DONGFANG ELECTRIC REVIEW

公开 ISSN 1001-9006 第38卷第1期(总第149期) 国内邮发代号：62-187
发行 CN 51-1333/TM 出版日期:2024年1月25日 国 内 定 价：8.00 元

东方电气评论 第三十八卷 第一期 二〇二四年一月

ISSN 1001-9006
CN 51-1333/TM

1

2024

第38卷 总第149期

# 東方電氣評論

# DONG FANG DIAN QI PING LUN

- 中国发电设备专业技术期刊、首届《CAJ-CD规范》执行优秀期刊
- 《中国学术期刊综合评价数据库(CAJCED)》期刊源
- 《万方数据-数字化期刊群》全文收录
- 《中国核心期刊(遴选)数据库》期刊源
- 《中文科技期刊数据库》（维普网）全文收录
- 《中国期刊全文数据库(CJFD)》全文收录

ISSN 1001-9006
01>
9 771001 900248

中国东方电气集团有限公司
四 川 省 动 力 工 程 学 会 主办

1
2024
第38卷第1期 总第149期
（双月刊，1987年创刊）

# 東方電氣評論

# 目 次



主管：中国东方电气集团有限公司
主办：中国东方电气集团有限公司·四川省动力工程学会
主编：胡修奎
副主编：董娜 唐健
本期责任编辑：张媛
英文编辑：李宏
编辑出版：《东方电气评论》编辑部
地址：成都市高新西区西芯大道18号
邮编：611731
电话：028-87898263
传真：028-87898267
电子信箱：dfdqpl@dongfang.com
印刷单位：成都金恒信印务有限公司
国内发行：四川省报刊发行局
国外发行：中国出版对外贸易总公司北京782信箱



[期刊基本参数]CN51-1333/TM*1987*b*A4*88*zh*p￥8.00*750*18*2024-01

# DONGFANG ELECTRIC REVIEW

1
2024
2024-1-25 Vol.38 No.1
(Bimonthly, since 1987)

# CONTENTS





**Sponsor:** Dongfang Electric Corporation
Chief Editor: HU Xiukui
Vice Chief Editors: DONG Na, TANG Jian
Executive Editor: ZHANG Yuan
English Editor: LI Hong
Edited and Published by:
Editorial Department of Dongfang Electric Review
No. 18 Xi Xin Avenue, Gao Xin Xi District, Chengdu, Sichuan, P. R. China
**Postal Code:** 611731
**Tel:** 028-87898263 **Fax:** 028-87898267
**E-mail:** dfdqpl@dongfang.com
**Overseas Distrbution by:**
China National Publishing Industry Trading Corporation
(P. O. Box 782, Beijing, P. R. C. )

# VR 交互式虚拟发电装备建模与仿真

张哲豪　蒲晓珉　边晓光　马腾　刘芙伶

东方电气集团科学技术研究院有限公司，成都 611731

**摘要：**本文旨在探讨基于 VR 技术的交互式虚拟发电装备建模与仿真系统关键技术。首先，提出了系统总体设计方案和关键技术。然后，针对高端发电装备虚拟场景复杂、模型网格数大的问题，对网格模型数据集构建技术、实时渲染技术、VR 虚拟交互技术等关键技术开展研究，在保证 VR 场景实时性的前提下，增强了 VR 场景的真实感和沉浸感，并以汽轮机为例，建立了可复用的典型物体交互模型，并开发了原型系统。最后，通过实际应用，验证了本文所述关键技术的可行性和有效性，并分析了其优缺点。本文所述关键技术提高了系统实时性、真实感和沉浸感，降低了系统硬件要求，且具有良好的交互性和复用性，具有较好的应用前景。

**关键词：**发电装备；网格模型；实时渲染；虚拟仿真

**中图分类号：**TM614　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）01-0001-06

# VR Interactive Virtual Power Generation Equipment Modeling and Simulation

*ZHANG Zhehao, PU Xiaomin, BIAN Xiaoguang, MA Teng, LIU Fuling*

( DEC Academy of Science and Technology Co., Ltd., 611731, Chengdu, China )

Abstract: This paper aims to explore the modeling and simulation system key technologies of interactive virtual power generation equipment based on VR technology. Firstly, the overall design scheme and key technologies of the system are proposed. Then, in view of the problem of complex virtual scene and large number of model grids for high-end power generation equipment, key technologies such as grid model data set construction, real-time rendering technology, and VR virtual interaction technology are studied. On the premise of ensuring the real-time performance of VR scenes, the realism and immersion of VR scenes are enhanced. Taking the steam turbine as an example, a reusable typical object interaction model is established, and a prototype system is developed. Finally, through practical application, the feasibility and effectiveness of the key technologies described in this paper are verified, and their advantages and disadvantages are analyzed. The key technologies described in this paper improve the real-time performance, realism, and immersion of the system, reduce the hardware requirements of the system, and have good interactivity and reusability, with good application prospects.

Key words: power generation equipment; mesh model; real-time rendering; virtual simulation

随着我国经济的快速发展和工业的升级换代，发电装备的数字化与智能化进程发挥着重要作用，是我国从高速发展转向高质量发展的“稳定器”和“压舱石”。随着高端发电装备的大规模使用，其安装、整备和维护需要技术熟练的操作人员[1]。现有的高端发电装备专业培训多为发电装备运用部门组织的幻灯片讲解、装备维护手册学习等形式，由于时间、空间限制，较为直观易懂的现场实际学习和训练较少，所以如何对高端发电装备各操作流程进行合理有效的培训，是保障高端发电装备安全、稳定运行的关键问题。

虚拟现实技术（Virtual Reality，VR）是新一代

**收稿日期：**2023-04-10

**基金项目：**5G+能源装备工业互联网应用层及边缘层关键技术研究项目（SC0021006）。

**作者简介：**张哲豪（1995－），男，2022 年毕业于中国矿业大学机械电子工程专业，工学硕士，助理工程师。现任东方电气集团科学技术研究院有限公司软件开发工程师，主要从事三维可视化方向研究与 VR、AR 软件开发工作。

IT 核心技术之一。近年来，在智能制造领域的应用方面，取得了一定的成果。有研究者[2-3]采用三维建模、摄像机分层距离剔除等技术，研究开发了基于虚拟现实技术的风电机组仿真培训系统；黄凯歌等[4]利用 Unity 平台实现了起重装备的三维场景用于起重机培训与考核；程永光等[5]通过 CFD 对某水泵水轮机的多个典型工况进行模拟，用 VR 展示了各工况独特的流态。上述学者的研究关注点主要集中于特定设备的 VR 系统上，没有解决复杂、高端装备 VR 场景所面临的诸多问题，例如高数量级的网格模型的轻量化和程序化、VR 场景渲染效果无法满足用户真实感和沉浸感需求、较为单一的 VR 场景交互仿真方式等。

本文主要针对高端发电装备大场景网格模型数据集构建技术、实时渲染技术、VR 虚拟交互技术开展研究，在建模方面，通过扫描点云构建细节层次（Level of Detail）网格模型，并采用纹理程序化等关键技术构建模型材质；在实时渲染方面，采用基于 Unity URP 渲染管线的实时渲染技术优化着色器通道映射，并通过三维几何变换完成对发电设备场景的渲染；开发 VR 发电装备虚拟仿真系统，实现发电装备网格模型库和装配数据的存储和热更新，并以燃气轮机为例，实现了 VR 虚拟发电装备场景的交互与仿真功能场景。该系统基于开放世界沙盒模拟对象框架[6]，在保证系统实时性和沉浸感的情况下，兼具真实的交互性。

## 1 系统总体设计

VR 发电装备虚拟仿真系统基于 Unity 引擎开发，采用通用渲染管线（Universal Render Pipeline，URP），使用基于对象的 C#编程语言和基于开放世界沙盒模拟的对象框架，实现了高端发电装备的虚拟仿真。虚拟发电装备模型资源在经过一系列网格模型数据集构建流程后，离线生成轻量化网格模型数据、预制体数据和装配数据，通过热更新的方式，注入 VR 发电装备虚拟仿真系统，进行实时渲染、三维变换与交互仿真。该系统采用的主要关键技术及其优点在于：

（1）采用基于点云重建处理发电装备虚拟三维网格模型，基于程序化纹理构建的模型材质，形成网格模型数据集，实现发电装备虚拟模型的精确构建，降低了运行平台的硬件要求，保证系统的实时性。

（2）采用基于真实光照的着色计算，优化的着色器通道映射方法等实时渲染关键技术，提升了 VR 系统的真实性和沉浸感。

（3）采用 VR 交互技术，实现了用户对虚拟发电装备场景的漫游、导航、爆炸分解、虚拟装配和发电设备组成的可视化预览等仿真交互功能，提高了交互仿真效果和用户体验。

该系统具有良好的应用前景和推广价值，可以在电力领域的 VR 发电设备仿真、教育和培训等方面得到广泛的应用。

## 2 发电装备网格模型数据集构建

高端发电装备网格模型的数据集构建流程，是保证 VR 系统真实感、沉浸感和培训有效性的关键流程之一。本文以汽轮机组建模为例，构建模型数据集，介绍 VR 系统中重型发电装备网格模型的关键技术。

### 2.1 基于扫描点云的发电设备网格重建技术

使用 XTOM-MATRIX-3M 三维激光密集点云扫描系统，对汽轮机组外形进行三维扫描，测量精度为 0.2 mm。在 PC 端实时进行逆向设计，在扫描的同时，实时获取汽轮机组的外形曲面点云的相对位置和顶点法线数据，从而获得汽轮机外形曲面的精确尺寸。

扫描完成的扫描点云在经过 CloudCompare 点云处理软件对扫描点云进行剪裁、去噪和拼接后[7]，保存为二进制扫描点云文件，即可导入三维可视化模型工具软件 3ds Max 中，对汽轮机模型进行重建，经过处理后的汽轮机扫描点云如图 1 所示。

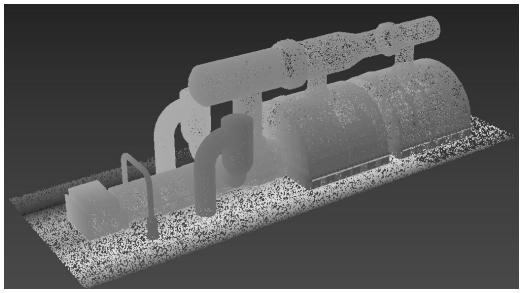


图 1 处理后的汽轮机扫描点云

在建模软件中，使用基于多边形细分曲面的硬表面建模方法，参考扫描点云数据，逆向建立汽轮机的高精度的网格模型，在保证网格模型量级可控、拓扑结构合理的情况下，解决传统正向建模过程中汽轮机网格模型精度差的问题。

基于多边形细分曲面的硬表面建模方法以多边形体的标准基本预制体（Standard Basic Prefab）为基础，根据汽轮机各零件曲面外形，对预制体的点、线、面进行拓扑编辑和整合[8]。首先，该方法实现了基于发电装备部件关键尺寸数据的开放网格曲面生成，可以统一地构建发电装备复杂外形部件的网格模型，即对扫描点云的网格化；其次，通过该方法构建的发电装备部件网格模型全部由多边形构成，便于渲染管线的批处理和并行着色计算，较传统实体模型来说，加速了 GPU 画面绘制过程。基于多边形细分曲面的硬表面建模方法如图 2 所示。

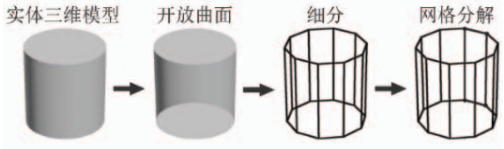



图 2　基于多边形细分曲面的硬表面建模方法

经过逆向构建的燃气轮机网格模型总三角面数约为 200 万，装配模型如图 3 所示。

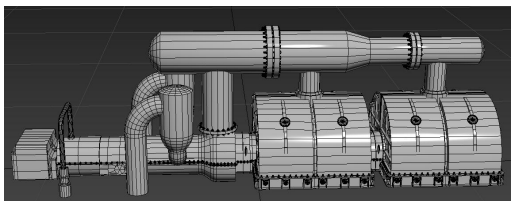


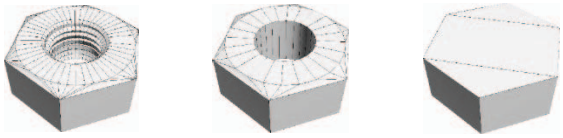
图 3　逆向重建后的汽轮机网格模型

## 2.2 细节层次网格模型数据集的构建

由于在 3D VR 可视化系统中，3D 场景模型的生成和渲染对实时性的要求较高，在硬件配置固定的情况下，存在 3D 场景的三角面数越多，系统画面渲染延迟越高的问题。为解决该问题，兼顾 3D 场景模型精度和渲染实时性，本节参考燃气轮机装配体基本结构，将燃气轮机虚拟模型分解为各个装配部件，依据细节层次模型（Level of Detail）对逆向建模的汽轮机网格模型进行优化，构建模型细节层次网格模型数据集，构建过程中的关键技术如下文所述。

（1）以树形结构绑定模型各个部件。根据燃气轮机部件装配体关系，自下而上地建立燃气轮机虚拟模型装配树，建立并绑定部件间父子关系，便于 VR 系统对汽轮机虚拟网格模型各部分的遍历与访问。

（2）部件减面与 LOD 模型生成。使用边坍缩（Edge Collapse）算法，基于模型包围盒（Bounding Box）占画面的百分比，生成不同精度的细节层次模型。以汽轮机低压汽缸顶盖紧固螺母网格模型为例，不同精度的模型和数据如图 4 和表 1 所示。



(a)LOD0　(b)LOD1　(c)LOD2

图 4　顶盖紧固螺母网格细节层次模型

表 1　顶盖紧固螺母网格模型细节层次表

| 网格模型 | 精度等级 | 面数 | 屏占比，% |
|---|---|---|---|
| 图 4 (a) | 精模 | 3544 | 60~100 |
| 图 4 (b) | 中模 | 328 | 20~60 |
| 图 4 (c) | 粗模 | 20 | 1~20 |

（3）同型部件网格模型复用。对于汽轮机模型中的相同型号部件模型，采用预制体实例的方式，完成多个不同位置的同型部件的实例映射，该流程可压缩汽轮机虚拟网格模型文件的大小，减少 VR 系统在初始化时读取和解析汽轮机虚拟网格模型的时间。

## 2.3 模型 UV 映射与多通道纹理贴图程序化研究

网格模型 UV 映射和多通道纹理材质直接决定了其渲染效果。发电装备网格模型以汽轮机为例，UV 映射采用 UDIM 多象限工作流技术，多通道纹理材质采用程序化基于物理的渲染材质纹理（Physically-Based Rendering，PBR）和 PBR 金属度/粗糙度工作流。

UDIM 多象限工作流技术是对传统 UV 映射和纹理工作流程的增强[9]，其实质是建立一个模型 UV 映射自动偏移系统，在系统运行设备配置有限的情况下，对汽轮机模型相邻表面同时使用多个较低分辨率的纹理贴图进行拼接，从而实现高分辨率贴图的效果，该技术增加了网格模型 UV 映射的贴图利用率，增强了 VR 系统下网格模型的真实感与

沉浸感，汽轮机虚拟网格模型多通道 UV 映射如图 5 所示。

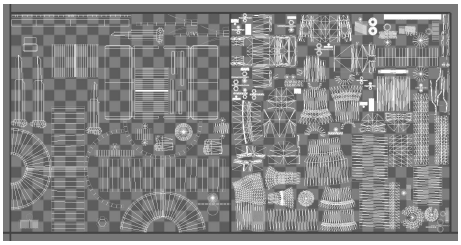


图 5　虚拟网格模型 UDIM 多象限工作流技术

由于不同的材质贴图制作流程对模型真实还原度、内存的占用量和操作的难易程度都会有很大的影响，本文所述汽轮机模型采用基于物理的多通道程序纹理渲染材质，在 Unity URP 渲染管线中，对该材质进行了适配和优化。将 PBR 材质贴图按类型和通道，压缩为 3 张 2k 分辨率的高清纹理中，减少了系统初始化的加载时间。

材质制作流程采用基于三维材质软件的 PBR 标准金属度/粗糙度材质标准工作流进行制作。对网格模型按多象限 UV 映射信息进行预烘焙，辅助汽轮机模型材质贴图纹理制作过程中的程序化流程。

使用程序纹理（Procedural Texture）逐步叠加计算，根据汽轮机各部件材质的物理和光学特性，基于生成的预烘焙纹理贴图，进一步生成汽轮机模型的表面材质，增加汽轮机模型的材质细节。

发电装备的硬表面法线纹理采用节点化程序纹理软件进行程序化生成。基于各类图像处理和生成算法，根据输入的参数进行各节点的实时计算。以汽轮机网格模型紧固螺杆螺纹为例，硬表面法线纹理基于参数化长方形，依次通过垂直均布、倒角等程序化节点进行参数化程序处理，生成螺纹硬表面法线纹理，生成的螺纹法线纹理效果如图 6 所示。

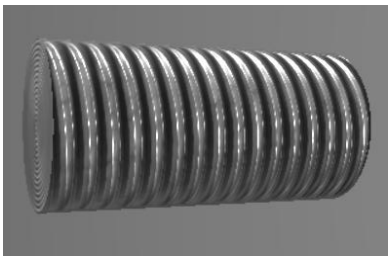
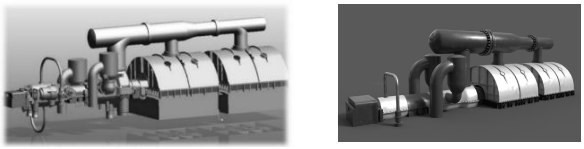


图 6　螺纹法线纹理渲染效果

材质制作完成后，使用 Nvidia Iray 实时渲染器预览汽轮机虚拟网格模型的材质效果。汽轮机结构图如图 7(a)所示，网格模型渲染图如图 7(b)所示。



(a)汽轮机结构图　　(b)网格模型渲染图

图 7　汽轮机结构图与网格模型渲染图

完成汽轮机虚拟网格模型的程序纹理生成后，采用通道包装技术（Channel Packaging）将单个材质的 8 个贴图通道按照 RGB 三通道和灰度（Grayscale）通道两种类型做分类整合，建立映射关系，存入 3 张满足 ARGB 8888 标准的 32 位高保真 Tegra 贴图中，如表 2 所示。该技术通过减少加载网格模型的贴图数量，减少了系统初始化时间。

表 2　网格模型材质贴图通道与贴图映射关系

| 通道名称 | 通道类型 | 映射通道 | 所属贴图 |
|---|---|---|---|
| Basecolor | RGB | RGB | BasecolorOpacity |
| Opacity | Grayscale | A | |
| Roughness | Grayscale | R | ChannelMask |
| Metallic | Grayscale | G | |
| AO | Grayscale | B | |
| Normal | RGB | RGB | Bump |
| Height | Grayscale | A | |

采用上述关键技术，建立发电设备高精度虚拟网格模型数据集，在保证系统实时性和真实感的情况下，降低了系统的资源 IO 延迟。

## 3　发电装备的 VR 实时渲染

利用前文构建的汽轮机组网格模型数据集，基于 Unity 引擎 URP 渲染管线，对系统的渲染技术进行优化研究。

### 3.1　基于真实光照的着色计算模型

由 Disney 于 2012 年提出的基于真实光照的实时渲染着色模型，相对于传统的光照模型，更加符合真实的光照物理原理。该模型经 Epic 改进后，广泛应用于影视和三维可视化渲染等领域[10]。

基于真实光照的着色计算模型的核心为双向反射分布函数（Bidirectional Reflectance Distribution Function，BRDF）[11]，其数学计算模型如下：

$$f_r(P,\omega_i,\omega_o)=k_d\frac{c}{\pi}+k_s\frac{DFG}{4(\vec{n}\cdot\omega_i)(\vec{n}\cdot\omega_o)} \quad (1)$$

式（1）中，前一项表示漫反射项，后一项表示高光反射项。其中，$k_d$ 和 $k_s$ 分别为两项的能量守恒系数，需满足 $k_d + k_s \leq 1$，即满足光照反射的能量守恒定律；$c$ 表示着色计算点 $P$ 处介质的反照率颜色；$D$、$F$、$G$ 分别代表法线分布函数、菲涅尔反射函数和几何遮蔽函数。使用 BRDF 进行光照渲染，通过 GPU 并行计算，实时输出画面像素点的辐照度颜色，可在不同平台上进行虚拟网格模型实时渲染，汽轮机虚拟网格模型实时渲染效果如图 8 所示。

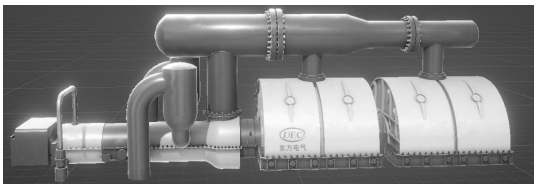


图 8　汽轮机网格模型实时渲染效果

### 3.2 发电装备网格模型的着色器通道映射优化方法

发电装备网格模型着色器基于 Unity URP 着色模型进行网格模型的并行光照计算，采用了如下的核心优化技术：

（1）包装贴图快速解析。在采样器根据片元着色器和 UV 信息对贴图进行采样后，将 3 张包装贴图按通道定义进行颜色抽取，并输入 URP Lit 着色程序入口中。

（2）基于距离的贴图 LOD 采样技术。为减少贴图采样时 GPU 的工作负担，该着色器实时获取当前片元与摄影机在世界坐标下的距离，以距离为参考对原贴图经过下采样（Down Sample）计算的过滤纹理（Mipmap）进行着色计算。

（3）UDIM 多象限贴图采样技术。对不在传统 UV 区间（$u,v \notin [0,1]$）的片元 UV 数据 $u$、$v$ 分量进行整数与小数分离，整数部分用于确定 UDIM 贴图阵列编号，小数部分用于确定 UV 在对应编号贴图上的采样坐标，输入采样器进行采样和光照计算。以汽轮机网格模型为例，UV 阵列和编号示例如图 9 所示。

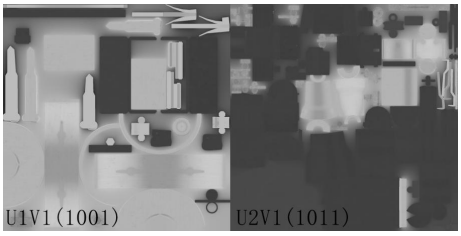
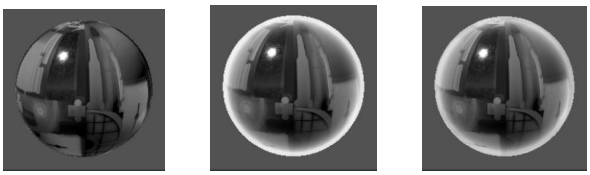



图 9　UDIM 贴图阵列

（4）集成网格模型用于交互的状态机。该技术基于用户与模型的交互，在着色器使用并缓存对应网格模型的状态机。状态机将模型分为三种状态：默认、被射线穿过和被选中，使用三个不同效果进行交互渲染。采用两个布尔状态变量作为状态机，储存网格模型状态，并驱动着色器渲染网格模型在不同状态下的效果。网格模型材质在不同交互状态下的效果如图 10 所示。



(a)默认　(b)被射线穿过　(c)被选中

图 10　网格模型交互材质效果

## 4　VR 发电装备虚拟仿真系统开发、测试与应用

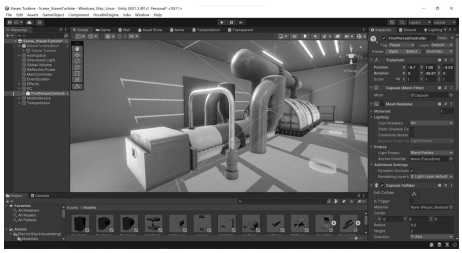
在真实、精确的发电设备网格模型数据集和实时渲染程序的基础上，采用 Unity 引擎对 VR 发电装备虚拟仿真系统进行开发，使用 C#编程语言进行脚本编辑，可编译并封装为 IL 中间语言，发布到 Win、UWP、IOS、WebGL 等平台，极具跨平台性。

### 4.1 VR 发电装备虚拟仿真系统的开发

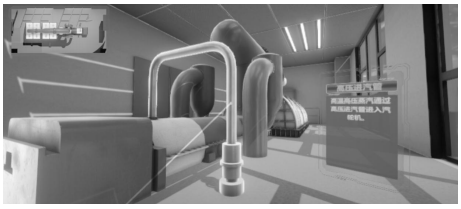
该系统以 HTC VIVE Pro 2 VR 设备和 SteamVR 平台为基础，使用 Unity 引擎，基于开放世界沙盒对象框架开发，可以在更高的分辨率和更快的刷新率下呈现更加清晰、平滑的 VR 图像。以虚拟汽轮机网格模型为例，发电设备模型库采用预制体的形式储存，链接模型网格、着色程序、脚本与材质贴图；模型部件装配信息采用 XML 可扩展标记语言存储，结构化地存储汽轮机模型各部件的层级、局部坐标、基于装配的父子关系等关键信息，可完整保留汽轮机模型装配树与装配信息，且便于系统的初始化与预加载。


图 11　HTC VIVE Pro2 VR 设备

该系统的功能包括发电装备的 VR 场景漫游、预览仿真发电装备的外观和内部结构、模拟发电装备的工作状态、操作人员的虚拟培训和维修，以汽轮机虚拟网格模型为例，系统开发界面和交互设计界面如图 12 所示。



(a)系统开发界面

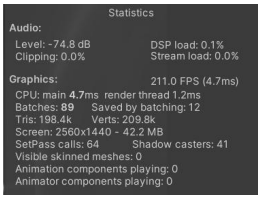


(b)系统交互设计

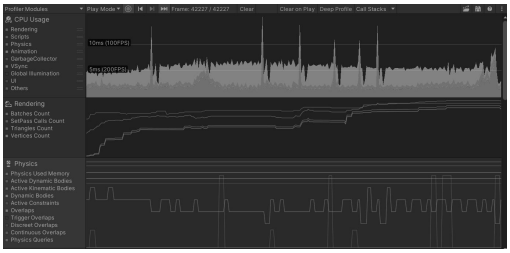
图 12　系统开发界面和交互设计

### 4.2 VR 发电装备虚拟仿真系统的测试

VR 发电装备虚拟仿真系统开发完成后，需要对系统进行测试，以验证系统的性能和功能是否符合要求。该系统的测试平台采用 i7-11800H 和 RTX-3050Ti 的 Windows11 中等配置平台，测试基于 Unity Statistics 场景统计面板和 Unity Profiler 系统性能分析工具，部分测试工具如图 13 所示。




(a) Unity Statistics 场景统计面板



(b)Unity Profiler 性能分析工具

图 13　部分系统测试工具

经过多轮测试，VR 发电装备虚拟仿真系统的各项指标均符合设计要求，性能稳定可靠测试结果如下：所有功能均正常运行，无明显异常；系统画面和交互过程响应速度快，运行流畅，无明显卡顿现象；能够在设备硬件配置中等的条件下运行，画面每秒平均帧数为 190，无明显性能瓶颈问题。

### 4.3 VR 发电装备虚拟仿真系统的应用

具备高自由度三维交互仿真的 VR 发电装备虚拟仿真系统已应用于中国东方电气集团科学技术研究院有限公司中，该系统在实际使用中具有较好的实时性、渲染画面表现出强烈的沉浸感，同时也保证了 VR 虚拟交互的真实感，应用现场如图 14 所示。

图 14　VR 发电装备虚拟仿真系统的应用现场

## 5　结语

本文通过对 VR 交互式虚拟发电装备建模与仿真系统搭建中的网格模型与材质工作流、基于物理的实时渲染技术和虚拟仿真系统交互方法等关键技术进行研究，通过新工作流构建发电装备网格模型数据集，解决了复杂高端发电装备装配的 VR 虚拟网格模型精度与面数的优化问题，依托 Unity 平台，采用新一代渲染管线进行系统画面计算，在保证系统实时性的条件下，大幅增加了 VR 系统的真实感；构建了统一、可复用的发电装备模型库与模型装配数据集，实现了基于开放世界沙盒模拟对象框架的系统交互方法，完成了发电设备多种交互与仿真行为。开发的 VR 发电装备虚拟仿真系统具有较强的真实感与沉浸感，具备友好、开放的可交互性。该系统已在东方电气集团科学技术研究院有限公司进行测试与使用，系统运行稳定且流畅，效果良好。

虽然本次实现了 VR 发电装备虚拟仿真系统，

（下转第 10 页）

# 基于紫外光固化技术发电机定子绕组快速修复绝缘材料研究

杨帅　张跃　胡波　谢志辉　张根博　周江

东方电气集团东方电机有限公司，四川 德阳 618000

**摘要：**随着国内外发电服务产业的发展和不断完善，迫切需要加快固化材料对发电机定子绕组绝缘损伤快速修复。本文综述了国内外发电机定子绕组绝缘损伤修复技术的研究现状，提出基于紫外光技术的快速固化方式，开发了发电机定子绕组快速修复绝缘材料。为实现发电机定子绕组绝缘损伤快速修复提供了新的技术手段。

**关键词：**发电机；定子绕组；紫外光；快速修复

**中图分类号：**TU992.23　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）01-0007-04

# Research on Insulation Materials for Quick Repair of Generator Stator Winding Based on UV-curable Technology

*YANG Shuai, ZHANG Yue, HU Bo, XIE Zhihui, ZHANG Genbo, ZHOU Jiang*

( Dongfang Electric Machinery Co.,Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China)

Abstract: With the development and continuous improvement of the power generation service industry both domestically and internationally, there is an urgent need for fast curing materials to quickly repair insulation damage to generator stator windings. This article summarizes the research status of insulation damage repair technology for generator stator windings both domestically and internationally, proposes a rapid curing method based on ultraviolet technology, and develops insulation materials for rapid repair of generator stator windings. This provides a new technical means for rapid repair of insulation damage in generator stator windings.

Key words: generator; stator winding; ultraviolet light; quick fix

发电机的运行可靠性对电力系统的正常运行尤其是国民经济的安全生产起到了极其重要的作用。定子线棒为大型发电机定子绕组的重要组成部分，其性能直接关系到机组的安全运行可靠性、寿命和技术经济指标。在机组运行过程中，定子绕组在电应力、机械应力及热应力等多重因素作用下，可能出现定子线棒绝缘磨损或损伤等异常现象，给发电机定子绕组安全运行带来隐患导致事故。采用传统的定子绕组磨损或损伤的绝缘修复工作量一般较大，且抢修周期较长，可能会造成巨大的经济损失[1-5]，因此，国内外对发电机定子绕组绝缘快速修复技术开展了丰富研究。

目前，定子绕组绝缘损伤修复方式采用复合材料胶接成型，修理中采用的固化方式仍以传统热固化为主，国内外在复合材料热固化成型和修理领域已经开展了广泛而深入的研究，并取得了丰硕的研究成果，研究涵盖了成型方式和修理胶粘剂研究、成型和修理参数优化、成型和修理性能研究以及有限元模拟等各个方面。但是传统修复方式主要存在成型和修理时间长、单位制造能耗高、环境友好性一般、非批量性产品成型和修理的经济性差，局部修理的性能一般等问题。

本文基于紫外光固化技术的环保、快速、性能优异等特点，采用环氧树脂为树脂集体，添加光引

**收稿日期：**2023-07-11

**作者简介：**杨帅（1988－），男，2015 年 7 月毕业于西南交通大学，工学硕士，工程师，现在东方电机有限公司从事高压电机绝缘技术工作。

发剂，开发了发电机定子绕组绝缘快速修复的光固化树脂。实现了发电机定子绕组绝缘损伤快速修复，为发电机服务产业提供了新的技术手段。

## 1 国内外技术现状

长期以来，对于绝缘材料尤其复合型绝缘材料的修复都采用热固化方式，即通过树脂与其相应固化剂在一定温度下的反应，逐步由流动态的树脂材料转化为具有良好性能的固体绝缘材料。该方法工艺成熟，可供选取使用的树脂及其固化剂种类繁多，可以满足几乎所有绝缘材料修复的需要。但是热固化方式的工艺条件决定了树脂及其固化剂之间的反应速率慢，从而修复所需时间长，修复工艺繁琐，在抬高直接修复成本的同时，有可能影响电气设备的使用，从而大幅提高了间接成本[6-8]。

紫外光固化技术作为一种低能耗和环保的新技术，已在电子设备领域及医疗等领域中得到应用，而采用紫外光固化技术应用于绝缘材料以及复合绝缘材料的固化是未来技术的发展趋势和方向，不仅可用于整体的复合绝缘材料的固化，还可用于整体试样的局部区域固化，能高效、快速、可靠的实现绝缘损伤的修复和并头的对接。国外紫外光固化技术已进行了系统且深入的研究，具有了丰富的研究成果。国内光固化技术的研究起步较晚，但在光固化树脂以及应用领域都有大量的研究[9-12]。

## 2 紫外光固化技术

紫外光固化技术是一种新型技术，是指在紫外光的作用下，其环氧树脂体系中的光敏物质成为活性粒子或基团，通过光化学反应，引发体系中的环氧树脂进行交联聚合，使具有反应活性的液态物质快速转变为具有良好绝缘性能的固态材料。

紫外光固化是在紫外光辐射下，激发环氧树脂体系中的光引发剂，使其产生自由基或者阳离子，从而引发环氧树脂化学键的断裂和重组（主要是各类聚合反应），形成固化了的体型结构[12-14]。

### 2.1 自由基光固化

自由基光固化树脂通过光引发自由基聚合反应进行固化。自由基聚合反应通常包括链引发、链增长、链转移和链终止过程。在引发机理上，光引发自由基聚合与传统的热引发自由基聚合的区别在于前者利用光引发剂的光解反应产生活性自由基，后者通过热引发剂分解得到自由基[12-14]。具体光引发过程如图 1。

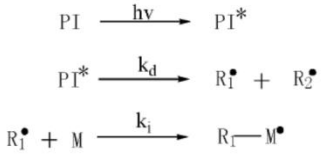



图 1 自由基光固化

在紫外光作用下，环氧树脂中光引发剂从基态跃迁到激发态，形成自由基。自由基与树脂中的单体发生双键结合，并在此基础上形成链状。其中环氧树脂中分子链的相互转化与温度引发自由基聚合的方式相同[12-13]。

### 2.2 阳离子光固化

树脂阳离子光固化，是通过紫外光引发阳离子聚合从而使树脂固化。与自由基光固化树脂体系相比,阳离子光固化树脂体系的特征为：阳离子光固化不受氧气的影响，对水汽、碱类物质敏感导致阻聚，阳离子光固化的活性中间体超强酸在化学上稳定性好，光照后材料仍能引发聚合交联，固化后的寿命长，有利于树脂体系固化程度的提高。同时，阳离子光固化是利用阳离子光引发剂在紫外光作用下产生的质子酸，促使环氧基的开环聚合或富电子双键如乙烯基醚的阳离子聚合。以碘锚盐阳离子光引发剂为例，其光解过程及引发环氧聚合过程如图 2[12-14]。

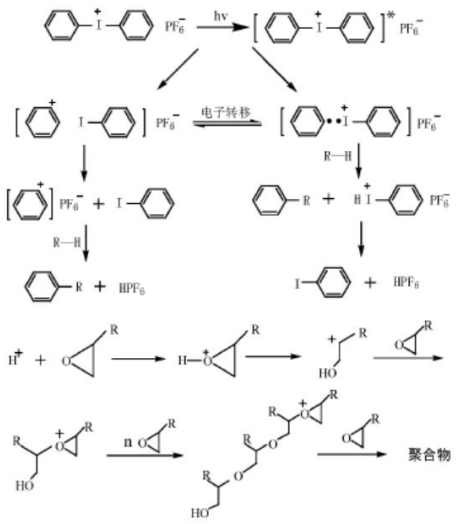



图 2 阳离子固化

环氧树脂体系在紫外光的作用下，易发生阳离子开环聚合形成聚醚主链。国内关于阳离子光固化树脂的研究已有成熟经验，目前使用的主要预聚体为环氧树脂。环氧化合物的单官能团一般只能作为稀释剂，环氧树脂应当至少含有两个环氧基团才能用作预聚体。国外某公司的产品专利表明其商品化的树脂中使用了含有氧杂环丁烷环氧树脂作为预聚体，氧杂环丁烷具有很高的反应活性，对于光固化快速成型技术具有重要作用，但成本较高[12-14]。

## 3 发电机光固化树脂研究

### 3.1 光敏树脂相溶性

选用不同种类的树脂作为自由基光固化树脂的预聚体，采用共溶剂法研究不同种类的光敏树脂共混的自由基树脂体系的相溶性。选择环氧树脂 A 型分别和树脂 B 型、树脂 C 型、树脂 D 型按一定比率共混，观察其透明度，并采用紫外光技术进行固化，观察样品的透明度。

环氧树脂 A 型分别和树脂 B 型、树脂 C 型、树脂 D 型的相溶性如表 1 所指示。环氧树脂 A 型与树脂 B 型相溶性最好，为澄清透明。

表 1 光敏树脂间的相溶性

| 光敏树脂 | 树脂 B 型 | 树脂 C 型 | 树脂 D 型 |
|---|---|---|---|
| 环氧树脂 A 型 | 透明 | 浑浊 | 浑浊 |
| 环氧树脂 A 型 | 透明 | 透明 | 浑浊 |
| 环氧树脂 A 型 | 澄清透明 | 透明 | 透明 |

### 3.2 光引发剂与光敏树脂的相溶性

光敏引发剂是光固化材料的关键组分，它对光固化材料的光固化速度起决定性作用。选用环氧树脂A型和树脂B型作为自由基光固化树脂的预聚体，研究光引发剂 A、光引发剂 B、光引发剂 C、光引发剂 D、光引发剂 E 与自由基光敏树脂体系的相溶性，如表 2 所示。光引发剂 A 与光敏树脂相溶性最好，样品透明，60°相对光泽值最大。

表 2 光引发剂与光敏树脂的相溶性

| 光引发剂类型 | 混溶性 | 样品透明性 | 60° 相对光泽值 |
|---|---|---|---|
| 光引发剂 A | 相溶 | 透明 | 106 |
| 光引发剂 B | 相溶 | 透明 | 93.8 |
| 光引发剂 C | 相溶 | 透明 | 86.7 |
| 光引发剂 D | 相溶 | 透明 | 90.6 |
| 光引发剂 E | 相溶 | 透明 | 63.2 |

### 3.3 光固化树脂性能

选用环氧树脂 A 型和树脂 B 型作为自由基光固化树脂的预聚体，按一定比率混合后，添加光引发剂 A，采用紫外光固化技术制作固化试样，对混合光固化树脂及固化后的试样进行性能测试，结果如表 3 所示。光固化树脂性能测试满足技术指标要求。

表 3 光固化树脂性能

| 序号 | 性能试验 | 测试结果 | 指标值 |
|---|---|---|---|
| 1 | 玻璃化转变温度 Tg/℃ | 94 | ≥80 |
| 2 | 体积电阻率/Ω·m | $6.17\times10^{14}$ | $\geqslant10^{14}$ |
| 3 | 表面电阻率/Ω | $3.16\times10^{16}$ | $\geqslant10^{12}$ |
| 4 | 击穿场强/kV/mm | 24 | ≥18 |
| 5 | 相比点痕化指数 CTI/V | 550 | `500 |
| 6 | 邵氏硬度 | 84.2 | - |

### 3.4 云母带-树脂复合材料的研究

云母带以其优异的绝缘性和良好的耐电晕性，一直是高压电机定子绕组主绝缘不可替代的材料。选用光固化树脂与少胶云母带，采用紫外光固化技术制作发电机主绝缘试样，固化时间为 15 s，如图 3 所示。对主绝缘试样进行性能测试，结果如表 4 所示。采用紫外光固化的主绝缘试样性能优异，且与传统热固化相比，紫外光固化可大幅度缩短主绝缘的固化时间。

图 3 紫外光固化主绝缘试样

表 4 云母带-树脂复合材料性能

| 序号 | 性能试验 | 测试结果 |
|---|---|---|
| 1 | 表明电阻率/Ω | $3.34\times10^{14}$ |
| 2 | 体积电阻率/Ω·m | $3.95\times10^{15}$ |
| 3 | 介质损耗% | 1.127 |
| 4 | 击穿场强 kV/mm | ＞23 |

## 4 结语

基于紫外光固化技术，选用环氧树脂 A 型和树脂 B 型作为自由基光固化树脂的预聚体，其相溶性好，添加光引发剂 A 作为光固化树脂，能够实现快速固化，其性能满足技术指标要求。

以少胶云母带为基材，光固化树脂为胶粘剂，采用紫外光固化技术固化成型的主绝缘，性能优异，与传统热固化方式相比，紫外光固化可大幅度缩短主绝缘的固化时间。发电机定子绕组光固化材料的开发，为实现发电机定子绕组绝缘快速修复奠定了基础。

### 参考文献：


[1] 高俊国, 孟睿潇, 胡海涛, 等. 电机定子绝缘老化寿命预测研究进展[J]. 电工技术报, 2020, 35(14):3065-3074

[2] 袁靖, 田键. 一起发电机定子线棒损伤原因及处理方法[J]. 技术与市场, 2019, 26(12):161-162

[3] STONE G C , MAUGHAN C V , NELSON D , et al. Impact of Slot Discharges and Vibration Sparking on Stator Winding Life in Large Generators[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2008, 24(5):14-21

[4] 张鹏. 12 MW 汽轮发电机定子故障修复[J]. 设备管理与维修, 2019, (23):82-83

[5] 宋建成, 成永红, 赵绍兴, 等. 300 MW 汽轮发电机主绝缘老化诊断[J]. 中国电力, 2000(6):40-44+58

[6] 王立军, 蒋卫东, 朱荣华. 大型发电机定子线圈对地绝缘的快速修复[J]. 电机技术, 2018(3):54-57

[7] 毕全瑞. 特高压电气设备用环氧树脂/氧化铝复合绝缘材料的固化动力学研究[D]. 合肥工业大学, 2020

[8] 初琳, 赵晓莉, 王丽娟. 树脂基复合材料固化技术发展现状[J]. 化工装备技术, 2013, 34(1):43-46

[9] 金养智. 光固化材料性能及应用手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010

[10] 王娟娟, 马晓燕, 晁小练. 辐射固化技术研究进展[J]. 材料保护, 2005, 28(1) : 44-47

[11] 陈小文, 李建雄, 刘安华. 快速成型自由基光固化树脂的研究[J]. 材料研究与应用, 2010, 4(4):635-640

[12] 陈小文. 快速成型光固化树脂体系研究[D]. 华南理工大学, 2011

[13] 刘博. 环氧树脂复合材料紫外固化工艺及修补技术研究[D]. 南京航空航天大学, 2014

[14] 马建. 紫外光快速固化环氧树脂及其复合材料研究[D]. 武汉理工大学, 2009


（上接第 6 页）

但是模型场景未接入真实数据，未能实现真实和虚拟的数据共享。为解决此问题，下一步将利用 5G 高速局域网，基于系统已有框架，接入发电装备真实运行数据，进一步开发网络通信和数据实时监测等功能，实现高端发电装备的 VR 数字孪生系统。

### 参考文献：


[1] 中国大连高级经理学院. 中国能源发展报告 2022[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2021

[2] 周琪琪, 孙建平. 基于虚拟现实技术的风电仿真培训系统[J]. 电力科学与工程, 2018,34(9):73-78

[3] 赵志鹏, 汪心明. 基于虚拟现实技术的风电机组培训系统设计[J]. 电力信息与通信技术, 2017,15(4):22-25

[4] 黄凯歌, 惠延波, 刘永刚, 等. VR 交互式三维虚拟起重装备建模与仿真[J/OL]. 计算机工程与应用:1-10[2023-12-11].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20230116.1807.016.html

[5] 程永光, 刘辉, 唐茂嘉, 等. 用 VR 技术展示水泵水轮机流态特性[J]. 中国农村水利水电, 2020(7): 167-172

[6] 王梁. 沙盒化电子游戏研究[D]. 山东大学, 2022

[7] 任飞, 常青玲, 刘兴林, 等. 基于点云的室内结构三维重建综述[J]. 计算机科学, 2022,49(S2):351-361

[8] BURROWS A , ALEXANDROV G .在 Blender 中制作硬表面建模[J]. 艺术教育, 2018(24):43-47

[9] AKENINE-MOLLER T , HAINES E , HOFFMAN N . Real-time rendering[M]. Boca Raton: AK Peters/crc Press, 2019

[10] CYRILLE D , WIRRMANN N . The Comprehensive PBR Guide by Allegorithmic-vol. 1[J]. Light and Matter: The Theory of Physically-Based Rendering and Shading, 2018, 1(1): 1-13

[11] 熊新科. Unity3D 内建着色器源码剖析[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2019

# 燃气锅炉绝氮燃烧数值模拟分析

马松华[1] 周建平[1] 邱福寿[1] 闫伟[1] 刘媛[1] 张香全[2] 吴文军[2] 胡春云[3] 李鹏[3] 刘四威[3]

1.中国石油天然气股份有限公司新疆油田分公司，新疆 克拉玛依 834000；2.上海源晗能源技术有限公司，上海 200122；

3.东方电气洁能科技成都有限公司，成都 611731

**摘要：**本文阐述了数值模拟技术在燃气锅炉绝氮燃烧上的应用，根据燃气锅炉相关设计参数及运行数据，通过燃气锅炉仿真数值模拟，分别在空气燃烧工况、绝氮（$CO_2$+$O_2$）燃烧工况、变负荷工况进行流场和温度场数值模拟测试；过量空气系数为 1.15 与 1.1 时不同氧气、二氧化碳比例的锅炉燃烧情况；以及变负荷下燃气锅炉的运行燃烧情况。为燃气锅炉绝氮燃烧试验装置奠定坚实的理论基础。

**关键词：**数值模拟；绝氮燃烧；燃气锅炉

**中图分类号：**TK229.8　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）01-0011-05

## Numerical Simulation of No-nitrogen Combustion in Gas-fired Boilers

*MA Songhua[1], ZHOU Jianping[1], QIU Fushou[1], YAN Wei[1], LIU Yuan[1], ZHANG Xiangquan[2], WU Wenjun[2], HU Chunyun[3], LI Peng[3], LIU Siwei[3]*

(1. Xinjiang Oilfield Branch，Xinjiang Oilfield Branch Company, Petro China, 834000, Karamay, Xinjiang, China;

2. Shanghai Yuanhan Energy Technology Co., Ltd., 200122, Shanghai, China;

3. Dongfang Electric Clean Energy Technology Chengdu Co., Ltd., 611731, Chengdu, China)

Abstract: This paper describes the application of numerical simulation technology to the no-nitrogen combustion of gas-fired boiler. According to the relevant design parameters and operation data of gas-fired boiler, the flow field and temperature field were obtained under the air combustion condition, the no-nitrogen ($CO_2$+$O_2$) combustion condition and the variable load condition. The combustion condition of the boiler with different oxygen and carbon dioxide ratio when the excess air coefficient is 1.15 and 1.1, and the operation combustion condition of the gas-fired boiler under variable load are obtained. This paper provides a reference for the operation of the test equipment of no nitrogen combustion in gas boiler.

Key words:numerical simulation; no-nitrogen combustion; gas-fired boilers

新疆油田启动了两千万吨 CCUS（Carbon Capture,Utlization and Storage）规划，通过 $CO_2$ 驱油提高采收率和咸水层碳封存，落实公司“清洁替代、战略接替、绿色转型”三步走战略，需要大量高浓度的碳源。新疆油田公司通过摸底注汽锅炉运行和碳排放现状：油田在用燃气注汽锅炉 300 余台，每年碳排放量约 568 万吨。由于烟气中 $CO_2$ 浓度较低，无法实现低成本捕捉利用[1-2]。因此，开展油田注汽锅炉 $CO_2$ 富集技术研究，是解决该问题的必要途径[3-5]。

通过技术论证，对现有注汽锅炉进行优化改进，通过加装设备及管线改造，开展油田注汽锅炉绝氮燃烧技术研究，可实现烟气 $CO_2$ 富集。目前新疆油田公司已具备部分设计及改造能力，但还需解决如下关键问题：（1）注汽锅炉绝氮燃烧成套技术问题；（2）$CO_2$ 与 $O_2$ 混配助燃工艺技术问题；（3）

**收稿日期：**2023-11-25

**作者简介：**马松华（1988－），男，2012 年毕业于哈尔滨工业大学热能与动力工程专业，本科，工程师。现任新疆油田公司实验检测研究院，主要从事油气田高风险装置检测研究工作。

PLC 智能安全控制技术。

## 1 数值模拟在绝氮燃烧上的实施

### 1.1 数值模拟的方法

数值模拟是通过建立一个数值计算平台，在此平台上可以进行几何参数化建模、划分计算网格、根据条件自主调节计算边界的功能。

在计算平台上实现空气燃烧工况模拟计算、绝氮燃烧工况模拟计算、变负荷及多种当量比的模拟计算。

空气燃烧工况模拟，作为绝氮燃烧数值计算结果的对比标准。

绝氮燃烧工况模拟，通过设置 50 %～110 %锅炉负荷及当量比范围为 0.3～1.5，在计算平台上进行自动调节边界条件计算，结果输出不同氧气和二氧化碳比例下的锅炉燃烧情况，得到不同负荷下的稳燃边界。

在计算平台上的多个绝氮工况计算结果与空气工况计算进行特征参数对比，若优于空气工况，则输出结果。

### 1.2 数值模拟的效果

依据新疆油田提供的装置参数，采用数值分析计算。获得的效果如下：

（1）建立燃气锅炉绝氮燃烧多工况数值计算平台，实现燃气锅炉不同参数运行性能迭代计算，可用来分析不同情况下锅炉运行性能，并且通过不同参数数值计算给出锅炉运行过程中各种运行参数的调节范围。

（2）开发的燃气锅炉绝氮燃烧多工况数值计算方法可用来开展不同型号的燃气锅炉设计、开发，可以提高产品开发效率。

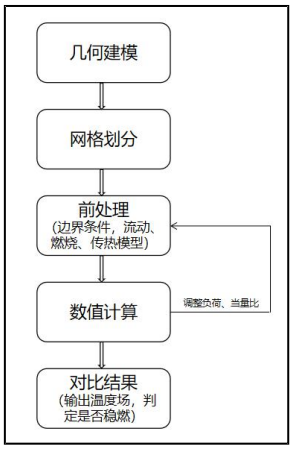



图 1 数值计算流程图

（3）开发的燃气锅炉绝氮燃烧多工况数值计算方法可用来快速开展不同负荷、燃烧当量比等参数的数值计算，短时间内提供大量数值计算结果，节省人力计算时间，提高计算效率。输出的稳燃边界等条件作为锅炉运行调节提供调节范围、方法的依据。

### 1.3 数值模拟的流程

数值模拟主要包含以下几个步骤：

（1）建立工程问题本质的数学模型，它是反应问题各分量之间的微分方程及相应的定解条件。

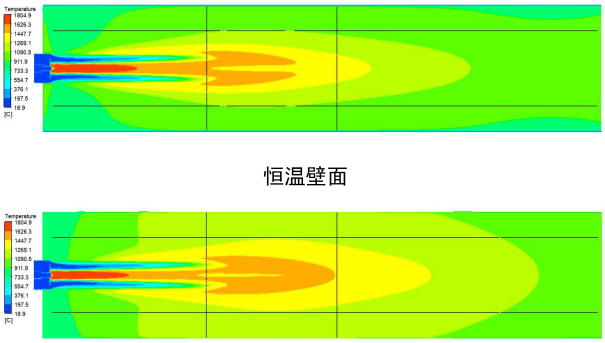
（2）寻求高效率、高准确度的计算方法，包括微分方程的离散化方法及求解方法，以及贴体坐标的建立、边界条件的处理等。

（3）编制程序和计算，该步骤是模拟的主体工作，它是通过实验来验证理论上的数值求解，完善数值求解。

## 2 结果与讨论

### 2.1 空气燃烧工况的计算

空气燃烧计算进口边界条件给定进口天然气进口流量 1 300 $Nm^3/h$，温度 20 ℃，空气流量 14 232 $Nm^3/h$，温度 110 ℃，辐射段出口为常压。锅炉内壁面布置的蛇形水管通过等效热量均布在壁面上，对辐射段壁面散热边界条件采用了恒温壁面和恒定换热系数两种工况计算，恒温壁面给定 870 ℃，恒定换热系数 110 W/（$m^2$·K）根据提供图片外侧壁温 274 ℃。



恒温壁面

恒定换热系数壁面

图 2 炉膛中间截面温度分布

图 2 为炉膛壁面两种换热边界条件情况的炉膛中间截面温度分布，可以看出，恒温壁面的散热量较大，导致贴近炉膛壁面处温度较低。整体炉膛

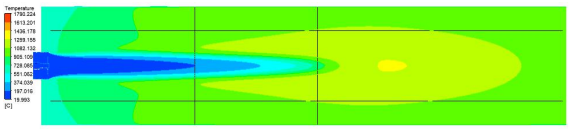
散热量较大，导致炉膛中高温区呈狭长状态。为了更直观比较高温区大小，在截面上做出四条网格线，垂直于轴向的直线坐标分别为：((3 300，-1 350，0)，(3 300，1 350，0))，((6 100，-1 350，0)，(6 100，1 350，0))，平行与轴向的直线对应的炉膛半径为800 mm。可以看出恒定换热系数工况的炉内高温区较宽。恒定壁温的炉膛出口温度为1 251.85 K，恒定换热系数炉膛出口温度为1 281.43 K。经过与实际燃气锅炉运行数据的对比，恒定换热系数的壁面边界条件所获得的结果与数值分析的结果一致。

## 2.2 绝氮燃烧工况

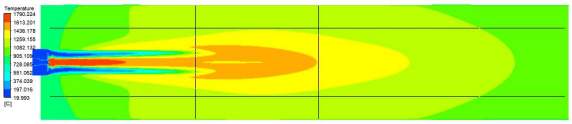
通过对空气燃烧的两种炉膛壁面热边界条件的计算，与已知的锅炉运行参数对比，发现采用恒定散热系数的炉膛壁面热边界条件计算结果与实际运行较接近，在计算绝氮工况时均采用恒定散热系数热边界条件。分别计算了过量空气系数为1.15与1.1时不同氧气、二氧化碳比例的锅炉燃烧情况，模拟数据计算工况如表1所示。

表1 燃气锅炉绝氮燃烧计算工况表

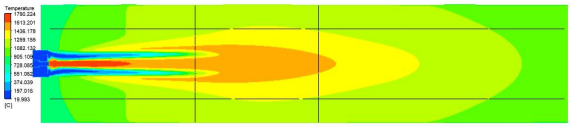
| 编号 | 天然气流量 Nm³/h | 温度 ℃ | $CO_2$:$O_2$比 | 过量氧气系数 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 300 | 20 | 76:24 | 1.15 |
| 2 | 1 300 | 20 | 70:30 | 1.15 |
| 3 | 1 300 | 20 | 70:30 | 1.1 |
| 4 | 1 300 | 20 | 72:28 | 1.1 |
| 5 | 1 300 | 20 | 71:29 | 1.1 |
| 6 | 1 300 | 20 | 69:31 | 1.1 |
| 7 | 1 300 | 20 | 74:26 | 1.1 |



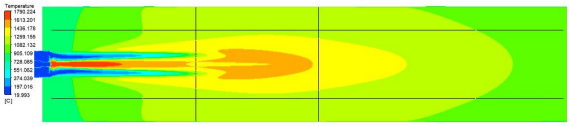
(a) $CO_2$:$O_2$=76:24、过量氧气系数 1.15



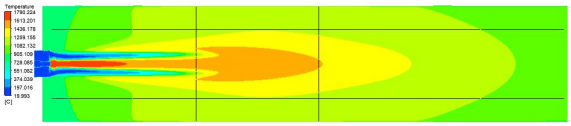
(b) $CO_2$:$O_2$=70:30、过量氧气系数 1.15



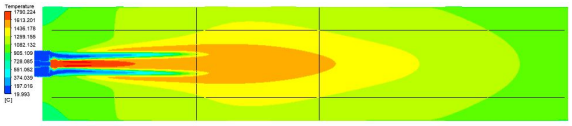
(c) $CO_2$:$O_2$=76:24、过量氧气系数 1.1



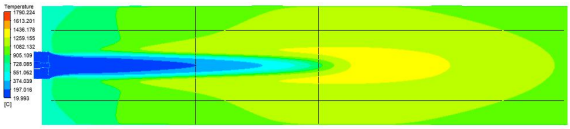
(d) $CO_2$:$O_2$=72:28、过量氧气系数 1.1



(e) $CO_2$:$O_2$=71:29、过量氧气系数 1.1



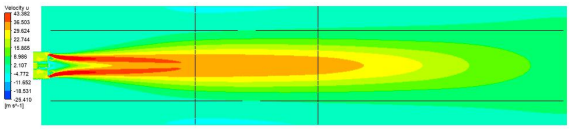
(f) $CO_2$:$O_2$=69:31、过量氧气系数 1.1



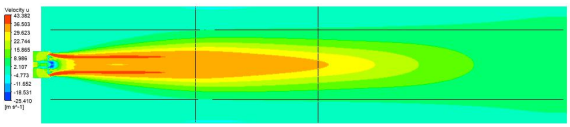
(g) $CO_2$:$O_2$=74:26、过量氧气系数 1.1

图3 炉膛中心面温度场分布云图

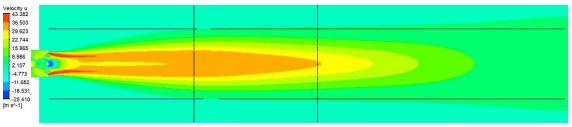
图3显示的是不同过量空气系数和不同氧气、二氧化碳比例的燃气锅炉中心截面温度场分布。结果表明，在图3(b)~(f)的过量空气系数和氧气、二氧化碳比例的条件下，燃气的燃烧器出口即起燃，在出口处形成明显的高温区，高温区的最高温度在1 700 ℃左右；而图3(a)和图3(g)的结果存在明显的异常，在炉膛中后部才形成约1 300 ℃的高温，其原因是低比例的氧浓度在保持过量空气系数不变时，$CO_2$浓度较大，燃烧器出口处的动量较大，难以发生起燃。



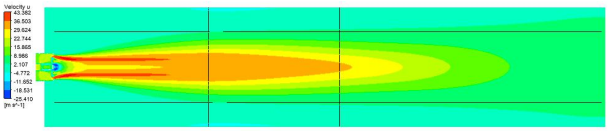
(a) $CO_2$:$O_2$=76:24、过量氧气系数 1.15



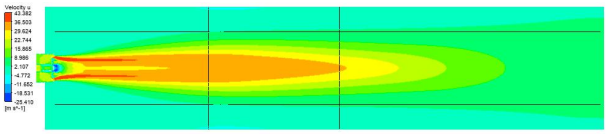
(b) $CO_2$:$O_2$=70:30、过量氧气系数 1.15



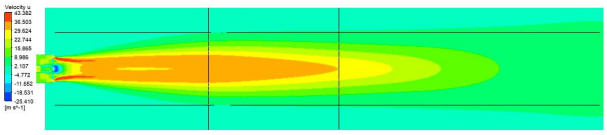
(c) $CO_2$:$O_2$=76:24、过量氧气系数 1.1



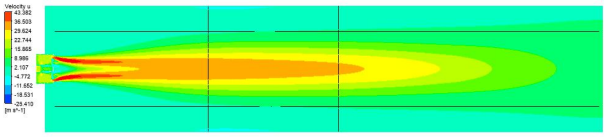
(d) $CO_2$:$O_2$=72:28、过量氧气系数 1.1



(e) $CO_2$:$O_2$=71:29、过量氧气系数 1.1



(f) $CO_2$:$O_2$=69:31、过量氧气系数 1.1



(g) $CO_2$:$O_2$=74:26、过量氧气系数 1.1

图 4 炉膛中心面温度场分布云图

图 4 显示的是不同过量空气系数和不同氧气、二氧化碳比例的燃气锅炉中心截面的轴向速度场分布。受温度场影响，可以看到图 4(b)~(f)在燃烧器出口的位置均能看到明显的回流区，保证燃烧器的稳定燃烧。而图 4(a)和图 4(g)则不存在这样的回流区。

## 2.3 变负荷计算工况

通过对绝氮燃烧工况不同过量空气系数和不同氧气、二氧化碳比例的计算，与现有锅炉运行参数对比，发现采用过量空气系数为 1.1，$CO_2$：$O_2$=72：28 的工况计算结果与实际燃气锅炉运行的参数较为接近。在进行变负荷计算时，采用恒定散热系数的炉膛壁面热边界条件，过量空气系数为 1.1，$CO_2$：$O_2$ 比例为 72：28 的边界条件，分别计算了 80 %和 110 %负荷燃气锅炉的运行燃烧情况。

图 5、图 6、图 7 分别显示的是空气工况和 80 %、100 %、110 %负荷绝氮燃烧工况燃气锅炉轴线温度曲线、轴线轴向速度曲线、轴线 CO 浓度曲线。结果表明：变负荷的绝氮燃烧工况与空气工况相比，轴线温度曲线、轴线轴向速度曲线、轴线 CO 浓度曲线变化趋势相同。

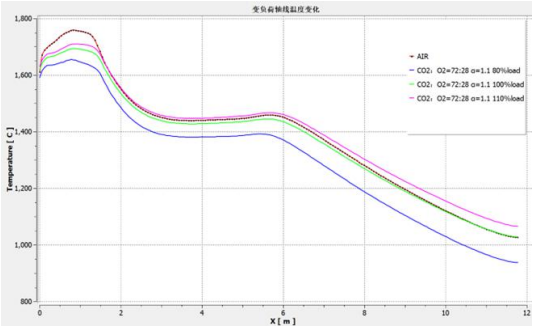



图 5 空气工况和 80 %、100 %、110 %负荷绝氮燃烧工况燃气锅炉轴线温度曲线

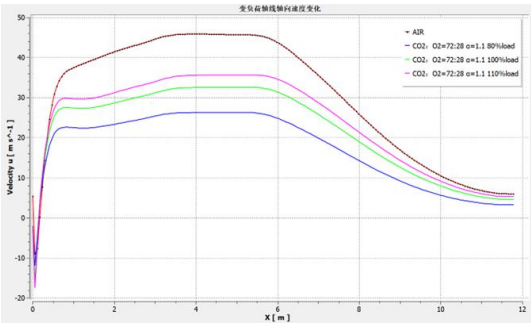



图 6 空气工况和 80 %、100 %、110 %负荷绝氮燃烧工况燃气锅炉轴线轴向速度曲线

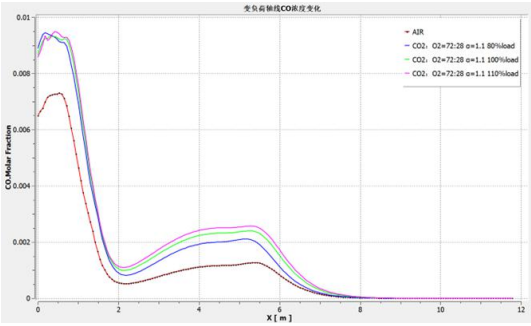



图 7 空气工况和 80 %、100 %、110 %负荷绝氮燃烧工况燃气锅炉轴线 CO 浓度曲线

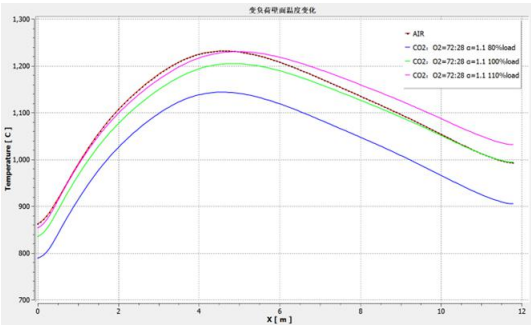



图 8 空气工况和 80 %、100 %、110 %负荷绝氮燃烧工况燃气锅炉壁面温度曲线

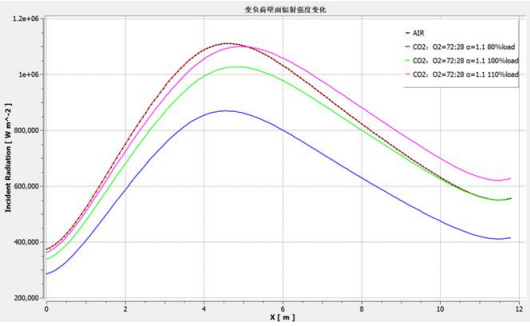



**图 9 空气工况和 80 %、100 %、110 %负荷绝氮燃烧工况燃气锅炉壁面辐射强度曲线**

图 8、图 9 分别显示的是空气工况和 80 %、100 %、110 %负荷绝氮燃烧工况燃气锅炉壁面温度曲线和壁面辐射强度曲线。结果表明，绝氮燃烧工况与空气工况相比，壁面温度曲线和壁面辐射强度曲线沿轴线方向的变化趋势相同，100 %绝氮燃烧工况的壁面温度值和壁面辐射强度值总体稍低于 100 %空气工况的计算结果，但两者的差均较小。

## 3 结语

通过燃气锅炉绝氮燃烧数值模拟的实施，得出如下结论：

（1）采用空气助燃，经过模拟数据与实际燃气锅炉运行数据的对比，恒定换热系数的壁面边界条件所获得的结果与数值分析的结果一致。

（2）通过对绝氮燃烧工况不同过量空气系数和不同 $O_2$、$CO_2$ 比例的计算，与现有锅炉运行参数对比，结果表明，过量空气系数为 1.1 时，$CO_2$∶$O_2$=72∶28 时的计算工况与实际燃气锅炉空气燃烧工况的结果相接近。

（3）变负荷工况，分别计算 80 %和 110 %负荷燃气锅炉的运行燃烧情况。100 %绝氮燃烧工况的轴线温度、轴线速度、壁面温度值和壁面辐射强度值总体要稍低于 100 %空气工况的计算结果，但两者的差均较小。整体的变化趋势与空气燃烧工况一致。

**参考文献：**

[1] 李晓艳. 新疆油田注汽管网结垢成分分析及对策[J]. 油气田地面工程, 2021, 40(10):82-87+92

[2] 刘克峰, 刘陶然, 蔡勇, 等. 二氧化碳捕集技术研究和工程示范进展[J/OL]. 化工进展, 1-15

[3] 刘畅. $O_2/CO_2$ 氛围下天然气富氧燃烧特性分析及 NOx 排放研究[D]. 长江大学, 2019

[4] 胡贤忠. $CH_4$ 在 $O_2/CO_2$ 气氛下燃烧特性的研究[D]. 东北大学, 2017

[5] 吴丽萍, 李明, 吴胜凯, 等. 油田注汽锅炉燃气燃烧技术发展与应用[J]. 热能动力工程, 2017, 32(7):126-129+144

集团要闻

# 东方电气集团与榆能集团签订横山二期三大主机设备合同

2023 年 12 月 12 日，中国东方电气集团有限公司与陕西榆林能源集团有限公司在成都签署榆能横山煤电一体化发电工程二期项目三大主机设备合同。东方电气集团党组成员、副总经理李忠军，榆能集团党委书记、董事长薛卫东，党委委员、副总经理杨倩共同见证签约。

双方将以榆能横山一期项目为标杆，携手将榆能横山二期打造成效率更高、质量更稳定的“精品工程”“样板工程”，推动双方合作再上新台阶，共同助力国家绿色低碳发展，共创价值、共享成功。

仪式前，双方进行了友好座谈。李忠军介绍了东方电气“六电六业”发展情况以及近期在科技创新、绿色低碳和数字化转型发展中取得的成绩。薛卫东介绍了榆能集团的发展战略和近期规划。双方一致认为在总结和继承前期良好合作的基础上，两个集团一定能够打造高质量的合作前景。

早在 2015 年，东方电气集团与榆能集团便签订榆能横山煤电一期项目供货合同，由东方电气集团提供全部两台机组三大主机设备。机组分别于 2018 年 12 月和 2019 年 10 月投运，2 号机组创造了连续安全运行 391 天的国内新纪录。2020 年，榆能横山 1 号机组获评中国电力企业联合会百万千瓦超超临界间接空冷机组 5A 级优胜机组。榆能横山一期项目的成功合作，让彼此加强了信任，深化了友谊。双方将以此为基础在能源及相关合作领域开展更深入、更全面的合作。

来源：东方电气网

# 燃料电池低温储存、启动热平衡建模与分析

刘煜[1,2] 曹蕾[1] 孔红兵[1] 胡军[1]

1.东方电气（成都）氢燃料电池科技有限公司，成都 611731；2. 长寿命燃料电池四川省重点实验室，成都 611731

**摘要：**质子交换膜燃料电池发动机低温冷启动性能是制约燃料电池发动机广泛应用的重要指标，合理的停机保温设计和启动策略能极大提高低温冷启动成功率、加快启动速度、减小膜电极损伤、延长燃料电池使用寿命。采用传热学原理，结合燃料电池物性参数，建立了燃料电池系统启停过程动态热平衡计算模型，并基于该模型对燃料电池在不同降温速度、不同低温储存温度和不同保温设计下的启动能耗等进行计算和对比分析研究。研究计算表明，所归纳的模型、计算方法和结果，可为工程应用提供降温时间、降温速度、保温所需厚度的数据参考，并指导选择燃料电池的低温储存环境，计算并使用合适的保温材料厚度，降低低温环境对燃料电池伤害、保障低温顺利启动、减小低温储存和启动能耗。

**关键词：**低温启动；热平衡；建模模拟

**中图分类号：**TM911.4 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-9006（2024）01-0016-04

## Modeling and Analysis of Fuel Cell Stack Low Temperature Storage and Subzero Start-up

*LIU Yu*[1,2], *CAO Lei*[1], *KONG Hongbin*[1], *HU Jun*[1]

( 1. Dongfang Electric (Chengdu) Hydrogen Fuel Cell Technology Co., Ltd ., 611731, Chengdu, China;

2. Sichuan Key Laboratory of Long-life Fuel Cells, 611731, Chengdu, China）

Abstract: The cold start characteristics of Proton-Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) Engine is one of the key indicators that constrains the wide application of the PEMFC engine. Suitable shut-down insulation design and start-up strategy could greatly enhance the success rate of subzero start-up, the speed of start-up, and reduce the membrane’s damage, prolong the life-span of the PEMFC. Adopting the heat transfer principle, combining with the physical property of PEMFC, the dynamic heat balance calculation model was established. Calculation, comparison and analysis of the start-up power consumptions under different cooling rate, sub-zero storage temperature, insulation thickness were carried out. The research and calculation show that the models, calculation methods and results can provide data reference on the cooling rate, speed and required insulation thickness. And can guide the selection of sub-zero storage environment, calculation of suitable insulation thickness. Thus, to reduce the damage, safeguard the start-up process, decrease the power consumption of storage and start-up of PEMFC in sub-zero environment.

Key words: sub-zero start-up; heat balance; modeling and simulation

质子交换膜（PEM）燃料电池在低温（＜0 ℃）环境下，会面临电堆结冰、系统难以启动、输出性能下降以及寿命降低、部件和传感器结冰[1,2]等一系列的问题，导致低温冷启动失败，延长启动时间。合理的停机保温措施和低温启动策略[3]能极大提高低温启动成功率、加快启动速度、减小对膜电极和系统零部件损伤、延长燃料电池使用寿命。因此近年来，低温无损储存和启动技术成为燃料电池的前沿研究方向之一。

从保温措施来讲，如表 1 所示，有两类技术路线[4]。

**收稿日期：**2023-10-08

**作者简介：**刘煜（1986－），男，2013 年毕业于西安交通大学化学工程与技术专业，工学博士，高级工程师。现于东方电气（成都）氢燃料电池科技有限公司从事燃料电池系统研发、工程应用等工作。

表 1　燃料电池保温技术路线

| 技术路线 | 相关技术 | 特点 |
|---|---|---|
| 停机保温 | 保温、隔热<br>能量管理<br>监测控制 | 属低温储存期间策略：<br>可选用耐温≥0℃的零部件，降低成本；<br>需保持系统温度不低于 0℃，保证零部件内部和膜电极表面不发生冻结；<br>低温储存时长和环境温度决定保温过程所需能量；<br>保温辅热所需功率正比于燃料电池系统表面积/温差；<br>适合短时停机和一般低温环境。 |
| 启动前加热 | 关机吹扫[5,6]<br>能量管理[7,8]<br>水含量管理<br>启停控制逻辑[9]<br>监测控制 | 属低温启动前的策略：<br>低温储存过程不需要能量；启动时需要能量；<br>加热功率正比于系统重量和冷却液重量；<br>适合长时停车和严寒低温环境；<br>对零部件耐低温要求高，可选用低温型系统辅助零部件。 |

## 1　燃料电池低温储存与启动过程热平衡建模

本研究主要从热力学角度探究表 1 中的储存保温和启动前加热技术方案。由于电堆是燃料电池系统发电的核心部件，其温度状况对低温储存和启动起决定性作用，故主要开展了电堆的储存保温与启动前加热的热平衡建模分析。

### 1.1 低温储存热平衡模型

表 1 中，对燃料电池开展保温的技术路线，是指保持电堆温度不低于 0 ℃。因此，除采取外部保温包覆外，如果低温储存时间过长，则维持电堆温度还需额外输入能量。

低温环境储存保温所需热量值，与系统对外的散热量相当。由于电堆停机时温度一般最高都不超过 80 ℃，辐射散热量占比很小，故忽略其对外辐射散热量。

根据牛顿冷却定律：

$$Q_1=h\cdot A\cdot(T_s-T_a) \tag{1}$$

可见，电堆对外散热量和保持电堆温度所需加热功率正比于燃料电池电堆表面积以及电堆与环境的温差。

### 1.2 启动热平衡模型

对燃料电池电堆开展启动前加热的技术路线：停机期间不需能量，但启动时需要较大能量；启动前所需加热功率决定加热速度，加热功率主要取决于电堆和冷却液的重量。

$$Q_2=\sum C_i m_i \Delta T + h\cdot A\cdot(T_s-T_a) \tag{2}$$

### 1.3 动态热平衡模型

针对不同停机时长的储存保温与启动加热技术策略，还需考虑停机后在不同环境温度、不同保温厚度条件下的降温时间。

在实际的工程应用中，可使用零维问题分析法的集中参数法温度场分析[10]来求出电堆停机时温度 $T_s$ 冷却至目标温度 $T_t$ 所需的时间 $t$。

$$t=\frac{\Sigma m_i C_i}{A}\left(\frac{1}{h}+\frac{l}{k}\right)\ln\left(\frac{T_s-T_a}{T_t-T_a}\right) \tag{3}$$

上述式中，$Q_1$—保温所需热量，W；

$Q_2$—升温所需热量，W；

$h$—对流换热系数, W/(m²·K)；

$k$—保温层导热系数，W/(m·K)；

$l$—保温层厚度，m；

A—散热面积，m²；

$T_s$—燃料电池电堆停机时温度，K 或℃；

$T_a$—环境温度，K 或℃；

$T_t$—目标温度，K 或℃；

$C_i$—燃料电池电堆各组件、冷却液比热容，J/(kg·K)；

$m_i$—燃料电池电堆各组件、冷却液质量，kg；

$\Delta T$—目标加热温度和环境温度之差，℃；

## 2　储存与启停过程动态热平衡模型分析计算

表 2　模型变量参数

| 参数 | 数值 | 备注 |
|---|---|---|
| 环境温度（低温），℃ | －40~－10 | 用于计算不同环境温度的电堆冷却、升温时间 |
| 电堆重量，kg | 35 | |
| 电堆散热面积，m² | 0.462 | |
| 空气对流传热系数，W/(m²·K) | 10 | |
| 导热系数，W/(m·K) | 0.036 | 常规保温材料 |
| 石墨比热容，J/(kg·K) | 710 | 因质子膜、边框等占据体积太小，电堆材料主要以石墨为主，此处取石墨的比热容 |
| 整堆冷却液重量，kg | 1.49 | |
| 冷却液比热容，J/(kg·K) | 3.2 | 取燃料电池专用冷却液（冰点-30℃）在 10℃时比热 |
| 保温层厚度，mm | 0~25 | 用于计算不同保温层厚度的电堆冷却时间 |
| 冷却液密度，kg/m³ | 1 091.6 | 取燃料电池专用冷却液（冰点-30℃）在 10℃时密度 |
| 加热效率，% | 90 | |
| 目标温度，℃ | 5 | |

以某型号 140 节电堆为例，结合表 1 所示的模

型输入参数，建立储存与启停过程动态热平衡模型，并开展了计算与分析。

基于常见低温环境温度，针对不同停机时堆温、不同电堆储存环境温度、不同电堆保温层厚度等多个因素变化，分析了对保温/升温能耗和降温时间/速度的影响。

国内常见低温工况，一般指燃料电池系统正常运行后，停机前的温度 65 ℃左右，低温环境温度约－20~－10 ℃。

### 2.1 常见低温工况下燃料电池冷却规律

计算燃料电池在不同的保温层厚度下，温度随时间的变化情况。

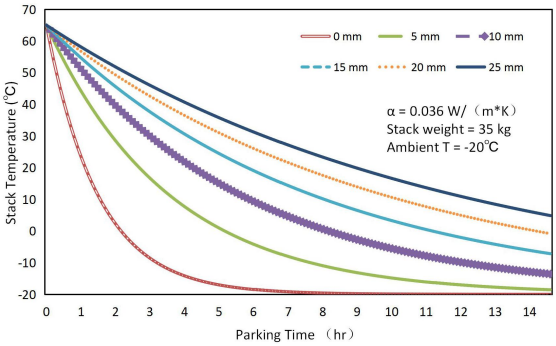



图 1　典型的电堆停机降温曲线

由图 1 可见，典型的低温环境中，仅 8 小时就可使重量 35 kg、未敷设保温层的电堆从 65 ℃降温到-20 ℃。而敷设 5 mm 保温层后电堆的降温时间则延长了近一倍（16 h）。敷设保温层，可延长降温时间、减缓电堆降温速度。

### 2.2 保温层厚度和环境温度对降温时间的影响

在不同的环境温度中，电堆外敷设不同保温层厚度、从 65 ℃降温到 5 ℃所需时间，如图 2 所示。

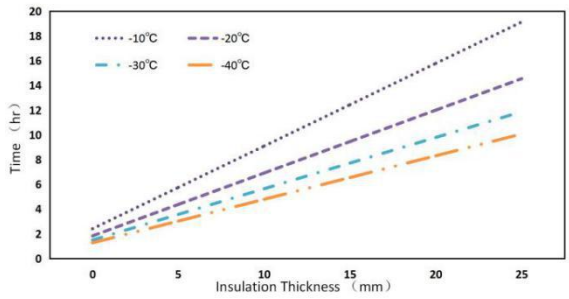



图 2　不同环温和保温厚度的电堆降温时间

由图 2 可见，电堆降温速度与保温厚度、环境温度成反比。

### 2.3 保温层厚度和初始温度对降温时间的影响

在-20 ℃环境中，电堆不同保温层厚度、不同初始温度降温到 5 ℃所需时间如图 3 所示。

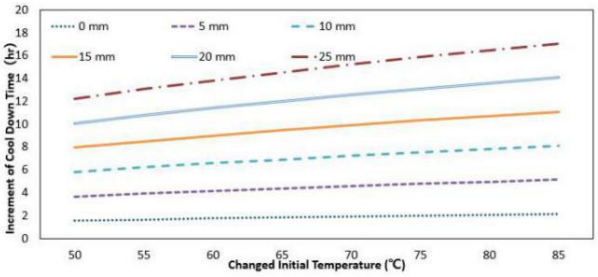



图 3　-20 ℃环温，不同保温层厚度和初始温度的电堆降温时间

由图 3 可见，电堆降温速度与保温厚度成反比，降温时间与低温储存前初始温度成正比，提高低温储存前的堆温，可延长电堆降温时间。美国 UTC 电力公司的专利[11]就提出了一种在停机前通过旁路将其他热量带给电堆，从而增加电堆显热、促进停机后保温效果的方法。

### 2.4 保温厚度与停机温度对能耗影响

图 4 表示出在不同环境温度、不同保温层厚度，将停机时 65 ℃的电堆温度保持在 5 ℃所需加热功率。

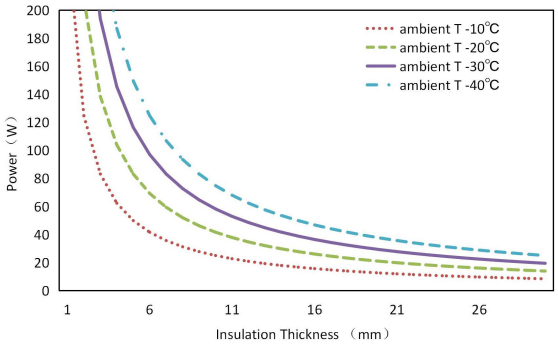



图 4　不同环温、保温层厚度将电堆温度保持在 5 ℃所需加热功率

由图 4 可见：

（1）保温所需能耗与保温层厚度、低温储存环境温度成反比；

（2）储存温度越高，越有利于降低保温能耗。据此可考虑尽量将燃料电池系统的储存环境设置在室内或有防风措施的区域，以尽量提高储存温度，降低保温能耗。

（3）一定的低温储存环境温度下，当保温层厚度增加到一定程度后，对于加热功率的需求几乎稳定不变，这是因为随保温层厚度增加，整个电堆对外换热的主导热阻逐渐由空气侧热阻变为了保

温层的热阻，即保温层厚到一定程度后、其对外散热时间需要很长，所以此时保温加热的功率需求几乎不随时间变化。就本文计算电堆来讲，保温层厚度的“敏感区”是在 0~10 mm 之间，在此区间内，通过增加保温层厚度、可大幅降低保温所需输入的热功率。超过 10~20 mm 的保温层厚度后，对于保温能耗的需求影响不大。因为增加保温层后、会增大电堆体积、重量、材料费用，还可能影响电堆运行时的性能，故而需应用此计算模型来选择电堆保温层的最佳厚度，以实现对电堆敷设保温的经济性、合理性。

### 2.5 停机后主动保温和启动前主动加热能耗对比

以停机时堆温 65 ℃，保温层厚度 15 mm 的电堆为例，计算出停机后主动保温在 5 ℃所需能耗，以及停机后自然冷却、启动前主动加热至 5 ℃所需的能耗，如图 5 所示。

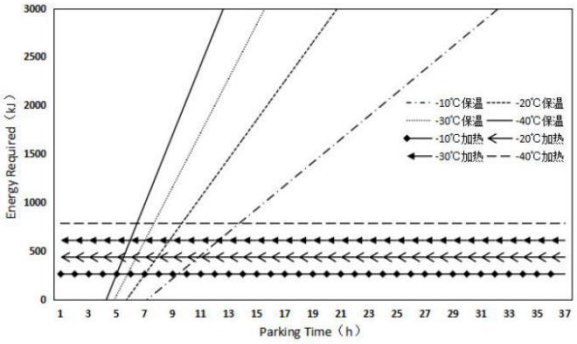



图 5　主动保温和主动加热的能耗对比

从图 5 可见，对于重量、外表面积一定的电堆，可视停机时间来选择采用停机后主动保温的方法还是停机后、下次启动前主动加热的方式。以-10 ℃环境为例，如果低温环境中停机时间在 9.2 h 以内，则使用停机后主动加热来保持电堆温度维持在零上 5 ℃的方式会更节约加热能量；如果低温环境中停机时间在 9.2 h 以上，则使用启动前加热的方式来加热电堆至零上温度的方式会更节约能量。

使用本文建立的计算模型和方法来计算保温、升温能耗，从而预测、指导选择合理的储存保温/启动前加热的方式，可节约低温启动能耗。

## 3　结语

通过对质子交换膜燃料电池电堆的低温储存、启动加热过程的热量平衡建模与分析，可得出用于指导工程应用的如下结论。本计算方法，可指导工程应用、制订电堆保温/升温策略，实现低温启动储存、启动过程能量精准化控制，大大减少低温启动所需能耗。

（1）结合电堆使用实际工况，选择合理的保温层厚度，可减缓电堆在低温环境中的冷却速度；

（2）工程实际应用中，可考虑将燃料电池系统的储存环境迁移到室内或有防风措施的区域，以尽量提高储存温度，降低保温能耗。

（3）停机后对外散热的燃料电池，存在“保温厚度敏感区”，在此敏感区内，通过增加保温层厚度、可大幅降低保温所需能耗。超过保温层厚度敏感区后，则保温所需能耗基本恒定。使用本文的计算方法，可用于选择电堆保温层最佳厚度，以实现保温的经济性、合理性。

## 参考文献

[1] 袁峰. 低温环境下质子交换膜燃料电池冷启动性能研究[D]. 浙江工业大学, 2019

[2] 林瑞, 蒋正华, 任应时, 等. 低温工况下燃料电池性能衰减及策略优化[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2018, 46(5):658-666

[3] 都京, 王宇鹏, 马秋玉, 等. 车用燃料电池发动机冷启动方法综述[J].汽车文摘, 2019(1):37-41

[4] AHMAD A . PESARAN GI-HEON KIM JEFFREY D . Gonder. PEM Fuel Cell Freeze and Rapid Startup Investigation [R]. Milestone Report NREL/MP-540-38760, 2005, 24-25

[5] 黄永. 质子交换膜燃料电池冷启动研究[D]. 武汉理工大学, 2008

[6] 潘浩. 质子交换膜燃料电池停机吹扫过程研究[D]. 清华大学, 2019

[7] 郭海鹏. 质子交换膜燃料电池低温储存与启动[D]. 大连交通大学, 2019

[8] 裴昱. 质子交换膜燃料电池低温储存与启动[D]. 大连交通大学, 2018

[9] 田中浩己, 弓田修. 燃料电池系统及燃料电池系统中的起动时控制方法: CN200980160017.0[P]

[10] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 高等教育出版社, 2006, 8

[11] PEM fuel cell with high porosity water transport plates and temperature increase before shut down in subfreezing conditions:US10633917[P]

# 基于虚拟现实技术的抽水蓄能机组智慧检修仿真系统应用研究

屈博兴[1] 曾建宏[1] 刘芙伶[2] 蒲晓珉[2]

1. 东方电气集团东方电机有限公司，四川 德阳 618000；2. 东方电气集团科学技术研究院有限公司，成都 611731

**摘要：**随着虚拟现实、三维可视化等先进计算机技术的快速发展与广泛应用，以及抽水蓄能电站建设的不断加速。针对当前发电设备制造业传统的产品服务模式与用户日益增长的对高端数字化服务需求之间的问题和矛盾，提出一种基于虚拟现实技术的抽水蓄能机组智慧检修仿真系统。系统根据抽水蓄能机组设计结构特点和运维检修技术特点，将先进的虚拟现实、建模与仿真等计算机技术与抽水蓄能水泵水轮发电电动机组的运维、监测、安装、检修及培训等业务深度融合，为其他基于虚拟现实技术建设的智慧运维及检修培训系统提供参考和依据。

**关键词：**虚拟现实；抽水蓄能机组；智慧运维；状态监测；检修培训；三维仿真；人机交互

**中图分类号：**TV737；TV743 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-9006（2024）01-0020-04

# Application Research of Intelligent Maintenance Simulation System of Pumped Storage Unit Based on Virtual Reality Technology

*QU Boxing*[1], *ZENG Jianhong*[1], *LIU Fuling*[2], *PU Xiaomin*[2]

（1. Dongfang Electrical Machinery Co.,Ltd.,618000,Deyang,Sichuan,China;

2. DEC Academy of Science and Technology Co., Ltd., 611731, Chengdu, China ）

Abstract: With the rapid development and wide application of virtual reality, 3D visualization and other advanced computer technologies, as well as the accelerated construction of pumped storage power station. Aiming at the problems and contradictions between the traditional product service mode of power generation equipment manufacturing industry and users' increasing demand for high-end digital service, a simulation system for intelligent maintenance of pumped storage unit based on virtual reality technology was proposed. According to the design structure characteristics of pumped storage unit and the characteristics of operation, maintenance and overhaul technology, the system deeply integrates advanced virtual reality, modeling and simulation and other computer technologies with the operation, monitoring, installation, overhaul and training of the pumped storage pump turbine generating electric unit, providing reference and basis for other intelligent operation, maintenance and overhaul training systems based on virtual reality technology.

Key words: virtual reality; pumped storage unit; intelligent operation and maintenance; status monitoring; maintenance training; 3D simulation; man-machine interaction

抽水蓄能是当前技术最成熟、经济性最优、最具大规模开发条件的电力系统绿色低碳清洁灵活调节电源，主要承担电力系统的调峰、填谷、调频、调相、储能、事故备用和黑启动等任务。

传统的抽水蓄能电站运维管理层次多，机组自动化、智能化水平低，专业划分细，运行、维护人

**收稿日期：**2023-04-12

**作者简介：**屈博兴（1988－），男， 2011 年毕业于西北农林科技大学热能与动力工程专业，学士，高级工程师。现在东方电气集团东方电机有限公司从事水电服务技术工作。

曾建宏（1975－），男，1999 年毕业于西安理工大学水利水电动力工程专业，学士，高级工程师。现任东方电气集团东方电机有限公司电站服务事业部总经理。

员仅具备各自专业范围内部的技术能力，工作局限性大，不具备跨专业解决复杂问题的能力，生产人员数量较多，生产效率和管理效率普遍不高，不但机组运维难度大易出错，而且周期长成本高，且存在人员安全隐患。长此以往，会对抽水蓄能机组及整个新型电力系统的可靠稳定性产生不良影响。因此，现代抽水蓄能电站对机组的运维检修和对技术人员的高效培训与考核评估提出了更高的要求。在“大云物移智”、BIM、VR/AR/MR 等互联网技术及计算机技术快速发展的环境条件下，智能化、可视化、服务化的设备运维管理是抽水蓄能机组运维检修现在以及未来的发展趋势。目前国内已有数字化培训系统平台，互动性十分有限，不能提供沉浸式、交互式的培训体验，培训效果差，平台化开发和可扩展能力不足，系统建设完成后很难再补充或更新应用场景内容。

针对目前三维数字化装配及检修培训系统平台存在的不足，本文提出一种基于虚拟现实技术的抽水蓄能机组智慧检修仿真系统用于抽水蓄能机组的运维、监测、安装、检修及培训等业务。通过使用虚拟现实技术和高质量三维模型及动画，制作成运维及检修培训的虚拟场景。培训人员可身临其境地感受设备运行、安装及检修过程，并且能在场景中自由走动，拖动设备，全方位观察设备状态，具有极强的互动性与很好的沉浸体验。针对不同的发电设备，本系统支持后期热更新，只需在服务端更新新的发电设备模型资源，客户端将在启动时自动更新，进一步增强系统的可扩展能力与灵活性。

## 1 抽水蓄能机组特点分析

抽水蓄能机组在电力系统负荷高峰时作水轮发电机运行，将水的势能通过发电机转换为电能；在电力系统负荷低谷时作水泵电动机运行，用电力系统低谷时的富余电能从下水库向上水库抽水，将电能转换为水的势能储存起来，具有停机（S）、旋转备用（SR）、发电（G）、发电调相（GC）、抽水（P）、抽水调相（PC）等 6 个稳态，线路充电（LC）、背靠背拖动（L）和黑启动（BS）等 3 个暂态，运行模式多变。目前，抽水蓄能机组运行水头范围已覆盖到 800 米，转轮直径最大可达 7 米，转速从 100 转每分钟到 750 转每分钟，整个主辅机系统设计复杂，对水泵水轮机、发电电动机、进水阀和成套设备研制技术及安装调试技术要求高，较常规水电机组研制和现场安装调试难度大、周期长。因其运行水头高、设计结构复杂、运行工况多变、安装工艺步骤多、安装标准要求高、现场调试难度大、涉及专业及流程较多等原因，给机组的安装调试、运维检修及人员培训带来了巨大挑战。

## 2 检修仿真系统技术研究

### 2.1 精细化高质量三维建模

三维建模，就是利用三维数据将现实中的三维物体或场景在计算机中进行重建，最终实现在计算机上模拟出真实的三维物体或场景。精细化高质量三维建模能获得高精度符合真实机组结构及工艺要求的三维模型，组成与真实环境高度接近的虚拟三维场景，增强系统最终的沉浸式效果。

精细化高质量三维模型严格按照抽水蓄能机组研制厂家设计图纸和机组安装检修标准工艺及核心技术进行建立，并能匹配不同装配层次仿真环境。为适应不同场景要求，降低计算机的使用门槛，三维模型在投入使用前进行轻量化，提高系统的渲染速度与操作流畅度。在轻量化的过程中必须充分考虑到模型信息的存储与表达是否符合计算机设备的特点，以及操作步骤是否简明易懂。

所有高精度模型支持绑定丰富逻辑和数据接口，为虚实机组数据互通、数据驱动、数字孪生及数字化智能化电厂建设打好模型基础。

### 2.2 工艺细节动画制作

工艺细节动画利用三维动画方式对机组结构、运行原理、安装及检修工艺等进行标准化细节化表达。

动画制作要点包括：严格参照抽水蓄能机组发电、抽水、调相启动流程和运行状态，动态模拟各运行模式，实现虚实机组动态同步展示及启动调试流程模拟培训；按照机组安装及维护标准化说明书并结合现场施工实际建立操作步骤，精确说明安装及检修工艺步骤和相应标准，实现机组全部套安装及检修工艺流程逐步可视化交互式呈现；大规模应用通用及专用工具；大跨度工艺细节呈现，从单个部套到整台机组，从最小零部件到厂房基建；大规模三维标准化可视化工艺技术动画设计呈现，涵盖真实及抽象工艺表达。

### 2.3 虚实机组数据互联及数据驱动

为达到虚实机组数据互联互通，抽水蓄能机组监测传感器预留行业通用化标准化数据接口，将采集到的数据传输到后台服务器，经过后台服务软件进一步整合后以接口的方式传给三维模型，三维模型实时接入机组运行数据，并随数据驱动进行三维动态显示，实现机组运行状态三维可视化展示；三维场景中绑定监测传感器及部套模型结构树关系，实现机组运行状态及故障信息框架化三维呈现，直观精准。

### 2.4 检修仿真系统软件功能

系统提供充分的变更与扩展能力，能同时支持集中式或分布式的体系框架，支持应用模块的调整、迁移和再分布，以适应各种机型不断更新变化的要求。基于虚拟现实技术的抽水蓄能机组智慧检修仿真系统平台软件功能模块的汇总表如下：

**表 1 抽水蓄能机组智慧检修仿真系统平台软件功能模块汇总表**

| 功能模块 | 功能模块具体内容 |
|---|---|
| VR运行仿真虚拟现实模块 | 工作模式切换<br>机组工作原理三维动画讲解说明<br>实际部署场景呈现 |
| VR检修培训系统模块 | 全套装配工艺流程展示<br>虚拟装配操作及考核 |
| VR实时状态监测模块 | 数据实时接入<br>数据驱动模型状态变化<br>数据可视化呈现 |
| 三维数字手册模块 | 典型部件装配三维动画展示，装配模型爆炸、旋转显示<br>二维码识别匹配进入 |
| VR典型故障案例模块 | 机组故障案例展示，可显示相应部套的三维模型，可显示影像、文档、图片等信息 |
| VR专家讲解模块 | 专家讲解内容展示，可显示相应部套的三维模型，可显示影像、文档、图片等信息 |
| AR远程专家系统 | 第一视角音视频交互、实时协作指导、文档及多媒体资料分享、多终端屏幕共享、多方通话管理 |
| 平台系统功能模块 | 用户管理<br>日志管理<br>其他管理 |

抽水蓄能机组运行仿真系统模块具有工作模式切换、不同子系统工作原理仿真、设计结构可视化讲解等功能。通过机组三维动态动画等技术实现虚实机组动态同步展示及运行调试流程模拟等功能，对真实机组运行状态进行沉浸式、交互式、全方位可视化展示，增强沉浸体验感，可显著提高运维人员对机组结构、运行原理及工作模式转换流程的学习掌握速度和效果质量。

抽水蓄能机组故障检修培训系统模块，主要实现在三维 VR 场景中体验机组的安装及检修场景操作培训和考核评估等功能。通过 VR 设备（手柄等）对机组全套部件装配工艺流程的展示及虚拟装配操作，提高学员设备安装及检修工艺流程等学习培训效率。

抽水蓄能机组实时运行状态 VR 监测模块中三维机组模型支持外部数据接入，并具备实时数据驱动能力，机组设备关键监测数据可实时可视化显示，三维场景显示直观，故障模型精准定位。

抽水蓄能机组典型案例模块精选机组安装、检修及故障处理等典型案例场景，采用三维模型透视、隐藏、爆炸等方式，结合真实案例视频、文档、图片综合立体呈现故障案例，提高机组检修质量和检修效率，以数字化方式固化电站检修经验及技术成果。

抽水蓄能机组专家讲解模块具有自由漫游、机组模型零件级拆解、手柄操作模型透视化及机组模型一键还原等功能，为教员和学员开展技术培训、制作培训资料等提供机组全部套可交互三维可视化环境。

抽水蓄能机组三维交互式数字化手册模块，主要应用于移动端（平板电脑和手机），根据机组零部件装配标准化工艺流程，进行产品安装三维动画展示，并具有部套级装配零件级爆炸视图显示、支持对 720 度全景展示、配合二维码扫码进入等功能，便于对外展示、现场指导及学习培训等。

远程专家系统集第一视角音视频交互、实时协作指导、文档及多媒体资料分享、多终端屏幕共享、多方通话管理等功能于一体，具有简单好用、清晰稳定、安全可靠、多终端、跨平台使用等特点。通过该系统专家可进行远程实时诊断和指导，有效提升服务效率，提高问题研判的准确性和处理反应速度。

系统分级设置用户权限，可对用户按角色、按

操作功能模块设置权限。设置平台管理员，可对系统用户设置权限。系统提供功能操作日志及业务数据改动日志，自动形成日志文件并保留，以供查询。

## 3 系统总体架构

基于虚拟现实技术的抽水蓄能机组智慧检修仿真系统架构分为三层，分别是基础数据支撑层，数据处理层和数据交互层。硬件系统由 VR 终端套件、电脑终端、移动终端（平板电脑或手机）和后台服务器构成，软件系统由 VR 仿真软件、AR 仿真软件以及后台服务软件构成。

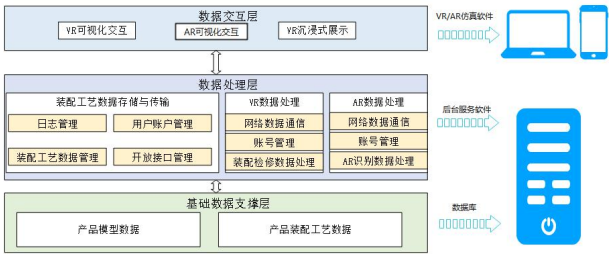



图 1 系统总体架构

基础数据支撑层作为系统的数据支撑基础，为整个系统提供基础数据，主要包括抽水蓄能机组的模型数据和抽水蓄能机组装配工艺数据。基础数据支撑层在后台服务器上利用数据库实现。数据库需存储 VR/AR 仿真软件中所有抽水蓄能机组的相关数据。

数据处理层用于处理系统基础数据支撑层提供的数据，数据处理层一方面是对采集的数据进行必要的整合与管理，另一方面是对必要的数据进行进一步的整合，通过标准协议或私有协议的方式向数据处理层提供数据，其目的是为了向交互层的可视化交互提供保障。数据处理层在后台服务器上通过后台服务实现。后台服务软件是整套软件系统的管理控制和数据服务枢纽，以数据接口的方式进行用户登录管理，为 VR/AR 仿真软件提供模型资源及传输数据库数据。

数据交互层是基于系统数据处理层处理后的数据，通过标准化协议，系统将处理后的数据进行展示，同时用户基于 VR 终端套件或移动终端，进行可视化交互，达到系统检修培训的目的。数据交互层则利用 VR/AR 仿真软件实现。VR 仿真软件运行在便携式笔记本电脑之上，便携式笔记本电脑上的 VR 画面通过视频线传输到 VR 头盔中。AR 仿真软件运行在移动终端上。

## 4 结语

本文以东方电机拥有完全自主知识产权的抽水蓄能机组为建模和先进计算机技术应用研究对象，分析了现代抽水蓄能机组运维特点，以用户需求为导向，以数字化服务为目标，通过将虚拟现实、三维仿真等先进计算机技术与抽水蓄能机组运维及检修真实场景深度融合，实现了抽水蓄能机组三维可视化、运行动态模拟、机组结构模块化、检修培训数字化、监测数据虚实交互、全景沉浸式漫游等功能。该系统具有良好的可视化、场景化、沉浸式、交互式产品功能体验，可显著提高用户对抽水蓄能机组的数字化运维、安装调试及检修培训能力，提升抽水蓄能水电站的运维一体化能力和运营效益，保障机组安全、稳定、可靠、智慧运行，为抽水蓄能的快速建设和良好持续发展提供更好的数字化服务及更优的人才保障。

**参考文献：**

[1] 肖志怀，林家洋，庄明，等. 水轮发电机组虚拟仿真培训系统研究[J]. 中国电力教育, 2014(27):93-95

[2] 李亦凡，张卫君，邱洋，等. 基于一体化平台的蓄能电厂仿真技术研究[J]. 水电站机电技术, 2019(12):38-40

# 大型混流式转轮工地制造技术

彭立帆　杨丽冬　王地召

东方电气集团东方电机有限公司，四川 德阳 618000

**摘要：**某水电站共安装 6 台单机容量约 200 MW 水轮发电机组，电站原水轮机由东方电机有限公司设计制造。本文简要介绍了转轮改造的制造工艺路径和相关技术创新。

**关键词：**水轮机；转轮；加工；工地制造

**中图分类号：**TK730　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）01-0024-05

## The Field Manufacturing Technology of the Large Francis Runner

*PENG Lifan, YANG Lidong, WANG Dizhao*

（Dongfang Electric Group Dongfang Electric Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan,China）

Abstract: A hydropower station is equipped with a total of 6 single-unit capacity of about 200MW hydrogenerator units, the original turbine of the hydropower station was designed and manufactured by Dongfang electric machinery limited liablity company.This paper briefly introduces the manufacturing process path and related technical innovation of runner transformation.

Key words: water turbine; runner; machining; field manufacturing

某水电站地处云南省澜沧江中游，水轮机单机容量超过 200 MW。其中，水轮机核心部件转轮总重量超过 100 t，最大直径超过 6 m，转轮精度要求高，制造难度大。为了能够在既定的工期内生产出高质量的转轮，针对转轮的结构特点，并结合公司的设备能力、制造技术储备等相关情况，将公司制造三峡、溪洛渡、白鹤滩等大型混流式水轮机所应用的工艺流程、现场制造技术进行了总结、优化和技术创新，最终制定了一套行之有效的转轮工地制造工艺方案。

## 1　转轮制造

转轮各零部件的材质均采用抗空蚀、抗磨蚀以及具备良好性能的 ZG04Cr13Ni4Mo，均要求 VOD 精炼铸造。转轮的上冠、下环、叶片都在厂内数控加工，加工完成后运输至转轮工地厂房，转轮在工地厂房完成组装、焊接、加工等工序。

### 1.1 转轮工地加工厂房工艺布局设计

#### 1.1.1 厂房主要参数

根据某工地实际施工尺寸及转轮的交货周期安排，工地厂房有效长度约 70 m，跨度约 20 m，柱间距约 10 m，工位数量设置为 5 个。厂房结构型式通常分为砖木、砖混凝土、钢筋混凝土以及钢材结构，我们采用重钢结构厂房，原因是其强度大、跨度大、工程施工周期短、价格较低、防火性能高、防侵蚀性强。根据转轮高度、实际使用设备工装的

**收稿日期：**2023-06-13

**作者简介：**彭立帆（1991－），男，2014 年毕业于西华大学机械设计制造及其自动化专业，工程师，在东方电机有限公司从事水轮机制造工艺工作。

杨丽冬（1991－），女，2014 年毕业于西南交通大学材料科学与工程专业，工程师，在东方电机有限公司从事水轮机技术管理工作。

王地召（1965－），男，1985 年毕业于四川工业学院水力机械专业，高级工程师，主任工程师，在东方电机有限公司从事水轮机制造工艺工作。

高度，确定吊车吊钩下净高不低于 13 m。根据转轮重量、实际使用设备工装的重量，确定主厂房区域承重和转轮运输通道的地面承重吨级约 200 t、辅助区域地面承重吨级约 100 t。

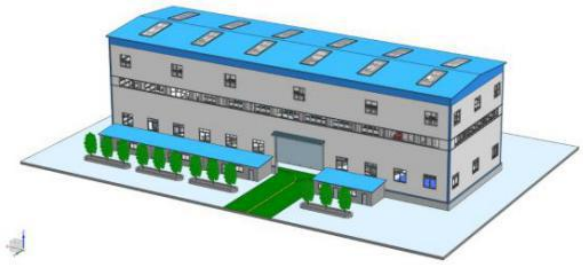


图 1　厂房鸟瞰图

### 1.1.2 工位设置简介

厂房内共设置五个主要工位，依次为：转轮机加工工位、转轮平衡、清理工位、转轮装焊工位（转轮铲磨工位）和转轮焊后热处理工位。

#### 1.1.2.1 转轮焊后热处理工位

综合各工位特点，为了减少转轮退火时对其他工位造成影响，因此，将转轮焊后热处理工位安排在厂房的端头。

转轮热处理方式有燃油退火和电加热退火两种，根据综合分析，从环保、成本、管理及地理环境等方面综合考虑，采用电加热方式对工地转轮进行退火。相比燃油退火，消除了燃油泄露及燃烧排放物对环境的污染。

电加热退火炉为分块式钟罩结构，采用内置电加热带进行加热退火。退火炉区域布置有电器元件，位置固定不动。在该工位设置混凝土基础承重。以转轮上冠直径为分布圆，均布 8 块承载基础钢板，以放置转轮。

#### 1.1.2.2 焊接、铲磨工位与拆装工位

焊接铲磨工位及拆装（焊接备用）工位，每工位各均布设置 5 块承载基础钢板，每块承载基础钢板位置设置混凝土基础承重。为便于转轮的吊装，将承载基础钢板与厂房中心线呈 45°布置。每个工位配置风包，用于转轮焊接时的铲磨。

#### 1.1.2.3 加工工位

转轮加工通常分为立车加工方案和专机加工方案。专机加工方案的特点是设备重量轻，刚性较差，但可灵活拆装、运输，总成本低；立车加工方案是传统的转轮加工方案，结构上钢性更好，设备控制系统更加稳定，更能保质保量完成转轮加工。从保证转轮生产质量的角度出发，为规避专机方案存在因加工臂较长，引起加工表面粗糙度值较高或加工稳定性较差的风险，转轮采用了立车加工方案。

转轮采用标准 9 M 立式车床加工，该工位由两个独立的区域构成，一个区域安装机床工作台，工作台固定在基础上，基础进行承载；在另一个区域安装立车立柱，立柱固定在地基基础上。在此工位完成全部转轮的机械加工，转轮联轴螺孔及销套孔的加工也在此工位上完成。

#### 1.1.2.4 静平衡工位

考虑到转轮完成静平衡后可更便捷的运输出厂，静平衡工位设置在靠近厂房大门处。同时，该工位设置了风包。由于转轮平衡试验工作时间较短，平衡完成后，该工位可用于清理、修磨及临时摆放转轮等需求。

#### 1.1.2.5 辅助工位

为充分使用主厂房区外的空间资源，辅助工位利用厂房立柱之间的空间和厂房围墙区域，设置配电室、更衣室、材料室、空压机室、工具室、磨刀室、办公室、休息室、门卫室、会议室、淋浴室、洗手间。

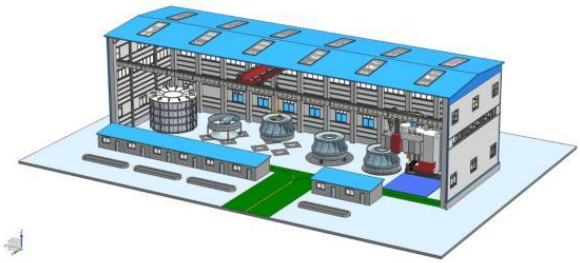


图 2　厂房三维布局图

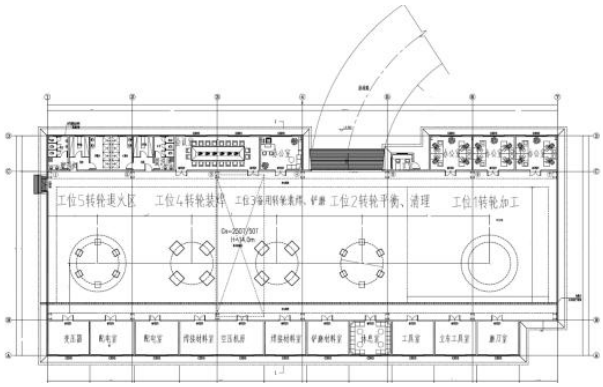



图 3　厂房工艺布局设计图

### 1.2 转轮流道铲磨

转轮流道的质量将直接影响转轮的运行效率、抗气蚀能力、疲劳寿命等转轮关键性能参数，因此，转轮流道的铲磨是转轮生产过程中的关键工序之一。以保证转轮流道质量为根本，兼顾提高转轮流道的铲磨效率，综合下述因素进行了优化：

（1）提升原材料自身质量。转轮各零部件的原材料均采取精密铸造技术，在保证材料理化性能要求的前提下，提高上冠、下环、叶片铸件表面质量。进而做到从原材料根源控制质量。

（2）优化流道磨削工艺。将目前采用的过流面有序性抛光优化为无序性表面抛光，通过此优化可以有效消除铲磨起始点因为过度重复抛光，而对过流面质量带来的影响。

（3）增加流道表面PT探伤检测。传统流道表面的探伤检测采用MT磁粉探伤的方式。该方式可检测转轮流道表面裂纹，提升流道质量，但也存在局限性，即很难识别不敏感的开口性类圆缺陷。而该类缺陷可通过PT探伤进行识别，因此，通过PT+MT探伤的方式可达到更广范围的缺陷探伤识别能力，可有效降低流道因缺陷识别度低带来的质量风险。

### 1.3 转轮加工

转轮的平面、圆面采用数控立车加工，联轴螺孔、销套孔采用镗孔专用设备加工，泄水锥工艺螺孔采用磁力钻加工。

#### 1.3.1 转轮车削加工

转轮装焊完成后，处于倒放状态。首先，立车对泄水锥及下环进行车削。之后，转轮翻身，处于正放状态，立车再对上冠及下环剩余部分进行车削。

图 4　转轮翻身

图 5　转轮加工

#### 1.3.2 转轮联轴螺孔、销套孔加工

转轮联轴螺孔、销套孔采用镗孔专用设备加工，与使用带镗铣功能的立车加工联轴孔及销套孔工艺相比，镗孔专用设备具有价格低、体积小、重量轻、加工精度高、通用性好等优势。

为满足转轮联轴销套孔形位公差、尺寸精度要求，同时保证转轮联轴孔与主轴联轴孔的位置精度，我们采用一副镗模（两件）分别用于主轴、转轮联轴销套孔的加工。该工艺方案既可以满足转轮、主轴联轴销套孔的加工精度要求，又可以避免因主轴与转轮联轴销套孔的生产周期重叠而延误转轮整体制造工期。

#### 1.3.3 转轮泄水锥工艺螺孔加工

转轮泄水锥平面设计了用于装把平衡盖板的工艺螺孔，由于泄水锥开口直径较小且周边均曲面，因此使用磁力钻加工该工艺螺孔。转轮泄水锥为中空结构，为方便磁力钻的固定安装，同时提高工艺螺孔的位置精度，采用实心钻模辅助磁力钻定位加工工艺螺孔。

### 1.4 转轮静平衡试验

转轮静平衡试验的实现方式主要有：凹凸球静压平衡、钢球镜板式静平衡、测杆应变片法静平衡以及三支点承重式静平衡。基于重点考虑静平衡试验的精度和过程操作的便利性，我们选择使用测杆应变片的工艺进行转轮静平衡。该静平衡工艺的原理是在平衡支柱的顶部布置应力棒，应力棒顶部设置平衡盖板，转轮使用螺栓把合的方法与平衡盖板进行连接。转轮平衡时，整个转轮的重量通过平衡盖板→应力棒→支柱→基础支撑。

在应力棒上对称设置四个应变片，构造成惠斯

登电桥，转轮不同方位的偏重将通过弯曲应力使应力棒发生形变，贴在应力棒上的应变片将准确的测量弯曲应力的矢量。根据测量出的结果，再计算出不平衡力矩配重大小和位置。

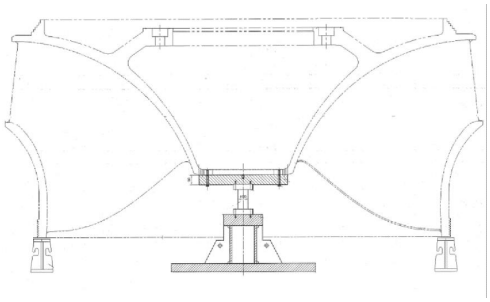


图 6　转轮平衡示意图

## 2　技术创新

### 2.1 工装创新

#### 2.1.1 转轮倒放吊具工艺创新

##### 2.1.1.1 传统起吊工艺简介

转轮平吊分为正放平吊和倒放平吊两种方式，转轮正放平吊主要通过联轴法兰与吊具的把合固定进行起吊，而转轮倒放平吊传统的措施是在转轮上焊接吊耳或者吊柱，采用钢丝绳进行倒放起吊。该起吊方式对于重量 100 吨以内的中小型转轮来说比较适用，但对于重量 100 吨以上的转轮而言，存在以下局限：第一，由于转轮重量重，吊耳吊柱的焊接量大，焊接释放的热量可能会使转轮产生局部变形，存在质量隐患。第二，转轮起吊过程中，两条吊绳要尽可能保持对称才能维持转轮起吊过程的平稳，对大型转轮来说可操作性差，存在安全隐患。因此，为解决上述技术难题，转轮倒放平吊吊具进行了创新研制，开发出一种均匀受力、避免本体焊接的大型混流式转轮倒放起吊工具。

##### 2.1.1.2 新型吊具结构与原理

该吊具的结构包括用于放入转轮泄水锥内腔的支承托板、支承托板上设置可拆卸的连接件、连接件上固定吊杆（用于与吊臂连接）。支承托板与转轮泄水锥内腔接触，起吊时承受转轮的重量。起吊时，首先通过连接件与支承托板连接，其次将连接件上的吊杆与吊臂连接，最后对转轮泄水锥进行起吊。

该吊具不再需要对转轮本体进行焊接，避免了因焊接吊具对转轮产生的质量风险。支承托板通过与转轮泄水锥内腔面接触受力进行起吊，接触面大，受力均匀，提高了大型转轮起吊的安全系数。通过刚性联接的方式进行转轮起吊，全程不使用钢丝绳，提高了转轮起吊过程中的稳定性和安全性。同时，该起吊工具的吊臂和连接件具有通用性，可适用于一定重量范围的转轮倒放平吊，吊臂还可通用于转轮正放平吊。吊具主要零件有：支承托板、吊环螺钉、托板挂件、连接件、吊臂、吊杆。

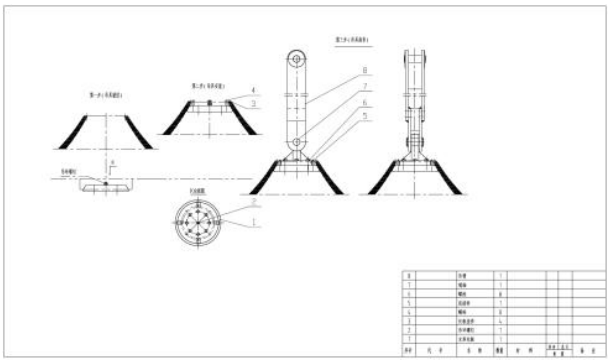


图 7　吊具结构示意图

#### 2.1.2 转轮镗孔支撑工具工艺创新

转轮联轴螺孔、销套孔在使用镗孔专用设备前，需设置镗孔支架作为镗孔专用设备的安装支撑。为保证镗孔专用设备安放处于水平状态，我们设计开发了镗孔支架，并对安装支架的方法进行了工艺创新，具体措施如下：

（1）在转轮上立车前装镗孔支架，粗调平转轮上的镗孔支架、电焊固定。

（2）待转轮上立车后，车削镗孔支架上平面。

通过上述工艺措施，保证了镗孔支架支撑平面的平面度，可快速为镗孔专机找平。并有效的减少了车修镗孔支架上平面去除的加工量，做到了一套镗孔支架用于多台份转轮镗孔加工，降低了工装总成本。

### 2.2 厂房布局优化

根据项目合同要求，本工地厂房需满足转轮年产能 2 台，并且具备转轮临时检修的功能。

通过调研数据整理，我们发现目前国内转轮工地制造常见的制造厂房布置大多数以 4 工位为主。经分析发现，传统 4 工位厂房布局方案的优势可完全满足转轮的整体制造需求，能有效控制厂房投资

总成本，并且最大限度的节省建设直线工期。但 4 工位厂房也有局限性，其年产能较低，仅能满足 1 台转轮的产出，不能满足本项目水电站改造装机生产计划进度要求。但若厂房布局按 6 个或更多数量的工位设置，则转轮年产能将达到 3~4 台或是更高，厂房总长递增，建设投资成本递增，建设工期递增，其转轮年产能将过剩。

因此，我们把厂房转轮年产能与实际需求进行结合，从经济、技术等多方面综合权衡，最终确定本项目转轮工地制造厂房布局按 5 工位数量设计。同时，为充分利用厂房面积，提高资源利用率，减少建造成本，在工位设置时，为适应单件小批量生产，尽可能利用厂房空间，采用了并行作业、单工位多用途方式的设置原则。综合考虑厂房长、宽比，桥式起吊高度，转轮进出退火炉需跨越另一台转轮等因素，切实做到转轮厂房年产两台并具备临时检修的规划，以满足水电站安装工程进度的需求。

### 2.3 转轮加工工艺创新

#### 2.3.1 项目背景

转轮重量超 100 吨，为保证其加工过程中能安全可靠的翻身，翻身方案采用焊接凳配合平衡梁的方式。但该翻身方式中使用的焊接凳与转轮下环本体有较大接触面的焊接，在转轮由倒放状态翻身至正放状态后，要对位于转轮下环外圆的焊接凳进行割除，割除期间将产生大量的热量，将会使下环周边发生形变。

#### 2.3.2 传统工艺方案

首先，设置上冠外圆作为转轮正放时的加工基准带，并在转轮倒放状态下加工上述基准带。其次，转轮由倒放状态翻身至正放状态，割除焊接凳。最后，以上冠外圆基准带找圆，以车平的垫筒找平后进行车序。

#### 2.3.3 技术创新方案

上述传统工艺方案受限于加工设备立车的侧刀架行程，在立车行程满足的情况下可以适用。但本项目使用的 9 m 立车，侧刀架设备行程无法抵达上冠外圆基准位置，不能加工上冠外圆的找圆基准带。因此，综合对实际转轮工况和设备行程限制因素的分析，我们决定采用新的工艺方案：转移基准，增加一次转轮正放状态下基准带的加工工序，主要措施如下：

（1）转轮翻身前倒放状态下使用立车加工下环外圆找圆基准带。

（2）转轮翻身后正放状态下，使用下环外圆找圆基准带找圆，加工上冠外圆找圆基准带，从而将找圆基准带由下环转移至上冠。

（3）转轮割除焊接凳，时效处理后使用上冠外圆找圆基准带找圆，巧妙的避开了使用下环焊接热变形区的基准带。

## 3 结语

该项目首台机转轮残余不平衡力矩仅 3.5 kg·m，远远低于设计允许残余不平衡力矩，实现了转轮静平衡零配重；转轮的安装、运行相关指标均达到了精品要求。该项目转轮的成功研制刷新了公司在国内混流式水轮机改造最大单机容量的记录，为推进后续 5 台转轮的改造提供了技术支撑，为今后公司工地厂房工艺布局设计、转轮现场制造积累了经验。

**参考文献：**

[1] 郭英, 王地召, 王大伦, 等. 溪洛渡水轮机转轮制造工艺浅析[J]. 华东科技(综合), 2019(3):306-307

[2] 罗兰，王地召. 大型混流式整体转轮现场制造技术[J]. 东方电气评论, 2014, 28(3):36-41+55

# 抽水蓄能发电电动机线棒表面电位分布特性研究

张小俊　杨帅　张根博　刘雁　谢志辉　刘江俊　张跃　何福优

东方电气集团东方电机有限公司，四川 德阳 618000

**摘要：**通过对抽蓄机组的重要性以及抽蓄机组国内研究现状分析，结合传统发电机线棒表面电位研究成果，本文采用有限元对抽蓄线棒进行建模，仿真分析不同电压幅值、频率、防晕长度、主绝缘厚度等对抽蓄线棒表面电位的影响，为验证仿真计算的准确性，采用表面电位测量系统对不同电压下线棒表面电位进行了测量。结果表明线棒低阻防晕层（未与铁心直接接触区域）表面电位随电压呈线性变化；表面电位随频率的增加而增大；随着低阻防晕长度的增加，防晕末端的电位较高，可能导致低阻防晕层过热；表面电位随主绝缘厚度的增加而降低。相关结果为抽蓄线棒绝缘优化设计提供理论参考。

**关键词：**抽水蓄能发电电动机；线棒；表面电位；电压；幅值；主绝缘

**中图分类号：**TV743　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）01-0029-04

# Study on Surface Potential Distribution Characteristics of Pumped Storage Generator Bar

*ZHANG Xiaojun, YANG Shuai, ZHANG Genbo, LIU Yan, XIE Zhihui, LIU Jiangjun, ZHANG Yue, HE Fuyou*

( Dongfang Electric Machinery Co.,Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China)

Abstract: Through the analysis of the importance of pump-storage generator and the domestic research status of pump-storage generator, combined with the research results of the surface potential of the traditional generator stator bar, this paper uses finite element method to model the pump-storage bar, and simulates and analyzes the influence of different voltage amplitude, frequency, anti-corona length, main insulation thickness, etc. on the surface potential of the pump-storage bar, in order to verify the accuracy of the simulation calculation, The surface potential measurement system was used to measure the surface potential of the bar under different voltages. The results show that the surface potential of the outer corona protection layer (not in direct contact with the stator core) of the bar changes linearly with the voltage; The surface potential increases with the increase of frequency; With the increase of the length of outer corona protection layer, the potential at the end of outer corona protection layer is higher, which is easy to cause overheating of the outer corona protection layer; The surface potential decreases with the thickness of the main insulation. The relevant results provide a theoretical reference for the optimal design of the bar insulation of pump-storage generator.

Key words: pumped storage generator; bar; surface potential; voltage; amplitude; main insulation

随着我国“碳达峰碳中和”发展目标的推进[1]，风能、太阳能等新能源得到飞速发展，中国能源结构改革和电力低碳转型正全面提速,新能源的并网发电使电网稳定性面临严峻的考验，作为能源电力系统中的“稳定器”和“平衡器”，抽水蓄能电站将迎来前所未有的发展机遇和挑战，对支撑可再生能源稳定规模化发展、促进清洁能源消纳、保障电网安全可靠运行具有重要意义[2-3]。对于传统的水轮发电

**收稿日期：**2023-09-05

**作者简介：**张小俊（1979－），男，2002 年 7 月毕业于四川大学，工学学士，高级工程师，现在东方电机有限公司从事高压电机绝缘技术研究与应用工作。

机组运行特点，抽水蓄能机组因其运行方式灵活、调节速度快，能大大优化电能品质等特点而快速发展。

现有文献对线棒的表面电位分布及电场分布主要集中在传统电机定子线棒[4-7]，对采用出槽部位长低阻结构的抽蓄线棒性能研究比较少。本文对采用出槽部位长低阻结构的抽水蓄能机组线棒进行建模，深入分析线棒表面电位分布的影响因素，并采用试验验证仿真结果的正确性。

## 1 线棒模型建立

### 1.1 控制方程和边界条件

$$\begin{cases} J = \sigma E + \dfrac{\partial D}{\partial t} \\ D = \varepsilon E \\ \nabla \bullet J = -\dfrac{\partial \rho}{\partial t} \end{cases} \quad (1)$$

由于 $E = -\nabla\varphi$，求解区域电场控制方程为：

$$\nabla \bullet (\sigma + j\omega\varepsilon)\nabla\varphi = 0 \quad (2)$$

由于空间某点的电位为电场力移动单位正电荷从该点至参考点（铁心末端）时所做的功。因此电位表示为：

$$\varphi_P = \int_0^P E \bullet dl \quad (3)$$

其中，$\varepsilon$ 为介电常数，$\sigma$ 为电导率，$\rho$为电荷密度，$J$ 为电流密度，$D$ 为电位移矢量，$E$ 为电场强度，$\varphi_P$ 为电位。

### 1.2 仿真模型及参数设置

采用 UG 建立线棒仿真模型如图 1 所示，与传统定子线棒结构相比，低阻出铁心长度远长于传统结构。

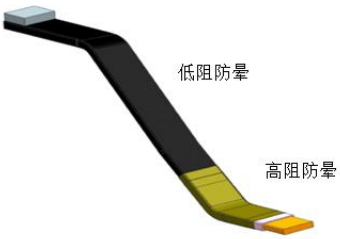



图 1 线棒仿真模型

采用 COMSOL Multiphysics 软件进行线棒表面电阻防晕层电位分布特性仿真分析，仿真参数如表 1 所示：

表 1 仿真参数

| 激励电压设定（AC） | |
|---|---|
| 高电压参量（kV） | $(10.5/\sqrt{3})\times\sin(100[1/s]\times\pi\times t)$<br>$1.5\times10.5\times\sin(100[1/s]\times\pi\times t)$<br>$(2.75\times10.5+6.5)\times\sin(100[1/s]\times\pi\times t)$ |
| 高电压对象 | 铜导体 |
| 低电压参量 | 峰值：0；角度：0 度；频率：50 Hz |
| 低电压对象 | 铁心 |

## 2 线棒表面低阻层电位分布特性仿真研究

### 2.1 电压幅值对低阻防晕层表面电位的影响

本文构建了线棒仿真模型，对线棒分别施加 6 kV、15.8 kV 和 35.4 kV，得到不同激励下线棒表面电位与电压幅值的关系，如图 2 所示。

从图中可以看出，线棒低阻防晕层（未与铁心直接接触区域）表面电位随电压呈线性变化，不同激励下线棒表面电位分布规律基本一致，幅值的斜率随施加电压幅值增大而增大。

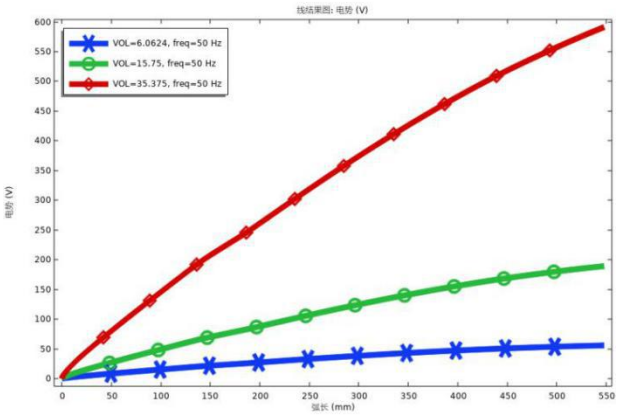



图 2 电压幅值对低阻防晕层表面电位的影响

### 2.2 电压频率对低阻防晕层表面电位的影响

对线棒分别施加频率 1 Hz、50 Hz、500 Hz、1000 Hz 的激励电压，线棒表面电位随电压频率变化的关系如图 3 所示。从图中可以看出，频率越低，线棒表面电位越低，电压频率过低容易导致线棒低阻防晕层末端场强突变，导致线棒端部放电，频率越高，线棒表面电位升高，表面电场越高，频率过高容易导致低阻防晕层损耗增加，低阻防晕层发热严重，加速防晕层热氧老化，不利于机组长期安全可靠运行。

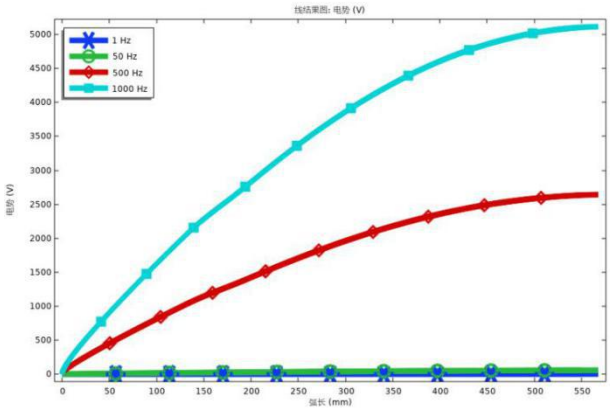



图 3　电压频率对低阻防晕层表面电位的影响

### 2.3 低阻防晕长度对低阻防晕层表面电位的影响

对低阻出铁心不同长度的线棒进行仿真分析，得到线棒表面电阻与低阻防晕长度的对应关系，如图 4 所示。从图中可以看出，线棒表面电位随低阻防晕长度的增加而增大，长度小于 400 mm，表面电位梯度增加大，长度大于 400 mm，线棒低阻防晕层面末端电位差变化小。

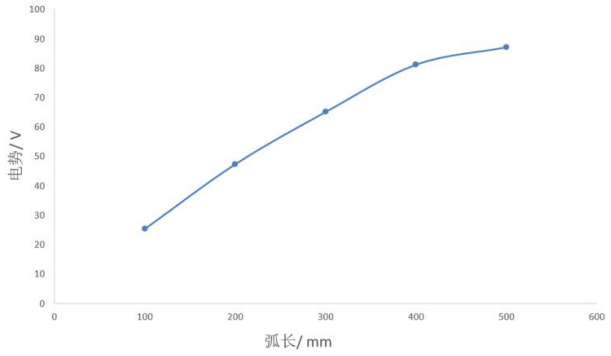



图 4　低阻防晕长度对低阻防晕层表面电位的影响

### 2.4 主绝缘厚度对低阻防晕层表面电位的影响

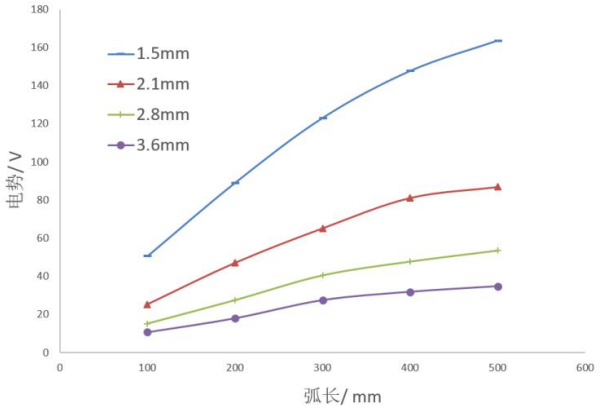



图 5　主绝缘厚度对低阻防晕层表面电位的影响

线棒主绝缘主要采用云母材料，在相对于介电常数相同的情况下，分别设置主绝缘厚度为 1.5 mm、2.1 mm、2.8 mm、3.6 mm，得到线棒不同厚度下表面电位分布，如图 5 所示。从图中可以看出，随着主绝缘厚度的增加，线棒低阻表面电位最大从 165 V 降低至 36 V，可见主绝缘厚度对线棒表面电位具有一定程度的影响。

## 3　线棒表面电位测试

### 3.1 线棒表面电位测量系统

表面电位测量系统如图 6 所示。本实验中湿度为 56 %，温度为 20 ℃，为探究不同电压对线棒表面电位的影响，电压设为 6 kV、15.8 kV、35.4 kV。当电压达到设定值时，移动探头，利用表面电位计测量出表面电位。实验数据反映出不同电压下表面电位随距离的变化规律。

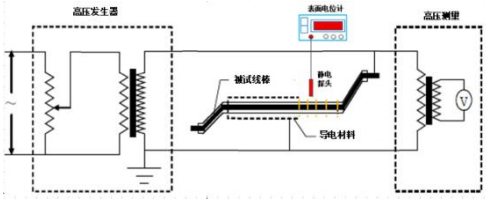



图 6　线棒表面电位测量试验装置

### 3.2 实验结果及分析

本文使用高压电源对试样线棒施加电压，线棒表面电位测试结果如表 2 所示，不同电压下，线棒表面电位随低阻防晕层距离的变化如图 7 所示。从测试结果可以看出，线棒表面电位随低阻防晕层距离的增加，表面电位逐渐增大，线棒表面电位的变化近似于线性，且测试结果与仿真结果一致。

表 2　端部低阻区域电位测试情况

| 出槽口距离/mm | 表面电位/V | | |
|---|---|---|---|
| | 6.0 kV | 15.8 kV | 35.4 kV |
| 50 | 9.9 | 26.2 | 57.1 |
| 100 | 17.9 | 47.5 | 105.3 |
| 150 | 25.5 | 68.2 | 152.2 |
| 200 | 30.6 | 84.8 | 189 |
| 250 | 36.2 | 101.3 | 228 |
| 300 | 41.2 | 115.7 | 262 |
| 350 | 45.7 | 128.5 | 291 |
| 400 | 49.2 | 139.2 | 317 |
| 450 | 51.4 | 145.9 | 335 |

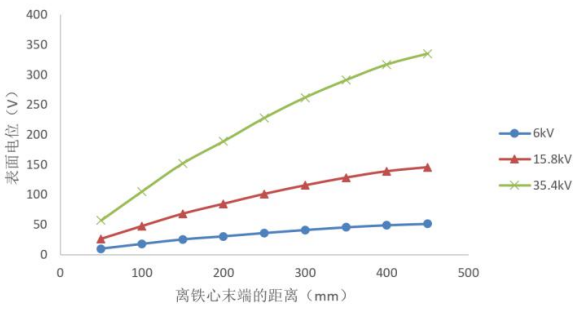



图 7　端部低阻区域电位的测试情况

## 4　结语

本文研究了高电压下抽蓄线棒低阻防晕层表面电位分布特性，分析了不同电压幅值、频率、主绝缘厚度、防晕长度对线棒表面电位的影响，并通过试验验证了仿真结果正确性，结论如下：

（1）抽蓄线棒低阻防晕层（未与铁心直接接触区域）表面电位随电压呈线性变化，不同激励下线棒表面电位分布规律基本一致，幅值的斜率随施加电压幅值增大而增大。电压频率过低容易导致线棒低阻防晕层末端场强突变，导致线棒端部放电，频率过高容易导致低阻防晕层损耗增加，低阻防晕层发热严重，加速防晕层热氧老化，不利于机组长期安全可靠运行。

（2）抽蓄线棒低阻防晕层表面电位随低阻防晕长度的增加而增大，后续需对低阻防晕层进行加强。

（3）抽蓄线棒低阻防晕层表面电位随着主绝缘厚度的增加而降低，主绝缘厚度对线棒表面电位具有一定程度的影响。

## 参考文献：

[1] POTRC S , CUCEK L , MARTIN M , et al. Sustainable renewable energy supply networks optimization-The gradual transition to a renewable energy system within the European Union by 2050[J].Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 146: 111186

[2] ZHAO Z , YANG J , CHUNG C Y ,et al.Performance enhancement of pumped storage units for system frequency support based on a novel small signal model[J].Energy, 2021(1):121207

[3] YANG W , YANG J .Advantage of variable-speed pumped storage plants for mitigating wind power variations: Integrated modelling and performance assessment[J]. Applied Energy, 2019, 237 (MAR.1): 720-732

[4] 胡建林, 赵禹来, 刘剑, 等. 大型水轮发电机定子线棒绝缘参数对线棒槽部表面电位分布及电场分布的影响[J]. 绝缘材料, 2022. 53(4):39-44

[5] 田晓雷. 高压电机定子线棒绝缘结构的电场研究[D]. 上海交通大学, 2014

[6] 孙永鑫, 任鹏, 陈阳. 定子线棒表面电位分布原理和影响因素研究[J]. 大电机技术, 2021(2):49-53

[7] 张跃, 梁智明, 何海洋. 大型水轮发电机定子线圈端部电位分布的仿真研究[C]//中国电工技术学会大电机 专业委员会. 中国电工技术学会大电机专业委员会2014年学术年会论文集. 哈尔滨大电机研究所杂志社, 2014:4

集团要闻

# 经营指标创近十年新高

从东方电气集团获悉，2023 年，东方电气集团重创新、提质效、促转型，不断推动技术领先、人才领先、质量领先、成本领先、产业领先“领先战略”落实落地，产业发展迈上新台阶，科技创新和数字化转型成果丰硕，改革深化提升行动实现良好开局，合规建设和风险防控扎实有力，队伍建设不断强化，主要经营指标创近十年新高，高质量发展取得新成效。

东方电气集团 2023 年科研投入强度持续保持在 5.5%以上，营业收入、利润总额连续第 4 年保持两位数增长，“六电六业”发展势头持续向好。

2023 年，被誉为中国“争气机”的国产首台 F 级 50 兆瓦重型燃机成功投运，国内首台单机容量最大 150 兆瓦级冲击式转轮并网发电，全球最大化学链燃烧兆瓦级中试示范装置建成，全新一代 18 兆瓦直驱海上风电机组下线，全球首个陆上商用模块化小堆关键设备接续发运，全球首次海上风电无淡化海水原位制氢海上中试成功。东方电气集团新建成 7 个数字化车间，数字化车间总数达 21 个。

来源：东方电气网

# 大兆瓦级风力发电机组大型承载部件拓扑优化设计

李源　赵天煜　尹国庆　马奔奔*　甄红亮　罗雷　洪超

东方电气风电股份有限公司，四川 德阳 618000

**摘要：**风电已成为我国继煤电、水电之后的第三大电源。随着成本下降和补贴退出的发展趋势，成本控制已然成为当前风电领域所面临的迫切需求。风电机组优异的结构不仅质量更轻，对塔筒负担更小，还能节省大量的制造材料。拓扑优化等系列优化手段已经在我国许多工业装备领域有广泛运用，并取得了良好的减重效果，然而拓扑优化技术在风电整机上依然使用较少。本文采用当前国际主流的拓扑优化方法，对大兆瓦级风力发电机组大型承载部件制订拓扑优化轻量设计流程；针对主机架及后机架结构进行实践应用，取得了显著的减重效果，验证了该轻量化设计流程，并通过极限和疲劳强度计算，证明了此方法的的高效性和精确性。

**关键词：**风电机组；拓扑优化；大型承载部件；主机架；后机架；强度校核

**中图分类号：**TM315　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）01-0033-06

# Topology Optimization Design of Large Bearing Components for Megawatt Wind Turbine

*LI Yuan, ZHAO Tianyu, YIN Guoqing, MA Benben*, ZHEN Hongliang, LUO Lei, HONG Chao*

( Dongfang Electric Wind Power Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China )

Abstract: Wind power has become the third largest power source in China after coal and hydropower. With the development trend of cost reduction and subsidy withdrawal, cost control has become an urgent demand in the current wind power field. The excellent structure of wind turbine is not only lighter, less burden on the tower, but also can save a lot of manufacturing materials. Topology optimization and other optimization methods have been widely used in many industrial equipment fields in China, and have achieved good weight reduction effect. However, topology optimization technology is still rarely used in wind turbine. The lightweight design process of topology optimization for large megawatt wind turbine castings is developed by using the current international mainstream topology optimization method. The lightweight design process is verified by practical application of the main framework and the back framework, and the efficiency and accuracy of the method are proved by the calculation of extreme and fatigue strength.

Key words: wind turbine; topology optimization; large castings; main framework; back framework; strength check

在整个“十三五”期间，风电的发展不再以规模为导向，成本下降和补贴退出已成为风电产业发展的重点。正是在当前背景下，整机制造、施工技术研发等领域要做深做透，逐步推动全产业链技术水平的进步和降低成本已经成为风电发展的重中之重。风电整机高空作业的工作状态对重量、刚强度的要求远高于煤电、水电等机组，优异的结构不仅质量更轻，对塔筒负担更小，还能节省大量的制造

**收稿日期：**2023-02-21

**作者简介：**李源（1982－），男，2007年毕业于西安交通大学机械工程专业，硕士，正高级工程师。现在东方电气风电股份有限公司从事风电总体设计、塔架设计工作。

马奔奔（1987－），男，2018年毕业于大连理工大学工程力学专业，博士，高级工程师。现在东方电气风电股份有限公司从事风电总体设计、拓扑优化减重设计工作。邮箱：mabenben.chn@foxmail.com

材料，而当前兆瓦级风电整机核心部件的刚强度设计依然严重依赖人员的工作经验，存在着用料过多，刚强度设计安全红线量化不清晰等问题。针对大兆瓦级风机关键核心部件的优化减重研究势在必行，在保证刚强度的前提下，轻量化风机机身，降低制造成本，提升风机的竞争水平。

随着数学规划、有限元和计算机硬件等计算科学和工具的发展，结构优化技术[1]已成功应用于各种重大装备的研制过程中，并成为产品创新设计平台不可缺少的重要组成部分[2-4]，也逐渐开始被应用到风电行业当中[5-9]。齐涛等[5]以某 2 MW 风电机组后机架为分析对象，进行极限和疲劳强度计算，然后根据安全系数分布对后机架进行结构优化，使极限及疲劳强度满足设计要求。何力等[6]针对某风电平台大尺寸肘板，通过对极坐标系下外形轮廓参数进行优化迭代，有效降低了结构应力，提高了结构疲劳寿命。葛旭等[7]针对海上 3 MW 固定式三桩单立柱风机支撑结构，对其主尺度参数进行优化设计，结构体积下降明显。杨兆忠等[8]基于 Optistruct 的优化算法，对摇臂基座的拓扑结构进行优化，在满足设计要求的同时还满足了其轻量化及成本要求。刘金增[9]等对某风电机组轴承座进行优化设计，结合 TOSCA 软件进行拓扑优化，Sculptor 和 Isight 软件进行参数优化，达到减重 26 %的效果。目前，风电行业设计人员往往只是对局部尺寸参数进行优化[5-7]，并很大程度上依赖设计经验，而拓扑优化技术在风电整机上使用较少，因此有必要将拓扑优化技术应用到大兆瓦级风力发电机组大型承载部件轻量设计中，在设计初期就对风机关键核心部件进行轻量化设计，极大的缩短设计周期，明确设计红线，降低制造成本。

本文将采用当前国际主流的拓扑优化方法，建立风机大型承载部件拓扑优化设计的通用优化列式和设计流程，并以某型号主机架及后机架为例验证此设计流程，并通过极限和疲劳强度计算，证明此方法的高效性和精确性。

## 1 优化列式和通用优化设计流程

### 1.1 优化设计的种类

根据设计变量类型或设计阶段的不同，结构优化问题可以分为三类：(a)尺寸优化、(b)形状优化和(c)拓扑优化[10-11]（图 1）。

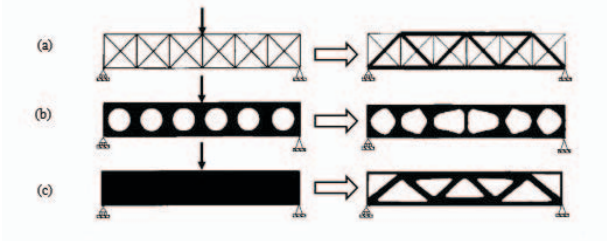



图 1 结构优化的三个层次

（1）尺寸优化

尺寸优化是结构优化的最低级别，在结构类型、拓扑布局和外形几何已经确定的前提下，针对结构中的局部细节如杆件或板的截面尺寸为设计变量以使结构的性能达到最优。

（2）形状优化

形状优化对应于结构的基本设计阶段。相比尺寸优化，形状优化的优化层次、设计空间和求解难度都有了显著提升。形状优化是指在结构整体布局已经确定的前提下，以结构件外形或者孔洞形状为优化对象来寻求最理想的几何形状。

（3）拓扑优化

拓扑优化是结构优化的最高级别。是根据给定的载荷情况、约束条件和性能指标，在设计域内合理优化材料的分布以使指标性能达到最优。拓扑优化可以为工程师提供很多意想不到的设计方案，是目前被广泛关注和使用的优化设计方法。

### 1.2 拓扑优化列式

常用商业软件的拓扑优化设计几乎都是基于变密度法（简称 SIMP 法），该方法原理简单、易于理解。该方法的基本思想是引入可表示材料有无的 0~1 人工密度作为设计变量，采用材料插值模型建立了单元密度与结构刚度之间的关系，从而将优化结构材料的分布转变为优化人工密度的分布来得到结构最优拓扑，其优化列式可以写为[12]：

$$\text{Find } x=(x_1,x_2,\ldots,x_n)^T$$

$$\text{Min } C(x)=F^TU$$

$$\text{S.t.}\begin{cases} V\le V^* \\ F=KU \\ x_i=\{0,1\}(i=1,2,\ldots,n) \end{cases} \tag{1}$$

式中：$x_i$ 为设计变量；$n$ 为优化设计变量个数；$K$ 为全局刚度矩阵；$U$ 和 $F$ 为全局的位移和载荷矢量；$V$ 为优化设计结构实际体积；$V^*$为结构体积上限。

### 1.3 风电机组大型承载部件优化流程

为了能够高效的满足新机型降本增效的需求，往往需要在设计初期就对其关键承载部件进行轻量化设计，可以极大的减少人工和时间成本，提升设计效率。为了达到上述目的，针对风电机组的研发特性，制定了风电关键承载部件拓扑优化轻量化设计技术路线，如图 2 所示。

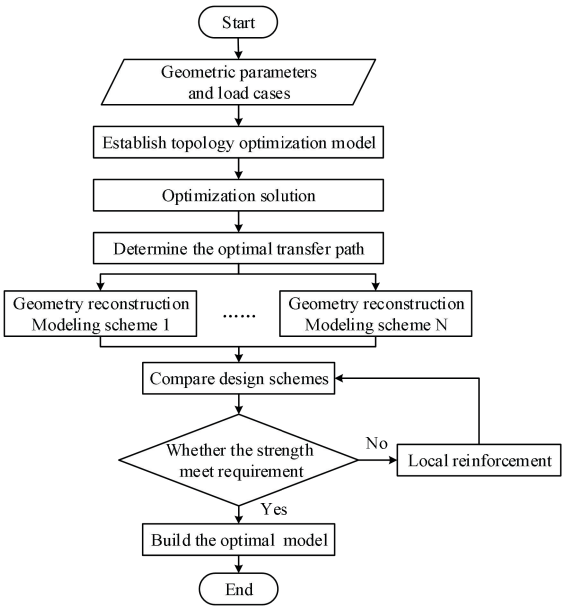



图 2　风电关键承载部件拓扑优化轻量化设计技术路线

主要包括以下步骤：

（1）根据几何特征和载荷工况建立拓扑优化模型。

（2）针对该模型形成目标、约束等优化列式，并采用数学规划求解，寻找多个初步优化设计构型。

（3）针对初步优化构型几何重构，并进行有限元刚强度、疲劳等分析，选出最优的设计方案。

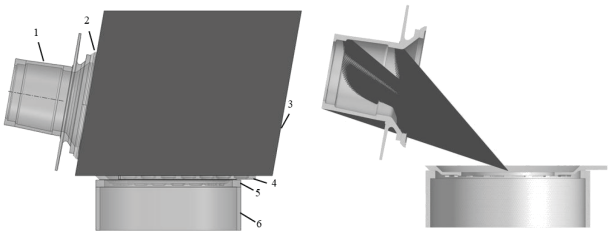
（4）经过局部加强、改进提升，形成最终优化设计模型。

## 2　某型号主机架拓扑优化

风电直驱机组主机架，是连接塔筒和轮毂的重要承载部件，其受载情况复杂，几何尺寸约束严苛。在以往，设计人员往往依赖经验反复进行试探性局部减重优化，花费大量人力和时间，也难以得到较为理想的优化结果。在此，针对某型号直驱机组主机架结构，在明确了材料参数、受载工况的前提下，对其展开基于 SIMP 法的“黑箱”拓扑优化设计[13]。

### 2.1 主机架优化模型

主机架采用“黑箱法”进行拓扑优化设计，“黑箱”做为可设计域，在“黑箱”空间内的材料才做拓扑优化设计，“黑箱”外的材料为不可设计域，形状体积不可更改。如图 3(a)所示，整个拓扑优化几何模型分为六个部分(1-发电机定子；2-法兰；3-“黑箱”；4-偏航制动盘；5-偏航轴承；6-塔筒)，其中发电机定子、偏航轴承和塔筒为不可设计域，主机架为设计域。为确保主机架连接位置不发生变化，将主机架所属连接法兰和偏航刹车盘划分为不可设计域。为了明确“黑箱”形状尺寸对优化结果有无影响，建立了方形、不同大小的流线管形设计域。




(a) 几何模型　　(b) 载荷施加方式

图 3　主机架拓扑优化

主机架材料采用球墨铸铁，该材料整体机械性能良好，在风电机组大型承载部件上广泛使用。球墨铸铁牌号选取 QT400-18AL，屈服强度为 220 MPa，许用应力 200 MPa。表 1 为计算模型所采用的材料属性。

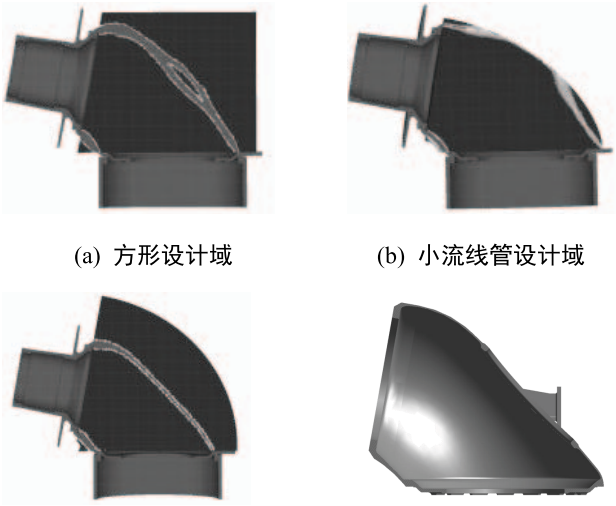
为减少优化时间，提高优化效率，主机架拓扑优化过程中未考虑偏航轴承的非线性影响，即未进行钢球-滚道非线性模拟，而是建立偏航轴承内外圈一体模型，与偏航刹车盘、塔筒采用绑定接触。另外，其他各部件之间也均采取绑定接触，塔筒底部端面采用固定支撑约束，约束底部端面上所有节点自由度。在偏航轴承上端面中心建立加载点，将塔顶载荷 Fx、Fy、Fz、Mx、My、Mz 分量施加在该点上，通过 Rbe3 单元将载荷传递到发电机定子与轴承连接面，如图 3(b)所示。机架设计域、连接法兰和偏航刹车盘采用四面体网格，其他部件采用六面体网格，节点数为 805 721，单元数为 2 177 387。

表 1　主机架零部件材料属性

| 部件 | 材料 | 屈服强度 $\sigma_s$/MPa | 弹性模量 $E$/MPa | 泊松比 $\mu$ | 密度 $\rho$/t·mm$^{-3}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 主机架；发电机定子 | QT400-18AL | 220 | 1.69E5 | 0.275 | 7.1E-9 |
| 偏航轴承；塔筒 | Structural steel | - | 2.06E5 | 0.3 | 7.8E-9 |

## 2.2 优化结果及几何重构

优化目标函数为柔度最小，体积约束条件为不超过设计域的 15 %，制造约束条件为对称拔模，迭代步数为 25 步。通过拓扑优化结果（红色为内部应力最优传递路径）可以看出，在给定足够大设计域“黑箱”尺寸的前提下，拓扑优化分析能够较好的得到内部较为稳定的应力传递路径（图 4 (a)和(c)所示）。而较小的设计域“黑箱”尺寸，边界因素限制了应力传递的流畅性，使优化结果变得不平滑、应力突变（图 4(b)所示）。



(a) 方形设计域　(b) 小流线管设计域

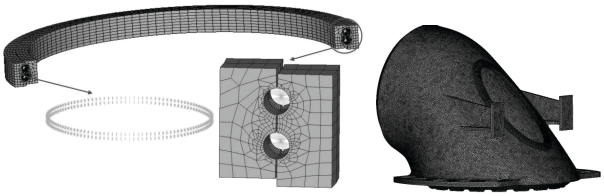
(c) 大流线管设计域　(d) 最终优化模型

图 4　主机架优化结果

通过三种设计方案对比，选定图 4(c)所示的优化结果进行几何重构，并校核其强度。在完成背部开孔操作和增加后机架连接法兰后，对模型局部补强、修补，形成最终优化设计模型，如图 4(d)所示。

## 2.3 极限及疲劳强度校核

为得到更为精确的极限强度结果，考虑偏航轴承的非线性影响，如图 5(a)所示，偏航轴承每个滚动体通过若干个 Link10 单元模拟，并结合实际情况设置 Link10 横截面面积和单元对应的初始应变量。主机架网格模型如图 5(b)所示采用四面体网格，其他部件采用六面体网格，节点数为 1 951 963，单元数为 1 022 085。



(a)方形设计域　(b)小流线管设计域

图 5　主机架强度及疲劳校核网络模型

加载及其他约束条件与拓扑优化模型相同，将所有计算工况的载荷分量施加在塔顶，分别计算主机架极限应力。主机架材料采用 QT400-18AL，屈服强度为 220 MPa，许用应力 200 MPa，如图 6 所示，其最大变形为 18.8 mm，最大等效应力为 197.7 MPa，小于许用应力，即极限强度满足要求。

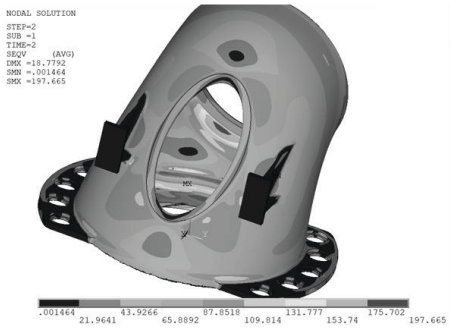



图 6　主机架优化模型极限强度

疲劳计算采用全寿命（S-N）分析方法，在疲劳应力计算基础上，用雨流计数法和 Palmgren-Miner 线性累积损伤理论（简称 Miner 理论）进行分析，根据 Palmgren-Miner 线性累积损伤理论，在使用寿命期内风力机的累积损伤应≤1，即[14]：

$$D=\sum_i \frac{n_i}{N\left(\gamma_m \gamma_n \gamma_f S_i\right)} \leq 1.0 \qquad (2)$$

式中：$n_i$ 为典型载荷谱的第 $i$ 级载荷的计算疲劳循环次数；$S_i$ 为与第 $i$ 级载荷计算循环次数对应的应力（或应变），包括平均应力和循环顺序的影响；$N\left(\gamma_m \gamma_n \gamma_f S_i\right)$ 为疲劳破坏循环次数，以应力（或应变）为自变量的函数；$\gamma_m$、$\gamma_n$、$\gamma_f$ 分别为相应的材料局部安全系数、破坏后果局部安全系数和载荷局部安全系数。对于所有正常和非正常设计工况，载荷局部安全系数取 1.0[15]。

计算 Mx、My、Mz、Fx、Fy、Fz 对应的单位

工况，通过 6 个单位工况、疲劳时序载荷以及年发生次数可计算得到疲劳年损伤值，由此可得到主机架疲劳寿命。采用关键面法、Goodman 修正计算得到主机架最大疲劳损伤为 0.005 7，疲劳寿命 175.4 年，即疲劳强度满足要求。

## 3 某型号后机架拓扑优化

风电半直驱机组的后机架采用桁架式结构，尾部需承担变压器和变流器的重量，而且跨度较大、为悬挑梁形式，按照以往的经验，在较短时间内难以设计出结构合理、重量较轻的结构，花费大量人力和时间。因此，在确定了前机架接口、材料参数、受载工况的前提下，对其展开基于 SIMP 法的“黑箱”拓扑优化设计[12]。

### 3.1 后机架优化模型

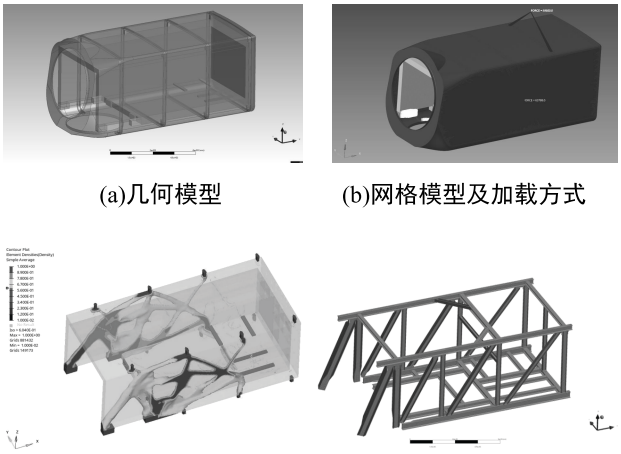
同样地，以“黑箱”作为可设计域，在“黑箱”空间内的材料做拓扑优化设计，“黑箱”外的材料作为不可设计域，形状体积不可更改。拓扑优化几何模型如图 7(a)所示，包含机舱罩壳、后机架“黑箱”模型、连接接口假体和施加重力的假体。

后机架材料采用低合金高强度结构钢，结构钢牌号选取 Q355-D，屈服强度为 355 MPa，许用应力 322 MPa。表 2 为计算模型所采用的材料属性。

表 2 后机架零部件材料属性

| 部件 | 材料 | 屈服强度 $\sigma_s$/MPa | 弹性模量 $E$/MPa | 泊松比 $\mu$ | 密度 $\rho$/t·mm$^{-3}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 后机架 | Q355-D | 355 | 2.1E5 | 0.3 | 7.85E-9 |
| 机舱罩壳 | FRP | - | 1.0E4 | 0.3 | 2.96E-9 |
| 前机架；轴承座 | QT500 | - | 1.69E5 | 0.275 | 7.1E-9 |

有限元网格模型采用 10 节点的四面体实体单元（solid187）和 20 节点的六面体网格（solid186），后机架“黑箱”模型采用高阶单元划分网格，其他采用低阶单元划分网格，单元数量为 984 879，节点数量为 464 928。优化模型的加载工况包括风载和重力载荷，风载施加在机舱罩壳模型的两侧以及尾部受风面，按风压与面积的乘积计算;重力载荷主要有变压器、变流器及换热器共计 37 吨，后机架、机舱罩壳自重，其中变压器、变流器、换热器重力通过质量点施加，后机架、机舱罩壳自重以密度施加。完全约束与前机架相连假体的六个方向的自由度。网格模型及加载方式如图 7(b)所示。



(a)几何模型 (b)网格模型及加载方式

(c)优化结果 (d)最终优化模型

图 7 后机架拓扑优化

### 3.2 优化结果及几何重构

同样的，设置目标函数为柔度最小，体积约束条件为不超过设计域的 15 %，制造约束条件为对称拔模，迭代步数为 25 步。图 7(c)为后机架拓扑优化结果，可以看到材料主要集中于前边。

基于优化结果，对后机架结构进行几何重构，并校核其强度。由于需要安装变压器、变流器及其他附件，并且前期已经确定了与主机架的连接接口，因此不能完全按照拓扑优化结果设计后机架模型，而是根据拓扑优化结果，综合考虑其他因素进行设计，使其结构分布更加合理，主要体现在前部，如图 7(d)所示。优化后的模型较以往减重 12.8 %

### 3.3 极限及疲劳强度校核

为得到更为精确的极限强度结果，有限元模型中采用 M45 实体螺栓连接前后机架，前后机架法兰面为标准接触，罩壳和前机架、后机架之间增加支撑假体，并设置为绑接接触，完全约束前机架底部在全局坐标系下的三个平动自由度。网格模型采用 10 节点的四面体实体单元（solid187）和 20 节点的六面体网格（solid186），螺栓利用实体单元建模，采用低阶单元划分网格，单元数量为 2 338 180，节点数量为 727 349。

静强度计算的载荷工况与优化相同，对实体螺栓施加预紧力，计算得到极限应力如图 8 所示，后机架采用 Q355 材料，板厚为 16~40 mm 时该材料屈服强度 345 MPa，后机架整体应力均在 300 MPa 以下。优化后的模型有效解决了连接法兰处容易应力集中的现象，通过 H 型钢型号的减小与增大，使后机架应力分布更为合理。

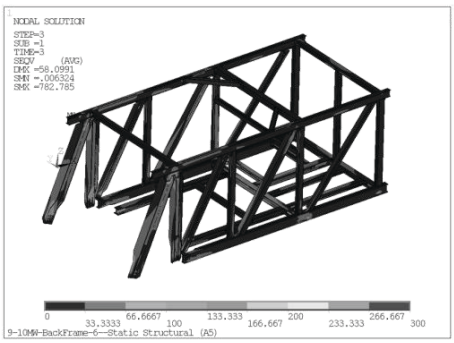



图 8　后机架优化模型应力云图

后机架疲劳分析方法与 2.3 节中相同，几何模型和有限元模型网格划分和边界条件与静强度分析一致。由于机架各型钢之间通过焊接接头把接或铆接，故主要对焊接接头的焊缝进行疲劳强度计算。对后机架 2 个单位载荷工况进行计算，通过单位工况、疲劳时序载荷以及年发生次数可计算得到疲劳年损伤值，由此可得到后机架焊缝疲劳寿命。MAPS 算法下的后机架焊缝最大年损伤值为 0.0 037，最小寿命为 30.67 年，满足 25 年的理论设计寿命要求。

综上所述，该拓扑优化设计方法与传统设计方法相比，在极限和疲劳满足要求的情况下，其迭代优化次数显著减少，有效降低了研发成本，故该拓扑优化轻量化设计流程是高效的和精确的。

## 4　结语

本文采用当前国际主流的拓扑优化方法，制订了大兆瓦级风力发电机组大型承载部件拓扑优化轻量设计流程。

针对某型号直驱机组主机架结构进行了基于 SIMP 法的“黑箱”拓扑优化设计，经过分析发现，在给定足够大设计域“黑箱”尺寸的前提下，拓扑优化分析能够得到内部较为稳定的应力传递路径。根据设计域为大流线管的拓扑优化结果，几何重构了主机架模型，并计算了该最优模型的极限和疲劳强度，得到最大等效应力为 197.7 MPa，疲劳寿命为 175.4 年，完全满足使用要求。

针对某型号半直驱机组的后机架桁架式结构，进行了基于 SIMP 法的“黑箱”拓扑优化设计，综合考虑结合优化结果及附件安装、部件接口等因素，调整得到了更加合理，应力分布更加均匀最优桁架结构，针对该最优模型进行极限和疲劳强度分析，发现该模型有效解决了连接法兰处应力集中现象，疲劳寿命为 30.67 年，完全满足使用要求。

验证了上述大型承载部件拓扑优化轻量化设计流程是高效和精确的。在成本控制已然成为当前风电领域的主旋律这一前提下，先进拓扑优化技术的应用可以显著提高新机型的设计效率，有时候甚至会优化出超乎想象的结果，有很大的应用前景和潜力。

## 参考文献：

[1] 程耿东. 工程结构优化设计基础[M]. 辽宁大连: 大连理工大学出版社, 2012

[2] GUO X , ZHANG W , ZHONG W . Doing topology optimization explicitly and geometrically-a new moving morphable components based framework[J]. Journal of Applied Mechanics, 2014, 81(8): 81009

[3] GUO X , ZHANG W , ZHANG J , et al. Explicit structural topology optimization based on moving morphable components (MMC) with curved skeletons[J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 2016, 310: 711-748

[4] 付强. 基于有限元数值模拟的箱梁腹板拓扑优化分析与设计[D]. 长安大学, 2017

[5] 齐涛, 董姝言, 苏凤宇, 等. MW 级风电机组的后机架结构计算及优化[J]. 可再生能源, 2016, 34(7): 1052-1057

[6] 何力, 张延辉, 杨俊. 海上风电平台大尺寸肘板结构形状优化方法[J]. 船海工程, 2022, 51(4): 116-119

[7] 葛旭, 徐业鹏, 黄丹. 基于进化策略的海上风电支撑结构多参数同步优化设计[J]. 可再生能源, 2020, 38(7): 900-904

[8] 杨兆忠, 胡鹏. 基于 Optistruct 对风电机组摇臂吊基座的拓扑优化设计[J]. 风能, 2015(8): 66-68

[9] 刘金增, 韩佳, 江鹏, 等. 风电机组轴承座轻量化设计[J]. 计算机辅助工程, 2022, 31(1): 45-49+55

[10] 薛日野. 考虑非线性的显式拓扑优化相关的问题研究[D]. 大连理工大学, 2018

[11] BENDS E , SIGMUND O , Service S , et al. Topology optimization: theory, methods, and applications[M]. New York: Springer, 2004

[12] 刘书田, 程耿东. 复合材料应力分析的均匀化方法[J]. 力学学报. 1997, 29(3): 306~313

[13] Altair OptiStruct 2016: Users Guide[DB]. Altair Engineering, Inc., Troy, Michigan, 2016

[14] 何玉林, 杨豆思, 金鑫, 等. 大型直驱型风力发电机组轮毂强度分析[J]. 机械科学与技术, 2012, 31(11):1824-1830

[15] Guideline for the Certification of Wind Turbines[S]. Published by Germanischer LIoyd WindEnergie, 2010

# 风电机组电气与机械联合仿真研究

赵伟　曾庆忠　刘佳佳　曾东

东方电气风电股份有限公司，四川 德阳 618000

**摘要：**本文基于 GH Bladed 软件建立风电机组电气与机械联合仿真平台，通过主控及发电系统自定义模型，与 Bladed 内置模型进行正确交互，针对电网电压故障的故障程度、故障类型、穿越策略等因素，分析风电机组电气与机械相互作用机理与特性。以上因素均能通过直接影响发电机电磁暂态过渡过程对结构载荷产生影响，并且不同故障因素对机组部件载荷的影响具有其规律性。

**关键词：**风电机组；Bladed 软件；电气机械联合仿真

**中图分类号：**TM315　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-906（2024）01-0039-04

# Research on Electrical and Mechanical Co-simulation of Wind Turbine

*ZHAO Wei, ZENG Qingzhong, LIU Jiajia, ZENG Dong*

( Dongfang Electric Wind Power Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China )

Abstract: Based on the GH Bladed software, a wind turbine electrical and mechanical co-simulation platform is established in this paper. Through the user-defined model of the main control and generation system, correct interaction is carried on with the built-in model of Bladed, and the interaction mechanism and characteristics of wind turbine electrical and mechanical are analyzed based on the fault degree, fault type, traversal strategy for grid voltage fault. The above factors can directly affect the structural load through the electromagnetic transient process of the generator, and the influence of different fault factors on the component load has its regularity.

Key words: wind turbine; bladed software; electrical and mechanical co-simulation

风电产业日臻稳健，风电技术日益进步，无论从量上，还是从质上，风电都取得了巨大进展。电力系统愈来愈将风电视作一种类同水电、火电的常规能源，要求风电具备故障电压穿越、调频、调压等能力，同时，以微电网为核心的风电电网特性更为复杂[1]。这些转变不仅对风电机组的电气特性提出了更高要求，也对风电机组的机械特性提出了更高挑战，尤其是各种电气暂态特性会对风电机组机械部件或结构造成极大冲击，其影响已不容忽视[2]。因此，研究风电机组电气与机械相互作用机理和特性，建立风电机组电气与机械联合仿真平台，对于促进风电机组载荷计算、机械设计具有重要意义。

建立单一软件自定义的联合仿真平台是进行风电机组电气与机械相互作用特性研究的发展趋势，是研究电网电压故障条件下，风电机组各部件受力特性的前提，也是提出相应优化设计和优化控制方法的基础。本文的主要研究目的是基于 GH Bladed 软件建立风电机组电气与机械联合仿真平台，以满足实际多样化的需求。

## 1　模型简介

电气仿真模型基于 GH Bladed 软件，外部控制器（External Controller）与 GH Bladed 通过 API（Application Programming Interface）进行交互，将外部控制器编译为动态链接库（Dynamic-linked Library, DLL），以此实现风电机组 Bladed 电气仿真，并通过分析电网故障时机械载荷变化研究机组电气与机械相互作用特性[3]。

**收稿日期：**2023-03-09

**作者简介：**赵伟（1983－），男，2008 年毕业于重庆大学机械学院，工学硕士，高级工程师，现从事风电设计工作。

为了实现风电机组电气与机械联合仿真，应先实现风电机组 Bladed 电气仿真，风电机组 Bladed 电气仿真分为三个层次进行实现：风电机组内置模型仿真、风电机组主控自定义仿真、风电机组主控和发电系统自定义仿真。

### 1.1 风电机组内置模型仿真

风电机组内置模型仿真是指风电机组气动、传动链、发电系统及其控制均采用 Bladed 软件自带模型进行的仿真。但此方法控制策略、发电系统模型单一，需要进一步进行优化[4]。

### 1.2 风电机组主控自定义仿真

风电机组主控自定义仿真是指风电机组气动、传动链、发电系统采用 Bladed 软件自带模型，而控制系统采用自定义外部控制器进行的仿真。

为了实现风电机组主控自定义模型仿真，可以将风电机组的主控策略采用外部控制器加以实现，外部控制器文件可以根据需要进行编写，其与 Bladed 的交互接口为 API 函数。编写时主要考虑风电机组的转矩控制和桨距角控制，此时，Bladed 的控制模块将转矩控制和桨距角控制均设置为离散外部控制器，同时对变桨控制相关的变桨执行机构（位置或变桨速率）和变桨控制模式（统一变桨或独立变桨）等进行正确设置，以使 Bladed 能够和自定义的外部控制器进行正确交互。

### 1.3 风电机组主控和发电系统自定义仿真

风电机组主控和发电系统自定义仿真是指风电机组气动、传动链等采用 Bladed 软件自带模型，而控制系统和发电系统都采用自定义控制器进行的仿真。

为了实现风电机组主控和发电系统自定义仿真，除实现主控自定义模型仿真外还需实现风电机组发电系统自定义模型仿真。Bladed 提供了发电机、齿轮箱和变桨执行机构 DLL。Generator DLL 用于表现发电机的电磁动态特性，还可以融入变流器、电网、电气损耗等模型，但不包含发电机运动方程，因为 Bladed 已在机械模型中建立相应模型。发电机 DLL 在 GH Bladed 软件的接入点为一个具有八个实参、无返回值的单一程序 DLL_GENER。

发电机 DLL 在 Visual Studio 2012 中进行编写、编译和调试，然后在 GH Bladed 电气模块中进行调用，从而实现自定义发电机模型和 GH Bladed 内置模型的数据交互。

DLL 中定义的积分状态变量数量不为零时，采用 Bladed 内置积分器；为零时，DLL 可以采用自定义的积分器，DLL 也支持同时使用 Bladed 积分器与 DLL 积分器，这就是联合仿真。

## 2 电气与机械联合仿真分析

相对直驱全功率风电机组而言，一方面双馈风电机组发电机定子直接与电网连接，其电气特性直接受电网特性的影响，从而对机组机械载荷产生直接影响[5]。另一方面，双馈风电机组电网故障穿越策略相对复杂，其控制特性直接影响机组电气特性，也会对机组部件载荷产生直接影响。因此，双馈风电机组在一定电网条件下，尤其是电网故障时，其电气与机械相互作用显著，具有典型性，故以某 2 MW 双馈风电机组为例，针对电网电压故障的故障程度、故障类型、穿越策略等方面，分析风电机组电气与机械相互作用的特性与机理。

选定在平均风速为 14 m/s 的湍流风条件下进行仿真，自定义主控模型调用时间步长为 20 ms，发电系统自定义模型仿真步长设定为 1 ms，仿真总时间为 25 s。

### 2.1 电网电压不同故障程度的仿真分析

研究电网电压故障程度对结构受力的影响，以平均风速为 14 m/s 湍流风，电网电压分别跌落至 85 %、75 %、50 %、35 %、20 %和电网电压分别升高至 120 %、125 %、130 %，轮毂受力 Mx 为例进行仿真分析。

（1）电网电压跌落至 85 %、75 %、50 %、35 %、20 %，轮毂受力 Mx 如图 1 所示。

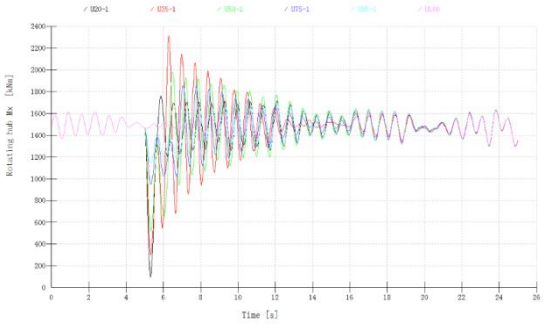



图 1 电网电压跌落不同程度时轮毂受力 Mx

（2）电网电压升高至 120 %、125 %、130 %时，轮毂受力 Mx 如图 2 所示。

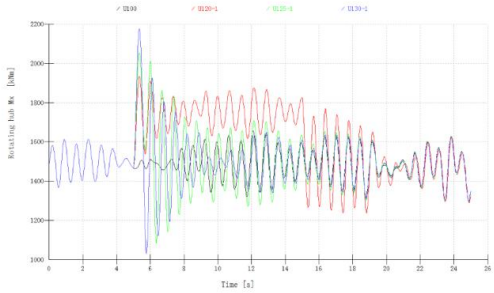


图 2　电网电压升高不同程度时轮毂受力 Mx

由图 1、图 2 可知，不论电压跌落或是升高，电网电压故障程度越大，轮毂受力 Mx 骤变程度越大，冲击也越大。除了冲击载荷，电压恢复时，还会引起轮毂 Mx 的周期性载荷变化。上述结果是由于电网电压骤然变化时，发电机电磁暂态过渡过程造成的。

### 2.2 电网电压不同故障类型的仿真分析

研究电网电压故障类型对结构受力的影响，以平均风速为 14 m/s 的湍流风，电网电压跌落至 75 %和电压升高至 125 %时，轮毂受力 Mx 为例进行仿真分析。

（1）故障穿越控制策略 1，电网电压跌落至 75 %和升高至 125 %，轮毂 Mx 如图 3 所示。

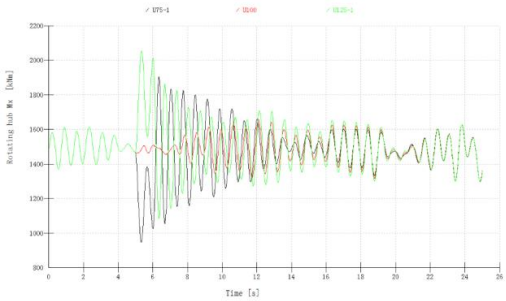


图 3　电网电压不同故障时轮毂受力 Mx

（2）故障穿越控制策略 3，电网电压分别跌落至 75 %和电压升高至 125 %，轮毂 Mx 如图 4 所示。

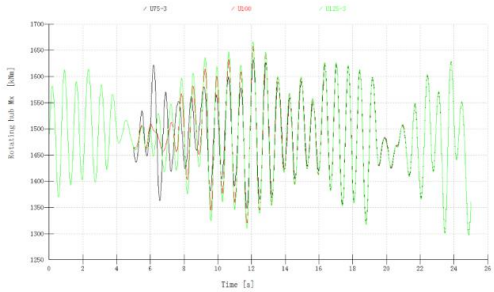


图 4　电网电压不同故障时轮毂受力 Mx

由图 3、图 4 可知，电网电压跌落或升高同等程度，关于稳态轮毂受力 Mx 具有一定的对等性。上述结果是由于作为发电机外部激励的电网电压具有对等性，其所引起的发电机电磁暂态过程，特别是故障瞬间的电磁暂态过程具有相当的对等性。从而风电机组各部件或结构的相应受力，如轮毂 Mx 也具有一定的对等性。

### 2.3 电网电压不同故障穿越策略的仿真分析

风电机组的运行特性与相应故障穿越策略密切相关。电网电压故障穿越策略对于风电机组电气受力和机械受力具有直接影响。考虑到风电机组的安全可靠运行，发电机电磁转矩应尽量响应风电机组主控转矩给定，从而更好保证风电机组安全可靠运行。

为了进行电网电压不同故障穿越策略条件下，风电机组各部件或结构受力特性的仿真分析，根据风电机组电网电压故障特性，以平均风速为 14 m/s 的湍流风，电网电压跌落至 75 %，故障穿越控制策略 1、2、3；电网电压升高至 125 %，故障穿越策略 1、2、3，两种情况下，轮毂受力 Mx 为例进行仿真分析。

（1）电网电压跌落至 75 %，故障穿越控制策略 1、2、3 时，轮毂受力 Mx 如图 5 所示。

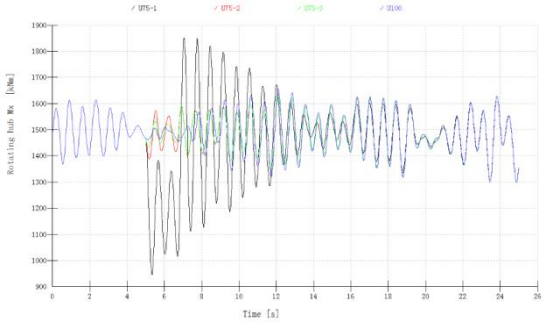


图 5　电压跌落至 75 %，穿越策略 1、2、3 时轮毂受力 Mx

（2）电网电压升高至 125 %，故障穿越控制策略 1、2、3 时轮毂受力 Mx 如图 6 所示。

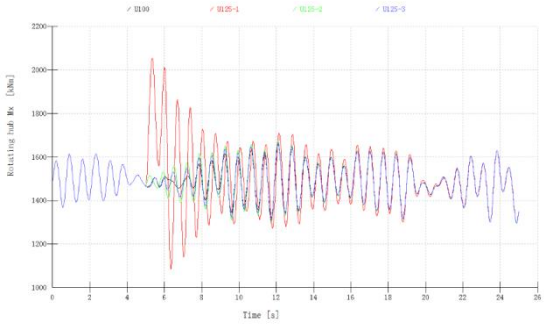


图 6　电压升高至 125 %，穿越策略 1、2、3 时轮毂受力 Mx

由图 5、图 6 可知，不同电网电压故障穿越策略对于风电机组机械受力具有重要影响。相对而

言，电网电压跌落对于发电机变流器系统进行控制策略的影响，要大于同等程度电网电压升高对于发电机变流器系统进行控制策略的影响，因为电网电压跌落使得电网“变弱”，而电网电压升高使得电网“变强”。

## 3 结语

（1）一般而言，电网电压故障类型相同，不同故障程度条件下，电网电压故障程度越大，风电机组各部件或结构受力冲击也越大，例如电网电压跌落至 20 %，轮毂 Mx 反向冲击载荷相对于相应稳态载荷最大变化约为 - 83 %和 30 %，而且某些工况下影响更大，比如转子 CrowBar 投切。同时，电网电压故障程度越大，电网电压故障引起的周期性载荷也越大，过渡过程也越长。这是由于电网电压骤然变化越剧烈，所引起的发电机电磁暂态过渡过程也越剧烈造成的。

（2）电网电压故障类型不同，故障程度相同条件下，电网电压同等跌落或升高，所引起的发电机电磁暂态过程有一定的对等性，从而风电机组各部件或结构的相应受力，如轮毂 Mx 也具有一定的对等性。这是由于电网电压同等跌落或升高，作为发电机外部激励的电网电压具有对等性，其所引起的发电机电磁暂态过程，特别是故障瞬间的电磁暂态过程具有相当的对等性。

（3）相对而言，电网电压跌落对于发电机变流器系统进行控制策略的影响，要大于同等程度电网电压升高对于发电机变流器系统进行控制策略的影响，因为电网电压跌落使得电网“变弱”，而电网电压升高使得电网“变强”。

然而，对于任意电网电压故障，由电网电压骤然变化（跌落或升高），引起的发电机电磁暂态过程无法避免。电网电压故障程度较小时，发电机变流器系统在满足电网无功输出要求的条件下，还有足够的能力进行有功输出控制；电网电压故障程度较大时，发电机变流器系统在满足电网无功输出要求的条件下，其有功输出控制受限，只能在相应限度内进行控制。同时，电网电压正常与电网电压故障之间的控制策略切换，对于风电机组各部件或结构的受力特性也存在影响。只能在满足电网无功输出要求的条件下，尽量降低发电机电磁暂态过程的峰值和加快发电机电磁暂态的过渡过程，减少对机组冲击。

**参考文献：**

[1] 高景德, 王祥珩, 李发海. 交流电机及其系统的分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005

[2] GB/T 36995-2018，风力发电机组 故障电压穿越能力测试规程[S]

[3] 付德义, 秦世耀, 薛扬, 等. 风电机组低电压穿越过程机械载荷特性研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(5): 1100-1106

[4] 秦世耀, 李少林, 王瑞明, 等. 风电机组传动链柔性建模及电网故障响应特性研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(3): 727-733

[5] 郭家虎, 张鲁华, 蔡旭. 双馈风力发电系统 在电网故障下的动态响应分析[J]. 太阳能学报, 2010, 31(8): 1023-1029

集团要闻

## 东方自控自主研发的飞轮储能变流器成功应用

2023 年 12 月 26 日，东方自控为国家电投集团新型飞轮储能系统示范项目提供的储能变流器在深圳成功通过测试，进入应用阶段，国电投科学技术研究院特发来感谢信。

飞轮储能系统具有高效、可靠、环保、长寿命和快速响应等优势。近年来，随着清洁能源和可持续发展的要求越来越高，飞轮储能系统逐渐成为储能技术的重要方向之一，在新能源、轨道交通、UPS 供电等众多行业愈加受到青睐。

该项目充分利用东方自控电力电子与控制共性技术平台优势，采用国产化自主控制系统，先后攻克“宽转速范围快速调节”“电动/发电互逆式控制”等技术难点，转矩动态响应、功率控制稳态误差等指标均处于领先水平，为飞轮储能系统提供了高效的能量传输解决方案。

下一步，东方自控将进一步做实“五个领先”，做大电力电子产业，坚持“市场出题、技术解题”的研发导向，着力产出更多有战略意义、市场价值的科技成果，为成为电力电子与控制行业领军企业奠定坚实科技基础。

来源：东方自控网

# 660 MW 等级燃重油锅炉水冷壁高温硫腐蚀研究

刘文峰[1,2] 尹朝强[1,2] 董猛[1,2] 夏伟[1,2]

1. 清洁燃烧与烟气净化四川省重点实验室，成都 611731；2. 东方电气集团东方锅炉股份有限公司，四川 自贡 643000

**摘要：**本文介绍了某 660 MW 等级燃高硫份重油项目锅炉水冷壁腐蚀情况，探讨研究了炉膛水冷壁高温硫腐蚀机理，分析了该类型锅炉炉膛水冷壁产生高温腐蚀的具体原因，并针对性提出了防止腐蚀的措施。

**关键词：**亚临界燃油锅炉；水冷壁；高温硫腐蚀

**中图分类号：**TK229.7 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-9006（2024）01-0043-06

# Research on High Temperature Sulfur Corrosion of the Water Wall of a 660 MW Heavy Fuel Oil Boiler

*LIU Wenfeng*[1,2], *YIN Chaoqiang*[1,2], *DONG Meng*[1,2], *XIA Wei*[1,2]

(1. Clean Combustion and Flue Gas Purification Key Laboratory of Sichuan Province, 611731, Chengdu, China;

2. Dongfang Boiler Co., Ltd., 643000, Zigong, Sichuan, China)

Abstract: This paper introduces the corrosion of the water wall of a 660 MW high sulfur heavy oil firing boiler, studies the high-temperature sulfur corrosion mechanism of the furnace water wall, analyzes the specific reasons for high-temperature corrosion of the furnace water wall of this type of boiler, and proposes measures to prevent the corrosion.

Key words: sub-critical fuel oil fired boiler; water wall; high temperature sulfur corrosion

中东地区油气资源丰富，该地区电力主要由燃油电厂提供。我国已经为中东沙特、伊拉克、伊朗等国家提供了众多燃油电站设备，积累了丰富的设计制造运行经验。由于中东地区所产的原油大多为高硫[1]、高钒原油[2]，导致燃用重油的锅炉有很高的高温腐蚀风险，特别是发生在锅炉炉膛水冷壁区域的腐蚀尤为严重。高温腐蚀导致水冷壁管子减薄，甚至爆管，危及锅炉运行安全。因此，分析燃重油锅炉的水冷壁腐蚀情况和腐蚀机理，对该类型锅炉的运行和维护，以及同类型锅炉的设计有重要的指导作用。

## 1 锅炉概况

该项目锅炉为660 MW 等级燃重油发电机组锅炉，为亚临界参数、自然循环、前后墙对冲燃烧方式、背靠背π型布置，一次中间再热，采用烟气再循环调温、单炉膛平衡通风、全钢构架的汽包炉。

该项目为典型660 MW 亚临界一次再热机组锅炉。锅炉燃用的油料为重油，具有硫含量高、矾含量高等特点。其中设计油品的硫含量达到 3.7 %。

## 2 锅炉水冷壁腐蚀情况

在该项目机组投入商业运行约 3 年后，锅炉水

**收稿日期：**2023-10-24

**基金项目：**四川省重点研发计划项目（23ZHSF0188）

**作者简介：**刘文峰（1986－），男，2009 年毕业于浙江大学能源与环境系统工程专业，本科，工程师。现任东方锅炉锅炉技术创新中心热动研发部，主要从事锅炉性能设计方向工作。

冷壁出现连续爆管。爆管主要发生在最上层燃烧器至燃尽风以及燃尽风至炉膛吹灰器之前的区域。爆管处水冷壁为内螺纹管，材质为 SA-213T2。典型的爆管见图 1。

图 1　爆管图示

图 1 所示的类似爆管还发生了至少 2 次，均为相同标高位置。由于爆管连续性和普遍性，电厂对该区域和水冷壁其他区域的管子壁厚进行了测量。

## 2.1 前墙水冷壁腐蚀情况

该锅炉水冷壁管子名义壁厚为 7.5 mm，经 3 年的运行后，管子壁厚开始减薄，部分区域减薄严重。前墙示意图见图 2，各位置壁厚测量数据见图 3~11。

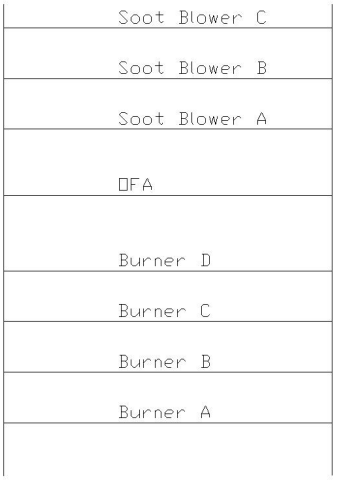



图 2　前墙水冷壁示意

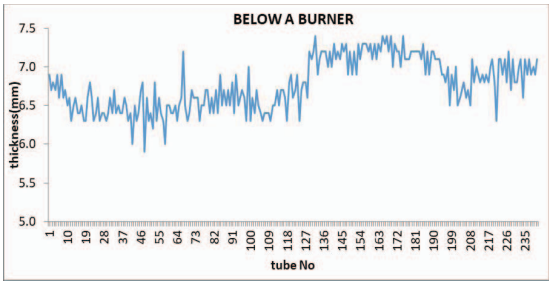



图 3 （前墙）A 层燃烧器以下管子壁厚分布

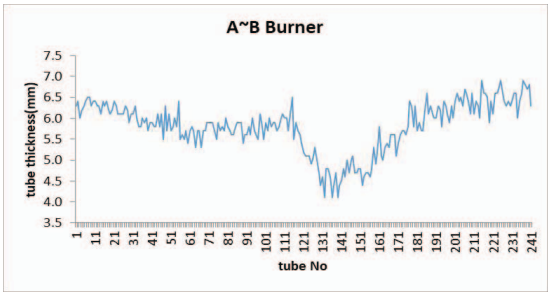



图 4 （前墙）A-B 层燃烧器管子壁厚分布

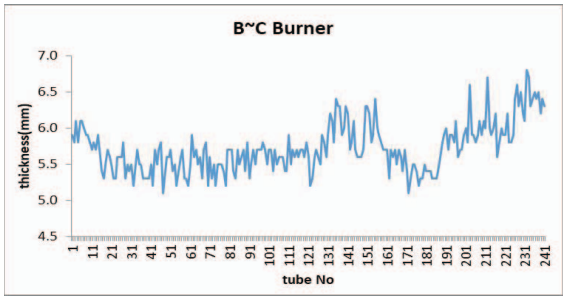



图 5 （前墙）B-C 层燃烧器管子壁厚分布

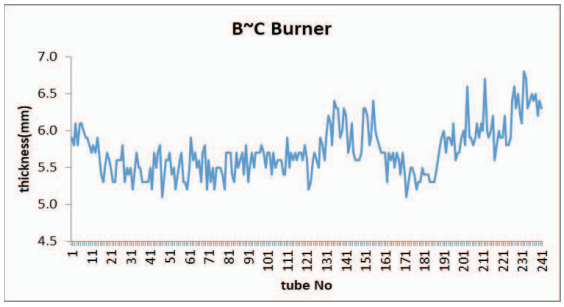



图 6 （前墙）C-D 层燃烧器管子壁厚分布

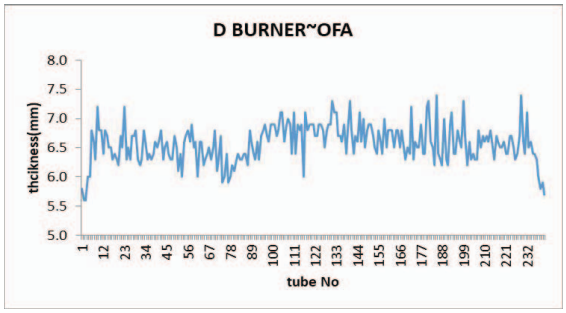



图 7 （前墙）D 层燃烧器-燃尽风管子壁厚分布

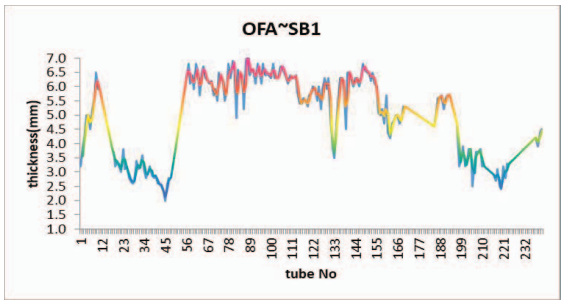



图 8（前墙）燃尽风-A 层吹灰器管子壁厚分布

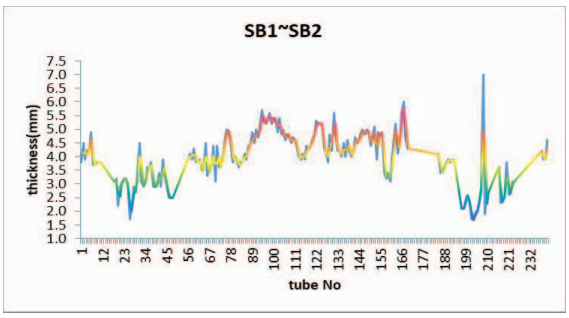



图 9 （前墙）A-B 层吹灰器管子壁厚分布

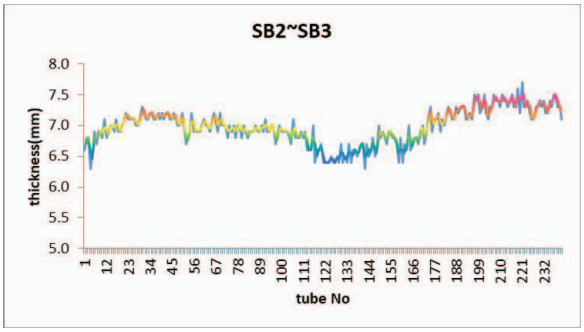



图 10 （前墙）B-C 层吹灰器管子壁厚分布

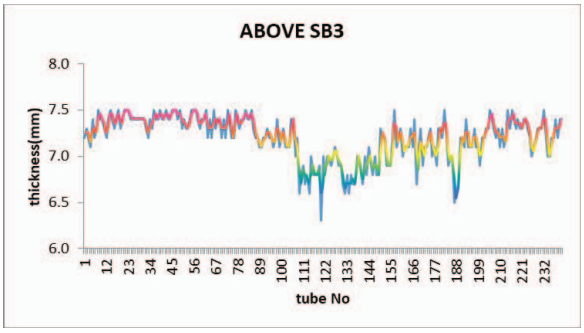



图 11 （前墙）C 层吹灰器以上管子壁厚分布

前墙水冷壁存在不同程度的腐蚀，根据腐蚀程度主要分成 4 个区域：

区域 1：位于燃烧器以下，腐蚀轻微。该区域管子平均壁厚 6.8 mm，最小壁厚 5.9 mm。年平均减薄率约 0.23 毫米/年。

区域 2：从 A 层燃烧器至燃尽风，腐蚀较为严重。该区域管子平均壁厚 6.1 mm，最小壁厚 4.1 mm。年平均减薄率约 0.47 毫米/年。壁厚分布和燃烧器布置没有必然相关，整体管子减薄沿炉膛宽度方向较为均匀。

区域 3：从燃尽风至 B 层吹灰器，腐蚀很严重。该区域管子平均壁厚 4.6 mm，最小壁厚 1.7 mm。年平均减薄率约 1.0 毫米/年。这段区域也是水冷壁爆管发生的区域。越靠近吹灰器，壁厚减薄越严重。同时局部区域存在很严重的腐蚀情况。

区域 4：B 层吹灰器以上，腐蚀轻微。该区域管子平均壁厚 7.1 mm，最小壁厚 6.3 mm。年平均减薄率约 0.13 毫米/年。

2.2 后墙水冷壁腐蚀情况

同时，对后墙水冷壁壁厚也进行了测量。由于结构原因，后墙没有设置吹灰器。后墙水冷壁示意图见图 12，各位置壁厚测量数据见图 13~17。

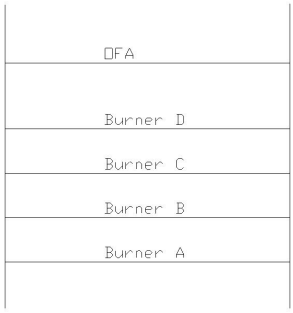



图 12 后墙水冷壁示意

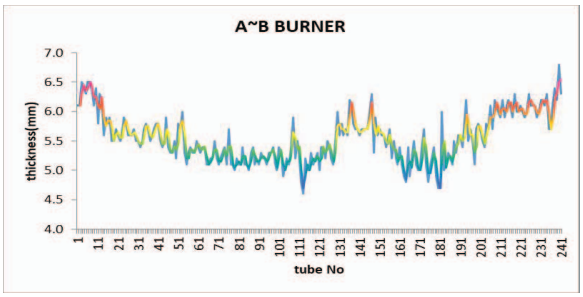



图 13 （后墙）A-B 层燃烧器管子壁厚分布

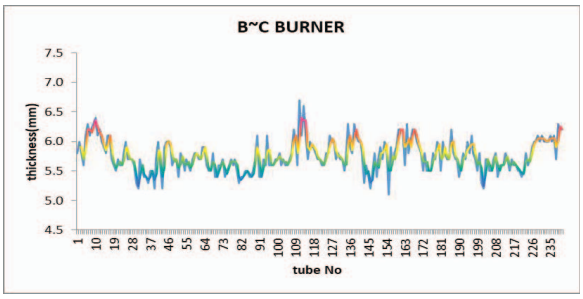



图 14 （后墙）B-C 层燃烧器管子壁厚分布

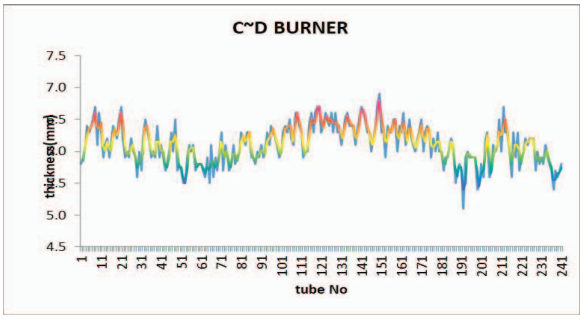



图 15 （后墙）C-D 层燃烧器管子壁厚分布

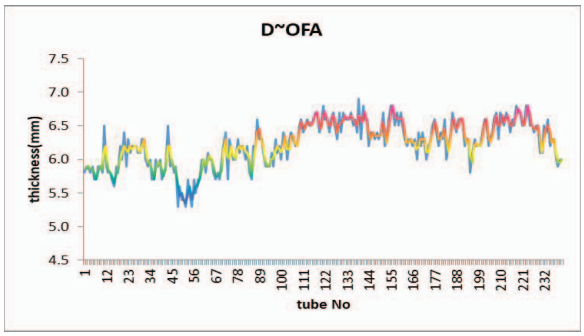



图 16 （后墙）燃尽风以上管子壁厚分布 1

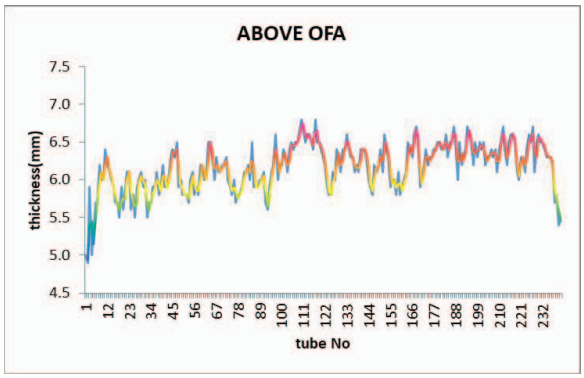



图 17 （后墙）燃尽风以上管子壁厚分布 2

后墙沿炉膛宽度和炉膛高度方向整体腐蚀情况较为均匀，没有出现局部严重腐蚀的情况。后墙整体腐蚀情况较为严重，管子平均壁厚 6.07 mm，最小壁厚 4.9 mm。年平均减薄率约 0.48 毫米/年。

### 2.3 侧墙水冷壁腐蚀情况

侧墙水冷壁没有布置燃烧器，但在前墙相同标高位置处设置了吹灰器，左右侧墙布置形式完全相同。同时左右侧墙水冷壁管子壁厚分布比较近似，壁厚数据分布接近。侧墙的壁厚分布以左侧墙测量数据为例。左侧墙水冷壁示意图见图 18，各位置壁厚测量数据见图 19~21。

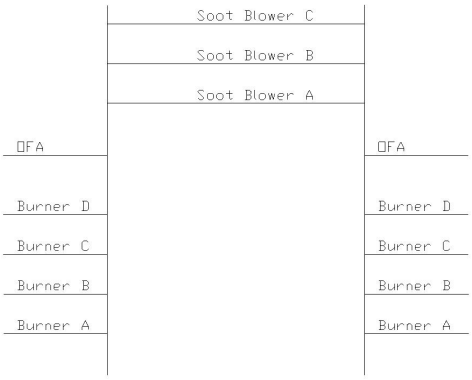



图 18 左侧水冷壁示意

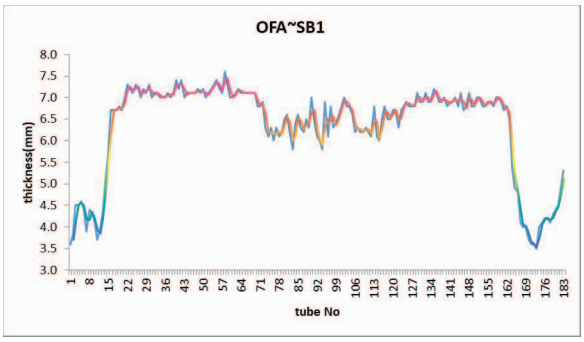



图 19 （左侧墙）燃尽风-A 层吹灰器管子壁厚分布

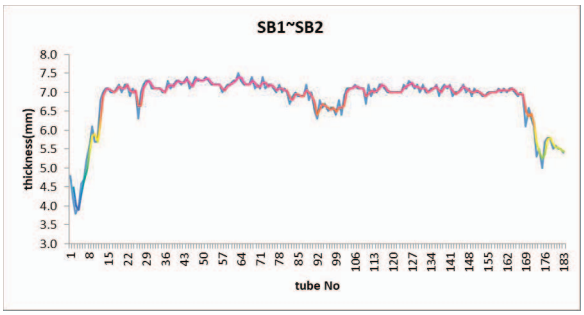



图 20 （左侧墙）A-B 层吹灰器管子壁厚分布

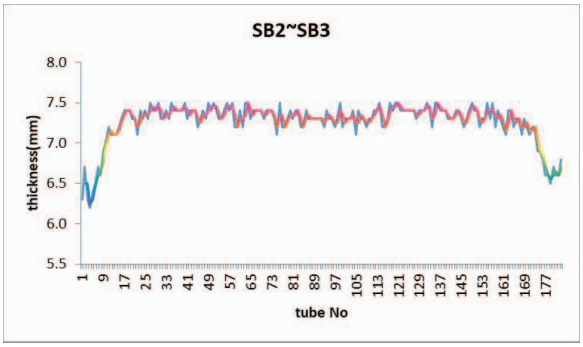



图 21 （左侧墙）B-C 层吹灰器管子壁厚分布

另外，还测量了水冷壁侧墙其他位置管子壁厚，显示壁厚减薄比较轻微。

根据以上数据可以判断，侧墙腐蚀主要发生在角部，即靠近前后墙的位置。部分区域管子减薄很严重，最小到了 3.5 mm。但侧墙中部几乎无腐蚀，水冷壁管减薄量很小。

## 3 锅炉水冷壁腐蚀原因分析

为分析水冷壁管减薄原因，对减薄的管子进行了取样分析，同时对其他减薄处管子外壁附着物进行了取样分析。

### 3.1 样管检测

在前墙水冷壁减薄严重的 A 层吹灰器区域取样，样管见下图。


图 22 样管外观

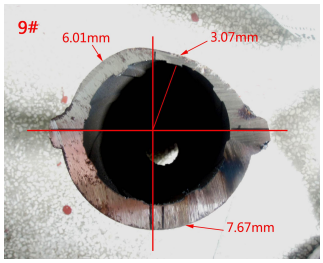



图 23 样管横截面

该样管向火面存在附着物，附着物呈灰绿色且不易脱落。从截面观察及尺寸检测可知（见图 23），样管无胀粗现象，其向火面出现不同程度的减薄现象，且均为从外壁开始减薄。向火面并不是均匀的减薄，因而最薄处均不在向火面的中心位置，而是在偏离中心位置 10°左右的区域且壁厚最薄处为一个平面。

对样管进行化学分析，检测结果见表 1。结果满足 ASME SA-213 对材料 SA-213T2 化学成分的要求。

表 1 样管化学成分检测结果（wt%）

| ITEM | C | Si | Mn | P |
|---|---|---|---|---|
| ASME SA-213T2 | 0.10~0.20 | 0.10～0.30 | 0.30~0.61 | ≤0.025 |
| Sample | 0.13 | 0.26 | 0.50 | 0.009 |
| **ITEM** | **S** | **Cr** | **Mo** | |
| ASME SA-213T2 | ≤0.015 | 0.50～0.81 | 0.44～0.65 | |
| Sample | 0.003 | 0.62 | 0.48 | |

对样管向火面减薄处进行金相检测，检测结果见图 24，组织均为 F+P+B，晶粒度为 8 级，为正常的 SA-213 T2 钢组织。

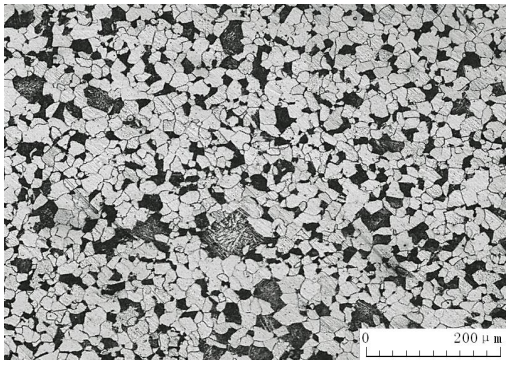



图 24 样管向火面外壁组织 100x

从对样管的金相检测结果来看，金相组织正常。因此，该区域的水冷壁管子是没有出现过超温现象。

从样管的外观、化学成分、晶相检测结果判断，管子减薄主要发生在管子外侧。管子爆管主要原因是壁厚减薄管子承受不住内压导致。

### 3.2 管壁附着物检测

针对前墙水冷壁区域，结合附着物组成分析，可以发现以下现象：①前墙 A 层燃烧器及以下区域，附着物主要组成为硫酸盐+钒酸盐+铁氧化合物；②A 至 D 层燃烧器区域，附着物中均含有一定量的硫化亚铁；③燃尽风至 A 层吹灰器区域，附着物中硫化亚铁含量较高，从 A 层吹灰器至 C 层吹灰器区域，硫化亚铁含量明显降低，以硫酸盐和钒酸盐为主。

针对后墙水冷壁区域，燃烧器区域的硫化亚铁含量分布与前墙基本一致，A 层燃烧器以下区域附着物中硫化亚铁含量较低，A 至 D 层燃烧器区域则相对较多。

侧墙燃尽风两侧区域的附着物中均存在硫化亚铁，A 层燃烧器以下及 A 层吹灰器以上区域的附着物则以钒酸盐、硫酸盐及铁的氧化物为主。

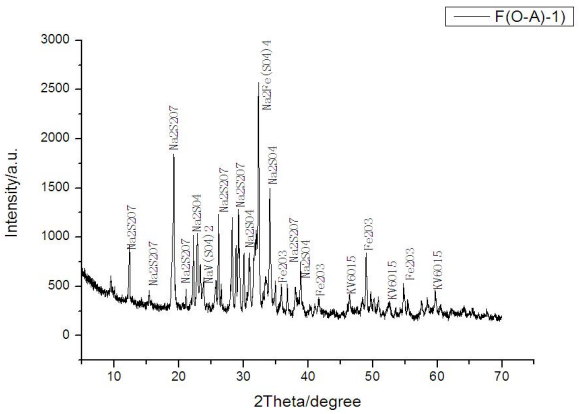



图 25 前墙 A 层燃烧器以下区域附着物 XRD 能谱图

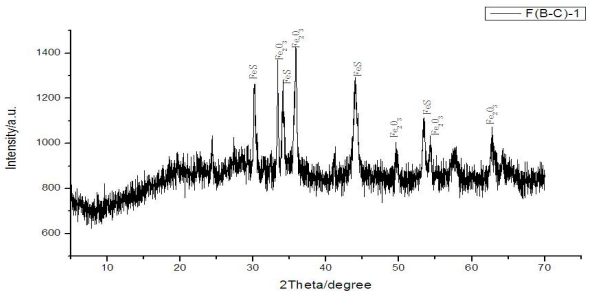



图 26 前墙燃烧器区域附着物 XRD 能谱图

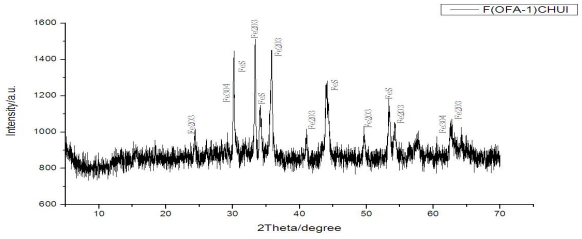



图 27 前墙燃尽风至 A 层吹灰器区附着物 XRD 能谱图

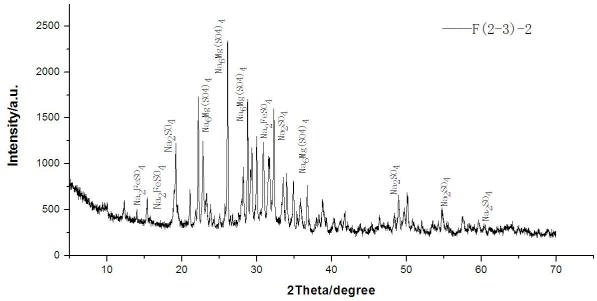



图 28 前墙 A 层吹灰器以上区域附着物 XRD 能谱图

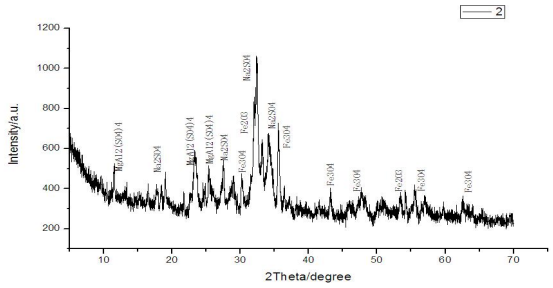



图 29 后墙 A 层燃烧器以下区域附着物 XRD 能谱图

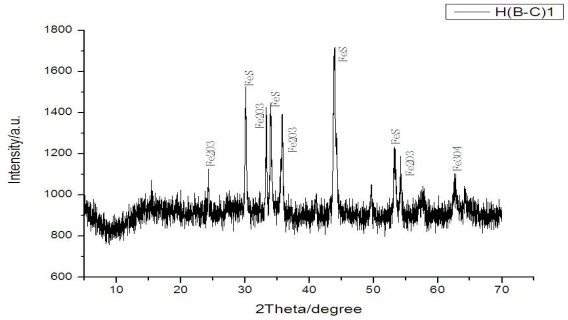



图 30 后墙燃烧器区域附着物 XRD 能谱图

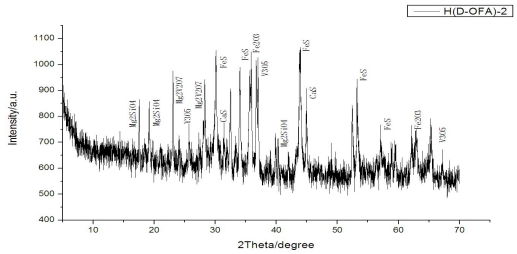



图 31 后墙燃尽风至 A 吹灰器区域附着物 XRD 能谱图

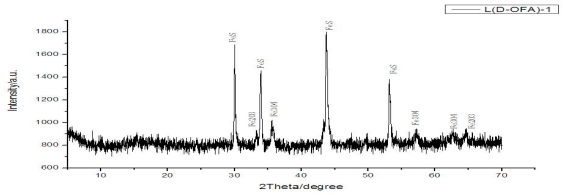



图 32 侧墙燃尽风区域附着物 XRD 能谱图（角落处）

### 3.3 水冷壁腐蚀机理分析

该项目锅炉由于控制 NOx 排放的需要，设置了燃尽风 OFA。对于设计有燃尽风（OFA）喷口，采用低氮燃烧方式的锅炉，水冷壁腐蚀是一个比较普遍的现象[3-4]，针对这个问题也有广泛的研究。腐蚀的机理普遍认为是还原性气氛下的硫化反应。

水冷壁腐蚀的主导机理应是硫化反应，即水冷壁附近处于还原性环境中时，燃料中的硫发生化合反应。

在通常氧化性气氛的运行条件下，低合金钢或者碳钢材质的水冷壁表面会形成一种铁氧化物，通常是 $Fe_3O_4$ 的氧化层，可以保护管子免受腐蚀。反应方程式如下：

$$3Fe+2O_2 \rightarrow Fe_3O_4$$

而且，在正常的运行条件下，烟气中氧量充足，硫被氧化生成 $SO_X$ ($SO_2/SO_3$)。

在还原性气氛下，燃料中的硫会生成 $H_2S$：

$$Fe+H_2S \rightarrow FeS+H_2$$

$Fe_3O_4$ 也能与 $H_2S$ 和 CO 发生反应：

$$Fe_3O_4+3H_2S+CO \rightarrow 3FeS+3H_2O+CO_2$$

由硫化反应造成的腐蚀比由氧化作用造成的腐蚀速率快得多，并且铁硫化合物沉积层相对铁氧化合物的氧化层更脆弱。也就是说相对于铁氧化合物，铁硫化合物对管子的保护性差，更容易剥落。

据观察，硫化反应和侵蚀作用同时发生时，腐蚀的速率会大大提高[3-5]。机理是当 FeS 不能像

（下转第 53 页）

# 大功率百万汽轮机侧齿汽封气动性能数值研究

刘秋霞　平艳　白昆仑　王姗　江生科

东方电气集团东方汽轮机有限公司，四川 德阳　618000

**摘要：**以典型大功率百万汽轮机组的叶顶汽封为对象，利用数值方法研究侧齿结构位置、数量和尺寸在额定工况下对密封效果的影响，并与传统城墙齿汽封对比，达到漏汽最小的最佳适用效果。结果表明：城墙齿汽封的侧齿结构通过划分腔室使主流产生大漩涡，进而抬升主流，阻碍蒸汽向前流动；对于大功率百万汽轮机，与城墙齿汽封相比，侧齿的数量、位置和尺寸均存在较佳值，使防泄漏效果最优，泄漏量相对减少 7.5 %。

**关键词：**汽轮机；数值模拟；侧齿汽封；泄漏量

**中图分类号：**TM621　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）01-0049-05

# Numerical Study on Aerodynamic Performance of Side Gear Seal of High Power Turbine

*LIU Qiuxia, PING Yan, BAI Kunlun, WANG Shan, JIANG Shengke*

( Dongfang Turbine Co.,Ltd.,618000, DeYang, SiChuan, China )

Abstract: Based on the tip seal of typical high power turbine, the influence of the structure of side seal, position, quantity and size on the sealing effect and get the best applicable effect under rated working conditions are studied by CFX numerical. The results show that the side seal structure added to the wall seal is to raise the main stream by making the main stream produce a large vortex structure through its divided chamber, which hinders forward flow of some fluids; For the high power turbine, compared with the wall seal, there are optimal values for the position, quantity, and size of the side seal, the anti leakage effect is better, and the leakage is relatively reduced by 7.5 %.

Key words: steam turbine; numerical simulation; side gear seal; leakage rate

近几年，碳中和、碳达峰等目标的陆续推出，对电力行业的节能减排、能源经济性提出了更高的要求，汽轮机作为大型电厂发电设备的动力核心部件，提高其整缸效率和经济性，具有重大的意义。汽轮机在运行过程中，隔板汽封、叶顶汽封和轴端汽封等密封结构造成的漏汽损失，是制约汽轮机效率的主要因素，尤其是叶顶汽封漏汽占比超过 20 %。

经过长期研究，目前的汽封形式多种多样，如迷宫汽封、刷式汽封、蜂窝汽封和布莱登汽封等[1-3]。汽轮机的密封研究方向主要是通过复杂多变的结构达到湍流增阻的目的。侧齿汽封通过在迷宫汽封的基础上增加侧齿结构，将汽封腔室划分为小腔室来增强涡流耗散，因其具有适应性强、安全可靠性高、密封效果好、可改造性强等优势而被广泛研究和应用。胡丹梅[4]提出节点式侧齿汽封，漏汽量比相同条件下的传统迷宫式汽封降低约 20 %。李子超等[5]将侧齿结构应用于核电汽轮机，研究了有无底齿对泄漏量的影响。在某能源站汽轮机改造上采用侧齿汽封后，机组运行安全性和热效率等均得到有效提高[6]。

**收稿日期：**2023-05-29

**作者简介：**刘秋霞（1995－）女，2021 年毕业于哈尔滨工业大学动力工程专业，硕士，助理工程师。现任东方汽轮机有限公司产品研发，主要从事旋转机械气动设计方向。邮箱：2362907790@qq.com

大功率百万汽轮机是目前火电行业运行效率最高、经济性最好的一类汽轮机组，为了让侧齿汽封在大功率百万机组上得到充分的应用，本研究以此为基础，通过数值计算分析侧齿结构的位置、数量和尺寸对泄漏量的影响，并分析其流动特性。

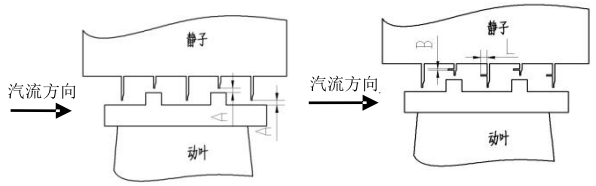
## 1 侧齿汽封的特征

常用的迷宫汽封结构，主要通过调整间隙来控制汽封的泄漏量，因其具有结构简单和成本低廉等优势，而被广泛应用，但是受反复启停、易磨损等因素的影响，在调整间隙时会受到一定的限制。相对于传统的迷宫密封，通过在汽封齿之间添加齿形结构，即侧齿结构，将汽封腔室划分为不同的小腔室，流体在小腔室内流动路径复杂，并产生小旋涡，耗散一部分能量，增加摩阻效应，从而达到降低泄漏量，提高汽轮机经济性的效果。此外，侧齿汽封结构还具有可靠性高、适应性强和改造及调试方便等优点[7]。

## 2 模型

### 2.1 物理模型

本文以某大功率百万机组典型级次叶顶汽封为对象，该汽封结构如图 1（a）所示，包括 2 个汽封短齿和 3 个汽封长齿。在汽封齿上增加侧齿结构，其余结构和尺寸保持不变，如图 1（b）所示，其中 A 表示汽封间隙，根据实际机组，取 1 mm，L 和 B 分别表示侧齿结构的长度和宽度。本文主要分析侧齿结构的位置、尺寸及数量对密封效果的影响。




（a）原始城墙齿汽封　　（b）侧齿汽封

图 1 汽封结构

### 2.2 计算模型及网格

为确保流体充分发展，进出口均做了延长处理，使用商用软件 ANSYS CFX 进行数值模拟，湍流模型采用 SST，壁面采用无滑移边界，工质为水蒸汽，边界条件根据实际工况给定，见表 1 所示。

表 1 边界条件

| | |
|---|---|
| 进口压力（MPa） | 27.9 |
| 进口温度（℃） | 571.4 |
| 出口静压（MPa） | 26.3 |
| 转速（r/min） | 3 000 |

本文使用 ANSYS 中的 mesh 模块对计算域进行网格划分，为了得到更准确的计算结果，设置壁面边界层取 0.001 mm，如图 2 所示。

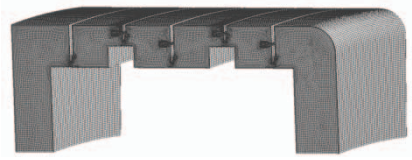


图 2 网格划分

### 2.3 性能指标

评判汽轮机汽封结构优劣的主要参数是流量系数，其定义为

$$\mu = A \cdot \sqrt{\frac{\left(P_0{}^2 - P_Z{}^2\right)}{Z \cdot P_0}} / G \qquad (1)$$

式中　$\mu$—流量系数；

A—汽封间隙的面积（$m^2$）；

$P_0$—汽封入口压力（Pa）；

$P_Z$—汽封出口压力（Pa）；

Z—汽封齿的总数；

G—汽封的实际泄漏量（kg/s）；

## 3 计算结果与分析

### 3.1 可靠性验证

首先选取了三组网格，对网格进行了无关性验证，如表 2 所示，当网格数量在 112 万左右时便趋于稳定。

表 2　网格无关性验证

| 网格数量（万） | 80.18 | 112.56 | 135.75 |
|---|---|---|---|
| 漏汽量（kg/s） | 12.409 | 11.946 | 11.922 |

为了验证本文数值模拟方法的准确性，将城墙齿汽封的 CFD 计算结果与试验结果进行对比。试验在自主开发的汽封试验平台上进行，如图 3 所示，试验台本体由变频电机、转子、汽封、筒体、端盖和基架等构成。空气从风机出口经进气阀进入储气

罐，然后经整流器和涡轮流量计进入试验台本体，最后排入大气。储气罐后的旁路管道上设有放空阀，试验过程中，通过调节进气阀和放空阀来达到不同的压比。

图 3 试验台本体图

针对城墙齿汽封在不同压比下进行了多组试验，得到了相应的泄漏情况。试验是以空气为工质，为保证 CFD 计算结果的准确性，进行可靠性验证的数值算例也将工质设为空气。验证结果如图 4 所示，从图中可以看出，CFD 数值模拟的结果与试验结果吻合良好，因此本研究的数值方法具有良好的可行性及预测的准确性。

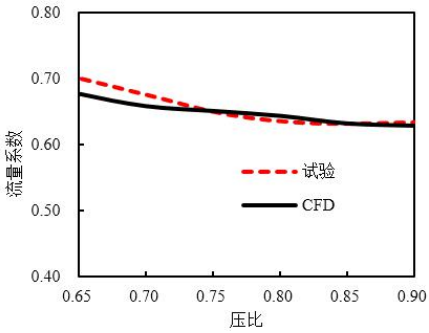



图 4 汽封试验与 CFD 结果对比

### 3.2 侧齿位置对密封效果的影响

首先分析计算了侧齿结构在汽封腔室内不同位置时的气动性能，考虑加工成本和结构强度，仅调整汽封长齿上侧齿结构的位置，分别设置在长齿中部以上 1.25 mm、中部及中部以下 1.25 mm，侧齿长度 L/A 和宽度 B/A 均保持不变，计算结果如表 3 所示。

表 3 漏汽量结果统计

| 汽封形式 | 城墙齿汽封 | 侧齿汽封 | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 侧齿位于中部以上 | 侧齿位于中部 | 侧齿位于中部以下 |
| 漏汽量（kg/s） | 11.946 | 14.62 | 11.239 | 13.48 |
| 相对值 | | +22.5 % | -5.91 % | +12.84 % |

从表 3 可以看出，当侧齿汽封腔室内的侧齿结构位于中部时，相对城墙齿汽封的泄漏量降低 5.91 %，而侧齿结构位于中部以上和中部以下时，泄漏量均明显增加，为分析原因，统计其平面流线图，如图 5 所示。

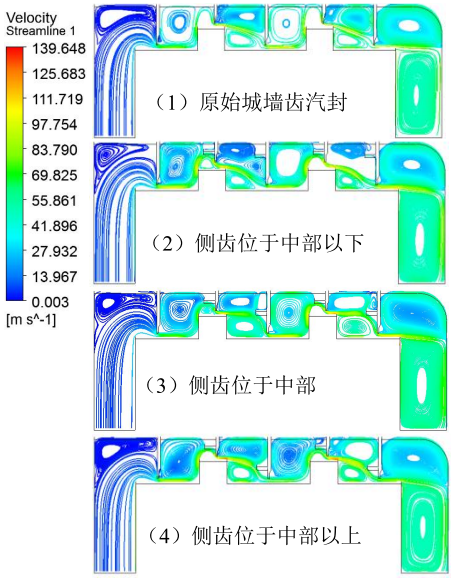



图 5 侧齿在不同位置的平面流线图

从图 5 可以看出，当侧齿结构位于中部时，侧齿结构使流体在长齿与凸台之间的汽封腔室上下产生两个大旋涡，位于下方的旋涡将进入下一个密封齿间隙的主流向上抬升，改变主流沿轴向流动轨迹，使得主流方向与中部的侧齿结构平齐，堵住上方的蒸汽向前流动，耗散一定的能量，使动能向热能转化更充分，所以降低了密封结构的泄漏量。当侧齿位于中部以上和以下位置时，在侧齿结构产生的旋涡均使主流向下一个汽封腔室倾斜，具有明显的透气效应，所以漏汽现象明显。

### 3.3 侧齿数量对密封效果的影响

为提高侧齿结构在大功率百万机组叶顶汽封上的应用效果，进一步增加侧齿在汽封长齿上的数量，相关漏汽结果如表 4 所示，齿数增多，泄漏量明显增大。

表 4 漏汽量结果统计

| 汽封形式 | 城墙齿汽封 | 侧齿汽封 | |
|---|---|---|---|
| | | 长齿上的侧齿数 1 个 | 长齿上的侧齿数 2 个 |
| 漏汽量（kg/s） | 11.946 | 11.239 | 12.275 |
| 相对值 | | -5.92 % | +2.75 % |

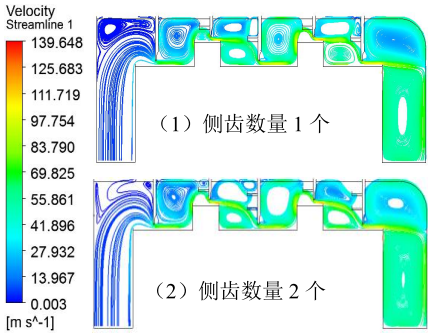



图 6 不同数量侧齿的平面流线图

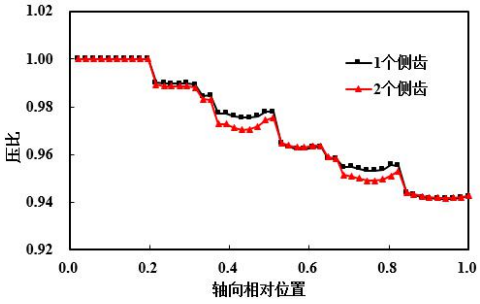



图 7 轴向压力分布

根据图 6 的流场图，增加侧齿数量相当于将侧齿结构向下移动，促使主流向下倾斜，大部分流体还未经耗散减速便进入下一个腔室。从压力分布曲线图 7 也可以看出，在增加侧齿位置处的压差明显增大，因此增加侧齿数量效果并不明显。

### 3.4 侧齿尺寸对密封效果的影响

为了使侧齿汽封能够在大功率百万汽轮机机组达到最佳的使用效果，在前面研究基础上继续调整侧齿的尺寸。先保证侧齿宽度不变，调整长度，得到最佳侧齿长度，再保证长度不变，调整宽度，得到最佳侧齿宽度，具体研究结果如图 8 所示，随着侧齿长度和宽度的变化，流量系数均先减小后增大，存在最佳值，当 L/A 为 2，B/A 为 0.4 时，具有最佳效果，相对原始城墙齿汽封，泄漏量减少 7.5 %。

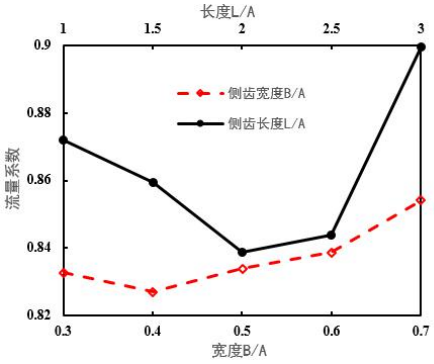



图 8 不同侧齿尺寸的流量系数

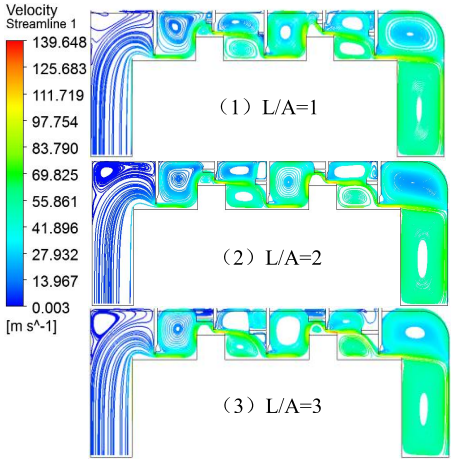



图 9 不同 L/A 的平面流线图

从图 9 的流场图可以看出，当 L/A 较小时，流体在侧齿腔室内不足以产生较大的旋涡抬升主流，当 L/A 较大时，汽封短齿处，较高的流速导致压降明显，漏汽量增大。

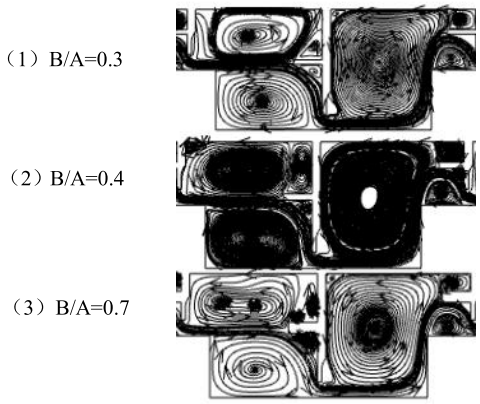



图 10 不同侧齿宽度 B/A 的流线图

从图 10 的流线图可以看出，当 B/A 过小或过大时，侧齿上方的空间都不利于逆向旋涡的产生，对流体的阻碍作用减弱。

### 3.5 不同汽封间隙下的验证

根据前期的研究结果，当侧齿结构 L/A 为 2，B/A 为 0.4 时，具有最佳效果，相对原始城墙齿汽封，泄漏量减少 7.5 %，为了进一步验证侧齿结构对漏汽量的影响，将最佳侧齿结构应用在不同汽封间隙之下，相应的漏汽情况如图 11 所示。

从图 11 可以看出，随着汽封间隙的增大，漏汽量逐渐增加，其中侧齿汽封在各个间隙下的流量系数均比城墙齿汽封小，由此可见侧齿汽封在不同汽封间隙下均有减少汽封漏汽量的效果，并且小间隙下效果更明显。

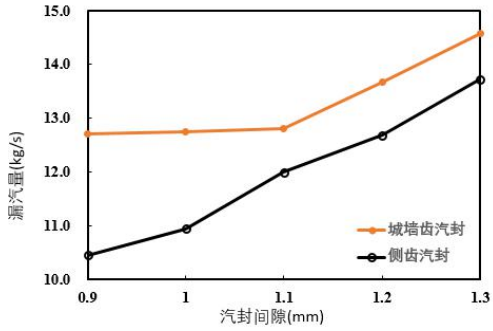



图 11 不同汽封间隙的漏汽量统计

## 4 结语

本文采用数值模拟方法对大功率百万汽轮机的叶顶汽封结构进行了数值研究，与试验结果吻合良好，验证了数值模拟的准确性。在此基础上，通过数值方法研究了侧齿汽封对叶顶汽封漏汽量的影响，并得到效果最佳的结构。

城墙齿汽封上的侧齿结构通过其划分腔室使汽流产生大漩涡，进而抬升主流，阻碍部分流体向前流动，达到降低泄露量的效果。

对于大功率百万机组的叶顶汽封，当侧齿结构位于汽封长齿的中部位置，且当侧齿数量为 1 个时，防泄漏效果最佳。

对于大功率百万机组，L/A 的最佳值为 2，B/A 的最佳值为 0.4，泄漏量相对原始城墙齿汽封减少 7.5 %。

经过验证，在不同的汽封间隙下，侧齿汽封相对于城墙齿汽封均有减少漏汽量的效果。

### 参考文献：

[1] 李敬, 孟召军, 张延峰. 对汽封改革趋势的综合分析[J]. 东北电力技术, 2004, 25(12): 37-39.

[2] 卫泳波, 张晓东, 张钰. 汽轮机新型汽封的应用和比较[J]. 热力发电, 2007, 36(12): 65-68

[3] 宁哲, 赵毅, 王生鹏. 采用先进汽封技术提高汽轮机效率[J]. 热力透平, 2009, 38(1): 15-17

[4] 胡丹梅, 商洪涛, 黄瑛琪. 汽轮机节点式侧齿汽封密封性能的数值分析[J]. 润滑与密封, 2010 (7): 36-39

[5] 李子超, 周涛, 马栋梁, 等. 核电汽轮机侧齿汽封流动特性的数值研究[J]. 汽轮机技术, 2017, 59(4): 277-279

[6] 龚翔. 采用侧齿汽封在汽轮机上的改造[D]. 华南理工大学, 2016

[7] 刘网扣,张兆鹤. 侧齿汽封的研究与应用[C]//中国动力工程学会. 超超临界机组技术交流 2012 年会论文集.2012:4

（上接第 48 页）

$Fe_3O_4$ 那样形成保护层有效的抑制进一步的腐蚀时，腐蚀速率就不会减慢。

基于此，该项目锅炉水冷壁腐蚀减薄的主要原因是清楚的。燃料重油中的硫含量高导致烟气中有很高的硫含量，而由于控制 NOx 的生成在锅炉主燃烧区域采用了欠氧燃烧导致燃烧器至燃尽风区域出现高浓度 $H_2S$，从而腐蚀水冷壁钢管。而吹灰器的吹扫导致吹灰器区域管壁上形成的保护性铁的氧化物被吹走，造成管壁直接暴露在强腐蚀性烟气当中，加快了管子的腐蚀进程。

## 4 结语

660 MW 等级燃高硫分重油锅炉的水冷壁有很高的腐蚀风险，在设计和运行中应予以充分重视并采取针对性措施尽量延长管子寿命。在控制 NOx 排放的同时应尽量提高主燃烧区域的氧量并精确控制运行中氧量分布，避免局部区域出现严重缺氧的情况；同时控制吹灰器的运行，在确保水冷壁吸热的情况下降低吹灰器的运行频率；局部角落区域应采用补风措施防止还原性气氛的产生。同时应在易腐蚀区域采取喷涂等措施防止高温腐蚀对水冷壁管造成腐蚀，延长锅炉寿命。

### 参考文献：

[1] TIAN S B . Distribution of Different Sulfur Compounds in Mideast Crude Oils[J]. Petrochemical Corrosion and Protection, 1997.14:1

[2] SPEIGHT J G. The Desulfurization of Heavy Oils and Residua [M]. Boca Raton: CRC Press, 1999

[3] HUIJBREGTS W M M , JANSSEN J B , RENS O C J. CORROSION IN LOW NOX FIRING CONDITIONS[J]. [2023-12-18]

[4] BAKKER W , KUNG S . Waterwall Corrosion in Coal-Fired Boilers, A New Culprit, FeS[C]//CORROSION Research Topical Symposium. NACE International, 2000

# 大功率汽轮机滑动轴承箱变工况性能研究

陈贝贝　邓凌宇　杨灵　章艳

东方电气集团东方汽轮机有限公司，四川 德阳 618000

**摘要：**本文通过对某大功率汽轮机滑动轴承箱的受力情况进行简化理论建模，重点对稳定工况、变工况条件下轴承箱的受力进行分析，采用两种不同方法对轴承箱的变工况性能进行稳定性评估。基于有限元方法对轴承箱的空载工况、稳定工况以及变工况的刚性进行对比分析，结果表明稳定工况下的轴承箱弯曲静刚度和轴向静刚度均处于最高水平，且变工况会导致轴承箱静刚度水平显著下降。对变工况性能要求高的轴承箱而言，调整推拉键高度可以用于改善轴承箱刚性设计。

**关键词：**轴承箱；稳定性；变工况；静刚度

**中图分类号：**TK262　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）01-0054-05

# Study on Performance of Sliding Bearing Box of High Power Steam Turbine under Different Working Conditions

*CHEN Beibei, DENG Lingyu, YANG Ling, ZHANG Yan*

( Dongfang Turbine Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China )

ABSTRACT: In this paper, through the simplified theoretical modeling of the bearing box of a high power steam turbine, the stress of the bearing box under stable and variable working conditions is analyzed, and the stability of the bearing box under variable working conditions is evaluated by using two different methods. Based on the finite element method, the rigidity of the bearing box under no-load condition, stable condition and variable condition was compared and analyzed. The results show that the bending static stiffness and axial static stiffness of the bearing box are at the highest level under stable condition, and the static stiffness of the bearing box under variable condition will significantly decrease. For bearing boxes with high performance requirements under variable working conditions, adjusting the height of push-pull keys can be used to improve the rigid design of bearing boxes.

Key word: bearing box; stability; variable condition; static stiffness

在汽轮机的运行过程中，滑销系统对机组的安全启停、稳定运行有着极其重要的作用。滑销系统不仅能保证机组相对位置不偏斜、膨胀通畅，而且能防止动静部件摩擦、机组振动等问题发生。而轴承箱又是汽轮机滑销系统中的关键部件，其安全可靠性是保证机组安全稳定运行的重要基础。

汽轮机中的轴承箱按工作状态是否运动可划分为两类：滑动轴承箱和不动轴承箱（“死点箱”）。轴承箱的稳定性以及刚性一直是结构设计所关注的重点。近年来国内已有不少学者对轴承箱的稳定性进行了相关分析研究。钱国浩[1]通过对轴承箱在启动、停机状态下的理论受力分析，在考虑管道推力、汽缸重力、摩擦力等条件下，针对某 200 MW 等级汽轮机死点轴承箱稳定性进行了分析与改进。刘志德等[2]采用有限元软件对空冷 600 MW 汽轮机落地轴承箱进行分析，分析了轴承座的刚性以及支撑刚度。彭国伟等[3]对 1 000 MW 等级中低压轴承箱进行理论以及有限元评估，基于工程的角度，提出了增加轴承箱稳定性的措施。此外，姜述杰等[4]采用模态测试方法对轴承箱动力学特性进行分析

**收稿日期：**2023-04-12

**作者简介：**陈贝贝（1987－），男，2013 年毕业于南京航空航天大学工程力学专业，硕士，工程师，从事汽轮机安全可靠性等方面的研究。

优化，降低了轴承座振动幅值。

尽管针对轴承箱的研究取得了一些进展，但总体来说，轴承箱的国内外研究内容较少。且更多集中在“死点箱”方面，而滑动轴承箱的相关理论以及有限元分析研究较少。但值得注意的是，随着机组功率等级越来越高，机组的灵活性要求越来越高，轴承箱受到的载荷水平以及载荷波动水平也显著提升。因此，迫切需要对滑动轴承箱的稳定性以及刚性进行深入研究，以适应机组灵活性运行引起工况变化而带来的冲击。

本文主要针对某大功率汽轮机滑动轴承箱进行理论受力分析，并结合有限元仿真方法对轴承箱在不同工况下的刚性进行评估，探讨轴承箱刚性设计的方法，为后续滑动轴承箱设计优化提供参考。

## 1 某滑动轴承箱结构简介

某高中压轴承箱结构示意图如下图 1 所示，该轴承箱底板落于基架上，底板与基架设有若干滑块，沿轴向方向可自由滑动，在横向键槽处与汽缸横向键连接，天地方向受到轴向左右两侧压块限位。高压缸和中压缸猫爪分别落在高中压方向的两个承重面上，由于机组绝对死点箱位于中压一侧，因此稳定运行前后，轴承箱的滑动方向为由中压侧向高压侧轴向移动。

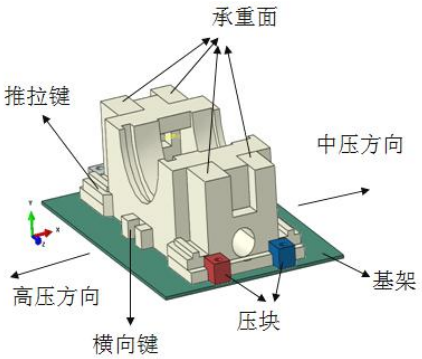



图 1 某轴承箱结构简化示意图

该轴承箱的结构较为复杂，载荷边界影响因素较多。因此，为深入分析滑动轴承箱的受力状况，先从理论上建立轴承箱的简化受力分析模型，进行理论的稳定性评估。再结合数值仿真分析方法，对轴承箱的刚性开展有限元评估。

## 2 轴承箱理论力学模型建立

根据滑动轴承箱的受力以及边界状况分析如图 2 所示。图中，$N_1$ 为高压缸作用于前枕座上的压力；$N_2$ 为中压缸作用于后枕座上的压力；$F_3$ 为高压缸内部轴向推力；$F_4$ 为中压缸内部轴向推力；$F_5$、$F_6$ 分别为高、中压缸管道推力；$F_7$ 为转子推力；$G_1$ 为转子载荷；$G_2$ 为轴承箱自重；$F_1$ 为（高压静子重量×0.5+高压转子重量×0.5+前轴承箱重量）×0.3；$F_2$ 为（$N_1$+$N_2$+$G_1$+$G_2$）×0.3，$F_f$ 为底板与基架之间的摩擦力。A、B 分别为轴承箱轴向两端点。

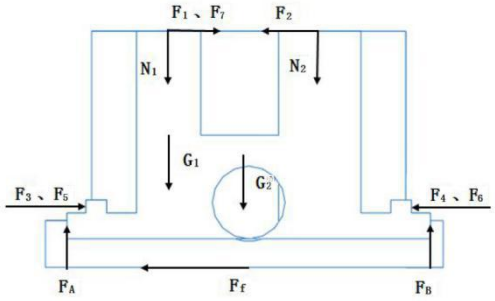



图 2 轴承箱受力简化示意图

轴承箱在稳定运行时，轴向摩擦力与轴向推力必然处于平衡状态，猫爪支撑面受到的天地向重力与 A、B 两点的支撑反力必然处于平衡状态，除此之外以 B 点为中心的力矩也处于平衡状态。因此，建立上述关系的力和力矩平衡方程如下：

$$F_1 + F_3 + F_5 + F_7 - F_2 - F_4 - F_6 - F_f = 0$$

$$N_1 + N_2 + G_1 + G_2 - F_A - F_B = 0$$

$$M_A + M_1 + M_3 + M_5 + M_7 - M_{G1} - M_{G2} - M_2 - M_4 - M_6 - M_{N1} - M_{N2} = 0$$

其中，上式的“M”为对应位置以“B”点取距后的弯矩符号，$F_A$、$F_B$ 分别为两端的天地向支反力。

### 2.1 变工况分析

在机组稳定运行时，轴承箱处于相对静止的状态，此时，汽缸内部轴向推力、管道推力、转子推力与摩擦力构成静态平衡力系。而在机组启动或者变工况时，由于受到急剧的载荷变化，轴承箱的支撑反力会发生改变，则会对轴承箱的稳定性产生影响。

基于上述分析内容，首先对轴承箱稳定工况下受载进行理论分析，再根据变工况载荷边界条件评估其对轴承箱的稳定性影响。

稳定工况下轴承箱载荷分布如表 1 所示。

表 1　稳定工况轴承箱载荷分布

| 代号 | 单位（kN） | 距 B 点力矩长度（mm） |
|---|---|---|
| $N_1$ | 650 | 1 030 |
| $N_2$ | 870 | 360 |
| $G_1$ | 250 | 980 |
| $G_2$ | 110 | 800 |

变工况时，轴承箱的受载较为复杂，主要考虑转子轴向推力、高中压缸推力以及前后枕座上轴向推力以及管道力变化对轴承箱支撑反力的影响，简化为表 2 所示。

表 2　变工况轴承箱受力分析

| 代号 | 单位（kN） | 距 B 点力矩长度（mm） |
|---|---|---|
| $F_1$ | 250 | 260 |
| $F_2$ | 570 | 260 |
| $F_3$ | 1 700 | 260 |
| $F_4$ | 1 900 | 260 |
| $F_5$ | 70 | 260 |
| $F_6$ | 90 | 260 |
| $F_7$ | 变工况载荷 | 900 |

机组的变工况主要包括以下两种，转子推力的大小和方向如表 3 所示（“+”表示由高压侧指向低压侧，“－”表示由低压侧指向高压侧）。

表 3　轴承箱变工况载荷

| 工况 | （工况一）抽汽工况 | （工况二）阀门瞬关 |
|---|---|---|
| 推力值 kN | －75 000 | 690 000 |

由于轴承箱受力复杂，按以下不同的两种方法分别进行评估。

（1）评估方法一

根据《火力发电设备技术手册》[5]的稳定性评估标准，所有作用于汽缸上的合力和合力矩的综合效应引起的支反力≥|G/40|，G 为汽缸重量。因此，基于这种思路，若对轴承箱简化为平面两支点结构，则该方法可以简化为: 作用于轴承箱上的合力和合力矩的综合效应引起的支反力≥|G/20|。此时，轴承箱受到的轴向力为压力产生的静摩擦力和高中压缸产生的轴向推力，两者互为平衡力系。则可求得稳定工况下 $F_A$ 为 948 kN，$F_B$ 为 934 kN。

基于轴承箱稳定工况承受的载荷重量，可以知道 G/20=94.9 kN。由表 4 可知，不同工况下轴承箱支反力均大于 G/20，支反力满足要求。

表 4　轴承箱变工况支反力变化　kN

| 支反力 | 稳定工况 | 工况一 | 工况二 | G/20 |
|---|---|---|---|---|
| $F_A$ | 948 | 774 | 1 261 | 94.9 |
| $F_B$ | 934 | 1 108 | 621 | 94.9 |

（2）评估方法二

轴承箱与汽缸受力状态类似，因此参考常用的汽缸稳定性方法对轴承箱进行理论评估。即根据稳定工况条件下 A、B 两点的支反力结果，评估在变工况下（抽汽工况和阀门瞬关工况）的支反力变化情况。由表 5 可以看出，机组瞬态运行工况变化引起的支反力变化均不超过±25 %，轴承箱稳定性满足要求。

表 5　轴承箱变工况支反力变化

| | 稳定工况 | 工况一 | 工况二 | 稳定工况 | 工况一 | 工况二 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 稳定支反力 $F_A$ | 变化支反力△$F_A$ | 变化支反力△$F_A$ | 稳定支反力 $F_B$ | 变化支反力△$F_B$ | 变化支反力△$F_B$ |
| 单位（kN） | 948 | +200 | -198 | 934 | -200 | +198 |
| 变化量（%） | / | +21.11 | -20.96 | / | -21.42 | +21.27 |

由表 4 和表 5 可以看出，以上两种理论评估方法均表明轴承箱稳定性满足要求。

尽管对轴承箱进行了稳定性相关的理论分析，但也看到这种简化方式比较简陋。首先，仅把轴承箱底板简化为两支点结构，未考虑底板与基架的面面接触；其次，未考虑轴承箱本身刚性的影响。因此，有必要对轴承箱进一步深入开展有限元分析，并对轴承箱的刚性进行研究。

## 3　轴承箱有限元分析

轴承箱分析模型包括压板、底板以及箱体。基架底面和压板底面全约束，压板与轴承箱接触、箱体底板与基架分别定义接触。横向给定轴承箱横向键位置约束，轴向给定高压侧底板端面约束。轴承箱体、基架以及压板材料均取为 ZG230-450，单元采用高阶单元，温度取轴承箱工作温度 60 ℃。

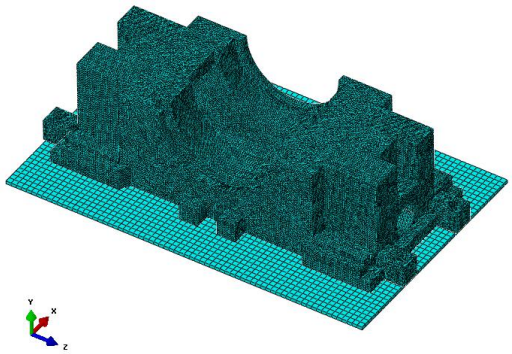


图 3　轴承箱有限元网格示意图

轴承箱的有限元分析分为两部分：

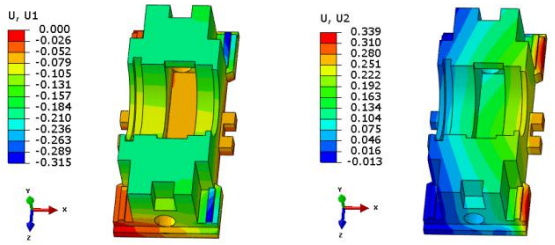
（1）空载工况、稳定工况及变工况刚度分析：考虑前、后枕座压力（汽缸及相关静子部件重量）、高/中压缸推力、轴承箱重量、转子载荷、转子推力等，分析轴承箱在稳定工况以及变工况工作状态下的刚性；

（2）轴承箱推拉键高度影响性分析：评估推拉键高度对轴承箱刚性影响。

### 3.1 轴承箱空载以及变工况性能分析

轴承箱的刚度是保证机组膨胀过程中保持顺畅的基础，尤其在变工况情况下，轴承箱的变形会直接影响动静间隙，对机组的启动运行有极大影响。为评估轴承箱的变工况性能，对空载工况、稳定工况以及变工况条件下轴承箱推拉键的轴向刚性以及底板弯曲刚性进行评估，为轴承箱的刚性设计提供参考。

空载工况分析时，仅考虑轴承箱本身自重，在推拉键位置受载，反映轴承箱受载和变形的固有特性。其余工况与理论分析轴承箱的受力状态一致。由于轴承箱主要载荷在天地向和轴向，因此主要考察轴承箱的轴向天地向、轴向变形，如图 4 所示。




（a）轴向变形　　（b）天地向变形

图 4　轴承箱变形图

从图中数据可以看出，轴承箱无论是轴向还是天地向变形一般在 0.3 mm 左右，数值较小，若以此变形来衡量刚性的优劣，则对于工程应用的指导价值有限。为此，参考刘志德等[2]对轴承座静刚度的研究思路，进行轴承箱静刚度的评估。

为评估轴承箱在变工况条件下的刚性性能，特选取如图所示的两条路径进行中压侧的刚度评估，其中路径 A 为轴向刚度路径，路径 B 为弯曲刚度路径。由于轴承箱高压侧与中压侧结构类似，这里不再对高压侧刚度进行分析。

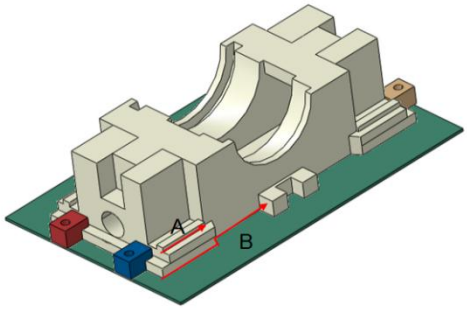



图 5　轴承箱刚度选取路径示意图

轴承箱在空载、稳定以及变工况条件下的静刚度曲线如图 6~7 所示。

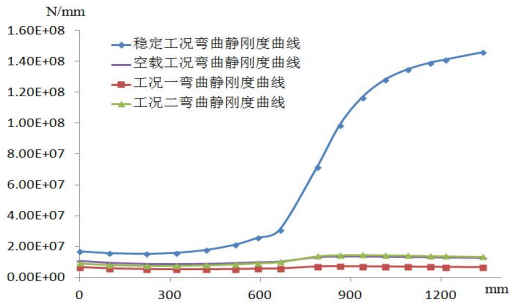



图 6　轴承箱弯曲静刚度曲线对比

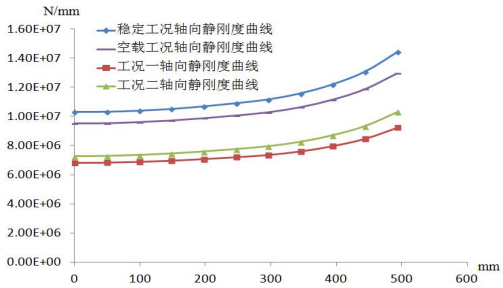



图 7　轴承箱轴向静刚度曲线对比

从图 6 和图 7 可以看出，变工况条件下，轴承

箱本身的固有刚性会发生显著变化。

由轴承箱的弯曲静刚度曲线可以看出，稳定载荷条件下轴承箱弯曲静刚度水平较高，且在越靠近中心线位置静刚度数值越高。在空载工况、工况一和工况二这三种条件下，空载和工况二的弯曲静刚度水平相差不大，略高于工况一。原因在于稳定工况下，箱体整体处于静态，轴承箱主要在承重面处受到天地向载荷，受到的轴向载荷几乎可以忽略，且越靠近中心线受这种载荷影响越小，故刚度越好，呈现明显的边界效应。

同样可以看出，稳定运行情况下推拉键处的轴向静刚度水平也比其余工况较高，其变化趋势也和弯曲刚度变化一致，越靠近中心线刚度就越高。

变工况条件下，尤其对于抽汽工况以及阀门瞬关工况，轴承箱的静刚度水平会显著降低。

为降低变工况对轴承箱刚度的影响，采取措施提高轴承箱本身的固有刚性。由前述轴承箱的理论受力可知，推拉键的高度直接影响着载荷分布以及轴承箱的刚度水平。因此，基于以上分析，对不同推拉键高度水平的轴承箱静刚度水平进行研究，为后续变工况设计提供依据。

### 3.3 推拉键高度对轴承箱刚度影响分析研究

由于空载工况反映的是轴承箱的固有特性，因此选取空载工况进行刚性评估更为合适。分别对推拉键高度 220 mm、260 mm、300 mm 进行刚度评估，结果对比如图 8 和图 9 所示。

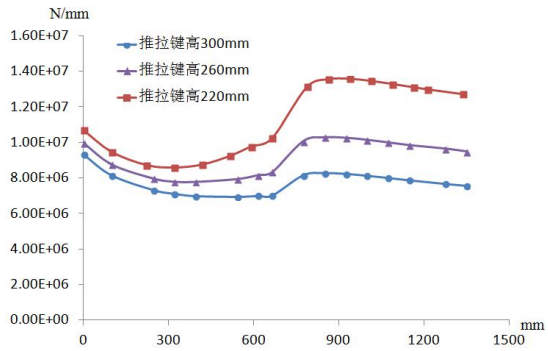



图 8　推拉键高度变化对弯曲静刚度曲线影响

从图 8 和图 9 可以看出，推拉键高度越高，弯曲刚度以及轴向刚度水平越低，远离中心线的刚度与靠近中心线的刚度差异越小。因此，在轴承箱的设计过程中，尤其对于结构明显弱于常规轴承箱的箱体，以及变工况性能要求更高的轴承箱，可以通过调整推拉键高度进行结构改进。

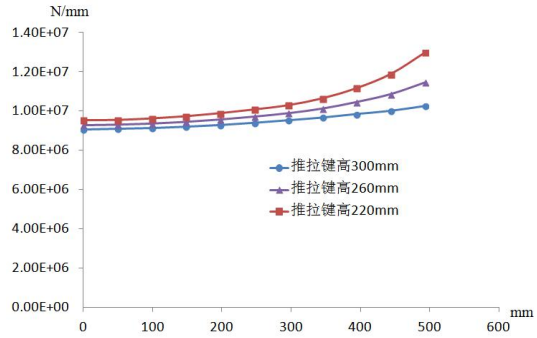



图 9　推拉键高度变化对轴向静刚度曲线影响

## 4　结语

本文通过对某大功率汽轮机滑动轴承箱的受力情况进行简化理论分析，采用两种不同方法对轴承箱的稳定工况、变工况性能进行稳定性评估；并基于有限元方法对轴承箱的空载工况、稳定工况以及变工况的刚性进行对比分析，得出以下结论：

（1）两种理论计算方法下的轴承箱变工况稳定性满足要求；

（2）与空载工况、变工况对比，稳定工况下的轴承箱弯曲静刚度和轴向静刚度水平更高，且越靠近中心线附近刚度越好，呈现明显的边界效应；

（3）变工况会导致轴承箱静刚度水平显著下降，对变工况性能要求高的轴承箱而言，调整推拉键高度可以用于轴承箱结构改进设计。

## 参考文献：

[1] 钱国浩. 200MW 汽轮机轴承箱稳定性分析与改进[J]. 东方汽轮机, 1995 (4):1-4

[2] 刘志德, 蒙俊斌, 张伟忠, 等. 600MW 直接空冷汽轮机落地轴承箱刚性分析[J]. 汽轮机技术, 2005(6):419-420

[3] 彭国伟, 刘雄, 陈铁宁, 等. 1 000 MW 汽轮机中低压轴承箱稳定性以及强度分析[J]. 东方汽轮机, 2021(2):8-11+40

[4] 姜述杰, 杨长柱, 翟栋, 等. 模态分析技术在轴承箱动力学特性改造中的应用[J]. 汽轮机技术, 2015,57(1):40-42

[5] 中国动力工程学会. 火力发电设备技术手册[M]. 机械工业出版社, 2000

# 深度调峰对汽轮机转子寿命损耗的影响及运行优化研究

祁乃斌　何江南　曹寒　马骏　陈丹　杨灵

东方电气集团东方汽轮机有限公司，四川 德阳 618000

**摘要：**电力市场对汽轮机组深度调峰和灵活性运行的要求不断提高。本文对某 660 MW 汽轮机高压转子在深度调峰工况下的瞬态温度场、应力和寿命损耗进行了计算，对比分析了改变负荷变化率、温度变化率、最低调峰负荷、主蒸汽温度降低幅度等措施对转子峰值应力的影响。基于上述分析结果，在保证转子安全性的前提下，提出了适应深度调峰和灵活性机组的优化运行方案。

**关键词：**深度调峰；汽轮机转子；寿命损耗

**中图分类号：**TK267　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）01-0059-06

# Study on the Influence of Deeply Peak Regulation on Turbine Rotor Life Loss and Operation Optimization

*QI Naibin, HE Jiangnan, CAO Han, MA Jun, CHEN Dan, YANG Ling*

( Dongfang Steam Turbine Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China )

Abstract: The requirements of the power market for deeply peak load regulation and flexible operation of steam turbine units are constantly increasing. The transient temperature field, stress and life loss of a 660MW turbine HP rotor under typical deeply peak load regulation condition were calculated, and the effects of adjusting load variation rate, temperature change rate, minimum peak regulation load and main steam temperature reduction range on the peak stress of the rotor were analyzed and compared. Based on the above results, the operation optimization scheme of the unit suitable for deeply peak load regulation and flexible operation is proposed on the premise of ensuring the safety of the rotor.

Key words: deeply peak regulation; turbine rotor; life loss

随着国家电源结构持续调整、优化，新能源装机占总装机容量的比例逐步提升。为了消纳风能、太阳能，煤电正由传统的提供电力、电量的主体电源，逐步转变为向电力系统提供可靠容量、调峰调频等辅助服务的基础性、调节性电源。

国外新能源占比较大的国家，其火电机组可实现 70 %负荷以上的调峰能力，最低稳定负荷可达 20 %~30 %额定负荷。我国在役机组锅炉最低稳燃负荷大多为额定负荷的 30 %~40 %，但从安全性方面考虑，实际运行最低负荷一般为额定负荷的 40 %以上，与国际先进水平还有较大的差距[1-2]。为了提升调峰能力，国家能源局出台了相关政策，安排一些在役机组通过灵活性改造实现深度调峰，机组不投油稳燃时纯凝工况最小技术出力预期达到 20 %~25 %额定负荷。对于新投产纯凝、抽凝机组，各地政策略有差异，但稳燃情况下最小技术出力要求不高于 20 %~30 %额定负荷。

关于深度调峰对汽轮机组的影响，主要体现在设备安全性和运行经济性两方面。机组参与深度调峰至 50%额定负荷以下，机组经济性明显降低[3]，

**收稿日期：**2023-05-10

**作者简介：**祁乃斌（1983－），男，2009 年毕业于西安交通大学热能与动力工程专业，硕士，高级工程师。现在东方电气集团东方汽轮机有限公司产品研发中心工作，主要从事转子、轴承研发工作。

文乐等人[4]通过定滑压曲线优化和配汽方式优化，对深度调峰工况下的机组性能优化进行了研究，史进渊等人[5]提出通过宽负荷通流优化和智能运维技术提升机组在调峰工况下的运行效率。对于深度调峰至 20 %工况，机组经济性大幅降低，更为重要的是如何保证机组的安全可靠性。还有研究者[6-7]研究了 40 %负荷以上调峰运行对转子安全性的影响，由于 40 %负荷以上主汽温度变化很小，对转子热应力的影响也很小。目前深度调峰至 20 %负荷对转子应力和寿命的影响研究很少。

本文以某 660 MW 超超临界机组高压转子为研究对象，结合 20 %深度调峰工况时的主蒸汽参数变化情况，采用二维轴对称模型计算了不同调峰负荷、不同变负荷速率、不同主蒸汽参数工况下转子的瞬态温度场、应力场，分析了关键部位的应力变化历程和寿命损耗，通过对比各工况下转子关键部位的峰值应力，得到了深度调峰过程中降低寿命损耗的主要控制因素。

## 1 调峰运行参数及分析模型

本文以某 660 MW 超超临界汽轮机组运行曲线为例，研究不同调峰运行工况下转子的温度场、应力场，以及对应的寿命损耗。

### 1.1 汽轮机组调峰运行曲线

对于滑压运行的汽轮机组，调节汽门全开，根据负荷大小调节进入锅炉的燃料量、空气量和给水量，使锅炉出口压力和流量随负荷升降而升降，一般为 30 %~40 %额定负荷以上主蒸汽温度不变，而汽轮机进汽压力和流量都随负荷升降而增减。目前，锅炉的负荷响应速率也是限制机组快速调峰的制约因素之一，本文中不考虑锅炉的限制，仅分析汽轮机快速负荷变化时转子的瞬态应力及寿命损耗。

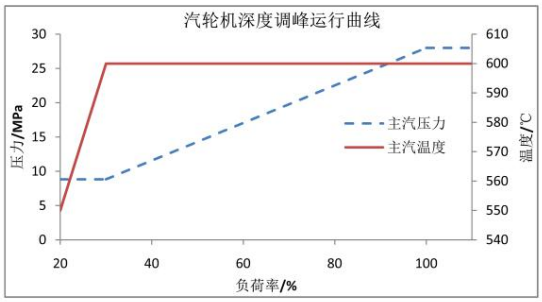



图 1 深度调峰运行时的主蒸汽压力、温度变化曲线

参考某项目配合数据，最低调峰负荷为 20 %额定负荷，此时主蒸汽温度相比 THA 工况降低约 50 ℃。根据该项目要求，深度调峰运行时的主蒸汽压力、温度变化曲线如图 1 所示。

### 1.2 高压转子分析模型

以某 660 MW 超超临界机组高压转子为研究对象，采用二维轴对称模型进行计算分析，转子自重及蒸汽压力的影响忽略不计[8]。汽轮机转子的对称轴、联轴器部分做绝热处理，轴承位置及与蒸汽接触区域按第三类热边界条件处理，换热系数根据文献[6]中的经验公式计算得到，转子材料性能数据参考文献[9]。

该转子长 6 810 mm，转子剖面图如图 2 所示。采用四边形 8 节点单元划分网格，在网格划分时对圆角等应力集中部位进行了局部网格加密，共划分了单元 16 964 个，节点 54 791 个，局部网格如图 3 所示。

图 2 某 660 MW 超超临界汽轮机组高压转子分析模型

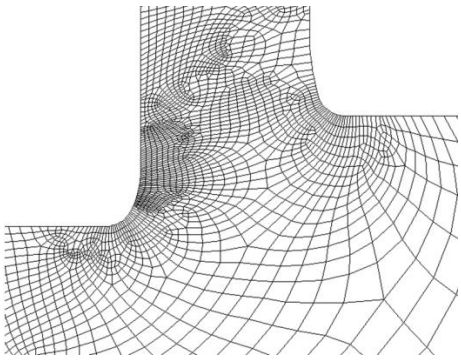


图 3 应力集中区域局部网格加密示意图

对于热-固耦合分析，分为单向耦合分析和双向耦合分析，双向耦合分析需要迭代计算，计算精度更高，但计算时间更长，有研究采用热固单、双向耦合模型对汽轮机转子瞬态温度场和应力场进行了对比分析，得到冷态启动时双向耦合模型最大热应力值比单向模型计算值小 4 %的结论[10]。本文主要目的是对比不同负荷变动工况下的峰值应力，计算量大，且主要关注相对变化量，为了缩短计算时间本文采用单向耦合模型进行计算。本文中除特别说明外应力值为 von-Mises 等效应力。

## 2 运行优化前的应力及寿命损耗分析

本分析通过计算转子的瞬态温度场和应力场，确定关键部位的应力变化历程，为后续的优化分析提供对照标准。

根据本机组滑参数运行曲线，在 30 %负荷以上主蒸汽温度不变。在从高负荷降低到 30 %负荷的过程中，根据热力计算数据，通流内温度有小幅升高，对应力和寿命的影响不大。为了分析深度调峰对转子应力和寿命损耗的影响，本文以 50 %负荷稳态工况为初始状态，进行降负荷、升负荷瞬态温度场和应力场分析，负荷变化率为 5 %额定负荷/分钟。负荷、主汽温度、压力变化曲线如图 4 所示。

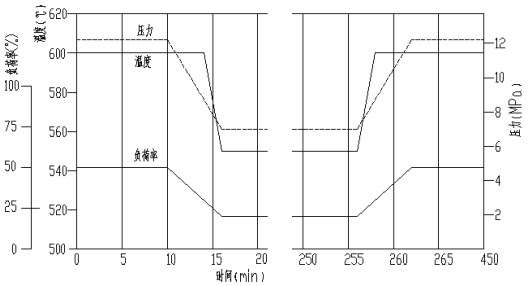



图 4　20 %负荷深度调峰运行曲线

### 2.1 瞬态温度场分析

50 %负荷稳态运行时的温度场如图 5 所示，一级轮盘沿径向的温度梯度较小。负荷降低到 20 %负荷后，转子表面被快速冷却，但转子中心温度降低较慢，转子中心温度高于表面温度，转子表面与中心的温差先快速增大后逐渐减小。在 20 %负荷运行 1 小时后的温度场如图 6 所示。在 20 %负荷运行约 4 小时后，转子温度场趋于稳定，一级轮盘沿径向的温度梯度降低到较低水平。在升负荷过程中，转子表面被加热，转子表面与中心的温差绝对值表现为先快速增大，后逐渐减小。一级轮盘表面温度、中心温度及温差随时间的变化曲线如图 7 所示。

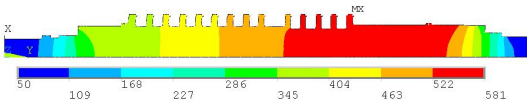



图 5　50 %负荷稳态温度场

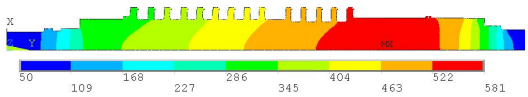



图 6　20 %负荷运行 1 小时的温度场

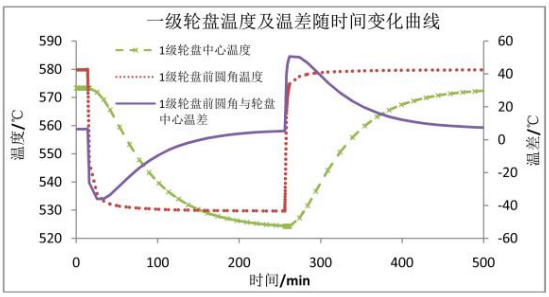



图 7　第一级轮盘表面与中心温度变化曲线

### 2.2 瞬态应力场分析

50 %负荷稳态运行时的应力云图如图 8 所示，一级轮盘后圆角处的最大 von-Mises 应力是 75.6 MPa。在降负荷到 20 %负荷运行约 9 min 后，一级轮盘后圆角处出现最大应力 239 MPa，此时的应力云图如图 9 所示，之后应力逐步降低。在升负荷过程中，一级轮盘后圆角处出现最大应力为 172 MPa，小于降负荷过程中的最大应力。在深度调峰运行过程中，高温段转子的损伤累积速度要远高于低温段转子[11]，主要是由于瞬态变化过程中，高温区域的热应力更大，因此提取了温度较高的前两级轮盘最大应力部位作为观测点，调峰过程中各点的瞬态应力随时间的变化曲线如图 10 所示。

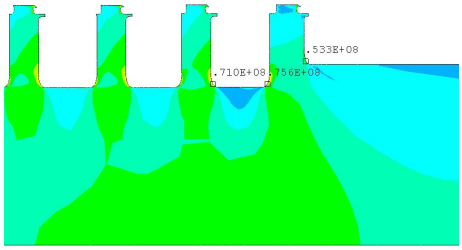



图 8　50 %负荷稳态运行时的应力云图

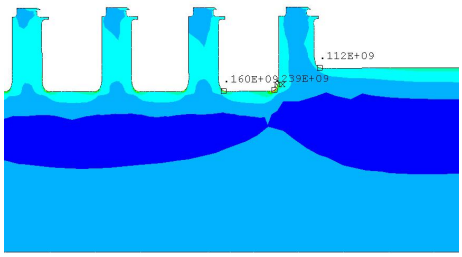



图 9　降至 20 %负荷运行 9 min 时的应力云图

对于本文分析的转子，深度调峰过程中轮盘最大应力出现在第 1 级轮盘后圆角处，后续分析重点对 1 级轮盘前后圆角的应力进行比较。

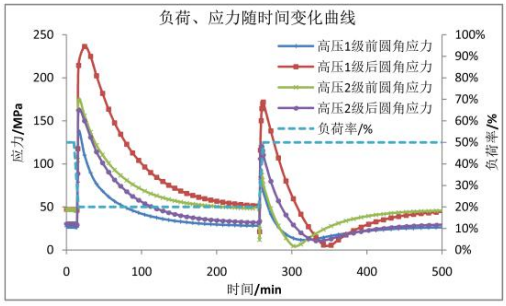
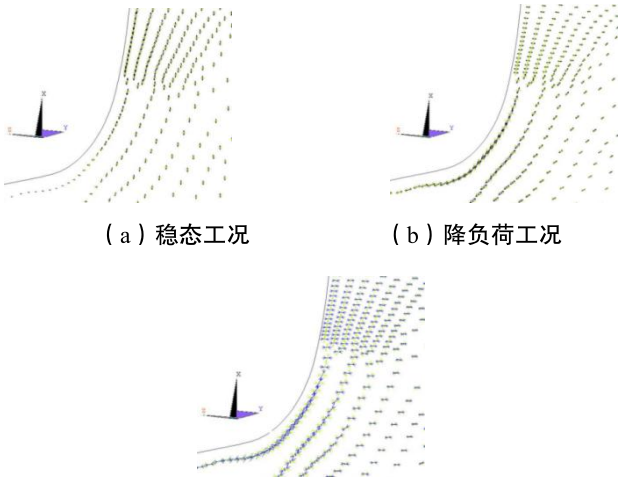



图 10　前 2 级轮盘前后圆角处 von-Mises 应力随时间变化曲线

## 2.3 应力变化规律分析

稳态工况下，转子的热应力较小，应力主要是离心力引起的，在轮盘圆角处最大主应力为拉应力，1 级轮盘后圆角处的主应力矢量图见图 11（a）。降负荷过程中，转子表面温度先降低，中心温度高于表面温度，热应力在转子表面表现为拉应力，热应力最大时的主应力矢量图如图 11（b）所示。在降负荷过程中，热应力和机械应力都为拉应力，合成应力高于机械应力。随着转子径向温度梯度先增大后减小，热应力绝对值也先升高后降低。

从低负荷升到高负荷过程中，转子表面温度先升高，中心温度低于表面温度，热应力在转子表面表现为压应力，合成应力变化趋势为：减小—增大—减小，如图 10 中所示，热应力绝对值最大时的主应力矢量图如图 11（c）所示。



（a）稳态工况　（b）降负荷工况

（c）升负荷工况

图 11　第 1 级轮盘后圆角处的主应力矢量图

降负荷和升负荷过程中 1 级轮盘后圆角处的最大、最小主应力随负荷变化曲线如图 12 所示。

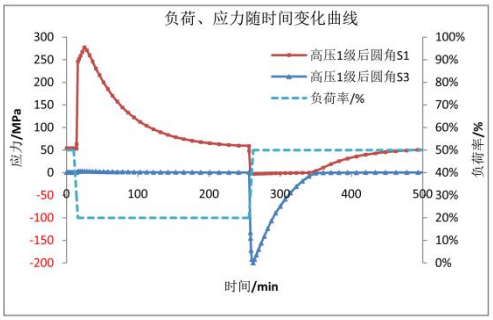



图 12　1 级轮盘后圆角处的最大、最小主应力随负荷变化曲线

## 2.4 寿命损耗分析

转子 1 级轮盘圆角处的应力为多轴应力状态，按 von-Mises 公式计算得到的等效应力结果均为正值，而工作在多轴应力状态的低周疲劳裂纹萌生寿命的预测，构成非对称低周疲劳循环，就需要确定等效应力的正负号[12]。通过前述分析，降负荷过程中出现的最大合成应力值要大于升负荷过程，且升降负荷过程中的等效应力正负号发生变化，寿命分析时将降负荷和升负荷按一个完整的循环考虑，并将降负荷过程中的应力峰值 239 MPa 作为应力循环的幅值，计算结果将偏于安全。

根据文献[13]中介绍的局部应力应变法，并对应变幅取 1.5 倍的安全系数[14]，计算转子最大应力处的低周疲劳寿命损耗，得到一次完整深度调峰过程的寿命损耗约为 0.001 8 %。

# 3 运行曲线优化对转子峰值应力的影响

在结构一定的情况下，影响高温部件峰值应力和寿命损耗大小的因素包括温度变化量和温度变化率。温度变化率相同的情况下，温度变化量越大，峰值应力越大；温度变化量相同的情况下，温度变化率越大，峰值应力越大。因此，从转子安全性的角度出发，可以通过减小温度变化量和降低温度变化率的方法实现峰值应力的降低。

## 3.1 相同调峰负荷，不同变负荷率下的应力分析

在汽轮机运行控制中，减小变负荷率是控制汽轮机高温部件热应力的有效手段，实质上是通过降低温度变化率，减小部件内部温度梯度，从而降低热应力。

本分析将变负荷率分别调整为 3 %额定负荷/分钟和 1.5 %额定负荷/分钟，从 50 %负荷降到 20 %负荷的时间从 6 分钟分别延长到 10 分钟和 20 分钟。

计算得到应力随时间变化曲线如图 13 和图 14 所示。

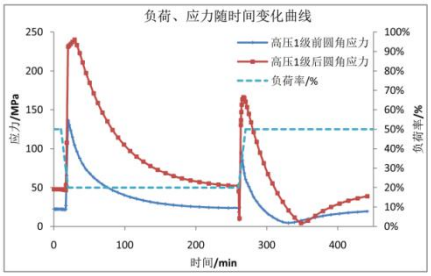



图 13　变负荷率 3 %　额定负荷/分钟时的应力变化曲线

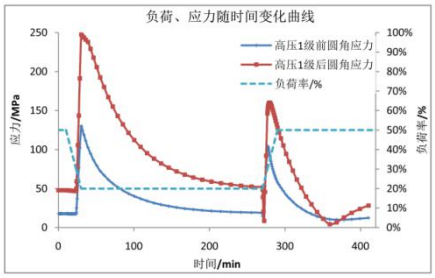



图 14　变负荷率 1.5 %额定负荷/分钟时的应力变化曲线

从上述分析可以看出，如果将变负荷率从 5 %调整到 3 %和 1.5 %，对峰值应力的影响很小，主要原因是温度变化率仍然很大，三种变负荷率对应的温度变化率分别为 25 ℃/min，15 ℃/min 和 7.5 ℃/min。为了验证温度变化率对峰值应力的影响，计算了变负荷率为 0.2 %额定负荷/分钟时的应力变化曲线（仅降低 30 %~20 %之间的变负荷率，30 %负荷以上仍为 5 %/min），对应的温度变化率为 1 ℃/min。计算得到应力随时间变化曲线如图 15 所示。

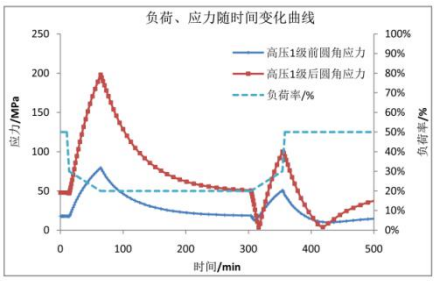



图 15　变负荷率 0.2 %额定负荷/分钟时的应力变化曲线

从变负荷率 0.2 %额定负荷/分钟时的计算结果可以看出，相比变负荷率 5 %额定负荷/分钟工况，峰值应力降到 198 MPa，下降了 41 MPa，但降负荷时间从 6 min 增加到了 54 min。如果温度降低值确定了，降低峰值应力的主要手段就是降低温度变化率，相应的也限制了负荷变化率，而且温度变化率降低到足够低才能起到降低应力的目的。

### 3.2 优化运行曲线对寿命损耗的影响

为了降低温度变化率，考虑优化滑参数运行曲线，原运行曲线中 30 %负荷以下定压、变温度运行，在压力变化曲线不变的情况下，分析蒸汽温度从 40 %和 50 %负荷开始降低，这样可以增加温度变化时间，降低温度变化率，调整后的运行曲线如图 16 所示。计算得到应力随时间变化曲线如图 17、图 18 所示。

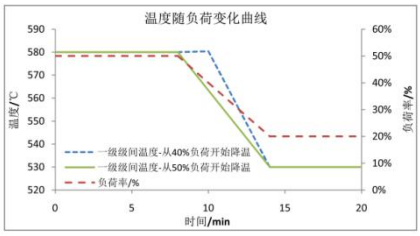



图 16　蒸汽温度从 40 %和 50 %负荷开始变化的运行曲线

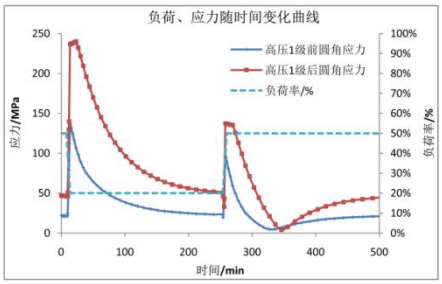



图 17　主蒸汽温度从 40 %负荷开始变化的应力变化曲线

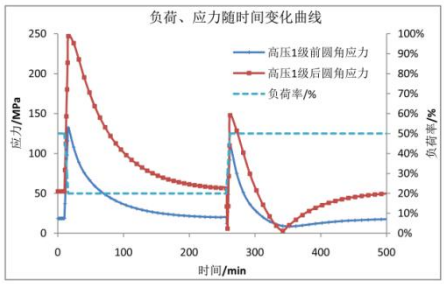



图 18　主蒸汽温度从 50 %负荷开始变化的应力变化曲线

从分析结果来看，变负荷率不变，仅改变开始降温的负荷点对于峰值应力的影响很小，其原因还是温度变化率较高。

### 3.3 相同变负荷率下，不同调峰负荷对寿命损耗的影响

深度调峰过程中，主汽温度与最低调峰负荷有关，因此为了减小调峰过程中主汽温度的降低幅度，可以限制调峰运行时的最低负荷。根据滑压运行曲线，降负荷到 30 %额定负荷，主汽温度不降低，根据热力计算，降负荷过程中通流内温度有小幅升高，对转子的应力影响不大，不再进行有限元分析。本

节假设调峰运行到 25 %额定负荷，相应的主汽温度下降幅度也减小一半，即主汽温度降低 25 ℃，变负荷率保持 5 %额定负荷/分钟不变。计算得到应力随时间变化曲线如图 19 所示。

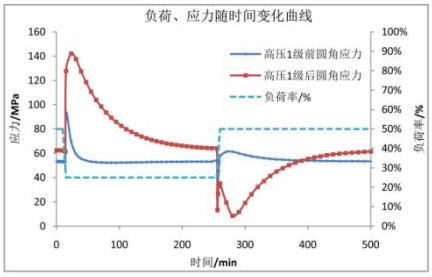



图 19　调峰到 25%负荷的应力变化曲线

从图 19 可以看出，最低调峰负荷为 25 %时，峰值应力降低到 142 MPa，相比最低调峰负荷为 20 %时，峰值应力降低了 97 MPa。峰值应力降低的主要原因是温度下降幅度减小了。

### 3.4 优化运行参数-减小调峰运行时的温度降低幅度

减小主蒸汽温度降低幅度和温度变化率都能降低转子峰值应力，但从前述分析可以看出，降低温度变化率的影响较弱，若要通过降低温度变化率降低峰值应力，温度变化率和负荷变化率都将大幅降低，限制了机组的灵活运行。减小主蒸汽温度降低幅度对转子峰值应力的影响较大，可以在保证负荷变化率不变的情况下大幅降低峰值应力。

仍以最低调峰负荷 20 %额定负荷为目标，负荷变动率保持 5 %额定负荷/分钟，将 20 %额定负荷时的主汽温度从 550 ℃提高到 575 ℃，计算得到应力随时间变化曲线如图 20 所示。

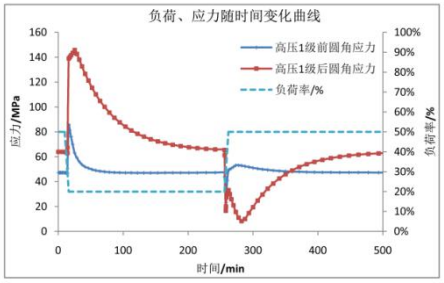



图 20　优化运行参数后的应力变化曲线

通过上述分析，减小主汽温度下降幅度后，在不降低变负荷率的情况下，转子的峰值应力下降明显，最大应力为 145.8 MPa，寿命损耗可以忽略不计。

在保证转子安全的前提下，能满足汽轮机组灵活性运行的要求。

## 4 结语

降低转子峰值应力的主要措施包括降低温度变化率和减小温度降低幅度。对于变负荷速率要求较高的机组，若要显著降低转子应力需要大幅降低温度变化率，影响机组的调峰速度。

减小主蒸汽温度降低幅度，可以在保证负荷变化率不变的情况下有效降低峰值应力，在满足转子安全性的前提下，保证机组的灵活性运行。

为了满足低调峰负荷和高调峰速度的需求，从降低转子峰值应力、减小转子寿命损耗的角度考虑，减小深度调峰过程中主蒸汽温度的降低幅度是保证转子运行安全的最有效措施。

## 参考文献：

[1] 张广才, 周科，鲁芬, 等. 燃煤机组深度调峰技术探讨[J]. 热力发电, 2017, 46(9):17-23

[2] 刘津. 火电机组深度调峰辅助服务报价研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021

[3] 吴瑞康, 华敏, 秦攀, 等. 燃煤机组深度调峰对汽轮机设备的影响[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 89-94

[4] 文乐, 薛志恒, 杨新民. 深度调峰下汽轮机的定滑压曲线试验与优化[J]. 热能动力工程, 2019, 34(11): 21-26

[5] 史进渊, 李军, 刘霞, 等. 我国大型汽轮机技术研究进展与展望[J]. 动力工程学报, 2022, 42(6): 498-506

[6] 王家鋆. 660 MW 汽轮机高中压模块灵活性调峰能力提升研究[D]. 上海: 上海发电设备成套设计研究院, 2020

[7] 韩彦广, 黄来. 600 MW 超临界汽轮机调峰运行过程中高中压转子疲劳寿命分析[J]. 汽轮机技术, 2012,54(1): 59-63

[8] 陈旭, 岳亚楠, 姜伟, 等. 核电机组孤岛运行汽轮机转子应力仿真分析[J]. 热力发电, 2022, 51(12): 149-156

[9] 孙伟, 马骏, 祁乃斌, 等. 某型汽轮机超高压转子启动过程温度场及应力场分析[J]. 东方电气评论, 2015 (113): 21-24

[10] 袁建宝, 徐自力, 李溶江, 等. 基于热固双向耦合模型的二次再热超超临界汽轮机超高压转子热应力研究[J]. 东方汽轮机, 2016(141): 15-19

[11] 洪辉. 灵活运行工况下汽轮机转子结构强度与损伤分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2020

[12] 史进源, 杨宇, 汪勇, 等. 大型发电机组可靠性预测与安全服役的理论及方法[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014

[13] 李舜酩. 机械疲劳与可靠性设计[M]. 北京: 科学出版社, 2007

[14] 中国动力工程协会. 火力发电设备技术手册: 第 2 卷: 汽轮机[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007

# 华龙一号核电机组的供热方案探讨

唐丽丽　赖强

东方电气集团东方汽轮机有限公司，四川 德阳 618000

**摘要：**文章分析了核电机组供热特点。针对华龙一号汽轮机组进行了两种不同供热方案的设计，对比分析了两种供热方案下汽轮机机组的出力，不同负荷下供热量和供热压力的影响等，从而针对不同需求推荐相应的供热方案。

**关键字：**华龙一号；核电机组；汽轮机

**中图分类号：**TM623　　**文献标示码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）01-0065-03

## Discussion on the Heating Scheme of Hualong-1 Nuclear Power Unit

*TANG Lili, LAI Qiang*

( Dongfang Turbine Co.,Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China )

Abstract:The article analyzes the heating characteristics of nuclear power units. Two different heating schemes were designed for the Hualong-1 steam turbine unit, and the output of the steam turbine unit under the two heating schemes, as well as the impact of heating volume and heating pressure under different loads, were compared and analyzed. Therefore, corresponding heating schemes were recommended for different needs.

Key words: hualong-1; nuclear power unit; steam turbine

随着核能发电技术的不断成熟和火电机组热电联产技术的大量应用，这几年大型商用核电的热电联产被不断研究，以期实现能源的综合利用，并为发电领域的低碳排放、实现“3060”碳达峰碳中和目标作出贡献。

一般情况下，核电汽轮机组在设计会有少量的供热供暖能力，比如辽宁红沿河核电站的机组。最近几年，核电汽轮机有的通过改造扩大其供热供暖能力，有的新机设计时就考虑设计为大供热量机组。2021 年 11 月 9 日，国家能源核能供热商用示范工程二期项目在山东省海阳市正式投用，海阳市整个城区将全部实现核能供暖。

2021 年 1 月 30 日，全球首堆华龙一号福清核电 5 号机组的成功商运；2022 年 3 月 25 日，福清核电 6 号机组正式具备商运条件，我国自主研发的第三代压水堆核电站——华龙一号示范工程的全面投运。随着示范成功，对华龙一号核电汽轮机机组的供热供暖需求，已经成为新的配置要求，而且多以大供热量为主。

## 1　核电汽轮机供热特点

对于大型核电站来说，从汽轮机发电机组中抽取相应的蒸汽作为热源进行供热、供暖，即热电联产形式最合适。核电汽轮机供热有以下特点：

（1）供热量大。相对于火电机组来说，由于大型商用核电汽轮机的进汽参数等与普通火电汽轮机不同，其汽轮机进汽量比火电机组大很多，从汽轮机抽取的供热蒸汽量也可以比火电机组大，目前在研的最大抽汽量约为 3 000 t/h。

（2）清洁。相对于化石能源来说，核能没有二氧化碳、氮氧化物、二氧化硫的排放。

（3）稳定。相对于风、光、水等清洁能源来说，核能发电机组热负荷稳定，不受天气等自然条件的影响。

**收稿日期：**2023-06-27

**作者简介：**唐丽丽 (1982－)，女，2008 年毕业于重庆大学动力工程及工程热物理专业，硕士研究生，高级工程师。现工作于东方汽轮机有限公司，主要从事汽轮机总体和热力系统设计研究工作。邮箱：tanglili@dongfang.com

（4）高效。核电热电联产属于能量的梯级利用，增加换热回路后实现热量外送。

## 2 华龙一号汽轮机组的供热设计

东方汽轮机有限公司的华龙一号汽轮发电机组的机组型式：三缸四排汽，由一个高压缸，一个中压缸（高中压合缸）和两个低压缸组成。回热系统由 2 个高压加热器，1 个除氧器（除氧器采用滑压运行），4 个低压加热器组成，为常规配置。根据供暖参数的要求可选择在汽轮机的主汽(汽轮机高压进汽阀门前)、高排、再热热段（汽轮机中压进汽阀门前）、中排等位置进行抽汽。由于主蒸汽和再热热段蒸汽温度较高，这两段抽汽可用于电厂内用汽和工业用汽；高排和中排的蒸汽温度较低，这两段抽汽可用于居民供暖。

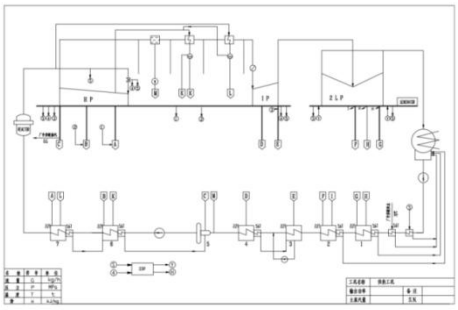


图 1 高排供暖抽汽时的原则性热力系统图

由于电厂内用汽或其他工业用汽的用汽量一般不大，现主要比较居民供暖高排抽汽和中排抽汽的不同经济性。按常规，供热回水温度为 70 ℃，根据热量优选其回水位置在一号低加进口前。图 1 和图 2 分别为高排和中排供暖抽汽时的原则性热力系统图。

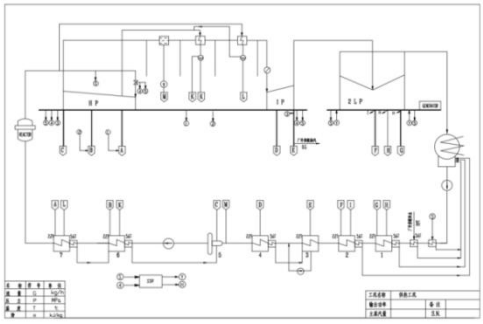


图 2 中排供暖抽汽时的原则性热力系统图

两种系统的设计工况的出力一致，进汽参数、背压等边界条件、回热系统、阀杆轴封漏汽系统及自密封系统一致。本文以额定 600 MW 的供暖热量，回水温度为 70 ℃；对外供热时，一般考虑换热参数和管道压损，对供热抽汽的压力有要求，本文以常规供热压力 0.27 Mpa 为供热抽汽压力下限进行核算。按照以上边界条件，计算得出机组在不同核岛负荷时的汽轮机的特征参数如表 1 所示。

表 1 供热工况下不同核岛负荷时汽轮机特征参数

| 供热方式 | \ | 高排 | | | | 中排 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 核岛负荷比 | \ | 100 % | 90 % | 85 % | 80 % | 100 % | 90 % | 85 % | 80 % |
| 主汽流量 | kg/h | 6 419.5 | 5 687.5 | 5 330.8 | 4 974.1 | 6 419.5 | 5 687.5 | 5 330.8 | 4 974.1 |
| 汽机功率变化 | MW | +269.9 | +135 | +67.9 | 0（基准） | +299 | +164.4 | +107 | +62.2 |
| 供热压力 | Mpa.a | 0.88 | 0.763 | 0.706 | 0.648 | 0.329 | 0.283 | 0.27 | 0.27 |
| 供热焓 | kJ/kg | 2 470.3 | 2 467.2 | 2 465.5 | 2 463.1 | 2 757.4 | 2 754 | 2 756.9 | 2 767.5 |
| 供热抽汽量 | t/h | 992.1 | 993.5 | 994.3 | 995.3 | 876.5 | 877.76 | 800 | 620 |
| 回水温度 | ℃ | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 |
| 供热热量 | MW | 600 | 600 | 600 | 600 | 600 | 600 | 547.5 | 426.2 |

注：汽机功率变化以 80 %TMCR 高排供热热量 600 MW 的汽轮机出力为基准。

## 3 华龙一号汽轮机组的不同供热方案结果分析

根据以上计算数据，现将不同核岛负荷时，不同供热方案汽轮机机组供热工况的经济性、供热压力和供热量进行对比分析。

### 3.1 不同供热方案的经济性

以高排额定供热 600 MW，80 %TMCR 时汽轮机的出力为基准，其他工况的出力均高于该工况。由图 3 可见，中排供热方案的出力在各工况均高于高排供热方案，拐点为降低供热量的影响。在拐点工况及以上，两种方案均能满足 600 MW 供热，中排供热方案在这些工况出力比高排供热方案高约

30 MW，而高排供热方案始终能满足 600 MW 的供热量。若机组负荷比较稳定或长期在高负荷供热，在低负荷供热量需求降低，可考虑中排供热方案，经济性更优；若机组热量要求一直较高，不随负荷变化，推荐高排供热方案，能满足要求。

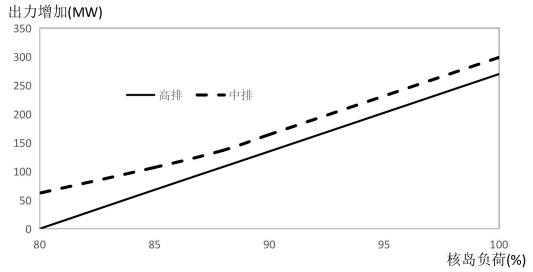



图 3 不同供热位置供机组出力对比

### 3.2 不同负荷的供热压力

高排抽汽位置抽取的蒸汽压力很高，在 100 %TMCR 高排供热抽汽工况时，满足 600 MW 供热抽汽时，供热压力仍然高达 0.88 Mpa，若要满足 0.27 Mpa 的供热压力，抽取的蒸汽需要减压后才能满足。在 53 %TMCR 以上，供热压力满足 0.27 Mpa，压力范围从 0.27 Mpa~0.88 Mpa,抽取的供热蒸汽压力波动范围较大。高排、中排不同供热位置供热压力对比见图 4。

因经过再热换热和中压缸做功，中排蒸汽参数较高排低得多。中排抽汽供热时，100 %TMCR 供热抽汽工况满足 600 MW 供热抽汽时，供热压力为 0.329 Mpa。随着核岛负荷的降低，供热蒸汽压力降低，要保证额定 0.27 Mpa 的供热压力，有两种方式：①降低供热抽汽量；②中排设置蝶阀，参调供热压力。因核电机组的特点，中排容积流量比火电机组大，蝶阀尺寸要比火电机组同类型的蝶阀大，布置位置需设计论证，在此不再赘述。

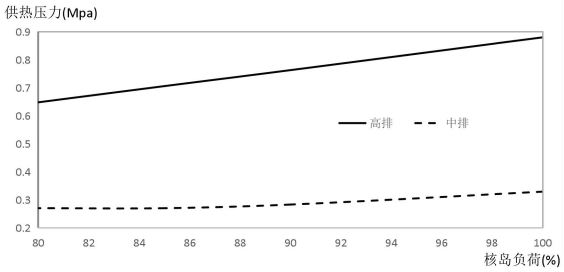



图 4 不同供热位置供热压力对比

### 3.3 不同负荷的供热量

满足 0.27 Mpa 额定供热压力时，高排抽汽位置抽取的蒸汽在拐点负荷以上基本能满足额定 600 MW 的供热热量，见图 3；中排供热时若要保证 600 MW 的供热需求，在中排没有安装供热蝶阀的前提下，需保证机组运行在 88 %负荷以上，见图 5。图 6 为满足 0.27 Mpa 供热压力、供热抽汽不可调时，不同供热位置供热抽汽量在不同负荷的变化。若中排供热方案同时加上中排按照供热蝶阀，则机组供热负荷基本不受限制。

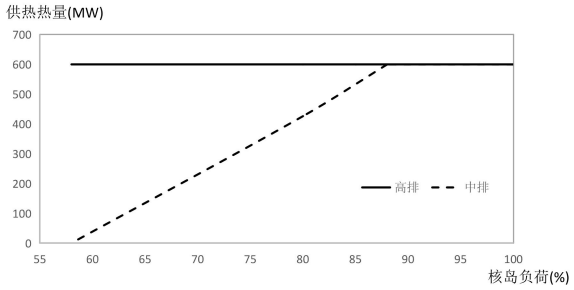



图 5 不同供热位置供热热量对比

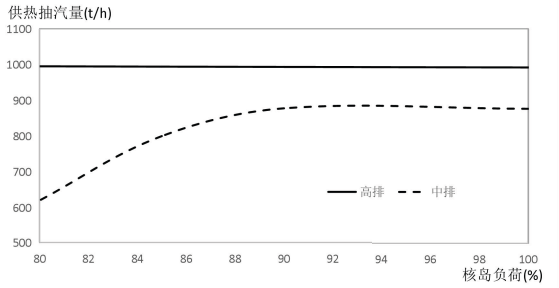



图 6 不同供热位置供热抽汽量对比

## 4 结语

核电作为绿色清洁能源，通过热电联产形式供热稳定、高效。针对华龙一号机组，其供热量流量远大于同功率等级的火电机组。经过对比计算，本文分析了在不同核岛负荷下汽轮机机组的出力、供热压力和供热量的变化情况。由分析可知，在高负荷工况，中排供热机组出力高于高排供热机组，经济性更优；高排供热更适用于 60 %~85 %TMCR 部分负荷工况也要满足大供热量和额定供热压力的情况；中排供热方案可通过加装蝶阀的方式满足供热量大和供热压力的要求。

## 参考文献：

[1] 洪安尧, 卫栋梁, 段艳雄, 等. 双抽汽轮机压力级最佳组合方式探讨[J]. 东方汽轮机, 2022, (4):33-35

[2] 田志强, 罗方, 薛军, 等. 基于优化能级匹配的高效热电联产机型技术研究[J]. 东方汽轮机, 2022, (2):38-41

[3] 卫栋梁, 李曦滨, 张小波, 等. 东方 1 000 MW～1 800 MW 半转速核电汽轮机的热力设计特点[J]. 东方汽轮机, 2009, (S1):15-19

# 核能综合利用的理论现状及发展前景探讨

苏宏[1] 陈新[2]

1. 东方电气股份有限公司，成都 611731；2. 东方电气集团东方汽轮机有限公司，四川 德阳 618000

**摘要：**在基础能源的核能领域，核能综合利用已成为核能行业的热门主题，在双碳要求下中国核电综合利用的前景广阔。核能综合利用，主要针对核能供暖、核能供汽、核能制氢及核能制淡等方面，开展具有市场竞争力的可行性方案和规划。本文将对核能综合利用主要技术方向的现状和前景进行探讨，提出对核能新领域的期待。

**关键词：**核能综合利用；核能供暖；核能供汽；核能制氢

**中图分类号：**TM623 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-9006（2024）01-0068-06

# Discussion On the Status and Prospect of Comprehensive Utilization of Nuclear Energy

*SU Hong*[1], *CHEN Xin*[2]

(1. DongFang Electric Co., Ltd., 611731, Chengdu, China; 2. DongFang Turbine Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China)

Abstract: In the field of nuclear energy, which is a basic energy source, the comprehensive utilization of nuclear energy has become a popular theme in the nuclear energy industry, and China's comprehensive utilization of nuclear power has a bright future under the dual-carbon requirement. The comprehensive utilization of nuclear energy mainly focuses on nuclear energy heating, nuclear energy gas supply, nuclear energy hydrogen production and nuclear energy desalination, etc., and carries out feasible programs and plans with market competitiveness. In this paper, we will discuss the current status and prospects of the main technical directions of the comprehensive utilization of nuclear energy, and put forward our expectations for the new field of nuclear energy.

Keywords: comprehensive utilization of nuclear energy; nuclear heating; nuclear steam supply; nuclear hydrogen production

截至2022年底，全球有33个国家和地区共运行422台核电机组，18个国家在建57台核电机组，根据统计在11个国家累计有69台核电机组采取了核能区域供暖、工业供热、海水淡化等核能综合利用。在中国大陆，截止2023年7月底共有85台核电机组，其中在运机组55台，在建机组30台，在建规模居世界第一，总机组数量居世界第二。鉴于中共中央国务院《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的实施意见》和《国务院关于印发2030年前碳达峰行动方案的通知》都明确指出积极安全有序发展核电、积极稳妥开展核能供暖等综合利用。党的二十大报告进一步提出“加快规划建设新型能源体系”，并再次强调“积极安全有序发展核电”。因此在碳达峰碳中和目标下，要求中国核能发展不仅仅是用于发电，还要考虑低碳转型的多元化应用，例如核能供暖、供汽、制氢、海水淡化等。

**收稿日期：**2023-08-29

**作者简介：**苏宏（1974－），女，1996年毕业于电子科技大学本科，高级工程师，现工作于东方电气股份有限公司核能事业部；

陈新（1987－），男，2009年毕业于华中科技大学本科，高级工程师，现工作于东方电气集团东方汽轮机有限公司产品研发中心，从事核电汽轮机及其辅助系统设计工作。

## 1 核能综合利用现状

### 1.1 核能发电

自 1991 年我国大陆第一座核电站秦山核电站建成投运，截止 2023 年 4 月，我国运行装机容量为 5 699 万千瓦，在建总装机容量约为 2 409 万千瓦，核电累计发电量超过 3 万亿千瓦时，核电安全运行业绩始终保持国际先进水平，减少燃烧标准煤约 10 亿吨，减排二氧化碳约 25 亿吨。中国核电核能发电为保障电力供应安全和推动降碳减排作出了突出的贡献。

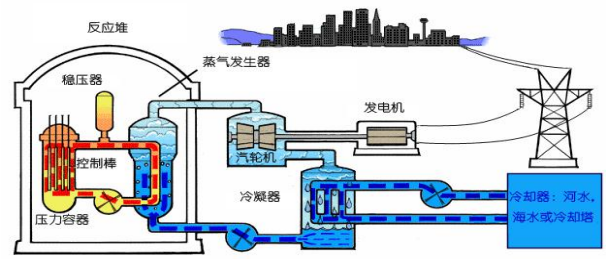



图 1 核能发电示意图

### 1.2 核能供暖

核能供暖是从核电机组二回路汽轮机高压缸排汽管道、再热蒸汽管道、中压缸排汽管道上抽汽适量蒸汽作为加热汽源至供热首站，对热网回水进行加热，与核电站外换热站进行多次换热，再通过供热管网传递到千家万户。整个过程中，只发生了蒸汽加热水和水加热水两个步骤，每个回路间进行热量的传递，没有直接接触水的热量转换，因此也不会有放射性物质进入暖气管道。

国外核能供暖最早是 20 世纪 60 年代开始，瑞典原型核动力反应堆 Agestas 是世界上第一个民用核能供暖的核电项目，目前国际上投运的 400 多台核电机组，有 40 多台核电机组进行了核能供暖，并且采用热电联产方式，验证了核能供暖是安全的、有效的和可靠的。

目前国内的核能供暖在秦山、红沿河、海阳等核电厂均实现了不同热负荷规模的供暖商业投运，整体运行稳定，安全性及用热品质高。

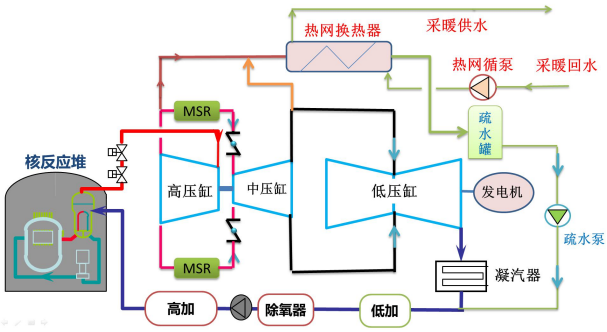



图 2 核能供暖示意图

表 1 国外参与核能供暖的部分核电站

| 国别 | 核电机组 | 投产时间 | 类型 | 功率 Mwe | 输热功率 MWth |
|---|---|---|---|---|---|
| 瑞士 | Beznau-1,2 | 1969-1971 | PWR | 365 | 2×80 |
| 俄罗斯 | Novovoronezh-3,4 | 1972 | PWR/VVER | 2×385 | 2×33 |
| 俄罗斯 | Kola-1-4 | 1973-1984 | PWR/VVER | 4×410 | 4×25 |
| 俄罗斯 | Kursk-2-4 | 1979-1986 | RBMK | 3×925 | 3×175 |
| 乌克兰 | Rovno-1.2 | 1981-1982 | PWR/VVER | 950 | 2×58 |
| 匈牙利 | Paks-2,3,4 | 1983 | PWR/VVER | 3×433 | 3×30 |
| 斯洛伐克 | Bohunice-34 | 1985 | PWR/VVER | 2×365 | 4×240 |
| 俄罗斯 | Smolensk-1.2 | 1983-1990 | RBMK | 2×410 | 2×173 |
| 俄罗斯 | Balakovo-1-4 | 1986-1993 | PWR/VVER | 4×950 | 4×200 |
| 俄罗斯 | Kalinin-1.2 | 1985-1987 | PWR | 2×950 | 2×80 |
| 保加利亚 | Kozloduy-5,6 | 1987 | PWR/VVER | 2×953 | 2×20 |
| 罗马尼亚 | Cernavoda-1 | 1996 | HWR/CANDU-6 | 660 | 47 |
| 匈牙利 | Paks | 在建 | PWR/VVER | 2×1 250 | 300 t/h |
| 芬兰 | Hanhikivi | 在建 | PWR/VVER | 2×1 250 | 76 t/h |
| 土耳其 | Akkuyu | 在建 | PWR/VVER | 2×1 250 | 170 t/h |
| 埃及 | EI Dabaa | 在建 | PWR/VVER | 2×1 250 | 120 t/h |

表 2 国内核能供暖核电站

| 核电机组 | 投产时间 | 类型 | 功率 Mwe | 输热情况 MW |
|---|---|---|---|---|
| 清华低温试验堆 | 1989 年 | 池式研究堆 | 50 W | 5 MW |
| 秦山二期 | 2013 年 | 660 MW | 2×660 | 2021 年一期 50 MW 投产<br>2022 年二期 150 MW 建设 |
| 海阳一期 | 2018 年 | CAP1000 | 2×1 250 | 2019 年一期 31.5 MW 投产<br>2021 年二期 202.5 MW 投产<br>2023 年三期 900 MW 建设 |
| 海阳二期 | 在建 | CAP1000 | 2×1 250 | 2×900 |
| 红沿河 1-2 | 2013 年 | CPR1000 | 2×1 000 | 2×55 |
| 红沿河 3-4 | 2015 年 | CPR1000 | 2×1 000 | 2×653 |
| 红沿河 5-6 | 2021 年 | CPR1000 | 2×1 000 | 2×653 |
| 华能石岛湾扩建 | 在建 | 华龙一号 | 2×1 200 | 厂内 45 MW，厂外 380 MW |
| 徐大堡一期 | 在建 | CAP1000 | 2×1 250 | 2×215 |
| 石岛湾 1 号 | 在建 | 国和一号 | 1×1 520 | 1×200 |
| 石岛湾 2 号 | 在建 | 国和一号 | 1×1 520 | 1×568 |

### 1.3 核能供汽

核能供汽是从核岛二回路的主蒸汽联箱抽取适量蒸汽作为加热汽源，通过蒸汽转换器生产三回路饱和蒸汽，再通过蒸汽再热用主蒸汽将其加热到过热蒸汽外供，加热蒸汽的疏水排入相应给水加热器或除氧器。二回路抽取的蒸汽经过多级换热，通过工业用汽管线将热量传递至石油化工或工业园区用户端。

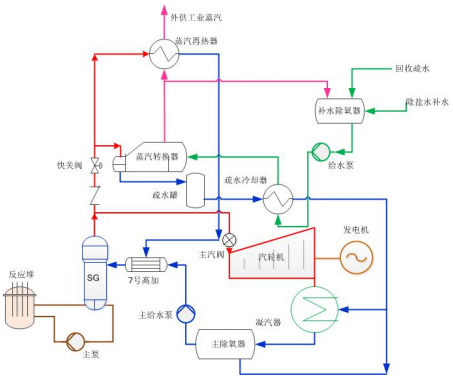



图 3 核能供汽示意图

表 3 国内核能供汽部分核电站

| 核电机组 | 投产时间 | 类型 | 功率 Mwe | 供汽情况 |
|---|---|---|---|---|
| 田湾 3、4 号 | 2018 年 | VVER | 2×1 250 | 2022 年 5 月开工，项目计划 2023 年底投产供汽。为连云港石化基地每年供汽量 480 万吨。 |
| 三门一期 | 2018 年 | CAP1000 | 2×1 250 | 2023 年 6 月开工，项目计划于 2026 年底建成，供汽规模为 1 800 吨/小时，为台州产业园一期工程提供年产千万吨的工业蒸汽。 |
| 江苏绿能一期 | 计划 | 高温气冷堆<br>华龙一号 | 1×350<br>2×1 250 | 高温蒸汽~1 100 t/h<br>低温蒸汽~1 800 t/h |

### 1.4 核能制氢

氢能，重量轻、环保，热值极被广泛认定为清洁能源。以化石燃料重整制氢方式是最广泛的工业应用，因在生产过程中会有二氧化碳等排放，产生的氢气被称为灰氢。将天然气通过蒸汽甲烷重整或自热蒸汽重整，在生产过程中使用碳捕集、利用与

封存等技术捕获温室气体，这样方式制成的氢气被称为蓝氢。通过使用可再生能源（例如太阳能、风能）电解水制成的氢气则称为绿氢。核反应堆与先进制氢工艺耦合生产得到的氢气称为粉氢，在此过程中无碳排放受到青睐。

目前核能制氢主要用两种方法：

（1）热化学循环制氢

利用热化学循环是高温热化学循环过程，通过蒸汽热解生产氢。

（2）高温电解制氢（HTSE）

HTSE 利用固体氧化物电解槽作为中央反应堆，实现水汽的有效分解，产生氢气。高温气冷堆出口温度可以到 650°以上，是目前最理想的高温电解制氢的核反应堆。

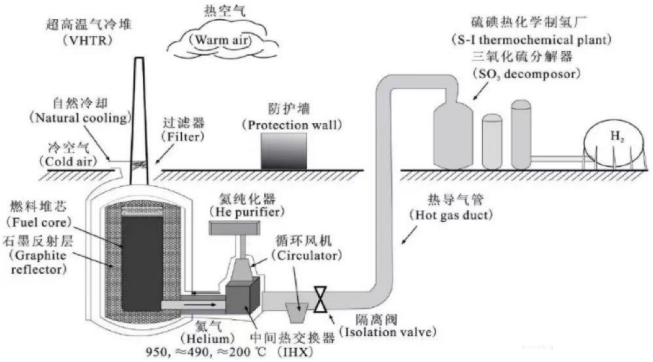



图 4 核能制氢示意图

表 4 国内外核能制氢的工作开展

| 国家 | 核能制氢工作开展 |
|---|---|
| 美国 | 美国 2002 年 4 月发布首份《国家氢能路线图》，明确了核能制氢作为一条十分重要的技术路线。美国纽约的九英里角核电站预计将在 2023 年年底前展示使用低温电解技术的核能制氢。美国 Davis- Bethor 核电站将使用低温电解（聚合物电解质膜）制氢预计 2023 年投入运行，另外普雷里岛核电站则预计在 2023 年底开始施工，于 2024 年初通电并生产氢气。 |
| 俄罗斯 | 2020 年 6 月发布《2035 年能源战略》，2020 年 10 月发布《2024 年前氢能发展路线图》，计划 2025 年在俄罗斯科拉核电厂投入电解制氢设施，计划在 2036 年建成 1 座高温气冷堆机组用于制氢。 |
| 法国 | 2020 年 9 月发布法国国家氢能战略。2021 年 10 月公布的“法国 2030 计划”中显示到 2030 年建成两座以上百万千瓦级“超级制氢厂”。<br>法国麦克菲公司目前获得了法国政府和欧盟委员会“欧洲共同利益项目——氢技术”的资金支持并完成超级制氢设施选址工作。<br>法国电力公司 EDF 计划投资 20 亿～30 亿欧元，在 2023 年建成 300 万千瓦电解槽的核电制氢设施。 |
| 英国 | 将利用小型压水堆 Rolls-Royce SMR（470 MWe）进行核能生产低碳氢。 |
| 瑞典 | 瑞典大瀑布电力公司(Vattenfall)从 2022 年 6 月开始就在灵哈尔斯建设两座小型堆(SMR)开展核能制氢的可行性研究，将综合利用灵哈尔斯(Ringhals)核电站和 Kattegat Syd 海上风电的进行电解氢生产。 |
| 韩国 | 韩国计划 2028-2030 年在蔚珍县建设 6 台 NuScale power 小型模块化反应堆(SMR)进行核能制氢。 |
| 中国 | 2018 年，中核集团联合清华大学和中国宝武建成了产氢能力 100 NL/h 规模的台架并实现 86 小时连续运行。<br>2021 年 9 月，清华大学组织华能和中核集团成立了“高温气冷堆碳中和制氢产业技术联盟”计划 2022-2023 年形成高温堆制氢的示范工程。<br>2022 年 11 月，东华能源与中国核电共同出资设立茂名绿能，推进高温气冷堆项目，进行丙烷脱氢工艺和匹配 SOEC 或碘硫循环制氢路线，实现大规模工业制粉氢。项目计划于 2023 年底开工建设，2027 年正式投入使用。 |

### 1.5 核能海水淡化

核能海水淡化主要采用低温多效热法，将核反应堆的直接蒸汽或者是二回路汽轮机抽汽作为热源，串联多组水平管喷淋降膜蒸发器，海水在蒸汽管内冷凝，释放出潜热，后组的蒸发温度低于前组，然后多次的蒸发和冷凝，最终得到淡化的蒸馏水。

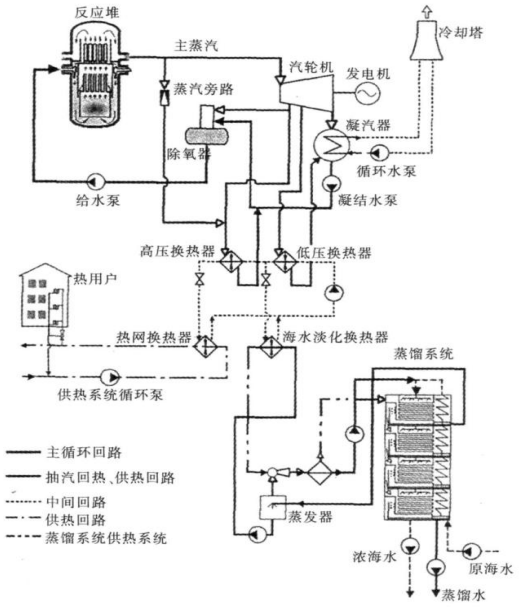



图 5 核能海水淡化示意图

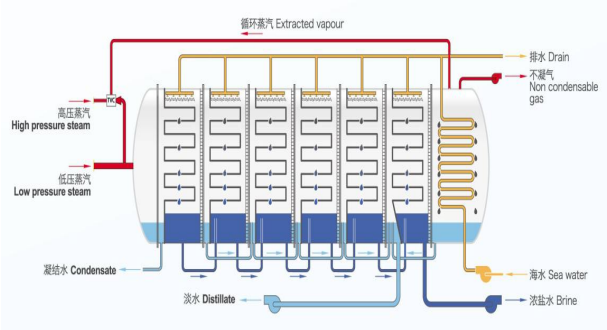



图 6 低温多效热法海水淡化原理图

### 1.6 核能其他应用

借助核电站堆芯内发生的核反应辐照氮元素的靶件，可以实现碳 14 的同位素生产。

## 2 核能综合利用发展前景

### 2.1 核能发电前景

核能作为一种清洁能源，全球都在积极推广核能发电，目前世界上共计超过 46 个国家有大型核电机组的发展需求，见下图。

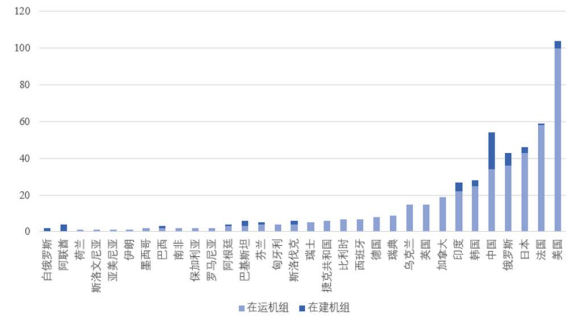



图 7 世界核电机组的发展需求情况

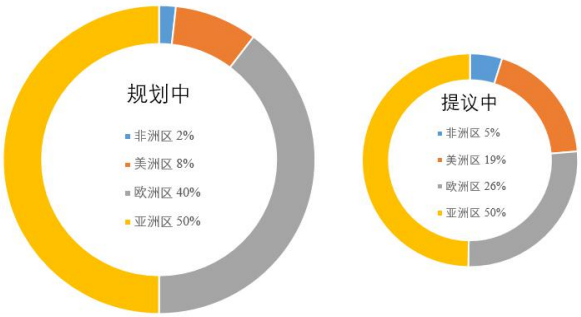



图 8 世界核电发展需求区域分布

### 2.2 核能供暖前景

据统计当前投运的核电站已实现 559 万平方米地域核能供暖，预计到 2030 年随着投产核电机组的增加，核能供暖应用将达到 3.2 亿平方米。而在 2016 年，国家发展改革委和国家能源局联合发布《能源技术革命创新行动计划(2016-2030 年)》指出 2050 年，核能供热具备规模建设条件，因此核能供暖前景可观。

### 2.3 核能供汽前景

2022 年国家工信部发布的《关于“十四五”推动石化化工行业高质量发展的指导意见》对高耗能的石化行业严重限制煤机组装机容量、煤炭消耗强度和总量、污染物排放总量和浓度。核能供汽应用给石化行业提供了低碳应用和转型的解决方案。

### 2.4 核能制氢前景

中国氢能联盟 2021 年发布的《中国氢能源及燃料电池产业白皮书》指出到 2050 年氢气需求量接近 6 000 万吨，氢能在中国能源供应中的占比将达到约 10 %。2022 年 3 月，国家发改委发布《氢能产业发展中长期规划（2021-2035 年）》，文件明确提出要因地制宜布局氢能设施，大力推进核能制氢、海水制氢、固体氧化物电解池制氢以及光解水制氢等新兴制氢技术的研究。因此核能制氢的前景广阔。

### 2.5 核能海水淡化前景

核电站选址临近海边，因此利用核能进行海水淡化有基础，此外沿海淡水资源的缺乏，海水淡化越来越被需求。目前国际上在日本和哈萨克斯坦实现了核能海水淡化项目，国内海南昌江小堆“玲龙

一号”项目建成后将开展核能海水淡化应用，海阳核电站也在开展核能海水淡化工程，其他国内多个核电站也在计划推进核能海水淡化工作。

## 3 结语

核能综合利用技术日趋成熟，热能传输以“传热不传质、多级物理隔离”的方式实现，改造及优化主要集中在常规岛，无放射性风险，无核电安全运行风险，因此利用核能开展供热、供汽、制氢和海水淡化等多元应用可行。核能综合利用符合我国能源结构的转型需求，满足我国电力系统安全、经济、清洁低碳能源体系的需求。核能综合利用也提供了新的经济增长点，核能综合利用将核能的利用率提升，扩展核能供应商，创造新商业模式，带动新的商业商机。根据上文显示中国也有多个核电机组开展了核能供暖、工业供热、海水淡化等综合利用工作，后续新建核电站均提出了核能综合利用的需求，核能综合利用正以蓄势待发的姿态，迎接更为广阔的应用与发展。

参考文献：

[1] IAEA, Nuclear Power Reactors in the World(2023)[R], USA, International Atomic Energy Agency , 2023

[2] 中国核能行业协会, 全国核电运行情况（2023 年 1-9 月）[R], 北京, 中国核能行业协会, 2023-11-6

[3] 余剑锋. 坚持创新发展全面建设核工业强国[N]. 求是，2023-2-1(1)

[4] 周正道, 华志刚, 包伟伟, 等. AP1000 核电机组供热方案研究及分析[J]. 热力发电, 2019, 48(12):92-97

[5] 王宏渊. 中国核能区域供热面临的机遇和挑战[J]. 能源与节能, 2013(4):36-38+55

[6] 王建强, 戴志敏, 徐洪杰. 核能综合利用研究现状与展望[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(04):460-468

[7] 核研院. 清华高温气冷堆制氢关键技术研究达到预期技术目标[N]. 新清华, 2014-10-17(003)

[8] 崔世杰, 朱道付, 郑治飞. 低温多效海水淡化蒸发器安装技术[J]. 机电工程技术, 2015, 44(8):57-60

[9] 顾有为, 刘钰熙. 大型核电机组海外市场需求分析及出口策略[J]. 中国核电, 2018,11(3):390-394

[10] 曾斌, 李言瑞, 屈凡玉, 等. 核能供热发展模式研究[J]. 能源, 2022(3):68-71

集团要闻

# 我国西北地区首台抽水蓄能机组投产发电

2023 年 11 月 25 日，东方电机为国网新源新疆阜康抽水蓄能电站研制供货的首台机组正式投产发电。新疆维吾尔自治区党委书记马兴瑞，自治区党委副书记、区政府主席艾尔肯·吐尼亚孜出席投产仪式，向工程投产表示热烈祝贺，并与国家电网有限公司总经理、党组副书记张智刚共同启动机组运行。集团公司党组成员、副总经理李忠军；股份公司副总裁，东方电机党委书记、董事长王军出席投产仪式。

国网新源新疆阜康抽水蓄能电站首台机组投产发电实现了我国西北地区抽水蓄能运行机组零的突破，开启了西北地区新型电力系统构建新篇章，对新疆培育发展新增长极、在中国式现代化进程中更好建设美丽新疆具有重要意义。

国网新源新疆阜康抽水蓄能电站是新疆首座大型抽水蓄能电站，也是东方电机首个高海拔地区抽水蓄能项目。电站总装机容量 1200 兆瓦，安装 4 台套单机容量 300 兆瓦的抽水蓄能机组，全部机组由东方电机研制供货并承担整组启动调试任务，预计 2024 年全面投产。本次投产发电的机组是我国西北地区首台在运抽水蓄能机组。

电站全面建成后，对保障电力系统安全稳定运行、推动新型电力系统建设发挥重要作用，对促进新疆地区风光资源优势转化为经济优势、推进“风光火储一体化”大型综合能源基地建设、助力“疆电外送”具有重要意义。

来源：东方电机网

# 能源大数据的数字化能源系统在企业的应用

张宇　毛勇

东方电气自动控制工程有限公司，四川 德阳 618000

**摘要：**针对当前企业存在数字化程度低下以及数字化建设导致的能源数据资源冗余等问题，明确大数据平台技术的应用目标，设计了基于大数据技术的数字化能源系统解决方案，对大数据平台的系统组成、层次划分及分层功能进行了定义。最后通过工程案例探讨了基于大数据技术的数字化能源系统在企业的实践应用，验证了数字化能源系统的有效性。

**关键词：**能源大数据；数字化能源系统；智慧能源系统；智能无人值守配电室

**中图分类号：**TP311.13　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）01-0074-07

# Application of Digital Energy System Based on Energy Big Data in Enterprises

*ZHANG Yu，MAO Yong*

( Dongfang Electric Automatic Control Engineering Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China )

Abstract: In response to the problem of energy data resource redundancy caused by low digitalization level and digital construction in current enterprises, the application goals of big data platform technology are clarified. A digital energy system solution based on big data technology is designed, and the system composition, hierarchical division, and hierarchical function of the big data platform are defined. Finally, the practical application of digital energy systems based on big data technology in enterprises was explored through engineering cases, verifying the effectiveness of digital energy systems.

Key words: energy big data; digital energy system; smart energy system; intelligent unattended power distribution room

在全球碳中和、碳达峰、数字化转型升级的背景下，企业面临外部竞争、环境保护、碳排放合规等多重压力。同时还面临企业实际生产成本过高等问题，如何保证正常生产并适当用投资实现节能减排是企业的首要任务，而企业所使用的能源种类较多，常见的就包括：水、电、气、热等，面临收集数据频繁、数据量大、时效性要求高、数据需要大量存储和计算等问题，而传统的能源管理手段、信息系统架构技术、信息系统管理方法无法满足企业的发展和管理要求。

因此，本文将探讨基于大数据技术的数字能源系统在企业中的应用。

## 1　企业现状

随着信息技术的不断迭代发展，一些企业建立了多种数字化系统，积累了大量数据[1]。但其他一些企业在能源领域的体系建设投入相对较少，管理相对粗放。大多数仍然采用每月人工抄表的方式进行能源管理和控制，存在数据不准确、时效性不够、效率低下、无法及时应对使用异常等问题，只能根

收稿日期：2023-09-18

作者简介：张宇（1981－），男，2004 年毕业于西南交通大学电气工程及其自动化专业，大学本科，工程硕士，高级工程师，现任东方中能工控网络安全有限公司副总经理（主持工作），主要从事电力电子与工业控制及其信息化方向的工作。

毛勇（1985－），男，2020 年毕业于绵阳师范学院电气工程及自动化专业，大学本科，高级工，现任东方自动控制工程有限公司装备技术，主要从事装备技术方向工作。

据情况进行有限的预警和事中干预，跑冒滴漏问题时有发生，导致能源消耗浪费、生产成本高等问题，同时，对用电安全、稳定生产也产生影响。

在能源管理数字化建设过程中，企业随着建设过程的深入逐渐认识到对能源数据的简单分析难以满足生产要求，科学的能源管理系统应该将数据与生产办公、业务流程等有机高效结合，并提供科学指导，辅助决策，实现数据的高效集成和应用。

## 2 基于大数据的数字化能源系统

### 2.1 总体架构

基于大数据技术的数字化能源管理系统总体架构分为 5 层：采集层、数据层、服务层、应用层、展示层，如图 1 所示。

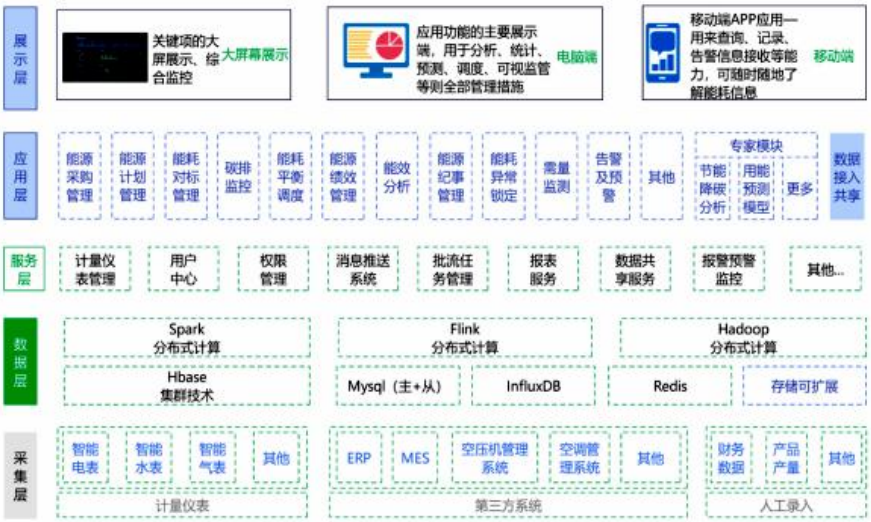



图 1　数字化能源管理系统总体架构图

为了实现对电、气、热、水等类型能源的实时监控，大数据平台需要在现场安装仪表设备，对所有设备的运行状态进行实时监控。由于用户的能源站点一般分散在不同位置，选择互联网作为采集层的通信网络最具性价比；基于大数据技术平台的数据层可实现多种能源数据，并且可扩展至 PB 级的数据存储和计算能力，实时接受处理采集层上传的数据，并进行存储和计算展示。根据业务场景和应用需求提供数据，并为终端用户提供展示层进行使用。

### 2.2 采集层

如图 2 所示，智能网关在网络通信层支持的各种工业协议：RS485、OPC、Modbus 连接设备层的各种设备和仪表，并获取电、水、气、环境等数据，并且集成第三方系统：MES、OA、ERP 等业务数据通过有线或无线 4G/5G 网络上传至大数据平台，进行数据清洗、融合、计算、处理、存储，最终共享给数据使用者。

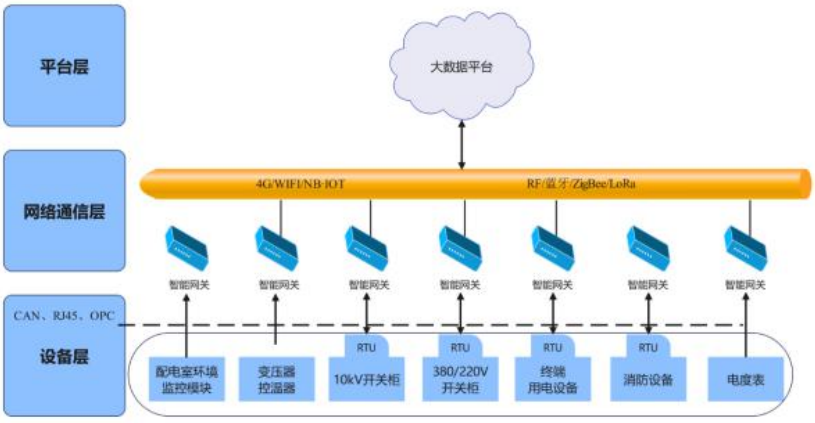



图 2　网络架构图

由于数据网络传输的安全性要求，网络层必须在企业网络内部传输，必须采用垂直认证、传输加密等措施来保证数据传输的安全可靠。

### 2.3 数据层

数据层主要负责数据的接受、清洗、处理计算和存储，从存储类型可分为两类存储：一类是业务数据、主数据、元数据的存储，其特点是数据量小、对数据准确性要求高、非连续、并且对数据缺失零容忍，为了方便对数据的灵活操作和查询，采用传统关系数据库 MySQL 集群模式进行存储，保证数据的可用性和性能。另一种是设备采集的数据和时间序列数据的存储，数据的特点是数据量大、计算量大、具备时序连续性、容忍少量数据丢失等异常情况，对数据库的读写性能和扩展性要求高，因此对于批量数据计算场景：基于日、月、年时间维度或业务需求的大批量数据统计和数据治理等，采用 Spark 对离线批量数据进行处理；针对低延时实时场景：实时数据采集、显示、报警提示等使用 flink 对流式实时数据处理，处理后的数据存储在基于分布式文件系统 HDFS 的 Hbase 中，只要 rowkey 设计合理，扩展到 PB 级的数据处理和存储能力只需要增加数据节点即可 ，根据数据特点和业务使用场景，分别选择两类数据进行存储。每个人各司其职，互不干扰，保证数据的及时性和可用性[3]。

同时基于数据使用场景：OLAP 建立数据仓库：分为 ODS 贴源层清洗获取原始数据、DWD 明细层进行集成数据建模存储、DWS 最终形成数据主题数据集市，为各种数据应用场景提供数据分析和服务。

### 2.4 服务层

服务层主要对常用的通用标准能力进行分类和抽象：仪器、账户、权限、消息、任务管理、报警、监控预警、数据共享等，形成基础标准平台服务能力，防止重复报送。 标准不统一，提高复用能力，降低使用门槛，通过微服务技术架构为上应用层提供基础能力支撑，同时提供良好的容错性和扩展性。

### 2.5 应用层

应用层主要根据业务需求和应用场景形成应用和模块，满足用户对现代数字能源管控的共同需求：包括能源采购、规划、对标、碳排放监测、产品单耗、班组和共享等用能分析、用能限额、用能流向、用能平衡、用能异常监测分析、能效分析、电费计算、功率因数分析、电能质量分析、负荷预测、抄表、报表等需要的应用场景。

### 2.6 展示层

根据用户不同的使用需求分为：监控大屏、电脑端、手机 APP，可随时满足集控中心监控、办公电脑、远程手机 APP 的显示和各种场合的使用需求，用户可以根据情况灵活选择使用。

### 2.7 大数据平台

#### 2.7.1 平台架构图

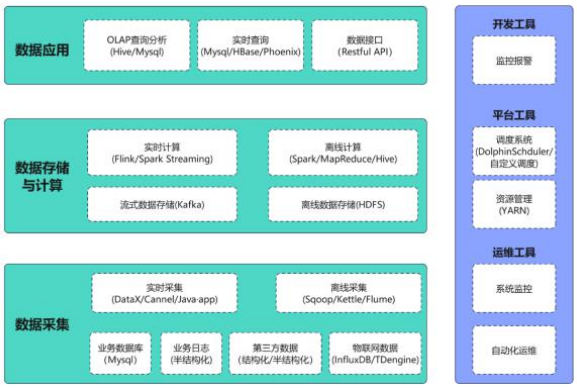



图 3 平台架构图

大数据平台分为数据应用、数据存储与计算、数据采集三层。同时工具层涵盖开发工具、平台工具、运维工具三类。

#### 2.7.2 数据采集

该平台采用 Sqoop、DataX、Cannel、Kettle、Flume 等开源组件和技术；实现离线采集加载、实时/准实时数据同步等功能；遵循开放、先进的原则；并提供了更高效的数据导入工具 SQL Bulkload，提高了数据采集的时效性及采集效率。

#### 2.7.3 数据存储与计算

基于 Hadoop 大数据分布式存储技术，平台构建了统一存储层。同时，基于 Spark、Flink、MapReduce 等分布式计算框架，构建分布式、水平扩展、高容错的弹性计算平台，引擎针对实时和离线计算场景进行优化。让平台具备海量数据计算、

低延迟响应等数据处理能力[2]。

2.7.4 资源管理与调度

（1）调度管理

调度管理是平台数据流的核心。调度系统使得相关的业务任务和处理任务按照一定的业务逻辑自动触发执行，平台通过自主研发并与 DolphinScheduler 集成构建了调度管理系统，以 DAG 流式方式组装 Task，可以解决数据开发 ETL 错综复杂的依赖关系，实时监控任务的运行状态。它还支持重试，从指定节点开始恢复失败、暂停和 Kill 任务等操作。

（2）资源管理

资源管理是大数据基础平台的通用资源管理系统。为上层应用提供统一的资源管理和调度，从而大大提高集群资源利用率，实现资源的统一管理和共享。

平台通过 Yarn 作为计算资源的统一调度管理，实现多任务共享集群资源的支持，通过 Scheduler 调度策略提供必要的资源隔离以及弹性计算，为数据处理提供支撑。

（3）集群管理

平台基于 Ambari 管理系统，提供简单易用的可视化管理和操作工具，包括一键式集群安装、参数配置、节点增删等，降低平台运维成本。

1）集群高可用性

大数据集群可以提供高可靠性和高可用性保证。即使集群中任意一个节点宕机，集群也能稳定运行。通过 HDFS 的三副本机制，保证单个 DataNode 的宕机不会影响整体分布式存储。当某个节点宕机导致副本丢失时，HDFS 会自动将副本数量恢复到 3 个，并且对上层应用透明。

分布式存储 HDFS 通过高可靠的 Namenode HA 方案，active namenode 和 standby namenode 同时运行，active namenode 发生故障时，standby namenode 能迅速自动切换为 active，保证 HDFS 的高可靠性，始终有一个 Namenode 做热备，防止单点故障问题。

2）集群兼容性

该平台支持在各种 x86 PC 服务器上安装和运行，并支持在基于 Power 芯片的 Power Linux 服务器上运行。还支持包括 Redhat、CentOS 等在内的主流 Linux 操作系统，同时还兼容麒麟、红旗等国产操作系统。

（4）安全管理

平台提供服务独立、统一控制、可视化操作的多租户管理系统。

该平台提供用户认证、授权、配额管理和资源控制。只有经过身份验证的用户才能访问系统。授权确保只有被授予权限的用户才能访问系统资源。配额管理和资源控制负责控制用户使用资源的大小。这三部分共同保证了平台大数据的安全。

平台可以提供表级和列级的数据权限控制。平台可以控制权限，包括读权限、写权限、执行权限、建表权限、管理员权限等。

（5）告警通知

平台提供报警事件管理、消息推送、推送规则制定等功能。具有“报警”标签页，实时显示故障报警，并可查看具体报警信息。针对每条告警信息都提供错误对应表，帮助用户快速定位故障根源。同时，用户可以自定义“报警”阈值。

2.7.5 数据应用

平台需要以提供不同的数据服务方式满足各个业务场景的数据需求。包括基于 Hive、Spark-SQL 等构建了 OLAP 查询分析服务；基于 Mysql、Hbase、Phoenix 等构建了实时查询分析服务；基于 Restful 风格的接口，构建了数据 API 服务。

## 3 主要功能

该系统是一款支持用户日常能源管理的数字化能源管理产品。可以帮助客户快速了解项目能源使用情况、查询能源使用数据、导出能源消耗报告，支持节能减碳、购电业务开展。主要包括以下功能：数据看板、能耗管理、能源分析、光伏发电、碳排放管理、运行监控、统计报表、权限管理等功能模块。可以帮助企业实现各种能源数据的监测、统计和分析。

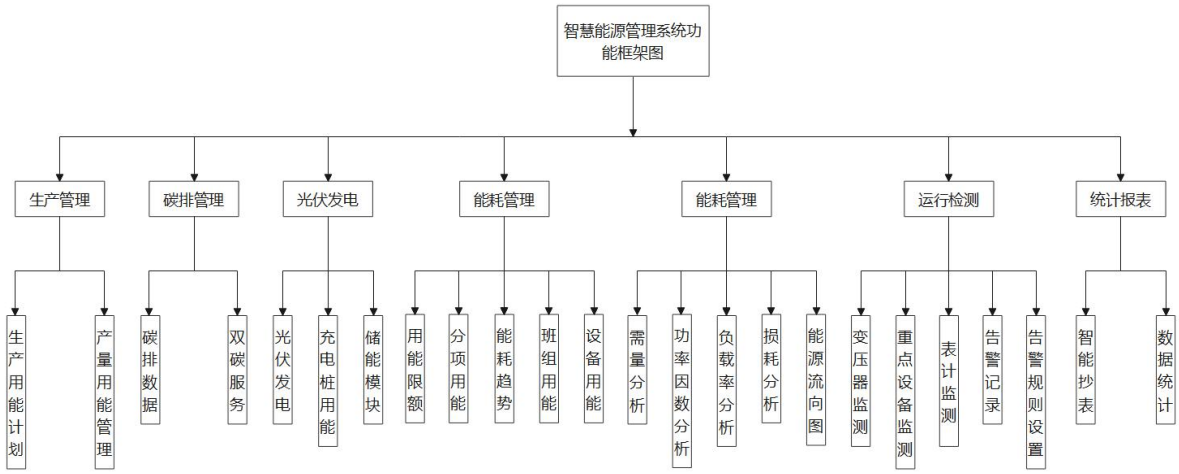



图 4　能源管理系统框架

### 3.1 总体用能情况

（1）数据看板

数据仪表板主要展示企业能源消耗的关键数据指标。页面数据每分钟刷新一次，反映企业当前整体能耗及运行状况。显示指标包括：当月实时累计用电量、当月实时预估电费、今日实时负荷、当月节能目标完成情况、当月分类用电量月份、近 30 天用电量趋势等。

图 5 用能情况数据看板

（2）能耗趋势

能源消耗趋势主要展示企业能源消耗趋势，并提供按照不同维度查看的功能，包括小时、日、月、年四个不同维度的查看；还提供任意维度的同比、环比和定制比较功能，各种数据支持导出 EXCEL。

（3）需量管理

需量管理功能主要为企业展示最大需量趋势，推荐优化的基本电费支付方式，帮助企业节省基本电费，降低电费成本。

（4）功率因数分析

功率因数分析显示项目的整体功率因数和各设备的功率因数。如果发现功率因数异常，系统会实时提醒。结合用户线下现场补偿及运行措施，可控制功率因数，避免电量调整费考核，降低用电成本。

（5）负载率分析

负载率分析显示项目中各变压器的运行负载率状态，统计各变压器在各种工况（轻载、正常、重载、过载）下的运行小时数。公司可以根据实际情况调整变压器的运行状态，以达到经济运行的效果，即降低电耗。

（6）损耗分析

损耗分析展示企业各级回路间的损耗情况，帮助企业发现项目中损耗异常的回路进行及时排查，保证数据的一致性。

### 3.2 分项用能管理

（1）分类/分项用能支持根据最新分时政策进行查询、统计及导出的功能。

（2）系统支持实时同步更新最新市场分时政策，并根据分时政策执行日期对全厂各分项、各个设备进行用电情况进行查询、统计及可视化展示，按需将数据导出为 EXCEL 文件。

（3）系统支持对单一设备的用电情况进行统一汇总或按分时汇总查询、统计及导出为 EXCEL 文件。

（4）系统支持对多设备汇总统计，并按照分时进行查询、统计及导出为 EXCEL 文件。系统支持对用电数据按照不同的时间维度进行查询统计，时间维度包括：小时、日、月、年。

### 3.3 碳排放

提供包括碳排放结构、日均碳排放、累计碳排放、年度碳排放余额等数据的统计分析。

### 3.4 用能分析

提供包括需量分析、功率因素分析、负载率、损耗等功能。

### 3.5 班制用能

| 编号 | 日期 | 总计(kWh) | TX-02-01(kWh) | TX-01-06(kWh) | TX-01-05(kWh) | TX-01-04(kWh) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2022-02-01 | 22260.50 | 3870.12 | 8370.12 | 9480.47 | 539.79 |
| 2 | 2022-02-02 | 23819.09 | 3750.00 | 9120.12 | 10289.06 | 659.91 |
| 3 | 2022-02-03 | 23685.08 | 3794.68 | 8970.70 | 10500.00 | 419.68 |
| 4 | 2022-02-04 | 24495.13 | 3794.68 | 9208.01 | 10921.88 | 570.56 |
| 5 | 2022-02-05 | 24809.32 | 3750.00 | 9331.05 | 11068.36 | 659.91 |
| 6 | 2022-02-06 | 25741.69 | 4500.00 | 9451.17 | 11220.70 | 569.82 |
| 7 | 2022-02-07 | 30507.57 | 8430.18 | 9808.59 | 11668.95 | 599.85 |
| 8 | 2022-02-08 | 30299.56 | 8310.06 | 9899.41 | 11519.53 | 570.56 |
| 9 | 2022-02-09 | 30391.84 | 8581.05 | 9480.47 | 11730.47 | 599.85 |
| 10 | 2022-02-10 | 30840.09 | 8759.77 | 9960.94 | 11519.53 | 599.85 |
| 11 | 2022-02-11 | 30450.45 | 8639.65 | 9659.18 | 11671.88 | 479.74 |
| 12 | 2022-02-12 | 27119.39 | 5279.30 | 9811.52 | 11578.13 | 450.44 |
| 13 | 2022-02-13 | 26761.23 | 4951.17 | 9629.88 | 11370.12 | 810.06 |
| 14 | 2022-02-14 | 30750.74 | 8430.18 | 9870.12 | 11850.59 | 599.85 |
| 15 | 2022-02-15 | 29756.83 | 8159.18 | 9568.36 | 11399.41 | 629.88 |
| 16 | 2022-02-16 | 29432.37 | 8325.44 | 9360.35 | 11446.29 | 300.29 |
| 17 | 2022-02-17 | 29817.63 | 8624.27 | 9178.71 | 11384.77 | 629.88 |
| 18 | 2022-02-18 | 30812.99 | 8550.29 | 9782.23 | 11730.47 | 750.00 |
| 19 | 2022-02-19 | 27568.36 | 4920.41 | 10139.65 | 11818.36 | 689.94 |
| 20 | 2022-02-20 | 26941.40 | 4920.41 | 9720.70 | 11610.35 | 689.94 |
| 21 | 2022-02-21 | 30927.98 | 9358.89 | 9597.66 | 11311.52 | 659.91 |
| 22 | 2022-02-22 | 30240.97 | 9150.88 | 9210.94 | 11279.30 | 599.85 |

图 6　班制用能统计

系统支持按照企业实际生产安排情况进行班次管理，支持根据工厂实际情况自定义不同班制的上班时间。同时系统支持按照班次进行全厂、分设备或多设备汇总的用电数据查询、统计、对比分析及导出为 EXCEL 文件，帮助工厂更加精细化的管理各班次用能情况。

### 3.6 运行安全管理

（1）重点用能设备管理

通过数据列表、曲线等形式直观的展示全厂重点用能设备的实时运行数据和历史运行数据，并可以对关键运行参数进行报警/预警阈值设定；实现故障工单管理，对每次系统报警预警的处理情况及结果予以记录，提升企业能源管理系统的运行管理水平及整体安全水平，确保安全生产。

（2）仪表监测

仪表监测展示企业各回路的实时运行状态，同时也可对历史运行数据进行查询。监测参数包括：三相电压、三相电流、功率因数、三相有功功率、三相无功功率、三相视在功率等。

（3）告警历史

告警历史展示企业各项回路告警的信息及处理情况。告警类型包括但不限于：电流越限、功率因数过低、功率越限等。

### 3.7 统计报表及工具

系统为用户提供强大的报表功能，可实现智能抄表及各种自定义报表的输出。主要汇总包括：综合能源数据（日、周、月、年等维度报表）、指标（单位产品能耗、万元产值能耗等）汇总统计等。同时也可以根据客户现有的用能报表格式，进行报表定制化，可实时统计，客户周期性导出报表后无需进行二次加工便可直接使用，方便快捷查询各种用能数据并进行导出。

### 3.8 系统配置及企业信息管理

本系统支持对系统的各个模块进行自定义配置，企业信息管理用于管理企业各项基本信息，可以维护企业的组织结构，同时可对组织结构进行授权，并管理企业下各种角色，对角色进行授权，实现人员的分权限管理。

## 4　案例分析

### 4.1 案例现状

东方电气自动控制工程有限公司作为中央企业东方电气集团有限公司的二级子企业，是东方电气集团电力电子与控制产业专业化发展平台，其主导产品发电控制系统累计配套发电设备产量超过 6 亿千瓦。

公司 10 kV 配电室 4 处，低压支线繁多，地点分散管理人员不足，不具备对用电情况进行分析的基础数据，无法实现有限管控，无法对用能精细化管理，对配电设备运行安全没有实时监控无法实现无人化管理，具体如下：

（1）不能实现能源数据的自动化和精细化管理，对总能耗与各分支能耗进实时计量、全时监测、分类/分项用能功能及组成比例无有效的监控和分析管理。

（2）能源管理无法可视化，全厂各级能源数据不能实时采集，重点能耗设备无法进行实时能耗监测，无法实现能耗清晰化、数据可视化、管理数字化、分析图表化、能耗指标化，导致我司对能源成本比重、能耗数据趋势无准确的掌握。

（3）对用能设备、各测量点异常情况、自动诊断和报警提示，超出功率范围的能耗设备不能实

时报警、对重要设备运行匹配状况无诊断信息。

### 4.2 应用效果

通过对企业完成三个厂区能源 78 只能源计量表、18 个环境监测点位、1 个气点位的数据采集，轻松存储以秒或者是分钟级别的所有历史采集数据，毫秒级响应。实现三个厂区能源数据实时监测，实现一秒钟出报表、远程抄表，能耗平衡、能耗异常监控预警，能效分析等提升能源管理效率 500 % 以上，能耗同比下降 6 %~10 %，减少碳排放 4 %~6 %左右，同时为企业带来以下价值：

（1）能源管理全局化

采用一体化设计理念，完成整个厂区的整体能源信息显示屏、能源流向和应用的发布。从厂区→部门/车间→设备子系统→设备数据，可以快速显示整个工厂的运行状况、经济、环保等指标的实时信息。

（2）能源管理可视化

实时采集全厂各级能源数据。对重点用能设备进行分布式节能监控和集中管理。通过简单易用的监控界面，实现能耗清晰化、数据可视化、管理数字化、分析图表化、能耗指数化、消费合理化，让管理者准确掌握能源成本占比和能耗数据趋势。

（3）能源管理精细化

对用能设备、测点、班组用能异常进行自动诊断和报警提示。对超出功率范围的用能设备进行报警，并提供重要设备运行匹配状态的诊断信息。基于数据实现精细化能源管理。管理人员可以根据系统提示及时、科学地进行处理，避免能源浪费，满足最低合理的能源需求。

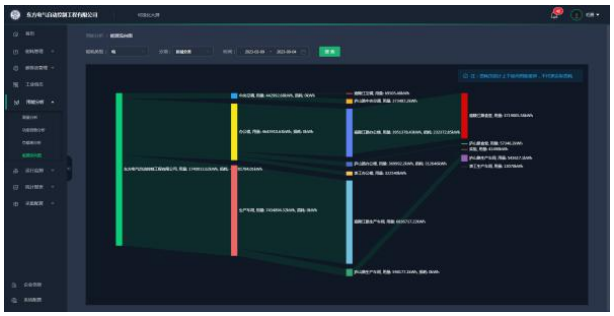


图 7　能源管理精细化模块

（4）设备能效精细化

实时监控用能设备或系统运行过程中的能耗数据。对设备功率、效率、负载等参数综合分析，实现产品单耗精细化管理。

（5）建立统一大数据平台

在后期，企业可以通过这个大数据平台不断加深数据采集的深度，支持企业数字化、智慧化升级。

（6）数据互联互通

打通与智慧园区系统的数据接口，实现数据互联互通。未来将具备与生产 MES、ERP 对接的能力，充分发挥数据的价值。

（7）实现配电室无人值守

从被动应对到主动预防，为用户构建安全、可靠、节能、高效的用电环境，可以极大促进配电系统的建设和智能化发展，提高效率，提高配电服务管理，提高配电服务水平和质量。

（8）建立能源管理体系

通过系统的数据作为支撑，基于数据建立能源成本中心进行量化管理，分摊到响应的厂区和部门，明确责任和限额，结合绩效、数据定期进行考核、改进，确保管理工作切实落地，持续进行降碳减排提效。

## 5　结语

本文首先介绍了当前企业能源管理中的常见问题和痛点，针对各种问题设计了基于大数据技术的数字能源系统解决方案，并介绍了大数据平台系统组成和技术架构、层次划分和层次功能。最后通过一个实际案例介绍基于大数据的数字能源系统的实际应用效果，以说明该解决方案的应用效果。说明通过大数据与数字能源系统的结合，不仅可以节能、减碳、增效，还可以有效分解信息。隔离孤岛，整合各系统现有数据资产，高效实现数据互联，充分挖掘数据价值。

### 参考文献：

[1] 瞿超畅, 倪俊. 企业能源管理系统大数据平台的研究[J]. 能源研究与利用, 2019(5):54–55

[2] 吴振扬, 王尧, 傅吉悦, 等. 大数据技术在能源互联网的应用[J]. 吉林电力, 2019(6):1–13

[3] 刘和志, 牟平伟. 大数据平台在配电运行管理及维护中的运用[J]. 重庆电力高等专科学校学报, 2018, 23(5):37-40

# 浅谈海上平台电能计量设备误差分析与改进措施

鲁醒悟

中海石油（中国）有限公司渤海油田岸电运维中心，天津 300459

**摘要：**我国海上油田局域电网正大规模接入陆地电网，受平台投产年限和成本因素影响，配套的电能计量设备参差不齐，导致电能计量结果存在一定的误差，这主要与计量设备本身性能及其外部电路结构有很大关系，是影响电能计量设备准确度的关键因素。本文重点分析了海上平台电网关口电能计量设备受二次回路压降影响的情况，制定有效的改进措施，为海上电力系统配置的不同的电能计量设备提升计量准确度提供了相应的解决方案。

**关键词：**电量计量；电网关口；电压互感器；二次压降；接触电阻；光纤数字化

**中图分类号：**TE953　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）01-0081-04

# Discussion on Error Analysis and Improvement Measures of Electric Energy Measurement Equipment on Offshore Platforms

*LU Xingwu*

(CNOOC (China) Co., Ltd. ,Bohai Oil Field Shore Power Operation and Maintenance Center，300459，Tianjin,China)

Abstract: The local power grid of offshore oil fields in our country is being connected to the land power grid on a large scale. Due to the influence of platform operation years and cost factors, the supporting electric energy metering equipment is uneven, resulting in certain errors in electric energy metering results. This is mainly related to the performance of the metering equipment itself and its external circuit structure, which is a key factor affecting the accuracy of electric energy metering equipment. This article focuses on the analysis of the impact of secondary circuit voltage drop on the energy metering equipment at the gateway of offshore platform power grids, and formulates effective improvement measures to provide corresponding solutions for improving the measurement accuracy of different energy metering equipment configured in offshore power systems.

Key words: electricity metering; grid gateway; voltage transformer; secondary pressure drop; contact resistance; fiber digitization

在能源管理和能源计费等领域，对电能的精确计量是一项非常重要的科学技术。海上油田接入陆地电网后，作为海陆电网互联关键节点的海上电力动力平台（Electric Power Platform，EPP）成为海上油田电网变配电的核心，该平台重要的输入和输出设备上都配备了相应的电能计量设备，同时在下游各个生产平台电力主要关口也都配备了相应电量计量设备，这些设备为上下游平台进行电量分摊计算提供重要的数据来源，其准确性直接影响到各平台耗能数据分析，也影响到未来用电量的滚动预测，甚至影响到公司整体电力交易的经济利益。

通过对各个平台电能使用量的精准计量，管理人员可以及时了解平台的实际用电情况，发现问题并采取有效措施降低用电量，比如进行节能设备的升级改造、淘汰落后高耗电设备、改变或调整生产流程的运行方式等。然而在进行电能计量时，可能

**收稿日期：**2023-11-25

**作者简介：**鲁醒悟（1983－），男，2007年毕业于西安石油大学电气工程及自动化专业，本科，工程师，现任中海石油（中国）有限公司天津分公司岸电运维中心河北调度中心总监，长期从事海上油田及陆地电网的运维和管理工作。

会出现多种因素造成的误差，包括计量表、测量互感器和计量设备的精度等等[1]。如果这些因素都不能满足相关行业或者国家标准，将会引起较大的电能计量误差。安装符合标准的计量设备，连接规范的外部电路，逐步成为电力行业的共识。海上局域电网接入陆地电网后，例如新投入的岸电 EPP 平台严格按照国家标准配置了精度较高的智能电度表，但电度表的电压采样依旧采用较为传统的连接方式，电压互感器二次电缆压降问题依旧存在；其他投产较早的海上平台，大多配置了多种非专用的电能计量设备，包括机械式电能表、数字多功能表等，这些设备计量精度相对较差，计量设备电压采样回路结构复杂，其回路压降问题则更为突出，对电能计量的精准度影响也更大。因此，计量用电压互感器到用户电量计量表之间的线路电压降问题是对计量结果最重要的影响因素之一，在进行电能计量的过程中，需要被重点关注。做好电能的精准计量有助于促进节约用电，减少浪费，从而实现对环境的保护和对资源的合理利用。

## 1 电压互感器二次压降误差的产生

EPP 平台向下游生产平台供电电压等级为 35 kV，通过对该 35 kV 配电设备结构研究分析，我们可以发现由于 35 kV 母线 PT 电压同时给多面外供电盘柜提供采样电压，而且所有的电压互感器二次信号线引线位置与电能表之间都存在一定距离。这些距离就使得电压互感器的采样电压经过二次导线后压降会变得更高。同时，由于这些二次电压导线的电缆直径一般较小，相应的导线电阻会较大，加之二次电压导线连接还经过多个空气开关、保险丝和接线端子，这些连接部位的接线可能会出现端子松动或者保险丝金属部件腐蚀等问题，这都会使每一个连接部位的接触电阻变大，从而增大回路电压压降。

在一些投产时间较长的井口平台电力系统中，计量设备的电压信号采集端口往往与多个设备共用（如指示仪表、多功能转换开关等），并且直接连接到带有较高电阻的电缆线上。当这些设备的负荷电流较大时，电压互感器二次回路会受到影响，从而导致二次回路产生更多压降。

计量用电压互感器二次压降的问题已经成为当今电力供配电行业面临的严峻挑战，因为它已经直接影响到电能计量系统对真实电压的读取，有的甚至会严重损害整个电网的稳定性，因此需要将其纳入整体电网健康水平的评估体系[1]。

## 2 电压互感器二次回路的接线形式

在深入探讨电压互感器二次回路线压降问题之前，我们首先要搞清楚它与电能表之间的联系，这里以 EPP 平台配电设备结构为例，该配电系统提供两种不同等级的外供电压，一种是我国海上油田主干电网常用的 35 kV 电压等级，另一种是用于海上岸电枢纽 EPP 平台之间互联线路的 110 kV 电压等级，而它们的二次回路接线方式也各有不同。

### 2.1 35 kV 配电系统电压互感器二次接线

为了降低电压互感器二次回路产生的压降，海上现有的配电设备一般只在 35 kV 电压互感器的一次侧安装高压熔丝，而在其二次侧则没有安装熔丝和其他保护设备，另外需要在电压互感器 PT 盘柜设立专门的电压引出端子或者接线盒，方便外部电能计量设备实现电压采样信号接入，而在电能计量盘柜同样需要专门电压接入端子或者接线盒，为外部电压线路接入提供便利。

如图 1（a）结构所示，当电压互感器安装位置与电能表之间存在较远距离时，接线盒 A 一般设置在母线 PT 柜的二次室内，距离电压互感器二次接线距离在 0.5~1 米之间，因为距离较近，其压差较小，可以忽略不计。接线盒 B 一般位于用户计量盘柜内，其距离接线盒 A 的距离一般会超过 10 到 15 米，甚至更长，这也是产生线路压降的主要来源。通过对接线盒 A 和接线盒 B 之间压降测量，可以方便且安全的实现两点之间的压降监测工作。

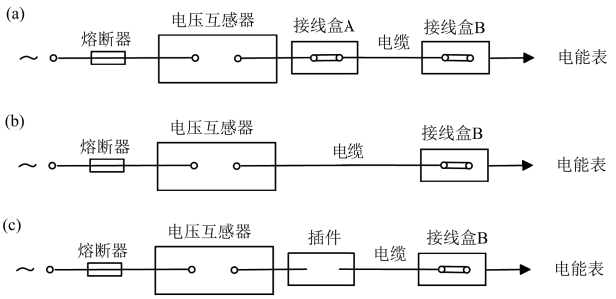



图 1 35kV 配电系统电压互感器二次接线

当电压互感器安装位置和电能表之间的距离较近时，一般会采用两种连接方式：

第一种：电压互感器采用直接固定式连接（应用于 EPP 平台），其二次侧电缆直接引出至互感器柜低压室端子排或接线盒，之后直接连接到盘柜电能表上，在实际中仅被少量使用。如图 1（b）所示。

第二种：电压互感器采用可移动手车式连接（应用于用户平台 35 kV 系统中），电压互感器二次电缆通过航空插接装置与互感器柜低压室端子排和接线盒连接，之后再与设置在互感器盘柜上电能表连接如图 1（c）所示。为保证手车式电压互感器可以自由出入盘柜室，需要保证二次电缆长度不少于 1 米，由于导线长度加长，需要选用横截面积不小于 4 平方毫米的二次导线。另外，对航空插接装置需要定期保养，涂抹防锈油和导电膏，从而降低回路电阻。

### 2.2 110 kV 电压互感器二次接线

EPP 平台的 110 kV 供配电系统一般采用管道式六氟化硫（SF6）气体绝缘组合电器，在该系统中电压互感器一二次侧结构会有所不同，一般在线路电压互感器的一次侧不会设计熔丝，而在互感器的二次侧需要安装熔丝或者高速断路器，从而达到防止二次侧发生短路的目的。同时，考虑到管道式气体绝缘组和电器结构的特殊性，为保证气室的密封性，一般在互感器外部单独设立专用的端子接线箱，实现与控制柜外部电路连接，如下图 2 所示。

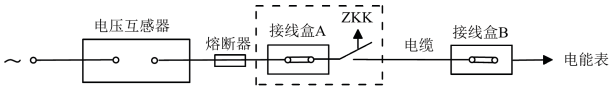



图 2　110 kV 电压互感器二次接线

## 3　降低计量用电压互感器二次压降的措施

电压互感器的二次压降问题会严重影响电能测量的精度，并且会对电力系统的稳定性造成负面影响。因此，我们需要制定一系列措施来改善二次压降，例如通过降低回路阻抗或减小回路电流等方式。此外，随着数字和智能化设备的应用，一些更加先进的技术解决方案开始逐步在电力系统中推广。下面对几种常用措施进行分析说明。

### 3.1 降低回路阻抗

研究表明，二次线路压降的产生主要取决于三个方面：导线阻抗、接头阻抗以及接触电阻阻抗。

（1）导线阻抗

导线的阻抗和导线电阻率、导线长度、导线横截面积以及导线的感抗等有直接关系，因此导线的材质选型很重要，一般测量用电压互感器二级电路的连接应当选用铜质单芯绝缘线，以确保其连接的安全可靠性和稳定性，当距离超过 10 米，电压互感器的二级电路的截面积应当符合规范，最低为 6 平方毫米，这样能最大限度的降低因导线材质和长度带来的阻抗压降。

（2）接头阻抗

通过对比 EPP 平台以及下游各生产平台电压互感器二次回路的结构，我们可以发现，一般电压互感器的二次回路包括接线端子、空气开关、航空插接头等一系列连接或转接环节，这些连接件和连接部位都会存在一定阻抗，俗称接头阻抗。其阻抗值相对固定，且阻值较小，外部措施无法改变其性能，只要选择符合国家和行业标准的连接元件，就能最大限度降低接头阻抗的影响。

（3）接触电阻阻抗

通过对各类电力行业研究报告的分析可以看出，接触电阻阻抗的大小对整个互感器二次回路阻抗大小影响最大，而且因接触电阻阻抗受环境、安装工艺、连接材质选型、触头连接情况、压力值、接触面大小以及氧化腐蚀程度等诸多因素影响。阻抗值存在随机性和波动性，且测量过程存在诸多困难，同样结构的盘柜在外部环境改变情况下，接触电阻阻抗会产生较大变化。

综合以上三个要素分析，我们可以看出：导线阻抗的影响可以通过增大导线截面积的方法来减小；接头阻抗的阻抗值一般较为固定，改变难度较大；接触电阻阻抗是影响回路电阻的关键因素，而它的阻抗随机性较高，对电路二次回路影响也最大，制定有效的应对措施也更为复杂。

因此，通过分析对比我们可以发现，应对电压互感器二次回路阻抗问题我们主要可以从以下几方面入手：

① 选用更大截面积的导线对电压互感器二次

回路线路进行替换。

② 满足安全和功能前提下，尽量减少接头环节，同时选用符合国家和行业标准的连接元件，能有效降低接头阻抗影响。

③ 定期开展对二次回路的检查和维护工作，重点检查各个元器件连接紧固情况、腐蚀情况等，并进行相应保养处理，增加必要的防腐和导电措施，从而最大限度降低接触电阻的影响。

### 3.2 减小回路电流

通常来说，电压互感器的二次侧的保护和计量绕组会分别接线，两者独立运行，其中的计量绕组主要用来连接计量用电能表，其运行电流通常不超过 200 mA[2]。

如果在实际应用检查中发现电压互感器的二次绕组电流超过了 200 mA，就需要采取如下措施来降低电流 ：

（1）选用二次绕组为多绕组的电压互感器，并将二次绕组的主绕组作为计量回路互感器使用。

（2）检查核实计量回路和其他保护回路是否完全分开，需要采用专用计量回路进行电能计量。

（3）采用专用且横截面较大电缆，能有效降低计量回路负载电流，进而产生的二次回路压降也会较小。

（4）在电能表计量电压端子并接补偿电容，这样能达到降低回路电压压降的效果[3]。

### 3.3 装设多功能智能电度表

多功能智能电度表功能强大，具备较高的计量精度，一只表集计量、显示、通讯、监测、费控等功能于一身，可以精确地分时计量三相正反向有功电能、四象限无功电能；可以实时测量三相电压、电流、有功功率、无功功率、功率因数等；可以监测并记录失压、失流、断相等事件。同时因其具备强大的通讯功能，能够实现高效、精准的数据远传，加之其拥有较大的输入阻抗，单只表的负荷流量只需要 30 mA 左右，这样一来，电压互感器计量用二次回路电流会显著下降，进而产生的压降也会相应减少，目前在各层级电网关口被广泛应用。目前在海上 EPP 平台重要的供电电网关口，都已经配备了此种智能电度表，设备运行稳定，计量准确度高。如下图 3 所示：

图 3 多功能智能电度表

通过引入专门的测量系统以及安装智能电度表，可以显著减少电压互感器二次回路的电流，这种方案比其他措施更加容易操作。

然而，依靠以上措施，仍然无法有效的将二次回路的电流降至理想水平，这主要取决于二次系统的结构中各元器件本身性能参数。包括降低回路阻抗措施的实施，只能有效的降低其对回路电压的影响，但最终仍然无法实现将二次回路压降降至零的目标。

### 3.4 进行光纤数字化转换装置改造

随着科技的不断进步，一种基于电压互感器二次输出电压的数字化方案正被越来越多的得到应用，其中最常见的是采用光纤传输信号的方式，这种方式不仅可以有效消除电压互感器二次回路的压降，而且还能满足电力系统数字化的需求。

#### 3.4.1 改造原理

将电压互感器的二次电压传输进行光纤数字化转换装置改造，采用高精度 A/D 转换技术将电压互感器输出的模拟信号转换为数字信号，并通过光纤传输技术实现数字信号的传输，在计量电能表接收端再实现 D/A 转换，这样计量设备可以接收到更加精准的电压互感器远传信号。从而很好的规避了二次回路电流和接触电阻的问题，将有效解决二次回路压降问题。

这种改造方案采用光纤作为数字信号传输介质，具有抗干扰性能强、传输距离远等优点，能够有效提高数字信号传输的稳定性和可靠性。

#### 3.4.2 采用这种方法的优势

（1）将电压互感器二次输出的模拟量信号转变为数字光脉冲信号，可以有效的避免因模拟量信号长距离传输带来的衰减问题。

（2）数字光脉冲信号在传输过程中不受外部

（下转第 87 页）

# 300 Mvar 调相机定子线圈制造工艺技术研究

王延明　陈萍　李江帆

东方电气集团东方电机有限公司，四川 德阳 618000

**摘要：**本文介绍了 300 Mvar 调相机定子线圈的主要技术参数及线圈制造的主要工艺过程，特别是对导线的质量提升进行了着重说明，为今后此类型线圈制造积累了一定经验。

**关键词：**调相机；定子线圈；导线；VPI；绝缘

**中图分类号：**TM761.12　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）01-0085-03

# Research on Manufacturing Technology of Stator Coil for 300 Mvar Condenser

*WANG Yanming, CHEN Ping, LI Jiangfan*

( Dongfang Electric Machinery Co.,Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China )

Abstract: This paper introduces the main technical parameters of stator coil for 300 Mvar condenser and the main process engineering of the coil manufacturing, especially the quality improvement of the conductor, which has accumulated some experiences for the same type of coil manufacturing in the future.

Key words: condense; stator coil; conductor; VPI; insulation

300 Mvar 调相机是目前世界单机容量最大、技术最先进的设备，是快速动态无功补偿装置，当电网发生故障时，减小电网电压跌落的幅度和速度，从而保证大电网的安全、可靠，能够有效地提高电网安全性、对电网传输有着重要作用。针对该机组应用于高海拔、定子线圈端部长、产品性能要求高等特点，吸取了空冷定子线圈的制造经验，解决了生产过程中遇到的多项难题。

## 1　定子线圈主要技术参数

| | |
|---|---|
| 额定电压 | 20 kV |
| 定子槽数 | 72 槽 |
| 单台定子线圈数 | 144 支 |
| 单根线圈重量 | 约 120 kg |
| 电磁线 | 涤玻烧结漆包铜扁线 20/180 |
| 主绝缘 | 少胶 VPI |

## 2　定子线圈制造工艺

### 2.1　主要的制造工序

下料去丝、压弯→编花、组合→直线胶化（股间试验）→棱边倒 R→端部成型、胶化→引线铲头、封焊→包对地绝缘→VPI 处理→绝缘烘焙→防晕处理→试验、入库。

### 2.2　电磁线的下料去丝、平直压弯

下料及去丝长度是根据首件试制情况最终确定的。电磁线的下料去丝、平直压弯是在东方电机进口的全自动下料去丝压弯机上进行的。下料前，根据图纸及工艺余量编制下料、去丝、压弯程序。下料过程中，用千分尺检查每盘电磁线的线芯及外形尺寸满足图纸要求，并且外观无损伤、发霉等现象。下料时，调整好下料机的校直轮，保证股线下料的平直度，去丝部位应呈现金属光泽，无余胶、氧化物及残余绝缘，换位弯部位无发瓢现象，绝缘

**收稿日期：**2023-11-03

**作者简介：**王延明（1989－），男，2012 年毕业于哈尔滨理工大学电气工程及其自动化专业，本科，工程师。现在东方电气集团东方电机有限公司从事发电机线圈制造工艺工作。

完好。

### 2.3 编花、组合、垫包

将压好 S 弯的单排股线以汽端为齐头打齐，进行单排换位编织，两个单排股线编织好后组合成一个线圈，组合时在两排股线间垫入排间绝缘，由于线圈的直线部分有较长一段处在铁芯槽外（图 1），为防止出槽口处股线松散，保证线圈的整体性能，适当延长了排间绝缘的长度。在线圈每个换位花处垫放一片换位垫片，然后在线圈两个小面分别垫置换位填充。排间绝缘和换位填充要求长度方向中心与线圈总换位中心一致。为了防止直线末端小面股线不平整、发瓢，在相应位置上下小面各垫一片夹板，再半叠包若干层热收缩带。

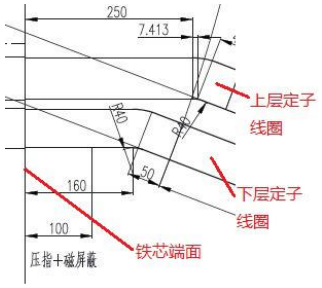



图 1　定子线圈出槽口处示意图

### 2.4 直线胶化、短路试验及棱边倒 R

直线胶化加压时采用分级加压方式，线圈刚入模时先加压力较小的初压，待导线内部的各种绝缘适当软化后，再加压力较大的全压，这种加压方式能最大程度地降低股间短路的风险。同时，由于调相机定子线圈导线高度较小，长度又比较长，属于“细长”型线圈，如果直线胶化质量不好，后序会很容易造成线圈变形，因此适当延长了导线的保温时间，并且降低了线圈的出模温度，保证了直线胶化后导线的刚性。直线胶化后需使用股间短路试验装置对股间及排间进行短路试验，要求不允许有短路点出现。调相机定子线圈由于在压弯及直线胶化时采取了相应的措施，很少出现股间短路的情况。为了提高线圈的电气性能，还需棱边倒 R，即使用锉刀或砂纸将导线的四个棱边倒出规定大小的圆角。

### 2.5 端部成型、胶化

线圈端部成型是将直线胶化后的导线端部垫好排间绝缘后，将导线放入端部成型固化模内，通过手工敲打、弯转线圈端部，使线圈端部成型。此序的关键点简单而言就是使成型后的线圈端部大、小面与模具相服帖。由于线圈股线为铜线，有一定的回弹性，若成型时是将股线刚好打靠至与模具固定侧压铁处，由于回弹，线圈端部会出现与模具不服帖现象，为此，通过试验摸索，在线圈成型时，通过适当增大线圈弯形角度，来抵消回弹对线圈端部形状的影响（图 2）。由于线圈端部较长，端部固化的质量将直接影响线圈是否会发生变形。端部固化质量主要与温度的均匀性、保温时间、保温温度、降温出模等因素有关。为保证线圈端部固化质量，主要从以下两个方面进行控制：

（1）温度均匀性。在首件试制时通过测量各处温度的方法，固定每个加热管的位置，并在加热过程中随时监控，使导线在端部胶化时整个端部的温度保持一致。

（2）保温时间、温度。线圈端部在进行热压固化时，若保温时间过短，或是保温温度过低，都会降低排间绝缘固化质量，出现线圈端部散匝、变形等现象。为保证保温温度，使用自动控温设备来加热，当温度升到规定的保温温度时，通过设备的自动调节，使温度能够恒定在保温温度，并能够持续至要求的保温时间。保温时间结束后，当温度降至规范允许的温度，才可允许拆模。

图 2　调相机定子线圈导线服帖模具

由于调相机定子线圈端部较长，且截面尺寸较小，端部就显得尤为“细长”，与其他汽发定子线圈相比刚性也较差，所以在线圈端部成型固化完出模后，线圈如何摆放也至关重要。摆放时如果线圈直线不在一个平面上或端部受到挤压，经过一段时间，线圈就会产生不能自行恢复的形变。因此要求在线圈端部成型固化完出模后摆放时，采用端部“凹摆”的方式，直线支撑间隔不得超过规定的距离，支撑高度一致，线圈槽口和引线部位必须有支撑，采用组合架摆放，不允许端部挤压变形。

### 2.6 主绝缘包扎

绝缘包扎是在恒温恒湿绝缘净化间内进行的。包扎前使用酒精或丙酮溶液清理干净导线表面，要

求导线表面不能有灰尘或其他污染物，导线无毛刺、尖角，换位填充完整。为了提高线圈的电气性能，还需在定子线圈出槽口 R 部分的对地绝缘采用技术手段进行特别处理。包扎设备采用数控龙门包带机，保证包扎时半叠包准确、张力恒定、无褶皱。包扎后的线圈必须存放在绝缘净化间内，且在规定的时间内进行 VPI 处理。

### 2.7 绝缘压型

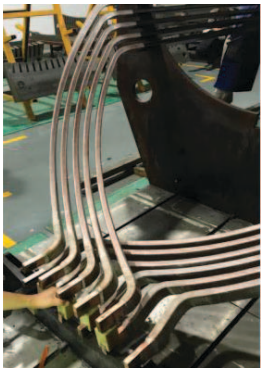


图 3　定子线圈外形尺寸检查

由于调相机定子线圈下线时对线圈端部斜边间隙要求非常严格，即对线圈端部形状和截面尺寸都提出了很高的要求，因此将绝缘压模设计为全模压结构。调相机定子线圈的主绝缘为 VPI 少胶体系，绝缘固化时是将线圈连同模具一同放入专用烘炉内加热的外加热方式，为了提高生产效率，充分利用烘炉资源，将绝缘压模设计为一模双压结构。同时这种结构使用时两个型腔的同一端共用一个锥体，又节约了模具制造成本。为了使一套模具两个型腔压制出的线圈具有互换性（图 3、图 4），要求模具端部采用数控加工。模具加压采用小型电动液压油缸来压紧螺钉，线圈从中间开始向两端移动逐渐加压，这样既可以保证压紧力恒定，线圈受力均匀，又可以减轻工人的劳动强度。

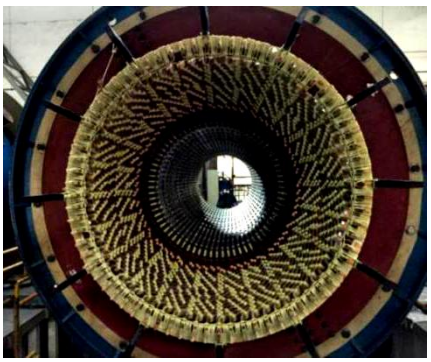


图 4　调相机定子线圈下线

## 3　结语

调相机定子线圈已经顺利投产、应用，检查、试验证明：调相机定子线圈各项指标合格，满足设计、下序要求。调相机定子线圈的生产制造工艺，尤其是导线制造部分，以及模具选用值得其他产品借鉴。

（上接第 84 页）

环境干扰和影响，信号传输可靠性高，能够有效地解决电压互感器二次导线压降带来的影响，大大提升测量的精确度。

通过对电压互感器二次电压传输进行光纤数字化转换装置改造，能够更加精确地获得准确的电能计量数据，为电网运行管理提供更精准的数据支持，电能的计量、监测和分析能力将进一步提高。通过将数字和光信号应用于 EPP 平台这样和电力核心，可以有效地解决各类关键电力数据远传问题，实现电网调度、控制和调节更加科学和精准，满足未来数字化电力自动化系统的发展需求。

## 4　结语

通过对电压互感器二次电压传输进行光纤数字化转换装置改造，能够更加精确地获得准确的电能计量数据，为电网运行管理提供更精准的数据支持。通过将数字和光信号应用于电力核心平台，可以有效地解决电力数据远传问题，有助于电网调度、控制和调节更加科学和精准，满足未来数字化、电力自动化系统的发展需求。


**参考文献：**

[1] 宋家全，刘伟．电能计量误差及计量改进[J].计量与测试技术，2012, 39(3):20

[2] 张丽萍，陈沛立．降低电压互感器二次回路压降的计算方法[J]．电气应用, 2005(10):74-76

[3] 左新燕，何毅民，王玉珍．电压互感器二次接线的改进[J]．石河子科技, 2001(5):39-40

# 《东方电气评论》征稿须知

《东方电气评论》是由中国东方电气集团有限公司、四川省动力工程学会联合主办的电站装备制造领域科技期刊，国内外公开发行双月刊，国内统一连续出版物号 CN51-1333/TM，国际标准连续出版物号 ISSN1001-9006。

《东方电气评论》综合介绍我国电站装备制造领域的科技研发成果及先进制造技术，主要栏目有基础研究、火力发电、核能发电、水力发电、风力发电、光伏发电、工程技术、项目管理等。

《东方电气评论》为学术性刊物，欢迎评论性文章，少量接受综述类文章。来稿必须未公开发表过，且创新性强、观点明确、数据可靠。文稿格式请参照《学术论文编写规则》(GB/T7713.2—2022)和 GB7714《文后参考文献著录规则》的较新版本；量和单位必须符合国家标准和国际标准。

稿件内容请勿涉及国家秘密和单位秘密，保密审查手续按作者所在单位的相关规定办理，必要时提供“不涉及保密，可以公开发表”的单位证明原件。投稿格式要求如下：

1、**投稿方式：**请使用电子文档投稿。电子文档的格式为 WPS 或 Word 文件。投稿时请提供通信作者或第一作者的电话号码、电子信箱和详细准确的邮送地址。

2、**论文内容结构包括：**论文题名（20 字内），作者姓名，作者单位（单位及部门名称、地址及邮编），摘要（200 字内），关键词（3~8 个），正文（图、表应在正文中明确引用位置出现）参考文献。

3、**英文项目：**题名、摘要、关键词、作者姓名及其单位与通信信息几部分，除中文外，须译成英文一并提供。

4、**插图与表格都应有图（表）序与图（表）题。**刊出后的图片均为灰度图片，请作者确保能准确反映需表达的全部信息，画面清晰，大小适宜。图中字符一般用 6 号宋体字，表格应做成三线表。

5、**文中符号：**外文字母、符号必须分清大小写、正斜体，上下角标，数码符号等其位置高低应区别明显，容易混淆的外文字母，请在第一次出现时注明文种或含义。

6、**论文作者署名**应遵守学术规范。

7、**作者简介：**包括姓名、出生年、性别、职称和职务、何时何地取得何校何专业学位（最高学历），曾获得过的重大成果或奖励，现在从事的专业工作。

8、**参考文献：**只列出已公开出版并在文中直接引用的主要文献，序号按文中出现的先后顺序编排。

9、**著作权声明：**本刊已被《中文科技期刊数据库（全文版）》《中国核心期刊（遴选）数据库》《中国学术期刊网络出版总库》及 CNKI 系列数据库收录，有关作者文章著作权使用费与本刊稿酬一次性给付，如作者不同意被收录，请在来稿时向本刊说明。

10、**版面费：**本刊未收取发表版面费。论文一经录用，编辑部酌付稿酬并赠送当期杂志每个作者 2 本。

11、**邮箱投稿：**dfdqpl@dongfang.com；投稿地址：成都市高新西区西芯大道 18 号，邮编：611731