DONGFANG ELECTRIC REVIEW

公开 ISSN 1001-9006 第38卷第6期 (总第154期) 国内邮发代号：62-187
发行 CN 51-1333/TM 出版日期:2024年11月25日 国 内 定 价：8.00 元

东方电气评论 第三十八卷 第六期 二〇二四年十一月

ISSN 1001-9006
CN 51-1333/TM

6

2024

第38卷 总第154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
- 《超星期刊域出版平台》全文收录

ISSN 1001-9006
11>
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

6
2024
第 38 卷第 6 期(卷终) 总第 154 期
（双月刊，1987 年创刊）

東方電氣評論

目 次

[期刊基本参数]CN51-1333/TM*1987*b*A4*88*zh*p￥8.00*750*18*2024-06

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：李宏
英文编辑：张媛
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

DONGFANG ELECTRIC REVIEW

6
2024
2024-11-25 Vol.38 No.6
(Bimonthly, since 1987)

CONTENTS

Sponsor: Dongfang Electric Corporation
Chief Editor: HU Xiukui
Vice Chief Editors: DONG Na, TANG Jian
Executive Editor:LI Hong
English Editor: ZHANG Yuan
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.)

基于碳足迹核算的电站锅炉减碳路径研究

祝仟[1] 曾令午[2] 张媛[1] 郑玉恒[1]

1. 东方电气集团科学技术研究院有限公司，成都 611731；2. 东方电气集团东方锅炉股份有限公司，成都 611731

摘要：二氧化碳排放导致的全球变暖问题日益严峻，重点领域节能降碳升级改造不容忽视。电站锅炉作为我国火力发电的主设备之一，拥有着庞大产品系统体系的同时也是重要碳排放领域之一，如何有效降低其碳排放量，寻找产品绿色减碳路径是电站锅炉制造企业关注的重点问题。本研究利用生命周期评价（LCA）方法，核算了电站锅炉产品原辅料获取、原辅料运输、产品部件生产制造等生命周期过程的碳排放，研究结果表明某台典型电站锅炉产品从“摇篮到大门”的碳足迹为10.07万tCO_2e，其中原辅料获取阶段碳排放占比最多，为70.74 %；产品部件生产制造过程次之，碳排放占比为25.75 %，原辅料运输阶段的碳排放占比相对最小，为3.51 %。结合各阶段碳排放水平以及锅炉产品生产制造过程中的实际情况，提出了强化电站锅炉产品的绿色设计、重视电站锅炉产品的节能生产、重视电站锅炉产品的绿色供应链建设、重视电站锅炉相关企业的数字化管理等多维度减碳路径，进一步促进电站锅炉的绿色低碳可持续发展。

关键词：电站锅炉；产品碳足迹；生命周期评价；减碳路径

中图分类号：X933.2 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-9006（2024）06-0001-06

Research on Carbon Reduction Path of Power Plant Boiler Based on Carbon Footprint Accounting

ZHU Qian[1], ZENG Lingwu[2], ZHANG Yuan[1], ZHENG Yuheng[1]

(1.DEC Academy of Science and Technology Co.,Ltd.,611731,Chengdu,China; 2.Dongfang Boiler Co.,Ltd.,611731,Chengdu,China)

Abstract:The problem of global warming caused by carbon dioxide emissions is becoming increasingly serious, and the upgrading of energy conservation and carbon reduction in key areas cannot be ignored. As one of the main equipment of thermal power generation in China, power plant boiler has a huge product system and is also one of the important carbon emission fields. How to effectively reduce its carbon emission and find a green path for product carbon reduction is the key issue that power plant boiler manufacturers pay attention to. In this study, the life cycle assessment (LCA) method was used to calculate the carbon emissions of raw materials acquisition, transportation of raw materials, production and manufacturing of product components and other life cycle processes of power plant boiler products. The research results showed that the carbon footprint of a typical power plant boiler product from "cradle to gate" was 100,700 tCO_2e, among which the carbon emissions at the raw materials acquisition stage accounted for the largest proportion. Is 70.74%; The production process of product parts is second, accounting for 25.75% of carbon emissions, and the carbon emissions in the transportation stage of raw materials are relatively the smallest, accounting for 3.51%. Combined with the carbon emission level of each stage and the actual situation in the production and manufacturing process of boiler products, a multi-dimensional carbon reduction path such as strengthening the green design of power plant boiler products, attaching importance to the energy-saving production of power plant boiler products, attaching importance to the green supply chain construction of power plant boiler products, and attaching importance to the digital management of power plant boiler related enterprises is proposed. Further promote the green, low-carbon and sustainable development of power station boilers.

Key words: power station boiler; product carbon footprint; life cycle assessment; carbon reduction path

收稿日期：2024-08-20

作者简介：祝仟（1997—），女，2023年毕业于西南交通大学环境工程专业，硕士研究生。现任职于东方电气集团科学技术研究院有限公司，主要从事双碳领域的研究工作。

随着经济社会的不断发展，二氧化碳排放量逐年增加，碳排放导致的全球变暖成为社会各界共同关注的关键环境问题。能源转换和供应领域，锅炉作为我国重要的能源转换设备，广泛应用于电力、供热、石化、化工、钢铁、有色金属等行业，是保障国民经济发展和人民生活的重要基础装备。对于电站锅炉而言，国家虽积极推动煤电结构优化和转型升级、产品绿色节能改造等措施，但当前仍是我国能源消耗量最大、碳排放量最多的耗能设备，相关企业承担着艰巨的减排任务。产品准确的碳足迹分布评估是实现产品低碳化的先决条件，因此通过产品碳足迹核算，识别电站锅炉在原辅料获取、原辅料运输、产品部件生产制造等各个阶段的碳排放量情况，对于推动电站锅炉产品低碳化改造和制造加工工艺优化提升，推动产业链上下游节能降碳，优化能源结构，促进行业转型升级、形成绿色低碳的生产方式的方面具有重要意义。

产品碳足迹作为碳排放定量化管理的一种有效工具，在各领域得到了广泛应用。Yavuzdeger 等[1]通过量化塑料瓶吹塑模具从原材料投入到最终在工厂形成模具每一个阶段的碳足迹，对塑料瓶吹塑模具生产的碳足迹有了全面了解，从而为推动模具行业的绿色低碳发展提供了宝贵的见解；He Bin 等[2]通过将产品制造过程分为制造设备层、零件层、产品层和车间层，并对每一层的碳排放源进行分析，形成了系统的碳排放量化模型，并以某种类型的风力发电机齿轮箱为例，识别出了风力发电机组齿轮箱的后壳体、前壳体和第一植物架是风力发电机组的主要碳排放部件；徐加雷等[3]通过对新能源汽车动力电池行业退役低镍镍钴锰酸锂(NCM111)电池回收再利用过程的碳足迹进行研究。计算得到通过回收 NCM111 电池生产 1 t 高镍镍钴锰酸锂(NCM811)电池的正极材料净温室气体排放量为 18.4 t CO_2e，比正常使用原生材料生产等量 NCM811 电池的正极材料减少 36.3 %的温室气体排放；张欢等[4]基于生命周期评价方法，对某出口的传感器产品进行碳足迹核算，研究结果显示生产阶段是主要排放过程，占总量的 31.60 %；甘欣等[5]选定从“摇篮到大门”的核算边界，对四川省典型企业的钢铁产品进行碳足迹核算，并基于核算结果提出加大技术研发力度及实行分类碳标签制度等方面建议。对于锅炉产品领域，仅侯娜娜等[6]对工业锅炉的产品碳足迹评估方法进行了研究，且以从“摇篮到坟墓”为核算边界案例，核算出的结果显示产品使用阶段的燃料燃烧占据其全生命周期排放的 99.95 %。与之不同的是，本文以电站锅炉为研究对象，结合供应链管理的实际需求，以生命周期评价为方法依据从电站锅炉产品制造本身降碳的角度出发，选用从“摇篮到大门”的核算边界，系统分析电站锅炉产品碳足迹核算的实际情况，切合实际，提出电站锅炉产品碳足迹核算的方法和模型，并基于核算结果提出电站锅炉产品低碳转型的有效路径，推动电站锅炉产品的绿色低碳转型及其绿色供应链构建。

1 产品碳足迹核算方法

产品碳足迹是仅考虑气候变化这一单一环境影响类别，以二氧化碳当量（CO_2e）为单位，表征产品系统中温室气体排放量和去除量总和的重要指标。[7]生命周期评价法作为核算产品碳足迹的主流方法，已被广泛应用于各类产品的碳足迹核算。该方法的技术框架由目标与范围的确定、清单分析、影响评价、结果解释四个部分组成。[8-10]基于该方法，研究者可对产品生命周期内资源能源消耗产生的温室气体排放进行衡量，包括原辅料的获取、原辅料的运输、产品的生产制造、产品运输、产品使用、产品废弃处置等过程。根据核算范围的不同，系统边界可分为“从摇篮到坟墓”（包含上述生命周期所有过程）和“从摇篮到大门”（仅包含从原辅料获取到产品生产制造出厂相关过程）两种类型。[11]

1.1 目标与范围的确定

目标与范围的确定是产品碳足迹研究的第一步，主要是在明确研究对象和应用意图的基础上，描述研究产品的声明/功能单位、系统边界、数据取舍及数据分配相关要求等。

对于电站锅炉而言，本研究考虑到下游供应商的实际需求及产品降碳的客观需要，选用“从摇篮到大门”的核算边界，即从自然界资源与能源的开采生产开始到锅炉产品部件从锅炉制造厂出厂结束，包括锅炉产品的原辅料获取、原辅料运输、产品部件的生产制造过程。系统边界如图 1 所示，以一台某类型的电站锅炉（如一台 660 MW 超超临界一次再热循环流化床锅炉）为声明单位。通过量化电站锅炉产品各阶段的碳排放，有效识别产品系统单元内的重要排放阶段、重点排放过程及主要影响因素等，对于探索电站锅炉的减碳路径、构建绿色供应链具有重要意义。

数据取舍方面，电站锅炉产品碳足迹核算应量化至少 95 %系统边界内预计会产生的温室气体排

放与清除[12]，即温室气体排放或清除量小于所评价产品温室气体总排放或清除估测值 1 %的可予以舍去，但累计不应超过 5 %；数据分配方面，电站锅炉产品碳足迹相关数据在无法避免分配的条件下，可按产品部件的重量比例关系分配将数据总量进行分配。[7]

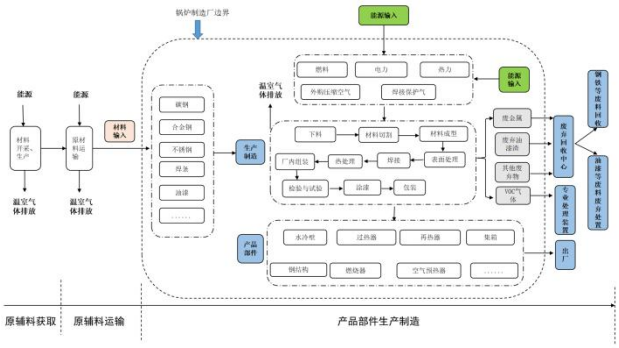


图 1　电站锅炉从“摇篮到大门”的系统边界图

1.2 清单分析

清单分析是产品碳足迹研究的核心步骤，是对所研究系统中输入和输出数据建立清单的过程。其中输入包括物料消耗、自然资源消耗、能源消耗等；输出包括产品、副产品、待处置废弃物、环境排放等。

对于电站锅炉而言，原辅料获取阶段，需要收集电站锅炉产品原辅料种类、每一种类材料对应的消耗量、每种类材料对应的温室气体排放因子；原辅料运输阶段，需要收集每一原辅料对应的运输距离、运输方式、材料供应商的供货权重及相关运输方式涉及的温室气体排放因子；对于产品部件生产制造过程，将原辅料及能源消耗视为系统的输入，相关产品部件及废弃材料视为输出，该过程需要收集每一系统单元对应的能源消耗、产品部件生产制造过程的材料废弃物、每一能耗及材料处置相关的温室气体排放因子。此外，产品部件的包装及油漆喷涂产生的 VOC 废气处理等过程产生的温室气体排放按照数据取舍原则舍弃后不纳入数据收集清单。

1.3 影响评价

影响评价是基于清单分析阶段的结果来量化产品系统生命周期各阶段温室气体排放对气候变化的潜在影响。通常以各阶段的活动数据与考虑了全球增温潜势（GWP）的温室气体排放因子的乘积得到的二氧化碳当量来表示。

对于电站锅炉而言，其从“摇篮到大门”的碳足迹采用公式（1）计算。

$$GHG_{锅炉} = GHG_{原辅料} + GHG_{原辅料,运} + GHG_{生产} \quad (1)$$

式（1）中：$GHG_{原辅料}$—锅炉产品原辅料获取过程的温室气体排放总量，单位为吨二氧化碳当量（tCO_2e）；

$GHG_{原辅料,运}$—原辅料运输过程的温室气体排放总量，单位为吨二氧化碳当量（tCO_2e）；

$GHG_{生产}$—锅炉产品部件生产过程的温室气体排放总量，单位为吨二氧化碳当量（tCO_2e）；

1.3.1 原辅料获取阶段

锅炉产品原辅料获取过程的温室气体排放采用公式（2）计算。

$$GHG_{原辅料} = \sum_{i=1}^{n} Q_i \times F_{GHG,i} \quad (2)$$

式（2）中：

Q_i—第 i 类原辅料的消耗量，单位为吨（t）；

$F_{GHG,i}$—第 i 类原辅料（从摇篮到大门）的温室气体排放因子，单位为吨二氧化碳当量/吨（tCO_2e/t）。

1.3.2 原辅料运输阶段

锅炉产品原辅料运输过程的温室气体排放采用公式（3）计算。

$$GHG_{原辅料,运} = \sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n} Q_{i,j} \times D_{i,j} \times C_{GHG,j} \quad (3)$$

式（3）中：

$Q_{i,j}$—第 j 种运输方式运输的第 i 种材料的量，单位为吨（t）；

$D_{i,j}$—第 j 种运输方式运输的第 i 种材料的运输距离，单位为千米（km）；

$C_{GHG,j}$—第 j 种运输方式的温室气体排放因子，单位为吨二氧化碳当量/（吨•千米）（$tCO_2e/(t\cdot km)$）。

1.3.3 产品部件生产制造阶段

锅炉产品各部件生产制造过程的温室气体排放可按式（4）计算：

$$GHG_{生产} = \sum_{k=1}^{l} GHG_{能耗,k} + GHG_{废弃,k} \quad (4)$$

式（4）中：

$GHG_{能耗,k}$—第 k 类锅炉产品部件生产过程中能源消耗产生的温室气体排放量，单位为吨二氧化碳当量（tCO_2e）；

$GHG_{废弃,k}$—第 k 类锅炉产品部件生产过程中废弃材料处置、回收产生的温室气体排放量，单位为吨二氧化碳当量（tCO_2e）；

锅炉产品部件生产过程中能源消耗产生的温室气体排放可按式（5）计算：

$$GHG_{能耗} = E_f + E_e + E_c + E_h + E_t \quad (5)$$

式（5）中：

E_f—燃料消耗产生的温室气体排放量，单位为吨二氧化碳当量（tCO_2e）；

E_e—电力产生的温室气体排放量，单位为吨二氧化碳当量（tCO_2e）；

E_c—外购压缩空气产生的温室气体排放量，单位为吨二氧化碳当量（tCO_2e）；

E_h—热力产生的温室气体排放量，单位为吨二氧化碳当量（tCO_2e）；

E_t—焊接保护气二氧化碳逃逸排放量，单位为吨二氧化碳当量（tCO_2e）。

燃料消耗产生的温室气体排放量按公式（6）计算：

$$E_f = \sum_k^l \sum_x^y (AD_{k,x} \times EF_x + AD_{k,x} \times EF'_x) \quad (6)$$

式（6）中：

$AD_{k,x}$—锅炉制造厂生产第 k 类部件消耗的第 x 种燃料的消耗量，单位为吨（t）、万立方米（$\times 10^4 m^3$）；

EF_x—第 x 种燃料获取（包括从自然界获取资源到燃料生产到运输至锅炉制造厂的过程）的排放因子，单位为吨二氧化碳当量/吨（tCO_2e/t）、吨二氧化碳当量/万立方米（$tCO_2e/\times 10^4 m^3$）；

EF'_x—第 x 种燃料使用的排放因子（燃料使用过程排放），单位为吨二氧化碳当量/吨（tCO_2e/t）、吨二氧化碳当量/万立方米（$tCO_2e/\times 10^4 m^3$）等。

EF'_x按公式（7）计算：

$$EF'_x = NCV_x \times CC_x \times OF_x \times 44/12 \quad (7)$$

式（7）中：

NCV_x—第 x 种燃料的低位发热量，单位为吉焦/吨（GJ/t）、吉焦/万立方米（$GJ/10^4 m^3$）；

CC_x—第 x 种燃料的单位热值含碳量，单位为吨碳/吉焦（tC/GJ）；

OF_x—第 x 种燃料的碳氧化率，单位为%。

电力产生的温室气体排放量按公式（8）计算：

$$E_e = \sum_k^l AD_{e,k} \times EF_e \quad (8)$$

式（8）中：

$AD_{e,k}$—锅炉制造厂生产第 k 类部件消耗的电力用量，单位为兆瓦时（MWh）；

EF_e—电力温室气体排放因子，单位为吨二氧化碳当量/兆瓦时（tCO_2e/MWh）。

外购压缩空气产生的温室气体排放量按公式（9）计算：

$$E_c = \sum_k^l AD_{c,k} \times EF_c \quad (9)$$

式（9）中：

$AD_{c,k}$—锅炉制造厂生产第 k 类部件消耗的外购压缩空气用量，单位为万立方米（$10^4 m^3$）；

EF_c—压缩空气的温室气体排放因子，单位为吨二氧化碳当量/万立方米（$tCO_2e/10^4 m^3$）。

热力产生的温室气体排放量按公式（10）计算：

$$E_h = \sum_k^l AD_{h,k} \times EF_h \quad (10)$$

式（10）中：

$AD_{h,k}$—锅炉制造厂生产第 k 类部件消耗的外购热力用量，单位为吉焦（GJ）；

EF_h—热力的温室气体排放因子，单位为吨二氧化碳当量/吉焦（tCO_2e/GJ）。

焊接保护气二氧化碳逃逸排放量按公式（11）计算：

$$E_t = \sum_k^l \sum_a^b \left(\frac{P_a \times W_{a,k}}{\sum_t P_t \times M_t} \times 44 + W_{a,k} \times EF_a\right) \times 10^{-3} \quad (11)$$

式（11）中：

$W_{a,k}$—锅炉制造厂生产第 k 类部件消耗的第 a 种焊接保护气的用量，单位为千克（kg）；

P_a—第 a 种焊接保护气中 CO_2 的体积百分比，单位为%；

P_t—混合气体中第 t 种气体的体积百分比，单位为%；

M_t—混合气体中第 t 种气体的摩尔质量，单位为克每摩尔(g/mol)；

EF_a—第 a 种焊接保护气获取过程（包括从自然界获取资源到焊接保护气生产到运输至锅炉制造厂的过程）的温室气体排放因子，单位为千克二氧化碳当量/千克（$kgCO_2e/kg$）；

a—保护气类型；

t—混合保护气中的气体种类。

废弃材料处置回收的温室气体排放按公式（12）

计算：

$$GHG_{废弃} = \sum_{i=1}^{n}(AD_{r,i} \times EF_{r,i} - F_i \times R_i \times A \times GHG_{c,i}) \quad (12)$$

式（12）中：

$AD_{r,i}$—第 i 种废弃材料处置的重量，单位为吨（t）；

$EF_{r,i}$—废弃处置第 i 种材料的温室气体排放因子，单位为吨二氧化碳当量/吨（tCO_2e/t）；

F_i—第 i 类原辅料的废弃率；

R_i—第 i 类废弃材料的可回收利用率，本文件设定各类废弃钢材的相关取值为 0.85；

A—分配系数，基于可回收材料与原材料的经济价值分配，本文件设定各类钢材的相关取值为 0.6；

$GHG_{c,i}$—第 i 类原辅料获取的温室气体排放量，单位为吨二氧化碳当量（tCO_2e）

1.4 结果解释

结果解释是基于清单分析和影响评价的结果识别出产品生命周期中的重大环境问题，并对结果进行评估分析，包括敏感性和不确定性的评估、研究的局限性等，进而根据评估结果给出整体的结论和改进的意见建议。

2 案例分析

基于上述方法，本研究以某电厂一台典型电站锅炉产品为研究对象，核算其从“摇篮到大门”的产品碳足迹。

原辅料获取阶段，将产品的材料组成细分为碳钢、不锈钢、合金钢、油漆等材料，由于数据统计的精细程度难以具体到每一产品的实际材料消耗，企业一般基于产品的物料平衡表（BOM 表）进行该阶段数据收集，相关材料种类消耗量以材料牌号细分到具体类别。此外，保温材料无论是否在锅炉制造厂的供货范围内，统一将该部分温室气体排放纳入该产品碳足迹核算，从而使产品的碳属性具有可比性；原辅料运输阶段，由于数据统计的精细程度难以具体到每一产品材料的运输情况，相关运输数据可基于锅炉制造厂一年的总体运输情况按供货商的供货权重进行统计，当数字化手段更加精确后，可分别统计每一材料对应的运输情况；产品部件生产制造阶段，涉及燃料、电力、热力、外购压缩空气、焊接保护气等能源消耗及废弃钢材、废油漆渣等废弃物的处理与回收，其中能源消耗数据可基于数据分配原则按重量比例关系在产品部件中进行分配。外部扩散厂的数据难以获取的，采用基于内部加工厂和外部扩散厂涉及该产品部件的重量比例关系，以内部加工厂分配的该产品相关能耗结果折算，所得数据上浮 5%获得。碳排放因子方面，当前我国还未建立统一的碳足迹数据库，大多采用国际主流的 Ecoinvent 数据库中相关数据作为代表。经统计，核算结果如图 2 所示。

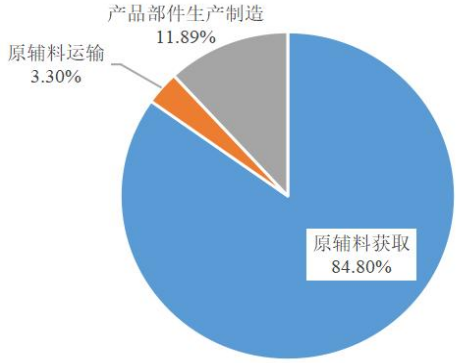


图 2 某典型电站锅炉产品从摇篮到大门的碳足迹结果

研究结果显示，某台典型电站锅炉产品从摇篮到大门的碳足迹总量为 10.07 万 t CO_2e，整体对比为原辅料获取＞产品部件生产制造＞原辅料运输。其中，原辅料获取阶段碳排放占比为 70.74 %，产品部件生产制造阶段碳排放占比为 25.75 %，原辅料运输阶段的碳排放占比为 3.51 %。由此可见，对于电站锅炉而言，原材料的类别及消耗量极大的影响着产品的碳足迹量化结果，同时产品部件生产制造阶段的能源消耗也是产品碳排放的一大重要来源。运输阶段的碳排放占比虽相对较小，但从碳排放总量结果方面来看仍不容忽视。

不确定分析及研究的局限性方面，Ecoinvent 数据库中的温室气体排放因子数据取值大部分基于国外或全球平均的研究，且由于研究数据的缺失，某些排放因子的选取是根据相关材料材质属性及生产工艺，选择相似的排放因子近似替代。运输数据方面，由于采购部门并未详细记录车辆载重信息以及每一材料的实际运输情况，采用统一模糊处理的方式进行统计，与实际情况可能存在一定差异，对电站锅炉产品碳足迹核算的真实值有一定影响。生产制造过程的数据基于重量原则将总体能耗分配到该产品，可能与实际生产中的能源消耗存在一定差异。未来，随着数字化手段更加精确化，产品碳足迹的准确程度将不断提高。

3 电站锅炉减碳路径分析

基于上述研究结果，笔者针对电站锅炉，提出一系列促进产品绿色低碳发展的有效路径：

（1）强化电站锅炉产品的绿色设计。在电站锅炉产品设计阶段，采用更加绿色低碳的设计理念，综合考虑产品研发、原辅料、生产、包装、运输和材料回收等过程，聚焦产品轻量化、低碳化、循环化等重点方向，最大限度降低资源能源消耗。考虑产品部件的可拆卸、可回收及绿色材料选择，对无法有效回收的部件，积极推动生物可降解材料及其他低碳材料开发；同时用好绿色设计工具，以专业的数字仿真数据管理平台及仿真软件，实现模型及试验数据打通、仿真数据高效管理及设计仿真流程化。

（2）重视电站锅炉产品的节能生产。在电站锅炉产品部件制造环节，通过调整生产线的设置和优化生产流程，采用智能化制造、自动化加工等数字化制造技术，厂区内燃气改电等措施，提高生产效率，降低物料浪费和能源消耗；推广使用更加高效节能的加工设备、照明设备、空调设备等，进一步减少能耗和碳排放；全面推行绿电替代，通过园区内自建光伏、光伏储能等方式减少生产过程排放，实现产品高效低耗生产；积极跟踪国家政策，探索购买碳汇、绿证等方式实现减碳，探索通过补偿减碳形式实现运营碳中和。

（3）重视电站锅炉产品的绿色供应链建设。坚持绿色采购理念，明确采购物品的环境要求和标准，大力推广使用环保材料和节能产品，将材料属性、采购距离、运输方式等协同纳入合格供应商评估范围，全面评估供应商的环境表现、能源利用效率、碳排放等多方面因素，确保供应商符合相关要求及标准。在原材料采购过程中适时向上游企业提出披露其产品碳足迹的要求，以此推动整个供应链的绿色可持续性。

（4）重视电站锅炉相关企业的数字化管理。加快部署相关企业能源管理系统和碳系统建设，实现企业能碳数据动态监管，有效盘活企业数据要素资产，打造形成以能碳监管、绿色资产管理、产品碳足迹等为核心竞争优势的能碳数字化“新质”管理工具。同时以物联网、人工智能、区块链、数字孪生等数字化技术，全面赋能企业智慧运维，基于采集和分析的数据，有的放矢地开展节能降碳更新改造工作，实现企业降本增效。

4 结语

本研究通过介绍生命周期评价方法，以电站锅炉为研究对象，核算了某电厂典型电站锅炉产品从“摇篮到大门”的碳足迹。研究结果发现，在系统边界范围内，某台典型电站锅炉产品的碳足迹总量为10.07 万 t CO_2e，其中，原辅料获取阶段的碳排放占比最大，为 70.74 %，产品部件生产制造阶段碳排放占比次之，为 25.75 %，原辅料运输阶段的碳排放占比相对最小，为 3.51 %。基于电站锅炉产品的碳足迹研究过程，识别出原辅料的种类及耗量、产品部件生产制造过程的能源消耗及原辅料的运输方式等因素是影响产品碳足迹的重大因素，从而提出了强化电站锅炉产品的绿色设计、重视电站锅炉产品的节能生产、重视电站锅炉产品的绿色供应链建设、重视电站锅炉相关企业的数字化管理等多维度减碳路径，进一步促进电站锅炉的绿色低碳可持续发展。

参考文献：

[1] Yavuzdeger A,Esenboga B,Ates K T,et al.Assessing the Carbon Footprint of Plastic Bottle Blow Mold Based on Product Life Cycle for Managing the Mold Industry's Carbon Emission[J]. Sustainability, 2024,16(5)

[2] He B, Qian S S , Li T Y.Modeling product carbon footprint for manufacturing process[J].Journal of Cleaner Production,2023,402

[3] 徐加雷, 余海军, 谢英豪, 等. 退役动力电池回收再利用碳足迹研究[J].环境污染与防治,2023,45(8):1092-1095+1100

[4] 张欢, 贺迪, 赵晓宇. 基于生命周期的电子产品碳足迹核算[J]. 智能建筑, 2022(9):62-67

[5] 甘欣, 钟玘狄, 邱凌, 等. 基于生命周期的四川省钢铁产品碳足迹核算研究[J]. 环境科学与管理,2023,48(9):20-25

[6] 侯娜娜, 笪耀东, 刘雪敏, 等. 工业锅炉产品碳足迹评估方法研究[J].中国特种设备安全, 2024, 40(5):12-18

[7] ISO 14067: 201 8 温室气体 产品碳足迹 量化要求和指南[S]

[8] GB/T 24040—2008 环境管理 生命周期评价 原则与框架[S]

[9] GB/T 24044—2008 环境管理 生命周期评价 要求与指南[S]

[10] Kallitsis E K, Anna K, Geoff H.Life cycle assessment of recycling options for automotive Li-ion battery packs[J].Journal of Cleaner Production, 2022,371

[11] 马晓, 尹超男, 王俊涛, 等. 基于生命周期评价方法的硅莫砖碳足迹分析与减碳路径研究[J/OL]. 耐火材料,1-9[2024-10-18]. http://kns.cnki. net/kcms/detail/41.1136.TF.20240626.1301.002.html

[12] PAS2050:2011 商品和服务在生命周期内的温室气体排放评价规范[S]

浅析磷酸铁生产废水处理技术

梁全勋[1] 郑明媚[1] 李娜[1] 秦佳旺[1] 邓毅[1] 庄原发[1,2]

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

摘要：磷酸铁生产中会伴随着酸性废水不断产生，废水水量大且成分较为复杂，含盐量高，直接排放不仅会对环境造成极大危害，还会造成资源的浪费。本文从磷酸铁生产废水来源、水质、处理技术进行介绍，并对未来处理技术发展进行总结。

关键词：磷酸铁；生产废水；处理技术

中图分类号：X703 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-9006（2024）06-0007-05

Analysis of Wastewater Treatment Technology for Iron Phosphate Production

LIANG Quanxun[1], *ZHENG Mingmei*[1], *LI Na*[1], *QIN Jiawang*[1], *DENG Yi*[1], *ZHUANG Yuanfa*[1,2]

(1.Dongfang Boiler Co., Ltd., 643001, Zigong, Sichuan, China;

2.Clean Combustion and Flue Gas Purification Key Laboratory of Sichuan Province, 611731, Chengdu, China)

Abstract: The production of iron phosphate is accompanied by the continuous generation of acidic wastewater, which is large in volume, complex in composition, and high in salt content, Its direct discharge not only causes great harm to the environment, but also wastes resources. This article introduces the sources, water quality, and treatment technologies of wastewater from the production of iron phosphate, and summarizes the development of future treatment technologies.

Key words: iron phosphate production; production wastewater; treatment technology

随着国家“双碳”目标的提出，节能减排势在必行，锂电池行业作为其重要抓手也迎来了快速发展，电池正极材料可分为锰酸锂、钴酸锂、磷酸铁锂电池以及三元锂电池等类型。目前动力电池在市场端主要以磷酸铁锂和三元锂电池为主。磷酸铁锂电池生产成本相对较低，在低端乘用车、通勤专用车辆领域应用较广。而三元正极材料因其具有能量密度高的专属特点，在高续航里程的乘用车领域应用较广。[1]近年来，国家减少了新能源汽车生产领域的补贴优惠政策，考虑电池生产成本及磷酸铁锂电池生产技术的不断提升，其性价比也逐步提升。据测算，如果电池生产的技术路线在短时间内没有重大突破，那么磷酸铁锂电池也必将长期具有低成本的优势，国内、国际上主要新能源车企也将重点攻关磷酸铁锂电池生产技术发展，预计到 2025 年国内新能源乘用车领域磷酸铁锂电池市场份额将达到 60 %，即将成为市场主流。

根据采用原材料以及合成相态的不同，磷酸铁锂的生产工艺可分为氧化铁红-固相法、草酸亚铁-固相法、磷酸铁-固相法以及其他合成法。由于磷酸铁-固相法工艺简单、原料利用率高、重复性好、正极材料活性高，已经成为了国内磷酸铁锂的主流生产技术。在此工艺中磷酸铁是磷酸铁锂的优良前驱体，应用广泛，其生产技术及应用方面的研究已逐渐成为行业内研究的热点。磷酸铁作为磷酸铁锂重要的合成原料，在其生产过程中会产生大量废水，一般生产每吨磷酸铁的废水产生量约为 50~100 t，其直接排放将对环境造成严重的破坏和影响，也会造成资源的浪费。

收稿日期：2024-07-10

基金项目：四川省科技计划资助（2022 JDTD0009）

作者简介：梁全勋（1989－），男，2012 年毕业于西南科技大学工业工程专业，本科，工程师。现任职于东方电气集团东方锅炉股份有限公司技术创新中心，从事水污染处理技术研发工作。

1 磷酸铁生产废水来源及水质

磷酸铁生产废水主要产生于磷酸铁合成、洗涤和分离工段，主要包括磷酸铁的洗涤废水和磷酸铁母液等。磷酸铁生产废水不但含有高浓度的硫酸根、磷酸根、不同浓度的金属离子，还含有由于不同合成工艺引入的盐类（铵根离子或者钠离子）等，成分较为复杂，不能按常规达标排放的处理方法进行处理。

1.1 磷酸铁生产工艺及废水产生情况

磷酸铁生产原料包括铁源和磷源，二者通过化学反应生成磷酸铁。铁源主要以铁屑、铁渣、硝酸铁、氯化铁和硫酸亚铁为主，其中硫酸亚铁主要来源于钛白粉生产的副产品绿矾（七水硫酸亚铁）；磷源主要有磷酸、磷酸二氢铵（磷酸一铵）等。

现阶段，磷酸铁产品的生产技术主要包括钠法、铵法、以及铁法，三种生产工艺的差异主要体现在原材料、产品品质以及生产废水等方面。铵法由于成本最低，产品品质好，主要副产物为硫酸铵，目前也是应用最多的工艺；其次是钠法，成本介于铵法和铁法之间，也是主流生产工艺之一，产品杂质较铵法多，副产品硫酸钠价值较低，也会产生大量废水；对于铁法，其排放物主要为氢气，产生废水很少、环保压力小，但是生产成本高且产品稳定性相对较差，相较铵法和钠法应用较少。

根据上述分析可知，磷酸铁生产废水主要是在铵法和钠法两种主流工艺中产生。由于两种方法的合成过程大致相同，且除了由于原料引入的盐类（NH_4^+、Na^+）不同外，其余废水成分类似，因此以铵法工艺为例，介绍磷酸铁生产废水产生情况。

铵法工艺为硫酸亚铁、磷酸一铵、双氧水经反应后生成磷酸铁沉淀和硫酸（$2FeSO_4+2NH_4H_2PO_4+H_2O_2=2FePO_4\downarrow+(NH_4)_2SO_4+H_2SO_4+2H_2O$），通过板框压滤机进行固液分离（固体为磷酸铁），滤液即为高浓母液（母液/合成母液）；为去除磷酸铁滤饼中的杂质离子，提高磷酸铁纯度，需要用水洗涤滤饼，出水即为一洗水（漂洗水/合成洗涤水）；洗净的物料与磷酸进行晶化反应，进一步合成磷酸铁浆料，之后经板框压滤再进行固液分离，得到的滤液为晶化母液（转化母液/老化母液），用水洗涤滤饼得到二洗水（转化洗涤水）；滤饼再经脱水干燥等工序得到磷酸铁产品。晶化母液由于含有磷酸，常回用至磷酸亚铁除杂车间或者回用为一洗水，也可能进行单独处理。而二洗水由于水质相对干净，通常直接回用为一洗水，在系统内循环，可充分减少一洗水的用量，但有少数项目将二洗水做单独处理。因此铵法工艺中磷酸铁生产废水主要来自于高浓母液和一洗水，也就是常说的母液和漂洗水。

1.2 磷酸铁生产废水水质水量

1.2.1 铵法生产废水水质

对于铵法工艺，一般母液和漂洗水水质见表 1。

表 1 铵法磷酸铁生产废水水质

项目	单位	混合母液	混合漂洗水
水温	℃	30~35（甲方一次降温后）	30~35（甲方一次降温后）
pH	/	2.0~2.5	2.2~2.5
总 P（PO_4^{3-}）	mg/L	2 200~3 000	200~400
NH_3-N	mg/L	6 000~7 000	1 500~2 000
SO_4^{2-}	mg/L	50 000~60 000	3 000~4 000
Na^+	mg/L	30~50	≤20
Ca^{2+}	mg/L	30~50	≤20
Mg^{2+}	mg/L	500~700	30~50
Mn^{2+}	mg/L	80~100	≤30
Fe^{2+}	mg/L	30~50	≤30
F^-	mg/L	30~50	≤20
Ni^{2+}	mg/L	≤10	≤5
TDS	mg/L	55 000~65 000	12 000~15 000
COD	mg/L	≤60	≤20
其他元素	mg/L	≤20	≤10

由表 1 可知母液和漂洗水中的污染物类型基本一致，但浓度差别较大，且漂洗水的水量大概是母液的 5~6 倍。母液和漂洗水均为酸性废水，废水中阳离子成分主要为铵根离子，同时铁、锰、钙、镁、等离子含量也不低；阴离子主要为磷酸根、硫酸根，氯离子含量几乎为零。其母液水质特点可总结为：

（1）pH 低（0.5~2）；

（2）总 P 含量高（1 500~2 000 mg/L）；

（3）硫酸根含量高（15 000~25 000 mg/L）；

（4）氨氮含量高（15 000~20 000 mg/L）；

（5）Mg^{2+}含量高（500~1 000 mg/L）。

漂洗水水质特点可总结为：

（1）pH 低（2~3）；

（2）总 P 含量高（500~1 000 mg/L）；

（3）硫酸根含量高（1 500~2 500 mg/L）；

（4）氨氮含量高（1 800~2 500 mg/L）；

整体而言，铵法磷酸铁生产废水为高浓酸性无机废水，氨氮、磷酸根、硫酸根离子浓度高，具有一定的回收价值；废水具有一定的温度且污染物种类多，含有 Mg^{2+}、Mn^{2+}、Fe^{2+}、Ca^{2+}、F^-等多种影响回用处理的污染因子；同时废水的硬度和 TDS 也相对较高，易产生结垢和堵塞问题。

1.2.2 钠法生产废水水质

对于钠法，由于合成步骤基本与铵法一致，因此其废水来源与铵法相同，且水质情况也类似。其主要区别为钠法采用氢氧化钠作为反应物质，铵法采用磷酸一铵，引入的盐分不同。最终废水中，铵法主要含有氨氮、而钠法主要含有 Na^+。因此钠法磷酸铁生产废水水质特点同样为酸性高盐无机废水，含有大量的 Na^+、PO_4^{3-}、SO_4^{2-}，且含有一定量的金属离子。

2 磷酸铁生产废水处理工艺

由于铵法和钠法磷酸铁生产废水水质类似，因此处理工艺也基本类似。磷酸铁生产废水处理分为间接排放以及零排放两种方式。近些年随着环保政策的日趋严格，“预处理+膜浓缩+MVR 蒸发结晶”的资源化零排放技术路线已经成为磷酸铁生产废水处理的主流工艺。

2.1 间接排放工艺

当磷酸铁工厂下游存在污水处理厂时，其部分指标排放标准可按照《无机化学工业污染物排放标准》(GB31573-2015)中间接排放标准。标准要求 COD≤200 mg/L，pH6~9，氨氮≤40 mg/L，悬浮物≤100 mg/L，总磷≤2 mg/L，总氨≤60 mg/L，其他指标参照下游接收污水处理厂要求。

此工艺处理方法主要采用石灰沉淀法，通过投加石灰同步生成硫酸钙（$CaSO_4$）和磷酸钙（$Ca_3(PO_4)_2$）沉淀而去除硫酸根（SO_4^{2-}）和磷酸根（PO_4^{3-}）[2]，重金属离子则与氢氧根反应生成氢氧化物，在不受总盐量超标影响的情况下直接排放，如果是铵法废水后续还需经过汽提脱氨后再进行排放。但该方法将产生大量的污泥，需进一步处理，同时对周围的水体也将造成较大影响。

对于铵法废水还可采用磷酸铵镁法（MAP），通过投加氢氧化镁和氧化镁生成鸟粪石（磷酸铵镁）（$Mg^{2+}+NH_4^++PO_4^{3-}+6H_2O=MgNH_4PO_4\cdot 6H_2O\downarrow$）；再通过汽提技术和硫酸吸收氨气，可生成硫酸铵，此工艺技术需要采用大量生蒸汽，废水的处理成本较高，并且最终很难达到排放标准要求指标。

2.2 零排放工艺

零排放路线通常采用“预处理+膜浓缩+MVR 蒸发结晶”的组合工艺。通过预处理可去除废水中硬度、重金属离子、悬浮物等污染物，以保证后续膜系统的正常运行。预处理常采取的方法为“混凝沉淀（沉淀池、高密池等）及软化+过滤（多介质过滤器、纤维束过滤器等）+超滤 UF”；预处理出水经后续多级反渗透浓缩减量，产水经后续深度脱盐处理（一般为多级反渗透）后达到回用水要求（通常电导率需≤10 μs/cm），回用至磷酸铁生产的配料或者漂洗工序，浓水（根据具体项目不同，TDS 含量要求有一定差异，TDS≥12 000 mg/L 或 15 000 mg/L 或 16 000 mg/L）进入 MVR 系统进行蒸发结晶。铵法废水经处理后，最终可制备出硫酸铵（根据后续结晶工艺不同如采用冷冻结晶还可产生磷酸一铵，有些蒸发结晶还可产生复合肥等副产物）。钠法废水经处理后，最终可制取硫酸钠。同时蒸馏出来的冷凝水经深度脱盐处理后也可以被回用至磷酸铁生产的配料或者漂洗工序。此工艺可达到废水零排放并可实现废水资源化利用，具有一定的经

济效益。

2.3 零排放工艺详述

零排放工艺主要流程见图 1。

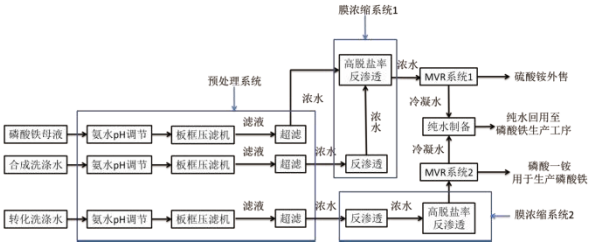


图 1　磷酸铁生产废水零排放处理工艺流程图

合成洗涤水和磷酸铁母液分别进行预处理后送入到膜浓缩系统 1，得到浓缩液 1 和纯水，浓缩液 1 进入 MVR 系统 1，进行蒸发结晶得到硫酸铵和冷凝水。转化洗涤水预处理后送入膜浓缩系统 2 进行浓缩，得到浓缩液 2 和纯水，浓缩液 2 再进入 MVR 系统 2，进行蒸发结晶得到磷酸一铵和冷凝水。2 套 MVR 系统得到的冷凝水，再一起进入纯水制备系统，得到纯水进行回用。由于回用水质的要求不同，膜浓缩系统的纯水直接用于洗涤用水，纯水制备的纯水则返回磷酸铁生产配料工序。

2.3.1 预处理系统

三种废水的预处理工艺相同，均采用“沉淀（氨水 pH 调节）+板框压滤+UF”。以磷酸铁母液为例，通过投加氨水调节 pH 至 5~6.5，通过沉淀反应去除 Mg^{2+}、Fe^{2+}、Mn^{2+}等无机离子以及悬浮物；然后进入板框压滤机进行固液分离，滤液送往超滤膜装置进一步去除废水中的悬浮物及胶体等污染物；经超滤膜过滤后的废水进入后续膜浓缩系统，超滤膜反冲洗水返回原水池；经板框压滤机的泥饼作为固废外运处理。

2.3.2 膜浓缩系统

膜浓缩系统 1 和膜浓缩系统 2 的工艺流程基本相同，只是处理的原料水不同，主要基于膜浓缩系统 1 进行简单说明。

经预处理后的磷酸铁母液以及合成洗涤水进入膜浓缩系统 1。由于合成洗涤水浓度较低，超滤后需要先进入反渗透进一步浓缩，得到 TDS ≥60 000 mg/L 的浓水，再和磷酸铁母液一起进入高浓度反渗透系统，得到 TDS≥120 000 mg/L 的浓水，系统得到的纯水直接回用至洗涤用水，而系统产生的浓水直接进入 MVR 蒸发系统进一步处理。

2.3.3 MVR 蒸发系统

蒸汽机械再压缩技术（Mechanical Vapor Recompression，MVR）的原理是将低品位蒸汽经过蒸汽压缩机压缩做功后提高其压力、温度，此时蒸汽的温度提升、焓值增加，然后送入加热器作为蒸汽热源，这样可充分利用蒸汽的潜热。从蒸发系统分离器闪蒸出的二次蒸汽，可以经压缩机做功后提高其温度并重复使用，达到充分利用二次蒸汽、提高热效率、节能的目的。[3-5]

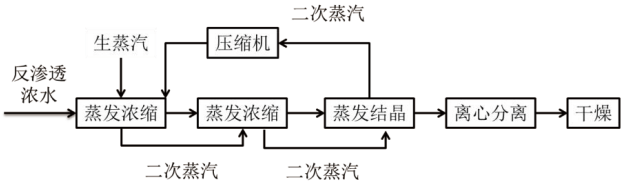


图 2　MVR 系统流程图

2.3.3.1 MVR 蒸发系统 1 生产工艺

（1）预热：来自膜浓缩系统的浓水（主要含硫酸铵溶液）经预热至一定温度后送 MVR 蒸发系统，被管壳式加热器内的蒸汽进行不接触加热。

（2）蒸汽热源：来自界区外的热源生蒸汽，在系统启动期间，进入 MVR 蒸发系统的加热器中与物料换热。受热的料液吸收热量升温后进入闪蒸室闪蒸出初始二次蒸汽。此部分二次蒸汽通过压缩机做功，提高焓值后再进入加热器中，作为热源与物料换热，之后即可停止生蒸汽的供应。同时，加热器产生的蒸汽冷凝水送出系统，经处理达标后回用。

（3）蒸发结晶：经蒸发浓缩后的溶液进入结晶罐，控制结晶罐中杂质离子的浓度和溶液温度，硫酸铵溶液蒸发控制温度 80±5 ℃，确保只析出硫酸铵晶体。结晶罐的少量富集母液返回浓缩罐循环蒸发结晶，提高硫酸铵晶体的析出率。

硫酸铵晶体积累到一定含固量时，将结晶罐底部的硫铵浆液排放到离心脱水机，经离心分离后，硫酸铵晶体从硫铵母液中分离出来。[6]

（4）产品干燥：从离心机分出的硫酸铵晶体含水量≤4%，再经螺旋输送机排放到固定式流化床

干燥器，保证最终硫酸铵结晶盐含水率在 0.3%以下。干燥后的硫酸铵产品经称量、包装机打包后外售。

（5）干燥尾气处理：由流化床干燥器出来的干燥尾气在排入大气前一般设有两级除尘。[6]首先经旋风除尘器除去尾气中夹带的大部分粉尘（细小晶体），再由尾气引风抽送至湿式除尘器，以进一步除去尾气中夹带的残留粉尘（微小晶体）后排入大气。

2.3.3.2 MVR 蒸发系统 2 生产工艺

预热：来自膜浓缩系统的浓 MVR 系统 2 主要处理磷酸铁转化洗涤水。工作原理及工艺过程与 MVR 系统 1 基本相同，但蒸发温度需控制在≤70±5 ℃以保证磷酸二氢铵析出。少量富集母液返回 MVR 系统 1 蒸发结晶回收硫酸铵，磷酸二氢铵返回磷酸铁生产车间作为原料使用。

2.3.4 产水回用系统

MVR 蒸发系统产水，一般送入纯水制备系统，采用两级反渗透膜工艺制备出电导率小于 10 μs/cm 的合格纯水，回用至磷酸铁生产车间。

2.4 小结

磷酸铁生产废水处理过程中，需要注意以下问题：

（1）分质处理：由于磷酸铁母液和漂洗液的水质（尤其是含盐量 TDS）和水量具有较大的差别，对膜系统的配置影响较大，需要对两股水单独进行分质处理。

（2）强化预处理：由于废水后续需进入膜浓缩系统，为减缓膜污染，延长膜使用寿命，需要强化去除废水中的悬浮物、重金属、硬度等离子。

（3）药剂选择：为了避免引入杂质离子，进行沉淀反应时铵法废水通常使用氨水，钠法废水通常使用液碱。有些项目也会使用 PAM 进行混凝沉淀，以增强污染物的去除效果。

（4）pH 调节：在进入膜浓缩系统前废水通常需要进行 pH 调节，一般铵法使用氨水，钠法使用液碱。若沉淀阶段加碱致使 pH 偏高，可用硫酸回调 pH。若前期加碱沉淀过程中，pH 可满足后续膜系统要求则不需硫酸进行调节。如果膜浓缩过程选择耐酸膜则可省去 pH 调节步骤，但对管道材质等耐酸腐蚀的要求较高。

3 结语

磷酸铁锂电池作为电池未来发展的主流方向，其前驱体磷酸铁生产废水的治理也正逐渐成为制约磷酸铁生产企业发展和制约电池级磷酸铁原料价格的重要因素。[7]

磷酸铁生产废水回用及资源化处理技术成熟，一般采用“预处理+膜浓缩+蒸发结晶”工艺流程。预处理系统设计的关键是选择合理的处理工艺，通过严格控制反应条件，尽可能去除悬浮物、钙镁硬度、铁离子和锰离子等污染物。一般磷酸铁生产废水水量较大，因此膜浓缩系统设计的关键是采用深度膜浓缩工艺，最大程度上将废水浓缩，减少后续蒸发系统的处理水量。最后的浓水一般浓度较高，可采用 MVR 等蒸发结晶技术制取盐分以实现零排放及资源化。

随着环保政策的日趋严格，工业废水零排放及资源化利用必将是大势所趋。而在磷酸铁生产废水处理领域，其回用处理以及浓水中盐分的资源化利用已成为磷酸铁生产废水处理的主流方向。

参考文献：

[1] 黄金, 余烨, 向黔新, 等. Ce 包覆锂离子高镍正极材料的合成及改性研究[J]. 广东化工, 2024, 51(8): 4-6+34

[2] 刘茂举. 磷酸铁生产废水的反渗透膜处理及回收利用[D].广西大学, 2020

[3] 田宁宁, 孟祥武. 氧氯化锆生产含盐废水治理技术研究[J]. 环境与发展, 2019, 31(1): 79-80

[4] 吕鹏波, 彭良辉. MVR 在炼厂烟气脱硫废水处理装置的应用[J]. 石化技术, 2020, 27(1): 239+241

[5] 秦佩, 吴晓伟. MVR 技术在电池材料废水资源化利用中的应用[J]. 山东化工, 2020, 49(13): 215-217

[6] 贺玮, 杨旋. 焦化厂煤气净化系统硫铵单元工艺及设备改进[J]. 煤矿机械, 2017, 38(4): 110-112

[7] 王君婷, 马航, 查坐统, 等. 磷酸铁工业废水处理工艺研究进展[J]. 无机盐工业, 2024, 56(6): 26-33

针对风况复杂多变山地风场的风机功率预测方法研究

钟卫华[1] 谭圆缘[2] 周胜伟[1] 徐 晖[1] 张富君[1] 苏坤林[2] 展宗霖[2*]

1. 雅砻江流域水电开发有限公司，成都 610000；2. 东方电气风电股份有限公司，四川 德阳 618000

摘要：使用测风设备采集到的风速风向数据，通过滑动平均的方法，避免复杂多变的风况带来预测功率的剧烈波动；对风速-功率点进行修正拟合，并收集风机真实出力的点位对功率曲线进行迭代修正；以风力发电机相关桨角参数作为分类条件，提出了一种功率预测方法，实现在山地风场复杂多变风况下的精准风功率预测。通过仿真，验证了该预测方法的有效性，可供实际工程参考应用。

关键词：山地风场；风力发电机；功率预测；功率曲线；桨角

中图分类号：TM614 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-9006（2024）06-0012-05

Research on the Method of Wind-turbine Power Prediction for Mountain Wind Farm under Complex Wind Conditions

ZHONG Weihua[1], TAN Yuanyuan[2], ZHOU Shengwei[1], XU Hui[1], ZHANG Fujun[1], SU Kunlin[2] ZHAN Zonglin[2]*

(1. Yalong River Basin Hydropower Development Co., Ltd., 610000, Chengdu,China;

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

Abstract: By using the wind speed and direction data collected by the wind measuring equipment, the sliding average scheme can avoid the violent fluctuation of the predicted power caused by the complex and changeable wind conditions. The wind speed-power point was corrected and fitted, and the real output point of the wind turbine was collected to iteratively correct the power curve. A power prediction method is proposed based on the blade Angle, which realizes accurate wind power prediction for mountainous wind farm under complex and variable wind conditions. Through simulation, the validity of the proposed method is verified, and it can be used as a reference for practical engineering.

Key words: mountainous wind farm; wind turbines; power prediction; power curve; blade angle

近年来，随着科技的发展与人口的增长，全球对能源的需求也大幅增加。为了维持生态与发展之间的平衡，我国提出了“碳达峰碳中和”的发展战略。截至 2023 年底，风电装机容量约 4.4 亿千瓦，占全国总发电装机容量的 15.1 %。风电作为一种新型电力，已经逐渐向主体能源进行转变。然而风电具有很强的随机性与不确定性，给整体电力系统带来了不稳定性，随着风电装机容量不断增加，电网安全与新能源发展的矛盾日益凸显。虽然功率预测为电网调度计划提供了可参考的数据，但现实中许多风场风况复杂多变，预测功率与实际偏差较大，并不能提供精准的预测结果，不仅导致有的风电场站遭受电网考核，也给电网片区的调度计划造成了困难。如何实现准确的风机功率预测是风电行业亟需解决的问题。

针对风机功率预测，国内外开展了广泛的研究。文献[1-3]提供了基于气象学的预测方法，文献[1]结合气象学与物理学中各种参数提出了预测模型，周宝斌[2]

收稿日期：2024-07-16

作者简介：钟卫华（1977－），男，2005 年毕业于南京水利科学研究院材料学专业，硕士，正高级工程师。现就职于雅砻江流域水电开发有限公司，主要从事水电、新能源机电物资技术研究及管理工作。

展宗霖（1985－），男，2011 年毕业于兰州理工大学自动化专业，本科，中级工程师。现就职于东方电气风电股份有限公司，主要从事智慧风电控制技术工作。

提出了考虑气象信息和频率特性的风电功率组合预测模型，以降低大量气象信息的复杂度。文献[4-12]提供了基于机器学习的各种方法，崔新苗[4]使用集成经验模态分解（CEEMDAN）对风速数据进行预处理，刘莉莎[5]提出了遗传算法优化 BP 神经网络（GA-BP）来对短时内相对规律的风速数据进行预测，赵龙[6]采用小世界拓扑结构对 BP 网络进行改进，建立了 SWBP 模型后，对数值天气预报（NWP）进行了研究与还原性预测。以上研究中，一是基于气象学和单机测风数据的功率预测方法，精确度与稳定性始终不高，且普适性较差，需要对每个风机均进行个性化建模，难以批量应用到大规模的风场功率预测中。二是基于机器学习的功率预测方法，想要获得稳定的风速来进行训练至少得获取四季的数据，耗时较长且难以应对不断变换的风况，难以在工程实际中进行应用。

上述研究只考虑了输入端的气象数据的预测精准性而未对实际运行中的风机情况以及逻辑状态进行判断优化。在采用测风设备的情况下，工程应用中提出了适用于风机实际运行的功率预测模型。但仍然存在过于依赖于功率曲线准确性的问题，若设计功率曲线与实际功率曲线出入较大，其准确性就会明显下降。

为解决以上问题，使用测风设备采集数据作为输入，本文提出了桨角迭代修正的功率预测方法。收集能体现风机实际发电能力的风速-功率数据来对功率曲线进行迭代并修正拟合；提出了一种基于桨角相关参数的功率预测计算方法，提供相对准确的预测功率，使得功率预测不再完全依赖于设计功率曲线。最后通过仿真分析，验证了本方法在风况复杂多变的山地风场情境下的功率预测精准性，适用于实际工程应用。

1 风机功率预测模型

在风机功率预测中，测风设备采集的气象信息作为输入，以供对风机进行实时预测；中间处理模块则主要依靠风速-功率对应关系，根据风速信息来计算功率信息；最终输出计算值作为当前的预测功率。以下为风机功率预测的理论模型与我们在实际工程应用中采用的功率预测模型。

1.1 理论功率预测模型

在风机功率预测过程中，主要分为三个部分：气象数据作为输入，功率曲线作为映射规则，最终输出预测功率。理论上的功率预测模型如下：

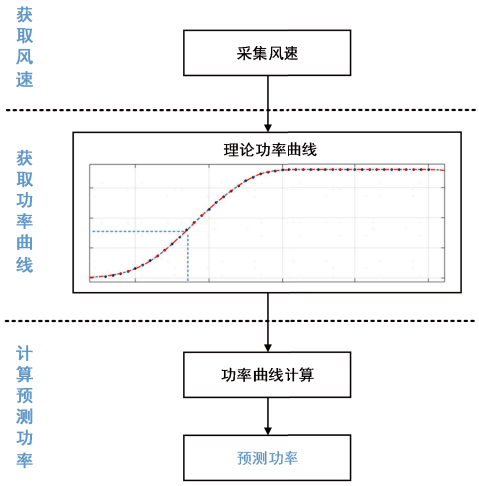


图 1 理论功率预测模型

理想情况下，风机的实发能力与功率曲线一致，所计算出的预测功率即为当前风速下风机实发功率的最大值。但在实际中，每台机组性能存在一定偏差，所处机位的空气密度也存在差异，这种情况下风机的实际发电能力一般都略低于设计功率曲线，若仍以设计功率曲线去计算当前风速下风机的预测功率，就会高于实发功率，从而导致计算出的风场当前预测功率高于风场实际发电能力，可能造成对出力计划值的支持不足。此外，在风况复杂多变的机位处，测风设备采集的风速与风向经常发生突变，直接使用未处理的数据，会造成预测功率不断震荡。

鉴于以上的工程应用中可能出现的问题，在风场实际应用时提出了优化后的功率预测模型来进行相应处理。

1.2 风场实际应用的功率预测模型

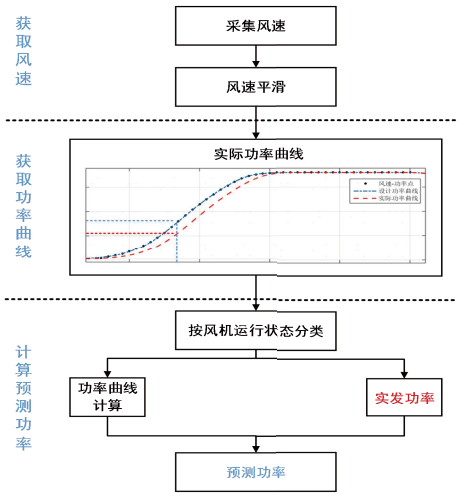


图 2 风场实际应用的功率预测模型

在风场实际中，考虑风况复杂多变的机位处风速风向时常发生突变，故对风速进行了平滑处理以避免造成预测功率结果的震荡。为了真实体现当前风机的实际发电能力，在判断风机已到达最大出力状态时，以实发功率代替设计功率曲线计算出的功率来作为预测功率。为了体现风机当前的发电潜力，以提供正确的电网调度指引，当风机未处于最大出力状态时则采用设计功率曲线计算出的功率作为预测功率。

此方法对复杂风况进行了处理，在保证预测功率尽量连续平稳的情况下又能体现当前风速变化情况，且当风机处于最大出力状态时使用实发功率作为预测功率体现其当前发电潜力，提供了真实准确的预测出力值。但此方法在工程应用中仍存在以下问题：①预测功率表现效果基本依赖于设计功率曲线与实际功率曲线的符合程度。在非满发状态，按照设计功率曲线的计算值来作为预测功率时，若风机实际功率曲线与设计功率曲线相差较大，仍会导致计算出风场当前的预测功率高于风场实际发电能力，造成对出力计划值的支持不足。②在上述前提下，预测功率在实际功率与功率曲线计算值之间切换时会有突变现象。预测功率的突变可能会造成调度计划值随之变更，从而导致分配给风机的有功目标值突然变化，造成风机控制上的不稳定以及全场有功出力上的震荡。③对于不同机位不同风况下的风机，不能随实际情况进行动态调整。

鉴于以上模型在实际应用中表现出的问题，我们提出了桨角迭代修正的风机功率预测模型。

2 桨角迭代修正的风机功率预测模型

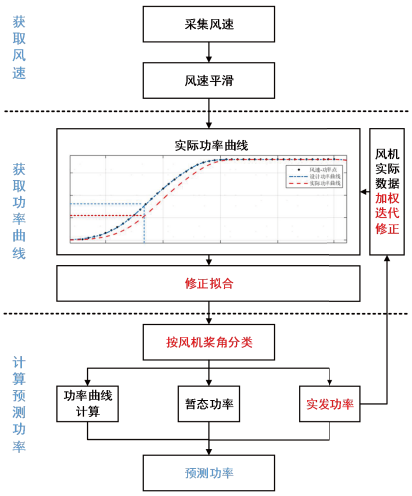


图 3 桨角迭代修正的风机功率预测模型

在“获取风速”部分，仍采用在现场应用中表现良好的风速平滑处理。在“获取功率曲线部分”，首先采用了“修正拟合”方法，不改变风速-功率点值的前提下，提高低风速段的功率预测值以在并网阶段争取更多的发电指标；在高风速段适当减小其拟合值，使得用于功率预测的曲线更贴近实际功率曲线。此外，在风机运行的过程中，当在某风速点风机处于最大出力状态时，记录当时的实发功率作为功率曲线的参考数据，通过各风机实发功率不断地迭代修正，最终使得用于计算的功率曲线与各风机真实的功率曲线愈加贴合。在“计算预测功率”部分，所采用的预测功率计算公式如下：

$$P_{pre} = \begin{cases} P_{cal} & A^{\circ} \le \varphi \le 90^{\circ} \\ P_{tra} & B^{\circ} \le \varphi \le A^{\circ} \\ P_{act} & \varphi \le B^{\circ} \end{cases} \tag{1}$$

$$P_{tra} = \min\left(P_{cal}, \frac{\varphi - B}{A - B} \cdot P_{cal} + \frac{A - \varphi}{A - B} \cdot \left(k\varphi + P_{act}\right)\right) \tag{2}$$

式中 P_{pre} 为预测功率，P_{cal} 为功率曲线计算出的功率，P_{trat} 为暂态功率，P_{act} 为风机实发功率。φ为桨角相关变量，A 与 B 为桨角相关度数阈值，k 为相关桨角系数。

在“远未达到最大出力”时采用功率曲线计算出的功率来表示其预测功率，在“基本达到最大出力”时采用实发功率来表示其预测功率。在两者之间，通过以“桨角相关变量”和“实发功率”为参数建立一个可供参考的暂态功率，从而实现相对精准的功率预测。

此方法具有以下效果：

（1）通过修正拟合，在避免降低发电指标的情况下，对各风速下的功率曲线计算值进行修正，从而达到对预测功率的辅助修正效果。

（2）通过识别可用的实发功率值，对功率曲线不断进行更新迭代，能够实现各机位功率曲线的动态调整，使得更贴近于实际功率曲线。

（3）提供了一种基于桨角相关变量的预测功率计算方法，通过桨角状态来对风机所处状态进行分类，提出了暂态功率以供预测功率取值，避免了因设计功率曲线与实际功率曲线之间差值导致的预测值突变，实现风机预测功率的准确计算。

3 仿真

3.1 仿真参数设置

设有一台 5 MW 风机，风速从 3 m/s 开始，后一秒风速相比于前一秒风速在（-0.1，+0.4）区间内随机变化，整体以增加的趋势持续 60 s，风机限电 3 MW。不考虑所提方法中真实风速-功率值对设计功率曲线的加权迭代修正，对比所提方法与风场实际应用方法的功率预测情况。

表 1　仿真参数设置

风机容量	额定功率 5 MW
风速信息	3 m/s 开始，（-0.1，+0.4）随机变化，持续 60 s
全场调度限制	单机限 3MW 以下发电

基于以上参数设置，设置两种场景：场景一：理想功率曲线，实际功率曲线与设计功率曲线一致。场景二：现实功率曲线，其实际功率曲线与设计功率曲线相比，风速-功率在风速域延迟 1 m/s，即（实际风速-1）对应的功率与设计功率曲线相当。在两种场景下分别进行仿真。

3.2 理想功率曲线下仿真分析

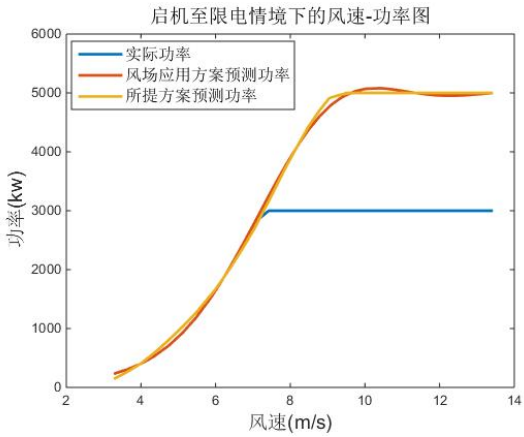


图 4　理想功率曲线情况下风机预测功率

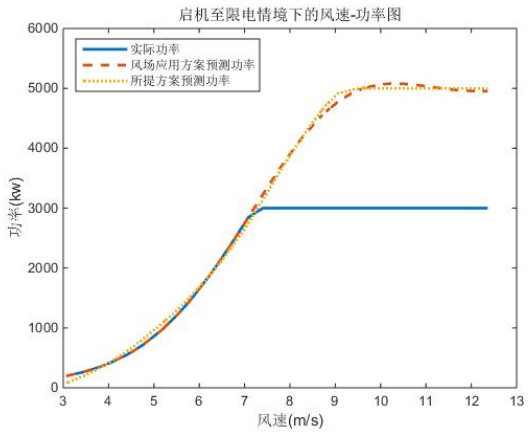


图 5　理想功率曲线情况下所得风速-功率点位

从图 4、图 5 可以看出，当风机实际功率曲线与设计功率曲线一致时，两种方法所得出的预测功率基本都能真实体现风机在当前风速下的发电能力。即理论情况下，当设计功率曲线即为实际功率曲线时，只需要代入功率曲线就可以获得精准的预测功率。

这是在设计时的理想情况，实际工程中，设计功率曲线一般都会与实际功率曲线有所出入。

3.3 现实功率曲线下仿真分析

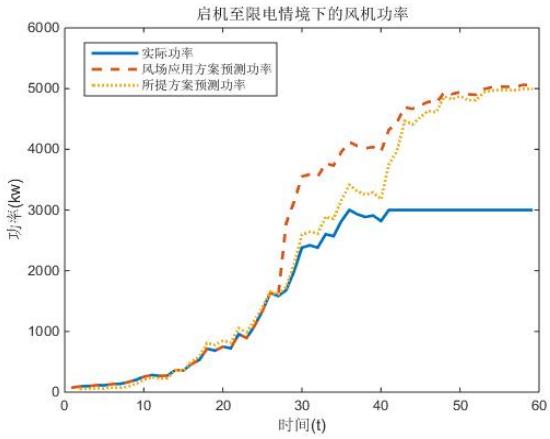


图 6　实际功率曲线情况下所得风速-功率点位

从图 6 可以看出，当设计功率曲线与实际功率曲线有较大差异时，即使不考虑风机实际数据对功率曲线的迭代修正效果，所提方法相比于工程实际应用中的方法计算出的预测功率仍更加贴合实际功率曲线。不难设想，若经过风机实际数据对功率曲线的加权迭代修正，所提方法对功率预测准确性的提升将会更大。

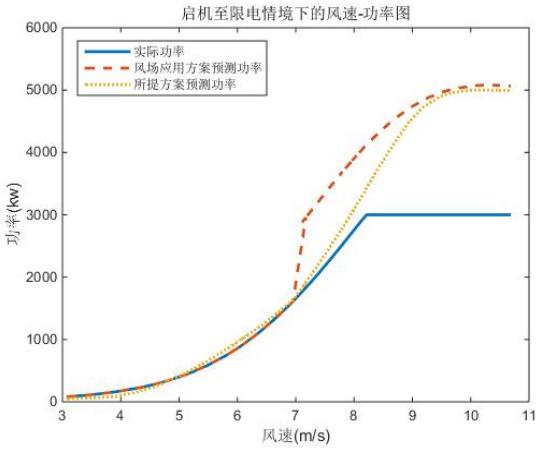


图 7　实际功率曲线情况下风机预测功率

从图 7 可以看出，所提方法避免了取值方法切换时预测值的突变，保证了功率预测值的连续性，适用于实际工程应用。

4 结语

针对山地风场中复杂的地形与风况导致功率曲线失真所带来的准确功率预测的挑战，本文提出了桨角迭代修正的功率预测方法，将风机实发能力数据纳入功率曲线迭代，通过基于桨角相关变量的计算，实现相对精准的风机功率预测。本方法能应对山地复杂风况的困难，适用各种风况下的风机功率预测，对风场功率预测与调度计划分配有积极意义，可供实际工程应用。

参考文献

[1] Liu Lijun, Liang Youjia. Wind power forecast optimization by integration of CFD and Kalman filtering[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2021, 43(6): 1-17

[2] 周宝斌. 考虑气象信息和频率特性的超短期风电功率组合预测研究[D].山东大学,2021

[3] 杨佳欣. 考虑风电数据特性的风功率预测方法研究[D].中南大学,2024

[4] 崔新苗. 基于机器学习的风机功率短期预测方法研究[D].上海电机学院,2023

[5] 刘莉莎. 微电网中短期风力发电和负荷预测的研究[D]. 山东大学, 2019

[6] 赵龙. 基于NWP和改进BP神经网络的风电功率预测研究[D].北京交通大学,2015

[7] 严北斗. 基于改进的CNN-LSTM短期风功率预测方法研究[D].昆明理工大学,2023

[8] 郭晓杰. 监督学习方法在短期风电功率预测中的应用研究[D].南京信息工程大学,2017

[9] 席语莲, 凌周玥, 许晓敏. 短期风电功率CEEMDAN-SMA- LSSVM预测模型研究[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(6):2396-2404

[10] 荆凯. 基于权重无关神经网络的风机功率超短期预测算法研究[D]. 宁夏大学,2021

[11] 郭晓杰. 监督学习方法在短期风电功率预测中的应用研究[D].南京信息工程大学, 2017

[12] 刘文斌, 谢丽蓉, 张革荣. 基于 VMD- HS- LSSVM 的风电功率短期预测[J]. 现代电子技术, 2022, 45(11): 176-181

集团要闻

国内锅炉行业首个水冷壁数制·智联工厂建成投运

2024 年 10 月 30 日，水冷壁数制·智联工厂在中国东方电气集团有限公司所属东方锅炉德阳制造基地正式投运，该项目由东方研究院总承包，是继联箱、蛇形管数字化工厂投产后又一行业标杆智能工厂，也是国内锅炉行业首个水冷壁数制·智联工厂。据了解，该工厂融合了工业互联网、工业机器人、机器视觉、大数据及人工智能等先进技术，创新生产组织模式，实现了全程数字化管理。试运行以来，设备数字化率达 100 %，人均产值提升 5 倍，为生产提速、高效交付提供了支撑。

水冷壁是锅炉产品的主要受压部件，制造质量要求较高。此次投运的水冷壁数制·智联工厂重点聚焦产能占比 70 %的水冷壁直管屏，围绕焊接接长、拼屏等关键工序，进行数智化改造，通过识别生产计划、过程质量管理等业务痛点，缩短工序间物流转运路径 468 米，提高了整体工艺布局的效率。

作为水冷壁制造的关键核心工序，水冷壁数制·智联工厂突破管屏组屏焊接工艺技术难点，应用 3D 机器视觉技术实现无人焊接操作，实时识别和跟踪最多 20 条焊缝，无人动态控制调整焊枪位置，最高焊接速度可达 0.9 米/分钟。

近年来，东方电气集团东方锅炉股份有限公司数智化建设按下“快进键”，因地制宜发展新质生产力，推进“智改数转”，逐步推进四川自贡、德阳两个基地 6 个数字化工厂建设，助力能源装备制造产业高质量发展。

来源：东方电气网

基于多特征融合的风电叶片实时故障诊断研究

张健[1] 奉凡森[2] 李政[1] 徐衡[1] 唐兆祥[1] 徐海[2*]

1. 雅砻江流域水电开发有限公司，成都 610051；2. 东方电气风电股份有限公司，四川 德阳 618000

摘要：为提高风电机组的叶片（以下简称风电叶片）故障实时诊断准确率，降低诊断的误报率和漏报率，本文以叶片振动信号为基础，统计风电叶片故障后特征变化概率和变化量，总结得到风电叶片损伤后变化明显的特征。为消除单一特征对诊断结果的绝对判断，降低变化不明显的特征影响力，本文提出一种多特征融合计算方法，根据融合特征对风电叶片进行实时故障诊断。研究结果及应用表明，采用多特征融合计算方法可以较好反映叶片出现叶尖开裂、叶片裂纹等故障，对风电叶片的实时故障诊断具有参考价值。

关键词：风电叶片；故障诊断；特征值；特征融合

中图分类号：TM614 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-9006（2024）06-0017-05

Research on Real-time Fault Diagnosis of Wind Turbine Blades Based on Multi-feature Fusion

ZHANG Jian[1], FENG Fansen[2], LI Zheng[1], XU Heng[1], TANG Zhaoxiang[1], XU Hai[2]*

（1. Yalong River Basin Hydropower Development Co., Ltd.,610051, Chengdu, China;

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

Abstract: To improve the real-time diagnostic accuracy of wind turbine blades (hereinafter referred to as wind turbine blades) and reduce the false alarm and false alarm rates in diagnosis, based on the blade vibration signal, the probability and amount of characteristic changes after wind turbine blade failure are statistically analyzed, and the obvious characteristics of changes after wind turbine blade damage are summarized. To eliminate the absolute judgment of single features on diagnostic results and reduce the influence of inconspicuous changes in features, a multi feature fusion calculation method is proposed to perform real-time fault diagnosis of wind turbine blades based on fused features. The research results and applications indicate that the use of multi-feature fusion calculation method can effectively reflect faults such as blade tip cracking and blade cracks, and has reference value for real-time fault diagnosis of wind turbine blades.

Key words: wind turbine blades;fault diagnosis;characteristic value;feature fusion

随着双碳目标的推进，风电行业得到大力发展，预计在 2030 年，全国的风电机组装机容量将会达到 8.24 亿 kW。[1]风电叶片作为风电机组捕获风能最重要的部件，风电叶片的运行状态与整个机组的运行状态息息相关。但是大部分机组都在山地、高原、戈壁等环境恶劣的地方运行，使得风电叶片在运行过程中出现各种损伤而未被检测到。[2]同时，随着机组大型化、叶片长柔化，风电叶片的运维和监测难度也大大增加，叶片出现损伤而未被及时发现，这些损伤会影响叶片运行可靠性，甚至危及机组的安全。

风电叶片的主要监测技术有叶片应变监测、叶片振动监测、叶片声发射监测、叶片噪声监测、叶片超声波监测等。[3]因为风电叶片运行安全的重要

收稿日期：2024-07-17

作者简介：张健（1986－），男，本科，高级工程师。现任职于雅砻江流域水电开发有限公司，主要从事水电、新能源机电设备技术研究与开发工作。

徐海（1982－），男，本科，现任职于东方电气风电股份有限公司，主要从事风电智能技术研发工作，邮箱：xuh8060@dongfang.com。

性，广大学者从不同角度对叶片状态监测和故障诊断做了大量研究。其中，孙玉明等人对风电叶片拉挤板进行超声监测研究，证明了其适用性。[4]贾辉等人利用声发射技术，基于主成分聚类和 BP 神经网络对风电叶片复合材料的疲劳损伤模式进行研究，证明了该方法对叶片复合材料未知损伤的识别能力。[5]凌旭等人从加速度传感器布置以及走线等方面对采集数据有效性进行研究，为叶片振动的数据来源可靠性提供了支撑。[6]吴国镜等人利用红外线热像检测技术对自然激励下的风电叶片进行检测研究，证明了该检测方案在风电叶片检测中的可行性。[7]林峰等人为消除叶片表面污垢对诊断结果的影响，对叶片表面图像进行预处理，利用卷积神经网络对叶片进行故障诊断，结果表明该方法可有效诊断表面有污垢的叶片损伤。[8]

上述风电叶片诊断研究方法都有其优点，也存在其不足。如部分超声波探伤检测方法和图像识别需要停机，实时性较差；部分方法采用深度学习进行监测，需要的数据样本量大。基于此，本文从理论分析叶片特征，统计分析叶片故障前后特征，提出一种基于多特征融合的实时故障诊断叶片方法。该方法简单有效，所需数据量不大，且能实现实时监测。

1 振动信号基本特征及信号降噪

1.1 振动信号时域特征

设备在运行过程中会产生振动信号，振动信号是设备运行状态的原始表象，时域特征值则是对振动信号特征反映的数值量，不同的时域特征具有不同含义，反映了设备运行状态。

部分常用的时域信号特征值有整流平均值、峰峰值、有效值、峭度系数、峰值因子、脉冲因子、裕度因子等。整流平均值为一组振动信号绝对值的平均值，反应了振动信号的能量幅值大小[9]，其计算方式为：

$$\mu = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}|x(n)| \tag{1}$$

峰峰值为振动信号最大值与最小值之间的差距，反映了振动信号的强度，其计算公式为：

$$x_{\mathrm{pp}} = x_{\max} - x_{\min} \tag{2}$$

有效值为振动信号的二阶原点矩，常用来反应设备运行状态，其计算公式为：

$$D = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} x_{(n)}^2} \tag{3}$$

峭度系数为振动信号分布特性的归一化 4 阶中心矩，一般用来反应振动信号中是否含有瞬态冲击成分，其计算公式为：

$$K_{\mathrm{f}} = \frac{\frac{1}{N-1}\sum_{n=1}^{N}(x(n)-\mu)^4}{\sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{n=1}^{N}(x(n)-\mu)^2}} \tag{4}$$

峰值因子为振动信号幅值与有效值的比值，主要用以检测振动信号中是否存在冲击成分，其计算公式为：

$$C_{\mathrm{f}} = \frac{X_{\mathrm{p}}}{D} \tag{5}$$

脉冲因子为振动信号幅值与振动信号整流平均值之间的比值，其计算公式为:

$$I_{\mathrm{f}} = \frac{X_{\mathrm{p}}}{\mu} \tag{6}$$

裕度因子为振动信号幅值与均方根幅值之间的比值，主要用以检测振动信号中是否存在磨损的情况，其计算公式为：

$$C_e = \frac{X_{\mathrm{p}}}{[\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\sqrt{|x(n)|}\,]^2} \tag{7}$$

1.2 信号降噪方法

滤波可以对振动信号进行有效处理，其主要目的是对采集的振动信号频谱进行改造，获取其中有价值的信息，抑制无用的信息或频率成分。工程中的振动信号往往存在较多噪声或正常设备运行特征，会将故障特征淹没，于是需要对原始振动信号进行滤波处理。

频域数字滤波是数字滤波的一种，主要对离散时间信号进行处理，适用于数据长度较大的信号。其基本原理是：对原始振动信号进行傅里叶变换，得到对应的频谱，将频谱中不需要的频率成分置零，然后求傅里叶逆变换，得到滤波后的信号。[10]频域数字滤波的基本表达式如式（8）所示。

$$\mathrm{y(n)} = \sum_{k=0}^{N-1} H(k)\cdot X(k)\cdot e^{j\frac{2\pi}{N}kn} \tag{8}$$

式（8）中：

H(k)—频率数字滤波器的响应函数；

X(k)—振动信号傅里叶变换后的频域信号；

其中，频域数字滤波器的响应函数决定了滤波器的响应特性，一般有低通、高通、带通、带阻，其基本公式如下：

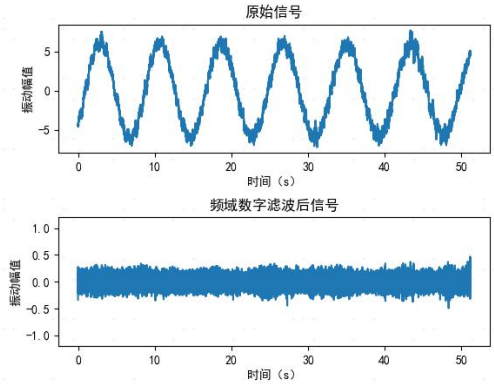
（1）低通滤波器：$H(k)=\begin{cases}1 & f<f_u\\ 0 & other\end{cases}$

（2）高通滤波器：$H(k)=\begin{cases}1 & f>f_u\\ 0 & other\end{cases}$

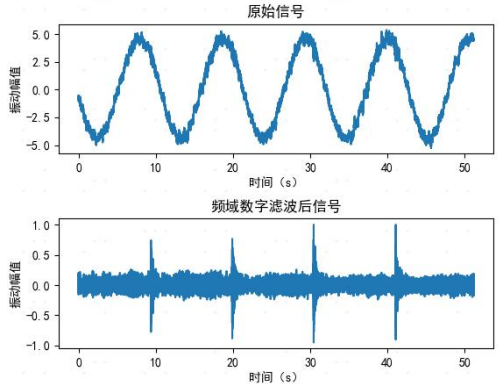
（3）带通滤波器：$H(k)=\begin{cases}1 & f_d<f<f_u\\ 0 & other\end{cases}$

（4）带阻滤波器：$H(k)=\begin{cases}0 & f_d<f<f_u\\ 1 & other\end{cases}$

使用带通滤波方法对某正常叶片和故障叶片振动信号进行滤波，滤波前后的振动信号结果如图1所示。



（a）正常叶片振动信号滤波前后对比



（b）故障叶片振动信号滤波前后对比

图1　叶片振动信号滤波前后对比

图1（a）和图1（b）所示分别为正常叶片和故障叶片的原始信号与滤波后时域信号对比。可以看出正常叶片与故障叶片的原始信号上无明显区别，在滤波之后，故障叶片的周期性冲击特征比较明显。对上述正常叶片和故障叶片之间的部分特征进行计算，计算结果如表1所示。其中变化率的计算方式为故障叶片特征与正常叶片特征之间的差值与正常叶片特征之比。

表1　正常叶片与故障叶片滤波前后特征对比

信号特征	原始信号			滤波后信号		
	正常叶片	故障叶片	变化率	正常叶片	故障叶片	变化率
整流均值	3.72	2.88	-23 %	0.07	0.05	-23 %
峰峰值	14.89	10.6	-28 %	0.96	1.96	103 %
有效值	4.17	3.2	-23 %	0.09	0.07	18.5 %
峭度系数	6.94	6.81	-1.8 %	7.37	12.4	68 %
峰值因子	3.57	3.31	-7.2 %	10.92	27.17	149 %
脉冲因子	3.99	3.68	-7.9 %	13.71	35.95	162 %
裕度因子	4.41	4.03	-8.5 %	16.19	43.08	166 %

从表1中可以看出，原始信号中，故障叶片比正常叶片的特征值更低，但是并没有低很多，这是由于工况影响；在进行滤波之后，故障叶片部分特征明显比正常叶片特征高，有的甚至高出1倍及以上，表示叶片已经出现故障。

2　叶片振动信号特征及多特征融合方法

2.1　叶片振动信号特征

风电叶片与常规旋转机械部件存在较大区别，其振动信号特征与常规旋转机械部件也有所不同。由于风电机组叶轮直径大，叶片围绕轮毂中心旋转时受重力影响较大，导致叶片振动信号与常规振动信号存在较大差距。叶片旋转过程中，其振动加速度主要由重力在叶片轴向的竖直垂直方向的分力以及叶片自身存在的振动产生，分力大小计算方式如式（9）。

$$G_y=G*cos\theta \tag{9}$$

式（9）中：G_y—重力在叶片轴向的竖直垂直方向的分力；

G—叶片受到的重力；

θ—叶片轴向与水平方向夹角；

θ的范围为[0,2π]，从式（9）可知，叶片轴向的竖直垂直方向的力与θ呈现余弦关系，故叶片的振动加速度信号也与余弦信号相似性较高，如图 2 所示。

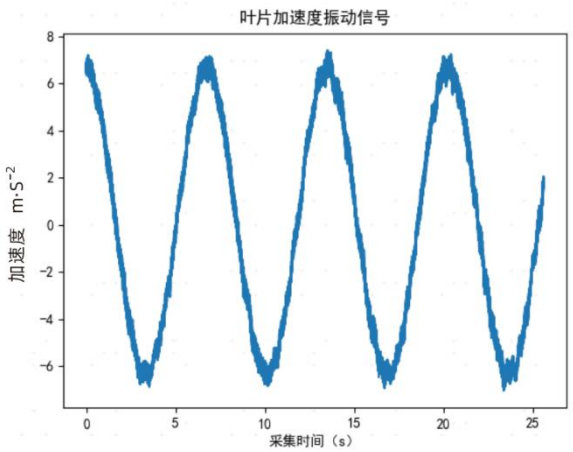


图 2　叶片加速度振动信号

受叶片重力的影响，叶片加速度振动信号与余弦信号高度相似，受重力影响的叶片加速度振动信号会淹没叶片本身的振动信号特征，使得叶片故障前后的加速度振动信号无明显区别。为排除重力因素的影响，需要对叶片加速度振动信号进行频域数字滤波。选择出现叶片损伤（开裂、鼓包）的某型叶片，采集叶片损伤前 126 组振动数据，叶片损伤后 88 组数据，对叶片损伤前后的部分时域特征做以下计算。

（1）叶片损伤后时域特征大于损伤前时域特征 50 %的概率

$$p=\frac{q_{\left[\frac{a_i-b_i}{b_i}>50\%\right]}}{m}\times 100\,\% \qquad (10)$$

式（10）中：

m—叶片损伤后信号采集的总数；

q—损伤后叶片特征值大于损伤前叶片特征值 50 %的次数；

a_i—叶片损伤后的时域特征值；

b_i—叶片损伤前的时域特征值；

（2）叶片损伤后时域特征值增长

$$W=\frac{\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{n}a_j-\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}b_j}{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}b_j}\times 100\,\% \qquad (11)$$

式（11）中：

n—叶片损伤前信号采集总数；

对某型数据进行上述指标计算，结果如表 2 所示。

表 2　某型叶片时域特征统计计算结果　%

时域特征	p	W
整流平均值	35	61
峰峰值	68	208
有效值	15	62
峭度系数	38	582
峰值因子	65	192
脉冲因子	52	126
裕度因子	47	268

2.2 叶片多特征融合方法

叶片作为非常规旋转的长柔性部件，其振动信号复杂，无稳定有效的特征值可以准确反映叶片实时运行状态。且机组运行环境复杂，为避免叶片实时诊断过程中出现误报、漏报等情况，降低单一特征对叶片诊断的影响力，提出一种多特征融合计算方法对叶片进行实时诊断。

振动信号中包含多种特征值，但是并非所有特征值在叶片损伤后存在明显变化，部分特征值在叶片损伤后变化微小。由于外部工况原因导致叶片特征明显变化，不结合该特征变化概率可能造成误报，即是外部环境因素引起特征变化而非叶片故障；部分特征变化量不大，但是出现概率极大，可能会认为是正常波动，造成漏报。基于此，为提高叶片诊断准确率，对多个振动信号特征值进行加权融合，采用多特征融合计算方法计算融合特征。

其计算公式如式（12）和（13）所示。

$$y=\sum_{i=0}^{n}k*(xi-x) \qquad (12)$$

$$k=p\cdot w \qquad (13)$$

式中：

xi—叶片振动信号特征值；

x—正常叶片振动信号特征值；

k—加权系数，根据表 2 确定；

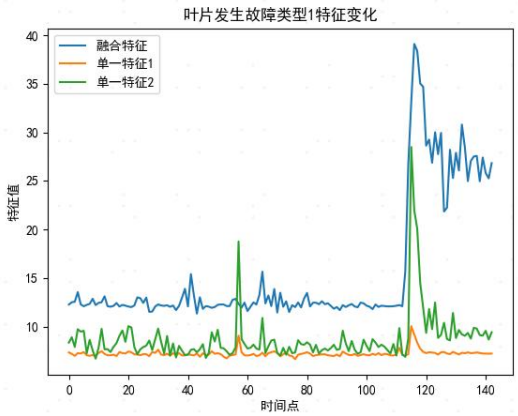
y—叶片多特征融合输出。

3　多特征融合方法在叶片故障诊断的应用验证

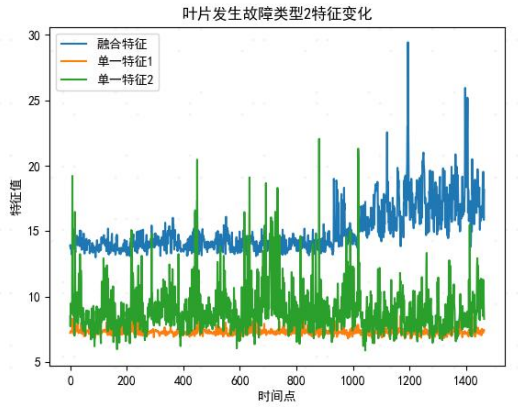
使用多特征融合方法对叶片进行实时故障诊断分析应用，选择叶片出现故障前后的数据进行应

用分析，其中一支叶片为故障类型 1，另一只叶片为故障类型 2。

以叶片正常运行时的振动信号特征值作为基准，采用多特征融合计算方法对叶片融合特征进行计算，2 支叶片融合特征计算结果如图 3 所示。



（a）叶片出现故障类型 1 时域特征



（b）叶片出现故障类型 2 时域特征

图 3　叶片出现故障时域特征

据图 3（a）所示。采用单一特征 1 或者 2 进行报警统计，以超过一定阈值进行报警可以发现误报 1 次，正常报警 1 次，误报率 50 %。采用多特征融合计算方法，可以有效降低单一特征影响力，误报率为 0，提高诊断的准确率。

据图 3（b）所示，单一特征 1 对叶片损伤不敏感，出现大量漏报，单一特征 2 会出现大量误报，出现故障类型 2 后又漏报。采用多特征融合计算方法进行判断，其误报率为 0，漏报率较低，且可以明显发现叶片出现故障 2 存在缓慢发展阶段，融合特征呈现缓慢抬升趋势，可以有效诊断叶片故障并跟踪叶片故障的发展。

4　结语

本文通过对叶片振动信号进行时域特征分析以及融合特征分析得出以下结论：

（1）采用单一特征对叶片进行实时故障诊断准确率低，易出现误漏报。

（2）提出一种时域多特征融合计算方法，综合平衡多特征影响力，有效降低单一特征对叶片运行状态的绝对判断，提高诊断准确率。

（3）采用多特征融合计算方法，在常规叶片故障诊断案例应用中，可降低叶片故障诊断误报率和漏报率 50 %。

参考文献：

[1] 吕安强，魏伦. 基于光纤传感技术的风机叶片故障检测技术研究进展[J]. 高压电器. 2022,58(7):83-92

[2] 李亚娟. 风电叶片分层缺陷演化的力学行为及声发射响应特性研究[D]. 河北大学, 2015

[3] 王磊，柳亦兵，滕伟，等. 风电机组叶片无损检测技术研究与进展[J]. 中国电力, 2023,56(10):80-95

[4] 孙玉明，陆发青，彭超义，等. 风电叶片拉挤主梁的超声检测[J]. 无损检测, 2022,44(12):31-36

[5] 贾辉，张磊安，王景华，等. 基于声发射技术的风电叶片复合材料损伤模式识别[J]. 可再生能源.2022,40(1):67-72

[6] 凌旭，程云荣，肖芝. 风电机组叶片振动测试数据有效性研究[J].电子测试, 2021,17:61-63

[7] 吴国镜，王健，张永，等. 自然激励风电叶片损伤的红外热像检测研究[J]. 太阳能学报. 2021,41(9):353-358

[8] 林峰，郭鹏，刘旭斌. 基于叶片表面污垢预处理与 CNN 的风电机组叶片表面损伤识别. 动力工程学报.2020,40(12):975-981

[9] 徐平，郝旺身. 振动信号处理与数据分析[M].2016

[10] 李舜酩，李香莲. 振动信号的现代分析技术与应用[M].2008

大兆瓦等级中速永磁风力发电机电磁激振谐响应分析

马奔奔　贺建华　赵天煜　李建富*　梁臣　胡鑫

东方电气风电股份有限公司风电研究设计院，四川 德阳 618000

摘要：半直驱风力发电机具有中速永磁的特点，与成熟的直驱永磁发电机相比，在转速、频率、结构、永磁固定方式、冷却方式及通风结构都存在很大不同。它兼顾了直驱的可靠、高效和双馈的低成本、小体积等优势，在近年风电整机价格的持续走低的背景下，有了较快的发展和提升。半直驱风力发电机电磁激振谐响应分析因为具有多学科耦合、建模复杂等特点，研究难度较高。本文通过对大兆瓦等级中速永磁风力发电机的设计研究，形成了电磁激励载荷的分析与提取、机电耦合分析模型的简化与建立、谐响应分析、真机试验测试对比等一整套方法，系统解决了电磁激振谐响应分析的难题。

关键词：半直驱发电机；中速永磁；电磁激振谐响应；真机试验

中图分类号：TM315　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）06-0022-05

Electromagnetic Excited Harmonic Response Analysis of Medium Speed Permanent Magnet Wind Turbine with Large Megawatt Grade

MA Benben, HE Jianhua, ZHAO Tianyu, LI Jianfu, LIANG Chen, HU Xin*

(Research and development center, Dongfang Electric Wind Power Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan China)

Abstract: The electromagnetic excited harmonic response analysis of semi-direct drive wind turbine is very difficult due to its multi-disciplinary coupling and complex modeling. In this paper, a complete set of methods are formed through the design and research of the medium speed permanent magnet wind turbine with large megawatt grade, such as analysis and extraction of electromagnetic excitation load, simplification and establishment of elector-mechanical coupling analysis model, harmonic response analysis, real machine test and comparison, which systematically solves the difficult problem of electromagnetic excitation harmonic response analysis.

Key words: semi-direct drive wind turbine; medium speed permanent magnet; electromagnetic excited harmonic response; real machine test

自我国风电国产化以来，直驱与双馈风力发电机组一直是市场的主流技术路线。双馈机型技术成熟，价格便宜，占据了在役风机的很大比例。但双馈机型电机转子采用交流励磁，引出线、滑环、碳刷等需要经常性维护。此外，双馈电机的齿轮箱也经常面临可靠性和漏油的风险。直驱机型则采用永磁电机且传动链不含有齿轮箱，传动结构简单更加稳定可靠。因此，直驱机型传动损耗更小，发电效率更高。但直驱机组尺寸规格较大，需要用到更多的有色金属和稀有金属，在风电步入平价时代，市场激烈竞争以及降本压力下，直驱机型高昂的成本限制了其进一步的发展。正是风电行业在微利时代，降本增效的背景下，半直驱机组有了重要的发展。半直驱机组是在直驱的基础上增加了齿轮箱，兼顾了直驱机型可靠和双馈传动链轻量化的各自优点，可以说，半直驱机组机械传动部分类似双馈，电气传动部分类似直驱，兼顾了直驱的高稳定性和双馈的低成本优势，更加符合风电机组大型化和海上风电规模化的发展趋势。

收稿日期：2023-12-27

作者简介：马奔奔（1987－）男，博士，高级工程师，长期从事风电发电机强度、传动链动力学等的研究。

李建富（1983－）男，正高级工程师，长期从事风力发电机相关技术研究。

发电机是风力发电机组中将机械能转化为电能的重要部件，半直驱风力发电机具有中速永磁的特点，与成熟的直驱永磁发电机相比，在转速、频率、结构、永磁固定方式、冷却方式及通风结构都存在很大不同。但随着大兆瓦等级应用要求的加速提高，电机设计难度却与日俱增。传统的“留大余量”“类比设计”等设计手段已不再适用。一方面是因为现在的电机设计目标增多，不仅要满足发电的基本需求，还要满足 NVH 性能好、温升极限、单位扭矩成本最低、短路力矩最小等多目标、多维度的要求。另一方面，风电行业中发电机设计现在已经全面进入极限设计时代，不断提升的转矩密度、功率密度和成本的要求使得设计不断超越以往经验极限，极大的提高了设计难度。

正是在风电行业永磁同步发电机设计周期变短、设计难度变大、设计目标多这样的背景下，传统风电电机设计中单一的电磁设计、结构设计以及刚强度分析等显然已经不能满足设计研发的需求。针对其复杂的多物理场特性，开展电磁激振谐响应分析是解决目前电机设计难题的有力武器，也逐渐被风电行业所重视。

对于电磁激励所诱发的振动问题，行业内常用的规避方法为通过进行模态分析来判断电磁激励频率是否避开结构的固有频率。但随着风电行业的不断发展，当前环境下仅靠模态分析已经不能完全满足研发需求，建立发电机乃至传动链的机电耦合动力学分析模型，并结合电磁分析、振动测试等进行电磁激振谐响应分析逐渐成为主流。丁亮[1]、张存等[2]分别通过添加电磁力作为激励源，对永磁风力发电机定子进行了瞬态响应分析。陈锐博等[3]采用解析和仿真相结合的方式建立了 8 MW 风力发电机一体化齿轮-发电机系统的动力学模型，分析了永磁发电机电磁激励对齿轮-发电机系统机电耦合动态特性的影响，虽然在小型试验台上进行了验证，但并未有真机实测的对比结果。

1 电磁力波载荷的分析与提取

1.1 力波阶次理论分析

在同步电机中，存在着定子和转子绕组磁势的基波和高次谐波。它们相互作用后，会在气隙产生一系列组合的电磁力波，这些力波有着不同的幅值、转速、转向、节点数。

定转子合成磁场的基波产生节点对数为磁极极数的力波，频率为两倍基波频率，力波幅值与气隙磁密的平方成正比，这是电机中最强的电磁力波。但由于节点数较多，频率较高，实际上引起的振动故障较少。

定子谐波磁场 Bν和转子谐波磁场 Bμ相互作用，会产生μ±ν次的力波，频率为两者频率的和或差。如果μ和ν比较接近，会产生阶次很低的电磁力波。即使对应的电磁力较小，也有可能引起电机的强烈振动，这往往是电机产生电磁振动及噪声问题的主要原因。

定子磁势基波及谐波次数为ν=(6k’/d+1)p，k’=0，±1, ±2,…

转子磁场基波及谐波次数为μ=(2k”+1)p，k”=0，1，2，…

其中，d 为每极每相槽数的分母，当为整数槽时取 1。P 为极对数。

1.2 计算方法

基于麦克斯韦电磁场方程和有限单元法，采用 JMAG 的场路耦合时步有限元法完成电磁力波计算。

在瞬态场模型中，定转子方程分别按各自的坐标系列出。定转子两部分的解通过气隙联系在一起。转子的旋转以转动转子的有限元网格实现，因此，瞬态法也称为时步法。因为转子中的 $\partial A/\partial t$ 包括了由运动引起的 A 对时间的变化率，考虑到求解区域中的涡流，把麦克斯韦方程组应用到二维求解区域后，可得场方程为：

$$\frac{\partial}{\partial x}(\nu\frac{\partial A}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(\nu\frac{\partial A}{\partial y})=-J+\sigma\frac{\partial A}{\partial t} \quad (1)$$

其中，A 为矢量磁位的轴向分量；ν 为磁阻率；J 为源电流密度。与上式相应的泛函为：

$$W(A)=\iint_{\Omega}(\int_0^B HdB-JA+\frac{1}{2}\sigma\frac{\partial A}{\partial t})d\Omega+\int_{S_2}H_tAdS \quad (2)$$

场路耦合时步有限元法是基于时步法的电机瞬态分析的一种有效方法[4-5]，它把外电路方程和电磁场方程耦合在一起联立求解。求解出磁场分布后，可以进而求得电磁力波的时空分布，在进行二维 FFT 分析后，可得电磁力波在频域和空间的谐波分布情况。

1.3 计算模型和参数设置

计算区域的主要边界条件和物理属性设置如下：

（1）定义电机模型内外圆弧为切向磁场边界；

（2）定义电机左右边界线为奇周期边界；

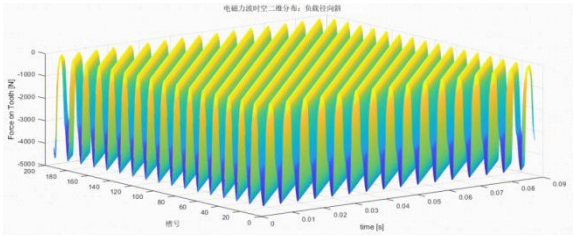
（3）定子铁心、转子铁心、阻尼等根据实际尺寸和真实材料建模，考虑阻尼涡流效应；

（4）将斜槽定义为三层切向，分别求取电磁力波，模拟斜槽的影响。

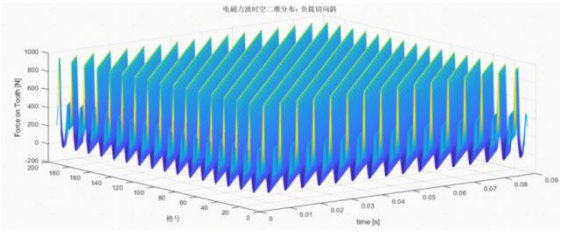
（5）设置电机转子旋转速度，定子静止。

1.4 电磁力波计算结果

气隙磁场中丰富的谐波，会相互作用产生一系列电磁力波。对气隙中的电磁力波进行时、空二维谐波分析，可得到其频率和节点对数。图 1 为最终得到的定子每齿径向电磁力波时空分布和切向电磁力波时空分布。



（a）定子每齿径向电磁力波时空分布



（b）定子每齿切向电磁力波时空分布

图 1　负载工况下，定子每齿受到的电磁力波时空分布

2　动力学分析模型

本文将采用 Romax 软件来建立某型号大兆瓦半直驱风力发电机机电耦合动力学分析模型，如图 2 所示。该电机转子具有 9 对磁极。

2.1 模型及边界条件

模型中包含电机定转子、电机定子基座、电机转子支架、齿轮箱后端盖、齿轮箱输出轴及轴承等。该模型采用 Romax 软件建立，其中，电机定子基座、齿轮箱后端盖、电机转子支架为有限元网格模型，电机定子铁芯、转子磁钢硅钢片为 Romax 建立的网格柔性模型，齿轮箱输出轴、轴承为 Romax 软件特有属性的刚性模型。

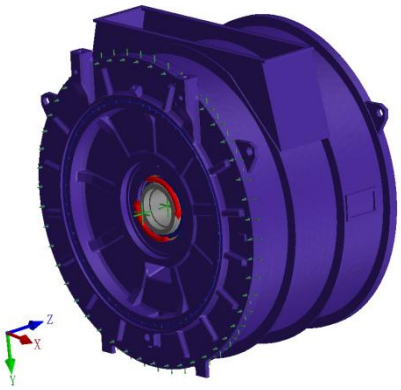


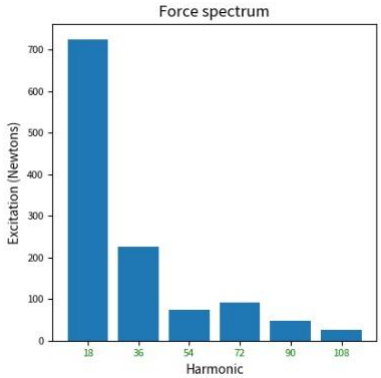
图 2　某型号发电机动力学分析 Romax 模型

定子部分在齿轮箱后端盖处设置固定约束，在齿轮箱输出轴上建立输入功率。对于模型中螺栓连接把合位置，按照螺栓实际尺寸建立 RBE2 节点连接。

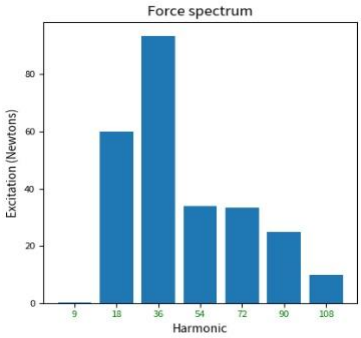
振动响应分析中，结构阻尼用模态阻尼比表示，按照工程经验采用 5 %；对于模型中的有限元部件，动力学 FE 缩聚的频率范围选择 0~2 300 Hz，以覆盖激励频率范围。整个动力学分析所用最高转速为 820 r/min，分析设置频率范围 0~1 500 Hz。

2.2 发电机电磁谐波激励导入

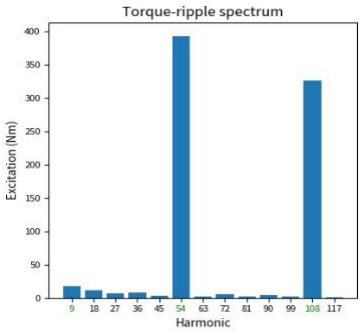
将发电机负载工况径向力、切向力及扭矩激励数据导入 Romax 模型，经快速傅里叶变换，得到发电机在负载工况下的电磁激励力如图 3 所示。可见，负载工况径向力和切向力主要考虑 9、18、36、54、72、90、108 阶次，扭矩波动主要考虑 9、54、108 阶次。



（a）径向力激励

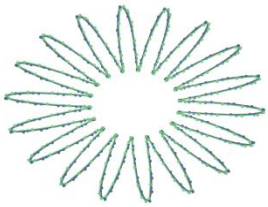


（b）切向力激励

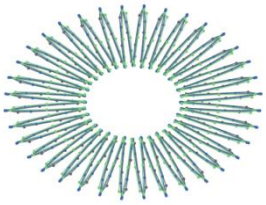


（c）扭矩激励

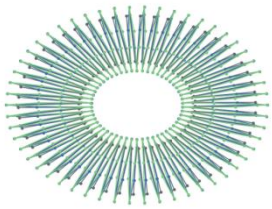
图 3　发电机在负载工况下的电磁激励力



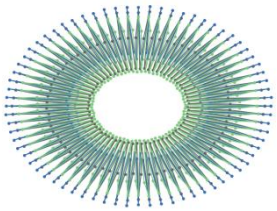
（a）18 阶电磁谐波激励



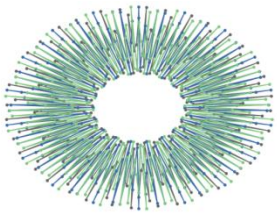
（b）36 阶电磁谐波激励



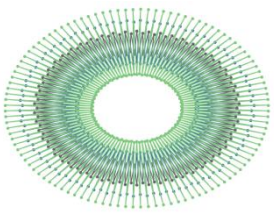
（c）54 阶电磁谐波激励



（d）72 阶电磁谐波激励



（e）90 阶电磁谐波激励



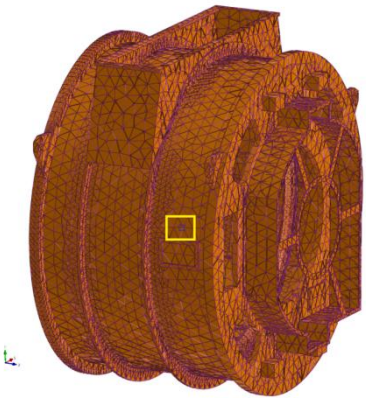
（f）108 阶电磁谐波激励

图 4　负载工况，径向槽激励力空间分布

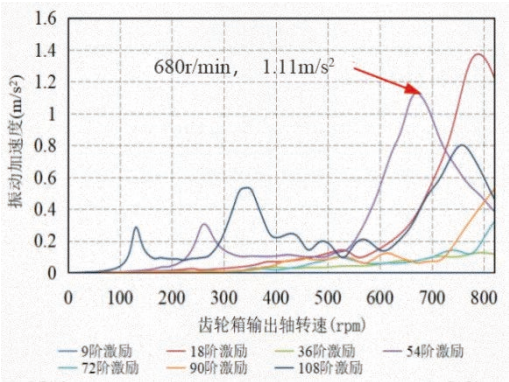
2.3 振动测点及仿真结果

Romax 模型中，将基座外壁上某一节点定义为传感器测点来提取附近的加速度值，位置如图 5(a)所示。这里需要说明的是因为定转子都具有周期对称的特性，故只在基座外壁设置 1 个测点测量结果是可靠的。

电机测点振动加速度响应曲线如图 5(b)所示。可以看出电机在所有电磁激励下振动响应最大为 1.372 m/s^2，此时电机转速 787.2 r/min 左右，受到第 18 阶电磁激励作用，对应电磁激励频率 236.16 Hz。另外，当电机转速 680 r/min 时，受到第 54 阶电磁激励作用，测点振动响应达到为 1.11 m/s^2，此时对应电磁激励频率 612 Hz。



（a）定子基座传感器测点位置



（b）电机测点振动加速度响应曲线

图 5　负载工况，电机测点的振动加速度响应情况

3　现场振动实测对比

同型号某大兆瓦半直驱风力发电机出厂前型式试验的真机上，在相同测点位置布置了加速度传

感器。共针对两台发电机样机，进行了前后两组测试。本次测试采用 SKVMA 振动测试分析系统，在测试过程中共使用 5 个传感器，分别为 3 个单轴加速度传感器、1 个速度传感器以及 1 个声压传感器，单轴加速度主要采集其振动系统的组成信息。整个 SKVMA 振动测试系统详细信息如表 1 所示。

表 1　SKVMA 振动测试系统详细信息

设备分类	型号	传感器灵敏度	分析量程	测量范围
振动分析仪	SK-4432	\	\	\
MEMS DC 单轴加速度传感器	3741B12100G	27 mv/g	±100 g	0~1 500 Hz
本特利速度传感器	330505	20 mv/mm/s	102 mm/s	1~200 Hz
ICP 声压传感器	378B02	50 mv/Pa	\	7~10 000Hz
SKVMA	电脑分析软件	\	\	\

电机温升试验共持续几个小时，在此期间发电机转速保持在 680 r/min，功率保持为额定功率。分别测得前后 2 台发电机非驱动端的振动加速度如图 7 所示，可以看出，两台发电机均需要 30 分钟左右的时间来持续升温，此时电机振动波动较大。温升试验开始约 30 分钟后，第一台发电机测点位置振动加速度稳定在 1.05 m/s^2 左右，第二台发电机测点位置振动加速度稳定在 1.19 m/s^2 左右。

电机出场的温升试验对应的便为仿真的负载工况，对比图 5 可以看出，在额定转速 680 r/min 时，机电耦合仿真结果为测点加速度 1.11 m/s^2，与真机结果吻合。

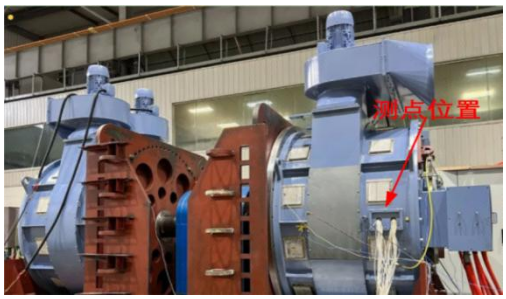


图 6　发电机上加速度传感器测点位置

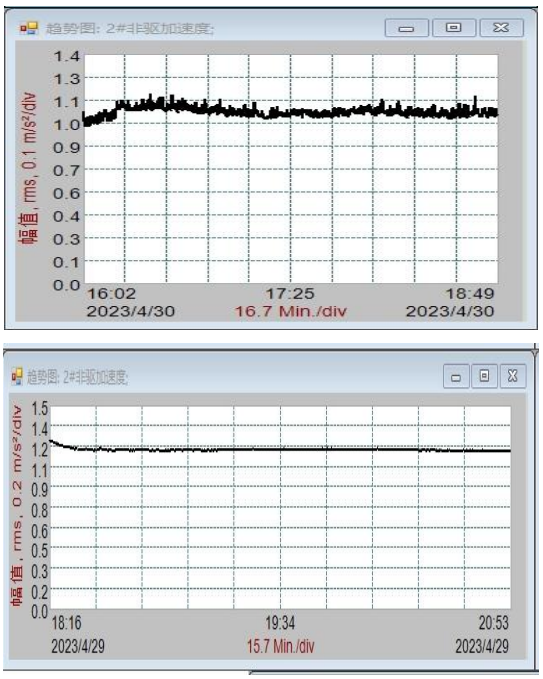


图 7　两台电机试验测点振动加速度

4　结语

本文针对大兆瓦等级中速永磁风力发电机电磁激振谐响应进行了分析研究，形成了电磁激励载荷的提取、机电耦合分析模型简化建立、谐响应分析、真机试验测试对比等一整套的研究方法。机电耦合仿真分析，求解出当电机转速 680 r/min 时，受到第 54 阶电磁激励作用，测点振动响应达到为 1.11 m/s^2。同一型号 2 台发电机真机出厂温升试验，同样测得相同位置振动加速度在 1~1.2 m/s^2。仿真分析结果与真机实测结果吻合。本文所提出的研究方法主要针对中速永磁风力发电机具有很好的普适性，其他类型发电机具有一定的参考作用。

参考文献：

[1] 丁亮. 大型永磁直驱同步风力发电机电磁振动的仿真分析[J]. 可再生能源, 2013, 31(11):39-42

[2] 张存, 沈意平, 阳雪兵, 等. 气隙偏心下永磁风力发电机定子电磁振动特性分析[J].电机与控制应用, 2022, 49(4):53-59

[3] 陈锐博, 刘长钊, 秦大同. 风电一体化齿轮-发电机系统机电-刚柔耦合动态特性[J].太阳能学报, 2023, 44(7):328-338

[4] 郭涛. 基于场路耦合时步有限元法的大型感应电机起动过程分析[D].哈尔滨理工大学, 2016

[5] 孙梦云. 基于场路耦合时步有限元法的感应电机瞬态分析[D].三峡大学,2013

最佳阵风转速控制参数的现场试验方法

邵勤丰[1] 王明军[2]

1.东方电气自动控制工程有限公司，四川 德阳 618000；2.四川工业科技学院，四川 德阳 618000

摘 要：本研究是通过现场试验方法得到的最佳转速控制参数使风电机组在风况不定，风速不稳的阵风条件下达到稳定运行，并兼顾风轮储能、输出稳定以及减少机组及部件的疲劳损坏等多个目标的实现。本文将就机组的阵风控制及控制转速参数寻优的现场试验方法进行阐述。

关键词：风电机组；风轮储能；超速停机；控制转速参数寻优；现场试验方法

中图分类号：TM315 **文献标识码**：A **文章编号**：1001-9006（2024）06-0027-06

Optimal Gust Speed Control Parameters Field Test Method

SHAO Qinfeng[1], WANG Mingjun[2]

(1. Dongfang Electric automatic control Engineering Co., LTD.,618000, Deyang, Sichuan; 2. Sichuan Institute of Industrial University, 618000, Deyang, Sichuan)

Absrtact: In this study, the optimal speed control parameters obtained by field test method make WTG run stably under the gust conditions with uncertain wind conditions and unstable wind speed, and take into account the realization of multiple goals such as energy storage of the wind turbine, stable output and reducing fatigue damage of the wind turbine and its components. It is described the field test method of gust control and optimization of control speed parameters of the WTG in this paper.

Key words: WTG; wind wheel energy storage; overspeed shutdown; optimization of control speed parameters; field test method

风电机组处在比较复杂的自然环境之中，时常要承受极端风况的作用。极端风况包括极端运行阵风、极端风向变化、极端相关阵风、极端风切变、台风等风况。[1]超出机组运行能力的极端阵风主要考虑机组的安全保护；而机组运行范围内的极端阵风，则应重点考虑机组并网运行稳定等问题，充分利用阵风带来的能量。但因极端阵风的风速变化频繁，很容易造成机组停机脱网，且在大风条件下的极端阵风停机，受风速变化影响，再次并网相当困难，停机到再次并网运行需要相当长的时间，这样还会大大减少机组的发电量。

随着机组容量及低风速、超低风速机组的开发，风轮直径不断增大。[2]风轮的转动惯量也随之增大。因风轮的巨大惯性，通常在阵风出现1～2 s后，风轮转速才发生变化，滞后系统容易引起机组转速失控，引发超速停机。[3]

机组发生极端风况超速停机的另外一个因素是由于桨叶气动的非线性特点，通常做法是根据桨距角[4-5]或者风速[5]来设计增益调节的变桨控制参数，桨距角或风速越大，则增益越小等，加强对叶轮的非线性调节，可避免桨距角的调节时间过长的问题，而阵风停机问题不能得到根本解决，不能很好地解决阵风况条件下的叶轮储能等问题。

国外在简化传动链模型及尾流模型的基础上，基于静态的功率-风速关系对抑制阵风超速作了研究，预估出风轮有效风速作为控制器的前馈信号，

收稿日期：2024-04-24

作者简介：邵勤丰（1977—），男，2008 年毕业于电子科技大学控制理论与控制工程专业，硕士，高工。现任职于东方电气自动控制工程有限公司研发中心工业数智化研究所，从事控制系统开发工作。

进行提前变桨动作[6]，因没有考虑偏航误差、风轮与塔架的动态特性，控制的准确性大打折扣；以测量桨叶根部挥舞与摆振方向的弯矩为基础，通过非线性观测器，预估出有效风速及入流角，并在此基础上识别极限事件模式，来进行快速变桨[7]，以降低风轮转速，但在目前运行的风电机组中，在桨叶根部贴应变片势必增加成本、故障几率及现场机组维修的难度，不利于在商运机组中应用推广；基于安装在机舱上的雷达测风仪，检测到风轮前的风速，处理后引入作为控制器的前馈信号，以降低机组的载荷，同时也有效抑制了风轮超速问题，雷达测风仪可较为准确地测量来流状况[8-9]，但在执行时，叶轮直径巨大、风况复杂多变等多种因素的制约同样降低了其控制的准确度。

在阵风条件下，变桨提前动作与快速动作的原则，再结合变速变桨控制算法基本结构，在变桨控制器上增加功率桨距角发电机转速控制环，使变桨在额定功率以前提前动作；在桨距角发电机转速控制环的比例项中增加非线性增益因子，使变桨控制能在阵风下快速动作，以有效抑制在阵风工况下风轮转速,减少阵风带来的超速停机，这是阵风控制策略的又一解决方案，该方案在一定程度上提高了机组的发电量，降低了机械载荷，提高了电网输出的稳定性，现场实践表明，该方案并不能从根本上解决阵风时的超速停机问题。[9]

由以上的阵风解决方案可知：为实现极端风况下的机组稳定运行，普遍采用了对阵风有效预测的基础上进行机组控制。根据极端风况预测原理，从理论上讲，常用的方法有基于物理模型的方法、基于统计的方法和基于机器学习的方法 3 类。[1]

基于物理模型的极端风况预测是将阵风看作大气湍流、边界层风速等物理量的函数。[10]文献[11]提出了一种基于放缩方法对极端阵风进行预测的模型。文献[12]对 COSMO 阵风判定模型和标准 WRF 阵风参数模型进行比较。但是这两种方法都需要根据风力发电场地貌、地面粗糙度等地理因素，以及风速、温度等环境因素来建模对极端风况进行预测。因风电机组所处的工作环境是十分复杂的，建立精确地模型较为困难，即使建立了适当的预测模型，当环境变化时，模型不能及时的更改，造成极端风况预测的准确度下降，难以实现预测模型在风电机组中的应用。

基于统计方法的极端风况预测方法是根据极值统计原理，建立相应的统计模型，这种方法多用于确定特定环境中极端阵风的恢复过程。[13]文献[14]构建了阵风机制分析模型实现对阵风的预测。这种方法需要大量的风速数据作为支撑，应用统计学方法对风速数据序列进行分析，建立将来某一时刻风速值与历史数据信息之间的数学关系式，实现对极端风况的预测。由于风速具有波动性和随机性的特点，使得风速具有很强的非线性。这种预测方法很难对风机上的风速做到实时性分析。

基于机器学习的极端风况预测是近几年的研究热点，这种方法的优势在于能够列出各种影响风速的因素与极端阵风之间复杂的非线性关系，而不必依赖于某些精确的模型参数。文献[15]使用自适应模糊推理算法对某地区每日的极端阵风进行了预测。

文献[16]应用某一确定高度的风速数据、温度数据和湿度数据作为 SVR 阵风预测模型的输入，对某地区日最大阵风进行了预测。文献[17]采用了 Ada Boost 分类树方法对极端阵风进行预测。文献[18]利用风电机组实测的历史数据，通过应用多种智能算法建立了极端阵风预测模型，通过对将来某段时间内的极端阵风发生概率进行预测，应用预测的结果对机组的控制参数进行差异化设置，保证机组的安全运行。这种方法需要大量的历史数据，并找出输入和输出之间的映射关系，这种映射关系没有一个固定的数学表达式，选择合理的机器学习算法和相应的模型结构，可以降低预测所需的时间并且提高预测的精度。

基于物理模型的极端风况预测方法受环境的影响比较大，在风机复杂的运行环境中，预测精度不高；基于极值统计原理的极端风况预测很难实现风速的实时预测；而机器学习方法对于非线性具有较好的学习能力和较低的预测时间，该类方法可以实现对风速的实时预测，对机组运行稳定能起到较好的效果，但其控制变量较多，且在充分发挥机组性能以及促使阵风控制多个目标的实现存在不足。

上述解决方案，主要从控制理论入手以期达到极端阵风条件下的长期稳定运行。而机组处于自然

条件下，风况千变万化。风的能量与风速的立方成正比，每当阵风来临，在 1～2 秒之内就会带来巨大的能量。一方面，前馈控制策略很难对整个风轮平面的风况进行准确预测。另一方面，转速控制策略难以在极短的时间内起到明显效果。加之，机组自主偏航等众多的不确定因数。另外，在阵风条件下，不必要的频繁变桨，即使避免了超速停机，但因阵风不必要的顺桨，损失了能量，减少了发电量输出，增加了机组的疲劳载荷和故障几率等。

目前，研究风电机组风轮的空气动力问题有 3 种方法：理论计算、风洞试验和风电场测试。风电场测试主要用于大型风电机组的性能测试和应用研究。[19]兆瓦级风电机组的研究应以风电场试验为基础。

该阵风处理方案是在既定的机组条件下，采用现场试验得到的最佳转速控制参数用于机组控制，配之以适当的控制策略和方法，是通过现场试验方法“预估”出极端阵风实际给机组带来的飞升转速，利用最佳转速控制参数对机组进行提前顺桨，避免了极端阵风带来的超速停机，兼顾了风轮储能，减少了阵风对机组的冲击及机组和部件的疲劳载荷，达到了多个控制目标的实现。

1 阵风控制及存在的问题

1.1 阵风工况下控制分析及最佳阵风控制转速参数的重要意义

在额定风速以下，当机组运行转速较高，如遇阵风，发电机转速容易超过保护定值[20]，导致超速停机。仅采取变桨措施，很难跟上风速的变化，往往在变桨的同时，时常还要增加发电机执行扭矩，以阻止叶轮转速的迅速上升，又有利于提高发电量。因此，在这种情况下，通常可以通过增加扭矩和叶轮速度上升的储能消耗阵风的能量避免出现阵风停机。

然而，在阵风工况下，发电机转速急剧上升，仅是通过理论计算，而不是通过现场试验则很难确定出合理的转速控制参数，时常会在机组没有达到满负荷，且最高运行转速还远不能触及机组的最高并网转速就开始顺桨，这不仅降低了风轮的储能效果，减少了风能利用，还会增加机组部件的疲劳损坏和故障几率。

当机组在额定风速以上运行时，此时机组已达到额定转速和额定功率，不能通过增加扭矩来消耗阵风带来的能量，机组已运行在变桨控制阶段，通常情况下是通过顺桨释放多余的能量。此时如遇阵风，一方面，由于风轮的巨大惯性，从阵风来临到发电机转速变化有一定的滞后；另一方面，由于桨叶气动的非线性特点，风速急剧上升的情况下，机组转速并非随着顺桨角度的变化而迅速下降。此时的极端阵风调节，主要通过速度裕度（机组额定转速与最高并网转速之差），即叶轮储能来消耗阵风能量，最大限度地让机组运行到接近最大运行转速以消耗阵风的能量，再配之以阵风控制策略达到极端阵风条件下的稳定运行。此时的最佳阵风转速控制参数及合理控制逻辑显得尤为重要，否则更容易引发阵风停机。

以上分析可知：最佳阵风转速控制参数及合理的阵风控制逻辑对极端阵风条件下的机组运行稳定、降低部件损坏、故障几率和提高发电量等具有重要的意义。

1.2 目前国内风电机组阵风控制策略存在的问题

保证风电机组在其风速运行范围内的长期稳定运行是风电机组设计的基本要求。为保证在极端风况下稳定运行，有的机组设计是把机组的最高并网运行转速长期控制在远低于机组及部件承受能力的转速之下，即使在极端阵风条件下，最高运行转速与机组的最高并网转速也有相当大的差距，从而导致风轮储能受阻，机组性能不能得到充分发挥；有的机组设计，则是当机组达到额定转速以后，就把转速稳定当成根本的控制目标，没有考虑阵风时的风轮储能等问题。这样势必导致顺桨频繁，既损失了风能，又增加了阵风对机组带来的冲击，减少了变桨休眠时间，增加了变桨耗电和变桨故障等；有的机组设计，在确定最佳转速控制参数时，主要是通过系统仿真软件获得，而没有经过长时间的现场试验得到，要么是最佳控制转速设置过高，难以保证阵风条件下的运行稳定，要么是控制转速设置过低难以发挥机组性能。对于以上机组有必要根据

现场试验对其转速控制参数及阵风控制逻辑进行优化。

再从国内风电机组的研发设计来看：在我国风电行业飞速发展中，已研发的一些机型由于研发单位分工过细，再加之研发人员因专业的局限及现场经验的缺乏，在阵风控制策略和方法方面难以从主控、变桨和变频器等多部件综合地考虑，使之协调一致以达到机组安全、风轮储能及降低部件疲劳强度等多个目标的实现。另一方面，由于国内风电生产厂家竞争激烈，新产品开发迅速，机组生产厂家每年都要开发众多的新机型，新产品的转速控制参数不是通过长期的现场试验得到，导致其偏离最佳值。

本文方案则是从系统观念出发，把整个风电机组看作是一个完整的系统，用现场试验的方法获得机组的最佳转速控制参数。

2 最佳控制参数的现场试验方法

如图 1 所示是风电机组的最高并网转速范围控制转速 V_K 寻优的现场试验方法。在通常情况下，阵风控制参数在满负荷风速及以上起控制作用的概率较高，而在小风条件下，起控制作用的概率较低。在满负荷风速以上做该现场试验，则更为合理。然而，在众多风电机组的实际运行环境中，满负荷风速以上的风频较少，阵风转速控制参数的获取受到大风条件的限制。为尽快得到最佳转速控制参数，本文提供了在小风条件下的最佳转速控制参数的现场试验方法，这大大缩短了阵风转速控制参数的寻优时间。为机组改造及新产品开发提供了转速控制参数及控制逻辑的现场试验方法。

2.1 阵风控制转速的试验方法

从风电场兆瓦级风电机组运行的实际情况来看，无论是直驱还是双馈机组。一方面，发电机、变频器及相关部件的承受能力决定了机组运行的最高并网转速V_{max} r/min，机组并网运行转速必须小于、等于该转速值，否则，可能使发电机或变频器等部件受到损坏，因此，为保护机组及部件安全，机组运行要受到最高并网转速为V_{max} r/min的限制。当机组的并网运行转速大于V_{max} r/min时，就会触发机组报超速停机。另一方面，为充分地发挥机组性能，提高发电量，机组能达到的并网转速越高，越有利于叶轮储能、减少变桨次数及部件的疲劳载荷等，有利于最大限度地提高发电量。因此，机组能运行的最高并网转速越高，则越有利。再从机组的运行稳定性方面看，在通常情况下，即便是极限阵风来临，机组也应稳定运行，不会出现转速超限的停机现象，所以，直驱和双馈机组都有一个把机组能控制在最高并网转速V_{max} r/min以内的最佳“极限阵风报警”值V_k r/min。该V_k r/min的是通过现场试验获得，其试验过程及方法，如图1所示。

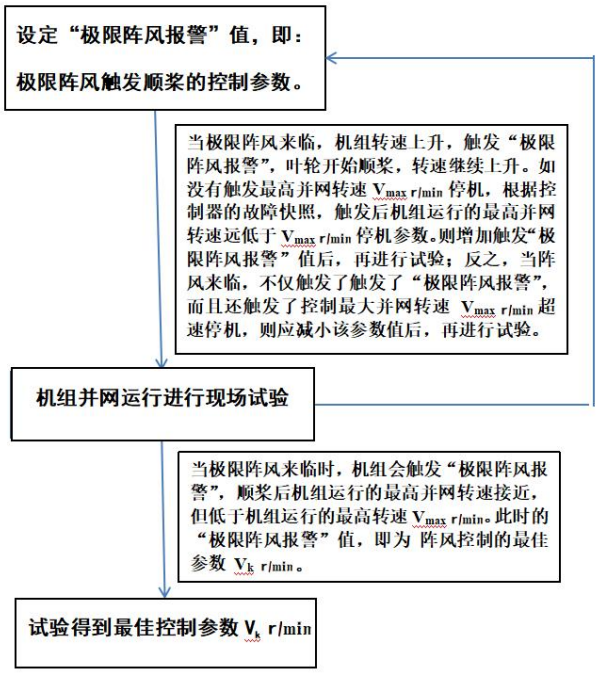


图 1 机组最佳“极限阵风报警”值 V_K r/min 的现场试验方法

V_K r/min 为触发“极限阵风报警”值，触发后，叶轮开始顺桨，此时叶轮转速继续上升，直至接近机组运行范围内的最高并网转速 V_{max} r/min，但不会超过 V_{max} r/min 值，即不会触发机组报超速停机，因此，通过 V_K r/min 来触发顺桨，降低叶轮转速。这样既达到保证机组运行安全及稳定的同时，又最大限度地保证叶片储能，提高发电量；减少阵风对机组带来的冲击及部件损坏等。为把机组运行转速控制在 V_{max} r/min 以下，提前触发 V_K r/min。该参数在多种风况下通过现场试验获得，从根本上解决了极端风况下机组运行范围内的转速超限问题。V_K r/min 是否最佳，直接关系到机组在极端风况条件下

的长期稳定运行，关系到风轮储能、对电网冲击、部件承受的疲劳强度以及部件损坏状况等。

其阵风控制逻辑如下：在机组最高并网转速范围内，因极限阵风，而转速过高，触发 V_K r/min，触发后叶片以正常停机顺桨速率进行顺桨。机组的额定转速 V r/min 降低，并以（V-1）r/min 为极端风况下机组的额定风轮转速进行运行转速的控制，该控制保持的时间为t（可根据极端风况条件在0～600秒之间调整），在这之后，再以每分钟增加 0.1 r/min 风轮转速的速率上升，恢复到机组正常的额定风轮转速 V r/min 对机组进行转速控制。

通过多次现场试验得到的最佳转速控制参数使机组在极端阵风条件下达到长期稳定运行。

2.2 小风条件下的现场试验方法及理论依据

小风条件下的试验方法是风电机组在风电场运行条件下，把并网机组的运行扭矩降低，或把机组设置为不并网的长期空转运行状态，即运行扭矩为 0，以提高小风条件下的叶轮转速。这样，机组在较低的风速条件下，就能达到额定转速，为转速控制参数寻优创造了更多的现场试验条件。

其控制原理为：风电机组叶轮吸收风能得到的功率等于叶轮扭矩乘以角速度，即：$P=N\omega$，式中：P 为叶轮功率，瓦特（W）；N 为扭矩，牛顿·米（N·M）；ω为叶轮的角速度，弧度/秒（rad/s）。

由上述公式可知：功率一定，扭矩与叶轮的角速度成反比，即降低发电扭矩，就能增加叶轮转速。

机组运行因短时极端风况（极限阵风、湍流等因素）造成叶轮加速的角加速度为β，作用时间为 t，因此，在短时间阵风给叶轮增加的角速度值为$\omega'=\beta t$,短时极端风况使叶轮达到的角速度等于或大于ω_{max}时就会触发停机。

$$\omega_{max}=\omega_{k}+\beta t \qquad (1)$$

风电机组在降低并网扭矩条件下运行，或在不并网条件下空转运行，此时与满负荷条件下机组的转动惯量相同。在小风条件下与满负荷风速以上的极端风况给风电机组叠加的最大角速度值为$\omega'=\beta t$，阵风风速瞬间变化的性质是基本一致的，因此，满负荷风速以上的运行及安全转速超限试验，可以移至小风条件下进行。由于因小风条件下的阵风风速与高风速条件下的阵风风速有所不同，因此，在小风试验得到的寻优控制参数还需在高风速条件下进行验证与校核，如有出入再根据实际情况进行调整。从多个风电场的机组试验来看，小风试验得到的最佳转速控制参数通常可直接用于机组的阵风控制。

2.3 适用机型及机组的空转设定

现场试验是研发兆瓦级风电机组的重要手段。本文所述的现场试验方法适用于各种有变频器参与的变桨变速并网风电机组。如：双馈、直驱和半直驱等。在进行小风条件下的阵风试验，通常需要对机组进行空转设定，采取以下措施可实现长期空转运行。

其具体措施如下：

（1）改变变频器或主控的信号状态，达到变频器不参与并网的空转状态。

采取适当的措施破坏变频器与主控之间的并网逻辑关系，在风轮转速进入变频器并网运行范围后，不让变频器切入、并网以达到机组空转的目的。

（2）通过修改相应的主控参数，屏蔽相应的运行故障，使其失去作用，机组就能运行在最大转速范围之内，并达到长期空转运行而不报任何故障。

因此，在进行机组空转运行设置时，首先，修改主控参数使机组在最大运行转速范围内运行，且转速由额定转速控制，这样机组就与满负荷并网状态的转速控制完全相同；其次，屏蔽相应的故障，通过这些措施使机组长期稳定地空转运行，而不会报故障停机。

3 结语

通过现场试验方法得到的最佳阵风转速控制参数使机组在极端阵风条件下运行稳定，既对保护设备有利，又能充分发挥机组的性能，最大限度地降低了机组运行的度电成本。该试验方法曾在 9 个不同地区多种机型的风电机组上试验和应用。小风条件下获得的机组转速控制最佳参数和安全控制逻辑，在大风期之时，在 9 个风电场几百台机组上应用顺利通过了大风期的现场检验，其后不断进行

推广应用，至今已在近万台风电机组上推广应用，取得了良好的经济效益和社会效益。

由流体力学相似理论可知，该转速控制参数寻优方法能适用于双馈机组，也同样能适用直驱和半直驱机组，该试验方法的推广和应用将具有广阔的前景和意义。

参考文献：

[1] 李洋. 考虑极端风况预测的风电机组塔架载荷控制策略研究[D]. 沈阳. 沈阳工业大学. 2022

[2] 赵靓. 1.5 MW、2 MW 风电机组风轮直径发展趋势［J］.风能，2014,25（5）:34-37

[3] 叶杭冶. 风电机组监测与控制［M］. 北京：机械工业出版社，2011：123-125

[4] Ianchi F D, De Battista H, Mantz R J, Wind turbine control systems-principles，modelling and gain scheduling design［M］. Berlin，Germany：Springer-Verlag,2007

[5] 郭鹏. 结合风轮气动特性分区的多 PID 切换变桨距控制［J］. 中国电机工程学报, 2010, 30（增刊）：153-158

[6] Vander Hooft E L, Van Engelen T G. Estimated wind speed feed forward control for wind turbine operation optimization［R］.Westerduinweg, Netherlands：Energy Research Center of the Netherlands（ECN）, 2004

[7] Kanev S, Van Engelen T G. Wind turbine extreme gust control［J］. Wind Energy,2010, 13（1）：18-35

[8] Bossanyi E A. Un- freezing the turbulence: application to LiDAR-assisted wind turbine control[J]. Renewable Power Generation,2013, 7(4):321-329

[9]娄尧林, 叶杭冶, 蔡旭, 等. 变速变桨风电机组阵风控制策略[J]. 电力自动化设备,2016, 36(12):24-28+62

[10] Sheridan P. Current gust forecasting techniques, developments and challenges[J]. Advances in Scienceand Research, 2018, 15: 159.

[11] Panofsky H A. Atmospheric turbulence[J]. Models and methods for engineering applications, 1984,397

[12] Stucki P, Dierer S, Welker C, et al. Evaluation of downscaled wind speeds and parameterised gusts forrecent and historical windstorms in Switzerland[J]. Tellus A: Dynamic Meteorology andOceanography, 2016, 68(1): 31820

[13] Palutikof J P, Brabson B B, Lister D H, et al. A review of methods to calculate extreme wind speeds[J].Meteorological Applications: A journal of forecasting, practical applications, training techniques and modelling, 1999, 6(2): 119-132

[14] Hofherr T, Kunz M. Extreme wind climatology of winter storms in Germany[J]. Climate research,2010, 41(2): 105-123

[15] Chaudhuri S, Middey A. Adaptive neuro-fuzzy inference system to forecast peak gust speed during thunderstorms[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2011, 114(3-4): 139

[16] Mercer A, Dyer J. A new scheme for daily peak wind gust prediction using machine learning[J].Procedia Computer Science, 2014, 36: 593-598

[17] Sprenger M, Schemm S, Oechslin R, et al. Nowcasting foehn wind events using the adaboost machinelearning algorithm[J]. Weather and Forecasting, 2017, 32(3): 1079-1099

[18] 黄小光, 王杏, 史晓鸣, 等. 基于机器学习的阵风预警方法与应用[J]. 可再生能源，2020, 38(5):635-640

[19] 贺德馨, 等. 风工程与空气动力学[M].北京:国防工业出版社,2006

[20] IEC. Wind turbine: part 1 design requirements: IEC61400-1-2005［S］.Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2005

集团要闻

“双碳”课题通过验收

2024 年 11 月 5 日，东方研究院承担的“双碳”研究课题——“能耗双控向‘碳双控’转变政策及其影响研究”顺利通过项目结题评审验收，为企业在“碳双控”政策推行下绿色低碳高质量发展提供指导依据。

“能耗双控向‘碳双控’转变政策及其影响研究” 是东方电气集团公司双碳研究中心重点项目，主要研究内容包括：通过对能耗双控政策的综合分析，系统介绍能耗双控内涵、相关政策及实施过程，识别能耗双控政策推行的政策效果及局限性；着重研究碳双控政策的相关内涵、碳双控政策提出的背景及碳双控政策的制度体系及实施进程。同时，项目结合我国区域经济及高耗能行业的发展格局，研判能耗双控向碳双控政策转变对我国区域经济、高耗能行业和能源电力行业的影响，进一步为企业在碳双控政策转变下产业布局规划与发展指明方向。

来源：东方电气公众号

董箐水电站自主可控筒形阀控制系统改造

贾小平　邓芳辉　席波　彭博　陈金鹏

东方电气自动控制工程有限公司，四川 德阳 618000

摘要：为解决董箐水电站筒形阀控制系统运行中存在的问题，开展自主可控水电站筒形阀控制系统的研究，本文研发一种数字液压技术应用于董箐筒形阀控制系统的改造，不仅可以全面提升筒形阀的安全性和稳定性，确保机组的安全稳定运行，还推动了相关产业的智能化转型。

关键词：筒形阀控制系统；自主可控；全数字集成式；改造

中图分类号：TV738　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）06-0033-4

Renovation for the Self-controlled Control System of Ring Gate for Dongjing Hydropower Plant

JIA Xiaoping, DENG Fanghui, XI Bo, PENG Bo, CHEN Jinpeng

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

Abstract: In order to solve the problems of the ring gate control system for Dongjing hydropower plant, research on the self-controlled control system of ring gate was carried out, and the achievements were applied to the renovation of ring gate control system for Dongjing hydropower plant,which can not only comprehensively improve the safety and stability of the ring gate, ensure the safe and stable operation of the unit, but also promote the intelligent transformation of related industries.

Key words: ring gate control system; self-controlled; digital integrated; renovation

1　筒形阀控制系统概述

筒形阀是水轮机组常用的进水阀之一，筒形阀主要由筒体、接力器、导向装置、密封、电液控制系统等组成。筒体布置在固定导叶和活动导叶之间，开启或提升后，被顶盖和座环之间的腔体所包容。

筒形阀 6 个接力器固定在顶盖上，通过电液控制系统提供的压力油操作接力器，驱动筒体保持水平的姿态作直线升降运动，从而实现筒形阀开启与关闭。

筒形阀控制系统的关键在于多个液压缸的同步控制，多个液压缸间存在负荷大且负荷不均匀，同步指标要求较高的难题。现在主要的筒形阀电液控制系统的同步控制方式分别采用机械链条同步方式[1-2]、电液伺服控制同步方式[3]和数字液压控制方式。[3-5]目前国外公司的产品以电液伺服控制同步方式为主，数字液压控制方式因控制精度高，结构简单在国内应用较为广泛。

2　数字液压技术

数字液压是一种采用数字电气技术和液压控制技术结合的先进的控制系统。它将传统液压控制系统中的机械液压控制元件替换为电控元件，采用数字控制技术实现液压系统的控制。[6-7]数字液压系统充分发挥了数字控制技术的优势，具有高可靠性、高柔性、高精度、高效率、低噪音等特点，广泛应用于机床、汽车、航空航天等领域，随着科技的不断发展，数字液压技术将不断得到优化和升

收稿日期：2024-06-28

作者简介：贾小平（1972－），男，四川泸州人，正高级工程师，学士，从事水轮机控制设备机械液压设计工作。

级，为各个领域的发展提供更加先进、高效的解决方案。

3 筒形阀控制系统存在的问题

3.1 董箐电站筒形阀概述

董箐电站是中国华电集团有限公司下属的贵州黔源电力股份有限公司的骨干电站之一，电厂装机容量 880 MW（4×220 MW）。四台水轮机组为某国外公司设计，进水阀采用筒形阀，该筒形阀是该公司在国内首台设计、制造、生产和使用的设备。

3.2 筒形阀控制系统概述

董箐筒形阀电液控制系统为典型的电液伺服控制系统，采用调节器控制电液转换器、液压锁锭以及释放电磁阀的带电动作来实现液压系统油路的通断，来控制筒形阀的启闭。筒形阀接力器内设直线位移变送器将筒形阀动作的位置信号反馈给调节器，调节器再对给定开度、实际开度以及 6 个接力器的实际开度进行分析比较，从而达到控制筒阀 6 个接力器同步的启闭，其工作原理如图 1。

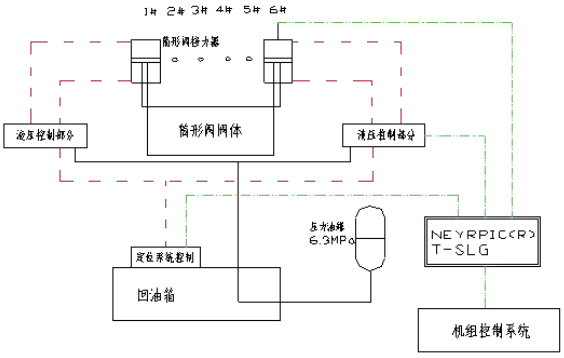


图 1　筒形阀电液控制系统工作原理图

3.3 筒形阀控制系统的基本参数

董箐筒形阀及其控制系统的基本参数如下：

表 1　董箐筒形阀及电液控制系统参数表

类型	参数	类型	参数
额定油压（MPa）	6.3	关闭时间（s）	60~90（可调）
外径（mm）	6 570	同步方式	电气液压同步
高度（mm）	1 445.5	最大工作水头（m）	124.5
壁厚（mm）	120	承受最大水压（mH_2O）	130.08
行程（mm）	1 379	接力器数量	6
接力器直径（mm）	280	接力器容积全开（L）	71
开启时间（s）	60~90（可调）	接力器容积全关（L）	90

3.4 筒形阀控制系统存在的问题

（1）董箐筒形阀为某国外公司在国内首台应用产品，技术不成熟，电气控制系统及液压控制系统存在一些缺陷和隐患。液压系统控制阀组安装位置不合理，控制阀组安装在水车室离地面 2 米多高处，并且由于阀组重量大，固定在边墙上的支架多，水车室空间狭窄，不能搭设操作平台，导致对液压系统控制阀组检修维护时只能借助人字梯和安全带作业，极其不方便存在很大的人身安全隐患。

（2）机组开停机过程中，筒形阀时常开启或关闭不成功，造成机组启停机失败，需要运行人员现场手动调节，手动调节的难度较大，接力器同步动作的准确性较难掌控，筒形阀运行可靠性大大降低。[8]

（3）筒形阀控制系统电子元器件已投运 10 多年，导致其可靠性降低，故障频发，且故障后无法修复，需频繁更换备件以消除故障，零部件只能由原设备厂家提供，采购周期长，价格远高于市场价格。由于董箐筒形阀为国外公司产品，技术由其掌控，因此对于重大故障处理、定检、调试必须由该公司技术人员到现场服务解决，成本巨大，极大增加了运维成本。

4 自主可控水电站筒形阀控制系统的研究

通过科研立项，在明确课题研发定位的基础上，以开发主要设备自主、技术可控的符合自主可控的筒形阀控制系统发展需求的全数字集成式筒形阀电液控制系统为目标，并能适用于董箐项目。将现有的控制系统 PLC 改为自主可控的 PLC、控制系统核心部件伺服比例阀改为自主可控的数字缸。致力于将现有的筒形阀控制技术与国产化自主可控 PLC 结合起来打造一套可实现国产化、高可靠性和运维便捷性的水电厂筒形阀控制系统，使得筒形阀的控制系统精度提高、环节减少、检修维护便利。通过紧紧围绕水电厂国产化发展方向，解决关键核心控制器件在水电站重要设备上的自主可控。

自主可控筒形阀控制系统由机械液压系统和电气控制系统两部分组成。

4.1 机械液压系统

筒形阀由 6 只均匀布置，配置相同，尺寸相同的数字缸共同来完成筒体的提升或下降。由于每个数字缸均可实现量化控制，因此在筒形阀的需要动作时，电气控制系统给每个数字缸输入相同时间内完成相同的位置目的信号，就可实现 6 个数字缸的同步运动，进而保证筒体在要求的时间内到达指定的目标，保持运动中的水平和运动的安全平稳状态。[9]筒形阀控制的液压系统图见图 2。

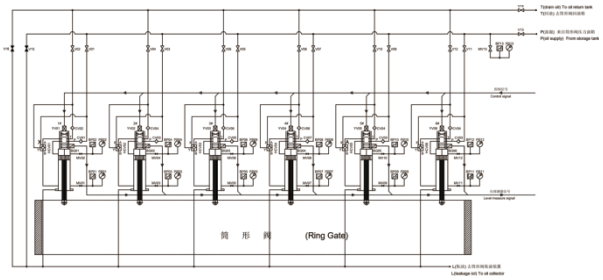


图 2　筒形阀控制系统的液压系统图

在调试、检修或紧急情况下，在电气不能正常工作或人为切除的情况下，也可以手动控制筒形阀的开启或关闭。只需人为操作手动操作手柄，每个接力器的手动操作手柄旋转的方向和旋转圈数相同的情况下，6 个接力器的运动方向和位置能保持同步，保证筒形阀的同步运动。在手运操作停止后，能使接力器停止不动，实现接力器可在任意位置停留。

机械液压系统的核心元件采用东方电气的数字缸，其由数字液压伺服阀与接力器组成，液压伺服阀由伺服电机驱动，推动阀芯向开、关接力器的方向移动，使液压伺服阀输出压力油推动接力器向开、关方向运动。当接力器运动时，反馈机构推动阀芯向液压伺服阀的中位运动，当接力器到达输入要求的位置后，阀芯正好处于中位，输出的油路切断，接力器停止并保持在当前位置。电气控制系统可将输入信号进行量化输出给伺服电机，同时数字缸上集成有接力器位置检测编码器，将接力器的位置进行量化反馈给电气控制柜，实现接力器的量化控制。筒形阀数字缸的示意图见图 3。

数字缸还具备手动操作功能，这得益于数字缸能实现量化输入与输出的一一对应，在没有控制电源或人为切断伺服电机电源的情况下，使用手动操作手柄，就能控制接力器的精确运动和位置控制。本改造项目的手动操作手柄与接力器位置的对应关系为手动操作手柄转动 3 圈，接力器行走 10 mm；接力器的开/关运动方向也由手动操作手柄旋转逆时针/顺时针旋转方向决定。

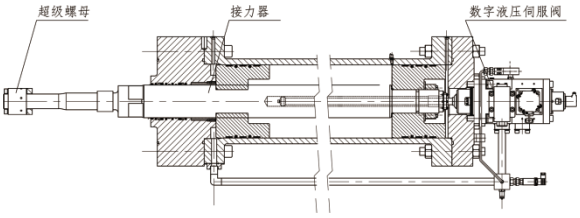


图 3　筒形阀数字缸示意图

4.2 电气控制系统

电气控制系统基于现有的筒形阀控制技术与国产化自主可控 PLC 结合起来打造一套可实现国产化、高可靠性和运维便捷性的水电厂筒形阀控制系统。通过紧紧围绕水电厂国产化发展方向，解决关键核心控制器件在水电站重要设备上的自作可控。

控制方式上，从接力器的行程检测、电气系统的控制信号到接力器的活塞杆移动，全程实现了数字化；这种控制方式安装简单，调试方便；提高了控制系统的可靠性、安全性和接力器的同步精度；增强了控制功能。

电气控制柜具有通过触摸屏方便的调节开启和关闭时间，可以实现筒形阀在任意位置停机静止，可以在触摸屏上实时显示当前筒形阀以及接力器的位置等。筒形阀电气控制柜的显示界面见图 4。

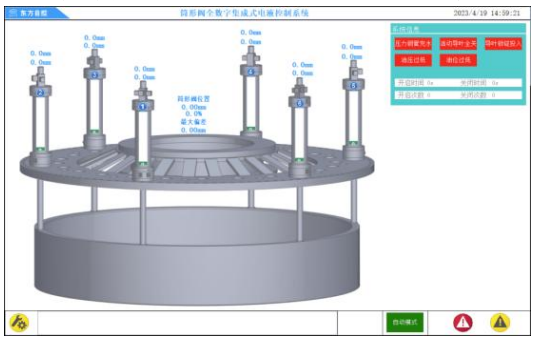


图 4　电气控制柜显示界面

4.3 科研改造效果

（1）连接与密封

将原接力器与筒体由螺纹连接方式更改为超级螺母连接方式，降低拆除时出现螺纹卡死的风险，大大减轻拆装的难度和工作量。

接力器下缸盖与提升杆间密封采用多道由轴用阶梯圈、轴用 Yx 圈、轴用方形圈、防尘圈组成组合密封结构，并设计单独的漏水口和漏油口。可以实现在不拆除提升杆的情况下就可以更换密封，同时防止渗漏水进入油液中引起油液乳化变质，提高系统的安全性能和延长部件的使用寿命。接力器与提升杆间密封结构示意图见图 5。

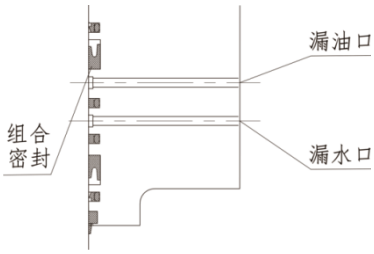


图 5　下缸盖与提升杆间密封结构示意图

（2）管道简化

改造前，液压控制系统回路复杂，机坑内和环管数量多达 13 根，单台机组筒形阀的连接控制软管数量多达 60 多条，管道接头点多，导致存在漏油与爆管的危险。董箐电站改造前的接力器管道图见图 6。

改造后，控制筒形阀所用的环管数量 2 根，全为钢管连接，消除了爆管的风险，可能的渗漏点大幅减少。[4]董箐电站改造后的接力器管道图见图 7。

图 6　改造前的接力器管道

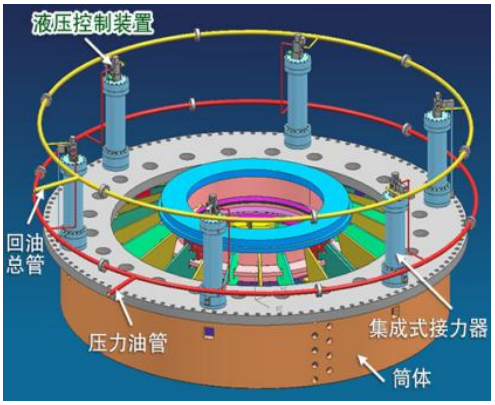


图 7　改造后的管道示意图

（3）性能提升

改造前：原系统采用比例阀作为电液转换元件控制液压缸的 6 缸任意位置同步精度基本保持在 3~5 mm 的范围内，在运行中出现多次失步，纠偏困难，甚至多次出现因无法纠偏造成开停机失败；该系统不具备手动操作功能，筒形阀动作过程中只能在全开或全关位置，不便于实现中间位置停留。

改造后：采用数字缸作为电液转换元件改造后的主要性能指标：

- 6 缸任意位置同步精度　≤1 mm
- 筒形阀位移检测精度　1.0 μm
- 筒形阀最小控制距离　0.01 mm
- 筒形阀位移显示精度　0.01 mm
- 具备手动操作功能；
- 能对任意接力器进行精确定位；
- 能长期保持在任意工作位置。

改造后的控制精度大幅提高，基本不会出现失步的情况，能保证筒形阀的长期安全稳定运行。

手运操作功能和能在任意位置保持的功能，对筒形阀在失电等异常情况下的安全和应急处置提供了保障，防止异常工况下筒形阀的永久性卡死。

接力器能保持在任意位置，能对任意接力器进行精确定位的功能，除了保证运行性能外，便于在检修等工况下操作筒形阀。

5　结语

董箐水电站筒形阀在局部设计上存在缺陷，导致筒形阀在开启或关闭过程中多次出现故障，技术

（下转第 64 页）

水轮发电机组顶盖排水控制系统设计

闫浩　马莹

东方电气自动控制工程有限公司，四川 德阳 618000

摘要：水轮机顶盖在立式水轮发电机组运行或停机中都会出现积水情况，顶盖积水超过安全水位会导致事故危害机组安全运行，因此当水位超过一定限度时需使用排水泵及时排出顶盖积水。顶盖排水系统中使用浮子开关监测顶盖积水位，将水位开关信号送入排水泵控制 PLC，PLC 通过控制排水泵驱动电路进而控制排水泵的启停，使积水位始终保持在安全阈值内，实现自动化控制保证机组安全稳定运行。本文从电气和控制角度介绍了三排水泵组合顶盖排水系统的控制设计方法，该方法提高了顶盖排水系统的整体效能和可靠性，实现了系统优化。

关键词：水轮发电机组；顶盖排水；轮换逻辑；控制设计

中图分类号：TM312.1　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）06-0037-03

Head Cover Drainage System Design for Hydrogenerator Set

YAN Hao, MA Ying

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

Abstract: During the operation or stop of a vertical hydrogenerator unit, water accumulation may occur on the head cover of the turbine. If the water accumulation on the head cover exceeds the safe water level, it can cause accidents and endanger the safe operation of the unit. Therefore, when the water level exceeds a certain limit, a drainage pump should be used to timely discharge the water accumulation on the head cover. In the head cover drainage system, a float switch is used to monitor the accumulated water level on the head cover, and the water level switch signal is sent to the drainage pump control PLC. The PLC controls the start and stop of the drainage pump by controlling the drive circuit of the drainage pump, ensuring that the accumulated water level is always within the safe threshold and achieving automatic control to ensure the safe and stable operation of the unit. This article introduces the control design method of the combined head cover drainage system with three drainage pumps from the perspectives of electrical and control,this method improves the overall efficiency and reliability of the head cover drainage system，achieving system optimization.

Key words: hydrogenerator set; head cover drainage; rotate logic; control design

顶盖排水系统是水轮发电机组重要的辅助设备，水轮机顶盖在立式水轮发电机组运行或停机中都会出现积水情况，顶盖积水主要由导叶中轴套漏水和主轴密封漏水等原因所致。若不控制顶盖积水液位高度，使顶盖积水到达一定液位会严重危害机组的安全运行，导致水淹水导轴承事故，造成机械事故停机，甚至发生水淹水车室的严重事故，因此必须使用顶盖排水装置及时排出积水。

现阶段为了实现排出顶盖积水控制顶盖液位，不使顶盖积水液位达到危险程度的目的，一般使用液位开关和液位变送器作为监测水位的监视器，使用 PLC 作为自动控制排水系统的控制器，使用排水泵作为抽排积水的执行器。为独立实现顶盖排水系统功能，使用以 PLC 为控制核心，由电气驱动回路和控制回路组成的顶盖排水控制柜或箱作为顶盖排水控制系统的控制集成。

收稿日期：2024-01-30

作者简介：闫浩 (1988—)，男，2011 年毕业于北京航空航天大学自动化（自动控制与信息技术）专业，本科，工程师。现任于职东方电气自动控制工程有限公司设计工程师，主要从事水轮发电机组自动化系统设计工作。

1 电气回路

以往顶盖排水系统选用两个排水泵实现该功能，所选泵功率较大，电源负荷高。选择三个排水泵的优点是可以降低单个排水泵的功率，从积水液位的危险层级上，分别使用不同的排水泵数量，利用不同程度的排水量使能效更高，更合理的执行排水任务，同时也保证了足够的排水量。由于泵的电机功率减小，电气回路中也可以不使用软启动器作为电机启动的电源控制器件，排水泵驱动电路上可以选择功率较小的电器元件组合，采用断路器、接触器和热过载继电器的典型电机驱动电路作为排水泵电机电源主回路。

1.1 主回路

三个排水泵电机分别由独立的主回路提供电源并控制。使用断路器作为电机电源供电开关，使用接触器控制电机启停，使用热过载继电器对电机进行功率热过载保护。

已知排水泵三相异步电机额定功率 P，电压 U，功率因数 $\cos\varphi$，效率 η。

根据公式：

$$I=\frac{\mathrm{P}}{\sqrt{3}\times U\times\cos\varphi\times\eta} \tag{1}$$

计算额定电流得：P。

断路器参考额定电流：$I_b=2I$，选用断路器额定电流应略大于此计算值。

接触器参考额定电流：$I_c=1.5I$，选用接触器所带电机标准额定功率和电流应相匹配。

热过载继电器参考额定电流：$I_c=1.15I$，选用热过载继电器电流整定范围应覆盖参考电流值。

或根据电动机起动与保护低压电气元件选型样本，匹配电动机额定功率直接选型。

1.2 控制回路

排水泵电机启停控制依靠各自主回路接触器的动作状态实现，接触器闭合则泵启动，接触器断开则泵停止。控制回路中使用转换开关实现“手动”“切除”“自动”三种控制模式，“手动”模式时，泵电机直接接通电源，泵运行；“切除”模式时，泵电机的电源电路被物理断开，泵停止，在以上两种控制模式下，PLC 逻辑对泵的启停都没有作用；只有在“自动”模式时泵的启停才完全交给 PLC 控制，此时 PLC 的控制逻辑才会在确定的输入参数下，对泵的启停做出准确控制。即人工干预的动作优先级要高于自动控制。

三种模式分别在不同的工况状态发挥不同作用。在机组调试阶段，手动模式可以检验泵的电源回路是否连接正确，供电电源以及排水泵是否正常；也可以在机组运行时人为操作排水泵的运行，在未达到自动模式控制启动排水泵增加排水量的情况下，增加单位时间排水量，迅速降低顶盖液位。切除模式是防止在不需要顶盖排水泵运行的情况下而误动，比如对泵进行检修和更换。自动模式可以完全依靠传感器和 PLC，对顶盖排水系统实现完全自动化的控制，实现无人值守的全自动运维。

各泵的控制模式、运行停机状态和故障状态都有对应的指示灯，可以显示在现地顶盖排水控制箱的前面板上，方便现地操作和指示。同时所有状态信息还被 PLC 收集，用于自动控制模式的输入参数，参与控制逻辑，并通过通讯上传至监控系统。

2 控制系统

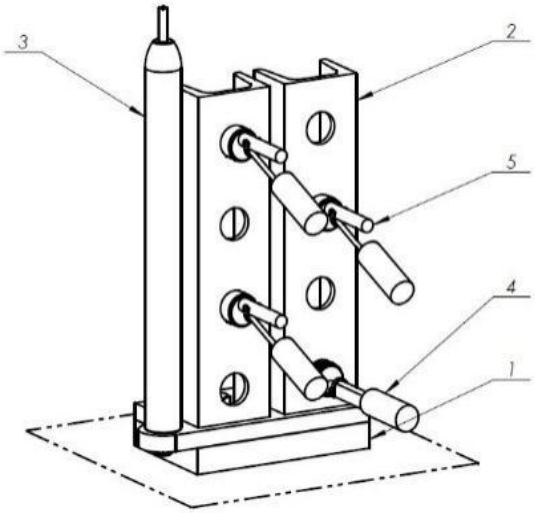
传感器和 PLC 是顶盖排水控制系统的核心，他们的组合将实时监控顶盖水位，控制排水泵启停，实现顶盖排水系统的自动化运行。

2.1 传感器

顶盖排水控制系统使用 4 个浮子式液位开关和 1 个压力式液位变送器作为水位报警监视器，液位开关按照顶盖积水液位为低液位、高液位、过高液位、事故报警液位，液位依次递增，危害报警级别递增。液位开关反馈给 PLC 的信号作为控制排水泵启停的信息依据与启停泵信号一一对应，按液位递增依次定义为停泵信号、启主用泵信号、启备用泵信号、机械事故报警信号。液位变送器直接将监测的模拟量信号传输至监控系统。

液位开关和液位变送器安装在加工好的安装支架上，各液位开关安装位置按照监测报警液位要

求开孔，支架通过螺栓把合在焊接底座上，焊接底座焊接在顶盖合适的位置（图 1）。



1-焊接底座；2-安装支架；3-液位变送器；4-液位开关（常闭）；5-液位开关（常开）

图 1　顶盖水位测量元件安装图

2.2 控制流程

顶盖排水控制系统默认状态为全部泵自动控制模式，各泵状态良好无故障，顶盖液位未到达高液位。机组运行后，当高液位信号出现时，PLC 控制启动主用泵运行，开始执行排水。经过一段时间后，如果液位持续升高，当过高液位信号出现时，PLC 控制启动备用泵运行，此时将作为备用泵的两个排水泵投入运行，三个排水泵同时工作进一步增加单位时间排水量。再经过一段时间后，如果液位继续升高，当事故报警液位信号出现时，通过液位开关硬接点将向监控系统发顶盖积水机械事故液位报警信号，此时监控系统将控制机组进入机械事故停机动作流程。

在排水过程中，如果液位得到控制，下降至安全液位，触发低液位信号，PLC 控制停止正在运行的排水泵，不再执行排水。安装在顶盖处的液位变送器也实时将液位信息传送至监控系统，如果出现水位持续升高无法控制，将由监控系统发出机械事故停机指令，对故障原因进行排查，对机组进行检修。排水过程中，当排水泵出现故障切除时，PLC 发出对应故障报警信号至监控系统，泵的启动优先级将重新排序，依据当前液位信号启动对应泵。

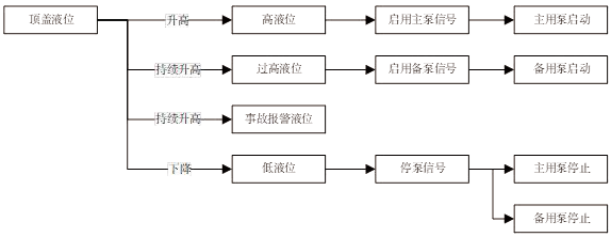


图 2　排水泵控制流程图

2.3 启动优先级排序

1 号、2 号、3 号三个排水泵的启动次序利用泵的运行状态、故障状态、控制模式和历史运行次数作为算法依据，启动优先级从高到低分别定义为主用泵、备用泵。

当泵出现故障时，将作为最低优先级排序。当泵在运行状态时，将作为最高优先级排序。控制模式分为手动、切除、自动；手动模式时，泵驱动电路直接接通电源启动运行，此时泵的排序优先级最高；切除模式时，泵驱动电路被物理断开，无法运行，此时同故障状态排序优先级最低；自动模式时，泵的启停控制由 PLC 控制逻辑决定。

以上各排序依据作为输入参数用于 PLC 的泵启停控制逻辑运算，同时还将利用泵的历史运行次数作为排序依据。次数最小的泵作为主用泵，其余两个泵作为备用泵；当多泵运行次数相等时，被命名为顺序优先的泵作为启动优先泵，即 1 号优先于 2 号，2 号优先于 3 号。

3　结语

三泵顶盖排水控制系统，增加了系统的冗余度，提高了系统整体可靠性和效能，以更加节能低碳的阶梯功耗设计，实现了系统优化。泵的轮换启动方式也使各排水泵在运行时间上得以均衡，不但在使用寿命上可以做到互相接近，而且更方便暴露设备的故障隐患，使运维更准确高效。通过传感器和 PLC 的有效反馈和控制，使电厂监控系统可以更准确的监视顶盖液位及排水系统情况，保障了机组的安全稳定运行。

紫兰坝水电站导水机构备件国产化替代设计研究与应用

卓莎林[1] 李建勋[1] 陈亮宇[1] 罗远红[2] 屈博兴[2] 高彬[2] 程崇高[2] 张东[2]

1. 华电四川发电有限公司珠宝寺水力发电厂，四川 广元 628000；2. 东方电气集团东方电机有限公司，四川 德阳 618000

摘要：紫兰坝水电站机组已运行14年，水轮机的导水机构是由国外公司设计、制造，导水机构缺陷率逐年上升，因导水机构备件均为进口件，存在采购周期长且结构尺寸、技术参数等无法满足原设计要求等问题，导致电站目前无法正常采购导水机构备件，已严重影响紫兰坝公司的正常电力生产。针对紫兰坝水电站目前存在的导水机构备件全部依赖进口的采购和技术风险，紫兰坝公司联合东方电机有限公司开展了导水机构备件国产化替代设计研究，通过对原导水机构部件进行结构、材质、性能、装配等全面分析对比研究与国产化替代设计，实现了紫兰坝水电站导水机构备件采购自主可控和技术优良的目标，为我国类似电站的进口件国产化替代研究与应用提供借鉴。

关键词：水电站；水轮机；贯流式；导水机构；国产化替代

中图分类号：TP273；TV74　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）06-0040-04

Research and Application on the Substitution Design of Water Distributor for Domestic Production in Zilanba Hydropower Station

ZHUO Shalin[1], LI Jianxun[1], CHEN Liangyu[1], LUO Yuanhong[2], QU Boxing[2], GAO Bin[2], CHENG Chonggao[2], ZHANG Dong[2]

（1.Huadian Sichuan Power Generation Co., Ltd., Baozhusi Hydroelectric Power Plant, 628000, Guangyuan, Sichuan, China;

2.Dongfang Electrical Machinery Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China）

Abstract: Zilanba hydropower Station unit has been in operation for 14 years. The water deflection of the turbine is designed and manufactured by foreign companies, and the defect rate of the distributor increases year by year.As the spare parts of the water guide mechanism are imported, the procurement cycle is long and the structure size and technical parameters cannot meet the original design requirements. As a result, the power station cannot normally purchase the spare parts of the distributor at present, which has seriously affected the normal power production of Zilanba Company.In view of the procurement and technical risks of the existing distributor spare parts of Zilanba hydropower station, which all rely on imports, Zilanba Company and Dongfang Electric Machine Co., LTD carried out a study on the replacement design of the distributor spare parts made in China. Through a comprehensive analysis, comparison and research on the structure, material, performance and assembly of the original distributor parts and the replacement design made in China, The objective of autonomous and controllable procurement of water guide mechanism spare parts of Zilanba hydropower station and excellent technology have been achieved, which will provide references for domestic substitution research and application of imported parts of similar power stations.

Key words: hydropower station; hydroturbine; bulb tubular turbine generator set; water distributor; domestic substitution

收稿日期：2024-10-09

作者简介：卓莎林（1990－），男，水电站动力设备与管理专业，本科。现任职于华电四川发电有限公司宝珠寺水电发电厂，主要从事电力系统生产管理工作。

1 电站概况

紫兰坝水电站位于四川省广元境内嘉陵江水系支流白龙江下游，电站以发电为主。电站共设计安装 3 台灯泡贯流式水轮发电机组，单机容量 34 MW，总装机容量 102 MW。电站首台机组于 2006 年 12 月投产发电。

2 项目背景

2.1 设备现状

紫兰坝水电站主机设备由东方电气集团东方电机有限公司生产，其中水轮机导水机构由奥地利维奥公司设计，韩国制造。因当年建设时的遗留问题，未提供备件详图，故无法正常采购导水机构备件，且所有备件均为进口件，存在采购周期长且结构尺寸、技术参数无法满足原设计要求等问题。机组运行 14 年以来，导水机构缺陷率逐年上升，为保证检修质量及机组安全稳定运行，急需对 3 台机组导水机构进行 A 级检修，亟待对机组导水机构部分关键备件进行国产化研究。

2.2 国产化需求

随着国家“两融合”的贯彻以及中国制造 2025 战略规划的部署，在节能、降耗、减排的政策要求和发电企业集约化、高效管理的需求驱动下，为提高机组安全运行可靠性，准确、高效采购满足设计要求和使用要求的备件，急需对机组导水机构的部分进口备件进行国产化研究。

3 项目目标

根据水轮机导水机构随机图纸和利用东方电机在灯泡贯流式机组结构设计、装配工艺等专业领域的丰富经验积累，在不改变水轮机导水机构整体结构的前提下，对导水机构装配的部分进口备件进行国产化研究及应用，国产化备件的各项性能应不低于相应进口产品，可显著降低检修维护成本，提高机组安全运行可靠性。

4 研究对象

导水机构装配的连杆、轴承、套筒、轴套、弹簧。

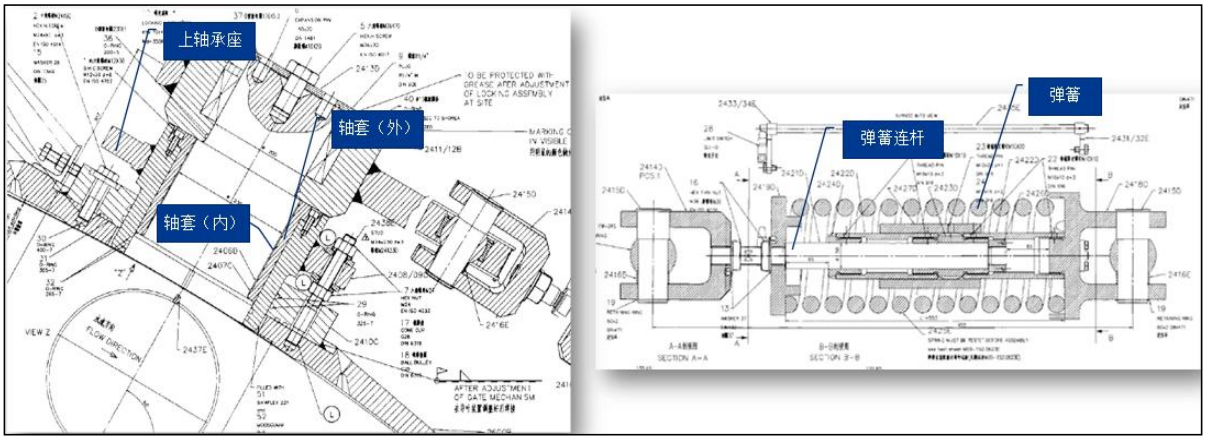


图 1 项目研究对象示意图

5 研究方案

因紫兰坝电站导水机构国产化的研究对象均为进口部件，且无相关设计资料，研究的主要思路是根据导水机构随机图纸先对导叶操作机构的设计结构、工作原理和装配关系进行全面细致地分析，在此基础上结合东方电机丰富的灯泡贯流式机组研制经验，采用其同类型机组先进设计理念，有针对性地对原设计结构和材料选取进行优化研究。主要实施步骤如下：

（1）对导水机构和研究对象的设计结构进行研究分析，并对其目前运行状态进行评价；

（2）对研究对象与其它配合部件之间的装配关系进行研究分析；

（3）结合东方电机同类型产品设计经验，对

研究对象进行相关受力分析计算；

（4）制定设计方案，制作相关试样，进行相应的性能测试，测试合格后进行生产；

（5）生产制造国产化备件，在机组检修期间进行装配和调试，开展真机运行试验；

（6）国产化备件在真机运行试验 1 年后，对国产化备件进行拆解检查，分析并总结试验效果。

6 选材分析

6.1 遇到的问题及应对措施

我们对导叶操作机构的连杆、轴承、套筒、轴套、弹簧进行检查和评价，分析其在长期运行后的状态和性能，然后根据检查评价结果采用东方电机当前先进的设计理念和成熟的制造工艺，重新设计制造国产化备件。通过对原进口备件进行检查和评价分析，针对原研究对象存在的部分问题提出了相应的解决措施，详见下表 1。

表 1　存在的问题及应对措施

序号	名称	设备状态	措施	初选材质	设计特点
1	上轴承座	密封槽及表面锈蚀严重，存在较严重变形	通过对配合部件之间的装配关系和性能分析，与同类型结构进行对比分析后，重新设计	ZG20Mn 或铸造不锈钢 ZG04Cr13Ni4Mo	应具有高强度、抗腐蚀、结构残余应力小等特点，且需综合考虑其异型结构特点和生产成本
2	轴套（外）	外轴套表面存在污染，端面存在磨损现象，轴套有吸水性，尺寸不稳定	通过对配合部件之间的装配关系和性能（机械性能、吸水率等）分析，与同类型结构进行对比分析后，重新设计	PA 类（尼龙 6、尼龙 66、尼龙 1010、聚芳砜等）高分子材料	应具有自润滑、高拉伸/弯曲强度、高硬度、低吸水性、低摩擦系数等特点
3	轴套（内）	轴套磨损，工作面污染，内轴套与外轴套存在局部脱层现象	通过对轴套（内）设计特点和功能进行分析，为提升轴套的检修便利性和降低检修成本，需考虑取消该结构的可行性	根据外观和设计经验可初步判断为聚四氟乙烯	应具有自润滑、耐腐蚀、耐磨、抗 老化、摩擦系数低等特点
4	弹簧	弹簧状态正常	通过对弹簧设计特点和功能进行分析，结合东方电机已有设计经验和运维经验，并与同类型结构进行对比分析后，重新设计	根据设计经验初步判断为合金弹簧钢	应具有良好的力学性能和工艺性能：高疲劳和屈服强度、有韧性，适用于承受重载和截面尺寸大等应用场景
5	弹簧连杆	弹簧连杆螺纹部分损坏	通过对弹簧连杆设计特点和功能进行分析，结合东方电机已有设计经验和运维经验，并与同类型结构进行对比分析后，重新设计	根据设计经验初步判断为锻钢 42CrMo 及以上	应具有高屈服/拉伸强度、有韧性，具有良好的机械性能和工艺性能，结构设计时应避免应力集中

图 2　导水机构研究对象图片

6.2 材料对比及选择

（1）上轴承座

原上轴承座采用 JIS SCW550（S355 JO）材质制造，轴承座法兰和轴承座筒体采用焊接结构，为了显著提升上轴承座的整体强度、抗锈蚀、抗氧化、抗疲劳和结构残余应力小等综合性能，经东方电机技术人员综合评估后，选取铸不锈钢 ZG04Cr13Ni4Mo 材质进行新上轴承座的制造。铸不锈钢 ZG04Cr13Ni4Mo 具有良好的机械性能、抗疲劳和抗氧化性能，使用寿命长。上轴承座整体铸造而成，无需组焊，避免了焊

缝应力的影响，结构尺寸更加稳定。

（2）连杆

原连杆采用 42CrMo 材质制造，考虑到连杆为受力部件，为了显著提升连杆的强度和抗疲劳等综合性能，经东方电机技术人员综合评估后，选取锻钢 34Cr2Ni2Mo 材质进行新连杆的制造，较原连杆具有更优的机械性能。

（3）压缩弹簧

原弹簧采用德标优质合金弹簧钢 50CrV4 材质制造，该材料具有良好的力学性能和工艺性能，高抗疲劳和屈服强度、有韧性，适用于承受重载和截面尺寸大等应用场景，因此新制压缩弹簧仍采用该种材质，更换为国标牌号 50CrVA。

（4）轴套

原轴套（外）采用 PAS（聚芳砜）材质制造，轴套装配由 PAS 和聚四氟乙烯两种材质的轴套粘接组成，在机组长期运行中，聚四氟乙烯轴套易与 PAS 外轴套脱开，从而影响活动导叶的受力，且聚芳砜吸水性较大，影响轴套的尺寸稳定性，若轴套与活动导叶轴颈之间的配合间隙设计不合理，可能引起抱轴或导叶晃动等问题。另外，在上轴承座与活动导叶轴颈之间设置两种轴套不便于机组检修，并增加了机组检修成本。

为了大幅度提升活动导叶操作机构的可靠性、稳定性和检修便利性，新轴套采用整体设计，并取消聚四氟乙烯内轴套，采用高分子改性聚己内酰胺+二硫化钼轴套，该材料是一种高分子聚合物，结晶度高，分子量高达 10 万~13 万，而普通的尼龙 6 的分子量只有 2 万左右，因此它具有很高的强度，能够长时间承受负荷；具有良好的回弹性，制品弯曲面不会发生永久变形，这样能保持强韧度，以抵抗由于反复冲击负荷产生的断裂；具有较好的耐蠕变特性，能长期能受轴承的重负荷，并有特别的吸振消音功能。

7 结构设计

东方电机根据原导水机构设计结构及各部件之间的配合关系，利用东方电机先进的设计理念和丰富的灯泡贯流式机组研制及改造经验，对国产化备件在结构设计、材料性能、装配工艺等方面进行综合分析、计算及创新，国产化备件设计特点如下。

7.1 上轴承座

上轴承座采用优质不锈钢铸钢 ZG04Cr13Ni4Mo 整体铸造而成，较原上轴承座材质和结构设计上，不仅显著提升了轴承座的整体刚强度，避免了焊接应力影响，而且大幅度提升了轴承座的密封性能、抗氧化、抗锈蚀性能和使用寿命。

7.2 连杆

连杆采用高强度锻钢 34Cr2Ni2Mo 材质整体锻造而成，较原连杆材质（42CrMo）机械性能、刚强度等性能指标有了显著提高，并采用降低应力集中的设计理念，进一步提升了连杆的安全可靠性。

7.3 压缩弹簧

压缩弹簧为导叶操作机构的重要受力部件，目前在国内外普遍使用的优质弹簧钢均为 50CrVA（国标弹簧钢）或 50CrV4（德标弹簧钢）。50CrVA 有良好的力学性能和工艺性能，淬透性较高，加入钒使钢的晶粒细化，降低过热敏感性，提高了强度和韧性，具有高的疲劳强度，屈服比也较高，是可用于较大截面的高负荷重要弹簧。

7.4 轴套

新轴套采用一体化设计结构，并采用高强度改性聚己内酰胺+二硫化钼均质高分子材料，具有良好的自润滑性能，安装后免维护，整个寿命期内无需额外添加润滑剂；动摩擦系数和静摩擦系数接近，工作时无爬行现象；吸水率低，尺寸稳定性优良；且对轴没有磨损，无化学腐蚀问题。

原轴套结构由外轴套（聚芳砜）和内轴套（聚四氟乙烯）组合而成，新型轴套相比原轴套装配在结构设计上更加可靠、简单、易维护，且吸水率低尺寸更加稳定，刚度好。

8 结语

通过对紫兰坝电站导水机构的部分关键进口备件进行国产化研究设计，彻底解决了紫兰坝水电站长期无法正常采购进口备件、备件采购周期长且尺寸和技术参数等无法满足原设计要求的问题。

经过国产化备件在机组上安装运行 1 年后的效果来看，国产化备件的各方面性能远优于原进口备件，达到了本次研究的目标和效果，为紫兰坝电站实现机组关键备件采购自主可控、降低检修维护成本和提高机组安全可靠性等方面提供了有力保障。

ASME 焊接工艺评定要素分析

张丹萍[1] 霍肖寒[1*] 黎振龙[2]

1 东方电气（广州）重型机器有限公司，广州 511455；2 广东省科学院中乌焊接研究所，广州 511455

摘要：ASME 标准是最为广泛、内容最为详尽的压力容器标准，在核岛主设备制造及核电站安装建设的设计、制造、检验、质量保证、运行维护等过程中广泛使用。国内核电站堆型主流的三代核电技术 CAP 1000 及 CAP 1400、小堆等堆型、四代核电技术高温气冷堆、快中子实验堆、低温堆等堆型，所用的标准体系均为美国的 ASME 核电标准体系。本文从 ASME 标准第Ⅸ卷焊接工艺评定篇中评定的制定、母材及焊材分组、焊后热处理及焊缝厚度覆盖范围等方面对应用 ASME 标准进行工艺评定过程中需要注意的问题进行分析。分析表明，根据焊接冶金性能、机械性能等影响焊缝性能的要素，焊接工艺评定的各要素都具有相应的评定覆盖性，评定制定的过程中必须严格遵循各评定要素的覆盖范围。

关键词：ASME 标准第Ⅸ卷；焊接工艺评定；评定要素；评定覆盖范围

中图分类号：TG44 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-9006（2024）06-0044-03

Analysis of Welding Variables for Welding Procedure Qualification According to ASME IX

ZHANG Danping[1], HUO Xiaohan[1], LI Zhenlong[2]*

（1.Dongfang (Guangzhou) Heavy Machinery Co., Ltd., 511455, Guangzhou, China；2.China-Ukraine Institute of Welding, Guangdong Academy of Sciences,511455, Guangzhou, China）

Abstract: More and more the third generation nuclear power plant manufacturing are substituted for the second half generation nuclear power plant manufacturing in China gradually, and the standard of nuclear power plant manufacturing according to ASME code will be used more and more than RCC-M code. This paper analyses the welding variables for welding procedure qualification basing on listing welding procedure qualification of one equipment manufacturing, base metal and welding material assignments, postweld heat treatment and range of thickness of base metal qualified. It concludes that assignments are based essentially on comparable base metal characteristics, such as composition on weldability, welding material and mechanical properties and so on, each welding variables has its range of qualification, and range of qualification welding variables shall be performed totally according to ASME.

Key words: ASME IX;welding procedure qualification; welding variables; range of qualification

焊接过程直接影响 ASME 规范产品的性能与质量，正确按 ASME 规范进行焊接工艺评定是制造安全、优质 ASME 规范产品的重要前提。焊接工艺评定工作是压力容器制造过程中的重要基础工作，是压力容器设备制造的先决条件，制定合理、覆盖性完善的焊接工艺评定尤为重要。

制定出覆盖性完善、满足 ASME 第Ⅸ卷要求的焊接工艺评定技术规程，就必须深入研究 ASME 第Ⅸ卷标准。本文将从依据 ASME 第Ⅸ卷制定焊接工艺评定过程中常见的、关键性问题进行分析讨论，列出评定

收稿日期：2024-08-08

作者简介：张丹萍（1987—），女，高级工程师，2011 年毕业于东北大学，工学硕士，2011 年至今于东方电气（广州）重型机器有限公司就职，主要从事核电核岛设备制造焊接技术、研发、质量管理工作。

霍肖寒（1993—），女，工程师，2015 年毕业于西安交通大学，邮箱：977567522@qq.com。

过程中的需引起重视的主要问题，并讨论其原因，为依据 ASME 标准体系的压力容器设备建造提供参考。

1 评定原则

在 ASME 第Ⅸ卷中，列出了焊接工艺评定的各类要素，其中包括母材、焊材、焊接方法、焊接位置、焊后热处理、焊接工艺组合等重要变素。产品实际制造前需依据影响焊接工艺评定的变素，结合设备的母材等性能及技术要求，制定覆盖产品所有焊缝接头的焊接工艺评定清单，焊接评定试板，验证满足产品要求的焊接工艺，得到指导产品焊接的工艺规程。焊接工艺评定是压力容器制造的先决条件。

2 评定的基本覆盖原则

评定的基本覆盖原则为相同重要变素等效覆盖原则。压力容器制造过程中所涉及到的材料种类繁多，根据材料的化学成分、焊接冶金性能以及力学性能等因素，对母材、焊材进行了材料分类，同时补充了焊接位置，焊后热处理，评定组合等其他重要变素。依据评定覆盖原则，可大大减少焊接工艺评定和焊工评定的数量。

2.1 母材 P-No 分类及覆盖

根据母材的特性，如化学成分、焊接性、力学性能等在理论上的类比分析，对母材进行了分类，详见表 1。

表 1 母材的分组

母材	焊接 P-No 或 S-No
钢及钢合金	P-No 或 S-No1～P-No 或 S-No11(含 5A、5B、5C)
铝及铝合金	P-No 或 S-No21～P-No 或 S-No25
铜及铜合金	P-No 或 S-No31～P-No 或 S-No35
镍及镍合金	P-No 或 S-No41～P-No 或 S-No49
钛及钛合金	P-No 或 S-No51～P-No 或 S-No53
锆及锆合金	P-No 或 S-No61～P-No 或 S-No62

当一种 UNS-No 的材料指定一个 P-No 时，另外一种具有相同 UNS-No 的材料则认为具有相同的 P-No，不论该材料是否被列入 QW422 中。

对于评定的抗拉强度，除 QW153 要求外，QW422 中规定的最小抗拉强度为评定的最小抗拉强度。

采用某一种 P-No 母材进行评定，则代表其他属于同类的 P-No 母材都已经进行了评定。对于已经评定合格的一种 P-No 的母材，由于标准升版或其他非材料成分等材料本身性质变化的原因更改了该 P-No 的母材分类号，则代表该母材所属的新的其他 P-No 的母材已经进行了评定。详细评定母材的覆盖范围见表 2。基于母材的组别的覆盖，大大减少了焊接工艺评定和焊工技能评定的数量。

表 2 分组母材的覆盖范围

评定试件用母材	评定覆盖母材范围
1 种 P-No+同种 P-No	相同的 P-No 或 S-No 内的母材
1 种 P-No+另种 P-No	与评定接头相同 P-No 或 S-No 内的两种母材
P-No3+ P-No3	P-No 或 S-No3+ P-No 或 S-No3 或 1
P-No4+ P-No4	P-No 或 S-No4+ P-No 或 S-No4、3 或 1
P-No5A+ P-No5A	P-No 或 S-No5A+ P-No 或 S-No5A、4、3 或 1
P-No5A+ P-No4 或 3 或 1	P-No 或 S-No5A+ P-No 或 S-No4、3 或 1
P-No4+ P-No3 或 1	P-No 或 S-No4+ P-No 或 S-No3 或 1
相同的两个未被制定 P-No 的母材相焊	与评定试件相同的母材
1 种未被制定 P-No 的母材+制定 P-No 的母材相焊	与评定相同的未被制定 P-No 或 S-No 的母材+与评定相同的制定 P-No 或 S-No 的母材相焊
两个不同的未被制定 P-No 的母材相焊	与评定相同的两个母材

2.2 焊材 F-No 、A-No 分类及覆盖性

为减少焊接工艺评定和焊工技能评定的数量，根据焊条和焊丝的使用特性，对焊条和焊丝进行了 F-No 的分组，根据焊材熔敷金属的化学成分，将焊材的熔敷金属进行了 A-No 的分组，详见 QW-430 和 QW440。需要注意的是，有了分组不代表评定所

采用的某一焊材可以完全用于同一组内的其他母材或替代具有相同 F-No 或 A-No 的焊材，而应结合冶金性能、焊后热处理、设计要求和使用要求、以及力学性能等方面考虑相应的母材和焊材的匹配性。

2.3 焊接位置

对于不同的焊接方法，不同坡口形式，焊接位置的评定覆盖范围不同，具体参见 QW405 的要求。焊接位置是试件或产品焊接的焊接位置，具体位置方位见 QW-461.1 或 QW-461.2。压力容器常用焊接方法的焊接位置变素覆盖范围见表 3。评定试板的焊接中隐含的焊接位置都是可以覆盖的。

表 3　焊接位置的覆盖性

焊接方法	坡口形式	试板位置	覆盖位置
SMAW	坡口焊	不限	所有位置①
	堆焊	1G 或 2G 或 3G	1G
		5G	1G,3G,4G,2G②
		2G+3G+4G	所有位置②
		6G	所有位置②
SAW	坡口焊	不限	所有位置
	堆焊	同 SMAW	同 SMAW
GTAW	坡口焊	不限	所有位置③
GMAW	堆焊	同 SMAW	同 SMAW

①当有冲击要求时，向上或向下焊不能相互覆盖。

②当 3G 或 5G 或 6G 位置堆焊试板，在立焊区域制取宏观金相腐蚀，化学，硬度，至少两个弯曲都合格后，则可覆盖全部堆焊位置。

③当由其他位置变更为立焊位置或由立焊直道变更为立焊摆动时，需重新评定。但如果经历高于上转变温度或奥氏体不锈钢固溶处理的焊后热处理情况除外。

2.4 焊后热处理

焊后热处理的目的主要有：消除焊接应力、改善焊缝组织和综合性能。工艺评定的热处理的变素主要是针对热处理对材料的焊接应力消除和改善焊缝组织性能的因素，根据具体情况进行分类进行的。例如对 P-No1 和 P-No3 等碳钢和低合金钢的材料不同热处理情况，对材料的组织性能的影响而进行分类考虑的，见 QW407.1。

不同的热处理温度保温区间和保温时间区间，对焊缝的组织性能同样有重要影响，保温时间和保温温度改变，影响评定的有效性。在 QW407.2 中明确了保温区间和保温时间区间为重要变素。评定覆盖的热处理时间如式（1）所示：

$$T=t/80\ \% \qquad (1)$$

注：T-评定覆盖时间，t-评定试板实际经历热处理时间

2.5 焊接工艺的组合

产品焊接时，在不同 WPS 的每种焊接方法、填充金属或各变素满足相应要求，以及相应的母材评定厚度范围和熔敷金属厚度范围都满足 QW451 的规定时，同一接头上，可以采用不同的焊接方法进行焊接。同样，在同一试板上，采用不同焊接方法焊接，各种焊接方法的评定厚度范围都按 QW451 的要求进行，其他要素都满足 QW250 的要求，则这些不同焊接方法的 WPS 可以组合一起使用，也可分开单独进行产品焊接，见 QW200.4。

3　评定厚度

3.1 母材覆盖范围

当其他焊接要素都相同，评定的接头的组织性能无影响的前提下，为避免母材厚度不同而进行重复评定，对母材的评定厚度进行区间划分，进而减少评定数量，比如评定试板厚度为 10 mm，WPS 中可用于焊接的母材厚度为 1.5~20 mm, 详见 QW451。

3.2 熔敷金属厚度覆盖范围

基于保证评定各要素都满足的前提下，熔敷金属的评定厚度进行区间划分，达到减少评定数量的目的。例如，评定试板熔敷金属的厚度为 30 mm，则相应的 WPS 的熔敷金属的厚度覆盖范围为 0~200 mm，在评定试板熔敷金属厚度在 19~38 mm 的范围内的任一厚度，WPS 的熔敷金属的厚度覆盖范围为 0~200 mm。详见 QW451。

4　结语

通过对 ASME 第Ⅸ卷的评定要素分析，结合对实际生产过程中的情况对比，得出如下结论：

（下转第 54 页）

核能发电设备供货合同项目管理研究

李昆　赵乐　包宜佳

东方电气集团东方电机有限公司，四川 德阳 618000

摘要：核电是国家大力发展的清洁能源之一。核能发电设备是核电站系统工程的重要组成部分，它的质量将会对核电站安全运行产生至关重要的影响。因此，研制单位要加强对核能发电设备供货合同项目管理的重视，协调相关方之间的关系，进而提高设备研制质量和产出效率，以保障核电站工程的顺利开展。本文主要研究如何提高核能发电设备供货合同项目管理工作水平。

关键词：核能发电设备；项目管理；核电站

中图分类号：TM623　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）06-0047-04

Research on Project Management of Nuclear Power Generation Equipment Supply Project

LI Kun, ZHAO Le, BAO Yijia

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

Abstract: Nuclear power is the clean energy energetically by the state. Nuclear power generation equipment is an important part of nuclear power plant systems engineering, whose quality would have a crucial impact on the safe operation of nuclear power plant. Therefore, the research and manufacturing corporation should pay more attention to the project management of nuclear power generation equipment supply project, coordinate the relationship between the relevant parties, and then improve the equipment manufacturing quality and output efficiency, to ensure the smooth implementation of nuclear power plant construction. This paper mainly studies how to improve the project management work of nuclear power generation equipment supply project.

Key words: nuclear power generation equipment; project management; nuclear power plant

党的二十大和国家“十四五”规划明确提出积极安全有序发展核电，预计到2025年在运核电装机将达到7 000万千瓦。近年来核电项目加速核准，我国核电行业发展进入新阶段。[1-2]核能发电设备是核电站系统工程中的一个重要组成部分，其质量会对核电站系统安全运行产生非常重要的影响，而且其研制过程具有复杂的技术性和工艺性，需要消耗研制单位大量的人力、物力以及资金成本。因此，相关研制单位加强和提升核能发电设备供货合同项目管理工作具有重要的现实意义。

1　核电站核能发电设备供货项目的特点

考虑核电站涉及核安全的重要性，研制单位需严格依据核电质保体系要求，以设备可靠性为中心，开展核能发电设备的供货项目管理工作。[3]核能发电设备学科跨度大、技术质量要求高、工艺流程复杂、项目周期长、资金投入大，对项目参与人员能力与水平的要求也相对较高。随着我国核电设备制造行业的逐渐发展，新技术、新工艺以及新材料的不断迭代，加之用户单位技术、质量、商务等要求的不断提升，从而对核能发电设备供货项目管理工

收稿日期：2024-03-14

作者简介：李昆 (1982—)，男，2008年毕业于兰州理工大学流体机械及工程专业，硕士，高级经济师。现任职于东方电气集团东方电机有限公司，主要从事项目管理工作。

作提出了更高的要求。[4-5]因此，核能发电设备研制的难度越大，用户单位要求的交货期越严格，项目管理工作所面临的处境也会变得更加复杂和困难。

2 核能发电设备供货合同项目管理

需按照以下几个方面对项目进行管理，才能保证核能发电设备供货项目顺利实施：要采用统筹兼顾的管理方法，协调好用户单位与研制单位的关系。研制单位管理人员要做好与用户单位相关人员的沟通交流工作，提高信息的传递效率，加快相关事宜的处理速度；要对各项工作的关系进行有效梳理，提前对核电站项目背景进行了解，对招标文件中质量保证、技术参数、管路接口等方面要求进行仔细认真的核对，提出科学合理的设备供货项目管理目标；由于核电站受到国家相关法律法规等的约束，用户单位对设备研制过程有着较为严格的质量保证要求，经常会出现用户单位参与设计、制造和试验过程的情况，所以要对技术、质量文件审查、监造见证相关工作予以重点监控；要对核电站现场安装施工逻辑与研制单位部套件产出计划进行提前匹配，进而保证在核电站施工期间，现场安装工作可以按计划开展。

3 提高核能发电设备供货项目管理工作水平的措施

3.1 质量管理

质量管理是核能发电设备供货项目管理的核心内容，是其他内容的依据和基础。在进行核能发电设备供货项目管理时，研制单位必须将质量管理放在首位。在项目启动前，应该先对项目背景进行全面了解，随后根据用户单位合同和质量保证规定建立科学完善的项目质量保证体系，要明确质量管理的第一责任人并编制出版项目质量保证大纲。项目质量保证大纲是项目产品和服务相关活动的质量保证纲领性文件，适用于项目合同实现全过程的控制，其中规定了质量目标、项目组织机构及职责、人员培训、沟通、文件控制、产品和服务实现、经验反馈等内容。此外，还需根据项目合同要求甄别研制单位现有规章制度、设计工艺文件，然后做出适应性调整，最终形成本项目适用的质保程序文件，以指导本项目执行全过程各项活动。质保程序文件可以是新编制的一组文件，亦可是通用程序文件+专用程序文件（合同中或用户对质保方面的特殊要求）。

对用户单位质量保证要求的严格履行是项目顺利开展的重要保证，尤其是执行过程中遇到用户单位质量保证程序文件升版时，必须要第一时间研读、分发和宣贯，避免因违反其中要求而出现返工或是无法挽回的错误。需严格按照核电设备质保分级管理要求，结合物项/活动技术成熟度、工艺难易度、合同风险、与核电站运行安全可靠性的相关程度等，对设备实现全过程分级，并制定原材料及配套件采购质保分级清单、制造工序及试验类质保分级清单和辅助设备质保分级清单。根据质保分级清单中规定的质保级别和相应要求，区别对待各项子过程，出版产品研制方案、采购技术规范、工艺试验方案、试验检验计划等文件。对于制造过程中出现的不符合项，要根据其质保等级和设备制造活动中不符合项处理程序进行处置。对于每一个不符合项，在进行纠正的同时，责任单位需要进一步分析原因，制定纠正措施，进行不符合项的二次关闭。内部不符合项要限定时间及时处理，并将清单定期上报用户单位备案。外部不符合项要按要求时间及时上报用户单位备案或审批。管理人员要时时关注生产过程中不符合项的处理情况，需要与用户单位沟通的要积极协调，同时监督内部人员及时处理、加快流转。质量管理部门定期对生产制造环节产生的不符合项进行趋势分析，通过数据分类统计反映出发生质量问题的主要症结，并对此制定有效的纠正措施，以降低不符合项的产生。

经验反馈是加强核能发电设备供货项目质量管理的重要手段。用户单位会不定期组织研制单位对核电站已投运机组现场安装、调试、运行期间发

生的经验教训进行系统梳理、分析和纠正，并加以总结利用以达到防止同类或类似事件再次发生的目的。依据用户要求和厂内项目执行情况，研制单位需建立经验反馈体系，对项目经验进行充分反馈和共享，对组织方法、技术工艺方案或项目管理手段进行改进，不断提高质量管理水平和减少重复性质量问题的发生，实现项目管理预期目标，同时将已证明有效的整改措施和优化成果，应用于新项目产品设计中，从而促进产品技术水平的不断提升。

3.2 进度管理

经过近二十多年的发展，用户单位一直在追求缩短核电站的建造周期，逐步压缩核能发电设备供货合同的交货期。这就对研制单位的项目管理工作提出了越来越高的要求。首先，在项目启动前，要从宏观角度对企业产能进行综合性分析和平衡，再按照公司制度和合同要求制定科学完善的项目专题计划。其次，要根据项目专题计划将任务派分给各个部门，并对各部门的实施进度进行监督管控。核能发电设备供货项目可以分为项目启动、生产制造、包装发运、现场安装调试、项目结算，共五个阶段。项目启动阶段的主要工作包括合同研读及项目执行策划、项目组织机构建立、质量保证大纲和质保分级清单的编制和报批、潜在供方清单的准备和报批、项目专题计划制定发布、文件出版提交计划编制发布、项目风险管控计划编制发布、制造开工条件的准备和检查等。项目管理人员要重点跟踪和督促上述工作的按期推进情况，以及采购的首批原材料的入厂复检，并及时与用户单位就开工条件检查相关事宜进行沟通协商。通过制造开工条件检查的，是项目如期开工的前提，同时也标志着生产制造阶段的开始。在生产制造阶段，项目管理人员要保证公司内部和用户单位的沟通畅通，管控制造进度和各种风险，监控关键原材料采购进度，组织专题会议处理技术、质量、进度等方面的问题。包装发运阶段重点关注的包括提前与用户单位沟通设备存储技术要求、根据现场进度匹配部套件产出时间、大件设备的运输方案等。现场安装调试阶段需要注意的包括提前了解现场设备安装计划与进展、工地服务人员需求安排，组织处理现场出现的问题、增补备品备件等。项目结算阶段需要注意梳理执行过程产生的各种记录，包括函件、纪要、邮件、照片、视频等，并针对专项问题整理证据，制定策略。与用户单位沟通过程中要积极主动，协调内外部人员，按照清单进行销号管理，限时消除遗留项，为按期关闭合同奠定基础。

项目进度管理是一个动态发展的过程，在实际执行过程中，若实际进展与计划出现偏差，相关管理人员应及时响应，分析偏差原因，制定有效措施，对项目进度进行纠偏，从而保障核能发电设备供货项目继续顺利进行。

3.3 风险管理

表 1　核能发电设备项目风险因素

一级风险	二级风险	含义
政策风险	核准风险	项目迟迟不能取得国家核准
	政策不稳定风险	原材料或进口零部件国家政策的变化造成的进度延误或成本增加
金融风险	通货膨胀风险	通货膨胀导致金融危机、货币贬值使得成本增加
	外汇风险	外汇汇率的变化造成进口原材料成本增加
市场风险	市场价格风险	原材料、零件、人工费等市场价格上升导致成本增加
	市场竞争风险	行业内其他企业，对本企业造成的商业竞争
质保风险	认知风险	相关单位未正确理解执行质保大纲和程序文件要求给项目造成不利影响
	程序变更风险	质保程序规定更改带来额外工作
技术风险	设计变更风险	设计变更导致停工、返工和项目成本增加
	工艺改进风险	工艺改进导致停工、返工和项目成本增加
资源风险	人力资源风险	人力资源供应不足导致进度延迟
	装备资源风险	制造、试验装备资源不足导致进度延迟
	关键原材料风险	关键的长线原材料不能按计划到厂
信用风险	信用风险	项目参与方不信守承诺，不履行合同约定
不可抗力	自然灾害	海啸、地震、暴雨等自然灾害导致停工

核能发电设备供货项目实施周期长，质量、技

术要求高、工艺复杂，在项目执行过程中受各种风险影响，因此风险管理对于核能发电设备供货项目管理尤为重要。在项目招投标阶段，应认真研读招标文件，收集项目风险信息，识别风险因素，并在谈判中与用户沟通协调降低已识别风险的影响程度。在项目启动阶段，根据合同和项目经验，需要项目执行团队再次识别项目风险并完成风险应对措施的制定工作，形成项目风险管控计划；项目执行过程中重点关注风险应对措施的执行进展情况，并根据风险因素的变化不断调整应对策略，同时仍然需要实时识别风险，对于新出现的风险，要制定应对措施。项目关闭时要及时总结，进行项目风险管控有效性的后评估，做好项目执行风险管控的经验反馈，形成过程资产，从而建立合理有效的项目风险管控体系。本文根据核能发电设备供货合同项目管理执行情况，将主要的风险因素归纳为 8 个一级风险，15 个二级风险，如表 1 所示。

用户单位的要求在变化、研制单位内部环境在变化，项目不同阶段应重点关注的关键风险也随之变化，因此项目执行过程就是内外部风险因素持续发展变化的动态过程。管理人员应根据项目发展的状态和趋势不断分析、判断和调整下一步的应对措施，以保证项目执行过程风险可控。

3.4 信息管理

在信息技术飞速发展的趋势下，传统的信息管理模式已无法适应当前用户单位对核能发电设备供货项目的要求，需将更多先进技术应用其中。由于核能发电设备供货项目管理的复杂性和长期性，其执行过程中会产生大量的信息，应贯彻核电“四个凡事”的文化理念，系统统筹管理信息，以保证项目资源利用率最大化。一是建立信息共享平台。针对核电产品严格的可追溯性要求，使用先进技术手段加强从原材料采购、加工制造、试验装配，直至废弃为止的全过程管理，如云计算、互联网等。开发产品实现过程信息共享平台，对产品实现过程产生数据进行即时采集和记录，以供研制单位各个部门和人员随时获取产品进展状态和关键数据资料；二是确保信息流畅通。依据核电质量保证要求和公司相关规定，梳理影响原材料采购、零件加工制造、试验装配等工作进行的限制条件，如采购技术规范、设计制造图纸、试验检验计划、项目质量保证大纲等文件的审批或升版。在产品实现过程信息共享平台的基础上增加限制条件，将以上条件与对应工作进行链接，消除信息流转过程中因相关人员认知不足或操作失误造成的盲点和阻滞，保证项目信息管理的系统性和有效性；三是应用智慧化项目管理工具。将大数据和人工智能等先进技术与产品实现过程信息共享平台有机结合，开发智能化项目管理工具，对项目执行过程中产生的大量数据进行分析和治理，辅助管理人员对项目发展趋势做出准确预判和及时纠偏。通过项目信息共享、过程数据分析，提高沟通效率，优化决策过程，科学配置各种资源，提升核能发电设备供货项目管理体系整体效能。

4 结语

核能发电设备供货项目管理是一个系统性、综合性很强的工作，其中各活动之间有着复杂的限制关系和先后顺序，需要研制单位严格依据用户单位合同和质量保证规定，采用有效措施和先进技术手段从质量、进度、风险、信息等方面加强项目全过程管理，进而保证核能发电设备的保质保量按期交付，以及核电站的建设质量与施工效率。

参考文献：

[1] 李萍, 杨红义, 刘琳, 等. “碳中和”目标下中国核电发展[J].节能技术,2023,41(1):10-15

[12] 屈凡玉, 李言瑞, 杨彬. 积极安全有序发展核电助力“双碳”目标顺利实现[J].能源,2022,(12):38-43

[3] 王春, 王德军, 王广金, 等. 质保分级管理在核电设备供货中的研究及应用[J].核安全,2023,22(5):44-50

[4] 郭宇. 核电装备产业链龙头联手突破关键技术[N].中国工业报,2023-12-01(006)

[5] 以华龙一号为依托发挥引领作用提升核电产业链供应链安全水平[J].国资报告,2023,(9):82-85

发电电动机转子视觉监测系统工程应用案例

毕扬[1] 孙宏宇[1] 熊治富[1] 李佳文[1] 周鹏达[1] 万慧明[2*]

1. 重庆蟠龙抽水蓄能电站有限公司，重庆 401420；2. 东方电气集团东方电机有限公司，四川 德阳 618000

摘要：发电电动机转速高且工况复杂，其转子事故频发，是电站重点巡检对象。针对该需求，本文从工程应用场景、硬件设计方案和软件方案三个方面阐述了一个发电电动机转子视觉监测系统应用案例，可以实现发电电动机转子的视觉监测，并自动分析其磁极螺栓和引出线情况。

关键词：发电电动机；转子；视觉监测；图像识别

中图分类号：TV734.2 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-9006（2024）06-0051-04

Engineering Application Case of Visual Monitoring System for Generator Motor Rotor

BI Yang [1], SUN Hongyu [1],XIONG Zhifu [1],LI Jiawen [1],ZHOU Pengda [1], WAN Huiming [2]*

(1.State Grid Xinyuan Chongqing Panlong Pumped Storage Company Limited, 401420, Qijiang, Chongqing, China;

2. Dongfang Electric Machinery Company Limited, 618000, Deyang, Sichuan, China)

Abstract: The rotor of the generator motor operates at high speeds and under complex conditions, making it prone to accidents and a focal point for inspection in power stations. In response to this need, this paper presents an application case of a visual monitoring system for the rotor of a generator motor from three aspects: engineering application scenarios, hardware design solutions, and software solutions. The system is capable of visually monitoring the rotor of the generator motor and automatically analyzing the conditions of the magnetic pole bolts and the lead-out wires.

Key words: generator motor; rotor; visual monitoring; image recognition

发电电动机相对于常规水轮发电机组，其结构更为紧凑、运行更为灵活、工况更加复杂多变。发电机转子作为其核心电磁感应及转动部件，受力复杂，结构安全性要求高，是电站重点巡检对象。

发电电动机转子常规的巡检方式是在检修期间，拆除部分挡风板，然后结合盘车进行人工巡检，也可以结合内窥镜进行更大范围检查。[1]这种巡检时费力，且需要进行停机检查，因此亟需一种新的巡检方式来替代。

目前，随着在线监测技术的发展，国内也有部分电站进行了转子视觉在线监测的试点。万安电站机组为常规水轮发电机，其在上机架挡风盖板上架设高速工业相机装置实现了磁极端部图片的清晰拍摄[2]；牡丹江抽水蓄能电站机组为发电电动机，利用红外热像仪与工业相机在线获取电机转子端部在高速旋转过程中的运行温度与高清图像。[3]上述应用实现了转子运行时图片的拍摄，但由于未结合图像算法，不能自动检测和判断转子故障情况，仍需要人工去上位机巡检。

本文结合一个实际工程应用案例，从硬件和软

收稿日期：2024-08-13

基金项目：国网新源集团有限公司科技项目资助（SGXYKJ-2022-078）

作者简介：毕扬（1982—），男，2003年毕业于华北电力大学电气工程及其自动化专业，学士，高级工程师。现任重庆蟠龙抽水蓄能电站有限公司单位，主要从事抽水蓄能电站管理工作。

万慧明（1990—），男，2013年毕业于大连理工大学电气工程专业，硕士，高级工程师。现任东方电气集团东方电机有限公司，主要从事水轮发电机及其相关智慧产品设计工作。

件两个方面设计了一套适用于发电电动机的转子视觉监测系统，可在线对转子进行拍摄和图像分析。

1 工程应用场景

某抽水蓄能电站发电电动机额定转速为428.6 r/min，磁极数量 14 个，磁极处额定线速度约为 120 m/s，采用端部回风固定挡风板结构，局部结构如图 1 所示。

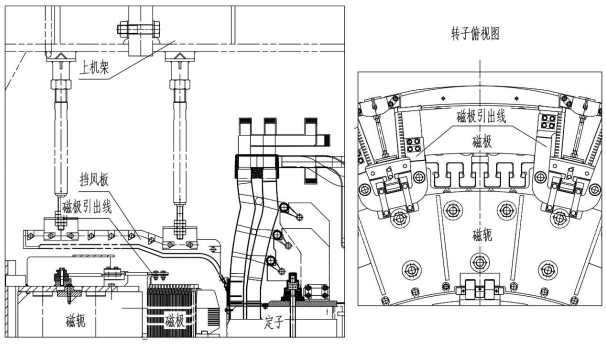


图 1 机组局部结构图

磁极引出线区域为重点关注区域，引出线的变形、把合螺栓松动情况是重点关注故障。

2 硬件方案

2.1 整体系统设计

转子视觉监测系统由工业相机、高亮光源、PLC 控制模块、电源控制模块、交换机以及服务器组成，系统拓扑如图 2 所示。

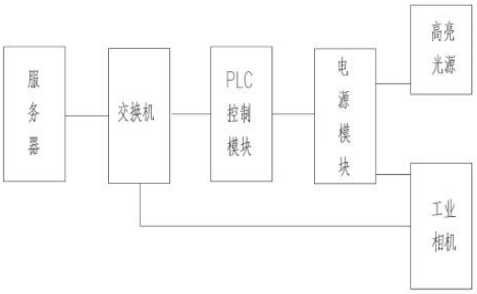


图 2 系统拓扑图

服务器通过交换机与 PLC 控制模块网络通信，发送启停指令；PLC 控制模块驱动电源模块控制高亮光源与工业相机的启停；服务器通过交换机与工业相机进行数据通信，抓取工业相机采集的照片。

当通讯线路低于 100 m 时，服务器上可以与工业相机直连通信，这种方式丢帧率更低。

2.2 发电机内部结构布置

发电电动机内部条件恶劣，属于高温、强磁和黑暗环境，且转子端部正上方有挡方板遮挡。图 3 为转子视觉监测装置在发电电动机内部的实物结构布置。

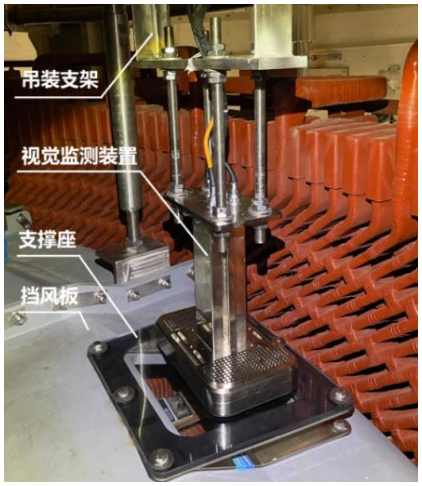


图 3 发电机内部结构布置

工业相机及高亮光源封装在视觉监测装置内部；视觉监测装置通过螺杆固定在吊装支架上；吊装支架焊接在上机架腿上。挡风板上开有视察窗口并埋置了固定用螺纹座；带透明有机玻璃板的支撑座用螺栓固定在挡风板上。

视觉监测装置及支撑座处在定子及转子的端部漏磁场中，本应用案例中两个部件均采用铝制件，可以起到设备电磁屏蔽及避免产生涡流。

视觉监测装置底部设有弹性密封胶圈，安装时与支撑座上的有机玻璃板贴合，一方面避免两个部件的刚性接触，另一方面防止有灰尘在此视觉通道堆积。

2.3 关键硬件选型

本应用案例中工业相机选用了一款 Baumer VLXT-55,配备 Computar 的 6 mm 焦距镜头。所选用的工业相机为 500 万像素（2464×2048）彩色相机，帧率最高可达 243 帧，采用 10GigE 万兆通讯接口，能够完成 100 m 内万兆电口的直接通信。由于挡风板距离转子较近，本案例中选用 6 mm 的短焦镜头保证视野足够大，从而支撑后续的自动巡检。

本应用案例中，高亮光源为定制光源，额定功率可达 1 000 W。光源集成在视觉监测装置底部，采用两侧多个小灯珠方式。为了保证均光效果，光源下方设置有均光板。

2.4 成像效果

在真机额定运行时，所采集到的转子照片如图4所示。照片中，整体画面光照均匀，磁极引出线及其上螺栓特征清晰，磁极数字标识明显，便于后续图像的分析与处理。同时，磁极铜排及磁极T尾也能清晰成像，方便后续人工检查整体磁极情况。

图4　真机额定运行转子照片

3　软件方案设计

3.1 工作模式

由于采用高亮光源，且处在发电机内部的高温环境下，本应用案例没有设置长期工作模式，避免工业相机过热保护而不能正常工作。

（1）定期运行模式

由于发电电动机启停频繁，为了适应该特点，转子视觉监测系统默认每30 min自动运行，启动工业相机及高亮光源进行单次图像采集和分析，然后自动断电。当处于静止工况时，系统会根据图像情况识别出该工况，延时10 min进行再次检测。

（2）人工巡检模式

除了定期运行外，系统也支持人工在上位上启动拍摄流程，然后进行该次结果的查看。

3.2 工作流程

系统工作流程步骤如下：

（1）系统收到定期运行或人工运行指令，开始运行；

（2）上位机驱动PLC打开工业相机及高亮光源电源，延时30 s(覆盖工业相机的启动时间)后上位机驱动工业相机进行单次图像的采集。

（3）PLC自动延时关闭工业相机及高亮光源电源；

（4）图像采集完成后，首先判断是否为同一张照片，若是则等待10 min后再回到第（2）步；若否则进行下一步图像处理；

（5）系统自动识别出磁极标记字符、磁极引出线情况及磁极引出线螺栓角度，然后进行存储和展示，前端同时也会根据预设逻辑提供相应的预警信号。

3.3 算法方案

（1）字符识别

为了能够定位磁极特征，本应用案例采用在磁极上进行字符标示的方式，如图5所示。为了降低字符识别难度及提供准确率，也可以采用喷码的方式。

图5　磁极字符标示

由于本案例采用的是手写字符方式，识别时需要对数据标定和训练，然后将训练好的模型对新的图像进行数字识别。图6为磁极字符识别的案例，由于磁极采用了多处标方式，识别时增加多字符逻辑判断，识别准确度可以达到100 %。

图6　磁极字符识别

（2）引出线识别

引出线识别包含两部分，一个是磁极的分类，一个是引出线自身特征的识别。

磁极分类用于挑选出能用于图像处理的图片，

从而保证所选图片里有需要的引出线特征。采用机器学习的图像分类方法，其分类效果如图 7，其中注释有 ycx 的图片为需要的图片。

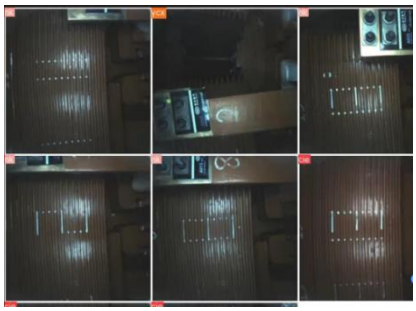


图 7　磁极分类

得到带有引出线特征的图片后，采用轮廓识别的方式进行引出线自身特征识别，如图 8 所示。结合引出线出现的位置以及引出线轮廓的面积，可以计算出引出线的变形情况。

图 8　引出线特征识别及计算

（3）螺栓角度识别

首先进行螺栓区域特征提取，然后以长方形垫片为模板进行坐标归一化，进而提取图片中螺栓的关键角点，并画线计算三条连线的角度，并取平均值作为最终角度。图 9 中三条线都折算到锐角的角度为 82.54°、82.08°和 82.56°，取平均值为 32.39°。目前该算法精度可以达到 2°左右。

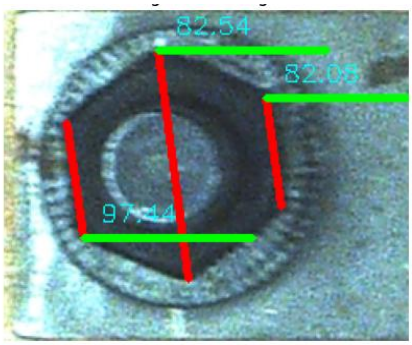


图 9　螺栓角度识别

4　结语

本文描述了一套适用于发电电动机的转子视觉监测系统，包含结构布置、硬件选型以及软件和算法方法。通过实际运行情况表明，该套系统能够在发电电动机上成功采集到运行过程中的高清转子照片，结合图像识别算法，能够对图片进行自动分析并报警，有助于实现转子磁极的智慧化运维。

参考文献：

[1] 李立秋,王大坤,张彤,等.一种抽水蓄能电站发电电动机转子在线检测系统设计[C]//中国水力发电工程学会电网调峰与抽水蓄能专业委员会.抽水蓄能电站工程建设文集 2019.国网新源安徽绩溪抽水蓄能有限公司;江苏亚奥科技股份有限公司,2019:5

[2] 万慧明, 陈珏良, 王星,等. 水轮发电机转子视觉监测系统工程应用研究[J].探索科学,2021(6):13-14

[3] 孙凯, 尹和松, 陈爽, 等. 抽水蓄能机组发电电动机转子端部运行状态在线监测系统研发[J].大电机技术, 2022(6):74-77

（上接第 46 页）

（1）压力容器制造过程中，必须具有可覆盖的焊接工艺评定支持，才可进行压力容器的制造活动。

（2）根据材料的化学成分、焊接冶金性能和力学性能等因素，对母材、焊材进行了材料分组，大大减少了评定的数量。

（3）具有位置相通或相近的评定位置可以覆盖相应位置的产品焊接。

（4）焊后热处理是影响焊接接头的重要变素，影响焊接应力或焊缝组织性能的热处理条件发生变化时，都应进行重新评定。

（5）产品焊接时，在不同 WPS 的每种焊接方法在满足相应覆盖范围时，可以采用不同的焊接方法进行同一接头的焊接；同时，采用不同焊接方法对同一评定接头进行焊接时，满足各焊接方法的变素前提下，可分开用于不同接头的焊接。

（6）评定试板的母材厚度具有相应的覆盖性，范围内的评定试板可覆盖该范围内的所有母材的评定，进一步减少了评定的数量，避免重复评定。

50MVar凸极调相机冷却技术研究与创新

李佳　张海波　张林　杨勇　周光厚

东方电气集团东方电机有限公司，四川 德阳 618000

摘要：近期研制的新型分布式凸极调相机，转子热负荷大幅超出设计经验范围，若沿用常规散热方式，热点温度将远超绝缘耐热限值，不能满足技术要求。本文提出该电机转子空内冷技术解决方案，并通过开展三维热-流场仿真、转子全电流温升试验等研究，消除了重大技术风险，为产品研制提供了关键技术保障。

关键词：分布式凸极调相机；冷却技术；三维热-流场计算；转子全电流温升试验

中图分类号：TM342　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1001-9006（2024）06-0055-04

Research and Improvement on 50Mvar Salient-pole Condenser Cooling Technology

LI Jia, ZHANG Haibo, ZHANG Lin, YANG Yong, ZHOU Guanghou

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

Abstract: For the newly developed distributed salient pole condenser, the rotor thermal duty greatly exceeds design experience. If the traditional cooling method is still using, the temperature rise will far exceed the limit of insulating materials and can not meet the technical requirements. In this paper, the technical solution of internal air-cooling of the motor rotor is proposed. Through the research of 3D flow-thermal field coupled simulation and full-current rotor temperature rise test, the major technical risks are eliminated and the key technical guarantee is provided for product development.

Key words: distributed salient pole condenser; cooling technology; 3D flow-thermal field coupled simulation; full-current rotor temperature rise test

“新能源+储能+调相机”模式的新能源特高压电网建设中，分布式调相机发挥着稳定电网电压、提高输电安全性的作用，是系统中的关键设备。调相机可设计为凸极和隐极两种形式，相对而言，凸极调相机具有更大转动惯量，更有利于电能质量的稳定，因此在新能源电网建设中的市场需求被逐渐释放。

我公司近期开发的50 MVar分布式空冷凸极调相机，配套服务于青海海南新能源基地。该型电机为保证较快的无功响应，设计了较大的转子电阻，使过励运行时的转子电流密度显著高出同级别空冷机，转子热负荷更是达到氢冷机水平。另外，该批调相机将安装在空气稀薄的高原地区，通风散热条件相对恶劣，冷却难度较大。为化解该项技术风险，研究并提出了实心转子空内冷技术，在未改变电磁设计的前提下大幅降低了转子温升，有力保障了产品研发质量。

1　冷却技术选型和优化

根据容量划分，凸极调相机可选择空冷、氢冷和液冷等冷却方式。容量不超过60 MVar一般采用空气冷却方式，容量超过60 Mvar时，为减少电机

收稿日期：2024-06-03

作者简介：李佳（1993－），女，工学硕士，工程师，2018年毕业于东北石油大学动力工程及工程热物理专业，现任职于东方电机有限公司从事电机冷却技术研发工作。

通风损耗，会考虑氢气冷却。为尽量增加滞相无功能力，调相机过励运行的励磁电流较大，所以转子对通风冷却要求较高。[1]早期空冷 30 MVar 和氢冷 60 MVar 机过励运行的转子电密分别达到 2.4A/mm^2 和 3.7 A/mm^2。近期研制机型的转子电密比上述氢冷机还要高。

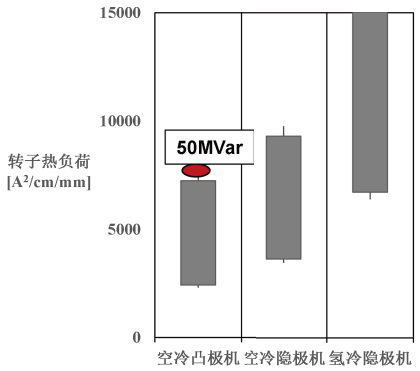


图 1　大中型电机转子热负荷比较

图 1 给出大中型空冷凸极、空冷隐极和氢冷隐极三类电机产品的转子热负荷统计。显然 50 MVar 调相机的转子热负荷突破了常规空冷凸极机极限，并达到了氢冷机取值范围。由于仍采用空气冷却，为降低温升至合理水平，冷却技术的选型和优化非常关键。下文对该产品技术研发过程中，针对电机风路设计、风机选型、研究与创新等工作进行简要的介绍。

1.1 电机风路布置

为改善冷却条件，调相机取消了空气冷却器和转子风扇，采用开启式强迫通风系统、前置式空气过滤器和顶置式抽风机。

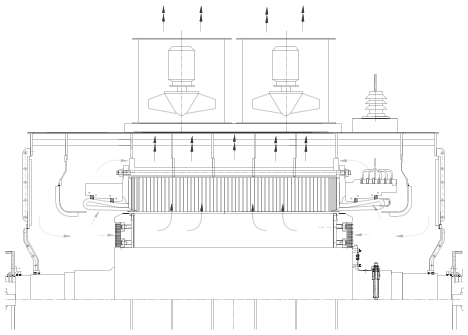


图 2　电机风路布置

电机风路布置见图 2。冷空气从外部环境进入电机，一部分流经端腔冷却端部线棒，另一部分经转子极间冷却磁极后，再流经铁芯风沟冷却定子本体。热空气统一由机座顶部风机排出。该方案带来几个好处：①取消二次冷却回路后，电机冷风直接取自厂房，温升基准可降低 8~10 K；②前置过滤器可以保证进入电机的空气洁净度；③改为顶置抽风机，一方面使流经磁极的空气没有了风扇温升，电机温升基准进一步降低 3~5 K，另一方面高效风机和变频控制策略实现了调相机不同工况的冷却风量调节，减小了调相机空载损耗近 100 kW、负载损耗 30 kW，起到了较明显的节能效果。

1.2 风机选型

运用 CFD 技术[2]完成了整机三维热-流场仿真，得到准确的电机风阻特性。根据计算，选择在机座顶部并联布置 2 台 37 kW 混流式通风机，以保证冷却风量不小于 27 m^3/s。由于是外供设备，还需要到风机制造厂进行性能试验见证，以保证实际性能满足设计和采购要求。

1.3 转子冷却研究和改进

对于转子冷却，开展多次选型计算，最终选择采用空内冷方案。相比表面冷却，内冷方案能成倍提高散热能力。转子空内冷技术被规模应用于高速隐极电机。我公司于近几年在白鹤滩、长龙山等凸极电机中也应用了该技术，主要因为该类电机在旋转时，转子支架、磁轭依靠径向高度差能提供巨大的离心风压，驱动大量空气进入磁极绕组散热孔，以风速超过 30 m/s、散热系数达到 200 W/m^2/K 的强对流作用，实现对绕组的直接冷却。

但 50 MVar 凸极调相机采用实心转子，无法依据现有经验进行设计。由于没有支架和磁轭提供离心风压，磁极绕组内部冷却气量小，散热孔的风速远低于前述项目；另外由于极数少、极间空间大，气流分离效应明显，绕组散热孔容易发生气量堵塞。因此调相机要实现转子空内冷，需在具体方案上想办法提高内冷气量并将其合理分配，避免散热不均、温度降不下来的问题。

通过专项技术研究，最终产品采取了以下措施：①磁极底部加工轴向小槽，并与散热孔连通，整体形成可供通风和散热的内部风路，磁极旋转时依靠自身的高度差产生离心风压，驱动空气沿内风路流动；②根据热-流场计算进行逐项优化，在实心轴端面加工甩风槽，提高风压增大散热孔总气量；③将散热孔集中布置在磁极的相对高温区域，特别是嵌入极间撑块、散热条件差的位置；④将底部轴向小槽改进为左右不等截面形式，同一轴向小槽的截面沿进深改进为不等高形式，使内冷气量一定的前提下，空气能更多偏向从背风侧散热孔流出，改善背风侧绕组散热条件。

通过初设和最终方案的三维热-流场计算，获得了相关参数的改进效果。若将初设方案的总风量、转子损耗、最高温升作为各变量基准值（100 %标

幺值），上述两种方案的仿真数据比较见图 3。

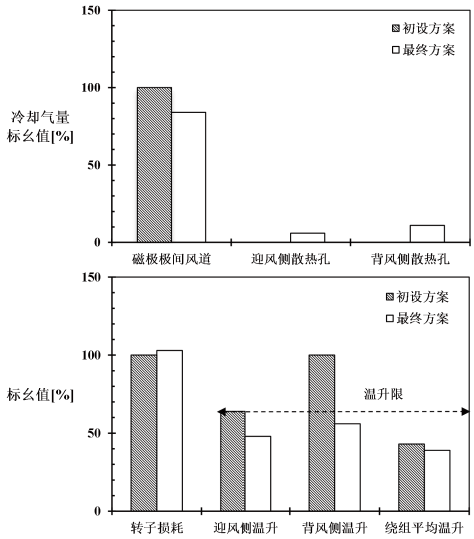


图 3　磁极的冷却气量和绕组温度变化

对比表明，虽然散热孔出气量占总风量的比重并不大，同时受开孔影响，转子损耗略微增加，但转子温度从最初大幅超出绝缘耐热限值，改善到最终方案低于限值 20 K 的状态，期间转子最高温升降幅达到了近 40 %，温度分布均匀性得到较大提升。最终方案的磁极温度分布见图 4。

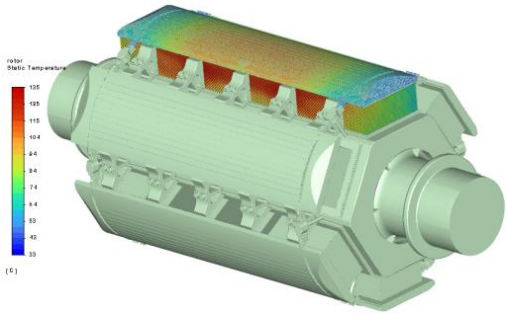


图 4　磁极温度场仿真云图

根据以上理论分析，该机型冷却技术的优化成果是显著的。

2　通风和温升试验

首台机 2021 年 5 月完成工厂总装，期间开展了型式试验和部分科研试验。

2.1　空载-短路法温升试验

型式试验采用空载-短路法获得电机分项损耗和温升测量值。依据同步电机试验标准[3]，将空转、空载、短路等多个热稳定工况的转子温升（电阻法测量值）作线性外推，与励磁电流对应的转子损耗线作交点，就可以获得转子的实际损耗和平均温升。型式试验得到的转子平均温升与前期 CFD 仿真计算值间的偏差未超过 3 %，符合技术开发预期。

图 5　总装试验现场

2.2　通风试验

为掌握通风系统的实际运行数据，在电机内部埋置了相关测量元件，完成了风机变频工作时的风量风压测试，结果表明风量实测与计算的偏差未超过 1%，电机冷却条件符合开发预期。以 50 Hz 总风量为基准值（100 %标幺值），测试数据的变化规律见图 6。

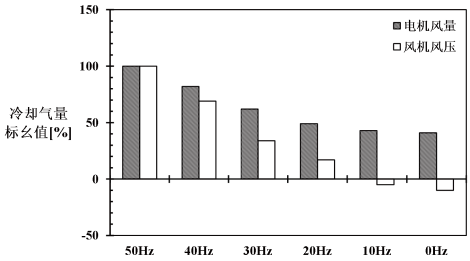


图 6　通风测试结果

2.3　转子全电流温升试验

虽然型式试验获得了转子平均温升，但是仍需要对转子温升分布进行补充测量，以保证最高温升低于技术限值。为此开展了凸极调相机转子全电流温升试验。

与大容量隐极同步电机转子全电流温升试验的实现方法[4]不同，调相机没有采用部分反接励磁绕组的做法来削弱磁场强度，而是将试验转速维持在额定转速 50 %，使转子在额定励磁电流下产生的主磁场强度大幅降低，定子电压随之下降到额定电压 70 %左右，以此形成安全的温升试验环境。由于电机容量小，温升试验中相关电气损耗可以被及时排出，试验过程不会造成任何破坏性后果。

另外，凸极电机转子温度分布的测试方法可以比隐极电机[5]简单，粘贴在磁极表面的热敏纸可以记录下试验中不同位置的最高温度，试验结束后抽出转子即可观测到完整数据，见图 7。

图 7　极间表面粘贴的热敏纸

试验转速为 50 %额定转速时，磁极散热孔气量相应减少，导致空内冷效果减弱。为防止过热，变频风机仍以 50 Hz 运行，以保证全电流温升试验时的电机总风量变化不大。

为便于对比，仍将初设方案的总风量、转子损耗、最高温升作为各变量基准值（100 %标幺值），绘制的全电流温升试验测量数据见图 8。

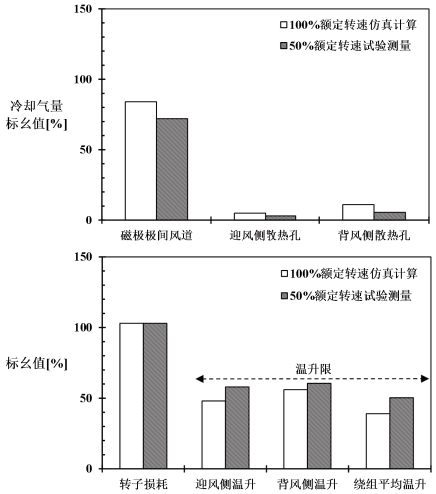


图 8　转子全电流温升试验数据

可以看出：

（1）50 %额定转速试验测量出的总风量比 100 %额定转速计算值下降约 15 %；磁极平均温度比 100 %额定转速计算值升高约 30 %；磁极最高温度比额定转速计算值升高仅 10 %，接近但并未超出绝缘耐热限值；

（2）50 %额定转速试验的温升均匀性明显优于 100 %额定转速计算结果。运用流体相关知识可知，变化符合凸极电机极间流场特征：电机转速为零时，磁极并不存在迎背风温差；转速逐渐升高，迎背风温差随周向气流偏向角增大而逐减增大，温升均匀性下降；转速到额定时，迎背风温差最大，温升均匀性最差。

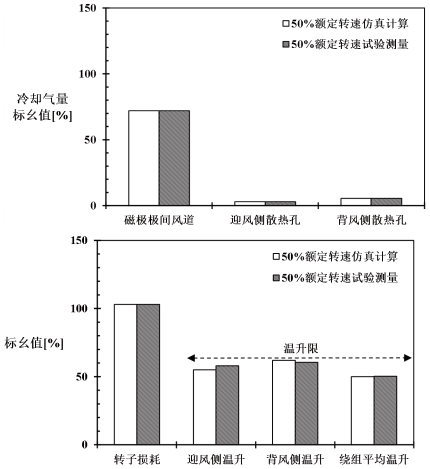


图 9　转子全电流温升试验和工况仿真对比

为正确评估试验结果，采用相同计算方法对该试验工况进行热-流场仿真，相关测试和计算的比较见图 9。

可以看出，热-流场计算的温升均匀性略差于试验测量，但相对偏差并不大。

基于同一工况试验测量和计算的一致性，可做出如下推论：①调相机过励运行的实际转子平均温升与热-流场仿真计算值相近；②实际转子温升均匀性略优于仿真计算结果，最高温升低于计算值，同时也低于绝缘耐热限值。

3　现场并网运行数据

首批产品 2021 年 6 月陆续交付用户，同年 9 月起在青海、海南千万千瓦级新能源基地投入运行。根据现场返回的并网运行监测数据，以转子平均温升计算值为基准（100 %标幺值），绘制电机温度监测数据和计算的比较，见图 10。其结论与前述工厂试验相同，不再赘述。

4　结语

50 MVar 分布式凸极调相机冷却设计难度大，但是得益于专业技术进步，最终成功实现了该型电机的空冷解决方案，在未改变电磁设计、保证暂态性能的同时，在理论分析和试验方法上皆有所创新，消除了转子过热的技术风险，为今后相关技术研究提供了重要经验。

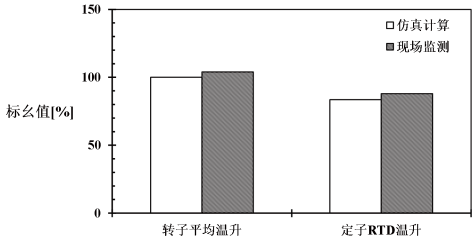


图 10　现场运行温升数据比较

参考文献：

[1] 丁舜年. 大型电机的发热与冷却[M]. 科学出版社,1992

[2] 陶文铨. 数值传热学[M].西安交通大学出版社,2008

[3] GB 1029-2005，三相同步电机试验方法[S]

[4] 赵昌宗. 用部分绕组反接法进行汽轮发电机转子全电流试验[J]. 东方电气评论,1989,(4):1-5

[5] Zhou G H Han L, Fan Z N, et al. Ventilation Cooling Design for a Novel 350-MW Air-Cooled Turbo Generator[J]. IEEE Access, 2018, 1-1

湿法脱硫吸收塔托盘设计位置对比分析

范思怡[1,3] 杨志忠[2,3]

1. 华东理工大学，上海 200237；2. 清洁燃烧与烟气净化四川省重点实验室，成都 611731；3. 东方电气集团东方锅炉股份有限公司，成都 611731

摘要：喷淋塔是目前湿法脱硫的主导塔型，湿法烟气脱硫吸收塔内的增效装置极大地影响了脱硫效率。托盘是应用最广泛的增效结构，其设计位置作为湿法脱硫系统中的重要设计参数之一，对脱硫效率具有重要影响。本研究旨在探讨不同的托盘设计位置对喷淋塔系统脱硫的预期影响。通过参考实际工程做对比分析，比较了托盘设计位置的不同方案，并评估了其适用情况，为吸收塔使用托盘增效的优化布置提供了理论指导和建议。

关键词：喷淋塔；湿法烟气脱硫；托盘；设计位置；优化布置

中图分类号：X773 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-9006（2024）06-0059-06

Comparison and Analysis of Tray Design Positions in Wet Flue Gas Desulfurization Absorber

FAN Siyi[1,3], YANG Zhizhong[2,3]

(1. East China University of Science and Technology, 200237, Shanghai, China; 2. Clean Combustion and Flue Gas Purification Key Laboratory of Sichuan Province, 611731, Chengdu, China; 3. Dongfang Boiler Co., Ltd., 611731, Chengdu, China)

Abstract:Spray tower is currently the dominant tower type in wet flue gas desulfurization(WFGD), and the efficiency-enhancing device within the absorber of WFGD greatly affect the desulfurization efficiency. The tray is the most widely used efficiency-enhancing structure, and its design position, as one of the important design parameters in WFGD systems, has a significant impact on desulfurization efficiency. This study aims to explore the expected effects of different tray design positions on desulfurization in spray tower systems. By referring to actual engineering and conducting comparative analysis, different tray design positions schemes were compared, and their applicability was evaluated, providing theoretical guidance and suggestions for optimizing the arrangement of tray efficiency enhancement in absorber.

Key words: spray tower; wet flue gas desulfurization; tray; design position; optimize layout

湿法脱硫是一种常用的烟气脱硫技术，广泛应用于燃煤电厂、工业锅炉烟气处理。[1]截至目前，双碳战略已上升到国家生态文明的高度，我国的烟气超低排放新格局已基本形成。《煤电节能减排升级与改造行动计划（2014~2020 年）》明确要求[2]：对新建和在役燃煤发电机组全面实施超低排放和节能改造。在基准氧含量 6 %条件下，烟尘、二氧化硫、氮氧化物排放浓度分别不高于 10 mg/Nm^3、35 mg/Nm^3 和 50 mg/Nm^3。部分重点地区实行“50355”超净排放工程，即烟尘排放浓度要求达到 5 mg/Nm^3。面对更高标准的环境要求，采取相应的增效措施，实现湿法烟气脱硫吸收塔的增效改造变得尤为重要。

在湿法脱硫系统的增效结构中，托盘作为关键组件之一，对脱硫效率具有重要影响。张玉山[3]等人利用托盘技术对 3 台 200 MW 机组进行了烟气脱硫超低排放改造，研究发现：增设托盘能使液气比降低 25~30 %，脱硫效率达到 98 %。以安徽某电厂 60 MW 机组脱硫改造为例，将托盘安装于喷淋空塔，对比前后运行成

收稿日期：2024-07-17

作者简介：范思怡（2000－），男，2022 年华东理工大学、东方电气集团联合培养硕士研究生在读，环境工程专业，主要研究方向大气污染物治理。

本和效果，托盘具有明显的优势。[4]

有研究表明，喷淋塔加装托盘后新增阻力较大，约为500~1 000 Pa，适用于引风机裕量充足的情况。[5]以一台600 MW的机组为例，喷淋塔增设一层托盘后，塔内阻力增加了500 Pa，折合风机功率增加了400 kW，但循环泵的配置功率能降低800 kW。[6]从环境和经济效益层面分析，运用托盘增效结构的吸收塔，在满足超低排放要求的同时，经济效益显著，并能实现节能降耗。由此可见，吸收塔设置托盘结构可作为火电厂脱硫装置改造的首选办法。[7]

1 托盘结构

托盘是一种多孔状的薄板。一层托盘由多个单元拼接组装而成，包含开孔托盘、单元隔离板、托盘支撑结构等。[8]其结构简图如图1所示。

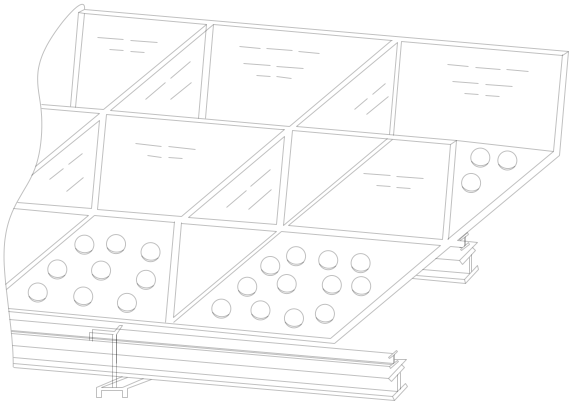


图1 托盘结构简图

托盘最早是美国巴威 (B&W) 公司开发。[9]B&W公司Johnson[10]等人将托盘用于湿式洗涤塔，能实现高效洗涤。托盘的开孔率一般控制在35 %~40 %左右，开孔孔径为30~40 mm，厚度一般选3~5 mm较为经济。

采用托盘进行脱硫增效时，探讨其增效机理，根据石灰石的溶解方程[11]：$K_{sp} = [Ca^{2+}][CO_3^{2-}]$。

$CaCO_3$的溶解度为 $S = \sqrt{K_{sp}}$

HCO_3^-和CO_3^{2-}存在水解，结合水解常数K_1、K_2及溶液中[H+]浓度，联立可得：

$$S=\sqrt{\frac{K_{sp}}{K_1 \cdot K_2} \cdot (K_1 \cdot [H^+] + K_1K_2 + [H^+]^2)}$$

式中：$K_1 = 10^{-6.34}$

$K_2 = 10^{-10.25}$

$K_{sp} = 2.8 \times 10^{-9}$

依据工程经验：多数吸收塔在运行时，底部浆池pH约为5.5，浆液吸收烟气中SO_2及其他酸性物质后，托盘持液层浆液pH约为4.0。[12]托盘能提供更多的反应面积，持液层能延长气液接触时间。伴随持液层浆液停留时间的增加，石灰石溶解量和单位体积浆液SO_2吸收量也增加。

通过上式计算出：底部浆池和托盘持液层石灰石的溶解速率分别为：S=3.676 kg/m^{3}和S=109.52 kg/m^3。由此可见，托盘持液层上的石灰石溶解速率约为吸收塔浆池内石灰石的溶解速率30倍。由此可见，采用托盘结构进行脱硫增效，托盘持液层能使单位体积浆液能吸收更多的SO_2，从而获得更高脱硫效率。

烟气进入增设托盘的吸收塔后，穿越持液层会产生大量的小气泡，气液两相剧烈扰动，提高了浆液对烟尘的捕捉效率。徐平[13]研究了燃煤火电机组超净排放技术路线，发现托盘对大于2.5 μm的粉尘具有较高的捕集效率，对粒径为0.1~1.0 μm的粉尘有10 %~20 %捕集效率，对粒径为1.0~2.0 μm的粉尘有20 %~40 %的捕集效率。吸收塔安装托盘之后，除尘效率能达到75 %~85 %左右[14]，通常与高效除雾器配合，控制并实现颗粒物（PM）的超低排放。

如前所述，托盘结构增效的实质是多孔状薄板增大了传质表面积，形成托盘持液层延长了气液接触时间，实现气流均布使气液两相充分且反应，从而获得更高、更稳定的脱硫效率。有研究表明，一层托盘的的脱硫效率相当于一层喷淋层的脱硫效率。[15]运行时可替代一层喷淋层，对应降低液气比，减少循环浆液量，起到节能优化的作用，经济效益显著。

当烟气进入吸收塔时，塔内同一横截面上烟气流速并不均匀。为保证脱硫的稳定，喷淋层喷嘴的设计需充分考虑烟气流速不均的影响。针对流速较高的区域，喷淋层需增加喷淋密度，故无托盘的喷淋空塔每层喷淋层需布置较多喷嘴，直接增加了液气比和电耗。[16]在吸收塔喷淋层之间布置托盘，能对烟气进行整流，强化传质，有效降低液气比。

吸收塔脱硫增效的路径选择丰富，托盘的广泛应用让其变得简单易行，然而目前对于托盘设计位置的理论研究还相对有限，托盘的设计位置能直接影响到气液反应过程和流体动力学特性。

2 单托盘设计位置分析

喷淋塔在逆流喷淋的基础上将一层或多层托盘安装在塔内下部，常见可布置于烟道入口上层和最下层喷淋层之间；亦可布置于喷淋层之间，不同的布置形式对应不同的增效机理和效果，面对复杂多变的实际工况，从而衍生出托盘设计位置的探讨。

托盘设计位置是湿法脱硫系统中重要的设计参数之一。当托盘和上层喷淋层垂直间距增大时，气体能通过的有效流通体积变大，烟气穿过持液层时流速降低，液体更容易穿过托盘空隙下落，导致托盘持液层降低，停留时间变短。有研究表明：塔内浆液停留时间和托盘持液量随垂直距离的增加而减小。故为实现脱硫增效，无论托盘采用何种安装位置，均需和上方的喷淋区保持一定高度。

因托盘多孔的结构，烟气与浆液的反应吸收过程是动态变化的，持液层浆液进行着紊流运动。烟气通过部分孔向喷淋层流动，浆液因重力作用通过另外的孔向下流动，故逆流的烟气与浆液会交替通过托盘上的孔，此过程能增大反应接触面积，增加停留反应时间。

安装托盘会改变原有吸收塔的结构，增设托盘会增加吸收塔高度。一般可采用抬高吸收塔净烟道出口、改变喷淋层布置形式等方法。对应托盘数量可设置 1~2 个，即单托盘技术和双托盘技术。在实际工程运用中，需根据具体条件进行选择合适的托盘技术，参考方式如下表 1 所示：

表 1　托盘技术选择参考表

对比点	单托盘	双托盘
流量	烟气流量小	烟气流量大
	处理较简单	单托盘难以均布烟气
脱硫除尘	脱硫除尘效率	脱硫除尘难度大
	要求不高	需提高效率
结构布局	投入成本	设备空间较大
	空间结构有限	允许采用复杂结构

根据工程需要，可设计单托盘结构，脱硫效率可达 97 %以上；也可设计双托盘结构，脱硫效率可达 99%以上，但系统阻力相对较高。综合费用、效率、环境等因素考虑，处理任务简单时使用单托盘技术，脱硫难度大或烟气流量大时，使用双托盘技术。

就使用单托盘进行脱硫增效而言，其主要有以下两种安装形式[17]：

方案 1：托盘布置于入口烟道和最下层喷淋层之间。此布置形式是工程中最常见的，其安装示意图如图 2 所示。

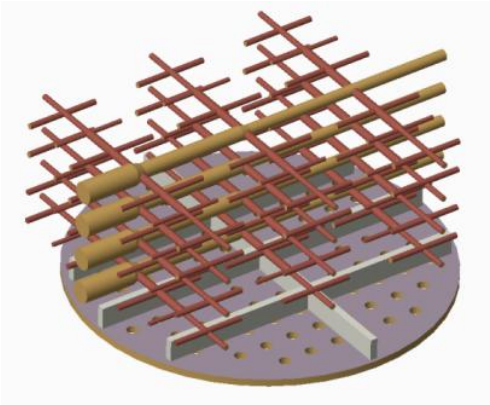


图 2　方案 1 安装示意图

将托盘布置在烟道入口和底层喷淋层间可以起到增大接触面积、缓冲、辅助除尘等作用。对比喷淋空塔，烟气从入口烟道进入吸收塔后向上流动，托盘是第一层“屏障”，对烟气有一定的减速效果，有效减缓了高温高速的烟气对底部喷淋层的冲击，理论上能减少吸收塔设备检修维护频率，更好地保障吸收塔安全稳定运行。托盘还能利用一部分烟气热量，使托盘持液层浆液的温度高于底部浆池，加速持液层浆液内石灰石溶解速率和气液两相反应速率。托盘多孔的结构能使高速上升的烟气均布分散成多个细流，与喷淋下降的液滴形成逆流充分接触，使脱硫效率更高。

周朝阳[18]在研究 1 000 MW 超超临界机组超低排放时，在原吸收塔入口烟道上沿与底层喷淋层之间 3 m 的空间，增设一层 3 mm 厚度的托盘。同时在喷淋层间距 2 m、循环泵流量 14 000 m^3/h 的基础上，新增一层喷淋层，当入口烟气浓度为 2 301.1 mg/m^3 时，SO_2 脱除效率 99.04 %。某电厂对 300 MW 机组实施超低排放改造[19]，当入口 SO_2 浓度 1 500 mg/m^3 时，将吸收塔净烟道出口处抬高 3 m，在吸收塔入口烟道上沿和最下层喷淋层之间安装托盘，出口 SO_2 浓度为 30 mg/m^3。由此可见，采用方案 1 所述托盘设计，仅需对吸收塔进行简要改造，通常伴随抬高吸收塔净烟道出口，托盘安装简单且脱硫效果显著。当进行脱硫吸收塔设计或改造，投入成本和空间结构有限时，需采用

托盘进行脱硫增效，此方案是较优选择。

方案 2：托盘布置于喷淋层之间，考虑脱硫效率及能耗两方面，多数布置于第二层和第三层喷淋层之间，实现吸收塔 SO_2 的吸收分区。

第二、三层喷淋层分级布置，托盘设置在其间，利用下面两层喷淋层提前对烟气进行洗涤。预洗涤浆液通过喷淋形成多种尺寸的液滴与烟气混合，能起到降温和减速的作用。同时，液滴与烟气中的悬浮物及带电微粒发生冲撞和吸附，能去除一小部分的粉尘。烟气通过托盘持液层整流后，能更均匀地进入第三喷淋层，借助第三层喷淋的洗涤，能有效地辅助去除烟气中的粉尘等颗粒物。

此方案安装示意图如图 3 所示。

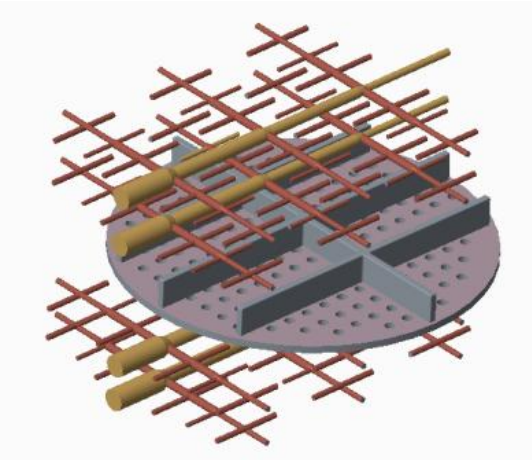


图 3　方案 2 安装示意图

相同工况下和方案 1 对比，经预洗的烟气相对更加稳定，再通过托盘多孔结构在托盘持液层中进行鼓泡传质，可提高脱硫效率并实现分级除尘。针对托盘横截面，经预洗涤后烟气初速度降低，气液间摩擦力减小，浆液对烟气的阻力降低，烟气通过持液层的时间缩短，从理论的角度分析，此设计方案脱硫效率略低于方案 1，但此方案实现了喷淋→鼓泡吸收→再喷淋的吸收过程，运行相对稳定且安全，故在入口 SO_2 浓度较大、烟气含尘较高等复杂工况时，此方案有一定的优势。

托盘将喷淋层吸收区分隔成上下两个分区，进行差异化喷淋层设计，上部喷淋区为低喷嘴压力喷淋区，降低循环泵扬程，节省能耗；下部为高喷嘴压力喷淋区，提高喷淋液滴动量，延长喷淋轨迹并通过碰撞、破碎产生更多比表面的液滴，增强传质效果。吸收区分区具有如下优点：

①降低托盘上方喷淋层液滴雾化能耗。

②强化托盘下方喷淋层雾化液滴的传质效果，增强 SO_2 吸收性能。

③在托盘上方形成高 pH 的喷淋层，提高脱硫效率。

④烟气负荷/SO_2 负荷适应性强，托盘上下方喷淋层运行方式组合更灵活。

参考工程实际，何海丽[20]对 4×600 MW 机组进行了升级改造，将原有的第三次喷淋层及支撑梁拆除，将托盘安装位置如上述方案 1 变化至方案 2，同时在高位布置新的湍流层和喷淋层。结果表明：原烟气中 SO_2 为 7 000 mg/m^3，托盘依据方案 1 布置，脱硫效率≥97.14 %，不能实现超低排放，但托盘依据方案 2 布置，脱硫效率≥99.6 %，满足超低排放要求。由此可见，在工程实际中托盘采用方案 2 所述布置形式，需对吸收塔喷淋层布局进行对应的改造，成本的投入相对较高，同时对吸收塔的富余空间结构也有对应要求。

综上所述，单层托盘在实际运用中主要有两种安装形式，都能起到均布气流、辅助除尘等作用，从而提高脱硫效率。但上述两种方案在功能和工作机理方面也存在差异，其主要区别见表 2。

表 2　单托盘布置方案差异对比

区别点	方案 1	方案 2
吸收过程	鼓泡吸收→喷淋	喷淋→鼓泡吸收→再喷淋
喷淋效果	影响最下层的喷淋分布	影响二三层喷淋衔接
粉尘收集	收集较大粉尘，实现初步过滤	经底层喷淋预洗涤，吸收更细小的粉尘
烟气控制	分散均布高速烟气	预洗涤降速降温引流、引导烟气进入后续喷淋层
设计要求	抬高净烟道出口	改造喷淋层
停留时间	高速烟气通过停留时间长	预洗涤降速烟气通过停留时间相对短

托盘具有较大的承重能力，方便在内部直接进行检修，托盘支撑梁是其承重的关键。基于表 2 的差异情况，当吸收塔利用托盘进行脱硫时，托盘的安装位置的不同，对应的烟气流速就不同。在喷淋量相同时，因为烟气和浆液逆向流动，烟气流速增大会阻止浆液下落，浆液在塔内停留时间随气速的增加而增加，持液量也随气速的增加而缓慢增加[21]，故不同的托盘位置会造成烟气给予托盘支撑梁和

喷淋层不同的冲击作用，进而衍生出不同挠度控制下托盘支撑梁安全的研究和设计。

3 双托盘设计位置分析

双托盘技术即利用两层托盘结构进行脱硫增效，适用于高脱硫率或升级改造项目。一般情况下，喷淋空塔不能直接改造成双托盘塔，否则喷淋层甚至整个辅机系统都将进行重新设计，弊大于利。[22]

双托盘技术与单托盘相比，最直观的区别在于多了一层持液层，实现二次强化传质，增加了烟气在吸收塔中与浆液的接触时间，提高了脱硫效率。[23]

利用托盘结构实现吸收塔脱硫增效，往往使用单托盘技术就能达到较优的脱硫效果。但双托盘技术在脱硫效率等方面优于单托盘技术，是因为双层结构有利于形成多次分散，加强气液两相传质效果层间的分级也能更好收集不同粒径的粉尘和脱硫产物，吸收塔阻力进一步增大，延长了停留时间。

依据工程经验：当烟气流量大、流速快时，单托盘不能很好地均布气流，易导致下游设备过载；当烟气含尘量高，单托盘辅助除尘过滤速度较慢，且易导致堵塞。所以在满足投入成本要求，且吸收塔满足超低排放改造条件时，双托盘技术有明显的优势。但此经验并非绝对，面对复杂实际工况，需综合考虑环境因素和经济效益影响，选择合适的托盘技术进行托盘增效。所以设计安装前需通过流场模拟确定最适合的托盘安装数量和位置，以便达到脱硫除尘、节能减排的最优效果。

根据不同的脱硫或改造要求，双托盘的布置也存在差异，设计位置多变，设计前需预先通过 CFD 流场模拟确定关键参数。一般在吸收塔内烟气入口和第一层喷淋层之间连续布置两层托盘，其余技术路线和脱硫环节与单托盘塔一致。[24]同时，也可不连续的布置托盘，形成鼓泡→喷淋→再鼓泡→再喷淋的吸收过程，其脱硫效率和适应能力毋庸置疑。参考实际改造项目，利用双托盘技术对 2×320 MW 机组进行超低排放提效改造。[25]在最下层喷淋层下方布置一层均流托盘，同时在第四层喷淋层下方也布置一层均流托盘，SO_2 排放浓度＜28 mg/Nm^3，烟尘排放浓度为 4.5 mg/Nm^3。故面对复杂脱硫情形，此布置形式是最优方案。

但因托盘能增大吸收塔阻力，双托盘会带来更大的阻力，风机的的压头选取规格偏大，投入成本及运行电耗随之增加，需在效率、费用、环境影响等多方面综合考虑，所以一般在低硫煤脱硫时不建议使用双托盘技术。

4 结语

（1）实现湿法烟气脱硫吸收塔脱硫增效，托盘是应用最广泛的增效结构，因其结构简单且效率高效，逐渐地成为脱硫增效的首选。建议在设计前通过流场模拟确定采用何种托盘技术及安装位置等，根据相关设计参数计算选取最适合的托盘大小、开孔率等，进一步确保托盘在实际使用中的效果。根据工程经验，托盘的开孔率一般控制在 35 %~40 %左右，开孔孔径为 30~40 mm，厚度一般选 3~5 mm 较为经济。

（2）采用单托盘技术进行脱硫增效，根据实际脱硫目标，选择不同的托盘布置方案。

当投入成本较少且吸收塔结构紧凑、富余空间狭小，优先考虑上述方案 1 所述安装形式，通常伴随抬高吸收塔净烟道出口的改造。

当投入成本和吸收塔空间富余时，优先考虑方案 2 所述安装形式，通常伴随改造喷淋层的布局。根据实际经验，结合费效比，建议安置于第二、三喷淋层之间。

（3）正常设计能满足超低排放要求，当入口 SO_2 浓度大幅波动时（向低浓度波动），可通过控制喷淋层及对应浆液循环泵的开闭，实现节能且高效的脱硫。

（4）当利用单托盘技术不能满足超低排放要求且烟气含尘量高时，通常选择在原基础上增加一层托盘，即采用双托盘技术，但吸收塔阻力及电耗也同步增加。

参考文献：

[1] 马双忱, 樊帅军, 武凯, 等. 双碳战略背景下燃煤电厂 CCUS 技

术发展：挑战与应对 [J]. 洁净煤技术, 2022, 28(6): 1-13
[2] 发展改革委 环境保护部 能源局关于印发《煤电节能减排升级与改造行动计划（2014—2020 年）》的通知 [J]. 中华人民共和国国务院公报, 2015(5): 65-71
[3] 张玉山, 彭立观, 刘德权. 3×200 MW 机组脱硫超低排放改造技术方案研究 [J]. 电站系统工程, 2021, 37(5):68-70
[4] 阮徐均, 陈尼青, 郑志秀, 等. 托盘技术在石灰石—石膏法脱硫中的应用研究 [J]. 中国环保产业, 2021(2) :50-52
[5] 刘娇. 湿法脱硫喷淋塔强化传质提效技术及减碳探讨 [J]. 东北电力技术, 2023, 44(6)：49-53
[6] 袁瑞龙, 孙琛, 肖爱萍, 等. 托盘技术应用于湿法烟气脱硫的现状与展望 [J]. 广州化工, 2016, 44(19)：39-41
[7] 卢晗, 郑鑫, 李薇, 等. 燃煤电厂脱硫技术及超低排放改造费效分析 [J]. 环境工程, 2018, 36(1)：97-102
[8] 杜明生, 肖海平, 张国柱, 等. 湿法脱硫系统托盘提效计算模型研究 [J]. 能源与环境, 2022(4): 84-86
[9] Downs W, Pirsh A E, Stewart F J, et al. Gas-liquid contact system [P]. US4263021, 1981-04-21
[10] Johnson, B. R, Dureiko, et al. Wet scrubber tray [P]. CA2850735C, 2015-10-20
[11] 邓乾红, 姚超良, 李玉兰, 等. 单塔双托盘脱硫除尘一体化技术 [J]. 中国环保产业, 2018(3): 36-40
[12] 李诚. CFD 流场数值模拟在火电厂超低排放改造工程中的应用 [D]. 北京: 清华大学, 2017
[13] 徐平. 燃煤火电机组超净排放技术路线分析与选择 [J]. 华电技术, 2015, 37(9): 55-58+79
[14] 梁晏萱, 苏成. 双托盘喷淋塔在石灰石-石膏湿法脱硫装置改造中的应用[J]. 重庆电力高等专科学校学报， 2015, 20(5)：38-42
[15] 杜乐, 黄建国, 殷文香. 一种提高石灰石-石膏法脱硫效率的方法-托盘塔 [J]. 环境与发展, 2014, 26(3)：196-198
[16] 田改霞. 300MW 机组超低排放改造 [J]. 甘肃冶金, 2018, 40(5): 51-53
[17] 颜俭, 惠润堂, 杨爱勇. 湿法烟气脱硫系统的吸收塔设备 [J]. 电力环境保护, 2006(5): 13-17
[18] 周朝阳. 1000 MW 超超临界机组超低排放改造工程分析 [J]. 洁净煤技术, 2017, 23(6)：118-123
[19] 温卿云, 谢倩, 杨西茜, 等. 燃煤电厂脱硫除尘超低排放改造措施探讨 [J]. 环保科技, 2017, 23(5): 6-10
[20] 何海丽. 4×600MW 机组超低排放改造技术方案 [J]. 节能与环保, 2023(2): 53-54
[21] 蒋惠梦, 余苏玲, 肖述明, 等. 湿法烟气脱硫喷淋塔的持液特性 [J]. 环境工程学报, 2017, 11(3): 1746-1754
[22] 尹丽丽. 燃煤电厂超低排放环保改造技术路线与环境效益 [J]. 黑龙江环境通报, 2017, 41(4): 82-84
[23] 卢泓樾. 燃煤机组烟气污染物超低排放研究 [J]. 电力科技与环保, 2014, 30(5)：8-11
[24] 吕璐. 火电厂超低排放改造技术应用研究进展 [J]. 资源节约与环保, 2020, (9)：1-2
[25] 林欢. 烟气高效脱硫协同除尘技术 [J]. 中国环保产业, 2019(5): 30-33

（上接第 36 页）

受制于人，对电厂的运行和维护增加了相当大的难度，同时运维成本也居高不下。筒形阀控制系统改造实现了筒形阀控制系统的核心元件的自主可控，全方位解决目前董箐存在的问题，改造后运行可靠，性能优良，值得推广应用。

参考文献：

[1] 张宁权. 筒阀在漫湾电站的应用[J].云南水力发电,2001(S1):7-9
[2] 杜江, 林洪德, 张利民, 等. 瀑布沟水电站筒形阀结构设计[J]. 东方电气评论,2011(1):38-42
[3] 孙文彬, 蒋登云, 田迅, 等. 溪洛渡水电站水轮机巨型圆筒阀选择及性能分析[J].大型水轮发电机组技术论文集, 2008(7): 163-169
[4] 甘楠, 时天富. 数字缸在水轮机筒形阀电液同步控制系统中的应用[J].水力发电 2011,37(8):59-61
[5] 权君宗, 伍英岩, 刘时贵, 等. 筒形阀全数字集成式电液控制系统[Z].2009
[6] Marouf W M.Digital intake valve based CFD investigations of a single cylinder spark ignition engine to improve its performance and emissions characteristics[J].Energy and Power, 2020, 10(2): 31-39
[7] Yagci B,Frazho A E,Sumali H.Determining the extension of a Hydraulic cylinder using spectral estimation[J].Journal of Sound and Vibration.2005,(6):487-496
[8] 李峰, 田维青, 李锋, 等. 董箐水电站 4 号机组筒形阀失步故障处理[J],水电自动化与大坝监测，2012(4):42-45
[9] 魏祥雨, 王世耕, 胡捷, 等. 闭环控制数字液压缸及实验研究[J], 液压与气动，2005(7):19-22

面向大尺寸蛇形管屏的激光自动放样系统开发

李浩[1] 缪玉鸿[2] 郝立夫[1] 徐文浩[1] 盛仲曦[1]

1. 东方电气集团科学技术研究院有限公司，成都 611731；2. 东方电气集团东方锅炉股份有限公司，四川 自贡 643001

摘要：本文针对大尺寸蛇形管屏拼装中的定位和放样精度问题，开发出一套激光自动放样系统，涉及软件框架结构的优化及控制系统的高效集成。此外，本研究还介绍了一种高精度的多激光投影子系统标定技术。通过场地实验验证，系统展现了卓越的操作可行性。最终实验结果显示，本文所开发的激光自动放样系统在 15 m 范围内投影精度可达到 0.13 mm，能够很好的满足生产现场应用需求。

关键词：蛇形管屏；激光投影；自动放样

中图分类号：TG409 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-9006（2024）06-0065-06

Development of a Laser Automatic Layout System for Large-sized Serpentine Tube Screen

LI Hao[1], MIAO Yuhong[2], HAO Lifu[1], XU Wenhao[1],SHENG Zhongxi[1]

(1.DEC Academy of Science and Technology Co., Ltd.,611731, Chengdu, China; 2. Dongfang Boiler Group Co.,Ltd.,643001, Zigong, Sichuan, China)

Abstract：In order to solve the problem of positioning and lofting accuracy in the assembly of large-size serpentine tube screen, a set of laser automatic lofting system was developed. System design involves the optimization of the software framework structure and the efficient integration of the control system. In addition, a high-precision calibration technique for multi-laser projection subsystems is introduced. Through field experiments, the system has demonstrated excellent operational feasibility. The final experimental results show that the laser automatic lofting system developed in this paper can reach 0.13mm in the range of 15m, which can well meet the application requirements of the production site.

Key words: serpentine tube screen;laser projection ;laser automatic lofting system

多部件拼装是机械生产制造过程中常见工艺，多部件拼装精度直接影响最终成品的形状和结构精度。[1-2]锅炉蛇形管屏由大量形状复杂的弯管拼装焊接而成，弯管的拼装精度直接影响最终成品的质量[3-4]，形状结构复杂的锅炉蛇形管屏拼装对于精度的要求更加明显。传统的管屏拼装工艺采用人工在拼装平台上手工划线的方式确定每根弯管的摆放方式，工作量大且难以保证划线精度。

针对多部件拼装自动放样应用，黄东伟[5]等人通过激光投影辅助实现了邮轮外板涂装前的轮廓和填充放样，实现了复杂异形曲面部件的自动放样，提升了外板拼装精度；王声[6]等人围绕飞机导管支架安装问题，采用激光投影技术实现了数字化定位和导管支架理论位置的三维投影，有效的控制和固化了导管支架安装并提升了安装精度；叶顺坚[7]等人通过激光引导实现了火箭仓体的精准装配，实现了贮箱箱底支架、支座等多个部件的高精度数字化装配。锅炉蛇形管屏尺寸较大且形状较为复杂，常见的小范围投影放样方法难以满足实际生产应用需求。

针对锅炉蛇形管屏拼装人工放样工作量大且难以保证放样精度的问题，开发了一套多激光投影

收稿日期：2024-07-09

作者简介：李浩（1991－），男，2015 年毕业于重庆大学机械制造及其自动化专业，硕士研究生，工程师。现任东方电气集团科学技术研究院有限公司，主要从事智能制造研究方向系统设计工作。

仪的全自动激光放样系统。首先，系统采用 5 个激光投影设备实现了 20 m×5 m 超大范围的投影放样，设计了多投影仪自动标定方法实现了多投影设备的投影坐标统一。然后，系统设计了和生产管理系统的数据交互功能，实现了投影图纸的传递、文件管理和数据库管理等功能。最后，基于所设计开发的激光投影系统开展了试验验证和现场应用，验证了系统的可行性，实现了复杂结构的蛇形管屏全自动放样应用。

1 系统设计

1.1 系统整体设计

为实现大尺寸锅炉式管屏拼装时的精准放样，本文给出了智能激光自动放样系统的设计框图。如图 1 所示，该系统由激光投影仪、图像捕获、升降机构、声光报警、操作台、UPS 等组成。

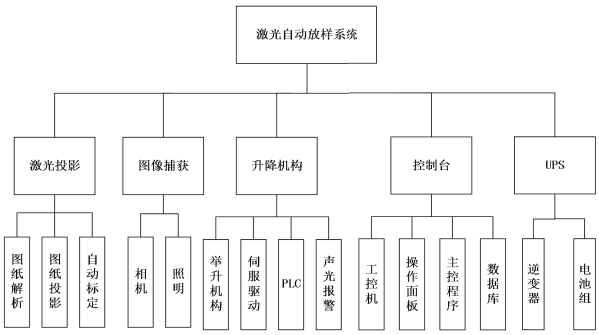


图 1 激光自动放样整体框图

本系统采用大功率单色振镜式激光投影仪作为主要设备，通过设计合理的举升机构实现设备的高点斜投影。举升机构采用销齿链加导向柱的设计，由伺服减速机构精确控制，确保运行时的高度稳定和可靠。

在激光投影仪的功能性上，引入了一项关键的自动标定技术[8]，该技术以靶标为依据，使得单个激光投影仪能够独立进行位置校准，实现精确投影。而当部署多个投影仪协作时，这一自动校准功能能够确保各设备在投影前同步校准，以达到统一效果。

为了高效地管理投影过程中的图像采集，选用了工业相机构建图像采集系统。这些相机与激光投影仪的安装高度一致，能够进行多视角拍摄，并可通过系统软件自动执行图像的采集与管理工作。

为了方便工人操作，设计对底层的应用环节进行了屏蔽，工人采用单一的控制台即可完成激光投影系统的所有操作，大大简化了整个工作流程。

最后，系统软件的设计不仅实现了操作流程的整体控制，同时还确保了与前端 MOM 系统的无缝数据交互，以及对后端激光投影仪数据和状态的实时管理。这使得整体操作变得更为流畅，可靠性和效率都得到了显著提升。

1.2 多投影仪子系统设计

为了满足大范围且精确的激光放样要求，设计了一个包含多个激光投影仪的子系统。如图 2 所示，该系统通过特定的垂直举升机构进行举升，通过将投影仪举升到适合的高度来实现高点斜投影。这一子系统在提供广泛投影覆盖的同时，支持细致调校以达到高精度投影效果。

根据工作区域的空间特点，整个装配平台的实际工作范围为 20 m×4.2 m，激光投影仪和图像采集系统均安装在顶部桁架之上的举升机构中。桁架结构采用 80 m×120 mm 的矩形管材制成，分为三段，段长 6.5 m，总长达 19.5 m，并使用板螺栓实现承接固定。升降机构由销齿链举升单元及伸缩导向单元构成，包含三套销齿链和与之配套的三套多节伸缩式铝合金立柱，能够确保整体升降过程的稳定，并保持精准的举升位置。动力单元由绝对值伺服电机与减速机提供。为了便于电线的布线与维护，桁架上特别设立了 75 mm×50 mm 的桥架，并通过 100 mm×75 mm 规格的柔性拖链将桁架上的线缆安全导引至地面。此外，地面部分的电缆通过挖设 160 mm×80 mm 的线槽并置入 150 mm×75 mm 的桥架来组织，方便地面附近所有线缆的布置。操作台内配备了人机接口、工控机、伺服驱动、PLC 控制器、网络交换机及 UPS 等重要组件。

在多投影仪系统中，准确的标定是保证精确放样的关键步骤。在复杂的放样作业中，每个投影仪单元都必须产生准确和同步的图像以维持整个系统的一致性和精度。因此，整个多投影系统需要进行标定。标定的过程确保每个投影仪的投影在特定距离和角度上都达到预期的位置和大小，从而允许

准确的图案叠加和对齐。这样可以纠正由光学畸变、机械误差和非理想安装引起的误差[9-13]，提高系统的整体精度和效率。

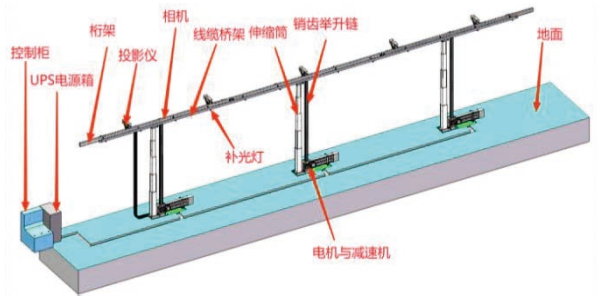


图 2　整体布局图

1.3 控制系统设计

电气控制系统作为自动放样系统的神经中枢，负责指挥各个子系统的协调运作和响应各类输入信号。如图 3 所示，整个控制系统由工业计算机，投影仪，工业相机，PLC，升降伺服几大部分组成。

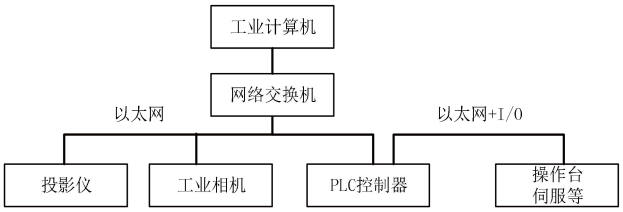


图 3　控制系统结构图

总控制系统核心由控制柜和工控机构成，实现激光投影放样系统、升降机构以及装配质量监控系统的协同自动控制功能。为确保系统整体的可靠运行与实时响应，采取工业以太网通信技术进行数据交换和信息传输。

在控制器方面，选用带有以太网端口的西门子 S7-1200 系列 PLC 以实施系统逻辑控制与处理计算任务。网络系统通过西门子专用网络交换机进行物理层的寻址。升降传动机构则选用 V90 系列 PN 总线型绝对值伺服电机完成位置闭环控制，该电机具有高精度定位和电源断电时位置记忆功能，且可通过其内置的抱闸装置实现升降装置的自锁，保障了操作安全。

由于整体架构要求三套升降机构能够同步运行，电气同步性对 PLC 和伺服电机而言尤为关键，因此二者都采用总线通信，以确保高实时性和可靠性，满足升降同步性的严格要求。

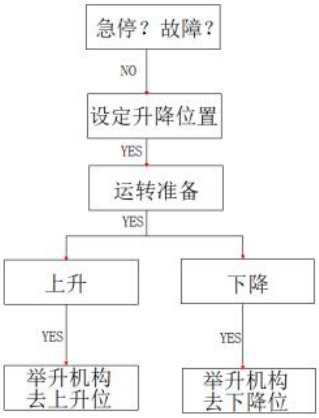


图 4　PLC 工作原理图

PLC 程序部分主要完成外部电机控制（升降机构）、安全报警、远程要求数据采集等任务。其程序工作的主要逻辑流程如图 4 所示。

1.4 软件系统设计

系统软件包含相机数据采集、激光投影仪控制、MOM 系统接口、数据库管理、人机接口等。相机采用千兆以太网接口，在切换图纸或人工控制的条件下捕获图像文件并记录到数据库中；激光投影仪支持 TCP 接口、主控程序的二次开发实现图纸导入设定、自动标定控制等任务；MOM 系统接口将实现系统工作状态的获取及任务的下发；数据库实现任务管理、登录权限控制等功能；人员接口部分主要实现简单的操作控制和图像展示。详细软件页面效果如图 5 所示：

图 5　软件界面示意图

为了方便扩展，软件采用分布式结构设计，将整个系统切分为多个子系统，各个子系统功能互不干扰，每个子系统只与数据库交互，数据库作为中间件协调各组件的工作。如图 6 所示，将整个系统软件分为 6 个子系统，包括 PLC 接口系统、激光投影接口系统、MOM 系统接口子系统、图像采集系统、用户界面和数据库系统。

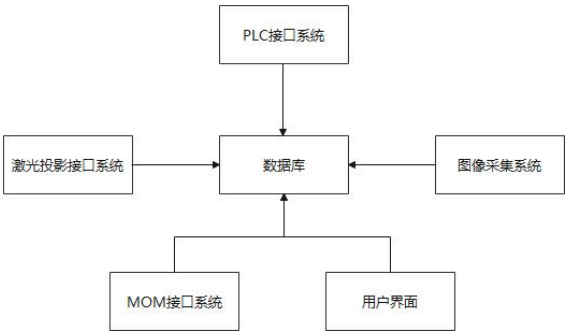


图 6　软件分布式结构

其中，MOM 系统实现激光投影系统的外部软件接口交互，负责传递激光投影系统的图纸、投影参数、记录的投影文件等。同时，与激光投影系统工作站通过网络进行通信，数据交互方面通过调用 WebApi 实现，使用 WebApi 发送 json 格式请求向 MOM 系统指定的 URL 资源查询最新的任务情况。

整个 MOM 系统服务器采用 HTTP 的方式进行交互。HTTP 的基础 API 接口有 4 种，对应了与 MOM 系统服务器交互的不同方法，分别是 GET、POST、PUT、DELETE。一个 URL 地址，描述了一个网络上的资源，而 HTTP 中的 GET、POST、PUT、DELETE 就对应着对这个资源的查、改、增、删 4 个操作。我们使用 GET 和 POST 就可完成所有接口操作，GET 用于获取/查询资源信息，POST 用于更新资源信息。其交互原理如图 7 所示：

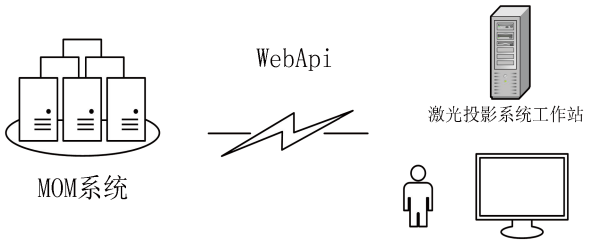


图 7　软件外部接口

为预防整个系统长期运行导致存档文件占用大量硬盘容量，增加了磁盘空间监测与管理功能。如图 8 所示，当磁盘容量不足时，按照文件创建时间删除最早的存档文件。

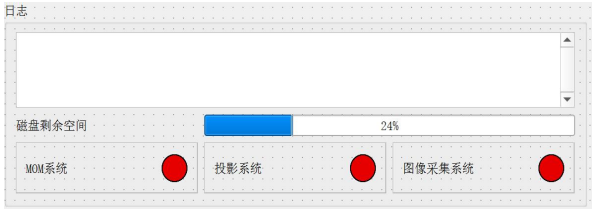


图 8　磁盘管理与系统监测

2　多投影仪系统标定方法

2.1　投影范围及数量

整个投影设备要求有效投影范围达到 4 m×20 m，设激光投影仪的宽度方向（$\beta=80°$）沿 20 m 方向布置，安装参数和投影区域示意图如图 9 所示。根据图 9 所展示的安装参数，举升机构的举升高度（相对于工作台）和激光投影设备的投影区域大小关系如表 1 所示。

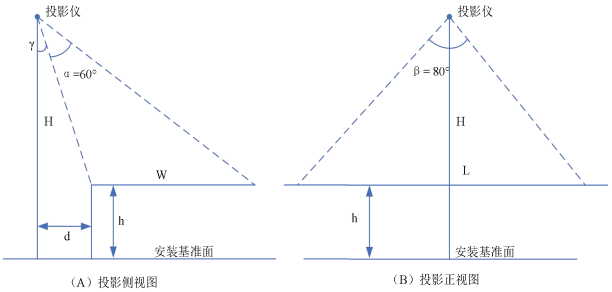


图 9　激光投影区域图

图 9 中，在给定 h、H 和 d 后，各参数计算方法如下：

$$\begin{cases} \tan\gamma=\dfrac{d}{H-h}\rightarrow\gamma=\arctan\dfrac{d}{H-h} \\ \tan(\gamma+\alpha)=\dfrac{W+d}{H-h}\rightarrow W=(H-h)\tan(\gamma+\alpha)-d \\ \tan\dfrac{\beta}{2}=\dfrac{0.5L}{H-h}\rightarrow L=2(H-h)\tan\dfrac{\beta}{2} \end{cases} \tag{1}$$

表 1　激光投影仪参数计算

总宽度（m）	4	总长度（m）	20
横向角度α	60	纵向角度β	80
工作面高差 h	1	举升高度 H	4.4
距边缘距离 d	0.4	投影仪安装斜角γ (内侧靠边)	6.709 836 808
投影宽度 W	7.498 444	投影长度 H	5.705 877 492
设备个数	4	接边长度	0.941 169 989
侧向斜边长度	3.460 275	纵向侧边长度	4.438 384 784

从表 1 可以看出，当举升高度达到 4.3 m 时，单个投影仪的投影长度可以达到 5.37 m，宽度可以达到 7.13 m，此时覆盖整个区域只需 4 个投影仪即可。为保证较高的投影重叠率和投影效果，设计预采用 5 个投影仪，其投影覆盖范围分析如图 10~11 所示。

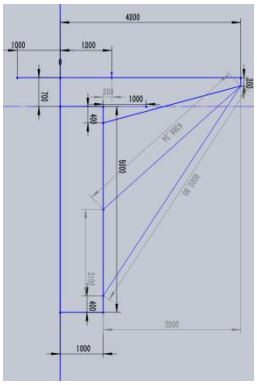


图 10　宽度方向投影覆盖范围分析

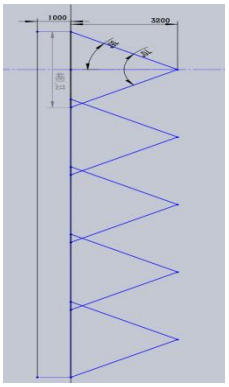


图 11　长度方向投影覆盖范围分析

2.2 激光投影仪标定设计

在一定范围内，投影仪具备自动标定功能，用于校准投影位置，在作业前需要自动完成自我标定。自我标定时投影仪小范围内自动跟踪标定靶，其范围为 6 cm 直径的圆，标定光斑如图 12 所示：

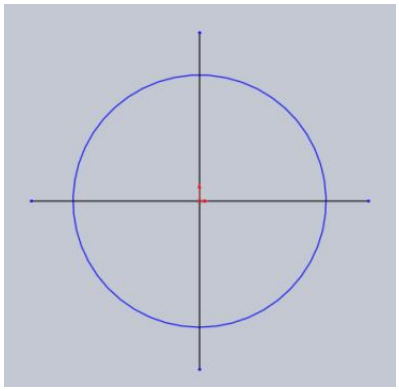


图 12　扫描自动标定光斑示意图

靶标布设需保证两个以上标靶布设在两个投影仪的公共区域内，投影区域外需要包含 4 个靶标，排布方式如图 13 所示。

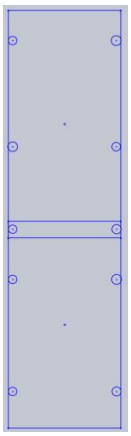


图 13　标定靶排布方式

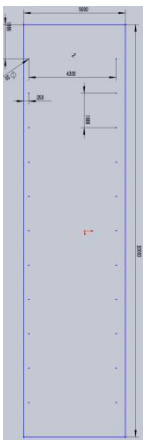


图 14　标定靶布置要求

为实现操作工验证投影精度，设计在工作平台上绘制一个方框，如图 14 所示，投影光线与方框重合则标志投影精度满足作业要求。初步计划采用如下的布设方式，图中外框表示平台，内框表示校对方框，标定靶设置 20 mm 的螺纹孔，用于放置标定靶。标靶末端为 6 cm 杆，在 20 mm 的螺杆上开 6 mm 孔用于放置标定靶。

*注：为保证管屏在平台上时不影响投影仪对标靶的校准，需保证管屏边沿与靶标有一定的安全间距，安全间距按照如下公式计算。

$$l = h_1 * L/H \tag{2}$$

在上式中，l 表示工件边缘距离标靶的中心距离，h_1 表示工件边沿距离平台的高度，L 表示投影仪中心距离标靶中心的水平距离，H 表示投影仪中心距离平台的垂直距离。

3　实验验证和现场应用

本次实验的目的是实现锅炉蛇形管车间的锅炉管道的自动放样，以验证整个系统的稳定性和可行性。拟投影的对象为锅炉管道图纸，外径为Ø60、Ø57、Ø51、Ø45 等规格，中心间距为Ø60、Ø64、Ø69、Ø70 等。需投影的工件实物如图 15 所示：

图 15　工件实物图

图 16　打开靶标保护盖

在正式投影之前，需对扫描仪进行自动标定，以确保整个系统的一致性和准确性。如图 16 所示，首先，需检查平台上的靶标保护盖是否打开。若未打开，需要将保护盖掀开，用于投影校准。

图 17　标定成功

然后，在系统页面中点击自动校准。如图 17 所示，系统提示标定中，等待标定结果，当出现标定成功提示时即可开始投影任务。标定成功后，后续投影任务可跳过标定步骤。

最后，工人使用工件轮廓线图纸，按照图层顺序将轮廓线、附件线、余量线依次投影在平台上，具体投影效果如图 18 所示。每一次线条投影后使用测量工具测量线条是否符合生产标准，符合标准后需要根据投影线条在地面进行描线，直到全部线条描样完成。对于多次生产同一工件的任务，只需在第一次使用时在地面描样即可。

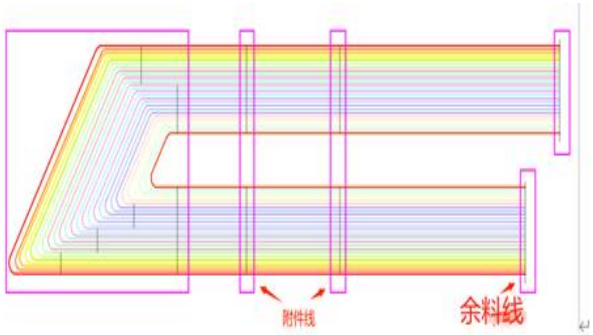


图 18　预拼接和预切割位置图

最终经过人工测量显示，本文所开发的激光自动放样系统在 15 m 范围内投影精度可达到 0.13 mm，能够很好的满足生产现场应用需求。

4　结语

针对锅炉蛇形管屏拼装人工放样工作量大且难以保证放样精度的问题，开发了一套多激光投影仪的全自动激光放样系统。首先，系统采用 5 个激光投影设备实现了 20 m×5 m 超大范围的投影放样，设计了多投影仪自动标定方法实现了多投影设备的投影坐标统一。然后，系统设计了和生产管理系统的数据交互功能，实现了投影图纸的传递、文件管理和数据库管理等功能。最后，基于所设计开发的激光投影系统开展了试验验证和现场应用，验证了系统的可行性，实现了复杂结构的蛇形管屏全自动放样应用。

参考文献：

[1] 林震, 王增海, 高和平, 等. 小口径锅炉管生产技术开发[J].包钢科技, 2023, 49(6):38-44

[2] 高飞, 张欣, 胡景超, 等. 超临界锅炉刚性梁内绑带原理及设计[J]. 锅炉制造, 2024, (6):6-7+10

[3] 罗永飞, 窦泉山, 王林森, 等. 旋风分离器管屏智能焊接设备的开发与应用[J]. 电焊机, 2024, 54(3):48-53

[4] 金姗, 臧平伟. 蛇形管组管子应力分析及固定方式优化[J].技术与市场, 2024, 31(2):96-99

[5] 黄东伟, 叶爱青 ,顾洋, 等. 激光投线辅助豪华邮轮外板涂装技术[J].船海工程, 2021, 50(6):6-9

[6] 王声, 吴军豪, 牛润军, 等. 激光投影技术在飞机导管支架安装中的研究与应用[J].导航与控制, 2018, 17(3):48-54.

[7] 叶顺坚, 郑凯, 刘立安, 等. 火箭舱体激光引导辅助装配技术研究[J].制造业自动化, 2023, 45(2):43-45+84.

[8] 贾顺利, 卢红龙, 刘月. 激光投影定位偏差分析技术研究[J].纤维复合材料, 2022, 39(4):114-119.

[9] 赵祖阳, 崔海华, 杜坤鹏, 等. 基于单应性矩阵的三维激光投影标定方法[J].光子学报, 2022, 51(11):312-321.

[10] 董玲洁, 代广红, 冀松. 基于 3D 激光投影的室内场景三维重建模型[J]. 应用激光, 2022, 42(7):125-132

[11] 史铮雪. 新型激光扫描投影系统关键技术研究[D]. 长春理工大学, 2022

[12] 王晨. 基于立体标靶的多节点三维测量系统同时标定研究[D]. 河北工业大学, 2020

[13] 范成博. 多色激光扫描投影系统及路径优化方法研究[D].长春理工大学, 2020

汽轮机数字电液系统的分析及控制器设计

刘楠

东方电气自动控制工程有限公司，四川 德阳 618000

摘要：本论文从工作原理、主要功能、物理特性几个方面，全面分析了汽轮机及其控制系统。针对目前广泛采用的数字电液调节系统，建立了汽轮机本体及数字电液控制系统中各主要环节的数学模型。并对此系统的对象简化模型进行了辨识。针对具体模型，通过建模仿真的方法，分别设计了模拟式和数字式的汽轮机转速调节 PID 控制器，及阀门伺服控制器。并采用基于继电反馈模型辨识的方法对 PID 参数进行整定，最终设计出了具有一定鲁棒控制指标的数字式转速调节 PI 控制器。

关键词：汽轮机；数字式电液控制系统；参数整定；模型辨识

中图分类号：TM315　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）06-0071-09

Analysis and Controller Design of Digital Electro-hydraulic Control System for Steam Turbine

LIU Nan

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

Abstract: Based on the turbine control system and its working principles, major functions, static and dynamic characteristics of the study in this paper, I have a comprehensive analysis of the turbine control system. I established a mathematical model for the main components of the turbine and digital electro-hydraulic control system for the widely used digital electro-hydraulic control system(DEH) in this paper. Then I identified the simplified object model of this system. For specific models, analog and digital PID controllers for turbine speed regulation, as well as valve servo controllers, were designed through modeling and simulation methods. And a method based on relay feedback model identification was used to tune the PID parameters, and a digital PI controller with certain robust control indicators was ultimately designed.

Key words: turbine; digital electro-hydraulic control system(DEH); parameters setting; identification

本文根据汽轮机控制系统（Digital Electro-Hydraulic Controller,DEH）在工程中的应用，针对目前火力发电厂大型单元机组控制系统的特点，研究汽轮机控制系统，目的是深入研究汽轮机数字式电液控制系统的工作原理和基本结构和控制特性。使本论文可以为具体的 DEH 开发和应用提供较好的理论研究方法。

1　主要研究内容

本文根据汽轮机的特性及系统要求，总结汽轮机数字式电液控制方法；并通过建立系统数学模型，利用建模工具仿真办法设计汽轮机计算机转速控制系统中的转速调节器，及阀门液压式控制回路的伺服控制器。这两个控制器都是 PID 控制方式，其中转速调节器采用基于继电反馈模型辨识的方法

收稿日期：2024-05-25

作者简介：刘楠(1986一)，女，2008 年毕业于哈尔滨工业大学自动化专业，学历本科，职称工程师（中级）。现任职于东方电气自动控制工程有限公司，主要从事汽轮机控制方向设计工作。

对 PID 参数进行整定，设计具有一定鲁棒性的数字式控制器。

2 汽轮机控制原理及数学模型建立

目前燃煤电站用汽轮机控制系统主要指汽机数字电液调节系统，它主要参与模拟量闭环控制系统，以实现汽轮机的转速控制和负荷控制，同时又具有监视、保护和在线试验的功能。

2.1 汽轮机转速控制回路的工作原理

汽轮机电液调节器有多个控制回路及多个控制参数，通过对这些参数如转速、功率、压力等的闭环控制，实现汽轮发电机组的运行。

在转速控制过程中，参与转速控制的执行器包括高压主汽门或调节汽门，补气门，以及中压联合/调节汽门，它们按照流量曲线规定的分配比例，构成多回路的串级调速系统。在启动和并网过程中控制转速需要投入转速回路，它是维持转速升降或保持的回路。

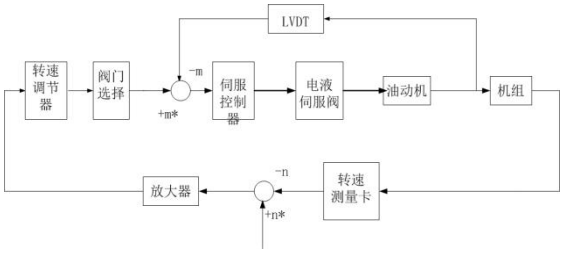


图 1 单机运行的汽轮机调速系统

2.2 汽轮发电机组启动工况转子数学模型

在启动工况下汽轮发电机转速变化范围大，相应的汽轮机转矩、功率随转速变化范围也很大。在这种工况下，汽轮发电机组采用非线性数学模型来描述其变化更为确切。在升速过程中汽轮机功率消耗在加速转子和克服摩擦鼓风损失上。

蒸汽转矩可用下式表示：

$$M_{\mathrm{T}} = K\frac{GH_0\eta}{n} \tag{1}$$

式（1）中，G—进入汽轮机的蒸汽流量；H_0—绝热焓量；η—汽轮机效率；n—汽轮机转速；K—与使用单位有关的系数。

根据汽轮机原理，对于任意一个透平级，可得到转矩与转速的关系为：

$$\frac{M_{\mathrm{T}}}{M_0} = \frac{G}{G_{\mathrm{H}}}\left(1+\frac{1}{\overline{C}_{\mathrm{u}}}-\frac{1}{\overline{C}_{\mathrm{u}}}\frac{n}{n_0}\right) \tag{2}$$

$$\overline{C}_u = \frac{C_{1u}+C_{2u}}{u} \tag{3}$$

式中，$\overline{C}_{\mathrm{u}}$—环流系数；$M_{\mathrm{T}}$—转矩；$G$—流量；$n$—转速；$u$—圆周系数；$C_{1\mathrm{u}}$—喷嘴出口汽流速度在圆周方向的分量；$C_{2\mathrm{u}}$—动叶出口汽流速度在圆周方向的分量。下脚“0”表示 3 000。

汽轮机一般为多极透平，其转速和转矩关系基本上和任意级相似，汽轮机转矩与转速的关系曲线如图 2 所示。

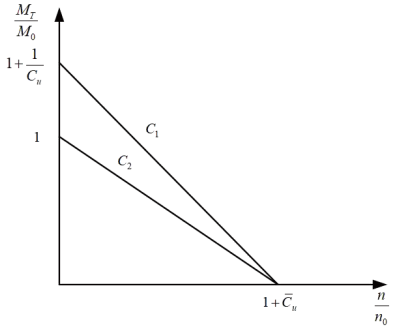


图 2 汽轮机转矩转速关系曲线

汽轮发电机组转子运动方程如下：当作用在转子上的主动力矩和阻力转矩有变化时，转子的转速和角加速度就会有变化，可得到下列数学表达式：

$$M_{\mathrm{T}} - M_{\mathrm{R}} = J\frac{d\omega}{dt} \tag{4}$$

$$\frac{M_{\mathrm{T}}}{M_0} - \frac{M_{\mathrm{R}}}{M_0} = \frac{J\omega_0}{M_0}\frac{d\frac{\omega}{\omega_0}}{dt} = \frac{J\omega_0}{M_0}\frac{d\frac{n}{n_0}}{dt} \tag{5}$$

$$令\ T_{\mathrm{a}} = \alpha\frac{J\omega_0}{M_0}\ 和\ \alpha = \frac{G_0}{G_{\mathrm{H}}} \tag{6}$$

$$\frac{M_{\mathrm{T}}}{M_0} - \frac{M_{\mathrm{R}}}{M_0} = \frac{T_{\mathrm{a}}}{\alpha}\frac{d\frac{n}{n_0}}{dt} \tag{7}$$

式中，M_{T}—汽轮机转矩；M_{R}—阻力转矩；ω—汽轮机角速度；J—汽轮发电机组转子转动惯量；n—汽轮机转速；G_{H}—机组额定流量；T_{a}—转子时间常数。

转子时间常数的物理意义：它表示当作用在转子上的阻力转矩为额定蒸汽所产生的转矩，并保持不变时，汽轮机的转速提升一个额定转速 ω_0 所需要的时间。它的倒数则表示了甩负荷时的初始加速度。T_a 的值随汽轮机功率的增加而减小，一般高压大功率汽轮机组约为 5~10 s。T_{a} 值直接影响了单机汽轮机的转速波动，它越小在负荷波动时汽轮机的转速波动越大。

阻力转矩：

$$M_R = K\omega^2 \tag{8}$$

$$M_0 = M_{R0} = K\omega_0^2 \tag{9}$$

$$\frac{M_R}{M_0} = \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 = \left(\frac{n}{n_0}\right)^2 \tag{10}$$

由此可得一组方程：

$$\left.\begin{aligned} &\frac{M_T}{M_0} - \frac{M_R}{M_0} = \frac{T_a}{\alpha}\frac{d\frac{n}{n_0}}{dt} \\ &\frac{M_T}{M_0} = \frac{G}{G_H}\left(1 + \frac{1}{\bar{C}_u} - \frac{1}{\bar{C}_u}\frac{n}{n_0}\right) \\ &\frac{M_R}{M_0} = \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 = \left(\frac{n}{n_0}\right)^2 \end{aligned}\right\} \tag{11}$$

式（11）对应的汽轮机相启动工况方框图见图 3：

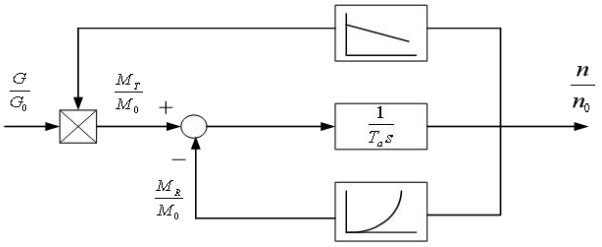


图 3　启动工况方框图

2.3 汽缸装置的数学模型

中间再热汽轮机的进汽装置主要包括高压进汽容积、中间再热器、中压调门、连通管、高压缸和中低压缸等环节。由于各部分存在较大容积，高压缸部分、中压缸和再热器部分、低压缸和连通管部分都可认为是一阶惯性环节。分别为：

$$\frac{1}{T_L s+1},\quad \frac{1}{T_R s+1},\quad \frac{1}{T_H s+1}$$

其中，T_H 为高压调节阀后蒸汽容积时间常数，T_R 为中间再热器的蒸汽容积时间常数，T_L 为连通管的蒸汽容积时间常数。

各部分连接后，总系统框图如图 4：

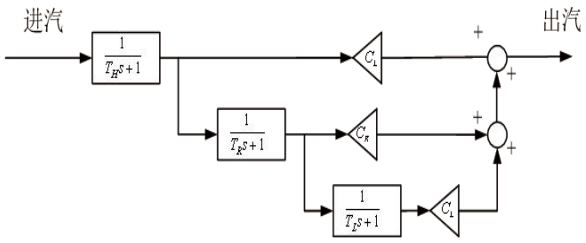


图 4　容汽系统框图

C_H、C_R、C_L 分别为高、中、低压缸部分功率占总功率的百分比，其总和即总功率为 1。

2.4 液压系统的数学模型

2.4.1 电液伺服阀数学模型

力矩马达传递函数:

$$G\left(\frac{s^2}{\omega^2} + \frac{2\zeta}{\omega}s + 1\right)\Delta\theta + (r+b)k_f\Delta x_v + rA_n P_{lp} = k_i\Delta i \tag{12}$$

式(12)中，方程已建立起力矩马达输入电流信号Δi与输出信号衔铁偏转角$\Delta\theta$之间的关系。[1]

其中，k_i—电流增益；G—力矩马达总刚度(包括静弹簧刚度和反馈杆的刚度)；ω—力矩马达固有频率，ζ—力矩马达阻尼系数；r—喷嘴到弹簧竹回转中心距离，m；b—小球中心到喷嘴的距离，m；K_f—反馈杆弹簧刚度，N/m；Δx_v—滑阀位移；A_n—喷嘴喷口面积，m^2；P_{lp}—两喷嘴腔的压差，Pa。

衔铁偏转角θ与挡板位移 x_f 的关系为：$x_f = r\theta$。[1]

液压前置级传递函数:

力矩马达的输出量,可以改变喷嘴挡板间的距离，从而使喷嘴两腔室产生压差而控制滑阀运动，也就是压差 P_{lp} 作用在滑阀端面积 A_v 上，此力要克服反馈杆小球的力，稳态、瞬态液流力和滑阀惯性力。故滑阀的动态特性:

$$\frac{\Delta x_v}{\Delta x_f} = \frac{k_{qp}/A_v}{s\left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\zeta_h}{\omega_h}s + 1\right)} \tag{13}$$

其中 k_{qp}—喷嘴挡板流量压力系数；A_v—滑阀端面积；ω_h—前置级液压自然频率，ζ_h—前置级液压阻尼系数；

由式（12）和（13）推导建立伺服阀的传递函数是个五阶系统，为得出简单明确的结论及实用的传递函数，需要对次要环节进行简化和忽略，以达到对传递函数进行简化而不失真。我们在一般伺服控制系统中，经常可以把电液伺服阀简化为二阶传递函数环节。[1]则伺服阀滑阀位移和线圈电流的关系可以用如下方程描述:

$$x_v = \frac{k}{\frac{s^2}{\omega^2} + \frac{2\delta}{\omega}s + 1}i \tag{14}$$

其中$\omega = 2\pi f$为伺服阀振荡环节角频率 rad/sec，δ 是电液伺服阀的阻尼系数，k 为电液伺服阀静态增益。

2.4.2 油动机数学模型

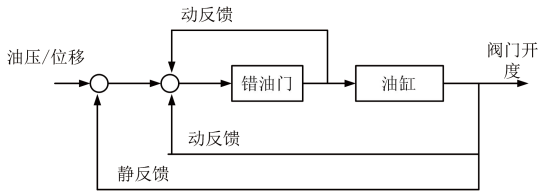


图 5　油动机原理性结构框图

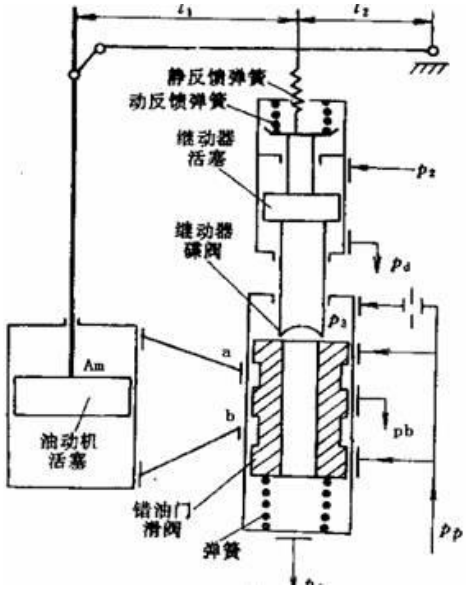


图 6　油动机结构图

高压抗燃油系统中油动机多采用如图 5~6 结构，电液转换器输出（即油动机输入）与油动机输出成比例一一对应，故经拉氏变换后可将其视为积分环节：$\frac{1}{T_M S}$。其中，T_M 为油动机时间常数，不同的机组油动机时间常数相差较大，这里选 T_M =0.3s。

2.4.3 阀门位置传感器数学模型

阀门位置传感器使用线形差动式压差变送器 LVDT，可将其视为纯比例环节，$k=1$。

2.5 转速测量环节

在转速控制回路中，转速信号是汽轮机的控制信号，这个信号的测量精度以及它的测量变送器的可靠性决定了汽轮机的安全运行。

2.5.1 转速传感器——磁阻发生器

汽轮机测量转速的传感器，多使用磁阻发生器，它将汽轮机的转速转换为相应频率的电压信号。磁阻发生器的齿轮安装在汽轮发电机主轴上，其感应电动势的交变频率可用下式表示：F= $\frac{nz}{60}$

其中，z—齿轮的齿数；n—汽轮机转速，$r/\min$。为便于转速的转换和用数字显示，常采用 60 齿的齿轮 $z=60$。这样汽轮机转速在数值上即为感应电动势的频率。而由于转速测量只使用磁阻发生器感应电动势的频率，故对输出电压的幅值信号没有严格要求，它只要可以被转速测量卡或转速测量变换器接收即可。

2.5.2 转速测量卡

在数字式电液调节系统中，多采用专用的转速测量卡作为转速测量变换器。它将磁阻发生器测得的转速脉冲信号转换，经通信方式送到主计算机，作为电液系统的转速负反馈，并通过 CRT 显示汽轮机实际转速。这种转速测量卡对转速测量的采样速率要求很高，所测得的转速能精确的代表汽轮机的实时转速。采样时间为 3~5ms。

如上所述，可将转速测量环节等效为比例系数 $k=1$ 的纯比例环节。

3　汽轮机转速控制器的设计

数字电液控制器是采用计算机技术对液压机构运行执行的运算和软件编程，以控制器为大脑，以液压机构为执行机构，实现控制功能。

本节主要针对汽轮机转速调节回路设计阀门伺服控制器以及转速调节器。转速调节回路主要在汽轮机升速、并网及甩负荷过程中控制转速，它是基于转速 PID 的控制系统。其基本工作原理和组成见第 2 节。

3.1 汽轮机阀门伺服控制器的设计

汽轮机电液调节器有多个控制回路及多个控制参数，通过对这些参数如转速、功率、压力等的闭环控制，实现汽轮发电机组的运行。

3.1.1 模拟式伺服控制器的设计

3.1.1.1 广义对象模型[2]的建立

根据 2.3.3 节中液压系统的数学模型，建立传递函数模型如图 7：

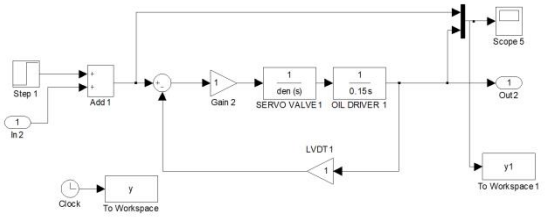


图 7　无伺服控制器的闭环系统模型

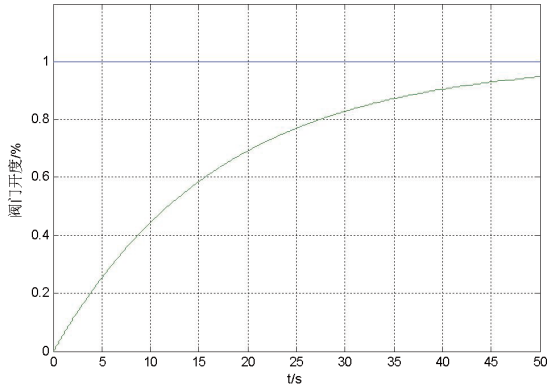


图 8　无伺服控制器时系统的阶跃响
（注：横坐标：t/s，纵坐标：阀门开度（0~100%）

图 8 为系统无调节器时的阶跃响应仿真曲线，通过此曲线可以看出此系统具有自稳定性。

3.1.1.2 设计模拟 PID 伺服控制器

下面将针对上节建立的闭环模型，设计 PID 伺服控制器。

如图 9 用模拟的方法分别设计理想 PID，实际 PID，以及不完全微分 PID 控制器。

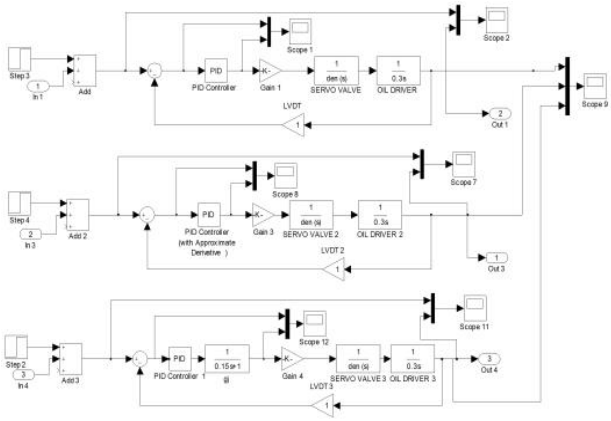


图 9　从上至下依次为理想 PID，实际 PID，不完全微分 PID 控制模型

调整 PID 参数：给定阶跃输入作为激励，根据经验法手调 PID 参数。

（1）根据经验确定一组调节器参数；

（2）投入闭环运行，加入阶跃扰动；

（3）观察调节器输出变化，并依照各参数对调节过程的影响，改变相应的参数。

反复试验，得到符合控制要求的阶跃响应曲线。

各控制器系统阶跃响应曲线和控制器输出曲线如图 10~13。

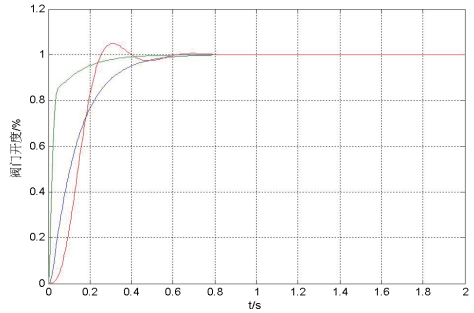


图 10 不完全微分 PID（红）、理想 PID（绿），一般 PID（蓝）控制下的阶跃响应
（注释：横坐标：t/s，纵坐标：阀门开度（0~100%））

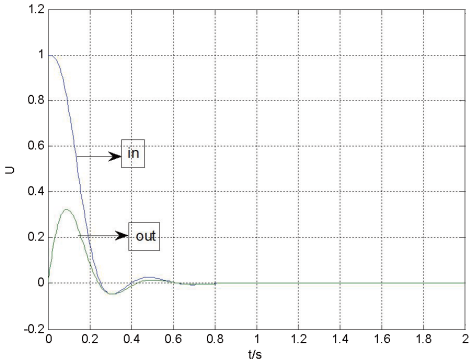


图 11　理想 PID 在单位阶跃激励下的控制器输出
（注释：横坐标：t/s，纵坐标：控制器的输出 U）

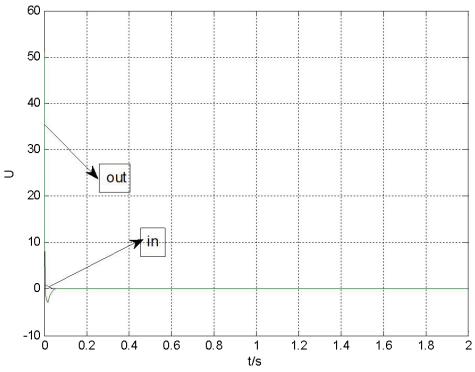


图 12　实际 PID 在单位阶跃激励下的控制器输出
（注释：横坐标：t/s，纵坐标：控制器的输出 U）

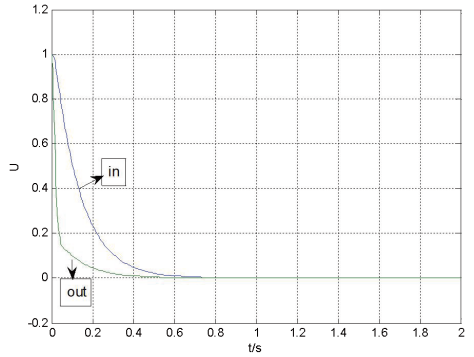


图 13　不完全微分 PID 在单位阶跃激励下的控制器输出
（注释：横坐标：t/s，纵坐标：控制器的输出 U）

经过对比，一般PID调节器在单位阶跃输入时，其微分作用只在开始阶段起作用，此后尽管依然存在，但由于偏差的变化速度为零，微分不再起作用，且在初始一段时间由于微分作用过强，在采用数字式控制器时容易引起溢出。而采用不完全微分PID算法可以克服上述缺点和提高抗干扰性，在实际应用时常在微分项或理想PID后加一个低通滤波器，构成不完全微分控制器（本文中采用的是后者）。

不完全微分的PID结构如图14。

$$G_{c1}(s)=K_1(K_{p1}+\frac{K_{i1}}{s}+K_{d1}s)\frac{1}{1+(K_{d1}/K_d^{'})s} \quad (15)$$

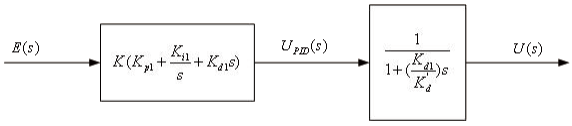


图14　不完全微分PID结构

最终控制器传函为

$$G_{c1}(s)=800(1+\frac{0.001}{s}+0.1s)\frac{1}{0.15s+1} \quad (16)$$

3.1.2 设计数字PID伺服控制器

根据上节整定好的PID控制参数，设计数字式PID：

设计思路：采用数字控制器的间接设计方法。根据上面设计的模拟控制器，采用双线性变换的离散化方法将Gc(s)离散为D(z)，选零阶保持器，根据实际系统要求采样周期T=5 ms。最后仿真校验性能指标。仿真模型及结果见图15~17。

模拟控制器离散化结果：

$$D_1(z)=800\frac{0.6721z^2-1.311z+0.6393}{z^2-1.967z+0.9672} \quad (17)$$

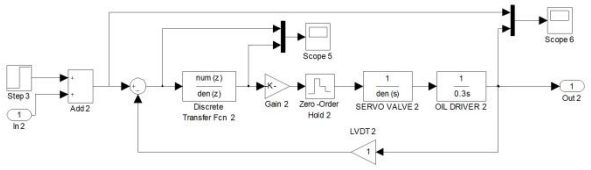


图15　数字式PID控制仿真模型

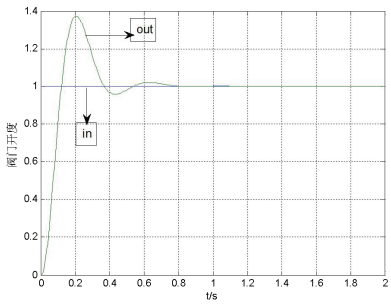


图16　数字式不完全微分PID控制器的阶跃响应，
（注释：横坐标：t/s，纵坐标：阀门开度（0~100%））

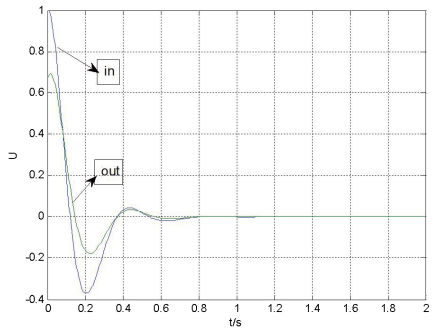


图17　数字式不完全微分PID在单位阶跃激励下的控制器输出

（注释：横坐标：t/s，纵坐标：控制器的输出U）

3.2 汽轮机转速调节器的设计

3.2.1 系统回路Simulink模型

根据3.2节中建立的系统各环节传函，建立模型如图18~21。给定阶跃输入，观察响应曲线图22，此系统具有自稳定性。

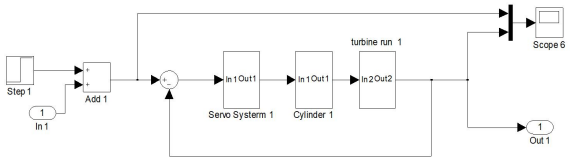


图18　无调节器的闭环系统模型

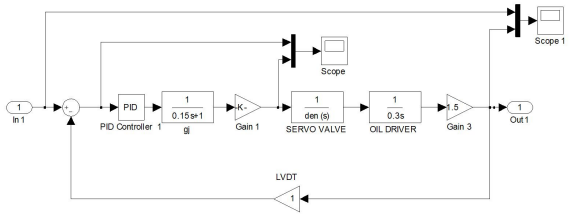


图19　液压伺服系统模型（servo systerm1）

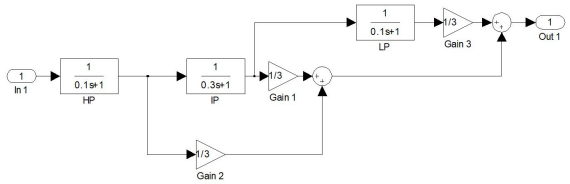


图20　汽缸部分模型(cylinder1)

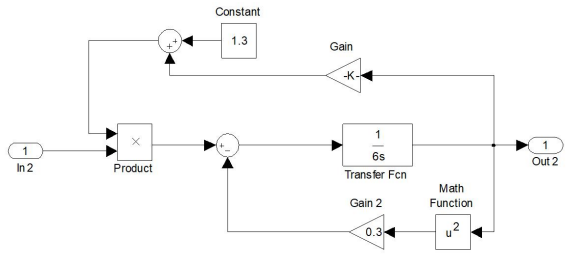


图21　启动时转子模型(turbine run1)

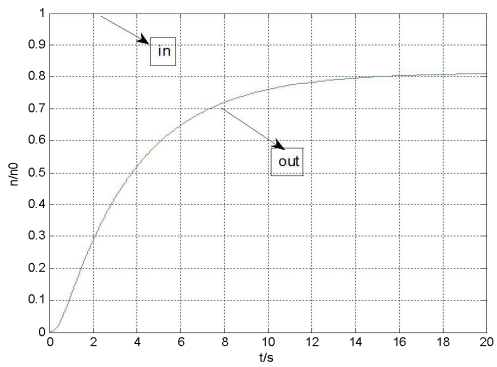


图 22　无调节器时系统的阶跃响应
（注释：横坐标：t/s，纵坐标：实际转速与额定转速（3 000 r/min）的比值（0~100%））

3.2.2 模拟式转速控制器设计

根据上节建立的系统数学模型，设计模拟 PID 控制器。

由于对象环节复杂，并且存在非线性，难于确定其精确的数学模型，故控制器参数采用常规整定方法实现困难。本论文采用了王亚刚等提出的“基于两个连续继电反馈试验辨识二阶加纯滞后模型的 PID 控制器参数的整定方法”。[3]

被控对象数学模型结构如下（二阶加纯滞后）：

$$G_P^{'}(s)=\frac{e^{-sL}}{as^2+bs+c} \tag{18}$$

其中 a，b，c 和 L 是有待确定的参数，a，b，c 的不同取值决定了模型的极点，可以是实数或虚数极点。这样模型就可以表示广泛的工业过程，包括低阶的和高阶的、小时滞的和大时滞的、单调阶跃响应的和振荡阶跃响应的过程。

1）辨识二阶+纯滞后模型

为了确定模型式中四个未知参数 a，b，c 和 L，可选择过程对象 Nyquist 图上的两点 ω_1 和 ω_2，使得

$$G_p^{'}(j\omega_1)=G_p(j\omega_1),\ G_p^{'}(j\omega_2)=G_p(j\omega_2) \tag{19}$$

$$\text{其中}\ \angle G_p(j\omega_2)=-\pi,\ \angle G_p(j\omega_1)=-\frac{\pi}{2} \tag{20}$$

这两点的频率特性可以容易的通过两个连续的继电反馈实验获得，如图 23~24 所示。

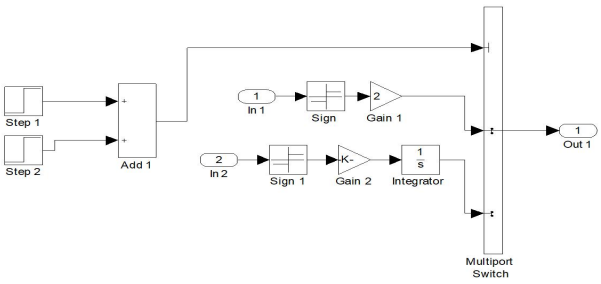


图 23　继电反馈实验

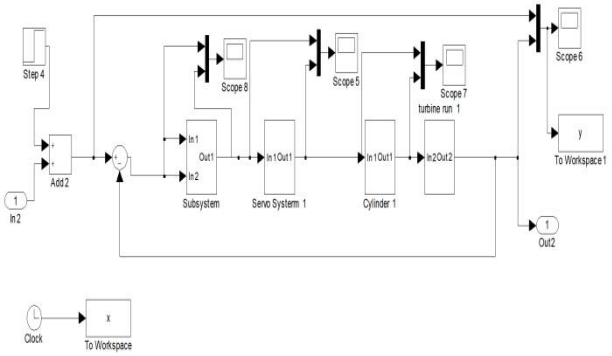


图 24　继电环节模型

在整定模式下，进行继电反馈的实验；在整定模式下，进行改进型继电反馈实验。测得临界振荡频率和以及过程对象在临界振荡频率点的增益和。

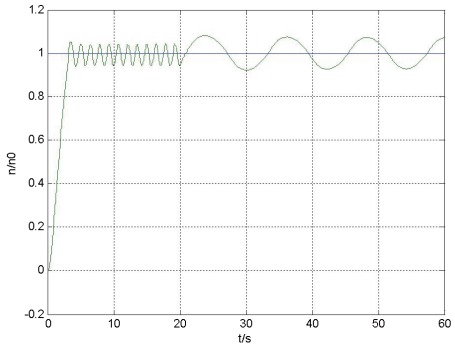


图 25　继电反馈环节输出

$$K_1=K_c=\frac{\pi m}{4d} \tag{21}$$

$$K_2=K_b=\frac{\pi m\omega_b}{4d} \tag{22}$$

式中，d—继电环节的振幅；m—继电反馈的实验输出的等幅振荡的幅值。

根据如下方程组：

$$\left.\begin{aligned}
&a=\frac{1}{\omega_1^2-\omega_2^2}\left(\frac{\sin(\omega_1 L)}{K_1}+\frac{\cos(\omega_2 L)}{K_2}\right)\\
&b=\frac{\sin(\omega_1 L)}{K_1\omega_1}\\
&c=\frac{1}{\omega_1^2-\omega_2^2}\left(\frac{\omega_1^2\sin(\omega_2 L)}{K_2}+\frac{\omega_2^2\cos(\omega_1 L)}{K_1}\right)\\
&\frac{\sin(\omega_1 L)}{\cos(\omega_2 L)}=\frac{\omega_1 K_1}{\omega_2 K_2}
\end{aligned}\right\} \tag{23}$$

根据式（23）可求得参数 a，b，c 和 L 的值，从而得到等效的二阶加纯滞后模型 $G_p^{'}(s)$。

2）基于二阶加纯滞后模型的鲁棒性能指标的 PI 控制器参数整定

鲁棒性能指标定义如下：

$$\frac{1}{\lambda}=\max_{0\le\omega<\infty}\left|\mathrm{Re}[G_c(j\omega)G_p(j\omega)]\right| \tag{24}$$

约束条件是 $G_c(j\omega)G_p(j\omega)$的 Nyquist 图在左半复平面上与通过的平行于虚轴且间距为$1/\lambda$的直线相切。它的取值一般为1.5～2.5。

设过程对象的传递函数为

$$G_p(j\omega)=\alpha(\omega)+j\beta(\omega) \tag{25}$$

根据继电反馈实验：

$$\left.\begin{aligned}\alpha(\omega)&=\frac{\left(c-a\omega^2\right)\cos(\omega L)-b\omega\sin(\omega L)}{\left(c-a\omega^2\right)^2+b^2\omega^2}\\ \beta(\omega)&=\frac{-\left(c-a\omega^2\right)\sin(\omega L)-b\omega\cos(\omega L)}{\left(c-a\omega^2\right)^2+b^2\omega^2}\end{aligned}\right\} \tag{26}$$

设计 PI 控制器的结构为

$$G_c(s)=K_p+\frac{K_i}{s} \tag{27}$$

即 $G_c(j\omega)=K_p-j\dfrac{K_i}{\omega}$ （28）

利用如下公式，可求得 K_P，K_i 的值

$$K_i=-\frac{\lambda\omega_{90}}{\beta(\omega_{90})} \tag{29}$$

$$K_p=\frac{1}{\alpha'(\omega_{90})}\left[\frac{\lambda\beta'(\omega_{90})}{\beta(\omega_{90})}-\frac{\lambda}{\omega_{90}}\right] \tag{30}$$

其中，取鲁棒性能指标 $\lambda=2$。

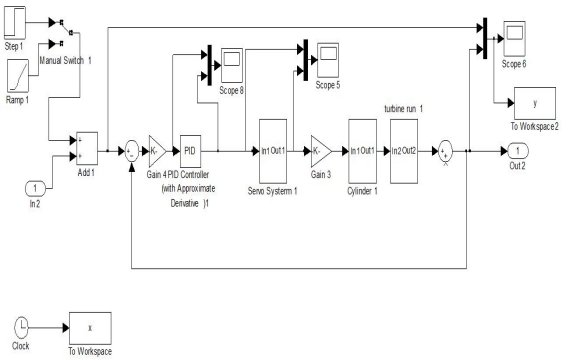


图 26　模拟 PI 控制系统模型

得到 PI 控制器为的参数初值，在此基础上再进一步调整放大环节参数，最终可得到 PI 控制器模型如下：

$$G_c(s)=K(K_p+\frac{K_i}{s}) \tag{31}$$

$$G_c(s)=300(1+\frac{0.052}{s}) \tag{32}$$

控制系统总的仿真模型见图 26。仿真的控制器波形如图 27~29。其中图 29 是斜率为 0.1 的斜坡输入相应。可以看到此方法给出了较为满意的控制效果，控制器可以满足要求。

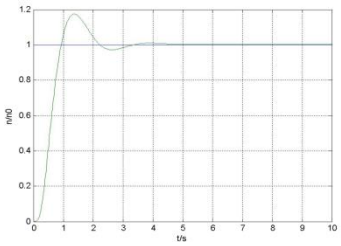


图 27　系统模拟 PI 控制器的阶跃响应

（注释：横坐标：t/s，纵坐标：实际转速与额定转速（3 000 r/min）的比值（0~100 %））

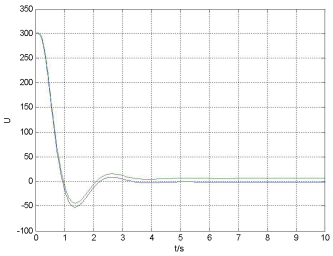


图 28　模拟 PI 调节系统在单位阶跃激励下的控制器输出

（注释：横坐标：t/s，纵坐标：控制器的输出 U）

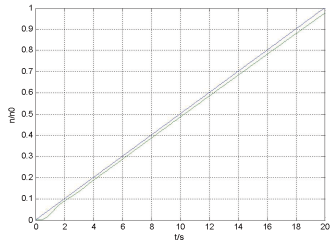


图 29　系统模拟 PI 控制器的斜坡响应

（注释：横坐标：t/s，纵坐标：实际转速与额定转速（3 000 r/min）的比值（0-100 %））

3.2.3 数字式控制器的设计

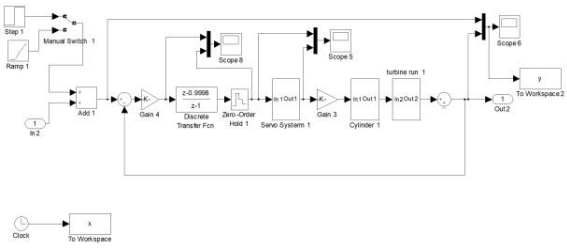


图 30　数字式 PI 控制系统模型

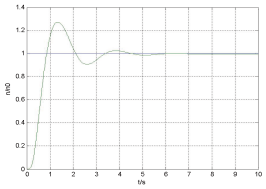


图 31　系统数字 PI 控制器的阶跃响应

（注释：横坐标：t/s，纵坐标：实际转速与额定转速（3 000 r/min）的比值（0~100 %））

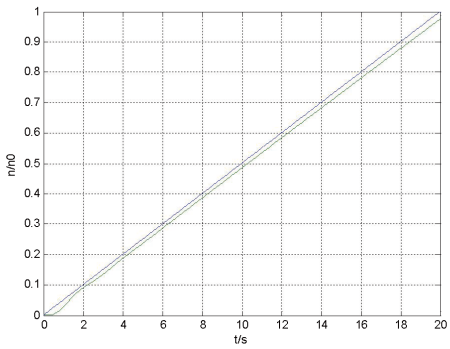


图 32　系统数字 PI 控制器的斜坡响应

（注释：横坐标：t/s，纵坐标：实际转速与额定转速（3 000 r/min）的比值（0~100 %））

采用 3.1.1.3 节与伺服控制器相同的离散化方法得到数字式转速调节器如下：

$$D_1(z)=800\frac{0.6721z^2-1.311z+0.6393}{z^2-1.967z+0.9672} \tag{33}$$

数字式控制回路的系统模型见图 30，仿真输出阶跃响应曲线见图 31，数字式控制器可以实现与模拟式控制器基本相同的控制效果。

在 t=6s 时，在系统输出端加入幅值为 0.1 的阶跃干扰，观察系统输出波形如图 34。

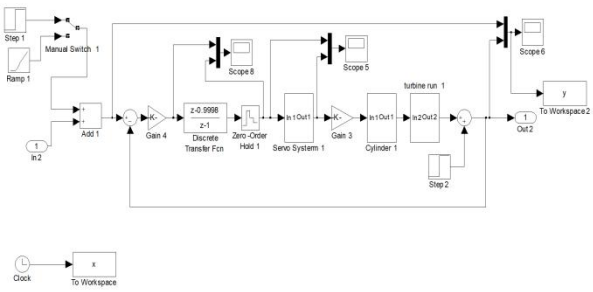


图 33　系统输出端加入阶跃干扰

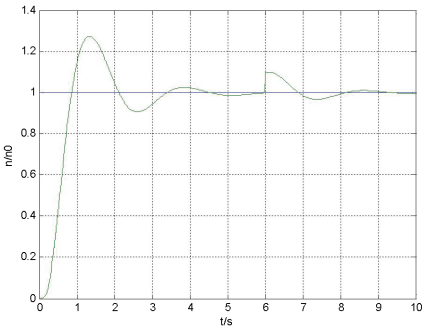


图 34　在 t=6s 时系统输出端加入幅值为 0.1 的阶跃干扰的仿真波形

（注释：横坐标：t/s，纵坐标：实际转速与额定转速（3 000 r/min）的比值（0~100 %））

仿真结果分析：采用此具有鲁棒性能指标的 PI 控制器对控制汽轮机模型的主要参数输出有较大帮助，对汽轮机模型的不确定性具有良好的适应性和鲁棒性。不仅提高了控制器输出的鲁棒稳定性也增加了其抗干扰的能力，对汽轮机控制安全性的提高也有一定的正向影响。

4　结语

本文首先分析了现有蒸汽式汽轮机及调速系统的特性及工作原理，然后根据汽轮机控制系统的动静态特性、动静态特性的主要衡量指标以及影响动静态性能的因素设计了汽轮机转速调节器及阀门伺服控制器。本文对目前广泛采用的数字式电液调节系统建立了电液转换器等主要控制环节的数学模型，同时对此模型作了比较全面而透彻地分析。为了进一步提高汽轮机的动态控制性能，在辨识模型的基础上设计了基于鲁棒控制指标的 PI 控制器。根据仿真结果可以得出，采用此控制器能够很好的提高汽轮机系统的鲁棒稳定性及抗干扰能力。能够较好的控制汽轮机主要参数的输出，对汽轮机模型的不确定性具有良好的适应性和鲁棒性。

由于试验条件局限性，文中还有许多地方值得做进一步的研究。

（1）虽然本文对汽轮机及其调节系统作了比较详尽的分析，但是由于实际中的各环节复杂的多，还有许多非线性，并且文中主要研究分析了转速控制 PI 系统，而此控制器对于其他相关环节的影响还需要做进一步的研究。

（2）虽然本文详细讨论了基于继电反馈试验的系统辨识方法，对具体的 DEH 模型进行了辨识，并在此基础上设计了基于鲁棒控制指标的 PI 控制器，但也只是进行了理论上的研究，对于实际工程上的应用还需要做更为广泛深入的探索。

参考文献：

[1] 上海新华控制技术（集团）有限公司. 电站汽轮机数字式电液控制系统—DEH[M]. 中国电力出版社, 2005

[2] 胡念苏. 汽轮机设备及系统[M]. 中国电力出版社, 2006

[3] 李宜达. 控制系统设计与仿真[M]. 清华大学出版社, 2004

数字能源管理技术在大型能源装备制造企业的应用与探索

王文波　文永寿　肖向东　郭光强　吴业俊　杜毅

东方电气集团东方锅炉股份有限公司，成都 611731

摘要：针对大型能源装备制造企业在能源管理过程中遇到的常见问题，东方锅炉搭建了“四统一可”的能源智慧管理平台，建立了五级能源监测体系，开展能源监测统计、能耗异常诊断、公辅系统与重点生产工序的能源精细化管理等，单位万元能耗显著下降，能源综合利用率提升，企业的运营成本逐步下降，企业竞争力持续增强。

关键词：数字能源管理；能源监测；节能诊断

中图分类号：F426.2　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）06-0080-05

Application and Exploration of Digital Energy Management in Energy Equipment Manufacturing Enterprises

WANG Wenbo, WEN Yongshou, XIAO Xiangdong, GUO Guangqiang, WU Yejun, DU Yi

(Dongfang Boiler Co., Ltd., 611731, Chengdu,China)

Abstract: In response to the common problems encountered by large energy equipment manufacturing enterprises in the energy management process, Dongfang Boiler has built a "four unified and feasible" energy intelligent management platform, established a five level energy monitoring system, carried out energy monitoring statistics, energy consumption anomaly diagnosis, and refined energy management of public and auxiliary systems and key production processes. It has achieved monitoring of 8 energy media (working fluids) such as water, electricity, and natural gas, covering more than 1000 meter terminals and parameter management of more than 2000 measurement points, significantly reducing energy consumption per 10000 yuan and achieving significant results.

Key words: digital energy management; energy monitoring; energy saving diagnosis

近年来，在“双碳”背景的战略驱动下，国家各部委及政府紧密围绕各领域节能工作的政策频出，各大领域绿色低碳的发展方向愈发明确，工业领域也围绕能效提升出台了重点领域节能降碳、改造升级等具体实施要求。[1]2022 年 1 月 24 日，国务院印发《“十四五”节能减排综合工作方案》，对单位国内生产总值能源消耗、能源消费总量以及具体排放指标都提出了明确要求并给出时间表。[2]

数字能源管理的建设方面，东方锅炉在全面落实国务院国资委关于加快推进国有企业数字化转型等工作要求的基础上，深入落实集团公司“11256”发展战略，以价值创造为导向，以新型能力建设为主线，以数据为关键驱动要素，提出建设具有东锅特色的能源动力智慧管理系统，提升能源管理水平、降低企业运营成本，提升企业竞争力。

1　建设目标

东方锅炉能源动力智慧管理系统，其目标是建设“一统四可”的智慧能源动力系统，一统指的是

收稿日期：2024-05-21

作者简介：王文波（1972—），男，1996 年毕业于四川轻化工学院机电工程专业，大专，工程师。现在东方电气集团东方锅炉股份有限公司从事工业节能研究与节能技术推广工作。

建设一个统一的能源管理平台，实现东方锅炉水、电、气等多种能源统一管理，全流程管理；四可指的是能源的 “可视化、可分析、可优化、可控制”，实现东方锅炉能源的采集、监测、分析、优化及智能化管理，提高能效水平，持续降低用能成本，创造能源管理价值。

主要实现如下目标：

（1）能源数据全局感知。实现企业生产涉及的主要能源介质（工质）如：水、电、天然气、压缩空气、氩气、二氧化碳、混合气等的数据全局感知，结合生产实际和能源管理需求建立完善的监测指标和控制指标，实现能源产耗指标动态管理。

（2）能耗智能诊断与分析。以能源信息数据采集为基础，建立涵盖生产工序用能分析与评价平台，通过对比分析、关联分析，为工序用能提供指导与改进依据，实现持续降低用能成本。可实现厂区能耗分析、产线能耗分析、单品能耗分析、产值能耗分析等。

（3）能源平衡分析及漏损检测。利用先进全景信息的展示技术，建立全流程能源管理综合展示平台，实现企业各种能源系统全景化、图形化、立体化、互动化展示。

（4）能源管理优化功能。对能源生产全过程进行能耗能效评价分析，通过多能源介质和多能流的动态平衡分析和预测分析，建立能源流、价值流及设备状态的动态平衡优化体系，进而有效降低能源损失，提高能源转化效率，降低企业能源成本，实现能源价值最大化的目的。

（5）健全能源考核指标体系。通过能源考核挖掘各能源子系统能效潜力，提高管理水平。通过指标比对、追溯查询等分析功能，最终实现系统对重点耗能工序考核。

2 技术路线

2.1 系统架构

系统平台架构由设备层、感知层、平台层、应用层和可视化层五部分组成（图 1），按照相关的信息安全、数据安全、网络安全等规范体系设计，系统各服务均采用了分布式设计技术。系统数据库将实时数据库和历史数据库相结合，实现强大的数据存储、运算和分析能力。通过 4G、5G、wifi、NB 等方式混合组网，并支持 Modbus、Profibus、TCP/IP、OPC 等多种通信规约与现场设备或三方系统进行通讯，接收数据作为展示、统计分析的依据，为上层应用软件提供能源相关的分析报表和结果。

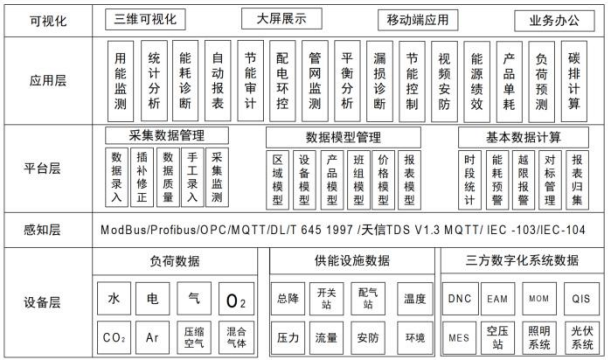


图 1　系统架构

2.2 关键技术

2.2.1 多源异构能源数据融合技术

系统采集数据不仅涉及水、电、天然气、氩气等 8 种能源介质、还有供能设施的连续运行数据及开关状态、温度传感器、烟感信号、水浸等信号；除此以外，还有来自 DNC、数字化车间等第三方系统繁杂的生产或管理数据，这些数据来自不同的源头，以不同的形式、不同的结构、或使用不同的标准、不同的采集频率、数据质量参差不齐，这些都对数据融合提出了巨大的挑战。

因此融合这些多源异构数据通常需要进行数据清洗、转换和整合的工作。多源异构数据源融合就是将来自不同数据源、不同格式或不同结构的数据整合在一起，以便进行更全面、准确的分析和决策。[3]

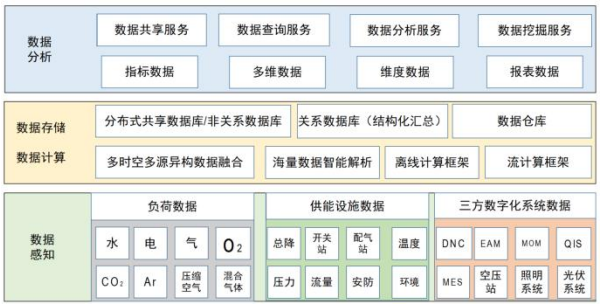


图 2　多源异构数据的海量存储

这需要对来源数据进行“采集-清洗-汇集-融合”全过程的多源异构数据融合处理。

（1）数据采集。这个环节的主要作用是将设备运行的数据根据工程实际情况采用多种采集方式（如有线/无线/4G/wifi 等）进行数据的统一采集,然后根据数据的类型和实际业务需求按照一定的采集频率完成抽取和传输,形成标准、易用的多个原始数据库，并完成结构化数据的元数据提取、结构化转换等使得来源广泛的各类数据都具有结构化表征，便于业务的数据访问。

（2）数据清洗。这个环节的主要作用是数据的错值/坏值/假值的清除、缺失数据插补、数据对齐。由于能源表计涉及的批次、品牌、质量等都不相同，有些设备或系统老旧,进入系统的“脏数据”普遍存在,需按照数据质量标准，结合业务实际情况进行逐一审查和校验,清除有问题的数据，保证数据质量。

（3）数据汇集。主要作用为将采集的各设备或子系统的数据完成汇总、转换、归一化处理等一系列工作，并根据业务的特点和需求分类建立不同的数据模型,能更好或更方便的为能源管理应用服务。

（4）数据融合。主要作用是通过对原本多个源头、不同结构的数据根据业务的实际需要进行融合处理。具体地，在能源管理场景下，特别是在复杂场景的能耗诊断，重点用能设备的能耗分析等，可将多种能源介质、生产工单、工艺数据进行融合，挖掘企业隐藏的节能潜力。

2.2.2 基于数据驱动的节能诊断技术

近年来，随着“大-智-物-移-云”等技术的快速发展，企业生产能耗数据、工业生产数据非常容易获取，大数据存储的技术也日益成熟，这些数据可将工业生产过程较为准确与完整的进行记录。具体地，在能源管理与节能诊断方面，可基于上述数据结合业务场景可建立所需的不能的能耗诊断模型，完成对重点工序或能耗设备的能耗诊断。这种基于数据驱动的方法避免了花费大量精力研究和建立相关的能耗机理模型，仅从数据的角度去发现问题，形成能耗诊断专家知识库。

首先，需要对诊断对象的用能数据、生产数据、设备运行数据按照业务要求，进行统一采集与管理，形成对象节能诊断的标准的原始能耗数据集。

其次，对原始能耗数据集进行分级离散化处理，然后利用关联规则算法挖掘生产能耗与过程对应变量之间的内在关系，形成典型的能耗数据特征集。

最后，筛选出能耗相关数据的强关联规则，还需完成计算结果的解析，然后结合相应的生产工艺（如热处理、焊接等），将有实际工程意义的强关联规则或算法包纳入企业能耗诊断专家知识库，进一步完善企业的重点工序与设备的节能诊断知识图谱。

系统从数据驱动的角度出发，构建了一个大数据驱动的分析框架，侧重于对重点用能设备的运行指标分析，通过数据挖掘等主流技术，并根据数据特点构建独立且完善的检测模型，实现设备异常的精准定位及实时报警，例如长时间待机、过度加热、频繁启停、管网漏损等设备异常状态，以此发现公司生产过程中的用能薄弱点，实现节能诊断（图 3）。

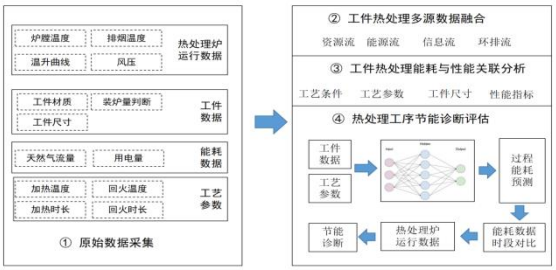


图 3 基于数据驱动的热处理工序节能诊断

2.2.3 能源装备一体化全景智能感知技术

融合三维可视化技术，建立“公司-基地-车间-设备”多维度设备能源一体化监测体系，主要用于开展企业能源数据融合、综合能耗分析、能源结构分析、能耗费用分析、重点用能设备监测、设备-能耗一体化感知、用能异常警告等多层级的企业能源设备状态智能感知（图 4）。[4]

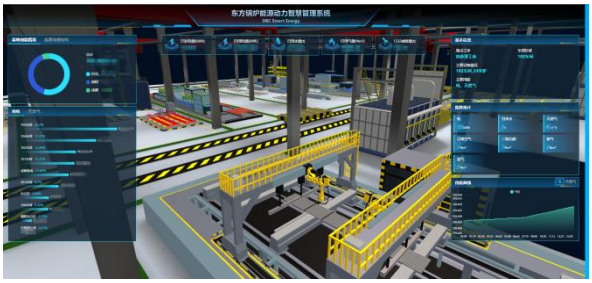


图 4 能源装备一体化数据全景感知

2.2.4 三维点云与几何特征提取技术

针对公司常年存在热处理炉工序的异形工件装炉量不合理的现象，如果采用机器视觉技术，对实现高温/复杂构件的几何特征提取，实现对工件体积计算，可用于热处理炉装炉监测与管控，并有效降低热处理工序的产品单位能耗。

在三维点云扫描技术中，点云上采样任务是一项重要的点云数据处理工作，其结果的好坏关系着下游多种任务的优劣，本项目探索使用融合三维点云与几何特征提取技术[5]（图 5），以期提高识别图形体积的计算效率和网络性能，解决点云稠密化的问题。

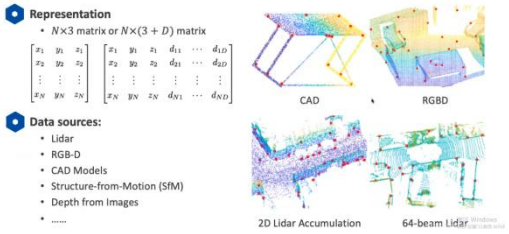


图 5　三维点云与几何特征提取

3　功能设计

3.1 海量能源异构数据采集

系统除了对企业各主要用能单位在生产涉及的水、电、天然气、氩气等常见能源介质（或工质）的数据进行采集外，还需要对重要的公用供能设施，如 35 kV 降压站、10 kV 开关站、配电所、中心水泵站、天然气配气站、天然气调压站、液态站的设施进行采集监测与管理，另外，出于对未来公司对工序和产品单耗及碳排放分析业务需求的考虑，能源管理系统还需与 DNC、数字化车间 MOM 系统，EAM，QIS 等多个第三方数字化系统互融互通，为后续业务的拓展提供数据支撑。

3.2 监测与统计分析

能源监测与统计分析，主要用于各级用能单位的能源数据实时监测、历史数据查询，以及能源综合查询、用能结构分析、能耗占比分析以及能耗费用分析，可为后续的能源管控重点工作及节能方向提供依据和思路。同时，支持工业气体结算表自动生成与下载，并支持报表方案定义配置。

3.3 能源平衡分析

能源平衡分析，从不同层级的用能单位为分析对象，研究其在生产过程中的能源平衡关系。研究其进入用能单位的总能源、用于生产的有效用能、以及未被利用的能源（跑冒滴漏、无效浪费等）三者之间的能源平衡关系。能源管理系统，以能流图、管网图的形式通过能源平衡分析，及时发现漏损，保证企业能源损耗维持在合理水平。

3.4 能耗异常诊断

能耗异常诊断，主要对企业用能单位及用能设备开展能耗突增诊断、能耗时段诊断以及系统告警等（包含遥测数据告警、开关跳变告警、能耗超限预警等多种告警种类），主要用于发现能耗短时大幅偏离历史水平的异常诊断，为企业的能源敏捷管理提供依据和强力支撑。

3.5 重点工序能源管理

重点工序能源管理，主要针对重点工序如焊接工序（热丝焊、自动附件焊、管屏龙门焊等）、热处理工序等涉及多种用能的工序或设备开展用能异常诊断，从能源数据的特征参数提取分析，来发现长时间待机、忘关阀门、焊接充气时间过长等多种潜在的用能不规范的隐蔽问题，并予以及时提醒与纠正，未来考虑纳入考核指标，以此来提高用能规范行为，降低人为因素造成的浪费（图 6）。

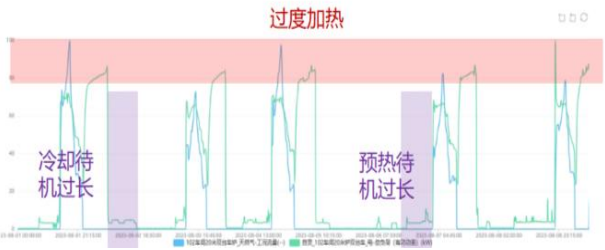


图 6　热处理能耗数据曲线

3.6 能源绩效管理

能源绩效管理，可根据用能单位或用能设备的历史用能数据水平，并结合生产计划，开展能耗限制（阈值），同时结合时间尺度（如时间占比）进行能耗预警（能耗偏离），当偏离阈值时，进行及

时报警，提醒相关部门及人员进行节能管控，避免用能大幅超标。以此收紧各用能部门的能耗预算，进一步提升各部门节能的意识，为后续的能耗考核提供一定的参考依据。

3.7 设备与计量器具管理

设备与计量器具管理，系统通过与 DNC、数字化车间、EAM、QIS 等多个系统对接，可实时掌握能源设备状态，设备备品备件以及能源计量器具送检台账等信息，用于设备能耗异常，或者计量器具损坏时，设备及器具的及时更换与维护，进一步提升系统运维效率与管理水平。

3.8 能源业务审批

能源业务审批，主要用于企业在日常生产中常见的停供能审批、临时线路停电作业、瓶装气体领用与配送等能源管理业务的线上审批。实现从“申请—审批—实施—反馈—结束”全流程线上审批，减少往日冗长的审批环节时间，还支持历史业务查询等，提高审批流转效率。

4 应用效果

经过为期两年的建设，东方锅炉完成能源动力智慧管理系统平台的建设，如图 7。

图 7　东锅能源动力智慧管理系统登录界面

经过一年多的不断探索与优化，公司充分利用能源动力智慧管理系统开展能源监测、重点工序能耗分析、重点设备用能异常诊断、加强能源绩效管理，取得明显实效，并入选工信部 2023 年能耗监测优秀场景，具体效果如下：

（1）健全公司能源监测体系。建立“公司-基地-车间-工序-设备”五级能源指标监测体系，实现企业一、二级表计 100 %全覆盖。

（2）实现海量能源数据智能感知与稳定存储。公司 8 种能源（或工质）近 1 000 个设备仪表终端、20 000 个数据测点的远程自动采集存储。

（3）降低人工成本 40 %以上。采集频率提升 10 倍，准确度接近 100 %，实现报表自动统计、能源自动结算。

（4）提升管理效率 30 %以上。打通能源与企业其他部门之间的信息孤岛，实现能源装备、生产车间、工艺部门、环保安全、企业管理、财务等多个业务部门数据共享、协同管理。

（5）助力企业节能减碳。截止 2022 年底公司万元产值综合能耗较 2020 年项目未实施之前下降 15 %，二氧化碳减排 1.015 万吨/年，氩气使用量平均下降 7 %，从降本、提效、节能降碳多个层面全面推动企业提质增效。

5 结语

东方锅炉能源智慧管理系统的建设，是大型能源装备制造企业的在能源管理数字化建设上的一次大胆尝试和探索，也取得了一定的效果，后续东方锅炉将继续从价值创造为导向，从业务实际需求出发，不断完善能源数字化管理功能，持续降低企业用能成本，推动企业的高质量发展。

参考文献：

[1] 姚刘奕，何文萱，唐海．企业能源管理系统的设计与应用 [J]. 智能制造 , 2023(4): 110-112

[2] 国务院印发《“十四五”节能减排综合工作方案》 原料用能不纳入全国及地方能耗强度和总量双控考核[J]. .上海化工,2022, 47(2):10

[3] 张延松，焦敏，王占伟，等．海量数据分析的 One-size-fits-all OLAP 技术[J].计算机学报,2011,34(10):1936-1946

[4] 汪浩，田丰，张文俊．基于 WebGL 的交互平台设计与实现[J]. 电子测量技术, 2015,38(8):119-122+128

[5] 杨军，李博赞．基于自注意力特征融合组卷积神经网络的三维点云语义分割[J]．光学精密工程,2022,30(7):840-853

面向锅炉制造企业的实验室信息化管理系统研究及应用

马雪琳[1] 陈虹[1,2] 张章[1] 李维成[1,2]

1. 东方电气集团东方锅炉股份有限公司，四川 自贡 643001；2. 清洁燃烧与烟气净化四川省重点实验室，成都 611731

摘要：针对锅炉制造企业基础实验、中试试验及实验室运行的综合管理需求，本文设计并应用了能够覆盖全工程阶段的试验数据信息化系统。通过对工作台、流程管理、工程项目管理、实验室管理、知识库、业务模型与系统管理等模块的设计，实现了试验数据格式内容的统一、实验室检测运行线上化、资源统筹管理等功能的集成，使得进一步的数据分析和应用成为可能。

关键词：试验数据；信息化管理系统

中图分类号：TP311.52；F426.4 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-9006（2024）06-0085-04

Research and Application of Test Data Information Management System for Boiler Manufacturers

MA Xuelin[1], *CHEN Hong*[1,2], *ZHANG Zhang*[1], *LI Weicheng*[1,2]

（1.Dongfang Boiler Co., Ltd., 643001, Zigong, Sichuan, China;

2.Clean Combustion and Flue Gas Purification Key Laboratory Sichuan Provincie, 611731, Chengdu, China）

Abstract: A comprehensive management system for basic experiments, pilot tests, and laboratory operations in boiler manufacturing enterprises has been designed and applied, which can cover the entire engineering stage. Through the design of modules such as workbench, process management, engineering project management, laboratory management, knowledge management, business model and system management, the unification of experimental data format and content, the online operation of laboratory testing, and the integration of resource coordination management have been achieved, making further data analysis and application possible.

Key words: test data; information management system

试验是基础研究的重要手段，为产品设计、改进及制造过程中的故障诊断提供了重要的数据支撑，是产品研发过程中不可或缺的重要环节。[1]某大型锅炉制造企业积累了大量实验数据，包括煤、生物质等燃料的分析检测和机理研究数据、小试中试等不同规模的各种试验台架上的试验研究数据、产品的现场调试和性能考核试验产生的数据。这些数据和基于这些数据提炼出的主要规律和形成的重要认识，共同构成公司技术开发以及产品设计和优化的基础，对公司的技术和产品的发展具有不可替代的重要作用。

实验室信息管理系统（Laboratory Information Management System，LIMS）产生于 20 世纪 70 年代，LIMS 在国外发达国家已经广泛应用，而国内实验室应用 LIMS 的时间较短，最早引入 LIMS 的主要是国家重点实验室、石油化工以及生物医药实验室。[2]类似的试验数据管理系统目前已经应用在交通、航空航天等各个领域：广西百色某公司研究

收稿日期：2023-12-20

作者简介：马雪琳（1995－），女，2021 年毕业于哈尔滨工业大学仪器仪表工程专业，硕士研究生。现在在东方电气集团东方锅炉股份有限公司技术创新中心，主要从事基础研究工作。

的高速公路隧道试验检测信息化管理系统[3]融合了公路工程试验检测单位的质量体系、项目管理、数据管理等方面的功能需求，包含建设项目信息管理、组织及仪器设备管理、质量体系管理、检测项目管理和监控测量数据处理等模块，目前已应用在某隧道路段；甘肃省交通科研研究院集团有限公司将LIMS系统应用在公路工程试验检测中[4]，从样品管理、客户管理、费用管理、试验检测管理、监控预警、数据管理、资源管理等方面研究探讨LIMS系统在公路工程试验检测中的应用，实现公路工程试验检测全过程、全周期溯源管理；北京航天长征飞行器研究所所建设的航天试验数据管理系统[5]针对航天产品试验种类多、数据量大、管理和挖掘应用困难的特点，实现了海量试验数据集中管理、分析处理、再利用及数据集成等功能，极大地提高了试验数据管理与分析应用的效率。

本文设计搭建了一个面向锅炉制造企业的试验数据信息化系统，在满足实验室管理和专业检测机构质量体系管理的基础上，能够对现有和未来可能产生的试验数据进行规范整合，减少信息孤岛，使试验数据更有价值。

1 现状与需求分析

目前的管理现状存在以下问题：

（1）试验数据没有统一管理。随着锅炉制造企业的试验任务不断增加，试验技术飞速发展，格式不一的试验数据急剧增长，各种试验数据基本上都分散在各种计算机、存储设备、分析仪器设备（或纸件）上，以各类电子文件的方式进行保存、整理、交流和传播。由于数据种类繁多，格式不统一，上述管理方式导致数据检索困难，数据流向不明，数据缺乏安全性，数据难于共享等等。所有这些问题都给数据管理造成巨大的压力，急需一个统一的管理平台来对这些数据进行规范的整合管理。

（2）实验室的检测任务和日常运行管理没有实现线上化。目前实验室信息管理系统在各个领域的应用已经十分广泛，对于锅炉制造企业的内部实验室而言，一个完善的实验室信息管理系统不仅能够提高检测效率、提升管理能力，同时也能够规范检测人员的操作、提高检测数据的利用效率。现有的实验室管理过程使用纸质的原始记录，不仅浪费纸张，还容易在抄写过程中出现错漏，也不方便数据分析整理。此外，设备检定到期、设备借用到期等情况也没有提示，容易出现过期问题，而线上管理则能够避免。

（3）没有统一的运行文件、试验文件存放管理平台。实验室、试验中心在运行过程中不仅会产生大量的试烧数据和检验检测数据，同时也会产生很多运行文件和记录，包括日常安全检查记录、日常管理计划文件等，这些往往留存时间长、数量多，仅用纸质文件管理十分容易出现丢失、错漏等问题，随着实验室运行年限增长还会出现纸质资料堆放过多、查找困难等问题，因此对这些文件记录进行细化管理也是十分必要的。

除此之外，试验数据管理系统还应有必须的系统管理和二次开发功能，包括数据上传模板的字段自定义、系统模块增减、用户信息更改和维护、检测报告模板修改等功能。二次开发功能能够保障系统的灵活性与可持续性，在业务内容有变化的情况下可以及时对系统结构和信息进行调整。

2 系统构成

2.1 系统功能结构

根据对数据管理现状的分析，将试验数据信息化系统的主要业务功能分为四大模块：试验数据管理、实验室管理、知识管理和系统管理。

（1）试验数据管理

试验数据管理以工程项目管理为基础，从产品的设计开始，将设计、试验、工程服务、售后问题反馈四个阶段数据统一进行管理，所有工程项目数据格式标准化、结构化。

（2）实验室管理

实验室管理包括分析测试管理、日常运行管理两个部分，分析测试管理分为检测数据管理、报告管理，日常运行管理包括实验室的资源、评价、日常检查等运行职能和资源的管理。

（3）知识管理

知识管理功能，用于存储和管理试验、实验室运行各阶段所需文件。可以根据知识文件类型进行知识分类。

（4）系统管理

系统管理包括用户管理、组织机构管理、数据查询与展示、数据对比、数据导出等，是系统各模块和逻辑的后台管理功能。

2.2 系统构成

根据系统的功能结构，将试验数据信息化系统分为业务管理和系统管理两大功能模块，其中业务管理模块为系统前台部分，包括工作台、实验室管理、工程项目管理、流程管理和知识库五个模块，系统管理则包括业务模型管理和系统管理两个模块，系统构架图如图 1 所示。

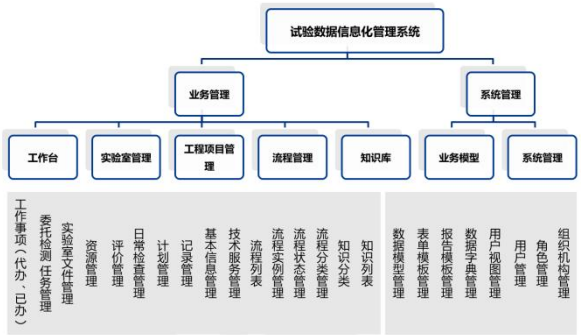


图 1　系统构架图

3　系统模块功能

3.1 工作台

工作台模块为用户提供了任务、流程、个人设置的处理界面，同时加入了消息管理和文件检索模块，能够提高用户的工作效率和工作便捷性。

3.2 流程管理

流程管理模块用于对各流程进行定义、模板修改、流程查看和删除等操作，在模块内可进行委托检测流程、耗材/药品借用流程、标准物资借用流程、设备借出及归还流程、年度仪器期间核查流程、仪器设备停用申请流程等实验室管理相关流程的发起，以委托检测流程为例，其界面如图 2 所示。该模块是实验室管理线上化的重要依托，用户和实验室管理人员可通过线上发起流程实现管理的可视化、信息化。

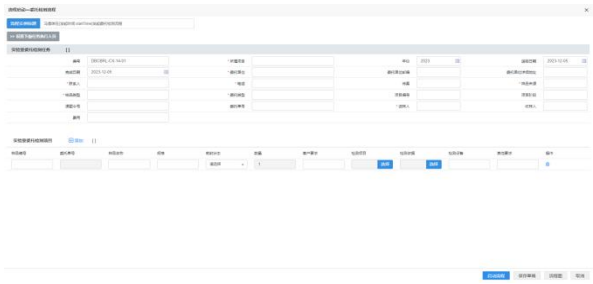


图 2　委托检测流程界面

3.3 工程项目管理

工程项目管理模块分为基本信息管理和技术服务管理两个部分，是工程项目数据和试验试烧数据的存储和管理模块。

基础信息管理模块用于整合锅炉制造项目的具体信息，整合了工程项目设计过程中的所有重要数据，为设计资料的留存提供了标准模板，同时也为后续工程项目设计和现场服务人员查阅数据提供了便捷。

技术服务管理用于收集试验试烧数据及现场服务数据，分为试验试烧、试验试烧数据、内部讨论、对外联系、现场服务几个部分。试验试烧数据及现场服务数据保存分散且没有统一收集模板，因此该模块的建立对这类数据的收集起到了很大的规范作用，项目负责人可在试烧试验之前在系统中进行试烧试验数据模板的下载，在试烧过程中按照模板进行数据收集，大大提高了数据的完整性。

图 3　工程阶段及其对应数据

工程项目管理模块将设计、试验、工程服务、售后反馈各个阶段数据进行了整合和统一管理，将各个阶段的信息串联在一起，为各部门之间的信息流通和数据应用打下了良好的基础，每个阶段及其对应的数据信息如图 3 所示。

3.4 实验室管理

实验室管理模块目前只对实验室管理人员开放，该模块的创建目的是实现实验室管理的全流程线上化，主要功能包括：委托检测任务管理、实验室文件管理、资源管理、评价管理、日常检查管理、计划管理、记录管理和历史煤质资料管理。该模块整合了实验室管理过程中产生的一切资料文件，同时有自动生成委托检测书、检测报告、检查记录等报告的功能，包括的主要模块与功能见表 1。

表 1　实验室管理主要模块及功能

模块	功能
委托检测任务管理	处理通过委托检测流程发起的检测任务，可同步检测仪器上的检测结果数据，并自动出具检测报告。
实验室文件管理	记录实验室文件管制与超期处理情况。
资源管理	包括设备管理、样品管理、耗材要因管理、标准物质管理、人员培训管理，分类建立了实验室资源管理台账，展示仪器设备及药品的有效期、借用情况、存放地点、型号参数等信息。
评价管理	涵盖了所有向实验室提供服务的服务商评价记录，包括检定/校准服务商评价、培训服务商评价、维修服务商评价、仪器耗材服务商评价、能力验证服务商评价、人员能力确认授权记录、人员能力评价基本信息。
日常检查管理	该模块用于记录基础实验室日常运行过程中产生的检查文件，包括保密执行情况检查记录、公正性执行情况检查、实验室用水确认、基础实验室安全巡查、安全防护装备及消防设施检查、修正因子登记、检测方法更新。
计划管理	用于记录实验室运行过程中所要实施的管理计划，包括管理评审计划、内审实施计划、年度培训需求计划、年度仪器期间核查计划、年度仪器设备检定计划、年度质量监控活动计划、能力验证和工作比对计划、年度内审计划。
记录管理	主要用于上传实验室三废处置记录。
历史煤质资料管理	目前整合了 1 374 条煤质数据信息，后续还将继续上传完善。

3.5 知识库

知识库模块的主要作用是上传、保存和查阅实验室运行、检测过程中产生的审批报告、检测报告、日常检查文件等数据，以及在流程管理模块、工程项目管理模块和实验室管理模块中通过系统生成的各类报告。此外该模块还用于上传前面所述各数据记录模块的数据模板，规范数据记录的统一性，增加数据可用性。

支持在线预览，包括 MSoffice、Zip、PDF、TXT 等格式。另外系统提供对文件的新增、修改、删除、上传、多文件批量上传、批量下载以及在线预览等管理功能，并能够对文档进行全新控制，所有附件类文档资料均采用加密方式进行网络传输及管理。具备国际通用的数据服务规范和快速高效多样的文件和数据检索功能。具备对非压缩文件进行全文检索。

3.6 业务模型与系统管理

业务模型与系统管理属于系统运行维护模块，用于修改或新增系统内的数据存储内容、格式、分类等信息，此外可进行用户信息、用户权限、系统安全策略等信息的定义。通过这两个模块可以实现系统面板的自定义功能，并根据人员权限分配可使用模块，大大提高了系统的灵活性和安全性。

4　结语

本文通过对锅炉制造企业的试验管理现状和管理需求进行分析，开展了面向锅炉制造企业的试验数据信息化系统的设计及建设，改善了试验数据管理分散流通困难、实验室检测任务及日常运行没有线上化、运行文件资料没有统一管理存放等问题，同时定义了试烧数据、现场服务数据的标准化模板，规范了试验过程和结果，实现了试验数据快速批量导入导出、数据在线统计、实验室资源统筹管理、检测报告自动生成、文件搜索存储、流程线上处理等功能的集成。通过本试验数据信息化系统的建设与应用，为试烧试验结束后数据的长期留存、数据共享提供了平台，使得进一步的数据分析和应用成为可能。

参考文献：

[1] 代威. 试验数据管理系统的研究与开发 [D].武汉：华中科技大学，2015

[2] 孙陆楠, 刘晓东, 关朋, 等. LIMS 在电工设备检测实验室的应用[J]. 电气传动,2021,51（20）:60-63

[3] 熊雅文, 王颁法, 罗宏伟, 等. 高速公路隧道试验检测信息化管理系统研究及应用[J].西部交通科技,2023,(8):202-205

[4] 张丽茹. LIMS 试验管理系统在公路工程试验检测中的应用[J]. 甘肃科技, 2023,39(7):61-64

[5] 赵振杰, 闫月晖, 秦绪国, 等. 基于大数据的航天试验数据管理系统建设与应用[J].智能制造,2023,(5):73-76