

ISSN 1001-9006
CN 51-1333/TM

2

2023

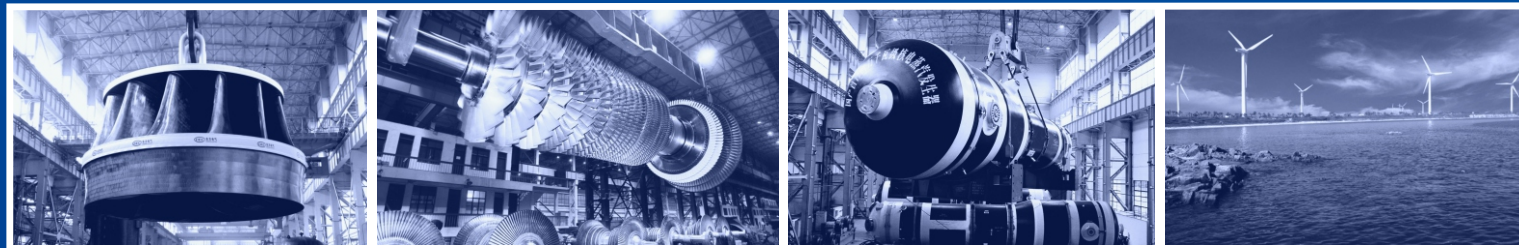
第37卷 总第146期

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

DONGFANG ELECTRIC REVIEW



东方电气评论

第三十七卷第二期

二〇二三年六月

公开 ISSN 1001-9006
发行 CN 51-1333/TM

第37卷第2期(总第146期) 国内邮发代号:62-187
出版日期:2023年06月25日 国内定价:8.00元



中国东方电气集团有限公司 主办
四川省动力工程学会



第37卷第2期 总第146期
(季刊, 1987年创刊)

東方電氣評論



目次

编辑委员会

主任委员: 王为民

副主任委员: 董娜 杨永

委员: 马擎天 王晓亮 王 愚 王建录 王拯元
方 宇 邓仲勇 乐劲松 石清华 光海杰
刘世洪 刘泰生 张启德 张国荣 邹 杰
何 维 陈文学 陈杰富 杨武勇 杨要武
杨华春 闵泽生 吴建东 赵永智 赵世全
侯小全 贺建华 钟 杰 郭 延 唐洪驹
谢光有 曾明富 赖成毅 潘乾刚 霍锁善

秘书长: 杨永

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: 王为民

副主编: 董娜 杨永

本期责任编辑: 王为民

英文编辑: 王为民

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

基础研究

面向大型锅炉装备制造行业数字化车间的制造运营管理系统功能设计与应用.....袁标 张知行 吴文亮等(1)
面向大型电站锅炉工艺BOM参数化设计研究...刘星 王林森 李勇等(6)
三菱M701F4型燃气—蒸汽联合循环机组APS“一键启停”的开发与应用.....陈琦 燕金栋 龙涛(10)
锂离子电池电解质在18650电池中的盐浓度研究.....朱睿 张中伟 王晶等(19)

核能发电

一种用于反应堆压力容器螺栓拉伸量测量的系统.....隆涛 文小军 丁然等(23)
CFR600型示范快堆蒸汽发生器关键焊接技术.....但军 李恩 蒋宇晨等(27)

风能发电

风光水多能互补系统研究展望.....晏明 刘德民 令红兵等(31)
风力发电机组极限外推参数估计对比研究...王钧 尹景勋 赵伟等(36)

光伏发电

塔式太阳能光热发电站镜场设计软件研究现状.....黄菊 鄢治国 邓彪等(41)
园区光储充能量管理系统设计及应用...王志民 林云松 鄢治国等(48)

水力发电

基于SolidWorks的抽水蓄能机组主轴密封水平台集成化设计.....颜欣 伍英岩(53)
高水头悬式抽水蓄能机组整体磁轭圈安装工艺.....张翔 杨悦伟(57)

燃煤发电

高硫煤烟气湿法脱硫化空气风机设计技术经济分析.....杨志忠 吕丽丹 孔晓玲等(61)
高速隐极电动机不同转子端部结构流动与传热耦合计算.....杨燕 王超 周光厚(67)
管式空气预热器螺旋槽管数值优化探讨.....王筱箴 黄雪飞(74)

元坝气田高压输电线路远程自动化系统的研究与应用.....杨洋 张文 李长春等(85)

简讯.....(17)(18)(26)

[期刊基本参数]CN51-1333/TM*1987*q*A4*88*zh*p¥8.00*750*17*2023-02

DONGFANG ELECTRIC REVIEW



2023-06-25 Vol.37 No.2
(Quarterly, since 1987)

CONTENTS

BASIC RESEARCH

Functional Design and Application of Manufacturing Operation Management System for Digital Workshops in Large Boiler Equipment Manufacturing Industry.....YUAN Biao,ZHANG Zhixing,WU Wenliang,et al (1)
Research on Parameterized Design of BOM for Large-scale Power Plant Boiler Process.....LIU Xing,WANG Linsen,LI Yong, et al (6)
Automatic Plant Startup and Shutdown System Development and Application of Mitsubishi M701F4 Gas Combined Cycle Unit.....CHEN Qi,YAN Jindong, LONG Tao (10)
Study of Electrolytic Concentration in 18650 Lithium Ion Battery.....ZHU Rui,ZHANG Zhongwei,WANG Jing,et al (19)

NUCLEAR POWER

A System for Reactor Pressure Vessel Bolt Stretch Measuring Measurement.....LONG Tao,WEN Xiaojun,DING Ran,et al (23)
Key Welding Technology of CFR600 Demonstration Fast Breeder Reactor Steam Generator.....DAN Jun,LI En,JIANG Yuchen,et al (27)

WIND POWER

Research Prospects of Wind Power-photovoltaic-hydro Multi-energy Hybrid Power System.....YAN Ming,LIU Demin,LING Hongbing,et al (31)
Comparison of Parameter Estimation Methods for Extreme Load Extrapolation of Wind Turbine.....WANG Jun,YIN Jingxun,ZHAO Wei,et al (36)

SOLAR POWER

Research Progress on the Software of the Heliostat Field Layout of the Solar Tower Thermal Power Plant.....HUANG Ju,YAN Zhiguo,DENG Biao,et al (41)
Design and Implementation of Energy Management System for IndustrialPark-used Photovoltaic-energy Storage-charging System.....WANG Zhimin,LIN Yunsong,YAN Zhiguo,et al (48)

HYDRAULIC POWER

The Integrated Design of Main Shaft Seal Water System Platform Based on SolidWorks.....YAN Xin,WU Yingyan (53)
Installation Process of Integral Yoke Ring for High Head Suspended Pumped Storage Unit.....ZHANG Xiang,YANG Yuewei (57)

THERMAL POWER/COAL-FIRED POWER

Techno-economic Analysis on Design of Oxidation Air Blowers for High Sulfur Coal Limestone Wet Flue Gas Desulfurization.....YANG Zhizhong, LV Lidan,KONG Xiaoling (61)
Coupling Calculation of Flow and Heat Transfer in Different Rotor end Structures of High-speed Hidden Pole Motor.....YANG Yan,WANG Chao,ZHOU Guangzhou (67)
Discussion on Numerical Optimization of Spiral Groove Tube of Tubular.....WANG Xiaozhen,HUANG Xuefei (74)

Research and Application of Remote Automation System for High Voltage Transmission Line in Yuanba Gas Field.....YANG Yang,ZHANG Wen,LI Changchun,et al (85)
NEWS IN BRIEF.....(17)(18)(26)

EDITORIAL BOARD

Chairman: WANG Weimin

Vice Chairmen: DONG Na, YANG Yong

Members: MA Qingtian, WANG Xiaoliang, WANG Yu, WANG Jianlu, WANG Zheng yuan, FANG Yu, DENG Zhongyong, LE Jinsong, SHI Qinghua, GUANG Haijie, LIU Shihong, LIU Taisheng, ZHANG Qide, ZHANG Guorong, ZOU Jie, HE Wei, CHEN Wenxue, CHEN Jiefu, YANG Wuyong, YANG Yaowu, YANG Huachun, MIN Zesheng, WU Jiandong, ZHAO Yongzhi, ZHAO Shiquan, HOU Xiaoquan, HE Jianhua, ZHONG Jie, GUO Yan, TANG Hongju, XIE Guangyou, ZENG Mingfu, LAI Chengyi, PAN Qiangang, HUO Suoshan

Chief Secretary: YANG Yong

Sponsor: Dongfang Electric Corporation

Chief Editor: WANG Weimin

Vice Chief Editors: DONG Na, YANG Yong

Executive Editor: WANG Weimin

English Editor: WANG Weimin

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 Distribution by:

China National Publishing Industry Trading Corporation
(P. O. Box 782, Beijing, P. R. C.)



面向大型锅炉装备制造行业数字化车间的制造运营管理系统功能设计与应用

袁标¹ 张知行¹ 吴文亮¹ 钟学娇² 闫富乾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 德阳 618000

摘要: 针对大型锅炉装备制造企业在设备研制过程中的生产管理需求, 设计并应用了覆盖车间全业务流程的制造运营管理系统。通过对计划控制中台、计划管理、物料管理、生产执行、质量管理、库存管理等模块的设计, 实现了车间数据源的统一、信息的电子化传递以及生产过程的全周期追溯。科学地指导车间达到精益生产的目的。

关键词: 制造运营管理系统; 数字化车间; 数据结构化; 模块化设计

中图分类号: TK226

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2023) 02-0001-05

Functional Design and Application of Manufacturing Operation Management System for Digital Workshops in Large Boiler Equipment Manufacturing Industry

YUAN Biao¹, ZHANG Zhixing¹, WU Wenliang¹, ZHONG Xuejiao², YAN Fuqian¹

(1. DEC Academy of Science and Technology Co., Ltd., 611731, Chengdu, China; 2. Dongfang Boiler Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China)

Abstract: Aiming at the production management requirements of large boiler equipment manufacturing enterprises during equipment development, a manufacturing operation management system covering the entire business process of the workshop was designed and applied. Through the design of modules such as the plan control center, plan management, material management, production execution, quality management, and inventory management, the unification of workshop data sources, electronic transmission of information, and full cycle traceability of the production process are realized, which guides the workshop scientifically to achieve the goal of lean production.

Key words: manufacturing operation management; digital workshop; data structuring; modular design

随着中国制造 2025 的提出, 越来越多的企业为实现制造强国的战略方针, 将数字化车间建设作为企业发展的核心项目。锅炉行业产品制造的特点为工序时间长、装配工艺复杂、产品回流和人工干预频繁等。其设计工艺信息存在多头来源、数据不统一等问题。车间制造信息流转过程中存在大量纸质单据, 透明化程度低, 导致生产数据收集困难, 质量追溯失真, 给车间生产计划、执行及质量管理带来了极大困难^[1]。为解决上述问题, 本文运用互

联网技术设计出一套符合锅炉行业的制造运营管理系统 (Manufacturing Operation Management, MOM), 实现车间生产计划、生产执行、质量检测等数据集成管理, 对锅炉行业制造效率的提升与数字化的实现具有重大意义。

1 制造运营系统需求分析

1.1 计划管理需求分析

以某大型锅炉制造企业为例, 目前车间的计划

收稿日期: 2023-03-20

基金项目: 项目名称: 高温高压部件小径管自动排料和备料自动化集成管控关键技术研究; 项目编号: SC0022097。

作者简介: 袁标 (1997-), 男, 2022 年毕业于西南交通大学机械工程专业, 硕士研究生。现任东方电气集团科学技术研究院有限公司, 主要从事系统设计, 数字孪生方向。

接收、下发、反馈均通过纸质单据进行执行。计划的传递过程较为繁琐，当计划涉及到变更时，现有计划下发方式未能及时更新。同时车间生产进度汇总困难，工序任务统筹、协同及调度难度大。管理者未能全面、及时的掌握车间生产状态、主料和外协件齐备等信息，不利于后续的生产。因此急需建立一个全面的生产计划管理模块，兼容已有的 ERP 系统，适应未来数字工厂的发展趋势。

1.2 物料管理需求分析

物料管理现有模式为项目部按照计划进行排料需求汇总，技术员再根据需求进行物料排料。车间备料、自动焊、装配工序按照生产计划打印落料单据，现场在落料单据上进行任务进度记录。其物料齐套确认方式为 EXCEL 单据或线下口头询问，沟通效率低，易遗忘。上述模式当生产计划变更频繁时，落料计划与生产计划匹配性校验工作量将会增大。同时车间各工序频繁进行纸质单据打印，加之排料结果也未实现电子化，导致资料收集传递较为困难。

1.3 生产执行需求分析

在生产执行层面，车间主要依靠纸质单据和口头通知传递生产任务。计划下发、变更及传递效率低下，记录追踪困难。工段排产时线下沟通量大，并且其报工数据未实时采集共享，绩效结算需收集大量数据进行手动转化，生产进度统计较为困难，存在一定的滞后性。

1.4 质量管理需求分析

质检人员根据质检委托，准备质检相关单据，现场进行质量检验并进行质量检验记录填写、归集。其模式存在的问题为质检基础数据来源不统一，与生产业务结合不紧密。质量检查申请提交不及时，存在漏报或晚报，导致质量检查延时的情况。同时质检工作任务量大，易出现质检漏项。质检数据由人工填写、统计，在电子归档时较为繁琐。

1.5 库存管理需求分析

(1) 焊材库管理需求分析

焊材库管理包括焊丝、焊条与焊剂的管理。除焊丝外，焊条和焊剂均需要烘焙加热。其焊材烘焙

计划、焊材烘焙管理，焊材领用及退库均通过纸质单据进行记录，使用纸质单据对焊材进行流转管理极大的影响了车间的生产管理效率，亟待通过电子系统解决。

(2) 工具工装库管理需求分析

车间的工具工装管理人员在收到生产计划后，通过内部系统查询工艺数据卡中工具工装的需求数量，与车间的管理台账进行对比，输出工具工装新增需求计划至归口管理的生产部门。工具工装库由于使用人工台账记录，工作量大，因此库存统计较为困难。同时其出库管理不严格，存在物料缺项、错用等情况。

1.6 技术资料管理需求分析

技术资料员从档案馆领取资料后，在 Excel 台账上做入库登记。车间会在生产之前从资料室成套领取所需的技术资料。但由于目前排料文件并未实现电子化，无法支持多人同时阅览以及通知现场图纸文件变更状况，造成技术资料的管理较为困难。

2 制造运营系统架构设计

制造运营系统在 MES 系统原有的基础功能上进行了更多模块的扩展，既涵盖 MES 中关注的产品定义、资源计划、生产计划和生产性能等生产核心要素，同时又包含了制造运营过程中的设备全面管控、生产执行、物料管理、计划协同和质量管控等模块^[2]。

依托车间现有数字化软、硬件设备，对制造运营系统进行整体架构设计，系统分为智能决策层、数据总线层、业务系统层、物联网层、智能装备层，系统架构图如图 1 所示。

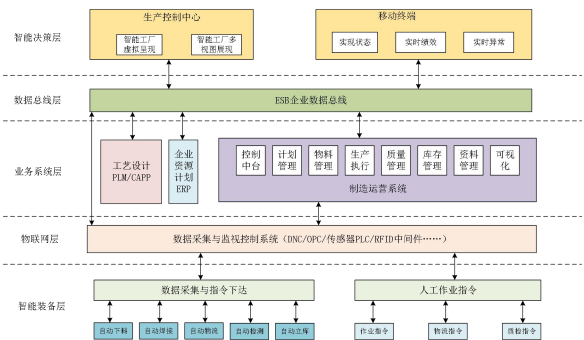


图 1 系统架构图

智能决策层分为生产控制中心与移动终端应用，可实现对整个系统的全面监控及分析决策。业务系统层既包括了制造运营系统的各功能模块，又集成了外部 PLM/CAPP、ERP 系统等^[3]。业务层与决策层之间通过 ESB 数据总线紧密相连。智能装备层实现了设备的数据采集与指令的下达执行，通过物联网层与系统进行信息交换。此系统实现了生产计划调度安排、物料管理、仓储管理等功能的集成，使车间生产执行实现数据全控制、全贯穿。其业务流程框架如图 2 所示：

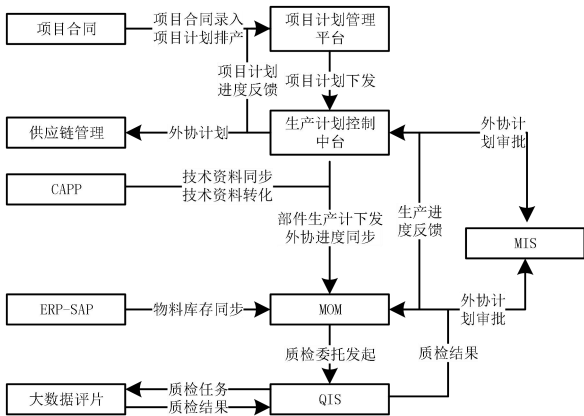


图 2 MOM 系统业务流程图

3 制造运营系统核心模块构建

制造运营管理系统是数字化车间最核心的系统。本文所设计的制造运营管理系统业务功能覆盖生产计划中台、计划管理、物料管理、质量管理、生产执行、库存管理等，如图 3 所示。通过各层级的大数据分析和图形化的数据看板，提供部件进度监控、外协进度监控、两料齐套监控、落料进度监控、车间负荷监控和外协件齐套监控^[4]。

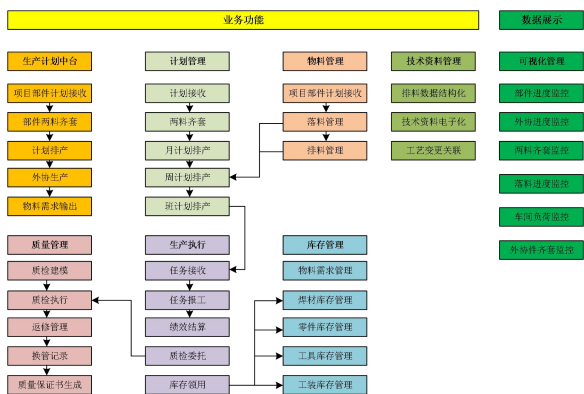


图 3 MOM 系统业务功能图

3.1 生产计划控制中台

计划管理在企业管理中占有核心地位，合理的计划可以提高工厂的整体产能，但是计划排产过程中需要参考的数据繁多，需要进行多系统或多部门数据协调。通过生产计划控制中台的设计，将车间排产过程中的数据实现透明化，为后续自动计划排产打下数据基础。本文从两料齐套、计划排产、进度跟踪、计划平衡四个方面对生产计划控制中台进行功能设计。其具体设计如表 1 所示。

表 1 生产计划控制中台功能设计表

功能名称	功能描述
两料齐套	可实现工艺文件齐套及主料齐套的便捷查询，对应的业务口可根据查询的主料情况及工艺资料情况，手动选择该部件物料齐套以及工艺资料的齐套
计划排产	实现辅助计划排产，项目计划自动拆分，车间负载自动计算，计划交期预测
进度跟踪	实现车间、外委进度自动采集及展示
计划平衡	实现系统管理计划平衡流程

3.2 车间计划管理模块

车间计划管理用于接收生产计划和控制中台拆分后的车间计划，其模块相关功能为：计划同步、计划排产、计划跟踪、负荷拆解、物料齐套等。通过计划管理模块将车间计划分为三个层级进行管理：第一个层级为计调计划，计调计划包括月度计划、周计划；第二个层级为工段长计划，工段长根据计调计划进行工段节点计划下发；第三个层级为班组计划，班组长根据工段长排的计划进行任务派工，将任务指定到具体执行人员。其计划管理页面如图 4 所示。

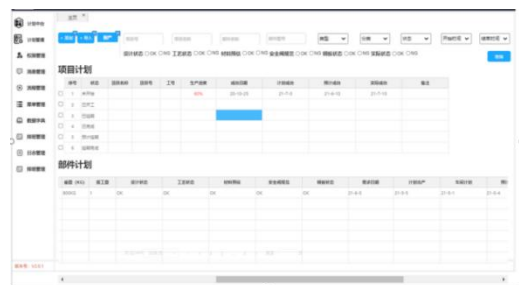


图 4 计划管理页面

3.3 物料管理模块

物料管理模块通过物料管理过程信息化、排料

数据结构化等,实现了物料管理规范化和工艺BOM向制造BOM转换,为生产执行提供基础数据。采用信息化的手段在现有业务流程的基础上进行优化,将物料需求及原材料管理进行数字化改造,降低沟通成本、提高过程透明性。物料管理模块基于CAPP基础数据实现原材料需求汇总。通过系统直接关联落料计划与生产计划,提高计划匹配性,并根据结构化落料单、排料单,系统自动生成备料、自动焊、装配工序生产任务。车间可根据生产任务自动关联结构化的落料单、排料单,实现车间无纸化管控。同时将工序物料齐套情况也实时显示,并作为计划执行顺序调整的指标。

3.4 生产执行模块

生产执行模块主要是以车间生产任务为核心管理对象,通过对生产任务全生命周期过程的记录,实现车间生产业务执行过程的监控与管理。通过生产任务派工信息电子化,实现生产及异常情况下计划的灵活调整。基于结构化物料清单自动生成各工序生产任务,系统自动汇总各工序计划排产条件,完成辅助排产。实时反馈前后工序的加工情况以及物料齐套情况,更好的调整、控制生产任务执行顺序,减少在制品的积压,提高周转效率。对在制品进行虚拟入库,支持多维度的生产进度统计查询和报表导出。同时系统根据在线报工数据及绩效结算逻辑自动输出员工绩效,更有利于数据的统计、分析、防错等。部分工序生产执行页面如图5所示。

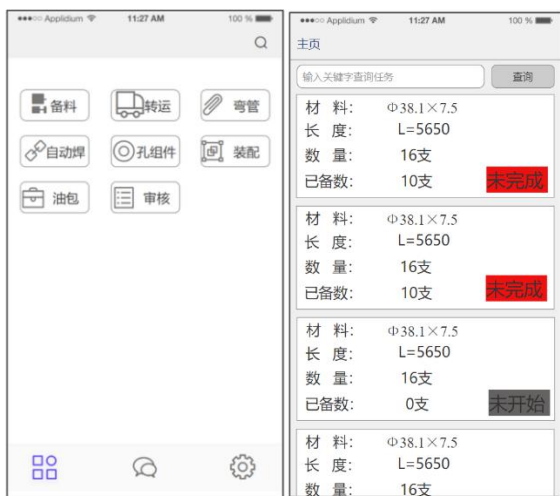


图5 生产执行页面

3.5 质量管理模块

车间质检模型维护由质检项、质检内容、质检规则、质检委托等基础数据建模工作组成,通过质量管理模块触发质检任务,质检提醒,降低漏检率。检查员在PC端和移动端进行质检工序的开工与报工,按照模板录入质检数据,动态设置关键工序,系统自动控制质检节点,实现质检流程的管控,关键数据的集成、存储以及电子档案的生成。辅助生成质量保证书,减少人员质量保证书归集工作量。通过质量管理模块的建设,对车间的改善效果如表2所示,质量管理模块操作页面如图6所示。

表2 质量模块改善表

流程名称	流程差异	单据取消
质检执行	变更前:质检执行人员在纸质单据上填写质检结果,并通过纸质单据进行质检记录的保存 变更后:系统自动根据质检建模基础数据生成质检执行单据,通过手持端进行质检单据填写,并留存	质量执行单据
质量保证书	变更前:质量保证书中所有单据均为质检人员线下进行收集汇总并装订成册 变更后:质量保证书中满足自动获取条件的单据:光谱分析检验报告、完工检查记录、无损检测报告等系统自动生成	部分质量保证书



图6 质量管理操作页面

3.6 库存管理模块

库存管理模块可分别对焊材、零件、工具工装进行管理。其中对焊材的管理实现了焊材入库、烘焙管理、有效期管理、焊材追溯管理等功能。通过与CAPP系统集成,自动获取零件清单、工艺流转卡和工艺数据表,生成电子台账。结合生产月、周计划,生成焊材领用计划和领料申请。在MOM系统内实现对焊材库管理,其具体功能如表3所示。

表 3 焊材管理功能设计表

名称	功能
焊材库管理	通过系统管理焊材库基础信息管理
焊材入库	通过系统完成焊材入库登记
焊材出库	通过系统完成焊材出库登记
烘焙管理	可通过系统录入烘焙记录, 可通过看板进行烘焙完成提醒
有效期管理	通过系统管理焊材使用有效期, 超出有效期进行提醒
焊材领用	系统内填报焊材领用申请, 实现系统提醒
焊材追溯管理	基于条码单据的焊材发放记录和追溯

库存管理模块对工具库的管理实现了车间工具二级库数字化管控以及入库台账记录, 支持工具齐套检验。其具体功能如表 4 所示。

表 4 工具库管理功能设计表

名称	功能
工具工装维护	工具工装基础数据维护, 库管员根据现场工具工装变动进行及时更改完善, 记录所有工具工装信息
工具工装库存查询	查询系统中的所有工具工装的库存信息
工具工装入库	库管员通过在手持设备上输入对应的编码、规格、单位、货架、仓位收货数量、品牌和厂家信息将工具工装进行入库 借用申领: 生产人员在手持设备选择需要借用的工具工装及数量进行申请借用 借用审批: 负责人收到现场人员申请的工具工装借用信息, 进行工具工装借用审批
借用管理	借用出库: 库管员对已审批的工具借用信息, 将需要借用的工具进行出库 借用更换: 现场人员使用工具有损坏或者需要更换时, 对借用的工具进行更换 借用退还: 借用的工具使用完或需要退还时, 在手持端对该工具发起退还
借用统计	统计的工具工装借用信息, 借用数量、借用日期、归还日期、借用类型、借用人及状态, 可进行导出
维修统计	将损坏的工具工装进行导出打印, 批量进行维修, 维修完成后入库
报废统计	记录所有已报废的工具工装信息, 可批量导出
工具工装申领	向一级库申领工具工装, 填写申领数据后进行打印申领单
工具工装条码打印	在系统中通过标签打印机进行打印标签二维码

3.7 技术资料管理模块

技术资料管理模块通过生产现场操作终端进行技术资料在线查看, 实现技术资料的在线预览。其功能设计如表 5 所示。

表 5 技术资料管理功能设计表

模块	名称	功能
技术资料管理	技术资料电子化	由 PLM、CAPP 数据结构化, CAPP 等系统进行基础数据的结构化, 通过接口获取上游系统结构化数据及排版图并在生产过程追踪进行使用; 生产人员可通过现场固定操作终端, 获取产品技术资料及排版图, 支持在线查看。
	排料数据结构化	建立结构化排料数据
	工艺变更关联	工艺人员在 MOM 中维护工艺变更内容, 系统自动将变更内容更新至现场

3.8 可视化模块

在日益追求效率与精益管理的现代企业工厂里, 生产线上的管理受到越来越高的重视, 其中可视化生产管理技术是数字化发展的必然趋势。通过智能电子看板系统, 将彻底使制造流程中的原本不可见的内容转变为可视化管理, 使生产、品质、设备的状况处于可控状态, 相关人员可在第一时间发现问题并解决问题。采用可视化的管理模式比当前的邮件、电话通知的方式更加有效。通过在车间布置两类电子看板: 生产看板、库房电子看板, 实现数字可视化管理, 为车间精益生产提供了更强大的工具支持。

4 结语

在数字化、智能化建设的主题下, 本文围绕锅炉车间生产运营核心业务管理系统进行开发设计, 旨在满足锅炉行业小批量、多品种、人工干预频繁产品的生产总装需求。结合信息技术以及互联网技术, 通过对生产计划、生产执行、质量、物料、库存、技术资料管理模块进行优化设计, 实现了车间生产的规范化、智能化。同时车间可视化管理模块的推进, 不仅完成了生产业务全流程的透明化, 提高了企业核心竞争力, 而且对整个锅炉行业的数字化建设提供了一定的示范参考作用。

参考文献:

- [1] 潘红伟. 研制与批产混线生产的 MOM 应用研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2021(10):185-186
- [2] 王春学. 大型电子装备总装数字化工厂制造运营管理系统[J]. 智能制造, 2022(1):106-111
- [3] 林锦州, 于英杰, 赵彦春. 面向智能工厂建设的汽车制造运行管理系统方案研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2018,8(2):79-81
- [4] 田俊, 章磊, 刘丽花. 面向军工电子生产的制造运营管理系统设计与应用[J]. 制造业自动化, 2022, 44(6):63-66

面向大型电站锅炉工艺 BOM 参数化设计研究

刘星¹ 王林森² 李勇² 丁健伟¹ 殷庆文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 643000

摘要: 为改变传统锅炉制造业工艺文件制定落后的现状, 响应数字化转型需求。本文针对电站锅炉典例公司的工艺现状, 提出自主研发的 T5 模式的工艺 BOM 数字化升级方案。根据此方案思想解决了工艺 BOM 映射匹配问题及焊缝种类生成问题, 给出数字化流程图及焊缝种类生成的数学模型。在此基础上实现工艺参数化系统, 给出此系统架构图, 并将此系统作为服务统筹进 MOM 系统中。在实例中, 制造公司在可控成本范围内, 实现了生产效率的提升, 为之后的全面数字化打下良好的基础。

关键词: T5 工作模式; 工艺 BOM 数字化升级; 匹配设计; 数字化转型

中图分类号: TK222

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2023) 02-0006-04

Research on Parameterized Design of BOM for Large-scale Power Plant Boiler Process

LIU Xing¹, WANG Linsen², LI Yong², DING Jianwei¹, YIN Qingwen¹

(1. Dec Academy of Science and Technology Co., Ltd., 611731, Chengdu, China; 2. Dongfang Boiler Co., Ltd., 643000, Zigong, Sichuan, China)

Abstract: In order to change the backward manufacturing process of traditional boiler industry documents and respond to the demand for digitization transformation, this paper proposes a digital upgrade plan for the T5 mode of the process BOM based on the manufacturing process status of a power plant boiler exemplar company. This plan solves the problems of process BOM mapping and matching and generates welding seam types based on the proposed ideas, and provides a digital process flowchart and a mathematical model for generating welding seam types. Based on this, a process parameterization system is implemented and the system architecture diagram is given, and this system is integrated into the MOM system as a service. In the example, the manufacturing company achieved an improvement in production efficiency within a controllable cost range, laying a solid foundation for comprehensive digitization in the future.

Key words: T5 working mode; digital upgrade of process BOM; matching design; digital transformation

在中国制造 2025 的背景下, 锅炉行业需要秉承创新驱动、智能转型、强化基础、绿色发展四个要点, 加快从传统制造升级到数字化智能化的中高端制造。电站锅炉是单件、小批量制造, 属于典型的离散型制造。每台锅炉产品均为定制设计, 制造工艺流程相对固化。如何让基于卡片式编制模式的

CAPP 系统快速高效的向 ERP、MOM 等系统传递结构化数据, 是当前数字化转型亟待解决的问题。

1 工艺 BOM 的数字化

中国的工业体系起步晚, 截止 2023 年, 仍约 84% 的中国企业处于智能化转型的早期和中期, 普

收稿日期: 2023-04-14

基金项目: 项目名称: 东方锅炉重容数字化车间项目; 项目编号: SC0021044。

作者简介: 刘星 (2000—), 男, 2022 年毕业于电子科技大学软件工程专业, 学士。现任东方电气集团科学技术研究院有限公司, 主要从事软件开发。

遍智能化程度不高^[1]。某锅炉公司（以下统称为 A 公司）早期适应工人知识水平，工艺指导文件采用人工编制，工艺 BOM 在简单的结构化基础上以易读、便于理解为主要设计思路，存在诸多非结构化数据。A 公司现阶段转型要求，需要在保留 A 公司工艺整体结构的基础上进行优化设计。对此，提出了 T5 工艺优化模式（图 1 所示）。

T5 工艺优化模式旨在梳理标准工序，将其结构参数化，将参数化工序对齐到 MOM 中。在实际数字化过程中，整理现有工艺路线，合并成模板，总结规律用软件匹配模板与零件，生成工艺指导文件，对接到 MOM 系统中。如何总结其中的规律用软件实现，是本文明确解决的问题。

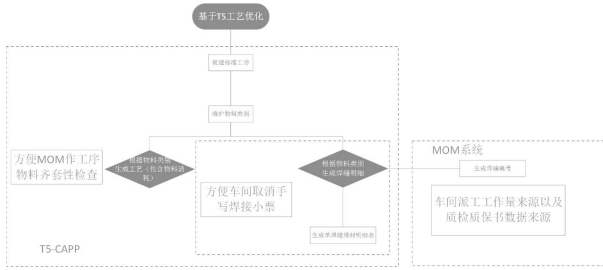


图 1 基于 T5 的工作模式

2 A 公司锅炉工艺 BOM 参数化

2.1 工艺 BOM 映射匹配

2.1.1 BOM 映射问题解析

工艺 BOM 模板清单，记录了每个大件物体的零件加工工艺。零件清单体现零件的种类、数量和规格等直观数据。两者都无法单一指导工人完成工艺加工。因此需将零件清单与工艺 BOM 映射起来，形成一份总装工艺，用于指导。其映射关系分为以下三种类型：①固定生成：即固定的加工工艺，加工该大件则必须要经过的工序；②零件匹配：模板内的零件工序映射零件清单对应零件，生成对应工序；③规则表达式匹配：工序中具有规则表达式指示，代表零件清单对应映射必须符合特殊条件才能拥有此项工序。例如：material>3,代表材料数量大于 3，符合条件可采纳工序。

2.1.2 数字化实现

通过分析以上三种类型，提出如图 2 所示的数字化流程，其系统实现页面如图 3 所示。

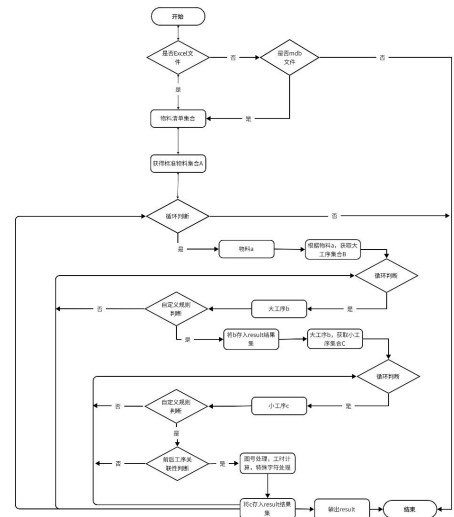


图 2 数字化实现流程图

图 3 实现图

2.2 工艺 BOM 映射匹配

2.2.1 零件清单业务解析

零件清单的零件种类根据焊缝匹配规则表生成焊缝种类，描述为：零件 A+零件 B=>焊缝，用于质检。分为以下四种情形：①普通匹配：零件清单拥有规则表映射的两项零件的直接得出对应种类；②自定义匹配：规则表上指定了该零件只遵循自定义匹配，该零件仅与特定零件匹配生成焊缝。例：规则表中指定零件 A 种类为自定义匹配项，在零件清单中若有零件 A，则会将其声明为零件 A18，代表零件 A 与序号 18 的零件进行匹配，对应生成规则表的焊缝；③同层级匹配：零件清单的零件序号具有层级分为严格层级和非严格层级。严格层级指前置序号相同且层级数严格相等，如：x/y 与 x/z, x 与 y, x/y-z 与 x/y-n。(x,y,z,n 均为整数)。非严格层级前置序号相同但层级数不相同，如：x/y 与 x/y-z。匹配过程中优先严格层级后非严格层级，例如：零件 C 为 3/4-1,则必须先匹配 3/4-x 的零件是否有对应焊缝，没有则进行非严格匹配，匹配 3/x 层

级的零件；④特殊匹配：特殊匹配指一种零件种类具有双匹配项，以该零件种类为A，双匹配项分别为B和C为例，A先和B进行同层级匹配，若未匹配成功，则与C进行普通匹配。

2.2.2 模型抽离

将零件清单抽离为两份集合：

$M=N=\{a,b,c,d,\dots\}$ 元素为零件，数量为 i 。

规则表：

$P=\{A=\{1,x,a,b,0\}, B=\{2,y,c,c,1\},$

$C=\{3,z,a,b,0,1\}, D=\{4,h,b,c,d,\dots\}$

元素为每一项规则，数量为 j 。依次看 A 代表普通匹配（ x 为焊缝种类， a, b 为零件，下同； $0, 0$ 为普通匹配标识）；B 代表自定义匹配（ $1, 0$ 为自定义匹配标识）；C 代表同级匹配（ $0, 1$ 为同级匹配标识）；D 代表特殊匹配（无数字标识）。

结果集： R

2.2.3 整体匹配方法

根据数学模型及业务要求，提出三种整体匹配解决方法： $M-P-N$ 的匹配， $P-M, P-N$ 的匹配和 $Z-P, Z=M \times N$ 的匹配。

(1) $M-P-N$ 正序匹配（图 4 所示）：即将 M 中的每一项与 P 中的规则比对后，循环寻找 N 中的匹配对应项。因此最大循环次数 m^2p ，衡量时间复杂度为 $O(n^3)$ 。

$U = \{X | X = P_p - M_m, M_m \in P_p, m \in 1,2,3, \dots, i, p \in 1,2,3, \dots, j\}$

$V = \{Y | Y = U_u - N_n, N_n \in U_u, n \in 1,2,3, \dots, i, u \in 1,2,3, \dots, x\}$

$R = \{r | r = P_p, V_v \subseteq P_p, p \in 1,2,3, \dots, j, v \in 1,2,3, \dots, x\}$

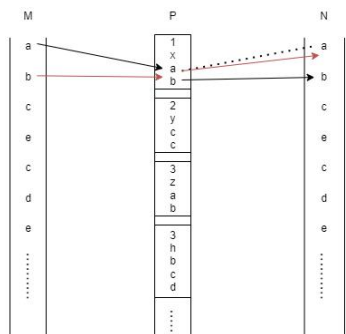


图 4 M-P-N 示意图

(2) $P-M, P-N$ 中序匹配（图 5 所示）：把 P 中的每一项规则提取出来，分别匹配 M, N 中零件，将每一个符合要求的项目对应。最大循环次数为 mp ，时间复杂度为 $O(n^2)$ 。

$R = \{r | r = P_p, M_m \in P_p, N_n \in P_p, m, n \in 1,2,3, \dots, i, p \in 1,2,3, \dots, j\}$

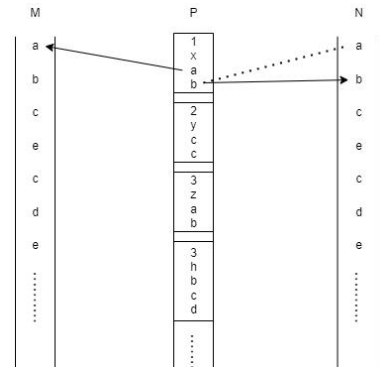


图 5 P-M, P-N 示意图

(3) $Z-P, Z=M \times N$ 倒序匹配（图 6 所示）：将 M, N 的所有零件合成为一个每个元素具有特征值的集合 Z ，也就是 M, N 的笛卡尔积。 P 中的每一个元素恰好包含 M, N 的特征值。特征值相同即可完成匹配。最大循环次数为 m^2 ，复杂度为 $O(n^2)$

$Z=M \times N$

$R = \{r | r = P_p, Z_z \subseteq P_p, p \in 1,2,3, \dots, j, z \in 1,2,3, \dots, x\}$

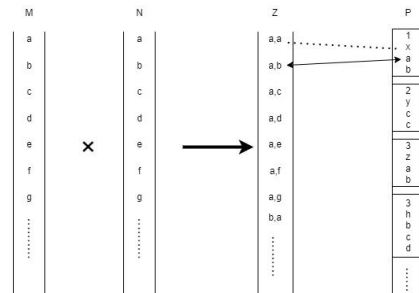


图 6 Z-P 示意图

2.2.4 Z-P 倒序匹配分组数字化实现

经过实践，整体匹配方法采用 $Z-P$ 倒序匹配，原因有如下三点：①正序匹配循环次数过高，效率低；②中序匹配程序数字化难度较高，容易出现误配，漏配的情况；③倒序匹配的特征匹配很适合多情况分组。

在以上数字模型的基础，提出如下的数字化流程（图 7、图 8、图 9）系统页面实现如图 10 所示

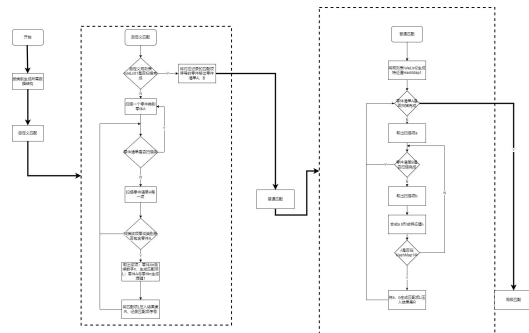


图 7 自定义匹配及普通匹配

三菱 M701F4 型燃气—蒸汽联合循环机组 APS “一键启停” 的开发与应用

陈琦 燕金栋 龙涛

广东粤电大亚湾综合能源有限公司, 广东 惠州 516080

摘要: 作为两班制调峰运行机组, 实现“一键启停”(APS控制), 对规范机组启停机过程的控制和操作有重要意义。本项目对三菱 M701F4 型联合循环机组启停过程进行了深入研究, 开发了机组 APS 控制逻辑的组态和验证, 并对原控制逻辑中不合理的部分进行了优化和完善, 实现了 APS 功能模块对机组各设备的有效控制和调节, 使机组在启停阶段的安全性和经济性得到明显提高。

关键词: APS; 启停; 调试; 优化

中图分类号: TM611.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2023) 02-0010-07

Automatic Plant Startup and Shutdown System Development and Application of Mitsubishi M701F4 Gas Combined Cycle Unit

CHEN Qi, YAN Jindong, LONG Tao

(Guangdong YuDean DaYaBay Comprehensive Energy Co.,Ltd., 516080, HuiZhou, Guangdong, China)

Abstract: As a two-shift peak-shaving operation unit, the realization of "one-key start and stop" (Automatic Plant Startup and Shutdown System, APS) is of great significance to standardize the control and operation of the unit start and stop process. This project has carried out in-depth research on the start-up and shutdown process of Mitsubishi M701F4 combined cycle unit, developed the configuration and verification of the unit APS control logic, optimized and improved the unreasonable part of the original control logic, realized the effective control and regulation of the APS function module on the unit's various equipment, and significantly improved the safety and economy of the unit in the start-up and shutdown stage.

Key words: APS; start and stop; shakedown test; optimize

某电厂项目采用三菱 M701F4 型分轴燃气-蒸汽联合循环机组, 燃机采用三菱 Diasys Netmation 控制系统, 汽轮机、余热锅炉及其它辅助设备则采用艾默生 OVATION 控制系统。

由于设备及控制系统的差异, 机组的启停操作量、耗时、风险及成本远高于 M701F3 单轴机组, 非常不利于两班制运行模式。针对于此, 特开展 F4 机组 APS 控制研究和逻辑优化, 以解决上述问题。

1 APS 技术的难点与意义

1.1 APS 实现的技术难点

(1) 燃机机组工艺过程复杂, 各工艺系统的配合要求高, 且运行方式多变, 对于自动控制系统的设计要求较高, 对 APS 系统的自适应的匹配度需求更高。

(2) 针对两班制机组, 分轴联合循环中的汽

收稿日期: 2023-02-27

作者简介: 陈琦 (1989—), 男, 2012 年毕业于华南理工大学能源工程及自动化专业, 本科, 工程师。现任职于广东粤电大亚湾综合能源有限公司。

燕金栋 (1982—), 男, 2004 年毕业于华中科技大学动力工程专业, 本科, 高级工程师。现任职广东粤电大亚湾综合能源有限公司。

龙涛 (1977—), 女, 1999 年毕业于沈阳大学工业自动化专业, 本科, 工程师。现任职广东粤电大亚湾综合能源有限公司。

轮机 DEH 出厂逻辑设计控制方式不够灵活,对于自动冲转以及并网后初始负荷控制回路整个过程的设计比较简单,需要深度优化。

(3) 在电网出现故障时,调峰机组需具备中断启停机功能。同时,配合电网调整机组负荷。因此,要求 APS 模块在任意节点都要能够做到投退无扰切换,涉及冲转过程中,负荷控制回路升降时刻的逻辑更要求精密可靠。

(4) 机组建设、调试工期短,未预留足够工期进行 APS 模块的开发、调试工作。现机组已投入商业运行,对调试过程中的安全性要求更高。

1.2 APS 的主要意义

(1) 提升机组启停机阶段的安全性

该项目为热电联产机组,为保证供热安全性和灵活性,采用分轴布置,因供热需求限制,目前仅能满足一台机组连续供热运行,其余机组采用两班制运行方式,启停频繁,操作量大,风险点多。

APS (Automatic Plant Startup and Shutdown System) 通过顺控启停逻辑实现机组主、辅设备的自动启停,同时在启停过程中自动判断设备状态以实现对各参数的自动调节,可大幅减少人为操作风险。

(2) 提高机组启动经济性

项目投产初期,由于运行经验欠缺,操作人员多采取比较保守的操作方法,对机组启动经济性有较大影响。通过总结合适的操作方法、节点、参数,并利用 APS 技术进行固化,可减少人为差异带来的操作迟滞,从而有效降低机组启动成本。

(3) 减少运行人员的操作压力

机组控制系统分为燃机控制系统 (TCS) 和分散控制系统 (DCS), TCS 通过硬接点或通讯方式与 DCS 建立部分数据连接,机组的控制需在 TCS 和 DCS 上分别进行。现机组热态启动操作票共有 86 项操作及检查步骤,实现机组 APS 可大为缓解运行人员的操作压力。

2 机组 APS 模块的开发

联合循环机组 APS 模块开发的主要思路是根据设备厂商对机组启停操作的要求,实现各主

设备的顺序启停。关于联合循环机组 APS 的开发,国内有多个项目进行了研究开发和实施^[1-4]。通过总结其他项目的实施经验,结合本项目设备特点,APS 模块分为启动、停运两个子模块,分别在机组启动 (图 1)、停运 (图 2) 两个阶段进行控制。每个子模块以断点的形式分步骤控制所涉及系统设备,每个断点内包含若干个子节点,断点及子节点设置各自的启动条件,APS 模块根据机组启停顺序,依次启动各断点和子节点,从而实现顺控启动、停运的功能。其中重要子节点,如:燃机发启动指令、燃机并网等,需要人工确认后,方可进行。

启动模块包含五个断点:

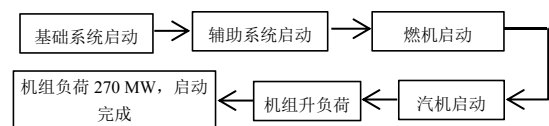


图 1 APS 启动模块流程

停运模块包含五个断点:

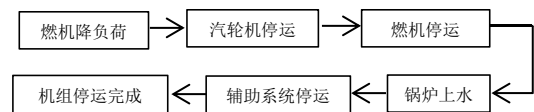


图 2 APS 停运模块流程

因 APS 模块的重要子节点需人工确认,如汽轮机冲转,但冲转条件满足后,运行人员无法在操作界面上直接看到该判断条件的状态,只能进入逻辑页面中去确认节点条件是否已满足。为提高 APS 模块的人机功效,项目小组完善了操作界面中相应的条件满足提示功能。在 APS 模式下,APS 模块会主动提示运行人员相应步骤已完成,由此避免了因人为疏忽导致的操作滞后、机组启停时间延长及启停经济性降低的问题。

3 机组控制逻辑的问题与优化

APS 模块是机组启停机过程中的管理、调度中心,部分设备的启动、调节仍需依靠设备的单体逻辑。运行人员通过总结启停机操作及运行经验,对设备单体控制逻辑提出优化建议,为 APS 模块的开

发、调试及可靠运行提供基础保障。

3.1 汽轮机启动控制与启动曲线不一致

根据 DEH 原有逻辑，汽轮机并网后，无论在冷、温、热状态下均需进行 20 分钟的暖机，这并不合理。暖机结束后，高、中压调阀进入压控模式，控制主蒸汽压力，不对汽轮机负荷进行控制。如图 3 所示，第一阶段为暖机阶段，第二阶段为压控模式阶段。从汽轮机厂家提供的启动曲线（见图 4）可看出，汽轮机调阀在启动阶段应在负荷控制模式下，汽轮机按照对应机组状态下的升负荷速率进行启动。

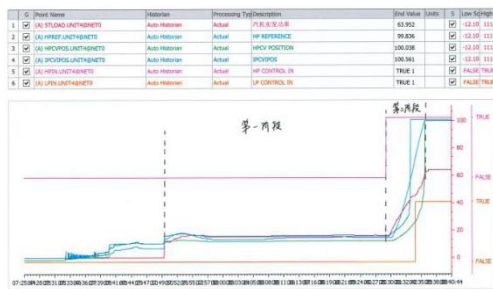


图 3 现有 DEH 汽轮机调阀开启模式

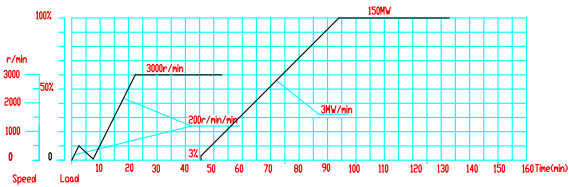


图 4 汽轮机厂家提供的汽轮机启动曲线

根据多次启动经验，项目组提出《F4 机组汽轮机启动方式的优化方案》，经与东方汽轮机、东方自控的设计人员讨论，按照优化方案，增设汽轮机高、中调阀负荷控制模块。在汽轮机并网后高、中调阀进入负荷控制方式，汽轮机按照厂家提供的启动曲线进行升负荷。同时，负荷控制模块可靠地实现了汽轮机启停阶段的故障中断功能。

3.2 汽轮机主调阀压力控制模式条件修正

汽轮机主调阀压力控制模式是根据压力设定值，对主汽系统压力进行口控制，确保进入汽轮机的主蒸汽压力在设定范围内，且不低于最低压力。在原有控制逻辑中，存在以下问题：

(1) 高、中压主调阀压力控制模式投入条件

设定不合理导致汽轮机在热态启动过程中，汽轮机在低负荷阶段停留时间过长。因进入汽轮机的蒸汽流量小、焓降高、温度较低，导致汽轮机转子冷却收缩，汽轮机负胀差现象严重；

(2) 高、中主压调阀在进入压力控制模式后，无法手动退出。当出现压力测点故障或其他设备故障时，调阀可能出现异常动作，导致事故扩大；

(3) 低压主调阀压力控制模式投入条件设定未按厂家说明书设计，导致启动过程中低压调阀开启时间延后，降低了机组启动经济性；

(4) 低压调阀进入压力控制模式会导致高、中主调阀退出手动控制模式，导致高、中压主调阀进入控制“真空期”。

根据汽轮机厂家说明书与 F3 机组运行经验，对汽轮机主调阀压力控制模式进行以下修正：

(1) 高、中压主调阀压力控制模式投入条件为：调阀开度大于 95%，且无“汽轮机停机指令”；

(2) 允许手动退出高、中主压调阀压力控制模式，阀门进入手动控制模式；

(3) 按照厂家说明书调整低压主调阀压力控制模式的投入条件，并删除低压主调阀控制模式与高、中压主调阀控制模式的关联。

3.3 机组启动阶段高压过热蒸汽温度超温

机组启动阶段，F4 燃机负荷从 150 MW 升至 170 MW 的过程中，因燃机燃料量增加，但 IGV 开度过小，导致燃机排气温度急剧上升。与此同时，高压主蒸汽流量较低，高过减温水控制阀无法有效控制蒸汽温度，高过蒸汽温度急剧上升，导致高过蒸汽超温，需要运行人员手动进行干预。

根据余热锅炉厂家说明书、及对燃机特殊阶段升负荷过程中烟气温度变化过程分析，项目组开发了机组启动阶段高压过热及中压再热蒸汽温度控制模块。通过该模块的控制，机组启停和正常运行过程中主蒸汽温度均有效、严格地控制在安全范围内。

3.4 锅炉冷态启动初期高压汽包上下壁温差大

锅炉冷态启动阶段，锅炉蒸发器逐渐产生汽水混合物进入汽包内。汽包下壁与大量饱和水接触，

汽包上壁与饱和蒸汽接触，饱和蒸汽在与汽包上壁接触的过程中，凝结成饱和水，同时释放大量的汽化潜热，对汽包上壁金属进行加热，导致汽包上下壁金属出现温差。上下壁温差过大会导致汽包金属热应力增大，对汽包正常运行产生很大的危害。汽包上下壁温差大易出现在冷炉启动升温、升压的初始阶段。

F4 联合循环机组配套的是东方菱日生产的余热锅炉，机组启动阶段，高压系统升温、升压更快，高压汽包上下壁温差大现象明显，若不进行人为干预，温差可能超过 100 °C，远超锅炉温差的安全范围。

根据余热锅炉厂家说明书、结合运行人员的操作经验，项目组开发了主蒸汽系统高、中压旁路的锅炉冷态启动控制模块。该模块通过控制主蒸汽系统的升压速率，从而达到控制汽包上下壁温差在范围内的目的。现锅炉冷态启动过程中，汽包上下壁温差均有效、严格的控制在安全范围。

3.5 机组疏水阀组开关条件不合理

疏水阀组有“顺控开/关”、“成组开/关”共有两套独立、并行的控制逻辑。在日常运行过程中，运行人员发现以下问题：

(1) 机组启动抽真空阶段，低真空保护条件复位后，机侧疏水阀自动全部打开，大量空气进入凝汽器，机组真空降低，重新触发低真空保护，疏水阀超驰关闭。此现象反复多次，延长了机组抽真空时间，影响机组启动经济性；

(2) 机组热态启动阶段，燃机点火后，机组机侧、炉侧疏水同时打开，主蒸汽系统压力下降较快，锅炉汽包出现“虚假水位”，易触发锅炉汽包水位保护；

(3) 机组冷态启动阶段，燃机点火后，机组机侧、炉侧疏水同时打开，因主蒸汽系统内没有蒸汽，导致凝汽器通过机侧、炉侧疏水阀直接与大气相通，导致机组真空急剧降低，易触发汽轮机低真空保护；

(4) 机组停运后，若保持真空，机侧疏水阀不会自动关闭，仍保持全开状态。因凝汽器内维持

真空，锅炉侧部分残留蒸汽被逐渐吸入凝汽器。与此同时，残留蒸汽降温、降压，冷凝成水聚集在管道内，易造成机组启动时水冲击；

(5) 部分疏水阀门关闭条件不合理，如低压导汽管疏水，出现机组冷态启动，低压调阀还未打开，导气管疏水已关闭，易造成汽轮机水击；

(6) 供热管道及供热母管侧疏水并入机组疏水逻辑内，非供热机组疏水在启动机阶段误动导致供热母管压力波动，影响供热稳定性。

针对以上问题，项目组对机组疏水重新分类，按照疏水点布置分为炉侧、机侧、汽机本体及供热管道四类，按主汽系统分为高、中、低压三类。总结运行经验，重新设计各疏水阀开启、关闭条件。机组启动时，按工质流向依次打开各疏水阀，在确保机组疏水充分的前提下，大大的减缓了疏水阀组动作时对系统的影响。

3.6 燃机、汽轮机发电机“一键并网”

燃机、汽轮机的同期操作都在 DCS 上进行，但并网过程中的个别步骤需在 TCS 和 DEH 上进行。燃机并网共有 9 步操作、汽轮机并网共有 10 步操作，操作步骤多且均为顺序操作。

机组调试过程中我们提出“一键并网”的设想，详细记录并网操作的步序和每一步操作完成后设备的状态、信号变化，并将其作为下一步操作的启动条件，顺利实现了燃机发电机和汽轮机发电机的“一键并网”。

3.7 机组给水泵“一键启停”

机组各给水泵启动前，操作人员均须手动将泵体进、出口阀门状态调整至适当状态，以满足给水泵电源开关的合闸条件。除此之外，各泵的附属设备也需要手动操作或启动，如：凝结水泵再循环阀、高压给水泵变频器、真空泵冷却水泵等。

为减少操作人员的工作量，同时避免附属设备操作不及时造成设备损坏，项目组总结各给水泵启动、停运操作，组建给水泵“顺控启动”、“顺控停运”模块。通过该模块，自动将泵体进、出口阀门调整至启动状态，同时顺序操作各附属设备。现机组凝结水泵、高压给水泵、中压给水泵、低压给水再循

环泵、TCA 给水泵、闭冷水泵、真空泵、循环水泵、脱硝系统，均已实现“一键启停”。

3. 冷态、低温态启动阶段汽机胀差大

该项目 F4 机组为供热机组，受其特殊供热压力设定值限制，汽轮机为东方汽轮机厂（DTC）制造的 LCC150-13.2/3.0/1.5/566/566 型双缸、三压、再热、抽凝式汽轮机。该汽轮机高中压缸体夹层内无蒸汽流通，汽轮机冷态、低温态启动过程中，缸体加热只靠缸体金属热传递，导致其缸体膨胀缓慢，易出现高中压缸胀差大现象，启动时间较长。F3 机组冷态启动约 3 小时，F4 机组冷态启动需 5~6 小时，远超汽轮机厂家说明书启动时长。

针对此现象，相关生产部门已向厂家反馈，厂家已提出相应的技术改造方案。同时，项目组根据汽轮机厂家说明书，丰富了机组启动阶段高压过热及中压再热蒸汽温度控制模块，控制主汽温度升温速率；分析机组历次冷态、低温态启动曲线，总结机组在 CCS 控制模式下的升负荷速率曲线，机组的升负荷速率由高中压缸体膨胀决定，相比简单采用固定的冷、温、热态启动速率，新的速率曲线能更准确把握机组启动状态，以此控制进入汽轮机的蒸汽流量。

表 1 机组温态启动信息

机组	启机日期	发令时刻	机组启动完成时刻	启动时长(分钟)	高中压缸胀差 (MAX)
#4	8.05	7:31	11:40	249	8.67
	8.21	7:21	12:02	281	9.021
	8.29	7:20	11:02	222	8.499
#5	5.4	6:29	11:02	273	8.339
	5.13	2:45	5:50	185	8.811
	4.8	6:33	12:08	335	8.51
#6	4.23	6:35	11:35	300	8.562
	9.23	7:51	11:11	200	7.64

以上两个控制方法应用在#6 机组 9 月 23 日温态启动中，对比机组近期温态启动信息（表 1），该次温态启动过程中，高中压缸胀差峰值最小，启动

耗时第二少，验证了该控制方法有效地提升了机组温态启动的安全性和经济性。

4 机组 APS 模块的使用效果

4.1 缩短机组启动时间，提高机组经济性

在 F3 机组运行分析系统的基础上，项目小组开发了 F4 机组启动经济性批量自动计算模块，对 #4 机投产以来的机组启动进行了经济性计算。在经济分析的过程中，剔除了部分因设备故障导致机组启动耗时延长的数据点。

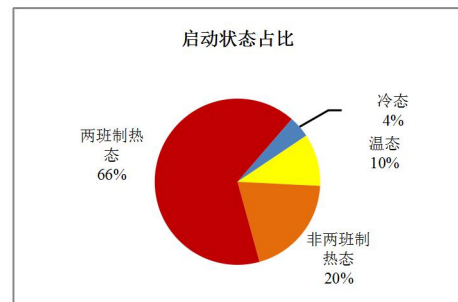


图 5 机组启动状态占比

机组不同的启动状态对机组启动经济性影响较大。作为调峰机组，机组热态启动次数占多数，但两班制热态启动与非两班制热态启动的经济数据相差较大。因此，本文在机组启动经济性分析时，对机组状态作以下区分：两班制热态、非两班制热态、温态。冷态启动因无数据，暂不分析。经统计，各种启动状态占比如图 5。

4.1.1 两班制热态启动

经统计，作为两班制运行调峰机组，两班制启动占比达 66%。提高两班制机组启动的经济性是降低全年机组启动成本的关键。



图 6 #4 机两班制热态启动数据

由上图 6 可见，经项目组逻辑优化后，#4 机两班制热态启动的耗时及成本均出现明显降低。为提高运行人员启动操作水平、累积运行经验，在 APS 调试阶段，运行部要求非项目组成员采用手动操作的方式启动机组，因此数据出现锯齿形波动。

实施前后#4 机两班制热态机组启动数据进行对比，如表 2：

表 2 实施前后#4 机两班制热态机组启动数据

	平均时长 (分钟)	平均成本 (万元)	数据总数 (组)
实施前	127.56	10.36	14 组
实施后	92.96	7.44	12 组

经逻辑优化后的 APS 两班制热态启动可节省成本 2.92 万元。

4.1.2 非两班制热态启动



图 7 #4 机非两班制热态启动数据

因机组停运时间长短不一，对机组启动影响较大，但从上图 7 可见经逻辑优化后，#4 机非两班制热态的启动耗时及成本整体趋势向下，说明优化效果明显。

实施前后#4 机非两班制热态机组启动数据进行对比，如表 3：

表 3 实施前后#4 机非两班制热态机组启动数据

	平均时长 (分钟)	平均成本 (万元)	数据总数 (组)
实施前	161.40	13.34	5 组
实施后	109.56	8.81	5 组

经逻辑优化后的 APS 两班制热态启动可节省成本 4.53 万元。

4.1.3 温态启动



图 8 #4 机温态启动数据

由图 8 可见，实施前后#4 机温态机组启动数据进行对比，如表 4：

表 4 实施前后#4 机温态机组启动数据

	平均时长 (分钟)	平均成本 (万元)	数据总数 (组)
实施前	301.7	19.95	3 组
实施后	228.7	14.93	4 组

由于机组停运时间较长，汽轮机缸体金属温度低，合适的燃机负荷、蒸汽参数、升温升压速率对汽轮机胀差影响较大。若系统参数过高，汽轮机胀差大，机组升负荷受限，延长启动耗时，降低机组启动安全性；若参数过低，机组升负荷过慢，燃料成本增加，降低机组启动经济性。APS 模块内的经验曲线能很好地解决上述问题，因此优化后的机组温态启动经济性提升明显。经逻辑优化后的 APS 两班制热态启动可节省成本 5.03 万元。

4.1.4 总体经济效益

根据统计，某年度机组总启动次数为 236 台次。其中，两班制热态 115 台次，非两班制热态 47 台次，温态 24 台次，冷态 10 台次。根据上述机组各启动状态经济性分析可估算本项目经济收益（不含冷态启动），如表 5：

表5 项目前后#4 机组启动数据

	温态	非两班 制热态	两班制 热态	合计
启动次数	24	47	155	226
单次节省成本 (万元)	5.03	4.53	2.92	
节约成本 (万元)	120.71	213.14	452.52	786.37

经估算，APS 模块的投用可节省启动成本约 786.37 万元/年。

4.2 提高机组运行安全性

在本次项目中，项目组提出多项合理化建议，经过运行部、设备部、技术分部的分析、讨论后实施，共涉及 124 个设备的单体逻辑。单体逻辑的优化不仅仅在 APS 模式下启停机有效，在运行人员手动操作过程中仍能自主协调控制，应用范围更广。

通过运行人员日常启停机操作、运行监视、实盘检验得出经验曲线共 6 条，代替逻辑内部分参数的固定速率值，使得逻辑参数更贴合不同的启停机工况，启停机过程中系统参数变化更加平滑，将参数严格控制在安全范围内的前提下，提高了机组启停机过程的经济性。

4.3 降低机组启停机阶段 NO_x 排放

燃气轮机在低负荷运行阶段，因参与燃烧的空气量较少，烟气温度较高，易产生较多的 NO_x。机组启动初期，脱硝装置温度未达到启动条件，无法控制机组 NO_x 排放。

缩短机组启动时间，可减少燃气轮机在低负荷运行时间，减少 NO_x 排放总量，对提高企业周边环境起到积极作用，提升企业环境效益。

4.4 减少机组运行人员的操作

在未使用 APS 模块前，机组启动操作票共有 86 项（不含辅机启动），停机操作票 59 项（不含辅机停运），使用 APS 模块后，运行人员仅需发出启动或停运指令及通过若干检查、监视步骤即可完成机组启动或停运操作，极大地减少了操作量，运行人员有更多的精力去检查设备运行状态和分析参数变化，同时也降低了人为误操作的几率，提高了机组的启停安全性。

5 结语

相比 M701F3 单轴机组，M701F4 分轴机组设备多、控制系统复杂，燃机和汽机需要更好的协调配合，两班制启停操作步骤繁多，APS 功能的实现难度更高。因机组已投入商运，APS 模块的调试只能根据电网启停机计划，在确保机组启停操作安全的前提下进行，对调试过程、优化方案也有更高的要求。在机组不同工况启停次数有限的情况下，我们对现有历次启停曲线进行了全面深入的分析，以期使 APS 逻辑组态更加合理。经过多次试验和优化，该项目 F4 机组 APS 模块形成了以下特点：

(1) 良好的适应性，一套顺控逻辑满足冷、温、热态启动需求；同时，设置预选条件，实现机组套餐式的启停机，如停机选择辅汽是否切换，是否破坏真空等。

(2) 合理搭配 APS 模块和单体逻辑，以优化单体逻辑为首选，以保证手动操作时，大部分设备可自动控制。

(3) 各步序启动条件和结束条件的判断严谨科学，既保证了 APS 执行过程中参数严格满足要求，又确保不因非重要异常造成顺控中断。

(4) APS 断点设置合理，确保了重要节点可控，同时程序执行灵活可靠，因故中断时设备状态可控，无扰切换至手动控制。

目前机组两班制运行 APS 功能已经验证满足预期功能，并取得可观的经济效益。另外，结合 M701F3 机组的优化经验，本次 APS 模块的开发也预留了相应的接口，提高了 APS 模块深度优化的灵活性。

参考文献：

- [1] 董溢华, 胥波. M701F4 机组一键自启停 (APS) 方案设计[J]. 东方电气评论, 2022, 36(1):56-61
- [2] 曹泉. 联合循环燃机机组 APS 控制策略及其实践[J]. 湖北电力, 2015, 39(4):71-73
- [3] 范新宇. M701F 型联合循环机组自动启停系统实施经验[J]. 燃气轮机技术, 2016, 29(2):53-57
- [4] 孙健, 张瑞华, 冀锋等. 燃气-蒸汽联合循环机组一体化 APS 研究与应用[J]. 工业控制计算机, 2021, 34(7):1-3

集团要闻

国产化首台 150 兆瓦级大型冲击式转轮在东方电气成功下线

2023年5月16日，东方电气自主研发的国内首台单机容量最大功率150兆瓦级大型冲击式转轮成功下线，实现了我国高水头大容量冲击式水电机组关键核心技术国产化“从无到有”的历史性突破，将为国内单机容量最大的冲击式水电机组装上“中国心”，开启我国水力发电产业高质量发展的崭新篇章。

东方电气集团党组书记、董事长俞培根，党组成员、副总经理张彦军，川投集团党委副书记、副董事长、总经理李文志，董事、副总经理、转轮国产化项目负责领导李洪出席活动。川投田湾河公司、大唐西藏、三峡建工、国机重装、中信重工、中水科技、上海勘测设计院、成都勘测设计院、长江勘测设计院、清华大学、西藏农牧学院等相关单位的领导和专家参加活动。东方电机党委书记、董事长王军主持活动。

俞培根代表东方电气集团向出席本次活动的领导专家表示热烈的欢迎，对大家长期以来对东方电气集团的关心、支持与帮助表示衷心的感谢，向参与150兆瓦级冲击式转轮国产化研制的全体人员表示热烈的祝贺。他表示，东方电气集团始终秉持产业报国初心和制造强国使命，把科技自立自强作为发展的战略支撑，用实际行动“把关键核心技术牢牢掌握在自己手中”。本次完工下线的国产化首台150兆瓦级冲击式转轮是东方电气集团深入践行国家“双碳”战略、瞄准国内空白和世界一流开展关键核心技术攻关、推动我国能源装备自立自强的具体实践。东方电气集团将持续坚持服务国家战略，与相关单位、创新联合体深入合作，按照既定的“三步走”战略，全力推进巨型冲击式水电机组关键核心技术攻关，不断提高我国能源装备行业核心竞争力，为加快建设科技强国，更好服务“双碳”目标作出新的更大贡献。

李文志代表川投集团向150兆瓦级冲击式转轮研制团队表示热烈的祝贺。他表示，东方电气集团与川投集团的合作源远流长、成果丰硕，双方优势互补、联合攻关，最终实现了150兆瓦级冲击式转轮国产化“从0到1”的突破，有力推动了高水头大容量冲击式水力发电机组国产化进程。科技创新是企业高质量发展的第一动力，也是企业转型升级的有力支撑，加快科技创新、推动高质量发展是双方共同的价值诉求。希望双方进一步加强创新协同，充分发挥自身领域优势，共同牵头打造高水平科技创新联合体，推动更多关键核心技术取得新突破，为国家实现高水平科技自立自强和四川科技强省建设贡献国企智慧和国企力量。

川投田湾河公司党委书记、董事长李红介绍了田湾河公司与东方电机冲击式机组国产化研制合作情况。

东方电机副总经理、总工程师梁权伟汇报了国产化冲击式转轮研制情况。川投田湾河公司党委副书记、总经理杨超龙报告了转轮检验验收情况。东方电机副总经理张天鹏和川投田湾河公司副总经理、转轮国产化项目田湾河公司工作组组长伍超分别代表双方移交了国产化首台150兆瓦级大型冲击式转轮合格证。

俞培根、李文志共同触摸水晶球，宣告国产化首台150兆瓦级大型冲击式转轮成功下线。

本次下线的冲击式转轮重约20吨，最大直径约4米，将用于四川省雅安市田湾河流域金窝水电站。

来源：东方电气微信公众号

《东方电气评论》征稿须知

《东方电气评论》是由中国东方电气集团有限公司、四川省动力工程学会联合主办的电站装备制造领域科技期刊，国内外公开发行季刊，国内统一连续出版物号 CN51-1333/TM，国际标准连续出版物号 ISSN1001-9006。

《东方电气评论》综合介绍我国电站装备制造领域的科技研发成果及先进制造技术，主要栏目有基础研究、燃煤发电、燃气发电、核能发电、水力发电、风力发电、光伏发电、工程技术、项目管理等。

《东方电气评论》为著作性刊物，欢迎评论性文章，少量接受综述类文章。

来稿必须未公开发表过，且创新性强、观点明确、数据可靠。文稿格式请参照《学术论文编写规则》(GB/T7713.2—2022)和 GB7714《文后参考文献著录规则》的较新版本；量和单位必须符合国家标准和国际标准。

稿件内容请勿涉及国家秘密和单位秘密，保密审查手续按作者所在单位的相关规定办理，必要时提供“不涉及保密，可以公开发表”的单位证明原件。投稿格式要求如下：

- 1、**投稿方式：**请使用电子文档投稿。电子文档的格式为 WPS 或 Word 文件。投稿时请提供通信作者或第一作者的电话号码、电子信箱和详细准确的邮送地址。
- 2、**论文内容结构包括：**论文题名（20 字内），作者姓名，作者单位(单位及部门名称、地址及邮编)，摘要（200 字内），关键词（3~8 个），正文（图、表应在正文中明确引用位置出现）参考文献。
- 3、**英文项目：**题名、摘要、关键词、作者姓名及其单位与通信信息几部分，除中文外，须译成英文一并提供。
- 4、**插图与表格都应有图（表）序与图（表）题。**刊出后的图片均为灰度图片，请作者确保能准确反映需表达的全部信息，画面清晰，大小适宜。图中字符一般用 6 号宋体字，表格应做成三线表。
- 5、**文中符号：**外文字母、符号必须分清大小写、正斜体，上下角标，数码符号等其位置高低应区别明显，容易混淆的外文字母，请在第一次出现时注明文种或含义。
- 6、**论文作者署名应遵守学术规范。**
- 7、**作者简介：**包括姓名、出生年、性别、职称和职务、何时何地取得何校何专业学位（最高学历），曾获得过的重大成果或奖励，现在从事的专业工作。
- 8、**参考文献：**只列出已公开出版并在文中直接引用的主要文献，序号按文中出现的先后顺序编排。
- 9、**著作权声明：**本刊已被《中文科技期刊数据库（全文版）》《中国核心期刊（遴选）数据库》《中国学术期刊网络出版总库》及 CNKI 系列数据库收录，有关作者文章著作权使用费与本刊稿酬一次性给付，如作者不同意被收录，请在来稿时向本刊说明。
- 10、**版面费：**本刊未收取发表版面费。论文一经录用，编辑部酌付稿酬并赠送当期杂志每个作者 2 本。
- 11、**邮箱投稿：**dfdqpl@dongfang.com；投稿地址：成都市高新西区西芯大道 18 号，邮编：611731

锂离子电池电解质在 18650 电池中的盐浓度研究

朱睿 张中伟 王晶 廖小东

东方电气集团科学技术研究院有限公司, 成都 611731

摘要: 选用功率型电解液和相同的电解质, 将两种不同浓度的电解质盐进行了分析, 研究了常温, 60°C下的循环, 倍率特性, 高低温, HPPC 性能。从各个电性能的测试结果来看。(1) 电解质盐含量越高, 后期循环性能越好; (2) 20C 电解质含量高的倍率特性比电解质含量低的高; (3) 电解质含量高的低温特性比电解质含量低的高; (4) 电解质盐含量高的功率特性较好;
关键词: 锂离子电池; 电解质; 浓度

中图分类号: TM912

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2023) 02-0019-04

Study of Electrolytic Concentration in 18650 Lithium Ion Battery

ZHU Rui, ZHANG Zhongwei, WANG Jing, LIAO Xiaodong

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

Abstract: The analysis of two different electrolytic concentration was made, based power type electrolyte and the same electrolytic. The performance of normal temperature cycles, 60°C high temperature cycles, rate, HPPC was investigated. From the results, (1)the more concentration of the electrolytic, the higher of the cycles performance; (2)the more concentration of the electrolytic, the better of the 20C rate performance; (3)the more concentration of the electrolytic, the better of the rate performance; (4)the more concentration of the electrolytic, the better of the power performance.

Key words: lithium ion battery; electrolytic; concentration

动力电池, 是 21 世纪后各国重点发展的绿色化学电源之一, 其特点是绿色环保, 循环寿命长, 可经受大电流充放电。到目前为止, 能用于电动汽车的电池包括: 锂离子电池、燃料电池、太阳能电池等。锂离子电池作为动力电池之一, 以其长寿命和高能量比等优势广泛应用于电动汽车上, 是电动汽车的动力源, 近几年发展最为迅猛^[1-2]。作为锂离子电池材料中的辅料, 诸如导电剂, 电解液都是重要的成分^[3-16], 锂离子电池电解液作为电池本体不可或缺的部分之一, 成为各个高校以及科研院所的研究重点, 前人已对锂离子电池电解液进行过研究和总结^[17-22], 但对电解质盐浓度的研究还未见报道。东方电气集团已投入大批资金用于动力电池综合平台的建设, 以及用于锂离子电池储能技术专项

研发, 已建设完成面积 500 平方米的锂离子电池研发实验室, 配备了电池测试设备, 高压电池成组设备等一系列仪器; 已建成一条完善的锂离子电池生产线, 可以稳定生产不同材料体系的锂离子电池, 为本次实验奠定了坚实基础。

1 实验部分

1.1 材料及设备

磷酸铁锂粉末 (阴极活性物)、石墨粉 (阳极活性物)、N-甲基吡咯烷酮 (浆料溶剂)、super-p (导电剂)、电解液 (自行配置)、电解质盐 LiPF₆、隔膜、聚偏氟乙烯 (阴极粘接剂)、羧甲基纤维素钠 (阳极增稠剂)、SBR 溶液 (阳极粘接剂)、铜箔 (集

收稿日期: 2023-03-20

作者简介: 朱睿 (1988—), 男, 2012 年毕业于华中科技大学机械设计专业, 工学硕士, 高级工程师, 现主要从事新能源技术研究工作。

流体)、铝箔(集流体)、真空双星行搅拌机、涂布机(深圳善营造)、电池测试仪。

1.2 实验过程

1.2.1 电芯制备

阳极极片制备:将石墨粉、super-p、羧甲基纤维素钠、SBR 溶液按质量比 94.5%:2%:2%:1.5%的比例在真空双星行搅拌机中搅拌成浆料,并用涂布机将浆料涂在铜箔上,烘干,辊压,裁片制成阳极极片

阴极极片制备:将磷酸铁锂粉末、super-p、聚偏氟乙烯按质量比 95%:3%:2%的比例在真空双星行搅拌机中混合搅拌成浆料,并用涂布机将浆料涂在铝箔上,烘干,辊压,裁片制成阴极极片。

按 18650 电芯的标准工艺,卷绕制成 18650 单体电芯后入烘箱 85 摄氏度干燥 24 小时。

1.2.2 电解液配置

将碳酸二甲酯,碳酸甲乙酯,碳酸乙烯酯按质量比 50%:30%:20%混合均匀,形成锂电池电解液溶剂备用。按表中所述电解质浓度配置两种不同的电解液(表 1)。

表 1 按 LiPF6 含量分别配置两种不同组别的电解液

电池组别	LiPF6 含量 (%)
A1	10
A2	12

1.2.3 注液

将配置好的两种不同的电解液注入已制备好的单体电芯中,经静置,化成,分容,制成 1.2 Ah 容量的 18650 电池。

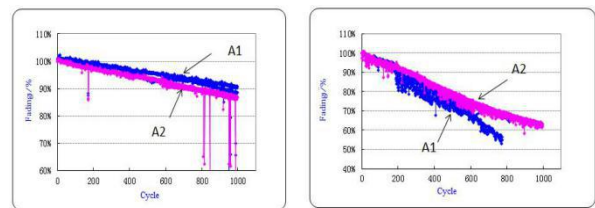
2 结果与讨论

2.1 循环分析

循环测试是检测电池使用寿命的重要测试方法,对于电动汽车而言,是检测其续航能力的关键参数。鉴于成组之后的电池,本身的一致性和使用环境的一致性差异,相比于单体电池的循环寿命会下降很多,要求单体电池的循环寿命在 1 000 次以上才能满足成组之后的循环次数要求。且电池在不同使用工况和稳定条件下会有不同的寿命,故需测试常温和高温两种温度条件下的循环寿命。

测试方法如下:将制备好的两种电池分别在常

温和 60℃ 高温环境下进行 4C 充电,4C 放电的循环测试。从测试数据上分析,①常温循环,电解质含量低的循环略好于电解质含量高的,但总体来说两者差距不大。②高温循环,两组电池在 500 次循环后出现分界点,电解质含量高的在 500 次循环后性能明显好于电解质含量低的。究其原因,应该是在循环过程中不断发生着嵌锂和脱锂过程,并不断伴随着锂离子的消耗,而电池中锂离子的主要来源于电解质盐,电解质盐的多少直接决定了后期的循环性能的好坏,电解质盐含量越高,后期循环性能越好。从循环的角度上讲,电解质盐含量越高对电池的续航更有利。



a.25℃4C/4C 循环

b.60℃4C/4C 循环

图 1 两组电池分别在常温和高温下的循环测试

2.2 放电倍率特性

电池极化的产生从总体来说归结于两方面,一是电池内阻,即电池本身的物理电阻,电池内阻越小,极化越小;二是电池活性物体系中锂离子传输速度的快慢,锂离子传输速度越快,极化越小。电池极化由以上两种因素综合而成。放电背景下,由于电池本身物理内阻一定,放电电流越大,因物理内阻产生的热量越大,总能量一定的情况下,电池放出容量越小;而锂离子传输相对于电子传输有不同的路径,电子传输速度的快慢无法决定离子传输快慢,故大电流放电时,离子传输速度无法跟进,导致极化增大,进一步导致电池放出容量小。放电倍率特性是考查电池大电流放电特性的重要依据,一般测试方法为满充电后,在以下倍率的电流下放电至最低电压,检测电池的放电容量和放电百分比。

结果如表 2 中所示:

表 2 两组电池的放电倍率以及温升变化

电池组别	放电比率 (%)				
	1C	3C	5C	10C	20C
A1	100.00	95.41	95.23	96.05	70.02
A2	100.00	94.90	94.65	95.70	77.30

电池组别	温升 (°C)				
	1C	3C	5C	10C	20C
A1	0.525	5.3	10.13	24	43.08
A2	0.1	4.2	8.4	20.85	40.1

由表中所示,从1C,3C,5C,10C的数据来看,两组电池的放电比率无差别,但电解质含量高的温升比电解质含量低的小;20C电解质含量高的倍率特性比电解质含量低的高约7%。究其原因,大电流放电伴随着锂离子的消耗,电解质含量高的从负极释放出的锂离子含量高,也不会消耗更多能量,发热量也较小,故温升较低。

2.3 充电倍率特性

充电倍率特性跟放电倍率类似,主要决定因素仍是内阻和极化的大小,不同的是,充电倍率所考查的是电池的快充特性。就现阶段电动汽车的电池体系而言,能否让消费者和使用者在更短的时间内将电池充满电,将大大提高消费者和使用者工作和生活上的便利,是直接影响电动汽车销量的重要因素,也是进一步影响电动汽车产业发展的重要环节。如果电池极化较大,充入的能量并非完全转化为电池的容量,有部分以热量的形式散发,造成浪费,故电池极化越小,充电倍率特性越好。如何保证大电流充入大容量,是动力电池研发的关键所在。一般充电倍率的测试方法如下:将电池满放,在以下设定倍率充电,考查电池的充电百分比,百分比越大,充电倍率特性越好。

表3 两组电池的充电倍率以及温升变化

电池组别	充电比率 (%)				
	1C	3C	5C	7C	10C
A1	100.00	102.8	101.8	99.2	88.8
A2	100.00	103.3	102.7	100.2	90.9

电池组别	温升 (°C)				
	1C	3C	5C	7C	10C
A1	1.2	7.2	12	18.8	23.9
A2	1.7	7.5	13.1	18.3	23.5

由表3中所示,从1C到7C的数据判断,两组电池的充电倍率特性和温升差别不大;在10C电流下,电解质含量高的充电倍率特性略好于电解质含量低的。原因为电解质含量高的从正极释放出的锂

离子含量高,但由于负极容纳锂离子饱和后,锂离子无法继续充入负极,导致两者的充电倍率整体差异不大。3C,5C的充电数据中超过100%的原因在于,由于是以1C的倍率值作基础,3C,5C充电时电池内部温度较高,激发了负极的活性,促使更多的锂离子进入负极,使之比1C的数据高2%~3%。

2.4 混合脉冲功率特性

混合脉冲功率特性,简称HPPC,是一种功率指标,评价动力电池瞬间释放电能的特性。一般的测试方法为每隔10秒静置,用10C电流放电10秒,检测电池的功率特性,一般确认50%SOC状态下的HPPC值,1700W/kg以上即达标,但鉴于18650这种特殊结构的电池,由于其极耳较窄,放电电流受影响,1400W/kg以上也算达标。

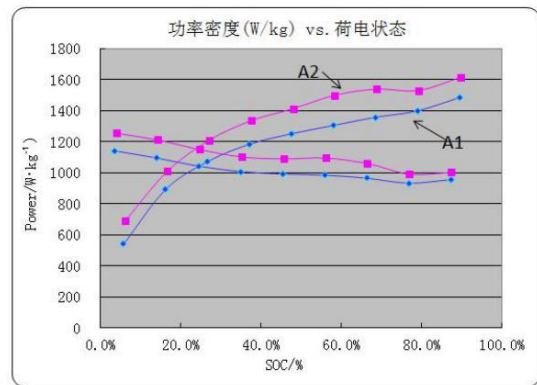


图2 两组电池的混合脉冲功率特性

从HPPC数据看出,电解质盐含量高的功率特性较好,究其机理与倍率特性一样,大电流放电伴随着锂离子的消耗,电解质含量高的从负极释放出的锂离子含量高,反应出高的HPPC特性。

2.5 高低温特性

高低温特性是模拟电池在不同温度环境下的放电性能,以常温25°C为标准,其他温度与之相比较,计算百分比。依次在不同的温度环境下,重复以上流程,记录数据见表4。

表4 两组电池的高低温性能

电池组别	不同温度的放电比率 (%)					
	-10°C	0°C	10°C	25°C	45°C	60°C
A1	70.45	81.18	97.02	100.00	101.07	101.33
A2	75.72	88.68	98.86	100.00	101.14	101.42

从高低温数据看出,电解质盐含量高的放电比率较好,究其机理与倍率特性一样,由于其锂离子含量高,温度较高的时候优势体现不出来,温度较低的时候,锂离子含量高的释放出较多的锂离子,反应出高的低温特性。

3 结果与讨论

通过两种不同的电解质盐浓度制备电解液,并对比了两者的电池质量循环、倍率、混合脉冲功率上的性能,从各个电性能测试结果来看。①电解质盐的多少直接决定了后期的循环性能的好坏,电解质盐含量越高,后期循环性能越好;②20C 电解质含量高的放电倍率特性比电解质含量低的高;③电解质含量高的充电倍率特性比电解质含量低的高;④电解质含量高的低温特性比电解质含量低的高;⑤电解质盐含量高的功率特性较好。从总体上说,电解质盐含量高的,对应的电性能越好,究其原因因为电解质含量越高,从负极释放出的锂离子含量也高,从而反应出好的电性能。

参考文献:

- [1] 刘春娜. 电动汽车电池应用与展望[J]. 电源技术, 2011, 35(1):12-14
- [2] 吴宇平, 戴晓兵, 马军旗等. 锂离子电池-应用与实践[M]. 北京: 材料科学与工程出版中心, 2004
- [3] 刘露, 戴永年, 姚耀春. 导电剂对锂离子电池性能的影响[J]. 材料导报, 2007(S1):267-269
- [4] 周振涛, 汪国杰, 李瑞珍等. 含氟聚合物胶粘剂及其电化学特性的研究[J]. 电源技术, 1998(2):47-50
- [5] 胡广侠. 锂离子电池充放电过程的研究[D]. 中国科学院研究生院(上海微系统与信息技术研究所), 2022
- [6] 姚耀春, 戴永年, 任海伦等. 离子电池中正极添加剂配比的优化研究[J]. 材料导报, 2004(2):89-91
- [7] Huang Shahua, Wen Zhaoyin, Yang Xuelin, et al. Improvement of the high-rate discharge properties of LiC002 with the Ag

- additives[J]. J Power Sourc, 2005(148):72
- [8] Christine A Frysz, Shui Xiaoping, Chung D D L Carbon filaments and carbon black as a conductive additive to the manganese dioxide cathode of a lithium electrolytic cell[J]. J. Power Source, 1996 (58):41
- [9] Cheon S E, Kwon C W, Kim D B, et al. Effect of binary conductive agents in LiCoO₂ cathode on performances of lithium ion polymer battery[J]. Electrochim Acta, 2000(46):599
- [10] Li Xinlu, Kang Feiyu, Shen Wanci. Multiwalled carbon nanotubes as a conducting additive in a LiNi_{0.7}Co_{0.3}O₂ cathode for rechargeable lithium batteries[J]. Carbon, 2006(44):1298
- [11] Ahn Soonho, Kim Youngduk, Kim Kyung Joon, et al. Development of high capacity, high rate lithium ion batteries utilizing metal fiber conductive additives[J]. J Power Source, 1999(81-82):896
- [12] 金明钢. 阴极导电剂含量对锂离子蓄电池性能的影响[J]. 电源技术, 2005(2):78-79+91
- [13] Liu Zhaolin, Lee Jim Y, Lindner H J. Effect of conducting carbon on the electrochemical performance of LiCoO₂ and LiMn₂O₄ cathodes[J]. J Power Source, 2001(97-98):361
- [14] Hong Jin K, Lee Jong H, Oh Seung M Effect of carbon additive on electrochemical performance of LiCoO₂ composite cathodes[J]. J Power Source, 2002(111):90
- [15] Shui Xiaoping, Frysz C A, Chung D D L. Solvent cleansing of the surface of carbon filaments and its benefit to the electrochemical behavior[J]. Carbon, 1995, 33(12):1681
- [16] Frysz C A, Chung DD L. Improving the electrochemical behavior of carbon black and carbon filaments by oxidation[J]. Carbon, 1997, 35(8):1111
- [17] 廖红英, 程宝英, 郝志强. 锂离子电池电解液[J]. 新材料产业, 2003(9):34-37
- [18] 吴萌, 栾和林, 姚文. 锂离子电池电解液的研究进展[J]. 矿冶, 2004(3):57-60+71
- [19] 蔡宗平, 许梦清, 李伟善等. 锂离子电池电解液负极成膜添加剂研究进展[J]. 电池工业, 2008(1):68-71
- [20] 韩景立, 刘国庆. 锂离子电池电解质溶液的研究[J]. 电化学, 2000(1):116-118
- [21] 黄文煌, 严玉顺, 万春荣等. 电解液添加剂对锂离子蓄电池循环性能的影响[J]. 电源技术, 2001(2):91-93
- [22] 袁中直, 周震涛, 李伟善. 电解液组成对锂离子电池碳负极 SEI 膜性能的影响[J]. 电池, 2002(6):354-357

欢迎投稿, 欢迎订阅!

一种用于反应堆压力容器螺栓拉伸量测量的系统

隆涛^{1,2} 文小军^{1,2} 丁然^{1,2} 刘剑^{1,2} 胡洪兴^{1,2}

1. 中国核动力研究设计院, 成都 610005; 2. 四川省核设施退役及放射性废物治理工程实验室, 成都 610005

摘要: 核电厂在进行反应堆压力容器堆内构件检修时, 通常使用螺栓拉伸机对压力容器进行开盖和盖闭操作。在压力容器开盖和闭盖的过程中, 都需要对压力容器主螺栓进行拉伸。为了保证每根主螺栓载荷的均匀性和可靠性, 需要对主螺栓的拉伸量进行测量。传统的液压螺栓拉伸量数据测量方式主要采用传统机械指针式百分表, 人工进行监测并手工记录数据, 这种方式往往造成测量数据存在误差和人为的不确定性因素, 直接影响了螺栓紧固的质量和设备的整体性能。为了提高螺栓拉伸量数据测量的准确性, 提升液压拉伸机的性能, 本文研究一套用于反应堆压力容器螺栓拉伸量的自动测量系统。螺栓拉伸量自动测量系统采用位移传感器采集螺栓的拉伸量变化, 通过数字式千分表实时显示螺栓拉伸量的测量数据, 并通过数据传输线以及多通道数据采集器将多组数据传输到工控机或者电脑上, 对测量的数据进行分析、处理、逻辑判断以及自动存储, 指导操作人员进行螺栓紧固。此外, 测量数据可以通过表格的形式导出, 方便操作人员对数据进行核查和问题追溯。

关键词: 螺栓拉伸; 数据采集; 测量系统; 数据传输

中图分类号: TM623

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2023) 02-0023-04

A System for Reactor Pressure Vessel Bolt Stretch Measuring Measurement

LONG Tao^{1,2}, WEN Xiaojun^{1,2}, DING Ran^{1,2}, LIU Jian^{1,2}, HU Hongxing^{1,2}

(1. Nuclear Power Institute of China, 610005, Chengdu, China;

2. Sichuan Engineering Laboratory for Nuclear Facilities Decommissioning and Rad-Waste Management, 610005, Chengdu, China)

Abstract: When the nuclear power plant carry out the maintenance of the reactor pressure vessel internals, the bolt tensioning machine is usually used to open and close the head of the pressure vessel. During the process of opening and closing the cover of the pressure vessel, it is necessary to stretch the main bolt of the pressure vessel. In order to ensure the load uniformity and reliability of each main bolt, it is necessary to measure the tensile amount of the main bolt. The traditional hydraulic bolt tension data measurement method mainly uses the traditional mechanical pointer dial indicator to monitor and record the data manually. This method often causes errors and artificial uncertainties in the measurement data, which directly affects the bolt fastening quality and the overall performance of the equipment. In order to improve the accuracy of bolt tension data measurement and improve the performance of hydraulic tension machine, this paper intends to study a set of automatic measurement system for bolt tension of reactor pressure vessel. The automatic measurement system of bolt tension adopts displacement sensor to collect the change of bolt tension, displays the measured data of bolt tension in real time through digital dial indicator, and transmits multiple groups of data to industrial computer or computer through data transmission line and multi-channel data collector, analyzes, processes, logically judges and automatically stores the measured data, and guides operators to tighten bolts. In addition, the measurement data can be exported in the form of tables, which is convenient for operators to check the data and trace problems.

Key words: bolt stretching; data collection; measuring system; data transmission

收稿日期: 2023-04-10

作者简介: 隆涛 (1988—), 男, 2015年毕业于重庆大学机械工程专业, 硕士研究生, 工程师, 就职于中国核动力研究设计院, 主要从事反应堆换料检修相关工作。

压力容器是反应堆的关键设备，是保证反应堆安全的重要压力边界，采用螺栓进行密封。因压力容器螺栓规格较大，一般采用液压螺栓拉伸器对螺栓拉伸后紧固。

液压螺栓拉伸器可同时紧固多个螺栓，是一种高效、安全的紧固和拆卸大直径螺栓的工具^[1-3]。工作时，高压油进入液压缸推动活塞上移，活塞拉动螺栓伸长^[4]，达到指定的伸拉量（拉伸量控制在螺栓的弹性范围内）^[5]后进行预紧，预紧后泄压拉伸量会产生一定回弹。拉伸量是评判螺栓预紧情况和受力均匀的关键，在螺栓紧固过程中需实时测量螺栓的拉伸量，以便于操作人员根据拉伸情况实时调整液压螺栓拉伸器的拉力^[6]，保证各个螺栓的残余拉伸量保持一致。

传统的螺栓拉伸量数据测量采用机械指针式百分表，人工进行监测并手工记录数据，这种方式往往造成测量数据存在误差和人为不确定性因素，直接影响螺栓紧固的均匀性，进而影响反应堆压力容器的密封性，影响反应堆安全。为解决上述问题，本文拟研究一种用于反应堆压力容器螺栓拉伸量自动测量系统，测量主螺栓在拉力作用下的伸长量，确保所有主螺栓拉伸量保持基本一致，进而保证主螺栓受力均匀^[7-8]。

1 螺栓拉伸量测量原理

当螺栓施加轴向载荷时且在该螺栓材料的弹性变形阶段，其伸长量与所加载荷成正比关系^[9]，其计算公式如下式（1）。

$$\Delta L = \frac{F \times L}{E \times A} \quad (1)$$

其中： ΔL — 螺栓的拉伸量，mm； F — 螺栓承受的轴向载荷，N； L — 螺栓的有效长度，mm； E — 螺栓材料的弹性模量，N/mm²； A — 螺栓的承载面积，mm²。

由上式（1）可看出，计算拉伸量需获得螺栓承受的轴向载荷、承载面积以及螺栓材料的弹性模量等数据。而在实际应用过程中，这些数据会随着压力容器的运行产生变化，从而造成数据不准确。

采用直接测量的方式获取螺栓拉伸量，通过拉伸前后位移变化反应主螺栓拉伸量，可减弱材料参

数、制造差异对拉伸量的影响。

$$\Delta L = Z_1 - Z_0 \quad (2)$$

其中： Z_1 — 拉伸后读数，mm； Z_0 — 拉伸前读数，mm。

2 拉伸量自动测量系统

2.1 系统组成

螺栓拉伸测量系统硬件由通用测量母表、数字式千分表、测量表座、母表校准装置、USB集线器、USB连接线以及工控电脑组成，如图1所示。利用数字式千分表采集螺栓拉伸伸长量，通过USB接口将每次采集到的测量数据传送到工控机上，并显示在工控机触摸屏上，帮助现场操作人员进行分析判断。同时，测量软件系统对采集的数据进行逻辑运算、判断、分析、报错、警告等，方便现场操作人员实时掌握螺栓拉伸量的变化，避免操作人员疏忽大意造成螺栓拉伸不到位或者过拉伸，螺栓螺母卡死或者损坏。测量的数据按照拉伸工艺要求自动生成测量数据表格，并可通过U盘导出，作业数据可供检验、验收及管理人员进行查看追溯，并通过数据表格分析问题，优化螺栓拉伸工艺。

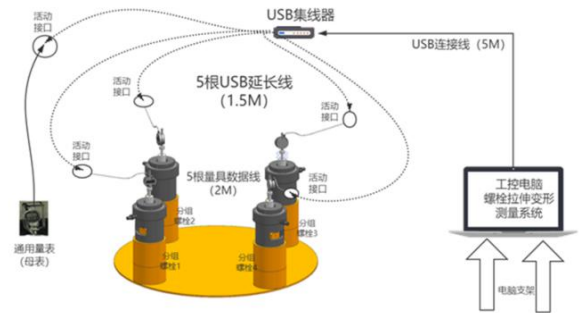


图1 螺栓拉伸测量系统示意图

2.2 螺栓拉伸测量软件

螺栓拉伸测量系统软件基于 Windows 操作系统，采用 C#语言进行定制化开发，支持 Win7/win10 版本，其它环境信息如表1所示。螺栓拉伸测量软件采用系统化管理采集、存储数据，保证数据传输的正确性、及时性，提高测量记录的效率；系统通过与采集量表集成，实现采集数据动态显示；实现对多量表数据一键采集；系统自动计算，对超过绝对拉伸值后实行颜色预警（预警点变为红色）。

表 1 螺栓拉伸量测量系统软件信息

序号	插件名称	版本	备注
1	驱动程序	USB-ITN	Marcore
2	运行时	windowsdesktop-runtime-5.0.0-rc.1.204 52.2-win-x64	Marcore
3	队列服务	otp_win64_23.0 rabbitmq-server-3.8.7	Marcore
4	.NET 安装包	.NDP452-KB2901907-x86-x64-AllOS- ENU	DMS

3 拉伸量测量系统应用实践

3.1 系统安装

螺栓拉伸测量系统安装在现有的反应堆压力容器螺栓拉伸装置上。作业时将反应堆压力容器螺栓拉伸装置吊装至反应堆压力容器上，通过调整十字滑架的作业顺序，将拉伸器吊装至待拉伸螺栓上，通过螺栓与主螺栓旋紧，将数字式千分表安装在测量表座上，表座安装到待测量螺栓上端面，数字式千分表数据线与工控一体机连接。

3.2 系统操作

使用时，安装好主螺栓拉伸测量系统及螺栓拉伸系统，启动液压泵升至系统设定工作压力值后系统保压，螺栓拉伸测量系统采集螺栓拉伸值，达到螺栓拉伸值后上紧螺母，螺栓拉伸系统卸压，螺栓拉伸测量系统采集螺栓残余值并存储。拆装拉伸器和螺栓拉伸测量系统，重复以上的过程，进行下一组螺栓的上紧及螺栓变形量采集存储，直至全部螺栓完成紧固。

系统硬件操作步骤如下：

- (1) 启动测量系统，填写基础信息：项目号、螺栓数量、工具数量等；
- (2) 手动清零校准好的测量母表，采集所有螺栓的“Z0”值并存储；
- (3) 安装 4 块测量表，采集第一遍对称拉伸螺栓变形的最大值和剩余值并存储；
- (4) 用测量母表采集所有螺栓的“Z1”值并存储；
- (5) 再次安装 4 块测量表，采集第二遍间隔拉伸螺栓变形的最大值和剩余值并存储；

(6) 用测量母表采集所有螺栓的“Z2”值并存储；

(7) 安装 4 块测量表，采集第三遍顺序拉伸螺栓变形的最大值和剩余值并存储；

(8) 用测量母表采集所有螺栓的“Z3”值并存储；

(9) 调整拉伸伸长量超出公差范围的螺栓，并用测量母表采集“Za”值并存储，调整拉伸至螺栓伸长量全部满足公差范围。

螺栓拉伸测量系统软件的操作流程图如下图 2 所示，软件操作见面如图 3 所示。

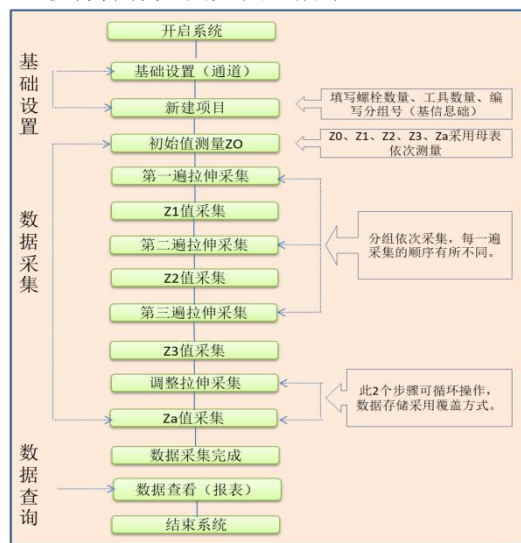


图 2 螺栓拉伸测量系统软件操作流程图

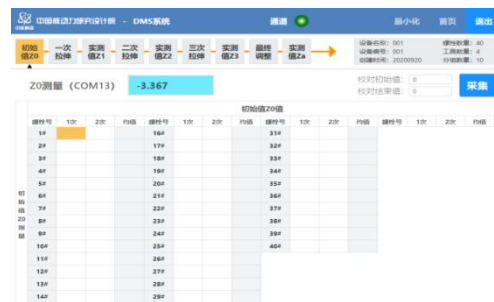


图 3 螺栓拉伸测量软件界面

3.3 应用示例

螺栓拉伸测量系统通过某反应堆压力容器开盖闭盖的现场实地应用，实现了压力容器主螺栓拉伸量的数字化测量与显示。按照拉伸工艺流程，实时监控主螺栓的拉伸量，自动生成数据报表，并将测量数据存储并导出，供检验、验收及管理人员进行查看追溯，优化螺栓拉伸工艺。螺栓拉伸测量

系统提高了螺栓拉伸伸长量采集、记录的工作效率，减少了人工采集、记录带来的错误，提高了反应堆压力容器开盖闭盖的自动化程度。某反应堆压力容器开盖闭盖螺栓拉伸测量系统应用测试如下图4、5所示。

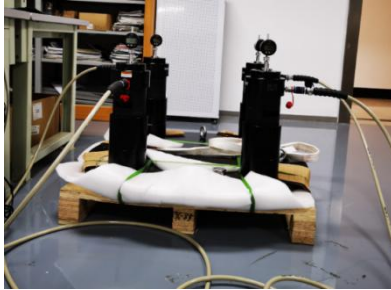


图4 螺栓拉伸测量系统硬件应用测试



图5 螺栓拉伸测量系统软件应用测试

4 结语

螺栓拉伸测量系统的应用，实现了某核反应堆压力容器在开盖、闭盖过程中第一次采用自动化的方式采集并记录螺栓拉伸伸长量，提高了螺栓拉伸伸长量

采集、记录的工作效率，减少了人工采集、记录带来的错误，提高了反应堆压力容器开盖闭盖的自动化程度。同时，导出的测量数据通过计算分析，可以指导反应堆压力容器的下一次开盖、闭盖，优化开盖、闭盖工艺流程，提高反应堆压力容器检修的工作效率和信息化水平。

参考文献：

- [1] 陶新磊, 刘超, 陈睿. 分段整体式主螺栓拉伸机在非能动核电项目的方案探讨[J]. 压力容器, 2020,37(7):75-78
- [2] 庞厚华. 一体化螺栓拉伸机的结构设计与研究[D]. 大连交通大学, 2013
- [3] 马丽娜, 焦建平, 朱丽梅等. 主螺栓拉伸机的研制[J]. 一重技术, 1997(1):43-45
- [4] 黄帅, 卢胡, 祝飞. 整体螺栓拉伸机在反应堆压力容器开盖操作中的应用及关键步骤分析[J]. 内燃机与配件, 2020(8): 61-62
- [5] 林天龙, 孙宇, 文小军等. 反应堆压力容器主螺栓拉伸装置设计分析[J]. 装备制造技术, 2018(11):39-43
- [6] 周文. 华龙一号反应堆压力容器整体式全同步螺栓拉伸机. 北京市, 北京雷蒙赛博机电技术有限公司, 2017-06-16
- [7] 徐洪福, 孙永刚. 一种新型的全自动螺栓拉伸机[J]. 科技创新与应用, 2013(27):68-69
- [8] 王强. 整体螺栓拉伸机性能影响因素分析[J]. 中国科技信息, 2017(18):89-91
- [9] 李文霏. 整体螺栓拉伸机的系统设计与研究[D]. 厦门大学, 2017

集团要闻

东树新材料结构胶获得海上和陆上百米级风电叶片全部叶型的应用许可

2023年3月17日，东树新材料常规型结构胶在客户处完成了关键及衍生叶型的静力和疲劳验证。至此，东树新材料结构胶已获得海上和陆上百米级风电叶片全部叶型的应用许可，能够对海上和陆上风电叶片的差异化需求提供专业的粘接方案。

作为整个风电叶片材料体系中风险最高的关键材料之一，推进风电叶片结构胶产业化进程一直是东树新材料不懈追求。东树新材料持续在市场上发力、在技术上攻坚，最终实现了结构胶系列产品迈向市场的关键一步，目前已成为国内第三家同时具备环氧树脂和结构胶产品供应能力的企业。

风电叶片用环氧结构胶作为叶片五大主材之一，其性能的优劣将直接决定叶片的质量。东树新材料自主研发的高韧性结构胶性能达到行业先进水平，有助于实现超大型风电叶片用结构胶的国产化替代，从而提升我国风电叶片制造行业核心竞争力。

来源：东方电气微信公众号

CFR600 型示范快堆蒸汽发生器关键焊接技术

但军 李恩 蒋宇晨 邓道勇 戴光明

东方电气(广州)重型机器有限公司, 广州 511455

摘要: CFR600 示范快堆蒸汽发生器是我国自主设计、制造的四代核电堆型, 本文主要介绍了 CFR600 示范快堆的产品结构、新型焊接材料研制以及技术控制要求, 并详细论述了管子-管板封口焊技术、钠进出口接管与耐热不锈钢异种钢对接技术、铬钼钢 (F22) 与 F91 材料异种金属对接技术、超大壁厚铬钼钢环缝对接技术等关键焊接技术, 为后续第四代核电堆型蒸汽发生器设计、研制提供技术保障。

关键词: 快堆; 核电技术; 蒸汽发生器; 焊接技术

中图分类号: TM623

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2023) 02-0027-04

Key Welding Technology of CFR600 Demonstration Fast Breeder Reactor Steam Generator

DAN Jun, LI En, JIANG Yuchen, DENG Daoyong, DAI Guangming

(Dongfang (Guangzhou) Heavy Machinery Co., Ltd., 511455, Guangzhou, China)

Abstract: CFR600 demonstration fast breeder reactor steam generator is the fourth Nuclear reactor designed by China. In this paper, the structural characteristics, the welding materials and the requirements of CFR600 steam generator was described. Meanwhile, the key welding processes to be implemented, such as the tube-to-tube sheet weld, Joint technology of sodium inlet and outlet pipe and heat-resistant stainless steel dissimilar steel, technology of dissimilar metal docking between chromium molybdenum steel (F22) and F91 material, ring joint technology of extra-large wall thick chromium molybdenum steel, have been introduced in detail, which provides technical supports for the design and development of the fourth generation nuclear power reactor steam generator.

Key words: fast breeder reactor; nuclear power technology; steam generator; welding technology

“快堆”全称“快中子增殖反应堆”(Fast Breeder Reactor, FBR), 是第四代先进核能系统主力堆型, 它可将天然铀资源利用率从目前的约 1% 提高至 60% 以上, 并实现放射性废物最小化, 能一举解决铀矿资源枯竭、核材料利用率低和核废料难以处理等问题^[1]。其形成的核燃料闭合式循环在运行过程中可以不断地产生新的燃料, 使其核燃料“越烧越多”。国际社会普遍认为, 发展和推广快堆, 可以从根本上解决世界能源的可持续发展和绿色发展问题^[2]。

与压水堆不同之处在于, 快中子堆以钚-239 为燃料, 利用快中子引发核裂变。钚-239 使原子核分裂成两个原子核, 裂变反应在放出大量热量的同时还会放出快中子, 这些快中子会被外围再生铀-238 所吸收, 使其变为钚-239, 衰变转化为燃料钚-239^[3]。

600 MW 钠冷示范快堆蒸汽发生器是中国原子能科学院与中国东方电气集团联合首次设计、东方电气(广州)重型机器有限公司首次研制的第四代核电技术。本研究基于“示范快堆蒸汽发生器”的研

收稿日期: 2023-03-30

作者简介: 但军 (1968—), 男, 2009 年毕业于华南理工大学高级管理人员工商管理专业, 硕士, 高级工程师, 现主要从事核电压力容器和换热器工艺研究和企业管理、核电产品项目管理。

制，主要介绍其产品结构以及关键焊接技术。

1 产品结构及主要材料

600 MW 示范快堆蒸汽发生器设计建造标准采用的是美标 ASME 2015 版，每个机组设置 16 台蒸汽发生器，蒸汽发生器包含蒸发器和过热器，蒸发器和过热器由钠入、出口接管进行连接，如图 1 所示。



图 1 蒸汽发生器外形示意图

其中蒸发器主体外形尺寸 2 740 mm × 1 736

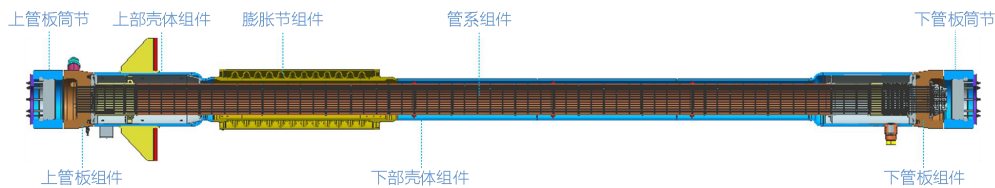


图 2 蒸汽发生器内部结构示意图

2 蒸汽发生器关键焊接技术

2.1 铬钼钢外伸式管子-管板封口焊技术

CFR600 示范快堆蒸汽发生器（以过热器为例）蒸汽设计温度高达 515 °C，设计压力高达 23.85 MPa，为满足产品运行要求，管板及换热管均采用全新研发的耐高温铬钼钢材料（F22、T22），该材料脆硬倾向大。管子-管板封口焊采用外伸填丝式焊接结构，如图 3 所示，焊接过程中，为避免铬钼钢材料焊接冷裂纹倾向，保证焊口质量，焊前及焊接过程中，需对整个管板待焊面进行预热，预热温度要求控制在 200 °C~250 °C。焊工需全程在 200 °C 以上半密闭高温环境下施焊，在核能领域尚属首次应用。为满足严苛的工况要求，封口焊焊缝 100 % 采用微焦距棒阳极 X 射线探伤，底片缺陷不允许超

mm × 20 826 mm (h)，净重约 51 吨；过热器主体外形尺寸 2 740 mm × 1 736 mm × 11 026 mm (h)，净重约 38 吨。该设备为管壳式换热器，包括两个回路，其中壳程侧回路工作介质为液态金属钠，设计温度 515 °C，设计压力 1.5 MPa；管程侧回路工作介质为水/蒸汽，设计温度 510 °C，设计压力 1.5 MPa。

示范快堆蒸汽发生器采用双管板、直换热管结构，主要功能是将壳程回路的高温液态金属钠热量传导至管程的水/蒸汽，在出口处产生高压过热蒸汽，从而进入到汽轮机发电；单套设备换热面积达到 584 m²，换热功率达到 3.8 万 kW 以上。产品主要包括顶盖组件、上/下管板筒节组件、上/下管板组件、上/下部壳体组件、管系组件、底盖组件、高压密封组件、换热管插件等，如图 2 所示。

快堆蒸汽发生器母材主要包括 SA-387M Gr.22Cl.1、SA-336 Gr.F22 Cl.1、SA-182M F91、SA-182M F316H，因其特殊的运行工况要求，母材及其使用的焊材均为国内首次自主研发，产品焊接工艺也均为国内首次开发。

过 0.5mm（底片成像放大 2~3 倍），单个接头氦检漏漏率 < 6.7 × 10⁻¹⁰ Pa · m³/s，焊缝渗透探伤不允许任何显示。

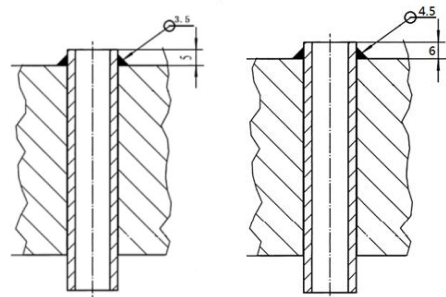


图 3 蒸发器、过热器管接头焊接结构

为实现封口焊待焊区域温度精准控制，本文设计了专用中频感应加热装置，如图 4 所示。同时也开发了专用自动封口焊设备，克服半密闭高温腔室

状态下恶劣工况条件，如图5所示。通过对焊接参数、钨极状态及旋转半径、清洁度等影响封口焊质量的关键因素控制，最终实现封口焊一次合格率 $\geq 99.1\%$ 。

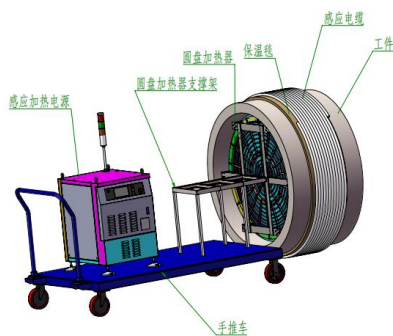


图4 中频感应加热系统



图5 自动封口焊示意图

2.2 铬钼钢(F22)与耐热不锈钢(316H)对接技术

蒸汽发生器壳程承压边界接管(F22)与安全端(316H)进行组装焊接，焊缝内侧的工作介质为液态金属钠，运行设计压力为2.5 MPa，设计温度为530℃，接头需具有较高的室温性能、高温性能和高温持久性能。

因镍元素在高温液钠环境下会发生镍原子迁移现象，无法采用成熟的镍基焊材作为隔离层，因而全新开发了特殊运行环境下的耐热钢隔离层焊接材料CHG-1625HRK，成功解决了铬钼钢(F22)与耐热不锈钢(316H)带CHG-1625HRK隔离层焊接接头两侧母材化学成分过渡的问题，如图6、图7所示。其最终焊缝性能满足高温液态钠长期使用工况，各项技术指标满足设计要求^[4]。

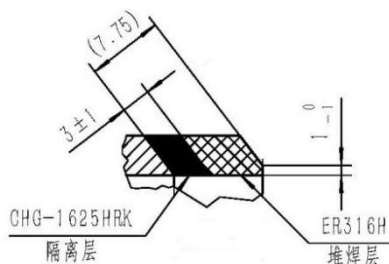


图6 隔离层结构示意图

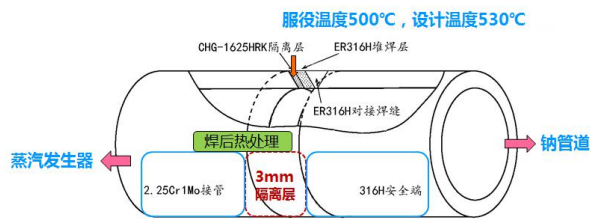


图7 F22与316H对接结构示意图

2.3 铬钼钢(F22)与F91对接技术

按照设计要求及材料特性，F22与F91对接后，焊口熔覆金属及两侧母材的热影响区需进行消应力热处理，改善焊接接头(焊缝及热影响区)的金相组织和性能。根据ASME标准及铬钼钢F22材料研发性能可以确定，F22焊后消应力热处理保温温度范围为675℃~705℃，F91材料焊后消应力热处理保温温度范围为750℃~770℃，两侧母材消应力热处理保温温度不存在重叠区域。采用F22母材热处理保温温度，则使得F91侧母材、热影响区及熔合区达不到高温回火的效果，无法改善该侧金相组织，无法提高焊接接头的塑性、韧性等力学性能，也无法有效降低该侧硬度，使得焊缝在运行过程中极易产生裂纹等缺陷。而采用P91母材热处理保温温度，会使得F22侧发生奥氏体转变，冷却后组织晶粒过大，碳化物聚集长大，使得该侧母材、热影响区等力学性能及硬度大幅降低^[5]，无法满足示范快堆蒸汽发生器设计运行要求。

根据设计要求，主蒸汽管嘴设计温度高达530℃，设计压力17 MPa，对F22与F91焊接接头有较高的高温强度及塑韧性要求，同时为满足设备长期高温服役的安全性，焊接接头需具有较高的高温持久性及疲劳性能，国内外尚无F22材料与P91材料对接后，接头性能满足上述要求的工程技术应用和经验。

为解决上述问题，本文通过大量试验及化学成分控制，完成了F91隔离层选型(选用特殊成分控制的E5515-B2-V焊材)及接头设计，如图8所示，可同时经受两侧母材不同消应力热处理制度。此外本文开发了特殊热处理工艺，如图9所示，成功实现了焊缝金属及两侧母材热影响区的残余应力消

除及组织转变,接头室温强度、高温强度及塑韧性、持久性能等指标满足设计要求。

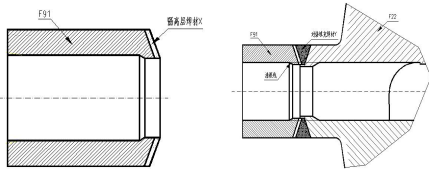


图8 F22与F91异种钢带隔离层对接结构示意图

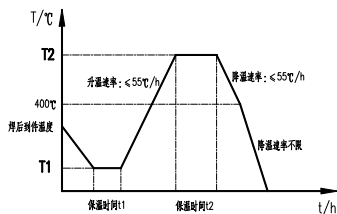


图9 F91隔离层堆焊热处理工艺示意图

2.4 超大壁厚铬钼钢环缝对接技术

示范快堆蒸汽发生器管板与管板筒节选用国内自主研发的铬钼钢材料。管板筒节壁厚达185 mm,内部腔室直径仅D870 mm。2.25Gr1Mo材料脆硬倾向明显,进行小直径、超大壁厚环缝焊接,焊接接头残余应力大,焊缝及热影响区存在较大的应力开裂风险。

为降低焊接过程的开裂风险,设计了专用中频感应加热设备。焊接前及过程中对焊缝及两侧母材至少300 mm区域进行加热,保证待焊接区域母材温度 $\ge 200^\circ\text{C}$ 。

在坡口的结构设计上选用了带止口环缝对接结构,如图10所示,减少了内侧坡口填充量。

为保证焊缝的最终性能,针对性的设计了盖面回火焊道和中间热处理工艺及装配,如图11所示,及时的消除焊接残余应力,减少焊接冷裂纹产生,实现了示范快堆16套蒸汽发生器,64条管板与管板筒节环缝,最终检验一次合格。

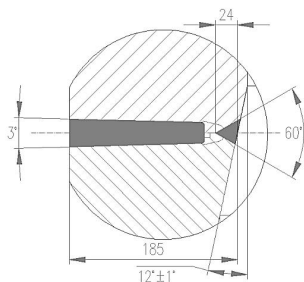


图10 管板-管板筒节带止口坡口示意图



图11 管板-管板筒节消应力装置

3 结语

CFR600型示范快堆蒸汽发生器是世界上仅少数发达国家能够研制的大型核电设备,在国内属首次制造。示范堆的成功研制,全面掌握了各种研发焊材的焊接特性,研制过程中攻克了一系列技术难题,开发了各种先进的加热及焊接装备,行业首创了多种焊接结构形式及工艺,使我国掌握了第四代钠冷快堆核电设备制造的关键技术,在未来的核电发展中,让中国立于世界核电技术先进行列,对国家能源安全起着非常重要的作用。

参考文献:

- [1] 佚名. 中国示范快堆实现土建开工[J].中国原子能科学研究院年报,2017
- [2] 王祥元,张娟. 快堆蒸汽发生器换热管高温拉伸试验研究[C].中国核学会.中国核科学技术进展报告(第七卷)——中国核学会2021年学术年会论文集第3册(核设备分卷、核材料分卷),2021:325-328
- [3] 蔡炳蔚. 钠冷快堆技术发展综述[J]. 新型工业化,2020,10(12):3-5
- [4] 李恩,蒋宇晨,刘远彬等. 一种用于高温液态钠介质下的铬钼钢与耐热不锈钢的焊接方法[P]. 广东省:CN113084309A,2021-07-09
- [5] 陈志明. F91钢管与A691Gr.1-1/4CrCL22钢管焊接接头的热处理[J]. 焊管,2020,43(1):40-43+48

风光水多能互补系统研究展望

晏明 刘德民 令红兵 张艳东 丁小莉

东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000

摘要: 风光水多能互补系统利用水电机组调整速率快、水库容量灵活性可调等特点, 以水电/抽水蓄能作为调节电源, 因地制宜, 匹配风电、光伏发电, 在电源侧通过多能互补解决新能源发电波动性和不稳定性问题。基于水电/抽蓄的快速灵活性调节, 可提高风电、光伏输出电能质量, 降低对电网的冲击, 增加新能源并网消纳, 提升水电站送出线利用率和经济效益, 建立了零碳清洁能源互补系统。本文综述了风光水多能互补系统研究现状、存在的问题, 并提出了未来发展趋势。

关键词: 风光水多能互补; 研究现状; 存在的问题; 发展趋势

中图分类号: TM61

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2023) 02-0031-05

Research Prospects of Wind Power-photovoltaic-hydro Multi-energy Hybrid Power System

YAN Ming, LIU Demin, LING Hongbing, ZHANG Yandong, DING Xiaoli

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

Abstract: The wind power-photovoltaic-hydro multi-energy hybrid power system using the characteristics of hydropower units' fast adjustment rate and reservoir's adjustable capacity, takes hydropower/pumped storage power as the regulating power supply, adapts measures to local conditions, matches wind power and photovoltaic power generation, to solve the problems of fluctuation and instability of new energy power generation through multi energy complementarity on the power side. Based on the rapid and flexible regulation of hydropower/ pumped storage power, it can improve the output power quality of wind power and photovoltaic, reduce the impact on the power grid, increase the electric power transmission of new energy, improve the utilization rate and economic benefits of power transmission grid for hydropower stations, and establish a zero carbon releasing energy complementary system. This paper summarizes the research status and existing problems of wind power-photovoltaic-hydro multi-energy hybrid power system, and puts forward the future development trend.

Key words: wind power-photovoltaic-hydro multi-energy hybrid power system; research status; existing problems; future development trend

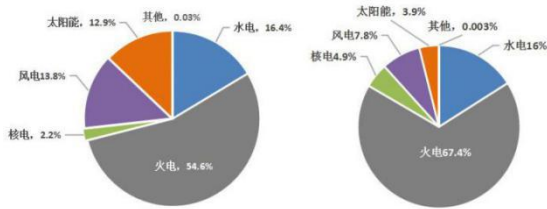
根据国家能源局的统计数据, 截止到 2021 年底, 我国发电总装机容量 23.77 亿千瓦, 同比增长 7.9%, 发电量 8.3 万亿 kWh, 同比增长 10.3%。其中, 风电、光伏装机容量分别达到 3.28 亿千瓦(占比 13.8%)、3.07 亿千瓦(占比 12.9%), 同比增长 16.6%、20.9%, 但其发电量占比仅占 7.8%、3.9%, 表明存在大量的弃风弃光, 导致这一问题的

主要原因就是风光发电存在较大的随机性和不稳定性, 对电网冲击较大, 限制了风电、光伏发电上网(图 1)。根据国家电网公司 2019 年预测, 2035 年前, 新能源装机将超过煤电成为全国第一大电源, 风、光装机规模分别达到 7 亿、6.5 亿千瓦, 总计 13.5 亿千瓦, 占总装机比例提高到 37%, 2050 年, 总装机 25.5 亿千瓦, 占比达到 52%。可以看出,

收稿日期: 2023-03-20

作者简介: 晏明(1986—), 男, 2011年毕业于哈尔滨工业大学化学工程与技术专业, 工学硕士, 高级工程师。现主要从事新技术研究工作。

如不采取相关措施，未来风电、光伏等新能源对电网的冲击将会逐步加大。为解决这一问题，结合“双碳目标”，利用清洁水电在电源侧对风光进行互补调节，是未来增加风光新能源出力的理想模式。



(a)电力装机结构 (b)电力发电量结构
图1 截止2021年底电力装机和发电量结构

水电/抽水蓄能进行风光调节在2021年国家发改委、能源局发布的《关于推进电力源网荷储一体化和多能互补发展的指导意见》中正式提出，明确了以“碳达峰 碳中和”为目标，构建清洁低碳、安全高效的能源体系。2022年3月，国家能源局进一步发布《国家能源局综合司关于开展全国主要流域可再生能源一体化规划研究工作有关事项的通知》，其主旨围绕水风光可再生能源一体化发展，实现可再生能源综合集约高效一体化开发。

我国水资源、风光资源丰富，具备风光水互补工程开发的资源基础，以雅砻江为例，其干流年流量600亿方，落差3830米，可装机3000万千瓦，沿线区域风电资源可开发量达1300万千瓦，光照资源可开发量可达1800万千瓦^[1]，以流域水电为基础，统筹风光资源，互补风电、光伏出力，具备

风光水一体化综合利用的条件和基础。

目前，国内建设及在建的风光水互补项目包括龙羊峡光水互补示范工程（水电1280MW、光伏850MW）、贵州玉龙镇象鼻岭“水光互补工程”（水电240MW、光伏48MW）、青海玉树水光互补微网发电示范工程（光伏2MW、水电12.8MW、储能15.2MWh）^[2]，苏洼龙项目（水电1200MW）等。象鼻岭采用光水互补模式后，送出线年利用小时数提高了7.7%^[3]，互补具有良好的经济性。目前风光水互补探索的重点及方向集中在跨流域、跨区域风光互补，根据规划，未来将有更多的水电/抽蓄机组参与到风光水互补系统中。

1 风光水互补政策支持

为提早实现2030碳达峰、2060碳中和目标，“十四五”阶段是关键期，根据国家发改委、能源局发布的《“十四五”现代能源体系规划》，推进水电基地、重大工程建设，实施小水电绿色改造，推动西南地区水电与风光发电协同互补，“十四五”末，常规水电容量达到3.8亿千瓦。四川、云南、贵州、西藏、青海等各省均在探索利用省内水电资源规划风光水互补，打造风光水一体化工程。国务院在《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》中指出，发挥黄河上游水电站和电网系统的调节能力，支持青海、甘肃、四川等风能、太阳能丰富地区构建风光水多能互补系统（表1）。

表1 各省风光水互补政策规划

省份	规划名称	“十四五”容量规模	风光水互补规划
四川	《四川省“十四五”能源发展规划》	水电核准在建0.12亿千瓦，新增投产0.24亿千瓦	重点推进雅砻江、金沙江、大渡河“三江”水电基地建设，规划建设雅砻江、金沙江上游、金沙江下游、大渡河中上游风光水互补利用基地。
云南	《云南省国民经济和社会发展规划第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》	电力装机达到1.3亿千瓦左右，绿色电源装机比重达到86%以上	以金沙江下游、澜沧江中下游大型水电站基地以及送出线路为依托，建设“风光水储一体化”国家示范基地。
贵州	《贵州省新能源和可再生能源发展“十四五”规划》	水电装机2281万千瓦（无新增），风电装机1080万千瓦（新增500万千瓦），光伏发电装机3100万千瓦（新增2043万千瓦）	建设乌江、北盘江、南盘江、清水江流域四个水风光一体化可再生能源综合基地以及风光水火储多能互补一体化项目，提高水电或火电送出通道利用率。

西藏	《西藏自治区国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》	水电建成和在建装机容量突破 1 500 万千瓦, 光伏装机突破 1 000 万千瓦	推动雅鲁藏布江、金沙江、澜沧江等流域水风光综合开发, 快速推动藏电外送规模化发展, 建设国家重要的清洁能源接续基地。
青海	《青海省“十四五”能源发展规划》	水电装机达 1 643 万千瓦 (新增 450 万千瓦), 光伏 4 580 万千瓦 (新增 3 000 万千瓦)、风电 1 650 万千瓦 (新增 807 万千瓦)	打造共和、贵南、同德、兴海等水风光储一体化工程。推动常规水电、可逆机组、储能工厂协同开发, 力争“十四五”开工建设 100 万千瓦的水电梯级储能工厂。

抽水蓄能在大规模风光并网方面, 具备优异的调节能力, 具体表现在调峰调谷、调频调相、事故备用、蓄能、黑启动等方面。根据《抽水蓄能中长期发展规划(2021-2035年)》, 截至2021年8月, 包括东方电机供货的仙游(单机300 MW)、仙居(单机375 MW)、绩溪(单机300 MW)、长龙山(350 MW)等电站在内, 我国抽蓄电站已投产总规模3 249 万千瓦, 在建规模为5 513 万千瓦, 均为世界第一。预计到2025年, 抽蓄投产总规模达到至少6 200 万千瓦, 2030年, 其投产规模再翻

番。

西部地区常规水电和抽蓄的大力规划建设, 为后续风光水互补提高调节能力奠定了坚实的基础。

2. 风光水互补研究现状

2.1 风光水互补工程现状

在风光水储互补领域, 各大电力巨头如三峡集团、中国能建规划设计集团、国家电投等, 均在推进相关示范项目的建设, 如表2所示。华能水电依托自身大中型水电站等区域的风光资源, 因地制宜开展风电、光伏建设, 致力于风光水储一体化发展。

表2 拟建/在建风光水互补工程

序号	项目名称	容量规模	备注
1	云南昆明“风光水储一体化”试验基地	300 万千瓦	规划建设
2	贺州市 2GW“风光水火储项目”	风电 300MW、抽蓄 1.2 GW、光伏 500 MW	桂东电力与贺州市签订框架协议, 总投资 110 亿
3	湖南省衡阳县风光水储多能互补项目	3 个风电项目、3 个光伏项目、抽蓄项目, 总装机容量 1 100 MW	中国能建与衡阳县签订投资开发协议, 总投资 55 亿
4	包头风光水储氢一体化能源示范项目	/	三峡集团与包头市签署战略合作协议
5	澜沧江清洁能源基地	10 GW 光伏+10 GW 水电	华能, 规划中
6	春厂坝“分布式光伏与梯级小水电互补联合发电技术研究及应用示范”工程	54 MW 水电、5 MW 抽蓄	中国电建, 实施中
7	荆门市百万千瓦级水风光一体化重大基地项目	总装机 300 万千瓦以上, 光伏 240 万千瓦以上, 风电 20 万千瓦以上, 抽蓄 20 万千瓦以上	签订开发协议, 投资测算 150 亿

目前, 风光水互补项目基本处于在建或论证规划阶段, 工程大多为示范研究, 未来随着越来越多的风光水储一体化项目的实施, 风光等新能源发电并网将得到质的提升。

2.2 研究方向

电网、发电集团、设备厂家、高校科研院所均在围绕风光水互补工况下的系统进行研究, 其研究方向包括基于不同优化目标的风水光容量匹配^[4]、

适应风光水互补运行的水电机组研究、不同时间尺度下的风光水处理耦合控制、风光水互补运行联合控制和优化调度、联合运行收益分配。

2.2.1 容量匹配研究

张海龙等人^[5]基于西藏阿里地区孤网条件下的未来用电需求, 结合光伏资源可装机容量, 采用光水互补方式, 以建设总费用最优为目标, 分析了水电装机容量。水电与光伏、风电容量配比的合理性,

在项目规划过程中意义重大，直接影响后续风光水互补系统的经济性。此外，在梯级电站的容量配置过程中，还应考虑水量平衡、对下游各级电站的影响。

2.2.2 水力发电设备研究

风光水互补系统目前仍处于研究阶段，为保障后续整体系统满足防汛、发电、高频互补等功能，相比常规水电设备，风光水一体化运行工况下导致的水电机组频繁负荷波动，对设备设计研发的要求更高更严苛。

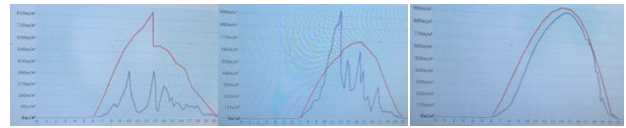
在常规水电机组升级方面，技术适应性提升具体表现在，①要求机组能全负荷工况运行，大部分负荷范围能长期安全稳定运行，其余负荷能安全运行；②能快速响应负荷的频繁波动；③相比常规水电机组，具备更加优异的水力特性，如压力脉动等；④基于设定的启停频次、负荷变动频次、甩负荷频次、飞逸频次等要求，旋转部件的设计要具备优异的机械特性和抗疲劳能力；⑤发电机要求具备承受较大电压、频率波动的能力，足够的调相容量和进相深度。

在抽蓄机组方面，技术正在朝向更高水头、容量及变速抽蓄等方向发展。我国抽水蓄能工程始于上世纪60年代的河北岗南电站，通过广抽、十三陵、天荒坪抽蓄电站的建设，逐步建立了我国抽蓄基础，东方电机在上述项目设备供货中均有参与，当前抽蓄市场占有率全国第一。目前，国内抽蓄设备在600米水头段及以下大容量、高转速领域，以东方电机为代表的产品，已达国际先进水平，未来将朝向变速抽蓄、分布式抽蓄、海水抽蓄等技术方向拓展。

2.2.3 联合调度研究

在风光水联合调度方面，其研究主要集中在风光电站集群调度、风光发电不确定性研究、风光水长期协调控制、水风光短期协调等领域^[6]。明波等人^[7]对水光互补中长期不同优化调度方法进行研究，表明，采用参数-模拟-优化方法能有效提高发电量、发电保证率和降低缺水指数。贾一飞等人^[8]通过建立合理的光伏出力预测模型和水光调度模型，能大大降低弃光和水库弃水。对风电、光伏出力预测是联合调度研究中的重要一环，对风光出力预测存在较大的困难，如图2所示，尤其是阴雨天气，预测

难度较大。康本贤^[9]通过多种建模，以龙羊峡光水互补实际情况进行验证发现，不同时间尺度、不同天气条件下采用不同的预测模型，能提高出力预测的准确性。



(a) 阴雨天气

(b) 晴天

图2 某光伏电站光伏预测与实时监测曲线对比

2.2.4 收益分配策略研究

陈述等人^[10]通过等分策略、按容分配策略和Shapley值分配策略进行研究，研究结论表明光伏电站最倾向参与多能互补，风电次之，水电再次之。对风光水互补系统中，各发电主体的收益分配研究及政策配套，目前还处于研究策划阶段。

2.3 风光水互补当前困境

资源匹配及输送困难。从表1可以看出，各省风光电力资源与水电资源比例差异较大，这就导致了风光利用水电的调节需要在更大的范围内进行。同时，部分地区主网架能力无法满足风光资源大规模消纳、电力供需结构性矛盾、外送电送-受-输协同等仍存在较大问题^[11]。需兼顾防汛、灌溉、发电经济性等要素。风光水互补运行能有效提高发电效益，但同时可能会导致枯水期系统失负荷天数增加，而丰水期又增大了下游的防汛压力^[12]。技术上，新能源发电预测、风光水互补协调调度、系统安全控制等技术方面未得到有效验证，应用存在风险。

市场机制待完善。大型抽水蓄能/水电通过电网或者直接参与风电、光伏电力输出调节，电力市场缺乏在该工况下对抽蓄/水电机组调节作用的鼓励机制以及分布式风光水互补系统联合打包供电鼓励机制缺乏。

3 风光水互补形式

风光水互补目前存在的形式主要有两种，一种是以龙羊峡为代表的水（风）光互补AGC调节，分配水、风/光出力，打包上网，跟随负荷曲线；另一种则是以流域或更大范围内的风光水调节，通过电网进行调度，将出力直接分配至电源端。结合水利灌溉、调水工程^[13]的风光水互补系统，“优先就

地消纳、兼顾发电效率”小型区域性风光-抽蓄系统、风光-泵-发系统，未来也可作为区域性水风光农联合运用探究方向。风-光-泵-发系统，可通过泵系统消纳风光的不稳定出力的同时，由水电机组平稳发

电以满足负荷需求，同时，高水位的上水库还能结合附近农、牧、渔需求提供水利灌溉便利，具有较好的应用价值（图3）。

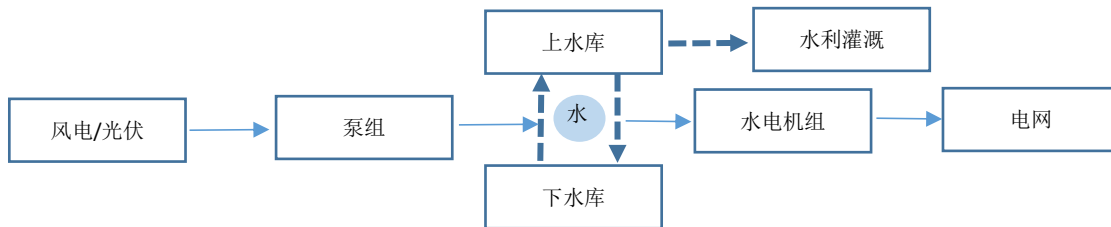


图3 风-光-泵-发系统

4 结语

双碳背景下，风电、光伏未来装机容量将逐步增大，大量直接上网对电网带来巨大冲击，最终导致弃风、弃光问题加剧，而负荷端我国能源电力消耗将逐年增大，在水资源丰富的地区和流域，利用水电/抽蓄进行风光水互补联合运行，能有效缓解这一系列矛盾。本文总结了目前国内风光水多能互补发展现状，得出以下结论：

（1）风光水互补系统能提升电站现有输出线效益，增长年发电时间，提高风光消纳，经济效益得到较好改善。但同时，采用这种方式，可能会带来丰水期防汛、枯水期失负荷的风险，因此，系统设计时应统筹考虑。

（2）除国家政策支持外，水资源丰富地区省份均出台政策支持风光水互补项目实施，同时，发电集团、电网、设计院、建设集团等电力相关巨头均在该领域发力，已规划项目众多，为后续风光水互补系统有效应用奠定了基础。

（3）风光水互补系统目前在容量匹配、设备技术研究、发电预测、联合调度等方面仍处于研究阶段，当前还存在资源匹配及输送难、系统安全控制不成熟、市场机制不健全等困境。

（4）风光水互补的形式主要有两种，基于水电站/抽蓄的风光水互补联合打包出力、区域电网内的风光水互补调度。此外，在小区域范围内，基于小水电改造，考虑农、牧、渔需求提供水利灌溉便利等因素下的风-光-泵-发系统具有一定的前景。

参考文献：

- [1] 吴世勇, 周永, 王瑞等. 雅砻江流域建设风光水互补千万千瓦级清洁能源示范基地的探讨[J]. 四川水力发电, 2016,35(3):105-108
- [2] 韩晓言, 丁理杰, 陈刚等. 梯级水光蓄互补联合发电关键技术与研究展望[J]. 电工技术学报, 2020, 35(13):2711-2722
- [3] 黄鹤, 秦岭, 喻洋洋等. 水光多能互补清洁能源智能发电技术[J]. 分布式能源, 2020,5(2):21-26
- [4] Xu Xiao, Hu Weihao, Cao Di, et al. Optimized sizing of a standalone PV-wind-hydropower station with pumped-storage installation hybrid energy system[J]. Renewable Energy, 2020, 147: 1418-1431
- [5] 张海龙, 赵言稳. 水光互补模式下阿青水电站装机容量优化选择[J]. 水利规划与设计, 2020(10):130-134
- [6] 申建建, 王月, 程春田等. 水风光多能互补发电调度问题研究现状及展望[J]. 中国电机工程学报, 2022,42(11):3871-3885
- [7] 明波, 郭鹏程, 陈晶等. 水光互补电站中长期随机优化调度方法评估[J]. 水电与抽水蓄能, 2021,7(5):20-24
- [8] 贾一飞, 林梦然, 董增川. 龙羊峡水电站水光互补优化调度研究[J]. 水电能源科学, 2020,38(10):207-210+106
- [9] 康本贤. 龙羊峡水光互补协调运行研究综述[J]. 西北水电, 2020(1):23-26
- [10] 陈述, 赵金凡, 陈云等. 水风光多能互补联合运行增益分配研究[J]. 科学技术与工程, 2022,22(10):3991-3997
- [11] 郭飞, 冯士睿, 刘强等. 浅谈风光水一体化在金沙江流域的典型应用[J]. 四川电力技术, 2021, 44(4):67-71
- [12] 闻昕, 孙圆亮, 谭乔凤等. 考虑预测不确定性的风-光-水多能互补系统调度风险和效益分析[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(3):32-41
- [13] 阎平, 赵丹, 许珂等. 基于富余风光资源利用的调水线路评价研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2020,18(6):494-501

风力发电机组极限外推参数估计对比研究

王钧 尹景勋 赵伟 曾庆忠

东方电气风电股份有限公司, 四川 德阳 618000

摘要: 本文采用全局最大值法提取风力发电机组的载荷极值, 选择三参数威布尔分布预测长期极限载荷, 对比分析4种不同参数估计方法(线性矩法、相关系数法、极大似然法、矩估计法)对外推结果的影响。

关键词: 极限外推; 全局最大值法; 三参数威布尔分布; 参数估计

中图分类号: TM315

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2023)02-0036-05

Comparison of Parameter Estimation Methods for Extreme Load Extrapolation of Wind Turbine

WANG Jun, YIN Jingxun, ZHAO Wei, ZENG Qingzhong

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

Abstract: In this paper, the global maximum method is used to extract the maximum load from each simulation of wind turbine, and the three parameter Weibull distribution is used to predict long-term extreme load. The extrapolation results of four parameter estimation methods including L-moment estimation, correlation coefficient estimation, maximum likelihood estimation and moment estimation are compared.

Key words: extreme load extrapolation; global maximum method; three parameter Weibull distribution; parameter estimation

从《IEC61400-1: 2005(第三版)》标准开始, 在风力发电机组设计中要求使用基于统计学的极限外推法确定50年一遇设计极端载荷^[1]。外推结果的准确性直接影响了机组的安全性和制造成本, 需要针对具体机型的载荷数据选择合适的拟合模型进行极限外推。相关研究表明三参数威布尔分布在风力发电机组极限载荷外推中具有较好的拟合效果^[2]。

三参数威布尔分布的参数估计方法有很多, 不同的参数估计方法在风力发电机组载荷外推中都有应用。目前并没有确切的证据表明哪种方法更合适, 需要根据特定的载荷数据进行拟合分析。本文基于东方风电某兆瓦级直驱风力发电机组仿真数据, 选择全局最大值法提取极值, 使用线性矩法、相关系数法、极大似然法、矩估计法进行参数估计,

对比分析4种不同参数估计方法对极限载荷外推结果的影响。

1 极限载荷外推

风力发电机组极限载荷外推采用基于统计学的外推方法, 假定载荷符合某一特定函数, 根据短期载荷概率分布预测长期载荷。IEC标准要求对设计载荷工况DLC1.1(正常湍流风模型NTM)计算的叶根摆振力矩 M_x 、叶根挥舞力矩 M_y 及叶尖变形进行50年一遇极限载荷外推, 保证外推极值不大于设计载荷工况DLC1.3(极端湍流风模型ETM)统计的极限载荷, 否则增加ETM风模型的湍流强度, 直到满足要求。

1.1 极值提取

载荷极值提取方法主要有分块最大值法、阈值

收稿日期: 2023-03-20

作者简介: 王钧(1992—), 男, 2017年毕业于华北电力大学, 工学硕士, 工程师。现在东方电气风电股份有限公司从事风力发电机组载荷计算相关工作。

-峰值法和全局最大值法。采用阈值-峰值法提取极值时,虽然 IEC 第三版标准推荐选取连续向上交叉的平均数加上 1.4 倍标准偏差提取极值,但是有研究表明该阈值可能会造成提取不到极值的情况发生,合理的阈值选择至关重要^[3]。分块最大值法则需要考虑最优分块数和分块极值独立性检验等问题^[4]。相对于前两种方法,全局最大值法直接从仿真时序中提取单个最大值,数据提取方便高效,在工程领域中具有广泛的应用^[5]。本文选择全局最大值法提取仿真载荷极值,用于后续外推对比分析。

1.2 短期分布

对于每个风速区间提取的 n 个极值数据,按数值大小依次排列 $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$, 其经验分布函数为:

$$F_{\text{short-term}}(x) = \frac{i}{n+1}, i=1, \dots, n \quad (1)$$

通过拟合经验分布可以得到短期概率分布,本文选取三参数威布尔分布进行载荷极值的短期分布拟合,其分布函数为:

$$F(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x-\gamma}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (2)$$

式中: γ —位置参数; η —尺度参数; β —形状参数。

1.3 长期载荷外推

进行长期载荷极值外推时,先对每个平均风速下的极值进行短期分布拟合,然后再根据平均风速分布概率对极值的短期分布进行加权,得到所有平均风速下极值的长期分布。在 N 个风速区间 $V_1 \leq V_2 \leq \dots \leq V_N$ 内的载荷极值长期外推概率分布为:

$$F_{\text{long-term}}(x) = \sum_{k=1}^N F_{\text{short-term}}(x | V_k) P_k \quad (3)$$

式中: 工况仿真周期为 10 分钟,则 50 年一遇超越概率为 $10/(50 \times 365.25 \times 24 \times 60) = 3.8 \times 10^{-7}$ 。 P_k 为各风速区间的分布概率,假设 10 分钟内风速的平均值服从瑞利分布,其累积概率函数为:

$$P(V) = 1 - \exp \left[-\pi (V / 2V_{\text{ave}})^2 \right] \quad (4)$$

式中: V_{ave} 为 10 分钟风速均值。

2 参数估计方法

2.1 线性矩法^[6]

线性矩定义为次序统计量的某种线性组合的

期望值,前四阶线性矩为:

$$\begin{cases} \lambda_1 = \alpha_0 \\ \lambda_2 = 2\alpha_1 - \alpha_0 \\ \lambda_3 = 6\alpha_2 - 6\alpha_1 + \alpha_0 \\ \lambda_4 = 20\alpha_3 - 30\alpha_2 + 12\alpha_1 - \alpha_0 \end{cases} \quad (5)$$

α_r 的无偏估计值为:

$$\begin{cases} \hat{\alpha}_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \\ \hat{\alpha}_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(i-1)(i-2) \cdots (i-r)}{(n-1)(n-2) \cdots (n-r)} x_i, r \geq 1 \end{cases} \quad (6)$$

线性矩系数定义如下:

$$\tau_r = \frac{\lambda_r}{\lambda_2}, r > 2 \quad (7)$$

形状参数、位置参数和尺度参数的估计值为:

$$\beta = \frac{\log(2)}{5} \quad (8)$$

$$\gamma = \lambda_1 + \frac{5\lambda_2}{\tau_4 - 5\tau_3 - 1} \quad (9)$$

$$\eta = (\lambda_1 - \gamma) / \Gamma \left[\frac{\log \left(\frac{10}{\tau_4 - 5\tau_3 + 4} \right)}{\log(2)} \right] \quad (10)$$

2.2 相关系数法^[7]

对式 (2) 取两次自然对数可得:

$$\ln[-\ln(1-F(x))] = \beta \ln(x-\gamma) - \beta \ln \eta \quad (11)$$

令:

$$\begin{cases} Y = \ln[-\ln(1-F(x))] \\ X = \ln(x-\gamma) \\ A = \beta \\ B = -\beta \ln \eta \end{cases} \quad (12)$$

将式 (12) 转化为线性关系式:

$$Y = AX + B \quad (13)$$

仿真得到的数据通过式 (12) 得到新的数据 (X_i, Y_i) , 由线性回归分析可得参数 A 、 B :

$$\begin{cases} A = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - (\sum_{i=1}^n X_i)(\sum_{i=1}^n Y_i) / n}{\sum_{i=1}^n X_i^2 - (\sum_{i=1}^n X_i)^2 / n} \\ B = \sum_{i=1}^n Y_i / n - A \sum_{i=1}^n X_i / n \end{cases} \quad (14)$$

X 和 Y 的相关系数 R 表达式为:

$$R = \frac{(\sum_{i=1}^n X_i Y_i - (\sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i) / n)^2}{(\sum_{i=1}^n X_i^2 - (\sum_{i=1}^n X_i)^2 / n)(\sum_{i=1}^n Y_i^2 - (\sum_{i=1}^n Y_i)^2 / n)} \quad (15)$$

将式(15)作为目标函数,使相关系数 R 取得最大值的 η 即为尺度参数的估计值,最后通过式(12)求出 γ 和 β 。

2.3 极大似然法^[8]

三参数威布尔分布的对数似然函数表达式为:

$$\ln L(x_1, \dots, x_n; \gamma, \beta, \eta) = n \ln \beta - n \ln \eta^\beta + (\beta - 1) \sum_{i=1}^n \ln(x_i - \gamma) - \frac{1}{\eta^\beta} \sum_{i=1}^n (x_i - \gamma)^\beta \quad (16)$$

式(8)对 η 的求偏导数并令其等于 0 可得:

$$\eta^\beta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \gamma)^\beta \quad (17)$$

式(9)带入式(8)可得:

$$\ln L(x_1, \dots, x_n; \gamma, \beta) = n \ln \beta - n + n \ln(n) + (\beta - 1) \sum_{i=1}^n \ln(x_i - \gamma) - n \ln \sum_{i=1}^n (x_i - \gamma)^\beta \quad (18)$$

将式(18)作为目标函数,使其取得最大值的 γ 和 β 即为所求的位置参数、形状参数的估计值,最后通过式(9)求出 η 。

2.4 矩估计法^[9]

若令 $g_i(\beta) = \Gamma(1 + i/\beta), i = 1, 2, 3$, 则三参数威布尔分布的数学期望 $E(x)$ 、标准差 $\sigma(x)$ 、偏度 $B(x)$ 及其对应的样本估计值 \bar{X} 、 S 、 B 为:

$$E(x) = \eta g_1(\beta) + \gamma \quad (19)$$

$$\sigma(x) = \eta \sqrt{g_2(\beta) - g_1^2(\beta)} \quad (20)$$

$$B(x) = \frac{g_3(\beta) - 3g_2(\beta)g_1(\beta) + 2g_1^3(\beta)}{[g_2(\beta) - g_1^2(\beta)]^{3/2}} \quad (21)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (22)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2} \quad (23)$$

$$B = \frac{n}{(n-1)(n-2)S^3} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^3 \quad (24)$$

将计算所得的样本估计值分别带入对应等式中,便可求得 η 、 γ 和 β 的估计值。

3 极限外推实例分析

本文基于 GH Bladed 仿真软件建立某兆瓦级直

驱风力发电机组模型,采用 Kaimal 湍流风谱模型,对每个 DLC1.1 工况进行 10 分钟仿真,从切入到切出风速按 2 m/s 间隔分为 9 个区间。采用全局最大值法提取叶根摆振力矩 M_x (图1)、叶根挥舞力矩 M_y (图2) 和叶尖变形 (图3) 极值。如图可知,叶根摆振力矩主导风速(极值较大对应风速)发生在切出风速附近,挥舞力矩和叶尖变形主导风速发生在额定风速附近。

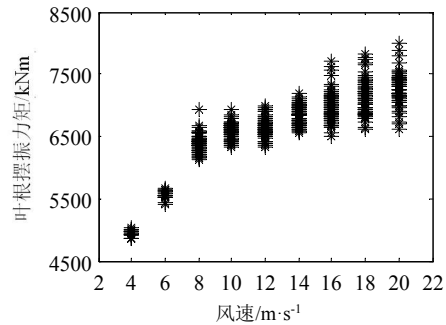


图1 叶根摆振力矩 M_x

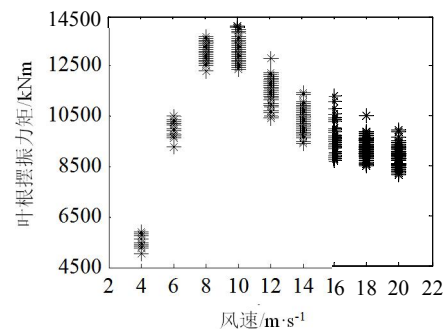


图2 叶根挥舞力矩 M_y

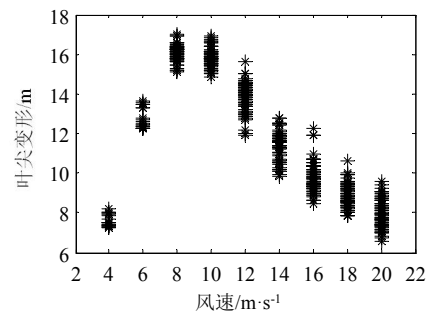


图3 叶尖变形

关于载荷极值数量的选择,IEC 标准推荐在每个风速下取 15 个,对于较小的风速区间(小于额定风速 2 m/s),可适当减少极值数量取 6 个^[10]。为了得到较为可靠的外推结果,本文在小风速区间进行 18 个仿真,其余风速区间进行 60 个仿真。10 分钟平均风速服从瑞利分布,各风速区间发生概率和仿真数量如表 1 所示。

表 1 各风速区间概率和仿真数量

平均风速 (m/s)	风速区间 (m/s)	概率	仿真数量
4	<5	0.295	18
6	5-7	0.201	18
8	7-9	0.182	60
10	9-11	0.138	60
12	11-13	0.090	60
14	13-15	0.051	60
16	15-17	0.026	60
18	17-19	0.011	60
20	>19	0.006	60

3.1 短期拟合对比

运用 4 种参数估计方法对 9 个风速区间载荷极值进行短期概率分布拟合，由于篇幅有限，仅以叶根摆振力矩 M_x 短期拟合为例，如图 4 所示。可以

看出 4 种参数估计方法在不同风速区间拟合效果显著不同。其中，在 $< 5 \text{ m/s}$ 、 $5 \sim 7 \text{ m/s}$ 、 $13 \sim 15 \text{ m/s}$ 和 $17 \sim 19 \text{ m/s}$ 几个区间拟合效果较好。线性矩法和相关系数法分别在 $9 \sim 11 \text{ m/s}$ 和 $11 \sim 13 \text{ m/s}$ 区间明显低估且显著偏离于其他 3 种方法，这两种方法同时在 $7 \sim 9 \text{ m/s}$ 区间表现出低估趋势。在 $15 \sim 17 \text{ m/s}$ 和 $> 19 \text{ m/s}$ 区间时，载荷极值尾部有明显向上偏离趋势，4 种参数估计方法对尾部数据的拟合效果都较差。图 5 对 $15 \sim 17 \text{ m/s}$ 区间载荷极值进行线性回归拟合分析，由于尾部数据线性的偏离，导致 4 种参数估计方法对尾部的拟合效果都不理想。

综合对比分析叶根摆振力矩、挥舞力矩和叶尖变形的短期拟合结果，结果表明文中采用的 4 种方法在不同风速区间拟合效果各有差异，并且都不能在所有风速区间较为理想的拟合载荷极值，尤其是在尾部数据线性回归拟合不佳时，但整体而言极大似然法的拟合效果最好，其余方法在不同风速区间拟合效果波动性较大。

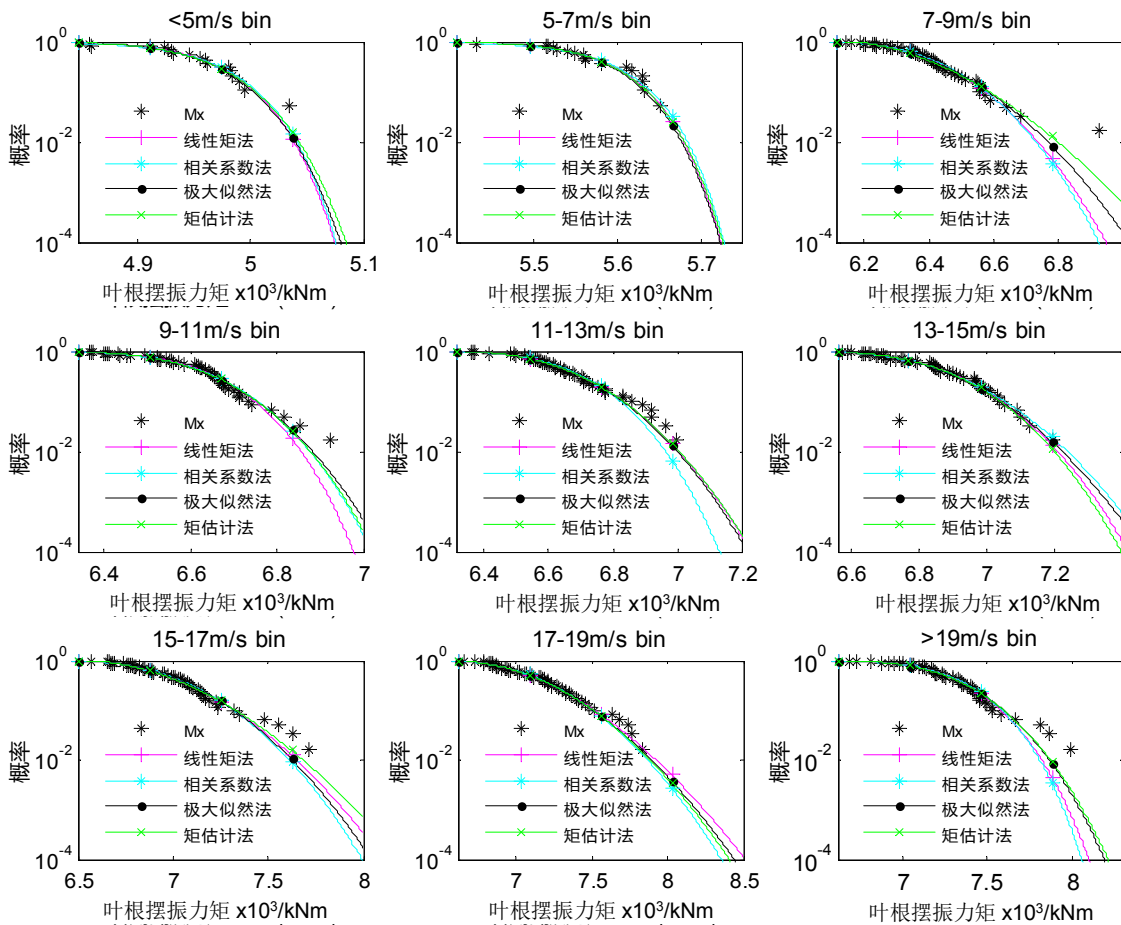


图 4 叶根摆振力矩短期分布拟合

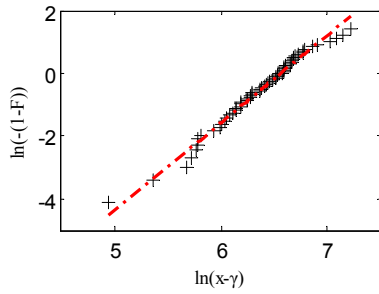


图5 线性回归拟合

3.2 长期外推对比

在载荷极值短期分布的基础上，由式（3）进行 50 年一遇超越概率下的长期外推，各风速区间短期分布拟合结果会导致长期外推结果有所差异。叶根摆振、挥舞力矩和叶尖变形的长期外推拟合结果分别如图 6、7、8 所示，表 2 为长期外推载荷和最大仿真值的对比结果。

从 4 种参数估计方法对载荷极值分布的拟合效果而言，整体上极大似然法拟合效果最优，其次是与其接近的线性矩法，相关系数法和矩估计法都出现了明显的低估结果。

表 2 50 年一遇外推载荷和最大仿真值的比值

	Mx	My	叶尖变形
线性矩法	1.080	1.122	1.056
相关系数法	1.058	1.106	1.030
极大似然法	1.070	1.123	1.055
矩估计法	1.067	1.111	1.055

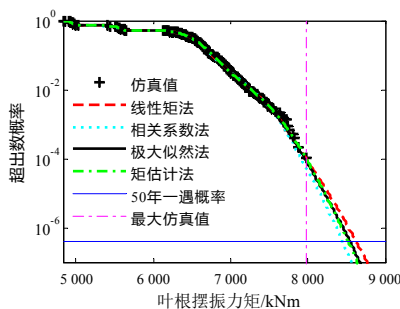


图 6 叶根摆振力矩 50 年外推

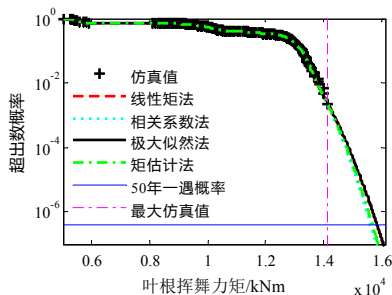


图 7 叶根挥舞力矩 50 年外推

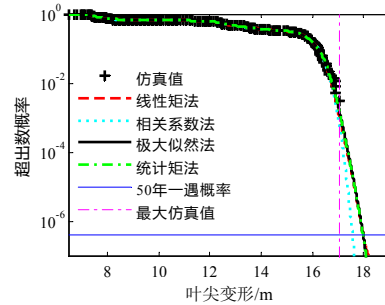


图 8 叶尖变形 50 年外推

4 结语

本文基于东方风电某兆瓦级直驱风力发电机组仿真数据，选择全局最大值法提取极值，采用 4 种参数估计方法进行三参数威布尔分布的参数估计，对比分析其对极限载荷外推结果的影响。

(1) 对于短期分布的拟合，4 种参数估计方法拟合效果各有差异，都不能在所有风速区间达到理想的拟合效果，尤其是在尾部数据线性回归检验效果不佳时，但相对而言极大似然法拟合效果最佳。

(2) 短期分布的拟合会影响长期外推结果，基于本文的载荷数据，极大似然法拟合效果最佳，其次是线性矩法，相关系数法和矩估计法都出现了明显的低估结果。

针对不同的载荷数据可能会得出不同的结论，因此需要根据实际拟合效果选择参数估计方法或对参数进行修正以较好地拟合外推数据。尽管如此，本研究仍能为风力发电机组极限外推参数估计方法的选择提供参考。

参考文献:

- [1] IEC 61400-1 Ed. 3, Wind Turbines - Part 1: Design Requirements, International Electrotechnical Commission[S]. IEC, 2005
- [2] Moriarty, P.J., Holley, W.E., and Butterfield, S.P.. Extrapolation of Extreme and Fatigue Loads using Probabilistic Methods[R]. NREL/TP-500-34421, 2004
- [3] Genz R, Nielsen K B, Madsen P H. An Investigation of Load Extrapolation according to IEC 61400-1 Ed. 3[C]. Proceedings of EWEA Conference, 2006
- [4] Jeffrey Fogle, Puneet Agarwal, Lance Manuel. Towards an Improved Understanding of Statistical Extrapolation for Wind Turbine Extreme Loads[J/OJ]. 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, January 2008. <https://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2008-1339>
- [5] 王清波, 赵伟, 曾庆忠. 统计外推法在风力发电机组载荷分析

(下转第 52 页)

塔式太阳能光热发电站镜场设计软件研究现状

黄菊¹ 鄢治国¹ 邓彪^{1*} 王志民¹ 朱彤²

1.东方电气自动化控制工程有限公司,成都 610036; 2.同济大学机械与能源工程学院,上海 201804

摘要:“十四五”期间风光热储四维一体、多能互补将是能源利用新趋势,塔式光热发电凭借自身优势将迎来新的发展。但随着光热发电站镜场容量的增加,现有镜场设计软件计算开销大、效率低下的问题愈发的凸显。通过深入分析塔式太阳能热发电站镜场设计软件现状,对不同镜场设计软件中的初始布局、效率计算、布局优化、吸热器能流密度分布等关键算法进行系统梳理和优劣势对比,提出软件整体性能提升的路径,为塔式太阳能热发电站的建设及镜场设计软件开发提供了思路和理论参考。

关键词:塔式太阳能;镜场布局;设计软件;算法

中图分类号:TM615

文献标识码:A

文章编号:1001-9006(2023)02-0041-07

Research Progress on the Software of the Heliostat Field Layout of the Solar Tower Thermal Power Plant

HUANG Ju, YAN Zhiguo, DENG Biao*, WANG Zhiming¹, ZHU Tong²

(1. Dongfang Electric Automation Control Engineering Co., Ltd., 610036, Chengdu, China;

2. School of Mechanical Engineering, Tongji University, 201804, Shanghai, China)

Abstract: During the "Fourteenth Five-Year Plan" period, the four-dimensional integration and multi-energy complementation of solar and thermal storage will be the new trend of energy utilization, and tower solar thermal power generation will usher in new development with its own advantages. However, with the increase of the capacity of the mirror field in the photothermal power station, the problems of high computational cost and low efficiency of the existing mirror field design software are increasingly prominent. This paper introduces and summarizes the key algorithms in those softwares, such as initial layout, efficiency calculation, layout optimization, energy flow density distribution of the receiver, analyzes the differences in functions and algorithms of different software. At last, the existing problems and some suggestions of the development of the software are discussed, and an outlook on the future development for the next research has been prospected.

Key words: solar tower thermal power; mirror field layout; design software; algorithms

在“碳中和”愿景下,持续推动可再生能源大规模开发与利用,构建清洁低碳安全高效的现代化能源体系,是“十四五”阶段我国能源发展的重要方向。光热发电凭借其一体化的储能系统,具备稳定、可靠、调节性能优异等特点,正逐步成为中国

能源结构低碳转型中的重要载体之一^[1]。2022年3月国家发展改革委、国家能源局联合印发《“十四五”现代能源体系规划》表明,十四五将推动光热发电与风电光伏融合发展、联合运行,因地制宜发展储热型太阳能热发电。风光热储四维一体、多能

收稿日期:2023-02-20

作者简介:黄菊(1982—),女,2008年毕业于西南交通大学材料科学与工程专业,硕士研究生,主要研究方向为太阳能发电、储能等新能源技术,以及传统能源发电技术绿色低碳发展。

邓彪(1991—),男,硕士研究生,主要从事太阳能光热发电镜场设计工作。邮箱:1094153808@qq.com。

互补将是能源利用新趋势。利好政策与自身优势双重加码，光热发电正迎来新热潮。

在我国已建成光热项目中，塔式占比为 60%，槽式的占比为 28%，菲涅尔式的占比 12%，塔式为我国光热项目主流。东方电气建设的哈密 50 兆瓦熔盐塔式光热发电项目是国家首批太阳能热发电示范项目，每年可提供 1.98 亿度的清洁电力。典型的塔式太阳能热发电系统由三个子系统组成：聚光集热、储热换热及常规发电系统。聚光集热系统中定日镜场的建设成本非常昂贵，占总投资费用的 40-50%^[2]。因此，电站建设前期利用镜场设计软件来生成高效低成本的镜场模拟布局是必不可少的。镜场设计软件是一个变量复杂、计算量大的工具软件，需要考虑大量变量（如太阳光的方向、太阳的形状、定日镜模型、姿态、表面误差、接收器的位置、几何参数以及定日镜、吸热器、太阳之间的相对位置等），最突出问题是在保证模型精度的情况下，每次全面设计和优化布局的过程中，都会重新计算每个定日镜的阴影遮挡效率和吸热器的能流密度分布，这将消耗大量的计算负荷和时间开销，软件计算效率低。

通过深入分析塔式太阳能热发电的镜场设计软件现状，对不同镜场设计软件中的初始布局、效率计算、布局优化、吸热器能流密度分布等关键算法进行系统梳理和优劣势对比，提出软件整体性能提升的路径，为塔式太阳能热发电站的建设及镜场设计软件开发提供了思路和理论参考。

1 现有镜场设计软件现状

表 1 总结了不同镜场设计软件在软件功能、布局方式及效率计算等方面的差异。不同的工具软件强调镜场设计内容不同，软件功能层面，基本所有镜场设计软件都具有计算光学效率的功能，部分软件能生成布局及年能量的预测；布局方式上，径向交错及其衍生布局占主导地位；算法层面，主要的差异体现在截断效率和阴影遮挡效率的计算方式上，形成了以解析方法和光线追踪方法为主的两条算法路线。

随着计算机算力的提升，后期镜场设计软件更注重集成化功能和计算效率的提升。美国可再生能

源公司 SolarPilot 镜场设计软件、国内浙能中控 SPD100 镜场设计软件、东方电气 HFLD 镜场设计软件提供了太阳追踪、镜场布局、性能计算、参数模拟、镜场优化、图形界面、成本预算等整体设计功能。计算效率提升方面，SolTrace、Tonatiuh 软件采用了多线程技术加速计算，TieSOL、SPD100 采用了 GPU 并行计算技术来提高计算。

表 1 不同太阳能热发电镜场设计软件功能和效率算法汇总

代码、软件年份	软件功能			主要布局方式		截断和遮挡效率算法		文献
	生成布局	光学效率	年能量预测	麦田型	径向交错	解析方法	光线追踪	
RECEL 1977	√	√		√	√	√		[3]
MIRVAL 1979		√			√		√	[4]
DELSOL3 1986	√	√	√		√	√		[5]
UNIZAR 1989		√	√		√	√		[6]
SolTrace 2003		√			√		√	[7]
Tonatiuh 2005		√			√		√	[8]
HFLD 2006	√	√			√		√	[9]
HFLCAL 2009	√	√			√	√		[10]
TieSOL 2011	√	√			√		√	[11]
Campo 2012	√	√			√			[12]
SolarPilot 2018	√	√	√	√	√	√	√	[13]
SPD100 2019	√	√	√	√	√	√	√	[14]

2 镜场设计软件中关键算法

2.1 镜场布局设计整体流程

不同的镜场设计软件强调镜场设计内容不同，全过程的镜场设计可通过几个不同功能的软件组合或者一个具有全面功能的软件完成，设计流程图 1 所示。

设计过程中，首先对定日镜模型、吸热器模型、边界条件及其它物理参数进行定义，选择合适的布局方式并完成初始布局（计算定日镜的坐标），结合太阳、吸热塔、定日镜三者之间的位置关系及太阳的姿态计算定日镜的姿态，通过解析或者光线追踪的方法计算镜场效率和吸热器上辐射能流密度分布，若未满足设计要求，对布局进行迭代优化，直到满足设计要求。

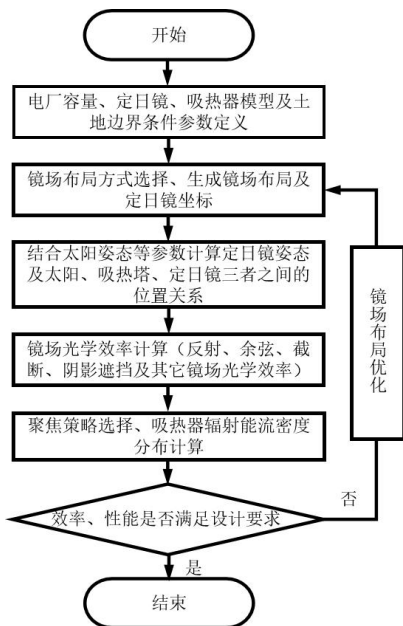


图1 镜场布局设计流程图

2.2 镜场初始布局算法

不同镜场设计软件的初始布局算法差异主要体现在基础物理参数定义、布局方式选择及镜场径向间距、方位间距上的求取规则不同^[15]。相同之处则是在计算流程上，如图2所示。

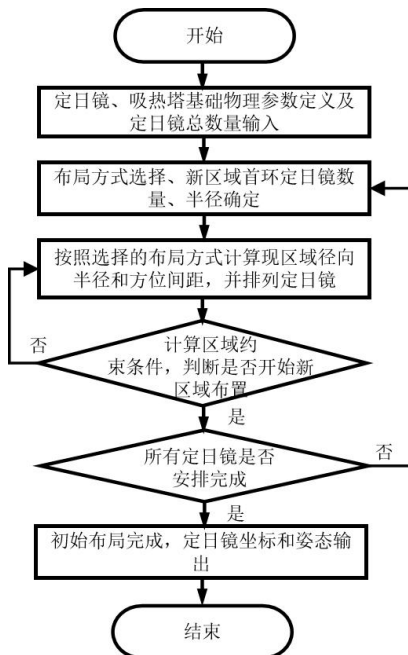


图2 模式化布局算法框架

2.2.1 基础物理参数定义

根据定日镜模型、镜场排列半径和定日镜间的安全系数计算镜场区域内定日镜之间的位置关系（如径向间距、方位角）等。不同软件使用的参数

和径向间距、方位间距求取规则存在差异。图3展示了Campo密集型径向交错算法中的基础参数定义^[12]。

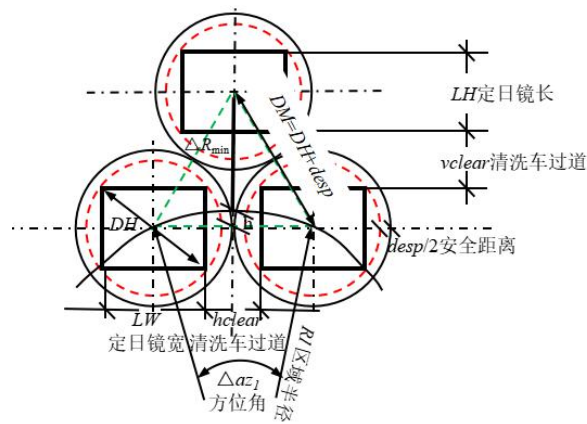


图3 Campo算法基础物理参数定义

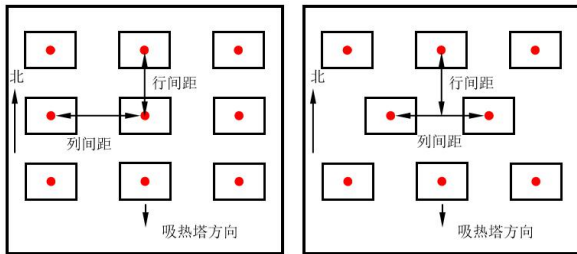
2.2.2 布局方式选择

模式化镜场布局是目前工程化应用较多的方式，主要分为麦田型布局（Confield layout）、径向交错布局（Radial Staggered Layout）、仿生布局（Biomimetic layout）及可变非均匀布局（Variable and Un-Even heliostat fields）等，如图4所示（根据当地条件决定圆形场或北部场）。Lipps和Vant-Hull等人^[3]在1978年首次提出了麦田型布局和径向交错布局，麦田型（图4a、b）中定日镜排成矩形阵列排布，具有排列简单、土建成本低的特点；径向交错布局定日镜之间的径向间距和方位角均为常数（图4c），相对于麦田型布局能有效的减少阴影遮挡。1986年DELSOL3镜场设计软件^[5]中布局方式则是基于Lipps和Walzel等人^[3,16]的前期研究，按照径向和圆周方向将镜场分为不同的区域，计算径向间距、方位间距，间距在保持约束值内，计算每个区域内定日镜的密度、数量和位置。文献^[17]基于传统径向交错布局方式提出了全年无遮挡径向交错布局方法，采用了几何作图法原理（图4d），与文献^[3]提出的径向交错法相比，该方法比较简单，避免了定日镜之间的遮挡损失，有效提高土地利用效率，更适用于定日镜场的初步设计。文献^[12]提出了密集型的径向交错布局（Campo），这种布局将定日镜区域划分为三个区域（图4e所示），布局从最密集的径向交错开始，每个区域定日镜之间的方位间距不变，通过增加定日镜之间的行间距

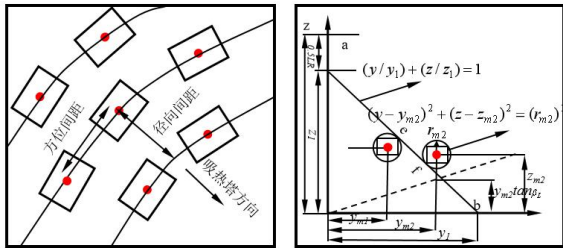
来扩大镜场，其布局的关键是阴影遮挡效率和其他效率之间的平衡，在保证光学效率精度的情况下，Campo 布局优化参数少、计算效率高。文献[18]提出了仿生螺旋布局，式(1)中的参数“a”和“b”决定了镜场定日镜的位置(图4f所示)，这种布局及衍生的混合布局与径向交错布局在文献[19]中做了对比，对于圆形场交错布局在光学效率上优于仿生螺旋布局及其衍生的混合布局，但仿生螺旋布局在地面空间布置上优于交错布局。

$$\begin{aligned} r &= ak^b \\ \theta &= 2\pi \phi \cdot 2k \end{aligned} \quad (1)$$

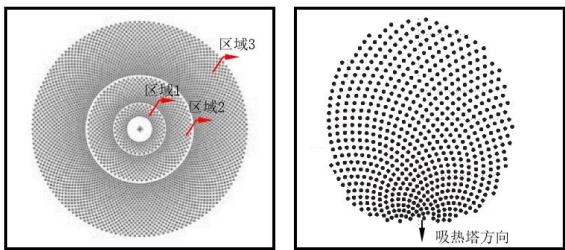
r 和 θ 定日镜在极坐标系下定日镜的位置坐标， ϕ 为常数 $\frac{1+\sqrt{5}}{2}$ ， a 和 b 则是布局需要优化的参数。



(a)麦田型布局(北场) (b)麦田型交错布局(北场)



(c)径向交错布局(圆形场) (b)无遮挡径向交错布局



(e)密集型径向交错布局 (f)仿生布局(北场)

图4 定日镜场布局方式

文献[20]提出了圆形多层次的定日镜场布局。文献[21]提出了非相等定日镜尺寸方法，较小的定日镜被放置在靠近吸热塔的地方，镜子的尺寸随着距离的增加而逐渐增大。这两种可变非均匀布局的

优势是减小了阴影遮挡因素，并可用于非平面的镜场，减少土建成本。

2.3 镜场光学效率算法

镜场光学效率由镜面反射效率、余弦效率、大气衰减效率、阴影遮挡效率、截断效率等组成。镜面反射效率与定日镜自身材料、表面清洁度相关，可视作常数。余弦效率是太阳入射光线与定日镜面法线之间的夹角的余弦值，结合反射定律和几何矢量法，用太阳入射单位向量和定日镜单位法向量的点积表示^[22]。大气衰减效率是因空气中灰尘、水蒸气、二氧化碳、温湿度等大气条件以及所处的海拔高度都会引起空气对太阳光线的吸收和散射，进而造成经定日镜反射到吸热器表面的太阳辐射能的衰减^[23]。以某单个定日镜的瞬时光学效率为研究对象，光学效率可表示为：

$$\eta_{i,t} = \rho \cdot \eta_{\cos w} \cdot \eta_{at} \cdot \eta_{int} \cdot \eta_{sb} \quad (2)$$

式中 ρ 为镜面反射效率， $\eta_{\cos w}$ 为余弦效率， η_{at} 为大气衰减效率， η_{int} 为截断效率， η_{sb} 为阴影遮挡效率。反射效率、余弦效率、大气衰减效率，在不同镜场设计软件中较为通用，其计算消耗的时间相比于阴影遮挡和截断效率的计算可以忽略不计。

2.3.1 阴影遮挡效率

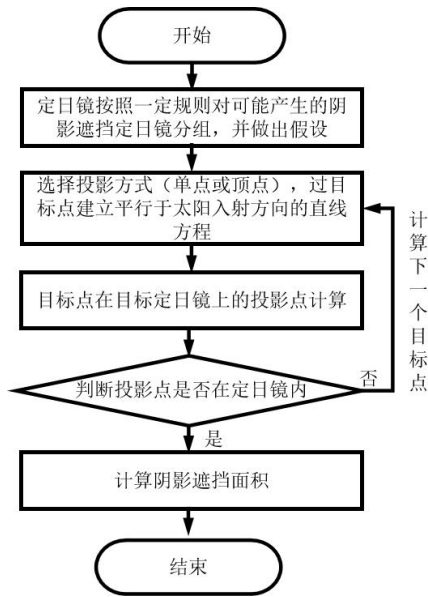
镜场布局中阴影遮挡效率的计算对程序进程的快慢起到决定性作用。目前，计算阴影遮挡主要有几何投影法和光线追踪算法^[24]。

(1) 几何投影算法中(图5a)，分为3种形式，问题定日镜在目标定日镜上投影^[25]、问题定日镜和目标定日镜在同一参考平面上投影^[26]、离散模型投影^[27](目标定日镜的反射面被细分为许多细分区域，检查进出每个细分区域的中心的太阳中心射线是否被阴影或遮挡)，具体算法参照文献^[28]。

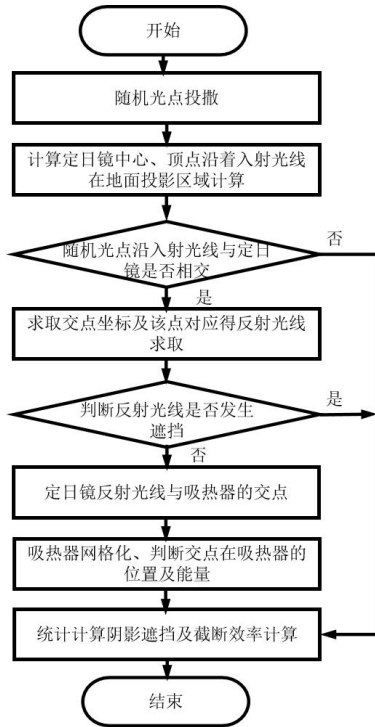
(2) 光线追踪法算法中(图5b)，光线被建模为具有一定分布的随机数，并假设产生的每一根光线的能量相等。通过统计定日镜反射面未接收到的射线和吸热器未接收到的射线数量，计算阴影遮挡效率，这种方法的精度随着产生的射线数量的增加而增加^[29,30]，公式为：

$$\eta_{sb} = 1 - (N_s + N_b) / (N - N_{grd}) \quad (3)$$

式中 N_s 为被发生阴影的光线数量， N_b 为被遮挡的光线数量， N 为总光线数量， N_{grd} 为无效光线数量。



(a)几何投影算法框架



(b) Monte-Carlo 光线追踪算法框架

图5 阴影遮挡效率算法框架

2.3.2 截断效率

截断效率是吸热器接收到的太阳能与定日镜反射的能量之比。解析方法求截断效率需要对吸热器上的定日镜反射产生的图像形状进行积分, 不同模型在吸热器上形成的图像有差别, 最重要的是需要对吸热器上的辐射能流密度分布进行模拟计算^[32]。

光线追踪法是对与吸热器表面产生交点的光

线进行统计计算, 分析每个定日镜反射光线在场景中的传播路径和运动轨迹, 清晰的判断与每一面定日镜的相交情况, 并统计最终落在吸热器表面上的光线数量, 截断效率为^[29]:

$$\eta_{\text{int}} = 1 - N_{\text{int}} / (N - N_{\text{grd}} - N_b) \quad (4)$$

式子 N_{int} 为吸热器溢出吸热器的光线数量。

2.4 吸热器辐射能流密度分布算法

吸热器通常要求辐射能流密度保持在一个最大值以下, 并且按照一定聚焦、瞄准策略地放置在吸热器上, 以实现一个可行的分布。常采用解析方法和光线追踪算法进行模拟计算。解析方法通常使用卷积积分或简化的高斯函数来对吸热器表面的反射图像进行建模, 反射图像的函数将光强度(通量)作为投影平面上位置的函数。较为主流的有 Hermitte 数值近似模型^[5,13]、UNIZAR 精确模型^[33]和 HFLCAL 简化模型^[10]。

DELSOL3 和 SolarPilot 镜场设计软件中在计算吸热器上的辐射能流密度分布时采用了 Hermitte 数值近似模型及其衍生算法^[13](针对不同类型的定日镜), 公式为:

$$F(x, y) = \frac{1}{2\alpha_x\alpha_y} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\alpha_x}\right)^2 - \frac{1}{2}\left(\frac{y}{\alpha_y}\right)^2\right] \cdot \left\{ \sum_{i=0}^I \sum_{j=0}^{J-i} A_{i,j} H_i\left(\frac{x}{\alpha_x}\right) H_j\left(\frac{y}{\alpha_y}\right) \frac{1}{i!j!} \right\} \quad (5)$$

式(5)中利用二维的 Hermitte 多项式来近似模拟一个平面定日镜反射到接收器上的辐射能密度分布, 不同位置上的强度是通过 Hermitte 多项式的 $H_i(x)$ 、 $H_j(y)$ 和 $A_{i,j}$ 的级数展开来修正, 其优势在于镜场布局优化过程中定日镜的几何形状、太阳形状以及光学误差的相关系数只需要计算一次(这些变量与太阳的位置和定日镜的姿态无关), 提高了计算效率。文献^[33]以积分的形式给出了 UNIZAR 模型来刻画聚焦型定日镜在接收器上形成的辐射能流密度分布, 本质上就是几个高斯分布的卷积。上述方法的计算过程涉及卷积操作, 无法给出通用的函数表达, 因此以 HFLCAL 为代表的多种简化模型相继出现, 使用各向同性的二维高斯函数, 直接在接收器表面刻画光斑的辐射能密度分布, 通过设置不同的高斯核参数, 来控制拟合光斑的形状和大小。文献^[34]对 UNIZAR 模型和 HFLCAL 模型进行

了对比得出, UNIZAR 和 HFCAL 模型可以作为非常适合的设计和优化工具, HFCAL 模型比 UNIZAR 模型简单得多, 也更精确。

光线追踪方法是以统计的形式计算吸热器上的光斑分布, 可得到相对精确的辐射能密度分布的预测结果, 被用作实验中的真实值进行对比, 其代价是计算复杂度比较高。

2.5 镜场布局优化算法

在完成初始布局的情况下, 需要通过改变塔高、吸热器形状、尺寸以及定日镜位置、数量等参数, 优化镜场布局, 获得最优的参数组合, 进而满足镜场效率、年能量和系统成本等要求。大多研究是以年光学效率^[35]、单位能源收集成本^[36]、土地面积利用率、塔高^[37]等为研究目标, 基于群的算法(如粒子群算法)、进化算法(如遗传算法)及这两类的衍生算法在目标函数的空间内搜索最优值。文献[38,39]采用粒子群算法优化交错布局和仿生布局。文献[40]利用遗传算法优化了仿生费马螺旋模式定日镜场, 利用这种方法对 PS10 电厂的镜场重新设计, 在改进设计中, 将定日镜的 624 个减少到 594 个, 年日照加权效率为 68.30%。文献[41]利用粒子群优化算法和遗传算法相结合对 Campo 定日镜场进行布局优化, 单位成本收集的能量最大, 提高了 3.8%。

3 结论及建议

在“双碳”背景下, 光热发电技术将迎来新一轮大规模的发展。除此, 在“智能制造”工业软件突破的政策激励下, 镜场设计软件的开发将具有重大的意义。

前期镜场设计软件受到计算机性能、算力的限制, 功能较为单一、计算效率低下, 大多研究都是通过算法的优化来提升软件整体性能。随着计算机性能提升, 镜场设计软件借助于 GPU 的并行计算能力及多线程编程技术, 实现了软件性能跨量级的飞跃。但随着塔式太阳能光热发电站镜场容量不断增加, 既保证模型精度又要兼顾软件计算效率的问题将愈发的凸显。本文对镜场布局设计的算法及相关软件现状进行总结, 分析了不同镜场设计软件的差别, 为自主研发镜场设计软件提供如下建议:

(1) 算法方面重点考虑布局方式、阴影遮挡和截断效率的计算模型。密集的径向交错布局(Campo 布局)优化参数少, 光学效率高, 可以对其进行优化和改进; 仿生布局虽然在圆形场的布局方式上光学效率低于径向交错, 但土地利用率较高, 其衍生的布局将是研究的热点。光学效率模型的选择, 简化的 HFLCAL 模型既能提高计算效率, 也能满足精度要求, 可以优先考虑。模型验证, 可采用 Monte Carlo 光线追踪法对解析的模型进行对比验证。

(2) 计算效率方面, 高性能的计算机是提高计算效率的关键, 借助于 GPU 并行计算能力, 对上述的算法进行程序加速, 跨量级的提高计算效率。

(3) 软件功能方面, 向集成化、多元化发展, 定日镜模型不仅局限于四边形, 可向多边形的方向拓展。

参考文献:

- [1] 曹传钊, 郑建涛, 刘明义等. 塔式太阳能热发电技术的发展[J]. 可再生能源, 2013, 31(12): 21-25
- [2] 张茂龙, 卫慧敏, 杜小泽等. 塔式太阳能镜场阴影与遮挡效率的改进算法[J]. 太阳能学报, 2016, 37(8): 1998-2003
- [3] LIPPS F W, ANT-Hull L L. A cellwise method for the optimization of large central receiver systems[J]. Solar Energy, 1978, 20(6): 505-516
- [4] LEARYN P L, Hankins J D. User's guide for MIRVAL: a computer code for comparing designs of heliostat-receiver optics for central receiver solar power plants[R]. Livermore, CA, Sandia National Laboratories, 1979. M.D
- [5] KISTLER, B. A user's manual for DELSOL3: A computer code for calculating the optical performance and optimal system design for solar thermal central receiver plants[R]. Albuquerque USA, Sandia National Laboratory, 1986
- [6] COLLADO F J, TURÉGANO J. Calculation of the annual thermal energy supplied by a defined heliostat field[J]. Solar Energy, 1989, 42(2): 149-165
- [7] WENDELIN T. SoITRACE: A new optical modeling tool for concentrating solar optics [C]. ASME International Solar Energy Conference, 2003: 253-260
- [8] BLANCO M J, AMIEVA J M, MANCILLAS A. The Tonatiuh software development project: an open source approach to the simulation of solar concentrating systems[C]. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Orlando, Florida USA, 2005

- [9] WEI X, Lu Z , Lin Z ,et al. Optimization procedure for design of heliostat field layout of a 1MWe solar tower thermal power plant[C]. *Solid State Lighting & Solar Energy Technologies*. 2007
- [10] SCHWARZBZL P , PITZ-PAAL R , Schmitz M. Visual HFLCAL-A Software Tool for Layout and Optimisation of Heliostat Fields[C]. *Solarpaces*. DLR, 2009.M. Izygon
- [11] P. Armstrong, C. Nilsson, N. Vu, TieSOL—A GPU-Based Suite of Software for Central Receiver Solar Power Plants[C]. *Proceedings of the 2011 SolarPACES International Symposium*, Granada, Spain, 2011
- [12] COLLADO F J, GUALLAR J. Campo: Generation of regular heliostat fields[J]. *Renewable Energy*, 2012, 46:49-59
- [13] WAGNER M J, WENDELIN T. SolarPILOT: A power tower solar field layout and characterization tool[J]. *Solar Energy* 2018,171:185-196
- [14] 许继刚, 汪毅. 塔式太阳能光热发电站设计关键技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2019:67-77
- [15] SMUTUBERRIA A, PASCAL J, GUIADO M, et al. Comparison of heliostat field layout design methodologies and impact on power plant efficiency[J]. *Energy Procedia* 2015, 69:1360-1370
- [16] M.D. Walzel, LIPPS F W, VANT-Hull L L. A solar flux density calculation for a solar tower concentrator using a two-dimensional hermite function expansion[J]. *Solar Energy*, 1977, 19(3):239-253
- [17] SIALA F, MEE F. Mathematical formulation of a graphical method for a no-blocking heliostat field layout[J]. *Renewable Energy*, 2001, 23(1):77-92
- [18] NOONE C J, TORRILHON M, MITSOS A. Heliostat field optimization: A new computationally efficient model and biomimetic layout[J]. *Solar Energy*, 2012, 86(2):792-803
- [19] ZHANG M, Du X, YANG L, et al. Comparing study of biomimetic spiral and radial staggered layouts of the heliostat field[J]. *Energy Procedia*, 2015, 69:242-249
- [20] ALDULAIMI R, MS Söylemez. Performance analysis of multilevel heliostat field layout[J]. *Turkish Journal of Science & Technology*, 2016,11(2):11-20
- [21] SAGHAFIFAR M, GADALLA M, MOHAMMADI K. Thermo-economic analysis and optimization of heliostat fields using AINEH code: Analysis of implementation of non-equal heliostats (AINEH)[J]. *Renewable Energy*, 2019,135:920-935
- [22] 程小龙, 尹延国, 马少波. 塔式电站定日镜场布局的优化设计研究[J]. *能源与环境*, 2018(2):64-66+70
- [23] SCHMITZ M, SCHWARZBZL P, BUCK R, et al. Assessment of the potential improvement due to multiple apertures in central receiver systems with secondary concentrators[J]. *Solar Energy*, 2006, 80(1):111-120
- [24] HUANG W, LI L, LI Y, et al. Development and evaluation of several models for precise and fast calculations of shading and blocking in heliostats field[J]. *Solar Energy*, 2013, 95:255-264
- [25] LIPPS F W, VANRHULL L L. Shading and blocking geometry for a solar tower concentrator with rectangular mirrors [J]. *American Society of Mechanical Engineers*, 1974, 1(4): 57-58
- [26] VITTITOE C N, BIGGS F. The HELIOS model for the optical behavior of reflecting solar concentrators[R]. Albuquerque USA, Sandia National Laboratory, 1976
- [27] McFee, R.H. Computer program concen for calculation of irradiation of solar power central receiver[C]. *ERDA Workshop on Methods for Optical Analysis of Central Receiver Systems*, University of Houston, 1974
- [28] SASSI G. Some notes on shadow and blockage effects[J]. *Solar Energy*, 1983, 31(3):331-333
- [29] 周艺艺. 塔式太阳能热电站系统的成像仿真与聚焦策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014:26-34
- [30] SANCHEZ M , ROMERO M. Methodology for generation of heliostat field layout in central receiver systems based on yearly normalized energy surfaces[J]. *Solar Energy*, 2006, 80(7):861-874
- [31] SALOMÉ A, CHHEL F, FLAMANT G , et al. Control of the flux distribution on a solar tower receiver using an optimized aiming point strategy: Application to THEMIS solar tower[J]. *Solar Energy*, 2013, 94(aug.):352-366
- [32] LIPPS F W , WALZEL M D. An analytic evaluation of the flux density due to sunlight reflected from a flat mirror having a polygonal boundary[J]. *Solar Energy*, 1978, 21(2):113-121
- [33] COLLADO F J , GÓMEZ A, TURÉGANO J A. An anaalytic function for the flux density due to sunlight reflected from a heliostat[J]. *Solar Energy*, 1986, 37(3):215-234
- [34] COLLADO, F J. One-point fitting of the flux density produced by a heliostat[J]. *Solar Energy*, 2010, 84(4): 673-684
- [35] WANG J, DUAN L, YANG Y. Rapid design of a heliostat field by analytic geometry methods and evaluation of maximum optical efficiency map[J]. *Solar Energy*, 2019,180:456-467
- [36] CARRIZOSA.E,DOMINGUEZ-BRAVO.C,FERNAN-DEZ-CARA E et al. A heuristic method for simultaneous tower and pattern-free field optimization on solar power systems[J]. *Computers & Operations Research*, 2015, 57(C):109-122
- [37] COLLADO, F J, GUALLAR, J. Two-stages optimised design of the collector field of solar power tower plants[J]. *Solar Energy*, 2016, 135:884-896
- [38] COFARGES O, BEZIAN J J., ELHafi M. Global optimization of solar power tower systems using a Monte Carlo algorithm: Application to a redesign of the PS10 solar thermal power plant[J]. *Renewable Energy* 2018,119:345-353
- [39] CHAO L, ZHAI R, LIU H, et al. Optimization of a heliostat field layout using hybrid PSO-GA algorithm[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 128:33-41

园区光储充能量管理系统设计及应用

王志民¹ 林云松¹ 鄢治国¹ 张川² 张豪亨¹

1.东方电气自动控制工程有限公司,四川 德阳 618000; 2.东方日立(成都)电控设备有限公司,成都 611731

摘要: 本文在对光储充系统相关研究的基础上,设计了一种园区光储充能量管理系统(EMS)。介绍了EMS的系统架构及设备管理、系统管理、数据展示、能源分析等功能设计,根据光伏发电量和用电负荷,结合峰谷用电时段分布,制定了能量管理策略,实现了经济利益最大化。

关键词: 光储充系统; 储能; 能量管理

中图分类号: TM615

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2023)02-0048-05

Desing and Implementation of Energy Management System for Industrial Park-used Photovolatic-energy Storage-charging System

WANG Zhimin¹, LIN Yunsong¹, YAN Zhiguo¹, ZHANG Chuan², ZHANG Haoheng¹

(1. Dongfang Electric Automatic Control Engineering Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China; 2. Dongfang Hitachi(Chengdu) Electrical Control Equipment Co., Ltd., 611731, Chengdu, Sichuan, China)

Abstract: Based on the research of photovoltaic-energy storage-charging system, an industrial park-used energy management system was designed. The software architecture and the function design including device management、system management、data presentation、energy analysis of the energy management system were introduced. Based on the energy generated by the photovoltaic system, the load and the peak-valley electricity time distribution, an energy management strategy was made, and the maximal economic profits was achieved.

Key words: photovolatic-energy storage-charging system; energy storage; energy management system

随着我国“碳达峰”“碳中和”计划的提出,我国能源结构将持续调整,风力发电、光伏发电等新能源发电将会迎来跨越式发展。由于新能源发电具有很强的波动性和随机性,大规模接入电网会对电网造成巨大的冲击。运用储能技术可以有效平抑新能源发电的波动性和随机性,从而在提升新能源接入电网比例的同时保持电网稳定。同时,在国家对新能源汽车产业发展大力支持和动力电池技术日渐成熟的背景下,新能源汽车市场发展迅速,产销量快速提升。特别是在新增乘用车市场,消费者购买新能源汽车的比例不断提升。因此,随着新能源汽车社会保有量不断提升,充电桩的需求量随之持续上涨,成为未来重要的用电负荷。将分布式新能源发电系统、储能系统及充电桩相结合可以组成光储

充系统。通过能量管理系统(EMS)控制光储充系统内相关设备间的配合,可以提升系统整体的安全性、可靠性。同时根据电价信息、功率限制政策、应急供电需求等制定合适的运行调度策略,可以有效增加系统的经济收益^[1-2]。基于上述目的,本文设计了一种园区光储充能量管理系统,其主要功能为实时运行状态监控、运行数据的采集、展示、储存与分析,在确保系统安全运行的同时提升系统的运行经济性。

1 光储充能量管理系统(EMS)结构

光储充系统分为三个部分:光伏发电系统、储能系统和充电桩系统。三个系统通过AC400V母线

收稿日期: 2023-03-20

作者简介: 王志民(1980—),男,硕士,高级工程师,现在东方电气自动控制工程有限公司科技创新中心主要从事新能源、电力电子、储能专业的相关研究工作。

耦合,通过以太网与EMS进行通讯,由EMS协调控制各系统的运行策略。EMS可以通过网络将监控数据传送给远方监控系统和监视大屏显示系统。光储充系统的系统架构如图1所示。

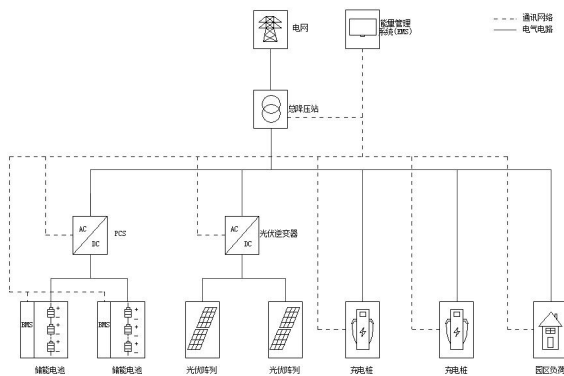


图1 光储充系统的系统架构

EMS是光储充系统的核心组成部分,负责整个系统的底层数据采集、系统网络监控、能量管理调度和运行数据分析。为保证光储充系统的稳定运行,EMS采用两级分级控制体系,分为本地EMS和集控EMS,其结构图如图2所示。

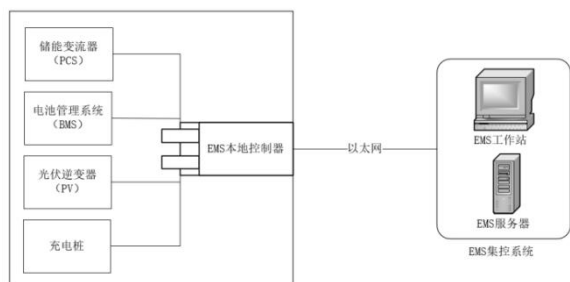


图2 能量管理系统(EMS)结构图

本地EMS可实现对储能变流器(PCS)、电池管理系统(BMS)、光伏逆变器、充电桩和电网的数据采集,并根据峰谷电价、限电政策、应急需求等不同的使用场景,制定和运行不同的能量管理策略。本地EMS通过向PCS发送有功、无功等控制指令控制PCS执行相应的动作,同时可以将监测的光储充系统实时运行状态、系统内各种设备状态等信息上传至集控EMS。

集控EMS由EMS工作站和EMS服务器构成。EMS工作站的主要功能是实时监控光储充系统的运行状态,同时负责制定光储充系统的运行模式;而EMS服务器的主要功能是储存光储充系统的运行数据,可以提供历史数据查询、数据分析等服务,

是后期根据大数据分析制定运行策略的前提保障。

2 EMS系统设计

2.1 系统架构设计

EMS采用分层设计思路进行系统架构设计,分为客户端和服务端两层架构。采用面向服务器架构的设计模式。系统内部功能模块分别进行独立封装,提供各自的运行服务,在降低系统设计难度的同时,有利于新模块的嵌入。整体系统的稳定性、可维护性与可扩展性都有了明显的提升^[3-4]。

光储充系统EMS的架构如图3所示,主要分为设备层、数据层和应用层。

设备层可以通过EMS就地控制器采集来自PCS、BMS、光伏系统、充电桩、用电设备的数据,同时可以采集其他基于标准协议的,需要接入EMS进行调度的设备的各项数据。

数据层可以实现实时数据库和历史数据库的交互。同时数据层可以提供数据库接口,供应用层访问使用。

应用层主要面对用户,提供用户数据交互、界面展示、数据查询、命令下发、授权验证、任务调度等服务。

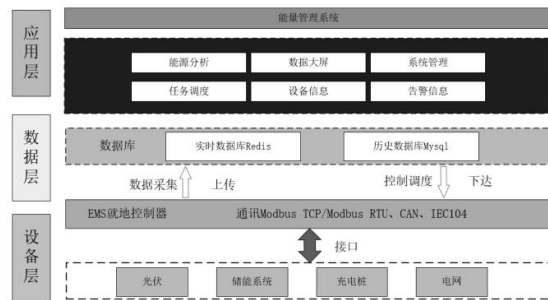


图3 能量管理系统(EMS)架构

2.2 系统硬件设计

EMS硬件主要包括EMS就地控制器、EMS集控工作台和服务器,现场布置如图4所示。

EMS就地控制器是基于RISC架构ARM9处理器构建而成,支持CAN、RS232、RS485、以太网等多种通信接口,可以同时接入Modbus RTU、Modbus TCP、IEC104、CAN等标准协议,能实时解析来自PCS、BMS、光伏发电系统、充电桩等设备的总线报文。



图4 能量管理系统（EMS）硬件布置

EMS 集控工作台采用工控机，采用 MySQL 完成对历史数据库的记录，采用 Redis 完成对实时数据库的记录。

EMS 集控服务器用来存储光储充系统的运行参数，为保证数据记录的安全与可靠，数据服务器采用双服务器热备份架构。数据采集后被分别送到两台服务器中同时进行处理，若其中一台服务器出现故障，不会影响整个光储充系统的正常工作。双服务器热备份模式可以有效提高光储充系统的运行稳定性。

3 EMS 系统功能设计实现

EMS 系统功能主要包括数据展示、设备信息、能源分析、告警信息、系统调度、系统管理等，如图 5 所示。

下面主要对设备管理、系统管理、数据展示、系统调度和能源分析五个功能进行介绍。

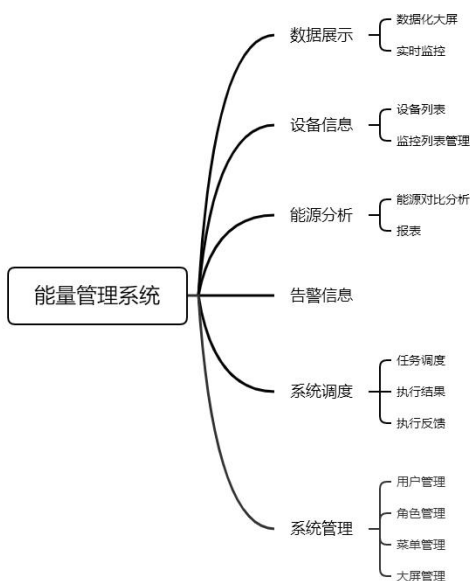


图5 能量管理系统（EMS）功能结构

3.1 设备管理

设备管理是指系统具备可二次开发的设备管理功能，EMS 可提供不同类型设备、多个设备同时接入系统的接口，同时可以在后期对设备进行调整。图 6 为设备模板添加和管理界面。

设备管理功能提供了 EMS 接入设备的灵活性，在设备类型和设备数量上均可以根据使用场景和用户要求进行定制化调整，同时在部署初期和后期均可进行更改。

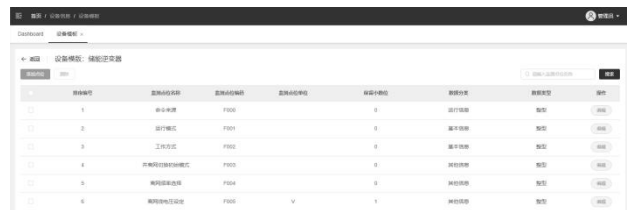


图6 设备模板管理界面

3.2 系统管理

系统管理主要是指用户权限管理。系统可进行用户级别及权限设置，防止用户非法访问。权限设置是指根据使用人员角色的不同进行分类，可分为管理人员、开发人员、运维操作人员、浏览用户等，从而实现对不同级别人员的安全管理，保证光储充系统监控和管理的安全。系统管理中的用户管理界面如图 7 所示。



图7 用户管理界面

3.3 数据展示

数据展示主要包括数据化大屏和实时监控功能。数据化大屏用于展示光储充系统的站点概况、二氧化碳减排曲线、3D模型、光伏系统发电的实时信息、外部环境监测、综合能源对比趋势、故障告警等信息。可以使用户获取清晰、详实的系统运行信息。

实时监控用于展示光储充系统的实时信息，包括电网实时信息、BMS采集的电池实时信息、光伏

系统发电实时信息、充电桩实时信息等。实时监控界面如图8所示。

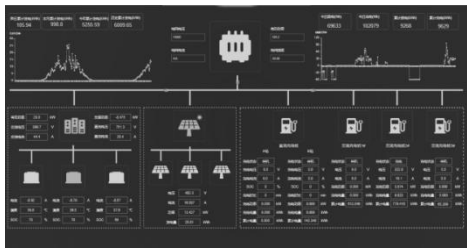


图8 实时监控界面

数据化大屏和实时监控也可以根据用户需求进行页面布局和展示信息的更改，在用户指定的位置显示用户所关注的信息，极大提升用户使用体验。

3.4 系统调度

EMS根据系统调度要求，执行各种任务调度策略。任务调度策略通过脚本开发，通过添加调度任务进行上传，可以满足客户不同的任务调度策略需求。任务调度界面如图9所示。



图9 任务调度界面

3.5 能源分析

能源分析是指对接入设备的能耗进行统计分析，同时可以按照时间段分布全方位体现光储充系统发电、用电情况，为客户提供能源使用情况分析报告。能源分析界面如图10所示。



图10 能源分析界面

4 光储充系统能量管理策略

光储充系统能量管理策略遵循三个基本的设计原则，一是为了减少从电网购电的费用，尽可能多的利用光伏系统进行发电，减少弃光现象；二是避

免储能系统进行深度放电，尽可能延长储能系统的使用寿命；三是根据当地梯度电价信息动态制定储能控制策略，最大程度利用峰谷电价差提升系统整体的经济性^[5-6]。

根据上述设计原则，制定的具体控制策略如下：

- ①采用一天一个充放电循环的模式，在储能系统合理荷电状态（SOC）范围内进行充放电，避免储能系统过充过放；
- ②最大限度消纳光伏系统发电电量，在负荷无法完全消纳光伏系统发电电量的时候使用储能系统进行电能储存，减少弃光现象；
- ③严格监视园区总用电功率，在不超过园区总用电需量限制的情况下对储能系统进行充电；
- ④实时监控光伏系统发电电量与负荷用电量，在实在无法消纳光伏系统发电电量的情况下停止光伏系统发电，避免向电网反向送电；
- ⑤为降低购电成本，尽量使用谷电价或平电价时段的电网电能；
- ⑥采取措施有效减小用户对电网的最大需求量，减小对电网可能产生的冲击。

以成都市为例，根据四川省发改委印发的《关于进一步完善我省分时电价机制的通知》的相关内容，项目所在地峰谷分时电价信息如表1所示。

表1 项目所在地峰谷分时电价

序号	时段	时间范围	电价（元）
1	高峰时段	11:00~12:00;	0.83
		14:00~21:00;	
2	平段	7:00~11:00;	0.52
		12:00~14:00;	
		21:00~23:00	
3	低谷时段	23:00~次日 7:00	0.21

结合上述成都地区电价峰、平、谷政策中的时间段分布，可以制定储能系统每日的充放电运行策略。储能系统充放电策略主要分为夜间谷电价充电策略和白天峰电价充放电策略两个部分。

(1)夜间谷电价充电策略：在夜间谷电价时段，光伏系统不发电。首先计算园区包括充电桩和其他用电负荷在内的负荷总功率。接着判断储能系统的故障状态和SOC状态是否满足充电要求。如果储能系统故障或者SOC大于90%，则不对储能系统进行充电，园区所有负荷由电网提供电力支持；如果储

能系统无故障且SOC小于90%，则电网在给园区所有负荷提供电力支持的同时对储能系统进行充电。整个过程中，电网总供电功率不超过园区总需量限制。

(2) 白天峰电价充放电策略：在白天峰电价时段，光伏系统进行发电。首先计算园区包括充电桩和其他用电负荷在内的负荷总功率以及光伏系统发电功率。接着比较总负荷功率和光伏发电功率大小，如果光伏系统发电功率大于总负荷功率，则接着判断储能系统故障状态和SOC状态是否满足充电要求，如果储能系统无故障且SOC小于90%，则光伏系统在为总负荷提供电力支持的同时对储能系统进行充电；如果储能系统有故障或者SOC大于90%，则抑制光伏系统发电，光伏系统仅满足总负荷用电功率即可，丢弃掉多出的发电能力。如果光伏系统发电功率小于总负荷功率，则接着判断储能系统故障状态和SOC状态是否满足放电要求，如果储能系统无故障且SOC大于10%，则光伏系统和储能系统同时出力为总负荷提供电力支持，如果储能系统有故障或者SOC小于10%，则光伏系统和电网同时出力为总负荷体提供电力支持。

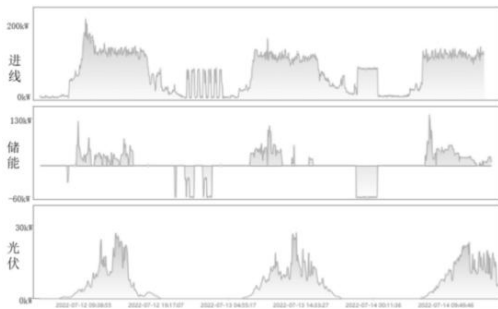


图 11 实际策略运行曲线

项目实际运行曲线如图11所示。在系统整体投入运行后，可以实现对进线功率的削减，极大的减小了电网冲击负荷。同时可以最大程度消纳光伏发电电量，充分利用太阳能资源。通过谷充峰放的循环，实现峰谷套利，提升光储充系统的经济性。

5 结语

本文设计了一种园区光储充能量管理系统，具有实时监控、设备管理、系统调度、能源分析等功能，根据光伏系统发电功率和用电负荷总负荷功率，结合当地峰谷用电时间段分布政策，制定了储能系统控制策略，实现了平移园区用电负荷、峰谷套利、园区经济利益最大化。该光储充能量管理系统已经在成都某企业园区安全稳定运行，为区域电网错峰避开负荷高峰发挥了巨大的作用，取得了很好的经济效益和社会效益。

参考文献：

- [1] 王晓华, 孙德亮, 李维华. 光储微网系统设计与应用[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2016,39(1):79-83
- [2] 傅金洲. 光(伏)储(能)一体发电系统的储能配置和能量管理策略研究[D]. 合肥工业大学, 2018
- [3] 刘舒, 白纪军, 万莎等. 靠港船舶岸电信息管理与监控系统设计[J]. 电信科学, 2018,34(5):176-182
- [4] 徐景新. 微网能量管理系统若干功能模块设计及应用研究[D]. 山东大学, 2017
- [5] 袁绍民, 游峰, 钱艳婷等. 并网储能系统控制策略研究[J]. 电源技术, 2019,43(7):1161-1163+1171
- [6] 崔红辉, 曹军, 李林等. 园区光储充微电网系统关键技术研究[J]. 电气应用, 2019,38(S1):40-44

(上接第 40 页)

中的应用[J]. 东方电机, 2012, 40(5):33-37

[6] Peeringa J. Comparison of extreme load extrapolations using measured and calculated loads of a MW wind turbine[M]. ECN Wind Energy, 2009

[7] 李成本, 高德忠. 外推法在风力发电机组载荷计算中的应用[J]. 一重技术, 2015(1): 9-13

[8] 郝晓乐, 雷晓波, 雷蒂远等. 三参数威布尔分布参数估算方法对比研究[J]. 机械研究与应用, 2017, 30(2): 1-4

[9] 史景钊, 杨星钊, 陈新昌. 3 参数威布尔分布参数估计方法的比较研究[J]. 河南农业大学学报, 2009, 43(4): 405-409

[10] IEC 61400-1 Ed. 4, Wind Turbines - Part 1: Design Requirements, International Electrotechnical Commission[S]. IEC, 2019

基于 SolidWorks 的抽水蓄能机组主轴密封水平平台集成化设计

颜欣 伍英岩

东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000

摘要: 本文以国内两个已成功投运的 4×300 MW 抽水蓄能项目辅助系统设计为例, 分别介绍了主轴密封水平平台集成化设计、集成平台的三维化设计方法与运用, 重点阐述了集成化、三维设计的突出作用, 同时对集成化、三维设计在抽水蓄能工程中的应用前景进行了展望。

关键词: 抽水蓄能机组; 主轴密封水系统; 集成化; 三维设计

中图分类号: TP391.72

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2023) 02-0053-04

The Integrated Design of Main Shaft Seal Water System Platform Based on SolidWorks

YAN Xin, WU Yingyan

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

Abstract: This paper takes two domestic 4 × 300 MW pumping-storage hydropower station projects as examples, the integrated design of the main shaft seal water integrated platform and the three-dimensional design method and application of the integrated platform are introduced respectively, and the prominent role of integrated and three-dimensional design is emphasized. At the same time, the application prospect of integrated and three-dimensional design in pumped storage projects is prospected.

Key words: pumping-storage hydropower station; main shaft sealing water system; Integration; three-dimensional design

抽水蓄能电站以其调峰填谷的独特运行特性, 发挥着调节负荷、促进电力系统节能和维护电网安全稳定运行的功能, 将成为我国电力系统有效的、不可或缺的调节工具^[1]。国家能源局发布的《抽水蓄能中长期发展规划(2021-2035)》中指出, 到2025年抽水蓄能投产总规模将达到6 200万千瓦以上, 到2030年达到1.2亿千瓦左右。预计十四五期间, 将有200多个抽蓄项目获得立项批准。

面对抽蓄项目的加速建设与大规模发展, 如何提高设计效率、生产效率成为了水电制造企业面临的艰巨挑战与任务。随着抽蓄工程建设不断增加的需求及设计软件的快速发展, 三维数字化设计正越

来越受到制造业企业的重视。利用三维数字化技术进行设计不仅更为直观, 还可通过一系列自动化手段将复杂的工作交给计算机快速完成, 从而大大缩短各专业的协同与配合时间、减轻设计者的负担, 增强施工人员和电站管理人员对设计意图的直观感受^[2]。

1 抽水蓄能机组主轴密封水系统特点

1.1 抽水蓄能机组特点

抽水蓄能机组具有结构紧凑、辅助系统多、设备配置复杂等特点, 在设备和管道的布置设计方面, 往往需要考虑设备功能、厂房位置、安装空间的等

收稿时间: 2022-03-03

作者简介: 颜欣(1989—), 男, 2011年毕业于华北电力大学热能与动力工程专业, 本科, 工程师。现在东方电气集团东方电机有限公司成套技术事业部工作, 主要从事水电站机组自动化系统设计及应用工作。

多种影响因素的平衡，非常考验设计人员的设计能力。

1.2 主轴密封水系统特点

抽水蓄能机组主轴密封水系统涉及到水泵水轮机的安全运行，它可以防止压力水渗漏到水轮机室，并为主轴密封提供连续恒压的冷却、润滑水源，确保机组的安全运行。为满足机组多种工况下的安全运行，主轴密封水系统须具备功能完善、结构紧凑、安全性高、便于维护等要素。不同于常规机组，抽水蓄能机组主轴密封水系统为了节约布置空间以及便于现场安装，通常采用集成化设计，即将所有设备、元件、控制箱、阀门、管道等集成到一个平台上，占用最小的布置空间同时又要保证其功能的完整性。

2 三维设计在集成化平台开发中的应用

2.1 统设计方式的局限

传统主轴密封水系统的设计中，采用AutoCAD绘制单线原理图、安装布置图、接口图等二维图纸，无法直观了解控制空间与设备布局，不利于检查与排除设备之间的干涉同时又节约安装空间。另外，由于抽蓄项目执行周期较长，设计工作期间常常会出现设计方案修改的情况，二维设计在修改设计方案时可能需要手动修改数份相关图纸，难免有遗漏、错误出现，而且会耗费设计人员大量的时间与精力。

2.2 三维设计方式的优势

SolidWorks是一款机械类三维设计软件系统，包含了数个不同的功能模块，各模块的功能都是独立又相互关联的。设计人员可以根据需要调用其中的某一个模块进行设计，不同的功能模块创建的文件有不同的文件扩展名，主要有草图绘制、零件设计、装配模块、工程图模块、钣金设计、模具设计、运动仿真等^[3]。

基于SolidWorks的三维设计，主要工作量体现在“零件图绘制”以及“装配体绘制”两个步骤。由于该软件灵活的工作模式，所以具有以下优势：

(1) 在设备零件布置阶段，可直观的观察空间利用率以及设备干涉情况，亦可兼具系统的整体美观性；

(2) 可利用软件自带的标准零件库或者自建零件库，以数据化的方式设置标准件，以尺寸驱动三维实体模型，省去相同设备、管件的需绘制不同

规格图纸的麻烦；

(3) 避免工作的重复，在完成零件图及基础装配图后，后期调整方案十分便利，可以自动生成相应视图二维图纸，无需重复修改；

(4) 集成化系统所设置的平台，安装时一般采用整体吊装方式，三维设计时可赋予零件基础重量，便于后期调整设备位置以避免整体重心过于偏移；

(5) 便于项目总体布置设计方考虑平台的布置方位，预留管道通过空间以及人员通过空间，避免出现施工阶段难以解决的问题。

三维设计在电站设计方面最主要的作用是机组厂房内部的布置设计优化。抽水蓄能机组地下厂房内部布置复杂，布置各种机电设备，包括水泵水轮机、发电电动机、油系统、气系统、水系统、电缆及桥架、母线、电气盘柜、通风空调系统、消防系统等，涉及多个不同专业。

3 主轴密封水系统原理及设计要求

3.1 主轴密封水系统基本原理

以某抽水蓄能电站A的主轴密封水系统为例，在初步确定其系统配置、功能后，绘制出相应的系统原理图（参见图1）。

为了确保主轴密封水系统水源的可靠性，该系统采用一主两备三路水源，且考虑了多重切换模式，增加了两路水源的旁通管道，以便在主、备用水源间切换以及主、备用过滤器间切换。为避免主轴密封水中断，设置电动阀、液压阀、全自动排污过滤器等可自动化切换的设备。当出现故障时，可以方便地进行不同回路间的自动切换。

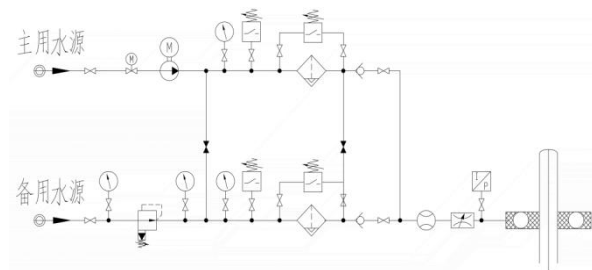


图1 抽水蓄能电站 A 主轴密封水系统图

3.2 主轴密封水平台的设计要求

由图1系统原理图可以看出，主轴密封水系统的设备、管路、管件、自动化元件相对较多，受限

于抽蓄机组厂房的布置空间，需要尽可能地减小其整体尺寸。系统对外接口包括主备用水源、供水出口、排污口、液压动力管道、控制箱电缆出线桥架等，在系统平台设计时，需要将以上接口的方位、尺寸一一明确。

目前国内抽水蓄能电站用户对三维数字化协同设计要求很高，按照不同设计阶段的不同要求，对电站油气水系统进行细化设计。土建、排管、电气二次、机械等专业之间的配合需要在同一个设计平台上进行，通过装配体尺寸核对、干涉检查、布置位置检查等技术手段，实现各专业间兼容，避免问题被带到现场。

4 SolidWorks 在设计集成化平台时的实际应用

4.1 设备选型和零件三维建模

集成化平台采用“自下而上”的设计方式，自下而上的设计方法是首先设计各个零件造型，然后按照各个零件的相对位置进行装配的一种方法^[4]。

设计过程中，根据合同及设计联络会要求确定的设备型号、管道口径、平台尺寸等参数内容，即可开展设备的零件三维建模工作。过滤器、阀门、自动化元件等可根据厂家提供的样本资料或数据手册进行建模，在零件图中将设备的外形尺寸、接口尺寸、重量一一确定。图2所示为部分设备、元件的三维零件图：



图2 主轴密封水系统部分零件图

为了避免在装配体中插入过多细小零件导致操作繁琐，前期建模除了绘制零件图外，还可以现将多个小零件组装成“子装配体”，图3所示为不同压力仪表的子装配体图：



图3 各压力仪表的子装配体图

4.2 零件装配

在设备、元件等各零件三维建模完毕后，根据现场可用空间，绘制出安装平台的零件图。随后即可新建“装配体”，通过插入零件或者插入子装配体的命令，开展零件装配工作。

在零件装配和总装配中，需确定零件或部件为装配的基准件，再开展装配工作。装配过程一般按先下后上，先内后外，先难后易^[5]。概括起来主要有两种装配模式：

(1) 在零件接口处设置“布管连接点”，后期在装配体中，则先确定主要零件位置，再通过“自动布管”命令，一键获取装配图；

(2) 确定主要零件位置后，手动插入管道、管件，通过“配合”命令，对设备以及管道的位置关系进行固定。

以上两种方式均可以得到完整的系统装配体，需要注意的是：

(1) 系统对外接口方位需要严格满足电站实际布置要求；

(2) 设备的相对布置位置要便于组装施工以及后期调试与维护；

(3) 各设备布置于平台后，可以验算整个系统重心位置，尽量使其重心靠近平台中心点，以保证安装施工期间的吊装安全。

4.3 完成装配后的校验

为了保证主轴密封水平台的结构合理，在组装时不至于发生相互干涉，在完成装配后需对各零部件进行干涉检查。软件中干涉检查包括了静态检查和动态检查，其中静态干涉检查对装配模型中各个零件之间的干涉情况自动检查，即可判断任意所有的零部件在空间上是否有重叠的现象发生。设计者可根据检查结果在模型中分析干涉原因，调整相关零部件参数或者装配关系，直至排除干涉为止。

在三维数字化设计中，各专业的的设计模型将形成在一个总装配体。不同专业设计时，可以通过实时查看总装配体来了解总体进度及其他专业的进展，从而在设计阶段就避免了干涉问题。

通过各专业内部及项目总体的碰撞干涉检查，可以发现和消除设计阶段可能未发现的碰撞及干涉，彻底避免各专业间设备的碰撞问题，可以减少施工过程中出现返工、整改的几率。例如，水泵进、

出口水管与其他设备之间存在许多折弯，在局促空间内容易形成干涉，采用三维设计，复杂的管路得到了合理的布置，未发生碰撞的现象。

鉴于该三维设计平台的强大功能，比之于常用的二维图纸，更加的直观和有效，提高了各专业间配合的效率。

4.4 生成二维工程图纸

虽然无纸设计是以后的发展方向，但在短期内还是无法普及这种生产方式，所以工程图还是与施工单位和生产部门交流的重要工具^[6]。在实际的项目设计、生产过程中，二维工程图纸仍然是指导生产制造、安装调试的主要技术文件，因此，在三维装配图仍然需要转化成二维的工程图纸以作指导。

Solidworks中的工程图模块，能够迅速的将三维装配体或者零件模型转换成二维工程图。且三维模型和相关联的二维工程图纸，所有在设计阶段设置的各项参数都具有相关性，互相驱动。因此，参数的修改在各个不同模块是同时实现的。其工程图模块功能面板见图4。



图4 Solidworks 工程图模块功能面板

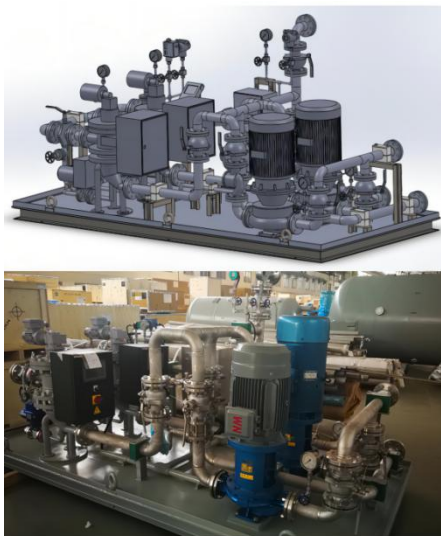


图5 抽蓄机组 A 由三维建模到实体产品

三维模型的各项参数能够直接体现的在二维图纸中，在二维图纸校验的过程中即可以此为基础

做调整修改。工程图模块提供的标注功能也非常全面，故转化后的二维图纸能满足工程需要。图5、图6所示即为三维建模到二维工程图纸，再到组装完成后的产品：

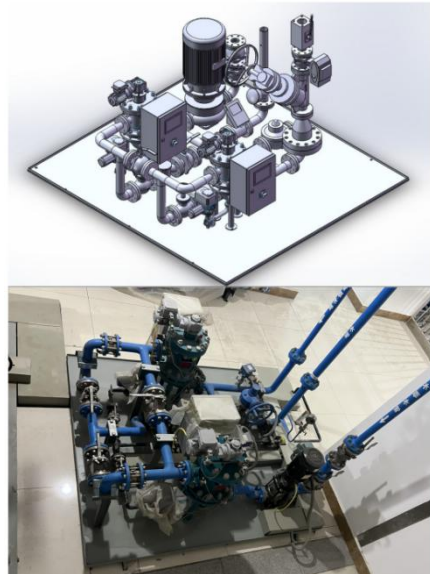


图6 抽蓄机组 B 由三维建模到实体产品

4.5 三维建模在工厂布置中的作用

三维建模可实现厂房预装，通过外接管道以及定位布置，可以直观地提前发现在安装阶段可能出现的问题。图7所示即为建模完成后的装配体在厂房中预装效果：

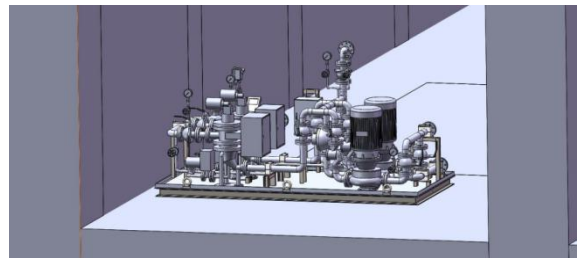


图7 主轴密封水平台在厂房中预装的效果图

5 结语

虽然二维设计在目前的工程设计中仍占主导地位，但在设计人员追求高效率、高准确度、高配合度、高通用性的需求下，三维集成化设计的优势越来越明显，并且在分析计算、自动优化、虚拟装配等方向逐步的实现应用。未来的抽水蓄能电站设计中，三维集成化设计不仅仅应用于水泵水轮机、发电电动机等大型机械设备的设计，还将越来越多

(下转第 60 页)

高水头悬式抽水蓄能机组整体磁轭圈安装工艺

张翔 杨悦伟

东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000

摘要: 整体磁轭圈结构磁轭具有刚性好, 安装周期短的优点, 应用越来越普遍。本文对高水头悬式抽水蓄能机组整体磁轭圈结构进行了简单介绍, 详细分析了整体磁轭安装工艺的技术难点, 解决了磁轭吊装、尺寸调整和测量、热打键质量控制等问题。

关键词: 抽水蓄能机组; 整体磁轭圈; 悬式发电机; 安装工艺

中图分类号: TV743

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2023) 02-0057-04

Installation Process of Integral Yoke Ring for High Head Suspended Pumped Storage Unit

ZHANG Xiang, YANG Yuewei

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

Abstract: The integral yoke ring structure yoke has the advantages of good rigidity and short installation period, and is applied more and more popular. In this paper, the structure of integral yoke ring of high head suspended pumped storage unit is introduced, the technical difficulties of integral yoke installation process are analyzed in detail, and the problems of yoke lifting, size adjustment and measurement, quality control of hot-key and so on are solved.

Key words: pumped storage unit; integral yoke ring; suspension generator; installation process

磁轭是抽水蓄能发电电动机的重要组成部分, 是发电机磁路的一部分, 承担着传递转子扭矩和提供转动惯量的作用。随着抽水蓄能机组水头和转速不断提高, 由此带来的刚强度要求日益凸显, 常规的扇形冲片磁轭已无法满足越来越高的要求。整体磁轭圈结构磁轭因刚性好, 迅速得到普及。对于高水头悬式抽水蓄能机组, 为提高转子运行稳定性, 发电机主轴通常采用一根轴结构, 由此对转子磁轭安装带来一些难题, 以往的磁轭安装工艺已不完全适用于新结构磁轭。

1 磁轭结构简介

常规扇形冲片结构磁轭片数多, 安装周期较

长。整体磁轭圈结构磁轭刚性更好, 并且段数少, 安装周期短, 但制造成本较高。一般 400 m 水头以下的抽水蓄能电站采用扇形冲片磁轭。当水头达到 400 m, 为提高发电机转子运行稳定性, 越来越多电站开始使用整体磁轭圈结构磁轭。水头达到 600 m 及以上的电站首选整体磁轭圈结构磁轭。

整体磁轭圈实现方式主要有三种: 多段整环厚钢板磁轭, 多段整环锻件磁轭, 以及整体锻件磁轭。伞式抽水蓄能机组磁轭一般采用多段整环厚钢板结构或多段整环锻件结构。整体锻件磁轭因高度限制, 目前仅用于分段轴结构的抽水蓄能机组。一根轴结构的悬式抽水蓄能机组一般采用多段整环厚钢板磁轭 (图 1)。

收稿时间: 2023-02-13

作者简介: 张翔 (1990—), 男, 2012年毕业于华中科技大学电气工程及其自动化专业, 学士学位, 工程师。现在东方电气集团东方电机有限公司数智部工作, 主要从事水轮发电机工艺工作。



图1 扇形冲片磁轭（左）、整环厚钢板磁轭（中）、整环锻件磁轭（右）

国内某抽水蓄能电站额定水头超过 600 m，发电机采用悬式结构，额定转速 500 r/min。主轴为一根轴结构，长度接近 10 m。磁轭采用多段环形厚钢板结构，套装在主轴中间的转子支架外圆上。整个磁轭高度超过 3 m，重量超过 170 t，每段磁轭段由多张磁轭环板把合而成（图 2）。

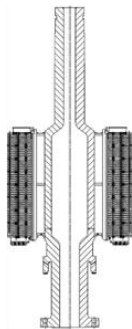


图2 一根轴结构抽蓄整体磁轭圈

2 整体磁轭圈安装难点分析

2.1 磁轭吊装高度受限

常规扇形冲片磁轭安装时可从径向进行叠装操作，对工地安装间高度没有特殊要求。悬式抽水蓄能机组主轴为一根轴结构，长度接近 10 m。当采用整体磁轭圈结构磁轭时，只能从主轴上端逐段套入。抽水蓄能电站多为地下厂房，工地安装间起吊高度有限。若采用常规方式起吊磁轭时，钢丝绳夹角大，容易与主轴发生干涉。对于采用半伞式结构的抽水蓄能电站，发电机上端轴与转子支架分开，吊装磁轭过程中可通过更换长短钢丝绳，分两次起吊解决安装间高度不足的问题。对于采用一根轴结构的悬式发电机机组，该方案仍然存在主轴顶端或外圆与钢丝绳干涉的问题。

2.2 磁轭调整尺寸困难

转子偏心值是衡量转子安装质量的重要指标。对于额定转速 500 r/min 的水轮发电机，国家标准要求转子整体偏心值不超过 0.15 mm，最大不应大于设计空气间隙的 1.5%。转子的偏心值是通过测量磁极外圆至主轴中心的距离计算得出，而磁极与磁

轭紧密贴合，挂磁极时无法调整径向尺寸，因此优先通过调整磁轭圆度以及与主轴同心来保证转子安装质量。

一般扇形磁轭冲片重量轻，可根据偏心测量结果随时用锤子敲击，进行局部调整，直至同心度、圆度满足要求。而整体磁轭圈单段磁轭重量约 25 t，惯性大，很难手工微调。

磁轭通过磁轭键、磁极键与主轴、磁极相连，从而传递转子扭矩。键工作面的贴合情况对打键后的紧度影响非常大。键接触面若有尖锐突变还可能导致键局部应力过高而断裂，这将严重影响转子运行稳定性和安全性。

常规扇形磁轭冲片厚度只有约 4 mm，叠片完成后可以用拉刀切除键接触面的错牙，提高磁轭键、磁极键接触面积。由于整体磁轭圈厚度过大，无法用拉刀修整错牙。整环结构使得所有键槽的位置相关联，单独调整某个键槽的错牙会导致其它键槽错位。而且内圆键槽的错牙会因磁轭热打键累积到磁轭外圆上。因此一方面要求工厂内加工后所有键槽一致对齐，另一方面要求工地安装时尽可能复原成厂内加工时的一致状态，保证磁轭段与段之间错牙 < 0.05 mm。

2.3 磁轭测量数据困难

磁轭安装后需记录与主轴同心度、圆度等数据，一般通过转子测圆架进行测量，根据测量结果对磁轭尺寸进行反复调整。对于伞式水轮发电机，转子测圆架安装在磁轭上平面，测圆架支臂离磁轭近，测量数据稳定精度高。对悬式水轮发电机，转子测圆架一般设置在主轴端头，支臂离磁轭远，测量数据精度相对较低。当采用整体磁轭圈结构时，磁轭吊装时还会与测圆架支臂干涉，安装人员爬到轴顶端进行操作非常不安全。

2.4 磁轭热打键后可能上移

为避免转子过速引起偏心振动，磁轭与转子支架之间通常采用热打键的方式设置一定的过盈紧量。即先将磁轭加热，在磁轭膨胀到一定尺寸时打紧磁轭键，待磁轭冷却后与转子支架之间形成过盈配合。多个抽水蓄能电站磁轭安装热打键后发现转子支架立筋挂钩上平面有较大间隙，磁轭发生整体上移现象。

经调查分析，主要是因为热打键冷却过程中，

热空气上浮聚集在转子支架与磁轭之间，转子支架上端受热膨胀速度比下端快，而磁轭温度和尺寸变化慢，导致磁轭上端比下端先抱紧。随着磁轭高度继续冷却收缩，与立筋挂钩将产生轴向间隙。

常规扇形叠片磁轭在圆周上相互断开，具有一定的柔性，在立筋挂钩处不容易产生间隙。而整体磁轭圈刚性非常强，热打键冷却过程中只要磁轭在某几根立筋上端先抱紧，磁轭将在所有立筋处整体悬空。

3 解决方案

3.1 磁轭吊装工艺改进

采用专用吊具双钩起吊方案代替单钩起吊，解决起吊高度受限问题（图3）。通过吊车主副钩同步抬吊，不受钢丝绳夹角限制，缩短了起吊高度，避免钢丝绳与主轴干涉。由于双钩起吊时无法转动工件，设计了一套环形磁轭起吊装置。该装置内部通过滚动轴承实现上下端相对回转，使得磁轭段吊装过程中能够旋转调整周向尺寸。通过T形挂钩将装置与磁轭极间T形槽连接，实现磁轭与起吊装置快速装拆。此外在转子安装间设置地坑，让主轴下端落在地坑内，也可降低一部分起吊高度。

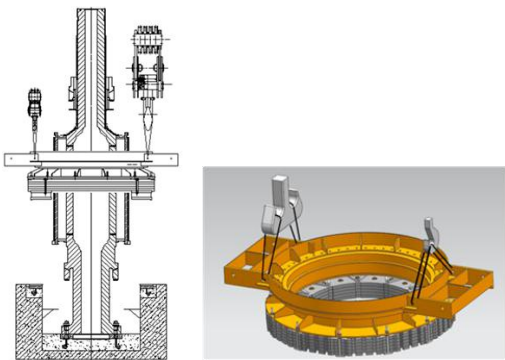


图3 磁轭段双钩起吊及吊装装置

3.2 磁轭调整工艺改进

优化产品结构，设计工艺止口实现首段磁轭与主轴同心快速调整。在首段磁轭下方与主轴立筋挂钩外圆设计0.5 mm工艺止口，首段磁轭吊装到主轴上后，利用止口进行定位，通过用塞尺测量立筋各处止口间隙来快速判断首段磁轭与主轴是否同心。

设计磁轭防错牙工具代替锤子敲击，对其余磁轭段进行同心及错位调整（图4）。磁轭防错牙工具为楔形结构，在相邻两段磁轭段之间的外圆键槽安

装防错牙工具，通过拧紧螺栓产生的压紧力使得后续磁轭段与前一段磁轭径向、周向对齐。利用杠杆原理，单人即可对重量超过25t的磁轭进行精细调整。只要对齐精度足够高，由此产生的误差累积很小。

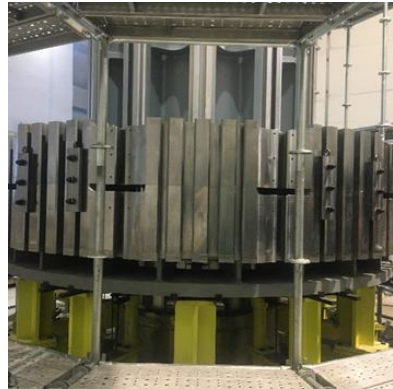


图4 磁轭防错牙工具

以往通过测量磁轭尺寸偏差进行调整，最终调整结果受测量精度影响，一般不小于0.02 mm。采用新工具进行调整，安装精度依赖磁轭在工厂内的加工精度。目前磁轭在工厂内加工时，已实现键槽从上到下一次加工而成。此时这种调整方式精度最佳，可达到不超过0.01 mm。并且不用反复调整，一次到位，效率很高。

3.3 磁轭测量方式改进

优化磁轭调整时的测量方法，将测量绝对值改为测量相对值。首段磁轭调整时用塞尺检查止口间隙值，其余段磁轭调整时用刀口尺和塞尺检查相邻两段磁轭径向、周向相对错位值，从而快速判断是否调整到位。仅在验收时采用吊线方式进行一次同心度及圆度绝对值测量，减少大量中间数据测量工作，提高了测量效率。



图5 转子测圆架和安装平台

设计新型转子测圆架，提高使用便捷性和安全性。新型转子测圆架为分瓣弧面轴承结构，安装在主轴上导滑转子外圆，有效降低了操作高度。由于距离磁轭相对较近，测量数据更加稳定。测圆架前后壁可单独拆下，防止吊装磁轭时发生干涉。同时设计八卦形磁轭安装平台，保证高空作业安全（图5）。使用盘扣结构能够快速装拆，兼顾磁轭安装和磁极挂装。

3.4 磁轭热打键上移质量控制

采用水冷+风冷方式解决磁轭热打键后整体上移问题。为避免磁轭热打键冷却后磁轭悬空，要求磁轭下端与转子支架先抱紧，可以控制磁轭与转子支架上端温差比下端大。常规机组一般只对磁轭的上下端温差进行了控制，对于整体磁轭增加了对磁轭和转子支架温差的监控。可采取的改进措施有：对转子支架增加通水冷却；用风机吸出转子支架与磁轭上端热空气，减缓转子支架升温速度；热打键后磁轭上端保持加热一段时间；磁轭下端先打开保温毯散热等。

4 实施情况

工厂内模拟工地条件进行了磁轭预装，并试打

了磁轭键。操作过程便利，磁轭与主轴同心度达到设计要求。用刀口尺检查磁轭外平面，段与段之间未发现明显错牙。工地安装后经测量与厂内预装状态基本相同，复位精度很高。磁轭热打键后与转子支架上筋挂钩接触良好。相比常规冲片磁轭，整体磁轭安装周期缩短至少 60 %。

5 结语

整体磁轭圈结构磁轭能显著减少工地安装周期，提高机组运行的稳定性，是未来抽水蓄能机组磁轭的发展方向。本文对高水头悬式抽水蓄能电站发电电动机整体磁轭安装技术难点进行了分析，提出了相应的改进方法，提高了工地安装质量和效率，为后续同类机组磁轭安装提供借鉴和参考。

参考文献：

- [1] 陈锡芳. 水轮发电机结构运行监测与维修[M]. 中国水利水电出版社, 2008.6
- [2] GB/T 8564-2003, 水轮发电机组安装技术规范[S]
- [3] DL/T 5230-2009, 水轮发电机转子现场装配工艺导则[S]
- [4] 覃群. 基于 SolidWorks 自顶向下设计方法研究[J]. 现代工业经济和信息化. 2022, 12 (7):88-90
- [5] 赵旭, 王建涛, 潘岩岩等. 三维装配工艺在生产中的应用[J]. 农业工程, 2018, 8(4):104-106
- [6] 周杰. 三维协同设计在设计院的应用[J]. 水利规划与设计, 2014 (4): 58-62
- [7] 学. 2008 (3):80-82+149
- [8] 钱玉莲, 王金峰, 王国光等. 数字化设计在仙居抽水蓄能电站中的应用[J].水利规划与设计, 2018 (2):95-99+159
- [9] 刘天祥, 黄海杨, 张晴. SolidWorks 在水工金属结构 BIM 设计中的应用[J].浙江水利科技, 2022, 50(4):79-83

（上接第 56 页）

的应用于繁杂的辅助系统设计，以此提高整个工程的设计质量，缩短研发周期，降低设计成本。该项技术的广泛应用不仅仅是技术层面的，亦能为设计、制造企业带来可观的经济效益，使相关企业能紧跟抽蓄大发展的要求，应对不断增加的设计进度压力与交付压力。

参考文献：

- [1] 崔继纯. 抽水蓄能电站规划及可持续发展研究[J]. 水电能源科

欢迎投稿，欢迎订阅！

高硫煤烟气湿法脱硫氧化空气风机设计技术经济分析

杨志忠^{1,2} 吕丽丹² 孔晓玲³ 张生涛³ 李灵均^{1,2} 陈廷² 武娟^{1,2} 韩鹰³

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

3.山东省章丘鼓风机股份有限公司, 山东 章丘, 250200

摘要: 基于石灰石-石膏湿法烟气脱硫化学反应机理, 提出了强制氧化工艺的氧化空气风机参数计算模型。对可用于氧化空气风机选型的罗茨风机、多级离心鼓风机、单级高速离心鼓风机、空气悬浮鼓风机、磁悬浮鼓风机特性进行了比较。阐述了高硫煤烟气脱硫氧化空气供给技术, 并对不同型号的氧化空气风机选型设计进行了技术经济性分析。对石灰石湿法烟气脱硫氧化空气系统设计、氧化空气风机选型设计具有指导意义。

关键词: 技术经济分析; 氧化空气风机; 石灰石湿法烟气脱硫; 高硫煤

中图分类号: X703.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2023) 02-0061-06

Techno-economic Analysis on Design of Oxidation Air Blowers for High Sulfur Coal Limestone Wet Flue Gas Desulfurization

YANG Zhizhong^{1,2}, LV Lidan², KONG Xiaoling³, ZHANG Shengtao³, LI Lingjun^{1,2}, CHEN Ting²,
WU Juan^{1,2}, HAN Ying³

(1. Clean Combustion and Flue Gas Purification Key Laboratory of Sichuan Province, 611731, Chengdu, China; 2. Dongfang Boiler Co., Ltd., 611731, Chengdu, China; 3. Shandong Zhangqiu blower Co., Ltd, 250200, Zhangqiu, Shandong, China)

Abstract: Based on chemical reaction mechanism of limestone-gypsum wet flue gas desulfurization, the calculation models for oxidation air blower parameters for forced oxidation process were proposed. The characteristics of Roots blower, multi-stage centrifugal blower, single-stage high-speed centrifugal blower, air suspension blower and magnetic suspension blower that can be used for selection of oxidation air blower are compared. The oxidation air supply technology for high sulfur coal flue gas desulfurization is described, and the technical and economic analysis is made on the selection and design of different types of oxidation air blowers. It has guiding significance for the design of oxidation air system and the selection of oxidation air blowers for limestone wet flue gas desulfurization.

Key words: techno-economic analysis; oxidation air blower; wet limestone FGD; high sulfur coal

石灰石-石膏湿法烟气脱硫技术因其脱硫效率高、工艺简单、成本低、可靠性高, 在烟气脱硫领域得到广泛应用。石灰石-石膏湿法烟气脱硫技术目前均采用强制氧化工艺, 即向吸收塔底部浆池中鼓入空气, 把脱硫反应生成的中间产物亚硫酸钙(CaSO_3)和亚硫酸氢钙($\text{Ca}(\text{HSO}_3)_2$)强制氧化为硫酸钙, 硫酸钙与水结晶生成脱硫副产物石膏

($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), 同时并有利于降低液气比和提高脱硫效率。

吸收塔氧化空气的供给由单独配置的氧化空气风机提供。氧化空气风机宜选用罗茨鼓风机, 也可选离心鼓风机, 具体型式需通过技术经济比较确定^[1]。

收稿日期: 2022-11-14

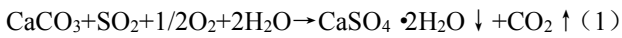
作者简介: 杨志忠 (1969—), 男, 2010年毕业于西南交通大学环境工程专业, 硕士, 正高级工程师。现任职于东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 主要从事烟气污染物治理研发设计工作。

1 氧化空气风机参数确定

氧化空气风机参数设计主要为流量和压头设计。氧化空气风机压头设计需克服氧化空气管喷口至吸收塔浆池液位埋深高度的阻力，且压头不能过高，以免吸收塔浆池内浆液鼓泡造成吸收塔浆液溢流和避免氧化空气风机电机选型跳档，增加工程造价。

1.1 氧化空气风机空气量的计算^[2-4]

石灰石-石膏湿法烟气脱硫反应机理，烟气中的SO₂与石灰石中的CaCO₃反应，生成石膏(CaSO₄·2H₂O)，总的化学反应如(1)式。



根据化学反应，脱硫反应所需的氧化空气量计算如(2)式。

$$Q = \frac{0.5 \times 22.4 \times Q_{\text{gas}} C_{\text{SO}_2} \times \eta \times (1 - \alpha)}{64 \times 0.21 \times 10^6 \beta} \quad (2)$$

(2)式中：

Q—氧化空气量，Nm³/h；设备选型时无需另加裕量。

0.5—脱硫氧化反应化学当量摩尔比。

22.4—标准状态气体体积，m³/kmol。

Q_{gas}—烟气流，Nm³/h。

C_{SO₂}—烟气中SO₂浓度，mg/Nm³。

η—SO₂去除效率。

α—SO₂自然氧化率，与烟气中的氧含量有关，一般取0.2。

β—强制氧化空气利用率，与氧化空气管喷口在吸收塔浆池中的埋深有关，一般取值为0.3~0.4。

64—SO₂摩尔质量。

0.21—空气中的氧气份额。

2.2 氧化空气风机压头计算

氧化空气由氧化空气风机提供，氧化空气风机压头计算：

$$P = P_1 + P_2 \quad (3)$$

(3)式中：

P—风机压头，kPa；罗茨式风机需加5%~10%裕量。

P₁—氧化空气管喷口静压，kPa。

P₂—氧化空气管路压损，kPa。

$$P_1 = \rho gh \times 10^{-3} \quad (4)$$

(4)式中：

ρ—吸收塔浆池浆液密度，kg/m³；罗茨鼓风机需按浆池最大运行浆液密度。

g—重力加速度常数，9.807 m/s²。

h—吸收塔内氧化空气管喷口至吸收塔浆池液位的埋深高度，m；罗茨鼓风机指吸收塔浆池最高运行液位，离心鼓风机指吸收塔正常运行液位。

2 氧化空气风机选型比较

石灰石-石膏湿法烟气脱硫系统氧化空气风机的选型，一般遵循高效、实用、低噪声、维护工作量小的原则。

目前技术条件下，石灰石-石膏湿法烟气脱硫系统可供选择的氧化空气风机型式主要有两大类，分别为罗茨鼓风机、离心鼓风机。

2.1 罗茨鼓风机

属于容积式回转鼓风机，工作原理如图1，是利用两叶或三叶轮在机壳内依靠同步齿轮做相对旋转运动，两转子保持着互相无接触的啮合。气体随着旋转叶轮（即转子）型面与机壳所形成的工作容积，由进风口被推送到出风口。罗茨鼓风机外形尺寸小，使用寿命长，一般在15年左右、且价格低廉。由于罗茨鼓风机为容积式，因此转速一定时，它的风量是固定的，要实现流量调节需要增加变频器来调节转速。罗茨风机能够提供比较恒定的空气量、压力变化能适应脱硫吸收塔液位波动。

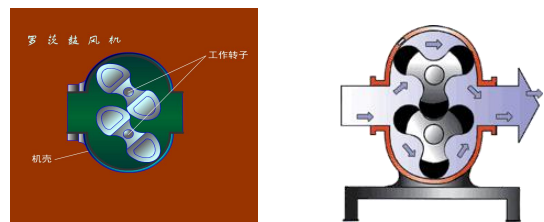


图1 罗茨风机工作示意图

2.2 离心鼓风机

离心鼓风机是工作叶轮在旋转的过程中，由于旋转离心力的作用及工作轮中的扩压流动，使气体的速度得到提高，随后在扩压器中把速度能转化为压力能。离心式鼓风机较容积式风机具有供气连续、运行平衡，效率高、结构简单、噪声低、外型尺寸及重量小、易损件少等优点。但也有随吸收塔

液位变化流量波动较大等特点，需配备相应的风量调节装置及控制系统^[5]。

离心鼓风机有多级低速离心鼓风机、单级高速离心鼓风机、空气悬浮离心鼓风机、磁悬浮离心鼓风机。

(1) 多级低速离心鼓风机

多级离心鼓风机是在一根主轴上安装多组叶轮逐步完成空气压缩，如图2。通常情况下多级离心鼓风机的转速有2980转/分或3550转/分两种。多级离心低速鼓风机气体经过两级以上叶轮的离心力及扩压器连续扩压而升高气体压力。在氧化脱硫系统复杂且工况多变的条件下，多级低速离心鼓风机经常偏离设计点工作，偏离鼓风机高效区后，往往效率不高。大机组受电机影响噪声会达到100dB(A)，噪音较大。多级低速离心风机叶轮普遍为二元流结构，因此整机效率不高，一般在68%左右，而对于安装三元流叶轮的多级低速离心鼓风机效率会显著提高。

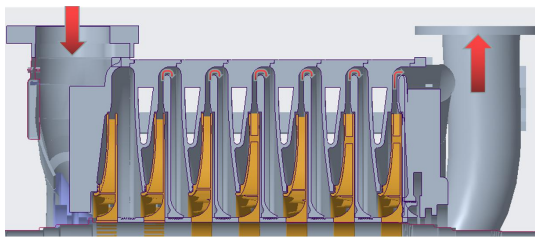


图2 多级离心风机工作示意图

(2) 单级高速离心鼓风机

单级高速离心鼓风机，叶轮为单级，空气一次性压缩完成，如图3。其叶轮采用三元流理论进行设计，气动损失小，效率高；叶轮入口前配备高效可调导叶，通过改变叶轮进气角度来实现对流量、压力的调节。由于入口导叶的调节原理不同于阀门，不产生节流作用，因此，在一定范围内，单级高速离心鼓风机的效率不会随着流量或出口压力的变化而明显降低，是一种高效节能型风机。该种风机借助齿轮箱增速后驱动或高速电机直接驱动，使叶轮转速达到8000~30000转/分，出口温度较低。对于脱硫行业，吸收塔浆池液位的波动，导致风机出口压力的变化，风机能够完全满足该工况变化需求：风机流量、压力调节范围可达40%~105%，且自动化控制程度非常高，借助特性曲线，将进口可调导叶、出口可调放空阀与风机运行参数实时联

锁，可实现主动防喘振，因而在恒定转速的条件下能够适应不同风量、不同液位高度（即不同出口压力）等复杂工况需求。设备尺寸适中，采用整体撬装式结构，安装便捷，减少占地空间。由于单级高速离心风机叶轮具有转速高、体积小、功率密度大、轮缘线速度高等特点，故要求其材质具备强度高、硬度大（耐磨性强）、韧性好等性能，通常选用航空级铝合金、钛合金或高强度马氏体硬化沉淀不锈钢，并且采用毛坯锻造+五坐标机床整体铣制工艺，因此叶轮价格较昂贵。同时，由于设备转速较高，故对设备自身保护及日常维护提出较高要求：避免吸入异物，保障清洁、合适温度压力的润滑油等条件均是必要的。如果按规操作且维护得当，风机使用寿命预期可达20年以上。

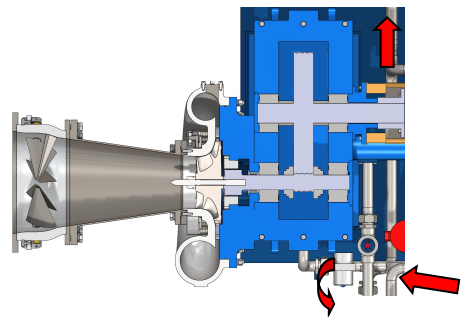


图3 单级高速风机工作示意图

(3) 空气悬浮离心鼓风机

空气悬浮离心鼓风机，采用一体化结构（高速电机+离心风机），由高速永磁电机直接驱动，三元流叶轮直接安装在电机主轴上，电机采用同步变频器来控制鼓风机转速，轴高速旋转与轴承产生相对运动，形成空气动力流场，产生压力差，将高速旋转的轴处于悬浮状态，如图4。空气悬浮离心鼓风机由于采用空气轴承，振动低、无摩擦无需润滑油系统，能够实现半永久工作，整机柜体集成设计，变频器+PLC可编程控制实现自动调节。但是空气悬浮风机在启动和停车以及低速运转时，存在主轴和轴承干摩擦情况，极易发生故障，因此不要频繁的开停车，就目前技术和其空气悬浮的工作原理，制约着空气悬浮离心鼓风机无法向重载、大机组及大功率高电压方向发展，总体上空气悬浮鼓风机具有结构简单，无摩擦和机械传动损失，整机运行效率70%~77%，同时柜体集成一体化风机运行可靠、噪音低，可靠运行时无需额外的维修保养等特点。

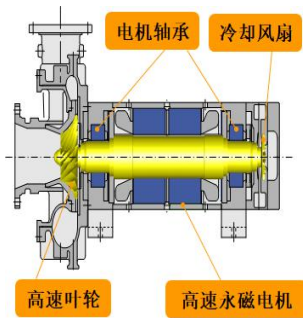


图4 空气悬浮鼓风机工作示意图

(4) 磁悬浮离心鼓风机

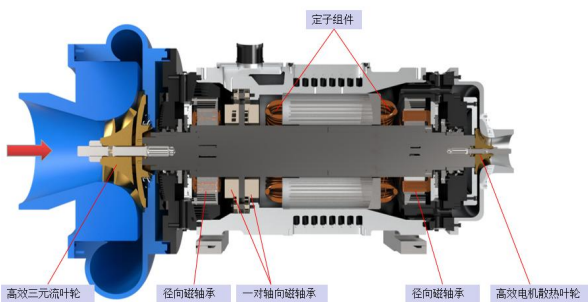


图5 磁悬浮鼓风机工作示意图

风机由5自由度主动磁悬浮轴承、三元流叶轮、高速永磁同步电机、高效变频器调速、智能化监测控制系统等组成，三元流离心叶轮和高速永磁同步

电机集成直驱结构。通过内置的位移传感器实时检测转轴的位置，将得到的信息传入磁悬浮轴承控制器进行调理、运算、放大，产生控制电流，再将该电流输入磁轴承线圈产生磁场，又由磁场产生吸力，从而实现转轴的悬浮。永磁同步电机通过变频器产生可控电流，将此电流输入电机定子产生旋转磁场，带动转轴高速旋转。随转轴高速旋转的叶轮带动空气从蜗壳进气口进入，通过叶轮做功和蜗壳导向成为具有一定流速和压力的气体，从蜗壳排风口排出，从而实现风机鼓风^[6]，如图5。

磁悬浮离心鼓风机和空气悬浮离心鼓风机一样都是将变频器、PLC 智能化监控系统、高速永磁同步电机、风机机头以及冷却系统、过滤系统、仪表及电控等元器件集成在隔音柜体内，达到一体化结构。磁悬浮离心鼓风机是现代磁悬浮技术在流体机械上的融合和应用，对于磁轴承实时的检测和准确的控制系统技术是一个不断完善和追求的方向，它是鼓风机安全可靠运行的保障。就磁悬浮离心鼓风机而言能承受更大的轴向力，较空气悬浮更能匹配复杂工况，具有高效节能、低噪音、免维护、智能控制等特点。

不同型式的氧化风机特性比较见表1。

表1 不同型式的氧化空气风机特性比较

风机型式	罗茨风机	多级离心	单级高速	空气悬浮	磁悬浮
压缩方式	容积式	离心式	离心式	离心式	离心式
风量, m ³ /min	≤1 400	≤2 000	≤2 000	≤600	≤600
压头, kPa	≤98 (单级) / ≤196 (双级)	≤145	≤196	≤120	≤150
风量调节	不可调	变频器调节	变频或导叶调节	永磁电机调节	永磁电机调节
工作范围	流量压力不可调	流量压力调节幅度较小	流量压力调节幅度大	流量压力调节幅度较大	流量压力调节幅度大
风机效率, %	64~70	70~78	≥83	85	85
噪音, dB (A)	≥100	85~100	90~95	80	80
振动	大	中	小	小	小
轴承	滚珠轴承	滚珠轴承或滑动	可倾瓦滑动轴承	空气轴承/铂片轴承	磁力轴承
轴承寿命	1~2年	3~5年	≥10	3~5年	半永久性
叶轮寿命	5~8年	10年	20年	20年	20年
叶轮转速, r/min	不变, 700~1 500	不变, 3 000~3 550	恒速/变速, 8 000~35 000	变速	变速
电动机类型	低速异步电动机	低速异步电动机	异步/永磁同步交流电动机	高速永磁同步电机	高速永磁同步电机
传动形式	皮带或联轴器	联轴器	联轴器/直联	直联	直联
电机效率, %	90~95	90~95	90~97	≥95	≥97

电机转速, r/min	不变, 1 400~3 000	不变, 2 980/3 550	恒速/变速, 1 400~35 000	精准调速	精准调速, ~60 000
自动化程度	低	中	中	高	高
润滑油	需要润滑油	需要润滑油	需要润滑油	无需润滑油	无需润滑油
易损件	轴承、齿轮	轴承、密封	轴瓦、密封	轴承、过滤网	过滤网
设备基础	需要	需要	需要	不需要	不需要
设备成本	最低	中	高	高	高
运行费用	最高	高	中	低	最低
整机效率, %	57	61~68	65~70	70~75	77
维护费用	低	低	中	高	低

3 高硫煤烟气脱硫氧化空气供给技术

燃高硫煤的烟气超低排放, 脱硫效率高, 需要的氧化空气量大, 吸收塔浆池容积大、浆池液位高, 氧化空气风机参数提高, 相应的氧化空气供给系统和氧化风机选型设计复杂。

目前氧化空气的供给主要有两种技术, 如图 6 所示。管网式氧化空气供给技术是在吸收塔浆池搅拌器上部布置若干开微孔的管道, 空气通过管道的微孔分布形成细小气泡分散到浆池中; 搅拌器+矛枪式组合技术是在搅拌器桨叶前方布置管道, 通过搅拌器旋转的桨叶将管道喷入的空气打碎成细泡扩散到浆池中。

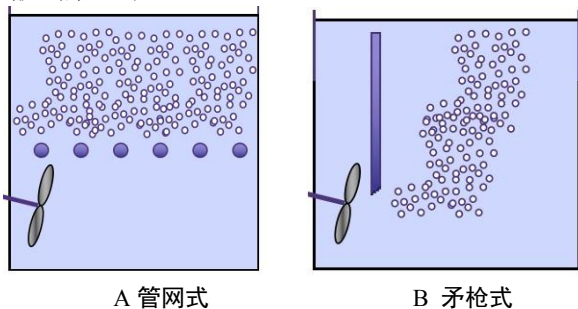


图 6 氧化空气供给技术

高硫煤烟气, 吸收塔浆池液位高, 管网式氧化空气供给技术, 可以抬高管网在浆池中的布置位置, 降低浆池氧化区高度, 大幅降低氧化空气风机压头, 将压头控制在 98 kPa 以下, 适应多种风机选型。矛枪式氧化空气供给技术有两种方式, 方式一

是在靠近吸收塔浆池底部区域设置一层搅拌器+矛枪式组合, 浆池氧化区高, 达到 14~18 m, 氧化空气风机压头大, 高达 160 kPa 以上, 风机选型型式少, 难度大、运行能耗高; 方式二是在吸收塔浆池中设置双层搅拌器, 下层搅拌器起浆液悬浮、防止浆液沉积作用, 上层搅拌器+矛枪式氧化空气喷枪组合起氧化空气播散作用, 上层搅拌器+矛枪式氧化空气喷枪组合布置可以降低浆池氧化区高度, 使风机选型压头控制在 98 kPa 以下, 适应多种风机选型和降低运行能耗。

4 高硫煤烟气脱硫氧化空气风机选型设计技术经济比较

某 660 MW 等级燃高硫煤发电厂, 设计条件为, 环境空气平均温度: 10.2 °C, 平均大气压: 794.4 hPa, 平均空气相对湿度: 79%。单台锅炉烟气量 197.4×104 Nm³/h, 水分含量: 6.16%, 氧含量: 4.92%, SO₂ 浓度: 9 000 mg/Nm³ (6%O₂, 干), 采用石灰石-石膏湿法烟气脱硫, 脱硫净烟气 SO₂ 浓度按超低排放 (≤35 mg/Nm³ (6%O₂, 干)) 设计。计算得到氧化空气总量为 34 568 Nm³/h (干), 氧化空气供给采用管网式, 风机压头 88.2 kPa, 风机数量按 N+1 台设计 (N 台运行、1 台备用)。可选择的风机型式有罗茨风机和离心式鼓风机。其不同型式的氧化风机选型技术经济比较见表 3。

表 2 不同型式的氧化空气风机选型技术经济比较

风机型式	罗茨风机	多级离心	单级高速	空气悬浮	磁悬浮
空气总风量, Nm ³ /h (干)	34 568	34 568	34 568	34 568	34 568
风机台数	3+1	2+1	2+1	3+1	3+1
单台风机风量, Nm ³ /h (干)	11 523	17 284	17 284	11 523	11 523

单台工况风量, m ³ /h (湿)	15 760	23 640	23 640	15 760	15 760
工况下进气压力, kPa	79.44	79.44	79.44	79.44	79.44
风机压头, kPa	88.2	88.2	88.2	88.2	88.2
风机效率, %	65	70	80	85	85
单台风机轴功率, kW	472.9	650.6	558	347.3	347.3
整机效率, %	57	61	68	72	77
整机电功率, kW	543.6	747.8	656.5	408.6	385.9
额定电机功率, kW	630	800	710	450	425
总电耗, kW	1 631	1 496	1 313	1 226	1 158
风机(含电机)总价, 万元	230	280	320	300	300
风机基础数量, 个	4	3	3	无	无
电气控制柜数量, 个	单配 4 个	单配 3 个	3 (成套)	与主机集成	与主机集成
年运行费用, 万元	652.4	598.4	525.2	480.4	463.2
第一年末设备投资 及运行总费用, 万元	882.4	878.4	845.2	780.4	763.2

备注: 1. 水冷却结构的鼓风机没有考虑冷却水消耗损失;
2. 多级离心鼓风机为二元流叶轮;
3. 年运行费用按年运行 8 000 h, 电价每 kW·h 按 0.50 元计算;
4. 投资费未计入土建基础、电缆及单独配置的电气柜。

比较表明, 空气悬浮和磁悬浮鼓风机综合成本优势明显。空气悬浮和磁悬浮鼓风机是近几年快速发展并迅速推向市场的离心鼓风机, 具有噪声低、效率高、安装简便等特点, 随着技术进步, 其初投资成本将会越来越低, 竞争优势将更加明显。

5 结语

(1) 氧化空气风机选型主要参数为风机流量和压头, 流量主要与烟气量及烟气中二氧化硫浓度、脱硫效率有关, 而压头主要与浆液密度及吸收塔内氧化空气管喷口至吸收塔浆池液位的埋深高度有关。

(2) 不同型式的氧化空气风机具有不同特点, 湿法脱硫以往多选成本及维护费用较低的罗茨风机, 随着风机技术进步, 低噪声、效率更高、运行费用更低的多级离心、单级离心、空气悬浮风机、磁悬浮风机也逐渐在湿法脱硫上应用, 相应的价格也更高。

(3) 高硫煤烟气脱硫氧化空气供给技术有管网式和搅拌器+矛枪式, 通过抬高管网在浆池中的布置高度或设置两层搅拌均可降低氧化空气浆池高度, 进而降低氧化风机选型压头, 控制氧化风机

压头不超过 98 kPa, 以适应多种风机选型和降低能耗。

(4) 针对某项目高硫煤烟气脱硫氧化风机进行选型比较, 相同氧化风机压头和氧化空气总量条件下, 综合比较, 采用多级离心、单级高速、空气悬浮、磁悬浮等型式的氧化风机, 不足一年其节约的运行成本即可抵消常规罗茨风机初投资成本低的优势, 氧化风机的具体选型宜结合项目情况、初期投资成本以及运行维护成本综合确定。

参考文献:

- [1] DL/T 5196-2016, 火力发电厂石灰石-石膏湿法烟气脱硫系统设计规程[S]
- [2] 杨志忠. 石灰石-石膏湿法烟气脱硫氧化空气研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009
- [3] 徐书德, 雷石宜, 陈彪. 湿法脱硫氧化风系统的优化改造实践[J]. 浙江电力, 2018,37(3):86-88
- [4] 谷小兵, 宁翔, 李建等. 脱硫氧化风系统母管制节能技术研究[J]. 能源与环境, 2021(5):52-54
- [5] 陆伟. 燃煤火电机组脱硫系统氧化风机的选型[J]. 科技资讯, 2013(12):88-89
- [6] 白生云. 好氧活性污泥法污水处理鼓风机选型及节能[J]. 山西建筑, 2014, 40(13):142-143

高速隐极电动机不同转子端部结构流动与传热耦合计算

杨燕 王超 周光厚

东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000

摘要: 本文阐述高转隐极电动机在不同转子端部结构下转子流动特性和传热特性。针对某大型高速隐极电动机, 通过有限体积法对电动机稳态运行时的三维流场和温度场进行耦合求解, 研究转子端部通风结构对转子流场、温度场特征的影响关系, 分析得到不同转子端部结构下转子各个风沟流量分布、转子风道静压分布以及转子通风沟的散热系数和温升分布情况。本文的研究成果, 可进一步了解同类电动机转子通风结构的特点, 为后续更多的高速隐极电动机通风结构设计奠定基础。

关键词: 高速隐极电动机; 转子端部结构; 计算流体力学; 耦合计算

中图分类号: TM303.6

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2023) 02-0067-07

Coupling Calculation of Flow and Heat Transfer in Different Rotor end Structures of High-speed Hidden Pole Motor

YANG Yan, WANG Chao, ZHOU Guanghou

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

Abstract: This paper describes the rotor flow characteristics and heat transfer characteristics of high-speed hidden pole motor under different rotor end cooling structures. For a large-scale highspeed hidden pole motor, the three-dimensional flow field and temperature field of the motor during steady-state operation are solved by the finite volume method. The influence of the rotor end ventilation structure on the characteristics of the rotor flow field and temperature field is studied. The flow distribution of each rotor duct, the static pressure distribution of the rotor duct, the heat dissipation coefficient and temperature rise distribution of the rotor ventilation duct under different rotor end structures are analyzed and obtained. The research results understanding the characteristics of rotor ventilation structure of similar motors further, and are reference for more ventilation structure design of high-speed hidden pole motor in the future.

Key words: high-speed hidden pole motor; rotor end cooling structure; computational fluid dynamics; coupling calculation

随着各行业加速产能置换转型升级, 对大功率同步电动机的要求越来越高。空冷电动机具有结构简单、维护费用低以及安全系数高等特点, 因此在技术可行的前提下, 现代用户更倾向于选用空冷产品。随着容量的增加, 电动机散热问题变得尤为突出, 通风冷却系统的合理设计显得特别重要。对于高速隐极电动机, 其转子具有外径大、电密高等特点, 导致转子线圈端部风路较长, 冷却比较恶劣,

因此有必要对电动机转子通风结构和散热特性进行研究。

高速隐极电动机与小型汽轮发电机具有类似的设计参数和结构特点, 小型汽轮发电机的相关研究可以为高速隐极电动机转子线圈散热特性研究提供较好的基础^[1-3]。电动机转子的旋转运动会给实验测量带来很大不便, 限制了实验测量法在电动机转子流场研究方面的应用^[4]; 在计算机模拟仿真方

收稿日期: 2023-03-20

作者简介: 杨燕 (1988—), 女, 2015年毕业于重庆大学动力工程与工程热物理专业, 硕士研究生, 工程师。现在东方电气集团东方电机有限公司研究试验中心工作, 主要从事电机通风冷却计算分析工作。

面，转子通风结构的完整性直接影响着最后的计算结果，而现有技术多采用简化的不完整模型，计算域有限，得到的计算结果也有限^[5-6]。

高速隐极电动机采用副槽通风的冷却方式对转子线圈直线段进行冷却。对于转子端部通风结构，选择的方式有：①单路+小齿孔；②单路+小齿月牙槽；③两路+小齿孔；④两路+小齿月牙槽；考虑到高速隐极电动机较常规汽轮发电机转子直径更大，转速变化范围广，高速隐极电动机转子冷却结构的定型需要充分的计算分析和试验研究。本文主要针对不同转子端部通风结构，建立转子全流域计算模型，分析得到不同转子端部结构下转子各个风沟流量分布、转子风道静压分布以及转子通风沟的散热系数和温升分布情况。

1 转子通风系统物理和数学模型

1.1 物理模型

高速隐极电动机在风扇和转子自身旋转产生的压头作用下，一部分冷却介质从转子护环与转子转轴间空隙流入电动机转子线圈端部和直线段，冷却转子线圈后进入气隙；另一部分冷却介质直接流入气隙，然后从定子风沟流出；第三部分冷却介质对定子端部进行冷却后通过压圈和机座端部环板间隙流出，如图1。

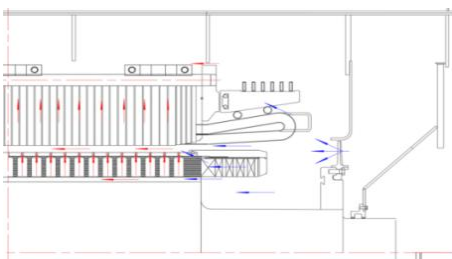


图1 电动机通风系统示意图

高速隐极电动机主体结构见图2。

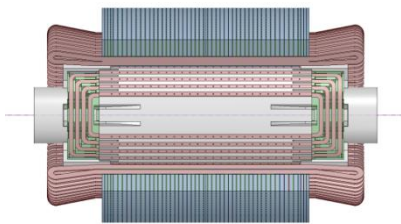


图2 高速隐极电动机主体结构三维模型

电动机采用副槽通风的冷却方式对转子线圈直线段进行冷却，冷却介质进入转子本体的副槽，通过与副槽连接的径向通风道将冷却介质引至转子线圈的直线部分，冷却介质沿轴向直线内冷风道流过一定距离后再由径向出风道排至气隙。计算域包含半轴向段的1/4圆（一个极）物理模型，其中转子端部冷却包括单路和两路通风方式，如图3和图4所示，转子沿Z轴正轴方向旋转，分别对转子小齿、大齿和副槽进行编号，R1#~R4#为迎风侧，L1#~L4#为逆风侧，其中小齿R4#和L4#风道处于极间，计算时只考虑了半个风道。

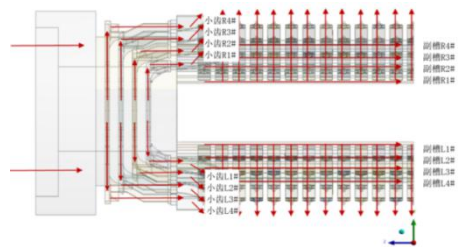


图3 转子端部单路冷却方式

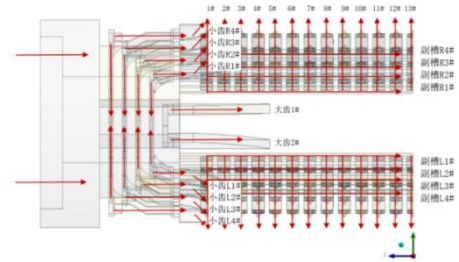


图4 转子端部两路冷却方式

对转子端部线圈和线圈直线段进行编号，R1#~R4#为迎风侧，L1#~L4#为逆风侧，如图5所示。

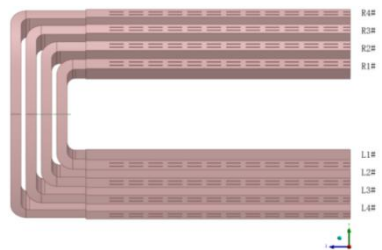


图5 转子线圈编号

1.2 数学模型

在求解转子流体流动物理模型时，需要利用质量守恒方程来进行控制，对于不可压缩流体的质量守恒方程^[7]为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

式中： ρ 为流体密度， kg/m^3 ； t 为时间， s ； \mathbf{u} 为流体的速度矢量。

动量守恒方程^[7]：

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} = \rho \mathbf{F} + \nabla p + \frac{\mu}{3} \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2)$$

式中： \mathbf{F} 为流体受到的质量力， N ； p 为流体压力， N ； μ 为流体的粘性系数。

当流体不可压缩且稳定流动时，根据电机转子的流场特性，选用两方程 RNG κ - ε 湍流模型^[8]，其通用方程为：

$$\frac{\partial (\rho \phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho V \phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad} \phi) + S \quad (3)$$

式中： ϕ 、 V 为通用变量； Γ 为扩散系数； S 为源项； ρ 为流体密度， kg/m^3 。

在求解温度过程中，还需要满足能量守恒方程^[9]：

$$\nabla (\rho \mathbf{u} T) = \nabla (\Gamma \text{grad} T) + S_T \quad (4)$$

式中： \mathbf{u} 为流体的速度矢量； Γ 为扩散系数； S_T 为流体内热预源及由粘性作用导致流体机械能转换成热能的部分。

三维热传导方程：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -q \quad (5)$$

式中： k_x 、 k_y 、 k_z 分别是 x 、 y 、 z 方向的导热系数， $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ； T 为温度； q 为内部热源密度， W/m^3 。

1.3 基本假设与边界条件

基本假设：①忽略重力和浮力的影响；②电机中流体雷诺数大于 2 300，属于湍流，因此采用湍流模型进行流场求解；③电机中流体雷流速远小于声速，流体看作不可压缩；④电机中流体流动认为是定常流动，即各个方程不含有时间项；⑤考虑电机中流体物性参数变化对转子温升的影响。

电机转子流体流动和传热是在非常复杂的情况下进行的，根据其结构、流体流动和传热的特点，给出其边界条件为：①冷却介质在转子流道内流动的动力主要来自于转子自身的旋转，模型中设置进口面为压力进口；②实际计算时利用 Fluent_UDF 实现定转子铜线损耗随温度变化的迭代求解；③转子端部以及气隙均采用旋转周期边界条件；④模型的进口风温设定为 40 °C。

2 流场和温度场耦合计算结果及分析

采用有限元法对电机转子通风系统进行三维耦合计算，并对计算结果进行分析。

2.1 流场计算结果

利用 CFD 方法对高速隐极电动机不同转子端部通风结构进行计算，获得各部分的风量分配数据如表 1 所示。可以看出，无论单路还是两路通风方式，月牙槽结构的总风量都比孔结构的风量大，这是由于月牙槽结构的风阻比孔结构的风阻小，依靠转子端部旋转产生的压头能够驱动更多的空气流动。

表 1 转子风量分配

转子部位	单路		两路	
	单路孔	月牙槽	两路孔	月牙槽
总风量	2.62	2.89	4.55	5.56
大齿风量	--	--	1.53	1.65
小齿风量	0.63	0.94	0.76	1.47
副槽风量	1.99	1.95	2.26	2.44

在单路通风方式下，月牙槽结构的转子总风量比孔结构大 10.3%，月牙槽结构的转子小齿风量比孔结构大 49.2%，月牙槽结构的转子副槽风量比孔结构小 2.0%。

在两路通风方式下，月牙槽结构的转子总风量比孔结构大 22.2%，月牙槽结构的转子大齿风量比孔结构大 7.8%，月牙槽结构的转子小齿风量比孔结构大 93.4%，月牙槽结构的转子副槽风量比孔结构大 8.0%。

对于小齿采用孔结构，两路通风方式的转子总风量比单路通风方式大 73.7%，两路通风方式的转子小齿风量比单路通风方式大 20.6%，两路通风方式的转子副槽风量比单路通风方式大 13.6%。

对于小齿采用月牙槽结构，两路通风方式的转子总风量比单路通风方式大 92.4%，两路通风方式的转子小齿风量比单路通风方式大 56.4%，两路通风方式的转子副槽风量比单路通风方式 25.1%。

2.1.1 流量偏差

为了便于分析不同转子端部结构下转子小齿和副槽风道的流量分配特性，定义风道流量偏差系数为：

$$\eta = \frac{Q_i}{Q_a} \quad (6)$$

式中： Q_i 为第*i*风道流量； Q_a 为各个风道平均流量。

图6为不同转子端部结构下各个小齿风道流量偏差系数分布情况（R4#和L4#小齿风道处于极间，计算时只考虑了半个风道，图中将其相加），从总体来看，单路通风方式下小齿风道的流量偏差比两路通风方式大。在单路通风方式下，迎风侧小齿风道的流量明显高于迎风侧，月牙槽结构的流量偏差比孔结构大；在两路通风方式下，小齿风道的流量主要呈“M”型分布，迎风侧月牙槽结构的流量偏差比孔结构小，迎风侧月牙槽结构的流量偏差比孔结构大。

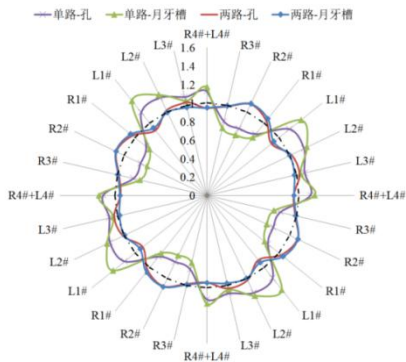


图6 端部结构对转子小齿风道流量偏差系数的影响

图7为不同转子端部结构对转子副槽风道流量偏差系数分布情况。从总体来看，两路通风方式下转子副槽风道的流量偏差比单路通风方式大，孔结构和月牙槽结构对转子副槽风道流量分配影响不大。从图7还可以看出，在单路通风方式下，无论是孔结构还是月牙槽结构，各个转子副槽风道（L1#除外）的流量偏差接近于1，流量分配较均匀；在两路通风方式下，无论是孔结构还是月牙槽结构，迎风侧R1#~R4#转子副槽风道的流量高于迎风侧L1#~L4#。

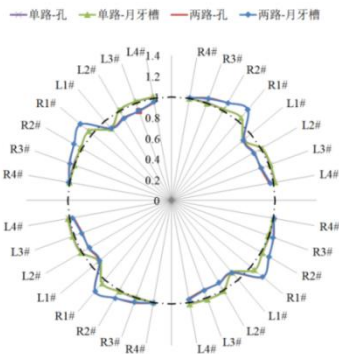


图7 端部结构对转子副槽风道流量偏差系数的影响

2.1.2 径向风孔流动分析

电动机转子副槽和径向风孔是典型的多支路分流流动，图8是多支路分流流动示意图。根据分流原理：

$$\omega_{i-1} > \omega_i (i=1, 2, \dots, N)$$

对于任意相邻两支路，应用伯努利方程：

$$P_{s,i-1} + P_{d,i-1} = P_{s,i} + P_{d,i} + \Delta P_{i-1,i} (i=1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

$$\Delta P_{s,(i-1,i)} = P_{s,i} - P_{s,i-1} = \frac{\rho}{2} \omega_{i-1}^2 - \frac{\rho}{2} \omega_i^2 - \lambda \frac{L}{D} \frac{\rho}{2} \omega_{i-1}^2 (i=1, 2, \dots, N) \quad (8)$$

其中 P_s 为静压， P_d 为动压。忽略通道中摩擦损失，通道中压力沿流动方向总是单调上升，如图9所示。

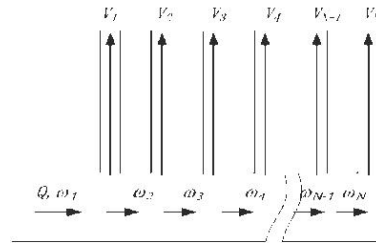


图8 多支路分流流动示意图

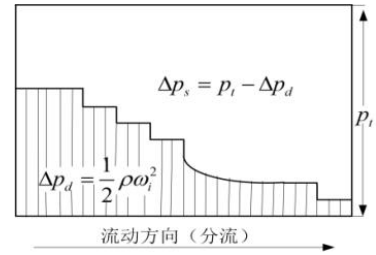


图9 多支路分流压力分布

主通道压力变化：忽略通道摩擦时，沿着主通道流动方向，动压逐渐降低，而静压逐渐增加；支路流量变化：背压不变时，沿着主通道流动方向，支路速度和流量均会逐渐增加。

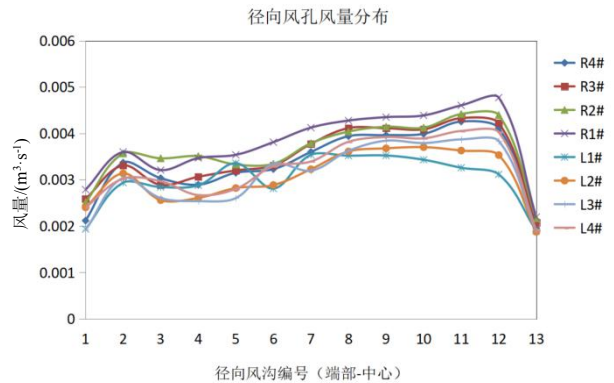


图10 两路月牙槽结构各个径向通风孔风量分布

根据 CFD 计算，得到两路月牙槽结构下各个径向通风孔风量分布情况（13#风沟是半个风沟）如图 10 所示。从图 10 可以看出，沿着流动方向（径向风沟编号从 1~13），基本满足支路风量逐渐增加的规律。

图 11 是单路月牙槽结构相对于两路月牙槽结构各个径向风沟风量变化百分比。从图 11 可以看出，单路通风方式下各个径向风沟（L3 和 L4 的 4# 和 5#除外）风量都有所降低。

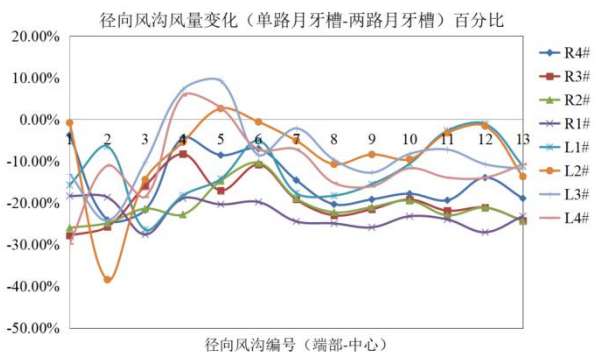


图 11 单路和两路结构径向通风孔风量对比

2.1.3 转子压力分布

计算获得转子压力场分布如图 12~图 15 所示。从图 12 和图 13 可以看出，对于转子端部单路通风方式，小齿无论是孔结构还是月牙槽结构，逆风区静压大于迎风区静压；。从图 14 和图 15 可以看出，对于转子端部两路通风方式，小齿无论是孔结构还是月牙槽结构，逆风区静压小于迎风区静压。

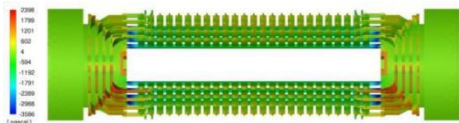


图 12 转子压力分布（单路-孔）

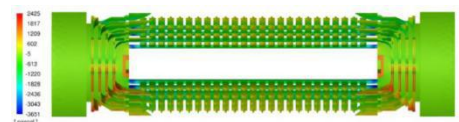


图 13 转子压力分布（单路-月牙槽）

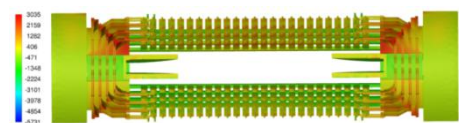


图 14 转子压力分布（两路-孔）

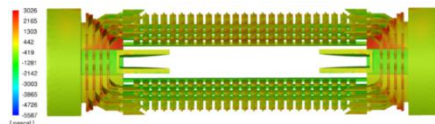


图 15 转子压力分布（两路-月牙槽）

2.2 散热系数计算结果

定义相对散热系数来分析不同转子端部结构下转子端部和直线段的散热系数变化情况：

$$\eta_{\alpha} = \frac{\alpha_i}{\text{两路月牙槽(端部 or 直线段)平均散热系数}} \quad (9)$$

式中： α_i 为第 i 号线圈(端部 or 直线段)平均散热系数，转子线圈编号方式见图 5。

图 16 为不同转子端部结构下转子端部线圈相对散热系数分布情况（R4#和 L4#小齿风道处于极间，计算时只考虑了半个风道，图中将其加权平均），可以得出以下结论：

- （1）单路孔和单路月牙槽结构具有相类似的散热系数分布，都是靠近大齿位置最高，极间最低，这是由于从大齿到极间，转子端部风路逐渐增长，散热效果会越来越差；月牙槽结构的散热系数大于孔结构（增大 0.7%~17.8%）；
- （2）两路孔和两路月牙槽结构具有相类似的散热系数分布，迎风侧散热系数高于逆风侧；月牙槽结构的散热系数大于孔结构(增大 3.2%~14.5%)；
- （3）两路通风方式下各个转子端部线圈的散热系数高于单路通风方式（L1#和 L2#除外）。

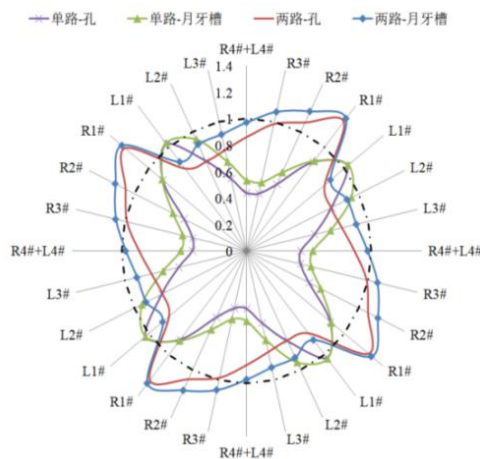


图 16 端部结构对转子端部线圈相对散热系数的影响

图 17 为不同转子端部结构下转子线圈直线段相对散热系数分布情况，可以得出以下结论：

(1) 单路孔和单路月牙槽结构具有几乎相同的散热系数分布，且采用孔和月牙槽冷却结构下各个转子线圈直线段散热系数变化不大（1%以内）；

(2) 两路孔和两路月牙槽结构具有几乎相同的散热系数分布，迎风侧的散热系数大于逆风侧，且采用孔和月牙槽冷却结构下各个转子线圈直线段散热系数变化不大（1%以内）；

(3) 两路通风方式下各个转子线圈直线段的散热系数高于单路通风方式。

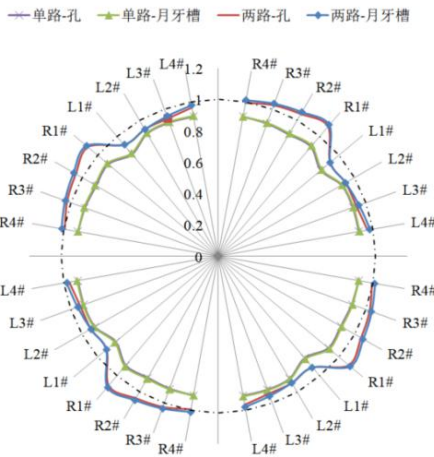


图 17 端部结构对转子线圈直线段相对散热系数的影响

2.3 温升计算结果

定义相对温升为：

$$\eta_r = \frac{\Delta T_i}{\text{考核温升}} \quad (10)$$

式中： ΔT_i 为第*i*线圈温升。

图 18 和图 19 分别是不同转子端部结构下各个转子线圈最高温升（相对）和平均温升（相对）对比情况。

在单路通风方式下，月牙槽结构端部线圈（R1#除外）的最高温升和平均温升均低于孔结构，其中 R4#端部线圈的最高温升变化为最大，为 24.1%；L4#端部线圈的平均温升变化为最大，为 22.1%。月牙槽结构线圈直线段（R1#除外）的最高温升略低于孔结构，月牙槽结构线圈直线段的平均温升高于孔结构，这是由于孔和月牙槽冷却结构下转子线圈直线段散热系数变化不大，月牙槽结构转子线圈直线段的风量较孔结构的有所降低。其中 L3#线圈直线段的最高温升变化为最大，为 5.8%；R1#线圈

直线段的平均温升变化为最大，为 13.2%。

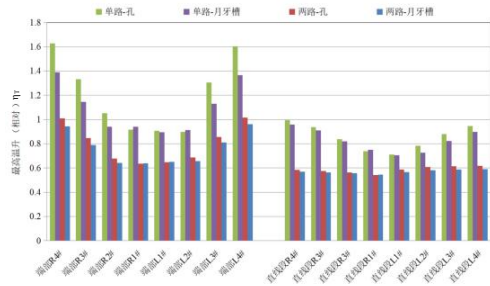


图 18 转子线圈最高温升（相对）

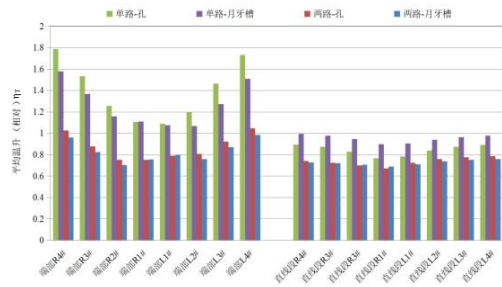


图 19 转子线圈平均温升（相对）

在两路通风方式下，月牙槽结构端部线圈（R1#和 L1#除外）的最高温升和平均温升均低于孔结构，其中 R4#端部线圈的最高温升和平均温升变化大，分别为 6.6% K 和 6.7%。月牙槽和孔结构线圈直线段的最高温升和平均温升变化不大，最高温升和平均温升变化均在 2.8% 以内。

对于小齿孔结构，采用两路通风方式转子线圈的最高温升和平均温升都明显低于单路通风方式，其中端部线圈最高温升降低了 21.2%~62.1%，平均温升降低了 29.9%~76.0%；线圈直线段最高温升降低了 12.5%~41.0%，平均温升降低了 5.9%~15.5%。

对于小齿月牙槽结构，采用两路通风方式转子线圈的最高温升和平均温升都明显低于单路通风方式，其中端部线圈最高温升降低了 24.3%~44.6%，平均温升降低了 27.6%~61.9%；线圈直线段最高温升降低了 13.9%~38.9%，平均温升降低了 19.3%~26.7%。

2.4 大号线圈温升对比

由于大号线圈（R4 和 L4）具有较高的温升水平，图 20 和图 21 分别是两路和单路月牙槽情况下大号线圈的温升分布曲线。

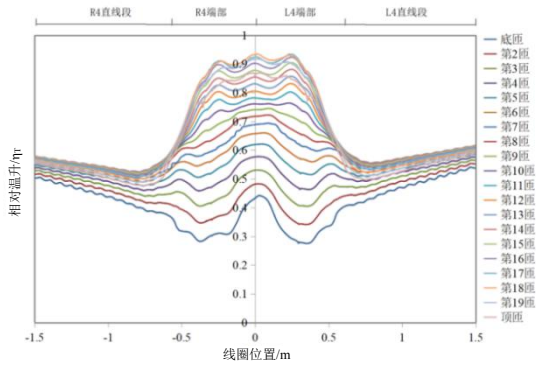


图 20 两路月牙槽大号线圈温升(相对)分布曲线

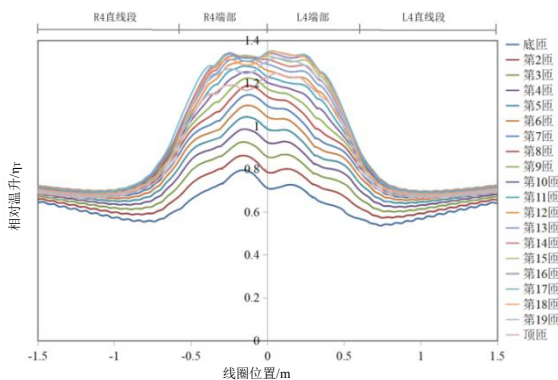


图 21 单路月牙槽大号线圈温升(相对)分布曲线

从图20可以看出,对于两路结构,每匝线圈迎风侧(R4)和逆风侧(L4)端部的温升分别比较对称,最高温升的位置在迎风侧(R4)和逆风侧(L4)端部交界处;从图21可以看出,单路结构的底匝到第14匝线圈最高温升的位置在迎风侧(R4),第15匝到顶匝线圈最高温升的位置在逆风侧(L4)。

对比图20和图21可以发现,两路结构和单路结构转子直线段相对温升变化不大,转子端部温升变化较大。

3 结语

本文基于计算流体力学和数值传热学原理,通过CFD仿真计算,研究了某高速隐极电动机不同转子端部冷却结构下转子各个风沟风量分布、转子风道静压分布以及各个转子通风沟的散热系数及温升分布情况。

3.1 对比单路和两路通风方式,得到结论如下:

(1) 无论单路还是两路通风方式,月牙槽结构具有较大总风量和小齿风量、较大端部散热系数、

较小的端部最高温升和平均温升。

(2) 单路通风方式下,月牙槽结构具有较小的副槽风量、线圈直线段有较低的最高温升和较高的平均温升,月牙槽结构和孔结构的转子线圈直线段的散热系数几乎相同。

(3) 两路通风方式下,月牙槽结构具有较大的副槽风量,月牙槽结构和孔结构的线圈直线段具有几乎相同的最高温升、平均温升和散热系数。

3.2 对于小齿孔和小齿月牙槽结构,得到以下结论:

无论是孔结构还是月牙槽结构,两路通风方式具有较大总风量、大齿风量、小齿风量、副槽风量、端部散热系数(个别除外)、直线段散热系数。

本文将转子端部结构对其温升的影响进行规律性分析和具体量化评估。研究发现,对于某高速隐极电动机,无论采取单路还是两路通风方式,小齿孔还是小齿月牙槽结构,转子直线段最高温升和平均温升均能满足考核要求,但转子端部最高温升和平均温升受到了较大的限制,因此可进行一系列结构优化设计,最终形成转子端部冷却的改进技术方案。

参考文献:

- [1] 路义萍,李伟力,马贤好等.大型空冷汽轮发电机转子温度场数值模拟[J].中国电机工程学报,2007(12):7-13
- [2] Gott B E B, Kaminski C A, Shartrand A C. Experience and recent development with gas directly cooled rotors for large steam turbine generators[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1984, PAS-103(10):2974-2981
- [3] 郑东平,蔡荣善.100~200 MW 空冷汽轮发电机的通风与温升计算[J].发电设备,2006,20(3):193-195
- [4] 廖毅刚,侯小全.全空冷汽轮发电机通风冷却研究[J].东方电气评论,2008(1):1-8
- [5] 路义萍,陈朋飞,李俊亭等.某新型空冷汽轮发电机转子通风方式的流场分析[J].中国电机工程学报,2010,30(6):63-68
- [6] 郑东平,胡晓红,袁益超.汽轮发电机转子轴向-径向通风冷却系统流动特性研究[J].大电机技术,2011(5):9-12+16
- [7] 陶文铨.数值传热学[M].西安:西安交通大学出版社,2008
- [8] Chen C-J, Jaw S-Y. Fundamentals of turbulence modeling[M]. Washington DC: Taylor & Francis, 1998
- [9] 王福军.计算流体力学分析—CFD 软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社.2004:1-13,31-38

管式空气预热器螺旋槽管数值优化探讨

王筱箴 黄雪飞

东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 成都 611731

摘要: 本文讨论了管式空气预热器螺旋槽管的数值优化及能效评价。CREO 软件建立螺旋槽管的三维模型, 通过 ANSYS 分析其传热系数和阻力系数。应用能效评价方法优化螺旋槽管的结构参数, 为工程设计人员提供参考。

关键词: 螺旋槽管; 数值计算; 能效评价

中图分类号: TM621; TK124

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2023) 02-0074-05

Discussion on Numerical Optimization of Spiral Groove Tube of Tubular Pir Areheater

WANG Xiaozhen, HUANG Xuefei

(Dongfang Boiler Co.,Ltd., 611731, Chengdu, China)

Abstract: The paper discusses the numerical optimization and energy efficiency evaluation of spiral grooved tubes of tubular air preheater. The three-dimensional model of spiral grooved tube is established by CREO software, the heat transfer coefficient and resistance coefficient are analyzed by ANSYS. The optimal structural parameter of spiral grooved tube is considered by means of energy efficiency evaluation method. The paper provides reference for engineering designers.

Key words: spiral grooved tube; numerical simulation; energy efficiency evaluation

2020年9月,我国明确提出2030年“碳达峰”与2060年“碳中和”目标^[1],促进绿色技术和节能减排技术的发展。2021年11月,国家发改委、国家能源局印发《全国煤电机组改造升级实施方案》,深入推动煤电领域的超低排放改造,灵活性改造及供热改造。在此背景下,各科研单位、电力企业与设备制造商纷纷开展节能降耗新技术的研究及应用。通过应用管式空气预热器与回转式空气预热器联合设计的GAH防堵技术方案的研究及改造应用^[2],可使300 MW亚临界W火焰锅炉的排烟热损失降低1.45%。通过对某公司CFB锅炉在解决腐蚀、磨损、漏风等技术方案进行总结^[3],为CFB机组的经济煤种惨烧、宽负荷适应性提供了经验。

管式空气预热器的性能提升研究再度引起工

程技术人员的关注。管式空气预热器传热强化技术在国内均有大量的研究,在标准^[4]及文献出版物^[5-7]中总结了关于传热和流动阻力计算的准则关联式。H型外翅片、高频焊接外螺旋翅片、内外螺旋槽管等在工程上已有较多的应用,其强化传热效果得到了广泛认同及工程实际验证。翅片管的大规模的市场应用受到制造工艺、质量、使用寿命及制作成本等因素的制约。H型外翅片管和高频焊接外螺旋翅片管采用焊接的方法将外螺旋翅片与基管焊接在一起,可减少翅片与基管的接触热阻,但加工难度较大且成型精度较低。通过实验装置对高频焊接外螺旋翅片的传热和流动阻力特性进行研究^[8],总结了传热系数与翅片间距、翅片高度、横向管间距、纵向管间距等因子的准则关联式,得到横

收稿日期: 2022-11-01

作者简介: 王筱箴 (1972—),女,2012年毕业于四川理工学院机械设计专业,大学本科,工程师。现任东方锅炉股份有限公司技术中心设计员,主要从事机械设计与电站锅炉研究等工作。

向管间距及翅片间距越大, 传热系数越大的结论。整体锯齿型螺旋翅片管采用热轧定制批量生产或者车削工艺加工方式, 制作成本适中, 产品质量可靠, 使用寿命长, 在工程中也得到了较多的应用。通过对整体齿型翅片管束的传热及阻力特性的实验研究^[9], 得出了其传热及阻力特性关联式, 结论为锯齿型翅片管束的翅基面积及翅片密度比外螺旋翅片更大, 传热系数高出约 11%。本文的研究对象为内外螺旋槽管, 采用冷轧工艺, 用光管在轧机上滚压出内外螺旋槽, 具有一次滚压成型, 不需要人工矫直, 产品精度高, 加工成本低等特点。螺旋槽管已有试验测试数据作为支撑并在大量的工程应用中得到了性能验证。

1 光管式空气预热器的数值模拟计算

本文统计了 100 余个实际工程项目 CFB 锅炉管式空气预热器的数据, 平均进口烟气温 283 °C、平均出口烟气温 134 °C、平均进口空气温度 31 °C、平均出口空气温度 225 °C, 见图 1。

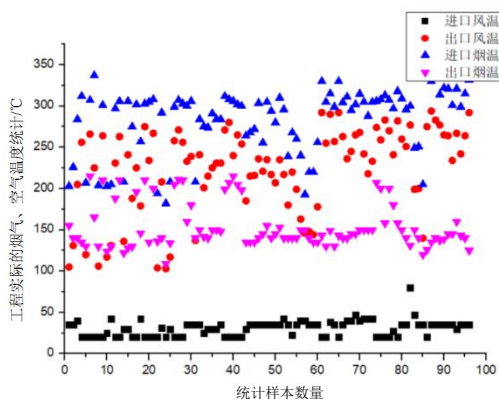


图 1 工程实际的烟气、空气温度统计

以上述平均温度值作为研究对象管式空气预热器的设计参数参考值, 以更接近于工程实际。依据取样工程项目的烟气、空气参数, 得到平均的烟气、空气的组分份额, 作为管式空气预热器的设计烟气参数, 用于性能计算程序分析及数值模拟分析。详细的烟气、空气成份如下:

烟气成份 (摩尔份额): $O_2=3.25\%$, $RO_2=14.21\%$, $N_2=73.33\%$, $H_2O=9.20\%$ 。

空气成份(摩尔份额): $O_2=20.67\%$, $N_2=77.75\%$, $H_2O=1.58\%$ 。

采用多组分气体物性参数的计算方法计算出

烟气与空气的导热系数、动力粘度、定压比热、密度等参数^[10], 并拟合为温度的多项式, 用以计算管式空气预热器的性能及数值模拟计算流体介质的物性参数设定。

研究对象为某管式空气预热器, 错列布置, 烟气自上而下通过管内, 空气横向通过管间。管箱单列布置, 共有 3 级。管子直径均为 $D_{41} \times 1.5\text{ mm}$, 横向节距 S_1 均为 70 mm, 纵向节距 S_2 均为 40 mm。每级管箱的横向管子排数 Z_1 均为 40, 纵向管子排数 Z_2 均为 40。

用管式空气预热器性能程序计算各工况下烟气和空气的进、出口温度数据及管子壁温, 作为数值模拟计算的边界条件。烟气纵向流经管内, 水力直径为管子内径 37 mm, 烟气定性温度为烟气进、出口平均温度 202.5 °C。空气横向流经管间, 水力直径为 46.12 mm, 空气定性温度为空气进、出口的平均温度 119.2 °C。管子的壁面温度为金属的平均温度 159.5 °C。

烟气、空气对管壁的对流放热系数计算准则式分别为式 (1)^[5]及式 (2)^[5]。光管式空气预热器的管内烟气纵向流动阻力采用 Merker 公式计算, 见式 (3)。光管式空气预热器的空气管间横向流动阻力计算准则方程见式 (4)^[6]。

$$h_g = 0.023 \frac{\lambda}{D_c} \left(\frac{\omega D_c}{\nu} \right)^{0.8} Pr^{0.3} C_k \quad (1)$$

$$h_a = 0.36 C_s \frac{\lambda}{D_c} \left(\frac{\omega D_c}{\nu} \right)^{0.6} Pr^{0.33} \quad (2)$$

$$C_{fg} = C_z \left(\frac{\omega D_c}{\nu} \right)^{-0.27} \quad (3)$$

$$C_{fa} = (1.82 \log \left(\frac{\omega D_c}{\nu} \right) - 1.64)^{-2} \quad (4)$$

式 (1) ~ 式 (4) 中:

h_g, h_a 分别为烟气、空气的对流传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; λ 为烟气、空气的导热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; De 为水力直径^[5], mm; ω 为烟气、空气的流速^[5], m/s; ν 为烟气、空气的运动粘度, m^2/s ; Pr 为烟气、空气的普朗特数; C_s 为修正系数, 计算值为 1.163^[5]; C_k 为修正系数, 查线图 1.16^[5]; C_z 为修正系数, 计算值为 1.243^[6]; C_{fg}, C_{fa} 分别为烟气、空气的流动阻力系数, $0.5 \Delta P \cdot De / (L \cdot V^2 \cdot \rho)$ 。

选取与整个管式空气预热器流体平均温度近似相等的中温段管组进行数值分析计算, 烟气流经

管内，烟气入口温度为 229.05 °C，出口温度为 173.7 °C。空气流经管间，空气入口温度为 85.4 °C，出口温度为 149.9 °C。壁面平均温度 159.5 °C。数值分析的计算模型选择 $k-\epsilon$ 双方程，采用速度入口，压力出口，恒壁温等边界条件。烟气与空气的导热系数、动力粘度、定压比热、密度采用拟合多项式计算。数值计算的管内及管间流体域见图 2，其中管间流体域的纵向管排数应不小于 10。

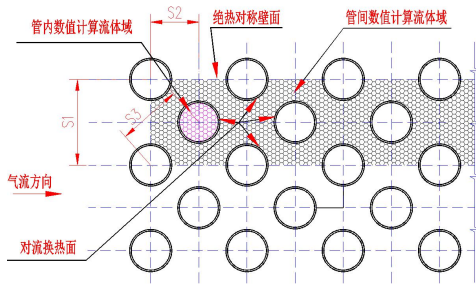


图 2 数值计算流体域

通过对光管的数值计算的结果进行分析比较，Standard $k-\epsilon$ 计算模型有较好的计算精度。在雷诺数 6 000~17 000 范围内，光管内烟气纵向流动的数值计算对流传热系数 h_g 与式 (1) 的偏差为 -9.85%~+2.1%，流动阻力系数 C_{fg} 与式 (3) 的偏差为 +24%~+30%，见图 3。

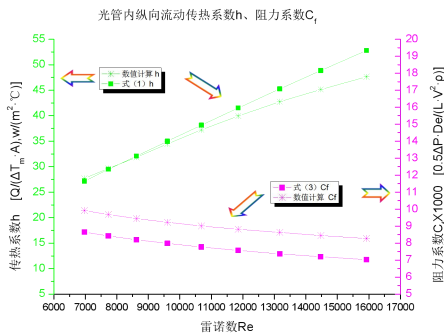


图 3 光管内纵向流动传热与阻力系数

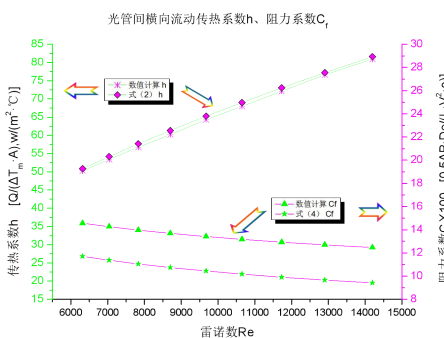


图 4 光管间横向流动传热与阻力系数

光管间空气横向流动的数值计算对流传热系数 h_a 与式 (2) 的偏差为 -1.3%~-0.9%，流动阻力系数 C_{fa} 与式 (4) 的偏差为 +16%~+23%，见图 4。

2 内外螺旋槽管数值模拟计算

内外螺旋槽管采用冷轧工艺，用光管在轧机上挤压出内外螺旋槽，加工成本低。 $D41 \times 1.5$ 的光管加工内外螺旋槽管的工艺成熟，在工程上已有大量的应用。按工程经验需考虑螺旋槽管的加工工艺及金属的延展率等因素，对 1.5 mm 薄壁管子的挤压螺旋槽深度建议不超过 1.5 mm。内、外螺旋槽管扩展了管子内壁及外壁的传热面积，螺旋槽改善了管子壁面的流态，传热得到强化。螺旋槽管结构尺寸见图 5， P 为螺距 (mm)， W 为槽口宽度 (mm)， H 为翅片深度 (mm)。

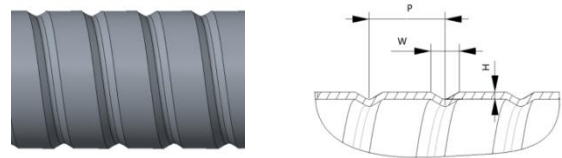


图 5 螺旋槽管结构尺寸

表 1 螺旋槽管结构尺寸 mm

编号	节距 P	槽宽 W	槽深 H
I	12	6	1.5
II	16	6	1.5
III	20	6	1.5
IV	16	8	1.5
V	16	10	1.5

本文对管式空气预热器管子的内外螺旋槽管结构参数进行设定的改变，通过 ANSYS 数值模拟计算分析螺旋槽管的传热和流动阻力特性，为工程优化设计及工程应用提供方法及建议。

采用 CROE 三维软件在光管上扫描螺旋沟槽，模拟螺旋槽管的轧制。本文设计了 5 种不同螺距、槽口宽度的螺旋槽管结构尺寸参数，见表 1。

三维内螺旋槽扩展了传热面积，同时提高了流体在管壁的流速，气流沿螺旋槽的旋向流动增强了底层气流的扰动及与中心区域流体的混合，传热得到提升。气流的纵向流动受螺旋槽的影响与边界层分离，边界层厚度减薄，同时也增强了气流的扰动

及与中心区域流体的混合, 传热得到提升, 见图6~图9。

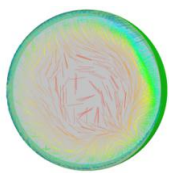


图6 纵向速度矢量图

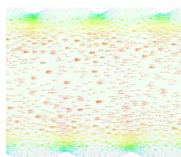


图7 横向速度矢量图

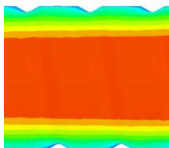


图8 横向温度云图

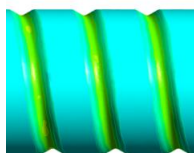


图9 传热系数云图

传热强化的主要因素。壁面区域的外螺旋槽改变了部分的流体流向, 对传热强化也有一定的促进作用, 见图11、图12。

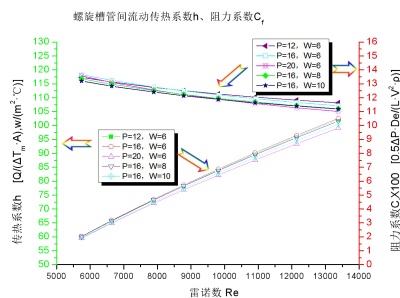


图13 螺旋槽管间横向流动传热系数及阻力系数

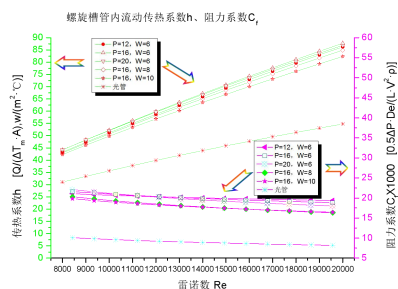


图10 螺旋槽管内纵向流动传热系数及阻力系数

通过数值计算结果的对比分析, Realizable $k-\varepsilon$ 数值计算模型对外螺旋槽的管间横向流动有较好的计算精度, 与工程数据有更好的一致性。在雷诺数 5 000~14 000 范围内, 外螺旋槽的管间流动传热系数 h 相比光管上升 1.26~1.31 倍, 阻力系数 C_f 下降 1.005~1.01 倍, 见图 13。在槽口宽度均为 $W=6$ mm 的情况下 (编号 I、II、III), 螺旋节距 $P=16$ mm 的三维外螺旋槽管具有最大的传热系数及阻力系数, $P=12$ mm 次之, $P=20$ mm 最小。传热系数与内螺旋槽管趋势一致, 而阻力系数与内螺旋槽管趋势不同。外螺旋槽管传热强化主要受扩展传热面积份额的影响, 受流态变化的影响更小。在螺旋节距 P 均为 16 mm 的情况下 (编号 II、IV、V), 槽口宽度 W 越大, 三维外螺旋槽管具有更小的传热系数和更小的阻力系数, 与内螺旋槽管的趋势一致。

通过数值计算结果的对比分析, Realizable $k-\varepsilon$ 计算模型对内螺旋槽管内纵向流动有较好的计算精度, 与工程实际数据有更好的一致性。在雷诺数 8 000~20 000 范围内, 内螺旋槽管内流动传热系数 h 相比光管上升 1.35~1.58 倍, 阻力系数 C_f 上升 1.96~2.19 倍, 见图 10。在槽口宽度 W 均为 6 mm 的情况下 (编号 I、II、III), 螺旋节距 $P=16$ mm 的三维内螺旋槽管具有最大的传热系数, $P=20$ mm 次之, $P=12$ mm 最小。螺旋节距 $P=12$ mm 的三维内螺旋槽管具有最大的阻力系数, $P=16$ mm 次之, $P=20$ mm 最小。在螺旋节距 P 均为 16 mm 的情况下 (编号 II、IV、V), 槽口宽度 $W=6$ mm 的三维内螺旋槽管具有最大的传热系数和阻力系数, $W=8$ mm 次之, $W=10$ mm 最小。

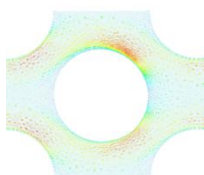


图11 纵向速度矢量图

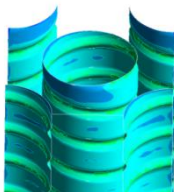


图12 传热系数云图

三维外螺旋槽扩展了管子外壁的传热面积, 是

3 管式空气预热器的能效评价

管式空气预热器的能效评价方法, 通常对传热系数和压降进行分析和比较, 有研究人员提出采用单位泵功率下的换热量指标 (Q/N), 或者传热努谢尔数与阻力系数的比值 (Nu/C_f), 或者压降与传热单元数的比值 ($\Delta P/NTU$) 等^[11-12], 上述方法简单直观, 但不能全面反映管式空气预热器的能效指标。作为进一步的研究, 有学者提出了基于热力学第二定律的评价方法, 包括熵评价法和焓评价法, 并在热交换器行业等到了广泛应用^[13-14]。管式空气预热器的能效评价, 除了考虑热效率和风机能耗等性能指标外, 还应考虑制造成本、安装成本、检修维护成本等因素的影响。

本文分析计算的5种类型的螺旋槽管均采用D45×1.5的光管轧制加工而成，其计算传热面积均采用光管的计算传热面积。5种类型的螺旋槽管的管径、管长、管排数、横向节距、纵向节距等参数均相同，因此具有相同的计算传热面积、设备重量及设备成本。基于此，本文采用相同设备成本基础上的能量净收益的能效评价方法，即通过比较换热器单元的换热量与通风能耗的差值EI进行判定，EI值越大表示换热器的能量净收益越大，因而具有更好的能效指标。相关的计算方法见式(5)~式(8)。

$$Q=MG \cdot CP \cdot \Delta t \quad (5)$$

$$\text{或 } Q=h \cdot \Delta T_m \cdot A \quad (6)$$

$$N=\xi \cdot \Delta P \cdot MG/\rho \quad (7)$$

$$EI = Q - N \quad (8)$$

式(5)~式(8)中： Q 为换热单元的换热量， W ； MG 为空气或烟气的质量流量， kg/s ； CP 为空气或烟气在定性温度下的比热， $J/(kg \cdot ^\circ C)$ ； Δt 为空气或烟气的进出口温度差， $^\circ C$ ； h 为对流传热系数， $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ； ΔT_m 为传热对数温差， $^\circ C$ ； A 为对流传热面积， m^2 ； N 为风机的泵功率， W ； ξ 为风机系数，取值 $0.87 \sim 0.88$ ； ΔP 为通风阻力， Pa ； ρ 为空气或烟气的密度， kg/m^3 ； EI 为能效指标， W 。

通过计算分析，表1中的II型螺旋槽管具有最好的能效指标，EI值对比见图14，与工程实际中采用性能测试方法获得的优选型号一致。

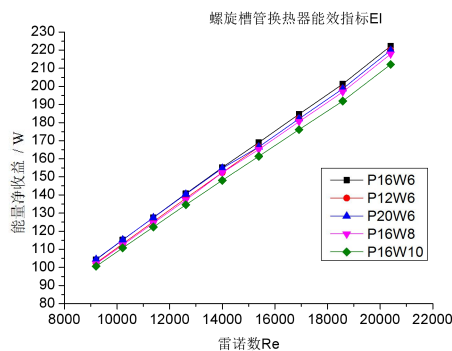


图14 螺旋槽管换热器能效指标EI对比

4 结语

本文基于CAE的数值模拟计算分析提供了螺旋槽管的一种优化设计方法，相对于试验研究可大幅度节约研究成本，并具有很高的数据可靠性和准确性。对于光管内纵向流动与光管间横向流动的数

值分析计算，Standard $k-\epsilon$ 计算模型有较好的计算精度。而对于螺旋槽管内纵向流动与管间横向流动的数值计算，Realizable $k-\epsilon$ 计算模型有较好的计算精度。通过对5种不同螺旋节距及螺旋槽口尺寸的螺旋槽管的数值计算分析对比，并采用净能量收益的能效评价方法进行判定，结论为II型螺旋槽管具有最好的能效指标，与工程实际中采用性能试验研究方法获得的优选型号一致。

本文如有错误或不当之处敬请批评指正。

参考文献:

- [1] 新华社. 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话 [EB/OL]. (2020-9-22)[2022-4-20]. https://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content_5546168.htm
- [2] 冉桑铭, 郑刚, 邓坚等. 基于升参数的亚临界W火焰锅炉整体提效改造方案研究[J]. 热力发电, 2022,51(1):79-86
- [3] 辛胜伟. 循环流化床锅炉典型共性问题攻关及展望[J]. 洁净煤技术. 2021,27(S2):18-22
- [4] с.и. 莫强. 锅炉设备空气动力计算[M]. 杨文学, 徐希平等译. 唐宗炎校. 北京: 电力工业出版社, 1981
- [5] 应静良, 李永华. 电站锅炉空气预热器[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002
- [6] 古尔维奇AM, 库兹涅佐夫HB. 锅炉机组热力计算标准方法[M]. 杨文学, 徐希平译. 北京: 机械工业出版社, 1998
- [7] 章成骏. 空气预热器原理与计算[M]. 上海: 同济大学出版社, 1995
- [8] 何法江, 曹伟武, 匡江红等. 螺旋翅片管束传热和阻力特性的试验研究[J]. 动力工程, 2009,29(5):460-464
- [9] 卓宁, 蒋伟元, 王坚等. 齿型螺旋翅片管束传热及通风特性试验研究[J]. 华东工业大学学报, 1996(1):23-26
- [10] 常勇强, 曹子栋, 赵振兴等. 多组分气体热物性参数的计算方法[J]. 动力工程学报, 2010,30(10):772-776
- [11] 邓先和, 张亚君, 邢华伟. 换热器在多种冲刷条件下的传热强化性能评价[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2002 (3): 44-45+49
- [12] 徐国想, 邓先和, 许兴友等. 换热器传热强化性能评价方法分析[J]. 淮海工学院学报(自然科学版), 2005(2):42-44
- [13] GB/T 30261-2013 制冷空调用板式热交换器效率评价方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013
- [14] GB/T 27698.5-2011 热交换器及传热元件性能测试方法第5部分: 管壳式热交换器用换热管[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012
- [15] 陶文铨. 传热学[M]. 第5版. 北京: 高等教育出版社, 2019
- [16] 中国动力工程学会. 火力发电设备技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000

元坝气田高压输电线路远程自动化系统的 研究与应用

杨洋 张文 李长春 姜玉峰 毕泉云 张永涛

中国石化西南油气分公司广元天然气净化公司, 四川 广元 628000

摘要: 元坝气田是中国石化在四川盆地部署的第二座超深层海相大气田, 位于四川东北山区, 元坝气田高压输电线路是元坝气田电力的唯一来源, 共计约 127 km, 输电线路具有分布广、自然环境恶劣、故障排查难等特点。结合元坝气田高压输电线路实际情况, 为解决高压输电线路故障排查难题、缩短故障排查并处理时间、减少人工成本, 从软件、硬件以及配体系统等多方面入手, 研制出一套符合气田输电线路运行现状的高压输电线路远程自动化系统, 该系统自动处理故障的平均耗时 0.1 h, 系统显示故障点人工处理平均耗时 2.4h, 远远优于之前的人工排查故障点并处理的平均耗时 4h, 具有重要研究和应用价值。

关键词: 高压; 输电线; 远程; 自动化; 故障点

中图分类号: TM75

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006 (2023) 02-0085-04

Research and Application of Remote Automation System for High Voltage Transmission Line in Yuanba Gas Field

YANG Yang, ZHANG Wen, LI Changchun, JIANG Yufeng, BI Quanyun, ZHANG Yongtao

(Guangyuan Natural Gas Purification Company of Sinopec Southwest Oil and Gas Company, 628000, Guangyuan, Sichuan, China)

Abstract: Yuanba Gas Field is the second super-deep marine gas field deployed by Sinopec in the Sichuan Basin, located in the northeast mountain area of Sichuan Province. The high-voltage transmission line of Yuanba Gas Field is the only source of power of Yuanba Gas Field, with a total length of about 127 km. The transmission line is characterized by wide distribution, bad natural environment, and difficulty in troubleshooting. In combination with the actual situation of the high voltage transmission line in Yuanba Gas Field, in order to solve the problem of troubleshooting the high voltage transmission line, shorten the troubleshooting and processing time, and reduce the labor cost, a set of remote automation system for the high voltage transmission line has been developed from the aspects of software, hardware, and ligand system. The average time for the system to automatically process the fault is 0.1 h. The system shows that the average time for manual processing of fault points is 2.4 hours, which is far better than the previous average time for manual troubleshooting and processing of fault points, and it has important research and application value.

Key words: high voltage; transmission line; long-range; automation; failure point

元坝气田坐落于四川东北部, 面积约 1 460 平方千米, 10 kV 集输线路承载着为整个气田生产提供电源的重要任务^[1]。10kV 集输线路全长约 127 km, 共有 47 条分支线路, 主要包括路断路器、避雷器、避雷针、绝缘子、熔断器等重要设备^[2-3], 每个重要

设备均有发生故障的可能。当某个设备发生故障时, 排查故障点需人工巡线逐一排查, 10 kV 集输线路分布在山区丛林, 为故障查找增加难度, 也给排查人员的生命安全造成威胁。目前油气田长输线路故障点排查的方法主要有人工逐点排查法、无人机排

收稿日期: 2023-02-21

作者简介: 杨洋 (1992—), 男, 2018 年毕业于西南石油大学化学工程与技术专业, 硕士研究生, 工程师, 现就职于中石化广元天然气净化有限公司从事天然气处理研究与管理工作。

查法、故障录波测距法等^[4]。人工排查和无人机排查十分耗时耗力，而故障录波测距只能检测到故障点与相邻变电站之间的距离，无法准确定位到具体的杆（塔）号，虽然与人工排查办法相比有一定优势，但是仍然不能精准定位故障点^[2,5,6]。

为了让 10 kV 集输线路柱上断路器与气田电网控制中心后台实现通讯，研究出一套高压输电线路远程自动化系统，运维人员可以利用该系统实时掌握线路运行状态，断路器故障时，能第一时间得知断路器因何种保护跳闸、跳闸断路器位号等详细信息，帮助运维人员判断故障性质和快速处置故障。

1 高压输电线路远程自动化系统的原理研究

高压输电线路远程自动化系统的关键设备为配电开关监控终端(简称 FTU)，其主要原理^[7-8]是通过 FTU 采集线路断路器电压、电流等信息后与配电自动化主站通信，FTU 与配电自动化主站通信采用 GPRS+SIM 卡等无线通信网络、以及光纤传感网、电力载波通信等有线通讯协议和技术，提供配电系统运行情况和各种参数即监测控制所需信息，包括开关状态、电能参数、相间故障、接地故障以及故障时的参数^[9]，并执行配电主站下发的命令，对配电设备进行调节和控制，实现故障定位、故障隔离和非故障区域快速恢复供电等功能^[10-11]。

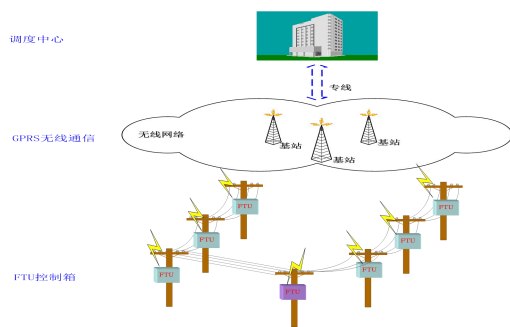


图 1 高压输电线路远程控制示意图

2 高压输电线路远程自动化系统的组建

2.1 软件系统选择

对现有条件进行研究，气田通讯集输机柜间与移动通讯有备用通讯端口、FTU 控制箱具有 SIM 通

讯卡接口、变电站与气田通讯集输机柜间具有光纤通讯备用端口。10 kV 集输线路通讯为企业内部通讯，要求具有信号加密、不受外界信号干扰等较高的安全性，且通讯软件应具备远程操作、状态显示、事件记录、操作便捷等实用性功能，通过对各类系统性能研究比较，选定 SL200e 软件。SL200e 软件平台是一套多线程、多任务、实时性的软件系统，主要用于电力自动化系统的数据采集、监视和通讯。

2.2 高压输电线路远程自动化系统配置流程

高压输电线路远程自动化系统配置流程如图 2 所示：

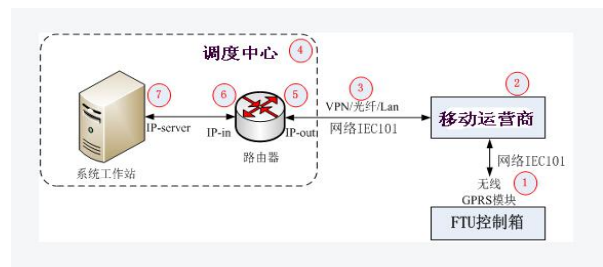


图 2 集输线路远程控制系统配置流程示意图

高压输电线路远程自动化系统配置流程：（1）无线 GPRS 模块①设置远方通讯 IP: port，上图中无线 GPRS 模块设置的远方 IP: port 为 5 IP-out + port；（2）使用 IEC101 规约通过网络进行通讯，其中 FTU 控制箱作为 client 端，系统工作站作为 server 端，client 主动连接 server，建立通信 socket；（3）移动运营商②到气田电力调度中心④之间单独架设通讯线路，VPN/光纤/Lan 均可；因元坝 10 kV 集输线路线路长、分布广，使用光纤通讯成本高、光纤架设难度大，根据实际情况选用 VPN。（VPN 的英文全称是“Virtual Private Network”，即“虚拟专用网络”。可以把它理解成虚拟的企业内部专线。它在公用网络上建立专用网络，通过特殊的加密的通讯协议在连接在 Internet 上的位于不同地方的两个或多个企业内部网之间建立一条专有的通讯线路。）（4）气田电力调度中心内部路由器分为外网口⑤和内网口⑥，外网口接入移动运营商专线，其 IP 地址由移动运营商分配，移动运营商把 FTU 控制箱的通讯数据送到外网口⑤；（5）对路由器进行配置，将外网口⑤和内网口⑥进行 IP 和 port 映射，这样外网口⑤才能将通讯数据转到内网口⑥上；（6）

内网口⑥的 IP 地址 IP-in 由气田电力调度中心统一分配, 与系统工作站⑦的 IP 地址 IP-server 在同一网段内; (7) 系统工作站⑦的 IP 地址 IP-server 和 port 由气田电力调度中心统一分配, 必须为固定 IP, 不可为动态分配 IP; (8) 系统工作站⑦通过 IP-server 网口接收内网口⑥的数据, 与每一个 FTU 控制箱建立以太网通讯 socket 连接。

2.3 高压输电线路远程自动化系统配置

通过 FTU 控制箱端口号、IP 等设置, 移动通讯卡 VPN 申请, 气田通讯集输机柜间外网口和内网口进行映射, 后台软件配置调试等工作, 实现了通过断路器 FTU 控制箱采集线路断路器电压、电流等信息后采用 GPRS+SIM 卡无线通信网络和光纤传感网、电力载波通信等有线通讯协议和技术与配电自动化主站通信的功能。

2.4 技术难点及创新

元坝气田 10 kV 集输线路没有用于电力自动化系统的数据采集、监视和通讯的软件系统, 集输线路柱上断路器与气田电网控制中心后台无任何方式的通讯, 运维人员无法实时掌握线路运行状态。高压输电线路远程自动化系统填补了这一空白, 将原真空断路器升级为具有远程通讯功能的断路器,

并通过系统优化, 赋予整个自动化系统具有远方通讯功能、自动隔离故障功能、恢复正常供电能力、就地和遥控功双重功能, 成功应用于元坝气田 10 kV 集输线路的日常运行维护和检维修, 提高了集输线路故障处理效率, 保证了上游井站场设备和高含硫天然气净化装置的安全、平稳运行, 故障处理时间从人工约 4 小时缩短至约 0.1 小时。

3 应用效果讨论与评价

断路器与后台的通讯即元坝气田 10 kV 集输线路远程自动化系统的应用, 实现了开关状态远程监控、远程分合闸、事项显示等多项实用功能。如图 3 所示。

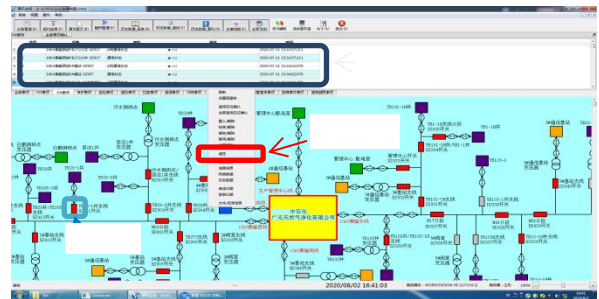


图 3 10kV 输电线路远程自动化系统

表 1 2021 年 4 月至 8 月输电线路故障处置时间统计表

位置	故障现象	保护动作情况 (站外)	试送电情况	恢复供电耗时 (h)
10 kV 集输南线	G906 开关“限时速断”、“零序过流”保护动作开关跳闸。	无	试送电成功	0.1
10 kV 生管线	G904 开关“限时速断”、“零序过流”保护动作开关跳闸。	0.4kV 快切装置动作	未试送电	0.5
10 kV 集输东线	YB1-1H 井支线 DZ935 开关“零序过流”保护动作开关跳闸, 重合闸失败。	零序过流 (跳闸)、重合闸失败	试送电成功	0.1
10 kV 集输西线	YB27-3 井支线 XZ919 开关 “零序过流”保护动作开关跳闸, 重合闸失败。	零序过流 (跳闸)、重合闸失败	试送电失败	1
10 kV 集输东线	YB1-1H 井支线 DZ935 开关“零序过流”保护动作开关跳闸, 重合闸失败。	零序过流 (跳闸)、重合闸失败	试送电成功	0.1
10 kV 集输西线	YB205 井支线 XZ915 开关 “速断”保护动作开关跳闸, 白鹤倒班点支线 XZ916 开关分闸。	速断 (跳闸)	试送电成功	0.1
10 kV 集输西线	YB27-3 井支线 XZ919 开关“速断”保护动作开关跳闸, 重合闸失败。	速断 (跳闸)、重合闸失败	试送电失败	1
10 kV 集输南线	6#基站支线 NZ949 开关“速断”保护动作开关跳闸。	速断 (跳闸)	试送电成功	0.1
10 kV 集输东线	YB103-1 井失电。	无	未试送电	0.8
10 kV 集输西线	YB29-2 井支线 XZ909 开关“过流”保护动作开关跳闸, 重合闸失败。	过流 (跳闸)、重合闸失败	试送电失败	0.6
10 kV 集输西线	YB27-1/2 井支线 XZ923 开关“速断”保护动作开关跳闸。	速断 (跳闸)	试送电成功	0.1
10 kV 集输西线	YB29-1 井支线 XZ911 开关“速断”保护动作开关跳闸, 重合闸失败。	速断 (跳闸)、重合闸失败	试送电失败	0.8
10 kV 集输西线	2#基站井支线 XZ912 开关“过流”保护动作开关跳闸, 重合闸失败。	过流 (跳闸)、重合闸失败	试送电成功	0.1

元坝气田输电线路已成功运用重合闸技术，远程分合闸(遥控)功能的实现在线路瞬时性故障处置上是一种质的提升。当重合闸不成功时，运维人员摇测绝缘合格后可进行一次远程试送电。2021年4月至8月，如表1所示，10 kV集输线路各分支断路器在发生13次故障，运维人员通过摇测绝缘合格后从后台遥控进行远程试送电，试送电7次成功，按瞬时故障计算，后台试送电处置时间0.1小时，极大的缩短了相关井站厂恢复供电的时间，远程送电不成功需人工现场用电，由于后台能准确显示故障点位置，现场处理故障并送电耗时最长才为0.8 h，而人工排查故障点并处理的平均耗时为4 h，输电线路远程自动化系统优势十分明显。另外在井站厂因生产需要需停电时，可直接在后台进行分闸操作，运维人员不用到现场操作开关，减少了人员出行交通风险以及山区滑坡、摔伤和操作时触电的风险，另一方面大量节约的时间。

表2 2021年故障平均处置时间对照表

处置类型	单次故障平均处置时间 (h)
人工排查处理	4
系统排查人工处理	2.4
系统排查自动处理	0.1

表2为2021年全年的故障平均处置时间对照表，从表中可以看出，人工排查处理故障平均耗时为4 h，系统排查人工处理平均耗时2.4 h，系统排查自动处理平均耗时0.1 h。断路器状态远程监控的实现，帮助运维人员实时掌握开关分合闸状态，当线路故障导致开关跳闸时，运维人员能第一时间获取开关跳闸保护动作情况、重合闸是否成功等基础信息，知悉若开关跳闸重合闸失败时失电所影响的范围。在远程试送电不成功(线路发生永久性故障)，后台获取的断路器跳闸信息、位号等帮助运维人员排查故障锁定了范围，大大缩减故障处理时间。

4 结语

结合元坝气田高压输电线路的实际状况，以需求为导向，形成了一套完整的针对集输线路安全运行、远程遥控、快速响应的远程自动化控制系统，在系统硬件要求、软件适配、网络传输等多方面进行充分研究并成功应用，提高了集输线路故障处理效率，保证了上游井站场装置的安全、平稳运行。

生产过程中，运维人员通过气田供电管理站控制室后台就能直接对10kV集输线路进行实时监控，运维人员能第一时间发现集输线路故障点，系统自动处理故障的平均耗时0.1 h，系统显示故障点人工处理平均耗时2.4 h，远远优于之前的人工排查故障点并处理的平均耗时4 h，具有重要研究和应用价值。

参考文献:

- [1] 张文, 杨洋, 王杰等. 断路器重合闸技术研究及在元坝气田中的应用[J]. 新技术新工艺, 2022, (8):74-77
- [2] 王林娟. 基于DSP的故障录波器设计及故障测距方法的研究[D]. 南京理工大学, 2004
- [3] 杨远航, 卢佳, 石恒初等. 一种输电线路的双端故障录波测距方法[P]. 云南省: CN112505488B, 2023-05-26
- [4] 王中豪. 人工智能技术在电器自动化控制中的应用及作用[J]. 电子技术与软件工程, 2021 (23):97-98
- [5] 梁光建, 阎文, 郑立评等. 基于小波网络的某放大电路故障检测[J]. 新技术新工艺, 2010, (3):29-32
- [6] 秦强林. 10kV高压大功率变频器研制与测试[J]. 东方电气评论, 2004, 18(3):141-146+150
- [7] 陈磊, 唐璜. 220kV输电线路运行维护与关键技术研究[J]. 电力设备管理, 2022 (16):38-41
- [8] 郭晓兰. 具有远程通讯功能的低压智能断路器监控系统研究[D]. 湖南大学, 2007
- [9] 徐立强, 范传康, 凌乐等. 工业GPRS监控节点可靠性技术研究[J]. 东方电气评论, 2015, 29(1):9-14
- [10] 何周, 朱晨光, 徐铭辉等. 基于ARM的馈线自动化终端FTU的设计与实现[J]. 电气制造, 2014, (10):62-63
- [11] 许达, 秦绮荷, 顾大德. 考虑设备故障概率的配网自愈故障隔离优化策略[J]. 电工技术, 2022(4):83-85+88