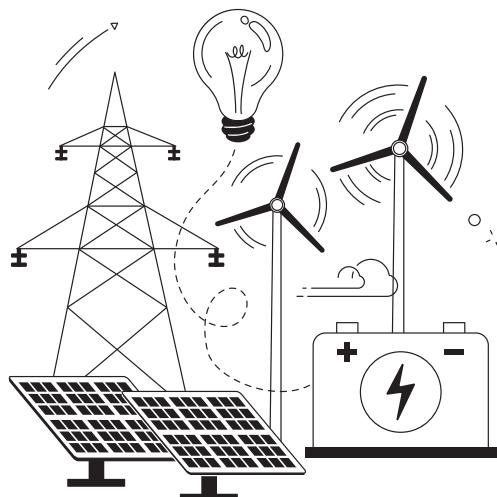


电力技术 与安全管理

Electric Power Technology and Safety Management



ART AND DESIGN PRESS INC.

(626 810 4480)

119 S Atlantic Blvd, Suite 300D

Monterey Park, CA 91754

Copyright © 2025 by ART AND DESIGN PRESS INC.

Complimentary Copy



编委 Editorial Board Member

Bateer Hexi

Inner Mongolia Energy Power Generation Hangjin Power Generation Co., Ltd.

Gaowa Morigeng

Inner Mongolia Electric Power (Group) Co., LTD. Ordos Power Supply Branch.

Juan Wang

Inner Mongolia Electric Power (Group) Co., LTD. Ordos Power Supply Branch.

Chaoshan Xie

Beijing BKC Technology Co., Ltd.



电力技术与安全管理

Electric Power Technology and Safety Management

第2卷 第5期 2025年5月刊

主 管 ART AND DESIGN PRESS INC.

主 办 ART AND DESIGN PRESS INC.

编 辑 《电力技术与安全管理》编辑部

ISSN(O): 2997-3503

ISSN(P): 2997-3473

地 址: 119 S Atlantic Blvd, Suite 300D Monterey Park, CA 91754

网 址: <https://www.artdesignp.com>

本刊说明:

凡向本刊所投稿件，全体作者需签署论文著作权转让声明书和论文发表承诺书，声明、承诺及相关事项如下：

1. 作者将论文的复制权、发行权、网络传播权、翻译权、汇编权、信息网络传播权、改编权等著作权在世界范围内免费转让给本刊。
2. 论文不侵犯他人著作权和其他权利，否则作者将承担由此产生的全部责任，并赔偿由此给出版单位造成的全部损失。
3. 论文署名作者享有该作品的完全著作权，署名作者的身份真实。
4. 论文未曾以任何形式公开发表过。
5. 作者所投本刊稿件，本刊编辑部拥有修改权。

电力系统 | POWER SYSTEM

- 001 电厂变频调速技术在风机、水泵运行中的应用及节能效果评估 董赫伦
Application and Energy-Saving Effect Evaluation of Variable Frequency Speed Regulation Technology in the Operation of Fans and Pumps in Power Plants Dong Helun
- 005 大型水电站高边坡施工安全控制关键技术分析 赵海
Analysis of Key Technologies for Safety Control in High Slope Construction of Large Hydropower Stations Zhao Hai
- 008 储能系统在充电桩一体化设计中的配置策略 校香云，马艳丽
Configuration Strategy of Energy Storage Systems in Integrated Design of Charging Piles Xiao Xiangyun, Ma Yanli
- 011 变频调速技术在电气控制与电机拖动节能系统中的应用分析 杨盆
Analysis of the Application of Variable Frequency Speed Regulation Technology in Electrical Control and Motor Drive Energy-saving Systems Yang Pen
- 015 探究漂浮式海上风电动态电缆敷设施工技术 徐茂禄
Exploring the Construction Technology of Dynamic Cable Laying for Floating Offshore Wind Power Xu Maolu
- 018 风电场电气设备中风力发电机的运行维护分析 赵海琦
Analysis of Operation and Maintenance of Wind Turbines in Electrical Equipment of Wind Farms Zhao Haiqi
- 021 国电投某发电厂 DCS 网络故障分析及处理方案 安磊
Analysis and Handling Scheme of DCS Network Fault in a Power Plant of SPIC An Lei
- 024 火力发电厂汽轮机组节能降耗技术应用研究 全宏宇，李铁军，贾艳辉
Application Research on Energy Saving and Consumption Reduction Technology of Steam Turbine Unit in Thermal Power Plant Tong Hongyu, Li Tiejun, Jia Yanhui
- 027 北斗短报文通信终端本地钟差对发射频率的影响及纠正措施 李龙，马晓铮
Influence of Local Clock Difference of Beidou Short Message Communication Terminal on Transmission Frequency and Correction Measures Li Long, Ma Xiaozheng

技术研究 | TECHNICAL RESEARCH

- 030 张家口地区网上国网用户分层管理机制构建 李荣荣
Construction of Hierarchical Management Mechanism for Online State Grid Users in Zhangjiakou Area Li Rongrong
- 033 汽轮机设备故障诊断与预防探讨 胡晓江，苏阳，潘杭，金仲超
Discussion on Fault Diagnosis and Prevention of Steam Turbine Equipment Hu Xiaojiang, Su Yang, Pan Hang, Jin Zhongchao
- 036 汽轮机低压缸零出力改造对机组经济性的影响分析 安鹏博
Analysis of the Impact of Zero Output Transformation of Low Pressure Cylinder in Steam Turbine on Unit Economy An Pengbo
- 039 燃煤机组气力输灰系统自动控制逻辑优化 陈晴
Optimization of Automatic Control Logic for Pneumatic Ash Conveying System in Coal-Fired Units Chen Qing

042	智能计量检定综合管控装置的设计与系统实现 Design and System Implementation of Integrated Smart Metering Verification Control Device	黎静, 李冰, 朱小超, 杜鹏, 廉宁 Li Jing, Li Bing, Zhu Xiaochao, Du Peng, Lian Ning
046	660MW 汽轮机大修中持环挂耳调整检修 Adjustment and Maintenance of the Retaining Ring and Hanging Ear During the Overhaul of a 660Mw Steam Turbine	王良瑞 Wang Liangrui
049	风光互补新能源系统在偏远地区的适用性及经济性分析 Analysis of the Applicability and Economic Viability of Wind-solar Complementary New Energy Systems in Remote Areas	张全跃, 陈航 Zhang Quanyue, Chen Hang
052	基于风险预控的煤电锅炉本质安全设计与生产全流程管控实践 Practice of Intrinsic Safety Design and Full-Process Management and Control of Coal-Fired Power Plant Boilers Based on Risk Precontrol	郭强, 苏承伟 Guo Qiang, Su Chengwei

电厂变频调速技术在风机、水泵运行中的应用及节能效果评估

董赫伦

阜新发电有限责任公司，辽宁 阜新 123000

DOI:10.61369/EPTSM.2025050001

摘要：在电力工业迅速发展的同时，电厂的能源消耗也越来越严重，其中，风机和水泵是电厂的重要耗能装置，对其进行节能改造具有重要的意义。本文对电厂风机、水泵采用变频调速技术进行较深入的研究，分析其节能效果，首先介绍变频调速的工作原理和特性，分析目前电厂的风机、水泵运行状况，指出其存在的问题；然后对变频技术在风机、水泵上的应用场景、改造流程和控制策略进行了详细的论述，建立一套科学的评价指标和方法，并以实例为基础定量地分析了该项目所产生的其它效益；最后针对实际应用中出现的一些问题进行分析，并给出了相应的解决方法。调查显示，采用变频技术对电厂风机和水泵进行节能改造，取得了较好的效果，其作为一种值得推广的技术，对于促进我国电厂的绿色、低碳发展有着十分重要的作用。

关键词：电厂；变频调速技术；风机；水泵；节能效果；应用

Application and Energy-Saving Effect Evaluation of Variable Frequency Speed Regulation Technology in the Operation of Fans and Pumps in Power Plants

Dong Helun

Fuxin Power Generation Co., Ltd., Fuxin, Liaoning 123000

Abstract : With the rapid development of the power industry, energy consumption in power plants has become increasingly severe. Among them, fans and pumps are important energy consuming devices in power plants, and energy-saving transformation of them is of great significance. This article conducts a more in-depth study on the use of variable frequency speed regulation technology in power plant fans and pumps, analyzes its energy-saving effect, first introduces the working principle and characteristics of variable frequency speed regulation, analyzes the current operating status of fans and pumps in power plants, and points out their existing problems; Then, a detailed discussion was made on the application scenarios, transformation processes, and control strategies of frequency conversion technology in fans and pumps. A set of scientific evaluation indicators and methods were established, and other benefits generated by the project were quantitatively analyzed based on examples; Finally, some problems that arise in practical applications are analyzed and corresponding solutions are provided. According to the survey, the use of frequency conversion technology for energy-saving renovation of power plant fans and pumps has achieved good results. As a technology worth promoting, it plays a very important role in promoting the green and low-carbon development of power plants in China.

Keywords : power plant; variable frequency speed regulation technology; fan; water pump; energy saving effect; application

引言

随着我国能源需求的不断增加和“双碳”战略的实施，作为能耗和碳排放量最大的行业，电力部门的节能减排工作已成为当务之急。在电厂中，风机、水泵是用电的重要装置，在电力消耗总量中，其耗电量约占电厂30-50%。而传统的风机、水泵运行模式多为恒速或节流方式，存在着能源消耗大、设备损耗大以及效率低等问题，已很难满足电站复杂变化的运行要求。变频技术可以按照实际的负载需要来准确地调整电机的速度，从而达到节能和提高效率的目的，在电厂风机、水泵节能改造中展现出巨大潜力。开展电厂风机水泵变频运行及其节能效应的研究，对减少电厂运行成本、提高能源利用率，以及减少环境污染，有着十分重要的实际意义。本文采用理论分析和案例研究相结合的方式，对电厂风机水泵节能改造的实践和节能效应进行较为系统的论述，以期为我国电厂节能技术的推广和应用提供借鉴。

作者简介：董赫伦（1985.08-），男，汉族，辽宁阜新人，学历：硕士研究生，职称：工程师，从事的研究方向：热能工程。

一、变频调速技术原理与特点

(一) 变频调速技术基本原理

变频技术的核心就是利用供电频率的变化实现对电动机速度的控制，按照感应电机的转速计算公式： $n=[60f(1-s)]/p$ ，其中 n 是电机的速度、 f 是电源频率、 s 是转差率、 P 是电机的极对数。当电机的对极数 P 和转差率 s 基本上保持恒定时，电机的旋转速度 n 与供电频率 f 成比例。变频调速系统是利用整流电路把工频交流电变成直流电，然后通过逆变电路把直流电变成频率、电压可调的交变电流，给电动机提供动力，以达到准确调整电动机速度的目的。

以风机为例，在需要风量的情况下用变频器将供电频率调低，从而使风机的风量和风压降低；相反，在需要空气流量的情况下，增大供电频率，电动机的速度就会增大，从而达到空气流量的要求。该速度调节方法可根据现场工作情况，对设备的操作参数进行动态调节，从而克服常规恒速运转所带来的能量浪费^[1]。

(二) 变频调速技术特点

采用变频调速技术可依据实际负载变化情况实时调整电动机速度，实现设备在高效率区域内工作，有效地解决传统节流方式中由于阀门开度降低而造成的能耗损失问题。通过实例分析表明，使用变频技术后，风机和水泵的节油率在20%~50%左右。同时，采用变频调速技术，可以对电动机进行无级调速，具有较宽的调速范围和较高的精度，可以对系统的负载进行迅速地反应，从而使得设备的工作更稳定，以适应电厂中各种复杂的工作环境。

此外，它还具有较高的控制精度，与PLC、DCS等控制系统组合后，可以达到自动控制的目的。其还具有过电流保护、过电压保护、欠压保护、过热保护等各种保护功能，可以有效地防止电动机出现故障而导致的损坏，从而提高设备的使用寿命，减少设备的维修费用。

二、电厂风机、水泵运行现状与问题分析

(一) 电厂风机、水泵运行特点

电厂的风机、水泵工作状态是复杂多变的，其用电需求受机组运行状态、生产工艺要求、环境条件等诸多因素的影响。比如，在电站锅炉的工作中，为了使炉内的负压保持平稳，必须对机组的负荷进行调整；鼓风机应按需要供给适当的风量；循环泵在电厂中也得到广泛的使用，它是按照机组的负荷、水温来进行流量调整，而给水泵则是按照锅炉水位、蒸汽流量来保证给水量和压力的恒定^[2]。

这些装置在使用时，经常出现负荷波动大、启停频繁的情况，在机组启停和变负载运行过程中，风机和水泵的工作参数需进行频繁地调节，常规的恒速工作模式很难适应这一多变的工作环境，降低设备的工作效率。

(二) 传统运行方式存在的问题

第一，传统的风机和水泵多采用恒速运转，即通过调整阀的

开度实现对流体的流量和压力的控制。这样的调整方式会导致气门的能耗增加，特别是在低压工况下，气门开度变小，损失更加明显，从而导致巨大的电能浪费。

第二，在恒速运转下，装备在高速高负荷下长时间工作，机械零件的磨损会越来越严重，这不仅会提高设备的故障率，还会缩短检修周期，从而使设备的维修费用和停工期变得更长，影响到电站的正常运转^[3]。

第三，传统的操作模式因不能随负荷变化而实时调整操作参数，当负载剧烈波动时，会导致系统压力不稳定以及流量不均匀，从而降低机组的生产效率和机组的产量。

第四，电动机直接启动时，起动电流高达5~7倍，对电网产生巨大的冲击，不仅会引起电网电压的剧烈波动，还会对其它电器设备的正常工作产生不利影响，加快电动机绕组的绝缘老化，缩短电动机的使用寿命。

三、变频调速技术在电厂风机、水泵中的应用

(一) 应用场景与选型

1. 应用场景

电厂的引风机、送风机、一次风机和脱硫增压风机都可以使用变频技术。如采用变频技术，可使引风机随锅炉的燃烧状况而调整风量，从而保持炉膛负压的稳定；变频调速技术能够提供一种可按燃油燃烧要求对供气量进行准确控制的方法，从而提高燃烧效率。

水泵的使用场合主要有循环泵、给水泵、凝结泵等，这些都是电站水泵的主要使用对象。其中循环泵采用变频技术，可按机组负载、水温等参数进行流量调整，达到经济高效运转的目的；给水泵按锅炉水位、蒸汽流量等参数进行调节，以确保锅炉的安全、稳定运行。

2. 选型原则与方法

在选择变频调速系统时，应从电机功率、调速范围、负载特点，以及工作环境等方面进行考虑。首先，为了保证变频调速系统能正常工作，变频调速系统必须具有比电动机更大的额定功率；其次，要依据电动机的速度调节范围及负载特点，选择适当的变频器型式，如风机、水泵等扭矩为平方的，可以选择一般的变频器；另外，为了满足电站的复杂工况，还需要对其保护级别和散热方式进行合理的设计。

(二) 系统改造与实施

在方案设计方面，在对风机和水泵变频调速系统进行改造之前，必须对原系统进行综合评价，并结合设备运行参数、负荷特点及节能指标等因素，制定出合理的改造方案。该方案包含变频器的选型、安装地点、电气接线方式，以及控制策略等方面的内容，由此保证改造后的变频器能与原设备及控制系统无缝连接。

在设备的安装方面，要按照有关的技术标准选择通风、干燥、无腐蚀性气体的地方进行安装。为了降低线损并且降低EMI，在安装时，应注意变频器与电动机间的线缆长度不宜过长。同时为保证整个系统的安全可靠，还需要加装断路器、熔断

器和反应炉等必要的保护设备。

另外，对于系统的调试，首先要做的是系统的安装调试，需要结合变频器的参数设置、空载试车、负荷试车，在设定参数时，应针对电动机及负荷的具体状况适当地调节变频调速范围、加速时间、减速时间及转矩补偿等参数；空车试车，主要检查电动机的转向、速度是否正常，有无不正常的噪声及震动；负荷试车是对系统在真实工作条件下的工作特性进行检测，并对其进行调整，以保证系统的稳定运行。

（三）运行控制策略

在给水泵等要求维持压力平稳的情况下，可以使用恒定压强控制策略。该装置利用压力传感器对系统内的压力进行实时监测，并向变频器提供压力信息，由变频器根据设定的压力与真实压力之间的差值来调整电机的速度，从而保证系统内的压力稳定在一个给定的范围内。同时，在风机和循环水泵等场合，也经常使用可变流量的控制方式，根据需要的空气量或流量，由流量传感器对实际流量进行检测，并且由变频器按流量变化调整电机速度，以适应各种工作条件的要求。在此基础上，建立该装置的操作模型，并对其在各工作状态下的能量特征进行分析，制定最优的运行参数组合，使设备在满足生产需求的前提下，实现能耗最小化。例如根据机组负荷、环境温度等因素，动态调整风机、水泵的运行台数和转速，提高系统整体运行效率。

四、变频调速技术节能效果评估

（一）评估指标与方法

1. 评估指标

评估指标	计算公式
节电量	节电量 = 改造前用电量 - 改造后用电量
节能率	节能率 = (改造前用电量 - 改造后用电量) ÷ 改造前用电量 × 100%
投资回收期	投资回收期 = 设备投资总额 ÷ 年节约费用

2. 评估方法

一方面，使用理论计算法，依据电动机的工作参数、负荷特性及变频器的工作原理，利用理论公式，推算出电动机的节能潜力及节能效果。比如按照风扇的相似原理，在风扇速度改变时，轴功和转速的三次方是成比例的，可以用来估计不同速度下的能量消耗。

另一方面，使用实测比较方法，在变频器改造前和改造后现场实测装置的工作参数（电流、电压、功率、流量、压力等），并与实测结果进行比较分析，评价其节能效果。该方法准确可靠，能更好地反映出装置的实际工作状况。

（二）案例分析

以某电厂300MW机组的循环水泵变频调速改造项目为例。改造前，循环水泵采用定速运行，通过调节出口阀门开度控制流量，运行过程中能耗较高。改造后，安装了两台额定功率为

800kW的变频器，对循环水泵进行变频调速控制。

改造前后运行数据对比显示，改造前循环水泵平均运行电流为180A，电压为6kV，功率因数为0.85，平均日用电量为28800kWh；改造后，在相同工况下，平均运行电流降至120A，电压不变，功率因数提高至0.92，平均日用电量为19200kWh。经计算，该循环水泵变频调速改造项目的日节电量为9600kWh，节能率约为33.3%。设备投资总额为200万元，年节约电费约为150万元（按电价0.6元/kWh计算），投资回收期约为1.33年。

（三）综合效益分析

采用变频技术，使风机、水泵的能耗大幅度降低，降低用电、发电费用，增加经济效益。因为它可以对电动机进行软起动和软停，防止装置在启动过程中产生的大电流冲击，还可以减小机械零件的损耗，从而使设备的使用寿命得到延长，同时还可以减少设备的维修次数和维修费用。因此采用变频技术，可以根据负载的变化，对设备的操作参数进行适时的调节，保证系统的平稳运转，降低由于设备工作不稳定而造成的生产事故和停工期，从而提高电厂的生产率和可靠性。

五、应用中存在的问题与解决措施

（一）应用中存在的问题

1. 谐波干扰问题

变频调速系统在工作时会产生大量的高次谐波，这种谐波将引起电网电压和电流波形的畸变，对电网的供电品质造成很大的影响，严重时还会引起电网事故。

2. 电磁兼容性问题

变频调速系统所引起的电磁干扰，除了对电网造成影响外，还可能对周边电子设备和控制系统造成干扰，造成设备误动作并且降低控制精度。

3. 初期投资成本高

由于变频器的价格比较高，在进行系统改造时还需要进行安装和调试，这就导致了该工程的前期投入很大，一些电站由于受资金的制约，难以对其进行改造。

4. 技术人员操作维护难度大

变频调速是电力电子和自动控制的交叉领域，需要有很高的专业素养。当前，一些电厂的技术人员还不能很好地理解变频调速的工作原理，也不能很好地保证机组的正常运转与维修。

（二）解决措施

1. 抑制谐波干扰

将交流电抗器、直流电抗器、滤波器等滤波器应用于变频调速系统的输入、输出端，可以有效地抑制谐波的生成与传播。同时通过对12脉波和18脉波的整流，可以减少电网中的谐波，改善电能品质。

2. 提高电磁兼容性

对变频调速系统的接线进行合理的设计，使电源、控制两条线路分别敷设，以减少对电网的干扰，通过加装屏蔽罩、采用屏蔽电缆等措施，对变频调速系统及敏感设备进行屏蔽，以降低其

电磁辐射，并且采用隔离变压器和光电耦合器等方法，对控制系统进行抗干扰处理。

3. 降低初期投资成本

国家可以制定相应的政策，如对电站的节能改造项目进行财政和税务上的补助，并鼓励电站采用变频技术进行技术改造，电厂可以通过与设备供应商进行协商，以获得更好的价格、更好的服务。同时也可以采取合同能源管理的方式，即由节能服务商承担项目的投资、建设和运营，而发电企业则通过节约能源收益来承担相应的投资风险。

4. 加强人员培训

电厂要定期举办有关变频调速的培训班，并邀请有关专家讲

授，以增强其业务素质和业务能力，通过组织技术人员之间的相互交流、相互学习，不断积累实际经验，提高其维修与管理水平。

六、结语

采用变频技术对电厂风机水泵进行控制是提高机组效率的一种有效途径。通过变频调速，准确调整装备的工作参数，可以大幅度地减少能源消耗，提升设备的工作效率与稳定性，具有很好的经济与社会意义。但是在实际工程中，由于谐波干扰较大、初期投资较高，以及技术人员也较难操作和维修。

参考文献

- [1] 苗雨. 变频调速技术在热电厂凝结水泵中的应用及其节能效果评估 [D]. 陕西省：西安理工大学，2016.
- [2] 相玲. 变频调速技术在风机、水泵节能改造中的应用 [D]. 北京市：华北电力大学，2012.
- [3] 张亮. 变频调速技术在风机节能运行中的应用及节能效果分析 [J]. 农家科技，2011,(S3):50–50.

大型水电站高边坡施工安全控制关键技术分析

赵海

中国水利水电第四工程局有限公司，青海 西宁 810000

DOI:10.61369/EPTSM.2025050002

摘要：大型水电站高边坡施工过程中存在地质条件复杂、施工扰动大和自然环境影响显著等特点，极易引发边坡失稳及安全事故。为保障施工安全，需建立科学的边坡稳定性评价体系，合理划分风险等级，并采用主动与被动防护相结合的技术手段。通过实时监测、信息化管理和智能化预警系统的集成应用，可有效提升高边坡施工的安全控制水平，降低地质灾害发生概率，确保工程顺利推进与人员生命安全。

关键词：大型水电站；高边坡；施工安全；稳定性控制；监测预警

Analysis of Key Technologies for Safety Control in High Slope Construction of Large Hydropower Stations

Zhao Hai

Sinohydro Bureau 4 Co., Ltd. Xining, Qinghai 810000

Abstract : The construction process of high slopes in large hydropower stations is characterized by complex geological conditions, significant construction disturbances, and notable impacts from the natural environment, which can easily lead to slope instability and safety accidents. To ensure construction safety, it is necessary to establish a scientific slope stability evaluation system, reasonably classify risk levels, and adopt technical means that combine active and passive protection. Through the integrated application of real-time monitoring, information management, and intelligent early warning systems, the safety control level of high slope construction can be effectively improved, the probability of geological disasters can be reduced, and the smooth progress of the project and the safety of personnel can be ensured.

Keywords : large hydropower station; high slope; construction safety; stability control; monitoring and early warning

引言

在我国西部及山区能源开发进程中，大型水电站建设逐渐迈向深山峡谷，随之而来的高边坡施工难题日益突出。受限于复杂地质结构与极端气候条件，高边坡极易诱发滑坡、崩塌等安全隐患。如何在确保工程进度的同时有效管控施工风险，已成为水电工程建设中的关键课题。对高边坡施工安全控制关键技术的系统研究，不仅关乎工程本身的稳定性，更直接关系到建设人员的生命安全与项目的可持续发展。

一、大型水电站高边坡施工面临的安全挑战

大型水电站多建设于地形陡峭、地质条件复杂的山谷地区，高边坡作为其主体结构和施工区域的重要组成部分，直接关系到整个工程的安全与稳定。然而，在实际施工过程中，高边坡所面临的安全挑战远比常规边坡更加严峻。一方面，自然地质条件极为复杂，不同岩层间存在强烈节理、断层破碎带和软弱夹层，易形成潜在滑移面，降低整体稳定性；另一方面，降雨、地震、温度变化等外部自然因素，也在不断影响边坡力学状态，极易诱发滑坡、塌方等地质灾害。此外，水库蓄水过程中的水位涨落也会

引起边坡应力重分布，加剧边坡变形趋势，对施工及运营安全造成长期威胁。^[1]

高边坡施工本身具有强扰动性，对边坡原有稳定结构产生重大影响。爆破开挖、机械作业及临时荷载的施加，均可能导致边坡局部失稳，诱发应力集中和裂缝扩展。同时，在施工组织过程中，由于工期紧、作业密度高，常常存在对安全控制重视不够、技术措施不到位等问题，使得高边坡的潜在风险未能得到及时识别和有效控制。此外，高边坡工程点多、面广，监测覆盖难度大，部分隐患往往在发生灾变前缺乏明显预兆，给现场管理和预警机制提出了更高要求。施工环境的高风险性决定了必须将高边坡安全控制纳入系统

工程管理中，贯穿设计、施工和运营全周期。^[2]

随着工程规模不断扩大与施工技术日益进步，传统的安全管理方式已无法满足现代大型水电站高边坡施工的需要。当前亟须从风险评估、稳定性分析、结构加固、实时监测和智能预警等多方面入手，建立一套科学、系统、高效的安全控制技术体系。同时，强化设计阶段对边坡结构稳定性的仿真预测、优化施工方案的动态调整机制，以及现场信息化监控手段的智能集成，将是提高高边坡施工安全水平的关键路径。只有正视和应对这些挑战，才能从根本上提升大型水电站高边坡施工的安全保障能力，确保工程顺利推进与生态环境协调发展。

二、高边坡稳定性分析与风险分级方法

高边坡的稳定性分析是确保大型水电站施工安全的基础工作，其科学性与准确性直接影响到后续防护设计和风险控制措施的有效性。在进行稳定性分析时，首先应全面掌握边坡的地质结构特征，包括岩体类型、节理裂隙发育状况、软弱夹层分布、地下水活动规律等。通过钻探取样、地质编录、地球物理探测及遥感测绘等多种手段，建立三维地质模型，为稳定性分析提供可靠依据。在此基础上，可采用极限平衡法、有限元法、离散元法等计算方法，分析边坡在静力、地震、降雨及水位变化等多种工况下的变形破坏模式，确定潜在失稳区域及其破坏机制，从而为工程决策提供定量支撑。^[3]

在边坡稳定性分析的基础上，开展风险分级是科学管理施工风险的重要手段。高边坡的风险分级需综合考虑边坡的失稳可能性、潜在破坏规模以及一旦失稳所造成的人员、设备和工程结构的损失程度。通常可将风险等级划分为高风险、中风险和低风险三个等级。高风险边坡往往具有结构松散、岩体破碎、地质灾害频发或邻近核心结构区等特点，需重点加强支护和实时监测；中风险边坡则应在规范施工管理的同时，根据现场情况采取局部加固措施；而低风险边坡则以常规防护为主。此外，风险分级结果应动态调整，在施工过程中根据监测数据和地质条件的变化及时更新，以保持风险评估的时效性和指导性。^[4]

高边坡稳定性分析和风险分级不仅是单纯的技术评估过程，更是系统安全控制体系的关键一环。通过将分析结果与施工组织方案相结合，可优化施工顺序，避开高风险区域或提前完成加固作业，降低边坡扰动程度。同时，依据风险等级设置差异化的监测频率和报警阈值，做到“分区管控、重点防护”。近年来，随着数值模拟技术和大数据分析的迅猛发展，边坡稳定性评价已逐步向信息化、智能化方向迈进。将多源监测数据与地质模型实时融合，可实现边坡稳定性的动态预测与预警，从而构建集“识别—评估—分级—控制”为一体的高效风险管理体系。

三、安全控制关键技术的集成与应用

高边坡作为大型水电站建设中的重要地质工程对象，其施工安全控制需要多种关键技术协同配合与有机集成，以实现对不稳

定因素的全过程动态管控。安全控制的核心在于技术手段与管理体系的有效融合，既包括对边坡本体稳定性的增强，也涵盖对施工扰动影响的最小化。在工程实践中，常用的主动防护技术包括锚杆、锚索加固、喷射混凝土、框架梁支护等，这些措施可增强岩体结构整体性、提高抗剪强度；而被动防护则主要依赖于拦石网、挡土墙、排水系统等设施，起到阻挡和引导滑移体的作用，减少灾害对下方作业区的影响。两者相互补充，在不同地质环境和风险等级下进行合理配置，是提高边坡安全性的关键。^[5]

除传统工程加固手段外，信息化与智能化技术的引入极大提升了安全控制的精准性与实时性。通过布设地表与深部监测设备，如倾斜计、测缝计、GPS、全站仪、地应力计和地下水位计等，可实现对边坡位移、裂缝变化、应力应变和地下水动态的全天候监控。此外，借助无人机航测、三维激光扫描和遥感技术，对边坡表面形变和潜在崩塌体的变化趋势进行宏观识别，形成多源信息融合的监测体系。通过数据中心与可视化平台的集成，技术人员可以实时掌握边坡安全状态，及时调整施工计划或启动应急响应，显著提高了风险应对的主动性。基于人工智能的智能预警系统可通过深度学习历史与实时监测数据，预测边坡失稳趋势，提前发布预警信息，为现场安全管理争取关键响应时间，提升风险防控能力。^[6]

关键技术的集成不仅体现在设备与方法的协同应用上，更体现在全生命周期的管理理念中。安全控制技术应贯穿勘察、设计、施工与运行各阶段，实现全过程动态管控。开挖前，通过数值模拟优化坡率与支护布置，降低扰动风险；施工中，借助信息化手段动态调整加固措施，使支护策略与地质变化同步；运行阶段则需持续监测与隐患排查，保障长期稳定。此外，建立多专业协作机制，融合岩土、结构、水利及信息技术等力量，能实现边坡风险的多维识别与应对。通过整合关键技术，构建系统化、多层次的安全控制体系，可有效应对复杂地质条件下的施工挑战，全面提升大型水电站高边坡工程的本质安全水平。

四、智能化监测预警系统在高边坡施工中的作用

高边坡施工过程中，地质结构复杂、外界扰动频繁且环境条件多变，极易诱发滑坡、坍塌等地质灾害。传统人工巡查或定点监测方式在信息获取的及时性与全面性方面存在明显局限，难以满足现代大型水电站工程对施工安全高效率、高精准度的需求。随着信息技术和智能装备的快速发展，智能化监测预警系统应运而生，成为高边坡安全控制的关键技术支撑。这类系统融合多种传感设备、数据通信技术与智能分析平台，能够实现对边坡变形、应力、水位、裂缝等多维数据的自动采集与传输，为施工单位提供连续、实时、高精度的安全信息。^[7]

在实际应用中，智能化监测系统主要由感知层、传输层和决策层三部分构成。感知层包括各种监测传感器与图像识别设备，布设于边坡关键部位，实时采集边坡物理状态信息；传输层依托无线网络、光纤通信或卫星链路，将数据快速回传至监控中心；决策层则借助数据处理平台、分析模型与智能算法，对采集到的

信息进行融合、比对与趋势预测，从而判断边坡的稳定状态。特别是在复杂施工阶段，通过对监测数据的动态分析，系统可提前识别潜在风险点，快速发布预警信息，有效提升对突发事件的响应效率和科学决策能力。相较传统方式，智能化系统具备覆盖范围广、数据密度高、响应速度快和预警能力强等突出优势。^[8]

智能化监测预警系统不仅提升了高边坡风险管理的科技水平，也推动了施工管理方式的变革。在施工组织层面，可根据实时监测结果动态调整作业安排、优化支护措施，实现“数据驱动”的精细化管理。在工程管理层面，预警系统可与边坡风险分级、应急响应机制深度融合，建立从信息采集、风险识别到预案启动的闭环管理链条。此外，系统生成的历史监测数据库还可为类似边坡工程提供有价值的参考资料，推动经验积累与知识转化。随着人工智能、物联网和大数据技术的持续演进，智能化监测预警系统将在高边坡施工中发挥越来越核心的作用，不仅为大型水电站建设提供安全保障，也代表了地质工程智能化发展的方向。

五、高边坡施工安全控制技术的发展趋势与优化路径

随着水电工程向更高海拔、更陡峭地形及更复杂地质条件拓展，高边坡施工安全控制技术也正不断向系统化、信息化与智能化方向迈进。传统依赖经验判断与静态分析的控制方式已难以满足现代大型水电站工程高效率、高安全的要求。未来的发展趋势将聚焦于全过程、全要素、全周期的综合安全控制体系构建，通过多学科融合与技术集成，打通设计、施工、运维各阶段的信息壁垒，实现边坡安全状态的动态感知、实时分析与智能决策，全面提升高边坡施工安全的科学管控水平。^[9]

当前及未来一个重要发展方向，是以大数据和人工智能为核心的预测性安全控制。借助物联网传感器、遥感影像、激光扫描

等手段获取的多源监测数据，在AI算法的支持下实现数据清洗、异常识别、趋势预测和决策辅助，提升边坡变形与失稳的预测能力。同时，基于三维地质建模与数值仿真技术，可实现对边坡结构响应的可视化模拟，辅助优化支护设计与施工组织方案。此外，智能预警系统将逐步向自动响应与闭环控制演化，不仅限于风险提示，更能触发现场的应急机制，推动边坡安全管理从“被动响应”向“主动预防”转变，增强施工组织的柔性与适应性。^[10]

在技术提升的同时，高边坡施工安全控制还需在管理机制与应用路径上实现优化。首先，应推动安全控制理念前置化，从项目立项与勘察设计阶段即引入边坡稳定性分析与风险分级体系，提升源头管控能力；其次，应加强跨专业协同，建立地质、结构、施工、监测等多领域的信息共享与联动机制，实现技术与管理的一体化协同；最后，应注重从典型工程中提炼关键技术路径与案例经验，推动标准化、模块化安全控制体系的构建，提高工程通用性与复制性。通过不断优化技术路径与管理方式，将有力提升高边坡施工的本质安全水平，为大型水电站建设提供坚实保障，也为山地基础设施工程的安全发展探索出更具前瞻性的方向。

六、结语

高边坡施工作为大型水电站建设中的关键环节，其安全控制技术直接关系到工程的整体稳定与施工安全。通过深入分析高边坡面临的风险挑战，构建科学的稳定性分析与风险分级体系，集成应用加固、防护、监测和预警等关键技术手段，已成为保障边坡安全的核心路径。未来，应持续推动智能化、系统化发展，强化多技术协同与管理机制优化，不断提升安全控制的精准性与前瞻性，为高边坡工程的高质量、高安全建设提供坚实技术支撑与保障基础。

参考文献

- [1] 陈吉.高边坡施工安全控制[J].价值工程,2016,35(26):94-96.DOI:10.14018/j.cnki.cn13-1085/n.2016.26.034.
- [2] 张传虎,胡浩,曹中升,苑善玉.高陡边坡快速优质开挖施工技术[J].电力勘测设计,2019(03):55-58+64.DOI:10.13500/j.cnki.11-4908/tk.2019.03.011.
- [3] 谭尧升,陈文夫,郭增光,林恩德,林鹏,周孟夏,李俊平.水电工程边坡施工全过程信息模型研究与应用[J].清华大学学报(自然科学版),2020,60(07):566-574.DOI:10.16511/j.cnki.qhdxxb.2020.26.004.
- [4] 樊启祥,林鹏,蒋树,魏鹏程,李果.金沙江下游大型水电站岩石力学与工程综述[J].清华大学学报(自然科学版),2020,60(07):537-556.DOI:10.16511/j.cnki.qhdxxb.2020.26.011.
- [5] 包文成,朱炜.扩建道路开挖高边坡的稳定性劣化机理与施工安全控制技术[J].中国科技信息,2022(03):30-31.
- [6] 张俊.高速公路高边坡施工安全风险评估与控制[J].中国储运,2022(02):117-118.DOI:10.16301/j.cnki.cn12-1204/f.2022.02.064.
- [7] 文佳.高速公路的高边坡施工安全风险控制分析[J].运输经理世界,2022(28):140-142.
- [8] 李颖峰.高速公路路堑高边坡施工安全风险控制研究[J].交通世界,2023(14):11-13.DOI:10.16248/j.cnki.11-3723/u.2023.14.041.
- [9] 张腾宵,田海涛.高速公路高边坡施工及其风险评价与过程控制[J].云南水力发电,2023,39(10):72-76.
- [10] 张竟.水运工程高边坡施工安全风险分析与防范策略[J].城市建设理论研究(电子版),2024(14):179-181.DOI:10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202414060.

储能系统在充电桩一体化设计中的配置策略

校香云，马艳丽

郑州电力职业技术学院，河南 郑州 451450

DOI:10.61369/EPTSM.2025050008

摘要：充电桩一体化设计中储能系统的配置策略决定了光储充系统的实际效能，本研究系统性分析了储能系统在平抑光伏波动与优化电网负荷所发挥的双重价值，结合充电桩一体化设计中储能系统的配置原则，提出容量匹配电网协同与场景适配的三维框架，详细探讨了不同充电场景的差异化配置要求。技术路径层面突破了光储充系统架构耦合模式选择与智能控制算法等关键瓶颈，创新性提出了模块化安全防护与弹性扩展方案。实践导向聚焦土地集约化与经济性优化路径，标准体系部分构建开放协同的产业生态框架，从而为充电桩一体化设计的可持续发展提供了有力的理论支撑与技术路线。

关键词：储能系统；充电桩；光储充；光伏发电

Configuration Strategy of Energy Storage Systems in Integrated Design of Charging Piles

Xiao Xiangyun, Ma Yanli

Zhengzhou Electric Power Technology College, Zhengzhou, Henan 451450

Abstract : The configuration strategy of energy storage systems (ESS) in the integrated design of charging piles determines the actual effectiveness of the photovoltaic–storage–charging (PV–SC) system. This study systematically analyzes the dual value of ESS in suppressing photovoltaic fluctuations and optimizing grid load. Combining the configuration principles of ESS in the integrated design of charging piles, a three-dimensional framework of capacity matching, grid synergy, and scene adaptation is proposed, and the differentiated configuration requirements of different charging scenarios are discussed in detail. At the technical path level, key technical bottlenecks such as the selection of coupling modes for the PV–SC system architecture and intelligent control algorithms have been broken through, and innovative modular safety protection and elastic expansion schemes have been proposed. The practice orientation focuses on land intensification and economic optimization paths, and the standard system partially constructs an open and collaborative industrial ecological framework, thus providing strong theoretical support and technical routes for the sustainable development of integrated charging pile design.

Keywords : energy storage system; charging pile; pv-storage-charging; photovoltaic power generation

引言

电动汽车普及加速充电基础设施升级迭代，充电桩一体化模式成为光储充系统建设的关键环节。当前光伏出力波动与充电负荷峰谷差制约系统效能，传统储能系统的配置方法已经难以满足复杂场景需求。本研究基于能源时空转换理论，突破现有研究聚焦单一技术的局限，首次建立配置策略的多维度评价体系，通过解析储能系统在能源缓冲与电网调频中发挥的核心作用，重构容量匹配与场景适配的协同机制，并重点解决直流耦合架构的能效优化问题，创新设计智能算法驱动的动态配置模型。本文的研究成果将为充电桩一体化设计提供系统性解决方案，助力能源转型战略实施。

一、储能系统在充电桩一体化设计中的核心作用与配置原则

(一) 核心功能：能源枢纽与电网稳定器

充电桩的运行稳定性与储能系统的调节能力息息相关，这是

因为光伏发电自然存在的间歇性特征对能源连续供给形成挑战，这种波动性依赖储能系统实现有效平衡。储能单元在强光照条件下主动吸纳电能盈余，在弱光照环境下及时补充电力缺口，双向调节行为建立起持续供能的循环机制。从电网运行角度观察，储能系统承担着关键的负荷缓冲角色，特别是在公交场站等特殊场

项目信息：本文系河南省高等学校重点科研项目（25B470017）。

作者信息：

校香云（1991-），女，汉族，河南郑州人，硕士，讲师，主要研究方向：供用电技术、电机与变压器等。

马艳丽（1980-），女，汉族，河南南阳人，硕士，高级实验师，主要研究方向：新能源发电技术、充电桩智能充电技术等。

景中，需要将高峰充电需求转移至电网低谷时段执行，这种调度策略能够显著改善区域电网负载分布形态。进一步分析可知，储能系统具备电力时空转换特性，借助分时电价差异在低谷阶段存储能量并于高峰时段释放电力，此种操作不仅重构了用能经济模型，而且也极大缓解了电网调峰压力。现阶段技术发展表明，储能装置正逐步转变为分布式能源网络的协调节点，通过整合电动汽车分布式电池资源形成虚拟调节体系，为电力系统源网荷协同提供基础支撑。

（二）配置原则体系

在充电桩一体化设计中，需要对储能系统的配置体系进行科学构建，而这就需要综合考量多重约束条件的交互关系。首先，需要将容量适配作为基本原则^[1]，这需要结合光伏历史出力水平与充电负荷峰值特征进行匹配计算，容量配置不足直接影响系统功能实现，而过度配置则会造成设备闲置损耗，因此需通过动态分析寻求精确平衡点。其次，电网安全性原则是重要的边界条件，储能系统额定功率须严格遵守变压器承载限值，同时配置反向电流阻断设备防止电能回流公共电网，针对不同应用环境下储能配置的差异化需求，商业区系统需增强日间平段能源调度效能，居住区配置则应侧重夜间谷段储能利用率，而公交场站类场景则必须强化高频次充放电特性。再次，经济性原则要贯穿系统全周期，优先选择循环寿命与成本均衡的电池技术路线，模块化架构支持后续分期扩容并降低初期投入压力，退役电池梯级利用方案可有效提升资源使用价值。最后，最终配置方案应遵循多重约束下的技术可行性与经济合理性统一。

二、储能系统配置在充电桩一体化设计中的关键技术路径

（一）系统架构设计：耦合模式选择

在充电桩一体化设计中，作为光储充系统的重要组成部分，其架构设计本质是对能量流通路径的优化决策过程。因此在选择耦合模式时，交流耦合模式需要构建分布式接入框架^[2]，光伏发电单元通过专用逆变器转换电能，储能装置配备独立变流设备，最终共同接入交流母线系统。由此设计的架构，其突出价值在于子系统间的运行互不干扰，当某个单元需要维护升级时不会影响其他设备运作，同时天然兼容现有交流充电设施大幅降低改造成本。值得注意的是该模式存在多级能量转换问题，从光伏直流电到交流母线再到储能电池的反复转换不可避免产生能耗损失。而直流耦合模式采用集成化设计思路，光伏组件产生的直流电能经由优化转换装置直接输送至直流母线，可同时向储能电池和直流充电桩供能，大幅减少转换环节提升能效水平。不过这种架构要求充电设备必须支持直流输入特性，无形中增加了设备定制成本。这两种技术路线的选择映射出工程应用中的典型矛盾，既要在技术成熟度与能源效率间寻找平衡点，又需考量初期投入与长期收益的关系。对于小型充电场景来说，通常采用交流耦合架构因其即插即用的便利特性，而大型场站则倾向直流耦合以实现全生命周期的能效优化。当前技术演进呈现融合趋势，新型混合架

构通过在光伏输入端设置智能路由装置，依据光照强度与负荷需求动态切换能量路径，使交流模式的灵活性与直流模式的高效性形成互补协同。在选择耦合模式时还需关注设备兼容性问题，选用标准化接口才能确保不同供应商设备的互操作性。

（二）储能类型与参数优化

储能技术选型本质是材料特性与经济效益的动态平衡过程，磷酸铁锂电池因其固有的电化学稳定性成为主流技术方案^[3]，该材料在高温运行条件下保持良好安全表现，特别适合高频次充放电场景的实际需求。钛酸锂电池虽然初始投资较高，但其卓越的循环寿命特性在公交场站等特殊应用场景展现独特价值，尤其适应每日多次充放电的高强度运行要求。容量确定需要建立动态计算模型，通过融合光伏历史出力曲线与充电负荷峰谷特征的时序关联，精准测算避免容量冗余导致的资源浪费或容量不足引发的运行中断问题。功率配置必须严格遵循电网物理承载极限，变压器安全阈值形成关键约束边界，模块化设计理念支持灵活扩展需求，典型如标准化百千瓦单元通过并联方式满足不同规模场站需求。工程实践中电池健康监测技术至关重要，依托内阻变化与容量衰减规律的动态追踪及时校准运行参数，保障系统全生命周期控制精度。技术发展聚焦自适应算法的创新突破，结合云端数据分析持续优化配置方案，最终形成适应运行环境自主演进的智能管理体系，这种动态调节机制有效延长系统服役周期。

（三）能量管理智能控制

智能控制系统构成光储充高效运行的中枢神经，其核心功能在于构建多维数据融合分析平台。系统持续采集历史负荷曲线、环境温湿度变化及实时电网频率波动等关键参数^[4]，建立具备自适应能力的虚拟负荷预测模型。该预测机制可提前规划未来数小时的最优充放电策略，在通信中断等特殊工况下维持基础调控功能，保障系统持续稳定运行。通信保障采用高速电力线载波等可靠传输技术^[4]，实现毫秒级精度的设备状态监控与指令下发，为精准控制提供底层支撑。控制策略的核心优势体现在分时电价机制的深度应用，夜间低谷电价时段储电与日间高峰时段供电的调度模式，显著提升电站运营经济效益。策略执行过程设置动态安全边界阈值，依据电池组实时温度与荷电状态自动调节充放电电流，确保设备安全运行同时延长电池使用寿命。技术演进聚焦机器学习算法的深化应用，通过对历史运行数据的持续学习优化控制参数，逐步形成自我完善能力的智慧管理体系。

（四）安全与扩展性设计

安全防护体系设计必须贯穿系统建设的全生命周期过程，在电气安全层面上需构建双重防护机制，应用防逆流装置阻断电能回灌风险的同时配置电压波动保护设备，通过拓扑隔离技术确保故障工况下的系统隔离能力。在电池安全防护方面还需采用多级监控策略，电池管理系统实时追踪温度电压核心参数变化趋势，结合耐高温电解液材料与热蔓延抑制结构设计，显著降低热失控事故概率。在物理防护体系上，则需通过专用防火材料构建密闭电池舱室，配合七氟丙烷气体灭火系统实现毫秒级响应，这种多级防护架构有效保障极端工况下的运行安全。在扩展性设计上，要聚焦系统可持续发展需求，模块化架构允许在不中断现网运行

的前提下分阶段扩容，标准化接口设计大幅简化新旧设备兼容流程。在空间布局上，需预留足够设备增容位置并设置专用电缆通道，为后期改造提供物理基础。此外，环境适应性设计还需重点强化极端温度防护能力，在寒冷地区配置电池自加热系统，高温环境则加强通风散热措施。在未来设计理念中，应进一步强调弹性扩展能力，即插即用型组件架构支持功率无缝升级，智能识别接口可自动适配新增设备参数。值得注意的是全生命周期维护方案设计，通过预留设备健康监测接口实现预测性维护能力，最终构建具备自我进化能力的可持续基础设施体系。

三、充电桩一体化设计中配置策略的实践导向与未来演进

(一) 智能算法驱动精准配置

在各种算法的驱动下，储能系统的配置正逐步发生转变。传统经验主导的设计方式逐步被数据模型替代，基于深度学习的分析技术通过解析历史运行数据内在关联，赋予系统自主优化容量功率匹配的能力。这种转变形成动态响应机制的核心价值，系统能够依据光伏出力波动特征与负荷变化动态调整充放电阈值。特别需要关注负荷预测精度的演进过程，时序分析算法可提前预判极端天气的充电需求异动。实践证明新型配置方式降低设计冗余的成效显著，资源利用率普遍提升百分之十五以上。未来技术发展将融合数字镜像理念建立虚拟仿真环境^[3]，从而为配置方案提供了验证平台，最终形成持续进化的智能配置体系。

(二) 土地集约化设计

随着土地资源的日益紧缺，空间利用理论也逐渐催生出来。为了实现空间合理利用，立体化设计成为突破空间限制的关键路径，变压器与低压设备的垂直分布使占地面积减少近百分之四十。顶棚光伏集成技术实现功能复合应用，碲化镉发电玻璃在维持透光需求的同时转换能源。值得深入探讨的是地下空间开发策略，嵌入式储能舱体设计释放地面空间压力。模块化预制技术大幅缩短施工周期，标准化组件支持现场快速安装。空间优化超越物理整合层面，设备散热系统的协同设计通过气流通道优化提升空间效能。在未来发展过程中，通过三维模拟技术预演设备布

局，将进一步挖掘出土地资源的利用潜力。

(三) 经济性优化路径

在充电桩一体化设计中，其全生命周期需以经济性优化为原则建立成本评估框架。初始投资需平衡电池技术路线差异，磷酸铁锂电池的经济性与钛酸锂电池的耐久性构成战略选择基础。运营阶段聚焦分时电价机制的应用实施，智能策略达成峰谷套利最优化。退役电池梯次利用的经济价值值得重点研究，经严格筛选的电池可在储能系统延续使用寿命五至八年。维护成本控制依托预测性维护技术，设备状态监测提前识别故障征兆。地方新能源激励政策与碳交易机制提供额外收益渠道，模块化设计带来的维护便捷性降低全周期成本，关键在于构建动态经济评估体系持续适应能源市场演变。

(四) 标准体系与生态协同

标准化建设是产业规模发展的必要前提，统一储能系统与充电设备的接口规范具有急迫性，消除不同厂商设备的兼容障碍。通信协议的互联互通尤为重要，电力线传输技术需与物联网协议深度融合。电池梯次利用标准体系的缺位影响资源循环效率，需构建从检测评估到重组应用的完整规范。产业生态协同要打通能源生产消费环节，虚拟电厂技术整合分散资源参与电力交易。政策制定需考虑技术前瞻性要求，国际标准接轨可参考国际电工委员会准则。未来生态将向开放共享模式转型，公共数据平台加速技术经验流通。产学研协同机制推动创新成果转化进程，这是产业可持续发展的根本保障。

四、结语

本研究系统构建了充电桩一体化设计中储能系统的配置策略框架，证实智能算法对精准配置的关键价值。创新提出的三维空间集约模式大幅提升土地资源效能，全生命周期经济模型为投资决策提供科学依据。通过建设该体系可有效破解产业协同障碍，突破虚拟电厂技术延伸储能系统的调节能力边界。在未来研究中，需重点关注多源异构数据的融合应用，强化极端天气场景下的配置鲁棒性。动态标准体系需持续对接国际规范，梯次电池应用亟需建立全链条监管机制。在产学研深度协同背景下，最终实现能源基础设施的高质量发展目标。

参考文献

- [1] 张麒. 光伏发电储能充电一体化技术及其应用研究 [J]. 光源与照明, 2024, (12): 117–119.
- [2] 宋绪双. 光储充一体化充电桩项目建设研析 [J]. 电力设备管理, 2024, (24): 147–149.
- [3] 徐颖, 张伟阳, 陈豪. 考虑虚拟负荷研判的 V2G 储能充电桩设计研究 [J]. 电力与能源, 2024, 45(06): 650–654.
- [4] 张元军, 李亚君, 张正修, 等. 光储充一体化技术的发展现状与未来趋势 [J]. 新能源科技, 2024, 5(05): 43–48. DOI: 10.20145/j.32.1894.20240507.
- [5] 杜健健, 曾彤, 张强. 新能源汽车“光储充”一体化充电站设计方案与性能评估 [J]. 汽车测试报告, 2023, (22): 85–87.

变频调速技术在电气控制与电机拖动节能系统中的应用分析

杨盆

中车资阳机车有限公司，四川 资阳 641300

DOI:10.61369/EPTSM.2025050009

摘要：当下我们处于能源短缺的情形之中，此时电气控制与电机拖动系统的节能降耗成为了工业领域的重要课题。而变频调速技术凭借其能够动态调节电机转速以及实现按需供能的优势，在该领域展现出了显著的节能效果。本文就阐述了变频调速技术的基本原理，并分析了其在电气控制与电机拖动节能系统中的应用价值，之后重点探讨了此技术在不同场景下的应用策略，当中包括了风机、水泵类负载，机床设备以及起重机械等等，最后对此技术的未来发展进行了展望，期望能够为工业领域的节能改造提供一定的参考意义。

关键词：变频调速技术；电气控制；电机拖动；节能系统；应用策略

Analysis of the Application of Variable Frequency Speed Regulation Technology in Electrical Control and Motor Drive Energy-saving Systems

Yang Pen

CRRC Ziyang Locomotive Co., LTD., Ziyang, Sichuan 641300

Abstract : At present, we are in a situation of energy shortage. At this time, energy conservation and consumption reduction of electrical control and motor drive systems have become important issues in the industrial field. Variable frequency speed regulation technology, with its advantages of dynamically adjusting motor speed and providing energy on demand, has demonstrated remarkable energy-saving effects in this field. This article expounds the basic principles of variable frequency speed regulation technology and analyzes its application value in electrical control and motor drive energy-saving systems. Then, it focuses on discussing the application strategies of this technology in different scenarios, including fan and pump loads, machine tools, and lifting machinery, etc. Finally, it looks forward to the future development of this technology. It is expected to provide certain reference significance for energy-saving renovations in the industrial field.

Keywords : variable frequency speed regulation technology; electrical control; motor drive; energy-saving system; application strategy

引言

工业化进程的不断加快使得工业用电量在全社会总用电量中所占的比例逐年地攀升，当中电机作为工业生产中的主要动力设备，其耗电量占到了工业用电总量的60%以上。然而传统的电机拖动系统，大多数都采用定速运行的方式，即通过阀门、挡板等节流装置来调节流量或者压力，该方式不仅效率低下，还会造成大量的能源浪费。

变频调速技术则是一种先进的电机调速方式，它主要改变了电机电源的频率和电压，以此实现电机转速的平滑调节，使电机输出功率与负载需求相匹配，最终达到节能的目的。与传统的调速方式相比来看，变频调速技术具有调速范围广、精度高、响应速度快、节能效果显著等众多优点，因而被广泛地应用于电气控制与电机拖动系统中。若将变频调速技术应用于电气控制与电机拖动节能系统，不单能够大幅度地降低能源消耗，还能够提高生产过程的自动化水平和控制精度，进而减少设备的机械磨损，使设备的使用寿命得以延长，有助于降低企业的生产成本。

一、变频调速技术的基本原理

变频调速技术是基于电机转速与电源频率成正比的原理而实

现的。基于异步电动机的转速公式 $n=60f(1-s)/p$ （其中 n 为电机转速， f 为电源频率， s 为转差率， p 为电机磁极对数）可知，当

改变电源频率 f 时，电机转速 n 也会随之发生改变。而变频调速技

作者简介：杨盆（1997.09-），男，汉族，云南昭通人，大学本科，助理工程师，研究方向：电气控制。

术正是经由变频器将电网的工频交流电（通常为50Hz或60Hz）转换为频率可调的交流电，从而实现对于电机转速的调节。

变频器可分为整流电路、滤波电路、逆变电路和控制电路四个部分^[1]。展开来说，整流电路负责将交流电转换为直流电；滤波电路则会对整流后的直流电进行平滑滤波，以减少谐波成分；而逆变电路可以将直流电转换为频率和电压均可调的交流电，再供给电机；控制电路的任务是以设定的转速或负载需求为基础，通过脉冲宽度调制（PWM）等技术来控制逆变电路的输出，从而实现对于电机转速的精确调节^[2]。实际在变频调速的过程中，为了保证电机的磁通恒定，操作者需要遵循“电压与频率成正比”的原则，即当改变电源频率时，务必相应地调节电源电压，以避免电机磁路饱和或者欠励磁，为电机的运行效率和性能提供保障。

二、变频调速技术在电气控制与电机拖动节能系统中的应用价值

（一）显著的节能效果

在传统的电机拖动系统之中，电机通常以额定的转速运行，若负载需求发生变化时，仅通过调节阀门、挡板等方式来改变流量或压力，但这种节流调节方式会造成大量的能量损耗。基于变频调速技术，便能够通过调节电机转速来适应负载的变化，使电机的输出功率与负载需求相匹配。而根据流体力学原理可得，风机、水泵等平方转矩负载的轴功率与转速的三次方成正比，在转速降低10%时，功率消耗即可降低27%左右，表明该技术的节能效果十分显著。甚至在变转矩负载和恒转矩负载当中，变频调速技术也能通过优化电机运行状态，来减少不必要的能量消耗。

（二）提高系统控制精度

变频调速技术能够实现电机转速的连续平滑调节，其调节精度可达0.1%甚至更高，已经远高于传统的调速方式。对于电气控制而言，该技术配合PLC、传感器等设备，就能够实现对于电机拖动系统的闭环控制，此时便可以精确地控制生产过程中的流量、压力、速度等参数，助力产品质量和生产效率的提高^[3]。

（三）延长设备使用寿命

传统的电机启动方式为直接启动或者星三角启动，这两种方式在启动时都会产生较大的冲击电流，且数值可达额定电流的5~7倍，会对电机和电网造成较大的冲击，非常容易导致电机绕组过热、绝缘老化，导致电机的使用寿命缩短。但变频调速技术采用了软启动方式，应用启动时电机转速会从0逐渐地上升到额定转速，将启动电流限制在额定电流的1.5倍以内，如此在极大程度上降低了启动冲击，直接地减少了电机的机械磨损和电气故障。

（四）改善系统运行性能

基于变频调速技术，能够实现电机的无级调速，使系统的运行变得更加平稳，还减少了机械振动和噪声。实际在生产的过程中，操作者应根据工艺的要求灵活地调节电机转速，进而提高生产的灵活性和适应性。如在纺织行业中，经过变频调速技术可精确地控制织机的转速，使其适应不同品种织物的织造需求。

三、变频调速技术在不同场景下的应用策略

（一）风机、水泵类负载的应用策略

风机和水泵是工业生产当中应用最为广泛的通用机械，其耗电量占到工业电机总耗电量的40%以上，因此是变频调速技术应用的重点领域。通常在这类负载的电气控制与电机拖动节能系统中，应用变频调速技术的策略主要包括以下几个方面：

1. 根据负载特性选择合适的变频器

由于风机、水泵均属于平方转矩负载，其转矩与转速的平方成正比关系，且在低速运行时负载转矩比较小，因此工程人员应优先选择通用型的变频器。原因是通用型变频器在平方转矩负载场景下具有良好的适配性，它能够满足基本的调速需求，并且成本相对也比较低^[4]。同时工程人员还需根据电机功率和负载特性，合理地去设置变频器的参数，比如最大频率需匹配电机的额定频率，加速时间和减速时间则应根据负载的惯性大小进行调整。而对于需要频繁启停或者是调速范围较宽的场合，像化工行业的间歇式通风系统，就需要选择具有高过载能力的变频器，其过载能力通常可达150%额定电流持续60秒以上，如此才能够适应复杂的运行需求。

2. 采用闭环控制方式

为了实现对于流量、压力等参数的精确控制，系统均要采用闭环控制方式。具体来说，技术人员要在系统当中安装流量传感器、压力传感器等检测设备，利用这些设备将检测到的实际参数实时地反馈给变频器或PLC。随后变频器或PLC会将实际参数与预设的设定值进行差值计算，并且根据计算结果通过变频器输出相应的频率和电压信号，达到调节电机转速的效果，使实际参数始终稳定在设定范围之内。例如恒压供水系统，该系统中常常会将压力传感器安装在管网的关键节点，用于实时地监测管网压力。一旦压力低于设定值，变频器就会立即提高电机转速，并增加水泵的出水量，以此提升管网压力。如果压力高于设定值，变频器则会自动地降低电机转速，经由减少水泵的出水量，来降低管网压力。在实践当中应用上述这种动态调节的方式，既能保证供水压力的稳定，满足用户的用水需求，又能避免电机长期满负荷运行造成的能源浪费。

3. 实现多泵联动控制

由于大型的供水、通风系统中单台设备的容量有限，其难以满足大范围变化的负载需求，使得系统需要多台水泵或者风机联合运行。基于上述情况，控制团队应当通过PLC与变频器的配合，构建起多泵联动控制系统^[5]。此系统的当中PLC作为控制核心，负责实时地采集系统流量、压力等负载信号，并且要根据负载需求的大小，自动地判断投入运行的泵（风机）数量和单台泵（风机）的最优转速，使系统始终能够运行在最佳效率状态。

（二）机床设备中的应用策略

因为机床设备的电机拖动系统对于调速精度和动态响应要求都比较高，所以需要利用变频调速技术来提高加工精度和生产效率^[6]。实践当中具体的应用策略如下：

1. 主轴驱动系统的变频调速

机床主轴需要实现宽范围的转速调节，才能适应不同材料和刀具的加工要求。若采用变频调速技术，就可以实现主轴的无级调速，且调速范围可达1:100以上。一方面是在高速加工中，工程人员可以选用高速变频器和电机，进而实现主轴的高速运转，使加工效率得以提升；另一方面是在精密加工中，通过精确地控制变频器的输出频率，能够保证主轴的转速稳定性，进而提高加工的精度。此外变频器的快速响应特性还能够实现主轴的快速启停和正反转切换，有助于缩短辅助加工的时间。

2. 进给驱动系统的变频调速

一般在进给系统之中需要实现精确的位置控制和速度控制。对此，可将变频器与伺服系统相结合，使其构成闭环调速系统。即利用光栅尺、编码器等位置检测设备，实时地检测工作台的位置和速度，并且反馈给控制系统，然后通过调节变频器的输出频率，来实现工作台的精确进给^[7]。另外，工程人员设置不同的进给速度，还可以满足不同加工工序的要求，比如粗加工时应当采用较高的进给速度，精加工时则要采用较低的进给速度。

3. 辅助电机的变频控制

在机床设备中的冷却泵、润滑泵等辅助电机之中采用变频调速技术，即可根据加工需求来调节其转速。例如，实际在加工的过程中，该技术可以根据切削量的大小自动地调节冷却泵的转速，有效地控制了冷却液的流量，这样一来不仅保证了冷却的效果，还减少了能源的消耗。

（三）起重机械中的应用策略

起重机械的电机拖动系统的职责在于实现重载启动、平稳运行、精准定位等功能，在变频调速技术的助力之下，能够有效地提高其运行的安全性和可靠性，同时还能实现节能^[8]。

1. 起升机构的变频调速

起升机构在起重机械的电机拖动系统当中是核心的部分，其性能会直接地关系到起重作业的安全。因此需要采用变频调速技术，来实现起升机构的软启动和软停止，进而避免启动和停止时的冲击载荷，目的是保护钢丝绳、吊钩等部件。就实际运行情况来看，在起升过程中，工程人员通过调节电机的转速，能够实现重物的平稳上升和下降；而在重物悬停时，基于变频器的零速抱闸功能，可以确保重物可靠停留在空中。

2. 运行机构的变频调速

运行机构包括了大车运行和小车运行两种情况，它们都需要实现平稳的调速和换向。由于变频调速技术能够实现运行机构的无级调速，因此该技术能使起重机根据作业的需求灵活地调整运行速度，有利于提高作业的效率。举个例子，换向时借助变频器的制动功能可以实现平滑换向，以此减少了机械冲击。

3. 变频与制动单元的配合

在所有的起重机械之中，若电机处于减速或者下放重物状态时，均会处于再生发电状态，此时产生的再生电能需要及时地进行处理，否则将会导致变频器直流母线电压升高，影响到系统的正常运行。结合变频调速系统来看，应当在该系统当中配置制动单元和制动电阻，即将再生电能消耗在制动电阻上，以确保系统

的稳定运行。如果面对大型的起重机械，则可以采用能量回馈装置，此装置能够将再生电能反馈到电网，进而实现能量的回收利用。

四、变频调速技术在电气控制与电机拖动节能系统中的发展趋势

（一）智能化水平不断提高

往后随着人工智能、物联网等技术的发展，变频调速技术将朝向智能化方向发展。结合当前现状来看，未来的变频器将具备更强的自学习、自适应能力，终将能够根据电机和负载的特性自动地优化运行参数，达到系统的最佳运行状态^[9]。而通过与物联网平台的对接，还可以实现对于变频调速系统的远程监控、故障诊断和预测性维护，直接地提高了系统的可靠性和运维效率。

（二）模块化和集成化设计

为了适应不同应用场景的需求，变频调速技术相关的研究者应注重对其模块化和集成化的研究。基于模块化设计，该技术即可根据实际需求灵活地组合不同功能的模块，如功率模块、控制模块、通信模块等等，能够提高系统的扩展性和通用性。集成化设计则是将变频器、电机、传感器等部件集成在一起，使其形成一体化的驱动系统，如此便能减少系统的安装空间和接线复杂度，从而提高系统的可靠性和效率。

（三）绿色节能技术进一步发展

在节能要求日益严格的背景下，变频调速技术也需要更加注重绿色节能。一方面，需要不断地优化变频器的拓扑结构和控制算法，旨在提高变频器的转换效率，以降低自身的能耗；另一方面，应当加强该技术与能量回馈、储能等技术的结合，进而实现能源的高效利用和回收。如起重机械、电梯等具有再生发电工况的设备当中，广泛地应用能量回馈装置，通过将再生电能反馈到电网，来提高能源的利用率。

（四）与新能源技术的融合

由于新能源产业的快速发展，变频调速技术终将与新能源技术进行深度地融合^[10]。以风力发电、光伏发电等领域为例，变频调速技术可用于调节发电机的转速，可以实现最大功率的跟踪控制，最终提高新能源的利用效率。而在电动汽车领域，变频调速技术则成为了驱动电机的核心控制技术，往后将不断地向高功率密度、高效率、高可靠性方向发展，推动着电动汽车的普及和发展。

五、结语

基于本次研究来看，变频调速技术在电气控制与电机拖动节能系统中的应用，为工业领域的节能降耗提供了有效的途径。此技术通过动态地调节电机转速，实现了电机输出功率与负载需求的精准匹配，在实践当中不只显著地降低了能源消耗，还提高了系统的控制精度、运行稳定性和设备使用寿命。尤其是从风机、水泵类负载到机床设备、起重机械等不同场景的应用策略可以看

出，变频调速技术具备广泛的适用性和显著的应用效果。以后随着智能化、模块化、绿色化等技术趋势的发展，变频调速技术在电气控制与电机拖动节能系统中的应用还将更加深入和广泛。因

此未来，相关研究在应进一步地加强技术研发和创新，结合实际情况不断地优化应用策略，以推动变频调速技术与新兴技术的融合！

参考文献

- [1] 钟逸飞, 陆铭, 范孟超, 等. 变频调速技术在工业电气自动化控制中的应用 [J]. 四川建材, 2024, 50(09): 198–200. DOI: 10.3969/j.issn.1672-4011.2024.09.072.
- [2] 李业林. 浅谈变频调速节能控制技术在水泵电机中的应用 [J/OL]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2024(11)[2024-11-01]. <https://www.cqvip.com/doc/journal/2010228831022089216>.
- [3] 滕萃, 文湘霖. 变频调速技术在电机拖动中的应用研究 [J]. 模具制造, 2024, 24(06): 142–144. DOI: 10.13596/j.cnki.44-1542/th.2024.06.045.
- [4] 李朋, 程振飞, 赵红伟. 变频技术在风力发电机组及电气系统中运用分析 [J]. 电力设备管理, 2024, (06): 104–106.
- [5] 司莉莉, 项克训. 变频调速技术在电气自动化中的应用与研究 [J]. 安家, 2024, (7): 0040–0042.
- [6] 黎亚. 变频调速技术在给水系统中的节能控制应用分析 [J/OL]. 中国科技期刊数据库 工业 A, 2021(12)[2021-11-16]. <https://www.cqvip.com/doc/journal/2010228865979974656>.
- [7] 魏连超. 变频调速技术在工业电气自动化控制中的应用分析 [J/OL]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2023(12)[2023-12-01]. <https://www.cqvip.com/doc/journal/201022888047419905>.
- [8] 胡俊鹏, 李欣凤. 电气自动化系统中的节能设计技术分析与应用研究 [J]. 前卫, 2024, (1): 0168–0170.
- [9] 王燕飞. 变频调速节能控制在水泵电机系统中的应用研究 [J]. 机电信息, 2016, (09): 90–91.
- [10] 郑书衡. 高压变频调速技术在电气控制节能中的运用分析 [J]. 中小企业管理与科技, 2021, 5(18): 173–174.

探究漂浮式海上风电动态电缆敷设施工技术

徐茂禄

中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司，广东 广州 510700

DOI:10.61369/EPTSM.2025050011

摘要：随着海上风电向深远海发展，海上风电漂浮式技术因其能够适应水深大、污染少等环境条件，已成为海上风电发展的未来趋势，是海上风电开发的新方向。作为连接漂浮式平台与固定式海上升压站或电网的关键“生命线”，动态海缆（又称动态输出缆）的敷设施工技术直接关系到整个风电场的安全稳定运行。本文以海上漂浮式风电动态缆的敷设施工技术作为研究对象，研究海上漂浮式风电动态缆敷设施工的难点、关键技术、关键装备、施工质量控制点，结合工程实例进行分析论证，为海上漂浮式风电动态缆敷设施工技术积累经验。

关键词：漂浮式海上风电；移动海缆；布设施工；动力布放；ROV；疲劳控制

Exploring the Construction Technology of Dynamic Cable Laying for Floating Offshore Wind Power

Xu Maolu

China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510700

Abstract : With the development of offshore wind power towards deeper waters, floating technology for offshore wind power has become the future trend of offshore wind power development due to its ability to adapt to environmental conditions such as large water depth and low pollution, and is a new direction for offshore wind power development. As a key "lifeline" connecting floating platforms with fixed offshore substations or power grids, the laying and construction technology of dynamic submarine cables (also known as dynamic output cables) directly affects the safe and stable operation of the entire wind farm. This article takes the laying construction technology of offshore floating wind power cables as the research object, studies the difficulties, key technologies, key equipment, and construction quality control points of offshore floating wind power cable laying construction, and analyzes and proves them with engineering examples to accumulate experience for offshore floating wind power cable laying construction technology.

Keywords : floating offshore wind power; mobile submarine cable; construction layout; power deployment; ROV; fatigue control

引言

全球性的能源革命推动海上风电向更深、更高发展。固定基础从50米以外不再经济，而浮动基础具有无限发展潜力。浮动海上风电系统由一个系泊系统锚固于海床之上，其上部的运动平台（承载风机的结构物）随风、浪、流作6个自由度运动（纵荡、横荡、垂荡、横摇、纵摇、艏摇）。连接上部的运动平台和固定基础（海上升压站、陆地电网）之间的缆线即动海缆。

动态海缆不同于常规静态海缆的最大区别为：动态海缆需持续经受平台运动带来的弯曲、拉伸、扭转变形等动态海缆受力，这使得动态海缆在结构工艺、施工技术等方面提出了更高的需求。同时动态海缆的敷设施工不仅要实现精准的敷设，还要保证电缆在施工和使用过程中无过高应力和疲劳损伤，动态海缆敷设施工技术的研究学习是漂浮海上风电的重要环节。

一、漂浮式海上风电动态电缆概述与技术难点

式海缆具有很多不同于传统静态海缆的特性。

（一）动态缆的特殊性

漂浮式海上风电动态缆与传统的静态海缆存在很大的不同，漂浮式海缆始终在适应着不断变化的恶劣的作业环境，这也使得漂浮

特性一：结构非常复杂，多层复合结构，中心导体层外加绝缘层、致密阻水层及关键防护层（一般含径向和纵向两种防护层），抗拉压载荷中心机械应力，同时应充分考虑抗拉应力和弯曲柔性的平衡，外表加设防腐层以及防腐蚀/海生物保护套。

作者简介：徐茂禄（1982.02-），男，广东广州人，汉族，本科，高级工程师，从事海上风电安全管理研究。

特性二：对动态性能有很高的要求。动缆应有足够的耐疲劳寿命，能够承受平台6自由度运动带来的可能高达数百万次反复弯绕、反复拉伸和反复扭转寿命要求；有足够的耐弯性能和足够的耐拉性能；有足够的阻水密封、耐海水腐蚀及防止海生物附着的性能。

特性三：其连接端点处需要保护。平台端部连接点处、海床处连接点处，是受力弯曲应力和疲劳载荷最大的部位，成为系统最敏感处，需作特殊设计和加装保护装置达到分散应力、防止过度弯曲和疲劳破坏的目的。

(二) 敷设施工的核心技术难点

海上风电动态缆敷设施工在漂浮平台与固定电源之间是漂浮式海上风能利用的核心所在，难度也远远超过海缆固定敷设。总结动态缆敷设施工技术难点如下几个方面。

(1) 精确定位与协同控制

敷设船在风、浪、流耦合运动中采用 DP 系统保持厘米级位置精度和多自由度运动中的浮板同步即缆线的释放张力和速度要与多自由度的运动中的浮板保持同步，否则会产生瞬间过载或者瞬间最小弯曲半径的设计。

(2) 动态响应与疲劳风险管理

悬垂段缆线的敷设过程中的海流和海浪激励会导致悬垂段出现涡激振动 Vortex-Induced Vibrations, VIV) 和复杂的运动，导致动态缆疲劳寿命损失超过 40%^[1](Johanning et al., 2018)，因此需要实时动态仿真系统，利用 OrcaFlex 等软件设计合理的 S 型 / J 型悬垂线形，控制敷设张力为 80–120kN，避开 1.5 ~ 3.2Hz 的振荡频率。

(3) 敏感区域防护技术

平台悬挂点、海床触地点为疲劳“双高风险点”；悬挂点处布放聚氨酯弯曲加强器 (BendStiffener)，弯曲应变减小 60%；悬挂点位置触地点处布放 ROV(遥控无人潜水器) 精确布放防磨垫、岩石压块，着底冲击力 $\leq 50\text{kN}$ ，悬挂点、触地点误差 $\pm 0.3\text{m}$ 。

(4) 复杂海床适应性施工

对于岩礁、沙坡等复杂海床，用多波束声呐和 AUV (autonomous Underwater Vehicle) 进行毫米级路由探查。大于 15° 的坡度必须事先挖沟或设置重力式保护座。欧洲的浮体工程 (AUV 提供浮体工程) 中，总安装成本的 18% 由海床预处理构成^[4]。

(5) 恶劣海况作业窗口管理

受施工波高 ($\leq 1.5\text{m}$)、流速 ≤ 1.5 节等海域环境条件约束，施工有效工期每年不足 120d，需实现基于机器学习算法的气象窗口预测模型，满足 72h 的作业窗口决策准确率达 85% 以上。

(6) 全要素高精度监控

敷设施工时需要使用光纤传感、MRU 运动参考单元等实时监控技术，其设备需满足能够进行 3D 状态监测。数据延迟必须控制在 200ms 以内，以满足闭环控制需求。

二、动态缆敷设施工关键技术

漂浮式海洋电缆动态敷设系统，是一项集合海洋工程、电力

及智能控制的复杂系统工程，如图 1 所示。其特点为动态适应。

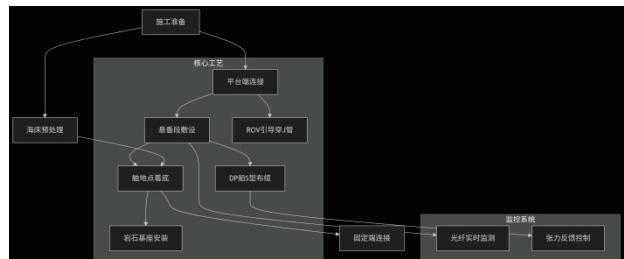


图 1 动态缆敷设技术路线图

DNVGL-ST-0359 中明确，系统使用寿命为 25 年，至少 1×10^8 个循环，即敷设阶段，从设计到监测的整个体系需要构建起来。

(一) 敷设方法与路径规划

S 形敷设是最常见的缆线敷设方法。S 形敷设方法是指在动态缆敷设施工过程中，通过船上放缆形成吊坠段、两头连接平台或锚定点吸收吊坠段释放的弹性变形能。施工中通过软件计算确定悬跨长度、悬垂位置、悬垂角度，平衡其缓冲效果与完善施工的安全性。

J 型敷设平台悬于海底较近或水深较小时，其缆线垂直于海底靠近平台，在平台附近形成 J 型曲线，对海底破坏较小，对船位要求也较高，需要有精度较高的动力定位系统来确保施工精度。

S 形敷设与 J 型敷设比较如表 1 所示，(注：表 1 内容依据文献^[2-3] 进行对比)：

表 1 敷设方法优劣势对比

方法类型	水深范围	平台运动容忍度	典型悬跨比 (L/h)	海床适应性
S 型敷设	>50m	高 ($\pm 3\text{m}$ 垂荡)	1.2–1.5	中等
J 型敷设	30 ~ 80m	低 ($\pm 1\text{m}$ 垂荡)	0.8–1.0	优良
混合敷设	全水深	可定制	1.0–1.2	优异
注：悬跨比 L/h = 悬垂段水平投影长度 / 水深				

(二) 关键施工工艺

平台端连接、悬挂采用“先平台、后海床”连接，敷设船提前就位锚泊平台，通过工作艇或船用起重机等将预装弯曲加强器 / 护套的缆线端部连接到平台 J 型管、I 型管接口或者固定于吊挂装置上，通过精操作和 ROV 水下操作确保吊挂点的角度满足要求，不要形成初始应力。

悬垂段敷设与形状控制敷设船在动力的驱动下，按照预定的轨迹前进，张紧器根据悬垂曲线及平台运动、环境载荷计算出释放张力、释放速度、及时张紧。

海床触地点是动态疲劳的敏感部位，需选择合适的位置、平整的海床。从地质条件上考虑，可预置岩石垫、安装重力架座保护座，或预埋入地下后开挖出埋沟（考虑到动态疲劳），ROV 引缆着底到预置或预制保护区域。

动态测试和监测贯穿于全部生命周期，敷设完工后通电测试、动态响应测试，通过平台运动或激振验证指标；通过光纤传

感系统长期健康监测预警，确保缆线长期安全运行，其流程如图2所示。



图2动态对接流程图

(三) 疲劳风险控制技术

VIV 抑制装置通过在悬垂段关键位置上设置螺旋列板、整流罩等关键设备，该设备的作用为改变水流，从而破坏漩涡周期性脱落，降低振幅，缓解涡激振动所产生的疲劳损害。

实时疲劳破坏评估是以监测系统，特别是光纤传感系统为前提，实时监测挂点、碰点等处的疲劳累积损伤，当发生临近阈值预警时，采取减小张力，停止作业等一系列减负荷措施以确保施工安全。

三、施工过程风险管理与质量控制

(一) 风险管理

动态缆安装风险较高，风险管控需多因素把控。环境窗管理是基础，需确定具体施工海况限值，如波高、周期、风速、流速等，结合精准气象海洋预报，用好开停机控，抓住有效工作窗口期；不能缺失应急方案，要对缆线损伤、设备故障、天气突变、船位失控等突发事件做好应急方案；关键设备应备份冗余，主动力定位系统、主张紧器、主机组等关键设备必须备份，所有设备一定要经得起检验和考验，有效提高设备的可靠性，避免设备发生故障。

(二) 质量控制

动态敷设的敷设质量全过程控制从始至终需要全方位的把控，敷设全程监测主要通过持续不断的记录、检查，从敷设张力、敷设速度、船位、姿态、缆线位置、形态、关键点弯曲半径，从而确保敷设施工参数满足规范要求。

关键点检不可少，平台端连接点、触地点着地点、固定端连接点等点通过 ROV 目视点检录像，再结合数据分析复核，保障每一个环节的质量。

四、工程案例分析

“三峡引领号”是我国首台漂浮式海上风电平台。“三峡引领号”机位水深约 30m，单机容量 5.5MW，使用半潜式平台结构，并于 2021 年 12 月正式并网发电。

其最大特征是以浅海适应、浅抗台风为特征，30m 浅水大偏移工况采用“分布式浮力块 + 配重块”系统，S 型悬垂线形吸收平台运动动能，解决了浅水动态缆线型不稳定问题，外径 13.28cm 的缆线抗弯、抗疲劳优化，耐 25 年 1 亿次动态弯曲周期，后期经过台风超强台风试验，可靠性得以验证。

创新点在于全过程的全创新，该项目率先在国内实现动态适应性设计进入风电领域，通过国内首创的动态适应性缆疲劳实验机完成服役；施工精度达 DP2 级，在距离风力发电机 40 米船内可靠作业 48 小时，ROV 的吊点连接偏差小于 0.5°，初步形成了“前期准测 + 中期 S 型敷设 + 后期动态性测试”的标准流程。

这个案例，要求行业从技术上往深处 (>100m) 打穿，施工端 DP 定位 + ROV 是常态，统一敷设规范。三峡引领号验证可能性，明阳天成号引领规模化，未来数字孪生 + AI 优化是动态缆敷设趋势。表 2 为典型工程案例施工参数对比。

五、结论

漂浮式海上风电动态缆敷设施工是个技术复杂、风险高的系统工程，要求掌握动态缆的技术特点，拥有先进的专用设备、施工技术、严格的疲劳风险控制、过程质量控制。随着漂浮式海上风电的大规模深远海发展，动态缆敷设技术将朝智能化、高效率、高可靠性发展。突破关键装备技术瓶颈，规范标准体系，加强施工组织管理，对于促进中国漂浮式海上风电产业健康、快速发展，高效利用深远海风能资源具有非常重要的意义，技术瓶颈的攻克、施工经验积累是保障连接着漂移风机和电网的“生命线”安全。

参考文献

- [1] 李华，王强，张宇。漂浮式海上风电动态缆技术发展与应用 [J]. 电力工程学报, 2023, 38(4): 45–53.
- [2] 陈晨，赵亮，孙明 . 基于数值模拟的漂浮式海上风电动态缆敷设安装工艺优化方案 [J]. J.Ocean Eng. 2024 – 42(2): 78 – 86.
- [3] 杨波，马琳，郑凯。浮式风电动态缆疲劳分析方法和工程应用 [J]. 中国海上油气 , 2024, 36(1): 156–164.
- [4] 黄辉，徐悦，何飞 . 浮水式风动电缆线路浅水区设计及仿真 [J]. 海洋工程设备与技术 , 2023, 10(3): 176–183.

风电场电气设备中风力发电机的运行维护分析

赵海琦

海南金盘智能科技股份有限公司，海南 海口 570100

DOI:10.61369/EPTSM.2025050013

摘要：长期暴露在复杂气象环境下的风电场电气设备，承受着交变载荷与电磁应力的双重作用。作为能量转换中枢的风力发电机，其内部的齿轮箱、发电机以及变流系统呈现出高动态的运行特征。设备维护领域正面临传统人工巡检效率不足、故障预警滞后等技术瓶颈，亟待构建全生命周期管理体系。本文聚焦风力发电机组的运行维护机理，通过分析设备退化规律与维护策略协同效应，对提升风电设备可用率的技术路径进行探索，从而为新能源场站运维模式的优化提供理论支撑。

关键词：风电场；电气设备；风力发电机；运行维护

Analysis of Operation and Maintenance of Wind Turbines in Electrical Equipment of Wind Farms

Zhao Haiqi

Hainan Jinpan Smart Technology Co., Ltd., Haikou, Hainan 570100

Abstract : The electrical equipment of wind farms, which are exposed to complex meteorological environments for a long time, bears the dual effects of alternating loads and electromagnetic stress. As the hub of energy conversion, the wind turbine exhibits highly dynamic operating characteristics in its internal gearbox, generator, and converter system. The field of equipment maintenance is facing technical bottlenecks such as insufficient efficiency of traditional manual inspections and lagging fault warnings, and there is an urgent need to build a full life cycle management system. This article focuses on the operation and maintenance mechanism of wind turbines. By analyzing the synergy between equipment degradation laws and maintenance strategies, it explores the technical path to improve the availability of wind power equipment, thus providing theoretical support for optimizing the operation and maintenance mode of new energy stations.

Keywords : wind farm; electrical equipment; wind turbine; operation and maintenance

引言

当前行业普遍采用的是基于固定周期的预防性维护模式，然而在实际的应用环节里常常会出现维护方面既冗余又不足的双重矛盾。随着机组单机容量突破至10MW量级，叶片扫风面积的扩大以及塔筒高度的增加显著改变了设备的受力模态，如此一来，传统的维护策略便难以与新型机组的动态特性相适配。本文以电气设备失效机理作为切入点，对变桨系统轴承微动磨损、发电机绝缘热老化等典型故障的形成机制展开系统的解析工作，进而揭示出环境风速突变以及电网谐波扰动对于设备寿命产生的耦合影响。通过将状态监测数据和故障树分析工具相结合的方式，提出了基于设备健康度评估的自适应维护决策模型，目的在于突破现有维护体系过度依赖人工经验的局限，为构建智能化的风电运维体系提供具有创新性的思路。

一、风电场电气设备与风力发电机概述

(一) 风电场电气设备的组成与功能

升压变压器承担着将风机产生的低电压提升至符合远距离输送标准的关键角色，依托电磁感应原理完成能量形态转换，为后续电力调度奠定基础。集电线路如同覆盖整片风电场的神经网络，通过多分支拓扑结构汇集各机群电能，其绝缘性能与载流量

设计需精准匹配区域气候特征与设备负载波动。断路器与隔离开关组成的安全防护体系，在故障发生时迅速切断异常电流通路，配合继电保护装置的多级整定策略，有效隔离设备损伤风险。无功补偿装置针对线路感性负荷特性动态调整容性电流输出，平衡系统功率因数，避免电网电压失稳引发的连锁反应。环境监测模块实时采集气象参数与设备温度数据，为运维决策提供前置预警信息。全站监控系统集成SCADA平台与通讯协议转换单元，实

作者简介：赵海琦（1975.11-），男，汉族，山东人，学历：硕士，研究方向：新能源发电。

现设备状态可视化监测与远程指令传输，形成覆盖物理层到控制层的立体化运维架构。防雷接地网络通过低阻抗导体将雷电流导入大地，其网格密度与埋设深度需综合考虑土壤电阻率与雷暴活动频率，电缆沟道则采用防水密封结构防止潮气侵蚀，这些细节设计共同构筑起电气设备全天候运行的防护屏障^[1]。

(二) 风力发电机在风电场中的重要性

风力发电机是将风能转换为机械功，机械功带动转子旋转，最终输出交流电的电力设备，一般有风轮、发电机(包括装置)、调向器(尾翼)、塔架、限速安全机构和储能装置等构件组成。风力发电机的工作原理比较简单，风轮在风力的作用下旋转，它把风的动能转变为风轮轴的机械能，发电机在风轮轴的带动下旋转发电。作为能量流传递的关键节点，风力发电机内部集成齿轮传动机构、电磁发电模块及功率调节单元，通过多级机械耦合与电气控制实现风能捕获、转速匹配与电流输出的动态平衡。机组叶片捕获的风速变化经主轴传递至齿轮箱，经增速处理后驱动发电机转子切割磁感线产生交流电，随后由变流系统调整电压频率以适配电网需求。运行过程中，设备需持续应对湍流冲击、温度波动及电磁干扰等多重应力，任何环节的异常都将引发电能质量下降或设备连锁故障。叶片气动效率、轴承润滑状态与绝缘材料老化程度等参数共同构成机组健康状态的基础评价维度，其可靠运转不仅维系着单台设备的出力水平，更影响着整个风电场并网稳定性与运维成本控制。

二、风力发电机的维护需求

(一) 风力发电机的常见故障类型

风电场中旋转机械部件的长期交变应力容易引发齿轮箱内部行星轮系与轴承的异常磨损，润滑介质性能衰减会加剧金属接触面的微观裂纹扩展。发电机绕组绝缘层在潮湿与温升双重作用下逐步老化，端部绑扎松动可能导致匝间短路故障，转子磁极冲片位移将引发气隙磁场畸变。复合材料叶片前缘在强风沙侵蚀与雨滴冲击下形成表面缺损，腹板粘接界面受材料热膨胀系数差异影响产生分层隐患，叶根螺栓预紧力松弛会造成法兰连接结构失稳。变桨系统编码器信号漂移引发桨距角控制偏差，滑环触点氧化导致动力传输中断，备用电源容量不足使得紧急顺桨功能存在滞后风险，液压驱动单元密封件龟裂引发的内漏会削弱变桨执行机构的动态响应能力。

(二) 维护需求

风力发电机长期暴露于风沙侵蚀、湿度波动及盐雾腐蚀等复合环境应力，其内部齿轮啮合面易形成点蚀与剥落，绕组绝缘材料受潮气渗透导致介电强度衰减，旋转部件在交变载荷作用下产生疲劳裂纹扩展风险。机组叶片气动外形受沙粒撞击发生微观形变，降低捕风效率的同时加剧塔筒摆动幅度，而变桨轴承润滑脂在高低温交替环境中易发生氧化变质，引发传动系统卡滞现象。海上机组面临更为严峻的氯离子侵蚀问题，螺栓连接部位易产生应力腐蚀开裂，发电机散热通道受盐分结晶堵塞将引起温升异常。振动监测信号中常隐含着轴承滚道划痕或齿轮断齿的早期特

征频率，若不及时识别可能演变为灾难性故障。叶片雷击防护系统老化会使雷电流泄放路径受阻，危及变流器功率模块安全^[2]。设备运行状态与风速湍流强度存在强相关性，极端工况下偏航系统频繁动作加速制动器摩擦片磨损，而塔筒法兰连接处螺栓预紧力松弛可能引发结构共振。维护活动的必要性源于设备退化机理与外部环境扰动的非线性耦合作用，既要防范突发性故障造成的非计划停机，也要抑制渐进性性能衰退导致的发电量隐性损失。

三、风力发电机的运行维护策略

(一) 定期维护计划的制定

维护人员需要每月打开齿轮箱观察窗查看油液颜色是否发黑或含有金属碎屑，用棉布擦拭注油口防止杂质混入，按照设备手册规定的周期补充合成润滑油。技术人员使用热成像仪扫描发电机接线盒与轴承座温度分布，对比历史数据识别局部过热区域，清理散热通道堆积的絮状物与盐雾结晶。操作员在风速低于切入值时攀爬塔筒，用手电筒照射方式检查轮毂法兰结合面渗油痕迹，用扭矩扳手复紧偏航齿圈固定螺栓，清理滑轨表面板结的润滑脂。电气班组每季度拆解变桨控制柜检查接触器触点烧蚀情况，用酒精棉片清理滑环表面碳粉堆积，测试备用蓄电池的电压保持能力。叶片巡检员借助无人机高清摄像头捕捉前缘腐蚀与后缘开裂图像，标记需要修补的砂眼与分层区域，清除排水孔堵塞的昆虫巢穴与植被种子。液压站维护需重点观察蓄能器压力表指针波动范围，及时更换龟裂的蓄能器皮囊，补充抗磨液压油至视窗中线位置^[3]。数据管理员每日导出SCADA系统记录的振动频谱与功率曲线，建立设备健康状态基线模型，筛选偏离阈值的异常工况生成工单。塔基水泵需在雨季前测试自动启停功能，疏通集水井滤网缠绕的枯草，检查电缆套管密封胶圈弹性是否丧失。

(二) 故障诊断与预警机制

值班员每日调取SCADA系统记录的发电机轴承振动频谱与齿轮箱噪声特征值，将三轴加速度传感器采集的时域信号导入故障模式识别软件，比对历史数据库中的劣化趋势图谱。维护人员要在季风季节前携带红外热像仪对变流器IGBT模块进行全功率段扫描，捕捉散热片温差超过阈值的发热点，排查水管路堵塞或风扇转速异常问题。叶片巡检人员操控多旋翼无人机搭载激光雷达扫描仪，沿叶尖到叶根路径检测表面曲率偏差，对比三维点云模型识别前缘腐蚀深度与后缘结构开裂长度。电气班组使用局放检测仪在夜间低负荷时段监听发电机绕组放电信号，通过特高频传感器定位绝缘层内部气隙放电的精确坐标，记录放电脉冲幅值与相位分布特征。数据工程师将变桨系统编码器反馈角度与理论值进行时域对齐，计算桨距角调节滞后时间，建立不同风速段下的动态响应基准曲线。液压维护人员定期截取蓄能器压力衰减曲线，绘制压力保持率随时间变化的散点图，结合比例阀电流波形判断密封件老化程度。结构监测团队在台风过境后调取塔架倾斜传感器历史数据，运用有限元分析软件模拟不同工况下的应力分布，标记法兰连接处可能出现塑性变形的风险区域^[4]。

(三) 紧急故障处理流程

当 SCADA 系统发出三级以上振动报警时，值班员需立即调取故障机组的功率曲线与偏航角度记录，结合气象站实时风速数据判断是否触发紧急停机指令。维修组抵达现场后开启塔筒底部急停开关并悬挂检修标牌，使用激光对中仪检测齿轮箱与发电机联轴器的同轴度偏移量，拆除弹性支撑螺栓查看缓冲垫片是否存在永久变形。电气工程师携带绝缘电阻测试仪攀爬至机舱控制柜，断开变流器直流母线连接端子，用万用表逐相测量定子绕组对地绝缘阻值，排查电缆铠装层破损导致的漏电隐患。液压系统突发失压故障时，操作人员应优先释放蓄能器残余压力，拆卸比例阀滤芯观察金属碎屑沉积情况，更换 O 型密封圈前需用绸布擦拭阀体安装面防止颗粒物嵌入^[5]。叶片异常震颤报警触发后，叶片维修队需在地面用长焦镜头拍摄全叶展动态视频，分析摆振频率与挥舞幅度数据，锁定疑似内部梁帽脱粘或腹板开裂的损伤区域。塔架基础沉降监测数据超限时，结构工程师应使用全站仪复测锚栓法兰的水平度偏差，开挖基础环外侧覆土检查防腐涂层剥落状况与混凝土碳化深度。所有故障处理后必须执行空载试运行测试，维修班长监督机组并网前完成各子系统功能自检，将处理过程与备件更换记录同步录入设备全生命周期管理系统。

(四) 维护人员的培训与管理

运维主管需依据机组型号与技术迭代周期定制差异化的培训课程，组织维护人员系统学习齿轮箱内窥镜检测规程与发电机绕组绝缘测试方法，安排模拟故障场景的实操考核以巩固轴承游隙测量、联轴器对中调整等核心技能。培训专员应结合海上与陆上环境的运维差异，增设盐雾腐蚀防护涂层修补、塔筒攀爬安全绳

系留技术等专项训练模块，利用虚拟现实设备构建叶片内部腔体检查、变桨电机拆装等高风险作业的沉浸式演练环境。维护班组需每月开展案例复盘会，由资深技师解析历史故障中齿轮断齿的频谱特征规律与变流器 IGBT 模块烧毁的诱因链，培养团队成员系统性故障溯源能力。人力资源部门应建立技能矩阵数据库，跟踪记录每位维护人员对激光对中仪、振动分析仪等精密仪器的操作熟练度，针对薄弱环节定向安排厂家工程师驻场指导。安全督导员须定期更新高空作业车操作认证与高压电工资质审查，组织雷暴天气应急避险演练以强化极端条件下的风险处置意识。班组内部应推行师徒结对机制，由经验丰富的技师带领新员工熟悉塔筒螺栓预紧力检测、滑环碳刷磨损评估等细节操作，逐步构建覆盖机械、电气与控制系统的复合型技能体系。管理部门还需关注维护人员长期户外作业的心理健康状态，引入人机交互安全性评估工具优化高空密闭空间作业流程，通过团队文化建设降低人为操作失误概率。

四、结语

提升风力发电机组的维护效能离不开机械动力学、材料科学以及智能算法等多学科知识体系的融合，本文论证了基于设备状态监测的预测性维护，相较于传统周期维护体现出了优越性，在高风速区域以及海上风电场景中更展现出显著的技术经济价值。未来维护技术的发展应着重对叶片应力分布式感知、齿轮箱油液在线分析等监测技术的工程适用性加以强化，并且要建立一个能够覆盖设计参数、运行数据以及维护记录的全维度数据库。

参考文献

- [1] 吴生炎. 风电场电气设备中风力发电机的运行维护分析 [J]. 通讯世界 , 2024, 31(11): 106–108.
- [2] 李智福. 风电场风力发电机的运行维护分析 [J]. 集成电路应用 , 2022, 39(04): 300–301.
- [3] 李绵基. 海上风电场风力发电机运行维护策略研究 [J]. 光源与照明 , 2022, (12): 222–224.
- [4] 李莉. 探究风电场电气设备中风力发电机的运行维护的措施 [J]. 电气技术与经济 , 2024, (01): 307–309.
- [5] 朱江. 浅论风电场电气设备中风力发电机的运行与维护 [J]. 科技风 , 2020, (26): 145–146.

国电投某发电厂 DCS 网络故障分析及处理方案

安磊

上海新华控制技术集团科技有限公司, 上海 200000

DOI:10.61369/EPTSM.2025050015

摘要：本文针对国电投某发电厂 DCS (分散控制系统) 网络突发故障展开深入分析，旨在明确故障根源并提出系统性处理方案。故障发生时，操作员无法对控制器内的设备进行监控和操作。本次网络故障的核心诱因是千兆网络与百兆网络混用，具体是从 OPU5 站问题，交换机功能失效，工控安全卫士影响，网络环境不佳等方面进行总结分析，经过对现场的报警历史记录的分析以及现场 DCS 网络设备的勘查，提出了系统性解决方案，为同类电厂 DCS 网络的稳定运行提供参考。

关键词：发电厂；DCS 网络故障；分析；处理方案

Analysis and Handling Scheme of DCS Network Fault in a Power Plant of SPIC

An Lei

Shanghai Xinhua Control Technology Group Co., Ltd., Shanghai 200000

Abstract : This paper conducts an in-depth analysis on the sudden DCS (Distributed Control System) network fault in a power plant of SPIC, aiming to identify the root cause of the fault and propose a systematic handling scheme. When the fault occurred, operators were unable to monitor and operate the equipment in the controller. The core cause of this network fault is the mixed use of gigabit network and 100-megabit network. Specifically, the analysis is summarized from aspects such as the problem of OPU5 station, failure of switch function, impact of industrial control security guard, and poor network environment. Through the analysis of on-site alarm history records and the investigation of on-site DCS network equipment, a systematic solution is put forward, which provides a reference for the stable operation of DCS networks in similar power plants.

Keywords : power plant; DCS network fault; analysis; handling scheme

一、故障现象及背景

国家电力投资集团有限公司某发电公司 #6 机组 DCS 采用的是新华集团的 XDPS 系统，本台机组 DCS 系统自 2005 年左右机组建成投运后一直使用至今，此前设备运行稳定正常，但于 2021 年 02 月 26 日 13 点 10 分至 13 点 49 分之间先后有 26 个控制器自动重启复位的现象，其中 DPU03/DPU23 和 DPU16/DPU26 这两对控制器在一分钟内先后自动重启，使得操作员在控制器重启的一分钟内无法对控制器内的设备进行监控和操作。^[1] 控制器的重启时间表如下：

控制器重启时间统计			
控制器号	启动时间	控制器号	启动时间
DPU01		DPU21	
DPU02	13:41:43	DPU22	13:36:06
DPU03	13:39:23	DPU23	13:38:43
DPU04	13:33:28	DPU24	
DPU05	13:40:30	DPU25	13:38:40
DPU06		DPU26	
DPU07	13:40:28	DPU27	13:35:46

控制器重启时间统计			
DPU08	13:31:26	DPU28	
DPU09	13:40:50	DPU29	13:42:24
DPU10	13:31:14	DPU30	13:39:25
DPU11	13:39:40	DPU31	13:32:16
DPU12	13:32:35	DPU32	13:36:27
DPU13	13:38:09	DPU33	13:40:38
DPU14		DPU34	13:44:38
DPU15	13:24:44	DPU35	
DPU16	13:39:46	DPU36	13:39:22
DPU17	13:39:01	DPU37	13:12:08
DPU18		DPU38	
DPU19		DPU39	
DPU20		DPU40	

二、故障分析及处理方案

通过查询本台机组的新华 DCS 历史报警和操作记录等信息，以及检修人员对事发时现场现象的描述，判断应该不是 DPU 硬件

故障，而是因为网络拥堵，造成控制器来不及处理大量的网络信息，引起控制器复位重启。^[2]

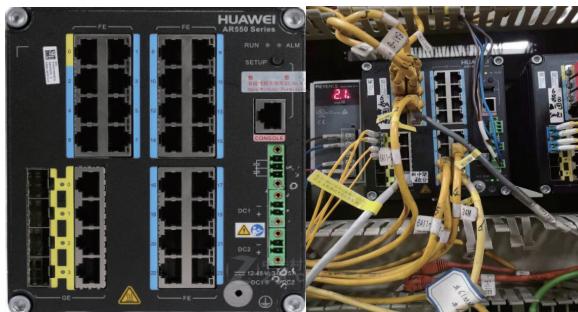
2021年03月08日在电厂检修人员的配合下，全面检查了整个DCS网络内的设备情况，包括DPU、交换机的状态，HMI站的软件及网络负荷，发现了以下情况：

1. 交换机

#6机DCS系统的A、B网交换机采用的是华为AR550系列，具体型号为AR550-24FE-D-H，是2020年电厂自行采购更换的，此型号的交换机未曾在任何新华DCS系统中使用过。华为AR550系列一款三层路由交换机，具备了耐高/低温、防尘、抗震、抗强电磁干扰等优秀品质，主要应用在物联网方面，此交换机端口数量为24个，控制端口为4×GE combo、8×FE，支持SEP、STP、RSTP、MSTP等网络协议，安全管理包含访问控制列表（ACL），802.1x认证，AAA认证，RADIUS认证，HWTACACS认证，广播风暴抑制，ARP安全，ICMP防攻击，URPF，CPCAR，黑名单，PKI。但AR550-24FE-D-H交换机自2019年12月31日已经停止整机销售，2024年12月31日将停止任何服务（包含服务热线电话）。^[3]



#6机实时数据网分为A网和B网（A、B网络互为冗余），A网配置了4台AR550-24FE-D-H交换机（A1、A2、A3、A4），交换机之间通过光跳线连接，形成环网结构（A1→A2→A3→A4→A1），B网的网络配置和A网相同。^[4]具体如下图所示：



此交换机的控制端口为4×GE combo，即左侧上图中的黄色端口（0,1,2,3），此端口是千兆网络端口。新华XDPS系统中DPU的网卡是百兆网卡，所以新华采用的交换机大多为百兆网络或者千兆/百兆网络自适应的交换机。^[5]

2.DCS人机接口站（以下简称HMI站）

HMI站是整个DCS网络最关键的设备之一，是操作员控制监视设备运行的窗口。在检查过程中发现#6机的HMI站型号多种，都不是从原DCS厂家采购的，HMI站的网卡类型多种，如

Realtek pcie Gbe family controller、Realtek Rtl8139、82566Dm Gigabit等。其配置也比较混乱，网卡的驱动也不是通过光盘安装，有的通过驱动精灵等网络软件下载安装。^[6]

在HMI站中，100、1000M的网卡均有配置，网络流量控制选项也未关闭，有些A/B网卡的网络文件共享与打印机共享打开。^[7]

通过检查发现，所有的HMI站安装了很多与DCS系统无关的软件，如360杀毒软件等，占据了HMI站的大量内存，有的HMI站的防火墙和自动更新处于打开状态，与新华要求的DCS软件安装环境矛盾。具体的HMI站网络情况如下表所示：

HMI	设备名称	网卡类型	带宽	网卡数	月度	年度	备注	腾新电厂HMI站网卡及软件状态	
								IP	MAC
NCW(0)	xiexian-01	D-Link(DT)	千兆	1	b-Link(DT)	千兆	360杀毒、工控	192.168.1.103	00:0c:29:00:00:01
NCW(0)	xiexian-02	D-Link(DT)	千兆	1	b-Link(DT)	千兆	360杀毒、工控	192.168.1.104	00:0c:29:00:00:02
NCW(0)	xiexian-03	S370T	千兆	1	b-Link(DT)	千兆	360杀毒、工控	192.168.1.105	00:0c:29:00:00:03
NCW(0)	xiexian-04	S370T	千兆	1	b-Link(DT)	千兆	360杀毒、工控	192.168.1.106	00:0c:29:00:00:04
OPV1(0)	xiexian-07	S370T	千兆	1	b-Link(DT)	千兆	360杀毒、工控	192.168.1.107	00:0c:29:00:00:07
OPV2(0)	xiexian-08	S370T	千兆	1	b-Link(DT)	千兆	360杀毒、工控	192.168.1.108	00:0c:29:00:00:08
OPV3(0)	xiexian-09	Realtek	千兆	1	b-Link(DT)	千兆	360杀毒、工控	192.168.1.109	00:0c:29:00:00:09
OPV4(0)	xiexian-32	S370T	千兆	1	b-Link(DT)	千兆	360杀毒、工控	192.168.1.110	00:0c:29:00:00:0a
OPV5(0)	xiexian-37	Realtek(R) PCI-E	千兆	1	b-Link(DT)	千兆	360杀毒、工控	192.168.1.111	00:0c:29:00:00:0b
S35(0)	xiexian-39	D-Link(DT)	千兆	1	b-Link(DT)	千兆	360杀毒、工控	192.168.1.112	00:0c:29:00:00:0c
大屏(0)	xiexian-40	D-Link(DT)	千兆	1	b-Link(DT)	千兆	360杀毒、工控	192.168.1.113	00:0c:29:00:00:0d
CTV1(0)	xiexian-41	D-Link(DT)	千兆	1	b-Link(DT)	千兆	360杀毒、工控	192.168.1.114	00:0c:29:00:00:0e

通过检查发现及运行人员反映，操作员站OPU3和OPU5操作比较卡顿，反应迟缓，其中OPU3的A、B网网卡是Realtek RTL8139的，也安装了360杀毒等软件，占用整个HMI站的内存比例较大。^[8]

OPU5的电脑型号是研华610H，A、B网网卡是电脑自带的Realtek pcie Gbe family controller的网卡，此网卡属于千兆网络网卡，并且OPU5的A网共享一直处于打开状态。本台电脑也安装了360杀毒、工控安全卫士等软件，并且工控安全卫士软件一直在发送一个名为ucl.dll、libxm12.dll等一系列文件不合法的报警。工控安全卫士所占的内存也高于其他电脑。具体情况如下图：



3. 软件

随着计算机和网络技术的发展，特别是信息化与工业化深度融合以及工业互联网的快速发展，工控系统产品越来越多地采用通用协议、通用硬件和通用软件，以各种方式与互联网等公共网络连接，病毒、木马等威胁正在向工控系统扩散，工控系统信息安全问题日益突出。^[9]

根据《工业自动化和控制系统网络安全集散控制系统(DCS)》要求DCS系统网络与外部网之间应使用物理或逻辑隔离技术措施进行防护；《防止电力生产事故的二十五项重点要求》(2023版)：其中9.8条为防止分散控制系统网络事故，规定分散控制系统与管理信息大区之间必须设置经国家指定部门检测认证的电力专用横向单向安全隔离装置；与其他生产大区之间应当采用具有访问控制功能的设备等实现逻辑隔离；与广域网的纵向交接处应当设置电力专用纵向加密认证装置等。所以在工控机内除了安装DCS软件外不建议安装其他软件，如360杀毒软件，同时建议使用DCS

厂家配套的工控安全防护软件，原厂家的工控安全防护软件是经过长期拷机验证的，也在别的项目实际验证过的，对工控机安全具有更好的防护作用。^[10]

三、处理方案及意见

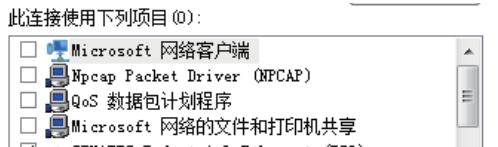
通过对现场的报警历史记录的分析以及现场 DCS 网络设备的勘查，具体的处理方案如下：

1. 交换机

联系原交换机服务厂商，检查交换机的网络配置，确认是否已经配置了广播风暴抑制功能，咨询华为或者要求服务厂商将环网的千兆网络改为百兆或者百兆 / 千兆自适应网络。

2.HMI 站

(1) 将所有 HMI 站的 A、B 网络网属性中的 Microsoft 网络的文件和打印机共享不勾选。



(2) 所有 HMI 站的 A、B 网网卡选用百兆网卡，如 D-Link(DFE-530TX)，网卡驱动用所带的光盘安装。

(3) 将比较卡顿的电脑进行更换。

(4) 所有的 HMI 站 windows 防火墙关闭。

3. 软件

卸载掉所有 HMI 站的 360 杀毒软件，删除掉 360 杀毒软件的文件等，减少对工控机的内存使用。

咨询工控安全卫士厂家关于 OPU5 中的报警含义，加强对所有 HMI 站的管理。

因为 #6 机已经接入了中能融合的态势感知平台，咨询中能融合厂家关于事故发生当天的网络数据流量情况，能否更清楚直接的判断出是那个端口的数据流量过大造成整个网络堵塞，引起了网络风暴。

四、分析原因及注意事项

本次网络故障可能是千兆网络和百兆网络混用导致的，主要原因具体分析如下：

参考文献

- [1] 辛丽梅 . 火电厂热工自动化 DCS 控制系统的运用分析 [J]. 科技视界 ,2024,14(33):65–68.
- [2] 邢智成 . 电厂热控 DCS 控制保护回路误动作原因与处理措施研究 [J]. 电力设备管理 ,2024,(21):67–69.
- [3] 陈迪新 , 潘宇 , 杨超 . 一种核电站安全级 DCS 网络故障分析及处理方法 [J]. 设备管理与维修 ,2023(13):95–97.
- [4] 舒小兰 , 梁雅媚 , 刘恩峰 . 一种工控机压力自动测试系统 [J]. 工业控制计算机 ,2024,37(7):1–2, 5.
- [5] 刘文娟 , 常芸 . 网络监控系统故障分析及处理措施 [J]. 科技风 ,2011(20):129–129.
- [6] 刘传德 , 刘俊峰 , 陈雷 . 基于双 PLC 和工控机的定位绞车变频电控系统设计研究 [J]. 现代工程科技 ,2024,3(8):77–80.
- [7] 陈国杰 . 数字油田 4G 网络下的数据通信故障分析及解决方案 [J]. 中国设备工程 ,2022(8):31–32.
- [8] 刘枫 . 国产工控机在高档数控系统上的应用 [J]. 精密制造与自动化 ,2024(4):50–53.
- [9] 胡益群 , 许光 . 网管型交换机在组播通信中的应用研究 [J]. 数字技术与应用 ,2019,37(6):37–38.
- [10] 姜冬旭 . 无人机高清图传系统光通信终端光机系统设计 [D]. 吉林 : 长春理工大学 ,2024.

1.OPU5 站

OPU5 站的 A、B 网网卡是千兆网络网卡，并且 A 网的共享没有关闭，网卡流量限制也未关闭，OPU5 站的工控安全卫士一直在发送报警信息，OPU5 站的最直观状态是操作反应缓慢，卡涩，在某一时间段内，OPU5 站自身的原因，向系统 A、B 网发送了大量的无用信息，DPU 在收到大量的无用信息后，来不及处理，导致 DPU 的 watchdog 建设定时器溢出，从而复位。

2. 交换机

网管型交换机具备抑制广播风暴的功能，但是此交换机并没有起到抑制风暴的作用，并且环网是千兆网络，不是千兆 / 百兆自适应网络或者百兆网络。

3. 工控安全卫士软件

主动防御系统的连续报警也很有可能是诱发本次网络风暴的一个原因，不停的发送报警信息，通过网络传播，造成网络拥堵。

4. 网络环境

本次网络风暴的一个客观的主要原因是网络环境差，即系统用了很多不是原厂家提供的工控机，工控机的型号多样，网卡网速、芯片驱动都各不相同，一旦出现网卡不稳定的情况，HMI 站会频繁向系统 A、B 网发送大量的无用信息，导致控制器复位。

五、预防措施建议

事故在于麻痹，安全在于防范。此次网络故障应引起重视，加强对 DCS 系统网络的管理，所以提出的建议如下：

1. 选用新华 DCS 厂家提供的工控机，保证型号统一，软件版本正版并且一致，所有软硬件设置遵循原厂家要求。
2. 选用新华 DCS 厂家推荐的工业以太网交换机，所推荐的交换机是出厂前经过长时间静态拷机实验和现场实际考验的设备，具备安全、可靠的使用性能，可以放心使用。
3. 加强对工控机的管理监视，针对现有卡顿、数据刷新缓慢的工控机应该引起重视，建议更换或者返修。
4. 加强工控机内软件管理，除 DCS 软件及 OFFICE 软件外，不要安装其他软件。
5. 建议工控防护软件使用新华 DCS 厂家所提供的工控防护软件。
6. 加强整个 DCS 网络内的网络设备管理，如交换机、光端机等设备，在使用寿命到期前就进行更换。

火力发电厂汽轮机组节能降耗技术应用研究

仝宏宇, 李铁军, 贾艳辉

华润电力(仙桃)有限公司, 湖北仙桃 433000

DOI:10.61369/EPTSM.2025050016

摘要 : 本文从通流系统改造、余热回收、辅机优化等技术应用, 到成本控制、方案适配、安全规范等应用原则, 再到监测体系建立、分阶段改造、参数优化、效果评估等应用策略入手, 对火力发电厂汽轮机组节能降耗技术进行论述。旨在证明该研究能够有效提升汽轮机组的运行能效, 为火力发电厂汽轮机组的高效低碳运行提供了全面的技术与策略支撑。

关键词 : 火力发电厂; 汽轮机组; 节能降耗; 通流系统; 余热回收

Application Research on Energy Saving and Consumption Reduction Technology of Steam Turbine Unit in Thermal Power Plant

Tong Hongyu, Li Tiejun, Jia Yanhui

China Resources Power (Xiantao) Co., Ltd., Xiantao, Hubei 433000

Abstract : This paper examines energy-saving and consumption-reduction technologies for steam turbine units in thermal power plants, covering technical applications such as flow system retrofitting, waste heat recovery, and auxiliary equipment optimization, along with application principles including cost control, solution adaptation, and safety compliance. The study further explores implementation strategies including monitoring system establishment, phased renovation, parameter optimization, and effectiveness evaluation. It demonstrates that these measures can significantly enhance operational efficiency of steam turbine units, providing comprehensive technical support for achieving high-efficiency and low-carbon operation in thermal power plants.

Keywords : thermal power plant; steam turbine unit; energy conservation; flow system; waste heat recovery

随着全球对能源节约与环境保护的重视不断提升, 火力发电作为能源供应的重要组成部分, 其汽轮机组的节能降耗水平直接影响着电厂的经济效益与环境效益。当前, 许多火力发电厂的汽轮机组在运行过程中, 由于技术应用不够完善、缺乏科学的应用原则与策略指导, 导致能耗较高, 未能充分发挥节能潜力。如何通过合理应用节能降耗技术, 遵循科学的应用原则, 实施有效的应用策略, 以实现汽轮机组的高效运行, 成为行业内亟待探索的重要课题。基于此, 开展火力发电厂汽轮机组节能降耗技术应用研究, 具有重要的现实意义与应用价值。

一、火力发电厂汽轮机组节能降耗技术

(一) 汽轮机通流系统升级改造技术

从精细化诊断开始, 借助高精度传感器组测定通流部分各级压力温度分布, 结合CFD流场仿真计算叶片气动效率衰减系数, 当该系数超过8%时即判定为需重点改造区域。结构优化阶段采用第三代弯扭联合成型叶片, 通过数值模拟将叶片进口角优化至18°出口角调整为22°, 使气流分离损失降低35%; 隔板汽封更换为蜂窝式结构, 通过激光干涉仪控制安装间隙在0.12mm以内, 较传统梳齿式减少汽封漏汽量40%。转子改造中实施高速动平衡处理, 使残余不平衡量控制在50g·mm以内, 轴承座采用预应力加固工艺提升刚度5%^[1]。改造后开展热态性能试验, 通过汽轮

机热耗率测试验证通流效率提升幅度, 满负荷试运行期间连续监测叶片振动幅值, 确保其不超过0.15mm, 汽封泄漏量稳定在设计值的90%以下, 最终实现机组热耗率降低4.5%以上。

(二) 乏汽余热深度回收技术

进行余热参数精准测定, 使用精度等级0.2级的热流计连续72h监测凝汽器出口乏汽参数, 当乏汽温度稳定在45℃且流量波动小于5%时, 建立回收系统数学模型。核心设备安装时, 在凝汽器喉部布置钛合金材质的表面式换热器, 换热管采用Φ19×1.2mm规格, 通过液压胀接工艺使管板与换热管的接触压力建议达到120MPa; 循环水系统增设CO₂跨临界热泵装置, 工质流量控制在80m³/h, 压缩机功率匹配150kW, 可将余热温度提升至85℃^[2]。系统集成时开发基于模糊控制的联动模块, 当乏汽压

力低于4.5kPa时自动打开30%开度的旁通阀，热泵运行频率随余热负荷变化在30~50Hz区间动态调节。投运后每月进行能效测试，确保余热回收率稳定在65%以上，年回收热量折合标煤量不低于800吨，同时通过在线清洗装置使换热器传热系数维持在初始值的90%以上。

(三) 辅机系统变频调节优化改造

开展为期30天的负荷特性测试，每小时记录一次辅机运行参数，绘制出流量在30%~100%区间的能耗曲线，当变负荷工况下能耗波动超过15%时确定改造范围。设备选型采用10kV级高压变频器，额定容量按辅电机功率的1.2倍配置，矢量控制模式下转速控制精度达到 $\pm 0.5\text{rpm}$ ，谐波畸变率控制在5%以内。改造实施时先对电机进行绝缘电阻测试，确保其值大于 $500\text{M}\Omega$ ，轴系找正偏差控制在0.05mm/m以内；电气连接采用铜排硬连接方式，通过PLC编程实现4~20mA信号的无缝对接，开发负荷反馈调节算法使辅机功率随主机负荷变化的响应时间控制在2s以内^[6]。调试阶段进行50%、75%、100%三个负荷点的性能测试，优化PID参数使转速超调量小于5%，稳态误差控制在1%以内；安装0.5级精度的电能表实时监测能耗，确保改造后辅机平均节电率达到30%以上。投运后建立月度维护制度，通过红外测温仪监测变频器模块温度不超过60°C，电容容量衰减量控制在初始值的10%以内。

二、火力发电厂汽轮机组节能降耗技术应用原则

(一) 基于能效提升目标开展成本控制

建立全生命周期成本核算体系，将技术改造的前期投入、中期运维与后期能效收益纳入统一评估框架。核心在于通过增量成本效益分析确定合理的投入边界，即当单位能效提升所需的改造费用低于行业平均节能收益阈值时，方可推进实施。优先选择具有模块化设计的技术方案，通过分步投入降低初期资金压力，将通流系统改造拆分为静叶栅优化、汽封升级等独立单元，根据能效提升的边际效益动态调整实施节奏^[4]。成本控制并非单纯压缩投入，而是通过精准测算不同技术的节能贡献率，确保每一分投入都能产生可量化的能效回报，避免为追求低成本而选择节能效果有限的改造方案，最终实现短期投入与长期收益的动态平衡。

(二) 改造方案适配机组运行特性

在技术选型前完成机组运行数据的系统性梳理，包括负荷波动范围、年运行小时数、蒸汽参数稳定性等关键指标，以此作为方案设计的基础依据。对于承担基荷的机组，应侧重提升满负荷工况下的运行效率，可优先选择通流系统深度改造等长效节能技术；对于调峰机组，则需兼顾变负荷工况下的能效稳定性，重点考虑变频调节、余热回收系统的快速响应能力^[5]。方案设计中需预留一定的调节余量，通过可变量化参数适应机组未来可能的运行模式变化，在辅机变频改造中采用宽频调速范围设计，使设备能在20%~100%负荷区间保持高效运行，避免因机组调峰需求变化导致技术方案提前失效。

(三) 技术应用方案符合安全规范标准要求

所有节能改造措施必须以不降低机组原有安全冗余为前提，

严格遵循电力行业相关的设计标准与运行规程。在改造实施前，需开展专项安全评估，重点核查技术方案对机组关键参数的影响，通流系统改造后叶片的强度储备系数不得低于1.5，乏汽余热回收系统的压力试验值需达到设计压力的1.25倍。对于涉及热力系统、电气回路的改造，必须满足设备绝缘等级、热膨胀补偿等安全指标，高压变频器的绝缘水平需符合GB/T14549规定的3kV及以上电压等级要求^[6]。改造完成后，需通过第三方安全验收，验证各项安全保护装置的联动可靠性，确保技术应用不会引入新的安全风险点，实现节能效益与运行安全的协同保障。

三、火力发电厂汽轮机组节能降耗技术应用策略

(一) 建立健全机组能耗实时监测体系

从监测维度的拓展着手，除常规的温度、压力、流量参数外，增加汽轮机缸体振动频率、润滑油温、轴封蒸汽用量等细节指标的监测，选用具有抗电磁干扰能力的智能传感器，布设时避开管道弯头和阀门阻力件区域，确保采集数据的代表性。数据处理层面引入边缘计算技术，在传感器就近节点完成初步数据清洗与特征提取，再通过加密传输协议发送至中央平台，减少数据冗余和传输延迟^[7]。平台分析模块需嵌入能耗诊断算法，能自动识别异常能耗模式，如蒸汽参数骤变时的能耗波动原因，并生成包含调节建议的分析报告。数据校验除常规校准外，每季度开展一次跨系统比对，将监测数据与机组DCS系统、SIS系统数据进行一致性核验，及时修正偏差，构建多层次的能耗数据校验网络。

(二) 制定分阶段技术改造实施计划

构建节能潜力矩阵，将各项技术按节能幅度、改造难度、投资回报周期三个维度进行量化评分，根据矩阵分布确定阶段重点。启动前要完成基础数据储备，包括近三年的机组运行曲线、故障记录、维护成本等，为改造方案设计提供原始依据。实施中需建立动态协调机制，每周召开跨部门协调会，同步推进设备采购、施工进度与停机计划，对改造中出现的系统兼容性问题，组织技术团队48h内提出解决方案。验收环节引入第三方评估机构，采用盲测方式验证改造效果，验收标准不仅包含能效指标，还需考核改造后机组的调峰响应速度、设备噪音等衍生指标。各阶段之间设置缓冲评估期，根据前一阶段的实际节能数据调整下一阶段的技术参数，避免计划与实际脱节。

(三) 优化蒸汽参数匹配运行工况

开展全负荷段的热力试验，绘制不同负荷下的蒸汽参数-能耗特性曲面，确定各负荷区间的参数优化区间，而非简单划分阈值。自动调节系统要引入预测控制算法，根据未来2h的负荷预测曲线提前调整蒸汽参数，若预测负荷从70%升至90%时，应提前15min逐步提升主蒸汽压力，减少参数突变带来的能耗损失^[8]。蒸汽管道维护要采用红外热成像检测技术，每半年进行一次全面扫描，精准定位保温薄弱点，对阀门、法兰等易漏部位采用可拆卸式保温结构，便于定期检查和维护。抽汽系统优化需建立多级联动调节逻辑，当某段抽汽量变化超过10%时，调整相邻抽汽段的参数，维持汽轮机内部的能量平衡，避免局部能量损失加剧。

(四) 定期评估节能效果

构建多维度评估指标体系，除常规的汽耗率、热耗率外，增加单位能耗的污染物排放量、设备可用率等衍生指标，全面反映节能技术的综合效益。常规评估需采用对比分析法，不仅对比实际值与计划值，还要与改造前同期数据、同类型机组先进水平进行横向对比，找出差距所在。全面评估前要进行数据预处理，剔除极端天气、电网限负荷等外部因素对能耗数据的干扰，确保评估结果的客观性^[9]。评估报告需包含技术寿命预测内容，根据设备磨损速率、性能衰减曲线，预测当前节能技术的有效周期和后续维护重点。评估结果要与奖惩机制挂钩，将节能指标完成情况纳入各部门绩效考核，形成“评估－改进－激励”的闭环管理。

四、结束语

上述研究表明，通过综合应用汽轮机组节能降耗技术、严格遵循应用原则并实施科学的应用策略，能够显著提升机组的节能效果。通流系统升级改造、乏汽余热深度回收、辅机系统变频调节优化等技术的合理应用，可从设备层面直接降低能耗。基于能效提升的成本控制、适配机组特性的改造方案、符合安全规范的技术应用等原则，为技术应用提供了科学指引。健全的能耗监测体系、分阶段的改造计划、优化的蒸汽参数匹配以及定期的节能效果评估等策略，保障了节能工作的有序推进与持续有效。这些方面相互配合，形成了一套完整的节能降耗体系，有效解决了汽轮机组运行中的能耗问题，为其高效运行奠定了坚实基础。

参考文献

- [1] 杨岩. 基于火力发电厂汽轮机组节能降耗技术研究 [J]. 机械工业标准化与质量 ,2024(10):44-46,50.
- [2] 邬慧佳. 浅析火力发电厂汽轮机组节能降耗措施 [J]. 中国设备工程 ,2023(11):89-91.
- [3] 陈进, 王士学. 1000MW 火力发电厂汽轮机组节能降耗的策略分析 [J]. 电力设备管理 ,2022(4):189-191.
- [4] 仇成孝. 火电厂汽轮机组节能降耗及经济运行研究 [J]. 数码设计 (上) ,2021,10(4):93-94.
- [5] 黄建. 火力发电厂汽轮机组节能降耗对策研究分析 [J]. 装饰装修天地 ,2022(7):115-117.
- [6] 邹超. 试析火电厂汽轮机组节能影响因素及其降耗对策 [J]. 电力设备管理 ,2021(5):101-102,165.
- [7] 付海元. 火力发电厂汽轮机组的节能降耗方法论述 [J]. 电脑校园 ,2024(12):145-147.
- [8] 赵敏. 浅谈火力发电厂汽轮机的高效节能与安全管理 [J]. 商品与质量 ,2021(10):68,70.
- [9] 贾卓, 吴家禹. 试析火力发电厂汽轮机运行存在的节能问题和应对策略 [J]. 百科论坛电子杂志 ,2021(4):1985.

北斗短报文通信终端本地钟差对发射频率的影响及纠正措施

李龙¹, 马晓铮²

1. 中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北 石家庄 050000

2. 信息支援部队某部, 河北 石家庄 050000

DOI:10.61369/EPTSM.2025050003

摘要 : 北斗短报文终端大多使用温补晶振作为频率基准, 由于钟漂效应, 温补晶振的中心频率会随时间产生偏移, 可能影响到设备的正常使用。本文针对北斗短报文通信终端的常规架构, 定量分析了钟差对终端发射频率的影响, 并从工程应用的角度设计了两种钟差测量的方法, 同时给出了钟差补偿策略。

关键词 : 北斗短报文通信; 钟差; 发射频率

Influence of Local Clock Difference of Beidou Short Message Communication Terminal on Transmission Frequency and Correction Measures

Li Long¹, Ma Xiaozheng²

1.The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang, Hebei 050000

2.A Unit of Information Support Force, Shijiazhuang, Hebei 050000

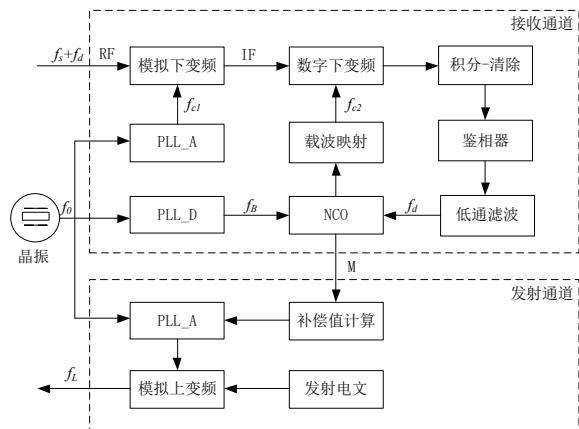
Abstract : Most of the BD-3 RSMC terminals use temperature-compensated crystal oscillators(TCXO) as the frequency reference. Due to the clock drift effect, the output frequency of the temperature-compensated crystal oscillator may shift over time, which may affect the normal operation of the equipment in severe cases. This paper quantitatively analyzes the impact of clock difference on the transmission frequency based on the conventional RSMC terminals, and designs two methods for clock difference measurement from the perspective of engineering application, A compensation strategy based on software solution is designed to calibrate the transmission signal frequency. The actual test results have proven the effectiveness of the strategy.

Keywords : Beidou short message communication; clock difference; transmission frequency

一、背景

北斗短报文通信功能是北斗三号系统的特色功能, 通过北斗地面主控站的信息转发, 任意两个北三用户机可以实现全天候的短报文互传。地面主控站时短报文通信信息处理的核心, 用户机发射的L频段入站信号首先经卫星转发至地面主控站, 主控站大系统解析入站信号后再将其通过卫星转发至对端用户机。由于多普勒效应的影响, 用户机发射的入站信号会发生频率偏移, 主控站大系统对频率偏移的适应范围有限, 因此要求用户机在发射时进行多普勒补偿, 使得到达地面系统的信号频偏处于规定的范围内。除了多普勒效应, 用户机的钟差也会影响发射频率, 且由于成本、体积限制, 用户机时钟源大多选用温补晶振。由于钟漂效应, 温补晶振的中心频率会随时间产生偏移。假如不考虑晶振频偏的影响, 入站信号的发射频偏将随时间增大, 严重情况下会达到地面系统无法解析的程度, 导致通信失败。本文针对北斗用户机常规架构, 分析了钟差对发射频率的影响, 结合使用场景, 给出了不同的用户机类型的钟差估计方法。

二、工作原理



北斗用户机短报文收发处理如图所示, 接收通道载波跟踪环路采用数字锁相环实现, 进入数字锁相环的是经过一次下变频的中频信号, 与本地 DDS 产生的二级载波混频后, 混频结果通过前端的鉴相器、滤波器等电路得到反馈信息, 用于实时调整本地载

波的相位信息，从而实现信号的跟踪。载波环路完成锁定后，本地载波频率与中频信号频率基本一致。^[1]

整个信号处理过程中，晶振为设备提供频率基准，各级载波也是由晶振频率变频而来。载波的频率准确度因此取决于晶振的频率准确度。由于成本限制，北斗短报文终端大多采用温补晶振（TCXO）作频率基准。温补晶振内置温度补偿电路，可在一定的温度范围内补偿温度对晶体振荡频率的影响。但晶振内部晶体材料和电子元件随时间发生老化，导致其性能发生变化，会导致输出频率出现漂移，一般情况下，老化导致的漂移会随时间积累，导致输出频率朝特定方向不断漂移。记晶振的标称频率为 f_0 ，由于晶振漂移，晶振实际输出频率记为 f'_0 ，晶振频偏通常用 ppm 为单位，

$$f_{ppm} = \frac{f'_0 - f_0}{f_0} (\approx 10^6) \quad 1)$$

接收通道采用二级下变频的方案，卫星下行信号频率为 f_s ，两级载波频率记为 f_{c1} 和 f_{c2} ，两，则有 $f_s = f_{c1} + f_{c2}$ ，由于晶振频偏的存在，两级载波的实际频率 f'_{c1} 和 f'_{c2} 均与设计值有所偏离，其中：

$$f'_{c1} = f_{c1}(1 + f_{ppm}) \quad 2)$$

$$f'_{c2} = f_{c2}(1 + f_{ppm}) \quad 3)$$

$$f'_{c1} + f'_{c2} = f_s(1 + f_{ppm}) \quad 4)$$

北斗短报文终端实际接收到的卫星信号频率记为 f_R ，则 $f_R = f_s + f_d$ ，其中， f_s 为卫星信号的标称频率，该频率值为 2.4GHz 左右。 f_d 为北斗短报文终端终端与卫星相对运动产生的多普勒频率， $f_d = \frac{v}{l} = \frac{v}{c} f_s$ ， v 表示终端与卫星的径向速率， λ 表示卫星信号载波波长， c 表示光速，当终端朝向卫星运动时，多普勒频率为正，当终端背离卫星运动时，多普勒频率为负。^[2]

由图 1 可知，经过两级下变频处理后，卫星信号的载波被完全剥离，只剩下多普勒频率，因此输出信号经低通滤波后，其频率理论上应等于多普勒频率。然而，由于钟偏的存在，实际输出的信号频率 Δf 除了包含多普勒频率外，还额外引入了部分误差，该误差等于卫星信号载波频率与钟差的乘积，即：

$$\Delta f = f_R - (f'_{c1} + f'_{c2}) = f_d - f_s f_{ppm} \quad 5)$$

载波跟踪环路使用带反馈的数字控制振荡器（NCO）用于本地二级载波生成和信号跟踪，两级下变频后的信号经过鉴相处理和低通滤波后形成反馈信号，实现 NCO 频率控制字 M 的调整，以实现本地载波信号与输入卫星信号的同步。数字控制振荡器（NCO）的基准频率 f_B 由晶振输出信号经锁相环生成，累加器位数为 N。对于 NCO 频率控制字 M 初始值，由以下公式确定

$$f_{c2} = f_B \frac{M}{2^N} \quad 6)$$

受晶振频偏影响，实际基准频率 $f'_B = f_B (1 + f_{ppm})$ ，NCO 的实际控制字 M' 与 Δf 的关系为：

$$\Delta f = f'_B \frac{M' - M}{2^N} \quad 7)$$

不考虑钟漂的情况下，NCO 进行多普勒频率估计依然按照标

称频率 f_B 进行计算：

$$f' d = f_B \frac{M' - M}{2^N} = \frac{f_d - f_s f_{ppm}}{1 + f_{ppm}} \quad 8)$$

终端发射的多普勒补偿公式为：

$$f'_L = f_L - \frac{f_d}{K} \quad 9)$$

$$\text{其中, } K \text{ 为发射频率与接收频率的比例因子, } K = \frac{f_s}{f_L} \quad 10)$$

$$f'_L = f_L (1 + f_{ppm}) - \frac{f_d}{K} = f_L - \frac{f_d}{K} + 2f_L f_{ppm} \quad 11)$$

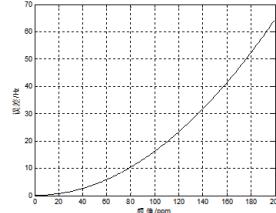
一般情况下，常规温补晶振的初始频偏在 1ppm 左右，每年偏

移在 1ppm 左右， f_{ppm} 的值较小， $1 + f_{ppm} \approx 1$ ，上式可简化为：

$$f'_d \approx f_d - f_s f_{ppm}$$

$$f'_L \approx f_L - \frac{f_d}{K} + 2f_L f_{ppm}$$

上述等式简化会带来一定的估计偏差，通过绘制偏差曲线，可以看出估计偏差随着频偏增加而增加，但误差值并不算大，在频偏高达 200ppm 时，频偏估计误差值还不到 70Hz。一般情况下，频偏在 20ppm 以下，此时频率误差还不到 1Hz，因此等式简化带来的估计偏差可以忽略不计。



由上式，受接收机钟差的影响，实际发射频率 f'_L 与理论值为 $(f_L - \frac{f_d}{K})$ 存在偏差，该偏差等于发射载波与频偏乘积的 2 倍。本质上，该偏差为钟差导致的多普勒估计偏差和发射载波偏差的叠加，折算到发射频段便会产生 2 倍频偏的效果。

钟差	1ppm	2ppm	3ppm	4ppm	5ppm
发射频偏 Hz	3200	6400	9600	12800	16000

一般来说，北斗卫星对于发射频偏的适应范围有效，按照 +12kHz 计算，假如对接收机钟差不做处理，当钟差超过 6ppm 时，发射频偏就会超出卫星的适应能力，导致无法正常解析入站数据，引发通信失败。例如对于出厂频偏 1ppm，钟漂 1ppm/ 年的接收机，最短 5 年后钟差就可能达到 3ppm 以上。

为了保证接收机的长期可用性，应定期对测量钟差并在入站发射时依据钟差值进行频率校正，以保证发射频率的准确度。

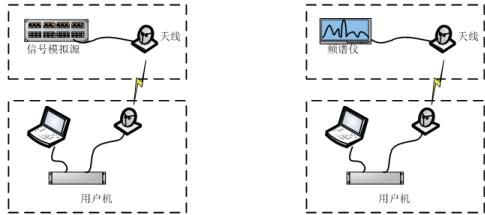
三、钟差的估计方法

对于钟差的估计方式，最直接的方法就是使用频谱仪测量晶振的输出频率，但晶振一般位于设备内部基带板卡，不拆解设备

的情况下不易测量。在不进行设备拆解的情况下，可以通过接收通道或者发射通道进行钟差测量。本文设计了两种方法实现整机状态下的钟差测量。^[3]

四、接收通道测量法

接收通道锁定信号后，多普勒估计值中含有钟差信息，根据该信息，产品与信号源相对静止的情况下， f_d 为 0，多普勒估计值仅包含钟差导致的频偏信息，利用多普勒估计值就可以计算出钟差。^[4]



$$f_{ppm} \approx -\frac{f'_d}{f_s}$$

接收通道测量法的

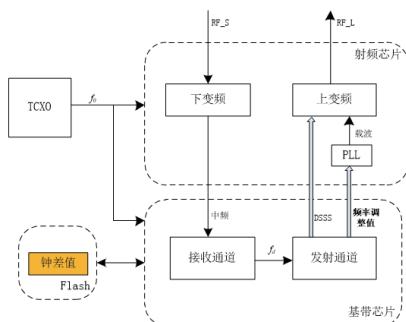
五、发射通道测量法

北斗短报文终端与卫星 / 信号源相对静止的情况下， f_d 为 0，可以通过频谱仪等仪器测量发射信号频率，从而计算出钟差。

$$f_{ppm} \approx \frac{f'_L - f_L}{2f_L}$$

以上两种测试方法不需要直接测量晶振频率。特别适合已交装产品的定期维护和外场标校。

六、钟差的补偿方法



北斗短报文终端的典型硬件组成如图所示，完成钟差估计后，钟差值存储于本地存储芯片（Flash/EMMC）中，发射通道利用接收通道输出的多普勒估计值 f'_d 和 Flash 中存储的钟差值 f_{ppm} 计算发射频率调整值，从而实现发射频率的多普勒补偿。具体计算公式如下：

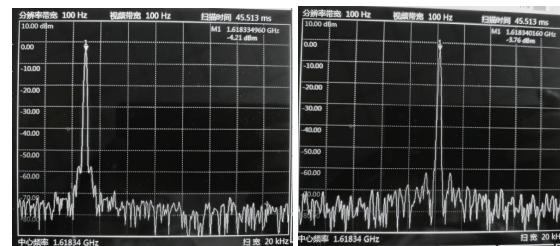
$$f'_L = f_L - \frac{f'_d}{K} - 2f_L f_{ppm}$$

以上公式成立的前提是接收通道已完成信号锁定并且计算出多普勒估计值 f'_d ，此外，还存在一种特殊情况是接收通道未完成锁定，接收通道不产生多普勒估计值，因此钟差带来的频偏仅影响了发射通道的载波频率，钟差带来的发射频偏接近接收通道锁定的情况下的二分之一，因此接收通道未锁定情况下，发射频率的补偿公式为：

$$f'_L = f_L - f_L f_{ppm}$$

七、钟差补偿实测效果

试验选用了一块典型的北三基带板卡，板卡上的基准源为 10MHz 国产温补晶振，经过 3 年的使用，板级晶振输出频率已出现明显的漂移，在不进行钟差补偿的情况下，输出 1.6G 单载波频偏约为 4.5kHz，折合 2.8ppm。当使用该频偏值进行频率校正后，输出频偏约 160Hz，验证了频偏补偿策略的有效性。



八、总结

本文分析了钟差对于北斗短报文终端发射频率的影响，结果表明不考虑钟差的情况下，发射频率会出现较大的频偏，随着时间的推移，很可能导致通信功能受到严重影响。根据设备的工作特点，给出了两种整机状态下的钟差标定方法并给出了发射补偿措施，该方法通过软件实现，无需进行产品硬件的更改，具有较高的工程价值，实测结果表明了频偏估计和补偿措施的有效性。

参考文献

- [1] 张静, 杨志强, 梁桂海, 北斗 RDSS 入站接收机测量方法研究 [J]. 计量科学与技术, 2023, 67 (2) :18-23.
- [2] 金耀, 张贺, 王泽林等, 北斗短报文发展与应用 [J]. 邮电设计技术, 2024 (3) :53-57.
- [3] 唐斌, 北斗区域短报文服务解析与试验验证, 第十四届中国卫星导航年会论文集 -S07 卫星导航用户终端, 2023.
- [4] 韩艳菊, 杨科, 郑鸿耀, 改进的模拟温补晶振宽温补偿方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41 (12) :2250-2255.

张家口地区网上国网用户分层管理机制构建

李荣荣

国网冀北电力有限公司张家口供电公司，河北 张家口 075000

DOI:10.61369/EPTSM.2025050004

摘要：随着电力服务数字化转型加速，用户差异化需求日益凸显，本文以张家口地区为研究对象，结合区域电网特征与用户行为数据，提出构建“数据驱动、精准适配”的网上国网用户分层管理机制。通过分析用户用电特征、服务偏好及区域发展需求，设计多维度分层指标体系，明确分层管理目标与实施路径，旨在提升服务效率、优化资源配置，为区域电力服务精细化升级提供理论支撑与实践参考。

关键词：张家口；网上国网；用户分层；管理机制；电力服务

Construction of Hierarchical Management Mechanism for Online State Grid Users in Zhangjiakou Area

Li Rongrong

Zhangjiakou Power Supply Company, State Grid Jibei Electric Power Company Limited, Zhangjiakou, Hebei 075000

Abstract : With the accelerated digital transformation of electricity services, users' differentiated needs are becoming increasingly prominent. This article takes the Zhangjiakou area as the research object and proposes the construction of a "data-driven, precise adaptation" hierarchical management mechanism for online State Grid users, combining regional power grid characteristics and user behavior data. By analyzing users' electricity consumption characteristics, service preferences, and regional development needs, a multi-dimensional layered index system is designed, and hierarchical management goals and implementation paths are clarified. The aim is to improve service efficiency, optimize resource allocation, and provide theoretical support and practical reference for the refined upgrading of regional electricity services.

Keywords : Zhangjiakou; online state grid; user stratification; management mechanism; electricity services

张家口是京津冀协同发展中的重要节点城市之一，电网服务涵盖范围广，用户种类多，采用“一刀切”的传统管理模式很难满足差异化的用户需求。网上国网是国家电网线上服务平台，提高了服务便捷性，但也面临着用户活跃度不均衡和需求响应落后的问题。建设科学分层管理机制是精准匹配服务资源，促进区域电力服务优质发展的关键途径。

一、张家口区域网上国网的用户特点分析

数字化浪潮带动下张家口地区网上国网用户量持续扩大，针对其特点进行深入分析有利于实现精准化服务。从用户的基本特性来看，他们的年龄分布是非常广泛的，覆盖了所有年龄段，但主要是中青年用户，特别是25–45岁的用户占了60%。这一部分人对于数字化工具的接受程度较高、工作和生活节奏较快、更加愿意通过线上渠道来方便地处理用电业务。从性别角度看，男性用户的数量稍微超过女性，达到了55%，这可能与男性在家中更频繁地处理与能源管理相关的工作有关，在地理分布方面，市中心的用户比例高达70%，而县城和乡镇的用户则占据了30%。城区内完备的网络基础设施、便利的移动网络覆盖带动了居民对

网上国网使用频率的提高。且县城及乡镇用户受网络条件，数字化素养的限制，其使用活跃度较低。各地区用户用电需求亦有差别，城区商业用户较为集中，用电稳定性，电费成本优化受到较多重视；乡村的居民用户更倾向于重视基本的电力服务和电价的优惠信息^[1]。

考虑到用户的使用偏好，有75%的用户主要依赖电费支付和电量查询功能，这大大增强了线上缴费的便利性，从而极大地优化了用户的使用体验；大约有30%的用户会密切关注能效账单，并依据分析数据来调整他们的电力使用习惯，以实现节能和减少消耗的目标；大约只有10%的用户尝试过处理复杂的业务，例如增容、新的分布式电源安装等，这表明在复杂业务的推广和操作指导方面还存在提升的空间。全面多维度的特征分析为张家口地

作者简介：李荣荣（1989.03-），女，汉族，河北张家口人，学历：研究生，职称：工程师。

区网上国网的用户分层管理机制建设打下坚实的基础。

二、张家口地区网上国网用户分层管理机制构建目标

建设张家口地区网上国网用户分层管理机制是以提高服务效能和优化资源配置为目标，以适应不同用户群体多样化需求为目标，从各方面提高用户满意度，使供电服务精准高效，精准服务于不同的用户群体为主要目标，通过科学分层为居民用户提供电费套餐个性化推荐，用电节能建议等服务，有利于用户进行合理用电规划，减少用电成本；为商业用户提供定制化能效分析报告辅助优化用电时段和设备选型以提高能源利用效率；对工业用户进行负荷预测和停电预警，确保生产的连续性^[2]。

资源的优化配置同样是一个至关重要的目标，根据用户用电规模，重要程度等要素分层合理配置运维资源。对重要的工业用户及大型商业综合体安排专业团队进行定期巡视，并优先确保供电可靠性；对一般居民用户采取智能化监测与远程故障诊断相结合的方式以减少运维成本。经过初步的计算和资源配置的优化，运维的效率可以增加20%，而资源的浪费则可以减少15%，提高用户的满意度也是很重要。通过分层管理使服务精细化、差异化，对用户提出的问题做出及时回应与解决。建立基于用户评价与投诉数据的用户反馈机制对服务策略进行动态调整，目标是将用户的满意度从目前的80%提高到超过90%，从而加强用户对国网在线平台的信赖和依赖，进一步推动平台的持续进步和服务质量的提升，进一步夯实国家电网张家口区域优质服务形象，为地方经济社会平稳发展做出贡献。

三、张家口地区网上国网用户分层管理机制构建的方法

(一) 用户数据采集及特征分析

用户数据采集和特征分析，是分层管理机制建设的基础，需要构建多维度的数据采集体系以涵盖用户的基础信息、用电行为和服务反馈等重点领域，通过系统对接，用户注册和线上问卷的渠道，综合获得用户身份信息、地域分布和用电设备类型的静态数据；在智能电表的支持下，用电信息采集系统对用户的用电量，用电时段和缴费频次的动态数据进行实时记录；同时在客服工单和平台评价的帮助下，采集用户服务满意度和业务办理需求反馈信息，在整合数据的过程中，采用了ETL（抽取、转换、加载）技术，对散布在多个系统中的数据进行了清理、去重和标准化操作，从而建立统一的数据存储仓库^[3]。完成数据采集及整合之后，利用统计学方法及机器学习算法深度剖析用户数据。经过聚类分析，张家口地区的网上国网用户中，有18%是工业用户，他们的月平均用电量超过50万度，主要集中在经开区和宣化区；在居民用户中，有75%的人使用电力，而在这之中，有40%的用户在电力使用上存在显著的峰谷差异，特别是在晚上18-22的时段，用电量达到了全天的60%。通过关联规则挖掘表明，装设电采暖设备用户在冬季用电量是一般用户的三倍。根据服务反馈的

数据，情感分析揭示了用户对于故障报修的响应速度的满意度只有68%，但对于在线支付的便利性，满意度高达92%。通过整合基础数据和用电习惯，我们构建了一个用户画像，结果显示老年用户的比例为12%，而他们在线业务处理的成功率不到30%，这使他们成为了服务优化的主要目标。

(二) 用户分层聚类模型的构造

用户分层聚类模型的构建需要根据张家口地区的实际情况，选择科学的算法和评价指标，以达到对用户群体准确划分的目的，可以根据之前收集到的用户数据筛选出用电规模、业务处理复杂度和服务响应敏感度这几个对用户行为和需求产生影响的核心变量并构造特征向量。考虑到数据的高维度和复杂性，选择使用主成分分析（PCA）技术进行降维，从而提取出关键的特征并减少数据的冗余性，在聚类算法的选取方面，全面比较K-Means, DBSCAN 和层次聚类的适用性并考虑了用户的数据特点和业务需求，优先选择K-Means++ 算法对初始聚类中心的选择进行优化以增强聚类的准确性和稳定性。利用肘部法则和轮廓系数来确定最佳聚类数量以避免过拟合或者欠拟合的问题。模型训练时不断地调整参数和迭代优化聚类结果，以保证同一类用户有相似的用电行为和服务需求以及不同类之间有明显的区别，在建立模型之后需要验证其有效性，采用交叉验证和留一法对模型泛化能力进行了评价；结合业务专家的经验人工校验聚类结果以保证分类逻辑与实际场景的一致性。最终建立的用户分层聚类模型可以把张家口地区在线国网用户分为工业大客户，商业用户，一般居民用户和特殊需求用户几个层次，为之后服务策略的开发提供了一个明确的用户分类框架。

(三) 分层服务的需求挖掘

分层服务中的需求挖掘需要对不同用户群体个性化诉求进行深入分析，从而为差异化服务奠定基础。以工业大客户为研究对象，采用实地走访和专题访谈的形式了解他们在供电可靠性、负荷调节和能效优化等方面的需求，例如是否需定制化停电计划以及有无分布式能源的接入要求；以商业用户为研究对象，着重研究了用户在电费成本控制，用电设备运维和节假日保电方案等方面所关注的问题，并分析了促销活动中用户用电负荷的变化情况和服务需求，对普通居民用户通过线上线下问卷和大数据分析，发掘他们对电费查询，缴费便捷性和节能知识推广的诉求，并聚焦老年用户智能化服务运行中的困难；考虑到张家口冬奥场馆和旅游景区附近用户的特殊用电需求，如季节性和临时性，分析了他们的保电预案和应急响应等特殊服务需求。同时借助于自然语言处理技术对社交媒体，客服平台上用户留言进行情感分析和主题提取以捕获用户的潜在需求。

(四) 差异化的服务策略设计

差异化服务策略的设计需要紧紧围绕各层次用户的需求进行资源整合，以达到服务精准触达和优化升级的目的，以工业大客户为服务对象，建立客户经理和技术专家组成的专属服务团队为客户提供“一对一”能效诊断和用电成本优化方案以帮助客户参与电力市场交易等；设立绿色通道，对扩容和设备改造等繁杂业务给予重点办理，减少办理周期，在商业用户方面，引入电费智

能分析工具对用电成本预警进行实时推送；为错峰用电提供了分时电价的优化意见；面向连锁商业机构开发了集团账户管理功能以实现对多地用电的统一监测和结算。对于普通的居民用户来说，他们的核心目标是提高服务的便利性，这包括简化电费支付和业务处理流程，以及开发如语音互动和一键报装这样的过时功能；定时推送节能小贴士和家庭用电安全知识等，改善用户的用电体验，对有特殊需求的用户制定了专门的保电方案并在大型活动中安排了人员值班和应急发电设备的调配；研发了景区用电可视化平台以实时显示负荷状态并支持远程控制，依靠大数据和人工智能技术实现精准推送服务，如基于用户的历史行为对业务需求进行预测并主动发出处理提醒等；对节能潜力用户有针对性地推送节能改造优惠政策。通过实施差异化服务策略，全面提高了各级用户满意度、增加了用户粘性、促进了网上国网平台服务质量与运营效益双丰收。

（五）服务策略的执行和资源配置

服务策略能否得到有效执行，取决于资源的合理配置和执行保障，在人力资源上，针对不同的服务策略要求，建立专业化的服务团队。向工业大客户服务团队提供电力工程师和市场分析师以保证能效诊断和电力交易服务专业；以老年居民用户为服务对象，对客服人员进行适老化服务技巧的训练，提高沟通效率，建立人员培训体系对员工进行经常性的业务知识和服务技能的培训，以提高队伍的整体服务水平，技术资源配置方面，对网上国网平台的功能进行了升级，针对不同级别的用户研发了专属服务模块。比如面向商业用户的智能用电管理系统的创建，集电费分析，负荷预测和设备监控于一体；针对特殊需求的用户建立应急指挥平台以达到数据实时共享和快速响应的目的。另外，通过引入云计算，边缘计算技术提高了平台数据处理能力和服务响应速度，确保了服务策略能够平稳运行，从物力资源上，以用户分布和服务需求为导向，对线下服务网点进行优化布局。工业集中区域新增了大型客户服务中心并配置了先进检测设备以适应现场服务的需要；在社区密集区域建立便民服务点、安装自助服务终端、为居民提供基础业务便捷服务。同时建立物资储备机制对可

能发生的用电故障提前做好抢修设备和物资储备，保障应急服务的及时性和高效性。通过科学配置人、技、物等资源为差异化服务策略落地执行提供扎实的支持。

（六）管理机制的效果评估和动态优化

建立一套完整的效果评估体系，是确保用户分层管理机制不断优化发展的关键所在。从服务质量，用户满意度和运营效益三个维度构建评估指标体系。在服务质量上，建立了业务处理时长，故障处理及时率和客户投诉率的量化指标；用户满意度采用线上问卷调查和电话回访的形式搜集用户的反馈信息，并形成满意度评分；从服务的成本、用户的活跃度以及业务处理的数量等多个方面来评估运营的效益，采用大数据分析和统计学方法对各指标定期监测分析。通过比较不同等级用户指标数据对差异化服务策略执行效果进行评价；采用趋势分析的方法对服务需求的变化和可能出现的问题进行了预测。比如，如果某一类用户的投诉率继续上升，就需要对投诉的成因进行深入的分析，并判断是服务策略无效还是需求没有得到满足，根据评价结果适时动态优化管理机制，针对成效较差的服务策略进行服务内容调整和服务流程优化；根据用户的新要求研发创新服务产品。同时建立反馈闭环机制将评价结果反馈到数据采集，分层聚类和需求挖掘过程中，对用户画像和需求分析进行完善，以促进整体管理机制不断完善。通过定期评估和动态优化来保证张家口地区国网在线用户分层管理机制时刻贴近用户要求，从而达到服务质量与运营效率持续改进的目的。

四、结束语

为了适应电力服务的数字化转型，构建张家口地区的网上国网用户分层管理体系成为了一个不可避免的选择。通过多维度的指标设计和动态管理策略能够有效提高服务的精准性和资源的利用效率，从而为区域电网的高质量发展提供了新的思路。今后需要进一步结合实际数据对模型进行优化，促进机制落地应用。

参考文献

- [1] 周小艳,王薇,彭海君.“网上国网”App信息公开对电力用户影响的研究[J].大众用电,2022,37(05):26-27.
- [2] 周顺,彭梦妮,刘轩昂.基于微信小程序的“村网共建”乡村振兴供电服务平台[J].大众用电,2024,39(01):63-65.
- [3] 薛云耀,许小卉,侯昱杰.浙江：推动模式创新 迈向服务高地[J].中国电力企业管理,2024(35):24-25.

汽轮机设备故障诊断与预防探讨

胡晓江¹, 苏阳¹, 潘杭², 金仲超³

1. 杭州汽轮动力集团股份有限公司, 浙江 杭州 310000

2. 浙江透平进出口贸易有限公司, 浙江 杭州 310000

3. 杭州汽轮新能源有限公司, 浙江 杭州 310000

DOI:10.61369/EPTSM.2025050005

摘要：汽轮机作为电力、化工等领域的核心动力设备，其运行稳定性直接影响生产系统的安全与效率。本文针对汽轮机常见的振动异常、油系统故障、叶片损伤等问题，系统分析故障产生的机理与诊断方法，从状态监测、数据解析、预防策略三个维度构建“诊断－预警－维护”一体化管理体系。通过融合振动分析、油液检测、红外热成像等技术手段，为提升汽轮机设备可靠性提供实践参考。

关键词：汽轮机；故障诊断；状态监测；预防维护；设备可靠性

Discussion on Fault Diagnosis and Prevention of Steam Turbine Equipment

Hu Xiaojiang¹, Su Yang¹, Pan Hang², Jin Zhongchao³

1. Hangzhou Steam Turbine Power Group Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310000

2. Zhejiang Turbine Import and Export Trading Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310000

3. Hangzhou Steam Turbine New Energy Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310000

Abstract : As a core power equipment in the fields of electricity and chemical industry, the operational stability of steam turbines directly affects the safety and efficiency of production systems. This article systematically analyzes the mechanisms and diagnostic methods of common faults such as abnormal vibrations, oil system failures, and blade damage in steam turbines. It constructs an integrated "diagnosis-warning-maintenance" management system from three dimensions: condition monitoring, data analysis, and prevention strategies. By integrating technical means such as vibration analysis, oil detection, and infrared thermal imaging, it provides practical references for improving the reliability of steam turbine equipment.

Keywords : steam turbine; fault diagnosis; condition monitoring; preventive maintenance; equipment reliability

引言

汽轮机通过将蒸汽热能转化为机械功，驱动发电机或其他负载运转，广泛应用于火力发电、核能发电、工业驱动等场景。据行业统计，汽轮机故障导致的停机事故占电力系统非计划停运总量的35%以上，单次停机平均造成经济损失超百万元。随着机组向高参数、大容量发展，其结构复杂性与运行条件严苛性显著提升，传统的“事后维修”模式已无法满足现代工业对设备可靠性的要求。故障诊断与预防技术通过对设备运行状态的实时监测和数据分析，提前识别潜在故障并采取干预措施，可使汽轮机故障发生率降低40%以上，平均寿命延长15%~20%。本文基于汽轮机结构特性与运行规律，系统梳理典型故障类型及诊断方法，构建科学的预防体系，为设备安全稳定运行提供技术支撑。

一、汽轮机主要故障类型及成因分析

(一) 振动异常故障

振动可作为汽轮机运行状态的关键表征，超80%的故障可经由振动信号得到反映，一般常见的振动异常有转子不平衡状况、

不对中问题、动静摩擦现象、油膜涡动及振荡等情况，转子不平衡常由转子材质不均匀，还有叶片结垢、磨损而引起质量分布失衡，其表现是振动幅值随转速的升高而递增，1倍频分量占据主导，其占比超过70%，某300MW机组鉴于末级叶片积盐现象，其不平衡量达到了500g · mm，振动数值超出标准至0.15mm，

作者简介：

1. 胡晓江（1981.03-），男，汉族，浙江永康人，本科，杭州汽轮动力集团股份有限公司，工程师，研究方向：汽轮机仪控；

2. 苏阳（1990.02-），男，汉族，浙江建德人，本科，杭州汽轮动力集团股份有限公司，工程师，研究方向：汽轮机、燃气机仪控；

3. 潘杭（1982.02-），男，汉族，浙江杭州人，本科，浙江透平进出口贸易有限公司，工程师，研究方向：汽轮发电机组、燃气轮机发电机组设备集成成套、燃气轮机热障涂层的过程控制；

4. 金仲超（1985.10-），男，汉族，浙江绍兴人，本科，杭州汽轮新能源有限公司，工程师，研究方向：汽轮机、燃气机仪控。

造成停机保护开启。不对中源于联轴器安装偏差、机组热变形引发的轴心线偏移，分为2倍频较为突出的平行不对中，还有1倍频跟2倍频一起存在的角度不对中，数据呈现出，约30%的振动故障出自不对中，热态不对中所占比例超60%，动静摩擦与轴系挠度增大、气缸变形以及隔板松动的情况有关，引发转子跟静子部件发生接触摩擦，振动信号处出现类似 $1/2X$ 、 $1/3X$ 的分数谐波，与此同时温度异常上扬，情况严重时诱发转子热弯曲现象，陷入不良循环，油膜涡动与振荡乃是滑动轴承油膜不稳定所催生的自激振动，若转速达到并超过2倍临界转速，很容易出现，振动的频率大概为 $0.4 - 0.5$ 倍频值，也许会致使轴瓦受损^[1]。

(二) 油系统故障

汽轮机润滑油系统担当润滑、冷却、密封等功能角色，其故障对机组安全构成直接威胁，主要有油质变质、油压异常及调速系统卡壳情况，油质容易劣化，主要是水分（ $> 0.1\%$ ）、杂质（NAS8级以上）超出正常范围，引起油膜强度降低，达到 $> 0.2\text{mgKOH/g}$ ，引发部件出现腐蚀问题，某机组因油箱呼吸器失去应有功效，油内水分占比为0.3%，造成轴瓦乌金出现磨损失效。因油泵出力不足、滤网堵塞或管路泄漏，造成油压异常现象，润滑油压力低于 0.08MPa 这一数值，危急遮断对应的油压低于 1.0 MPa ，说不定会引起轴瓦烧坏或停机故障，调速系统卡涩，源于伺服阀、错油门等部件被油中颗粒污染，也或是被油泥黏附，导致调门动作出现迟缓乃至失控情形，统计数据显示，大概25%的汽轮机非计划停机与此事关联。

(三) 叶片与通流部分故障

汽轮机能量转换，核心部件非叶片莫属，面临高温、高压状态且承受交变载荷作用，常有的故障是叶片断开、隔板走形、结垢与被腐蚀，叶片断裂很多时候是由疲劳损伤，也就是应力集中处裂纹萌生，即湿蒸汽区被水滴冲蚀，以及振动共振，即叶片固有频率与激振频率耦合引起，某机组低压缸末级叶片共振时振幅达 0.5mm ，运行1.2万小时的过程结束后断裂。隔板变形是高温蒸汽发挥作用隔板刚度的欠缺，说不定安装间隙配置不当造成动静间隙消失无踪，引起摩擦磨损情况的出现，超临界机组鉴于蒸汽温度达到 566°C 以上，隔板出现变形的风险急剧增大，结垢与腐蚀是因为蒸汽质量不佳，引起盐分在叶片表面堆积，再不然含硫蒸汽诱发了晶间腐蚀，引起通流效率下降，增添转子失去平衡的风险，要是结垢厚度增加 0.1mm ，机组效率近似降低1%。

(四) 气阀与气缸故障

汽阀及气缸的故障主要有主汽阀/调门滞涩、气缸变形与漏汽现象、膨胀不顺畅，主汽阀/调门卡涩这一状况，是阀杆与阀套间隙被氧化皮或杂质卡住的结果，造成阀门无法完全开启或闭合，对机组负荷的调节产生干扰，于高温高压蒸汽构成的环境里，阀杆氧化速度可增至 $0.02\text{mm}/\text{千小时}$ 。气缸变形及漏汽是由于启停阶段温度梯度过大，引起气缸热应力不均，结合面平整度突破标准界限，引起蒸汽泄露，若漏汽量有1%的增长，机组热耗率近乎上升0.5%，膨胀若不通畅，乃是滑销系统卡涩致使气缸自由膨胀受限，造成附加应力的形成，引起轴承座偏移或是动静间隙出现变动，某机组鉴于纵销存在卡涩现象，膨胀差超过既定标准到

5mm ，诱发振动失稳。

二、汽轮机故障诊断技术与方法

(一) 振动监测与分析技术

振动监测与分析的技术包含在线振动监测体系、频谱分析方法、相位分析手段以及模态分析途径，在线振动监测系统在诸如轴承座、转子这类关键部位安设磁电式或压电式传感器，即时采集振动相关的位移、速度、加速度信号，设置包含正常值、预警值、停机值的三级报警界限，振动信号24小时连续记录与趋势分析，是 300MW 以上机组要实现的。频谱分析采用傅里叶变换，让振动时域信号转成频域图谱，认定特征频率相关分量，若1倍频成为主导，就是不平衡现象，有2倍频突出情况说明是不对中，0.若检测到 $0.4 - 0.5$ 倍频则是油膜振荡，分数次谐波揭示或许是摩擦或者松动造成。采用键相传感器，相位分析得以测量振动相位，分辨不平衡位置（相位角和转子高点相呼应）与故障类型，在出现不对中故障情形的时候，相位差受负荷变化影响显著，差值 $> 30^\circ$ ，模态分析采用的激励手段为锤击法或激振器，测得转子-轴承系统固有频率及振型，判定共振隐患，临界转速周边，需将振动幅值控制到 $< 0.05\text{mm}^2$ 。

(二) 油液分析技术

油液分析技术涉及到理化性能核验、油液铁谱探究还有光谱检测，定期实施的理化性能检测，检测润滑油黏度（ 40°C 时应达ISOVG46标准）、水分、酸值、闪点等指标，测定油质的劣化级别，新油投入运行前，必须实施真空滤油处理，颗粒度需实现NAS6级达标。油液铁谱分析借助显微镜对油中磨粒的形态、大小与成分加以观察，判定磨损位置与类别，钢铁磨粒若尺寸超过 $5\mu\text{m}$ ，往往暗示轴承或者齿轮发生了磨损，粒径 $2 - 5\mu\text{m}$ 的铜粒或许源自轴瓦，纤维颗粒反映出密封件老化这一状况，光谱分析依靠原子吸收光谱，测定油里Fe、Cu、Cr等金属元素的浓度，搭建油内金属元素浓度走势曲线，若Fe元素浓度按月计算的增量 $> 5\text{ppm}$ ，必须排查轴承与叶片是否存在磨损。

(三) 温度与压力监测技术

温度跟压力监测所采用的技术有红外热成像、蒸汽参数监测、膨胀监测，红外热成像对诸如气缸、阀门、管道这类部件实施红外扫描，查找温度分布是否存在异常，轴承温度宜小于 90°C ，定子线圈温度宜小于 120° C ，若温差跨越 10°C 界限，提示有故障迹象。在蒸汽参数监测过程里，实时采集主蒸汽/再热蒸汽的压力（偏差值 $\pm 5\%$ ）、温度（偏差 $\pm 10^\circ\text{C}$ ）及流量数据，鉴别通流部分是否结垢，利用线性位移传感器测量气缸与转子的膨胀量实施膨胀监测，让胀差符合设计范围要求一般是 $\pm 3\text{mm}$ ，启停阶段要把控温升率小于 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ ，杜绝膨胀不顺。

(四) 无损检测与离线诊断

超声波检测、渗透检测和内窥镜检查属于无损检测与离线诊断范畴，超声波检测针对叶片、转子等关键部件开展超声波探伤工作，找出内部裂纹，每2万小时应检测叶根、轴肩等应力集中的部位一次，借助渗透检测对叶片表面、螺栓等部件宏观缺陷展开检

查，就如疲劳裂缝、腐蚀的坑洼，检测启动前要把表面氧化皮除去，保障缺陷显现明晰，实施内窥镜检查，从孔洞或预留通道插入内窥镜，审视通流部分积垢问题、叶片破损、隔板变形等现象，高压缸检查周期为每3年一次，一年之中要对低压缸检查一次。

三、汽轮机故障预防策略与维护措施

(一) 基于状态的预测性维护

基于状态做预测性维护，得建立状态评估模型，还需制定有差异的维护周期，把控关键参数，创立状态评估模型应聚合振动、温度、油液等多维度数据，采用机器学习算法（就如BP神经网络）去构建设备健康度评估模型，实现7至30天的故障预报警，某发电集团应用该技术之后的阶段，汽轮机未计划停机次数出现52%的下降。按照设备运行时间、工况条件和状态监测结果去制定差异化维护周期，动态调控维护间隔时长，像高负荷机组，油液分析周期定为15天，每日对振动监测数据开展分析；备用机组实施每月一次的静态检查，关键参数把控需严格把控蒸汽质量（钠含量 $< 5 \mu\text{g/kg}$ ，二氧化硅未达 $20 \mu\text{g/kg}$ ，抑制叶片的结垢与腐蚀现象；实现润滑油过滤精度为NAS6级，使水分控制低于0.1%水平；轴承回油温度不得超出65℃。

(二) 安装与调试阶段的质量控制

安装调试阶段的质量把控，具体有精密找正、转子平衡和间隙的调整内容，借助激光对中仪完成联轴器的精密找正，实现平行偏差 $< 0.05\text{mm/m}$ 的精准控制，角度偏差须小于 0.05mm/m 的数值，热态找正应考量机组运行后的温度变形补偿量。就转子平衡而言，动平衡精度要达到ISO G2.5级，余留的失衡量值：转速为 3000r/min 的机组，残余不平衡量得小于 $500\text{g} \cdot \text{mm}$ ，若机组转速为 1500r/min ，残余不平衡量得小于 $1000\text{g} \cdot \text{mm}$ ，首次启动前需开展 $500 - 800\text{r/min}$ 低速动平衡的相关操作，严格按照设计要求对间隙进行调整，设定动静间隙，如轴封的间隙大小为 $0.3 - 0.5\text{mm}$ ，隔板径向的间隙在 $1.5 - 2.5\text{毫米}$ 范围，达成既避免摩擦发生，又降低漏汽的损失^[3]。

(三) 运行过程中的优化操作

运行时段的优化操作有启停曲线的优化、负荷波动的管理以

及异常工况的处置，优化启停曲线需制订恰当的升速、升负荷曲线，防止转速急速跨越临界转速，当振动幅值达到 0.1mm 以上要降速，维持高压缸内外壁温差低于 50°C ，需保证法兰与螺栓的温差 $< 30^\circ\text{C}$ 。负荷波动的控制要杜绝机组频繁改变负荷，避免叶片承受的交变应力超出合理范围，需定时针对调峰机组开展低周疲劳寿命评估，开始处理异常工况的时候，要是出现振动快速激增($> 0.03\text{mm/min}$)、轴承温度瞬间陡升($> 5^\circ\text{C/min}$)等现象时，即刻下调负荷开展检查；要是遇到水冲击情形，赶紧停机且启动疏水阀功能，禁止采用强行启动方式。

(四) 检修与改造措施

检修跟改造手段有定期的大修活动、技术方面的改造以及备品备件管理事项，按照“逢修必改”的原则实施定期大修，开展对运行 $8000 - 12000$ 小时机组的全面检修，着重替换老化的密封部件、磨损的轴瓦，应对叶片损伤难题，对调速系统进行校准。技术改造实施对有设计瑕疵部件的升级，就像把传统轴瓦换成可倾瓦，此时稳定性提升30%，对叶片喷涂耐磨涂层，以此延长寿命两倍，于油系统增添在线滤油装置，油质达标率提升到95%，备品备件管理提出，关键备件（诸如叶片、主轴、伺服阀）需选用原厂件，存储环境得维持干燥清爽，相对湿度 $< 60\%$ 为宜，定时开展防锈处置与性能核验。

四、结语

对汽轮机故障进行诊断与预防是个系统性项目，应整合设备构造特性、运转规律及监测的相关数据，创建“监测 – 诊断 – 维护”闭合管理体系，采用像振动分析、油液检测这样的技术手段，可有力识别逾90%潜在故障；实施预测性的运维方针，可让设备可用率提高至95%及以上，极大降低运维花销。伴随物联网跟人工智能技术相融入，汽轮机故障诊断要往“全息感知、智能预警、自主决策”方向实现转变：采用布置无线传感器网络达成全状态的监测工作，采用数字孪生技术模拟故障发展进程，依靠大数据分析改良维护方针，最终实现汽轮机设备达成“零故障”运行状态的目标，为工业生产安全高效运转筑牢根基。

参考文献

- [1] 王勇. 大型汽轮机振动故障诊断与处理技术 [M]. 北京：中国电力出版社，2020.
- [2] 张伟，李明. 汽轮机油系统故障分析及预防措施 [J]. 热力发电，2021,50(3):120–125.
- [3] 刘军，赵刚. 300MW 汽轮机叶片故障诊断与寿命评估 [J]. 动力工程学报，2020,40(5):356–361.

汽轮机低压缸零出力改造对机组经济性的影响分析

安鹏博

华能国际电力股份有限公司营口电厂，辽宁 营口 115000

DOI:10.61369/EPTSM.2025050006

摘要：汽轮机低压缸零出力改造在应用中主要就是通过优化低压缸进汽的方式进行处理，保留少量蒸汽满足冷却以及带走鼓风热量的技术手段。此种技术在应用中可以有效提高机组的供热能力，增强调峰的灵活性。此种技术手段在热电联产机组中应用，效果显著。改造之后，可以有效提高机组自身的供热能力，提高整体经济效益。但是此技术在应用中还是受到多种因素的影响，因此，在对其进行改造处理中，必须要综合技术可行性、经济性以及安全性等多种因素进行分析，方可有效保障项目改造的长期性、稳定性。

关键词：汽轮机；低压缸零出力；经济性；冷源损失

Analysis of the Impact of Zero Output Transformation of Low Pressure Cylinder in Steam Turbine on Unit Economy

An Pengbo

Huaneng International Power Co., Ltd. Yingkou Power Plant, Yingkou, Liaoning 115000

Abstract : The zero output transformation of the low-pressure cylinder of a steam turbine is mainly carried out by optimizing the steam inlet of the low-pressure cylinder, retaining a small amount of steam to meet the cooling needs, and removing the heat from the blast. This technology can effectively improve the heating capacity of the unit and enhance the flexibility of peak shaving in application. This technological approach has been applied in cogeneration units with significant results. After the renovation, it can effectively improve the heating capacity of the unit itself and enhance the overall economic benefits. However, this technology is still influenced by various factors in its application. Therefore, in the process of retrofitting it, it is necessary to comprehensively analyze various factors such as technical feasibility, economy, and safety in order to effectively ensure the long-term and stability of the project renovation.

Keywords : steam turbine; low pressure cylinder zero output; economy; cold source loss

引言

在电力市场的快速发展过程中，为了有效满足新能源消纳需求，火电机组在发展中必须要提高自身的灵活性，并且将其作为提升电网调节能力的关键技术手段。而汽轮机低压缸零出力技术具有高效、低成本的特征，在应用中可以将原有做功的低压缸进汽引入供热系统中，有效实现低压缸“近零”出力运行，这样则可以在满足供热需求的同时，有效提高机组的调峰能力，增强运行的经济性。

一、汽轮机低压缸零出力改造核心原理

(一) 改造核心原理

汽轮机低压缸零出力改造是火电厂中对于大型供热机组进行改造处理，提高其整体的供热能力，增强灵活性，降低冷源损失的重要技术手段，其对于机组经济性会产生复杂的影响。

其中，改造主要就是通过在低压缸进汽管道上添加旁路阀，主要为蝶阀或者旋转隔板，根据实际状况合理选择。然后，根据改造的需求配套对应的控制系统、低压缸冷却蒸汽系统。这样则可以保障系统在供热需求相对较高的时候，可以通过关闭或者大幅度关小的方式进行处理，将原本进入到低压缸中的蒸汽，大部分或者全部抽走，实现对外供热。在系统中会保留部分冷却蒸

汽，这些蒸汽则会进入到低压缸带走转子转动而产生的鼓风热量，充分维持低压缸使其临近真空状态。在此种状态下，低压缸接近零出力，其中机组功率主要就是通过中压缸以及高压缸承担主要运行需求。

(二) 核心机制

1. 基础优化

第一，关断阀与旁路阀

改造中通过在低压缸入口位置的蒸汽管道中，安装液动或者电动关断阀，这样则可以在操作中快速切断蒸汽流量。其中阀门阀门关闭 $\geq 95\%$ ，则可以有效阻断中排蒸汽进入到低压缸中；而在非供热阶段，则可以全部打开阀门，这样则可以有效恢复原蒸汽通路。在设计中，其阀门与管路系统如表1所示。

表1. 阀门与管路系统技术要求

组件	技术要求	作用
主关断阀	耐温大于400°C，耐压大于1.5MPa，关闭时间小于30s	切断低压缸进汽
冷却蒸汽调节阀	精确流量控制，保障其误差小于±2%	保障转子安全
旁路管道	应用 AISI304L 等不锈钢材质，保障保温层厚大于150mm	高温蒸汽输送至热网加热器

第二，旁路系统设计

在设计中根据实际状况增设热网蒸汽旁路管控结构，操作中可以根据需求进行调控，将中压缸排气直接引入到热网加热器中。

2. 低压缸冷却保护系统设计

冷却蒸汽系统在设计中要保留3%~5%的额定蒸汽流量，利用旁路小阀则可以进入到低压缸中，其具有预防低压缸超温变形的作用，也可以避免低压缸在运行中因为无蒸汽流动而出现的真空破坏等诸多问题。同时，利用末级叶片保护：消除鼓风摩擦生热风险。在应用中其主要控制逻辑就是冷却蒸汽流量会通过温度反馈调节阀对其进行动态控制，在应用中可以有效维持低压缸排汽温度处于安全区间范围以内。

3. 热力循环优化

在对其改造之后，原有通过凝汽器像环境排放的热量会通过回收处理，提高整体利用效率，效果显著。

(三) 技术实现关键系统

1. 控制系统升级

DCS 逻辑组态在设计中可以根据实际状况增设“供热模式 / 发电模式”的切换按钮，基于实际状况进行优化完善。而通过联动控制关断阀、冷却阀等相关设备则可以进行动态管理，综合实际状况对优化顺序流程。

通过安全连锁进行自动化控制，如果在系统运行中其低压缸金属温度大于90°C，或者其振动大于80 μm，则可以自动开启冷却阀系统。同时，如果热网的压力高于上限阈值参数，系统会优先保护中压缸安全，充分提高了系统的稳定性。

2. 监测系统强化

通过在低压缸温度的监控，了解转子表面、缸体轴向等相关区域的温度变化。而在设置中布设末级叶片振动传感器，可以了解其主要温度变化。通过多种技术手段可以实时监测中排蒸汽焓值、热网回水温度等相关参数的匹配度。

二、汽轮机低压缸零出力改造对机组经济性影响分析

(一) 正面影响

1. 提高供热能力

通过汽轮机低压缸零出力改造可以有效提高机组的供热能力，增强经济性。其中，通过增加可以抽汽量达到改造的目的，可以有效提高经济性。在没有改造之前，低压缸中最小冷却的流

量会限制最大抽泣量的处理。而对其进行改造拆除之后，可以将原用于低压缸发电的焓值低、做功能力弱等相关低品位蒸汽进行处理，可以直接的利用其热能达到供热的目的，充分提高了机组整体的供热能力。

2. 提高供热效率

在改造之后，将原有的低品位蒸汽供热替代了新蒸汽或者高参数抽气等高品位的蒸汽，有效实现供热需求，这样则可以有效避免了因为抽汽量过大而出现的低压缸鼓风超温等问题。通过此种方式进行处理，有效降低了单位供热量产生的标准煤耗，切实提高了综合能源的利用效率。

3. 降低发电煤耗

在特定的工况状态下，可以有效减少冷源损失。例如，在纯凝工况中，低压缸排气中的冷源损失是导致电厂在运行中效率不足的主要成因。通过对对其进行优化改造，则可以有效满足供热工况的应用需求，可以将原有排入凝汽器中的多数热量用于供热处理，充分减少了冷源损失性问题。而在供热工况中通过此种方式进行改造处理，可以有效减少了低压缸中的低功率做功。其中，低压缸蒸汽粗使相对较低，而在处理中将部分的蒸汽能量用于高效供热系统，则可以有效降低单位发电量的热耗。

4. 切实提高机组运行的灵活性

通过改造拆除之后，机组可以在宽阔的范围内进行处理，独立调节发电功率以及供热量，有效增强了热电解耦能力。在供热需求相对较高的状态下，通过此种系统进行处理可以有效保障其发电功率相对较高，其中高压缸承担的同时也提供了大量的抽汽供热，有效降低了为了满足供热需求而降低发电功率的问题出现，切实提高了电网调峰专特下的供热需求。

5. 提高幅度调峰能力

在非供热或者系统处于低负荷的状态下，低压缸可以恢复运行，但是其改造自身不会降低其整体的运行能力。而在供热季节或者深度调峰等状态下，因为供热符合可以实现独立运行，这样则可以有效降低机组在运行中的发电负荷需求，有效保障了供热参数的稳定性，有效满足了新能源的消纳需求。

(二) 负面影响

1. 低压缸效率损失

在切缸状态下，低压缸呈现零处理或者极小的出力运行状态下，其效率接近于零，对其部分损失在运行中会被供热收益覆盖，一般不会将其作为负面经济的主要因素。

2. 厂用电率增加

冷却蒸汽系统在运行中的系统能耗会受到一定的影响。其必须要增加小容量的冷却蒸汽系统，例如可以通过泵、风机等相关设备进行处理，这样则会在一定程度上增加少量的用电量。而在切缸中，凝汽器的热负荷会大幅度的降低，在理论上来说可以有效减少循环水泵的出力。但是在运行中必须要保障循环水量可以有效满足系统运行的需求，保障真空系统可以实现温度控制以及严密性监视，因此无法根据比例降低用电。在整体上来说，厂用电率会在一定程度上提高，但是相对与供热以及发电煤耗来说，其影响相对较小。

3. 设备投资成本

在改造运行中要对阀门、管道以及控制系统、冷却蒸汽系统等进行优化，必须要对其进行一次性投资，因此要分析投资回收期。

4. 增加运行维护成本

改造之后的系统涉及到阀门、冷却等相关设备的维护处理工作，在一定程度上增加了运维成本。同时，低压缸在切缸运行中，转子处于鼓风摩擦的状态，其整体的流量虽然相对较小，但是必须要重点分析转子振动、叶片安全以及轴承温度等多种因素，必须要对其进行严密的监控。最后，在系统运行中，频繁的操作会直接增加设备磨损等风险隐患问题。

5. 非供热季纯凝效率的微小影响

在系统的改造中会增加一定的管道、阀门。这些设备在纯凝工况下会导致其产生微小流动阻力损失变化，严重的会造成纯凝工况热耗出现微小的上升，一般为<0.5%左右，但是此损失相对与供热的收益来说可以忽略。

6. 潜在风险成本

通过改造处理之后，系统复杂程度显著提高，如果在设计、制造以及安装中出现运行不当等诸多问题，则会导致低压缸出现过热损坏等问题，或者会出现冷却蒸汽不足，振动异常等安全隐患问题，这样则会增加维修损失以及停机损失的出现几率。

三、汽轮机低压缸零出力改造对机组经济性探究

汽轮机低压缸零出力改造会直接影响机组经济性。其中，供热需求以及持续的时间是影响经济性的主要因素之一。其中年供热量越大，其供热期越长，则产生的经济性越强。例如，在北方地区的采暖热电厂中因为其供热需求相对较大，持续时间相对较长，其产生的收益则相对较高。

(一) 替代热源的成本

替代热源成本也是影响经济性的重要因素之一。如果在对其进行改造处理之后，增加的供热能力替代了效率相对较低的小锅炉，或者有效避免了新建能源的投资，其则会产生显著的经济效益。

益。相反，如果其替代的是原有效率相对稳定的设备，则收益相对来说则会降低。

(二) 燃料价格

燃料价格是影响经济性的重要变量。如果煤价相对较高，其节约的费用成本相对越高，投资回收期也会缩短。例如，在部分区域中煤炭价格波动相对较大，在电厂中应用低压缸零处理技术进行处理，则会降低发电煤耗，这样则可以在高煤价阶段有效提高整体的经济效益。

(三) 电价政策与辅助服务收益

受到电力市场环境因素的影响，通过改造处理则可以提高系统的灵活性，增强深度调峰能力，并且在一定程度上获得额外的收益，则可以切实提高项目的经济性。

(四) 投资成本与运行维护成本

在进行分析中，要基于实际状况对其进行动态分析。电厂中机组容量差异性、结构不同、改造方案的差异都会直接影响投资成本。对此，在应用中必须要基于实际状况对其进行系统分析。另外，新增设的系统在应用中必须要合理分析其风险成本，方可有效保障改造之后系统运行的安全性、稳定性。

最后，在计算指标中，重点分析增量投资回收期，主要根据改造总投资/(年新增净收益-年新增运行维护成本)的公式对其进行计算分析。通过此指标可以直观的分析项目投资的周期。而其内部收益率是对项目全生命周期经济性进行评估的重要工具，通过其进行分析，可以充分反映项目在全生命周期内中产生的平均收益率。

四、结束语

双碳目标驱动影响下，火电机组必须要提高自身的调峰能力，增强供热效率。而通过汽轮机低压缸零出力改造的方式进行处理，切除低压缸进汽，可以有效满足能源梯级利用的发展需求。汽轮机低压缸零出力改造可以有效提高火电机组供热的灵活性，也是提高其经济性的重要技术手段。此技术在应用中效果显著，但是在推广中还是必须要解决相关技术问题。对此，随着技术手段的不断发展与完善，今后，低压缸零出力改造技术势必会更加成熟，可以有效满足电力市场稳定运行需求，也为新能源的消纳工作提供技术支持。

参考文献

- [1] 陈昆.汽轮机低压缸零出力运行通流部分的鼓风工况与冷却安全性研究 [D]. 山东大学, 2023.
- [2] 陈荣轩, 李晓辉.350MW汽轮机低压缸零出力的应用 [J].电站辅机, 2023, 44(01):3034.
- [3] 彭金宝, 刘喆, 徐宪龙, 等.350MW三菱TC2F汽轮机低压缸零出力改造案例研究 [J].汽轮机技术, 2022, 64(05):388391.
- [4] 左启尧, 唐震, 李慧勇, 等.电网调峰背景下汽轮机低压缸零出力技术现状综述 [J].发电技术, 2022, 43(04):645654.
- [5] 黄坤.630MW汽轮机低压缸零出力改造方案及试验效果 [J].能源与环境, 2022, (03):5961.
- [6] 刘天文.汽轮机低压缸零出力运行安全性分析及寿命评价 [D].山东大学, 2022.
- [7] 岳博.1000MW热电联产机组热电解耦改造方案综合评价研究 [D].天津大学, 2022.
- [8] 李玉辉.350MW超临界汽轮机低压缸零出力运行安全性分析 [J].东北电力技术, 2022, 43(03):3236+39.
- [9] 陈元峰.325MW汽轮机低压缸零出力技术应用实践探析 [J].中国设备工程, 2021, (23):234235.
- [10] 东方汽轮机连续中标北方地区低压缸零出力供热改造项目 [J].东方汽轮机, 2021, (03): 19.

燃煤机组气力输灰系统自动控制逻辑优化

陈晴

国能粤台山发电有限公司，广东 台山 529200

DOI:10.61369/EPTSM.2025050007

摘要：气力输灰系统广泛应用于国内外各大型火电厂的输灰系统，在实际运行中，由于传统的物位计信号的误差，很多除灰系统只能选择使用时间装料的方式来完成输灰工作。至今这种输送方式仍没有形成解决用气量浪费严重，阀门开关频率过快，稀相输送对管道及阀门的磨损等问题，严重缩短除灰系统的使用寿命。本文介绍了除灰系统的工作原理及控制方法，详细分析了除灰系统效率低的原因，根据分析结果提出了仓泵料位测量及控制逻辑优化方案，优化后的运行结果表明，除灰系统的除灰效率得到了很大的提高。

关键词：气力输送；料位；控制；逻辑优化

Optimization of Automatic Control Logic for Pneumatic Ash Conveying System in Coal-Fired Units

Chen Qing

Guoneng Yuedian Taishan Power Generation Co., Ltd., Taishan, Guangdong 529200

Abstract : Pneumatic ash conveying systems are widely used in large thermal power plants both domestically and internationally. In practical operation, due to the inaccuracy of traditional level meter signals, many ash removal systems can only rely on time-based loading to complete the conveying process. This method has not yet resolved issues such as severe waste of air consumption, excessive valve switching frequency, and wear caused by dilute-phase conveying on pipelines and valves, which significantly shortens the service life of ash removal systems. This paper introduces the working principles and control methods of ash removal systems, analyzes the causes of low efficiency in detail, and proposes optimization schemes for level measurement and control logic in ash storage pumps. The optimized operational results show a significant improvement in the efficiency of the ash removal system.

Keywords : pneumatic conveying; material level; control; logic optimization

引言

气力输送是一项综合性技术，它涉及流体力学、材料科学、自动化技术、制造技术等领域^[1-2]，属输送效率高、占地少、经济而无污染，广泛应用于国内外各大型火电厂的输灰系统。燃煤机组气力除灰系统在设计时通常遵循料位优先的设计原理，并且具有时间保护的功能。所以在设计时必须要将料位数据信息放在首位。在实际运行中，由于传统的物位计信号的误差，很多除灰系统只能选择使用时间装料的方式来完成输灰工作。为了保证仓泵内不发生灰尘堵塞的现象，系统所设置的装料时间相对保守，装灰输送的周期很短，每一次输灰量很低，严重的增加了除灰系统的耗气量，造成资源的浪费。除此之外，频繁的灰尘输送会对阀门管道造成严重的磨损，缩短除灰系统的使用寿命，在系统维护和检修上的花费也会相应的增多。因此对料位测控数据的可靠性研究和自动控制逻辑的优化，才能有效解决仓泵料位的控制问题和料位控制的精准度。

一、传统仓泵料位计测量原理

目前常见的除灰系统中所使用的料位计包括音叉、超声波、射频导纳、雷达、电容等形式^[3-4]，一般采用插入式的安装方式，料位计探头需要直接接触到煤灰。因煤灰为粉状物料与固体物料

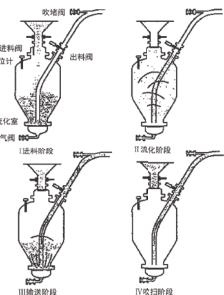
的混合体，黏结性较强，流动性较差，所以经常会附着在料位计传感器上，导致信息误报。而且传统的料位计无法实现料位的连续测量，一旦发生误报，为了保证仓泵内不发生灰尘堵塞现象，除灰系统只能选择使用时间装料的方式来完成煤灰或除尘灰粉的去除工作，除灰的效率大大降低。

作者简介：陈晴（1982.02-），男，汉族，湖南湘乡人，工程师，学士学位，研究方向：从事热工自动化和测量仪表方面的科研工作，E-mail：16100408@chnenergy.com.cn

二、传统仓泵输灰工作原理及控制方式

(一) 传统仓泵输灰工作原理

目前常用的除灰系统采用正压浓相发送器，正压浓相发生器的工作原理图如下：



正压浓相发送器工作过程分为四个阶段：

1. 进料阶段：进料阀打开，物料自由落入发送器内，当发送器内上升物料触及料位计后，料位计发出料满信号，进料阀自动关闭，完成进料过程。

2. 流化加压阶段：进气阀自动开启，压缩空气进入发送器底部，扩散后穿过流化床，在物料充分流化的同时，发送器内气压上升。

3. 输送阶段：当发送器内压力达到一定值时，压力传感器发出信号，出料阀自动开启，流化床上的物料流化加强，输送开始，发送器物料逐渐减少，此过程中流化床上的物料，始终处于边流化边输送。

4. 吹扫阶段：当发送器物料输送完毕，压力下降到管道阻力时，指示灯发出信号，通气延续一定时间，压缩空气清扫管路，然后进气阀关闭，间隔一定时间，关闭出料阀，打开进料阀，完成一次输送循环。

(二) 传统仓泵输灰控制方式

仓泵进料时间的控制有两个控制点：一是时间控制，二是仓泵料位控制。两个是并列关系，到其中任何一个控制点达到要求时，仓泵进料阶段结束。例如：第一种情况：进料时间未达到设定值而仓泵内料位计发料位高报警送输灰控制系统，结束进料阶段，同时自动关闭进料阀。第二种情况：在预设定的进料时间内粉煤灰与料位计探头没有接触，料位计不动作无反馈信号，但进料时间已到，输灰控制系统收到时间已到信号，结束进料阶段，同时自动关闭进料阀。

三、传统仓泵输灰系统存在的问题

在实际应用中由于我们使用的料位计的原理、仓泵环境、仪表结构等因素，使得98%的仓泵料位计出现误报、拒报情况。当料位计不准时，仓泵料位控制失去作用，仓泵控制系统自动切换到时间控制，不再理会料位计信号。

从传统老式仓泵使用效果看，绝大多数电厂仓泵由于料位计使用效果差，输灰系统大多采用时间控制，由于灰斗下料速度不稳定，从安全角度考虑，时间都设置得比较保守。结果就导致每

次仓泵输送的灰很少，用掉的压缩空气却很多。当灰量比较大，又来不及排灰时，就使得灰斗内大量积灰。另一个副作用加大了输送每吨灰的耗气量，增加了对排灰管道、阀门的磨损。如果进料时间设得过长时，又来不及排灰，引起灰斗内大量积灰，造成安全隐患。

由于采用时间控制仓泵工作，在仓泵工作中动作频率非常高，内部工作环境恶劣，料位计极容易损坏，导致误报与失效。使得料位控制在运行中难以得到真正使用，仓泵进料控制基本是按照时间控制模式来进行的。由于运行从安全角度与不堵灰角度考虑，仓泵进料时间被控制在非常短的时间内。仓泵进料量主要取决于上面灰斗内灰量，灰量大，十几秒就会满泵，而当灰斗内没有灰或者灰量很少时，致使满泵时间比较长（半小时可能也无法达到三分之一的泵）。从而导致在多次循环中，仓泵处于非常少量甚至空泵输灰状态，造成大量压缩空气损失，能源浪费严重。同时，由于时间控制间隔较小，仓泵极少量煤灰或空泵输灰占到整个输灰次数的65%以上，系统动作频率高，进料阀等周边设备磨损快，在灰量少时，输灰系统处于稀相输灰状态，输灰管道磨损大，还容易导致管道堵灰的发生。

四、仓泵输灰系统的改进方案

(一) 仓泵料位测量改进

目前火力发电厂仓泵料位计大都输出为开关量状态信号，料位计的测量受高温、温漂、摩擦、挂料误报、悬浮粉料干扰、迅速下料及气压冲击、灰粉静电干扰、煤品变化等诸多因素的干扰容易产生误报警。因此料位的测量应采用连续测量的方式，实现仓泵内料位的模拟量显示，精准测出仓泵内实际灰位。目前市场上能够实现连续灰位测量的有无源核子料位计、有源核子料位计和接触式跟踪测量料位计等^[5-6]。要从控制程序上利用灰位信号控制卸灰阀放灰频率必须确保料位的连续准确测量，才能为下一步开关卸灰阀提供精准信号，这样才能大大解决输灰系统的节能、阀门的使用寿命及管道的磨损^[7-8]。

(二) 新型仓泵输灰系统的具体改造方案。

1. 一、二电场仓泵运行改造如下：

(1) 一、二电场分别有8台仓泵，每4个仓泵为一个输灰单元，共分为一电场A、B及二电场A、B两个输灰单元，将原逻辑以时间控制改成以仓泵灰位高度信号的方式，分别对一、二电场八台仓泵分为A、B两侧输灰的运行方式进行修改。由于一、二电场灰量较多，因此A、B两侧各自一组，设计以整个灰位高度70%信号作为阀门开启信号。在一组四个仓泵信号中，以高位领先的方式启动整个一组系统，也就是说四个仓泵中的任何一个仓泵信号，只要某一个信号达到最高信号就可以启动整个一组系统工作。

(2) 时间逻辑辅助控制，运行人员可能根据灰量的大小调整输灰运行的时间间隔，以仓泵灰位最长进灰时间为基准，通过使用厂家的运行记录，进灰最长时间在85分钟，因此我们可以把逻辑时间调整为80分钟，如灰斗内灰位由于此循环时间过长而积聚过多，下个循环会以灰位高度形式迅速进行放灰。同时在画面上

增加手自动操作按钮，灰量大或故障，需要对仓泵连续输灰时，运行人员把按钮切换到手动方式即可。

(3) 电除尘一、二电场仓泵输灰系统逻辑修改及运行方式：逻辑控制电除尘一、二电场 A、B 侧输灰顺序，闭锁 A、B 侧同时输灰，实现电场 A 侧运行→结束→电场 B 侧运行→结束→电场 A 侧运行循环，同时在画面上增加手自动操作按钮，灰量大或故障，需要电场 A、B 侧连续输灰时，运行把按钮切换到手动方式即可。

2. 对电除尘三、四电场仓泵的改造

3. 四电场的灰量相对一、二电场灰量更为稀少，灰量约占总灰量的 5%，将原逻辑以时间控制改成以仓泵灰位高度信号为主，时间控制为辅的控制方式。以整个灰位高度 70% 信号作为阀门开启信号，时间控制调整根据实际输灰情况由运行人员进行手动设定。同时在画面上增加手自动操作按钮，灰量大或故障，运行把按钮切换到手动方式即可。

五、改造后的运行方式及使用效果

(一) 改造后的运行方式

正常情况下每个输送单元按设定的参数自动程控运行，流程为：开始运行 --- 进料阀开（输送罐开始装灰）--- 输送罐料位达到设定值或设置的装灰时间到 --- 进料阀关 --- 出料阀开 --- 进气阀开（开始输送）--- 输送管道压力降至设定值 --- 进气阀关（一个输送循环结束）--- 进入下一循环。

本程序设置两个参数设置窗，分别是进料灰位高度设置和进灰时间设置。进料灰位高度设置在保证电除尘器灰斗不满灰的情况下，尽可能的设置灰位较高位置，占整个量程 60% 左右。进灰时间的设置是为保障仓泵安全运行，在以灰位高度为基准信号前天下设置时间保障信号，补充料位计出现异常情况下，可最大限度的设置时间保证灰斗不满灰，从而达到安全节能的目的。

(二) 改造效果

通过下面数据的分析，我们可以看到原有输灰系统在以“时间控制”为主的控制逻辑和以连续料位测量及改造优化后的仓泵输灰程序的实际情况。如图 1、图 2、图 3 所示。

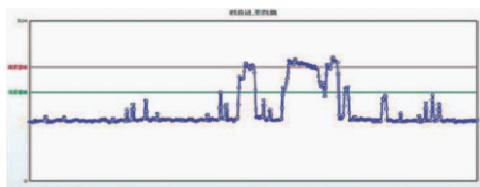


图 1 时间逻辑控制下的灰斗料位趋势图

参考文献

- [1] Smith, J. R., & Brown, T. L. (2020). Advances in Pneumatic Conveying Systems. *Journal of Power Engineering*, 45(3), 112–125.
- [2] Zhang, H., et al. (2019). Optimization of Control Logic for Ash Handling in Thermal Power Plants. *Energy and Environment*, 34(2), 78–89.
- [3] Wang, L., & Li, X. (2018). Continuous Level Measurement Technologies for Industrial Applications. *Automation in Industry*, 22(4), 56–67.
- [4] Johnson, P. (2017). Wear Reduction in Pneumatic Conveying Pipelines. *Mechanical Engineering Journal*, 12(1), 45–53.
- [5] Chen, G., et al. (2016). Energy Efficiency Improvements in Coal-Fired Power Plants. *Sustainable Energy Reviews*, 50, 200–210.
- [6] Liu, Y. (2015). Automation and Control Systems for Ash Handling. *Power Plant Technology*, 28(3), 34–42.
- [7] Anderson, R. (2014). Nuclear Level Gauges for Bulk Material Measurement. *Nuclear Engineering*, 19(5), 88–97.
- [8] Lee, S., & Park, M. (2013). Valve Optimization in Pneumatic Systems. *Fluid Dynamics*, 40(6), 123–135.
- [9] White, D. (2012). Maintenance Strategies for Pneumatic Conveying Systems. *Industrial Maintenance*, 15(4), 67–74.
- [10] Taylor, K. (2011). Environmental Impact of Coal Ash Disposal. *Environmental Science*, 25(7), 101–110.

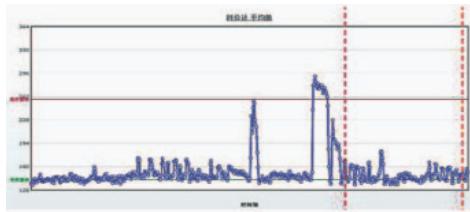


图 2 时间逻辑控制下的仓泵料位趋势图

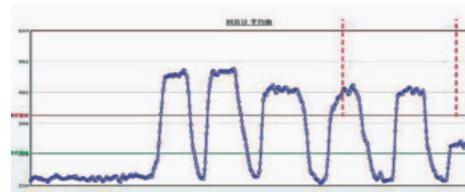


图 3 连续料位测量控制逻辑下仓泵料位趋势图

根据现场观察和分析可知道，仓泵进料的量主要取决于上方灰斗中干灰的量。当灰斗中灰料比较多时，仓泵进料基本是满泵，当灰斗内料很少时，仓泵内进料很少，甚至于处于空泵运行。根据当天试验的情况来看，24 小时内，仓泵超过一大半时间处于空泵运行状态。根据现场历史经验与情况统计，在时间控制模式下，仓泵有超过 60% 时间处于耗能低效率状态下运行。浪费了大量的压缩空气与能源，同时，进出料阀门也在无灰状态下还频繁动作，压缩空气消耗较高，设备的机械磨损大，降低了使用寿命，增加了设备的维护量。

从图 1 与图 2 中可以看出，在使用“时间控制”的模式下：仓泵中每次落灰量差异非常大。从图 3 中可以看出在使用连续料位测量控制的模式下仓泵达到一定料位后再开始输灰，相比而言，输灰的频次明显减少。

六、结语

根据目前国内电厂运行分析，燃煤电厂对于煤炭燃烧后所排放的大量粉煤灰的处理问题，是关系到电厂的环境保护与降本增效的重大课题^[9–10]。本文通过对改造的方案优化与节能的研究和实践，对提高仓泵的运行工况稳定性效果明显，自动投入率增高，减少了稀相输灰情况的发生，减少了阀门的动作次数，极大地节省了输灰压缩空气使用量，且节约了更换料位计的大量维护工时和维护费用，大大降低了仓泵阀门和输灰系统管道的维护工作量的维护费用，有效提高了输灰系统运行的可靠性。

智能计量检定综合管控装置的设计与系统实现

黎静, 李冰, 朱小超, 杜鹏, 廉宁

国网宁夏电力有限公司银川供电公司计量中心, 宁夏 银川 750004

DOI:10.61369/EPTSM.2025050010

摘要 : 智能计量检定综合管控装置通过表计收发平台与智能存储单元的协同工作, 实现了对计量检定过程的全程管控。该装置采用基于 Linux 平台的 OpenCloudOS Server 8 系统, 并结合 SpringBoot、MyBatis 框架进行开发, 利用 RFID 技术实现表计的智能存储与管理。表计收发平台通过条形码扫描和数据智能统计, 实现表计信息的高效录入与存储; 智能存储单元则通过 RFID 技术实现对表计的自动识别与管理, 确保表计全生命周期的高效管控。系统实时监测并提醒检定状态, 保障计量检定过程的数字化、自动化与高效性。该装置不仅提升了计量检定工作效率, 还确保了数据的准确性和安全性, 为计量管理提供了创新的解决方案。

关键词 : 智能计量; 检定管控; RFID 技术; 存储单元; 数字化

Design and System Implementation of Integrated Smart Metering Verification Control Device

Li Jing, Li Bing, Zhu Xiaochao, Du Peng, Lian Ning

Metrology Center, Yinchuan Power Supply Company, State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan, Ningxia 750004

Abstract : The integrated smart metering verification control device achieves full control over the metering verification process through the coordinated work of the meter receiving and dispatching platform and the smart storage unit. The device utilizes the OpenCloudOS Server 8 system based on the Linux platform, combined with the SpringBoot and MyBatis frameworks for development. It employs RFID technology to enable intelligent storage and management of meters. The meter receiving and dispatching platform facilitates efficient meter information entry and storage through barcode scanning and intelligent data statistics. The smart storage unit automatically identifies and manages meters using RFID technology, ensuring efficient control over the entire lifecycle of the meters. The system monitors and alerts the verification status in real-time, guaranteeing digitization, automation, and efficiency in the metering verification process. This device not only enhances metering verification efficiency but also ensures data accuracy and security, providing innovative solutions for metering management.

Keywords : smart metering; verification control; RFID technology; storage unit; digitization

引言

随着科技的进步, 传统的计量检定方法逐渐暴露出效率低、数据管理不便等问题。智能化、数字化的技术发展为计量检定提供了新的解决方案。通过引入表计收发平台与智能存储单元, 结合 RFID 技术和智能感知技术, 计量检定过程得以实现全面数字化管控。这一创新系统不仅提高了检定工作的效率, 还优化了数据存储和管理, 确保了数据的实时性和准确性。在计量行业日益复杂的需求下, 如何实现更高效、更精确的检定管理, 成为亟待解决的关键问题。该系统的设计与实现正是应对这一挑战, 推动计量检定技术的全面升级。

一、计量检定综合管控装置的设计思路

(一) 系统需求分析

智能计量检定综合管控装置的核心功能需求首先体现在表计的高效管理上。装置需要能够支持大规模表计的实时信息录入与管理, 确保表计从入库到使用、从检定到出库的全过程数据追踪。通过条形码或 RFID 技术, 实现表计的自动识别与信息录入, 每个表计的唯一身份信息(如型号、生产日期、检定结果等)需

准确存储于数据库中, 精度要求达到 0.01mm 的高水平, 以确保检定数据的准确性。此外, 系统还需提供信息检索和查询功能, 支持用户快速找到所需表计, 提升检定工作的效率^[1]。

其次, 系统的状态监控功能是保证整个检定过程顺利进行的关键。通过智能感知技术与传感器, 实时监测表计的检定状态和环境条件, 如温度、湿度、压力等, 确保检定过程中的外部环境不会影响到检定结果的准确性。系统需提供报警机制, 当检测到异常情况时, 能够及时通知相关人员, 并对表计进行相应的维护和调整^[2]。

例如，当环境温度超过标准范围时，系统应能够自动停止检定并提醒操作人员进行调节，精确度要求控制在 $\pm 0.5^\circ \text{C}$ 以内。

(二) 系统架构设计

系统的总体架构包括表计收发平台和智能存储单元两大功能模块。表计收发平台是装置的核心部分，承担着表计信息的录入、管理、查询等任务。平台采用基于 Linux 的 OpenCloudOS Server 8 系统，结合 SpringBoot 与 MyBatis 框架，确保系统的高效性与稳定性。前端部分采用 Vue 框架进行开发，配合 ElementUI 样式组件库，确保用户界面简洁易用。后端通过 Tomcat 应用服务器、FTP 文件存储服务和 MySQL 数据库服务来保障数据的存储与传输效率。表计的条形码扫描功能使得每个表计在进入收发平台时能够迅速被识别，信息实时录入数据库，保障了数据的准确性与完整性^[3]。

智能存储单元是系统的另一个关键模块，主要用于对表计的智能化管理。该单元结合 RFID 技术与移动端技术，能够实现对表计的自动识别、存取及状态监控。采用 Android 框架与 Vant 样式组件库，通过移动设备对表计进行管理，实时获取表计的位置与状态信息。RFID 技术的应用不仅提高了表计管理的效率，还减少了人工干预的误差。存储单元支持对多个表计的集中管理，能够通过无线网络与表计收发平台同步数据，确保数据的一致性与准确性。硬件架构方面，系统支持高精度传感器与多重数据存储方案，精度要求可达到 0.001g 的级别，确保装置在高精度环境下运行的稳定性。此外，系统新增短信通知功能，当电表完成检定或状态发生变化（如检定失败、待处理等）时，可通过集成的短信网关服务（如阿里云短信服务或腾讯云短信平台）自动向用户发送状态提醒，确保用户及时掌握表计状态。该功能通过后端任务调度模块与短信 API 接口联动，实现状态变更的触发通知机制，提升了系统的用户服务能力与响应效率。

二、表计收发平台的研究与实现

(一) 技术选型

在表计收发平台的设计中，操作系统选择了 OpenCloudOS Server 8，这是一个基于 Linux 的操作系统，具备高稳定性与高并发处理能力，能够满足大规模数据处理需求。OpenCloudOS Server 8 提供了良好的网络支持和系统资源管理功能，特别适用于云计算和大数据环境下的应用，能保证平台在长时间运行下的稳定性和高效性。

开发框架方面，后端选择了 SpringBoot 与 MyBatis 框架，SpringBoot 框架能够快速搭建一个独立的、基于 Java 的企业级应用，具备强大的扩展性与稳定性，适合处理大数据量和高频次的请求。而 MyBatis 作为数据持久层框架，能够高效地与数据库进行交互，简化了 SQL 语句的编写，并提升了系统性能。前端使用 Vue.js 框架，结合 ElementUI 组件库，实现了前后端分离的设计，提升了用户体验和平台的响应速度。该技术栈的选型保证了系统的高效性、灵活性和可扩展性^[4]。

(二) 功能实现

表计收发平台的核心功能包括条形码扫描、表计信息录入、

文件存储与管理、数据在线预览和智能统计等。条形码扫描功能通过与扫描设备的接口对接，能够快速识别表计条形码，实现表计信息的自动录入。该过程确保了表计信息采集的高效性与准确性，能够极大地减少人工录入的错误。

平台还具备文件存储与管理功能，能够将检定数据、检验记录等信息进行存储，采用 FTP 文件存储服务与 Mysql 数据库存储方式相结合，保障数据的高效管理与访问。数据在线预览功能使得用户能够实时查看表计的检定状态，系统支持智能统计功能，能够根据表计检定的数据生成统计报表，支持按不同维度（如时间、地区、检定状态等）进行查询与筛选，进一步提升数据分析和决策支持能力。

(三) 系统优化

为了提高表计收发平台的性能，首先在数据库查询效率方面进行了优化。通过 MyBatis 框架的缓存机制，减少了对数据库的频繁访问，降低了查询响应时间。同时，采用 SQL 语句优化技术，减少了冗余查询和不必要的数据加载，进一步提升了数据库的处理速度。在高并发情况下，系统能够支持每秒处理数百次请求，确保在高数据量的情况下，平台依然能够流畅运行，不受性能瓶颈的影响。尤其在大规模表计数据的处理过程中，系统响应时间得到了有效控制，最大查询响应时间缩短至 200 毫秒以内^[5]。

在安全性方面，平台采用了严格的权限控制和身份认证机制，保障了系统的安全性和数据的机密性。所有用户操作都需要经过身份验证与权限校验，确保只有授权用户才能访问敏感数据和执行特定操作。此外，为了保护数据传输的安全性，系统采用了 HTTPS 协议对数据传输进行加密，有效防止了数据在传输过程中的泄露。平台还定期进行安全漏洞扫描和修补，及时消除潜在的安全风险，防止恶意攻击和数据泄露，确保系统的长期稳定运行。

三、表计智能存储单元的设计与实现

(一) RFID 技术应用

RFID（射频识别）技术在表计智能存储单元中的应用，主要通过无线电波实现对表计的自动识别与智能化管理。在表计存储过程中，每个表计上都会附加一个 RFID 标签，内含唯一的识别信息。RFID 读写器在短距离内即可读取这些标签，读取距离可达 1.5 米以上，识别精度高达 99.9%。系统通过 RFID 读写设备自动识别表计标签，并将相关表计信息实时同步至后台数据库，实现表计的全过程追踪与管理^[6]。

RFID 技术的优势在于减少了人工干预并提高了数据录入的准确性，确保了表计管理的高效性。存储单元通过 RFID 系统实时记录每个表计的存储位置、检定状态及其他关键信息，每次操作和状态变化都会自动被记录和更新。与传统条形码扫描相比，RFID 技术支持批量识别，能够一次性读取多个表计的信息，极大提升了工作效率。尤其在处理大量表计的存储和检定过程中，RFID 技术能够显著减少操作时间，提高工作流程的流畅性和精确度。

(二) 存储单元功能设计

表计智能存储单元的功能设计重点在于实现高效且智能的表

计信息管理。该存储单元通过 RFID 技术，自动识别和记录每个表计的存储信息、检定历史记录以及其他关键数据。每个表计的存储位置都可以通过系统的可视化管理界面精确标定，从而确保任何时候都能准确找到目标表计，避免因表计混乱存放而导致的查找困难或操作错误。系统通过实时更新存储信息，确保数据的及时性和准确性，进而提高管理效率。

此外，智能管控功能使得存储单元能够自动更新表计的检定状态和存储状态。系统通过实时监控表计的工作状态，能够自动判断表计是否处于有效使用状态。若检测到表计存在异常情况或超期未检定，系统会立即触发报警，提醒相关人员进行处理。这种自动化功能大大减少了人工干预，提升了工作效率和准确性^[7]。

为了进一步提升管理效率，存储单元还集成了快速信息读取和管理功能。通过扫描 RFID 标签，用户可以迅速获取表计的所有相关信息，包括设备类型、检定日期、状态更新等。存储单元还具备数据分析功能，能够统计和分析表计的使用频率与检定期，帮助管理人员及时调整使用和存储策略，确保表计的合理使用、减少浪费，并提升设备管理的整体效率。

(三) 系统实现

表计智能存储单元的软件实现结合了 HTML5、安卓框架和 Vant 样式组件库，以确保系统的高效、稳定和用户友好的操作体验。HTML5 作为前端开发技术，提供了强大的跨平台支持，使得存储单元的管理界面可以在不同设备上流畅运行，保证了用户在移动端与桌面端均能实现快速访问与操作。安卓框架则提供了稳定的操作环境，使得移动端设备能够通过安卓应用实现对存储单元的实时监控和管理^[8]。

Vant 样式组件库则进一步提升了用户交互界面的美观性与易用性。通过简洁的 UI 设计，用户能够方便地操作存储单元的各项功能，如查看表计信息、更新检定状态、执行 RFID 扫描等。此外，系统还支持数据的本地缓存和云端同步功能，确保在网络环境不稳定的情况下，数据依然能够顺利保存并同步到服务器。整个系统的设计注重了响应速度和稳定性，使得表计的智能存储和管理工作能够高效执行。

四、计量检定综合管控装置的应用与效能

(一) 系统应用

计量检定综合管控装置在实际应用中的功能，主要体现在对检定过程的实时监控和全程状态跟踪。通过与表计收发平台和智能存储单元的协同工作，系统能够实时获取检定过程中每个表计的状态信息，包括检定开始时间、完成时间、状态更新等数据。平台通过无线网络与后台系统进行数据传输，使得检定数据能够在第一时间上传至中央服务器，实现数据的实时共享和同步。系统的实时监控功能使得管理人员能够随时查看表计的检定状态，及时发现潜在问题，避免延误和失误。

此外，综合管控装置的全程状态跟踪功能，能够在每个表计的检定过程中，准确记录所有操作与状态变化。每一个表计的工作周期、检定结果、存储位置、使用状态等信息都能在系统中查

询到。这些信息能够帮助管理人员更好地掌握表计的使用情况和维修需求，从而提升计量检定的精度与效率。

(二) 用户交互与体验

为提升用户体验，系统在设计上特别考虑了交互性和便捷性。通过短信提醒功能，用户可以实时接收到表计检定过程中的关键状态更新，包括检定开始、完成、异常等信息。例如，当表计的检定状态发生变化时，系统会立即通过短信向相关人员发送提醒，确保信息及时传递。此举能够有效减少人工疏漏，保证每个环节都能按时完成。短信提醒功能的加入大大提高了系统的响应速度和用户的便捷性^[9]。

系统还通过精简的操作界面和简化的流程设计，提升了用户的操作效率。用户可以通过手机、平板等移动终端随时访问系统进行操作，不仅提升了灵活性，还进一步优化了现场工作的效率。此外，表计信息的在线预览和智能统计功能，帮助用户快速查看数据并做出决策，进一步优化了用户体验，增强了操作的可操作性和透明度^[10]。

(三) 实际效能评估

对计量检定综合管控装置的应用效果进行了详细评估，结果显示系统在提升工作效率和减少错误率方面具有显著的优势。首先，表计信息的自动录入和管理显著缩短了检定准备时间，系统能够在扫描条形码或读取 RFID 标签后，迅速自动识别表计并进行数据录入。根据实际应用数据，检定流程的时间缩短了约 30%。此外，自动化的数据管理大大降低了人工操作的误差，检定错误率降低了 20% 以上，确保了数据的准确性和完整性。

通过系统的实时监控和状态跟踪，管理人员能够及时发现并纠正操作中的问题，减少了因人为疏忽造成的设备损坏和数据遗漏。综合来看，该装置的应用不仅提高了计量检定工作的效率，还保障了数据质量和系统安全，推动了检定工作的智能化发展。如表 1 所示。

表 1：系统效能评估

项目	检定时间减少	错误率减少	工作效率提升
系统应用前	100%	5%	1X
系统应用后	70%	4%	1.3X
时间节省与效率提升	30%	20%	30%

数据表展示了系统应用前后在检定时间、错误率以及工作效率方面的变化，进一步证明了系统优化的效能。

五、结语

智能计量检定综合管控装置的设计与实现，通过表计收发平台与智能存储单元的协同工作，成功提升了计量检定过程的效率与精准度。系统通过 RFID 技术和智能感知技术，实现了对表计的全程监控和自动化管理，大幅减少了人工操作的误差，保障了数据的准确性和可靠性。系统的实时监控、状态跟踪及数据传输功能，使得管理人员能够随时掌握表计的检定状态，有效提升了工作效率与管理水平。同时，短信提醒等人性化设计增强了用户

体验。实际应用结果表明，系统的实施不仅减少了检定时间，提升了检定精度，还为计量管理的数字化转型提供了有力支持。未

来，随着技术的不断发展，该系统有望进一步优化，推动更广泛领域的智能化管理应用。

参考文献

- [1] 刘昌鲁, 吕鲁望, 杨颖. 计量检定误差理论方面的应用趋势分析 [J]. 中国质量监管, 2024, (11):102–103.
- [2] 张永芹. 计量检定测试在质量控制中的应用与发展 [J]. 大众标准化, 2024, (16):4–6.
- [3] 王韵龙, 郑琳. 计量在人工智能与大数据分析中的角色 [J]. 模具制造, 2024, 24(09):240–242.DOI:10.13596/j.cnki.44-1542/th.2024.09.079.
- [4] 黄汀汀. 计量检定在食品质量控制中的应用与挑战 [J]. 食品安全导刊, 2024, (32):41–43.DOI:10.16043/j.cnki.cfs.2024.32.004.
- [5] 胡雪斌, 沈丹, 甘建红. 数字化智能化助推天然气计量工作的思考 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(20):94–96.
- [6] 陈德坚. 燃油加油机计量检定管理中存在的问题和对策研讨 [J]. 大众标准化, 2023, (19):188–190.
- [7] 郭玉华. 物联网的智能化计量检定技术方法分析 [J]. 仪器仪表标准化与计量, 2019, (06):29–30+42.
- [8] 张毅, 梁艳, 张楠, 等. 计量检定全过程智慧监管探索 [J]. 中国计量, 2021, (11):24–26.DOI:10.16569/j.cnki.cn11-3720/t.2021.11.010.
- [9] 门平, 毕俊杰, 古兆兵, 等. 国内外指针式压力表智能计量检定技术 [J]. 计测技术, 2021, 41(05):114–119.
- [10] 余锋. 智能计量器具的远程检定与监管技术研究 [J]. 中国质量监管, 2024, (12):70–71.

660MW 汽轮机大修中持环挂耳调整检修

王良瑞

国家电投集团贵州金元股份有限公司纳雍发电总厂，贵州 毕节 553303

DOI:10.61369/EPTSM.2025050012

摘要：随着我国经济的发展，社会对电力资源的需求量与日俱增，660MW 超临界汽轮机组在我国电力生产中起着不可或缺的作用。国内 660MW 超临界汽轮机组中，缸内持环多为采用悬吊式支承，这种支承方式均采用两侧挂耳结构。在机组检修过程中，持环两侧挂耳调整尤为重要，机组挂耳数量多，检修调整工作量大，对检修人员技术水平要求较高。本文主要结合现场检修工作经验，以中压第一级持环为例，对挂耳膨胀间隙与防跳间隙的测量以及在调整相关间隙过程中要注意的细节加以叙述。规范的检修工藝才能为设备安全、稳定、高效的运行提供有力保障。

关键词：660MW 超临界机组；悬吊式支承；挂耳；膨胀间隙；防跳间隙；检修工艺；安全运行

Adjustment and Maintenance of the Retaining Ring and Hanging Ear During the Overhaul of a 660Mw Steam Turbine

Wang Liangrui

Nayong Power Plant of Guizhou Jinyuan Co., Ltd. of State Power Investment Corporation, Bijie, Guizhou 553303

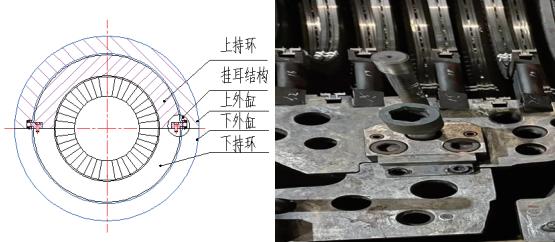
Abstract : With the development of China's economy, the demand for electric power resources in society is increasing day by day. The 660MW supercritical steam turbine unit plays an indispensable role in China's electric power production. In domestic 660MW supercritical steam turbine units, the suspension-type support is commonly used for the carrier ring inside the cylinder, and this support method adopts a double-side hanging ear structure. During the maintenance process of the unit, the adjustment of the hanging ears on both sides of the carrier ring is particularly important. There are many hanging ears on the unit, and the maintenance and adjustment workload is heavy, which requires high technical skills from maintenance personnel. This article mainly combines on-site maintenance work experience, taking the first-stage intermediate pressure carrier ring as an example, to describe the measurement of the expansion gap and anti-bounce gap of the hanging ears, as well as the details to be noted during the adjustment of relevant gaps. Standard maintenance processes can provide strong guarantees for the safe, stable, and efficient operation of equipment.

Keywords : 660MW supercritical unit; suspended support; hanging ear; expansion gap; anti-bouncing gap; maintenance process; safe operation

一、挂耳结构支承介绍

国内 660MW 超临界汽轮机组中，汽缸内部持环、平衡股、内轴封、内缸等部件多采用悬吊式支承，这种支承主要靠两侧挂耳对称悬吊在外部汽缸中分面上，使两侧挂耳承受持环全部重量，不让持环与下内缸槽道直接接触，给持环留出弧背间隙，底销顶部间隙，便于机组正常运行时，持环受热膨胀，同时也遵循了汽轮机中分面原则。挂耳结构主要有挂耳、上下调整块、调整垫片及其固定螺栓几部份组成，挂耳通过螺栓固定在下部持环中分面上的边缘上，下调整块通过螺栓固定在下部内缸或下部外缸中分面上，上调整块通过螺栓固定在上部内缸或上部外缸凹槽内，调整垫片介于调整块与汽缸之间，挂耳压在下调整块上，通过调整挂耳下方调整块和调整垫片的厚度可实现持环洼窝中心垂直与水平两个方向的调整。挂耳与上调整块之间留有一定间隙，便于挂耳

受热膨胀的同时也能限制持环在复杂工况下可能产生的剧烈震动，该间隙称为防跳间隙。挂耳与上持环之间留有一定间隙，便于机组正常运行时挂耳受热向上膨胀，称为挂耳的膨胀间隙。^[1]



二、挂耳的间隙测量与调整

当持环经过中心调整及机组长时间运行过程中挂耳松动重新

作者简介：王良瑞（1996.10-），男，汉族，贵州人，学历：本科，职称：助理工程师从事的研究方向：火电厂汽轮机及附属设备运行维护及检修。

固定后，挂耳的水平高度会发生一定变化，这将改变挂耳的膨胀间隙与防跳间隙，需要进行一定处理以达到规定要求，保障机组检修质量。^[2]

(一) 解体工作注意事项

1. 在首次揭开外缸、内缸、持环时，需要检查各挂耳以及上调整块是否固定牢固，是否有固定螺栓断裂等因素引起的挂耳松动情况，检查挂耳及调整块表面是否有磨损情况，如有磨痕需修锉处理。

2. 拆卸各上下调整块固定螺栓，取出调整块及调整垫片，测量各调整块及对应调整垫片厚度并做好记录，再使用白布包裹进行妥善保管，并标注名称便于区别。在调整块固定螺栓拆卸过程中，经常遇见螺栓难拆卸或螺栓断裂情况，在拆卸前可使用煤油或松动剂浸泡螺栓4h左右，再进行拆除，如无法拆卸，可使用烤具对螺栓进行快速加热，使螺杆伸长，释放预紧力后拆卸螺栓。如在拆卸过程中致使螺栓断裂，可在断螺栓中心钻一比螺栓小径小0.5~1.5mm的孔，用小窄凿小心地凿出螺纹第一牙，再用钢丝钳将残余螺纹拉出即可。

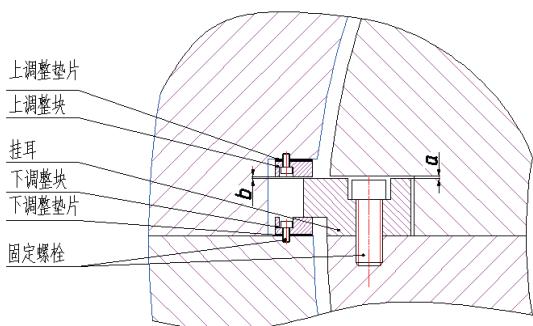
3. 使用丝锥对各螺栓孔进行理芽，用砂布将各接触面打磨干净，检查各调整垫片或调整块是否有毛刺，如有则需进行处理，使各部件达到装复条件。

(二) 挂耳膨胀间隙与防跳间隙测量。

1. 该工艺检修可在持环中心调整后与汽封调整工艺同步开展进行。

2. 擦拭干净上下持环中分面后，装复上持环并锁紧1/3螺栓，使用塞尺检查持环接合面间隙，要求做到0.05mm不入，否则应检查是否有局部顶死的情况，或者中分面存在间隙未处理合格。

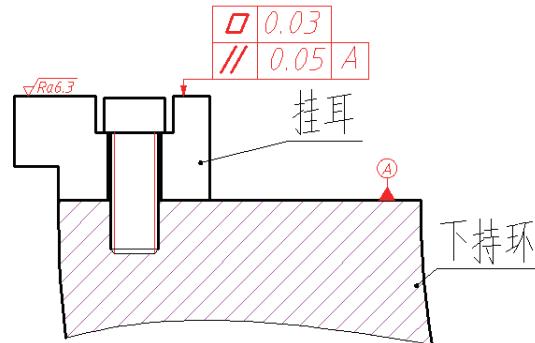
3. 使用塞尺测量挂耳与上持环凹槽之间的间隙，并详细记录各个点的间隙大小，测量出的最小值即为该挂耳的膨胀间隙a。在膨胀间隙调整完成后，在挂耳露出的地方沿着前后方向并排放置两颗铅丝，选用厚度为间隙设计值*(1.25~1.5)的铅丝，装复内缸并锁紧内缸1/3螺栓，使用塞尺检查内缸接合面间隙，要求做到0.05mm不入，拆卸内缸之后使用外径千分尺测量铅丝各个点厚度，并详细记录各个点的数据，测量出的最小值即为挂耳的防跳间隙b。(注：膨胀间隙a与防跳间隙b如下图所示。)



(三) 挂耳膨胀间隙调整

1. 根据测量数据，需将膨胀间隙a调整到0.13mm~0.25mm范围内，具体每个位置所对应间隙还需按照文件包或图纸要求执

行。若间隙过大，可通过增加挂耳厚度的方法以达到调整目的。先测量挂耳与持环中分面原始高度，再通过对母材进行焊接性分析，从焊接材料，焊接方法，工艺参数等方面分析后实施对挂耳表面进行堆焊，待自然冷却后对挂耳进行打磨，打磨掉堆焊出的多余部份，在打磨时要求做到挂耳表面粗糙度小于等于6.3，平面度要求小于等于0.03mm，相对于下持环中分面平行度达0.05mm以下。可使用研磨平板的方法以达到相关技术要求，可先在挂耳平面的四个角上将挂耳厚度打磨到目标值，打磨时时刻注意厚度变化，使用深度尺测量与持环中分面的距离变化，直到到达目标值后停止打磨，涂抹上红丹，标记好四个参照点，再使用磨光机整遍打磨挂耳，要交叉打磨挂耳，以四个点为参考，直至厚度接近四个点停止整遍打磨，开始吃点子研磨平面，在挂耳上涂抹红丹，用小平板对着挂耳表面来回磨，再用磨光机打磨掉局部凸起，最终整个表面所有位置均有点接触（包括四个参考点也存在点接触），接触点均匀分布在整个表面上，接触点密实且无硬点，接触面积在75%以上，最后使用锉刀和砂纸去除表面及边角毛刺。如间隙过小，则在以上调整方法中省去堆焊，即可实现调整目的。在膨胀间隙调整结束后，复测膨胀间隙是否合格，若仍不合格，需按照以上步骤再次调整，直至合格为止。



2. 挂耳的膨胀间隙调整结束后，进行挂耳的防跳间隙b调整，根据测量数据，需将防跳间隙b调整到0.15mm~0.20mm范围内，具体每个位置所对应间隙还需按照文件包或图纸要求执行。若间隙过大，可增加上调整块与上内缸之间的垫片厚度，要求垫片总数不超过3张，且垫片平整无毛刺。若间隙过小，可通过减少垫片数量，如垫片减完也无法满足垫片间隙要求，可以通过打磨调整块厚度以满足间隙要求，打磨调整块厚度与打磨挂耳为同样方法。在膨胀间隙调整结束后，复测防跳间隙是否合格，若仍不合格，需按照以上步骤再次调整，直至合格为止。全部调整合格后，更换所有调整块固定螺栓，装复所有上调整块及调整垫片，注意垫片不得有漏出调整块部份，调整块的固定螺栓不得有凸出调整块部份，否者螺栓将与挂耳顶死，导致外缸无法正常装复。

三、挂耳承力分配及接触检查

(一) 两点悬挂及多点悬挂式挂耳检修

持环或内缸均采用挂耳结构支承其自身重量，同时满足其配

合要求，但持环和内缸存在一组（左右侧共两个）挂耳与两组挂耳（左右侧共四个）的区别，其对应检修也存在不同要求。^[3]

（二）在持环或平衡毂类单组挂耳设备上

重量均匀分布在两个点上，自然不存在重量分配不均情况，在设备放入就位后还应该使用0.02mm塞尺检验挂耳下部是否还存在间隙，以防止因为设备其余部分摩擦或其他原因致使部件未放入到位情况发生。同时还要保障挂耳下部与调整块之间、下部调整块与下缸之间两个受力平面接触均匀。对应在检修中，应该让挂耳下方的调整块表面平整，在满足两个平面的平行度形位公差小于等于0.03mm前提下，还应该研磨两个接触平面。研磨分为粗磨与精磨两个步骤进行，首先粗磨应该在调整垫片配合的另一个面上涂抹红丹，对研检查调整垫片接触情况，然后使用角磨机修刮平面上的凸起部位，反复对研检查，直至整个面接触均匀为止，达到粗磨要求，再进行精磨。精磨可将红丹涂抹到调整垫片平面上，反复对研，再使用角磨机修刮加工面上的痕迹，反复多次研磨，直至整个平面上的接触点占整块平面的75%以上。这样才能使设备重量均匀的分布在整个挂耳平面上，避免接触点过少导致尺寸精度改变或震动因素的产生。

（三）高压内缸、中压内缸和低压内缸

因为缸体在机组中纵向尺寸较长，单组挂耳难以保证设备安装的平稳性，均采用的是两组挂耳，四个位置受力的结构方式。因为转子轴系存在一定趋势扬度的原因，缸的前后洼窝中心自然需要分开调整，而两组挂耳刚好能够满足这一条件可实现前后分别调整。在调整时尽量做到两侧调整垫片厚度一致，当洼窝左右不一致时，差值较少情况下可通过增减调整垫片厚度，如果差值过大，则需要调整缸底部的底销。当所有调整工作结束，还需要使用0.02mm塞尺，检测四个挂耳底部的接触面是否存在间隙，需要消除翘脚的情况，使四个承力点均能分担设备的重量。

四、结语

汽轮机中分面原则中，持环的挂耳结构有着重要作用，对挂耳的检修要求做到“精”与“细”，从检修的工艺优化，流程管理，质量验收三方面着手，严格执行三级验收把关，提高挂耳结构检修质量，是降低设备故障发生几率的有效办法，故障的减少能大大降低企业的经济损失。

参考文献

- [1] 张磊，《汽轮机设备检修》[M]. 中国电力出版社,2012.
- [2] 汪玉林，《汽轮机设备检修实用技术》[M]. 中国电力出版社,2012.
- [3] 尹鲁，李明涛. 浅谈汽轮机的常见故障及检修方法 [J]. 中国新技术新产品,2011.

风光互补新能源系统在偏远地区的适用性及经济性分析

张全跃，陈航

贵州金元智慧能源有限公司，贵州 贵阳 550018

DOI:10.61369/EPTSM.2025050014

摘要：现阶段处于全球能源结构向清洁能源转型的时代，风光互补新能源系统凭借其可再生、环保且能充分利用自然资源的特点，成为了解决偏远地区能源供应问题的重要方案。基于此，本文结合偏远地区的地理环境、能源需求及现有能源供应状况，深入地分析了该系统在偏远地区的适用性，其中包括资源适配性、技术可行性和环境友好性等多个方面。接着再从初始投资、运营维护成本、能源收益及社会效益等角度，对于其经济性进行了详细地探讨。

关键词：风光互补新能源系统；偏远地区；适用性；经济性；能源供应

Analysis of the Applicability and Economic Viability of Wind-solar Complementary New Energy Systems in Remote Areas

Zhang Quanyue, Chen Hang

Guizhou Jinyuan Smart Energy Co., Ltd., Guiyang, Guizhou 550018

Abstract : In the current stage, we are in an era of global energy structure transformation towards clean energy. Wind-solar complementary new energy systems, with their renewable, environmentally friendly, and efficient utilization of natural resources characteristics, have become an important solution for addressing energy supply issues in remote areas. Based on this, this paper combines the geographical environment, energy demand, and existing energy supply status of remote areas to deeply analyze the applicability of this system in remote areas, including resource compatibility, technical feasibility, and environmental friendliness among other aspects. Then, from the perspectives of initial investment, operation and maintenance costs, energy benefits, and social benefits, it thoroughly discusses its economic viability.

Keywords : hybrid renewable energy system combining wind and solar power; remote areas; applicability; cost-effectiveness; energy supply

引言

能源是社会经济发展的重要基础之一，对于偏远地区而言，能源供应更是关乎当地居民生活质量提升、产业发展及社会稳定的关键因素。然而，由于地理位置偏远、地形复杂、交通不便等众多原因，许多偏远地区长期都面临着能源短缺、供应不稳定且成本高昂的问题。此时，常见的传统化石能源供应方式不但需要大量的运输成本，还会对当地的生态环境造成破坏。因此使用风光互补新能源系统，即将风能发电与太阳能发电相结合，以充分地利用两种能源在时间和空间上的互补性，达到提高能源供应稳定性和可靠性的目的。因为这种系统无需依赖传统的电网基础设施，所以非常适合在电网难以覆盖的偏远地区应用。

一、风光互补新能源系统在偏远地区的适用性分析

(一) 资源适配性

偏远地区大多数都拥有丰富的风能和太阳能资源，它们地处高原、山区或草原，而这些地区地势开阔、遮挡物少，风力资源非常丰富，这恰好为风光互补新能源系统的应用提供了良好的自然基础。例如我国的青藏高原、内蒙古草原等地区，年平均风速

都较高，已然具备了大规模开发风能的潜力。同时上述这些地区大多数海拔都较高，空气稀薄使得太阳的辐射强度较大，因此太阳能资源也十分的充足。风光互补新能源系统则能够充分地利用起偏远地区的风能和太阳能资源，进而实现两种能源的互补利用。从时间方面来看，风能在夜间和冬季往往更为丰富，而太阳能在白天和夏季表现更佳，将两者进行结合就可以有效地弥补单一能源供应的间歇性和不稳定性^[1]。若从空间方面入手，不同的地

作者简介：张全跃（1971.01-），男，侗族，贵州岑巩人，学历：大专，从事的研究方向或工作领域：新能源开发、建设。

理位置可能会存在着风能和太阳能资源分布的差异，但风光互补系统可以根据当地的实际资源情况进行灵活地配置，使得能源的利用效率得以增高。

(二) 技术可行性

新能源技术的不断进步，使得风光互补新能源系统的技术也在日益成熟，为其在偏远地区的应用提供了可靠的技术保障。尤其是在发电技术方面，风力发电机和太阳能电池板的效率在不断地提高，成本还逐渐地降低了。目前主流的风力发电机的发电效率可达30%-40%，太阳能电池板的转换效率也能达到15%-25%，已然能够满足偏远地区的能源需求。针对于偏远地区的特殊环境，相关设备在设计上也进行了针对性的优化，比如提高了设备的抗风沙、抗严寒、抗腐蚀能力，使其能够较好的适应偏远地区恶劣的气候条件。

同时储能技术也是风光互补新能源系统的关键技术之一，在近些年来也取得了显著的进展。其核心在于蓄电池性能在不断地提升，循环寿命延长的同时充放电效率得到了提高，且成本出现了持续地下降。甚至新型储能技术如锂离子电池、飞轮储能等也在逐步地进行推广和应用，以此为系统的储能提供了更多的选择。

(三) 环境友好性

偏远地区往往拥有着独特的生态环境，此类环境的生态系统较为脆弱，所以对能源开发的环境要求比较高。但风光互补新能源系统作为一种清洁能源利用方式，具有显著的环境友好性。与传统的化石能源相比来看，风光互补新能源系统在发电过程中不会产生二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物等污染物，也不会排放烟尘和废渣，因此有效地减少了对当地空气、水和土壤的污染，有助于保护当地的生态环境。

在能源开发的过程当中，风光互补新能源系统也不需要大规模的开采和运输，进而减少了对于地表植被的破坏和对地质结构的影响。与水电站、火电站等大型能源项目进行比较发现，其占地面积小，因此对生态环境的影响范围有限，且项目在建成后非常易于恢复^[2]。

二、风光互补新能源系统在偏远地区的经济性分析

(一) 初始投资成本

风光互补新能源系统的初始投资主要包括了设备采购成本、运输成本、安装调试成本等等。其中设备采购成本是初始投资的主要组成部分，涵盖了风力发电机、太阳能电池板、储能设备、控制器、逆变器等设备的费用。现阶段随着新能源产业的快速发展，相关设备的价格呈现出了下降的趋势。运输成本在偏远地区的初始投资中也占有一定的比例。由于偏远地区的交通不便，导致设备运输的难度大，加上运输距离比较远，致使运输的费用相对较高。特别是对于一些大型设备，像风力发电机的塔架、风车等，还需要特殊的运输工具和运输方案，所以进一步地增加了运输的成本。而安装调试成本主要有土建工程费用、安装人工费用和调试费用等等。对于偏远地区来说，由于地形复杂、施工条件

艰苦，因此土建工程的难度较大，成本也相对较高。同时安装和调试人员还需要前往偏远地区进行作业，其差旅费、人工费等也间接地增加了安装调试的成本^[3]。

虽然风光互补新能源系统的初始投资相对较高，但与传统的电网延伸方案相比来说，在一些地理位置极其偏远的地区，其初始投资可能更具优势。原因是传统的电网延伸需要建设大量的输电线路和变电站，如此一块不仅投资巨大，而且建设周期很长，那么对于人口稀少、分散的偏远地区来说，经济性便比较差。

(二) 运营维护成本

风光互补新能源系统的运营维护成本由设备维护费用、人员工资、保险费用等组成。首先是设备维护费用，它包括了定期地检查、清洁、更换易损部件等费用。因为风力发电机需要定期地对轴承、齿轮箱等部件进行润滑和检查，太阳能电池板也需要定期地清洁以保证其发电效率，储能设备还需要进行定期维护以延长其使用寿命。但偏远地区的设备维护难度较大，导致维护人员的出行和设备的运输成本较高，所以设备维护的费用就相对较高。但随着设备可靠性的提高和维护技术的进步，相信设备的故障率也会逐渐地降低，此时维护周期便会延长，维护成本也会随之逐步下降。

其次为人员工资，主要是指系统管理人员和维护人员的薪酬。就小型的风光互补新能源系统来说，通常可以由当地居民经过培训后兼任维护工作，此举可以降低人员工资的成本。而对于大型系统，依然需要专业的维护人员进行管理和维护，因此人员工资的成本相对较高。此外便是保险费用，该项费用是为了应对系统可能发生的意外损坏而支付的费用，像自然灾害、设备故障等等。一般情况下，保险费用的高低与系统的规模、价值以及当地的风险状况有关。

(三) 能源收益

能源供应的成本节约和能源销售收益两个部分统称为风光互补新能源系统的能源收益。从成本节约方面入手而言，如果偏远地区的居民和企业使用风光互补新能源系统，就可以减少对于传统化石能源的购买，以此便节约了能源方面的支出^[4]。甚至在一些有条件的偏远地区，多余的电能还可以通过微型电网或者是储能设备进行储存，然后再出售给周边地区或接入国家电网，进而获得能源销售收益，即能源供应的能源销售收益。

(四) 社会效益

实践当中，风光互补新能源系统在偏远地区的应用不仅仅具有经济效益，还具有非常显著的社会效益，具体阐述如下。因为充足的电力可以保障居民的照明、取暖、制冷等基本生活需求，进而促进了家用电器的普及，也就提高居民的生活质量。同时稳定的能源供应还可以为当地的学校、医院等公共服务设施提供电力支持，直接地改善了当地的教育和医疗条件。不仅如此，许多偏远地区都拥有丰富的特色农产品和旅游资源，只是由于能源短缺，才导致相关产业的发展受到了限制。可充足的电力可以为农产品加工、旅游设施建设等提供能源方面的保障，使得当地产业得到升级和发展，以此能够增加当地的经济收入。

另外该系统的应用还有助于减少偏远地区对传统化石能源的

依赖，进而降低能源供应的风险。因为传统的化石能源供应受到国际市场价格波动、运输条件等因素的影响较大，而风光互补新能源系统利用的是当地的可再生能源，所以能源供应具有较强的自主性和稳定性，为当地的能源安全提供了保障。

三、案例分析——以威宁县迤那镇分布式光伏发电项目为例

威宁县迤那镇地处偏远，该地以往能源供应比较依赖于传统电网延伸与少量化石能源，此方式成本高且稳定性差。为了改善能源现状，在当地引入了分布式光伏发电项目，因而成为了风光互补新能源系统在偏远地区应用的典型案例。

（一）项目背景与目标

迤那镇拥有充足的太阳能资源，它年日照时数较长且太阳辐射的强度大，具备了发展光伏发电的天然优势。同时当地居民生活用电及小型产业用电需求的增长，传统的能源供已经难以满足，能源成本也居高不下，进而制约了当地经济发展。在此背景之下，分布式光伏发电项目旨在利用本地太阳能资源，实现能源的自给自足，在降低能源成本的同时可以提升能源供应稳定性，最终促进当地可持续发展。

（二）系统设计详情

结合当地的环境与市场情况，该项目最终选用了单面型540Wp单晶硅电池组件。此类组件的效率稳定，市场占有率比较高，证明能有效地满足项目发电需求。哪怕当地的气候多变，时有风沙天气，可单晶硅组件抗风沙、抗腐蚀能力强，能够保障其长期稳定的运行。而在光伏阵列运行方式上，考虑到了系统的可靠性及场址区实际条件，在项目当中全部采用了固定式的安装方式。虽然自动跟踪式发电量更高，但该装置的初始投资大、维护复杂。加之当地的地形复杂且交通不便，所以还是选择了初始投资低、维护简单的固定式安装。逆变器选型则采用了组串式逆变器，即根据屋顶面积的差异，选用了25kW、17kW、8kW三种规格，共计210台。原因是组串式逆变器适合分布式光伏电站，其中多路MPPT跟踪可以减少组件差异与遮挡影响，以此提高发

电效率。

（三）发电量计算结果

以当地多年的平均太阳辐射数据及光伏组件光电转换特性为根据，经计算明确本次项目的理论发电量可观。但由于考虑到了组件衰减、环境因素等方面的影响，最终项目首年的上网发电量为580.34万kW·h，利用小时数为1223.46h。而在运行期25年内，年平均发电量是541.25万kW·h，总发电量达到了13531.34万kW·h。与预期对比来看，发电量与预期基本相符，仅在部分月份因天气异常略有波动，可通过优化组件布局、加强设备维护，发电量的稳定性有了逐步地提升。

（四）项目优势与效益

该项目有效地提升了能源供应稳定性，并减少了对于外部能源的依赖。即以往旱季水电供应不足时用电非常紧张，可现有光伏发电用于补充电力，使居民与产业用电得到了保障。在此基础上，还降低了能源成本，直接地减少了居民电费方面的支出。同时因为光伏发电清洁无污染，所以减少了二氧化碳等污染物的排放，保护了当地的生态环境，进而促进了该地的可持续发展。

（五）案例总结与启示

威宁县迤那镇分布式光伏发电项目的成功应用，直接为偏远地区提供了借鉴价值。此项目因地制宜选择了系统方案，以此充分地发挥出了风光互补新能源系统优势。可提醒相关人员在实践当中要更加重视技术创新、资金筹集与政策支持，如此才可以确保项目顺利地实施与长期稳定地运行，最终才能为偏远地区能源转型与经济发展注入新的动力。

四、结语

虽然目前已有部分偏远地区开始尝试应用风光互补新能源系统，但对于该系统在不同偏远地区的具体适用性以及经济性的全面评估仍有待更为深入的研究。本文就对于风光互补新能源系统在偏远地区的适用性和经济性进行了系统地分析，并且结合威宁县迤那镇分布式光伏发电项目进行了论述，相信可以推动该系统在偏远地区进行广泛地应用。

参考文献

- [1] 李亮,胡伟,侯诗文,等.远程控制风光互补提水系统的应用[J].水电能源科学,2022,40(11):189-192.DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2022.20212492.
- [2] 卢化滨,付振常.风光互补发电系统在工程中应用的可行性分析[J].山西建筑,2011,37(10):126-127.
- [3] 周开平.风光互补新能源项目在偏远地区的应用实践[J].城市地理,2024,(18):220-222.
- [4] 杨卫华,宋旭飞,蒋康乐,等.风光互补联合制氢系统在河北省不同地区的适用性分析[J].节能,2018,37(08):64-68.DOI:10.3969/j.issn.1004-7948.2018.08.019.
- [5] 李睿.温室太阳能供暖系统构建与性能评价[D].西北农林科技大学,2024.DOI:10.27409/d.cnki.gxbnu.2024.003037.
- [6] 马旭.资源与需求耦合下分布式能源共生价值优化模型研究[D].华北电力大学(北京),2022.DOI:10.27140/d.cnki.gbbu.2022.001666.
- [7] 李争,张蕊,孙鹤旭,等.可再生能源多能互补制-储-运氢关键技术综述[J].电工技术学报,2021,36(03):446-462.DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.200332.
- [8] 杨洪朝.考虑多能互补技术特征的综合能源服务商投资及定价决策方法[D].长沙理工大学,2019.DOI:10.26985/d.cnki.gesjc.2019.000766.
- [9] 耿磊.太阳能-地源热泵供热空调系统的建筑适用性研究[D].河北工业大学,2016.
- [10] 邹雪梅.太阳能热水系统能效测评方法研究[D].山东建筑大学,2015.

基于风险预控的煤电锅炉本质安全设计与生产全流程管控实践

郭强，苏承伟

黄河上游水电开发有限责任公司，青海 西宁 810000

DOI:10.61369/EPTSM.2025050017

摘要：本文聚焦基于风险预控的煤电锅炉本质安全设计与生产全流程管控实践，阐述了设计阶段的风险预控总体策略，探讨了实现本质安全的具体设计要点。在生产全流程管控实践上，介绍了全流程风险预控管控体系的构建；针对运行、维护与检修、应急管理及事故后控制等阶段的风险预控措施进行了详细说明。此外，还分析了数字化孪生技术、大数据与人工智能、一体化安全管理信息平台等数字化与智能化技术在煤电锅炉风险预控中的应用，研究旨在为提升煤电锅炉的安全性能、保障其安全稳定运行提供理论与实践参考。

关键词：煤电锅炉；风险预控；本质安全设计；全流程管控

Practice of Intrinsic Safety Design and Full-Process Management and Control of Coal-Fired Power Plant Boilers Based on Risk Precontrol

Guo Qiang, Su Chengwei

Huanghe Hydropower Development Co., Ltd., Xining, Qinghai 810000

Abstract : This paper focuses on the practice of intrinsic safety design and full-process management and control of coal-fired power plant boilers based on risk precontrol. It elaborates on the overall strategy of risk precontrol in the design stage and explores the specific design points for achieving intrinsic safety. In terms of full-process management and control practices, the paper introduces the construction of a full-process risk precontrol management and control system. Detailed explanations are provided for risk precontrol measures in stages such as operation, maintenance and repair, emergency management, and post-accident control. Additionally, the paper analyzes the application of digitalization and intelligent technologies such as digital twin technology, big data and artificial intelligence, and integrated safety management information platforms in risk precontrol of coal-fired power plant boilers. The research aims to provide theoretical and practical references for improving the safety performance of coal-fired power plant boilers and ensuring their safe and stable operation.

Keywords : coal-fired power plant boilers; risk precontrol; intrinsic safety design; full-process management and control

引言

本质安全理念强调从源头消除或降低风险，通过设计优化、技术升级和管理强化，实现“即使发生人为失误或设备异常，也能有效避免事故发生”的目标。在此背景下，将风险预控思想融入煤电锅炉的本质安全设计，并延伸至生产全流程管控，成为提升锅炉安全水平的关键路径。本文正是基于这一现实需求，围绕基于风险预控的煤电锅炉本质安全设计与生产全流程管控展开研究。通过分析设计阶段的风险预控策略、系统与设备的本质安全优化要点，探讨生产全流程中运行、维护、应急等环节的风险管控实践，并结合数字化孪生、大数据等技术应用，旨在为构建煤电锅炉全生命周期安全保障体系提供理论参考与实践路径，助力煤电行业实现安全、高效、可持续发展。

一、基于风险预控的煤电锅炉本质安全设计

(一) 设计阶段的风险预控总体策略

作为能量转换的核心，锅炉性能直接影响发电效率和环境排放。随着环保要求的日益严格和经济运行需求的提升，火电厂锅

炉运行控制的节能和效率优化需求日益迫切^[1]。在煤电锅炉设计初始阶段，制定风险预控总体策略是保障其本质安全的基础，需构建全面系统的防控体系。要全面识别风险，收集同类锅炉运行数据、事故案例和技术资料，运用专业方法找出全生命周期可能存在的风险点。科学评估风险，依据发生可能性、后果严重程度等

指标量化或定性分析，确定风险等级^[2]。针对高等级风险制定专门防控措施，中低等级风险也纳入体系以防升级。明确预控目标，确保设计中各类风险被控制在合理程度，保障锅炉在正常和异常情况下的安全性。同时考虑到运行环境、技术条件等变化会导致风险改变，设计阶段需制定定期重新评估风险和调整预控措施的制度，以保证策略始终有效。

（二）系统与工艺的本质安全设计

煤电锅炉的系统与工艺设计是实现本质安全的关键环节，需要从源头上消除或降低风险^[3]。在系统设计方面，要注重系统的可靠性和冗余性。同时系统的各个组成部分之间要实现良好的协同工作，避免因某一部分的故障而引发整个系统的瘫痪。在工艺设计上，要优化燃烧工艺，提高燃料的燃烧效率，减少有害物质的排放。通过合理设计炉膛的结构、布置燃烧器的位置等，使燃料在炉膛内能够充分燃烧，降低因燃烧不充分而导致的结焦、积灰等问题的发生概率^[4]。此外，还要制定科学合理的工艺参数，并通过有效的控制手段确保这些参数在正常范围内波动，避免因参数异常而引发安全事故。

（三）关键设备与结构的本质安全设计

关键设备与结构的安全性能对煤电锅炉整体安全影响重大，设计中需高度重视^[5]。受压元件需按相关标准规范设计制造，选用高强度、高韧性、耐腐蚀的优质材料并严格质检，结构设计要避免应力集中，通过合理布局和尺寸设计使受力均匀，提升抗疲劳性能与使用寿命^[6]。燃烧器设计要保证燃料稳定燃烧和良好雾化，依据燃料特性确定类型和参数以实现充分混合、提高效率，同时具备良好调节性能，能随负荷变化调整燃料和空气供应量，确保燃烧稳定。锅炉支撑结构和框架需合理设计，保证足够强度和刚度以承受自重、介质压力及外部荷载，且布置均匀合理，避免因受力不均导致变形或损坏。

（四）仪表、控制与安全联锁系统的本质安全设计

仪表、控制与安全联锁系统是保障煤电锅炉安全运行的重要手段，其本质安全设计可及时处理异常、防事故发生扩大^[7]。仪表系统需保证测量数据准确可靠，选用高精度、高稳定性仪表，合理布置安装位置以精准测量关键部位参数，同时要具备良好抗干扰能力以防数据失真^[8]。控制系统要实现对锅炉运行的精准控制，采用先进算法和设备，实时控制调节燃烧、给水、蒸汽温度等参数，使锅炉处于最佳运行状态，且需有良好响应速度和稳定性，及时处理扰动以保证参数稳定。安全联锁系统作为最后一道安全防线，设计要确保异常时及时动作，包含多种联锁保护功能，当参数超安全值时，能自动报警并采取保护措施，保障锅炉安全。

（五）人机工程与应急设计

人机工程与应急设计旨在提高操作人员工作效率和安全性，以及事故时能迅速有效应急处理。人机工程设计需考虑操作人员生理和心理特点，操作界面简洁明了，仪表、按钮等布置符合人体工程学，便于观察操作；操作环境保持良好通风、照明和温度，减少疲劳与误操作；同时提供必要培训指导，让操作人员熟悉流程和安全注意事项^[9]。应急设计要制定完善应急预案和措施，预案包含报警程序、救援组织机构、处置方法等，且定期演练以

确保操作人员能迅速响应处理；锅炉设计中设置必要应急设备设施提供保障，还需考虑事故时的物料隔离和排放措施，避免事故扩大蔓延。

二、煤电锅炉生产全流程风险预控管控实践

（一）全流程风险预控管控体系构建

构建煤电锅炉生产全流程风险预控管控体系是安全生产的重要保障，需覆盖其从启动到停运的全生命周期，贯穿风险预控理念^[10]。具体要做到，明确各部门和人员职责，成立由企业高层领导任组长，生产、技术、安全、维护等部门负责人及专业技术人员组成的专门管理小组，确保各项工作有人负责；建立完善包括风险识别与评估、管控措施执行、监督检查、考核奖惩等在内的管理制度，以规范流程，保障工作有序开展；搭建信息共享平台，利用先进技术建立全流程风险信息管理系统，实现信息实时共享，提高效率与准确性；加强企业文化建设，通过培训和宣传教育培养员工风险预控意识，使其掌握相关方法技能，形成“人人讲安全、事事讲风险”的良好氛围。

（二）运行阶段的风险预控

运行阶段是煤电锅炉生产中风险集中的阶段，做好此阶段风险预控至关重要。需加强运行参数监控，实时监测蒸汽压力、温度、水位等关键参数，确保在正常范围波动，发现异常及时调整以防事故。要做好设备巡检，定期检查受压元件、燃烧器等设备的运行状态及有无异常，发现问题及时记录并安排维修，同时做好巡检记录，为后续设备维护和风险评估提供依据。此外要严格执行操作规程，操作人员经专业培训后，需熟悉规程并严格按其操作，进行启炉、停炉等重要操作时遵守步骤，避免因操作不当引发安全事故。

（三）维护与检修阶段的风险预控

维护与检修阶段对保障煤电锅炉设备性能和安全运行至关重要，风险预控工作不可忽视。维护阶段需制定科学的维护计划，依据设备运行状况、使用年限及制造商建议，明确维护内容、周期和方法，包括清洁、润滑、紧固、检查仪表精度等，同时做好记录，及时处理潜在问题。检修阶段要严格遵守规程和安全规定，检修前制定详细方案，明确范围、步骤和安全措施；进入受限空间检修的人员需经严格安全培训交底，配备防护用品；检修中按方案操作，避免违章；检修后全面检查试验，确保设备性能达标方可投运。此外，要加强人员管理，维护与检修人员需具备相应专业技能和资质，熟悉设备情况，定期接受培训考核以提升业务水平和安全意识。

（四）应急管理与事故后风险控制

应急管理与事故后风险控制是煤电锅炉生产全流程风险预控管控的重要部分，能在事故发生时减少人员伤亡和财产损失，防止事故再发。应急管理方面，要制定完善应急预案，依据可能发生的事故类型明确应急处置措施、救援组织机构、物资储备等；定期组织演练，让员工熟悉流程方法，提高应急响应能力；建立应急救援队伍，配备必要设备物资，确保能迅速开展救援。事故

后风险控制方面，要及时调查分析事故，组织专业人员查明直接和间接原因，确定责任方；根据调查结果制定整改措施，消除隐患防类似事故；评估损失，做好善后，安抚受害者及家属。另外要建立事故信息反馈机制，及时将调查结果、整改措施等反馈给相关方，使其吸取教训；将事故信息纳入风险评估体系，重新评估相关风险并调整管控措施，不断完善风险预控管控体系。

三、数字化与智能化技术在风险预控中的应用

(一) 数字化孪生技术

数字化孪生技术是煤电锅炉风险预控的新兴高效手段，通过构建与物理锅炉完全映射的数字模型提供全新视角和方法。该模型借助遍布关键部位的传感器，实时同步物理锅炉的温度、压力等参数和运行状态，精准模拟运行情况，方便操作人员和管理人员随时了解细微变化，及时发现潜在风险点。基于此模型可进行多种模拟仿真实验，提前制定应对措施以避免实际运行风险；在维护与检修阶段，能模拟检修过程，发现方案问题、优化流程，降低检修风险。此外，该技术可为员工培训提供逼真模拟环境，新员工可在数字模型上练习操作，熟悉运行流程和应急处理方法，提高实际操作安全性。

(二) 大数据与人工智能

大数据与人工智能技术在煤电锅炉风险预控中作用日益重要，能从海量数据中挖掘潜在风险信息，实现智能化预警和控制。大数据技术可收集、存储和分析生产全流程的大量数据，包括运行参数、设备状态等，通过深入分析发现隐藏关联和规律，识别风险因素。人工智能技术利用大数据分析结果构建智能风险预警模型，依据实时运行数据自动识别异常并预警，相比人工监控更准确及时，能在风险萌芽阶段警报，争取处理时间。此外，人工智能可用于锅炉控制优化，通过智能算法实时调整运行参数，使锅炉处于最佳状态，降低参数异常引发风险的可能；还能

辅助制定维护计划，根据设备运行状态和历史数据预测剩余寿命，提前安排维护，避免设备故障导致安全事故。

(三) 一体化安全管理信息平台

一体化安全管理信息平台是整合煤电锅炉风险预控相关信息和功能的综合性平台，能实现信息集中管理与高效利用，提升风险预控整体效能。平台可整合设计资料、运行数据等各类信息形成完整数据库，通过统一标准和接口实现不同系统设备的信息共享交互，避免信息孤岛，方便管理人员查询信息以支持决策。在风险预控上，平台能实时展示运行状态和风险预警信息，实现风险评估自动化标准化并自动生成报告，提高效率和准确性；还可管理跟踪维护检修工作，制定计划、安排任务、记录信息，确保按流程进行，对问题隐患及时下达整改通知并跟踪消除。此外，平台为应急管理提供支持，事故时能快速调取应急预案等信息辅助决策，记录处理全过程，为事后分析总结、完善应急体系提供依据。

四、结束语

本文从本质安全设计与生产全流程管控两个维度，系统阐述了基于风险预控的煤电锅炉安全管理体系。实践表明，这种“设计－管控－技术”三位一体的风险预控模式，既能从根本上降低锅炉固有风险，又能通过全流程闭环管理及时化解运行中的动态风险，为煤电锅炉的安全高效运行提供了全方位保障。随着新能源与煤电联营模式的推进、环保标准的进一步收紧，煤电锅炉的风险因素将更趋多元化。因此需持续深化本质安全设计理念，推动数字化技术与安全管理的深度融合，完善风险预控的标准化与智能化体系，同时加强人员安全素养培训，形成“技术防控+管理优化+人员赋能”的协同机制。唯有坚持“预防为主、源头管控、全程防控”的原则，才能有效应对行业发展的新挑战，为煤电行业的绿色低碳转型与安全可持续发展奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 阎小瑞, 解小军, 王昊泳. 基于模糊关联规则的火电厂锅炉设备故障智能预警研究 [J]. 自动化应用, 2025, 66(1):155–158. DOI:10.19769/j.zdhy.2025.01.044.
- [2] 刘学莹. 350MW 超临界锅炉末级过热器壁温计算及氧化膜热应力分析 [D]. 华北电力大学, 华北电力大学(北京), 2024.
- [3] 白哲, 陈晓龙, 杨元成. 超超临界电站锅炉水冷壁管横向开裂原因分析 [J]. 电力安全技术, 2024, 26(4):60–63. DOI:10.3969/j.issn.1008-6226.2024.04.019.
- [4] 胡仙楠, 邓博宇, 刘欢鹏, 等. 循环流化床锅炉负荷快速调节技术现状及发展趋势 [J]. 洁净煤技术, 2023, 29(6):11–23. DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.SD23060101.
- [5] 刘繁旭, 施龙平, 杨金泽. 燃煤锅炉水冷壁管的沉积物氧化腐蚀特征与力学特性分析 [J]. 工业加热, 2024, 53(4):45–48, 54. DOI:10.3969/j.issn.1002-1639.2024.04.011.
- [6] 梁双荣, 徐艳, 段丽, 等. 煤电机组掺烧生物质需关注问题及分析 [J]. 节能, 2025, 44(1):138–140. DOI:10.3969/j.issn.1004-7948.2025.01.037.
- [7] 刘军, 郑志行, 吴爱军, 等. 600 MW 超临界锅炉水冷壁高温腐蚀综合治理应用研究 [J]. 锅炉技术, 2022, 53(6):65–71. DOI:10.3969/j.issn.1672-4763.2022.06.012.
- [8] 张朋. 基于 LightGBM 模型的电站锅炉运行目标值优化 [D]. 华北电力大学, 华北电力大学(保定), 2023.
- [9] 周西伟. 基于数据挖掘的锅炉岛运行能效诊断及优化研究 [D]. 广东: 华南理工大学, 2023.
- [10] 王中玉. 锅炉长周期运行寿命管理模式应用分析 [J]. 电气技术与经济, 2024(2):287–290. DOI:10.3969/j.issn.1673-8845.2024.02.088.