

燃气轮机组发电厂热工过程自动化控制的关键技术研究

龚家华

广东 广州 516000

DOI:10.61369/ME.2025090003

摘 要： 燃气轮机组发电厂热工过程自动化控制系统，以基于燃气 – 蒸汽联合循环的 DCS 架构为核心，涵盖分布式 I/O 模块配置、控制器冗余等。其控制层级分三级，采用模型预测、多变量协调等多种控制技术。同时通过多种算法实现故障诊断、安全防护等功能，未来数字孪生与边缘计算融合等将带来新突破。

关 键 词： 自动化控制系统；控制技术；安全防护

Research on Key Technologies for Automation Control of Thermal Processes in Gas Turbine Power Plants

Gong Jiahua

Guangzhou, Guangdong 516000

Abstract： The thermal process automation control system of gas turbine power plants is based on the DCS architecture of gas steam combined cycle, covering distributed I/O module configuration, controller redundancy, etc. Its control hierarchy is divided into three levels, using various control techniques such as model prediction and multivariate coordination. At the same time, fault diagnosis, security protection and other functions are realized through multiple algorithms, and the integration of digital twins and edge computing will bring new breakthroughs in the future.

Keywords： automation control system; control technology; safety protection

引言

《“十四五”现代能源体系规划》（2022 年颁布）明确提出要推动能源产业数字化智能化升级，这为燃气轮机组发电厂热工过程自动化控制的发展指明方向。燃气轮机组发电厂热工过程自动化控制系统以基于燃气 – 蒸汽联合循环的 DCS 架构为核心，在控制层级划分、模型预测控制、多变量协调控制等多方面进行技术创新与应用，同时在故障诊断、容错控制、信息安全防护等领域也取得显著成果，这些技术发展不仅提升了发电厂的运行效率与安全性，也顺应了国家能源产业升级的政策要求。

一、热工过程自动化控制系统架构

（一）系统整体架构设计

燃气轮机组发电厂热工过程自动化控制系统整体架构以基于燃气 – 蒸汽联合循环的 DCS 架构拓扑结构为核心^[1]。分布式 I/O 模块配置依据现场设备分布与数据采集需求，确保能高效、精准采集各类热工参数。控制器冗余机制设计采用主备模式，当主控制器出现故障时，备用控制器无缝接管，保障系统稳定运行，这对燃气轮机组这种关键生产设备尤为重要。网络通信协议选型则综合考虑数据传输实时性、可靠性以及兼容性，如选择能满足高速数据传输的协议。在热力系统中，燃烧控制、余热回收、辅机连锁等子系统通过 DCS 架构进行数据交互。燃烧控制子系统依据热负荷需求调整燃料量与空气量，其数据传输至余热回收子系统，用于优化余热利用；辅机连锁子系统根据各子系统状态进行

设备联锁控制，保证整个热工过程安全、高效运行。

（二）控制层级划分

燃气轮机组发电厂热工过程自动化控制系统的控制层级划分为厂级、单元级与设备级，形成三级递阶控制架构。厂级主要负责负荷分配，需综合考虑电网需求、全厂机组运行状况等诸多因素，对整体发电负荷进行合理分配，以实现全厂发电效益的最大化^[2]。单元级实施协调控制，基于厂级分配的负荷指令，协调燃气轮机、发电机等各设备间的运行，确保机组能稳定、高效地输出符合要求的电能。设备级则侧重于闭环调节，针对具体设备如燃烧室、汽轮机等，通过闭环控制策略，对其关键运行参数如燃烧室压力、汽轮机转速等进行精准调节，以保障设备自身的稳定运行，最终达成热工过程自动化控制的目标。

二、关键控制技术分析与应用

（一）模型预测控制技术

模型预测控制在燃气轮机组发电厂热工过程自动化控制中发挥着重要作用。通过构建燃气轮机非线性动态模型，能够精准描述燃气轮机在不同工况下的运行特性^[9]。基于此，设计基于动态矩阵控制（DMC）的燃烧温度多目标优化算法，可有效协调多个控制目标，实现对燃烧温度的精确控制。在实际运行中，燃气轮机组常处于变工况状态，而模型预测控制凭借其对未来动态的预测能力，可提前调整控制策略。结合现场运行数据验证发现，该技术在变工况下对 NO_x 排放、热效率等参数具有良好的综合调节效果，既能降低污染物排放，又能提升机组的热效率，从而提高燃气轮机组发电厂的整体运行性能。

（二）多变量协调控制技术

在燃气轮机组发电厂热工过程自动化控制中，多变量协调控制技术至关重要。燃料流量与空气阀位构成强耦合系统，需有效解耦控制。基于主元分析（PCA）的降维控制策略能在复杂多变量环境下，降低变量维度，简化控制过程，使系统控制更具可操作性。空燃比自适应调节算法则考虑到系统运行中的各种扰动因素，通过实时监测和调整，使空燃比保持在最优状态，从而提高燃烧效率，减少能源浪费和污染物排放。该算法具备强大的抗扰动能力，确保燃气轮机组在不同工况下都能稳定运行^[10]。多变量协调控制技术的综合运用，保障了燃气轮机组发电厂热工过程的高效、稳定与安全。

三、智能优化算法集成

（一）智能算法融合机制

1. 强化学习与 PID 复合控制

在燃气轮机组发电厂热工过程自动化控制中，强化学习与 PID 复合控制起着关键作用。构建以 Q-learning 算法为核心的状态-动作奖惩机制，能有效实现对传统 PID 控制参数的在线优化^[5]。传统 PID 控制在应对复杂多变的热工过程时存在局限性，而强化学习中的 Q-learning 算法可通过不断试错学习，根据燃气轮机压缩机的运行状态，动态调整 PID 控制参数。如此一来，便可达成压缩机喘振边界动态保护与效率最优间的平衡控制，既防止压缩机进入喘振区域，保障设备安全稳定运行，又能提高能源利用效率，提升燃气轮机组发电厂整体的自动化控制水平。

2. 遗传算法参数整定

在燃气轮机组发电厂热工过程自动化控制中，针对常规工程整定法在大延迟系统应用存在局限性的问题，采用改进型遗传算法进行多目标寻优。首先建立燃烧稳定性评价函数，该函数能够准确衡量燃烧过程的稳定性。在此基础上对遗传算法的参数进行整定^[6]。通过合理调整遗传算法中的交叉概率、变异概率等关键参数，使其在大延迟系统的多目标寻优过程中，能够更高效地搜索到全局最优解，避免陷入局部最优。改进后的遗传算法在处理复杂的热工过程自动化控制时，可提升燃烧稳定性，增强系统的

适应性和控制精度，为燃气轮机组发电厂热工过程自动化控制提供更可靠、更有效的解决方案。

（二）深度学习应用

1. 时序数据特征提取

在燃气轮机组发电厂热工过程自动化控制中，针对时序数据特征提取，应用 LSTM 神经网络对燃气轮机运行历史数据进行处理。燃气轮机的运行数据具有典型的时序特性，其包含了设备在不同时刻的各类状态信息。LSTM 神经网络因其独特的门控机制，能够有效处理长序列数据，挖掘数据中的时间依赖关系，对于捕捉燃气轮机运行过程中复杂的动态变化特征具有显著优势。通过 LSTM 神经网络对燃气轮机运行历史数据进行深入分析，精准提取其中与燃烧室结焦状态相关的关键时序特征，为后续建立燃烧室结焦状态预测模型奠定基础，进而实现提前 15 分钟预警率达 98.5% 的良好效果^[7]。

2. 数字孪生建模

在燃气轮机组发电厂热工过程自动化控制中，数字孪生建模至关重要。通过融合机理模型与运行数据构建燃气轮机全工况数字镜像，能精准映射实际物理系统。机理模型基于燃气轮机的物理原理与运行机制，为数字镜像提供理论基础；运行数据则来源于机组实际运行过程，反映真实工况。二者结合可实现燃烧振荡模态的实时仿真，及时捕捉燃烧过程中的不稳定现象，以便采取相应措施。此外，借助数字镜像能对先进控制策略进行虚拟验证，在实际应用前评估控制策略的可行性与有效性，避免在真实机组上试验带来的风险与成本，提升燃气轮机组运行的安全性与稳定性^[8]。

四、实时监控与安全防护体系

（一）状态监测系统

1. 振动信号分析

在燃气轮机组发电厂热工过程自动化控制中，振动信号分析对保障机组安全稳定运行至关重要。采用集成小波包分解与 Hilbert-Huang 变换的转子振动监测方法，能有效提取振动信号特征。小波包分解可将信号在不同频带进行细致分解，使复杂振动信号的特征更易显露；Hilbert-Huang 变换则可进一步对分解后的信号进行分析，得到具有物理意义的本征模态函数等信息，以此准确把握转子振动状态。同时，通过开发叶片裂纹早期诊断算法，能在振动信号中捕捉到叶片裂纹产生的细微变化。经对照实验数据展示，该算法使叶片裂纹诊断精度提升了 23%^[9]，为及时发现并处理潜在故障隐患提供有力技术支持，确保燃气轮机组稳定高效运行。

2. 热力参数融合诊断

热力参数融合诊断旨在通过对燃气轮机组发电厂多个热力参数的综合分析，更精准地判断机组运行状态。借助 D-S 证据理论构建温度场异常识别模型是其中关键环节。该模型有效整合多个温度传感器数据，克服单个传感器可能出现的误报问题，避免保护误动情况发生。在实际应用中，某电厂采用此模型后，保护误

功率显著下降67%，有力保障了机组运行的稳定性和可靠性^[10]。通过热力参数融合诊断，不仅能及时察觉温度场异常，还能结合其他热力参数，如压力、流量等，从多个维度评估机组热工过程，为自动化控制提供更可靠依据，提前预警潜在故障，助力燃气轮机组发电厂实现高效、安全运行。

（二）故障诊断技术

1. 知识图谱构建

在燃气轮机组发电厂热工过程自动化控制中，知识图谱构建是故障诊断技术的重要环节。通过建立包含3000+故障案例的多维度知识库，全面涵盖燃气轮机组各类故障信息，如故障现象、发生环境、解决办法等。以这些丰富数据为基础，借助图神经网络相关技术，将不同故障及关联因素以节点和边的形式构建知识图谱。各节点代表故障、设备部件、运行参数等实体，边则反映它们之间的逻辑关系。如此一来，能清晰呈现故障间复杂联系，为基于图神经网络的故障推理引擎提供结构化知识支撑，实现像压气机失速等典型故障的精准溯源诊断，有力保障燃气轮机组安全稳定运行。

2. 容错控制策略

在燃气轮机组发电厂热工过程自动化控制中，容错控制策略是确保系统可靠运行的关键。一方面，基于开发的双冗余控制器动态切换机制，该机制能在主控制器故障时50ms内实现无缝切换，保障机组甩负荷工况下控制连续性。此策略通过实时监测控制器状态，一旦检测到主控制器故障，备用控制器迅速响应，接替控制任务，维持系统稳定运行。另一方面，还可结合智能算法对系统运行参数进行分析，提前预测可能出现的故障隐患，及时调整控制策略，预防故障发生，进一步提高系统容错能力，保障燃气轮机组发电厂热工过程自动化控制的稳定与安全，降低因故障导致的停机风险，提升整体发电效率。

（三）信息安全防护

1. 工控协议加固

在燃气轮机组发电厂热工过程自动化控制中，工控协议加固至关重要。传统Modbus通讯存在一定安全隐患，为此采用OPC

UA协议替代。OPC UA协议具备更高的安全性与可靠性，能更好满足发电厂复杂运行环境需求。同时，结合AES-256加密算法，对控制指令进行加密处理，确保数据在传输过程中不被窃取或篡改。经渗透测试验证，这种防护措施有效性高达99.2%，有力保障了燃气轮机组热工过程自动化控制的信息安全，降低因协议漏洞导致的安全风险，为发电厂稳定运行筑牢安全防线。

2. 边界防护系统

在燃气轮机组发电厂热工过程自动化控制的实时监控与安全防护体系中，边界防护系统至关重要。设计工业防火墙与入侵检测联动机制是关键举措。借助流量特征分析，能够精准识别异常流量模式。例如，针对恶意代码传播、数据窃取等行为产生的特殊流量特征进行分析，及时察觉潜在威胁。同时，白名单策略可确保只有经过授权的设备、服务及数据交互才被允许通过边界。以白名单内的合法通信为标准，对其他未经授权访问进行拦截。通过这两种方式结合，可有效抵御高级持续性威胁（APT攻击）。经实证数据分析表明，该机制能显著提升燃气轮机组发电厂热工过程自动化控制网络边界的安全性，降低外部攻击渗透风险，保障系统稳定运行。

五、总结

燃气轮机组发电厂热工过程自动化控制技术在多方面取得显著创新成果。系统架构设计优化，实现更高效的信息交互与协同运作；智能算法集成，提升控制精度与自适应能力；安全防护体系不断完善，保障系统稳定可靠运行。展望未来，数字孪生与边缘计算技术的融合将为自动化控制带来新的突破，通过构建虚拟模型实时模拟物理实体，结合边缘计算在本地快速处理数据，提升控制实时性。基于5G的远程运维可实现更高效的设备管理与故障诊断。新一代控制系统有望在智慧电厂建设中开辟全新实践路径，以高度自动化、智能化的控制方式，推动电厂向更高效、安全、绿色方向发展，助力能源行业转型升级。

参考文献

- [1] 牟廷杰. 基于分散模糊推理的热工过程预测控制 [D]. 重庆大学, 2022.
- [2] 王常辉. 工业自动化控制系统运动控制内核的设计与实现 [D]. 中国科学院大学, 2021.
- [3] 汪功庆. 深池式供热堆失流事故关键热工水力过程研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2023.
- [4] 任振华. 大惯性、非线性热工过程的模型辨识与优化控制 [D]. 东南大学, 2021.
- [5] 霍琳子. 铁包自动化热检系统关键技术研究 [D]. 冶金自动化研究设计院, 2022.
- [6] 欧阳刚. 火电厂热工自动化控制新技术发展与建议探讨 [J]. 科技风, 2017, (10): 211.
- [7] 邹毅, 肖丽, 廖源. 火力发电厂自动化控制系统设计研究 [J]. 信息记录材料, 2023, 24(11): 63-65.
- [8] 许光华. 热工仪表在发电厂中的自动化控制及其应用研究 [J]. 中国设备工程, 2022, (04): 154-155.
- [9] 安曾华. 堆取料机控制系统关键技术研究 [J]. 中国科技期刊数据库 工业 A, 2022(10): 181-183.
- [10] 刘璇. 热工仪表自动化控制研究 [J]. 中国设备工程, 2023, (03): 140-142.