

基于 MPC 的高低旁路与中调门 协同供汽控制策略研究

张 杰¹, 张卫军¹, 刘 园¹, 陶 庆²

(1. 国家能源费县发电有限公司, 山东 临沂 273425; 2. 国能节能技术有限公司, 北京 100143)

摘要:随着工业供汽与灵活性发电需求的日益增长,燃煤机组控制系统面临新的挑战。传统供汽方式在变负荷工况下存在供汽参数波动大、机组运行经济性差及安全性风险等问题。针对高低旁路供汽系统,提出了一种多变量预测控制优化策略。以工业供汽压力稳定为核心目标,打破传统单一调节的局限,统筹协调高压旁路阀、中压调门等多项关键执行机构,实现多执行机构的协同联动控制。通过建立系统的简化动态数学模型,并设计多变量预测控制器,在 Matlab/Simulink 平台进行了仿真验证。结果表明,该优化控制策略效果突出,在机组负荷大幅扰动的场景下,高压旁路阀与中压调门能够在运行约束范围内快速响应、协同动作,有效抑制参数波动,热再压力可快速稳定在 3.5 MPa 的目标值,供汽压力稳定性得到显著提升。

关键词:多变量预测控制;高低旁路;中压调门;协同控制;抽汽;热再压力

中图分类号:TP271

文章编号:1000-0682(2026)04-0089-04

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2026.04.015

Research on the control strategy of high – low bypass and mid – tone gate coordinated steam supply system based on MPC

ZHANG Jie¹, ZHANG Weijun¹, LIU Yuan¹, TAO Qing²

(1. Guoneng Feixian Power Generation Co., Ltd., Shandong Linyi 273425, China;

2. CHN ENERGY Energy Conservation Technology Co., Ltd., Beijing 100143, China)

Abstract: With the increasing demand for industrial steam supply and flexible power generation, coal – fired unit control systems are facing new challenges. Traditional steam supply methods exhibit large fluctuations in steam supply parameters, poor operational economy, and safety risks under variable load conditions. This paper proposes a multivariable predictive control optimization strategy for high – low bypass steam supply systems. Centered on stabilizing industrial steam supply pressure, this strategy breaks the limitations of traditional single regulation, coordinating multiple key actuators such as high – pressure bypass valves and medium – pressure dampers to achieve collaborative control among multiple actuators. By establishing a simplified dynamic mathematical model of the system and designing a multivariable predictive controller, simulations were conducted on the Matlab/Simulink platform. The results indicate that the optimization control strategy is highly effective. Under scenarios of significant unit load disturbances, the high – pressure bypass valves and medium – pressure dampers can respond quickly and act collaboratively within operational constraints, effectively suppressing parameter fluctuations. The reheating pressure can rapidly stabilize at the target value of 3.5 MPa, significantly improving the stability of the steam supply pressure.

Keywords: multivariable predictive control; high – low bypass; medium – pressure governor; coordinated control; steam extraction; thermal re – pressurization

0 引言

收稿日期:2026-03-30

第一作者:张杰(1967—),男,山东人,学士,高级工程师,从事发电厂运行生产管理、节能降耗工作。

“双碳”目标驱动下,燃煤火电机组正向基础保障性和系统调节性电源转型。高低旁路系统与中调

门联合调节,是实现对外供汽、提升机组低负荷运行能力,进而提高综合能源利用效率与灵活性的关键技术^[1-2],其高精度、快响应、高可靠控制已成为热力系统自动化领域的研究热点与难点。该协同供汽系统具有多变量、强耦合、大滞后、非线性特性。中调门与高低旁路阀位调节相互影响,蒸汽参数耦合性强,单一回路调节易引发参数波动连锁反应;加之蒸汽管网延时、用户负荷扰动等因素,传统 PID 及单变量反馈控制难以实现协同优化,易出现参数超调大、响应慢、稳态精度不足等问题^[3-5]。当前相关研究多聚焦单一部件或两两协同控制,存在明显局限:或仅优化中调门参调逻辑,未发挥高低旁路快速调节优势^[6-7];或侧重高低旁路联合调节,忽视与中调门的协同匹配,导致工况不协调、能耗增加^[8-9];且现有策略多为传统反馈模式,缺乏工况预测能力^[10-11],难以满足高精度供汽需求。多变量预测控制(MPC)可有效处理多变量耦合、大滞后问题,能通过预测模型实现多控制变量协同优化,将 MPC 应用在供热二次网中^[12],实现了温度均衡和水泵耗电量下降。在反应釜的温度控制过程中使用 MPC 控制,能够具备极强的干扰能力^[13]。将 MPC 控制应用在超超临界火电机组协调控制系统中,在机组大

范围变负荷运行过程中响应更加及时且稳态误差很小^[14]。在其他复杂工业过程中也得到了初步应用^[15-16]。

为此,该文提出基于多变量预测的高低旁路与中调门协同供汽系统的控制策略,解析系统动态特性并构建预测模型,设计预测控制器实现阀位协同分配与超前调节,通过仿真与现场试验验证有效性,为相关系统控制优化提供理论与工程参考。

1 高低旁与中调门协同供汽改造方案

高低旁供汽是将部分主蒸汽利用机组的高压旁路通过降温减压后进入再热冷段管道,该部分蒸汽随高排原有排汽一同经锅炉再热器后至再热热段管道,随后从低压旁路管道抽汽,一般情况下,优先采用关小中调门来提高抽汽的压力,当热再抽汽无法满足供汽要求时开启高旁,增大热再抽汽能力。本次提出的多变量预测的高低旁路与中调门协同供汽控制系统,为保障机组的安全运行,以中调门开度及速率为约束条件,以抽汽压力为被控量,同时调节中调门和高旁门开度来满足供汽需求。图 1 为高低旁与中调门协同供汽系统图。

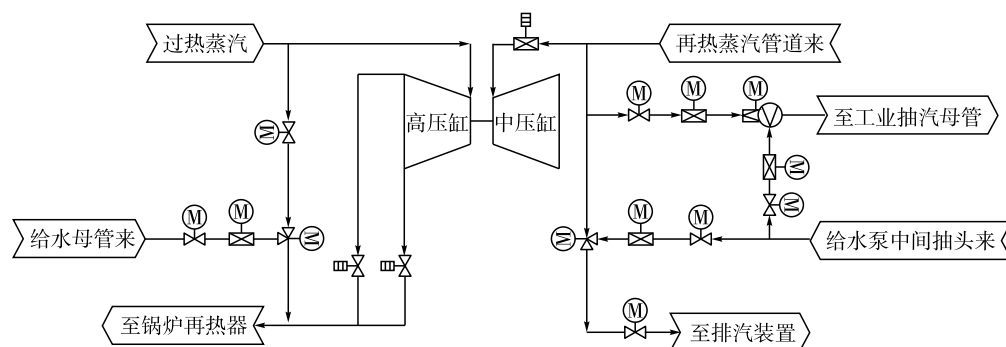


图 1 高低旁与中调门协同供汽系统图

该协同供汽系统为典型的多变量复杂系统,其动态特性与耦合机制主要体现在 3 个方面。

(1)多变量耦合特性:中调门开度、高旁阀位、低旁阀位为 3 个核心控制变量,供汽压力、温度为主要被控变量。高旁阀开度增大时,流入再热系统的蒸汽量增加,导致供汽压力上升;中调门开度增大时,流出再热系统的蒸汽量增加,导致供汽压力下降;低旁阀开度增大时,泄放的蒸汽量增加,供汽压力随之下降,三者调节动作相互影响,形成强耦合关系。

(2)大滞后特性:蒸汽在管网中的传输存在一定延时,且减温减压、热量散失等过程也会导致被控

参数的响应滞后,滞后时间通常为 2~5 s,传统反馈控制难以快速响应参数变化。

(3)非线性特性:高低旁路阀与中调门均为非线性节流元件,其流量-开度特性呈非线性关系,小开度段流量增益大,大开度段流量饱和,且受蒸汽压力、温度影响显著,进一步增加了系统控制难度。

目前工业供汽系统多采用传统 PID 单回路控制,控制架构单一,未实现高低旁路与中调门的三者协同,调节潜力未充分释放;采用纯反馈控制模式,对负荷扰动、管网延时的应对能力弱,参数超调量大、响应速度慢;无法适配系统非线性特性,全工况调节精度难以保证。

2 控制策略设计

2.1 总体控制架构

模型预测控制 (model predictive control, MPC) 是一种先进的计算机控制方式,它结合了过程模型、在线优化和滚动时间窗口的概念,通过预测系统未来的行为并据此确定最优的控制策略^[17-19]。不同于传统经典的控制方式,MPC 不再仅仅依赖于当前的系统状态或简单的误差反馈来进行控制,而是利用已知的系统信息和未来的信息建立预测模型,预测未来输出,并在反馈校正后与设定值进行比较,对滚动时域下的目标函数进行优化,得到当前时刻的控制输入,从而实现对系统的优化控制。MPC 控制结构如图 2 所示。图 2 中, y_r 为输出设定值, u 为计算出的控制量, y 为系统真实值, y_m 为预测值, y_p 为反馈校正后的预测值。

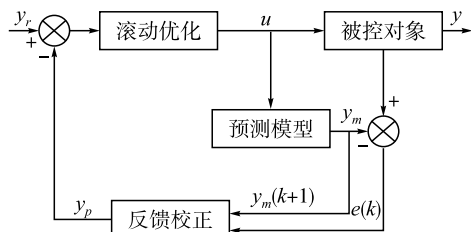


图 2 MPC 控制结构图

为了更直观地展示 MPC 的控制原理和各组成部分的协作过程,MPC 控制示意图如图 3 所示。

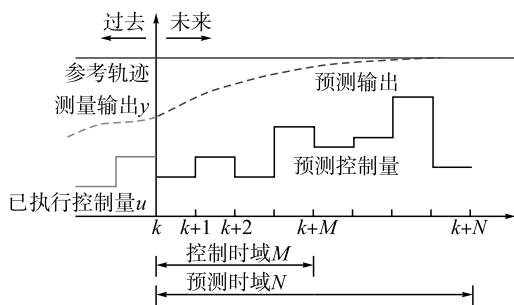


图 3 MPC 控制示意图

图 3 中,在 k 时刻,即预测时域 N 范围内,预测控制系统生成了预测输出 y_m 。为了减小 y_m 与参考轨迹的偏差,需要在控制时域 M 范围内寻找最佳控制序列,但是由于模型不匹配等因素的存在,不能将控制序列全部应用于系统,而是选择控制序列的第一个元素加入到控制系统中。当系统进入到下一个采样时刻 $k+1$ 时,获取新的输出值,并将其作为初始条件,重复上述过程。

2.2 多变量预测控制器设计

由于模型预测控制器对时滞系统的控制能够表

现出很好的控制性能,并且在工业过程控制领域也广泛的使用^[20-22]。该文利用 Matlab Simulink 软件自带的模型预测控制器工具箱进行 MPC 控制器的设计,实现高旁阀与中调门开度的协同分配,其设计主要包括预测时域、控制时域、目标函数与约束条件 4 个部分,重点考虑负荷扰动的影响。采用模型预测控制算法实现对供汽系统供汽压力的控制。

在模型预测控制算法中,模型预测控制器的参数选择关系到控制器的性能^[10-11]。在预测时域 N_p 的调节过程中,适当减小预测时域 N_p 能够提高控制系统的响应速度。适当增加预测时域 N_p ,能够提高控制系统的稳定性。控制时域 N_c 应小于等于预测时域 N_p 。经验表明,增加控制时域 N_c 能够增加系统的响应速度,但是如果过大会引起系统震荡。本次预测时域 N_p 用于设定热再压力预测的时间长度,控制时域 N_c 用于设定阀门调节指令的优化长度。结合系统滞后特性与负荷扰动应对需求,设定 $N_p = 50$, $N_c = 8$,兼顾预测精度与计算实时性,确保能够及时响应负荷变化。

用的供汽系统压力模型预测模型为一个带有时滞环节的供汽系统数学模型。模型根据机理进行了简化,能够大致模拟实际的状态。利用模型预测控制工具箱,导入已经建立好的供汽系统传递函数模型。以热再压力与设定值的偏差最小为优化目标,同时考虑负荷扰动的影响。

结合运行要求,设定控制变量约束范围:中调门开度 20% ~ 100%,高旁阀位 0 ~ 100%;调节速率约束:单个阀门每步调节幅度不超过 1%,避免阀门频繁动作,延长设备使用寿命。

3 仿真实验与分析

为验证所设计的基于模型预测控制 (MPC) 的热再抽汽压力控制系统在负荷扰动下的控制性能,采用 MATLAB R2025a/MPC Toolbox 搭建仿真平台,以热再抽汽压力稳定控制为研究对象,设置负荷扰动的仿真场景,从稳态特性、动态响应和调节逻辑 3 个维度验证控制系统的有效性,并量化分析核心控制指标。热再抽汽压力设定值为 3.5 MPa,20 s 后阶跃增加;执行机构初始开度为高旁阀 50%、中联门 50%,中联门开度约束 20% ~ 100%,采样时间 $T_s = 1$ s,仿真时长 0 ~ 300 s。热再压力变化情况如图 4 所示。

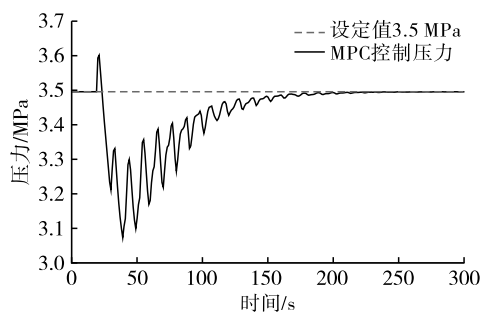


图4 热再压力变化情况

由图4可知,前20s系统处于负荷稳态工况,仿真结果显示:所提MPC控制策略下,供汽压力稳定在3.5MPa,稳态偏差 $\leq 1 \times 10^{-8}$ MPa。

20s负荷阶跃变化后,热再抽汽压力快速上升,最高峰值出现在23s,峰值为3.6105MPa;最低峰值出现在39s,峰值为3.07MPa;250s时稳态偏差 $\leq 8.5 \times 10^{-5}$ MPa,300s时偏差为0,完全稳定在3.5MPa。

负荷增加导致蒸汽流量上升,压力短暂超调。250s内精准回归设定值,验证了MPC控制器对负荷扰动的快速抑制能力和稳态精准性。

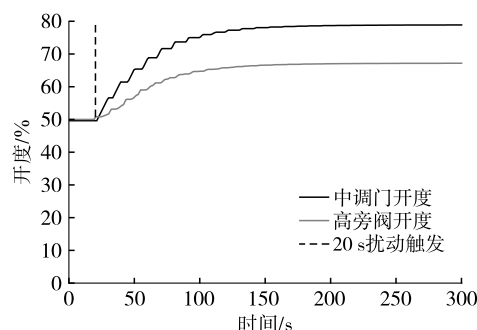


图5 高旁阀和中调门开度变化

由图5可知,在前20s稳定工况下,高旁阀开度保持50%、中调门开度保持50%,执行机构无调节动作及波动,无“零漂”“抖振”现象,符合工业控制系统“稳态无扰动”的基本要求。20s负荷扰动后,高旁阀从初始50%逐步开大,最终稳定在67.16%,总调节幅度17.16%。中调门从初始50%逐步开大,最终稳定于78.87%,总调节幅度28.87%,调节过程开度始终处于20%~100%的约束范围内。中调门为“快响应”执行机构,开大幅度可增加蒸汽流出热再系统,快速抵消压力上升趋势;其与高旁阀形成“快-慢”协同调节模式,既保障了扰动的快速抑制,又避免了单一执行机构调节幅度过大导致的系统不稳定。

负荷增加导致热再系统蒸汽供需失衡,进而引发压力上升;MPC控制器通过协同调节方式,实

现热再系统蒸汽供需重新平衡,最终使压力回归设定值,完全契合火电机组热再压力的工业调节逻辑。

4 结论与展望

针对工业供汽系统机组负荷频繁波动、易引发抽汽压力失稳的实际特点,提出基于多变量预测控制(MPC)的高旁阀与中调门协同供汽控制策略,依托MPC算法的多变量协调与前瞻预测优势,实现高旁阀、中调门的协同控制,精准匹配负荷变工况下的抽汽压力需求。仿真验证结果表明,该策略在供汽压力调控中展现出超调量小、调节响应时间短、抗负荷扰动能力强、稳态控制误差小的显著优势。综上,该文提出的协同供汽控制策略为燃煤机组工业供汽系统的优化调控提供了有效方案,具备一定的工程参考价值。

参考文献:

- [1] 周国强,赵树龙. 汽轮机高、低压旁路联合供热应用研究[J]. 东北电力技术,2019,40(11):1-4.
- [2] 孙文彬,盛伟. 汽轮机高低旁路联合供热调峰经济效益分析[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版),2020,16(02):29-33.
- [3] 张帆. 多目标非线性预测控制及其在机炉协调优化控制中的应用研究[D]. 南京:东南大学,2017.
- [4] 杨阳,李滨. 基于量子粒子群算法的火电厂热控系统自动控制研究[J]. 自动化技术与应用,2022,41(09):106-109.
- [5] 张自贵,邵毅,佟强,等. 主蒸汽压力自适应AGC负荷控制策略优化[J]. 东北电力技术,2023,44(11):36-38+42.
- [6] 董天文,米斌,喻敏,等. 中调门参调高低旁联合供热的作用[J]. 科技与创新,2024(12):94-96+99.
- [7] 姜建强,王勇. 基于1000MW级超超临界燃煤机组利用中调门参调方式提高工业供热能力的技术研究与应用[J]. 电气时代,2023(S2):116-118.
- [8] 刘畅,耿林霄,王珩,等. 高低旁路联合供热改造控制策略研究[J]. 热力发电,2020,49(11):126-132.
- [9] 章春. 某660MW超超临界二次再热中调门节流自动控制实际应用探析[J]. 中国机械,2023(34):83-86.
- [10] 查倩. 基于模型预测的柴油机燃烧闭环控制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2023.
- [11] 赵伟策,张军. 基于多策略改进布谷鸟算法的裂解釜温度控制[J]. 化工自动化及仪表,2025,52(05):698-703.
- [12] 黎逢珍. 基于模型预测控制的供热二次网系统仿真与优化[D]. 吉林:东北电力大学,2025.

(下转第104页)

启动、突加负载及参数摄动等多工况仿真环境下对所提策略进行验证,并与传统 PI 控制和传统滑模控制进行量化对比。实验结果表明:所提方法实现了转速无超调量启动,调节时间可缩短至 0.015 s,突加负载时转速跌落降低约 66.67%,恢复时间缩短约 76.19%。证明了在参数摄动条件下该方法能保持良好的稳态性能,同时控制量抖振也得到了有效抑制。

参考文献:

- [1] 宫琦,朱刚,周会川. 基于 SVPWM 的永磁同步电机控制系统仿真研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2025(6):118-123.
- [2] 李泽华. 矢量脉宽调制下永磁同步电机磁链滑模控制[J]. 电子设计工程, 2025, 33(14):71-74+79.
- [3] 张巧,王志晓,宿敬肖. 带式输送机外转子永磁同步电机转矩优化研究[J]. 机械设计与制造, 2025(12):22-28+34.
- [4] 杨羽萌,朱其新,刘红俐. 考虑直流偏置下的永磁同步电机扰动抑制研究[J]. 机床与液压, 2026, 54(2):120-124.
- [5] 张冬冬,董亲源,荣存浩,等. 超高速永磁同步电机齿槽转矩与定子辅助槽参数优化设计[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2025, 45(6):570-581.
- [6] 杨帆,赵希梅,金鸿雁,等. 基于广义比例积分观测器的永磁同步电机鲁棒谐振预测电流控制[J]. 电工技术学报, 2024, 39(10):2995-3006.
- [7] 陈云龙. 永磁同步电机飞轮储能系统定子电流谐波抑制与母线电压控制策略研究[D]. 杭州:浙江大学, 2024:56-78.
- [8] 冯煜焜,姚文熙,李武华. 结合迭代学习与扰动观测器的永磁同步电机多源扰动抑制[J]. 振动与冲击, 2025, 44(3):230-237+250.
- [9] 尹书哲,花国祥,黄兴,等. 带电作业机器人机械臂自适应滑模控制方法[J]. 兵工自动化, 2026, 45(2):89-91+107.
- [10] 曹庆梅,项瑞雯,谭永红,等. 基于模糊逻辑改进的四旋翼无人机滑模控制方法及其在非匹配不确定性条件下的应用(英文)[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2025, 26(10):1942-1956.
- [11] 彭承欣,王伟. 三相四桥臂永磁同步电机系统多谐波电流注入开路故障容错控制方法[J]. 电气工程学报, 2025, 20(4):120-131.
- [12] 梁庭福,李鑫帅,王鹏康,等. 基于层次非奇异终端和超螺旋滑模扰动观测器的永磁同步电机滑模控制[J]. 兵器装备工程学报, 2025, 46(2):196-203.
- [13] 张乃峰,郭凯凯,刘晨,等. 基于新型趋近律的三相永磁同步电机滑模控制研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2025, 42(6):26-32.
- [14] 赵凯辉,涂麟轩,何颖荣,等. 基于紧格式动态线性化的 PMSM 无模型自适应快速终端滑模控制[J]. 电力系统保护与控制, 2026, 54(2):70-81.
- [15] 李星. 基于扩张状态观测器的 PMSM 滑模控制[J]. 电气应用, 2025, 44(6):106-111.
- [16] distance optimization[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(1):53-66.
- [17] TANG M, AN B, QIU J, et al. Multi-model predictive control of SCR flue gas denitrification system in coal-fired power plant based on kernel fuzzy c-means clustering and integrated model[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2024, 102(2):748-764.
- [18] 权丽. 基于预测控制的聚合温控负荷需求侧资源调度控制方法[D]. 北京:华北电力大学, 2021.
- [19] 康殿煜. 基于 MPC 算法微振动平台驱动设计[D]. 桂林:桂林电子科技大学, 2025.
- [20] 寇艺耀,李俊杰,匡大志,等. 基于模型预测控制的低温温控策略设计及实验验证[J]. 低温与超导, 2023, 51(06):62-68.
- [21] Kim S, Lee J, Han K, et al. Vehicle path tracking control using pure pursuit with MPC-based look-ahead

(上接第 92 页)