

基于 MPC 预测控制的燃气轮机发电机组进气导叶自动化调整策略

卢翔

内蒙古双欣环保材料股份有限公司

DOI:10.32629/etd.v7i6.21029

[摘要] 燃气轮机发电机组变负荷运行中进气导叶调节耦合强、约束多,传统PID难以兼顾快速性与平稳性。构建以机组功率、转速、排气温度和IGV开度为核心变量的离散状态空间模型,提出模型预测控制的IGV自动化调整策略。控制器引入开度、开度变化率及温度安全边界约束,设置滚动优化、反馈校正和异常保护逻辑。仿真显示负荷突增和入口扰动工况下,策略缩短调节时间,降低峰值偏差与稳态误差,减少导叶频繁动作。

[关键词] 模型预测控制; 燃气轮机; 进气导叶; 自动化调整; 约束控制

中图分类号: TH138.23 **文献标识码:** A

Automated Adjustment Strategy of Inlet Guide Vanes for Gas Turbine Generator Set Based on Model Predictive Control

Xiang Lu

Inner Mongolia Shuangxin Environmental Protection Materials Co., Ltd.

[Abstract] To address the strong coupling, multi-constraint behavior, and insufficient dynamic quality of conventional PID regulation in inlet guide vane (IGV) control for gas turbine generator sets, a discrete state-space model is established with power output, shaft speed, exhaust temperature, and IGV opening as key variables. An MPC-based automated IGV adjustment strategy is proposed, in which vane opening, rate limits, and temperature safety boundaries are explicitly considered. Rolling optimization, feedback correction, and protection logic are integrated into the controller. Simulation results under load-ramp and inlet-disturbance conditions show that the proposed method shortens settling time, reduces peak deviation and steady-state error, and lowers unnecessary vane actions. The strategy is suitable for engineering deployment in DCS or turbine supervisory control systems.

[Key words] model predictive control; gas turbine; inlet guide vane; automated adjustment; constrained control

引言

燃气轮机发电机组在部分负荷和快速调峰工况下,需要通过燃料流量与进气导叶联动调节维持压气机工作裕度、排气温度和机组效率,其中IGV开度变化直接影响进气量分配与压比建立,因此其控制品质对整机动态性能具有放大作用。针对GT36机组的现场调试研究表明,导叶开度规律不仅影响启动与并网过程,还与喘振裕度和排温控制精度密切相关^[1]。

在常规DCS逻辑中,IGV多采用分段给定叠加PID修正的方式,当负荷指令、环境温度和燃料品质同时波动时,容易出现响应滞后、控制量来回修正和执行机构动作频繁等问题。燃机机组自动协调控制的工程实践指出,若只优化单一回路而未兼顾负荷

分配和约束边界,机组整体响应会受到明显限制^[2]。

模型预测控制具有显式处理输入输出约束、适合多变量耦合对象、便于在滚动时域内综合动态品质和执行代价等特点,已被用于燃机扰动抑制与能量管理研究^[3]。据此,围绕燃气轮机发电机组IGV自动化调整过程,建立与工程对象一致的离散模型,并设计面向负荷跟踪与安全约束协同的MPC调节策略。

1 燃气轮机进气导叶自动调节对象及控制需求分析

1.1 进气导叶执行机构与控制对象特性

IGV位于压气机进口段,其主要功能是在部分负荷或环境工况变化时改变压气机通流能力,使空气流量、压比和燃烧组织保持在合理区间。对于单轴发电型燃气轮机而言,IGV开度减小时,

压气机进口流量下降, 燃烧室空燃比与透平温度分布随之变化; 开度增大时, 机组功率提升能力增强, 但排气温度偏差、压气机稳定裕度以及执行器磨损也会同步受到影响。

IGV调节对象包含负荷指令、燃料阀、压气机、燃烧室和透平的多变量耦合系统, 不是单一位置伺服回路。对象动态有非线性增益变化, 工况切换引起模型失配。燃氢或混氢机型燃料热值扰动放大转速和温度耦合。

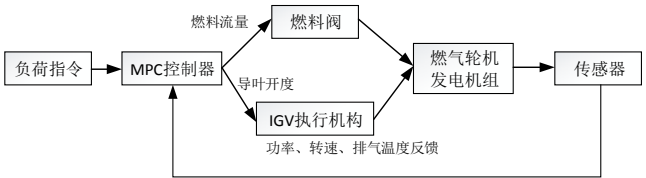


图1 燃气轮机进气导叶自动调节系统结构示意图

1.2 自动调节目标与约束条件

IGV自动调节的核心目标包括: 在负荷指令变化后尽快将导叶开度调整到目标区间; 控制排气温度峰值不超过设备保护定值; 限制转速偏差与导叶开度变化率; 在满足跟踪性能的同时尽量减少执行机构无效动作。对于采用液压或电液执行机构的IGV系统, 还需考虑开度上下限、每采样周期动作斜率限制和故障回退逻辑。

根据机组运行经验, 本文将IGV开度约束设置为18%~62%, 单步调节增量约束设置为±1.6%, 排气温度偏差控制目标限定在±12℃以内, 机组相对转速偏差控制目标限定在±0.5%以内。上述约束既反映现场安全边界, 也为预测控制器求解提供了可执行的控制域。

表1 进气导叶控制相关变量及约束设定

变量	工程含义	下限	上限
IGV 开度/%	执行机构位置给定	18	62
Δ IGV/%	单采样周期开度增量	-1.6	1.6
Δ T _{exh} /℃	排气温度偏差	-12	12
Δ n/%	相对转速偏差	-0.5	0.5
Δ P/MW	功率跟踪偏差	-1.8	1.8

2 基于MPC的进气导叶自动化调整策略设计

2.1 控制模型建立与离散化处理

在不改变燃机控制主回路结构的前提下, 将IGV自动调整部分抽象为带扰动项的离散状态空间模型。状态变量选取为功率偏差、相对转速偏差、排气温度偏差和IGV位置偏差, 控制量为IGV增量, 外部扰动主要由负荷指令变化和入口参数波动构成。为兼顾工程可实现性与模型简洁性, 采用采样周期Ts=0.5 s的线性化分段模型, 并在额定负荷附近完成离散化处理。

$$x(k+1) = A_i x(k) + B_i \Delta u(k) + E_i d(k) \quad (1)$$

式中: $x(k)$ 为状态向量; A_i 、 B_i 、 E_i 为第*i*负荷段离散模型矩阵; $\Delta u(k)$ 为IGV控制增量; $d(k)$ 为外部扰动。考虑到机组在40%~90%负荷区间内的动态特征变化较为明显, 模型参数采用在线修

正方式按负荷段进行切换。对于部分负荷工况, 可由监督层根据当前功率水平选择相应模型矩阵, 实现预测模型与实际对象的一致性提升。氢燃料微型燃机控制策略对比结果表明, 在工况大范围变化时引入模型切换和前馈补偿有助于改善系统稳定性^[4]。式中: $y(k)$ 为输出向量; C_i 、 D_i 为输出矩阵; 输出分量包含功率偏差、转速偏差、排气温度偏差及IGV位置偏差

$$y(k) = C_i x(k) + D_i \Delta u(k) \quad (2)$$

2.2 MPC优化目标函数与滚动优化机制

预测控制器以负荷跟踪误差、排气温度偏差和控制增量为综合优化对象, 在每个采样时刻利用当前状态计算预测域内的最优控制序列, 再只实施首个控制量并滚动更新。对于燃料流量与IGV联合控制的混氢燃机研究, LPV-MPC方法能够在功率跟踪与温度安全之间取得较好的平衡, 这说明将IGV纳入多约束优化框架具有明确工程意义^[5]。

$$J = \sum (w_p eP^2 + w_n e_n^2 + w_t eT^2) + \sum (w_u \Delta u^2) \quad (3)$$

式中: J 为优化目标; 预测域和控制域内分别累加功率误差 eP 、转速误差 e_n 、排气温度误差 eT 以及控制增量 Δu ; w_p 、 w_n 、 w_t 、 w_u 为权重系数。为避免IGV执行机构高频抖动, 目标函数中对控制增量设置了权重, 并对连续若干采样时刻的增量变化施加平滑约束; 同时引入反馈校正环节, 用实测功率、排气温度和开度偏差对预测模型进行滚动修正。当求解结果触及温度边界或开度边界时, 控制器优先压缩增量, 再进入保护逻辑。

$$\Delta u_{min} \leq \Delta u(k+j) \leq \Delta u_{max}, \quad u_{min} \leq u(k+j) \leq u_{max} \quad (4)$$

式中: Δu_{min} 、 Δu_{max} 为控制增量上下限; u_{min} 、 u_{max} 为IGV实际开度上下限; j 为预测步长。

2.3 自动化调整流程与保护逻辑

自动化调整流程包括工况识别、状态估计、预测优化、控制量修正、执行器限幅和异常保护6个环节。工况识别模块根据负荷阶跃幅值、排气温度斜率和入口参数变化率判断当前是否进入快速调节状态; 状态估计模块对测量信号进行滤波, 抑制传感器噪声对优化结果的影响; 执行层仅接收通过限幅和速率约束后的IGV目标值。

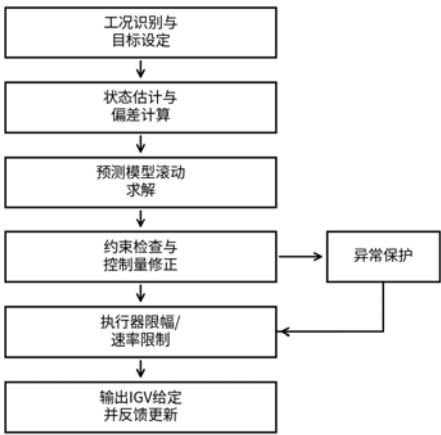


图2 MPC预测控制滚动优化流程图

当检测到排气温度逼近上限、相对转速偏差连续超限或执

行器反馈中断时, 控制器停止继续放大导叶指令, 转入保护模式并输出保守开度给定。该逻辑可以降低模型失配或测量异常下的控制风险, 使MPC策略具备接入DCS或PLC系统所需的工程鲁棒性。

3 仿真验证与结果分析

3.1 仿真工况设置

仿真对象为某单轴燃气轮机发电机组IGV调节子系统, 额定功率取35 MW, 额定转速3000 r/min, 采样周期0.5 s。选取两类典型工况进行验证: 工况A为机组负荷由60%阶跃提升至82%; 工况B为环境入口温度上升并伴随燃料热值轻微波动。对比控制策略分别为常规PID和所提MPC, 其中PID参数依据现场整定经验设置, MPC预测域 N_p 取12, 控制域 N_c 取4。

在对照试验中, 重点考察IGV开度响应、排气温度峰值偏差、稳态误差以及执行器动作次数。由于航空推进系统研究已表明, 两层式预测控制在多变量受限对象上更利于协调快慢变量[6], 因此本文在求解中将开度给定与约束检查分层处理, 以降低在线求解波动。

3.2 动态响应结果与统计分析

图3为工况A下IGV开度动态响应。负荷指令10 s突增后, 两种控制器抬升IGV开度。PID曲线15 s至35s出现缓慢爬升和二次修正, MPC曲线约20 s接近目标值, 响应过程平滑。表2统计显示MPC调节时间由25.8 s压缩至16.4s, 峰值偏差由1.67%降至0.38%, 稳态误差由0.43%降至0.17%。

表2 不同控制策略性能指标统计结果

策略	调节时间/s	峰值偏差/%	稳态误差/%	排温峰值偏差/℃	IGV动作次数
PID	25.8	1.67	0.43	11.6	21
MPC	16.4	0.38	0.17	7.1	14

工况B入口扰动引起排气温度上扬, PID策略多次修正导叶开度抑制温度偏差, 动作次数增加; MPC通过预测域提前收敛控制量, 排气温度峰值偏差控制在7.1℃, 较PID减小约4.5℃。策略在快速性、平稳性和约束满足方面折中。

按式(5)计算, MPC平均绝对误差为0.21, PID为0.46。预测控制改善瞬态偏差峰值, 降低全时域累积误差。图3显示MPC曲线靠近目标区间后未大幅反向修正, 印证表2动作次数下降结果。

$$IAE = (Ts/N) \cdot \sum |e(j)| \quad (5)$$

式中: IAE为平均绝对误差指标; Ts为采样周期; N为统计样本数; $e(j)$ 为第j时刻的开度跟踪误差。

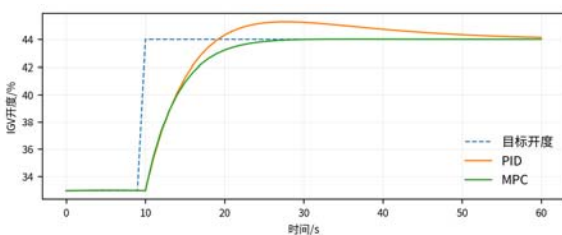


图3 不同控制策略下IGV开度动态响应曲线

3.3 工程应用可行性讨论

对于现有燃机控制系统, MPC模块可布置在机组监督层或先

进控制层, 底层仍由原有伺服执行器完成位置闭环。工程实现时仅需增加模型计算、在线优化和状态估计功能, 不必整体替换燃机主控逻辑, 因此具备较好的改造可行性。若控制周期选取在0.5 s及以上, 普通工业控制器即可满足该类小规模二次规划的在线求解要求。

本文模型基于典型工况附近线性化结果, 极端环境温度和燃料组分急剧变化适应性受限。后续可引入增益调度或LPV建模, 提升全工况控制精度。

MPC模块与现有燃机顺控、启停逻辑和主燃料调节回路并行运行, 控制输出作用于IGV目标给定层, 不破坏原有保护链路。采用OPC或Modbus通信的站控系统, 上位机完成模型参数调用和优化结果下发, 底层控制器执行位置闭环。

IGV执行机构存在迟滞、死区和磨损累积, 控制器追求最短调节时间可能增加机械冲击。目标函数引入控制增量惩罚, 使导叶轨迹保持连续, 兼顾设备寿命与调节品质。长期运行机组结合历史运行数据定期修正模型参数, 避免设备老化导致预测精度下降。

4 结束语

燃气轮机发电机组IGV调节存在多变量耦合与约束协调问题, 构建面向功率、转速和排气温度协同约束的MPC自动化调整策略。离散模型、滚动优化与保护逻辑结合, 实现IGV开度在变负荷与入口扰动工况下平稳快速调节。仿真显示策略缩短调节时间、降低峰值偏差、减少执行机构动作次数。MPC在IGV耦合敏感环节提供约束协调能力, 不替代燃机常规控制。模型选取和保护边界设置合理, 可提高机组负荷响应品质与运行稳定性。

【参考文献】

- [1]冯益林, 郑隆云. GT36型燃气轮机的可调进气导叶调试方法[J]. 燃气轮机技术, 2024, 37(4): 55-58.
- [2]黄群亮, 陈正建, 郑冉阳, 等. 基于负荷分配优化的燃机机组自动协调控制研究[J]. 电子设计工程, 2025, 33(11): 187-191.
- [3]张玉豪, 王子楠, 曾博洋, 等. 结合神经网络与模型预测控制的燃机运行扰动抑制研究[J]. 推进技术, 2025, 46(10): 234-248.
- [4]刘越茂, 连晋毅. 氢燃料微型燃气轮机增程系统的控制策略对比[J]. 计算机仿真, 2025, 42(2): 171-175.
- [5]Lai Y, Wang D, Chen D, et al. Adaptive optimal control method for hydrogen-mixed gas turbine based on model predictive control[C]//Proceedings of Global Power and Propulsion Society. Shanghai, 2025: GPPS-TC-2025-0049.
- [6]Hill E D, Simon D L, Connolly J W A. A comparison of model predictive control architectures for application to electrified aircraft propulsion systems[C]//Proceedings of the ASME Turbo Expo 2024: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. London, 2024: GT2024-123859.

作者简介:

卢翔(1996—), 男, 汉族, 宁夏银川人, 本科, 研究方向: 仪表/控制。