

# 考虑燃气轮机运行安全性的排气温度控制策略优化

李雷, 李亚聪, 房爱兵

(新奥能源动力科技(上海)有限公司, 上海 201306)

**摘要:** 排气温度控制是确保燃气轮机稳定和安全运行的关键因素,为解决气体燃料热值波动导致燃气轮机在基本负荷下出现超温运行的问题,提出3种基于前馈与反馈协同的排气温度控制策略,以新奥动力E135微型燃气轮机发电机组为对象,建立了燃气轮机与排气温度控制的联合动态仿真模型,并综合机组稳定性设计了适应度函数,进一步结合粒子群优化算法,确定了3种排气温度控制策略的最优参数。通过对比分析3种控制策略在10%和20%燃气扰动下机组的响应特性,并通过真机测试进行验证。结果表明:基于一次补偿的排气温度控制策略效果最为显著,在基本负荷工况下,该策略可实现机组有效响应0~10%范围内的燃气扰动,满足燃气轮机应用项目热值波动运行边界,提升了机组运行的安全性。

**关键词:** 排气温度控制;燃气轮机;燃气扰动;一次补偿;安全性

中图分类号:TK47 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2025.03.002

[引用本文格式] 李雷,李亚聪,房爱兵.考虑燃气轮机运行安全性的排气温度控制策略优化[J].热能动力工程,2025,40(3):8-14. LI Lei, LI Yacong, FANG Aibing. Optimal exhaust temperature control strategy considering operation safety of gas turbine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025, 40(3): 8-14.

## Optimal Exhaust Temperature Control Strategy Considering Operation Safety of Gas Turbine

LI Lei, LI Yacong, FANG Aibing

(ENN Energy Power Technology (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai, China, Post Code: 201306)

**Abstract:** Exhaust temperature control is a key factor in ensuring the stable and safe operation of gas turbines. To address the issue of gas turbine overheating during base load operation caused by fluctuations in the calorific value of gaseous fuels, three exhaust temperature control strategies based on the synergy of feedforward and feedback control were proposed. Taking the ENN POWER E135 micro gas turbine generator set as the research object, a joint dynamic simulation model of the gas turbine and exhaust temperature control was established. An fitness function was designed considering the stability of the unit, and the optimal parameters for the three exhaust temperature control strategies were determined using the particle swarm optimization (PSO) algorithm. By comparing and analyzing the unit response characteristics under 10% and 20% in fuel disturbances for three control strategies, which were validated through real machine testing. The results show that the exhaust temperature control strategy based on single-stage compensation is the most effective. Under base load conditions, this strategy enables the unit to effectively respond to fuel disturbances within the range of 0-10%, meeting the operational boundaries for calorific value fluctuations in gas turbine applications and enhancing the operational safety of the unit.

**Key words:** exhaust temperature control, gas turbine, fuel disturbances, single-stage compensation, safety

收稿日期:2024-07-18; 修订日期:2024-08-18

基金项目:上海市科学技术委员会科研计划项目(18DZ1202001)

**Fund-supported Project:** Research Program of Science and Technology Commission of Shanghai Municipality (18DZ1202001)

作者简介:李雷(1992-),男,新奥能源动力科技(上海)有限公司工程师。

## 引言

燃气轮机运行时涡轮前温度与燃气轮机输出功率和效率密切相关,其设计水平取决于总体结构形式、材料性能、冷却系统设计、热障涂层和制造工艺等因素<sup>[1]</sup>。对于微型燃气轮机,其结构形式和工艺设计受到成本和加工难度约束。空气系统的设计主要起到平衡轴向力和封严等作用,如果采用涡轮无气膜冷却结构,一旦在短时间内涡轮前温度超过设计规定值,会大幅降低涡轮高温部件的寿命,甚至引起涡轮叶片烧毁和断裂。当燃气轮机在基本负荷附近运行时,其运行状态受到涡轮前温度限制系统的调节。然而,由于受涡轮结构的复杂性、气流分布的均匀性以及材料的耐受温度等多方面因素的制约,难以对涡轮前温度进行直接测量和精准控制。行业内普遍采用基于涡轮排气温度的控制来间接控制涡轮前温度的方式。因此,为了保证燃气轮机安全可靠运行,必须提高涡轮排气温度控制可靠性和鲁棒性。

文献[2-11]围绕燃气轮机涡轮排气温度控制开展了广泛研究,对揭示燃气轮机涡轮排气温度影响特性、设计解析控制策略以及分析超温故障等方面的研究均取得了重要进展,显著改善了系统排气温度控制的可靠性,为行业研发设计提供了借鉴和参考。然而,机组工作边界条件变化扰动对排气温度控制影响的研究甚少。

微型燃气轮机因效率高、体积小和环保性强等特性广泛应用于分布式能源领域<sup>[12]</sup>,但其工作边界条件存在多样性和复杂性,在燃气轮机运行过程中时常发生燃气组分变化范围大、燃气压力波动程度高等现象,系统容易产生失稳振荡,进而引发超温停机故障,甚至对涡轮寿命造成影响。本文以新奥动力 E135 微型燃气轮机发电机组为研究对象,建立燃气轮机系统动态仿真模型,并结合粒子群寻优算法进行控制参数寻优,研究 3 种基于前馈与反馈协同的排气温度控制策略在燃气扰动下机组的响应特性。

## 1 动态仿真模型

### 1.1 控制策略

本文以新奥动力 E135 微型燃气轮机发电机组为对象,在温度 288.15 K 和压力 101.325 kPa 的进气条件下,额定发电功率为 135 kW,转速为 51 000 r/min,压比为 4.5。燃气轮机为单轴结构形式,包括单级离心压气机、单筒型干式低 NO<sub>x</sub> 燃烧室和 2 级轴流式涡轮。图 1 为燃气轮机结构示意图,其中下标表示燃气轮机各热力系统的截面位置, $T$  和  $p$  分别代表各截面处的温度和压力。

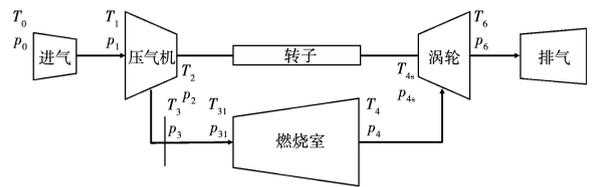


图 1 燃气轮机结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of gas turbine structure

在基本负荷运行时,燃气轮机通过精准控制排气温度,确保机组的安全与稳定运行。这一控制过程需综合考虑涡轮前温度、NO<sub>x</sub> 排放、效率和燃烧稳定性等多重因素,并要求排气温度控制具备响应快和波动小的特性,以实现高效、环保且可靠的运行效果。根据燃气轮机温度控制原理,基准策略(PID 算法)公式如下:

$$e_0(t) = T_{6\text{ref}} - T_6 \quad (1)$$

$$e(t) = \begin{cases} e_0(t) - \delta, & e_0(t) \geq \delta \\ e_0(t) + \delta, & e_0(t) \leq -\delta \\ 0, & |e_0(t)| \leq \delta \end{cases} \quad (2)$$

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt \quad (3)$$

式中: $e_0(t)$ —控制器偏差值; $T_{6\text{ref}}$ —排气温度参考值; $T_6$ —排气温度实际值; $\delta$ —死区范围, $\delta = 3 \text{ K}$ ; $e(t)$ —死区之后的偏差值; $u(t)$ —燃料控制输出; $k_p$ —比例系数; $k_i$ —积分系数。

在实际应用中,燃气轮机在基本负荷运行时,若遇到燃气组分波动或非计划性运行等情况,会导致排气温度反馈控制无法快速响应系统扰动,从而引发机组超温或非计划停机。为解决这一问题,基于

文献[13]在前馈与反馈协同控制研究的基础上,本文提出了3种不同的排气温度控制策略:

策略 A(放大误差策略)公式如下:

$$f_1(\lambda_0, \omega_0, e(t)) = \begin{cases} \lambda_0 \cdot e(t), & e(t) \geq \omega_0 \\ e(t), & e(t) < \omega_0 \end{cases} \quad (4)$$

$$u_1(t) = k_p f_1(\lambda_0, \omega_0, e(t)) + k_i \int_0^t f_1(\lambda_0, \omega_0, e(t)) dt \quad (5)$$

式中:  $f_1(\lambda_0, \omega_0, e(t))$ —经过放大的偏差值;  $\lambda_0$ —放大系数;  $\omega_0$ —经过放大偏差  $e(t)$  策略的比较阈值;  $u_1(t)$ —放大误差策略的燃料控制输出。

策略 B(增益补偿策略)公式如下:

$$f_2(\lambda_1, \omega_1, e(t)) = \begin{cases} \lambda_1 \cdot e(t), & e(t) \geq \omega_1 \\ 0, & e(t) < \omega_1 \end{cases} \quad (6)$$

$$u_2(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + f_2(\lambda_1, \omega_1, e(t)) \quad (7)$$

式中:  $f_2(\lambda_1, \omega_1, e(t))$ —燃料增益补偿值;  $\lambda_1$ —增益系数;  $\omega_1$ —基于偏差  $e(t)$  增益补偿策略比较阈值;  $u_2(t)$ —经过增益补偿后的燃料控制输出。

策略 C(一次补偿策略)公式如下:

$$s(t) = \begin{cases} 0, & e(t) < \omega_2 \\ 1, & e(t) \geq \omega_2 \end{cases} \quad (8)$$

$$f_3(\varepsilon, s(t)) = \varepsilon \quad (9)$$

$$u_3(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + f_3(\varepsilon, s(t)) \quad (10)$$

式中:  $f_3(\varepsilon, s(t))$ —燃料一次补偿值,  $s(t)$ —一次补偿的上升沿信号;  $\omega_2$ —基于偏差  $e(t)$  的一次补偿策略比较阈值;  $\varepsilon$ —一次补偿策略条件触发后燃料补偿值;  $u_3(t)$ —经过一次补偿策略后的燃料控制输出。

### 1.2 系统动态仿真模型

本文建模时利用进排气装置特性、压气机特性、涡轮特性和变工质物性函数描述燃气轮机气动热力学非线性特征;利用转子动力学描述转子惯性,作为模型的最重要动态特性;利用容积气动力学构建通流工质流量与容积压力、温度的微分方程,从而实现燃气轮机模型的无迭代求解。此外,增加了燃料控制阀建模及排气温度传感器建模等,文献[14-16]对燃气轮机建模进行了详细的研究,因此本文不再对公式推导进行描述。

基于 MATLAB/Simulink 平台搭建了微型燃气轮机系统仿真模型,包括热力模型、不同排气温度控制器模型和燃气扰动注入模型,图2为燃气轮机动态仿真模型示意图。

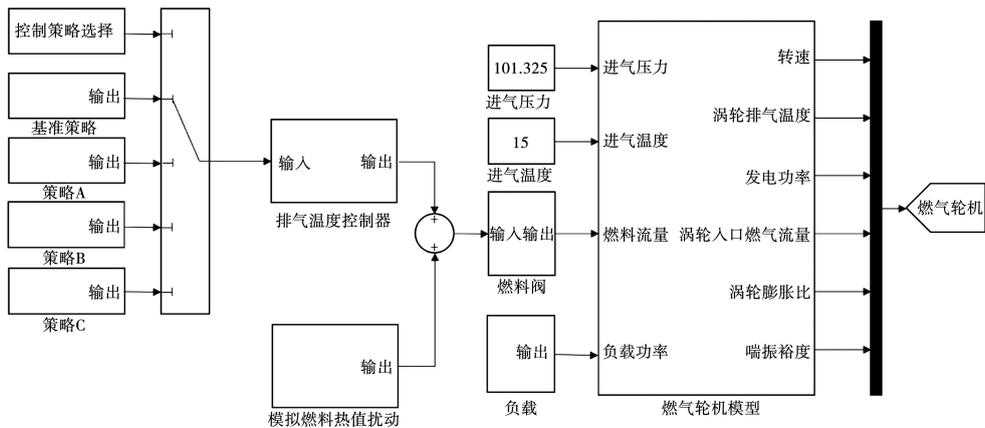


图2 燃气轮机动态仿真模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of dynamic simulation model of gas turbine

## 2 仿真分析

### 2.1 控制策略参数寻优

对于上述3种排气温度控制策略,控制参数的

选择会显著影响控制策略的效果,尤其是最优参数的确定。为了提高参数优化的精度和调参效率,本文引入了粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)。PSO算法广泛应用于目标或参数寻优问题,

相应过程参见文献[17-19]。在本文中,适应度函数 $J$ 综合了各参数的性能指标,以燃气轮机排气温度峰值为主要依据,评估机组在基本负荷工况下的安全性( $T_6 + 20$  °C边界范围内),同时考虑燃料输出避免触及熄火边界,整体表示如下:

$$\begin{cases} J = \min[\alpha T_6(t) + \beta u(t)] \\ \text{s. t. } u(t) \geq 0.6u_0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\alpha$ 、 $\beta$ —排气温度和燃料输出的权重函数; $T_6(t)$ —涡轮排气温度; $u(t)$ —燃料控制输出; $u_0$ —基本负荷工况下燃料控制输出。

综上,排气温度控制策略参数优化流程包括控制策略的选择、基于 PSO 算法的优化调度及基于 PSO 参数寻优后燃气轮机动态模型计算,图3为排气温度控制策略参数优化流程。

数优化结果如表1所示。

表1 排气温度控制策略参数优化结果

Tab.1 Parameter optimization result of exhaust temperature control strategy

控制策略	优化区间	最优值
A	$\omega_0 \in [1, 10]$	1.62
	$\lambda_0 \in [1, 3]$	2.59
B	$\omega_1 \in [1, 10]$	2.97
	$\lambda_1 \in [0.0001, 0.00025]$	$2.02 \times 10^{-4}$
C	$\omega_2 \in [1, 10]$	2.83
	$\varepsilon \in [-0.005, -0.004]$	-0.0049

## 2.2 控制策略对比分析

图4和图5分别为10%和20%燃气扰动下机组的响应特性。当机组在基本负荷工况运行时,于40s处施加燃气阶跃扰动,持续3s后恢复。需要特别说明的是,由于受燃气热值变化试验条件的限制,本研究通过改变燃气流量来模拟燃气热值波动。

在10%和20%燃气扰动下,机组表现出相似的响应特性。当机组在基本负荷工况下,燃气流量在40s处发生阶跃向上变化时,3种优化控制策略相比基准策略在排气温度抑制方面表现更优。由于燃料流量相对于基本负荷工况的过量,发电功率出现跃升。此时,排气温度控制器通过减少燃料流量输出来抑制排气温度和发电功率的上升,并逐渐恢复稳定。3s后,燃气扰动中止。然而,对于燃气轮机系统而言,这相当于对尚未完全稳定的机组施加了一个反向燃料阶跃扰动。此时,控制策略仅在排气温度上升阶段发挥作用,随后在排气温度控制器和功率控制器的协同作用下,机组逐渐回归到基本负荷工况。

根据微型燃气轮机的结构特性,空气系统主要用于平衡轴向力和封严,其结构上未设计气膜冷却功能。因此,超温现象会在短时间内对涡轮材料产生热穿透,进而显著影响涡轮的寿命和强度。通过上述分析可知,在燃气阶跃扰动情况下,3种优化控制策略相比基准策略表现出更优的控制效果。其中,策略A能够有效抑制排气温度的上升,但在排气温度正向调节阶段,其抑制速率有所减慢;策略B

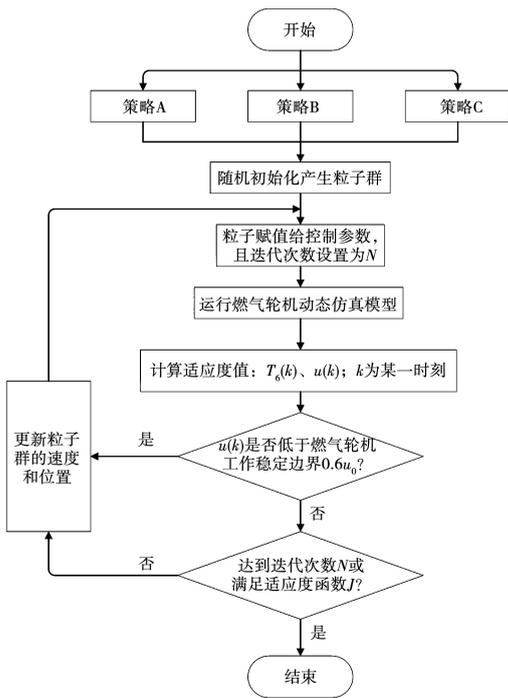


图3 排气温度控制策略参数优化流程

Fig.3 Flowchart of parameter optimization of exhaust temperature control strategy

针对粒子群优化算法的具体参数设置如下:权重函数 $\alpha$ 和 $\beta$ 分别为0.8和0.2,粒子群规模为100,迭代次数为100,最小排气温度峰值为900K,基本负荷工况下燃料输出为0.02 kg/s,加速常数 $c_1$ 和 $c_2$ 分别为2.1和2.4,惯性因子 $w$ 为0.5。通过粒子群优化算法的迭代搜索,排气温度控制策略参

相比基准策略有一定改善,但燃料控制输出下降幅度最大,距离熄火安全边界的裕度最小。综合考虑峰值温度、峰值温度上升时间和燃料输出安全边界等多个维度,策略 C 的效果最佳。

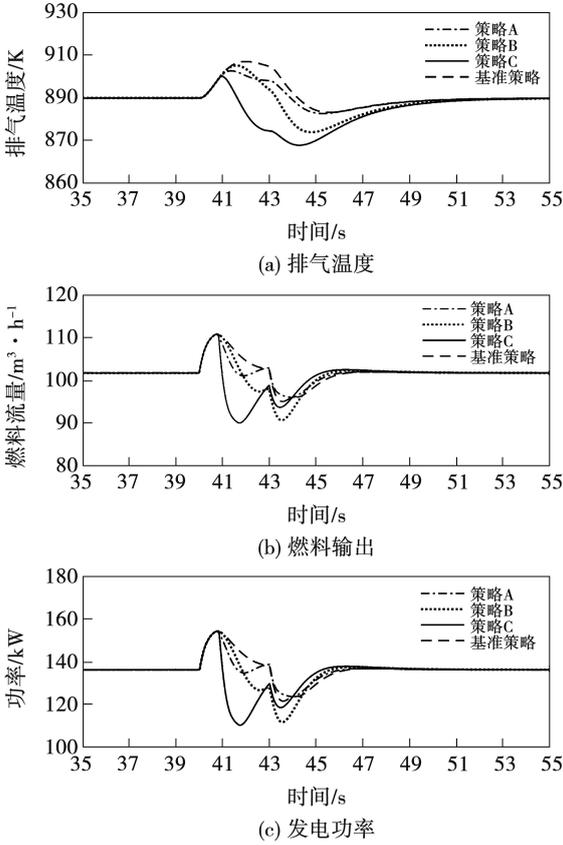


图 4 10% 燃气扰动下机组的响应特性  
Fig. 4 Response characteristics of the unit under 10% fuel disturbance

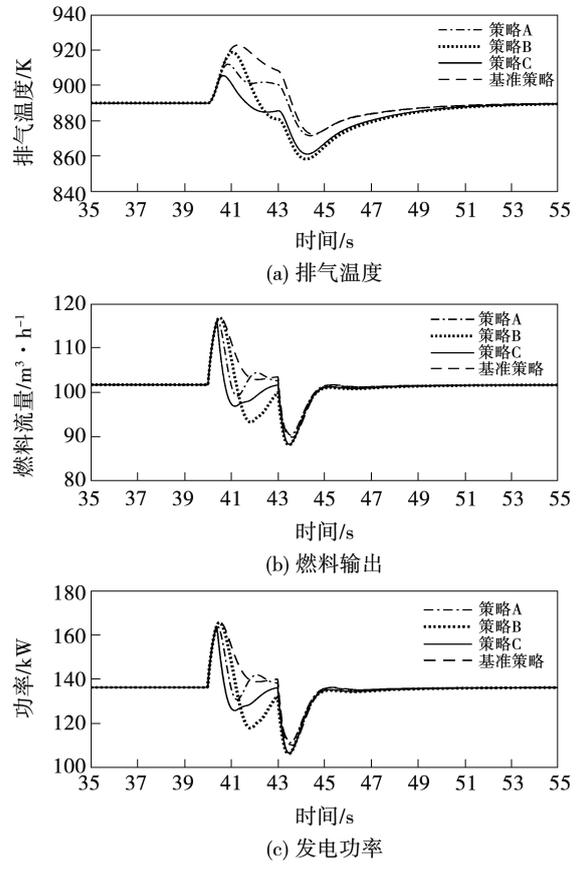


图 5 20% 燃气扰动下机组的响应特性  
Fig. 5 Response characteristics of the unit under 20% fuel disturbance

图 4 和图 5 是基于排气温度热电偶测量值进行的结果分析对比,热电偶的时间常数设置为  $1.7\text{ s}^{[20]}$ 。为了进一步凸显策略 C 在燃气轮机机组抗扰动能力方面的优势,本文评估了排气温度热电偶传感器对控制效果的影响。在 20% 燃气扰动工况下,涡轮排气温度实际值与其热电偶传感器测量值的对比如图 6 所示。结果显示,策略 C 和基准策略的排气温度实际峰值均比测量峰值高出 60 K 以上。这一结果表明,在基本负荷下,当系统受到燃气阶跃向上扰动时,需通过排气温度控制器迅速抑制排气温度上升,以避免机组因超温而发生非计划停机或涡轮损伤。

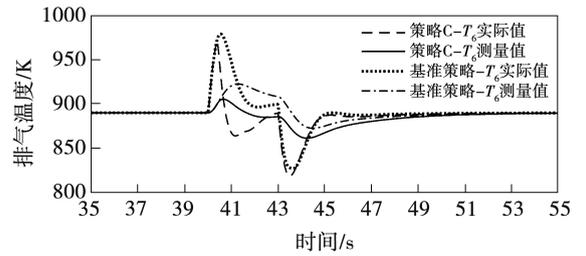


图 6 涡轮排气温度实际值与其热电偶传感器测量值的对比

Fig. 6 Comparison of the actual turbine exhaust temperature and the measured value from the thermocouple sensor

### 3 试验验证

在基本负荷工况下,本文借助仿真手段对燃气轮机在燃气阶跃扰动下的控制策略进行了优化验证,结果表明,策略 C 在抑制排气温度波动及提升系统稳定性方面展现出显著优势。为进一步确认其

工程应用价值,本文开展了策略 C 在 E135 燃气轮机上的试验研究。

为确保机组安全,试验首先在部分负荷下进行,将温控线设置为 405 °C,并施加基于该工况下 10% 的燃气流量扰动,试验结果如图 7 和图 8 所示。图 7 展示了部分负荷下验证策略可行性的机组关键参数响应特性,图 8 则对比了策略 C 与基准策略的排气温度响应特性。结果显示,策略 C 在实际应用中效果显著,最大温度变化被有效控制在了 12.5 °C 以内,充分证明了其工程可行性。与仿真结果相比,在试验阶段,策略 C 的排气温度测量值变化最高点时刻相较发电功率变化峰值时刻滞后 6 s 以上。这一现象与传感器的时间常数密切相关,时间常数越大,测量值偏离实际排气温度的程度越显著,从而可能对优化策略的效果产生一定影响。

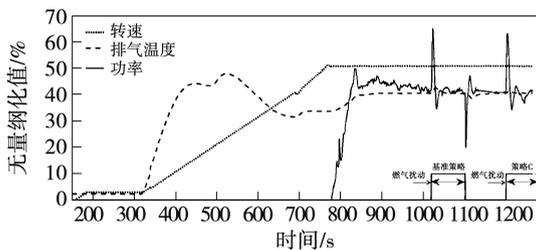


图 7 部分负荷下验证策略可行性的机组关键参数响应特性

Fig. 7 Characteristic of unit key parameters' response for verifying the feasibility of strategies under partial load conditions

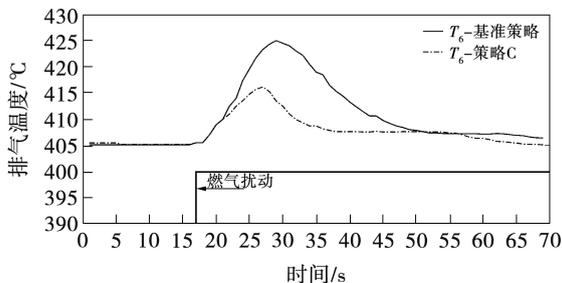


图 8 策略 C 与基准策略的排气温度响应特性

Fig. 8 Exhaust temperature response characteristics of strategy C and baseline strategy

在燃气轮机的部分负荷工况下,策略 C 的有效性得到了充分验证。随后,为进一步评估其性能,研究团队在基本负荷工况下开展了不同程度燃气热值

扰动下的机组响应特性试验。华白指数是衡量气体燃料可互换性的重要指标,对于同一种气体燃料,其变化范围通常不应超过  $\pm 5\%$  [21]。此外,华白指数还可作为评估燃气轮机系统燃料适应性的关键参数,同时也是燃气轮机应用项目中合理的热值波动运行边界。在试验过程中,当燃气扰动程度分别达到 5% 和 10% 时,机组的运行结果如表 2 所示。结果表明,策略 C 在抑制系统扰动方面表现出色,具有显著的工程实用性。然而,当燃气扰动达到 10% 时,系统已触发超温报警。鉴于此,研究团队决定暂停更高程度燃气扰动下的策略验证工作。未来,可考虑对排气温度热电偶传感器进行技术改制,以进一步开展相关试验,深入探究策略 C 在更大扰动范围内的性能表现。

表 2 5% 和 10% 燃气扰动的机组的运行结果

Tab. 2 Operational results of gas turbine unit under 5% and 10% fuel disturbances

控制策略	排气温度正向最大变化		机组状态	
	5% 燃气扰动	10% 燃气扰动	5% 燃气扰动	10% 燃气扰动
基准策略	15.7 °C	32.3 °C	超温报警, 但未触及停机逻辑	超温停机
策略 C	11.2 °C (10 °C 以上未超过 5 s)	21.4 °C (20 °C 以上未超过 5 s)	机组正常运行	超温报警, 但未触及停机逻辑

## 4 结论

(1) 围绕燃气轮机排气温度控制展开研究,提出 3 种基于前馈与反馈控制协同策略,分别为放大误差策略、增益补偿策略和一次补偿策略。通过粒子群优化算法,确定了各策略的最优控制参数,为后续试验和仿真分析奠定了基础。

(2) 在燃气轮机的基本负荷工况下,对 3 种策略开展了仿真对比分析。结果表明,在 10% 和 20% 燃气扰动下,3 种优化控制策略相比基准策略在排气温度抑制方面表现更优,且策略 C 效果最为显著。策略 C 在 10% 和 20% 燃气扰动工况下,排气温度峰值分别仅上升 10 和 13 °C,且峰值上升时间最短,始终处于燃气轮机的安全运行边界范围内。

(3) 试验验证也证实了策略 C 的优越性。在基本负荷工况下,燃气扰动达 10% 时,该策略的排气温度响应特性良好,完全满足燃气轮机应用项目的热值波动边界要求,展现出显著的工程可行性。然而,试验结果也表明,排气温度热电偶的性能对策略效果有一定影响。因此,下一步计划定制时间常数更小的排温传感器,以进一步优化试验验证效果并提升控制精度。

## 参考文献:

- [1] 曾 瑜,韩振兴,仇长阔,等.燃气轮机基本负荷温度控制策略研究[J].中国机械,2023(9):18-24.  
ZENG Yu,HAN Zhenxing,QIU Changkuo,et al. Research on basic load temperature control strategies for gas turbines[J]. Machine China,2023(9):18-24.
- [2] 张 波,史绍平,秦 晔,等.燃用低热值合成气的燃气轮机涡轮排气温度分散度优化研究[J].中国电机工程学报,2019,39(5):1377-1387.  
ZHANG Bo,SHI Shaoping,QIN Ye,et al. Optimization of exhaust temperature deviations for gas turbine for low heating value syngas[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(5):1377-1387.
- [3] 王伟影,赵宁波,唐 瑞,等.燃气轮机排气温度异常检测及诊断[J].哈尔滨工程大学学报,2015,36(3):337-342.  
WANG Weiyong,ZHAO Ningbo,TANG Rui,et al. Anomaly detection and diagnosis of gas turbine exhaust gas temperature[J]. Journal of Harbin Engineering University,2015,36(3):337-342.
- [4] 苏鹏飞,赵世全,方 宇.重型燃气轮机排气温度研究[J].工程热物理学报,2024,45(1):107-114.  
SU Pengfei,ZHAO Shiquan,FANG Yu. Research on the exit temperature of a heavy duty gas turbine[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2024,45(1):107-114.
- [5] 魏昌淼,吴明昊,唐 鹏.某工业型燃气轮机超温停机故障分析[J].燃气轮机技术,2023,36(3):47-50.  
WEI Changmiao,WU Minghao,TANG Peng. Analysis of overtemperature shutdown fault of an industrial gas turbine[J]. Gas Turbine Technology,2023,36(3):47-50.
- [6] 许 淼,张立颖,吴尚泽,等.西门子重型燃气轮机排气温度控制策略解析[J].东北电力技术,2018,39(9):29-31.  
XU Miao,ZHANG Liying,WU Shangze,et al. Analysis of exhaust temperature control strategy for Siemens heavy-duty gas turbine[J]. Northeast Electric Power Technology,2018,39(9):29-31.
- [7] 王铭辉.自抗扰控制在燃气轮机功率与排气温度控制中的应用[J].科技创新与应用,2023,13(31):50-54.  
WANG Minghui. Application of ADRC in power and exhaust temperature control of gas turbine[J]. Technology Innovation and Application,2023,13(31):50-54.
- [8] 李建伟,苏 焯,毛志伟,等.西门子 SGT5-8000H 级燃气轮机排气温度的控制[J].浙江电力,2020,39(3):82-87.  
LI Jianwei,SU Ye,MAO Zhiwei,et al. Exhaust temperature control for Siemens SGT5-8000H gas turbine[J]. Zhejiang Electric Power,2020,39(3):82-87.
- [9] 韩国栋,曹云鹏,王伟影,等.基于 LSTM 神经网络的燃气轮机排温预测方法[J].热能动力工程,2022,37(3):28-34.  
HAN Guodong,CAO Yunpeng,WANG Weiyong,et al. Prediction method of gas turbine exhaust temperature based on LSTM neural network[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2022,37(3):28-34.
- [10] 王惠杰,苑国庆,张晓博,等.基于混合模型的燃气轮机负荷与排气温度关系的研究[J].汽轮机技术,2015,57(5):332,344-346.  
WANG Huijie,YUAN Guoqing,ZHANG Xiaobo,et al. Research on relationship between load and exhaust temperature of gas turbine based on mixed model[J]. Turbine Technology,2015,57(5):332,344-346.
- [11] 白明亮,张冬雪,刘金福,等.基于深度自编码器和支持向量数据描述的燃气轮机高温部件异常检测[J].发电技术,2021,42(4):422-430.  
BAI Mingliang,ZHANG Dongxue,LIU Jinfu,et al. Anomaly detection of gas turbine hot components based on deep autoencoder and support vector data description[J]. Power Generation Technology,2021,42(4):422-430.
- [12] 林育超,李永毅,何怡冲,等.掺氢比例波动时氢混燃气轮机动态响应特性研究[J].热力发电,2023,52(11):95-104.  
LIN Yuchao,LI Yongyi,HE Yichong,et al. Study on dynamic response characteristics of hydrogen blended gas turbine with fluctuation of hydrogen blending ratio[J]. Thermal Power Generation,2023,52(11):95-104.
- [13] 陈金伟,陈梅珊,梅姣姣,等.考虑环境温度和功率的燃气轮机进口可转导叶控制策略优化[J].上海交通大学学报,2016,50(4):540-544,550.  
CHEN Jinwei,CHEN Meishan,MEI Jiaojiao,et al. Optimization of IGV temperature control strategy for gas turbine considering ambient temperature and load[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University,2016,50(4):540-544,550.
- [14] 任敬琦,曹 越,桑懿谦,等.H 级重型燃气轮机建模与动态仿真[J].动力工程学报,2018,38(2):98-104.  
REN Jingqi,CAO Yue,SANG Yiqian,et al. Modeling and dynamic simulation of H-class heavy-duty gas turbines[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2018,38(2):98-104.
- [15] 强雄超,陈海朝,杜 洋,等.燃气轮机动态仿真及排放特性研究[J].燃气轮机技术,2018,31(4):8-14.  
QIANG Xiongchao,CHEN Haichao,DU Yang,et al. Dynamic simulation and emission characteristics study on gas turbine[J]. Gas Turbine Technology,2018,31(4):8-14.