

# 基于PI与无模型自适应控制结合的 燃气轮机转速控制方法\*

邓望权<sup>1,2,3,4</sup>, 田震<sup>1,2,3</sup>, 王子楠<sup>1,2,3</sup>, 肖波<sup>1,2,3,4</sup>

- (1. 中国科学院工程热物理研究所 先进燃气轮机实验室, 北京 100190;
2. 中国科学院 先进能源动力重点实验室, 北京 100190;
3. 中国科学院 轻型动力创新研究院, 北京 100190;
4. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049)

**摘要:** 针对燃气轮机转速控制问题, 提出一种基于PI控制与数据驱动的无模型自适应控制结合的控制设计。以建立的燃气轮机慢车速度以上模型为研究对象, 在通过遗传算法整定出最优PI控制器参数的基础上, 通过对传统PI控制器的积分环节与紧格式无模型自适应控制器的相似替换, 使得控制器具有在线整定内部参数的优势, 表现出更优的动态控制性能。仿真结果表明: 所设计的基于PI与无模型自适应控制结合的控制设计, 较之基于遗传算法离线整定的最优PI控制器, 在转速调整时具有更快的上升时间和调节时间, 且对性能退化模型也能自适应地改善控制效果。该控制器设计基于PI控制进一步提高了控制品质, 其自适应过程改善了系统的鲁棒性, 基于PI结构的改进也具有工业应用前景。

**关键词:** 燃气轮机; 控制器设计; 遗传算法; PI控制; 无模型自适应控制

**中图分类号:** TK471 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2022) 07-210006-09

**DOI:** 10.13675/j.cnki.tjjs.210006

## Speed Control Method of Gas Turbine Based on Combination of PI and Model Free Adaptive Control

DENG Wang-quan<sup>1,2,3,4</sup>, TIAN Zhen<sup>1,2,3</sup>, WANG Zi-nan<sup>1,2,3</sup>, XIAO Bo<sup>1,2,3,4</sup>

- (1. Advanced Gas Turbine Laboratory, Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. Key Laboratory of Advanced Energy and Power, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
3. Innovation Academy for Light-Duty Gas Turbine, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
4. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** A controller design based on PI control and data-driven model-free adaptive control (MFAC) is proposed to deal with the problem of gas turbine speed control. The established model above the idle speed of gas turbine is taken as the research object, based on the optimal PI controller parameters tuned by genetic algorithm, the integration of the traditional PI controller is similarly replaced with the compact form dynamic linearization (CFDL) model-free adaptive controller, which makes the controller have the advantage of tuning of internal parameters online and shows better dynamic control performance. The simulation results show that the designed con-

\* 收稿日期: 2021-01-04; 修订日期: 2021-04-19。

基金项目: 中国科学院轻型动力创新研究院创新引导基金项目 (CXYYJ20-QN-03)。

作者简介: 邓望权, 硕士生, 研究领域为燃气轮机控制技术。

通讯作者: 肖波, 硕士, 研究员, 研究领域为航空发动机。

引用格式: 邓望权, 田震, 王子楠, 等. 基于PI与无模型自适应控制结合的燃气轮机转速控制方法[J]. 推进技术, 2022, 43(7):210006. (DENG Wang-quan, TIAN Zhen, WANG Zi-nan, et al. Speed Control Method of Gas Turbine Based on Combination of PI and Model Free Adaptive Control[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(7):210006.)

troller based on the combination of PI and model-free adaptive control has faster peak time and regulating time than the optimal PI controller tuned by genetic algorithm offline during speed adjustment, what's more, the controller can also improve the control effect adaptively for a kind of performance degradation model. The quality of control is improved further with the controller design based on PI control, which has industrial application prospects, with the adaptive process improving the robustness.

**Key words:** Gas turbine; Controller design; Genetic algorithm; PI control; Model-free adaptive control

## 1 引言

燃气轮机控制系统的基础目标是在满足其运行可靠性要求的基础上可以稳定地在某一转速下工作,以提供所需负荷。一般而言,其控制系统和航空发动机控制系统大同小异,基本由转速控制主回路和多个限制保护回路结合 Min-Max 选择结构组成<sup>[1]</sup>。在理论研究上,随着控制理论的发展,滑模控制、智能控制和其他一些先进控制算法都与燃气轮机控制系统的结合有相关研究进展<sup>[2-3]</sup>。而对于转速主控制回路以及其他保护回路而言,工业上常用燃气轮机的控制系统的核心方法还是经典的 PI (Proportional integral) 控制<sup>[4]</sup>。且由于燃气轮机的强非线性和时变性,某工况下整定出的 PI 参数不一定适用于燃气轮机的所有工作状态,所以实际中使用的是基于增益调度的 PI 控制。

经典的 PID (Proportional integral derivative) 控制器结构简单,参数少,被广泛地应用于实际生产生活中 90% 以上的控制系统。目前,在其参数整定研究上,最优化和智能化等现代方法正逐渐成为 Z-N (Ziegler-Nichols) 等传统参数整定方法的补充。且对现在已有的各种 PID 模块而言,主要分为基于增益调度的参数整定和自适应算法的参数整定。二者各有优劣,前者的整定过程是繁杂的,且由于动态过程性能的变化,控制器需要定期调整;而后的局限在于自适应调整参数可覆盖的范围是有限的<sup>[5]</sup>。

无模型自适应控制是一种利用系统的 I/O 数据来设计控制器的数据驱动控制方法。其核心思想是利用一个等价的动态线性化模型来代替一般离散时间非线性系统。具体通过 I/O 数据和在线估计算法来计算动态线性化模型中的伪偏导数等以实现自适应控制。

无模型自适应控制的输入输出有界的稳定性和跟踪误差的单调收敛性在早期都得到过证明<sup>[6]</sup>,目前不论是其控制结构与理论深入<sup>[7]</sup>还是与诸如神经网络<sup>[8]</sup>、粒子群算法<sup>[9]</sup>等智能控制方法的结合也已有很多理论上的研究进展;其参数整定方面的研究,主流

上是全格式的 MFAC 下可以相似 PID 结构进行经验性整定<sup>[10]</sup>和虚拟参考反馈<sup>[11]</sup>的整定方法;而在其实际应用中,在无人驾驶<sup>[12]</sup>、交通调度<sup>[13]</sup>、图像识别<sup>[14]</sup>等领域也都有成功的实践。但是,一方面考虑到常规的无模型自适应控制算法有较多参数需要提前进行整定,面对一个全新的研究对象时往往需要一段时间调试过程才能投入工业使用;另一方面,工业常用的基于增益调度的 PI 控制器设计往往无法考虑被控对象全部的性能变化来进行调度设计。

本文在利用遗传算法整定最优 PI 控制器对燃气轮机慢车及其以上模型进行转速控制的基础之上,基于 PI 型 MFAC 控制器参数整定思想,提出一种 PI 控制与无模型自适应控制相结合的控制器的设计:通过分析积分环节离散格式与紧格式无模型自适应控制 (CFDL-MFAC) 的相似性,考虑对 PI 控制器中的积分环节进行 MFAC 相似结构的替换,使得新的控制器能够在线自适应整定内部参数,面对工况变化的情况具有更好的动态特性。并在对这种新的控制器设计进行小案例仿真验证控制效果的基础上,也对燃气轮机的慢车及以上非线性部件级模型及其退化模型进行了进一步的对比仿真验证。

## 2 遗传算法整定 PI 参数

遗传算法是一种智能优化算法,能有效求解组合优化问题及非线性多变量,多目标的函数优化问题<sup>[15-17]</sup>。这里以建立的部件级燃气轮机慢车及其以上模型为控制对象,采用经典的牛顿-拉夫逊法迭代求解部件法模型。考虑到后文中方便对比两种控制器在调整转速时动态特性的不同,PI 控制器参数整定过程针对于燃气轮机慢车以上某一工作转速调节到慢车转速的动态过程,性能指标采用转速调节过程中实际转速与期望转速误差  $e(t)$  平方的积分

$$J = \int_{t_0}^{t_1} |e(t)|^2 dt \quad (1)$$

为进一步保证求解效率,这里采用最佳个体保存 (Elitist preserve) 的遗传算法对进行参数整定。根据每一个个体的 PI 参数对转速调节过程仿真完毕

后,采用上式的离散形式计算对应参数下的性能参数。PI 控制器整定的结构流程如图 1 所示。

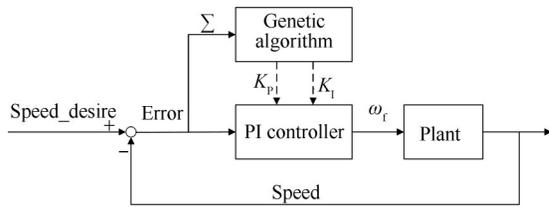


Fig. 1 Structure diagram of tuning PI controller based on genetic algorithm

遗传算法主要流程和基本参数设置如下:

(1)初始化。为减少优化计算的盲目性,提高效率,提前经验性地整定出大致的 PI 参数参考范围之后,在此预估范围内进行随机个体生成。个体数目取  $M=100$ 。

(2)选择操作。对每个个体进行适应度计算,使用个体对应的 PI 参数应用到控制器和燃气轮机模型进行联合仿真。适应度函数取为性能指标  $J$  平方的倒数。具体考虑用轮盘赌的方法来选择父代个体。

(3)交叉操作。交叉概率  $P_c$  设为 0.99,具体采用随机选点的实值交叉方法。

(4)变异操作。变异概率  $P_m$  设为 0.1,采用均匀变异的实值变异方法。

经过选择的父代个体在经过交叉变异操作之后生成下一代个体,并单独保留适应度最高个体。整个过程拟循环运行 100 代,重复计算三次,取其最优解。群体适应度变化如图 2 所示,可以看出在第 20 代左右群体适应度已经趋于稳定,而 20~100 代过程中群体适应度的波动是因为采用了较大的变异概率去搜索其他潜在的最优解导致。

另外,为相对直观地表现出通过遗传算法整定 PI 参数过程的优化效果,分别使用第一代随机生成种群中最优个体的 PI 参数与最后一代种群中的最优

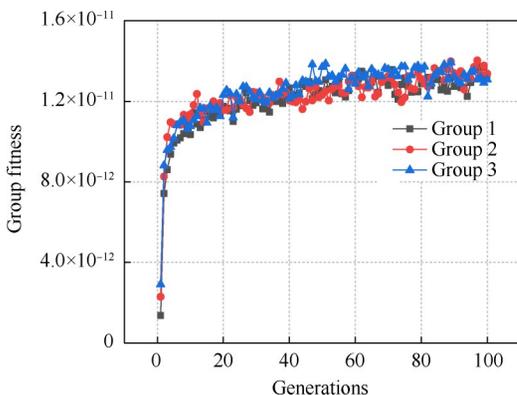


Fig. 2 Group fitness change with generations

个体的 PI 参数,针对整定时转速调节至慢车转速的动态过程进行了仿真对比(图中的转速以额定转速的百分比表示),如图 3 所示。

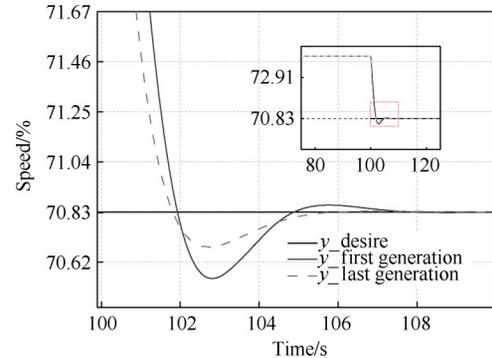


Fig. 3 Speed curves in different PI

而通过更进一步计算可以得出两次转速调节过程的性能指标  $J$  和相关动态性能参数经遗传算法整定控制器后的优化程度(这里调节时间以转速调节至慢车转速 0.2% 以内为指标),如表 1 所示。

Table 1 Changes of dynamic performance

Parameter	First generation	Last generation
$J$	$8.5533 \times 10^5$	$2.7410 \times 10^5$
Peak time/s	2.8200	2.7200
Regulating time/s	3.8700	2.9500
Overshoot/s	0.0039	0.0021

为保证整定结果接近理论最优,重复三次计算过程得到最优结果的误差棒和其中一次过程参数随遗传算法代数的变化如图 4 所示。

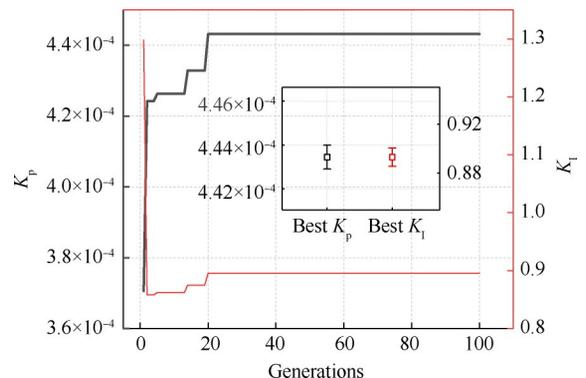


Fig. 4 Parameters change with generations and error bar of three calculations

从图 4 中可以看出,在第 20 代控制器的最优 PI 参数已经收敛,与前文群体适应度的观察结果估计基本一致。并且三次重复计算过程得到的三组最优参数误差很小。故认为优化计算结果可信,且在后

文采用最优的一组PI参数： $K_p=4.43158 \times 10^{-4}$ ； $K_i=0.895756$ 。

### 3 PI/MFAC组合控制器设计

在前文通过遗传算法完成对PI控制器参数整定的基础上,考虑CFDL-MFAC与PI控制器组合的控制器设计。在此之前,本节先对MFAC算法本身和组合控制器设计思想来源的参数整定方法做一定程度的介绍。

#### 3.1 动态线性化

一般实际受控系统的模型可以由下面的离散时间单输入单输出非线性系统描述。

$$y(k+1) = f(y(k), \dots, y(k-n_y), \dots, u(k), \dots, u(k-n_u)) \quad (2)$$

式中 $y(k)$ ,  $u(k)$ 分别表示受控系统的输出和输入,对燃气轮机转速控制而言,表示模型的转速输出和燃料输入,而 $n_y, n_u$ 分别表示受控系统输出和输入模型阶次。

对于无模型自适应控制算法而言,离散时间非线性系统的动态化线性方法包括紧格式动态线性化方法(CFDL)、偏格式动态线性化方法(PFDL)和全格式动态线性化方法(FFDL)。本文从结构相似角度考虑紧格式动态线性化方法,且其可调参数相对较少,结构简单。

对紧格式的无模型自适应控制在应用中,被控对象需满足以下假设条件<sup>[18]</sup>:

除有限点外,对所有 $k$ 而言

非线性系统描述函数 $f(\dots)$ 对 $(n_y+2)$ 个控制输入变量的偏导数是连续的。

系统(1)满足广义的Lipschitz条件,  $|y(k_1+1) - y(k_2+1)| \leq b|u(k_1) - u(k_2)|$ , 其中对任意 $k_1 \neq k_2$ 有 $u(k_1) \neq u(k_2)$ , 且 $b$ 为正常数。

这两个假设前提对于实际中绝大多数的非线性系统都是适用的。对于燃气轮机转速控制过程而言,以上的连续性假设和有界性假设也都是满足的。于是基于以上假设,一定存在着一个有界的伪偏导数 $\phi(k)$ ,使得CFDL模型成立<sup>[18]</sup>。

$$\Delta y(k+1) = \varphi(k)\Delta u(k) \quad (3)$$

式中,定义 $\Delta y(k+1) = y(k+1) - y(k)$ ,  $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$ 。

#### 3.2 控制算法与参数整定

基于动态线性化模型的建立,由类似改进的投影算法的思想,求其准则函数的极值后引入步长因子即得到CFDL-MFAC的控制律<sup>[19]</sup>为

$$u(k) = u(k-1) + \frac{\rho\phi(k)}{\lambda + |\phi(k)|^2} \cdot (y^*(k+1) - y(k)) \quad (4)$$

式中, $\lambda > 0$ 为惩罚因子,用来限制输入量的变化, $\rho \in (0, 1]$ 为步长因子, $y^*$ 为期望输出。并且进一步,由这种控制律的对称相似结构可以给出一种有效的伪偏导数估计律<sup>[20]</sup>,即

$$\hat{\phi}(k) = \hat{\phi}(k-1) + \frac{\eta\Delta u(k-1)}{\mu + |\Delta u(k-1)|^2} \cdot (\Delta y(k) - \hat{\phi}(k-1)\Delta u(k-1)) \quad (5)$$

式中, $\mu > 0$ 为惩罚因子,用来限制伪偏导数估计值的变化, $\eta \in (0, 2]$ 为步长因子。

且出于应用上的考虑,在对伪偏导数估计明显不合理的情况下重置伪偏导数,其中 $\varepsilon$ 为任意小的常数<sup>[21]</sup>。

$$\begin{aligned} \hat{\phi}(k) = \hat{\phi}(0) \quad & \text{if } |\hat{\phi}(k)| \leq \varepsilon \\ & \text{or } \text{sign}(\hat{\phi}(k)) \neq \text{sign}(\hat{\phi}(0)) \\ & \text{or } |\Delta u(k-1)| \leq \varepsilon \end{aligned} \quad (6)$$

同理,根据不同的动态线性化模型(偏格式或全格式)和响应的假设条件,可以得到与之对应的无模型自适应控制律和相应的伪梯度向量或伪Jacobi矩阵估计算法。文献[10]根据离散形式PI/PID控制律与两种模型阶次下FFDL-MFAC控制律结构的相似性,分别提出了基于经验方法整定PI/PID控制器参数的MFAC参数整定方法。下面以PI型MFAC为例给出文献中的相应结论:对于系统输入阶次和系统输出阶次都为1的FFDL-MFAC有

$$\Delta y(k+1) = \phi_1(k)\Delta y(k) + \phi_2(k)\Delta u(k) \quad (7)$$

式中 $\phi_1(k)$ ,  $\phi_2(k)$ 为伪梯度向量中的元素,其对应的控制律等价于

$$\begin{aligned} \Delta u(k) = & \left[ \frac{\rho_2 \hat{\phi}_2(k)}{\lambda + |\hat{\phi}_2(k)|^2} + \frac{\rho_1 \hat{\phi}_2(k) \hat{\phi}_1(k)}{\lambda + |\hat{\phi}_2(k)|^2} \right] e(k) - \\ & \frac{\rho_1 \hat{\phi}_2(k) \hat{\phi}_1(k)}{\lambda + |\hat{\phi}_2(k)|^2} e(k-1) \end{aligned} \quad (8)$$

而对于离散的PI控制器,满足

$$\Delta u(k) = K_p \left( 1 + \frac{t_s}{t_i} \right) e(k) - K_p e(k-1) \quad (9)$$

式中 $K_p$ 为比例常数, $t_i$ 为积分常数, $t_s$ 为系统采样时间。于是在初始化MFAC控制器伪梯度向量之后,通过建立起MFAC与PI控制相关参数的桥梁——根据误差项系数对应相等来计算整定出步长因子和惩罚

因子的值,使得整定PI控制器参数的一系列经验方法都可以应用到MFAC的参数整定上。

### 3.3 积分环节相似结构

基于以上对无模型自适应控制和相似结构下参数整定方法的简要介绍,考虑到基于增益调度的PI控制无法兼顾所有的系统动态变化,且对于最简单的CFDL-MFAC本身的参数整定除伪偏导数初值外也有两个步长因子和两个惩罚因子需要提前确定。于是受PI型MFAC参数整定时利用相似结构的启发,提出一种PI与CFDL-MFAC组合的控制器设计。

对PI控制器单独的积分环节离散化处理,即从式(9)中去除比例环节,可以得到

$$\Delta u(k) = K_p \left( \frac{t_s}{t_i} \right) \cdot e(k) \quad (10)$$

对于调节问题有

$$e(k) \equiv y^* - y(k) \quad (11)$$

将式(11)带入式(4)后对比式(10),可以发现CFDL-MFAC与PI控制器的积分环节结构的相似性,相似结构下二者的对应误差项系数需满足对应关系

$$K_p \left( \frac{t_s}{t_i} \right) = \frac{\rho \cdot \phi(k)}{\lambda + |\phi(k)|^2} \quad (12)$$

于是在满足式(12)的相似结构参数对应相等前提下,考虑可以对PI控制器结构下的积分环节进行相似CFDL-MFAC的替换,形成二者相互结合的PI/MFAC组合控制器,控制器的环节替换过程如图5所示。

基于这种无模型自适应控制与经典PI控制结合

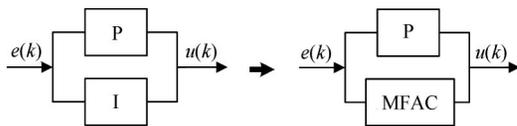


Fig. 5 Combined structure of PI controller and model-free controller

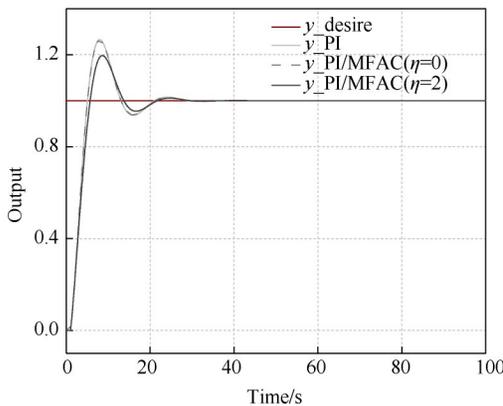


Fig. 6 System block diagram in simulink and simulation results

成新的控制器形式,以工业常见的惯性滞后模型为对象,考虑对此控制器的效果进行仿真验证,具体对象的传递函数模型取

$$G(s) = \frac{e^{-s}}{3s + 1} \quad (13)$$

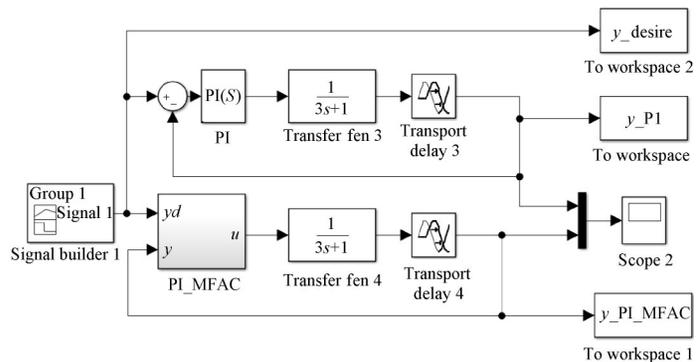
PI控制器参数取 $K_p=0.5, K_i=1$ ;而对应于积分相似的CFDL-MFAC控制器参数取 $\phi(0)=1, \rho=0.01, \lambda=1$ 。系统采样时间取0.01s。Simulink系统框图及仿真结果如图6所示。

整个系统仿真过程重复两次,分别设置伪偏导数估计算法的步长因子 $\eta=0$ 和 $\eta=2$ 。从式(4)可以看出,当 $\eta=0$ 时理论上无模型自适应控制过程中不再进行伪偏导数的自适应更新。MFAC此时完全相似于一个积分环节,这种情况下PI/MFAC控制器和PI控制器的阶跃响应完全重合;而当 $\eta=2$ 时,无模型自适应控制在相似于积分环节的基础上,同时根据控制过程的I/O数据对伪偏导数进行自适应的调整,从图6仿真结果也可以看出,PI/MFAC控制器的响应表现出更少的超调量和更快的调节时间。

### 3.4 联合燃机模型的仿真

在仿真中,燃气轮机模型采用和前文遗传算法整定PI控制器参数时相同的部件级慢车以上模型,整个过程在Simulink中进行,系统采样时间取为0.01s。整个系统的结构图与图1相似(这里不再重复给出系统图),具体只是将遗传算法整定参数的模块去除并将PI控制器换成PI/MFAC组合控制器,而PI/MFAC组合控制器结构已由前文图5指出。

伪偏导数初值的选取,根据图3仿真过程中慢车附近的转速调节前后,模型稳态运行时燃料量的差值与燃气轮机转速的差值,经由式(3)计算可以得到相对合理的估计值,这里具体取为 $\phi(0)=8500$ 。PI/MFAC控制器中无模型自适应部分相关参数在确定伪偏导数初值的情况下,依据前文遗传算法整定的



PI 参数和式 (12) 进行计算可以得出  $\rho=0.03374, \lambda=1$ 。而与伪偏导数估计算法相关的步长因子  $\eta$  和惩罚因子  $\mu$  是对伪偏导数自适应更新速率的调节和对估计算法稳定性的调控, 可以方便地依据经验手动进行取值。

因为采用牛顿-拉夫逊法对部件级模型求解, 计算量偏大, 仿真开始时需要运行一定时间收敛至稳态。于是系统仿真过程先于某一慢车以上燃料量下保持运行 100s 至稳态以后再切换控制器接管模型的燃料量控制。

仿真过程的期望转速信号为 300s 阶跃至 83% 额定转速和 500s 阶跃至额定转速的阶梯信号。分别就 PI/MFAC 控制器的伪偏导数不进行更新和进行更新的过程进行仿真, 并与之前单独的 PI 控制器控制仿真过程进行对比。全过程系统仿真的转速变化如图 7 所示。

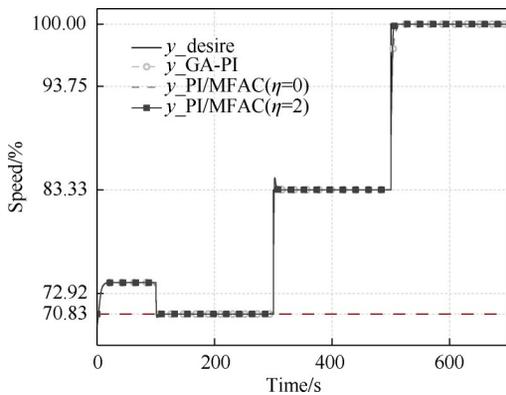
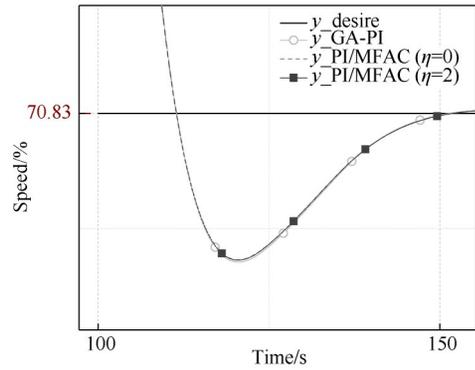


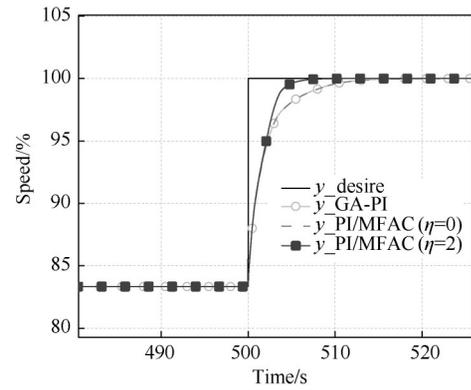
Fig. 7 Speed response of system simulation

图 7 从全局上看, 基于遗传算法离线整定参数的 PI 控制器和 PI/MFAC 组合控制器对慢车以上模型的转速控制都响应迅速且超调不大。为进一步观察二者的差别, 对系统仿真调整至慢车转速和调整至额定转速的转速响应过程进行局部放大, 具体如下图 8 所示。

图 8(a) 为慢车以上转速调整至慢车转速过程的响应曲线。因 PI/MFAC 控制器相关的参数是根据整定的最优 PI 参数在相似结构下进一步确定。而 PI 参数的整定过程是在相同的系统变化下基于遗传算法完成的, 所以控制过程在以 ISE 的性能指标下几乎已经是最优。因而无论 PI/MFAC 控制器的步长因子取  $\eta=0$  或  $\eta=2$ , 都无法对此控制过程进行更进一步的优化。而转速变化曲线超调量细微的减小是由于相似结构替换的计算误差引起, 伪偏导数是否迭代更新几乎无法影响控制效果。



(a) Idle speed response



(b) Rated speed response

Fig. 8 Partial enlarged view of fig.7

而当燃气轮机在不同转速下工作时, 工况条件改变使得部件级模型产生非线性的动态变化, 理论上对慢车转速下遗传算法整定的 PI 控制器效果产生影响。图 8(b) 为针对转速调节至额定转速的系统仿真过程曲线。可以看出, GA-PI 控制过程调节时间明显变长, 以燃气轮机调节到额定转速的 1% 以内为指标, 调节时间为 7.38s (对比图 8(a) 慢车转速的调节过程以 0.5% 为指标的调节时间仅为 2.05s)。

从图 8(b) 可以进一步看出, 当步长因子  $\eta=0$  时, 伪偏导数不进行更新的 PI/MFAC 组合控制器的曲线与基于遗传算法离线整定的 PI 控制器几乎完全一致, 这也和图 6 中步长因子  $\eta=0$  的情况一致, 都证明了 CFDL-MFAC 与 PI 的积分环节结构相似性的结论。而当步长因子  $\eta=2$ , 控制器 MFAC 部分进行伪偏导数自适应更新时, PI/MFAC 控制器的调节时间明显缩短, 在同样以调节到额定转速的 1% 以内为指标的情况下, 其调节时间仅为 3.82s, 较之前文的 PI 控制器缩短了 3.56s。

图 9 为压气机出口温度 ( $T_3$ ), 出口压力 ( $p_3$ ) 和燃气涡轮出口温度 ( $T_6$ ) 在图 8(b) 转速控制过程的系统仿真下, 燃气轮机部件关键截面参数的监测响应过程。由其燃气轮机转速的响应过程可以看出, 当无

模型自适应部分取步长因子  $\eta=0$  时,PI/MFAC组合控制器和原PI控制器控制下的系统响应几乎完全一致,于是对于燃气轮机部件各出口温度压力的响应都只考虑对步长因子取  $\eta=2$  的情况;另一方面考虑到系统调整至慢车过程两种控制器的对比并不明显,于是主要针对系统仿真至额定转速过程的响应进行对比。从各个图的对比中都可以看出PI/MFAC组合控制器表现出比PI控制器更快的响应速度和更少的超调量。

转速控制过程中对以上非控制参数的监测表明,PI/MFAC在转速控制中更快的自适应过程不会使得温度压力的变化比原有PI的控制过程产生更多超

调(不是以牺牲某些部件的正常运行来达到的,从另一方面验证了这一控制器的合理性)。

最后,对建立的燃气轮机部件级慢车以上模型,考虑一种性能退化情况对模型的影响后结合控制器进行仿真,对比两种控制器面对性能退化情况下的控制效果和鲁棒性。

性能退化过程主要考虑压气机部件的退化,因气体流量是压气机污染性能退化的重要影响因素<sup>[22]</sup>,使用退化因子法来模拟性能退化对燃气轮机模型压气机部件的影响时,主要考虑流量损失和效率损失两部分,具体取二者都为10%的情况。

图10为该性能退化模型下重复图8(b)的燃气轮机转速仿真过程。对比图8(b)可以发现,在退化模型下燃气轮机调节至额定转速过程的时间明显变长。当同样以调节到额定转速的1%以内为稳定指标,此时PI控制器的调节时间为8.97s,而PI/MFAC组合控制器通过对内部参数的自适应更新具有更好的动态性能,其调节时间为7.01s,较之缩短了1.96s。

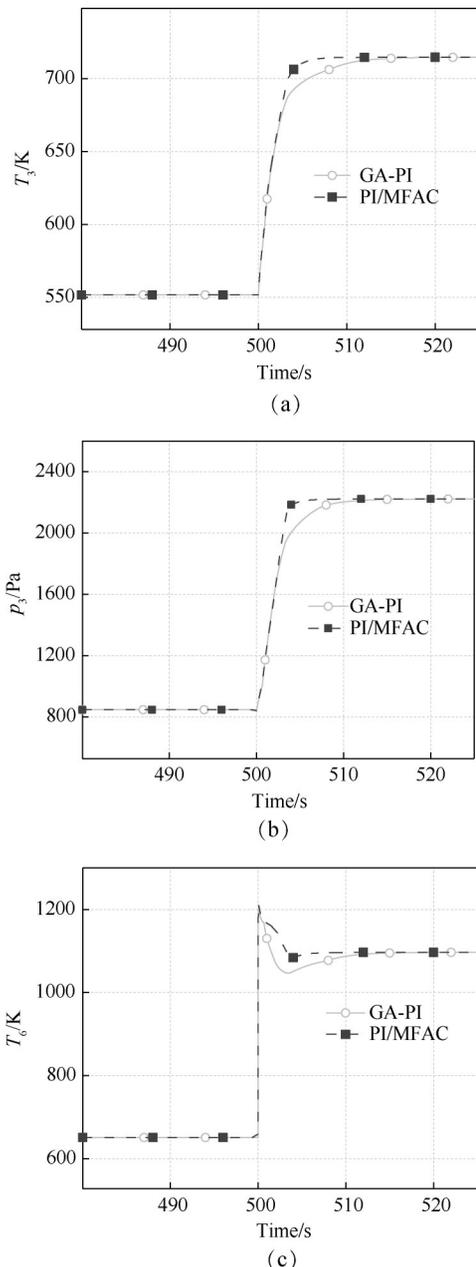


Fig. 9 Response curves of  $T_3, p_3, T_6$  with different controllers near rated speed

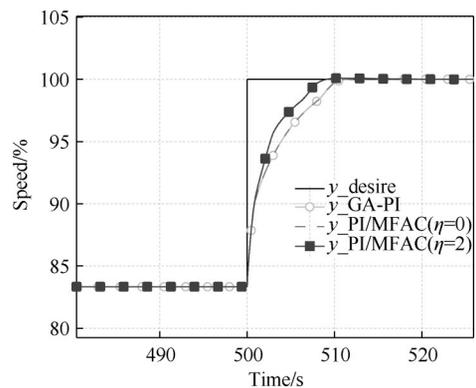


Fig. 10 Speed response based on performance degradation

图11为性能退化模型下对应于图9过程,在燃气轮机转速调节过程中对其部件关键截面参数  $T_3, p_3, T_6$  的仿真监测曲线图。在燃气轮机主要部件出口的气体参数的曲线变化对比中也都可以看出PI/MFAC组合控制器在面对燃气轮机部件性能退化的情况,也表现出比原PI控制器更快的响应速度和更少的超调量。且此动态性能的改善不会以牺牲燃气轮机部件关键截面的正常工作参数范围为代价。

整体的仿真过程表明,无论是控制器面向仿真工况改变至额定转速附近的调节过程,还是一种性能退化情况下的转速调节过程,所提出的一种PI控制和MFAC结合的组合控制器设计,都表现出比遗传算法离线整定的PI控制器更好的动态性能以及鲁棒性。

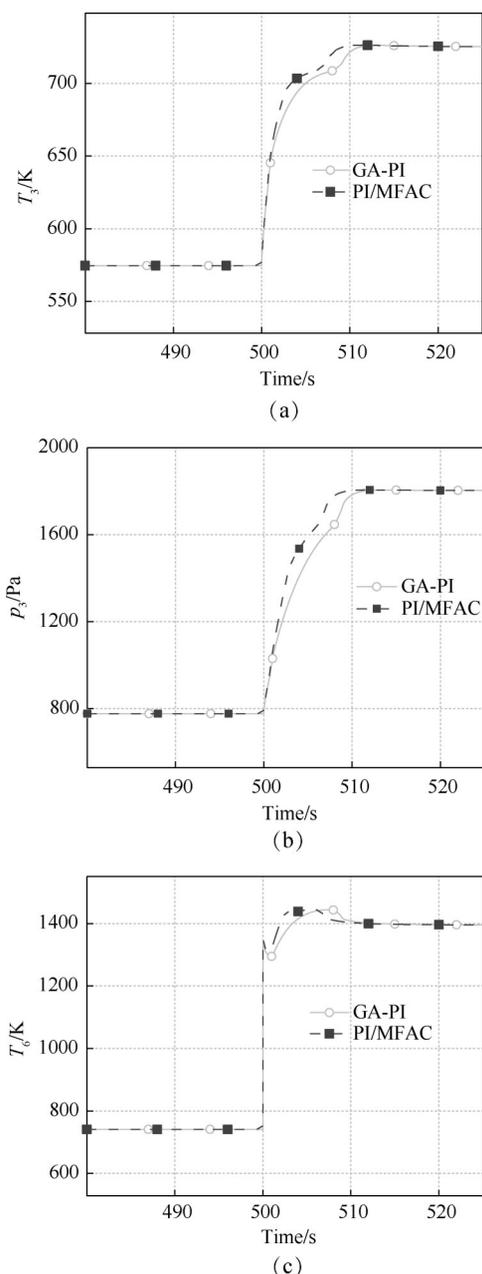


Fig. 11 Response curves of  $T_3$ ,  $p_3$ ,  $T_6$  with different controllers near rated speed based on performance degradation

## 4 结论

通过本文研究,得到以下结论:

(1)采用遗传算法可以有效地针对燃气轮机转速的某一调节过程进行PI控制器参数整定,超调量等动态性能在迭代中都得到优化。

(2)CFDL-MFAC与离散格式下PI控制的积分环节有相似的结构,在对PI控制器积分环节进行替换后形成的组合控制器对于惯性滞后模型表现出更好的控制效果。

(3)基于PI/MFAC组合的燃气轮转速控制器,较之慢车转速附近由GA离线整定的PI控制器,在额定转速的调节过程和考虑性能退化的情况下表现出更好的动态性能和鲁棒性。

致谢:感谢中国科学院轻型动力创新研究院创新引导基金项目的资助。

## 参考文献

- [1] Richter H, Litt J. A Novel Controller for Gas Turbine Engines with Aggressive Limit Management [C]. *San Diego: Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 2011.
- [2] Hanz Richter. Multiple Sliding Modes with Override Logic: Limit Management in Aircraft Engine Controls [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2012, 35(4): 1132-1142.
- [3] Junxia Mu. Advanced Controller Design for Aircraft Gas Turbine Engines [J]. *Control Engineering Practice*, 2005, 13(8): 1001-1015.
- [4] 薛银春, 孙健国. 燃气轮机控制技术综述[J]. *航空动力学报*, 2005, 20(6): 1066-1071.
- [5] Yun Li. Patents, Software, and Hardware for PID Control: An Overview and Analysis of the Current Art [J]. *Control Systems IEEE*, 2006, 26(1): 42-54.
- [6] 侯忠生. 非参数模型及其自适应控制理论[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [7] 管庭筠, 李秋红. 基于改进无模型自适应算法的涡扇发动机限制保护控制方法[J]. *推进技术*, 2020, 41(10): 2348-2357. (GUAN Ting-jun, LI Qiu-hong. Control Method for Limit Protection of Turbofan Engine Based on Improved Model Free Adaptive Algorithm [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(10): 2348-2357.)
- [8] Leandro dos Santos Coelho. Model-Free Adaptive Control Optimization Using a Chaotic Particle Swarm Approach [J]. *Chaos Solitons & Fractals*, 2009, 41(4).
- [9] Leandro dos Santos Coelho, Marcelo Wicthoff Pessoa, Rodrigo Rodrigues Sumar, et al. Model-Free Adaptive Control Design Using Evolutionary-Neural Compensator [J]. *Expert Systems with Applications*, 2010, 37(1): 499-508.
- [10] 郭代银. 无模型自适应控制参数整定方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [11] 金尚泰, 赵汝莉, 侯忠生, 等. 基于虚拟参考反馈整定的改进无模型自适应控制[J]. *控制与决策*, 2015, 30(12): 2175-2180.
- [12] 田涛涛, 侯忠生, 刘世达, 等. 基于无模型自适应控制的无人驾驶汽车横向控制方法[J]. *自动化学报*, 2017, 43(11): 1931-1940.
- [13] 侯忠生, 晏静文. 带有迭代学习前馈的快速路无模型

- 自适应入口匝道控制[J]. 自动化学报, 2009, 35(5): 588-595.
- [14] 鲁迪. 无模型自适应控制方法在图像识别中的应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [15] 席裕庚, 柴天佑. 遗传算法综述[J]. 控制理论与应用, 1996, 13(6): 697-708.
- [16] Jamshidi Mo. Tools for Intelligent Control: Fuzzy Controllers, Neural Networks and Genetic Algorithms [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2003 (361): 1781-1808.
- [17] Katoch S, Chauhan S S, Kumar V. A Review on Genetic Algorithm: Past, Present, and Future [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2021, 80(4).
- [18] Hou Zhongsheng, Jin shangtai. Model Free Adaptive Control[M]. USA: Boca Raton, 2013.
- [19] 侯忠生, 韩志刚. 非线性系统参数估计及与之对偶的自适应控制[J]. 自动化学报, 1995, 21(1): 122-125.
- [20] 侯忠生, 黄文虎, 韩志刚. 自校正控制系统的对称相似结构设计初探: 参数模型情形[J]. 控制与决策, 1998(s1): 3-5.
- [21] Hou Zhongsheng, Xiong Shuangshuang. On Model Free Adaptive Control and Its Stability Analysis [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2019, 64 (11) : 4555-4569.
- [22] Diakunchak I S. Performance Deterioration in Industrial Gas Turbines [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1992, 114(2): 161-168.

(编辑:朱立影)