

基于人工蜂群算法优化的燃气发生器 压强自适应模糊免疫PID控制*

柴金宝¹, 陈 雄¹, 周景亮¹, 何 坤²

(1. 南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094;

2. 四川航天系统工程研究所, 四川 成都 610100)

摘 要: 固冲发动机燃气流量控制系统因具有较强的非线性和时变性, 导致其控制问题较难解决。为了实现对燃气压强的精确闭环控制, 设计了基于人工蜂群算法优化的自适应模糊免疫PID (ABC-AFI-PID) 控制器。控制器的比例系数由模糊免疫控制器在线修正, 积分和微分系数由自适应模糊控制器实时调整, 并应用人工蜂群算法对控制器的设计参数进行鲁棒优化。采用ABC-AFI-PID控制器、自适应模糊PID (AF-PID) 控制器和传统PID控制器分别对某滑盘阀式流量控制系统的线性和非线性模型进行仿真, 来验证控制器在设计工作点 (7.24MPa) 附近以及全压强调节范围内的动态性能和稳态性能。结果表明: 在不同的工况下, ABC-AFI-PID控制器体现出良好的品质。相比于AF-PID控制器可将压强响应速度提高约1.8~2.5倍, 相比于传统的PID控制器可将压强响应速度提高约4.6~5.1倍, 并且其超调量也被控制在7.14%以内。该控制器在快速性、稳定性和鲁棒性上均展现出了巨大优势, 显著地提高了燃气流量控制系统的性能。

关键词: 燃气发生器; 燃气流量控制; 参变系统; 自适应PID; 模糊免疫算法; 人工蜂群算法

中图分类号: V435*.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2019) 02-0441-08

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.170800

Adaptive Fuzzy Immune PID Control for Gas Generator Pressure Based on Artificial Bee Colony Algorithm Optimization

CHAI Jin-bao¹, CHEN Xiong¹, ZHOU Jing-liang¹, HE Kun²

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Systems Engineering Institute of Sichuan Aerospace, Chengdu 610100, China)

Abstract: Gas flow control system for solid rocket ramjet is difficult to be solved due to its strong nonlinear and time-varying characteristics. Adaptive fuzzy immune PID controller based on artificial bee colony algorithm (ABC-AFI-PID) optimization was designed in order to achieve accurate pressure closed-loop control. The proportionality of controller was duly corrected by fuzzy immune controller, the integral and derivative coefficients were adjusted by adaptive fuzzy controller in real time, and the artificial bee colony algorithm was used to robustly optimize the design parameters. The linear and nonlinear models of a sliding disc valve flow control system were simulated by using ABC-AFI-PID controller, AF-PID controller and traditional PID controller to verify the dynamic and steady-state performance of the new controller nearby design working point (7.24MPa) and full pres-

* 收稿日期: 2017-12-07; 修订日期: 2018-01-28。

基金项目: 总装备部预先研究项目 (404040301); 国家自然科学基金 (51606098); 江苏省自然科学基金 (BK20140772)。

作者简介: 柴金宝, 硕士生, 研究领域为固冲发动机燃气流量调节技术。E-mail: 654991492@qq.com

通讯作者: 陈 雄, 博士, 教授, 研究领域为航空宇航推进理论与工程。E-mail: chenxiong@njust.edu.cn

sure regulation range. Simulation results show that ABC-AFI-PID controller is in possession of good quality at different working conditions. Compared with AF-PID controller, the response speed of pressure can be increased by about 1.8~2.5 times; compared with traditional PID controller, the response speed of pressure can be increased by about 4.6~5.1 times. And its overshoot is also controlled within 7.14%. This controller has shown great advantages in rapidity, stability and robustness characteristics. Hence, the performance of gas flow control system is remarkably improved.

Key words: Gas generator; Gas flow control; Parameter-varying system; Adaptive PID; Fuzzy immune algorithm; Artificial bee colony algorithm

1 引 言

固体火箭冲压发动机兼具固体火箭发动机和冲压发动机的优点,能够满足新一代超声速巡航导弹对机动性与灵活性的需求,因此成为各国正在研制的新型推进系统^[1-2]。固冲发动机工作性能的高低依赖于来流空气质量与燃气质量的比值(空燃比),当空燃比在一定范围内时可使发动机的工作性能和安全性能达到最佳^[3]。而空气流量会随着导弹的飞行状态(如飞行高度、攻角及马赫数等)的变化而变化,同时发动机的推力也与燃气发生器产生的富燃气体流量密切相关^[4],因此对燃气流量进行有效的控制可使发动机具有良好的工作性能及推力调节能力。

目前,研究较多的燃气流量控制方案主要是变喉面式,通过机械阀门调节燃气发生器的喷喉面积来控制燃气压强,从而调节推进剂的燃速以控制燃气流量^[5]。尽管设计起来比较困难,但具有高调节比和较理想的控制效果。较为熟知的GQM-163超声速掠海靶弹、“流星”超视距空空导弹和俄罗斯研制的R-77M-PD空空导弹的燃气流量控制方案都采用的变喉面式^[6]。国内各航空航天院所及某些高等学校也纷纷对燃气流量控制进行理论与实验研究^[7],但是在压强控制方面取得的成果并不多。

燃气发生器在工作时,推进剂燃速的非线性和自由容积的时变性使压强控制算法设计起来较为困难,关于压强控制的文献也较少。聂聆聪等^[8]提出的模糊积分算法使燃气发生器具有较小的超调,解决了传统PID不适合控制流量调节系统的问题,但比例系数无法自整定导致系统响应时间较长。何坤等^[9]设计了模糊PI算法并对不同工况下的线性模型进行了仿真,得出该算法能够解决自由容积时变性带来的控制效果差的难题,但是忽略了微分作用且控制器的抗干扰能力未知。刘源翔等^[10]为使系统超调量达到最低,采用线性自抗扰控制器来补偿系统参变的影响,使系统的抗扰能力更强的同时提高了一定

的响应速度。上述研究的压强控制算法虽然可实现压强在一定范围内的自适应控制,但选用的设计参数均由经验值确定,并没有达到最优的控制效果,使得压强响应时间仍然较长,同时稳态性能也并非最佳。

传统的PID控制算法在控制诸如本文所研究的非线性时变系统时,对系统参数扰动的鲁棒性不强,因此需要寻求更加合适的算法^[11]。模糊控制不依赖系统精确的数学模型,将自然语言表述成控制策略,具有很强的灵活性和适应性,非常适合控制非线性参变系统^[12]。近年来,免疫反馈算法已经被证明拥有很强的鲁棒性和自适应、自学习能力,已经被广泛地应用在各个工程领域^[13]。

为提高燃气流量控制系统的控制精度,本文将模糊控制、免疫反馈控制和传统的PID控制相结合,引入自适应模糊免疫PID控制器来对燃气发生器内压强进行闭环控制。为减小设计参数对控制效果的影响,采用新兴的群集智能优化算法——人工蜂群算法对控制器的设计参数进行鲁棒优化,并通过对不同工况下的滑盘阀式燃气流量控制系统进行压强控制仿真。结果显示,ABC-AFI-PID控制器相比于AF-PID控制器和传统的PID控制器,显著地提高了燃气流量控制系统的动态性能和稳态性能。

2 燃气发生器与系统模型

2.1 流量可调燃气发生器

本文研究的滑盘阀式流量控制系统如图1所示,主要由燃烧室、压力传感器、控制板、伺服电机、减速箱、和滑盘阀等组成。燃烧室内的压强由压力传感器采集并传递给控制器,控制器根据目标压强与实际压强的偏差控制电机及减速器的转角增量,使滑盘阀转动改变喷喉面积,实现压强闭环控制。控制过程中的有效喷喉面积为图2的阴影部分面积 A_1 。图中, R 为滑盘阀的通孔半径, L 为滑盘阀的摆动半径, θ 为滑盘摆角。由几何关系可导出 A_1 与 θ 满足^[14]

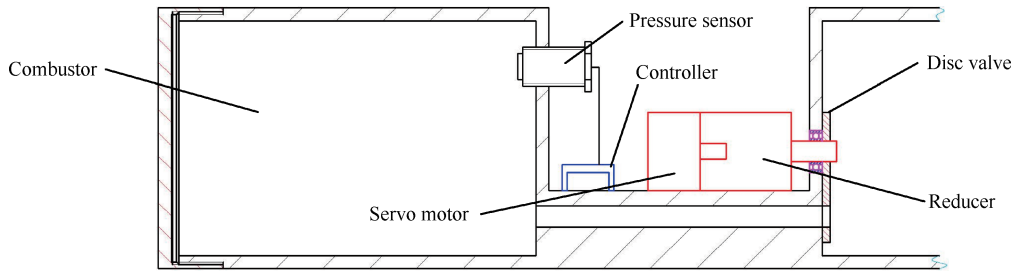


Fig. 1 Gas flow control system with sliding disc valve

$$A_t = 2R^2 \arccos\left(\frac{L}{R} \sin \frac{\theta}{2}\right) - 2R \cdot L \sin \frac{\theta}{2} \sin\left[\arccos\left(\frac{L}{R} \sin \frac{\theta}{2}\right)\right] \quad (1)$$

图3为 $\theta=0^\circ \sim 30^\circ$ 时,与有效喷喉面积 A_t 对应的曲线图,从图中容易看出 θ 在 $0^\circ \sim 20^\circ$ 左右变化时, A_t 近似满足线性关系,只有在 $25^\circ \sim 30^\circ$ 时,才体现出较强的非线性。因此,为使研究方便并考虑后续实验所需的压强调节范围,将 θ 设定在 $0^\circ \sim 15^\circ$,从而由压强和喷喉面积的稳态关系得出压强的调节范围为 $2.78\text{MPa} \sim 12.15\text{MPa}$ 。

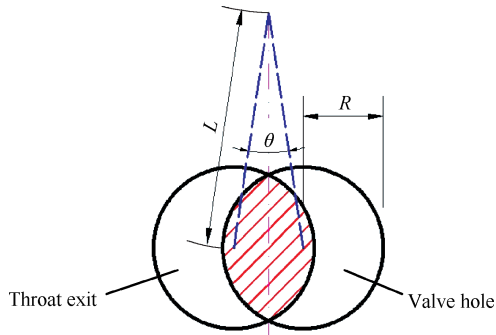
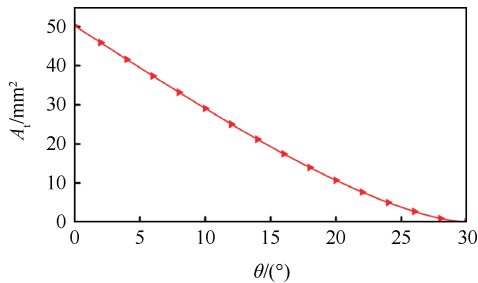


Fig. 2 Schematic diagram of effective throat area

Fig. 3 Numerical relationship between θ and A_t

2.2 控制系统的数学模型

对于端面燃烧的燃气发生器,在燃烧过程中近似满足零维内弹道微分方程^[15]

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\Gamma^2 C^{*2}}{V} \left(\rho_p A_b a p^n - \frac{p \cdot A_t}{C^*} \right) \quad (2)$$

式中 p 和 A_t 分别为燃气发生器的压强和喉部面积, ρ_p 和 C^* 分别为推进剂的密度和特征速度, A_b 为燃

面面积, a 和 n 分别为燃速系数和压强指数。式(2)是非线性方程,为系统的非线性模型,表征了控制系统的非线性。为研究方便,将式(2)在某一平衡压强 p_0 处进行线性化并取拉氏变换,可得

$$G_p(s) = \frac{P(s)}{A_t(s)} = \frac{K_0}{T_1 s + 1} \quad (3)$$

$$K_0 = \frac{p_0}{n \rho_p A_b a p_0^{n-1} C^* - A_{t0}} \quad V_0 = \frac{V_0}{\Gamma^2 C^* (A_{t0} - n \rho_p A_b a p_0^{n-1} C^*)}$$

式中 Γ 为比热比函数, A_{t0} 和 V_0 分别为平衡点处的喉部面积和空腔自由容积。由2.1节分析可知, A_t 与 θ 可视为线性关系,满足式(4)。由于执行机构伺服电机与滑盘之间连有减速箱,在输出扭矩足够的情况下电机转角 θ_m 与滑盘转角 θ 满足式(5)

$$\frac{A_t(s)}{\theta(s)} = K_\theta \quad (4)$$

$$\frac{\theta(s)}{\theta_m(s)} = i \quad (5)$$

式中 i 为齿轮箱的减速比。根据式(3)~(5)可得出系统输入与输出的传递函数为

$$G(s) = \frac{P(s)}{\theta_m(s)} = \frac{K_1}{T_1 s + 1} \quad (6)$$

式中 $K_1 = i \times K_0 \times K_\theta$ 。在压强控制过程中,压强和喷喉面积会随时间变化,而推进剂燃烧也会使燃烧室内的自由容积变化,由式(3)可知 K_1 与 T_1 均随时间变化,因此系统具有较强的时变性。以上讨论表明压强控制系统是一个强非线性时变系统,若要精确控制压强,传统的PID算法显然达不到要求,需要寻求更合适的控制算法。

3 控制器设计

随着智能控制理论的发展,具有自适应能力的算法在对强复杂性、非线性、滞后性和耦合性的系统控制上的优势受到了人们的青睐。而以模糊算法和PID相结合的自适应模糊PID算法已经在各个工程

领域上得到了应用,并取得了令人满意的效果。免疫反馈算法因具有较快的响应速度,也得到广泛地应用。本文结合几种算法的优点,引入自适应模糊免疫PID控制器进行压强控制,既可提高系统的响应速度,又能达到较高的稳态精度。

3.1 模糊免疫控制

免疫控制是模拟生物机体在面对外来抗原入侵时通过自身的免疫反应,消除抗原来避免机体受损的一种自适应控制。以体液免疫为例,当有抗原入侵时,T细胞感受信息并分化为 T_H 和 T_S 细胞。其中 T_H 细胞的作用是促进B细胞的产生,而 T_S 细胞是为了抑制B细胞的产生。抗原较多时, T_H 细胞较多而 T_S 细胞较少,产生较多的B细胞和抗体并及时清除抗原;抗原较少时, T_H 细胞较少而 T_S 细胞较多,随着时间的推移使免疫系统逐渐平衡^[16]。

基于以上原理,假设在处理第 k 代抗原 $\varepsilon(k)$ 时B细胞接收的总刺激为

$$S(k)=T_H(k)-T_S(k) \tag{7}$$

$$T_H(k)=k_1\varepsilon(k),T_S(k)=k_2f(S(k),\Delta S(k))\varepsilon(k)$$

式中 k_1 为促进系数, k_2 为抑制系数, $f(\cdot)$ 为一非线性函数,表征细胞抑制刺激能力的大小。若将 $\varepsilon(k)$ 替换成压强控制偏差 $e(k)$, $S(k)$ 替换成控制器的输出 $u(k)$,则控制律(7)可改写为^[17]

$$u(k)=K[1-\eta f(u(k),\Delta u(k))]e(k)=K_{p1}e(k) \tag{8}$$

式中 $K=k_1$,表征系统的快速性; $\eta=k_1/k_2$,表征系统的稳定性。合理地调整两个参数,可使系统响应速度快的同时超调量也较小。

免疫控制器中的 $f(\cdot)$ 的选择对控制性能影响较大,因此,本文使用一个二维输入一维输出的Mamdani型模糊控制器对 $f(\cdot)$ 进行逼近。模糊控制器的输入为免疫控制器的输出 $u(k)$ 和输出变化率 $\Delta u(k)$,输出为抑制函数 $f(\cdot)$ 的值。将 $u(k)$ 和 $f(\cdot)$ 用三个模糊

集 P (正)、 N (负)和 ZO (零)模糊化,将 $\Delta u(k)$ 用两个模糊集 P 和 N 模糊化。其隶属度均定义在 $(-\infty,+\infty)$ 区间内^[18]。为保证系统的稳定性,参考文献[19]的方法使用Lyapunov综合法导出模糊规则,见表1。将模糊免疫控制与PID算法结合,得到基于增量式的模糊免疫PID控制律为

$$u(k)=u(k-1)+K_{p1}[e(k)-e(k-1)]+K_{i0}e(k)+K_{d0}[e(k)-2e(k-1)+e(k-2)] \tag{9}$$

Table 1 Fuzzy rule table for $f(\cdot)$

Δu	u		
	N	ZO	P
N	P	P	ZO
P	ZO	N	N

K_{p1} 实际是一个非线性函数,故模糊免疫PID控制器可根据压强偏差和滑盘转角来自适应调整比例系数,能够提高系统的响应速度和鲁棒性。

3.2 自适应模糊控制

PID算法中的比例系数已经由模糊免疫算法实时调整,而对于积分和微分系数的修正,本文使用自适应模糊控制器完成。以压强的偏差 $e(k)$ 和偏差变化率 $ec(k)$ 作为模糊控制器的输入,以积分系数和微分系数的变化量 Δk_i 和 Δk_d 作为输出。偏差 $e(k)$ 和偏差变化率 $ec(k)$ 由量化因子 k_e 和 k_{ec} 量化为模糊变量,经过模糊推理、模糊决策,再由清晰化因子 k_{Ki} 和 k_{Kd} 采用“Centroid”法解模糊后得到 ΔK_i 和 ΔK_d 的清晰值。输入和输出的论域均为 $\{-6,-5,-4,-3,-2,-1,0,1,2,3,4,5,6\}$,其模糊子集为 $\{NB,NM,NS,ZO,PS,PM,PB\}$;隶属函数采用高斯隶属函数和S型隶属函数的组合,兼顾了响应速度和稳态精度的要求;根据PID控制原理和经验设计如表2的模糊规则表^[20]。控制器在工作时根据模糊规则表在线修正积分和微分系数,达到稳定控制的目的。

Table 2 Fuzzy rule table for ΔK_i and ΔK_d

e	ec													
	NB		NM		NS		ZO		PS		PM		PB	
	ΔK_i	ΔK_d	ΔK_i	ΔK_d	ΔK_i	ΔK_d	ΔK_i	ΔK_d	ΔK_i	ΔK_d	ΔK_i	ΔK_d	ΔK_i	ΔK_d
NB	NB	PS	NB	NS	NM	NB	NM	NB	NS	NB	ZO	NM	ZO	PS
NM	NB	PS	NB	NS	NM	NB	NS	NM	NS	NM	ZO	NS	ZO	ZO
NS	NB	ZO	NM	NS	NS	NM	NS	NM	ZO	NS	PS	NS	PS	ZO
ZO	NM	ZO	NM	NS	NS	NS	ZO	NS	PS	NS	PM	NS	PM	ZO
PS	NM	ZO	NS	ZO	ZO	ZO	PS	ZO	PS	ZO	PM	ZO	PB	ZO
PM	ZO	PB	ZO	NS	PS	PS	PS	PS	PM	PS	PB	PS	PB	PB
PB	ZO	PB	ZO	PM	PS	PM	PM	PS	PM	PS	PB	PS	PB	PB

将模糊免疫控制和模糊自适应控制与PID结合,构成自适应模糊免疫PID控制器,可同时提高系统的动态性能和稳态性能。控制器的结构图如图4所示,其中 p_i 为目标压强, p_r 为实际压强。算法遵循如下控制律

$$u(k) = u(k-1) + K_{pi}[e(k) - e(k-1)] + (K_{i0} + \Delta K_i)e(k) + (K_{d0} + \Delta K_d)[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (10)$$

3.3 人工蜂群(ABC)算法

ABC算法是启发于蜜蜂群采蜜机理的广义邻域搜索算法,对寻优函数和初值无特殊要求,具有全局收敛能力,适用性较强^[21]。ABC算法模型包括:蜜源(解空间范围内的可能解)、引领蜂和待工蜂,待工蜂又分为观察蜂和侦察蜂两种。蜂群对蜜源的搜寻过程如下:(1)引领蜂发现蜜源并通过舞蹈动作共享信息,蜜源质量与动作幅度成正比;(2)高质量蜜源吸引较多的观察蜂在其附近采蜜,若找到更高质量的蜜源则观察蜂变成引领蜂;(3)引领蜂在其附近经 $Limit$ 次搜索后仍没找到更高质量的蜜源,则放弃该蜜源并转化为侦察蜂,再随机产生新的蜜源。通过三种蜜蜂角色的转换,共同协作搜寻高质量蜜源。其中,引领蜂可维持解的优良性;观察蜂可提高收敛速度;侦察蜂可有效地使算法跳出局部最优解^[22]。ABC算法基本步骤^[23]为:

Step 1:算法初始化,即确定解空间的维数 D 和范围,设定蜜蜂总数为 N ,其中引领蜂和待工蜂各 $N/2$,最终迭代次数 $MaxCycles$ 及蜜源最大局部搜索次数 $Limit$ 。

Step 2:令所有蜜蜂均为侦察蜂并根据公式(11)在解空间随机生成 N 个解向量,分别计算各个解的适应度,并令排名前 $N/2$ 的蜜蜂作为初始引领蜂。式中, $i=1,2,\dots,N,j=1,2,\dots,D,rand$ 是 $[0,1]$ 之间的随机数。 $X_{\max}^j$ 和 $X_{\min}^j$ 分别是 X^j 取值的上下限。

$$X_i^j = X_{\min}^j + rand \times (X_{\max}^j - X_{\min}^j) \quad (11)$$

Step 3:搜索阶段开始,每只引领蜂利用公式(12)在其邻域进行搜索更优蜜源,当新蜜源的适应度更高时,采用贪婪选择机制用新蜜源代替旧蜜源。式中, φ 为 $[-1,1]$ 的随机数, $l \in \{1,2,\dots,N/2\}$,且 $l \neq i$ 。

$$V_i^j = X_i^j + \varphi(X_i^j - X_l^j) \quad (12)$$

Step 4:观察蜂根据蜜源的适应度选择一个引领蜂,并在其邻域内采用贪婪选择机制搜索新蜜源。选择概率 P_s 由公式(13)给出。式中 $fitness$ 为适应度函数。

$$P_s = fitness_i / \sum_{i=1}^{N/2} fitness_i \quad (13)$$

Step 5:若在某只引领蜂的位置周围,搜索次数达到 $Limit$ 次后仍未找到更优蜜源,则该引领蜂转化为侦察蜂,并重新利用公式(11)进行初始化。

Step 6:若算法循环 $MaxCycles$ 次,则停止计算并输出最优适应度及各优化后的参数值,否则转向Step 2。

由于自适应模糊免疫PID控制器的设计参数(K, η, K_{i0}, K_{d0})对控制器性能有较大影响,因此用ABC算法进行鲁棒优化。为取得良好压强控制效果,本文采用各性能指标加权形式的目标函数。首先,将压强偏差绝对值时间积分指标作为目标函数的主要部分;加入控制输入的平方项以防止控制能量过大,即

$$J_1 = \int_0^\infty (w_1 |e(t)| + w_2 u^2(t)) dt$$

将上升时间加权至目标函数以提高压强的响应速度,即 $J_2 = w_3 \cdot t_u$;采用超调惩罚功能控制压强的超调量,即当 $e(t) < 0$ 时,将压强的超调量加权至目标函数,即 $J_3 = w_4 \cdot \sigma_s$ 。因此,最终的目标函数如公式(14),优化时选取蜜源的适应度函数为 $fitness = 1/J$ 。

$$J = \int_0^\infty (w_1 |e(t)| + w_2 u^2(t)) dt + w_3 \cdot t_u + w_4 \cdot \sigma_s \quad (14)$$

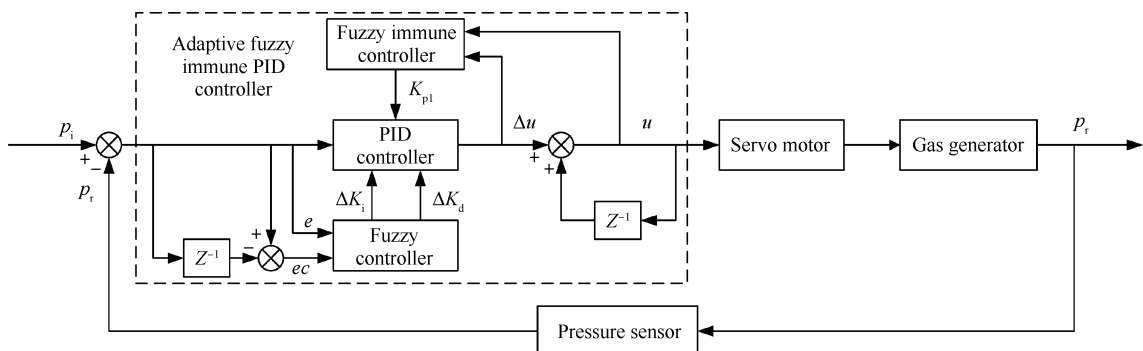


Fig. 4 Structure of adaptive fuzzy immune PID controller

式中 w_1, w_2, w_3, w_4 为各指标的权值, $e(t)$ 为压强偏差, t_u 为上升时间, σ_s 为压强的超调量。

4 仿真实验与结果分析

为了检验 ABC-AFI-PID 控制器对压强控制系统的控制效果,对 ABC-AFI-PID 控制器、自适应模糊 PID 控制器和传统的 PID 控制器进行仿真对比。针对时变性和非线性特点,对燃气发生器工作在压强设计点 ($\theta=11^\circ, p_0=7.24\text{MPa}$) 附近,不同自由容积时的控制效果以及燃气发生器长时间工作下全工作压强范围内的控制效果进行仿真。

4.1 ABC 算法优化设计参数

设定蜜蜂总数 N 为 40,最终迭代次数为 50 代,局部最大搜索次数为 20 次;设计参数的范围是: $0.005 \leq K \leq 0.05, 0 \leq \eta \leq 2, 1 \times 10^{-6} \leq K_{i0} \leq 1 \times 10^{-5}, 1 \times 10^{-8} \leq K_{d0} \leq 1 \times 10^{-7}$; 目标函数的权值 $w_1=0.999, w_2=0.001, w_3=2, w_4=100$ 。对压强设计点处的控制器参数进行 ABC 算法寻优,得到的目标函数值变化过程如图 5 所示。当 ABC 算法迭代 16 次左右后基本收敛,收敛速度较快,优化后的参数值为: $K=0.0105, \eta=0.0303, K_{i0}=7.08 \times 10^{-6}, K_{d0}=7.82 \times 10^{-8}$ 。将优化后的参数值作为 ABC-AFI-PID 控制器的初始参数,而模糊自适应 PID 和传统 PID 控制器的参数均由传统的方法整定,整定后: $K_p=4.25 \times 10^{-4}, K_i=1.07 \times 10^{-6}, K_d=7.5 \times 10^{-8}$ 。

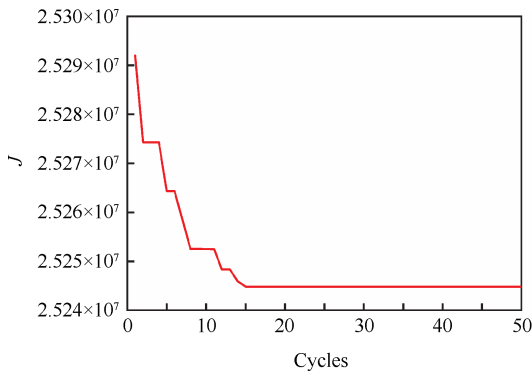


Fig. 5 Objective function value of ABC algorithm

4.2 工作点附近的控制仿真

对燃气发生器工作在设计点附近,不同的自由

容积时压强阶跃响应进行仿真,如图 6 所示,其中 Δp 表示相对于平衡点的压强变化量;响应结果如表 3 所示。这里定义响应时间为压强达到指令值且不再发生振荡时所需的时间。

燃气发生器在装药后初始的自由容积为 0.0015m^3 ,三种控制器对阶跃输入的响应较理想,基本可以无超调地将压强调节至目标值。在响应时间方面,ABC-AFI-PID 控制器最佳,为 0.19s ;AF-PID 控制器次之,为 0.48s ;传统 PID 控制器响应较慢,为 0.88s 。当系统工作一段时间后,自由容积分别变化至 0.006m^3 和 0.01m^3 时,控制效果有所变化。对比分析:传统的 PID 控制器超调量分别达到了 17.48% 和 28.00% ,响应时间也比初始时增加了 1.81s 和 3.76s ,自由容积变化导致了系统时间常数变大,但传统的 PID 控制器的设计参数是固定不变的,这使得控制效果不够理想;而 ABC-AFI-PID 控制器和 AF-PID 控制器的设计参数会根据系统的变化修正,超调量相对较低且无振荡,且 ABC-AFI-PID 控制器的比例系数通过模糊免疫算法实时调整,使系统的响应速度得到大大提高,响应时间仅为 0.61s 和 0.92s 。因此 ABC-AFI-PID 控制器在响应速度和稳态精度方面均优于另外两种控制器,具有较强的鲁棒性。

实际工作中,控制系统可能会受到干扰因素的影响,因此考核控制器的抗干扰能力是十分必要的。干扰来源包括阀体的烧蚀、未完全燃烧的推进剂颗粒沉积堵塞部分喉道以及执行机构可能存在的机械空程等,这些干扰可以等效地看作对滑盘摆角的扰动。假设在 $V=0.0015\text{m}^3$ 条件下燃气发生器工作 1.2s 时,由于上述扰动的存在,导致控制器的输出有一个阶跃变化,其幅值为 0.2° ,施加干扰后三种控制器的恢复效果曲线如图 7 所示。从图中可以看出,ABC-AFI-PID 控制器和 AF-PID 控制器对外界干扰的抵抗能力均强于传统 PID 控制器,尽管两者的调整时间差别不大,但 ABC-AFI-PID 控制器的扰动超调最低,大约只有 AF-PID 控制器的一半,很明显抗干扰能力更加优秀。

Table 3 Response results for different free volume

Free volume/ m^3	ABC-AFI-PID		AF-PID		PID	
	Response time/s	Overshoot/%	Response time/s	Overshoot/%	Response time/s	Overshoot/%
0.0015	0.19	0	0.48	0	0.88	0
0.006	0.61	4.18	1.13	8.75	2.69	17.48
0.01	0.92	7.14	1.66	13.63	4.64	28.00

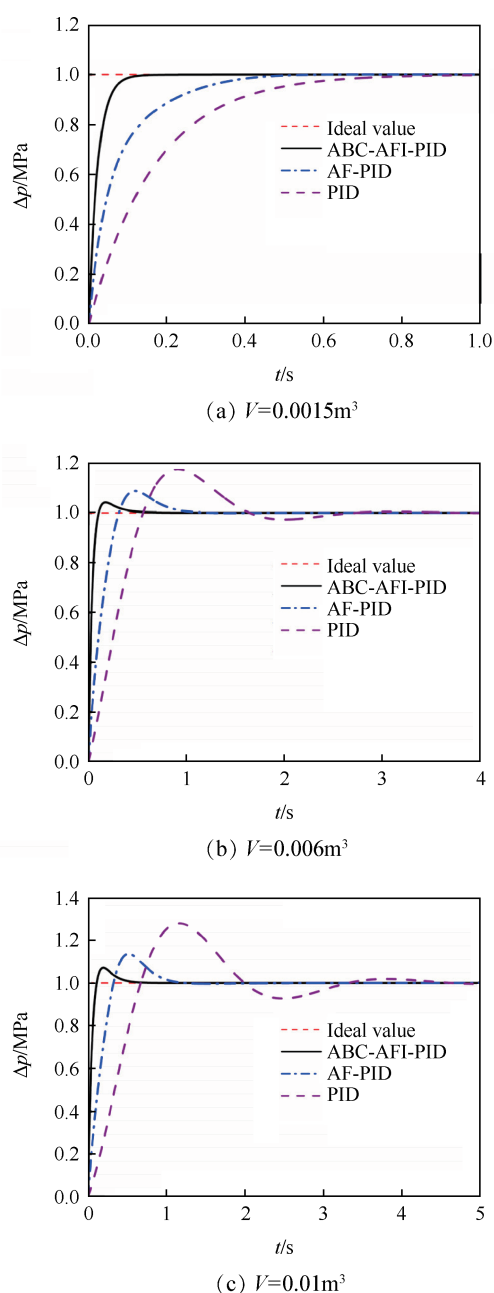


Fig. 6 Control results of three controllers for different free volumes

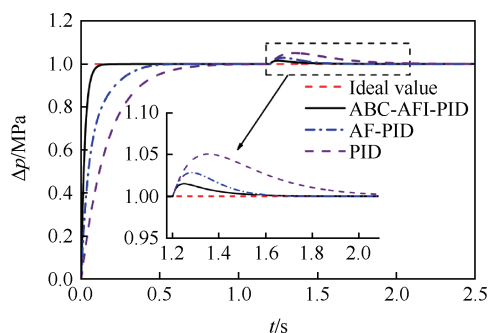


Fig. 7 Control results of three controllers with disturbance

4.3 全压强调节范围的控制仿真

前面已经对压强设计点附近的系统动态特性进

行了仿真,而燃气发生器在实际工作中会偏离设计点,因此要对系统长时间工作的非线性模型进行仿真,验证控制器克服系统非线性的能力。考虑到后续实验条件,为保证燃气发生器使用的推进剂正常燃烧的最低压强(约 2.5MPa),文中压强在 2.78MPa ~ 12.15MPa。如果流量调节比没有达到要求,可通过使用更高压强指数的固体推进剂来增大压强的调节范围,或重新设计发动机的喉部面积调节范围,然后再按所提出的算法重新对设计参数进行优化,以达到更大的流量调节比。

因此,压力指令选择基于全工作压强的方波,燃气发生器工作时间为 50s,仿真结果如图 8。在燃气发生器工作的前 15s 里,三种控制器对指令信号的跟踪能力良好;但由于药柱燃烧使得自由容积不断增大,在工作 15s 之后不同的控制器出现了大小不同的超调量且随着时间的推移超调具有增大的趋势,而 ABC-AFI-PID 控制器能将超调量控制到较低值,稳态精度较另外两种控制器高。响应速度方面,ABC-AFI-PID 控制器在 50s 时间内的响应速度均是最小的,即动态性能也为最优。综上所述,ABC-AFI-PID 控制器更适合于固冲发动机燃气流量控制系统。

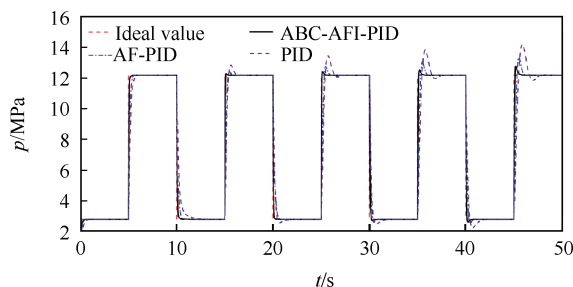


Fig. 8 Control results of three controllers for pressure regulation range

5 结 论

(1)在本文研究的滑盘阀式燃气流量控制系统中,滑盘摆角 θ 在较小范围($0^\circ \sim 20^\circ$)内变化时,有效喷喉面积 A_1 与滑盘摆角 θ 近似线性关系,可在研究中进行简化处理。

(2)基于人工蜂群算法优化的自适应模糊免疫 PID 控制器能有效地对燃气发生器压强进行闭环控制,在工作点附近及压强调节范围内均体现出良好的响应速度、稳态精度和抗干扰能力,具有较强的鲁棒性。该控制器能将压强响应时间控制在 1s 以内,且超调量最大不超过 7.14%,相比于 AF-PID 控制器和传统的 PID 控制器,显著地提高燃气流量控制系统

的控制精度。

致 谢:感谢总装备部预先研究项目、国家自然科学基金、江苏省自然科学基金资助。

参考文献:

- [1] Ronald S Fry. A Century of Ramjet Propulsion Technology Evolution [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2004, 20(1): 27-58.
- [2] Nakayama H, Ikegami Y, Yoshida A. Full-Scale Firing Tests of Variable Flow Ducted Rocket Engines Employing GAP Solid Fuel Gas Generator [R]. *AIAA* 2009-5121.
- [3] 刘源翔. 变流量整体式固冲发动机控制系统研究 [D]. 北京:北京理工大学, 2015.
- [4] BAO W, LI B, CHANG J. Switching Control of Thrust Regulation and Inlet Buzz Protection for Ducted Rocket [J]. *Acta Astronautica*, 2010, 67(7-8): 764-773.
- [5] 霍东兴, 闫大庆, 高 波. 可变流量固体冲压发动机技术研究进展与展望[J]. *固体火箭技术*, 2017, 40(1): 7-15.
- [6] 杨石林, 张 岗. 可变燃气流量固冲发动机控制系统研究进展[C]. 西安:中国航天第三专业信息网第三十七届技术交流会暨第一届空天动力联合会议, 2016.
- [7] 龚 晰, 何保成, 刘志明. 固体火箭冲压发动机发展与流量调节现状[J]. *飞航导弹*, 2015, (2): 74-78.
- [8] 聂聆聪, 刘志明, 刘源祥. 流量可调燃气发生器压力闭环模糊控制算法[J]. *推进技术*, 2013, 34(4): 551-556. (NIE Ling-cong, LIU Zhi-ming, LIU Yuan-xiang. Pressure Close Loop Fuzzy Control Method of a Flow Adjustable Gas Generator[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2013, 34(4): 551-556.)
- [9] 何 坤, 陈 雄, 郑 健, 等. 模糊PI控制算法在燃气发生器上的应用[J]. *推进技术*, 2017, 38(8): 1878-1884. (HE Kun, CHEN Xiong, ZHENG Jian, et al. Fuzzy PI Control Algorithm for Gas Generator [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(8): 1878-1884.)
- [10] 刘源翔, 聂聆聪, 张 皎, 等. 基于线性自抗扰控制器的燃气流量可调发生器压强控制算法研究[J]. *推进技术*, 2015, 36(12): 1768-1773. (LIU Yuan-xiang, NIE Ling-cong, ZHANG Jiao, et al. Research on Pressure Control Algorithm of a Flow Adjustable Gas Generator Based on Linear Active Disturbance Rejection Control[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(12): 1768-1773.)
- [11] 刘金琨. 先进PID控制MATLAB仿真[M]. 北京:电子工业出版社, 2011.
- [12] 胡包钢, 应 浩. 模糊PID控制技术研究发展回顾及其面临的若干重要问题[J]. *自动化学报*, 2001, 27(4): 567-584.
- [13] 王东风, 韩 璞. 基于免疫遗传算法优化的汽温系统变参数PID控制[J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(9): 212-217.
- [14] 杨石林, 高 波, 董新刚. 滑盘式流量调节燃气发生器动态特性分析[J]. *固体火箭技术*, 2009, 32(5): 506-510.
- [15] 何勇攀, 陈玉春, 于守志, 等. 固体火箭冲压发动机燃气发生器动态特性影响分析[J]. *航空动力学报*, 2017, 32(1): 227-232.
- [16] 孙 涛. 基于模糊免疫自适应PID的智能控制算法的研究[D]. 大连:大连海事大学, 2009.
- [17] 何景峰, 沈 刚, 丛大成, 等. 模糊免疫PID控制在淀粉浓度控制中的应用[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(1): 137-142.
- [18] 董全成, 冯显英. 基于自适应模糊免疫PID的轧花自动控制系统[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(23): 30-37.
- [19] 高宪文, 赵亚平. 焦炉模糊免疫自适应PID控制的应用研究[J]. *控制与决策*, 2005, 20(12): 1346-1349.
- [20] 石辛民, 郝整清. 模糊控制及其MATLAB仿真[M]. 北京:清华大学出版社, 2008.
- [21] 卢彬彬, 肖玲斐, 龚仁吉, 等. 基于人工蜂群算法的航空发动机参数自整定PID控制[J]. *推进技术*, 2015, 36(1): 130-135. (LU Bin-bin, XIAO Ling-fei, GONG Ren-ji, et al. Self-Tuning PID Control for Aero-engine Based on Artificial Bee Colony Algorithm [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(1): 130-135.)
- [22] 江铭炎, 袁东风. 人工蜂群算法及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2014.
- [23] ZHANG Dong-li, TANG Ying-gan, GUAN Xin-ping. Optimum Design of Fractional Order PID Controller for an AVR System Using an Improved Artificial Bee Colony Algorithm [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(5): 973-980.

(编辑:史亚红)