改进遗传算法在燃气流量调节中的应用 *

王 昭[1,2]，田小涛[1,2]，黄 萌[1,2]，张 博[1,2]

（1. 西安现代控制技术研究所，陕西 西安 710065；
2. 中国兵器工业集团有限公司 现代控制技术重点实验室，陕西 西安 710065）

摘 要：为了改善固体火箭冲压发动机燃气流量控制系统的性能，对于整个控制过程中的响应时间、压强超调量、流量负调量等重要的设计参数进行先验的评估和考量，通过改进遗传算法来整定PID控制器的参数，并在此基础上实现燃气发生器内的压强控制和流量调节。首先，为了加速遗传算法的收敛进程，优化了选择算子。此外，改进了适应度函数的表达式，从而降低了燃气负调量和流量在调节过程中的振荡。仿真结果表明：对于阶跃形式的压力指令，相较原始的PID控制器，经过改进的遗传算法寻优所设计的控制系统能够在更短的响应时间内基本消除燃气压强的超调量，并减小燃气流量的负调量。对于方波形式的压力指令，经过改进遗传算法优化的PID控制器能够大幅降低燃气发生器长时间工作后引起的流量负调量，显著提升了燃气流量控制系统的性能。

关键词：固体火箭冲压发动机；燃气发生器；控制系统；流量调节；遗传算法；适应度函数

中图分类号：V435 **文献标识码**：A **文章编号**：1001-4055（2022）11-210484-10

DOI：10.13675/j.cnki. tjjs. 210484

Application of Improved Genetic Algorithm for Gas Flow Regulation

WANG Zhao[1,2]，TIAN Xiao-tao[1,2]，HUANG Meng[1,2]，ZHANG Bo[1,2]

（1. Xi'an Modern Control Technology Research Institute，Xi'an 710065，China；
2. Key Laboratory for Modern Control Technology，China North Industries Group Corporation Limited，Xi'an 710065，China）

Abstract：In order to improve the performance of gas flow control system in the ducted rocket，it is necessary to evaluate and consider the important design parameters such as response time，pressure overshoot，and flow negative regulation during the entire control process. Therefore，the improved genetic algorithm was adopted to tune the parameters of the PID controller. On this basis，the pressure control and flow regulation in the gas generator were realized. First，the selection operator was optimized to speed up the convergence process of genetic algorithm. In addition，the expression of fitness function was modified to reduce flow negative regulation and suppress flow oscillation. The simulation results show that for the step pressure command，compared with the original PID controller，the control system based on the improved genetic algorithm can effectively eliminate the pressure overshoot and reduce the flow negative regulation in a shorter response time. For the square wave pressure command，the PID controller tuned by the improved genetic algorithm can dramatically reduce the flow negative regulation after a long working time in gas generator，which significantly improves the performance of the gas flow control system.

Key words：Solid rocket ramjet engine；Gas generator；Control system；Flow regulation；Genetic algorithm；Fitness function

* **收稿日期**：2021-07-19；**修订日期**：2021-12-02。

通讯作者：王 昭，博士，工程师，研究领域为人工智能在发动机控制中的应用。

引用格式：王 昭，田小涛，黄 萌，等. 改进遗传算法在燃气流量调节中的应用[J]. 推进技术，2022，43(11)：210484.（WANG Zhao，TIAN Xiao-tao，HUANG Meng，et al. Application of Improved Genetic Algorithm for Gas Flow Regulation[J]. *Journal of Propulsion Technology*，2022，43(11)：210484.）

1 引 言

固体火箭冲压发动机由于将火箭发动机和冲压发动机组合在一起，因而在性能上兼备了两种发动机的优点，得以广泛应用于新型战术导弹中，其工作性能主要由进气道所捕获的空气流量决定，而空气流量与导弹的飞行高度、马赫数和攻角密切相关。当燃气流量不调节时，会造成空燃比不在合理范围内，轻则性能下降，重则引起燃烧不稳定和熄火。由此观之，非常有必要对燃气发生器进行流量调节，从而使得空燃比保持在合理范围内[1]。

常见的燃气流量控制方式有变燃面式、非壅塞式、涡流阀式和变喉面式等。其中，变喉面式因较大的流量调节比而得以广泛应用，具体的控制方法为通过电机来控制阀门，从而改变燃气发生器的有效喷喉面积，以此控制燃气压强，进而改变推进剂燃速来达到调节燃气流量的目的[2]。由于燃气流量在实验过程中难以实时测量，故而一般通过控制燃气压强达到调节流量的目的。

由于燃气发生器在工作时，推进剂燃速是非线性的，此外空腔自由容积会随着时间而发生改变，所以燃气流量控制系统是一个非线性时变系统。非线性会导致压强在上升和下降阶段的响应不一致，时变性会使得压强响应时间随着推进剂的燃烧而变长，且超调量随之不断增大。需要强调的是，燃气流量控制系统在流量调节时必然会出现负调情形。负调指的是当控制系统需要增大流量时，减小喉部面积会导致流量先减小而后再升至目标值，反之亦如此。负调产生的关键是，在进行流量调节的某些阶段，压强的响应速度慢于喷管喉部面积的变化速度[3]。负调量如果过大甚至会造成发动机熄火或爆炸[4]。因此，燃气流量调节的目标是兼顾响应时间、压强超调和流量负调三个方面的控制效果。

目前，燃气流量调节的控制器大体上可分为两大类：自抗扰控制器和PID控制器。自抗扰控制器的核心思想是将系统中无法建模部分以及各种扰动的“总和”视为总扰动，而后用扩张状态观测器对其进行估计，并加以消除[5]。刘源翔等[6]采用线性自抗扰控制器实现了对燃气压强的无超调控制。周景亮等[7]在此基础上引入了过渡过程，虽然牺牲了一定的响应速度，但却抑制了流量负调。

PID是通过捕捉目标值和实际值之间的误差来消除误差的方法[8]。由于传统的PID参数是针对设计点整定的，无法在整个调节过程中始终保持很好的调节特性。因此，行之有效的方法是使得PID参数能够随着控制量的变化而自适应地调整，主要有两种途径：一种是基于插值表，亦即通过采集导弹的飞行参数来查前馈表，而后通过插值来更新PID参数[9]。但前馈表的生成需要大量的试验数据，因而成本极其高昂。

另一种途径可称之为智能PID控制，其主要框架是将模糊算法、神经网络算法、人工蜂群算法等用于整定PID参数。在此思路下，聂聆聪等[10]提出了模糊积分控制算法，考虑了时变性的因素，但是比例系数并没有进行模糊调节，且模糊规则和隶属度函数的确定需要依据经验来确定。何坤等[11]对比例系数也进行了模糊算法整定，在响应时间的控制上比模糊积分算法更具有优势。此外，何坤等[12]还比较了神经网络PI控制器和模糊PI控制器的性能，发现无论是压强超调还是响应时间，前者都优于后者。

上述算法对燃气发生器压强的控制结果都有很大的改善，但是对于整个控制过程中的响应时间、压强超调、流量负调等重要的设计参数没有先验的评估和考量，为了弥补这一不足，柴金宝等[13]采用自适应模糊免疫PID控制器来控制燃气压强。为提升控制效果，对控制器的设计参数进行了优化，但是目标函数没有考虑流量负调。周俊等[14]通过遗传算法来优化神经网络的权值，而后进得到PID参数，但是其适应度函数亦没有包含燃气流量的负调量。

本文将燃气负调量和阀门转角纳入到适应度函数的表达式中，改进了遗传算法中的选择算子，并在此基础上设计了PID控制器，而后利用仿真分析验证了该控制器的控制效果。

2 控制原理及模型

2.1 控制原理

如引言中所述，由于燃气流量难以直接测量，所以一般情况下，是以压强作为控制量，来间接达到燃气流量调节的目的。电动滑盘阀式燃气流量控制系统的框图如图1所示，其中，p_i为压强指令，p_r为压力传感器所采集的实际压强，m为计算的燃气流量。工作时，将p_i与p_r之间的偏差信号输入压强控制器，通过其输出信号来控制执行机构运动，以此来改变滑盘阀的转角，进一步改变有效喉部面积，从而得以调节燃气流量。

2.2 系统模型

本文采用的燃气发生器模型满足如下的零维弹道方程[15]

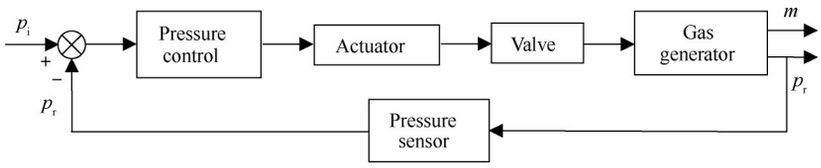


Fig. 1　Structure diagram of gas flow control system[2]

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t} = \dfrac{\Gamma^2 C^{*2}}{V}\left(\rho_p A_b \alpha p^n - \dfrac{p \cdot A_t}{C^*}\right) \\ V = V_0 + \int A_b \alpha p^n \mathrm{d}t \end{cases} \tag{1}$$

式中p为燃气发生器压强，V_0为燃气发生器的初始自由容积，ρ_p为推进剂密度，C^*为推进剂特征速度，$n(0 < n < 1)$为燃速压强指数，α为燃速系数，A_t为燃气发生器喉部面积，A_b为燃面面积，Γ为比热比函数。燃气流量与压强之间的关系为

$$m = \frac{p \cdot A_t}{C^*} \tag{2}$$

式(1)和(2)是通过喉部面积来求取燃气压强和流量的数学模型。而压强控制器输出的是角度指令，故而还需给出喉部面积与角度指令之间的对应关系。喉部面积模型如图2所示，其中，R为调节孔的半径，R_0为常开孔的半径，两孔之间的间距为L，θ为阀体转动的角度。

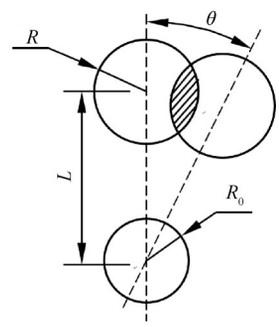


Fig. 2　Schematic of throat model

利用几何关系可导出阴影部分的面积S_1为[16-17]

$$S_1 = \begin{cases} 0 & (\theta < 0) \\ 2R^2 \arccos\left(\dfrac{L}{R}\sin\dfrac{\theta}{2}\right) - 2RL\sin\dfrac{\theta}{2}\sin\left[\arccos\left(\dfrac{L}{R}\sin\dfrac{\theta}{2}\right)\right] & \left(0 \leqslant \theta \leqslant 2\arcsin\dfrac{R}{L}\right) \\ 0 & \left(\theta > 2\arcsin\dfrac{R}{L}\right) \end{cases} \tag{3}$$

令常开孔的面积为S_0，则喉部面积为$A_t = S_0 + S_1$。

接下来，还需确定执行机构的模型。本文采用如下的一阶惯性模型[2,6,18-19]

$$\frac{\Delta\theta(s)}{\Delta\theta_i(s)} = \frac{k}{Ts + 1} \tag{4}$$

式中$\Delta\theta_i$为目标转角，$\Delta\theta$为实际转角，k为减速机构的减速比，T为时间常数。式(1)~(4)联立即为燃气流量调节的系统模型。

3　控制器设计

3.1　PID控制器

PID控制器在过程控制和工业自动化中应用广泛，其控制效果依赖于参数的整定。在传统控制过程中，PID参数整定使用经验凑试法，该方法易于理解，但效率低下且控制效果差强人意[20]。而遗传算法通过遗传算子来交换个体之间的信息，从而使得个体不断逼近最优解[21]。故此，本文采用遗传算法来整定PID参数。

考虑到执行机构所需的输入量是转角增量，本文采用增量式PID控制器[22]，即

$$\begin{aligned} \mathrm{d}\theta_i(t) = {} & \mathrm{d}\theta_i(t-1) + k_p\big(e_r(t) - e_r(t-1)\big) + \\ & k_i e_r(t)T + k_d\big[e_r(t) - 2e_r(t-1) + e_r(t-2)\big] \end{aligned} \tag{5}$$

式中$\mathrm{d}\theta_i(t)$为当前采样时刻的目标转角，压强偏差$e_r(t) = p_i(t) - p(t)$，k_p为比例系数，k_i为积分系数，k_d为微分系数。

3.2　基于遗传算法的参数整定

本文采用基于遗传算法的参数整定方法[23]。为了便于描述，将遗传算法优化PID参数的方法记为GA-PID。

遗传算法主要由以下三个要素构成：(1)编码方式；(2)适应度函数；(3)遗传算子。

(1)编码方式

本文采用实数编码，个体的编码长度等于PID参数的个数。需要强调的是，在实数编码方法中，必须保证权值在给定的区间范围内，遗传算法中所使用

的交叉、变异等算子必须保证其运算结果所产生的新个体在这个限制范围内。

(2)适应度函数

考虑控制系统的稳定性、准确性和快速性三个指标,以控制量、误差、振荡和负调量作为约束条件,定义下式作为参数选择的目标函数,即

$$J = \int_0^{\infty}\Big(w_1\left|e_r(t)\right| + w_2\left(\mathrm{d}\theta_i(t)\right)^2 + w_3\left|\mathrm{d}p(t)\right| + w_4\left|\mathrm{d}\theta(t)\right|\Big)\mathrm{d}t + w_5\sum_{fr}\left|m_i - m(t)\right| \tag{6}$$

式中 $e_r(t)$ 为 t 时刻的系统误差,$\mathrm{d}\theta_i(t)$ 为目标转角,$\mathrm{d}p(t)$ 为压强变化量,$\mathrm{d}\theta(t)$ 为阀门转角,$\sum_{t\in\Pi}\left|m_i - m(t)\right|$ 为出现负调的燃气流量的绝对负调量之和,其中,Π 表征出现负调的时刻作为元素所组成的集合,m_i 为出现负调前的流量值,w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 为系数。其中,w_1 项是为了减小压强的稳态误差;w_2 项是防止控制能量过大;w_3 是为了抑制压强的振荡,不仅仅是超调所引发的振荡,在达到目标压强之前的振荡亦须抑制;w_4 项是为了减小阀门角度的振荡从而抑制流量的振荡;w_5 项则是为了减小流量负调量。本文取 $w_1 = 0.999, w_2 = 0.001, w_3 = 400$,$w_4$ 和 w_5 的取值在第4节给出。

适应度函数则为 $f = 1/J$。需要强调的是,适应度需要进行比例变换,用以抑制早期收敛。常用的比例变换方法有指数比例、幂比例和线性比例等三种[24]。本文采用线性比例来进行适应度变换。

(3)遗传算子

遗传算子包括选择、交叉和变异算子。

原始的遗传算法通常采用"轮盘赌法"来选择个体,每个个体被选中的概率与其适应度大小成正比。但是,该算子有一个明显的缺陷:由于基于随机操作,所以选择误差较大,尤其在种群规模较小的情况下,可能会漏选使用度较高的个体[25]。

为了防止漏选情况的出现,本文采用保留最优个体法、直接淘汰最差个体法和轮盘赌法的混合算法。设种群规模为 N,每代保留一个适应度最高的个体直接到下一代,不参与交叉、变异操作。此外,每代直接淘汰最差的一个个体。而后,再将最优个体复制 N_e 个用以接下来的交叉和变异操作,而剩余的 $\left(N - N_e - 1\right)$ 个个体通过轮盘赌法选择而得。

采用数学交叉算子和多元非均匀变异策略[26]。

给定运行参数:交叉概率 P_c 和变异概率 P_m,最大进化代数 g_{max} 和种群规模 N。

3.3 基于遗传算法的PID控制算法

本文的主要目标是构造基于遗传算法的PID控制器,而后在此基础上进行流量调节。需要指出的是,在进行调节之前,首先要获得燃气发生器的稳态压强。具体的算法步骤如下:

(1)种群初始化。随机生成 N 组PID参数作为第一代种群,每一组PID参数即为一个个体,生成的PID参数为 $[0, 10^{-6}]$ 中的实数。需要说明的是,本文生成随机数所采用的种子是计算机系统的默认值。

(2)利用遗传算法进行离线优化。顾名思义,离线学习是在所有的输入矢量和目标矢量集准备完成之后才开始对PID参数进行批量调整[21]。如此,输入样本为每一采样时刻的 $\left[p_i(t), p(t), e_r(t)\right]$,下一时刻的样本是根据这一时刻的样本通过PID控制器计算得到的。换言之,若将时间离散为 δ 个时刻,那么输入样本为 $\boldsymbol{x}_t$, $t = 1, 2, \cdots, \delta$。如此,则目标函数为

$$J = w_5\sum_{fr}\left|m_i - m(t)\right| + \sum_{t=1}^{\delta}\Big(w_1\left|e_r(t)\right| + w_2\left(\mathrm{d}\theta_i(t)\right)^2 + w_3\left|\mathrm{d}p(t)\right| + w_4\left|\mathrm{d}\theta(t)\right|\Big)\Delta t \tag{7}$$

而后,可以得到每个种群个体所对应的适应度函数。需要说明的是,输入样本数是由采样时间所决定的,采样时间越长,样本数越少,则控制精度越差;反之,采样时间越短,样本数越多,虽然控制精度提高,但是计算量也随之增加。

(3)根据适应度函数,采用遗传算子(选择、交叉、变异)进行优化。

(4)如果适应度函数满足要求或者达到了最大进化代数,则获得了优化的PID参数,否则回到第(2)步继续优化。

(5)利用优化的PID参数进行压强的闭环控制,直至达到目标压强。

综上所述,基于遗传算法优化神经网络的PID控制算法流程如图3所示。

4 仿真分析

在建立燃气发生器控制模型和设计GA-PID控制算法的基础上,对滑盘阀燃气流量调节系统进行仿真。为了检验该控制器对压强控制系统的控制效果,针对时变性和非线性的特点,本文首先对不同目标压强和初始自由容积时GA-PID控制器的控制效果进行分析,而后在全压强调节范围内采用GA-PID

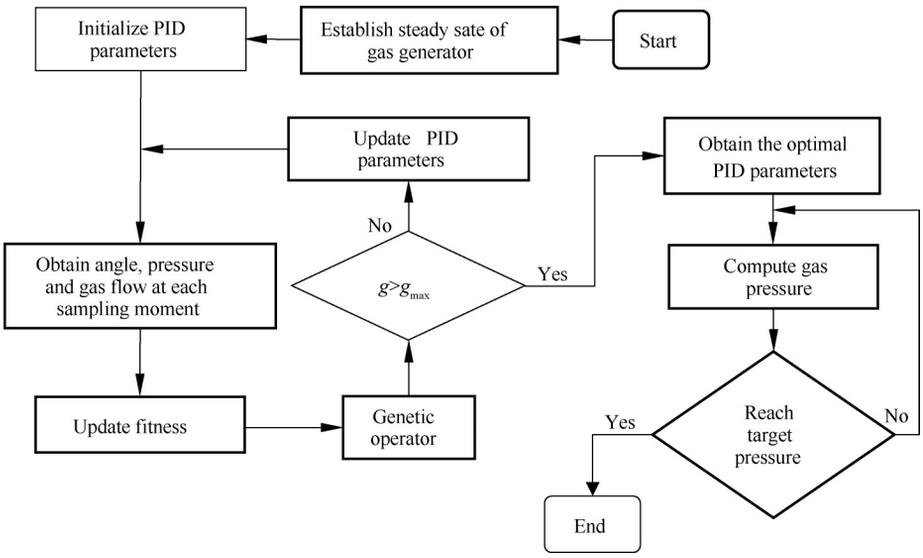


Fig. 3　Flowchart of PID controller based on genetic algorithm

控制器针对高目标压强和低目标压强分别进行仿真，并与原始PID和TD-PID控制器的控制效果加以对比。需要说明的是，TD-PID是将过渡过程引入到PID控制器中，而过渡过程是由跟踪微分器（Tracking differentiator，TD）离散实现的，因而是解决超调与快速性矛盾的一种有效办法[2]。

4.1　控制参数优化

燃气发生器初始滑阀位置为0，此时喉道面积最大。待燃气发生器稳态建立之后，开始给出调节指令并进行流量调节。采样周期取5ms，目标压强为5MPa，初始自由容积为$1.5\times10^{-3}m^3$，各参数见表1。

为了对控制性能进行不断提升，本文考察了不同设置的GA-PID的阶跃响应结果，其所对应的参数如表2所示。

Table 1　Parameters of simulation

Parameter	Value
R/mm	5.2
L/mm	20
R_0/mm	3.0
n	0.5
k	3
ρ_p/(kg/m^3)	1600
C^*/(m/s)	800
A_b/m^2	0.011
α	6.5×10^{-6}
Γ	1.1
N	4901
g_{max}	100
P_c	0.9
P_m	0.02

Table 2　Parameters of GA-PID

Algorithm	N_e	w_4	w_5
GA-PID(SET1)	0	0	0
GA-PID(SET2)	49	0	0
GA-PID(SET3)	199	0	0
GA-PID(SET4)	199	6×10^8	0

图4所示为遗传算法的优化过程。其中，横坐标g为遗传代数，纵坐标f_{max}表征每一代群体中最优个体的适应度。可以看到，通过GA-PID(SET1)，GA-PID(SET2)和GA-PID(SET3)的比较，对于选择算子而言，随着最优个体复制个数N_e的取值增大，遗传收敛的速度加快；反之，单纯的轮盘赌法由于随机性的原因无法收敛。究其本质，最优个体复制得越多，整个群体越向最优个体集中，而交叉和变异算子则可避免陷入局部收敛。总之，对于该算例而言，N_e取值愈大，遗传收敛的效果愈好。

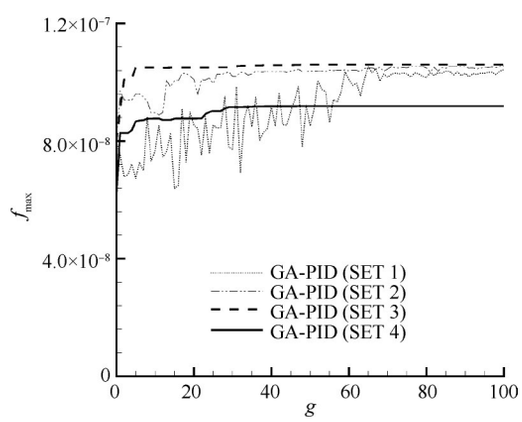


Fig. 4　Evolution process of different settings of GA-PID

图5所示为采用不同PID控制器仿真所得的阶跃响应曲线对比。定量的对比见表3。需要指出的是，表3中的负调量指的是相对负调量，亦即绝对负调量与初始流量之比。调节时间指的是阶跃响应到达目标压强的±2%误差带内所需的最短时间。由表3可知，对于GA-PID(SET 3)而言，经过遗传算法优化之后，已经实现了压强无超调，负调量和调节时间也得到了有效的控制。但是，从图5(d)中可以看到，流量的振荡依然很大，这是由于阀门转角在调节过程中的振荡所导致的，如图5(e)所示。为了解决该问题，在GA-PID(SET 4)算法的适应度函数中加入了w_4项，用以抑制转角的振荡，可以看到基本消除了流量的振荡，而且大大降低了流量的负调量。

对于GA-PID(SET 3)和GA-PID(SET 4)而言，压强超调量皆可以完全消除，而负调和调节时间的优化则不可兼得，随着调节时间的缩短，负调量却在增加。综合考量，GA-PID(SET 4)的仿真结果较好，与GA-PID(SET 3)相比，负调量从2.69%大幅降至0.04%，而调节时间仅从0.53s增至0.56s，且基本消除了压强和流量在调节过程中的振荡情况。

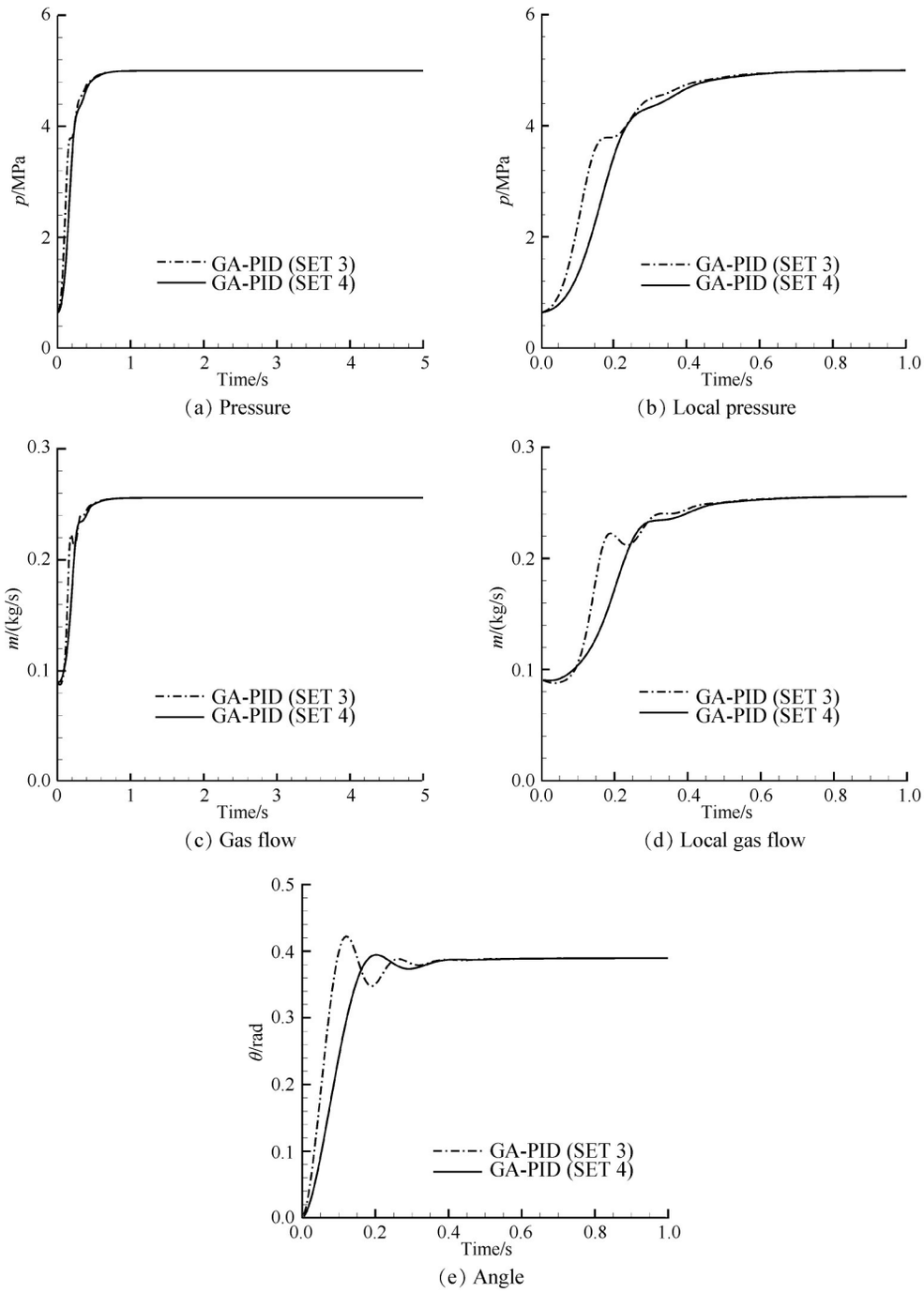


Fig. 5 Comparison of step response between different algorithms

Table 3　Comparison of control performance between different PID controller

Algorithm	Pressure overshoot/%	Flow negative regulation/%	Response time/s
GA-PID(SET 3)	0	2.69	0.53
GA-PID(SET 4)	0	0.04	0.56

4.2　不同目标压强和自由容积的控制仿真

对于燃气流量调节而言，目标压强与当前压强的差值加大，如果要在较短的响应时间内达到目标压强，滑盘阀的转速，亦即喉部面积变化速度便要加大。而随着自由容积的增大，由式(1)可知，压强的变化速度便会减小。总之，目标压强和自由容积两种因素的增大均会引起负调量的大幅增加，因为负调是由于压强的相对变化速度的绝对值小于喉部面积变化速度的绝对值所导致的[18]。因此，本文要考察不同目标压强和初始自由容积时GA-PID的控制效果。

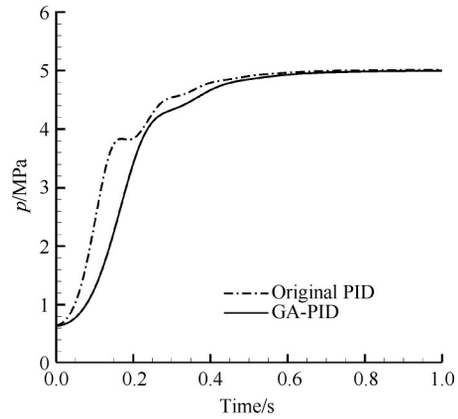
首先，考察目标压力为5MPa，初始自由容积分别为0.0015，0.006，0.01m^{3}时的情形。图6所示为不同自由容积下阶跃响应的压力曲线对比，表4所示为仿真结果的定量对比。其中，原始PID的参数是针对目标压力为5MPa，初始自由容积为0.0015m^{3}的情形进行整定的，整定后取k_p=4×10^{-9}，k_i=1×10^{-10}，k_d=1×10^{-7}。可以看到，在初始自由容积为0.0015m^{3}时，较之于原始PID，GA-PID的控制优势并不明显，虽然超调量和负调量有所减少，但是调节时间却逊于前者。但是，随着初始自由容积的增大，GA-PID的控制优势便得以充分体现，无论是超调、负调还是调节时间，都优于原始PID，这是由于原始PID的参数是针对一个工作点进行整定的，一旦工作点发生变化，其控制性能便会大幅下降。

图7所示为初始自由容积为0.0015m^3，不同目标压强下阶跃响应的压力曲线对比，表5所示为相应的定量对比。对于GA-PID而言，随着目标压强由5MPa提升至10MPa，负调量仅从0.04%增至0.28%，调节时间仅从0.56s增至0.60s。反观原始PID，目标压强为10MPa时，负调量达到了30%。

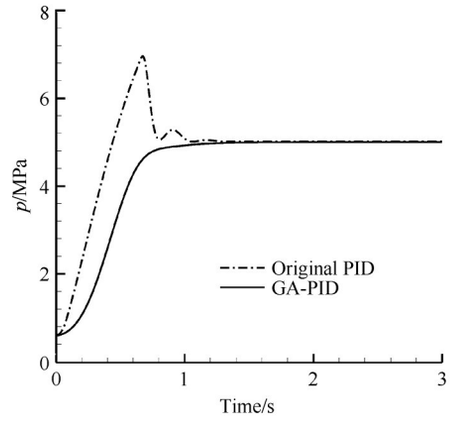
综上所述，GA-PID会随着目标压强和初始自由容积的变化调整PID的参数，取得良好的控制效果。

4.3　全压强调节范围的控制仿真

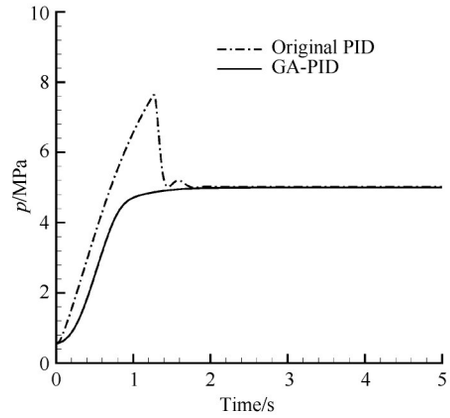
本节选取燃气发生器在全压强调节范围内的高目标压强(5~9MPa)和低目标压强(2~6MPa)进行控制仿真。压力指令为方波，燃气发生器工作时间为35s。



(a) V_0=0.0015m^3



(b) V_0=0.006m^3



(c) V_0=0.01m^3

Fig. 6　Comparison of step response between different algorithms

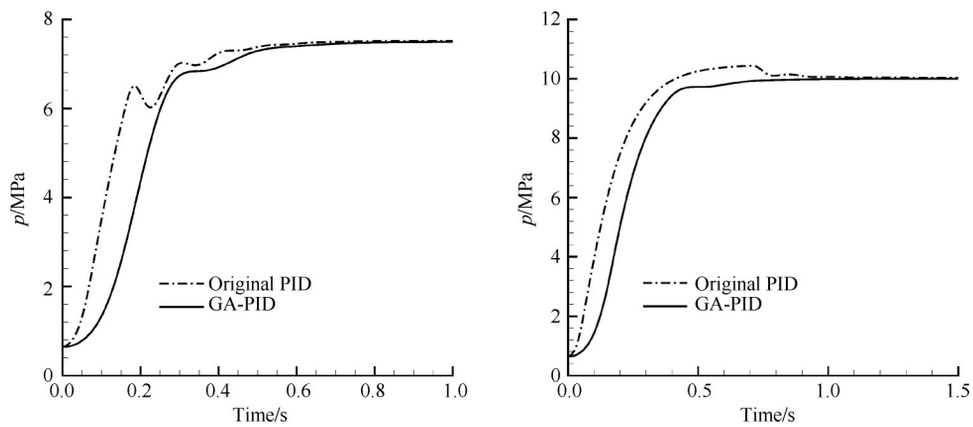
图8所示为高目标压强范围时不同设置的GA-PID控制器经过20代遗传进化得到的动态响应，其所对应的参数如表6所示。作为对比，图8也给出了TD-PID控制器得到的动态响应。可以看到，对于GA-PID(SET 5)而言，前15s内控制器跟踪信号能力良好，基本无超调；在15～35s，随着推进剂的不断燃烧使自由容积增大，响应时间逐渐变长且出现超调，但超调最大仅有2.4%；与此同时，负调也在不断增大，最大值高达35.9%。总之，GA-PID(SET 5)对于

Table 4 Response results for different free volume

Free volume/m^3	GA-PID			PID		
	Pressure overshoot/%	Flow negative regulation/%	Response time/s	Pressure overshoot/%	Flow negative regulation/%	Response time/s
0.0015	0.00	0.04	0.56	0.33	3.1	0.50
0.006	0.03	4.45	0.92	39.3	55.5	1.00
0.01	0.08	14.9	1.36	52.7	63.2	1.68

Table 5 Response results for different target pressure

Pressure/MPa	GA-PID			PID		
	Pressure overshoot/%	Flow negative regulation/%	Response time/s	Pressure overshoot/%	Flow negative regulation/%	Response time/s
5	0	0.04	0.56	0.33	3.1	0.50
7.5	0	0.11	0.53	0.33	17.4	0.49
10	0	0.28	0.60	4.40	30.0	0.76



(a) 7.5MPa (b) 10MPa

Fig. 7 Comparison of step response between different algorithms

流量负调的控制效果较差。为了对其进行改善，在GA-PID(SET 6)控制器的目标函数中加入w_5项，将最大负调量降至7.3%，调节时间虽然有所增加，但在3s内可以达到目标压强。相较于TD-PID控制器，GA-PID(SET 6)虽然调节时间较长，但由于GA-PID(SET 6)的目标函数中加入了w_5项，所以没有出现流量振荡的情形。

图9所示为低目标压强范围时GA-PID控制器和TD-PID控制器的动态响应对比，GA-PID控制器所对应的参数如表7所示。可以看到，对于低目标压强而言，GA-PID(SET 5)控制器基本上无超调，但是流量负调最大值达到39.8%。在加入w_5项后，GA-PID(SET 6)控制器将流量负调最大值降至15.7%。相较于GA-PID(SET 6)控制器，TD-PID控制器可以快速无超调地达到目标压强，且负调量也更小，控制效果最佳。

综合对比可知，对于高目标压强情形而言，GA-PID(SET 6)的控制效果最好；对于低目标压强情形而言，TD-PID的控制效果最好。故此，下一步可将GA-PID(SET 6)和TD-PID的优点结合起来，亦即将过渡过程引入到GA-PID中，以期可以快速小超调地达到目标压强，而且负调量很小，并且在调节过程中流量没有振荡情形的发生。

综上所述，GA-PID控制器在将阀门转角纳入到适应度函数后，降低了燃气流量在调节过程中的振荡，将负调量纳入到适应度函数后，大幅降低了燃气流量的负调，但同时也增加了响应时间。下一步需要综合考察适应度函数系数w_1~w_5变化对燃气流量调节时压强超调、响应时间和流量负调的影响。此外，遗传算子中的交叉和变异概率等参数会影响遗传算法的收敛结果，亦须关注其对流量控制的影响。再者，将过渡过程引入GA-PID控制器中，以期缩短调节时间，进一步改善控制效果。

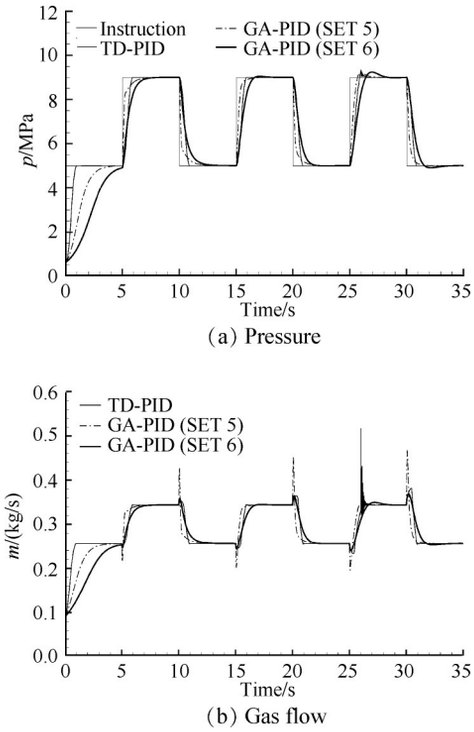


Fig. 8　Dynamic response of higher pressure range with different controllers

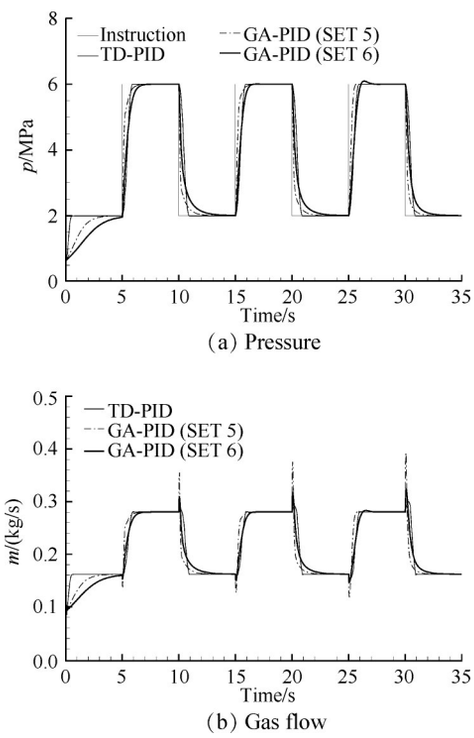


Fig. 9　Dynamic response of lower pressure range with different controllers

Table 6　Parameters of GA-PID corresponding to higher pressure range

Algorithm	N_e	w_4	w_5
GA-PID(SET 5)	499	6×10^8	0
GA-PID(SET 6)	499	6×10^8	4×10^6

Table 7　Parameters of GA-PID corresponding to lower pressure range

Algorithm	N_e	w_4	w_5
GA-PID(SET5)	499	4×10^8	0
GA-PID(SET6)	499	4×10^8	4×10^6

5　结　论

本文建立了滑阀式燃气流量调节燃气发生器的动态模型，并针对系统的负调和振荡特性，设计了一种改进遗传算法优化的PID控制器，在此基础上开展了仿真研究，得到的主要结论如下：

（1）遗传操作中的选择算子对于进化过程的收敛速度有着极其重要的影响。本文改善了选择算子，引入最优个体复制个数N_e的概念，大大加速了遗传收敛。

（2）将阀门转角和负调量纳入到适应度函数的表达式中，有效抑制了流量在调节过程中的振荡，并显著降低了流量负调。

（3）相较原始的PID控制器，经过改进遗传算法优化的PID控制器不仅能够大大缩短调节时间，而且压强超调量和流量负调量均得到了很大的改善，证明了该算法的有效性和可行性。

（4）适应度函数中的系数会影响目标函数的取值，而遗传算子中的交叉和变异概率等参数会影响遗传算法的收敛结果，因此将来需对其进行继续研究，以期进一步地优化计算结果。

下一步可将过渡过程引入到GA-PID控制器中，以期缩短调节时间，进一步改善控制效果。

参考文献

[1] 何洪庆，陈旭扬，孙贵宁，等．固冲发动机的流量调节技术[J]．战术导弹技术，2009(2)：36-40.

[2] 柴金宝，陈　雄，何　坤，等．跟踪微分器在变流量燃气发生器上的应用研究[J]．推进技术，2019，40(5)：1153-1161.（CHAI Jin-bao，CHEN Xiong，HE Kun，et al. Research on Tracking Differentiator for Variable Flow Gas Generator[J]. *Journal of Propulsion Technology*，2019，40(5)：1153-1161.）

[3] 牛文玉．燃气流量可调的固体火箭冲压发动机控制方法研究[D]．哈尔滨：哈尔滨工业大学，2009.

[4] 曹军伟，何国强，崔金平，等．固体火箭冲压发动机燃气流量调节的负调现象[J]．固体火箭技术，2015，38(3)：332-335.

[5] 韩京清．自抗扰控制技术[M]．北京：国防工业出版社，2013.

[6] 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.）

[7] 周景亮，陈 雄，柴金宝，等. 固体火箭冲压发动机流量可调燃气发生器控制算法[J]. 航空动力学报，2020，35(5)：1109-1120.

[8] 韩京清. 从PID技术到"自抗扰控制"技术[J]. 控制工程，2002，9(3)：13-18.

[9] Pinto P C，Kurth G. Robust Propulsion Control in all Flight Stages of a Throtteable Ducted Rocket[R]. *AIAA* 2011-5611.

[10] 聂聆聪，刘志明，刘源翔. 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.）

[11] 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.）

[12] 何 坤，陈 雄，余业辉，等. 神经网络PI控制算法在燃气发生器上的应用[J]. 兵工自动化，2017，36(6)：42-45.

[13] 柴金宝，陈 雄，周景亮，等. 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[J]. 推进技术，2019，40(2)：441-448.（CHAI Jin-bao，CHEN Xiong，ZHOU Jing-liang，et al. Adaptive Fuzzy Immune PID Control for Gas Generator Pressure Based on Artificial Bee Colony Algorithm Optimization[J]. *Journal of Propulsion Technology*，2019，40(2)：441-448.）

[14] 周 俊，周长省，陈 雄. 基于BP神经网络固冲发动机燃气流量调节控制[J]. 计算机仿真，2015，32(1)：56-59.

[15] 刘源翔，姚晓先，聂聆聪，等. 一种流量可调燃气发生器压强控制算法的研究[J]. 固体火箭技术，2014，37(1)：43-46.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 柴金宝. 变流量固冲发动机燃气流量调节系统控制算法及实验研究[D]. 南京：南京理工大学，2019.

[19] 蒋海波，崔新艺. 无刷直流电机模糊控制系统的建模与仿真[J]. 西安交通大学学报，2005，39(10)：1116-1120.

[20] 王晓天，边思宇. 基于遗传算法和神经网络的PID参数自整定[J]. 吉林大学学报(理学版)，2018，56(4)：953-958.

[21] 郭海湘，诸克军，胡 杰，等. GA-BP嵌套算法的理论及应用[J]. 数学的实践与认识，2008，38(1)：116-125.

[22] 刘金琨. 先进PID控制MATLAB仿真(第4版)[M]. 北京：电子工业出版社，2016.

[23] 高俊山，牟晓光，杨嘉祥. 一种基于遗传算法和神经网络的PID控制[J]. 电机与控制学报，2004，8(2)：108-112.

[24] 韩瑞峰. 遗传算法原理与应用实例[M]. 北京：兵器工业出版社，2009.

[25] 徐丽娜. 神经网络控制(第三版)[M]. 北京：电子工业出版社，2009.

[26] 李敏远，都延丽. 基于遗传算法学习的复合神经网络自适应温度控制系统[J]. 控制理论与应用，2004，21(2)：242-246.

(编辑：史亚红)