

# 燃气发生器供气多级调压控制策略与实现方法

褚卫华, 谢明伟

(中国空气动力研究与发展中心 设备设计及测试技术研究所, 四川 绵阳 621000)

**摘 要:**针对高压气源供气管路双级调压阀调压过程中存在的耦合、压力波动和管路压力难以快速收敛,导致的燃气发生器燃烧脉动压力大、点火延迟和爆燃问题,提出了双级调压阀位置与压力串联闭环调压控制策略,并通过分析给出了一级调压阀位置闭环目标跟踪曲线和二级调压阀最佳调节位置的调试获取方法。双级调压阀位置与压力串联闭环调压控制策略和实现方法在某装置大流量燃气发生器供应调压系统中得到应用验证,调压精度优于 1%。结果表明:采用一级位置闭环和二级压力闭环控制策略可以很好地解决串联调压阀调节过程中存在的压力耦合问题,一级调压阀位置闭环目标跟踪曲线和二级调压阀最佳调节位置的调试获取方法简单有效。

**关键词:**燃气发生器;环状缝隙调压阀;控制策略;多级调压;控制耦合

**中图分类号:**TH41 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9374(2021)03-0060-07

## Control strategy and implement method of multi-stage pressure regulation for gas supply of gas generator

CHU Weihua, XIE Mingwei

(Facility Design and Instrument Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, Sichuan China)

**Abstract:** The coupling, pressure fluctuation and difficulty in fast convergence of pipeline pressure during the process of pressure regulation with two-stage pressure regulating valve for high-pressure gas supply lead to high combustion pulsation pressure, ignition delay and deflagration of the gas generator. A closed-loop pressure control strategy using the series circuit of position and pressure for two-stage pressure regulating valve is proposed. And through the analysis, the debugging method about the closed-loop target tracking curve of the first-stage pressure regulating valve and the optimal adjusting position of the second-stage pressure regulating valve is given. The control strategy and implementation method have been applied in the large-flow supply pressure regulating system of a gas generator, and the pressure regulation accuracy is better than 1%. The results show that the control strategy of first-stage position closed-loop and second-stage pressure closed-loop can well solve the pressure coupling problem in the adjustment process of the series pressure regulator, and the obtained method of debugging and optimal adjusting position is simple and effective.

**Keywords:** gas generator; annular gap pressure-regulating valve; control strategy; multi-stage pressure regulation; control coupling

收稿日期:2020-06-20;修回日期:2020-09-13

基金项目:国家 863 计划项目(2014AA8061009)

作者简介:褚卫华(1968—),男,博士,研究员,研究领域为流体控制。

## 0 引言

燃气发生器是一种采用氧化剂(氧、空气或其他氧化剂)和燃料(酒精、煤油、天然气等)燃烧生成预定流量、压力和温度的高温燃气装置,适合短时输出大功率热能动力,在工业用燃气轮机、火箭冲压、高超声速推进地面试验系统、气动激光器和化学激光器压力恢复系统等军事和民用领域得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>。典型的以空气为氧化剂的燃气发生系统组成原理如图1所示,由气源、空气调节管路、燃料挤推管路、点火装置和燃气发生器组成,空气调节管路主要功能是为发生器供应稳定流量的空气,燃料挤推管路为燃烧过程提供稳定的燃料供应。当燃气发生器应用于激光器等移动装置时,为了方便安装运输,减小装备规模,提高机动能力,需要将空气等氧化剂压缩到高压气瓶中,在工作过程中通过控制系统高精度调节调压阀为燃气发生器燃烧提供满足流量和压力要求的空气等氧化剂,从而保证燃气发生器稳定燃烧<sup>[3-4]</sup>。因此,如何将气源高压空气等氧化剂高精度稳定控制调节,满足燃气发生器燃烧要求的气流,以最大效率利用高压气源空气等是安装于移动装置上燃气发生器需要解决的难题。

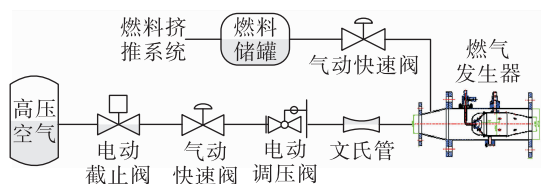


图1 燃气发生器结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of gas generator

对于高压气源,特别是大流量空气等氧化剂供应管道,如果采用单级调压阀直接调压则对调压阀阀门强度、尺寸、型面设计和调压精度等都提出很高要求,很大的降压比在工程上甚至无法实现,一般都采用双调节阀串联调压的方式实现<sup>[5]</sup>。双调节阀串联调压方式有两种,一种是机械式减压阀加伺服调压阀方式,伺服调压阀与调压阀后压力传感器、控制器组成压力闭环控制。这种调压方式原理是:首先采用减压阀将阀前高压气源较高的压力减

少至某一固定压力,然后通过控制器自动控制伺服调压阀将阀后压力高精度调节到目标值;另一种方法是采用两个伺服调压阀串联调压的方式。由于减压阀的特点是在进口压力不断发生变化波动的情况下,保持气体出口压力在一定可控范围之内<sup>[6]</sup>,因此机械式减压阀与伺服调压阀串联的调压方式,控制策略和调试过程简单,但由于减压阀阀后压力与阀前压力有一定比值要求,高压气源终止使用压力过高,高压气源压力低于某一值后减压阀无法按要求完成减压工作,因此高压气瓶组高压气体有效利用率很低。采用双伺服调压阀串联自动调节的方式,可以最有效利用高压气瓶组气源,但是控制策略复杂。本文以串联伺服调压阀为研究对象,研究双级串联伺服调压阀实现高压气源高精度调节的控制策略,并分析控制策略的实现过程和调试方法。

## 1 控制系统组成与控制策略分析

调压阀是通过总压调节实现气流速度和流量的精确控制。随着气源压力降低,通过控制调压阀的开度,以保证稳定室内气流压力稳定在某一运行值<sup>[7]</sup>。为了保证压力调节的稳定性,阀门型面曲线通常采用指数特性曲线。其优点在于调压过程中,阀后压力相对变化量与阀芯的相对位移量基本呈线性,有利于阀门控制系统设计与压力调节。典型的环状缝隙调压阀的气源特性公式<sup>[8]</sup>为

$$\mu = \mu_{\min} \left\{ 1 - \frac{\frac{n+1}{2} Ma F \sqrt{KRT_h}}{B \left( 1 + \frac{K-1}{2} Ma^2 \right)^{\frac{K+1}{1(K-1)}} \cdot \frac{p_0}{p_h}} \right\}^{-\frac{2n}{n+1}}$$

式中: $\mu$ 为阀门前后总压比; $\mu_{\min}$ 为阀门前后最小总压比; $Ma$ 为气流马赫数; $F$ 为试验段截面积; $K$ 为绝热指数; $R$ 为气体常数; $T_h$ 为气源初始总温; $p_h$ 为气源初始压力; $p_0$ 为稳定段总压; $B$ 为气源容积; $n$ 为气流试验过程多变指数; $K$ 为绝热指数。

伺服调压阀后压力调节闭环控制原理如图2所示,闭环控制由控制器、调压阀、阀后压力传感器构成,控制器根据压力目标值与调压阀后压力传感器差值实时调节阀芯位置,改变阀芯受控流体的压差,实现阀后压力精确控制。

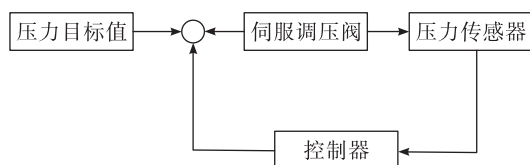


图2 调压阀后压力闭环控制系统框图

Fig. 2 Diagram of pressure closed-loop control system after pressure regulating valve

目前燃气发生器等空气供应管路双级伺服调压阀调压控制方式有两种:第一种方式是第一、二级调压阀均采用独立的压力闭环控制,第一级调压阀输出作为第二级调压阀输入。由于采用这种方式一级调压阀后压力调节会直接影响到二级调压阀后压力,在两级之间压力控制存在很大的耦合性,空气管路供应压力很难实现高精度控制。第二种方式是第一级调压阀采用位置控制,调压阀位置随气源压力线性变化,二级调压阀采用压力闭环。第二种调压方式克服了第一种方式存在的控制耦合问题,控制稳定性和精度有所提高,但一级调压阀后压力变化较大,增加了二级调压阀调压难度,也不能使二级调压阀工作在最佳调压位置,难以充分发挥二级调压阀最佳调压特性,无法达到高精度调压效果。

本文采用位置与压力闭环控制解决双级伺服调压阀控制耦合问题的基础上,研究一级调压阀按气源压力移动定位的关系曲线调试获取方法,确保一级调压阀后压力基本稳定在某一固定值,简化二级调压阀控制策略,同时使二级调压阀调压过程中工作在最佳调压位置,发挥二级调压阀最佳调压特性,使双级调压阀调压达到最佳效果,双级伺服调压阀位置与压力闭环控制原理图如图3所示。

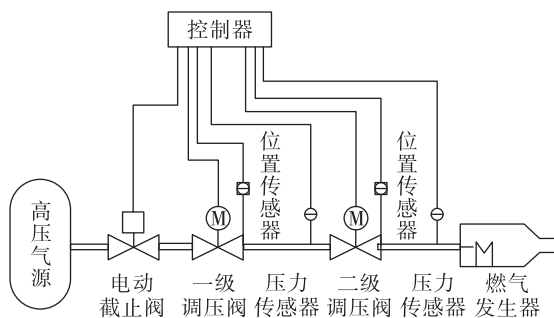


图3 双级伺服调压阀位置与压力串联闭环控制原理图

Fig. 3 Closed-loop control schematic diagram of position and pressure series of two-stage pressure regulating valve

## 2 控制调试与实现方式

### 2.1 二级调压参数调节与最佳调压位置确定

调压阀调压特性与阀门入口气流总温、气流马赫数  $Ma$ 、摩尔质量等有密切关系,特别是阀门压比曲线,阀后压力/阀前压力与阀门开度关系曲线与调压阀阀芯型面有直接联系<sup>[9-10]</sup>。图4是典型调压阀调压特性曲线,从阀门调压特性曲线可以看出,随着  $Ma$  的增加,压力增大,调压性能曲线整体下移。因此,要使双级调压阀达到最佳调压效果和精度,需要分析二级调压阀在要求工作状态下其压比特性曲线和最佳调压位置,在进行压力闭环控制的过程中,在最佳调压位置附近完成目标压力精调。

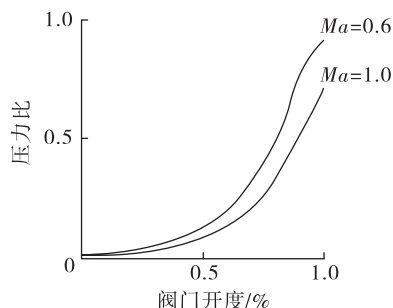


图4 典型调压阀调压特性曲线

Fig. 4 Pressure regulating gulating characteristic curve of typical pressure regulating valve

二级调压阀目标工作状态下压比曲线最有效的调试获取方法是:

1) 将一级调压阀 100% 全开,二级调压阀采用压力闭环控制,控制目标压力为燃气发生器工作压力,采用传统 PID 控制通过试验完成二级调压阀后压力闭环控制参数调节。

2) 二级控制参数调节完成后,将气源压力填充到二级调压阀工作压力上限值,继续保持一级调压阀 100% 全开,开始二级调压阀后压力调节,气源压力开始下降,直到气源压力下降到二级调压阀后压力无法实现目标压力调节为止。

3) 对试验数据进行拟合获取二级调压阀全位置压比曲线。

以某引射系统燃气发生器空气高压调节管路为例,通过试验调试获得的二级调压阀全位置压比曲线具体见图5。在压比曲线中,横坐标为二级调

压阀开度,纵坐标为二级调压阀阀后压力与调压阀阀前压力比值。

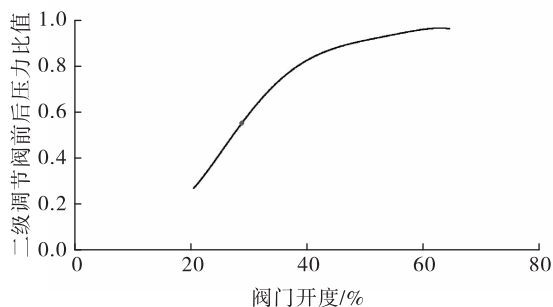


图 5 二级调压阀压比曲线图

Fig. 5 Pressure ratio curve of second-stage pressure regulating valve

在压比曲线上,调压阀最佳调压位置是斜率为 1 的直线中点部分。

## 2.2 一级调压阀位置闭环控制目标曲线分析

一级调压阀位置闭环控制目标曲线实际上是实现二级调压阀在目标工作压力处高精度调压时一级调压阀位置随气源压力变化关系曲线。一级调压阀位置闭环控制目标曲线确定的目的是:调压过程中,一级调压阀实时以该位置曲线为目标值进行位置闭环定位,实现二级调压阀阀前压力,即一级调压阀阀后压力基本稳定,实现二级调压阀前压力粗调,从而保证二级调压阀在最佳调压点附近完成微调,实现二级调压阀阀后压力高精度稳定在目标值。

一级调压阀位置闭环控制目标曲线具体调试过程是:

1)将二级调压阀固定到最佳调压位置,由控制器、二级调压阀阀后压力传感器和一级调压阀组成压力闭环控制,控制算法采用传统 PID。

2)将气源压力打到气源压力上限值后进行控制参数调节,将二级调压后压力稳定控制在目标压力。

3)控制参数调试完成,对试验数据进行拟合,得到二级调压阀工作在最佳调压位置时,一级调压阀位置与气源压力关系曲线。

以某引射系统燃气发生器空气高压调节管路为例,通过试验调试获得的一级调压阀位置与气源压力关系曲线如图 6 所示,横坐标为气源压力,纵坐标为一级调压阀开度。图 7 为一级调压阀后压力变

化曲线。一级调压阀沿气源压力目标位置曲线闭环控制方法,克服了双压力闭环控制在压力通道之间出现的耦合效应,解决了串联压力通道闭环控制之间交叉干扰导致严重影响控制性能问题。在气源压力高压(大于 12 MPa)阶段,保持二级调压阀工作在最佳调压位置,一级调压阀后压力基本稳定在 5% 以内,为二级高精度调压奠定基础。随着气源压力下降进入低压(6 ~ 12 MPa)阶段,一级调压阀后压力平稳降低,通过二级调压阀后压力闭环控制可实现稳定调压。

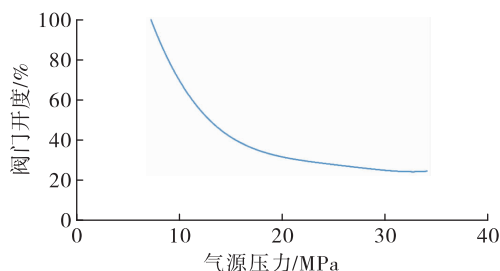


图 6 一级调压阀位置与气源压力关系曲线

Fig. 6 Relationship curve between position of first-stage pressure regulating valve and gas source pressure

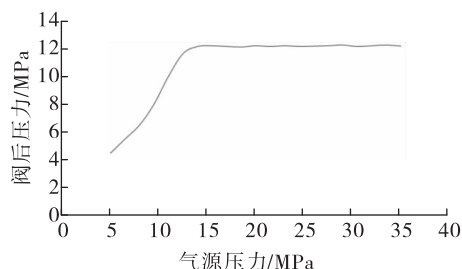


图 7 一级调压阀后压力曲线

Fig. 7 Pressure curve after first-stage pressure regulating valve

## 2.3 双级伺服调压阀压力调节实现方式

明确二级调压阀最佳调压位置和一级调压阀位置闭环控制曲线调试方法后,可以按以下步骤高效实现高压气源双级高精度调压控制:

1)将气源压力填充到二级调压阀工作压力上限值,一级调压阀保持 100% 全开,二级调压阀采用压力闭环控制,控制目标压力为燃气发生器工作压力,通过实验完成二级调压阀后压力闭环控制参数调节。

2)二级控制参数调节完成后,从试验数据里得到二级调压阀全位置压比曲线。

3)压比曲线调压直线部分中点确定为二级调

压阀的最佳调压位置。

4) 将二级调压阀固定到最佳调压位置, 由控制器、二级调压阀后压力传感器和一级调压阀组成压力闭环控制, 以燃气发生器工作压力为控制目标压力, 经调试从试验数据中得到二级调压阀工作在最佳位置时的一级调压阀位置与气源压力关系曲线。

5) 完成控制器中双级调压控制算法编写, 其中, 第一级调压阀控制为闭环位置控制, 控制目标是一级调压阀位置随气源压力变化的关系曲线, 二级调压阀以二级调压阀后压力为目标压力, 进行 PID 压力闭环控制。

6) 将气源压力打到高压状态, 进一步对双级调压控制参数进行试验验证与控制参数优化。

## 2.4 控制策略

在双级调压阀位置和压力闭环控制中, 第一级调压阀位置闭环和第二级压力闭环控制都采用 PID 控制算法。PID 控制算法是通过输出反馈误差, 调节比例、积分、微分系数, 从而实现在线控制和调整。PID 控制数学模型<sup>[11-12]</sup>为

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt}$$

式中:  $k_p$  为比例系数;  $k_i$  为积分系数;  $k_d$  为微分系数。

第一级调压阀位置闭环主要任务是: 依据气源压力与调压阀位置关系曲线根据气源压力完成调压阀位置快速跟踪定位, 控制过程中必须在快速跟踪基础上兼顾定位。由于比例系数  $k_p$  主要影响系统的响应速度, 增大比例系数, 会提高系统的响应速度; 反之, 减小比例系数会使调节过程变慢, 增加系统调节时间。因此, 采用第一级调压阀位置环采用单比例控制算法, 比例系数依据误差自动变参

数。具体变化规则如下<sup>[13-14]</sup>:

$$\begin{aligned} \text{if } |e(t)| > e_{p1}, k_p &= C_{p1} \\ \text{if } e_{p2} < |e(t)| \leq e_{p1}, k_p &= C_{p2} \\ \text{else } k_p &= C_{p3} \end{aligned}$$

式中  $e_{p1} > e_{p2}$ ;  $C_{p1} < C_{p2} < C_{p3}$ 。比例系数  $k_p$  依据定位误差变化, 保证动态跟踪特性同时兼顾定位精度。

第二级调压阀压力闭环主要目的是实现二级调压阀后压力高精度控制。为了保证二级调压阀在气源压力高压阶段和低压阶段都能实现高精度和稳定, 采用常规 PID 由于不能在线整定, 无法取得满意的控制效果<sup>[15-16]</sup>, 因而需要利用模糊控制规则在线对其进行参数的自适应整定, 实现对系统动态的、准确的和稳定的控制。

模糊控制器的模糊输入确定为二级调压阀后压力偏差  $e$  和压力偏差的变化  $e_c$ 。输出变量确定为 PID 控制参数的变化量  $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 、 $\Delta k_d$ 。偏差  $e$  的基本论域为  $[-0.5, 0.5]$ ; 偏差变化  $e_c$  的基本论域为  $[-0.2, 0.2]$ ; 输出  $\Delta k_p$  的基本论域为  $[-3.0, 3.0]$ ;  $\Delta k_i$  的基本论域为  $[-0.02, 0.02]$ ;  $\Delta k_d$  的基本论域为  $[-10.0, 10.0]$ 。输入输出的模糊子集定义为  $[\text{NB}, \text{NM}, \text{NS}, \text{ZR}, \text{PS}, \text{PM}, \text{PB}]$ , 模糊论域定义为  $[-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6]$ 。考虑到对论域的灵敏度、覆盖程度、鲁棒性和稳定性等原则, 用三角形隶属函数作为隶属度函数, 基本公式为<sup>[17-18]</sup>

$$f(x) = \begin{cases} (x-a)/(b-a) & a \leq x \leq b \\ (c-x)/(c-b) & b < x \leq c \end{cases}$$

模糊 PID 控制器的  $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 、 $\Delta k_d$  控制规则如表 1 所示<sup>[19-21]</sup>。

表 1 模糊 PID 控制器的  $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 、 $\Delta k_d$  控制规则  
Tab. 1 Control rules of  $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 、 $\Delta k_d$  for fuzzy PID controller

NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB
PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NS/NB	ZR/ZR/NM	ZR/ZR/PS
PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZR/ZR/NS	NS/ZR/ZR
PM/NB/ZR	PM/NM/NS	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZR/ZR/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZR
PM/NM/ZR	PM/NM/ZR	PS/NS/NS	ZR/ZR/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/ZR
PS/NM/ZR	PS/NS/ZR	ZR/ZR/ZR	NS/PS/ZR	NS/PS/ZR	NM/PM/ZR	NB/PB/PB
PS/ZR/PB	ZR/ZR/NS	NS/PS/PS	NM/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PB/PS	NB/PB/PB
ZR/ZR/PB	ZR/ZR/PM	NS/PS/PM	NM/PS/PM	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB



模糊PID控制保证了二级调压阀后压力控制精度,实现了气源压力高压阶段和低压阶段都优于1%。

### 3 调试结果分析

双级调压阀位置与压力串联闭环调压控制策略和实现方法在某装置大流量燃气发生器中得到应用,高压气源压力为35 MPa,二级调压阀后目标压力为5.3 MPa,调试结果(见图8)表明:

1) 双级调压阀位置与压力串联闭环调压控制策略很好解决了双级调压阀压力控制耦合问题。通过调试试验获取气源压力与一级调压阀位置关系曲线,与二级调压阀最佳调压位置相结合,大大提高空气管路压力控制精度,减小了发生器燃烧脉动和发生器振动问题。

2) 燃气发生器空气供应压力实现快速稳定,缩短了发生器点火时间,减小了点火过程中的冲击。

3) 由于一级调压阀位置严格按其试验获取的目标曲线运动,调压阀后压力稳定无冲击,减小压力波动对二级低压调压阀的冲击,延长二级调压阀工作寿命。

4) 多燃气发生器同时工作时,保证了各燃气发生器点火同步性。

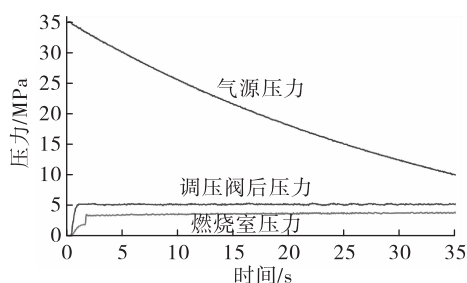


图8 双级自动调压控制结果曲线

Fig. 8 Result curve of two-stage automatic pressure regulating control

### 4 结论

针对高压气源双级调压阀调压存在的耦合和调节过程中压力波动问题,在深入分析和试验验证的基础上提出了一种双级调压阀位置与压力串联闭环调压控制策略,给出了有效的实现方法,并在某引射系统燃气发生器高压空气调节管路上得到

了成功应用,主要结论如下:

1) 采用一级位置闭环和二级压力闭环控制策略可以很好地解决串联调压阀调节过程中存在的压力耦合问题,并可以将高压气源压力得到最大效率利用。

2) 二级调压阀最佳调压位置和一级调压阀位置与气源压力关系曲线调试获取方法简单有效。

3) 一级调压阀按照位置与气源压力关系曲线进行跟踪定位,二级调压阀在最佳工作区域进行压力闭环调压,不仅保证了一级调压阀后压力稳定无冲击,而且实现了二级调压阀后压力快速稳定,阀门系统调压精度得到最有效的发挥。

4) 双级调压阀压力控制系统给出的调试和实现方式简单有效,大大提高调试效率,缩短调试时间,降低调试成本,并且采用模糊PID控制可以更有效地实现压力调节控制。

#### 参考文献:

- [1] 赵芳,任泽斌. 燃气发生器应用综述[J]. 火箭推进, 2019, 45(3): 1-8.  
ZHAO F, REN Z B. Overview of application of combustion-gas generator [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2019, 45(3): 1-8.
- [2] 何晶晶. 燃气发生器监测和控制系统的的设计及应用[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [3] 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.
- [4] 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, 2010.
- [5] 石璞,朱国强,李进贤,等. 液体火箭发动机针栓喷注器雾化燃烧技术研究进展[J]. 火箭推进, 2020, 46(4): 1-13.  
SHI P, ZHU G Q, LI J X, et al. Advances in atomized combustion technology research of pintle injector for liquid rocket engines [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2020, 46(4): 1-13.
- [6] 贾一平,黄运华. 基于AMESim的气动减压阀建模与仿真分析[J]. 机械工程与自动化, 2018(2): 60-62.
- [7] 曾利权,达兴亚,周润. 试验台调压阀气动设计与性能分析[J]. 阀门, 2015(5): 1-3.
- [8] 侯良学,崔晓春,陈志敏. 环状缝隙调压阀的一种设计方法和特性计算[J]. 机械科学与技术, 2012, 31(6):

- 1005-1009.
- [9] 马立坤. 燃气流量可调固体火箭冲压发动机动态响应过程研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- [10] 杨瑞康, 张勤练, 周舟, 等. 推力室外壁机器人自适应焊接控制研究[J]. 火箭推进, 2019, 45(1): 66-72.  
YANG R K, ZHANG Q L, ZHOU Z, et al. Research on robot adaptive welding control of thrust chamber outer wall [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2019, 45 (1): 66-72.
- [11] 郭永凤. 基于改进 PID 控制的移动液压机械手轨迹追踪研究[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(10): 79-82.
- [12] 姜晓平, 朱奕, 伞冶. 大功率随动试验台多永磁同步电机同步控制[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(4): 88-95.
- [13] 李岩, 牟春晖, 聂聆聪. 基于  $\mu$  综合的宽包线冲压发动机多变量鲁棒稳定控制研究[J]. 推进技术, 2019, 40(6): 1409-1418.
- [14] 聂聆聪, 朴胜志, 吴智锋, 等. 几何可调液体冲压发动机多变量控制算法研究[J]. 推进技术, 2013, 34(12): 1690-1695.
- [15] 聂聆聪, 李岩, 戴冬红, 等. 涡轮冲压组合发动机模态转换多变量控制研究[J]. 推进技术, 2017, 38(5): 968-974.
- [16] 朱美印, 王曦, 但志宏, 等. 高空台进气控制系统压力 PI 增益调度控制研究[J]. 推进技术, 2019, 40(4): 902-910.
- [17] 但志宏, 张松. PLC 实现的 FUZZY 自适应 PID 控制器在高空模拟试验中的应用[J]. 自动化技术与应用, 2011, 30(1): 20-23.
- [18] 柴金宝, 陈雄, 余业辉, 等. 基于 Fuzzy-PI 双模控制器的燃气发生器压强控制算法研究[J]. 推进技术, 2018, 39(5): 1151-1156.
- [19] CHENG P, LI Q L, CHEN H Y. Flow characteristics of a pintle injector element [J]. Acta Astronautica, 2019, 154: 61-66.
- [20] MARCHI A, NOURI J, YAN Y, et al. Spray stability of outwards opening pintle injectors for stratified direct injection spark ignition engine operation [J]. International Journal of Engine Research, 2010, 11(6): 413-437.
- [21] NINISH S, VAIDYANATHAN A, NANDAKUMAR K. Spray characteristics of liquid-liquid pintle injector [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2018, 97: 324-340.