

文章编号: 2097-1974(2024)06-0088-09

DOI: 10.7654/j.issn.2097-1974.20240614

# 运载火箭气瓶自动充气控制策略研究

夏先军, 张润红, 杨加东, 于新辰, 严万洪  
(西昌卫星发射中心, 西昌, 615606)

**摘要:** 为了提高运载火箭地面供配气系统的工作效率, 各发射场对气瓶充气提出了自动控制的需求。针对运载火箭气瓶充气过程, 设计出了基于PID控制技术的气瓶自动充气方案, 并通过AMESim软件仿真进行自动充气控制策略研究。结果表明, 通过合理设置PID控制模块参数, 所设计的自动充气方案能够满足箭上气瓶自动充气要求, 控制模块使用的压力传感器应靠近箭上气瓶位置安装, 以提高气瓶自动充气控制效果。

**关键词:** 运载火箭; 气瓶; 自动充气; PID; AMESim

中图分类号: V554 文献标识码: A

## Research on Control Strategy of Automatic Charging of Gas Cylinder in Launch Vehicle

XIA Xianjun, ZHANG Runhong, YANG Jiadong, YU Xincheng, YAN Wanhong  
(Xichang Satellite Launch Center, Xichang, 615606)

**Abstract:** In order to improve the efficiency of gas supply system in space launch, automatic charging technology of gas cylinders is proposed. Automatic charging schemes of gas cylinders based on PID control technology are designed, and the automatic control strategy is studied through the system simulation software AMESim. The results indicate that by setting the PID control module parameters reasonably, the schemes of gas charging can meet the automatic charging requirements of gas cylinders on launch vehicle. To improve the automatic charging control effect of gas cylinder, pressure sensor used in the control module should be installed close to the cylinders of launch vehicle.

**Keywords:** launch vehicle; gas cylinder; automatic gas charging; PID; AMESim

### 0 引言

气瓶是运载火箭动力系统的重要贮气装置, 所贮存的高压气体用来实现贮箱增压、阀门控制和管路吹除等功能。在运载火箭发射场测试中, 气瓶充气是不可或缺的项目, 若充气速率过快, 气瓶温度急剧升高, 对气瓶材料性能产生影响, 可能造成气瓶承压能力降低, 具有一定安全隐患; 若充气速度过慢, 充气用时增加, 会对测试流程产生影响, 因此气瓶充气通常对充气速率有严格要求。目前, 运载火箭气瓶充气基本是手动控制进行, 要求操作人员实时观察充气压力, 并调整充气手阀开度来控制充气升压速率, 受人员经验和气源压力波动等因素影响, 短时平均充气速率很难严格按照技术要求进行。随着中国航天事业的蓬勃发展, 发射场地面供气系统对气瓶自动充气的需求也日益强烈。

目前有关气瓶充气的文献报道较少, 王恺等<sup>[1]</sup>利用系统仿真软件AMESim构建了基于实际物理过程的复合材料气瓶充放气仿真模型, 并对充放气过程中的内、外侧换热及瓶壁间导热进行了数值模拟, 分析了复合材料气瓶充放气过程中的压力和温度特性, 研究结果与试验数据一致性较好; 罗天培等<sup>[2]</sup>基于开口系能量方程、理想气体状态方程以及不同流动状态下的质量流量方程, 利用集总参数法编写计算程序, 对常温氮气瓶的充放气过程压力和流量进行计算模拟, 结果与试验数据一致性好; 安刚<sup>[3]</sup>采用变质量系统热力学和气体动力学理论, 对70 MPa车载储氢气瓶快速充气过程进行分析研究, 得出了气瓶快速充气过程中的压力、温度变化规律, 分析了气源体积、气源压力、散热功率、管路通径和充气流动阻力等因素对充气时间和充气率的影响。以上研究主要集中在

气瓶充气过程中的压力、温度特性等方面，不涉及气瓶充气过程的控制，有关气瓶自动充气控制策略的研究少有报道。

本文基于现行运载火箭典型气瓶充气过程，设计出基于PID控制技术的气瓶自动充气方案，并通过AMESim软件建模，对气瓶自动充气控制策略进行研究，为运载火箭气瓶充气工作优化提供参考。

## 1 基本原理

### 1.1 典型气瓶充气气路原理

运载火箭气瓶充气气路通常由箭上部分和地面设备部分组成，箭上部分包括气瓶组、气瓶充气开关和管路，地面部分由配气台和管路组成。配气台气瓶充气路由减压阀、压力表、充气手阀、放气手阀、压力传感器和管路构成<sup>[4]</sup>，典型气瓶充气气路原理如图1所示。

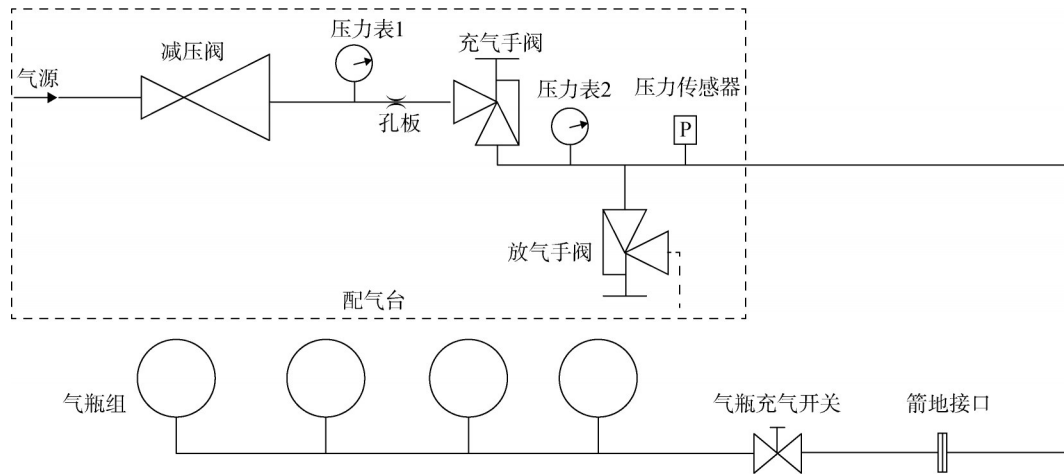


图1 典型气瓶充气气路原理

Fig.1 Typical pneumatic schematic diagram of gas cylinder charging

气瓶充气时，打开箭上气瓶充气开关，配气台进行调压，将气源部分提供的高压气体经减压阀减压至要求压力，打开配气台充气手阀，经充气手阀和孔板的双重节流后，对箭上气瓶进行充气。通过调整配气台充气手阀开度控制气瓶充气速率。

### 1.2 气瓶充气过程热力学分析

在实际的气瓶充气过程中，气瓶的换热特性由3部分组成，气瓶内侧为充气介质强制对流换热，气瓶外侧为空气或其他介质的自然对流，同时气瓶内外壁之间存在径向导热。对气瓶实际充气过程的建模通常有两种方式，即工程简化算法和基于实际物理过程的建模方法<sup>[1]</sup>。

#### 1.2.1 工程简化算法<sup>[5]</sup>

工程上为简化计算，常采用综合换热系数表征气瓶充气过程的换热特性，忽略具体换热过程，认为气瓶内气体和外界间的总传热量和传热系数、换热面积、温差有关，即：

$$Q' = h' A_s (T' - T) \quad (1)$$

式中  $Q'$  为单位时间内气瓶内气体和外界间的传热量，单位 W； $h'$  为综合换热系数，单位  $W/(m^2 \cdot K)$ ； $A_s$  为气瓶表面积，单位  $m^2$ ； $T'$ 、 $T$  分别为环境温度和气体温度，单位 K。

对于综合换热系数  $h'$ ，考虑气瓶内侧的介质强制对流换热、气瓶外侧介质的自然对流及气瓶内外壁间的径向导热，由于受充气速率、气瓶结构尺寸及环境条件的影响，通常由试验确定。

#### 1.2.2 基于实际物理过程的建模方法<sup>[5-7]</sup>

在气瓶充气过程中，气瓶内介质与内壁换热、气瓶内外壁面导热和气瓶外壁与周围环境换热3部分建模方法如下。

a) 气瓶内介质与内壁换热。

气瓶内介质与内壁面之间的换热量  $\delta Q_i$  由下式计算：

$$\delta Q_i = h_i S_i (T_i - T) \quad (2)$$

式中  $S_i$  为气瓶内壁表面积，单位  $m^2$ ； $h_i$  为气瓶内壁面对流换热系数，单位  $W/(m^2 \cdot K)$ ； $T_i$  为气瓶内壁面温度，单位 K； $T$  为气体介质温度，单位 K。充气过程中，气瓶瓶内气体与内壁之间换热方式为强迫对流交换，采用湍流换热公式计算内壁面对流换热系数：

$$h_i = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \frac{\lambda'}{L} \quad (3)$$

式中  $Re$ 、 $Pr$  分别为气体介质的雷诺数和普朗特数； $\lambda'$  为气瓶内气体导热系数，单位  $W/(m \cdot K)$ ； $L$  为气瓶内壁特征尺度，单位 m。

b) 气瓶内外壁面导热。

气瓶内外壁面导热热流  $\delta Q_w$  由下式计算:

$$\delta Q_w = \frac{4\pi\lambda_w(T_o - T_i)}{\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_o}} \quad (4)$$

式中  $\lambda_w$  为气瓶壁导热系数, 单位  $W/(m \cdot K)$ ;  $T_i$ ,  $T_o$  分别为气瓶内、外壁面温度, 单位  $K$ ;  $r_i$ ,  $r_o$  分别为气瓶内、外壁面半径, 单位  $m$ 。

c) 气瓶外壁和周围环境的换热。

热流  $\delta Q_o$  由下式计算:

$$\delta Q_o = h_o S_o (T_o - T_1) \quad (5)$$

式中  $S_o$  为气瓶外壁面换热面积, 单位  $m^2$ ;  $h_o$  为气瓶外壁面对流换热系数, 单位  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $T_1$  为气瓶外周围环境温度, 单位  $K$ 。

在充气过程中, 气瓶外壁面与周围介质为自然对流换热, 本文采用自然对流换热模型, 对流换热系数计算公式为

$$h_o = 0.27(Gr \cdot Pr)^{0.25} \frac{\lambda}{L} \quad (6)$$

式中  $Gr$  为气瓶外介质的格拉晓夫数;  $\lambda$  为气瓶外介质的热导率, 单位  $W/(m \cdot K)$ 。

### 1.3 PID控制原理

在工业过程控制系统中, 最常运用的控制策略是比例积分微分控制, 简称为PID控制。PID控制系统的基本原理如图2所示<sup>[8]</sup>。

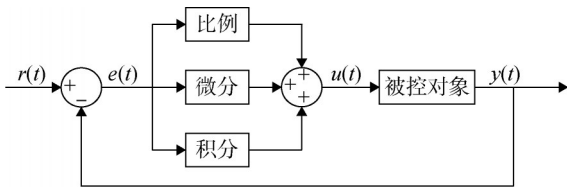


图2 PID控制基本原理

Fig.2 Fundamentals of PID control

PID控制系统通常是由一个PID控制器和一个被控对象所组成, 它是一种单位负反馈控制系统。其中PID控制器是一种线性控制器, 是将比例P的误差e与系统的积分I部分和微分D部分按照线性组合的方式进行构建。

系统的误差  $e(t)$  由下式计算:

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (7)$$

式中  $r(t)$  是目标值;  $y(t)$  是实际输出值。

PID的控制规律表达式为<sup>[8-9]</sup>

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (8)$$

式中  $u(t)$  为控制器的输出值;  $K_p$  为PID控制器中的比例因子;  $T_i$  为PID控制器中的积分时间常数;  $T_D$  为PID控制器中的微分时间常数。

也可以写为

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (9)$$

式中  $K_i$ ,  $K_D$  分别为积分因子和微分因子, 与  $K_p$  关系为

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (10)$$

$$K_D = K_p T_D \quad (11)$$

PID控制器各环节作用如下<sup>[8-10]</sup>:

a) 比例因子  $K_p$ : 比例控制的实质是一个可调增益放大器, 它可以改变被控信号的幅值, 但不能改变其相位, 增大  $K_p$  能够加快系统调节速度, 使系统反应更灵敏, 同时减少稳态误差。但是  $K_p$  过大会导致超调量增大、振荡次数增加、动态性能变差等。

b) 积分因子  $K_i$ :  $K_i$  可消除稳态误差, 提高无差度。当系统存在误差时, 积分控制器会不断累计误差, 输出控制量, 直至系统无差。但加入  $K_i$  会使系统动态响应变慢, 系统稳定性下降。

c) 微分因子  $K_D$ : 微分信号反映了误差信号的变化率, 可以在误差信号变化过大前, 引入早期修正信号, 因此微分控制可以预测系统未来变化, 实现系统提前控制, 极大提升系统响应速度, 减少调节时间, 改善滞后问题, 但增强微分作用会削弱系统的抗干扰能力。

PID控制器的3个环节会相互影响, 所以在整定PID控制器参数时, 需要用试验的方法来多次调试才能达到满意的控制效果。

## 2 运载火箭气瓶自动充气方案

实现火箭气瓶自动充气的关键, 是进行压力自动调节控制, 压力自动调节控制可通过电控减压阀和电动节流阀来实现, 因此运载火箭气瓶自动充气方案有两种, 分别是基于电动节流阀和电控减压阀的气瓶自动充气方案。

### 2.1 基于电动节流阀的气瓶自动充气方案

在典型气瓶充气气路的基础上, 选用电动节流阀作为气瓶自动充气气路压力调节控制阀门, 自动充气气路原理见图3。

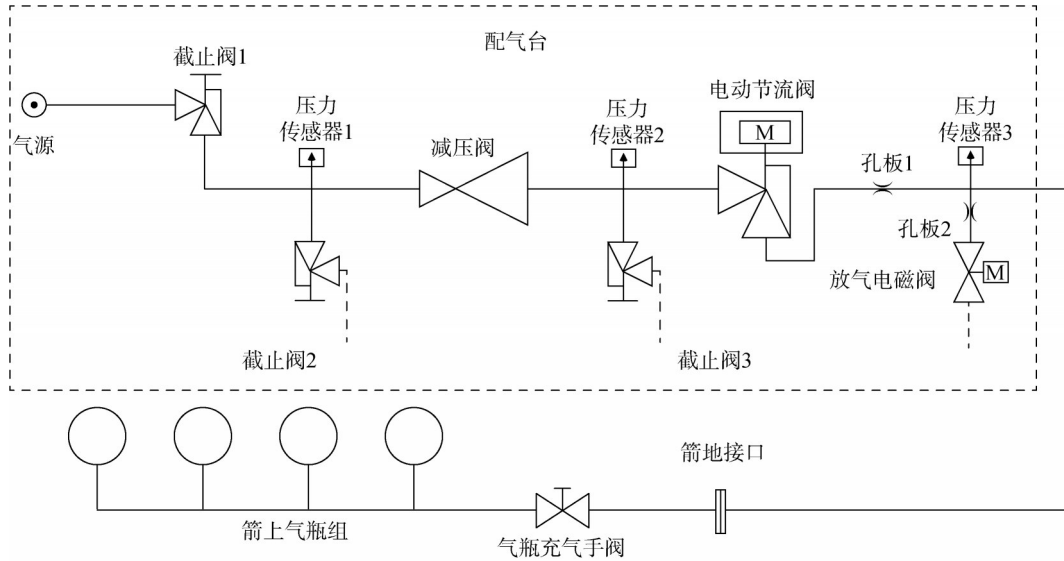


图3 基于电动节流阀的气瓶自动充气气路原理

Fig.3 Pneumatic schematic diagram of automatic gas cylinder charging based on electronic throttle valve

高压气体通过截止阀1，经减压阀减压至要求压力，当气瓶充气时，调整电动节流阀阀芯开度，经孔板节流后，通过气瓶充气开关对气瓶组进行充气。压力传感器3实时监测配气台气瓶充气管路压力，配气台控制模块根据充气速率要求值和气瓶初始压力得出理论压力时间曲线，并计算某时刻充气压力与理论要求压力的偏差，通过PID控制方式，

实时调整电动节流阀阀芯开度，控制气瓶充气速率与要求值一致。

### 2.2 基于电控减压阀的气瓶自动充气方案

选用电控减压阀作为气瓶自动充气气路压力调节控制阀门，电控减压阀具备自动调压能力，在气路设计上通过与电磁阀配合，实现气瓶远控自动充气，气路原理见图4。

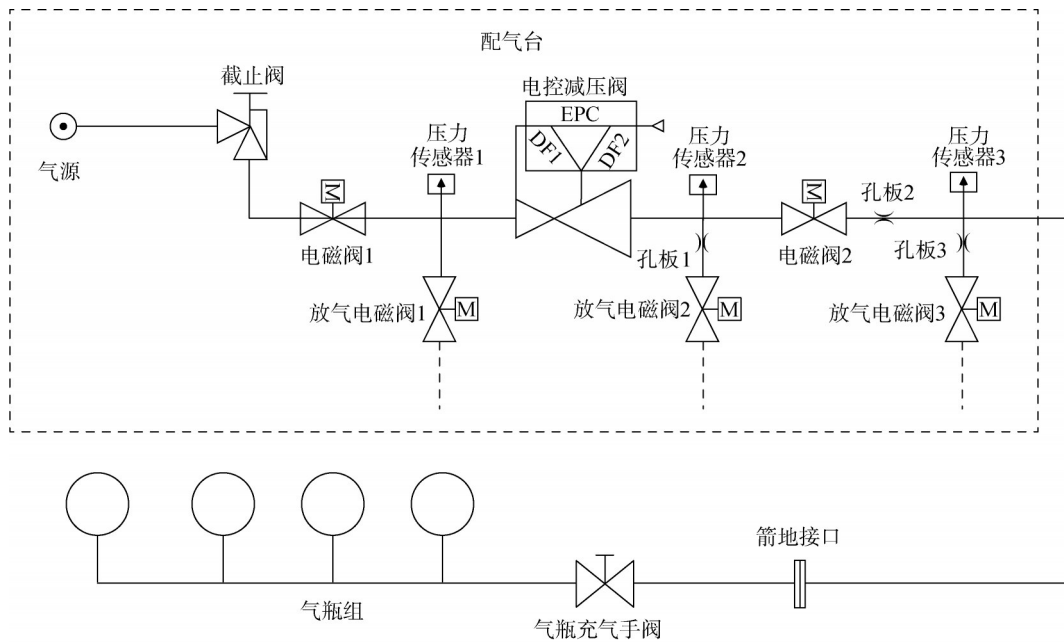


图4 基于电控减压阀的气瓶自动充气气路原理

Fig.4 Pneumatic schematic diagram of automatic gas cylinder charging based on electric pressure reducing valve

高压气体通过截止阀和电磁阀1（常开）后，经电控减压阀自动调压至要求压力，当气瓶充气时，电磁阀2加电打开，经孔板2节流后，通过气瓶充气开关对气瓶组进行充气。压力传感器3实时监测配气台气瓶充气管路压力，配气台控制模块根据充气速率要求值和气瓶初始压力得出理论压力时间曲线，并计算某时刻充气压力与理论要求压力的偏差，通过PID控制方式，实时调整电控减压阀出口压力，控制气瓶充气速率满足要求。

### 3 气瓶自动充气控制策略研究

#### 3.1 基于电动节流阀的气瓶自动充气控制策略研究

##### 3.1.1 电动节流阀实现气瓶自动充气建模

以基于电动节流阀的气瓶自动充气方案为研究对

象，采用系统仿真软件AMESim对气瓶自动充气过程进行建模，系统模型如图5所示<sup>[11-12]</sup>。充气管路由配气台台内部分和台外部分组成，台内部分管路通径10 mm、总长度4 m，台外部分管路通径6 mm、总长度40 m。气瓶组由4个25 L的复合材料气瓶构成，复合材料气瓶从内向外依次由内胆层和缠绕层组成，气瓶和充气管路换热基于实际物理过程进行设置。减压阀出口压力采用恒定压力和温度气源元件，电动节流阀选用定流量系数可调孔板元件，充气管路限流孔板采用定流量系数孔板元件，减压阀出口压力设置与气瓶充气压力相同，可调孔板、节流孔板通径分别是3 mm和1.75 mm，流量系数均为0.72。

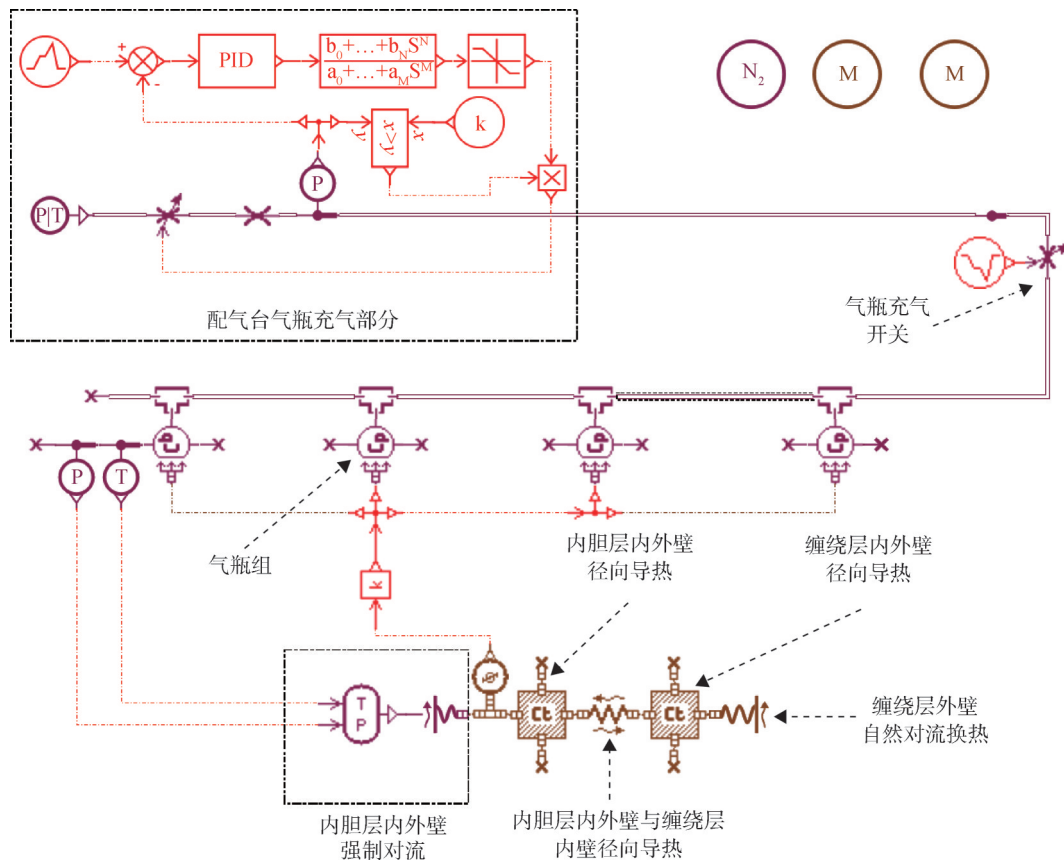


图5 基于电动节流阀气瓶自动充气模型

Fig.5 AMESim model of automatic gas cylinder charging based on electronic throttle valve

气瓶充气速率控制策略：减压阀调压至气瓶充气目标压力，设定气瓶充气目标压力和充气速率，开始气瓶充气。传感器实时监测气瓶充气管路压力，若传感器监测压力大于等于设定充气目标压力，气瓶停止充气，否则控制模块计算理论压力和气瓶充气管路压

力偏差，经PID计算、传递函数作用和限幅，输出结果至电动节流阀，通过调整电动节流阀阀芯开度，控制气瓶充气速率与要求速率一致。气瓶充气至目标压力后，关闭电动节流阀，停止充气，具体控制过程见图6。

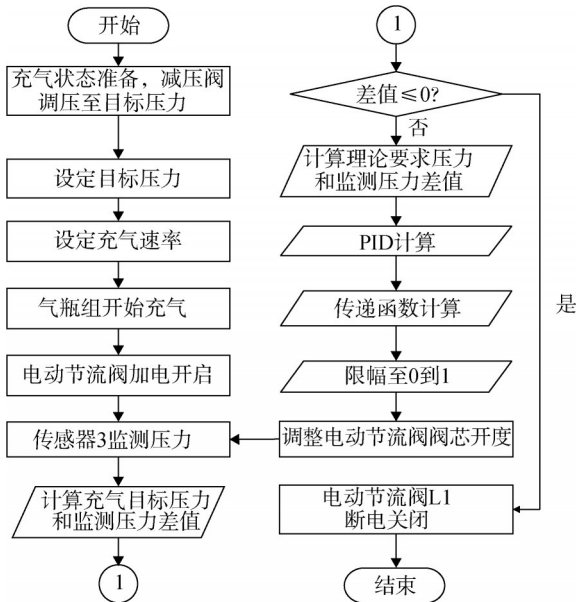


图6 电动节流阀气瓶自动充气控制策略

Fig.6 Control strategy of automatic gas cylinder charging based on electronic throttle valve

3.1.2 电动节流阀实现气瓶自动充气仿真结果分析

模型中PID控制模块比例因子  $K_p=3$ , 积分因子  $K_i=0.2$ , 微分因子  $K_d=0.8$ , 传递函数  $G(s) = 1/(s + 10)$ , 限幅范围0到1。设置气瓶充气初始压力为0 MPa, 充气目标压力20 MPa, 充气速率0.6 MPa/min。充气过程气瓶压力仿真结果、目标压力和孔板后压力对比曲线见图7, 控制模块能够控制气瓶平均充气速率为0.6 MPa/min, 与要求充气速率相同, 实现了气瓶充气的自动控制。开始充气阶段, 电动节流阀开启, 为了克服管路流阻, 快速调整气瓶充气压力满足要求, 调整电动节流阀至孔板后压力值较高, 随着充气的进行, 孔板后压力与气瓶压力压差逐渐减小, 从而确保气瓶能够按照要求速率充气至目标压力。

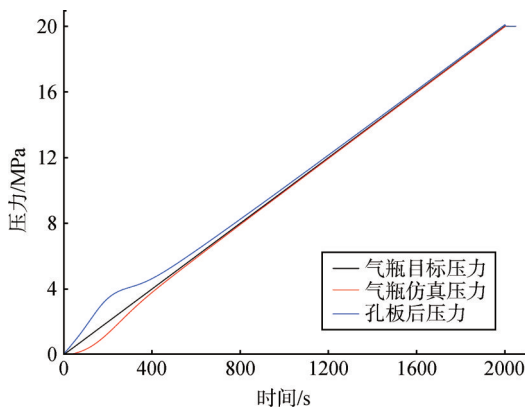


图7 气瓶充气压力与目标压力对比结果

Fig.7 Comparison results between gas cylinder charging pressure and target pressure

为了验证控制模块参数设置的有效性, 在气瓶充气目标压力为20 MPa时, 分别设置充气速率为0.3 MPa/min、0.4 MPa/min、0.6 MPa/min 和0.8 MPa/min, 对气瓶充气过程进行仿真, 不同充气速率下, 气瓶充气压力变化如图8所示。由图8可见在不同充气速率下, 控制模块均能通过调整电动节流阀完成气瓶自动充气, 且确保平均充气速率与要求值相等。

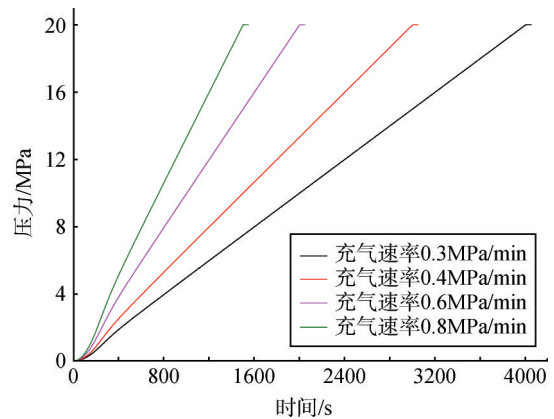


图8 不同目标充气速率下气瓶压力变化结果

Fig.8 Results of cylinder pressure changes with different target charging rates

从图7和图8可见, 在气瓶充气开始阶段, 气瓶压力与目标充气压力偏差较大, 随着充气时间的延长, 气瓶充气压力变化与目标压力变化逐步趋于一致, 气瓶充气过程能够按照既定充气速率进行。在开始充气阶段, 气瓶压力与目标压力偏差较大, 这是因为压力传感器后的充气管路总长度为40 m, 充气管路较长, 系统中限流孔板和管路中流阻的存在使气瓶压力上升滞后于电动节流阀出口压力的上升, 滞后量在充气后半段稳定在较小水平。

3.2 基于电控减压阀的气瓶自动充气控制策略研究

3.2.1 电控减压阀实现气瓶自动充气控制建模

以基于电控减压阀的气瓶自动充气方案为研究对象, 采用系统仿真软件 AMESim 对气瓶自动充气过程进行建模, 系统模型如图9所示<sup>[11-12]</sup>, 电控减压阀采用可调压力温度气源元件, 用定流量系数可调孔板元件模拟充气阀, 充气管路孔板采用定流量系数孔板元件, 模型相关参数设置与3.1.1小节相同。

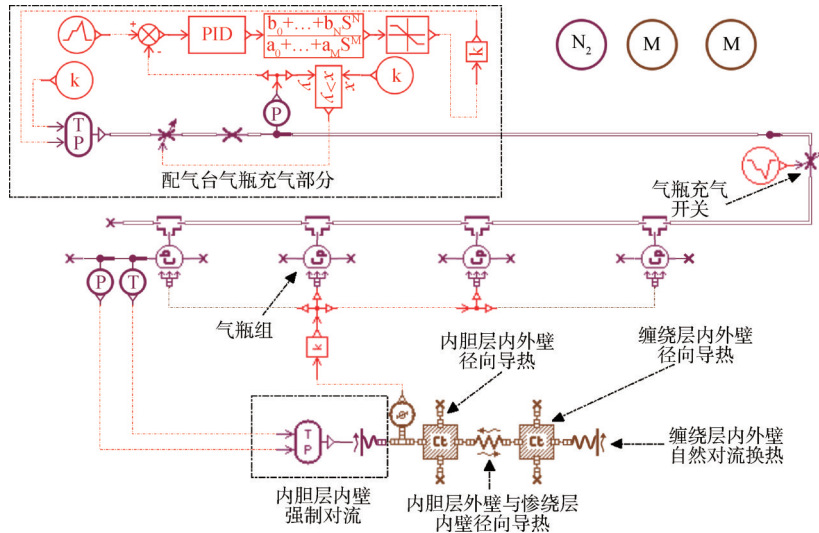


图9 基于电控减压阀气瓶自动充气模型

Fig.9 AMESim model of automatic gas cylinder charging based on electric pressure reducing valve

气瓶充气速率控制策略：打开箭上气瓶充气开关和配气台气源供气手阀，设定气瓶充气目标压力和充气速率，开始气瓶充气。自动打开图4中的电磁阀2充气，传感器实时监测气瓶充气管路压力，若传感器压力大于等于设定充气目标压力，气瓶停止充气，否则控制模块计算理论压力和气瓶充气管路压力偏差，经PID计算、传递函数作用、限幅和增益放大，结果输出至电控减压阀，电控减压阀通过调整出口压力，控制气瓶充气速率与要求速率一致。气瓶充气至目标压力后，电控减压阀停止调压，关闭充气电磁阀2，气瓶停止充气。具体控制过程如图10所示。

### 3.2.2 电控减压阀实现气瓶自动充气仿真结果分析

模型中PID控制模块比例因子 $K_p=3.5$ ，积分因子 $K_i=0.22$ ，微分因子 $K_d=0.8$ ，传递函数 $G(s)=1/(s+10)$ ，限幅范围0到1，增益300，设置气瓶充气初始压力为0 MPa，充气目标压力20 MPa，充气速率0.6 MPa/min。充气过程气瓶仿真压力、减压阀调压压力和目标压力对比曲线如图11所示。

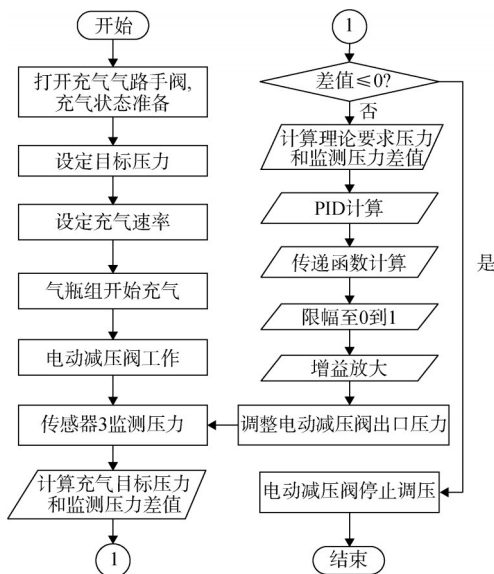


图10 电控减压阀气瓶自动充气控制策略

Fig.10 Control strategy of automatic gas cylinder charging based on electric pressure reducing valve

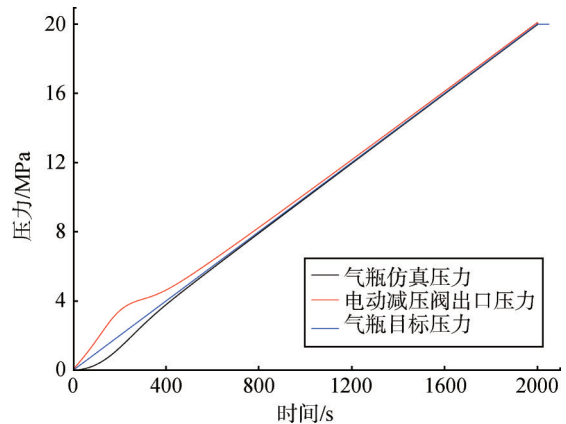


图11 气瓶充气压力、减压阀出口压力和目标压力对比结果

Fig.11 Comparison results of gas cylinder charging pressure, pressure relief valve outlet pressure, and target pressure

电控减压阀在控制模块作用下自动调压，开始阶段为了克服管路流阻，快速调整气瓶充气压力满足要求，减压阀调压至较高压力。随着充气的进行，电控减压阀出口压力与气瓶压力压差逐渐减小，确保气瓶能够按照要求速率充气至目标压力。气瓶充气开始阶段和3.1.2节电动节流阀控制充气过程一致，气瓶压力与目标压力偏差较大，随着充气过程的进行，气瓶

压力逐渐和目标压力趋于一致。由于管路系统存在流阻，电控减压阀出口调压压力始终略高于气瓶内气体压力，从而对气瓶进行充气。

同样为了验证控制模块参数设置的有效性，在气瓶充气目标压力为20 MPa时，对不同充气速率气瓶充气过程进行仿真，气瓶充气压力变化如图12所示。可见在不同充气速率下，控制模块均能通过控制电控减压阀自动调压完成气瓶自动充气，并控制平均充气速率与目标速率一致。

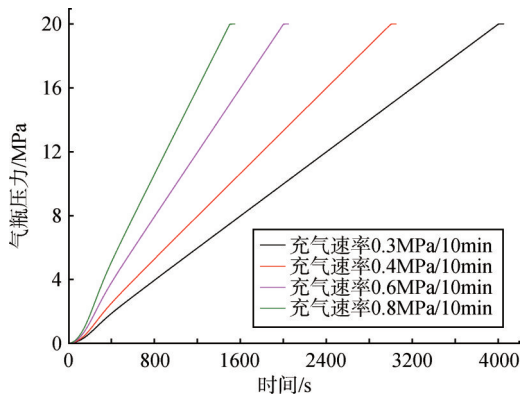


图12 不同目标充气速率下气瓶压力变化结果

Fig.12 Results of cylinder pressure changes with different target inflation rates

### 3.3 压力传感器安装位置对气瓶自动充气影响研究

以基于电动节流阀的气瓶自动充气方案为例，目标充气压力20 MPa，要求充气速率0.6 MPa/min，进行控制模块压力传感器安装位置对气瓶自动充气控制策略影响研究。分别将图3中压力传感器3设置在配气台、靠近箭上开关端和箭上气瓶处，进行仿真计算。压力传感器3三种安装位置对应气瓶压力变化曲线和气瓶目标压力变化曲线对比结果如图13所示。

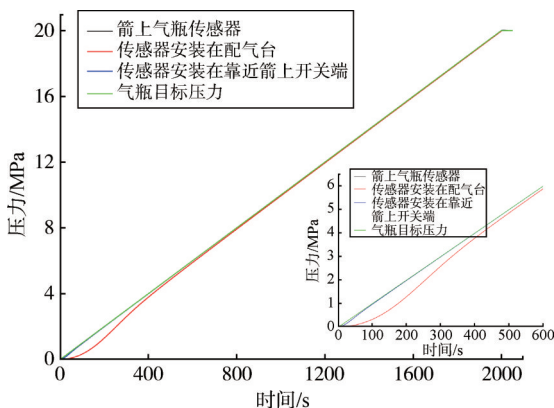


图13 传感器安装位置对气瓶自动充气影响

Fig.13 Influence of sensor installation position on automatic charging of gas cylinder

压力传感器安装在配气台内，远离箭上气瓶时，在气瓶充气初始阶段，气瓶压力与目标充气压力偏差较大，随着充气的进行，偏差越来越小，逐渐接近；当压力传感器在靠近箭上开关端时，在气瓶开始充气后，气瓶压力与目标充气压力偏差很小，很快气瓶压力基本与目标充气压力一致；当使用箭上气瓶压力传感器进行自动充气控制时，整个充气过程气瓶压力与目标充气压力高度一致。

可见在进行气瓶自动充气时，参与充气速率控制的压力传感器安装位置与箭上气瓶越靠近，越有利于控制模块进行自动控制。因此，在进行气瓶自动充气气路设置时，应把压力传感器安装在靠近火箭端或者使用箭上气瓶压力传感器，从而提高气瓶自动充气控制效果。

## 4 结束语

本文在运载火箭气瓶典型充气气路的基础上，分别应用电动节流阀和电控减压阀设计出了气瓶自动充气方案，并采用系统仿真软件AMESim进行建模，系统研究了基于PID控制的气瓶自动充气策略。应用电动节流阀和电控减压阀作为配气台气瓶自动充气的核心阀件，通过合理设置PID控制模块参数，能够满足运载火箭箭上气瓶自动充气要求，控制模块使用的压力传感器应尽量安装在靠近箭上气瓶端，以提升控制效果。

相比于电动节流阀只能应用于特定节流调压气路，电控减压阀具备远程控制调压能力，从而对不同供气气路进行压力调节，在发射场应用场景更加广泛，在发射场自动供气系统中更具应用潜力。

### 参 考 文 献

[1] 王恺, 陈二锋, 张翼, 等. 复合材料气瓶充放气过程仿真与验证[J]. 压力容器, 2016, 33(12): 1-6.  
 WANG Kai, CHEN Erfeng, ZHANG Yi, et al. Simulation and experimental validation on charge/discharge of composite cylinders [J]. Pressure Vessel Technology, 2016, 33(12): 1-6.

[2] 罗天培, 孙德, 张家仙, 等. 常温及低温容器充放气模型研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2021(4): 55-58+64.  
 LUO Tianpei, SUN De, ZHANG Jiaxian, et al. Charge and discharge model investigation of vessel at normal and cryogenic circumstance [J]. Missiles and Space Vehicles, 2021(4): 55-58+64.

[3] 安刚. 车载储氢气瓶快速充气分析[J]. 导弹与航天运载技术, 2009 (3): 50-55.  
 AN Gang. Numerical analysis of fast-filling process of hydrogen

- storage cylinder for vehicles[J]. Missiles and Space Vehicles, 2009 (3): 50-55.
- [4] 郭珣. 基于典型气路的高压全自动供气技术研究[D]. 北京: 中国运载火箭技术研究院, 2019.
- GUO Xun. A research on high pressure full-automatic gas supply technology based on typical gas path[D]. Beijing: China Academy of Launch Vehicle Technology, 2019.
- [5] 王道连, 陈二锋, 冉振华, 等. 冷氦气瓶放气过程建模及模型有效性验证[J]. 低温与超导, 2015, 43(8): 11-14.
- WANG Daolian, CHEN Erfeng, RAN Zhenhua, et al. Modeling and validation verification on the discharge process of cold helium cylinder[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2015, 43(8): 11-14.
- [6] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer[M]. Third Edition. Beijing: Higher Education Press, 1998.
- [7] CHURCHILL S W, CHU H H S. Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 1975, 18(9): 1323-1329.
- [8] 朱平平. 基于模糊PID的核环境机器人电液比例位置控制系统设计研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2020.
- ZHU Pingping. Design and research of electro-hydraulic proportional position control system for nuclear environment robot based on fuzzy PID[D]. Hengyang: University of South China, 2020.
- [9] 黄钰. 航空氧气面罩精密调压供气技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
- HUANG Yu. Research on precise pressure regulation and air supply technology for aviation oxygen mask[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021.
- [10] 黄红生. 自动控制原理及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- HUANG Hongsheng. Principles and applications of automatic control[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [11] 付永领, 祁晓野. LMS Imagine.Lab AMESim 系统建模和仿真参考手册[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.
- FU Yongling, QI Xiaoye. System modeling and simulation reference manual of LMS Imagine.Lab AMESim[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2011.
- [12] 付永领, 齐海涛. LMS IMAGINE.LAB AMESIM 系统建模和仿真[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.
- FU Yongling, QI Haitao. System modeling and simulation of LMS IMAGINE. LAB AMESIM[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2011.

#### 作者简介

- 夏先军 (1988—), 男, 工程师, 主要研究方向为运载火箭测试发射。
- 张润红 (1982—), 女, 副高级工程师, 主要研究方向为运载火箭测试发射。
- 杨加东 (1982—), 男, 工程师, 主要研究方向为运载火箭测试发射。
- 于新辰 (1991—), 男, 工程师, 主要研究方向为运载火箭测试发射。
- 严万洪 (1989—), 男, 工程师, 主要研究方向为运载火箭测试发射。