

引用格式：閻耀保，李磊，原佳阳，等. 喷嘴挡板式三通气动阀控缸特性分析 [J]. 飞控与探测, 2018, 1 (2): 044-048.
Yin Yaobao, Li Lei, Yuan Jiayang, et al. Characteristics analysis of pneumatic nozzle flapper three-way valve control cylinder [J]. Flight Control & Detection, 2018, 1 (2): 044-048.

喷嘴挡板式三通气动阀控缸特性分析^{*}

閻耀保¹, 李 磊¹, 原佳阳¹, 郭生荣²

(1. 同济大学 机械与能源工程学院 · 上海 · 200092;
2. 南京机电液压工程研究中心 航空机电系统综合航空科技重点实验室 · 南京 · 210061)

摘要：喷嘴挡板式三通气动阀控不对称缸常用于航空发动机起动系统的引气控制。在分析由固定节流孔、喷嘴挡板可变节流孔和容腔组成的喷嘴挡板式气动三通阀原理的基础上，建立了气动三通阀控不对称缸差动系统的数学模型，得到了气源、控制阀与气缸结构参数对三通阀控缸静、动态特性的影响规律。研究发现，通过增大空气填充速率和减少空气需求，可以提高喷嘴挡板式三通气动阀控缸的响应速度，例如增大喷嘴挡板式气动三通阀的固定节流孔直径、减小活塞有效面积、提高供气压力等；理论分析结果与实践结果一致。

关键词：三通气动阀控缸；喷嘴挡板式；固定节流孔；可变节流孔；容腔

中图分类号：TG156

文献标志码：A

文章编号：2096-5974(2018)02-0044-05

Characteristics Analysis of Pneumatic Nozzle Flapper Three-way Valve Control Cylinder

YIN Yaobao¹, LI Lei¹, YUAN Jiayang¹, GUO Shengrong²

(1. College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092;
2. Nanjing Mechatronic and Hydraulic Engineering Research Centre, Aviation Key Laboratory of
Science and Technology on Aero Electromechanical System Integration, Nanjing 210061)

Abstract: It is commonly used to bleed air in aero-engines system with the asymmetric cylinder of the three-way pneumatic valve control cylinder which is composed of a fixed orifice, a variable orifice with different nozzle-flapper type and a vessel. Based on the theory of the valve control cylinder, we have built up the mathematical model of the pneumatic three-way asymmetric cylinder differential system, and got the influence rule of air source, control valve and the cylinder's structure parameters for the cylinder's static and dynamic characteristics. The cylinder's response speed can be improved by measures for increasing air filling rate and reducing air requirements, such as increasing fixed orifice diameter, reducing the piston effective action area, increasing air source pressure and so on. The theoretical analysis is consistent with experimental results.

Keywords: three-way pneumatic valve control cylinder; nozzle-flapper type; fixed orifice; variable orifice; vessel

0 前 言

气体控制阀引入电信号，通过控制电信号的大小来控制高压气体的流动状态^[1]。W. E. Seidel 将通道出口的气体压力反馈到执行机构，保证压力稳定以提高机构响应速度^[2]；P. C. Mouton 利

用弹性固定件实现控制阀的快速开启^[3]；J. Wiggins 提出了双执行器控制阀结构，用以解决极端条件引起的问题^[4]。气体控制阀的应用越来越广泛。航空发动机起动系统多采用气体控制阀进行发动机的第一次起动。国内对于发动机快速起动问题进行了研究：如在发动机起动供气管路系

* 收稿日期：2018-09-03；修回日期：2018-09-05

作者简介：閻耀保（1965-）男，教授，主要从事极端环境下的电气液伺服控制的研究。

统匹配条件下, 起动机进口最小压强要求下的起动包线^[5]; 空气涡轮起动系统建模与起动系统匹配^[6]; 基于AMESim软件的空气涡轮起动机ATS调压装置建模^[7]; 动态前馈补偿控制器缩短发动机系统的起动时间^[8]; 气体控制阀的余度设计^[9]。

在国内外文献中, 气体控制阀通过控制减压阀出口压力调节流量大小。本文以某企业自主研发的喷嘴挡板式三通气动控制阀为例, 分析三通气动阀控缸差动系统数学模型, 结合单喷嘴挡板阀和作动筒原理, 通过控制阀的输入电流控制流量大小, 研究结构参数对三通气动阀控缸响应速度的影响规律。

1 三通气动阀控缸模型

图1所示为某气体控制阀回路简图。当电磁阀不通电时, 电磁阀内部的球阀隔断通道, 蝶阀保持闭合状态。当电磁阀通电时, 三通气动阀控缸处于工作状态, 经减压阀调压后的气体流经电磁阀通道进入阀控缸推动活塞移动; 阀控缸的内部压力可以通过流经单喷嘴挡板的控制电流来调节; 活塞的位移通过连杆机构转换为蝶阀的开度, 即通过执行阀控缸的控制电流来调整蝶阀开度。本文通过三通气动阀控不对称气缸, 将单喷嘴挡板阀和不对称气缸(作动筒)有效结合, 研究阀控缸的结构参数对其响应速度的影响规律。

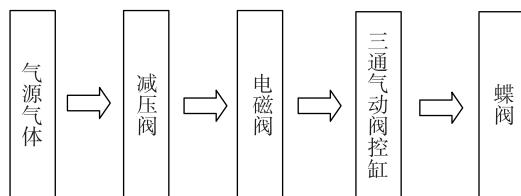


图1 气体控制阀工作原理简图
Fig. 1 Operation principle of air control valve

如图2所示, 三通气动阀控缸差动系统由单喷嘴挡板阀和不对称缸即作动筒组成, 用于控制作动筒的输出位移。图2中, 1为单喷嘴挡板阀的固定节流孔, 2为单喷嘴挡板阀的部分扩大示意图, 3为不对称缸即作动筒。作动筒的腔1为控制腔, 腔1的压力通过单喷嘴挡板阀来控制; 腔2为弹簧腔, 与大气相连通; 腔3为作动筒的小腔, 与供气腔相连通。假设入口压力为恒定值, 各节流口采用平均温度且为绝热过程。

固定节流孔1处的流量 Q_1 为

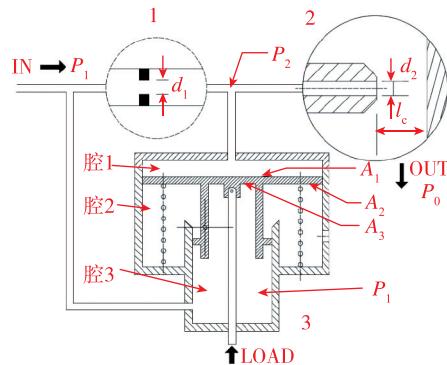


图2 三通气动阀控缸差动系统原理简图

Fig. 2 Sketch of differential system of three-way pneumatic valve control cylinder

$$Q_1 = \begin{cases} \frac{C_1 P_1 \frac{\pi}{4} d_1^2}{\sqrt{RT}} \cdot \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \\ \quad \left(0.5283 \leq \frac{P_2}{P_1} \leq 1 \right) \\ \frac{C_1 P_1 \frac{\pi}{4} d_1^2}{\sqrt{RT}} \cdot \sqrt{\frac{2k}{k+1} \left(\frac{2}{k+1} \right)} \\ \quad \left(0 \leq \frac{P_2}{P_1} < 0.5283 \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中, C_1 为节流孔节流系数; P_1 为节流孔入口压强, Pa; P_2 为控制腔压强, Pa; d_1 为节流孔的直径, m; T 为节流孔入口温度, K; R 为气体常数, J/(K · mol); k 为气体绝热指数。

喷嘴挡板处的出口流量 Q_2 为

$$Q_2 = \begin{cases} \frac{C_2 P_2 \pi d_2 l_c}{\sqrt{RT}} \cdot \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[\left(\frac{P_0}{P_2}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_0}{P_2}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \\ \quad \left(0.5283 \leq \frac{P_0}{P_2} \leq 1 \right) \\ \frac{C_2 P_2 \pi d_2 l_c}{\sqrt{RT}} \cdot \sqrt{\frac{2k}{k+1} \left(\frac{2}{k+1} \right)} \\ \quad \left(0 \leq \frac{P_0}{P_2} < 0.5283 \right) \end{cases} \quad (2)$$

式中, C_2 为喷嘴挡板处的节流系数; d_2 为喷嘴直径, m; l_c 为喷嘴与挡板间的距离, m; P_0 为大气环境压强, Pa。

作动筒容腔1内气体的连续性方程为

$$Q_1 = Q_2 + \frac{V_1}{kRT} \cdot \frac{dP_2}{dt} + \frac{P_2 A_1}{RT} \cdot \frac{dy}{dt} \quad (3)$$

式中, V_1 为作动筒腔1容积, m^3 ; A_1 为活塞与作

动筒腔1接触的有效面积, m^2 ; y 为作动筒输出位移, m 。

作动筒活塞的受力平衡方程为

$$P_2 A_1 - P_0 A_2 - P_1 A_3 = m_1 \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 + B_1 \frac{dy}{dt} + k_1 (y_0 + y) + F_f \quad (4)$$

式中, B_1 为作动筒活塞的等效阻尼, $\text{N} \cdot (\text{m}/\text{s})$; m_1 为作动筒活塞质量, kg ; k_1 为作动筒活塞的等效弹簧刚度, N/m ; y_0 为作动筒活塞弹簧的等效预压缩量, m ; A_2 为活塞与作动筒腔2接触的有效面积, m^2 ; F_f 为活塞的滑动摩擦力, N ; A_3 为活塞与作动筒腔3接触的有效面积, m^2 。

2 静态特性和动态特性分析

三通气动阀控缸差动系统性能包括静态特性和动态特性。静态特性指稳态工作时, 单喷嘴挡板阀的输入控制电流 i (mA) 和气缸输出位移 y (m) 之间的函数关系。动态特性指三通气动阀控缸的气缸活塞从起始位置运动到终点位置过程的时间响应。

单喷嘴挡板阀通过力矩马达控制喷嘴与挡板之间的距离, 即可变节流孔的大小, 从而控制固定节流孔与可变节流孔中间控制腔的压力值。单喷嘴挡板阀力矩马达的力矩平衡方程式为

$$T_t = K_t i + K_m \theta = J_a \frac{d^2 \theta}{dt^2} + B_a \frac{d\theta}{dt} + K_a \theta + P_2 A_N r \quad (5)$$

$$\theta = \frac{l_c}{r} \quad (6)$$

式中, K_t 为电磁力矩系数, $\text{V}/(\text{rad}/\text{s})$; K_m 为磁扭矩弹簧刚度, $(\text{N} \cdot \text{m})/\text{rad}$; θ 为挡板转过的角度, rad ; J_a 为衔铁挡板反馈杆组件的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; B_a 为衔铁挡板反馈杆组件的阻尼系数; K_a 为弹簧管刚度, $(\text{N} \cdot \text{m})/\text{rad}$; A_N 为喷嘴孔面积, m^2 ; r 为弹簧管旋转中心到喷嘴中心线距离, m 。

因为 J_a 和 B_a 项数值比较小, 可以忽略不计; 此外, P_2 项虽然是变量, 但变化的量级较小, 故将该项考虑为常数; 式(5)和式(6)可简化为电流 i (A) 和挡板间隙 l_c (m) 之间的线性关系, 为

$$l_c = \frac{K_t r}{K_a - K_m} i + \frac{r^2}{K_m - K_a} P_2 A_N \quad (7)$$

以某喷嘴挡板阀为例, 控制电流 i 为 100mA 时, 喷嘴挡板间隙 l_c 为 $2.5 \times 10^{-4}\text{m}$; 控制电流 i

为 0mA , 间隙 l_c 为 $8.6 \times 10^{-5}\text{m}$ 。可得控制电流 i (A) 和喷嘴挡板间隙 l_c (m) 之间的线性关系为

$$l_c = 1.64 \times 10^{-3} i + 8.6 \times 10^{-5} \quad (8)$$

阀控缸入口压力为 198kPa ; 节流孔直径为 0.8mm , 选择范围为 $0.8\sim 1.2\text{mm}$; 喷嘴直径为 0.61mm ; 作动筒腔1容积 V_1 为 46mL ; 活塞与作动筒腔1接触的有效面积 A_1 为 27.69cm^2 。喷嘴挡板负载腔压力最大为 193kPa , 大气环境压力为 101kPa , 极端压力比为 0.523 , 接近极限压力比 0.5283 , 而节流孔前后的压力比大于该极限压力比 0.523 ; 故节流孔和喷嘴挡板处的流动为亚音速流动。

单喷嘴挡板压力特性是指负载腔堵死时的阀门位移与负载压力之间的关系, 即 $Q_1 = Q_2$, 联立式(1)、式(2)、式(4)、式(6)和式(8), 可得气体控制阀的静态特性曲线, 即控制电流和作动筒位移的关系。如图3所示, 控制电流的死区范围为 $0\sim 50\text{mA}$; 控制电流为 100mA 时, 活塞位移为 0.037m 。理论结果和实验结果基本一致。气源压力 300kPa , 温度 188°C , 利用角位移传感器检测蝶阀的转动角度, 转换为作动筒输出位移。实验时, 蝶阀作用在作动筒上的负载力不恒定, 导致蝶阀开启力矩大于设定值, 理论值略高于实验值。

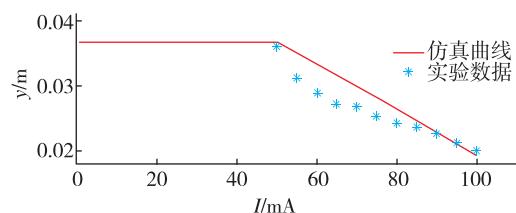


图3 三通气动阀控缸静态特性理论结果与实验结果

Fig. 3 Theoretical results and experimental results of static characteristics of three-way pneumatic valve control cylinder

图4所示为三通气动阀控缸位移和压力的理论响应时间特性。图4(a)所示为活塞的位移-时间的响应特性, 由图可知三通气动阀控缸的响应时间为 12.3s 。图4(b)所示为三通气动阀控缸压强-时间响应特性, 控制阀的填充管道和作动筒腔1的时间为 0.5s , 响应时间大部分消耗在活塞移动过程中, 即高压气体的填充速率不能满足活塞的移动速度。

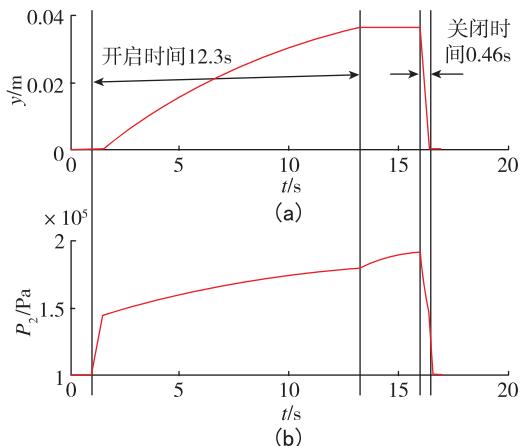


图4 作动筒位移和压力的时间响应特性

Fig. 4 Displacement and pressure response characteristics with time of actuator cylinder

3 动态特性改进措施

为提高三通气动阀控缸差动系统的动态特性, 可从增大气体填充速率和减小气体需求两方面进行改进, 具体措施包括: 增大固定节流孔直径、提高供气压力、减小作动筒腔1容积和减小活塞有效面积。

3.1 固定节流孔直径对阀控缸动态特性的影响

由式(1)可知, 流量 Q_1 与固定节流孔直径 d_1 的平方成正比, 增大节流孔直径 d_1 可以在很大程度上增大空气填充速率; 由阀控缸静态特性可知, 保证阀控缸的静态特性不发生改变, 需保证 d_1^2/d_2 的值为定值。图5所示为节流孔直径 d_1 分别为0.8mm、1.0mm和1.2mm时的静态特性, 相应的喷嘴直径分别为0.61mm、0.95mm和1.37mm。

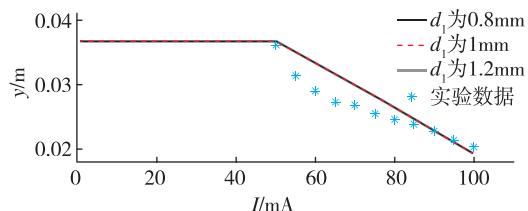


图5 不同节流孔直径下三通气动阀控缸的静态特性

Fig. 5 Static characteristics of three-way pneumatic valve control cylinder under different orifice diameters

图6所示为上述条件下, 静态特性基本不变时的阀控缸位移响应特性。响应时间分别为12.3s、7.9s和5.5s, 增大节流孔的直径, 响应时间由12.3s缩短到5.5s。可见, 增大固定节流孔

直径可以有效地缩短阀控缸的响应时间。

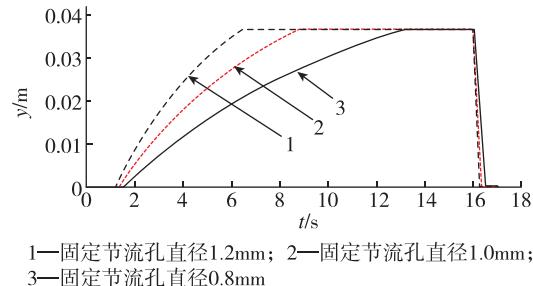


图6 不同固定节流孔直径下作动筒位移响应特性

Fig. 6 Displacement response characteristics of actuator cylinder under different fixed orifice diameters

3.2 供气压力对阀控缸动态特性的影响

图7所示为供气压力值从198kPa增大至202kPa时的静态特性。提高供气压力, 增大了作动筒腔1的内部稳定压力, 扩大了控制电流的死区范围。如图8所示, 作动筒位移响应时间为11.3s, 一定程度上缩短了阀控缸的响应时间。

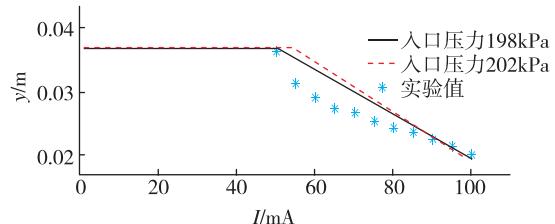
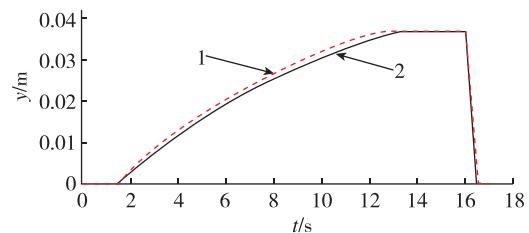


图7 不同供气压力时三通气动阀控缸静态特性

Fig. 7 Static characteristics of three-way pneumatic valve control cylinder under different bleed pressure



1—供气压力202kPa; 2—供气压力198kPa

图8 不同供气压力下作动筒位移响应特性

Fig. 8 Displacement response characteristics of actuator cylinder under different bleed pressure

3.3 作动筒容积对阀控缸动态特性的影响

经过电磁阀的气体填充作动筒腔1, 当压力到达一定值时, 推动活塞移动。由连续性方程式(3)可知, 腔1容积 V_1 越大, 需要的流量就越多,

响应越慢。图9所示为不同作动筒腔1容积下作动筒位移响应特性。在腔1体积分别为5mL、20mL和46mL时，作动筒响应时间分别为11.2s、11.6s、12.3s。由图可得，减小容积 V_1 ，可缩短作动筒活塞运动前空气的填充时间。

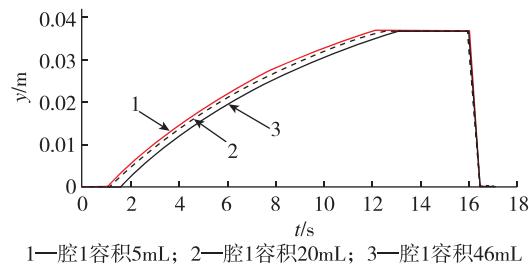


图9 不同作动筒腔1容积下作动筒位移响应特性

Fig. 9 Displacement response characteristics of actuator cylinder under different volumes of chamber. 1

3.4 活塞有效面积对阀控缸动态特性的影响

由流量连续性方程式(3)可知，减小活塞有效面积 A_1 ，可以提高阀控缸的响应时间。图10所示为不同活塞有效接触面积下三通气动阀控缸的动态特性。有效面积 A_1 分别为 27.69cm^2 、 22.79cm^2 和 18.22cm^2 时，响应时间为 12.3s 、 9.2s 和 8.4s 。可见，减小活塞有效面积可以在一定程度上提高阀控缸的响应速度。活塞有效面积越小，活塞移动时作动筒腔1新增容积越小，对空气的需求量也越小，阀控缸的响应速度越快。

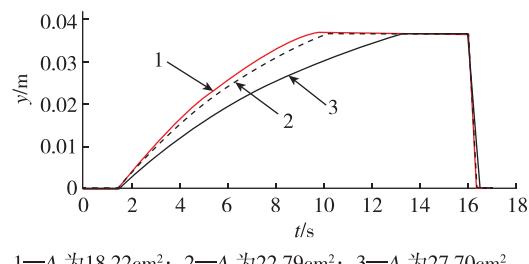


图10 活塞不同有效面积下作动筒位移响应特性

Fig. 10 Displacement response characteristics of actuator cylinder under different active contact areas of piston and control chamber

4 结 论

1) 建立了喷嘴挡板式三通气动阀控不对称缸的数学模型，分析了阀控缸启动过程的影响因素，得到了结构参数与气动参数对三通阀控缸差动系统静、动态特性的影响规律。

2) 可以采取增大空气填充速率和减少空气需求两方面的措施，提高喷嘴挡板式三通气动阀控缸的响应速度，如采取增大喷嘴挡板式气动三通阀的固定节流孔直径、减小活塞有效面积、提高供气压力等措施。理论分析结果与实践结果一致。

参考文献 (References)

- [1] WIGGINS J D, WOODRUFF E E, BANTA P W. Pneumatic valve control having improved opening characteristics and an air turbine starter incorporating the same, US 7066710 B2 [P]. 2006.
- [2] SEIDEL W E, MARKUNAS A L, NELSON T A. Control valve, US 4617958 A [P]. 1986-10-21.
- [3] MOUTON P C. Control device for a starter valve of a turbine aero-engine, US 4805873 [P]. 1989-02-12.
- [4] WIGGINS J, LANE G, MARSHALL D, et al. Dual actuator air turbine starter valve, US6684898 B2 [P]. 2004-02-03.
- [5] 王新月,卿雄杰,刘晓伟.某型飞机发动机起动供气系统匹配及性能模拟[J].西北工业大学学报,2006,24(3):295-298.
WANG X Y, QING X J, LIU X W. Simulation study on how to ensure starting of a certain type of aero-engine in high altitude region [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2006, 24 (3): 295-298 (in Chinese).
- [6] 张强,唐宏刚,唐力.民用飞机发动机起动系统匹配分析[C]//上海市科学技术协会学术年会暨上海市航空学会学术年会,2012:114-120.
ZHANG Q, TANG H G, TANG L. Analysis on the matching of commercial aircraft engine starting system [C] // Annual Meeting of Shanghai Science and Technology Association and Annual Academic Conference of Shanghai Aviation Society, 2012; 114-120 (in Chinese).
- [7] 孙牧桥,苏三买,成剑,等.气涡轮起动机调压装置AMESim建模与仿真[J].航空动力学报,2012,27(2):450-456.
SUN M Q, SU S M, CHENG J, et al. Air turbine starter pressure controller modeling and numerical simulation based on AMESim [J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27 (2): 450-456 (in Chinese).
- [8] 雷勇,李辉,石小江.航空发动机空气起动系统的前馈-反馈复合控制[J].机电工程,2011,28(5):586-589.
LEI Y, LI H, SHI X J. Feedforward-feedback composite control for aero engine air starting system [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2011, 28 (5): 586-589 (in Chinese).
- [9] 张玮,任德平.一种新型起动空气阀的余度设计[J].液压气动与密封,2014,34(9):82-84.
ZHANG W, REN D P. Redundancy design of a new type starting air valve [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2014, 34 (9): 82-84 (in Chinese).