

一种基于开关电磁阀的气动比例舵机研究*

张军昌¹, 文建刚², 曹国武², 肖凯¹

(1 国防科学技术大学航天与材料工程学院, 长沙 410073; 2 中国兵器工业第203研究所, 西安 710065)

摘要:为了满足导弹控制系统对于舵机的仿真要求,文中针对基于开关电磁阀的气动比例舵机进行了建模分析,系统采用了PID控制的控制策略,并通过了仿真和试验验证;结果表明,采用开关电磁阀的气动比例舵机具有良好的性能品质,所设计的控制算法是有效的。

关键词:气动舵机;开关电磁阀;PID控制

中图分类号:TJ760.35 **文献标志码:**A

The Research of Pneumatic Proportional Actuator Based on On/Off Valve

ZHANG Junchang¹, WEN Jiangan², CAO Guowu², XIAO Kai¹

(1 College of Aerospace and Material Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2 No. 203 Research Institute of China Ordnance Industries, Xi'an 710065, China)

Abstract: In this paper, modeling analysis of a pneumatic proportional actuator based on on/off valve was done in order to meet the requirement of missile simulation, the law of PID control was designed, and the system was simulated and experimented. The results show that this system has good control ability, and the algorithm of control system is effective.

Keywords: pneumatic actuator; on/off valve; PID control

0 引言

舵机作为导弹的重要控制部件之一,其性能对于导弹的控制有很大的影响。目前应用较多的是电动舵机,其具有结构简单、能源单一、易于控制、可靠、带负载能力强等优点,但电动舵机的性能严重依赖于电机的性能,存在着一些明显的弊端,如体积大、延时长、快速性差等。气动舵机可以弥补此类缺陷,特别适合于快速性要求高的导弹控制中。

采用开关电磁阀控制的气动比例舵机以高速开关阀作为控制元件,其特点是利用控制器输出的脉冲调制信号经放大后去控制开关阀,能得到近似连续的流量和压力信号以驱动执行元件。气动执行元件具有良好的低通滤波特性,所以尽管输入为脉冲调制信号,但仍能得到平滑的输出^[1]。由于开关阀具有开关速度快和结构简单等特性,所以开关式气动伺服系统具有频响较高、抗干扰能力强、结构简单、成本低廉和环境要求不高等优点,其理论带宽可达到50Hz以上,有较高的研究价值。

1 建模与分析

1.1 系统组成

气动比例舵机的主要组成有:舵机控制器、驱动器、气源系统、电磁阀、气缸、传动组件和电位计,其组成框图如图1所示。

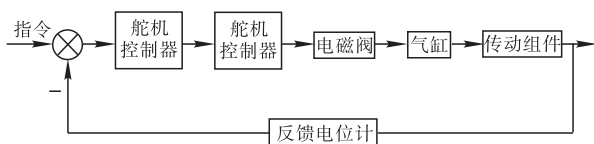


图1 气动比例舵机系统框图

其中:控制器的功能是采集控制指令和舵机反馈电位计的电压信号,经求差、放大和校正网络的运算后形成控制运动的指令信号,再经舵机驱动器的功率放大,控制伺服电磁阀开关动作,带动舵面实现舵偏角度跟随指令信号^[2]。电磁阀的基本功能是快速向气缸控制腔充气、放气,使气缸达到控制所需要的压力。气缸是舵机的执行部件,在PWM控制状态下,起低通滤波作用,能使活塞形成与控制信号成比例的连续运动。传动组件是把活塞的直线运动转化为舵

* 收稿日期:2010-04-01

作者简介:张军昌(1976-),男,陕西合阳人,工程师,硕士研究生,研究方向:舵机设计与控制。

翼的圆周摆动。

1.2 电磁阀的数学模型

开关电磁阀的结构如图 2 所示,具有如下特点:

1) 结构简单紧凑,采用球阀开关形式,所用钢球为普通钢球,钢球放在两孔之间,限制其径向运动,两孔台阶处均有 0.1mm 的密封带,便于气体密封;

2) 响应速度快,采用的小质量球阀为其提高速度提供了保证,电磁铁采用了电工纯铁材料,并通过减小衔铁运动的气隙、增加线圈匝数等措施,提高了通电时的吸力;

3) 开关电磁阀的复位弹簧、衔铁顶杆,进气排气孔有较高的同心度,保证了其工作的可靠性和可重复性。

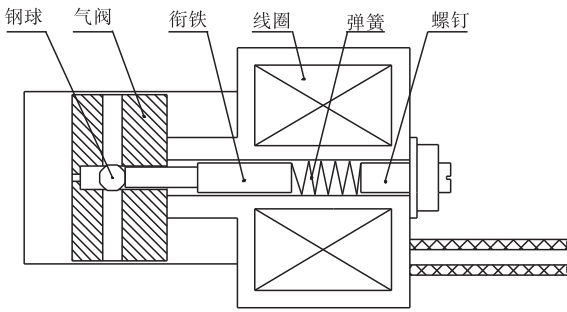


图 2 开关电磁阀结构示意图

电磁阀电压平衡方程:

电磁阀工作时,线圈中的电流变化会在线圈内产生感应电动势,电磁阀线圈的等效电路如图 3 所示,通电时的电压平衡方程为:

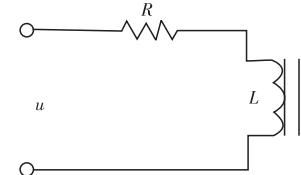


图 3 电磁阀线圈的等效电路

$$u = i_1(t)R + \frac{d\psi_1(t)}{dt} \quad (1)$$

式中: $d\psi_1(t)$ 为 t 时刻电磁系统的磁链; $i_1(t)$ 为 t 时刻通过线圈的电流; u 为线圈励磁电压; R 为线圈电路的总电阻。

则电磁力与电流 i 和间隙大小 δ 的关系可以由式(2)确定:

$$F = \frac{i^2 N^2 A u_0}{2\delta^2} \quad (2)$$

式中: N 为线圈的匝数; u_0 为真空磁导率; i 为线圈电流; δ 为气隙长度; A 为有效吸合面积。

衔铁的运动微分方程为:

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} = F_1 - F_f - N \quad (3)$$

式中: M 为运动部件的总质量; x 为衔铁位移; b 为速度阻尼系数,其值甚小,可以忽略不计; F_1 为作用于衔铁上的电磁力; F_f 为作用于衔铁上的弹簧力; N 为

摩擦力,在阀芯运动阶段,该值为动摩擦力值很小,可以略去。

电磁阀在工作过程中存在着启闭延时(见图 4),其原因主要是:

1) 由于电磁线圈的电感作用,其通(断)电时将产生感应电动势阻止电流上升(下降)。因此,要达到启动衔铁的电流,需要一定的时间 t_1 。

2) 衔铁及阀芯从一端到另一端需要时间 t_2 。

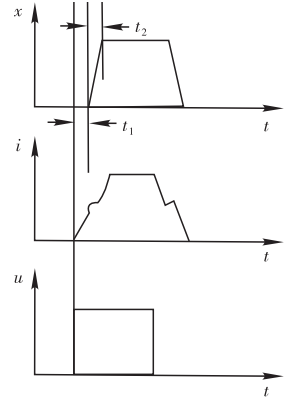


图 4 电磁阀的启闭延时

建模过程中要考虑到延迟时间 $t = t_1 + t_2$ 。

1.3 气阀压力流量特性

根据 sanvilte 气体流量公式,可以确定气阀进气口气体流速为亚音速,排气口气体流速为音速,气体流量公式如下:

$$\dot{m} = AP \sqrt{\frac{2k}{RT(k-1)}} \left[\left(\frac{P_d}{P} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_d}{P} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right] \frac{P_d}{P} \cdot 0.528 \quad (4)$$

$$\dot{m} = AP \sqrt{\frac{k}{RT} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k}}} \frac{P_d}{P} \leq 0.528 \quad (5)$$

高速开关电磁阀处于脉冲宽度调制(PWM)工作方式时,其输出流量和压力在较大范围内基本与 PWM 占空比成比例线性关系,式(4)作为进气流量公式,式(5)作为排气流量公式,在一个 PWM 周期内,进气量与占空比 τ 成比例,排气量与 $(1-\tau)$ 成比例,得到气缸内的实际流量 \dot{m}_c 。

$$\dot{m}_c = A_{\text{进}} P \sqrt{\frac{2k}{RT(k-1)}} \left[\left(\frac{P_d}{P} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_d}{P} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right] \times \tau - A_{\text{排}} P_d \sqrt{\frac{k}{RT} \frac{k}{RT} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k}}} \times (1-\tau) \quad (6)$$

式中: A 为节流口流通截面的有效面积; P_d 为控制腔气体压力; P 为节流口上游气体压力。

1.4 气缸的流量方程

设气缸活塞位于气缸中点时位置记为零点,且活塞上移为正,下移为负,则有:

$$\dot{m} = \frac{A_1}{RT_1 k} (kP_1 \frac{dy}{dt} + (l+y) \frac{dP_1}{dt}) \quad (7)$$

式中: A_1 为气缸活塞无杆腔的有效面积; y 为气缸活塞的位移; l 为气缸活塞总位移的 1/2; P_1 为气缸活塞无杆腔的气压; T_1 为气缸活塞无杆腔的温度。

1.5 气缸活塞的力平衡方程

气缸活塞受力示意图如图 5 所示。以气缸活塞

为研究对象, 根据牛顿第二定律可列出气缸的力平衡方程:

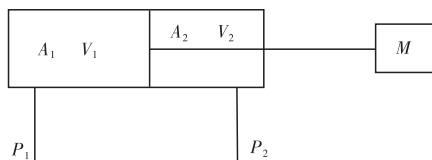


图 5 气缸活塞受力示意图

$$M\ddot{y} = A_1 P_1 - A_2 P_2 - F_1 - F_f \quad (8)$$

式中: M 为气缸活塞和负载的质量; y 为气缸的位移; A_1 为气缸无杆腔活塞面积; P_1 为气缸无杆腔的压力; A_2 为气缸有杆腔活塞面积; P_2 为气缸有杆腔的压力; F_1 为外作用力; F_f 为气缸活塞的摩擦力。

1.6 阀控缸的传递函数

由式(1)~式(8), 并代入相关参数可得到阀控缸关于描述输入电压与输出速度的传递函数:

$$G(s) = \frac{7025}{0.15s^2 + 45s + 7025} \quad (9)$$

1.7 PID 控制

伺服系统采用 PID 控制器, 这种控制器是最早发展起来的控制策略之一, 由于算法简单, 鲁棒性好和可靠性高, 被广泛应用于过程控制和运动控制中, 尤其适用于可建立精确数学模型的确定性控制系统, 对低阶、非时变、线性的控制系统具有很好的跟踪和抗干扰能力^[3]。控制器的输入输出关系可描述为:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (10)$$

2 仿真与试验验证

设定 PID 参数, 得到如图 6 所示的舵机控制系统。通过 MATLAB 软件的仿真工具, 可得到不同指令下的舵机响应曲线, 如图 7、图 8 所示。

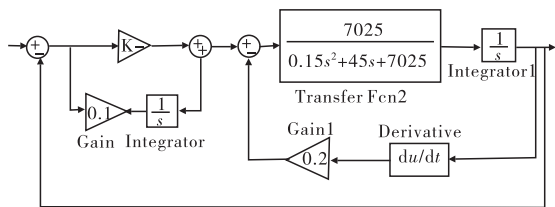


图 6 PID 舵机控制系统

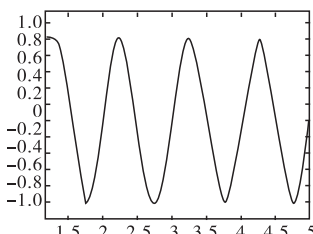
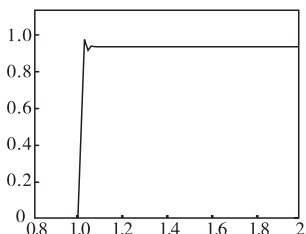


图 7 阶跃响应仿真曲线

图 8 正弦响应仿真曲线

在舵机样机加工调试完成后, 得到实际测试曲线如图 9~图 12 所示。

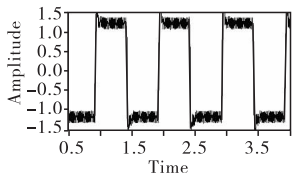
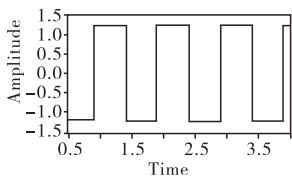


图 9 小角度方波响应曲线

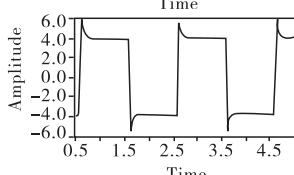
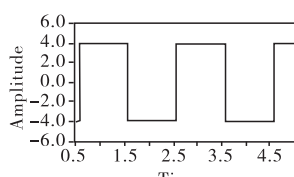


图 10 大角度方波曲线

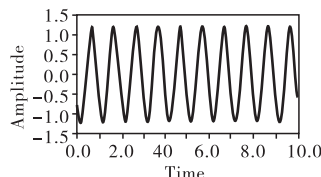
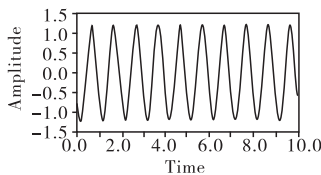


图 11 低频正弦响应曲线

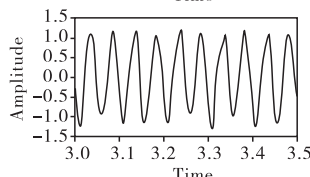
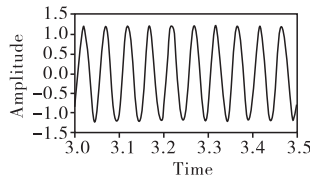


图 12 高频正弦响应曲线

3 结论

文中基于开关电磁阀原理设计了一种气动比例舵机, 并进行了建模分析和控制策略的选择。通过仿真分析和样机测试, 证明了该气动舵机具有如下的优势:

- 1) 带宽远高于传统的气动舵机和电动舵机, 可以达到 30Hz 以上;
- 2) 舵机摆速很高, 可以达到 800°/s 以上;
- 3) 具有较好的跟踪性能, 稳态误差小于 0.3°。

结果表明, 该气动舵机具有良好的控制品质, 尤其适用于要求具有快速响应的导弹控制系统中。

参考文献:

[1] 姚晓先. 脉宽调制线性化舵机系统动态分析[C]// 战术导弹控制技术发展趋势, 1989.

[2] 胡林. 高精度舵机控制器的研制[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.

[3] 陶永华, 尹怡欣, 葛芦生. 新型 PID 控制及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.

[4] 孟秀云. 导弹制导与系统控制原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2003.

[5] 胡祐德, 马东升, 张莉松. 伺服系统原理与设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1999.