

转板式气动数字压力阀设计与仿真研究^{*}

杨凯钧¹, 慎石磊², 杨庆华^{1*}

(1. 浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 浙江 杭州 310032;

2. 聚光科技(杭州)股份有限公司, 浙江 杭州 310052)

摘要:随着数字化控制技术的快速发展,直接数字化控制是目前研究较多的一种针对数字/伺服阀控压力系统的控制方法。针对之前“气动阀多采用阀芯阀套结构、模拟量控制,对控制器要求高”的问题,提出了一种转板式气动数字压力阀结构。该气动数字阀采用步进电机加一块特殊形状的转板来实现对气动阀输出气压的控制,采用计算机直接控制方式,建立了气动数字压力阀的数学模型,并对其进行了仿真实验。实验研究结果表明,该数字阀气压输出、输入线性度高,利于开环控制。

关键词:转板式;气动数字阀;数学模型;仿真实验

中图分类号:TH138.52⁺1;TP138.52

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2010)09-0053-04

Design and simulation study of pneumatic digital pressure valve based on rotating plate

YANG Kai-jun¹, SHEN Shi-lei², YANG Qing-hua¹

(1. Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology

(Zhejiang University of Technology), Ministry of Education, Hangzhou 310032, China;

2. Focused Photonics(Hangzhou), Inc., Hangzhou 310052, China)

Abstract: Along with the rapid development of digital control technology, direct digital control technology has been popular studied on control of the digital/servo valve pressure control system. Aiming at the structure of valve's core and sleeve, the control mode of analog signals was used in most previous pneumatic valve which needed high requirement of the controller, a pneumatic digital pressure valve with rotating plate's structure was presented. A stepping motor assembled with a special shape of the rotating plate was used in the pneumatic digital pressure valve to achieve the goal of controlling the output pressure of the pneumatic digital valve, it worked by computer direct control mode. The mathematical model of the pneumatic digital pressure valve was constructed, and a simulation experiment was carried out, The experiment research results indicate that high linear relationship between the output and input of the pneumatic digital pressure valve can be gotten, which is good to open-loop control.

Key words: rotating plate type; pneumatic digital valve; mathematical model; simulation experiment

0 引 言

机器人技术的快速发展要求某些特种机器人在与人做近距离的交互及抓取操作时具有良好的柔顺性。基于机器人技术的这一发展趋势,本实验室对气动柔性驱动器在机器人手指关节的应用进行了较为深入的研究,如气动柔性关节手指、五自由度气动手指等。在

这些研究中,使用了压力控制阀、流量控制阀等各种气动控制元件,通过对高压气体的控制来驱动各类装置,以完成不同的动作。

用数字信号直接控制的阀,称为数字控制阀,简称数字阀。用计算机对电液(气)控制系统进行实时数字化控制是今后液压(气压)技术发展的重要趋向^[1-2]。浙江工业大学的阮健教授等^[3-5]利用数字执行元件步进

收稿日期:2010-03-10

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2009AA04Z209);浙江省基金人才资助项目(R1090674)

作者简介:杨凯钧(1982-),男,浙江嵊州人,硕士研究生,主要从事气动控制阀、机电一体化方面的研究. E-mail: kelleyang@126.com

通信联系人:杨庆华,男,教授,博士生导师. E-mail: robot@zjut.edu.cn

电机驱动阀芯,从而实现 2D 气动数字伺服阀的直接数字控制,同时研究了它的静态特性^[6-7]。文献[8]设计了基于电反馈的新型气动数字压力阀,其优点是响应速度较快,但是其体积较大,稳定性有待提高。

针对以往使用气动控制阀存在的一些不足之处,在基于电反馈的新型气动数字压力阀的基础上,本研究设计了一种全新的转板式气动数字阀,该转板式气动数字压力阀通过计算机直接控制步进电机驱动一块特殊形状的转板实现控制阀输出气压的目的,阐述了转板式气动数字压力阀的结构原理,建立了其数学模型,并进行了仿真实验研究。

1 转板式气动数字压力阀结构及工作原理

转板式气动数字阀的主体机械结构如图 1 所示,主要由驱动模块、阀体模块和转接模块 3 个部分组成。其中,驱动模块主要包括步进电机、连接柱、衬柱等传动零件。阀体模块是转板式气动数字阀的核心部分,主要包括气缸、衬板、转板 3 个部分,主要负责对气体压力的控制。转接模块包括单个数字阀上的进排气板和阀岛结构上的分气块。转板式气动数字阀的实物图如图 2 所示。

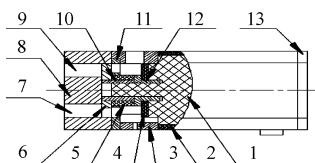


图 1 转板式气动数字阀结构图

1—步进电机;2—电机外壳;3—气缸;4—内电路板;5—衬柱;6—转板;7—进气孔;8—进排气板;9—排气孔;10—连接柱;11—衬板;12—压板;13—电机后盖板

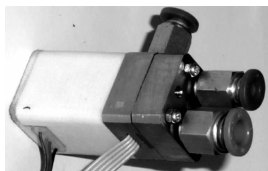


图 2 转板式气动数字阀实物图

转板式气动数字阀是一个典型的三通阀,包括一个进气孔、一个排气孔和一个输气孔,在图 1 气缸处另一面有一个输气孔,主要用于与气动执行元件连接。阀体由电机、气缸和衬板共同组成一个气室,气室主要起气流缓冲作用。同时,在气室中放置一块用于测试的反馈电路板,电路板上安装压力传感器和位置传感器,分别用以测得气室中的实时压力大小和即时转板

位置并提供反馈信号给控制电路板。

数字阀工作时,由步进电机轴驱动转板转动,由于转板的特殊形状,在同一时间,进气孔和排气孔中只有一个与气室相通,而气室直接通过输气孔与气动执行元件相连。

转板式气动数字阀的核心零件是转板,其外轮廓的一半呈半圆形,另一半为类阿基米德螺线。类阿基米德螺线的一端与前述半圆形的一端连接,另一端通过一个辅助半圆形与前述半圆形的另一端连接,其结构如图 3 所示。

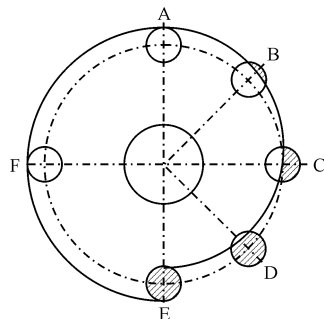


图 3 转板形状平面图及工作机理示意图

图 3 同时也是转板的工作机理示意图,图中 A~F 中阴影部分面积分别是转板转过不同角度时,进气孔的敞开面积。从位置 A 到位置 E,随着转板转过不同的角度,进气孔的敞开面积大小也随之变化,以此来实现控制气体流量和压力大小的目的^[9-10]。

图 3 中大半圆弧 AE 的半径为 8 mm,小弧 AE 为类阿基米德螺线,最大阴影部分的圆的半径为 1.5 mm,也就是当进气孔处于最大开口时,它的开口面积为 7.07 mm²。

通过对转板转动角度和进气孔敞开面积的研究,可以得到通气孔敞开面积 A 与转板转动角度 θ 之间的对应关系曲线如图 4 所示。

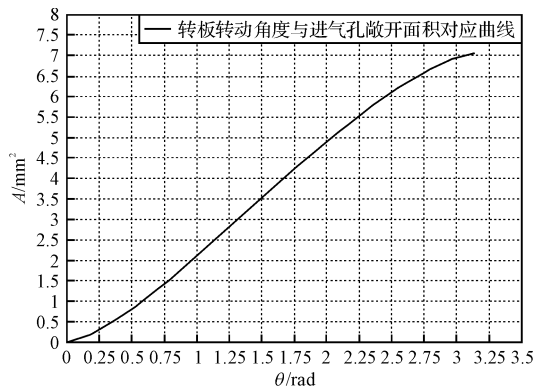


图 4 进气孔敞开面积与转板转动角度关系曲线

在 Matlab 中,借助曲线拟合函数 Ployfit 对上述曲线进行拟合,可得到进气孔敞开面积和转板转动角度

的3阶拟合表达式为:

$$A = -0.2561\theta^3 + 1.1394\theta^2 + 1.2120\theta - 0.0384 \quad (1)$$

式中:转板旋转角度 θ 用弧度表示,对于旋转角度等于零时有常数 -0.0384 ,影响此时气孔敞开面积的实际值,但是由于其数值较小,对数字整体阀影响甚微,忽略其影响,式(1)可以理解为气孔敞开面积 A 和转板转动角度 θ 之间的实际表达式。

2 转板式气动数字压力阀数学模型

由于气体流动状态比较复杂,为了方便研究和讨论,特作如下假设^[11]:①工作介质为理想气体;②在同一容器内压力场和温度场都是均匀的;③气流通过节流器时,整个流动是稳定的一维流动;④气体流动为等熵流动。

气动数字压力阀的数学模型包括两部分,即步进电机数学模型^[12]和数字阀阀体数学模型。

2.1 混合式步进电机的力矩方程

混合式步进电机的力矩方程为:

$$T_e = T_i \sin[Z_i(\theta_m - \theta)] \quad (2)$$

式中 T_i —静转矩; Z_i —转子齿数; θ_m —磁场的旋转角度; θ —步进电机转子转角。

在电磁转矩 T_e 作用下,机械运动方程为:

$$T_e = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + T_L \quad (3)$$

式中 J —转板的转动惯量; D —黏性阻尼; T_L —转板的摩擦转矩。

2.2 阀口气体质量流量方程

根据气体动力学和热力学基本方程,气流通过薄刃节流孔口时,它的质量流量方程可以表示为^[13]:

$$Q_m = C_c A p_0 \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{1}{RT_0} \left\{ \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right\}} \quad (4)$$

式中 A —气体喷嘴出口处的截面积; C_c —空气收缩系数; k —空气绝热指数; T_0 —气体温度; R —气体常数; p_1 、 p_0 —流入、流出截面上气体的压力。

当 R 、 k 、 A 、 C_c 、 P_0 一定时,通过喷管的质量流量从 $p_1/p_0 = 1$ 时为零开始,随着 p_1/p_0 值的降低而增加,当 $p_1/p_0 = 0$ 时同样为零,所以, p_1/p_0 在等于 $(0,1)$ 之间某个数时,方程式达到最大值。对于空气来说, $k = 1.4$,通过解方程式得到,当 $p_1/p_0 = 0.528$ 时, Q_m 达到最大值,此时阀体内气体也达到最大流量,也就是此时阀将输出最大压力,数字阀将达到一个相对稳定的状态。

根据以上内容,气动数字阀阀口气体质量流量方

程可以写成以下分段形式:

$$Q_m = \begin{cases} C_c A p_0 \sqrt{\frac{2k}{RT_0(K-1)}} \sqrt{\left(\frac{p_b}{p_0} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_b}{p_0} \right)^{\frac{k+1}{k}}} & \left(0.528 \leq \frac{p_b}{p_0} \leq 1 \right) \\ C_c A p_0 \left(\frac{2}{1+k} \right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{RT_0(k+1)}} & \left(0 \leq \frac{p_b}{p_0} \leq 0.528 \right) \end{cases} \quad (5)$$

式中 C_c —空气收缩系数; A —阀口有效开口面积; k —空气绝热指数; p_b —气动数字阀阀口下游压力; p_0 —气动数字阀阀口上游压力; T_0 —气体温度; R —摩尔气体常数。

由流体力学的伯努利方程可知,当流体流速一定的情况下,气体压力由密度决定,也就是流量决定,所以式(5)表明,当气体性质和外界条件确定以后,阀口的有效开口面积成了决定输出气体压力大小的因素,当阀体达到稳定状态后,输出气体压力将由阀进气孔有效开口面积决定,并稳定于某一个值。

3 转板式数字压力阀动态系统仿真实验

根据式(1)的转板角度和数字阀开口面积公式,在不考虑气体泄漏情况下,结合式(5),按以下仿真实验参数,对转板式气动数字阀动态响应进行仿真实验:

气源压力 P_0 为0.5 MPa;大气压力 P_A 为0.11 MPa;气体收缩系数 C_c 为1.05;温度 T 为293.15 K;定容容器初始气压 P_a 为0.11 MPa;摩尔气体常数 R 为8.314 J·mol⁻¹·K⁻¹;空气绝热指数 k 为1.4 J。

仿真实验显示,在给定数字阀稳定压力源(0.5 MPa)的情况下,转板式气动数字阀的输出压力与进气孔开口面积有关,也就是与转板的旋转角度有关。理论上,数字阀可以实现开环控制,当气动系统处于静态时,定容容器容腔内的压力由阀进气孔开口面积决定。仿真实验得到转板转动角度与数字阀输出压力的对应关系曲线如图5所示。

从图5中可以看出,在阀口面积一定的情况下,随着阀口面积增加,阀口压力迅速增大,转板在小范围内转动,即可达到理想的压力输出。在较小的转板运动范围内,曲线的线性度较好。但是随着阀口面积的增大,阀口压力上升逐渐减缓。

同样在0.5 MPa理论气源输入状态下,转板固定

在转板角度为 60° 、 90° 和 100° 情况下,分别对其进行仿真研究,转板在不同转动角度情况下,系统的仿真响应曲线对比图如图 6 所示。

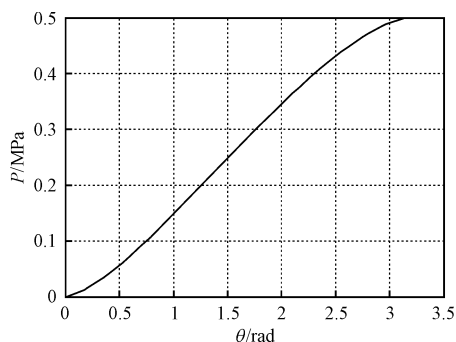


图 5 转板转动角度与数字阀输出压力仿真曲线

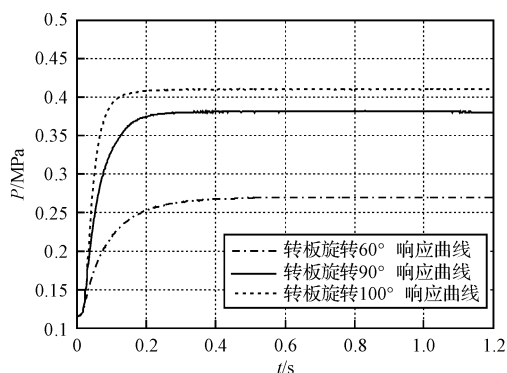


图 6 转板旋转 3 种典型角度时数字阀响应仿真曲线对比

图 6 对比曲线显示,数字阀响应速度很快,大约在 0.2 s 后数字阀进入稳定状态,输气孔理论上可输出较为稳定可控的气压。从图 6 中可以看出,在气孔开口面积不同的情况下,阀的响应时间稍有不同,一般情况下,如果阀口开口面积较大则响应更快。当系统基本达到稳定状态时,系统将输出较为稳定的气压,此气压大小由数字阀进气孔敞开面积决定。

4 结束语

本研究主要设计了一种新型的转板式气动数字阀,提出了该阀的数学模型,并对其进行了仿真研究。主要研究成果归纳如下:

(1) 提出了一种新型的转板式气动数字阀结构,由数字信号控制步进电机驱动转板直接控制阀口面积;

(2) 建立了转板式气动数字阀数学模型,数学模

型简明易懂,易于理论分析;

(3) 对转板式气动数字阀进行了仿真实验研究,仿真分析表明:该阀气压输出线性度良好,便于开环控制。

在此基础上,笔者对转板式气动数字阀的阀体机械结构和阀控电路及控制思路进行了更深入的研究和改进探讨,使其更加简单实用,并通过数字阀特性实验来测试和论证仿真结果,并提出了闭环控制思路,研制了闭环控制相关硬件并做了研究。本研究为转板式气动数字压力阀的后续研究奠定了基础。

参考文献 (References):

- [1] 林昌杰. 电液数字阀在伺服系统中的应用[J]. 武汉交通职业学院学报, 2005(1): 0062 - 0064.
- [2] HU G X, HU X D, JIN Y F, et al. The development of the precise double sided polishing machine[J]. **Key Engineering materials** vols, 2006(6): 370 - 374.
- [3] 李 胜, 俞浙青, 阮 健. 2D 气动数字伺服阀[J]. 机床与液压, 2003(1): 56 - 57.
- [4] TAKASHI K. Stepper Motors and their Microprocessor Control[M]. Oxford: Clarendon Press, 1986.
- [5] RUAN J, XU YM, YU C Y. Technique of Pressure Regulation with a Capillary Damper Tube[C]// Proceedings of International Conference on Fluid Power Control and Robotics. Cincinnati: [s. n.], 1990: 324 - 329.
- [6] 白继平, 俞浙青, 阮 健. 2D 气动数字伺服阀静态特性分析[J]. 工程设计学报, 2005, 12(3): 172 - 176.
- [7] 郭 缓, 张 迎, 张 强, 等. 基于虚拟的伺服阀特性测试[J]. 机械, 2008, 35(2): 61 - 63.
- [8] 杨庆华, 欧昆增, 鲍官军. 新型气动数字压力阀特性研究[J]. 中国机械工程, 2009(9): 1009 - 1011.
- [9] 谈育伦. 智能电气阀门定位器的应用及调试方法[J]. 现代制造技术与装备, 2009(5): 45 - 46.
- [10] 陈 绍. 阀控液压转向系统的仿真与分析[J]. 现代制造技术与装备, 2009(2): 77 - 78.
- [11] SMC(中国)有限公司. 现代实用气动技术[M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [12] 王宗培, 史敬灼. 二相混合式步进电动机仿真模型分析[J]. 微特电机, 1998(6): 3 - 6.
- [13] 阮 健. 电液(气)直接控制技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1999.

[编辑: 柴福莉]