

$\phi 6$ 通径 2D 数字阀高频电-机械转换器的研究^{*}

李江龙, 阮 健, 李 胜

(浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘要:为提高数字伺服阀的频率特性和响应速度,对弹射系统用 $\phi 6$ 通径,2D 数字阀选用低惯量的两相混合步进电机作为其电-机械转换器,介绍了其工作原理并设计了 2D 数字伺服阀专用 DSP 控制器,采用电流和位置双闭环算法对其性能进行了实验研究。实验结果表明,该电-机械转换器在幅值 100% 最大阀开口的阶跃信号输入下,上升时间为 5 ms;正弦输入信号下,对应 -3 dB 的频宽分别约为 305 Hz;其频响高于同类数字伺服阀用电-机械转换器。

关键词:2D 数字阀;嵌入式控制;电-机械转换器;频率响应

中图分类号:TH137

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)02-0191-04

Research on the high-frequency actuator of 2D digital valve- $\phi 6$

LI Jiang-long, RUAN Jian, LI Sheng

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In order to improve the frequency characteristics of digital servo valve and the response speed, a low inertia of the two-phase hybrid stepping motor was choosed and used as the actuator of 2D digital valve- $\phi 6$ ejection systems. Then, the basic theory of stepping motor was presented, and a 2D digital servo valve controller which was embedded in current and position of double closed loop control algorithm was designed in this research. The experimental results show that using the stepper motor as the actuator, the rise time is 5 ms for 100% input signal and the bandwidth is about 305 Hz at -3 dB gain for 25% input signal. The frequency response is higher than the similar actuator of digital servo valve.

Key words: 2D digital valve; embedded control; actuator; frequency response

0 引 言

电-机械转换器是连接电气元件和机械元件的桥梁,提高其频响和带载能力是提高液压伺服阀频宽的一个前提^[1]。传统的电-机械转换器有动铁式力矩马达,动圈式力马达,比例电磁铁和步进电机^[2],分别用于电液伺服阀、比例阀和数字阀。

目前,随着先进制造技术,微电子技术及嵌入式计算的发展,基于新型功能材料(超磁致伸缩材料 GMM、电致伸缩材料 PMN 和形状记忆合金 SMA 等)^[3,4]的电-机械转换器已广泛应用于电液伺服阀上。而以 2D 数字伺服阀为代表的数字阀则采用先进嵌入式伺服控

制的两相混合式步进电机^[5]。2D 数字伺服阀利用单个阀芯的旋转和滑动的双运动自由度而设计的伺服螺旋机构实现伺服阀功率级的液压放大功能,相对其他伺服阀其具有结构简单、抗污染能力强、构成导控阀导控级的零位泄漏小、固有频率高、动态性能好等优点^[6-7]。

本研究针对 $\phi 6$ 通径数字伺服阀选用一种低惯量,高频响的步进电机,并设计了基于 DSP2812 的专用控制器对其动态特性进行研究。

1 电-机械转换器的结构与原理

1.1 电-机械转换器的结构原理

如图 1 所示为 2D 数字阀电-机械转换器外形图,

由步进电机和位置反馈模块组成。

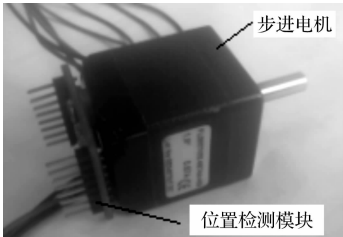


图 1 电-机械转换器实物图

该数字阀电-机械转换器采用型号为 FL28STH32-0674A 的两相混合式步进电机,外形尺寸为 $28 \times 28 \times 32(\text{mm}^3)$,其参数如表 1 所示。

表 1 步进电动机参数

重量/kg	电阻/ Ω	转动惯量/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^2)$	电感/mH	齿数
0.11	5.6	9	3.4	50

其原理如图 2 所示。它由定子和转子组成。定子有 8 个极(1,3,5,7 是 A 相;2,,4,6,8 是 B 相)。每相各极相差 $\pi/2$,且极性相反。

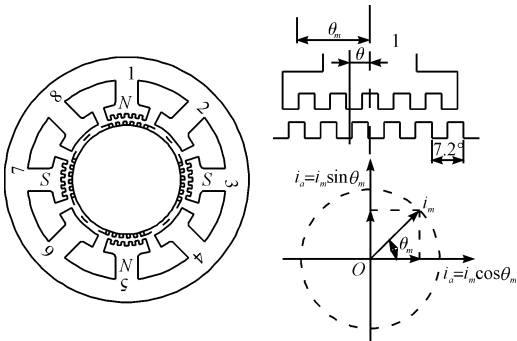


图 2 混合式步进电机的工作原理

转子由两段均匀分布着 50 个小齿的铁芯构成,一端铁芯呈 S 极,另一端铁芯呈 N 极,两铁芯上的小齿错开半个齿。

在其 A 相与 B 相线圈中通入相位差为 $\pi/2$ 的正弦波电流,考虑步进电机的磁路材料存在着严重的饱和及磁滞非线性影响^[8],则会对转子产生类似正弦波的牵引力矩 T_A 和 T_B ,其关系函数为^[9]:

$$T(i) = \begin{cases} T'_{amp} \sin \left(\frac{\alpha i}{i_r} + \Delta \right) & i > 0, \frac{di}{dt} < 0 \text{ or } i \leq 0, \frac{di}{dt} > 0 \\ T'_{amp} \sin \left(\frac{\alpha i}{i_r} - \Delta \right) & i > 0, \frac{di}{dt} > 0 \text{ or } i \leq 0, \frac{di}{dt} < 0 \end{cases}$$

式中: $T'_{amp} = T_{amp} \frac{\sin(\alpha - \Delta)}{\sin(\alpha + \Delta)}$; i_r —步进电动机的额定电流; α —描述磁路非线性而引入的控制参数,其取值范围为 $0 \sim \pi/2$, α 值越大则磁路饱和越严重, Δ —描述磁滞非线性的控制参数。

从而对转子形成力矩旋转磁场矢量,其合成矢量旋转 2π 电角度,转子转动一个齿距角 7.2° ,以实现步进电机的连续运动。

1.2 2D 数字伺服阀控制器设计

2D 数字伺服阀电-机械转换器的性能与所选的步进电机的性能和控制器的好坏有关^[10],为实现电-机械转化器的控制设计了专用的控制器。其功能框图如图 3 所示。2D 阀控制器主控芯片采用 TI 公司的 DSP2812 芯片,该芯片最高能达到 150 M 的处理速度,能实时对控制信号进行处理;其内部事件管理器产生用于控制电机转动的 4 路 PWM 信号,通过控制 IR2110 驱动芯片来控制两个“H 桥”中 IRF640 的关断,从而产生相位差为 $\pi/2$ 的正弦波电流 i_a 和 i_b ;SPI 模块接收固定在电机上的 AS5045 磁旋转编码器检测到的电机转子的角位移信号;ADC 模块用于检测串接在电枢绕组中取样电阻经光耦隔离放大后的电压值。

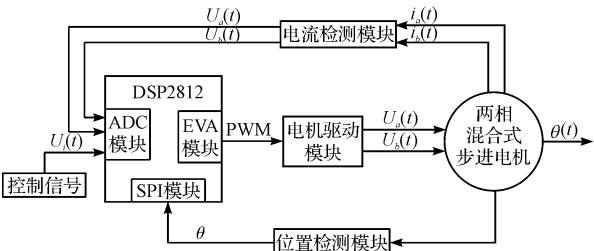


图 3 控制器框图

为了保证步进电机式电-机械转换器的定位精度及动态响应特性,采用双闭环的控制方法:一是位置反馈闭环,读取电机的角位移 θ 并进行位置反馈;一是相电流反馈闭环,实测两相电流合成的旋转磁场的角位移 θ_m ;然后计算出二者的差值 $(\theta_m - \theta)$,使其大小保持在半个齿距角范围内快速响应。为获得良好的控制效果,位置闭环和电流闭环均采用了 PID 控制。

2 实验研究

为了对阀的电-机械转换器进行实验研究,本研究搭建了实验平台,如图 4 所示。

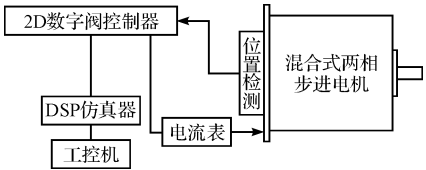


图 4 电-机械转换器实验台模块图

实验中选用幅值为 $\pm 2 \text{ A}$ 的电流表串接在步进电机两相绕组中,用来标定和监控其电流;仿真器选用 C2000 系列专用 XDS100USB 仿真器。2D 阀电-机械

转换器所需的控制信号由 DSP 控制器给出,经过固化在芯片内部的控制算法驱动步进电机的转动,控制器对实际检测到的电流信号进行转换得到电机实际的电角度位置。控制器通过 SPI 接口从固定在电机上的 AS5045 角位移传感器读出转子的绝对角位置值并保存在芯片内部 RAM 中。通过 DSP 专用仿真软件 CCS3.3 把控制信号和电机实际电角度位置保存在工控机中。

2.1 电-机械转换器的阶跃特性的测试

不同幅值下电-机械转换器的阶跃响应曲线如图 5 所示。从图 5 可知,该电-机械转换器具较快的响应速度。随着幅值的增大,电-机械转换器的响应时间变慢,但超调越来越小,这是由于相同算法的 PID 参数对不同幅值的调节能力不同。在幅值 25% ,50% ,100% 最大阀开口下,其上升时间分别为 2 ms ,3.2 ms ,5 ms。

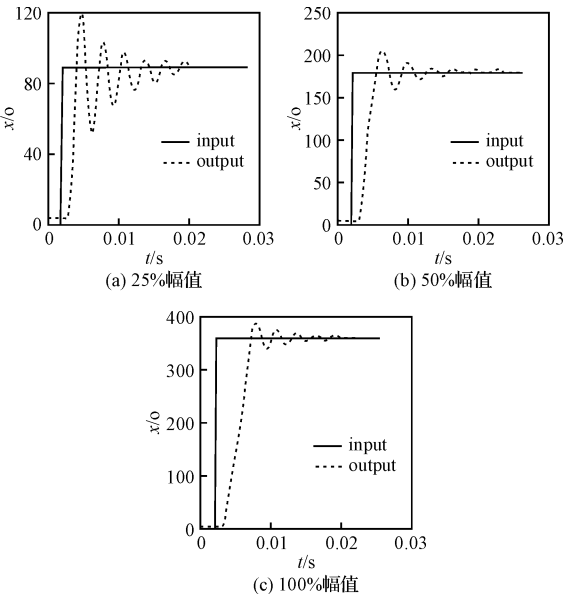


图5 不同幅值下电-机械转换器的阶跃响应

2.2 电-机械转换器的频率特性的测试

如图 6 所示为在幅值 25% ,50% ,100% 最大阀开口下对应频率为 50 Hz 正弦信号的响应。在相同频率正弦信号作用下,电-机械转换器的频率响应随输入信号幅值的不同而有所差异,主要表现在相位差上。随着幅值的增大,电-机械转换器的跟踪能力下降,相位差也越来越大。

根据在不同频率下所测的频率响应,可以得到电-机械转换器的频率特性。在 25% ,50% ,100% 最大阀开口幅值下电-机械转换器的频率特性如图 7 所示。由图可知,随着频率的增加,电-机械转换器输出的幅值发生了的衰减,相位也产生了滞后。这是因为在低频时,电机转子的输出角位移和输入电流所产生的旋

转磁场的运动是同步的,没有滞后,转子的角位移幅值和相位与旋转磁场基本重合;输入电流提高时,电机绕组的反电势的影响增大,转子的角位移和旋转磁场有了相位滞后,角位移的幅值也发生了衰减。

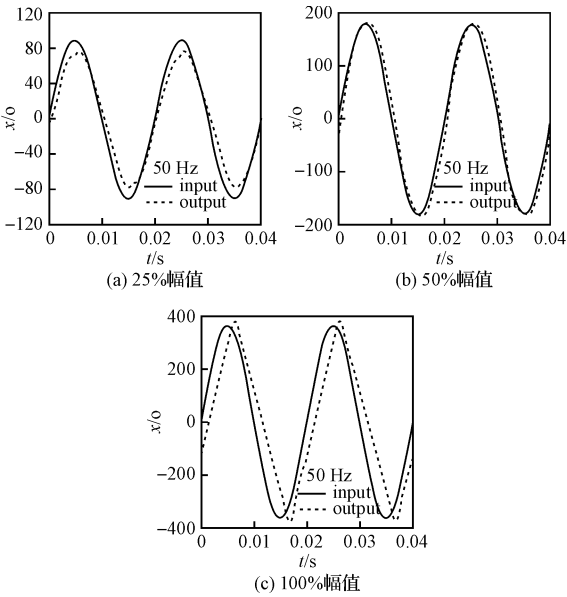


图6 50 Hz 正弦信号下电-机械转换器的动态响应

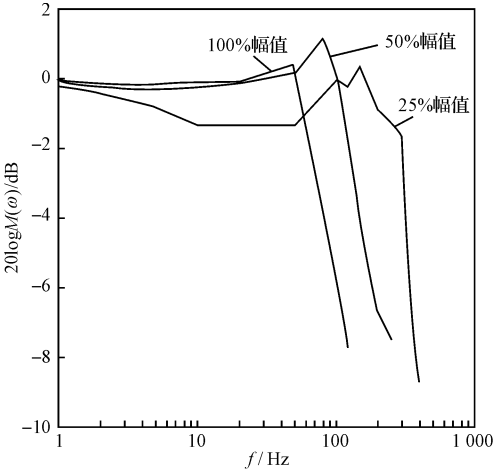


图7 不同幅值下电-机械转换器的幅频特性

由图还可以看出,电-机械转换器的频宽与其幅值成反比。在 100% 幅值下,电-机械转换器 -3 dB 所对应频率分别约为 65 Hz,50% 幅值时增加到 135 Hz,100% 时达到最高的 305 Hz。

3 结束语

2D 数字阀电-机械转换器频响与所用步进电机转子惯量和控制算法有关,本研究用专用的控制算法对 φ6 通径 2D 数字伺服阀用小惯量步进电机的阶跃特性和频率特性进行研究,使其实现精确定位和更快速响应控制。在 100% 幅值下其阶跃响应达到 5 ms,

25% 幅值下对应 -3 dB 频宽达到 305 Hz, 其频响高于其它同类的电-机械转换元件。为提高数字伺服阀的频响奠定了基础。

参考文献 (References):

- [1] 骆涵秀, 李世伦, 朱 捷, 等. 机电控制[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2003.
- [2] 王传礼, 袁桂峰. 阀用电-机械转换器的应用研究[J]. 安徽理工大学学报, 2005, 12(4): 41-44.
- [3] 刘国华, 花 蓉. 新型功能材料驱动的高性能电液伺服阀[J]. 合肥工业大学学报, 2005, 1(1): 45-48.
- [4] YOSHIO Y, HIROSHI E, JUN S. Application of giant magnetostrictive materials to positioning actuators[C]//Proceedings of the 1999 IEEE/ASME, Atlanta, USA, 1999: 215-220.
- [5] RUAN J, BURTON R. A new approach of direct digital control for spool valves[C]//ASME, The Fluid Power and Sys-

tems Technology Division (Publication), 2002: 157-167.

- [6] 阮 健. 电液(气)直接数字控制技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2000.
- [7] RUAN Jian, BURTON R, UKRAINETZ P. Some experimental considerations of stage control in digital valves[J]. **The Fluid Power and Systems Technology Division**, 2002(9): 55-62.
- [8] BURTON R, RUAN J, UKRAINETZ P. Analysis of electromagnetic nonlinearities in stage control of a stepper motor and spool valve[J]. **Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control**, 2003, 125(3): 405-412.
- [9] 阮 健, 李 胜, 裴 翔, 等. 数字阀的分级控制及非线性[J]. 机械工程学报, 2005, 41(11): 91-97.
- [10] 李 胜, 裴 翔, 阮 健. 数字阀控制器的设计方法研究[J]. 工程设计学报, 2002, 9(3): 124-126.

[编辑: 张 翔]

(上接第 190 页)

一个脉冲比, 并把下一个脉冲比作为当前的脉冲比。同时重新计算当前的伺服电机的脉冲个数。

在实际调试过程可对 K_p 、 K_i 、 K_d 进行调试, 以选定合理的值, 保证偏差控制在合理的范围之内^[11-12]。

4 结束语

该电子送经控制系统在 YJHS 型经编机上经过了测试, 结果表明送经响应速度快, 送经量控制精确; 人机界面实现了所有运行参数的设定和显示, 编织操作方式简便, 可视性强。该送经系统具有很好的实时跟随特性, 能最大限度降低停机横条的产生。另外还设计了失电保护系统, 能避免机器在运行中任何时候由于电网突然掉电而引起的经轴崩纱现象。在实际应用中可控制 4 个经轴送经, 能够满足车速最高 2 000 r/min 的条件下送经量的要求, 达到客户对经编织物速度和花型的要求。

参考文献 (References):

- [1] 蒋高明. 现代经编工艺与设备[M]. 上海: 中国纺织出版社, 2004.

- [2] MAYER K. KAMCOS-the name for karl mayer's machine command system[J]. **Kettenwirk Praxis**, 2005(1): 28.
- [3] The India Textile Journal Group. Electronic let-off & take-up[J]. **The Indian Textile Journal**, 2003, 113(4): 90.
- [4] 张 琦, 汤友章. 经编机电子送经反馈控制及误差分析[J]. 针织工业, 2006(8): 34-36.
- [5] 王文进, 蒋高明. EBC 经编电子送经系统[J]. 针织工业, 2007(6): 16-19.
- [6] MAYER K. EBA 2-step dokumentation (Version 3.0) [J]. **Karl Mayer Textilmaschinen fabric GmbH**, 2000(5): 31-32.
- [7] MAYER K. ProFab network system-provide all tasks the most suitable tools[J]. **Kettenwirk Praxis**, 2004(3): 44.
- [8] 李又元. 经编电子送经原理及故障维修[J]. 针织工业, 2006(4): 3-5.
- [9] 陶永华. 新型 PID 控制及应用[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [10] 孔 震, 蒋高明, 夏凤林. 经编机伺服控制系统的参数调节方法[J]. 纺织学报, 2008(10): 102-104.
- [11] 李 伟, 董继先, 汤 伟. 自整定 PID 控制器在白泥回转窑中的应用[J]. 轻工机械, 2009(3): 33-35.
- [12] 刘哲伟, 颜建军, 潘 刚. 模糊控制在流浆箱控制中的应用[J]. 轻工机械, 2009(3): 29-32. [编辑: 张 翔]