第29卷第21期	中 国 电 机 工 程 学 报	Vol.29 No.21 Jul. 25, 2009
2009年7月25日	Proceedings of the CSEE	©2009 Chin.Soc.for Elec.Eng. 93

文章编号: 0258-8013 (2009) 21-0093-06 中图分类号: TH 137 文献标志码: A 学科分类号: 470-40

开关型电磁铁控制比例伺服阀的方法及实验研究

许小庆, 权龙, 李斌

(太原理工大学机械电子工程研究所,山西省 太原市 030024)

Study on Controlling Theories and Methods of Switching Solenoids Proportional Servovalve

XU Xiao-qing, QUAN Long, LI Bin

(Research Institute of Mechanic-Electronics Engineering, Taiyuan University of Technology,

Taiyuan 030024, Shanxi Province, China)

ABSTRACT: A new scheme for electrohydraulic proportional servo valves with switching solenoids was presented. A method of the adaptive feed forward compensator (AFFC) to correct static nolinear characteristic of the switching solenoids is proposed based on closed loop control. The transient time duration is shortened significantly by using the anti-saturation integral control (ASIC) techniques, while the static error is maintaining at zero. The principles of AFFC and ASIC are explained theoretically and tested in experiments. Moreover, the results show that the transient time duration is even shorter when the gain of the close feedback loop was increased in the scheme, the scheme has the advantages of simple design and low cost.

KEY WORDS: proportional servo valve; solenoid; feed forward; adaptive; integrator

摘要:提出利用开关电磁铁构成单电磁铁式电液比例伺服阀 的方案。在闭环控制基础上,提出自适应前馈补偿方法,解 决开关电磁铁的非线性问题;采用抗饱和积分控制方法,在 消除稳态误差的基础上,减小电磁铁动态响应时间。在理论 上解释 2 种方法的原理,试验验证 2 种控制方法的效果。另 外,利用电磁铁心速度反馈,增大闭环回路增益,进一步减 小电磁铁的动态响应时间。结果表明,与现有采用比例电磁 铁的技术相比,新方案具有设计简单、成本低的优点。

关键词:比例伺服阀;电磁铁;前馈;自适应;积分器

0 引言

随着电液比例伺服阀技术的迅速发展,在很多 应用场合其取代电液伺服阀已成为趋势^[1-4]。目前, 电液比例伺服阀的生产主要被美国 MOOG、 PARKER 等少数生产商垄断,其价格比较高,故低 成本、高性能的比例伺服阀成为研究热点。

电液比例伺服阀由电-机械转换器、液压阀、 位移传感器、控制和驱动电路等4部分组成,研究 重点集中于其关键元件——电-机械转换器。短行 程电-机械转换器的形式有很多种^[5-11],而比例阀用 电-机械转换器通常包括动铁式和动圈式直线电机 2种,动铁式包括双电磁铁和单电磁铁,其中单电 磁铁结构简单、成本低。

单电磁铁比例伺服阀的电磁铁和位移传感器 如图1所示,电磁铁推动液压阀阀芯单方向运动, 另外一个方向运动由复位弹簧完成。目前,这种阀 在性能上已经接近或达到双电磁铁比例伺服阀的 性能,成本却低很多,但这种单电磁铁式比例伺服 阀采用的电磁铁为比例电磁铁,设计时需要对隔磁 环的几何参数进行优化^[12-15],对组成比例电磁铁的 材料要进行特殊选择,要求制造精度高,由此导致 了成本上升。

开关电磁铁是液压技术中应用最广泛的电-机 械转换器,具有结构简单、材料便宜、生产批量大 等优点,但开关电磁铁的静态特性具有严重的非线



Fig. 1 Single-solenoid and position transducer

基金项目: 国家自然科学基金项目(50575156): 山西省自然科学基 金项目(20041053)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50575156).

性,要使其用于比例伺服阀,必须对其非线性特性 进行修正,就目前研究来看,效果有限^[12-15]。因此 本文提出采用自适应前馈补偿和抗饱和积分控制 方法,解决开关电磁铁的非线性问题,同时改善其 动态指标,使其达到成本低、行程大、动静态特性 都比较好的目的。

1 开关电磁铁的基本特性

图 2 是电磁铁动静态特性试验系统,图中弹簧 用于模拟阀芯的回复力,进行静态特性测试时用刚 性材料代替弹簧连接电磁铁动子和力传感器。试验 时,首先设计测试或控制方案,然后在 Matlab/ Simulink 中实现,通过德国 Dspace 仪器公司的实时 仿真产品 RTC (DSpace Real Time Card)实现实时测 试和控制。

线圈电流 *i* 变化时,实测开关电磁铁的电磁吸力-位移(*F*-*x*)特性曲线和电磁吸力-电流(*F*-*i*)特性曲线,如图 3 所示,图中 *h* 为气隙长度。当线圈电









流一定时,随着动子位移 x 增大,动子逐渐接近端 面,气隙变小,电磁吸力增大。可以看出, F-x 曲 线和 F-i 曲线都有明显的非线性特点及滞环特性, 在电磁换向阀中,这种电磁铁可以直接使用,但作 为比例控制则无法使用。由于无法保证稳态精度, 其动态响应特性没有意义。

2 前馈补偿与抗饱和积分

2.1 自适应前馈补偿

当开关电磁铁的静态非线性特性严重时,按线 性系统理论设计控制环节的参数,不仅难以解决动 态指标与静态指标之间的矛盾,而且难以照顾到电 磁铁的静态工作点。自适应前馈补偿的目的就是消 除电磁铁各工作点非线性特性引起的误差。

采用单电磁铁组成比例伺服阀时,电磁铁输出 单向电磁吸力。动子向气隙减小的方向运动时,动 子的驱动力主要是电磁吸力;反向运动时,主要驱 动力为电磁阀的液动力,为增加回复力,需要安装 回复弹簧,并选择恰当的点为零位工作点。理想的 比例电磁铁的静态特性如图 4 所示,在工作区间 [*x*min, *x*max]内,*F*-*x*特性为一族水平直线,水平直线 之间的间距与电流*i*的变化呈线性关系,*i*按箭头方 向增大,选择工作区间的中点*x*₀为动子零位(对应图 中工作点 0),设回复弹簧刚度线性,则动子位移与 输入信号稳态关系呈线性,即动子在 1、0、2 工作 点之间可按直线转移。



图 4 实际电磁铁与理想比例电磁铁的特性差异 Fig. 4 Characteristic difference between practical solenoids and perfect solenoids

由图 3 和图 4 可知,动子的整个工作区间跨越 很大的非线性区域,从一个工作点向另一个工作点 转移时,无法保证动子输出位移和输入信号之间的 线性关系。

通过前馈补偿环节,给实际开关电磁铁的力特 性给予一定补偿,如图4所示,以力标准衡量,补 偿量大小为理想力特性F₀(*i*)与实际力特性F(*i*, *x*)之 间的差值:

$$\Delta F = F_0(i) - F(i, x) \tag{1}$$

则实际开关电磁铁可以表现出理想比例电磁铁的 静态特性。在此基础上,应用其他控制方法可以不 考虑电磁铁的静态非线性因素。实际应用中,电磁 铁的输出力不易测量,可转换为对线圈电流或电压 的补偿。

2.2 抗饱和积分控制原理

抗积分饱和控制同时利用比例控制的恒增益 和积分器的稳态高增益特点,使电磁铁在动态过程 中保留比例控制的特点,进入稳态后具有积分控制 的特点。

抗饱和积分控制传递函数为

$$G_{\rm CI}(s) = \begin{cases} \frac{K_{\rm xi}}{s}, & |e(t)| \le B\\ 0, & |e(t)| > B \end{cases}$$
(2)

式中: *K*_{xi}为积分常数; *e*(*t*)为误差信号; *B*为积分器 启闭阈值。抗饱和积分和前馈补偿的框图如图 5 所 示。



图 5 抗饱和积分控制器及自适应前馈补偿器 Fig. 5 Anti-saturation integral controller and adaptive feed forward compensator

图 5 中*K*_q为自适应前馈补偿系数,动态过程中 根据阀心位移变化,对输入到电磁铁线圈的电流进 行动态补偿,具有自适应补偿非线性误差的作用。 幅值判断的作用是,对动子位移跟踪误差进行判 断,决定积分器是否有效,积分器设有输出上下限, 达到抗积分饱和的目的。

当动子位移与目标位移误差较大时,幅值判断 环节会关闭积分器,使阀心快速接近目标,当阀心 接近目标位置,即误差信号 *e*(*t*)满足

$$|e(t)| \le B \tag{3}$$

时,启动积分器,使阀心位移无静差跟踪输入信号。因此,B的大小对电磁铁动静态的性能有重要影响。就开关电磁铁而言,非线性因素常会使单纯的比例 控制所造成的稳态误差|e(t)|很大,使式(3)无法得到 满足或满足的时间太短,导致积分器失效,进一步 导致误差失控,此时必须加大 B 或进行适当补偿。

下文讨论 *B* 的选择原则。对理想比例电磁铁 组成的线性系统而言,当仅有比例控制时,稳态

误差为

$$e_{\rm s} = U_{\rm i} - U_{\rm x}(U_{\rm i}) = U_{\rm i} / K_{\rm cp}$$
 (4)

式中: U_i为输入信号; U_x(U_i)为动子位移传感器输 出信号的稳态值; K_{cp}为控制回路的位置增益,在线 性系统中为常数。对于电磁铁工作过程中的所有输 入信号,如果满足:

$$B \ge U_{\rm imax}/K_{\rm cp}$$
 (5)

式中U_{imax}为输入信号最大值,尽量选择比较小的B,就可以达到快速、无静差控制阀心位移的目的。

对具有非线性特性的开关电磁铁而言,动子位 移传感器输出信号与线圈电流之间并不是线性的。 设非线性系统产生的输出稳态误差*e*_{ns}为

$$e_{\rm ns} = U_{\rm i} - U_{\rm n}(U_{\rm i}) \tag{6}$$

式中*U*_n(*U*_i)是传感器测量到的开关电磁铁的位移稳态值,此时选择阈值为*B*_n:

$$B_{n} \ge \left[U_{i} - U_{n}(U_{i})\right]|_{max}$$

$$\tag{7}$$

与式(5)不同,由于影响开关电磁铁静特性的因素很多,很难通过式(7)确定*B*_n,保守选择则*B*_n较大。如果*B*_n过大,就失去了抗饱和积分的意义。因此, 今

$$U_{\rm n}(U_{\rm i}) = U_{\rm x}(U_{\rm i}) - \Delta U_{\rm n}(U_{\rm i})$$
 (8)

则

$$e_{\rm ns} = e_{\rm s} + \Delta U_{\rm n}(U_{\rm i}) \tag{9}$$

误差*e*_{ns}由 2 部分组成,线性误差*e*_s和非线性增量误 差Δ*U*_n(*U*_i), 2 项对应的积分器阈值分别为

$$B \ge |e_{\rm s}|$$
$$B_{\rm A} \ge |\Delta U_{\rm m}(U_{\rm s})|$$

取

$$B_{\rm n} = B + B_{\Delta} \tag{10}$$

可以达到抗饱和积分控制的目的。

受非线性因素影响,位移反馈信号不是 $U_x(U_i)$ 而是非线性输出 $U_n(U_i)$,导致非线性误差 $\Delta U_n(U_i)$,该误差值对应一定量值的输入量,可以通过前馈补偿的形式消除。

理论上,选择理想的前馈补偿增益 K_q 时,可以 使 $\Delta U_n(U_i)=0$,此时 $B_n=B$,即可以按照式(5)选择积 分阈值。实际应用中,只要将 $\Delta U_n(U_i)$ 减小到一定程 度,在此基础上,其他控制手段就可以取得比较好 的控制效果。

3 开关电磁铁闭环控制

3.1 闭环比例控制

利用位移传感器检测电磁铁动子位移信号,构 成位移闭环,可以减小跟踪误差和开关电磁铁的非 线性误差。静态特性可通过系统对三角波输入信号的跟踪能力描述,三角波信号变化速度相对系统的响应速度很慢,可认为是静态信号。图 6 中曲线 3 为开关电磁铁的闭环比例控制特性,试验中比例增益*K*xp=4。试验结果表明,单纯的比例控制,虽然特性较开环有明显改善,但稳态误差仍然很大,无法使用。



Fig. 6 Position close loop static characteristics of switching solenoids

3.2 PI 控制

闭环比例控制增益*K*_{xp}越大,跟踪误差越小,但 *K*_{xp}不能无限增大,试验结果表明,当输入信号为强 度 0.75 V的阶跃信号(对应动子位移 0.75 mm), *K*_{xp}=4 时,仍有明显稳态误差,而阶跃响应已经有 明显抖动,如图 7 中曲线 2 所示。为保证控制精度, 采用PI控制策略,即采用如下控制器



Fig. 7 Step responses of plunger stroke

试验中取比例增益*K*xp=4,积分增益*K*xi=30,图 6 中曲线 4 是采用闭环PI控制后的稳态跟踪曲线, 可见,采用闭环PI控制,稳态误差被消除。因此, 从稳态指标分析,PI控制可以达到控制要求;但由 于积分环节加入,动态响应速度必然下降,调整时 间很长,如图 7 中曲线 3 所示,调整时间超过 0.4 s, 无法满足比例伺服阀的要求。必须采取其他手段解 决响应速度和误差之间的矛盾。 试验中还测试了PID的控制效果,选择控制参数*K*xp=4、*K*xi=30、*K*xd=0.01,但当输入信号幅值变化时,受非线性特性影响,性能相差极大,无法满足要求。

3.3 抗饱和积分控制

采用抗饱和积分控制,适当选择 B 可完全消除 稳态误差,同时消除积分环节给电磁铁的控制带来 的动态过程加长的不利影响。对于开关电磁铁而 言,由于非线性严重,要兼顾所有工作点,需要增 大 B,这样可以取得明显的控制效果,但理想的方 法是与自适应前馈补偿方法同时使用。

3.4 自适应前馈补偿

若稳态误差为 0,系统进入稳态后,动子位移 与输入信号相等,因此可以根据输入信号进行补 偿,从而改善系统的性能。根据式(9),前馈*K*q的调 整规律按下式确定

$$K_{\rm q} = \Delta U_{\rm n}(i,x)/U_{\rm i} \tag{12}$$

开关电磁铁静态特性受多种因素影响,难以用 解析手段准确描述出来,故难以按照式(1)或式(12) 计算补偿量。实际应用时,当开关电磁铁的结构参 数确定以后,可以通过实验测量所需补偿量的取值 范围,具体方法是采用图2所示的试验系统,先固 定*B*_n(试验中取为0.05 mm),给定输入电压*U*_i,改变 *K*_q,使稳态误差为0,可以确定*K*_q的取值范围[*K*_{min}, *K*_{max}],实验测试结果如表1所示。

表 1 前馈增益 $K_q \subseteq U_i$ 的关系($B_n=0.05 \text{ mm}$) Tab. 1 Function of feed forward gain K_q to input U_i ($B_n=0.05 \text{ mm}$)

$U_{ m i}$	$K_{ m q}$	$U_{ m i}$	$K_{ m q}$
0.25	[0.10, 1.5]	-0.25	[1.15, 3.0]
0.50	[1.15, 2.0]	-0.50	[2.10, 3.0]
0.75	[0.95, 1.4]	-0.75	[1.90, 2.5]
1.00	[0.88, 1.2]	-1.00	[1.80, 2.3]
1.25	[0.70, 1.0]	-1.25	[1.80, 2.0]
1.50	[0.65, 0.9]	-1.50	[1.85, 3.0]

由表1可知, *K*q可以在一定范围内取值。实际应用中同型号的比例电磁铁,其特性并不完全一致,但差别不大,适当缩小表1中*K*q的取值范围并选择合适的*K*q,就可以对同一型号的电磁铁进行有效补偿。

采用自适应前馈补偿+抗饱和积分控制后,电 磁铁的动静态性能得到大幅提高,试验结果表明, 静态测试中,动子完全跟上三角波信号,已很难区 分,因此在图 6 中没有给出。动态响应曲线如图 7 中曲线 4 所示,其比例增益*K*xp=4,积分器启闭阈值 *B*=0.05 mm,积分增益*K*_{xi}=30,前馈增益*K*_q根据输入信号的大小进行自动调整,对于表1中没有的点,进行插值处理。比较图7中曲线4和曲线2可以看出,动态响应过程和比例控制过程几乎没有差别,响应速度快,而当比例控制的误差信号进入*B*_n后,系统很快进入稳定状态,响应时间为0.1 s。

3.5 性能提高

抗积分饱和控制解决了积分环节带来的静动 态特性之间的矛盾,自适应前馈补偿有效减小了开 关电磁铁的非线性特性带来的位置误差,不仅提高 了电磁铁的性能,而且可以在此基础上采用其他方 法改善系统的性能。

上述2种方法并不解决单纯比例控制所产生的 振荡问题,因此,应在此基础上采取其他措施,进 一步改善系统的性能。采用微分反馈是简单且非常 有效的处理方法,增加后的反馈部分变为

$$G_{\rm FV}(s) = 1 + K_{\rm FV} \cdot s \tag{13}$$

试验中取K_{FV}=0.06。试验结果如图7中曲线5所示, 系统除没有静差外,动态响应已经没有超调,响应 时间减小到0.06s。

上述几种主要控制方式下线圈电流的变化情况如图 8 所示,增加自适应前馈补偿以后,线圈电 感产生的延迟被补偿,尤其在电流下降的过程中更 加明显。

通过自适应前馈补偿、抗饱和积分控制、速度 反馈控制,开关电磁铁组成的比例伺服阀的动静态 性能都得到了大幅提高。



图 8 输入 0.75 V(对应输出 0.75 mm)时线圈电流 Fig. 8 Step responses of coil current

4 结论

1)由开关电磁铁构成的单电磁铁比例伺服阀 可以降低比例伺服阀的成本,研究这种电磁铁的控 制技术有实际意义。

2)由开关电磁铁构成的单电磁铁比例伺服阀 需要解决2个关键问题:①如何消除开关电磁铁的 非线性特性对控制精度产生的不利影响;②如何提 高动子位移对输入信号的响应速度,即电液比例伺 服阀的响应速度。

3)采用自适应前馈补偿后,开关电磁铁的闭 环静特性基本达到线性化,同时其工作行程和控制 精度得到大幅提高。

4)利用抗饱和积分控制,可以在消除稳态误差的前提下,达到缩短电磁铁动态响应时间的目的,并在此基础上设计其他控制方案。试验结果表明,采用速度反馈,取得了非常好的效果。

参考文献

- Bang Y B, Hur J W, Joo C S, et al. Two-stage electrohydraulic servovalve using stack-type piezoelectric elements[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: part C, Journal of Mechanical Engineering Science, 2004, 218(1): 53-65.
- [2] 沈传亮,程光明,杨志刚,等.新型直动式压电伺服阀[J].机械 工程学报,2004,40(9):125-128.
 Shen Chuanliang, Cheng Guangming, Yang Zhigang, et al. New type piezoelectric direct drive servo valve[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(9): 125-128(in Chinese).
- [3] Baucer F, Reichert M. The use of piezo-actuated for high dynamic servovalves[J]. Ölhydraulik and Pneumatik, 2005, 19(6): 1-16.
- [4] Inami M, Niimi S, Yoshida M, et al. Development of a linear solenoid valve adopting to the VVT system[C]. JSAE Annual Congress (Autumn), Tokyo, Japan, 2003.
- [5] 陈幼平,杜志强,艾武,等.一种短行程直线电机的数学模型及 其实验研究[J].中国电机工程学报,2005,25(7):131-136 Chen Youping, Du Zhiqiang, Ai Wu, et al. Research on model of a new short-stroke linear motor and its experiments[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(7): 131-136(in Chinese).
- [6] 石胜君,陈维山,刘军考,等.一种基于纵弯夹心式换能器的直线超声电机[J].中国电机工程学报,2007,27(18):30-34.
 Shi Shengjun, Chen Weishan, Liu Junkao, et al. Ultrasonic linear motor using longitudinal and bending multimode bolt-clamped langevin type transducer[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(18): 30-34(in Chinese).
- [7] 刘建芳,杨志刚,程光明,等. 压电驱动精密直线步进电机研究
 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 102-107(in Chinese)
 Liu Jianfang, Yang Zhigang, Cheng Guangming, et al. A study of precision PZT line step motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 102-107(in Chinese)
- [8] 刘仁鑫,张铁民,秦勇. 一种矩形振子新型压电直线电机[J]. 中国电机工程学报,2008,28(14):114-117.
 Liu Renxin, Zhang Tiemin, Qin Yong. A new type of linear piezoelectric motor based on rectangular actuator[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(14):114-117(in Chinese).
- [9] 邓中亮.高频响精密位移直线电机及其控制的研究[J].中国电机 工程学报,1999,19(2):41-46.
 Deng Zhongliang, Research on linearmotor and its control for high response frequency and precision displacement[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(2):41-46(in Chinese).
- [10] Suzuki T, Tanaki H. Temperature compensation of giantmagnetostrictive actuator and itsapplication to diesel injector [J]. Transactions of the Japan Fluid Power System Society, 2004,

35(1): 1-6.

- [11] Yun S. Electro-magnetic proportional solenoid[J]. Transactions of the Japan Fluid Power System Society, 2004, 35(5): 342-347.
- [12] Urai T, Tanaka H. Development of a giant magnetostrictive tandem actuator and the application to a servovalve[J]. Nihon Yukuatsu Gakkai Ronbunshu, 2001, 32(3): 53-57.
- [13] 王淑红,肖旭亮,熊光煜.直流恒力电磁铁特性[J]. 机械工程学报,2008,44(2):244-247.
 Wang Shuhong, Xiao Xuliang, Xiong Guangyu. Direct current electromagnets with constant traction characteristic[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2008,44(2):244-247(in chinese).
- [14] 付文智,李明哲,崔相吉. 淮恒力电磁铁的吸力特性研究[J]. 机 械工程学报,2003,39(7):117-122.
 Fu Wenzhi, Li Mingzhe, Cui Xiangji. Study on the traction

characteristic of electromagnetics of qusi-constant traction[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering , 2003 , 39(7) : 117-122(in Chinese).

[15] Kondo H, Hibi A. A study of a multi-step pole type electro-magnetic proportional actuator[J]. Transactions of the Japan Fluid Power System Society, 2008, 39(1): 45-49.

	3
	26
	(C)
1	1
	许小庆

收稿日期: 2009-04-28。 作者简介:

许小庆(1964一),男,博士研究生,主要研究 方向为电液伺服系统及元件控制理论与方法, xxq6010962@163.com;

权龙(1959—),男,博士,教授,博士生导师, 太原理工大学机械电子工程研究所所长,主要研究 方向为机械电子工程;

李斌(1959—),男,副教授,太原理工大学机 械工程学院教师,主要研究方向为机械电子工程。

(责任编辑 王剑乔)