

带长管道的阀控马达无磁转台控制策略研究

代勇 王旭永 璩金超 陶建峰 刘鹏

上海交通大学,上海,200240

摘要:针对带长管道的阀控马达系统用常规 PID 策略控制效果不理想的缺点,提出了一种新的 PID 控制策略对系统进行控制。以考虑管道效应的系统数学模型为基础,引入对凸轮转子叶片马达所受扰动力矩的分析,并结合时滞系统的特点,导出了 PID 控制策略。实验和仿真结果基本一致,表明该控制策略能显著提高系统的速率精度并有效地减少抖动,达到很好的控制效果。

关键词:无磁转台;长管道;控制策略;速率精度

中图分类号: TP273

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2012.02.020

Study on Control Strategy for Non-magnetic Turntable of Hydraulic Servo Motor with Long Pipeline

Dai Yong Wang Xuyong Qu Jinchao Tao Jianfeng Liu Peng

Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240

Abstract: Because the traditional PID control strategy did not perform well in a valve-controlled motor system with long pipeline, a new PID control strategy was proposed herein. Based on the pipeline-included system's mathematical model, the PID control strategy was derived, where the force analysis of cam motor and the time delay properties were taken into consideration. The simulation results are basically in accordance with the experimental data, which indicates that this control strategy can improve the speed precision of the turntable largely and reduce the jitter effectively.

Key words: non-magnetic turntable; long pipe; control strategy; speed precision

0 引言

高精度磁导航器件是现代军事、航空航天、石油探测等诸多领域必不可少的关键部件。在磁导航器件的控制系统中,伺服阀会产生无法忽略的电磁干扰,必须远离无磁马达,在伺服阀和马达之间以长管道连接。这一反传统的设计将会对系统的运动平稳性、动态特性等诸多性能带来影响^[1],传统的建模和控制规律将受到挑战。虽然对此类系统的建模与动态特性已有研究^[2],但相应的有效控制策略依然缺乏。

本文主要研究带长管道的阀控系统的控制策略。首先针对带长管道的阀控凸轮转子马达^[3]的实际运行状况,分析了系统扰动的来源,然后结合系统滞后特征在 PID 控制方法的基础上^[4-5]导出应用于此类系统的一种 PID 控制策略。理论推导、仿真分析和实验结果均表明:PID 的控制策略对提高带长管道的阀控马达无磁转台系统的相关性能具有很好的效果。

1 系统传递函数与扰动分析

带长管道的阀控凸轮转子叶片马达系统原理如图 1 所示,电液伺服阀与马达之间存在连接管道。

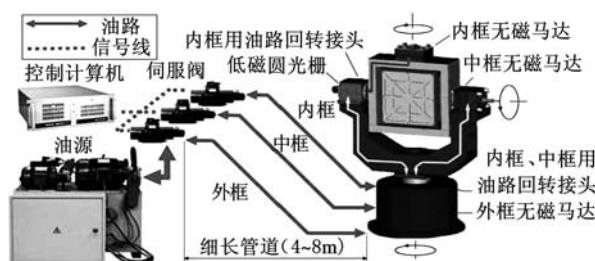


图 1 带长管道工作腔的阀控马达
三轴无磁转台原理示意图

考虑阀流量方程、管道特性和马达—负载动态特性,可以得到考虑管道特性的电液位置伺服系统的开环传递函数模型^[6]:

$$\frac{\theta(s)}{X(s)} = \frac{K_q/D_m}{s(s^2/\omega_h^2 + 2\xi_h s/\omega_h + 1)G_p(s)} \quad (1)$$

$$G_p(s) = (\cosh \Gamma + 2Z_c \sinh \Gamma) + (\sinh \frac{\Gamma}{2Z_c} + 2K_c \cosh \Gamma) \frac{J_t s + B_m}{D_m^2 (s^2/\omega_h^2 + 2\xi_h s/\omega_h + 1)} \quad (2)$$

$$\omega_h = 2D_m \sqrt{\beta_c/(J_t V_t)} \quad (3)$$

$$\xi_h = \frac{C_{tm}}{D_m} \sqrt{\frac{J_t \beta_c}{V_t}} + \frac{B_m}{4D_m} \sqrt{\frac{V_t}{J_t \beta_c}} \quad (4)$$

式中, Γ 为传递算子; K_q 为电液伺服阀的阀口流量增益, m^3/s ; D_m 液压马达的理论排量, m^3/r ; ω_h 为无阻尼液压固有频率, rad/s ; ξ_h 为量纲—液压阻尼比; Z_c 为管路的特性阻抗; K_c 为电液伺服阀的阀口流量—压力系数, $\text{m}^2/(\text{s} \cdot \text{Pa})$; J_t 为马达及负载的总转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; B_m 为马达及负载的黏性阻尼系数, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}$; β_c 为系统有效体积模量, Pa ; V_t 为液压马达两腔的总容积, m^3 。

从式(1)可以看出, $G_p(s)$ 含有双曲函数等复

杂环节,用经典控制理论分析会遇到很大困难。另外,虽然本系统采用的凸轮转子叶片马达运行相对平稳,但马达转动时,叶片与凸轮转子之间的相互作用力(正压力与摩擦力)仍会引起扰动力矩,这最终会造成转速波动并影响转台的性能。扰动力矩主要由两部分组成。

(1) 叶片对马达的干扰力矩。凸轮转子叶片马达主轴上安装两个互相成 90° 的凸轮转子,凸轮与主轴由花键连接。凸轮转子长径和定子内孔之间为滑动配合。定子上有两个叶片槽,槽内装有能径向滑动的叶片,叶片在根部弹簧片的作用下紧压在凸轮转子表面,保证初始封闭。转子外表面曲线由2段大圆弧、2段小圆弧和4段过渡曲线组成。转子转动时,叶片就作径向往复运动。对于这种结构的马达来说,叶片对马达的总干扰力矩为^[7]

$$M = 2 \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 M_{ij} \quad (5)$$

其中, $i=1$ 代表前凸轮, $i=2$ 代表后凸轮, $j=1$ 代表叶片对凸轮转子的摩擦力产生的摩擦干扰力矩, $j=2$ 代表叶片对凸轮转子的正压力产生的波动力矩。叶片对凸轮转子的摩擦力、叶片对凸轮转子的正压力可由马达低速运行时的力平衡方程求得。

(2) 凸轮转子叶片马达特殊的密封形式导致摩擦力矩对马达控制特性有很大影响。考虑密封结构、材料、流体类型、流体压力、温度、摩擦速度、表面粗糙度等因素,可以将密封的摩擦力矩表示为^[8]

$$T = K_1 K_2 K_3 f p_e v a b r \quad (6)$$

式中, K_1 为由密封结构和材料确定的经验系数; K_2 为与表面粗糙度相关的系数; K_3 为与流体类型和性质相关的系数; f 为摩擦因数; p_e 为有效接触压力; v 为摩擦速度; a 为密封接触面宽度; b 为密封接触面长度; r 为密封接触面到回旋轴的作用半径。

2 PIDD 算法分析

图1中,电液伺服阀与马达之间存在连接管道。赵彤等^[9-10]对液压管道的分布参数模型作了精确线性近似。岑豫皖^[6]在考虑管道效应的情况下,推导了电液位置伺服系统的传递函数,并根据线性近似,以仿真和实验的方法讨论了管道参数对系统性能的影响。严格地说,带长管道的阀控马达系统是一个非线性系统,包含管道、伺服阀等非线性环节。长管道的存在会导致伺服阀变化引起的压力和流量的改变不能及时作用于液压马达,这种滞后环节的存在对系统控制精度和稳定

性都有较大影响。因此,本节在考虑主要非线性因素对系统影响的情况下,结合马达所受力矩扰动的情况,探求合适的控制策略。

假设控制器在 t_A 时刻控制伺服阀开口变化,这一开口变化引起的阀口压力和流量的变化在经历一个延时 Δt 后,才能在 t_B 时刻达到马达,调节马达的动作。假设马达开始以恒定速率转动, t_A 时刻马达遭遇扰动力矩,引起转速的变化,位置误差反馈回输入端后,控制器根据位置误差控制伺服阀开口变化。阀开口变化导致的压力和流量的变化经过大约 $t_B - t_A$ 的延时后作用于 t_B 时刻的马达。根据PID原理, t_B 时刻系统需要的反馈压力信号为

$$u(t_B) = K_P e(t_B) + K_I \int_0^{t_B} e(t) dt + K_D \dot{e}(t_B) \quad (7)$$

将 t_B 时刻的误差 $e(t_B)$ 用 t_A 时刻的误差 $e(t_A)$ 表示,并考虑到 $t_B - t_A$ 较小,可认为这段时间内干扰力矩近似恒定,根据动力学关系,恒定干扰转矩对应于角位移的平方,因此位置误差的三阶导数为0,即有

$$e(t_B) = e(t_A + t_B - t_A) = e(t_A) + (t_B - t_A) \dot{e}(t_A) + (t_B - t_A)^2 \ddot{e}(t_A) / 2 \quad (8)$$

将式(8)代入式(7),并整理得

$$u(t_B) = K'_P e(t_A) + K'_I \int_0^{t_A} e(t) dt + K'_D \dot{e}(t_A) + K'_{DD} \ddot{e}(t_A) \quad (9)$$

$$K'_P = K_P + K_I (t_B - t_A) \quad (10)$$

$$K'_I = K_I \quad (11)$$

$$K'_D = K_P (t_B - t_A) + K_I (t_B - t_A)^2 / 2 + K_D \quad (12)$$

$$K'_{DD} = K_P (t_B - t_A)^2 / 2 + K_I (t_B - t_A)^3 / 6 + K_D (t_B - t_A) \quad (13)$$

由式(9)可以清楚看出,为了消除管道造成的响应滞后,控制器在 t_A 时刻给出控制信号的时候,控制信号应该由比例、积分、一阶微分、二阶微分4个环节组成。

3 算法稳定性分析

对于本文所研究的带长管道工作腔的阀控马达系统,滞后(伺服阀响应引入的滞后、管道压力波引起的滞后、轴系摩擦的滞后)环节的存在不但影响了系统的动态性能,也降低了系统的稳定性。

对于PID调节器,增大比例项和微分项的系数,有利于提高动态响应并抑制外部扰动^[11],但过大的系数将影响系统的稳定。这种固有矛盾造成PID参数整定的困难。在带长管道的阀控马达系统中,滞后环节的存在将严重影响系统的稳定性。如果采用PID调节器,就需要通过整定

PID 参数使系统既克服滞后环节的影响,具有一定的稳定裕度,又要满足一定动态指标和稳态精度的要求,这在提高系统动态性能指标的同时,降低了系统的稳定性。

本文提出的 PIDD 算法如图 2 所示。图 2 中, θ_d 为马达预期位置, θ_r 为马达的实际位置。引入的角度位置微分的微分项环节(图 2 中虚线框所示)将位置误差的二阶微分反馈回输入端,通过整定这一环节的参数,能够克服滞后环节对稳定性的不利影响^[12]。这样也可以方便地通过调整比例、微分、积分项参数从而提高转台动态性能。因此,对于本文中的带长管道的阀控马达系统来说, PIDD 控制策略与传统的 PID 控制策略相比,在不影响系统稳态性能的前提下,前者在提高该特定系统的动态性能上提供了更多的可能手段。

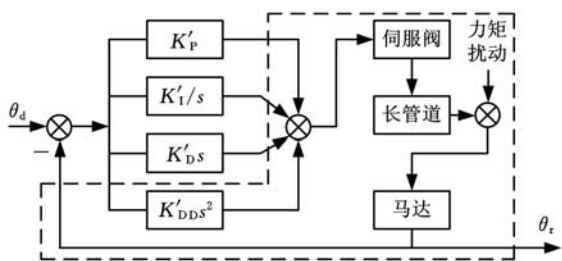


图 2 带长管道的阀控凸轮转子叶片马达 PIDD 控制框图

事实上,本文所提出的 PIDD 控制算法与常规加速度反馈相似,都是将加速度信号反馈回输入端。但加速度反馈是将加速度传感器采集位置的加速度信号反馈回输入端的,而本文直接对反馈回的位置误差在程序上进行二阶微分处理,因此不需要增加加速度传感器,这样可以节省成本并使系统简化。需要注意的是,用软件实现微分的微分项,可能会放大实际中可能出现的高频杂波干扰^[13],因此可以在 PIDD 环节之前增加滤波环节,以有效地减少干扰。这一措施已在三轴转台中得到实际应用。

4 仿真与实验

4.1 基于 AMESim 的系统仿真

本节采用 AMESim 对带长管道的阀控马达系统进行仿真分析,以验证文中所提出的 PIDD 算法的优越性,具体模型如图 3 所示。图 3 中, AMESim 阀控马达系统仿真模型分别表示了油源、油液特性、蓄能器、伺服阀、管道、马达、模拟负载、位置传感器和控制器。油源额定压力为 5MPa。在 AMESim 模型中可以设置管道长度,图 3 根据实际情况,设定伺服阀和马达之间的管道长度为 10m, AMESim 会根据设置的管道参数

进行管道自动建模。马达端连接模拟负载以及角速度传感器。虚线部分为系统控制信号,系统采用 PIDD 控制方案。

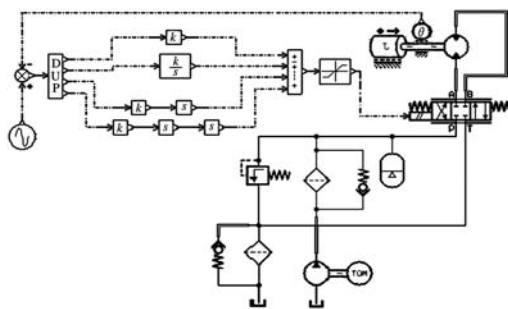
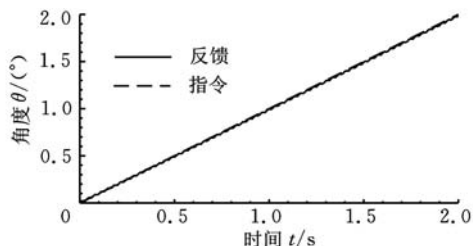
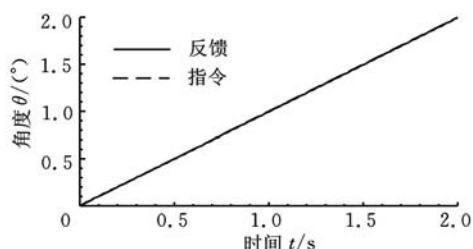


图 3 AMESim 阀控马达系统模型

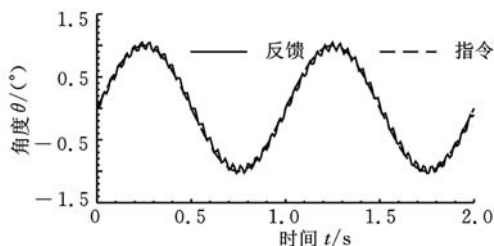
具体仿真曲线如图 4 所示。由图 4 可以看出,马达在低速运行(低频的正弦信号类似于低速)时,长管道的时滞效应很容易引起系统的低速抖动,从而影响转台的低速速率精度。在引入新型 PIDD 算法后,马达的低速性能得到了明显



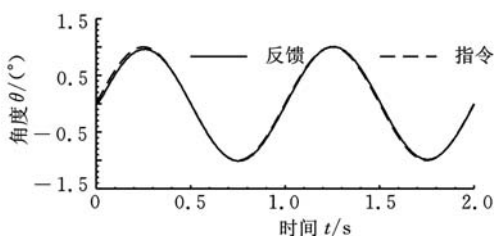
(a)PID 控制算法速率曲线



(b)PIDD 控制算法速率曲线



(c)PID 控制算法正弦信号



(d)PIDD 控制算法正弦信号

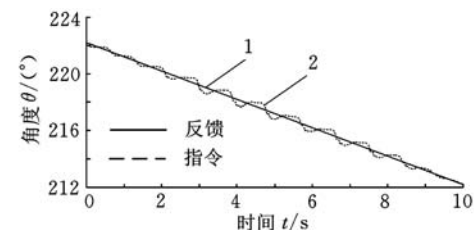
图 4 两种算法仿真曲线对比

的改善,在 $1^\circ/\text{s}$ 斜坡信号和 1Hz 的正弦信号下均表现出了优秀的低速性能。

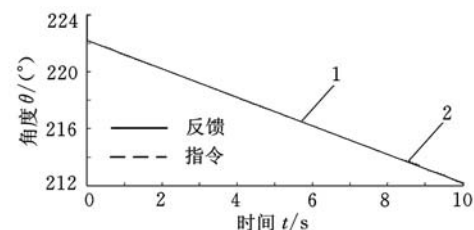
4.2 实验

无磁三轴液压转台为了保证无磁的性能指标,将伺服阀与马达采取了远离放置的措施。此方法给系统带来了长管道的影响,致使系统变为一个时滞系统,出现明显的低速爬行或抖动现象。

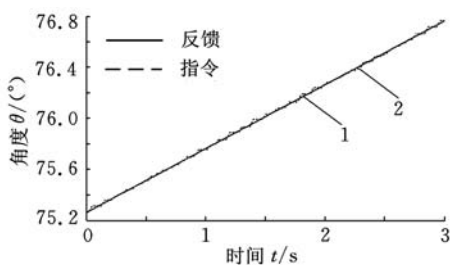
针对该特殊的系统布置与出现的问题,在试验中采用了PIDD控制策略,经调试后各最优参数如下: $K'_p=0.8, K'_i=0.2, K'_d=0.03, K'_{DD}=0.00032$,可以看实际系统中二阶微分的系数比一阶微分的系数要小两个数量级左右。根据第2节的理论分析, $K'_{DD}\approx(t_B-t_A)K'_d$,其中 t_B-t_A 由管道长度和压力波传递速度确定,为几十毫秒,因此理论分析所得到的二阶微分的系数比一阶微分的系数也要小大致两个数量级,与实际情况吻合。图5所示为PID与PIDD两种控制策略下马达的实际运行曲线。



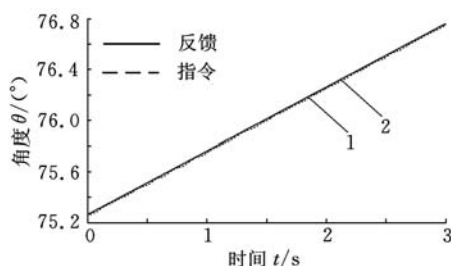
(a)PID控制算法的反向速率曲线



(b)PIDD控制算法的反向速率曲线



(c)PID控制算法的正向速率曲线



(d)PIDD控制算法的正向速率曲线

图5 两种算法实际曲线对比

由图5可以看出,未采用PIDD算法的马达低速曲线都存在一定幅度的抖动。这是由长管道的时滞作用和马达的干扰力矩共同引起的。应用PIDD算法可以有效地消除或减弱这种抖动。

5 结论

(1)对于本文所研究带长管道的阀控马达系统,管道效应会对系统稳定性、动态特性等性能造成影响,从而使该类系统的建模分析和控制规律与常规系统有较大差异。

(2)根据系统时滞特点,结合马达所受扰动情况,提出了一种新的PIDD控制策略。其中,二阶微分项的引入起到消除长管道引起的滞后的作用。

(3)分析、仿真和试验表明,PIDD策略能在一定程度上消除由扰动力矩和长管道带来的抖动等问题,提高系统的位置精度和速率精度等性能。该控制策略工程实施简单易行,只需要多整定二阶微分项参数,并根据需要加入滤波环节,具有实际应用价值。

参考文献:

- [1] Kong Xiaowu, Qiu Minxiu, Wei Jianhua, et al. A Study of the Influences of Pipe on Valve Control Hydraulic System[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Fluid Power Transmission and Control. Hangzhou, 2001: 23-27.
- [2] 阮晓芳. 带长管道阀控系统的动态特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [3] 刘鹏, 王旭永, 陶建峰, 等. 无磁仿真转台用凸轮转子马达叶片干扰力矩[J]. 上海交通大学学报, 2010, 44(12): 1773-1777.
- [4] 李书训. 转台伺服系统摩擦分析及补偿研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1999.
- [5] Dupont P E. Avoiding Stick-slip through PD Control[J]. IEEE Trans. on Automatic Control, 1994, 39(5): 1094-1097.
- [6] 岑豫皖. 液压管道对电液伺服系统稳定性影响的研究[J]. 机床与液压, 1998, 26(4): 58-60.
- [7] 扬飞鸿. 无磁凸轮转子液压马达及伺服驱动技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- [8] 刘令勋, 刘英贵. 动态密封设计技术[M]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
- [9] 赵彤, 彭光正, 许耀铭. 液压管路分布参数模型的精确近似(第一报)[J]. 机床与液压, 1989, 17(1): 43-50.
- [10] 彭光正, 赵彤, 许耀铭. 液压管路分布参数模型的精确近似(第二报)[J]. 机床与液压, 1989, 17(2):

基于 sEMG 的按摩椅绩效人机评价模型实验研究

杨钟亮 孙守迁 陈育苗

浙江大学,杭州,310027

摘要:针对机械式按摩椅缓解肌肉疲劳的绩效,提出了基于表面肌电(sEMG)信号的人机评价模型。实验要求两名被试者在执行静力性标准俯卧撑(SPU)动作之间,分别采用静坐与按摩两种方式恢复肌肉疲劳,并在 SPU 过程中采集竖脊肌的 sEMG 信号。根据模型的评价指标对实验数据进行了比较与分析,结果表明,SPU 后采用拍打按摩恢复对竖脊肌疲劳缓解的效果好于静坐恢复的效果,从而验证了模型在按摩椅人机评价上的可行性。

关键词:按摩椅;表面肌电;工效学;评价模型;肌肉疲劳

中图分类号: TB18; TP391.9

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2012.02.021

A Pilot Study on Ergonomics Evaluation Model of Massage Chair Performance Based on sEMG

Yang Zhongliang Sun Shouqian Chen Yumiao

Zhejiang University, Hangzhou, 310027

Abstract: The purpose of this paper was to evaluate the effects on the relaxation of muscular fatigue using an automated massage chair. Two healthy participants performed the static standard push-up (SPU) exercise respectively before and after recovering from sitting still without massage and beat massage on the massage chair. The sEMG signals were recorded during SPU exercises. An ergonomics evaluation model was developed based on sEMG, in which experimental data were analyzed by indexes. Results show the effects on the relaxation of erector spine fatigue from beat massage are better than that from sitting still. In this respect, the feasibility of the model on massage chair ergonomics evaluation was verified.

Key words: massage chair; surface electromyography (sEMG); ergonomics; evaluation model; muscular fatigue

0 引言

按摩治疗作为非传统医学的一部分正流行起来,被证实能有效地减轻疼痛、缓解压力、提高睡眠质量、增强免疫力^[1]。手工按摩缓解疲劳、紧张等方面的研究尚处于探索阶段。Deborah 等^[2]针对声谱仪操作员工作时的肌肉不适,通过比较椅上按摩对缓解这些肌肉不适的效果,验证了按摩方案的可行性;Black 等^[3]研究了椅上按摩对病人

摆脱心理治疗药物时焦虑的疗效;Buck 等^[4]从人机评价的角度,研究了按摩师进行椅上与桌上按摩时不同的姿势所引起的肌肉健康问题。

经验丰富的按摩专家的数量毕竟有限,为满足大众急剧增长的需求,按摩椅等多种自动化按摩设备被研制出来并迅速市场化。按摩椅避免了受众因手工按摩时因皮肤接触引起的心理上的不适^[5],具有操作便捷、按摩手法多样、用户可控制按摩位置与时间等优点。目前,国内外针对按摩椅在缓解肌肉疲劳绩效评价等方面的研究尚处于起步阶段。尹小琴等^[6]分析了推拿机器人末端执行器 4 种按摩手法(振法、按法、揉法、滚法)所需的施力方向和运动自由度。Kolich 等^[7]比较了汽

收稿日期:2011-02-18

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2009BAG12A01-E08-2,2009BAG12A01-E09-2);国家自然科学基金资助项目(61070075,61004116)

31-40.

[11] 徐国柱,刘槌,张元生.转台速率波动原因分析及一种自适应抑制方法探讨[J].航空精密制造技术,2004,40(1):31-35.

[12] 徐国柱,刘槌,孟凡军.利用加速度反馈改善转台低速性能[J].中国惯性技术学报,2008,16(4):502-504.

[13] Lee K C, Jeong Y H, Koo D H, et al. Development of a Radial Active Magnetic Bearing for High Speed Turbo-machinery Motors[C]//2006 SICE-ICASE In-

ternational Joint Conference, Busan, 2006: 1543-1548.

(编辑 张洋)

作者简介:代勇,男,1987年生。上海交通大学机械与动力工程学院硕士研究生。主要研究方向为液压伺服控制系统。王旭永,男,1960年生。上海交通大学机械与动力工程学院副教授、博士。陈金超,男,1986年生。上海交通大学机械与动力工程学院硕士研究生。陶建峰,男,1975年生。上海交通大学机械与动力工程学院讲师、博士。刘鹏,男,1987年生。上海交通大学机械与动力工程学院硕士研究生。