基于变系数 PID 的无刷直流电动机双闭环系统

郭 宏 吴海洋 巫佩军

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191) (清华大学 自动化系, 北京 100084)

摘 要: 针对应用于直接驱动阀的电气双余度无刷直流力矩电动机控制系统,提出在位置环采用变系数 PID(Proportion Integration Differentiation)控制算法,根据位置偏差改变调节参数,逐步加强比例和积分作用以快速消除系统稳态误差而又不引起系统抖动;为了保证系统的稳定性,对位置偏差的积分项进行了限制. 实验结果表明:位置环采用该变系数 PID 控制算法的双闭环系统能够有效地保证系统的稳定性能和响应精度. 同幅值的位置阶跃响应,位置环/电流环双闭环系统的上升时间比位置环/速度环双闭环系统的上升时间减小了 32%;位置环/速度环双闭环系统具有优良的负载适应性能,鲁棒性强.

关 键 词: 直接驱动阀; 双余度无刷直流电动机; 双闭环控制系统; 变系数 PID; 鲁棒性

中图分类号: TM 301.2

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)01-0001-05

Brushless DC motor double closed-loop control system based on variable coefficient PID

Guo Hong Wu Haiyang

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Wu Peijun

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A variable coefficient proportion integration differentiation(PID) algorithm used in the position loop was proposed and analyzed in the control system of electrical dual-redundancy brushless DC torque motor used in the direct drive valve. The steady-state error of the system was eliminated quickly by enhancing the influence of proportion regulator and integrator gradually according to the position deviation. The integration of position error was limited to ensure the system's stability. Experimental results show that the variable coefficient PID algorithm used in the position loop can ensure the system's stability and the accuracy of the position response, whatever the inner loop uses current loop or velocity loop. For the same step response, the step rise time of the double closed loop structure of the position and current reduced more than 32% compared with that of the double closed loop structure of the position and velocity. However, the double closed-loop structure of position/velocity loop performs strong loading appliance and strong robustness.

Key words: direct drive valve(DDV); dual-redundancy brushless dc motor; double closed-loop control system; variable coefficient proportion integration differentiation(PID); robustness

直接驱动阀(DDV, Direct Drive Valve)伺服系统具有结构简单、抗污染能力强、可靠性高等优点,采用力矩电机直接驱动阀芯的结构易于实现系统的数字化控制和余度管理,在航空航天领域得到了广泛的应用[1-3]. 无刷直流力矩电动机具有功率密度大、可靠性高、响应速度快以及便于实

收稿日期: 2010-09-03; **网络出版时间**: 2012-01-06 15:10; **DOI**: CNKI:11-2625/V.20120106.1510.008

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120106.1510.008.html

基金项目: 航空科学基金资助项目(20007ZC51039)

作者简介: 郭 宏(1967-),男,教授,黑龙江哈尔滨人,guohong@buaa.edu.cn.

现余度形式等优点[4-5]. DDV 系统采用双余度无刷直流力矩电动机直接驱动主控阀的形式,具有结构简单、响应快、可靠性高等优点. 然而,液动力负载的变化直接作用到电机轴端,对电机运行的稳定性有极大影响. 因此,需要对适用于该系统的控制系统结构和控制算法进行研究.

文献[6]针对一种串联式三余度结构的无刷直流力矩电动机控制系统,提出了一种改进的防饱和积分的变结构 PID(Proportion Integration Differentiation)控制策略. 文献[7]针对机械/电气混合四余度无刷直流力矩电动机系统,在位置环/电流环的双闭环结构中引入了基于转速调节的限流环节,位置环采用了一种适应小偏差输入的变结构 PID 控制算法. 但是,以上两篇文献都没有对速度环进行详细的研究.

本文针对一种 DDV 用电气双余度无刷直流力矩电动机控制系统,提出了位置环采用一种变系数 PID 控制算法.

1 电机与液动力负载模型

1.1 双余度无刷直流力矩电动机

本文中的双余度无刷直流力矩电动机采用定子铁芯隔槽嵌放两套电枢绕组的形式,构成电气双余度,并采用主备工作方式.

忽略电机磁路饱和,且不计涡流损耗和磁滞损耗,气隙磁场为方波,三相绕组采用星型连接方式,可得到电机电压平衡式为

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中,R 为绕组相电阻;L 为绕组相电感;M 为同余度三相绕组间的互感;U_a,U_b,U_c 为绕组相电压;i_a,i_b,i_c 为绕组相电流;e_a,e_b,e_c 为绕组的空载相反电势.

双余度电机采用主备方式工作,所以工作时电机的电磁转矩即为一个余度的电磁转矩,电磁转矩方程为

$$T_e = K_t i_1 \tag{2}$$

式中,T_e 为电磁转矩;K_t 为电磁转矩系数;i_1 为绕组线电流. 电机的机械运动方程为

$$T_e - T_l - T_f = J\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} \tag{3}$$

式中,T_l 为液动力负载转矩;T_f 为整个系统的摩擦转矩;J 为系统运动部分的转动惯量,包括电机转子转动惯量和平板阀阀芯折算到电机轴端的转动惯量;ω 为电机的角速度.

1.2 液动力负载模型

电机的负载主要是液动力矩,其包括稳态液动力矩和瞬态液动力矩. 本文针对的 DDV 伺服系统的工作液压环境为 27 MPa,根据所用平板阀的结构参数并结合实际情况,得出稳态液动力矩与平板阀转角之间的关系如式(4)和式(5)所示:

$$T_l = \begin{cases} 0.075f & \theta \geqslant 0 \\ 0.0567f & \theta < 0 \end{cases} \tag{4}$$

$$f = \begin{cases} 0 & |\theta| \leqslant 0.48^\circ \\ 0.5\left[1.25 - \left(\dfrac{1.35}{\sin|\theta|} - 12\right)\tan|\theta|\right]^2 \cot|\theta| & 0.48^\circ \leqslant |\theta| \leqslant 0.72^\circ \\ 2\left[1.25 + 8\tan|\theta| - \dfrac{1.35}{\cos|\theta|}\right] \cdot \left[12\tan|\theta| + 1.25 + \dfrac{1.35}{\cos|\theta|}\right] & 0.72^\circ < |\theta| \leqslant 12.62^\circ \\ 10 - 0.5\left[1.25 - 8\tan|\theta| + \dfrac{1.35}{\cos|\theta|}\right]^2 \cot|\theta| & 12.62^\circ < |\theta| \leqslant 15^\circ \end{cases} \tag{5}$$

式中,θ 为平板阀转角,范围为 $-15^\circ \sim +15^\circ$;f 为阀芯承受的液动力.

瞬态液动力是指阀开口发生变化时,由于流经阀口的液流速度改变,导致阀心油槽中及阀腔环形通道的液流动量发生变化而产生的液动力,其大小与液流速度成正比[8]. 由于瞬态液动力矩受到液压油温、液压源压力波动以及液压阀的加工和装配误差的影响,变化复杂,很难确定其具体的表达式. 所以,瞬态液动力矩的存在对系统性能有较大影响.

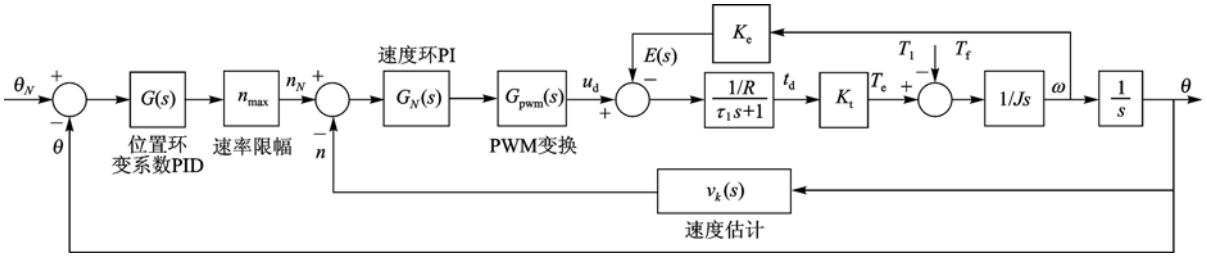
2 系统控制策略

2.1 系统控制结构

传统的"三环"结构,即由内到外为电流环、速度环和位置环,满足不了 DDV 伺服系统对快速性的要求. 所以本文采用双闭环控制结构,对位置环/电流环和位置环/速度环 2 种双闭环控制结构进行了研究,以便在实际应用中根据不同的要求选择合适的控制系统结构. 电机输出转矩与电机电流成正比,控制电流相当于直接控制电机的输

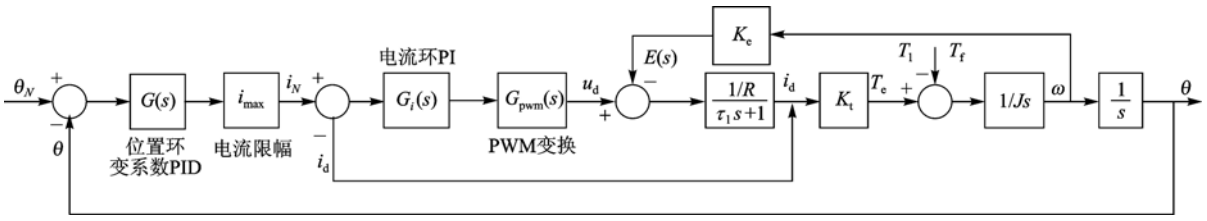
出力矩,所以采用电流环可以提高系统的快速性能. 对于由位置环和速度环组成的双闭环控制系统,速度环为内环,可以增大系统阻尼,抑制振荡,进而提高系统的稳定性[9].

位置环采用变系数 PID 控制算法时,位置环/速度环双闭环系统控制结构框图如图 1 所示,位置环/电流环双闭环系统控制结构框图如图 2 所示.



θ_N—位置给定;θ—位置反馈;n_N—速度给定;n—速度反馈;τ_1—电磁时间常数,$\tau_1=(L-M)/R$;
K_e—反电势常数;u_d 端电压;$E(s)$—反电势;i_d 电流反馈.

图 1　基于位置环/速度环的系统控制结构框图



i_N—电流给定.

图 2　基于位置环/电流环的系统控制结构框图

位置环/电流环双闭环系统的闭环传递函数可以简化为

$$W_1(s)=\left[\alpha k_p k_i k_s K_t\left(s+\frac{\beta k_{ip}}{\alpha k_p}\right)\right]\Big/ [JR\tau_1 s^4+J(R+k_i k_s)s^3+k_e K_t s^2+\alpha k_p k_i k_s K_t s+\beta k_{ip} k_i k_s K_t] \tag{6}$$

式中,$0<\alpha\leqslant 1$ 为位置环比例系数的修正系数;$0<\beta\leqslant 1$ 为位置环积分系数的修正系数;k_i为电流环比例系数;k_p为位置环比例系数;k_{ip}为位置环的积分系数;k_s为脉冲宽度调制(PWM,Pulse Width Modulation)变换系数.

在位置环/速度环双闭环系统中,速度环采用比例控制,速度反馈采用单位反馈,经过简化其闭环传递函数为

$$W_2(s)=\left[\alpha k_p k_n k_s K_t\left(s+\frac{\beta k_{ip}}{\alpha k_p}\right)\right]\Big/ [RJ\tau_1 s^4+RJs^3+(K_e+k_n k_s)K_t s^2+\alpha k_p k_n k_s K_t s+\beta k_{ip} k_n k_s K_t] \tag{7}$$

式中,k_n为转速环的比例系数. 式(6)和式(7)中,$J=1.7\times10^{-5}$ kg·m^2;$K_e=0.186$ V/(rad·s^{-1});$K_t=0.186$ (N·m)/A. 将这些参数的值代入 2 种闭环系统的特征方程,并用赫尔维茨判据判别系统的稳定性,结果表明选择合适的调节参数,2 种双闭环控制系统都能够稳定.

2.2　位置环控制算法

由于 DDV 系统存在苛刻的饱和非线性环节,并且受到直接耦合到电机轴端的未知的液动力负载的影响,使得常规 PID 控制方法难以满足系统在整个角度范围内对控制精度和稳定性能的要求[6]. 针对上述问题,本文提出了一种变系数 PID 控制算法,如式(8)所示.

$$G(s)=\begin{cases}\left[\alpha_1 k_p+\beta_1\dfrac{k_{ip}}{s}\right]E(s) & |E(s)|\geqslant E_0\\ \left[\alpha_2 k_p+\dfrac{\beta_2 k_{ip}}{s}\right]E(s) & E_1\leqslant|E(s)|<E_0\\ \left[\alpha_3 k_p+\dfrac{\beta_3 k_{ip}}{s}\right]E(s) & E_2\leqslant|E(s)|<E_1\\ \left[k_p+\dfrac{k_{ip}}{s}\right]E(s) & |E(s)|<E_2\end{cases} \tag{8}$$

式中,$0<\alpha_1<\alpha_2<\alpha_3<1$;$0<\beta_1<\beta_2<\beta_3<1$;$E_0$,$E_1$,$E_2$为变系数临界值,其大小要根据系统的实际情况来选择,其中,E_2和 E_1都比较小,以适应小角度响应;$E(s)$是偏差输入的拉普拉斯变换. 此变系数 PID 的原理是在大偏差阶段采用较小的 k_p和 k_{ip}以防止系统抖动,随着 $E(s)$的减小逐步加大 k_p和 k_{ip}以快速消除稳态误差且不引起系统抖动.

本文采用双闭环控制系统,将变系数PID算法用于位置环的控制中,为加强系统的稳定性,对位置环的位置偏差的积分项输出进行了限幅,具体公式为

$$u_i = \begin{cases} u_{max} & u_i \geqslant u_{max} \\ u_i & |u_i| < u_{max} \\ -u_{max} & u_i \leqslant -u_{max} \end{cases} \quad (9)$$

式中,u_i为积分项的输出;u_{max}为积分项输出上限.u_{max}的选取要合适,其太大则失去作用,太小会使积分的作用受限,不利于消除稳态误差.

2.3 速度环的设计

在2种结构的双闭环控制系统中,电机的位置信号由角位移传感器获取,电机的电流信号由霍尔传感器获取. 系统中并未安装速度传感器,所以电机的转速信号不能直接获取. 但由于系统中安装了反应电机位置的角位移传感器,所以可以由位置信号来估算电机的转速,以实现位置环/速度环双闭环控制系统的设计与研究. 工程上,速度信号常常通过对离散的位置信号进行近似微分来估算. 现在,很多种类的离散时间微分滤波器已经被用于速度估计的设计中,但是它们固有的时间延迟会降低系统的稳定性能[10]. 所以这里采用位置信号微分的二阶泰勒级数展开式来估计电机的转速,用这种方法可以在减小估计误差的同时尽量减少时间延迟[10-11]. 具体的公式为

$$v_k = K_f[\Delta x_k + 1/2(\Delta x_k - \Delta x_{k-1})] \quad (10)$$

式中,v_k为电机的转速;K_f为校正系数;$\Delta x_k = x_k - x_{k-1}$;$\Delta x_{k-1} = x_{k-1} - x_{k-2}$;$x_i(i = k,\ k-1, k-2)$是第$i$次采样周期测得的位值信号.

3 系统硬件结构及实验结果

3.1 系统硬件结构

双余度无刷直流电动机驱动控制器的主控单元采用DSP(Digital Signal Processing)+FPGA(Field-Programmable Gate Array)的硬件结构,充分利用了DSP的快速运算能力和FPGA的强大的逻辑处理能力[12]. 此控制器功能强大,除完成基本功能外还具有故障检测、实时监控以及故障保护等功能. DSP主要完成双闭环控制算法的计算,FPGA主要完成对外设的控制、电机换相、PWM生成以及故障保护等工作.

3.2 实验结果

用于DDV伺服系统实验的电气双余度无刷直流力矩电动机的参数为:额定电压为28 V;额定电流为2 A;$R = 2.1\ \Omega$;$L = 2.6$ mH;堵转转矩为1.1 N·m;电机的转动惯量为1.5×10^{-5} kg·m^2. 平板阀折算到电机轴上的转动惯量为2.119×10^{-6} kg·m^2. DDV伺服系统的工作液压油源压力为27 MPa.

图3是采用位置环/电流环双闭环控制系统时,双余度直接驱动阀伺服系统从-7°~+7°的位置阶跃响应曲线,调节时间为18 ms,系统超调量为0.6%. 图4是采用位置环/速度环双闭环控制系统时,双余度直接驱动阀伺服系统从-7°~+7°的位置阶跃响应曲线,调节时间均为28 ms,系统没有超调量. 实验结果表明:基于变系数PID的双闭环控制系统具有良好的阶跃响应性能;采用位置环/电流环双闭环系统时,系统的快速性更好.

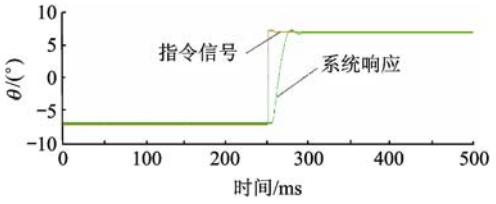


图3 位置环/电流环系统阶跃响应曲线

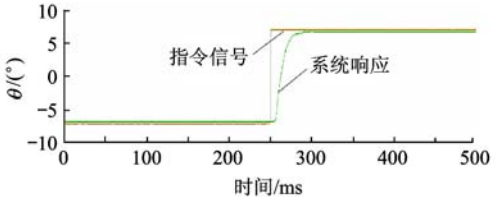


图4 位置环/速度环系统阶跃响应曲线

图5和图6分别为采用2种双闭环控制系统时,系统的低频(0.1 Hz)正弦波响应曲线. 电机转速较小时,瞬态液动力对系统的影响较小,2种双闭环系统在低频情况下正弦波跟踪性能良好,具有优良的动态跟踪品质.

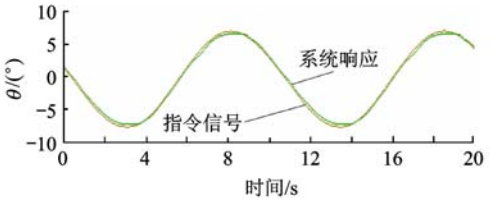


图5 位置环/电流环0.1 Hz正弦波响应

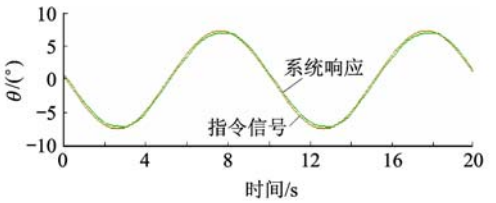


图6 位置环/速度环0.1 Hz正弦波响应

从2种双闭环控制系统的阶跃响应曲线和正

弦波响应曲线可以得出,位置环采用变系数 PID 控制算法的双闭环控制系统具有优良的动态跟踪品质和稳态精度.

图 7 和图 8 是 5 Hz 频率下系统的正弦波响应曲线. 由于电机运动速度加快,瞬态液动力对系统的影响加大. 采用位置环/电流环双闭环控制结构时,系统的适应性能下降,抵抗负载扰动能力差,位置响应信号出现波动情况;而采用位置环/速度环双闭环控制结构时,控制系统的适应性能好,抗负载扰动能力较强,具有很强的鲁棒性.

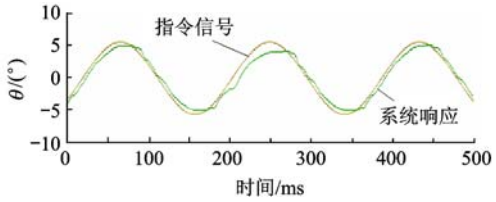


图 7　位置环/电流环 5 Hz 正弦波响应曲线

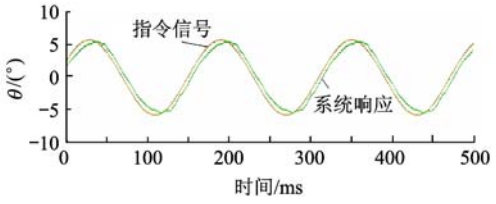


图 8　位置环/速度环 5 Hz 正弦波响应曲线

4　结　论

本文针对应用于直接驱动阀的双余度无刷直流力矩电动机位置伺服控制系统,提出在位置环采用一种变系数 PID 控制策略. 通过理论分析与实验研究得到以下结论:①位置环采用变系数 PID 算法的双闭环系统,能有效克服 DDV 系统液动力的影响,具有优良的动态品质和稳态精度. ②由位置环和电流环构成的双闭环控制系统具有优良的快速性能;但是,随着频率的增大,瞬态液动力对系统的影响加大,系统的正弦波响应会出现波动现象,抗负载扰动能力差,鲁棒性能较差. ③由位置环和速度环构成的双闭环控制系统的负载适应性好,在整个频响范围内,正弦波响应曲线都很平滑,抵抗负载扰动能力较强,具有很强的鲁棒性.

参考文献(References)

[1] 郭宏,蔚永强,邢伟. 三余度直接驱动阀驱动控制系统[J]. 北京航空航天大学学报,2007,33(11):1286 – 1290
Guo Hong, Yu Yongqiang, Xing Wei. Triplex-redundancycontrol system for direct-drive-valve[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(11): 1286 – 1290(in Chinese)

[2] Lin Jea-Sen, Chen Chern-Lin, Lai Chen-Yan. A high-bandwidth PWM servo amplifier for the direct-drive-valve actuation system [C]//Amplified Power Electronics Conference and Exposition. San Diego, CA: IEEE, 1993: 28 – 332

[3] 王大彧,郭宏,于凯平,等. 基于 FPGA 的直接驱动阀用音圈电机功率驱动器[J]. 北京航空航天大学报,2010,36(8):953 – 956
Wang Dayu, Guo Hong, Yu Kaiping, et al. FPGA-based power drive device for voice coil motor used in direct drive valve[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(8): 953 – 956(in Chinese)

[4] 王自强,张龙,黄燕丹. 飞行控制用无刷直流电动机的优化设计[J]. 北京航空航天大学学报,2004,30(7):587 – 592
Wang Ziqiang, Zhang Long, Huang Yandan. Optimization design of brushless DC motor for flight control[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronatics, 2004, 30(7): 587 – 592(in Chinese)

[5] Fang Hongwei, Xia Changliang, Chen Zhengwei, et al. Position servo control of brushless DC motor based on the second discrete filter[C]//Robotics and Biomimetics. Sanya: IEEE, 2007: 1838 – 1842

[6] 郭宏,蔚永强. 基于变结构 PID 控制的直接驱动阀伺服控制系统[J]. 电工技术学报,2007,22(11):58 – 62
Guo Hong, Yu Yongqiang. DDV Servocontrol system basedon variable-structure PID control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(11): 58 – 62(in Chinese)

[7] 王巍,郭宏,邢伟,等. 电气/机械混合四余度无刷直流力矩电动机控制系统[J]. 中国电机工程学报,2010,30(6):100 – 104
Wang Wei, Guo Hong, Xing Wei, et al. A control system for electrical/mechanical hybrid four-redundancy brushless DC torque motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(6): 100 – 104(in Chinese)

[8] 付永领,裴忠才,宋国彪,等. 新型直接驱动伺服阀的瞬态液动力分析[J]. 机床与液压,1999(1):23 – 24
Fu Yongling, Pei Zhongcai, Song Guobiao, et al. Analysis of transient flow force in a new direct drive servo valve[J]. Machine Tool & Hydraulics, 1999(1): 23 – 24(in Chinese)

[9] 马瑞卿,刘卫国,罗兵. 双余度有限转角力矩电动机控制技术[J]. 微电机,2000,33(3):24 – 26
Ma Ruiqing, Liu Weiguo, Luo Bing. Controlling of dual-redundancy limited angle torque motor[J]. Micromotors Servo Technique, 2000, 33(3): 24 – 26(in Chinese)

[10] Jhih-Da Hsu, Ching-Lung Tsai, Ying-Yu Tzou. Design and implementation of a voice-coil motor servo control IC for auto-focus mobile camera applications[C]//Power Electronics Specialists Conference. Orlando, FL: IEEE, 2007: 1357 – 1362

[11] Shao Xiaoyin, Sun Dong. Development of an FPGA-based motion control ASIC for robotic manipulators[C]//Intelligent Control and Automation. Dalian: [s. n.], 2006: 8221 – 8225

[12] Wang Dayu, Yu Kaiping, Guo Hong. Functional design of FPGA in a brushless DC motor system based on FPGA and DSP [C]//Vehicle Power and Propulsion Conference. Harbin: IEEE, 2008: 1 – 4

(编　辑:赵海容)