控制力矩陀螺框架高精度周期随动控制

徐向波 李海涛 薛立娟 杨莲慧

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘 要: 为实现控制力矩陀螺框架伺服系统的高精度周期随动控制,采用比例积分微分(PID,Proportion Integration Differentiation)控制器结合重复控制器的控制方式,PID 控制器实现框架伺服系统静态和匀速运动的高精度控制,插入式重复控制器实现对周期性输入信号的精确跟踪. 对控制力矩陀螺框架系统进行了建模,设计了 PID 控制器与插入式重复控制器,并分析了重复控制器的稳定性条件、稳态跟踪性能和对扰动的抑制能力. 仿真结果和实验结果表明:采用插入式重复控制器使控制力矩陀螺跟踪 1Hz 给定速度信号时的稳态跟踪误差大幅减少. PID 控制器结合插入式重复控制器结构简单,两者可分开独立设计,参数设计容易.

关 键 词: 控制力矩陀螺; 周期随动控制; 插入式重复控制器; 稳态跟踪误差

中图分类号: TP 271

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)08-1017-05

High precision periodic control method of control moment gyro gimbal system

Xu Xiangbo Li Haitao Xue Lijuan Yang Lianhui

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to realize high periodic precision control of control moment gyro (CMG) gimbal system, a controller consisted of proportiona integration differention (PID) controller and plug-in repetitive controller was adopted. PID controller can realize high precision control of static state and uniform speed state, while plug-in repetitive controller can realize accurate tracking of periodic given signal. CMG gimbal system modeling was performed, and the PID controller and plug-in repetitive controller were designed, then stability conditions, steady tracking properties and ability of suppressing disturbance were analyzed. Simulation and experiment results show plug-in repetitive controller can effectively reduce steady tracking error when CMG gimbal system tracks a 1Hz periodic given velocity signal. The structure of the controller is simple and the plug-in repetitive controller can be designed separated from system's PID controller, so it is easy to design parameters.

Key words: control moment gyro; periodic control; plug-in repetitive controller; steady tracking error

控制力矩陀螺(CMG, Control Moment Gyro)可提供快响应、高精度的输出力矩,很好地满足了立体测绘、灾害监测、军事侦察等敏捷机动卫星平台的姿态控制需求[1-2],为了扩大近地敏捷机动卫星平台的观测范围和实现卫星平台对被测区域的反复观测,需要控制力矩陀螺输出一定周期的力矩,这就需要 GMG 框架系统高精度地跟踪此周期的给定速度信号.

CMG 框架系统在跟踪一定周期的给定速度信号时,其输出速度与给定速度在幅值和相位上存在偏差,即系统的稳态跟踪误差. 为了减小 CMG 框架系统的稳态跟踪误差,大多采用提高系

收稿日期: 2011-05-13; **网络出版时间**: 2012-08-23 14:55

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120823.1455.020.html

基金项目: 国家 973 计划资助项目(2009CB724000)

作者简介: 徐向波(1982-),男,山东烟台人,博士生,xuxiangbo119@163.com.

统增益和前馈的方法,过高的系统增益会减小系统的稳定裕度;而基于反模型或零相差的前馈控制[3]需要被控对象较为精确的数学模型,被控对象参数发生变化时很难达到理想的控制效果,反模型前馈控制要求闭环系统为最小相位系统以及较高的采样频率,零相差要求指令超前值已知且控制较为复杂,采用常系数或对系数进行模糊控制的前馈方法[4]均是在系统稳态时对前馈系数进行整定,当被控对象参数变化或者受到扰动时控制效果较差,且模糊控制算法较为复杂,需要较多调试经验. 重复控制[5-8]是一种基于内模原理可实现对周期性跟定信号的高稳态精度跟踪的控制方法. CMG 框架系统大部分时间工作在在静止和匀速运动状态,仅适用重复控制器很难实现高精度控制,插入式的重复控制[9-11]可与系统的 PID 控制器分别独立设计,具有结构简单、计算量少、对系统参数变化不敏感等众多优点,可实现 CMG 框架系统在静止、匀速和周期随动的控制.

1 CMG 框架系统被控对象建模

CMG 从结构上主要分为高速转子系统和框架系统两部分,其结构图如图 1 所示.

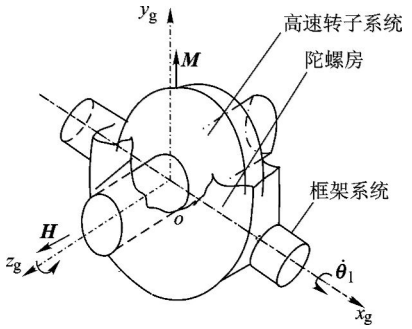


图 1 CMG 结构图

高速转子系统提供角动量 $\boldsymbol{H}$,当框架转动时,$\boldsymbol{H}$ 方向变化,由于陀螺效应,CMG 输出力矩为

$$\boldsymbol{M} = \boldsymbol{H} \times \dot{\boldsymbol{\theta}}_1 \tag{1}$$

其中,$\boldsymbol{M}$ 为 CMG 的输出力矩;$\dot{\boldsymbol{\theta}}_1$ 为框架转动的角速度. 从式(1)可知,CMG 要输出一定周期的力矩,要求其框架系统按照此周期输出对应的速度.

CMG 框架系统结构简图如图 2 所示,r_i 为电流控制器的给定电流,旋转变压器和轴角解码器解算出负载端(高速转子系统)的输出速度,电流互感器测试三相逆变桥输出的电机绕组电流值,CMG 框架系统根据给定速度及反馈的负载端输出速度和绕组电流值,经过速度控制器和电流控制器计算后输出相应占空比的电压脉冲驱动 CMG 框架电机通过谐波减速器带动负载端转动.

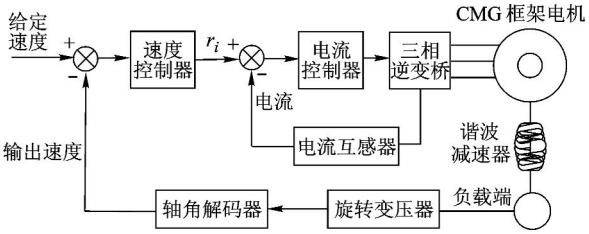


图 2 CMG 框架结构简图

根据 CMG 框架电机电枢回路得到电压方程的拉氏变换形式:

$$U_d(s) = C_e s\theta_m(s) + i_m(s)(R + Ls) \tag{2}$$

电磁力矩为

$$T_m(s) = K_m i_m(s) \tag{3}$$

CMG 框架系统所采用的谐波减速器柔轮存在弹性变形,将负载力矩折合到电机轴上,根据牛顿定律可得

$$T_m(s) = J_m s^2\theta_m(s) + T_{ml}(s)/(N\eta) \tag{4}$$

由虎克定律,负载力矩可表示为

$$T_{ml}(s) = K_l[\theta_m(s)/N - \boldsymbol{\theta}_l(s)] \tag{5}$$

CMG 框架系统负载端的力矩平衡方程如下:

$$T_{ml}(s) = J_l s^2\boldsymbol{\theta}_l(s) + b_l s\boldsymbol{\theta}_l(s) + f_m(s) \tag{6}$$

为提高 CMG 框架系统动态响应速度,其控制系统电流环采用比例控制,则

$$U_d(s) = i_{k_p}[r_i(s) - i_m(s)] \tag{7}$$

其中,U_d 为 CMG 框架电机的电枢回路电压;θ_m,i_m 和 T_m 分别为 CMG 框架电机角位置、绕组电流和电磁力矩;R 和 L 分别为 CMG 框架电机两相绕组电阻和电感;K_m 和 C_e 分别为 CMG 框架电机力矩系数和反电动势系数;T_{ml} 为 CMG 负载力矩;J_m,J_l 和 b_l 分别为电机端转动惯量、负载端转动惯量和负载端粘性阻尼系数;N,K_l 和 η 分别为谐波减速器的传动比、刚度系数和力矩效率;$\boldsymbol{\theta}_l$ 和 f_m 为负载端角位置和所受到的各项随机扰动;i_{k_p} 为电流环控制器的比例系数. 图 3 所示系统定义为包括电流环在内的广义被控对象 $P(s)$.

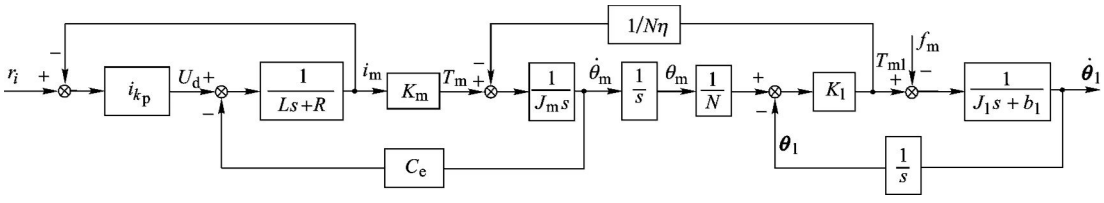


图 3 CMG 框架系统被控对象框图

2　CMG 框架系统控制器设计

图 4 为 CMG 框架控制系统框图,其中,r_V 为 CMG 框架系统的给定速度;$G_{PID}(s)$为速度环的主控制器;K 为重复控制器开关;虚线框内的部分为插入式重复控制器 $H(s)$,表达式为

$$H(s) = \frac{a(s)}{1 - F(s)e^{-Ts}a(s)} \tag{8}$$

其中,$a(s)$为前馈控制器,以提高重复控制器的响应速度;e^{-Ts}为延迟环节,T 为延迟时间,即跟踪信号的周期值;$F(s)$为低通滤波器,与延迟环节串联以改善系统稳定性. 图 4 中 $C(s)$为控制补偿器,以实现系统正则稳定.

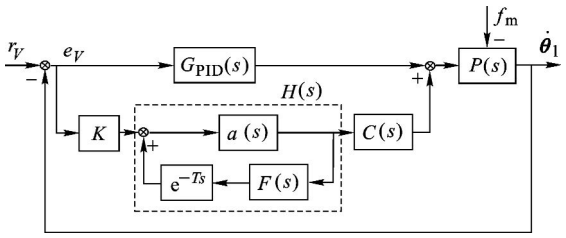


图 4　CMG 框架控制系统框图

CMG 框架系统控制器采用 PID 控制器与插入式重复控制器并联的形式,两者可分开独立设计. 首先,按照 CMG 框架系统工作在静止、恒定转速和阶跃等情况下的性能指标,赋值 $K=0$,此时重复控制器不参与,对 PID 控制器参数进行调试,以满足 CMG 基本的静态特性和动态特性;然后根据 CMG 需要输出一定周期的力矩时的指标要求,赋值 $K=1$,使重复控制器参与控制作用,调试重复控制器的控制参数,以减小 CMG 框架系统对周期性给定速度信号的跟踪误差.

2.1　重复控制器稳定性分析

由于插入式重复控制器与系统 PID 控制器可独立设计,仅考虑重复控制器的控制作用时,CMG 框架系统可简化为图 5 形式.

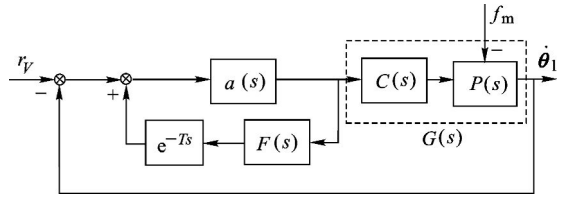


图 5　CMG 重复控制系统框图

前馈控制器 $a(s)$常设置为稳定的真有理分式形式,为简化运算,取 $a(s)=1$,并令 $G(s)=C(s)P(s)$,则图 5 的传递函数为

$$\frac{\dot{\theta}_1(s)}{r_V(s)} = \frac{G(s)}{1 - F(s)e^{-Ts} + G(s)}$$

其中,$F(s)$在其截止频率 ω_c 内近似等于 1 以减小系统的跟踪误差,高频段则小于 1 以提高系统的稳定性,根据小增益定理,系统指数渐进稳定条件如下:

1) $C(s)$、$P(s)$为正则传递函数,且不含虚轴上的零点;

2) $[1+G(s)]^{-1}G(s)$为正则的稳定有理函数矩阵;

3) $\| F(s)[1+G(s)]^{-1} \|_\infty < 1$,其中 $\| \cdot \|_\infty$为函数的无穷范数.

2.2　重复控制器稳态误差分析

图 4 所示 CMG 框架系统不考虑干扰 f_m 时,误差的传递函数为

$$e_V(s) = \frac{[1+G_{PID}(s)][1-F(s)e^{-Ts}]}{[1+G_{PID}(s)][1-F(s)e^{-Ts}] + KC(s)P(s)} \cdot \frac{r_V(s)}{1+G_{PID}(s)P(s)} \tag{9}$$

式(9)中右边由 2 部分组成,其中第 1 部分为重复控制器的误差衰减函数;第 2 部分为无重复控制器时的系统误差. $F(s)$在其截止频率 ω_c 内近似等于 1,稳态误差在重复频率及其谐波频率 ω_k($\omega_k = 2k\pi/T$,k 为正整数)处近似等于 0,此时误差衰减函数的幅值为

$$A_\infty(\omega_k) = \left| \frac{1}{1 + \dfrac{KC(j\omega_k)P(j\omega_k)}{[1+G_{PID}(j\omega_k)][1-F(j\omega_k)]}} \right| \tag{10}$$

$A_\infty(\omega_k)$反映了重复控制器对给定周期信号的跟踪能力,由式(10)可知,在系统稳定的基础上增大$|C(j\omega_k)P(j\omega_k)|$或使 $F(j\omega_k)$接近 1,可有效改善系统的跟踪能力.

2.3　重复控制器干扰抑制能力分析

控制系统的灵敏度函数反映了自身的干扰抑制能力,由图 4 可求系统灵敏度函数为

$$S_r = \frac{1 - F(s)e^{-Ts}}{1 - F(s)e^{-Ts} + \dfrac{KC(s)P(s)}{1+G_{PID}(s)P(s)}} \cdot \frac{1}{1+G_{PID}(s)P(s)} \tag{11}$$

式(11)右边由 2 部分组成,第 1 部分为重复控制器的灵敏度衰减函数,反映重复控制器对系统扰动抑制能力的变化;第 2 部分为无重复控制器的系统灵敏度函数,定义 M_r 为灵敏度衰减比:

$$M_r = \left| \frac{1 - F(j\omega)e^{-j\omega T}}{1 - F(j\omega)e^{-j\omega T} + \dfrac{KC(j\omega)P(j\omega)}{1+G_{PID}(j\omega)P(j\omega)}} \right| \tag{12}$$

低频时，$F(s)$ 近似等于 1，则 M_r 在重复频率及其谐波频率 ω_k 处近似等于 0，对干扰有很好的抑制作用；但对于随机频率的干扰，M_r 有可能大于 1，对于随机干扰比较大的系统，实际设计中必须注意.

2.4 重复控制器设计

重复控制器的设计主要是对 $F(s)$ 的设计及延迟时间 T 的选取. T 选取为 CMG 框架系统给定角速度的周期值. 在已知广义被控对象 $P(s)$ 的情况下，$F(s)$ 的选取与系统的补偿环节 $C(s)$ 紧密相关. 为简化系统，选取常规一阶低通滤波器形式 $F(s)=1/(\lambda s+1)$，参数 λ 的选取成为关键，与系统的稳定性、稳态精度和误差收敛速度紧密相关. 可首先选取一个较大的 λ 值，以保证系统足够的稳定裕度，然后根据系统的稳态精度和误差收敛速度要求完成补偿环节 $C(s)$ 的参数设计，最后根据系统稳定的要求：$|F(j\omega)|$ 始终小于 $|1+G(j\omega)|$，优化参数 λ.

采用直观的画伯德图法可以很好地优化参数 λ，画出 $|1+G(j\omega)|$ 的伯德图，采用试凑法选取不同的 λ 值，以得到 $|F(j\omega)|$ 刚好位于 $|1+G(j\omega)|$ 下方时的 λ_0. 为提高系统的稳定裕度，一般选取 $\lambda=1.2\lambda_0$.

3 仿真及实验验证

3.1 仿真验证

为验证插入式重复控制器的有效性，对 CMG 框架控制系统进行仿真，实际系统参数如表 1 所示. 给定速度为 $r_V=0.1745\sin(2\pi t)$ rad/s，扰动 $f_m=\sin(4\pi t)$ N，设计的低通滤波器为 $F(s)=1/(0.1s+1)$，系统控制器为 $G_{PID}(s)=50+6\,000/s+12s$，控制补偿器 $C(s)=(5.15s^2+100s+260\,000)/s$，延迟时间 $T=1$ s，广义被控对象为

$$P(s)=2\,451\,000/(0.036\,76s^4+590.5s^3+13\,710s^2+8\,179\,000s+170\,500\,000)$$

表 1 CMG 框架系统参数

参数	数值	参数	数值
L/mH	0.635	J_m/(kg·m^2)	0.0042
R/Ω	8.8	J_1/(kg·m^2)	2.0242
i_{k_p}	1.4	b_1/(N·s·rad^{-1})	0.06
K_m/(N·A^{-1})	0.982	N	100
K_1/(N·m·rad^{-1})	26181	η	0.681

采用重复控制器前后，CMG 框架控制系统的速度跟踪曲线如图 6 和图 7 所示，从对比可以看出加入重复控制器后系统的稳态跟踪误差衰减了 90% 以上.

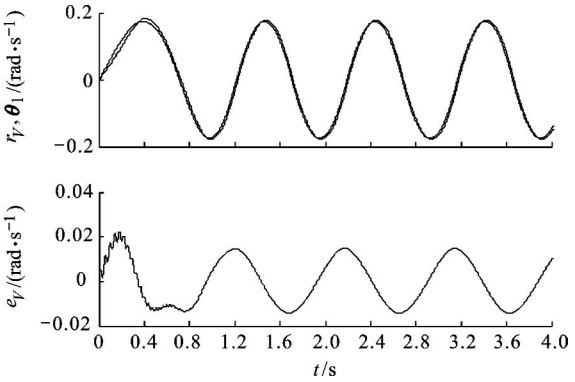


图 6 无重复控制器的 CMG 框架系统速度波形

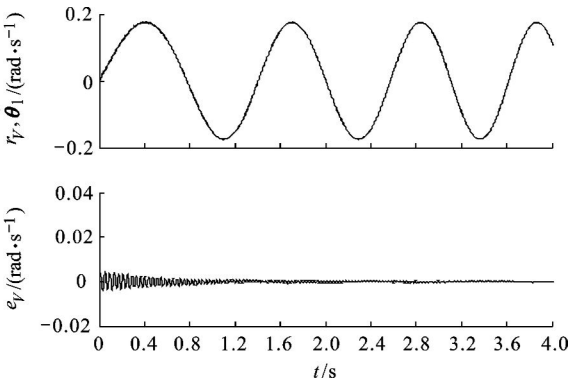


图 7 有重复控制器的 CMG 框架系统速度波形

3.2 实验验证

CMG 实验系统如图 8 所示，主要由 CMG 监控系统、电路箱及 CMG 组成，其中 CMG 监控系统发送 r_V 指令，对 CMG 框架系统的输出速度、电流、系统温度和真空度等参数进行实时检测和显示，并对系统控制精度、稳定度、功耗、正弦给定转速下框架系统跟踪的幅值比、相位差等参数进行解算和显示.

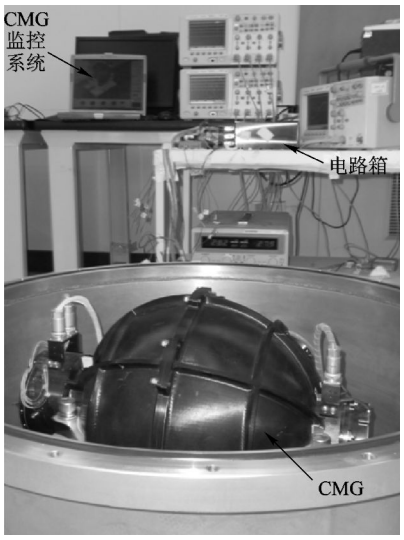


图 8 CMG 实验系统

实际 CMG 框架控制系统在采用重复控制器前后的速度跟踪曲线分别如图 9 和图 10 所示，图

中幅值比、相位差分别为 $\dot{\boldsymbol{\theta}}_1$ 与 r_V 的幅值比和滞后的相位角. 从图 9 可以看出不使用重复控制器时幅值比为 -0.32 dB,相位差为 -0.14 rad,即幅值衰减 3.62%,相位滞后 0.02 个周期,从图形上可以较为明显地看出 $\dot{\boldsymbol{\theta}}_1$ 与 r_V 在幅值和相位的差别;采用重复控制器后,由图 10 可以看出 $\dot{\boldsymbol{\theta}}_1$ 与 r_V 两条曲线基本重合,其中幅值比为 -0.01 dB,相位差为 -0.02 rad,即幅值衰减 0.12%,相位滞后 0.003 个周期.

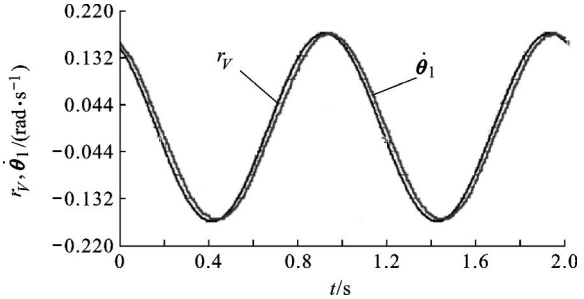


图 9　无重复控制器的 CMG 框架系统实测速度波形

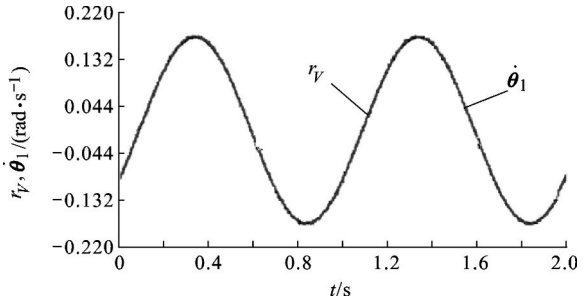


图 10　有重复控制器的 CMG 框架系统实测速度波形

4　结　论

本文介绍了插入式重复控制器在 CMG 框架周期随动控制中的应用. 插入式重复控制器可与系统主控制器分开独立设计,结构较为简单,仿真和实验证明了重复控制器的有效性. 实验中 CMG 框架系统跟踪 1Hz 速度时,负载输出转速与给定转速的幅值衰减从 3.62% 减小到 0.12%,减小了 97%,相位滞后从 0.02 个周期减小到 0.003 个周期,减小了 85.7%,有效地提高了 CMG 框架系统的周期随动跟踪性能.

参考文献（References）

[1] 魏彤,房建成. 磁悬浮控制力矩陀螺磁轴承的变工作点线性化自适应控制方法[J]. 机械工程学报,2007,43(6):110 - 115
Wei Tong, Fang Jiancheng. Adaptive control based on variant operatingpoint linearization in magnetic bearings of MSCMG [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(6): 110 - 115 (in Chinese)

[2] 徐向波,房建成. 基于角加速度的陀螺框架伺服系统干扰观测器[J]. 北京航空航天大学学报,2009,35(6):669 - 672
Xu Xiangbo, Fang Jiancheng. Disturbance observer based on angular acceleration for gyro gimbal servo system [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(6): 669 - 672 (in Chinese)

[3] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M]. 2 版. 北京:电子工业出版社,2004:55 - 58
Liu Jinkun. Advanced PID control and MATLAB simulation [M]. 2nd ed . Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004: 55 - 58 (in Chinese)

[4] 李建文,刘刚,李红. 磁悬浮控制力矩陀螺框架伺服系统前馈补偿模糊控制方法[J]. 微电机,2009,42(5):35 - 42
Li Jianwen, Liu Gang, Li Hong. Fuzzy control method of gimbal servo system in magnetically suspended rotor system of CMG [J]. Micromotor, 2009, 42(5): 35 - 42 (in Chinese)

[5] Cao Zhenwei, Ledwich G F. Adaptive repetitive control to track variable periodic signals with fixed sampling rate [J]. IEEE Transactions on Mechatronics, 2002, 7(3): 378 - 384

[6] 马菲. 重复控制在 DVD 机伺服系统中的研究与应用[D]. 上海:上海交通大学自动化系,2008
Ma Fei. Research and application of repetitive control on DVD tracking servo system[D]. Shanghai: Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University, 2008 (in Chinese)

[7] Demirel B, Güvenc L. Paramenter space design of repetitive controller for satisfying a robust performance requirement [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2010, 55(8): 1893 - 1898

[8] Park S W, Jeong J, Yang H S, et al. Repetitive controller design for minimum track misregistration in hard disk drives [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(9): 2522 - 2527

[9] Tsai M C, Yao W S. Design of a plug-in type repetitive controller for periodic inputs [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2002, 10(4): 547 - 555

[10] Yao W S, Tsai M C. Analysis and estimation of tracking errors of plug-in type repetitive control systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(8): 1190 - 1195

[11] Wu X H, Xu J X. Design of a plug-in type repetitive control scheme for eliminating supplyside current harmonics of three-phase PWM boost rectifiers under generalized supply voltage conditions [J]. IEEE Transactions on Power electronics, 2010, 25(7): 1800 - 1810

(编　辑:刘登敏)