

两维转镜的等效动态控制误差模型辨识

李 慧^{1,2}, 吴军辉^{1,2}, 胡 欣^{1,2}, 樊宏杰^{1,2}, 赵宏鹏^{1,2}, 黄振宇^{1,2}

- (1. 电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室, 河南 洛阳 471003;
2. 中国人民解放军 63892 部队, 河南 洛阳 471003)

摘 要: 两维转镜的动态控制误差是影响激光制导武器对抗闭环半实物仿真试验精度的重要误差源, 建立准确的控制误差模型是系统精度分析的基础。对于转镜的动态控制误差分析建模问题, 常采用经典的频域设计法建立控制系统的传递函数来分析其控制误差, 建模过程复杂且难以建立准确的模型, 提出了一种过程辨识的方法, 分析了辨识原理、辨识输入信号设计、模型阶次及模型参数的辨识方法等, 在使用行列式比定阶法确定模型阶次的基础上, 采用递推最小二乘法建立了转镜的等效动态控制误差模型。然后, 根据转镜控制系统指标设计等效正弦信号对该模型进行了验证, 结果表明: 动态控制误差模型估计输出与实际仿真输出基本相同, 估计误差均值为 0° , 最大值仅为 $13''$, 说明了建模的准确性, 同时也为激光制导武器对抗闭环半实物仿真试验系统中其他仿真设备的建模提供了方法支持。

关键词: 两维转镜; 动态控制误差模型; 过程辨识; 递推最小二乘法

中图分类号: TN977 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)02-0366-06

Identification of equivalent dynamic control error model for two-dimensional mirror

Li Hui^{1,2}, Wu Junhui^{1,2}, Hu Xin^{1,2}, Fan Hongjie^{1,2}, Zhao Hongpeng^{1,2}, Huang Zhenyu^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, Luoyang 471003, China; 2. 63892 PLA, Luoyang 471003, China)

Abstract: Dynamic control error of precise two-dimensional mirror was the important influencing error factor on simulation precision of the laser guided weapon countermeasure simulation system, the accurate error model was the foundation for precision analysis of the simulation system. At present classical frequency method was adopted to analyze the control error by setting up the transfer function of the servo system, the modeling process was complex and accurate model was not easy to build. Then the paper gave the principle of the identification method, the design approach of input LFM signal, the ranks and parameters of the equivalent control error model which was built by using RWLS method. The proposed model was verified by simulative test by inputting the sine signal according to the performance index of the mirror. The result showed that the estimate output was consistent with the simulation output: the estimate average error and maximum error were 0° and $13''$ respectively, which explained the accuracy of

收稿日期: 2012-06-05; 修订日期: 2012-07-03

基金项目: 总装重大课题研究基金(2010SY3310002)

作者简介: 李慧(1980-), 男, 博士, 主要从事光电对抗与光电对抗仿真技术方面的研究。Email: limingj12@163.com

the control error model and provided the support for modeling the dynamical control error of other simulation equipment in the simulation system.

Key words: two-dimensional mirror; dynamic control error model; process identification; RWLS

0 引言

激光制导武器对抗闭环半实物仿真试验系统在开展试验时, 需要根据制导武器仿真计算机解算的控制数据, 对精密两维转镜的方位和俯仰轴进行实时引导控制, 受仿真设备控制系统设计和性能的限制, 必然存在动态控制误差^[1]; 要使该半实物仿真试验系统得到有效应用, 在实验前需进行精度分析以全面掌握系统的仿真精度和试验结果可信度, 为分析计算在不同战情及不同输入条件下, 两维转镜的动态控制误差对弹目/弹干扰视线模拟精度及系统仿真精度的影响, 需要建立其准确的动态控制误差模型^[2-3]。

对于控制系统动态控制误差的分析计算, 常采用经典的频域法, 先建立整个控制系统传递函数模型, 分析不同输入信号作用下的动态误差情况, 整个过程包含对被控对象的动力学特性分析、补偿算法、控制器的设计以及实际调试参数试凑, 建模过程复杂, 并且难以建立准确的系统传函模型^[4]; 而工程上常采用卷积法或动态误差系数法对系统的动态控制误差进行简化计算^[5], 能在一定程度上反映设计系统的跟踪精度, 对于不同的系统计算误差可能较大。

因此, 文中详解了动态误差系数法分析两维转镜控制误差的局限性, 为避免用机理建模法得到两维转镜的伺服系统传递函数, 采用实践中广泛应用的过程辨识方法: 直接利用转镜控制系统的输入引导数据与输出误差信号, 通过递推最小二乘法建立了转镜的等效动态控制误差模型; 并根据转镜伺服系统的性能指标设计了等效正弦信号对得到的模型进行验证。结果证明, 辨识得到的等效控制误差模型与转镜的实际动态特性逼近程度高, 而且受非线性环节及系统不可测噪声影响小, 也为半实物仿真系统中其他仿真设备的分析建模提供一种方法。

1 转镜动态控制误差分析方法

两维转镜为由反射镜组件和转台组件组成的精

密机电伺服装置, 用于变换激光指示信号和激光角度欺骗干扰信号的照射方向, 模拟弹目、弹干扰视线运动。其中, 反射镜组件由反射镜、镜盖和反射镜座组成, 转台组件主要由方位、俯仰轴系、力矩电机、编码器以及限位装置组成。两维转镜的伺服系统可看作一个单输入单输出的位置随动系统, 数字引导控制时采用复合控制结构, 如图 1 所示。

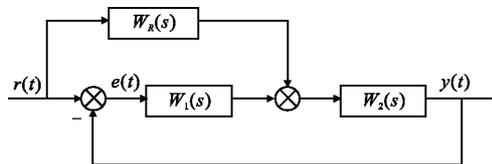


图 1 转镜伺服系统复合控制结构简图

Fig.1 Complex control frame for servo system of reflector

系统的误差传递函数为:

$$\Phi_e(s) = \frac{E(s)}{R(s)} = \frac{1 - W_R(s)W_2(s)}{1 + W_1(s)W_2(s)} \quad (1)$$

将误差传递函数 $\Phi_e(s)$ 在 $s=0$ 的邻域内展开成泰勒级数, 得:

$$\Phi_e(s) = c_0 + c_1s + c_2s^2 + \dots \quad (2)$$

将 $E(s)$ 进行拉氏反变换得到:

$$e(t) = c_0r(t) + c_1\dot{r}(t) + c_2\ddot{r}(t) + \dots \quad (3)$$

式中: c_0 、 c_1 和 c_2 分别为位置、速度和加速度误差系数, 令 $c_1=1/kv$, $c_2=1/ka$, 则 kv 、 ka 分别称为速度、加速度品质因数。

公式(3)是工程上用来设计伺服系统和评价伺服系统控制精度的依据。但该式能成立的前提是(一) $s \rightarrow 0$, 频域上相当于 $\omega \rightarrow 0$, 即输入信号频谱位于低频段, 或者大部分在低频段; (二)输入指令信号的机动性不能太大, 高阶导数分量很小, 因为输入的方位、俯仰指令信号即使有同样的速度与加速度, 高阶导数分量的不同也会导致控制误差的变化。

在实际战情条件下, 当激光制导武器先跟踪指示激光信号, 在弹道末段较容易被干扰, 会被引偏跟踪角度欺骗干扰信号, 这样弹干扰视线角速度和角加速度会突然变大, 因此有必要对两维转镜的输入引导指令进行频谱分析和运动特性分析。图 2、图 3

和图 4 分别为根据某一实际战情条件下的实际弹道数据,通过解算得到的转镜方位引导指令的功率谱、角速度和角加速度变化曲线。

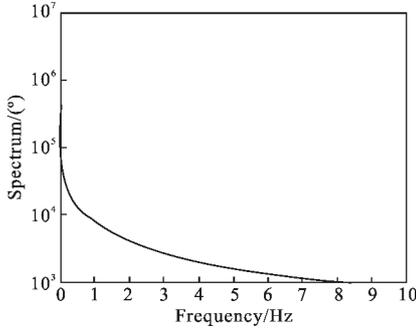


图 2 方位引导信号的频谱

Fig.2 FFT of azimuth input signal

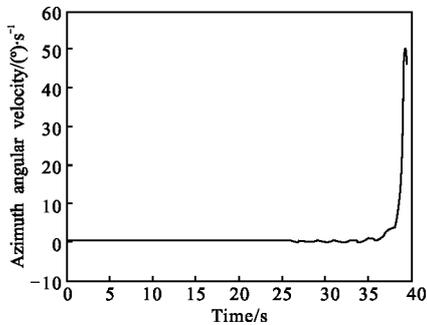


图 3 方位角速度随时间变化曲线

Fig.3 Curve of azimuth angular velocity vs time

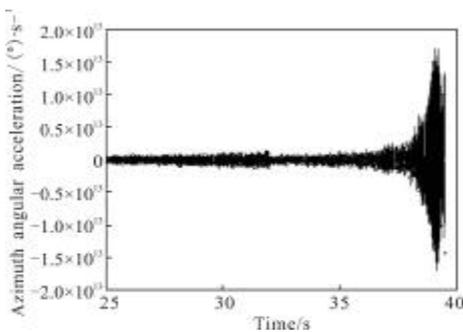


图 4 方位角加速度随时间变化曲线

Fig.4 Curve of azimuth angular acceleration vs time

由图 2~4 可知,输入信号的频谱位于低频段,但受到干扰后,方位角速度、角加速度变化很大,因此,只采用动态误差系数评价转镜伺服系统控制精度的方法是不准确的。而且, c_1 和 c_2 等误差系数与伺服系统的传递函数模型有关, 传函模型的不准确同样会带来不同的控制误差,对转镜方位伺服系统分别跟踪等效正弦目标和实际弹道目标时,通过误差系数法与仿真计算得到的控制误差分别见表 1。

表 1 动态误差系数法与仿真计算得到的转镜控制误差

Tab.1 Control error obtained by coefficient method and simulation

Azimuth servo system of mirror	Target characteristic	K_v	K_a	Error coefficient calculation	Simulation control error
	Equivalent sine wave	587.3	486.4	4.1'	0.4'
	Actual trajectory	587.3	486.4	∞	0.7'

由表 1 可知,采用动态误差系数法计算转镜的动态控制误差与通过建立控制系统模型仿真计算得到的结果相差较大,说明采用动态误差系数法进行计算是不准确的。下面拟使用过程辨识方法建立转镜相应的动态控制误差模型。

2 系统辨识法建立转镜控制误差模型

2.1 辨识原理

如图 5 所示,把待辨识的转镜动态过程看作“黑箱”,其只考虑过程的输入输出特性,而不强调过程的内部机理。 $u(k)$ 为经制导武器仿真计算机解算,并输入到二维转镜控制计算机的引导信号, $z(k)$ 为相应的控制误差输出,输入输出均可测,输入输出信号的时序关系如图 6 所示,输入输出是在统一时间信号下记录的,输出控制误差的时刻与发送引导数据时刻是对齐的。

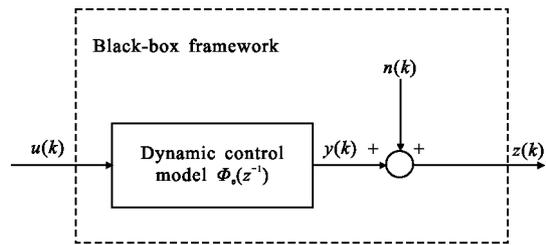


图 5 转镜辨识的黑箱结构

Fig.5 Black box structure of identification

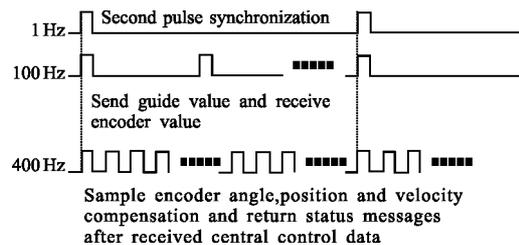


图 6 转镜的输入输出信号时序关系

Fig.6 Schedule of in-output signal

图 5 中, $\Phi_e(z^{-1})$ 用来描述过程的输入输出特性, 可表示为:

$$\Phi_e(z^{-1}) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{1+a_1z^{-1}+\dots+a_nz^{-n}}{b_1z^{-1}+b_2z^{-2}+\dots+b_mz^{-m}} \quad (4)$$

所采用的模型结构为:

$$A(z^{-1})z(k) = B(z^{-1})u(k) + n(k) \quad (5)$$

转化为最小二乘格式, 并且模型采用 FIR 结构, 得到:

$$\begin{cases} z(k) = h^T(k)\theta + n(k) \\ h(k) = [u(k-1), \dots, u(k-n)]^T \\ \theta = [d_1, d_2, \dots, d_n]^T \end{cases} \quad (6)$$

式中: d_1, d_2, \dots, d_n 为待辨识模型的参数, 模型阶次为 n 。对于 $k=1, 2, \dots, L, L$ 为数据长度, 则公式(6)构成一个方程组, 可表示为:

$$z_L = H_L(k)\theta + n_L \quad (7)$$

可以看出, 确定模型阶次后, 模型辨识就转化为模型参数 θ 的辨识问题。

2.2 模型阶次辨识

对于单输入单输出控制过程的阶次辨识问题, 可采用行列式比法、F 检验法、AIC 准则法、递阶辨识等几种方法^[6]。阶次辨识和参数估计往往是相互依赖的, 在采用极大似然法估计模型参数时, 确定模型阶次一般用 AIC 准则; 而用最小二乘法估计模型参数时, 用拟合优度法及行列式比法等。

在此采用行列式比定阶法确定模型的阶次。行列式比定阶法是直接利用转镜控制系统的输入输出数据, 构成积矩矩阵, 由积矩矩阵的行列式比来判定系统阶次。其特点是在参数估计之前可确定模型的阶次, 但由于数据中噪声的存在, 有时判定的阶次仅作参考, 需要模型的辨识精度来适当调整阶次。

2.3 模型参数的递推最小二乘法辨识

参数模型的辨识方法有最小二乘辨识法、极大似然法等, 其中最小二乘法又有一次完成算法和适用于在线辨识的递推算法, 由于一次完成算法要求输入信号必须是 $2n$ 阶持续激励信号, 需要进行矩阵求逆运算, 计算量较大也不能采用实时在线辨识。因此, 这里采用递推最小二乘法(RWLS)进行参数估计^[7-8]。

递推最小二乘算法表示为:

$$\begin{cases} p(k) = p(k-1) - k(k)h^T(k)p(k-1) \\ k(k) = p(k-1)h(k)[h^T(k)p(k-1)h(k)+1]^{-1} \\ \hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + k(k)[z(k) - h^T(k)\hat{\theta}(k-1)] \end{cases} \quad (8)$$

在完成模型参数的最小二乘估计, 即模型参数的辨识之后, 要对模型的辨识精度进行验证。验证方法为计算模型估计值残差, 表示为:

$$e_L = z_L - \hat{z}_L \quad (9)$$

式中: \hat{z}_L 为模型的估计输出值。可表示为:

$$\hat{z}_L = H_L \hat{\theta}_{RWLS} \quad (10)$$

3 模型辨识的验证

利用图 7 中的转镜方位伺服系统模型进行实验, 对于模型中的传感器噪声, 实际应用中采用了移动平均滤波法对噪声进行了有效滤除。先产生模型辨识的输入输出数据。为了使系统为可辨识的, 输入信号必须充分激励系统的所有模态, 具体在工程应用中, 选择输入信号的功率或幅度不易过大, 信号对系统的“净扰动”要小, 而且工程上要便于实现, 成本低^[9]。线性调频信号(LFM)广泛应用于通讯、雷达、地质勘测等研究领域, 许多试验与理论证明, 调频模式信号满足持续激励信号条件, 可以作为辨识输入信号。

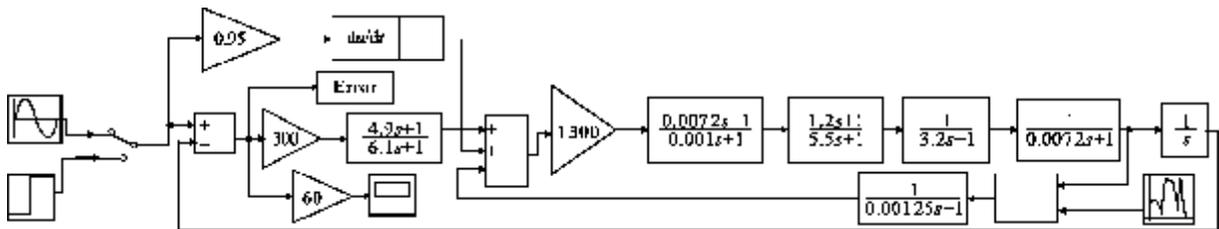


图 7 两维转镜的方位伺服系统仿真模型

Fig.7 Simulation model of azimuth servo system for reflector

利用连续调频信号 $18\sin(2\pi(0.089+0.0001t)t)$ 作为激励信号对两维转镜进行持续激励测试, 如图 8

所示, 输入调频信号的低频频带宽度较宽, 能够较好的覆盖转镜的频带, 持续激励转镜系统的所有模态。

利用该调频信号进行测试,得到了转镜的输入输出样本,仿真时间 500s,采样周期为 0.01s,可得到 50 000组数据,为了防止相邻数据采样时间间隔太短而使数值计算出现病态,进行了二次采样,获得辨识数据样本 5 000 组。按照上述给出的辨识步骤,模型阶次选择 19 阶时,可获得较高的辨识精度。此时根据公式(8)得到模型系数 $\hat{\theta}_{RMLS}$,见表 2。利用公式(10)计算得到模型估计输出值如图 9 所示,根据公式(9)即可计算出模型输出估计残差,如图 10 所示。

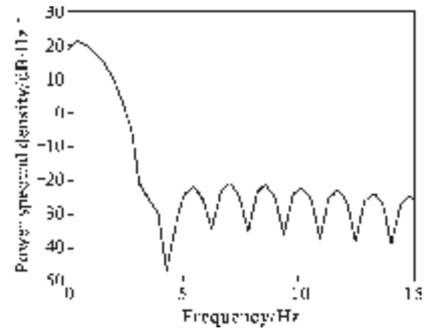


图 8 输入线性调频信号的功率谱
Fig.8 Power spectral density of input LFM

表 2 模型辨识系数

Tab.2 Identification parameter of model

θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	θ_9	θ_{10}
1.07×10^{-4}	7.69×10^{-5}	4.49×10^{-5}	2.50×10^{-5}	3.74×10^{-6}	-1.42×10^{-5}	-2.89×10^{-5}	-4.03×10^{-5}	-4.82×10^{-5}	-5.27×10^{-5}
θ_{11}	θ_{12}	θ_{13}	θ_{14}	θ_{15}	θ_{16}	θ_{17}	θ_{18}	θ_{19}	
-5.39×10^{-5}	-5.16×10^{-5}	-4.59×10^{-5}	-3.68×10^{-5}	-2.43×10^{-5}	-8.56×10^{-6}	1.05×10^{-5}	3.27×10^{-5}	5.80×10^{-5}	

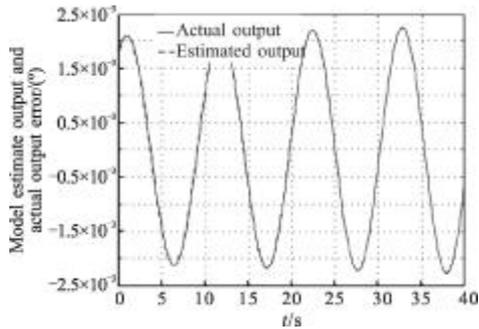


图 9 动态控制误差模型估计输出误差

Fig.9 Estimated input of dynamic control error model

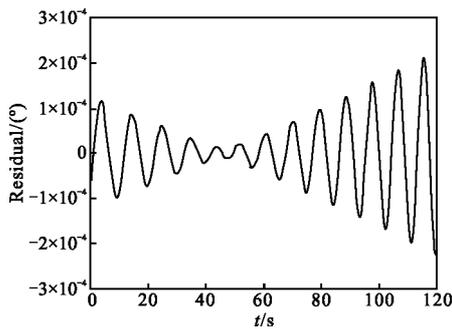


图 10 模型辨识输出残差曲线

Fig.10 Residual curve of identification model

由图 9 可以看出,模型有较高的辨识精度,同时,对比图 9 和图 10,残差也具有一定的周期性并且与动态控制误差输出周期一致,这说明辨识得到的等效动态控制误差模型并没有能够完全模拟转镜的误差传递函数,两者之间仍有一个近似线性的差

异,可以通过改进辨识方法进一步提高精度。但是,此时模型估计的残差均值为 0,均方差为 $1.2''$,可认为模型有较高的辨识精度,完成了等效动态控制误差模型的准确辨识和建立。

在完成了模型辨识之后,要对模型的正确性进行验证。验证采用等效正弦信号,由两维转镜的指标最大角速度 $30 (^\circ)/s$,最大角加速度 $50 (^\circ)/s^2$,控制误差 1 mrad ,得到等效正弦信号^[10]。

$$A(t) = 18^\circ \sin(1.667t) \quad (11)$$

设置好参数后,输入为等效正弦信号时,两维转镜的仿真模型输出误差曲线与辨识得到的动态控制误差模型估计输出的误差曲线如图 11 所示,可以看出,两者误差输出幅值相同,相位也基本保持一致。两个模型输出的误差曲线如图 12 所示。

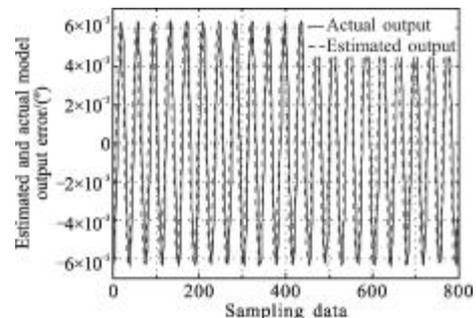


图 11 仿真模型与估计模型输出误差曲线

Fig.11 Output error of simulation model and identification model with equivalent sine wave

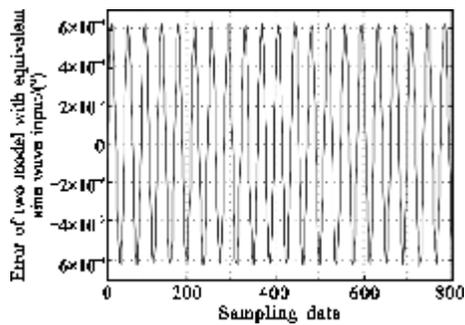


图 12 估计模型的验证误差曲线

Fig.12 Estimation of validation error curve model

由图 11 和图 12 可知,输入为等效正弦信号时模型输出误差最大值为 $23''$,模型输出残差最大值仅为 $13''$,均值为 0,从等效正弦信号测试来看,辨识的控制误差模型具有较高的辨识精度。

4 结 论

分析了动态误差系数法计算精密两维转镜动态控制误差的局限性,采用递推最小二乘法建立了转镜的等效动态控制误差模型,并根据转镜控制系统性能指标设计了等效正弦输入信号进行仿真测试,结果说明通过辨识得到的动态控制误差模型能够很好的逼近两维转镜的真实伺服系统误差传递函数特性。为两维转镜等设备的动态控制误差建模提供一种方法,也为半实物仿真系统的精度分析提供了模型支撑。但实际伺服系统中会有摩擦等非线性因素,文中仅提供了一种方法并进行了仿真测试验证,为得到更加准确的动态控制误差模型,下一步需要在实际设备上进行充分的辨识实验,以发现问题完善该方法和模型。

参考文献:

- [1] Li Hui, Li Zhi, HU Xin, et al. Dynamic simulation and control error analysis of two-dimensional reflector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1916-1921. (in Chinese)
李慧, 李芷, 胡欣, 等. 精密两维转镜的动力学仿真与控制误差分析[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(7): 1916-1921.
- [2] Wang Yunping, Zhao Changming, Li Yan, et al. Hardware-in-the-loop-simulation system for laser angle deception jamming [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1217-1222. (in Chinese)
王云萍, 赵长明, 李岩, 等. 激光角度欺骗干扰半实物仿真试验系统[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(5): 1217-1222.
- [3] Ding Changming. Accuracy analysis of HIL simulation system via parameter identification [J]. *System Engineering and Electronics*, 2001, 23(3): 79-81. (in Chinese)
丁长明. 用参数辨识法对半实物仿真系统进行精度分析[J]. *系统工程与电子技术*, 2001, 23(3): 79-81.
- [4] Zhang Binghua, Zhang Shouhui. *Electro-Optical Imaging and Tracking System*[M]. Chengdu: Publishing House of Electronics University of Science and Technology, 2002. (in Chinese)
张秉华, 张守辉. *光电成像跟踪系统* [M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2002.
- [5] Wang Guangxiong, He Lian. *Control System Design* [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2010. (in Chinese)
王广雄, 何联. *控制系统设计*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [6] Fang Chongzhi, Xiao Deyun. *Process Identification* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988. (in Chinese)
方崇智, 萧德云. *过程辨识*[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- [7] Tan Wenbin, Li Xingfei, Xiang Hongbiao, et al. Parameter identification of LuGre model based on analysis of steady state error[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(3): 664-672. (in Chinese)
谭文斌, 李醒飞, 向红标, 等. 应用稳态误差分析辨识 LUGre 模型参数[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(3): 664-672.
- [8] Chen Hui, Tan Yonghong, Zhou Xingpeng, et al. Identification and control of dynamic modeling for piezoceramic actuator [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(1): 88-95. (in Chinese)
陈辉, 谭永红, 周杏鹏, 等. 压电陶瓷执行器的动态模型辨识与控制[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(1): 88-95.
- [9] Zhao Bin, Zhou Jun, Lu Xiaodong. Modeling of three axis simulator based on xPC target [J]. *Journal of System Simulation*, 2011, 23(2): 284-289. (in Chinese)
赵斌, 周军, 卢晓东. 基于 xPC 的三轴仿真转台模型辨识方法研究[J]. *系统仿真学报*, 2011, 23(2): 284-289.
- [10] Ma Jiaguang. The basic technologies of the acquisition, tracking and pointing system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1989, 16(3): 1-42. (in Chinese)
马佳光. 捕获跟踪与瞄准系统的基本技术问题[J]. *光电工程*, 1989, 16(3): 1-42.