文章编号:1007-2780(2014)05-0721-07

舰载光电伺服设备的系统辨识研究

周俊鹏*,李 焱,王一卉,陈 娟
(长春工业大学 电气与电子工程学院,吉林 长春 130012)

摘要:系统辨识即获取电机机械时间常数 T_m 和对应的固有放大倍数 K。舰载光电系统由于受到横摇、纵摇、艏摇的扰动,其系统辨识的可信度及精度直接影响到调节器参数的设定,从而对稳态和动态精度会有很大的影响。常规公式法求电机机械时间常数在实际应用中非常不便,并且大多数场合不能求得 T_m。本文以 PC104 硬件平台为依托,推导出的近似逼近 e 指数函数作为阶跃法获取系统辨识的理论依据,并设计了友好的人机交互界面可以方便的显示、修改系统辨识的结果。试验分析表明,应用 Origin 拟合 e 指数函数使阶跃法得到的 T_m 和 K 拟合可信度达到 96%以上,其拟合误差小于 0.1,精度完全满足使用要求。解决了实际工程中获取 T_m 和 K 精度低、可信度不高的难题。此方法成功地应用在项目中,并对求得电机机械时间常数有很好的通用性和借鉴性。

关 键 词:系统辨识;近似逼近 e 指数;Origin 拟合;阶跃法;可信度
中图分类号:TM383.4 **文献标识码**:A **doi**:10.3788/YJYXS20142905.0721

Shipboard photoelectric equipment servo system identification

ZHOU Jun-peng*, LI Yan, WANG Yi-hui, CHEN Jun

(*Chanchun University of Tecnology, College of electrical and Electronic Engineering, Changchun* 1320012, *China*)

Abstract: Obtaining the motor mechanical time constant T_m and inherent magnification K is knowed as system identify. Ship-borne photoelectric system was disturbed due to the roll, pitch, bow wave disturbance, and the reliability and accuracy of the system discerniblile directly affect the regulator parameter setting. Thereby, the steady state and dynamic accuracy will confront serious influence. Conventional formula method for motor mechanical time constant in the practical application is very inconvenient, and most of the occasions for T_m can't be gotten. Based on PC104 hardware platform, this paper deduced the approximate approach e exponential function as step method for system identification that is the theoretical basis, designed a friendly human-computer interaction interface to display and modify the result of the system on discerniblile easily. By test analysis: applying Origin fitting e exponential function can make the step method of T_m and K fitting credibility more than 96%, the fitting error is less than 0.1, accuracy can meet the needs completely. The problem of low accuracy and credibility has been solved for getting T_m and K in the practical engineering. This method is successfully used in some projects, and the results show that the method is feasible and practical.

Key words: system identify; approximate approach e exponential; Origin fitting; step method; credibility

收稿日期:2014-01-28;**修订日期**:2014-02-21.
基金项目:国家 863 高技术研究发展计划(No. 2006aa701410);中国科学院知识创新工程领域前沿资助项目
* 通信联系人,E-mail:zhoujunpeng.g123@163.com

1 引 言

可信度高的系统辩识获取电机机械时间常数 T_m 和固有放大倍数 K 的精度高，从而得到的电机传递函数模型准确。T_m 的倒数是速度环的第二个拐点与调节器构成的系统影响 BODE 图低频段的走势，根据自控原理低频段增益及其走势直接影响系统稳态精度和动态精度，获得准确的 T_m 和 K，能使控制模型准确，从而稳态、动态精度相对越高。常规系统辩识方法均从直流电机微分方程出发，并没有给出具体实施方案和实施过程[1-2]，只是利用电流与时间的关系图得到电流值的 63.2%，其对应的时间即为机械时间常数 T_m[2]。而电机空载条件下运行，测出空载机械特性计算出电动机转动惯量，进而从导出公式中计算出 T_m，但此方法只能适应具有大转动惯量的电机，没有太大的实用价值[3]。利用最小二乘构造俩参数线性方程，求出机械时间常数，其计算过程繁琐，只适用于某些电机而不具有普遍性[4]，构造更复杂的三参数最小二乘线性方程，仅仅从理论出发，没有实际工程背景，并不具有实用价值[5]。利用扫频法测出系统输入与输出的关系，在 MATLAB 中的 simulink 环境下开发递推最小二乘在线系统辩识，有其应用的局限性，精度不是很高[6]，卡尔曼滤波辩识算法，虽然给出来精度，但运算量过大，不利于舰载伺服系统对 T_m 的获取[7]。另外，有些方法导出 T_m 和时间的积分关系，将积分转化为梯形面积，但没有给出可信度、精度和工程可行性[8]。设计并利用 Origin 中近似逼近 e 指数函数拟合方法，其拟合误差小于 0.1，可信度达到 96%以上，解决了上述传统方法在获取电机机械时间常数精度低，可信度不高的问题。该项技术成功地应用在项目中，其拟合阶跃法对获取电机机械时间常数有很好的通用性和借鉴性。

2 伺服系统实现

2.1 PC104 硬件平台

选 X86 架构的 PC104 嵌入式计算机作为目标机的伺服控制系统核心处理器，128M 的 CF 卡作为外部程序机为核心处理器，128M 的 CF 卡作为外部程序存储器。显控系统硬件实物如图 1 所示。分别设计定义了 16C754 四路串口的基地址分别为 0x330、0x348、0x298、0x240，中断号分别为 0x04、0x05、0x03、0x07。定义了 82C55 按照 A 路输入，B、C 路输出的方式工作，基地址为 0x3e0。FPGA 为显控系统各芯片提供地址译码，并在外部准秒脉冲同步基础上产生 16、25、400 Hz的内部分频信号。通过 INTEL 82559ER 的网络控制芯片与外部通道台进行 UDP 网络的信息交互。

如图 1 所示，此硬件作为伺服系统辨识的平台，进行软件开发。

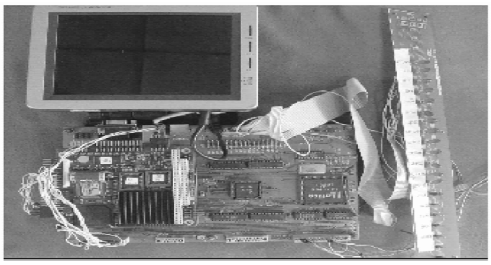


图 1 舰载伺服系统硬件实物图

Fig. 1 Picture of display and control system

2.2 软件实现

由旋转变压器反馈出来的速度码值用 aa_0 来表示，速度环开环输出码值用 axk 来表示。在 TL16C754A 口中断程序中设定 axk 的码值，编码器的采样周期 0.002 5 s，这样就可以得到旋转变压器反馈速度值 aa_0。在程序的主函数中设置输出函数 fprintf(fp1,"%04d%08.4lf%06ld/n",++Store_Counter,aa_0,encodera_0)，便于读出旋转变压器的值，流程图如图 2 所示。在 CCS3.3 中通过选择存盘操作可以得到 DAT 文件，即可直接用 word 的 EXCEL 文件打开，选择适当值。

人机交互界面采用多任务机制，具有优先级且任务间具备同步优点；多任务间的通信；中断延迟、任务切换、驱动程序延迟等操作系统行为是可知和可预测的。见人机交互界面图 3，可以在界面上方便的显示、修改 T_m 和 K 值，不用编译函数体。

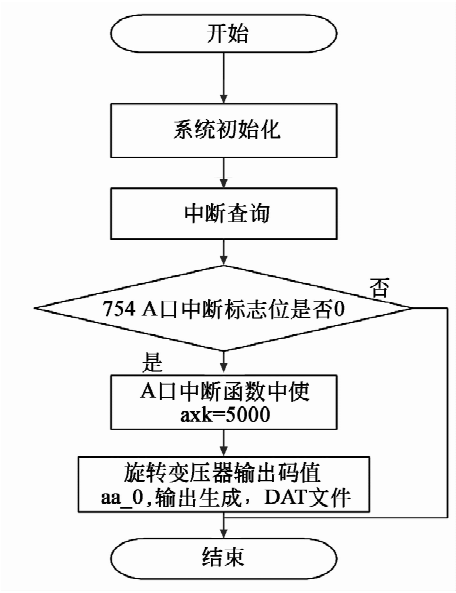


图 2　A 口中断流程图

Fig. 2　Flow chart of port A interruption

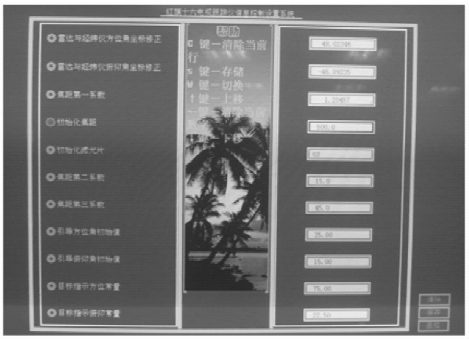


图 3　人机交互界面图

Fig. 3　Man-machine interface diagram

此显控系统中右面前 4 列分别对应 T_m、K、精度可信度，可见此人机交互界面直接读取 T_m 和 K，及相关参数方面非常方便实用。

3　系统辨识的研究分析

3.1　近似逼近 e 指数函数理论依据

根据电压平衡方程式和负载为零时转矩平衡方程式，以及机电时间常数、电气时间常数计算公式可得：

$$[T_m T_e \quad T_m \quad 1]\begin{bmatrix}\ddot{\Omega}(t)\\ \dot{\Omega}(t)\\ \Omega(t)\end{bmatrix} = K[U_a(t)]. \quad (1)$$

其中：T_m 为机电时间常数，T_e 为电气时间常数，$\Omega(t)$为电机角速度，U_a 为电机端电压。

$$K = \frac{2\pi}{60 C_e \Phi},$$

其中：C_e 为电动势常数，Φ 为磁通量。

零初始条件下对式(1)做拉氏变换可得：

$$[T_m T_e \quad T_m \quad 1]\begin{bmatrix}S^2\Omega(S)\\ S\Omega(S)\\ \Omega(S)\end{bmatrix} = K[U_a(S)].$$

易得 2 个极点为：

$$\begin{bmatrix}S_1\\ S_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\dfrac{-T_m + \sqrt{T_m^2 - 4T_m T_e}}{2T_m T_e}\\ \dfrac{-T_m - \sqrt{T_m^2 - 4T_m T_e}}{2T_m T_e}\end{bmatrix}.$$

将拉氏变换式转换成频率表达式为：

$$[T_m T_e \quad T_m \quad 1]\begin{bmatrix}(\mathrm{j}2\pi f)^2\Omega(\mathrm{j}2\pi f)\\ \mathrm{j}2\pi f\Omega(\mathrm{j}2\pi f)\\ \Omega(\mathrm{j}2\pi f)\end{bmatrix} = K[U_a(\mathrm{j}2\pi f)].$$

将 $f=0$ 时和 $f=f$ 时两频率代入上式中做比，并代入所求得的 2 个极点可得：

$$\frac{\Omega(f=f)}{\Omega(f=0)} = \frac{1}{T_m T_e \sqrt{16\pi^4 f^4 + \dfrac{1}{T_m^2 T_e^2} - \dfrac{8\pi^2 f^2}{T_m T_e} + \dfrac{4\pi^2 f^2}{T_e^2}}} = M_f,$$

其中：M_f 为电压频率为 f 时电机的角速度与电压频率为 0 时电机角速度的比值。由上式可得：

$$T_m = \frac{T_e + \sqrt{\dfrac{1}{4\pi^2 f^2}\left(\dfrac{1}{M_f^2} - 1\right) + \dfrac{T_e^2}{M_f^2}}}{4\pi^2 f^2 T_e^2 + 1}.$$

当 $T_m \gg T_e$时伺服电机传递函数可近似为：

$$\frac{\Omega(s)}{U_a(s)} = \frac{K}{T_m s + 1}.$$

阶跃响应为：

$$\Omega(s) = \frac{K}{T_m s + 1} \times \frac{1}{s}.$$

对其进行拉氏反变换有：

$$\Omega(t) = K(1 - \mathrm{e}^{-\frac{t}{T_m}}).$$

可见当 $t=T_m$ 时：

$$\Omega(t) = K(1 - \mathrm{e}^{-1}) = 0.632,$$

此公式作为阶跃法拟合曲线公式的依据。

3.2　近似逼近的 e 指数系统辨识模型

对于公式法带来的不便，且大多方法逼近真

实值的精度很低，利用 Origin 拟合 e 指数函数方法其可信度高达 96%以上，而且 e 指数的函数表达式用计算机很容易实现。在 OriginPro7.0 中根据公式：

$$\Omega(t) = K(1 - e^{-\frac{t}{T_m}}). \tag{2}$$

将速度输出码值通过 e 指数函数转化成连续函数。根据式(2)使用拟合函数为：

$$Y = P_1 \times (1 - e^{-\frac{X}{P_2}}), \tag{3}$$

其中：Y 为旋转编码器反馈速度码值(即 aa_0 的值)，X 为对应码值的序号。

P_1、P_2 为最终需要拟合的未知量对应的机械时间常数和固有放大倍数。这样就可以通过测量得到的输出速度码值和对应的码值序号，通过式(3)以及 Origin 拟合转换出未知量 P_1、P_2，得到最终的近似逼近 e 指数函数，从而获得高可信度和精度的系统辨识。

$$K = P_1/axk, \tag{4}$$

$$T_m = P_2 * T, \tag{5}$$

其中：P_1，P_2 为通过 Origin 拟合出来的数值，axk 为开环输出速度码值，T 为采样周期 800 Hz。

4 Origin 拟合实现及分析

4.1 系统辨识实现过程

为提高获得 T_m 和 K 的准确性，在试验中正向、反向各测两次，最后取平均值经过计算即可得到所需时间常数和放大倍数。在中断程序中设置速度开环输出的码值 axk＝5 000(正向)，axk＝－5 000(反向)，用旋转变压器得到的 2 000 多组值，导入 originPro 中，通过拟合可得所需近似逼近 e 指数函数，从而计算出 T_m 和 K。

图 4～图 7 中横轴为旋转变压器的码值所对应的序号值，纵轴为旋转变压器输出的码值，黑实线代表真实值曲线，红虚线代表按照近似逼近 e 指数函数 300 次连续逼近拟合后的曲线。从阶跃曲线中可以看出正向第一次拟合低码段，与真实曲线有细微的偏差。反向第一次测量其低码段有不明显的偏离，四幅拟合曲线图中的中高码段与真实曲线基本完全重合。可见应用 Origin 软件，按照近似逼近 e 指数函数去逼近真实曲线的效果很好。从图 4 和图 6 旁边的小放大图中可清楚看到。

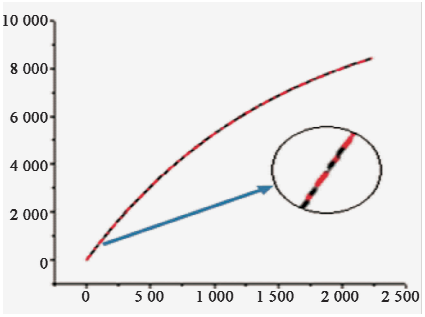


图 4 正向第一次拟合曲线图

Fig. 4 Positive first fitting curves picture

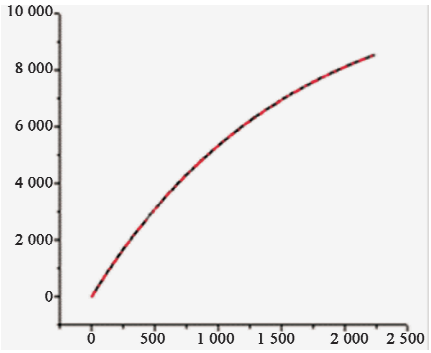


图 5 正向第二次拟合曲线图

Fig. 5 Positive second fitting curves picture

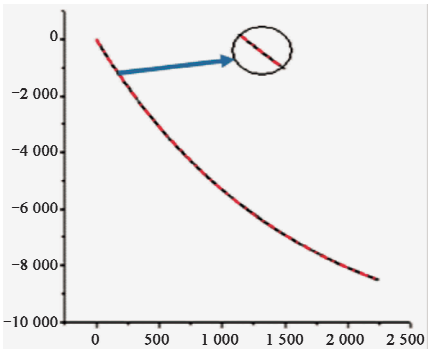


图 6 反向第一次拟合曲线图

Fig. 6 Negative frist fitting curves picture

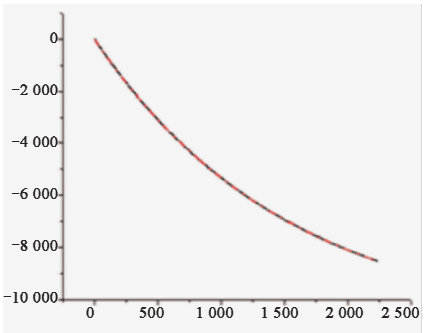


图 7 反向第二次拟合曲线图

Fig. 7 Negative second fitting curves picture

4.2　系统辨识精度分析

为方便得到试验结论，从 Origin 中提出数据得到表 1，从表 1 中可清晰看出可信度都大于 96%，误差均小于 0.1，完全满足工程中所需精度要求。另外，可从表 1 中计算出 P_1 的平均值为 11 067.228 67，P_1 的误差平均值为 0.095 4。P_2 的误差平均值为 0.025 7，P_2 的平均值为 1 530.074 615。通过式(4)和式(5)最终得到电机固有放大倍数为：$K=2.213\ 4$，由于旋转变压器采样频率为 800 Hz 即 0.001 25 s 可知电机机械时间常数为 1.912 6 s。所求值亦可在前述显控系统中显示。

表 1　试验数据拟合值表

Tab.1　Test data fitted value

	正向第一次测量	正向第二次测量	反向第一次测量	反向第二次测量	平均值
P_1 值	10 969	1 111	−11 085	−11 104	11 067
P_2 值	1 528	1 530	1 530	1 532	1 530
P_1 误差	0.086 4	0.192 22	0.082 49	0.078 73	0.095
P_1 可信度	0.965 7	0.965 84	0.965 79	0.965 89	0.966
P_2 误差	0.020 43	0.044 86	0.019 29	0.018 39	0.025
P_2 可信度	0.965 7	0.965 84	0.965 79	0.965 89	0.966

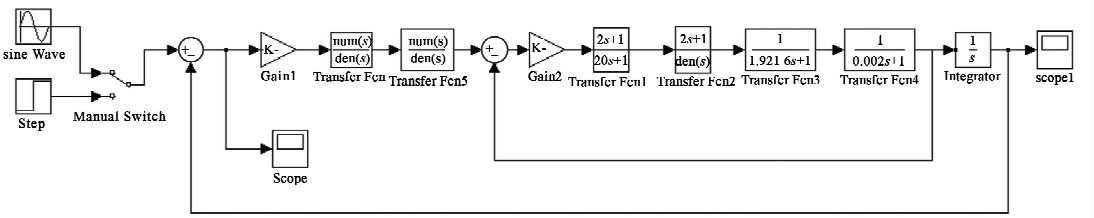


图 8　光电经纬仪模型方框图

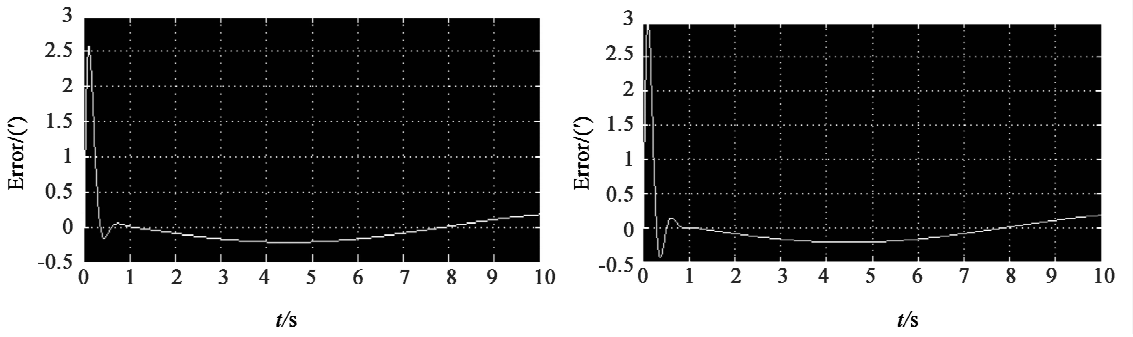
Fig.8　Optical-electrionic theodolite model block diagram

4.3　控制精度对比分析

常规法计算机械时间常数公式为

$$T_m=\frac{GD^2R}{375C_eC_m\Phi^2},\tag{6}$$

其中：GD^2 为转动惯量，R 为电阻，C_e 为电动势常数，C_m 为电磁转矩常数，Φ 为磁通量。将厂家给出的电机常数带入式(6)中得 $T_m=1.998\ 7$ s。光电经纬仪要求最大角速度 48°/s，最大角加速度 22°/s²，经计算可得到等效正弦，将此参数带入图 8 的 Sine Wave 中。再分别将常规公式法得到的 $T_m=1.998\ 7$ 和由 e 指数拟合阶跃法得到的 $T_m=1.921\ 6$ 带入图 8 中的 Transfer Fcn4 中，通过以上实际模型，经由 MATLAB 中的 SIMULINK 仿真得到如图 9(a)、(b)所示。



(a)新阶跃法误差图

(a)New step method error picture

(b)常规法误差图

(b)Routine method error picture

图 9　跟踪误差对比图

Fig.9　Tracking error comparsion picture

从图 9 中可清晰看到常规法最大误差 3′，e 指数阶跃法最大误差为 2.5′，跟踪误差明显得到改善。

5 结 论

经过试验对比分析可知，用 e 指数拟合的阶跃法误差小于 0.1，其置信度达到 96%以上，弥补了公式法获取 T_m 上的种种不足，并且克服了其他方法获取 T_m 困难、可信度和精度不高的难题。从跟踪误差对比图中可看到新方法得到误差减小 0.5’，可看到此方法在提高跟踪精度方面的优越性。同时方便的得到放大倍数 K，电机电气时间常数 T_e 可通过万用表测得，从而得到电机传递函数。在开发的人机交互界面上方便的修改、显示系统辩识结果。此方法在实际应用中方便、可行、有效，能够满足项目对 T_m 的精度需要。对系统辩识具有很好的通用性和借鉴性。

参 考 文 献：

[1] 苗本健. 伺服电动机动态参数辨识问题[J]. 伺服控制，2013(1)：39-41.
Miao B J. Servo motor dynamic parameter identification problem [J]. *Servo Control*，2013(1)：39-41. (in Chinese)

[2] 蔡莎莎，毛晓明，陈志勇，等. 同步电机调速系统参数辩识研究进展与展望[J]. 广东电力，2012，25(10)：29-32.
Cai S S，Mao X M，Chen Z Y，*et al*. Research progress and prospect of reference identification of synchronous motor speed control system [J]. *Guangdong Power*，2012，25(10)：29-32. (in Chinese)

[3] 张文海. 伺服电动机的时间常数问题[J]. 微特电机，2012，40(8)：75-76.
Zhang W H. Time constant problem of servo motor [J]. *Emotorcn*，2012，40(8)：75-76. (in Chinese)

[4] 冯清青. 永磁直流电机测试系统研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2012.
Feng Q Q. Research on permanent magnetic DC motor testing system [D]. Harbin：Harbin Engineering University，2012. (in Chinese)

[5] 刘琼. 直流伺服系统模型及其辩识[J]. 电气传动自动化，2012，34(6)：18-21.
Liu Q. The model and identification of DC servo system [J]. *Electric Drive Automation*，2012，34(6)：18-21. (in Chinese)

[6] 张升. 永磁无刷直流电机速度控制与模型参数辩识研究[D]. 北京：北方工业大学，2013.
Zhang S. Speed control and model parameters identification study of permanent magnet brushless DC motor [D]. Beijing：North China University of Technology，2013. (in Chinese)

[7] 王建峰，张天宏. 基于 MATLAB/XPC 的直流电机参数辩识及双闭环控制研究[J]. 测控技术，2011，30(12)：32-36.
Wang J F，Zhang T H. Study on parameter identification of DC motor and double closed loop control based on MATLAB/XPC [J]. *Measurement & Control Technology*，2011，30(12)：32-36. (in Chinese)

[8] 魏彤，郭蕊. 自适应卡尔曼滤波在无刷直流电机系统辩识中的应用[J]. 光学精密工程，2012，20(10)：2308-2314.
Wei T，Guo R. Application of adaptive Calman filter in Brushless DC motor system identify-cation [J]. *Optics and Precision Engineering*，2012，20(10)：2308-2314. (in Chinese)

[9] 喻冬梅，幸明强，汪建兵. 无刷直流电动机 T_m 和 T_l 测量方法[J]. 舰船科学技术，2011，33(10)：86-88.
Yu T M，Xing M Q，Wang J B. Brushless DC motor T_m and T_l measurement method [J]. *Ship Science and Technology*，2011，33(10)：86-88. (in Chinese)

[10] 潘先喜. 永磁同步电机的伺服控制系统研究与实现[D]. 武汉：武汉理工大学，2011.
Pan X X. Research and implementation of control system of permanentmagnet synchronous motor servo [D]. Wuhan：Wuhan University of Technology，2011. (in Chinese)

[11] 李焱，曹立华，王弟男. 惯导平台下舰载光电搜索跟踪系统的控制[J]. 光学精密工程，2011，19(5)：1126-1123.
Li Y，Cao L H，Wang D N. Controlling of shipborne optoelectronic searching and tracking system based on inertial navigation platform [J]. *Optics and Precision Engineering*，2011，19(5)：1126-1133. (in Chinese)

[12] 李焱，陈涛，曹立华. 舰载光电设备跟踪掠海目标的控制[J]. 光学精密工程，2010，18(5)：936-941.
Li Y，Chen T，Cao L H. Control of ship-based optoelectronic equipment for tracking near-sea targets [J]. *Optics*

and Precision Engineering，2010，18(5)：936-941.（in Chinese）

[13] 赵磊，王学亮，巩岩. 基于 FPGA 的液晶显示屏测试用标准白场装置[J]. 液晶与显示，2014，29(1)：94-100.
Zhao L，Wang X L，Gong Y. FPGA based white field apparatus for LCD calibration [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*，2014，29(1)：94-100.（in Chinese）

[14] 赵梓权，王瑞光，郑喜凤，等. LED 显示屏的色域校正[J]. 液晶与显示，2013，28(1)：92-98.
Zhao Z Q，Wang R G，Zheng X F，*et al*. Color Gamut correction of LED Displays [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*，2013，28(1)：92-98.（in Chinese）

作者简介：周俊鹏(1984－)，男，吉林省吉林市人，硕士研究生，主要从事电子学设计、动机座光电系统伺服控制、快速反射镜伺服控制等技术研究。E-mail：zhoujunpeng.g123@163.com

李焱(1980－)，男，吉林长春人，博士，副研究员，主要从事电子学设计、动机座光电系统伺服控制、舰载光电对抗设备总体设计等研究。E-mail：liy211@163.com