

文章编号: 2095-4980(2019)04-0610-06

一种用于高精度双框架伺服系统的标定方法

张 勇¹, 吴 浩², 王伟明³, 佘明华³, 李 欣³

(1.中国人民解放军 32181 部队, 河北 石家庄 050000; 2.陆军工程大学 电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003;
3.石家庄铁道大学 电气与电子工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘 要: 为实现对空间动态目标的稳定跟踪, 介绍了一种高精度双框架结构伺服系统, 通过标定提高了其指向精确度。利用旋转变压器作为角度位置传感器, 通过激光测距机和相机实现远场目标的稳定跟踪。利用高精度单轴转台、激光测距机和平面反射镜对伺服系统双框架指向精确度进行标定实验测量。针对伺服系统几何误差, 对获得的采样数据进行分段直线拟合, 并写入控制程序。对测量数据进行分段检索定位, 通过拟合直线参数对数据进行修正。实验结果表明, 标定后的双框架伺服系统指向精确度优于 16", 可有效提高伺服系统指向精确度。

关键词: 伺服系统; 标定; 指向精确度; 旋转变压器

中图分类号: TN249; TH161^{+.7} **文献标志码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA201904.0610

A calibration method for high-precision double gimbals servo system

ZHANG Yong¹, WU Hao², WANG Weiming³, SI Minghua³, LI Xin³

(1.32181 Unit of PLA, Shijiazhuang Hebei 050000, China; 2.Department of Electronic and Optical Engineering, Army Engineering University(Shijiazhuang Campus), Shijiazhuang Hebei 050003, China; 3.Department of Electrical and Electronics Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang Hebei 050043, China)

Abstract: In order to achieve the stability tracking of the spatial dynamic target, a high-precision double gimbals servo system is introduced and its pointing accuracy is improved by the calibration experiment. The resolver is used as the angle position sensor in the servo system which can realize the steady tracking of the far-field target by the laser rangefinder and the camera. The pointing accuracy of the servo system is measured by using the high-precision single-axis turntable, laser rangefinder and plane mirror. For the geometric error of servo system, the sampled data is fitted by sectional line and written into the control program. The measurement data is segmented and positioned, and is corrected by fitting the straight line parameters. The experimental results show that the pointing accuracy of double gimbals servo system has reached 16". This method can effectively improve the pointing accuracy of the servo system.

Keywords: servo system; calibration; pointing accuracy; resolver

伺服系统是指利用负反馈原理通过各种控制方法或策略, 使输出服从于输入的运动控制系统^[1]。为实现伺服系统高精度控制要求, 通常会对伺服系统传感器及整机进行标定。文献[2]提出一种新的基于速率转台恒速转动和位置转动相结合的旋转变压器测角误差动静组合标定方法。文献[3]通过采用 24 面棱体和自准直仪标定的方法获得角度实际误差值, 结合优化算法的曲线拟合方法计算误差模型参数。以上方法都是对旋转变压器进行标定以及误差补偿, 但伺服系统还受到平台框架加工、装配误差以及调校精确度等引起的几何误差影响, 导致指向精确度产生误差^[4]。文献[5]对光电探测系统指向精确度的误差源进行了分析, 提出基于半参数回归模型的标定算法来修正模型线性误差, 该方法获得了较好的标定效果, 但标定过程较为复杂。文献[6]针对导引头标定问题, 提出一种模型线性化和分步最小二乘估计相结合的指向误差标定方法, 该方法有较高的精确度和良好的稳定性, 但实验中利用激光跟踪仪成本较高。本文提出的双框架伺服系统属于指向精确度测量系统, 可通过光学系统实现远场目标的稳定跟踪^[7-8]。该伺服系统采用旋转变压器作为位置传感器, 其控制精确度主要取决于位置传感器的测量精确度。针对双框架伺服系统的几何误差进行补偿, 通过高精度单轴转台对整机进行

收稿日期: 2017-12-29; 修回日期: 2018-03-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51305455); 陆军装备部资助项目(ZS2014070140A12002)

测量、标定及校验，将标定结果进行直线拟合并写入伺服控制程序中。实验结果验证了该方法可大幅度提高伺服系统测角精确度，具有方法简单、精确度高且重复性好等优点。

1 高精度度双框架伺服系统组成

高精度度双框架伺服系统用于实现远场目标的稳定跟踪。利用激光测距机实时检测系统与被测目标之间的相对距离，同时输出框架角信息。控制方案采用位置、速度双回路反馈：旋转变压器提供角位置测量信号，目标与相机的相对运动构成位置反馈；微机械(Micro Electro Mechanical Systems, MEMS)速率陀螺的绝对角速度作为速度反馈，伺服控制系统组成如图 1 所示。相机测量出伺服系统角跟踪误差信号，通过算法处理和双回路反馈控制相机运动，实现对目标的双平面跟踪。常见的两轴双框式结构分为 U 型滚仰式双框架和方位/俯仰式双框架^[9]。其中 U 型滚仰式双框架随着离轴角减小，滚转框可能由于伺服电机的驱动能力不足而造成目标丢失，即产生过顶跟踪问题。方位/俯仰式双框架由于框架结构限制，角度摆动范围不如 U 型滚仰式大，但这种结构不会产生过顶跟踪问题，且控制方式简单。综上分析，在方案设计时采用方位/俯仰型式双框架结构，外框为方位通道，内框为俯仰通道，2 个控制通道相互独立，且组成和功能相同。为保证安装电机后的回转框架力矩平衡，在器件对称布置基础上做配平设计。

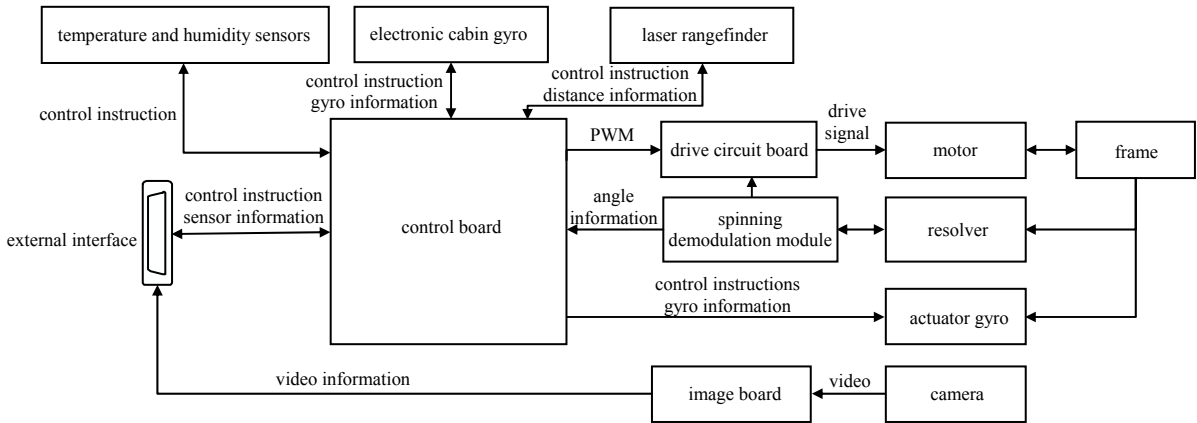


Fig.1 Architecture of servo and control system
图 1 伺服控制系统及结构组成

伺服系统硬件主要由伺服控制板、电机、激光测距机、相机、温湿度传感器、陀螺、旋转变压器等组成，该伺服系统设计指标如表 1 所示。伺服控制板辅以旋变解调模块、电源转换模块、串口通信模块、电机驱动单元等共同构成伺服控制硬件电路。目前各类高精度度伺服平台常用交流永磁同步电机和直流无刷电机^[10]。永磁同步电机测量精确度高但结构复杂，控制器成本高。直流无刷电机精确度稍低但转矩大，结构简单，制造成本低。考虑电机的输出转速和输出力矩等参数，选定直流无刷力矩电机作为本系统的驱动电机。陀螺采用低成本 MEMS 实现速度敏感及控制，与测速机及光电编码器测速方式相比，能够减小框架体积和质量，且在速度分辨力方面有更好的优势。指向伺服系统中使用的高精确度位置传感器多为精密电位器、光电编码器和旋转变压器^[11]。精密电位器价格低，精确度高但对环境要求高，重复性差。光电编码器响应性好但对环境敏感，抗干扰能力较差。旋转变压器结构简单，抗干扰能力强，环境适应性好。同等精确度与光电编码器价格相当，且外形尺寸小，本系统采用旋转变压器作为测角传感器。旋转变压器出厂时本身精确度满足要求并成线性变化，但旋转变压器装配完成后，传感器的零线与机械框架轴线偏差，会影响测量角度的准确性，同时还存在机械框架轴系垂直度误差和回转误差。

表 1 伺服系统设计要求
Table1 Design requirements of servo system

main indicators	technical parameters
range of motion	azimuth:from -90° to +90°; pitch:-50°~+40°
angle measurement accuracy	30"
maximum speed of rotation	40°/s
overall dimensions	Φ172 mm×280 mm
storage/operating temperature	-30℃~+55℃/-20℃~+45℃
load space and weight	70 mm×40 mm×130 mm
operating voltage	DC 24 V

2 高精度双框架伺服系统标定方法

伺服系统装配和制造时的几何误差都会影响伺服系统的指向精度。指向误差为目标理想指向与实际指向之间的误差^[12]，如图 2 所示。对双框架系统，指向误差可由方位误差 $\delta\alpha_i$ 和俯仰误差 $\delta\beta_i$ ($i=1,2,\dots,n$, n 为观测数据样本大小) 表征，则指向误差模型^[13-14]可表示为：

$$\begin{cases} \delta\alpha_i = \hat{\alpha}_i - \alpha_i = \sum_{j=1}^{m_a} a_j f_{aj}(\alpha_i, \beta_i) \\ \delta\beta_i = \hat{\beta}_i - \beta_i = \sum_{k=1}^{m_b} b_k f_{bk}(\alpha_i, \beta_i) \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\hat{\alpha}_i$ 和 $\hat{\beta}_i$ 为目标在方位和俯仰方向的实际指向； α_i 和 β_i 为对应的理想指向； a_j ($j=1,2,\dots,m_a$) 和 b_k ($k=1,2,\dots,m_b$) 为误差系数； $f_{aj}(\bullet)$ 和 $f_{bk}(\bullet)$ 为观测角度到指向误差的转换函数。

负载在惯性系发生俯仰和方位的角运动，不考虑控制系统等其他误差，其指向误差为 $\Delta\theta = \sqrt{\delta\alpha^2 + \delta\beta^2}$ ^[12]。

利用高精度单轴转台(以下简称转台)可以测得伺服系统在方位和俯仰方向的实际指向，控制伺服系统转轴与转台轴线平行，在方位与俯仰方向上对伺服系统进行角度补偿，从而得到方位误差与俯仰误差^[15]。

实验装置包括 TD-650 高精度单轴转台、30 cm×30 cm 平面反射镜和 60 cm×60 cm 十字靶板。将双框架伺服系统固定在转台上，将伺服系统方位框架转动中心与转台中心对准，十字靶板置于转台一侧，20 m 处放置平面反射镜。内框架搭载有激光测距机，使框架和转台读数置零，调整转台使激光光斑打到靶板中心(两侧画有误差边界线±4 mm)，实验方法如图 3 所示。该双框架伺服系统精确度要求优于 30"。分析实验方法误差，计算误差边界线范围是否满足精确度要求。转台精确度 $\delta=10''$ ，测量距离 $L=40$ m，激光光斑质心的读取误差 $\theta=1'$ ，人眼观测距离 $z=1$ m。 l 为理论靶线宽度， x 为人眼观测靶线宽度误差， l' 为满足精确度误差的靶线宽度。

$$l = \frac{30''}{3600} \times \frac{\pi}{180^\circ} \times 40000 = 5.877 \text{ mm} \quad (2)$$

$$x = z\theta = \frac{1}{60} \times \frac{\pi}{180^\circ} \times 1000 = 0.29 \text{ mm} \quad (3)$$

$$\delta_1 = \frac{x}{L} = \frac{0.29}{40000} \times \frac{180^\circ}{\pi} = 4.153 \times 10^{-4} = 1.4954'' \quad (4)$$

$$\Delta_1 = \sqrt{\delta^2 + \delta_1^2} = \sqrt{10^2 + 1.4954^2} = 0.0028 \approx 10.1'' \quad (5)$$

$$s = L\Delta_1 = 0.0028 \times \frac{\pi}{180^\circ} \times 40000 = 1.955 \text{ mm} \quad (6)$$

$$l' = 5.877 - 1.955 = 3.922 \text{ mm} \approx 4 \text{ mm} \quad (7)$$

式(2)为伺服系统测量精确度 30" 转化为靶板上测量范围。

式(3)~(4)为求得人眼观测激光光斑的角度误差。式(5)~(6)为将测量方法误差转化为靶板上测量范围。式(7)为求得去除测量方法误差靶板上光斑测量范围，经计算与实验方法吻合，满足测量精确度要求。

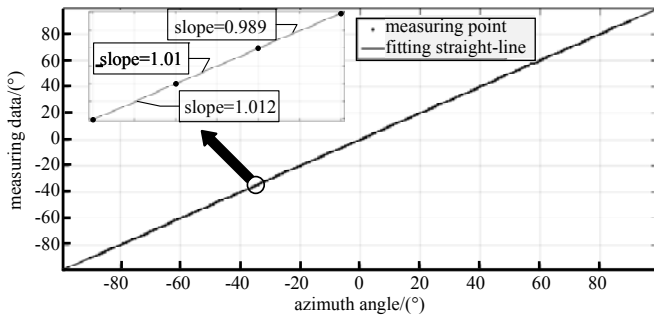


Fig.4 Fitting line of azimuth calibration
图 4 方位角标定结果拟合直线

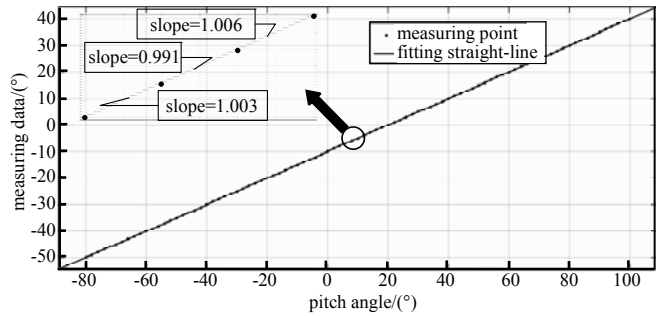


Fig.5 Fitting line of pitch calibration
图 5 俯仰角标定结果拟合直线

利用该实验方法进行标定，需要观测激光光斑与十字靶板的对准，因此采用静态标定方法。采样间隔越小，误差精确度越高，测量工作越繁琐。实际操作中在保证高精度要求的基础上，尽可能减少采样点，通过

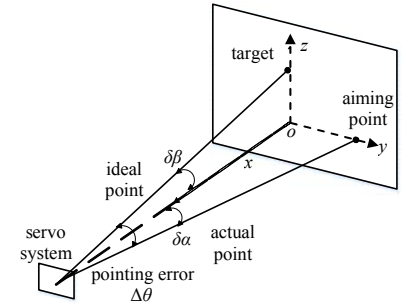


Fig.2 Pointing error of servo system
图 2 伺服系统指向误差图

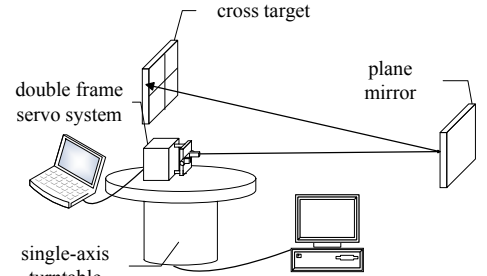


Fig.3 Experimental method of double gimbals servo system
图 3 双框架伺服系统实验方法

上位机控制伺服系统框架以 1° 的变化量对角度测量范围进行标定, 利用转台使激光光斑打到靶板中心, 记录转台测量值为真值。因旋转变压器本身精确度成线性变化, 在装配过程中引入一些微小误差量, 同时采样间隔满足测量需求, 因此可认为采样点之间的角度变化是线性的。分段拟合直线如图 4、图 5 所示。拟合结果基本呈线性变换, 通过放大, 可看到测量点之间的斜率变化, 说明测量精确度还存在较大误差。采用分段直线拟合方式对记录数值进行直线拟合, 将分段拟合直线写入伺服系统控制板中, 通过分区域检测的方式对测量值定位, 根据区域拟合直线的参数(斜率、截距及端点坐标)即可对测量误差进行修正。

3 实验结果与分析

标定前采用实验装置对伺服系统框架转角精确度进行测量和验证, 通过上位机控制框架转动相应角度, 控制转台使激光光斑始终打到靶板中心同一位置, 记录转台角度值即为方位框架转动角度真值。翻转伺服系统, 将伺服系统俯仰框架转动中心与转台中心对准。步骤与方位角测量相同, 记录俯仰框架转动角度真值。标定前 10° 范围内采样间隔为 5° , 10° 范围外采样间隔为 10° , 避免了测量过程繁琐, 同时包含 2 种采样间隔保证精确度。利用多项式拟合方法对测量结果进行直线拟合, 计算伺服系统转角精确度误差是否满足设计要求。测量结果误差分布如图 6、图 7 所示, 标定前伺服系统整体空间范围测量误差如图 8 所示。

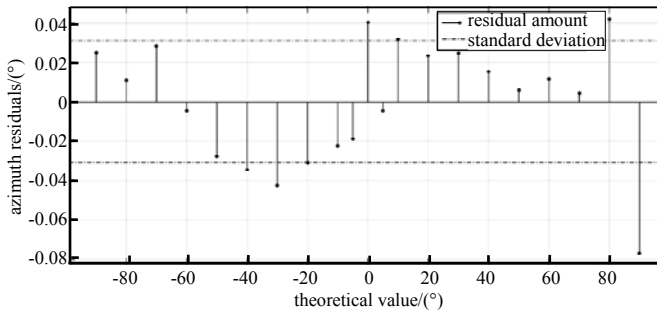


Fig.6 Error distribution of azimuth measurement results
图 6 方位角测量结果误差分布

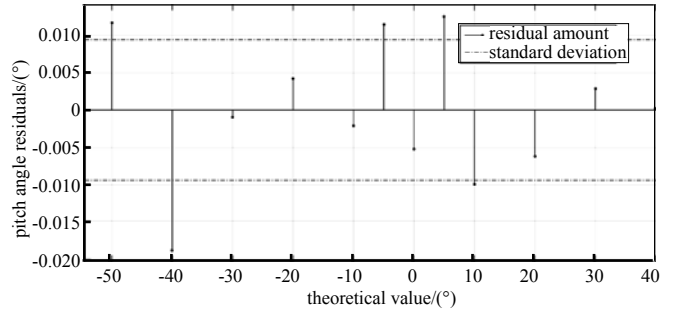


Fig.7 Error distribution of pitch angle measurement results
图 7 俯仰角测量结果误差分布

对标定前伺服系统框架转角进行测量, 分别在俯仰角范围和方位角范围进行逐点测量, 并计算测量点角度误差。根据 2 个方位的角度误差, 仿真模拟伺服系统空间角度指向误差, 经比较不满足伺服系统的指向精确度设计要求。经计算, 方位角测量误差为 $\Delta_{fw} = 0.03084 = 111''$, 俯仰角测量误差为 $\Delta_{fy} = 0.009434 = 33''$, 伺服系统指向精确度误差为:

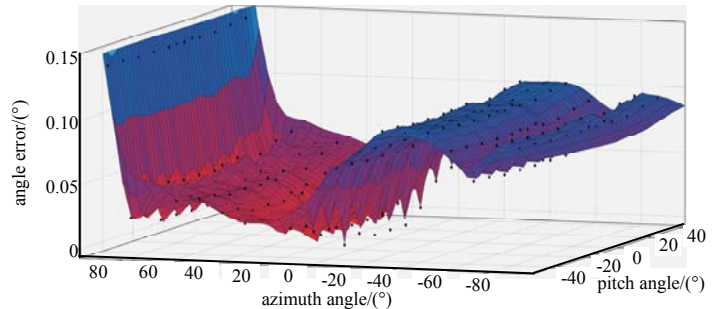


Fig.8 Spatial angle error of servo system before calibration
图 8 标定前伺服系统空间角度误差仿真图

$$\Delta = \sqrt{\Delta_{fw}^2 + \Delta_{fy}^2 + \Delta_l^2} = \sqrt{0.03084^2 + 0.009434^2 + 0.0028^2} = 116'' \quad (8)$$

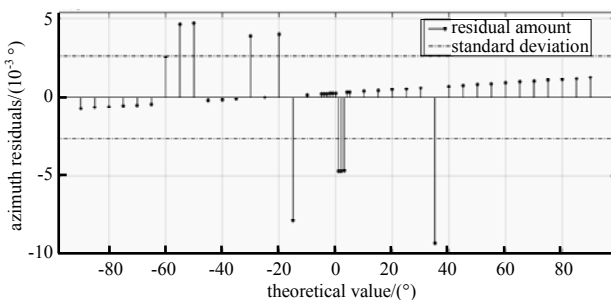


Fig.9 Error distribution of azimuth measurement results
图 9 方位角测量结果误差分布

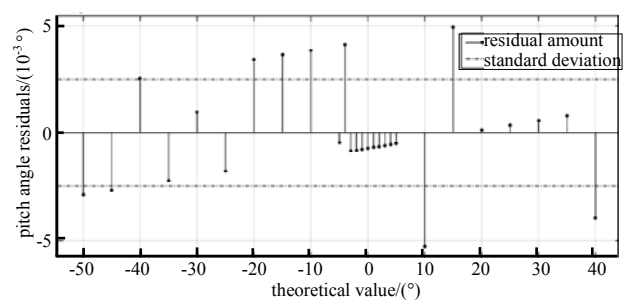


Fig.10 Error distribution of pitch angle measurement results
图 10 俯仰角测量结果误差分布

利用实验装置对伺服系统框架转角精确度进行测量和计算, 标定前测量时选取 10° 为采样间隔, 间距选取过大不利于曲线拟合和分析。因此标定后测量时在 5° 范围内以 1° 采样间隔进行测量, 5° 范围外以 5° 采样间隔进行测量。利用多项式拟合方法对测量结果进行直线拟合, 并计算伺服系统转角误差精确度。标定后测量结果误差分布如图 9、图 10 所示。仿真标定后伺服系统整体空间范围测量误差, 如图 11 所示。

通过对伺服系统俯仰及方位角的测量, 在一些角度存在偏差量较大的现象。经分析可能与旋转变压器的出厂精确度以及测量方法的误差有关。本方法采用设备相对简单, 测量过程中不可避免会存在一些误差, 如人眼观测误差、转台旋转误差等, 导致测量结果出现偏差。但从实验结果观测, 伺服系统的精确度得到了大幅提高。

对标定后伺服系统框架转角进行测量, 根据俯仰和方位 2 个方位的角度误差, 仿真模拟出双框架系统空间角度指向误差。与标定前伺服系统双框架转角精确度误差仿真模拟图相比, 标定后空间角度误差小, 整体变化趋于平稳。伺服系统指向精确度误差达到 $16''$, 方位角与俯仰角精确度都得到提高, 尤其是方位转角精确度提升 10 倍左右, 满足设计要求。方位角测量误差为 $\Delta_2 = 0.002\ 671 \approx 9.6''$, 俯仰角测量误差为 $\Delta_3 = 0.002\ 458 \approx 8.8''$, 伺服系统指向精确度误差为:

$$\Delta = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2} = \sqrt{0.002\ 8^2 + 0.002\ 671^2 + 0.002\ 458^2} = 16'' \quad (9)$$

4 结论

本文利用一种基于高精度单轴转台的标定方法, 测量伺服系统俯仰角和方位角真值, 并对采集的数据进行分段直线拟合。标定后方位角与俯仰角的误差均值分别由原来的 $111''$ 和 $33''$ 减小至 $9.6''$ 和 $8.8''$, 满足了伺服系统指向精确度设计要求。实验结果表明, 该标定方法对于双框架伺服系统具有较高的精确度和良好的稳定性, 能够有效修正系统误差。由于利用人眼观测激光光斑会引入观测误差, 下一步可通过数字图像处理或位置传感器进一步优化标定方法, 提高伺服系统标定精确度。

参考文献:

- [1] 莫会成, 闵琳. 现代高性能永磁交流伺服系统综述——传感装置与技术篇[J]. 电工技术学报, 2015, 30(6): 10–21. (MO Huicheng, MIN Lin. Summary of modern high performance permanent magnet ac servo system—sensor device and technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(6): 10–12.)
- [2] 张京娟, 张仲毅, 刘俊成. 一种新型的旋转变压器测角误差标定技术[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(1): 149–153. (ZHANG Jingjuan, ZHANG Zhongyi, LIU Juncheng. Novel method of calibrating the angle-measurement error of resolver[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(1): 149–153.)
- [3] 山丹, 胥效文, 史忠科. 一种旋转变压器误差分析和校正方法[J]. 计算机技术与发展, 2014(2): 183–185. (SHAN Dan, XU Xiaowen, SHI Zhongke. A method of analysis and calibration of resolver errors[J]. Computer Technology & Development, 2014(2): 183–185.)
- [4] 王涛, 朱明超, 阎胜利, 等. 稳定平台轴系精度对视轴指向误差的影响分析[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(11): 2265–2269. (WANG Tao, ZHU Mingchao, YIN Shengli, et al. Analysis of LOS pointing error derived from precision of shafting in stabilization mechanism[J]. Infrared & Laser Engineering, 2011, 40(11): 2265–2269.)
- [5] 张智永, 周晓尧, 范大鹏. 光电探测系统指向误差分析、建模与修正[J]. 航空学报, 2011, 32(11): 2042–2054. (ZHANG Zhiyong, ZHOU Xiaoyao, FAN Dapeng. Analysis, modeling and correction of pointing errors for electro-optical detection systems[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2011, 32(11): 2042–2054.)
- [6] 孙辉, 刘慧, 罗安治, 等. 应用模型线性化和最小二乘估计的导引头指向精度标定[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 2060–2068. (SUN Hui, LIU Hui, LUO Anzhi, et al. Calibration of seeker's pointing error based on model linearization and Least Square Estimation[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(7): 2060–2068.)
- [7] HILKERT J M. Inertially stabilized platform technology concepts and principles[J]. IEEE Control Systems, 2008, 28(1): 26–46.

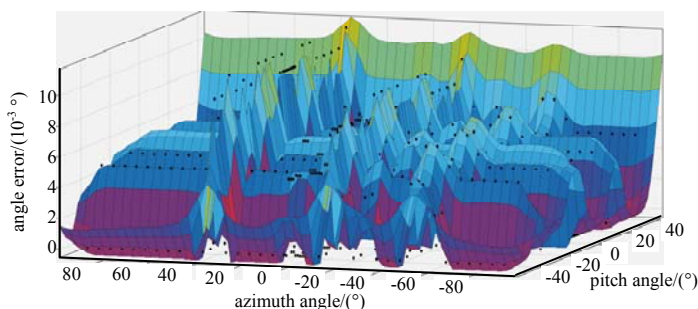


Fig. 11 Spatial angle error of servo system after calibration

图 11 标定后伺服系统空间角度误差仿真图

- [8] MASTEN M K. Inertially stabilized platforms for optical imaging systems[J]. Control Systems IEEE, 2008,28(1):47-64.
- [9] 张镇. 面向小型化红外导引头的交流伺服系统研制[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2016. (ZHANG Zhen. Research on ac servo system of the miniaturized infrared seeker[D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2016.)
- [10] 张勇,程小华. 无刷直流电机与永磁同步电机的比较研究[J]. 微电机, 2014,47(4):86-89. (ZHANG Yong, CHENG Xiaohua. Comparison study of brushless DC motors and permanent magnet synchronous motors[J]. Micromotors, 2014, 47(4):86-89.)
- [11] 周风余,李贻斌,苏学成,等. 高精度伺服控制系统位置检测单元的设计[J]. 电气传动, 2000,30(3):33-37. (ZHOU Fengyu, LI Yibin, SU Xuecheng, et al. Design of position-unit for high precision servo control system[J]. Electric Drive, 2000,30(3):33-37.)
- [12] 李岩,范大鹏. 光电稳定机构指向误差建模与敏感度分析[J]. 国防科技大学学报, 2008,30(1):104-109. (LI Yan, FAN Dapeng. Development of pointing error and sensitivity analysis of opto-electrical stabilization mechanism[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2008,30(1):104-109.)
- [13] 李岩. 光电稳定跟踪装置误差建模与评价问题研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2008. (LI Yan. A study on error modeling & evaluation of electro-optical stabilization/tracking equipment[D]. Changsha, China: National University of Defense Technology, 2008.)
- [14] RUE A K. Calibration of precision gimbaled pointing systems[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 1970,6(5):697-706.
- [15] 徐涛,李博,刘廷霞,等. 车载光电跟踪系统跟踪转台的初始标定[J]. 光学精密工程, 2013,21(3):782-789. (XU Tao, LI Bo, LIU Tingxia, et al. Initial calibration of tracking turntable of vehicle-borne optoelectronic tracking system[J]. Optics and Precision Engineering, 2013,21(3):782-789.)

作者简介:



张 勇(1974-), 男, 河北省邢台市人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为光电检测与图形图像处理.email:bit10701159@163.com.

吴 浩(1993-), 男, 河北省辛集市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为光电检测与图像处理.

王伟明(1979-), 男, 河北省保定市人, 博士, 讲师, 主要研究方向为增强现实技术.

李 欣(1990-), 女, 石家庄市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为机器视觉与图像处理.

倡明华(1992-), 男, 山东省郓城县人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为伺服控制技术.