

转台工作面角位置测量装置误差分析与补偿*

杨华晖^{1,2}, 冯伟利³, 刘福², 周军³, 马征⁴

(1. 军械工程学院导弹工程系 石家庄 050003; 2. 军械技术研究所 石家庄 050003;
3. 北京航天计量测试技术研究所 北京 100076; 4. 陆军驻长治地区军代室 长治 046012)

摘要:针对特定转台轴端角位置检测误差不能反映实际产品工作面空间角位置的问题,介绍了一种以圆光栅和水平电容传感器作为测角元件的转台工作面空间角位置定位测量装置。以提高空间测角精度为目的,重点对装置各项误差因素进行归类分析。除光栅和传感器分别存在的分系统测角误差外,测量装置还存在转轴与测量基面不平行、传感器敏感轴与测量基面不平行等误差项。为修正测角系统误差,根据圆光栅旋转面、传感器敏感轴、转轴轴系、测量基面的空间几何关系建立数学模型,分析系统误差影响因素。最后利用分度误差在0.3"高精度转台对校准装置进行标定,并利用径向基函数(RBF)神经网络建立误差补偿模型,对系统测角精度进行修正,使系统最大误差值由13.75"下降至2.9",满足了3"以内的测角精度需求。

关键词:角位置;圆光栅;水平电容传感器;误差补偿;神经网络

中图分类号: TH712 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4030

Error analysis and compensation of angular position measuring device for turntable working surface

Yang Huahui^{1,2}, Feng Weili³, Liu Fu², Zhou Jun³, Ma Zheng⁴

(1. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China; 2. Ordnance Technological Research Institute, Shijiazhuang 050003, China; 3. Beijing Aerospace Institute for Metrology and Measurement Technology, Beijing 100076, China; 4. Army Representatives Office in Changzhi, Changzhi 046012, China)

Abstract: The detection of angular positioning error on specific turntable shaft end cannot reflect its actual space angular position of working surface. Thus, a space angular position measuring device of turntable working surface is introduced with circular grating and horizontal capacitance sensor as its angle measuring components. The error factors of the measuring device are especially classified and analyzed in order to improve spatial angle measurement accuracy. Besides the angle measuring error of subsystem, the measuring device has error that the shafting or the sensitive direction of horizontal capacitance sensor is not parallel to the reference plane for measurement and others error terms. The mathematical model is established to analyze the factors of systematic errors and correct them according to the spatial geometrical relations of grating rotary surface, sensitive direction of sensor, rotation axis and reference plane for measurement. Then the measuring device is calibrated by using high-precision turntable with 0.3" indexing error. And the mathematical model of error compensation is established based on radial basis function (RBF) neural network to improve precision with the maximum error value decreased to 2.9" from 13.75" to satisfy angular measuring accuracy within 3" demand.

Keywords: angular position; circular grating; horizontal capacitance sensor; error compensation; neural network

1 引言

在国防工业和科研领域中,转台常用于角度测量设

备标定惯性器件或作为半实物仿真设备进行导航与制导技术的研究,因此对转台测角精度的要求也越来越高^[1-2]。高精度转台不仅要体现在轴端角度传感器(如圆光栅、多极感应同步器、时栅位移传感器)测角精度的提

高上,更不能忽略转台台面在俯仰、摇摆方向旋转时所形成的空间角位置的精度,这是因为往往转台台面才是用于标定定向设备和进行半实物仿真的实际部分,即转台工作面的空间角位置精度将会对标定和仿真实验结果产生重要影响。

对转台轴端角位置误差的检定通常采用《GJB1801-93 惯性技术设备主要性能试验方法》中规定的方法,即在转台轴端安装多面棱体或多齿分度台加平面镜的方法,但该方法很难直接体现转台工作面在俯仰、摇摆方向旋转时的空间角位置误差。转台轴端角位置是测量轴外端某点位置围绕轴系直线旋转形成的静态角,而空间角位置是测量转台工作面上某点位置围绕轴系直线旋转所成角度,确保转台输出角度能反映工作面在空间某点的实际角位置。

转台输出角位置除测角传感器本身包括的机械安装误差、刻线误差、细分误差外^[3],转台台面工作过程中还存在震动误差、旋转偏心误差等,其中工作面(某点)绕轴系的旋转轨迹与轴端偏心误差实际转角和测量转角的差值,该测角偏差与圆光栅安装偏心角误差具有相似的几何关系^[4,6]。

针对上述误差分析,本文利用圆光栅和水平电容传感器(电子水泡)设计实现了一种转台工作面空间角位置定位测量装置,在此基础上对该装置的测角误差项进行分类分析,建立空间几何数学模型,对测量过程中存在的系统误差进行理论分析和仿真研究。针对复杂、非线性测角系统误差补偿方法有自适应神经模糊推理系统^[7]、遗传算法参数优化方法^[8]、四元数法^[9]以及动态模糊神经网络^[10]等,本文采用径向基函数(radial basis function, RBF)神经网络^[11-12]建立误差补偿模型,对经过理论分析的系统误差进行补偿研究,具有误差模型逼近精度高、补偿速度快、算法易于实现等优点。

2 空间角位置定位测量装置

2.1 空间角位置定位测量原理

转台轴端角位置误差使用多面棱体和光电自准直仪标定时,是在 $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, \dots, 360^\circ$ 的定位角位置进行检测,采用全组合测量方法,目的是消除由多面棱体引入的偏差以及测量的随机误差。采用全组合法虽然提高了测量精度,但定位位置和数据量太多,进行完整的一组测量需要5 000多个定位位置的数据,不利于满足转台装备的计量保障需求。

图1所示为空间角位置定位测量装置原理。测量装置固定在转台工作面上,测量基面与工作面装调至平行,主轴轴端固定有圆光栅,电子水泡固定在装置转轴内,可随转轴在任意角度内的倾斜翻转,可以输出其敏感轴与

大地水平面间的倾斜角度,起到相对测量零位的作用。当转台工作面在空间内沿旋转轨迹由起始位置运动至测量位置时,装置测量基面随转台工作面共同翻转,校准装置转轴在电机控制下,反向旋转至电子水泡敏感轴与水平面平行,此时圆光栅前后读数差值即为转台工作面空间角位置翻转的真实角度,如图1两个 θ 角所示,该方法有效避免了轴端旋转与工作面旋转的偏心误差以及随大地震动等造成的随机误差,并反映出台面在俯仰、倾斜方向翻转时的实际空间角位置信息。使用该方法可对转台工作面 360° 整周范围内不同定位角位置误差进行检测,具体测量位置可根据转台实际校准需求确定,具有方法简单、高效快速等优点^[13]。

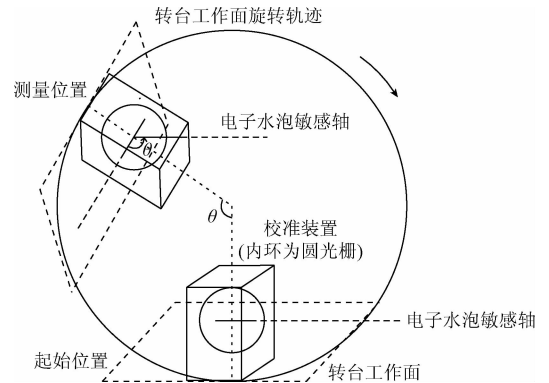


图1 空间角位置定位测量原理

Fig. 1 Principle of space angular positioning measurement

2.2 校准装置的应用

校准装置可在实验室及室外复杂环境下对转台、倾斜台、摇摆台等通用转台的空间角位置误差进行快速现场校准,替代自准直仪、多面棱体等难以装调的精密设备,满足装备计量保障单位的校准工作需求。

校准装置其准备可分为安装面调平和稳定性测试两个方面,其自动化程度高、数据处理快速高效;测试流程可分为光栅盘过零、电子水泡调零和空间角位置测试3个步骤。图2所示为使用校准装置对某型转台内框空间角位置定位测量的现场。

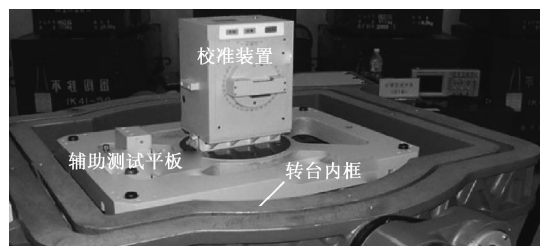


图2 转台内框角位置校准现场

Fig. 2 The angular position calibration scene of turntable inner frame

3 测角误差项分析与建模

3.1 测角误差项分析

由上述空间角位置测量原理分析可知,该测角系统主要可以分为圆光栅测角误差、电子水泡测角误差和测量基面与转轴几何关系引入的误差,如表1所示。圆光栅测角误差与其在转台、坐标测量机、车床等方面应用时产生的误差项相同,可以利用光电自准直仪和多面棱体进行标定,也可以通过偏差补偿和细分误差校准的方法减小影响^[14-15]。电子水泡测角误差主要是由水平电容传感器输出的不稳定电压引起的,但由于其输出线性度较好,因此可以通过线性插值的方法进行补偿。因此以上两种分系统测角误差均可单独进行修正。

表1 测角系统误差项分析

Table 1 Error analysis of angle measuring system

误差项	具体描述
圆光栅测角误差	1) 机械安装误差(偏心、径向跳动等)
	2) 光栅细分误差、刻线不均匀误差
	3) 读数头及测量电路引入误差
电子水泡测角误差	1) 示值误差(只考虑小范围 $\pm 20''$ 以内)
	2) 零位稳定性误差
测量基面与转轴轴系误差	1) 转轴与测量基面不平行引入误差
	2) 电子水泡敏感轴与测量基面不平行引入误差
	3) 测量基面平面度引入误差

在测量基面与转轴引入的3项误差当中,测量基面平面度引入误差由于还受到转台工作面的影响,此处不作为该校准装置的系统误差进行标定和补偿。转轴与测量基面以及电子水泡敏感轴与转轴几何关系相对确定,可以通过空间几何建模方法进行确定,所以看作系统误差。

3.2 转轴轴系与测量基面不平行引入的误差

分析当转轴轴系与测量基面不平行引入的误差,如图3所示,平面1为水平基准面,平面2为旋转后工作面或测量基面所在平面,平面3为轴系与测量基面不平行时圆光栅所在的旋转面。向量 n 为平面3法向量,即实际转轴轴系方向所在的向量。此时转轴与测量基面之间引入的夹角为向量 n 与平面2之间的夹角 α ,电子水泡敏感轴方向为向量 e 所在直线方向,工作面实际转角为 β_1 。当转轴带动光栅逆向旋转时,电子水泡敏感方向由 e 转至 e' ,光栅实测角度为 β_2 ,引入偏差为:

$$\Delta\beta = \beta_2 - \beta_1 \quad (1)$$

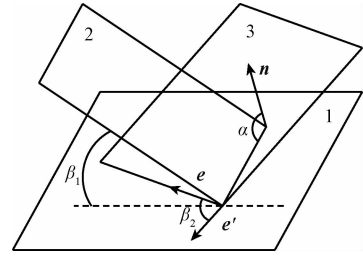


图3 转轴轴系与测量基面不平行情况示意图
Fig. 3 Schematic diagram of shafting and measuring base in non-parallel situation

为进一步分析测角偏差 $\Delta\beta$,建立几何模型如图4所示。

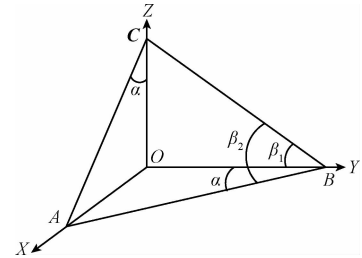


图4 轴系与基面几何空间建模

Fig. 4 Spatial geometric modeling of shafting and base

面 YOZ 为理想情况下圆光栅旋转面,面 ABC 为偏差情况下旋转面。根据几何关系,面 YOZ 与面 ABC 夹角为 α ,因此有:

$$\angle ACO = \angle ABO = \angle \alpha \quad (2)$$

设坐标点 $A(a, 0, 0)$ 、 $B(0, b, 0)$ 、 $C(0, 0, c)$,则有:

$$\cos(\beta_1) = \frac{b}{\sqrt{b^2 + c^2}} \quad (3)$$

$$\cos(\alpha) = \frac{b}{\sqrt{a^2 + c^2}} \quad (4)$$

根据余弦定理,则有:

$$\cos(\beta_2) = \frac{BC^2 + BA^2 - AC^2}{2 \cdot BC \cdot AB} = \cos(\beta_1) \cdot \cos(\alpha) \quad (5)$$

根据几何关系,偏差角 $\Delta\beta$ 为:

$$\Delta\beta = \arccos(\cos(\beta_1) \cdot \cos(\alpha)) - \beta_1 \quad (6)$$

由以上建模分析可知,由转轴轴系和测量基面倾斜角 α 引起的测量误差随工作面旋转面角度的变化而变化,其误差值 $\Delta\beta$ 可表示为旋转角度 β_1 的函数。为较直观观察误差值 $\Delta\beta$ 的变化规律,利用MATLAB做出旋转角度 β_1 在 $0 \sim \pi$ 内的变化曲线($\pi \sim 2\pi$ 位置根据对称性可知),如图5所示,取倾斜角 $\alpha = 25''$ 。

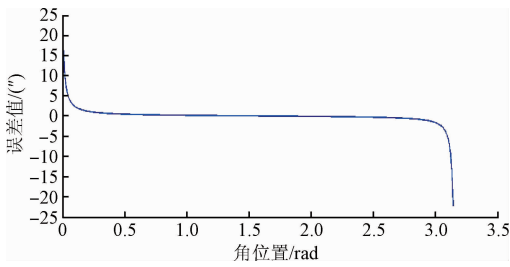


图 5 误差值 $\Delta\beta$ 变化曲线

Fig.5 Changing curve of error $\Delta\beta$

由图 5 可以看到,误差值在角位置在 0 和 π 位置附近幅值较大,对测量装置测量精度影响较大,误差项不能忽略,需要标定后进行修正。

3.3 电子水泡敏感轴与测量基面不平行引入误差

水泡敏感轴和基面不平行情况如图 6 所示,转台工作面旋转至任何定位角位置,电子水泡敏感轴方向与测量基面的相对位置关系都不会改变,即始终与测量基面的夹角为 γ 。由于 γ 角的存在,则在定位角位置进行测量时会引入一固定分量偏差,但两个固定位置的相对旋转角度不会引入偏差分量,即为:

$$\begin{cases} \Delta\beta = \gamma \\ (\beta + \gamma) - (\beta' + \gamma) = \beta - \beta' \end{cases} \quad (7)$$

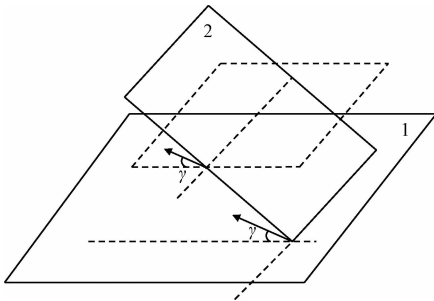


图 6 水泡敏感轴与基面不平行情况示意图

Fig.6 Schematic diagram of sensor and measuring base in non-parallel situation

4 RBF 神经网络

经上述分析可知,转轴轴系与测量基面不平行以及电子水泡敏感轴与测量基面不平行引入的误差均为系统误差,应该建立误差模型进行修正。考虑到测量装置由圆光栅和电子水泡两个测角元件组成,其分系统测角误差也会对空间定位角位置误差产生影响,即两测角元件之间相关性较大,误差成因复杂,不具有线性规律,因此本文采用 RBF 神经网络对空间角位置标定误差进行预测和补偿。

径向基函数神经网络在 20 世纪 80 年代由 Moody J 和 Darken C 提出,是一种 3 层前馈网络,包括输入层、隐

含层和输出层,网络结构如图 7 所示,能以任意精度逼近任意连续函数,具有学习收敛速度快、全局最优及逼近精度高等优点。

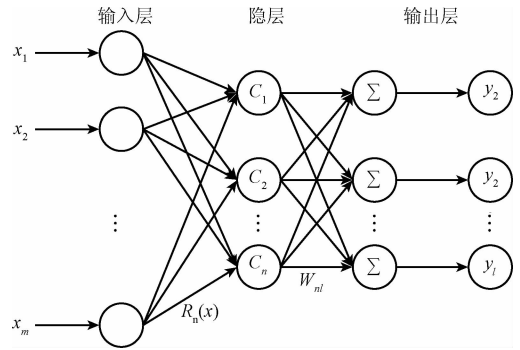


图 7 RBF 神经网络拓扑结构

Fig.7 RBF neural network topology architecture

图 7 中 $R_n(x)$ 为 RBF 网络隐含层的激活函数,能对输入信号产生局部响应,因此输入信号 x_m 越靠近 $R_n(x)$ 的中央范围,隐含层神经元的输出越大。RBF 神经网络常用隐层激活函数有薄样条函数、多重二次函数、逆多重二次函数和高斯函数。为使误差补偿函数具有局部逼近能力,选取高斯函数为 RBF 神经网络的激活函数,则网络输出为:

$$y_i = \sum_{i=1}^n w_{ni} \exp\left[-\frac{\|X_k - c_{ki}\|^2}{2\sigma_k^2}\right] \quad (8)$$

$$\sigma_k = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^l \|d_j - y_j c_j\|^2 \quad (9)$$

式中 y_i 为学习样本网络的输出, W 为输出权值矩阵, C_{ki} 为网络隐层结点的中心向量, σ_k 为对应径向函数的宽度, $\|\cdot\|$ 表示欧氏距离。

该误差补偿模型中,空间角位置误差与工作面旋转角度有对应关系,因此将工作面空间转角作为 RBF 神经网络的输入层变量 x ,角位置误差作为输出层期望 y ,神经网络训练需要空间角位置的标定数据。

5 标定实验与误差补偿研究

5.1 空间角位置误差标定方法

空间角位置标定仪器可以选用立式多齿分度台或数显台,但按照计量校准要求,标定仪器的精度至少应该是被测仪器的 4 倍以上,对于误差在 3'' 以内的空间角位置测量装置,常用分度台和数显台均难以满足要求,因此文中采用经全组合法标定过的分度精度在 0.3'' 以内的气浮转台作为空间定位角位置校准仪器,校准方法如图 8 所示。

如图 8 在转台轴端固定辅助测试的角板,被校准仪器测量基面吸附在角板上,测试之前需要调整角板吸附面与水平面平行。随后转台以 5° 为间隔向某一方向旋转,被测仪器则向相反方向旋转,取转台输出角度 θ_1 ,被测仪器输

出角度 θ_2 , 空间角位置误差 $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$, 整周共测 72 组误差数据, 测量组数 5 组, 未发现有异常点数据, 且被测仪器角度重复性不超过 $0.5''$, 保证了误差曲线的封闭性。

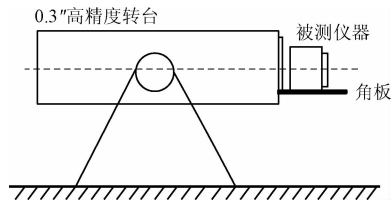


图 8 空间定位角位置校准方法

Fig. 8 Calibration method of space angular position

5.2 误差补偿研究

选取重复项较好的一组数据进行误差补偿仿真验证, 以 $0^\circ, 10^\circ, \dots, 350^\circ$ 的误差值作为网络训练样本, 图 9 所示为该样本学习能力检验曲线; 以 $5^\circ, 15^\circ, \dots, 355^\circ$ 的误差值作为测试样本, 图 10 所示为该样本的推广能力检验曲线。RBF 神经网络误差补偿模型中设置神经元最大数目 600, 扩展速度 150, 训练消耗时间为 6 s, 综合学习和推广能力曲线可以看到, 该模型逼近和推广能力较强, 具备角位置误差预测补偿能力。

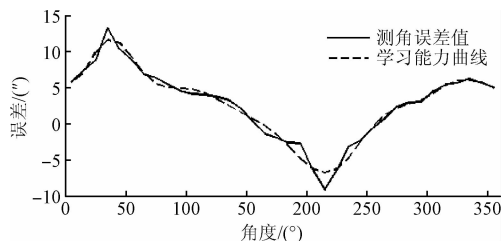


图 9 样本学习能力曲线

Fig. 9 Curve of sample learning ability

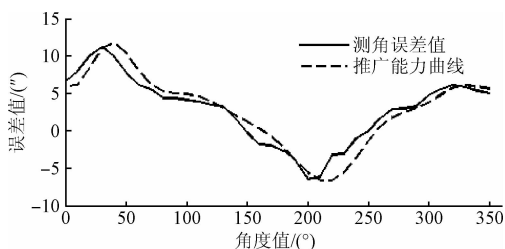


图 10 样本推广能力曲线

Fig. 10 Curve of sample generalization ability

为进一步分析空间角位置测量装置误差变化规律以及 RBF 神经网络补偿效果, 做出补偿前后误差变化曲线进行观察, 如图 11 所示。原始误差值曲线较 y 轴零线有偏移量, 即加入了某个正值角度的误差分量, 但曲线总体变化与前述分析的由转轴轴系和测量基面倾斜角 α 引起的系统误差曲线存在差异, 经分析为测角分系统圆光栅误差叠加引起的, 变化曲线接近正弦变化规律。

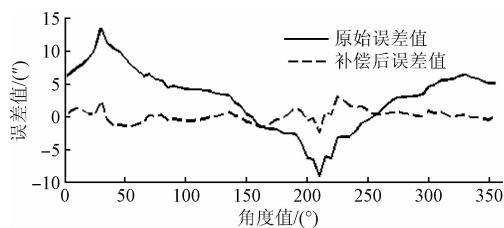


图 11 补偿前后误差曲线对比

Fig. 11 Correlation curve before and after the error compensation

从图 11 的误差补偿效果来看, 补偿前后标准偏差由 $4.68''$ 下降至 $0.96''$, 最大误差值由 $13.75''$ 下降至 $2.9''$, 满足角位置测量装置的 $3''$ 以内的需求, 且误差曲线明显趋于平缓, 补偿效果明显。

6 结 论

在分析传统转台角位置定位误差测量方法的基础上, 介绍了一种用于校准转台工作面空间角位置误差的测量装置, 测角元件采用圆光栅和电子水泡。

分析了测量装置的误差项, 并针对测量基面和转轴轴系引入的系统误差进行空间建模分析, 并仿真出系统误差变化曲线进行观察, 该分析方法对其它空间测角误差分析有参考价值。

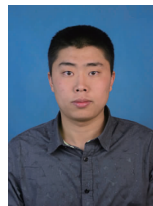
介绍了一种利用高精度标定空间角位置测量装置的方法, 并运用 RBF 神经网络对测得误差数据进行建模预测和修正, 并对补偿前后误差曲线做进一步分析。

参考文献

- [1] 杨黎都, 肖本龙, 张程, 等. 三轴仿真转台动态性能对仿真试验影响分析[J]. 电子测量技术, 2011, 32(12): 28-31.
YANG L D, XIAO B L, ZHANG CH, et al. The impact analysis of three-axis motion simulator dynamic performance on simulation [J]. Electronic Measurement Technology, 2011, 32(12): 28-31.
- [2] 杜壁秀, 米阳, 张淑梅. 变结构控制在高精度转台系统中的应用[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(9): 68-71.
DU B X, MI Y, ZHANG SH M. Application of variable structure control for high precision turntable [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2014, 33(9): 68-71.
- [3] 陈晓怀, 杜国山, 程真英. 光栅测量系统的误差研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(3): 187-191.
CHEN X H, DU G SH, CHENG ZH Y. Research on dynamic error of grating measurement system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2012, 26(3): 187-191.
- [4] 郑大腾, 谢世坤, 罗志扬, 等. 关节臂坐标测量机圆光

- 栅偏心误差建模及修正研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(10): 1568-1574.
- ZHENG D T, XIE SH K, LUO ZH Y, et al. Circular grating eccentricity error modeling and correction of articulated arm CMMs [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2016, 30 (10): 1568-1574.
- [5] 艾晨光, 褚明, 孙汉旭, 等. 基准圆光栅偏心检测及测角误差补偿[J]. 光学精密工程, 2012, 20 (11): 2476-2484.
- AI CH G, CHU M, SUN H X, et al. Eccentric testing of benchmark circular grating and compensation of angular error [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(11): 2476-2484.
- [6] 刘昱, 张宇, 潘军, 等. 重力梯度测量中光栅角编码器安装误差的影响及分析[J]. 中国惯性技术学报, 2015, 23(1): 6-8.
- LIU Y, ZHANG Y, PAN J, et al. Influence and analysis of optical angular encoder's installation error in gravity gradiometry [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2015, 23(1): 6-8.
- [7] 王艳永, 邓方, 孙健. 改进的自适应神经模糊推理系统的角度传感器误差补偿方法 [J]. 控制理论与应用, 2013, 30(10): 1342-1346.
- WANG Y Y, DENG F, SUN J. Improved adaptive neural-network-based fuzzy inference system angular sensor error compensation method [J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(10): 1342-1346.
- [8] 劳达宝, 周维虎, 李万红, 等. 基于遗传算法的柱面光栅测角技术研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(7): 2182-2188.
- LAO D B, ZHOU W H, LI W H, et al. Cylindrical grating angle measurement technology based on genetic algorithm [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(7): 2182-2188.
- [9] 贾建援, 柴伟, 于大林等. 方位俯仰转台误差参数辨识与指向精度分析[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(7): 1500-1508.
- JIA J Y, CHAI W, YU D L, et al. Error parameters identification and pointing accuracy analysis of an azimuth-elevation turntable [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument. 2016, 37(7): 1500-1508.
- [10] 王福吉, 贾振元, 阳江源, 等. 基于动态模糊神经网络的机床时变定位误差补偿[J]. 机械工程学报, 2011, 47(13): 175-179.
- WANG F J, JIA ZH Y, YANG J Y, et al. Time-varying position error compensation of machine tools based on dynamic fuzzy neural networks [J]. Journal Of Mechanical Engineering, 2011, 47(13): 175-179.
- [11] 邵婷婷, 樊延虎, 林开东. 基于 RBF 神经网络的电子罗盘误差补偿研究[J]. 电子测量技术, 2014, 37(3): 36-38.
- SHAO T T, FAN Y H, LIN K D. Research on error compensation of electronic compass based on RBF neural network [J]. Electronic Measurement Technology, 2014, 37(3): 36-38.
- [12] 高贯斌, 王文, 林铿, 等. 基于 RBF 神经网络的关节转角误差补偿[J]. 机械工程学报, 2010, 46(12): 20-24.
- GAO G B, WANG W, LIN K, et al. Error compensation of joint angles based on rbf neural networks [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(12): 20-24.
- [13] 刘杨, 吕恒毅, 王岩, 等. 光通信粗瞄系统莫尔条纹信号正弦性补偿方法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(8): 1735-1740.
- LIU Y, LV H Y, WANG Y, et al. Compensation method of Moire fringe sinusoidal deviation in satellite optical communication coarse pointing system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 33 (8): 1735-1740.
- [14] 冯英翘, 万秋华. 小型光电编码器细分误差校正方法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(6): 1374-1379.
- FENG Q Y, WAN Q H. Interpolation error calibration method of small photoelectric encoders [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34 (6): 1375-1379.
- [15] 何绪龙, 冯伟利, 郑应强, 等. 角位置定位误差检测及补偿技术[J]. 宇航计测技术, 2008, 28(2): 11-13.
- HE X L, FENG WEI L, ZHENG Y Q, et al. The error of angular measurement and its compensation [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2008, 28(2): 11-13.

作者简介



杨华晖, 分别在 2014 年和 2016 年在军械工程学院获得学士和硕士学位, 现为军械工程学院博士研究生, 主要研究方向为装备计量检定、信号测试和处理。

E-mail: yanghuahui1992@163.com

Yang Huahui received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Ordnance Engineering College in 2014 and 2016, respectively. Now he is a Ph. D. candidate in Ordnance Engineering College. His main research interests include measurement and calibration of equipment, signal testing and processing.



冯伟利, 1985 年于天津大学获学士学位, 现为北京航天计量测试技术研究所研究员, 主要研究方向为定向瞄准技术、发射技术及相关理论等。

E-mail: f13501036004@sina.com

Feng Weili received his B. Sc. degree from Tianjin University in 1985. Now he is a research fellow in Beijing Aerospace Institute for Metrology and Measurement Technology. His main research interests include directional sighting technology, transmission techniques and related theories.