

文章编号 1004-924X(2013)02-0294-07

用动态水平基准测量系统实时 测量船体横扭角和纵挠角

王晓明^{1,2}, 张尧禹¹, 乔彦峰^{1*}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 设计了动态实时水平基准测量系统, 讨论了用该测量系统测量远望号测量船变形角的可行性及利用该系统测量船体横扭角和纵挠角的原理和误差项。依据测量船的实际需要确定了动态水平基准测量系统的关键技术指标, 并分析了测量船体横扭角和纵挠角的测量精度。分析结果表明: 系统对船体横扭角和纵挠角的测量误差均不大于 $3''$, 测量距离理论上不受任何限制, 远大于 200 m(测量船船体长度)。利用现有外场试验条件进行了码头停靠状态下远望号测量船两测量点间的船体横扭角和纵挠角测量试验, 结果表明: 利用动态水平基准测量系统实时测量船体横扭角和纵挠角的方法切实可行, 不仅提高了测量精度, 而且克服了传统的大钢管基准测量法体积大、重量沉, 装调及维护困难等缺陷。实验显示, 该动态实时水平基准测量系统的应用领域相对广泛。

关键词: 测量船; 纵挠角; 横扭角; 水平基准; 动态测量

中图分类号: U674.82; TB922 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132102.0294

Real-time measurement of ship's transverse and vertical twist angles by dynamic horizontal datum measuring system

WANG Xiao-ming^{1,2}, ZHANG Yao-yu¹, QIAO Yan-feng^{1*}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

** Corresponding author, E-mail: YanfengQiao@ciomp.ac.cn*

Abstract: A dynamic real-time horizontal datum measuring system was designed and the feasibility of the measurement system used to measure the twist angles of Yuan Wang tracking ship was discussed. Then the measuring principle and the measuring errors of the system when it measured transverse and vertical twist angles were analyzed. According to the measuring demands, the key technical specifications were determined and the measurement accuracies on transverse and vertical twist angles were analyzed. The analyzed results show that the measurement errors for transverse and vertical twist angles of the measurement ship are not more than $3''$, and the measuring distance is without any restrictions

收稿日期: 2012-01-12; 修订日期: 2012-03-01.

基金项目: 国防科技预言基金资助项目 (No. 1040603)

in theory, much longer than 200 m(the length of Yuan Wang surveying vessel). A measuring experiment was performed on the transverse and vertical twist angles of the Yuan Wang tracking ship when it is a docking state, results show that the proposed method is feasible, and it can not only increase the measurement accuracy, but also overcomes the drawbacks from the traditional large steel pipe based the method. It is characterized by compact dimensions, lower weights and wider application fields.

Key words: surveying vessel; transverse angle; vertical twist angle; horizontal standard; dynamic measurement

1 引言

远望号航天测量船采用单站测量体制,测控设备以船舶为平台在动态条件下进行测量,因此其位置和姿态在不断变化。在测控设备跟踪被测目标时,只有对船的位置和姿态进行同步测量,并在船体坐标系和大地坐标系之间进行坐标变换,才能对测控设备与整个试验航区建立正确的联系。基于惯性导航技术的船位船姿测量系统作为全船的精度基准,各测控设备相对于基准惯性导航设备的扭转变形角的测量由基于大钢管两测量点相对变形测量体制来完成,该体制是著名光学专家王大珩院士提出和建立的^[1-4]。虽然大钢管基准测量法很好地解决了船体测量点扭转变形角的测量问题,但是其复杂的结构、庞大的体积给设备的安装调试和标校使用带来诸多不便。同时,因为大钢管基准测量体制占据了船上大量宝贵的空间资源,所以其应用受到极大限制^[5-6]。为了解决这些问题,本文设计了动态实时水平基准测量系统,该系统是以完成船体被检基面相对绝对大地水平基准的实时精密测量为目的而构建的光、机、电一体化高精度测量仪器。它以惯性导航设备提供的船体水平姿态信息为支撑,以绝对大地水平面为测量基准,利用光学编码器测角原理和光学自准直测角原理实现对船体二维扭转角的精密测量。通过测量系统获取的自准直光管星点像信息和复示平台编码器的角度信息,并依据误差传递原理分析解算中存在的误差项以及各误差项对解算结果的影响,进而确定系统的总体设计指标。最后,利用现有外场试验条件进行了码头停靠状态下远望号测量船两测量点间的船体二维扭转角测量试验。本设计中选用光学自准直测微原理测量船体横扭角和纵挠角,并结合光学系统参

数和测量系统的系统误差对测量结果进行解算分析。分析结果显示,测量系统对船体横扭角和纵挠角的实时测量误差均不大于 3"。

2 动态实时水平基准测量原理

2.1 测量系统关键技术指标的确定

2.1.1 测量系统组成

动态实时水平基准测量系统的总体组成主要包括:探测装置(惯性同步复示平台,平台误差检测工具)和电子学系统(图像处理模块、编码器电路控制模块、跟踪伺服模块、数据通讯模块、系统同步模块、显示控制模块)两大部分。对外接口主要包括:惯性导航接口(姿态角度)、外部系统接口(GPS, IRIG-B)和综合信息网络平台接口(结果输出)等 3 个部分,测量系统组成如图 1 所示。

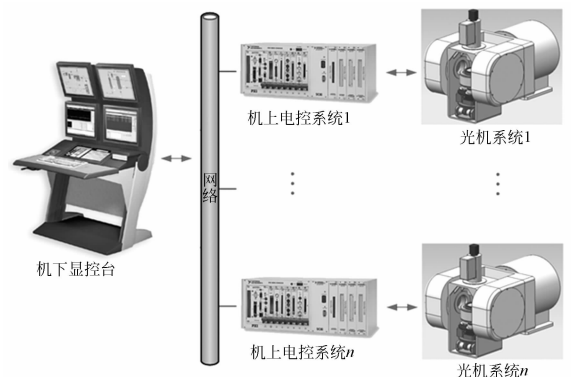


图 1 测量系统组成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of measurement system

2.1.2 系统工作原理

动态实时水平基准测量系统以现有的载体惯性导航姿态信息作为基础支撑信息,以大地地理水平作为绝对水平参考基准,利用相对惯导地平

坐标相对稳定的复示平台作为过渡基准,通过光学编码测角系统、水平误差检测工具进行两级精密测量,采用数据实时耦合的方式,实现了船体被检基面相对绝对大地水平基准的实时精密测量。系统采用分布式测量方式,包括 2 套探测装置和 2 套电控系统。机下显控台(主要包含主控计算机系统)接收惯导系统提供的姿态角数据传输给电控系统;机上电控系统完成对探测装置的实时测量信息的接收、处理、发送以及大地水平引导、捕获、跟踪,并将水平基准角信息传输给主控计算机系统;最后由主控计算机系统对外输出水平基准角度的测量信息。

探测装置主要由惯性同步复示平台和水平误差检测工具两部分组成,如图 2 所示。惯性同步复示平台是系统跟踪目标的执行机构,主要完成惯导水平姿态的跟踪和设备视轴指向的精密测量;复示平台由垂直相交的纵摇轴系和横摇轴系组成,纵摇轴和横摇轴上分别装有精密的 21 位绝对式轴角编码器和力矩电机。水平误差检测工具是测量惯性同步复示平台水平倾斜量的精密检测机构,主要由自准直测微平行光管、水银液浮反射镜和多自由度隔振平台等部分组成,整体安装于惯性同步复示平台上。

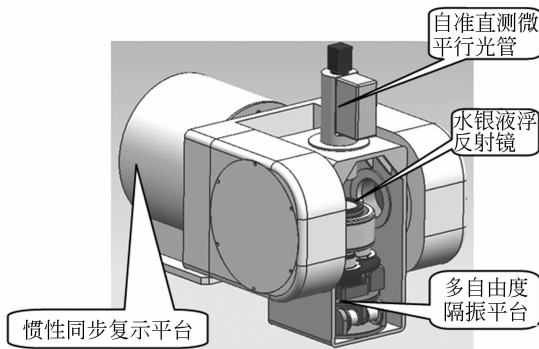


图 2 探测装置三维组成示意图

Fig. 2 Diagram of detection apparatus for three-dimensional composition

2.1.3 系统总体设计指标确定

2.1.3.1 惯性同步复示平台分系统

编码器选型:采用 21 位绝对式编码器,测角精度优于 $1''$;

工作范围:载体纵向 $\psi \geq \pm 22.5^\circ$,

载体横向 $\theta \geq \pm 22.5^\circ$;

复示平台同步跟踪误差:载体纵向 $\sigma_{\psi} \leq \pm 1'$;载体横向 $\sigma_{\theta} \leq \pm 1'$ 。

2.1.3.2 水平误差检测工具分系统

口径:50 mm;

焦距:300 mm;

探测器:采用像元数 $\geq 512 \times 512$,像元尺寸 $\leq 5 \mu\text{m}$ 的 CCD 探测器;

自准直测微平行光管视场:视场 $\geq 15' \times 15'$;

测角精度:对惯性同步复示平台实时水平基准测角误差: $\leq 2''$;

测量频率(实时): $\geq 20 \text{ Hz}$ 。

2.2 惯性同步复示平台设计

惯性同步复示平台分系统的机械结构由纵摇轴系和横摇轴系两个精密轴系组成,纵摇基座和横摇转轴固联在一起共同形成系统的纵摇轴线和横摇轴线,用以实现角度测量、跟踪驱动和位置反馈等功能。惯性同步复示平台分系统的二维模型如图 3 所示。本设计采用 2 台 21 位绝对式光电轴角编码器完成俯仰角、方位角的实时测量。分辨率为 $0.077''$ (24 位),测角误差 $\sigma < 1''$ 。

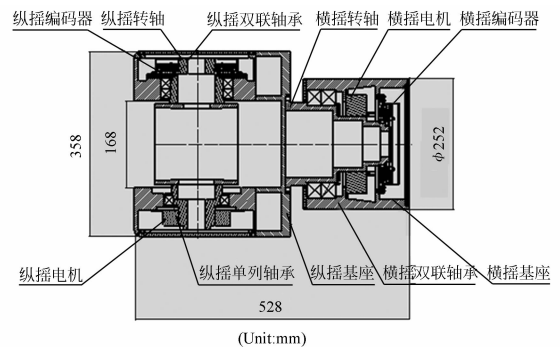


图 3 复示平台二维结构图

Fig. 3 Schematic diagram of compound platform

2.3 水平误差检测工具设计

水银液浮反射镜依靠水银对反射镜的浮力作用始终与绝对大地水平面保持水平,与光轴竖向下安装的自准直测微平行光管组成自准直光路。当自准直测微平行光管光轴与水银反射面法线平行时,光线仍按原路返回,星点分划板在 CCD 上所成的星点像位置保持不变;当自准直测微平行光管光轴绕 x 轴旋转一倾角 α 时,根据反射定律和几何光学原理,光线经过水银反射面后其偏转是光管光轴偏转的 2 倍,即光线与光轴成 2α 角返

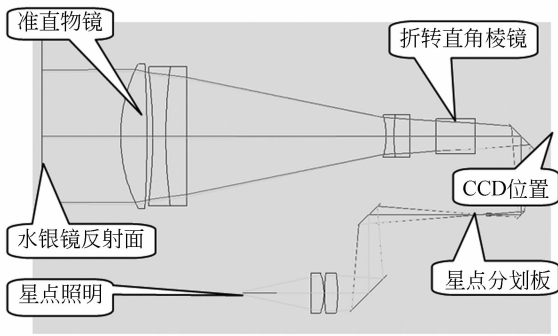


图 4 自准直测微平行光管光路二维模型图

Fig. 4 Two-dimensional model of optical path for self-collimator

回,反射回的星点像就相应的产生一个偏移量 S , S 与 α 的关系为:

$$S = f \times \tan 2\alpha, \quad (1)$$

式中: f 为自准直测微平行光管的物镜组焦距。

同理,当光管光轴绕 z 轴旋转一角度时,也可通过上式求得光管光轴绕 z 轴的旋转角度。

当 α 为小角度时,可以用角度的弧度值代替正切值,即得自准直测量原理公式:

$$\alpha = S\rho/2f, \quad (2)$$

式中: ρ 为弧度对角度的转换系数,一般取 $\rho = 206\ 265$ 。

水银液浮镜组件的三维模型如图 5 所示,主要由反射镜、液浮半球底座、盛液容器、置中拨叉

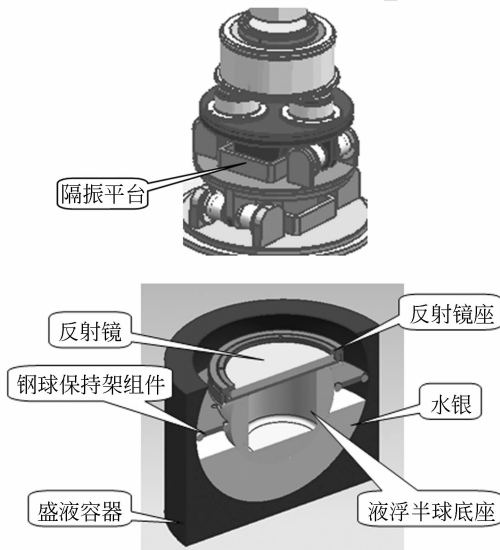


图 5 水银液浮镜组件三维模型图

Fig. 5 Three-dimeational model of mercury float mirror assembly

和多自由度隔振平台等部分组成。安装于液浮半球底座上的反射镜依靠盛液容器中水银对半球底座的浮力作用与绝对大地水平保持一致,盛液容器选择球型设计,目的是保证盛液容器在摆动及转动过程中,容器内水银体积不受压缩,液面高度保持不变。钢球保持架组件的作用主要是保持液浮反射镜在动态实时水平测量系统工作时处于盛液容器的中央位置,多自由度隔振平台是为了减小船体振动对水银液浮镜稳定性的影响。

3 系统实时测量精度分析

系统综合精度包括水平误差检测工具的图像处理误差和惯性同步复示平台的测角误差。

3.1 图像处理引起的误差 σ_i

图像处理引起的误差受像元分辨率误差、空间量化误差、信号处理误差、视轴调整误差和目标运动引起的误差等因素的影响。根据水平误差检测工具分系统选用的探测器的技术指标和光学系统参数,计算误差结果如表 1 所示。

表 1 图像处理引起的误差
Tab. 1 Errors induced by image processing

	自准直测微 平行光管	备注
像元数	1 024 × 768	
像元间距	4.65 μm	
焦距	300 mm	
像元分辨率 δ	1.6''	
像元分辨率误差 σ_F	0.9	$\sigma_F = \delta/\sqrt{3}$
空间量化误差 σ_B	0.9	$\sigma_B = \delta/\sqrt{3}$
信号处理误差 σ_C	0.45	$\sigma_C = N_C \cdot \sigma_F$ (按 0.5 个 像元计算, $N_C = 0.5$)
静态误差 σ_I	1.4	$\sigma_I = (\sigma_F^2 + \sigma_B^2 + \sigma_C^2)^{1/2}$
目标运动引起的误差 σ_Y	0.45	$\sigma_Y = N_Y \cdot \sigma_F$ (按 0.5 个 像元计算, $N_Y = 0.5$)
动态误差 σ_D	1.5''	$\sigma_D = (\sigma_I^2 + \sigma_Y^2)^{1/2}$

3.2 惯性同步复示平台测角误差

横摇轴、纵摇轴倾斜调整误差给惯性同步复示平台测角带来误差,误差因素包括:调整机构的灵敏度,检测仪器精度与读数误差,以及检测时轴系晃动引起的误差。按下式计算(按等概率分布):

$$\sigma_{IT} = \frac{I_{Tmax}}{\sqrt{3}}, \quad (3)$$

式中： σ_{IT} 为倾斜误差均方值； I_{Tmax} 为倾斜误差最大值。

依据现有检测仪器的精度及以往的工程经验，取 $I_{Tmax} = 1.2''$ ，得 $\sigma_{IT} = 0.7''$ 。

综上所述，横摇轴差 σ_v 和 σ_1 分别为：

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_{IT}^2} = \sqrt{1.38^2 + 0.7^2} = 1.5''$$

$$\sigma_1 = \sqrt{\sigma_v^2 + \sigma_{IT}^2} = \sqrt{1.13^2 + 0.7^2} = 1.33''$$

根据课题组自制的设备情况，计算得到各部件的精度指标见表 2。

表 2 惯性同步复示平台测角误差

Tab.2 Measurement errors of initial platform (")

项目	平台误差检测工具	
	横摇	纵摇
测角误差(指向)	2.2	2.4

注：复示平台纵摇角 $E = 22.5^\circ$

3.3 综合精度分析

由表 1 和表 2 中的误差值按公式(测角误差(指向) = (图像处理引起的误差² + 惯性同步复示平台测角误差²)^{1/2}) 计算系统的综合测角误差如表 3 所示：

表 3 系统综合测角误差

Tab.3 Total errors of system (")

误差源	误差值	造成的横摇误差	造成的纵摇误差
横摇轴差	1.5	$\frac{1}{\sqrt{2}} \tan E$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$
纵摇轴差	1.33	$\tan E$	0
零位差	1.0	0	1
照准差	1.0	$\sec E$	0
编码器误差	1.0	1	1
复示平台测角误差			
静态误差	1.63		1.77
动态增量(40%静态)	0.65		0.71
动态投影误差	1.75		1.91
动态指向误差	1.62		1.91

注：复示平台纵摇角 $E = 22.5^\circ$

4 船体二维扭转角实时测量实验

本研究在现有试验条件下开展了外场试验，以验证微动态条件下基于液浮水银反射镜面和自准直式测微平行光管的动态水平误差检测方法的

可行性和正确性，从而为系统研制提供设计依据。

4.1 现有船体变形测量系统简介

现有船体变形测量系统布局如图 6 所示，是依据大钢管基准测量法建立的高精度光学测角系统，系统的误差因素可分为单元误差和安装误差两部分。单元误差指分系统各部件的制造、装调和性能变化产生的各项误差，安装误差指各系统上船安装时带来的误差，现阶段变形测量误差的总误差约为 $5''^{[2]}$ 。

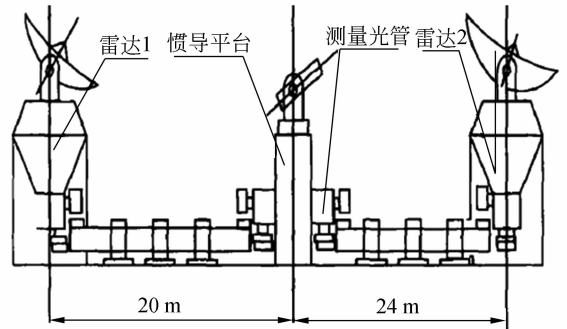


图 6 变形测量系统布局图

Fig.6 Layout of deformation measurement system

4.2 试验系统组成

试验设备主要由自准直测微平行光管、水银液浮反射镜、莱卡经纬仪、时统同步模块，主控计算机及图像处理计算机等部分组成，如图 7 所示。试验采用的测量船停靠在码头，其水平面内的倾斜角度值在 $10'$ 之内，不超出自准直测微平行光管的视场范围($44'$)，利用平台水平误差检测工具对船体在横摇和纵摇两个方向上的倾斜角度进行实时测量。

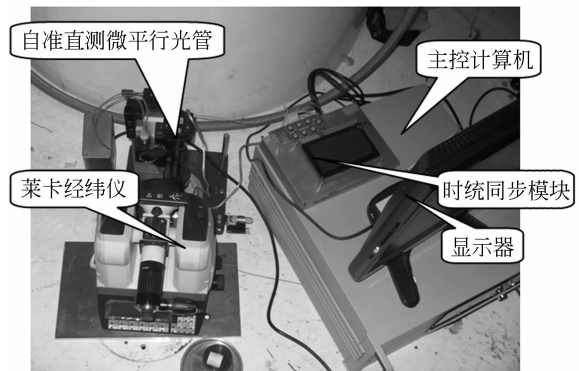


图 7 试验设备组成示意图

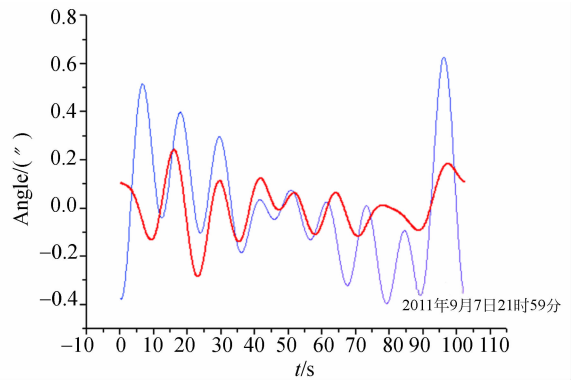
Fig.7 Sketch map of test equipment

4.3 试验步骤

先将莱卡经纬仪(精度为 $0.2''$)开机并进行调平后,与测量船上安装的标校经纬仪基座基准镜准直,找出精确的船体艏尾线方向,固定莱卡经纬仪的位置并记录其方位测量值,并以此作为测试平台光机部分的安装基准方向。将实验平台的光机部分安装于莱卡经纬仪与标校经纬仪基座基准镜之间,调整测试平台光机部分的方向,直至精确瞄准船体艏尾线。然后,开启船姿船位系统中的基准惯性导航设备和变形测量系统,为试验数据比对提供依据,并打开测试平台的图像记录分系统与时间同步分系统,以测试时间同步分系统与惯导系统的时间同步性及图像记录分系统的有效性。最后,同步记录试验平台的实时船摇图像信息、惯导实时船摇角度信息及变形测量系统角度信息,完成试验数据采集,并对采集数据进行FFT滤波处理^[7-10],去除船体振动及信号电噪声等干扰。

4.4 试验数据处理

试验结果如图8所示,蓝线代表测量船船体变形测量系统得到的被测点变形角的实时测量数据,红线代表通过对比平台误差检测工具得到的水平基准测量信息与基准惯性导航设备提供的基准点船体水平姿态信息得到的被测点的实时扭转角度数据(彩图见期刊电子版)。试验结果表



(b)纵挠角比对曲线图

(b)Curves of vertical deflection angle ratio

图8 对比试验结果

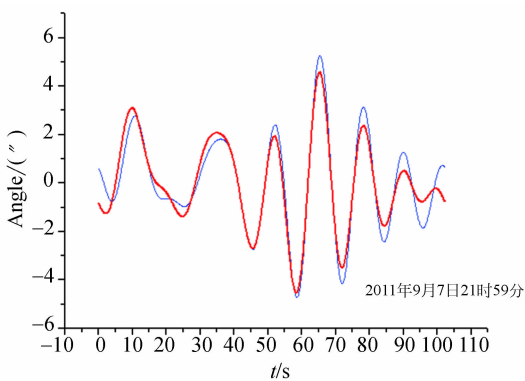
Fig. 8 Comparison of test results between ship deformation measurement system and proposed system

明:利用动态水平基准测量系统实时测量船体二维扭转角的方法切实可行,对船体二维扭转变形角的测量误差不大于 $3''$ 。

5 结论

本文对动态实时水平基准测量系统进行了设计并探讨了将该测量系统应用于船体二维扭转角实时测量的可行性。在对动态实时水平基准测量原理进行研究后,本文确定了测量系统的设计方案,并对测量系统的实时测量精度进行了分析。分析结果显示,系统对船体横扭角和纵挠角的测量误差均不大于 $3''$,测量距离理论上不受任何限制,远大于200 m(测量船船体长度),满足设计指标要求。最后,利用现有的外场试验条件完成了码头停靠状态下远望号测量船两测量点间的船体横扭角和纵挠角测量试验,由于该测量系统上船的安装精度明显优于传统的大钢管测量法,所以实验结果优于 $5''$ 。试验结果表明:利用动态水平基准测量系统实时测量船体二维扭转角的方法切实可行,不但可以提高船体横扭角和纵挠角的测量精度,而且扩大了变形测量系统的应用领域。

ZHANG Y Y, ZHANG M H, QIAO Y F. One advanced precision contactless position measuring system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(1): 41-44. (in Chinese)



(a)横扭角比对曲线图

(a)Curves of transverse twist angle

参考文献:

- [1] 张尧禹,张明慧,乔彦峰.一种高精度非接触位置测量系统[J].*光学精密工程*,2002,10(1):41-44.

- [2] 李岩,张尧禹,岳俊华. 船体变形测量的新技术[J]. 光学精密工程,2008,11(16):2235-2238.
LI Y, ZHANG Y Y, YUE J H. New technology of ship distortion measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,11(16):2235-2238. (in Chinese)
- [3] 王建军,张光明. 测量船舶体横扭角测量的双频偏振法[J]. 光学精密工程,1997,7(3):118-123.
WANG J J, ZHANG G M. Two-frequency polarization method for metering of instrumentation ship hull twist [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997,7(3):118-123. (in Chinese)
- [4] 王建军,王颖. 光栅法在船体横扭角测量中的应用[J]. 光学精密工程,2005,13(3):371-375.
WANG J J, WANG Y. Application of raster metering to hull transverse twist measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(3):371-375. (in Chinese)
- [5] YEFIMEV M V. Ballistic missile aiming system [J]. *Missile and Rockets*,1970,123(4):23-25.
- [6] ZHANG Y Y, ZHANG M H, QIAO Y F. The re-
search of CCD laser collimation system [C]. *ISIST 2002 the International Symposium on Precision Mechanical Measurements, Hefei*, 2002.
- [7] HUNTLEY J M. Maximum likelihood analysis of speckle photography fringe patterns [J]. *Applies Optics*,1992,31(23):4834.
- [8] ZHANG Y Y. The research of horizontal shafting in new photoelectricity transit instrument [D]. *Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences*,2000.
- [9] LIM Y C, YOU L J. Transfer alignment error compensator design using H-filter [C]. *American Control Conference*, 2002:1460-1465.
- [10] 李文军,陈涛. 光电跟踪系统噪声分析及其抑制[J]. 光学精密工程,2007,15(2):254-260.
LI W J, CHEN T. Analysis and restraining of random noise of optoelectronic tracking system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(2):254-260. (in Chinese)

作者简介:



王晓明(1984—),男,吉林长春人,助理研究员,博士研究生,2008年于吉林大学获得工学硕士学位,主要从事光电经纬仪光机结构设计以及光电测量技术方面的研究工作。E-mail: wangxiaoming316@yahoo. cn



张尧禹(1973—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,2003年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光电测量光机结构设计方面的研究。E-mail: Yaoyuzhang@ciomp. ac. cn

导师简介:



乔彦峰(1962—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1985年于南京工学院(现东南大学)获得学士学位,主要从事光电测量与控制方面的研究。E-mail: YanfengQiao@ciomp. ac. cn

(版权所有 未经许可 不得转载)