

动态实时光学精密水平姿态测量方法

冯小勇¹ 朱伟康¹ 乔彦峰² 李辉芬¹ 刘新明¹

(¹ 中国卫星海上测控部, 江苏 江阴 214431
² 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要 为了解决运动载体(如车辆、船舶和飞机等)实时精密水平姿态测量的问题,基于液体自动水平原理,提出了采用“光学编码精密测角+惯性同步复示平台+水平误差检测工具”的水平姿态测量方案,并进行了码头船舶动态原理验证试验。结果表明,测量原理正确、有效、可行,试验设备与惯导设备的水平姿态的差分差值小于等于 $2.0''$ [均方根(RMS)值]。该方法可以为运动载体(例如各类军用武器发射平台)实时提供高精度的水平姿态信息,并用于运动载体水平结构变形测量、惯导水平精度鉴定等。

关键词 测量;惯性导航;运动载体;水平姿态;结构变形

中图分类号 TH7; V444; V455 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0312001

A Dynamic, Real-Time, High-Precision Optical Method of Level Attitude Measurement

Feng Xiaoyong¹ Zhu Weikang¹ Qiao Yanfeng² Li Huifen¹ Liu Xinming¹

(¹ China Satellite Maritime Tracking and Controlling Department, Jiangyin, Jiangsu 214431, China
² Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract To measure the level attitude of moving carriers (such as vehicles, ships, aircraft, etc.) in real-time and highly precisely, based on liquid's automatic level, a method combining high-precision optical angle measurement, inertial synchronous multiplexing platform and level error detection tool is proposed and tested on a docking ship. The test result confirms the correctness, effectiveness and feasibility of this method. The difference D-value between the level attitude measurements of test equipment and inertial equipment is not larger than $2.0''$ [root mean square (RMS)]. This method can be used in high-precision measurement of level attitude, measurement of structural deformation and accuracy evaluation of inertial system of moving carriers such as different kinds of military weapon launching platforms.

Key words measurement; inertial navigation; moving carrier; level attitude; structural deformation

OCIS codes 120.3930; 120.4630; 000.2170; 000.3110; 230.0250

1 引 言

运动载体(如车辆、船舶、飞机、火箭、导弹等)在运动状态下,主要包括三个方面的状态变化:位置平移(前后、左右、上下)、姿态旋转(航向、纵摇、横摇)、结构变形(艏挠、纵挠、横扭),其中纵摇、横摇、纵挠、横扭四个分量与水平姿态有关^[1~4]。水平误差检测工具作为一种通用检测计量工具,在众多领域都具

有非常广泛的应用,因其具体使用要求、使用环境不同,性能指标和设计原理千差万别。合像水平仪、电子水平仪等测量精度很高(测量误差小于等于 $1''$),但主要应用于静态环境下的精密水平测量。基于惯性元件的水平测量仪器、惯性导航设备可以对运动载体的水平姿态进行实时测量,但通常测量精度较低(测量误差大于等于 $10''$)^[5,6]。

收稿日期: 2012-09-17; **收到修改稿日期**: 2012-10-30

基金项目: 总装备部重点试验技术研究项目资助课题。

作者简介: 冯小勇(1965—),男,本科,高级工程师,主要从事航天测控、光学测量和导航技术等方面的研究。

E-mail: fxxxxxy@yahoo.cn

实现动态精密水平测量关键需要解决三个主要问题:测量范围要足够大(大于等于 $\pm 22.50^\circ$),以适应运动载体水平姿态变化范围;测量精度要足够高($\sigma \leq 3.0''$),以满足水平姿态精密测量需要;测量数据要实时输出($f \geq 20$ Hz),以适应动态实时测量要求^[7~9]。为了实现运动载体水平姿态的精密测量,本文主要采用“光学编码精密测角+惯性同步复示平台+水平误差检测工具”的光学水平姿态测量方案,满足了实际应用对测量范围、测量精度及实时测量的性能要求。

2 测量系统组成及原理

动态实时光学精密水平姿态测量方法,主要利用液体重力自动水平原理,以大地水平(水银表面或

液浮镜面)作为水平测量的参考基准,利用载体惯性导航姿态信息作为基础支撑信息,把相对惯导地平坐标稳定的复示平台作为过渡基准,在由光学编码测角元件进行载体基面与复示平台夹角测量的同时,利用光学精密测量工具(如自准直式平行光管)作为测量手段,通过视频跟踪处理系统实时完成水平误差的跟踪测量^[10~12]。

系统组成主要包括探测装置(信息检测与采集输出)、控制机箱(信息处理与测量控制)、主控微机(显示控制与信息交换)等三个部分。对外接口主要包括惯性导航(接收惯导姿态信息)、时码终端(接收中心时间同步信息)、网络输出(输出水平姿态信息)等三个部分。动态实时光学精密水平姿态测量方法如图1所示。

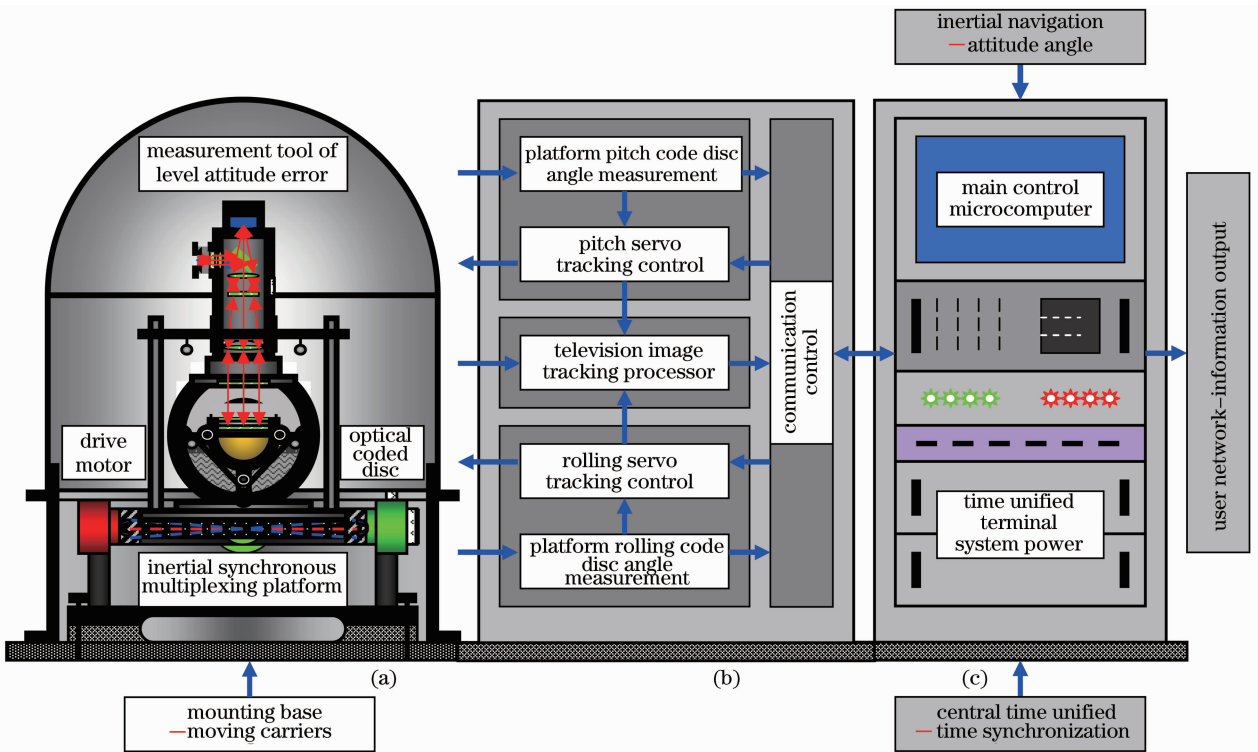


图1 动态实时光学精密水平姿态测量方法。(a)探测装置-水平监测;(b)控制电路-跟踪测量;(c)主监控台-显示控制

Fig.1 A dynamic, real-time, high-precision optical method of level attitude measurement. (a) Sniffer; level test;

(b) control circuit; tracking and measuring; (c) main platform for monitoring control; display and control

探测装置通过安装基面与被检基面固连,主要用于实时检测运动载体被检基面相对大地水平参考平面的变化情况,是系统实现核心功能的关键部件。它的组成主要包括:安装基座(通过安装基座与被检基面连接)、惯性同步复示平台(采用两环、两轴结构)、水平跟踪驱动电机(平台横摇驱动电机、平台纵摇驱动电机)、光学编码测角元件(横摇测角光学码盘、纵摇测角光学码盘)和水平误差检测工具(自准

直式平行光管、面阵 CCD、液浮反射镜面组合)等。

控制电路主要用于实时测量信息接收、处理、发送以及实时大地水平引导、捕获、跟踪,是系统内部信息交换、数据处理和状态控制的中心环节。它的组成主要包括:伺服跟踪控制系统(横摇伺服跟踪控制、纵摇伺服跟踪控制)、平台位置角度测量(横摇编码测角电路、纵摇编码测角电路)、电视图像跟踪处理(横向水平误差测量、纵向水平误差测量)、数字通

讯控制系统等。

主监控台主要用于实时内外信息交换、处理、显示,并对系统进行实时状态控制,是系统状态控制和内外信息处理的核心设备,主控制台置于主控机房实现测量系统远程监控。主控制台对内主要完成实时测量信息的输入和实时引导信息的输出,对外主要完成中心时统同步信息、惯性导航船姿数据的输入和对综合信息网络的水平姿态信息输出。它的组成主要包括:主控微机(硬件、软件)、接口电路、供电电源和时码终端等。

在实际动态测量情况下,系统实时接收载体惯性导航的姿态信息作为引导信息,通过伺服跟踪控制使复示平台跟踪惯导地平坐标,置于复示平台上的自准直式水平误差检测工具,利用电视测量实时检测复示平台的水平误差,而被检基面与复示平台之间的夹角由光学编码测角元件完成实时测量。这样,通过光学编码测角系统(适合较大角度动态精密测量)、水平误差检测工具(适合较小角度静态精密测量)进行两级精密测量,利用数据实时耦合的方式,就实现了运动载体被检基面相对大地水平的实时跟踪和精密测量。

系统主要技术指标如下。测量范围:载体纵向 $\Psi \geq \pm 22.5^\circ$,载体横向 $\theta \geq \pm 22.5^\circ$;水平误差:载体纵向 $\sigma\Psi \leq 3''$,载体横向 $\sigma\theta \leq 3''$;采样频率: $f \geq 20$ Hz (对外实时输出频率)。

3 测量模型与误差模型

光学水平测量系统对载体水平姿态测量给出了一种全新的测量体制和测量方法,建立完善的测量

设备数学模型和测量误差修正模型,是测量系统进行方案设计和工程设计的前提和基础,也是测量系统实现正确控制和精密测量的关键^[13]。其专用坐标系统的定义如下。

地平坐标系(固联镜面): $O_p-X_pY_pZ_p$ 为右手直角坐标系。原点 O_p 位于液浮镜面中心, X_p 轴沿当地地理水平指向载体右方, Y_p 轴沿当地地理水平指向载体前方, Z_p 轴沿当地地理垂线(椭球体表面法线)指向上方。其中, $X_pO_pY_p$ 平面为当地大地水准面。

复示坐标系(固联平台): $O_f-X_fY_fZ_f$ 为右手直角坐标系。也可称为平台坐标系。原点 O_f 位于复示平台二轴的交点, X_f 轴沿复示平台指向载体右方, Y_f 轴沿复示平台指向载体前方, Z_f 轴垂直于复示平台指向上方。

测量坐标系(固联载体): $O_c-X_cY_cZ_c$ 为右手直角坐标系。原点 O_c 位于复示平台二轴的交点, X_c 轴沿运动载体横轴指向右方, Y_c 轴沿复示平台纵向轴线指向前方, Z_c 轴沿运动载体竖轴指向上方。

载体艏高于左高时姿态角为正,载体艉高于右高时姿态角为负。同时规定:坐标逆时针旋转为正向旋转,坐标顺时针旋转为反向旋转。坐标定义与旋转变换如图 2 所示。

由探测装置的测量元素得到载体的水平姿态测量结果需要进行两次坐标旋转变换,第一次坐标变换为由测量坐标系旋转到复示坐标系,其旋转变量为测角编码器的测量结果,第二次坐标变换为由复示坐标系旋转到地平坐标系,其旋转变量为电视处理器的测量结果。

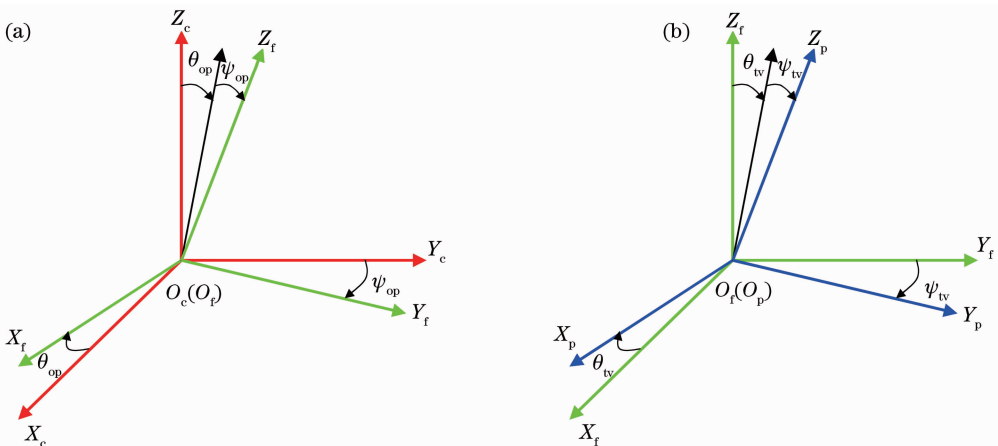


图 2 坐标定义与旋转变换。(a)第一次坐标旋转变换;(b)第二次坐标旋转变换

Fig. 2 Coordinate definition and rotation transformation. (a) The first coordinate rotation transformation; (b) the second coordinate rotation transformation

3.1 测量系统数学模型

空间某点(空间向量) \mathbf{P}_m 在不同的坐标系有不同的坐标数值(向量分量)。由测量坐标系的 $\mathbf{P}_c(x_c, y_c, z_c)$ 到复示坐标系的 $\mathbf{P}_f(x_f, y_f, z_f)$ 、地平坐标系的 $\mathbf{P}_p(x_p, y_p, z_p)$ 、地理坐标系 $P_t(x_t, y_t, z_t)$,坐标

旋转变换过程如下。

测量坐标系中 $\mathbf{P}_c(x_c, y_c, z_c)$ 至复示坐标系中 $\mathbf{P}_f(x_f, y_f, z_f)$ 的变换过程为:绕 Z_c 轴反向旋转 θ ,绕 Y_c 轴反向旋转 θ_{op} ,绕 X_c 轴反向旋转 ψ_{op} 。坐标旋转的变换矩阵为

$$\mathbf{C}_c^f = \mathbf{C}_{xc}(\psi_{op})\mathbf{C}_{yc}(\theta_{op})\mathbf{C}_{zc}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta_{op} & 0 & \sin \theta_{op} \\ \sin \psi_{op} \sin \theta_{op} & \cos \psi_{op} & -\sin \psi_{op} \cos \theta_{op} \\ -\cos \psi_{op} \sin \theta_{op} & \sin \psi_{op} & \cos \psi_{op} \cos \theta_{op} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

复示坐标系的 $P_f(x_f, y_f, z_f)$ 至地平坐标系的 $P_p(x_p, y_p, z_p)$ 变换过程为:绕 Z_f 轴反向旋转 θ ,绕 Y_f 轴反向旋转 θ_{iv} ,绕 X_f 轴反向旋转 ψ_{iv} 。坐标旋转的变换矩阵为

$$\mathbf{C}_f^p = \mathbf{C}_{xf}(\psi_{iv})\mathbf{C}_{yf}(\theta_{iv})\mathbf{C}_{zf}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta_{iv} & 0 & \sin \theta_{iv} \\ \sin \psi_{iv} \sin \theta_{iv} & \cos \psi_{iv} & -\sin \psi_{iv} \cos \theta_{iv} \\ -\cos \psi_{iv} \sin \theta_{iv} & \sin \psi_{iv} & \cos \psi_{iv} \cos \theta_{iv} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

可以得到坐标变换:测量坐标系→地平坐标系

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} = \mathbf{C}_f^p \begin{bmatrix} x_f \\ y_f \\ z_f \end{bmatrix} = \mathbf{C}_f^p \mathbf{C}_c^f \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \mathbf{C}_c^p \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix}. \quad (3)$$

令

$$\mathbf{C}_c^p = \mathbf{C}_f^p \mathbf{C}_c^f = \begin{bmatrix} C_{c11}^p & C_{c12}^p & C_{c13}^p \\ C_{c21}^p & C_{c22}^p & C_{c23}^p \\ C_{c31}^p & C_{c32}^p & C_{c33}^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{iv} & 0 & \sin \theta_{iv} \\ \sin \psi_{iv} \sin \theta_{iv} & \cos \psi_{iv} & -\sin \psi_{iv} \cos \theta_{iv} \\ -\cos \psi_{iv} \sin \theta_{iv} & \sin \psi_{iv} & \cos \psi_{iv} \cos \theta_{iv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_{op} & 0 & \sin \theta_{op} \\ \sin \psi_{op} \sin \theta_{op} & \cos \psi_{op} & -\sin \psi_{op} \cos \theta_{op} \\ -\cos \psi_{op} \sin \theta_{op} & \sin \psi_{op} & \cos \psi_{op} \cos \theta_{op} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

由“测量坐标系→地平坐标系”坐标旋转变换关系,对于测量坐标系 $O_c-X_cY_cZ_c$ 的单位向量 $\mathbf{P}_c(x_c, y_c, z_c) = \mathbf{P}_c(0, 0, 1)$,亦即被检基面的法线方向的单位向量在对应地平坐标系 $O_p-X_pY_pZ_p$ 的单位向量 $\mathbf{P}_p(x_p, y_p, z_p)$,存在

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} = \mathbf{C}_c^p \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{c11}^p & C_{c12}^p & C_{c13}^p \\ C_{c21}^p & C_{c22}^p & C_{c23}^p \\ C_{c31}^p & C_{c32}^p & C_{c33}^p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{c11}^p & C_{c12}^p & C_{c13}^p \\ C_{c21}^p & C_{c22}^p & C_{c23}^p \\ C_{c31}^p & C_{c32}^p & C_{c33}^p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{c13}^p \\ C_{c23}^p \\ C_{c33}^p \end{bmatrix}, \quad (5)$$

亦即

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} = \mathbf{C}_c^p \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{iv} \sin \theta_{op} + \sin \theta_{iv} \cos \psi_{op} \cos \theta_{op} \\ \sin \psi_{iv} \sin \theta_{iv} \sin \theta_{op} - \cos \psi_{iv} \sin \psi_{op} \cos \theta_{op} - \sin \psi_{iv} \cos \theta_{iv} \cos \psi_{op} \cos \theta_{op} \\ -\cos \psi_{iv} \sin \theta_{iv} \sin \theta_{op} - \sin \psi_{iv} \sin \psi_{op} \cos \theta_{op} + \cos \psi_{iv} \cos \theta_{iv} \cos \psi_{op} \cos \theta_{op} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

最终可得地平坐标的摇摆角度为

$$\tan \theta_p = \frac{x_p}{z_p}, \quad \theta_p = \arctan\left(\frac{x_p}{z_p}\right), \quad \text{if } x_p \geq 0, \text{ then } \theta_p \geq 0, \quad (7)$$

$$\tan \psi_p = \frac{y_p}{z_p}, \quad \psi_p = \arctan\left(\frac{y_p}{z_p}\right), \quad \text{if } y_p \leq 0, \text{ then } \psi_p \geq 0. \quad (8)$$

地平坐标的被检基面法线方向的单位向量如图3所示。

如果实际情况需要给出地理坐标系的载体水平姿态信息,可通过引入惯导系统实时提供的航向信

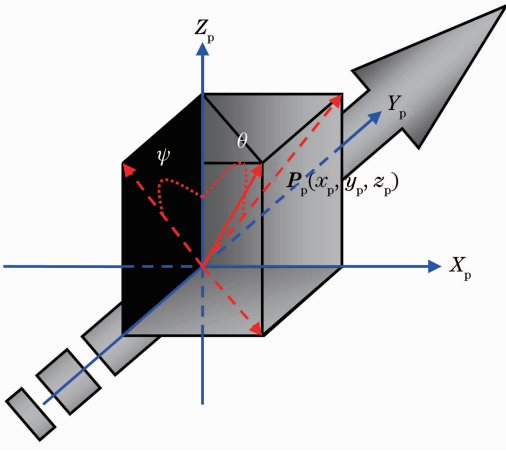


图3 地平坐标的被检基面法线方向的单位向量

Fig. 3 Unit vector of normal direction of the measured plane in ground level coordinate

息,经过坐标分解变换或坐标旋转变换,将地平坐标系的载体水平姿态信息转换为地理坐标系的载体水平姿态信息。

3.2 测量系统误差分析

测量系统的误差标定需要在陆基静态条件下进行,标定工作主要包括探测装置内部安装误差标定及探测装置测量零点对准取齐。内部安装单项误差主要包括光学码盘定向误差及设备三轴正交误差,可通过设置基准反射镜面、基准标校平台的方法,由检测经纬仪、0.2"平行光管、合像水平仪等工具检测标定。测量零点对准取齐包括方位取齐及水平取齐,方位取齐以载体艏艉镜法线为参考基准,由专用折转光管、检测经纬仪、0.2"平行光管等工具检测标定,水平取齐以大地水平为参考基准,由合像水平仪检测标定^[14]。安装在载体上的惯导设备,其测量零点的对准取齐方法与探测装置的基本相同。

依据测量系统结构设计原理,测量设备单项误差主要包括光学码盘定向误差和设备三轴正交误差。

光学码盘定向误差包括纵摇测角码盘零位(ψ_{cp}^0)、横摇测角码盘零位(θ_{cp}^0)。其修正算法可分别表示为

$$\Delta\psi_{cp} = -\psi_{cp}^0, \quad (9)$$

$$\Delta\theta_{cp} = -\theta_{cp}^0. \quad (10)$$

设备三轴正交误差包括纵向转轴正交误差(误差幅值: P_h^0 ;误差指向: θ_{max})、横向转轴正交误差(R^0)、光管光轴正交误差(C_ψ^0)。修正算法可分别表示为

$$\begin{cases} \Delta\psi_{cp} = -P_h^0 \cos(\theta_{max} - \theta_{cp}) \\ \Delta\theta_{cp} = P_h^0 \sin(\theta_{max} - \theta_{cp}) \tan \psi_{cp} \end{cases}, \quad (11)$$

$$\begin{cases} \Delta\psi_{cp} \approx 0 \\ \Delta\theta_{cp} = -R^0 \tan \psi_{cp} \end{cases}, \quad (12)$$

$$\begin{cases} \Delta\psi_{cp} = -C_\psi^0 \\ \Delta\theta_{cp} = -C_\theta^0 \sec \psi_{cp} \end{cases}. \quad (13)$$

在对测量系统进行误差分析的基础上,可以给出水平测量误差修正模型。纵摇测量误差修正模型可表示为

$$\psi_{cp}^r = \psi_{cp} - \psi_{cp}^0 - P_h^0 \cos(\theta_{max} - \theta_{cp}) - C_\psi^0. \quad (14)$$

横摇测量误差修正模型为

$$\theta_{cp}^r = \theta_{cp} - \theta_{cp}^0 + P_h^0 \sin(\theta_{max} - \theta_{cp}) \tan \psi_{cp} - R^0 \tan \psi_{cp} - C_\theta^0 \sec \psi_{cp}. \quad (15)$$

在对原始测量数据 ψ_{cp} 、 θ_{cp} 、 θ_{rv} 、 θ_{lv} 进行误差修正后,通过进行测量坐标系 \rightarrow 复示坐标系的坐标变换 $C_{ic}(\psi_{rcp}, \theta_{rcp}, 0)$ 以及复示坐标系 \rightarrow 地平坐标系的坐标变换 $C_{pf}(\psi_{rv}, \theta_{rv}, 0)$,即可得到地平坐标系的实时水平测量结果(ψ_{dprm} 、 θ_{dprm})。

3.3 重力异常修正方法

重力异常 Δg 主要由于实际地球形状的不规则性和内部结构的不均匀性引起,可通过参考“全球重力垂线偏差数据库”,按照“墨卡托(Mercator)投影理论”,解算出某个经纬度区域($2' \times 2'$)的东向 Δg_x 、北向 Δg_y 及斜向 Δg_z 三个重力异常分量。

重力异常水平分量的东向分量 Δg_x 、北向分量 Δg_y 会对系统的水平基准产生影响,东向分量 Δg_x 会造成液面绕北向转轴的常值偏转,北向分量 Δg_y 会造成液面绕东向转轴的常值偏转。而斜向偏差 Δg_z 对液面水平的影响可以忽略。

由重力异常引起的地理坐标系液浮镜面水平基准的误差角量(ρ_x 、 ρ_y)为

$$\begin{cases} \rho_x = \frac{\Delta g_y}{g_0} \\ \rho_y = -\frac{\Delta g_x}{g_0} \end{cases}, \quad (16)$$

式中 ρ_x 为相对于大地方位正北方向的倾斜分量, ρ_y 为相对于大地方位正东方向的倾斜分量。由重力异常引起的载体坐标系液浮镜面水平基准的误差角量(ρ_ψ 、 ρ_θ)为

$$\begin{bmatrix} \rho_\psi^0 \\ \rho_\theta^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_\psi \\ \rho_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos K & -\sin K \\ \sin K & \cos K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho_x \\ \rho_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos K & -\sin K \\ \sin K & \cos K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\Delta g_y}{g_0} \\ -\frac{\Delta g_x}{g_0} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

式中 K 为运动载体的航行方向。

重力异常基准误差纵摇测角修正算法和横摇测角修正算法可分别表示为

$$\Delta\psi_{dg} = +\rho_{\psi}^0, \quad (18)$$

$$\Delta\theta_{dg} = +\rho_{\theta}^0. \quad (19)$$

重力异常所引起的水平误差通常为几角秒至几十角秒,重力异常对基于重力测量的其他测量系统具有相同的效果。

4 原理验证试验情况

现场试验在某测量船停靠码头期间进行。因为船舶在码头停泊时摇摆倾斜范围较小,不会超出自准直式平行光管的视场范围,使得在没有惯性同步复示平台的情况下,也能够验证光学水平测量系统

测量原理的正确性、可行性和有效性。码头试验利用船载惯导设备的姿态数据作为比对基准,试验设备与惯导设备对船体在横摇和纵摇两个方向上的摇摆角度进行了实时同步测量。

试验研究器材组成主要包括:莱卡经纬仪(测角精度 $0.2''$)、自准直式测微平行光管(焦距:300 mm、口径:50 mm;视场: $\pm 22'$; CCD: Sony; 像元数量: 1280 pixel \times 960 pixel; 像元尺寸: $3.75 \mu\text{m}$; 像元角度: $1.25''$)、光管二维调整支架、水银液浮反射镜面(口径:80 mm)、时统同步模块、主控微机及图像采集处理软件等部分。试验平台整体固联在船体甲板(标校经纬仪过渡座)上。实验系统组成原理如图 4 所示。

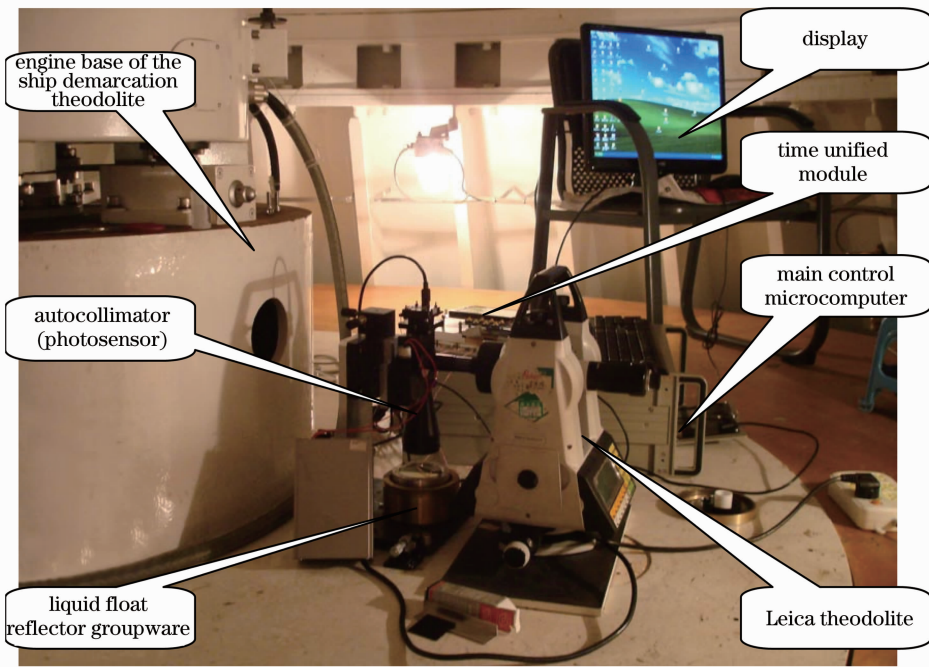


图 4 实验系统组成原理

Fig. 4 Composition and principles of the test system

由于实验平台(CCD)与惯导设备(INS)在码头船摇条件下无法进行测量坐标零点的对准取齐,所以数据处理时主要进行两套设备相对变化量值的比较(差分数据为后帧数据减去前帧数据;差分差值为实验平台差分数据减去惯导设备差分数据)。码头动态实验结果如图 5 所示。

由实验数据处理结果可以得到如下基本结论:

- 1) 光学水平测量系统与船载惯性导航设备的差分差值 $\sigma \leq 2.0''$ (均方根值);
- 2) 码头试验结果表明,利用液体重力自动水平

原理,以当地大地水平(水银表面或液浮镜面)作为绝对水平参考基准,采用“光学编码精密测角+惯性同步复示平台+水平误差检测工具”实现运动载体水平姿态精密测量是正确、有效、可行的;

3) 光学水平测量系统具有实现精度设计指标要求的能力, $\sigma \leq 3.0''$ (均方根值)。

实验系统可以通过优化和改进系统设计(如优化液浮反射镜面结构、选用高分辨率的探测器件、设计三维减振复示平台、采用规整均匀的圆星点孔、改进数据处理滤波算法等)继续提高实际测量精度。

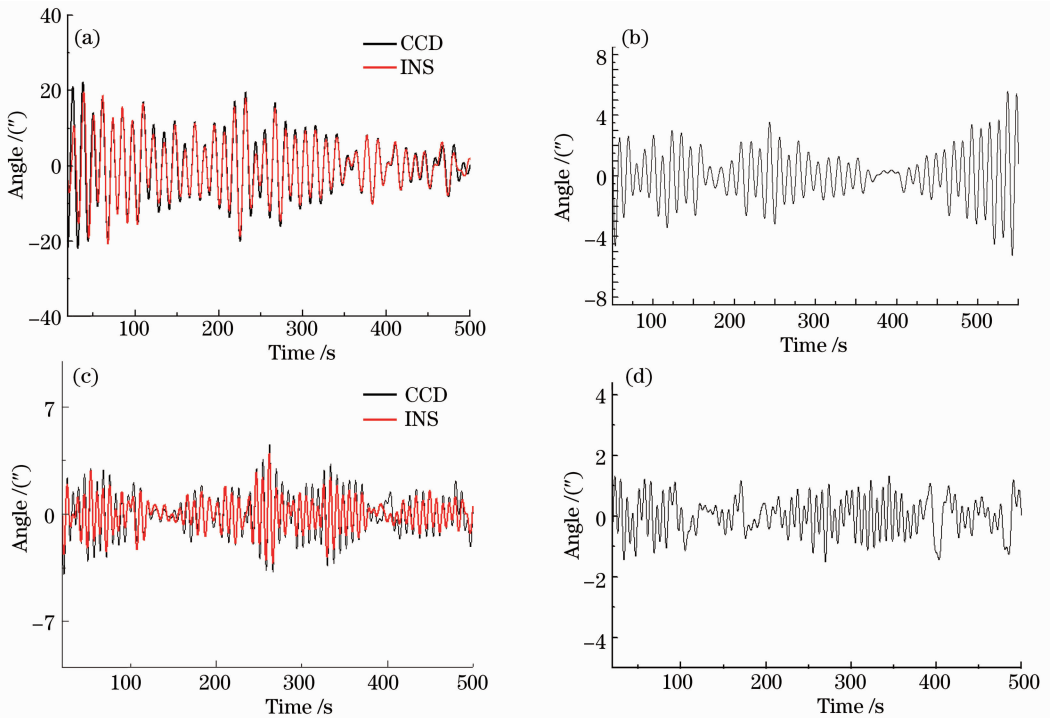


图5 码头动态试验结果。(a)横摇数据的差分数据；(b)横摇数据的差分差值；(c)纵摇数据的差分数据；(d)纵摇数据的差分差值

Fig. 5 Dynamic test result on a docking ship. (a) Difference data of roll data; (b) difference D-value of roll data; (c) difference data of pitch data; (d) difference D-value of pitch data

5 结 论

综上所述可以看出：该方法有利于充分发挥不同类型测角元件的最大优点，不仅具有测量范围大、测量精度高、实时性能好的优点，而且还能同时满足静态、准静态-准动态、动态条件下的水平信息精密测量，特别是为动态实时精密水平测量提供了一种全新的解决方案。

光学水平测量系统可采用分布式测量， N 套探测装置和 N 套电控系统共用1套主控制台，亦即“ $N+N+1$ ”模式。当有一套测量系统($N=1$)时，测量系统只能给出被检测点的实时水平姿态信息(纵摇角度、横摇角度)，当有 N 套测量系统($N \geq 2$)时，测量系统不仅能给出被检测点的实时水平姿态信息(纵摇角度、横摇角度)，而且还能给出任意两个被检测点之间的载体结构变形信息(纵挠变形、横扭变形)。

码头试验结果表明：利用液体重力自动水平原理，以当地大地水平(水银表面或液浮镜面)作为绝对水平参考基准，采用“光学编码精密测角+惯性同步复示平台+水平误差检测工具”实现运动载体水平姿态精密测量是正确、有效、可行的。该方法不仅

能够给出比原支撑惯导更高精度的水平姿态信息($\sigma \leq 3''$)，而且还能实现运动载体结构变形(纵挠、横扭)的测量，取消现有作为测扭基准的大钢管，从而大大简化变形测量系统结构^[15]。

目前由于受时间和条件限制，大动态条件下的试验数据还不够充分，为优化和完善光学水平测量系统工程设计方案，课题后续将以船舶海上工程应用为背景继续开展深化研究，特别是在不同航行工况、风浪等级、不同海域的试验研究。

参 考 文 献

- 1 Cui Xingyi, Wei Wei, Wang Ruizhao *et al.*. Correlativity analysis between changes of hull attitude disturbance and fire data errors [J]. *J. Gun Launch & Control*, 2010, (1): 4~7
崔星毅, 魏 玮, 王蕊照 等. 车体姿态扰动与射击诸元误差相关性分析[J]. *火炮发射与控制学报*, 2010, (1): 4~7
- 2 Zhu Yunzhao, Wang Shunting, Miao Lingjuan *et al.*. Review of measuring technique for ship deformation[J]. *Ship Engineering*, 2007, **29**(6): 58~61
朱昀焯, 汪顺亭, 缪玲娟 等. 船体变形测量技术综述[J]. *船舶工程*, 2007, **29**(6): 58~61
- 3 Zhu Yunzhao, Wang Shunting, Miao Lingjuan *et al.*. Measurement of ship deformation and its influence on navigation attitude parameter [J]. *Microcomputer Information*, 2008, **24**(22): 285~286
朱昀焯, 汪顺亭, 缪玲娟 等. 船体变形对航姿参数的影响及其测量[J]. *微计算机信息*, 2008, **24**(22): 285~286

- 4 Wang Shunting, Wang Zhanqing, Zhu Yunzhao *et al.*. Monitoring on ship hull deformation and correction for heading & attitude information [J]. *J. Chinese Inertial Technology*, 2007, **15**(6): 635~641
汪顺亭, 汪湛清, 朱昀招等. 船体变形的监测方法及其对航向姿态信息的修正[J]. 中国惯性技术学报, 2007, **15**(6): 635~641
- 5 Wang Cuntang, Yang Enhui, Zhang Jianguo *et al.*. The structure and measurement principle analysis for omnibearing electronic gradiometer[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2006, **27**(2): 183~185
王存堂, 阳恩会, 张建国等. 全方位电子水平仪的结构及测量原理分析[J]. 仪器仪表学报, 2006, **27**(2): 183~185
- 6 Wan Dejun, Liu Yufeng. Summary on removing influence of ship deformation and providing accurate attitude references for warship [J]. *J. Chinese Inertial Technology*, 2005, **13**(4): 77~82
万德均, 刘玉锋. 削减舰船变形的影响和为全舰提供高精度姿态基准[J]. 中国惯性技术学报, 2005, **13**(4): 77~82
- 7 Chao Zhichao, Fu Sihua, Jiang Guangwen *et al.*. Mono camera and laser rangefinding sensor position-pose measurement system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0312001
晁志超, 伏思华, 姜广文等. 单目摄像机激光测距传感器位姿测量系统[J]. 光学学报, 2011, **31**(3): 0312001
- 8 Dai Dongkai, Wang Xingshu, Hu Chunsheng *et al.*. Camera calibration and attitude measurement technology based on astronomical observation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0312005
戴东凯, 王省书, 胡春生等. 基于天文观测的相机标定及姿态测量技术研究[J]. 光学学报, 2012, **32**(3): 0312005
- 9 Jiang Jie, Wang Haoyu, Zhang Guangjun. Error analysis of attitude angle measuring system based on photoelectric collimation and virtual extension imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0112002
江洁, 王昊予, 张广军. 基于光电准直虚拟扩展成像的姿态角测量系统的误差分析[J]. 光学学报, 2011, **31**(1): 0112002
- 10 Li Xiangrong, Qiao Yanfeng, Liu Wei *et al.*. Autocollimation interferometry method for boats' three-dimensional distortion[J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(5): 761~763
李向荣, 乔彦峰, 刘微等. 船体三维角度变形的自准直干涉测量方法[J]. 光学技术, 2005, **31**(5): 761~763
- 11 Xiao Yongliang, Su Xianyu, Chen Wenjing. Fringe reflection photogrammetry based on pose estimation with free planar mirror reflection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(5): 0512003
肖永亮, 苏显渝, 陈文静. 基于自由镜面反射位姿评估的条纹反射摄影测量[J]. 光学学报, 2012, **32**(5): 0512003
- 12 Li Lin. Method of contained optical horizontal reference measurement based on CCD [J]. *J. Transducer Technology*, 2001, **20**(2): 32~34
李临. 基于 CCD 技术的自举式光学水平基准测量方法[J]. 传感器技术, 2001, **20**(2): 32~34
- 13 Chen Peng, Hu Guangda, Liu Xiaojun. Camera pose estimation based on virtual control points [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(11): 1108003
陈鹏, 胡广大, 刘晓军. 基于虚拟控制点的像机姿态测量算法[J]. 中国激光, 2012, **39**(11): 1108003
- 14 He Pengju, Liang Bin, Zhang Tao *et al.*. Calibration method for wide field of view star sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1023001
贺鹏举, 梁斌, 张涛等. 大视场星敏传感器标定技术研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(10): 1023001
- 15 Wang Jianjun, Wang Ying. Application of raster metering to hull transverse twist measurement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, **13**(3): 371~375
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

栏目编辑: 何卓铭