

文章编号 1004-924X(2005)03-0371-05

光栅法在船体横扭角测量中的应用

王建军^{1,2}, 王 颖²

(1. 国防科学技术大学, 湖南 长沙 410073; 2. 中国人民解放军 63921 部队, 北京 100094)

摘要:介绍了测量船体变形测量系统几种测量方法的基本工作原理, 比较了这几种测量方法的优缺点, 在此基础上提出了一种新的测量方法-光栅法。该方法涉及的测量系统不仅体积小、质量轻, 便于安装调试, 而且精度也比较高, 克服了前几种方法的不足。光栅法采用了图像高精度亚像素定位方法, 可提高测量精度。对该方法的测量精度进行了理论分析与仿真试验, 从理论误差和试验结果中, 可得出结论: 光栅法的测角精度可优于 $5''$, 能达到测量船体变形测量系统的要求。

关键词:图像处理; 亚像素处理; 变形测量系统; 光栅法; 横扭角

中图分类号: TB92 文献标识码: A

Application of raster metering to hull transverse twist measurement

WANG Jian-Jun^{1,2}, WANG Ying²

(1. *National University of Defence Technology, Changsha 410073, China;*
2. *CPLA 63921 Unit, Beijing 100094, China*)

Abstract: Some methods metering instrumentation ship's hull deformation are generalized, and their advantages and disadvantages are compared. A new raster metering method is put forward, which not only has some advantages of small bulk, light weight and ease of installation, but also has higher precision. A high precision sub-pixel location technology is used in this approach and the precision of angle metering can be higher. Through theoretic analysis and practical experiment, the results show the precision of angle metering has excelled 5 arc second.

Key words: image processing; sub-pixel processing; deformation metering system; raster metering, transverse twist angle

1 引言

在风浪、载重、船舶振动、温度变化等因素作用下,测量船船体将产生挠扭曲变形,直接影响船载外测设备的测量精度,因此需要采用船体变形测量系统对外测设备安装的基座与惯导基座之间相对角偏移进行监测,并将测量数据实时送给中心控制系统或外测设备,以及时进行修正。按照传统,外测设备与惯导两基座之间的船体变形可定义为纵挠、艏挠、横扭三维角度变形量。对纵挠角和艏挠角的测量,常采用平行光管发射、线阵 CCD 接收测量的方法,该方法技术比较先进、实施起来方便。对横扭角的测量难度较大,国内外曾先后提出了 4 种方法:(1)偏振光测量法;(2)大钢管基准法;(3)双光源双 CCD 探测法^[1];(4)双频偏振光法^[2],这些方法各有其特点,但仍显不足。本文提出光栅法,作为探讨改进的一种新方法。

2 以往方法比较

方法(1):偏振光能量测量法由美国 20 世纪 60 年代提出并应用于船体横扭角测量,其主要原理是:在惯导基座上安装自准直光管,发射出一束平行光,在外测设备基座上安装一块带有起偏器的平面反射镜,法线与平行光平行,自准直光管发出的平行光经起偏平面镜反射变成偏振光,返回到自准直光管。通过偏振计,检测出自准直光管与平面反射镜在扭转方向的角度变化,偏振计接收的光功率与扭转角大小呈线性比。

方法(2):大钢管基准法是在测量船甲板上安装不易产生横向扭曲变形的刚性大钢管作为船体横扭角测量的参考基准,并且在大钢管的两端水平安装平面反射镜,平面反射镜上方相应的两基座(外测设备

基座或惯导基座)上安装自准直测量光管,分别测量两基座与大钢管之间扭曲变形,最后合成为两基座之间的扭曲变形值,即横扭角值。

方法(3):双光源双 CCD 探测法是一种直接测量方法。在外测设备基座上安装 2 个点光源,2 个点光源为刚性连接,在惯导基座上对应位置安装 2 个面阵 CCD 探测器件,2 个面阵 CCD 探测也采用刚性连接;分别测量 2 个点光源在面阵 CCD 上的成像位置,通过位置的相对变化和 2 个点光源之间的距离可以计算出船体横扭角变化的大小。

方法(4):双频偏振光法是近几年才提出来的,其原理比较复杂:首先需要双频偏振光源(频率不等的正交圆偏振光)产生一束具有旋转偏振面的线偏振光,利用分光镜将该光束分成 2 路,一路为参考光路,一路为测量光路。2 光路通道中安装偏振器,参考光路偏振器安装在惯导基座上;测量光路偏振器安装在雷达等外测设备基座上。这种线偏振光透过偏振器后产生光强度变化——其相位与偏振器取向角有关的光束,然后利用光电转换器件将光信号转换成电信号,采用鉴相器测量两电压信号的相位差,可获得 2 偏振器取向角的变化量,即两基座之间的横扭角变化。

上述 4 种方法各有特点,且其中偏振光测量和大钢管基准法都已在实践中应用,但仍存在一些缺点:

(1)偏振光能量测量法

特点:结构简单,体积小、质量轻,便于上船安装和维护。

缺点:对偏振计接收灵敏度、起偏器与检偏器要求较高,难以满足高精度测量要求。

(2)大钢管基准法

特点:原理简要,测量精度高,技术成熟。

缺点:设备沉重、体积大,安装维护不便,只能安装在甲板上,对人员通行不利。

(3) 双光源双 CCD 探测法

特点:原理简要,技术基础成熟,质量轻,便于上船安装和维护。

缺点:两光源和两 CCD 跨度要求大,否则测量精度难以满足要求。

(4) 双频偏振光法

特点:技术先进,结构简单,体积小、质量轻,便于上船安装和维护。

缺点:双频辐射源制造比较困难,需要采用很高的电压控制。

3 光栅法

光栅法的基本原理是:在一个基座上安装一块光栅,并在光栅前放置光学镜头,使通过光学镜头后的光变为平行光;另一个基座上安装一台 CCD 相机,相机对准光栅,并使其成一清晰的图像。将图像采集到计算机中,通过亚像素处理技术^[4]提取相邻两光栅线在 CCD 相机同一行的成像位置,则两位置之间的间距 d ,同光栅方向和 CCD 行方向的夹角 θ 的关系如图 1 所示。用方程表示为

$$d = p / \sin \theta, \quad (1)$$

式中 p 为光栅的节距。当光栅节距一定时, θ 与 d 的对应关系为

$$\theta = \arcsin(p/d), \quad (2)$$

系统参数设计时,必须首先考虑 2 个方面因素:

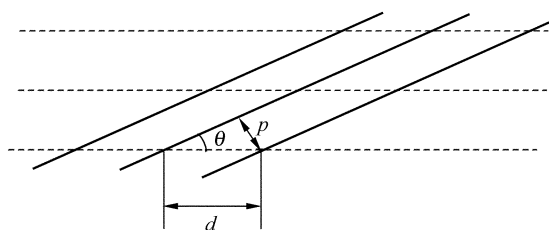


图 1 间距 d 与夹角 θ 的关系

Fig. 1 Relationship between space d and angle θ

(1) 必须保证在同一行 CCD 上,至少

有 2 个光栅节点。若 CCD 水平方向像元数为 1 000,则两光栅线在水平方向的间距不大于 500。

(2) 必须保证系统满足精度测量要求,即测角精度优于 $5''$ 。系统测角精度可由式(3)获得,

$$\Delta\theta = \frac{p}{\sqrt{d^2 - p^2}} \times \sqrt{\left(\frac{\Delta p}{p}\right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2}, \quad (3)$$

可见影响测角精度主要有节点位置提取带来的误差,节距变化带来误差。采用亚像素提取技术后,节点位置提取精度很容易达到 0.2 个像素;由于相机采用平行光成像方式,因此距离的变化对光栅像的节距不会有任何影响,影响像面节距的只有光学系统的焦距 f ,以及光栅实际间距 p_0 。光学系统的焦距可以精确标定(相对误差为 0.1‰);光栅板采用先进的光刻技术,误差可控制在 0.25 μm 以内,若光栅的间距为 2.5 mm,则相对误差为 0.1‰。假设发射系统与接收系统光学焦距分别为 f_1 、 f_2 ,则像面节距为

$$p = \frac{f_2}{f_1} \times p_0, \quad (4)$$

像面节距误差为

$$\frac{\Delta p}{p} = \sqrt{\left(\frac{\Delta f_2}{f_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta f_1}{f_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta p_0}{p_0}\right)^2} = \frac{\sqrt{3}}{10\,000}, \quad (5)$$

因此,像面节距总误差不会超过 0.2‰。

横扭角的变化范围为 $\pm 10'$ 。从图 2 和图 3 可以看出,合理设计夹角的初始角 θ_0 、并选择合适的参数,可满足间距和测角精度的要求。图 4 描述了 $\theta = 90' \pm 10'$ 、 $p = 10$ Pixel 时光栅间距与测角精度随夹角的变化关系。上述图中,光栅间距均随夹角的增大而减小,测角精度均随夹角的增大而降低。

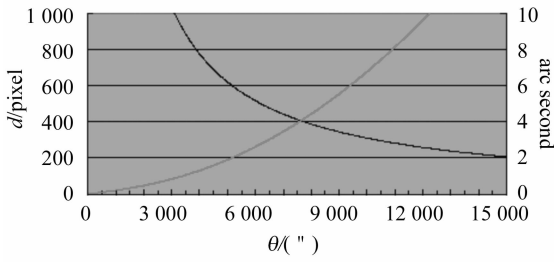


图 2 $p=15$ pixel 时, 间距 d 、测角精度 $\Delta\theta$ 与夹角 θ 的关系

Fig. 2 When $p=15$ pixel, relationship between space d , angle error $\Delta\theta$ and angle θ

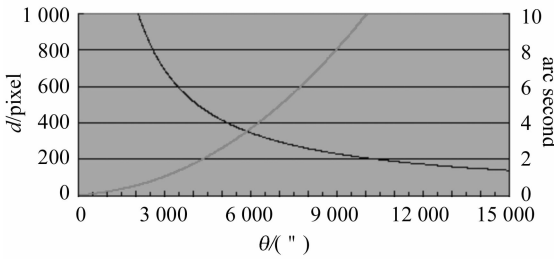


图 3 $p=10$ pixel 时, 间距 d 、测角精度 $\Delta\theta$ 与夹角 θ 的关系

Fig. 3 When $p=10$ pixel, relationship between space d , angle error $\Delta\theta$ and angle θ

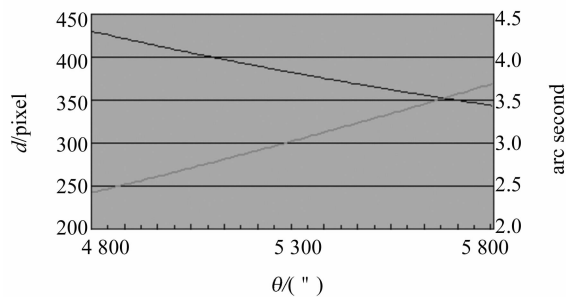


图 4 $p=10$ pixel, θ 为 $4800 \sim 6000''$ 时, 光栅间距 d 、测角精度 $\Delta\theta$ 与夹角 θ 的关系

Fig. 4 Relationship between space d , angle error $\Delta\theta$ and angle θ , when $p=10$ pixel and θ from $4800 \sim 6000''$

4 实验及结果

为了验证光栅法理论分析的准确性,

建立了实验装置。将刻画好的光栅及光学镜头安装在一台 T_3 经纬仪旋臂上, 在离经纬仪 18 m 处安装一台数字 CCD 相机, 相机对准光栅, 使光栅在像面上清晰成像。通过旋转 T_3 经纬仪, 带动光栅的转动。 T_3 经纬仪转动的读数, 即为光栅相对相机的横扭角。通过亚像素法提取每帧图像上光栅的角度 θ' , 与 T_3 经纬仪的读数进行比较, 得到光栅法的测量误差。实验结果如表 1 所示。

表 1 实验结果(单位:角秒)

Tab. 1 Experimental results(unit:arc second)

序号	测量值 θ'	T_3 经纬仪的转动量	测量误差
1	4 630.7	0	
2	4 874.3	240	3.6
3	5 112.2	480	1.5
4	5 351.9	720	1.2
5	5 593.2	960	2.5
6	5 835	1 200	4.3
7	6 068.8	1 440	-1.9
8	6 320.8	1 680	10.1

$\Delta\theta=4.6$

5 结 论

光栅法通过建立一定的模型, 将扭曲角度测量变为直线上 2 个点的位置测量, 并充分利用了高精度的亚像素提取技术。通过理论分析与半实物仿真实验验证, 基本可实现测量船船体横扭角测量。该方法系统结构简单、质量轻、便于上船安装, 具有一些无可争辩的优点。但也有不足之处: 角度与位置并非线性关系, 测角精度也随角度的变化而变化。另外设备工程化时, 还需充分考虑同时发生的纵、横挠角的耦合及船体振动等因素的影响, 并需设计工程上合理的光学系统口径与焦距。

参考文献:

- [1] 倪炜. 测量船船体变形测量一种新体制、新方法研究[D]. 北京:北京跟踪与通信技术研究所,1994.
NI W. *A new system and method for the metering of instrumentation ship hull deformation* [D]. Beijing: Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, 1994. (in Chinese)
- [2] 王建军. 测量船船体横扭角测量的双频偏振法[J]. 光学精密工程, 1999, 7(3):118-123.
WANG J J. Two-frequency polarization method for metering of instrumentation ship's hull transverse twist[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1999, 7(3):118-123. (in Chinese)
- [3] 杨国光. 近代光学测试技术[M]. 北京:机械工业出版社, 1986.
YANG G G. *Modern optics testing technology*[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1986. (in Chinese)
- [4] 于起峰, 陆宏伟. 基于图像的精密切量与运动测量[M]. 北京:科学出版社, 2002:132-163.
YU Q F, LU H W. *Precision measurement and movement measurement based on image*[M]. Beijing: Science Press, 2002:132-163. (in Chinese)

作者简介:王建军(1970—),男,1993年毕业于国防科学技术大学应用物理系,一直从事光学设备总体工作,曾获部委级科技进步二等奖两项、三等奖两项,发表论文多篇。