

测量船船体横扭角测量的双频偏振法

王建军 张光明

(北京跟踪与通信技术研究所 北京 100094)

摘 要 针对目前测量船船体变形测量系统的一些不足,首次提出采用双频偏振法测量横扭角,并从实际出发介绍了双频偏振辐射源产生的三种方法。在着重分析该方法的测量精度后,讨论了双频偏振法的优越性及不足之处。

关键词 双频偏振法 变形测量系统 横扭角 测量船

1 引 言

在风浪、载重、船舶振动、温度等因素作用下,测量船船体将产生挠扭曲等变形效应,直接影响着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基座与惯导基座之间的相对角偏移进行监测,并将监测数据用于测量设备测量数据的实时修正。两设备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。目前我国对纵挠角和艏挠角采用平行光管发射、CCD接收的测量方法,其技术比较先进、实施起来较方便。但对横扭角仍借助于大钢管作为测扭的基准参考进行间接测量,该方法要求大钢管必须刚性强、在外力作用下无横扭变形,无卡滞地安装在船体上,并能绕其轴灵活转动。大钢管作为封舱件,设备沉重、体积较大,给安装维护带来不便。近年来,我们对横扭角提出了一种新的直接测量方法——两个点光源发射、分别由两个面阵 CCD 成像测量的技术^[1],但此方法要求测量元件横向跨距较大,并没有达到体积最小化的目的。

美国早在 60 年代就采用偏振光来测量船体变形的横扭角^[2]:在惯导基座上安装一台偏振计,实际上是一种自准直发射接收机,在雷达基座上安装一块带有极化元件的平面反射镜,平面反射镜的法线与偏振计法线平行。发射接收机发出一束平行光经平面反射镜反射回来变成偏振光,偏振计带有检偏器,能检测出平面反射镜上起偏器的角度位移变化。若船体无横扭变形,则偏振计接收的光通量是一个固定值;若船体产生横扭形变,则偏振计接收的光通量发生相应的变化。该方法对偏振计的接收探测器灵敏度、起偏器与检偏器的偏振度要求较高,就国

内目前技术水平, 尚达不到船体变形高精度测量的要求。

下面我们介绍另一种偏振光测角的方法: 双频偏振法^[3]。

2 双频偏振法的基本原理

对于任一沿 z 轴传播的具有旋转偏振面的线偏振光的复振幅可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \tilde{E}_x &= E_0 \cos(\omega_1 t) e^{i\omega_2 t} \\ \tilde{E}_y &= E_0 \sin(\omega_1 t) e^{i\omega_2 t} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

(1) 式中 E_0 为振幅, $\omega_2 t$ 为相角; ω_1 为偏振面旋转的角频率; \tilde{E}_x 、 \tilde{E}_y 分别为该偏振光在 x 、 y 坐标轴上的投影。

若在该线偏振光的传播方向放置一块偏振器, 偏振器的取向 \overrightarrow{OP} 与 x 轴夹角为 θ , 则透过偏振器的光的复振幅为

$$\begin{aligned} \tilde{E}_p &= \tilde{E}_x \cos\theta + \tilde{E}_y \sin\theta \\ &= E_0 e^{i\omega_2 t} [\cos(\omega_1 t) \cos\theta + \sin(\omega_1 t) \sin\theta] \\ &= E_0 e^{i\omega_2 t} \cos(\omega_1 t - \theta) \end{aligned}$$

因此入射到光电探测器上的光强为

$$\begin{aligned} I &= \tilde{E}_p \times \tilde{E}_p^* \\ &= \frac{1}{2} E_0^2 [1 + \cos(2\omega_1 t - 2\theta)] \end{aligned}$$

光电探测器接收到入射光, 输出电压为

$$U = \frac{k}{2} E_0^2 [1 + \cos(2\omega_1 t - \theta)]$$

其中 k 为光电转换系数。

通过上述方法, 我们可以将偏振器的旋转角度量变为光电探测器输出电压的相位位移量。如果旋转偏振面的线偏振光源固定在惯导基座上, 偏振器及光电探测器固定在雷达基座上, 则光电探测器输出电压的相位位移量, 与惯导基座和雷达基座之间的横扭角大小成正比。但若若要测量横扭角, 还需测量输出电压初始相位, 因此必须建立参考通道, 参考通道输出频率为 ω_1 、初始相位与横扭角 θ 无关的正弦信号。我们只要将上述的偏振器也装到惯导基座上, 则该光通道就变为参考光通道。我们通过图 2 方式实现横扭角的测量: 辐射源 1 为旋转偏振面的线偏振光, 由分光器 2 分成两路, 分别通过参考偏振器 3 与测量偏振器 4、光电探测器 5 和 6 将输出的信号电压加到相位比较器(鉴相器) 7 上。辐射源、参考偏振器、分光器与惯导基座成刚性连接, 测量偏振器、光电探测器与雷达基座成刚性连接, 则鉴相器上的相位差即惯导基座与雷达基座横扭角的两倍。

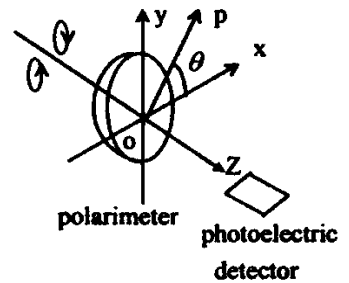


Fig. 1 Sketch map of a line polarize light through a polarimeter

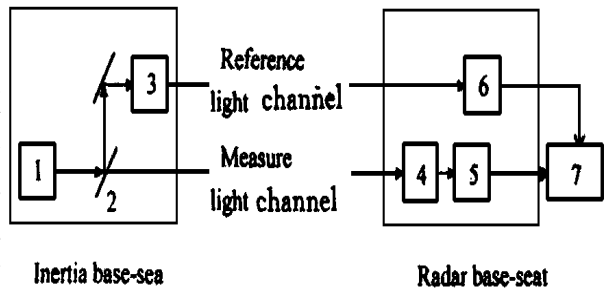


Fig. 2 Reference & measure light channel

辐射源 1 为旋转偏振面的线偏振光, 由分光器 2 分成两路, 分别通过参考偏振器 3 与测量偏振器 4、光电探测器 5 和 6 将输出的信号电压加到相位比较器(鉴相器) 7 上。辐射源、参考偏振器、分光器与惯导基座成刚性连接, 测量偏振器、光电探测器与雷达基座成刚性连接, 则鉴相器上的相位差即惯导基座与雷达基座横扭角的两倍。

以上方法对光源的要求比较严格, 必须是旋转偏振面的线偏振光。那么怎样获得这种偏

振光呢?

在(1)式中复振幅在 x 坐标轴上的投影可以转换为

$$\begin{aligned}\tilde{E}_x &= E_0 \cos(\omega_1 t) e^{i\omega_2 t} \\ &= E_0 \cos(\omega_1 t) [\cos(\omega_2 t) + i \sin(\omega_2 t)] \\ &= E_0 [\cos(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t) + i \cos(\omega_1 t) \sin(\omega_2 t)] \\ &= E_0 \cdot \frac{1}{2} \left[\cos\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t\right) + \cos\left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2} t\right) + i \sin\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t\right) + i \sin\left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2} t\right) \right] \\ &= \frac{E_0}{2} (e^{i\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t} + e^{i\frac{\omega_2 - \omega_1}{2} t})\end{aligned}\quad (2)$$

在 y 坐标轴上的投影转换为

$$\begin{aligned}\tilde{E}_y &= E_0 \sin(\omega_1 t) e^{i\omega_2 t} \\ &= E_0 \sin(\omega_1 t) [\cos(\omega_2 t) + i \sin(\omega_2 t)] \\ &= E_0 [\sin(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t) + i \sin(\omega_1 t) \sin(\omega_2 t)] \\ &= E_0 \cdot \frac{1}{2} \left[\sin\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t\right) - \sin\left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2} t\right) - i \cos\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t\right) + i \cos\left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2} t\right) \right] \\ &= \frac{E_0}{2} \cdot \left[\cos\left(\frac{(\omega_1 + \omega_2)t - \pi}{2}\right) + \cos\left(\frac{(\omega_2 - \omega_1)t + \pi}{2}\right) \right. \\ &\quad \left. + i \sin\left(\frac{(\omega_1 + \omega_2)t - \pi}{2}\right) + i \sin\left(\frac{(\omega_1 + \omega_2)t + \pi}{2}\right) \right] \\ &= \frac{E_0}{2} (e^{i\frac{(\omega_1 + \omega_2)t - \pi}{2}} + e^{i\frac{(\omega_2 - \omega_1)t + \pi}{2}})\end{aligned}\quad (3)$$

通过(2)式和(3)式可以看出任一具有旋转偏振面的线偏振光可将其表示为两个频率不等的正交(逆向旋转)的圆偏振光相迭加的形式。其复振幅分别为

$$\left. \begin{aligned}\tilde{E}_{1x} &= \frac{E_0}{2} e^{i\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t} \\ \tilde{E}_{1y} &= \frac{E_0}{2} e^{i(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t - \frac{\pi}{2})}\end{aligned} \right\} \quad (4)$$

和

$$\left. \begin{aligned}\tilde{E}_{2x} &= \frac{E_0}{2} e^{i\frac{\omega_2 - \omega_1}{2} t} \\ \tilde{E}_{2y} &= \frac{E_0}{2} e^{i(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2} t + \frac{\pi}{2})}\end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中(4)式表示为右旋圆偏振光, (5)式表示为左旋圆偏振光。

因此,我们可以将两个频率不等的正交圆偏振光,迭加成具有旋转偏振面的线偏振光。该偏振光称为双频偏振光,上述测角方法称之为双频偏振法。

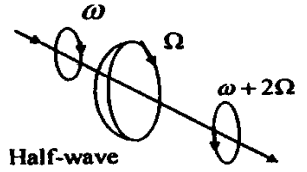
3 双频辐射源的产生

从以上原理可知,要实现双频偏振法对横扭角进行测量,其关键技术是旋转偏振面的线偏振光(即双频正交圆偏振光)的产生,下面介绍双频辐射源产生的几种方法。

3.1 旋转半波片法

如图圆偏振光垂直的传播入射到半波片, 则通过半波片的透射光由原来的右旋偏振光变为左旋偏振光, 其初始相位由半波片的取向角决定。假如半波片以角速度 Ω 旋转, 则输出端光的相位也以 2Ω 的速度旋转。

该方法为使光波频移一个较大的数值, 要求机械旋转角速度 Ω 大。如要达到 1kHz 的频移, 半波片必须以 60,000rpm 的速度旋转, 而实际应用中则往往要求频移达 1MHz 甚至更高, 采用机械旋转半波片是行不通的。



Half-wave
Fig. 3 Rotating half wave
plate method

3.2 塞曼效应法

我们知道: 当光源置于外磁场中, 在磁场的作用下, 光源的每条谱线分裂成波长比较靠近的圆偏振光, 这种现象就是“塞曼效应”。如果我们将氦氖激光器置于轴向磁场中, 则氦氖激光器由于塞曼效应产生频率为 ω_1 和 ω_2 的两个正交圆偏振光。这种激光器称之为双频激光器。在谐振腔长度为 15cm 的激光器中, 如果轴向磁场为 300 高斯, 则得到 2.2MHz 的偏振面旋转频率^[4]。压电陶瓷与激光器的一反射面呈刚性连接, 压电陶瓷由音频振荡器产生 ω_1 的振荡频率, 其频率与激光器的差频进行比较, 保证不稳定性为 1×10^{-7} 左右。

该方法的测角误差与谐振腔的品质因素(即 Q 值)有关。随着激光器使用时间的延长, 谐振腔内反射镜质量变坏, 谐振腔的 Q 值降低, 导致测量精度下降, 超出横扭角测量精度的要求。

3.3 普克尔双横向电光效应法

由横向电光效应可知, 在外电场作用下的电光晶体相当一个波片, 可以改变通过它的偏振光的偏振态, 它的相位位移(延迟)随外电场的大小而改变。在电光晶体的横向加上两个正交的电场, 两正交电场合成一个旋转圆形电场, 偏振光通过此电光晶体时便产生偏振光相位位移。

用旋转电场替代旋转波片, 其旋转角速度较易提高。原则上可以达到 1GHz 的光波频移。该方法的差频稳定度由电场控制信号的稳定度决定, 可以保证差频的高稳定性。

从以上三种双频辐射源来看, 普克尔双横向电光效应法克服了前两种方法的不足, 具有差频高度稳定的特点。而且还可用电场控制信号作为参考信号送入鉴相器, 从而还达到取消参考光通道的作用。

4 精度分析

双频偏振法将扭转角度量转换为两电信号间的相位差, 通过鉴相器测量出其相位差。

目前数字电路鉴相器因电路简单、集成化程度高、体积小、功耗低、热噪声电压低而倍受人们青睐。其输出电压与输入信号间的相位差成正比,

$$U_d = k_d \Delta\varphi = k_d(\varphi_1 - \varphi_0)$$

其中 k_d 为鉴相器的灵敏度, 其值为 0.32V/rad; $\varphi_1 = 2(\omega_1 t_1 - \theta_1)$ 、 $\varphi_0 = 2(\omega_1 t_0 - \theta_0)$ 分别为测量通道和参考通道的相位值; t_1 、 t_0 分别为从辐射源经测量通道与参考通道达到鉴相器

的时间; θ_1 、 θ_0 分别为测量偏振器与参考偏振器的取向角, 取 $\theta_0 = 0$ 。

因此, 有

$$\Delta\varphi = \frac{U_d}{k_d} = 2\omega_1 \Delta t - 2\theta_1$$

其中 $\Delta t = t_1 - t_0 = \frac{\Delta l}{c}$, $\Delta l = l_1 - l_0$ 为测量通道与参考通道长度之差(一般小于 3m), c 为光速。由上式可得

$$\theta_1 = \omega_1 \Delta t - \frac{U_d}{2k_d}$$

所以横扭角的测量误差为

$$\Delta\theta_1 = \Delta(\omega_1 \Delta t) + \frac{\Delta U_d}{2k_d} = \Delta\omega \cdot \Delta t + \omega_1 \Delta(\Delta t) + \frac{\Delta U_d}{2k_d}$$

其中 $\Delta\omega_1$ 为频率不稳定性, 取 $\omega_1 = 2\pi \times 10^6$ (1/s), $\Delta\omega_1$ 取为 $1 \times 10^{-7} \omega_1 = 0.2\pi$ (1/s), Δt 的大小为 $3/(3 \times 10^8) = 1 \times 10^{-8}$ s; $\Delta(\Delta t)$ 是由测量和参考通道长度相对变化带来的时间误差, 其值小于 $0.0015/(3 \times 10^8) = 5 \times 10^{-12}$ s;

ΔU_d 为模数转换时的量化误差, 取为 $5\mu\text{V}$; 因此 $\Delta\omega \cdot \Delta t = 2\pi \times 10^{-9}$ rad, $\omega_1 \cdot \Delta(\Delta t) = \pi \times 10^{-5}$ rad, $\frac{\Delta U_d}{2k_d} = 1.56 \times 10^{-5}$ rad。

所以通过以上分析可知横扭角的测量精度优于 7 角秒, 满足测量船船体变形测量精度要求。

5 结 论

采用双频偏振法测量船体横扭角, 将扭曲角度量变为电信号的相位差进行测量, 其系统结构简单、体积小、重量轻、便于安装, 具有一些无可争辩的优点。其不足之处是必须采用大的控制电压来产生双频辐射源, 此外, 在工程化时尚需经过实验论证。

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: [硕士学位论文]. 北京: 北京跟踪与通信技术研究, 1994
- 2 国外舰船技术编辑部. 美国靶场测量船, 1976
- 3 巴特拉柯夫 A C 等. 激光测量系统. 北京: 电子工业出版社, 1989
- 4 周炳琨, 高以智等. 激光原理. 北京: 国防工业出版社, 1984

Two-frequency Polarization Method for Metering of Instrumentation Ship's Hull Transverse Twist

WANG Jian Jun, ZHANG Guang-Ming

(*Beijing Institute of Tracking & Telecommunication technology, Beijing 100094*)

Abstract

In allusion to the shortages of instrumentation ship's hull deformation metering system, a two-frequency polarization method of metering the hull transverse twist is proposed, three approaches of obtaining the two-frequency polarization radiator are introduced. Finally, the measuring precision of the new method is analysed, its advantages and disadvantages of the new method are discussed.

Key words: Two-frequency polarization method, Deformation metering system, Transverse twist angle, Instrumentation ship

王建军 男, 1970 年 12 月出生, 1993 年毕业于国防科学技术大学应用物理系。毕业后一直从事卫星、导弹光学测控设备总体工作。