

文章编号: 0258-7025(2003)Supplement-0149-03

物体三坐标自旋转角度光电测试方法与仪器

张记龙, 程耀瑜

(华北工学院电子信息工程系, 山西 太原, 030051)

伊格礼·阿里克塞耶维奇

(圣彼得堡光机学院, 俄罗斯 197022)

摘要 介绍了光电三坐标旋转角度测试方法,研究了中空四面体反射检测传感器的特性以及由中空四面体组成的三坐标测试仪器和该仪器在三坐标旋转角度测试中的应用。

关键词 测绘仪器; 角度测试; 光学四面体; 三坐标

中图分类号 O435; TN911.73 **文献标识码** A

Measurement of Three Angular Coordinates of Rotating Object

ZHANG Ji-long, CHENG Yao-yu

(Department of Electronic Engineering and Information Science, North China Institute of Technology, Taiyuan, Shanxi 030051, China)

Konjakhin I. A.

(Fine-Optic Mechanical Institute, St. Petersburg 197022, Russian)

Abstract A new optical-electronic measuring method of rotating angles of object is represented, and a tetrahedral transducer, which is used for angle measurement, has been researched. Measuring apparatus of rotating of object is made by use of a tetrahedral transducer.

Key words instruments of measurement; angle measurement; optical tetrahedral transducer; three coordinates

1 引言

为了提高角度测试精度和速度,实现测试过程的自动化,广泛采用光电自校准测角技术。本文研究了以光学中空四面体为检测元件的三坐标光电角度测试系统。

2 自旋转角度光电测试原理

如图1所示,假设三坐标光电角度测试系统的发射、接收、记录单元位于静止坐标 xyz 中,而检测单元与被测物体一起固定在运动坐标 $x_1y_1z_1$ 中,在原始静止状态,两坐标的对应轴互相平行,中心 o 与 o_1 相距 d , oo_1 平行于三坐标光电角度测试系统的轴,为方便起见,称 o_1x_1, o_1y_1 为校准轴, o_1z_1 为扭转轴。

当被测物体静止时,从位于静止坐标系的三坐

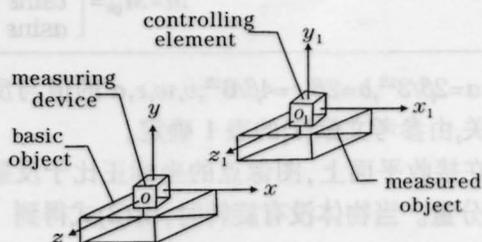


图1 检测原理示意图

Fig.1 The principle of angular measurement

标光电角度测试系统的发射单元发出的平行光束单位矢量 A_0 ,经检测单元反射后,被接收单元接收

$$A_1 = MA_0 \quad (1)$$

式中 M 为检测单元的作用矩阵, A_0, A_1 分别为入射光束与反射光束的单位矢量,而且 M 是相对动坐标的, A_0, A_1 是相对静坐标的。当被测物体旋转时,动坐标也同步旋转,反射光束的单位矢量 B_1 可用

(2)式表示

$$B_1 = M_r M_r^{-1} A_1 = M_\theta A_1 \quad (2)$$

$$M_\theta = M_r M M_r^{-1} \quad (3)$$

式中 M_r 是从动坐标系 $x_1 y_1 z_1$ 到静坐标系 xyz 的转换矩阵; M_r^{-1} 为 M_r 的逆矩阵。

接收单元接收到的反射光束单位矢量的变化为

$$C = B_1 - A_1 = (M_r M M_r^{-1} - M) A_0 \quad (4)$$

由(4)式看出,可以检测物体的旋转角。

3 检测单元的特性

基于光电自准直原理的测角仪,按照检测单元的反射器的类型有三种:利用重力场的测角仪;利用

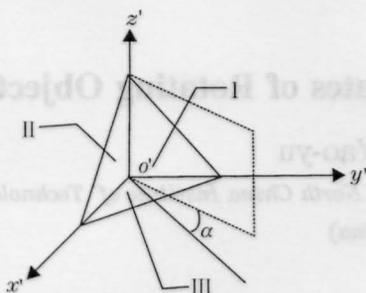


图2 检测反射单元

Fig.2 The measuring reflector

直角棱镜的测角仪;利用平面镜组合的测角仪,这三种均不能满足三坐标自动旋转角度测试的要求,故研制了一种新型的角反射体,其结构如图2所示。

此检测单元由三个反射镜 I, II, III 组成, I, II 是平面反射镜,且镜面相互垂直, III 是一锥面,其锥顶在坐标原点,锥顶角为 $90^\circ - \beta$, β 为一倾角。三镜面的法向矢量为

$$N_1 = (1, 0, 0)^T, N_2 = (0, 1, 0)^T, N_3 = (p, q, 0)^T$$

$$p = \beta [\cos(\alpha + 45^\circ) - \cos 45^\circ]$$

$$q = \beta [\sin(\alpha + 45^\circ) - \sin 45^\circ]$$

角度 α 决定于锥面的位置,其含义为有二面角 $o'x'y'$ 的二分面与通过锥面母线和锥轴的夹角。取值范围是 $-45^\circ \sim 45^\circ$ 。角反射传感器的作用矩阵为

$$M = M_{ijk} = M_0^{-1} M_i M_j M_k M_0 \quad (5)$$

式中 M_{ijk} 是相对 $x_1 y_1 z_1$ 的, $M_i M_j M_k$ 是三镜在辅助坐标系 $x'y'z'$ 的作用矩阵,且

$$M_i = E - 2N_i N_i^T \quad (6)$$

式中 M_0 为辅助坐标系 $x'y'z'$ 与运动坐标 $x_1 y_1 z_1$ 之间的转换矩阵,该矩阵决定于检测单元在运动坐标 $x_1 y_1 z_1$ 的初始安装角位置,而三坐标角度独立测试条件决定了初始安装角位置。理论分析表明^[1], M_0 应取(7)式

$$M_0 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 \cos\theta_3 & \cos\theta_2 \sin\theta_3 & \sin\theta_2 \\ \cos\theta_1 \sin\theta_3 + \sin\theta_1 \sin\theta_2 \cos\theta_3 & \cos\theta_1 \cos\theta_2 - \sin\theta_1 \sin\theta_2 \sin\theta_3 & -\sin\theta_1 \cos\theta_2 \\ \sin\theta_1 \sin\theta_3 - \cos\theta_1 \sin\theta_2 \sin\theta_3 & \sin\theta_1 \cos\theta_3 + \cos\theta_1 \sin\theta_2 \sin\theta_3 & \cos\theta_1 \cos\theta_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

将(6),(7)式代入(5)式得到

$$M = M_{ijk} = \begin{bmatrix} -1 & -c \sin \epsilon & -a \sin \epsilon \\ c \sin \epsilon & -1 & b \cos \epsilon \\ a \sin \epsilon & -b \cos \epsilon & -1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & cv & av \\ -cv & 0 & -bw \\ -av & -bw & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中 $a = 2\beta/3^{1/2}, b = 2\beta, c = 4\beta/6^{1/2}, v, w, \epsilon, a$ 的值与反射次序有关,由参考文献[1]的表1确定。

在接收平面上,图像点的坐标正比于反射矢量 B_1 的分量。当物体没有旋转时,由(2)式得到

$$\begin{bmatrix} x_{ijk}^0 \\ y_{ijk}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{ijk}^E \\ y_{ijk}^E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{ijk}^C \\ y_{ijk}^C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \sin \epsilon \\ -b \cos \epsilon \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -av \\ bw \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中第一项是长、短轴分别为 b, a 中心在原点 o 的椭圆,与反射次序无关,长轴沿 oy 方向;第二项决定了椭圆相对于的点偏移,因此,形成依反射次序

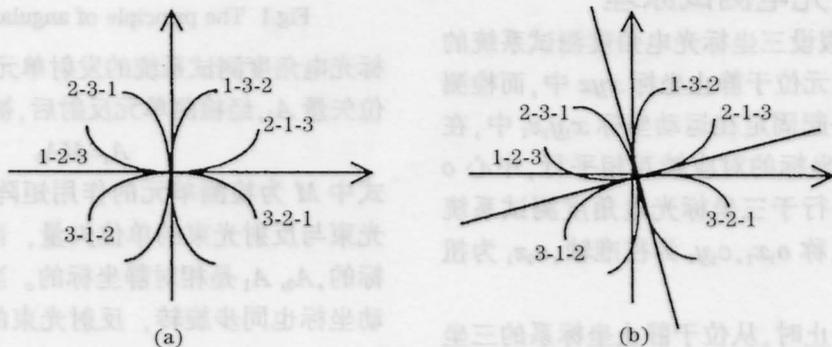


图3 旋转前后接收器上(CCD)的图像。(a) 旋转前;(b) 旋转后

Fig.3 Pictures before and after rotation. (a) Before rotation; (b) After rotation

的、相切于原点的非完整的椭圆组,如图 3(a)所示。

$$\begin{bmatrix} x_{ijk} \\ y_{ijk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 \end{bmatrix} M_{col} \begin{bmatrix} x_{ijk}^0 \\ y_{ijk}^0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中第一个矩阵描述了不改变图像形状和尺寸的围绕中心 o 的旋转; 而 M_{col} 描述了图像形状和尺寸的改变,如图 3(b)所示。

$$M_{col} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 + \sqrt{2} \sin\theta_2 \cos\theta_2 & -\sin\theta_1 \cos\theta_2 \\ \sqrt{2} \sin\theta_2 & \cos\theta_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

旋转后,椭圆短半轴变为

$$a_0 = a(\cos\theta_1 \cos\theta_2 + \sqrt{2} \sin\theta_1) \quad (12)$$

引入椭圆弧在坐标原点的切线

$$\tan\varphi_1 = (y_{123a}/x_{123a})|_{a=0}, \quad \tan\varphi_2 = (y_{231a}/x_{231a})|_{a=0} \quad (13)$$

$$\varphi_{1,2} = \theta_3 + \varphi_{col,1,2} \quad (14)$$

式中 $\varphi_{col,1,2}$ 描述了不依赖扭转的旋转。

$$\begin{cases} \tan\varphi_{col,1} = \frac{\sqrt{2} \sin\theta_2}{\cos\theta_1 + \sqrt{2} \sin\theta_1 \cos\theta_2} \\ \tan\varphi_{col,2} = \frac{\sin\theta_1 \sin\theta_2}{\cos\theta_2} \end{cases} \quad (15)$$

因此,通过测量 φ_1, φ_2 和 $\lambda = a/a_0$ 可以测量三个旋转角 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 。当旋转角小于 5° 时,由方程式(16)可求出 θ_1, θ_2 和 θ_3

$$\theta_1 = (\lambda - 1)/\sqrt{2}, \quad \theta_2 = \lambda(\varphi_1 - \varphi_2)/\sqrt{2}, \quad \theta_3 = \varphi_2 \quad (16)$$

4 仪器的精度与测试范围

1) 自校准角 θ_1, θ_2 的测试范围为 $\pm 10^\circ$, 测试误差为 $2'30''$ 和 $2'10''$;

2) 扭转角 θ_3 的测试范围为 $\pm 10^\circ$, 测试误差为 $1'30''$;

3) 测试距离不小于 6 m;

4) 仪器体积 250 mm×60 mm×60 mm。

参 考 文 献

1 J. L. Zhang, L. Wang. An optical-electronic system for automatic docking of spatial vehicle[C]. *The 14th World Congress of International Federation of Automatic Control*, 1999. 361-364

... (faded text) ...

... (faded text) ...