

Test Method of the Absolute Angle Measuring System with Inductosyn Based on Theodolite

S H A N G C h a o , W A N G G a n - q u a n , C H E N G u i - l i n *
(Shanghai Institute of Technical Physics, Shanghai 200083, China)

Abstract : The absolute rotary Inductosyn is an accurate analog transducer of absolute angle. An accurate measuring circuit should be implemented for it. The system precision must be tested by experiments, and could be improved by the results. Two common test methods are introduced. Then an appropriate way based on theodolite is presented, and analyzed by using theories of optical vector reflection and coordinate transform. The system errors are pointed out and their expressions are determined. Then the separating method is given. The analysis accords with the experiment.

Key words : theodolite; inductosyn; angle measuring; error

EEACC :7210;7320C

基于经纬仪的感应同步器测角精度检测方法研究

尚 超,王淦泉,陈桂林*

(中国科学院上海技术物理研究所,上海 200083)

摘 要 : 绝对式圆感应同步器是一种模拟式的精密绝对角度传感器,其测角系统的精度需要通过实验检测并校正。介绍了目前常用的两种检测方法,提出了一种基于经纬仪的检测方法。利用光学向量反射和坐标变换原理对该方法进行了理论分析。指出了测量系统的固有误差,给出了系统误差的表达式及其分离方法。理论分析与实验数据一致。

关键词 : 经纬仪;感应同步器;测角;误差

中图分类号:TP212.1

文献标识码:A

文章编号:1004-1699(2008)05-0865-04

感应同步器(Inductosyn)是一种精密的角度传感器,具有精度高(特别是重复性精度)、寿命长、速度快、耐恶劣环境、稳定可靠等一系列优点。因而被广泛应用于航空航天,机械加工,精密仪器等领域。绝对式圆感应同步器(Absolute Rotary Inductosyn)是由粗精两套绕组组成的绝对式角度传感器,可以在 360° 范围内实现精确测量。由于感应同步器的输出为模拟电压量,需要相应的精密测量电路才能获得数字化角度信息。因此基于感应同步器的数字测角系统的精度是由感应同步器和测角电路共同决定的。

为了检验测角系统的精度,并对测角系统进行校正,必须有一套合适的检测方法。目前常用检测方法有两种:23 面棱镜或多齿分度盘加自准直光管^[1-2]。其中 23 面棱镜不适合小范围回转轴系的测

量,多齿分度盘则不适合高密度测量,而且自准直光管的视场很小。一般星载的二纬扫描机构通常采用经纬仪检测轴系误差^[3-4]。这种方法测量视场大,并且适合小范围回转轴系的高密度测量。本论文对基于经纬仪的感应同步器测角精度检测方法进行了分析和讨论。

1 检测原理

首先我们完成了绝对式圆感应同步器测角电路的设计和调试,获得了 0.11" 的稳定分辨率和 1.6 MHz 的转换速率,并搭建了如图 1 所示的实验平台进行测角精度检测。实验用经纬仪是瑞士徕卡(Leica)公司的工业标准高精度经纬仪 TM5100A。其标准偏差(Standard Deviation)为 1",测量精度为 0.5"。

收稿日期:2007-08-30 修改日期:2007-10-08

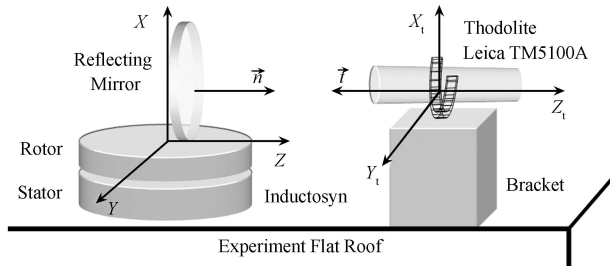


图1 检测方案原理图

如图1,反射镜可以跟随感应同步器的转子一起转动,其法线转过的角度等于感应同步器转过的角度。同时绕经纬仪的 X_i 轴转动望远镜筒,使其光源发出的光线经反射镜准直反射后,在望远镜筒内的分划板上生成清晰无视差的像。此时经纬仪的水平转角读数就等于感应同步器转过的角度。为了方便分析,我们根据图1设定如下正交直角坐标系:

感应同步器空间的定坐标系 XYZ ;

随感应同步器转动的动坐标系 $x_i y_i z_i$;

随反射镜转动的动坐标系 $x_r y_r z_r$;

经纬仪空间的定坐标系 $X_i Y_i Z_i$;

随经纬仪转动的动坐标系 $x_i y_i z_i$ 。

在初始状态时, XYZ 与 $x_i y_i z_i$ 重合, $X_i Y_i Z_i$ 与 $x_i y_i z_i$ 重合。当感应同步器的转子绕 X 轴转动角度时

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos & -\sin \\ 0 & \sin & \cos \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

理想情况下, $x_i y_i z_i$ 和 $x_r y_r z_r$ 重合,因此

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos & -\sin \\ 0 & \sin & \cos \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix} \quad (2)$$

调节经纬仪绕 X_i 轴水平转动角度,使其出射光线经反射镜准直反射后在望远镜筒的分划板上成清晰无视差的像,则

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos & -\sin \\ 0 & \sin & \cos \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

理想情况下, XYZ 和 $X_i Y_i Z_i$ 重合。另外在两个动坐标系 $x_r y_r z_r$ 和 $x_i y_i z_i$ 中分别有

$$\vec{n} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \vec{t} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

联立式(2),(3)和(4)得

$$= \quad (5)$$

式(5)表明经纬仪转动的角度等于感应同步器

转动的角度,因此该方法可以实现检测感应同步器测角精度的目的。

2 测量系统误差分析

实际上整个实验平台存在多种影响测量结果的因素,从而导致测量系统误差。如果不能把系统误差分离出来,那么实验测得的感应同步器测角系统的精度就是错误的。

首先安装感应同步器的机械平台没有经纬仪的水平调节功能,所以无法保证感应同步器的转轴 X 与地球的垂轴平行,即感应同步器的定坐标系 XYZ 与经纬仪的定坐标系 $X_i Y_i Z_i$ 之间存在偏差。由于感应同步器是被测单元,所以我们以感应同步器的定坐标系 XYZ 作为参考坐标系,则经纬仪的定坐标系 $X_i Y_i Z_i$ 与感应同步器的定坐标系 XYZ 的关系可表示为:

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos & 0 & \sin \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin & 0 & \cos \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中: α 和 β 是两个坐标系的垂轴(X 轴与 X_i 轴)之间未对准的俯仰角和方位角。

其次,反射镜是手工用胶水固定在感应同步器的转子上的。因此不能保证镜面的竖直程度,也就是说不能保证反射镜的法线方向与 Z 轴平行,故反射镜动坐标系 $x_r y_r z_r$ 与感应同步器动坐标系 $x_i y_i z_i$ 不重合。因为无论反射镜如何倾斜,我们总能通过转感应同步器的转子,使反射镜的法线向量在初始状态时位于 XOZ 平面内。则当转子转动时,总是位于 $x_i o z_i$ 平面内,设 n 与 z_i 轴的夹角为 θ ,则反射镜的动坐标系 $x_r y_r z_r$ 与感应同步器的动坐标系 $x_i y_i z_i$ 的转换关系为

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos & 0 & \sin \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin & 0 & \cos \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix} \quad (7)$$

由于各个坐标系之间存在偏差,所以当感应同步器的转子绕 X 轴转动角度时,经纬仪需要分别绕 X_i 轴和 Y_i 轴转动相应角度才可以实现经纬仪望远镜内的准直成像。因此经纬仪动坐标系与定坐标系之间的关系式(3)必须修改如下:

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos & -\sin \\ 0 & \sin & \cos \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos & 0 & \sin \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin & 0 & \cos \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\text{在 } XYZ \text{ 坐标系中有 } \vec{n} = \vec{t} \quad (9)$$

联立式(1),(4),(6),(7),(8)和(9)得

$$\begin{bmatrix} \sin \\ -\sin \cos \\ \cos \cos \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \cos \cos \sin + \cos \sin \sin \cos + \sin \cos \cos \\ \sin \sin - \cos \sin \sin \\ -\sin \cos \sin - \sin \sin \sin \cos + \cos \cos \cos \end{bmatrix} \quad (10)$$

求解以上方程组得:

$$= \arctan \left(\sin \tan(-) + \frac{\cos \tan}{\cos(-)} \right) \quad (11)$$

$$= \arcsin(\sin(-) \cos \cos - \sin \sin)$$

其中: 为经纬仪水平转角,与感应同步器的转角对应; 为经纬仪俯仰转角,是由实验平台的系统误差造成的; 代表了反射镜的安装误差; 和 代表了经纬仪坐标系与感应同步器坐标系之间的偏差。

为了反映实验平台引入的系统误差,我们设感应同步器的转角 为准确值,引入系统误差 如下:

$$= (-) - (0 - 0) \quad (12)$$

综上所述,测量系统的误差受多个因素的影响,为了分离出 就必须知道这些因素的参数值。

3 实验结果及系统误差的分离

显然,通过直接测量的方法获得影响系统误差的多个因素的参数值是比较困难的。但是我们获得了俯仰方向转角 与这些参数的函数关系式,同时我们也可以通过实验获得经纬仪在俯仰方向转角的数值。在实验的过程中,我们确实观察到了经纬仪的准直成像在俯仰方向的运动。

实验以中间位置作为参考原点,水平转动感应同步器进行测量(根据应用需求我们设定的测量范围为 ±7°,间距为 0.1°)。根据本文设定的坐标系,提取实验数据如下(转化为弧度单位):

表 1 实验数据

方向	最左	中间	最右	中间
水平角	0.194	-0.004	-0.148	0.0103
俯仰角	-0.009585	-0.010017	-0.01021	-0.009993

$$\text{当 } = 0 \text{ 时: } 0 = \arcsin(\sin(-) \cos) \quad (13)$$

在 0.2 rad (11.5°) 的范围内,当 < 0.02 rad (1.15°) 时,与(-)的差小于 40 μrad(16.5),所以我们可以取

$$0 = - \quad (14)$$

参考表 1 数据,可取

$$- = 0 = - 0.01 \text{ rad} \quad (15)$$

$$0 = 0 \quad 0 = 0$$

在实验中,我们假设参考点为误差零点,即测量的误差为相对误差,则表 1 数据需要变化为相对值(俯仰方向减去 0)。

表 2 实验数据的相对值

方向	最左	中间	最右	中间
水平角 / rad	0.194	-0.004	-0.148	0.0103
相对俯仰角 / rad	0.000415	-0.000017	-0.00021	0.000007

把(15)代入(11),按照不同的 值对 作图如下

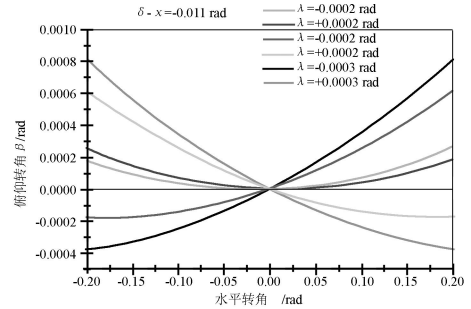


图 2 俯仰角与各误差源的关系

参考表 2 数据及图 2,则可取 近似值为 - 0.002 rad,结合式(11)及式(15),可得相对误差曲线如下(转化为与实验数据相同的单位和范围):

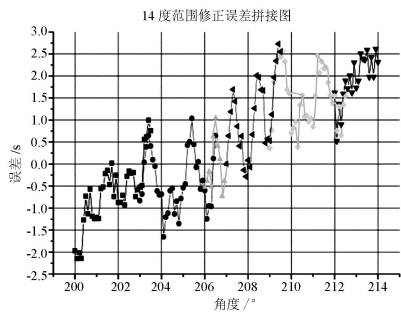
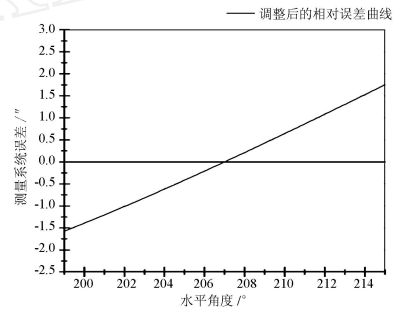


图 3 相对系统误差曲线与实验误差曲线对比

由图 3 可见,由实验平台的非理想特性带来的系统误差与实验数据吻合,测量误差是系统误差和测角误差的综合。

4 结论

经纬仪可以用来检测感应同步器的测角精度,并且具有视场大,转动范围小,测量密度高等优点。但是由于实验平台各个坐标系之间存在偏差,所以

这种检测方法会引入系统误差。本文给出了系统误差的表达式和分离方法。实验结果与分析结果一致,证明了该方法的正确性。

由于实验测量的重复性精度达到 0.5,按照本文给出的分离方法对实验数据进行处理,可以消除实验平台的系统误差,达到进一步提高感应同步器测角精度的目的,以满足工程应用的更高要求。

参考文献:

[1] 任顺清,曾庆双,陈希军. 圆感应同步器测角误差的分离技术

[J]. 中国电机工程学报,2001,21(4):92-95.

[2] 任顺清,尹国兴,曾庆双,王常虹. 小范围回转轴系感应同步器测角系统的误差分离技术[J]. 电机与控制学报,2005,9(2):183-186.

[3] 惠彬,裴云天. 二纬扫描镜非正交分析[J]. 光学仪器,2004,26(6):38-41.

[4] 刘宏伟,李欣耀,王淦泉,裴云天. 60°二纬扫描镜轴系误差测量方法研究[J]. 光学仪器,2007,29(1):1-6.



尚 超(1981-),男,河南汝州人,博士研究生,主要从事精密角度测量技术研究,newstarsc@163.com



陈桂林(1941-),男,福建南安人,中国科学院院士,中科院上海技术物理研究所研究员,博士生导师,主要从事空间红外遥感技术研究。

www.cnki.net