

# 轴系回转轴线指向误差测量方法

史耀强, 郑 渊

(上海航天技术研究院, 上海 201109)

**摘 要:** 回转轴线指向误差是扫描机构的重要性能指标之一, 对遥感成像质量有明显影响。针对回转轴线无法直接精确测量的问题, 提出了基于平面反射镜、电子自准直仪的测量系统。在详细分析平面反射镜法线与回转轴线间关系的基础上, 对测得的镜面法线指向数据进行傅里叶级数展开, 通过零次项去除和一次谐波分量误差分离处理, 得到真实的重转轴线指向误差。利用该方法对某扫描轴系实物进行了测量, 结果表明: 该方法测得的重转轴线误差为 39", 满足系统的指标要求, 相对于常规处理方法在精度和准确度上有所提高。

**关键词:** 回转轴线; 指向误差; 镜面法线; 电子自准直仪; 误差分离

**中图分类号:** TN 133.35

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.04.017

## A Measurement Method for the Pointing Error of a Shafting Rotation Axis

SHI Yaoqiang, ZHENG Yuan

(Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** The pointing error of a shafting rotation axis is one of the important performance indices for scanning mechanisms, and has a significant effect on the image quality of remote sensing. In order to solve the problem that the rotation axis cannot be measured directly and accurately, a measurement system based on plane mirror and electronic autocollimator is proposed. Based on the detailed analysis of the relationship between the plane mirror normal and the rotation axis, the measured pointing data of the plane mirror normal is expanded by Fourier series. Then, by removing the zero-order terms and separating the first harmonic component error, the real pointing error of the rotation axis is obtained. The results measured by this method show that the pointing error of the rotation axis is 39", which meets the system index requirement. Compared with conventional treatment methods, the precision and accuracy of the proposed method are improved.

**Key words:** rotation axis; pointing error; plane mirror normal; electronic autocollimator; error separation

## 0 引言

由于在轨瞬时视场有限, 航天遥感探测载荷通常以机构运动带动天线扫描的方式来实现宽角度、大范围覆盖<sup>[1-2]</sup>。扫描机构的运转性能, 如平稳性(稳速精度)、轴系回转误差、平台角振动干扰等诸多因素, 都将影响探测天线的最终指向精度, 进而影响高精度探测载荷的工作性能<sup>[3]</sup>。

机构回转误差存在于每一个轴系中且无法消除, 是轴系的固有属性, 也是其性能评价的重要指标之一。机构回转误差一般包括 3 个方面: 轴向窜动、径向晃动和回转轴线指向误差。国内外关于轴

向窜动、径向晃动的测量研究已取得很多成果, 如通过标准零件(圆柱、平晶等)<sup>[4]</sup>、基准圆度补偿<sup>[5]</sup>、单/双向反向法<sup>[6]</sup>等手段实现亚微米级精度测量。由于遥感探测载荷对天线指向偏差更为敏感, 机构的指向精度决定了探测天线在轨指向精度<sup>[7]</sup>, 在对支撑扫描天线的回转轴系进行回转误差测量时, 轴线指向误差的测量变得至关重要, 并且其测量结果还能直接用于探测光路性能的先期仿真分析, 评估其对系统性能的最终影响。在回转轴线指向误差测量方面, GAO 等提出带倾角的三点法对主轴回转误差进行测量, 由数据处理分离出径向误差和指向

收稿日期: 2020-02-17; 修回日期: 2020-03-12

作者简介: 史耀强(1983—), 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为结构机构、产品保证管理。

角误差<sup>[8]</sup>,但测得数据为点位移形式的综合误差,其中还包含主轴外形误差和系统原理误差,数据处理方法也较为复杂;LIU等<sup>[9]</sup>将激光器固定于旋转轴上,通过测量激光光束在位置传感器上的偏移来获取径向误差和指向角度误差<sup>[9]</sup>,然而考虑到激光器安装所需的空間,该方法并不适用于所有轴系(特别是小型、微型轴系)的测量。

本文采用平面反射镜、电子自准直仪组成简单测量系统,直接测量工作角度范围内平面反射镜的法线指向误差,通过对测得数据的傅里叶级数展开形式进行误差分离处理,从而获得包含在其中的轴系回转轴线指向误差。

## 1 回转轴线指向误差

国际机械生产技术研究协会(CIRP)对回转轴线的定义:回转轴线是一条某指定物体绕自身旋转的线段。由于轴承制造误差、轴系内部间隙以及外界干扰力矩等,运转过程中的回转轴线在外壳固定坐标系中并非稳定不变的,甚至存在明显的多圈非重复性<sup>[10]</sup>,因此,对处于某个具体时刻的回转轴线称之为瞬时回转轴线。为表征瞬时回转轴线在空间中的倾角变化,假定一条特定的线段作为基准,称为平均回转轴线<sup>[11]</sup>。该线段满足:轴系运转过程中,瞬时回转轴线相对于该线段的夹角偏差最小。同时可以认为,瞬时回转轴线与平均回转轴线的夹角即为回转轴线当前时刻的指向误差。

在遥感探测载荷中,常将探测天线与转轴连接,通过转轴的转动来扫描以扩大探测范围,在特定的控制系统下也可用于探测补偿。扫描天线的姿态将影响整个遥感载荷的实际探测区域,其初始安装偏差决定了扫描轨迹,回转轴线指向误差则决定了轴系动态转动过程中探测足迹偏离理想轨迹的程度。前者可以通过地面装调测试进行保证,而后者则完全取决于轴系的自身固有特性,必须在轴系集成至系统前进行独立测试评估。

## 2 测量系统原理

回转轴线是虚拟的线段,无法被直接测量,不能通过“独立测量再比较”的方式获得瞬时回转轴线的指向偏差。因此,回转轴线指向误差测量系统应具备两个功能:将无法直接测量的回转轴线转换为可测的物理对象,且物理对象能被方便、高精度地测量;转换后的物理对象与回转轴线指向角误差间存在明确的数学关系,在后续数据处理中能通过误差分离方法获得纯粹的回转轴线指向误差。

在指向角测量方面,光学测量手段多样,成熟度和准确度均很高。考虑将回转轴线的指向变化转换为镜面法线的指向变化,在转轴外露端面上粘贴一片平面反射镜,由自准直仪对反射镜镜面法线进行自准直测量,监测其在转动过程中的指向偏差。CCD数显电子式自准直仪对指向角的测量结果将在水平、垂直两个方向分别示值,如图1所示。

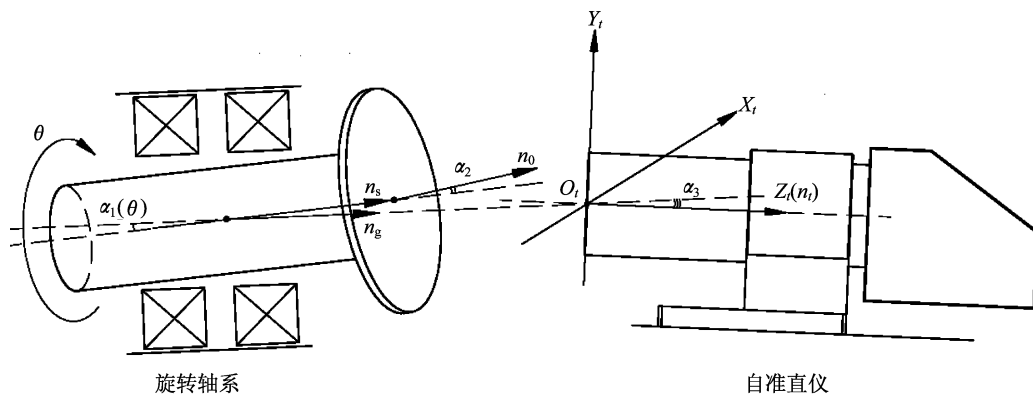


图1 轴系回转轴线指向误差测量系统

Fig.1 Measurement system for the pointing error of a shafting rotation axis

回转轴线误差为瞬时回转轴线 $n_s$ 与平均回转轴线 $n_g$ 间夹角 $\alpha_1(\theta)$ 在 $O_i X_i$ 、 $O_i Y_i$ 方向的分量。转轴转动时,平面镜镜面法线 $n_0$ 绕瞬时回转轴线 $n_s$ 转

动,转向、转速与转轴相同,且保持固定夹角 $\alpha_2$ 。平均回转轴线 $n_g$ 、自准直仪测量光轴 $n_i$ 在空间中固定,夹角为 $\alpha_3$ 。

根据自准直仪测量原理(如图 2 所示),在  $XOY$  示值坐标系中,平均回转轴线  $n_g$  将对应固定  $A$  点  $(x_0, y_0)$ ; 转轴转动  $\theta$  时,瞬时回转轴线  $n_s$  对应  $B$  点  $(x(\theta), y(\theta))$ , 而此时的实际示值为镜面法线  $n_0$  的指向角  $C$  点  $(x'(\theta), y'(\theta))$ 。转轴转动 1 圈,  $B$  点形成的闭合曲线即为回转轴线指向误差曲线。以顺时针转动为例,  $C$  点对应的实际示值曲线表示为

$$x'(\theta) = \alpha_1(\theta)_x + x_0 + \alpha_2 \cdot \cos(\theta + \beta) \quad (1)$$

$$y'(\theta) = \alpha_1(\theta)_y + y_0 + \alpha_2 \cdot \sin(\theta + \beta) \quad (2)$$

式中:  $\alpha_1(\theta)_x = x(\theta) - x_0$ , 为实际回转轴线指向误差  $\alpha_1(\theta)$  在  $X$  方向的分量;  $\alpha_1(\theta)_y = y(\theta) - y_0$ , 为实际回转轴线指向误差  $\alpha_1(\theta)$  在  $Y$  方向的分量;  $\beta$  为开始测量( $\theta = 0$ )时  $BC$  的初始相位角。

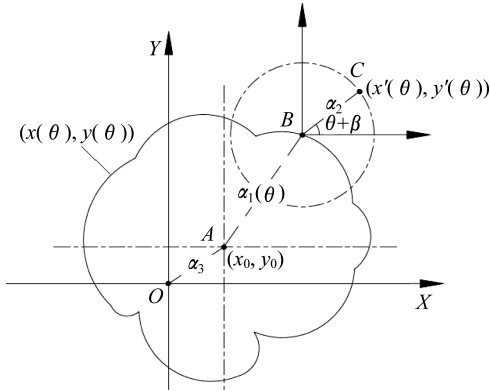


图 2 平面坐标系中各物理量的关系

Fig.2 Relationship of the physical quantities in the plane coordinate system

### 3 数据误差分离

式(1)和式(2)表明,利用上述方法进行测量,可以得到包含回转轴线指向误差的数据。以  $x'(\theta)$  为例,若能从读数结果中分离出被测对象与测量设备摆放产生的固定偏差  $x_0$ 、平面反射镜镜面倾斜产生的误差  $\alpha_2 \cdot \cos(\theta + \beta)$ , 则可获得回转轴线指向误差在  $X$  方向的分量。

从误差特性来看,固定偏差  $x_0$  为 0 阶分量,镜面倾斜误差  $\alpha_2 \cdot \cos(\theta + \beta)$  为 1 阶分量,且与  $Y$  方向的分量  $\alpha_2 \cdot \sin(\theta + \beta)$  幅值相等、相位相差  $90^\circ$ 。若回转轴线指向误差中不存在这样的分量,则可以通过傅里叶级数展开的方式进行分离去除。

1) 假设  $\alpha_1(\theta)_x, \alpha_1(\theta)_y$  中存在固定偏差。图 2 中  $A$  点表征了在当前测量系统中,固定于空间的平均回转轴线。若假设成立,则意味着还存在一条异

于前述平均回转轴线的回转轴线,两条回转轴线的固定夹角在  $X, Y$  方向的分量对应与所假设的固定偏差,这显然不可能。

2) 假设  $\alpha_1(\theta)_x, \alpha_1(\theta)_y$  中存在幅值相等且相位相差  $90^\circ$  的 1 阶分量。该部分误差表明,在轴系转动过程中,瞬时回转轴线存在绕平均回转轴线成固定夹角转动的情况。当幅值较大时,需调整轴系内支承轴承在周向的相对角度位置,进一步提高回转精度;当幅值较小或不明显时,可通过对天线进行调整的方式进行补偿,以达到消除该误差的目的。因此,该部分误差的去除不会对应用性能产生影响。

需要注意的是,  $\alpha_1(\theta)_x, \alpha_1(\theta)_y$  中仅幅值相等、相位相差  $90^\circ$  的那部分 1 阶分量是可以去除的,其余部分则不能忽略,否则将人为增大测量误差。

在实际测量时,无论是自动读数还是人工读数,所得数据均为误差曲线上的离散点值。为方便数据处理,建议以  $360^\circ/4n$  ( $n \geq 2$ ) 等间隔转动转轴并记录自准直仪的示值。1 周内,  $X, Y$  向的读数顺序排列得到数组分别记为  $W_x(i)$  和  $W_y(i)$  ( $i = 0, 1, 2, \dots, 4n - 1$ )。

将  $W_x$  和  $W_y$  写成如下傅里叶级数形式:

$$W_x(i) = \frac{a_{x0}}{2} + \sum_{k=1}^{4n-1} \left[ a_{xk} \cos\left(\frac{2\pi i \cdot k}{4n}\right) + b_{xk} \sin\left(\frac{2\pi i \cdot k}{4n}\right) \right] \quad (3)$$

$$W_y(i) = \frac{a_{y0}}{2} + \sum_{k=1}^{4n-1} \left[ a_{yk} \cos\left(\frac{2\pi i \cdot k}{4n}\right) + b_{yk} \sin\left(\frac{2\pi i \cdot k}{4n}\right) \right] \quad (4)$$

其中,傅里叶级数的计算公式为

$$a_{xk} = \frac{2}{4n} \sum_{i=0}^{4n-1} W_x(i) \cos\left(\frac{2\pi i \cdot k}{4n}\right)$$

$$b_{xk} = \frac{2}{4n} \sum_{i=0}^{4n-1} W_x(i) \sin\left(\frac{2\pi i \cdot k}{4n}\right) \quad (5)$$

$$a_{yk} = \frac{2}{4n} \sum_{i=0}^{4n-1} W_y(i) \cos\left(\frac{2\pi i \cdot k}{4n}\right)$$

$$b_{yk} = \frac{2}{4n} \sum_{i=0}^{4n-1} W_y(i) \sin\left(\frac{2\pi i \cdot k}{4n}\right) \quad (6)$$

根据式(1)和式(2),结合回转轴线的定义有

$$\frac{a_{x0}}{2} = x_0, \frac{a_{y0}}{2} = y_0 \quad (7)$$

考虑到  $\left( a_{x1} \cos\left(\frac{2\pi i}{4n}\right) + b_{x1} \sin\left(\frac{2\pi i}{4n}\right), a_{y1} \times$

$\cos\left(\frac{2\pi i}{4n}\right) + b_{y1} \sin\left(\frac{2\pi i}{4n}\right)$ 形成的曲线为近似椭圆的光滑闭合曲线,  $(\alpha_2 \cos(\theta + \beta), \alpha_2 \sin(\theta + \beta))$ 应为

$$|\alpha_2| = \min \left( \sqrt{\left[ a_{x1} \cos\left(\frac{2\pi i}{4n}\right) + b_{x1} \sin\left(\frac{2\pi i}{4n}\right) \right]^2 + \left[ a_{y1} \cos\left(\frac{2\pi i}{4n}\right) + b_{y1} \sin\left(\frac{2\pi i}{4n}\right) \right]^2} \right) \quad (8)$$

假设式(8)中最小值在  $i = m$  时取得, 则可通过式(9)和式(10)求得  $\alpha_2$  和  $\beta$ :

$$\alpha_2 \cos\left(\frac{2m\pi}{4n} + \beta\right) = a_{x1} \cos\left(\frac{2m\pi}{4n}\right) + b_{x1} \sin\left(\frac{2m\pi}{4n}\right) \quad (9)$$

$$\alpha_2 \sin\left(\frac{2m\pi}{4n} + \beta\right) = a_{y1} \cos\left(\frac{2m\pi}{4n}\right) + b_{y1} \sin\left(\frac{2m\pi}{4n}\right) \quad (10)$$

至此, 可得实际的回转轴线误差为

$$x\left(\frac{2\pi i}{4n}\right) = \sum_{k=1}^{4n-1} \left[ a_{xk} \cos\left(\frac{2\pi i \cdot k}{4n}\right) + b_{xk} \sin\left(\frac{2\pi i \cdot k}{4n}\right) \right] - \alpha_2 \cos\left(\frac{2\pi i}{4n} + \beta\right) \quad (11)$$

$$y\left(\frac{2\pi i}{4n}\right) = \sum_{k=1}^{4n-1} \left[ a_{yk} \cos\left(\frac{2\pi i \cdot k}{4n}\right) + b_{yk} \sin\left(\frac{2\pi i \cdot k}{4n}\right) \right] - \alpha_2 \sin\left(\frac{2\pi i}{4n} + \beta\right) \quad (12)$$

以上数据误差分离过程可通过 Matlab 编程处理实现。相比于独立地直接去除 X、Y 方向读数的一次谐波分量<sup>[12]</sup>, 此法将更为准确。

## 4 某扫描轴系的测量

### 4.1 某扫描轴系简介

某扫描驱动机构用于驱动一探测天线, 如图 3 所示, 通过旋转来实现天线对不同区域的扫描探测。该扫描驱动机构由步进电机、谐波减速器、旋转变压器、支承轴系、外壳和天线安装转接件构成, 支承轴系采用一对背靠背安装的角接触轴承。根据系统设计指标要求, 该旋转扫描轴系要求 360°范

其最大内接圆。 $\alpha_2$  满足

围内转轴的轴线指向角度变化不超过 0.05°。

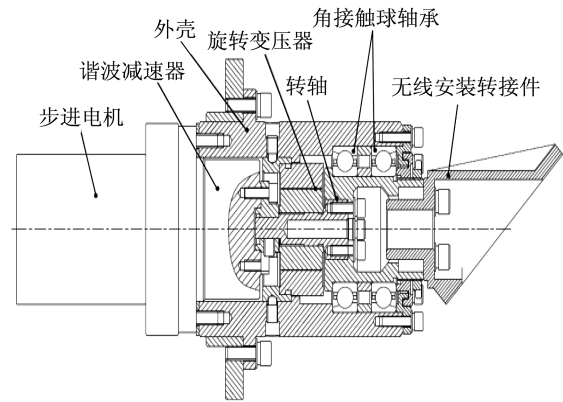


图 3 某扫描轴系剖视图

Fig.3 Sectional view of a scanning shafting

### 4.2 测量数据与处理

测量用自准直仪为德国摩勒公司产 ELCO-MAT3000 型电子自准直仪。测量范围 ±1 000", 显示分辨率可达 0.01", 全测量范围内测量精度 ±0.25"。

在转轴输出端端面粘贴平面反射镜, 调整外壳使平面反射镜基本对准自准直仪测量口。进一步精确调整电子自准直仪基座在 X、Y 方向的水平倾角, 直至显示屏中出现十字光标, 且光标基本处于测量范围中心。

在后续测量中, 设定单圈测量数据为 16 个 ( $n = 4$ , 对应角度间隔为 22.5°), 并增加一个检验读数, 以检验轴系的重复特性, 该数据不参与离散傅里叶级数计算。测量所得数据详见表 1。

表 1 自准直仪测量数据汇总表

Tab.1 Summary of the data measured by the autocollimator

转角	0°	22.5°	45°	67.5°	90°	112.5°	135°	157.5°	180°
X	654"	453"	258"	97"	10"	14"	120"	310"	538"
Y	-505"	-489"	-398"	-232"	-16"	248"	-469"	632"	706"
转角	202.5°	225°	247.5°	270°	292.5°	315°	337.5°	360°	—
X	794"	985"	1 135"	1 202"	1 180"	10 67"	908"	660"	—
Y	680"	578"	399"	203"	-89"	-292"	-423"	-501"	—

根据式(5)~式(7)得 $(x_0, y_0)$ 为 $(607.8''$ ,  
 $91.9'')$ ,  $a_{x1}=69.7''$ ,  $b_{x1}=-596.4''$ ,  $a_{y1}=-608''$ ,  
 $b_{y1}=-85.8''$ 。由此得到一阶分量为

$$\begin{pmatrix} 69.7 \cos\left(\frac{2\pi i}{16}\right) - 596.4 \sin\left(\frac{2\pi i}{16}\right), \\ -608 \cos\left(\frac{2\pi i}{16}\right) - 85.8 \sin\left(\frac{2\pi i}{16}\right) \end{pmatrix}$$

$$i=0, 1, 2, \dots, 15$$

对应的误差分量见表2。

利用式(8),得到其最大内接圆的半径 $|\alpha_2|$ 为  
597.7''。

从式(9)和式(10)进一步得到

$$\begin{pmatrix} \alpha_2 \cos\left(\frac{2\pi i}{4n} + \beta\right), \alpha_2 \sin\left(\frac{2\pi i}{4n} + \beta\right) \end{pmatrix},$$

$$i=0, 1, 2, \dots, 15$$

对应的圆误差分量见表3。

表2 1阶分量对应误差值

Tab.2 Error data of the first-order component

转角	0°	22.5°	45°	67.5°	90°	112.5°	135°	157.5°
X	69.7''	-163.8''	-372.4''	-524.3''	-596.4''	-577.7''	-471''	-292''
Y	-608''	-594.6''	-490.6''	-311.9''	-85.8''	153.4''	369.3''	528.9''
转角	180°	202.5°	225°	247.5°	270°	292.5°	315°	337.5°
X	-69.7''	163.8''	372.4''	524.3''	596.4''	577.7''	471''	292.7''
Y	608''	594.6''	490.6''	311.9''	85.8''	-153.4''	369.3''	-528.9''

表3 1阶分量中的圆误差分量

Tab.3 Circle error components of the first-order component

转角	0°	22.5°	45°	67.5°	90°	112.5°	135°	157.5°
X	79.3''	-153.4''	-362.8''	-517''	-592.4''	-577.7''	-475''	-300''
Y	-592.4''	-577.7''	-475''	-300''	-79.3''	153.4''	362.8''	517''
转角	180°	202.5°	225°	247.5°	270°	292.5°	315°	337.5°
X	-79.3''	153.4''	362.8''	517''	592.4''	577.7''	475''	300''
Y	592.4''	577.7''	475''	300''	79.3''	-153.4''	-362.8	-517

将表1中数据去除0阶分量 $(607.8'', 91.9'')$ 及  
表3中1阶分量中圆误差后,得到回转轴线指向  
误差最大值为 $39''$ ,满足指标要求,如图4所示。

根据表2中1阶分量误差分析,X方向与Y方向

误差幅值不等,若采用直接去除0阶分量和1阶分  
量的方法,计算得到的回转轴线指向误差约为 $28''$ ,  
则因数据过处理而忽略了部分误差,人为提高了轴  
系指向精度。

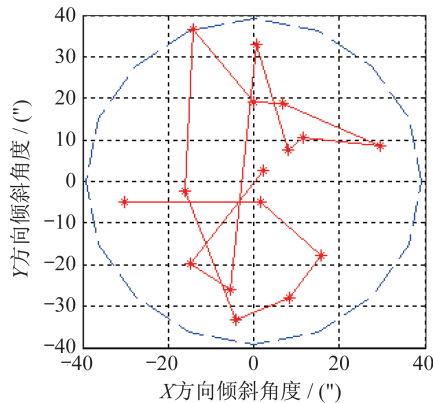


图4 回转轴线指向误差合成曲线

Fig.4 Composite curve of the pointing error of the rotation shafting axis

## 5 结束语

通过转轴端面粘贴平面反射镜,将无法直接测  
量的回转轴线转换为可测量的镜面法线,利用电子  
自准直仪来实现高精度测量。从测量原理出发,分  
析镜面法线与平均回转轴线间的数学关系,为后续  
测得数据的处理提供了理论依据。在误差分离过  
程中,将测试数据以傅里叶级数形式展开,去除其  
中的0阶分量、1阶分量中的圆误差,获得更为准确  
的回转轴线指向误差值。按此方法对某扫描轴系  
实物进行了测量,数据处理结果表明,该轴系满足  
系统指标要求,并且已用于某背景型号微波探测载

(下转第140页)