



中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 1669—2017

三轴转台校准规范

Calibration Specification for Three Axis Tables

2017-11-20 发布

2018-02-20 实施

国家质量监督检验检疫总局 发布

三轴转台校准规范

Calibration Specification

for Three Axis Tables

JJF 1669—2017

归口单位：全国惯性技术计量技术委员会

主要起草单位：航空工业北京航空精密机械研究所

航空工业北京长城计量测试技术研究所

参加起草单位：南京市计量监督检测院

本规范委托全国惯性技术计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

孟凡军（航空工业北京航空精密机械研究所）

张 明（航空工业北京航空精密机械研究所）

董雪明（航空工业北京长城计量测试技术研究所）

参加起草人：

李碧政（航空工业北京航空精密机械研究所）

张 杰（南京市计量监督检测院）

市场监管总局

目 录

引言	(II)
1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 术语	(1)
4 概述	(1)
5 计量特性	(2)
6 校准条件	(3)
7 校准项目和校准方法	(4)
8 校准结果表达	(24)
9 复校时间间隔	(25)
附录 A 校准证书内页格式	(26)
附录 B 三轴转台主要性能参数的测量不确定度评定	(27)
附录 C 三轴转台主要性能参数的其他校准方法	(39)

引 言

本规范是针对惯性产品用三轴转台校准制定的计量技术规范。本规范的编写过程主要参考了 JJF 1210—2008《低速转台校准规范》和 GJB 1801—1993《惯性技术测试设备主要性能试验方法》。

本规范为首次发布。

市场监管总局

三轴转台校准规范

1 范围

本规范规定了惯性产品用三轴转台的校准项目和校准方法。

2 引用文件

JJF 1210—2008 低速转台校准规范

GJB 585A—1998 惯性技术术语

GJB 1801—1993 惯性技术测试设备主要性能试验方法

GJB 5878—2006 双轴测试转台通用规范

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

3 术语

GJB 1801—1993 和 GJB 585—1998 确立的以及下列术语、定义和符号适用于本规范。

3.1 三轴相交度 three-axis intersection

三根相互正交的回转轴，与期望其相交于一点所偏离的程度。

3.2 角位置定位稳定性 angular position stability

规定时间内转台角位置的变化量。

4 概述

三轴转台主要由机械台体、电控柜、系统软件和专用电缆等部分组成。机械台体包括：三根正交的工作轴、相对应的框架、被测件的安装基准和基座。轴上装有测角元件、驱动部件和导电滑环等。通常把三根工作轴按相对位置称为：内轴、中轴和外轴。即内轴由中框架支撑，中轴由外框架支撑，外轴由底座支撑。框架的形式有 U 形和 O 形两种，总体结构有 U-O-O，U-U-T，O-O-T，O-O-O 等多种组合。被测件的安装基准有框架式和台面式两种。框架式安装基准需配置专用安装板。电控柜可以是一个或多个，内装测量控制单元（或计算机）、驱动器和电源等电气部件。

三轴转台应为产品测试提供精确的坐标基准和运动基准。由于惯性系统能敏感地球速率和重力加速度的变化，测试时通常要求产品（通过转台）相对当地地理坐标取不同指向。作为坐标基准，机械台体三根正交的工作轴可建立精确的坐标系，利用角位置定位模式可方便地实现各种指向。为保证坐标系的不变性，转台安装时应调整底座水平，并利用台体上的方位镜与安装地的方位基准确定转台的初始位置。例如，立式三轴转台的外轴指天，一般用方位镜确定水平位置的中轴的指向（东向或北向）。从而确定转台

的坐标零位。卧式三轴转台的外轴水平，可以用方位镜确定外轴的指向。

三轴测试转台的测角系统能随时显示各轴的角位置。整度间隔角位置输出脉冲是对连续测量的补充，以满足实际试验的需要。

5 计量特性

三轴转台的计量特性见表 1。

表 1 计量特性

序号	计量特性名称	指标
1	安装基准面平面度	0.01 mm
2	安装基准面端跳	0.01 mm
3	安装基准面与内轴轴线的平行度	3"
4	轴线回转倾角误差	$\pm 1''$
5	轴线垂直度	$\pm 1''$
6	轴线相交度	0.2 mm 直径球
7	角位置定位误差	$\pm 1.5''$
8	角位置定位重复性	1"
9	角位置分辨率	0.36"
10	角位置定位稳定性	2"/12 h
11	角速率相对误差	1×10^{-5} (360°平均) 1×10^{-4} (10°平均) 1×10^{-3} (1°平均)
12	角速率平稳性	1×10^{-5} (360°平均) 1×10^{-4} (10°平均) 1×10^{-3} (1°平均)
13	角速率分辨率	0.000 1 °/s
14	幅频特性	15 Hz (幅值 10%、相位 10°)
15	正弦运动失真度	5%
16	正弦运动幅值误差	5%
17	正弦运动频率误差	1%
18	磁场强度	0.5 mT
19	引北镜反射平面与引北轴轴线方位垂直度	3"
20	引北直角棱镜反射法线与引北轴轴线方位垂直度	3"

6 校准条件

6.1 校准环境条件：

环境温度：(20±5)℃，2 h 内的温度波动度小于 1℃。

相对湿度：30%~80%；

周围无震动、强电磁干扰，没有突加、突卸负载和其他脉冲负载。

6.2 仪器及设备

校准用标准装置及配套设备如表 2 所示。

表 2 校准用标准装置及推荐技术指标

序号	校准用标准装置 及配套设备	技术指标	校准参数
1	刀口尺	0 级刀口尺	平面度
2	量块	四等	平面度
3	千分表	0.002 mm	端面跳动
4	频率计	100 MHz 频率稳定性： $\pm 5 \times 10^{-4}$	角速率相对误差 及平稳性
5	电子水平仪	示值误差：0.2″	垂直轴倾角 回转误差
6	失真度仪	最大允许误差：0.1%	波形失真度
7	多面棱体	转台定位误差≤2″不低于 3 等多面棱体 转台定位误差≤10″不低于 4 等多面棱体	角位置定位误差
8	光电自准直仪	转台定位误差≤2″， 自准直仪示值误差≤0.1″	轴回转倾角误差 轴线垂直度
9	便携式圆光栅 测角系统	小于 0.5″	角位置定位误差 角速率相对误差及平稳性
10	动态信号分析仪	频率范围：不小于 10 kHz 动态范围：不低于 60 dB	幅频特性
11	磁强计	0.001 mT	磁场强度
12	激光跟踪经纬仪	激光跟踪经纬仪 0.5 μm/m	相交度
13	测微准直望远镜	0.02 mm/格	相交度
14	目标	同轴度 0.005 mm	相交度
15	平面镜	平面度 0.05 μm	轴回转倾角误差、轴线垂直度
16	自准直经纬仪	0.5″	引北镜、垂直度

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

校准项目见表 3。

表 3 校准项目一览表

序号	校准项目	校准方法
1	安装基准面平面度	7.2.1
2	安装基准面端跳	7.2.2
3	安装基准面与内轴轴线的平行度	7.2.3
4	轴线回转倾角误差	7.2.4
5	轴线垂直度	7.2.5
6	轴线相交度	7.2.6
7	角位置定位误差	7.2.7
8	角位置定位重复性	7.2.8
9	角位置分辨力	7.2.9
10	角位置定位稳定性	7.2.10
11	角速率相对误差	7.2.11
12	角速率平稳性	7.2.12
13	角速率分辨力	7.2.13
14	幅频特性	7.2.14
15	正弦运动失真度	7.2.15
16	正弦运动幅值误差	7.2.16
17	正弦运动频率误差	7.2.17
18	磁场强度	7.2.18
19	引北镜反射平面与引北轴轴线方位垂直度	7.2.19
20	引北直角棱镜反射法线与引北轴轴线方位垂直度	7.2.20

7.2 校准方法

7.2.1 安装基准面平面度

将刀口尺水平放置在安装基准面上，刀口尺两侧放置两块等尺寸量块，中间用量块检测，使用不同的量块观察其光隙大小或是否能通过刀口尺下方。分别在安装基准面上四个方向校验，记录校验数据。取数据的最大差值为安装基准面平面度。

7.2.2 安装基准面端跳

调整安装基准面处于水平状态，校准示意图如图 1 所示。将装有千分表的表架固定好，把量块放在基准面不同位置处，使千分表与量块工作面接触并读数。旋转安装基准

面并移动量块，在工作台圆周均匀分布的各个点上进行检测，并记录数据。数据记录中最大和最小示值之差即为安装基准面端跳。

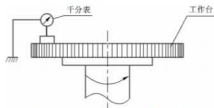


图1 安装基准面端跳校准示意图

7.2.3 安装基准面与内轴轴线的平行度

校准安装基准面与水平面的偏差和内轴轴线与水平面的偏差，由此求得安装基准面与内轴轴线的平行度。

a) 校准程序

如图2所示，将平行平板安装在内框上，与安装基准面贴合，并调整内框和中框均处于水平位置。

1) 把水平仪放在平行平板上，使水平仪的敏感方向与内轴轴线平行，记取水平仪读数 a_1 ，见图1。然后将水平仪调转 180° ，记取水平仪读数 a_2 ；

2) 将内框绕内轴翻转 180° ，把水平仪置于平行平板的另一面上，水平仪放置方向同1)。记取水平仪读数 a_3 ，见图2。然后将水平仪调转 180° ，记取水平仪读数 a_4 ；

3) 内框转 180° 恢复至1) 的状态，然后将平行平板在水平方向转 180° ；

4) 重复1) 和2) 的过程，记取水平仪读数 $a_5 \sim a_8$ 。

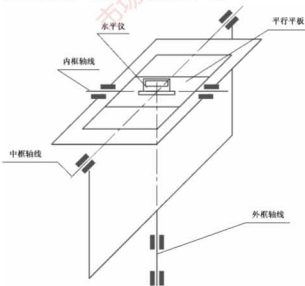


图2 安装基准面与内框轴线平行度校准示意图

b) 数据处理

内框基准面与内框轴线平行度 f 依公式 (1) 计算。

$$f = k \times [(L_1 - L_2)/2 + (L_3 - L_4)/2]/2 \quad (1)$$

式中:

f ——内框基准面与内轴轴线平行度 ($''$);

k ——电子水平仪读数转换系数;

L_i ——基准面在相应位置对水平面的倾斜度 ($i=1\sim 4$);

其中: $L_1 = (a_1 - a_2)/2$; $L_2 = (a_3 - a_4)/2$; $L_3 = (a_5 - a_6)/2$; $L_4 = (a_7 - a_8)/2$ 。

7.2.4 轴线回转倾角误差

轴线回转倾角误差一般采用光电自准直仪校准方法,在满足要求的条件下,铅垂轴可以采用电子水平仪校准方法。

7.2.4.1 光电自准直仪校准方法

a) 校准程序

将光电自准直仪置于被测轴一侧。平面镜装于轴的一端或轴框架中间位置,使光电自准直仪对准平面镜,调整此平面镜使之与被测轴线垂直,然后将被测轴置于零位。

从零度开始旋转被测轴一周,每间隔 10° 从光电自准直仪读取 X 方向(即水平方向)的示数 W_{xi} , $i=1, \dots, 36$ 。 Y 方向(即竖直方向)的示数 W_{yi} , $i=1, \dots, 36$ 。并记录数据。图3所示为平面镜装于中心时内框、中框轴线回转倾角误差校准示意图。图4所示为平面镜装于轴端时内框、中框轴线回转倾角误差校准示意图。连续测量5次,数据记入计算机中。

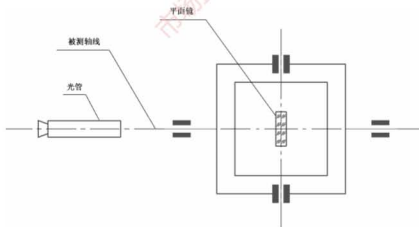


图3 内框、中框轴线回转倾角误差(中心)校准示意图

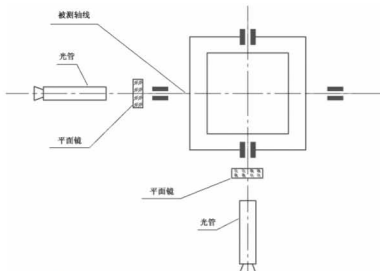


图4 内框、中框轴线回转倾角误差（端面）校准示意图

b) 数据处理及结果

测量值 W_{xi} 、 W_{yi} 为被校准轴角位置的周期函数。

将测量值 W_{xi} 、 W_{yi} 分别展成傅里叶级数，然后扣除光电自准直仪零位误差和平面镜与旋转轴线安装不垂直形成的零次和一次谐波分量即可得到倾角回转误差的两个直角坐标分量 ΔW_{xi} 、 ΔW_{yi} ，合成两分量得 W_i 。

傅里叶分析：

将周期函数 W_{xi} 、 W_{yi} 展开为傅氏级数：

$$W_{xi} = \frac{a_{x0}}{2} + \sum_{k=1}^i [a_{xk} \cos(k\theta) + b_{xk} \sin(k\theta)] \quad (2)$$

$$W_{yi} = \frac{a_{y0}}{2} + \sum_{k=1}^i [a_{yk} \cos(k\theta) + b_{yk} \sin(k\theta)] \quad (3)$$

式中： $i=1, \dots, 36$ ； k 为谐波次数。

零次和一次项傅氏系数为 a_{x0} 、 a_{y0} 和 a_{x1} 、 b_{x1} 、 a_{y1} 、 b_{y1} ，

$$a_{x0} = 2/n \sum_{i=1}^n W_{xi} \quad (4)$$

$$a_{x1} = 2/n \sum_{i=1}^n W_{xi} \cos\theta \quad (5)$$

$$b_{x1} = 2/n \sum_{i=1}^n W_{xi} \sin\theta \quad (6)$$

$$a_{y0} = 2/n \sum_{i=1}^n W_{yi} \quad (7)$$

$$a_{y1} = 2/n \sum_{i=1}^n W_{yi} \cos\theta \quad (8)$$

$$b_{y1} = 2/n \sum_{i=1}^n W_{yi} \sin\theta \quad (9)$$

扣除安装误差：

从傅氏级数中扣除光管零位和平面镜与轴线安装不垂直造成的零次和一次谐波分量，得到回转倾角误差的两个正交分量 ΔW_{xi} 、 ΔW_{yi} 。

$$\Delta W_{xi} = W_{xi} - a_{x0} - a_{xi} \cos \theta - b_{xi} \sin \theta \quad (10)$$

$$\Delta W_{yi} = W_{yi} - a_{y0} - a_{yi} \cos \theta - b_{yi} \sin \theta \quad (11)$$

$$W_i = \sqrt{\Delta W_{xi}^2 + \Delta W_{yi}^2} \quad (12)$$

回转倾角误差计算：

$$W = \{W_i\}_{\max} \quad (13)$$

转台回转倾角误差取 5 次正、反回转倾角误差的平均值作为轴线回转倾角误差：

$$\bar{W} = 1/n \sum_{i=1}^5 W_i \quad (14)$$

测量标准偏差：

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (W_i - \bar{W})^2} \quad (15)$$

7.2.4.2 电子水平仪校准方法

a) 校准程序

使内框轴和中框轴处于零位，然后将两轴锁定。把水平仪置于外框架的基准面上，调整垫铁使水平仪在外框架转动一周内示数变化不超过回转误差要求值的 5 倍。

从 0° 开始旋转外框轴一周，每间隔 10° 从水平仪读取 X 方向的示数，记录数据 W_{xi} 。

将水平仪转 90°，从零度开始旋转外框轴，每间隔 10° 从水平仪读取 Y 方向的示数，记录数据 W_{yi} 。图 5 所示为外框轴线回转倾角误差校准示意图。连续测量 5 次数据记入计算机中。

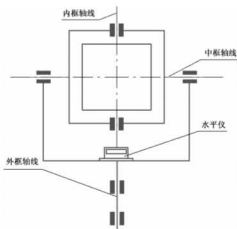


图 5 外框轴线回转倾角误差校准示意图

b) 数据处理及结果

数据处理同 7.2.4.1 中的处理算法。

7.2.5 轴线垂直度

轴线垂直度校准可以采用光电自准直仪校准方法及电子水平仪校验方法。校验过程中可以根据不同的旋转轴和校准条件采用不同的方法。三轴转台一般校验内框、中框轴线垂直度以及中框、外框轴线垂直度。

7.2.5.1 双镜法校准中框、外框轴线垂直度

a) 校准程序

内框架与中框之间锁定，将光电自准直仪置于中框轴一侧。

- 将两个平面镜装于中框架两端轴的安装端面。
- 将双面平面镜装于轴的一端安装端面。
- 将双面平面镜装于轴框架中间位置。

使光电自准直仪对准反射镜一个面，调整此反射镜使之与中框轴线垂直。再使中框、外框轴处于零位，这时将底座与外框架之间锁定。校准示意图如图 6 所示。

读取光电自准直仪垂直方向示数，记为 Y_{11} 。使中框轴按 45° 间隔转动一周，记下光电自准直仪水平方向示数 $Y_{12}, Y_{13}, \dots, Y_{18}$ 。

将外框轴转动 180° 后再次锁定，这时光电自准直仪对准另一反射镜面，读取光电自准直仪垂直方向示数，记为 Y_{21} 。使内框轴按 45° 间隔转动一周，记下光电自准直仪垂直方向示数 $Y_{22}, Y_{23}, \dots, Y_{28}$ 。以上数据记于表中。

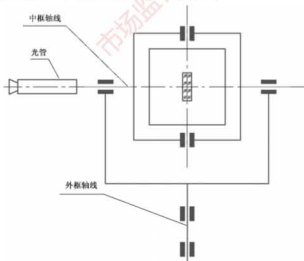


图 6 中框、外框轴线垂直度校准示意图

b) 数据处理

按照 GJB 1801—1993《惯性技术测试设备主要性能试验方法》中关于“轴线垂直度试验”的数据处理方法，计算公式 (16) ~ (19) 如下：

$$W_1 = [(Y_{11} + Y_{15})/2 - (Y_{21} + Y_{25})/2]/2 \quad (16)$$

$$W_2 = [(Y_{12} + Y_{16})/2 - (Y_{22} + Y_{26})/2]/2 \quad (17)$$

$$W_3 = [(Y_{13} + Y_{17})/2 - (Y_{23} + Y_{27})/2]/2 \quad (18)$$

$$W_4 = [(Y_{14} + Y_{18})/2 - (Y_{24} + Y_{28})/2]/2 \quad (19)$$

式 (16) ~ (19) 中:

W_1 ——中框轴与外框轴在 Y_{11} 、 Y_{15} 相对位置下的两回转轴线垂直度;

W_2 ——中框轴与外框轴在 Y_{12} 、 Y_{16} 相对位置下的两回转轴线垂直度;

W_3 ——中框轴与外框轴在 Y_{13} 、 Y_{17} 相对位置下的两回转轴线垂直度;

W_4 ——中框轴与外框轴在 Y_{14} 、 Y_{18} 相对位置下的两回转轴线垂直度。

取 W_1 、 W_2 、 W_3 、 W_4 四个数据的最大值作为测量所得的中框、外框轴线的垂直度。

7.2.5.2 电子水平仪法校准中外、中内垂直度

a) 校准程序

将三轴转台调平, 三轴定位于各自零位。使内框轴铅垂。电子水平仪放在内框轴框架平面上。此时三轴转台外框轴转角为 α 、中框轴转角为 β 、内框轴转角为 γ 。

当三轴转台外框轴转角 $\alpha=0^\circ$, 中框轴转角为 $\beta=0^\circ$, 内框轴转角为 $\gamma=0^\circ$, 读取电子水平仪示数 $F(0, 0, 0)$;

旋转外框轴转角 $\alpha=180^\circ$, 内框轴转角为 $\gamma=0^\circ$, 读取电子水平仪示数 $F(180, 0, 0)$;

旋转外框轴转角 $\alpha=0^\circ$, 内框轴转角为 $\gamma=180^\circ$, 读取电子水平仪示数 $F(0, 0, 180)$;

旋转外框轴转角 $\alpha=180^\circ$, 内框轴转角为 $\gamma=180^\circ$, 读取电子水平仪示数 $F(180, 0, 180)$;

当三轴转台外框轴转角 $\alpha=0^\circ$ 、中框轴转角为 $\beta=180^\circ$ 、内框轴转角为 $\gamma=0^\circ$ 时, 读取电子水平仪示数 $F(0, 180, 0)$;

旋转外框轴转角 $\alpha=180^\circ$, 内框轴转角为 $\gamma=0^\circ$, 读取电子水平仪示数 $F(180, 180, 0)$;

旋转外框轴转角 $\alpha=0^\circ$, 内框轴转角为 $\gamma=180^\circ$, 读取电子水平仪示数 $F(0, 180, 180)$;

旋转外框轴转角 $\alpha=180^\circ$, 内框轴转角为 $\gamma=180^\circ$, 读取电子水平仪示数 $F(180, 180, 180)$ 。

校准示意图如图 7 所示。

b) 数据处理

中框和外框垂直度:

$$\Delta\theta_1 = [F(0, 0, 180) - F(180, 0, 0) + F(0, 180, 180) - F(180, 180, 0)]/4$$

中框和内框垂直度:

$$\Delta\theta_2 = [F(0, 0, 180) - F(180, 0, 0) - F(0, 180, 180) + F(180, 180, 0)]/4$$

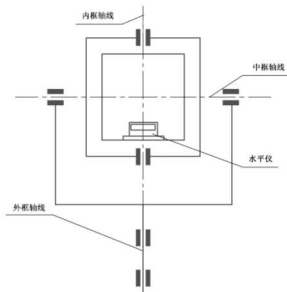


图7 电子水平仪法校准示意图

7.2.6 轴线相交度

7.2.6.1 轴端双目标校准法

a) 校准程序

1) 测量中框、外框轴线间距离 X_1

分别将两个同心圆目标安装在中框轴两端，打开白炽灯光源，使光源从目标的背面照亮目标。

将外框架与底座锁定，同时锁定内框架，使准直望远镜对准目标Ⅰ中心，转动中框轴并调整目标，使目标中心画圆最小，见图8(a)。

通过光电自准直仪与棱体确定将外框旋转 180° ，将外框用夹具固定，准直望远镜不动，转动中框轴并调整目标Ⅱ，使目标中心画圆最小，见图8(a)。

使准直望远镜对准目标Ⅰ中心，记下准直望远镜水平方向示数 X_1 ，转动外框轴 180° 后，使准直望远镜读出目标Ⅱ中心在水平方向示数 X_2 。

2) 测量内框、中框轴线间距离 Y_1

分别将两个同心圆目标安装在内框轴两端，打开白炽灯光源，使光源从目标的背面照亮目标。

将外框轴用插销锁定，再将中框架置于水平位置后用插销锁定。使准直望远镜对准目标Ⅰ中心，转动内框轴并调整同心圆目标，使目标中心画圆最小，见图8(b)。

通过光电自准直仪与棱体确定将中框旋转 180° ，将外框轴用框锁与底座锁定，准直望远镜不动，转动内框轴并调整目标Ⅱ，使目标中心画圆最小，见图8(b)。

使准直望远镜对准目标Ⅰ中心，记下准直望远镜竖直方向示数 Y_1 ，此时三个框架均用插销锁定，转动中框轴 180° 后固定，使准直望远镜读出目标Ⅱ中心在竖直方向示

数 Y_2 。

3) 测量外框、内框轴线间距离 Z_i

使准直望远镜，记下准直望远镜水平方向示数 Z_1 ，见图 8 (b)。此时三个框架均用插销锁定。

通过光电自准直仪与棱体确定将外框旋转 180° ，使准直望远镜对准目标 II 中心，读出目标在水平方向示数 Z_2 。

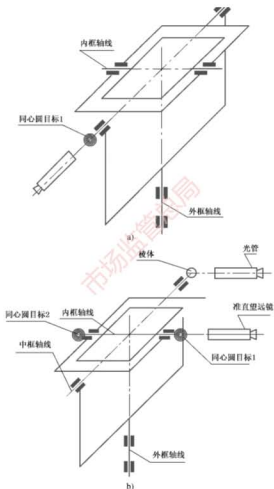


图 8 三框轴线相交度校准简图

b) 数据处理及结果

三框轴线相交度计算公式为：

$$\Phi = 2 \sqrt{\left(\frac{X_1 - X_2}{2}\right)^2 + \left(\frac{Y_1 - Y_2}{2}\right)^2 + \left(\frac{Z_1 - Z_2}{2}\right)^2} \quad (20)$$

由式 (20) 计算得到 Φ 值, 表示三轴相交度不大于 Φ 。

7.2.6.2 激光跟踪仪校准法

a) 校准程序

将三轴转台调平, 使方位框 (外框) 轴铅锤, 俯仰 (中框) 轴线水平, 横滚 (内框) 轴线铅锤。将激光跟踪仪安置在距转台 5 m 处, 对准三轴转台。在三轴台方位轴框 (外框) 架上下固定两个镜座, 俯仰 (中框) 轴框架上水平固定两个镜座, 横滚 (内框) 轴框架上下固定两个镜座。

将激光跟踪仪靶镜引至横滚 (内框) 靶镜座上, 转动横滚 (内框) 轴, 采集激光跟踪仪数据用分析软件拟合计算出一个回转圆的中心坐标, 然后将激光跟踪仪靶镜引至另一个横滚 (内框) 靶镜座上, 转动横滚轴, 采集激光跟踪仪数据用分析软件拟合计算出另一个回转圆的中心坐标。根据两圆心坐标可构造出横滚 (内框) 轴回转轴线。

同上原理可标定俯仰 (中框) 轴线和方位 (外框) 轴线回转轴线, 利用计算机软件计算出方位 (外框) 轴线距横滚 (内框) 轴线之间的距离 Z 、俯仰 (中框) 轴线距横滚 (内框) 轴线之间的距离 Y 和方位 (外框) 轴线距俯仰 (中框) 轴线之间的距离 X 。

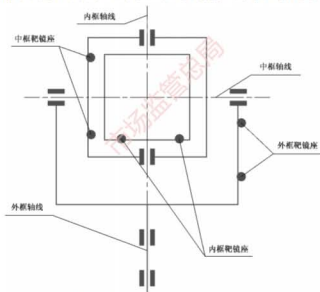


图9 激光跟踪仪校准相交度示意图

b) 数据处理及结果

轴线相交度:

$$\Phi = 2\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

7.2.7 角位置定位误差

7.2.7.1 光电自准直仪法

a) 校准程序

将多面棱体安装在转台被校准转轴上, 并使多面棱体轴线与转台旋转轴线重合, 同轴度误差应不大于 0.01 mm, 棱体各工作面与转台旋转轴的轴线的平行度 (塔差) 不

大于 $10''$ 。

启动转台，使旋转轴处于角位置显示 0° 为起始位置，记录光电自准直仪读数 a_0 ，将旋转轴顺时针依次转动棱体面固定的角度，并记录光管的读数 a_i ($i=1, 2, \dots, n$)， n 为棱镜面数。

方法同上，使旋转轴处于角位置显示 0° 为起始位置，记录光电自准直仪读数 b_0 ，将旋转轴逆时针依次转动棱体面固定的角度，并记录光管的读数 b_i ($i=1, 2, \dots, n$)， n 为棱镜面数。

连续测量 N 次 ($N \geq 5$) 数据并记录。

图 10、图 11、图 12 分别为内框、中框和外框角位置定位误差校准示意图。

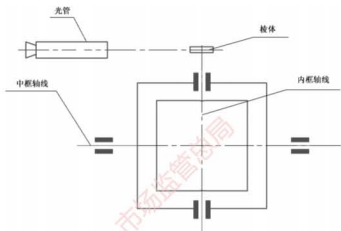


图 10 内框轴角位置定位误差校准示意图

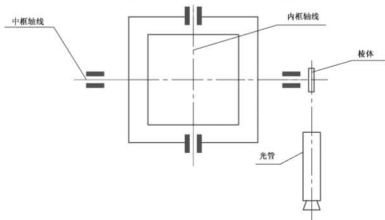


图 11 中框轴角位置定位误差校准示意图

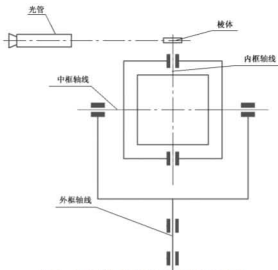


图 12 外框轴角位置定位误差校准示意图

b) 数据处理

$$e_{ai} = a_i - a_1 - \Delta_i \quad (21)$$

$$e_{bi} = b_i - b_1 - \Delta_i \quad (22)$$

式中:

e_{ai} ——顺时针旋转对应校准位置的角位置示值误差;

e_{bi} ——逆时针旋转对应校准位置的角位置示值误差;

Δ_i ——棱体相应面的棱体偏差。

($i=1, 2, \dots, n$, n 为需要校准的位置数。)

单次测量的角位置示值误差最大值: $e^+ = \max \{e_{ai}, e_{bi}\}$; 最小值: $e^- = \min \{e_{ai}, e_{bi}\}$

连续测量 N 次 ($N \geq 5$), 取每次测量值的最大值的平均值和每次测量值的最小值的平均值为角位置示值误差的最大值 θ^+ 和最小值 θ^- 。

$$\theta^+ = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^+ \quad (23)$$

$$\theta^- = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^- \quad (24)$$

7.2.7.2 光栅测角系统方法

将校准光栅测角系统转轴与转台转轴通过联轴节连接在一起, 并使转台轴线与光栅测角系统同轴, 同轴度 0.002 mm 内。

启动转台, 使旋转轴处于角位置显示 0° 为起始位置, 记录转台的示值 a_0 , 编码器的示值 c_0 , 将旋转轴顺时针依次转动棱体面固定的角度, 并记录光管的读数 a_i , 编码器的示值 c_i ($i=1, 2, \dots, n$), n 为需要校准的位置数。

方法同上, 使旋转轴处于角位置显示 0° 为起始位置, 记录转台的示值 b_0 , 编码器的示值 c_0 , 将旋转轴逆时针依次转动棱体面固定的角度, 并记录光管的读数 b_i , 编

码器的示值 c_i ($i=1, 2, \dots, n$), n 为需要校准的位置数。角位置误差编码器校准示意图如图 13 所示。

连续测量 N 次 ($N \geq 5$) 数据并记录。

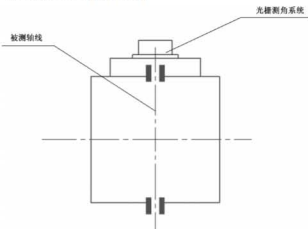


图 13 角位置误差编码器校准示意图

数据处理:

$$e_{ai} = (a_i - a_1) - (c_i - c_1) \quad (25)$$

$$e_{bi} = (b_i - b_1) - (\tilde{c}_i - \tilde{c}_1) \quad (26)$$

式中:

e_{ai} ——顺时针旋转对应校准位置的角位置示值误差;

e_{bi} ——逆时针旋转对应校准位置的角位置示值误差。

单次测量的角位置示值误差最大值: $e^+ = \max \{e_{ai}, e_{bi}\}$; 最小值: $e^- = \min \{e_{ai}, e_{bi}\}$ 。

连续测量 N 次 ($N \geq 5$), 取每次测量值的最大值的平均值和每次测量值的最小值的平均值为角位置示值误差的最大值 θ^+ 和最小值 θ^- 。

$$\theta^+ = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^+ \quad (27)$$

$$\theta^- = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^- \quad (28)$$

7.2.8 角位置定位重复性

a) 校准程序

同角位置定位精度 7.2.4a)。

b) 数据处理

计算第 i 个测量位置 N 次测量对应的角位置误差的平均值:

$$\bar{\theta}_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e_{aik} \quad (29)$$

计算第 i 个测量位置的重复性:

$$\epsilon_i = 3 \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (e_{aik} - \bar{\theta}_i)^2} \quad (30)$$

定位重复性：

$$\epsilon = \max\{\epsilon_i\} \quad (31)$$

7.2.9 角位置定位分辨力

a) 校准程序

在校准各轴角位置定位误差后，任选被测轴的一个位置，读取光电自准直仪读数 a_{1i} 后，通过输入分辨力当量位置指令角度使转台被测轴产生运动，读取光电自准直仪读数 a_{2i} 。每个转向重复上述试验 3 次，记下光电自准直仪相应读数 a_{1i} 、 a_{2i} ， $i=1, 2, 3$ ，并记录数据。

b) 数据处理

$$e_i = a_{2i} - a_{1i}, i = 1, 2, 3 \quad (32)$$

$$E = (e_1 + e_2 + e_3)/3 \quad (33)$$

式 (32)、式 (33) 中：

a_{1i} ——被测轴在选定位置的光电自准直仪读数，“”；

a_{2i} ——被测轴在 a_{1i} 位置增加当量指令角度后的光电自准直仪读数，“”；

e_i ——被测轴单次测量角位置定位分辨力；

E ——计算得到的角位置定位分辨力。

7.2.10 角位置定位稳定性

校准程序按照角位置定位精度方法进行准备，选取被测轴，光电自准直仪对准后保持位置指令不变，待工作稳定后记录转台角位置读数，每隔半小时记录角位置读数 θ_i ， $i=1, \dots, n$ ，至规定的时间为止。则角位置定位稳定性：

$$R_\theta = 3 \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\theta_i - \bar{\theta})^2} \quad (34)$$

式中， $\bar{\theta}$ 为记录的角位置数据的平均值。

$$\bar{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^n \theta_i}{n} \quad (35)$$

7.2.11 角速率相对误差

7.2.11.1 定角测时法

校准程序：

转台被测框闭合，其余框机械锁。使转台被测框工作在速率方式，按给定的指令速率稳定运转后，设置转台的同步角度间隔脉冲输出，将同步角度间隔脉冲连接到频率计测量相邻脉冲的间隔时间，连续测量 10 次 ($|\omega| \leq 0.005^\circ/\text{s}$ ，测量次数不小于 3 次)，得到间隔时间 $T_1, \dots, T_{10}$ 。

定角间隔选取原则如下：

$\omega < 1^\circ/\text{s}$ ，定角间隔为 1° ；

$1^\circ/\text{s} \leq \omega < 10^\circ/\text{s}$ ，定角间隔为 10° ；

$\omega \geq 10^\circ/\text{s}$ ，定角间隔为 360° 。

平均时间：

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i \quad (36)$$

角速率相对误差：

$$U_w = \frac{1}{T_g} | \bar{T} - T_g | \quad (37)$$

式中：

T_g ——给定速率下被校准轴转过给定角度所用时间的名义值；

$\bar{T}$ ——给定速率下被校准轴转过给定角度所用时间的平均值。

7.2.11.2 定时测角法

同光栅测角系统角位置校准方法，将标准光电编码器安装在被测轴上，使编码器的运动轴与转台被校准轴重合，同轴度误差不大于 0.002 mm ，通过数据采集通道定时采集光栅测角系统的角位置值。使转台被测框工作在速率方式，按给定的指令速率稳定运转后，按照定时间隔信号采集光栅测角系统的角位置增量值，连续测量 10 次（ $|\omega| \leq 0.005^\circ/\text{s}$ ，测量次数不小于 3 次），得到： $\theta_1, \dots, \theta_{10}$ 。定时的间隔选择参考定角测时角度间隔的选取方法。

角位置增量平均值：

$$\bar{\theta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_i \quad (38)$$

角速率相对误差：

$$U_w = \frac{1}{\theta_g} | \bar{\theta} - \theta_g | \quad (39)$$

式中：

θ_g ——给定时间下被校准轴在给定的时间内转过的角度增量的名义值；

$\bar{\theta}$ ——给定时间下被校准轴在给定的时间内转过的角度增量的平均值。

7.2.12 角速率平稳性

角速率平稳性校准程序同角速率相对误差，数据处理：

a) 定角测时法

$$\sigma_w = \frac{1}{\bar{T}} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2} \quad (40)$$

式中：

N ——按照给定速率选定的次数。

b) 定时测角法

$$\sigma_w = \frac{1}{\bar{\theta}} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\theta_i - \bar{\theta})^2} \quad (41)$$

7.2.13 角速率分辨率

校准程序：

使被校准框轴工作在速率方式，给定需要校准的速率指令，使被校准轴稳定运动，采用 7.2.11 角速率示值误差校准方法，计算平均速率 ω_1 ，按照工作的速率选型定角间隔或者定时间间隔，得出 $T_1, \dots, T_{10}$ ，或者 $\theta_1, \dots, \theta_{10}$ 。

改变转台的给定速率，在 ω_1 速率指令下增加速率分辨率 R_ω 的速率指令值，及指令为 $\omega_1 + R_\omega$ ，得到 $T_1', \dots, T_{10}'$ ，或者 $\theta_1', \dots, \theta_{10}'$

$$R_\omega = |\omega' - \omega| \quad (42)$$

$$\omega' = \frac{\Delta\theta'}{\bar{T}} \text{ 或 } \omega' = \frac{\bar{\theta}'}{\bar{T}} \quad (43)$$

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\bar{T}} \text{ 或 } \omega = \frac{\bar{\theta}}{\bar{T}} \quad (44)$$

式中：

ω —— 给定速率下运动轴的平均速率；

ω' —— 给定速率增加最小速率指令增量后运动轴的平均速率；

$\bar{\theta}$ —— 给定速率增加最小速率指令增量后，运动轴的规定采样时间内角度增量实测值的平均值；

$\bar{T}$ —— 给定速率增加最小速率指令增量后，运动轴转过定角间隔时间的平均值。

7.2.14 幅频特性

a) 校准程序

在三轴转台安装好模拟负载，三轴分别校准。动态信号分析的信号源输出扫频信号给到三轴转台的运动轴，同时信号给到分析仪的通道 1，转台采集信号源信号，控制转台按照信号指令运动，并将对应的运动信息通过输出接口反馈到动态信号分析仪的通道 2。信号分析仪自动计算通道 1 和通道 2 的幅值变化和相位变化。输入信号的频率范围，测量步距及起始频率根据指标要求进行设定。系统幅频特性校准简图如图 14 所示。

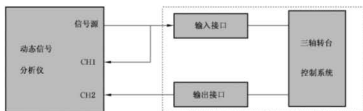


图 14 系统幅频特性校准简图

b) 数据处理

通过动态信号分析仪采集对应频率的幅值特性和相位特性即为对应校准轴的频率特性曲线，分别记录对应频率的幅值误差和相位误差。

7.2.15 正弦运动失真度

a) 校准程序：

同角位置及角速率特性光栅测角系统校准方法，将标准光栅测角系统安装在被测轴上，使光栅测角系统的运动轴与转台被校准轴重合，同轴度误差不大于 0.002 mm。在被测轴达到稳定的正弦运动状态后，由数据采集系统按给定的采样周期采集光栅测角系统的角运动信息，并生成数据文件。

正弦周期内的采样点数 P 应不少于 100 个，且宜分段选取，见表 4。

表 4 正弦周期内的采样点数

频率范围/Hz	采样点数 P 个
0.1~1	≥ 400
1.1~3	≥ 300
3.1~5	≥ 200
≥ 5.1	≥ 100

采样周期 T_s 与采样点数 P 的乘积应尽可能与正弦摆动周期 T 一致，其相对误差应小于 0.5%。相对误差按公式 (45) 计算：

$$\left| \frac{(T_s \times P - T)}{T} \right| \leq 0.5\% \quad (45)$$

式中：

T_s —— 采样周期；

P —— 采样点；

T —— 正弦摆动周期。

采样周期数 n 应不少于 3 个，应分段选取，见表 5。

表 5 采样周期数

频率范围/Hz	采样周期数 n 个
0.1~0.5	≥ 3
0.6~1	≥ 5
≥ 1	≥ 10

b) 数据处理

将采集的 n 个周期的角位置数据进行傅里叶分析，获得各次项系数 $A_{11} \sim A_{1n}, \dots, A_{m1} \sim A_{mn}$ 。按公式 (46) 计算各次项系数平均值 A_k ，其中 $k=1 \sim m$ 。

$$A_k = \frac{\sum_{i=1}^n A_{ki}}{n} \quad (k=1, \dots, m) \quad (46)$$

按公式 (47) 计算波形失真度 δ ：

$$\delta = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^m A_k^2}}{A_1} \times 100\% \quad (47)$$

式中：

m ——谐波项次数， m 应不小于 3。

7.2.16 正弦运动幅值误差

校准程序同 7.2.15 正弦运动失真度，

数据处理：

将采集的 n 个周期的角位置数据进行傅里叶分析，求取各周期的 1~ m 次项系数，可按公式 (46) 计算各项系数平均值 A_k 。

则一次项系数平均值为：

$$A_1 = \frac{\sum_{i=1}^n A_{1i}}{n} \quad (48)$$

式中：

A_1 ——幅度平均值；

$A_{11} \sim A_{1n}$ ——各周期的一次项幅度值。

按公式 (49) 计算幅度误差 ΔA ：

$$\Delta A = |A_1 - A| \quad (49)$$

式中：

A ——给定幅度。

7.2.17 正弦运动频率误差

a) 校准程序

采集的 n 个周期的角位置数据，扣除摆动中心位置值。由于采样数据的离散性，在实际采集的角位置数据中，往往没有角位置为运动中心位置的数据。应使用两个由小于运动中心到大于运动中心的两个数据 Y_i^- , Y_i^+ 及对应的采样序列数 X_i^- , X_i^+ 进行线性插值。

b) 数据处理

按公式 (50) 计算过零点的 X_i^0 。

$$X_i^0 = X_i^- - \frac{Y_i^-}{Y_i^+ - Y_i^-} (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (50)$$

式中：

X_i^- ——过零点负采样数据的采样序列数，并且有 $X_i^+ = X_i^- + 1$ ；

Y_i^- ——距离零点最近的负采样数据；

Y_i^+ ——距离零点最近的正采样数据。

按公式 (51) 计算两过零点值之间的间隔 T_{ei} ：

$$T_{ei} = X_{i+1}^0 - X_i^0 \quad (51)$$

按公式 (52) 计算 n 个周期过零点值之间的平均间隔 T_e ：

$$T_e = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} T_{ei}}{n-1} \quad (52)$$

按公式 (53) 计算角位置正弦摇摆运动频率 F_0 ：

$$F_0 = \frac{1}{T_s \times T_z} \quad (53)$$

按公式 (54) 计算频率误差 ΔF ：

$$\Delta F = |F_0 - F| \quad (54)$$

式中：

F ——给定频率，Hz。

7.2.18 磁场强度

磁场强度校准点位置示意图如图 15 所示。

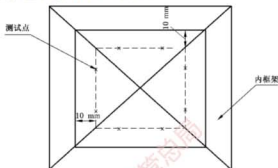


图 15 磁场强度校准点位置示意图

a) 校准程序

在内框架内，距侧面 10 mm 处任选八点（宜均匀分布，如图 15），用磁强计分别测量各点 X、Y、Z 三个正交方向的磁场强度 Δ_{xi} 、 Δ_{yi} 和 Δ_{zi} ($i=1, 2, \dots, 8$)。

b) 数据处理

按公式 (55) 计算 δ_i ：

$$\delta_i = \sqrt{\Delta_{xi}^2 + \Delta_{yi}^2 + \Delta_{zi}^2} \quad (55)$$

式中：

δ_i ——工作台磁场强度，mT；

Δ_{xi} ——X 方向的磁场强度，mT；

Δ_{yi} ——Y 方向的磁场强度，mT；

Δ_{zi} ——Z 方向的磁场强度，mT。

7.2.19 引北镜反射平面与引北轴轴线方位垂直度

a) 校准程序：

将光电自准直仪置于被测轴一侧。平面镜装于轴的一端，使光电自准直仪对准平面镜，调整光电自准直仪使之与平面镜垂直，然后将被测轴置于零位。

光电自准直仪读取 X 方向（即水平方向）的示数 a_{X1} ，Y 方向（即竖直方向）的示数 a_{Y1} 。

从零度开始旋转被测轴 180° ，光电自准直仪读取 X 方向（即水平方向）的示数

a_{x_2} , Y 方向 (即竖直方向) 的示数 a_{y_2} , 其中 $a_{y_2} - a_{y_1} < 3$ 倍要求的垂直度精度。

b) 数据处理

引北镜反射平面与引北轴轴线方位垂直度:

$$\Delta = \frac{a_{x_2} - a_{x_1}}{2} \quad (56)$$

7.2.20 引北直角棱镜反射法线与引北轴轴线方位垂直度

a) 校准程序

1) 调整平面镜

将光电自准直仪置于被测轴一侧。平面镜装于轴的一端, 使光电自准直仪对准平面镜, 调整光电自准直仪使之与平面镜垂直, 然后将被测轴置于零位。

光电自准直仪读取 X 方向 (即水平方向) 的示数 a_{x_1} , Y 方向 (即竖直方向) 的示数 a_{y_1} , 从零度开始旋转被测轴 180° , 光电自准直仪读取 X 方向 (即水平方向) 的示数 a_{x_2} , Y 方向 (即竖直方向) 的示数 a_{y_2} , $a_{y_2} - a_{y_1} < 3\Delta$ 。

引北镜反射平面与引北轴轴线方位垂直度:

$$\Delta = \frac{a_{x_2} - a_{x_1}}{2}$$

调整平面镜, 使

$$\Delta = \frac{a_{x_2} - a_{x_1}}{2} < \frac{1}{3}\alpha$$

式中:

α ——引北直角棱镜反射法线与引北轴轴线方位垂直度。

2) 校准垂直度

将被测轴置于零位, 将光电自准直经纬仪置于被测轴一侧。平面镜装于轴的一端, 使光电自准直经纬仪对准平面镜, 调整光电自准直经纬仪水平并使之与平面镜垂直。

光电自准直经纬仪读取 X 方向 (即水平方向) 的示数 X_1 , 从零度开始旋转被测轴 180° , 光电自准直经纬仪读取 X 方向 (即水平方向) 的示数 X_2 。

引北镜反射平面与引北轴轴线方位垂直度位置:

$$\theta_1 = \frac{a_{x_2} - a_{x_1}}{2}$$

转动光电自准直经纬仪瞄准引北直角棱镜, 光电自准直经纬仪读取 X 方向 (即水平方向) 的示数 θ_2 。

引北直角棱镜反射法线与引北轴轴线方位垂直度 α_1 :

$$\alpha_1 = \theta_1 - \theta_2 = \frac{a_{x_2} - a_{x_1}}{2} - \theta_2$$

式中:

a_{x_2} ——光电自准直经纬仪读取 X 方向 (即水平方向) 的示数;

a_{x_1} ——光电自准直经纬仪读取 X 方向 (即水平方向) 的示数;

θ_2 ——光电自准直经纬仪读取 X 方向 (即水平方向) 的示数。

使光电自准直经纬仪反转 180° ，瞄准镜头倒镜 180° ，对准平面镜，调整光电自准直经纬仪水平并使之与平面镜垂直。

光电自准直经纬仪读取 X 方向（即水平方向）的示数 a_{X_2} ，从零度开始旋转被测轴 180° ，光电自准直经纬仪读取 X 方向（即水平方向）的示数 a_{X_1} 。

引北镜反射平面与引北轴轴线方位垂直度位置：

$$\theta_3 = \frac{a_{X_1} - a_{X_2}}{2}$$

转动光电自准直经纬仪瞄准引北直角棱镜，光电自准直经纬仪读取 X 方向（即水平方向）的示数 θ_4 。

引北直角棱镜反射法线与引北轴轴线方位垂直度 α_2 ：

$$\alpha_2 = \theta_3 - \theta_4 = \frac{a_{X_1} - a_{X_2}}{2} - \theta_4$$

式中：

X_4 ——光电自准直经纬仪读取 X 方向（即水平方向）的示数；

X_3 ——光电自准直经纬仪读取 X 方向（即水平方向）的示数；

θ_4 ——光电自准直经纬仪读取 X 方向（即水平方向）的示数。

引北直角棱镜反射法线与引北轴轴线方位垂直度校准示意图如图 16 所示。

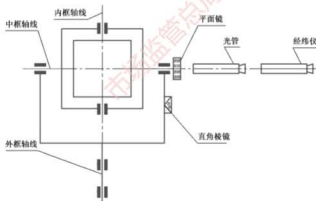


图 16 引北直角棱镜反射法线与引北轴轴线方位垂直度校准示意图

b) 数据处理

校准得到的引北直角棱镜反射法线与引北轴轴线方位垂直度：

$$\alpha = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}$$

8 校准结果表达

校准结果应在校准证书或校准报告上反映。校准证书或报告至少应包括以下信息：

a) 标题：“校准证书”或“校准报告”；

b) 实验室名称和地址；

- c) 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
- d) 证书或报告的唯一标识（如编号），每页及总页数的标识；
- e) 客户的名称和地址；
- f) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 进行校准的日期，如果与校准结果的有效性和应用有关时，应说明被校对象的接收日期；
- h) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- i) 校准装置的溯源性及有效性标识；
- j) 校准环境的描述；
- k) 校准结果及其测量不确定度的说明；
- l) 校准证书或校准报告签发人的签名、职务或等效标识；
- m) 校准结果仅对被校对象有效的声明；
- n) 未经实验室书面批准，不准部分复制证书的声明。

9 复校时间间隔

建议复校时间间隔为1年。送校单位可根据实际使用情况自主决定。

附录 A

校准证书内页格式

证书编号：

校准环境条件	温 度：___℃ 相对湿度：___%	地点：_____ 其他：_____
序号	校准项目	校准结果
1	安装基准面平面度	
2	安装基准面端跳	
3	安装基准面与内轴轴线的平行度	
4	轴线回转倾角误差	
5	轴线垂直度	
6	轴线相交度	
7	角位置定位误差	
8	角位置定位重复性	
9	角位置分辨力	
10	角位置定位稳定性	
11	角速率相对误差	
12	角速率平稳性	
13	角速率分辨力	
14	幅频特性	
15	正弦运动失真度	
16	正弦运动幅值误差	
17	正弦运动频率误差	
18	磁场强度	
19	引北镜反射平面与引北轴轴线方位垂直度	
20	引北直角棱镜反射法线与引北轴轴线方位垂直度	

校准员：_____

核检员：_____

日期：_____

附录 B

三轴转台主要性能参数的测量不确定度评定

B.1 回转倾角误差测量不确定度评定

B.1.1 测量模型

测量模型为式 (B.1):

$$\theta = \alpha - \Phi - \psi \quad (\text{B.1})$$

式中:

α —— 为读数值 X 和 Y 的合成值;

Φ —— 反射镜安装偏差角;

ψ —— 光电自准直仪偏差角;

θ —— 所求误差角。

当把数据中的直流分量和一次谐波分量剔除后测量模型可表示为

$$\theta_d = \alpha_d - \varepsilon_d \quad (\text{B.2})$$

式中, ε_d 是由于存在测量中分度误差, 导致平面反射镜安装角不是单纯的一次分量造成的平面镜安装角的残留影响。

B.1.2 分量标准不确定度评定

B.1.2.1 平面镜带有有限的安装误差引起的不确定度分量 u_1

一般有 $(\varphi_i) \in (-5'', 5'')$, 分度误差在 $(-5'', 5'')$ 内, 所以在分度点上有 ε_{sd} 和 $\varepsilon_{sd}(\varphi)$ 的范围均为 $(-0.028'', 0.028'')$ 。

若属于矩形分布: 包含因子 $k = \sqrt{3}$, 则

$$u_1 = a / \sqrt{3} = 0.016''$$

相对不确定度估计值为 10%。

自由度为 $\nu = 1/2 (100/10)^2 = 50$

B.1.2.2 自准直仪检测误差引起的不确定度分量 u_2

转台在 $10''$ 范围内自准直仪检测误差不大于 $0.1''$, 均匀分布 $0.1''$ 内, 则

$$u_2 = 0.1'' / \sqrt{3} = 0.058''$$

B.1.2.3 自准直仪测量重复性引起的不确定度分量 u_3

自准直仪测量重复性 $0.2''$, 在此范围内均匀分布, 则

$$u_3 = 0.2'' / \sqrt{3} = 0.12''$$

B.1.2.4 转台回转倾角误差测量重复性引起的不确定度分量 u_4

转台回转倾角误差测量 5 次, 结果为 $0.49''$, $0.60''$, $0.45''$, $0.40''$, $0.55''$, 则标准偏差:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e}_1)^2} \quad (\text{B.3})$$

$$u_4 = s = 0.08''$$

B.1.3 合成不确定度

不确定度传播模型为式 (B.5):

$$\theta_d^2(\varphi) = [\theta_{xd}(\varphi)]^2 + [\theta_{yd}(\varphi)]^2 = [X_d(\varphi) - \varepsilon_{xd}(\varphi)]^2 + [Y_d(\varphi) - \varepsilon_{yd}(\varphi)]^2 \quad (\text{B.4})$$

$$u_c^2(\theta_d) = c_1^2 u^2(X) + c_2^2 u^2(Y) + c_3^2 u^2(\varepsilon_{xd}) + c_4^2 u^2(\varepsilon_{yd}) \quad (\text{B.5})$$

相应传递系数为

$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{\partial \theta_d}{\partial X_d(\varphi)} = 1 \\ c_2 &= \frac{\partial \theta_d}{\partial Y_d(\varphi)} = 1 \\ c_3 &= \frac{\partial \theta_d}{\partial \Phi_{xd}(\varphi)} = -1 \\ c_4 &= \frac{\partial \theta_d}{\partial \Phi_{yd}(\varphi)} = -1 \end{aligned} \quad (\text{B.6})$$

B.1.3.1 测量不确定度分量一览表

轴线回转倾角误差不确定度评定汇总表见表 B.1。

表 B.1 轴线回转倾角误差不确定度评定汇总表

不确定度分量	不确定度来源	评定方法	评定结果
u_1	平面镜带有有限安装误差引起的不确定度分量	B	$0.016''$
u_2	自准直仪检测误差引起的不确定度分量	B	$0.058''$
u_3	自准直仪测量重复性引起的不确定度分量	B	$0.12''$
u_4	转台回转倾角误差测量重复性引起的不确定度分量	A	$0.08''$

B.1.3.2 合成标准不确定度

$$\begin{aligned} u_c(\theta) &= \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} \\ u_c(\theta) &= 0.15'' \end{aligned} \quad (\text{B.7})$$

B.1.4 扩展不确定度

扩展不确定度为式 (B.8):

$$U_{95} = k \times u_c(\theta) = 2 \times 0.15'' = 0.30'' \quad (\text{B.8})$$

B.2 测微准直望远镜测量轴线相交度不确定度评定

B.2.1 测量模型

测量模型为式 (B.9):

$$\Delta_i = L_i - L_1 \quad (\text{B.9})$$

式中:

Δ_i ——转台轴线相交度误差, mm;

L_1 ——转台轴线相交度测量转台 0° 时测微准直望远镜示值, mm;

L_i ——转台轴线相交度测量转台 180° 时测微准直望远镜示值, mm。

B.2.2 测量不确定度来源

1) 不确定度来源主要是自准直仪误差, 包括测微准直望远镜鼓轮估读引起的不确定度;

2) 测微准直望远镜目标对准引起的不确定度;

3) 180° 转角误差引起的不确定度;

4) 目标与轴线不同轴引起的不确定度。

B.2.3 标准不确定度评定

B.2.3.1 测微准直望远镜鼓轮估读引起的不确定度 u_1

估读误差 = $0.002 \text{ mm}/0.1 \text{ 格}$, $k=\sqrt{3}$, 则

$$u_1 = 0.002 \text{ mm} / \sqrt{3} = 1.2 \text{ } \mu\text{m}$$

B.2.3.2 测微准直望远镜目标对准引起的不确定度 u_2

对目标瞄准 10 次, 瞄准偏差 $\sigma = 1 \text{ } \mu\text{m}$, 校准时取二次平均值, 则

$$u_2 = 1 \text{ } \mu\text{m} / \sqrt{2} = 0.7 \text{ } \mu\text{m}$$

B.2.3.3 180° 转角误差引起的不确定度 u_3

180° 转角误差 = $1''$, 当外框半径 1 时, 由此引起的目标转过的距离 0.01 mm , $k=\sqrt{3}$, 则

$$u_3 = 0.01 \text{ mm} / \sqrt{3} = 0.0058 \text{ mm} = 5.8 \text{ } \mu\text{m}$$

B.2.3.4 目标与轴线不同轴引起的不确定度 u_4

目标与轴线不同轴 0.005 mm , $k=\sqrt{3}$, 则

$$u_4 = 0.005 \text{ mm} / \sqrt{3} = 0.0029 \text{ mm} = 2.9 \text{ } \mu\text{m}$$

B.2.4 合成标准不确定度

不确定度传播模型为式 (B.10):

$$u_c^2(y) = \sum [\partial f / \partial x_i]^2 u^2(x_i)$$

$$u_c^2 = u_c^2(\Delta_i) = c^2(L_i) u^2(L_i) + c^2(L_1) u^2(L_1) \quad (\text{B.10})$$

式中:

$$c(L_i) = 1$$

$$c(L_1) = -1$$

B.2.4.1 测量不确定度分量一览表

轴线相交度不确定度评定汇总表见表 B.2。

表 B.2 轴线相交度不确定度评定汇总表

不确定度分量	不确定度来源	评定方法	评定结果
u_1	测微准直望远镜鼓轮估读引起的不确定度	B	$1.2 \mu\text{m}$
u_2	测微准直望远镜目标对准引起的不确定度	A	$0.7 \mu\text{m}$
u_3	180° 转角误差引起的不确定度	B	$5.8 \mu\text{m}$
u_4	目标与轴线不同轴引起的不确定度	B	$2.9 \mu\text{m}$

B.2.4.2 合成标准不确定度

$$u_c(\Phi) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = 6.6 \mu\text{m} \quad (\text{B.11})$$

B.2.5 扩展不确定度

扩展不确定度为式 (B.12):

$$U_{95} = k \times u_c(\Phi) = 2 \times 0.0066 \text{ mm} = 0.0132 \text{ mm} = 13.2 \mu\text{m} \quad (\text{B.12})$$

B.3 激光跟踪仪测量轴线相交度不确定度评定

B.3.1 测量模型

测量模型为式 (B.13):

$$\Delta_i = L_i - L_1 \quad (\text{B.13})$$

式中:

Δ_i —— 转台轴线相交度误差, mm;

L_1 —— 转台轴线相交度测量转台方位轴线垂线坐标, mm;

L_i —— 转台轴线相交度测量转台横滚轴线垂线坐标, mm;

B.3.2 测量不确定度来源

- 自准直仪误差, 包括激光跟踪仪环境温度、气流引起的不确定度;
- 激光跟踪仪测量误差引起的不确定度; 回转轴线变动误差引起的不确定度;
- 目标球座安装引起的不确定度。

B.3.3 标准不确定度评定

B.3.3.1 激光跟踪仪环境温度、气流引起的不确定度 u_1

读数变化误差 $= 0.0005 \text{ mm}$, $k = \sqrt{3}$, 则

$$u_1 = 0.0005 \text{ mm} / \sqrt{3} = 0.00029 \text{ mm} = 0.3 \mu\text{m}$$

B.3.3.2 激光跟踪仪测量误差引起的不确定度 u_2

激光跟踪仪测量误差 $0.5 \mu\text{m}/\text{m}$ 。 $k=2$, 测量距离 $= 5 \text{ m}$, 则

$$u_2 = 0.5 \mu\text{m}/\text{m} \times 5 \text{ m} / 2 = 1.3 \mu\text{m}$$

B.3.3.3 三轴转台回转轴线变动误差引起的不确定度 u_3

横滚轴回转轴承径向误差 0.002 mm ; 俯仰轴回转轴承径向误差 0.004 mm ; 方位轴回转轴承径向误差 0.002 mm ; $k = \sqrt{3}$, 则

$$u_3 = (\sqrt{0.002^2 + 0.004^2 + 0.002^2}) \text{ mm} / \sqrt{3} = 0.0049 \text{ mm} / \sqrt{3} = 2.8 \mu\text{m}$$

B.3.3.4 目标球座安装引起的不确定度 u_4

目标球座安装误差 0.005 mm, $k=\sqrt{3}$, 则

$$u_4 = 0.005 \text{ mm} / \sqrt{3} = 0.0029 \text{ mm} = 2.9 \mu\text{m}$$

B.3.4 合成标准不确定度

不确定度传播模型为式 (B.14):

$$u_c^2(y) = \sum [\partial f / \partial x_i]^2 u^2(x_i)$$

$$u_c^2 = u_c^2(\Delta_i) = c^2(L_i) u^2(L_i) + c^2(L_1) u^2(L_1) \quad (\text{B.14})$$

式中:

$$c(L_1) = -1 \quad (\text{B.15})$$

B.3.4.1 测量不确定度分量一览表

轴线相交度不确定度评定汇总表见表 B.3。

表 B.3 轴线相交度不确定度评定汇总表

不确定度分量	不确定度来源	评定方法	评定结果
u_1	激光跟踪仪环境温度、气流引起的不确定度	B	0.3 μm
u_2	激光跟踪仪测量误差引起的不确定度	B	1.3 μm
u_3	三轴转台回转轴线变动误差引起的不确定度	B	2.8 μm
u_4	目标球座安装引起的不确定度	A	2.9 μm

B.3.4.2 合成标准不确定度

$$u_c(\Phi) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = 4.2 \mu\text{m}$$

B.3.5 扩展不确定度

扩展不确定度为式 (B.16):

$$U_{95} = k \times u_c(\Phi) \quad (\text{B.16})$$

$$U_{95} = k \times u_c(\Phi) = 2 \times 0.004 2 \text{ mm} = 0.008 4 \text{ mm} = 8.4 \mu\text{m}$$

B.4 角位置定位误差不确定度评定

B.4.1 测量模型

测量模型为式 (B.17):

$$e_{\alpha i} = \alpha_i - \alpha_1 - \Delta_i \quad (\text{B.17})$$

式中:

$e_{\alpha i}$ ——转台角位置定位误差, 角秒;

α_i ——转台角位置定位转角光电自准直仪示值, 角秒;

α_1 ——转台角位置定位零位光电自准直仪示值, 角秒;

Δ_i ——多面棱体角位置偏差, 角秒。

B.4.2 测量不确定度来源

不确定度来源主要是自准直仪误差, 包括自准直仪量化误差引起的不确定度、自准直仪示值误差引起的不确定度、自准直仪测量重复性、棱体误差等。

测量不确定度的来源为以下几方面:

a) 角度测量引起的不确定度分量；

b) 棱体引起的不确定度分量。

B.4.3 标准不确定度评定

B.4.3.1 角度测量引起的不确定度分量 $u(a_i)$

a) 自准直仪量化引起的不确定度 $u(a_1)$

1级自准直仪分辨率 $0.01''$ ，在此区间认为服从三角分布，则

$$u(a_1) = 0.01'' / \sqrt{6} = 0.004''$$

b) 自准直仪检测误差 $u(a_2)$

转台在 $100''$ 范围内自准直仪检测误差不大于 $0.1''$ ，均匀分布 $0.1''$ 内，则

$$u(a_2) = 0.1'' / \sqrt{3} = 0.058''$$

c) 自准直仪测量重复性 $u(a_0)$

自准直仪测量重复性 $0.2''$ ，在此范围内均匀分布，则

$$u(a_0) = 0.2'' / \sqrt{3} = 0.12''$$

d) 自准直仪示值误差引起的不确定度 $u(a_i)$

$$\begin{aligned} u(a_i) &= \sqrt{u^2(a_0) + u^2(a_2) + u^2(a_1)} \\ &= \sqrt{0.058^2 + 0.12^2 + 0.004^2} = 0.133'' \end{aligned}$$

B.4.3.2 棱体引起的不确定度分量

棱体引起的不确定度 $u(\Delta)$ ，三等棱体不确定度 $0.5''$ ， $k=3$ ，则

$$u(\Delta) = 0.5'' / 3 = 0.167''$$

B.4.4 合成标准不确定度

不确定度传播模型为式 (B.18)：

$$u_c(e_{ai}) = \sqrt{c^2(a_i)u^2(a_i) + c^2(a_1)u^2(a_1) + c^2(\Delta)u^2(\Delta)} \quad (\text{B.18})$$

$$c(a_i) = c(a_1) = c(\Delta) = 1, \text{ 则}$$

合成标准不确定度：

$$u_c(e_{ai}) = \sqrt{u^2(a_i) + u^2(a_1) + u^2(\Delta)} \quad (\text{B.19})$$

B.4.4.1 测量不确定度分量一览表

角位置定位误差主要标准不确定度汇总表见表 B.4。

表 B.4 角位置定位误差主要标准不确定度汇总表

不确定度分量	不确定度来源	评定方法	评定结果
$u(a_i)$	自准直仪检测误差引起的不确定度	B	$0.133''$
$u(a_1)$	自准直仪量化误差引起的不确定度	B	$0.004''$
$u(\Delta)$	棱体误差引起的不确定度	B	$0.167''$

B.4.4.2 合成标准不确定度

$$u_c(e_{ai}) = \sqrt{u^2(a_i) + u^2(a_1) + u^2(\Delta)} = 0.214''$$

B.4.5 扩展不确定度

则角位置定位误差扩展不确定度为式 (B.20):

$$U_{95} = k \times u_c(e_{ai}) = 2 \times 0.214'' = 0.43'' \quad (\text{B.20})$$

B.5 光栅测角系统校准角位置定位示值误差扩展不确定度评定

B.5.1 测量模型

测量模型为式 (B.21):

$$e_i = (a_i - a_1) - (b_i - b_1) \quad (\text{B.21})$$

式中:

a_i ——编码器第 i 测点示值, $i = 1, 2, \dots, n$;

b_i ——转台第 i 测点示值;

e_i ——被校准编码器第 i 测点的误差值。

$$\Delta \max = [e_i]_{\max} = [(a_M - a_1) - (b_M - b_1)] \quad (\text{B.22})$$

$$\Delta \min = [e_i]_{\min} = [(a_N - a_1) - (b_N - b_1)] \quad (\text{B.23})$$

式中:

a_M ——各校准点误差中最大值所对应的编码器示值;

a_N ——各校准点误差中最小值所对应的编码器示值;

b_M ——各校准点误差中最大值所对应的转台示值;

b_N ——各校准点误差中最小值所对应的转台示值。

B.5.2 标准不确定度评定

B.5.2.1 与转台读数有关的不确定度 $u(a)$

B.5.2.1.1 被校准转台量化误差引入的标准不确定度分量 u_1

被校准转台分辨力为 $0.18''$, 以等概率出现在半宽为 $0.18''/2 = 0.09''$ 的区间内, 估计相对不确定度为 10%, 则

$$u_1 = \frac{0.18''}{2} \times \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.05''$$

$$\nu_1 = \frac{1}{\left(\frac{10}{100}\right)^2} = 50$$

B.5.2.1.2 被校准转台测角重复性引入的标准不确定度分量 u_2

转台测角重复性 $\Delta_{\text{重}} = 0.3''$ (3 倍标准差), 则

$$u_2 = \frac{\Delta_{\text{重}}}{3} = \frac{0.3''}{3} = 0.10''$$

测角重复性是用双观测法测量。3 级编码器测角重复性每周测量点数不少于 16 点, 即双周测量点数不少于 32 点, 所以自由度 $\nu_2 = 31$, 则

$$u(a) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = \sqrt{0.05^2 + 0.10^2} = 0.10''$$

$$\nu(a) = \frac{u(a)^4}{\frac{u_1^4}{\nu_1} + \frac{u_2^4}{\nu_2}} = \frac{0.30^4}{\frac{0.05^4}{50} + \frac{0.30^4}{31}} = 31$$

B.5.2.2 便携式光栅测角系统示值误差引入的标准不确定度分量 $u(b)$

校准所使用的便携式光栅测角系统示值误差（PV 值）为 $0.5''$ ，该值以等概率分布落在其区间内，估计相对不确定度为 10%，则

$$u(b) = \frac{0.5''}{2\sqrt{3}} = 0.14''$$

$$\nu(b) = \frac{1}{\left(\frac{10}{100}\right)^2} = 50$$

B.5.3 合成标准不确定度

不确定度传播模型为式（B.24）：

$$u_c(e_i) = c^2(a)u^2(a) + c^2(b)u^2(b) \quad (\text{B.24})$$

$$c(a) = 1, \quad c(b) = -1$$

B.5.3.1 标准不确定度一览表

不确定度来源主要是自准直仪误差，被校准转台量化误差引入的标准不确定度分量 u_1 、被校准转台测角重复性引入的标准不确定度分量 u_2 、便携式光栅测角系统示值误差引入的标准不确定度分量 $u(b)$ 等。

表 B.5 便携式光栅测角系统测量角位置定位示值误差主要标准不确定度汇总表

不确定度分量	不确定度来源		评定方法	评定结果
$u(a)$	u_1	被校准转台量化误差引入的标准不确定度	B	$0.05''$
	u_2	被校准转台测角重复性引入的标准不确定度分量	A	$0.10''$
$u(b)$	$u(b)$	便携式光栅测角系统示值误差引入的标准不确定度分量	B	$0.14''$

B.5.3.2 合成不确定度计算

$$u_c(e_i) = \sqrt{c^2(a)u^2(a) + c^2(b)u^2(b)} \quad (\text{B.25})$$

$$= \sqrt{1^2 \times 0.10^2 + (-1)^2 \times 0.14^2} = 0.17''$$

B.5.3.3 有效自由度

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u_c^4}{\frac{u^4(a)}{\nu(a)} + \frac{u^4(b)}{\nu(b)}} = \frac{0.17^4}{\frac{0.10^4}{31} + \frac{0.14^4}{50}} = 76$$

$$t_{0.95}(76) = 2.0$$

B.5.3.4 扩展不确定度

$$U_{95} = t_{0.95}(76) \times u_c(e_i) = 2.0 \times 0.17'' = 0.34''$$

B.6 角速率相对误差测量不确定度评定

B.6.1 测量模型

角速度相对误差

$$U_w = \frac{1}{T_s} | \bar{T} - T_s | \quad (\text{B.26})$$

式中:

T_s ——给定速率下被校准轴转过给定角度所用时间的名义值;

$\bar{T}$ ——给定速率下被校准轴转过给定角度所用时间的平均值。

B.6.2 测量不确定度来源分析

由于 $\omega = \theta/t$, 所以角速率不确定度应包括角度不确定度与时间不确定度分量。用定角测时法测量时, 定角间隔 θ 是由角位置测量系统给出, 并根据速率高低分档给定的, 校准过程中, θ 与 t 相互独立。

测量不确定度的来源为以下几方面:

- a) 角度不确定度分量;
- b) 时间不确定度分量。

B.6.3 测量不确定度分量

B.6.3.1 角度不确定度分量

角度测量可采用每转一个角度间隔发一个脉冲的方式定角, 给出定角的角度信号。

角度不确定度 u_θ 为转台角位置定位误差引起的不确定度。所以 $u_\theta = \sigma$ 。

角位置定位误差引起的不确定度 u_1 :

转台引入的 B 类不确定度, 由转台的角位置定位误差给出其定位误差为 $0.2''$, 假设属于均匀分布, 则标准偏差

$$\sigma = u_1 = 0.2'' / \sqrt{3} = 0.12''$$

则角度不确定度分量 u_θ :

$$u_\theta = 0.12''$$

B.6.3.2 时间不确定度分量

时间测量则采用数字频率计。时间不确定度 u_t 应包括数字频率计不确定度 u_4 ; 时间测量的不确定度 u_5 和远优于被测对象的时间基准频率不确定度 (该项不确定度可以忽略)。所以

$$u_t = \sqrt{u_4^2 + u_5^2} \quad (\text{B.27})$$

B.6.3.2.1 数字频率计不确定度 u_4

数字频率计引入的 B 类不确定度, 其标准偏差 $\sigma = u_4 = 1 \times 10^{-8}$ s

B.6.3.2.2 时间测量的不确定度 u_5

对同一给定角度, 连续测量 10 次, 以 10 次测量的标准偏差 σ 为时间测量的 A 类标准不确定度

$$\sigma = u_5 = 3 \times 10^{-3}$$

则时间不确定度分量 u_t

$$u_t = \sqrt{u_4^2 + u_5^2} = 3 \times 10^{-3}$$

转台以 $\omega = 0.01^\circ/\text{s}$ 运转, 运转稳定后, 进行测量。

B.6.4 角速率相对误差合成标准不确定度

以定角测时法为例,转台的角速率可表示为

$$\omega = \theta / t \quad (\text{B.28})$$

式中:

θ ——定角间隔;

t ——转台转过定角间隔所用的时间。

定角的角度信号由角位置测量系统给出。定角的间隔根据速率高低分挡,测时用数字频率计。则角速率相对误差为

$$U_m = (|\bar{t} - t_g|) / t_g \quad (\text{B.29})$$

式中:

U_m ——角速率相对误差;

t_g ——给定速率下被测轴转过定角间隔所用时间的名义值;

$\bar{t}$ ——给定速度下被测轴转过定角间隔实测时间的平均值。

由于 $\omega = \theta / t$, 所以角速率不确定度应包括角度不确定度与时间不确定度分量。用定角测时法测量时,定角间隔 θ 是由角位置测量系统给出,并根据速率高低分挡给定的,校准过程中, θ 与 t 相互独立。

根据不确定度的传递公式

$$u_c(\omega) = \sqrt{c^2(u_\theta)u_\theta^2 + c^2(u_t)u_t^2} \quad (\text{B.30})$$

式中:

$u_c(\omega)$ ——角速率不确定度;

u_θ ——角度不确定度分量;

u_t ——时间不确定度分量。

由于 $c(u_\theta) = 1/t$, $c(u_t) = -\theta/t^2$

所以,式(B.30)可写成

$$u_c(\omega) = \sqrt{(1/t^2)u_\theta^2 + (\theta^2/t^4)u_t^2} \quad (\text{B.31})$$

B.6.4.1 测量不确定度分量一览表

角速率相对误差主要标准不确定度汇总表见表 B.6。

表 B.6 角速率相对误差主要标准不确定度汇总表

不确定度分量	不确定度来源		评定方法	评定结果
u_θ	$u_\theta = \sigma = u_1$	角度不确定度分量	B	$0.12''$
u_t	$u_t = \sqrt{u_1^2 + u_2^2}$	时间不确定度分量	A	$3 \times 10^{-3} \text{ s}$

B.6.4.2 合成标准不确定度

将 $u_\theta = 0.12''$, $u_t = 3 \times 10^{-3} \text{ s}$, $t = 100 \text{ s}$, $\theta = 1^\circ = 3600''$ 代入 (B.31) 式, 求得:

$$u_c(\omega) = 1.61 \times 10^{-3} (''/\text{s})$$

$$=4.48 \times 10^{-7} (^{\circ})/\text{s}$$

B.6.5 扩展不确定度

扩展不确定度：

$$\begin{aligned} U_{95} &= k \times u_c(\omega) \\ &= 2 \times 4.48 \times 10^{-7} (^{\circ})/\text{s} = 8.96 \times 10^{-7} (^{\circ})/\text{s} \end{aligned}$$

B.7 磁场强度测量不确定度评定

B.7.1 测量模型

$$\delta_i = \sqrt{\Delta_{xi}^2 + \Delta_{yi}^2 + \Delta_{zi}^2} \quad (\text{B.32})$$

B.7.2 测量不确定度来源分析

因为分别测量各点 X、Y、Z 三个正交方向的磁场强度 Δ_{xi} 、 Δ_{yi} 和 Δ_{zi} ，其测量不确定度各不相关， $u(x_i) = u(y_i) = u(z_i)$ 。

测量不确定度的来源为以下几方面：

- a) 磁场计示值误差引起的不确定度分量；
- b) 磁场计读数引起的不确定度分量。

B.7.3 测量不确定度分量

B.7.3.1 磁场计示值误差引起的不确定度 u_1

磁场计引入的 B 类不确定度，其标准偏差：

$$\sigma = u_1 = 0.01/3 \text{ mT}$$

B.7.3.2 磁场计读数引起的不确定度分量 u_2

磁场计读数时读数不稳定引起读数误差 0.011 mT，则磁场计读数引起的不确定度分量，其中

$$u_2 = 0.001 \text{ mT}$$

$$u_c(i) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 0.001 \text{ mT}$$

B.7.4 磁场强度合成标准不确定度

因为分别测量各点 X、Y、Z 三个正交方向的磁场强度 Δ_{xi} 、 Δ_{yi} 和 Δ_{zi} ，其测量不确定度各不相关， $u(x_i) = u(y_i) = u(z_i)$ 。

因此不确定度的传递公式为：

$$u_c(\sigma_i) = \sqrt{u^2(x_i) + u^2(y_i) + u^2(z_i)} = \sqrt{3} u(x_i) = \sqrt{3} u(y_i) = \sqrt{3} u(z_i) \quad (\text{B.33})$$

B.7.4.1 测量不确定度分量一览表

磁场强度主要标准不确定度汇总表见表 B.7

表 B.7 磁场强度主要标准不确定度汇总表

不确定度分量	不确定度来源		评定方法	评定结果
$u(x_i) = u(y_i) = u(z_i)$	u_1	磁场计示值误差引起的不确定度	B	0.003 mT
	u_2	磁场计读数引起的不确定度分量	A	0.001 mT

B.7.4.2 合成标准不确定度

$$\begin{aligned}
 u_c(\delta_i) &= \sqrt{u^2(x_i) + u^2(y_i) + u^2(z_i)} \\
 &= \sqrt{3} u(x_i) = 0.0017 \text{ mT}
 \end{aligned}
 \tag{B.34}$$

B.7.5 扩展不确定度

扩展不确定度：

$$\begin{aligned}
 U_{95} &= k \times u_c(\delta_i) \\
 &= 2 \times 0.0017 \text{ mT} = 0.0034 \text{ mT}
 \end{aligned}$$

附录 C

三轴转台主要性能参数的其他校准方法

C.1 中框翻滚法校准内框、中框轴线垂直度

a) 校准程序

内框、中框轴线垂直度校准安装示意图如图 C.1 所示, 将两平面镜装于内框架两端轴的安装端面、双面平面镜装于轴的一端安装端面或轴框架中间位置, 外框架与底座之间锁定, 将光电自准直仪置于内框轴一侧。使光电自准直仪对准反射镜一个面, 调整此反射镜使之与内框轴线垂直。再使内、中框轴处于零位, 并将中框架与外框架锁定。

读取光电自准直仪水平方向示数, 记为 X_{11} 。

使内框轴按 45° 间隔转动 1 周, 记下光电自准直仪水平方向示数 X_{12} , X_{13} , ..., X_{18} 。

将中框轴转动 180° 后再次锁定, 这时光电自准直仪对准另一面反射镜, 读取光电自准直仪水平方向示数, 记为 X_{21} 。

使内框轴按 45° 间隔转动 1 周, 记下光电自准直仪水平方向示数 X_{22} , X_{23} , ..., X_{28} 。

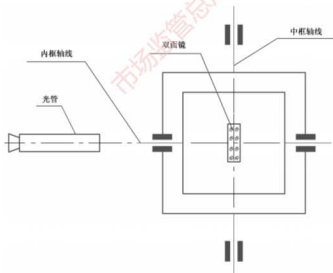


图 C.1 内框、中框轴线垂直度校准示意图

b) 数据处理

计算公式 (C.1) ~ 公式 (C.4) 如下:

$$V_1 = [(X_{11} + X_{15})/2 - (X_{21} + X_{25})/2]/2 \quad (C.1)$$

$$V_2 = [(X_{12} + X_{16})/2 - (X_{22} + X_{26})/2]/2 \quad (C.2)$$

$$V_3 = [(X_{13} + X_{17})/2 - (X_{23} + X_{27})/2]/2 \quad (C.3)$$

$$V_4 = [(X_{14} + X_{18})/2 - (X_{24} + X_{28})/2]/2 \quad (C.4)$$

式 (C.1) ~ 式 (C.4) 中:

V_1 ——中框轴与内框轴在 X_{11} 、 X_{15} 相对位置下的两回转轴线垂直度;

V_2 ——中框轴与内框轴在 X_{12} 、 X_{16} 相对位置下的两回转轴线垂直度;

V_3 ——中框轴与内框轴在 X_{13} 、 X_{17} 相对位置下的两回转轴线垂直度;

V_4 ——中框轴与内框轴在 X_{14} 、 X_{18} 相对位置下的两回转轴线垂直度。

取 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 四个数据的绝对值的最大值作为测量所得的内、中框轴线的垂直度。

C.2 内外框翻滚法校准内框、中框轴线垂直度

校准程序:

内框、中框轴线垂直度校准安装示意图如图 C.2 所示, 将平面镜装于内框架轴的安装端面或轴框架中间位置, 外框架与底座之间锁定, 将光电自准直仪置于内框轴一侧。使光电自准直仪对准反射镜一个面, 调整此反射镜使之与内框轴线垂直。内框轴转动 180° , 光电自准直仪水平方向示数小于 $0.4''$ 。再使内、中框轴处于零位, 这时将中框架与外框架之间锁定。将平面镜装于中框架轴的安装端面、转动外框轴使中框架轴安装的平面反射镜面对准光电自准直仪, 调整此反射镜使之与中框轴线垂直。中框轴转动 180° , 光电自准直仪水平方向示数小于 $0.4''$ 。

在外框中心位置安装二十四面棱体, 用另一台光电自准直仪瞄准棱体第一面。

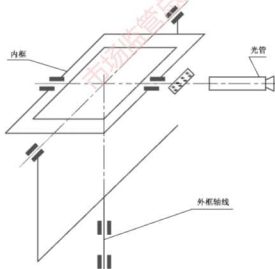


图 C.2 内外框翻滚法校准内框、中框轴线垂直度校准示意图

此时读取瞄准中框反射镜的光电自准直仪水平方向示数, 记为 X_{11} 。

中框轴转动 180° , 读取瞄准中框反射镜的光电自准直仪水平方向示数, 记为 X_{12} 。

通过光电自准直仪与棱体准确将外框旋转 180° 。此时读取瞄准内框反射镜的光电自准直仪水平方向示数, 记为 X_{21} 。

内框轴转动 180° , 读取瞄准内框反射镜的光电自准直仪水平方向示数, 记为 X_{22} 。

则内框、中框轴线垂直度计算为:

$$V = \frac{(X_{22} - X_{21}) - (X_{12} - X_{11})}{2} - \Delta_{180} \quad (\text{C.5})$$

式中:

X_{22} 、 X_{21} ——瞄准内框反射镜的光电自准直仪水平方向示数;

X_{12} 、 X_{11} ——瞄准中框反射镜的光电自准直仪水平方向示数;

Δ_{180} ——二十四面棱体 $0 \sim 180^\circ$ 棱体偏差。

C.3 外框翻滚法校准内框、中框轴线垂直度

a) 校准程序

内框、中框轴线垂直度检测时由于中框旋转 180° 后, 光管与平面镜方向相反, 因此将外框旋转 180° 后, 同样可以实现检测效果, 如下图 C.3 所示。

外框架与底座之间用电控锁定, 将光管置于内框轴一侧。使光管对准双面镜一个面, 调整此双面镜使之与内框轴线垂直。再使内框轴、中框轴处于零位, 这时将中框架与外框架之间用电控锁定。

读取光管水平方向示数, 记为 X_{11} ;

使内框轴按 45° 间隔转动 1 周, 记下光管水平方向示数 X_{12} , X_{13} , $\dots$, X_{18} ;

将中框轴转动 180° 后再次锁定, 这时外框架转动 180° 对准双面镜一个面, 读取光管水平方向示数, 记为 X_{21} ;

使内框轴按 45° 间隔转动 1 周, 记下光管水平方向示数 X_{22} , X_{23} , $\dots$, X_{28} 。

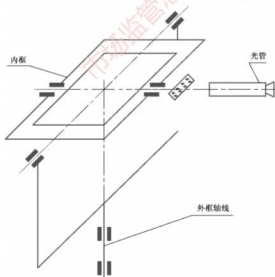


图 C.3 内框、中框轴线垂直度检验示意图

b) 数据处理

计算公式如下:

$$V_1 = \pm [(X_{11} + X_{15})/2 - (X_{21} + X_{25})/2]/2 \quad (\text{C.6})$$

$$V_2 = \pm [(X_{12} + X_{16})/2 - (X_{22} + X_{26})/2]/2 \quad (\text{C.7})$$

$$V_3 = \pm [(X_{13} + X_{17})/2 - (X_{23} + X_{27})/2]/2 \quad (\text{C.8})$$

$$V_4 = \pm [(X_{14} + X_{18})/2 - (X_{24} + X_{28})/2]/2 \quad (\text{C.9})$$

式中:

V_1 ——中框轴与内框轴在 X_{11} 、 X_{15} 相对位置下的两回转轴线垂直度;

V_2 ——中框轴与内框轴在 X_{12} 、 X_{16} 相对位置下的两回转轴线垂直度;

V_3 ——中框轴与内框轴在 X_{13} 、 X_{17} 相对位置下的两回转轴线垂直度;

V_4 ——中框轴与内框轴在 X_{14} 、 X_{18} 相对位置下的两回转轴线垂直度。

取 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 四个数据的最大值作为测量所得的内框、中框轴线的垂直度。

C.4 五角棱镜法校准中框、外框轴线垂直度

a) 校准程序

校准示意图如图 C.4。

调整中框、外框轴处于零位,用电子水平仪将外框轴线与水平面调垂直,电子水平仪读数在平行中框轴线方向读数变化在一个数内,将底座与外框架之间锁定。

将光电自准直仪置于中框轴一侧。将平面镜装于中框架端轴的安装端面或轴框架中间位置。使光电自准直仪对准反射镜一个面,调整此反射镜使之与中框轴线垂直,中框轴转动 180° ,光电自准直仪垂直方向示数小于 $0.4''$ 。

在转台外框中心位置或中框轴反射镜下方安放一平面反射镜或液面镜,用电子水平仪调整平面镜使镜面垂直于外框轴线,误差小于 $0.2''$ 。

读取瞄准中框反射镜的光电自准直仪水平垂直示数,记为 Y_{11} 。

中框轴转动 180° ,读取瞄准中框反射镜的光电自准直仪垂直方向示数,记为 Y_{12} 。

在转台中框轴反射镜与光电自准直仪之间安放一直角转折五角棱镜,读取瞄准外框中心反射镜或液面镜的光电自准直仪水平垂直示数,记为 Y_{22} 。

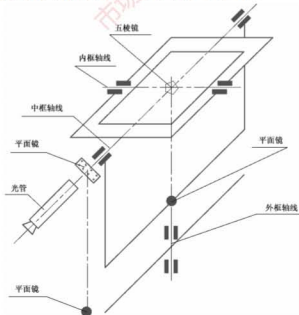


图 C.4 五角棱镜法中框、外框轴线垂直度校准示意图

b) 数据处理及结果

则外框、中框轴线垂直度为:

$$V = Y_{22} - \frac{(Y_{12} - Y_{11})}{2} - \Delta_{\text{五棱镜}} \quad (\text{C.10})$$

Y_{11} 、 Y_{12} ——瞄准中框反射镜的光电自准直仪水平垂直示数;

Y_{22} ——瞄准外框中心反射镜或液面镜的光电自准直仪水平垂直示数;

$\Delta_{\text{五棱镜}}$ ——五角棱镜直角误差。

C.5 中心单目标校准法校准三轴相交度

C.5.1 校准程序

a) 测量前的调整

1) 将带有目标的球形目标座通过一安装板固定在内框架上, 应注意使目标的刻划面通过球形目标座的球心;

2) 打开白炽灯光源, 使光源从目标的背面照亮目标;

3) 使内框、中框架正交并用插销锁定, 同时将外框架与底座间用插销锁定。使准直望远镜通过中框轴一端轴孔对准目标中心, 转动中框轴并调整目标, 使目标中心画圆最小, 见图 C.5 (a);

4) 将外框轴转 90° 后用插销锁定, 再将中框架置于水平位置后用插销锁定。使准直望远镜通过内框轴一端轴孔对准目标中心, 转动内框轴并调整球形目标, 使目标中心画圆最小, 见图 C.5 (b);

5) 反复进行 c、d 两项调整, 直到在这两种情况下目标中心画圆均为最小。

b) 测量中框、外框轴线间距离 X

1) 使准直望远镜通过中框轴一端轴孔对准目标中心, 记下光管水平方向示数 X_1 , 见图 C.5 (a), 此时三个框架均用插销锁定;

2) 转动外框轴 180° 后用插销锁定, 再将目标翻转 180° 。使准直望远镜通过中框轴另一端轴孔读出目标中心在水平方向示数 X_2 。

c) 测量内框、中框轴线间距离 Y

1) 使准直望远镜通过内框轴一端轴孔对准目标中心, 记下准直望远镜竖直方向示数 Y_1 , 见图 C.5 (b), 此时三个框架均用插销锁定;

2) 转动中框轴 180° 后用插销锁定, 再将目标翻转 180° , 使准直望远镜通过内框轴另一端轴孔读出目标中心在竖直方向示数 Y_2 。

d) 测量外框、内框轴线间距离 Z

1) 使准直望远镜通过内框轴一端轴孔对准目标中心, 记下准直望远镜水平方向示数 Z_1 , 见图 C.5 (b)。此时三个框架均用插销锁定;

2) 转动外框轴 180° 后用插销锁定, 再将目标翻转 180° 。使准直望远镜通过内框轴另一端轴孔读出目标在水平方向示数 Z_2 。

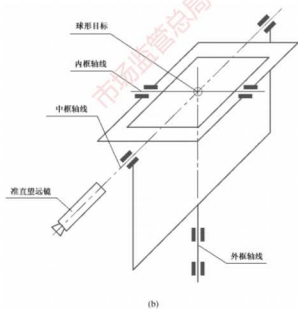
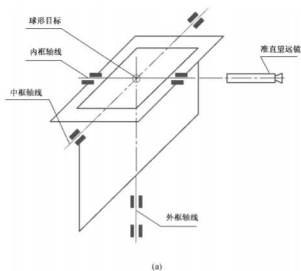


图 C.5 三框轴线相交度检验示意图

C.5.2 数据处理及结果

三框轴线相交度为： $\sigma = 2 \cdot \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$

$$= 2 \sqrt{\frac{(X_1 - X_2)^2}{2} + \frac{(Y_1 - Y_2)^2}{2} + \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{2}} \quad (\text{C.11})$$

C.6 轴端单目标校准法校准三轴相交度

C.6.1 校准程序

a) 测量内框、中框轴线间距离 Y

1) 使准直望远镜在平行于内框轴线的方向对准内框目标中心, 转动内框轴并调整目标, 使目标中心画圆最小。记下准直望远镜竖直方向示数 Y_1 , 见图 C.6, 此时三个框架均用电控锁定;

2) 转动中框轴 180° 后用电控锁定, 再将外框轴翻转 180° , 使准直望远镜对准目标中心读出目标中心在竖直方向示数 Y_2 。

b) 测量外框、内框轴线间距离 Z

1) 使准直望远镜在平行于内框轴线的方向对准内框目标中心, 记下准直望远镜水平方向示数 Z_1 , 见图 C.6。此时三个框架均用电控锁定;

2) 转动外框轴 180° 后用电控锁定, 再将中框轴翻转 180° 。使准直望远镜对准目标中心读出目标在水平方向示数 Z_2 。

外框、内框轴线间距离:

$$Z = (Z_2 - Z_1) / 2 \quad (\text{C.12})$$

式中:

Z_1 ——准直望远镜水平方向示数;

Z_2 ——准直望远镜水平方向示数。

c) 外框、中框轴线间距离 X

转动中框轴使内框轴铅垂, 在平行于中框轴线的方向调整准直望远镜对准内框目标中心, 记下准直望远镜水平方向示数 X_1 。转动外框 180° , 瞄准内框目标中心, 记下准直望远镜水平方向示数 X_2 。

外框、中框轴线间距离:

$$X = (X_2 - X_1) / 2 - Y \quad (\text{C.13})$$

式中:

X_1 ——准直望远镜水平方向示数;

X_2 ——准直望远镜水平方向示数;

Y ——内框、中框轴线间距离。

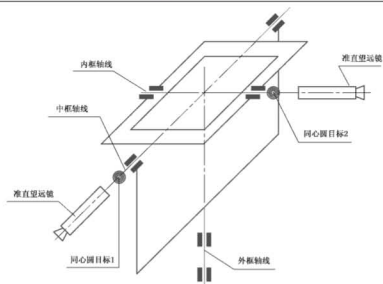


图 C.6 内中框、内外框轴线相交度检验示意图

C.6.2 数据处理及结果

三框轴线相交度计算为：

$$\Phi = 2\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (\text{C.14})$$