



中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 1115—2004

光电轴角编码器校准规范

Calibration Specification for Photoelectric Shaft Encoders

2004 - 03 - 02 发布

2004 - 06 - 02 实施

国家质量监督检验检疫总局 发布

光电轴角编码器校准规范

Calibration Specification for

Photoelectric Shaft Encoders

JJF 1115—2004

代替 JJG900—1995

本规范经国家质量监督检验检疫总局于 2004 年 03 月 02 日批准，并自 2004 年 06 月 02 日起施行。

归口单位： 全国几何量角度计量技术委员会

起草单位： 中国科学院光电技术研究所

本规范委托归口单位负责解释

本规范主要起草人：

曹学东 （中国科学院光电技术研究所）

范天泉 （中国科学院光电技术研究所）

耿丽红 （中国科学院光电技术研究所）

目 录

1 范围	(1)
2 引用文献	(1)
3 术语和定义	(1)
4 概述	(1)
5 计量特性	(1)
5.1 分度误差	(1)
5.2 测角重复性	(1)
5.3 编码器的零位误差	(1)
5.4 测角回程误差	(1)
6 校准条件	(2)
6.1 环境条件	(2)
6.2 校准用标准器	(3)
7 校准项目和校准方法	(3)
7.1 分度误差	(3)
7.2 编码器的零位误差	(5)
7.3 测角重复性	(5)
7.4 测角回程误差	(6)
8 校准结果表达	(6)
9 复校时间间隔	(6)
附录 A 分度误差校准实例	(7)
附录 B 测角重复性校准实例	(10)
附录 C 测角回程误差校准实例	(11)
附录 D 光电轴角编码器分度误差测量不确定度分析	(12)
附录 E 校准证书格式及内容	(17)

光电轴角编码器校准规范

1 范围

本规范适用于分辨力为 $0.1'' \sim 30''$ 的光电轴角编码器（以下简称编码器）的校准。

2 引用文献

本规范引用以下文献：

JJF 1001—1998 通用计量术语及定义

JJF 1059—1999 测量不确定度评定与表示

JJF 1094—2002 测量仪器特性评定

JB/T 9942—1999 光栅角位移传感器

JB/T 10034—1999 光栅角位移测量系统

JJG 472—1997 多齿分度台国家计量检定规程

使用本规范时，应注意使用上述引用文献的现行有效版本。

3 术语和定义

编码器的零位误差：

编码器的零位误差是指编码器从正、反方向不同位置回到其零位时，其角度位置的最大变化量。

4 概述

编码器主要是以光栅盘或码盘作为测量元件，用来测量转角。它可以单独作为角度计量器具，也可以作为某一设备或仪器的测角部件。编码器原理及结构示意图如图 1 所示。按分度误差，编码器可分为 7 级。

5 计量特性

5.1 分度误差

各级编码器的分度误差要求见表 1。

5.2 测角重复性

各级编码器的测角重复性要求见表 1。

5.3 编码器的零位误差

编码器的零位误差要求在制造厂家的产品标准中规定，也可由用户根据需要确定。

5.4 测角回程误差

编码器的测角回程误差要求在制造厂家的产品标准中规定，也可由用户根据需要确定。

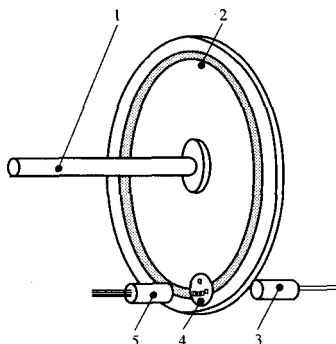


图1 编码器原理及结构示意图

1—主轴；2—光栅盘（或码盘）；3—光源；4—指示光栅；5—接收器件组

表1 各级编码器的分度误差、测角重复性要求

准确度级别	分度误差		测角重复性/ (")
	无绝对零位编码器	有绝对零位编码器	
	$(P - V) / (")$	最大允许误差/ (")	
1	0.5	± 0.25	≤ 0.2
2	1	± 0.5	≤ 0.3
3	2	± 1	≤ 0.4
4	4	± 2	≤ 0.8
5	10	± 5	≤ 1.6
6	20	± 10	≤ 3.2
7	60	± 30	≤ 6.4

注：P—峰值，V—谷值。

当编码器不按准确度等级进行分级时，其分度误差、测角重复性要求在制造厂家的产品标准中规定，也可由用户根据需要确定。

6 校准条件

6.1 环境条件

校准时的温度及温度变化应满足表2要求。被校准编码器与校准所用标准器具应有足够的平衡温度时间，通常应不少于2h。被校准编码器应在接通电源10min后开始校准。

表2 校准时的温度及温度变化要求

准确度级别	校准时的温度要求/($^{\circ}\text{C}$)	温度变化/($^{\circ}\text{C}/\text{h}$)
1	20 ± 2	≤ 0.5
2		
3	20 ± 3	≤ 1
4		
5		
6	20 ± 5	≤ 1
7		

6.2 校准用标准器

校准用标准器见表3。

表3 校准用标准器

序号	标准器	分度值/等级
1	转台	1~3级编码器用分度值为 $0.1'' \sim 0.5''$ 的转台 4级编码器用分度值为 $1''$ 的转台 5~7级编码器用分度值为 $2'' \sim 10''$ 的转台
2	自准直仪	1~3级编码器用分度值 $\leq 0.1''$ 的自准直仪 4级编码器用分度值为 $0.2''$ 的自准直仪 5~7级编码器用分度值为 $1''$ 的自准直仪
3	多面棱体	1~3级编码器用不少于17面的3等多面棱体 4级编码器用不少于16面的4等多面棱体 5~7级编码器用不少于12面的4等多面棱体

7 校准项目和校准方法

7.1 分度误差

编码器的分度误差可以直接用转台(分度台、测角仪等)校准,也可采用多面棱体-自准直仪校准,校准点数通常根据被校准编码器的级别而定。1级、2级编码器采用不少于17面的质数面棱体进行校准,且采用排列互比法;3级、4级编码器校准点数应不少于16点;5级、6级、7级编码器校准点数应不少于12点。校准点数也可按委托单位的要求而定。

排列互比法的操作与数据处理方法见JJG 472—1997《多齿分度台计量检定规程》。

编码器校准时是否带联轴节由送校单位确定。

7.1.1 直接用转台(分度台、测角仪等)校准

将被校准编码器转轴与转台转轴通过联轴节连接在一起,并使被校准编码器主轴轴

线与转台轴线重合，固定编码器不动部分，记下编码器示值 a_1 及转台示值 b_1 。转台转过一个位置，记下编码器示值 a_2 及转台示值 b_2 ，转动转台直至测完所有被测点。再次转动转台使编码器示值为 a_1 ，同时记下转台示值 b'_1 ，并记算一测回首尾重合差 $H = |b'_1 - b_1|$ ，各级编码器一测回首尾重合差要求见表 4。

表 4 一测回首尾重合差要求

准确度级别	首尾重合差/ (")
1	≤ 0.2
2	≤ 0.3
3	≤ 0.5
4	≤ 1
5	≤ 3
6	≤ 5
7	≤ 15

直接用转台校准编码器示意图如图 2。

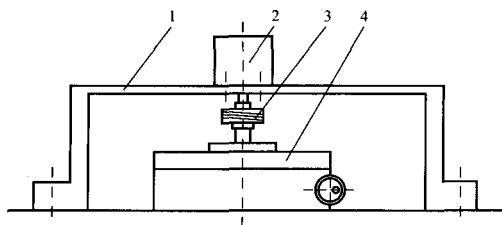


图 2 直接用转台校准编码器示意图

1—支架；2—被校编码器；3—联轴节；4—转台

编码器各测点的误差值计算公式见下式：

$$e_i = (a_i - a_1) - (b_i - b_1) \quad (1)$$

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 测点的分度误差值。

7.1.2 用多面棱体—自准直仪校准

将多面棱体安装在编码器转轴上，并使多面棱体轴线与编码器旋转轴线重合，同轴度误差应不大于 0.5mm，棱体各工作面与被检编码器的轴线的平行度（塔差）不大于 30"；安放自准直仪，使自准直仪视轴垂直于多面棱体工作面并相对准多面棱体第一工作

面中心, 自准直仪分划板竖线应与编码器轴线平行; 记下编码器示值 a_1 及自准直仪初始读数 c_1 , 旋转编码器主轴使多面棱体第二工作面对准自准直仪, 记下编码器示值 a_2 及自准直仪相应的读数 c_2 , 旋转编码器主轴直至校准完所有校准点。再次旋转编码器主轴使编码器示值为 a_1 , 同时记下自准直仪示值 c'_1 , 并计算一测回首尾重合差 $H = |c'_1 - c_1|$, 各级编码器一测回首尾重合差要求见表 4。

用多面棱体 - 自准直仪校准编码器示意图如图 3。

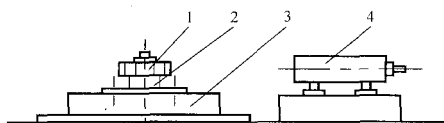


图 3 用多面棱体 - 自准直仪校准编码器示意图

1—多面棱体; 2—多面棱体调整架; 3—被校编码器; 4—自准直仪

编码器各测点的误差值计算公式见下式:

$$e_i = (a_i - a_1) - (b_i - b_1) - (c_i - c_1) \quad (2)$$

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

b_i ——棱体第 i 面与第 1 面夹角;

c_i ——自准直仪第 i 测点读数;

e_i ——被校准编码器第 i 测点的误差值。

若被校准编码器含细分处理部分且分度误差校准间隔为细分周期的整数倍时, 则应在误差最大值点及最小值点处校准细分误差, 细分误差校准点数为 n , n 通常不小于 10。校准间隔为 Δ/n (Δ 为一个细分周期)。细分误差校准完后按分度误差计算公式计算各点误差值。

当被校准编码器有绝对零位时, 应以绝对零位为起点进行分度误差的校准, 且分度误差校准结果同时给出误差 (含细分点误差) 最大值和最小值; 当被校准编码器无绝对零位时, 分度误差取各校准点误差 (含细分点误差) 中最大值 P 与最小值 V 之差 (即 $P - V$ 值) 作为校准结果。分度误差校准结果形式也可按委托单位的要求而定。

7.2 编码器的零位误差

编码器的零位误差的校准装置与分度误差的校准装置相同。

转动编码器回转轴使编码器转至零位位置。转动编码器回转轴, 使编码器向示值增加的方向转过一个角度后再转回至零位, 记下测量装置读数值。然后转动编码器回转轴使编码器向示值减小的方向转过一个角度后再转回至零位, 再次记下测量装置读数值。依此反复测量, 共测量 10 次。取测量装置读数的最大值和最小值之差作为编码器的零位误差校准结果。

7.3 测角重复性

测角重复性的校准装置与分度误差的校准装置相同, 按双观测法进行。

按分度误差校准方法以相同的转动方向重复连续测量两周（第一周、第二周测量点位置相同），读取测量装置第一周各测点测量值 d_1, d_2, \dots, d_n ，第二周各测点测量值 d'_1, d'_2, \dots, d'_n 。按公式（3）计算测角重复性。

$$\left. \begin{aligned} f_i &= d_{i+1} - d_i \\ f'_i &= d'_{i+1} - d'_i \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\Delta_{\text{重}} = 3 \times \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (f_i - f'_i)^2}$$

式中： d_i ——第一周第 i 测点的测量值， $i = 1, 2, \dots, n$ ； $d_{n+1} = d_1$

d'_i ——第二周第 i 测点的测量值， $i = 1, 2, \dots, n$ ； $d'_{n+1} = d'_1$

f_i ——第一周相邻测点测量值之差；

f'_i ——第二周相邻测点测量值之差；

n ——每周测量点数；

$\Delta_{\text{重}}$ ——测角重复性。

7.4 测角回程误差

测角回程误差的校准装置与分度误差的校准装置相同。

按分度误差校准方法正、反各测量一周（正、反测量点位置相同），取各测点正、反读数值之差的绝对值中最大者作为测角回程误差校准结果。

8 校准结果表达

经校准的编码器发给校准证书或校准报告。

9 复校时间间隔

复校时间间隔由送校单位根据实际使用情况确定，建议为 1 年。

附录 A

分度误差校准实例

A.1 采用多面棱体—自准直仪法校准

被校对象：分辨力为 $0.1''$ ，细分周期为 $60''$ ，无绝对零位的 3 级光电轴角编码器。
 校准用标准器具：24 面棱体（3 等）；自准直仪，示值误差（PV 值）为 $0.2''$ （ $\pm 100''$ 范围内）。

多面棱体—自准直仪法校准数据见表 A.1。

表 A.1 多面棱体—自准直仪法校准数据

序号	编码器示值	棱体角度值	自准直仪读数/ ($''$)	误差值/ ($''$)
	①	②	③	④ = ① - ② - ③
1	0°	0°	0.0	0.0
2	15°	$15^\circ - 1.0''$	0.6	0.4
3	30°	$30^\circ - 0.5''$	-0.3	0.8
4	45°	$45^\circ + 1.4''$	-1.7	0.3
5	60°	$60^\circ + 0.5''$	-0.2	-0.3
6	75°	$75^\circ - 0.9''$	0.9	0.0
7	90°	$90^\circ - 0.4''$	-0.5	0.9
8	105°	$105^\circ - 0.9''$	0.3	0.6
9	120°	$120^\circ - 0.1''$	-0.5	0.6
10	135°	$135^\circ - 0.4''$	-0.4	0.8
11	150°	$150^\circ + 0.3''$	-1.0	0.7
12	165°	$165^\circ + 1.4''$	-1.7	0.3
13	180°	$180^\circ + 0.0''$	-0.3	0.3
14	195°	$195^\circ - 0.5''$	0.4	0.1
15	210°	$210^\circ + 0.5''$	0.2	-0.7
16	225°	$225^\circ - 0.2''$	1.1	-0.9
17	240°	$240^\circ + 0.4''$	0.3	-0.7
18	255°	$255^\circ - 4.5''$	5.0	-0.5
19	270°	$270^\circ - 0.3''$	1.0	-0.7
20	285°	$285^\circ + 0.6''$	0.2	-0.8
21	300°	$300^\circ - 0.2''$	1.0	-0.8
22	315°	$315^\circ + 0.2''$	0.5	-0.7
23	330°	$330^\circ + 0.6''$	-0.5	-0.1
24	345°	$345^\circ + 0.1''$	0.4	-0.5
25	0°	0°	0.3	-0.3

表 A.1 (续)

在误差最大值处校准细分误差				
序号	编码器示值	棱本角度值	自准直仪读数/ (")	误差值/ (")
1	90°0.0"	90° - 0.4"	- 0.5	0.9
2	90°5.0"	90° - 0.4"	4.7	0.7
3	90°10.0"	90° - 0.4"	9.6	0.8
4	90°15.0"	90° - 0.4"	14.8	0.6
5	90°20.0"	90° - 0.4"	19.8	0.6
6	90°25.0"	90° - 0.4"	24.8	0.6
7	90°30.0"	90° - 0.4"	30.0	0.4
8	90°35.0"	90° - 0.4"	35.0	0.4
9	90°40.0"	90° - 0.4"	39.7	0.7
10	90°45.0"	90° - 0.4"	44.5	0.9
11	90°50.0"	90° - 0.4"	49.7	0.7
12	90°55.0"	90° - 0.4"	54.9	0.5
13	90°60.0"	90° - 0.4"	59.8	0.6
在误差最小值处校准细分误差				
序号	编码器示值	棱本角度值	自准直仪读数/ (")	误差值/ (")
1	225°0.0"	225° - 0.2"	1.1	- 0.9
2	225°5.0"	225° - 0.2"	6.1	- 0.9
3	225°10.0"	225° - 0.2"	11.0	- 0.8
4	225°15.0"	225° - 0.2"	16.0	- 0.8
5	225°20.0"	225° - 0.2"	21.0	- 0.8
6	225°25.0"	225° - 0.2"	25.8	- 0.6
7	225°30.0"	225° - 0.2"	30.6	- 0.4
8	225°35.0"	225° - 0.2"	35.7	- 0.5
9	225°40.0"	225° - 0.2"	41.1	- 0.9
10	225°45.0"	225° - 0.2"	46.0	- 0.8
11	225°50.0"	225° - 0.2"	50.8	- 0.6
12	225°55.0"	225° - 0.2"	55.9	- 0.7
13	225°60.0"	225° - 0.2"	61.0	- 0.8

校准结果： $0.9 - (-0.9) = 1.8''$ (不确定度 $U = 0.6''$, $p = 95\%$)

A.2 采用排列互比法校准

被校对象：分辨力为 $0.1''$ ，细分周期为 $60''$ ，无绝对零位的 2 级光电轴角编码器。

校准用标准器具：23 面棱体 (3 等)；自准直仪，示值误差 (PV 值) 为 $0.2''$ ($\pm 100''$ 范围内)。

排列互比法校准数据见表 A.2。

表 A.2 排列互比法校准数据

测回数	自准直仪读数/(°)																							
	1面	2面	3面	4面	5面	6面	7面	8面	9面	10面	11面	12面	13面	14面	15面	16面	17面	18面	19面	20面	21面	22面	23面	
第1测回	0.0	1.1	0.9	0.4	1.4	1.8	0.6	0.1	-0.5	0.5	1.0	0.8	-0.7	-0.2	-0.9	0.7	-1.5	0.7	-0.4	-0.8	0.5	-0.2	-1.4	
第2测回	0.0	0.8	0.4	0.5	1.1	1.2	0.9	-0.4	-0.7	0.0	0.7	0.6	-1.1	-0.2	-1.5	0.3	-1.6	0.7	-1.1	-0.9	0.0	-0.6	-2.0	
第3测回	0.0	0.6	0.9	0.4	0.6	1.6	0.7	-0.2	-0.8	0.1	0.8	0.6	-0.9	-0.6	-1.7	0.5	-1.5	0.3	-0.9	-0.9	0.0	-0.9	-1.7	
第4测回	0.0	1.3	0.9	0.2	1.3	1.7	1.0	-0.1	-0.6	0.4	1.0	1.1	-0.9	-0.4	-1.2	0.8	-1.6	0.6	-0.7	-0.9	-0.1	-0.4	-1.5	
第5测回	0.0	0.7	0.1	0.3	0.8	1.4	0.5	-0.5	-0.9	-0.1	0.8	0.3	-1.4	-0.7	-1.5	0.0	-1.8	0.2	-1.2	-1.5	-0.2	-0.8	-2.1	
第6测回	0.0	0.4	0.7	0.1	0.9	1.2	0.5	-0.4	-1.0	0.2	0.5	0.2	-1.2	-0.6	-1.9	0.2	-1.9	0.1	-1.5	-1.2	-0.2	-1.0	-1.7	
第7测回	0.0	1.3	0.9	0.7	1.3	1.6	0.9	-0.2	-0.3	0.3	0.8	0.7	-0.7	-0.4	-1.2	0.6	-1.6	0.2	-0.8	-0.7	0.1	-0.2	-1.3	
第8测回	0.0	0.6	0.5	0.1	0.7	1.2	0.3	-0.4	-1.1	-0.3	0.5	0.4	-1.5	-0.7	-1.8	0.0	-2.4	0.0	-1.3	-1.4	-0.2	-0.8	-2.3	
第9测回	0.0	0.9	0.6	0.3	1.0	1.4	0.9	-0.4	-1.0	0.1	0.7	0.3	-1.1	-0.6	-1.7	-0.1	-1.9	0.1	-1.4	-1.0	0.1	-0.9	-1.5	
第10测回	0.0	0.7	0.5	0.2	0.8	1.5	0.5	-0.6	-0.9	0.1	0.4	0.4	-1.3	-0.8	-2.1	0.1	-2.0	-0.1	-1.0	-1.0	-0.4	-0.5	-1.9	
第11测回	0.0	0.7	0.7	0.2	1.2	1.4	0.5	-0.3	-0.7	-0.1	0.7	0.3	-1.3	-1.0	-1.7	0.2	-2.1	0.4	-0.9	-1.3	0.2	-0.7	-1.6	
第12测回	0.0	0.9	0.7	0.5	0.8	1.2	0.7	-0.2	-1.0	0.0	0.6	0.3	-1.7	-0.7	-1.8	0.0	-1.7	0.4	-1.3	-0.8	0.0	-0.5	-1.7	
第13测回	0.0	0.7	0.8	0.2	0.7	1.4	0.7	-0.6	-0.8	0.0	0.4	-0.1	-1.4	-0.8	-2.0	0.3	-1.8	-0.1	-0.9	-1.1	0.0	-0.8	-1.8	
第14测回	0.0	1.1	0.6	0.2	1.0	1.6	0.5	-0.3	-0.9	-0.2	0.2	0.3	-1.3	-0.9	-1.5	0.4	-2.1	0.5	-1.0	-0.9	0.1	-0.5	-1.5	
第15测回	0.0	0.5	0.2	0.1	0.8	1.0	0.4	-0.7	-1.3	-0.8	0.2	0.0	-1.8	-0.8	-1.8	-0.3	-1.9	0.0	-1.2	-1.2	-0.2	-0.7	-2.0	
第16测回	0.0	0.6	0.7	0.5	0.8	1.4	0.5	-0.5	-1.3	-0.1	0.4	0.1	-1.1	-0.6	-1.9	0.4	-1.8	0.3	-1.0	-1.0	0.1	-0.6	-1.4	
第17测回	0.0	1.0	0.9	0.4	1.2	1.6	0.6	-0.7	-0.9	0.0	0.4	0.6	-1.0	-0.8	-1.3	0.4	-1.6	0.4	-0.9	-0.8	0.1	-0.3	-1.6	
第18测回	0.0	0.9	0.4	0.3	0.8	1.2	0.1	-0.7	-1.1	-0.3	0.7	0.4	-1.6	-0.5	-1.7	0.3	-1.9	0.2	-1.0	-1.1	0.2	-0.7	-1.9	
第19测回	0.0	0.4	0.4	0.0	0.6	0.8	0.3	-0.8	-1.4	-0.1	0.4	-0.1	-1.3	-0.7	-1.8	0.0	-2.1	0.2	-1.2	-0.9	-0.3	-0.9	-1.8	
第20测回	0.0	1.0	0.7	0.2	0.5	1.4	0.6	-0.6	-0.8	0.2	0.4	0.7	-1.1	-0.4	-1.6	0.3	-1.6	0.4	-0.6	-1.0	0.0	-0.4	-1.4	
第21测回	0.0	0.7	0.4	-0.2	0.7	1.2	0.2	-0.4	-0.9	-0.4	0.7	0.3	-1.2	-0.7	-1.7	0.3	-1.9	0.4	-1.1	-1.2	0.0	-0.5	-1.9	
第22测回	0.0	0.7	0.1	0.2	0.9	1.2	0.7	-0.3	-1.2	0.2	0.6	0.6	-1.1	-0.5	-1.5	0.3	-1.5	0.3	-1.1	-0.9	0.2	-0.8	-1.6	
第23测回	0.0	0.5	0.7	0.4	0.8	1.7	0.8	-0.6	-0.6	0.1	0.8	0.5	-1.1	-0.4	-1.5	0.7	-1.7	0.3	-0.8	-0.7	0.0	-0.4	-1.7	
竖行和 S_i	-14.0	18.1	13.7	6.2	20.7	31.7	13.4	-9.8	-20.7	-0.2	13.7	9.3	-27.8	-14.0	-37.3	6.4	-41.5	6.5	-23.3	-23.2	0.0	-14.1	-39.3	
斜行和 Y_i	-14.0	-6.7	-6.8	-10.9	-2.0	-2.8	-11.8	-0.4	-4.7	-2.2	-4.5	-4.5	-2.2	-4.4	2.0	-4.8	-7.0	-2.4	0.1	-7.2	-2.6	-4.7	-7.0	
棱体误差 $(S_i - S_1)/n$	0.0	0.8	0.6	0.3	0.9	1.4	0.6	-0.4	-0.9	0.0	0.6	0.4	-1.2	-0.6	1.6	0.3	-1.8	0.3	-1.0	-1.0	0.0	-0.6	-1.7	
分度误差 $(Y_i - Y_1)/n$	0.0	-0.3	-0.3	-0.1	-0.5	-0.5	-0.1	-0.6	-0.4	-0.5	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5	-0.4	-0.7	-0.4	-0.3	-0.5	-0.6	-0.3	-0.5	-0.4	-0.3

校准结果: $0 - (-0.7) = 0.7''$ (不确定度 $U = 0.04''$, $p = 95\%$)

附录 B

测角重复性校准实例

被校对象：分辨力为 $0.1''$ ，细分周期为 $60''$ ，无绝对零位的 2 级光电轴角编码器。

校准用标准器具：23 面棱体（3 等）；自准直仪，示值误差（ PV 值）为 $0.2''$ （ $\pm 100''$ 范围内）。

测角重复性校准数据见表 B.1。

表 B.1 测角重复性校准数据

序号	编码器示值	棱体角度值	自准直仪读数/ $(''$)		相邻差/ $(''$)		两周各对应点相邻差之差/ $(''$)
			第一周	第二周	第一周	第二周	
1	0°0'0.0"	0°0'0.0"	0.0	0.1	1.2	1.1	-0.1
2	15°39'7.8"	15°39'7.0"	1.2	1.2	-0.4	-0.3	0.1
3	31°18'15.6"	31°18'15.0"	0.8	0.9	-0.4	-0.4	0.0
4	46°57'23.5"	46°57'23.2"	0.4	0.5	1.1	1.0	-0.1
5	62°36'31.3"	62°36'30.4"	1.5	1.5	0.2	0.3	0.1
6	78°15'39.1"	78°15'17.7"	1.7	1.8	-1.2	-1.1	0.1
7	93°54'47.0"	93°54'46.4"	0.5	0.7	-0.4	-0.5	-0.1
8	109°33'54.8"	109°33'54.4"	0.1	0.2	-0.6	-0.7	-0.1
9	125°13'2.6"	125°13'3.5"	-0.5	-0.5	0.8	0.8	0.0
10	140°52'10.4"	140°52'10.4"	0.3	0.3	0.6	0.7	0.1
11	156°31'18.3"	156°31'17.7"	0.9	1.0	-0.1	-0.2	-0.1
12	172°10'26.1"	172°10'25.7"	0.8	0.8	-1.5	-1.7	-0.2
13	187°49'33.9"	187°49'35.1"	-0.7	-0.9	0.4	0.6	0.2
14	203°28'41.7"	203°28'42.3"	-0.3	-0.3	-0.5	-0.5	0.0
15	219°7'59.6"	219°7'51.2"	-0.8	-0.8	1.7	1.6	-0.1
16	234°46'57.4"	234°46'57.1"	0.9	0.8	-2.2	-2.4	-0.2
17	250°26'5.2"	250°26'7.0"	-1.3	-1.6	2.2	2.3	0.1
18	266°5'13.0"	266°5'12.7"	0.9	0.7	-1.2	-1.2	0.0
19	281°44'20.9"	281°44'21.9"	-0.3	-0.5	-0.5	-0.4	0.1
20	297°23'28.7"	297°23'29.7"	-0.8	-0.9	1.3	1.2	-0.1
21	313°2'36.5"	313°2'36.5"	0.5	0.3	-0.5	-0.3	0.2
22	328°41'44.3"	328°41'44.9"	0.0	0.0	-1.4	-1.5	-0.1
23	344°20'52.2"	344°20'53.9"	-1.4	-1.5	1.4	1.6	0.2

$$\text{校准结果: } \Delta_{\text{重}} = 3 \times \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (f_i - f'_i)^2} = 3 \times 0.086 = 0.26 (")$$

附录 C

测角回程误差校准实例

被校对象：分辨力为 $0.1''$ ，细分周期为 $60''$ ，无绝对零位的 2 级光电轴角编码器。

校准用标准器具：23 面棱体（3 等）；自准直仪，示值误差（PV 值）为 $0.2''$ （ $\pm 100''$ 范围内）。

测角回程误差校准数据见表 C.1。

表 C.1 测角回程误差校准数据

序号	编码器示值	棱体角度值	自准直仪读数/ ($''$)		测角回程误差 / ($''$)
			正测	反测	
			①	②	③ = ② - ①
1	$0^{\circ}0'0.0''$	$0^{\circ}0'0.0''$	0.0	0.1	0.1
2	$15^{\circ}39'7.8''$	$15^{\circ}39'7.0''$	1.2	1.2	0.0
3	$31^{\circ}18'15.6''$	$31^{\circ}18'15.0''$	1.1	1.0	-0.1
4	$46^{\circ}57'23.5''$	$46^{\circ}57'23.2''$	0.3	0.3	0.0
5	$62^{\circ}36'31.3''$	$62^{\circ}36'30.4''$	1.5	1.6	0.1
6	$78^{\circ}15'39.1''$	$78^{\circ}15'17.7''$	2.0	2.0	0.0
7	$93^{\circ}54'47.0''$	$93^{\circ}54'46.4''$	0.7	0.8	0.1
8	$109^{\circ}33'54.8''$	$109^{\circ}33'54.4''$	0.2	0.1	-0.1
9	$125^{\circ}13'2.6''$	$125^{\circ}13'3.5''$	-0.5	-0.5	0.0
10	$140^{\circ}52'10.4''$	$140^{\circ}52'10.4''$	0.5	0.6	0.1
11	$156^{\circ}31'18.3''$	$156^{\circ}31'17.7''$	1.0	1.0	0.0
12	$172^{\circ}10'26.1''$	$172^{\circ}10'25.7''$	0.9	0.9	0.0
13	$187^{\circ}49'33.9''$	$187^{\circ}49'35.1''$	-0.5	-0.6	-0.1
14	$203^{\circ}28'41.7''$	$203^{\circ}28'42.3''$	-0.1	-0.1	0.0
15	$219^{\circ}7'59.6''$	$219^{\circ}7'51.2''$	-0.8	-0.8	0.0
16	$234^{\circ}46'57.4''$	$234^{\circ}46'57.1''$	0.7	0.6	-0.1
17	$250^{\circ}26'5.2''$	$250^{\circ}26'7.0''$	-1.4	-1.7	-0.3
18	$266^{\circ}5'13.0''$	$266^{\circ}5'12.7''$	0.9	0.9	0.0
19	$281^{\circ}44'20.9''$	$281^{\circ}44'21.9''$	-0.3	-0.4	-0.1
20	$297^{\circ}23'28.7''$	$297^{\circ}23'29.7''$	-0.8	-0.8	0.0
21	$313^{\circ}2'36.5''$	$313^{\circ}2'36.5''$	0.4	0.3	-0.1
22	$328^{\circ}41'44.3''$	$328^{\circ}41'44.9''$	-0.2	-0.3	-0.1
23	$344^{\circ}20'52.2''$	$344^{\circ}20'53.9''$	-1.3	-1.5	-0.2

校准结果： $0.3''$

附录 D

光电轴角编码器分度误差测量不确定度分析

D.1 用多面棱体—自准直仪校准

D.1.1 概述

D.1.1.1 测量对象：分辨力为 $0.1''$ ，无绝对零位的 3 级光电轴角编码器（以下简称编码器）。

D.1.1.2 校准用标准器具：3 等多面棱体，检定误差（不确定度）为 $0.5''$ ，包含因子 $k=3$ ；自准直仪，示值误差（PV 值）为 $0.2''$ （ $\pm 100''$ 范围内）。

D.1.1.3 环境条件：（ 20 ± 3 ） $^{\circ}\text{C}$ 。

D.1.1.4 测量过程

将多面棱体安装在编码器转轴上，并使多面棱体轴线与编码器旋转轴线重合。安放自准直仪，使自准直仪视轴垂直于多面棱体工作面并对准多面棱体第一工作面中心。自准直仪分划板竖线应与编码器轴线平行，记下编码器示值及自准直仪初始读数 a_1, c_1 ；旋转编码器主轴使多面棱体第二工作面对准自准直仪，记下编码器示值及自准直仪相应的读数 a_2, c_2 ；旋转编码器主轴直至校准完所有校准点。

分度误差取各校准点误差值中最大值 P 与最小值 V 之差（即 $P - V$ 值）作为校准结果。

D.1.2 数学模型

$$e_i = (a_i - a_1) - (b_i - b_1) - (c_i - c_1)$$

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

b_i ——棱体第 i 面与第 1 面夹角；

c_i ——自准直仪第 i 测点读数；

e_i ——被校准编码器第 i 测点的误差值。

$$\begin{aligned} \Delta &= [e_i]_{\max} - [e_i]_{\min} \\ &= [(a_M - a_1) - (b_M - b_1) - (c_M - c_1)] - [(a_N - a_1) - (b_N - b_1) - (c_N - c_1)] \\ &= (a_M - a_N) - (b_M - b_N) - (c_M - c_N) \end{aligned}$$

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棱体工作面与第 1 面夹角；

b_N ——各校准点误差中最小值所对应的棱体工作面与第 1 面夹角；

c_M ——各校准点误差中最大值所对应的自准直仪读数；

c_N ——各校准点误差中最小值所对应的自准直仪读数；

Δ ——分度误差校准结果。

则合成标准不确定度应为：

$$u_c^2 = c^2(a)u^2(a) + c^2(b)u^2(b) + c^2(c)u^2(c)$$

$$c(a) = 1; c(b) = -1; c(c) = -1$$

D.1.3 标准不确定度一览表

表 1 标准不确定度一览表

标准不确定度分量	不确定度来源	标准不确定度值	$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$	$ c_i u(x_i)$	自由度
$u(a)$	与编码器读数有关的不确定度	0.10"	1	0.10"	31
u_1	编码器量化误差	$\frac{0.1}{2} \times \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.03"$			50
u_2	编码器测角重复性	$\frac{0.3}{3} = 0.10"$			31
$u(b)$	多面棱体检定误差	$\frac{0.5}{3} = 0.17"$	-1	0.17"	50
$u(c)$	自准直仪示值误差	$\frac{0.2}{2\sqrt{3}} = 0.06"$	-1	0.06"	50

D.1.4 不确定度分量估算

D.1.4.1 与编码器读数有关的不确定度 $u(a)$ D.1.4.1.1 被校准编码器量化误差引入的标准不确定度分量 u_1

被校准编码器分辨力为 0.1"，以等概率出现在半宽为 $0.1"/2 = 0.05"$ 的区间内，估计相对不确定度为 10%，则

$$u_1 = \frac{0.1}{2} \times \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.03 \text{ (")}$$

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

D.1.4.1.2 被校准编码器测角重复性引入的标准不确定度分量 u_2

3 级编码器测角重复性为 $\Delta_{\text{重}} = 0.3"$ (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

$$u(a) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = \sqrt{0.03^2 + 0.10^2} = 0.10 \text{ (")}$$

$$\nu(a) = \frac{u(a)^4}{\frac{u_1^4}{\nu_1} + \frac{u_2^4}{\nu_2}} = \frac{0.10^4}{\frac{0.03^4}{50} + \frac{0.10^4}{31}} = 31$$

D.1.4.2 多面棱体检定误差引入的标准不确定度分量 $u(b)$

校准所使用的多面棱体为 3 等，其检定证书中注明其测量不确定度为 $0.5''$ ， $k=3$ ，估计相对不确定度为 10%，则

$$u(b) = \frac{0.5}{3} = 0.17('')$$

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

D.1.4.3 自准直仪示值误差引入的标准不确定度分量 $u(c)$

校准所使用的自准直仪示值误差（PV 值）为 $0.2''$ （ $\pm 100''$ 范围内），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

$$u(c) = \frac{0.2}{2\sqrt{3}} = 0.06('')$$

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

D.1.5 标准不确定度计算

$$u_c = \sqrt{c^2(a)u^2(a) + c^2(b)u^2(b) + c^2(c)u^2(c)}$$

$$= \sqrt{1^2 \times 0.10^2 + (-1)^2 \times 0.17^2 + (-1)^2 \times 0.06^2} = 0.21('')$$

D.1.6 有效自由度

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u_c^4}{\frac{u^4(a)}{\nu(a)} + \frac{u^4(b)}{\nu(b)} + \frac{u^4(c)}{\nu(c)}} = \frac{0.21^4}{\frac{0.10^4}{31} + \frac{0.17^4}{50} + \frac{0.06^4}{50}} = 96$$

$$t_{0.95}(96) = 2.0$$

D.1.7 扩展不确定度

$$U = t_{0.95}(96) \times u_c = 2.0 \times 0.22 = 0.4('') \quad (p = 95\%)$$

D.2 直接用转台校准

D.2.1 概述

D.2.1.1 测量对象：分辨力为 $0.1''$ ，无绝对零位的 3 级光电轴角编码器（以下简称编码器）。

D.2.1.2 校准用标准器具：转台，示值误差（PV 值）为 $1''$ 。

D.2.1.3 环境条件： $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$ 。

D.2.1.4 测量过程

将被校准编码器转轴与转台转轴通过合适的联轴节连接在一起，并使被校准编码器主轴轴线与转台轴线重合，固定编码器不动部分，记下编码器示值及转台示值 a_1 ， b_1 。

转台转过一个位置，记下编码器示值及转台示值 a_2, b_2 ，转动转台直至测完所有被测点。

分度误差取各校准点误差值中最大值 P 与最小值 V 之差（即 $P - V$ 值）作为校准结果。

D.2.2 数学模型

$$e_i = (a_i - a_1) - (b_i - b_1)$$

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。

$$\begin{aligned} \Delta &= [e_i]_{\max} - [e_i]_{\min} \\ &= [(a_M - a_1) - (b_M - b_1)] - [(a_N - a_1) - (b_N - b_1)] \\ &= (a_M - a_N) - (b_M - b_N) \end{aligned}$$

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；

Δ ——分度误差校准结果。

则合成标准不确定度应为：

$$\begin{aligned} u_c^2 &= c^2(a)u^2(a) + c^2(b)u^2(b) \\ c(a) &= 1; c(b) = -1 \end{aligned}$$

D.2.3 标准不确定度一览表

表 1 标准不确定度一览表

标准不确定度分量	不确定度来源	标准不确定度值	$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$	$ c_i u(x_i)$	自由度
$u(a)$	与编码器读数有关的不确定度	$0.10''$	1	$0.10''$	31
u_1	编码器量化误差	$\frac{0.1}{2} \times \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.03''$			50
u_2	编码器测角重复性	$\frac{0.3}{3} = 0.10''$			31
$u(b)$	转台示值误差	$\frac{1}{2\sqrt{3}} = 0.29''$	-1	$0.29''$	50

D.2.4 不确定度分量估算

D.2.4.1 与编码器读数有关的不确定度 $u(a)$

D.2.4.1.1 被校准编码器量化误差引入的标准不确定度分量 u_1

被校准编码器分辨力为 $0.1''$ ，以等概率出现在半宽为 $0.1''/2 = 0.05''$ 的区间内，估计相对不确定度为 10%，则

$$u_1 = \frac{0.1}{2} \times \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.03 (")$$

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

D.2.4.1.2 被校准编码器测角重复性引入的标准不确定度分量 u_2

3 级编码器测角重复性允许值为 $\Delta_{\text{重}} = 0.3''$ (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

$$u(a) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = \sqrt{0.03^2 + 0.10^2} = 0.10 (")$$

$$\nu(a) = \frac{u(a)^4}{\frac{u_1^4}{\nu_1} + \frac{u_2^4}{\nu_2}} = \frac{0.10^4}{\frac{0.03^4}{50} + \frac{0.10^4}{31}} = 31$$

D.2.4.2 转台示值误差引入的标准不确定度分量 $u(b)$

校准所使用的转台示值误差 (PV 值) 为 $1''$ ，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

$$u(b) = \frac{1}{2\sqrt{3}} = 0.29 (")$$

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

D.2.5 标准不确定度计算

$$\begin{aligned} u_c &= \sqrt{c^2(a)u^2(a) + c^2(b)u^2(b)} \\ &= \sqrt{1^2 \times 0.10^2 + (-1)^2 \times 0.29^2} = 0.31 (") \end{aligned}$$

D.2.6 有效自由度

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u_c^4}{\frac{u^4(a)}{\nu(a)} + \frac{u^4(b)}{\nu(b)} + \frac{u^4(c)}{\nu(c)}} = \frac{0.31^4}{\frac{0.10^4}{31} + \frac{0.29^4}{50}} = 64$$

$$t_{0.95}(64) = 2.0$$

D.2.7 扩展不确定度

$$U = t_{0.95}(64) \times u_c = 2.0 \times 0.32 = 0.6 (") \quad (p = 95\%)$$

附录 E

校准证书格式及内容

E.1 校准证书封面格式

(实验室名称)

校准证书

(校准证书编号)

被校准设备

型号规格

出厂编号

生产厂家

委托方名称及地址

校准地点

校准日期

(实验室签章)

主 管
核验人员
校准人员

本校准证书无校准人员签名及实验室签章无效。

复制本校准证书必须保持其完整性，否则须经签发实验室的书面许可。

E.2 校准证书内容

校准证书的内容应排列有序、清晰，并包括下列内容：

- (1) 标题：校准证书；
- (2) 实验室名称和地址；进行校准的地点；
- (3) 证书编号；页码及总页数；
- (4) 委托方的名称及地址；
- (5) 被校准设备；
- (6) 被校准设备的生产厂、型号规格及编号；
- (7) 校准日期；
- (8) 校准人员、核验人员、主管人员姓名及签名；
- (9) 采用本校准规范的说明及本规范的任何偏离、增加或减少的说明；
- (10) 环境温度情况；
- (11) 校准条件下的测量不确定度；
- (12) 未经实验室许可，不得局部复制校准证书的声明。