

# 中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 1408—202X

---

## 关节臂式坐标测量机校准规范

Calibration Specification for Articulated Arm  
Coordinate Measuring Machines

(征求意见稿)

202X - XX - XX 发布

202X - XX - XX 实施

---

国家市场监督管理总局 发布

# 关节臂式坐标测量机校准规范

Calibration Specification for Articulated Arm  
Coordinate Measuring Machines

**JJF 1408—202X**

代替 JJF1408-2013

**归口单位：**全国几何量长度计量技术委员会

**主要起草单位：**XXX

**参加起草单位：**XXX

XXX

XXX

本规范委托全国几何量长度计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

XXX

XXX

XXX

参加起草人：

XXX

XXX

XXX

# 目 录

引言 .....	II
1 范围 .....	1
2 引用文件 .....	1
3 术语 .....	1
4 概述 .....	1
6 校准条件 .....	3
7 校准项目和方法 .....	3
8 校准结果 .....	9
9 复校时间间隔 .....	9
附录 A 测头标定方法 .....	10
附录 B 校准结果记录表样式 .....	11
附录 C 测量臂空间长度示值误差校准结果不确定度评定示例 .....	14
附录 D 校准证书内页格式 .....	16

# 引言

JJF1071《国家计量校准规范编写规则》、JJF1001《通用计量术语及定义》和 JJF1059.1《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑本规范制定工作的基础性系列规范。

本规范是对 JJF1408-2013《关节臂式坐标测量机校准规范》的修订，修订中参考了 ISO10360-12 Articulated arm coordinate measurement machines, ASME B89.4.22 Methods for Performance Evaluation of Articulated Arm Coordinate Measuring Machines, ISO10360-8 CMMS with optical distance sensors 中的相关项目和方法。

与 JJF1408-2013 相比，除编辑描述性修改、计量文献更新外，主要技术变化如下：

- 适用范围中增加了配置非接触式测量传感器的多轴工业机器人测量系统；
- 术语中增加了测头的定义描述；
- 增加了尺寸误差、形状误差、定位一致性等计量性能及其校准项目和方法；
- 修改了主要校准设备及技术要求；
- 增加了空间长度示值误差校准对测量臂的摆放距离及摆臂姿态的要求。
- 增加了附录 B.3、B.4 校准结果记录表样例；
- 增加了附录 D 校准证书内页格式。

本规范的历次版本发布情况：

——JJF1408-2013

# 关节臂式坐标测量机校准规范

## 1 范围

本规范规定了关节臂式坐标测量机的校准方法，适用于工业上常用的关节臂式坐标测量机(也称便携式三维测量臂、曲臂式坐标测量机，以下简称测量臂)。配有非接触式传感器的多轴工业机器人测量系统等其它原理相同的测量仪器的校准也可参照此规范。

## 2 引用文件

本规范引用下列文件：

ISO10360-12 Articulated arm coordinate measurement machines;

ASME B89.4.22 Methods for Performance Evaluation of Articulated Arm Coordinate Measuring Machine;

ISO10360-8 CMMS with optical distance sensors。

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

### 3.1 球杆 standard bar, ball bar

由一个刚性杆连接的两个或多个直径相同的标准球组成的标准器。

注：球杆中心长度是指标准球球心之间的空间长度。

### 3.2 测头 probe

确定关节臂式坐标测量机的移动部件相对于某测量点的位置的传感器。包括接触式测头和非接触式测头。

(a) 接触式测头：指纯机械地确定移动部件相对于工件的位置的测头；

(b) 非接触式测头：一般指安装在臂上的激光扫描测头。

## 4 概述

测量臂是一种基于旋转关节和转动臂、需手动操作实现测量的坐标测量系统，

利用旋转关节角度编码器的转角信息和转动臂长度，获得仪器坐标系中的测头坐标。

常见的测量臂有5轴、6轴、7轴几种构造，由肩关节、肘关节、腕关节和测头组成，肩关节包括A、B转轴，肘关节包括D或C、D转轴，腕关节包括E、F或E、F、G转轴，测头一般包括接触式刚性测头或非接触式测头，测头安装在最后一个转轴（F或G）上，见图1~图4所示。

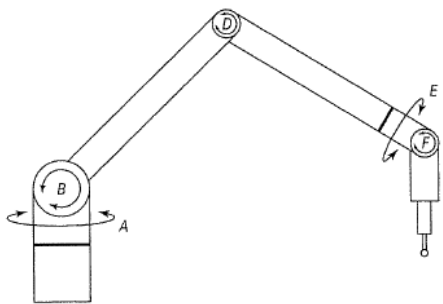


图1 2-1-2构造按A-B-D-E-F旋转轴

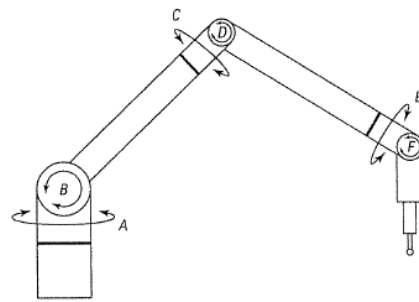


图2 2-2-2构造按A-B-C-D-E-F旋转轴

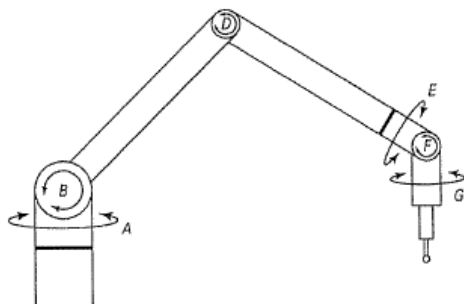


图3 2-1-3构造按A-B-D-E-F-G旋转轴

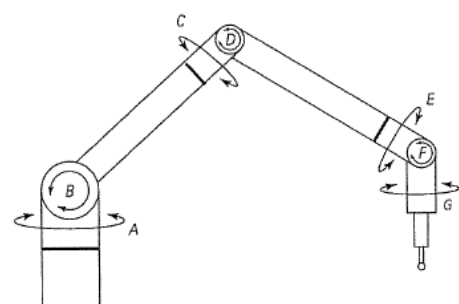


图4 2-2-3构造按A-B-C-D-E-F-G旋转轴

## 5 计量特性

### 5.1 单轴坐标测量一致性 SPAT

测量臂通过最大可能的运动范围给出某个固定点坐标的综合能力。

### 5.2 尺寸误差 $P_{\text{SIZE}}$

测量臂测量小零件尺寸误差的能力。

### 5.3 形状误差 $P_{\text{FORM}}$

测量臂测量小零件形状误差的能力。

#### 5.4 定位一致性（接触式测头 $L_{DIA}$ ，非接触式测头 $L_{DIA,ODS}$ ）

测量臂不同方向测量固定球球心坐标的综合能力。

#### 5.5 空间长度示值误差 $E$

测量臂在有效测量范围内关节不同姿态下测得的空间长度最大示值误差。

### 6 校准条件

#### 6.1 环境条件

6.1.1 温度条件：应根据被校测量臂的测量不确定度或用户约定要求确定。推荐的最低要求为：实验室温度变化应不超过  $1.0\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ ，被校仪器恒温时间应不少于  $4\text{ h}$ ，开机预热时间应不少于  $0.5\text{ h}$ ，标准器在室内恒温时间应不少于  $4\text{ h}$ 。

#### 6.2 主要校准设备及要求

表 1 主要校准设备及要求

序号	校准设备	精度要求	用于校准项目
1	标准锥孔和三面孔 直径：10 mm~15 mm	锥孔锥角的范围为 $60^{\circ}\sim 120^{\circ}$ ，内表面粗糙度不大于 $Ra0.8\mu\text{m}$ ； 测头在锥孔内的尺寸不小于测头球直径的三分之一	单轴坐标测量一致性 尺寸误差 形状误差 定位一致性
	标准球 直径：10 mm~50 mm	直径不确定度 $U$ 不大于 $2\mu\text{m}$ ， $k=2$ 圆度不大于 $2\mu\text{m}$	
2	标准球杆组 测量范围：最大长度应不小于测量臂测量范围的 66%	球杆长度的扩展不确定度 $U\leq 1/3 MPE $ (空间长度最大允许误差)	空间长度示值误差
3	温度传感器	MPE: $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$	标准器温度测量
4	辅助平台	铸铁平台或大理石平台	各项校准项目

注：空间长度示值误差校准可采用满足不确定度和测量范围要求的其它标准器或标准装置，如量块、锥孔杆、以激光干涉仪为主标准器的测量装置等。

### 7 校准项目和方法

校准前需标定测头，标定方法见附录 A。

#### 7.1 单轴坐标测量一致性 SPAT

通常采用锥孔校准法和标准球校准法。

在测量臂测量范围内至少 3 个位置，固定安装校准用工具。推荐的 3 个位置



如图 5 所示。

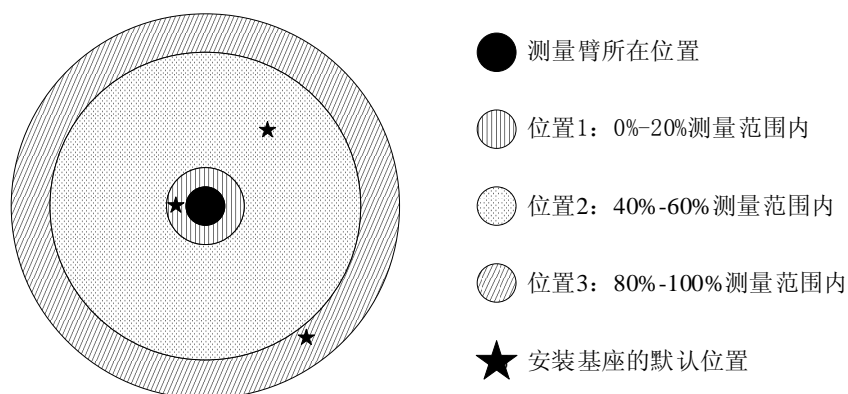


图 5 校准工具 3 个推荐位置

### 7.1.1 锥孔校准法

在每一位置，摆动测量臂肘关节从左方到右方不小于  $180^\circ$ ；同时旋转测量臂腕关节不小于  $90^\circ$ （如图 6 所示），保持测头不脱离校准锥或孔的中心，采集不少于 10 个坐标值为一组测量结果，重复测量三组数据。

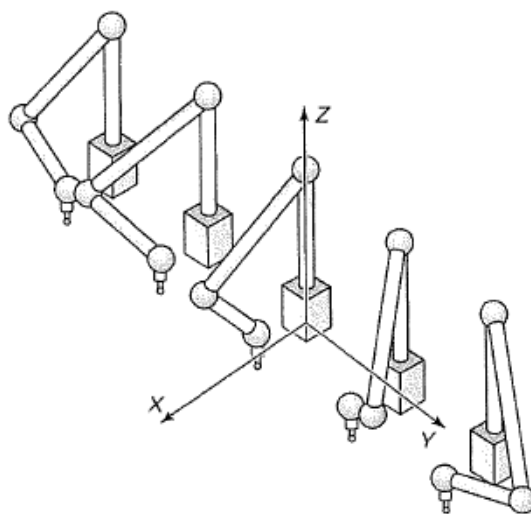


图 6 测量臂摆动方式

每组单轴坐标的最大值与最小值之差的二分之一分别为  $\delta_{x_i}$ 、 $\delta_{y_i}$ 、 $\delta_{z_i}$ （见公式（1）～公式（3）），取最大值为测量结果。

$$\delta_{x_i} = \frac{\max(x_i) - \min(x_i)}{2} \quad (1)$$

$$\delta_{y_i} = \frac{\max(y_i) - \min(y_i)}{2} \quad (2)$$

$$\delta_{z_i} = \frac{\max(z_i) - \min(z_i)}{2} \quad (3)$$

式中：

$x_i$ 、 $y_i$ 、 $z_i$ ——测量点坐标，mm。

### 7.1.2 标准球校准法

在每一位置，摆动测量臂肘关节从左方到右方不小于 180°，同时旋转测量臂腕关节不小于 90°（如图 6 所示），在标准球表面采集不少于 5 个点（4 个点分布在赤道线上，1 个点位于球的一极）拟合球心坐标，重复测量至少 6 次，得到 6 个球心坐标，计算方法同公式（1）～公式（3）。

### 7.2 尺寸误差 $P_{\text{SIZE}}$

在测量臂测量范围内 2 个不同位置（近端和远端）固定安装标准球，采集标准球上 25 个点（25 个点应尽量均匀分布在标准球至少半个球上，点的分布位置按图 7 所示）。

最小二乘法拟合球，分别计算两个位置的拟合球球径  $D_i$  与参考值  $D_{\text{ref}}$  之差，取绝对值的较大值为尺寸误差的测量结果，计算见公式（4）：

$$P_{\text{SIZE}} = \max(|\Delta D_i|)$$

$$\Delta D_i = D_i - D_{\text{ref}} \quad (4)$$

式中： $D_{\text{ref}}$ ——标准球直径参考值，mm；

$D_i$ —— $i$  位置的球径拟合值，mm。

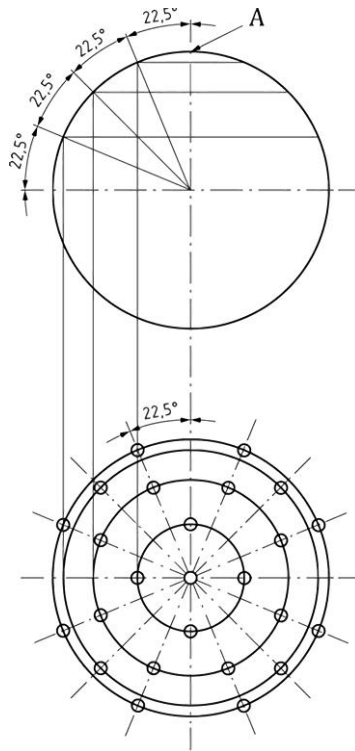


图7 测量点分布

### 7.3 形状误差 $P_{\text{FORM}}$

测量方法同 7.2。

最小二乘法拟合球，分别计算每个位置 25 个测量点至拟合球球心间的距离，取距离的最大值与最小值之差为形状误差的测量结果，计算见公式（5）：

$$P_{\text{FORM}} = \max(R_i) - \min(R_i)$$

$$R_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} \quad (5)$$

式中：  $x_0$ 、 $y_0$ 、 $z_0$ — 最小二乘拟合球球心坐标，mm；

$x_i$ 、 $y_i$ 、 $z_i$ — 25 个测量点坐标，mm；

### 7.4 定位一致性（接触式测头 $L_{\text{DIA}}$ ，非接触式测头 $L_{\text{DIA.ODS}}$ ）

在测量臂测量范围内 2 个不同位置（近端和远端）固定安装标准球。分别在 5 个相互垂直的不同方向测量（如图 8 所示）；每个方向接触式测头测量不少于 5 个点（如图 9 所示），非接触式测头扫描面积不少于三分之一一个球。测量过程中测头方向保持不变。

用最小二乘法拟合每个方向的测量结果，计算任意两个拟合球的球心距，取

最大值为校准结果。计算见公式（6）。

$$L_{\text{DIA}}(L_{\text{DIA,ODS}}) = \max(\Delta D_{ij})$$

$$\Delta D_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (6)$$

式中： $x_i$ 、 $y_i$ 、 $z_i$ 、 $x_j$ 、 $y_j$ 、 $z_j$ — 拟合球球心坐标，mm；

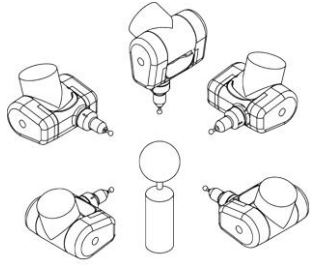


图 8 接触式和非接触式测头的 5 个垂直方向

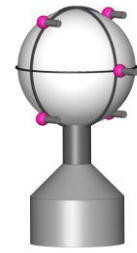
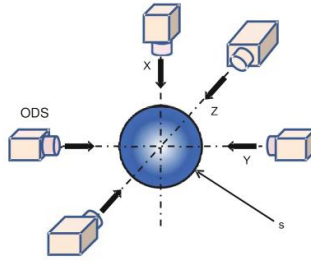


图 9 测量点分布

### 7.5 空间长度示值误差 $E$ （接触式和非接触式测头）

选用至少两个不同长度的标准球杆，最长球杆长度应不小于测量臂测量范围的 66%。

测量臂的球形工作范围分为 8 个相等的象限，球半径等于测量臂测量半径  $R$ ，球心为肩关节的角度编码器的中心，通过球心且与仪器安装平面平行的面为赤道面。

标准球杆的摆放空间姿态为水平、竖直及  $45^\circ$  倾斜。摆放位置以赤道面为界分高低方向。摆放方向是指球杆或其延长线与球的关系，当球杆或其延长线不通过球心时表示为切向，通过球心为径向。摆放距离  $d$  是指从标准球杆中心到仪器中心的距离。

推荐的摆放空间位置见图 10 和表 2。

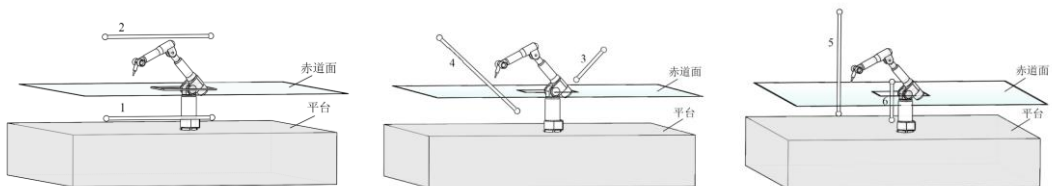


图 10 标准器摆放位置

表2 标准器摆放推荐位置

位置	标准器	象限	摆放姿态	摆放方向	摆放距离 $d$	摆放位置（以赤道面为界）
1	长	1&2	水平	切向	$d \geq \sqrt{(0.8R)^2 - (0.5L_{\text{长}})^2}$	赤道面上方不小于 40% $R$
2	长	6&7	水平	切向	$d \geq \sqrt{(0.8R)^2 - (0.5L_{\text{长}})^2}$	赤道面下方不小于 20% $R$
3	短	1	45 度	径向	$d \leq 0.2R + 0.5L_{\text{短}}$	赤道面上方
4	长	2&6	45 度	切向	$d \geq \sqrt{(0.8R)^2 - (0.5L_{\text{长}})^2}$	两个球分别位于赤道面两侧
5	长	1&5	竖直	切向	$d \geq \sqrt{(0.8R)^2 - (0.5L_{\text{长}})^2}$	两个球分别位于赤道面两侧
6	短	2&6	竖直	切向	$d \leq 0.2R$	两个球分别位于赤道面两侧
每个位置测量完毕，旋转测量臂底座 180°，重复测量						

每次长度测量时，测量臂摆臂姿态（如图 11 摆臂方式）应至少包含 LR、OR、LO 三个组合方式（见表 3），测量标准球上不少于 5 个点（4 个点分布在赤道线上，1 个点位于球的一极），拟合计算标准球杆的中心长度。

空间长度示值误差的计算见公式（7），每一位置独立重复测量 3 次。

$$\Delta L_i = L_i - L_{\text{cal}} \quad (7)$$

式中  $L_{\text{cal}}$ —标准球杆中心长度值，mm；

$L_i$ —每个位置的长度测量值，mm。

取  $|\Delta L_i|$  最大值为校准结果。

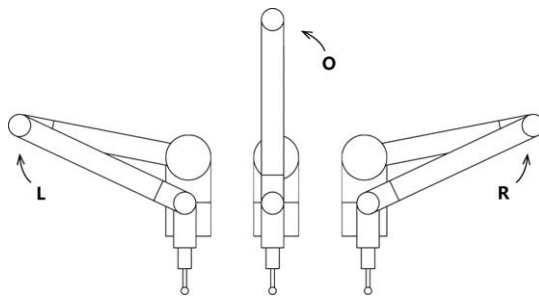


图 11 标准球测量时摆臂方式

表3 测量臂摆臂姿态组合推荐方式

测量次数	1		2		3	
标准球位置	左球	右球	左球	右球	左球	右球
摆臂姿态	L	R	L	O	O	R

## 8 校准结果

经校准的测量臂出具校准证书，并给出各校准项目名称和测量结果以及空间长度示值误差的扩展不确定度。

## 9 复校时间间隔

由于复校时间间隔的长短是由测量臂的使用情况、使用者、测量臂本身质量等诸因素所决定的，因此送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。建议复校间隔一般不超过 1 年。

## 附录 A

## 测头标定方法

用一个最大端直径为 10 mm 至 15 mm 的锥孔, 固定在测量臂测量半径 20%~80% 范围内的任意位置 (一般推荐 50%~60%), 分前后左右四个方向, 每个方向 5 个点, 每组内每个点与点之间的夹角为 20° 左右, 如图 A.1 所示。也可采用厂商提供其他它标定方法, 结果应满足厂商提出的指标要求。

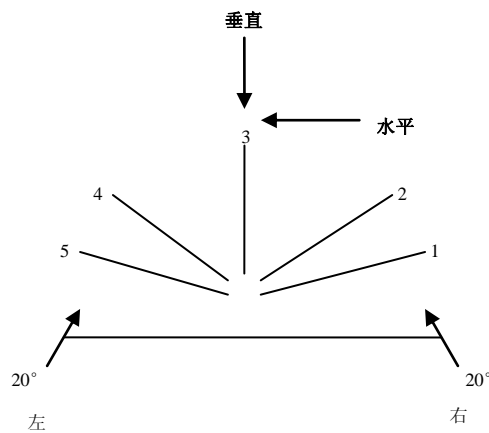


图 A.1 标定测头示意图

## 附录 B 校准结果记录表样式

## B.1 单轴坐标测量一致性结果记录表(锥孔法)

测量次数	测量点序号 No.	位置 1 ( $D \geq 80\%R$ )			位置 2 ( $D = (40\% \sim 60\%)R$ )			位置 3 ( $D \leq 20\%R$ )		
		x-轴 $x_i$ mm	y-轴 $y_i$ mm	z-轴 $z_i$ mm	x-轴 $x_i$ mm	y-轴 $y_i$ mm	z-轴 $z_i$ mm	x-轴 $x_i$ mm	y-轴 $y_i$ mm	z-轴 $z_i$ mm
1	1	766.2948	-251.196	489.8972	553.2310	-251.123	403.1298	496.7545	-397.5781	98.9128
	2	766.2838	-251.213	489.9001	553.2304	-251.130	403.1308	496.7533	-397.5679	98.9115
	3	766.2859	-251.209	489.9089	553.2339	-251.132	403.1341	496.7613	-397.5714	98.9040
	4	766.2929	-251.195	489.9142	553.2448	-251.119	403.1444	496.7815	-397.5660	98.9036
	5	766.2878	-251.199	489.9163	553.2312	-251.120	403.1516	496.7798	-397.5778	98.9054
	6	766.2927	-251.200	489.9078	553.2293	-251.124	403.1338	496.7552	-397.5733	98.9132
	7	766.2856	-251.211	489.9044	553.2244	-251.136	403.1267	496.7488	-397.5698	98.9115
	8	766.2833	-251.211	489.9089	553.2262	-251.129	403.1294	496.7547	-397.5706	98.9066
	9	766.2855	-251.210	489.9095	553.2433	-251.124	403.1388	496.7754	-397.5714	98.9063
	10	766.2855	-251.201	489.9181	553.2403	-251.122	403.1469	496.7727	-397.5722	98.9132
	$\delta_1=(\max-\min)/2$	0.0057	0.0089	0.0104	0.0102	0.0084	0.0124	0.0163	0.0061	0.0048
2	1	766.2844	-251.199	489.9133	553.2260	-251.125	403.1303	475.4290	-397.5425	85.9783
	2	766.2794	-251.211	489.9077	553.2222	-251.134	403.1266	475.4226	-397.5392	85.9771
	3	766.2725	-251.216	489.9146	553.2261	-251.135	403.1313	475.4330	-397.5356	85.9756
	4	766.2834	-251.198	489.9142	553.2433	-251.120	403.1417	475.4565	-397.5323	85.9694
	5	766.2809	-251.200	489.9157	553.2363	-251.123	403.1488	475.4470	-397.5381	85.9777
	6	766.2784	-251.199	489.9141	553.2254	-251.124	403.1413	475.4263	-397.5359	85.9882
	7	766.2730	-251.212	489.9081	553.2177	-251.132	403.1335	475.4225	-397.5316	85.9848
	8	766.2729	-251.209	489.9081	553.2232	-251.129	403.1363	475.4320	-397.5303	85.9811
	9	766.2819	-251.209	489.9086	553.2416	-251.125	403.1426	475.4476	-397.5358	85.9796
	10	766.2850	-251.199	489.9172	553.2367	-251.125	403.1492	475.4480	-397.5398	85.9777
	$\delta_2=(\max-\min)/2$	0.0063	0.0092	0.0047	0.0128	0.0072	0.0113	0.0170	0.0061	0.0094
3	1	766.2816	-251.199	489.9227	-773.329	553.2354	-251.123	496.7638	-397.5812	98.9215
	2	766.2730	-251.215	489.9144	-773.348	553.2302	-251.134	496.7561	-397.5813	98.9178
	3	766.2709	-251.213	489.9219	-773.359	553.2338	-251.137	496.7620	-397.5802	98.9148
	4	766.2760	-251.204	489.9214	-773.359	553.2453	-251.121	496.7859	-397.5753	98.9142
	5	766.2739	-251.201	489.9264	-773.336	553.2350	-251.121	496.7765	-397.5835	98.9169
	6	766.2771	-251.203	489.9189	-773.332	553.2346	-251.126	496.7652	-397.5811	98.9252
	7	766.2722	-251.213	489.9056	-773.328	553.2249	-251.134	496.7590	-397.5760	98.9260
	8	766.2732	-251.209	489.9154	-773.339	553.2222	-251.132	496.7525	-397.5732	98.9209
	9	766.2754	-251.209	489.9177	-773.344	553.2405	-251.130	496.7757	-397.5818	98.9049
	10	766.2757	-251.204	489.9232	-773.363	553.2390	-251.122	496.7736	-397.5813	98.9156
	$\delta_3=(\max-\min)/2$	0.0053	0.0083	0.0104	0.0180	0.0115	0.0080	0.0167	0.0052	0.0105
Max ( $\delta_i$ )	0.0063	0.0092	0.0104	0.018	0.0115	0.0124	0.0170	0.0061	0.0105	
坐标测量一致性校准结果: $\leq 0.017$ mm										



## B.2 单轴坐标测量一致性结果记录表(标准球法)

测量点序号 No.	位置 1 ( $D \leq 20\%R$ )			位置 2 ( $D = (40\% \sim 60\%)R$ )			位置 3 ( $D \geq 80\%R$ )		
	x-轴 $x_i$ mm	y-轴 $y_i$ mm	z-轴 $z_i$ mm	x-轴 $x_i$ mm	y-轴 $y_i$ mm	z-轴 $z_i$ mm	x-轴 $x_i$ mm	y-轴 $y_i$ mm	z-轴 $z_i$ mm
1	-727.412	17.198	138.380	981.775	-308.492	133.001	117.269	-1168.203	131.026
2	-727.405	17.216	138.394	981.759	-308.502	133.006	117.270	-1168.215	130.984
3	-727.395	17.208	138.390	981.771	-308.488	133.003	117.255	-1168.233	130.987
4	-727.383	17.176	138.349	981.777	-308.492	133.012	117.248	-1168.232	130.999
5	-727.372	17.188	138.353	981.766	-308.515	133.012	117.296	-1168.210	130.999
6	-727.401	17.201	138.372	981.771	-308.501	133.017	117.299	-1168.246	131.021
$\delta = (\max - \min) / 2$	0.020	0.020	0.023	0.009	0.013	0.008	0.026	0.022	0.021
Max ( $\delta$ )	0.026 mm								
坐标测量一致性校准结果: $\leq 0.026$ mm									

## B.3 尺寸误差和形状误差校准结果记录表

单位: mm

测量点	位置 1 ( $L \leq 20\%R$ )			$R_i$	位置 2 ( $D \geq 80\%R$ )			$R_i$
	x	y	z		x	y	z	
1	-229.999	103.211	527.832	24.994	290.553	136.118	-252.879	24.994
2	-236.796	101.820	520.118	25.000	289.579	144.877	-252.737	24.991
3	-225.928	101.129	517.547	24.996	298.411	140.708	-251.888	24.993
4	-220.039	100.623	528.337	24.991	282.436	137.415	-251.737	24.995
5	-226.964	101.367	534.959	24.989	284.726	130.526	-250.563	24.992
6	-238.728	101.054	533.207	24.997	293.281	128.416	-250.098	24.995
7	-239.140	98.355	513.788	24.993	301.641	149.147	-248.650	24.990
8	-219.481	96.539	513.757	24.993	288.778	154.181	-248.825	24.991
9	-223.397	97.399	540.471	24.996	275.959	136.333	-248.231	24.992
10	-243.094	98.067	535.713	24.993	284.713	125.492	-247.637	24.995
11	-244.854	98.978	523.778	24.996	299.401	126.788	-247.337	24.996
12	-247.577	95.596	519.078	24.992	308.177	129.071	-241.886	24.995
13	-225.891	94.281	507.806	24.994	308.980	148.785	-242.554	24.991
14	-212.060	94.244	529.339	24.998	292.822	160.270	-242.848	24.998
15	-230.730	94.160	545.609	24.996	272.870	148.477	-243.930	24.993
16	-249.636	91.661	536.347	24.996	282.717	122.036	-243.616	24.994
17	-254.081	86.700	521.399	24.995	284.595	117.498	-237.026	24.993
18	-241.611	89.152	506.418	24.996	304.946	121.409	-236.138	24.995
19	-214.034	89.044	511.507	24.991	312.549	149.112	-235.614	24.992
20	-229.383	88.388	549.101	24.992	291.261	160.651	-242.489	24.999
21	-248.806	88.843	540.385	24.993	272.188	142.371	-245.151	24.990
22	-250.333	80.996	510.620	24.994	289.886	165.083	-229.866	24.997
23	-216.052	79.827	506.376	24.995	268.824	151.150	-234.282	24.991

24	-208.465	80.630	536.733	24.997	277.967	119.279	-234.039	24.993
25	-228.870	79.113	551.187	24.994	302.387	118.300	-230.298	24.994
拟合球心坐标	-231.061	78.286	526.303	/	290.426	140.147	-228.212	/
拟合球直径	49.989			/	49.987			/
$\Delta D_i$	-0.006			/	-0.008			/
$\Delta R_i$	/			0.011	/			0.009
校准结果：尺寸误差 $\leq 0.008$ mm，形状误差 $\leq 0.011$ mm								

## B.4 定位一致性校准结果记录表

单位：mm

拟合球心坐标	位置 1 ( $L \leq 20\%R$ )				位置 1 ( $L \geq 80\%R$ )			
	x	y	z	球心间距最大值	x	y	z	球心间距最大值
O <sub>1</sub>	290.4248	140.1421	-228.2371	0.031	-231.0510	78.2960	526.3071	0.011
O <sub>2</sub>	290.4253	140.1430	-228.2309		-231.0528	78.2940	526.2963	
O <sub>3</sub>	290.4261	140.1476	-228.2188		-231.0524	78.2936	526.3040	
O <sub>4</sub>	290.4252	140.1483	-228.2194		-231.0485	78.2947	526.2976	
O <sub>5</sub>	290.4284	140.1480	-228.2067		-231.0530	78.2949	526.3021	
定位一致性校准结果： $\leq 0.031$ mm								

## B.5 空间长度示值误差校准结果记录表

位置	象限	摆放姿态	摆放位置(距离赤道面) mm	摆放距离 d(mm)	摆放方向	标准器长度 mm	$\Delta L_1$ mm	$\Delta L_2$ mm	$\Delta L_3$ mm	$ \Delta L_i $ 最大值 mm
1	1&2	水平	高 250	300	切向	800	-0.017	-0.015	-0.012	0.017
	3&4						-0.019	-0.016	-0.019	0.019
2	6&7	水平	低 200	300	切向	800	-0.021	-0.015	-0.017	0.021
	5&8						-0.016	-0.018	-0.020	0.02
3	1	45 度	高位	200	径向	500	-0.010	-0.015	-0.019	0.019
	3						-0.018	-0.016	-0.017	0.018
4	2&6	45 度	高低	300	切向	800	-0.014	-0.022	-0.019	0.022
	4&8						-0.019	-0.022	-0.014	0.022
5	1&5	竖直	高低	300	切向	800	-0.011	-0.017	-0.012	0.017
	3&7						-0.017	-0.022	-0.021	0.022
6	2&6	竖直	高低	100	切向	500	-0.014	-0.011	-0.008	0.014
	4&8						-0.016	-0.014	-0.020	0.020
$ \Delta L_i $ 最大值										0.022
空间长度示值误差校准结果： $\leq 0.022$ mm										

## 附录 C

### 测量臂空间长度示值误差校准结果不确定度评定示例

#### C.1 测量方法

将标准球杆分别放置在相对于测量臂不同位置处进行测量。以编号为 W25-S2-21-36039 的测量臂为例进行空间长度示值误差校准结果不确定度的分析。

#### C.2 数学模型

由测量原理和方法，得到数学模型：

$$\Delta L_i = L_i - L_{\text{cal}} \quad (\text{C.1})$$

$L_{\text{cal}}$ —标准球杆的参考值，mm；

$L_i$ —每个位置的长度测量值，mm。

#### C.3 方差和灵敏系数

因为各输入量彼此独立。依不确定度传播率： $u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n [c_i u(x_i)]^2$

由式 (C.1) 得方差： $u_c^2(\Delta L_i) = c_1^2 u^2(L_i) + c_2^2 u^2(L_{\text{cal}})$

式中： $u(L_i)$ —测量重复性引入的标准不确定度分量；

$u(L_{\text{cal}})$ —标准器具引入标准不确定度分量。

灵敏系数

$$c_1 = \frac{\partial(\Delta L_i)}{\partial(L_i)} = 1 \quad c_2 = \frac{\partial(\Delta L_i)}{\partial(L_{\text{cal}})} = -1$$

故： $u_c^2(\Delta L_i) = u^2(L_i) + u^2(L_{\text{cal}})$

#### C.4 标准不确定度分量

标准不确定度一览表（见表 C.1）

表 C.1 测量不确定度来源及说明

输入标准不确定度 $u(x_i)$	不确定度来源	影响量	置信因子 $k_i$	标准不确定度分量 $u_i/\mu\text{m}$
$u_1(L_{\text{cal}})$	标准球杆测量不确定度	6.0 $\mu\text{m}$	2	3.00
$u_2(L_{\text{cal}})$	标准球杆温度变化测量误差	0.1 $^{\circ}\text{C}$	$\sqrt{3}$	0
$u_3(L_{\text{cal}})$	标准球杆温度线膨胀系数测量误差	$0.58 \times 10^{-6}$	$\sqrt{3}$	1.61
$u(L_i)$	测量重复性引入的标准不确定度分量	2.50 $\mu\text{m}$	1	2.50

## C.4.1 标准球杆测量不确定度引入的标准不确定度分量

标准球杆测量不确定度不大于  $6.0 \mu\text{m}$ ,  $k=2$ , 则

$$u_1(L_{cal}) = \frac{6.0}{2} = 3.00 \mu\text{m}$$

## C.4.2 标准球杆温度变化引入的标准不确定度分量

标准球杆的线膨胀系数为  $(0 \pm 1) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , 长度为  $1600\text{mm}$ , 温度测量不确定度优于  $0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$ , 按均匀分布处理, 则

$$u_2(L_{cal}) = \frac{L \times \alpha \times \Delta t}{\sqrt{3}} = \frac{1600 \times 10^3 \times 0 \times 0.1}{\sqrt{3}} = 0$$

## C.4.3 标准球杆的线膨胀系数测量误差引入的标准不确定度分量

标准球杆的线膨胀系数一般为  $(0 \pm 1) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , 在半宽区间内按均匀分布, 线膨胀系数引入的不确定度为  $u(\alpha) = \frac{1 \times 10^{-6}}{\sqrt{3}} = 0.58 \times 10^{-6}$ , 推荐实验室环境温度

$(20 \pm 3) \text{ } ^\circ\text{C}$ , 平均偏离为  $3 \text{ } ^\circ\text{C}$ , 按均匀分布处理, 则:

$$u_3(L_{cal}) = \frac{1600 \times 10^3 \times 3 \times 0.58 \times 10^{-6}}{\sqrt{3}} \approx 1.61 \mu\text{m}$$

## C.4.4 测量重复性引入的标准不确定度分量

用标准球杆 ( $L=1600 \text{ mm}$ ) 在空间不同位置、不同姿态进行重复性测量, 其重复性引入不确定度为:

$$u(L_i) = 2.50 \mu\text{m}$$

## C.5 合成不确定度

$$\begin{aligned} u(L_{cal}) &= \sqrt{u_1^2(L_{cal}) + u_2^2(L_{cal}) + u_3^2(L_{cal}) + u^2(L_i)} \\ &= \sqrt{3.00^2 + 1.61^2 + 2.50^2} \\ &= 4.23 \mu\text{m} \end{aligned}$$

## C.6 扩展不确定度

$$U = 8.46 \mu\text{m} \quad (k=2)$$

测量臂空间长度示值误差在测量范围内的最大允许误差为  $\pm 0.026\text{mm}$ 。此时的测量能力指数:

$$C_m = |MPE| / U = 3.1$$

## 附录 D

## 校准证书内页格式

本关节臂式坐标测量机经校准，结果如下：

1. 单轴坐标测量一致性：≤ \_\_\_\_mm

2. 探测形状误差： $P_{\text{FORM}} \leq$  \_\_\_\_mm

3. 探测尺寸误差： $P_{\text{SIZE}} \leq$  \_\_\_\_mm

4. 定位一致性： $L_{\text{DIA}} \leq$  \_\_\_\_mm

$L_{\text{DIA.ODS}} \leq$  \_\_\_\_mm

5. 空间长度误差： $|E| \leq$  \_\_\_\_mm， $U =$  \_\_\_\_ mm ( $k=2$ )

注：校准证书的内容符合 JJF1071《国家计量校准规范编写规则》的要求。由于各实验室对校准证书有自己的设计，本附录仅建议与校准结果相关部分的内页格式。其中的部分内容可以由于实验室的证书格式不同而在其他部分表述。