

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 1064—2024

坐标测量机校准规范

Calibration Specification for Coordinate Measuring Machines



2024-06-14 发布

2024-12-14 实施

国家市场监督管理总局 发布

坐标测量机校准规范

Calibration Specification for
Coordinate Measuring Machines

JJF 1064—2024
代替 JJF 1064—2010

归口单位：全国几何量长度计量技术委员会

主要起草单位：中国计量科学研究院

广东省计量科学研究院

重庆市计量质量检测研究院

参加起草单位：天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室

本规范委托全国几何量长度计量技术委员会负责解释

主要起草人：

王为农（中国计量科学研究院）

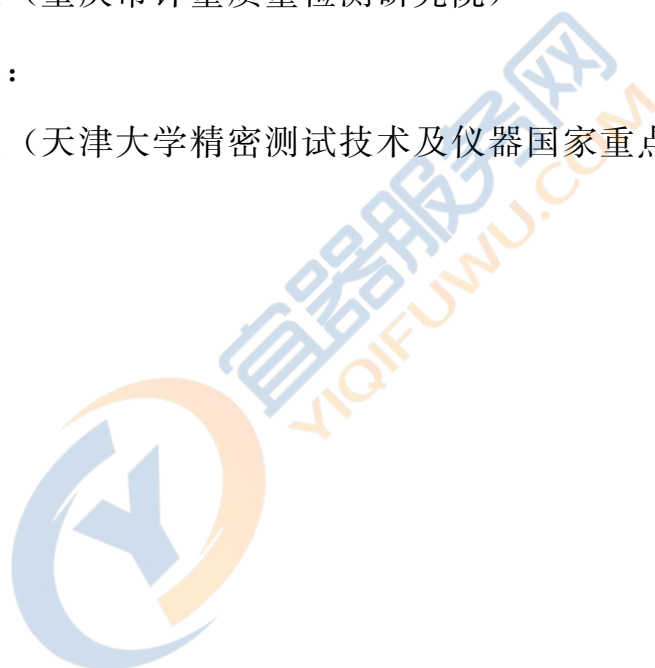
位恒政（中国计量科学研究院）

张 勇（广东省计量科学研究院）

徐 健（重庆市计量质量检测研究院）

参加起草人：

马爱文（天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室）



目 录

引言	(Ⅲ)
1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 术语和定义	(1)
4 概述	(3)
5 计量特性	(3)
5.1 探测误差	(3)
5.2 长度示值误差及长度示值误差重复性	(4)
5.3 四轴误差	(5)
5.4 计量特性的选择	(5)
6 校准条件	(7)
6.1 环境条件	(7)
6.2 探测系统配置	(7)
6.3 操作条件	(7)
6.4 标准器	(7)
7 校准方法	(9)
7.1 探测误差	(9)
7.2 长度示值误差及长度示值误差重复性	(21)
7.3 四轴误差	(25)
8 校准结果的处理	(28)
9 复校时间间隔	(29)
附录 A 大型坐标测量机的补充测量	(30)
附录 B 测量不确定度报告示例	(31)
附录 C 原始记录格式	(32)

引 言

JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001—2011《通用计量术语及定义》和 JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》共同构成本规范修订工作的基础性系列规范。

本规范采用下列标准中规定的坐标测量机计量特性、符号和校准方法：

GB/T 16857.1—2002《产品几何量技术规范(GPS) 坐标测量机的验收检测和复检检测 第1部分：词汇》；

GB/T 16857.2—2017《产品几何技术规范(GPS) 坐标测量机的验收检测和复检检测 第2部分：用于测量线性尺寸的坐标测量机》；

GB/T 16857.3—2009《产品几何技术规范(GPS) 坐标测量机的验收检测和复检检测 第3部分：配置转台的轴线为第四轴的坐标测量机》；

GB/T 16857.4—2003《产品几何量技术规范(GPS) 坐标测量机的验收检测和复检检测 第4部分：在扫描模式下使用的坐标测量机》；

GB/T 16857.5—2017《产品几何技术规范(GPS) 坐标测量机的验收检测和复检检测 第5部分：使用单探针或多探针接触式探测系统的坐标测量机》；

ISO 10360-7：2011《产品几何量技术规范(GPS) 坐标测量机的验收检测和复检检测 第7部分：配置影像探测系统的坐标测量机》[Geometrical product specifications (GPS)—Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM)—Part 7: CMMs equipped with imaging probing systems]；

ISO 10360-8：2013《产品几何量技术规范(GPS) 坐标测量系统的验收检测和复检检测 第8部分：配置光学测距测头的坐标测量机》[Geometrical product specifications (GPS)—Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS)—Part 8: CMMs with optical distance sensors]；

ISO 10360-9：2013《产品几何量技术规范(GPS) 坐标测量系统的验收检测和复检检测 第9部分：配置多种探测系统的坐标测量机》[Geometrical product specifications (GPS)—Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS)—Part 9: CMMs with multiple probing systems]。

但选用计量特性有下列偏离：

——GB/T 16857.4—2003 中仅采用了 T_{HP} 。

——未采用 GB/T 16857.5—2017 中万向探测系统间接标定条件下的探测误差。

——未采用 ISO 10360-7：2011 中的垂直度误差和 Z 轴长度示值误差检测。

本规范采用 GB/T 34881—2017《产品几何技术规范(GPS) 坐标测量机的检测不确定度评估指南》和 GB/T 39518—2020《产品几何技术规范(GPS) 使用单探针和多探针接触式探测系统坐标测量机的检测不确定度评估指南》中对校准结果的不确定度评定方法，以引用文件的形式作为测量不确定度报告示例。

本规范是对 JJF 1064—2010《坐标测量机校准规范》的修订。除编辑性修改以外，

主要的技术变化如下：

- 根据 ISO 10360-2：2009《产品几何技术规范(GPS) 坐标测量机的验收检测和复检检测 第2部分：用于测量线性尺寸的坐标测量机》及其后发布的各部分标准中计量特性符号的变化情况，统一采用了现行有效的 ISO 10360 各部分标准中计量特性的符号，最大允许误差符号采用了新的形式；
- 调整了计量特性的名称，以便区分；
- 给出了坐标测量机配置及对应的校准项目表；
- 规定了单探针探测误差校准中，探针方向与测头方向一致；
- 删除了配备影像探测系统坐标测量机的变焦探测误差；
- 增加了光学测距测头的计量特性校准；
- 增加了多种探测系统的计量特性校准；
- 删除了期间核查的要求。

本规范的历次版本发布情况为：

- JJF 1064—2010；
- JJF 1064—2004；
- JJF 1064—2000。



坐标测量机校准规范

1 范围

本规范适用于基于互相垂直的 3 个直线运动导轨构成的坐标测量机的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1001 通用计量术语及定义

JJF 1071 国家计量校准规范编写规则

GB/T 16857.1 产品几何量技术规范(GPS) 坐标测量机的验收检测和复检检测
第 1 部分：词汇

GB/T 18779.1 产品几何量技术规范(GPS) 工件与测量设备的测量检验 第 1
部分：按规范检验合格或不合格的判定规则

GB/T 34881—2017 产品几何技术规范(GPS) 坐标测量机的检测不确定度评估
指南

GB/T 39518—2020 产品几何技术规范(GPS) 使用单探针和多探针接触式探测
系统坐标测量机的检测不确定度评估指南

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 术语和定义

JJF 1001、GB/T 16857.1 界定的以及下列术语和定义适用于本规范。

3.1 坐标测量机的测量方案 measurement strategy of CMM

使用坐标测量机进行测量时，被测件在测量空间的安装位置，坐标测量机采用的测
头和探针配置、探测点的数目和分布、测量方法（如点位测量、扫描测量、对中测量
等）、环境条件、评定方法等的总和。

3.2 操作条件 operating condition

保证生产商规定的性能参数能够实现的额定操作条件。

注：每个探测系统的操作条件可以通过一个缩写词来识别，其相应的性能值可被引用。通常生
产商会为每种探测系统规定操作条件，但是生产商可以为一个单一探测系统规定几种操作条件，可
以包括：

- 探针和加长杆的长度（如果适用）；
- 安装（万向的或固定的，是否使用探针交换架）；
- 照明（如果适用）；
- 标定程序；
- 滤波设定；
- 允许的表面区域；

——允许的表面条件（粗糙度、反射率）。

3.3 多测头系统 multi-probe system

具有两个及以上测头的探测系统。

3.4 多探测系统 multiple probing systems; MPS

具有两种及以上具有不同操作条件的不同类型探测系统组成的探测系统。

注：

1 一个探测系统组合可能是同一个探测系统或者是不同的探测系统（如在双工模式中的双主轴坐标测量机的情况）。

2 在一个多探测系统中，进行探测组合的不同测头的技术通常是不同的，例如接触测头和影像测头，或两个具有不同特性的接触测头。如果所有测头是接触式的，并具有相同的特性，该探测系统按照多测头系统进行校准更加合理。

3.5 影像探测系统 imaging probing system

利用影像系统生成测量点的探测系统。（见图 1）

注：

1 本术语主要关注可以在垂直于探测系统轴线方向进行测量的影像探测系统。

2 视频或视觉探测系统均是影像探测系统。

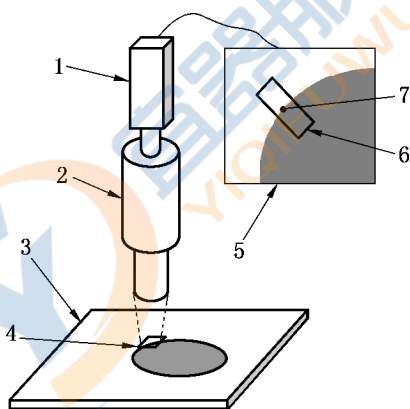


图 1 影像探测系统

1—照相机或其他捕捉被测物表面影像的系统；2—影像探测系统的各种光学元件；
3—被测物；4—视场（物方）；5—视场（像方）；6—测量窗；7—测量点

3.6 影像测头坐标测量机 imaging probe CMM

装备了影像探测系统的坐标测量机。

3.7 视场 field of view; FOV

通过影像探测系统看到的区域。（见图 1）

注：视场的测量范围，或尺寸由最终成像的物方范围进行表述。

3.8 测量窗 measuring window

视场中用于确定测量点（集）的区域。（见图 1）

注：根据不同的影像测头坐标测量机或同一台影像测头坐标测量机的不同应用，测量窗的大小和方向可以有許多非常不同的选择。

3.9 (二维探测系统的) 测量平面 measuring plane (of the 2D probing system)

由二维探测系统视场决定的二维平面。

3.10 光学测距测头 optical distance sensors; ODS

利用光学测距原理的非接触测头部件。

注：典型的测量原理是三角法测距和同轴测距。三角法测距包括线结构光法、莫尔条纹法、狭缝光法、点扫描等，同轴测距包括干涉测量和共焦系统。

3.11 探测误差 probing errors

按照规定的测量方案，利用坐标测量机对圆形、球形或平面标准器进行测量，其形状、位置和尺寸与参考值的差。

注：根据探测系统的配置和误差的不同，用探测系统特点和误差特点命名探测误差的名称，见表 1。

3.12 长度示值误差 length measurement errors

按照规定的测量方案，利用坐标测量机对长度标准器在坐标测量机测量空间的不同方向和位置进行长度测量，其示值与参考值的偏差。

3.13 长度示值误差重复性 repeatability of length measurement errors

探针对主轴偏置 $L=0$ 时，利用坐标测量机得到的相同方向和位置 3 次长度测量示值误差的最大差值。

4 概述

坐标测量机是由机械主机、位移传感器、探测系统、控制系统和测量软件等组成的测量系统。本规范针对的坐标测量机，机械主机采用 3 个互相垂直的直线导轨构成机器坐标系的 3 个轴，控制系统操作测头相对物体的运动，采集被测几何要素表面的点坐标集，通过计算获得几何要素的参数。根据坐标测量机的配置不同，测量可以手动、机动或自动进行。通过增加不同附件，可以提高测量的灵活性和扩大适用范围。通过人机对话，可以在计算机控制下完成全部测量的数据采集和数据处理工作。

配备三维接触测头的坐标测量机构成基本配置的坐标测量机。在基本配置基础上，坐标测量机配置具有扫描功能的三维接触测头、配置影像测头、配置其他一维或二维测头、配置旋转工作台，或者配置上述几种或全部附件，构成多轴、多探测系统的坐标测量机，可以满足对多种多样被测对象和被测参数的测量需求。

本规范通过对基本配置及附加配置的特定坐标测量机尺寸要素测量能力的测试，获得必要信息，为用户评定针对特定任务的测量不确定度提供基础数据。

5 计量特性

5.1 探测误差

不同配置下坐标测量机的探测误差见表 1。

表 1 不同配置下探测误差的名称和符号

配置		符号	名称
基本配置		P_{FTU}	单探针形状探测误差
		P_{STU}	单探针尺寸探测误差
		P_{FTM}	固定多探针形状探测误差
		P_{FTN}	固定多测头形状探测误差
		P_{FTE}	直接标定万向探测系统形状探测误差
		P_{STM}	固定多探针尺寸探测误差
		P_{STN}	固定多测头尺寸探测误差
		P_{STE}	直接标定万向探测系统尺寸探测误差
		P_{LTM}	固定多探针位置探测误差
		P_{LTN}	固定多测头位置探测误差
		P_{LTE}	直接标定万向探测系统位置探测误差
配备接触式扫描测头		T_{HP}	接触式扫描探测误差
二维测头		P_{F2D}	二维测头探测误差
		P_{FV2D}	影像测头探测误差
光学测距测头	点测量式 光学测距测头	$P_{Form. Sph. 1 \times 25; Tr; ODS}$	点测量式光学测距测头形状探测误差
		$P_{Size. Sph. 1 \times 25; Tr; ODS}$	点测量式光学测距测头尺寸探测误差
	面测量式 光学测距测头	$P_{Form. Sph. 1 \times 25; St; ODS}$	面测量式光学测距测头形状探测误差
		$P_{Size. Sph. 1 \times 25; St; ODS}$	面测量式光学测距测头尺寸探测误差
		$P_{Form. Sph. D95\%; St; ODS}$	面测量式光学测距测头探测离散差
		$P_{Size. All. Sph. 1 \times 25; St; ODS}$	面测量式光学测距测头尺寸全探测误差
		$E_{Form. Pla. D95\%; St; ODS}$	面测量式光学测距测头平面形状探测误差
	配旋转测座的 光学测距测头	$L_{Dia. 5 \times 25; Art; ODS}$	面测量式光学测距测头万向位置探测误差
多探测系统		$P_{Form. Sph. n \times 25; ; MPS}$	多探测系统形状探测误差
		$P_{Size. Sph. n \times 25; ; MPS}$	多探测系统尺寸探测误差
		$L_{Dia. n \times 25; ; MPS}$	多探测系统位置探测误差

5.2 长度示值误差及长度示值误差重复性

不同配置下坐标测量机的长度示值误差及长度示值误差重复性名称及符号见表 2。

表 2 不同配置下长度示值误差的名称和符号

配置	符号	名称
基本配置	E_0	偏置 $L=0$ 时的长度示值误差
	R_0	偏置 $L=0$ 时的测量重复性
	E_L	偏置 $L=150\text{ mm}$ 条件下的长度示值误差
二维测头	E_B	二维测头双向长度示值误差(E_{BXY}, E_{BX}, E_{BY})
	R_B	二维测头双向长度示值误差重复性
	E_U	二维测头单向长度示值误差(E_{UXY}, E_{UX}, E_{UY})
	R_U	二维测头单向长度示值误差重复性
	E_{BV}	影像测头双向长度示值误差
	E_{UV}	影像测头单向长度示值误差
光学测距测头	$E_{Bi;Tr;ODS}$	面测量式光学测距测头双向长度示值误差
	$E_{Uni;Tr;ODS}$	面测量式光学测距测头单向长度示值误差

5.3 四轴误差

配备转台作为第四轴的坐标测量机，相关的误差名称和符号见表 3。

表 3 配备转台作为第四轴的误差名称和符号

配置	符号	名称
配备转台	F_R	径向四轴误差
	F_T	切向四轴误差
	F_A	轴向四轴误差

5.4 计量特性的选择

根据不同的配置，坐标测量机校准的计量特性不同。建议根据用户的配置，在表 4 中进行选择，确定开展校准的计量特性。

说明：根据表 4 中“配置”列的内容，“选择”列标记被校坐标测量机的实际情况。对所标记的配置，开展该配置对应的探测误差和长度示值误差及其重复性的校准，校准方法见相关章节。

表 4 坐标测量机配置及校准项目确认表

序号	配置	选择	探测误差	章节号	长度示值误差及其重复性	章节号
1	基本配置					
1.1	单探针测头	☐	P_{FTU} P_{STU}	7.1.1	E_0 R_0	7.2.1

表 4 坐标测量机配置及校准项目确认表 (续)

序号	配置	选择	探测误差	章节号	长度示值误差 及其重复性	章节号
1.2	固定多探针探测系统	☐	P_{FTM} P_{STM} P_{LTM}	7.1.2	E_{150}	7.2.2
1.3	固定多测头探测系统	☐	P_{FTN} P_{STN} P_{LTN}	7.1.2	——	——
1.4	探针直接标定的万向 探测系统	☐	P_{FTE} P_{STE} P_{LTE}	7.1.3	——	——
2	扫描探测系统	☐	T_{HP}	7.1.4	——	——
3 二维测头						
3.1	影像测头	☐	P_{FV2D}	7.1.5	E_{BV} E_{UV}	7.2.3
3.2	二维测头	☐	P_{F2D}	7.1.6	E_B R_B E_U R_U	7.2.4
4 光学测距测头						
4.1	点测量式光学测距 测头	☐	$P_{Form. Sph. 1 \times 25; Tr; ODS}$ $P_{Size. Sph. 1 \times 25; Tr; ODS}$	7.1.7	——	——
4.2	面测量式光学测距 测头	☐	$P_{Form. Sph. 1 \times 25; St; ODS}$ $P_{Size. Sph. 1 \times 25; St; ODS}$ $P_{Form. Sph. D95\%; St; ODS}$ $P_{Size. Sph. All; St; ODS}$ $E_{Form. Pla. D95\%; Tr; ODS}$	7.1.7	$E_{Bi; Tr; ODS}$ $E_{Uni; Tr; ODS}$	7.2.5
4.3	配置万向测量座	☐	$L_{Dia. 5 \times 25; Art; ODS}$	7.1.7	——	——
5	多探测系统	☐	$P_{Form. Sph. n \times 25; MPS}$ $P_{Size. Sph. n \times 25; MPS}$ $L_{Dia. n \times 25; MPS}$	7.1.8	——	——
6	转台	☐	F_R F_T F_A	7.3	——	——

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 环境条件要求

校准结果的温度参考值为 20 ℃。环境温度对 20 ℃ 的偏离及其变化会引入不确定度分量，应在校准结果中的不确定度评定中考虑。

环境条件的允许极限由用户规定。校准时环境条件应控制在允许极限内。

6.1.2 环境温度的测量

校准过程中应测量和记录环境的温度变化情况，包括温度随时间的变化，以及温场的空间分布及其变化。

6.2 探测系统配置

需考虑规定的最大允许误差对应的探测系统配置的极限（探针、探针加长杆、探针方向、探针系统的重量、影像测头物镜放大倍数、照明条件、测量的锥角范围等），由用户规定。

扫描模式探测误差使用探针的标称直径对校准结果有影响，由坐标测量机用户规定。没有特别规定时，采用直径为 3 mm 的探针进行检测。

多探针探测系统误差校准中使用的所有探针均应在许可范围内选择，即应具有相同的材料、相同的探针杆直径和标称针尖偏置长度。当针尖偏置标称长度不相等时，允许标称针尖偏置长度差异不超过 6 mm 或 10%。

6.3 操作条件

坐标测量机运动应平稳，无部件干涉引起的噪声。运动范围达到要求。

应采用制造商的操作说明书中规定的程序对坐标测量机进行必要的准备，包括：

- a) 坐标测量机启动/预热周期；
- b) 探测系统的配置和组装；
- c) 探针针尖和标准球的清洁程序；
- d) 探测系统的标定程序。

6.4 标准器

6.4.1 尺寸实物标准器

校准长度示值误差用的尺寸实物标准器应满足表 5 要求，根据需要选择。

表 5 尺寸实物标准器的要求和适用项目

序号	名称	规格	要求	基本配置	影像测头	面测量式光学测距测头
1	量块	最短长度 30 mm, 最大长度不小于空间对角线的 66%	测量面之间的距离经过校准	+	—	—
2	步距规			+	—	—
3	球列	最大长度不小于空间对角线的 66%	球间距不少于 5 个, 经过校准	+	—	+

表 5 尺寸实物标准器的要求和适用项目（续）

序号	名称	规格	要求	基本配置	影像测头	面测量式光学测距测头
4	线纹尺	最短长度 30 mm,最大长度不小于测量平面对角线的 66%	刻线同侧和对侧间距离经过校准	—	+	—
5	短线纹尺	刻画间隔不大于 0.1 mm		—	+	—

注：当上述实物标准器最大长度无法达到空间对角线的 66% 时，可以考虑采用附录 A 进行补充测量。

6.4.2 形状实物标准器

校准探测误差用的形状实物标准器应满足表 6 要求，根据需要选择。

表 6 三维形状实物标准器的要求和适用项目

序号	名称	规格	要求	探测误差					四轴误差
				基础配置	光学测距测头	二维测头	扫描测头	多探测系统	
1	扫描检测球	$\phi 25\text{ mm}$	标称直径 25 mm；表面粗糙度 R_a 不大于 $0.05\text{ }\mu\text{m}$ ；直径和形状经校准	+	+	+	+	—	—
2	检测球	$\phi 10\text{ mm} \sim \phi 30\text{ mm}$	直径和形状经校准	+	+	+	—	+	—
3	检测球组	$\phi 10\text{ mm} \sim \phi 30\text{ mm}$	形状经校准	—	—	—	—	—	+
4	检测平板	长度见注 1 宽度见注 2	平面度经校准	—	+	—	—	—	—

“+”表示适用，“—”表示不适用。

注：

1 平板长边的长度，应大于线扫描测头扫描线长度，或者面测量式光学测距测头物方视场宽度的两倍以上。

2 平板短边的长度（宽度）：

a) 当采用线扫描或点扫描测头时，应不小于探测用的标准球的直径；

b) 当采用面测量式光学测距测头时，应不小于下列两个尺寸的较小值：探测用的标准球的直径值或面测量式光学测距测头物方视场的宽度。

6.4.3 二维形状实物标准器

二维形状实物标准器应满足表 7 要求，根据需要选择。

表 7 二维形状实物标准器的要求和适用项目

序号	名称	规格	要求	探测误差		
				二维测头 P_{F2D}	影像测头 P_{FV}	多探测 系统
1	圆形靶标	$\phi 20\text{ mm} \sim \phi 50\text{ mm}$	形状经校准	+	—	—
2	圆形靶标	$\phi 0.1\text{ mm} \sim \phi 1\text{ mm}$	形状经校准	—	+	—
3	环规	$\phi 5\text{ mm} \sim \phi 25\text{ mm}$	形状/直径经校准	+	—	+

“+”表示适用，“—”表示不适用。

7 校准方法

7.1 探测误差

7.1.1 单探针形状探测误差 P_{FTU} 、单探针尺寸探测误差 P_{STU}

7.1.1.1 配置

采用平行于测头轴线的探针进行的测试。可以是固定多探针探测系统或万向探测系统中的对应配置。探针针尖偏置长度 l_U 与校准结果密切相关，建议至少选取一个包含坐标测量机生产商建议的长度，也可以在用户常用的范围内，按照表 8 建议选取长度 l_U ，进行校准。

表 8 单探针探测误差校准建议探针针尖偏置长度

单探针针尖偏置长度 l_U
20 mm
30 mm
50 mm
100 mm

7.1.1.2 程序

- 1) 选择符合表 6 要求的检测球，安装在坐标测量机测量空间的任意位置。
- 2) 安装探针针尖，偏置长度 l_U 。
- 3) 测量并记录 25 个点的坐标。这些点应尽量均匀分布在检测球至少半个球上。点的分布位置应由用户规定，如果用户没有规定，建议下列探测分布（见图 2）：
 - 在检测球的极点（探针方向所定义）一点；
 - 极点下 22.5° 四点（均匀分布）；
 - 极点下 45° 八点（均匀分布），相对于前一组点旋转 22.5° ；
 - 极点下 67.5° 四点（均匀分布），相对于前一组点旋转 22.5° ；
 - 极点下 90° （即在赤道上）八点（均匀分布），相对于前一组点旋转 22.5° 。

7.1.1.3 测量结果的处理

使用所有 25 个测量点，计算最小二乘拟合球的球心和半径 r 。分别计算 25 个测量

点到最小二乘拟合球球心的距离 r_i 。

单探针形状探测误差 P_{FTU} ：

$$P_{FTU} = \max(r_i) - \min(r_i) \quad (1)$$

单探针尺寸探测误差 P_{STU} ：

$$P_{STU} = r - r_0 \quad (2)$$

式中：

i —— 测量点序号, $i=1, 2, \dots, 25$;

r —— 对检测球测量 25 个点获得的半径测得值;

r_0 —— 检测球半径的参考值;

$\max(r_i)$ 、 $\min(r_i)$ —— 25 个测量点到最小二乘拟合球球心距离的最大值和最小值。

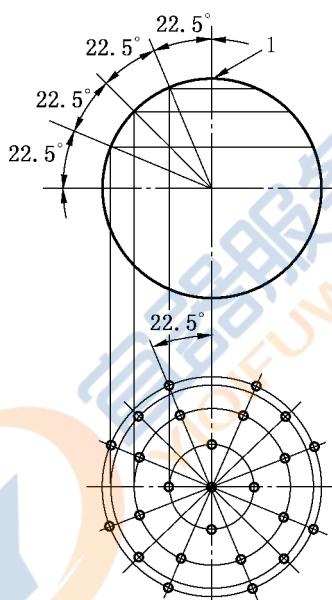


图 2 探测误差测量点分布
1—顶点

7.1.2 固定多探针/多测头探测系统的探测误差 (P_{FTM} 、 P_{STM} 、 P_{LTM} 、 P_{FTN} 、 P_{STN} 、 P_{LTN})

7.1.2.1 配置

使用 5 根不同方向的固定探针测头, 见图 3。

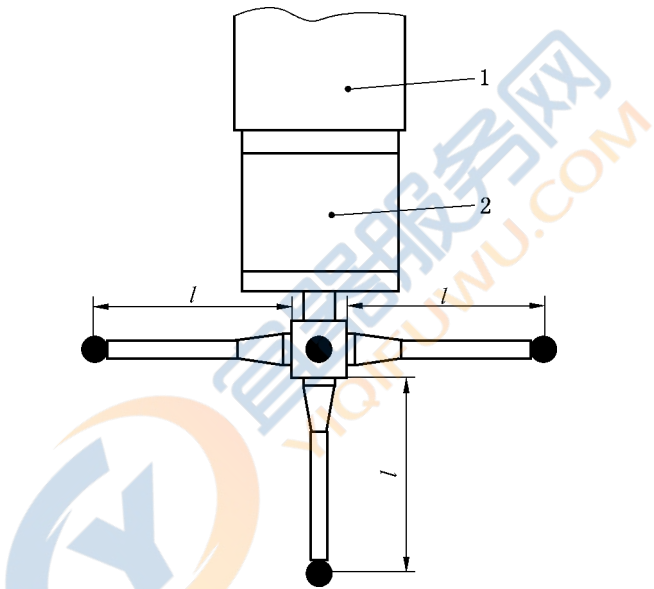
校准结果与探针针尖偏置长度密切相关。

对多探针探测系统, 建议至少选取一个包含坐标测量机生产商建议的一个探针针尖偏置长度 l , 也可以在用户常用的范围内, 按照表 9 建议选取长度 l , 进行测试。

对多测头探测系统, 建议至少选取一个包含坐标测量机生产商建议的探针针尖偏置长度 l_0 , 也可以在用户常用的范围内, 按照表 9 建议选取长度 l_0 , 进行校准。

表 9 多探针/多测头探测系统探测误差校准建议探针针尖偏置长度

多探针针尖偏置长度 l	多测头探测系统针尖偏置长度 l_0
20 mm	——
30 mm	——
50 mm	50 mm
100 mm	100 mm
200 mm	200 mm
400 mm	400 mm



注：为了清晰，5 根探针中的 4 根可见，并仅可见 3 个测杆。

图 3 固定多探针探测系统的探针针尖偏置长度 l

1—探测轴；2—测头

7.1.2.2 程序

1) 选择符合表 6 要求的检测球，安装在坐标测量机测量空间的任意位置，但必须保证所有探针可以正确探测。

2) 多探针组合结构应有一根探针平行于测头轴线，4 根探针位于垂直于测头轴线的平面内，并且相邻探针夹角为 90°。测头到探针联接点的距离应为正常使用坐标测量机探针部件时可能的最小距离（见图 3）。

3) 应按坐标测量机制造商规定的正常操作程序分别对 5 根探针进行标定。

4) 检测球安装时应与探针标定所用标准球的位置不同。

5) 每个探针在检测球上测量 25 点，总共 125 点。

各测量点应在检测球上匀称分布，至少覆盖半个球面。对所有探针，推荐测量点分布为：一点位于检测球极点；四点均布且与极点成 22.5°；八点均布，相对于前者旋转 22.5°且与极点成 45°；四点均布，相对于前者旋转 22.5°且与极点成 67.5°；八点均布，

相对于前者旋转 22.5° 且与极点成 90° (见图 2)。对于各个不同方向的探针, 其极点由探针方向确定。

如果坐标测量机配有探针或测头更换系统, 应进行 5 次探针或测头更换, 每根探针测量前更换一次。但是, 如果更换系统少于 5 个测头或探针库位置, 某些测头或探针库位置要更换 1 次以上, 以实现更换 5 次。

7.1.2.3 测量结果的处理

1) 将每个探针测量的 25 点计算一个最小二乘拟合球, 共获得 5 个球。计算 5 个球的中心坐标 x 、 y 、 z 的范围。这三个坐标范围上的最大值为位置误差 P_{LTM}/P_{LTN} 。

固定多探针探测系统位置误差 P_{LTM} :

$$P_{LTM} = \max[\max(x_i) - \min(x_i), \max(y_i) - \min(y_i), \max(z_i) - \min(z_i)] \quad (3)$$

固定多测头探测系统位置误差 P_{LTN} :

$$P_{LTN} = \max[\max(x_i) - \min(x_i), \max(y_i) - \min(y_i), \max(z_i) - \min(z_i)] \quad (4)$$

其中:

$\max(x_i)$ 、 $\max(y_i)$ 、 $\max(z_i)$ 为各点坐标值 x 、 y 、 z 的最大值;

$\min(x_i)$ 、 $\min(y_i)$ 、 $\min(z_i)$ 为各点坐标值 x 、 y 、 z 的最小值;

$i=1, 2, \dots, 5$ 。

2) 用 5 根探针测得的 125 点计算一个最小二乘拟合球。计算最小二乘球的 125 个半径值的范围, 即球的形状误差, 给出固定多探针/固定多测头形状探测误差 P_{FTM}/P_{FTN} 。类似地, 计算拟合球直径与检测球参考值的偏差, 为固定多探针/固定多测头尺寸探测误差 P_{STM}/P_{STN} 。

固定多探针/固定多测头形状探测误差 P_{FTM}/P_{FTN} :

$$P_{FTM} = \max(r_i) - \min(r_i) \quad (5)$$

$$P_{FTN} = \max(r_i) - \min(r_i) \quad (6)$$

固定多探针/固定多测头尺寸探测误差 P_{STM}/P_{STN} :

$$P_{STM} = r - r_0 \quad (7)$$

$$P_{STN} = r - r_0 \quad (8)$$

式中:

i ——测量点序号, $i=1, 2, \dots, 125$;

r ——对检测球测量 125 个点获得的半径测得值;

r_0 ——检测球半径的参考值;

$\max(r_i)$ 、 $\min(r_i)$ ——125 个测量点到最小二乘拟合球球心距离的最大值和最小值。

7.1.3 万向探测系统 (P_{FTE} 、 P_{STE} 、 P_{LTE})

7.1.3.1 配置

使用万向探测系统的 5 个不同的角度位置, 测量检测球形状、尺寸和位置 (见图 4)。每个角度位置上, 在检测球上测量 25 点, 5 个位置共测 125 点。

对多探针探测系统, 建议至少选取一个包含坐标测量机生产商建议的一个探针针尖偏置长度 l , 也可以在用户常用的范围内, 按照表 9 建议选取长度 l , 进行测试。

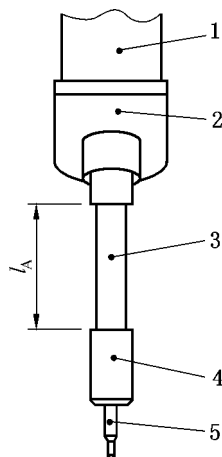


图4 垂直位置时万向探测系统

1—轴端；2—转向测头夹持器；3—测头加长杆；4—测头；5—探针

7.1.3.2 程序

1) 选择符合表6要求的检测球，安装在坐标测量机测量空间的任意位置，但必须保证所有万向探测系统的探针可以正确探测。

2) 将一个20 mm直形短探针（特殊规定除外）和一个测头加长杆安装在万向探测系统上。测头加长杆的长度 l_A 应按下列长度值选择：50 mm、100 mm、200 mm、400 mm。除非有特殊规定，探针和测头加长杆都应选择坐标测量机测头系统允许使用的附件。

3) 依据坐标测量机制造商规定的常规操作程序对万向测头系统的5个角度位置分别标定。这5个位置应包括1个与主轴平行的位置和4个与主轴垂直的位置，每个位置与相邻位置成 90° 。

4) 检测球安装时应与探针标定所用标准球的位置不同。在每一个角度位置对检测球进行25点测量，总共125点。

5) 测点应均布在检测球上，至少覆盖半球。对所有位置建议的采样点方案为：一点位于检测球极点；四点均布且与极点成 22.5° ；八点均布，相对于前者旋转 22.5° 且与极点成 45° ；四点均布，相对于前者旋转 22.5° 且与极点成 67.5° ；八点均布，相对于前者旋转 22.5° 且与极点成 90° （见图2）。对于各个方向位置，其极点由探针方向确定。

6) 如果坐标测量机提供探针或测头更换系统，应对探针进行5次更换。在测量过程中，每个角度位置，都应重新在更换系统上取出和放回探针或测头，总共进行5次。

7.1.3.3 测量结果的处理

1) 每个测量角度的一组25个测点用最小二乘法拟合一个球，共拟合5个球。计算5个球球心坐标 x 、 y 、 z 的范围，其中最大值即是万向探测系统位置探测误差 P_{LTE} 。

万向探测系统位置探测误差 P_{LTE} ：

$$P_{LTE} = \max[\max(x_i) - \min(x_i), \max(y_i) - \min(y_i), \max(z_i) - \min(z_i)] \quad (9)$$

2) 检测球5个测量角度的所有125测点计算最小二乘拟合球，这个拟合球的直径测得值与其参考值之间的差值即是万向探测系统尺寸探测误差 P_{STE} 。计算125个点到最

小二乘球球心的半径范围，即球的形状误差，是万向探测系统形状探测误差 P_{FTE} 。

万向探测系统形状探测误差 P_{FTE} ：

$$P_{\text{FTE}} = \max(r_i) - \min(r_i) \quad (10)$$

万向探测系统尺寸探测误差 P_{STE} ：

$$P_{\text{STE}} = r - r_0 \quad (11)$$

式中：

i ——测量点序号， $i=1, 2, \dots, 125$ ；

r ——对检测球测量 125 个点获得的半径测得值；

r_0 ——检测球半径的参考值；

$\max(r_i)$ 、 $\min(r_i)$ ——125 个测量点到最小二乘拟合球球心距离的最大值和最小值。

7.1.4 接触式扫描探测误差 (T_{HP})

7.1.4.1 原理

在规定的时间内，扫描检测球上 4 个目标扫描平面，利用所有扫描点的测量数据计算最小二乘拟合球，计算球心到各扫描点的距离的变化范围，即形状误差，确定扫描探测误差 T_{HP} 。

7.1.4.2 配置

采用 3 mm 直径球形探针。

7.1.4.3 程序

选择符合表 6 规定扫描检测球。

检测球应不同于探测系统标定的标准球。用户可随意把其放在与标定球不同的任何位置。

仔细清洁检测球和夹具，清除可能会影响测量或检测结果的残留物。牢固安装检测球，使因偏移而产生的误差减至最小。

用户可在限定的范围内随意选择检测球安装的方向和位置。

采集并记录检测球的修正扫描线上扫描点的测量结果。修正扫描线在检测球表面上所规定的 4 个目标扫描平面内（见图 5）。

注：

- 1 目标扫描平面 1 平分球体。
- 2 目标扫描平面 2 与目标扫描平面 1 是相距 8 mm 的平行平面。
- 3 目标扫描平面 2、目标扫描平面 3 与目标扫描平面 4 相互垂直。
- 4 目标扫描平面 3 通过球体的极点。
- 5 目标扫描平面 4 是距离极点 8 mm 的平面。
- 6 α 是探针轴偏离探测轴轴线的角，建议 α 约为 45° 。
- 7 由探针轴线确定检测球的极点和平分球体的面。

建议扫描点的间距为 0.1 mm~0.2 mm。

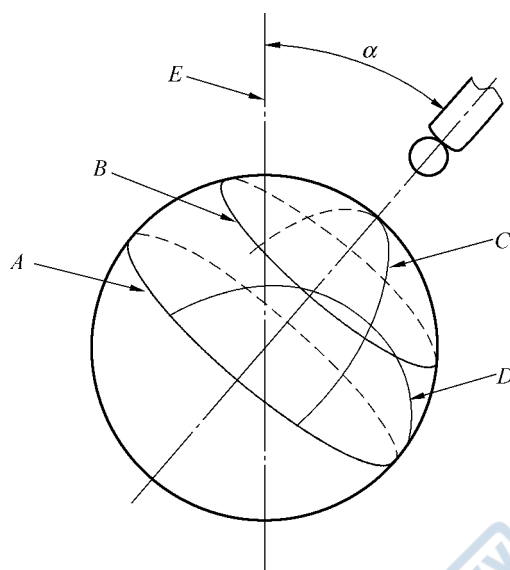


图5 检测球上四个目标扫描平面

 α —探针轴与探测轴间的夹角

A—目标扫描平面1；B—目标扫描平面2；C—目标扫描平面3；

D—目标扫描平面4；E—探测轴的轴线

4 条线扫描的每一个过程都必须从探针离检测球至少 10 mm 处的中间点开始，在规定的速度下沿表面法线方向趋近检测球，沿规定路径进行线扫描，至探针离检测球至少 10 mm 处的中间点结束。

记录从第一条扫描线起始点到第四条扫描线结束点之间的扫描检测时间 τ_{HP} ， τ_{HP} 应不大于 $\tau_{HP,MPE}$ ，必要时调整扫描速度。

注：数据处理应采用与坐标测量机正常测量所采用的同一算法和参数，不应采用附加的滤波或其他优化措施。

7.1.4.4 测量结果的处理

按 4 条修正扫描线测得的全部扫描点计算出最小二乘拟合球的中心。

计算测得的每个扫描点的径向距离 r_i 。

由计算得到的径向距离 r_i 的变化范围，即形状误差，作为出扫描探测误差 T_{HP} ：

$$T_{HP} = \max(r_i) - \min(r_i) \quad (12)$$

式中：

i ——测量点序号， $i=1, 2, \dots$ ；

$\max(r_i)$ 、 $\min(r_i)$ ——所有测量点到最小二乘拟合球球心距离的最大值和最小值。

7.1.5 影像测头探测误差 (P_{FV2D})

7.1.5.1 原理

在坐标测量机不运动的条件下，利用影像测头对视场内标准器的圆周进行测量，确定测量点到最小二乘拟合圆圆心距离的范围，评价影像测头探测误差 P_{FV2D} 是否符合规定的最大允许探测误差 $P_{FV2D,MPE}$ 。

7.1.5.2 程序

根据表 7 选择圆形靶标。靶标直径为视场大小的 10%~30%。

在影像测头的测量平面安装靶标。靶标应安装牢固，以减小晃动引入的误差。

在允许的极限内，用户可以任意选择靶标的安装位置。但应该确保不在探测系统标定的位置。

在靶标的圆周上，通过互不重叠的测量窗测量并记录 25 个点。这些点应尽量均匀分布在靶标的圆周上。测量过程中不移动坐标测量机，不重新对焦。

7.1.5.3 测量结果的处理

使用所有 25 个测量点，计算最小二乘拟合圆。对 25 个测量点分别计算最小二乘半径距离 r_i 。

计算探测误差 P_{FV2D} ，为 25 个最小二乘半径距离的极差：

$$P_{FV2D} = \max(r_i) - \min(r_i) \quad (13)$$

式中：

i ——测量点序号， $i=1, 2, \dots, 25$ ；

$\max(r_i)$ 、 $\min(r_i)$ ——25 个测量点到最小二乘拟合圆圆心距离的最大值和最小值。

7.1.6 二维测头探测误差 (P_{F2D})

7.1.6.1 原理

通过确定测量点到最小二乘拟合圆圆心距离的范围，评价二维测头探测误差 P_{F2D} 是否符合规定的最大允许探测误差 $P_{F2D, MPE}$ 。影像测头也可以作为二维测头使用，这时影像测头通过移动位置，使测量目标点落入测量窗。

7.1.6.2 程序

选择符合表 7 规定的环规或圆形靶标作为标准器。

在二维探测系统的测量平面安装标准器。标准器应安装牢固，以减小晃动引入的误差。

在允许的极限内，用户可以任意选择测头的方向和标准器的安装位置。

测量并记录 25 个点。这些点应尽量均匀分布在标准器的圆周上。

采用影像测头时，不同点之间必须通过移动坐标测量机进行瞄准，测量窗应互不重叠（如图 6 所示），并且分别位于视场的指定区域（如图 7 所示）。每个点的测量允许重新对焦。

7.1.6.3 测量结果的处理

使用所有 25 个测量点，计算最小二乘拟合圆。对 25 个测量点分别计算最小二乘半径距离 r_i 。

计算探测误差 P_{F2D} ，为 25 个最小二乘半径距离的极差：

$$P_{F2D} = \max(r_i) - \min(r_i) \quad (14)$$

式中：

i ——测量点序号， $i=1, 2, \dots, 25$ ；

$\max(r_i)$ 、 $\min(r_i)$ ——25 个测量点到最小二乘拟合圆圆心距离的最大值和最小值。

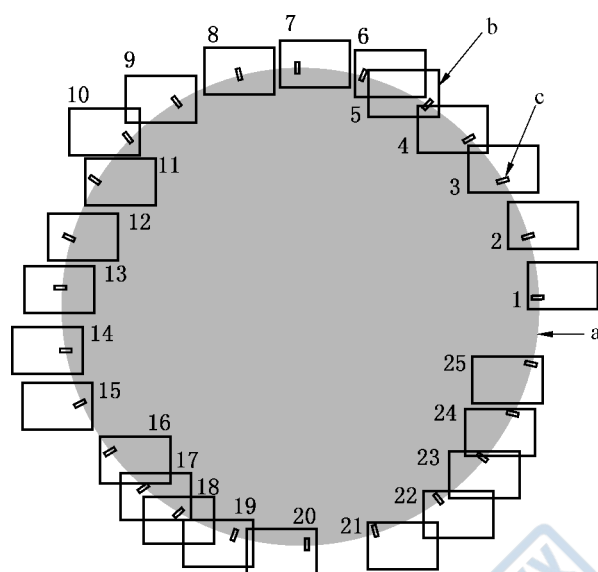


图 6 符合 7.1.2.2 测量方式要求的视场、测量窗位置图
a—图形边缘；b—视场；c—测量窗

21	22	23	24	25
16	17	18	19	20
11	12	13	14	15
6	7	8	9	10
1	2	3	4	5

图 7 测量各点时测量窗在视场中的位置

7.1.7 光学测距测头探测误差 ($P_{\text{Form. Sph. } 1 \times 25; \text{Tr}; \text{ODS}}$ 、 $P_{\text{Size. Sph. } 1 \times 25; \text{Tr}; \text{ODS}}$ 、 $P_{\text{Form. Sph. } 1 \times 25; \text{St}; \text{ODS}}$ 、 $P_{\text{Size. Sph. } 1 \times 25; \text{St}; \text{ODS}}$ 、 $P_{\text{Form. Sph. D95\%; St}; \text{ODS}}$ 、 $P_{\text{Size. Sph. All}; \text{St}; \text{ODS}}$ 、 $E_{\text{Form. Pla. D95\%; St}; \text{ODS}}$ 、 $L_{\text{Dia. } 5 \times 25; \text{Art}; \text{ODS}}$)

7.1.7.1 配置

配置了点测量式光学测距测头的坐标测量机，进行形状探测误差 $P_{\text{Form. Sph. } 1 \times 25; \text{Tr}; \text{ODS}}$ 、尺寸探测误差 $P_{\text{Size. Sph. } 1 \times 25; \text{Tr}; \text{ODS}}$ 评价。

配置了面测量式光学测距测头的坐标测量机，进行形状探测误差 $P_{\text{Form. Sph. } 1 \times 25; \text{St}; \text{ODS}}$ 、尺寸探测误差 $P_{\text{Size. Sph. } 1 \times 25; \text{St}; \text{ODS}}$ ，离散点形状探测误差 $P_{\text{Form. Sph. D95\%; St}; \text{ODS}}$ 、尺寸全探测误差 $P_{\text{Size. Sph. All}; \text{St}; \text{ODS}}$ 。

配置了面测量式光学测距测头的坐标测量机，需要进行平面形状探测误差 $E_{\text{Form. Pla. D95\%; Tr}; \text{ODS}}$ 评价。

当探测系统配备了旋转测座时，增加测试万向位置探测误差 $L_{\text{Dia. } 5 \times 25; \text{Art}; \text{ODS}}$ 。

面测量式光学测距测头测量，需要将测量数据转换为测量点时，测量点的选取应在测量区域内尽量均匀分布，每个测量点在物方视场内的面积不大于 5 mm^2 。当测量点在物方视场内的面积大于 5 mm^2 时，需要在证书中说明。

7.1.7.2 程序

在坐标测量机的测量范围内,用户可以自由选择安装标准球和标准平面的位置。标准球和平面标准器应安装稳固,最大限度地降低震动和不稳定引起的误差。

使用标准球测量时,标准球上的测量区域应包含制造商指定的最大锥度角,即可以看到标准球可测区域的边界。测量点的区域应在证书中给出。

使用平面标准器测量时,测量平面在像方视场应尽量覆盖全部视场,测量点的区域应在证书中给出。

使用平面标准器进行拼接测量时,测量平面在像方视场应尽量覆盖全部视场,测量三个位置,相邻两个位置的物方视场重叠约 1/3。测量点的区域应在证书中给出。

7.1.7.3 测量结果的处理

1) 点测量式光学测距测头探测误差 ($P_{\text{Form. Sph. } 1 \times 25; \text{St; ODS}}$ 、 $P_{\text{Size. Sph. } 1 \times 25; \text{St; ODS}}$)

利用点测量式光学测距测头对检测球进行测量,测量期间光学测距测头相对检测球运动,并对可测量区域内均匀分布的 25 个测量点进行瞄准采样,计算最小二乘拟合球。计算每一个测量点到拟合球心的距离,求最大值与最小值之差,得到点测量式光学测距测头形状探测误差 $P_{\text{Form. Sph. } 1 \times 25; \text{Tr; ODS}}$:

$$P_{\text{Form. Sph. } 1 \times 25; \text{Tr; ODS}} = \max(r_i) - \min(r_i) \quad (15)$$

点测量式光学测距测头尺寸探测误差 $P_{\text{Size. Sph. } 1 \times 25; \text{Tr; ODS}}$:

$$P_{\text{Size. Sph. } 1 \times 25; \text{Tr; ODS}} = r - r_0 \quad (16)$$

式中:

i ——测量点序号, $i=1, 2, \dots, 25$;

r ——对检测球测量 25 个点获得的半径测得值;

r_0 ——检测球半径的参考值;

$\max(r_i)$ 、 $\min(r_i)$ ——25 个测量点到最小二乘拟合球球心距离的最大值和最小值。

2) 面测量式光学测距测头探测误差 ($P_{\text{Form. Sph. } 1 \times 25; \text{St; ODS}}$ 、 $P_{\text{Size. Sph. } 1 \times 25; \text{St; ODS}}$)

利用面测量式光学测距测头对检测球进行测量,测量期间光学测距测头相对检测球静止。在视场内均匀选取 25 个小区域,按照点测量方式采样 25 个测量点,计算最小二乘拟合球的球心坐标及半径。计算每一个点到拟合球心的距离,求最大值与最小值之差,得到面测量式光学测距测头形状探测误差 $P_{\text{Form. Sph. } 1 \times 25; \text{St; ODS}}$:

$$P_{\text{Form. Sph. } 1 \times 25; \text{St; ODS}} = \max(r_i) - \min(r_i) \quad (17)$$

面测量式光学测距测头尺寸探测误差 $P_{\text{Size. Sph. } 1 \times 25; \text{St; ODS}}$:

$$P_{\text{Size. Sph. } 1 \times 25; \text{St; ODS}} = r - r_0 \quad (18)$$

式中:

i ——测量点序号, $i=1, 2, \dots, 25$;

r ——对检测球测量 25 个点获得的半径测得值;

r_0 ——检测球半径的参考值;

$\max(r_i)$ 、 $\min(r_i)$ ——25 个测量点到最小二乘拟合球球心距离的最大值和最小值。

3) 探测离散差 ($P_{\text{Form. Sph. D95\%; St; ODS}}$)

利用面测量式光学测距测头对检测球进行点云测量,删除点云中 5% 的点,计算最

小二乘拟合球球心坐标，计算每一个点到拟合球心的距离，求最大值与最小值之差，作为面测量式光学测距测头探测离散差 $P_{\text{Form. Sph. D95\%;St;ODS}}$ 。

$$P_{\text{Form. Sph. D95\%;St;ODS}} = \max(r_i) - \min(r_i) \quad (19)$$

式中：

i ——测量点序号， $i=1, 2, \dots$ ；

$\max(r_i)$ 、 $\min(r_i)$ ——删除 5% 后所有测量点到最小二乘拟合球球心距离的最大值和最小值。

4) 平面形状探测误差 ($E_{\text{Form. Pla. D95\%;St;ODS}}$)

利用面测量式光学测距测头对平面标准器进行点云测量，删除点云中 5% 的点，计算最小二乘拟合平面，计算每一个点到拟合平面的距离 d_i ，求最大值与最小值之差，作为面测量式光学测距测头平面形状探测误差 $E_{\text{Form. Pla. D95\%;St;ODS}}$ 。

$$E_{\text{Form. Pla. D95\%;St;ODS}} = \max(d_i) - \min(d_i) \quad (20)$$

式中：

i ——测量点序号， $i=1, 2, \dots$ ；

$\max(d_i)$ 、 $\min(d_i)$ ——删除 5% 后所有测量点到最小二乘拟合平面距离的最大值和最小值。

5) 尺寸探测误差 ($P_{\text{Size. Sph. 1}\times 25;\text{St;ODS}}$)

利用面测量式光学测距测头对检测球进行测量，选取 25 个小区域按照点测量方式测量 25 个点，计算最小二乘拟合球直径。则尺寸探测误差 $P_{\text{Size. Sph. 1}\times 25;\text{St;ODS}}$ 就是该球体的直径测得值 D 与直径参考值 D_0 的差值：

$$P_{\text{Size. Sph. 1}\times 25;\text{St;ODS}} = D - D_0 \quad (21)$$

6) 尺寸探测全误差 ($P_{\text{Size. All. Sph. 1}\times 25;\text{St;ODS}}$)

利用面测量式光学测距测头对标准球进行点云测量，利用点云中所有的点，计算最小二乘拟合球直径，检测球直径的测得值 D 与参考值 D_0 的差值作为面测量式光学测距测头尺寸探测全误差 $P_{\text{Size. All. Sph. 1}\times 25;\text{St;ODS}}$ 。

$$P_{\text{Size. All. Sph. 1}\times 25;\text{St;ODS}} = D - D_0 \quad (22)$$

式中：

$\max(d_i)$ 、 $\min(d_i)$ ——删除 5% 后所有测量点到最小二乘拟合平面距离的最大值和最小值。

7) 万向位置探测误差 ($L_{\text{Dia. 5}\times 25;\text{Art;ODS}}$)

利用安装在旋转测座上的面测量式光学测距测头在五个不同角度位置测量标准球，如图 8。每一个角度姿态下，在标准球上选取 25 个小区域按照点测量方式测量 25 点，计算最小二乘拟合球，获得 5 个拟合球。计算出这 5 个拟合球球心的最小外接球 (MCS)，该最小外接球的直径就是万向位置探测误差 $L_{\text{Dia. 5}\times 25;\text{Art;ODS}}$ 。

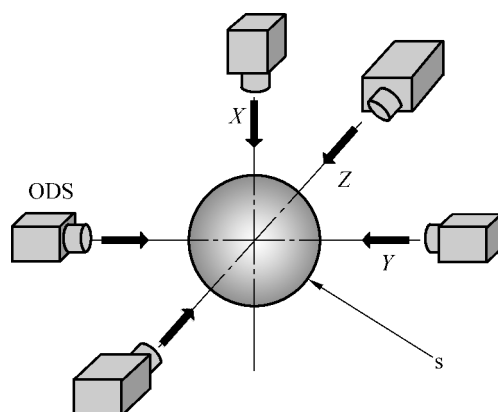


图 8 万向位置探测误差的五个传感器的位置
s—检测球；ODS—光学测距测头

8) 光学测距测头平面形状探测误差 ($E_{\text{Form. Pla. D95\% ; Tr ; ODS}}$)

用表 6 规定的检测平板确定平面形状探测误差值。平板标准器应置于两个位置，如图 9 所示。

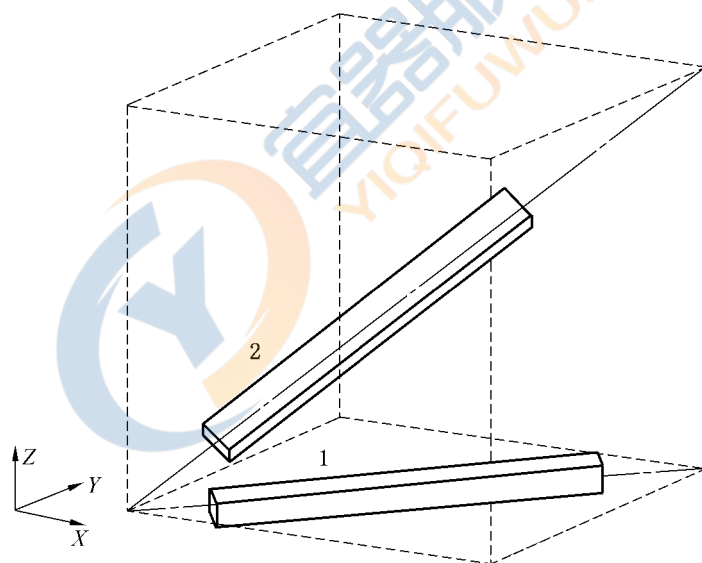


图 9 平板标准器安装的两个位置

以点云方式测量平面，删除点云中 5% 的点，利用 95% 的测量点计算最小二乘拟合平面，并计算这些点到拟合面的距离 d_i ，平面形状误差 $E_{\text{Form. Pla. D95\% ; Tr ; ODS}}$ ：

$$E_{\text{Form. Pla. D95\% ; Tr ; ODS}} = \max(d_i) - \min(d_i) \quad (23)$$

式中：

i ——测量点序号， $i=1, 2, \dots$ ；

$\max(d_i)$ 、 $\min(d_i)$ ——删除 5% 后所有测量点到最小二乘拟合平面距离的最大值和最小值。

7.1.8 多探测系统误差 ($P_{\text{Form. Sph. } n \times 25; \text{MPS}}$ 、 $P_{\text{Size. Sph. } n \times 25; \text{MPS}}$ 、 $L_{\text{Dia. } n \times 25; \text{MPS}}$)

7.1.8.1 原理

采用多探测系统中的每种探测系统测量同一个标准球，每个探测系统在其测量区域内均匀分布地选择 25 个小区域，按照点测量方式测量 25 点。对各个探测系统所获取的测量点采用最小二乘法分别计算拟合球心坐标，所有 n 个球心坐标的最小外接球直径为多探测系统位置探测误差 $L_{\text{Dia. } n \times 25; \text{MPS}}$ 。组合所有 n 个探测系统探测测量所得到的点，采用最小二乘法拟合球计算形状和尺寸，得到多探测系统形状探测误差 $P_{\text{Form. Sph. } n \times 25; \text{MPS}}$ ，以及多探测系统尺寸探测误差 $P_{\text{Size. Sph. } n \times 25; \text{MPS}}$ 。

7.1.8.2 程序

在坐标测量机测量范围内选择 3 个位置进行检测，1 个位置应尽量靠近标准球位置，另 2 个位置可通过移动坐标机的运动轴与标准球的位置发生明显变化，最大的移动距离可达到单轴移动范围的 50%，用户可在机器的各轴的移动范围内选择检测球的放置位置。

对具有 n 个测头的多探测系统，在放置标准球的每个位置，每种探测系统需要在标准球表面获得 25 个测量点，共得到 $25n$ 个测量点。

当使用二维探测系统时，应保证 25 个测量点按一定的间隔均匀分开且不重叠。

7.1.8.3 测量结果的处理

在标准球放置 3 个不同的位置上分别分析测量数据。对共有 n 套测头的多探测系统，每套探测系统采集 25 个探测点，各自进行无约束最小二乘拟合高斯球，由 n 个球心的最小外接球获得位置探测误差 $L_{\text{Dia. } n \times 25; \text{MPS}}$ 。

对 n 套测头获得的所有 $25n$ 个探测点，采用无约束的最小二乘法得到高斯拟合球，高斯拟合球直径与检测球直径参考值的偏离值为尺寸探测误差 $P_{\text{Size. Sph. } n \times 25; \text{MPS}}$ 。

$$P_{\text{Size. Sph. } n \times 25; \text{MPS}} = r - r_0 \quad (24)$$

对 n 套测头获得的所有 $25n$ 个探测点，采用无约束的最小二乘法得到高斯拟合球，各探测点对高斯拟合球的最大半径与最小半径的差值，即为多探测系统形状探测误差 $P_{\text{Form. Sph. } n \times 25; \text{MPS}}$ 。

$$P_{\text{Form. Sph. } n \times 25; \text{MPS}} = \max(r_i) - \min(r_i) \quad (25)$$

式中：

i ——测量点序号， $i=1, 2, \dots$ ；

r ——对检测球测量 25 个点获得的半径测得值；

r_0 ——检测球半径的参考值；

$\max(r_i)$ 、 $\min(r_i)$ ——所有测量点到最小二乘拟合球球心距离的最大值和最小值。

7.2 长度示值误差及长度示值误差重复性

7.2.1 长度示值误差 (E_0) 及长度示值误差重复性 (R_0)

7.2.1.1 原理

针对三维测头，使用平行于主轴并且 0 偏置的测头，使用符合表 5 要求的尺寸实物标准器，通过比较 5 个不同长度的标准器的参考值和指示值，评价坐标测量机是否符合规定的最大允许示值误差 $E_{0, \text{MPE}}$ 及 $R_{0, \text{MPE}}$ 。5 个尺寸实物标准器放在测量空间的 7 个不同的方向或位置，各测量 3 次，共进行 105 次测量。

7.2.1.2 程序

1) 在允许的极限内,用户可以任意选择 5 个不同尺寸实物标准器的 7 个方向和位置。如果没有特殊要求,其中 4 个方位应该在测量空间的 4 个不同对角线方向,见表 10。

表 10 测量空间的不同方向

序号	在测量空间的方向	要求或缺省
1	沿测量空间对角线,从(1,0,0)到(0,1,1)	缺省
2	沿测量空间对角线,从(1,1,0)到(0,0,1)	缺省
3	沿测量空间对角线,从(0,1,0)到(1,0,1)	缺省
4	沿测量空间对角线,从(0,0,0)到(1,1,1)	缺省
5	平行于机器标尺,从(0,1/2,1/2)到(1,1/2,1/2)	用户要求
6	平行于机器标尺,从(1/2,0,1/2)到(1/2,1,1/2)	用户要求
7	平行于机器标尺,从(1/2,1/2,0)到(1/2,1/2,1)	用户要求

注:表中参数基于假设坐标测量机测量空间的坐标 (X, Y, Z) , 在一个角为 $(0, 0, 0)$, 另一个对角为 $(1, 1, 1)$ 。

2) 对所有 7 个不同的位置或方向重复下列步骤:

在每个不同的方向或位置对 5 个尺寸实物标准器各测量 3 次,对外侧或内侧进行双向测量。在标准器的两个工作端面上各测量一个点,尺寸测量值为两点间沿标准器长度方向的距离。

7.2.1.3 测量结果的处理

1) 对 105 个测得值计算与尺寸实物标准器的参考值之差,作为尺寸测量的示值误差 E_0 。

只有在温度修正功能是被测坐标测量机的正常功能时,才允许对这个值进行温度修正。

2) 3 次测量结果之差的最大值,是尺寸测量示值误差的重复性 R_0 。

7.2.2 长度示值误差 (E_{150})

7.2.2.1 配置

使用符合表 5 要求的尺寸实物标准器,采用 5 个均匀分布的长度,装卡在 XZ 平面或 YZ 平面的对角线。2 根针尖偏置长度 150 mm 探针在测头两侧安装,垂直于尺寸实物标准器长度方向。

7.2.2.2 程序

1) 根据生产商的操作条件标定 2 根探针;

2) 分别使用 2 根探针对尺寸实物标准器的 5 个长度各测量 3 次,获得总共 30 个数据。

7.2.2.3 测量结果的处理

计算 30 个测得值与尺寸实物标准器对应尺寸的参考值之差,作为 E_{150} 的校准结果。

7.2.3 影像测头长度示值误差 (E_{BV} 、 E_{UV})

7.2.3.1 原理

使用符合表 5 要求的尺寸实物标准器。将标准器平行于测量平面放置于视场内的任意位置。不移动影像测头，采用瞄准刻线边缘的探测模式测量标准器，通过同侧单边测量的测得值与标准器实际值的差值确定影像测头单边长度示值误差 E_{UV} ；通过不同侧单边测量的测得值与标准器实际值的差值确定影像测头双边长度示值误差 E_{BV} 。

7.2.3.2 程序

选择短线纹尺作为标准器，最短尺寸不大于影像探测系统视场短边的 10%，最大尺寸不小于影像探测系统视场对角线的 66%，共 5 个不同尺寸，其他尺寸应使测量长度间隔基本均匀。

在允许的极限内，用户可以任意选择标准器的安装位置。但应该特别注意确保不在探测系统标定的位置。

标准器放置于影像测头测量平面内的 4 个不同方向或位置。沿影像测头视场的 2 个对角线方向是必须测量的位置。允许用户选择其余的 2 个，默认为坐标测量机的 2 个轴线方向，并位于影像测头的视场中央。

在影像测头的测量平面安装标准器。标准器应安装牢固，以减小晃动引入的误差。

对 5 个尺寸各测量 3 次，对刻线的同侧和至少一个对侧边缘进行测量。尺寸测量值为两点间沿标准器长度方向的距离。

7.2.3.3 测量结果的处理

通过同侧边缘测得值与尺寸实物标准器的参考值之差，计算每一个尺寸测量的单边长度示值误差 E_{UV} 。

通过对侧边缘测得值与尺寸实物标准器的参考值之差，计算每一个尺寸测量的双边长度示值误差 E_{BV} 。

7.2.4 二维测头长度示值误差及其重复性 (E_B 、 R_B 、 E_U 、 R_U)

7.2.4.1 原理

使用符合表 5 要求的尺寸实物标准器。将标准器放置于测量平面内的任意位置。移动测头，采用瞄准刻线边缘的探测模式测量标准器，通过同侧的单边测量的测得值与标准器实际值的差值确定二维测头单边长度示值误差 E_U 。通过对侧的单边测量测得值与标准器实际值的差值确定二维测头双边长度示值误差 E_B 。根据标尺摆放的方向，二维测头长度示值误差可以标记为 E_{UX} 、 E_{UY} 、 E_{UXY} ， E_{BX} 、 E_{BY} 、 E_{BXY} 。

7.2.4.2 程序

1) 在允许的极限内，用户可以任意选择标准器的安装位置。标准器安装应安装牢固，以减小晃动引入的误差。

2) 标准器放置于坐标测量机水平测量区域内的 4 个不同方向或位置。沿水平测量区域的 2 个对角线方向是必须测量的位置。允许用户选择其余的 2 个，默认为坐标测量机的 2 个水平轴线方向，并位于测量区域的中央。

3) 对 5 个尺寸各测量 3 次，分别对同侧和对侧进行测量。测量值为沿标准器长度方向的距离。

7.2.4.3 测量结果的处理

通过测量值与尺寸实物标准器的约定真值之差，计算测得值与参考值的差，作为 E_{UXY} 、 E_{BXY} 、 E_{UX} 、 E_{UY} 、 E_{BX} 、 E_{BY} 的测量结果。

所有测量的每组 3 个测得值之差，是对应的示值误差重复性范围 R_U 、 R_B 。

7.2.5 光学测距测头长度示值误差 ($E_{Bi,Tr,ODS}$ 、 $E_{Uni,Tr,ODS}$)

7.2.5.1 原理

使用符合表 5 要求的尺寸实物标准器。通过比较 5 个不同长度的球心距离或平面距离指示值和参考值，评价坐标测量机光学测距测头长度示值误差。5 个尺寸实物标准器放在测量空间的 7 个不同的方向或位置，各测量 3 次，共进行 105 次测量。

7.2.5.2 程序

1) 在允许的极限内，用户可以任意选择 5 个不同尺寸实物标准器的 7 个方向和位置。如果没有特殊要求，其中 4 个方位应该在测量空间的 4 个不同对角线方向，见表 11。

表 11 测量空间的不同方向

序号	在测量空间的方向	要求或缺省
1	沿测量空间对角线,从(1,0,0)到(0,1,1)	缺省
2	沿测量空间对角线,从(1,1,0)到(0,0,1)	缺省
3	沿测量空间对角线,从(0,1,0)到(1,0,1)	缺省
4	沿测量空间对角线,从(0,0,0)到(1,1,1)	缺省
5	平行于机器标尺,从(0,1/2,1/2)到(1,1/2,1/2)	用户要求
6	平行于机器标尺,从(1/2,0,1/2)到(1/2,1,1/2)	用户要求
7	平行于机器标尺,从(1/2,1/2,0)到(1/2,1/2,1)	用户要求

注：表中参数基于假设坐标测量机测量空间的坐标 (X , Y , Z)，在一个角为 (0, 0, 0)，另一个对角为 (1, 1, 1)。

2) 对所有 7 个不同的位置或方向重复下列步骤：

在每个不同的方向或位置对 5 个尺寸实物标准器各测量 3 次，对平面要素的尺寸实物标准器的对侧进行双向测量。在标准器的两个工作端面上各测量一个点，尺寸测量值为两点间沿标准器长度方向的距离。

在每个不同的方向或位置对 5 个尺寸实物标准器各测量 3 次，对球面要素的尺寸实物标准器，测量球心距。

7.2.5.3 测量结果的处理

对全部 105 个检测量，平面要素尺寸实物标准器的外侧或内侧测得值计算双向长度示值误差 $E_{Bi,Tr,ODS}$ ：

$$E_{Bi,Tr,ODS} = L_{Bi,meas} - L_{Bi,cal} \quad (26)$$

式中：

$L_{Bi,meas}$ —— 双向长度测得值；

$L_{Bi,cal}$ —— 双向长度参考值。

对球面要素的尺寸实物标准器测得值计算单向长度示值误差 $E_{\text{Uni;Tr;ODS}}$:

$$E_{\text{Uni;Tr;ODS}} = L_{\text{Uni. meas}} - L_{\text{Uni. cal}} \quad (27)$$

式中:

$L_{\text{Uni. meas}}$ —— 单向长度测得值;

$L_{\text{Uni. cal}}$ —— 单向长度参考值。

7.3 四轴误差

7.3.1 原理

通过测量安装在旋转工作台上检测球组的两个球心坐标的变化,评价坐标测量机的测量能力是否符合规定的最大允许误差 ($F_{R,MPE}$ 、 $F_{T,MPE}$ 、 $F_{A,MPE}$)。

检测球中心位置在旋转工作台上的工件坐标系中:对于一台理想的四轴坐标测量机,在工作台旋转时,检测球的中心位置应保持恒定。

每个检测球中心由三个方向确定:径向、切向和轴向。

安装在工作台上的每个检测球中心在工作台的不同角位置处进行一系列测量。分别计算每个检测球在三个方向示值误差 (F_R 、 F_T 、 F_A) 的最大和最小测量结果的范围。

7.3.2 程序

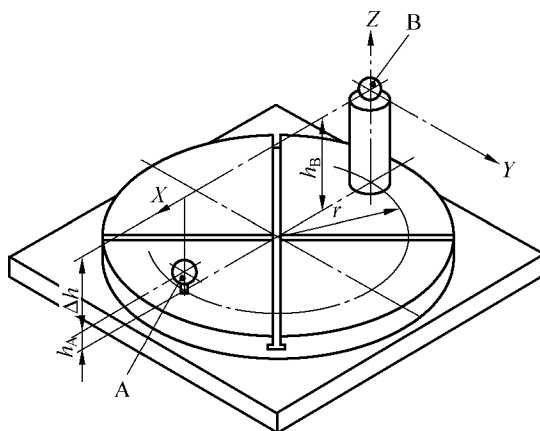
将检测球 A 安装在旋转工作台上半径 r 处 (r 的取值见表 12), 尽量靠近工作台表面。将检测球 B 安装在旋转工作台上, 半径与检测球 A 相同, 尽量在工作台表面对径位置, 高度为 Δh , 见表 12 和图 10。

检测球的安装必须足够牢固, 以避免晃动或弯曲变形引起的误差, 特别是旋转工作台轴线为水平时。

在旋转工作台上定义一个直角工件坐标系 (见图 10), 满足下列条件:

- a) 检测球 B (远离工作台表面) 的中心建立坐标系原点;
- b) 基准轴 Z 必须平行于旋转工作台的轴线;
- c) 第二轴 X 必须在包含基准轴 Z 和检测球 A 中心的平面内。

注: 第三轴 Y 定义正切方向。



注: 图中的 X、Y、Z 符号用于说明与旋转工作台的关系, 不需要与机器轴符号一致。

图 10 检测球在旋转工作台上的位置, 用于验收检测和校准

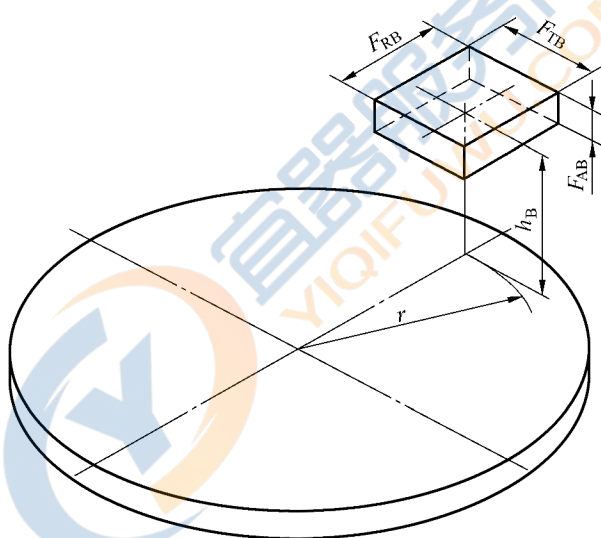
表 12 检测球在旋转工作台上的位置

组合序号	高度差 h/mm	半径 r/mm
1	200	200
2	400	200
3	400	400
4	800	400
5	800	800

注：应选择上述组合之一。

注：表 12 中规定的高度和半径是为了便于比较不同的坐标测量机。

建立工件坐标系后开始测量：在 origin（位置 0）测量检测球 B 中心。用户可以选择旋转工作台的任何非零角位置作为表 13 中的位置 0。



注：为了清晰，检测球 A 的位置未标出。

图 11 配置转台轴线作为第四轴的坐标测量机校准和验收检测中三

个四轴误差 (F_{RB} 、 F_{TB} 、 F_{AB}) 的三维示意图

r —检测球 B 到旋转工作台轴线的半径； h_B —检测球 B 中心到旋转工作台工件装卡表面的高度

旋转工作台顺序旋转到 7 个角位置，在每个位置测量检测球 A 的中心。建议 7 个测量位置包含至少从起始位置起的 720° 的位置。然后旋转工作台反方向旋转到 7 个角位置，测量检测球 A 的中心。当旋转工作台回到起始位置，作为位置 14，同时测量两个检测球。

然后旋转工作台在相同方向旋转到 7 个角位置，并从相反的方向旋转到 7 个角位置。在每个位置测量检测球 B。当旋转工作台旋转到初始位置时，作为位置 28，测量两个检测球（见表 13）。

注：

1 200 mm 的值使 $1'$ 的角度误差约等于 $1\ \mu\text{m}$ 线性误差。为了评价不同测量空间的机器，适合不同机器测量大型工件公差要求的能力（例如：工件大于工作台尺寸），上述测量过程引起的误差与使用的高度和距离近似成比例。

2 在坐标测量机测量范围内，用户可以选择生产商规定范围内的任何旋转工作台的载重、位置 and 方向。

3 有些坐标测量机使用旋转工作台作为扩展测量空间的工具。在这样的坐标测量机上，起始角位置必须保证可以同时测量两个检测球。

表 13 旋转工作台缺省名义角位置

位置 序号	角位置 (°)		坐标测量值					
			检测球 A			检测球 B		
	W_1	W_2	X_A	Y_A	Z_A	X_B	Y_B	Z_B
0	0	0	X_{A0}	$Y_{A0}=0$	Z_{A0}	$X_{B0}=0$	$Y_{B0}=0$	$Z_{B0}=0$
1	75	135	X_{A1}	Y_{A1}	Z_{A1}	——	——	——
2	125	225	X_{A2}	Y_{A2}	Z_{A2}	——	——	——
3	175	315	X_{A3}	Y_{A3}	Z_{A3}	——	——	——
4	385	405	X_{A4}	Y_{A4}	Z_{A4}	——	——	——
5	410	540	X_{A5}	Y_{A5}	Z_{A5}	——	——	——
6	510	630	X_{A6}	Y_{A6}	Z_{A6}	——	——	——
7	820	810	X_{A7}	Y_{A7}	Z_{A7}	——	——	——
8	510	630	X_{A8}	Y_{A8}	Z_{A8}	——	——	——
9	410	540	X_{A9}	Y_{A9}	Z_{A9}	——	——	——
10	385	405	X_{A10}	Y_{A10}	Z_{A10}	——	——	——
11	175	315	X_{A11}	Y_{A11}	Z_{A11}	——	——	——
12	125	225	X_{A12}	Y_{A12}	Z_{A12}	——	——	——
13	75	135	X_{A13}	Y_{A13}	Z_{A13}	——	——	——
14	0	0	X_{A14}	Y_{A14}	Z_{A14}	X_{B14}	Y_{B14}	Z_{B14}
15	-75	-135	——	——	——	X_{B15}	Y_{B15}	Z_{B15}
16	-125	-225	——	——	——	X_{B16}	Y_{B16}	Z_{B16}
17	-175	-315	——	——	——	X_{B17}	Y_{B17}	Z_{B17}
18	-385	-405	——	——	——	X_{B18}	Y_{B18}	Z_{B18}
19	-410	-540	——	——	——	X_{B19}	Y_{B19}	Z_{B19}
20	-510	-630	——	——	——	X_{B20}	Y_{B20}	Z_{B20}

表 13 旋转工作台缺省名义角位置 (续)

位置 序号	角位置 (°)		坐标测量值					
			检测球 A			检测球 B		
	W_1	W_2	X_A	Y_A	Z_A	X_B	Y_B	Z_B
21	—820	—810	——	——	——	X_{B21}	Y_{B21}	Z_{B21}
22	—510	—630	——	——	——	X_{B22}	Y_{B22}	Z_{B22}
23	—410	—540	——	——	——	X_{B23}	Y_{B23}	Z_{B23}
24	—385	—405	——	——	——	X_{B24}	Y_{B24}	Z_{B24}
25	—175	—315	——	——	——	X_{B25}	Y_{B25}	Z_{B25}
26	—125	—225	——	——	——	X_{B26}	Y_{B26}	Z_{B26}
27	—75	—135	——	——	——	X_{B27}	Y_{B27}	Z_{B27}
28	0	0	X_{A28}	Y_{A28}	Z_{A28}	X_{B28}	Y_{B28}	Z_{B28}
四轴误差			F_{RA}	F_{TA}	F_{AA}	F_{RB}	F_{TB}	F_{AB}
注：角位置 W_1 用于带有部分覆盖的旋转工作台的坐标测量机。角位置 W_2 用于带有全覆盖的旋转工作台的坐标测量机。对特定的坐标测量机只使用一列。表中二字线(——)表示对此检测球在此角位置不测量。								

7.3.3 测量结果的处理

使用位置 0 到位置 28 的测量 (检测球 A 的坐标符号为 X_A 、 Y_A 、 Z_A ，检测球 B 的坐标符号为 X_B 、 Y_B 、 Z_B)，计算两个检测球中心的径向、切向和轴向误差的峰-峰值，作为三个四轴误差 (F_R 、 F_T 、 F_A) (见表 13 和图 11)。

注：

- 1 X_A 和 X_B 是检测球 A 和 B 的径向分量，用于计算径向四轴误差 F_{RA} 和 F_{RB} 。
- 2 Y_A 和 Y_B 是检测球 A 和 B 的切向分量，用于计算切向四轴误差 F_{TA} 和 F_{TB} 。
- 3 Z_A 和 Z_B 是检测球 A 和 B 的轴向分量，用于计算轴向四轴误差 F_{AA} 和 F_{AB} 。

8 校准结果的处理

经校准的坐标测量机出具校准证书。校准证书的内容应符合 JJF 1071 的要求。校准结果至少应包含以下内容：

- 校准条件；
- 被校准的计量特性和测得值；
- 测得值的不确定度；
- 需要符合性评定时，根据 GB/T 18779.1 的规定，给出符合性评定结论。

其中，根据坐标测量机的配置不同，证书中给出的计量特性组合有差异，应与原始记录相对应。允许以列表或图形的方式给出测得值。

9 复校时间间隔

坐标测量机应定期进行校准。由于复校时间间隔的长短影响测量数据的质量风险，因此送校单位应根据仪器的使用情况、仪器本身质量等诸因素，自主决定复校时间间隔。



附录 A

大型坐标测量机的补充测量

A.1 当尺寸实物标准器的规格无法满足表 5 的要求时，建议增加实物标准器测量位置/方向，或增加使用激光干涉仪进行位置示值误差测量。

A.2 增加实物标准器测量位置时，实物标准器测量位置/方向的总数一般不应超过 12 个。增加的实物标准器的摆放位置应不与 7.2.1 中规定的测量位置重叠，使实物标准器覆盖测量范围内不同位置。

A.3 当 A.2 的测量覆盖测量范围区域不能满足要求时，建议在 A.2 规定的测量基础上补充进行激光干涉仪进行位置示值误差测量。

执行 7.2.1 测试合格后，使用激光干涉仪进行位置误差测量。

坐标测量机显示的位置坐标与激光干涉仪的示值之差为其位置示值误差。位置示值误差的测量结果不作为合格与否的判断依据，仅作为选择安装实物标准器测量位置/方向的参考。

每条测量线在全长上均匀测量 20 个间隔。在往返行程上分别测量一次。测量的零点设置在测量线的一端，每次测量过程中不得重新设置激光干涉仪或坐标测量机的示值。

当坐标测量机采用计算机误差修正技术，坐标测量机的示值应采用修正后的值。

分析测量数据，找出位置误差最大的 5 个区域，安装实物标准器进行长度示值误差测量，以检验是否满足要求。

附录 B

测量不确定度报告示例

B.1 探测误差 P 测量结果的不确定度计算

见 GB/T 39518—2020。

B.2 尺寸测量示值误差 E 测量结果的不确定度计算

见 GB/T 34881—2017 的 6.2 和 A.3。

B.3 示例：采用陶瓷检测球和钢质量块校准坐标测量机的不确定度

见 GB/T 34881—2017 的 C.3.1。



附录 C

原始记录格式

原始记录/校准证书编号：

坐标测量机校准记录

仪器名称：				
型号规格：				
测量范围：				
设备编号：				
客户名称：				
客户地址：				
联系人及联系方式：				
校准日期：				
校准地点：				
校准人员：		核验人员：		
校准所依据的技术文件(代号、名称) JJF 1064—2024《坐标测量机校准规范》				
校准环境条件：				
温 度： ℃； 相对湿度： %				
校准使用的计量(基)标准装置或主要标准器				
名称	测量范围	不确定度/准确度	证书编号	证书有效期至

一、设备配置及校准项目、测得值汇总

序号	配置	选择	符号	最大允许误差	测得值			
1	基本配置				1	2	3	结果
1.1	单探针测头	☐	P_{FTU}					
			P_{STU}					
			E_0		见二、尺寸测量示值误差测得值 E_0 图			
			R_0		见二、尺寸测量示值误差测得值 R_0 数据表			
1.2	固定多探针探测系统	☐	P_{FTM}					
			P_{STM}					
			P_{LTM}					
			E_{150}		见二、尺寸测量示值误差测得值 E_{150} 图			
1.3	固定多测头探测系统	☐	P_{FTN}					
			P_{STN}					
			P_{LTN}					
1.4	探针直接标定的万向探测系统	☐	P_{FTE}					
			P_{STE}					
			P_{LTE}					
2	扫描探测系统							
2.1	扫描探测误差	☒	T_{HP}					
3	二维测头							
3.1	影像测头 (影像测头做二维测头使用)	☐	P_{FV2D}					
			E_{BV}					
			E_{UV}					
3.2	二维测头	☐	P_{F2D}					
			E_B					
			R_B					
			E_U					
			R_U					

(续)

序号	配置	选择	符号	最大允许误差	测得值			
4	光学测距测头							
4.1	点测量式光学测距测头	☐	$P_{\text{Form. Sph. } 1 \times 25; \text{Tr; ODS}}$					
			$P_{\text{Size. Sph. } 1 \times 25; \text{Tr; ODS}}$					
4.2	面测量式光学测距测头	☐	$P_{\text{Form. Sph. } 1 \times 25; \text{St; ODS}}$					
			$P_{\text{Size. Sph. } 1 \times 25; \text{St; ODS}}$					
			$P_{\text{Form. Sph. D95\%; St; ODS}}$					
			$P_{\text{Size. Sph. All; St; ODS}}$					
			$E_{\text{Form. Pla. D95\%; Tr; ODS}}$					
			$E_{\text{Bi; Tr; ODS}}$					
			$E_{\text{Uni; Tr; ODS}}$					
4.3	配置万向测量座	☐	$L_{\text{Dia. } 5 \times 25; \text{Art; ODS}}$					
5	多探测系统							
5.1	多探测系统误差	☐	$P_{\text{Form. Sph. } n \times 25; \text{; MPS}}$					
			$P_{\text{Size. Sph. } n \times 25; \text{; MPS}}$					
			$L_{\text{Dia. } n \times 25; \text{; MPS}}$					
6	转台							
6.1	四轴误差	☐	F_{R}					
			F_{T}					
			F_{A}					

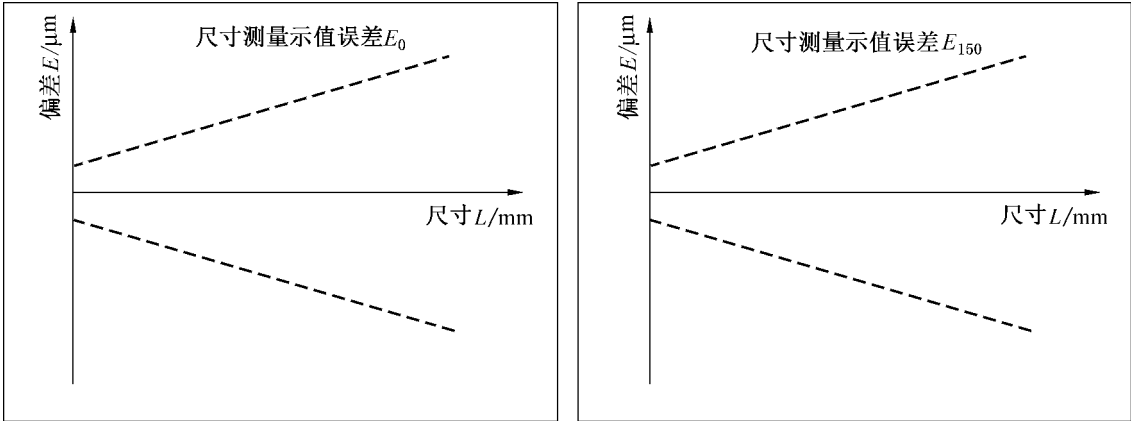
二、测量示值误差测得值 E_0 、 R_0

方向	参考尺寸	偏差 D_1	偏差 D_2	偏差 D_3	$E_{0, \text{MPE}}$	R_0
X						
Y						

(续)

方向	参考尺寸	偏差 D_1	偏差 D_2	偏差 D_3	$E_{0,MPE}$	R_0
Z						
S1						
S2						
S3						
S4						

$R_0 = \max(D_i) - \min(D_i) \quad (i = 1, 2, 3)$



三、尺寸测量示值误差测得值 E_{150}

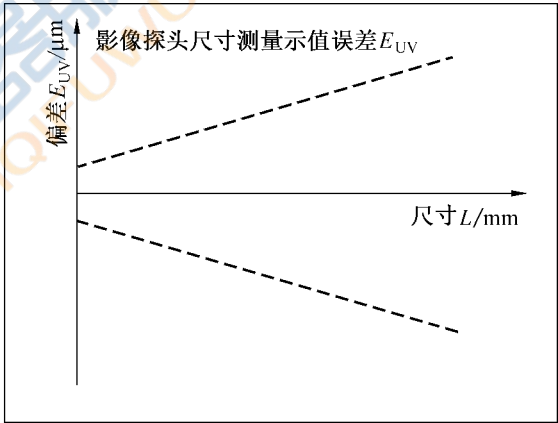
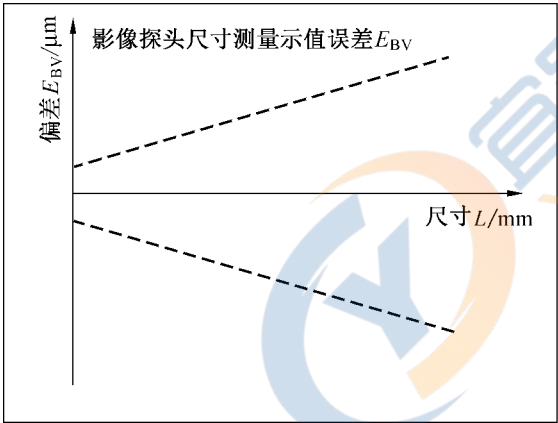
方向	参考尺寸	测得值 1	测得值 2	测得值 3	$E_{150, \text{MPE}}$
XZ1 (YZ1)					
XZ2 (YZ2)					

四、影像测头长度示值误差 (E_{BV} 、 E_{UV})

方向	参考尺寸	测得值 1	测得值 2	测得值 3	$E_{150, \text{MPE}}$
X					
Y					

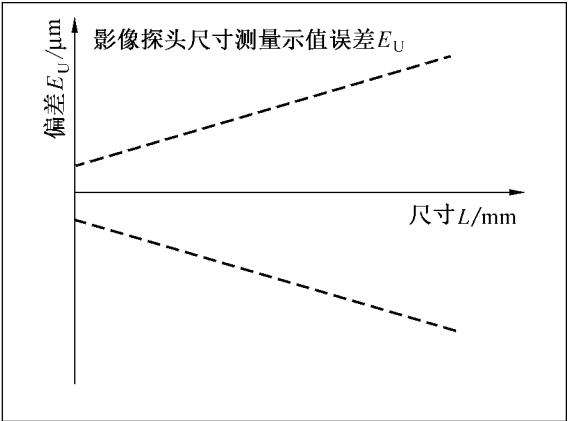
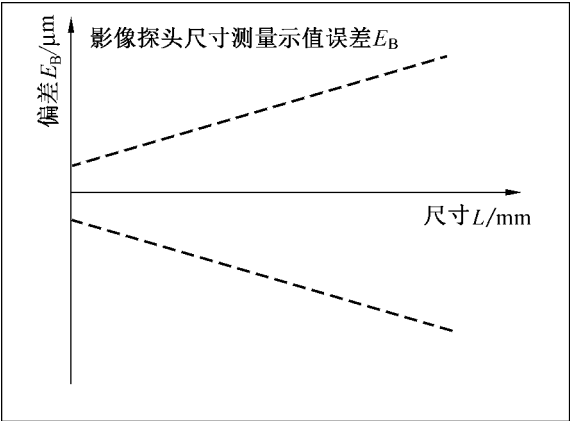
(续)

方向	参考尺寸	测得值 1	测得值 2	测得值 3	$E_{150\text{.MPE}}$
XY1					
XY2					



五、二维测头/影像测头长度示值误差（ E_B 、 E_U ）

方向	参考尺寸	测得值 1	测得值 2	测得值 3	$E_{150,MPE}$
X					
Y					
XY1					
XY2					



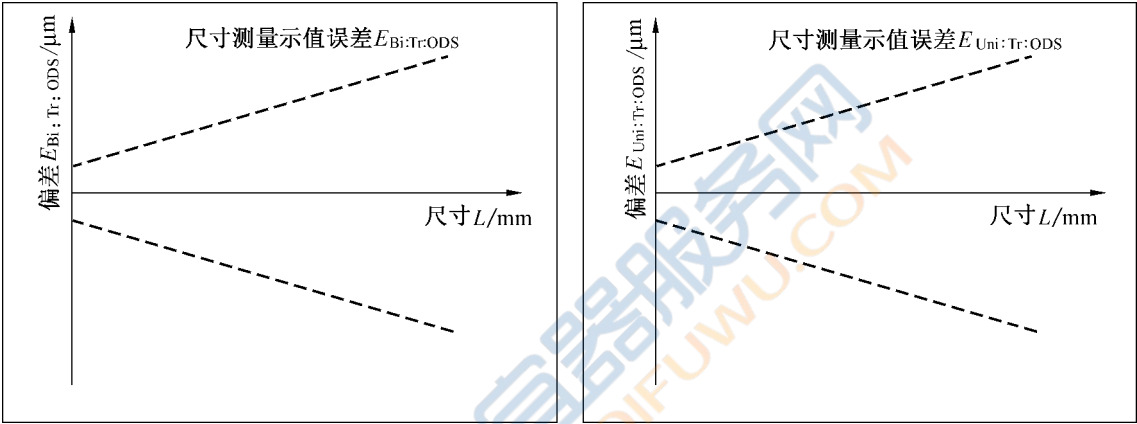
六、光学测距测头长度测量示值误差测得值 ($E_{Bi;Tr;ODS}$ 、 $E_{Uni;Tr;ODS}$)

方向	参考尺寸	偏差 D_1	偏差 D_2	偏差 D_3	$E_{0,MPE}$	R_0
X						
Y						
Z						
S1						
S2						
S3						

(续)

方向	参考尺寸	偏差 D_1	偏差 D_2	偏差 D_3	$E_{0,MPE}$	R_0
S4						

$R_0 = \max(D_i) - \min(D_i) \quad (i = 1, 2, 3)$



七、旋转工作台缺省名义角位置

位置 序号	角位置 (°)		坐标测量值					
			检测球 A			检测球 B		
	W_1	W_2	X_A	Y_A	Z_A	X_B	Y_B	Z_B
0	0	0	X_{A0}	$Y_{A0} = 0$	Z_{A0}	$X_{B0} = 0$	$Y_{B0} = 0$	$Z_{B0} = 0$
1	75	135	X_{A1}	Y_{A1}	Z_{A1}	—	—	—
2	125	225	X_{A2}	Y_{A2}	Z_{A2}	—	—	—
3	175	315	X_{A3}	Y_{A3}	Z_{A3}	—	—	—
4	385	405	X_{A4}	Y_{A4}	Z_{A4}	—	—	—
5	410	540	X_{A5}	Y_{A5}	Z_{A5}	—	—	—
6	510	630	X_{A6}	Y_{A6}	Z_{A6}	—	—	—
7	820	810	X_{A7}	Y_{A7}	Z_{A7}	—	—	—
8	510	630	X_{A8}	Y_{A8}	Z_{A8}	—	—	—
9	410	540	X_{A9}	Y_{A9}	Z_{A9}	—	—	—
10	385	405	X_{A10}	Y_{A10}	Z_{A10}	—	—	—
11	175	315	X_{A11}	Y_{A11}	Z_{A11}	—	—	—

(续)

位置 序号	角位置 (°)		坐标测量值					
			检测球 A			检测球 B		
	W_1	W_2	X_A	Y_A	Z_A	X_B	Y_B	Z_B
12	125	225	X_{A12}	Y_{A12}	Z_{A12}	——	——	——
13	75	135	X_{A13}	Y_{A13}	Z_{A13}	——	——	——
14	0	0	X_{A14}	Y_{A14}	Z_{A14}	X_{B14}	Y_{B14}	Z_{B14}
15	—75	—135	——	——	——	X_{B15}	Y_{B15}	Z_{B15}
16	—125	—225	——	——	——	X_{B16}	Y_{B16}	Z_{B16}
17	—175	—315	——	——	——	X_{B17}	Y_{B17}	Z_{B17}
18	—385	—405	——	——	——	X_{B18}	Y_{B18}	Z_{B18}
19	—410	—540	——	——	——	X_{B19}	Y_{B19}	Z_{B19}
20	—510	—630	——	——	——	X_{B20}	Y_{B20}	Z_{B20}
21	—820	—810	——	——	——	X_{B21}	Y_{B21}	Z_{B21}
22	—510	—630	——	——	——	X_{B22}	Y_{B22}	Z_{B22}
23	—410	—540	——	——	——	X_{B23}	Y_{B23}	Z_{B23}
24	—385	—405	——	——	——	X_{B24}	Y_{B24}	Z_{B24}
25	—175	—315	——	——	——	X_{B25}	Y_{B25}	Z_{B25}
26	—125	—225	——	——	——	X_{B26}	Y_{B26}	Z_{B26}
27	—75	—135	——	——	——	X_{B27}	Y_{B27}	Z_{B27}
28	0	0	X_{A28}	Y_{A28}	Z_{A28}	X_{B28}	Y_{B28}	Z_{B28}
四轴误差			F_{RA}	F_{TA}	F_{AA}	F_{RB}	F_{TB}	F_{AB}
注：角位置 W_1 用于带有部分覆盖的旋转工作台的坐标测量机。角位置 W_2 用于带有全覆盖的旋转工作台的坐标测量机。对特定的坐标测量机只使用一列。表中二字线(——)表示对此检测球在此角位置不测量。								

$F_{RA} = \max(F_{RA}, F_{RB}) \quad F_{TA} = \max(F_{TA}, F_{TB}) \quad F_{AA} = \max(F_{AA}, F_{AB})$