



中华人民共和国工业和信息化部 兵工民品计量技术规范

JJF（兵工民品） 0022—2023

X 射线三维尺寸测量机校准规范

Calibration Specification for X - ray Three Dimensional Size Measuring Machine

（报批稿）

20XX—XX—XX 发布

20XX—XX—XX 实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

X射线三维尺寸测量机 校准规范

Calibration Specification for X - ray
Three Dimensional Size Measuring
Machine

JJF（兵工民品） 0022—2023

归 口 单 位：中国兵器工业标准化研究所

主要起草单位：中国兵器工业标准化研究所

参与起草单位：深圳市计量质量检测研究院

北京北方车辆集团有限公司

本规范技术条文委托起草单位负责解释

本规范主要起草人：

靳京民（中国兵器工业标准化研究所）

詹高伟（深圳市计量质量检测研究院）

关静宇（中国兵器工业标准化研究所）

参加起草人：

郭继平（深圳市计量质量检测研究院）

伍沛刚（深圳市计量质量检测研究院）

姚泽龙（深圳市计量质量检测研究院）

陈照聚（深圳市计量质量检测研究院）

杜 勤（北京北方车辆集团有限公司）

目 录

引言 (II)

1 范围..... (1)

2 引用文件..... (1)

3 术语和计量单位..... (1)

4 概述..... (1)

5 计量特性..... (2)

6 校准条件..... (2)

7 校准项目和校准方法..... (3)

8 校准结果表达..... (6)

9 复校时间间隔..... (6)

附录 A 原始记录格式..... (7)

附录 B 校准证书内页格式..... (8)

附录 C 长度测量误差测量不确定度评定示例.....(10)

引 言

本规范依据 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》编写。

本规范为首次发布。

X 射线三维尺寸测量机校准规范

1 范围

本校准规范适用于具有三维几何尺寸测量功能的线阵扫描方式和锥束扫描方式的 X 射线三维尺寸测量机的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1071—2010 国家计量校准规范编写规则

JJF 1059.1-2012 测量不确定度评定与表示

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 术语和计量单位

下列术语和定义适用于本规范。

3.1

探测形状误差 probing form error

P_F

在 X 射线三维尺寸测量机扫描重构的标准球数据的球面上均匀采集若干个测量点（ ≥ 25 个），采用最小二乘法进行拟合计算，得到的高斯拟合球的半径变化量。

3.2

探测尺寸误差 probing size error

P_s

在 X 射线三维尺寸测量机扫描重构的标准球数据的球面上均匀采集若干个测量点（ ≥ 25 个），采用最小二乘法进行拟合计算，得到的高斯拟合球直径与标准球直径校准值之间的差值。

4 概述

4.1 原理

通过 X 射线穿透被测样品进行断层扫描，由探测器接收并产生一系列投影图像，经过滤波除噪和重构软件计算处理后得到断层扫描数据，通过分析软件阈值设置和可视化，可以查看体积数据和二维切片，并且通过测量工具实现尺寸测量的非接触式测量。

4.2 结构

X 射线三维尺寸测量机主要是由 X 射线管、转台、被测样品、X 射线探测器以及重构三维软件构成, 典型 X 射线三维尺寸测量机结构示意图见图 1 所示。

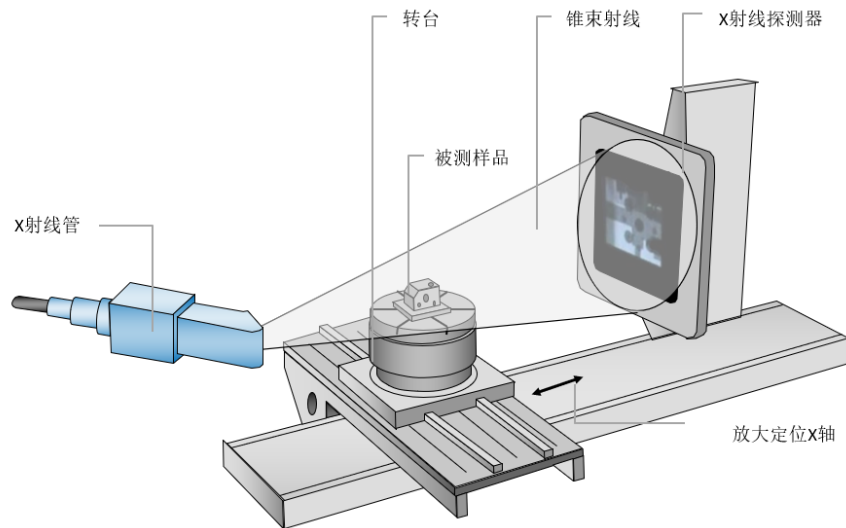


图 1 典型 X 射线三维尺寸测量机结构示意图

5 计量特性

5.1 探测形状误差 (P_F)

5.2 探测尺寸误差 (P_S)

5.3 长度测量误差 (E)

注: 对于多球标准器, 长度测量误差即为两个校准球的球心距测量误差。

6 校准条件

6.1 环境条件

环境条件应满足以下要求:

- a) 温度: $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$;
- b) 相对湿度: $< 60\%$;
- c) 实验室无灰尘、振动、噪音等影响。

6.2 测量标准及其他设备

6.2.1 标准器和主要校准设备应经过计量校准并经确认, 标准器和其他设备的技术要求见表 1。

6.2.2 主要校准设备可选用多种类型材料制成, 推荐使用红宝石。支承球的圆棒可采用低密度材料制成, 应避免使用对 X 射线具有强烈吸收能力材料, 如钢铁等。

6.2.3 推荐使用表 1 所列标准器及其他设备, 也可以使用其他满足技术要求的校准设备进行校准。

表 1 标准器及其他设备

序号	校准项目	标准器	
		名称	技术要求
1	探测形状误差 (P_F)	红宝石标准球	表面粗糙度 R_a 不大于 $0.05\ \mu\text{m}$; 直径和形状误差经过校准, 形状误差 MPE: $1.0\ \mu\text{m}$; 直径不应大于 X 射线三维尺寸测量机测量空间对角线的 20%。
2	探测尺寸误差 (P_S)	红宝石标准球	
3	长度测量误差 (E)	多球标准器	最小球心距小于 $30\ \text{mm}$; 最大球心距大于 X 射线三维尺寸测量机测试位置空间对角线长度的 66%, 其校准结果的扩展不确定度 $U \leq 1\ \mu\text{m}$, $k=2$ 。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

校准项目见表 2。

表 2 校准项目

序号	校准项目	校准方法条款
1	探测形状误差	7.2.2
2	探测尺寸误差	7.2.3
3	长度测量误差	7.2.4

7.2 校准方法

7.2.1 校准前准备

7.2.1.1 X 射线三维尺寸测量机启动/预热时间不小于 15 分钟;

7.2.1.2 X 射线管真空度符合仪器说明书要求、功率能够稳定输出;

7.2.2 探测形状误差

7.2.2.1 选定量程内的任意两个放大倍率, 两个放大倍率需覆盖 X 射线三维尺寸测量机量程的 66%。每个放大倍率下选取视窗内上中下三个位置放置标准球, 上下位置到视窗边沿距离需要保证大于 $5\ \text{mm}$, 测量探测形状误差, X 射线三维尺寸测量机探测误差测量位置示意图见图 2。

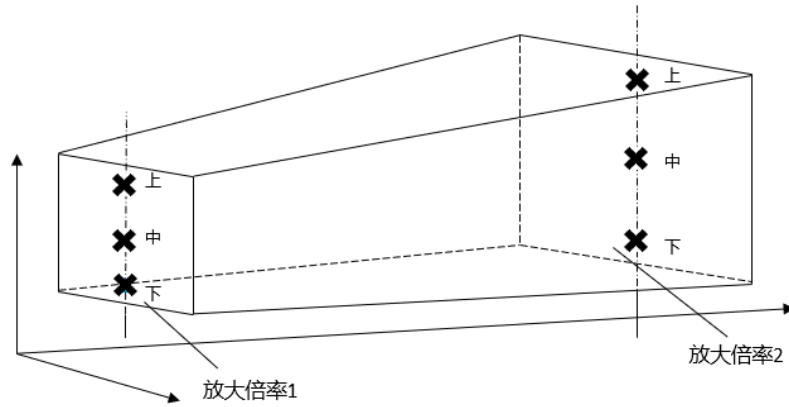


图2 X射线三维尺寸测量机探测误差测量位置示意图

7.2.2.2 通过三维软件在每个测量位置球面均匀分布采集不小于 25 个测量点,探测采点分布如图 3 所示,利用最小二乘法拟合高斯球面。计算各测量位置选定球冠表面数据点与球心之间的距离 R_i ,其中最大距离 $R_{\max,i}$ 与最小距离 $R_{\min,i}$ 之差即为该位置的探测形状误差 $P_{F,i}$,按公式 (1) 计算。

$$P_{F,i} = R_{\max,i} - R_{\min,i} \quad (1)$$

式中:

$P_{F,i}$ —— i 位置的重构球面的探测形状误差, mm;

$R_{\max,i}$ —— i 位置的重构球面测量点与高斯拟合球心的最大距离, mm;

$R_{\min,i}$ —— i 位置的重构球面测量点与高斯拟合球心的最小距离, mm。

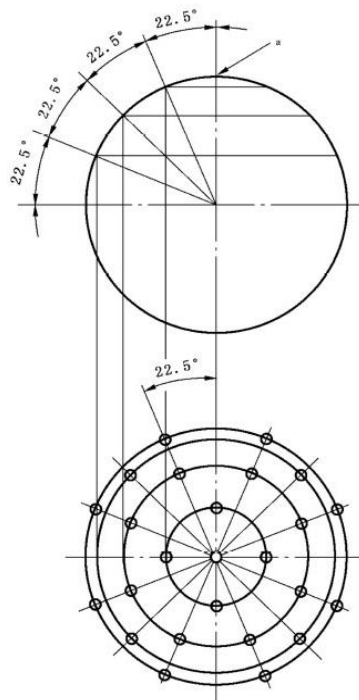


图3 探测采点分布

7.2.2.3 取六个位置中的探测形状误差的最大值作为最终测量结果。校准探测形状误差过程中使用的测量策略和评定设置,如:球面采集测量点数,测量点分布方式和拟合方式,应记录在原始记录中,如果使用到粗差去除和滤波设置,也应记录在原始记录中,原始记录格式见附录 A。

7.2.3 探测尺寸误差

7.2.3.1 按照 7.2.2.1 的方法执行,测量探测尺寸误差,其放置位置与探测形状误差的放置位置一致。

7.2.3.2 通过三维软件在每个测量位置球面均匀分布采集不小于 25 个测量点,探测采点分布见图 3,利用最小二乘法拟合高斯球面。各测量位置高斯拟合球的直径测量值 $D_{a,i}$ 与红宝石球的直径校准值 $D_{r,i}$ 之差即为该位置的探测尺寸误差 $P_{S,i}$,按公式 (2) 计算。

$$P_S = D_a - D_r \quad (2)$$

式中:

P_S ——探测尺寸误差, mm;

D_a ——各测量位置高斯拟合球的直径测量值, mm;

D_r ——标准球的直径校准值, mm。

7.2.3.3 取六个位置中的探测尺寸误差的最大值作为最终测量结果。校准探测尺寸误差过程中的测量策略和评定设置,如球面采集测量点数,测量点分布方式和拟合方式,如果使用到粗差去除和滤波设置应记录在原始记录中,原始记录格式可参见附录 A。

7.2.4 长度测量误差

7.2.4.1 通过调整放大倍率设置旋转台的位置,将多球标准器安装固定在旋转台中心,选择两个不同的放大倍率位置测量长度测量误差。

7.2.4.2 测量空间七个方位,各个空间测量方位的分布见表 2,长度测量误差的空间测量方位见图 4,每个方位至少五组长度尺寸,共计不少于 35 组长度尺寸;每组测量三次,最小的长度尺寸不超过 30 mm;最大的一组长度尺寸大于测试位置空间对角线长度的 66%。

7.2.4.3 使用 X 射线三维尺寸测量机扫描得到多球标准器的原始数据。

表 2 测量空间方位

方位序号	测量空间方位描述
1	沿空间对角线从点 $(R, 0^\circ, 0)$ 到 $(R, 180^\circ, H)$
2	沿空间对角线从点 $(R, 0^\circ, 0)$ 到 $(0, 0^\circ, H)$
3	沿空间对角线从点 $(R, 0^\circ, H/2)$ 到 $(R, 180^\circ, H)$
4	沿 Z 轴从点 $(0, 0^\circ, 0)$ 到 $(0, 0^\circ, H)$
5	沿 Z 轴从点 $(R, 0^\circ, 0)$ 到 $(R, 0^\circ, H)$
6	沿半径方向从点 $(R, 0^\circ, H/2)$ 到 $(R, 180^\circ, H/2)$
7	沿半径方向从点 $(R, 0^\circ, H)$ 到 $(R, 180^\circ, H)$

注：圆柱坐标系 (ρ, θ, z) 中圆柱测量空间对角点假设为 $(R, 0^\circ, 0)$ 和 $(R, 180^\circ, H)$ ，半径 $\rho=R$ ，全高度 $z=H$ 。

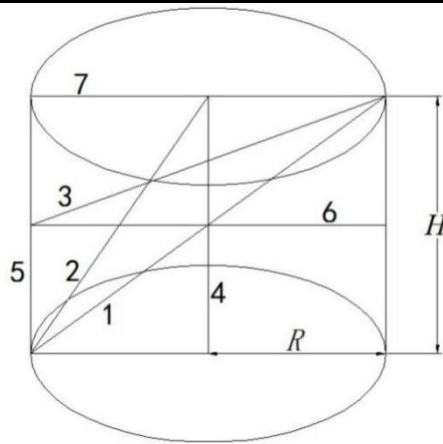


图 4 长度测量误差的空间测量方位

7.2.4.4 对 X 射线三维尺寸测量机扫描后得到多球标准器的原始数据进行重构，对 35 个球心距相关联的球面进行采集测量点并利用最小二乘法进行拟合求出球心坐标，计算球心距 $L_{k,1}, L_{k,2}, L_{k,3}, \dots, L_{k,34}, L_{k,35}$ 。则各个位置的长度测量误差 E_i ，按公式 (3) 计算。

$$E_i = SD_i = L_{k,i} - L_{r,i} \quad (3)$$

式中：

E_i ——第 i 个位置长度测量误差，mm；

SD_i ——第 i 对球两球球心距测量误差，mm；

$L_{k,i}$ ——标准球第 i 对球两球心距离的测量值，mm；

$L_{r,i}$ ——标准球第 i 对球两球心距离的校准值，mm。

7.2.4.5 校准长度测量误差过程中的测量策略和评定设置，如球面采集测量点数，测量点分布方式和拟合方式，如果使用到粗差去除和滤波设置应记录在原始记录中，原始记录格式见附录 A。

8 校准结果表达

X射线三维尺寸测量机经校准后出具校准证书，校准证书应符合JJF 1071-2010中5.12的要求，校准证书格式见附录B。测量不确定度的评定应符合 JJF 1059.1《测量不确定度评定与表示》的要求，长度示值误差测量不确定度评定示例见附录C。

9 复校时间间隔

由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等因素所决定，因此复校时间间隔由用户根据使用情况自行确定，一般不超过12个月。

附录 A

原始记录格式

委托方名称		委托方地址	
被测设备		制造者	
型号		编号	
依据文件		校准地点	
温度		湿度	

计量标准器信息

标准器名称	测量范围	技术指标	溯源证书	有效期

1 探测误差

1.1 探测误差校准参数设置

X 射线三维尺寸测量机扫描参数设置				测量策略	
参数名称	单位	放大倍率 1	放大倍率 2	采集点数	
管电压	kV			测点分部	
管电流	μA			拟合方法	
投影数量	pcs			滤波设置	
体素尺寸	μm			粗差去除	

1.2 探测误差测量结果

（单位：mm）

	位置一			位置二		
位置	上	中	下	上	中	下
探测形状误差						
探测尺寸误差						

测量结果的扩展不确定度： $U =$ μm ， $k=2$ 。

2 长度测量误差

2.1 长度测量误差校准参数设置

X 射线三维尺寸测量机扫描参数设置				测量策略	
参数名称	单位	放大倍率 1	放大倍率 2	采集点数	
管电压	kV			测点分部	
管电流	μA			拟合方法	
投影数量	pcs			滤波设置	
体素尺寸	μm			粗差去除	

2.2 长度测量误差测量结果

测量结果由计算机自动输出报告。

测量结果的扩展不确定度： $U = \quad \mu\text{m}$ ， $k=2$ 。

校准人：

核验人：

原始记录编号：

附录 B

校准证书内页格式

1 探测误差

1.1 探测误差校准参数设置

X 射线三维尺寸测量机扫描参数设置				测量策略	
参数名称	单位	放大倍率 1	放大倍率 2	采集点数	
管电压	kV			测点分部	
管电流	μA			拟合方法	
投影数量	pcs			滤波设置	
体素尺寸	μm			粗差去除	

1.2 探测误差测量结果：（单位：mm）

	放大倍率 1			放大倍率 2		
位置	上	中	下	上	中	下
探测形状误差						
探测尺寸误差						

测量结果的扩展不确定度： $U = \quad \mu\text{m}$ ， $k = 2$ 。

2 长度测量误差

2.1 长度测量误差校准参数设置

X 射线三维尺寸测量机扫描参数设置				测量策略	
参数名称	单位	放大倍率 1	放大倍率 2	采集点数	
管电压	kV			测点分部	
管电流	μA			拟合方法	
投影数量	pcs			滤波设置	
体素尺寸	μm			粗差去除	

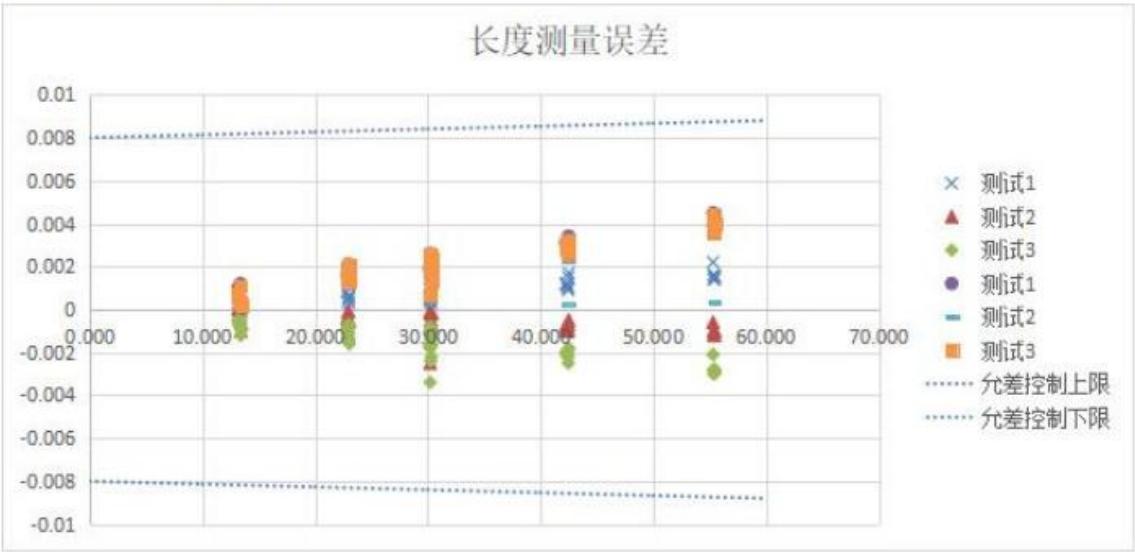
2.2 长度测量误差测量结果：

单位：mm

		放大倍率 1			放大倍率 2		
球心距编号	尺寸校准值	示值误差			示值误差		
		1 次	2 次	3 次	1 次	2 次	3 次
1-2							
1-3							
1-4							
1-5							
2-3							
2-4							
...							

测量结果的扩展不确定度： $U = \quad \mu\text{m}$ ， $k = 2$ 。

长度测量误差 E 见下图：



附录 C

长度示值误差测量不确定度评定示例

C.1 测量方法

选用某 X 射线三维尺寸测量机, 其视窗内测量空间范围为 $\varnothing 60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$, 其长度测量最大允许误差为 $\pm (8+L/75) \mu\text{m}$ 。选用红宝石球标准器, 按照 7.2.4 规定, 在空间 7 个方位, 各五组数据, 每组三次进行测量。使用的红宝石球标准器的 35 组长度尺寸中, 最小长度尺寸校准值为 13.148 mm , 最大长度尺寸校准值为 59.831 mm , 测量结果的扩展不确定度为 $U=1 \mu\text{m}$, 红宝石标准器上红宝石球通过碳棒安装在钢质底座上, 其热膨胀系数为 $11.6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。测量时环境温度为 $(20 \pm 2) \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

C.2 数学模型

数学模型见公式 (C.1)。

$$E = SD = L_k - L_r \quad (\text{C.1})$$

式中:

E ——长度测量误差, mm ;

SD ——标准球两球心球心距测量误差, mm ;

L_k ——标准球两球心距离的测量值, mm ;

L_r ——标准球两球心距离的校准值, 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, 方差按式 (C.2) 计算。

$$u_c^2(E) = u_c^2(SD) = c_1^2 u^2(L_k) + c_2^2 u^2(L_r) \quad (\text{C.2})$$

式中:

$u(L_k)$ ——测量重复性引入的标准不确定度分量;

$u(L_r)$ ——标准器具引入的标准不确定度分量。

$$c_1 = \frac{\partial (SD)}{\partial L_k} = 1;$$

$$c_2 = \frac{\partial (SD)}{\partial L_r} = -1。$$

C.4 标准不确定度分量

C.4.1 标准器具引入标准不确定度分量 $u(L_r)$

C.4.1.1 红宝石球标准器的球心距误差校准值引入的不确定度分量 $u(L_{r1})$

红宝石球标准器选定的 35 组长度尺寸全部由三坐标测量机校准, 根据校准证书, $U=1\mu\text{m}$, 包含因子 $k=2$, 则红宝石球标准器的球心距误差校准值引入的不确定度分量为:

$$u(L_{r1}) = \frac{1}{2} = 0.5\mu\text{m}$$

C.4.1.2 红宝石球标准器温度差引入的标准不确定度分量 $u(L_{r2})$

校准过程中, 红宝石球标准器的温度与被校准时的温度不一致, 则该温度将导致该标准器因温度偏离而引入误差, 设定温度变化为 $\pm 2^\circ\text{C}$, 红宝石球标准器热膨胀系数为 $11.6 \times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$, 红宝石标准器最大长度尺寸为 59.831 mm , 按均匀分布, $k=\sqrt{3}$, 则红宝石球标准器温度差引入的标准不确定度分量为:

$$u(L_{r2}) = \frac{L \times \alpha \times \Delta t}{\sqrt{3}} = \frac{59.831 \times 10^3 \mu\text{m} \times 2^\circ\text{C} \times 11.6 \times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}}{\sqrt{3}} \approx 0.8\mu\text{m}$$

C.4.2 测量重复性引入的标准不确定度分量 $u(L_k)$

考虑 X 射线三维尺寸测量机本身自校准, 三维重构软件拟合和计算、测量程序设置参数等因素将引入不确定度, 将这些影响因素作为整体看待。重复性评价按照 35 组 ($m=35$) 每组三次 ($n=3$) 重复测量确定合并样本标准差。设 35 组测量中, 每三次测量的极差为 R_i , 则该组测量重复性为:

$$s_i = R_i / C \quad (\text{C.3})$$

式中:

C ——极差系数, 当 $n=3$ 时, $C=1.69$ 。

取 35 组测量得到的合并样本标准差为:

$$s_p = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m s_i^2} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (R_i / C)^2} \quad (\text{C.3})$$

则测量重复性引入的标准不确定度分量:

$$u(L_k) = s_p = 0.8\mu\text{m}$$

C.4.3 测量不确定度来源及说明见表 C.1。

表 C.1 测量不确定度来源及说明

标准不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源	标准不确定度值 $u(x_i)$	$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$
$u(L_r)$	$u(L_{r1})$ 红宝石球标准器的校准值引入的不确定度分量	$0.5\mu\text{m}$	1
	$u(L_{r2})$ 红宝石球标准器温度差引入的标准不确定度分量	$0.8\mu\text{m}$	1
$u(L_k)$	测量重复性引入的标准不确定度分量	$0.8\mu\text{m}$	-1

C.5 合成标准不确定度

上述不确定度分量相互独立，故合成标准不确定度：

$$u_c = \sqrt{0.5^2 + 0.8^2 + 0.8^2} = 1.3 \mu\text{m}$$

C.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，长度测量误差校准结果的扩展不确定度为：

$$U = k \times u_c = 2.6 \mu\text{m}$$

长度测量误差校准结果的扩展不确定度小于仪器的长度测量的最大允许误差的三分之一，可以认为测量能力足够。

中华人民共和国工业和信息化部
兵工民品计量技术规范
X 射线三维尺寸测量机校准规范

JJF (军工民品) 0022—2023

版权所有 不得翻印