

中华人民共和国国家计量技术规范

JJFXXXX-XXXX

基于量值特性分析的坐标测量机 测量不确定度评定

Evaluation of Measurement Uncertainty for Coordinate Measuring
Machine Based on Quantitative Characteristic Indicators Analysis

(草案)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

国家市场监督管理总局 发布

基于量值特性分析的坐标 测量机测量不确定度评定

Evaluation of Measurement Uncertainty for

Coordinate Measuring Machine Based on

Quantitative Characteristic Indicators Analysis

JJFXXXX-XXXX

归口单位：全国测量不确定度计量技术委员会

主要起草单位：中国计量大学

中国计量科学研究院

合肥工业大学

参加起草单位：中原工学院

浙江省质量科学研究院

本规范委托全国测量不确定度计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

参加起草人：

目录

前言 II

引 言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 符号 4

5 测量不确定度评定过程 5

5.1 评定总则与流程 5

5.2 测量任务定义与条件描述 6

5.3 建立测量模型 6

5.4 标准不确定度的评定 7

5.5 合成标准不确定度 9

5.6 确定扩展不确定度 9

6 测量不确定度报告 10

附录 A11 坐标测量机孔径测量的量值特性法不确定度评定示例 11

附录 B 坐标测量机圆度测量的量值特性法不确定度评定示例 16

前言

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》、JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》和JJF 1059.2-2012《用蒙特卡洛法评定测量不确定度》等基础性计量技术规范起草。

本规范首次提出基于测量系统量值特性的黑箱法面向任务不确定度评定，解决传统透明箱模型误差源分解繁琐、复杂几何测量落地难的行业问题。

本规范为首次制定。

引言

坐标测量机（CMM）具有多参数、多任务和高柔性的特点，其面向特定测量任务的测量不确定度评定是几何量精密测量的技术难题。传统基于测量模型和误差溯源的分析方法依赖测量方法与测量原理的详细分解，在复杂任务中实施困难、可操作性差。

量值特性指标源于测量系统分析，反映了测量数据的统计特性，是对测量结果的综合评价，无需关心具体的内部测量模型和测量方法。近年来，将偏倚、线性、稳定性、分辨力、测量重复性、测量复现性等量值特性指标应用于CMM面向任务的不确定度评定，有效简化了不确定度分析难度，增强了工程可操作性。

为规范和推广这一评定方法，统一评定程序，制定本规范。

基于量值特性分析的坐标测量机测量不确定度评定

1 范围

本规范规定了基于量值特性分析的坐标测量机（CMM）面向任务的测量不确定度评定方法。

本规范适用于接触式坐标测量机实施尺寸与几何量测量任务时，基于量值特性指标对测量结果进行测量不确定度的评定与报告。

本规范的原则可推广至其他类似多任务的误差源不易确定或不确定度分量不易量化的测量仪器或测量系统面向任务的测量不确定度评定。

2 规范性引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1064—2024 坐标测量机校准规范

JJF 1094—2002 测量仪器特性评定

JJF 1130—2005 几何量测量设备校准中的不确定度评定指南

GB/T16857.1 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 40681.7—2026 生产过程能力和性能监测统计方法 第7部分：测量过程能力

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

JJF1001、JJF1059.1、GB/T16857.1、GB/T 40681.7 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 coordinate measuring machine (CMM) [GB/T16857.1-2002, 2.1]

通过运转探测系统测量工件表面空间坐标的测量系统。

3.2 测量不确定度 measurement uncertainty, uncertainty of measurement [JJF1001, 5.18]

简称不确定度 uncertainty

根据所用到的信息，表征赋予被测量值分散性的非负参数。

注：

1 测量不确定度包括由系统影响引起的分量，如与修正量和测量标准所赋量值有关的分量及定义的不确定度。

有时对估计的系统影响未作修正，而是当作不确定度分量处理。

2 此参数可以是诸如称为标准测量不确定度的标准偏差（或其特定倍数），或是说明了包含概率的区间半宽度。

3 测量不确定度一般由若干分量组成。其中一些分量可根据一系列测量值的统计分布，按测量不确定度的 A 类评定进行评定，并可用标准偏差表征。而另一些分量则可根据基于经验或其他信息获得的概率密度函数，按测量不确定度的 B 类评定进行评定，也用标准偏差表征。

4 通常，对于一组给定的信息，测量不确定度是相应于所赋予被测量的值的。该值的改变将导致相应的不确定度的改变。

5 本定义是按 2008 版 VIM 给出，而在 GUM 中的定义是：表征合理地赋予被测量之值的分散性，与测量结果相联系参数。

3.3 面向任务的测量不确定度 task-oriented measurement uncertainty

针对坐标测量机的具体测量任务（包括被测工件特征、安装方式、环境条件和测量策略等），所评定出的测量结果的测量不确定度。

3.4 量值特性指标 quantitative characteristic indicators

反映测量结果统计特性，用于综合评价测量系统质量的特性指标，通常包括偏倚、线性、稳定性、分辨力、测量重复性和测量复现性等。简称量值特性。

3.5 测量系统分析 measurement system analysis [ISO 13053-2:2011, 2.18]

为评估测量系统的性能而进行的一系列研究。

注：

- 1 这些研究旨在识别和量化测量过程中的变异来源（如偏倚、线性、分辨力、稳定性、重复性和复现性）。
- 2 通过验证测量系统，可以确保所获得数据的一致性和稳定性。
- 3 在工业应用中，常用于判断测量系统是否满足预期用途的要求。

3.6 测量重复性 measurement repeatability [JJF1001, 5.13]

简称重复性 repeatability

在相同测量程序、相同操作者、相同测量设备、相同操作条件和相同地点，并在短时间内对同一或相类似被测对象重复测量的一组测量条件下，对同一或类似被测对象重复测量所得示值或测得值间的一致程度。

3.7 测量复现性 measurement reproducibility [JJF1001, 5.16, 有修改]

简称再现性或复现性 reproducibility

在不同地点、不同操作者、不同测量设备，对同一或相类似被测对象重复测量的一组测量条件下，在规定条件下，对同一或类似被测对象重复测量所得示值或测得值间的一致程度。（不同的测量系统可以采用不同的测量程序）

注：

本规范面向单台 CMM 任务评定时，复现性仅考虑操作人员、工件装夹、测头配置、测量时段变化，不更换测量设备。

3.8 测量过程的稳定性 stability of a measurement process [GB/T 40681.7—2026, 3.18, 有修改]

简称稳定性 stability

测量过程的特性，用于表征测量过程随时间保持恒定的能力。

3.9 分辨力 resolution [GB/T 40681.7—2026, 3.14]

引起测量设备的相应示值产生可察觉到变化的被测量的最小变化

注：

- 1 分辨力可能与诸如噪声（内部或外部的）或者摩擦有关，也可能与被测量的值有关。
- 2 对于数字显示设备，其分辨力等于数字步进量。
- 3 分辨力不一定是线性的。

3.10 偏倚 Bias [GB/T 40681.7—2026, 3.9]

系统测量误差的估计值。

3.11 线性 linearity [JJF 1094—2002, 4.7, 有修改]

在测量设备预期的工作量程内，偏倚随被测量值变化的规律及其偏离直线的程度。

3.12 示值误差 error of indication [JJF1001, 7.32]

测量仪器示值与对应输入量的参考量值之差。

3.13 测量模型 measurement model, model of measurement [JJF1001, 5.31]

简称模型 model

测量中涉及的所有已知量间的数学关系。

注：

- 1 测量模型的通用形式是方程： $h(Y, X_1, \dots, X_n)=0$ ，其中测量模型中的输出量 Y 是被测量，其量值由测量模型中输入量 $X_1, \dots, X_n$ 的有关信息推导得到。
- 2 在有两个或多个输出量的较复杂情况下，测量模型包含一个以上的方程。

3.14 测量函数 measurement function [JJF1001, 5.32]

在测量模型中，由输入量的已知量值计算得到的值是输出量的测得值时，输入量与输出量之间量的函数关系。

注：

- 1 如果测量模型 $h(Y, X_1, \dots, X_n)=0$ 可明确地写成 $Y=f(X_1, \dots, X_n)$ ，其中 Y 是测量模型中的输出量，则函数 f 是测量函数。更通俗地说， f 是一个算法符号，算出与输入量 $X_1, \dots, X_n$ 相应的唯一的输出量值 $y=f(X_1, \dots, X_n)$ 。

2 测量函数也用于计算测得值 Y 的测量不确定度。

3.15 不确定度评定的黑箱模型 black box model for uncertainty estimation [JJF1130, 3.1]

用于不确定度评定的方法或模型。在该模型中,由测量所得到的输出量的值与输入量(激励原)具有相同的单位,而不是通过测量与被测量有函数关系的其他量而得到的。

注:

- 1 在本技术规范的黑箱模型中,假设各不确定度分量具有可加性。影响量已被换算到被测量的单位,并且灵敏度系数等于 1。
- 2 在许多情况下,一个复杂的测量方法可以看作一个简单的黑箱,该黑箱具有激励源输入和测量结果输出。当打开黑箱时,它可以转化为若干个“小”黑箱和(或)若干个透明箱。
- 3 即使为了作相应的修正而有必要进行补充测量以确定影响量的数值,其不确定度评定的方法仍然是黑箱方法。

3.16 不确定度评定的透明箱模型 transparent box model for uncertainty estimation [JJF1130, 3.2]

用于不确定度评定的方法或模型。在该模型中被测量的值是通过测量与被测量有函数关系的其他量而得到的。

4 符号

表 1 通用符号

符号	说明
X_i	测量模型的第 i 个输入量
$\bar{X}_i$	测量模型的第 i 个输入量多次重复测得值的算术平均值
Y	测量模型的输出量
y	Y 的测得值
f	测量模型的函数关系,测量模型通式为 $Y=f(X_1, X_2, \dots, X_n)$, n 为输入量的数量
δ_k	随机变量,修正模型存在的第 k 个不确定度来源
δ_r	随机变量,重复性对测得值的影响误差
δ_R	随机变量,复现性对测得值的影响误差
δ_d	随机变量,分辨力对测得值的影响误差
δ_s	随机变量,稳定性对测得值的影响误差
δ_E	随机变量,示值误差(反映偏倚和线性)对测得值的影响误差
δ_T	随机变量,温度变化对测得值的影响误差

u_r	重复性引入的标准不确定度
u_d	分辨力引入的标准不确定度
u_R	复现性引入的标准不确定度
u_s	稳定性引入的标准不确定度
u_E	示值误差（反映偏倚和线性）引入的标准不确定度
a	输入量可能值分布的半宽度，等于误差或不确定度因素的极限值
b	由误差或不确定度因素的极限值 a 到不确定度分量 u_i 的换算系数
MPE	最大允许误差
MPE_E	坐标测量机的最大允许示值误差，通常以 $MPE_E=A+B \cdot L$ 的形式表示
MPE_P	坐标测量机的最大允许探测误差，通常以 $MPE_P=A$ 的形式表示
s_{x_i}	样本标准偏差
$s_{\bar{x}}$	样本平均值的标准偏差
u_i	第 i 个不确定度因素 X_i 引入的不确定度分量
$u(y)$ 或 u_c	输出量 Y 的（合成）标准不确定度
U	扩展不确定度
k	包含因子
p	包含概率
u_{Temp}	温度补偿引入的不确定度分量

5 测量不确定度评定过程

5.1 评定总则与流程

基于量值特性分析的坐标测量机面向任务的不确定度评定，其核心是依据黑箱思想，用实际测量条件下的量值特性指标来量化和合成各不确定度贡献。基于量值特性分析的坐标测量机测量不确定度评定步骤如下：

- 明确测量任务，定义被测量，记录影响量及工况条件；
- 基于黑箱建模方法建立测量模型；
- 通过试验或历史数据获取各项量值特性指标的量化值；
- 将各量值特性指标转化为标准不确定度；
- 基于 GUM 或 MCM 依据测量模型合成标准不确定度；
- 确定扩展不确定度和输出报告。

基于量值特性分析的坐标测量机测量不确定度评定流程如图 1 所示：

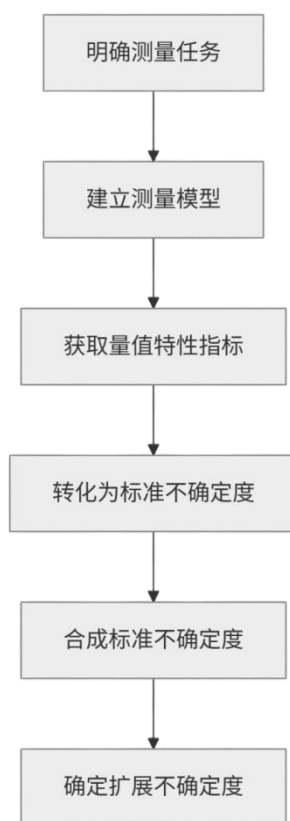


图 1 基于量值特性分析的坐标测量机面向任务的不确定度评定流程

5.2 测量任务定义与条件描述

应详细记录测量任务信息，至少包括：

- 被测工件（材料、形状、尺寸）；
- 被测几何特征及位置；
- 坐标系建立与测量策略（测点数目、分布、评价算法）；
- 环境条件（温度、湿度、振动等）；
- 操作人员、测量机状态、测量周期等。

这些信息构成面向任务的测量复现性条件集，是后续量值特性评价的基础。

5.3 建立测量模型

在一个完整的测量过程中，包括测量仪器、测量人员、测量环境、测量方法、被测对象及其误差来源等所有元素的集合称为测量系统，任何一个测量过程实质上都是通过测量模型进行量值传递的过程，该过程也伴随着误差传递，误差因素对测量结果的影响最终反映在测量值上，通过一系列量值特性指标来表征，因此，可采用量值统计分析法进行不确定度来源分析与建模。

量值统计分析法直接对测量结果的量值进行统计分析，输出量与输入量具有相同单位，测量结果不需要通过与被测量有函数关系的其他量而得到。相较于误差溯源法，不确定度传递关系简单，模型使用方便，更契合于坐标测量机面向任务的测量不确定度评定简单性、快速性、实用性的要求。尺寸和几何误差测量任务主要包含 2 个核心问题，即实际要素如何提取、理想要素如何评定。前者决定测量方法，后者则取决于评定方法。评定方法引入的不确定度属于规范不确定度范畴，因此在进行测量不确定度评定时不考虑理想要素评定方法的影响。

将坐标测量机测量工件的测量过程的偏倚、线性、稳定性、分辨力、测量重复性、测量复现性 6 项量值特性指标作为测量模型的输入量，基于黑箱建模方法建立坐标测量机面向任务的测量模型如公式（1）：

$$Y=y+\max(\delta_r, \delta_d)+\max(\delta_R, \delta_s)+\delta_E \quad (1)$$

式中， Y 为模型的输出量，即坐标测量机测量任务的测量量； y 为坐标测量机测量任务的测得值；输入量 δ_r 表示测量重复性对测量结果影响的误差随机变量；输入量 δ_d 表示分辨力对测量结果影响的误差随机变量；输入量 δ_R 表示测量复现性对测量结果影响的误差随机变量；输入量 δ_s 表示测量稳定性对测量结果影响的误差随机变量；输入量 δ_E 表示偏移和线性对测量结果影响的误差随机变量。

注：在未进行温度补偿的测量中，在建立测量模型时还需要考虑温度变化影响因素引入的测量误差 δ_T ，则测量模型如公式（2）：

$$Y=y+\max(\delta_r, \delta_d)+\max(\delta_R, \delta_s)+\delta_E+\delta_T \quad (2)$$

5.4 标准不确定度的评定

测量模型中对应各不确定度影响因素均可视为彼此独立，其标准不确定度依据获得的量值特性指标评定。

5.4.1 重复性引入的标准不确定度

测量过程的重复性意味着测量系统自身的变异是一致的。在每次测量不确定度概算中，至少应包括一次重复性。使用坐标测量机对标准件或典型工件进行 n ($n \geq 10$) 次重复测量获得实验数据，按照 A 类评定的方式计算重复性引入的标准不确定度。

以单次测量值作为测量结果估计值时，测量系统重复性引入的标准不确定度如公式（3）所示：

$$u_r=s_{x_i}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i-\bar{x})^2}{n-1}} \quad (3)$$

式中， x_i 是重复性条件下获得第 i 次测量值； $\bar{x}$ 是 n 次重复测量计算的平均值。

以测量平均值 $\bar{x}$ 作为测量结果估计值时，测量系统重复性引入的标准不确定度如公式（4）所示：

$$u_r = s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} = \frac{s_{x_i}}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

5.4.2 分辨力引入的标准不确定度

测量系统的分辨力、数字显示器的末位步进或经修约的测量值，均会产生不确定度分量。坐标测量机通常都具备足够高的分辨力，使得由分辨力的标准不确定度计算得出的扩展不确定度显著低于被测特性（被测量）的规范区间的 5%。当重复性不确定度分量源自实验数据时，若该重复性不确定度分量大于基于分辨力的分量，则分辨力等因素的影响已被包含其中；反之，按公式（5）计算分辨力引入的标准不确定度。

$$u_d = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{d}{2} = \frac{d}{\sqrt{12}} \quad (5)$$

式中， d 为坐标测量机的分辨力。

5.4.3 复现性引入的标准不确定度

复现性改变的测量条件包括测量原理、测量方法、观测者、测量仪器、参考测量标准、地点、使用条件及时间等。对于同一台坐标测量机测量同一工件或类似工件时，复现性评价的主要是实验室人员变异性对于测量一致性的影响，即由不同的操作人员，采用相同的测量仪器，对同一被测量进行测量时，测量平均值的变差。

由多名不同测量人员按照各自的测量习惯自行确定测量策略和测头配置，对被测工件的尺寸参数进行 m 组独立重复测量，设第 j 组重复测量列的平均值为 $\bar{y}_j$ 。再将 m 组测量列的均值 $\bar{y}_j$ 看作一个测量列，该测量列的均值为 $\bar{\bar{y}}$ 。按公式（6）计算复现性引入的标准不确定度。

$$u_R = \sqrt{\frac{1}{(m-1)} \sum_{j=1}^m (\bar{y}_j - \bar{\bar{y}})^2} \quad (6)$$

5.4.4 稳定性引入的标准不确定度

测量系统的统计稳定性一般考虑系统使用寿命期间会遇到的环境、使用者、零部件的损耗与腐蚀等各种影响测量系统稳定性的因素，通过使用测量系统定期地对标准件进行重复测量，由测量平均值和极差来描述测量系统的稳定状态，预测系统未来的过程性能。对于坐标测量机测量工件的具体测量过程，受关注的是“短期”稳定性，以偏移总变化量来表征，通常对于测量结果的影响较小，且稳定性等效于时间变化引起的复现性，对此情况，稳定性 δ_s 引入的标准不确定度 u_s 可不单独作为不确定度分量考虑。

5.4.5 偏移和线性引入的标准不确定度

引起偏移的原因包括：测量系统的标准器存在误差；测量系统的部件存在制造和安装误差，或是已经磨损；测量仪器的特性误差，如非线性转换等；仪器没有正确校准；测量环境不理想；操作

人员使用不当等。通常通过校准的方式确定测量仪器测量范围内某一量值位置上的偏移。

线性反映了测量仪器在测量范围内不同位置上的偏移值的关系。在校准时，一般在测量范围内均匀选择不同校准点，由各校准点的测量平均值与校准参考值的差值来确定测量范围内不同位置上的偏移值，再用回归分析的方法求得偏移值与校准参考值的回归直线。回归直线的斜率越小，测量仪器线性越好。测量仪器的线性等于回归直线的斜率绝对值的绝对值乘以过程变差。

偏倚和线性对测量结果的影响通过坐标测量机的示值误差与探测误差定量表征。当坐标测量机定期校准并满足所规定计量特性的最大允许误差 MPE 值时，安全起见应采用“过量估计”，按公式（7）用坐标测量机的最大允许示值误差 MPE_E 或最大允许探测误差 MPE_P 计算偏移和线性引入的标准不确定度。

$$u_E = \frac{MPE}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

坐标测量机的示值误差、探测误差等计量特性在校准时考虑了测量机测头配置、坐标系建立方法、被测对象的装夹、空间位置和环境等因素的影响，因此用 MPE 包含了上述不确定度来源的影响。

5.5 合成标准不确定度

测量模型中 δ_r 、 δ_R 、 δ_E 等各输入量的期望值均为 0，标准偏差即为其标准不确定度。依据 JJF 1059.1 的测量不确定度评定流程，基于测量模型通过对应不确定度影响因素的标准不确定度传播；或者依据 JJF 1059.2 的测量不确定度蒙特卡洛方法的评定流程，基于测量模型通过输入量的概率分布传播，均可获得合成标准不确定度 u_c 。

此步具体评定过程同 JJF 1059.1 或 JJF 1059.2，不做赘述。

5.6 确定扩展不确定度

若依据 JJF 1059.1 进行 5.5 节的合成标准不确定度计算，则扩展不确定度 U 由合成标准不确定度 u_c 乘包含因子 k 得到，按公式（8）计算：

$$U = k u_c \quad (8)$$

y 是被测量 Y 的估计值，被测量 Y 的可能值以较高的包含概率落在 $[y-U, y+U]$ 区间内，即认为 $y-U \leq Y \leq y+U$ 。被测量的值落在包含区间内的包含概率取决于所取的包含因子 k 的值， k 值一般取 2 或 3。常取 $k=2$ ，包含概率 $p \approx 95\%$ 。若希望包含概率 $p \approx 99\%$ ，可取 $k=3$ 。

若依据 JJF 1059.2 按照蒙特卡洛方法进行 5.5 节的合成标准不确定度计算，则扩展不确定度由对应包含概率对应的包含区间决定。

测量结果用公式（9）表示：

$$Y=y\pm U$$

(9)

6 测量不确定度报告

完整的测量结果应报告被测量的测得值及其测量不确定度以及有关的信息。报告应尽可能详细，以便使用者可以正确地利用测量结果。根据 5.5 具体采用方法不同，测量结果输出报告要求具体参照 JJF1059.1 或 JJF1059.2。

一般，完整的测量不确定度报告至少应包含以下信息：

- 1) 被测对象与任务描述；
- 2) 测量设备、测量策略及环境条件；
- 3) 各项量值特性指标及其来源（试验日期、评价方法）；
- 4) 各标准不确定度分量及其评定方法；
- 5) 合成标准不确定度；
- 6) 包含因子与扩展不确定度；
- 7) 评定依据（明确注明本规范，即“依据 JJF××××—20XX”）。

附录 A

坐标测量机孔径测量的量值特性法不确定度评定示例

A.1 概述

本实例涉及采用量值特性分析方法进行坐标测量机孔径测量不确定度的评定。

A.2 测量任务

测量任务是采用坐标测量机对车载空调压缩机后缸体零件孔径进行测量。零件图纸规范见图

A.1.

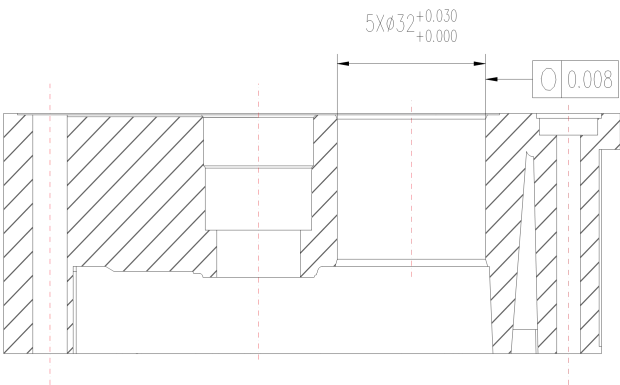


图 A.1 被测零件

零件的材料为 ACD14 铝合金，热膨胀系数 α_w 为 $23.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，其分布半宽 $\Delta\alpha_w$ 为 $1.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

A.3 测量条件

- 坐标测量机的最大允许示值误差为 $\text{MPE}_E = (3 + L/250) \mu\text{m}$ （其中 L 单位为 mm ）；
- 实验室温度为 $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$ ；
- 坐标测量机光栅尺热膨胀系数 α_M 为 $10.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，其分布半宽 $\Delta\alpha_M$ 为 $1.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ；
- 测量前，零件与测量环境进行充分的等温处理。

A.4 不确定度来源列表和讨论

见表 A.1。

表 A.1 孔径测量的不确定度分量概述

符号	不确定度 分量名称	评注	评定方法
----	--------------	----	------

u_E	示值误差引入的不确定度分量	包含偏倚和线性，主要反映测量系统自身系统性误差的综合影响，依据坐标测量机的最大允许示值误差评定。	B 类评定
u_r	重复性引入的不确定度分量	主要反映测量条件不变时的随机性误差，通过相同条件下重复性测量实验评定。	A 类评定
u_R	复现性引入的不确定度分量	主要反映测量条件变化时的随机性误差，通过变化条件下复现性测量实验评定。	A 类评定
u_d	分辨力引入的不确定度分量	主要反映分辨力不足导致的随机性误差，在坐标测量机测量中，由于重复性的影响大于分辨力的影响，该项不确定度分量可忽略。	忽略
u_s	稳定性引入的不确定度分量	主要反映短期时间效应导致的随机性误差；在坐标测量机测量中可忽略。	忽略
u_{Temp}	温度补偿引入的不确定度分量	主要反映量值特性指标未包含的温度补偿引入的不确定度分量影响	B 类评定

A.5 不确定度评定

A.5.1 示值误差引入的不确定度分量评定

对于孔径测量，可直接采用 MPE_E 量化示值误差引入的不确定度分量：

$$MPE_E = 3\mu\text{m} + L/250 = (3 + 32/250)\mu\text{m} = 3.13\mu\text{m}$$

由此计算出孔径测量示值误差引入的不确定度分量为：

$$u_E = \frac{MPE_E}{\sqrt{3}} = 1.81\mu\text{m}$$

A.5.2 重复性、复现性引入的不确定度分量评定

由至少 3 名测量人员在覆盖日常产品检验时间段内对被测工件进行多组独立、重复测量。包括工件的定位、装夹、测头校验、建立工件坐标系等工作在新的测量循环中均要重新进行，每组测量均重复 10 次，数据已排除粗大误差。孔径测量实验数据如表 A.2 所示。

表 A.2 孔径测量重复性、复现性实验数据（mm）

重复测量	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组
1	32.0043	32.0067	32.0054	32.0033	32.0048
2	32.0042	32.0065	32.0061	32.0044	32.0053
3	32.0036	32.0070	32.0057	32.0042	32.0058

4	32.0042	32.0064	32.0061	32.0041	32.0050
5	32.0040	32.0068	32.0057	32.0043	32.0053
6	32.0045	32.0062	32.0052	32.0043	32.0051
7	32.0040	32.0065	32.0057	32.0048	32.0048
8	32.0038	32.0065	32.0048	32.0045	32.0049
9	32.0036	32.0065	32.0056	32.0041	32.0042
10	32.0029	32.0072	32.0056	32.0045	32.0052
均值 $\bar{x}_i$	32.0039	32.0066	32.0056	32.0043	32.0050
标准差 σ_i	0.00046	0.00030	0.00039	0.00040	0.00042
重复测量	第 6 组	第 7 组	第 8 组	第 9 组	第 10 组
1	32.0055	32.0067	32.0054	32.0046	32.0049
2	32.0054	32.0076	32.0055	32.0051	32.0049
3	32.0051	32.0078	32.0044	32.0049	32.0052
4	32.0059	32.0078	32.0053	32.0055	32.0051
5	32.0053	32.0074	32.0048	32.0051	32.0043
6	32.0050	32.0076	32.0063	32.0058	32.0051
7	32.0056	32.0073	32.0059	32.0053	32.0048
8	32.0053	32.0074	32.0059	32.0051	32.0050
9	32.0057	32.0068	32.0057	32.0048	32.0035
10	32.0054	32.0081	32.0047	32.0040	32.0039
均值 $\bar{x}_i$	32.0054	32.0075	32.0054	32.0050	32.0047
标准差 σ_i	0.00027	0.00044	0.00060	0.00050	0.00058
10 组测量的均值	$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{10} \bar{x}_i}{10} = 32.0053$				

采用合并样本标准差的方法对重复性引入的不确定度分量进行估计。孔径测量重复性引入的不确定度分量为：

$$u_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} \sigma_i^2}{10}} = 0.00045 \text{ mm}$$

复现性引入的不确定度分量为：

$$u_R = \sigma_Z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2}{10-1}} = 0.0011 \text{ mm}$$

A.5.3 温度补偿引入的不确定度分量

被测温度变化引入的不确定度分量为：

$$u_T = L \cdot (\alpha_W - \alpha_M) \cdot \frac{\Delta T}{\sqrt{3}} = 32 \times (23.2 - 10.5) \times 10^{-6} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \text{ mm} = 0.00023 \text{ mm}$$

被测工件热膨胀系数变化引入的不确定度分量为：

$$u_{CTE1} = L \cdot (T - 20) \cdot \frac{\Delta \alpha_W}{\sqrt{3}} = 32 \times 1 \times \frac{1}{\sqrt{3}} \times 10^{-6} \text{ mm} = 0.00002 \text{ mm}$$

坐标测量机光栅尺热膨胀系数变化引入的不确定度分量为：

$$u_{CTE2} = L \cdot (T - 20) \cdot \frac{\Delta \alpha_M}{\sqrt{3}} = 32 \times 1 \times \frac{1}{\sqrt{3}} \times 10^{-6} \text{ mm} = 0.00002 \text{ mm}$$

综合以上分量，温度补偿引入的不确定度分量为：

$$u_{Temp} = \sqrt{u_T^2 + u_{CTE1}^2 + u_{CTE2}^2} = 0.00024 \text{ mm}$$

A.5.4 合成标准不确定度和扩展不确定度

孔径测量不确定度分量概算如表 A.3 所示。

表 A.3 孔径测量不确定度概算汇总

符号	不确定度分量名称	评定方法	评定结果 /mm
u_E	示值误差引入的不确定度分量	B 类评定	0.00181
u_r	重复性引入的不确定度分量	A 类评定	0.00055
u_R	复现性引入的不确定度分量	A 类评定	0.0011
u_{Temp}	温度补偿引入的不确定度分量	B 类评定	0.00024

计算孔径测量合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_E^2 + u_r^2 + u_R^2 + u_{\text{Temp}}^2} = 0.0022 \text{ mm}$$

取包含因子 $k = 2$ ，计算扩展不确定度为：

$$U = 2 \times u_c = 0.0044 \text{ mm}$$

附录 B

坐标测量机圆度测量的量值特性法不确定度评定示例

B.1 概述

本实例涉及采用量值特性分析方法进行坐标测量机圆度测量不确定度的评定。

B.2 测量任务

测量任务是采用坐标测量机对图 A.1 中车载空调压缩机后缸体零件 $\phi 32\text{mm}$ 内孔圆度进行测量。

B.3 测量条件

——坐标测量机的最大允许探测误差 $\text{MPE}_p = 3.5\mu\text{m}$;

——采用自动测量方法进行测量;

——采样点数满足采样需求。

B.4 不确定度来源列表和讨论

见表 B.1。

表 B.1 圆度测量的不确定度分量概述

符号	不确定度分量名称	评注	评定方法
u_E	示值误差引入的不确定度分量	主要反映偏倚的影响，线性的影响可忽略。依据坐标测量机的最大允许探测误差评定，或借助已校准标准器评定。	B 类评定
u_r	重复性引入的不确定度分量	主要反映测量条件不变时的随机性误差，通过相同条件下重复性测量实验评定。	A 类评定
u_R	复现性引入的不确定度分量	主要反映测量条件变化时的随机性误差，通过变化条件下复现性测量实验评定。	A 类评定
u_d	分辨力引入的不确定度分量	主要反映分辨力不足导致的随机性误差，在坐标测量机测量中，由于重复性的影响大于分辨力的影响，该项不确定度分量可忽略。	忽略
u_s	稳定性引入的不确定度分量	主要反映短期时间效应导致的随机性误差；在坐标测量机测量中可忽略。	忽略

B.5 不确定度评定

B.5.1 示值误差引入的不确定度分量评定

对于圆度测量，可采用 MPE_p 量化示值误差引入的不确定度分量：

$$u_E = \frac{MPE_p}{\sqrt{3}} = \frac{3.5}{\sqrt{3}} \mu\text{m} = 2.02 \mu\text{m}$$

考虑到其中存在过量估计，可借助已校准标准器评定示值误差引入的不确定度分量。选择公称尺寸为 32mm 的标准环规作为标准器，采用实验方法评定示值误差引入的不确定度。已知标准环规圆度的校准值为 $x_{\text{CAL}} = 0.60 \mu\text{m}$ ，校准不确定度为 $u_{\text{CAL}} = 0.03 \mu\text{m}$ 。

使用坐标测量机在覆盖日常测量情况的变化测量条件下对标准环规圆度进行重复测量，分别计算各组测量均值，得出圆度测量结果的最大值为 $3.2 \mu\text{m}$ ，计算偏倚的最大值为：

$$b_{\max} = \left| \bar{x}_j - x_{\text{CAL}} \right|_{\max} = |3.20 - 0.60| \mu\text{m} = 2.60 \mu\text{m}$$

考虑到环规校准值的不确定度 $u_{\text{CAL}} = 0.03 \mu\text{m}$ 相对较小，可忽略，因此圆度测量示值误差引入的不确定度分量为：

$$u_E = \frac{b_{\max}}{\sqrt{3}} = 1.50 \mu\text{m}$$

B.5.2 重复性、复现性引入的不确定度分量评定

由至少 3 名测量人员在覆盖日常产品检验时间段内对被测工件进行多组独立、重复测量。包括工件的定位、装夹、测头校验、建立工件坐标系等工作在新的测量循环中均要重新进行，每组测量均重复 10 次，数据已排除粗大误差。圆度测量实验数据如 B.2 所示。

表 B.2 圆度测量重复性、复现性实验数据（ μm ）

重复测量	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组
1	4.3	3.9	3.3	4.5	4.4
2	3.5	3.5	3.2	3.9	3.5
3	4.4	3.8	2.9	4.3	4.4
4	3.9	3.6	3.4	4.0	3.5
5	3.9	3.6	2.5	4.5	2.6
6	5.3	4.1	3.2	4.6	3.9
7	4.6	3.7	2.7	3.6	3.0
8	3.9	4.2	4.9	4.4	3.9
9	3.7	4.2	2.9	3.6	3.8
10	3.8	5.1	2.5	4.2	4.5

均值 x_i	4.13	3.97	3.15	4.16	3.75
标准差 σ_i	0.53	0.47	0.69	0.37	0.62
重复测量	第 6 组	第 7 组	第 8 组	第 9 组	第 10 组
1	3.9	3.6	3.6	3.8	4.1
2	3.6	4.5	3.3	3.9	3.7
3	3.7	3.3	3.5	4.5	3.9
4	4.0	3.2	3.7	4.0	3.8
5	4.5	4.5	4.3	3.6	2.5
6	3.2	4.2	5.4	4.7	3.9
7	4.2	4.1	3.5	4.2	3.1
8	3.9	3.8	4.4	3.8	3.1
9	3.1	5.0	3.8	3.2	4.0
10	3.7	4.3	3.8	4.4	3.9
均值 x_i	3.78	4.05	3.93	4.01	3.60
标准差 σ_i	0.42	0.57	0.62	0.45	0.52
10 组测量的均值	$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{10} x_i}{10} = 3.85$				

采用合并样本标准差的方法对重复性引入的不确定度分量进行估计。圆度测量重复性引入的不确定度分量为：

$$u_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} \sigma_i^2}{10}} = 0.54 \mu\text{m}$$

复现性引入的不确定度分量为：

$$u_R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2}{10-1}} = 0.30 \mu\text{m}$$

B.5.3 合成标准不确定度和扩展不确定度

圆度测量不确定度分量概算如表 B.3 所示。

表 B.3 圆度测量不确定度概算汇总

符号	不确定度分量名称	评定方法	评定结果/ μm
u_E	示值误差引入的不确定度分量	B 类评定	1.5
u_r	重复性引入的不确定度分量	A 类评定	0.54
u_R	复现性引入的不确定度分量	A 类评定	0.30

计算圆度测量合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_E^2 + u_r^2 + u_R^2} = 0.0016 \text{ mm}$$

取包含因子 $k = 2$ ，计算扩展不确定度为：

$$U = 2 \times u_c = 0.0032 \text{ mm}$$

中华人民共和国
国家计量技术规范
基于量值特性分析的坐标测量机测量不确定度评定
JJFXXXX—XXXX
国家市场监督管理总局发布