



中华人民共和国国家标准

GB/T 18779.2—2004/ISO/TS 14253-2:1999

产品几何量技术规范(GPS) 工件与测量设备的测量检验 第2部分:测量设备校准和产品检验中 GPS测量的不确定度评定指南

Geometrical Product Specifications (GPS)—
Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment—
Part 2: Guide to the estimation of uncertainty in GPS measurement,
in calibration of measuring equipment and in product verification

(ISO/TS 14253-2:1999, IDT)

2004-11-11 发布

2005-07-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言	I
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 用逼近 GUM 法评定测量不确定度的基本概念	5
6 不确定度管理程序——PUMA	5
7 测量误差和测量不确定度来源	8
8 不确定度分量、标准不确定度和扩展不确定度的评定方法	12
9 不确定度的实际评定——PUMA 方法的不确定度概算	18
10 应用	20
附录 A(资料性附录) 环规校准不确定度概算实例	24
附录 B(资料性附录) 校准溯源等级设计不确定度概算实例	29
附录 C(资料性附录) 圆度测量不确定度概算实例	46
附录 D(资料性附录) 在 GPS 矩阵模式中的位置	50
参考文献	51

前 言

GB/T 18779《产品几何量技术规范(GPS) 工件与测量设备的测量检验》分为如下三部分:

——第1部分:按规范检验合格或不合格的判定规则;

——第2部分:测量设备校准和产品检验中GPS测量的不确定度评定指南;

——第3部分:达成关于测量不确定度报告协议的导则

本部分为GB/T 18779的第2部分。

本部分等同采用ISO/TS 14253-2:1999《产品几何量技术规范(GPS) 工件与测量设备的测量检验 第2部分:测量设备校准和产品检验中GPS测量的不确定度评定指南》(英文版)。

本部分等同翻译ISO/TS 14253-2:1999。

为便于使用,本部分做了下列编辑性修改:

- a) “本技术规范”一词改为“本部分”;
- b) 删除了ISO/TS 14253-2的前言和引言;
- c) 增加了国家标准的前言;
- d) 将国际标准技术规范的表述改为适用于国家标准的表述。

本部分的附录A、附录B、附录C、附录D均为资料性附录。

本部分由全国产品尺寸和几何技术规范标准化技术委员会提出并归口。

本部分起草单位:机械科学研究院中机生产力促进中心、郑州大学、北京市计量科学研究所、中国航空工业第一集团公司第304研究所。

本部分主要起草人:李晓沛、倪育才、张琳娜、吴迅、孙玉玖。

产品几何量技术规范(GPS) 工件与测量设备的测量检验

第2部分:测量设备校准和产品检验中 GPS测量的不确定度评定指南

1 范围

GB/T 18779的本部分规定了不确定度管理程序(PUMA)。它是以《测量不确定度表示指南》(GUM)和JJF 1059:1999《测量不确定度评定与表示》为基础,用于评定测量结果不确定度的实用性逼近程序。

本部分适用于工业生产GPS领域中测量标准和测量设备的校准以及工件GPS特征量的测量。目的是给出完成不确定度报告所需的全部信息,并为测量结果及其不确定度(顾客和供方之间的关系)的国际、国内比对提供基础。本部分通常也用于下述情况的不确定度评定和给出不确定度报告:

- 单个测量结果;
- 两个或多个测量结果的比较;
- 由一个(或多个)工件(或测量设备)得到的测量结果与给定的规范(即测量设备或测量标准的计量特征量的最大允许误差MPE,以及工件特征量的公差限等)的比较,以判定是否合格。

注1:本部分的逼近法基本上基于对不确定度的上界进行估计,即在不确定度评估的各阶段高估其不确定度,高估的程度由逼近次数来控制。

注2:逼近法或逼近程序是一种能经济地进行自调节的方法,也是为了降低生产中的计量成本而改变(增大)现有测量不确定度的工具。逼近法能够使风险、成果和成本之间进行协调。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过GB/T 18779本部分的引用而成为本部分的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本部分,然而,鼓励根据本部分达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本部分。

GB/T 10610—1998 产品几何量技术规范 表面结构 轮廓法 评估表面结构的规则和方法

GB/T 19001—2000 质量管理体系 要求(idt ISO 9001:2000)

GB/T 19004—2000 质量管理体系 业绩改进指南(idt ISO 9004:2000)

GB/T 18779.1—2002 产品几何量技术规范(GPS) 工件和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(eqv ISO 14253-1:1998)

GB/T 18780.1—2002 产品几何量技术规范(GPS) 几何要素 第1部分:基本术语和定义(idt ISO 14660-1:1999)

ISO 1:2002 产品几何量技术规范(GPS) 工业长度测量的标准参考温度

测量不确定度表示指南(Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)(GUM), BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, 第1版, 1995)

JJF 1059—1999 测量不确定度的评定与表示(原则上采用GUM的基本内容)。

JJF 1001—1998 通用计量名词及定义(国际通用计量学基本术语(VIM)BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, 第2版, 1993)。

3 术语和定义

GB/T 18779.1, GB/T 18780.1和JJF 1001中确立的以及下列术语和定义适用于本部分。为了方便,下面重复列出了JJF 1001中的一些术语。

3.1

不确定度评定的黑箱模型 black box model for uncertainty estimation

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与输入量(激励源)的量值具有相同的单位,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:在本部分的黑箱模型中,假设各不确定度分量是可直接合成的。影响量已被换算到被测量的单位,并且灵敏系数等于1。

注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具有激励源输入的黑箱,测量结果由该黑箱输出。当打开黑箱时,它可以转化为若干个次级小黑箱和(或)若干个透明箱。

注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。

3.2

不确定度评定的透明箱模型 transparent box model for uncertainty estimation

用于不确定度评定的方法或模型,在该模型中,被测量之值是通过与被测量有函数关系的其他量的测量而得到。

3.3

测量任务 measuring task

根据定义对被测量的定量确定。

3.4

基本测量任务(基本测量) basic measurement task(basic measurement)

作为评估工件或测量设备更复杂特征量之基础的(一个或多个)测量任务。

注:基本测量实例:

- 1) 工件某要素直线度的测量中,若干测点中某一点的测量;
- 2) 确定千分尺示值误差范围时,若干次示值误差单独测量中的某一次。

3.5

总体测量任务 overall measurement task

复杂的测量任务,被测量之值以若干可能不同的基本测量为基础而确定的。

注:总体测量任务实例:

- 1) 工件某要素直线度的测量;
- 2) 千分尺示值误差范围的确定。

3.6

(测量的)扩展不确定度 expanded uncertainty(of a measurement)

U

确定测量结果区间的量,合理赋予被测量之值分布的大部分可望含于此区间。

注:测量的扩展不确定度用大写字母 U 表示。

3.7

(测量的)真不确定度 true uncertainty (of a measurement)

U_A

由完善的不确定度评定所得到的测量不确定度。

注:按其本性,真不确定度是无法确定的。

3.8

(测量的)约定真不确定度 conventional true uncertainty (of a measurement)

GUM 不确定度 GUM uncertainty

U_C

完全按照 GUM 所规定的详细程序评定得到的测量不确定度。

注:约定真不确定度可能不同于按照本部分评定得到的不确定度。

3.9

(测量的)近似不确定度 **approximated uncertainty (of a measurement)**

U_{EN}

按照简化的逼近法评估得到的测量不确定度。

注：脚标 N 表示 U_{EN} 是通过 N 次逼近评估得到的。当知道逼近次数并不重要时，可以使用不带逼近次数 N 的 U_E 。

3.10

(测量或校准的)目标不确定度 **target uncertainty (for a measurement or calibration)**

U_T

对给定的测量任务优化确定的不确定度。

注1：目标不确定度是包括诸如设计、制造、质量保证、服务、市场、销售和分包在内的管理决定结果。

注2：目标不确定度应综合考虑规范(公差或最大允许误差 MPE)、过程能力、成本、GB/T 19001 的 7.6 条、GB/T 19004 的 7.6 条以及 GB/T 18779.1 的要求，确定其最佳值。

3.11

要求的测量不确定度 **required uncertainty of measurement**

U_R

对给定的测量过程和测量任务所要求的不确定度。

注：要求的不确定度可以由用户等规定。

3.12

不确定度管理 **uncertainty management**

根据测量任务和目标不确定度，使用不确定度核算方法，给出合适的测量程序的过程。

3.13

(测量或校准的)不确定度核算 **uncertainty budget (for a measurement or calibration)**

对不确定度分量评估的总结性陈述，这些分量对测量结果的不确定度有贡献。

注1：只有当测量过程(包括测量对象、被测量、测量方法和测量条件)确定时，测量结果的不确定度才是明确的。

注2：“核算”一词的意思是根据测量程序、测量条件和假设，对不确定度分量以及他们的合成标准不确定度和扩展不确定度的数值进行分配。

3.14

不确定度贡献因素 **uncertainty contributor**

x_x

测量过程中的测量不确定度来源。

3.15

不确定度贡献因素的极限值(变化限) **limit value (variation limit) for an uncertainty contributor**

a_{xx}

不确定度贡献因素(x_x)极端值的绝对值。

3.16

不确定度分量 **uncertainty component**

u_{xx}

不确定度贡献因素(x_x)的标准不确定度。

注1：在逼近法中，符号 u_{xx} 用于所有的不确定度分量，这与 GUM 现行版本是不一致的。后者有时用符号 s_{xx} 表示由 A 类评定得到的不确定度分量，而用符号 u_{xx} 表示由 B 类评定得到的不确定度分量。

注2：严格地说，不确定度分量是不确定度贡献因素(x_x)的标准不确定度与对应灵敏系数的乘积。

3.17

测量仪器的影响量 influence quantity of a measurement instrument

测量仪器的特征量,它影响用该仪器得到的测量结果。

3.18

工件的影响量 influence quantity of a workpiece

工件的特征量,它影响对该工件的测量结果。

4 符号

表 1 中的符号适用于 GB/T 18779 的本部分。

表 1 通用符号

符 号	说 明
a	分布的极限值
a_{xx}	误差或不确定度贡献因素的极限值(以被测量的单位表示)
a_{ix}	误差或不确定度贡献因素的极限值(以影响量的单位表示)
α	线膨胀系数
b	由误差或不确定度贡献因素的极限值 a_{xx} 到不确定度分量 u_{xx} 的换算系数
C	修正值
d	测量设备的分辨力
E	杨氏模量
ER	(测量)误差
G	一组测量值的函数, $G(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots)$
h	滞后值,安全因子
k	包含因子
m	置信区间之半中所包含的标准偏差数
MR	测量结果(数值)
n	……的数目
N	逼近次数
ν	泊松系数
p	全部不相关的贡献因素个数
r	全部相关的贡献因素个数
ρ	相关系数
TV	真值
u, u_i	标准不确定度(标准偏差)
s_x	样本标准偏差
$s_{\bar{x}}$	样本平均值的标准偏差
u_c	合成标准不确定度
u_{xx}	不确定度贡献因素(x, x)的标准偏差,即不确定度分量
U	测量的扩展不确定度
U_A	测量的真不确定度
U_C	测量的约定真不确定度
U_E	测量的近似不确定度(未说明逼近次数)
U_{EN}	逼近 N 次评估得到的近似不确定度
U_R	要求的测量不确定度
U_T	目标不确定度
U_v	(不是按照 GUM 或本规范所评定的)不确定度数值
X	测量结果(未修正)
X_i	测量结果(在不确定度评定的透明模型中)
Y	测量结果(已修正)

5 用逼近 GUM 法评定测量不确定度的基本概念

完整地采用 GUM 法,可以得到约定真测量不确定度 U_c 。

本部分采用简化的逼近法(程序),通过过量估计有影响的不确定度分量,得到近似不确定度 U_E ($U_E \geq U_c$)。过量估计的过程为每一个已知的或能预期的不确定度分量提供了在最坏情况下可能出现的上界,从而确保了评定结果的安全可靠,即没有低估测量不确定度。本部分的逼近法基于下述条件:

- 所有的不确定度贡献因素均已被识别;
 - 已经决定哪些可能的修正值需要进行修正;
 - 每一个贡献因素对测量结果不确定度的影响,均以标准不确定度 u_{xi} 给出,称为不确定度分量;
- 注:作为约定,逼近法中每一个贡献因素对测量不确定度的影响都必须通过有关的物理方程或公式以及灵敏系数换算到被测量的单位。
- 采用 PUMA(不确定度管理程序)逼近过程;
 - 每一个测量不确定度分量(标准不确定度) u_{xi} ,既可以用 A 类方法评定,也可以用 B 类方法评定;
 - 为得到测量不确定度的粗略估计值以对其有一个总的了解,并且为节约成本,在进行不确定度的首次逼近评估时,如有可能,应优先采用 B 类评定;
 - 所有不确定度贡献因素影响的总和(称为合成标准不确定度)用下式计算:

$$u_c = \sqrt{u_{x1}^2 + u_{x2}^2 + u_{x3}^2 + \dots + u_{xm}^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

——仅在采用黑箱模型评定不确定度,并且所有不确定度分量 u_{xi} 均不相关时,式(1)才成立;

——为简单起见,各不确定度分量之间的相关系数仅取下列数值:

$$\rho = 1, 0, -1 \quad \dots\dots\dots (2)$$

如果不知道各测量不确定度分量之间是否不相关,则假定它们是完全相关的,即 ρ 等于 1 或 -1。

在将各分量代入式(1)进行计算之前,应先将相关分量算术相加;

——扩展不确定度 U 用下式计算:

$$U = k \times u_c \quad \dots\dots\dots (3)$$

此处 $k=2$, k 是包含因子(见 8.8)。

- a) 逼近法一般至少包括以下两次的各不确定度分量的重复评估:
 - 1) 第一次评估是十分粗略、快速以及低成本的,其目的是识别最大的几个不确定度分量(见图 1);
 - 2) 下一次评估,如果有的话,则仅将最大几个分量的“上界”重新进行更精确的评定,以将不确定度的估计值(u_c 或 U)减小到能被接受的程度。
- b) 逼近法可用于下述两种情况:
 - 1) 对给定测量过程的测量结果进行不确定度管理(可用于已知测量过程的结果,或对两个或两个以上的测量结果进行比较);
 - 2) 测量过程的不确定度管理中,寻求满足条件 $U_E \leq U_T$ 的合适测量过程。

6 不确定度管理程序——PUMA

6.1 概述

测量不确定度概算和管理的先决条件是清楚地识别和明确测量任务,即要定量确定的被测量(工件的 GPS 特征量或 GPS 测量设备的计量特征量)。测量不确定度是按照工件 GPS 特征量的定义或 GPS 标准中给定的 GPS 测量设备计量特征量的定义所得测量结果之质量的度量。

GPS 的综合标准和通用标准规定了被测特征量的“约定真值”。在许多情况下,GPS 标准也规定了理想的或约定真的测量原理、测量方法、测量程序和标准参考条件。

对特征量的标准化约定真值等(理想的操作过程)的偏离,均对测量不确定度有贡献。

6.2 给定测量过程的不确定度管理

图1给出给定测量任务(图1中框2)和现有测量过程(框1)的不确定度管理框图。测量原理(框3),测量方法(框4),测量程序(框5)和测量条件(框6)是给定的,或是在此情况下已经确定的,它们是不能改变的。唯一的任务是要估计其测量不确定度。要求的不确定度 U_R 可以是给定的,也可以是待定的。

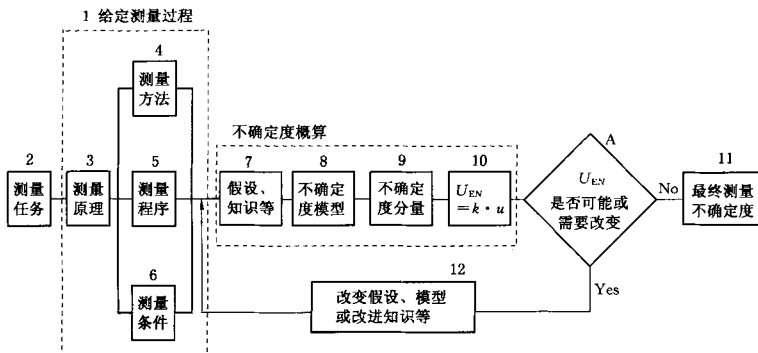


图1 给定测量过程的测量结果不确定度管理

采用逼近 GUM 法时,首次评估是方向性的,目的是为了找到占优势的不确定度贡献因素。如果有必要的话,在此情况下的管理过程要做的仅是改进对占优势不确定度贡献因素的评定,使其更接近于不确定度分量的实际情况,从而避免过于高估这些不确定度分量。

给定测量过程的不确定度管理程序如下:

- a) 最好采用不确定度评定过程的黑箱模型进行首次评估,建立初步的不确定度估算(框7~9),得到扩展不确定度的首次粗略估计值 U_{E1} (框10)。每次逼近评估得到的不确定度 U_{EN} 都是通过他们的上界进行评估而完成的。
- b) 将首次评估得到的不确定度 U_{E1} 与实际测量任务所要求的不确定度 U_R 进行比较(框A):
 - 1) 如果 $U_{E1} \leq U_R$, 即 U_{E1} 可以接受,则首次评估的不确定度估算证明了给定的测量过程对于测量任务来说是合适的(框11);
 - 2) 如果 $U_{E1} > U_R$, 即 U_{E1} 不可接受,或者不存在所要求的不确定度 U_R ,但是希望 U_E 更小一些,并更接近于真值,则继续进行逼近过程。
- c) 在进行新的逼近评估之前,对全部不确定度贡献因素的相对大小进行分析。在许多情况下,只有很少几个不确定度分量在合成标准不确定度和扩展不确定度中占优势。
- d) 改变假设或改进有关不确定度分量的知识(框12),以得到最大的(占优势)不确定度分量的更准确的不确定度上界估计值;也可改用更详细的不确定度评定模型或更高分辨力的测量过程(框12)。
- e) 作第二次逼近评估的不确定度估算(框7~9),再次得到更小和更准确的测量不确定度上界估计值 U_{E2} (框10)。
- f) 将第二次评估得到的不确定度 U_{E2} (框A)与实际测量任务所要求的不确定度 U_R 进行比较:
 - 1) 如果 $U_{E2} \leq U_R$, 即 U_{E2} 可以接受,则第二次评估的不确定度估算证明了给定的测量过程对于测量任务来说是合适的(框11);
 - 2) 如果 $U_{E2} > U_R$, 即 U_{E2} 不可接受,或不存在所要求的不确定度 U_R ,但是希望其更小和更接

近于真值,则需要再次进行逼近过程。对不确定度分量的大小,特别是此时最大的不确定度分量,重新进行评估,同时改变假设,改进知识,改变模型等(框 12)。

- g) 为得到更准确的(更低的)测量不确定度上界的估计值,当所有能改进的可能性都已考虑过,但仍没有得到可以接受的测量不确定度 $U_{EN} \leq U_R$ 时,这就证明不可能满足所要求的测量不确定度 U_R 。

6.3 用于测量过程(程序)设计和开发的不确定度管理

此时,不确定度管理是用来开发合适的用于工件几何特征量测量或测量设备计量特征量校准的测量程序。不确定度管理是为完成明确的测量任务(图 2 中框 1)和达到给定的目标不确定度 U_T (框 2)。测量任务和目标不确定度的确定是公司(本部门)足够高层层的政策性决定。一个合适的测量过程,评定得到的测量不确定度应小于或等于目标不确定度。如果评定得到的不确定度远小于目标不确定度,则对于完成测量任务来说,该测量过程在经济上并不是最佳的。也就是说,该测量过程成本太高。

给定测量任务(框 1)和给定目标不确定度 U_T (框 2)的不确定度管理程序(PUMA)包括下述内容(见图 2):

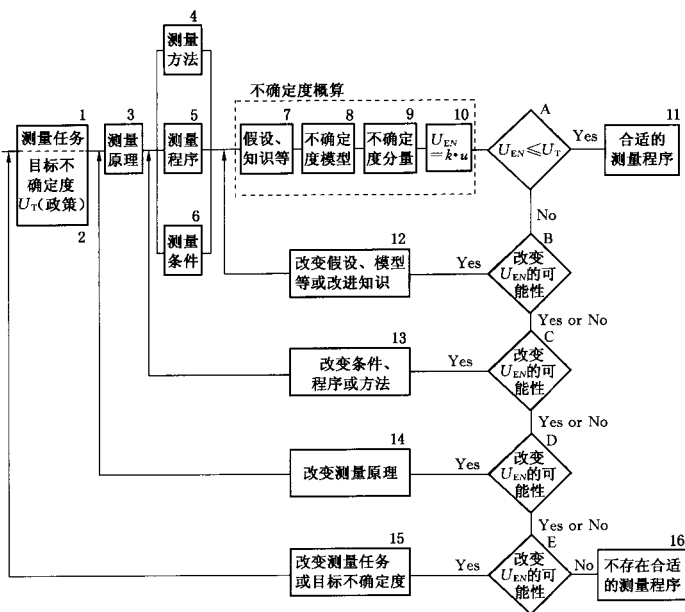


图 2 测量过程(程序)的测量不确定度管理程序(PUMA)

- 根据经验和本部门内可能得到的现有测量仪器,选择测量原理(框 3)。
- 根据经验和可能确定初步的测量方法(框 4)、测量程序(框 5)和测量条件(框 6)。
- 最好采用不确定度评定过程的黑箱模型进行首次评估,建立初步的不确定度概算(框 7~9),得到扩展不确定度的粗略估计值 U_{EN} (框 10)。全部不确定度 U_{EN} 的评估是通过不确定度的上界进行评估而完成的。

- d) 将首次评估得到的不确定度 U_{E1} 与给定的目标不确定度 U_T 进行比较(框 A):
- 1) 如果 $U_{E1} \leq U_T$, 即 U_{E1} 可以接受, 则首次评估的不确定度概算证明了该测量过程对于测量任务来说是合适的(框 11);
 - 2) 如果 $U_{E1} \leq U_T$, 则测量程序在技术上是接受的, 但此时通过改变测量方法或测量程序(框 13)而增大测量不确定度, 也许能建立更经济有效的测量过程。此时需要再次进行逼近并得到测量不确定度 U_{E2} (框 10);
 - 3) 如果 $U_{E1} > U_T$, 即 U_{E1} 不可接受, 则继续进行逼近过程, 或可以得出结论: 不存在合适的测量程序。
- e) 在继续进行逼近之前, 对各不确定度贡献因素的相对大小进行分析。在许多情况下, 总有几个分量在合成标准不确定度或扩展不确定度中占优势地位。
- f) 如果 $U_{E1} > U_T$, 则改变关于各不确定度分量的假设、模型或增加知识(框 12), 以得到这些最大(占优势)分量的更准确的上界估计值。
- g) 对不确定度概算作第二次逼近(框 7~9), 得到第二个较低的但更准确的测量不确定度上界估计值 U_{E2} (框 10)。
- h) 将第二次评估得到的不确定度估计值 U_{E2} 与给定的目标不确定度 U_T 相比较(框 A):
- 1) 如果 $U_{E2} \leq U_T$, 即 U_{E2} 可以接受, 则第二次评估的不确定度概算证明了该测量程序对于测量任务来说是合适的(框 11);
 - 2) 如果 $U_{E2} > U_T$, 即 U_{E2} 不可接受, 则必须进行第三次或更多次的评估。反复对不确定度贡献因素进行分析, 并同时改变假设、模型或增加知识(框 12), 特别是当时最大的几个不确定度贡献因素。
- i) 为得到更准确的(更低的)不确定度上界估计值, 而所有方法都使用过后仍没有得到可以接受的测量不确定度 $U_{EN} \leq U_T$, 则必须改变测量方法、测量程序或测量条件(框 13)以降低不确定度估计值 U_{EN} 。逼近过程将重新从首次评估开始。
- j) 如果改变测量方法、测量程序或测量条件(框 13)后仍无法得到可以接受的测量不确定度, 则最后的可能性是改变测量原理(框 14)并重新开始上述程序。
- k) 如果改变测量原理和重新进行上述逼近过程后仍无法得到可以接受的测量不确定度, 则最后的可能性是改变测量任务或目标不确定度(框 15), 并重新开始上述程序。
- l) 如果不可能改变测量任务或目标不确定度, 这就是说不存在合适的测量程序(框 16)。

7 测量误差和测量不确定度来源

7.1 误差的类型

测量结果中通常包含各种不同类型的误差。按它们在测量结果中出现的规律, 误差可以分为: 系统误差、随机误差、漂移和粗差。

所有的误差从本质上来说均是系统性的。如果发现某一误差是非系统性的, 则主要是因为产生误差的原因没有找到, 或是对误差的分辨能力不够所致。系统误差可以用其数值的大小和符号来表示(+ 或-)。

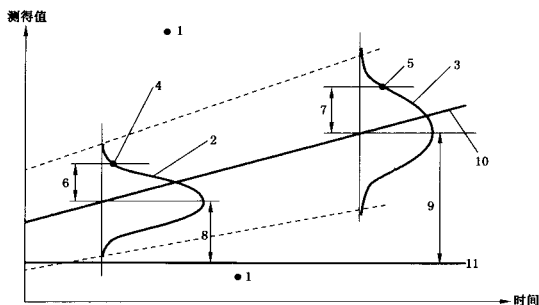
$$ER = MR - TV$$

此处, ER——误差;

MR——测量结果;

TV——真值。

随机误差是由不受控的随机影响量所引起的系统误差。由随机效应引入的不确定度可以用标准偏差以及分布类型来表示。多次测量结果的平均值常常作为估计系统误差的基础(见图3)。



- 1——粗差；
- 2——分散性 1；
- 3——分散性 2；
- 4——测量结果 1；
- 5——测量结果 2；
- 6——随机误差 1；
- 7——随机误差 2；
- 8——系统误差 1；
- 9——系统误差 2；
- 10——漂移；
- 11——真值。

图3 测量结果的误差类型

漂移是由不受控的影响量的系统影响所引起的。漂移常常是一时间效应或磨损效应,他们可以用单位时间内的变化或使用一定次数后的变化来表示。

粗差是由测量过程中不可重复的突发事件所引起的。电子噪声或机械噪声可以引起粗差。产生粗差的一个经常出现的原因是操作人员在读数和书写方面的疏忽以及错误地使用测量设备。粗差是不可能进一步描述的。

测量过程的误差或不确定度是许多已知或未知误差所引起的,他们源自大量的误差来源或误差贡献因素。

在不同情况下,误差的来源或贡献因素是不相同的,各分量之和也是不相同的。

可以对误差作系统性的探讨。图4给出10种不同的误差来源及其合成。

下面给出10种不确定度贡献因素的示例和详细内容。

困难往往在于各种不确定度贡献因素对测量结果的影响虽然常常是分别起作用的,但在许多情况下,他们也会互相影响而引起附加的误差和不确定度。

在进行不确定度概算时,可以参考图4以及下文中例举的误差来源表。在任何情况下,在对每一个不确定度分量进行评估时,均需要物理学方面的知识和计量学的实践经验。

为方便起见,在不确定度概算中可以对不确定度贡献因素或不确定度分量进行分类。

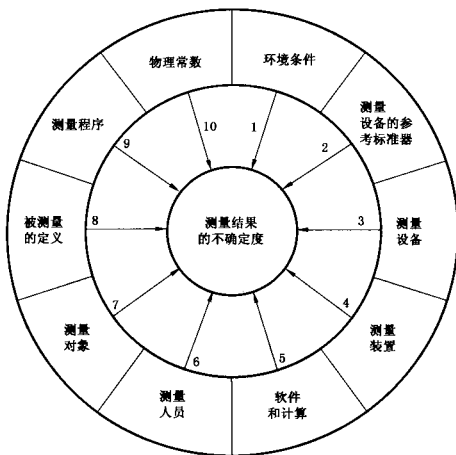


图 4 测量中的不确定度贡献因素

7.2 测量环境

在大部分情况下,特别是在 GPS 测量中,环境温度是测量不确定度的主要贡献因素。其他可能的不确定度贡献因素有:

- 温度及其随时间和空间的变化;
- 振动和噪声;
- 湿度;
- 污染;
- 照明;
- 气压;
- 空气成分;
- 气流;
- 重力;
- 电磁干扰;
- 电源的瞬变;
- 压缩空气(例如:空气轴承);
- 热辐射;
- 工件;
- 标尺;
- 仪器的热平衡。

7.3 测量设备的参考标准器

测量设备常常可分为“参考标准器”和“其他设备”两类。

- 稳定度;
- 刻度的质量;
- 温度膨胀系数;
- 物理原理:线纹尺,光学数字标尺,磁数字标尺,轴,齿轮齿条,干涉仪;
- CCD 技术;
- 校准不确定度;
- 主标尺的分辨力(模拟或数字);
- 自上次校准以来的漂移;
- 波长误差。

7.4 测量设备

- 解读系统;
- 电子和机械放大;
- 波长误差;
- 零点稳定度;
- 力和力的稳定度;
- 滞后;
- 导轨或滑轨;
- 探头系统;
- 表面缺陷;
- 硬度和刚度;
- 读数系统;
- 线膨胀系数;

- 温度稳定性和温度灵敏度；
- 视差；
- 自上次校准以来的漂移；
- 响应特性；

- 内插系统，波长误差；
- 内插分辨率；
- 数字化。

7.5 测量装置(工件的装夹除外)

在许多情况下不存在安装问题, 仅用测量设备就可以单独进行测量。

- 余弦误差和正弦误差；
- 阿贝原理；
- 温度灵敏度；
- 硬度和刚度；
- 探头半径；

- 探头尖端的形状误差；
- 探头系统的硬度；
- 光学孔径；
- 工件和测量装置的相互作用；
- 预热。

7.6 软件和计算

小数点和有效数字的影响。

- 修约和量化；
- 算法；
- 算法的贯彻；
- 计算中有效数字的位数；
- 取样；

- 滤波；
- 算法的修正和验证；
- 内插和外推；
- 粗差处理。

7.7 测量人员

人类的情绪是不稳定的, 不同天, 甚至在一天之内往往也会有很大的差别。

- 教育程度；
- 经验；
- 培训；
- 体力上的缺陷和能力；

- 知识；
- 诚实度；
- 奉献精神。

7.8 测量对象, 工件或测量仪器的特征量

- 表面粗糙度；
- 形状误差；
- 杨氏模量(弹性模量)；
- 超出弹性模量的硬度；
- 温度膨胀系数；
- 传导性；
- 重量；
- 尺寸；
- 形状；

- 磁性；
- 材料的吸湿性；
- 时效；
- 清洁；
- 温度；
- 内部应力；
- 蠕变特性；
- 装卡引起的工件畸变；
- 方向性。

7.9 GPS 特征量以及工件或测量仪器特性量的定义

- 基础；
- 参考系统；
- 自由度；
- GB/T 10610 给出的有关特征量的定义；

- 给定公差的因素；
- 涉及链环 3 和 4 的偏差 (ISO/TR 14638)；
- 距离；
- 角度。

7.10 测量程序

- 空气调节；
- 测量次数；

- 测量顺序；
- 测量持续时间；

- 测量原理选择;
- 准直;
- 参考标准及其数值的选择;
- 仪器的选择;
- 测量人员的选择;
- 测量人员数目;
- 策略;
- 锁紧;
- 定位;
- 测量点数目;
- 探测原理和策略;
- 探测系统的配置;
- 漂移的验证;
- 反向测量;
- 冗余度,误差分离。

7.11 物理常数和换算因子

对修正用物理常数的认识程度,例如,材料特性(工件,测量仪器,环境空气等)。

8 不确定度分量、标准不确定度和扩展不确定度的评定方法

8.1 不确定度分量的评定

不确定度分量可用两种不同的方法进行评定:A类评定和B类评定。

A类评定是指用统计方法对不确定度分量 u_{xx} 的评定。B类评定是指用任何非统计方法对不确定度分量 u_{xx} 的评定。

在大多数情况下,A类评定所得到的不确定度分量估计值比B类评定更准确。但在许多情况下B类评定也能得到足够准确的不确定度分量估计值。

因此在逼近法中,只要不是绝对必须采用不确定度的A类评定,一般均选择B类评定。在某些情况下可能无法采用其他评定方法,而只能采用A类评定。

注:在本标准中无论A类或B类评定的不确定度分量,都采用相同的符号 u_{xx} 。这与GUM现行版本不同,在GUM中A类评定不确定度分量用符号 s_{xx} 表示,而B类评定不确定度分量用符号 u_{xx} 表示。

8.2 不确定度分量的A类评定

8.2.1 概述

不确定度分量 u_{xx} 的A类评定需要由重复测量获取数据。分布的标准偏差或平均值的标准偏差可用8.2.2中的公式计算。

8.2.2 统计工具

无论何种类型的统计分布,下述统计参数由公式定义:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad \dots\dots\dots(4)$$

\bar{x} 是 n 个测量结果 X_i 的平均值,也是该分布总体均值 μ 的估计值。

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - X_i)^2}{n-1}} \quad \dots\dots\dots(5)$$

s_x 是由 n 个测量结果得到的样本分布的标准偏差,也是分布的标准偏差 σ 的估计值。

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - X_i)^2}{n(n-1)}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}} \quad \dots\dots\dots(6)$$

样本平均值的标准偏差 s_x 等于样本标准偏差 s_x 除以测量次数 n 的平方根。

当平均值或标准偏差由很少的重复测量次数得到时,估计得到的标准偏差可能是错误的,有可能太小。由于此原因,采用安全因子 h 。

安全因子 h 的数值(根据 t 分布计算得到的)见表2。

当测量结果是由与该分量有关的影响量的单次读数得到时,在不确定度概算中用样本标准偏差 s_x (更恰当地说应是与安全因子的乘积)作为标准不确定度 u_{xx} 的值。

$$u_{xx} = s_{x,n} \times h \quad \dots\dots\dots (7)$$

当测量结果是由与该分量有关的影响量的若干次读数的平均值得到时,在测量不确定度概算中用平均值的标准偏差 $s_{\bar{x}}$ 作为标准不确定度 u_{xx} 。

$$u_{xx} = s_{\bar{x},n} \times h \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中: $\left(s_{\bar{x},n} = \frac{s_{x,n}}{\sqrt{n}} \right)$

表 2 样本标准偏差 s_x 的安全因子

测量次数 n	安全因子 h
2	7.0
3	2.3
4	1.7
5	1.4
6	1.3
7	1.3
8	1.2
9	1.2
≥ 10	1

8.3 不确定度分量的 B 类评定

8.3.1 概述

用任何非统计方法来评定标准偏差往往受限于过去的经验,甚至是在“猜测”其标准偏差的大小。这时虽然无法直接估计其标准偏差,但根据经验,能知道或能根据逻辑推理和物理定律来得到变化的极限值(误差极限值)。在许多情况下,规范(技术指标)作为极限值是已知的,因此能采用一种系统的方法从极限值导出标准偏差。

8.3.2 由误差限到标准偏差的转换方式

若变化限为 a ,对于所有各种有界的分布,由 8.2.2 中的公式所定义的标准偏差和变化限 a 之间存在与分布有关的确定比值。因此如果已知变化极限 a 及其分布类型,就能计算出标准偏差。对于误差极限值为 $-a$ 和 a 的对称分布,有:

$$u_{xx} = a \times b \quad \dots\dots\dots (9)$$

经验表明,为了从变化限导出标准偏差,大多数情况下仅采用三种分布类型就已足够。图 5 给出三种分布类型,以及由极限值导出不确定度分量 u_{xx} (标准不确定度)的公式。高斯分布是无界的,用两倍的标准偏差 $2s$ 来作为高斯分布的极限值。图 5 所示三种分布的 b 值和 u_{xx} 为:

——高斯分布: $b=0.5$, $u_{xx} = \frac{a}{2} \approx 0.5 \times a$;

——矩形分布: $b=0.6$, $u_{xx} = \frac{a}{\sqrt{3}} \approx 0.58 \times a \approx 0.6 \times a$;

——U 形分布: $b=0.7$, $u_{xx} = \frac{a}{\sqrt{2}} \approx 0.71 \times a \approx 0.7 \times a$ 。

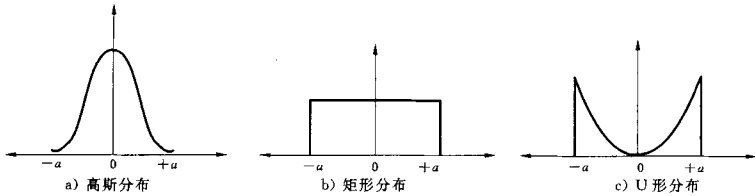


图 5 由变化限 a 导出不确定度分量 u_x (标准不确定度) 的三种分布类型

不确定度分量的 B 类评定需要合理地进行“猜测”或需要有关极限值 a 的知识。在确定 a 值时,要确保高估,但不要过于高估其极限值。然后是对分布作假设。在许多情况下分布类型是已知的或是十分明显的。否则,就作保守性的假设。如果已知不是高斯分布,则选择矩形分布或 U 形分布。如果已知不是矩形分布,则选择 U 形分布。U 形分布是最保守的假设。

采用非统计方法对影响量的标准不确定度进行合理评估的一种方法是根据经验或物理定律来确定影响量的极限值,然后再根据对该不确定度分量所假设的分布类型从极限值换算为标准偏差。

8.4 A 类和 B 类评定的常见实例

8.4.1 概述

本条给出若干常见的不确定度贡献因素和不确定度分量的实例,说明如何导出不确定度分量 u_x 。这些实例不可能涉及到在 GPS 领域的测量和校准中可能出现的全部问题。

8.4.2 用实验数据或其极限值评定同一不确定度分量

重复性测量数据提供了利用 A 类评定和 B 类评定来得到不确定度分量的可能性。

通过 8.2.2 所给的公式,可由重复性测量数据计算出标准偏差,即不确定度分量(A 类评定)。

仅使用数据组中的极端值作为偏离平均值的极限值(a 值),则利用同样的测量数据也可以通过 B 类评定的方法得到不确定度分量。于是不确定度分量就可以用图 5 中的公式计算。

8.4.3 重复性

在每个测量不确定度估算中,应至少包括一次重复性。在大部分情况下,重复性只能通过实验进行评估(A 类评定)。由 8.2.2 中 s_x 和 s_s 的公式可以得到不确定度分量。

由重复性导出的不确定度分量有可能小于从测量装置的分辨力引入的不确定度分量,此时应该用后者代替重复性。

8.4.4 分辨力和修约

测量装置的分辨力(模拟式或数字式),以及测得值或其修约后之值的最后一位数字的步长,其中最大者所引入的不确定度分量为:

$$u_x = \frac{d}{2 \times \sqrt{3}} \approx \frac{d}{2} \times 0.6 \approx 0.3 \times d \dots\dots\dots (10)$$

式中 d 是分辨力或最后一位数字的步长。其不确定度分量等于极限值为 $a=0.5 d$ 的矩形分布的不确定度分量。

如果重复性不确定度分量是从实验数据得到的,并且由重复性所引入的不确定度分量大于由分辨力等所引入的不确定度分量,则后者已经包括在重复性不确定度分量中。

8.4.5 测量设备的最大允许误差(MPE)

当已经知道测量设备或测量标准满足所规定的计量特征量的 MPE 值(最大允许误差)时,则可从这些 MPE 值导出有关的不确定度分量:

$$u_x = \text{MPE} \times b \dots\dots\dots (11)$$

式中 b 的数值根据 8.3.2 中给出的规则和假设的分布选择。如果存在某一测量设备或大量的同型号设

备的校准数据,则常常可以利用这些数据得到其分布类型,偶尔还可以利用 8.2.2 的公式以 A 类评定的方式直接对不确定度分量进行评定。

8.4.6 修正值

已知误差 ER 的大小和符号(+或-)可以将修正值 C 加到测量结果上进行补偿:

$$C = -ER$$

即使已进行了修正,但仍存在一不确定度分量,即修正值的不确定度。为了使修正后能减小测量不确定度,修正值的不确定度应该小于其误差或修正值。

是否要对已知的误差进行修正,这是负责进行不确定度概算者的责任。对一已知的误差是否要进行修正的判据是其经济性。

漂移常常作为可以修正的已知误差处理。

8.4.7 滞后

测量设备示值的滞后 h 常常作为相对于由滞后所形成的两个示值的平均值对称的误差或不确定度处理。如果有足够的数数据则不确定度分量可以由 A 类评定得到。也可以由 B 类评定得到,此时不确定度分量为:

$$u_{ex} = \frac{h}{2} \times b \quad \dots\dots\dots(12)$$

式中 b 的数值根据 8.3.2 中给出的规则和假设的分布选择。

8.4.8 影响量(温度、测力、测量方向等)

测量会受到许多影响量的影响,这些影响量会影响测量装置和测量对象。在 GPS 测量中常见的的影响量是温度、测力和测量方向等。影响量是用诸如 $^{\circ}\text{C}$, N 和 $^{\circ}$ (角度)等与长度单位不同的其他物理单位来表示的,并且可以通过物理定律和公式换算到长度。

影响量的数值或范围常常是已知的,并且此数值或范围的不确定度是作为极限值而已知的。

8.4.8.1 温度

对于 GPS 和 GPS 测量,根据 ISO 1 标准参考温度是 20°C 。由于诸如温度高低,以及时间和空间的温度梯度等来自于温度的影响,会引起测量设备,测量装置以及被测对象的长度变化和弯曲变形。温度的变化对长度的影响由线膨胀方程给出:

$$\Delta L = \Delta T \times \alpha \times L \quad \dots\dots\dots(13)$$

式中, ΔT 是温度差, α 是材料的线膨胀系数, L 是所考虑的有效长度。

在温度作为影响量时,从温度换算到长度的方程可以和其他几何和物理方程一起使用,得到温度对 GPS 测量结果(长度,形状等)的影响。

8.4.8.2 测力

GPS 测量的标准条件是测力等于零。由于测力不等于零而对长度测量误差和不确定度的影响是由弹性引起的,在某些情况下也可能由测量设备、测量装置和测量对象的塑性形变所致。特别应该研究测力对测量设备和测量对象之间接触部位的几何形状的影响。

测力的影响可以由经验公式或物理方程来定量确定(Hertz 公式等)。此影响与力的大小、方向、几何形状以及诸如 E (杨氏模量)和 ν (泊松系数)等材料常数有关。

8.4.8.3 测量方向

测量方向应该由测量对象的几何特征量的定义来确定。

相对于定义规定的测量方向之偏差对测量结果的影响可以由基本三角方程来进行计算。有时还会受到其他影响量的方向性效应的影响。

8.4.9 被测量的定义

GPS 测量中的被测量是工件的 GPS 特征量(常常以技术图纸上的要求给出),以及测量设备或计量标准的计量特征量。

这些被测量是在 GPS 标准中定义的。在许多情况下,测量程序会故意地或偶然地不符合被测量的定义。在这种情况下,测量程序相对于定义的偏差将使测量结果产生误差或不确定度。如果知道误差,则就可能进行修正。实际上测量程序总是会引入与被测量定义有关的不确定度分量。

8.4.10 校准证书

校准证书给出计量特征量的测得值及其不确定度。当使用所给的校准值时,不确定度分量 u_{xx} 由下述方法得到:

——如果所给出的是扩展不确定度 U ,并按照 GUM 的要求同时给出包含因子 k ,于是:

$$u_{xx} = \frac{U}{k} \dots\dots\dots (14)$$

某些校准组织统一规定了 k 的缺省值。在此情况下证书上不给出包含因子。

——如果不确定度是以 U_v 表示,并同时给出置信水准,即 95% 或 99%,此时:

$$u_{xx} = \frac{U_v}{m} \dots\dots\dots (15)$$

m 是对应于所给置信水准的置信区间内所包含的标准偏差数。

有时校准证书仅仅证明设备满足标准或制造商的产品说明书等所规定的规范(一组 MPE 值)。在这种情况下就可以利用计量特征量的标称 MPE 值,不确定度分量将可由规范中规定的 MPE 值导出。

8.4.11 测量对象的表面纹理、形状和其他几何偏差

在测量时,测量对象的表面与测量设备相接触。测量设备测头和表面之间的相互作用与表面纹理、形状和其他几何量参数相对于标称值的偏差有关,于是引入不确定度分量。

这些分量可以通过实验得到(A类评定);或通过B类评定得到;或部分通过实验,部分采用B类评定得到。

8.4.12 物理常数

物理常数(例如线膨胀系数,杨氏模量,泊松系数等)常常包含在修正值,由影响量换算为被测量的公式,或评估的测量不确定度分量中。他们常常不是精确已知的,而是可以评估的。

物理常数引入了附加的不确定度分量,他们只能采用B类方法进行评定。

8.5 不确定度评定的黑箱模型和透明箱模型

在许多情况下,同一测量过程的不确定度可以用不同级别的模型来评估。两种极端的情况是黑箱模型和透明箱模型。

在黑箱模型中,全部测量过程看作为一具有未知内容的黑箱。不确定度概算和不确定度分量仅描述对测量过程的总的影晌。选择这种模型时,要确定不确定度分量与每一个误差贡献因素之间的函数关系也许是十分困难的。

为了充分利用不确定度概算的全部优点,也许必须打开黑箱作更详细的不确定度概算。可以将其看作为若干个较小的次级黑箱,或是基于详细的测量过程而建立一不确定度评定的透明箱模型。黑箱模型是一种低分辨力的模型,而透明箱模型则是一种高分辨力的模型。

在不确定度评定的黑箱模型中,输入量和输出量的单位是相同的,因此各输入量的标准不确定度,即不确定度分量是可以直接合成的,并且各输入量之和的期望为零。对于黑箱模型,在本标准的PUMA方法中,所有的影响量均被换算到被测量的单位。因此,在黑箱模型中所用的不确定度分量的灵敏系数都等于1。

在不确定度评定的透明箱模型中,所有这些对不确定度分量的约束都不存在,即各输入量的单位不一定与输出量相同,并且由于他们的灵敏系数不等于1,因此各输入量的标准不确定度是不能直接合成的。

8.6 不确定度评定的黑箱模型——由不确定度分量合成得到合成标准不确定度 u_c

在不确定度评定的黑箱模型中,测量结果是被已知修正值修正后的读数:

$$Y = X + C$$

此处 X 是测量仪器的读数, 而 $C = \sum C_i$ 是由诸如校准证书, 温度修正和畸变修正等得到的各修正值之和。

测量结果的合成标准不确定度由下式给出:

$$u_c = \sqrt{u_r^2 + \sum_{i=1}^p u_i^2} \quad \dots\dots\dots (16)$$

式中:

p ——不相关的不确定度贡献因素个数;

u_r ——由下式计算得到的强相关的($\rho=1$ 或 -1)不确定度贡献因素之和:

$$u_r = \sum_{i=1}^r u_i \quad \dots\dots\dots (17)$$

r ——强相关的不确定度贡献因素个数。

在测量 Y 时, 合计共有 $(p+r)$ 个不确定度贡献因素。

不相关不确定度贡献因素($\rho=0$)是几何相加的(方和根法)。

强相关不确定度贡献因素是代数相加的。

保守的估计是将所有已知不完全不相关的不确定度贡献因素均看作为强相关。

8.7 不确定度评定的透明箱模型——由不确定度分量合成得到合成标准不确定度 u_c

在不确定度评定的透明箱模型中, 被测量之值被看作为若干个测量值 X_i 的函数。这些测量值本身可以是一个函数(透明箱模型)或黑箱模型:

$$Y = G(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_{p+r}) \quad \dots\dots\dots (18)$$

测量的合成标准不确定度由下式给出:

$$u_c = \sqrt{u_r^2 + \sum_{i=1}^p \left(\frac{\partial Y}{\partial X_i} \times u_{X_i} \right)^2} \quad \dots\dots\dots (19)$$

此处 u_r 是强相关的测量不确定度分量之和:

$$u_r = \sum_{i=1}^r \frac{\partial Y}{\partial X_i} \times u_{X_i} \quad \dots\dots\dots (20)$$

式中:

$\frac{\partial Y}{\partial X_i}$ ——函数 Y 相对于 X_i 的偏导数。

u_{X_i} ——第 i 个被测量(函数)的合成标准不确定度, 它是在被测量 Y 的测量不确定度评定中透明箱模型的一部分。

u_{X_i} ——可能是一个黑箱的结果(合成标准不确定度 u_c), 也可能是另一个透明箱模型的不确定度估计值。

不相关的不确定度分量($\rho=0$)采用几何相加(方和根法)。

强相关的不确定度分量采用代数相加(强相关的不确定度分量的数目是 r)。

保守的估计是将所有不知道是否完全不相关的分量都看作为强相关。

不相关的不确定度分量的数目是 p 。

在评定被测量 Y 的测量不确定度的透明箱模型中, 总共有 $(p+r)$ 个不确定度分量, 其中每一个分量还可能是若干个测量不确定度分量的合成。

8.8 由合成标准不确定度 u_c 评定扩展不确定度 U

在 GPS 测量中, 扩展不确定度 U 可由下式计算:

$$U = u_c \times k = u_c \times 2 \quad \dots\dots\dots (21)$$

除非另有规定, 在 GPS 测量中包含因子 $k=2$ 。

8.9 测量不确定度参数 u_c 和 U 的性质

不确定度分量和合成不确定度分别用标准不确定度 u_x 和 u_c 来表示。对于实际的工业 GPS 测量，在全部不确定度贡献因素中，有些因素是恒定不变的，而有些则是具有时间常数的变化因素，他们的大小覆盖几个数量级。不可能对所有的系统误差都进行修正，测量不确定度包括了所有未被修正的系统误差的影响。

在大多数的情况下， u_c 和 U 不是随机变量。他们是不知其误差的准常数。因此， U 和 u_c 不能当作标准偏差处理，而是具有一未知的不变误差。

9 不确定度的实际评定——PUMA 方法的不确定度概算

9.1 概述

附录 A 中的实例给出如何使用 PUMA 方法进行不确定度概算和编制相关文件。

本章将给出编写文件的顺序和要列入不确定度概算中的每一个不确定度分量的评估程序。

9.2 不确定度概算的先决条件

只有在下列情况下才有可能进行不确定度概算：

——测量任务明确。在测量任务中指出工件特性的特征量和测量设备特征量的定义(图 2 中框 1)；

测量不确定度概算仅用于单个的特定测量结果。单个测量结果可以作为一组测量结果的代表；

——测量原理明确并已知，或至少已知其概况(图 2 中框 3)；

——测量方法明确并已知，或至少已知其概况(图 2 中框 4)；

——测量程序明确并已知，或至少已知其概况(图 2 中框 5)；

测量程序包括测量设备的选择；测量程序应给出在测量中如何处理测量设备和工件的细节。

不确定度概算反映了这些活动和程序中的每一步；

——测量条件明确并已知，或至少已知其概况(图 2 中框 6)。

每个测量均包含图 6 中给出的三要素(1, 2 和 3)。不确定度概算将反映该三要素：

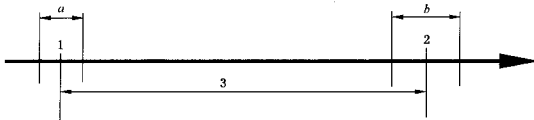
——参考点的确定(图 6 中 1)，常常是零点。在许多情况下测量设备的置零是校准程序的一部分。

不确定度与参考点或零点的设定有关；

——测量点的确定(图 6 中 2)，它是在测量工件或测量设备特征量时测量设备的读数。不确定度与读数本身有关，它依赖于测量设备和测量对象的特征量；

——测量设备从参考点到测量点的行程(3)。该行程的误差和不确定度由测量设备的校准得到。

三要素会受到各种不确定度来源的影响。所有不确定度来源的影响将在不确定度概算中作系统性的核查。



1——参考点；

2——测量点；

3——测量设备行程。

a ——参考点的不确定区域；

b ——测量点的不确定区域。

图 6 测量三要素的一般模型

当测量设备的示值误差用误差范围表示时,总体测量任务,即要定量测量的特征量常常是由两个(或多个)测量值或同类的基本测量通过简单计算而得到。在此情况下不确定度概算也可以对基本测量,即若干个校准值之一进行。与特征量有关的不确定度将根据基本测量的不确定度数值通过计算而得到。

9.3 不确定度概算的标准程序

下列程序有助于建立和编写 PUMA 方法首次评估的不确定度概算。

9.3.1 明确要进行不确定度概算的总体测量任务(被测特征量),基本测量值(基本测量结果)和编写文件。

9.3.2 编写下述文件:

- 测量原理;
- 测量方法;
- 测量程序;
- 测量条件。

9.3.3 对测量装置作图解性的表示。框图也许能有助于了解测量中存在的 uncertain 度来源。

9.3.4 建立测量值和总体测量任务的特征量之间的数学关系。

如果测量任务可以用黑箱模型来解决,一般不需要数学关系。

如果测量任务需要用透明箱模型来解决,则需要数学关系。

9.3.5 对所有可能的不确定度贡献因素和分量进行初步研究并列入文件,结果和式样示于表 3。

测量结果的不确定度由若干不确定度分量组成,应确保同一个不确定度来源只出现一次。在许多实际情况中这往往是无法做到的,但对于不确定度概算中占优势的不确定度来源来说,这一原则是十分重要的。

表 3 包括两级分辨力。在采用 PUMA 方法作不确定度概算的首次评估之前的初始阶段,测量不确定度的模型还没有建立时,分级是有用的。低分辨力常常表示采用单个黑箱作为模型。高分辨力则给出将一个黑箱分成若干个小黑箱的可能性。

在两级分辨力中,对每一个不确定度分量都规定了数学符号和名称。

表 3 中的评注栏是对各不确定度分量的信息、条件、甚至初步结论的总结,因此评注栏仅是个备注。

表 3 不确定度概算中各不确定度分量的概况、符号、名称和评注

符号 低分辨力	符号 高分辨力	名称	初步评注
u_{xx}	u_{xa}	xa 的名称	与 xa 有关的不确定度分量的初步观测,信息,评注和结论
	u_{xb}	xb 的名称	与 xb 有关的不确定度分量的初步观测,信息,评注和结论
	u_{xc}	xc 的名称	与 xc 有关的不确定度分量的初步观测,信息,评注和结论
		总的 xx 的名称	与总的 xx 有关的不确定度分量的初步观测,信息,评注和结论
u_{yy}	u_{ya}	ya 的名称	与 ya 有关的不确定度分量的初步观测,信息,评注和结论
	u_{yb}	yb 的名称	与 yb 有关的不确定度分量的初步观测,信息,评注和结论
		总的 yy 的名称	与总的 yy 有关的不确定度分量的初步观测,信息,评注和结论
u_{zz}		zz 的名称	与 zz 有关的不确定度分量的初步观测,信息,评注和结论

9.3.6 根据表 3 给出的信息,研究和建立用于该次逼近评估的不确定度模型。

对于每一个不确定度分量:

- 确定评定方法,A类评定或B类评定;
- 对测量不确定度分量数值的说明和论证,以及背景材料等;
- 对于A类评定,给出分量的数值及测量次数;
- 对于B类评定,给出极限值 a^* (变化限以影响量的单位表示), a (变化限以被测量的单位表示)

示),假定的分布和得到的不确定度分量数值。

- 9.3.7 研究、寻找和用文件说明已被确认的不确定度分量之间可能的相关性。
- 9.3.8 根据模型和相关性,选择正确的计算公式,并计算合成的标准不确定度 u_c 。
- 9.3.9 给出扩展不确定度 U ,此处 $U=2 \times u_c$ 。
- 9.3.10 给出包含不确定度概算中所有关键信息的汇总表(见表4的实例)。研究能改变不确定度分量估计值的可能变化,准备进行下一次逼近评估(如果一旦有必要的话)。特别是要给出经济性的评估。

表4 包含全部关键信息的不确定度概算汇总表实例

分量名称	评定类型	分布类型	测量次数	变化限 a^* 影响量单位	变化限 $a/\mu m$	相关系数	分布 因子 b	不确定度 分量 $u_{xi}/\mu m$
u_{xa} xa 的名称	A		10			0		1.60
u_{xb} xb 的名称	B	高斯		1.90	1.90	0	0.5	0.95
u_{xc} xc 的名称	B	矩形		3.42	3.42	0	0.6	2.05
u_{ya} ya 的名称	A		15			0		1.20
u_{yb} yb 的名称	A		15			0		0.60
u_{za} za 的名称	B	U		10°	1.57	0	0.7	1.10
u_{zb} zb 的名称	B	U		15° $\alpha_1/\alpha_2=1.1$	0.6	0	0.7	0.42
合成标准不确定度 u_c								3.29
扩展不确定度 $U(k=2)$								6.58

10 应用

10.1 概述

对 GPS 测量,由通常的不确定度概算可以得到下列方程。不确定分量可按其来源分组:

$$u_c = \sqrt{u_{MPE1}^2 + \dots + u_{M1}^2 + \dots + u_{B1}^2 + \dots + u_{O1}^2 + \dots + u_{E1}^2 + \dots} \quad \dots\dots\dots(22)$$

$$U = u_c \times k \quad (k=2) \quad \dots\dots\dots(23)$$

例如,各组不确定度分量可来源于:

- 测量设备(或测量标准) $u_{MPE1}, u_{MPE2}, u_{MPE3}, \dots;$
- 环境 $u_{M1}, u_{M2}, u_{M3}, \dots;$
- 测量人员 $u_{B1}, u_{B2}, u_{B3}, \dots;$
- 测量装置 $u_{O1}, u_{O2}, u_{O3}, \dots;$
- 测量对象(工件或测量设备) $u_{E1}, u_{E2}, u_{E3}, \dots;$
- 测量对象特征量的定义 $u_{D1}, u_{D2}, u_{D3}, \dots;$
- 测量程序 $u_{P1}, u_{P2}, u_{P3}, \dots;$
- 其他 $u_{etc.}, \dots;$

经验表明,在大多数情况下,当其他组的某一不确定度分量有一较小的变化时,不同组的不确定度分量之间是互不影响的。这就是说,可以用该方程来评估一组或几组不确定度来源对绝对不确定度或相对不确定度的影响。

也可能对不确定度概算作一些“改动”，改变一组或几组不确定度分量使测量和校准过程更为经济和有效，利用不确定度概算可评估每个不确定度分量的经济影响。

10.2 不确定度数值的评估和文件编制

在许多情况下通过本标准的不确定度概算可以给出有测量或校准过程的不确定度数值的评估。

10.3 测量过程或校准过程的设计和文件编制

10.3.1 测量过程或校准过程的优化和文件编制

通过若干次逼近评估的优化，考虑到技术方面和经济方面的判据，PUMA 方法给出了编制和优化测量或校准过程的可能性。

10.3.2 测量程序的开发

测量程序的开发和不确定度概算是平行进行的。PUMA 方法给出了分析每一个子程序对不确定度影响的可能性，从而开发和优化了总的测量程序。

10.3.3 校准程序的开发

校准程序的开发和不确定度概算是平行进行的。PUMA 方法给出了分析每一个子程序对不确定度的影响的可能性，从而开发和优化了总的校准程序。

10.3.4 次级测量方法和设备的合格或不合格

在许多情况下，直接根据被测特征量(工件的 GPS 特征量和测量设备的计量特征量)定义的理想测量方法和测量设备来进行测量可能成本太高或耗时过多。对测量对象的形状和角度偏差的分析结果及其对不确定度概算影响的研究，给出了判定次级测量方法和测量设备合格与否的可能性，同时也为了降低成本。例如，在 V 形块中的三点测量(次级方法)也许是一种有效的替代通过半径的变化来测量圆度的方法(根据圆度的定义来进行的一种理想的测量)。

10.3.5 测量设备和装置的合格性

特定的测量设备和测量装置对测量不确定度的影响(u_{MPE_x} 和 u_{O_x})可以从测量不确定度概算得到。所用其他的不确定度分量都看作为固定不变。当得到的合成标准不确定度满足目标不确定度的要求，则该测量设备或测量装置对于测量任务来说是合格的。

10.3.6 最佳测量能力 BMC 的编制

最佳测量能力(BMC)是对于特定的测量任务，公司或实验室可能达到的最小不确定度。当不确定度概算中所有的不确定度分量都达到最小时，此时的合成标准不确定度 $u_{c,min}$ 就是对于该任务的最佳测量能力。

10.4 校准溯源等级的设计、优化和文件编制

10.4.1 校准溯源等级的设计

不确定度概算给出了公司或实验室中两级校准溯源之间功能关系的平衡点(见附录 A 的实例和图 7)。对于具有给定目标不确定度的车间基层测量，采用 PUMA 方法时，将来源于测量设备的不确定度分量(u_{MPE_x})视为可变的，而所有其他不确定度分量则看作固定不变，于是可以得到对测量设备计量特征量(MPE 值)的最低要求(参见图 7)。

同样的程序用于测量设备的校准中，可以得到对测量标准的计量特征量的最低要求。该程序可用于各级校准溯源中，于是可以给出公司或实验室的整个校准溯源等级设计。

10.4.2 对测量标准的要求和合格性

在校准中，特定测量标准(u_{MPE_x})对测量不确定度的影响可由不确定度概算得到。所有其他的不确定度分量均看作固定不变。当得到的合成标准不确定度满足目标不确定度的要求，则该测量标准对该校准任务来说是合格的。

10.4.3 对外部校准证书的要求和合格性

在公司或实验室内部校准溯源中，参考标准的计量特征量将在其不确定度概算中产生不确定度分量，参考标准成为“测量设备”的一部分。而在外部校准溯源中，该参考标准变为“测量对象”。将所有其

他的测量不确定度分量看作不变,由参考标准引入的不确定度分量看作变量,对校准证书的要求可由下式导出:

$$u_T \geq u_c = \sqrt{u_{EMT_r}^2 + \dots + u_{M_r}^2 + \dots + u_{b_r}^2 + \dots + u_{O_r}^2 + \dots + u_{E_r}^2 + \dots + u_{D_r}^2 + \dots + u_{P_r}^2 + \dots} \quad (24)$$

当得到的合成标准不确定度满足目标不确定度的要求时,该校准证书是合格的。

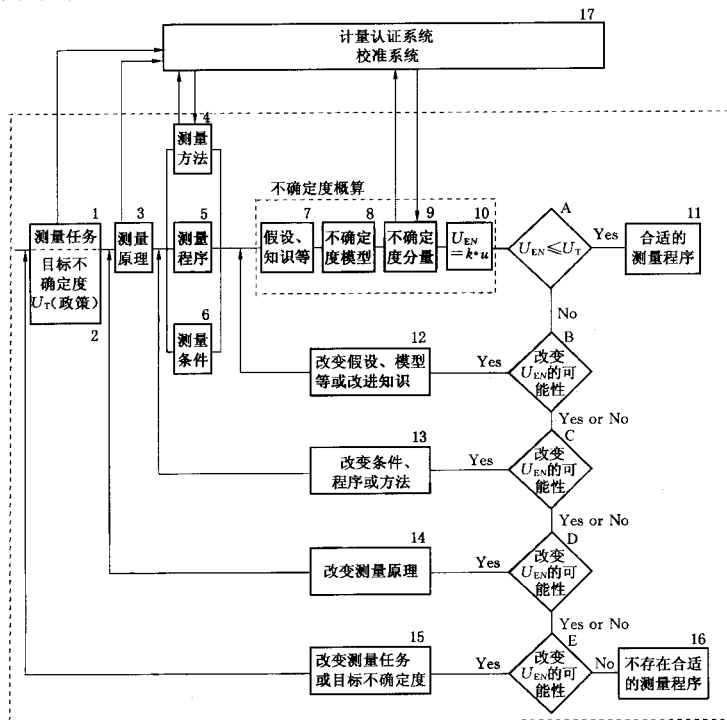


图7 不确定度概算和测量中使用的测量设备或测量标准的校准级别之间的关系

10.4.4 核查标准使用的评估

作为校准的补充,在车间中使用核查标准也许是减小测量不确定度的一种方法。通过替换被校准测量装置的不确定度概算中有关的不确定度分量,加上可能出现的新的不确定度分量,可以估计核查标准对测量不确定度的影响(见附录B实例)。

10.5 新测量设备的设计和文件编制

10.5.1 新测量设备的规范

将测量设备(u_{MPE_x})的不确定度分量作为未知变量,而将所有其他不确定度分量看作不变量,可以建立特定测量任务的不确定度概算。由公式(24)可以得到对本部门目前还不存在的新测量设备的要求。

10.5.2 特定测量设备的设计

将目前还没有设计的测量设备的不确定度作为未知变量,而将所有其他不确定度分量看作不变量,可以建立特定测量任务的不确定度概算。由公式(24)可以得到对新测量设备的设计要求。

10.6 对环境的要求及其合格性

由不确定度概算,可以得到环境对测量不确定度的影响(u_{Me})。所有其他的不确定度分量是不变量,而将环境引起的不确定度分量看作变量。于是就能从式(24)得到对环境的要求。

当得到的合成标准不确定度满足目标不确定度的要求时,则环境条件对于该测量任务来说是合格的。

10.7 对测量人员的要求及其合格性

由不确定度概算,可以得到测量人员对测量不确定度的影响(u_{Mz})。所有其他的不确定度分量是不变量,而将测量人员引起的不确定度分量看作变量。于是就能从公式(24)得到对测量人员的要求。

当得到的合成标准不确定度满足目标不确定度的要求,则测量人员对于该测量任务来说是合格的。

附录 A
(资料性附录)

环规校准不确定度概算实例

本附录给出的实例仅用来说明 PUMA,它仅包括所说明情况下较大的不确定度贡献因素。对于不同的目标不确定度和不同的应用,其他的不确定度分量也许不可忽略。

A.1 概述

本实例涉及采用 PUMA 方法进行测量不确定度的评定和对给定的测量任务判断测量程序和测量条件的合格性。

A.2 任务和目标不确定度

A.2.1 测量任务

测量任务为对 $\phi 100 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 环规的对称平面中确定方向的两点直径进行校准。对称平面的圆度为 $0.2 \mu\text{m}$ 。

A.2.2 目标不确定度

目标不确定度为 $1.5 \mu\text{m}$ 。

A.3 原理、方法、程序和条件

A.3.1 测量原理

机械接触式,与一已知长度(参考环规)进行比较。

A.3.2 测量方法

差分法,用 $\phi 100 \text{ mm}$ 的参考标准环规与 $\phi 100 \text{ mm}$ 的被测环规进行比较。

A.3.3 初始测量程序

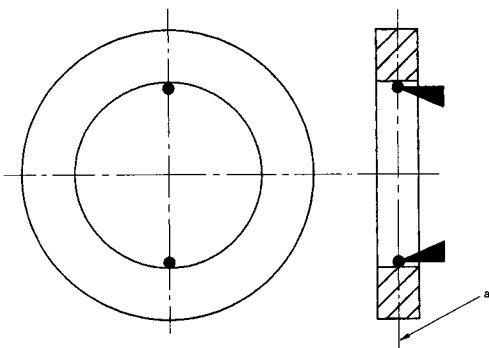
- 用卧式测量机测量被测环规。
- 使用 $\phi 100 \text{ mm}$ 的参考环规。
- 卧式测量机作比较仪用。

A.3.4 初始测量条件

- 卧式测量机符合生产厂的技术指标(见表 A.1)。
- 数字式读数显示,分辨力 $0.1 \mu\text{m}$ 。
- 实验室温度: $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 。
- 自动记录测量机温度,分辨力 0.25°C 。
- 被测环规和参考环规之间的温度差小于 1°C 。
- 测量机和环规都是钢制的。
- 操作人员是经过培训的,并且十分熟悉测量机的使用。

A.4 测量装置图示

测量装置见图 A.1。



a——对称面。

图 A.1 测量装置

A.5 不确定度来源

不确定度来源和评注见表 A.1。

表 A.1 直径测量的不确定度分量概述和评注

符号 低分辨力	符号 高分辨力	不确定度 分量名称	评 注	
u_{RS}		参考标准环规	经认可的校准证书给出 $\phi 100$ mm 直径的测量不确定度为 $U = 0.8 \mu\text{m}$	
u_{EC}		测量机示值误差	测量机经过校准,并证明 MPE 值符合技术要求。对于任意零位,标尺误差小于 $0.6 \mu\text{m} + 4.5 \times 10^{-6} L$	
u_{FA}		测砧准直	由于测砧以相同的方式与参考环规和被测环规接触(只要他们的直径在合理范围内),平行度误差可以忽略	
u_{RR}	u_{RA}	分辨力	$u_{RA} = \frac{d}{2\sqrt{3}} = \frac{0.1 \mu\text{m}}{2\sqrt{3}} = 0.029 \mu\text{m}$	u_{RR} 等于两者 中较大者
	u_{RE}	重复性	已对重复性进行了研究,标准偏差为 $0.7 \mu\text{m}$ 。 (当采用平方相加时,这相当于参考环规和被测环规的测量重复性均为 $0.5 \mu\text{m}$)	
u_{TD}		两环规间的温度差	假定参考和被测环规之间的温度差服从 U 形分布。并假定两次测量间的时间间隔不长,因此测量机的温度没有改变	
u_{TA}		膨胀系数差	假定温度服从 U 形分布。并假定两次测量之间的时间间隔不长,因此测量机的温度没有改变	
u_{TO}		被测环规圆度	圆度为 $0.2 \mu\text{m}$ 。椭圆形的形状误差	

A.6 首次评估

A.6.1 首次评估不确定度分量的说明及计算

a) u_{RS} ——参考标准(环规)

校准证书给出

校准证书给出参考环规直径的扩展不确定度为 $U=0.8 \mu\text{m}$ (包含因子 $k=2$):

$$u_{RS} = \frac{U}{k} = \frac{0.8 \mu\text{m}}{2} = 0.8 \mu\text{m} \times 0.5 = 0.4 \mu\text{m}$$

$$u_{PA} = 0$$

b) u_{EC} ——卧式测量机的示值误差

B类评定

示值误差曲线的最大允许值(任意零位)为: $0.6 \mu\text{m} + 4.5 \times 10^{-6} L$ 。参考环规和被测环规间直径差,即测量距离 $L \ll 1 \text{mm}$,因此:

$$a_{EC} = 0.6 \mu\text{m}$$

为安全起见,假定为矩形分布($b=0.6$)。于是不确定度分量为:

$$u_{EC} = 0.6 \mu\text{m} \times 0.6 = 0.36 \mu\text{m}$$

c) u_{PA} ——测站准直

B类评定

由于参考环规和被测环规用同样的接触方法(只要他们的直径在合理范围内),平行度误差可以忽略。

$$u_{PA} = 0$$

d) u_{RR} ——重复性/分辨力

A类评定

对两环规直径差测量的重复性进行了研究,得到标准偏差为 $0.7 \mu\text{m}$ 。(当采用平方相加时,这相当于参考和被测环规的重复性均为 $0.5 \mu\text{m}$)。由于进行6次重复测量,于是不确定度分量为:

$$u_{RR} = \frac{0.7 \mu\text{m}}{\sqrt{6}} = 0.29 \mu\text{m}$$

e) u_{TD} ——两环规之间的温度差

B类评定

两环规间温度差不大于 1°C 。两环规的线膨胀系数假定为 $\alpha = 11 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$,于是:

$$a_{TD} = 11 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \times 100 \text{ mm} \times 1^\circ\text{C} = 1.1 \mu\text{m}$$

假定服从U形分布($b=0.7$):

$$u_{TD} = 1.1 \mu\text{m} \times 0.7 = 0.77 \mu\text{m}$$

f) u_{TA} ——线膨胀系数差

B类评定

对 20°C 的最大偏差为 1°C 。线膨胀系数之差假定小于 10% 。于是:

$$a_{TA} = 11 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \times 100 \text{ mm} \times 1^\circ\text{C} \times 10\% = 0.11 \mu\text{m}$$

假定服从U形分布($b=0.7$):

$$u_{TA} = 0.11 \mu\text{m} \times 0.7 = 0.08 \mu\text{m}$$

g) u_{RO} ——被测环规的圆度

B类评定

形状误差为一椭圆,圆度为 $0.2 \mu\text{m}$ 。由于仅测量规定方向上的直径,因此圆度对测量结果的影响不大。

$$u_{RO} = 0$$

A.6.2 首次评估不确定度分量之间的相关性

估计各不确定度分量之间无相关性。

A.6.3 首次评估合成标准不确定度和扩展不确定度

当各不确定度分量之间不存在相关性时,合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{u_{RS}^2 + u_{EC}^2 + u_{PA}^2 + u_{RR}^2 + u_{TD}^2 + u_{TA}^2 + u_{RO}^2}$$

代入 A.6.1 中的数值后,可得:

$$u_c = \sqrt{0.40^2 + 0.36^2 + 0^2 + 0.29^2 + 0.77^2 + 0.08^2 + 0^2} \mu\text{m} = 0.99 \mu\text{m}$$

扩展不确定度:

$$U = u_c \times k = 0.99 \mu\text{m} \times k = 1.98 \mu\text{m}$$

A.6.4 首次评估的不确定度概算汇总

首次评估的不确定度概算汇总表 A.2。

表 A.2 不确定度概算汇总(首次评估)

分量名称	评定类型	分布类型	测量次数	变化限 a^* 影响量单位	变化限 $a/\mu\text{m}$	相关系数	分布因子 b	不确定度分量 $u_{ci}/\mu\text{m}$
u_{RS} 参考标准	证书					0	0.5	0.40
u_{EC} 测量机示值误差	B	矩形		0.6 μm	0.6	0	0.6	0.36
u_{PA} 测砧准直	B	矩形		0	0	0	0.6	0
u_{RR} 重复性/分辨力	A		6			0		0.29
u_{TD} 两环规温度差	B	U形		1 $^{\circ}\text{C}$	1.1	0	0.7	0.77
u_{TA} 线膨胀系数差	B	U形		1 $^{\circ}\text{C}$	0.11	0	0.7	0.08
u_{RD} 被测环规的圆度	B			0	0	0		0
合成标准不确定度 u_c								0.99
扩展不确定度 $U(k=2)$								1.98

A.6.5 首次评估的不确定度概算分析

首次评估的不确定度 $U_{E1} > U_T$, 不满足判据。存在一个占优势的分量 u_{TD} , 它是由温度差 1 $^{\circ}\text{C}$ 所引起的。但在假设的条件下不可能将 u_{TD} 估计得更小, 唯一的解决办法是改变测量条件。应该改进温度的平衡状态, 这就是说, 要有更长的平衡温度时间, 也许还应该采取更有效的隔热, 以防止装卸和测量时操作人员体温的影响。

在不确定度概算中, 除了与温度有关的不确定度分量, 减小其他不确定度分量对合成标准不确定度和扩展不确定度都几乎不起作用。

A.6.6 首次评估的结论

首次评估证明测量程序是合格的, 但测量条件需要改进。

两环规的最大温度差应不超过 0.5 $^{\circ}\text{C}$ 。

A.7 第二次评估

在 u_{TD} 和 u_{TA} 的表示式中, 温度条件由 1 $^{\circ}\text{C}$ 改为 0.5 $^{\circ}\text{C}$ 。不确定度分量的说明和计算也要作相应的改变。

A.8 第二次评估的结论

在第二次评估中, 温度差被限制在 0.5 $^{\circ}\text{C}$ 以内。表 A.3 给出的数据表明目标不确定度已得到满足。

$$U_{E2} = 1.46 \mu\text{m} < U_T = 1.5 \mu\text{m}$$

第二次评估表明, 测量条件是合格的。

表 A.3 不确定度概算汇总(第二次评估)

分量名称	评定类型	分布类型	测量次数	变化限 a^* 影响量单位	变化限 $a/\mu\text{m}$	相关系数	分布因子 b	不确定度分量 $u_{xi}/\mu\text{m}$
u_{RS} 参考标准	证书					0	0.5	0.40
u_{RC} 测量机示值误差	B	矩形		0.6 μm	0.6	0	0.6	0.36
u_{PA} 测砧准直	B	矩形		0	0	0	0.6	0
u_{RR} 重复性/分辨力	A		6			0		0.29
u_{TD} 两环规温度差	B	U形		0.5 $^{\circ}\text{C}$	0.55	0	0.7	0.39
u_{TA} 线膨胀系数差	B	U形		0.5 $^{\circ}\text{C}$	0.06	0	0.7	0.04
u_{RD} 被测环规的圆度	B			0	0	0		0
合成标准不确定度 u_c								0.73
扩展不确定度 $U(k=2)$								1.46

A.9 实例评论、总结

本实例证明,利用 PUMA 方法可以证明测量程序和测量条件是否满足目标不确定度判据:

$$U_{EN} \leq U_T$$

首次评估后,不满足目标不确定度判据。由于在此情况下只有一个占优势的不确定度分量,为了满足目标不确定度判据,应改进温度条件。这表明在首次评估后,每一个不确定度分量的改变将影响合成标准不确定度和扩展不确定度。按照不确定度分量的相对大小,可以制订降低不确定度的策略。

附录 B
(资料性附录)

校准溯源等级设计不确定度概算实例

本附录给出的实例仅用来说明 PUMA。它仅包括所说明情况下的较大的不确定度贡献因素。对于不同的目标不确定度和不同的应用,其他的不确定度分量也许不可忽略。

B.1 概述

本实例用来说明在工业生产中如何运用 PUMA 方法对计量校准溯源等级进行详细的优化设计。本实例包括:

- 用外径千分尺测量局部直径;
- 外径千分尺的校准;
- 校准外径千分尺所用的测量标准的校准要求;
- 使用核查标准作为校准的补充。

此外,本实例还包括了图 B.1 所示的三级校准溯源等级中的测量不确定度评定和对计量特征量要求的估算。三级校准溯源分别为:

- 第三级** 用外径千分尺测量一圆柱体的局部(两点)直径。采用 PUMA 方法和相对于给定的目标不确定度 U_T 来对测量程序进行评价。
- 第二级** 外径千分尺计量特征量的校准,这些计量特征量将影响第 I 级的测量不确定度。
- 第一级** 校准外径千分尺所用的测量标准的计量特征量的校准要求;各特征量的最大允许误差 (MPE 值)。

作为另一种形式的两点直径测量,通过不确定度概算对作为外径千分尺校准工作补充的核查标准的使用进行评估。

在第 III 级,对两点直径测量的不确定度进行了评定。将外径千分尺计量特征量的最大允许误差(示值的最大允许误差 MPE_{ML} ,测砧平面度的最大允许误差 MPE_{MF} 和两测砧之间的平行度的最大允许误差 MPE_{MP})看作为待定的未知变量。根据关系式:

$$U_T \geq U_{WP} = f(MPE_{ML}, MPE_{MF}, MPE_{MP}, \text{其余各测量不确定度贡献因素})$$

可以确定对外径千分尺三个计量特征量 MPE_{ML} , MPE_{MF} 和 MPE_{MP} 的要求。在第 II 级,对三个计量特征量(示值误差,测砧平面度和两测砧间平行度)校准的测量不确定度进行了评定。在第 I 级,用同样的方法可以给出校准外径千分尺三个计量特征量时所用的测量标准的计量特征量的 MPE 值,这时,将三个测量标准的 MPE 值作为待定的未知变量。

上述校准溯源三个等级的不确定度概算的结果是:

- 外径千分尺各 MPE 值的优化,他们直接由在车间内对测量不确定度的要求导出;
- 校准外径千分尺所用测量标准(量块,平晶和平行平晶)的 MPE 值的优化。这些 MPE 值是对校准证书的最低要求;
- 采用作为校准工作补充的核查标准,可以定量确定对测量不确定度的改进。

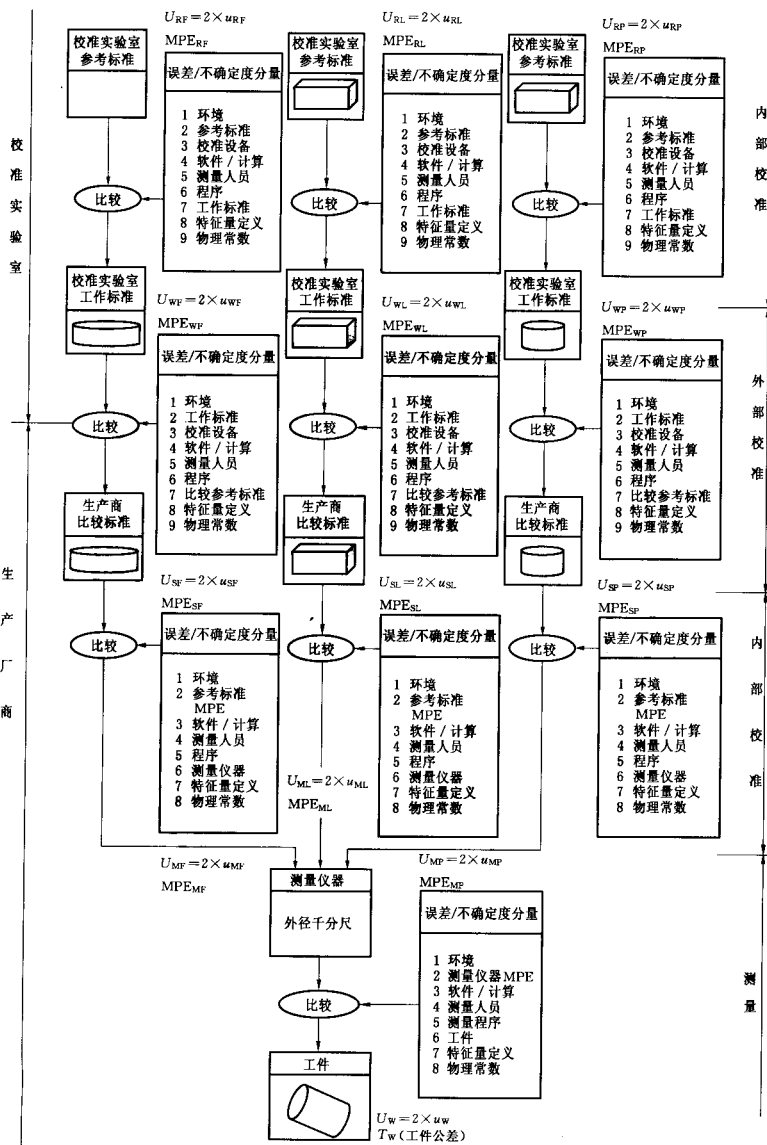


图 B.1 局部直径测量和外径千分尺校准的校准溯源等级

B.2 局部直径测量

B.2.1 任务和目标不确定度

B.2.1.1 测量任务

测量一组标称尺寸 $\phi 25 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 精密(钢制)转轴的局部(两点)直径。

B.2.1.2 目标不确定度

目标不确定度是 $8 \mu\text{m}$ 。

B.2.2 原理,方法和条件

B.2.2.1 测量原理

长度测量,与一已知长度进行比较。

B.2.2.2 测量方法

用带有 $\phi 6$ 平面测砧的模拟式外径千分尺进行测量,外径千分尺的测量范围为 $0 \sim 25 \text{ mm}$,游标刻度间隔为 $1 \mu\text{m}$ 。

B.2.2.3 初始测量程序

- 当轴在机床卡盘上时测量其直径。
- 只允许测量一次。
- 测量前,用布将轴擦干净。
- 测量时使用摩擦轮。
- 不使用主轴卡具。

B.2.2.4 初始测量条件

- 已经证实,轴和千分尺的温度会随时间而改变。与标准参考温度 20°C 的最大偏差为 15°C 。
- 轴和千分尺之间的最大温度差为 10°C 。
- 为加工该轴,有三个操作人员使用该机床和千分尺。
- 轴的圆柱度优于 $1.5 \mu\text{m}$ 。
- 形状误差的类型未知,但其锥度很小。

B.2.3 测量设备图示

见图 B.2。

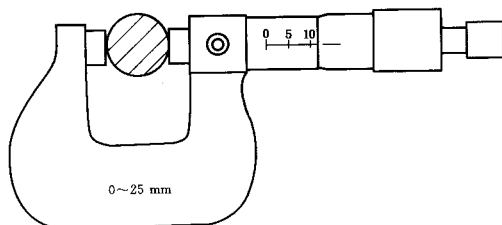


图 B.2 测量 $\phi 25 \text{ mm}$ 局部直径的测量装置

B.2.4 不确定度贡献因素列表和分析

两点直径测量采用黑箱模型的不确定度评定程序。不加以任何修正值,所有的误差贡献均计入测量不确定度。

表 B.1 给出所有影响直径测量不确定度的不确定度贡献因素及其名称。

表 B.1 局部直径测量(两点直径)的不确定度分量的概况及评注

符号 低分辨力	符号 高分辨力	不确定度分量 名称	评注	
u_{ML}		千分尺示值误差	对千分尺示值误差的最大允许值 MPE_{ML} 的要求是一个未知变量,初步设定为 $6 \mu\text{m}$ 。并通过校准后的零位调整,使示值误差曲线对称地分布	
u_{MF}		千分尺两测砧平面度	对两测砧平面度偏差的要求 MPE_{MF} 是一个未知变量,初步设定为 $1 \mu\text{m}$	
u_{MP}		千分尺两测砧间平行度	对两测砧间平行度偏差的要求 MPE_{MP} 是一个未知变量,初步设定为 $2 \mu\text{m}$	
u_{MX}		主轴卡具的影响,千分尺方位和手持时间	在本情况下这些影响并不起作用。并未使用主轴卡具。对 $0\sim 25 \text{ mm}$ 千分尺,方位和手持时间并无重大影响	
u_{RR}	u_{RA}	分辨力	$u_{RA} = \frac{d}{2\sqrt{3}} = \frac{1 \mu\text{m}}{2\sqrt{3}} = 0.29 \mu\text{m}$	u_{RR} 等于两者之间较大者
	u_{RE}	重复性	实验证明,三位操作人员具有同样的重复性。该实验包括每位操作者对同一 $\phi 25$ 精密塞规作 15 次以上的测量。千分尺的柔性的影响已包括在重复性内	
u_{NP}		三位操作人员间的零位变化	三位操作者以不同的方式使用千分尺。零位是不同的,这取决于千分尺的校准者。每一位操作者对同一 $\phi 25$ 精密塞规作 15 次以上的测量	
u_{TD}		温度差	在测量期间,轴和千分尺的最大温度差为 10°C	
u_{TA}		温度	相对于标准参考温度 20°C 的最大温度偏差为 15°C	
u_{WE}		工件形状误差	测得的圆柱度为 $1.5 \mu\text{m}$ 。圆柱度的主要部分是圆度偏差。对直径的影响是圆柱度的两倍,即 $3 \mu\text{m}$	

B.2.5 首次评估

B.2.5.1 首次评估不确定度分量说明及计算

a) u_{ML} ——千分尺示值误差

B 类评定

外径千分尺的计量特征量:示值误差的最大允许值 MPE_{ML} 通常被定义为示值误差曲线的最大范围,而与零位示值误差无关。示值误差曲线相对于零点的位置是另一个(独立的)计量特征量。

在本情况下,假定在校准过程中对示值误差曲线定位,使示值的最大正、负误差具有相同的绝对值。

由于最终的 MPE_{ML} 值尚未确定,这是不确定度概算的任务之一。现初步选定为 $6 \mu\text{m}$ 。由于上面提到的置零程序,误差的极限值为:

$$a_{ML} = \frac{6 \mu\text{m}}{2} = 3 \mu\text{m}$$

由于在给定的情况下无法证明服从高斯分布,故根据高估的原则假定为矩形分布,即 $b = 0.6$ 。于是:

$$u_{ML} = 3 \mu\text{m} \times 0.6 = 1.8 \mu\text{m}$$

b) u_{MF} ——千分尺测砧的平面度

B 类评定

当用具有两个平行平表面的量块来校准示值误差曲线时,测砧的平面度偏差对轴的直径测量有影响。

由于最终的 MPE_{MF} 尚未确定,这是不确定度概算的任务之一。现初步选定 MPE_{MF} 之值为 $1 \mu\text{m}$ 。

由于有两个测砧, MPE_{MF} 对测量不确定度的影响应加倍。假定为高斯分布,即 $b = 0.5$,于是由每个测砧的平面度所引入的不确定度分量为:

$$u_{MF} = 1 \mu\text{m} \times 0.5 = 0.5 \mu\text{m}$$

c) u_{MP} ——千分尺两测砧面的平行度

B类评定

当用具有两个平行平表面的量块来校准示值误差曲线时,测砧的平行度偏差将影响轴的直径测量。由于最终的 MPE_{MP} 值尚未确定,这是不确定度概算的任务之一。现初步选定 MPE_{MP} 之值为 $2\ \mu\text{m}$ 。假定其为高斯分布,即 $b=0.5$,于是:

$$a_{MP} = 2\ \mu\text{m}$$

$$u_{MP} = 2\ \mu\text{m} \times 0.5 = 1\ \mu\text{m}$$

d) u_{RR} ——重复性/分辨力

A类评定

三位操作者具有相同的重复性。在实验中,将 $\phi 25$ 的塞规当作“工件”进行测量。因此实际工件的形状误差未包括在重复性研究中。每一位操作者均测量 15 次。他们的标准偏差均为:

$$u_{RR} = 1.2\ \mu\text{m}$$

在本情况下,由分辨力引入的不确定度分量 $u_{RA} < u_{RE}$,因此 u_{RA} 已包括在 u_{RE} ,即 u_{RR} 中。

e) u_{NP} ——三位操作者之间零位的变化

A类评定

根据与测量重复性时所做的同样实验,对三位操作者和校准人员之间的零位差作了研究,得到:

$$u_{NP} = 1\ \mu\text{m}$$

f) u_{TD} ——温度差

B类评定

观测到千分尺和工件间的最大温度差为 10°C 。由于无任何信息表明温度差的符号,故假定其在 $\pm 10^\circ\text{C}$ 范围内变化。若千分尺和工件的线膨胀系数为 $11 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$,其极限值为:

$$a_{TD} = \Delta T \times \alpha \times D = 10^\circ\text{C} \times 11 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \times 25\ \text{mm} = 2.8\ \mu\text{m}$$

假定为 U 形分布,即 $b=0.7$,于是:

$$u_{TD} = 2.8\ \mu\text{m} \times 0.7 = 1.96\ \mu\text{m}$$

g) u_{TA} ——温度

B类评定

观测到相对于标准参考温度 20°C 的最大偏差为 15°C 。由于无任何信息表明偏差的符号,故假定其在 $\pm 15^\circ\text{C}$ 范围内变化。同时假定工件和千分尺之间的线膨胀系数差最大为 10% ,于是其极限值为:

$$a_{TA} = 0.1 \times \Delta T_{20} \times \alpha \times D = 0.1 \times 15^\circ\text{C} \times 11 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \times 25\ \text{mm} = 0.4\ \mu\text{m}$$

假定为 U 形分布,即 $b=0.7$,于是:

$$u_{TA} = 0.4\ \mu\text{m} \times 0.7 = 0.28\ \mu\text{m}$$

h) u_{WE} ——工件形状误差

B类评定

测得样品轴的圆柱度为 $1.5\ \mu\text{m}$ 。圆柱度是半径变化的度量。故假定它对直径的影响是圆柱度偏差的两倍(无任何信息表明该影响可能小于此值),于是其极限值为:

$$a_{WE} = 3\ \mu\text{m}$$

假定为矩形分布,即 $b=0.6$,于是:

$$u_{WE} = 1.8\ \mu\text{m}$$

B.2.5.2 首次评估各不确定度分量间的相关性

估计各不确定度分量之间无任何相关性。

B.2.5.3 首次评估合成标准不确定度和扩展不确定度

当各不确定度分量之间不存在相关性时,其合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{u_{ML}^2 + u_{MF}^2 + u_{MP}^2 + u_{RR}^2 + u_{NP}^2 + u_{TD}^2 + u_{TA}^2 + u_{WE}^2}$$

根据 B.2.5.1 中给出的值,可得:

$$u_c = \sqrt{1.8^2 + 0.5^2 + 0.5^2 + 1.0^2 + 1.2^2 + 1.0^2 + 1.96^2 + 0.28^2 + 1.8^2}\ \mu\text{m}$$

$$u_c = 3.79\ \mu\text{m}$$

$$U = u_c \times k = 3.79\ \mu\text{m} \times 2 = 7.58\ \mu\text{m}$$

B.2.5.4 首次评估的不确定度概算汇总(见表 B.2)

表 B.2 首次评估不确定度概算汇总(两点直径测量)

分量名称	评定类型	分布类型	测量次数	变化限 a^* 影响量单位	变化限 $a/\mu\text{m}$	相关系数	分布因子 b	不确定度分量 $u_{ei}/\mu\text{m}$
u_{ML} 千分尺示值误差	B	矩形		3.0 μm	3.0	0	0.6	1.80 ⁽¹⁾
u_{MF} 千分尺平面度 1	B	正态		1.0 μm	1.0	0	0.5	0.50 ⁽³⁾
u_{MF} 千分尺平面度 2	B	正态		1.0 μm	1.0	0	0.5	0.50 ⁽³⁾
u_{MP} 千分尺平行度	B	正态		2.0 μm	2.0	0	0.5	1.00 ⁽²⁾
u_{RR} 重复性	A		15			0		1.20 ⁽²⁾
u_{NP} 零位变化	A		15			0		1.00 ⁽²⁾
u_{TD} 温度差	B	U形		10 $^{\circ}\text{C}$	2.8	0	0.7	1.96 ⁽¹⁾
u_{TA} 温度	B	U形		15 $^{\circ}\text{C}$ $\alpha_1/\alpha_2 = 1.1$	0.4	0	0.7	0.28 ⁽³⁾
u_{WE} 工件形状误差	B	矩形		3.0 μm	3.0	0	0.6	1.80 ⁽¹⁾
合成标准不确定度 u_c								3.79
扩展不确定度 $U(k=2)$								7.58

B.2.5.5 首次评估的不确定度概算分析

首次评估的不确定度概算表明测量不确定度 $U_{E1} = 7.6 \mu\text{m}$, 小于目标不确定度 $U_T = 8 \mu\text{m}$ 。

表 B.2 给出的不确定度分量中, 有三个较大的分量, 三个中等大小的分量和三个较小的分量, 在表中分别标记为(1)、(2)和(3)。

在计算合成标准不确定度的公式中, 各不确定度分量是平方相加的。因此很难看出它们对 u_c 的影响。用方差 u^2 来表示, 往往能更直接地看出各不确定度分量对合成标准不确定度的影响(见表 B.3)。

由表 B.3 可知:

——如果外径千分尺不存在误差, 则扩展不确定度 U 将从 $7.6 \mu\text{m}$ 降低到 $6.2 \mu\text{m}$;

——如果操作人员, 环境和工件等方面均十分理想, 则扩展不确定度 U 将从 $7.6 \mu\text{m}$ 降低到 $4.4 \mu\text{m}$ 。

显然, 在本情况下占优势的不确定度分量并不来源于测量设备, 而来源于测量过程。

由于扩展不确定度 $U = 7.6 \mu\text{m}$, 如果按照 GB/T 18779.1 的合格判定规则, 在生产轴的时候, 工件的直径公差应缩小 $2 \times 7.6 \mu\text{m} = 15.2 \mu\text{m}$ 。对于 $\phi 25 \text{ mm}$ 来说, 缩减的量相当于 IT 6 公差 ($13 \mu\text{m}$) 的全部。

如果 U 占工件公差的 10%, 则工件的公差应该是 IT10 ($84 \mu\text{m}$)。如果工件的公差减小, 则 U 将超过工件公差的 10%。当公差为 IT8 ($33 \mu\text{m}$), 则测量不确定度将约占去工件公差的 46%, 这就是说, 在生产轴时, 实际公差只剩下原来工件公差的 54%。

如果目标不确定度是 $6 \mu\text{m}$ 而不是 $8 \mu\text{m}$, 则由首次评估得到的测量不确定度就太大了 ($U_{E1} = 7.6 \mu\text{m}$), 至少还需要降低 $1.6 \mu\text{m}$ 。这相当于 u^2 要降低 38%。

有必要关注一下最大的不确定度分量, 即工件和测量设备之间的温度差。通过改变测量程序或在生产时对温度进行测量, 可以将该分量由占 u^2 的 27% 降低到接近于零。

对三位操作者进行进一步的培训, 可以减小重复性 u_{RR} 和零位的变化 u_{NP} 。这可以降低所需的 38% 中的 15%。

如果对工件只进行一次测量, 则由工件的形状误差所引入的不确定度分量是不可能降低的。如果

增加测量次数,这一不确定度分量才有可能减小。取四次测量的平均值,可以降低所需的38%中的17%。但是这将增加测量时间,而时间常常意味着金钱。

在这种情况下,有许多种办法可以降低测量不确定度。选择何种方法来降低测量不确定度的依据是使其成本为最低。在考虑如何降低测量不确定度时,成本总是要首先考虑的。

在此情况下,要降低由千分尺带来的不确定度分量是不现实的。而仅是设备的分辨力所引入的不确定度分量可以通过采用其他最大允许误差较小的设备来降低。如果测量时间也可以减少,并且可以测量几个直径而不受操作者的影响,这也许是一个经济上合理的解决办法。

这有可能将扩展不确定度由 $U=7.6\ \mu\text{m}$ 减小到 $2.6\ \mu\text{m}$ 。

表 B.3 各不确定度分量对 u_c 和 u_c^2 的影响(25 mm 两点直径测量)

分量名称	不确定度来源	不确定度分量 $u_{ex}/\mu\text{m}$	$u_{ex}^2/\mu\text{m}^2$	在 u_c 中所占百分比/%	在 u_c^2 中所占百分比/%	不确定度来源
u_{ML} 千分尺示值误差	测量设备	1.8	3.24	23	33	测量设备
u_{MF} 千分尺平面度 1		0.5	0.25	2		
u_{MF} 千分尺平面度 2		0.5	0.25	2		
u_{MP} 千分尺平行度		1.0	1.00	7		
u_{RR} 重复性	操作人员	1.2	1.44	10	17	操作人员
u_{NP} 零位变化		1.0	1.00	7		
u_{TD} 温度差	环境	1.96	3.84	27	27	环境
u_T 温度		0.28	0.08	0		
u_{WE} 工件形状误差	工件	1.80	3.24	23	23	工件
合成标准不确定度 u_c		3.79	14.34	100	100	总计

B.2.5.6 首次评估的结论

正如上例所述,千分尺的三个 MPE 初步设定值对于给定的测量任务和给定的目标不确定度来说是可行的。对千分尺的要求可以再次确认如下:

- 误差曲线(最大值—最小值): $MPE_{ML} = 6\ \mu\text{m}$ (双边规范);
- 测砧平面度: $MPE_{MF} = 1\ \mu\text{m}$ (单边规范);
- 测砧平行度: $MPE_{MP} = 2\ \mu\text{m}$ (单边规范)。

千分尺应满足这些要求,但这些规范将由于校准时的测量不确定度 U_{SL} , U_{SF} 和 U_{SP} 而变小。因此必须要知道校准千分尺时的测量不确定度。

B.2.6 第二次评估

对于本例,不需要进行第二次评定。首次评定得到的扩展不确定度数值有可能再稍稍减小一些,但正如上面已经论证过的,如果不对测量方法和测量程序作重大的改变,测量不确定度不可能大幅度减小。

B.3 外径千分尺示值误差的校准

B.3.1 要求

对测量标准(量块)MPE 值的要求目前还未确定,它将作为不确定度概算的任务之一而被确定。

B.3.2 任务和目标不确定度

B.3.2.1 总体任务

总体任务是测量示值误差曲线的范围。在示值误差曲线中包括 11 次基本测量,他们分布在 0~25 mm 范围内,并且具有不同的测量不确定度。为了避免不必要地重复进行测量不确定度概算工作,找

出 11 个测量点中不确定度最大者(25 mm),并判断是否可以将该最大不确定度用于其他 10 个测量点。作为核检,同样也要对不确定度最小的测量点(0 mm)进行不确定度概算。

B.3.2.2 基本测量任务

测量 0~25 mm 范围内 11 个测量点(0,2.5,5,……,22.5 和 25 mm)的示值误差。

B.3.2.3 基本测量的目标不确定度

基本测量的目标不确定度是 $1 \mu\text{m}$ 。

B.3.3 原理、方法、程序和条件

B.3.3.1 测量原理

与一已知长度进行比较的长度测量。

B.3.3.2 测量方法

用 10 块间隔为 2.5 mm 的专用量块($L=2.5,5,\dots,22.5,25 \text{ mm}$)对千分尺进行校准。

B.3.3.3 初始测量程序

——外径千分尺的读数与置于两测砧之间的量块长度进行比较。

——每块量块进行一次(校准)测量。其示值误差等于千分尺读数减去量块长度。

B.3.3.4 初始测量条件

——校准人员是富有经验的。

——室温未进行控制。

——全年室温的变化范围为: $20^\circ\text{C} \pm 8^\circ\text{C}$ 。

——在一小时内室温变化小于 0.5°C 。

B.3.4 测量设备图示(见图 B.3)

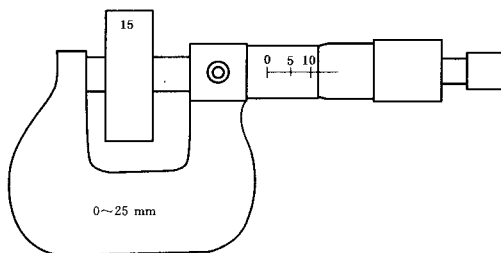


图 B.3 测量装置

B.3.5 不确定度贡献因素

不确定度贡献因素评注见表 B.4。

表 B.4 千分尺示值误差校准(25 mm 测量点)的不确定度分量概况及评注

符号	详细符号	不确定度分量名称	评注	
u_{SL}		量块长度 MPE_{SL}	量块的 MPE_{SL} 是一个特定的未知变量。初步确定选用 2 级量块	
u_{RR}	u_{RA}	分辨力	$u_{RA} = \frac{d}{2\sqrt{3}} = \frac{1 \mu\text{m}}{2\sqrt{3}} = 0.29 \mu\text{m}$	u_{RR} 等于两者之间较大者
	u_{RE}	重复性	用同一块 25 mm 量块,进行至少 15 次测量	
u_{TD}		温度差	观测到量块和千分尺之间的最大温度差为 1°C	
u_{TA}		温度	相对于标准参考温度 20°C 的最大偏差为 8°C	

B.3.6 首次评估

B.3.6.1 首次评估不确定度分量说明和计算

a) u_{SL} ——量块长度 B类评定

到目前为止,最终的 MPE_{SL} 值尚未确定,这是不确定度概算的任务之一。初步确定选用 2 级量块,其 MPE_{SL} 可从量块标准中的公差值查得。对于 25 mm 量块,其极限值为:

$$a_{SL} = 0.6 \mu\text{m}$$

根据经验,假定为矩形分布($b=0.6$),于是:

$$u_{SL} = 0.6 \mu\text{m} \times 0.6 = 0.36 \mu\text{m}$$

b) u_{RR} ——重复性/分辨力 B类评定

已进行了重复性实验。用该千分尺对 25 mm 量块进行了 15 次测量,得到实验标准差 $u_{RE} = 0.19 \mu\text{m}$ 。由于 $u_{RA} > u_{RE}$,因此选用分辨力引入的不确定度分量 u_{RA} 来作为 u_{RR} :

$$u_{RR} = 0.29 \mu\text{m}$$

c) u_{TD} ——温度差 B类评定

观测到千分尺和量块之间的最大温度差为 1°C 。由于不知此温度差的符号,故假设在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 范围内变化。假定量块和千分尺的线膨胀系数均为 $11 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。于是其极限值为:

$$a_{TD} = \Delta T \times \alpha \times D = 1^\circ\text{C} \times 11 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \times 25 \text{ mm} = 0.28 \mu\text{m}$$

假定为 U 形分布($b=0.7$),于是

$$u_{TD} = 0.28 \mu\text{m} \times 0.7 = 0.20 \mu\text{m}$$

d) u_{TA} ——温度 B类评定

观测到与标准参考温度 20°C 之间的最大温度差为 8°C 。由于无任何信息表明该温度差的符号,故假设在 $\pm 8^\circ\text{C}$ 范围内变化。同时假定工件和千分尺的线膨胀系数最大可能有 10% 的判别,于是其极限值为:

$$a_{TA} = 0.1 \times \Delta T_{20} \times \alpha \times D = 0.1 \times 8^\circ\text{C} \times 11 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \times 25 \text{ mm} = 0.22 \mu\text{m}$$

假定为 U 形分布,即 $b=0.7$:

$$u_{TA} = 0.2 \mu\text{m} \times 0.7 = 0.15 \mu\text{m}$$

B.3.6.2 首次评估各不确定度分量之间的相关性

估计各不确定度分量之间不存在相关性。

B.3.6.3 首次评估合成标准不确定度和扩展不确定度

由于各不确定度分量均不相关,故合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{u_{SL}^2 + u_{RR}^2 + u_{TD}^2 + u_{TA}^2}$$

代入 B.3.6.1 中的数据,得:

$$u_c = \sqrt{0.36^2 + 0.29^2 + 0.20^2 + 0.15^2} \mu\text{m} = 0.5 \mu\text{m}$$

对于 25 mm 测量点,其扩展不确定度(包含因子 $k=2$)为:

$$U_{25 \text{ mm}} = 0.5 \mu\text{m} \times 2 = 1.0 \mu\text{m}$$

而对于 0 mm 测量点,其扩展不确定度为:

$$U_{0 \text{ mm}} = 0.4 \mu\text{m} \times 2 = 0.8 \mu\text{m}$$

B.3.6.4 首次评估不确定度概算汇总(见表 B.5)

表 B.5 首次评估不确定度概算汇总示值误差测量(25 mm 测量点)

分量名称	评定类型	分布类型	测量次数	变化限 a^* 影响量单位	变化限 $a/\mu\text{m}$	相关系数	分布因子 b	不确定度分量 $u_x/\mu\text{m}$
u_{MSL} 量块 MPE_{SL}	B	矩形		$0.6 \mu\text{m}$	0.6	0	0.6	0.36
u_{RR} 分辨力	B	矩形		$0.5 \mu\text{m}$	0.5	0	0.6	0.29
u_{TD} 温度差	B	U形		1°C	0.20	0	0.7	0.20
u_{TA} 温度	B	U形		8°C	0.14	0	0.7	0.14
合成标准不确定度 u_c								0.50
扩展不确定度 $U(k=2)$								1.00

B.3.6.5 首次评估不确定度概算分析

主要的不确定度分量来源于量块和分辨力。没有必要再进行第二次评定来减小 u_c 和 U 。由于分辨力为 $1 \mu\text{m}$, 因此 $U < 1 \mu\text{m}$ 是无用的。校准时对温度的要求为 $20^\circ\text{C} \pm 8^\circ\text{C}$, 本例由于被测长度较短, 故在该温度范围内温度对测量不确定度影响甚小。对于大型千分尺, 这一温度变化范围将引入一占优势的 uncertain 分量。

保守地估计, 在 $0 \sim 25 \text{ mm}$ 范围内的所有测量点均采用 $U = 1 \mu\text{m}$ 。于是, 校准时各测量点示值误差之差的最大值应为:

$$\text{MPE}_{\text{ML}} - (2 \times U) = 6 \mu\text{m} - (2 \times 1.0 \mu\text{m}) = 4 \mu\text{m}$$

B.3.6.6 首次评估的结论

根据初始的假设和设定, 能满足目标不确定度的要求。这一事实证明了用 2 级量块作测量标准和 $20^\circ\text{C} \pm 8^\circ\text{C}$ 的室温条件是符合要求的。

B.3.7 第二次评估

不需要进行第二次评估。

B.4 测砧平面度的校准

B.4.1 任务和目标不确定度

B.4.1.1 测量任务

测量任务为对外径千分尺的两个 $\phi 6 \text{ mm}$ 的测砧的平面度进行测量。

B.4.1.2 目标不确定度

目标不确定度是 $0.15 \mu\text{m}$ 。

B.4.2 原理、方法、程序和条件

B.4.2.1 测量原理

与一标准平面相比较的光干涉测量。

B.4.2.2 测量方法

将光学平晶置于测砧端部, 其表面大体上与测砧表面平行。估读干涉条纹数目。

B.4.2.3 测量程序

—将平晶研合到测砧表面上。

—在干涉条纹接近对称的情况下(图 B.4b), 估读观察到的干涉条纹数目。

—取干涉条纹数与所用单色光半波长之乘积作为平面度偏差。

B.4.2.4 测量条件

—对环境温度条件无要求。

—平晶必须至少恒温 1 小时。

B.4.3 测量装置图示(见图 B.4)

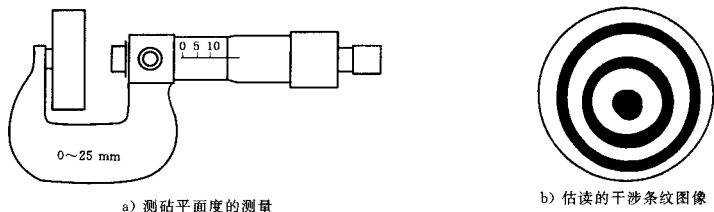


图 B.4 测量装置

B.4.4 不确定度贡献因素列表和分析(见表 B.6)

千分尺测砧平面度的校准只有两个值得考虑的不确定度分量。平晶的平面度和干涉图像读数的分辨力。读数时应使干涉图像接近于对称(见图 B.4b)。

表 B.6 测砧平面度校准的不确定度分量概述和评注

符号 低分辨力	符号 高分辨力	不确定度分量名称	评注
u_{SF}		平面度 MPE_{SF}	采用 $\phi 31$ mm 平晶。给出的平面度是对应于全面积的。实际使用面积仅为 $\phi 6$ mm~ $\phi 8$ mm
u_{RR}		分辨力	分辨力以 0.5 个条纹间距估计; $d=0.15 \mu\text{m}$

B.4.5 首次评估

B.4.5.1 首次评估不确定度分量和计算

a) u_{SF} ——平晶的平面度

B 类评定

MPE_{SF} 的最终值尚未确定,这是不确定度估算的任务之一。初步假定在平面中央 $\phi 8$ mm 面积内的 MPE_{SF} 为 $0.05 \mu\text{m}$ 。于是其极限值为:

$$a_{SF} = 0.05 \mu\text{m}$$

假定为矩形分布($b=0.6$),于是:

$$u_{SF} = 0.05 \mu\text{m} \times 0.6 = 0.03 \mu\text{m}$$

b) u_{RR} ——分辨力

B 类评定

假设波长为 $0.6 \mu\text{m}$ 。干涉条纹之间的高度差为半个波长,即 $0.3 \mu\text{m}$ 。因此分辨力为:

$$d = 0.5 \times 0.3 \mu\text{m} = 0.15 \mu\text{m}$$

假定为矩形分布($b=0.6$),于是不确定度分量为 u_{RR} :

$$u_{RR} = \frac{d}{2} \times 0.6 = \frac{0.15 \mu\text{m}}{2} \times 0.6 = 0.05 \mu\text{m}$$

B.4.5.2 首次评估不确定度分量之间的相关性

估计各不确定度分量之间不存在相关性。

B.4.5.3 首次评估合成标准不确定度和扩展不确定度

$$u_c = \sqrt{u_{SF}^2 + u_{RR}^2}$$

代入 B.4.5.1 中的数值后,得:

$$u_c = \sqrt{0.03^2 + 0.05^2} \mu\text{m} = 0.06 \mu\text{m}$$

于是扩展不确定度(包含因子 $k=2$)为:

$$U = 0.06 \mu\text{m} \times 2 = 0.12 \mu\text{m}$$

B.4.5.4 首次评估不确定度概算汇总(见表 B.7)

B.4.5.5 首次评估不确定度概算

可以看出,主要的不确定度分量来源于分辨力,或者说是干涉图像的读数。与分辨力相比,平晶平面度误差是比较不重要的。如果千分尺测砧的最大允许误差 $MPE_{MF} = 1 \mu\text{m}$,则扩展不确定度 U 为其大小的 12%。

表 B.7 测砧平面度校准的首次评估不确定度概算汇总

分量名称	评定类型	分布类型	测量次数	变化限 a^* 影响量单位	变化限 $a/\mu\text{m}$	相关系数	分布因子 b	不确定度分量 $u_{xi}/\mu\text{m}$
u_{SP} 平晶平面度	B	矩形		0.05 μm	0.05	0	0.6	0.03
u_{RR} 干涉图像分辨力	B	矩形		0.075 μm	0.075	0	0.6	0.05
合成标准不确定度 u_c								0.06
扩展不确定度 $U(k=2)$								0.12

B.4.5.6 首次评估结论

满足目标不确定度的要求。根据 GB/T 18779.1 对于单边公差判据,校准时测得的平面度误差的最大值应为:

$$MPE_{MF} - U = 1.00 \mu\text{m} - 0.12 \mu\text{m} = 0.88 \mu\text{m}$$

将 $\phi 8 \text{ mm}$ 的 MPE_{SP} 要求换算到 $\phi 30 \text{ mm}$ 的要求,见 B.6。

B.4.6 第二次评估

不需要进行第二次评估。

B.5 测砧平行度校准

B.5.1 任务和目标不确定度

B.5.1.1 测量任务

测量任务为对外径千分尺的两个 $\phi 6 \text{ mm}$ 测砧之间的平行度进行测量。

B.5.1.2 目标不确定度

目标不确定度: $0.30 \mu\text{m}$ 。

B.5.2 原理、方法、程序和条件

B.5.2.1 测量原理

与两个平行表面进行比较的光干涉测量。

B.5.2.2 测量方法

——将平行平晶置于两测砧之间,并调整到与一个测砧表面平行。

——观测另一个测砧上的干涉条纹数。

B.5.2.3 测量程序

——将平行平晶研合到一个测砧的表面上。调节平行平晶使其大体上平行于测砧的表面(得到对称的干涉图像见图 B.5b)。

——用千分尺测量平行平晶,调整测力到正常水平。

——观测在另一个测砧表面上的干涉条纹数(见图 B.5c)。

——取干涉条纹数和所用单色光半波长的乘积作为两测砧间的平行度误差。

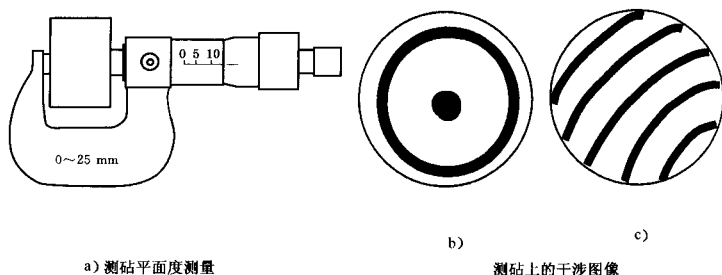


图 B.5 测量装置

B.5.2.4 测量条件

- 无温度要求。
- 平行平晶至少应恒温 1 小时。

B.5.3 测量装置图示(见图 B.5)

B.5.4 不确定度贡献因素列表和分析

测砧间平行度的校准有三个主要的不确定度分量(见表 B.8)：

- a) 平行平晶的平行度；
- b) 平行平晶和第一个测砧的准直；
- c) 第二个测砧上干涉图像读数的分辨力。

由平行平晶两表面的平面度误差引入的不确定度分量可以忽略,因此他比其他分量小得多。

表 B.8 两测砧间平行度校准的不确定度分量汇总和评注

符号 低分辨力	符号 高分辨力	不确定度分量名称	评 注
u_{SP}		平行平晶的平行度 MPE_{SP}	平行平晶直径为 $\phi 31$ mm。使用面积仅为 $\phi 6$ mm~ $\phi 8$ mm
u_{OP}		相对于第一个测砧的准直	假定最大准直误差为 0.5 个条纹
u_{KR}		分辨力	分辨力估计为 1 个条纹

B.5.5 首次评估

B.5.5.1 首次评估不确定度分量说明及计算

- a) u_{SP} ——平行平晶的平行度

B 类评定

MPE_{SP} 的最终值尚未确定,这是不确定度概算的任务之一。初步假定在表面中央 $\phi 8$ mm 面积内的 MPE_{SP} 为 $0.1 \mu\text{m}$ 。于是其极限值为：

$$a_{SP} = 0.1 \mu\text{m}$$

假定为矩形分布 ($b=0.6$)，于是：

$$u_{SP} = 0.1 \mu\text{m} \times 0.6 = 0.06 \mu\text{m}$$

- b) u_{OP} ——对第一个测砧的准直

B 类评定

假定波长为 $0.6 \mu\text{m}$ 。最大准直误差为 0.5 个条纹,即：

$$a_{OP} = 0.15 \mu\text{m}$$

假定为矩形分布 ($b=0.6$)：

$$u_{OP} = 0.15 \mu\text{m} \times 0.6 = 0.09 \mu\text{m}$$

c) u_{RR} ——第二个测砧的分辨力

B类评定

波长为 $0.6 \mu\text{m}$ 。分辨力假定为 1 个条纹,即 $0.3 \mu\text{m}$ 。于是不确定度分量 u_{RR} 为:

$$u_{RR} = \frac{d}{2} \times 0.6 = \frac{0.3 \mu\text{m}}{2} \times 0.6 = 0.09 \mu\text{m}$$

B.5.5.2 首次评估不确定度分量之间的相关性

估计各不确定度分量之间不存在相关性。

B.5.5.3 首次评估合成标准不确定度和扩展不确定度

$$u_c = \sqrt{u_{SP}^2 + u_{CP}^2 + u_{RR}^2}$$

代入 B.5.5.1 中的数值后,得:

$$u_c = \sqrt{0.06^2 + 0.09^2 + 0.09^2} \mu\text{m} = 0.14 \mu\text{m}$$

于是扩展不确定度(包含因子 $k=2$)为:

$$U = 0.14 \mu\text{m} \times 2 = 0.28 \mu\text{m}$$

B.5.5.4 首次评估不确定度概算汇总(见表 B.9)

表 B.9 两测砧间平行度校准的首次评估不确定度概算汇总

分量名称	评定类型	分布类型	测量次数	变化限 a^* 影响量单位	变化限 $a/\mu\text{m}$	相关系数	分布因子 b	不确定度分量 $u_{xi}/\mu\text{m}$
u_{SP} 平行平晶的平行度	B	矩形		$0.1 \mu\text{m}$	0.1	0	0.6	0.06
u_{CP} 对第一个测砧的准直	B	矩形		$0.15 \mu\text{m}$	0.15	0	0.6	0.09
u_{RR} 第二个测砧的读数分辨力	B	矩形		$0.15 \mu\text{m}$	0.15	0	0.6	0.09
合成标准不确定度 u_c								0.14
扩展不确定度 $U(k=2)$								0.28

B.5.5.5 首次评估不确定度概算分析

从不确定度概算可以看出,在两个测砧上的读数分辨力是主要的不确定度分量。而平行平晶几乎没有影响。

B.5.5.6 首次评估结论

满足目标不确定度的要求。根据 GB/T 18779.1 对于单边公差判据,在校准时测得平行度误差的最大值应是:

$$\text{MPE}_{MP} - U = 2.00 \mu\text{m} - 0.30 \mu\text{m} = 1.7 \mu\text{m}$$

将 $\phi 8 \text{ mm}$ 的 MPE_{SP} 要求换算到对 $\phi 30 \text{ mm}$ 的要求,见 B.6。

B.5.6 第二次评估

不需要进行第二次评估。

B.6 对校准标准的要求

对用于校准千分尺的校准标准的要求由 B.3, B.4 和 B.5 中的不确定度概算给出。

B.6.1 量块

前面所作的 uncertain 度概算的先决条件是采用钢(或陶瓷)制 2 级量块,其线膨胀系数 α 在 $11 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 左右。并且对每一个测量点均使用单块量块,以避免两个或多个量块间研合层的影响。

将 2 级量块改为 1 级量块,对 25 mm 测量点,扩展不确定度 U 将从 $1.0 \mu\text{m}$ 降为 $0.8 \mu\text{m}$,而 MPE_{ML} 将从 $2.0 \mu\text{m}$ 减小到 $1.6 \mu\text{m}$ 。由于千分尺的分辨力 $1 \mu\text{m}$, MPE_{ML} 减小 $0.4 \mu\text{m}$ 是无意义的,它对实际测量结果以及测量不确定度几乎没有影响。

在相同的校准条件下,对 1 级和 2 级两种量块进行了比较,见表 B.10。在全部四种情况下,均使用测量范围内最大点的不确定度。在所有的情况下,使用 1 级量块所起的作用不大。

关于量块的结论:在本校准条件下使用 2 级钢量块或陶瓷量块即可满足要求,并且应按 2 级量块的要求进行校准。

注:使用 2 级量块,并按 2 级要求进行校准将降低成本。

表 B.10 使用 1 级和 2 级量块校准外径千分尺的测量不确定度的比较

测量范围/ mm		量块级别 ISO 3650	不确定度分量/ μm				合成标准不确定度/ μm			
由	到		u_{SL}	u_{RR}	u_{TD}	u_{TA}	u_c	U	MPE _{ML} 减少(2U)	1 级和 2 级之差
0	25	2	0.34	0.29	0.20	0.14	0.50	1.00	2.00	0.4
		1	0.17				0.40	0.80	1.60	
25	50	2	0.46	0.40	0.40	0.28	0.78	1.56	3.12	0.4
		1	0.23				0.67	1.34	2.68	
50	75	2	0.57	0.50	0.60	0.42	1.05	2.10	4.20	0.5
		1	0.28				0.93	1.86	3.72	
75	100	2	0.69	0.60	0.80	0.56	1.34	2.64	3.28	0.5
		1	0.35				1.20	1.40	2.80	

B.6.2 平晶

在校准千分尺测砧的平面度时,仅使用 $\phi 31$ mm 总表面中的 $\phi 6$ mm~ $\phi 8$ mm 部分的面积。对 $\phi 8$ mm 的要求是最大平面度误差为 $0.05 \mu\text{m}$ 。利用这一初始条件,平晶对合成不确定度的影响可以忽略。如果平晶平面度误差的 MPE 值增加 50%,则不确定度从 $U=0.12 \mu\text{m}$ 增加到 $U=0.13 \mu\text{m}$ 。

可以假设平晶表面的形状误差是一球面。这是机器研磨加工过程中最通常出现的误差类型。如果是球面的话,则对 $\phi 6$ mm 或 $\phi 8$ mm 形状误差为 $0.05 \mu\text{m}$ 时,相当于 $\phi 30$ mm 的 $1.25 \mu\text{m}$ 平面度误差。对于 $1.25 \mu\text{m}$ 的形状误差,大部分生产厂都有能力自己进行测量,而不必求助于外部的校准实验室。

关于平晶的结论:

——如果用 $\phi 31$ mm 平行平晶的一个表面作为光学平面,则可以通过生产厂的内部校准来进行检验。

——市场上可以得到的最普通的平行平晶是在直径 30 mm 范围内最大平面度误差 $0.1 \mu\text{m}$ 。假设其形状为球面,则其表面的平面度误差比上述要求好 5 到 10 倍。

注:将一个光学平面置于另一个光学平面之上,通过干涉图像可以观察表面的球形形状。

B.6.3 平行平晶

在校准千分尺两测砧间的平行度时,仅使用 $\phi 31$ mm 总表面中 $\phi 6$ mm~ $\phi 8$ mm 的区域。对 $\phi 8$ mm 的区域,平行度误差的要求最大为 $0.10 \mu\text{m}$ 。

根据这一初始条件,平行平晶对合成不确定度的影响可以忽略。如果采用理想的平行平晶,则不确定度将由 $U=0.28 \mu\text{m}$ 减小到 $U=0.25 \mu\text{m}$ 。如果平行平晶的最大允许平行度误差增加 50%,则不确定度将由 $U=0.30 \mu\text{m}$ 增加到 $U=0.34 \mu\text{m}$ 。

假定平行平晶的表面是平面或球面,并且在直径 30 mm 区域内其平面度误差为 $0.1 \mu\text{m}$,于是对于 8 mm 时的 $0.1 \mu\text{m}$ 平行度误差,相当于直径 30 mm 时的 $0.4 \mu\text{m}$ 。符合这一要求的平行平晶可从市场上得到。

结论:

——商品平行平晶对测砧平行度校准的影响是如此之小,即使其 MPE 值增加 50% 到 100%,对千分尺的测量准确度也没有影响。

——光学平行平晶平行度的 MPE 值是如此之大,因此没有必要由外部经过认可的实验室来进行校准。

B.7 使用核查标准作为校准的补充

在生产领域通常使用核查标准(见图 B.6, 稍作改变的 PUMA 框图)。这使机床操作者有可能对测量设备进行核查并最终使测量正确。如果相对于生产公差而言, 测量设备的长期稳定性不好, 则核查标准是必须的。

为了说明核查标准对不确定度概算的作用, 仍采用千分尺的例子(见 B.2)并作些相应的改动。这将说明核查标准是如何消除, 改变, 和增加原来千分尺校准的不确定度概算中的不确定度分量的(在表 B.11 中用“*”标记)。

新的不确定度概算将可以指出, 核查标准是否能改善这一情况, 即减小车间内的测量不确定度。

在本情况下, 可以采用 25 mm 量块作为核查标准。最好采用数显千分尺, 因为比较容易用量块来进行调整。在参考点(25 mm)的位置, 测量一轴的直径。轴直径的最大变化范围假定是 25 mm \pm 0.2 mm。

千分尺的校准仍是必需的。校准程序将要作些改进。并且还要加上相对于测量点(即 25 mm)的小量偏差的影响。新的 MPE_{ML-CH} 不能小于 3 μ m, 这允许校准时在小范围内的示值变化为 1 μ m, 并且 $a_{ML-CH} = 1.5 \mu$ m。

在车间这样较差环境中设定参考点(25 mm), 将会引入新的不确定度分量。假定核查标准和千分尺的温度差小于 3 $^{\circ}$ C, 则新的不确定度分量 $u_{TI-CH} = 0.6 \mu$ m。

由三个操作者之间的零位变化所引起的不确定度分量将不存在, 代之以的是另一个由读数设定引起的分量。从理论上来说, 该分量 u_{NP-CH} 不可能小于 0.29 μ m。实验表明, 在车间条件下它至少约为 0.4 μ m。

所有的其他不确定度分量没有改变, 它们不受核查标准的影响。

由表 B.11 可知, 在本情况下, 测量不确定度的改进并不很大。从 $U = 7.58 \mu$ m(B.2 中的实例)降到 $U_{CH} = 6.74 \mu$ m, 总共降低了 0.84 μ m, 或者说原先 U 值的 11%。

这表明, 与使用核查标准相比, 对测量程序作其他的改变将对测量不确定度有大得多的影响。

表 B.11 首次评估不确定度概算汇总
用核查标准 25 mm 量块作为参考点测量 25 mm 的两点直径

分量名称	评定类型	分布类型	测量次数	变化限 a^* 影响量单位	变化限 a/μ m	相关系数	分布因子 b	不确定度分量 u_x/μ m
u_{ML-CH} 千分尺示值误差**	B	矩形		1.5 μ m	1.5	0	0.6	0.87
u_{MF} 千分尺平面度 1	B	高斯		1.0 μ m	0.15	0	0.5	0.50
u_{MF} 千分尺平面度 2	B	高斯		1.0 μ m	0.15	0	0.5	0.50
u_{MP} 千分尺平行度	B	高斯		2.0 μ m	2.0	0	0.5	1.00
u_{RR} 重复性	A		15			0		1.20
u_{NP-CH} 参考点**	A		15			0		0.40
u_{TI-CH} 温度差**	B	U形		3.0 $^{\circ}$ C	0.85	0	0.7	0.60
u_{TA} 温度	B	U形		15 $^{\circ}$ C $\alpha_1/\alpha_2 = 1.1$	0.4	0	0.7	0.28
u_{WE} 工件形状误差	B	矩形		3.0 μ m	3.0	0	0.6	1.80
合成标准不确定度 u_c								3.37
扩展不确定度 $U(k=2)$								6.74

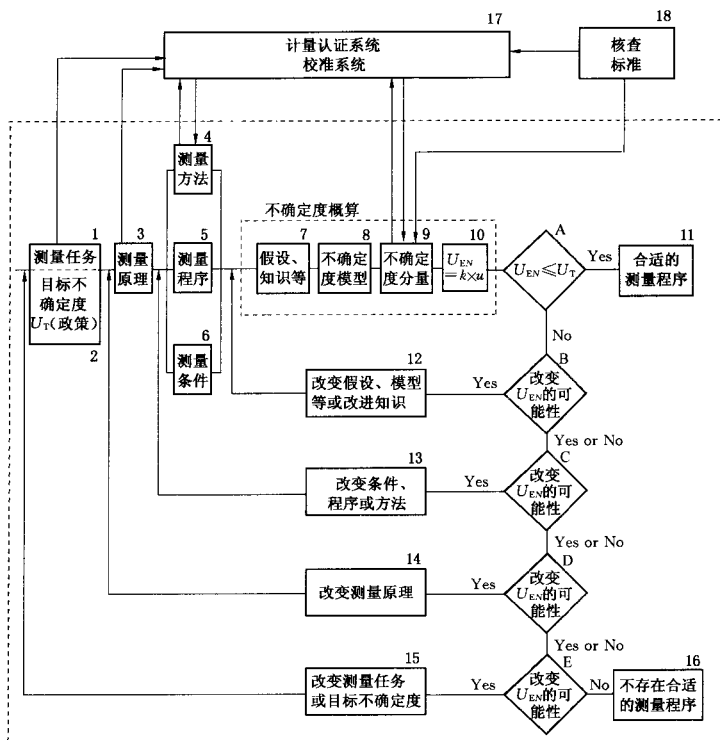


图 B.6 核查标准与 PUMA 的衔接

附录 C

(资料性附录)

圆度测量不确定度概算实例

本附录给出的实例仅用来说明 PUMA。它仅包括所说明情况下的较大的不确定度分量。对于不同的目标不确定度和不同的应用,其他的不确定度分量也许不可忽略。

C.1 任务和目标不确定度

C.1.1 测量任务

测量 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的基轴,其圆度误差预计为 $4 \mu\text{m}$ 。

C.1.2 目标不确定度

目标不确定度为 $0.20 \mu\text{m}$ 。

C.2 原理、方法、程序和条件

C.2.1 测量原理

机械接触法,与一特征圆进行比较。

C.2.2 测量方法

采用工作台旋转式圆度测量仪,测量相对于最小二乘圆圆心的半径变化。

C.2.3 测量程序

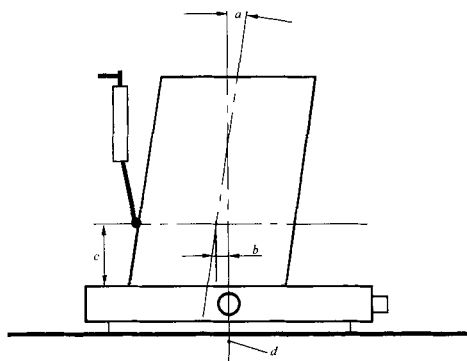
- 工件安放于转台上。
- 相对于转轴,对工件定心和准直。
- 仅测量一次(工作台旋转),并由该设备的软件进行计算。

C.2.4 测量条件

- 圆度仪已经过校准,其性能符合技术指标要求(见表 C.1)。
- 温度可控制到对测量结果不起作用的程度。
- 操作人员经过培训,并且熟悉圆度测量仪的使用。
- 圆度测量仪的安装正确。
- 在工作台上方的测量高度 h 处,工件对于旋转轴的定心偏差小于 $20 \mu\text{m}$ 。
- 工件轴与旋转轴的准直优于 $10 \mu\text{m}/100 \text{ mm}$ 。

C.3 测量设备图示(参见图 C.1)

C.4 不确定度贡献因素列表和分析(见表 C.1)



- a—准直偏差；
b—定心偏差；
c—测量高度；
d—旋转轴。

图 C.1 测量装置

表 C.1 圆度测量不确定度分量概况和评注

符号 低分辨力	符号 高分辨力	不确定度分量名称	评注
u_{IN}		噪声	校准过程中,测量的电噪声和机械噪声是常见的
u_{IC}		闭合误差	校准过程中,测量的闭合误差是常见的
u_{IR}		重复性	对测量标准进行校准时,进行了重复性测量
u_{IS}		主轴误差	使用标准球校准主轴径向误差。该圆度仪主轴的最大允许误差为: $MPE_{IS} = 0.1 \mu\text{m} + 1 \times 10^{-6} h$, h 为测量高度
u_{IM}		放大倍数误差	采用定标块对放大倍数进行校准,放大倍数的最大允许误差为 4%
u_{CF}		工件定心	在测量高度上,工件轴线对旋转轴的偏心不超过 $20 \mu\text{m}$
u_{AL}		工件准直	工件的轴相对于旋转轴的准直优于 1×10^{-4}

C.5 首次评估

C.5.1 首次评估不确定度分量及计算

- a) u_{IN} ——噪声

A类评定

为确定在实验室内仪器所检测到的噪声水平(电噪声和机械噪声),在一稳固的地基上进行实验。当主轴误差分离后,典型的噪声峰峰值为 $0.05 \mu\text{m}$ 。假定该误差与根据正态分布的部分误差相互作用。为了确保不低估该不确定度分量,峰峰值当作 $\pm 2s$ 估计。

于是,对测量不确定度的贡献为:

$$u_{IN} = \frac{0.05 \mu\text{m}}{4} = 0.013 \mu\text{m}$$

- b) u_{IC} ——闭合误差

B类评定

实验表明,闭合误差小于 $a_{1C}=0.05\ \mu\text{m}$ 。闭合误差与部分误差间的相互作用常常是很严重的。因此采用 U 形分布来模拟这种相互作用。于是,对测量不确定度的贡献为 ($b=0.7$):

$$u_{1C}=0.05\ \mu\text{m}\times 0.7=0.035\ \mu\text{m}$$

c) u_{1R} ——重复性

A 类评定

已对重复性进行了研究,并给出 6σ 重复性为 $0.1\ \mu\text{m}$ 。假定其为正态分布,于是对测量不确定度的贡献为:

$$u_{1R}=\frac{0.1\ \mu\text{m}}{6}=0.017\ \mu\text{m}$$

d) u_{1S} ——主轴误差

B 类评定

根据技术指标,在工作台上方 h 处圆度测量的主轴误差不大于:

$$\text{MPE}_{1S}=0.1\ \mu\text{m}+1\times 10^{-4}h$$

测量是在工作台上方 $h=25\ \text{mm}$ 处进行的,于是最大允许误差为 $a_{1S}=0.125\ \mu\text{m}$ 。

由于该误差是用一比较低的低通滤波器测量的,因此保守地估计这一误差对应于误差分布的 $95\%(2\sigma)$,于是对测量不确定度的贡献为 ($b=0.5$):

$$u_{1S}=0.125\ \mu\text{m}\times 0.5=0.063\ \mu\text{m}$$

e) u_{1M} ——放大倍数误差

B 类评定

根据用定标块进行的校准,放大倍数的最大允许误差 MPE 为 $\pm 4\%$ 。测量部分的圆度是 $4\ \mu\text{m}$ 量级。于是误差限为:

$$a_{1M}=4\ \mu\text{m}\times 0.04=0.16\ \mu\text{m}$$

假定放大倍数误差满足矩形分布 ($b=0.6$)。于是不确定度分量为:

$$u_{1M}=0.16\ \mu\text{m}\times 0.6=0.096\ \mu\text{m}$$

f) u_{1CE} ——工件定心

B 类评定

在测量高度上,工件轴与旋转轴的偏心不超过 $20\ \mu\text{m}$ 。由此得最大误差:

$$a_{1CE}<0.001\ \mu\text{m}$$

于是不确定度分量为:

$$u_{1CE}\approx 0$$

g) u_{1AL} ——工件准直

B 类评定

工件轴与旋转轴的准直优于 $10\ \mu\text{m}/100\ \text{mm}$ 。由此得最大误差:

$$a_{1AL}<0.001\ \mu\text{m}$$

于是不确定度分量为:

$$u_{1AL}\approx 0$$

C.5.2 首次评估不确定度分量之间的相关性

估计各不确定度分量之间无相关性。

C.5.3 首次评估合成标准不确定度和扩展不确定度

当各不确定度分量之间不存在相关性时,合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{u_{1N}^2 + u_{1C}^2 + u_{1R}^2 + u_{1S}^2 + u_{1M}^2 + u_{1CE}^2 + u_{1AL}^2}$$

代入 C.5.1 中给出的各分量的值,得到:

$$u_c = \sqrt{0.013^2 + 0.035^2 + 0.017^2 + 0.063^2 + 0.096^2 + 0 + 0}\ \mu\text{m} = 0.122\ \mu\text{m}$$

扩展不确定度为:

$$U = u_c \times k = 0.122\ \mu\text{m} \times 2 = 0.244\ \mu\text{m}$$

C.5.4 首次评估不确定度概算汇总(见表 C.2)

C.5.5 首次评估不确定度概算的分析

在首次评估的不确定度概算中两个最大的不确定度分量依次为 u_{1M} 和 u_{1S} 。前者来源于放大倍数误

差,后者是径向的主轴误差。

C.5.6 首次评估的结论

目标不确定度未得到满足。主轴误差是仪器的特征量,是无法改变的。因此只能减小放大倍数误差,这要求有更好的校准标准和仔细的校准程序。为了满足目标不确定度 $U_T=0.20\ \mu\text{m}$ 的要求,放大倍数误差应该降到约 2%。

表 C.2 首次评估圆度测量不确定度概算汇总

分量名称	评定类型	分布类型	测量次数	变化限 a^* 影响量单位	变化限 $a/\mu\text{m}$	相关系数	分布因子 b	不确定度分量 $u_{xx}/\mu\text{m}$
u_N 噪声	A		>10			0		0.013
u_C 闭合误差	B	U形		0.05 μm	0.05	0	0.7	0.035
u_R 重复性	A		>10			0		0.017
u_{IS} 主轴误差	B	高斯		0.125 μm	0.125	0	0.5	0.063
u_{IM} 放大倍数误差	B	矩形		4%	0.160	0	0.6	0.096
u_{CE} 工件对心	B	—		—	<0.001	0	—	0
u_{AL} 工件准直	B	—		—	<0.001	0	—	0
合成标准不确定度 u_c								0.122
扩展不确定度 $U(k=2)$								0.244

C.6 第二次评估

放大倍数误差设定为 2%。不确定度概算也应有相应的改变。表 C.3 给出新的第二次评估的不确定度汇总。此时,目标不确定度已得到满足。

表 C.3 第二次评估圆度测量不确定度概算汇总

分量名称	评定类型	分布类型	测量次数	变化限 a^* 影响量单位	变化限 $a/\mu\text{m}$	相关系数	分布因子 b	不确定度分量 $u_{xx}/\mu\text{m}$
u_N 噪声	A		>10			0		0.013
u_C 闭合误差	B	U形		0.05 μm	0.05	0	0.7	0.035
u_R 重复性	A		>10			0		0.017
u_{IS} 主轴误差	B	高斯		0.125 μm	0.125	0	0.5	0.063
u_{IM} 放大倍数误差	B	矩形		2%	0.080	0	0.6	0.048
u_{CE} 工件对心	B	—		—	<0.001	0	—	0
u_{AL} 工件准直	B	—		—	<0.001	0	—	0
合成标准不确定度 u_c								0.089
扩展不确定度 $U(k=2)$								0.178

附 录 D
(资料性附录)
在 GPS 矩阵模式中的位置

关于 GPS 标准矩阵模式见 ISO/TR 14638。

D.1 本部分及其使用的信息

本部分是 GPS 领域中,以 GUM(测量不确定度表示指南)为基础的测量不确定度评定的指南。它采用 GUM 的基本概念,提出了评定测量不确定度的实用性逼近程序。逼近程序是一种能经济地进行自调节的方法,在工业企业的计量活动中,它是以最小的成本获得最大的效益的工具。

逼近法(PUMA——不确定度管理)是开发和/或验证测量程序的一种方法,该测量程序评定得到的测量不确定度 U_E 可满足给定的目标不确定度 U_T ,即 $U_E < U_T$ 。

D.2 本部分在 GPS 矩阵模式中的位置

本部分是一项综合的 GPS 标准,它在通用的 GPS 矩阵中影响所有标准链的链环 4、5 和 6,如图 D.1 图解所示。

D.3 相关的标准

相关的标准为图 D.1 所示标准链涉及的标准。

图 D.1

参 考 文 献

- [1] ISO/TR 14638:1995 Geometrical Product Specifications (GPS)—Masterplan.
 - [2] WECC 19:1990, Guidelines for the Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibrations, published by the Western European Calibration Corporation-WECC.
-