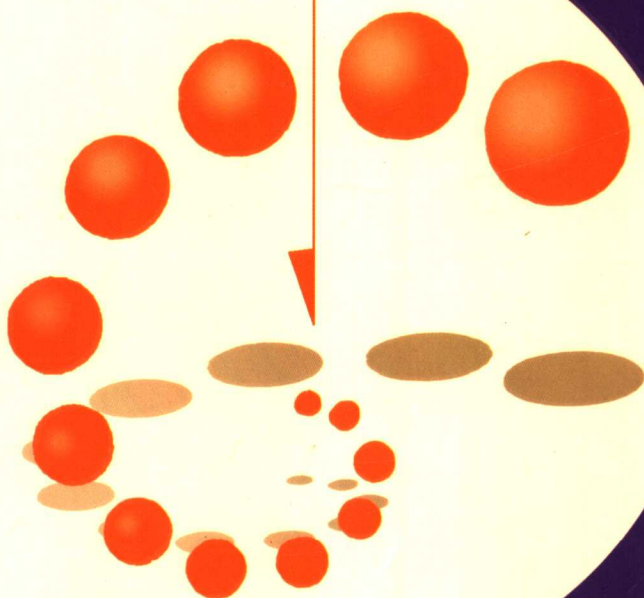


● 计量技术法规宣贯教材

几何量测量设备 校准的不确定度评定

倪育才 编著



中国计量出版社
CHINA METROLOGY PUBLISHING HOUSE



计量技术法规宣贯教材

几何量测量设备校准的 不确定度评定

倪育才 编著

中国计量出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

几何量测量设备校准的不确定度评定/倪育才编著. 北京: 中国计量出版社, 2006.2

计量技术法规宣贯教材

ISBN 7-5026-2276-4

I. 几… II. 倪… III. 几何量—计量仪器—不确定度—检定—规范—中国—教材
IV. TH710.6-65

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 155671 号

内 容 提 要

本书为国家计量技术法规 JJF 1130—2005《几何量测量设备校准中的不确定度评定指南》的宣贯教材, 对该指南的难点和重点做了透彻的解释。对规范涉及的相关内容, 尤其是国际上发布的相关文件的内容, 本书从读者的实际需要出发做了较详细的介绍, 主要有: 关于测量误差和测量不确定度的基本概念; 测量设备校准和产品检验的合格与不合格的判定规则; 测量仪器检定中的合格判定问题; 工件测量检验的合格判定; 校准溯源的等级设计实例等。

本书对计量部门、企业及技术机构的几何量计量校准和工件测量人员有重要参考价值。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

电话 (010) 64275360

<http://www.zgjl.com.cn>

北京市迪鑫印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

787 mm×1092 mm 16 开本 印张 6.75 字数 146 千字

2006 年 2 月第 1 版 2006 年 2 月第 1 次印刷

*

印数 1—3 000 定价: 20.00 元

前言

自 1993 年国际上发布了《测量不确定度表示指南》(简称 GUM) 以来,若干测量领域又根据本领域的实际情况和需要,相继出台了一些仅适用于各自领域的关于测量不确定度的评定指南。于是在这些领域,有两个文件可以作为评定测量不确定度的依据: GUM 或者各自领域的评定指南。在几何量测量领域,除了可以依据 GUM 外,国际标准化组织 (ISO) 在 1999 年又发布了 ISO/TS 14253-2《GPS 测量,测量设备校准和产品检验中的不确定度评定指南》。GPS 为“产品几何量技术规范”(Geometrical Product Specification) 的缩写。

国家计量技术规范 JJF 1130—2005《几何量测量设备校准中的不确定度评定指南》就是依据 ISO/TS 14253-2 而制定的。两者的差别在于 ISO/TS 14253-2 除了可以应用于测量设备的校准外,也可以应用于工件的测量检验。而 JJF 1130—2005 则仅涉及测量设备的校准,即其中不包括 ISO/TS 14253-2 中有关工件的测量检验部分。

本书作为国家计量技术规范 JJF 1130—2005《几何量测量设备校准中的不确定度评定指南》的宣贯教材,除了对 JJF 1130—2005 中的有关问题作较详细的解释以外,为了照顾到有些读者对测量不确定度的基本概念知之不多和缺乏测量不确定度评定的实际经验,以及为方便读者查阅起见,本书还包括一些与测量不确定度评定有关的其他内容,主要有:

- (1) 关于测量误差和测量不确定度的基本概念;
- (2) 测量不确定度评定的 GUM 方法;
- (3) 测量设备校准和产品检验中合格与不合格的判定规则,以及测量仪器检定中的合格判定问题;
- (4) 补充了 ISO/TS 14253-2 中有关工件的测量检验部分,特别是补充了校准溯源的等级设计实例,相信该实例对于大部分生产厂商来说是具有相当参考价值的。

由于依据不同的评定指南评定得到的测量不确定度在数值上多少会有些差异,于是不可避免地会提出究竟采用何种方法为宜的问题。实际上 ISO/TS 14253-2 已经对该问题作了回答,该文件首次给出了真不确定度 (true uncertainty)、约定真不确定度 (conventional true uncertainty) 和近似不确定度 (approximated uncertainty) 三个术语的定义。真不确定度的定义是“由完善的不确定度评定所得到的测量不确定度”。任何不确定度评定或多或少都会有缺陷,因此完善的不确定度评定是不存在的。这相当于将真值的概念借用到不确定度上。约定真不确定度的定义是“完全按照 GUM 所规定的详细程序评定得到的测量不确定度”,所以约定真不确定度也可以称为 GUM 不确定度。而近似不确定度的定义

是“按照迭代法这种简化的方法评定得到的测量不确定度”。由此可见，GUM给出的是约定的评定测量不确定度的方法，而 ISO/TS 14253-2 给出的迭代法是评定测量不确定度的近似方法。也就是说，若用两种方法评定得到的不确定度的差别可以忽略不计的话，则可以采用比较简单的近似方法，否则就应该采用 GUM 给出的约定方法。一般说来，近似不确定度均稍大于（或等于）GUM 不确定度。

ISO/TS 14253 实际上是一组系列文件，至今为止已发表了三部分。该系列文件主要是为了解决在合格评定中如何处理测量不确定度的问题。ISO 14253-1 给出了按规范检验合格或不合格的判定规则。ISO/TS 14253-2 给出了在 GPS 领域的工件和测量设备的测量检验中评定测量不确定度的方法。ISO/TS 14253-3 则给出了供方和用户如何对测量不确定度的陈述达成协议的处理程序。

文件第一部分的核心是合格和不合格的判定规则与测量不确定度有关。规则的出发点是测量不确定度永远不利于进行测量检验的一方，因此进行测量检验的一方往往会给出一个较小的并且得不到另一方认可的测量不确定度。于是在文件的第二部分对测量不确定度的评定方法作了规定。但由于测量不确定度不是一个纯客观的参数，多少会带一些主观色彩，因此测量一方即使完全按照规定对测量不确定度进行评定，但仍有可能得不到对方的认可。于是文件的第三部分给出了双方对测量不确定度无法达成协议时的处理程序。因此这三部分文件相互之间是密切相关的。本书对这三部分的内容均作了介绍。

笔者感谢李晓沛女士提供的 ISO 14253 系列文件的原件。

倪育才

2005 年 11 月

目 录

第一章 误差和测量不确定度的基本概念	(1)
第一节 术语和定义	(1)
第二节 误差	(8)
第三节 测量不确定度	(12)
第四节 测量误差和测量不确定度之间的区别	(16)
第五节 测量仪器和不确定度	(18)
第二章 用迭代法评定测量不确定度的基本原理	(20)
第一节 测量不确定度评定的 GUM 法和 ISO 法	(20)
第二节 用迭代法评定测量不确定度的基本原理	(21)
第三节 不确定度管理程序—PUMA	(22)
第三章 测量不确定度的评定方法	(27)
第一节 数学模型	(27)
第二节 不确定度分量	(31)
第三节 合成标准不确定度和扩展不确定度	(39)
第四章 不确定度的实际评定—PUMA 方法的不确定度概算	(43)
第一节 不确定度概算的先决条件	(43)
第二节 首次评估不确定度概算的标准程序	(44)
第三节 应用	(46)
第五章 工件和测量设备的合格判定	(51)
第一节 合格评定与不确定度	(51)
第二节 按规范检验合格和不合格的判定规则	(54)
第三节 双方对测量不确定度无法达成协议时的处理程序	(57)
第四节 计量检定的合格判定	(60)
第六章 用迭代法评定测量不确定的实例	(63)
第一节 标称直径 100 mm 环规的校准	(63)
第二节 圆度测量不确定度概算实例	(68)
第七章 校准溯源等级设计实例——基轴直径测量的校准溯源等级设计	(74)
第一节 局部直径测量的三级校准溯源等级设计	(74)
第二节 基轴直径测量	(75)
第三节 外径千分尺示值误差的校准	(83)
第四节 外径千分尺测砧平面度的校准	(87)
第五节 外径千分尺两测砧间平行度的校准	(89)
第六节 对校准外径千分尺用的校准标准的要求	(92)
第七节 使用核查标准作为校准的补充	(94)
附录 通用符号表	(97)
参考文献	(99)

第一章

误差和测量不确定度的基本概念

第一节 术语和定义

本节给出本书所采用的主要术语的定义，它们是在各种国内或国际文件中明确给出的。未标明出处的术语均取自计量技术规范 JJF 1001—1998《通用计量术语及定义》。源于其他文件的术语则给出其出处。

1 [量的] 真值 true value [of a quantity]

与给定的特定量的定义一致的值。

注：

- (1) 量的真值只有通过完善的测量才有可能获得。
- (2) 真值按其本性是不确定的。
- (3) 与给定的特定量定义一致的值不一定只有一个。

2 [量的] 约定真值 conventional true value [of a quantity]

对于给定目的具有适当不确定度的、赋予特定量的值，有时该值是约定采用的。

例：a) 在给定地点，取由参考标准复现而赋予该量的值作为约定真值。

b) 常数委员会 (CODATA) 1986 年推荐的阿伏加得罗常数值 $6.022\ 136\ 7 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ 。

注：

- (1) 约定真值有时称为指定值、最佳估计值、约定值或参考值。
- (2) 常常用某量的多次测量结果来确定约定真值。

3 测量不确定度 uncertainty of measurement

表征合理地赋予被测量之值的分散性，与测量结果相联系的参数。

注：

- (1) 此参数可以是诸如标准偏差或其倍数，或说明了置信水准的区间的半宽度。
- (2) 测量不确定度由多个分量组成。其中一些分量可用测量列结果的统计分布估算，并用实验标准偏差表征。另一些分量则可用基于经验或其他信息的假定概率分布估算，也可用标准偏差表征。
- (3) 测量结果应理解为被测量之值的最佳估计，而所有的不确定度分量均贡献给了分散性，包括那些由系统效应引起的（如，与修正值和参考测量标准有关的）分量。

4 标准不确定度 standard uncertainty

以标准偏差表示的测量不确定度。

5 不确定度的 A 类评定 type A evaluation of uncertainty

用对观测列进行统计分析的方法，来评定标准不确定度。

注：不确定度的 A 类评定，有时也称为 A 类不确定度评定。

6 不确定度的 B 类评定 type B evaluation of uncertainty

用不同于对观测列进行统计分析的方法，来评定标准不确定度。

注：不确定度的 B 类评定，有时也称为 B 类不确定度评定。

7 合成标准不确定度 combined standard uncertainty

当测量结果是由若干个其他量的值求得时，按其他各量的方差和协方差算得的标准不确定度。

8 不确定度分量 uncertainty component u_{xx}

不确定度因素 xx 的标准不确定度。

注：在迭代法中，符号 u_{xx} 用于所有的不确定度分量，这与 JJF 1059 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。

[ISO/TS 14253-2: 1999]

9 扩展不确定度 expanded uncertainty

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：总是用大写字母 U 表示测量的扩展不确定度。

10 包含因子 coverage factor

为求得扩展不确定度，对合成标准不确定度所乘之数字因子。

注：

(1) 包含因子等于扩展不确定度与合成标准不确定度之比。

(2) 包含因子有时也称覆盖因子。

11 真不确定度 true uncertainty 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。

[ISO/TS 14253-2: 1999]

12 约定真不确定度—GUM 不确定度 conventional true uncertainty—GUM uncertainty U_C

完全按照 GUM 或 JJF 1059 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规范评定得到的不确定度。

[ISO/TS 14253-2: 1999]

13 近似不确定度 approximated uncertainty U_{EN}

按照迭代法这种简化的方法评定得到的测量不确定度。

注：脚标 N 表示 U_{EN} 是通过 N 次迭代评定得到的。当知道迭代次数不重要时，可以使用不带迭代次数的符号 U_E 。

[ISO/TS 14253-2: 1999]

14 [测量或校准的] 目标不确定度 target uncertainty (for a measurement or calibration) U_T

对给定的测量任务所能得到的最佳不确定度。

注：

(1) 目标不确定度是管理决定的结果，包括诸如设计、制造、质量保证、服务、市场、销售和分包等方面在内。

- (2) 目标不确定度的决定应(最好)考虑到技术指标(公差或最大允许误差 MPE), 工艺能力、成本、风险以及 GB/T 19001—2000 中的分条款 7.6, GB/T 19004—2000 中的分条款 7.6, GB/T 18779.1 中 7.6 的要求。

[ISO/TS 14253-2: 1999]

15 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例如用户规定。

[ISO/TS 14253-2: 1999]

16 [测量或校准的] 不确定度概算 uncertainty budget (for a measurement or calibration)

对不确定度分量评定的总结性表述, 这些分量对测量结果的不确定度有影响。

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。
- (2) “概算”一词的意思为根据测量程序, 测量条件和假设, 对不确定度分量, 以及它们的合成标准不确定度和扩展不确定度的数值进行分配。

[ISO/TS 14253-2: 1999]

17 不确定度管理 uncertainty management

根据测量任务和目标不确定度, 使用不确定度概算技术, 给出合适的测量程序的过程。

[ISO/TS 14253-2: 1999]

18 不确定度因素 uncertainty contributor x_x

测量过程的测量不确定度来源。

[ISO/TS 14253-2: 1999]

19 不确定度因素的极限值(变化限) limit value (variation limit) for an uncertainty contributor a_{xx}

不确定度因素 x_x 极值的绝对值。

[ISO/TS 14253-2: 1999]

20 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的值与输入量(激励源)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) 在计量技术规范 JJF 1130—2005 的黑箱模型中, 假设各不确定度分量具有可加性^①。影响量已被换算到被测量的单位, 并且灵敏系数等于 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。

[ISO/TS 14253-2: 1999]

21 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测量与被测量有函数关

^① 可加性的意思是指由于各影响量的不确定度分量均具有与被测量相同的量纲, 因此各分量可以直接合成。

系的其他量而得到的。

[ISO/TS 14253-2: 1999]

22 测量任务 measuring task

根据定义对被测量的定量确定。

[ISO/TS 14253-2: 1999]

23 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复杂特性依据的 (一个或多个) 测量任务。

注: 基本测量的实例:

- a) 确定工件某特性的直线度偏差时, 若干次独立的偏差测量中的某一次测量;
- b) 在测量千分尺示值误差范围时, 若干次独立的示值误差测量中的某一次测量。

[ISO/TS 14253-2: 1999]

24 总体测量任务 overall measurement task

需要若干个基本测量, 甚至可能是若干个各不相同的基本测量作为基础进行评价的复杂测量任务。

注: 总体测量任务实例:

- a) 工件某计量特性的直线度测量;
- b) 千分尺示值误差的范围。

[ISO/TS 14253-2: 1999]

25 影响量 influence quantity

不是被测量但对测量结果有影响的量。

例: a) 用来测量长度的千分尺温度;

b) 交流电位差幅值测量中的频率;

c) 测量人体血液样品血红蛋白浓度时的胆红素的浓度。

26 工件的影响量 influence quantity of a workpiece

工件的特性, 它能影响对该工件的测量结果。

[ISO/TS 14253-2: 1999]

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

测量仪器的特性, 它能影响使用该仪器得到的测量结果。

[ISO/TS 14253-2: 1999]

28 [测量] 误差 error [of measurement]

测量结果减去被测量的真值。

注:

- (1) 由于真值不能确定, 实际上用的是约定真值。
- (2) 当有必要与相对误差相区别时, 此术语有时称为测量的绝对误差。注意不要与误差的绝对值相混淆, 后者为误差的模。

29 相对误差 relative error

测量误差除以被测量的真值。

注: 由于真值不能确定, 实际上用的是约定真值。

30 随机误差 random error

测量结果与在重复性条件下, 对同一被测量进行无限多次测量所得结果的平均值之差。

注:

- (1) 随机误差等于误差减去系统误差。
- (2) 因为测量只能进行有限次数, 故可能确定的只是随机误差的估计值。

31 系统误差 systematic error

在重复性条件下, 对同一被测量进行无限多次测量所得结果的平均值与被测量的真值之差。

注:

- (1) 如真值一样, 系统误差及其原因不能完全获知。
- (2) 对测量仪器而言, 其系统误差也称为测量仪器的偏移。

32 [测量仪器的] 最大允许误差 maximum permissible errors [of a measuring instrument]

对给定的测量仪器, 规范、规程等所允许的误差极限值。

注: 有时也称测量仪器的允许误差限。

33 [测量仪器的] 示值 indication [of a measuring instrument]

测量仪器所给出的量的值。

注:

- (1) 由显示器读出的值可称为直接示值, 将它乘以仪器常数即为示值。
- (2) 这个量可以是被测量、测量信号或用于计算被测量之值的其他量。
- (3) 对于实物量具, 示值就是它所标出的值。

34 测量仪器的 [示值] 误差 error [of indication] of a measuring instrument

测量仪器示值与对应输入量的真值之差。

注:

- (1) 由于真值不能确定, 实际上用的是约定真值。
- (2) 此概念主要应用于与参考标准相比较的仪器。
- (3) 就实物量具而言, 示值就是赋予它的值。

35 [测量仪器的] 引用误差 fiducial error [of a measuring instrument]

测量仪器的误差除以仪器的特定值。

注: 该特定值一般称为引用值, 例如, 可以是测量仪器的量程或标称范围的上限。

36 公差 tolerance T

上公差限和下公差限之差。

注:

- (1) 公差是一个没有符号的量。
- (2) 公差可以是双侧的或单侧的 (最大允许值仅在一侧, 另一个极限值为零), 但标称值不一定在公差区内。

[ISO 14253-1: 1998]

37 公差区 tolerance zone

公差范围 tolerance interval

特征量在公差限之间的一切变动值, 包括公差限本身。

[ISO 14253-1: 1998]

38 公差限 tolerance limits**极限值** limiting values

特征量的给定允许值的上界和（或）下界的规定值。

[ISO 14253-1: 1998]

39 合格（符合） conformance, conformity

满足规定的要求。

[ISO 14253-1: 1998]

40 合格区 conformance zone

被扩展不确定度 U 缩小的规范区（见图 1-1）。

注：在上规范限和（或）下规范限处，规范区被扩展不确定度缩小。

[ISO 14253-1: 1998]

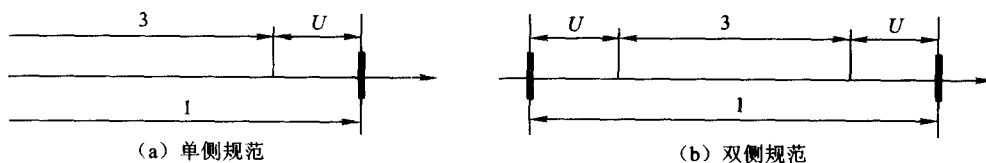


图 1-1 合格区

1—规范区；3—合格区

41 不合格（不符合） non-conformance, non-conformity

未满足规定的要求。

[ISO 14253-1: 1998]

42 不合格区 non-conformance zone

被扩展不确定度 U 扩大的规范区外的区域（见图 1-2）。

注：在上规范限和（或）下规范限处，规范区被扩展不确定度扩大。

[ISO 14253-1: 1998]

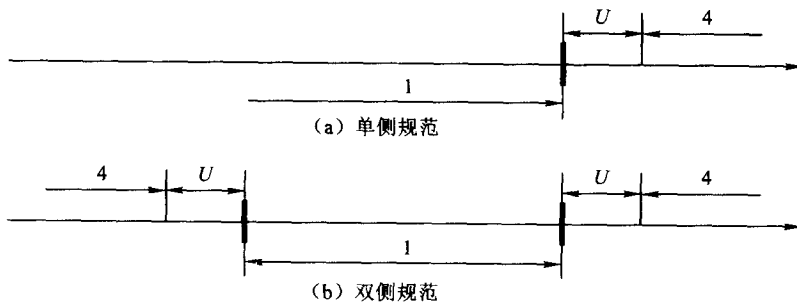


图 1-2 不合格区

1—规范区；4—不合格区

43 规范^① specification

工件特征量的公差，或测量设备特征量的最大允许误差 MPE。

① 在计量技术规范 JJF 1130—2005 中，有时也译为“技术指标”。

注：规范应涉及或包括图样、样板或其他有关文件，并指明用以检查合格与否的方法和判据。

[ISO 14253-1: 1998]

44 规范区 specification zone

规范范围 specification interval

工件特征量或测量设备特征量在规范限之间的一切变动值，包括规范限本身。

[ISO 14253-1: 1998]

45 规范限 specification limits

工件特征量的公差限或测量设备特征量的最大容许误差。

[ISO 14253-1: 1998]

46 上规范限 (USL) upper specification limit

给定的下列规定值：

- 工件特征量公差限的允许值上界；或
- 测量设备特征量允许误差的允许值上界。

[ISO 14253-1: 1998]

47 下规范限 (LSL) lower specification limit

给定的下列规定值：

- 工件特征量公差限的允许值下界；或
- 测量设备特征量容许误差的允许值下界。

[ISO 14253-1: 1998]

48 不确定区 uncertainty range

规范限附近的区域，考虑到测量不确定度后，在该区域内无法判断合格或不合格（见图 1-3）。

注：

- (1) 不确定区位于单侧规范限或双侧规范限两侧，其宽度为 $2U$ 。
- (2) 在测量结果的上界和下界处，测量不确定度的大小可以不同。

[ISO 14253-1: 1998]

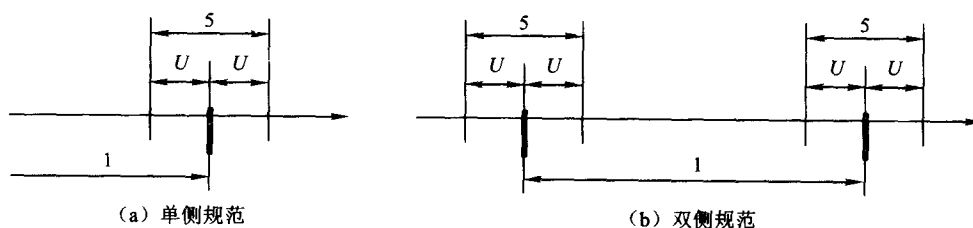


图 1-3 不确定区

1—规范区；5—不确定区

49 偏差 deviation

一个值减去其参考值。

50 修正值 correction

用代数方法与未修正测量结果相加，以补偿其系统误差的值。

注:

- (1) 修正值等于负的系统误差。
- (2) 由于系统误差不能完全获知, 因此这种补偿并不完全。

51 修正因子 correction factor

为补偿系统误差而与未修正测量结果相乘的数字因子。

注: 由于系统误差不能完全获知, 因此这种补偿并不完全。

52 测量结果的完整表述 (y') result of measurement, complete statement

包括扩展不确定度 U 的测量结果。

注: 测量结果的完整表述由公式 $y' = y \pm U$ 表示。

[ISO 14253-1: 1998]

53 校准 calibration

在规定条件下, 为确定测量仪器或测量系统所指示的量值, 或实物量具或参考物质所代表的量值, 与对应的由标准所复现的量值之间关系的一组操作。

注:

- (1) 校准结果既可给出被测量的示值, 又可确定示值的修正值。
- (2) 校准也可确定其他计量特性, 如影响量的作用。
- (3) 校准结果可以记录在校准证书或校准报告中。

第二节 误差

一、测量误差的基本概念

测量误差常简称为误差。国家计量技术规范 JJF1001—1998《通用计量术语及定义》中给出测量误差的定义为“测量结果减去被测量的真值”。根据误差的定义, 若要得到误差就必须知道真值。但由于真值无法得到, 因此严格意义上的误差也无法得到。在误差定义的注解中同时还指出: “由于真值不能确定, 实际上用的是约定真值”, 这表明实际上的误差都是由约定真值得到的。对大部分的长度测量来说, 一般都有一个测量标准, 其标准值通常由上级部门的检定证书或校准证书提供。在测量中该标准值就可以作为约定真值使用, 但此时还需考虑约定真值本身的误差, 因而可能得到的只是误差的估计值。何况有些测量连约定真值都无法得到, 例如地球和月球间距离的测量。对于这一类既不可能知道真值, 又无法知道其约定真值的测量, 是不可能得到符合定义要求的误差的。

此外, 过去在“误差”这一术语的使用上也经常出现概念混乱的情况, 即“误差”这一术语的使用经常有不符合误差定义的情况, 或者说, 过去我们经常会错误地使用“误差”这一术语。根据误差的定义, 误差是一个差值, 它是测量结果与真值或约定真值之差。因此在数轴上它表示为一个点, 而并不表示为一个区间或范围。既然它是两个量的差值, 就应该是一个具有确定符号的量值。当测量结果大于真值时, 误差为正值; 反之, 当测量结果小于真值时, 误差为负值。由此可见, 误差这一参数既不当, 也不可能以“ $\pm$ ”号的形式表示。过去人们在使用“误差”这一术语时, 有时是符合误差定义的, 例如测量仪器的示值误差, 它表示“测量仪器的示值与对应输入量的真值之差”。但经常也有误用的情况, 例如过去通

过误差分析所得到的测量结果的所谓“误差”，实际上并不是真正的误差，因为它不符合误差的定义。实际上，它是被测量不能确定的范围。

例如经常有人说“千分尺的示值误差为 $\pm 3\mu\text{m}$ ”，其实这种说法是值得商榷的。因为 $\pm 3\mu\text{m}$ 并不是千分尺的示值误差，而是千分尺示值误差可能出现的范围。一把合格的千分尺，其各测量点的示值误差可能出现在 $-3\mu\text{m}$ 到 $+3\mu\text{m}$ 中间的任何值。测量仪器各个测量点的示值误差必须通过校准才能得到，并且对各个测量点而言一般也不存在一个统一的示值误差。因此，正确的说法应是“千分尺示值的最大允许误差是 $\pm 3\mu\text{m}$ ”。必须要强调，既然误差等于测量结果减去被测量的真值（或约定真值），因此误差只有通过测量才能得到。通过所谓的分析方法是得不到误差的，得到的只是误差可能出现的范围，或者说通过分析方法得到的不可能是误差。

误差经常用于已知约定真值的情况，例如经常用示值误差来表示测量仪器的特性，测量仪器的示值误差是相对于校准该仪器时对应输入量的约定真值而言的。

产生误差的原因是测量过程的缺陷，而测量过程的缺陷可能源自于各种各样的原因，因此测量结果的误差往往是由多个分量组成的。

测量误差常称为绝对误差，这是为区别于相对误差而言的。相对误差定义为测量误差除以被测量的真值，实际上只能用测量误差除以被测量的约定真值。而在具体工作中则通常用测量结果来代替约定真值而得到相对误差。绝对误差的量纲与被测量的量纲相同，而相对误差是无量纲量，或者说其量纲为1。

必须注意，当被测量可能接近于零时，就不能用相对误差来表示，例如测量仪器的示值误差。因此测量仪器通常用引用误差表示，引用误差的定义为：测量仪器的误差除以仪器的特定值。定义中的特定值一般称为引用值，通常采用测量仪器的量程或标称范围的上限。

二、测量误差的分类

ISO/TS14253-2 将测量误差分为四类：系统误差、随机误差、漂移和粗差。图 1-4 给出系统误差，随机误差，漂移和粗差的图解。

图中，直线 1 表示真值，它是不随时间而变化的，因此是一条与时间坐标 X 轴平行的直线，但其真正位置是不可能确切知道的。2 和 3 表示在两个不同的时刻 t_1 和 t_2 进行测量所得到的分散性，即被测量的概率密度分布曲线。由于漂移的存在，在两个不同的时刻得到的多次测量结果的平均值是不同的。斜线 4 表示测量结果的漂移，即无限多次测量结果的平均值随时间的变化。5 和 6 分别表示在时刻 t_1 和 t_2 进行无限多次测量所得结果的平均值（即他们的数学期望）。于是根据系统误差的定义，它们与真值 1 的差 7 和 8 就分别表示在两个不同时刻 t_1 和 t_2 进行测量时

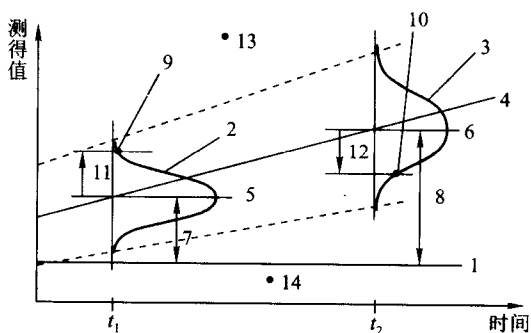


图 1-4 测量结果的误差类型图解

- 1—真值；2—分散性 1；3—分散性 2；
- 4—漂移；5—无限多次测量结果的平均值 1；
- 6—无限多次测量结果的平均值 2；7—系统误差 1；
- 8—系统误差 2；9—测量结果 1；10—测量结果 2；
- 11—随机误差 1；12—随机误差 2；13—粗差；14—粗差

的系统误差。9 和 10 分别表示在时刻 t_1 和 t_2 具体进行测量时得到的某个测量结果。它们与无限多次测量结果的平均值 5 和 6 之差即为随机误差（图中 11 和 12）。注意图中表示随机误差 11 和 12 的箭头方向即表示随机误差的符号。如图所示，前者随机误差大于零，后者则小于零。两条虚线之间所夹的区域为不确定区域，是测量结果可能出现的范围。出现在不确定区域之外的测量结果 13 和 14 是在计算中应予以剔除的粗差（也称离群值）。

实际上，漂移是由不受控的影响量的系统影响所引起的，常常表现为时间效应或磨损效应。从实质上来说，漂移是一种随时间或随使用次数而改变的系统误差。测量结果中的粗差则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。产生粗差的另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。必须将粗差和其他几种误差相区分，粗差是不可能再进一步描述的。粗差既不可能被定量地描述，也不能成为测量不确定度的一个分量。由于粗差的存在，使测量结果中可能存在异常值。在计算测量结果和进行测量不确定度评定之前，必须剔除测量结果中的异常值。异常值的剔除应通过对数据作适当的检验，并按一定的规则进行。

因此，一般说来可以将误差分为系统误差和随机误差两类。

三、系统误差和随机误差

1 系统误差

系统误差的定义为：在重复性条件下，对同一被测量进行无限多次测量所得结果的平均值与被测量的真值之差。

注：

（1）如真值一样，系统误差及其原因不能完全获知。

（2）对测量仪器而言，其系统误差也称为测量仪器的偏差。

由定义可知，系统误差仅与无限多次测量结果的平均值有关，而与在重复性条件下得到的各测量结果的数值大小无关。因此，在重复性条件下得到的不同测量结果应该具有相同的系统误差。

由于系统误差和真值有关，而真值是无法确切知道的，只能用约定真值代替，因而可能得到的只是系统误差的估计值，并具有一定的不确定度。系统误差可以通过对测量结果进行修正而消除。由于误差等于负的修正值，因此系统误差的不确定度就是修正值的不确定度。

不宜按过去的说法将系统误差分成已定系统误差和未定系统误差。也不宜说未定系统误差按随机误差处理。未定系统误差其实是不存在的，过去所说的未定系统误差从本质上说并不是误差，而是不确定度。

系统误差一般来源于影响量，它对测量结果的影响已经被识别并可以定量地进行估算。这种影响称之为“系统效应”。若该效应比较显著，也就是说如果系统误差比较大，则可以对测量结果进行修正而予以补偿。修正前、后的测量结果分别称为未修正测量结果和已修正测量结果。

2 随机误差

随机误差的定义为：测量结果与在重复性条件下，对同一被测量进行无限多次测量所得结果的平均值之差。

注：

(1) 随机误差等于误差减去系统误差。

(2) 因为测量只能进行有限次数，故可能确定的只是随机误差的估计值。

根据定义，若测量结果为无限多次测量结果的平均值，显然此时的随机误差为零，也就是说测量结果中已经不含有随机误差分量，只存在系统误差。但由于实际上不可能进行无限多次测量，因而在测量结果中随机误差分量和系统误差分量都存在。在重复性条件下得到的不同测量结果具有不同的随机误差，但有相同的系统误差。例如，在短时间内对某一物体的长度连续测量两次，虽然得到的测量结果可能不同，例如分别为 10.006mm 和 10.008mm，即它们的随机误差各不相同，但它们的系统误差是相同的。

直到现在，有许多新出版的关于误差或不确定度的教科书中，还经常将由多次重复测量得到的结果通过贝塞尔公式计算得到的实验标准差错误地称为“随机误差”。1993 年前，随机误差被定义为在同一量的多次测量过程中，以不可预知方式变化的测量误差分量。这里所谓的不可预知分量是指在相同测量条件下的多次测量中，误差的符号及其绝对值变化不定的分量。其大小用多次重复测量结果的实验标准差表示。1993 年后，随机误差的定义已经改变，因此不应该再按照过去的定义来使用“随机误差”这一术语。现在随机误差是按其本质来定义的。但由于该定义中涉及无限多次测量所得结果的平均值，因此与系统误差一样，能确定的同样只是随机误差的估计值。随机误差一般来源于影响量的随机变化，故称之为“随机效应”。正是这种随机效应导致了测量结果的分散性。就单个测量结果而言，随机误差的符号和绝对值是不可预知的。但就相同条件下多次测量结果而言，其总体上仍存在一定的规律性，故称为统计规律性。

随机误差的统计规律性主要表现在下述三方面：

(1) 对称性

指绝对值相等而符号相反的误差，出现的次数大致相等。也就是说，测得值以其算术平均值为中心对称地分布。

(2) 有界性

指测得值的随机误差的绝对值不会超过一定的界限。也就是说，不会出现绝对值很大的随机误差。

(3) 单峰性

所有的测得值以他们的算术平均值为中心相对集中地分布，绝对值小的误差出现的机会大于绝对值大的误差。

由于随机变量的数学期望即是对该随机变量进行无限多次测量的平均值，因此也可以说，随机误差是指测量误差中数学期望为零的误差分量，而系统误差则是指测量误差中数学期望不为零的误差分量。

根据定义，误差、系统误差和随机误差均表示两个量值之差，因此随机误差和系统误差也都应该具有确定的符号，同样也都不应当以“ $\pm$ ”号的形式出现。由于随机误差和系统误差都是对应于无限多次测量的理想概念，而实际上无法进行无限多次测量，只能用有限次测量的结果作为无限多次测量结果的估计值，因此可以确定的只是随机误差和系统误差的估计值。