

第五章 计量基础

第一节 基本概念

一、计量的内容、分类和特点

(一)计量的内容

自然界的一切现象或物质，都是通过一定的“量”来描述和体现的。也就是说，“量是现象、物体或物质可定性区别与定量确定的一种属性”。因此，要认识大千世界和造福人类，就必须对各种“量”进行分析和确认，既要区分量的性质，又要确定其量值。计量正是达到这种目的的重要手段之一。从广义上说，计量是对“量”的定性分析和定量确认的过程。

计量是实现单位统一、保障量值准确可靠的活动。计量学是关于测量的科学，它涵盖测量理论和实践的各个方面，而不论测量的不确定度如何，也不论测量是在哪个领域中进行的。为了经济而有效地满足社会对测量的需要，应从法制、技术和管理等方面开展计量管理工作。

在相当长的历史时期内，计量的对象主要是物理量。在历史上，计量被称为度量衡，即指长度、容积、质量的测量，所用的器具主要是尺、斗、秤。随着科技、经济和社会的发展，计量的对象逐渐扩展到工程量、化学量、生理量，甚至心理量。与此同时，计量的内容也在不断地扩展和充实，通常可概括为六个方面：

- (1) 计量单位与单位制；
- (2) 计量器具(或测量仪器)，包括实现或复现计量单位的计量基准、计量标准与工作计量器具；
- (3) 量值传递与溯源，包括检定、校准、测试、检验与检测；
- (4) 物理常量、材料与物质特性的测定；
- (5) 测量不确定度、数据处理与测量理论及其方法；
- (6) 计量管理，包括计量保证与计量监督等。

(二)计量的分类

计量涉及社会的各个领域。根据其作用与地位，计量可分为科学计量、工程计量和法制计量三类，分别代表计量的基础性、应用性和公益性三个方面。

(1)科学计量是指基础性、探索性、先行性的计量科学研究，它通常采用最新的科技成果来准确定义和实现计量单位，并为最新的科技发展提供可靠的测量基础。

(2)工程计量，又称工业计量，是指各种工程、工业、企业中的实用计量。随着产品技术含量提高和复杂性的增大，为保证经济贸易全球化所必需的一致性和互换性，它已成为生产过程控制不可缺少的环节。

(3)法制计量是指由政府或授权机构根据法制、技术和行政的需要进行强制管理的一种社会公用事业，其目的主要是保证与贸易结算、安全防护、医疗卫生、环境监测、资源控制、社会管理等有关的测量工作的公正性和可靠性。

计量属于国家的基础事业。它不仅为科学技术、国民经济和国防建设的发展提供技术基础，而且有利于最大程度地减少商贸、医疗、安全等诸多领域的纠纷，维护消费者权益。

(三)计量的特点

计量的特点可以归纳为准确性、一致性、溯源性及法制性四个方面。

(1)准确性是指测量结果与被测量真值的一致程度。由于实际上不存在完全准确无误的测量，因此在给出量值的同时，必须给出适应于应用目的或实际需要的不确定度或可能误差范围。所谓量值的准确性，是在一定的测量不确定度或误差极限或允许误差范围内，测量结果的准确性。

(2)一致性是指在统一计量单位的基础上，无论在何时何地采用何种方法，使用何种计量器具，以及由何人测量，只要符合有关的要求，测量结果应在给定的区间内一致。也就是说，测量结果应是可重复、可再现(复现)、可比较的。

(3)溯源性是指任何一个测量结果或测量标准的值，都能通过一条具有规定不确定度的不间断的比较链，与测量基准联系起来的特性。这种特性使所有的同种量值，都可以按这条比较链通过校准向测量的源头追溯，也就是溯源到同一个测量基准(国家基准或国际基准)，从而使其准确性和一致性得到技术保证。

(4)法制性是指计量必需的法制保障方面的特性。由于计量涉及社会的各个领域，量值的准确可靠不仅依赖于科学技术手段，还要有相应的法律、法规和行政管理的保障。特别是在对国计民生有明显影响，涉及公众利益和可持续发展或需要特殊信任的领域，必须由政府起主导作用，来建立计量的法制保障。

由此可见，计量不同于一般的测量。测量是以确定量值为目的的一组操作，一般不具备、也不必完全具备上述特点。计量既属于测量而又严于一般的测量，在这个意义上可以狭义地认为，计量是与测量结果置信度有关的、与测量不确定度联系在一起的一种规范化的测量。

二、计量的法律和法规

我国现已基本形成由《中华人民共和国计量法》及其配套的计量行政法规、规章(包括规范性文件)构成的计量法规体系。

(一)《中华人民共和国计量法》

《中华人民共和国计量法》，简称《计量法》，是调整计量法律关系的法律规范的总称。1985年9月6日经第六届全国人民代表大会常务委员会议第十二次会议审议通过，中华人民共和国主席令予以公布，自1986年7月1日起施行。

《计量法》是国家管理计量工作的根本法，是实施计量法制监督的最高准则。《计量法》共6章35条，基本内容包括：(1)计量立法宗旨；(2)调整范围；(3)计量单位制；(4)计量器具管理；(5)计量监督；(6)计量授权；(7)计量认证；(8)计量纠纷的处理；(9)计量法律责任等。

制定《计量法》的目的，是为了保障单位制的统一和量值的准确可靠，从而促进国民经济和科技的发展，为社会主义现代化建设提供计量保证，并保护人民群众的健康和生命、财产的安全，维护消费者利益，以及保护国家的利益不受侵犯。

《计量法》的调整对象是中华人民共和国境内的所有国家机关、社会团体、中国人民解放军、企事业单位和个人，凡是建立计量基准、计量标准，进行计量检定、制造、修理、销售、进口、使用计量器具，使用法定计量单位，开展计量认证，实施仲裁检定和调解计量纠纷，以及进行计量监督管理等方面所发生的各种法律关系。它侧重调整单位制的统一以及影响社会秩序、危害国家和人民利益的计量问题，有关家庭自用、教学示范用的计量器具一般不在《计量法》的调整之列。

(二)计量法规

1. 计量行政法规和规范性文件

(1) 国务院依据《计量法》所制定(或批准)的计量行政法规。例如：《中华人民共和国计量法实施细则》、《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》等。

(2) 省、直辖市、自治区人大常委会制定的地方计量法规。

2. 计量规章、规范性文件

(1) 国务院计量行政部门制定的各种全国性的单项计量管理办法和技术规范。例如：《中华人民共和国计量法条文解释》、《中华人民共和国强制检定的工作计量器具明细目录》、《中华人民共和国依法管理的计量器具目录》、国家计量检定规程等。

(2) 国务院有关主管部门制定的部门计量管理办法。例如：《国防计量监督管理条例》、《农业部部级质检中心验收和计量认证程序》等。

(3) 县级以上地方人民政府及计量行政部门制定的地方计量管理办法。例如：《上海市计量监督管理条例》、《河北省计量管理条例》、《南京市计量管理办法》等。

三、量值溯源、校准和检定

(一)量值溯源体系

通过一条具有规定不确定度的不间断的比较链，使测量结果或测量标准的值能够与规定的参考标准(通常是国家计量基准或国际计量基准)联系起来特性，称为量值溯源性。

?? 这种特性使所有的同种量值，都可以按这条比较链，通过校准向测量的源头追溯，也就是溯源到

(2) 得出标称值偏差的报告值，并调整测量仪器或对其示值加以修正；

(3) 给标尺标记赋值或确定其他特性值，或给参考物质的特性赋值；

(4) 实现溯源性。

校准的依据是校准规范或校准方法，对其通常应作统一规定，特殊情况下也可自行制定。校准的结果可记录在校准证书或校准报告中，也可用校准因数或校准曲线等形式表示。

(三)检定

测量仪器的检定，是指查明和确认测量仪器是否符合法定要求的程序，它包括检查、加标记和(或)出具检定证书。

检定具有法制性，其对象是法制管理范围内的测量仪器。一台检定合格的测量仪器，也就是一台被授予法制特性的测量仪器。鉴于各国管理体制不同，法制计量管理的范围也不同。根据检定的必要程度和我国对其依法管理的形式，可将检定分为强制检定和非强制检定两类。

(1) 强制检定是指由政府计量行政主管部门所属的法定计量检定机构或授权的计量检定机构，对某些测量仪器实行的一种定点定期的检定。我国规定，用于贸易结算、安全防护、医疗卫生、环境监测四个方面且列入《中华人民共和国强制检定的工作计量器具明细目录》的工作计量器具，属于国家强制检定的管理范围。此外，我国对社会公用计量标准，以及部门和企业、事业单位的各项最高计量标准，也实行强制检定。强制检定的特点，是由政府计量行政部门统管，指定的法定或授权技术机构具体执行，固定检定关系，定点送检；检定周期由执行强检的技术机构按照计量检定规程，结合实际使用情况确定。

(2) 非强制检定是指由使用单位自己或委托具有社会公用计量标准或授权的计量检定机构，对强检以外的其他测量仪器依法进行的一种定期检定。其特点是使用单位依法自主管理，自由送检，自求溯源，自行确定检定周期。

强制检定与非强制检定均属于法制检定，是我国对测量仪器依法管理的两种形式，都要受法律的约束。不按规定进行周期检定的，要负法律责任。计量检定工作应当按照经济合理的原则，就近就地进行。

检定的依据是按法定程序审批公布的计量检定规程。我国《计量法》规定：“计量检定必须按照国家计量检定系统表进行。国家计量检定系统表由国务院计量行政部门制定。计量检定必须执行计量检定规程。国家计量检定规程由国务院计量行政部门制定。没有国家计量检定规程的，由国务院有关主管部门和省、自治区、直辖市人民政府计量行政部门分别制定部门计量检定规程和地方计量检定规程，并向国务院计量行政部门备案。”因此，任何企业和其他实体是无权制定检定规程的。

在检定结果中，必须有合格与否的结论，并出具证书或加盖印记。从事检定工作的人员必须经考核合格，并持有有关计量行政部门颁发的检定员证。

随着改革开放及经济发展，在强化检定法制性的同时，对大量的非强制检定的测量仪器，为达到统一量值的目的，应以校准为主。过去，一直没有把校准作为实现单位统一和量值准确可靠的主要方式，而常用检定取而代之。这一观念目前正在改变中，校准在量值溯源中的地位已逐步确立。

第二节 计量单位

一、概述

在测量中，人们总是用数值和测量单位(在我国，又称为计量单位)的乘积来表示被测量的量值。所谓计量单位，是指为定量表示同种量的大小而约定地定义和采用的特定量。为给定量值按给定规则确定的一组基本单位和导出单位，称为计量单位制。

法定计量单位是指由国家法律承认、具有法定地位的计量单位。实行法定计量单位是统一我国计量制度的重要决策。它将彻底结束多种计量单位制在我国并存的现象，并与国际主流相一致。

我国《计量法》规定：“国家采用国际单位制。国际单位制计量单位和国家选定的其他计量单位，为国家法定计量单位。”

国际单位制是我国法定计量单位的主体，所有国际单位制单位都是我国的法定计量单位。国际标准 ISO 1000 规定了国际单位制的构成及其使用方法。我国规定的法定计量单位的使用方法，包括量及单位的名称、符号及其使用、书写规则，与国际标准的规定一致。

国家选定的作为法定计量单位的非国际单位制单位，是我国法定计量单位的重要组成部分，具有与国际单位制单位相同的法定地位。

国际标准或有关国际组织的出版物中列出的非国际单位制单位(选入我国法定计量单位的除外)，一般不得使用。若某些特殊领域或特殊场合下有特殊需要，可以使用某些非法定计量单位，但应遵守相关的规定。

二、法定计量单位的构成

国际单位制是在米制的基础上发展起来的一种一贯单位制，其国际通用符号为“SI”。它由 SI 单位(包括 SI 基本单位、SI 导出单位)，以及 SI 单位的倍数单位(包括 SI 单位的十进倍数单位和十进分数单位)组成，具有统一性、简明性、实用性、合理性和继承性等特点。SI 单位是我国法定计量单位的主体，所有 SI 单位都是我国的法定计量单位。此外，我国还选用了一些非 SI 的单位，作为国家法定计量单位。

我国法定计量单位的构成(见图 5.2-1)如下：

- (1) SI 基本单位共 7 个，见表 5.2-1；
- (2) 包括 SI 辅助单位在内的具有专门名称的 SI 导出单位共 21 个，见表 5.2-2；
- (3) 由 SI 基本单位和具有专门名称的 SI 导出单位构成的组合形式的 SI 导出单位；
- (4) SI 单位的倍数单位包括 SI 单位的十进倍数单位和十进分数单位，构成倍数单位的 SI 词头共 20 个，见表 5.2-3；
- (5) 国家选定的作为法定计量单位的非 SI 单位共 16 个，见表 5.2-4；
- (6) 由以上单位构成的组合形式的单位。

(一) SI 基本单位

表 5.2-1 列出了 7 个 SI 基本量的基本单位，它们是构成 SI 的基础。

(二) SI 导出单位

SI 导出单位是用 SI 基本单位以代数形式表示的单位。这种单位符号中的乘和除采用数学符号。它由两部分构成：一部分是包括 SI 辅助单位在内的具有专门名称的 SI 导出单位；另一部分是组合形式的 SI 导出单位，即用 SI 基本单位和具有专门名称的 SI 导出单位(含辅助单位)以代数形式表示的单位。

某些 SI 单位，例如力的 SI 单位，在用 SI 基本单位表示时，应写成 $\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$ 。这种表示方法显然比较繁琐，不便使用。为了简化单位的表示式，经国际计量大会讨论通过，给它以专门名称——牛[顿]，符号为 N 。类似地，热和能的单位通常用焦[耳](J)代替牛顿米($\text{N} \cdot \text{m}$)和 $\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$ 。这些导出单位，称为具有专门名称的 SI 导出单位。

电离辐射、医疗卫生领域中的某些量，涉及人类健康和安全防护。这些量的量纲相同，或具有与其他量相同的量纲，因此，用 SI 基本单位表示这些量的 SI 导出单位时，也具有相同的形式。为了便于区分不同的物理量，避免使用时混淆而造成事故，这些量的 SI 导出单位也被赋予专门的名称。例如：吸收剂量、比授（予）能及比释动能的单位，通常用[戈（瑞）(Gy)]代替焦耳每千克(J/kg)，剂量当量单位则用[希（沃特）]代替焦耳每千克(J/kg)。

SI 单位弧度(rad)和球面度(sr)，称为 SI 辅助单位，它们是具有专门名称和符号的量纲为一的量的导出单位。例如：角速度的 SI 单位可写成弧度每秒(rad/s)。

电阻率的单位通常用欧姆米($\Omega \cdot m$)代替伏特米每安培($v \cdot m/A$)，它是组合形式的 SI 导出单位之一。

表 5.2-2 列出的是包括 SI 辅助单位在内的具有专门名称的 SI 导出单位。

(三) SI 单位的倍数单位

在 SI 中，用以表示倍数单位的词头，称为 SI 词头。它们是构词成分，用于附加在 SI 单位之前构成倍数单位(十进倍数单位和分数单位)，而不能单独使用。

表 5.2-3 共列出 20 个 SI 词头，所代表的因数的覆盖范围为 $10^{-24} \sim 10^{24}$ 。

词头符号与所紧接着的单个单位符号(这里仅指 SI 基本单位和 SI 导出单位)应视作一个整体对待，共同组成一个新单位，并具有相同的幂次，而且还可以和其他单位构成组合单位。例如： $1 \text{ cm}^3 = (10^{-2} \text{ m})^3 = 10^{-6} \text{ m}^3$ ， $1 \mu \text{ s}^{-1} = (10^{-6} \text{ s})^{-1} = 10^6 \text{ s}^{-1}$ ， $1 \text{ mm}^2/\text{s} = (10^{-3} \text{ m})^2/\text{s} = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

由于历史原因，质量的 SI 基本单位名称“千克”中已包含 SI 词头，所以，“千克”的十进倍数单位由词头加在“克”之前构成。例如：应使用毫克(mg)，而不得用微千克($\mu \text{ kg}$)。

(四) 可与 SI 单位并用的我国法定计量单位

由于实用上的广泛性和重要性，在我国法定计量单位中，为 11 个物理量选定了 16 个与 SI 单位并用的非 SI 单位，如表 5.2-4 所示。其中 10 个是国际计量大会同意并用的非 SI 单位，它们是：时间单位——分、[小]时、日(天)；〔平面〕角单位——度、〔角〕分、〔角〕秒；体积单位——升；质量单位——吨和原子质量单位；能量单位——电子伏。另外 6 个，即海里、节、公顷、转每分、分贝、特(克斯)，则是根据国内外的实际情况选用的。

三、法定计量单位的基本使用方法

我国国家标准 GB3100—93《国际单位制及其应用》和 GB3101—93《有关量、单位和符号的一般原则》，对 SI 单位的使用方法作了规定，并与国际标准 ISO 1000:1992 和 ISO 31—0:1992 的规定一致。

(一) 法定计量单位的名称

法定计量单位的名称，除特别说明外，一般指法定计量单位的中文名称，用于叙述性文字和口述中。名称中去掉方括号中的部分是单位的简称，否则是全称。简称和全称可任意选用，以表达清楚了为原则。

组合单位的中文名称，原则上与其符号表示的顺序一致。单位符号中的乘号没有对应的名称，只要将单位名称接连读出即可。例如： $N \cdot m$ 的名称为“牛·米”，简称为“牛米”。而表示相除的斜线(/)，对应名称为“每”，且无论分母中有几个单位，“每”只在分母的前面出现一次。例如：单位 $J/(kg \cdot K)$ 的中文名称为“焦耳每千克开尔文”，简称为“焦每千克开”。

如果单位中带有幂，则幂的名称应在单位之前。二次幂为二次方，三次幂为三次方，依次类推。但是，如果长度的二次和三次幂分别表示面积和体积，则相应的指数名称分别称为平方和立方；否则，仍称为“二次方”和“三次方”。例如： m^2/s 这个单位符号，当用于表示运动粘度时，名称为“二次方米每秒”；但当用于表示覆盖速率时，则为“平方米每秒”。负数幂的含义为除，既可用幂的名称，也可用“每”。例如： $^{\circ}C^{-1}$ 的名称为每摄氏度，亦称负一次方摄氏度。

(二) 法定计量单位和词头的符号

法定计量单位和词头的符号，是代表单位和词头名称的字母或特种符号，它们应采用国际通用符号。在中、小学课本和普通书刊中，必要时也可将单位的简称(包括带有词头的单位简称)作为符号使用，这样的符号称为“中文符号”。

法定计量单位和词头的符号，不论拉丁字母或希腊字母，一律用正体。单位符号一般为小写字母，只有单位名称来源于人名时，其符号的第一个字母大写；只有“升”的符号例外，可以用 L。例如：时间单位“秒”的符号是 s，电导单位“西[门子]”的符号是 S，压力、压强、应力的单位“帕(斯卡)”的符号是 Pa。

词头符号的字母，当其所表示的因数小于 10^6 时，一律用小写体；而当大于或等于 10^6 时，则用大写体。尤其要注意区分词头符号 Y(10^{24})与 y(10^{-24})，Z(10^{21})与 z(10^{-21})，P(10^{15})与 p(10^{-15})，M(10^6)与 m(10^{-3})。

单位符号没有复数形式，不得附加任何其他标记或符号来表示量的特性或测量过程的信息。它不是缩略语，除正常语句结尾的标点符号外，词头或单位符号后都不加标点。

由两个以上单位相乘构成的组合单位，相乘单位间可用乘点也可不用。但是，单位中文符号相乘时必须用乘点。例如：力矩单位牛顿米的符号为 $N \cdot m$ 或 Nm ，但其中文符号仅为牛·米。相除的单位符号间用斜线表示或采用负指数。例如：密度单位符号可以是 kg/m^3 或 $kg \cdot m^{-3}$ ，其中文符号可以是千克/米³或千克·米⁻³。单位中分子为1时，只用负数幂。例如：用 m^{-3} ，而不用 $1/M^3$ 。表示相除的斜线在一个单位中最多只有一条，除非采用括号能澄清其含义。例如：用 $W/(K \cdot m)$ ，而不用 $W/K/m$ 或 $W/K \cdot m$ 。也可用水平线表示相除。

词头的符号与单位符号之间不得有间隙，也不加相乘的符号。口述单位符号时应使用单位名称而非字母名称。

(三)法定计量单位和词头的使用规则

法定计量单位和词头的名称，一般适宜在口述和叙述性文字中使用。而符号可用于一切需要简单明了表示单位的地方，也可用于叙述性文字之中。

单位的名称与符号必须作为一个整体使用，不得拆开。例如：摄氏度的单位符号为 $^{\circ}C$ ， $20^{\circ}C$ 不得读成或写成“摄氏 20 度”或“20 度”，而应读成“20 摄氏度”，写成“ $20^{\circ}C$ ”。

用词头构成倍数单位时，不得使用重叠词头。例如：不得使用毫微米、微微法拉，等。选用 SI 单位的倍数单位，一般应使量的数值处于 0.1~1 000 的范围内。例如： $1.2 \times 10^4 N$ 可以写成 12kN；1401Pa 可以写成 1.401kPa。非十进制的单位，不得使用词头构成倍数单位。亿 (10^8)、万 (10^4) 不是词头，只按一般数词使用。只通过相乘构成的组合单位，词头通常加在组合单位中的第一个单位之前。例如：力矩的单位 $kN \cdot m$ ，不宜写成 $N \cdot km$ 。

只通过相除构成或通过乘和除构成的组合单位，词头通常加在分子中的第一个单位之前，分母中一般不用词头。例如：摩尔内能单位 kJ/mol ，不宜写成 $J/mmol$ 。但质量的 SI 单位 kg 不作为有词头的单位对待。例如：比授能的单位可以写成 J/kg 。当组合单位分母是长度、面积和体积单位时，按习惯和方便，分母中可以选用词头构成倍数单位。例如：密度的单位可以选 g/cm^3 。

第三节 测量仪器

一、概述

(一)测量仪器的分类

单独地或连同辅助设备一起用以进行测量的器具，称为测量仪器，又称计量器具。其中，使用时以固定形态复现或提供给定量的一个或多个已知值的测量仪器称之为实物量具，简称量具，例如：砝码、量块、标准电阻线圈、标准信号发生器、标准硬度块、参考物质等。

实物量具不同于一般的测量仪器。量具本身所复现或提供的已知量值，即给定量，就是其本身量值的实际大小，而一般测量仪器所指示的量值往往是一种等效信息。例如：体温计能指示出温度，但本身并不能提供实际温度，而只是指示出人体温度的一种等效信息。

测量仪器按其结构和功能特点可分为四种：

(1)显示式测量仪器，又称为指示式测量仪器，它能直接或间接显示出被测量的示值。例如：转速计、温度计、密度计、弹簧式压力表、千分尺、电流表、功率表、频率计等。这类测量仪器按其给出示值的形式，又分为模拟式、数字式和记录式三种。

(2)比较式测量仪器，它能使被测量具或使被测量与标准量具相互比较。例如：天平、长度比较仪、电位差计、光度计、测量电桥等。

(3)积分式测量仪器，它通过一个量对另一个量的积分来确定被测量值。例如：家庭用的电能表，测量的是在两次付费时刻之间的一段时间内，所耗用的电功率对时间的积分。又如：皮革面积测量仪，测量的是皮革摊平在平面上，其轮廓线所围的平面面积。

(4)累积式测量仪器，它通过对来自一个或多个源中，同时或依次得到的被测量的部分值求和，来确定被测量值。例如：累积式皮带秤，是通过累积器根据称重和位移传感器提供的信息，对皮带测量段上每次称得的各分量负荷进行累加求和，并通过累积指示器显示累积值。另外还有电子轨道衡、总加式电功率表等。

按其计量学用途或在统一单位量值中的作用，测量仪器可分为测量基准、测量标准和工作用测量仪器三种。

(二)测量设备

测量设备是为实现测量过程所必须的测量仪器、软件、测量标准、标准物质线辅助设备线它们的组合。测量设备不仅包含一般的测量仪器，而且包括各等级的测量标准，各类参考物质和实物量具，与测量设备连接的各种辅助设备，以及进行测量所必须的软件和资料。辅助设备主要指本身不能给出量值而没有它又不能进行测量的设备，以及作为检验手段用的工具、工装、定位器、模具等。辅助设备有时会直接影响测量的准确可靠程度。进行测量所必须的软件和资料，是指设备使用说明书、作业指导书以及有关测量程序文件等软件，当然也包括一些测量仪器本身的控制和测量程序。没有这些资料和软件，也不能给出准

确可靠的数据。总之，测量设备是对测量所包括的硬件和软件的统称，对测量设备进行控制，是企业质量管理的重要内容。

二、测量仪器的计量特性

测量仪器的计量特性是指其影响测量结果的一些明显特征，其中包括测量范围、偏移、重复性、稳定性、分辨力、鉴别力（阈）和示值误差等。为了达到测量的预定要求，测量仪器必须具有符合规范要求的计量学特性。

确定测量仪器的特性，并签发关于其法定地位的官方文件，称为测量仪器控制。这种控制可包括对测量仪器的下列运作中的一项、两项或三项：

- 型式批准；
- 检定；
- 检验。

这些工作的目的是要确定测量仪器的特性是否符合相关技术法规中规定的要求。型式批准是由政府计量行政部门做出的承认测量仪器的型式符合法定要求的决定。所谓型式，是指某一种测量仪器的样机及(或)它的技术文件(例如:图纸、设计资料等)，实质上就是该种测量仪器的结构、技术条件和所表现出来的性能。

检定是查明和确认测量仪器是否符合法定要求的程序，它包括检查、加标记和(或)出具检定证书。检定是对使用中测量仪器进行监督的重要手段，其内容包括检查测量仪器的检定标记或检定证书是否有效、保护标记是否损坏、检定后测量仪器是否遭到明显改动，以及其误差是否超过使用中最大允许误差等。

(一) 标称范围、量程和测量范围

测量仪器的操纵器件调到特定位置时可得到的示值范围，称为标称范围。此时的示值范围是与测量仪器的整体相联系的，是指标尺所指示的被测量值可得到的范围。标称范围通常以被测量的单位表示，而不管标尺上所标的单位是什么。例如:一台万用表，把操纵器件调到 $\times 10$ 一挡，其标尺上、下限的数码为 $0\sim 10$ ，则其标称范围为 $(0\sim 100)V$ 。标称范围一般用上限和下限说明，例如: $(100\sim 200)^{\circ}C$ 。当下限(即最小值)为零时，标称范围一般只用其上限(即最大值)来表示，例如: $(0\sim 100)v$ 的电压表，其标称范围可表示为 $100V$ 。

标称范围的上限与下限之差的绝对值，称为量程。例如:某温度计的标称范围为 $(-30\sim 80)^{\circ}C$ ，则其量程为 $|80-(-30)|^{\circ}C=110^{\circ}C$ ；某电压表的标称范围为 $100V$ ，则其量程为 $|100-0|V=100V$ 。

测量范围，也称为工作范围，是指测量仪器的误差处于规定的极限范围内的被测量的示值范围。在这一规定的测量范围内使用，测量仪器的示值误差必处在允许极限内；而若超出测量范围使用，示值误差就将超出允许极限。换言之，测量范围就是在正常工作条件下，能确保测量仪器规定准确度的被测量值的范围。

有些测量仪器的测量范围与其标称范围相同，例如体温计、电流表、压力表、密度计等。而有的测量仪器处在下限时的相对误差会急剧增大，例如地秤，这时应规定一个能确保其示值误差处在规定极限内的示值范围作为测量范围。可见，测量范围总是等于或小于标称范围。

注意正确区别和掌握示值范围、标称范围、测量范围和量程的概念。示值范围是指测量仪器标尺或显示装置所能指示的范围，可用标在标尺或显示器上的单位表示；标称范围是对测量仪器整体而言的，通常用被测量的单位表示；测量范围是指能保证规定准确度、使误差处于规定极限内的量值范围；量程则是指标称范围上、下限之差的绝对值。

(二) 额定操作条件、极限条件和参考条件

额定操作条件是指测量仪器的正常工作条件，也就是使测量仪器的规定计量特性处于给定极限内的使用条件。在这些条件中，一般包括被测量和影响量的范围或额定值，只有在规定的范围或额定值下使用，测量仪器才能达到规定的计量特性或规定的示值允许误差值。例如:工作压力表测量范围的上限为 $10MPa$ ，则压力的最大值只能加到 $10MPa$ ；额定电流为 $10A$ 的电表，其输入电流不得超过 $10A$ 。在使用测量仪器时，搞清额定操作条件十分重要，只有满足这些条件，才能保证测量结果的准确性和可靠性。

测量仪器的规定计量特性不受损也不降低，其后仍可在额定操作条件下运行所能承受的极端条件，称为极限条件。极限条件应规定被测量和影响量的极限值。例如:有些测量仪器可以进行测量上限之上 10% 的超载试验，在包装条件下的振动试验， $(-40\sim +50)^{\circ}C$ 的温度试验或 $95\%RH$ 以上的湿度试验等，这些都属于测量仪器的极限条件。

参考条件是指测量仪器在性能试验或进行检定、校准、比对时的使用条件，即标准工作条件，或称为标准条件。这些条件一般应对作用于测量仪器的影响量的参考值或参考范围做出明确规定，以真正反映测量仪器的计量性能和保证测量结果的可比性。

注意正确区别和掌握额定操作条件、极限条件和参考条件。前者是测量仪器正常使用的条件，后者是为确定测量仪器本身计量性能所规定的标准条件，中者则是仪器不受损坏和不降低准确度所允许的极端条件。在这三者中，参考条件的要求最严，额定操作条件则较宽，而极端条件的范围和额定值为最大。

(三) 示值误差和最大允许误差

示值就是由测量仪器所指示的被测量值。测量仪器的示值误差是测量仪器示值与对应的输入量的真值之差，它是测量仪器最主要的计量特性之一，本质上反映了测量仪器准确度的大小，即测量仪器给出接近于真值的响应的能力。示值误差大，则其准确度低；示值误差小，则其准确度高。

示值误差是相对真值而言的，由于真值不能确定，实际上使用的是约定真值或实际值。为确定测量仪器的示值误差，当接受高等级的测量标准对其进行检定或校准时，该测量标准器复现的量值即为约定真值，通常称为实际值、校准值或标准值。所以，指示式测量仪器的示值误差=示值-实际值，实物量具的示值误差=标称值-实际值。

例如：被检电流表的示值 I 为 40A 时，用标准电流表检定，其电流实际值为 $I_0=39A$ ，则示值 40A 的误差 Δ 为：

$\Delta = I - I_0 = (40 - 39)A = 1A$ 即该电流表的示值比其约定真值大 1A。

又如：某工作玻璃量具的容量的标称值 v 为 1000mL，经标准玻璃量具检定，其容量实际值 v_0 为 1005mL，则量具的示值误差 Δ 为：

$\Delta = v - v_0 = (1000 - 1005)mL = -5mL$ 即该工作量具的标称值比其约定真值小 5mL。

测量仪器示值误差，通常简称为测量仪器的误差，可用绝对误差形式表示，也可用相对误差形式表示。确定测量仪器示值误差的大小，是为了判定测量仪器是否合格，并获得其示值的修正值。

对给定的测量仪器，由规范、规程等所允许的误差极限值，称为测量仪器的最大允许误差。通常可简称为 **mpe**，有时也称为测量仪器的允许误差限。

示值误差和最大允许误差均是对测量仪器本身而言的。最大允许误差是指技术规范（例如标准、检定规程、校准规范）所规定的允许的误差极限值，它是一个判定测量仪器合格与否的规定的要求；而示值误差则是指测量仪器某一示值的误差的实际大小，它是通过检定、校准所得到的一个值或一组值，用以评价测量仪器是否满足最大允许误差的要求，从而判断其是否合格，或者根据实际需要提供修正值，以提高测量结果的准确度。

(四) 灵敏度

测量仪器响应的变化除以对应的激励变化，称为灵敏度。它反映测量仪器被测量（输入）变化引起仪器示值（输出）变化的程度，用被观察变量的增量（即响应或输出量）与相应被测量的增量（即激励或输入量）之商来表示。如果被测量变化很小，而引起的示值改变（输出量）很大，则该测量仪器的灵敏度很高。

灵敏度是测量仪器重要的计量特性之一，其值应与测量目的相适应，并不是越高越好。例如：为了方便读数，及时地使示值稳定下来，有时还需要施加阻尼，特意降低灵敏度。

(五) 分辨力

显示装置能有效辨别的最小的示值差，称为显示装置的分辨力，或简称为分辨力。它是指显示装置中对其最小示值的辨别能力。模拟式显示装置的分辨力，通常为标尺分度值的一半，即用肉眼可以分辨到一个分度值的 1/2；当然也可以采取其他工具，例如放大镜、读数望远镜等来提高分辨力。

对于数字式显示装置，其分辨力为末位数字的一个数码。对半数字式的显示装置，其分辨力为末位数字的一个分度。显然，分辨力高可以降低读数误差，从而减少由于读数误差引起的对测量结果的影响。

(六) 稳定性和漂移

稳定性通常是指测量仪器保持其计量特性随时间恒定的能力。若稳定性不是对时间而言，而是对其他量而言，则应予明确说明。稳定性通常用以下两种方式定量地表征：

(1) 计量特性变化某个规定的量所经历的时间；

(2) 计量特性经过规定的时间所发生的变化量。

例如：标准电池对其长期稳定性（电动势的年变化幅度）和短期稳定性（电动势在 3~5 天内的变化幅度），分别提出了明确的要求；量块的稳定性，则以规定长度每年的允许最大变化量（微米/年）进行考核。

对于测量仪器，尤其是测量标准或某些实物量具，稳定性是重要的计量特性之一。测量仪器产生不稳定的因素很多，主要原因是元器件的老化、零部件的磨损，以及使用、储存、维护工作不细致等所致。对测量仪器进行周期检定或定期校准，就是对其稳定性的一种考核。

漂移是测量仪器计量特性的慢变化。它反映了在规定的条件下，测量仪器计量特性随时间的慢变化，诸如在几分钟、几十分钟或几小时内，保持其计量特性恒定的能力。例如：测量仪器在规定时间内零点漂移，线性测量仪器静态特性随时间变化的量程漂移。

漂移往往是由于温度、压力、湿度等外界变化所致，或由于仪器本身性能的不稳定所致。测量仪器使用前采取预热、预先在实验室内放置一段时间与室温等温，就是减少漂移的一些措施。

三、测量仪器的选用原则

选用测量仪器应从技术性和经济性出发，使其计量特性(如最大允许误差、稳定性、测量范围、灵敏度、分辨力等)适当地满足预定的要求，既要够用，又不过高。

(一) 技术性

在选择测量仪器的最大允许误差时，通常应为测量对象所要求误差的1/3~1/5，若条件不许可，也可为1/2，当然此时测量结果的置信水平就相应下降了。

在选择测量仪器的测量范围时，应使其上限与被测量值相差不大而又能覆盖全部量值。

在选择灵敏度时，应注意灵敏度过低会影响测量准确度，过高又难于及时达到平衡状态。

在正常使用条件下，测量仪器的稳定性很重要，它表征测量仪器的计量特性随时间长期不变的能力。

一般来说，人们都要求测量仪器具有高的可靠性；在极重要的情况下，比如在核反应堆、空间飞行器中，为确保万无一失，有时还要选备两套相同的测量仪器。

在选择测量仪器时，应注意该仪器的额定操作条件和极限条件。这些条件给出了被测量值的范围、影响量的范围以及其他重要的要求，以使测量仪器的计量特性处于规定的极限之内。

此外，还应尽量选用标准化、系列化、通用化的测量仪器，以便于安装、使用、维修和更换。

(二) 经济性

测量仪器的经济性是指该仪器的成本，它包括基本成本、安装成本及维护成本。基本成本一般是指设计制造成本和运行成本。对于连续生产过程中使用的测量仪器，安装成本中还应包括安装时生产过程的停顿损失费(停机费)。通常认为，首次检定费应计入安装成本，而周期检定费应计入维护成本。这就意味着，应考虑和选择易于安装、容易维修、互换性好、校准简单的测量仪器。

测量准确度的提高，通常伴随着成本的上升。如果提出过高的要求，采用超越测量目的的高性能的测量仪器，而又不能充分利用所得的数据，那将是很不经济，也是毫无必要的。此外，从经济上来说，应选用误差分配合理的测量仪器来组成测量装置。

第四节 测量结果

一、测量准确度和精密度

(一) 测量准确度(Accuracy)

通过测量所得到的赋予被测量的值，称为测量结果。而真值是与被测量定义一致的值。测量准确度是指测量结果与被测量真值之间的一致程度。

通常认为，测量准确度是一个定性的概念，不宜将其定量化。与被测量定义一致的真值，实质上就是被测量本身，它是一个理想化的概念，难于操作，所以，准确度的值无法准确地给出。换言之，我们可以说准确度高低、准确度等级或准确度符合××标准等，而不宜将准确度与数字直接相连，例如：准确度为0.25%、16mg或±16mg等。

在实际工作中，有些情况下约定真值的含义是明确的，例如：当测量仪器接受高等级的测量标准对其进行检定或校准时，该测量标准器所复现的量值即为约定真值，这时，测量准确度可以用测量结果对约定真值的偏移来估计。

(二) 测量精密度(Precision)

测量精密度是指在规定的条件下获得的各个独立观测值之间的一致程度。不要用术语“精密度”来表示“准确度”，因为前者仅反映分散性，即指随机效应所致的测量结果的不可重复性或不可再现性；而后者则是指在随机效应和系统效应的综合作用下，测量结果与真值的不一致。

二、测量重复性和再现性

(一) 测量重复性(Repeatability)

在相同测量条件下，对同一被测量进行连续多次测量所得结果之间的一致性，称为测量结果的重复性。这些条件称为重复性条件，包括：(1)相同的测量程序；(2)相同的观测者；(3)在相同的条件下使用相同的测量仪器；(4)相同的地点；(5)在短时间内重复测量。换言之，就是在尽量相同的程序、人员、仪器、环境等条件下，以及尽量短的时间间隔内完成重复测量任务。上述定义中的“一致性”是定量的，可以用重复条件下对同一量进行多次测量所得结果的分散性来表示。而最为常用的表示分散性的量，就是**实验标准差**。

(二) 测量再现性(Reproducibility)

在改变了的测量条件下，对同一被测量的测量结果之间的一致性，称为测量结果的再现性。再现性又称为复现性、重现性。在给出再现性时，应详细地说明测量条件改变的情况，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。这些内容可以改变其中一项、多项或全部。同测量重复性一样，这里的“一致性”也是定量的，可以用再现性条件下对同一量进行重复测量所得结果的分散性来表示，例如用再现性标准差来表示。再现性标准差有时也称为**组间标准差**。

测量结果重复性和再现性的区别是显而易见的。虽然都是指同一被测量的测量结果之间的一致性，但其前提不同。重复性是在测量条件保持不变的情况下，连续多次测量结果之间的一致性；而再现性则是指在测量条件改变了的情况下，测量结果之间的一致性。

在很多实际工作中，最重要的再现性指由不同操作者、采用相同测量方法、仪器，在相同的环境条件下，测量同一被测量的重复测量结果之间的一致性，即测量条件的改变只限于操作者的改变。

第五节 测量误差和测量不确定度

一、测量误差和测量结果修正

(一) 测量误差

测量结果减去被测量的真值所得的差，称为测量误差，简称误差。测量结果是人们认识的结果，不仅与量的本身有关，而且与测量程序、测量仪器、测量环境以及测量人员等有关。而被测量真值是与被测量的定义一致的某个值，它是量的定义的完整体现，是与给定的特定量的定义完全一致的值，只有通过完善的或完美无缺的测量才能获得。真值从本质上说是不能确定的。但在实践中，对于给定的目的，并不一定需要获得特定量的“真值”，而只需要与“真值”足够接近的值。这样的值就是约定真值，对于给定的目的可用它代替真值。例如：可以将通过校准或检定得出的某特定量的值，或由更高准确度等级的测量仪器测得的值，或多次测量的结果所确定的值，作为该量的约定真值。

测量结果的误差往往是由若干个分量组成的，这些分量按其特性可分为随机误差与系统误差两大类，而且无例外地取各分量的代数和。换言之，任意一个误差，均可分解为系统误差和随机误差的代数和，即可用下式表示：

$$\text{误差} = \text{测量结果} - \text{真值} = (\text{测量结果} - \text{总体均值}) + (\text{总体均值} - \text{真值}) = \text{随机误差} + \text{系统误差}$$

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的结果的平均值之差，称为随机误差。随机误差大抵来源于影响量的变化，这种变化在时间上和空间上是不可预知的或随机的，它会引起被测量重复观测值的变化，故称之为“随机效应”。可以认为，正是这种随机效应导致了重复观测中的分散性。

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，称为系统误差。由于只能进行有限次数的重复测量，真值也只能用约定值代替，因此可能确定的系统误差只是其估计值，并具有一定的不确定度。系统误差大抵来源于影响量，它对测量结果的影响若已识别，则可定量表述，故称之为“系统效应”。该效应的大小若是显著的，则可通过估计的修正值予以补偿。

(二) 测量结果修正

对系统误差尚未进行修正的测量结果，称为未修正结果。当由测量仪器获得的只是单个示值时，该示值通常是未修正结果；而当获得几个示值时，未修正结果通常由这几个示值的算术平均值求得。

例如：用某尺测量圆柱直径，单次观测所得的示值为14.7mm，则该测得值是未修正结果。如果进行10次测量，所得的示值分别为14.9、14.6、14.8、14.6、14.9、14.7、14.7、14.8、14.9、14.8(mm)，则该测量列的未修正结果为其算术平均值，即 $(14.9+14.6+\dots+14.8)/10=14.77\approx 14.8(\text{mm})$ 。

对系统误差进行修正后的测量结果，称为已修正结果。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，称为修正值。在上述例子中，若该尺经量块检定，其修正值为-0.1mm，则单次测量的已修正结果为 $(14.7-0.1)\text{mm}=14.6\text{mm}$ ；而10次测量的已修正结果为 $(14.8-0.1)\text{mm}=14.7\text{mm}$ 。

修正值等于负的系统误差，也就是说，加上某个修正值就像扣掉某个系统误差，其效果是一样的。即：

$$\text{真值} = \text{测量结果} + \text{修正值} = \text{测量结果} - \text{误差}$$

需要强调指出的是：系统误差可以用适当的修正值来估计并予以补偿，但这种补偿是不完全的，也即修正值本身就含有不确定度。当测量结果以代数和的方式与修正值相加之后，其系统误差的绝对值会比修正前的小，但不可能为零，也即修正值只能对系统误差进行有限程度的补偿。

二、测量不确定度

(一) 基本概念

测量的目的是为了确定被测量的量值。测量结果的质量(品质)是量度测量结果可信程度的最重要的依据。测量不确定度就是对测量结果质量的定量表征，测量结果的可用性很大程度上取决于其不确定度的大小。所以，测量结果表述必须同时包含赋予被测量的值及与该值相关的测量不确定度，才是完整并有意义的。

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，称为测量不确定度。从词义上理解，“不确定度”即怀疑或不肯定，因此，广义上说，测量不确定度意味着对测量结果可信性、有效性的怀疑程度或不肯定程度。实际上，由于测量不完善和人们认识的不足，所得的被测量值具有分散性，即每次测得的结果不是同一值，而是以一定的概率分散在某个区域内的多个值。虽然客观存在的系统误差是一个相对确定的值，但由于我们无法完全认知或掌握它，而只能认为它是某种概率分布于某区域内的，且这种概率分布本身也具有分散性。测量不确定度正是一个说明被测量之值分散性的参数，测量结果的不确定度反映了人们在对被测量值准确认识方面的不足。即使经过对已确定的系统误差的修正后，测量结果仍只是被测量值的一个估计值，这是因为，不仅测量中存在的随机因素将产生不确定度，而且，不完全的系统因素修正也同样存在不确定度。

不要把误差与不确定度混为一谈。测量不确定度表明赋予被测量之值的分散性，是通过对测量过程的分析 and 评定得出的一个区间。测量误差则是表明测量结果偏离真值的差值。经过修正的测量结果可能非常接近于真值(即误差很小)，但由于认识不足，人们赋予它的值却落在一个较大区间内(即测量不确定度较大)。

为了表征赋予被测量之值的分散性，测量不确定度往往用标准差表示。在实际使用中，由于人们往往希望知道测量结果的置信区间，因此测量不确定度也可用标准差的倍数或说明了置信水平的区间的半宽表示。为了区分这两种不同的表示方法，分别称它们为标准不确定度和扩展不确定度。

本小节涉及的某些内容与概念需用概率统计的概念与术语，可参见《质量专业理论与实务(中级)》第一章。

1. 标准不确定度

以标准差表示的测量不确定度，称为标准不确定度，用符号 u 表示，它不是由测量标准引起的不确定度，而是指不确定度以标准差来表征被测量之值的分散性。

由于测量结果的不确定度往往由许多原因引起，对每个不确定度来源评定的标准差，称为标准不确定度分量。标准不确定度分量有两类评定方法，即 A 类评定和 B 类评定。

用对观测列进行统计分析的方法来评定标准不确定度，称为不确定度的 A 类评定，有时也称为 A 类不确定度评定。所得到的相应的标准不确定度称为 A 类不确定度分量，用符号 u_A 表示。

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，称为不确定度的 B 类评定，有时也称为 B 类不确定度评定。所得到的相应的标准不确定度称为 B 类不确定度分量，用符号 u_B 表示。

当测量结果是由若干个其他量的值求得时，测量结果的标准不确定度，等于这些其他量的方差和协方差适当和的正平方根，称之为合成标准不确定度，用符号 u_c 表示。合成标准不确定度是测量结果标准差的估计值，它表征了测量结果的分散性。

2. 扩展不确定度

用标准差的倍数或说明了置信水平的区间的半宽表示的测量不确定度，称为扩展不确定度，通常用符号 U 表示。

扩展不确定度确定的是测量结果的一个区间，合理地赋予被测量之值的分布的大部分可望包含于此区间。实际上，扩展不确定度是由合成不确定度的倍数表示的测量不确定度，它是将合成标准不确定度扩展了 k 倍得到的，即 $U=ku_c$ ， k 称为包含因子。通常情况下， k 取 2(或 3)。

(注) 假设测量结果是标准差为 u_c 的正态分布，它位于 $(-ku_c, ku_c)$ 之间的概率为 $2\Phi(k)-1$ ，取 $k=2、3$ 时， $2\Phi(k)-1=95.45\%、99.73\%$ ，当取 $k=2.575$ 时， $2\Phi(k)-1=99.00\%$ 。

如果只知道， u_c^2 的估计值 s_c^2 为自由度 v 的 X^2 分布，则对于置信度为 $\gamma=1-\alpha$ 而言， $k=t_\gamma(v)$ ， $t_\gamma(v)$ 是自由度为 v 的 t 分布的 $\gamma=1-\alpha$ 分位数。

(二) 测量不确定度的来源

测量过程中有许多引起测量不确定度的来源，它们可能来自以下十个方面：

1. 对被测量的定义不完整或不完善

例如：定义被测量是一根标称值为 1m 的钢棒的长度，若要求测准到微米级，则被测量的定义就不够完整，因为此时被测钢棒受温度和压力的影响已较明显，而这些条件没有在定义中说明。由于定义的不完整，将使测量结果中引入温度和压力影响的不确定度。这时，完整的定义应是：标称值为 1m 的钢棒在 25.0℃ 和 101325 Pa 时的长度。若在定义要求的温度和压力下测量，就可避免由此引起的不确定度。

2. 实现被测量定义的方法不理想

如上例，被测量的定义虽然完整，但由于测量时温度和压力实际上达不到定义的要求(包括由于温度和压力的测量本身存在不确定度)，使测量结果中引入了不确定度。

3. 取样的代表性不够，即被测量的样本不能代表所定义的被测量

例如：测量某种介质材料在给定频率下的相对介质常数，由于测量方法和测量设备的限制，只能取这种材料的一部分作为样块进行测量。如果测量所用的样块在材料的成分或均匀性方面不能完全代表定义的被测量，则样块将引起不确定度。

4. 对被测量过程受环境影响的认识不周全，或对环境条件的测量与控制不完善

同样以上述钢棒为例，不仅温度和压力影响其长度，实际上，湿度和钢棒的支撑方式都有明显影响。但由于认识不足，没有采取措施，就会引起不确定度。

5. 对模拟仪器的读数存在人为偏差(偏移)

模拟式仪器在读取其示值时，一般是估读到最小分度值的 1/10。由于观测者的位置和观测者个人习惯不同等原因，可能对同一状态下的显示值会有不同的估读值，这种差异将产生不确定度。

6. 测量仪器的分辨力或鉴别力不够

数字式测量仪器的不确定度来源之一，是其指示装置的分辨力。即使指示为理想重复，这种重复性所贡献的测量不确定度仍然不为零，这是因为，当输入信号在一个已知的区间内变动时，该仪器却给出了同样的指示。

7. 赋予测量标准和标准物质的值不准

通常的测量是通过被测量与测量标准的给定值进行比较实现的，因此，该测量标准的不确定度将直接引入测量结果。例如：用天平测量时，测得质量的不确定度中包括了标准砝码的不确定度。

8. 用于数据计算的常量和参量不准

例如：在测量黄铜的长度随温度变化时，要用到黄铜的线热膨胀系数。查有关数据手册可以找到所需的值，与此同时，也可从手册上查出或计算出该值的不确定度，它同样是测量结果不确定度的一个来源。

9. 测量方法和测量程序的近似性和假定性

例如：被测量表达式的近似程度，自动测试程序的迭代程度，电测量中由于测量系统不完善引起的绝缘漏电流、热电势、引线电阻上的压降等，均会引起不确定度。

10. 在表面上看来完全相同的条件下，被测量重复观测值的变化

在实际工作中我们经常发现，无论怎样控制环境条件以及各类对测量结果可能产生影响的因素，而最终的测量结果总会存在一定的分散性，即多次测量的结果并不完全相同。这种现象是一种客观存在，是由一些随机效应造成的。

上述不确定度的来源不一定是独立的，例如，第 10 项可能与前面各项都有关。

(三) 测量不确定度的评定

1. 测量模型的建立

被测量指的是作为测量对象的特定量。在实际测量的很多情况下，被测量 Y (输出量) 不能直接测得，而是由 N 个其他量 X_1, X_2, \dots, X_N (输入量) 通过函数关系 f 来确定的：

$$Y=f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (5.5-1)$$

上式表示的这种函数关系，就称为测量模型，或测量过程的数学模型。

测量模型 f 代表所使用的测量程序和评定方法，它描述如何从输入量 X_i 的值求得输出量 Y 的值。输入量 X_1, X_2, \dots, X_N 本身可看做被测量，也可能取决于其他量，甚至包括系统效应的修正值和修正因子，因此，函数关系式 f 可能非常复杂，以至于不能明确地表示出来。当然，数学模型有时也可能简单到 $Y=X$ 。例如：用卡尺测量工件的尺寸，工件的尺寸就等于卡尺的示值。

数学模型不是惟一的。采用不同的测量方法和不同的测量程序，就可能有不同的数学模型。例如：一个随温度 t 变化的电阻器两端的电压为 V ，在温度为 t_0 时的电阻为 R_0 ，电阻器的温度系数为 α ，则电阻器的损耗功率 P (输出量或被测量) 取决于 V, R_0, α 和 t (输入量)，即：

$$P=f(V, R_0, \alpha, t)=V^2/R_0 [1+\alpha (t-t_0)] \quad (5.5-2)$$

同样是测量该电阻器的损耗功率 P ，我们也可采用测量其端电压和流经电阻的电流 I 来获得，则 P 的数学模型就变成： $P=f(V, I)=VI$ (5.5-30)

数学模型可用已知的物理公式求得，也可用实验的方法确定，有时甚至只能用数值方程给出。如果数据表明， f 未能将测量过程模型化至测量所要求的准确度，则必须在 f 中增加其他输入量，即增加影响量。例如：在电阻功率的测量中，增加电阻上已知的温度非均匀分布、电阻温度系数的非线性关系、电阻值与大气压力的关系等，直至测量结果满足要求。

在输入量 X_1, X_2, \dots, X_N 中，一类是当前直接测定的量，其值和不确定度得自于单一观测、重复观测，或依据经验的调整等，并可能涉及仪器读数的修正值，以及诸如环境温度、大气压力、湿度等影响量修正值的确定。而另一类则是从外部引入的量，例如：与已校准的测量标准、有证参考物质相关的量，或从手册中查出的参考数据等。

设式 (5.5-1) 中被测量 Y 的估计值，即输出估计值为 y ，输入量 X_i 的估计值，即输入估计值为 x_i ，则有 $y=f(x_1, x_2, \dots, x_N)$ (5.5-4)

在此，输入值是经过对模型中所有主要系统效应的影响修正的最佳估计值。否则，须将必要的修正值作为独立的输入量引入测量模型中。

对于一随机变量，可以使用其分布方差或方差的正平方根，即标准差，来量度其值的分散性。与输出估计值或测量结果 y 相关的测量标准不确定度 $u(y)$ ，是被测量 Y 的标准差，它是通过与输入估计值相关的标准差，即标准不确定度 $u(x_i)$ 来确定的。与估计值相联系的标准不确定度具有与估计值相同的量纲。在有些情况下，使用相对标准不确定度，即估计值的测量不确定度除以估计值的模，可能更为适当，它的量纲为 1。当估计值等于 0 时，相对不确定度的概念不适用。

2. 输入估计值测量不确定度的评定

(1) 概述

与输入估计值相关的测量不确定度，采用“A 类”或采用“B 类”方法评定。标准不确定度的 A 类评定，是通过对观测列的统计分析来评定不确定度的方法。此时，标准不确定度为通过求平均程序或适当的

回归分析求得的平均值的实验标准差。标准不确定度的 B 类评定，是用不同于对观测列统计分析的方法来评定不确定度的方法。此时，标准不确定度是根据其他知识或信息得出的。

(2) 标准不确定度的 A 类评定

当在相同的测量条件下，对某一输入量进行若干次独立的观测时，可采用标准不确定度的 A 类评定方法。

假定重复测量的输入量 X_i 为量 Q 。若在相同的测量条件下进行 $n(n>1)$ 次独立的观测，量 Q 的估计值为各个独立观测值 $q_j(j=1, 2, \dots, n)$ 的算术平均值

$$\bar{q} = \sum_{j=1}^n q_j / n \quad (5.5-5)$$

与输入估计值 \bar{q} 相关的测量不确定度可按以下方法之一评定：

(a) 值 q_j 的实验方差 $s^2(q)$ 是概率分布方差的估计值，可按下式计算

其(正)平方根称为实验标准差。算术平均值 \bar{q} 方差的最佳估计值，是由下式给出的平均值的实验方差： s^2

$$s^2(\bar{q}) = s^2(q) / n \quad (5.5-7)$$

其(正)平方根称为平均值的实验标准差。与输入估计值 \bar{q}

如输入估计值 x_i 来源于制造部门的说明书、校准证书、手册或其他资料，其中同时还明确给出其扩展不确定度 $U(x_i)$ 及包含因子 k 的大小，则与输入估计值相关的标准不确定度 $u(x_i)$ 为：

$$u(x_i) = U(x_i) / k \quad (5.5-10)$$

〔例 5.5-3〕校准证书上指出，标称值为 1kg 的砝码的实际质量 $m=1000000.32\text{g}$ ，并说明按包含因子 $k=3$ 给出的扩展不确定度 $U=0.24\text{mg}$ 。则由该砝码导致的测量标准不确定度分量 $u(m)$ 为：

$$u(m) = 0.24\text{mg} / 3 = 80 \mu\text{g}$$

相对标准不确定度为：

$$u_{\text{rel}}(m) = u(m) / m = 80 \times 10^{-9}$$

(b) 已知扩展不确定度和置信水平的正态分布

如果给出 x_i 在一定置信水平 p 下的置信区间的半宽，即扩展不确定度 U_p ，除非另有说明，一般按正态分布来评定其标准不确定度 $u(x_i)$ ，即：

$$u(x_i) = U_p / k_p \quad (5.5-11) \quad \text{其中，} k_p \text{——置信水平 } p \text{ 下的包含因子。}$$

正态分布的置信水平 p (置信概率) 与包含因子 k_p 之间存在着下表所示的关系。

〔例 5.5-4〕校准证书上给出标称值为 10Ω 的标准电阻器的电阻 R_s 在 23°C 时为：

$$R_s(23^\circ\text{C}) = (10.00074 \pm 0.00013) \Omega \quad \text{同时说明置信水平 } p=99\%。$$

由于 $U_{99}=0.13\text{m}\Omega$ ，按表 5-5-1， $k_p=2.58$ ，故其标准不确定度 $u(R_s)=0.13\text{m}\Omega / 2.58=50 \mu\Omega$ 。

(c) 其他几种常见的分布

除了正态分布外，其他常见的分布有 t 分布、均匀分布、反正弦分布、三角分布、梯形分布、两点分布 等。

若只知道输入量的估计值 x_i 分散区间的上限和下限分别为 a_+ 和 a_- (例如测量仪器的出厂指标、温度范围、由自动数据简化引起的舍入或截断误差)，则只能保守一些假定输入量 X_i 在上、下限之间的概率分布为均匀(矩形)分布。按照上述情况 (b) 的做法，输入估计值 x_i 及其标准不确定度 $u(x_i)$ 分别为：

$$x_i = (a_+ + a_-) / 2 \quad (5.5-12)$$

$$u^2(x_i) = (a_+ - a_-)^2 / 12 \quad (5.5-13) \quad \text{如果上、下限之差用 } 2a \text{ 表示，即 } a_+ - a_- = 2a，\text{ 则：}$$

$$u^2(x_i) = a^2 / 3 \quad (5.5-14) \quad \text{或：} \quad u(x_i) = a / 1.73 \quad (5.5-15)$$

〔例 5.5-5〕手册中给出纯铜在 20°C 时的线膨胀系数 $\alpha_{20}(\text{Cu})$ 为 $16.52 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$ ，并说明此值的变化范围不超过 $\pm 0.40 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$ 。保守一些假定 $\alpha_{20}(\text{Cu})$ 在此区间内为均匀分布，则线膨胀系数的标准不确定度 $u(\alpha)$ 为：

$$u(\alpha) = 0.40 \times 10^{-6} \text{C}^{-1} / 1.73 = 0.23 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}。$$

(d) 由重复性限或再现性限求不确定度

在规定实验方法的国家标准或类似技术文件中，按规定的测量条件，当明确指出输入量的两次测得值之差的重复性限，或再现性限 R 时，如无特殊说明，则输入估计值的标准不确定度为：

$$u(x_i) = r / 2.83 \quad (5.5-16)$$

$$\text{或 } u(x_i) = R / 2.83 \quad (5.5-17)$$

这里，重复性限，或再现性限 R 的置信水准为 95%，并作为正态分布处理。

3. 输出估计值标准不确定度的计算

(1) 当全部输入量彼此独立或不相关时，与输出估计值 y 相关的标准不确定度，即合成标准不确定度，由下式得出：

式中， $x_i(y)$ 是与输入估计值 x_i 相关的标准不确定度对于与输出估计值 y 相关的标准不确定度的贡献，即：

$$u_i(y) = c_i u(x_i) \quad (5.5-19)$$

c_i 是与输入估计值 x_i 相关的灵敏系数，它等于在输入估计值 x_i 处评定的模型函数 f 关于 X_i 的偏导数，即：

灵敏系数 c_i 表示输出估计值 y 随输入估计值 x_i 的变化而变化的程度。它可以从模型函数 f 按式 (5.5-19) 评定，或采用数值方法计算，即分别计算因输入估计值 x_i 的 $+u(x_i)$ 和 $-u(x_i)$ 的变化而引起的输出估计值 y 的变化，所得的 y 值之差除以 $2u(x_i)$ 即为 c_i 的值。有时，可以通过实验，例如分别在 $x_i \pm u(x_i)$ 重复测量，找出输出估计值 y 的变化以求出 c_i 的值。

如果模型函数 f 是输入量 X_i 的和或差，即：

则输出估计值应是相应的输入估计值的和或差，即：

式中, p_i 即为灵敏系数, 故与输出估计值相关的合成标准不确定度为:

如果模型函数 f 是输入量 X_i 的积或商, 即:

则输出估计值应是相应的输入估计值的积或商, 即

在这种情况下, 灵敏系数等于 $p_i y/x_i$, 如果采用相对标准不确定度 $\omega(y)=u(y)/|y|$ 和 $\omega(x_i)=u(x_i)/|x_i|$ 的话, 可以得到与式(5.5-22)类似的表达式:

(2)当两个输入量 X_i 和 X_k 之间有一定程度的相关性时, 即它们之间不是相互独立的, 那么, 其协方差也应作为不确定度的一个分量来考虑。在以下情况下, 与两个输入量 X_i 和 X_k 的估计值相关的协方差可以认为是零或影响非常小:

(a)输入量 X_i 和 X_k 相互独立, 例如, 它们是在不同的独立实验中重复而且非同时测得的, 或它们分别代表独立进行的不同评定所得出的量;

(b)输入量 X_i 和 X_k 中的一个可作为常量看待;

(c)研究表明, 输入量 X_i 和 X_k 之间没有相关性的迹象。

有时, 可以通过改变测量程序来避免发生相关性, 或者使协方差减小到可以忽略不计的程度。例如:通过改变所使用的同一台标准器等。

4. 扩展不确定度的评定

扩展不确定度是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。实际上, 扩展不确定度是将输出估计值的标准不确定度 $u(y)$ 扩展了 k 倍后得到的, 这里的 k 称为包含因子。即:

$$U=ku(y) \quad (5.5-27)$$

k 值一般为 2, 有时为 3, 这取决于被测量的重要性、效益和风险。当可以赋予被测量正态分布, 且与输出估计值相关的标准差的可靠性足够高时, 包含因子 $k=2$, 这代表扩展不确定度的包含概率约为 95%。

扩展不确定度是测量结果取值区间的半宽, 该区间可期望包含了被测量之值分布的大部分。而测量结果的取值区间在被测量值概率分布中所包含的百分数, 称为该区间的置信水平或置信概率, 用符号 p 表示。与置信水平相联系的扩展不确定度, 用符号 U_p 表示。例如:若合理地赋予被测量之值的分散区间包含全部的测得值, 则此区间的置信概率为 $p=100\%$, 扩展不确定度用 U_{100} 表示, 它就是置信区间的半宽, 通常用符号 a 表示。若只包含 95%的被测量之值, 则此区间称为置信概率为 $p=95\%$ 的置信区间, 其半宽就是扩展不确定度 U_{95} ; 类似地, 若要求 99%的概率, 则半宽为 U_{99} 。显然, $U_{95}<U_{99}<a$ 。

5. 测量不确定度的报告

一个完整的测量结果应包含两部分:

(1)被测量 Y 的最佳估计值, 即输出估计值 y , 一般由测量列的算术平均值给出;

(2)描述该测量结果分散性的测量不确定度, 它实际上是测量过程中来自测量设备、环境、人员、测量方法及被测对象的所有不确定度因素的集合。

报告测量不确定度有两种方式:一种是直接使用合成标准不确定度, 另一种是使用扩展不确定度。在进行基础计量学研究和基本物理常量的测量时, 通常使用合成标准不确定度。除此之外, 一般采用扩展不确定度来报告测量不确定度。

设被测量是标称值为 100g 的标准砝码质量 m_s 下面举例说明其测量结果的表达方法:

(1)用合成标准不确定度表达

(a) $m_s=100.02147\text{g}$, $u(m_s)=0.35\text{mg}$ 。

(b) $m_s=10002147(35)\text{g}$, 括号中的数是 $u(m_s)$ 的数值, 与所说明结果的最后位数字相对应。

(c) $m_s=100.02147(0.00035)\text{g}$, 括号中的数是 $u(m_s)$ 的数值, 用所说明结果的单位表示。

(2)用扩展不确定度表达

(a) $m_s=100.0215\text{g}$, $U(m_s)=0.7\text{mg}(k=2)$ 。

(b) $m_s=(1000215\pm 00007)\text{g}$, 其中 \pm 后的数是扩展不确定度 $U(m_s)$, $k=2$ 。

需要指出的是:输出估计值 y 及其标准不确定度 $u(y)$ 或扩展不确定度 $U(y)$ 的数值都不应给出过多的有效位数。一般来说, 最终报告时, 扩展不确定度 $U(y)$ 至多为两位有效数字, 即可取 1~2 位有效数字。但在计算过程中, 为了避免修约误差, 可能需要保留一些多余的位数。

按照 1~2 位有效位数, 对测量不确定度的数值进行修约时, 一般要将最末位后面的数都进位而不是舍去。例如: $U(y)=10.4\text{mm}$, 应进位到 11mm。一旦测量不确定度的有效位数确定了, 则应采用它的修约间隔来修约测量结果, 以确定其有效位至哪一位。也就是说, 当采用同一测量单位来表述测得值及其不确定度时, 它们的有效位数应是对齐的。

6. 测量不确定度的分类和评定流程

归纳上述内容，可将测量不确定度的分类简示如下：

测量不确定度评定的总流程，可归纳示于图 5.5-1。

(四) 测量不确定度应用实例

〔例 5.5-6〕高值电阻的测量

1. 测量任务

在某电子设备的生产中，需要使用 $1\text{M}\Omega$ 的高值电阻，设计要求其最大允许误差应在 $\pm 0.1\%$ 以内。为此，对选用的高值电阻进行测量，以确定其电阻值是否满足预期的使用要求。

2. 测量方法

用一台数字多用表对被测电阻器的电阻进行直接测量，测量系统按图 5.5-2 连接。

3. 测量仪器

使用 5 位半的数字多用表一台，经检定合格并在有效期内。

用该数字多用表测量电阻的技术指标如下：

最大允许误差为： $\pm (0.005\% \times \text{读数} + 3 \times \text{最低位数值})$ ；测量时所用档的满量程值为 $1999.9\text{k}\Omega$ ，最低位数值为 $0.01\text{k}\Omega$ ；当环境温度为 $(5 \sim 25)\text{ }^\circ\text{C}$ 时，温度系数的影响可忽略。

4. 实测记录

在室温 $(23 \pm 1)\text{ }^\circ\text{C}$ 下，用该数字多用表重复测得的显示值 R_i 列于表 5.5-2。

测量次数 $n=10$

测量结果为

5. 测量不确定度评定

(1) 测量模型电阻器的电阻值就等于数字多用表的电阻显示值 R 。

(2) 标准不确定度分量

①A 类评定

由实测数据估算平均值的实验标准差 $s(R)$ 为：

故标准不确定度分量 $u_1(R)$ 为：

②B 类评定

根据数字多用表的技术指标，确定其最大允许误差的区间的半宽 a 为：

$$a = 0.005\%R + 3 \times 0.01\text{k}\Omega$$

设测量值在该区间内为均匀分布(矩形分布)。由数字多用表不准引*的标准不确定度分量 $u_2(R)$ 为：

$$u_2(R) = a / \sqrt{3}$$

二、测量设备的计量确认

计量确认是指为确保测量设备满足预期使用要求而进行的一组操作。所有的测量设备必须满足规定的计量要求，即必须经过确认，并在受控条件下使用，才能保证测量结果的有效性。由于不同测量过程的计量要求各不相同，因此，按某一特定测量过程的要求确认的测量设备也许不能用于其他的测量过程。

图 5.6-2 所示的是测量设备计量确认过程的流程图。

计量确认过程有两个输入，即顾客计量要求和测量设备特性；而确认过程的惟一输出，则是测量设备的确认状态，即测量设备是否满足顾客的计量要求。

顾客计量要求是指顾客根据相应的生产过程所规定的测量要求，它取决于被测量的情况。显然，确定计量要求属于顾客的职责范畴。但由于这项工作通常要求对生产过程有深刻的认识，并涉及专业的计量学知识，因此，在有些情况下，顾客也可委托具有相应技术能力和资格的专业人员代为完成。确定顾客计量要求时还需考虑不正确测量发生的风险，及其对相关产品质量的影响。顾客计量要求通常用最大允许误差、测量不确定度等技术指标来表述。

顾客计量要求一旦确定之后，就可据此选择合适的测量设备，或将已有测量设备的特性与之相比较，以确认测量设备是否满足这些要求。

测量设备的特性通常是通过一次或多次校准或检定确定的。将所确定的测量设备的特性与顾客计量要求进行比较后，即可确认测量设备是否符合预期使用要求。例如：将测量设备的示值误差与作为顾客计量要求之一的最大允许误差进行比较。如果示值误差小于最大允许误差，则确认该设备符合要求，可以使用；否则，需采取措施加以改进，待重新确认满足要求后，方可使用。

校准证书或校准报告中非常重要的信息之一，是关于校准结果测量不确定度的说明，它将用于使用该设备的测量过程不确定度的评价。

测量过程的一些重要特性，如测量不确定度等，不仅取决于测量设备本身，也取决于环境条件、测量程序等，有时还与观测者的技能和经验有关。为此，在选择测量设备时，关键的一点是将整个测量过程作为总体来考虑，以更好地满足使用要求。

以下举例说明测量设备计量确认的一般程序。

[例 5.6-1] 某生产过程对反应器压力的要求是应控制在(200~250)kPa 的范围内。据此，我们得出用于反应器的压力测量设备的计量要求如下：测量范围为(150~300)kPa；最大允许误差为 2kPa；测量不确定度为 0.3kPa(不包括与时间有关的效应)；规定时间内的漂移不大于 0.1kPa。

比照此要求，顾客比较不同制造厂商提供的压力设备的技术指标(直接的或隐含的)，从中挑选出最适配的测量设备和测量程序。例如：顾客可能最终选定了某厂家生产的一台准确度等级为 0.5%、测量范围为(40~400)kPa 的压力计。

为确认所选压力计的性能满足反应器的压力测量要求，应对压力计进行校准。假设通过校准发现，在 200kPa 时压力计的标值误差为 3kPa，而校准不确定度为 0.3kPa。显然，该压力计不满足规定的最大允许误差要求，暂时不能使用，而须进行调整。若经过调整之后重新进行校准，示值误差为 0.6kPa，而校准不确定度仍为 0.3kPa，则该压力计已满足最大允许误差要求。假如我们还可证明它符合漂移要求的话，就可确认该压力计满足计量要求，可用于反应器的压力测量。

三、测量过程实施的控制

为控制测量过程的实施，不仅需确定该测量过程预期用途下所要求的特性，还需对这些特性进行分析/控制。测量过程的特性主要包括：最大允许误差、测量不确定度、稳定性、重复性、再现性等等。

应按规定的程序和时间间隔监控测量过程的实施，以确保能够及时发现测量过程中出现的问题，并迅速采取改进措施，避免偏离预期的要求。

测量过程的失控，例如由于核查标准退化或观测者技能不同等引起的问题，可通过一系列后过程活动来揭示，其中包括：控制图分析、趋势图分析、后续检验、实验室间比对、内部审核、顾客反馈等，特别是统计分析技术在测量控制体系中的应用起着非常重要的作用。

习题及答案

一、单项选择题

1. 实现单位统一、保障量值准确可靠的活动, 被称为()。 A. 计量 B. 测量 C. 检定 D. 校准
2. 计量的特点概括起来, 可以归纳为 4 个方面, 其中, ()是指任何一个测量结果或测量标准的值, 都能通过一条具有不确定度的连续比较链, 与计量基准联系起来。
A. 准确性 B. 一致性 C. 溯源性 D. 法制性
3. 关于我国法定计量单位, ()的说法不正确。
A. 我国采用国际单位制(SI) B. 所有 SI 单位都是我国法定计量单位 C. 我国法定计量单位都是 SI 单位
D. 《计量法》的颁布第一次以法律形式统一了全国的计量单位制度
4. 密度为 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 的正确读法是()。
A. 10 千克每立方米 B. 10 千克每三次方米 C. 10 千克每米三次方 D. 每立方米 10 千克
5. 下列计量单位中, ()书写正确。 A. $\text{km}/\text{小时}$ B. J/mmol C. $\text{m}\mu\text{m}$ D. dm
6. 对于非强制检定的测量仪器, 应以()为主要手段, 以达到统一量值的目的。
A. 校准 B. 周期检定 C. 非周期检定 D. 定点检定
7. 测量结果与被测量真值之间的一致程度, 是()。
A. 测量精密性 B. 测量准确度 C. 测量重复性 D. 测量复现性
8. 以标准差表征的测量结果分散性, 称为()。
A. 标准不确定度 B. 扩展不确定度 C. 合成不确定度 D. B 类不确定度 E. A 类不确定度
9. 表征测量仪器的计量特性随时间不变的能力的参数是()。 A. 分辨力 B. 灵敏度 C. 稳定性 D. 漂移
10. 数字显示器的分辨力为 δ_x , 设均匀分布, 取 $k=1.73$, 则由分辨力引入的标准不确定度为()。
A. $8\delta_x$ B. $0.5\delta_x$ C. $0.588\delta_x$ D. $0.29\delta_x$

二、多项选择题

11. 根据其地位和所起的作用不同, 国际上趋向于将计量分为()。
A. 法制计量 B. 实用计量 C. 科学计量 D. 工业计量
 12. 按照我国的规定, ()属于强制检定的管理范围。
A. 社会公用计量标准
B. 用于贸易结算、安全防护、医疗卫生、环境检测并列人相应目录的工作测量仪器
C. 企业、事业单位的最高计量标准 D. 用于企业内部结算的测量仪器
 13. 下列计量单位中, ()不属于 SI 基本单位。 A. 开(尔文) B. cd C. 克 D. 伏(特)E. mol
 14. 国际单位制(SI)单位是由()组成的。
A. SI 单位的倍数单位 B. SI 基本单位 C. SI 导出单位 D. SI 词头
 15. 下列计量单位中, ()属于我国法定计量单位。
A. 小时(h) B. 华氏度($^{\circ}\text{F}$) C. 海里(n mile) D. 公顷(hm^2)
 16. $10\mu\text{s}^{-1}$ 等于()。 A. 10^{-5}s^{-1} B. 10^5s^{-1} C. 10^7s^{-1} D. 10MHz
 17. 按计量学用途或在统一单位量值中的作用, 测量仪器可分为()。
A. 测量基准 B. 测量标准 C. 实物量具 D. 工作用测量仪器
 18. 测量仪器控制包括()。 A. 校准 B. 检定 C. 型式批准 D. 检验
 19. 测量不确定度可用()表示。
A. 标准差 B. 说明了置信水准的区间的半宽度 C. 标准差的倍数 D. 最大允许误差
 20. 标准不确定度包括()。 A. 扩展不确定度 B. 合成不确定度 C. A 类不确定度 D. B 类不确定度
- ### 三、综合分析题
21. 数字电压表制造厂说明书说明: 仪器校准后 1~2 年内, 在 1V 内示值最大允许误差为 $\pm\{16\times 10^{-6}\times(\text{读数})+2\times 10^{-6}\times(\text{范围})\}$ 。设校准后 20 日在 1V 测量电压, 在重复性条件下 4 次独立测得电压 V , 其平均值为 $V=0.955001\text{V}$, 平均值的实验标准差为 $s(V)=10\mu\text{V}$ 。
- (1) 由示值不稳定导致的不确定度为 A 类不确定度, $u_A=(\quad)$ 。 A. $10\mu\text{V}$ B. $5\mu\text{V}$ C. $20\mu\text{V}$ D. $14\mu\text{V}$
 - (2) 由示值误差导致得标准不确定度为 B 类不确定度。假设为均匀分布, $k_B=1.73$, 则 $u_B=(\quad)$ 。
A. $10\mu\text{V}$ B. $20\mu\text{V}$ C. $5\mu\text{V}$ D. $14\mu\text{V}$
 - (3) 合成标准不确定度 $u_c=(\quad)$ 。 A. $20\mu\text{V}$ B. $10\mu\text{V}$ C. $5\mu\text{V}$ D. $14\mu\text{V}$
 - (4) 取 $k=2$, 则扩展不确定度 $U=(\quad)$ 。 A. $20\mu\text{V}$ B. $40\mu\text{V}$ C. $10\mu\text{V}$ D. $28\mu\text{V}$

- ### 四、答案
1. A 2. C 3. C 4. A 5. D 6. A 7. B 8. A 9. C 10. D 11. A、C、D 12. A、B、C 13. C、D 14. A、B、C 15. A、C、D 16. C、D 17. A、B、D 18. B、C、D 19. A、B、C 20. B、C、D 21. (1)A(2)A(3)D(4)D