

机械制造检测 技术手册

李新勇 赵志平 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

机械制造检测技术手册

主 编	李新勇	赵志平		
副主编	程仲文	孙建仁		
参 编	郭兰中	薛旺录	孙永吉	国洪建
	刘小斌	牛广文	高瑞春	



机械工业出版社

前 言

从事机械制造实践与教学工作多年，经常面对产品质量检验、实物检测、工件测绘、测量分析等必须及时处理的实际问题，要频繁地翻阅大量资料，查找相关的测量知识，但目前现有资料比较零散，查找资料很费时。为此我们组织了理论与实践能力较强的教师、工程师、技师，结合实际生产加工质量检测经验以及教学工作中经常遇到的相关问题，本着实用的原则编著此手册，便于机械工业领域技术人员、管理人员、检验人员、操作工人以及本专科院校师生等有关人员参考使用。

现代质量检测的职能与传统质量检验的职能相比有很大不同，它由简单单纯把关的被动检测，发展为“积极预防与严格把关相结合”的主动检测，这一发展对工程技术人员及质量检测相关人员提出了更高的要求，即不仅会检测产品的实物质量，而且会识别各种质量问题（缺陷），以及分析造成质量问题的原因，并提出改进和预防措施。另外，近几年，为适应国际标准，我国修订了许多机械制造质量检测方面的标准并制定了新规范，许多制造企业对此了解并不多，在制造过程中难免会出现质量纠纷。本手册引用国家新标准，介绍了机械产品检测的基础知识、常用资料，以及有关产品的质量标准、技术要求、检验方法、质量检测中常见质量问题及其产品质量原因分析和预防措施。

本手册的特点有以下几个方面：

- 1) 系统性。弥补了目前国内缺少系统、全面介绍机械制造检测技术资料的急需。
- 2) 全面性。内容齐全，涵盖了机械制造领域从原材料到成品的全部检测技术。
- 3) 指导性。用通俗的语言，采用白描的手法一一介绍检测方法，读者只要照着做就可以了。
- 4) 实用性。本书按照国内机械制造技术体系编写，易于理解，易于查找，易于使用。
- 5) 先进性。技术内容准确，本手册所有技术标准均参照国内最新的技术标准及规范。
- 6) 参照性。附录提供了机械制造计算常用的资料及最新的标准、规范，便于读者查阅。

本手册是机械制造领域一本综合性检测工具书，其中大量数据来自现有国家、行业中的最新标准或生产中的经验数据。但由于我国标准制定的后滞性，书中部分数据仍采用旧的标准数据，仅供使用者参考，使用时请根据企业实际情况核对。

本手册由李新勇、赵志平任主编，程仲文、孙建仁任副主编，参加编写的有郭兰中、薛旺录、孙永吉、国洪建、刘小斌、牛广文、高瑞春等。

在本手册的编写中得到了高等院校、科研院所、厂矿企业等多家单位的大力支持与帮助，在此表示感谢。虽然我们编写人员作了许多研究，倾注了大量心血，尽了最大的努力，但由于水平有限，错误在所难免，我们诚挚地欢迎广大读者批评指正，以便再版时修正。

编 者
于兰州

目 录

前言

第1章 机械检测基础知识 1

1.1 基本知识 1

1.1.1 检测概述 1

1.1.2 检测技术常识 2

1.2 测量误差与不确定度评定 4

1.2.1 测量误差 4

1.2.2 不确定度评定与测量结果的表示 11

1.3 数值的修约与极限数值的表示和判断 18

1.3.1 数值修约 18

1.3.2 极限数值的表示和判断 21

1.4 正确选择检测方法的原则及其误差计算 23

1.4.1 正确选择检测器具的原则 24

1.4.2 正确选择测量基准的原则及其定位方法 24

1.4.3 正确选择比较形式 26

1.4.4 正确选择测量力的原则 27

1.4.5 正确选择标准件的原则 28

1.4.6 正确选择客观条件中各种因素的原则 28

第2章 机械通用检测器具 30

2.1 普通量具 30

2.1.1 金属直尺、钢卷尺 30

2.1.2 内外卡钳 31

2.1.3 塞尺 35

2.2 游标量具 36

2.2.1 游标量具读数原理 36

2.2.2 游标卡尺 38

2.2.3 高度游标卡尺 42

2.2.4 深度游标卡尺 43

2.2.5 齿厚游标卡尺 43

2.3 螺旋测微量具 45

2.3.1 外径千分尺 45

2.3.2 数显千分尺 50

2.3.3 杠杆千分尺 51

2.3.4 两点内径千分尺 52

2.3.5 内测千分尺 54

2.3.6 三爪内径千分尺 55

2.3.7 公法线千分尺 56

2.3.8 壁厚千分尺 57

2.3.9 板厚千分尺 57

2.3.10 尖头千分尺 58

2.3.11 深度千分尺 58

2.3.12 奇数沟千分尺 59

2.4 指示式量具 60

2.4.1 百分表和千分表 60

2.4.2 杠杆千分表 63

2.4.3 杠杆百分表 65

2.4.4 内径百分表 65

2.4.5 其他指示式量具 67

2.5 平直度量具 70

2.5.1 平面平晶 70

2.5.2 刀口形直尺 71

2.5.3 平尺 72

2.5.4 平板 73

2.5.5 方箱 75

2.5.6 条式和框式水平仪 75

2.5.7 光学合像水平仪 78

2.5.8 电子水平仪 79

2.6 角度量具 80

2.6.1 直角尺 80

2.6.2 正弦规 83

2.6.3 游标万能角度尺 84

2.6.4 中心规 87

2.6.5 半径规(R规) 87

2.7 量块 88

2.8 常用光学仪器的种类和用途 93

2.8.1 测长仪 93

2.8.2 工具显微镜 96

2.8.3 光学计(光学比较仪) 100

2.8.4 电动量仪和气动量仪 102

2.8.5 三坐标测量机 103

2.9 量具、量仪的维护保养 110

第3章 光滑工件尺寸的检测 112

3.1 光滑工件尺寸精度的基础知识 112

3.1.1 尺寸精度的基本概念	112	5.3.4 圆柱度误差的检测	221
3.1.2 极限与配合	114	5.3.5 线轮廓度误差的检测	222
3.1.3 光滑工件的测量验收	129	5.3.6 面轮廓度误差检测	222
3.2 光滑工件尺寸的综合检测	133	5.4 位置误差的检测	223
3.2.1 光滑量规	133	5.4.1 平行度误差的检测	223
3.2.2 综合检测	139	5.4.2 垂直度误差的检测	224
3.3 光滑工件尺寸的单项检测	140	5.4.3 倾斜度误差的检测	227
3.3.1 轴类(外尺寸)零件的检测	140	5.4.4 同轴度误差检测	227
3.3.2 孔类(内尺寸)零件的检测	143	5.4.5 对称度误差的检测	228
3.3.3 光滑工件尺寸的间接检测	145	5.4.6 位置度误差的检测	230
3.3.4 大尺寸零件(500mm 以上) 的测量	147	5.4.7 圆跳动误差的检测	230
3.3.5 小尺寸的测量	151	5.4.8 全跳动误差的检测	231
第4章 角度与锥度的检测	156	第6章 表面粗糙度检测	233
4.1 角度的术语及参数	156	6.1 表面粗糙度的评定	233
4.1.1 角度单位及换算	156	6.1.1 表面粗糙度轮廓	233
4.1.2 角度的术语及定义	157	6.1.2 表面粗糙度轮廓评定 基本参数	233
4.2 角度的检测	159	6.1.3 表面粗糙度轮廓的评定参数	235
4.2.1 角度测量的方法	159	6.2 表面粗糙度轮廓的技术要求	237
4.2.2 平面角度的检测	160	6.2.1 表面粗糙度轮廓技术要求 的内容	237
4.3 圆锥配合及公差	162	6.2.2 表面粗糙度轮廓幅度参数 的选择	237
4.3.1 圆锥及其配合的基本参数	162	6.2.3 表面粗糙度轮廓参数极 限值的选择	238
4.3.2 圆锥配合的分类及特点	165	6.3 表面粗糙度轮廓技术要求在 零件图上的标注	239
4.3.3 圆锥公差	167	6.3.1 表面粗糙度轮廓的基本 图形符号和完整图形符号	239
4.4 锥度的检测	170	6.3.2 表面粗糙度轮廓技术要求 在完整图形符号上的标注	240
4.4.1 锥度测量的方法	170	6.3.3 表面粗糙度轮廓代号在 零件图上标注的规定和方法	243
4.4.2 圆锥量规	171	6.4 表面粗糙度轮廓的检测	245
4.4.3 锥度的检测	172	6.4.1 比较检测法	245
第5章 形位误差的检测	178	6.4.2 用电动轮廓仪测量 ——针描法	246
5.1 基本概念	178	6.4.3 用光切显微镜测量 ——光切法	247
5.1.1 零件几何要素	178	6.4.4 用干涉显微镜测量 ——干涉法	247
5.1.2 常见几何误差种类	179	6.4.5 利用强光散射原理测量零件 的表面粗糙度	248
5.1.3 几何公差带的形状	180	第7章 螺纹检测	250
5.1.4 几何误差基准	194	7.1 螺纹相关知识概念	250
5.1.5 几何公差等级与几何公差值	196		
5.1.6 公差原则	201		
5.2 几何误差的评定及其检验原则	212		
5.2.1 形状误差及其评定	212		
5.2.2 方向误差及其评定	216		
5.2.3 位置误差及其评定	217		
5.2.4 几何误差的检测原则	217		
5.3 形状误差的检测	218		
5.3.1 直线度误差的检测	218		
5.3.2 平面误差的检测	219		
5.3.3 圆度误差检测	220		

7.1.1 螺纹基本知识	250	8.5.4 轴向齿距偏差的检测	356
7.1.2 螺纹结合的各几何参数对其互换性的影响	256	8.5.5 螺旋线波度偏差的检测	358
7.1.3 螺纹合格性判断	258	8.5.6 齿厚的检测	360
7.2 螺纹公差	260	8.5.7 齿轮副接触斑点的检测	367
7.2.1 普通螺纹	260	8.5.8 齿轮副侧隙的检测	368
7.2.2 55° 寸制管螺纹	265	8.6 内齿轮的检测	369
7.2.3 60° 密封圆锥螺纹	266	8.6.1 齿廓的检测	369
7.2.4 梯形螺纹	272	8.6.2 齿圈径向跳动的检测	370
7.3 圆柱螺纹的综合检测	277	8.6.3 基节和公法线的测量	370
7.3.1 螺纹量规	278	8.6.4 齿厚的检测	370
7.3.2 综合检测	279	8.7 锥齿轮的检测	371
7.4 圆柱外螺纹的单项测量	280	8.7.1 锥齿轮精度	371
7.4.1 中径的检测	280	8.7.2 锥齿轮的单项误差测量	380
7.4.2 牙型半角的检测	293	8.7.3 锥齿轮的综合误差测量	381
7.4.3 螺距的检测	295	8.8 蜗轮、蜗杆的检测	382
7.5 圆柱内螺纹的单项测量	297	8.8.1 蜗杆传动的基本知识	382
7.5.1 中径的检测	297	8.8.2 圆柱蜗杆、蜗轮精度	390
7.5.2 螺距和牙型半角的测量	299	8.8.3 蜗杆的检测	404
7.6 圆锥螺纹的检测	301	8.8.4 蜗轮的检测	408
7.6.1 圆锥螺纹的综合检测	302	第9章 键的检测	413
7.6.2 圆锥外螺纹的单项测量	302	9.1 键的基本知识	413
7.7 机床丝杠、螺母的检测	306	9.1.1 单键的基本知识	413
7.7.1 机床丝杠和螺母的公差	306	9.1.2 单键联接的极限与配合	414
7.7.2 丝杠、螺母的检测	311	9.1.3 花键的基本知识	418
第8章 齿轮检测	316	9.1.4 矩形花键联接的极限与配合	421
8.1 齿轮传动的分类及特性	316	9.1.5 渐开线花键联接的极限与配合	424
8.1.1 齿轮传动的分类	316	9.2 键结合的检测方法	430
8.1.2 齿轮传动的使用要求	317	9.2.1 单键的检测	430
8.2 渐开线圆柱齿轮的精度制	318	9.2.2 矩形花键的检测	434
8.2.1 轮齿同侧齿面偏差的定义和允许值	318	9.2.3 圆柱直齿渐开线花键的检测	436
8.2.2 渐开线圆柱齿轮精度制的构成	323	第10章 各类毛坯件的检测	444
8.3 圆柱渐开线齿轮的单项检测	328	10.1 轧制件(型材)的检测	444
8.3.1 齿距偏差检测	329	10.1.1 金属材料轧制件的检测内容	444
8.3.2 齿廓偏差检测	333	10.1.2 轧制件外观检测	444
8.3.3 螺旋线偏差检测	337	10.1.3 轧制件力学性能检测	445
8.3.4 径向跳动检测	340	10.1.4 轧制件工艺性能试验	446
8.3.5 切向综合偏差检测	341	10.2 铸件毛坯检测	446
8.3.6 切向综合偏差检测	342	10.2.1 相关知识	446
8.4 圆柱齿轮整体偏差的检测	344	10.2.2 铸件毛坯的检测内容	447
8.5 替代项目的检测	349	10.2.3 工序的检测	448
8.5.1 公法线长度的检测	349	10.2.4 铸件成品的检测	451
8.5.2 基节偏差的检测	353	10.2.5 铸件常见的缺陷	460
8.5.3 接触线偏差的检测	355	10.3 锻件毛坯检测	461

10.3.1 锻件相关概念	461	11.4.5 感应加热淬火、回火件 的检测	524
10.3.2 锻件材料毛坯和模具 的检测	462	11.5 热处理件常见的缺陷	527
10.3.3 锻造过程的检测	463	11.5.1 正火、退火处理常见的缺陷	527
10.3.4 锻件成品的检测	464	11.5.2 淬火、回火处理常见的缺陷	527
10.3.5 锻件验收的技术条件	466	11.5.3 渗碳处理常见的缺陷	528
10.3.6 锻件常见的缺陷	484	11.5.4 渗氮处理常见的缺陷	529
10.4 焊接件毛坯检验	484	11.5.5 特殊钢的热处理常见 的缺陷	531
10.4.1 相关概念	484	第12章 装配和成品检测	532
10.4.2 焊接毛坯缺陷	485	12.1 装配精度基础	532
10.4.3 焊接件的超声检测	486	12.1.1 装配精度	532
第11章 热处理件的检测	493	12.1.2 装配精度的获得方法	532
11.1 热处理件检测基础知识	493	12.1.3 装配精度的内容	533
11.1.1 外观检测	493	12.1.4 装配精度的检测工具	534
11.1.2 硬度检测	493	12.2 装配检测基础	540
11.1.3 变形与开裂检测	496	12.2.1 部装的检测	540
11.1.4 金相检测	497	12.2.2 总装的检测	540
11.1.5 化学成分检测	498	12.3 装配检测	542
11.1.6 无损检测	499	12.3.1 部件及机构装配的检测	542
11.2 热处理的基本方法	501	12.3.2 机械设备总装后的检测	545
11.2.1 钢铁整体热处理常用 基本方法	501	12.4 成品检测	552
11.2.2 钢铁表面热处理常用 基本方法	503	12.4.1 成品检测方式	552
11.2.3 有色金属热处理常用 基本方法	504	12.4.2 成品检测方法	553
11.3 硬度的测定	505	12.4.3 成品检测类型	554
11.3.1 布氏硬度测定法	505	12.4.4 成品检测内容	554
11.3.2 洛氏硬度测定法	507	附录A 长度计量常用数学	559
11.3.3 维氏硬度测定法	510	A.1 常用代数公式	559
11.3.4 显微硬度测定法	512	A.2 三角函数	561
11.3.5 锉刀检验硬度法	513	A.3 矩阵	564
11.3.6 硬度检验应注意的事项	513	A.4 几何	567
11.4 几种热处理零件的检测	515	A.5 微分与导数	576
11.4.1 正火、退火件的检测	516	A.6 概率与数理统计	579
11.4.2 淬火、回火件的检测	517	A.7 常用单位换算	583
11.4.3 渗碳、碳氮共渗件的检测	521	附录B 检测技术相关标准、规范	587
11.4.4 渗氮、氮碳共渗件的检测	522	参考文献	592

第1章 机械检测基础知识

1.1 基本知识

1.1.1 检测概述

为了满足机械产品的功能要求，在正确合理地完成了可靠性、使用寿命、运动精度等方面的设计以后，还须进行加工和装配过程的制造工艺设计，即确定加工方法、加工设备、工艺参数、生产流程及检测手段。其中，特别重要的环节是质量保证措施中的质量检测。

检测是测量与检验的总称，就是确定产品是否满足设计要求的过 程，即判断产品合格性的过程。测量是指将被测量与作为测量单位的标准量进行比较，从而确定被测量的实验过程；而检验是借助某种手段或方法，测量产品的质量特性值，获取质量数据后与标准（或规范）要求进行对比与评判的活动。

检验和测量的区别在于：检验只评定被测对象是否合格，而不能给出被测对象值的大小；测量是通过被测对象与标准量的比较，得到被测对象的具体量值，一次判别被测对象是否合格的过程。例如，用光滑极限量规检验被测零件尺寸，可以直接判断被测尺寸是否在其极限尺寸范围之内，从而得到被检零件是否合格的结论，然而却不能得出其实际尺寸。因此检验和测量的概念是明显不同的。检测的核心是测量技术，通过测量得到的数据，不仅能判断产品的合格性，还为分析产品制造过程中的质量状况提供了最直接而可靠的依据。一般说来，在大批量生产条件下，检验精度要求不太高的零件时常采用检验，因为检验的效率高；而高精度、单件小批生产条件下或需要进行加工精度分析时，多采用测量。

一个完整的测量过程应包括测量对象、计量单位、测量方法（包括测量器具）和测量精度等四个要素。

1) 测量对象。测量对象在机械精度的检测中主要是有关几何精度方面的参数量，其基本对象是长度和角度。但是，长度量和角度量在各种机械零件上的表现形式是多种多样的，表达被测对象性能的特征参数是相当复杂的。因此，认真分析被测对象的特性、研究被测对象的含义是十分重要的。例如，表面粗糙度的各种评定参数、齿轮的各种误差项目、尺寸公差与几何公差之间的独立与相关的关系等。

2) 计量单位。计量单位（简称单位）是以定量值表示同种量的量值而约定采用的特定量。我国规定采用国际单位制（SI）为基础的“法定计量单位制”。它是由一组选定的基本单位和由定义公式与比例因数确定的导出单位所组成的。如长度计量基本单位为“m（米）”，机械工程中常用的长度单位“mm（毫米）”、“ μm （微米）”和“nm（纳米）”为导出单位；角度单位以“°（度）”、“′（分）”为导出单位，以及国际单位的辅助单位“rad（弧度）”、“sr（球面度）”等。

在测量过程中，测量单位必须以物质形式来体现，能体现计量单位和标准量的物质形式有：光波波长、精密量块、线纹尺、各种圆分读盘等。

3) 测量方法。测量方法是根据一定的测量原理，在实施测量过程中对测量原理的运用及其实际操作。广义的说，测量方法可以理解为测量原理、测量器具（计量器具）和测量条件（环

境和操作者)的总和。

在实施测量的过程中,应根据被测对象的特点(如材料硬度、外形尺寸、生产批量、制造精度、测量目的等)和被测参数的定义来拟定测量方案,选择测量器具和规定测量条件,合理地获得可靠的测量结果。

4) 测量精度。测量精度是测量结果与真值的一致程度。真值是当某被测量能被完善地确定并能排除所有测量上的缺陷时,通过测量所得到的量值。由于会受到许多因素的影响,测量过程总是不完善的,即任何测量都不可能没有误差。对于每一个测量值都应给出相应的测量误差范围,说明其可信度。因此,不考虑测量精度而得到的测量结果是没有任何意义的。

1.1.2 检测技术常识

1. 检测的一般步骤

(1) 确定被检测项目 审阅被测零件图样及有关技术资料,了解被测件的用途,熟悉各项技术要求,明确需要检测的项目。

(2) 设计检测方案 根据检测项目的性质、要求、结构特点、批量大小、检测设备状况、检测环境及检测人员的能力等多种因素,设计一个能满足检测精度要求且具有低成本、高效率的检测预案。

(3) 选择检测器具 按照规范要求选择适当的检测器具,或设计、制造专用的检测器具和辅助工具,并进行必要的误差分析。

(4) 检测前准备 清理检测环境并检查是否满足检测要求,清理标准器、被测件及辅助工具,对检测器具进行调整使之处于正常状态。

(5) 采集数据 安装被测件,按照设计预案采集测量数据,并规范地做好原始数据记录。

(6) 数据处理 对检测数据进行计算和处理,获得检测结果。

(7) 填报检测结果 将检测结果填写在检测报告单及有关的原始记录中,并根据技术要求作出合格与否判定。

2. 测量方法及其分类

(1) 按测得示值方式划分

1) 绝对测量。在计量器具的读数装置上可表示出被测量的全值,如千分尺的测量。

2) 相对测量。在计量器具的读数装置上只表示出被测量相对已知标准量的偏差值,如量块调整比较仪。

(2) 按测量结果获得方法划分

1) 直接测量。用计量器具直接测量被测量的整个数值或相对于标准量的偏差。

2) 间接测量。测量与被测量有函数关系的其他量,再通过函数关系式求出被测量。

(3) 按同时测量被测参数的多少划分

1) 单项测量。单独地、彼此没有联系地测量零件的单项参数,如分别测量齿轮的齿厚、齿形、齿距等。这种方法一般用于量规的检定、工序间的测量,或为了工艺分析、调整机床等目的。

2) 综合测量。同时检测工件上的几个有关参数,综合判断工件是否合格,如齿轮运动误差的综合测量、用螺纹量规检验螺纹的作用中径等。综合测量一般用于终结检验,其测量效率高,能有效保证互换性,在大批量生产中应用广泛。

(4) 按被测件表面与测量器具测头是否有机接触划分

1) 接触测量。测量器具的测头与零件被测表面接触后有机作用力的测量,如用游标卡尺、千分尺测量零件等。为了保证接触的可靠性,测量力是必要的,但它可能使测量器具及被测

件发生变形而产生测量误差,还可能造成对零件被测表面质量的损毁。

2) 非接触测量。测量器具的感应元件与被测件表面不直接接触,因而不存在机械作用的测量力。属于非接触测量的仪器主要是利用光、气、电、磁等作为感应元件与被测件表面的联系,如干涉显微镜、磁力测厚仪、气动量仪等

(5) 按测量在工艺过程中所起作用划分

1) 主动测量。在加工过程中进行的测量。其测量结果直接用来控制零件的加工过程,决定是否继续加工或判断工艺过程是否正常、是否需要进行调整,故能及时防止废品的发生,所以又称为积极测量。

2) 被动测量。加工完成后进行的测量。其结果仅用于发现并剔除废品,所以被动测量又称为消极测量。

(6) 按被测工件在测量时所处状态划分

1) 静态测量。测量时被测件表面与测量器具测头处于静止状态。例如用外径千分尺测量轴径、用齿距仪测量齿轮齿距等。

2) 动态测量。测量时被测件表面与测量器具测头处于相对运动状态,或测量过程是模拟零件处于工作或加工时的运动状态,它能反映生产过程中被测参数的变化过程。例如用激光比长仪测量精密纹线尺,用电动轮廓仪测量表面粗糙度等。

(7) 按测量中测量因素是否变化划分

1) 等精度测量。在测量过程中,决定测量精度的全部因素或条件不变。例如,由同一个人、同一台仪器,在同样的环境中,以同样的方法,同样仔细地测量同一个量。在一般情况下,为了简化测量结果的处理,大都采用等精度测量。实际上,绝对的等精度测量是做不到的。

2) 不等精度测量。测量过程中,决定测量精度的全部因素或条件可能改变或部分改变。由于不等精度测量的数据处理比较复杂,因此一般用于重要的科研试验中的高精度测量。

3. 检测器具

(1) 检测器具的分类 按所用量具的不同可分为以下几类。

1) 单值量具。只能体现一个单一量值的量具。可以用来校对和调整其他测量器具或作为标准量与被测量直接进行比较,如量块、角度块等。

2) 多值量具。可体现一组同类量值的量具。同样能校对和调整其他测量器具,或作为标准量与被测量直接进行比较,如线纹尺、90°角尺等。

3) 专用量具。专门用来检验某种特定参数的量具。常见的有:检验光滑圆柱孔或轴的光滑极限量规,判断内螺纹或外螺纹合格性的螺纹量规,判断复杂形状的表面轮廓合格性的检验样板,用模拟装配通过性来检验装配精度的功能量块,各种专用量仪等。

4) 通用量具。我国习惯上将结构比较简单的测量仪器称为通用量具,如游标卡尺、外径千分尺、百分表等。

(2) 检测器具的技术性能指标

1) 标称值。标注在量具上用以表明其特性或指导使用的量值。例如标在量块上的尺寸,标在刻线上的尺寸,标在角度量块上的角度。

2) 分度值。计量器具刻尺或度盘上每个刻度间距所代表的量值或指量仪显示的最末一位数字所代表的量值。在长度测量中,常用的分度值有0.01mm、0.005mm、0.002mm和0.001mm等几种。对于有些量仪(如数字式量仪),采用非刻度盘指针显示,就不称为分度值,而称为分辨力。分度值是一种测量器具所能直接读出的最小单位量值,它反映了读数精度的高低;从一个侧面说明了测量器具的测量精度的高低。

3) 刻度间距。计量器具标尺或圆刻度盘上两相邻刻线中心之间的距离或圆弧长度。刻度间

距太小,会影响估读精度,太大则会加大读数装置的轮廓尺寸。为适于人眼观察,刻度间距一般为 $0.75 \sim 2.5\text{mm}$ 。

4) 示值范围。是指计量器具所能显示或指示的被测量起始值到终止值的范围。

5) 测量范围。是指计量器具的误差处于规定极限内,所能测量的被测量最小值到最大值的范围。

6) 灵敏度 (K)。计量器具对被测量变化的反应能力,即: $K = \Delta L(\text{被观测变量的增量}) / \Delta x(\text{被测量的增量})$ 。当分子分母为同一类量时,灵敏度又称放大比 K ,它表示计量器具放大微量的能力。

7) 灵敏限 (阈)。能引起计量器具示值可觉察变化的被测量的最小变化值。该指标反映量仪对被测量值微小变动的不敏感程度。

8) 测量力。接触测量过程中测头与被测物体之间的接触压力。过大的测量力会引起测头和被测物体的变形,从而引起较大的测量误差。较好的计量器具一般均设置有测量力控制装置。

9) 示值误差。计量器具示值与被测量真值之间的差值。示值误差是测量仪器本身各种误差的综合反映。因此,仪器示值范围的不同工作点,示值误差是不相同的。一般可用适当精度的量块或其他标准计量器,来检定测量器具的示值误差。

10) 示值变动性。在测量条件不变的情况下,对同一被测量进行多次重复测量时,其结果的最大差异。

11) 回程误差。在相同测量条件下,对同一被测量进行往返两个方向测量时,量仪的示值变化量。它是由测量器具中测量系统的间隙、变形及摩擦等原因引起的。

12) 不确定度。在规定条件下测量时,由于测量误差的存在,对测量值不能确定的程度。

1.2 测量误差与不确定度评定

1.2.1 测量误差

1. 真值与误差

测量的目的是为了得到被测物理量所具有的客观真实数据。但由于受测量方法、测量仪器、测量条件以及观测者水平等多种因素的限制,测量不可避免地存在误差,因此任何测量值不可能绝对精确,只是在一定程度上近似于它的真实值。这种实际测量值与被测几何量真值之间的差值称为测量误差。测量误差可以用绝对误差或相对误差来表示。

(1) 绝对误差 绝对误差 δ 是指被测量的实际值与其真值之差,即

$$\delta = x - x_0 \quad (1-1)$$

式中 x ——实际值 (测量值);

x_0 ——真值或约定值。

真值是一个理想的概念,一般来说真值是未知的,因此绝对误差也就是未知的。在实际测量中,常用约定真值或不存在系统误差情况下的算术平均值来代替真值。

理论真值:三角形内角之和等于 180° ,理论设计值和理论公式值等。

约定真值:由国际计量大会定义的单位可作为约定值。

相对真值:高一级标准器与低一级标准器的误差,相对而言可认为前者是后者的真值。标准物质证书上所给出的标准值也是相对真值。

绝对误差是代数值,即它可能是正值、负值或零,其绝对值大小决定了测量的精确度,测量误差绝对值越小,说明测得值越近似于真实值,因而测量的精确度越高;反之,测量的精确度

低。绝对误差可以评定任一测量的精确度,但是相同的误差,由于被测量的不同,其测量结果的精确度是不同的,因而就有相对误差的概念。

(2) 相对误差 相对误差 E 是指绝对误差的绝对值与被测的真值的比值,通常用百分数来表示。由于被测几何量的真值无法得到,因此在实际中常以被测几何量的测得值代替真值进行估算,即

$$E = \frac{|\delta|}{x_0} \times 100\% \approx \frac{|\delta|}{x} \times 100\% \quad (1-2)$$

相对误差是一个无量纲的数值,不论用什么单位进行测量,如其测量精度相同,则其相对误差的大小总是相同;而当被测量的大小不同时,则其相应的相对误差就不同,因而可由其大小判断测量的精确度。

2. 测量误差分类

根据误差的特征可分为:系统误差、偶然误差和粗大误差三大类。

(1) 系统误差 系统误差是指在相同条件下,多次测量同一量值时,该误差的绝对值和符号保持不变,或者在条件改变时,按某一确定规律变化的误差。前者称为定值系统误差,例如量块的实际值和公称值之差;后者称为变值系统误差,按变动规律的不同可分为周期性误差和累积误差。周期性误差是指按周期规律出现的误差,如测微仪的指针和刻度盘的偏心所引起的误差;而累积误差是指随着时间或长度的增大而增大,或随着长度的缩短而减小,如温度变化对长度的影响。

1) 系统误差产生的原因。

①量具或计量仪器设计、制造、装配和使用调整的不正确而引起的误差。例如:非线性用线性代替引起的误差;刻度盘的刻度误差;百分表未调零而引起的误差等。

②测量方法的不完善(包括计算公式不准确,测量方法选择不当,工件安装、定位不准确等)引起的误差。例如:不正确地支承细长工件而引起的变形误差;在接触测量中,由于测头测量力的影响,使被测零件和测量装置变形而产生的误差;不遵守温度规范而引起的温度误差等。

2) 减少和消除系统误差的基本方法。系统误差的出现一般都有较明确的原因,但需要对具体问题进行分析,要设法找出其主要原因,然后采取措施消除它的影响或者是对测量结果进行修正。需要注意的是,系统误差具有恒定性,总是使测量结果偏向一边,或者偏大,或者偏小。因此,多次测量求平均值并不能消除系统误差,但可以采用下述方法减少和消除系统误差。

①根源法。从产生的根源上消除系统误差是最根本的方法。例如:量具或量仪零位偏移的误差,可以事先检查零位是否对准后,方可进行测量;为消除安装误差,仪器应调平的就应使用水平仪调平;为消除测量条件中温度的误差,应避免局部和瞬时的温度变化等。

②修正法。对于一些固定的系统误差,如能事先用相应精度的仪器将其检定出来,并制定出相应的修正表或修正曲线,就可以对其加以修正,这就是检定工作的重要性。例如:某一量块的公称尺寸为10mm,但经检定其真实值为10.001mm,即系统误差 $\delta = -0.001\text{mm}$ 。因此当采用该量块进行测量时,就应在测量结果中加入大小与误差值相同、但符号相反的修正量($c = +0.001\text{mm}$),这样就可以消除该系统误差。

③抵消法。对于一些固定的或变动的系统误差,常可以根据误差出现的符号不同和相互补偿的原理用两次测量读数的方法达到消除系统误差的目的。例如,后面章节中讲到的螺纹螺距、牙型半角的测量等。

(2) 随机误差 在实际测量条件下,多次测量同一量时,误差的绝对值符号的变化,时大

时小、时正时负，以不可预定方式变化着的误差叫做随机误差，也称为偶然误差。

随机误差产生的原因主要是由许多暂时不加控制和尚未控制的连续变化的微小因素所造成的。例如，仪器中传动链的间隙、连接件的弹性变形、油层带来的停滞现象和摩擦力的变化等；仪器显示数值的估计读数位偏大和偏小；仪器调节平衡时，平衡点确定不准；测量环境扰动变化以及其他不能预测、不能控制的因素，如空间电磁场的干扰、电源电压波动引起测量的变化等等。

这些因素的共同影响使测量结果围绕测量的平均值发生涨落变化，这一变化量就是各次测量的随机误差。随机误差的出现，就某一次测量而言是没有规律的，当测量次数很多时，随机误差就显示出明显的规律性。实践和理论都已证明，随机误差服从一定的统计规律，即正态分布，可以采用统计学方法估算随机误差。

(3) 粗大误差 粗大误差是指由于某些偶尔突发性的异常因素或疏忽所致，明显超出统计规律预期值的误差，又称为疏忽误差、过失误差，或简称粗差。

粗大误差的产生原因如下：

1) 测量方法不当或错误，测量操作疏忽和失误，如未按规程操作、读错读数或单位、记录或计算错误等。

2) 测量条件的突然变化，如电源电压突然增高或降低、雷电干扰、机械冲击和振动等。

由于该误差很大，明显歪曲了测量结果，是在一定的测量条件下所不应有的测量误差，故应按照一定的准则进行判别，将含有粗大误差的测量数据（称为坏值或异常值）予以剔除。

消除粗大误差的方法主要从产生的原因上着手，如在测量前可以用较简略的方法测得近似值，测量后加强检查，或用另一方法检验，对于精密的测量应由两人互检等。

3. 随机误差的分布规律、特征及估算

(1) 随机误差的分布规律及特征 对于某一测量经过多次重复性测量，可得一系列的测得值。通过式 (1-1) 可得到一系列的随机误差值。为了充分反映误差分布的情况，除用表格的形式（称误差分布表）来表达外，还可以用作图法将它表示出来，即把落在一个误差区域内相对出现的次数以长方形面积表示。如图 1-1 所示，以横坐标表示误差的区域，纵坐标表示落在该误差区域的频率，这样就可以得到随机误差分布曲线图（也称直方图）。当测量次数 n 很大时（即 $n \rightarrow \infty$ ），而区域又分得很小时，测量列的随机误差多接近于正态分布（即高斯分布），标准化的正态分布曲线如图 1-2 所示。图 1-2 中横坐标 $\delta_i = x_i - x_0$ 表示随机误差，纵坐标表示对应的误差出现的频率密度 $f(\delta)$ 。

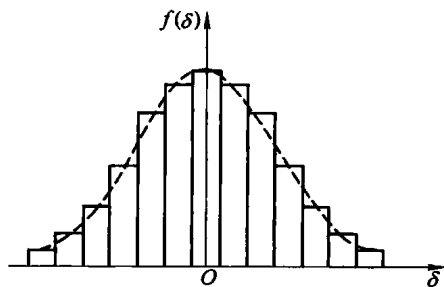


图 1-1 随机误差的直方图

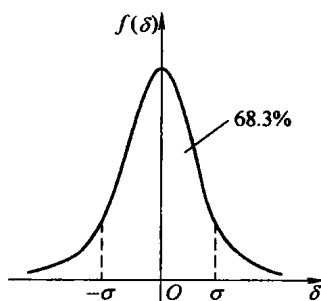


图 1-2 随机误差的正态分布

服从正态分布的随机误差具有如下特征。

- 1) 单峰性。绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的误差出现的概率大。
- 2) 对称性。绝对值相等的正负误差出现的概率相同。

3) 有界性。绝对值很大的误差出现的概率趋于零。

4) 抵偿性。误差的算术平均值随着测量次数的增加而趋于零, 即 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i = 0$ 。因此, 增加测量次数可以减小随机误差, 但不能完全消除。

(2) 随机误差的评定 随机误差符合正态分布规律, 应用概率论方法可导出:

$$f(\delta) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \quad (1-3)$$

式中的特征量 σ 为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \delta_i^2}{n}} (n \rightarrow \infty) \quad (1-4)$$

式中 σ ——标准误差;

n ——测量次数;

δ_i ——各测量值的误差;

e ——自然对数的底数, $e = 2.7182\cdots$ 。

随机误差的大小常用标准误差来表示。由概率论可知, 误差出现在 $(-\sigma, +\sigma)$ 区间内的概率 P 就是图 1-2 中该区域内 $f(\delta)$ 曲线下的面积, 即

$$p(-\sigma < \delta < +\sigma) = \int_{-\sigma}^{+\sigma} f(\delta) d(\delta) = \int_{-\sigma}^{+\sigma} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} d(\delta) = 68.3\% \quad (1-5)$$

标准误差 σ 与各测量值的误差 δ 有着完全不同的含义。 δ 是真实的误差值, 而 σ 并不是一个具体的测量误差, 它反映在相同条件下进行一组测量后, 随机误差出现的概率分布情况, 只具有统计意义, 是一个统计特征量, 其物理意义为代表测量数据和测量误差分布离散程度的特征数。图 1-3 是不同 σ 值时的概率密度 $f(\delta)$ 曲线。 σ 值小, 曲线陡且峰值高, 说明测量值的误差集中, 小误差占优势, 各测量值的分散性小, 重复性好; 反之, σ 值大, 曲线较平坦各测量值的分散性大, 重复性差。

(3) 极限误差 式 (1-5) 表明, 进行一次测量, 随机误差落在 $(-\sigma, +\sigma)$ 区间的概率为 68.3%。区间 $(-\sigma, +\sigma)$ 称为置信区间, 相应的概率称为置信概率。显然, 置信区间扩大, 则置信概率提高, 如图 1-4 所示。当置信区间取 $(-2\sigma, +2\sigma)$ 、 $(-3\sigma, +3\sigma)$ 时, 相应的置信概率 $P(2\sigma) = 95.4\%$ 、 $P(3\sigma) = 99.7\%$ 。定义 $\delta = 3\sigma$ 为极限误差, 其概率含义是在 1000 次测量中只有 3 次测量的误差绝对值超过 3σ 。由于在一般测量中测量次数很少超过几十次, 因此, 可以认为测量误差超出 $\pm 3\sigma$ 的概率是很小的, 故称为极限误差, 一般可作为可疑值取舍的判定标准, 也称作剔除坏值标准的 3σ 法则。

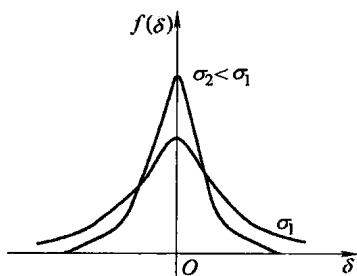


图 1-3 不同 σ 值的概率密度 $f(\delta)$ 曲线

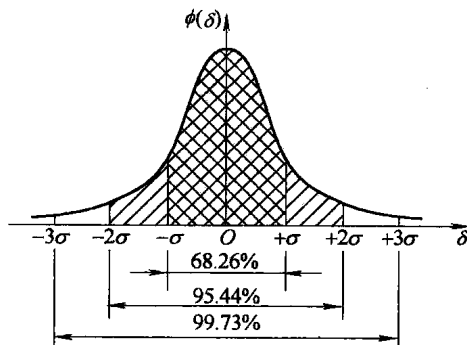


图 1-4 置信概率与置信区间曲线

(4) 随机误差的估算 实际测量总是在有限次内进行。如果测量次数 $n \leq 20$, 误差分布明显偏离正态分布而呈现 t 分布形式, 如图 1-5 所示。 t 分布函数已算成数表, 可以在《数学手册》中查阅。由图可见, t 分布比正态分布曲线变低变宽了; n 越小, t 分布越偏离正态分布。但无论哪一种分布形式, 一般都有两个重要的数字特征量, 即算术平均值和标准偏差。

1) 算术平均值 $\bar{x}$ 。设某个物理量真值为 x_0 , 进行 n 次等精度测量, 测量值分别为 $x_1, x_2, \dots, x_n$, (测量过程无明显的系统误差), 各次测量的随机误差为 $\delta_i = x_i - x_0$, 求和, 得

$$\sum_{i=1}^n \delta_i = \sum_{i=1}^n x_i - nx_0 = \sum_{i=1}^n (x_i - x_0) \quad (1-6)$$

即

$$\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} - x_0 \quad (1-7)$$

则

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-8)$$

或

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i = \bar{x} - x_0 \quad (1-9)$$

根据随机误差的抵偿特性, 及 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i = 0$, 于是

$$\bar{x} \rightarrow x_0 \quad (1-10)$$

可见, 当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时, 算术平均值 $\bar{x}$ 接近于真值 x_0 , 称 $\bar{x}$ 为测量值的近似真实值或最佳值。为了估计误差, 定义测量值与近似真实值的差值为偏差: 即 $v_i = x_i - \bar{x}$, 偏差又称为“残差”。测量中真值得不到, 因此误差也无法知道, 而测量的偏差可以准确知道。测量误差分析中要经常计算这种偏差, 用偏差来描述测量结果的精确程度。

2) 平均值的标准误差。误差理论证明, 平均值的标准误差为

$$S_{\bar{x}} = \sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (\text{贝塞尔公式}) \quad (1-11)$$

其意义表示某次测量值的随机误差在 $-\sigma_{\bar{x}} \sim +\sigma_{\bar{x}}$ 之间的概率为 68.3%。标准误差 $\sigma_{\bar{x}}$ 小表示测量值密集, 即测量的精密度高; 标准误差 $\sigma_{\bar{x}}$ 大表示测量值分散, 即测量的精密度低。估计随机误差还有用算术平均误差、 $2\sigma_{\bar{x}}$ 、 $3\sigma_{\bar{x}}$ 等其他方法来表示的。

当测量次数 n 有限, 数理统计理论可证明其算术平均值的标准误差为

$$S_{\bar{x}} = \sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1-12)$$

由上式可知, $S_{\bar{x}}$ 随着测量次数的增加而减小, 似乎 n 越大, 算术平均值约接近真值。实际上, 当 $n > 10$ 以后, $S_{\bar{x}}$ 的变化相当缓慢, 因此, 在实际测量中单纯地增加测量次数是没有必要的, 一般测量次数取 5~10 次即可。

3) 测量结果的表示方法。当算术平均值的标准误差为已知时, 测量结果可以表示如下:

$$x = \bar{x} \pm \sigma_{\bar{x}} \quad (1-13)$$

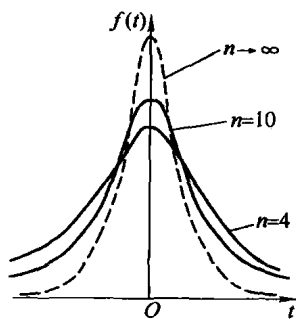


图 1-5 t 分布函数曲线

这就是说：被测值的真实值可以用算术平均值作为其近似值，此近似值的可靠程度由其标准误差来说明，即它越小，那么其结果的精度也越高；反之，越低。而其极限误差为

$$\Delta_{\text{lim}} = \pm 3\delta_x \quad (1-14)$$

【例】用最小分度为毫米的米尺测量某物体的长度 l ，5 次的测量值分别为 62.58cm、62.54cm、62.56cm、62.54cm、62.52cm。求测量结果，采用标准误差表示测量的随机误差。

解 (1) 求算术平均值 $\bar{l}$

$$\bar{l} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 l_i = \frac{1}{5} (62.58 + 62.54 + 62.56 + 62.54 + 62.52) \text{cm} = 62.55 \text{cm}$$

(2) 计算平均值的标准误差 $\sigma_{\bar{l}}$

$$\sigma_{\bar{l}} = \sqrt{\frac{1}{5(5-1)} \sum_{i=1}^5 (l_i - \bar{l})^2} = \sqrt{\frac{1}{20} (0.03^2 + 0.01^2 + 0.01^2 + 0.01^2 + 0.03^2)} \text{cm} = 0.01 \text{cm}$$

标准误差按只入不舍的修约原则，保留一位有效数字。

(3) 计算相对误差 E

$$E = \frac{\sigma_{\bar{l}}}{\bar{l}} = \frac{0.01}{62.55} = 2 \times 10^{-4}$$

(4) 写出测量结果

$$l = \bar{l} \pm \sigma_{\bar{l}} = (62.55 \pm 0.01) \text{cm}, E = 2 \times 10^{-4}$$

或

$$l = 62.55 (1 \pm 0.02\%) \text{cm}$$

4. 测量中异常数据的剔除

剔除测量列中异常数据的标准有几种，如 $3\sigma_x$ 准则、肖维准则、格拉布斯准则等。

(1) $3\sigma_x$ 准则 统计理论表明，测量值的偏差超过 $3\sigma_x$ 的概率已小于 1%。因此，可以认为偏差超过 $3\sigma_x$ 的测量值是其他因素或过失造成的，为异常数据，应当剔除。剔除的方法是将多次测量所得的一系列数据，算出各测量值的偏差 δ_i 和标准偏差 σ_x ，把其中最大的 δ_i 与 $3\sigma_x$ 比较，若 $\delta_j > 3\sigma_x$ ，则认为第 j 个测量值是异常数据，舍去不计。剔除 x_j 后，对余下的各测量值重新计算偏差和标准偏差，并继续审查，直到各个偏差均小于 $3\sigma_x$ 为止。

(2) 肖维准则 假定对一物理量重复测量了 n 次，其中某一数据在这 n 次测量中出现的几率不到半次，即小于 $\frac{1}{2n}$ ，则可以肯定这个数据的出现是不合理的，应当予以剔除。

根据肖维准则，应用随机误差的统计理论可以证明，在标准误差为 σ 的测量列中，若某一个测量值的偏差等于或大于误差的极限值 K_σ （肖维系数），则此值应当剔除。不同测量次数的误差极限值 K_σ 见表 1-1。

表 1-1 不同测量次数的误差极限值 K_σ

n	K_σ	n	K_σ	n	K_σ
4	1.53σ	10	1.96σ	16	2.16σ
5	1.65σ	11	2.00σ	17	2.18σ
6	1.73σ	12	2.04σ	18	2.20σ
7	1.79σ	13	2.07σ	19	2.22σ
8	1.86σ	14	2.10σ	20	2.24σ
9	1.92σ	15	2.13σ	30	2.39σ

(3) 格拉布斯 (Grubbs) 准则 若有一组测量得出的数值, 其中某次测量得出数值的偏差的绝对值 $|\delta_i|$ 与该组测量列的标准偏差 σ_x 之比大于某一阈值 $g_0(n, 1-p)$, 即

$$|\delta_i| > g_0(n, 1-P) \cdot \sigma_x$$

则认为此测量值中有异常数据, 并可予以剔除。这里 $g_0(n, 1-P)$ 中的 n 为测量数据的个数。而 P 为服从此分布的置信概率。一般取 P 为 0.95 和 0.99 (至于在处理具体问题时, 究竟取哪个值则由实验者自己来决定)。表 1-2 中列出了 $P=0.95$ 和 0.99 时或 $1-P=0.05$ 和 0.01 时, 对不同的 n 值所对应的 g_0 值。

表 1-2 $g_0(n, 1-P)$ 值表

$1-P$ n	0.05	0.01	$1-P$ n	0.05	0.01
3	1.15	1.15	17	2.48	2.78
4	1.46	1.49	18	2.50	2.82
5	1.67	1.75	19	2.53	2.85
6	1.82	1.94	20	2.56	2.88
7	1.94	2.10	21	2.58	2.91
8	2.03	2.22	22	2.60	2.94
9	2.11	2.32	23	2.62	2.96
10	2.18	2.41	24	2.64	2.99
11	2.23	2.48	25	2.66	3.01
12	2.28	2.55	30	2.74	3.10
13	2.33	2.61	35	2.81	3.18
14	2.37	2.66	40	2.87	3.24
15	2.41	2.70	45	2.91	3.29
16	2.44	2.75	50	2.96	3.34

5. 测量精度的表征

测量精度是指被测几何量的测得值与其真值的接近程度。它和测量误差是从两个不同角度来说明同一概念的。测量误差越大, 其测量精度越低; 测量误差越小, 其测量精度越高。为了反映系统误差和随机误差对测量结果的不同影响, 测量精度可分为以下几种。

1) 精密度。测量的精密度 (Precision of Measurement) 是指在相同条件下, 对被测量进行多次反复测量, 测得值之间的一致 (符合) 程度。从测量误差的角度来说, 精密度所反映的是测得值的随机误差。精密度越高, 表示随机误差越小。随机因素使测量值呈现分散而不确定, 但总是分布在平均值附近, 其表征量为随机误差的标准差 σ 。

2) 正确度。测量的正确度 (Correctness of Measurement) 是指被测量的测得值与其“真值”的接近程度。从测量误差的角度来说, 正确度所反映的是测得值的系统误差。正确度高, 不一定精密度高。也就是说, 测得值的系统误差小, 不一定其随机误差亦小。理论上可以用修正值来消除。正确度的表征量为平均值与真值的偏差。

3) 精确度。测量的精确度亦称准确度 (Accuracy of Measurement), 是指被测量的测得值之间的一致程度以及与其“真值”的接近程度, 即是精密度和正确度的综合概念。从测量误差的角度来说, 精确度 (准确度) 是测得值的随机误差和系统误差的综合反映。若随机误差和系统