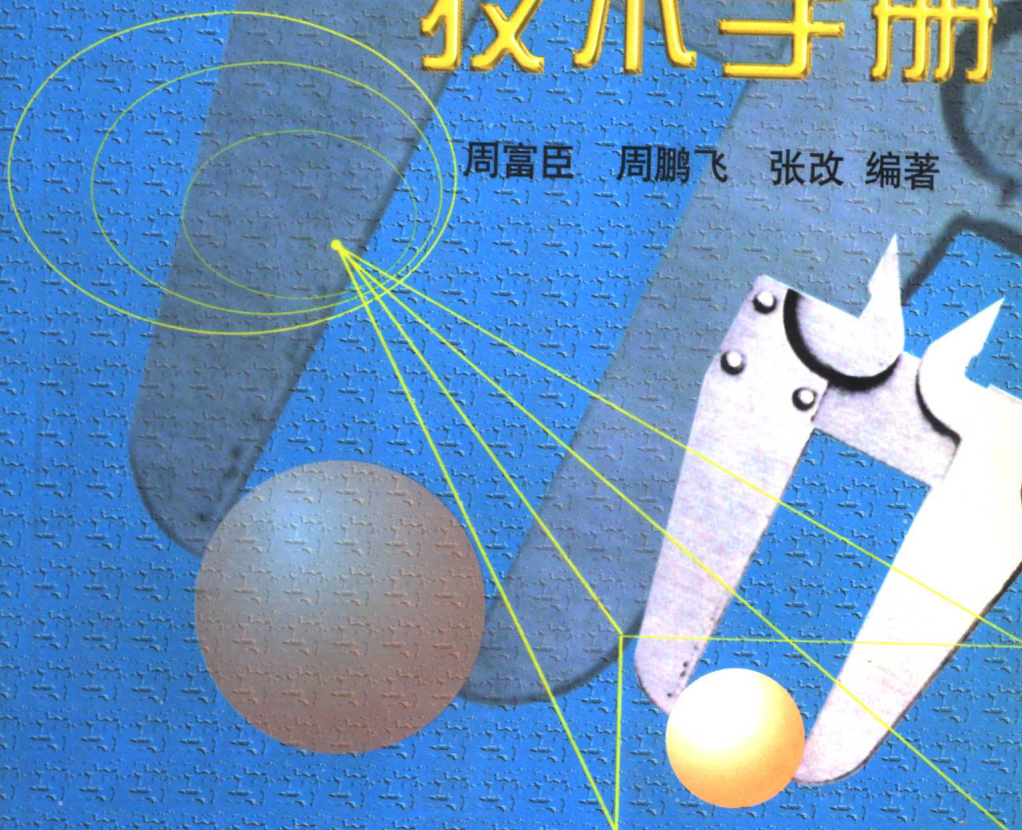


机械制造 计量检测 技术手册

周富臣 周鹏飞 张改 编著



机械工业出版社

机械制造计量检测技术手册

周富臣 周鹏飞 张改 编著



机械工业出版社

本手册是机械制造工业从事计量检测人员的工具书。具有很强的实用性和可操作性。内容包括：检测基础、误差理论、角度和锥体的测量、样板和型面尺寸的测量、轴孔零件的测量、螺纹测量、形位误差的测量、表面粗糙度测量、计数抽样检验、谐波分析、仪器的维护保养、计量检测常用数学公式和测量数据的计算机处理。

本手册可供工矿企业、研究院所从事计量检测的工程技术人员、工人和管理人员使用，也可供相关专业的大专院校及中等专业学校师生参考，还可作为计量检测人员技术培训教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

机械制造计量检测技术手册/周富臣等编著. —北京：机械工业出版社，1998.12

ISBN 7-111-06762-2

I. 机… II. 周… III. 机械-测量-手册 N. TG8-62

中国版本图书馆CIP数据核字 (98) 第 27382 号

出版人：马九荣（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

责任编辑：余茂祚 版式设计：张世琴 责任校对：肖新民

封面设计：姚学峰 责任印制：路琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1999 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

850mm×1168mm¹/₃₂·23 印张·653 千字

0 001—2 500 册

定价：40.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

前 言

为了满足机械制造工业从事计量检测人员加深基本理论、提高操作水平、增强分析及解决较复杂问题的能力迫切需要,为了工程技术人员和管理人员工作的方便,我们编写了这本手册。

本手册取材广泛,博采众长,内容翔实,深入浅出,紧密联系生产实践,融入了作者 30 多年的检测实践经验,反映了所发表的数十篇论文的见解观点,展现了作者对一些学术问题进行探讨研究的成果,收录了作者亲自做过的检测实例,因此,本手册具有较高的实用价值和可操作性。

编写中,力求加强对常用资料,基础知识,基本操作技能,常用测量器具的性能特点,典型零件的测量原理和测量方法的介绍,并采用最新国家标准。为方便使用,尽量采用了图表形式。

本手册对测量公式大都进行了微分处理,给出了函数误差式,这是同类文献所少有的。通过对函数误差式的分析,可以找出对测量影响较大的因素,以便采取措施,改善测量条件,减小测量误差。

谐波分析一章,多数文献仅介绍 12 点坐标法的富氏因数的计算公式和验算公式,少数文献提及 24 点坐标法。本手册给出了作者算出的 20 点、36 点和 48 点坐标法的计算公式和验算公式,使之成为一个系统、完整的材料,供使用者按需选用。

关于测量数据的计算机处理,限于篇幅仅介绍了计算直线度和剔除粗大误差的程序。

本手册系三人合作编著。张改编写第 12 章并为第 11 章提供了材料,周鹏飞编写了第 13 章,补充了第 12 章,校验了全书的测量公式。其余由周富臣编著并通纂全书。

中国计量测试学会常务理事、中国计量测试学会几何量专业委员会副主任委员、博士生导师叶声华教授,中国计量测试学会计量仪器专业委员会委员庄葆华教授对本书的出版给予了宝贵的支持和

指导。第一拖拉机工程机械集团公司标准化办公室邵国顺高级工程师和王金萍同志为本书提供了许多标准资料，中信重型机械公司杜西灵高级工程师对本书提出了许多好建议，第一拖拉机工程机械集团公司计量处诸多同志也给以积极的支持和配合。还要特别提出，研究员级高级工程师余茂祚同志为本书的出版付出了辛勤的劳动，在此一并致谢。本手册编写中，参阅了有关文献，引用了有关资料和例证，特此向原作者表示深切的谢意。

由于水平有限，书中谬误疏漏之处在所难免，尚望专家和读者不吝指教。

编著者

目 录

前言

第一章 概述	1
第一节 长度的单位与基准	2
第二节 长度计量器具与测量方法分类	5
第三节 长度计量常用术语	8
第四节 计量器具的选择	19
参考文献	34
第二章 误差理论及应用	35
第一节 误差的定义和种类	35
第二节 随机误差的特征	38
第三节 正态分布	40
第四节 算术平均值原理	52
第五节 标准偏差 σ 的计算	53
第六节 用算术平均值表示被测量真值的置信区间	65
第七节 方差和标准偏差的置信区间	72
第八节 粗大误差的发现及剔除	76
第九节 系统误差的发现及消除	80
第十节 误差分析	86
第十一节 不等精度测量	95
第十二节 组合测量	101
第十三节 有效数字的确定及运算法则	108
第十四节 测量不确定度及其评定	111
参考文献	119
第三章 角度和锥体的测量	120
第一节 角度的测量	120
第二节 锥体的测量	136

第三节	锥体大小头直径的测量	150
第四节	正弦尺测量的误差分析	166
	参考文献	171
第四章	样板和型面尺寸的测量	172
第一节	样板的几种简易测法	172
第二节	样板空间交点尺寸的测量	173
第三节	样板圆弧半径的测量	176
第四节	大尺寸样板的测量	190
第五节	在万能工具显微镜上对一个样板的四种测量方法	191
第六节	几种型面尺寸的平台测量	193
	参考文献	206
第五章	轴和孔的测量	208
第一节	用万能量具测量轴类零件	208
第二节	立式光学计	211
第三节	在平台上测量轴类零件	224
第四节	用万能量具测量孔径	225
第五节	万能测长仪	232
第六节	用万能工具显微镜灵敏杠杆测量孔径	241
第七节	828NES 万能测量机	243
第八节	在平台上测量孔径	248
	参考文献	250
第六章	螺纹测量	251
第一节	普通螺纹的基本牙型及几何要素	251
第二节	普通螺纹公差	258
第三节	梯形螺纹和圆柱管螺纹	267
第四节	螺纹的综合检测	277
第五节	螺纹单一中径的测量	281
第六节	螺距和牙型角的测量	324
第七节	内螺纹中径的测量	329
第八节	奇数槽丝锥中径的测量	338

第九节	60°圆锥管螺纹的测量	344
第十节	石油工业用锥度螺纹量规的测量	349
	参考文献	368
第七章	形状和位置误差的测量	369
第一节	概述	369
第二节	直线度及其检测	376
第三节	平面度及其检测	387
第四节	其他形状误差的检测	411
第五节	位置误差的检测	416
	参考文献	444
第八章	表面粗糙度及其检测	445
第一节	概述	445
第二节	表面粗糙度的评定参数及系列值	450
第三节	表面粗糙度符号、代号及注法	461
第四节	用比较法和印模法评定粗糙度	468
第五节	表面粗糙度比较样块	471
第六节	用光切显微镜测量	476
第七节	用干涉显微镜测量	488
第八节	用轮廓仪测量	497
	参考文献	514
第九章	计数抽样检验	515
第一节	概述	515
第二节	计数抽样的数学原理	517
第三节	抽样检验的基本事实	532
第四节	计数抽样程序及抽样表	533
第五节	应用实例	605
	参考文献	608
第十章	实用谐波分析法	609
第一节	谐波分析的基本原理	609
第二节	8点坐标法	612
第三节	12点坐标法	618

第四节	20 点坐标法	622
第五节	24 点坐标法	626
第六节	36 点坐标法	634
第七节	48 点坐标法	649
第八节	应用实例	660
参考文献		667
第十一章	仪器的维护保养	668
第一节	温度	668
第二节	湿度	670
第三节	防尘	674
第四节	防有害气体的腐蚀	675
第五节	防振、防霉、防锈	677
参考文献		680
第十二章	计量检测常用数学公式	681
第一节	初等代数	681
第二节	平面几何	689
第三节	平面三角	692
第四节	平面解析几何	702
第五节	导数和微分	711
参考文献		714
第十三章	测量数据的计算机处理	716
第一节	直线度误差的计算	716
第二节	用 3σ 准则剔除粗大误差	725

第一章 概 述

计量是科学研究的技术基础。门捷列夫说过：“没有计量，就没有科学。”什么是计量，计量就是从数量上和质量上正确反映周围物质世界的真实情况，揭示自然界物质的运动规律，以达到认识世界改造世界的一门科学，也是研究计量制度和计量单位、名称、定义以及建立基准、标准进行量值传递的一门科学。

计量工作深深扎根于国民经济的各个领域，是一项重要的技术基础。现代生产和科学技术的发展，不断地给计量工作以新的技术装备，在某种意义上也标志着一个国家的现代化水平和科学技术的发展程度。

目前计量科学已发展成包括长度、温度、力学、电磁、无线电、光学、声学、放射性、化学和时间频率等十大类计量。

长度计量是计量科学技术的重要组成部分，是计量科学技术发展应用最早、最普遍的一个专业。长度计量是企业生产和管理活动的一个重要组成部分。长度计量对保证产品质量，提高劳动生产率，降低能源和材料消耗，搞好经济核算，完善经济责任制，改善企业管理，提高经济效益具有重要作用。

长度计量是研究机械零件的几何参数，包括各种长度、角度、表面粗糙度、几何形状误差和相互位置误差等数值大小的鉴别问题。

长度计量的实质，就是将被测长度与作为基准的长度单位相比较而得出其比值的认识过程，即

$$L = Ku$$

式中 L ——被检测长度；

u ——长度单位；

K ——比值。

例如在检定量块时，就是将量块与某一已知光波波长进行比较。检定三针时，就是将三针与作为基准的量块进行比较。在测量工件时，又

经常将它与量仪或量具上的刻线尺进行比较。

显然,任何测量过程,都是两个同值的量的比较。这一认识过程的正确与否(即测量不确定度的大小)与作为基准的长度单位量,所采用的比较方法(即测量方法),所采用的测量器具(量仪和量具),周围环境条件(温度、湿度、灰尘、振动、电压波动等)和测量人员素质(技术水平、精神状态、劳动态度)以及被测对象等有关。

上述因素既受历史条件和生产与科研技术发展条件的制约,又随着人类生产实践和科学研究的不断发展而日趋完善。

第一节 长度的单位与基准

目前世界上通用的长度单位有米制(即公制)和英制两种。米制长度单位是十进制的,使用方便,已为世界上绝大多数国家采用。

我国国务院于1959年6月25日颁布了《统一计量制度的命令》,确定了米制为我国基本计量制度。1985年9月6日正式颁布计量法并于1986年7月1日正式施行。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我国法定计量单位。

国际单位制是在米制基础上发展起来的单位制。其国际简称SI。它包括SI单位、SI词头和SI单位的十进倍数与分数单位三部分。SI单位包括SI基本单位、SI辅助单位和SI导出单位。SI基本单位有七个,它们是:长度——米(m),质量——千克(公斤)(kg),时间——秒(s),电流——安[培](A),热力学温度——开[尔文](K),物质的量——摩[尔](mol),发光强度——坎[德拉](cd)。

国际单位制和我国法定计量单位都规定长度的基本单位为m(米),在机械制造中常用mm(毫米)作单位,在长度计量中的误差常用 μm (微米)作单位。

长度计量单位的名称及代号见表1-1。

长度基本单位m(米)的量值由“米”的定义来确定。自从“米”出现以来,随着科学技术的进步,它的定义进行了一次又一次的变更。

“米”定义最早起源于法国,第一个“米”的定义是由法国科学院向法国国民议会推荐并采纳的。当时的“米”定义为:“米等于地球子

午线 $1/4$ 弧长的 $1/1000$ 万。”1791 年这个长度单位被法国国会批准,并以法律形式予以肯定。1792 年法国科学院派出工作组测量法国北部的敦格尔克经巴黎到西班牙的巴塞罗那之间的地球子午线长度。1799 年测量工作结束,新测量的 1m 的长度比原来假定的 1m 长 0.3mm 。按照新的长度用铂制造了一个米原器,称为“档案米尺”,这就是世界上最原始的米原器。

表 1-1 长度计量单位的名称和代号

单位名称	代 号	对主单位的比
纳米	nm	10^{-9}
微米	μm	10^{-6}
毫米	mm	10^{-3}
厘米	cm	10^{-2}
分米	dm	10^{-1}
米	m	1
十米	dam	10^1
百米	hm	10^2
公里(千米)	km	10^3

后来,由于科学技术的发展,发现地球也是一个变化着的自然物体,不符合计量基准稳定性的要求,于是于 1869 年废除了第一个米定义而保留了“档案米尺”作为统一量值的基准。

1875 年 5 月 20 日,美、俄、德、法、阿根廷、丹麦、奥地利和比利时等 17 国在巴黎召开会议,讨论建立统一计量制度的问题,并签订了《米制公约》。还决定由上述国家共同出资建立国际计量局,并用铂铱合金制成了新的米原器,这种新米原器,按“档案米尺”复制,截面呈 X 型,具有高的恒定性和刚性。在 X 型长方体中间平面上的两端抛光部分刻有 3 条横向刻线,并定义:“在 0°C 时中间一根刻线至另一端中间刻线之间的距离为 1m ”。为了使尺杆因自重而引起的变形为最小,规定米尺应支撑在尺的中间相距为 $l=0.55938L$ 的两个所谓白塞尔点上。这种新米原器称为国际米原器,见图 1-1。由于金属内部不稳定,受温度影响很大,测量精度只能达到 $0.1\mu\text{m}$,

又很难复制。

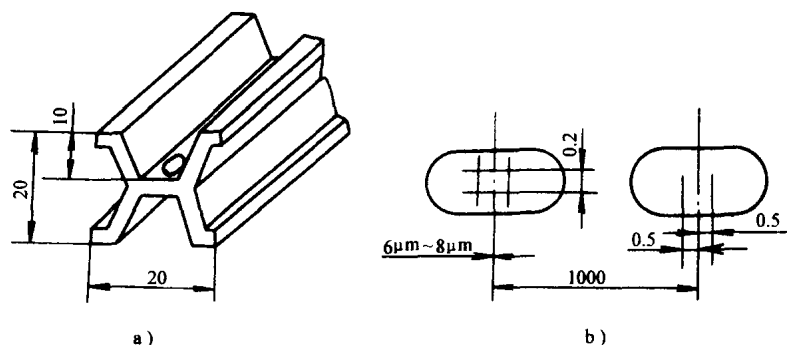


图 1-1 国际米原器

a) 外形图 b) 局部放大

1889 年召开第一届国际计量大会，订制了 31 根铂铱合金制成的米基准原器，其中第 6 号精度最高，因此会议批准第 6 号做为国际米原器存放在国际计量局（巴黎），其余 30 根按抽签办法发给米制公约成员国，做国家基准。这次大会通过了“米”的上述定义。

用实物定义的米，由刻线工艺、测量方法、材料和保管方面的原因，米原器的精度为 $\pm 0.11\mu\text{m}$ ($\pm 1.1 \times 10^{-7}$)。这样的精度显然不能满足当代科学技术发展的需要。1927 年第 7 届国际计量大会初步决定利用光波波长来复制“米”。将镉红色光的光波波长在含有 0.03%（体积分数） CO_2 的干燥空气内，在 15°C 及一个大气压（101.325kPa）下同米原器比较，结果 1m 等于这种光波波长的 1553164.14 倍，以此作为米的新定义，大会正式批准以镉的红色光波作为长度基准的副标准。

1960 年 10 月第 11 届国际计量大会上通过以氪⁻⁸⁶ (^{86}Kr) 辐射的真空波长作为长度计量的基准（精度达 1×10^{-8} ）。将氪⁻⁸⁶ 辐射的橙黄谱线的波长与国际米原器相比对后，确定新的米定义为：“米的长度等于氪⁻⁸⁶ 原子的 2P_{10} 和 5d_5 能级之间跃迁所对应的辐射在真空中波长的 1650763.73 倍。”定义中的氪⁻⁸⁶ 原子的 2P_{10} 和 5d_5 能级之间跃迁所对应的辐射指的就是氪⁻⁸⁶ 的橙黄谱线。采用这种光波，测量精度可达 $0.001\mu\text{m}$ 。

1983 年第 17 届国际计量大会对米的定义又进行更改。新的“米”定义是一个开放型的不规定具体计量标准器的定义，新的“米”定义建立在真空中光速值 ($c=299792458\text{m/s}$) 这一基本物理常数的基础上。具体定义为：“米是光在真空中在 $1/299792458\text{s}$ 时间间隔内所经过的距离。”

长度基准从子午线的 $1/4000$ 万转换为铂铱米原器的刻线距离是为了便于应用；从刻线距离转换为镉光波波长，也就是从人造物体转换为自然物资是为了取得不消灭性和长期稳定性及提高测量精度，因为光波波长长期稳定，不会损坏或丢失，又便于复制和校核。从镉光波波长转换到氪⁻⁸⁶光波波长，是为了提高测量精度，从氪⁻⁸⁶光波波长转换到光波波长，不仅提高了稳定性，也为实现长度基准和时间基准的统一提供方便。

第二节 长度计量器具与测量方法分类

一、计量器具的分类

按用途特点计量器具可分为：

1. 标准量具

如量块、 90° 角尺、圆柱角尺、表面粗糙度样块等均属此类。这种量具只有一个固定尺寸，通常用来校对和调整其他计量器具或作为标准用来与被测工件进行比较测量。

2. 通用量具（万能量具）和量仪

游标卡尺、千分尺、框式水平仪、钢直尺等属于通用量具。

百分表、千分表、光学量仪等属通用量仪。量具与量仪的区别在于前者没有传动放大机构。

3. 极限量具

如卡板、光滑极限量规等。这种量具没有刻度，不能得出被测工件的具体尺寸，只能确定被测工件合格与不合格。

4. 专用量仪

(1) 端度量仪 主要用来测量（检定）量块、校对量杆等端面长度、测量球体和圆柱体直径、板形工件的厚度、平行度等。这类仪器包括各类测微计、立（卧）式光学计、测长仪、测长机、接触式

干涉仪等。

(2) 线纹量仪 主要用来测量刻线之间的距离, 如阿贝线纹比较仪。

(3) 角度量仪 主要用来测量角度和对圆周进行分度。这类仪器有测角仪、分度头、分度台及小角度仪器等。

(4) 平直量仪 主要用来测量平板的平面度和导轨的直线度等。这类仪器有各类平面干涉仪、平直仪、自准直仪等。

(5) 齿轮量仪 主要用来测量齿轮及齿轮刀具的各参数。这类仪器有双面啮合检查仪、单面啮合检查仪、周节仪、基节仪、渐开线检查仪、滚刀检查仪等。

(6) 表面粗糙度量仪 专门用来检测 R_a 、 R_z 、 R_y 、 S 、 S_m 和 t_p 等粗糙度参数。这类仪器有干涉显微镜、光切显微镜和电动轮廓仪等。

按结构特点计量器具可分为:

(1) 游标量具 如游标卡尺、游标量角器等。

(2) 螺旋副量具(测微量具) 如各种千分尺。

(3) 机械式量仪 如百分表、测微计等, 均采用机械方法实现原始信号的转换。机械式万能测齿仪也属此类。

(4) 光学量仪 如光学计、工具显微镜、光学分度头、测长仪、测长机、接触式干涉仪等。均采用光学原理实现对原始信号的转换放大。

(5) 气动量仪 如浮标式气动量仪、薄膜式气动量仪等。气动量仪是将工件尺寸的变化转换成压缩空气流量或压力的变化, 并加以显示。它可以测量孔径、槽宽、长度、厚度、外圆直径和两孔中心距等。气动量仪具有大的放大倍率(从 250 倍~100000 倍, 常用 1000 倍~40000 倍), 且进行非接触测量和远距离测量。

(6) 电动量仪 如电感测微仪等。电动量仪是把被测原始信号转变为电量来实现长度测量的仪器。它具有精度高、易于实现自动测量、数字显示和对被测参数进行各种数学运算等特点。

还有近年来发展起来的采用光栅、激光为标准的新技术, 将光、机、电结合起来并配备微机, 以实现测量的数字化与自动化。如三

坐标测量机、激光比长仪、828NES 万能测量机、带微机的万能工具显微镜等。

二、测量方法的分类

根据获得测量结果的不同方式可分为：

1. 直接测量和间接测量

从测量器具的读数装置上直接得到被测量的数值或对标准值的偏差称直接测量。如用千分尺、测长仪、比较仪测欲测尺寸为直接测量。通过测量与被测量有一定函数关系的量，根据已知的函数关系式求得被测量的测量称间接测量。如在万能工具显微镜上通过测出弓高和弓高所对应的弦长来计算圆弧半径的测量为间接测量。

2. 绝对测量和相对测量

量具量仪示值直接反映被测量量值的测量叫绝对测量。用外径千分尺测轴径，既是直接测量又是绝对测量。将被测量与一个标准量值进行比较得到被测量与标准量的差值的测量称相对测量。在立式光学计或接触式干涉仪上检定量块的测量就是相对测量。

3. 接触测量和非接触测量

量具量仪的测头与被测件表面直接接触并有机机械作用的测力存在的测量为接触测量。反之为非接触测量。气动量仪的测量和干涉显微镜及磁力测厚仪的测量均属于非接触测量。

4. 单项测量和综合测量

个别地彼此没有联系的测量被测件的单项参数叫单项测量。如分别测量螺纹的单一中径、螺距、螺纹半角等为对螺纹的单项测量。同时测量工件上的几个有关参数，从而综合判断被测件合格与否的测量称综合测量。如用螺纹量规对螺纹制件的测量，齿轮双面啮合仪对齿轮的测量均为综合测量。

5. 被动测量和主动测量

工件加工一道工序或全部工序后的测量称被动测量，仅用于发现并挑出废品。工件在加工过程中进行测量为主动测量。其测量结果直接用来控制工件的加工过程，及时防止和消灭废品，如有些磨床上就装有主动测量装置。

6. 静态测量和动态测量

测量时，被测的量不随时间变化的测量称静态测量。反之，在测量过程中被测的量随时间变化的测量称动态测量。

第三节 长度计量常用术语

(1) 分度值（刻度值） 相邻两刻线所代表的量值之差叫分度值。如百分表的分度值为 0.01mm ，立式光学计的分度值为 0.001mm 。常用的分度值有（ mm ）： 0.0001 、 0.0002 、 0.0005 、 0.001 、 0.002 、 0.005 、 0.01 、 0.02 、 0.05 和 0.1 。

(2) 刻度间距（刻线间距） 测量器具标尺或圆分度盘上相邻两刻线中心或中心线之间的距离或圆弧长度叫刻度间距。如游标卡尺主尺的刻度间距为 1mm 。刻度间距可以在 $1\text{mm}\sim 2.5\text{mm}$ 内选择。这是因为通常人的眼睛在明视距离（ 250mm ）下能够分开的两个点的最小夹角为 $1'$ ，所以能分开的视见宽度为

$$A = 250\text{mm} \times 0.00029 = 0.075\text{mm}$$

考虑到一般能估读到 $1/10$ 刻度间距，故刻度间距必须大于 0.75mm ，通常取 $1\text{mm}\sim 2.5\text{mm}$ 。实践证明，这个范围是合适的，刻度间距太大或太小都不便于估读。上式中的 0.00029 为 $1'$ 的弧度值。

还应指出，刻度间距是指目视的距离。如立式光学计刻度尺的刻度间距为 0.08mm ，经目镜放大 12 倍后，目视刻度间距为 $0.08\text{mm} \times 12 = 0.96\text{mm}$ 。

对某些特殊指示方式，如水平仪靠水泡位置指示，气动量仪用水柱或浮子位置指示，考虑到指示液面呈弧形或浮子波动，刻度间距应适当放大，通常取 $3\text{mm}\sim 5\text{mm}$ 。

(3) 示值范围（指示范围） 是量具或量仪显示或指示的起始值到终止值的范围，即直接读数的范围。千分尺的示值范围为 25mm ，立式光学计的示值范围为 $\pm 0.1\text{mm}$ ，杠杆千分尺的示值范围为 $\pm 0.02\text{mm}$ 。

(4) 测量范围 是指在允许的误差限内，计量器具能测量的被测量值的范围。立式光学计的测量范围为 $0\sim 180\text{mm}$ ； $25\text{mm}\sim 50\text{mm}$ 的杠杆千分尺的测量范围为 $25\text{mm}\sim 50\text{mm}$ 。

示值范围主要取决于主刻度尺的分度范围，测量范围取决于测