

几何量精密测量技术

周龙声 许维伯 编译



几何量精密测量技术

周龙声 许维伯 编译



机械工业出版社

本书系参照日本东京大学教授中野幸久所著《精密测定技术》一书编译而成。该书在日本用作计量测试技术人员知识更新的教材，以适应机械工业“电子革命”的新时代。

本书主要内容包括：基准传递，各种变换器的应用，测量误差的修正与评估，长度测量，角度测量，圆度测量，表面粗糙度与波纹度测量，二维尺寸和形状测量，三维测量，在线测量等。

本书以介绍新原理、新概念与新方法为主，着重于实用，通俗易懂，可供计量测试人员自学用，也可供大专院校有关专业师生参考。

几何量精密测量技术

周龙声 许维伯 编译

责任编辑：贺篋窠

封面设计：田淑文

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 1/32·印张 7 3/4·字数 165 千字

1988年4月北京第一版·1988年4月北京第一次印刷

印数 0,001—4,000·定价：2.50 元

ISBN 7-111-00483-3/TG·127

前 言

量检测水平是衡量一个国家工业技术水平的重要尺度。世界工业发达国家都把计量检测、原材料和工艺装备作为工业生产的三大支柱。随着科学研究和工业技术的发展,许多新技术、新工艺已经把计量检测在生产中的作用,从过去的逐级传递量值和间接控制产品质量,推进到生产和科研的第一线。在机械工业中,由于电子技术的广泛渗透,机械加工向数控化、高效率化和高精度化发展,促使精密测量从以往的以静态为主,向更着重于动态测量和在线测量的方向发展。与此同时,随着机械-电气变换机构的发展,测量结果的数字化处理变得比较容易,借助于电子计算机,使计算、统计、分析、显示、记录,以至向其它工程远程输送和反馈等,都可以迅速完成。从而使传统的计量检测技术在很多方面发生了革命性转变,测量仪器大多向机光电一体化发展,测量后的数据处理成为提高测量精度的主要手段之一。而且,生产管理上的决策也依赖于通过测量提供更多的信息。

日本战后在重建工业的初期,就明确提出计量要先行。故在1951年颁布了计量法,并以颁布日(6月7日)作为每年的全国“计量纪念日”;到1981年6月,为纪念计量法颁布三十周年,通产省举行“计量强调月”,着重宣传在新形势下计量工作的地位与作用。作为本书主要参考文献的《精密测定技术》一书就是在这次高潮之后,为适应计量测试人员知识更新的需要而编写的,于1984年出版。作者中野幸久系东

京大学教授，在日本计量界有很高声望，他的其它著作也很多。

本书是实用技术书，而不是学术著作；主要读者对象是从事实际测量作业的计量测试人员，而不是从事研究工作的专家；主要目的是提供较新原理与概念，而不是详细介绍仪器结构与操作要领。所以，在理论阐述上难免有欠周密之处，在方法介绍上也显得不够详尽。但在科学理论和逻辑简单性方面结合得较好，因此具有简明扼要、通俗易懂的优点。读者用较少的时间阅读本书，就可从中获得实用的基本概念，不但可以立即与工作联系起来，在一般实际问题上加以运用，而且在此基础上再去阅读深奥的专门著作，也会感到方便易懂。

目 录

前言

| | |
|------------------------------|----|
| 第 1 章 长度基准和实用标准 | 1 |
| 1.1 长度基准的传递..... | 7 |
| 1.1.1 米的新定义 | 7 |
| 1.1.2 长度基准的传递 | 5 |
| 1.2 实用标准..... | 5 |
| 1.2.1 光波基准的实际体现 | 5 |
| 1.2.2 光波干涉仪 | 7 |
| 1.2.3 量块的绝对测量 | 9 |
| 1.3 端面类量具和线纹类量具..... | 15 |
| 1.3.1 端面类量具的标准——量块 | 15 |
| 1.3.2 量块的形状、尺寸和精度 | 16 |
| 1.3.3 线纹类量具的标准——标准线纹尺 | 20 |
| 1.3.4 标准线纹尺的精度与支承 | 21 |
| 第 2 章 变换器及其应用 | 23 |
| 2.1 变换器的种类与要求 | 23 |
| 2.2 机械位移运动变换与放大机构..... | 24 |
| 2.2.1 斜面放大机构 | 24 |
| 2.2.2 将直线运动变换为回转运动的机构 | 26 |
| 2.2.3 杠杆放大机构 | 28 |
| 2.2.4 弹簧放大机构 | 28 |
| 2.3 机械-光学变换 | 30 |
| 2.3.1 光学变换放大机构 | 30 |
| 2.3.2 光学杠杆 | 31 |
| 2.3.3 透镜系放大 | 34 |
| 2.4 物理光学变换 | 36 |

| | | |
|------------|-------------------------|-----------|
| 2.4.1 | 利用光波干涉观测平面 | 36 |
| 2.4.2 | 显微干涉仪 | 37 |
| 2.5 | 机械-流体变换器 | 38 |
| 2.5.1 | 液体水平面 | 38 |
| 2.5.2 | 应用空气流的机械-流体变换 | 41 |
| 2.6 | 机械-电气变换 | 46 |
| 2.6.1 | 电气触点通断变换 | 46 |
| 2.6.2 | 位移-电阻变换 | 47 |
| 2.6.3 | 形变-电阻变换 | 47 |
| 2.6.4 | 差动变压器 | 51 |
| 2.6.5 | 位移-电容变换 | 56 |
| 2.6.6 | 位移-阻抗变换 | 58 |
| 2.6.7 | 涡流式传感器 | 59 |
| 2.6.8 | 非接触式位移测量仪 | 59 |
| 2.7 | 机械位移-电脉冲变换 | 60 |
| 2.7.1 | 绝对方式 | 61 |
| 2.7.2 | 增量方式 | 62 |
| 2.7.3 | 光栅直线编码器 | 62 |
| 2.7.4 | 莫尔条纹直线编码器 | 65 |
| 2.7.5 | 光栅尺的制作与检测 | 66 |
| 2.7.6 | 磁栅直线编码器 | 68 |
| 2.7.7 | 回转编码器 | 69 |
| 第3章 | 测量误差 | 72 |
| 3.1 | 误差理论的作用与目的 | 72 |
| 3.2 | 系统误差 | 72 |
| 3.2.1 | 测量环境偏离标准状态引起的误差 | 73 |
| 3.2.2 | 温度梯度引起的误差 | 77 |
| 3.2.3 | 弹性变形引起的误差 | 78 |
| 3.2.4 | 测量轴线偏斜引起的误差 | 85 |

| | | |
|------------|------------------------|------------|
| 3.2.5 | 仪器结构引起的误差 | 87 |
| 3.2.6 | 其它因素引起的误差 | 87 |
| 3.3 | 偶然误差 | 88 |
| 3.3.1 | “准确”与“精密” | 88 |
| 3.3.2 | 偶然误差的正态分布 | 88 |
| 3.3.3 | 测量精密度的评估 | 89 |
| 3.3.4 | 测量方法的总误差 | 94 |
| 3.4 | 误差的传播 | 95 |
| 3.5 | 测量器具的精度 | 98 |
| 第4章 | 长度测量的基础技术 | 100 |
| 4.1 | 几何基准与实用基准 | 100 |
| 4.1.1 | 精密铸铁平板 | 100 |
| 4.1.2 | 钢质研磨平板 | 104 |
| 4.1.3 | 平晶 | 105 |
| 4.2 | 刻度的读数 | 106 |
| 4.2.1 | 刻度小数的读取 | 106 |
| 4.2.2 | 数字标度的读数误差 | 108 |
| 4.2.3 | 游标刻度 | 108 |
| 4.2.4 | 读数显微镜 | 109 |
| 4.3 | 绝对测长和比较测长 | 111 |
| 4.3.1 | 阿贝原则 | 112 |
| 4.3.2 | 反转原理 | 115 |
| 4.4 | 外侧尺寸的测量 | 116 |
| 4.4.1 | 比较测长器 | 116 |
| 4.4.2 | 超精密比较测长器 | 118 |
| 4.4.3 | 绝对测长器 | 119 |
| 4.5 | 内侧尺寸的测量 | 123 |
| 4.5.1 | 内径测量的几何学 | 123 |
| 4.5.2 | 用测长器测量内径 | 125 |

| | | |
|------------|----------------------|------------|
| 4.5.3 | 用空气测微器测量内径 | 126 |
| 4.6 | 大尺寸的测量 | 127 |
| 4.6.1 | 现场用测量器具 | 127 |
| 4.6.2 | 计量室用测量器具 | 128 |
| 4.6.3 | 温度不均匀与弹性变形 | 128 |
| 4.6.4 | 用鞍形规测量大尺寸外径 | 129 |
| 第5章 | 角度的测量 | 130 |
| 5.1 | 角度的实用基准 | 130 |
| 5.1.1 | 角度的单位 | 130 |
| 5.1.2 | 角度量块 | 130 |
| 5.1.3 | 直角尺 | 131 |
| 5.1.4 | 多面棱镜 | 136 |
| 5.1.5 | 刻度板的自检定 | 137 |
| 5.1.6 | 光学分度头和光学分度检定器 | 138 |
| 5.2 | 角度的测量 | 140 |
| 5.2.1 | 正弦规 | 140 |
| 5.2.2 | 外侧角的测量 | 141 |
| 5.2.3 | 内侧角的测量 | 142 |
| 5.2.4 | 燕尾槽的测量 | 142 |
| 5.2.5 | 圆锥角和锥度的测量 | 143 |
| 第6章 | 极限量规 | 146 |
| 6.1 | 极限量规概述 | 146 |
| 6.1.1 | 零件检验用极限量规 | 146 |
| 6.1.2 | 极限量规的功能与种类 | 146 |
| 6.1.3 | 极限量规的制造公差与磨损余量 | 148 |
| 6.2 | 极限量规体系的基本问题 | 150 |
| 6.2.1 | 极限量规设计的原则 | 150 |
| 6.2.2 | 极限量规对形状误差的检验功能 | 151 |
| 6.2.3 | 极限量规与加工作业的关系 | 153 |

| | |
|-----------------------------|-----|
| 第7章 二维尺寸和形状的测量 | 154 |
| 7.1 二维长度测量仪 | 154 |
| 7.1.1 基本测量机构 | 154 |
| 7.1.2 光学测头 | 155 |
| 7.2 轮廓检查仪 | 156 |
| 7.2.1 放大倍率 | 156 |
| 7.2.2 基本结构 | 157 |
| 7.2.3 与测量精度有关的事项 | 159 |
| 7.2.4 测量方法 | 161 |
| 7.3 工具显微镜和万能测量显微镜 | 161 |
| 7.3.1 基本结构 | 163 |
| 7.3.2 影响测量精度的因素 | 165 |
| 7.3.3 各种附属设备和测量方法 | 165 |
| 7.4 二维尺寸和形状测量数据处理 | 171 |
| 第8章 圆度测量 | 172 |
| 8.1 圆度的定义和评定 | 172 |
| 8.1.1 圆度的定义 | 172 |
| 8.1.2 圆度的评定 | 172 |
| 8.2 圆度的近似测量 | 174 |
| 8.2.1 直径测量法 | 174 |
| 8.2.2 V形架测量法 | 174 |
| 8.3 回转台测量装置 | 178 |
| 8.4 圆度仪测量法 | 180 |
| 8.4.1 原理与型式 | 180 |
| 8.4.2 测量系统 | 181 |
| 8.4.3 测量倍率 | 181 |
| 8.4.4 滤波器的使用 | 181 |
| 8.4.5 测头的选用 | 183 |
| 8.4.6 测量其它形位误差的功能 | 184 |

| | | |
|-------------|--------------------------------|------------|
| 8.4.7 | 记录图形的畸变 | 184 |
| 8.4.8 | 测量值的解析和应用 | 188 |
| 第9章 | 表面粗糙度、波纹度和轮廓形状的测量 | 191 |
| 9.1 | 断面曲线 | 191 |
| 9.1.1 | 断面曲线的定义 | 191 |
| 9.1.2 | 断面曲线的滤波 | 192 |
| 9.2 | 评定参数 | 194 |
| 9.2.1 | 表面粗糙度评定参数 | 194 |
| 9.2.2 | 表面波纹度评定参数 | 198 |
| 9.3 | 测量方法 | 201 |
| 9.3.1 | 触针式测量法 | 201 |
| 9.3.2 | 光切测量法 | 205 |
| 9.3.3 | 光波干涉测量法 | 207 |
| 9.3.4 | 激光测量法 | 208 |
| 9.3.5 | 波纹度测量 | 209 |
| 9.4 | 波纹度和外观质量的关系 | 211 |
| 第10章 | 三维测量 | 213 |
| 10.1 | 三维坐标测量机的结构 | 214 |
| 10.1.1 | 基本结构 | 214 |
| 10.1.2 | 一般使用的测头 | 217 |
| 10.1.3 | 全方位传感器 | 219 |
| 10.1.4 | 技术开发课题 | 221 |
| 10.2 | 三维坐标测量机的数据处理 | 222 |
| 10.2.1 | 以计算机为中心的数据处理系统 | 222 |
| 10.2.2 | 构成测量基准的坐标 | 224 |
| 10.2.3 | 基本计算程序 | 226 |
| 10.3 | 三维坐标测量机的精度 | 226 |
| 10.3.1 | 三维坐标测量机的误差 | 226 |
| 10.3.2 | 三维坐标测量机的精度校核 | 227 |

| | |
|---------------------------------|-----|
| 第11章 机械加工在线测量与自动定尺 | 229 |
| 11.1 机械加工在线测量的意义 | 229 |
| 11.2 自动定尺装置 | 229 |
| 11.2.1 自动定尺面临的问题与对策 | 229 |
| 11.2.2 接触式自动定尺装置 | 230 |
| 11.2.3 滚动式自动定尺装置 | 233 |
| 11.2.4 非接触式自动定尺装置 | 234 |
| 11.2.5 测头组入刀具交换系统的测量法 | 235 |

第 1 章 长度基准和实用标准

1.1 长度基准的传递

1.1.1 米的新定义

一九八三年十月二十日，在法国巴黎举行的第十七届国际计量大会上，正式通过了米的新定义：“米是光在真空中，在 $1/299\,792\,458\text{ s}$ 的时间间隔内运行距离的长度”。

这是第三次更改米的定义。

一八七五年国际米制公约的建立，改变了十九世纪国际上长度单位的混乱局面，当时规定通过巴黎的地球子午线的四千万分之一为一米。但没过多久，人们就发现上述米的规定不能满足工业发展的要求，于是在一八八九年的米制公约国际计量大会上，又通过了规定用铂铱合金米尺上两条刻线间的距离作为一米的定义值。这根米尺称为国际米原器，安放在法国巴黎国际计量局的地下室内，各国都保存有一支国际米原器的复制品。

这是米定义的第一次变更。

国际米原器作为米基准一直沿用了七十一年，它的相对精度为千万分之一左右（即 1 m 的测量精度为 $0.1\mu\text{m}$ 左右）。到了二十世纪中叶，这个精度也显得不够用了，不仅影响了自然科学的发展，也不能满足机械制造，特别是精密机械制造等行业的要求。此外，随着人们对微观世界认识的不断深入，发现铂铱合金米尺会由于物质内部结构随时间的变化而引起两条刻线间距离的变化，从而无法保证国际米原器所规定的精度。

一九〇五年，爱因斯坦利用量子理论，成功地解释了光电效应和光的本性，确定了频率与能量之间的关系。于是，有些物理学家就提出了利用原子辐射的波长值代替国际米原器作为米定义的新建议。第二次世界大战后， ^{86}Kr 低压气体放电灯(简称 ^{86}Kr 灯)研制成功，人们发现，在一定条件下， ^{86}Kr 同位素原子辐射出的橙黄色谱线的真空波长值是个定值。因此，一九六〇年国际计量大会通过了“米等于 ^{86}Kr 原子在 $2p_{1/2}$ 和 $5d_5$ 能级之间跃迁所对应的辐射真空波长的 $1\,650\,763.73$ 倍的长度”的米定义。

这是第二次米定义的变更。

根据上述定义，一米的精度为十亿分之四，它意味着在长度为 5cm 的固定物质内不差一个原子间的距离，或在 1000km 的长度测量中不差 4mm 。

一九六七年，秒的定义也由地球自转一周的 $1/86\,400$ 改为“秒是 ^{133}Cs 原子基态在两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的 $9\,192\,631\,770$ 个周期的持续时间”。实现上述定义的装置称为原子钟，这个钟的精度为百万亿分之一左右，即五百万年的误差不到一秒。从而为把长度基准和时间基准联系起来创造了条件。

一九六〇年，单色性好、相干能力强、能量高度集中和方向性好的激光问世。一九六一年，物理学家和计量学家开始从事激光应用于计量的研究。他们利用特殊方法对激光频率进行稳频，使稳频激光输出频率的稳定性和复现性达到优于百亿分之一，比以 ^{86}Kr 灯作为米定义的精度还高一百倍以上。一九六九年以后，用触须二极管成功地测量了 CH_4 稳频 $3.39\mu\text{m}$ He-Ne 激光器输出频率的绝对值和波长的绝对值，又经过国际间平均与核对，得到真空光速值为 $299\,792\,458$

m/s。此值的精度比过去提高了一百倍。

以后，物理学家和计量学家又经过十余年的研究与验证，终于在第十七届国际计量大会上正式通过了米的新定义。新的米定义的特点是：把真空中的光速值作为一个固定不变的基本物理常数，光速值不再是一个物理学中可测量的量，而是一个换算常数；长度测量可通过时间或频率测量导出，从而使长度单位和时间单位结合了起来。

在第十七届国际计量大会闭幕的当天，国际计量委员会就召开了会议，通过了推行新的米定义的实施方案，并推荐了五条激光辐射作为波长标准。它们都是以真空光速 $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$ 为出发点，用直接频率测量或间接频率测量的方法测出谱线的频率 f ，再按 $\lambda f = c$ 这个公式导出波长 λ 。这些激光辐射的数据如下：

1. 由 CH_4 饱和和吸收稳频的 He-Ne 激光辐射，其波长 λ 为 $3\,392\,231\,397.0\text{ fm}$ ，相对不确定度 (3σ) 为 $\pm 1.3 \times 10^{-10}$ ；
2. 由 $^{127}\text{I}_2$ 饱和和吸收稳频的 He-Ne 激光辐射，其波长 λ 为 $576\,294\,760.27\text{ fm}$ ，相对不确定度 (3σ) 为 $\pm 6 \times 10^{-10}$ ；
3. 由 $^{127}\text{I}_2$ 饱和和吸收稳频的 He-Ne 激光辐射，其波长 λ 为 $632\,991\,398.1\text{ fm}$ ，相对不确定度 (3σ) 为 $\pm 1 \times 10^{-9}$ ；
4. 由 $^{127}\text{I}_2$ 饱和和吸收稳频的 He-Ne 激光辐射，其波长 λ 为 $611\,970\,769.8\text{ fm}$ ，相对不确定度 (3σ) 为 $\pm 1.1 \times 10^{-9}$ ；
5. 由 $^{127}\text{I}_2$ 饱和和吸收稳频的 Ar 离子激光辐射，其波长 λ 为 $514\,673\,466.2\text{ fm}$ ，相对不确定度 (3σ) 为 1.3×10^{-9} 。

国际计量委员会同时强调指出，复现新的米定义并不排斥现在已经使用的 ^{86}Kr 、 ^{198}Hg 及 ^{114}Cd 谱线，不过它们的不确定度要低得多，例如 ^{86}Kr 的不确定度为 $\pm 4 \times 10^{-9}$ 。

新的米定义的实施需要过程，在过渡阶段，各国已建立

的 ^{86}Kr 、 ^{114}Cd 、 ^{198}Hg 谱线波长基准仍将发挥主要作用,其数据列于表1.1。

表1.1 一级、二级基准波长 (μm)

| 一级基准 | 二级基准 | | |
|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| ^{86}Kr | ^{86}Kr | ^{114}Cd | ^{198}Hg |
| 0.60578022 (橙) | 0.65480720 (红) | 0.64402480 (红) | 0.57922683 (黄) |
| | 0.64228006 (红) | 0.50872379 (绿) | 0.57711983 (黄) |
| | 0.56511286 (绿) | 0.48012521 (蓝) | 0.54622706 (绿) |
| | 0.45036162 (紫) | 0.46774581 (紫) | 0.4359564 (紫) |

注: 本表数据引自日本 1974 年理科年表。在长度测量中, 用二级基准已经足够。

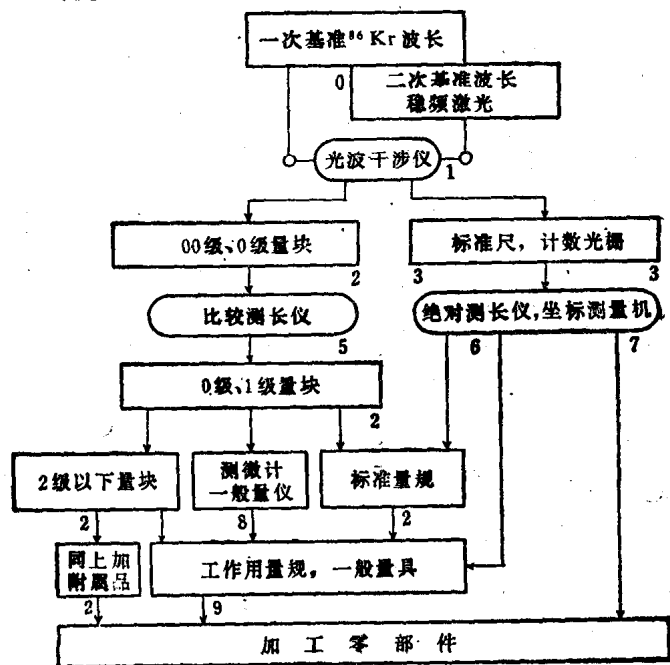


图1.1 长度量值的传递系统

1.1.2 长度基准的传递

在机械工业中，作为标准用的长度测量器具为量块和标准尺。量块是钢制块状端面量具，在其两个平行端面间具有精密的标准尺寸。标准尺是在所要求的区间内，按一定间距精密地刻有细线刻度的尺。这两种构成了各工厂尺寸标准的精密测量器具，在机械制造和检测中起承上启下的作用。一方面要和前节所述的基准波长符合，一方面又作为检定工厂所用其它量具的基准。从光波基准到加工零件测量系统的长度传递，如图1.1所示。机械工业对长度计量的管理必须考虑经济和容易实施，按这样的传递系统，通常是适宜的。

1.2 实用标准

1.2.1 光波基准的实际体现

a) 光的干涉

将两块接近于理想平面的玻璃板按图1.2 a 那样略有倾斜地重叠在一起，从上方射入单色光，并从上方观察。其中一部分光线 S_2 由 F_0 面反射，另一部分光线 S_1 穿过 F_0 后由 F_u 面反射， S_1 、 S_2 的反射光线分别为 S'_1 、 S'_2 。当 S'_1 和 S'_2 在 F_0 面上相遇时，两路光线所经历的路程长度有差异，这项光程差取决于 F_0 和 F_u 之间空气楔的厚度。若空气隙厚度为 $2n\lambda/4$ (λ 为光波波长)，光波的峰和谷相叠，反射光最暗；若空气隙厚度为 $(2n+1)\lambda/4$ ，光波的峰与峰相叠，反射光最明亮。因此出现明暗相间的图案。这就是所谓光的干涉现象和干涉条纹。从一个暗条纹到邻近的另一个暗条纹，或者从一个亮条纹到邻近的另一个亮条纹，反映了空气隙的厚度变化 $\lambda/2$ 。

b) 平晶

图1.2 a 下方的 F_u 面，不论是什么材料，只要作成可以