

计测工程学

[日] 谷口 修
堀込 泰雄

计 量 出 版 社

计 测 工 程 学

〔日〕谷口修 堀込泰雄 共著

计 量 出 版 社

1985·北京

内 容 提 要

本书全面、系统地介绍了计测方面的基础理论 各种物理量的测量方法和原理, 以及一些新的计测技术。

本书共分四章: 第一章介绍计测的基础理论和测量系统的组成; 第二章至第四章则分别叙述了各种物理量的测量方法。其中第二章长度与角度的测量是所谓“精密测量”的一个重要分支, 故将其单独列为一章。并且, 对机械零件的测量中比较困难的螺纹和齿轮的测量也作了一定论述。第三章主要对转速、质量、力、功率、压力、流量、液面、粘度等力学量的测量进行了介绍; 第四章主要对振动、声音、温度、湿度、化学量等环境条件的测量进行了论述。

读者对象: 从事计量测试和机械工程技术工作的科技人员、大学、中学有关专业的师生。

计 测 工 学

谷口修 堀込泰雄 共著
森北出版株式会社 1977

计 测 工 程 学

〔日〕谷口修 堀込泰雄 共著
黄诗翊 胡升峰 陈国定 张少鹤 译 马之行 校
责任编辑 刘长顺

计量出版社出版
(北京和平里11区7号)

三河县中赵甫印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

开本 850×1168 1/32 印张 8 7/8
字数 232 千字 印数 1—12 000
1985年8月第一版 1985年8月第一次印刷
统一书号 15210·426

定价 1.95 元

前 言

计测技术近年来有了很大的发展，特别是不断地采用了应用电子技术的新的计测方法。无论是为了充分地使用这些新技术来进行计测，还是在实验中操作各种各样的测量仪器，都必须学会与计测有关的系统的基础知识。

本书正是针对机械工程技术人員所必须具备的计测基础理论和各物理量的测量方法来进行解说，并作为大学、中专用的计测工程学的教科书而编写的，当然作为一般机械工程技术人員的参考书想必也有一定作用。

为了将涉及广泛而多种多样的测量技术进行尽可能系统的归纳，本书共分四章。即，第一章：计测基础；第二章：长度和角度的测量；第三章：力学量的测量；第四章：环境的测量。第一章包括计测的基础理论和计测系统的组成；第二章至第四章则分别叙述了各物理量的测量方法。其中第二章长度与角度的测量是所谓“精密测量”的一个重要分支故将其单独列为一章。并且，对机械零件的测量中比较困难的螺纹和齿轮的测量也作了一定论述。第三章主要对转速、质量、力、功率、压力、流量、液面、粘度等力学量的测量进行讲解。第四章主要对振动、声音、温度、湿度、化学量等环境条件的测量进行论述。

关于单位制问题，因为我国在不久的将来就要全面采用国际单位制（SI），因此，本书决定全部采用SI单位。

在本书的编写过程中，参阅了不少的参考书、杂志和产品目录，也以参考文献刊载于书末，在此，仅向各位作者表示深切的谢意。另外，作者还要向从计划到校对一直给予了大力支持的森北出版社，尤其是池田广好先生表示衷心的感谢。

著 者

昭和51年7月

目 录

第1章 计 测 基 础

1.1 测量和单位制	(1)
(1) 测量和单位	(1)
(2) 基本量和导出量	(1)
(3) 单位制	(1)
(4) 量纲	(4)
1.2 误差及其数据处理	(5)
(1) 误差	(5)
(2) 误差的统计处理	(6)
(3) 误差的传递	(13)
1.3 计测系统的特性	(15)
(1) 静态特性	(16)
(2) 传递函数	(17)
(3) 计测系统的动态特性	(20)
1.4 计测系统的结构	(41)
(1) 计测系统的组成	(41)
(2) A-D转换器和D-A转换器	(47)
(3) 传输	(55)
(4) 指示、显示和记录	(65)
练习题	(72)

第2章 长度与角度的测量

2.1 长度标准	(74)
(1) 端面标准	(74)
(2) 线纹标准	(77)
2.2 极限量规	(83)

2.3	长度测量中的系统误差	(85)
(1)	热膨胀引起的误差	(85)
(2)	测量力引起的误差	(86)
(3)	几何学误差	(87)
2.4	放大	(89)
(1)	机械放大	(89)
(2)	光学杠杆放大	(93)
(3)	光波干涉放大	(95)
(4)	流体放大	(100)
(5)	电气放大	(105)
2.5	长度的数字测量	(109)
(1)	光学脉冲刻度尺	(109)
(2)	光栅刻度尺	(111)
(3)	感应同步器	(112)
(4)	磁尺	(113)
2.6	角度的测量	(114)
(1)	角度的标准	(114)
(2)	刻度盘	(115)
(3)	角度测量仪器	(117)
2.7	形状误差的测量	(120)
(1)	直线度与平面度	(121)
(2)	圆度	(124)
2.8	表面光洁度	(126)
2.9	复杂机械零件的测量	(129)
(1)	螺纹的测量	(129)
(2)	齿轮的测量	(135)
	练习题	(143)

第3章 力学量的测量

3.1	转速测量	(145)
(1)	模拟方式	(145)
(2)	计数方式	(147)

(3) 频闪仪.....	(148)
3.2 质量、力、功率测量.....	(150)
(1) 质量和力.....	(150)
(2) 力的测量方法.....	(150)
(3) 光弹性.....	(160)
(4) 功率测量.....	(164)
3.3 压力测量.....	(169)
(1) 液体压力计.....	(171)
(2) 活塞式压力计.....	(174)
(3) 弹簧式压力表.....	(175)
(4) 电气式压力传感器.....	(177)
(5) 真空压力测量.....	(179)
3.4 流量测量.....	(183)
(1) 容积式流量计.....	(183)
(2) 差压式流量计.....	(183)
(3) 转子流量计.....	(187)
(4) 流速测量.....	(189)
3.5 液位测量.....	(194)
(1) 钩形液位计和玻璃管液位计.....	(195)
(2) 浮力式液位计.....	(195)
(3) 压力式液位测量法.....	(197)
(4) 其他液位计.....	(197)
3.6 粘度测量.....	(199)
(1) 动力粘度、运动粘度.....	(199)
(2) 旋转式粘度计.....	(201)
(3) 细管式粘度计.....	(202)
练习题.....	(204)

第 4 章 环境的测量

4.1 振动的测量.....	(206)
(1) 地震式拾振器的原理.....	(206)
(2) 振动传感器.....	(211)
(3) 阻抗的测量.....	(216)

(4) 平衡试验.....	(218)
4.2 声的测量	(229)
(1) 声的强度.....	(229)
(2) 响度.....	(232)
(3) 噪声的测量.....	(233)
4.3 温度的测量	(238)
(1) 温标.....	(238)
(2) 液柱温度计.....	(239)
(3) 双金属温度计.....	(241)
(4) 压力式温度计.....	(242)
(5) 热电偶温度计.....	(244)
(6) 电阻式温度计.....	(248)
(7) 辐射温度计.....	(253)
4.4 湿度的测量	(258)
(1) 湿度的表示方法.....	(258)
(2) 绝对测量法.....	(259)
(3) 毛发湿度计.....	(259)
(4) 干湿球湿度计.....	(260)
(5) 露点计.....	(261)
(6) 电阻式湿度计.....	(262)
4.5 化学量的测量	(262)
(1) 气体分析.....	(262)
(2) 液体浓度的测量.....	(268)
(3) pH 值的测量.....	(272)
练习题.....	(275)
参考文献	(275)

第 1 章 计 测 基 础

1.1 测量和单位制

(1) 测 量 和 单 位

所谓测量就是和基准量相比较，用数值表示一个量的操作过程。例如：长度测量把一米定为基准量，表示待测长度是该基准量的多少倍的数值就是测量值。通常为了测定一个量，可以用基准量表示为一定的数值，我们把这种基准量定义为单位，即：

$$\text{量} = \text{数值} \times \text{单位}$$

(2) 基本量和导出量

为了制定单位，理应遵循各种量中存在着的理论体系。所谓理论体系是由定义和法则组成的，用来定义各种量和确定单位。

基本量

根据一定理论体系定义物理量的时候，无定义就可以采用的量称为基本量。在国际单位制 (SI) 中，把长度、质量、时间、电流强度、温度、物质的量和发光强度这七个量定作基本量。

导出量

根据一定的定义或法则，由基本量组合导出的量称为导出量。例如：速度这个量就是用长度和时间来定义的导出量。

(3) 单 位 制

由于基本量的选择方法和基准量的确定方法不同，按理说可以存在各种各样的单位制。但是，1948年在第九届国际计量大会上，制定了一种所有米制公约签字国都可采用的一量一单位的实用计量单位制。1960年把这种单位制正式命名为国际单位制，

简称SI。

在日本工业标准 JIS Z 828 2-1974 中, 规定了量的代号和单位代号, 制成了一览表。又在日本工业标准 JIS Z 8203-1974 “国际单位制SI 及其使用方法”中, 规定了SI单位以及常与SI并用的单位, 这就为在不久的将来全面地过渡到SI奠定了基础。

基本单位

表示基本量的单位叫做基本单位。SI 的基本单位列于表 1.1 中, 其定义分别如下:

表 1.1 SI 的基本单位

量	单 位 名 称	单 位 符 号
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

(a) 米

米等于氪-86原子的 $2p_{1/2}$ 和 $5d_5$ 能级之间跃迁所对应的辐射, 在真空中的1 650 763, 73个波长的长度。

(b) 千克 (公斤)

千克是质量单位, 等于国际千克原器的质量。

(c) 秒

秒是铯-133原子基态的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。

(d) 安 [培]

安培是一恒定电流, 若保持在处于真空中相距 1 米的两无限长, 而圆截面可忽略的平行直导线内, 则在此两导线之间产生的力在每米长度上等于 2×10^{-7} 牛顿。

(e) 开 [尔 文]

热力学温度单位开尔文是水三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。

摄氏温度(代号 $^{\circ}\text{C}$)也作为SI的单位继续使用。摄氏温度和开尔文温度的关系为:

$$t^{\circ}\text{C} = (t + 273.15)\text{K} \quad (1.1)$$

(f) 摩 [尔]

1. 摩尔是一系统的物质的量,该系统中所包含的基本单元数与 0.012 千克碳-12的原子数目相等。

2. 在使用摩尔时,基本单元应予指明,可以是原子、分子、离子、电子以及其它粒子,或是这些粒子的特定组合。

(g) 坎 [德 拉]

“坎德拉是一光源在给定方向上的发光强度,该光源发出频率为 540×10^{12} 赫兹的单色辐射,且在此方向上的辐射强度为 $1/683$ 瓦特每球面度”。

辅助单位

SI的辅助单位列于表1.2中。

表 1.2 SI 的辅助单位

量	单 位 名 称	国 际 符 号
平 面 角	弧 度	rad
立 体 角	球 面 度	sr

(a) 弧 度

弧度是一圆内两条半径之间的平面角,这两条半径在圆周上截取的弧长与半径相等。

(b) 球面度

球面度是一个立体角,其顶点位于球心,而它在球面上所截取的面积等于以球半径为边长的正方形面积。

如果认为: $\text{rad} = \text{m}/\text{m}$, $\text{sr} = \text{m}^2/\text{m}^2$ 则是导出单位。但是角速度单位为: rad/s , 辐射强度单位为: W/sr , 从这种表示方法看, 它们也可看作基本单位。因此, 在SI中设置了辅助单位这一类。

导出单位

导出量的单位叫导出单位。具有专用名称的15个导出单位列于表1.3中。其它主要的导出单位可参阅有关国际单位制资料

表 1.3 具有专用名称的 SI 导出单位

量	名 称	符 号	用 SI 基本单位表示的表示式
频率	赫[兹]	Hz	s^{-1}
力	牛[顿]	N	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
压力	帕[斯卡]	Pa	N/m^2
能, 功	焦[耳]	J	$\text{N} \cdot \text{m}$
功率	瓦[特]	W	J/s
辐[射]通量			
电荷, 电量	库[仑]	C	$\text{s} \cdot \text{A}$
电压	伏[特]	V	W/A
静电容量	法[拉]	F	C/V
电阻	欧[姆]	Ω	V/A
电导	西[门子]	S	Ω^{-1}
磁通[量]	韦[伯]	Wb	$\text{V} \cdot \text{s}$
磁通密度	特[斯拉]	T	Wb/m^2
电感	亨[利]	H	Wb/A
光通[量]	流[明]	lm	$\text{cd} \cdot \text{sr}$
[光]照度	勒[克斯]	lx	lm/m^2

(4) 量 纲

导出量 G_k 由基本量 $G_1, G_2, \dots, G_7$ 导出, 可以表示为:

$$G_k = z \cdot G_1^{a_1} \cdot G_2^{a_2} \dots G_7^{a_7} \quad (1.2)$$

式中: $z, a_1, a_2, \dots, a_7$ 均为常数。

现把 G_k 用数值 n_k 和单位 U_k 来表示, 则:

$$G_k = n_k [U_k] \quad (1.3)$$

同理, 设:

$$G_1 = n_1 [U_1], G_2 = n_2 [U_2], \dots, G_7 = n_7 [U_7] \quad (1.4)$$

则:

$$G_k = z_1 n_1^{\alpha_1} n_2^{\alpha_2} \dots n_7^{\alpha_7} [U_1^{\alpha_1} \cdot U_2^{\alpha_2} \dots U_7^{\alpha_7}] \quad (1.5)$$

由式 (1.3) 和式 (1.5) 得:

$$[U_k] = \zeta_k [U_1^{\alpha_1} \cdot U_2^{\alpha_2} \dots U_7^{\alpha_7}] \quad (1.6)$$

式中:

$$\zeta_k = \frac{z_1 n_1^{\alpha_1} n_2^{\alpha_2} \dots n_7^{\alpha_7}}{n_k}$$

如把式 (1.6) 称为单位 $[U_k]$ 的量纲式, 则 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_7$ 称为关于量 $G_1, G_2, \dots, G_7$ 的量纲

〔例题1.1〕 试求力的量纲表达式

〔解〕

因为: 力 = 质量 $\times$ 加速度

$$= \text{质量} \times \frac{\text{长度}}{[\text{时间}]^2}$$

设: $[F]$ = 力的单位,

$[M]$ = 质量的单位,

$[L]$ = 长度的单位,

$[T]$ = 时间的单位,

则: $[F] = \zeta_r [MLT^{-2}]$

如果用 s 代入 $[T]$, M 代入 $[L]$, kg 代入 $[M]$, N 代入 $[F]$, 则 $\zeta_r = 1$ 成立。

1.2 误差及其数据处理

(1) 误差

所谓误差就是测量值减去真实值之差值。

即: 误差 = 测量值 - 真实值

实际上, 真实值并不知道。为了提高测量精度, 实用中可以找出一个数值, 不妨把它当作真实值。

相对误差定义为:

$$\text{相对误差} = \frac{\text{误差}}{\text{真实值}}$$

并把用百分比表示的相对误差称为误差百分率。误差可分为系统误差、随机误差和粗大误差三类。

(a) 系统误差

使用零位偏移了的千分尺去测量长度就会产生零位偏移误差。通过调节零位可以消除这种误差。如果知道零位偏移的数值，通过补偿读数也能消除这种误差。我们把这种产生于同一原因，具有相同的符号（+ 或者 -）并且具有同等大小数值的误差称为系统误差。如能预先查出系统误差的值，通过补偿就可以消除。

产生系统误差的原因有以下三种：

测量装置的固有误差，又称仪器误差。例如：由于刻度误差、零位调节偏差以及齿轮、螺纹节距误差等机构误差而引起的误差。

环境误差

由于测量时环境的温度、湿度和气压等因素所引起的误差。

个人误差

用眼睛判断刻度，要求读数精确到1/10的时候，由于测量者的视差而引起的误差。例如：应该读为7的地方，许多人往往读成8。

(b) 随机误差

由于不能查明的原因而产生的误差称为随机误差。其符号与数值的大小都是变动的。一般认为随机误差的产生是由于许多点滴影响测量值的因素之综合，并且这些因素在每次测量时都是各自变动着的。

(c) 粗大误差

粗大误差是测量人员因疏忽而出错，或者根据错误的结果计算出来的测量值。

(2) 误差的统计处理

现用最小刻度为1μm的测长仪测量某一工件共计五十次，其

结果列于表1.4上。

根据表中的数据，作出统计图如图1.1所示

这种统计图可以说概略地表示了获得各个测量值的概率。统计图的纵坐标旁标着 f ($1/\mu\text{m}$) 的刻度。 f 值由下式求得。

$$f = \frac{\text{相对频数}}{\text{测量值范围(直方的宽度)}}$$

表 1.4 频 数 分 布 表

测量值(mm)	出现频数(次)	相对频数%
55.0026	2	4
27	3	6
28	2	4
29	10	20
30	4	8
50.0031	13	26
31	9	18
33	4	8
34	1	2
35	2	4
合 计	50	100

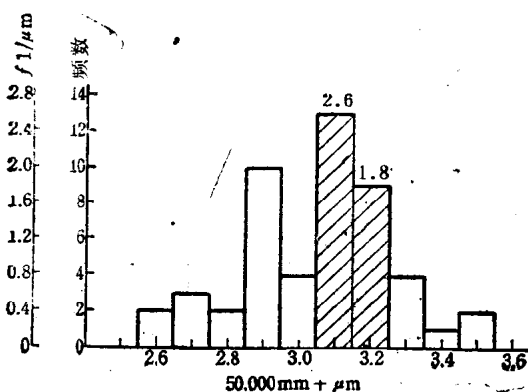


图 1.1 统计图

以 f 为纵坐标时，各个长方形的面积表示在该长方形宽度范围内的测量值所引起的相对频数。例如：图中画有斜线的直方部分表示在测量值范围 50.003 05—50.003 25 中，相对频数占总数的 0.1 ($2.6 + 1.8$) = 0.44 (44%)

当然测量的次数越多，有效的测量值也就越多。如果测量次数无限地增加下去，可以获得如图 1.2 所示的一条近似连续的曲线。我们把这些测量值的集合称为总体，而把函数 $f(x)$ 称为概率分布密度函数。测量值 x_1 与 x_2 之间的概率 $P(x_1 < x < x_2)$ 可以用图中画斜线部分的面积来表示。即：

$$P(x_1 < x < x_2) = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx \quad (1.7)$$

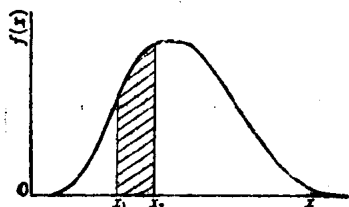


图 1.2 概率密度函数

正态分布

一般常用的概率分布密度函数呈正态分布。正态分布的函数 $f(x)$ 可用下式表示：

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} \quad (1.8)$$

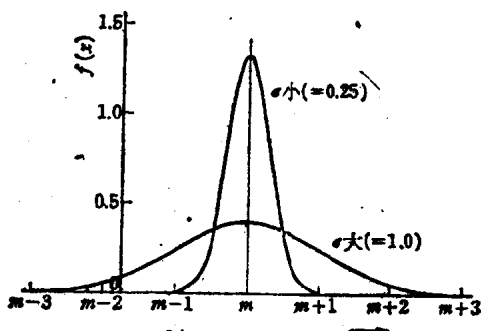


图 1.3 正态分布

式中： m 是总体的平均值，称为分布中心。正态分布就是以 m 为中心的对称分布。总体标准差 σ 的大小决定分布的分散程度。图 1.3 表示正态分布的概率密度函数 $f(x)$ 。

如果把式 (1.8) 代入式 (1.7)，就可求出测量值在 x_1 与 x_2 之间的概率。现把 x_1 和 x_2 分别选为 $m \pm \sigma$, $m \pm 2\sigma$, $m \pm 3\sigma$ ，可得下列结果：

$$P(m - \sigma < x < m + \sigma) = 68.3\%$$

$$P(m - 2\sigma < x < m + 2\sigma) = 95.5\%$$

$$P(m - 3\sigma < x < m + 3\sigma) = 99.7\%$$

即是说, 测量值 x_i 在 $m \pm \sigma$ 范围内的概率为 68.3%。同理, x_i 在 $m \pm 2\sigma$, $m \pm 3\sigma$ 的范围内的概率分别为 95.5% 和 99.7%。95% 的概率表示如下:

$$P(m - 1.96\sigma < x < m + 1.96\sigma) = 95\%$$

我们所处理的测量数据集严格地说并非按照正态分布, 但在很多情况下, 常可近似地按正态分布去处理。

平均值与标准偏差

取 n 个测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 可按下式计算该测量列的平均值 $\bar{x}$ 和标准偏差 s_n 。

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.9)$$

$$s_n = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1.10)$$

并把 s_n^2 称为测量列的方差, 它和 s_n 一样用以表示分散的程度。

〔例〕 取出 10 个测量值, 求 $\bar{x}$ 、 s_{10}^2 和 s_{10} 的顺序如下:

表 1.5

i	x_i mm	$x_i - \bar{x}$ μm	$(x_i - \bar{x})^2$ $(\mu\text{m})^2$	i	x_i mm	$x_i - \bar{x}$ μm	$(x_i - \bar{x})^2$ $(\mu\text{m})^2$
1	50.0031	+0.3	0.09	6	30	+0.2	0.04
2	26	-0.2	0.04	7	29	+0.1	0.01
3	24	-0.4	0.16	8	31	+0.3	0.09
4	27	-0.1	0.01	9	30	+0.2	0.04
5	28	-0.2	0.04	10	28	0	0
Σ					282		0.52

$$\bar{x} = 50.000 + \frac{0.0282}{10^{-1}} = 50.00282 \text{ mm}$$

$$s_{10}^2 = \frac{1}{10^{-1}} \times 0.52 = 0.0578 (\mu\text{m})^2$$