

非 电 量 电 测 法

〔西德〕 R·梯尔 著
鲍贤杰 译 张伦 校

人 民 邮 电 出 版 社

*Elektrisches Messen
nichtelektrischer Größen*

R. Thiel

B.G. Teubner Stuttgart 1977

内 容 简 介

本书扼要论述了非电量电测法的工作原理及其测量电路。书中首先介绍了几种重要的敏感元件的原理和结构，以及它们的应用范围。然后较详细地说明了非电量电测的测量系统和测量数据处理问题。最后，对力学量（应变、位移、旋转角、转速、角速度和振动）、温度和其它一些非电量的测量问题作了简略说明。

本书涉及的内容比较广泛，可供从事非电量测量工作的广大工程技术人员阅读，同时也供高等院校测量专业的师生参考。

非 电 量 电 测 法

[西德] R·梯尔 著

鲍贤杰 译 张伦 校

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本：787×1092 1/32 1981年4月 第 一 版
印张：6 24/32 页数：108 1981年4月河北第一次印刷
字数：150 千字 印数：1—8,100 册

统一书号：15045·总2487—无6141

定价：0.71 元

译 者 序

非电量电测是电测量技术领域中的一个重要分支。将非电量转换成电参量加以测量具有快速、精确、直观以及便于遥测和使测量过程自动化等显著优点。随着电测量技术水平的迅速提高，非电量电测法也获得了相应的发展。

本书是国外新近出版的论述非电量电测法的专著之一。书中以简明扼要的方式，介绍了有关非电量测量的各个主要方面，其中包括：几种常用的（电阻式、电感式、电容式和压电式等）敏感元件、非电量电测的测量系统、测量过程的自动化、测量数据的处理等，并列举了若干应用实例，使叙述更臻完美。

本书的题材在国内以往所出版的书籍中尚不多见，我们希望本书的翻译出版能对从事非电量测量的同志有所启发和帮助。

徐德炳老师和吴如松同志曾对译稿提出宝贵意见，译者谨在此表示衷心的感谢。

由于译者水平所限，译文中的错误和不当之处在所难免，恳切希望读者不吝批评指正。

目 录

第一章 引论	(1)
1.1 待测量概述	(1)
1.2 测量电路	(2)
1.3 定义	(3)
第二章 敏感元件	(6)
2.1 无源和有源敏感元件的原理概述	(6)
2.2 电阻式敏感元件	(6)
2.2.1 原理	(6)
2.2.2 应用实例	(7)
2.2.3 分压器式测量电路	(8)
2.2.4 电阻式测量电桥电路	(12)
2.2.5 使用电阻式敏感元件的测量电路	(21)
2.3 电感式敏感元件	(30)
2.3.1 原理	(30)
2.3.2 结构类型	(30)
2.3.3 变压器式敏感元件	(32)
2.3.4 扼流装置的交流测量电桥	(33)
2.4 电容式敏感元件	(36)
2.4.1 原理	(36)
2.4.2 结构类型	(36)
2.4.3 电容式敏感元件的测量电路	(39)
2.5 有源电动敏感元件	(42)

2.5.1	原理	(42)
2.5.2	平移结构	(42)
2.5.3	旋转结构	(42)
2.6	压电敏感元件	(44)
2.6.1	工作原理	(44)
2.6.2	测量电路	(45)
2.6.3	时间常数	(45)
2.6.4	频率测量范围	(46)
2.7	在热动力学、光学和化学中应用的有源敏感 元件	(47)
第三章	测量系统	(48)
3.1	概述	(48)
3.2	标准测量变换器	(49)
3.2.1	定义	(49)
3.2.2	位移/电流—标准测量变换器	(50)
3.2.3	力/电流—标准测量变换器	(50)
3.3	匹配装置	(51)
3.3.1	测量频率范围	(51)
3.3.2	补偿器	(52)
3.3.3	调制测量放大器	(52)
3.3.4	载频测量放大器	(53)
3.3.5	直流电压测量电桥放大器	(55)
3.3.6	载频测量放大器与直流电压测量放大器的 比较	(58)
3.3.7	电荷测量放大器	(59)
3.3.8	交流电压测量放大器	(60)
3.3.9	测量电缆	(60)

3.4	输出装置	(63)
3.5	测量数据的自动采集	(67)
3.5.1	测量值采集装置	(67)
3.5.2	测量值采集装置中的母线系统	(69)
3.5.3	多路切换器	(71)
3.6	远距测量和遥测技术	(72)
3.6.1	远距测量装置	(72)
3.6.2	信息转换成幅值的模拟远距测量法	(73)
3.6.3	信息转换成频率的模拟远距测量法	(74)
3.6.4	模拟脉冲法	(75)
3.6.5	频分多路传输法	(76)
3.6.6	时分多路传输法	(78)
3.6.7	采用脉相调制 (<i>PPM</i>) 的时分多路传输 法	(80)
3.6.8	采用数字脉码调制 (<i>PCM</i>) 的时分多路 传输法	(81)
第四章	电子测量的数据处理	(85)
4.1	运算器	(85)
4.1.1	模拟运算装置	(85)
4.1.2	函数发生器	(89)
4.1.3	微分和积分电路	(90)
4.2	幅度测量仪	(92)
4.2.1	限幅器和极限值开关	(92)
4.2.2	峰值测量	(93)
4.2.3	时间函数的线性平均值	(93)
4.2.4	统计分析	(94)
4.3	频率分析器	(97)

4.3.1	频率分析	(97)
4.3.2	相关分析	(100)
第五章	测量系统的电路型式和干扰电压	(104)
5.1	测量系统	(104)
5.1.1	测量系统各个单元的匹配条件	(104)
5.1.2	测量信号源、测量放大器和输出装置的 接地和隔离方式	(105)
5.1.3	测量单元的组合	(107)
5.2	测量系统中的干扰电压	(108)
5.2.1	内部长期电干扰	(108)
5.2.2	内部瞬时干扰	(109)
5.2.3	外来电干扰	(110)
5.2.4	接地电压	(112)
5.2.5	常模(串模)干扰电压	(113)
5.2.6	共模干扰电压	(114)
第六章	灵敏度、分辨率和误差	(116)
6.1	测量系统的灵敏度	(116)
6.1.1	传感器的灵敏度	(116)
6.1.2	测量系统的总灵敏度	(117)
6.1.3	测量值计算	(117)
6.2	分辨率	(120)
6.3	测量误差	(121)
6.3.1	定义	(121)
6.3.2	误差根源和误差类型	(122)
6.3.3	特性曲线的线性误差	(123)
6.3.4	温度影响误差	(125)
6.3.5	滞后和静态误差	(126)

6.3.6	时间特性	(126)
6.3.7	噪声	(128)
6.3.8	工作电压的影响	(128)
6.3.9	数字测量法的误差值	(128)
6.4	可靠性和安全因数	(129)
第七章	力学量传感器	(132)
7.1	应变测量	(133)
7.1.1	电阻应变片	(133)
7.1.2	电阻应变片的测量电路	(140)
7.1.3	电感式应变传感器	(151)
7.1.4	弦线应变传感器	(152)
7.2	位移测量	(153)
7.2.1	模拟式位移传感器	(153)
7.2.2	增量式位移传感器	(156)
7.2.3	数字编码式位移传感器	(157)
7.2.4	测量位移的特殊方法	(158)
7.3	旋转角传感器	(159)
7.3.1	模拟式旋转角传感器	(159)
7.3.2	数字式旋转角传感器	(160)
7.4	转速和角速度传感器	(162)
7.5	振动测量	(163)
7.6	扭转振动传感器和扭转加速度传感器	(169)
7.7	力的测量	(170)
7.8	液压和气压的测量	(173)
7.9	转矩测量和功率测量	(174)
7.10	时间测量	(177)
第八章	温度测量	(180)

8.1	电阻温度计	(180)
8.2	热电偶	(183)
8.3	辐射高温计	(185)
8.4	特殊温度测量法	(186)
第九章	光电测量变换器	(188)
9.1	光敏电阻和光电二极管	(189)
9.2	光电管和光电倍增管	(191)
9.3	光电池	(192)
9.4	光电晶体管和光电可控硅	(193)
第十章	其它方面的测量	(195)
10.1	水准面测量	(195)
10.2	流量测量	(196)
10.3	湿度测量	(197)
10.4	pH 值测量	(198)
第十一章	环境保护测量	(199)
11.1	概述	(199)
11.2	光度测定法	(201)

第一章 引 论

随着现代科学技术的发展，应用电测法测量非电量已经非常普遍。非电量的电测法已广泛运用于研究、研制、试验、检测、产品检验以及控制、调整和自动化设备中。

1.1 待测量概述

非电量的电测法是指通过应用物理效应，把待测物理量转换成电学量并进一步测量的全部过程。

表 1 汇列了几个非电量的最大值 x_{max} 和最小值 x_{min} 及其比值 x_{max}/x_{min} 。通常，最大值是指可测的最大值，最小值是指待测量的最小可探测部分，即量化单位 ($M_i\beta_{quant}$) (参阅第 6.2 节)。

表 1. 待测非电量的数值范围

			最 小 值	最 大 值	$\frac{x_{max}}{x_{min}}$
			x_{min}	x_{max}	
应 变	ϵ		10^{-2} 微应变	10^5 微应变	10^7
位 移	S		1 微米	10 米	10^7
旋 转 角	α		$10^{-6} \times 360^\circ$	$10^\circ \times 360^\circ$	10^8
转 速	n		4×10^{-2} /分	4×10^5 /分	10^7
加 速 度	a		$10^{-6} g$	$10^5 g$	10^{11}
拉力和压力	F		2×10^{-5} 牛顿	2×10^7 牛顿	10^{12}
压 强	P		10^{-5} 巴	10^4 巴	10^9
时 间	t		10^{-10} 秒	10^9 秒	10^{19}
温 度	θ		$10^{-6} K$	$10^{12} K$	10^{18}

表 1 中给出的比值 $x_{\max}/x_{\min}$ 的范围为 $10^0 \sim 10^{19}$ 。在电测量技术中, 与此相对应的比值范围为 $10^0 \sim 10^{28}$, 而实质上是 $10^0 \sim 10^{42}$ 。虽然上述比值中并非全都明确表示出它们的数量级, 然而应该指出, 在对非电量进行电测时, 对工作范围和测量范围将提出极为严格的要求。这样, 几乎不可能用一部通用设备来最佳地完成整个领域的测量任务, 这样做在经济上是不合算的。

不仅对不同的待测量, 而且对某个测量范围, 也常常要求采用不同的测量系统和测量方法。因此, 为了最佳选择和正确运用测量设备, 需要全面掌握非电量电测法的有关知识。

1.2 测量电路

图 1 示出对非电量进行电测量的测量设备的基本结构。测量电路由传感器 AN 、匹配电路 AS 、数据采集和处理装置 DV 以及输出装置 AG 等部分组成。测量电路各个组成部分的名称, 要与由测量设备的任务所规定的测量仪器的排列次序相符合。可以在测量期间或在测量之后进行数据处理。在待测量变

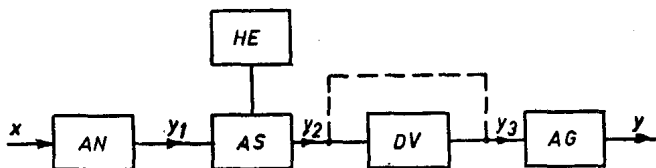


图 1 非电量的电测设备图 (VDE/VDI 规范 2600 第 3 页), 其中, AN —传感器 (例如 7.7 节中的力传感器); AS —匹配电路, 匹配器 (例如 3.3 节中的载频测量放大器); DV —数据采集和数据处理装置 (例如第 4 章中的运算器、电子计算机或分析器); AG —输出装置 (例如 3.4 节中的记录器); HE —辅助电源 (例如电流源), x —输入待测量; y —测量信号和输出量

换器中，传感器和匹配电路组合成一个部件（参阅第 1.2 节和第 3.2 节）。

这种测量方法的优点是：对待测量、测量范围和测量频率有较好的适应性，具有高的分辨率，对待测量的影响小到可以忽略，可进行模拟和数字多路测量，可对测量值实现远距离传输和遥测，可对测量数据进行自动处理，具有高的测量精度和可靠性。

1.3 定义

敏感元件（测量探针，测量元件）：在测量电路中，敏感元件是一种用来把物理量变成电学量的变换元件。

传感器（测量值接收器，测量发送器）：传感器包括所有把物理量变换成电学量的部件。敏感元件也能直接作为传感器，例如，应变片或热电偶。

测量变换器（信号变换器）：这是一种普通的测量仪器。根据仪器的特性曲线，测量变换器将模拟输入信号变换成与其有关的单值模拟输出信号。

待测量变换器：这是指输入信号和输出信号具有不同物理特性的测量变换器。通常，传感器是待测量变换器，例如，热电偶是以温度作为输入信号和以电压作为输出信号的温度传感器。

测量值变换器：这是指输入信号和输出信号具有相同物理特性的测量变换器。

标准测量变换器：（标准化变送器）这是一种具有表 2 所示归一化输出信号范围的测量变换器（参阅 3.2 节）。

在由传感器和匹配电路组合形成的标准测量变换器中（图

1)，能把一个范围可选择的输入物理量，变换成为一个范围相一致的输出电学量。各种各样的物理量，如力、温度等，都可作为输入量。输出量则是表 2 列出的标准信号之一（*VDI/VDE2600*）。

表 2. 待测量从0到100%的标准信号

输出直流电流 I （与电流成正比的系统）	
（0 ~ ±5）毫安或 （0 ~ ±20）毫安	固 定 零 点
（1 ~ 5）毫安或 （4 ~ 20）毫安	活 动 零 点
（0 ~ 5）毫安或 （12 ~ 25）毫安	可 调 极 限
输出直流电压 U （与电压成正比的系统）	
（0 ~ ±10）伏或（0 ~ ±1）伏	
频率 f 或脉冲串（与时间成正比的系统）	
（5 ~ 25）脉冲/秒	
气动标准信号 P	
（0.2 ~ 1.0）巴	

对于匹配电阻 $R \leq 1$ 千欧的低阻跟随器，在负载变化时，输入电流的变化可以小到忽略不计；对于匹配电阻 $R \geq 1$ 千欧的高阻跟随器，在负载电阻变化时，输入电压的变化可以小到忽略不计。

具有活动零点的测量设备可以用1~4毫安的稳态电流，使保护电路能够检测出由于仪器或电源工作不正常（或由于信号传输线中断）而引起的故障。

在工业调整设备中，待测量变换器主要应用在图 2 所示调整回路内。

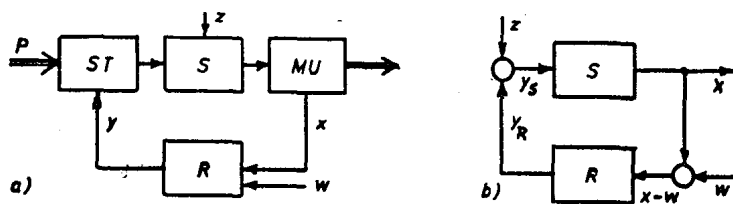


图 2 调整回路 (a) 仪器排列图, (b) 按照 *DIN* (德国标准) 19226 的方框图, P —工艺过程 (传送能量、材料或坯料), S —调整部分, MU —待测量变换器, R —调整器, ST —控制部分, x —受控量 (待测量), w —控制变量, $x_w = x - w$ —调整误差, y —调整量, z —干扰量

第二章 敏感元件

2.1 无源和有源敏感元件的原理概述

在把非电量变换成电学量时，根据表 3 所列出的关系，靠无源敏感元件来影响电学量，靠有源敏感元件产生电学量。

表 3. 敏感元件的工作原理

无 源 敏 感 元 件			有 源 敏 感 元 件
通过下列方式影响电学量：			通过机械能、热能、光能或化学能的变换来产生电学量
机械连接	利用物理学关系式	位移或力的补偿	
被 影 响 的 量			所 产 生 的 量
电阻 R	电 阻	电 流 I	电 压 U
电感 L	电 压		电 流 I
电容 C	辐射强度		电 荷 Q

2.2 电阻式敏感元件

2.2.1 原理

可以把敏感元件的电阻视为长度为 l 、截面积为 A 、电阻率为 ρ 或电导率为 γ 的一根导体的电阻来进行计算

$$R = \rho l / A = l / (\gamma A) \quad (1)$$

在温度 $\vartheta_K = 20^\circ \text{C}$ 时，电阻为 R_{20} ，当温度为 ϑ 时，则电

阻为

$$R_{\theta} = R_{20} [1 + \alpha_{20} (\theta - 20^{\circ}\text{C})] \quad (2)$$

式中, α_{20} 是电阻的温度系数。

物理量的变化会直接影响敏感元件的电阻, 例如, 电阻 R 会随机械长度 l 、截面积 A 、温度 θ 和电导率 γ 而变化。

对于电阻式敏感元件所出现的电阻变化 ΔR , 可以利用不同的测量电路进行检测。

2.2.2 应用实例

图 3 中列出的电路符号表明电阻式敏感元件的各种应用情况。

模拟电阻式敏感元件是由 $R = 1 \sim 10^6$ 欧的硬线(金属丝)、半导体或液体组成。数字式敏感元件是下述类型的开关元件, 诸如: 机械动作开关触点、电控开关晶体管或光控制的光电开

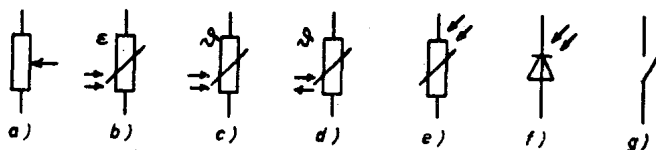


图 3 电阻式敏感元件的电路符号 (DIN 40700, 第 8 页, 40712 和 40716, 第 6 页)

- (a) 纵向或旋转式电阻丝敏感元件;
- (b) 金属或半导体电阻应变片;
- (c) 电阻式温度计, 镇流电阻, 正温度系数电阻 (阻值 R 随温度 θ 的升高而增加);
- (d) 电阻式温度计, 热敏电阻, 负温度系数电阻 (阻值 R 随温度 θ 的升高而减小);
- (e) 光敏电阻 (与电流方向无关);
- (f) 光电二极管;
- (g) 数字开关元件。

关电路，这类元件的电阻可以在接近于零到接近于 ∞ 的两个极限值之间断续变化。

2.2.3 分压器式测量电路

按图 4 (a) 和图 4 (b) 所示的负载和带箭头的参数符号系统 (DIN 5489)，在具有恒压源 U_q 和恒流源 I_q 的电路中引入了带箭头的参数符号。本书选用 U_0 为测量电路的输入电压。

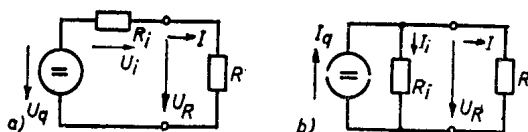


图 4 内阻为 R_i 、负载电阻 R 上分压为 U_R 的电流回路的等效电路

(a) 电源电压为 U_q 的电压源

(b) 电源电流为 I_q 的电流源

分压器：在图 5 所示的分压电路中，在分压电阻的两端加上输入电压 U_0 ，并在滑臂和参考点之间抽头取得分压。在电阻串联时，电压比与抽头电阻有关。

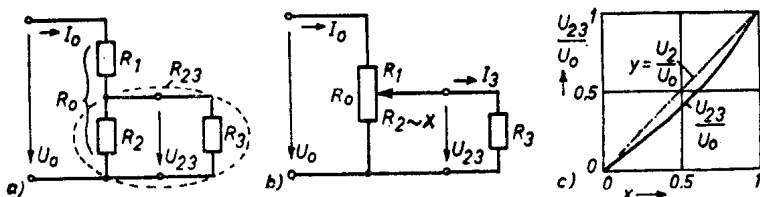


图 5 在输入电压 U_0 处总电阻为 R_0 、负载电阻为 R_3 的加载分压器

(a) 分电阻为 R_1 、 R_2 的固定抽头；

(b) 可变滑臂位置 x ；

(c) 负载因数 $C = R_3/R_0 = 1$ 时的负载特性曲线 $U_{23}/U_0 = f(x)$ 和理想特性曲线 $y = f(x)$