

快速变化的电量和 非电量的动态测量

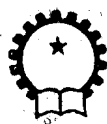
〔联邦德国〕 A. 赫德尔 等 编著

机械工业出版社

快速变化的电量和非电量的 动态测量

A.赫德尔 G.安德列
〔联邦德国〕 R.A.哈赤克 R.克劳斯 编著
O.毛厄尔 H.西 玛

刘瑞复 程瑞全 译



机械工业出版社

2583/66

本书分八章对动态测量快速变化的电量和非电量的各环节作了深入浅出的介绍。首先对动态测量的基本知识作了简明扼要的概述，然后从实用出发，对电阻应变片、热电偶、压电晶体、电感式传感器等及其测量线路作了较详细的论述，最后对数据采集和数据处理中常用的磁存储器、磁带记录器、计算机软件及其接口电路等作了概括而实用的介绍。

本书是一本有实用价值的参考书，可供从事实验室和现场测试的工程技术人员、工人和大专院校师生参考。

Dynamisches Messen

Messen von schnellveränderlichen elektrischen
und nichtelektrischen Größen

A. Hederer G. Andrae

R. A. Hatschek R. Krause

O. Maurer H. Sima

Lexika-Verlag, 1978

* * *

快速变化的电量和非电量的动态测量

A. 赫德尔

G. 安德列

〔联邦德国〕

R. A. 哈茨克

R. 克劳斯

编著

O. 毛厄尔

H. 西玛

刘瑞复、程端全 译

责任编辑：贺毓鑫

封面设计：刘代

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）

煤炭工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 850 × 1168¹/₃₂ · 印张 6 · 字数 150 千字

1987年5月北京第一版 · 1987年5月北京第一次印刷

印数 0,001—3,450 · 定价：1.80元

统一书号：15033·6568

前 言

由于近年来对测量变化量的仪器和系统的要求逐渐增高，而且在这方面已取得了很大进展，因此有必要系统综述一下动态测量技术的当代水平。

本书由制造厂和用户的专家，分八章详述了动态测量的各个测量环节及其相互关系。

对于发生在测量点的问题，本书给予了最优先的地位。因为这里最难满足测量精度和可靠性的要求，而且在采用了测量结果的数字式数据处理以后，有时也容易被忽略，所以应该使数据处理技术与测量点所能提供的可能性相适应。

本书在大多数情况下，仅简单地提供了各种测量方法的研究结果，并且说明其所达到的程度。

读者利用本书最后提供的大量参考文献，可以针对有关的问题进行深入的了解。

出版社和作者希望，这本综合性著作将有助于读者解决所遇到的测量问题，并能防止从测量结果中得出错误的判断。

序 言

物理量的测量代表了一个发展非常快的领域。在变动着的环境条件下，对被测量随时间变化的研究，已具有越来越重要的地位。这就是说，测量必须是动态的，或者如数据处理专业人员常说的，要求“实时显示”。由于经济原因也要求进行动态测量，以便对工程对象的可靠性及其制造所需的材料进行优化。对于复杂的技术装备，首先是核反应堆，还有汽车、飞机和很多其它的设备，其安全性的要求不断提高，因而就要求在动态测量的基础上，对系统进行广泛而全面的研究。由于研究工作要在极端的环境条件下进行，因此就更增加了困难。例如，必须在很宽的温度、湿度和压力范围内，有时还要在核辐射影响下对被测物进行测量。

在这种情况下，关键是要知道测量仪器本身的工作状态。对此，近年来恰好给予了很大的注意。当然首当其冲的是测量传感器本身，因为它就位于试件上，或者在试件附近，处于与试件相同的环境条件之下。本书即试图对测量传感器的使用范围特别加以详细说明。从测量技术的观点来看，这第一个测量环节也是最重要的一个环节。目前测量仪器的测量精度，可重复性和分辨能力，均仅取决于测量传感器。在第2~4章中对测量传感器作了详细介绍。

尽管如此，由于测量环节的数量也参与决定对每个环节的要求，因此有必要了解一个测量系统各环节之间的关系。第1章论述了各测量环节之间的原则关系，并给出了各环节相互适应的简单要求。

随着被测系统或设备复杂程度的提高，测量数据的正确处理问题显得更加重要了。几百个测量通道提供了极不相同的数据的

现象并不罕见。因此需要寻找一种适当的中间存贮装置，在容量、速度、信息的接受和经济价格等方面与任务相适应。

本书第5章对电感式传感器和载波放大器作了详细的论述。第6章对直接耦合放大器的干扰、噪声、漂移以及匹配等问题作了全面的分析。

本书第7章综述了当代各种存贮的可能性，并试图展望其未来。第8章广泛地展示了各种不同问题的解决方法和数据处理的特点。当然，这个领域中的革新速度是特别快的，而这则主要取决于目前微处理机和微型计算机的应用。尽管如此，建立一套最佳的数据处理设备，也比以前更容易了。在确定本书的上述水平和内容时，考虑到的原则是使尽可能多的从事实验室和现场测试的工程技术人员从中得到益处。

阿尔弗雷德·赫德尔

目 录

前言

序言

1 动态测量基础	1
物理学士 A.赫德尔(A.Hederer)	
1.1 概述	1
1.2 系统参数	2
1.3 动态测量的测量链	7
1.4 改善幅频特性的补偿法	8
1.5 测量值的数字式传输	11
2 电阻片和电阻片传感器	14
工学博士 G.安德列(G.Andreae)	
2.1 电阻片的结构和作用方式	14
2.2 电阻片的性能	15
2.2.1 线性	15
2.2.2 横向灵敏度	15
2.2.3 疲劳特性	16
2.2.4 蠕变	16
2.2.5 极限频率	17
2.3 干扰值	18
2.3.1 温度	18
2.3.2 湿度	20
2.3.3 流体静压力	26
2.3.4 核辐射	27
2.4 半导体电阻片	27
2.5 带有电阻片的测量传感器	28
2.6 电阻片线路和应变测量电桥	29
3 温度测量传感器	32

V

自然科学博士 O.毛厄尔(O.Maurer)

3.1 概述	32
3.2 过渡方程	33
3.3 在固体内或贴近固体的温度测量	35
3.4 在液体中的温度测量	36
3.5 在气体和蒸汽中的温度测量	38
3.6 接触式温度计	39
3.6.1 电阻式温度计	39
3.6.2 热电偶	45
3.7 辐射式温度计	48
3.7.1 整体辐射式温度计	52
3.7.2 部分辐射式温度计	53
3.7.3 比色辐射计(比例辐射计)	54
4 压电测量传感器	55

博士 R.A.哈赤克(R.A.Hatschek)

4.1 定义	55
4.2 压电效应	56
4.3 实际采用的压电材料	60
4.3.1 石英	60
4.3.2 铌酸锂	62
4.3.3 电气石	62
4.3.4 氮化铝	63
4.3.5 氧化锌	63
4.3.6 压电陶瓷	63
4.3.7 压电永电体	64
4.4 主动压电传感器	64
4.4.1 概述	64
4.4.2 力传感器	66
4.4.3 压力传感器	69
4.4.4 加速度传感器	76
4.4.5 应变传感器	81
4.5 压电测量回路	81

4.5.1	电缆	81
4.5.2	电缆插头	82
4.5.3	电路匹配	82
5	电感式测量值的转换	87
物理学士 A.赫德尔(A.Hederer)		
5.1	概述	87
5.2	电感式测量值转换的原理	88
5.3	电感式测量值转换的应用实例	90
5.3.1	位移测量	90
5.3.2	电感式力和压力测量	91
5.3.3	电感式扭矩测量	92
5.3.4	电感式加速度测量	94
5.4	载波频率信号条件	96
5.4.1	概述	96
5.4.2	载波测量电桥的结构	96
5.4.3	载频测量电桥的传递特性	99
5.5	利用电感式测量值转换进行非接触测量	102
5.5.1	概述	102
5.5.2	非接触式电感传感器的结构	105
5.5.3	电感式位移测量的品质因素	108
6	测量放大器	111

工程师 H.西玛(H.Sima)

6.1	概述	111
6.2	直接耦合放大器和调制放大器	111
6.3	直接耦合直流放大器电路	114
6.4	放大器的输出电路	116
6.5	信号源和放大器的组合	117
6.6	干扰的影响	117
6.6.1	噪声	118
6.6.2	漂移、噪声、测量灵敏度和带宽	120
6.7	同相电压与同相抑制	121
6.8	匹配仪器	123

X

6.9 测量放大器示例	128
6.10 多路放大器系统	128
7 测量值的存贮	130

物理学士 A.赫德尔(A.Hederer)

7.1 概述	130
7.2 用于DR、FM和PCM记录法的磁带仪	130
7.2.1 概述	130
7.2.2 录磁	131
7.2.3 在磁带上对测量值进行调制记录	135
7.3 大容量的数字存贮器	144
7.3.1 概述	144
7.3.2 光学存贮系统	144
7.3.3 磁泡	145
7.3.4 电荷耦合元件	147
7.4 用于数据简化的中间存贮	148
7.4.1 概述	148
7.4.2 用测量数据的限时存贮作为程序测量的基础	149
8 在动态测量中采用数字计算机	152

物理学士、工程师 R.克劳斯(R.Krouse)

8.1 电子数据处理设备的基本类型	152
8.2 数据采集系统	152
8.3 计算机硬件控制系统	154
8.4 计算机软件控制系统	155
8.5 系统选择的标志	155
8.5.1 测量任务的标志	156
8.5.2 继续处理的标志	156
8.5.3 经济性的问题	156
8.5.4 周围环境的影响	157
8.5.5 对制造厂的评价	157
8.6 对系统和元件性能的技术要求	157
8.6.1 概述	157
8.6.2 扫描法	157

8.7 扫描控制——顺序控制·····	158
8.8 计算机控制系统的标记和特征举例·····	160
8.8.1 用于数据传输和磁带存贮的 PCM 遥测技术·····	160
8.8.2 干扰的影响和不可靠性·····	162
8.8.3 编码·····	163
8.9 多路传输法·····	164
8.10 副载波和主载波的 环 形 结 构·····	165
8.11 脉码调制 (PCM) ——磁带存贮器·····	167
8.12 动态测试技术中的计算机控制检 测 设 备·····	170
8.12.1 模拟线路的计算机控 制 检 测 系 统·····	170
8.12.2 发动机检测台的 自 动 化·····	172
8.13 接口问题和 标 准 化·····	172
参考文献·····	174

1 动态测量基础

1.1 概 述

测量是将信息从一个系统传输到另一个系统，本文即对测量系统进行描述。

在这个传输过程中将出现能量的传递，它也可能会改变被测值。在测量中信息传输的质量直接与能量转换有密切关系，因此本章将给出明确的定义。假如被测量本身随时变化，而测量系统又能精确地跟随被测量的变化而变化，则称其为动态测量。与此相反，所谓静态测量，是指在测量过程中被测量保持恒定不变，至少在测量精度范围内是这样。静态测量系统是比较容易描述的，例如，带有动圈系统的检流计的转角 φ （即测量系统所产生的信息）与电流 I （即被测系统电流回路的信息）有关，其关系式如下：

$$\varphi = \frac{WAB}{T} I = \text{const} I \quad (1.1)$$

通过方程式(1.1)中的常数可充分的描述出信息的传输。该常数决定了灵敏度和准确度以及恒定常数的范围。换句话说，线圈匝数 w 、线圈面积 A 、磁场强度 B 和扭矩 T 决定了在一定的转角 φ 范围内传输信息为线性。

观察一下电流 $I(t)$ 随时间变化的函数，简单的公式(1.1)就成了唯一能描述快速振动检流计系统动态特性的微分方程式，即

$$\ominus \frac{d^2\varphi}{dt^2} + a\ominus \frac{d\varphi}{dt} + T\varphi = aI \quad (a = wAB) \quad (1.2)$$

式中的第一项考虑了系统的惯性，第二项考虑了系统的摩擦。去掉这两项，就剩下静态描述了。这种微分方程的解可以以一种比较复杂的方程式来描述信息的传递。如果用一个电路系统

$\ominus a$ 为阻尼系数——译者注。

(例如一个放大器)来代替振动着的检流计,则电感和电容耦合将决定微分方程式中的前两项。在典型应用情况下,可以很容易地解出这种常系数线性微分方程。第一种是指测量值和测量系统的激振源按正弦函数变化的,第二种是指系统受一次性冲击信号激发。而微分方程的计算结果通常用于描述测量系统的频率特性和动态响应特性。尽管激发函数是特殊的,但仍有普遍意义,例如对标准的正弦函数激励进行付立叶合成。

在实际工作中,估计这样一个动态测试系统的应用范围是非常有价值的。表征信息传递的函数解(以下简称为传递函数)在任何情况下都是复数,用公式 $G = G_r + jG_j$ 中的实数 G_r 和虚数 G_j ,可以描述振幅 x 的传递特性为

$$\left| \frac{x^2}{x_0^2} \right| = G_r^2 + G_j^2 \quad (1.3)$$

以及输入和输出信号之间的相位角为

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{G_j}{G_r} \quad (1.4)$$

1.2 系统参数

以快速振荡的检流计为例,还可以在实际使用中加以扩展。首先是“起振状态”,这时可以描述一个持续时间较长的现象。在以频率 f (角频率 $\omega = 2\pi f$)激振时,式(1.2)的解表示了摆角 φ 和记录纸带上幅值 x 的过渡关系,即

$$x_a = \frac{1}{\omega^2 - 2j\alpha\omega + 1} x_r \quad (1.5)$$

把它分成实数部分 G_r 和虚数部分 G_j ,就可以得到所谓的幅频特性,即激振源的幅值(输入信号幅值) x_r 与所激起的系统振荡(输出幅值)幅值 x_a 之比,换言之,按方程式(1.3),振幅误差与角频率 ω 和阻尼系数 α 之关系为

$$\left| \frac{x_a}{x_r} \right| = \frac{1}{\sqrt{(\omega^2 + 1)^2 + (2\alpha\omega)^2}} \quad (1.6)$$

由方程式(1.4)计算出的相频特性为

$$\angle(x_a, x_e) = \arctg \frac{2\alpha\omega}{(1 + \omega^2)} \quad (1.7)$$

动态测量中以传递函数式(1.6)、(1.7)取代了在静态测量式(1.1)中的系数。在图1.1中给出了式(1.6)中的函数关系。横坐标是测量角频率 $\omega = 2\pi f$ 与快速振荡检流计固有振荡频率 $\omega_0 = 2\pi f_0$ 的比值。

但是当快速选择一个测量系统时，利用这种图形太繁琐了。在大多数情况下仅给出极限值或系统参数就够了。因此可以给出极限频率和阻尼系数。对于后者，还常有一个最佳值，在快速振荡检流计中为

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.7$$

极限频率 f_0 确定了一个频率范围，在这个频率范围之内的幅值误差 $|G(j\omega)|$ 不能超过一个恒定值。人们常用 $-3\text{dB} \triangleq 30\%$ 表示约定值。幅值 $|G(j\omega)| \leq 5\%$ 范围内表示为平滑的幅频特性，除了第4章所述的压电晶体传感器是个例外。这里所讨论的动态测量仪器也反映了直流(DC)部分($f=0$) (图1.2)，通过低通滤波器

可使过程 $G(j\omega) = \left| \frac{x_e}{x_a} \right|$ 理想化。

为了表明幅频特性曲线，当 $\alpha = 0.7$ 时，相对幅度误差为

$$r = \frac{x_e - x_a}{x_e} \quad (1.8)$$

以及频率比例系数为 $K = \frac{f}{f_0}$ 时，得到了一个对于评价系统很有用的表1.1。

从表中可以看出，当动态测量允许误差 r 为3%时，测试系统的工作频率可以达到自振频率的50%。

在许多应用场合（例如开关接通现象）需要表示的是时间特性，而不是频率特性。一般皆可利用付立叶变换进行换算。在描

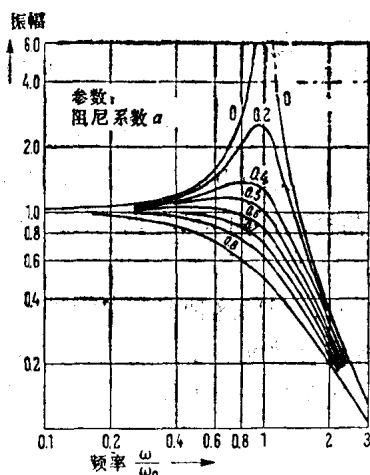


图1.1 快速振荡检流计的幅频特性

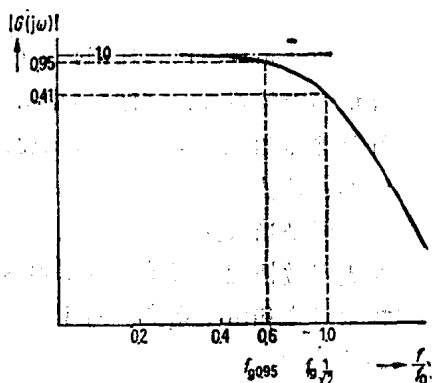


图1.2 由幅频特性定义的极限频率 f_e

表1.1 相对幅度误差 r 和测量频率 f 与自振频率 f_0 之比 K 的误差

r (%)	1	2	3	5	10
K (%)	38	45	50	68	83

述系统参数时，可用系统的响应时间 t_E 或者用上升时间常数 τ 来表示。为了给系统参数下定义，可解微分方程(1.2)，或者在脉冲激励情况下解常系数线性微分方程。图1.3所示为系统瞬态响应的基本原理，并说明了系统的响应时间常数 t_E 。在最陡的地方做一条切线，其交点的距离定为 $\omega_0 t_E$ 。计算其陡度时，有如下关系式：

$$t_E = \frac{1}{2f_0} \quad (1.9)$$

再一次指出，上述分析要求一定的传输特性。对于机械的弹簧-质量-系统，例如快速振动的检流计，式(1.9)给出了很近似

的结果。而对于电子系统，如放大器，式(1.9)就不适用了。

快速振动检流计可以传递具有很小幅值差的宽频带。对稳幅，在起振过程中必须允许有超幅振动；而对于电子测量仪器，则要求有很好的“脉冲特性”，即在起振过程中无超幅振荡。这可以通过使传递函数接近高斯传递函数来实现，通常是利用上升时间 τ 作为系统参数。

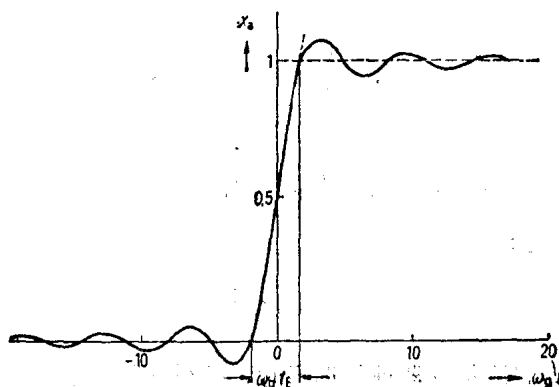


图1.3 阶跃函数和起振时间 t_E 的定义

图1.4给出了 t_E 值与 τ 值之间的差别。其中 τ 表示测量值从额定值的10%上升到90%所需的时间。

在高斯传递函数的有效条件下， τ 与 t_E 值之差甚小，即

$$\tau = 1.022 t_E \quad (1.10)$$

“高斯”传递中的上升时间仅比起振时间高约2%。

假如传递是从0Hz开始的，则上升时间 τ 与带宽 B 或截止频率 f_g 之间的关系也比较重要。当频率 $f = B$ 时的相对幅值衰减为 $\frac{1}{\sqrt{2}} \triangleq 3\text{dB}$ 。按高斯传递函数计算起振过程时，式(1.9)变成下式：

$$\tau = \frac{0.34}{B} \quad (1.11)$$

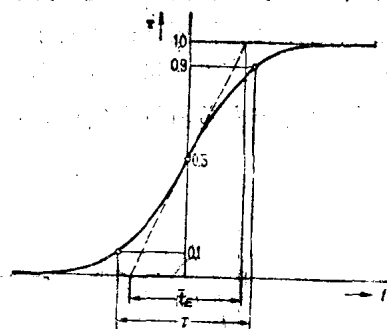


图1.4 起振时间 t_s 和上升时间 τ 的定义

而对0Hz传递则为

$$\tau = \frac{0.34}{f_R} \quad (1.12)$$

在对动态测量仪器进行选择时，必须优先考虑截止频率或上升时间，因为这两个系统参数对于是否能够传递所要传递的信息起主要作用。图1.5举例说明了高速开关的瞬态特性。

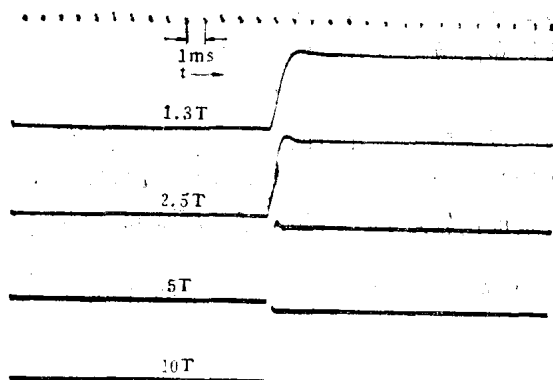


图1.5 具有不同截止频率的快速振动检流计的开关过程