

测量系统原理

[英] J.P. 本特利 著 朱德忠 李荣先 译

PRINCIPLES OF
MEASUREMENT
SYSTEMS

中国计量出版社

测 量 系 统 原 理

〔英〕 J.P. 本特利 著

朱德忠 李荣先 译

中国计量出版社

内 容 提 要

本书根据 J.P. 本特利所著《测量系统原理》(Principles of Measurement Systems) 1983 年版译出。

全书共分三部分。第一部分叙述测量系统的基本原理, 介绍测量系统静态、动态特性的分析方法; 第二部分详细论述测量系统的典型元件, 包括常用的敏感元件、信号调理元件、信号处理元件和数据显示元件; 第三部分全面介绍工业过程中常用的测量系统, 包括流量测量系统、气动测量系统、测量系统的传热效应、热辐射测量系统、超声测量系统、气相色谱法以及数据采集和遥测系统。

本书可作为工科大学学生过程检测或测试技术课程的教科书, 也可供有关高等院校教师以及科研和工程技术人员参考。

John P. Bentley
PRINCIPLES OF
MEASUREMENT SYSTEMS

Longman London and New York 1983

测 量 系 统 原 理

[英] J.P. 本特利 著

朱德忠 李荣先 译

责任编辑 吴 金

中国计量出版社

北京和平里一区7号

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

—*—

开本 850×1168/32 印张 14.375 字数 372 千字

1988年5月第1版 1988年5月第1次印刷

印数1—7 000

ISBN 7-5026-0028-0/TB·25

定价 4.00 元

译 者 序

本书根据英国 Teesside 多科工业大学 J.P. 本特利 (Bentley) 所著《测量系统原理》(Principles of Measurement Systems) 1983 年版译出。

近 20 年来, 由于工业自动化技术的迅速发展, 对过程检测提出了愈来愈高的要求。过程自动化的关键往往在于过程检测。本书将过程检测作为系统、完整的学科来介绍, 不同于一般的热工测量仪表教科书。书中详细阐述了测量系统的基本原理, 系统静、动态特性的分析方法以及过程检测中常用的敏感元件、信号调元元件、信号处理元件和数据显示元件, 比较全面地介绍了工业过程中常用的测量系统。本书采用了独特的分类方法, 通过突出物理过程来论述各种热工量 (如压力、流速、流量、温度、成分) 和机械量 (如力、力矩、加速度) 的测量系统, 并引进了微机数据处理等新技术, 使过程检测课程更为系统化。

译者认为本书是一本较好的教科书, 它可作为工科大学学生过程检测或测试技术课程的教材, 也可供科技工作者和工程技术人员参考。书中还选有大量的例题和习题, 便于读者自学。

对原书中某些印刷错误或需要改正的地方, 在翻译过程中都作了相应的修改。

本书第一、三部分由朱德忠翻译, 第二部分由李荣先翻译, 全书由朱德忠统稿, 并由顾毓沁校阅。

限于译者水平, 译文中疏漏不妥之处在所难免, 恳请读者批评指正。

译者 1986 年 12 月

序 言

近 20 年来,在工业、军事、科学和医学等广阔领域中,自动化技术的应用得到了迅速的发展。这期间控制工程逐渐成为一门重要的学科,并出版了许多控制理论的教科书。然而,我们越来越明显地看到,自动控制的发展经常由于没有准确可靠的测量设备和缺乏有经验的人员去设计、生产和维护这些设备而受到阻碍。所以必须强调要设立较高层次的教育系统来进行测量和检测仪表的教学,但是这一科目又往往只是作为对用来测量给定变量例如流速或加速度的技术的介绍。这样做的结果就显得该科目不那么有用和急需,于是也就阻碍了检测仪表学成为一门独立的学科。

本书试图通过对测量系统的研究,把检测仪表学建成一门系统、完整的学科。测量系统是一个信息系统,它是观测待测变量数值的系统。一个给定的系统可以包含四种元件:敏感、信号适调、信号处理和数据显示元件。本书分为三部分。第一部分(第一至七章)研究系统的一般性原理。这一部分首先讨论个别元件具有的静态和动态特性,以及它们在稳态和非稳态条件下对整个系统准确性的影响。在后几章里讨论负载、干扰和噪声对系统性能和系统可靠性的影响,以及选用系统经济性的判据。第二部分(第八至十一章)研究当前广泛应用的敏感、信号适调、信号处理和数据显示元件的原理和性质。第十章讨论典型微型计算机的结构以及它在速度测量系统中作为一种信号处理元件的应用。第三部分(第十二至十八章)叙述了许多具有重要工业应用的专门测量系统,其中包括流量测量、气动、传热、热辐射、超声、气相色谱、数据采集和遥测等。全书包括 200 余幅插图和约 80 道习题(附有答案),并在每章末尾列出不少参考文献,提供了有

益的补充阅读材料。

本书特别适宜于仪表和控制专业的大学生使用。而且，由于测量和仪表在所有技术部门中都变得越来越重要，因此本书对于从事电气、电子、机械、化学、土木工程和应用物理学习的大学生也是有用的。其中多数材料对工业测量和控制中有关课程的讲师和学生都是有益的。我还希望本书对工程师和科学家解决实际测量问题能有所帮助。

我要感谢我的同事 Dr. T. Cartledge 的支持和鼓励，以及很多学生的建议和批评。同时要特别感谢我的妻子 Pauline，由于她精心打印手稿，使本书得以圆满完成。

J.P. 本特利

目 录

第一部分 一般原理

第一章 一般的测量系统	(1)
第二章 测量系统元件的静特性	(4)
2.1 系统特性	(4)
2.2 系统元件的一般形式	(11)
2.3 统计特性	(13)
2.4 静特性的鉴定——校准	(19)
第三章 静态测量系统的准确性	(32)
3.1 理想元件组成的系统的测量误差	(32)
3.2 非理想元件组成的系统的误差概率密度函数	(34)
3.3 减小误差的方法	(38)
第四章 测量系统的动态特性	(46)
4.1 典型系统元件的传递函数 $G(s)$	(46)
4.2 元件动态特性的判定	(54)
4.3 测量系统的动态误差	(63)
4.4 动态补偿方法	(69)
第五章 测量系统的负载效应	(76)
5.1 电负载	(76)
5.2 一般性负载	(85)
第六章 测量系统的信号和噪声	(93)
6.1 引言	(93)
6.2 随机信号的统计表征量	(94)
6.3 噪声和干扰对测量电路的影响	(105)
6.4 噪声源和耦合机理	(107)
6.5 减少噪声和干扰影响的方法	(111)
第七章 测量系统的可靠性、方案的选择和经济性	(122)

7.1	测量系统的可靠性	(122)
7.2	测量系统的选择	(124)
7.3	总使用期运行费用	(133)

第二部分 典型测量系统元件

第八章	敏感元件	(139)
8.1	电阻敏感元件	(139)
8.2	电容敏感元件	(148)
8.3	电感敏感元件	(151)
8.4	电磁敏感元件	(157)
8.5	热电敏感元件	(159)
8.6	弹性敏感元件	(165)
8.7	压电敏感元件	(174)
8.8	压阻敏感元件	(179)
8.9	电化学敏感元件	(179)
第九章	信号适调元件	(186)
9.1	不平衡电桥	(186)
9.2	放大器	(197)
9.3	交流载波系统	(204)
9.4	闭环系统	(209)
第十章	信号处理元件	(223)
10.1	模-数转换	(223)
10.2	典型微机系统	(236)
10.3	微机在速度测量系统中的应用	(241)
第十一章	数据显示元件	(252)
11.1	数据显示元件的评论与选择	(252)
11.2	指针-标尺式指示仪表	(254)
11.3	模拟图形记录仪	(257)
11.4	简单数码显示	(263)
11.5	阴极射线管显示	(267)
11.6	数字记录仪	(270)

第三部分 专门测量系统

第十二章	流量测量系统	(275)
12.1	流场中一点速度的测量.....	(275)
12.2	体积流量测量.....	(277)
12.3	质量流量测量.....	(296)
12.4	恶劣条件下的流量测量.....	(300)
第十三章	气动测量系统	(311)
13.1	挡板-喷嘴位移敏感元件.....	(311)
13.2	中继放大器原理.....	(317)
13.3	扭矩-平衡变送器.....	(319)
13.4	气动传送和数据显示.....	(323)
第十四章	测量系统中的传热效应	(327)
14.1	引言.....	(327)
14.2	热传感器的动态特性.....	(329)
14.3	流速测量用的恒温风速计系统.....	(335)
14.4	测量气体导热系数和成分用的热导池系统.....	(340)
第十五章	热辐射测量系统	(347)
15.1	引言.....	(347)
15.2	热辐射测量系统的一般形式.....	(347)
15.3	热辐射测量系统的种类.....	(362)
第十六章	超声测量系统	(372)
16.1	基本的超声传送环节.....	(372)
16.2	压电超声发送器的原理.....	(373)
16.3	超声传送的原理.....	(378)
16.4	超声测量系统举例.....	(388)
第十七章	气相色谱法	(397)
17.1	原理和基本理论.....	(397)
17.2	典型的气体色谱法.....	(402)
17.3	信号处理和操作程序.....	(406)
第十八章	数据采集和监测系统	(415)
18.1	分时多路传输.....	(415)

18.3	典型数据采集系统.....	(417)
18.5	串行数字信号.....	(420)
18.4	误差检测和修正.....	(427)
18.5	移位键控.....	(430)
18.6	典型遥测系统.....	(435)
习题答案.....		(440)

第一章 一般的测量系统

测量系统的作用是把与被测变量相对应的数值提供给观测者。通常这数值或测量值不等于变量真值。例如，管道中流量由指针-标尺指示仪表读出的测量值是 $11.0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ，而真正的流量可能是 $11.2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。发动机测得的转速数字显示可以是 3140 rev/min ，而真正的转速可能是 3133 rev/min 。很明显，现在测量系统输入的是变量真值，而输出的则是测量值（见图 1.1）。确定变量真值所涉及到的问题将在下一章讨论。

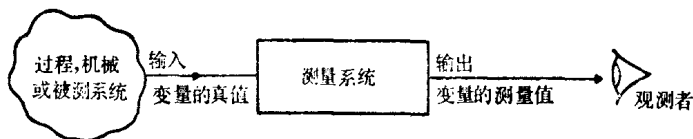


图 1.1 测量系统的作用

测量系统由几个元件或组件组成。元件可以分为四种，然而对某个系统来说，有的元件可以不出现，有的又可以出现不止一次。这四种元件都表示在图 1.2 中，并如图 1.2 所示那样来定义。

敏感元件：它与过程相接触，并给出一个以某种方式决定于被测变量的输出量。例如，热电偶的毫伏热电势决定于温度，电

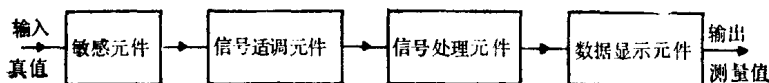


图 1.2 测量系统的一般结构

阻应变片的电阻值决定于机械应变；孔板的压差决定于流量。如果在测量系统中有不止一个敏感元件，那么与过程相接触的元件称为一次（初级）敏感元件，其它的为二次（次级）敏感元件。

信号适调元件：它把敏感元件的输出信号转换成更适合于进一步处理的形式，通常是直流电压、直流电流或频率信号。例如不平衡电桥把阻抗的变化转换为电压的变化；放大器把毫伏放大为伏；振荡器把阻抗变化转换为变频电压。

信号处理元件：它接受适调元件的输出，并将其转换成更适合于显示的信号。例如模-数转换器把电压转换成数码形式输入计算机；微型计算机从输入的数码数据计算出变量的测量值。典型的计算如从流量和密度数据来算出产生的气体的总质量，对色谱峰积分求出气流的成分，对敏感元件非线性作修正。

数据显示元件：它以观测者易于认识的形式来显示测量值。例如简单的指针-标尺指示仪表、图形记录仪、字母显示和可视显示单元。图 1.3 表示一个包括上述所有元件的重量测量系统。

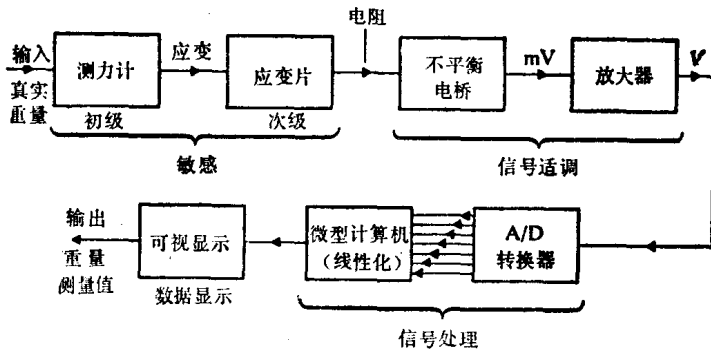


图 1.3 重量测量系统

传感器 (transducer) 这个词通常是与测量和仪表联系起来使用的。它加工成组件，(通常是)给出一个对应于诸如压力或加速度那样的输入变量的输出电压。所以我们看到这样一个传感器，它可包括敏感元件和信号适调元件。例如一个重量传感器包

括了图 1.3 所示的头四种元件。还要着重指出，测量系统中每一个元件本身又可以由更为简单的元件组成的一个系统。第八至十一章讨论了每种常用元件的典型例子。

用框图来讨论元件和系统的性质是非常有用的方法，本书所用主要框图的符号如图 1.4 所示。

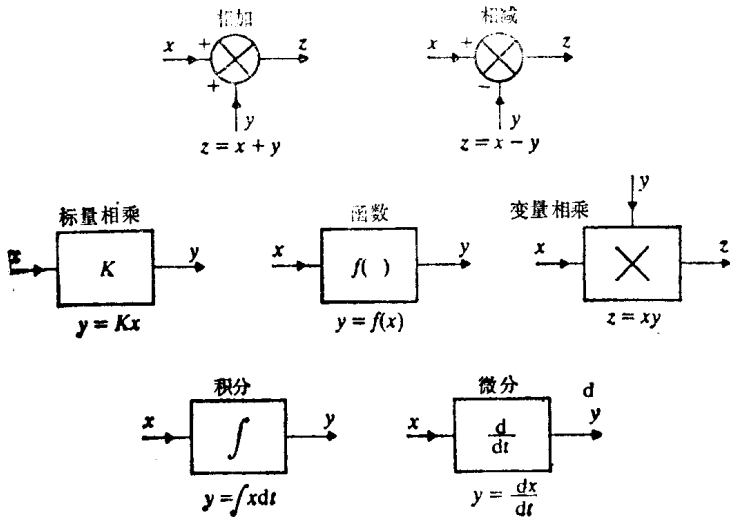


图 1.4 框图符号

第二章 测量系统元件的静特性

在前一章中, 我们已看到一个测量系统是由各种元件组成的, 下面各章将讨论典型元件所具有的特性以及它们对系统整体性能的影响。本章涉及的是静特性或稳态特性, 即当输入 I 维持常数或缓慢变化时, 元件输出 O 和输入 I 之间存在的关系。

2.1 系统特性

系统特性能用数学或图表的方法来准确地定量表示, 这和统计特性不同, 统计特性不能准确地定量表示, 2.3 节中将对此进行讨论。

量程: 元件输入量的量程由 I 的最小值和最大值, 即 $I_{\min}$ 到 $I_{\max}$ 来规定; 输出量的量程由 O 的最小值和最大值, 即 $O_{\min}$ 到 $O_{\max}$ 来规定。例如一个压力变送器输入量的量程可为 $0 \sim 10^4 \text{ Pa}$, 输出量的量程为 $4 \sim 20 \text{ mA}$; 热电偶输入量的量程可为 $100 \sim 250^\circ\text{C}$, 输出量的量程为 $4 \sim 10 \text{ mV}$ 。

间隔: 即输入量或输出量的最大变化, 输入量间隔是 $I_{\max} - I_{\min}$, 输出量间隔是 $O_{\max} - O_{\min}$ 。这样在上述例子中, 压力变送器的输入量间隔为 10^4 Pa , 输出量间隔为 16 mA ; 热电偶输入量间隔为 150°C , 输出量间隔为 6 mV 。

理想直线: 如果对应的输入量 I 和输出量 O 落在一条直线上, 那么该元件是线性的。理想直线是从最小量点 $A(I_{\min}, O_{\min})$ 连到最大量点 $B(I_{\max}, O_{\max})$, 所以有以下方程:

$$O - O_{\min} = \frac{O_{\max} - O_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} (I - I_{\min}) \quad (2.1)$$

即理想直线方程:

$$O_{\text{ideal}} = KI + a \quad (2.2)$$

其中,

$$K = \frac{O_{\max} - O_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \quad (2.3)$$

$$a = O_{\min} - KI_{\min}$$

分别为理想直线的斜率和截距。

于是上述压力变送器的理想直线是:

$$O = 1.6 \times 10^{-3} I + 4.0$$

非线性度: 许多情况下由式 (2.2) 和 (2.3) 所定义的直线关系并不成立。这样的元件称为非线性元件。非线性度能用函数 $N(I)$ 来定义 (图 2.1), 它表示实际特性和理想直线特性之间的差别, 即:

$$N(I) = O(I) - (KI + a) \quad (2.4)$$

或

$$O(I) = KI + a + N(I)$$

非线性度常用最大非线性度 $\hat{N}$ 来定量表示, 它写成满刻度偏转 (f.s.d.) 的百分数, 即间隔的百分数, 于是:

以 f.s.d. 的百分数表示的最大非线性度

$$= \frac{\hat{N}}{O_{\max} - O_{\min}} \times 100\% \quad (2.5)$$

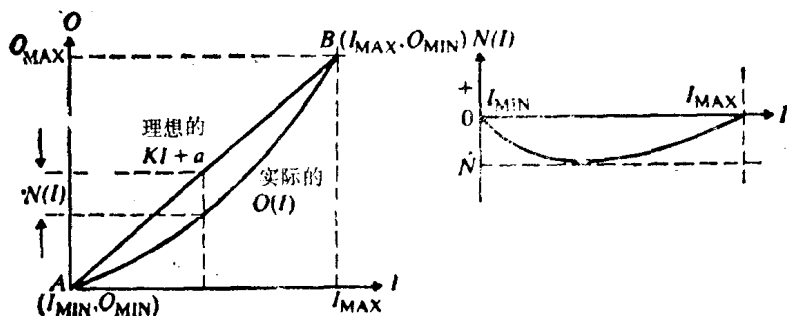


图 2.1 非线性度的定义

许多情况下, $O(I)$ 进而 $N(I)$ 能用 I 的多项式表示, 即:

$$\begin{aligned} O(I) &= a_0 + a_1 I + a_2 I^2 + \dots + a_q I^q + \dots + a_m I^m \\ &= \sum_{q=0}^m a_q I^q \end{aligned} \quad (2.6)$$

在两种不同金属接点处热电势随温度的变化就是这样一个例子。对于铜-康铜 (T 型) 热电偶接点, 在 $0 \sim 400^\circ\text{C}$ 量程内, 热电势 $E(T)$ μV 和接点温度 $T^\circ\text{C}$ 之间多项式的前四项是⁽¹⁾:

$$\begin{aligned} E(T) &= 38.74 T + 3.319 \times 10^{-2} T^2 + 2.071 \times 10^{-4} T^3 \\ &\quad - 2.195 \times 10^{-6} T^4 + \text{直至 } T^5 \text{ 的高次项} \end{aligned} \quad (2.7a)$$

因为 $T = 0^\circ\text{C}$ 时, $E = 0 \mu\text{V}$ 和 $T = 400^\circ\text{C}$ 时, $E = 20869 \mu\text{V}$, 所以理想直线方程应是:

$$E_{\text{ideal}} = 52.17 T \quad (2.7b)$$

而非线性修正函数为:

$$\begin{aligned} N(T) &= E(T) - E_{\text{ideal}} \\ &= -13.43 T + 3.319 \times 10^{-2} T^2 + 2.071 \times 10^{-4} T^3 \\ &\quad - 2.195 \times 10^{-6} T^4 + \text{高次项} \end{aligned} \quad (2.7c)$$

有时用其它表达式比用多项式更为合适, 例如热敏电阻温度 $T^\circ\text{C}$ 时的电阻 $R(T) \Omega$ 可以用下式表示:

$$R(T) = 0.04 \exp\left(\frac{3300}{T + 273}\right)$$

灵敏度: 它是输出量 O 相对于输入量 I 的变化率, 即 $dO/dI = K + dN/dI$ 。于是对理想元件, $dO/dI = K$, 即上述压力变送器的 $dO/dI = 1.6 \times 10^{-3} \text{mA/Pa}$ 。温度 $T^\circ\text{C}$ 时铜-康铜热电偶的灵敏度 dE/dT 为:

$$\begin{aligned} dE/dT &= 38.74 + 6.638 \times 10^{-2} T + 6.213 \times 10^{-4} T^2 \\ &\quad - 8.780 \times 10^{-6} T^3 + \text{高次项} \end{aligned} \quad (2.8)$$

在 200°C 时, 灵敏度约为 $50 \mu\text{V}^\circ\text{C}^{-1}$ 。

环境影响: 一般来说, 输出量 O 不只和信号输入 I 有关, 而且还和环境输入有关, 诸如环境温度、大气压力、相对湿度和电源电压等。这样, 如果式 (2.4) 足以代表元件在“标准”环

境条件下〔环境温度 25℃，大气压力 1 000 mbar (10⁵Pa)，相对湿度 80%，电源电压 10 V〕的特性，那么考虑到环境条件偏离“标准”时，方程式必须加以修正。环境输入有两种主要形式，一种是变动输入，它将引起元件线性灵敏度变化。如果 I_M 是环境变动输入和“标准”之差（标准条件下 I_M 为零），那么就会引起线性灵敏度从 K 变到 $K + K_M I_M$ 〔图 2.2(a)〕。另一种是干扰输入，它将引起元件的截距或零偏置发生变化。如果 I_I 是环境干扰输入和标准值的差（标准条件下 I_I 为零），那么就会引起零偏置从 a 变到 $a + K_I I_I$ 〔图 2.2(b)〕。 K_M ， K_I 称为环境耦合常数或灵敏度。因而欲修正式 (2.4)，必须用 $(K + K_M I_M)I$ 代替 KI ，并用 $a + K_I I_I$ 代替 a ，得到：

$$O = KI + a + N(I) + K_M I_M I + K_I I_I \quad (2.9)$$

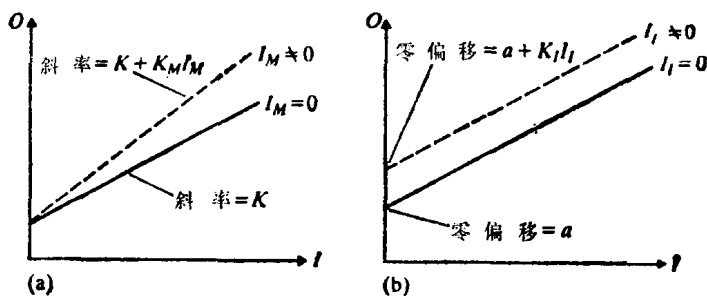


图 2.2 变动输入和干扰输入的影响

(a) 变动输入；(b) 干扰输入

变动输入的一个例子如图 2.3 所示的电位器式位移传感器电源电压 V_s 的变化 ΔV_s 。热电偶参考接点温度 T_2 的变化是干扰输入的一个例子（见下节和 8.5 节）。

变差：对于一定的输入量 I ，在它向上增加或向下减少时，输出量 O 可以是不同的。这两个输出量 O 值的差值就是变差（图 2.4），即：

$$\text{变差 } H(I) = O(I)_{I_1} - O(I)_{I_2} \quad (2.10)$$