

普通高等教育机电类规划教材

测量系统设计与应用

华中理工大学 夏士智 主编

机械工业出版社

13
8

测量系统设计与应用
夏士智 主编
机械工业出版社
FDG

普通高等教育机电类规划教材

测量系统设计与应用

主编 华中理工大学 夏士智
参编 华中理工大学 刘家群
成少铭



机械工业出版社

本书是根据高等工业学校检测技术及仪器仪表专业教学指导委员会1992年制订的测量系统设计与应用课程教学大纲编写的。全书共分为十二章：第一章至第四章论述测量系统的结构、特性、仿真及精度分析；第五章至第十一章分别介绍机械量、热工量、物性量与成分量的检测方法、检测仪表及系统；第十二章举例讨论测量系统的设计方法。

本书是高等院校检测技术及仪器仪表专业的教材，也可作为其他有关专业“自动检测技术及仪表”和“工程检测技术”课的教材或参考书。同时可供从事自动化和检测技术工作的工程技术人员参考。

测量系统设计与应用

主编 华中理工大学 夏士智

参编 华中理工大学 刘家群
成少铭

*
责任编辑：王小东 版式设计：王颖

封面设计：姚毅 责任校对：姚培新

责任印制：王国光

*
机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码：100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*
开本787×1092¹/₁₆·印张15.75·字数382千字

1995年10月第1版第1次印刷

印数 0 001—2 000 定价：12.80元

*
ISBN 7-111-04664-1/TP·269(课)

前 言

本书是根据高等工业学校检测技术及仪器专业教学指导委员会1992年于南京制订的“检测系统设计与应用”教学大纲编写的，作为“检测技术及仪器仪表专业”检测系统设计与应用课的教材。

全书分为十二章。第一章至第四章介绍测量系统的基本原理与结构、测量系统特性及计算机仿真、测量系统精度分析；第五章至第十一章分别介绍机械量、热工量、成分和物性量的检测原理、方法和系统；第十二章讨论测量系统的设计并给出实例。

本书由华中理工大学自动控制工程系夏士智主编，并编写第一、四、八、九、十、十一、十二章；刘家群编写第五、六、七章；成少铭编写第二、三章。本书由东北重型机械学院史锦珊主审；浙江大学钱浚霞、重庆大学朱麟章、吉林工业大学戴逸松对本书进行了评审，并提出了宝贵的意见，对此深表感谢。

限于作者的水平和能力，加之科学技术的迅速发展，本书难免有不妥或不能满足需要之处，期望读者批评指正。

作者1994年夏于武汉

EA009/06

目 录

前言	
第一章 测量系统的基本原理	1
第一节 测量系统的分类	1
第二节 测量系统的工作原理	3
第三节 测量系统的结构	6
复习思考题与习题	16
第二章 测量系统特性	17
第一节 测量系统的数学模型	18
第二节 测量系统的静态特性	25
第三节 测量系统的动态特性	32
复习思考题与习题	42
第三章 测量系统计算机仿真研究	43
第一节 基本原理	43
第二节 测量系统数学模型的时域分析	47
第三节 测量系统数学模型的频域分析	53
复习思考题与习题	58
第四章 测量系统精度分析	59
第一节 测量系统的误差	59
第二节 测量系统误差的综合与分配	59
第三节 提高测量系统精度的方法	62
复习思考题与习题	69
第五章 运动量的测量	70
第一节 位移的测量	70
第二节 速度的测量	74
第三节 加速度的测量	81
复习思考题与习题	83
第六章 力、力矩、轴功率的测量	84
第一节 力的测量	84
第二节 力矩的测量	88
第三节 轴功率的测量	95
复习思考题与习题	100
第七章 振动与噪声的测量	101
第一节 振动的测量	102
第二节 噪声的测量	107
复习思考题与习题	116
第八章 压力的测量	117
第一节 压力的单位及标准	117
第二节 压力的基本测量方法	119
第三节 压力测量系统及压力计的使用	128
复习思考题与习题	131
第九章 流量测量	132
第一节 概述	132
第二节 差压式流量计	137
第三节 线性流量计	143
第四节 质量流量的测量	154
第五节 多相流体的流量测量	158
复习思考题与习题	163
第十章 温度测量	164
第一节 温度标尺	164
第二节 温度测量的基本原理	166
第三节 接触测温方法及仪表	169
第四节 辐射测温方法	183
第五节 新型温度传感器	193
第六节 温度标准的传递	197
复习思考题与习题	198
第十一章 其他参数的测量	200
第一节 物位检测系统	200
第二节 物性检测	207
第三节 成分分析方法及仪表	215
复习思考题与习题	221
第十二章 测量系统的设计	222
第一节 测量系统和测量仪表设计原则和方法	222
第二节 测量仪表和测量系统设计实例	223
附录	235
附录A 铂铑 ₁₀ -铂热电偶分度表	235
附录B 镍铬-镍硅(镍铬-镍铝)热电偶分度表	239
附录C 铜热电阻分度表(Cu50)	242
附录D 铜热电阻分度表(Cu100)	242
附录E 铂热电阻分度表	243

第一章 测量系统的基本原理

第一节 测量系统的分类

传统的测量是指以确定量值为目的的一组操作。为了确定某一物理量的大小，就要把它与同种类的作为单位的量进行比较。因此，也可以说测量是通过实验方法把被测量与同种类的作为单位的量进行比较的过程。比较的结果可以用单位的名称及数值两部分来表示。若以 Q 表示某一物理量，以 $[Q]$ 表示同种类的单位量，则有

$$\frac{Q}{[Q]} = m \quad \text{或} \quad Q = m[Q] \quad (1-1)$$

式 (1-1) 称为测量的基本方程。式中 m 为比较得到的数字值，而被测量的大小由数字值 m 与单位 $[Q]$ 组合来表示。

随着科学技术的发展和生产发展的需要，被测量的范围不断扩大，往往不可能通过简单的比较来完成测量。另一方面，还需要通过测量来确定或监视生产过程的进行或工作状态，因此现代的测量比传统的测量更为复杂。通常要对被测对象进行检出、变换、分析、处理、比较、判断、显示、控制等，这就成了广义的测量或称为检测。可以认为现代的测量或检测是一种特殊形式的信息传输过程，检测系统是获取和传输信息的一种信息通道。

一个系统是若干元件和部件的集合，它由元件或部件按一定的方式组合后完成某种特定的功能。测量系统或称检测系统，就是由敏感元件、转换电路、显示器等功能元件或部件组合而成的系统。按照它在生产过程中所起的作用，大致可以分为下述几类：

1. 过程或状态监测系统 测量系统从其原理来说，可以用来测量生产过程参数，检查和监视设备的工作状态。例如，对于蒸汽锅炉，可以用温度计、压力计、流量计来测定生产的蒸汽的温度、压力值以及产生的蒸汽的数量；还可以用水位计测定锅炉中的水位，用以检查是否缺水或满水。这些检测仪表只检测这些参数的数值而没有控制这些参数的作用。这样的检测系统只对生产过程或状态起测量、检查或监督作用。

2. 过程或状态监控系统 生产过程的自动化已成为现代化生产标志之一。为了对生产过程进行控制需对过程参量进行检测。

图 1-1 所示为最常见的反馈控制系统原理框图。

由图可见，这样的反馈控制系统是由检测仪表、控制器、执行器等组成，具有检测和控制的功能。

3. 状态分析诊断系统 对于旋转机械，常检测它的振动并据此分析它的工作状态。对于卷扬机，可对它的钢丝

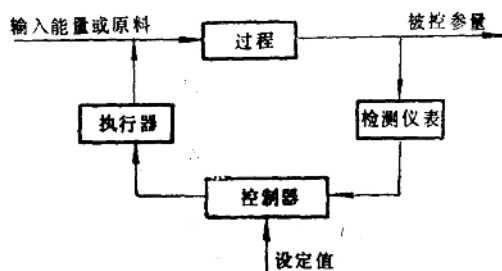


图 1-1 反馈控制系统

绳进行检测,并由所获得的信息分析它的可靠性。这样的系统需要由传感器、变换器、数据采集与分析装置等构成,对设备进行监测,并分析、判断它的状态。图1-2为我国生产的一种旋转机械故障分析与诊断系统示意图。

该系统可以配用电涡流传感器、压电式加速度或速度传感器、热电阻温度传感器、压阻式压力传感器等。传感器的输出通过适配器调理成 $0\sim 5V$ 的信号,送到采集器的相应通道进行A/D变换,并根据设定的判据进行判断,以决定是否发出报警信号。采集的信息送到上位机进行实时数据分析、处理、存储、打印以及故障诊断。可见,这样的系统具有状态监测及分析判断的功能。

4. 综合信息识别系统

对某一对象进行检测,获取有关的信息,其目的是了解对象的有关参量,研究对象的特性,分析对象现在、过去和未来的状态。为达到这样的目的,可以采用图1-3所示的综合信息识别系统。由测量单元获取有关信息;分析单元进行对象特性的分析,获取对象特性;确认单元按获得的信息确定对象目前的状态;预测单元可预测对象未来的变化或特性;控制单元则对对象进行控制,使处于设定状态。这样的系统充分利用检测获得的信息,具有监测控制及状态分析与预测的功能。

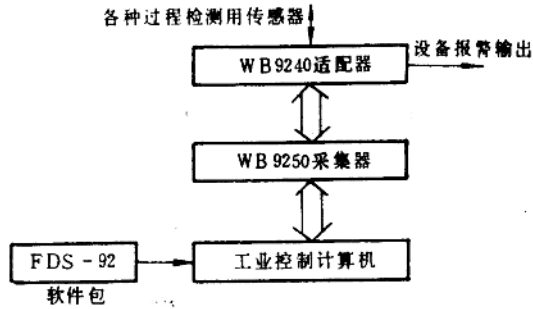


图1-2 旋转机械故障诊断系统

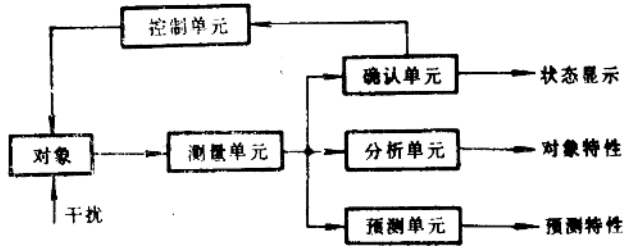


图1-3 综合信息识别系统

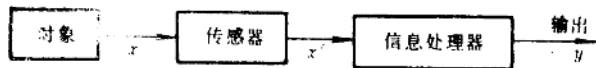


图1-4 开环型测量系统

有时只需进行对象特性的识别,无需预测和控制,则只需稍简单的信息识别系统即可。例如,图形识别、颜色识别等。

对于测量系统如果按其结构型式来分类,大致可分为开环型结构和闭环型结构两大类。

1. 开环型结构 开环型结构的测量系统一般由敏感元件(传感器)、放大器、转换电路、显示器等串联构成。如图1-4所示。

开环型结构的检测仪表有模拟式的、数字式的。模拟式测量系统中被测量被变换为模拟信号进行处理,以模拟量进行显示。而数字式系统则把被测量变换为离散的脉冲或数码形式进行处理,最后以数字显示。

2. 反馈型结构 简单的反馈型结构的测量系统如图1-5所示。

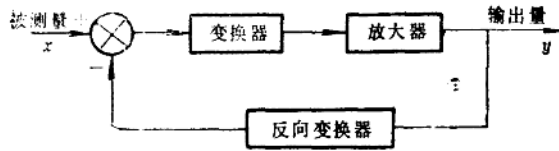


图1-5 反馈型测量系统

在正向通道中的变换器通常是将被测非电量信号转换为电信号的变换器，而反向变换器则将电量信号变换为非电量信号。

平衡式仪表和检测系统常采用这种结构。

第二节 测量系统的工作原理

如前所述，测量过程是按测量基本方程确定被测量的数值的过程。传统的测量方法有下述三种：

1. 简单测量 采用适当的测量仪表即可直接完成测量任务时，这种测量称为简单测量。
2. 直接测量 在测量过程中只包含一项简单测量和只根据一些已知数据对测量结果进行运算就可以得到被测量的大小，这样的测量称为直接测量。
3. 间接测量 如果对被测量量的测量包括两个或两个以上的简单测量或包括根据若干直接测量结果来计算出最后的测量结果，则称这种测量方法为间接测量。

为了进行直接测量，常采用以下方法：

1. 偏差法 当用指针式仪表来进行直接测量时，用指针相对于刻度线的位移（偏差）来表示被测量的大小，这种方法就是偏差式测量法。一般地说，被测量作用于测量系统，使测量系统偏离原始（零位）平衡位置，由偏差的大小决定被测量的值的测量方法就是偏差式测量法。

2. 零位法（平衡法） 这种测量方法的原理是把被测量和已知标准量进行比较，在达到平衡时，由标准量的数值决定被测量的大小。天平称重就是采用这种测量方法。当用天平称量时，使被测量物与砝码进行比较，也就是使它们共同作用于指零机构，当达到平衡时，指零机构指示为零，即可由砝码重量确定被测物重量。在指零机构分辨率足够高时，测量误差主要取决于标准量的误差，测量精度一般比偏差法高。

采用零位法进行测量时，必须进行标准量的调节的操作，使达到平衡。在工业仪表中，这样的调节操作可以采用自动装置来进行，这样的仪表就是自动平衡式仪表。

3. 微差法 微差法是偏差法和零位法的组合。在这种测量方法中，使被测量 x 的大部分作用与已知标准量 S 的作用相抵消，对两者的差值 $d = x - S$ 用偏差法进行测量。通常总是使差值 d 很小，即使对它的测量精度不很高，最终的测量结果仍可达到较高的精度。这是因为 $x = S + d$ ，而已知标准量 S 可以达到较高精度， d 愈小，它的测量误差对总的测量误差的影响就愈小。这种测量方法不需要调节标准量，也不需要平衡调节操作，所以测量易达到较高精度，测量系统的响应也较快。工程测量中常采用的不平衡电桥就是采用微差法进行测量的典型例子。

前面说过, 间接测量是由若干个直接测量的结果计算出被测量的量值的测量方法。由于测量系统中广泛的使用了计算机, 这样的计算很容易在测量系统中实现。这样就把间接测量转化为直接测量了。

为了从被测对象处获得所需的信息, 除必须有敏感元件或传感器外, 通常还应根据对象的特性, 采用适当的检测变换方式, 才能获得带有所需信息的信号。基本的检测变换方式有下述几种。

1. 直接变换方式 这种变换方式是由一个或多个变换环节串联构成, 如图1-6所示。

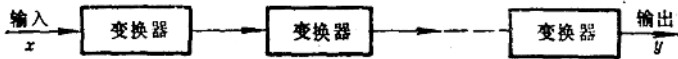


图1-6 直接变换方式

从变换器的输入、输出能量看, 信号变换器可分为被动式和调制式两类, 如图1-7所示。

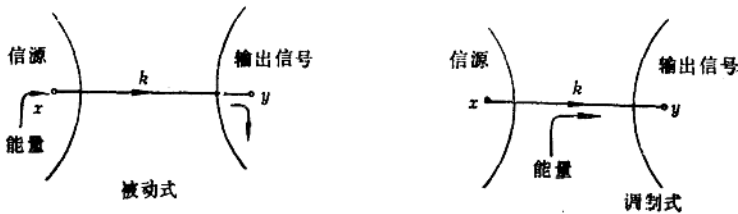


图1-7 被动式和调制式变换器

被动式变换器工作所需能量由信源提供, 不需外加能源。它的构造简单, 但较易扰乱被测对象的原有状态。例如温度检测用的热电偶就是这种变换器。

调制式的变换器实现信号变换时需要从辅助能源取得能量, 因而输出信号的能量水平高。它相当于用被测量对一个能量系统的参数进行调制, 所以称为调制变换方式。

2. 比较式检测变换方式 比较式检测变换方式如图1-8所示。

在这种检测变换方式中, 基准元件给出比较信号 x_c , 比较信号 x_c 与被测量 x 同时作用于比较检测元件, 比较检测元件对二者进行比较并给出结果, 即输出 y , 由输出 y 来决定被测量的大小。若比较信号是固定的, 就是前面所说的微差法。另一种方式是将 x 与 x_c 比较后由调整元件控制 x_c , 使与 x 相一致, 此时由比较信号确定被测量的大小。这种方式就是前面所说的平衡法。

3. 探查式(发射式)检测变换方式 当被测量不能直接作为传感器的输入信号时, 常采用探查式的检测变换方式。这种方式如图1-9所示。

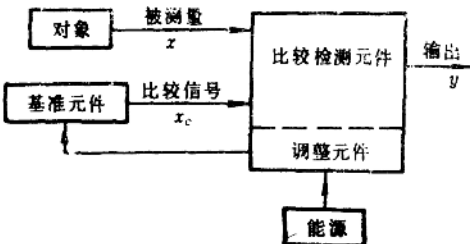


图1-8 比较式检测变换方式

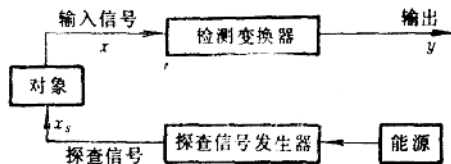


图1-9 探查式检测变换方式

探查信号发生器发出探查信号 x_s ，它与被测对象的被测参量相互作用，或者说被测参量对探查信号进行调制，形成一个带有被测量的信息的信号 x 作为检测变换器的输入。

通常用超声波、红外线、激光、放射性辐射、微波、X射线等作为探查信号。无损检测和很多非接触检测法就是采用这种方式进行的。这种检测变换方式由检测系统发出探查信号，是一种主动检测方式。

4. 信息处理式检测方式

图1-10为信息处理式检测方式的结构示意图。

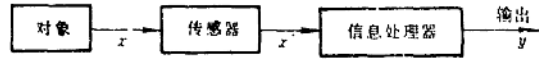


图1-10 信息处理式检测方式

在这种检测变换方式中，传感器所接受的不是直接被测量的信号而可能是其他的某种信号，只有用信息处理器对这些获得的信息处理以后才获得与被测量有一定关系的输出信号。

测定两相流体流量的相关检测法就是这种方式的典型例子。图1-11所示为相关流量计原理示意图。

若所测定的流体是气—固两相流体，采用电容式传感器及相应信号变换器，得到的是与固相浓度有关的两列随机信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ ，它们的互相关函数为

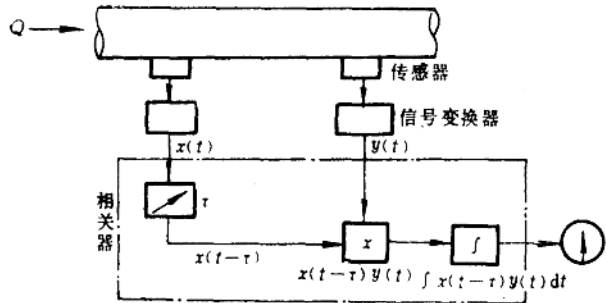


图1-11 相关流量计原理示意图

$$R_{xy} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int y(t) x(t - \tau) dt$$

式中 τ 为延迟时间。若流体流经两传感器所需时间为 τ_m ，则当 $\tau = \tau_m$ 时， R_{xy} 有最大值。由相关器对所获得的两列随机信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 进行处理，获得 R_{xy} 最大值时的延迟时间 τ ，即为流体流经两传感器间距离 L 所需时间 τ_m ，故可得流速 $u = L/\tau_m$ 。可见，传感器得到的只是与固相浓度有关的两列随机信号，只有以相关器处理后才能得到与流速有关的信息 τ_m 。

随着计算机技术的普及，信号处理技术的进步，这种检测变换方式的应用也愈来愈多。

5. 复合检测方式 将不同机能的元素有机地结合在一起，实现必要的检测变换机能，形成复合检测方式。最常用的是多传感器结构的复合检测方式。如图1-12所示。

例如扩散硅差压变送器，差压 Δp 的测量受到静压和温度的影响。为解决这一问题，可以在硅杯上同时形成

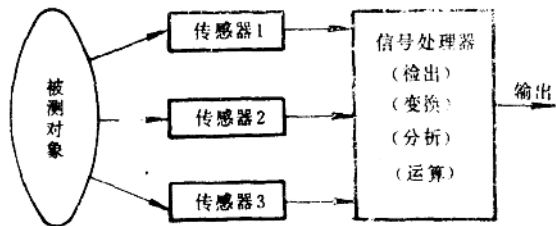


图1-12 复合检测方式

差压、静压和温度三组敏感元件，取得差压信号 E_d 、静压信号 E_s 、温度信号 E_T ，再以信号处理器进行计算处理，可消除静压和温度对差压测量的影响，还可同时输出差压、静压、温度的数值。现在生产的智能差压变送器大体上都采用这种复合检测方式。复合检测方式是提高

检测系统性能的有效方法，检测系统的复合方式是多样的，这里举出的只是其中的一例。

从上述各种检测变换方式可以看到，它们都是要获得包含所需信息的信号。把信息标志在物质载体上的处理称为调制。为了形成信号可以用表征任何物理特性的指定幅度、振荡、脉冲作为信息的载体。

在电动仪表中常用直流电压或电流作为信息的载体；在气动仪表中以气压作为信息载体。这一类信息载体只有它们的幅度可以被调制，是以它们的幅值来传送信息的。

第二种信息载体是振荡。例如交流电压。它的振幅、频率、相位三个参量可以被调制而形成带有信息的信号。

第三种信息载体是脉冲序列。脉冲序列的参量有：脉冲幅宽、脉冲宽度、脉冲间隔、脉冲位置、脉冲频率等，这些参量均可被调制。对连续信号的采样值还可以用脉冲数来量化，还可以用脉冲的有无的组合形成编码的信字信号。以脉冲作信息载体有很大的灵活性。

第三节 测量系统的结构

一、测量系统的基本机能

测量系统是由一些元件和部件以一定的方式组合起来完成特定的测量任务的设备的总体。为了解它的结构，首先应该知道它所必须具备的基本功能。

前面说过，测量是把被测量与同种类的单位量进行比较，以数值或符号表示被测量大小的过程。因此，一个以测量为目的的仪器仪表或检测系统必须具有基准量（单位量）保存、进行比较、将比较结果数值化或符号化并给以显示的功能。但是，为了与单位量进行比较，通常要将被测量加以变换，变换为易于传送、容易设置基准、易于进行比较的量。实现这一功能的是传感器、变送器。这种功能就是检测变换功能。当传感器或变换器对所需信号进行检出变换时，往往还受到其他干扰信号的影响。因此，测量系统在对有用信号进行检出变换时应当只对有用信号作出响应，而不响应干扰信号。这种机能就是信号选择功能。

图1-13所示为由上述各种基本功能的子系统组合的测量系统的例子。

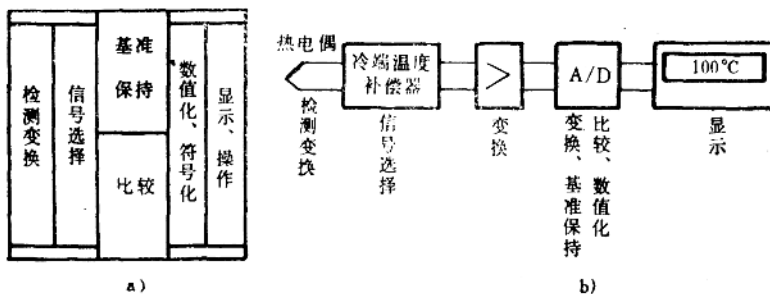


图1-13 测量系统的基本功能

图a表示了测量系统的各种基本功能。实现检测变换功能的部件是测量系统与被测对象间的“接口”。而显示操作部件是测量系统与人—观察者间的“接口”。

图b是数字显示的热电偶测温系统。热电偶是检测变换元件，它将被测温度转换为热电动势，实现检测变换功能。热电偶在检测时，若它的参考端（冷端）温度变化，它输出的热

电动势也会发现变化。可见，冷端温度的变化是一种干扰输入，它将引起测量误差。为了使热电动势只随被测温度变化就要将热电偶参考端温度保持恒定，或用冷端温度补偿器实现消除冷端温度变化影响的作用。这种使检测系统对输入信号选择性响应的功能就是信号选择功能。放大器将热电动势放大到适应A/D变换需要的值，这也是一种数量变换的功能。放大后的信号与A/D变换器保存的基准量进行比较并变换为数字量输出，由显示仪表进行数字显示。因此，A/D变换器实现基准保持、比较与数值化的功能。

下面对检测变换、信号选择、基准保持三种基本功能进行些简单的讨论。

1. 检测变换功能 将被测量 x 从被测对象中检出并变换成被测信号时，通常是按照某种物理效应或现象来进行的。我们希望在进行这样的变换时，使输出 y 与被测量 x 间有确定的关系，使

$$y = f(x)$$

对于一个系统，若其内部状态变量为 u_1, u_2, \dots, u_r ，有效输入及干扰输入变量为 x_1, x_2, \dots, x_n ，则系统输出 y 将为

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r)$$

以热电偶为例，有效输入变量为被测温度 x_1 ，干扰输入变量为冷端温度 x_2 。热电偶两电极材料纯度为其内部状态变量 u_1 和 u_2 。这种条件下热电动势为输出 y ，因而

$$y = f(x_1, x_2; u_1, u_2)$$

也就是说，热电动势受到被测温度、冷端温度及两热电极材料纯度的影响。只有在冷端温度及热电极材料特性不变的情况下热电动势才只随被测温度变化，即

$$y = f_1(x_1)$$

这时热电动势才与被测温度有一一对应的关系。因此，在使用中要防止热电极老化，并且要消除冷端温度变化造成的影响。

2. 信号选择功能 由上述热电偶的例子可以看出，对于热电偶来说，被测温度是有效输入信号，而参考端温度是干扰输入信号。只有使热电偶仅响应被测温度的变化时才能正确地进行测量。测量系统的信号选择功能就是对输入信号选择性响应的功能，因而只有具有良好的信号选择功能才能正确地进行测量。

在传感器和检测系统的设计中可以看到很多使信号变换与信号选择功能很好配合的实例。例如，对电阻式传感器，金属电阻的变化是金属种类、纯度、形状尺寸和温度等的函数。在设计电阻式传感器时，若使它的材料和纯度一定，并使电阻丝不受应力的作用，则它的电阻只随温度变化，可以作为温度传感器使用。若设计时使它的形状尺寸受应力而改变，则可作为应变计使用。二者在设计时的注意点是不相同的。前者要防止应变的影响，而后者要防止温度的影响。

3. 基准保持功能 在测量仪表或测量系统中必须要保存有与被测量进行比较的标准量或它的代表。如果能把被测量与同种类的基准量（单位量）相比较，测量就比较容易进行。例如用尺子测量长度。但是在测量仪表或测量系统中，要保持与被测量同种类的标准量往往是很困难而且也是不必要的。通常只是像长度、电阻、电压、频率这样稳定的物理量能保持在测量系统中作为比较基准。例如，在模拟式仪表中，刻度标尺作为单位量的代表，以长度或角度作为比较基准。在仪表制造阶段，通过标定，把单位量赋予刻度标尺。被测量最终也变换为线位移或角位移与刻度标尺相比较。可见测量的精度取决于仪表所保持的基准量的

精度，仪表中保存高稳定性的基准量是维持仪表高稳定性的重要条件。

通过标准传递体系或高精度仪表对使用中的仪表进行校正，是维持使用中的仪表的精度的一另一途径。在易于取得外界标准的情况下，通过校正来维持精度是有效的方法。智能化仪表就常采用自校正的方法来维持其良好的精度。

二、测量系统输入—输出结构

测量系统一般性输入—输出结构如图1-14所示。

对于输入信号，按所起的作用可以分为三类：有效输入、直接干扰输入、调制干扰输入。

有效输入是我们所要求的被测量，而直接干扰输入和调制干扰输入是对测量系统起干扰作用的影响量。图中的 F_D 是传感器或变换器对有效输入 i_D 的变换函数； F_I 是对直接干扰输入 i_I 的变换函数；调制干扰输入 i_M 通过变换函数 $F_{M \cdot D}$ 和 $F_{M \cdot I}$ 来改变 F_D 和 F_I ，从而使输出受到影响。可见 i_I 和 i_M 是两种不同类型的影响量。

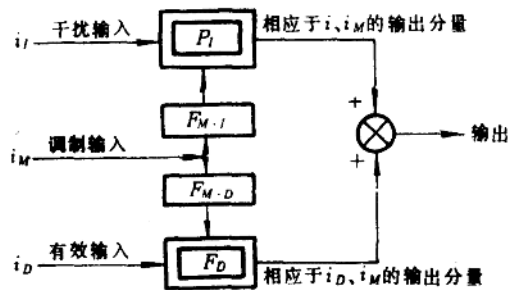


图1-14 一般性输入—输出结构

图1-15是应变计系统受到干扰的例子。

应变片贴于试件上，试件的应变是有效输入。外界交变电场的干扰使在无应变时系统也有输出，可见交变电场干扰是直接干扰输入。测量电桥的电源发生变化将使输入—输出关系改变，所以电源 E_s 的变化

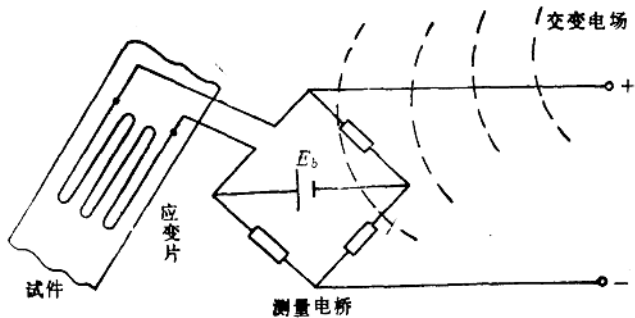


图1-15 应变计系统的干扰输入

可以视为调制干扰输入。由于应变片对温度也敏感，环境温度变化也是一种调制干扰输入。

当测量系统的结构和干扰的方式不同时，消除干扰影响的方法也是不同的。通常采用下述的一些方法来消除直接干扰输入和调制干扰输入的影响。

1. 信号滤波方法 当直接干扰输入信号和调制干扰输入信号在频带上能和有效输入分开时，就可能采用滤波的方法来消除它们的影响。

如图1-15所示应变计系统，若被测量为试件静态受力情况，有效输入信号的频率极低，近似直流，而干扰输入信号是50Hz的交变电场。这种情况下就可以采用低通滤波器来滤除干扰信号。根据测量系统的具体情况，可以采取输入滤波或输出滤波。输入滤波和输出滤波的原理结构如图1-16所示。

滤波可以在输入端进行，也可以在输出端进行，根据干扰输入信号与有效输入信号的频带来选择滤波器的形式。对于图1-15的例子可以在它的输出端进行低通滤波以尽可能的消除50Hz的干扰。在理想情况下，滤波器对于干扰信号的传递系数 $K=0$ ，可完全滤除干扰信号。

2. 反相输入法 当系统不可避免地引入了直接干扰输入信号时, 可以有意地引入一个与直接干扰输入信号反相的附加干扰输入信号, 使二者对系统的作用相互抵消。反相输入方法的原理结构如图1-17所示。

由图1-17可见, 当引入反相干扰信号使得 $O_{I1} = O_{I2}$ 时, 则可完全抵消干扰输入的影响。

为了减少环境温度对动圈式显示仪表的影响, 就可以采用上述方法。如图1-18所示。

环境温度对动圈式显示仪表的影响主要是使动线圈的电阻值 R_{cost} 改变, 因而使分度特性变化。所以环境温度变化是造成干扰的原因, 属于调制干扰输入信号。为了消除这种影响, 可以在动线圈回路中串入一个负温度系数的热敏电阻 R_{comp} 。这时指针的转角, 即指示值与输入信号电压 e_i 的关系为

$$\theta = \left(\frac{e_i}{R_{cost} + R_{comp}} \right) K$$

式中, K 为比例系数。

当环境温度升高时, R_{cost} 增大, R_{comp} 降低。搭配适当可以使 $R_{cost} + R_{comp} = R_{total}$ 不变, 从而使指示值不受环境温度变化的影响。

习惯上将这种引入反相输入抵消干扰输入影响的方法称为补偿法。

3. 计算校正法 若系统的数学模型明确, 能够按照干扰输入计算出它对输出的影响时, 则可以测定干扰输入值并计算其影响, 对输出值加以校正。在利用热电偶作传感器的微机化温度仪表中普遍采用这样的方法来校正热电偶冷端温度的影响。

这里举出的是几种基本的消除干扰输入信号的影响的方法。系统的这种机能就是信号选择机能, 上述消除干扰输入信号影响的基本方法就是实现信号选择功能的基本方法,

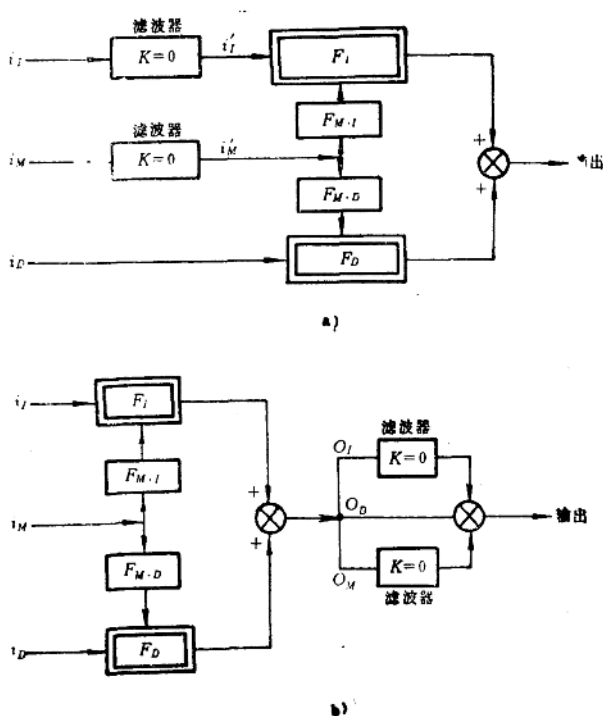


图1-16 输入、输出滤波

a) 输入滤波 b) 输出滤波

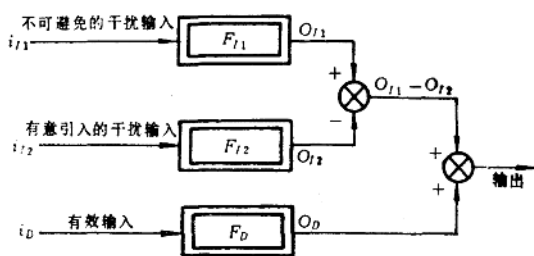
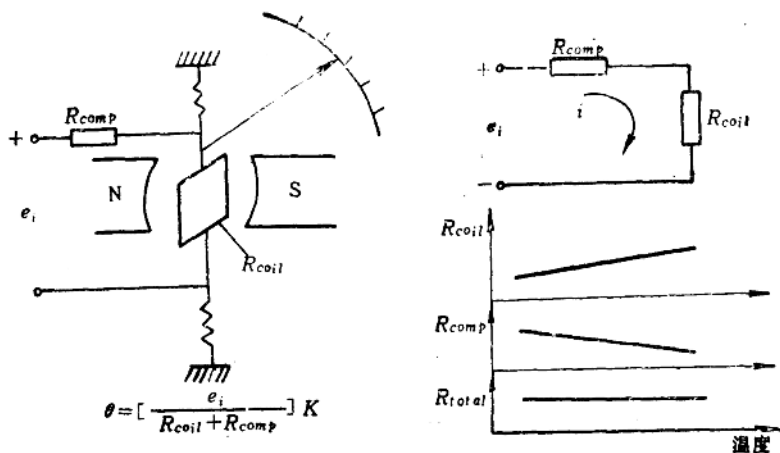


图1-17 反相输入法



$$\theta = \left[\frac{e_i}{R_{coil} + R_{comp}} \right] K$$

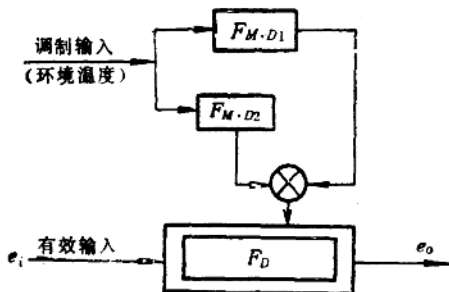


图1-18 动圈式仪表的温度补偿

三、测量系统中的几种基本结构

测量系统是由多个部件或环节构成的，常采用下述几种基本结构形式构成测量系统或测量系统的一个环节。

1. 补偿结构与差动结构 对于一个传感器，成为它的输入量的往往不仅是所需要的被测量，还有一些成为干扰的影响量，例如环境温度的变化等。这里我们不详细区分直接干扰输入和调制干扰输入，而把它们都视为干扰量。因此，一般情况下传感器是多输入单输出系统，如图1-19所示。

若输入量 x_1 是被测量，其他的输入量 x_2 、 x_3 、...、 x_n 就是对测定结果造成影响的干扰量或称影响量。检测系统应当有使输出不受干扰量影响的信号选择功能，补偿结构就是实现这种功能的基本结构型式。图1-20为基本补偿结构型式。

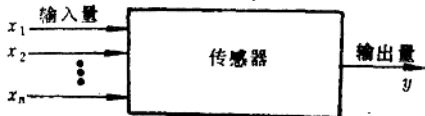


图1-19 传感器的一般输入形式

图中传感器 A 为测量用传感器，被测量 u_1 及干扰量 u_2 为其输入，输入与输出的关系可以表示为

$$y_A = f_A(u_1, u_2) \tag{1-2}$$

当 u_1 和 u_2 有微小变化时，则有

$$y_s = f_s(u_1 + \Delta u_1, u_2 + \Delta u_2) \quad (1-3)$$

图中传感器B为补偿用传感器,使干扰量 u_2 作用于它,并在设定的 u_1 时有

$$y_B = f_B(u_1, u_2) \quad (1-4)$$

当干扰量为 $u_2 + \Delta u_2$ 时,则有

$$y_B = f_B(u_1, u_2 + \Delta u_2) \quad (1-5)$$

所以,补偿结构的输出为

$$\begin{aligned} y &= y_A - y_B \\ &= f_A(u_1 + \Delta u_1, u_2 + \Delta u_2) \\ &\quad - f_B(u_1, u_2 + \Delta u_2) \end{aligned} \quad (1-6)$$

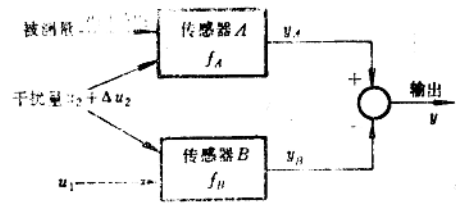


图1-20 基本补偿结构

将式(1-6)按级数展开,并且只考虑到 Δu_1 和 Δu_2 的二次项,则可得到

$$\begin{aligned} y &= f_A(u_1 + u_2) + \frac{\partial f_A}{\partial u_1} \Delta u_1 + \frac{\partial f_A}{\partial u_2} \Delta u_2 \\ &\quad + \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial^2 f_A}{\partial u_1^2} (\Delta u_1)^2 + 2 \frac{\partial^2 f_A}{\partial u_1 \partial u_2} (\Delta u_1, \Delta u_2) + \frac{\partial^2 f_A}{\partial u_2^2} (\Delta u_2)^2 \right\} \\ &\quad - \left\{ f_B(u_1, u_2) + \frac{\partial f_B}{\partial u_2} \Delta u_2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f_B}{\partial u_2^2} (\Delta u_2)^2 \right\} \end{aligned} \quad (1-7)$$

在设计时,使两传感器在 Δu_2 的变化范围中有

$$f_A(u_1, u_2) = f_B(u_1, u_2) \quad (1-8)$$

即使两传感器在干扰量变化范围内特性相同,则有

$$\frac{\partial f_A}{\partial u_2} = \frac{\partial f_B}{\partial u_2}, \quad \frac{\partial^2 f_A}{\partial u_2^2} = \frac{\partial^2 f_B}{\partial u_2^2} \quad (1-9)$$

因此,式(1-7)可简化为

$$y = \frac{\partial f_A}{\partial u_1} \Delta u_1 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f_A}{\partial u_1^2} (\Delta u_1)^2 + \frac{\partial^2 f_A}{\partial u_1 \partial u_2} (\Delta u_1, \Delta u_2) \quad (1-10)$$

由式(1-10)可见,输出 y 中干扰量 Δu_2 的一次项及二次项均消失了,但还存在 $(\Delta u_1, \Delta u_2)$ 的一项。可见采用这种结构可减小 Δu_2 的影响,实现对 Δu_1 的影响的补偿,但补偿不一定是完全的。

如果上述两传感器的传递函数是 u_1 和 u_2 的函数的线性组合的话,即

$$f(u_1, u_2) = \alpha_1 f_1(u_1) + \alpha_2 f_2(u_2) \quad (1-11)$$

则

$$\frac{\partial^2 f}{\partial u_1 \partial u_2} (\Delta u_1, \Delta u_2) = 0 \quad (1-12)$$

故式(1-10)成为

$$y = \frac{\partial f_A}{\partial u_1} \Delta u_1 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f_A}{\partial u_1^2} (\Delta u_1)^2 \quad (1-13)$$

也就是说在这种情况下 Δu_2 的影响可以完全消除,即实现完全补偿。实际上这种情况就是干扰量是直接干扰输入信号,而不是调制干扰输入信号的情况。

如果传感器的传递函数是 u_1 的函数与 u_2 的函数的乘积时,即

$$f(u_1, u_2) = \alpha f_1(u_1) f_2(u_2) \quad (1-14)$$

用上述基本补偿结构是不能实现完全补偿的。在这种情况下,有

$$\begin{aligned} f_A(u_1 + \Delta u_1, u_2 + \Delta u_2) &= \alpha f_1(u_1 + \Delta u_1) f_2(u_2 + \Delta u_2) \\ f_B(u_1 + \Delta u_1, u_2 + \Delta u_2) &= \alpha f_1(u_1) f_2(u_2 + \Delta u_2) \end{aligned} \quad (1-15)$$

若取两传感器的输出的比值作为输出量, 则有

$$y = \frac{f_A(u_1 + \Delta u_1, u_2 + \Delta u_2)}{f_B(u_1, u_2 + \Delta u_2)} = \frac{f_1(u_1 + \Delta u_1)}{f_1(u_1)} \quad (1-16)$$

这种情况下, 在输出 y 中不包含 Δu_2 的影响, 即实现完全补偿。这实际上是干扰量为调制干扰输入的情况。这种补偿方式称为比率补偿, 其结构如图1-21所示。

从上面的分析可见, 利用补偿结构来实现对于干扰量的影响进行补偿时, 必须要有检测干扰量用的补偿传感器, 而且补偿用传感器的特性在干扰量变化范围内应与测定用传感器的特性相一致。但并不要求两传感器在物理结构上一致。

差动结构是补偿结构的特例。图1-22所示为差动结构型式。

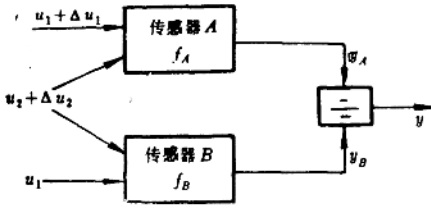


图1-21 比率补偿结构

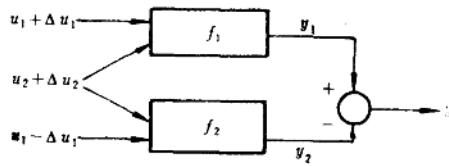


图1-22 差动结构

由图1-22可见, 它与补偿结构的不同点是被测量的变化量 Δu_1 以相反方向作用于两传感器, 因此输出为

$$y = f_1(u_1 + \Delta u_1, u_2 + \Delta u_2) - f_2(u_1 - \Delta u_1, u_2 + \Delta u_2) \quad (1-17)$$

由于差动结构的两传感器常采用对称结构型式, 能较好地保证

$$f_1(u_1, u_2) = f_2(u_1, u_2) \quad (1-18)$$

因此, 可得到

$$y = 2 \frac{\partial f}{\partial u_1} \Delta u_1 + 2 \frac{\partial^2 f}{\partial u_1 \partial u_2} (\Delta u_1 \Delta u_2) \quad (1-19)$$

由式(1-19)可以看到, 差动结构既可实现对干扰量的补偿还提高了灵敏度。因此, 在测量系统中常采用差动结构。

2. 反馈结构 反馈测量系统是常用的测量系统型式。一般反馈测量系统的结构如图1-23所示。

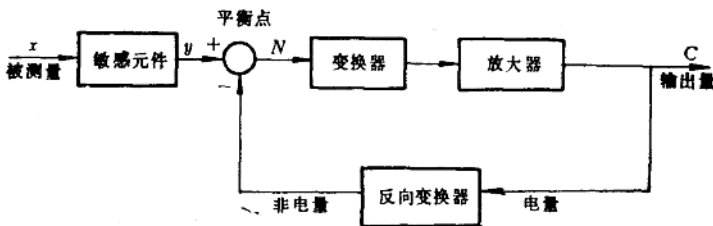


图1-23 反馈测量系统结构

在非电量的检测中, 敏感元件常将被测量变换为力或位移等非电量经变换器变换为电量。系统的输出量一般为电量, 经反向变换器变换为非电量在平衡点与输入进行比较, 其差值由变换器变换为电量放大后输出。