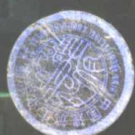


土木工程监测技术

TUMUGONGGCHENG
JIANCETESHU

夏才初 潘国荣 等编著
李永盛 主审

中国建筑工业出版社



土木工程监测技术

夏才初 潘国荣 等编著
李永盛 主 审

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

土木工程监测技术/夏才初等编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2001.7
ISBN 7-112-04632-7

I. 土… II. 夏… III. 土木工程-工程施工-监测 IV. TU712

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 26591 号

本书内容包括监测技术基础知识、建筑工程、岩石隧道工程、软土隧道工程 (盾构、顶管等)、道路工程、边坡工程等的施工监测和长期监测, 以及地质雷达技术在土木工程中的应用。详细介绍各种监测项目的原理、方法、仪器仪表、测点布设技术以及各种土木工程的监测要求。重点论述各种土木工程中所需进行的监测项目的确定、监测手段的选择、仪器仪表量程和精度的确定、监测频度和预警值的确定, 以及预警制度等监测规划大纲制订中的重要技巧。

本书是从事土木工程监测技术的工程人员, 以及从事土木工程的设计、监理等科技人员的重要工具书, 也可作为土木工程监测技术培训班的教材和相关专业研究生和本科生的选修课教材。

* * *

责任编辑 郦锁林

土木工程监测技术

夏才初 潘国荣 等编著

李永盛 主审

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京云浩印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 19 $\frac{1}{4}$ 字数: 477 千字

2001 年 7 月第一版, 2001 年 7 月第一次印刷

印数: 1—4000 册 定价: 25.00 元

ISBN 7-112-04632-7
TU·4149 (10082)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

土木工程都建造在岩土介质之上或之中，在施工过程中必须进行动态监测，实行信息化施工，提供反馈信息，从而指导施工和修改设计，以确保工程安全。重要工程在竣工后还需进行长期监测。随着人们对土木工程施工中监测重要性认识的深入，以及国家有关法规的实施，土木工程监测已越来越成为继勘察、设计、施工、监理之后的又一个产业。本书内容包括房屋建筑工程、基坑工程、岩石隧道工程、软土隧道工程（盾构、顶管等）、道路工程、边坡工程等工程的施工监测和长期监测，以及地质雷达技术在土木工程中的应用。详细介绍各种监测项目的原理、方法、仪器仪表、测点布设技术以及各种土木工程的监测要求。重点论述各种土木工程中所需进行的监测项目的确定、监测手段的选择、仪器仪表量程和精度的确定、监测频度和预警值的确定，以及预警制度等监测规划大纲制订中的重要技巧。既体现有关标准、规程和规范，也融入大量的最新科研成果和经验资料。

土木工程监测技术是一门综合性很强的技术，它是以土力学、岩体力学、钢筋混凝土力学及土木工程设计理论和方法等学科为理论基础，以仪器仪表、传感器、计算机、测试技术等学科为技术支持，同时还融合土木工程施工工艺和积累的工程实践经验。

本书是在同济大学于1999年12月和2000年10月举办的两期土木工程监测技术培训班讲义基础上编辑成书的。全书由夏才初主持编著，李永盛主审。第一、三、四、五章和第十章第三节由夏才初编著，第二、六章和第十章第一节由潘国荣编著，第七章由石振明编著，第八章由张雷编著，第九章由谢雄耀、万明浩编著，第十章第二节由赵挺生、夏才初编著。在本书的编著过程中特别注重介绍近几年在国内工程建设中得到广泛应用并获得成功的新元件、新仪器、新技术和新方法，并尽可能吸收国内外在该领域的最新成果。其中相当一部分内容是全体作者结合所承担的国家重要科研或工程监测与咨询任务积累的经验成果，反映了全体作者及其所属学科组在该领域的研究水平和特色。本书是从事土木工程监测的技术人员，以及从事土木工程的设计、监理等科技人员必备的工具书，也是土木工程各学科师生的重要参考书。

限于我们的水平，书中不当之处在所难免，敬请读者批评指正。

目 录

第一章 监测技术基础知识	1
第一节 测试系统的组成和特性	1
第二节 测试系统的静态传递特性	5
第三节 传感器原理	7
第四节 测试系统选择的原则与标定	23
第二章 工程建筑物变形监测	27
第一节 概述	27
第二节 变形监测的周期及其精度要求	30
第三节 常用变形监测仪器简介	32
第四节 高程控制网的建立及沉降监测	46
第五节 变形监测平面控制网的建立	49
第六节 位移监测方法	52
第七节 倾斜监测	58
第八节 建筑物裂缝与挠度监测	60
第九节 变形监测实例	62
第三章 基坑工程施工监测	73
第一节 概述	73
第二节 监测仪器和方法	75
第三节 监测方案设计	94
第四节 监测报表与监测报告	103
第五节 基坑工程施工监测实例	105
第四章 岩石隧洞工程信息化施工监测	114
第一节 岩石隧洞工程信息化施工	114
第二节 岩石隧洞监测的项目和方法	115
第三节 监测方案设计	123
第四节 监测数据的分析处理	131
第五节 工程实例	132
第五章 地铁盾构隧道施工监测	142
第一节 盾构隧道监测的意义和目的	142
第二节 盾构隧道监测的项目和方法	143
第三节 盾构隧道监测方案的设计	145
第四节 盾构隧道施工监测实例	151
第五节 顶管法隧道施工监测及实例	158

第六章 地铁盾构施工贯通监控技术	164
第一节 引言	164
第二节 地铁隧道贯通的误差来源及不同阶段误差限值分配	164
第三节 影响贯通的各个环节及精度控制	166
第四节 如何提高地下导线的精度	174
第五节 测有多个陀螺方位角地下导线的平差及精度分析	177
第六节 地下导线随盾构推进逐段接测中的可靠性检验	179
第七节 多维粗差的逐步剔除	183
第七章 边坡工程监测	186
第一节 边坡工程监测的目的	186
第二节 边坡工程监测的特点、内容和技术手段	187
第三节 监测方案设计	197
第四节 监测实施和监测资料汇总及分析	199
第五节 工程实例	204
第八章 软土路基的沉降与稳定监测	214
第一节 监测方案	214
第二节 资料分析	223
第三节 软土路基沉降与稳定监测实例	227
第九章 地质雷达技术及其在工程中的应用	245
第一节 地质雷达方法原理及特点	245
第二节 地质雷达仪器及其发展	246
第三节 地质雷达数据采集的最优化分析	247
第四节 地质雷达图像的数字处理技术	255
第五节 地质雷达图像解释的研究	263
第六节 地质雷达技术在土木工程施工中的应用	270
第十章 其 他	281
第一节 GPS 全球定位系统及其在变形监测中的应用	281
第二节 声发射监测技术及其应用	288
第三节 大体积混凝土施工温度监控技术	298
附录 各种传感器性能指标	302
参考文献	307

第一章 监测技术基础知识

第一节 测试系统的组成和特性

随着现代科学技术的迅猛发展和生产水平的提高，各种测试技术已越来越广泛地应用于各种工程领域和科研工作中，测试技术水平的高低越来越成为衡量国家科技现代化的重要标志之一。当代测试技术的作用主要体现在四个方面：

- (1) 各种参数的测定；
- (2) 自动化过程中参数的反馈、调节和自控；
- (3) 现场实时检测和监控；
- (4) 试验过程中的参数测量和分析。

当代科技水平的不断发展，为测试技术水平的提高创造了物质条件，反过来，拥有高水平的测试理论和测试系统又会促进科技成果的不断发现和创新。当前，随着半导体技术的新的突破和大规模集成电路构成的微处理器的出现，测试技术越来越朝着高精度、小型化和智能化方向发展，新型传感器的研制也是当代测试技术的重要发展内容。

只有对测试系统有一个完整的了解，才能按照实际需要设计或配置出一个有效的测试系统，以达到实际测试目的。按照信号传递方式来分，常用的测试系统可分为模拟式测试系统和数字式测试系统。

一、测试系统的组成

一个测试系统可以由一个或若干个功能单元组成。如图 1-1 是一个完整的力学测试系统，它由四大部分组成：荷载系统、传感器、信号变换与测量电路、显示记录系统以及数据处理和打印机等外围设备。若要以最佳方案完成测试任务，就应该对整套测试系统的各个功能单元作全面和综合的考虑。当然，根据测试目的和要求不同，可以只有其中的一两个部分，如弹簧称，只有一根弹簧和刻度尺，它包含了传感、测量和显示等功能。如图 1-2 所示的直剪试验计算机辅助测试系统，则是一个复杂的多单元测试系统。

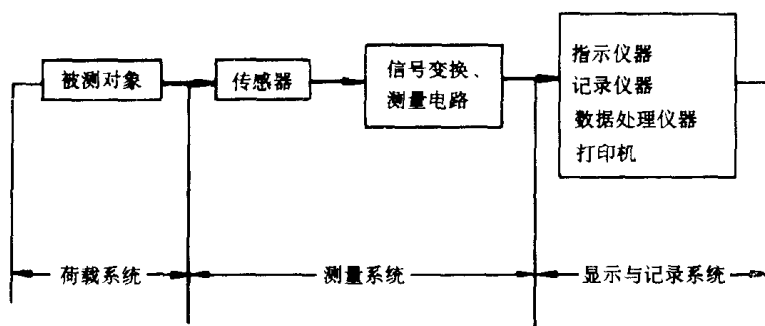


图 1-1 测试系统的组成

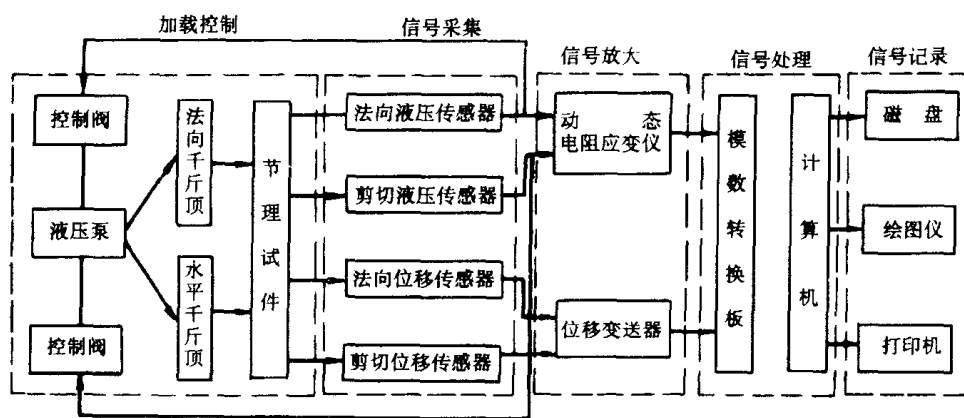


图 1-2 直剪试验计算机辅助测试系统框图

1. 荷载系统

荷载系统是使被测对象处于一定的受力状态下，使与被测对象（试件）有关的力学量之间的联系充分显露出来，以便进行有效测量的一种专门系统。测定岩石及结构面力学性质的直剪试验系统中的直剪试验架和液压控制系统就是一个荷载系统。它由直剪试验架、液压控制系统组成，液压泵提供施加到试件上的荷载，液压控制系统则使荷载按一定速率平稳地施加，并在需要时保持其恒定，从而使试件处于一定法向应力水平下进行剪切试验。在土木工程中，荷载是通过施工和开挖等工程活动施加的。

2. 测量系统

测量系统由传感器和测量电路组成，它把被测量（如力、位移）通过传感器变成电信号，经过后接仪器的变换、放大、运算，变成易于处理和记录的信号。传感器是整个测试系统中采集信息的关键环节，它的作用是将被测非电量转换成便于放大、记录的电量，所以，有时称传感器为测试系统的一次仪表，其余部分为二次仪表或三次仪表。直剪试验系统中，需要观察在不同法向应力水平下，试件在剪切过程中，法向和剪切方向的力和位移的变化。采用四支位移传感器分别测量试件在法向和剪切方向的位移，采用两只液压传感器分别测量试件在法向和剪切方向的荷载。其中，用荷载传感器和动态电阻应变仪组成力的测量系统，用位移传感器和位移变送器组成位移测量系统。动态电阻应变仪和位移变送器内的中间变换和测量电路中通常有电桥电路、放大电路、滤波电路及调频电路等。所以测量系统是根据不同的被测参量，选用不同的传感器和后接仪器组成的测量环节。不同的传感器要求与其相匹配的后接仪器。

3. 信号处理系统

信号处理系统是将测量系统的输出的信号进一步进行处理以排除干扰，或输出不同的物理量，如对位移量的一次微分得到速度，二次微分得到加速度。图 1-2 中，计算机中需设计智能滤波等软件，以排除测量系统中的噪声干扰和偶然波动。以提高所获得信号的置信度。对模拟电路则要用专门的仪器或电路如滤波器等。

4. 显示和记录系统

显示和记录系统是测试系统的输出环节，它是将对被测对象所测得的有用信号及其变

化过程显示或记录（或存储）下来，数据显示可以用各种表盘、电子示波器和显示屏来实现，而数据记录则可采用函数记录仪、光线示波器、磁盘等设备来实现，直剪试验计算机辅助测试系统中，以微机屏幕、打印机和绘图仪等作为显示记录设备。

二、测试系统的主要性能指标

测试系统的主要性能指标有精确度、稳定性、测量范围（量程）、分辨率和传递特性等。测试系统的主要性能指标是经济合理地选择测试系统时所必须明确提出的指标。

1. 测试系统的精度和误差

测试系统的精度是指测试系统给出的指示值和被测量的真值的接近程度。精度与误差是同一概念的两种不同表示方法。通常，测试系统的精度越高，其误差越低，反之，精度越低，则误差越大。实际中，常用测试系统相对误差和引用误差的大小来表示其精度的高低。

$$\text{绝对误差:} \quad \Delta_x = x - A_0 \quad (1-1a)$$

$$\text{相对误差:} \quad \gamma_x = \frac{x - A_0}{A_0} \times 100\% \quad (1-1b)$$

$$\text{引用误差:} \quad \gamma_y = \frac{x - A_0}{X_m} \times 100\% \quad (1-1c)$$

式中 x ——仪器指示值；

A_0 ——真值；

X_m ——仪器测量上限。

绝对误差越小，则说明测量结果越接近被测量的真值。实际上，真值是难于确切测量的，因此，常用更高精度的仪器测得的值 X_0 代替真值（叫约定真值）。在使用引用误差表示测试仪器的精度时，应尽量避免仪器在靠近测量下限的 $1/3$ 量程内工作，以免产生较大的相对误差。

相对误差可用来比较同一仪器不同测量结果的准确程度，但不能用来衡量不同仪表的质量好坏，或不能用来衡量同一仪表当不同量程时的质量。因为对同一仪表在整个量程内，其相对误差是一个变值，随着被测量量程的减少，相对误差是增大的，则精度随之降低。当被测量值接近到量程起始零点时，相对误差趋于无限大。实际中，常以引用误差来划分仪表的精度等级，可以较全面地衡量测量精度。

2. 稳定性

仪器示值的稳定性有两种指标。一是时间上稳定性，以稳定度表示。二是仪器外部环境和工作条件变化所引起的示值不稳定性，以各种影响系数表示。

(1) 稳定性 它是由于仪器中随机性变动、周期性变动、漂移等引起的示值变化。一般用精密度的数值和时间长短同时表示。例如每 8h 内引起电压的波动为 1.3mV，则写成稳定度为 $\delta_s = 1.3\text{mV}/8\text{h}$ 。

(2) 环境影响 是指仪器工作场所的环境条件，诸如室温、大气压、振动等外部状态以及电源电压、频率和腐蚀气体等因素对仪器精度的影响，统称环境影响，用影响系数表示。例如周围介质温度变化所引起的示值变化，可以用温度系数 β_t （示值变化/温度变化）来表示。电源电压变化所引起的示值变化，可以用电源电压系数 β_u （示值变化/电压变化率）来表示。如 $\beta_u = 0.02\text{mA}/10\%$ ，表示电压每变化 10% 引起示值变化 0.02mA。

3. 测量范围（量程）

系统在正常工作时所能测量的最大量值范围，称为测量范围，或称量程。在动态测量时，还需同时考虑仪器的工作频率范围。

4. 分辨率

分辨率是指系统能够检测到的被测量的最小变化值，也叫灵敏阈。若某一位移测试系统的分辨率是 $0.5\mu\text{m}$ ，则当被测的位移小于 $0.5\mu\text{m}$ 时，该位移测试系统将没有反应。通常要求测定仪器在零点和 90% 满量程点的分辨率，一般来说，分辨率的数值愈小愈好。

5. 传递特性

传递特性是表示测量系统输入与输出对应关系的性能。了解测量系统的传递特性对于提高测量的精确性和正确选用系统或校准系统特性是十分重要的。

对不随时间变化（或变化很慢而可以忽略）的量的测量叫静态测量；对随时间而变化的量的测量叫做动态测量。与此相应，测试系统的传递特性分为静态传递特性和动态传递特性。描述测试系统静态测量时输入-输出函数关系的方程、图形、参数称为测试系统的静态传递特性。描述测试系统动态测量时的输入-输出函数关系的方程、图形、参数称为测试系统的动态传递特性。作为静态测量的系统，可以不考虑动态传递特性；而作为动态测量的系统，则既要考虑动态传递特性，又要考虑静态传递特性；因为测试系统的精度很大程度上与其静态传递特性有关。

三、线性系统

为达到不同测试目的可组成各种不同功能的测试系统，这些系统所具有的主要功能是应保证系统的输出能精确地反映输入。对于一个理想的测试系统应该具有确定的输入-输出关系，其中以输出与输入成线性关系时为最佳，即理想的测试系统应当是一个时不变线性系统。

若系统的输入 $x(t)$ 和输出 $y(t)$ 之间关系可以用常系数线性微分方程式来表示，则该系统称为线性时不变系统，简称线性系统，这种线性系统的方程的通式为：

$$\begin{aligned} & a_n y^n(t) + a_{n-1} y^{n-1}(t) + \cdots + a_1 y^1(t) + a_0 y(t) \\ & = b_m x^m(t) + b_{m-1} x^{m-1}(t) + \cdots + b_1 x^1(t) + b_0 x(t) \end{aligned} \quad (1-2)$$

式中 $y^n(t)$ 、 $y^{n-1}(t)$ 、 $y^1(t)$ ——分别是输出 $y(t)$ 的各阶导数；

$x^n(t)$ 、 $x^{n-1}(t)$ 、 $x^1(t)$ ——分别是输入 $x(t)$ 的各阶导数。

a_n 、 a_{n-1} 、 $\cdots$ 、 a_0 和 b_m 、 b_{m-1} 、 $\cdots$ 、 b_0 为常数，与测量系统特性和输入状况和测试点分布等因素有关。

从式 (1-2) 可以看到，线性方程中的每一项都不包含输入 $x(t)$ 、输出 $y(t)$ 以及它们的各阶导数的高次幂和它们的乘积，此外其内部参数也不随时间的变化而变化，信号的输出与输入和信号加入的时间无关。

在研究线性测试系统时，对系统中的任一环节（如传感器、运算电路等）都可简化为

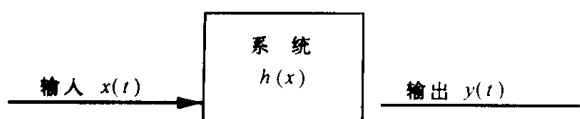


图 1-3 系统、输入与输出

一个方框图，并用 $x(t)$ 表示输入量， $y(t)$ 表示输出量， $h(t)$ 表示系统的传递关系，则三者之间的关系可用图 1-3 表示。 $x(t)$ 、 $y(t)$ 和 $h(t)$ 是三个具有确定关系的量，当已知其中任何两

个量,即可求第三个量,这便是工程测试中常常需要处理的实际问题。

第二节 测试系统的静态传递特性

一、静态方程和标定曲线

当测试系统处于静态测量时,输入量 x 和输出量 y 不随时间而变化,因而输入和输出的各阶导数等于零,式 (1-2) 将变成代数方程:

$$y = \frac{a_0}{b_0} x = Sx \quad (1-3)$$

上式称为系统的静态传递特性方程 (简称静态方程),斜率 S (也称标定因子) 是常数。表示静态 (或动态) 方程的图形称为测试系统的标定曲线 (又称特性曲线,率定曲线、定度曲线)。在直角坐标系中,习惯上,标定曲线的横坐标为输入量 x (自变量),纵坐标为输出量 y (因变量)。图 1-4 是标定曲线实例及其相应的曲线方程。图 1-4 (a) 输出与输入成线性关系,是理想状态,而其余的三条曲线则可看成是线性关系上叠加了非线性的高次分量。其中 c 图是只包含 x 的奇次幂的标定曲线,是较为合适的,因为它在零点附近有一段对称的而且很近似于直线的线段, b 、 d 两图的曲线则是不合适的。

标定曲线是反映测试系统输入 x 和输出 y 之间关系的曲线,一般情况下,实际的输出-输入关系曲线并不完全符合理论所要求的理想线性关系。所以,定期标定测试系统的标定曲线是保证测试结果精确可靠的必要措施。对于重要的测试,需在进行测试前、后都对测试系统进行标定,当测试前、后的标定结果的误差在容许的范围内时,才能确定测试结果有效。

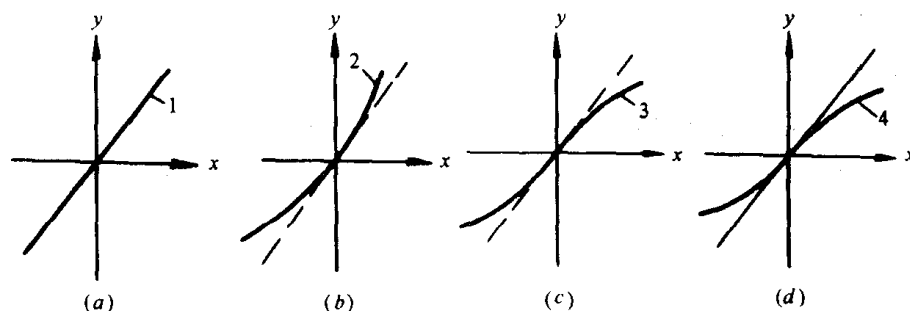


图 1-4 标定曲线的种类

(a) 曲线方程 $y = a_0 x$; (c) 曲线方程 $y = a_0 x + a_2 x^3 + a_4 x^5$;

(b) 曲线方程 $y = a_0 x + a_1 x^2 + a_3 x^4$; (d) 曲线方程 $y = a_0 x + a_1 x^2 + a_2 x^3 + a_3 x^4$

求取静态标定曲线,通常以标准量作为输入信号并测出对应的输出,将输入与输出数据绘制成散点图,再用统计法求出一条输入-输出曲线。标准量的精度应较被标定的系统的精度高一个数量级。

二、测试系统的主要静态特性参数

根据标定曲线便可以分析测试系统的静态特性。描述测试系统静态特性的参数主要有灵敏度、线性度 (直线度)、回程误差 (滞迟性)。

1. 灵敏度

对测试系统输入一个变化量 Δx ，就会相应地输出另一个变化量 Δy ，则测试系统的灵敏度为：

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-4)$$

对于线性系统，由式 (1-3) 可知： $S = \frac{a_0}{b_0} = \text{Const}$ ，即线性系统的测量灵敏度为常数。

无论是线性系统还非线性系统，灵敏度 S 都是系统特性曲线的斜率。若测试系统的输出和输入的量纲相同，则常用“放大倍数”代替“灵敏度”，此时，灵敏度 S 无量纲。但输出与输入是可以具有不同量纲的。例如某位移传感器的位移变化 1mm 时，输出电压的变化有 300mV，则其灵敏度 $S = 300\text{mV/mm}$ 。

2. 线性度（直线度）

标定曲线与理想直线的接近程度称为测试系统的线性度，如图 1-5 (b)。它是指系统的输出与输入之间是否保持理想系统那样的线性关系的一种量度。由于系统的理想直线无法获得，在实际中，通常用一条反映标定数据的一般趋势而误差绝对值为最小的直线作为参考理想直线代替理想直线。

若在系统的标称输出范围（全量程） A 内，标定曲线与参考理想直线的最大偏差为 B ，则线性度 δ_l 可用下式表示：

$$\delta_l = \frac{B}{A} \times 100\% \quad (1-5)$$

参考理想直线的确定方法目前尚无统一的标准，通常的做法是：取过原点，与标定曲线间的偏差的均方值为最小的直线，即最小二乘拟合直线为参考理想直线，以该直线的斜率的倒数作为名义标定因子。

3. 回程误差

回程误差指在相同测试条件下和全量程范围 A 内，当输入由小增大和由大减小的行程中，如图 1-5 (c)，对于同一输入值所得到的两个输出值之间的最大差值 $h_{\max}$ 与量程 A 的比值的百分率，即：

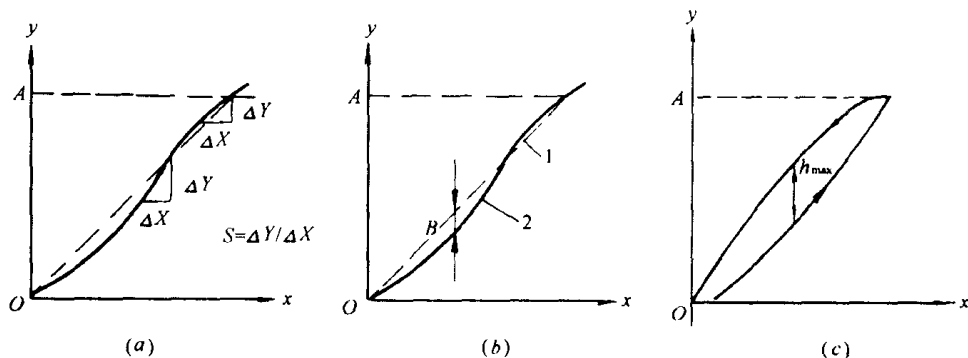


图 1-5 测试系统的主要静态特性参数图析

(a) 灵敏度；(b) 线性度；(c) 回程误差

$$\delta_h = \frac{h_{\max}}{A} \times 100\% \quad (1-6)$$

回程误差是由滞后现象和系统的不工作区（即死区）引起的。前者在磁性材料的磁化过程和材料受力变形的过程中产生，后者是指输入变化时输出无相应变化的范围，机械摩擦和间隙是产生死区的主要原因。

第三节 传感器原理

在土木工程中，所需测量的物理量大多数为非电量，如位移、压力、应力、应变等等。为使非电量能用电测方法来测定和记录，必须设法将它们转换为电量，这种将被测物理量直接转换为相应的容易检测、传输或处理的信号的元件称为传感器，也称换能器、变换器或探头。

根据《传感器的命名法及代号》GB7666—87 的规定，传感器的命名应由主题（传感器）前面加四级修饰词：主要技术指标—特征描述—变换原理—被测量，例如，100mm 应变式位移传感器。但在实际应用中可采用简称，即可省略四级修饰词中的任一级，但第一级修饰词（被测量）不可省略，例如，可简称电阻应变式位移传感器、荷重传感器等。传感器一般可按被测量的物理量、变换原理和能量转换方式分类，按变换原理分类如：电阻式、电容式、差动变压器式、光电式等来分，这种分类易于从原理上识别传感器的变换特性，对每一类传感器应配用的测量电路也基本相同。按被测量的物理量分类如：位移传感器、压力传感器、速度传感器等。

一、应力计和应变计

应力计和应变计是土木工程测试中常用的两类传感器，其主要区别是测试敏感元件与被测物体的相对刚度的差异。具体说明如下：

图 1-6 所示的系统，系由两根相同的弹簧将一块无重量的平板与地面相连接所组成，弹簧常数均为 k ，长度为 l_0 ，设有力 P 作用在板上，将弹簧压缩至 l_1 ，如图 1-6 (b) 所示，则：

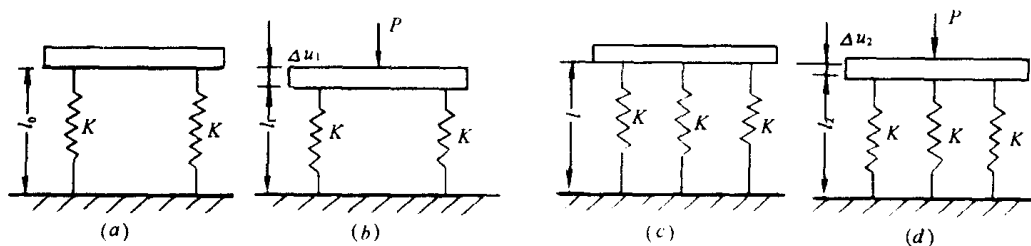


图 1-6 应力计和应变计原理

(a) 初始状态；(b) 受力 P 作用后；(c) 初始状态下放置测试元件；
(d) 放置测试元件后受力 P 的作用

$$\Delta u_1 = \frac{P}{2k} \quad (1-7)$$

如果想用一个测量元件来测量未知力 P 和压缩变形 Δu_1 ，在两根弹簧之间放入弹簧常数为 K 的元件弹簧，则其变形和压力为：

$$\Delta u_2 = \frac{P}{2k + K} \quad (1-8)$$

$$P_2 = K\Delta u_2 \quad (1-9)$$

式中 P_2 、 Δu_2 ——分别是元件弹簧所受的力和位移。

将式 (1-7) 代入式 (1-8) 有：

$$\Delta u_2 = \frac{2k\Delta u_1}{2k + K} = \Delta u_1 \frac{1}{1 + \frac{K}{2k}} \quad (1-10)$$

将式 (1-8) 代入式 (1-9) 有：

$$P_2 = K \frac{P}{2k + K} = P \frac{1}{1 + \frac{2k}{K}} \quad (1-11)$$

在式 (1-10) 中，若 K 远小于 k ，则 $\Delta u_1 = \Delta u_2$ ，说明弹簧元件加进前后，系统的变形几乎不变，弹簧元件的变形能反映系统的变形，因而可看作一个测长计，把它测出来的值乘以一个标定常数，可以指示应变值，所以它是一个应变计。

在式 (1-11) 中，若 k 远小于 K ，则 $P_2 = P$ ，说明弹簧元件加进前后，系统的受力与弹性元件的受力几乎一致，弹簧元件的受力能反映系统的受力，因而可看作一个测力计，把它测出来的值乘以一个标定常数，可以指示应力值，所以它是一个应力计。

在式 (1-10) 和式 (1-11) 中，若 $K \approx 2k$ ，即弹簧元件与原系统的刚度相近，加入弹簧元件后，系统的受力和变形都有很大的变化，则既不能做应力计，也不能做应变计。

上述结果，也很容易从直观的力学知识来解释，如果弹簧元件比系统刚硬很多，则 P 力的绝大部分就由元件来承担，因此，元件弹簧所受的压力与 P 力近乎相等，在这种情况下，该弹簧元件适合于做应力计。另一方面，如果弹簧元件比系统柔软很多，它将顺着系统的变形而变形，对变形的阻抗作用很小，因此，元件弹簧的变形与系统的变形近乎相等，在这种情况下，该弹簧元件适合于做应变计。

二、电阻式传感器

电阻式传感器是把被测量如位移、力等参数转换为电阻变化的一种传感器，按其工作原理可分为电阻应变式、电位计式、热电阻式和半导体热能电阻传感器等，电阻应变式传感器是根据电阻应变效应先将被测量转换成应变，再将应变量转换成电阻，所以也是电阻式传感器的一种，其使用特别广泛。

电阻应变式传感器的工作原理是基于电阻应变效应，其结构通常由应变片、弹性元件和其它附件组成。在被测拉压力的作用下，弹性元件产生变形，贴在弹性元件上的应变片产生一定的应变，由应变仪读出读数，再根据事先标定的应变-力对应关系，即可得到被测力的数值。

弹性元件是电阻应变式传感器必不可少的组成环节，其性能好坏是保证传感器质量的关键。弹性元件的结构形式是根据所测物理量的类型、大小、性质和安放传感器的空间等因素来确定的。

1. 测力传感器

测力传感器常用的弹性元件形式有柱式（杆式）、环式和梁式等。

(1) 柱（杆）式弹性元件 其特点是结构简单、紧凑，承载力大。主要用于中等荷载和大荷载的测力传感器。其受力状态比较简单，在轴力作用下，同一截面上所产生的轴向应变和横向应变符号相反。各截面上的应变分布比较均匀。应变片一般贴于弹性元件中部。图 1-7 拉压力传感器结构示意图，图 1-8 是荷重传感器结构示意图。

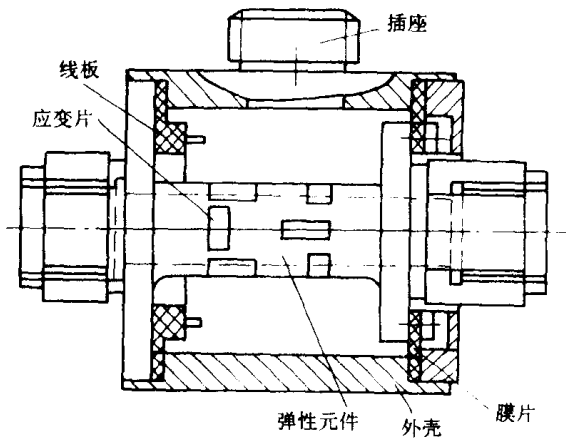


图 1-7 拉压力传感器

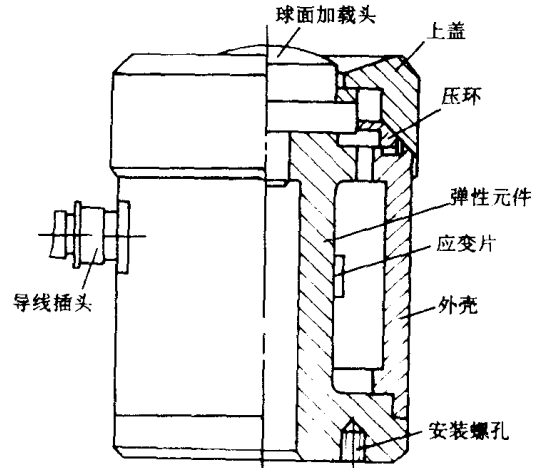


图 1-8 荷重传感器结构

(2) 环式弹性元件 其特点是结构简单、自振频率高、坚固、稳定性好。主要用于中小载荷的测力传感器。其受力状态比较复杂，在弹性元件的同一截面上将同时产生轴向力、弯矩和剪力，并且应力分布变化大。应变片应贴于应变值最大的截面上。

(3) 梁式弹性元件 其特点是结构简单、加工方便，应变片粘贴容易且灵敏度高。主要用于小载荷、高精度的拉压力传感器。梁式弹性元件可做成悬臂梁、铰支梁和两端固定式等不同的结构形式，或者是它们的组合。其共同特点是在相同力的作用下，同一截面上与该截面中性轴对称位置点上所产生的应变大小相等而符号相反。应变片应贴于应变值最大的截面处，并在该截面中性轴的对称表面上同时粘贴应变片，一般采用全桥接片以获得最大输出。

2. 位移传感器

用适当形式的弹性元件，贴上应变片也可以测量位移，测量的范围可从 0.1 ~ 100mm。弹性元件有梁式、弓式和弹簧组合式等。位移传感器的弹性元件要求刚度小，以免对被测构件形成较大反力，影响被测位移。图 1-9 是双悬臂式位移传感器或夹式引伸计及其弹性元件，根据弹性元件上距固定端为 x 的某点的应变读数 ϵ ，即可测定自由端的位移 f 为：

$$f = \frac{2l^3}{3hx}\epsilon \quad (1-12)$$

弹簧组合式传感器多用于大位移测量，如图 1-10，当测点位移传递给导杆后使弹簧伸长，并使悬臂梁变形，这样从应变片读数可测得测点位移 f ，经分析两者之间的关系为：

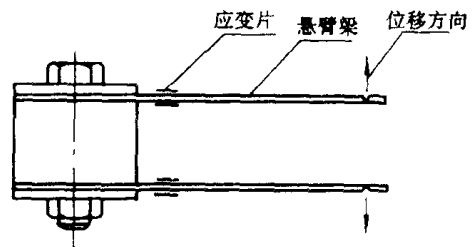


图 1-9 双悬臂式位移传感器

$$f = \frac{(k_1 + k_2)l^3}{6k_2(l - l_0)}\epsilon \quad (1-13)$$

式中 k_1 、 k_2 ——分别为悬臂梁与弹簧的刚度系数。

在测量大位移时， k_2 应选得较小，以保持悬臂梁端点位移为小位移。

3. 液压传感器

液压传感器有膜式、筒式和组合式等，测量范围从 0.1kPa 到 100MPa。膜式传感器是在周边固定的金属膜片上贴上应变片，当膜片承受流体压力产生变形时，通过应变片测出流体的压力。周边固定，受有均布压力的膜片，其切向及经向应变的分布如图 1-11 所示，图中 ϵ_t 为切向应变， ϵ_r 为经向应变，在圆心处 $\epsilon_t = \epsilon_r$ 并达到最大值。

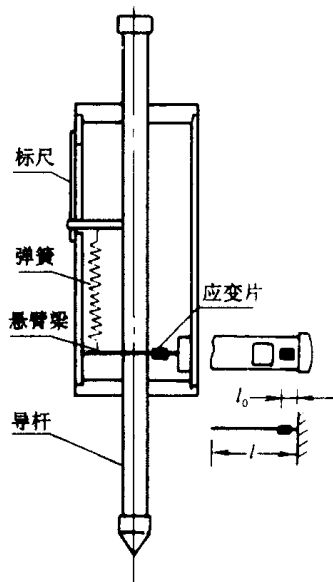


图 1-10 弹簧组合式传感器

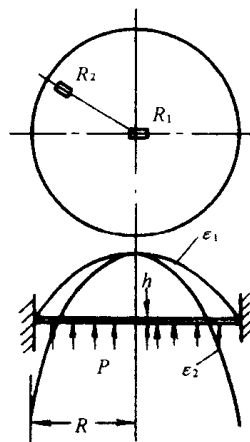


图 1-11 膜式压强传感器膜片上的应变分布

$$\epsilon_{t\max} = \epsilon_{r\max} = \frac{3(1 - \mu^2)}{8E} \frac{pR^2}{h} \quad (1-14)$$

在边缘处切向应变 ϵ_t 为零，经向应变 ϵ_r 达到最小值：

$$\epsilon_{r\min} = -\frac{3(1 - \mu^2)}{4E} \frac{pR^2}{h} \quad (1-15)$$

根据膜片上应变分布情况，可按图 1-11 所示的位置贴片， R_1 贴于正应变区， R_2 贴于负应变区，组成半桥（也可用四片组成全桥）。

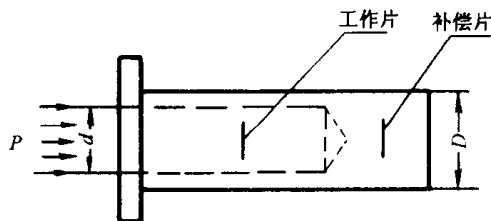


图 1-12 筒式压强传感器

筒式压强传感器的圆筒内腔与被测压力连通，当筒体内受压力作用时，筒体产生变形，应变片贴在筒的外壁，工作片沿圆周贴在空心部分，补偿片贴在实心部分如图 1-12 所示。圆筒外壁的切向应变为：

$$\epsilon_t = \frac{P(2 - \mu)}{E(n^2 - 1)} \quad (1-16)$$

式中 n ——筒的外径与内径之比 D/d 。

对应薄壁筒，可按下式计算：

$$\epsilon_t = \frac{Pd}{SE}(1 - 0.5\mu) \quad (1-17)$$

式中 S ——筒的外径与内径之差。

这种形式的传感器可用于测量较高的液压。

4. 压力盒

电阻应变片式压力盒也采用膜片结构，它是将转换元件（应变片）贴在弹性金属膜片式传力元件上，当膜片感受外力变形时，将应变传给应变片，通过应变片输出的电信号测出应变值，再根据标定关系算出外力值。图 1-13 是应变片式压力盒的构造。

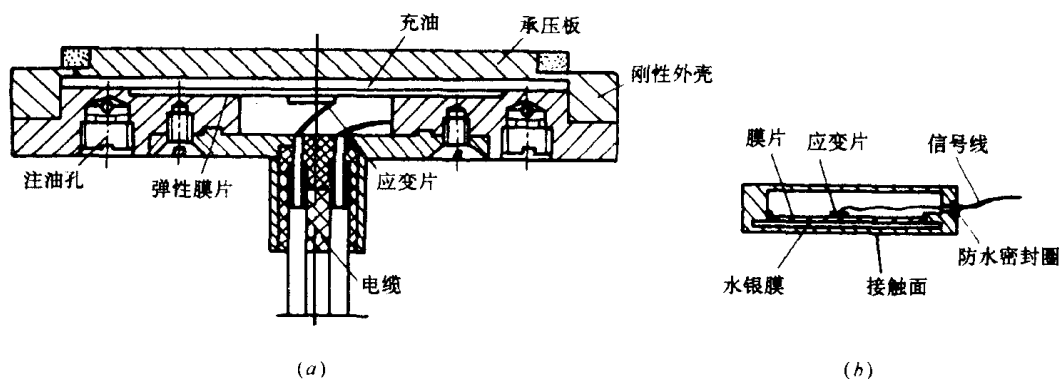


图 1-13 应变片式压力盒的构造
(a) 接触式压力盒；(b) 埋入式压力盒

5. 热电阻温度计

热电阻温度计是利用某些金属导体或半导体材料的电阻率随温度变化而变化（或增大或减小）的特性，制成各种热电阻传感器，用来测量温度，达到温度变化转换成电量变化的目的，因而，热电阻传感器一般是温度计。金属导体的电阻和温度的关系可用下式表示：

$$R_t = R_0(1 + \alpha \Delta t)$$

式中 R_t 、 R_0 ——温度为 $t^\circ\text{C}$ 和 $t_0^\circ\text{C}$ 时的电阻值；

$\Delta t = t - t_0$ ——温度的变化值；

α ——温度在 $t_0 \sim t$ 之间金属导体的平均电阻温度系数。

电阻温度系数 α 是温度每变化一度时，材料电阻的相对变化值。 α 越大，电阻温度计越灵敏。因此，制造热电阻温度计的材料应具有较高、较稳定的电阻温度系数和电阻率，在工作温度范围内物理和化学性质稳定。常用的热电阻材料有铂、铜、铁等，其中铜热电阻常用来测量 $-50^\circ\text{C} \sim 180^\circ\text{C}$ 范围内的温度。可用于各种场合的温度测量，如大型建筑物厚底板温差控制测量等。其特点是，电阻与温度呈线性关系，电阻温度系数较高，机械性能好，价格便宜。缺点是体积大，易氧化，不适合工作于腐蚀性介质与高温下。图 1-14 (a) 是铜电阻温度计结构，采用漆包铜线，直径 $0.07 \sim 0.1\text{mm}$ 双绕在圆柱形塑料骨架上，