



书名：岩土工程测试技术

ISBN：978-7-307-14711-9

作者：齐善忠

出版社：武汉大学出版社

定价：36.00元

前 言

随着现代化建设的飞速发展,各类土木建筑工程日新月异,重型厂房、高层建筑、周边环境复杂的深大基坑、重大的水利枢纽、艰险的铁路、桥梁和隧洞,以及为了向海洋寻找资源、向地下争取空间而进行的各种开发性工程等各类工程的成功与否,在很大程度上取决于其周围岩土体能否提供足够的承载力,不产生影响建筑物安全、正常使用的过大或不均匀沉降,以及水平位移、稳定性或各种形式的岩土应力作用。为了保证各类工程及周围环境安全,确保工程的顺利进行,必须进行岩土测试、检测和监测。

岩土工程测试技术不仅在岩土工程建设实践中十分重要,而且在岩土工程理论的形成和发展过程中也起着决定性的作用。岩土工程测试技术的重要性,主要在于岩土工程设计、施工的复杂性和特殊性。在岩土工程中普遍采用信息化施工,是把获得的施工检测信息加以处理,与工程类比的经验方法相结合,建立一些必要的判断准则,利用测量结果及时调整、确定支护参数或做出施工决策,因此,测试在这个过程中起着极其重要的作用,监测成为影响岩土工程成败的重要因素之一。在大型岩土工程中,检测与监测已经贯穿于勘察、设计、施工和运营的整个过程。

本书主要面向本科生、专科生,以及一线工程技术人员,因此在编写过程中淡化了过于复杂的理论推导,以“简单、够用”为度,注重实践和操作,培养解决具体问题的能力,强调工程应用,在相关理论和基础知识介绍后给出了工程实例,以便于学生掌握具体工程的测试方案制定原则、测试设备的选择、测试方案的实施步骤以及测试结果的分析方法,提高学生的动手能力。每章后附有复习思考题,可以用于巩固所学知识,提高学习效率。

本书在编写过程结合作者近年来所参与的工程项目经验和成果、教学总结和专业技术培训资料所编写。在编写过程中参考了大量的国内外文献和有关部门的工程数据,主要参考文献列于书末,书中不再一一注明,特此向作者和有关单位表示诚挚的谢意。

限于作者水平,书中难免有不足之处,恳请读者批评指正。

编 者

目 录

CONTENTS

模块 1

绪 论

- ◎ 1.1 测试技术在岩土工程中的地位和作用 1
- ◎ 1.2 岩土工程测试的目的和意义 2
- ◎ 1.3 岩土工程测试技术的发展现状 4
- ◎ 复习思考题 5

模块 2

测试技术基础知识

- ◎ 2.1 测试系统的组成 6
- ◎ 2.2 传感器的基本特征 7
- ◎ 2.3 常用传感器的类型和工作原理 10
- ◎ 2.4 监测仪器的选择和标定 19
- ◎ 复习思考题 24

模块 3

岩土工程原位测试技术

- ◎ 3.1 概述 25
- ◎ 3.2 静载荷试验 25
- ◎ 3.3 静力触探试验 33
- ◎ 3.4 标准贯入试验 39
- ◎ 3.5 十字板剪切试验 45
- ◎ 3.6 旁压试验 49
- ◎ 3.7 岩土体现场剪切试验 52
- ◎ 复习思考题 57

模块 4

基桩质量检测技术

- ◎ 4.1 基桩检测方法及项目 59
- ◎ 4.2 基桩声波透射法测试技术 60
- ◎ 4.3 基桩低应变测试技术 69
- ◎ 4.4 Osterberg 试桩法 76
- ◎ 4.5 声波透射法检测混凝土灌注桩工程实例分析 80

模块 5

◎ 复习思考题 92

基坑工程监测

◎ 5.1 概述 93
 ◎ 5.2 变形监测 95
 ◎ 5.3 土压力和孔隙水压力监测 107
 ◎ 5.4 支护结构内力监测 113
 ◎ 5.5 监测警戒值与报警 116
 ◎ 5.6 监测期限与频率 118
 ◎ 5.7 监测报表与监测报告 119
 ◎ 5.8 工程实例与分析 120
 ◎ 复习思考题 130

模块 6

地下工程的监测和监控

◎ 6.1 概述 131
 ◎ 6.2 围岩压力量测 134
 ◎ 6.3 位移量测 138
 ◎ 6.4 现场量测计划和测试的有关规定 144
 ◎ 6.5 施工监控及量测数据的分析与应用 147
 ◎ 6.6 工程实例与分析 152
 ◎ 复习思考题 157

模块 7

边坡工程监测技术

◎ 7.1 边坡监测的目的 158
 ◎ 7.2 边坡监测的内容、方法及仪器选择 159
 ◎ 7.3 边坡变形监测 164
 ◎ 7.4 边坡应力监测 169
 ◎ 7.5 边坡地下水监测 172
 ◎ 7.6 边坡工程监测的设计 174
 ◎ 7.7 工程实例 178
 ◎ 复习思考题 182

模块 8

城市地铁区间隧道盾构施工监测技术

◎ 8.1 盾构法施工地层变形理论 183
 ◎ 8.2 隧道盾构施工监测的意义和目的 187
 ◎ 8.3 盾构隧道监测的内容及项目选取 188
 ◎ 8.4 盾构隧道监测方案及监测点布置 192
 ◎ 8.5 盾构邻近或穿越建筑物时的保护措施 195

模块 9

- ◎ 8.6 广州地铁某区间隧道盾构施工监测 199
- ◎ 复习思考题 202

岩土工程无损检测技术与声发射技术

- ◎ 9.1 岩土工程无损检测技术基本理论简介 203
- ◎ 9.2 回弹法检测结构混凝土的抗压强度 209
- ◎ 9.3 超声波检测结构混凝土的抗压强度 216
- ◎ 9.4 声发射技术简介 219
- ◎ 复习思考题 223

参考文献

- 224

绪 论

【本章提要】

本章介绍了测试技术在岩土工程中的地位和作用，明确了岩土工程测试的目的和意义，分析了岩土工程测试技术的发展现状，提出了需要进一步研究的内容。



1.1 测试技术在岩土工程中的地位和作用

岩土体是一种古老而又普通的建筑材料，可作为房屋、水坝、道路、港口码头、隧道等各类建筑物的天然地基和周边介质。地基基础及地下结构形式的确定主要取决于岩土体的具体工程性质。对特定的岩土工程问题，首先进行岩土工程勘察与土工试验，以提供进行岩土工程设计所必需的计算参数；然后利用岩土力学的理论和相应的工程规范进行具体的岩土工程设计。岩土力学从一定意义上讲就是一门试验力学，试验是岩土力学发展的基础。借用传统的弹塑性力学理论并通过试验研究加以调整和改造，从而构建岩土体的强度理论和本构模型，并进而逐渐形成现代岩土力学理论。从计算分析的角度，通过勘察、室内试验和原型试验手段测定岩土体的工程性质指标仍是岩土工程其中的一个关键问题。

由于岩土体是天然的产物，不同于钢材等人工制成的材料，在其沉淀及分化过程中受到地质构造、应力状态、应力历史等多种不确定的物理化学因素的影响，因此其力学性质复杂多变，具有很强的不确定性和变异性；由于勘察与试验结果存在着一定的不确定性，在岩土工程施工过程中还必须通过现场监测与检测，以确保岩土工程的安全性。同时通过监测数据进行岩土工程的反演分析，可以验证工程设计的合理性和进一步改进工程设计。

岩土工程测试技术不仅在工程实践中十分重要，而且在学科理论的研究与发展中也起着决定性作用。例如，众所周知的土的非线性应力-应变关系及应力路径描述，是使岩土工程性状分析工作上升到本征性新水平的重要标志，但它也是来源于试验的理论成果，如果没有三轴有效应力测试仪器的产生，就不可能有应力路径的描述和控制设计。如果我们再追溯到早期的达西定律、摩尔-库伦强度理论等旧有的岩土力学理论，几乎都是基于试验测试的结果。所以，岩土测试技术在工程实践中是以岩土力学理论为指导法则和服务对象的，而岩土力学理论又是以岩土测试技术为实验依据和发展背景的。这就是岩土工程监测和测试在生产实践和科学实验中的地位和作用。

监测与检测的重要性主要体现在三个方面：

(1) 保证工程的施工质量和安全，提高工程效益。要做到这一点，各项监测与检测工作必须在充分了解工程总体情况（勘察成果、设计意图、施工组织计划）的前提下有针对性地进行。在此基础上，合理安排监测与检测的重点及其在空间和时间上的布局，选择恰

当的方法，及时提出阶段性的分析和最后的成果，使工程师们能够尽可能定量地了解 and 把握工程的进程、所处的状态、质量情况和出现的问题，确定修正设计或施工方案的必要性，甚至在紧急状态下采取应急措施，力争使工程达到质量、进度、安全、效益相统一的最佳效果。

(2) 在岩土工程服务于工程建设的全过程中，现场监测与检测是一个重要的环节，可以使工程师们对上部结构与下部岩土地基共同作用的性状及施工和建筑物运营过程的认识在理论和实践上更加完善，便于总结工作经验和形成新的认识。

(3) 依据监测结果，利用反演分析的方法，求出能使理论分析与实测基本一致的工程参数。在现代岩土力学中，有人将这种方法称为室内试验和原位测试以外的第三种试验方法。这种通过现场监测，反求力学参数的方法，正越来越多地受到人们的重视。



1.2 岩土工程测试的目的和意义

1.2.1 岩土工程测试的意义

随着现代化建设事业的飞速发展，各类土建工程日新月异，重型厂房、高层建筑、重大的水电枢纽、艰险的铁路、桥梁和隧洞，以及为了向海洋寻找资源、向地下争取空间而进行的各种开发性工程等，都与它们所赖以存在的岩土地层有着极为密切的关系。各类工程的成功与否，在很大程度上取决于岩土体能否提供足够的承载能力，保证建筑物不产生影响其安全、正常使用的过大或不均匀的沉降，以及水平位移、稳定性或各种形式的岩土应力作用。为了解决建筑地基、斜坡路基、堤坝挡墙、铁路桥隧、地下建筑、岸边支挡、近海工程、场地抗震、地震区划、地热开发、地下蓄能以及国土开发和环境保护等各类工程的岩土工程问题，在岩土工程方面，提出了一系列新的理论和新的设计方法。例如，根据岩土特性，针对工程特点，可以设计相应的数值计算模型，以便准确掌握岩土体在工程运营期间的性状，预估其长期效果和影响。

然而新的岩土力学理论要变为工程现实，如果没有相应的测试手段，则是不可能的。因为，不论设计理论与方法如何先进、合理，如果测试技术落后，则设计计算所依据的岩土参数无法准确测求，不仅岩土工程设计的先进性无从体现，而且岩土工程的质量与精度也难以保证。所以，测试技术是从根本上保证岩土工程设计的精确性、代表性以及经济合理性的重要手段。在整个岩土工程中它与理论计算和施工检验是相辅相成的。

试验工作在岩土工程当中占有非常重要的位置，它不仅是学科理论研究发展的基础，而且也作为岩土工程设计所必需。岩土工程在设计和施工前，必须进行相应的岩土体的室内试验或原位测试，以便为岩土工程师提供最基本的设计数据。由于试验水平和试验条件的局限性，以及很多岩土工程地质条件、荷载条件和施工条件的复杂性，用现有的试验指标和岩土力学理论很难定量计算其强度、稳定性和变形量。为了保证工程的质量和施工的安全性，现在国内外有经验的岩土工程师都非常重视岩土工程的现场检测和监测，其目的在于能够有效控制现场施工质量；同时对由于施工引起的岩土体的位移、应力以及周边环境

进行相应的跟踪监测，通过现场反馈信息及时对现场施工方法进行调整或及时进行设计变更，以确保施工安全和保护周边环境。此外，也为今后类似的岩土工程的设计和施工提供经验数据。

因此，岩土工程的测试、检测与监测是从事岩土工程工作的人员所必需的基本知识，同时也是从事岩土工程理论研究所必需掌握的基本手段。所以，对土木工程专业学生而言，这是一门必须掌握的专业基础课程。

1.2.2 岩土工程测试的内容

岩土工程测试技术一般分为室内试验技术、原位测试试验技术和现场监测与检测技术三个方面，它们具有各自的特点和优势，不能相互取代。本书重点介绍现场监测与检测技术的内容。

1. 室内试验技术

室内试验技术能进行各种理想条件下的控制试验，在一定程度上容易满足理论分析的要求。室内试验主要有土的物理力学指标室内测试试验、岩石的物理力学指标室内测试试验、利用相似材料完成的岩土工程模型试验和采用数值方法完成的数值仿真试验。

2. 原位测试试验技术

原位测试可以在最大限度上减少试验前对岩土体的扰动，避免这些扰动对试验结果的影响。原位测试结果可以直接反映原位测试体的物理力学状态，更接近工程实践的实际情况。同时，对于某些难以采样进行室内测试的岩土体（如承受较大固结压力的砂层），原位测试是必需的。在原位测试方面，地基中的位移场、应力场测试，地下结构表面的土压力测试，地基土的强度特性及变形特性测试等方面是研究的重点。原位测试技术可以分为土体的原位测试试验和岩体的原位测试试验两类。

3. 现场监测技术

现场监测工作主要包括三个方面的内容：

(1) 对岩土所受到的施工作用、各类荷载的大小以及在这些荷载作用下岩土反应性状的监测。比如，岩土体与结构物之间接触压力的量测、地下结构的变形与内力量测、岩土体中的应力量测、岩土体深处其内部变形与位移的监测以及孔隙水压力的量测等。

(2) 对建设中或运营中结构物的监测。对建筑物的沉降观测就是一个最常见的例子，除此之外，还包括对基坑开挖支护结构的监测等。

(3) 监测岩土工程在施工及运营过程中对周围环境的影响。包括基坑开挖和人工降水对邻近结构域设施的影响。

现场监测就是以实际工程作为对象，在施工期及工后期对整个岩土体和地下结构以及周围环境，于事先设定的点位上，按设定的时间间隔进行应力和变形现场观测。岩土工程现场监测的目的是：

① 检验岩土工程施工质量是否满足岩土工程设计和有关规程、规范的要求；

② 指导岩土工程的施工方法、流程和施工进度，通过岩土工程监测反馈分析岩土工程设计与施工是否合理，并为后续设计与施工方案提供优化意见；

- ③检测岩土工程施工对环境的影响，验证岩土工程施工防护措施的效果；
- ④及时发现和预报岩土工程施工过程中所出现的异常情况、防止岩土工程施工事故，保障岩土工程施工安全；
- ⑤提供定量的岩土工程质量事故鉴定依据；
- ⑥为建（构）筑物的竣工验收提供所需的监测资料。



1.3 岩土工程测试技术的发展现状

1.3.1 发展现状

岩土工程原位测试与监测技术经过多年的发展，主要进展有：

(1) 新型传感器及相关的测试系统不断出现，如采用全站仪进行表面水平位移观测，深层侧向位移观测出现了梁式倾斜仪，分层沉降观测中开始采用磁环式沉降仪等，测试手段不断更新。

(2) 大型工程的自动监测系统不断出现，如软基加固、公路路基、基坑支护等工程现场监测很多采用了先进的实时自动化监测。如多通道无线遥测隧道围岩位移系统已用于工程实践；基于 GIS 和可视化技术的大型边坡安全监测系统已经有了成功的使用。在上海轨道交通建设中，基于上海地铁建设多年的科研成果和管理经验基础上开发的地铁远程施工监控系统已经全面应用，该系统是基于网络通信传输、无线通信传输、网络数据库、数据分析、预测、决策、预警等基础上开发的，综合了施工、监理、监测、管理等多种信息。

(3) 一系列新兴技术用于岩土工程测试中，如国内外已有将光纤传感技术用于岩土工程现场监测中的实例。光纤布拉格光栅（Fiber Bragg Grating Sensors, FBG）传感器已经用于深基坑钢筋混凝土内支撑应变监测。声发射技术在岩体局部冒落的预测预报、岩爆现象的预测预报、地应力测试等领域得到广泛应用。近景摄影测量技术已经应用于地下工程位移监测，并达到了较高的精度。三维隧道影像扫描仪已经用于全面精确地记录隧道开挖面地质及支撑施工结果的影像与几何资料，该法有助于提高施工质量和工程管理水平。

(4) 监测数据的分析和反馈技术提高迅速。先进的三维地质建模软件、数据库系统、数据挖掘和专家系统等都在逐步应用。人工神经网络技术、时间序列分析、灰色系统理论、因素分析法、支持向量机方法等数据处理技术得到广泛应用。岩土工程反分析特别是基于现场量测变形的位移反分析研究取得重要进展，反分析得到的综合弹性模量等参数成为岩土工程围岩稳定性数值模拟分析的重要基础，在岩土工程信息化施工中发挥了巨大作用。岩土工程施工监测信息管理、预测预报系统的发展成绩显著。

(5) 国内很多地方对实行“第三方监测”进行了探索和实践，实施城市地下工程施工“第三方监测”是保证施工安全和工程质量十分重要的举措，有效地避免了施工过程中可能发生的事故。

(6) 对于如磁悬浮铁路路基工程等大型重要的岩土工程，监测不仅在施工过程中开展，而且在运营过程中也要进行，岩土工程的运营期间的长期健康监测系统的建立和研究已经发展为岩土工程领域的重要课题之一。

1.3.2 需要进一步研究的内容

岩土工程的规模越来越大，要求的施工技术越来越高，现场监测成为保证安全施工的重要手段，展望未来，为了满足不断发展的岩土工程对监测技术的要求，岩土工程现场监测技术需要在下面几个方面开展进一步的研究：

(1) 目前，国产的岩土工程现场监测仪器的信息化程度较低，急需对先进的国外监测仪器进行消化吸收，提高国产化率，降低监测仪器的成本。

(2) 发展岩土工程施工自动监测系统，提高监测的可靠性，同时应降低自动监测系统的造价，便于广泛使用。岩土工程施工监测信息系统主要以隧道、基坑和边坡工程施工监测为应用对象，运用工程可视化技术与地理信息系统的全新思想，将数据库管理、分析预测与测点图形功能三者无缝集成，实现以测点地图为中心的查询和数据输入输出的双向可视化，并提供监测概预算和图形报表等完整的实用工具。系统功能齐全，交互灵活，无需其他应用软件系统支撑，对工程施工设计与科学研究具有实用价值。

(3) 研制施工期监测信息预测预报系统软件。已有的软件适合现场施工人员使用的很少，并且功能不够全面、集成性较差，导致数据处理及分析实时性差、方法落后，自动化、信息化程度低，根据监测信息及时反馈指导施工的水平较低。急需研究利用监测数据开展地下工程施工风险预测预报的完善系统，发挥监测工作的优化设计和及时反馈指导施工的作用。

(4) 积极发展第三方监测，全面提高地下工程安全施工的水平。由于针对“第三方监测”没有国家性的法规进行明确规定和管理，各地“第三方监测”处于无序状态，因此，急需对“第三方监测”的内容、责任主体、监测指标及管理信息系统数据标准等进行统一的管理和规定。

复习思考题

1. 开展岩土工程测试工作有什么意义？
2. 岩土工程测试的主要内容有哪些？
3. 岩土工程现场监测的目的是什么？
4. 简述岩土工程监测技术研究的发展状况。

测试技术基础知识

【本章提要】

本章介绍了测试系统的组成及其静态特性、动态特性，重点介绍了常用传感器的原理和特征。在此基础上，介绍了传感器选择方法、质量要求和标定方法。

“测试系统”这一概念是传感技术发展一定阶段的产物。在工程中，需要有传感器与多台仪表组合在一起，才能完成信号的检测，这样便形成了测试系统。尤其是随着计算机技术及信息处理技术的发展，测试系统所涉及的内容也不断得以充实。

为了更好地掌握传感器，需要对测试的基本概念、测试系统等方面的理论及工程方法进行学习和研究，只有了解和掌握了这些基本理论，才能更有效地完成监测任务。



2.1 测试系统的组成

测试技术包括测量技术和试验技术两个方面。测试技术是通过测试系统来实现的，按照信号传递方式来分，常用的测试系统可分为模拟式和数字式两种。一个测试系统可以由一个或若干个功能单元组成。通常，测试系统应具有以下几个功能：将被测对象置于预定状态下，对被测对象所输出的信息进行采集、变换、传输、分析、处理、判断和显示记录，最终获得测试所需的信息。一个典型的力学测试系统如图 2-1 所示。

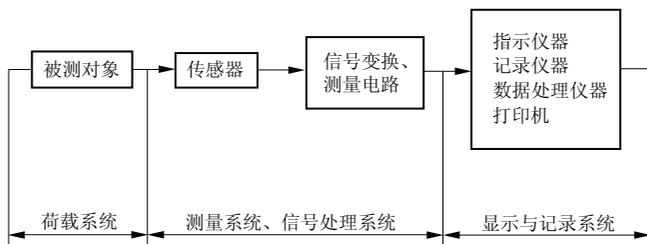


图 2-1 测试系统的组成

由图 2-1 可知，一个完善的力学测试系统由荷载系统、测量系统、信号处理系统和显示记录系统四大部分组成。

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。岩土工程测试采用的荷载系

统除液压式外，还有重力式、杠杆式、气压式等。

2. 测量系统

测量系统由传感器、信号变换和测量电路组成，它将被测量（如力、位移等）通过传感器变成电信号，经过变换、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首要的关键环节，它的作用是将被测量（主要是非电量）转换成便于放大、记录的电量。

3. 信号处理系统

信号处理系统是将测量系统的输出信号作进一步处理以便排除干扰。如智能测试系统中需要设置智能滤波软件，以便排除测量系统中的干扰和偶然波动，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）来达到这些目的。

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，它是将被测对象所测得的有用信号及其变化过程显示或记录下来。数据显示可以用各种表盘、电子示波器和显示屏来实现，数据记录可以采用记录仪、光式示波器等设备来实现，智能测试系统中以微机、打印机和绘图仪等作为显示记录设备。



2.2 传感器的基本特征

传感器是指能感受规定的物理量，并按一定规律转换成可用输入信号的器件或装置。

传感器通常由敏感元件、转换元件和测试电路三部分组成。

(1) 敏感元件是指能直接感受（或响应）被测量的部分，即将被测量通过传感器的敏感元件转换成与被测量有确定关系的非电量或其他量。

(2) 转换元件则将上述非电量转换成电参量。

(3) 测量电路的作用是将转换元件输入的电参量经过处理转换成电压、电流或频率等可测电量，以便进行显示、记录、控制和处理的部分。

可通过两个基本特性即传感器的静态特性和动态特性来表征一个传感器性能的优劣。

所谓静态特性，是指当被测量的各个值处于稳定状态（静态测量之下）时，传感器的输出值与输入值之间关系的数学表达式、曲线或数表。当一个传感器制成后，可用实际特性反映它在当时使用条件下实际具有的静态特性。借助实验的方法确定传感器静态特性的过程称为静态校准。校准得到的静态特性称为校准特性。在校准使用了规范的程序和仪器后，工程上常将获得的校准曲线看作该传感器的实际特性。

2.2.1 传感器的静态特性参数指标

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（迟滞性）。

1. 线性度

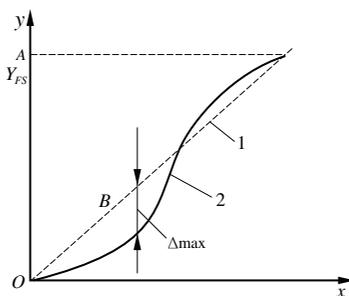
理想的传感器输出与输入呈线性关系。然而，实际的传感器即使在量程范围内，输出与输入的线性关系严格来说也是不成立的，总存在一定的非线性。线性度是评价非线性程度的参数。其定义为：传感器的输出-输入校准曲线与理论拟合直线之间的最大偏差与传感器满量程输出之比，称为该传感器的线性度或非线形误差。通常用相对误差表示其大小：

$$e_f = \pm \frac{\Delta_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (2-1)$$

式中 e_f ——非线性误差（线性度）；

Δ_{\max} ——校准曲线与理想拟合直线间的最大偏差；

Y_{FS} ——传感器满量程输出平均值，如图 2-2 所示。



1—拟合直线；2—校准曲线

图 2-2 非线性误差说明

非线性误差大小是以一拟合直线或理想直线作为基准直线计算出来的，基准直线不同，所得出的线性度就不一样。因而不能笼统地提线性度或非线性误差，必须说明其所依据的基准直线。按照所依据的基准直线的不同，有理论线性度、端垂线性度、独立线性度、最小二乘法线性度等。最常用的是最小二乘法线性度。

2. 灵敏度

灵敏度是指稳态时传感器输出量 Y 和输入量 X 之比，或输出量 Y 的增量和输入量 X 的增量之比，如图 2-3 所示，用 S 表示为

$$S = \Delta Y / \Delta X \quad (2-2)$$

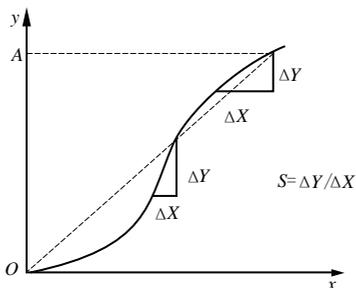


图 2-3 灵敏度

3. 分辨力

传感器能检测到的最小输入增量称分辨力，在输入零点附近的分辨力称为阈值。

4. 测量范围和量程

在允许误差限内，被测量值的下限到上限之间的范围称为测量范围。

5. 迟滞

输入逐渐增加到某一值与输入逐渐减小到同一输入值时的输出值不相等，叫迟滞现象。迟滞差（回程误差）表示这种不相等的程度。如图 2-4 所示，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：

$$\delta_h = \frac{h_{\max}}{A} \times 100\% \quad (2-3)$$

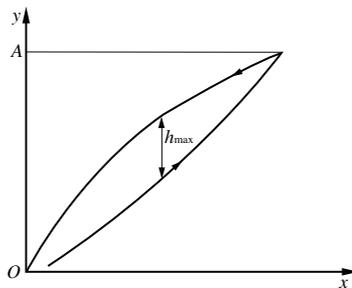


图 2-4 迟滞

6. 重复性

传感器在同一条件下，被测输入量按同一方向作全量程连续多次重复测量时，所得输出-输入曲线的不一致程度，称重复性。

7. 零漂和温漂

传感器在无输入或输入为另一值时，每隔一定时间，其输出值偏离原始值的最大偏差与满量程的百分比为零漂。而温度每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，传感器输出值的最大偏差与满量程的百分比，称为温漂。

2.2.2 传感器的动态特性

当测量某些随时间变化的参数时，只考虑传感器的静态性能指标是不够的，还要注意其动态性能指标。只有这样，才能使检测、控制比较正确、可靠。

实际被测量随时间变化的形式可能是各种各样的，所以研究动态特性时，通常根据正弦变化与阶跃变化两种标准输入来考察传感器的响应特性。传感器的动态特性分析和动态标定都以这两种标准输入状态为依据。对于任一传感器，只要输入量是时间的函数，则其输出量也应是时间的函数。

为了便于分析和处理传感器的动态特性，同样需建立数学模型，用数学中的逻辑推理

和运算方法来研究传感器的动态响应。对于线性系统的动态响应研究，最广泛使用的数学模型是普通线性常系数微分方程。只要对微分方程求解，就可得到动态性能指标。



2.3 常用传感器的类型和工作原理

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，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。下面讲述常用传感器的原理。

2.3.1 电阻应变片式传感器

电阻应变式传感器具有悠久的历史。由于它具有结构简单、体积小、使用方便、性能稳定、可靠、灵敏度高、动态响应快、适合静态及动态测量、测量精度高等优点，因此成为目前应用最广泛的传感器之一。电阻应变式传感器是一种利用电阻应变效应，由电阻应变片和弹性元件组合起来的传感器。当弹性元件感受到外力、位移、加速度等参数的作用时，其表面产生应变，再通过粘贴在上面的电阻应变片将其转换成电阻的变化，通过测量电阻应变片的电阻值变化来测量位移、加速度、力、力矩、压力等各种参数。

1. 应变片的工作原理

电阻应变片的工作原理是基于金属的应变效应的。金属丝的电阻随着它所受的机械变形（拉伸或压缩）的大小而发生相应变化的现象称为金属的电阻应变效应。

由物理学可知，金属导线的电阻 R 与其长度 l 成正比，与其面积 A 成反比，则电阻值的表达式为

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2-4)$$

当电阻丝受到拉力作用时将沿轴线伸长，伸长量为 Δl ，横截面面积相应减小 ΔA ，电阻率的变化设为 $\Delta \rho$ ，则电阻的相对变化量为

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A} \quad (2-5)$$

对于半径为 r 的圆导体， $\frac{\Delta A}{A} = \frac{2\Delta r}{r}$ 。又由材料力学可知，在弹性范围内有 $\frac{\Delta l}{l} = \epsilon$ ， $\frac{\Delta r}{r} = -\mu\epsilon$ ， $\frac{\Delta \rho}{\rho} = \lambda\sigma = \lambda E\epsilon$ ，其中 σ 为应力值，带入式 (2-5) 可得

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu + \lambda E) \epsilon \quad (2-6)$$

式中 ϵ ——导体的纵向应变，其数值一般很小，常为微应变度量；

μ ——电阻丝材料的泊松比，一般金属 μ 为 0.3~0.5；

λ ——压阻系数，与材质有关；

E ——材料的弹性模量。

因此, $(1+2\mu)\epsilon$ 表示由于几何尺寸变化而引起的电阻的相对变化量, $\lambda E\epsilon$ 表示由于材料电阻率的变化而引起电阻的相对变化量。不同属性的导体, 这两项所占的比例相差很大。

通常把单位应变所引起的电阻值相对变化称为电阻丝的灵敏系数, 并用 K_0 表示, 则 $K_0=1+2\mu+\lambda E$ 。 K_0 与金属材料 and 电阻丝形状有关。显然, K_0 越大, 单位纵向应变所引起的电阻值相对变化越大, 说明应变片灵敏。大量实验证明, 在电阻丝拉伸极限内, 电阻的相对变化与应变成正比, 即 K_0 为常数。因此, 式 (2-6) 可表示为

$$\frac{\Delta R}{R} = K_0 \epsilon \quad (2-7)$$

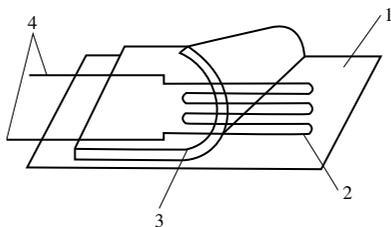
各种材料的灵敏度系数由实验测定。一般用于制造电阻丝应变片的金属丝其灵敏系数多在 1.7~3.6 之间。

2. 应变片的构造和种类

金属电阻应变片分为丝式应变片、箔式应变片和薄膜应变片 3 种。其中使用最早的是电阻丝应变片, 构造如图 2-5 所示。

金属丝式应变片的敏感栅由金属丝绕制而成, 金属丝材料为电阻率 ρ 大而电阻温度系数 α 小的材料。丝式应变片的规格一般以使用面积 ($l \times b$) 和敏感栅的电阻值来表示。阻值一般在 50~1 000 Ω 范围内, 常用的为 120 Ω 。

箔式电阻应变片是利用光刻、腐蚀等工艺制成的一种很薄的金属栅, 厚度为 0.003~0.01 mm, 其优点是表面积与截面之比大, 散热条件好, 允许通过的电流较大, 可制成各种需要的形状, 易于大批量生产, 因此得到了广泛应用, 现已基本取代了金属丝式应变片, 是目前主要使用的一种应变片。其构造如图 2-6 所示。



1—基片；2—电阻丝；3—覆盖层；4—引出线

图 2-5 应变片的构造

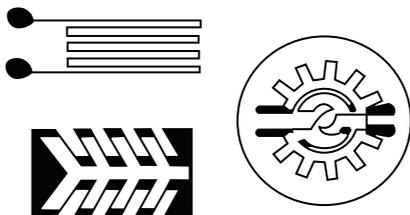


图 2-6 箔式电阻应变片

电阻应变片必须被粘贴在试件或弹性元件上才能工作。粘结剂和粘结技术对测量结果有直接的影响, 因此, 粘结剂的选择、粘贴技术、应变片的保护等都必须认真做好。

3. 电阻应变片的特性

实际应用中, 选用应变片时, 要考虑应变片的性能参数, 主要有: 应变片的电阻值、灵敏度、允许电流和应变极限等。当前的金属电阻应变片的电阻值已经趋于标准化, 主要规格有 60 Ω 、120 Ω 、350 Ω 、600 Ω 和 1 000 Ω 等, 其中 120 Ω 的用得最多。

(1) 电阻应变片的灵敏系数: 将电阻应变丝做成电阻应变片后, 其电阻的应变特性与金属单丝是不同的, 因此, 必须通过实验重新测定。该实验必须按规定的统一标准进行。实验证明, $\Delta R/R$ 与 ϵ 在很大范围内有很好的线性关系, 即

$$\frac{\Delta R}{R} = K\epsilon \quad (2-8)$$

式中 K ——电阻应变片的灵敏系数。

实验表明, 应变片的灵敏系数 K 恒小于电阻丝的灵敏系数 K_0 , 究其原因, 主要是因为应变片中存在着所谓的横向效应。应变片的灵敏系数 K 值一般由生产厂家通过抽样标定后给出, 产品包装上标明的“标称灵敏系数”是出厂时测定的该批产品的平均灵敏系数值。

(2) 横向效应: 应变片的敏感栅除了有纵向线栅外, 还有圆弧形或直线形的横栅。横栅既对应变片轴线方向的应变敏感, 又对垂直于轴线方向的横向应变敏感。当材料产生纵向应变 ϵ_x 时, 将在其横向产生一个与纵向应变符号相反的横向应变 $\epsilon_y = -\mu\epsilon_x$, 因此, 应变片上横向部分的线栅与纵向部分的线栅产生的电阻变化符号相反, 使应变片的总电阻变化量减小, 从而降低了整个电阻应变片的灵敏度, 这就是应变片的横向效应。应当指出, 横向灵敏度引起的误差往往是较小的, 只在测量精度要求较高和应变场的情况较复杂时才考虑修正。

(3) 温度误差及补偿: 应变片由于温度变化所引起的电阻变化与试件(弹性元件)应变所造成的电阻变化几乎有相同的数量级, 如果不采取必要的措施克服温度的影响, 测量精度将无法保证。下面分析产生温度误差的原因及补偿方法。

①温度误差: 由于测量现场环境温度改变而给测量带来的附加误差, 称为应变片的温度误差。产生温度误差的主要因素有以下两点。

电阻温度系数的影响。敏感栅的电阻丝阻值随温度变化的关系可用下式表示

$$R_T = R_0 (1 + \alpha\Delta T) \quad (2-9)$$

式中 R_T ——温度为 T ($^{\circ}\text{C}$) 时的电阻值;

R_0 ——温度为 T_0 ($^{\circ}\text{C}$) 时的电阻值;

ΔT ——温度变化值, $\Delta T = T - T_0$;

α ——敏感栅材料的电阻温度系数。

当温度变化 ΔT 时, 电阻丝电阻的变化值为

$$\Delta R_{\text{总}} = R_T - R_0 = R_0 \alpha \Delta T \quad (2-10)$$

当试件与电阻丝材料的线膨胀系数相同时, 不论环境温度如何变化, 电阻丝的变形和自由状态一样, 不会产生附加变形。当试件与电阻丝材料的线膨胀系数不同时, 由于环境温度的变化, 电阻丝会产生附加变形, 从而产生附加电阻。

由以上分析可知, 由于温度变化而引起的附加电阻给测量带来误差, 该误差除与环境温度有关外, 还与应变片本身的性能参数及试件的线膨胀系数有关。

②温度补偿方法: 电阻应变片的温度补偿方法通常有电桥补偿和应变片自补偿两大类。

电桥补偿法，也称补偿片法，其原理如图 2-7 所示。

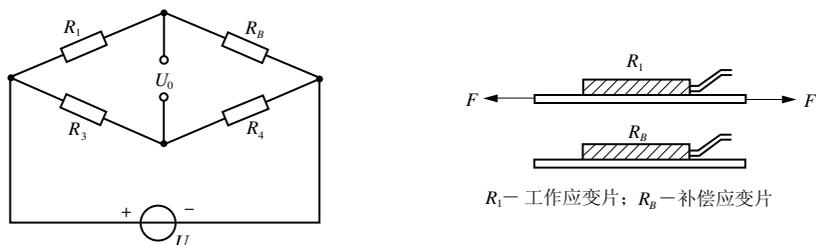


图 2-7 电桥补偿法

电桥输出电压 U_0 与桥臂参数的关系为：

$$U_0 = B (R_1 R_4 - R_2 R_3) \quad (2-11)$$

式中 B ——由桥臂电阻和电源电压决定的常数。

由式 (2-11) 可知，当 R_3 和 R_4 为常数时， R_1 和 R_2 对电桥输出电压 U_0 的作用方向相反。利用这一基本关系可实现对温度的补偿。

测量应变时，工作应变片 R_1 粘贴在被测试件表面，补偿应变片 R_2 粘贴在与被测试件材料完全相同的补偿块上，置于试件附近，并且仅工作应变片承受应变。

当被测试件不承受应变时， R_1 和 R_2 处于同一环境温度 T 的温度场中，调整电桥参数使之达到平衡，则有

$$U_0 = B (R_1 R_4 - R_2 R_3) = 0 \quad (2-12)$$

在工程上，一般按 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ 选取桥臂电阻。当温度升高或降低 ΔT 时，两个应变片因温度变化而引起的电阻变化量相同，电桥处于平衡状态，即

$$U_0 = B [(R_1 + \Delta R_{1T}) R_4 - (R_2 + \Delta R_{2T}) R_3] = 0 \quad (2-13)$$

若此时被测试件有应变 ϵ 的作用，则工作应变片电阻 R_1 又有了新的增量 $\Delta TR_1 = R_1 K \epsilon$ ，而补偿片因不承受应变，故不产生新的增量，此时电桥的输出电压为

$$U_0 = B R_1 R_4 K \epsilon \quad (2-14)$$

由式 (2-14) 可知，电桥输出电压 U_0 仅与被测试件的应变 ϵ 有关，而与环境温度无关。

电桥补偿法的优点是简单、方便，在常温下补偿效果较好，其缺点是在温度变化梯度较大的情况下，很难做到工作片与补偿片处于温度完全一致的情况，因而影响补偿效果。

应变片自补偿法。粘贴在被测部位上的应变片是一种特殊应变片，当温度变化时，产生的附加应变为零或相互抵消，这种应变片称为温度自补偿应变片。利用这种应变片实现温度补偿的方法称为应变片自补偿法。

2.3.2 钢弦频率式传感器

1. 钢弦频率式传感器原理

钢弦式传感器的敏感元件是一根金属丝弦（一般称为钢弦、振弦或简称“弦”）。常用高弹性弹簧钢、马氏不锈钢或钨钢制成，它与传感器受力部件连接固定，利用钢弦的自振频率与钢弦所受到的外加张力关系式测得各种物理量。由于它结构简单可靠，传感器的设计、制造、安装和调试都非常方便，而且在钢弦经过热处理之后其蠕变极小，零点稳定，

因此备受工程界青睐。近年来，钢弦频率式传感器在国内外发展较快，欧美已基本用其替代了其他类型的传感器。

钢弦式仪器是根据钢弦张紧力与谐振频率成单值函数关系设计而成的。由于钢弦的自振频率取决于它的长度、钢弦材料的密度和钢弦所受的内应力。其关系式为

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} \quad (2-15)$$

式中 f ——钢弦振动频率；
 L ——钢弦长度；
 ρ ——钢弦的密度；
 σ ——钢弦所受的张拉应力。

以压力盒为例，钢弦上产生的张拉应力由外来压力 P 引起，则

$$P = K (f^2 - f_0^2) \quad (2-16)$$

式中 f ——压力盒受压后钢弦的振动频率；
 f_0 ——压力盒未受压时钢弦的振动频率；
 K ——压力计率定常数， kPa/Hz^2 ；
 P ——压力盒底部薄膜所受的压力。

从式 (2-16) 中可以看出钢弦的张力与自振频率的平方差呈直线关系。

2. 钢弦传感器的种类

钢弦式传感器有钢弦式应变计、钢弦式土压力盒、钢筋应力计等。图 2-8 为钢筋应力计的构造图。

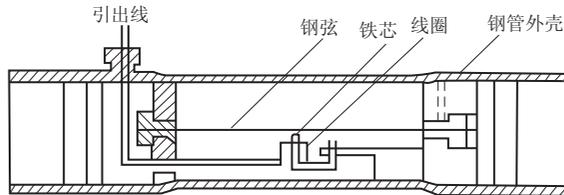
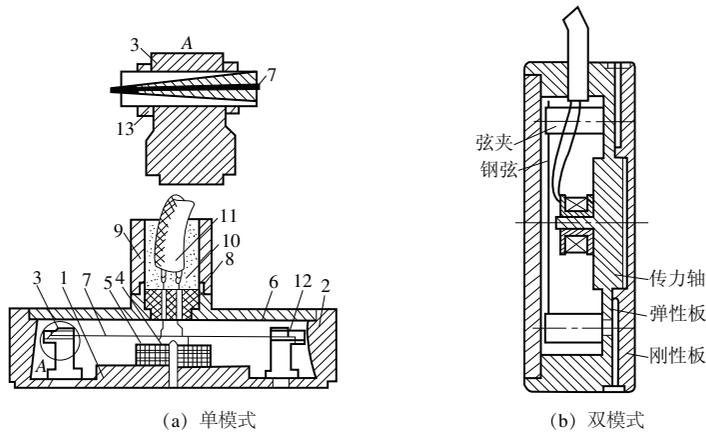


图 2-8 钢弦式钢筋应力计构造图

图 2-9 为单膜式和双膜式土压力盒的构造图。土压力计在一定压力作用下，其传感面（即薄膜）向上微微鼓起，引起钢弦伸长，钢弦在未受压力时具有一定的初始频率，当拉紧以后，它的频率就会增高。作用在薄膜上的压力不同，钢弦被拉紧的程度不一样，测量得到的频率也因此发生差异。可根据测到的不同频率来推算出作用在薄膜上的压力大小，即为土压力值。

钢弦式传感器所测定的参数主要是钢弦的自振频率，常用专用的钢弦频率计测定，也可用周期测定仪测周期，二者互为倒数。在专用频率计中加一个平方电路或程序也可直接显示频率平方。图 2-10 所示是钢弦式测试系统。

钢弦式传感器不受接触电阻、外界电磁场影响，性能较稳定，耐久性能好，是岩土工程中比较理想的测试手段。



1—承压板；2—底座；3—钢弦夹；4—铁芯；5—电磁线圈；6—封盖；7—钢弦；8—塞；
9—引线管；10—防水涂料；11—电缆；12—钢弦架；13—拉紧固定螺栓

图 2-9 单膜式和双膜式土压力盒的构造图

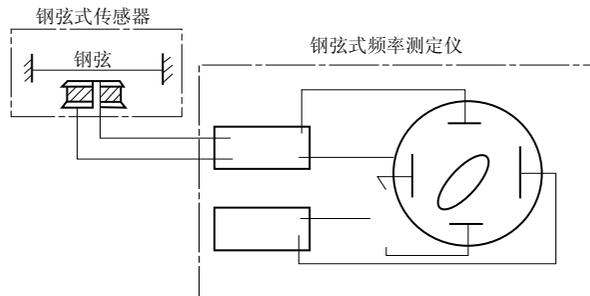


图 2-10 钢弦式测试系统

2.3.3 光纤传感器

光纤传感器是基于光导纤维的新型传感器，起源于光纤通信技术，它的应用是传感器领域的重大突破。在光通信利用中发现当温度、应力等环境变化时，引起光纤传输的光波强度、相位、频率、偏振态等变化，测量光波量的变化，就可知道导致这些变化的温度、应力等物理量的大小，根据这些原理便可研制出光导纤维传感器。光导纤维是 20 世纪 70 年代发展起来的一种新兴的光电子技术材料。到目前为止，光纤技术主要用于光纤通信、直接信息交换，把待测的和光纤内的导光联系起来，形成光纤传感器。光纤传感器的迅速发展始于 1977 年，光纤传感器现已日趋成熟，这一项新技术的影响目前已十分明显。光纤传感器与传统传感器相比具有许多优点，目前已研制了多种不同的光纤传感器，用于磁、声、压力、温度、加速度，陀螺、位移、液面、转矩、光、电流和应变等物理量的测量，解决了以前认为难以解决，甚至不能解决的技术难题。

1. 光导纤维的结构和导光原理

(1) 光纤的结构：光导纤维，简称光纤，是一种用于传输光信息的多层介质结构的对称圆柱体，光纤传感器所用光纤与普通通信用光纤基本相同，都由纤芯、包层和涂覆层组成，结构如图 2-11 所示。

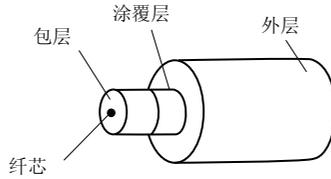


图 2-11 光纤的基本结构

纤芯的主要成分为二氧化硅，其中含有极微量的掺杂剂，一般为二氧化锗，用以提高纤芯的折射率，形成全内反射条件的弱导光纤将光限制在纤芯中。纤芯的直径在 $5\sim 50\ \mu\text{m}$ 之间，其中单模光纤为 $9\ \mu\text{m}$ ，多模光纤为 $50\ \mu\text{m}$ 。包层主要成分也为二氧化硅，直径为 $125\ \mu\text{m}$ 。涂覆层一般为环氧树脂、硅橡胶等高分子材料，外径为 $250\ \mu\text{m}$ ，用于增强光纤的柔韧性、机械强度和耐老化特性。而有些类型的光纤传感器由于使用的场合不同，需要对普通光纤做些加工处理，使其对特定的信号更加敏感。光纤的最外层加上一层不同颜色的塑料套管，一方面起到保护作用，另一方面以颜色区分各种光纤。还可以将许多单条光纤组成光缆，光缆中的光纤数少则几根，多则几千根。光缆主要用于通信。

(2) 光纤的导光原理：利用光的全反射原理，只要使射入光纤端面的光线与光轴的夹角小于一定值，使得光纤中的光线发生全反射时，则光线射不出光纤的纤芯（纤芯折射率大于包层折射率），如图 2-12 所示。光线在纤芯和包层的界面上不断发生全反射，经过若干次的全反射，光就能从光纤的一端以光速传播到另一端，这就是光纤导光的基本原理。光纤传播的光波，可以分解为沿纵轴向传播和沿横切向（剖面方向）传播的两种平面波成分。沿横切向传播的光波在纤芯和包层界面上会发生全反射，当它在横切向往返一次的相位变化为 2π 的整数倍时，将形成驻波。只有能形成驻波的那些以特定角度射入光纤的光才能在光纤内传播。形成驻波的光线组称为模，它们是离散存在的，即某一种光纤只能传输特定模数的光。

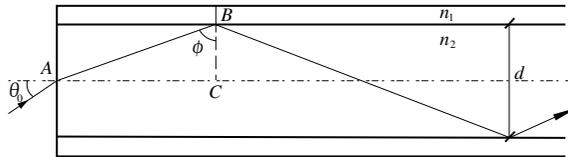


图 2-12 光在光纤中的全反射

2. 光纤传感器基本原理及类型

(1) 光纤传感器基本原理：光纤传感器的基本原理是将来自光源的光经过光纤送入调制器，使待测参数与进入调制区的光相互作用后，引起光纤传输的光波强度、相位、频率、偏振态等发生变化，称为被调制的信号光，再经过光纤送入光探测器，经解调器解调后，获得被测参数。

(2) 光纤传感器的类型：按照光纤在传感器中的作用，光纤传感器可以分为功能型、非功能型和拾光型三大类，如图 2-13 所示。

①功能型（内调制型、全光纤型）光纤传感器。如图 2-13 (a) 所示，此时光纤不仅是导光媒质，而且也是敏感元件，光在光纤内受被测量调制。此类传感器的优点是结构紧凑、灵敏度高，但是，它需用特殊光纤和先进的检测技术，因此成本高。随着对光纤传感

器基本原理的深入研究和各种特殊光纤的成功研制，高灵敏度的功能型光纤传感器必将得到更广泛的应用。

②非功能型（或称传光型）光纤传感器。如图 2-13（b）所示，光纤在其中仅起导光作用，光照在光纤型敏感元件上受被测量调制。光纤与普通传感器中的导线作用相当，因而不能称为严格意义上的光纤传感器。此类光纤传感器无须特殊光纤及其他特殊技术，比较容易实现，成本低，但灵敏度也较低，只能用于对灵敏度要求不太高的场合。

③拾光型光纤传感器。如图 2-13（c）所示，用光纤作探头，接收由被测对象辐射的光或被其反射、散射的光。其常用的有：光纤激光多普勒速度计、辐射式光纤温度传感器等。

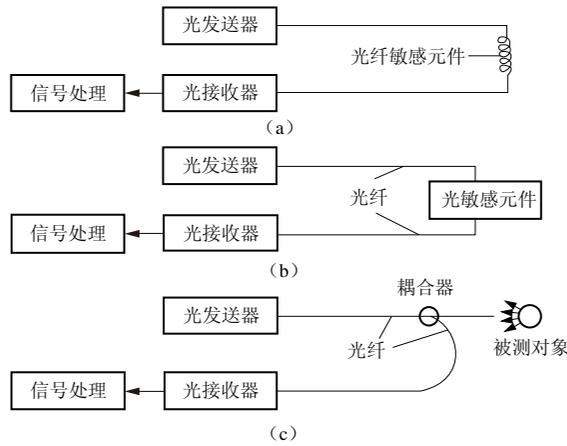


图 2-13 根据光纤在传感器中的作用分类

3. 光纤传感器的特点

(1) 质量轻、体积小：普通光纤外径为 $250\ \mu\text{m}$ ，最细的传感光纤直径仅为 $35\sim 40\ \mu\text{m}$ ，可在结构表面安装或者埋入结构体内部，对被测结构的影响小，测量的结果是结构参数更加真实的反映。埋入安装时可检测传统传感器很难或者根本无法监测的信号，如：复合材料或者混凝土内部应力或者温度场分布、电力变压器的绝缘检测、山体滑坡的监测等。

(2) 灵敏度高：光纤传感器采用光测量的技术手段，一般为微米量级。采用波长调制技术，分辨率可达到波长尺度的纳米量级。它是某些精密测量与控制必不可少的工具。

(3) 耐腐蚀：由于光纤表面的涂覆层是由高分子材料做成的，耐环境或者结构中酸碱等化学成分腐蚀的能力强，适应于智能结构的长期健康监测。

(4) 抗电磁干扰：当光信息在光纤中传输时，它不会与电磁场产生作用，因而信息在传输过程中抗电磁干扰能力很强。因此，光纤传感器特别适用于高压大电流、强磁场噪声、强辐射等恶劣环境中，能解决许多传统传感器无法解决的问题。

(5) 绝缘性能高：光纤是不导电的非金属材料，其外层的涂覆材料硅胶也不导电，因而光纤绝缘性能高，便于测量带高压设备的各种参数。

(6) 传输频带较宽：通常系统的调制带宽为载波频率的百分之几，光波的频率较传统的位于射频段或者微波段的频率高几个数量级，因而其带宽有巨大的提高，便于实现时分或者频分多路复用，可进行大容量信息的实时测量，使大型结构的健康监测成为可能。

(7) 使用期限内维护费用低。

4. 光纤传感器的应用

作为 20 世纪 70 年代中期出现的一种新型传感器，光纤传感器是对以电信号为基础的传统传感器的变革。目前的工程应用中，光纤可以构成位移、应变、压力、速度、加速度、转矩、角速度、角加速度、温度、电流、电压、流量、流速，以及磁、光、声、射线等近百种物理量检测的传感器，所以光纤传感器可以被称为万能传感器。当然，光纤传感器在开发过程中还有不少的实际困难，如噪声源、检测方法、封装、光纤的被覆等问题。因此，光纤传感器的实用化研究还在进行中。

下面介绍一种较为实用的光纤位移传感器。图 2-14 所示为光纤位移测量的原理图。光纤作为信号传输介质，起导光作用。光源发出的光束经过光纤 1 射到被测物体上并发生散射，有部分光线进入光纤 2 并被光电探测器件（此处为光敏二极管）接收，转变为电信号。由于入射光的散射作用随着距离 x 的大小而变化，所以进入光纤 2 的光强也会发生变化，光电探测器件转换的电压信号也将发生变化。实践证明：在一定范围内，光电探测器件的输出电压 U 与位移量 x 之间呈线性关系。在非接触式微位移测量、表面粗糙度测量等场合采用这种光纤传感器是很实用的。

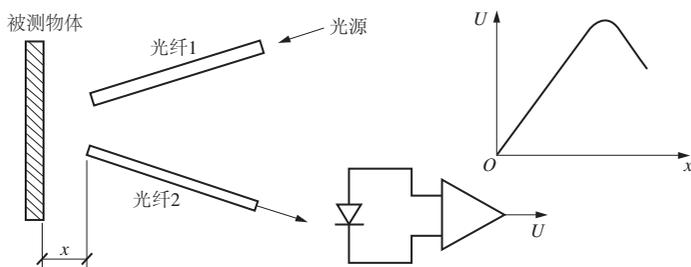


图 2-14 光纤位移测量原理图

光纤传感器在土木工程的应用领域相对较广泛，已经从混凝土的浇筑过程扩展到地基、桥梁、大坝、隧道、大楼、地震和山体滑坡等复杂系统的监测。

2.3.4 其他原理的传感器

除了上述类型的传感器以外，还有一些利用其他原理制成的安全监测仪器。例如电容式传感器、磁电式传感器、压电传感器、光纤传感器等都被用来制成安全监测仪器。

电容式传感器是将被测量（如尺寸、压力等）的变化转换成电容变化量的一种传感器。实际上，它本身（或和被测物）就是一个可变电容器。以最简单的平行极板电容器为例说明其工作原理，在忽略边缘效应的情况下，平板电容器的电容量 C 为：

$$C = \epsilon \epsilon_0 s / \delta \quad (2-17)$$

式中 ϵ_0 ——真空的介质常数；

s ——极板的遮盖面积 (m^2)；

ϵ ——极板间介质的相对介电系数，在空气中， $\epsilon = 1$ ；

δ ——两平行极板间的距离 (m)。

式 (2-17) 表明，当被测量 δ 、 s 或 ϵ 发生变化时，都会引起电容的变化。如果保持其中的两个参数不变，而仅改变另一个参数，就可把该参数的变化变换为单一电容量的变化，

再通过配套的测量电路,将电容的变化转换为电信号输出。根据电容器参数变化的特性,电容式传感器可分为极距变化型、面积变化型和介质变化型三种,其中极距变化型和面积变化型应用较广。

依据电介质压电效应研制的一类传感器称为压电传感器。压电效应是指:某些电介质在沿一定方向上受到外力的作用而变形时,其内部会产生极化现象,同时在它的两个相对表面上出现正负相反的电荷。当外力去掉后,它又会恢复到不带电的状态,这种现象称为正压电效应。当作用力的方向改变时,电荷的极性也随之改变。相反,如在电介质的极化方向上施加电场,这些电介质也会发生变形,电场去掉后,电介质的变形随之消失,这种现象称为逆压电效应,或称为电致伸缩现象。压电式加速度传感器在飞机、汽车、船舶、桥梁和建筑的振动和冲击测量中已经得到了广泛的应用,特别是航空和宇航领域中更有它不可替代的作用。

磁电式传感器简称感应式传感器,也称电动式传感器。它把被测物理量的变化转变为感应电动势,是一种机-电能量变换型传感器,不需要外部供电电源,电路简单,性能稳定,输出阻抗小,又具有一定的频率响应范围(一般为 $10\sim 1\,000\text{ Hz}$),适用于振动、转速、扭矩等测量。但这种传感器的尺寸和重量都较大。

差动电阻式传感器是美国加州大学卡尔逊教授研制的,又习惯被称为卡尔逊式仪器。其内腔由两根弹性钢丝作为传感元件,受力后一根受拉、一根受压。当受环境量变化作用时,两者的电阻值向相反方向变化,通过两个元件的电阻值比值,测出物理量的数值。差动式应变计的特点是灵敏度较高、性能稳定、耐久性好。

电感式传感器是根据电磁感应原理,利用线圈电感的变化来实现非电量电测。它是把被测量如位移、振动、压力、应变、流量、相对密度等,转换为电感量变化的一种装置。按照转换方式的不同,常分为自感式(包括可变磁阻式与涡流式)和互感式(差动变压器式)两种。

以上各种类型传感器均需要与之配套的测量仪表,方能测出输出的电信号,而测定出对应的物理量。为此在选用观测仪器时,应尽量使用同一种原理的观测仪器和测量仪表,有利于人员培训,操作使用与维护管理。

当今,传感器技术的主要发展动向,一是开展基础研究,重点研究传感器的新材料和新工艺;二是实现传感器的智能化。智能型传感器是一种带有微处理器并兼有检测和信息处理功能的传感器。智能型传感器被称为第四代传感器,使传感器具备感觉、辨别、判断、自诊断等功能,是传感器的发展方向。



2.4 监测仪器的选择和标定

2.4.1 监测仪器的选择

岩土工程监测中,根据不同的工程场地和监测内容,监测仪器(传感器)和元件的选择应从仪器的技术性能、仪器埋设条件、仪器测读的方式和仪器的经济性四个方面加以考虑。其原则如下:

1. 仪器技术性能的要求

(1) 仪器的可靠性：仪器选择中最主要的要求是仪器的可靠性。仪器固有的可靠性是最简易、在安装的环境中最持久、对所在的条件敏感性最小，并能保持良好的运行性能。为考虑测试成果的可靠程度，一般认为，用简单的物理定律作为测量原理的仪器，即光学仪器和机械仪器，其测量结果要比电子仪器可靠，受环境影响较少。对于具体工程，在满足精度要求下，选用设备应以光学、机械和电子为先后顺序，优先考虑使用光学及机械式设备，提高测试可靠程度；这也是为了避免无法克服的环境因素对电子设备的影响。所以在监测时，应尽可能选择简单测量方法的仪器。

(2) 仪器使用寿命：岩土工程监测一般是较为长期、连续进行的观测工作，要求各种仪器能从工程建设开始，直到使用期内都能正常工作。对于埋设后不能置换的仪器，仪器的工作寿命应与工程使用年限相当，对于重大工程，应考虑某些不可预见因素，仪器的工作寿命应超过使用年限。

(3) 仪器的坚固性和可维护性：仪器选型时，应考虑其耐久和坚固，仪器从现场组装标定直至安装运行，应不易损坏，对各种复杂环境条件下均可正常运转工作。为了保证监测工作的有效和持续，仪器选择应优先考虑比较容易标定、修复或置换的仪器，以弥补和减少由于仪器出现故障给监测工作带来的损失。

(4) 仪器的精度：精度应满足监测数据的要求，选用具有足够精度的仪器是监测的必要条件。如果选用的仪器精度不足，可能使监测成果失真，甚至导致错误的结论。过高的精度也不可取，实际上它不会提供更多的信息，只会给监测工作增加麻烦和费用预算。

(5) 灵敏度和量程：灵敏度和量程是互相制约的。一般对于量程大的仪器其灵敏度较低；反之，灵敏度高的仪器其量程则较小。因此，仪器选型时应对仪器的量程和灵敏度统一考虑。首先满足量程要求，一般是在监测变化较大的部位，宜采用量程较高的仪器；反之，宜采用灵敏度较高的仪器；对于岩土体变形很难估计的工程情况，既要高灵敏度又要有大量程的要求，保证测量的灵敏度又能使测量范围可根据需要加以调整。

2. 仪器埋设条件的要求

(1) 仪器选型时，应考虑其埋设条件。对用于同一监测目的的仪器，在其性能相同或出入不大时，应选择在现场易于埋设的仪器设备，以保证埋设质量，节约劳力，提高工效。

(2) 当施工要求和埋设条件不同时，应选择不同仪器。以钻孔位移计为例，固定在孔内的锚头有：楔入式、涨壳式（机械的与液压的）、压缩木式和灌浆式。楔入式与涨壳式锚头，具有埋设简单、生效快和对施工干扰小等优点，在施工阶段和在比较坚硬完整的岩体中进行监测，宜选用这种锚头。压缩木式锚头具有埋设操作简便和经济的优点，但只有在地下水比较丰富或很潮湿的地段才选用。灌浆式锚头最为可靠，完整及破碎岩石条件均可使用，永久性的原位监测常选用这种锚头。但灌浆式锚头的埋设操作比较复杂，且浆液固化需要时间，不能立即生效，对施工干扰大，不适合施工过程中的监测。

3. 仪器测读方式的要求

(1) 测读方式也是仪器选型中需要考虑的一个因素。岩土体的监测，往往是多个监测项目子系统所组成的统一的监测系统。有些项目的监测仪器布设较多，每次测量的工

作量很大，野外任务十分艰巨。为此，在实际工作中，为提高一个工程的测读工作效率与加快数据处理进度，选择操作简便易行、快速有效和测读方法尽可能一致的仪器设备是十分必要的。有些工程的测点，人员到达受到限制，在该种情况下可采用能够远距离观测的仪器。

(2) 对于能与其他监测网联网的监测，如水库大坝坝基边坡监测时，坝基与大坝监测系统可联网监测，仪器选型时应根据监测系统统一的测读方式选择仪器，以便于数据通讯、数据共享和形成统一的数据库。

4. 仪器选择的经济性要求

(1) 在选择仪器时，进行经济比较，在保证技术使用要求时，使仪器购置、损耗及其埋设费用最为经济，同时，在运用中能达到预期效果。仪器的可靠性是保证实现监测工作预期目的的必要条件，但提高仪器的可靠性，要增加很多的辅助费用。另外，选用具有足够精度的仪器，是保证监测工作质量的前提。但过高的精度，实际上不会提供更多的信息，还会导致费用的增加。

(2) 在我国，岩土工程测试仪器的研制已有很大发展。近年研制的大量国产监测仪器，已在岩土工程的监测中大量采用，实践证明，这些仪器性能稳定可靠且价格低廉。

2.4.2 监测仪器的质量要求

监测仪器应考虑的主要技术性能及其质量标准主要有可靠性和稳定性、准确度和精度、灵敏度和分辨力。

1. 可靠性和稳定性

可靠性和稳定性是指仪器在设计规定的运行条件和运行时间内，检测元件、转换装置和测读仪器、仪表保持原有技术性能的程度。要求用于岩土监测的仪器，应能经受时间和环境的考验，仪器的可靠性和稳定性对监测成果的影响应在设计所规定的范围内。仪器由于温度、湿度等因素影响引起的零漂，应限制在仪器设计所规定的限度内，仪器允许使用的温度、湿度范围越大，其适应性越好。

2. 准确度和精度

准确度是指测量结果与真值偏离的程度，系统误差的大小是准确度的标志。系统误差越小，测量结果越准确。精度是指在相同条件下测量同一个量所得结果重复一致的程度。由偶然因素影响所引起的随机误差大小是精度的标志，随机误差越小，精度越高。

3. 灵敏度和分辨力

对传感器而言，灵敏度是输入量（被测信号）与输出量的比值。具有线性特性的传感器灵敏度为常数。当用相等的被测量输入两个传感器时，灵敏度高的传感器的输出量高于灵敏度低的传感器。对于接收仪器来说，同一个微弱输入量，灵敏度高的接收仪器读数值比灵敏度低的仪器读数值大。

分辨力对传感器来说是灵敏度的倒数，灵敏度越高，分辨力越强，传感器检测出的输入量变化越小。对机测仪器（如百分表、千分表等），其分辨力以表尺面的最小刻度表示。

2.4.3 监测仪器的适用范围和使用条件

1. 变形观测仪器

对建筑物和地基的变形观测包括表面位移观测和内部位移观测。目的是观测水平位移和垂直位移，掌握变化规律，研究有无裂缝、滑坡、滑动和倾覆的趋势。

表面位移观测一般包括两大类：

(1) 用经纬仪、水准仪、电子测距仪或激光准直仪，根据起测基点的高程和位置来测量建筑物表面标点、觇标处高程和位置的变化。

(2) 在建筑物内、外表面安装或埋设一些仪器来观测结构物各部位间的位移，包括接缝或裂缝的位移测量。如在坝体内部、坝基或坝肩、竖井、廊道、隧洞、压力钢管、发电厂房以及高边坡、深基础等部位安装位移测量仪器，观测其自身和相互间的位移和位移变化率。内部安装的位移测量仪器要在结构物的整个寿命期内使用。因此，这些仪器必须具有良好的长期稳定性，有较强的抗蚀能力，适应恶劣工作环境的能力强、耐久性好、易于安装、操作简单，记录仪表直接易掌握，而且能长距离传输。常用的内部位移观测仪器有位移计、测缝计、倾斜仪、沉降仪、垂线坐标仪、引张线仪、多点变位计和应变计等。

2. 压力（应力）观测仪器

工程建筑物的压力（应力）观测包括：混凝土应力观测、压力观测、孔隙压力观测、坝体及坝基渗透压力观测、钢筋压力观测、岩体应力（地应力）及岩土工程的荷载或集中力的观测等。

对于混凝土建筑物应力分布，是通过观测应变计的应变计算得来的。为了校核应变计的计算成果，有时通过埋设应力计来测量基础的垂直应力与之比较，当然这种应力计只能测量压应力。

土压力的观测对研究土体内各点应力状态的变化是非常重要的。观测的仪器有：边界式土压力计和埋入式土压力计两类。土压力计测得的土压力均为总压力，要求得土体有效应力，在埋设土压力计的同时，应埋设孔隙压力计。

孔隙压力计又叫渗压计，在土石坝和各种土工结构物中埋设渗压计，可以了解土体孔隙压力分布和消散的过程。在坝基和坝肩观测孔隙压力，对测定通过坝体接缝或裂缝，坝基和坝肩岩石内的节理、裂缝或层面所产生的渗漏，以及校核抗滑稳定和渗透稳定也是至关重要的。在高层建筑的地基、高边坡、大型洞室以及帷幕灌浆等工程中，埋设孔隙压力观测仪器也是必不可少的。渗压计用于混凝土坝基扬压力观测时，也称扬压力计。

通常称作钢筋计的是用来观测钢筋混凝土结构物内钢筋受力状态的仪器，国内常用的有钢弦式和差动电阻式两类。

3. 其他观测仪器

温度观测也是岩土工程监测中不可少的。凡是观测与外界温度或自身温度有关的物理量，均观测温度。此外，许多工程还根据温度观测了解由温度直接反映的工程性状。为了监测施工期和正常运行期的温度分布，进行混凝土坝内部温度观测，一般都采用网络布置温度计。

目前使用的温度计大多是电阻式温度计，使用差动电阻式仪器均可同时进行温度观测。

岩土工程中的动态观测，主要是观测由于地震和爆破等外界因素引起的岩土体和结构的振动和冲击。通过振动速度、加速度、位移、动应变应力、动土压力、动水压力和动孔隙水压力观测，确定振动波衰减速度、峰值速度和冲击压力。动态观测使用的传感器有：速度计、加速度计、动水压力计、动土压力计、动孔隙水压力计。岩土工程的动态观测，还包括使用声波速度和地震波速度测试手段测试岩体波速来确定岩体松动范围和动态力学参数。

2.4.4 传感器（仪器）的标定

仪器（传感器）的标定（又称率定）是利用精度高一级的标准器具对传感器进行定度的过程，从而确定其输出量与输入量之间的对应关系，同时也确定不同使用条件下的误差关系。由于传感器在制造上的误差，即使仪器相同，其输出特性曲线（标定曲线）也不尽相同。因此，传感器在出厂前都作了标定，因此在购买的传感器提货时，必须检验各传感器的编号及与其对应的标定资料。传感器在运输、使用等过程中，内部元件和结构因外部环境变化和内部因素的变化，其输入输出特性也会有所变化，因此，必须在使用前或定期进行标定。

标定的基本方法是：利用标准设备产生已知“标准”输入量，或用标准传感器检测输入量的标准值，输入待标定的传感器，并将传感器的输出量与输入标准量相比较，获得校准数据和输入输出曲线、动态响应曲线等，由此分析计算而得到被标传感器的技术性能参数。

传感器的标定分为静态标定和动态标定两种。

1. 传感器的静态标定

静态标定主要用于检验和测试传感器的静态特性指标，如线性度、灵敏度、滞后和重复性等。

根据传感器的功能，静态标定首先需要建立静态标定系统，其次要选择与被标定传感器的精度相适应的一定等级的标定用仪器设备。按传感器的种类和使用情况不同，其标定方法也不同，对于荷重、应力、应变传感器和压力传感器等的静标定方法是利用压力试验机进行标定。更精确的标定则是在压力试验机上用专门的荷载标定器标定。位移传感器的标定则是采用标准量块或位移标定器。

具体标定步骤如下：

- (1) 将传感器测量范围分成若干等间距点；
- (2) 根据传感器量程分点情况，输入量由小到大逐渐变化，并记录各输入输出值；
- (3) 将输入值由大到小逐点减少下来，同时记录下与各输入值相对应的输出值；
- (4) 重复上述两步，对传感器进行正反行程多次重复测量，将得到的测量数据用表格列出或绘制曲线；
- (5) 进行测量数据处理，根据处理结果确定传感器的静态特性指标。

2. 传感器的动态标定

一些传感器除了静态特性必须满足要求外，其动态特性也需要满足要求。因此在进行静态校准和标定后还需要进行动态标定，以便确定它们的动态灵敏度、固有频率和频响范围等。

传感器进行动态标定时，需有一标准信号对它激励，用标准信号激励后得到传感器的输出信号，经分析计算、数据处理，便可决定其频率特性，即幅频特性、阻尼和动态灵敏度等。

复习思考题

1. 简述传感器的定义与组成。
2. 一个测试系统由哪些部分组成？
3. 传感器的静态特性的主要技术参数指标有哪些？
4. 钢弦式传感器的工作原理是什么？
5. 什么是金属的电阻应变效应？怎样利用这种效应制成应变片？
6. 试述应变片温度误差的概念、产生的原因和补偿办法。
7. 光纤传感器的特点是什么？
8. 选择传感器的原则有哪些？
9. 如何选择监测仪器和元件？
10. 如何进行传感器的标定？传感器的标定步骤有哪些？