

高校土木工程  
专业指导委员会规划推荐教材

# 岩土工程测试与监测技术

南京工业大学 宰金珉 主编  
中国矿业大学 贺永年 杨为好 主审

中国建筑工业出版社

高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材

# 岩土工程测试与监测技术

南京工业大学 宰金珉 主编  
中国矿业大学 贺永年 杨为好 主审

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

岩土工程测试与监测技术/宰金珉主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2008

高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材

ISBN 978-7-112-09839-2

I. 岩… II. 宰… III. ①岩土工程—测试技术—高等学校—教材②岩土工程—监测—高等学校—教材  
IV. TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 017756 号

高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材

岩土工程测试与监测技术

南京工业大学 宰金珉 主编

中国矿业大学 贺永年 杨为好 主审

\*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

世界知识印刷厂印刷

\*

开本: 787×960 毫米 1/16 印张: 17 $\frac{1}{2}$  字数: 425 千字

2008 年 7 月第一版 2008 年 7 月第一次印刷

印数: 1—3000 册 定价: 29.00 元

ISBN 978-7-112-09839-2

(16543)

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

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。岩土测试技术以岩土力学理论为指导法则，以工程实践为服务对象，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。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准确性、代表性以及经济性的重要手段。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。

岩土工程的测试、检测与监测是从事岩土工程勘察、设计、施工和监理的工作者所必需的基本知识，同时也是从事岩土工程理论研究所必需具备的基本手段。因此，对土木工程专业学生而言，岩土工程检测和测试技术是一门必须掌握的专业基础课程。

本书讲义在南京工业大学岩土工程、勘察技术与工程等专业本科生、研究生中试用多年，其间曾作过几次修订。

本书编写分工如下：第1章由汪中卫编写，第2章由徐洪钟编写，第3章由袁灿勤编写，第4章由李俊才编写，第5章由黄广龙编写，第6章由王旭东编写，第7章由陈新民编写，第8章由蒋刚编写。全书由宰金珉、王旭东和徐洪钟组撰与统稿。

中国矿业大学贺永年、杨为好教授对本书的初稿进行了详细的审阅，提出了许多宝贵的修改意见和建议，在此表示衷心的感谢！

本书在编辑出版过程中，得到了中国建筑工业出版社的大力帮助和支持，在此也表示感谢！

限于编者水平，书中难免有不足之处，恳请读者批评指正。

岩土工程的测试、检测与监测是从事岩土工程勘察、设计、施工和监理的工作者必需掌握的基本知识，同时也是从事岩土工程理论研究所必需具备的基本手段。本书主要内容包括：绪论、测试技术基本知识、岩土的原位测试技术、地基加固的检验与检测、桩基础的测试与检测、基坑工程监测、地下工程的监测和监控、边坡工程监测等。

本书可作为土木工程、岩土工程、勘察技术与工程等专业本科生和研究生的教材，也可供相关专业技术人员在从事工程勘察、设计、施工和监理等工作时参考。

\* \* \*

责任编辑：王 跃 吉万旺

责任设计：赵明霞

责任校对：关 健 王雪竹

# 目 录

<b>第1章 绪论</b> .....	1
§ 1.1 本课程的目的和意义 .....	1
§ 1.2 本课程在岩土工程中的地位与作用 .....	2
§ 1.3 岩土工程测试、检测及监测技术简介 .....	3
§ 1.4 岩土工程测试与检测技术的现状与展望 .....	6
<b>第2章 测试技术基础知识</b> .....	8
§ 2.1 测试的一般知识 .....	8
§ 2.2 传感器的基本特性 .....	9
§ 2.3 常用传感器的类型和工作原理 .....	12
§ 2.4 监测仪器的选择和标定 .....	22
思考题 .....	27
<b>第3章 岩土的原位测试技术</b> .....	28
§ 3.1 概述 .....	28
§ 3.2 静力载荷试验 .....	28
§ 3.3 静力触探试验 .....	35
§ 3.4 野外十字板剪切试验 .....	45
§ 3.5 动力触探 .....	52
§ 3.6 扁铲侧胀试验 .....	62
§ 3.7 岩土体现场剪切试验 .....	66
思考题 .....	71
<b>第4章 地基加固的检验与检测</b> .....	72
§ 4.1 概述 .....	72
§ 4.2 主要的地基加固方法及适用条件 .....	74
§ 4.3 各类地基加固的检验与检测 .....	81
§ 4.4 工程实例 .....	93
思考题 .....	99
<b>第5章 桩基础的测试与检测</b> .....	100
§ 5.1 概述 .....	100
§ 5.2 单桩竖向抗压静载荷试验 .....	101
§ 5.3 单桩竖向抗拔静载荷试验 .....	108
§ 5.4 单桩水平静载荷试验 .....	111

§ 5.5	桩基的低应变动测	117
§ 5.6	桩基的高应变动测	130
§ 5.7	Osterberg 试桩法和静动试桩法	144
	思考题	149
<b>第 6 章</b>	<b>基坑工程监测</b>	<b>150</b>
§ 6.1	概述	150
§ 6.2	变形监测	152
§ 6.3	土压力和孔隙水压力监测	163
§ 6.4	支护结构内力监测	169
§ 6.5	监测警戒值与报警	172
§ 6.6	监测期限与频率	175
§ 6.7	监测报表与监测报告	176
§ 6.8	工程实例	177
	思考题	188
<b>第 7 章</b>	<b>地下工程的监测和监控</b>	<b>189</b>
§ 7.1	概述	189
§ 7.2	围岩压力量测	192
§ 7.3	位移量测	198
§ 7.4	现场量测计划和测试的有关规定	204
§ 7.5	施工监控及量测数据的分析与应用	208
§ 7.6	工程实例	213
	思考题	221
<b>第 8 章</b>	<b>边坡工程监测</b>	<b>222</b>
§ 8.1	概述	222
§ 8.2	边坡工程监测方法与内容	223
§ 8.3	边坡变形监测	229
§ 8.4	边坡应力、地下水、环境等监测	238
§ 8.5	边坡工程监测的设计	241
§ 8.6	监测实施和资料汇总分析	247
§ 8.7	工程实例	253
	思考题	266
	参考文献	267

# 第1章 绪论

## § 1.1 本课程的目的和意义

岩土工程是利用土力学、岩体力学及工程地质学的理论与方法，为研究各类土建工程中涉及岩土体的利用、整治和改造问题而进行的系统工作。

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，可以设计相应的应力—应变本构关系，给定数值计算模型，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。这可以说是岩土力学新理论的极大贡献。

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，而且也为岩土工程设计所必需。岩土工程在设计 and 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 本课程在岩土工程中的地位与作用

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。岩土力学在一定意义上讲就是一门试验力学,试验是土力学发展的基础。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,从而产生岩土体的强度理论和本构模型,并进而逐渐形成现代土力学理论。从计算分析的角度而言,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, K. Terzaghi 在 19 世纪 20 年代就创立了土的一维固结理论,对于主固结过程作出了数学解析,同时还提出次固结(次时间效应)的概念性论述。但是,由于当时的测试手段跟不上,所以他始终没有对次固结过程进行过具体的分析,甚至在试验中无法准确划分主、次固结的界限。然而,到了 19 世纪 70 年代,人们开始在土样内实际监测固结过程中的孔隙水压力变化,尤其是在等梯度固结试验等仪器及方法提出之后,才开始能够真正划分二者的界限,从而为建立完整的固结理论提供了有效手段。又如,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)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。

### § 1.3 岩土工程测试、检测及监测技术简介

随着生产的发展,各类土木工程如雨后春笋般涌现,并向着高、深、大的方向发展,而岩土工程测试技术是从根本上保证岩土工程勘察、设计、治理、监测的准确性、可靠性以及经济合理性的重要手段,因此,岩土体工程特性的准确测试更显得重要。

为解决各类复杂的岩土工程问题,出现了许多新理论和新设计方法,而岩土工程理论是以岩土测试技术和相应的实验依据作为发展背景的。如果没有新的测试技术的相应发展,设计所依据的各项参数就无法测得,设计的结果也无从验证,故而岩土工程理论、设计的先进性也无法体现。因此岩土工程测试不仅在土木工程实践中非常重要,而且在岩土工程学科理论发展中也起着关键作用。

岩土工程测试包括室内土工试验、岩体力学试验、原位测试、原型试验和现场监测等,在整个岩土工程中占有特殊而重要的地位。

#### 1. 室内土工试验

目前,土工试验大致可分为观察判别试验、物理性质试验、化学性质试验和力学性质试验等。

## 2. 岩体力学试验

岩体力学试验主要任务是进行常规力学指标测试和岩体变形与破坏机理的分析与研究。

## 3. 原位测试

有些岩土工程由于地质条件复杂或者结构条件与荷载条件复杂,难以用理论计算方法对土体的应力—应变的变化作出准确的预计,也难以在室内模拟现场地层条件和现场荷载条件进行试验。这时,可以通过原位试验为设计提供可靠的依据。原位测试就是在岩土工程施工现场,在基本保持被测试岩土体(或加固体)的结构、含水量以及应力状态不变的条件下测定其基本物理力学性能。岩土原位测试又可以分为两种,一种是作为获取设计参数的原位试验,另一种则是作为提供施工控制和反演分析参数的原位检测。

原位测试的独特优点在于:

- (1) 避开了取土样的困难,可以测定难以采取不扰动试样的土层(如砂土、贝壳层、流动淤泥等)的有关工程性质;
- (2) 在原位应力条件下进行试验,避免采样过程中应力释放的影响;
- (3) 试验的岩土体体积较大,代表性强;
- (4) 工作效率较高,可大大缩短勘探试验的周期。

原位测试尽管有着诸多优点,但也有其不足之处:

- (1) 各种原位测试都有其针对性和适用条件,如使用不当则会影响结果的准确性和合理性;
- (2) 原位测试所得参数与土的工程性质间的关系往往是建立在统计关系上;
- (3) 影响原位测试成果的因素较为复杂(如周围的应力场、排水条件和施工过程对测试环境的干扰等),使得对测定值的准确判定造成一定的困难;
- (4) 原位测试中的主应力方向与实际岩土工程问题中多变的主应力方向往往并不一致。

因此,岩石的室内试验与原位测试,两者各有其独到之处,在全面研究岩石的各项性状中,两者不能偏废,而应相辅相成。至于工程物探,与原位测试方法的关系十分密切,有些检测工作本身就是应用物探方法进行的。物探测试技术主要有层析成像(CT)技术、电磁波透视、浅层地震、地质雷达、声纳剖面、瞬变电磁法等。

## 4. 原型试验

原型试验以实际地下结构物为对象在现场地质条件下按设计荷载条件进行试验,其试验结果具有直观、可靠等优点,主要有桩基试验、锚杆试验等。通过原型试验可以进一步验证工程勘察结果和设计结果的正确性与可靠性。

## 5. 现场监测

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。

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与设施的影响。

工程中一些现场监测项目和方法见表 1-1 所示。

建筑物与岩土体的变形观测及方法

表 1-1

监测项目		观测方法
地表位移、沉降观测	短距离测量	岩体表面收敛测量、滑坡记录仪等
	长距离测量	光学仪器测量等
岩体内部的变形观测		钻孔伸长仪、钻孔温度计等
土体内部的变形观测		测斜仪、伸长仪、分层沉降观测仪等
建筑物与岩土体间接触压力的测量		压力盒、钢筋应力计等
岩体应力测量	间接测量	钻孔变形计、钻孔应变计、钻孔包体式应力计
	直接测量	水压破裂法测量、液压枕等
土体应力测量		压力盒
孔压测量		测压管、孔隙水压力计

## § 1.4 岩土工程测试与检测技术的现状与展望

近年来,各类建设工程的不断开展,给岩土工程领域带来了巨大活力,同时也提出了更高的要求。新技术、新设备,包括GPS等在内的高技术的注入,大大促进了岩土工程检测与测试水平的提高,为岩土工程领域的不断扩展打下了坚实的基础。岩土工程检测与测试始终贯穿于岩土工程勘察、设计、施工、监测的全过程。岩土工程勘察,在解决与工程有关的岩土工程问题,查明不良工程地质现象,提出解决存在问题的方法;利用获得的检测、测试数据合理确定岩土参数;科学准确地作出结论等方面发挥了巨大的作用。岩土工程测试要求技术人员责任心强,它直接关系岩土工程参数提取是否准确与合理。但由于各种原因,在岩土工程测试工作的开展中还存在一些非技术性的不足之处,例如还存在下列情况:

(1) 手段单一。岩土工程测试是获得岩土工程科学参数的主要手段。针对不同的岩土工程项目,应采用不同的测试方法,以得到合理的岩土工程参数。如果无视工程复杂程度与否,仅用单一简单方法,难免得到不合实际的结论。

(2) 结果缺乏科学合理的解释。岩土工程测试是一项技术性强,责任心强的严肃性工作。如果在重要环节使用非专业人员或人员的素质与训练不够,则结果的科学性与合理性得不到保证。

(3) 管理制度不健全。管理制度不健全是阻碍岩土测试及岩土工程领域发展的根本所在。如果无论工程大小与复杂程度,也不管所需的设备是否满足要求,只从经济效益出发,跨越资质、等级,低水平操作是管理失效的主要表现。

(4) 人员培训不及时。我国岩土工程领域的快速发展,对岩土工程检测与测试提出了更高的要求,测试新技术的应用被普遍重视,对人员的培训考核显得尤为重要。

充分利用岩土工程检测、测试技术,是保证岩土工程质量的根本保证,是推进岩土工程领域不断扩展的基石。通过对以上几个方面存在问题的回顾,有必要采取以下几方面措施:

(1) 首先应建立健全行业管理制度,严肃行业纪律,提高参与岩土工程领域工作人员的素质,确保这一行业向着规范化发展。

(2) 增强对从事岩土工程工作的单位考核与管理,应特别注意人员培训与考核、设备保有率与完好率和适应行业发展的能力。

(3) 为确保岩土工程质量,应加强对岩土工程各个环节的控制,增强对检测、测试环节的阶段验收和最终评判。

今后,岩土工程测试将在如下几方面得到发展:

(1) 取样技术的标准化。实践证明,室内试验仍是不可缺少的技术手段,岩

土的一些基础数据,如粒度成分、密度、含水量、可塑性等指标,只能通过室内试验测定。测定土的力学性状时,室内试验可根据需要,控制应力、应变及排水条件,而原位测试很难做到;室内测定的指标,其物理力学意义是明确的,而有些原位测试得到的指标,没有明确的物理力学意义。既然室内试验不能废弃,取样技术问题就不能回避。

(2) 新仪器新方法的开发。由于试验方法在很大程度上影响着岩土力学理论的发展,结合有关高技术产业,广泛吸收现代计算机技术、同位素示踪技术、光电电子技术、卫星测量技术、电、磁场测试技术、声波测试技术、遥感测试技术以及传感器技术的最新成就,开发出功能强、精度高、速度快、抗干扰、智能化程度高的高精度试验仪器(如高精度局部位移传感器和压力传感器)。高精度测试仪器的出现将使得测试结果的可靠性、可重复性方面得到很大的提高,最终将导致岩土工程方面测试结果在可信度方面的大大改进。地下结构表面的土压力测试等传统测试难题等变得简单而可靠,室内室外试验所得到的试验数据更具有现实的工程意义。

(3) 工程地球物理探测。工程物探在我国已有 40 多年历史,早期主要引用传统的物探方法,如地面直流电法、电测井等,方法单一,多解性强,误差很大,效果不理想。近年来,国内外应用各种物探原理(弹性波、声波、电压磁波、应力波等)开发了一批性能很强的专用仪器,如波速仪、探地雷达、管线探测仪、打桩分析仪等,这些仪器具有精度高、抗干扰能力强等优点,而且能适应各种岩土工程的需要。因此各种物探的新技术和新方法将会有很强的生命力,是今后发展的一个重要方向。

(4) 现场测试、室内试验、理论预测和数值反分析及其再预测的有机结合与循环。室内试验是基础,并由此做出工程行为理论预测;现场实时监控与测试能提供对预测作出重要的修正,并经反分析得到按既有理论得出符合实际工程反应所需的参数值,从而进行再预测。这种循环高速、定时的进行是现场综合测控的重要方法,远程自动控制与实施是测控的革命性进展。

## 第2章 测试技术基础知识

### § 2.1 测试的一般知识

在科学技术高度发达的现代社会中，人类已进入瞬息万变的信息时代，人们在从事工业生产和科学实验等活动中，主要依靠对信息资源的开发、获取、传输和处理。传感器处于研究对象与测控系统的接口位置，是感知、获取与检测信息的窗口。一切科学实验和生产过程，特别是自动检测和自动控制系统所获取的信息，都要通过传感器转换为容易传输与处理的电信号。

在岩土工程实践中提出监测和检测的任务是正确及时地掌握各种信息。大多数情况下是要获取被测对象信息的大小，即被测试的值大小。这样，信息采集的主要含义就是测试、取得测试数据。

“测试系统”这一概念是传感技术发展到现在一定阶段的产物。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。

#### 2.1.1 测试

测试是以确定量值为目的的一系列操作。所以测试也就是将被测试值与同种性质的标准量进行比较，确定被测试值对标准量的倍数。它可由下式表示：

$$x = nu \quad (2-1)$$

或 
$$n = \frac{x}{u} \quad (2-2)$$

式中  $x$ ——被测试值；

$u$ ——标准量，即测试单位；

$n$ ——比值（纯数），含有测试误差。

由测试所获得的被测的量值叫测试结果。测试结果可用一定的数值表示，也可以用一条曲线或某种图形表示。但无论其表现形式如何，测试结果应包括两部

分：比值和测试单位。确切地讲，测试结果还应包括误差部分。

被测试值和比值等都是测试过程的信息，这些信息依托于物质才能在空间和时间上进行传递。参数承载了信息而成为信号。选择其中适当的参数作为测试信号，例如热电偶温度传感器的工作参数是热电偶的电势。测试过程就是传感器从被测对象获取被测试的信息，建立起测试信号，经过变换、传输、处理，从而获得被测试的量值。

### 2.1.2 测试系统构成

测试系统是传感器与测试仪表、变换装置等的有机组合。图 2-1 所示为测试系统原理结构框图。



图 2-1 测试系统原理结构框图

系统中的传感器是感受被测试的大小并输出相对应的可用输出信号的器件或装置。

数据传输环节用来传输数据。当测试系统的几个功能环节独立地分隔开的时候，则必须由一个地方向另一个地方传输数据，数据传输环节就是能够完成这种传输功能的环节。

数据处理环节是将传感器输出信号进行处理和变换。如对信号进行放大、运算、线性化、数-模或模-数转换，变成另一种参数的信号或变成某种标准化的统一信号等，使其输出信号便于显示、记录，既可用于自动控制系统，也可与计算机系统联接，以便对测试信号进行信息处理。

数据显示环节将被测试信息变成人感官能接受的形式，以完成监视、控制或分析的目的。测试结果可以采用模拟显示，也可采用数字显示，也可以由记录装置进行自动记录或由打印机将数据打印出来。

## § 2.2 传感器的基本特性

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。

所谓动态特性，是指当被测量随时间变化时，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。

### 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（非线性误差）

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：

$$e_f = \pm \frac{\Delta_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (2-3)$$

式中  $e_f$ ——非线性误差（线性度）；

$\Delta_{\max}$ ——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。

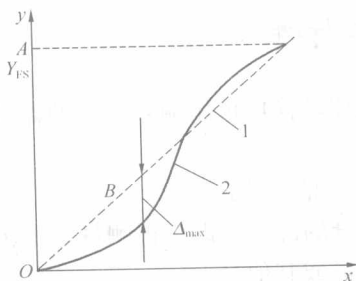


图 2-2 非线性误差说明

1—拟合直线；2—校准曲线

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形误差，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