

土木工程研究生系列教材

# 土木工程测试技术

赵望达 主编  
徐志胜 主审



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

土木工程研究生系列教材

# 土木工程测试技术

主 编 赵望达  
副主编 李耀庄  
参 编 李 昀 申永江  
主 审 徐志胜



机械工业出版社



本书是根据我国高等院校土木工程专业教学大纲编写的,系统地介绍了土木工程测试技术中的智能传感器技术、无损检测技术、信息处理技术等。本书共分9章,内容包括:绪论、测试技术传感器基础、混凝土测试方法、混凝土缺陷的超声探伤及声发射诊断、混凝土测温技术、应变测量及应用、超声检测仪及智能超声检测仪开发技术、土木工程测试数据处理方法、土木工程测试应用实例。

本书内容新颖,体系全面,重点突出,结合实际,内容涉及土木工程测试的理论、技术与应用等各个方面。

本书可作为高等院校土木工程专业、交通运输工程专业的硕士研究生必修课程教材,也可供相关工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

土木工程测试技术/赵望达主编. —北京:机械工业出版社, 2013. 12

土木工程研究生系列教材  
ISBN 978-7-111-44282-0

I. ①土… II. ①赵… III. ①土木工程—建筑测量—研究生—教材 IV. ①TU198

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第236606号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:马军平 责任编辑:马军平 林辉

版式设计:常天培 责任校对:潘蕊

封面设计:张静 责任印制:李洋

三河市国英印务有限公司印刷

2014年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·15印张·368千字

标准书号:ISBN 978-7-111-44282-0

定价:35.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

# 前 言

进入 21 世纪以来，人类社会迈向信息化的步伐已越来越快。对于土木工程，如何利用信息时代的先进控制技术、测试技术、计算机技术和网络技术，不断拓宽其研究应用范围就是其发展的趋势之一。土木工程测试技术是包含了多学科知识的一门综合技术。为了满足培养土木工程信息化技术人才，以及土木工程专业人员的需要，编者参照土木工程专业教学大纲，并根据多年从事信息科学与工程及土木工程交叉领域研究和研究生教学的经验，编写了这本研究生教材。

本书的主要特点是图文并茂、系统性强、理论联系实际，注重应用，特色突出。本书系统地介绍了土木工程测试技术中智能传感器技术、无损检测技术、信息处理技术等核心知识。

本书由中南大学土木工程学院赵望达教授担任主编并负责统稿，李耀庄教授任副主编，李昀博士、申永江博士参加编写工作。具体编写分工为：第 1、5、7、8 章由赵望达编写，第 3、6 章由李耀庄编写，第 2、9 章由李昀编写，第 4 章由申永江编写。本书编写工作始于 2004 年，历时十年，在作为内部教材使用过程中，根据历届研究生们对教材核心知识点、总体结构及许多细节问题提出的意见和建议进行了不断的修正。特别要感谢李卫高、袁月明、杨琳琳、冯瑞敏、卢超、周湘川、张振兴、李洪、李旭、丁文婷等研究生在书稿资料整理过程中付出的艰苦劳动。

本书由中南大学徐志胜教授主审。徐教授对本书的编写提出了许多宝贵的意见和建议，在此对他表示衷心的感谢。同时，本书参考并引用了大量的书刊资料及有关单位的一些科研成果和技术总结，在此谨向这些文献的作者表示衷心的感谢。

本书编写中，虽然力图在认真总结土木工程专业教学和实践的同时，集理论与应用为一体，按独立的学科体系搭建本书的框架结构，但因本书所涉及学科领域较多，需要的知识面较广，且科学是不断发展的，人们对科学问题的认识也是不断深入完善的，限于作者水平及经验，不妥之处，敬请读者和同行给予批评指正。

编 者

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 土木工程测试技术概述 .....	1
1.2 土木工程测试技术体系结构 .....	1
1.3 无损检测技术的发展趋势 .....	2
1.4 神经网络在土木工程测试中的应用 .....	4
<b>第 2 章 测试技术传感器基础</b> .....	6
2.1 传感器的基本原理 .....	6
2.2 智能传感器 .....	13
2.3 无线传感器网络 .....	20
2.4 传感器在土木工程测试领域的应用 .....	24
<b>第 3 章 混凝土测试方法</b> .....	28
3.1 回弹法 .....	28
3.2 超声检测法 .....	38
3.3 钻芯法 .....	52
3.4 超声回弹综合法 .....	55
3.5 其他测试方法 .....	63
<b>第 4 章 混凝土缺陷的超声探伤及声发射诊断</b> .....	66
4.1 概述 .....	66
4.2 混凝土裂缝深度的检测 .....	68
4.3 混凝土其他缺陷的检测 .....	73
4.4 混凝土损伤程度的声发射诊断 .....	92
<b>第 5 章 混凝土测温技术</b> .....	102
5.1 混凝土测温概述 .....	102
5.2 热电偶测温法 .....	106
5.3 热电阻测温法 .....	108
5.4 光纤测温法 .....	110
5.5 DS18B20 测温法 .....	112
5.6 基于多种温度传感器的测温系统 .....	114
<b>第 6 章 应变测量及应用</b> .....	120
6.1 电阻应变计的测量与选择 .....	120
6.2 电阻应变计的粘贴 .....	122
6.3 电阻应变计工作原理概述 .....	123
6.4 测量桥路的选择 .....	129
6.5 现场应变测量 .....	132
6.6 钢筋混凝土应变测量 .....	136
6.7 动态应变仪和静态应变仪 .....	147

<b>第7章 超声检测仪及智能超声检测仪开发技术</b> .....	150
7.1 概述 .....	150
7.2 超声检测仪 .....	150
7.3 智能超声检测仪开发技术 .....	155
<b>第8章 土木工程测试数据处理方法</b> .....	173
8.1 检测数据的误差处理 .....	173
8.2 检测数据的回归分析 .....	182
8.3 先进数据处理方法 .....	190
<b>第9章 土木工程测试应用实例</b> .....	205
9.1 基于进化神经网络的火灾模拟试验实例 .....	205
9.2 桥梁测试实例 .....	208
9.3 变电站混凝土结构的检测实例 .....	223
<b>参考文献</b> .....	233

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 土木工程测试技术概述

进入 21 世纪以来,人类迈向信息化的步伐越来越快。土木工程是研究人们基本生活设施和环境的古老学科。在日新月异的信息化时代,新的学科不断涌现,一方面给老学科带来了巨大压力,另一方面也为老学科的发展提供了机遇。对于土木工程学科,利用信息时代的先进控制技术、测试技术、计算机技术和网络技术,不断拓宽其研究领域和应用范围就是土木工程学科发展的机遇之一。因此,在土木工程研究生教育中,如何培养研究生综合利用信息领域先进技术与成果,进行与土木工程交叉的边缘领域的研究与探索,进而提高其综合科研素质,是一个对培养土木工程专业高端人才具有重要意义的课题。特别是在国家“十一·五”规划提出全面建设创新型国家和创新型大学之际,对传统学科进行学科交叉的创新也是培养高素质人才具有战略意义的重要课题。

在信息化时代下,西方发达国家纷纷迎合这一新的要求,非信息类学科大量开设信息学科相关课程,以培养非信息类学科大学生更好地利用先进信息技术手段的能力以及综合科研素质。美国的伊利诺伊厄本那一香槟大学土木工程与环境系开设了结构进化计算、神经网络和数字计算等与信息学科密切相关的课程,从而使其毕业学生在工程设计或科学研究中能很好地运用遗传算法、神经网络和先进计算机技术等进行结构优化设计,运用小波神经网络、概率神经网络以及单片机、DSP 技术进行结构的损伤诊断。

在国内,许多非信息类专业,特别是传统的工科专业不仅开设电工电子技术、计算机文化基础、FORTRAN 语言、C 语言等基础信息类课程,很多专业还开设单片机原理、数字信号处理、传感器技术等信息应用技术类课程,大大丰富了学生的选课范围。哈尔滨工业大学和大连理工大学以王光远院士、欧进萍院士等学科领军大师为首,吸引信息、材料、机械等学科的高层次人才,组成跨学科、跨学校的课题组,并让博士、硕士研究生以及一些优秀的本科生参加高水平的国家自然科学基金、国家重大科技攻关项目,在桥梁结构的健康监测、大型海洋平台在线安全监测等项目中应用先进的信息化技术,取得了一系列有重要影响的成果。沈阳建筑大学的姜绍飞教授在土木建筑结构设计和监测中引入信息学科的人工智能和智能计算方法,在土木建筑学科的教学和科研中进行了大量的探索性研究。

## 1.2 土木工程测试技术体系结构

### 1.2.1 智能传感器技术

智能传感器(Intelligent Sensor)是具有信息处理功能的传感器。智能传感器带有微处理机,具有采集、处理、交换信息的能力,是传感器集成化与微处理机相结合的产物。一般智能机器人

的感觉系统由多个传感器集合而成,采集的信息需要计算机进行处理,而使用智能传感器就可将信息分散处理,从而降低成本。与一般传感器相比,智能传感器具有以下三个优点:通过软件技术可实现高精度的信息采集,不仅成本低,并具有一定的编程自动化能力,功能多样化。

智能传感器具有使用简单、精确度高等特点,包括光纤传感器、压电传感器、磁致伸缩传感器和纤维增强复合材料等。压电传感器与磁致伸缩传感器,既可作为传感器也可作为执行器,这使得土木工程测试成为一个积极的测试工作。智能传感器能够对土建结构及内部状态进行实时、在线的无损检测,有利于结构的安全监测和整体性评价及维护。

### 1.2.2 无损检测技术

无损检测是一种在不损伤材料和成品的条件下研究其内部和表面有无缺陷的技术。它利用材料内部结构的异常或缺陷的存在所引起的对热、声、光、电、磁等反应的变化,来评价结构异常和缺陷存在及其危害程度。无损检测一般有三种简称,即 NDT (Nondestructive Testing) 无损检测, NDI (Nondestructive Inspection) 无损检查, NDE (Nondestructive Evaluation) 无损评价。无损检测的目的-般包括:定量掌握强度与缺陷的关系;评价构件的允许负荷、寿命或剩余寿命;检测在制造过程中产生的结构不完整性及缺陷情况,以便改善制造工艺。它不仅涉及成品部件的试验评价,也与设计制造工艺相关,可以有效地减少因建筑物的破坏所造成的经济损失及人员伤亡。

无损检测技术在很大程度上是一种信息技术,它是一个获取信号、提取信息、导出结论的过程。因此,发展新型高性能的接收换能器,采用先进的信号处理技术是主要的发展方向。信号处理,特别是数字信号处理已经变得越来越重要,人工智能、神经网络、模式识别和图像识别等将获得更广泛的应用。计算机对无损检测的发展也是至关重要的,它在检测自动化、数据处理、改变显示方式和数值模拟等方面将发挥巨大作用。经过不断创新,无损检测技术必将更加广泛地应用于土木工程中。

### 1.2.3 信息处理技术

信息处理技术是指用计算机技术处理信息,计算机运行速度极高,能自动处理大量的信息,并具有很高的精确度。

为了适应信息时代的信息处理要求,当前信息处理技术逐渐向智能化方向发展,从信息的载体到信息处理的各个环节,广泛地模拟人的智能来处理各种信息。人工智能学科与认知科学的结合,进一步促进了人类的自我了解和控制能力的发挥。研究具有认知机理的智能信息处理理论与方法,探索认知的机制,建立可实现的计算模型并发展应用,有可能带来未来信息处理技术突破性的发展。如神经网络、遗传算法等先进测试数据组合处理方法均在土木工程信息处理中获得越来越广泛的应用。

## 1.3 无损检测技术的发展趋势

### 1.3.1 无损检测技术的发展概况

早在 20 世纪 30 年代,人们就开始探索混凝土无损检测技术。1930 年首先出现了表面



压痕法。1948年瑞士人施密特(E. Schmid)研制成功回弹仪。1949年加拿大的莱斯利(Leslie)等运用超声脉冲检测混凝土获得成功。20世纪60年代罗马尼亚的费格瓦洛(I. Facaoaru)提出超声回弹综合法。随后,许多国家也相继开展了这方面的研究工作,制定了有关的技术标准。我国在20世纪50年代引进瑞士、英国、波兰等国的回弹仪和超声仪,并结合工程应用开展了许多研究工作。经过几十年的研究和工程应用,我国研制了一系列的无损检测仪器设备,结合工程实践进行了大量的应用研究,逐步形成了JGJ/T 23—2011《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》,CECS 02—2005《超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程》,CECS 69—2011《拔出法检测混凝土强度技术规程》,CECS 21—2000《超声法检测混凝土缺陷技术规程》等技术规程,并由此解决了工程实践中的问题,取得了巨大的社会经济效益。

### 1.3.2 无损检测技术的应用

无损检测技术可直接检验结构物的混凝土强度、缺陷及其他物理力学性能指标,可以确保结构质量,节约材料,提高劳动生产率和加快施工进度。它特别适用于确定不利条件(火灾、冰冻、超载、地震、各种化学介质的侵蚀等)下混凝土的损害程度,研究和评价同一试样随时间而变异的各种性能。因此,对无损检测技术的研究就具有更大的现实意义和广阔的发展前景。

随着人们对工程质量的关注,以及无损检测技术的迅速发展和日臻成熟,无损检测技术在建设工程中的作用日益明显。它不但已成为工程事故的检测和分析手段之一,而且正在成为工程质量控制和构筑物使用过程中可靠性监控的一种工具。可以说,无损检测技术成为建筑技术发展水平的重要标志之一。

随着我国工程界对新技术、新材料的应用,对检测技术也提出了新的要求,如高强、高性能混凝土的应用,以及再生混凝土等新材料的应用对结构工程无损检测技术提出了新的要求。计算机、互联网技术将与新一代检测仪器和检测技术紧密结合。伴随着电子技术的不断进步,仪器处理能力得到提高,模糊聚类分析、神经网络甚至人工智能等先进的数据处理手段将得到更广泛的应用,使其能快速地进行大量信息的处理,使检测结果更加可靠,检测水平不断提高。

### 1.3.3 无损检测技术的分类和特点

无损检测技术的主要特点是非破坏性、随机性、远距离探测、间接性、现场检测等,并且检测数据可连续性采集,通过数理分析和逻辑判断,能够比较准确地推定出工程质量的状况。

按检测目的,无损检测方法分为四类:

- 1) 检测结构、构件混凝土强度值。
- 2) 检测结构、构件混凝土内部缺陷(如裂缝、孔洞和不密实区、结合面质量、损伤层等)。
- 3) 检测几何尺寸(如钢筋位置、保护层厚度、板面或墙面厚度等)。
- 4) 检测结构混凝土强度质量的匀质性。

按检测对结构、构件是否造成破损分为非破损检测方法(如回弹法、超声法、超声-回

弹综合法、磁测法、电测法、电磁法等)和半破损检测方法(如钻芯法、拔出法、射钉法等)。

### 1.3.4 无损检测的发展动向

1) 随着计算机技术的应用,检测仪器逐步向高、精、尖方向发展,如超声仪的智能化、超声成像技术、雷达波反射成像技术及冲击一回波技术等。其优点在于:①从单一的参数检测到多参数综合分析,从简单的检测数据到直观的检测结果表达;②为一机多用开辟了途径,如将超声仪和冲击一回波仪合二为一,增加了仪器的使用价值;③大力发展高速无损检测技术,这将大幅度降低检测费用,使大范围的精细检测和在线检测成为可能。

2) 随着高灵敏传感系统的不断出现,如红外、微波、射线等传感系统,适用于无损检测技术的传感系统越来越多样化。

3) 为了适用某些特殊结构物的检测需要,无损检测系统正朝着专用化、小型化、一体化、集约化的趋势发展。

4) 无损检测结果的评定是从检验批的总体中,随机抽取若干组试件进行破坏性抗压试验,并以此试验结果,根据抽样理论中试样统计参数与总体统计参数之间的关系,来判断被评价的检验批的总体质量。无损检测结果的评定方法由单值或平均值评定方法过渡到统计方法评定,它使评定结果更加合理,并与国家有关标准取得了一致,提高了无损检测结果的可信性。

5) 无损检测技术中缺陷检测判断依据向多方向发展。

① 概率法判据。指检出大面积网格测试之中的统计异常值,出现该异常值的部位即为缺陷区。

② PSD判据。指在连续测量的沿线上,声时曲线的斜率与相邻测点声时差值的乘积。

③ NFP判据(多因素概率法)。运用多项参数(如声时、波幅、频率等)进行缺陷综合判断,可提高判断的灵敏性和可靠性。

④ 多因素模糊综合判据。采用模糊数学的方法对各参数权数进行合理分配,列出因素集和评判集,并通过模糊变换作出综合判断。

## 1.4 神经网络在土木工程测试中的应用

思维学普遍认为,人类大脑的思维分为抽象(逻辑)思维、形象(直观)思维和灵感(顿悟)思维三种基本方式。

抽象(逻辑)思维是指根据逻辑规则进行推理的过程。它先将信息化成概念,并用符号表示,然后根据符号运算、按串行模式进行逻辑推理,这一过程可以写成串行的指令,让计算机执行。形象(直观)思维是将分布式存储的信息综合起来,结果是忽然间产生想法或解决问题的办法。这种思维方式是基于以下两点:一是信息是通过神经元上的兴奋模式分布存储在网络上;二是信息处理是通过神经元之间同时相互作用的动态过程来完成的。

人工神经网络就是模拟人思维的第二种方式。人工神经网络(Artificial Neural Networks, 简称为ANNs)也简称为神经网络(NNs)或连接模型(Connection Model)。它是一种模仿动物神经网络行为特征,进行分布式并行信息处理的算法数学模型。这是一个非线性动力学

系统,其特色在于信息的分布式存储和并行协同处理。虽然单个神经元的结构极其简单,功能有限,但大量神经元构成的网络系统所能实现的行为却是极其丰富多彩的。

#### 1.4.1 神经网络在土木工程中应用的可行性

神经网络能够在土木工程中得到应用,是由神经网络的特点符合土木工程的应用要求所决定的,神经网络的特点如下:

- 1) 分布式存储信息:网络结构和连接权。
- 2) 自适应性:自学习、自组织、泛化和训练。
- 3) 并行性:每一神经元独立,各神经元并行处理。
- 4) 联想记忆功能。
- 5) 自动提取特征参数。
- 6) 鲁棒性(容错性)。

其在土木工程应用的可行性,可从以下两点分析:

1) 专家系统成为工程设计中必不可少的工具,但系统存在一些缺陷,神经网络的上述特点正好可解决这些问题。

2) 在损伤诊断中通过损伤模式匹配和特征参数的自动提取来解决复杂的非线性、不确定性问题。

#### 1.4.2 神经网络在土木工程中的应用领域

神经网络在土木工程中的应用领域主要包括:结构分析与初步设计、结构优化设计、结构损伤检测和诊断、结构控制、科学决策、结构材料与本构关系、回归分析。

回归法在分析混凝土强度无损检测数据时存在局限性,最新的研究在处理数据时引入了非线性数据分析领域比较成熟的人工神经网络(ANNs)技术。结果表明,ANNs适合处理这类数据,并在一些方面补充了回归法的不足。ANNs的引入使混凝土强度无损检测数据分析中增加了新的相关变量,可以更深入或更广泛地考察混凝土强度无损检测及其数据处理的有关问题。

## 第 2 章 测试技术传感器基础

智能传感器 (Intelligent Sensor 或 Smart Sensor) 在检测及自动控制系统中相当于人的五感 (即视、听、嗅、味、触等)。自动化系统的功能越全, 系统对传感器的依赖程度也越大。在高级控制系统中, 智能传感器是一项关键技术。新型传感器不仅要“感知”外界的信号, 还要把“感知”到的信号进行必要的加工处理, 两者结合实现传感器的优异功能是今后传感器发展的必然趋势。传感器的智能化是科学技术发展的结果, 也是科学技术发展的需要。智能传感器的概念最初是美国宇航局 (NASA) 在开发宇宙飞船过程中形成的。自 20 世纪 70 年代初出现以来, 智能传感器的研究已成为当今传感器技术发展中的主要方向之一。

### 2.1 传感器的基本原理

#### 2.1.1 传感器的定义

GB 7665—2005《传感器通用术语》对传感器下的定义是: “能感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用信号的器件或装置, 通常由敏感元件和转换元件组成”。传感器又被称为发送器、传送器、变送器、检测器、探头等。

传感器的定义包含了下面四个方面的含意:

- 1) 传感器是测量装置, 能完成信号获取任务。
- 2) 它的输入量是某一被测量, 可能是物理量, 也可能是化学量、生物量等。
- 3) 它的输出量是某种物理量, 这种量要便于传输、转换、处理、显示等, 这种量可以是气、光、电量, 但主要是电量。
- 4) 输出输入有对应关系, 且应有一定的精确度。

传感器是一个系统。它可以是单个的装置, 也可以是复杂的组装体。但是无论其构成怎样, 它都具有一些相同的基本功能, 即需要检测输入信号并由此产生可测量的输出信号。

从仿生学的角度来理解: 将系统类比成人体器官来划分各系统, 如电源部件、传感部件、控制部件、执行部件和机械部件等。传感部件 (相当于眼、耳等感觉器官) 接受被测量信号 (相当于光、声等外部信号), 然后传递给控制部件 (相当于大脑), 由控制部件进行处理后将处理结果输出给执行部件 (相当于口、肢体等), 并由执行部件做出相应的动作。仿生学中系统与器官类比图如图 2-1 所示。

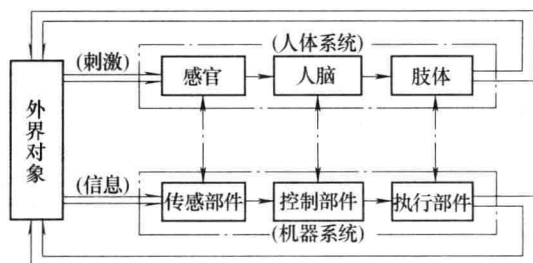


图 2-1 仿生学中系统与器官类比图 (传感器相当于“电五官”)



### 2.1.2 传感器的结构

传感器一般由敏感元件、传感元件、转换元件三部分组成。从系统角度看，传感器的结构图如图 2-2 所示。



图 2-2 传感器的结构图（从系统角度）

1) 敏感元件是指传感器中能直接感受被测量，并输出与被测量成确定关系的某一物理量的部件。

2) 传感元件是指传感器中能将敏感元件输出转换为适于传输和测量的电信号部件。

3) 转换元件是由于传感器输出信号一般都很微弱，需要有信号调节与转换元件将其放大或转换为容易传输、处理、记录和显示的形式，这一元件一般称为转换元件。传感器输出信号有很多形式，如电压、电流、频率、脉冲等，输出信号的形式由传感器的原理确定。常见的信号调节与转换电路有放大器、电桥、振荡器、电荷放大器等，它们分别与相应的传感器配合。

从信号角度看，传感器的结构图如图 2-3 所示。

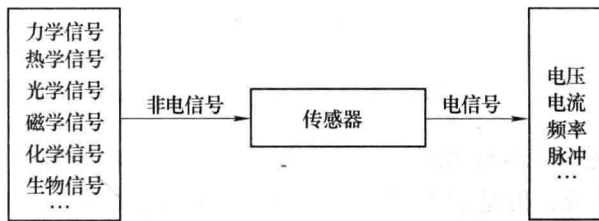


图 2-3 传感器的结构图（从信号角度）

图 2-4 所示为一些传感器的工作示意图。由图 2-4a、b 可以看出，热敏电阻和应变计都可以产生一种可变化的电阻值输出。许多传感器产生的电信号不仅可以以电阻的方式，还可以以电压、电流或频率等方式输出。图 2-4c 所示的弹簧秤，在可变力的作用下会产生一个位移的变化，即弹簧秤的表盘指针会沿着刻度方向移动（或转动）一个与弹簧所受力成正比的位移。图 2-4d 所示中，文丘里（Venturi）管通过测量压力差以确定液体的流量。

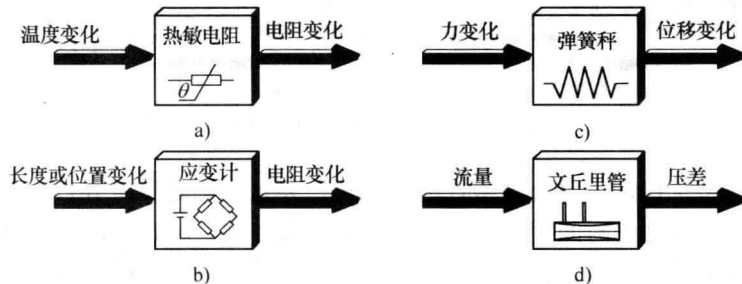


图 2-4 传感器工作示意图

### 2.1.3 传感器的应用模式

系统有很多种类和定义。但是，为了方便，本书仅把基本的传感器系统看做借助于某种处理过程从不同的输入产生某种定量输出的装置。图 2-5 所示是以流程图形式表示的基本系统。流程图是一种解释测量系统工作原理的有效方法。

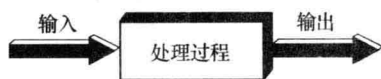


图 2-5 系统的流程图

人们通常把传感器的应用划分为三种系统类型，分别是测量系统、开环控制系统和闭环控制系统。

(1) 测量系统 测量系统显示或记录一种与被测输入变量相对应的定量输出，测量系统除了以用户可以读懂的方式向用户显示之外，不以任何方式对输入量产生响应。图 2-6 所示为测量系统的基本流程图。

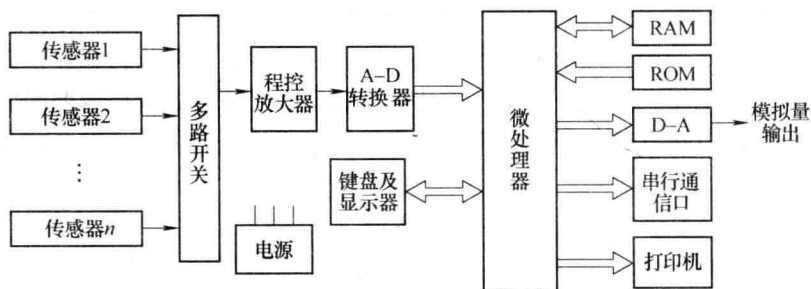


图 2-6 测量系统的基本流程图

(2) 开环控制系统 开环和闭环控制系统都是试图使被控变量保持为某预定的值。控制系统中包含了测量系统，但是它不同于纯粹的测量系统，其测量结果并不需要显示给用户，而是通过其测量系统输出量以便调节控制系统的某一参数。图 2-7 所示为一个开环控制系统的流程图。开环控制系统的基本原理是系统被一个预设值信号所控制。如果测量系统的输出量没有影响控制系统的预定参数，系统所要求的控制也能够达到，即使其他因素改变导致系统的输出不正确，预设值也不会改变。

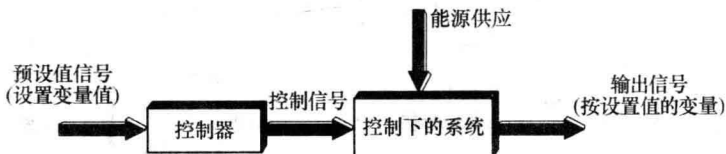


图 2-7 开环控制系统的流程图

假如一个开环系统控制一条街上路灯的开和关，要求夜幕降临时开灯，天亮时关灯。控制信号将根据天黑和天亮的时间用一个定时控制装置设置开、关灯的时间。这个系统可能在几周时间内还能正常工作，但是，在一年时间里，天黑和天亮的时间是变化的，预设的信号（时间）不久就会不合适（开、关灯的时间要么早、要么晚）。图 2-8 所示为路灯开环控制

系统的流程图。

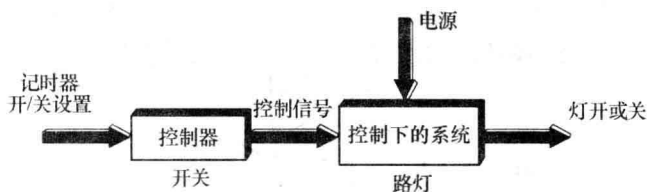


图 2-8 路灯开环控制系统的流程图

在该开环系统中，没有将检测到的、实际正在发生变化的系统参数输入给系统，即对于路灯控制系统来说，它不知道天是亮还是暗。对于一个开环系统，人们不得不估算什么时间天黑和什么时间天亮，并相应地改变预设值以控制开灯和关灯时间。这些预设的时间必须根据一天内天亮和天黑的时间变化而变化。因此，它需要频繁地调整预设值。通常这种调整的次数越少，工作的效果越差，且系统不会产生任何未预期的操作。例如，阴天或多云的天气，路灯应该比晴朗的天气要早开，但这在开环系统中是无法实现的。

开环控制系统在设计和制造上通常比较简单、廉价，但其效率很低或需要不断地进行调整操作。在很多情况下，正在控制的参数也在以某种方式发生变化，从而导致预设值不准确，进而需要更新设置。要准确地设置预设值，通常需要很高的技巧和准确的判断。若控制系统的参数没有达到预期值，将会产生很严重的后果。例如，在容器里注入危险性液体，需要控制液体的满溢高度，此时如果用开环控制系统就不合适。

(3) 闭环控制系统 在闭环控制系统里，输出状态会直接影响输入条件。闭环控制系统通过测量被控制系统的参数输出值并将其与期望值比较，其差值称为误差。

图 2-9 所示为闭环控制系统的流程图。期望值可认为是已知的，并作为信号参考值，或称为预设值，这个值与测量装置检测的测量值（称为反馈信号）进行比较。反馈信号与参考信号的差值称为误差信号。误差信号经过调制处理（如放大）以便能够调节控制系统。例如，误差信号是一种电信号，它可能需要被放大。被调制处理的误差信号称为控制信号。然后，控制信号调节系统的输出，以便尽可能使反馈信号与参考信号相一致。这将减少误差到零，并由此使系统达到期望值。

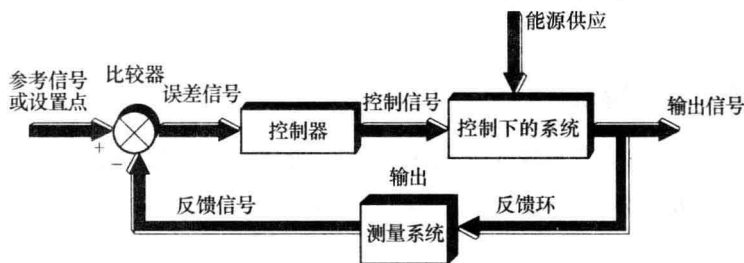


图 2-9 闭环控制系统的流程图

例如，在化工厂的储罐里存放着危险性液体，它的液位闭环控制系统的示意图如图 2-10 所示，储罐通过泵注入该液体。当需要对液体进行进一步加工处理时，另一个系统打开卸荷阀，并按生产需要放出液体，这样，储罐内的液面降低了。如果采用开环系统将无法实现有

效控制，因为预设值发生错误时后果是非常严重的，储罐内充满液体时可能会溢出危险性液体，流干液体导致化工厂停产。为了确保化工厂有效地工作，储罐内液体需要保持在一个最佳高度，可以用一个液面传感器检测液面并产生一个电信号输出。

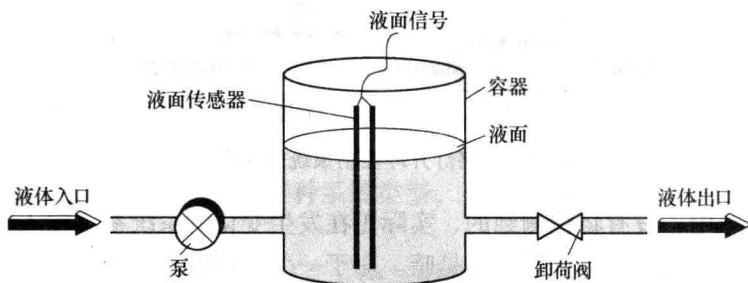


图 2-10 液位闭环控制系统的示意图

图 2-11 所示为控制储罐内液面的闭环控制系统的流程图。由液面传感器的输出（反馈信号）与理想液面（参考信号）比较，其差值就是误差信号。误差信号通过控制器被调制为控制信号。控制信号又驱动泵，并决定通过泵向储罐输入的液体流量。当误差为 0 时，液面达到了理想高度，控制信号为 0 并因此使泵停下来。利用这种方法，将与液面相关的信号变为电信号，无论它是恒定的还是变化的，通过控制泵的流量都可以始终保持安全的液面高度。

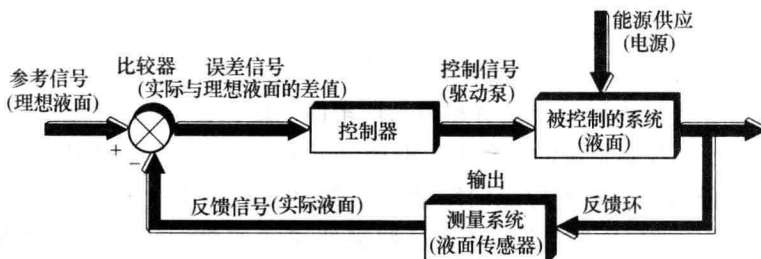


图 2-11 液面闭环控制系统的流程图

闭环系统通过自动反馈信息调整输入量达到控制输出量的目的，因此，它比开环系统误差更小，工作更有效，操作更简便。然而，其制造安装成本较高，且系统可能变得更复杂。

#### 2.1.4 传感器的应用特性

传感器特性主要是指输出与输入之间的关系：当输入量为常量，或变化极慢时（如温度、压力等），这一关系称为静态特性；当输入量随时间较快地变化时，这一关系称为动态特性。

传感器输出与输入关系可用微分方程来描述。理论上，将微分方程中的一阶及以上的微分项取为零时，即得到静态特性。因此，传感器的静态特性只是动态特性的一个特例。

传感器的输出与输入具有确定的对应关系，最好呈线性关系。但一般情况下，输出输入不会符合所要求的线性关系，同时由于存在迟滞、蠕变、摩擦、间隙和松动，以及传感器内部储能元件（电感、电容、质量块、弹簧等）和外界条件的影响等各种因素，使输出输入



对应关系的唯一确定性也不能实现。考虑了这些情况之后，传感器的输出输入作用图大致如图 2-12 所示。

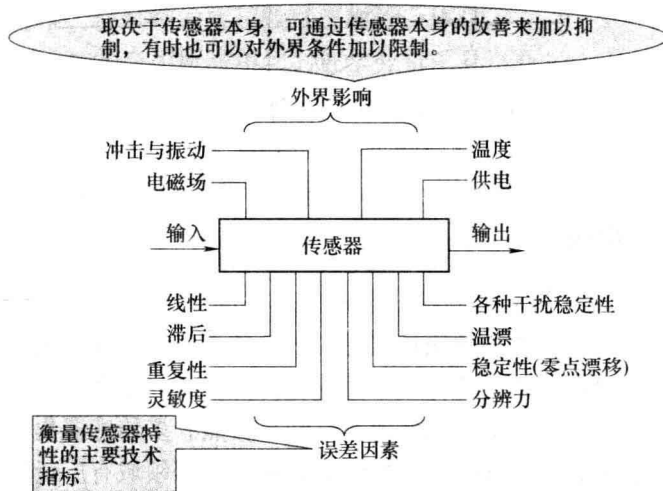


图 2-12 传感器输入输出作用图

## 2.1.5 传感器的应用选型

传感器的应用选型见表 2-1。

表 2-1 传感器的应用选型

基本参数指标	1) 量程指标: ① 量程范围; ② 过载能力等。 2) 灵敏度指标: ① 灵敏度; ② 分辨力; ③ 满量程输出等 3) 精度有关指标: ① 精度; ② 误差; ③ 线性; ④ 滞后; ⑤ 重复性; ⑥ 灵敏度误差; ⑦ 稳定性等 4) 动态性能指标: ① 固定频率; ② 阻尼比; ③ 时间常数; ④ 频率响应范围; ⑤ 频率特性; ⑥ 临界频率、速度; ⑦ 稳定时间等
环境参数指标	1) 温度指标: ① 工作温度范围; ② 温度误差; ③ 温度漂移; ④ 温度系数; ⑤ 热滞后等 2) 抗冲振指标: 允许各向抗冲振的频率、振幅及加速度、冲振所引入的误差 3) 其他环境参数: ① 抗潮湿; ② 抗介质腐蚀能力; ③ 抗电磁场干扰等
可靠性指标	① 工作寿命; ② 平均无故障时间; ③ 保险期; ④ 疲劳性能; ⑤ 绝缘电阻; ⑥ 耐压及耐温等
其他指标	与使用有关的指标: ① 供电方式 (直流、交流、频率及波形等); ② 功率; ③ 各项分布参数值、 ④ 电压范围与稳定度; ⑤ 外形尺寸; ⑥ 质量; ⑦ 壳体材质; ⑧ 结构特点; ⑨ 安装方式; ⑩ 馈线 电缆等

## 2.1.6 传感器的应用符号

GB/T 14479—1993《传感器图用图形符号》表示如下：正方形表示转换元件，三角形表示敏感元件，X 表示被测量符号，\* 表示转换原理。

几种典型传感器的通用图形符号如图 2-13 所示。