



普通高等教育“十二五”规划教材

检测技术基础与 传感器原理

郭颖 主编 / 张凯举 副主编

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

普通高等教育“十二五”规划教材

检测技术基础与传感器原理

郭颖 主编

张凯举 副主编

中国石化出版社

内 容 提 要

本书分为两篇,第1篇介绍检测技术的基本知识;第2篇介绍常见的传感器,包括应变式传感器、电容式传感器、电感式传感器、压电式传感器、热电式传感器、光电式传感器等,详细阐述了基本概念、工作原理、主要特性、测量转换电路及其典型应用。

本书取材新颖、叙述由浅入深,循序渐进。将检测技术基础知识与传感器原理紧密结合,内容全面、系统。既可作为高等院校电子信息类、仪器仪表类各专业的教学用书,也可作为有关工程技术人员参考及自学用书。

图书在版编目(CIP)数据

检测技术基础与传感器原理 / 郭颖主编. —北京:
中国石化出版社, 2015. 8
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5114-3374-9

I. ①检… II. ①郭… III. ①技术测量-高等学校-
教材 ②传感器-高等学校-教材 IV. ①TG806

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 127475 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。



中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com

北京富泰印刷有限责任公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 16 印张 400 千字

2015 年 8 月第 1 版 2015 年 8 月第 1 次印刷

定价:34.00 元

❖ 前 言 ❖

“千里眼、顺风耳”的古代神话传说是人类对扩展感觉器官的能力，更好地了解客观事物本质属性的一种美好憧憬。为此，人们经历了千百年的奋斗，陆续发明了各种各样的传感器、探测器检测装置及系统等，一步一步地实现着古人的梦想。尤其是进入 20 世纪以来，在科技飞速发展的推动下，人们获取信息的能力提高到了新的水平。以检测技术为基础发展起来的各种测量方法和测量装置已经成为人类生产生活、科学研究和防灾保护等活动中获取信息的重要工具。检测技术也必将成为 21 世纪教学和科研最重要的理论基础和核心技术。

学习传感器与检测技术的目的就是为了更好地了解和掌握这方面的知识，在工作实践中创造性地开发与应用。为此，我们编写了这本教材——检测技术基础与传感器原理。本书为了适应教学内容和课程体系改革的需要，将检测技术的基础知识与非电量测量课程的内容有机地整合为一门课程。这样“整合”不仅加强了课程内容间的联系与综合，避免脱节和不必要的重复，大大节省了学时，而且有利于拓宽学生的专业面。

全书共分为两篇。第 1 篇共 2 章，主要介绍了检测技术的基本知识；第 2 篇共 8 章，详细地叙述了各类常用传感器的基本概念、基本原理和主要特性，分析了传感器的测量电路、外围电路及应用电路。

本书由辽宁石油化工大学郭颖、张凯举、邓淑贤、王艳、赵宇共同完成。可作为高等院校电子信息类、仪器仪表类各专业的教学用书，也可作为有关工程技术人员参考及自学用书。

由于作者水平有限，书中难免有欠妥和错误之处，恳请读者批评、指正。

编者

❖ 目 录 ❖

第 1 篇 检测技术基础知识

第 1 章 检测技术基本概念	(1)
1.1 检测技术概述	(1)
1.2 测量方法	(1)
1.3 检测系统	(3)
1.4 检测技术的发展趋势	(7)
第 2 章 误差分析与数据处理	(9)
2.1 误差的基本概念及其分类	(9)
2.2 随机误差	(12)
2.3 系统误差	(23)
2.4 粗大误差	(31)
2.5 误差合成与分配	(35)
2.6 数据处理的基本方法	(46)
思考题与习题	(61)

第 2 篇 传 感 器

第 3 章 传感器的特性	(64)
3.1 传感器的定义及分类	(64)
3.2 传感器的一般特性	(66)
思考题与习题	(77)
第 4 章 应变式传感器	(78)
4.1 电阻应变式传感器	(78)
4.2 压阻式传感器	(94)
思考题与习题	(100)
第 5 章 电容式传感器	(103)
5.1 电容式传感器的工作原理和结构	(103)
5.2 测量电路	(111)
5.3 误差分析	(118)
5.4 电容式传感器的应用	(121)
思考题与习题	(126)
第 6 章 电感式传感器	(128)
6.1 自感式传感器	(128)

6.2	差动变压器	(135)
6.3	电涡流式传感器	(142)
	思考题与习题	(148)
第7章	压电式传感器	(150)
7.1	压电式传感器的工作原理	(150)
7.2	压电材料	(153)
7.3	压电式传感器的信号调理电路	(155)
7.4	压电式传感器的应用	(158)
	思考题和习题	(161)
第8章	热电式传感器	(162)
8.1	热电阻	(162)
8.2	热电偶	(167)
	思考题与习题	(176)
第9章	固态传感器	(181)
9.1	磁敏传感器	(181)
9.2	光敏传感器	(195)
9.3	气体传感器	(207)
9.4	湿度传感器	(213)
	思考题与习题	(219)
第10章	新型传感器	(221)
10.1	光纤传感器	(221)
10.2	CCD 图像传感器	(235)
10.3	红外传感器	(237)
	思考题和习题	(246)
	参考文献	(248)

第 1 篇 检测技术基础知识

第 1 章 检测技术基本概念

1.1 检测技术概述

检测技术是以研究检测系统中的信息提取、信息转换以及信息处理的理论与技术为主要内容的一门应用技术学科。检测技术属于信息科学的范畴，与计算机技术、自动控制技术和通信技术构成完整的信息技术学科。检测技术研究的主要内容包括测量原理、测量方法、测量系统和数据处理四个方面。

检测是利用各种物理、化学效应，选择合适的方法与装置，将生产、科研、生活等各方面的有关信息通过检查与测量的方法赋予定性或定量结果的过程。

在科学实验和工业生产中，为了及时了解实验进展情况、生产过程情况以及它们的结果，人们需要经常对一些物理量，如电流、电压、温度、压力、流量、液位等参数进行测量。如加热炉的温度控制，首先应对被测对象即炉膛内炉温进行测量，将测量到的数据提供给操作人员掌握炉况并将此工况值送入调节或控制装置以便实施自动控制炉温。通过对这些已获得的信息进行加工、运算、分析等，以进行预报、报警、检测、计量、保护、控制、调度和管理等工作，达到预防自然灾害、防止事故发生、提高劳动生产率、正确计量、顺利进行科学实验、进行文明生产和科学管理的目的。

现代人们的日常生活也越来越离不开检测技术。例如，用一氧化碳气敏传感器对煤气溢出进行监视等。

科学技术越发达，自动化程度越高，对检测技术的依赖性就越大。20 世纪 80 年代以来，世界各国都将检测技术列为重点发展的技术，十分重视。

1.2 测量方法

一般说的测量，其含义是用实验方法去确定一个参数的量值(数值和单位)，即通过实验，把一个被测参数的量值(被测量)和作为比较单位的另一个量值(标准量)进行比较，确定出被测量的大小和单位。所以测量是以确定量值为目的的一组操作。通过测量可以掌握被测对象的真实状态，测量是认识客观量值的唯一手段。

在测量中，把作为测量对象的特定量，也就是需要确定量值的量，称为被测量，由测量所得到的赋予被测量的值称为测量结果。单次测量所得到的量值是确定的，此测量结果常称为测得值。

测量方法是指实现测量过程所采用的具体方法。对于测量方法，从不同角度发出，有不

同的分类方法。根据测量手段分类,可以分为直接测量、间接测量和联立测量;根据测量方式分类,可以分为偏差式测量、零位式测量和微差式测量。

1.2.1 直接测量、间接测量和联立测量

1. 直接测量

在使用仪表进行测量时,如果对仪表读数不需要经过任何运算就能直接表示测量所需要的结果,这种测量就称为直接测量。例如,用磁电式电流表测量电路的支路电流、用弹簧式压力表测量锅炉压力等。

直接测量既可采用直接比较法,把同属一种物理量的被测量与标准量直接比较;也可以采用间接比较法,把被测量变换为能与标准量直接比较的物理量,然后再进行比较。在非电量电测技术中使用间接比较法比较多。例如,电阻应变式测力计将形变变换为电阻值的变化,然后与标准电阻相比较。

直接测量的优点是测量过程简单而迅速,缺点是测量精度不高,这种测量方法是工程上大量采用的方法。

2. 间接测量

有的物理量无法被测量或不便于直接测量,这就要求在使用仪表进行测量时,首先对与被测物理量有确定函数关系的几个量进行测量,然后将测量值代入函数关系式,经过计算得到所需的结果,这种方法称为间接测量。

例如,对生产过程中的纸张的厚度进行测量时无法直接测量,只得通过测量与厚度有确定函数关系的单位面积质量来间接测量。在测量直流功率时,根据 $P=UI$,先对 U 和 I 进行直接测量,再计算出功率 P 。间接测量比较复杂,但可以得到较高的测量精度。

3. 联立测量

在应用仪表进行测量时,若被测物理量必须经过求解联立方程组才能得到最后结果,则称这样的测量为联立测量。

在进行联立测量时,一般需要改变测试条件,才能获得一组联立方程所需要的数据。在测量过程中,操作手段很复杂,花费时间很长。联立测量是一种特殊的精密测量方法。一般在科学实验或特殊场合采用。

1.2.2 偏差式测量、零位式测量和微差式测量

1. 偏差式测量

在测量过程中,用仪表指针的位移(即偏角)决定被测量值,这种测量方式称为偏差式测量。

仪表上有经过标准器具校准过的标尺或刻度盘。在测量时,利用仪表指针在标尺上的示数,读取被测量的数值。偏差式测量简单、迅速,但精度不高。这种测量方法广泛应用于工程测量中。例如,用磁电式电压表测量电气元件两端的电压。

2. 零位式测量

用已知的标准量去平衡或抵消被测量的作用,并用指零式仪表来检测测量系统的平衡状态,从而判断被测量值等于已知标准量的方法称为零位式测量。

零位式测量的优点是可以获得比较高的测量精度,但是测量过程比较复杂,在测量时,

要进行平衡操作，花费时间长。因此，这种方法不适用于测量变化迅速的信号，只适用于测量变化较缓慢的信号。例如，用天平测量物体的质量，用电位差计测量未知电压等。

3. 微差式测量

微差式测量法是综合了偏差式测量法与零位式测量法的优点而提出的测量方法。这种方法是将被测的未知量与已知的标准量进行比较并取得差值，然后用偏差法测得此差值。应用这种方法进行测量时，标准量装在仪表内，并且在测量过程中直接与被测量进行比较。由于二者的值很接近，因此，测量过程中不需要调整标准量，而只需要测量二者的差值。

设 N 为标准量， x 为被测量， Δ 为二者之差，则 $x = N + \Delta$ ，即被测量时标准量与偏差值之和。

由于 N 为标准量，其误差很小并且 $\Delta \ll N$ 。因此，选用高灵敏度的偏差式仪表测量 Δ 时，即使测量 Δ 的精度较低，但因 $\Delta \ll N$ ，故总的测量精度仍很高。

微差式测量的优点是反应快而且测量精度高，适用于在线控制参数的检测。

1.3 检测系统

1.3.1 检测系统基本概述

工业检测技术涉及的内容较广泛，常见的内容如表 1.1 所示。

表 1.1 工业检测涉及的内容

被测量类型	被 测 量	被测量类型	被 测 量
热工量	温度、热量、比热容、热流、热分布、压力(压强)、压差、真空度、流量、流速、物位、液位、界面	物体的性质和成分量	气体、液体、固体的化学成分、浓度、黏度、湿度、密度、酸碱度、浊度、透明度、颜色
机械量	直线位移、角位移、速度、加速度、转速、应力、应变、力矩、振动、噪声、质量	状态量	工作机械的运动状态(启停等)、生产设备的异常状态(超温、过载、泄漏、变形、磨损、堵塞、断裂等)
几何量	长度、厚度、角度、直径、间距、形状、平行度、同轴度、粗糙度、硬度、材料缺陷	电工量	电压、电流、功率、电阻、阻抗、频率、脉宽、相位、波形、频谱、磁场强度、电场强度、材料的磁性能

在进行检测时所使用的仪器仪表，最早的是机械式仪表，以后发展到光学、电学等。近年来，由于电子技术的飞速发展，电量的测量技术也相应得到了提高，如准确度高、灵敏度高、反应速度快、能连续进行测量、便于自动记录等。可是在科学技术和工程上所要测量的参数大多为非电量。

依据检测对象是电量还是非电量，检测系统可分为电量检测系统和非电量检测系统两大类。由于非电量的种类比电量多得多，因此非电量检测系统比电量检测系统更为常见，更具有普遍性。

早期非电量的测量多采用非电的方法，例如，用尺测量长度和用水银温度计测量温度。但是

随着科学技术的发展,对测量的精确度、速度都提出了新的要求,尤其是对动态变化的物理过程进行测量以及对物理量的远距离测量,用非电的方法已经不能满足要求了,必须采用电测法。

电测法就是把非电量转换为电量来测量。由于非电量常常都通过传感器转换成电量来测量,电量检测系统的前端加上传感器即构成非电量检测系统,所以电量检测系统大多数已被包含在非电量检测系统中。本书只研究非电量检测系统。

1.3.2 检测系统的组成与功能

非电量检测系统的结构框图如图 1.1 所示。它由传感器、信号调理、信号分析与处理或微型计算机等环节组成,或经信号调理环节后,直接显示和记录。

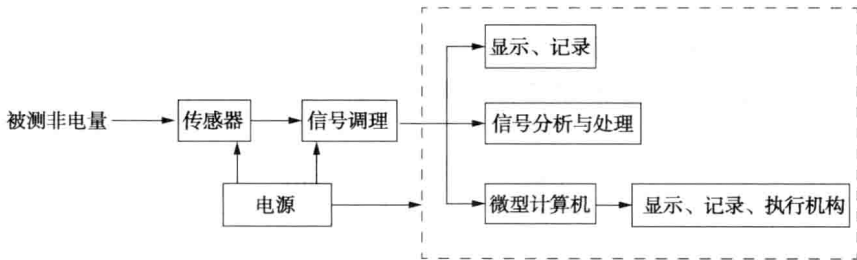


图 1.1 非电量检测系统结构框图

1. 传感器

传感器是将外界信息按一定规律转换成电量的装置,它是实现自动检测和自动控制的首要环节,本书将在后面进行重点介绍。

2. 信号调理环节

信号调理环节是对传感器输出的电信号进行加工,如将信号放大、调制解调、阻抗变换、线性化、将阻抗变换为电压或电流等,原始信号经这个环节处理后,就转换成符合要求,便于输送、显示、记录、转换以及可作进一步后续处理的中间信号。这个环节常采用模拟电路、电桥电路,相敏电路、测量放大器、振荡器等。常用的数字电路有门电路、各种触发器、A/D 和 D/A 转换器等。信号调理有时可能是许多仪器的组合,有时也可能仅有一个电路,甚至仅是一根导线。

3. 显示及记录环节

人们都希望及时知道被测量的瞬时值、累积值或其随时间的变化情况,因此,各类检测仪表和检测系统在信号调理环节计算出被测量的当前值后,通常均需送至各自的显示器作实时显示。显示器到检测系统是与人联系的主要环节之一,显示的方式常用的有模拟显示、数字显示、图像显示。

(1) 模拟显示就是利用指针对标尺的相对位置来表示读数。用有形的指针位移模拟无形的被测量是比较方便、直观的。指示仪表有磁电系、电磁系、电动系和感应系等多种形式,但均有结构简单、价格低廉、显示直观的特点,在检测精度要求不高的测量显示场合应用较多。指针式仪表存在指针驱动误差和标尺刻度误差,这种仪表的读数精度和仪器的灵敏度等受标尺最小分度的限制。

(2) 数字显示实际上是用一只专用的数字电压表、数字电流表或数字频率计,以数字形

式直接显示出被测量数值的大小。在正常情况下,数字式显示仪表彻底消除了显示驱动误差,能有效地克服读数的主观误差,可提高显示和读数的精度,还能方便地与计算机连接并进行数据传输。因此,各类检测仪表和检测系统正越来越多地采用数字式显示方式。

(3) 图像显示是指使用屏幕显示读数或者被测参数变化的曲线。这种显示方法具有形象性和易于读数的优点,又能同时在同一屏幕上显示一个被测量或多个被测量的变化曲线,有利于对它们进行比较、分析。屏幕显示器一般体积较大,价格比模拟显示和数字显示要高得多,其显示通常需要由计算机控制,对环境、湿度等指标要求较高。

在测量过程中,有时不仅要读出被测参数的数值,而且还要了解它的变化过程,特别是动态过程的变化,根本无法用显示仪表指示,那么就要把信号送至记录仪自动记录下来,现在常用的自动记录仪有笔式记录仪(如电平记录仪、 $x-y$ 函数记录仪、电子电位差计、光线示波器等)、磁带记录仪、电传打字机等。记录仪起记录信号的作用。

4. 信息分析与处理

对于动态信号的出路,即动态测量,常常还需要对测得的信号进行分析、计算和处理,从原始的测试信号中提取表征被测对象某一方面本质信息的特征量,以利于对动态过程作更深入了解。这个领域中采用的仪器有频谱分析仪、波形分析仪、实时信号分析仪、快速傅立叶变换仪等,但计算机技术在信号处理中已被广泛应用。

5. 电源

整个测试系统中还必须包括电源,一个检测系统往往既有模拟电路部分,又有数字电路部分,通常需要多组幅值大小要求各异但稳定的电源。这类电源在检测系统使用现场一般无法直接提供,通常只能提供交流 220V 工频电源或+24V 直流电源。检测系统在设计时需要根据使用现场的供电电源情况及检测系统内部电路的实际需要,统一设计各组稳压电源,给系统各部分电路和器件分别提供它们所需的稳定电源。在一些便携式仪器中,一般采用电池供电。

以上几个部分不是所有的检测系统都具备的,而且对于有些简单的检测系统,其各环节之间的界线也不是十分清楚,需根据具体情况进行分析。

另外,在进行检测系统设计时,对于把以上各环节具体相连的传输通道,也应给予足够的重视。传输通道的作用是联系系统的各个环节,为各环节的输入、输出信号提供通路。它可以是导线、管路(如光导纤维)以及信号所通过的空间等。信号传输通道比较简单,易被人们忽视,如果不按规定的要求布置及选择,则易造成信号的损失、失真或引入干扰等,影响检测系统的精度。

1.3.3 检测系统的分类

随着科技和生产的迅速发展,检测系统的种类不断增加,其分类方法也很多,工程上常用的几种分类法如下:

1. 按被测参数分类

(1) 电气参数:电能、电功率、电压、电流、频率、电阻、电容、磁场强度、磁通密度等。

(2) 机械参数:质量、位移、振动、力、应力、力矩、转速、线速度、加速度、噪声、缺陷检查、故障诊断等。

(3) 过程参数：主要是热工参数，通常可细分为温度、压力、流量、物位、成分分析等。每种参数被测对象范围、特性不同，需采用的检测方法和装置也不同，因此过程参数检测仪表用量大，检测介质多变、所处环境恶劣。

2. 按被测参量的检测转换方法分类

被测参量通常是非电量，通常需要用某种传感器把被测参量转换成电量，以便于处理。被测量转换成电量的方法很多，最主要的有下列几类：

(1) 电磁转换：电阻式、应变式、压阻式、热阻式、电感式、互感式、电容式、阻抗式、磁电式、热电式、压电式、霍尔式等。

(2) 光电转换：光电式、激光式、红外式、光栅、光导纤维等。

(3) 其他能/电转换：声/电转换(超声波式)、辐射能/电转换(X射线式、 β 射线式、 γ 射线式)、化学能/电转换(各种电化学转换)等。

3. 按使用性质分类

检测仪表使用场合不同决定其使用性质的差异，通常可据此分为工业用表、实验室表和标准表三种。

标准表是各级计量部门专门用于精确计量、校准送检样品和样机的标准仪表。标准表的精度等级必须高于被测样品、样机所标称的精度等级；而其本身由根据量值传递的规定，必须经过更高一级法定计量部门的定期检定、校准，由更高精度等级的标准表检定，并出示该标准表中心核定的合格证书，方可依法适用。

实验室表多用于各类实验室中，它的使用环境条件较好，往往具有特殊的防水、防尘措施。对于温度、相对湿度、机械振动等的允许范围也较小。这类检测仪表的精度等级虽比工业用表高，但使用条件要求较严，只适用于实验室条件下的测量与读数，不适于远距离观察及传送信号等。

工业用表是长期使用于实际工业生产现场的检测仪表与检测系统。这类仪表为数最多，根据安装地点不同，又有现场安装及控制室安装之分。前者应有可靠的防护，能抵御恶劣的环境条件，其显示也应醒目。工业用表的精度一般不是很高，但要求能长期连续工作，并具有足够的可靠性。在某些场合下使用时，还必须保证不因仪表引起事故，如在易燃、易爆环境条件下使用时，各种检测仪表都应有很好的防爆性能。

4. 按是否接触被测介质分类

检测仪表按是否接触被测介质分类，可分为接触式和非接触式检测仪表。

接触式检测仪表的检测元件与被测介质直接接触，感受被测量的作用或变化，从而获得测量信号。如热电阻温度计测温、电容式物位计测物位等都是接触式检测，其测量结果较准确但易受介质或化学性质影响。

非接触式检测仪表不直接接触被测介质，而是间接感受被测量的变化以达到检测目的。如辐射温度计不与被测物直接接触，而是接收被测物热辐射的能量并转换为电信号，再按辐射定律以温度值显示出来。其特点是不受被测对象污染或影响，使用寿命长，适用于接触式仪表某些难以胜任的场合，但测量精度一般比接触式略低。

5. 按仪表各环节连接方式分类

如前所述，检测系统由传感器、信号调理、显示、记录等环节等环节组成，这些内部环节的连接方式不同，使检测系统有开环式与闭环式之分。

开环式仪表中各环节按开环方式连接,系统中前一环节是后一环节的输入,首尾相接形成测量链,信号由输入端到输出端沿一个方向传递。

闭环式仪表又称为反馈式仪表,其最大的特点是整个仪表的传递函数只与反馈环节传递函数有关,而与各串联环节无关,故在很大程度上消除或减少了其他环节的影响。

此外,检测系统按显示方式可分为指示式(模拟式)显示、数字式显示、屏幕显示等几类,按被测对象状态分类可分为静态测量和动态测量。

1.4 检测技术的发展趋势

1. 不断提高仪器的性能,扩大应用范围

随着科学技术的发展,对仪器仪表性能的要求也在相应地提高,同时需要研究解决生产工艺过程中极端参数测量用的仪器,例如连续测量液态金属的温度、长时间连续测量高温介质(2500~3000℃)、固体物表面高温测量、极低温度测量(超导)、混相流量测量、脉动流量测量、微差压(几十帕)测量、超高压测量、高温高压下成分测量、高精度(0.01%)质量称重等,所以仪器要在原有的基础上不断地提高技术性能指标,扩大应用范围。

仪器仪表的可靠性对仪表的质量来说已成为一个重要因素,从20世纪60年代开始,人们就开始对仪表的可靠性进行研究,这方面内容包括对仪表可靠性和故障率的数学模型和计算方法的研究,对仪表可靠性设计、分配、预测、检验和分析试验的研究。仪表系统组件可靠性是对仪表整机性能的影响和确定整机可靠性方法的研究。

2. 微电子技术、微处理器与传感器结合

将微电子技术、微处理器与传感器结合,形成新一代智能传感器,将是非电量电测技术发展的一种新的趋势。智能传感器不仅具有检测信息的能量转换功能,而且具有测量、判断和处理信息的能力。由于微电子技术的发展,微型信号调节与微机接口电路、信号处理电路(包括微处理器)可与传感器封装成一体,使得传感器不仅有检测信号的能力,同时可以判断信号和处理信号,这样它本身已经成为一个非电量电测系统。只要传感器本身的性能稳定,即使是一个性能指标不高的传感器,进行智能化处理后,也可大大地提高传感器的精度,同时还可以进行温度补偿、线性化处理等一系列传感器功能优化工作。

3. 研究多维化、多功能化的仪器

目前的传感器主要是用来测量一个点的参数,但是在科学技术和工程上有时需要测量在一条线上或一个面上的参数,因此需要相应地研究一维、二维甚至三维仪器。

在有些场合,人们希望能在某一点同时测得两个甚至更多的参数,因此就要求能有测量多参数的仪器,即要使一台仪器多功能化,譬如说同时能测得一点的温度和湿度,为此人们在探索和寻求一些敏感元件材料,这种材料能同时感受两个以上参数而变换成不同的电量,而且要互不影响。

4. 研究无接触测量技术

在测量过程中,把传感器置于被测对象上,相当于加一负载在上面,这样多少会影响测量的精度。而在有些被测物上根本不可能安装仪器,例如,测量高速旋转轴的振动、转矩等,因此国际上都在研究采用无接触式的测试技术。目前已采用的一些光电式传感器、电涡流式传感器、超声波仪表、同位素仪表都是在这个要求上发展起来的。微波技术原来是用于

通信领域的，现在也被用来作为非电量电测技术的一种手段，而且还在研究用其他的原理和方法来进行无接触式的测量。

5. 研究新型原理的传感器

由于科学技术的发展，需要测量极端参数值(超高温、超高压、超低温)和特征(识别颜色、味觉、嗅觉)等，因此促使人们不断地探讨新的测量机理，以研制新型原理的传感器和仪表。这方面目前的研究除利用新的物理效应、化学反应和生物功能外，还不断研究仿生学，仿照生物的感觉功能和人的视、听、触、味等五官感觉，来开发未来的新型传感器。例如，研究狗的鼻结构来探索嗅觉传感器，因为狗辨别气味的能力是相当高的，它可以从十四五种混杂的气味中找出特定的一种气味，也能感受普通人嗅觉极限千万分之一的稀释液的气味。

6. 综合测试系统

综合测试系统是指采用多种及多个仪表或传感器去探索测试某一物理量的线、面和体空间参数及综合参数，以构成特殊的自动测试系统。例如，复杂机械零件的形状和位置误差的自动测试，粮食、烟草、酒类以及药材等产品质量综合参数的自动测试等。

第 2 章 误差分析与数据处理

人类在进行测量时，由于测量实验结果中存在误差的必然性与普通性，影响了得到的测量实验数据的可信赖性，甚至失去其科学价值与实用意义。因此，为了减小和控制误差的影响，掌握误差理论知识、具有认识误差性质、分析误差因素及其产生原因、减小和控制误差及最终结果评定等能力，是非常必要的。

2.1 误差的基本概念及其分类

2.1.1 研究误差的意义

- (1) 正确认识误差性质，分析产生误差原因，以减少或消除。
- (2) 正确处理测量和实验数据，合理计算结果，以得到更接近真值的数据。
- (3) 正确组织实验过程，合理设计、选用一起和测量方法，在最经济的条件下，得到最理想结果。
- (4) 研究误差可促进理论发展。(如雷莱研究：化学方法、空气分离方法。制氮气时，密度不同，导致后人发现惰性气体。)

2.1.2 误差定义及表示方法

定义：被测量的值与真值差异在数值上的表现——误差。误差=测得尺寸-真实尺寸。

例如，在长度测量中，测量某一尺寸的误差公式可表示为：误差=测得值-真值。

误差表示方法包括绝对误差、相对误差和引用误差(测量误差可用绝对误差表示，也可用相对误差表示)。

1. 绝对误差(测量误差)

绝对误差=测得值-真值

$$\Delta x = x - x_0$$

绝对误差有方向(+, -)、有单位、有大小。

真值：被测量的真实大小。常用实际值代替真值。(真值是一个理想的概念，一般是不知道的，通过测量得到的是真值的近似值，但在某些特定的情况下，真值又是可知的。如理论值，三角形内角之和为 180° ；定义值(按定义人为规定的)，国际千克基准的值可认为是 1kg 等；实际值，满足规定精确度的用来代替真值的量值。

在实际工作中常用到修正值：为减少或消除系统误差一种处理方法。

修正值=真值-测量值=-绝对误差

$$c = -\Delta x = x_0 - x$$

修正结果是将测得值加上修正值后的测量结果，这样可提高测量准确度。

【例 2-1】 用某电压表测量电压，电压表的示值为 226V，查该表的检定证书，得知该

电压表在 220V 附近的误差为 5V，被测电压的修正值为 -5V，则修正后的测量结果为 $226 + (-5V) = 221V$ ($226V$ —测得值， $220V$ —真值， $5V$ —绝对误差)。

2. 相对误差

$$\text{相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{真值}} \times 100\% \approx \frac{\text{绝对误差}}{\text{测量值}} \times 100\%$$

相对误差有大小、方向(+, -)、无单位，常用%表示；对于相同的被测量，可用绝对误差评定精度。对于不同的被测量或不同的物理量，可用相对误差评定精度。

【例 2-2】 用两种方法来测量 $L_1 = 100\text{mm}$ 的尺寸，其测量误差分别为 $\delta_1 = \pm 10\mu\text{m}$ ， $\delta_2 = \pm 8\mu\text{m}$ ，根据绝对误差大小，可知后者的测量精度高。但若用第三种方法测量 $L_2 = 80\text{mm}$ 的尺寸，其测量误差为 $\delta_3 = \pm 7\mu\text{m}$ ，此时用绝对误差就难以评定它与前两种方法精度的高低，必须采用相对误差来评定。

第一种方法的相对误差为

$$\frac{\delta_1}{L_1} = \pm \frac{10\mu\text{m}}{100\text{mm}} = \pm \frac{10}{100000} = \pm 0.01\%$$

第二种方法的相对误差为

$$\frac{\delta_2}{L_2} = \pm \frac{8\mu\text{m}}{100\text{mm}} = \pm \frac{8}{100000} = \pm 0.008\%$$

第三种方法的相对误差为

$$\frac{\delta_3}{L_3} = \pm \frac{7\mu\text{m}}{80\text{mm}} = \pm \frac{7}{80000} \approx \pm 0.009\%$$

由此可见，第一种方法精度最低，第二种方法精度最高。

3. 引用误差

指仪器仪表表示值的相对误差。

仪器表示值误差 = 示值 - 真值

$$\text{引用误差} = \frac{\text{示值误差}}{\text{测量范围上限}} \times 100\%$$

引用误差有大小，有方向，无单位，相对量程而言。

【例 2-3】 测量范围上限为 19600N 的工作测力计(拉力表)，在标定示值为 14700N 处的实际作用力为 14778.4N，则此测力计在该刻度点的引用误差为

$$\frac{14700\text{N} - 14778.4\text{N}}{19600\text{N}} \times 100\% = \frac{-78.4}{19600} \times 100\% = -0.4\%$$

2.1.3 误差来源

在测量过程中，按误差产生的原因可归纳为以下几种。

1. 测量装置误差

(1) 标准量具误差：以固定形式复现标准量具的器具，如氩 86 灯管、标准量块、标准电池、标准电阻、标准砝码等，它们本身体现的量值，不可避免地都含有误差。

(2) 仪器误差：直接或间接将被测量和已知量进行比较的器具设备，如天平、压力计、温度计等本身都具有误差。

(3) 附件误差: 仪器的附件及附属工具, 如千分尺的调整量棒等的误差, 也会引起测量误差。

2. 环境误差

测量时各种环境因数与规定的标准状态不一致造成的误差, 如温度、湿度、气压、振动、照明、重力加速度、电磁场等仪器在规定条件下的误差为基本误差, 超出规定条件所增加的误差为附加误差。

3. 方法误差

由于测量方法不完善所引起的误差。如测轴周长 s , 再由 $d = \frac{s}{\pi}$ 求直径, π 取值不同, 将会引起误差。

4. 人员误差

分辨能力、视觉器官的生理变化、习惯、疏忽等引起的误差。

2.1.4 误差分类

按误差的特点和性质, 误差可分为系统误差(也称偶然误差)和粗大误差三类。

1. 系统误差

在相同条件下, 多次测量同一量值时, 该误差的绝对值和符号保持不变, 或者在条件改变时, 按某一确定规律变化的误差——系统误差。如标准量值不准、一起刻度不准确引起的误差。

系统误差又可按下列分类:

(1) 按对误差掌握的程度分。

① 已定系统误差: 指误差的绝对值和符号已确定。

② 未定系统误差: 指误差的绝对值和符号未确定, 但可的出误差范围。

(2) 按误差出现规律分。

① 不变系统误差: (指绝对值和符号一定) 相当于以定系统误差。

② 变化系统误差: (指绝对值和符号为变化) 相当于未定系统误差, 但变化规律可知, 如线性、周期性等。

2. 随机误差

在相同测量条件下, 多次测量同一量值时, 绝对值和符号以不可预定方式变化的误差——随机误差。如仪器仪表中传动部件的间隙和摩擦、连接部件的弹性变形等引起的示值不稳定。

3. 粗大误差

指明显著超出统计规律预期值的误差——粗大误差。又称为疏忽误差、过失误差、寄生误差或简称粗差。如测量方法不当或错误, 测量操作疏忽和失误(如未按规程操作、读错读数或单位、记录或计算错误等)。测量条件的突然变化(如电源电压突然增高或降低、雷电干扰、机械冲击和振动等)。由于该误差很大, 明显歪曲了测量结果。故应按照一定的准则进行判别, 将含有粗大误差的测量数据(称为坏值或异常值)予以剔除。

上述三种误差在一定条件下可以相互转换, 特别是系统误差与随机误差之间并没有完全界限。系统误差是一种可知的误差, 因而可以修正; 随机误差是一种未知的误差, 但可以用数据统计处理方法去减小。