

计量中专试用教材

非电量检测

黄应川 编



中国计量出版社

内 容 提 要

本书是 计 量 中 专 电 学 计 量 专 业 的 一 门 专 业 课 教 材。全 书 共 十 五 章，主 要 包 括 五 个 方 面 的 内 容，非 电 量 检 测 的 基 本 知 识，非 电 量 检 测 中 的 传 感 器，信 号 处 理 电 路，几 种 常 见 的 非 电 量 的 检 测，微 处 理 器、在 电 测 中 的 应 用。此 外，对 测 量 结 果 的 显 示 与 记 录，传 感 器 的 标 定，以 及 电 测 的 新 技 术 也 作 了 介 绍。

全 书 内 容 完 整，系 统 并 通 俗 易 懂。该 书 除 作 为 电 磁 学 计 量 专 业 的 中 专 教 材 外，还 可 供 职 工 培 训 以 及 从 事 非 电 量 检 测 工 作 的 工 程 技 术 人 员 参 考。

计 量 中 专 试 用 教 材
非 电 量 检 测

黄 应 川 编

责 任 编 辑 王 晓 莹

✻

中 国 计 量 出 版 社 出 版

北 京 和 平 门 西 街 甲 2 号

中 国 计 量 出 版 社 印 刷 厂 印 刷

新 华 书 店 北 京 发 行 所 发 行

✻

开 本 787×1092/16 印 张 20.5 字 数 496 千 字

1990 年 9 月 第 1 版 1990 年 9 月 第 1 次 印 刷

印 数 1—5 000

ISBN 7-5026-0335-2/TB·276

定 价 9.50 元

出版前言

国家技术监督局是国务院统一管理和组织协调全国技术监督工作的职能部门。负责管理全国标准化、计量、质量监督工作，并对质量管理进行宏观指导。

随着技术监督事业的迅速发展，当前迫切需要大量的各级、各类计量专门人才，举办各种形式的计量中等教育，对于提高在职计量人员的素质、改善计量队伍的结构，培养一批计量队伍的新生力量，都具有重要意义，并将对计量事业的发展产生深远影响。

近几年来，由于一批计量中专学校的创办，各种形式的计量中等教育如委托或联合办计量中专班、计量函授中专、计量职业高中、计量中专的专业证书培训等，也在各地陆续开展起来，但是缺少教材已成为计量中等教育迫切需要解决的重大问题。因此，我们根据国家技术监督局的决定，组织编写了这套计量中专教材，其中包括：几何量、热工、力学、电磁学计量四个专业的部分专业基础课和专业课试用教材，争取在1988至1991年内出版齐。

本书是委托四川省技术监督学校组织编写的电磁学计量专业的专业课教材。

计量事业的教育基础十分薄弱，组织编写行业性教材还是第一次，基本条件和经验都不足，因此，这套教材的编写工作是在时间紧、难度大的情况下进行的，虽然经过多方面努力，但仍然存在很多不足之处，甚至于错误，我们拟在试用过程中听取各方面意见，于适当时机再次组织修改。

另外，这套教材主要是根据三年制全脱产的计量中等专业教育的需要编写的。在目前情况下，要对各种形式的计量中等教育都编出相应的教材难以做到。因此，编写过程中，在一定程度地考虑了教材适用的多样性。其他形式的计量中等教育可参照本套教材的基本内容，适当调整使用。

在教材的编写、审议过程中，得到了中国计量出版社、中国计量科学研究院、中国测试技术研究院、中国计量学院、中国计量测试学会，河北、四川、山东、吉林省标准计量局及有关的高等院校、省市计量部门、科研单位、大中型企业的大力支持，在此，谨表示衷心感谢！

国家技术监督局宣传教育司

1988.8

编 者 的 话

本书是根据原国家计量局教育处于1987年初审定的标准计量中等专业学校《非电量检测》课程教学大纲编写的。

近年来,电测技术在检测和计量中的应用越来越广泛,作用和地位越来越重要,许多传统的计量检测方法将逐渐地被电测的方法所替代。

非电量电测技术涉及面广,所需用的基础知识较多,除了计量理论、误差理论、工程力学等以外,还直接涉及到物理学、电工学、电子学、材料科学、仪器零件、控制理论及数字计算技术等方面的学科知识。尤其与普通物理学和电子学更为密切。

非电量检测是把被测的物理、化学、生物等信息量,转换为与之有确定对应关系的电学量进行测量。它具有测量范围广、精度高、响应速度快、能自动连续地进行测量,又便于测量数据的传送、记录、显示、存储等特点。

全书共十五章,主要内容包括:非电量检测的基本知识;非电量检测中的传感器;信号处理电路;几种常见的非电量的电测量;微处理器和在电测中的应用等。书中每章后面有小结和练习题。本教材也是从事标准计量的中等技术人员和科学研究人员在进行各种静态与动态的非电量测试中较有裨益的参考书。

本书由西南交通大学黄应川副教授编写,哈尔滨工业大学郭振芹副教授主审。在编写过程中一直得到原国家计量局教育处杨发旺、安国、章学峰等同志,以及四川省标准计量职工中等专业学校的大力支持和热情帮助;全书由章学峰工程师审定。在初稿审定过程中,中国测试技术研究院孙玉声高级工程师、成都科技大学龚志钰副教授、中国计量学院张云骏讲师、成都科学仪器厂叶心华工程师等提出了许多中肯的修改意见,在此一并表示诚挚的谢意。

由于水平有限,书中难免存在错误和不妥之处,恳切希望读者批评指正。

1988年8月

目 录

绪 论	(1)
第一章 非电量检测的基本知识	(3)
第一节 测量系统的静态特性	(3)
第二节 测量系统的动态特性	(12)
本章小结	(17)
练习题	(18)
第二章 弹性敏感元件	(19)
第一节 弹性敏感元件的基本特性及形式	(19)
第二节 拉压变形的弹性敏感元件	(22)
第三节 弯曲变形的弹性敏感元件	(26)
第四节 剪切变形的弹性敏感元件	(38)
本章小结	(41)
练习题	(41)
第三章 电阻式传感器	(45)
第一节 电位器式电阻传感器	(45)
第二节 电阻应变计	(54)
第三节 压阻式传感器	(69)
第四节 热电阻式传感器	(72)
本章小结	(75)
练习题	(76)
第四章 电磁式传感器	(78)
第一节 电感式传感器	(78)
第二节 互感式传感器	(88)
第三节 电涡流式传感器	(96)
第四节 压磁式传感器	(101)
本章小结	(108)
练习题	(110)
第五章 磁电式传感器	(112)
第一节 磁电式传感器的工作原理和基本结构	(112)
第二节 磁电式传感器的特性	(115)
本章小结	(117)
练习题	(117)
第六章 电容式传感器	(118)
第一节 电容式传感器的结构形式和工作原理	(118)

第二节 电容式传感器的类型和特性	(119)
第三节 电容式传感器的测量电路	(125)
第四节 电容式传感器特点及典型结构	(131)
本章小结	(135)
练习题	(138)
第七章 压电式传感器	(140)
第一节 压电效应及压电材料	(140)
第二节 压电式传感器的测量电路	(145)
第三节 压电式传感器的典型结构	(149)
本章小结	(152)
练习题	(152)
第八章 频率式传感器	(154)
第一节 振弦式传感器	(154)
第二节 振筒式传感器	(159)
第三节 振膜、振梁式传感器	(161)
第四节 数字式传感器	(163)
本章小结	(171)
练习题	(171)
第九章 热电式传感器	(173)
第一节 热电偶传感器的物理基础	(173)
第二节 热电偶的结构和类型	(176)
第三节 热电偶的分度和主要特性	(179)
第四节 热电偶实用测量电路	(181)
第五节 热电偶的使用特性及误差	(183)
本章小结	(186)
练习题	(187)
第十章 其它传感器	(189)
第一节 光电式传感器	(189)
第二节 光导纤维传感器	(197)
第三节 热敏元件及半导体温度传感器	(203)
第四节 磁敏元器件	(208)
第五节 气敏、湿敏传感器	(215)
第六节 生物传感器	(219)
本章小结	(221)
练习题	(222)
第十一章 信号处理电路	(223)
第一节 概述	(223)
第二节 信号处理电路	(224)
第三节 线性化处理电路	(230)

第四节 测量仪表的抗干扰	(234)
本章小结	(239)
练习题	(241)
第十二章 几种常见的非电量的电测量	(242)
第一节 位移的电测量	(242)
第二节 力的电测量	(257)
第三节 压力的电测量	(264)
第四节 转矩的电测量	(270)
第五节 温度的电测量	(273)
本章小结	(277)
练习题	(278)
第十三章 常用非电量电测显示记录仪器	(280)
第一节 光线示波器	(280)
第二节 自动平衡记录仪	(284)
第三节 磁带记录仪	(285)
本章小结	(288)
练习题	(289)
第十四章 传感器的标定	(290)
第一节 传感器的静态标定	(290)
第二节 传感器的动态标定设备	(295)
第三节 力传感器的动态标定	(300)
第四节 压力传感器的动态标定	(300)
本章小结	(303)
练习题	(303)
第十五章 微处理器在电测中的应用	(304)
第一节 微处理机电测系统概述	(304)
第二节 微处理机电测系统举例	(309)
本章小结	(316)
练习题	(317)
主要参考文献	(318)

绪 论

在工农业生产、科学研究和技术监督中,需要对许多参量进行检测,而这些参量中,绝大多数是非电量。非电量是相对于电量而言的被测量。它在种类和数量上都远比电量多得多。在许多领域中需要测量的非电量,如机械量、热学量、化学量、光学量和声学量等等,都可以用非电的方法测量。

用电测技术的方法对非电量进行测量,称为非电量的电测技术,即非电量检测,或称非电量电测量。它首先把非电参量转换成电信号然后进行测量。非电量电测技术的主要优点有:测量范围广、精度高;响应速度快,能自动、连续地测量,并可以自动显示记录;可以实现远距离的遥测遥控;容易实现非接触测量和动态测量;可以和具有卓越数据处理功能的电子计算机相连接而实现多功能以及智能化测量等等。

非电量的电测技术广泛地应用于工农业生产、科学研究和技术监督部门:

例如,为使生产过程正常运行,必须对与运行状态和控制要求有关的非电量进行测量和监视。这在自动生产线上尤其重要。在冶金工业中轧制钢材时,轧钢机轧辊的轧力需要进行测定;发电厂锅炉的进水量、压力、温度、蒸汽消耗量等都必须进行自动检测以及随时监视。

为使材料产品达到应有的技术标准,必须严格地进行检定。一架飞机从设计到样机试飞,所需要检测的非电量是相当繁多的。为研究飞机的静强度,要贴上数百只电阻应变计。机上有关点的应力、振动、温度和机内管路中的压力、流量、温度以及油箱的液位和液温等这些非电量的检测均需要自动地进行。又如,工业锅炉在出厂前必须对焊缝的缺陷(如裂缝、灰渣、气泡、未焊透和表面缺陷等)进行严格检查,其检测结果将作为技术档案随锅炉出厂。总之,工业生产中,各种材料、器材的质量鉴定和监督都离不开非电量的检测。

在工程结构和机械设计过程中,若仅凭已有的理论公式或经验公式计算,往往还不够准确,特别是对许多复杂的结构和特殊条件还没有理论或经验公式可依据时,就更需要进行实地的测试。同时,在现代化的设计工作中,通常都要先作模拟实验,通过模拟实验来寻找或判断最佳条件。而这些模拟实验是离不开非电量测量的。

在许多科学研究过程中,非电量检测也占有很重要的位置。例如,航空和宇航技术中的风洞实验要涉及大量的机械量的检测;新型建筑材料、机械构件的研制以及桥梁的架设等均需要进行种类繁多的大量的非电量测量后,才能得到可靠的研究数据,取得应有的成果。

非电量检测技术中的关键元件是传感器。传感器是一种能锐敏感知被测参量的功能转换元件(或装置)。它能把光、磁、热、力、超声、气氛、射线和酶等物理学、化学、生物学等的非电参量转换成与之有对应关系的和易于精确处理的电的或其它形式的信号。

传感器的种类很多,分类方法也比较多。但它通常都是由两个基本环节——敏感元件和传感元件所组成。敏感元件的作用是感知和检测出被测非电量,并将其转换成其它形式的非电量。这是因为有些非电量并不是通过一次转换就可以变成为电量的,而必须要事先进行一

次预变换后，再被转换成电量。例如，在测量力学量中的力、压力或加速度时，就需要首先由弹性敏感元件把它经过预变换为应变或位移量输出，然后再由传感元件变换成电量。因此，传感元件的作用就是把经敏感元件预变换输出的非电量转换成电量。

但是，并非所有的传感器均由敏感元件和传感元件组成，有的传感器集敏感和传感为一体，不需要进行预变换，而直接将非电量转换为电量。如热敏电阻和光电器件就具有这种功能。传感器技术的发展是很快的，今后总的趋势是向高精度、高可靠、小型化、集成化、固体化和智能化方向进展。

《非电量检测》是标准计量中专电磁学计量专业的一门专业课程。它主要研究各种非电量转换为电信号的方法及各种测量线路，是对非电量参数进行动、静态测试所必备的专业知识。本教科书具有下列几个特点：

①比较全面系统地阐述了非电量检测的基本知识和非电量检测系统的组成，并详细地介绍了各种传感器的工作原理、特性、测量电路和实际应用。对检测转换后的电信号的处理分析、记录显示和传感器的标定也作了相应的介绍。对几种常用的非电量的检测有专门的讲解。

②通过本书的学习能建立一个非电量检测的完整的系统概念。在实际工作中，当面临检测任务时，能选择正确的测量方法和所需的检测元件（或装置），进而组成能完成实际任务的检测系统，并且对所用的测量电路具有一定的分析能力。

③为适应非电量检测技术的发展，对于一些新的传感技术和自动检测技术也作了介绍。

④书中许多章节可以独立讲述，便于教师讲授和读者学习。每章后的习题有助于读者加深概念的理解和灵活应用。

第一章 非电量检测的基本知识

为实现非电量的电测量，首先需要解决的是从非电量到电量的变换，这一变换主要靠传感器来完成；传感器输出的电信号需要经过测量电路进行加工和处理，如衰减、放大、调制和解调、滤波、运算和数字化等；测量结果由输出电路显示或记录，为了显示被测量的变化过程，可以采用光线示波器、记录仪、屏幕显示器、打字机和磁带等输出设备。

因此，一个非电量测量系统，不论多么复杂，都是由三个基本部分——传感器、测量电路和输出电路所组成。一般也称传感器部分为一次仪表，而称测量电路和输出电路为二次仪表。

测量系统的特性包括测量系统的测量范围；过载能力；测量系统的输入-输出响应特性；组成系统的关键部件的质量指标等。由于测量系统的输入-输出响应特性具有普遍的意义，我们将作重点讲述。

一个测量系统当对所测的非电量进行检测时，由于被测非电量所处状态不同，对于同一测量系统所测得的结果是不相同的。例如，在测量某一液压装置的液体压力时，压力值在一段时间内可能十分稳定，而在另一段时间内则可能有缓慢的变化，或者呈现周期性的脉动变化，甚至出现尖峰突变的压力。因此，一个测量系统的输入-输出关系可以根据被测非电量的状态来划分，通常划分为静态特性和动态特性。

由于传感器是非电量电测系统的重要组成部分，它直接影响测量系统的特性。所以这里以传感器为分析对象来讨论其静、动态特性。

第一节 测量系统的静态特性

测量系统的静态特性是指被测非电量的各个值，在测量时间内均处于稳定状态时的输入-输出关系。一般情况下，测量系统的输入-输出关系并不呈线性。衡量测量系统静态特性的指标有线性度、迟滞、重复性、灵敏度、分辨率、阈值、稳定性和零漂等。

一、实际特性和理论特性

（一）实际特性

测量系统的实际特性是它本身固有的特性。实际特性是指测量系统（或传感器）对应于每一个输入值，均有一个输出值相对应，这些输出值的连线就表明该系统的输入-输出关系。

（二）理论特性

由于测量系统在通常情况下的实际特性并非一条直线（即不成线性），为分析问题和应用起见需要把它理想化，看成是一条直线，所以称为理论特性。但测量系统的理论特性又是一条根据不同方法做出来的直线，且这条直线要求与实际特性接近，我们称之为拟合直线。由于拟合方法不同，拟合直线有端基直线、理想斜率直线、端点平移直线和最小二乘法直线

等。

二、线 性 度

线性度是衡量测量系统（或仪表、传感器）的实际特性符合直线的程度。由于实际特性通常是一条曲线，它与理论特性间有一偏差，这个偏差的大小反映了实际特性的非线性的程度。故可用非线性误差来表示测量系统的线性度。测量系统的线性度定义为

$$\gamma_f = \pm \frac{|\Delta_{\max}|}{y_{F.s}} \times 100\% \quad (1.1)$$

式中 γ_f ——线性度（或非线性误差）；

$\Delta_{\max}$ ——实际特性与理论特性的最大偏差值；

$y_{F.s}$ ——测量系统（仪表）满量程输出值的平均值。

由式(1.1)可知，测量系统的线性度与最大偏差 $\Delta_{\max}$ 、满量程输出平均值 $y_{F.s}$ 有关。当测量系统已定后， $y_{F.s}$ （取平均值是因为多次测试时，对应于满输入值 $x_{F.s}$ 的 $y_{F.s}$ 并不完全相同）是一个定值，而 $\Delta_{\max}$ 却是由实际特性和理论特性（拟合直线）所确定的。显然，对于同一条实际特性曲线，由于拟合直线的不同， $\Delta_{\max}$ 值也不同，求出的线性度 γ_f 也不同。故测量系统有不同名称的线性度。

（一）理想线性度

理想线性度是由理想斜率法做出的拟合直线（称为理想斜率拟合直线）中求得的线性度。

测量系统的实际静态特性在忽略了一些影响因素（如迟滞、蠕变等）后，可以用一个数学的多项代数式表示

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \cdots + a_nx^n \quad (1.2)$$

式中 y ——测量系统的输出量；

x ——测量系统的输入量；

a_0 ——当 $x=0$ 时的输出值；

a_1 ——一次项系数，或称线性项系数；

$a_2, a_3, \cdots, a_n$ ——非线性项待定系数。

式(1.2)中，若零位输出，非线性项的待定系数均为零时，即 $a_0 = a_2 = a_3 = \cdots = a_n = 0$ ，则式(1.2)变为

$$y = a_1x \quad (1.3)$$

显然，式(1.3)是一个过坐标原点的直线方程，由它得出的一条直线称为理想直线， a_1 就是理想直线的斜率。测量系统的实际特性[式(1.2)]与理想特性[式(1.3)]间存在最大偏差值 $\Delta_{\max}$ ，用此 $\Delta_{\max}$ 值求出的线性度 γ_f 称为理想线性度。如图 1.1 所示。

（二）端基线性度

端基线性度是由端基拟合直线求出的线性度，拟合直线的两个端、基点是指与量程的上、下极限值对应的标定数据点。通常取 $x=0$ 时输出平均值作为基点（起始点），取满量程输出平均值的一点为端点（终点），连结基点与端点就得端基拟合直线。用实际特性曲线与端基拟合直线的最大偏差来求出线性度就是端基线性度。

由于实际特性是测量系统在标定时数据点的连线，标定时输入量的变化有正行程（从小

到大)和反行程(从大到小),所以对应的输出量的所得值是不完全相同的。如果是多次重复测量那更是如此。故端基拟合直线与实际特性曲线的偏差值也因正反行程和重复测试的各次曲线不同而存在差异,在标定时应取偏差的最大值来求线性度(见后面例题一的计算)。

端基拟合直线如图 1.2 所示。

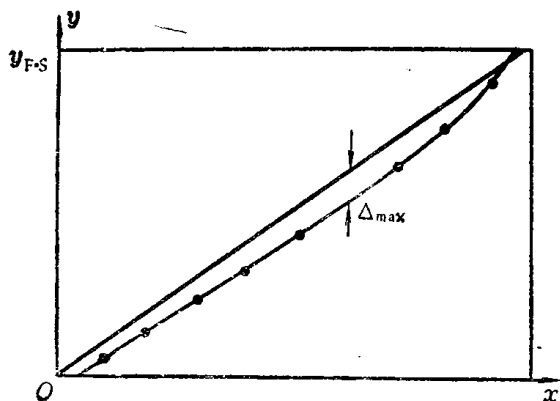


图 1.1 理想拟合直线

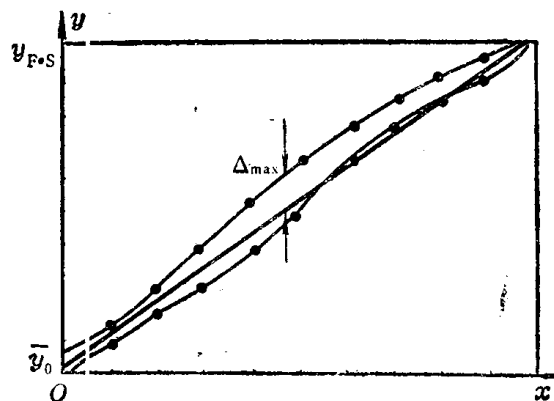


图 1.2 端基拟合直线

(三) 独立线性度

独立线性度是由端点平移拟合直线求出的线性度。端点平移拟合直线又叫最佳平均拟合直线,如图 1.3 所示。它是这样做出的:在标定的曲线(实际特性)上找出端基点并作出端基直线,以此作两条与端基直线平行的直线,且这两条直线恰好包围所有的标定数据点(即包围实际特性曲线),然后在这两条平行线之间作一条正、负等距离的直线,这条直线与实际特性的正、负偏差相等,该直线为端点平移直线。由此得出 Δ_{max} 值后求得的线性度 γ_I 称为独立线性度。

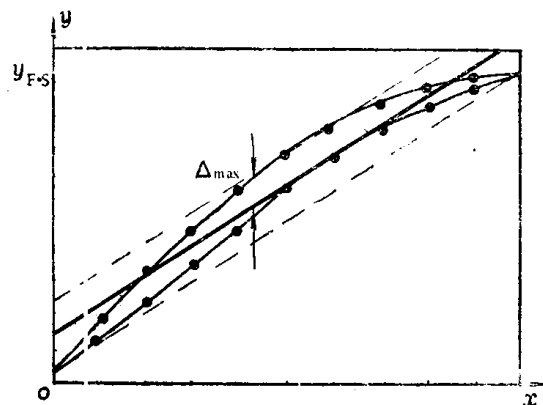


图 1.3 最佳平均拟合直线

(四) 最小二乘线性度

由上述三种方法作出的拟合直线与实际特性曲线均有较大的偏差,因此求出的线性度与测量系统实际的线性度相差较大。用数学方法中的最小二乘法作的拟合直线可以最大限度地接近实际特性曲线。由此而求得的线性度较准确地反映了测量系统的线性度。

由测量系统的静态特性表示式 (1.2) 可知,当非线性项系数满足 $a_2 = a_3 = a_4 = \dots = a_n = 0$ 时,式 (1.2) 变为

$$y = a_0 + a_1 x \quad (1.4)$$

式(1.4)是直线方程的标准式,一般写成 $y = b + kx$ 。b 称为截距, k 称为斜率。最小二乘拟合直线就是以此标准直线方程作出的。显然,要作出直线先得求出 b 和 k。设测量系统的实

实际特性有 n 个校准测试点, 第 i 个校准测试点的输出为 y_i , 对应于直线方程为 $(b + kx_i)$, 则实际特性与理论特性 (拟合直线) 在 i 点的偏差为

$$\Delta_i = y_i - (b + kx_i) \quad (1.5)$$

最小二乘拟合直线的拟合原则是使 $\sum_{i=1}^n \Delta_i^2$ 为最小值, 亦即使实际特性与理论特性的各个校准测试点的偏差的平方值的总和为最小值, 即: $\sum_{i=1}^n \Delta_i^2 = \Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \cdots + \Delta_n^2$. 如果 $\sum_{i=1}^n \Delta_i^2$ 为最小值时, 那么该拟合直线就能最大限度地接近于实际特性曲线. 设

$$S = \sum_{i=1}^n \Delta_i^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (b + kx_i)]^2 \quad (1.6)$$

对 (1.6) 式求极值就可得到 b 和 k 的解为

$$k = \frac{n \sum_{i=1}^n y_i x_i - \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (1.7)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - k \sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1.8)$$

式中 $\sum_{i=1}^n x_i = x_1 + x_2 + x_3 + \cdots + x_n;$

$$\sum_{i=1}^n y_i = y_1 + y_2 + y_3 + \cdots + y_n;$$

$$\sum_{i=1}^n y_i x_i = y_1 x_1 + y_2 x_2 + \cdots + y_n x_n;$$

$$\sum_{i=1}^n x_i^2 = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + \cdots + x_n^2;$$

n ——校准测试点的总个数。

式 (1.7) 和式 (1.8) 是联立的。

解联立式得到截距 b 和斜率 k 后, 最小二乘拟合直线方程 $y = b + kx$ 就可成立了. 对应于每一个输入值 x , 最小二乘拟合直线均有一个输出值 y 与之相对应. 由此可求出每一个测试点对应的偏差值 Δ , 然后在所有的偏差值中找出一个最大偏差值 $\Delta_{\max}$ 后, 就可按 (1.1) 式求出线性度 γ_f .

以上介绍的四种线性度和求计线性度的方法, 都是按式 (1.1) 来求计的, 不同之处在于最大偏差值 $\Delta_{\max}$ 的求计方法不同, 亦即作拟合直线的方法不同. 若对于同一个测量系统, 显然四种方法求计出的线性度是不会相同的. 从方法上看, 当然端基法较为简单直观,

而独立法和最小二乘法比较复杂。但从准确度来看，显然最小二乘法求出的线性度要准确些。但如果将最小二乘拟合直线作成过零点的直线，即 $y = kx$ ($b = 0$) 时，求出的线性度比理想斜率法更为准确。有的测量系统（或测量仪表）求计线性度时采用了过零点的最小二乘拟合直线。此时

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n y_i x_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (b = 0) \quad (1.9)$$

式中， $\sum_{i=1}^n y_i x_i$ 和 $\sum_{i=1}^n x_i^2$ 与前面的表示相同，最小二乘线性度具体求计参见后面例题一。

三、迟滞（回差）

测量系统的迟滞又称回差，它是指测量系统在正行程（输入值从小到大）和反行程（输入值从大到小）测试所得输入-输出特性曲线不重合的程度。这种现象说明，对于同一输入信号，测量系统的正反行程的输出信号值是不相同的。迟滞现象如图 1.4 所示。

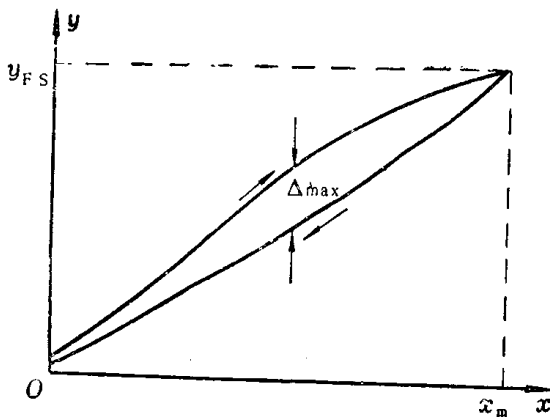


图 1.4 迟滞

迟滞反映了测量系统（仪表）中机械部分存在的不可避免的缺陷，如轴承摩擦、间隙、螺丝松动、元件腐蚀或内损等。电气部分如有铁磁元件时，也将对迟滞产生影响。迟滞的大小可用迟滞误差表示，其定义为

$$\gamma_h = \frac{\Delta_{max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1.10)$$

式中 Δ_{max} ——正、反行程输出的最大偏差值；

y_{FS} ——满量程输出值。

四、重复性

重复性是指测量系统在输入量按同一方向（正或反）作全量程连续多次变化时所得的输入-输出特性不一致的程度。显然特性一致，重复性好。

重复性的好坏可以用重复性误差来衡量。测量系统的重复性误差是这样定义的：取正反行程中不重复的最大偏差中的最大值者与输出满量程平均值 y_{FS} 之比的百分数，即

$$\gamma_R = \pm \frac{\Delta_{max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1.11)$$

式中 Δ_{max} ——正、反行程中不重复的最大偏差；

y_{FS} ——输出满量程平均值。

测量系统的重复性如图 1.5 所示。测量系统的重复性一般在标定过程中来确定，但具体方法也不统一。现以“电阻应变称重传感器”的重复性误差标定为例，传感器的重复性误差

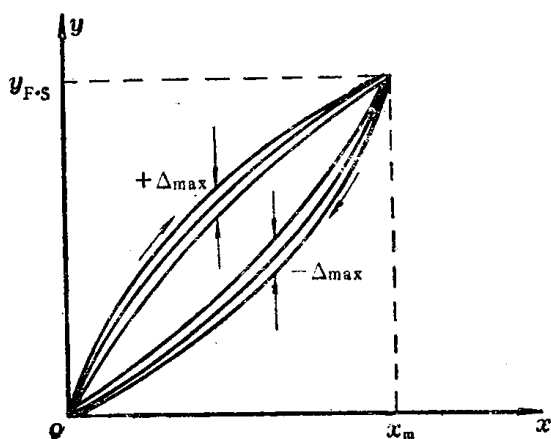


图 1.5 重复性

(R) 按下式计算, 即

$$R = \frac{|\Delta Q_R|}{Q_n} \times 100\%$$

式中 ΔQ_R ——同一行程同一试验点 3 次测量的实际输出信号值之间的最大差值; Q_n ——额定输出。

另外, 由于重复性误差是根据随机误差来描述校准数据的离散程度 (即不重复的程度), 故校准的循环次数不同, 其最大偏差值也就不一样, 则重复性误差也不一样。因此, 按 (1.11) 式求得的重复性误差 γ_R 也不一样。

为了得到较为准确的重复性应该按标准误差求计, 这里不作介绍了。

五、灵敏度

灵敏度是测量系统在稳定状态下输出量的变化值与输入量的变化值之比, 即

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1.12)$$

当 $\Delta x \rightarrow 0$ 时, $S = dy/dx$ 。通常, 静态特性的非线性不很明显时, 测量系统的灵敏度就用拟合直线的斜率 k 表示。对于静态特性具有明显非线性的测量系统, 则用 $S = dy/dx$ 表示, 或者用特性中某一较小区间内的斜率表示。当测量系统是在有激励源或在某工作电压范围内进行测量时, 则应该说明在多大的电源电压 (或电流) 下的灵敏度。例如, 应变式传感器往往给出在单位电压的电源激励下满量程输出的电压值作为它的灵敏度。

六、零点漂移、蠕变

(一) 零点漂移 (零漂)

零漂表示测量系统在零输入的情况下, 输出值的漂移。零漂有两种:

1. 时间零漂

系统加上电源, 在环境温度不变的情况下, 规定时间间隔内零输出的变化, 可用下式求计:

$$\gamma_D = \frac{|y_D|}{y_{F.S.}} \times 100\% \quad (1.13)$$

式中 y_D ——相邻时间间隔所测得的实际零点输出值之间的差值;

$y_{F.S.}$ ——满量程输出值。

2. 零点温漂

系统环境温度每变化 1°C 时, 零点输出的变化值。它可以用变化值本身表示, 也可用变化值与满量程输出值之比的百分数表示。

(二) 蠕变

蠕变是指某些测量载荷的仪表, 当加载后随时间变化而使输出发生变化的现象。例如称

重传感器其蠕变可按下式求计

$$\gamma_p = \frac{y_2 - y_3}{y_{F.s.}} \times 100\% \quad (1.14)$$

式中 y_2 ——与时间 t_2 相对应的输出值;

y_3 ——与时间 t_3 相对应的输出值;

$y_{F.s.}$ ——满量程输出值。

例题一：有一只压力传感器的校准数据如表 1.1 所示。设传感器在 $x = 2.5 \times 10^5$ Pa 输

表 1.1

y_i (V) $x_i \times 10^5$ (Pa)			0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
次 数								
校 准 数 据	1	正行程	0.002 0	0.201 5	0.400 5	0.600 0	0.799 5	1.000 0
		反行程	0.003 0	0.202 0	0.402 0	0.601 0	0.800 5	
	2	正行程	0.002 5	0.202 0	0.401 0	0.600 0	0.799 5	0.999 5
		反行程	0.003 5	0.203 0	0.402 0	0.601 5	0.800 5	
	3	正行程	0.003 5	0.202 0	0.401 0	0.600 0	0.799 5	0.999 0
		反行程	0.004 0	0.203 0	0.402 0	0.601 0	0.800 5	

入值时有满量程输出值。试根据这些校准数据求计:

①端基线性度;

②最小二乘线性度;

③灵敏度;

④迟滞;

⑤重复性。

解: ①求端基线性度

为了求计端基线性度, 应先求得端基拟合直线方程式。根据以上所讲方法, 则应找出基点和端点。

基点: $x = 0$ 时的零输出平均值

$$\bar{y}_0 = \frac{0.002\ 0 + 0.003\ 0 + 0.002\ 5 + 0.003\ 5 + 0.003\ 5 + 0.004\ 0}{6} = 0.003\ 1\ (\text{V})$$

端点: $x = 2.5 \times 10^5$ Pa 时的输出平均值

$$\bar{y}_{F.s.} = \frac{1.000 + 0.999\ 5 + 0.999\ 0}{3} = 0.999\ 5\ (\text{V})$$

$$\text{端基直线的斜率 } k = \frac{\bar{y}_{F.s.} - \bar{y}_0}{x_{2.5}} = \frac{0.999\ 5 - 0.003\ 1}{2.5} = 0.398\ 6\ (\text{V} / \times 10^5 \text{ Pa})$$

则得端基拟合直线方程为

$$y = 0.003\ 1 + 0.398\ 6\ x$$

列表找出每个校准点的实际输出值与拟合直线对应点输出值的最大偏差，然后再从这些偏差值中找出其中的最大偏差值 $\Delta_{\max}$ 。

表 1.2

x	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
拟合直线 y	0.003 1	0.202 4	0.401 7	0.601 0	0.800 3	0.999 6
实际校准数据	0.004 0	0.201 5	0.400 5	0.600 0	0.799 5	0.999 0
Δ	0.000 9	-0.000 9	-0.001 2	-0.001 0	-0.000 8	-0.000 6

从表 1.2 中可得 $\Delta_{\max} = -0.001 2$ ，因此可求出端基线性度为

$$\gamma_f = -\frac{0.001 2}{0.999 5} \times 100\% = -0.120 1\% = -0.12\%$$

②求最小二乘线性度

先求出最小二乘拟合直线方程式，即先求出截距 b 和斜率 k 。

因 y 的数据点为 33 个，故试验校准点总数 $n = 33$ ，即

$$\sum_{i=1}^{33} x_i = 37.5 \quad (x_i \text{ 的个数应取 } 33, \text{ 重复使用})$$

$$\sum_{i=1}^{33} y_i = 15.042 5$$

$$\sum_{i=1}^{33} y_i x_i = 25.516 8$$

$$\sum_{i=1}^{33} x_i^2 = 63.75$$

将上述数据代入式 (1.7) 和 (1.8) 后，得到

$$k = 0.398 5$$

$$b = 0.003 0$$

于是，得到最小二乘拟合直线方程式为

$$y = 0.003 0 + 0.398 5 x$$

以此方程列表即可找出最大偏差值 $\Delta_{\max}$ 。

表 1.3

x	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
拟合直线 y	0.003 0	0.202 3	0.401 5	0.600 8	0.800 0	0.999 6
实际校准数据	0.004 0	0.201 5	0.400 5	0.601 5	0.800 5	1.000 0
Δ	0.001 0	-0.000 8	-0.001 0	0.000 7	0.000 5	0.000 4