

T1193
7734

高等学校教材

检测技术

主编 周泽存 刘馨媛
参编 严松龄 蔡仁钢
主审 王厚枢

机械工业出版社

(京)新登字 054 号

内 容 简 介

为适应科学技术的发展,本书强调基础理论与基本知识的宽厚,注重基础理论与实际应用之结合,注重近代检测手段之介绍。全书共分两篇,第一篇为检测技术基础理论,其中第一、二章为检测系统的基本特性和测量误差分析与数据处理,第三、四章为测试信号的分析与处理。第二篇为检测技术的实践篇,其中第五、六章为传感器的基本原理与结构和非电量基本参数的检测方法及系统,适当加强了红外、激光、超声和光纤等近代检测技术的内容。第七、八章为微弱信号检测与抗干扰技术,第九章为微机检测系统。本书内容丰富,取材新颖,结构严谨。

本书为专业教学指导委员会指定的该专业本科、专科学生用教科书,可作为电气类和其他有关专业的教学参考书,也可作为有关专业工程技术人员的参考书。

检 测 技 术

主 编 周泽存 刘馨媛
参 编 严松龄 蔡仁钢
主 审 王厚枢

*

责任编辑:贡克勤 版式设计:冉晓华
封面设计:姚 毅 责任校对:袁春兰

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码:100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

北京京建照排厂激光照排

北京交通印务实业公司印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ · 印张 21 · 字数 523 千字

1993 年 12 月北京第 1 版 · 1993 年 12 月北京第 1 次印刷

印数 00 001—7100 定价:17.00 元

*

ISBN 7-111-04002-3/TN · 77

前 言

检测技术是电气技术专业的必修主干课程。本书系根据电气技术专业教学指导委员会制订的检测技术课程基本要求进行编写的,是教学指导委员会指定的本专业本科、专科学生用教科书,也可作为电气类和其他有关专业的教学参考书,以及作为有关专业工程技术人员的参考书。

为了适应今后科学技术的发展,本书强调基础理论与基本知识的宽厚,注重基础理论与实际应用之结合,注重近代检测手段之介绍。全书共分两篇,第一篇为检测技术基础理论,共四章:第一、二章为检测系统的基本特性和误差理论,重点阐述检测系统的静、动态特性,性能指标与标定方法和测量误差的估算,随机信号及其数据处理方法。第三、四章为测试信号的分析与处理,着重阐明正交变换,离散与快速傅氏变换和模拟与数字滤波器设计的基本概念与方法。第二篇为检测技术的应用与实践篇,共五章:第五、六章主要叙述传感器的基本原理与结构和非电量的检测技术及系统,适当加强了红外、激光、超声和光纤等近代检测技术的内容。为了加强微弱信号的检测与抗干扰技术,将此二内容单独列为第七及第八章,第九章为微机检测系统,着重阐明微机在检测中的应用。

全书的计划教学时数为 80 学时,删去部分章节的内容后(如第二章第四节,第三、四、七章),也可适用于 50~60 学时。

本书第一、二、七章由东南大学刘馨媛编写,第三、四章由东南大学周泽存编写,第六、八章由山东工业大学严松龄编写,第五、九章由北京航空航天大学蔡仁钢编写,全书由东南大学周泽存、刘馨媛统稿并担任主编,由南京航空学院王厚枢教授担任主审。

由于编者水平有限,错误和缺点难免,恳请读者指正和赐教。

编者

1993.5

序

电气技术专业是电工学科领域内强弱电相结合的一个学科型宽口径专业。自1979年创办以来,已在教育部、航空航天部、机械工业部、轻工业部、水利电力部、冶金工业部、地质矿产部、城乡建设环境保护部以及地方的几十所高等和中等院校相继成立了电气技术专业。1984年教育部批准将该专业由试办改为正式专业。1986年12月中国电工技术学会教育工作委员会组织同行专家评审通过全国电气技术教学研究会经调查研究而提出的《电气技术专业人才培养基本业务规格》,确定了该专业的主要课程。1987年成立全国电气技术专业教学指导委员会,挂靠在机械工业部。该委员会于1988年讨论通过了各课程研究组制定的主要课程和教学环节的基本要求,并据此组织编审有关教材,陆续出版,作为该专业的第一轮试用教材。

电气技术专业具有四个特性:其一是学科性,即它是面向整个电工学科而不是以某一特定的电气产品或工程对象来设置专业;其二是基础性,突出强调技术基础在人才培养过程中的重要性和技术基础课程自身学科体系的相对完整性;其三是综合性,强调学科相互交叉和相互渗透的重要性,因此提出四个结合,即强电弱电相结合,元件系统相结合,软硬件相结合和电与机相结合;其四是实践性,即在切实加强基础理论和基本技能的同时,特别强调培养综合运用这些基础和技能来分析和解决实际工程问题的能力,为此必须加强实践性的教学环节,并重视自学能力的培养。因此,本专业的课程设置、课程改革和教材编写都力求体现这四个特性。

这批教材的书稿都是在具有多年教学经验,师生反映较好的讲义中,经院校推荐,专业指导委员会组织有关教师根据专业改造的基本要求重新编写并组织专家进行评审的,各有关出版社为保证教材的质量也作出了很多的努力,但是,限于水平和经验,并且这毕竟也还是初次改革的尝试,不足之处希望使用单位、广大师生提出批评和建议,为不断提高电气技术专业教材的质量而努力。

全国电气技术专业教学指导委员会

1993. 6

目 录

序	
前言	
第一章 检测系统的基本特性	1
第一节 检测系统的组成	1
第二节 检测系统的数学模型	1
第三节 检测系统的静态特性及其性能指标	3
一、检测系统的静态特性	3
二、检测系统的静态性能指标	4
第四节 检测系统的动态特性及其性能指标	11
一、概述	11
二、检测系统的动态误差	11
三、常见检测系统的动态特性	11
四、检测系统的动态性能指标	17
五、主要动态性能参数的测定	19
习题与思考题	21
第二章 测量误差分析与数据处理	23
第一节 测量误差的分类与测量结果的评定	23
一、研究测量误差的目的	23
二、误差的来源	23
三、测量误差的分类	23
四、测量结果的评定	25
第二节 随机误差的估算方法	26
一、样本均值与标准偏差	26
二、置信区间与置信概率	31
三、测量结果的正确表示	32
四、按 t 分布处理时的计算	33
五、不等精度的测量	34
第三节 粗差的判别与坏值的舍弃	35
一、莱以特准则(或 3σ 准则)	36
二、格拉布斯准则	36
第四节 处理系统误差的一般方法	37
一、系统误差的分类	37
二、判断系统误差的方法	37
三、减小和消除系统误差的方法	38
四、系统误差的估计方法	41
第五节 误差的传递	42
一、函数系统误差的传递	42
二、函数随机误差的传递	44
第六节 误差的合成	45
一、随机误差的合成	45
二、系统误差的合成	45
三、系统误差与随机误差的合成	46
第七节 测量数据处理	47
一、有效数字与科学记数	47
二、等精度测量结果的数据处理步骤	49
三、最小二乘法原理	52
四、曲线的拟合	52
五、经验公式的选择与检验	53
第八节 随机过程及其数据处理	55
一、随机过程及其特征量	55
二、平稳随机过程	59
三、随机数据处理的一般步骤	63
习题与思考题	64
第三章 信号分析基础	66
第一节 正交函数集及信号分析	66
一、正交函数集及傅氏级数复数表达式	66
二、非周期与周期信号的傅氏变换	68
三、离散信号的分析	70
四、离散信号(序列)的频谱与其 Z 变换的关系	71
第二节 离散傅氏变换(DFT)	72
一、非周期信号的离散傅氏变换	72
二、周期信号的离散傅氏变换	76
三、离散傅氏变换的基本性质	78
四、功率谱、振幅谱及相位谱	80
五、离散傅氏变换与 Z 变换的关系	80
六、快速傅氏变换(FFT)	81
第三节 沃尔什函数和沃尔什—阿达马变换	83
一、沃尔什函数集	83
二、用沃尔什函数集分解信号—沃尔什级数	86
三、阿达马编号的沃尔什—阿达马变换	

(WHT) _n	87	十、激光器	156
习题与思考题	88	十一、超声换能器	158
第四章 模拟及数字滤波器	90	第三节 几种新型传感器	159
第一节 模拟滤波器的基本概念	90	一、光纤传感器	159
一、基本概念及理想滤波器	90	二、薄膜传感器	164
二、低通模拟滤波器设计的一般方法	92	三、智能化传感器	167
第二节 巴特沃思低通滤波器的设计	94	习题与思考题	169
第三节 切比雪夫低通滤波器的设计	97	第六章 非电量基本参数的检测方法	171
第四节 模拟滤波器的原型变换	103	第一节 力和转矩的测量	171
一、低通到高通的变换	103	一、力的测量	171
二、低通到带通的变换	104	二、转矩的测量	180
三、低通到带阻的变换	106	第二节 位移和厚度的测量	183
第五节 数字滤波器概述	108	一、位移的测量	183
第六节 无限冲激响应数字滤波器(IIR)的设计	109	二、厚度的测量	191
一、冲激响应不变法	109	第三节 运动速度、加速度和振动的测量	193
二、双线性变换法	111	一、运动速度的测量	193
第七节 有限冲激响应数字滤波器(FIR)的设计	114	二、加速度的测量	194
一、FIR 数字滤波器的线性相位特性	114	三、振动的测量	197
二、FIR 数字滤波器的设计——“窗口法”	116	第四节 转速的测量	200
第八节 从低通原型模拟滤波器到高通、带通和带阻数字滤波器的变换	122	一、接触式转速仪	201
一、高通数字滤波器设计	122	二、测速发电机	201
二、带通数字滤波器设计	124	三、光电式转速表	201
三、带阻数字滤波器设计	125	四、频闪转速表	203
习题与思考题	126	第五节 噪声的测量	203
第五章 传感器	127	一、概述	203
第一节 传感器的基本概念	127	二、声学中的基本物理量	204
一、传感器的分类及要求	127	三、噪声的主观评价	205
二、传感器的基本结构型式	128	四、噪声的测量系统	206
三、传感器的发展趋势	129	五、声功率的测量	209
第二节 常用传感器	129	六、噪声测量要求	210
一、电阻式传感器	130	第六节 温度的测量	211
二、电感式传感器	134	一、概述	211
三、电容式传感器	137	二、热电阻测温系统	212
四、压电式传感器	140	三、热电偶测温系统	215
五、磁电式传感器	144	四、非接触式测温	217
六、热电偶传感器	145	第七节 压力的测量	220
七、光电式传感器	150	一、概述	220
八、霍尔式传感器	152	二、压力测量仪表	220
九、红外探测器	154	第八节 流量的测量	222
		一、概述	222
		二、差压式流量计	223
		三、转子流量计	227
		四、靶式流量计	228

五、电磁流量计	228	三、电阻耦合(漏电流耦合)	261
六、超声波流量计	229	四、共阻抗耦合	261
第九节 物位的测量	231	五、差模干扰(串模干扰,正态干扰)	262
一、概述	231	六、共模干扰(同相干扰,对地干扰)	263
二、直读式玻璃液位计	231	七、共模干扰抑制比	264
三、浮力式液位计	231	第三节 常用的干扰抑制措施	264
四、电容式液位计	232	一、屏蔽	264
五、声波式物位计	233	二、接地	265
六、光学物位计	233	三、浮置(浮接、浮空)	267
第十节 成分的测量	235	四、滤波器	268
一、概述	235	习题与思考题	269
二、热导式气体分析仪	235	第九章 微机在检测技术中的应用	270
三、电化学式分析仪	237	第一节 微机检测系统概述	270
四、磁式氧分析仪	238	一、信号输入通道的基本结构	270
五、光学吸收式分析仪	240	二、数据输出通道的基本结构	272
六、安全报警用自动分析仪	241	第二节 信号变换电路	273
习题与思考题	242	一、差动、可编程和隔离放大电路	273
第七章 微弱信号检测	243	二、交一直流量电变换电路	275
第一节 微弱信号检测概述	243	三、峰值检测电路	280
第二节 频域的窄带化处理(锁相放大法)	243	四、非线性函数拟合变换电路	280
一、锁相放大器的构成原理	243	第三节 采样/保持电路	282
二、锁相放大器中的信号相关原理	244	一、采样/保持电路的主要特性参数	282
三、相敏检波的信号频谱迁移与窄带 滤波抑制噪声	245	二、采样/保持器的典型电路	283
四、等效噪声带宽与信噪比的改善	246	第四节 多路转换开关电路	284
五、正交矢量型锁相放大器	249	第五节 模拟/数字转换器及其误差	286
六、锁相放大器的应用	249	一、A/D 转换电路的型式	286
第三节 时域信号的取样平均处理(取样积分器)	250	二、A/D 转换器的转换误差	287
一、定点式取样积分器	251	第六节 模拟/数字转换器的双极性扩展电路	289
二、扫描式取样积分器	252	一、双极性二进制数码	289
三、数字多点平均器	253	二、偏置码双极性扩展电路	290
习题与思考题	255	三、符号—数值码双极性扩展电路	292
第八章 抗干扰技术	256	第七节 微机的 A/D 转换及 D/A 转换接口技术	293
第一节 干扰的类型及产生	256	一、微型机的总线	293
一、干扰的类型	256	二、微机对外部设备的寻址方式	298
二、干扰的产生	257	三、输入输出的控制方式	300
三、固有干扰源	258	四、A/D 转换器与微处理器的接口方法	302
四、干扰叠加和信噪比	258	五、D/A 转换器与微处理器的接口方法	304
第二节 干扰信号的基本输入方式	259	六、数字信号与微处理器的接口方法	306
一、静电电容耦合	259	七、串行接口方法	306
二、电磁耦合(电感性耦合)	260		

第八节 微机测试系统的设计	308	二、高精度双斜积分型 A/D 转换电路	318
一、设计任务	308	三、8098 单片机组成的工频相位测量系统...	320
二、输入通道电路的设计分析	310	四、MCS-96 单片机在路面平整度测定	
三、软件程序设计	312	仪中的应用	322
第九节 微机检测系统实例——中频电源		习题与思考题	324
供电参数智能测试仪	314	参考文献	325
第十节 单片计算机在检测技术中的应用	316		
一、MCS-51 数据采集和显示系统	318		

第一章 检测系统的基本特性

第一节 检测系统的组成

检测系统,它既可以是一般的检测装置,即简单的检测系统,也可以是一个复杂的自动检测系统。图 1-1 为检测系统的原理结构框图。它由下列功能环节组成。

传感器处于被测对象与测试系统的接口位置,是一个能量变换器。它直接从对象中提取被测量的信息,感受其变化并变换成便于测量的其他量。例如将速度变换成电压,将应变变换成电阻,将流量变换成压力等。无疑,传感器的优劣,直接影响检测装置的质量,它是检测系统的重要部件。

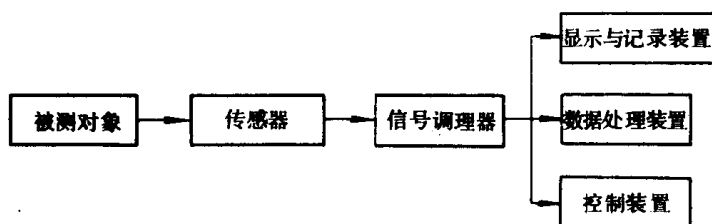


图 1-1 检测系统的原理结构框图

信号调理器又称中间转换器,它的作用是将传感器的输出信号进行传输、放大和转换等,使其适合于显示、记录、数据处理或控制。例如桥接电路、电子放大器、调制与解调器及模数转换器等。

输出环节包含显示和打印记录装置、数据处理和控制装置等,它们不仅可以实时检测,而且可以实现对被测对象的控制。

第二节 检测系统的数学模型

这里“检测系统”的概念是广义的,它不仅可以理解为组成系统的整个检测装置,也可以理解为系统中的某个装置,如传感器、放大器、显示和记录器等。但通常是指前者。

在工程实践和科学实验中,常遇到的一些检测系统大都可以认为是线性系统,不管它是电气、机械、热工或生物医学工程等系统,均可以近似地用常系数线性微分方程来描述。

对于线性时不变单输入单输出(不包含外界噪声干扰的响应)的检测系统来说,其数学模型表示为

$$\begin{aligned} & a_n y''(t) + a_{n-1} y^{n-1}(t) + \cdots + a_1 y'(t) + a_0 y(t) \\ & = b_m x^m(t) + b_{m-1} x^{m-1}(t) + \cdots + b_1 x'(t) + b_0 x(t) \end{aligned} \quad (1-1)$$

式中, $y''(t)$ 、 $y^{n-1}(t)$ 、 $\cdots$ 、 $y'(t)$ 分别为输出 $y(t)$ 的各阶导数; $x^m(t)$ 、 $x^{m-1}(t)$ 、 $\cdots$ 、 $x'(t)$ 分别为输入 $x(t)$ 的各阶导数; a_n 、 a_{n-1} 、 $\cdots$ 、 a_1 、 a_0 和 b_m 、 b_{m-1} 、 $\cdots$ 、 b_1 、 b_0 系与检测系统特性有关的常数; n 和 m 为正整数,一般 $n \geq m$ 。

对上式进行拉氏变换,即可由时域形式变换到复频域形式,当初始条件为零时,得到系统

的传递函数为

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (1-2)$$

式中, s 为复频率。

传递函数是一个有理分式, 可以很方便地描述系统本身的特性。

在检测系统工程实际中, 最常见的为零阶系统、一阶和二阶系统。和控制系统相类似, 包含有比例环节、惯性环节和振荡环节等。例如在应力、应变测量中, 已知各环节的连接方式及其传递函数, 见图 1-2a。只要允许忽略连接环节之间的负载影响(即后环节的输入阻抗比前环节的输出阻抗大得多), 系统的总传递函数便可用各个环节的传递函数之积表示, 见图 1-2b。

一个线性的连续时间系统可以用线性微分方程描述, 而对于离散系统, 则可以用差分方程来描述。

图 1-3 示出一简单的离散检测系统, $x(n)$ 为系统的输入序列, $y(n)$ 为系统的输出序列, 离散系统的差分方程可根据系统的基本结构来建立。

图 1-3 中 $1/E$ 是移位(延时)元件, 表示右移一位, 或是单位延时, Σ 表示加法器, 箭头旁边的 a 表示乘以 a 的乘法器。 $y(n)$ 经单位移位后得 $y(n-1)$, 由加法器写出

$$y(n) = ay(n-1) + x(n)$$

或 $y(n) - ay(n-1) = x(n) \quad (1-3)$

式(1-3)是一个常系数线性差分方程。对于一个复杂的离散系统, 必须用高阶的差分方程来表达, 则式(1-3)等号左边由输出序列 $y(n)$ 及其移位序列 $y(n-1)$, $y(n-2)$, $\dots$, $y(n-N)$ 等组成; 等号右边由输入序列 $x(n)$ 及其移位序列 $x(n-1)$, $x(n-2)$, $\dots$, $x(n-M)$ 等组成, 故差分方程的一般形式可以写成:

$$\sum_{k=0}^N a_k y(n-k) = \sum_{r=0}^M b_r x(n-r) \quad (1-4)$$

式中, k 和 r 皆为整数; a_k 和 b_r 为相应项的加权系数。

如果等号左边含有移位序列 $y(n-N)$, 则此差分方程就是 N 阶的, n 以递减方式给出, 称为后向差分方程, 即向右移序的差分方程。

对差分方程进行 Z 变换并移项后, 得

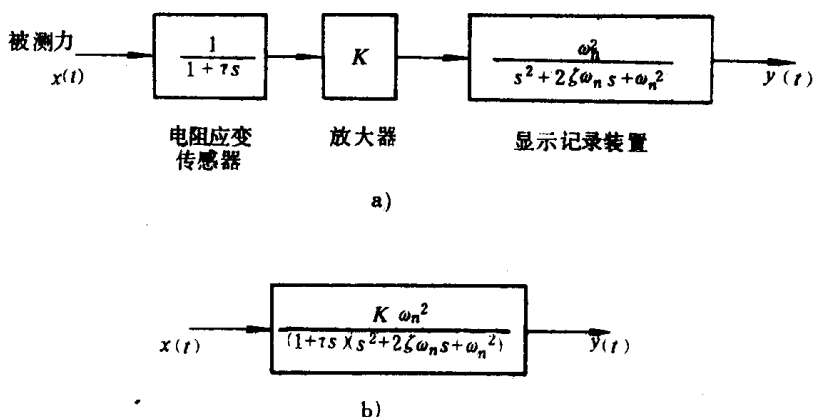


图 1-2 一个应力应变检测系统的传递函数

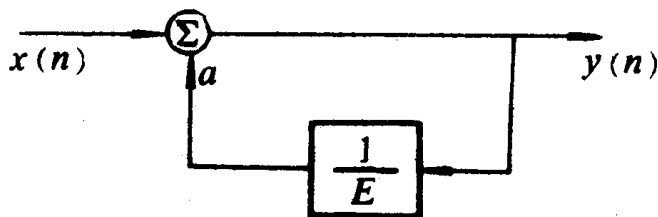


图 1-3 一简单离散系统示意

$$H(Z) = \frac{Y(Z)}{X(Z)} = \frac{\sum_{r=0}^M b_r Z^{-r}}{\sum_{k=0}^N a_k Z^{-k}} = \frac{b_M Z^{-M} + b_{M-1} Z^{-(M-1)} + \cdots + b_1 Z^{-1} + b_0}{a_N Z^{-N} + a_{N-1} Z^{-(N-1)} + \cdots + a_1 Z^{-1} + a_0} \quad (1-5)$$

$H(Z)$ 称为离散系统的传递函数,由系统的特性所决定。

随着工业生产的不断发展及数字计算机的广泛应用,对测量提出了高精度、数字化等方面的要求。数字信号处理具有许多优点:处理手段丰富、灵活;检测处理系统性能稳定;精度高等。

第三节 检测系统的静态特性及其性能指标

一、检测系统的静态特性

在静态测量中,静态特性也称标度特性。它是当输入信号 x 不随时间变化(即 $dx/dt=0$,线性微分方程(1-1)中的各阶导数等于零),或随时间变化很缓慢时检测系统的特性,此时该系统处于稳定状态,输出信号 y 与输入信号 x 之间的函数关系,一般可用下列代数方程多项式来表示

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \cdots + a_n x^n \quad (1-6)$$

式中, $a_0, a_1, \cdots, a_n$ 为标定系数,它决定静态特性曲线的形状和位置。

当式(1-6)中 $a_0=0, a_2=a_3=\cdots=a_n=0$ 时, $y=a_1 x$, 即输出与输入特性曲线是经过坐标原点的直线,见图 1-4a。这是一种理想的检测系统。

当式(1-6)中 $a_2=a_3=\cdots=a_n=0$ 时, $y=a_0+a_1 x$, 即特性曲线是一条零点迁移的直线,见图 1-4b。

当式(1-6)中只存在奇次项时, $y=a_1 x + a_3 x^3 + a_5 x^5 + \cdots$, 则在原点附近相当范围内特性曲线基本上呈线性,并具有 $y(x) = -y(-x)$, 即曲线对原点对称的性质,见图 1-4c。

当式(1-6)中只存在一次项和偶次项时, $y=a_1 x + a_2 x^2 + a_4 x^4 + \cdots$, 则特性曲线只有较小的线性段,且曲线不对称,见图 1-4d。

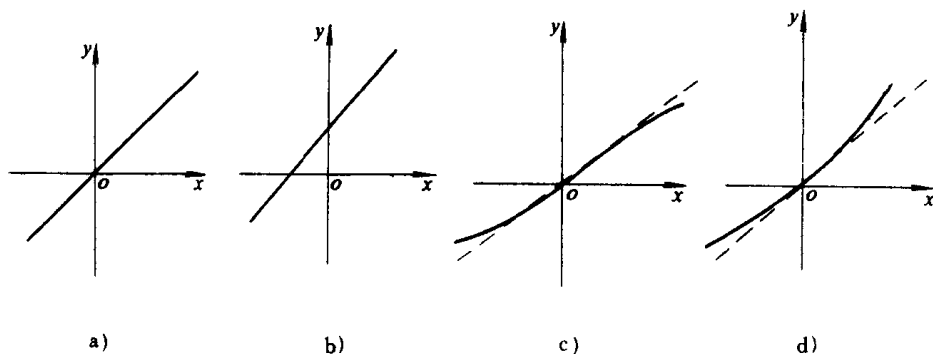


图 1-4 检测系统的静态特性

通常希望检测系统的静态特性曲线呈线性。在实际运用时,如果非线性项的方次不高,则在输入量变化不大的范围内,可以用切线或割线代替实际曲线的某一段,使检测系统的静态特性近似于线性。

应该指出,检测系统的静态特性是在静态标准条件下进行校准(标定)的。静态标准条件是指没有加速度、振动、冲击(除非这些参数本身就是被测物理量);环境温度一般为室温 $20 \pm$

5℃;相对湿度不大于85%;大气压力为 $101324.72 \pm 7999.32\text{Pa}$ ($760 \pm 60\text{mmHg}$)的情况。在这种标准工作状态下,利用一定精度等级的校准设备,对系统输入高精度的标准量信号,测出相应的输出量值,并进行往复循环测试,得出系统的静态特性,可以用输出一输入数据列成表格或画成曲线(称为校准曲线或标定曲线)表示。

二、检测系统的静态性能指标

(一) 灵敏度 S

灵敏度是指检测装置在静态测量时,输出量的增量与输入量的增量之比的极限值,即

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right) = \frac{dy}{dx} \quad (1-7)$$

灵敏度的量纲是输出量的量纲和输入量的量纲之比。当某些检测装置或组成环节的输出和输入具有同一量纲时,常用“增益”或“放大倍数”来代替灵敏度。

对线性检测装置来说,灵敏度为

$$S = \frac{y}{x} = K = \frac{m_y}{m_x} = \tan \theta \quad (1-8)$$

式中, m_y 、 m_x 为坐标轴 y 和 x 上曲线的比例尺; θ 为相应点切线与 x 轴间的夹角。

式(1-8)表示线性检测装置的灵敏度为一常数,可由静态特性曲线(直线)的斜率来求得,直线的斜率越大,其灵敏度就越高,见图1-5a。对于线性性不太好的检测装置如图1-5b所示,则可用输出量与输入量测量范围 $\bar{y}$ 与 $\bar{x}$ 之比值来表示其平均灵敏度,即

$$\bar{S} = \frac{\bar{y}}{\bar{x}} = \frac{m_y}{m_x} \tan \theta \quad (1-9)$$

式中, $\bar{x} = x_h - x_l$; $\bar{y} = y_h - y_l$;而 x_l 与 y_l 是 x 和 y 的测量下限值, x_h 与 y_h 是 x 和 y 的测量上限值。

对于非线性检测装置,其灵敏度是变化的,见图1-5c。

一般希望检测装置的灵敏度 S 在整个测量范围内保持为常数。这样要求一方面有利于读数,另一方面便于分析和处理测量结果。

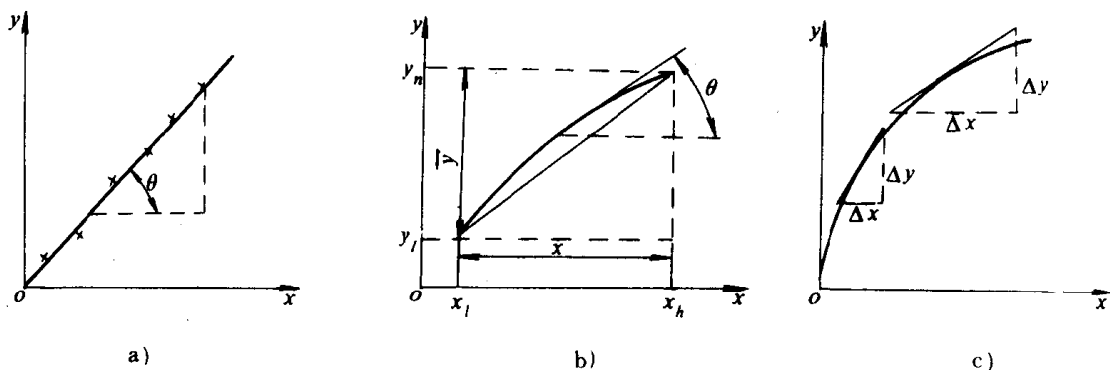


图 1-5 检测装置的灵敏度

在实际测量中,最常用的还有相对灵敏度表示法。相对灵敏度 S_r 为输出变化量与被测量的相对变化率之比,即

$$S_r = \frac{\Delta y}{\frac{\Delta x}{x}} \times 100\% \quad (1-10)$$

例 今分析测量电桥(见图1-6)的电阻灵敏度,图中 $R_2 = R_3 = 1000\Omega$,若 $R_1 = 1000\Omega$,则 R_1

$=1000\Omega$ 时,桥路平衡。在平衡点附近,若调整 R_N 变化量 $\Delta R_N = 0.001\Omega$,对应检流计指针偏转 Δy 为 1mm ,则电桥在接近平衡时的电阻灵敏度

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta R_N} = \frac{1\text{mm}}{0.001\Omega} = 1000\text{mm}/\Omega$$

或

$$S_r = \frac{\Delta y}{\frac{\Delta R_N}{R_N} \times 100\%} = \frac{1\text{mm}}{0.0001\%}$$

必须注意,灵敏度调得越高,系统就越容易受外界干扰,即系统稳定性往往越差。

(二) 精度

在静态测量中,由于任何检测装置和测量结果都含有一定大小的误差,所以人们感兴趣的往往是用误差来说明精度。

1. 绝对误差 δ

绝对误差是检测装置示值 x 与被测量真值 x_0 之间的代数差值,即

$$\delta = x - x_0 \quad (1-11)$$

实际上,真值是未知的,通常只能用所谓实际值(或约定真值)来代替真值,它是由高一级的计量标准所复现或高精度仪器测得的被测量值。绝对误差 δ 越小,说明示值越接近于真值,测量精度越高,但这一结论只适用于被测值相同的情况,而不能说明不同值的测量精度。

在校准或检定仪表时,常采用比较法,即对同一被测量,将标准表的示值 x_0 (真值)与被校表的示值 x 进行比较,则它们的差值就是被校表示值的绝对误差。如果它是一恒定值,则是系统误差(详见第三章),此时仪表的示值应加以修正,修正后才可得到被测量的实际值 x_0 。即

$$x_0 = x - \delta = x + c \quad (1-12)$$

式中, c 称为修正值或校正值。修正值与示值的绝对误差的数值相等,但符号相反,即为

$$c = -\delta = x_0 - x \quad (1-13)$$

试验室用的标准表常由高一级的标准表校准,检定结果附带有示值修正表,或修正曲线 $c = f(x)$ 。

2. 示值相对误差 r (简称相对误差)

示值相对误差是检测装置示值绝对误差与真值 x_0 之比,常用百分数表示,即

$$r = \frac{\delta}{x_0} \times 100\% = \frac{x - x_0}{x_0} \times 100\% \quad (1-14)$$

当测量误差很小时,示值相对误差可近似用下式计算

$$r = \frac{\delta}{x} \times 100\% \quad (1-15)$$

示值相对误差只能说明不同测量结果的准确程度,而不能用来评价检测仪表本身的质量。因为同一台检测仪表在整个测量范围内的相对测量误差不是定值,随着被测量的减小,相对误差也增大,当被测量接近于量程的起始零点时,相对误差趋于无限大,故一般不应测量过小的量,而多用在测量接近上限的量如 $2/3$ 量程处。

3. 最大引用误差 $q_{\max}$ (又称满量程相对误差)

为了合理地评价检测装置的质量,采用了最大引用误差的概念。

检测表示值绝对误差 δ 与仪表量程 L 之比,称之为仪表示值的引用误差 q 。引用误差

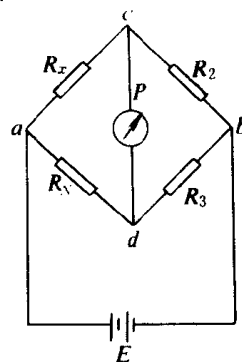


图 1-6 测量电桥的电阻灵敏度

常以百分数表示

$$q = \frac{\delta}{L} \times 100\%$$

最大引用误差是检测仪表示值的绝对误差(绝对值)的最大值与仪表量程 L 之比值的百分数,即

$$q_{\max} = \frac{|\delta|_{\max}}{L} \times 100\% = \frac{|x - x_0|_{\max}}{L} \times 100\% \quad (1-16)$$

最大引用误差是检测仪表基本误差的主要形式,故也常称之为仪表的基本误差,它很好地说明了检测仪表的测量精度是检测仪表的主要质量指标。

4. 精度等级

仪表在出厂检验时,其示值的最大引用误差 $q_{\max}$ 不能超过其允许误差 Q (以百分数表示)即

$$q_{\max} \leq Q$$

工业检测仪表常以允许误差 Q 作为判断精度等级的尺度。规定:取允许误差百分数的分子作为精度等级的标志,也即用最大引用误差中去掉百分数(%)后的数字来表示精度等级,其符号是 G , 则 $G = Q \times 100$, 或 $Q = G\%$ 。工业仪表常见的精度等级如表 1-1 所示。

表 1-1 工业仪表常见精度等级

精度等级 G		0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	5.0
允许(引用)误差	$ Q $	0.1%	0.2%	0.5%	1%	1.5%	2%	2.5%	5%

一般情况下,1.0 级精度仪表,表示其允许误差 $Q = \pm 1\%$, 即允许误差的变化范围可以从 -1% 至 $+1\%$ 。应当注意的是:精度等级说明了引用误差允许值的大小,它决不意味着该仪表实际测量中出现的误差。如果认为 1.0 级仪表所提供的测量结果一定包含着 $\pm 1\%$ 的误差,那就错了。只能说在规定的条件下使用时,它的绝对误差的最大值的范围是在量程的 $\pm 1\%$ 之内。即

$$\delta_{\max} = \pm G\% \times L = \pm 1\% \times L$$

若量程为 100V 的 1.0 级电压表, $|\delta_{\max}| \leq |\pm 1\% \times 100| = 1V$, 或 $|q_{\max}| \leq 1\%$ 。

例如,一台按毫伏刻度的电子电位差计检验记录如表 1-2 所示。

表 1-2 一台电子电位差计检验记录

示 值 $x(\text{mV})$	0.00	2.00	4.00	6.00	8.00	10.00
真 值 $x_0(\text{mV})$	0.01	1.98	4.01	5.97	8.04	9.99
绝对误差 $\delta(\text{mV})$	-0.01	+0.02	-0.01	+0.03	-0.04	+0.01
引用误差 $q(\%)$	-0.1	+0.2	-0.1	+0.3	-0.4	+0.1

由此可得最大引用误差为

$$q_{\max} = \frac{\delta_{\max}}{L} \times 100\% = -0.4\%$$

若仪表为 0.5 级精度,则允许误差为

$$Q = \pm 0.5\%$$

因为 $|q_{\max}| < |Q|$, 故此仪表检验合格。

需要提及的是人们习惯上又把精度称之为准确度,有关这些名词的区别及有关误差的分析在下一章中将进一步阐述。

(三) 线性度 e_L

具有线性特性的检测装置最受使用者欢迎。但实际上,由于各种原因,其输出量与输入量之间的关系并不是完全线性的。通常用检测装置的标定曲线与某种拟合直线之间的偏差程度作为线性度的一种度量,以输出最大偏差与满量程(F.S.)输出比值的百分数来表示其大小。

$$e_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{y_{F.S.}} \times 100\% \quad (1-17)$$

式中, $\Delta L_{\max}$ 为输出平均值与基准拟合直线间的最大偏差; $y_{F.S.}$ 为满量程输出平均值。

由此可见,线性度是以一定的拟合直线作为基准来确定的,因而线性度和直线拟合方法有关。最常用的线性度的定义和表示方法有:

端基线性度——把校准数据的零点输出平均值和满量程输出平均值连成直线,作为拟合直线,如图 1-7a 所示。端基线性度可表示为

$$e_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{y_{F.S.} - y_0} \times 100\% \quad (1-18)$$

式中, $y_{F.S.} - y_0$ 为标称输出范围; y_0 为零点输出平均值

这种拟合直线方法简单直观,应用比较广泛。但是没有考虑所有校准数据的分布,拟合精度很低,尤其当检测装置有比较明显的非线性时,拟合精度更差。

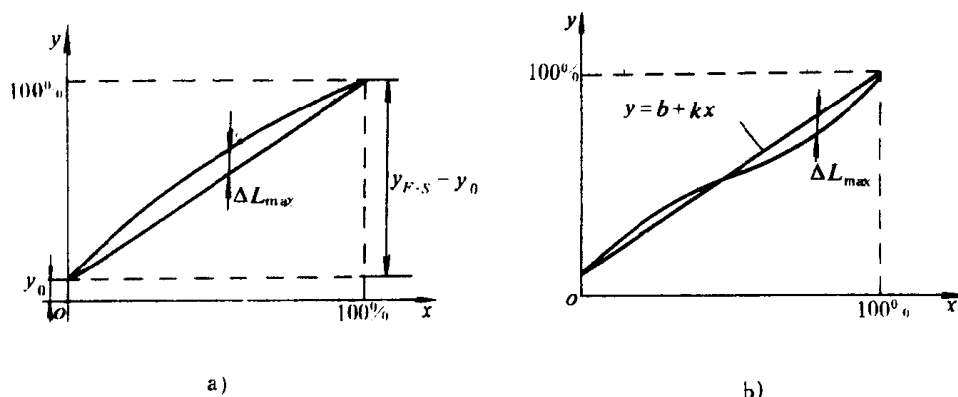


图 1-7 线性度

a) 端基线性度 b) 最小二乘线性度

最小二乘线性度——按最小二乘法原理求取拟合直线(见图 1-7b),该直线能保证与检测装置校准数据的偏差(残差)平方和为最小。若最小二乘法拟合直线方程式为

$$y = b + kx \quad (1-19)$$

式中的系数 b (截距)和 k (斜率)可根据下述分析求得。

设实际校准测试点有 n 个,第 i 个校准数据 y_i 与其拟合直线上相应值之间的偏差为

$$v_i = y_i - (b + kx_i) \quad (1-20)$$

按最小二乘法原理,应使 $\sum_{i=1}^n v_i^2$ 为最小值,故由 $\sum_{i=1}^n v_i^2$ 分别对 k 和 b 求一阶偏导数并令其等于零,即可求得 k 和 b :

$$k = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (1-21)$$

$$b = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (1-22)$$

式中, $\sum x_i = x_1 + x_2 + \dots + x_n$; $\sum y_i = y_1 + y_2 + \dots + y_n$; $\sum x_i y_i = x_1 y_1 + x_2 y_2 + \dots + x_n y_n$; $\sum x_i^2 = x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2$ 。

拟合直线的斜率 k 和截距 b 也可由以下二式求得

$$k = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (1-23)$$

$$b = \bar{y} - k\bar{x} \quad (1-24)$$

式中, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i$; $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum y_i$ 。

$\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 为全部测试点的平均值, 就是全部测试点的点系中心。

若将式(1-24)代入式(1-19)则得

$$y = \bar{y} - k\bar{x} + kx$$

由上式可见, 当 $x = \bar{x}$ 时, $y = \bar{y}$ 。亦即由最小二乘法原理求得的拟合直线将通过全部测试点的点系中心。

最小二乘法的拟合精度很高, 在数据较多情况下, 计算繁琐, 可由计算机处理。

(四) 迟滞 e_H :

检测装置的输入量由小增大(正行程), 继而自大减小(反行程)的测试过程中, 对应于同一输入量, 输出量往往有差别, 这种现象称为迟滞。迟滞是由于装置内部的弹性元件, 磁性元件以及机械部分的摩擦、间隙、积塞灰尘等原因而产生。迟滞大小常用全量程中最大的迟滞 $\Delta H_{\max}$ 与满量程输出平均值之比的百分数表示

$$e_H = \frac{\Delta H_{\max}}{y_{F.S.}} \times 100\% \quad (1-25)$$

式中, $\Delta H_{\max}$ 为输出值在正反行程中的最大差值 (见图 1-8)。

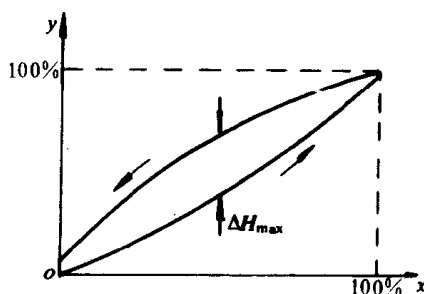


图 1-8 迟滞特性

(五) 重复性

检测装置于多次重复测试时, 在同是正行程或同是反行程中, 对应于同一输入量其输出量也不尽然相同 (见图 1-9), 重复性表示对应于同一输入量时其输出量的重复程度。重复性误差可由曲线中最大重复差值 $\Delta R_{\max}$ 求出, 由于校准的循环次数不同, 其最大偏值也不一样, 故此法求出的值不太可靠。

重复性误差 e_R 反映的是校准数据的离散程度, 属随机误差, 根据标准偏差计算

$$e_R = \pm \frac{Z\sigma_{\max}}{y_{F.S.}} \times 100\% \quad (1-26)$$

式中, $\sigma_{\max}$ 为全部校准点正行程与反行程输出值的标准偏差中之最大值; Z 为置信系数, 通常取 2 或 3。误差依从正态分布, 取 2 时, 置信概率为 95.4%; 取 3 时, 置信概率为 99.73%。

标准偏差 σ 的计算方法常用贝塞尔公式

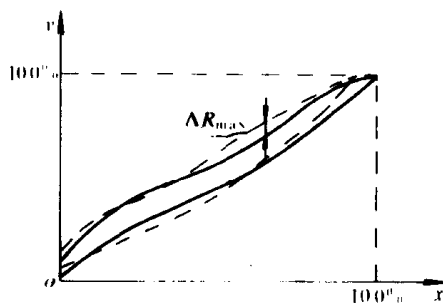


图 1-9 重复性

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}}$$

式中, y_i 为某校准点之输出值; $\bar{y}$ 为输出值的算术平均值; n 为测量次数。

(六) 静态性能指标的其他术语

灵敏阈——又称为死区,它是指由于摩擦或游隙等影响所引起的检测装置不响应的最大输入变化量,是衡量起始点不灵敏的程度。

分辨力——是指能引起输出量发生变化时输入量的最小变化量 Δx 。它说明了检测装置响应与分辨输入量微小变化的能力。可以用具体数值(即绝对值)表示,也可用全量程中最大的 $\Delta x_{\max}$ 与满量程 x_m 之比的百分数表示。

测量范围——是指检测装置能够正常工作的被测量的量值范围,即测量最小输入量(下限)至最大输入量(上限)之间的范围。测量范围可能是单向的,如 $0 \sim 50\text{mm}$;或双向的如 $\pm 10^\circ\text{C}$;或双向不对称的如 $-10 \sim 25\text{g}$ 等。

量程——是指检测装置测量上限和测量下限之代数差。例如 $-40 \sim 100^\circ\text{C}$ 的温度测量系统,其量程为 140°C ,又如 $10 \sim 20\text{g}$ 的加速度测量装置,其量程为 10g 等。

稳定性——是指在一定工作条件下,保持输入信号不变时,输出信号随时间或温度的变化而出现的缓慢变化程度。随着时间变化而出现的漂移称为时漂;随着环境温度变化而出现的漂移称之为温漂。例如,弹性元件的时效,电子元件的老化,放大线路的温漂,热电偶热电极的污染等。

可靠性——现代工业生产的自动化程度日益提高,检测装置的任务不仅要提供检测数据,而且要以此为依据,直接参与生产过程的控制,因此检测装置在生产过程中的地位越来越重要。检测装置出现故障往往导致严重的事故,为此必须加强检测装置可靠性的研究。衡量检测装置可靠性的综合指标是有效度,其定义为

$$\text{有效度} = \frac{\text{平均无故障工作时间}}{\text{平均无故障工作时间} + \text{平均修复时间}}$$

例 有一只压力计的标定数据如表 1-3 所示。试求其最小二乘线性度和灵敏度。

表 1-3 压力计的标定数据^①

$x_i (\text{kPa})$			2	4	6	8	10
$y_i (\text{mV})$							
校准次数	1	正行程	190.9	382.8	575.8	769.4	963.9
		反行程	191.6	384.1	577.3	770.6	964.4
	2	正行程	191.1	383.2	576.1	769.8	964.6
		反行程	191.6	384.2	577.4	771.0	965.1

^① 加速度=0, 振动量级=0, 环境温度= $20 \pm 1^\circ\text{C}$, 相对湿度=80%, 大气压力= $101.327 \pm 5.000\text{kPa}$ 。

解 由校准数据得知,这只压力计近似线性特性,迟滞与不重复性误差均较小,可用平均标定曲线来计算,故得表 1-4 的处理数据。