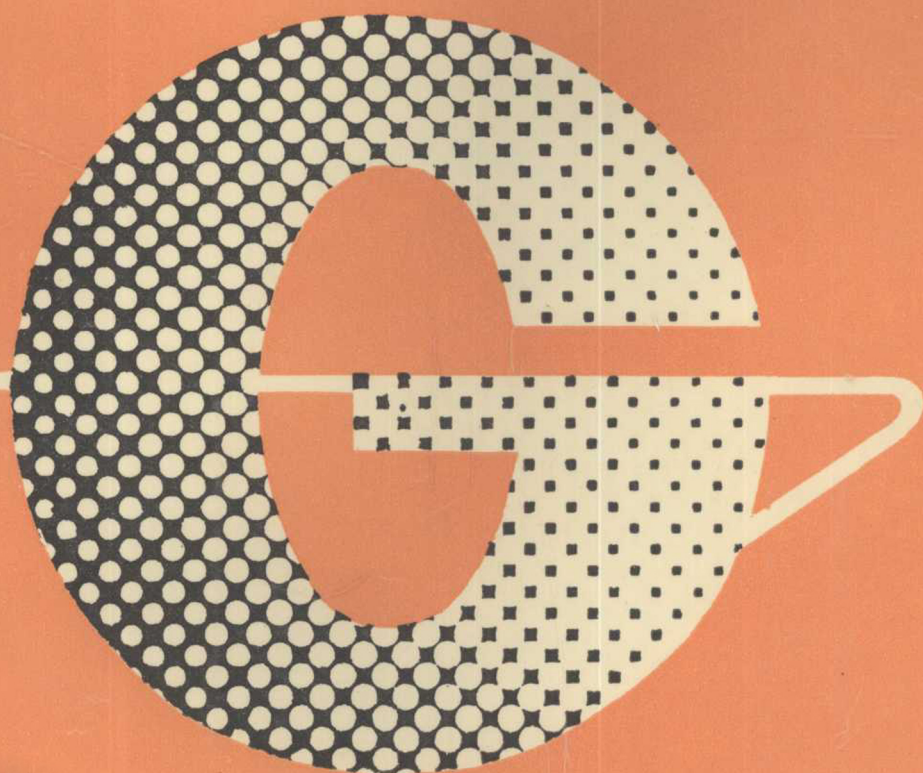


普通高等专科学校教育机电类规划教材

自动检测技术



郑州机械专科学校 马西秦 主编

机械工业出版社

普通高等专科学校教育机电类规划教材

自动检测技术

郑州机械专科学校 马西秦 主 编

南京机械专科学校 许振中 副主编



机械工业出版社

前 言

本书是根据全国高等专科学校电气工程类专业教材编审委员会的决定，按照“自动检测”课程组商定的教学大纲和教材基本内容编写的。

本书作为高等工业专科学校电气应用类专业“自动检测技术”课程的教材，贯彻了理论以够用为度，要为应用服务的教材编写原则，选材广泛，深度适宜，注重应用实例的介绍，同时尽量反映检测技术领域内的新技术、新动向。全书共分十四章，第一章讲述检测技术的基本知识。第二章到第十一章分别介绍常用传感器的工作原理，基本结构、主要性能、测量电路和应用方法。第十二章着重介绍检测系统信号处理中的微弱信号放大和线性化处理。第十三章讲述检测系统抗干扰技术。第十四章简要介绍一些新型传感器，以反映新技术和新元件在检测技术中的应用。

本书是按照教学时数为50学时编写的，不同的学校和专业选用该教材时，可根据具体情况删节部分内容。本书可作为工程专科学校电气自动化、电气技术、应用电子技术等专业“自动检测技术”课程的教材，也可供职工大学、夜大和函授大学教学使用。还可供从事这方面工作的工程技术人员参考。

本书由郑州机械专科学校马西秦主编、南京机械专科学校许振中副主编。第一章、第八章由马西秦编写，第二~五章和第十四章由许振中编写，第六章、第七章、第九章由上海轻工业专科学校赖申江编写，第十章、第十一章、第十三章由上海机械专科学校谢根涛编写，第十二章由马西秦和哈尔滨机电专科学校王振波编写。

湘潭机电专科学校周金明副教授担任本书主审，认真负责地审阅了全部书稿和插图，并提出了宝贵的修改意见。

本书在编写过程中参阅了多种同类教材和专著，在此向编、著者致谢。

编 者

1993年4月

目 录

前言

第一章 检测技术的基本知识	1
第一节 概述	1
第二节 测量方法	4
第三节 检测系统的基本特性	7
第四节 误差的概念	9
第五节 随机误差的处理方法	12
第六节 系统误差的消除方法	17
思考题与习题	19
第二章 电阻式传感器	20
第一节 电阻应变式传感器	20
第二节 固态压阻式传感器	28
第三节 热电阻式传感器	31
第四节 气敏电阻	35
第五节 湿敏电阻	39
思考题与习题	43
第三章 电容式传感器	44
第一节 电容式传感器的工作原理	44
第二节 电容式传感器的类型及特性	44
第三节 电容式传感器的测量电路	46
第四节 电容式传感器的应用	51
思考题与习题	53
第四章 电感式传感器	54
第一节 自感式电感传感器	54
第二节 差动变压器	58
第三节 电涡流式传感器	62
思考题与习题	66
第五章 压电式传感器	68
第一节 压电式传感器的工作原理	68
第二节 压电材料及压电元件的结构	70
第三节 压电式传感器的测量电路	72
第四节 压电式传感器的应用	74
思考题与习题	75
第六章 磁电式传感器	76
第一节 磁电式传感器的工作原理	76
第二节 磁电式传感器的结构和应用	76
思考题与习题	78

第七章 热电偶传感器	79
第一节 热电偶工作原理	79
第二节 热电偶的材料、结构及种类	82
第三节 热电偶的冷端补偿	89
第四节 热电偶测温线路	91
思考题与习题	91
第八章 光电传感器	95
第一节 光电效应与光电器件	95
第二节 光电传感器与光电检测	103
思考题与习题	108
第九章 霍尔传感器	109
第一节 霍尔传感器的工作原理	109
第二节 集成霍尔传感器	115
第三节 霍尔传感器的应用	117
思考题与习题	119
第十章 数字式传感器	120
第一节 光栅传感器	120
第二节 磁栅传感器	127
第三节 感应同步器	132
思考题与习题	141
第十一章 其他传感器	142
第一节 超声波传感器	142
第二节 红外传感器	146
第三节 激光传感器	150
思考题与习题	157
第十二章 检测系统中的信号处理	158
第一节 微弱信号放大	158
第二节 线性化处理	161
思考题与习题	166
第十三章 检测装置的抗干扰问题	167
第一节 干扰的类型及其防止	167
第二节 噪声源及噪声耦合方式	168
第三节 共模与差模干扰	173
第四节 常用的抗干扰措施	175
思考题与习题	181
第十四章 新型传感技术简介	182
参考文献	187

第一章 检测技术的基本知识

第一节 概 述

一、检测技术的含义、作用和地位

在人类的各项生产活动和科学实验中，为了了解和掌握整个过程的进展及其最后结果，经常需要对各种基本参数或物理量进行检查和测量，从而获得必要的信息，做为分析判断和决策的依据，可以认为检测技术就是人们为了对被测对象所包含的信息进行定性的了解和定量的掌握所采取的一系列技术措施。随着人类社会进入信息时代，以信息的获取、转换、显示和处理为主要内容的检测技术已经发展成为一门完整的技术科学，在促进生产发展和科技进步的广阔领域内发挥着重要作用。其主要应用如下：

1) 检测技术是产品检验和质量控制的重要手段。借助于检测工具对产品进行质量评价是人们十分熟悉的。这是检测技术重要的应用领域。但传统的检测方法只能将产品区分为合格品和废品，起到产品验收和废品剔除的作用。这种被动检测方法，对废品的出现并没有预先防止的能力。在传统检测技术基础上发展起来的主动检测技术或称之为在线检测技术使检测和生产加工同时进行，及时地用检测结果对生产过程主动地进行控制，使之适应生产条件的变化或自动地调整到最佳状态。这样检测的作用已经不只是单纯的检查产品的最终结果而且要过问和干预造成这些结果的原因，从而进入质量控制的领域。

2) 检测技术在大型设备安全经济运行监测中得到广泛应用。电力、石油、化工、机械等行业的一些大型设备通常在高温、高压、高速和大功率状态下运行，保证这些关键设备安全运行在国民经济中具有重大意义。为此，通常设置故障监测系统以对温度、压力、流量、转速、振动和噪声等多种参数进行长期动态监测，以便及时发现异常情况，加强故障预防，达到早期诊断的目的。这样做可以避免严重的突发事件，保证设备和人员安全，提高经济效益。即使设备发生故障也可以从监测系统提供的数据中找出故障原因，缩短检修周期，提高检修质量。另外，在日常运行中，这种连续监测可以及时发现设备故障前兆，采取预防性检修。随着计算机技术的发展，这类监测系统已经发展到故障自诊断系统。可以采用计算机来处理检测信息，进行分析、判断，及时诊断出设备故障并自动报警或采取相应的对策。

3) 检测技术和装置是自动化系统中不可缺少的组成部分。任何生产过程都可以看作是由“物流”和“信息流”组合而成，反映物流的数量、状态和趋向的信息流则是人们管理和控制物流的依据。人们为了有目的地进行控制，首先必须通过检测获取有关信息，然后才能进行分析判断以便实现自动控制。所谓自动化，就是用各种技术工具与方法代替人来完成检测、分析、判断和控制工作。一个自动化系统通常由多个环节组成，分别完成信息获取、信息转换、信息处理、信息传送及信息执行等功能。在实现自动化的过程中，信息的获取与转换是极其重要的组成环节，只有精确及时地将被控对象的各项参数检测出来并转换成易于传送和处理的信号，整个系统才能正常地工作。因此，自动检测与转换是自动化技术中不可缺

少的组成部分。

4) 检测技术的完善和发展推动着现代科学技术的进步。人们在自然科学各个领域内从事的研究工作,一般是利用已知的规律对观测、试验的结果进行概括、推理,从而对所研究的对象取得定量的概念并发现它的规律性,然后上升到理论。因此,现代化检测手段所达到水平在很大程度上决定了科学研究的深度和广度。检测技术达到的水平愈高,提供的信息愈丰富、愈可靠,科学研究取得突破性进展的可能性就愈大。此外,理论研究的一些成果,也必须通过实验或观测来加以验证,这同样离不开必要的检测手段。

从另一方面看,现代化生产和科学技术的发展也不断地对检测技术提出新的要求和课题,成为促进检测技术向前发展的动力。科学技术的新发现和新成果不断应用于检测技术中,也有力地促进了检测技术自身的现代化。

检测技术与现代化生产和科学技术的密切关系,使它成为一门十分活跃的技术学科,几乎渗透到人类的一切活动领域,发挥着愈来愈大的作用。

二、检测系统的组成

一个完整的检测系统或检测装置通常是由传感器、测量电路和显示记录装置等部分组成,分别完成信息获取、转换、显示和处理等功能。当然其中还包括电源和传输通道等不可缺少的部分。图 1-1 给出了检测系统的组成框图。

1. 传感器

传感器是把被测量(如物理量、化学量、生物量等)转换为另一种与之有确定对应关系,并且便于测量的量(通常是电量)的装置。显然,传感器是检测系统与被测对象直接发生联系的部分。

它处于被测对象和检测系统的接口位置,构成了信息输入的主要窗口,为检测系统提供必需的原始信息。它是整个检测系统最重要的环节,检测系统获取信息的质量往往是由传感器的性能一次性确定的,因为检测系统的其它环节无法添加新的检测信息并且不易消除传感器所引入的误差。

检测技术中使用的传感器种类繁多,分类的方法也各不相同。从传感器应用的目的出发,可以按被测量的性质将传感器分为:机械量传感器,如位移传感器、力传感器、速度传感器、加速度传感器等;热工量传感器,如温度传感器、压力传感器、流量传感器等;化学量传感器;生物量传感器等。

从传感器研究的目的出发,着眼于变换过程的特征可以将传感器按输出量的性质分为:

(1) 参量型传感器 它的输出是电阻、电感、电容等无源电参量,相应的有电阻式传感器、电感式传感器、电容式传感器等。

(2) 发电型传感器 它的输出是电压或电流,相应的有热电偶传感器、光电传感器、磁电传感器、压电传感器等。

2. 测量电路

测量电路的作用是将传感器的输出信号转换成易于测量的电压或电流信号。通常传感器输出信号是微弱的,就需要由测量电路加以放大,以满足显示记录装置的要求。根据需要测

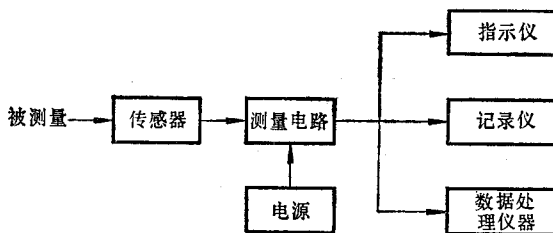


图1-1 检测系统的组成框图

量电路还能进行阻抗匹配、微分、积分、线性化补偿等信号处理工作。

应当指出测量电路的种类和构成是由传感器的类型决定的，不同的传感器所要求配用的测量电路经常具有自己的特色。

3. 显示记录装置

显示记录装置是检测人员和检测系统联系的主要环节，主要作用是使人们了解检测数值的大小或变化的过程。目前常用的有模拟显示、数字显示和图象显示三种。

模拟式显示是利用指针对标尺的相对位置表示被测量数值的大小。如各种指针式电气测量仪表，其特点是读数方便、直观，结构简单、价格低廉，在检测系统中一直被大量应用。但这种显示方式的精度受标尺最小分度限制，而且读数时易引入主观误差。

数字式显示则直接以十进制数字形式来显示读数，实际上是专用的数字电压表，它可以附加打印机，打印记录测量数值，并且易于和计算机联机，使数据处理更加方便。这种方式有利于消除读数的主观误差。

图象显示，如果被测量处于动态变化之中，用显示仪表读数就十分困难，这时可以将输出信号送至记录仪，从而描绘出被测量随时间变化的曲线，做为检测结果，供分析使用。常用的自动记录仪器有笔式记录仪、光线示波器、磁带记录仪等。

三、非电量电测法的特点

从检测系统的组成可以看出，对各种被测量的测量通常的做法是通过传感器将其转换为电量，从而使我们能够使用丰富、成熟的电子测量手段对传感器输出的电信号进行各种处理和显示记录。因此这种非电量电测法构成了检测技术中最重要的内容，利用这种方法几乎可以测量各种非电量参数。因此，电子技术的发展和在检测中的应用大大促进了检测技术的发展，为电子计算机技术进入检测领域创造了条件。

非电量电测法的主要优点如下：

- 1) 能够连续、自动地对被测量进行测量和记录。
- 2) 电子装置精度高、频率响应好，不仅能适用于静态测量，选用适当的传感器和记录装置还可以进行动态测量甚至瞬态测量。
- 3) 电信号可以远距离传输，便于实现远距离测量和集中控制。
- 4) 电子测量装置能方便地改变量程，因此测量的范围广。
- 5) 可以方便地与计算机相联，进行数据的自动运算、分析和处理。

四、检测技术的发展方向

科学技术的迅猛发展，为检测技术的现代化创造了条件，主要表现在以下两个方面：

第一，人们研究新原理、新材料和新工艺所取得的成果将产生更多品质优良的新型传感器。例如光纤传感器、液晶传感器、以高分子有机材料为敏感元件的压敏传感器、微生物传感器等。

另外，代替视觉、嗅觉、味觉和听觉的各种仿生传感器和检测超高温、超高压、超低温和超高真空等极端参数的新型传感器也是今后传感器技术研究和发展的方向。

新型传感器技术除了采用新原理、新材料和新工艺之外，还向着高精度小型化和集成化的方向发展。

传感器集成化的一个方向是具有同样功能的传感器集成化，从而使对一个点的测量变成对一个平面和空间的测量。例如，利用电荷耦合器件形成的固体图象传感器来进行的文字和

图形识别即是如此。

传感器集成化的另一个方向是不同功能的传感器集成化，从而使一个传感器可以同时测量不同种类的多个参数。例如，测量血液中各种成分的多功能传感器。

除了传感器自身的集成化之外，还可以把传感器和后续电路集成化。传感器和测量电路的集成化可以减少干扰，提高灵敏度，方便使用。如果将传感器和数据处理电路集成在一起，则可以方便地实现实时数据处理。

第二，检测系统或检测装置目前正迅速地由模拟式、数字式向智能化方向发展。带有微处理机的各种智能化仪表已经出现，这类仪表选用微处理机做控制单元，利用计算机可编程的特点，使仪表内的各个环节自动地协调工作，并且具有数据处理和故障诊断功能，成为一代崭新仪表，把检测技术自动化推进到一个新水平。

智能化仪表比一般检测装置功能强得多，它可以进行：

- 1) 自动调零和自动校准。
- 2) 自动量程转换。在程序控制下，可以使测量工作从高量程到低量程自动进行，并通过比较判断，使被测量处于最适当的量程之内。
- 3) 自动选择功能。通过多路转换器和A/D转换器的配合，在程序控制下，既可以顺序地测量，也可以任意地选择对应不同参数的测量通道，从而自动改变仪表测量功能。
- 4) 自动数据处理和误差修正。利用微机强大的运算能力，编制适当的数据处理程序，即可完成线性化、求取平均值、标准偏差、做相关计算等数据处理工作，并且可以根据工作条件的变化，按照一定公式自动计算出修正值，同时修正测量结果，提高测量精度。
- 5) 自动定时测量。利用计算机硬件定时或软件定时的功能可以完成各种时间间隔的定时自动测量。
- 6) 自动故障诊断。在微机控制下，可对仪表电路进行故障检查和诊断，遇到故障点后能够自动显示故障部位，使得排查故障方便，缩短检修时间。

第二节 测量方法

一、测量的基本概念

测量或检测是指人们用实验的方法，借助于一定的仪器或设备，将被测量与同性质的单位标准量进行比较，并确定被测量对标准量的倍数，从而获得关于被测量的定量信息。测量过程中使用的标准量应该是国际或国内公认的性能稳定的量，称为测量单位。

测量的结果包括数值大小和测量单位两部分。数值的大小可以用数字表示，也可以是曲线或者图形。无论表现形式如何，在测量结果中必须注明单位。否则，测量结果是没有意义的。

检测技术比上述的测量定义有更加广泛的含义。它是指下述的全面过程：按照被测量的特点，选用合适的检测装置与实验方法，通过测量和数据处理及误差分析，准确得到被测量的数值，并为进一步提高测量精度，改进实验方法及测量装置性能提供可靠的依据。

一切测量过程都包括比较、示差、平衡和读数等四个步骤。例如，用钢卷尺测量棒料长度时，首先将卷尺拉出与棒料平行紧靠在一起，进行“比较”；然后找出卷尺与棒料的长度差别，即“示差”；进而调整卷尺长度使二者长度相等，达到“平衡”；最后从卷尺刻度上读出棒

料的长度，即“读数”。

测量过程的核心是比较，但被测量能直接与标准量比较的场合并不多，大多数情况下，是将被测量和标准量转换成双方易于比较的某个中间变量来进行的。例如，用弹簧秤称重。被测重量通过弹簧按比例伸长，转换为指针位移，而标准重量转换成标尺刻度。这样，被测量和标准量都转换成位移这一中间变量，可以进行直接比较。

此外，为了提高测量精度，并且能够对变化快、持续时间短的动态量进行测量，通常将被测量转换为电压或电流信号，利用电子装置完成比较、示差、平衡和读数的测量过程。因此，转换是实现测量的必要手段，也是非电量电测的核心。

二、测量方法

测量方法是实现测量过程所采用的具体方法，应当根据被测量的性质、特点和测量任务的要求来选择适当的测量方法。按照测量手续可以将测量方法分为直接测量和间接测量。按照获得测量值的方式可以分为偏差式测量、零位式测量和微差式测量。此外，根据传感器是否与被测对象直接接触，可区分为接触式测量和非接触式测量。而根据被测对象的变化特点又可分为静态测量和动态测量等。

(一) 直接测量与间接测量

1. 直接测量

用事先分度或标定好的测量仪表，直接读取被测量测量结果的方法称为直接测量。例如，用温度计测量温度，用电压表测量电压等。

直接测量是工程技术中大量采用的方法，其优点是直观、简便、迅速，但不易达到很高的测量精度。

2. 间接测量

首先，对和被测量有确定函数关系的几个量进行测量，然后，再将测量值代入函数关系式，经过计算得到所需结果。这种测量方法，属于间接测量。例如，测量直流电功率时，根据 $P = IU$ 的关系，分别对 I 、 U 进行直接测量，再计算出功率 P 。在间接测量中，测量结果 y 和直接测量值 x_i ($i = 1, 2, 3 \dots$) 之间的关系式可用下式表示

$$y = f(x_1, x_2, x_3 \dots)$$

间接测量手续多，花费时间长，当被测量不便于直接测量或没有相应直接测量的仪表时才采用。

(二) 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，利用测量仪表指针相对于刻度初始点的位移（即偏差）来决定被测量的测量方法，称为偏差式测量。在使用这种测量方法的仪表内并没有标准量具，只有经过标准量具校准过的标尺或刻度盘。测量时，利用仪表指针在标尺上的示值，读取被测量的数值。它以间接方式实现被测量和标准量的比较。

偏差式测量仪表在进行测量时，一般利用被测量产生的力或力矩，使仪表的弹性元件变形，从而产生一个相反的作用，并一直增大到与被测量所产生的力或力矩相平衡时，弹性元件的变形就停止了，此变形即可通过一定的机构转变成仪表指针相对标尺起点的位移，指针所指示的标尺刻度值就表示了被测量的数值。

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。

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，从而判定被测量值等于已知标准量的方法称做零位式测量。

用天平测量物体的质量就是零位式测量的一个简单例子。用电位差计测量未知电压也属于零位式测量，图1-2所示的电路是电位差计的原理性示意图。

图中 E 为工作电池的电动势，在测量前先调节 RP_1 ，校准工作电流使其达到标准值，接入被测电压 U_x 后，调整电位器 RP 的活动触点，改变标准电压的数值，使检流计 P 回零，达到 A 、 D 两点等电位，此时标准电压 U_s 等于 U_x ，从电位差计读取的 U_s 的数值就表示了被测未知电压 U_x 。

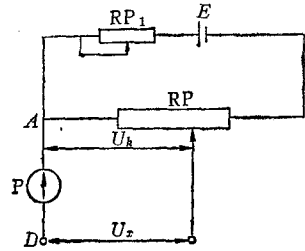


图1-2 电位差计原理图

在零位式测量中，标准量具处于测量系统中，它提供一个可调节的标准量，被测量能够直接与标准量相比较，测量误差主要取决于标准量具的误差。因此，可获得比较高的测量精度。另外，指零机构愈灵敏，平衡的判断愈准确，愈有利于提高测量精度。但是这种方法需要平衡操作，测量过程较复杂，花费时间长，即使采用自动平衡操作，反应速度也受到限制，因此只能适用于变化缓慢的被测量，而不适于变化较快的被测量。

3. 微差式测量

这是综合零位式测量和偏差式测量的优点而提出的一种测量方法。基本思路是将被测量 x 的大部分作用先与已知标准量 N 的作用相抵消，剩余部分即两者差值 $\Delta = x - N$ ，这个差值再用偏差法测量。微差式测量中，总是设法使差值 Δ 很小，因此可选用高灵敏度的偏差式仪表测量之。即使差值的测量精度不高，但最终结果仍可达到较高的精度。

例如，测定稳压电源输出电压随负载电阻变化的情况时，输出电压 U_0 可表示为 $U_0 = U + \Delta U$ ，其中 ΔU 是负载电阻变化所引起的输出电压变化量，相对 U 来讲为一小量。如果采用偏差法测量，仪表必须有较大量程以满足 U_0 的要求，因此对 ΔU 这个小量造成的 U_0 的变化就很难测准。当然，可以改用零位式测量，但最好的方法是如图1-3所示的微差式测量。

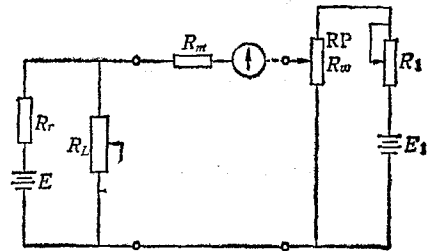


图1-3 微差式测量原理图

图中使用了高灵敏度电压表——毫伏表和电位差计， R_r 和 E 分别表示稳压电源的内阻和电动势， R_L 表示稳压电源的负载， E_1 、 R_1 和 R_0 表示电位差计的参数。在测量前调整 R_1 ，使电位差计工作电流 I_1 为标准值。然后，使稳压电源负载电阻 R_L 为额定值。调整 RP 的活动触点，使毫伏表指示为零，这相当于事先用零位式测量出额定输出电压 U 。正式测量开始后，只需增加或减小负载电阻 R_L 的值，负载变动所引起的稳压电源输出电压 U_0 的微小波动值 ΔU ，即可由毫伏表指示出来。根据 $U_0 = U + \Delta U$ ，稳压电源输出电压在各种负载下的值都可以准确地测量出来。

微差式测量法的优点是反应速度快，测量精度高，特别适合于在线控制参数的测量。

第三节 检测系统的基本特性

检测系统的特性，一般分为静态特性和动态特性两种。

当被测量不随时间变化或变化很慢时，可以认为检测系统的输入量和输出量都和时间无关。表示它们之间关系的是一个不含时间变量的代数方程，在这种关系的基础上确定的检测装置性能参数通常称为静态特性。

当被测量随时间变化很快时，就必须考虑输入量和输出量之间的动态关系。这时，表示它们之间关系的是一个含有时间变量的微分方程。由此引出的检测系统对快速变化被测量的响应特性称为动态特性。

本节介绍的检测系统的静，动态特性参数同样适用于组成检测系统的各个环节，如传感器等。

一、静态特性

(一) 灵敏度与分辨率

灵敏度是指传感器或检测系统在稳态下输出量变化和引起此变化的输入量变化的比值。可表示为

$$s = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad \text{或} \quad s = \frac{dy}{dx}$$

它是输入-输出特性曲线的斜率。

如果系统的输出和输入之间有线性关系，则灵敏度 s 是一个常数。否则，它将随输入量的大小而变化。如图1-4所示。

一般希望灵敏度 s 在整个测量范围内保持为常数。这样，可得均匀刻度的标尺，使读数方便，也便于分析和处理测量结果。

由于输入和输出的变化量一般都有不同的量纲，所以灵敏度 s 也是有量纲的。如输入量为温度($^{\circ}\text{C}$)，输出量为标尺上的位移(格)，则 s 的量纲为格/ $^{\circ}\text{C}$ 。如果输入量和输出量是同类型量，则此时 s 可理解为放大倍数。因此，灵敏度比放大倍数有更广泛的含义。

如果检测系统由多个环节组成，各环节的灵敏度分别为 s_1 、 s_2 、 s_3 ，而且各环节以图1-5所示的那样串联的方式相连接，则整个系统的灵敏度可用下式表示

$$s = s_1 s_2 s_3$$

提高灵敏度，可得到较高测量精度，但应当注意，灵敏度愈高，测量范围往往愈窄，稳定性往往愈差。

分辨率是指检测仪表能够精确检测出被测量的最小变化的能力。输入量从某个任意值(非零值)缓慢增加，直到可以测量到输出的变化为止，此时的输入量就是分辨率。它可以

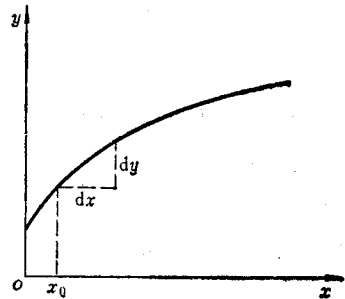


图1-4 检测系统灵敏度

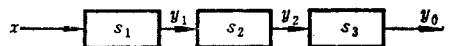


图1-5 串联系统示意图

用绝对值，也可以用量程的百分数来表示。它说明了检测仪表响应与分辨输入量微小变化的能力。灵敏度愈高，分辨率愈好。一般模拟式仪表的分辨率规定为最小刻度分格值的一半。数字式仪表的分辨率是最后一位的一个字。

(二) 线性度

线性度是用实测的检测系统输入-输出特性曲线与拟合直线之间最大偏差与满量程输出的百分比来表示的。

$$E_f = \frac{\Delta_m}{Y_{FS}} \times 100\%$$

由于线性度（非线性误差）是以所参考的拟合直线为基准线算得的，所以基准线不同，所得线性度就不同。拟合直线的选取方法很多，采用理论直线做为拟合直线，确定的检测系统线性度，称做理论线性度。理论直线通常取连接理论曲线坐标零点和满量程输出点的直线。如图1-6所示。

采取不同的方法选取拟合直线，还可以得到不同的线性度。如使拟合直线通过实际特性曲线的起点和满量程点，可以得到端基线性度。使拟合直线与特性曲线上各点偏差的平方和为最小，可得到最小二乘法线性度等。

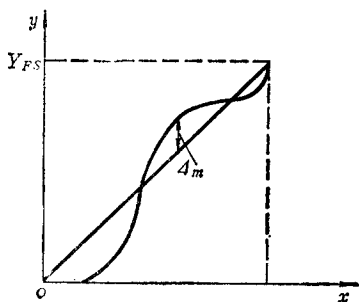


图1-6 理论线性度示意图

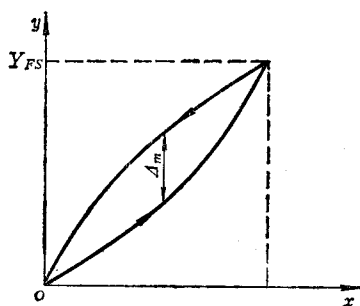


图1-7 迟滞特性示意图

(三) 迟滞

迟滞特性表明检测系统在正向（输入量增大）和反向（输入量减小）行程期间，输入-输出特性曲线不一致的程度。也就是说，对同样大小的输入量，检测系统在正、反行程中，往往对应两个大小不同的输出量。通过实验，找出输出量的这种最大差值，并以满量程输出 Y_{FS} 的百分数表示，就得到了迟滞的大小（见图1-7）。

$$E_h = \frac{\Delta_m}{Y_{FS}} \times 100\%$$

式中， Δ_m 为输出值在正、反行程期间的最大差值。

迟滞可能是由仪表元件存在能量吸收或传动机构的摩擦、间隙等原因造成的。

(四) 测量范围与量程

测量范围是指正常工作条件下，检测系统或仪表能够测量的被测量值的总范围。通常以测量范围的下限值和上限值来表示。如某温度计的测量范围是 -20°C 至 $+200^{\circ}\text{C}$ 。

量程是测量范围上限值与下限值的代数差。如上述温度计的量程是 220°C 。

给出测量范围即给出了被测量的上、下限，也就给出了量程。但仅知量程，却无法判断检测系统的测量范围。

(五) 精度等级

检测系统或仪表精度等级的表示和其引用误差有关。这将在下一节中详细叙述。

检测系统的静态特性还包括重复性、稳定性、死区等参数。

二、动态特性

随着自动化生产和科学技术的发展，对于随时间快速变化的动态量，进行检测的机会越来越多。这时检测系统除了满足静态特性要求之外，还应当对变化中的被测量保持足够响应，即具有良好的动态特性。只有这样，才能迅速准确地测出被测量的大小或再现被测量的波形。

在实际工作中，检测系统的动态特性通常是用实验方法求得的。我们可以根据系统对一些标准输入信号的响应来评定它的动态特性。因为，系统对标准输入信号的响应和它对任意输入信号的响应之间存在一定的关系。知道了前者，就可以推算后者。在时域内，研究动态特性时常用阶跃信号来分析系统的瞬态响应，包括超调量、上升时间、响应时间等。在频域内，研究动态特性时，则采用正弦输入信号来分析系统的频率响应，包括幅频特性和相频特性。

对检测系统动态特性的理论研究，通常是先建立系统的数学模型，通过拉氏变换找出传递函数表达式，再根据输入条件得到相应的频率特性，并以此来描述系统的动态特性。大部分检测系统可以简化为单自由度一阶或二阶系统。因此，我们可以方便地应用自动控制原理中的分析方法和结论。这里不再赘述。

第四节 误差的概念

在检测过程中，被测对象、检测系统、检测方法和检测人员都会受到各种变动因素的影响。而且，对被测量的转换，有时也会改变被测对象原有的状态。这就造成了检测结果和被测量的客观真值之间存在一定的差别。这个差值称为测量误差。误差公理告诉我们：任何实验结果都是有误差的，误差自始至终存在于一切科学实验和测量之中，被测量的真值是永远难以得到的。尽管如此，我们仍然可以设法改进检测工具和实验手段，并通过检测数据的误差分析和处理，使测量误差处在允许的范围之内。或者说，达到一定的测量精度。这样的测量结果就被认为是合理的，可信的。

测量误差的主要来源可以概括为工具误差、环境误差、方法误差和人员误差等。

在分析测量误差时，人们采用的被测量真值是指在确定的时间、地点和状态下，被测量所表现出来的实际大小。一般来说，真值是未知的，所以误差也是未知的。但有些值可以作为真值来使用。例如理论真值，它是理论设计和理论公式的表达值。还有计量学约定真值，它是由国际计量学大会确定的长度、质量、时间等基本单位。另外，考虑到多级计量网中计量标准的传递，高一级标准器的量值也可以作为相对真值。

为了便于对误差进行分析和处理，人们通常把测量误差从不同角度进行分类。按照误差的表示方法可以分为绝对误差和相对误差；按照误差出现的规律，可以分为系统误差、随机误差和粗大误差；按照被测量与时间的关系，可以分为静态误差和动态误差等。

一、绝对误差与相对误差

(一) 绝对误差

绝对误差是仪表的指示值 x 与被测量的真值 x_0 之间的差值，记做 δ

$$\delta = x - x_0$$

绝对误差有符号和单位，它的单位与被测量相同。引入绝对误差后，被测量真值可以表示为

$$x_0 = x - \delta = x + c$$

式中， $c = -\delta$ ，称为修正值或校正量，它与绝对误差的数值相等，但符号相反。

含有误差的指示值加上修正值之后，可以消除误差的影响。在计量工作中，通常采用加修正值的方法来保证测量值的准确可靠。仪表送上级计量部门检定，其主要目的就是获得一个准确的修正值。例如，得到一个指示值修正表或修正曲线。

绝对误差愈小，说明指示值愈接近真值，测量精度愈高。但这一结论只适用于被测量值相同的情况，而不能说明不同值的测量精度。例如，某测量长度的仪器，测量10mm的长度，绝对误差为0.001mm。另一仪器测量200mm长度，误差为0.01mm。这就很难按绝对误差的大小来判断测量精度高低了。这是因为后者的绝对误差虽然比前者大，但它相对于被测量的值却显得较小。为此，人们引入了相对误差的概念。

(二) 相对误差

相对误差是仪表指示值的绝对误差 δ 与被测量真值 x_0 的比值，常用百分数表示，即

$$r = \frac{\delta}{x_0} \times 100\% = \frac{x - x_0}{x_0} \times 100\%$$

相对误差比绝对误差能更好地说明测量的精确程度。在上面的例子中

$$r_1 = \frac{0.001}{10} \times 100\% = 0.01\%$$

$$r_2 = \frac{0.01}{200} \times 100\% = 0.005\%$$

显然，后一种长度测量仪表更精确。

在实际测量中，由于被测量真值是未知的，而指示值又很接近真值。因此，可以用指示值 x 代替真值 x_0 来计算相对误差。

使用相对误差来评定测量精度，也有局限性。它只能说明不同测量结果的准确程度，但不适用于衡量测量仪表本身的质量。因为同一台仪表在整个测量范围内的相对误差不是定值。随着被测量的减小，相对误差变大。为了更合理地评价仪表质量，采用了引用误差的概念。

引用误差是绝对误差 δ 与仪表量程 L 的比值。通常以百分数表示。引用误差

$$r_0 = \frac{\delta}{L} \times 100\%$$

如果以测量仪表整个量程中，可能出现的绝对误差最大值 δ_m 代替 δ ，则可得到最大引用误差 r_{0m} 。

$$r_{0m} = \frac{\delta_m}{L} \times 100\%$$

对一台确定的仪表或一个检测系统，最大引用误差就是一个定值。

测量仪表一般采用最大引用误差不能超过的允许值作为划分精度等级的尺度。工业仪表

常见的精度等级有0.1级, 0.2级, 0.5级, 1.0级, 1.5级, 2.0级, 2.5级, 5.0级。精度等级为1.0的仪表, 在使用时它的最大引用误差不超过 $\pm 1.0\%$, 也就是说, 在整个量程内它的绝对误差最大值不会超过其量程的 $\pm 1\%$ 。

在具体测量某个量值时, 相对误差可以根据精度等级所确定的最大绝对误差和仪表指示值进行计算。

显然, 精度等级已知的测量仪表只有在被测量值接近满量程时, 才能发挥它的测量精度。因此, 使用测量仪表时, 应当根据被测量的大小和测量精度要求, 合理地选择仪表量程和精度等级, 只有这样才能提高测量精度。

二、系统误差与随机误差

(一) 系统误差

在相同的条件下, 多次重复测量同一量时, 误差的大小和符号保持不变, 或按照一定的规律变化, 这种误差称为系统误差。其误差的数值和符号不变的称为恒值系统误差。反之, 称为变值系统误差。变值系统误差又可分为累进性的、周期性的和按复杂规律变化的几种类型。

检测装置本身性能不完善、测量方法不完善、测量者对仪器使用不当、环境条件的变化等原因都可能产生系统误差。例如, 某仪表刻度盘分度不准确, 就会造成读数偏大或偏小, 从而产生恒值系统误差。温度、气压等环境条件的变化和仪表电池电压随使用时间的增长而逐渐下降, 则可能产生变值系统误差。

系统误差的特点是可以通过实验或分析的方法, 查明其变化规律和产生原因, 通过对测量值的修正, 或者采取一定的预防措施, 就能够消除或减少它对测量结果的影响。

系统误差的大小表明测量结果的正确度。它说明测量结果相对真值有一恒定误差, 或者存在着按确定规律变化的误差。系统误差愈小, 则测量结果的正确度愈高。

(二) 随机误差

在相同条件下, 多次测量同一量时, 其误差的大小和符号以不可预见的方式变化, 这种误差称为随机误差。

随机误差是测量过程中, 许多独立的、微小的、偶然的因素引起的综合结果。

在任何一次测量中, 只要灵敏度足够高, 随机误差总是不可避免的。而且在同一条件下, 重复进行的多次测量中, 它或大或小, 或正或负, 既不能用实验方法消除, 也不能修正。但是, 利用概率论的一些理论和统计学的一些方法, 可以掌握看似毫无规律的随机误差的分布特性, 确定随机误差对测量结果的影响。

随机误差的大小表明测量结果重复一致的程度, 即测量结果的分散性。通常, 用精密度表示随机误差的大小。随机误差大, 测量结果分散, 精密度低。反之, 测量结果的重复性好, 精密度高。

精确度是测量的正确度和精密度的综合反映。精确度高意味着系统误差和随机误差都很小。精确度有时简称为精度。图1-8形象地说明了系统误差、随机误差对测量结果的影响, 也说明了

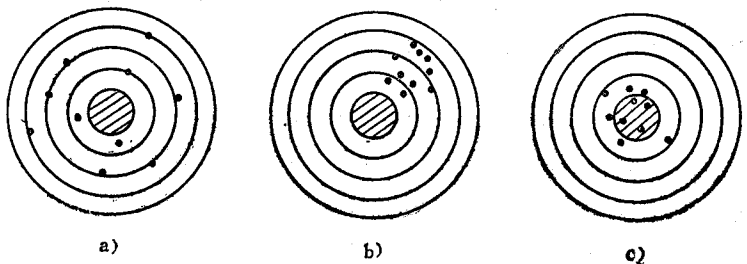


图1-8 正确度、精密度和精确度示意图

正确度、精密度和精确度的含意。

图1-8 a 的系统误差较小，正确度较高。但随机误差较大，精密度低。

图1-8 b 的系统误差大，正确度较差。但随机误差小，精密度较高。

图1-8 c 的系统误差和随机误差都较小，即正确度和精密度都较高。因此精确度高。显然，一切测量都应当力求精密而又正确。

三、系统误差与随机误差的关系

虽然，系统误差和随机误差的性质不同，但两者并不是完全彼此孤立的。它们总是同时出现并对测量结果产生影响。实际上，很难把它们严格区分开来。人们一方面可以把难于完全掌握或过于复杂的系统误差当做随机误差来处理。另一方面，对某些随机误差的来源和变化规律有了更深入的了解后，就可以把它看成系统误差而加以修正或预防。

由于在任何一次测量中，系统误差和随机误差一般都同时存在，所以按其對测量结果的影响程度分三种情况处理：系统误差远大于随机误差时，基本上按纯系统误差处理；系统误差很小或已经修正时，可按纯随机误差处理；系统误差和随机误差影响差不多时，二者均不可忽略，应分别按不同方法处理。

四、粗大误差

明显歪曲测量结果的误差称做粗大误差，又称过失误差。粗大误差主要是人为因素造成的。例如，测量人员工作时疏忽大意，出现了读数错误、记录错误、计算错误或操作不当等。另外，测量方法不恰当，测量条件意外的突然变化，也可能造成粗大误差。

含有粗大误差的测量值称为坏值或异常值。坏值应从测量结果中剔除。

在实际测量工作中，由于粗大误差的误差数值特别大，容易从测量结果中发现，一经发现粗大误差，可以认为该次测量无效，测量数据应剔除，从而消除它对测量结果的影响。

坏值剔除后，正确的测量结果中不包含粗大误差。因此，要分析处理的误差只有系统误差和随机误差两种。

第五节 随机误差的处理方法

一、概率、概率密度与正态分布

自然界中，某一事件或现象出现的客观可能性大小，通常用概率来表示。

客观的必然现象称为必然事件。例如，平面三角形内角和为 180° ，就是一个必然事件。必然事件的概率为1。

违反客观实际的不可能出现的现象称为不可能事件，不可能事件的概率为零。

客观上可能出现，也可能不出现，而且不能预测的现象称为随机事件或随机现象。它具有一定的概率，且概率在0和1之间。例如，抛掷硬币，出现正面朝上或反面朝上的现象，即为一随机事件。当抛掷次数无限加多时，大量的实验证明，它们的概率接近0.5。

在研究随机事件的统计规律时，概率是一个重要的概念。它是随机事件统计规律性的表现，是随机事件的固有特性。同时，也应当注意到概率是个统计概念，只有在大量重复实验中，对整体而言才有意义。

在相同的条件下，对某个量重复进行多次测量，在排除系统误差和粗大误差之后，测量结果的随机误差在某个范围内取值的可能性，就是一个随机事件的统计概率问题。

下面是一组无系统误差和粗大误差的独立的等精度长度测量结果。用长300mm的钢板尺，测量已知长度为836mm的导线，共测量了150次，即 $n = 150$ 。现将测量结果，对应的误差 δ_i ，各误差出现的次数 n_i 等列于表1-1中。

表 1-1

区间号	测量区间中心值 x_i (mm)	误差区间中心值 δ_i (mm)	出现次数 n_i	频率 n_i/n (%)
1	831	-5	1	0.66
2	832	-4	3	2.00
3	833	-3	8	5.33
4	834	-2	18	12.00
5	835	-1	28	18.66
6	836	0	34	22.66
7	837	+1	29	19.33
8	838	+2	17	11.33
9	839	+3	9	6.00
10	840	+4	2	1.32
11	841	+5	1	0.66

为了便于统计，在这里我们将测量结果分成了11个区间，区间长度 $\Delta x_i = 1 \text{ mm}$ 。因此，测量误差也相应的被分成11个区间，误差区间长度 $\Delta \delta_i = 1 \text{ mm}$ 。

表1-1中还列出根据统计结果计算得到的频率 (n_i/n) 的数值。它表示测量值或随机误差落在某个区间的相对次数。

在直角坐标图上，以频率 (n_i/n) 为纵坐标，以随机误差 δ_i 为横坐标，画出它们的关系曲线，得到频率直方图，或称统计直方图。如图1-9所示。

如果改变区间长度 $\Delta \delta_i$ 的取值，相应的频率值 (n_i/n) 也会发生变化，对同一组测量数据，频率直方图将不相同。如果以 $n_i/(n\Delta \delta)$ 这个量做为纵坐标，就可以避免这个问题。

当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时，令 $\Delta \delta \rightarrow d\delta$ ， $n_i \rightarrow dn$ ，无限多个直方图中，顶点的连线就形成一条光滑的连续曲线，这条曲线称为随机误差正态分布曲线。此时， $n_i/(n\Delta \delta)$ 的极限 $f(\delta)$ 称为概率密度。即

$$f(\delta) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n_i}{n\Delta \delta} = \frac{1}{n} \frac{dn}{d\delta}$$

$f(\delta)$ - δ 的图形如图1-10所示。显然，曲线

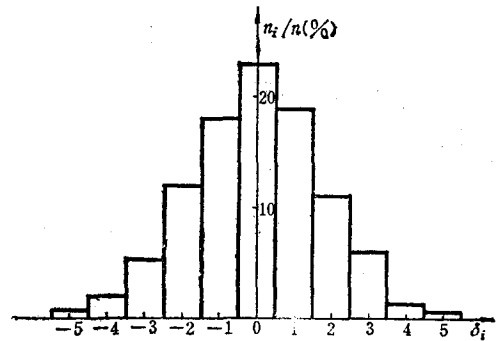


图1-9 随机误差的统计直方图

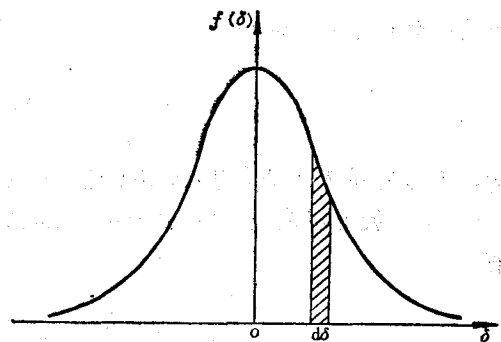


图1-10 随机误差的正态分布曲线