

高等学校教材

非电量电测技术

(修订本)

沈阳工业大学 严钟豪 主编
浙江大学 谭祖根

GAO DENG XUE
XIAO JIAO CAI

机械工业出版社

高等学校教材

非电量电测技术

(修订本)

沈阳工业大学 严钟豪
浙江大学 谭祖根 主编



机械工业出版社

本书阐明了非电量电测系统各个环节,包括信息的获得,信号的传输、转换和处理,以及它们相互之间的关系。着重论述了各类传感器,包括结构型传感器、物性型传感器和数字式传感器的基本原理和典型应用,以及信号传输、转换和处理过程中的设计原则和方法。

全书共十六章。第一章为基本知识,第二章到第十五章为各类传感器,第十六章为非电量电测系统。

本书为电磁测量技术及仪表专业教材,也可供其它专业根据需要选用,并可作为有关工程技术人员的参考书。

高等学校教材
非电量电测技术
(修订本)

沈阳工业大学 严钟豪 主编
浙江大学 谭祖根

*
责任编辑:林静贤 版式设计:冉晓华
封面设计:田淑文 责任校对:熊天荣
责任印制:王国光

*
机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)
(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)
机械工业出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*
开本 $787 \times 1092 \frac{1}{10}$ ·印张 $21 \frac{3}{4}$ ·字数 535 千字
1983 年 7 月北京第一版
1989 年 11 月北京第二版·1989 年 11 月北京第七次印刷
印数 29,151—33,350·定价:4.35 元

*
ISBN 7-111-01803-6/TM·233(课)

前 言

本书是根据1984年3月电磁测量技术及仪表专业教材编审小组第二次会议通过的“非电量电测技术”教学大纲和1986年在杭州制订的教材编写大纲编写的。

80年代以来,非电量电测技术有了很大发展。一方面是各种新型传感器的大量涌现和新的传感原理的应用;另一方面是微电子技术和计算机技术在非电量测量中的普遍应用。与此同时,根据教学大纲的要求,要压缩教学学时。为了适应这种情况,我们对初版进行了修订。修订的原则是既要压缩总学时,又要尽可能地反映当前技术发展的状况,保持全书的系统性和完整性。

为此,在修订中我们对初版中比较陈旧的内容作了一些删节,简化了一些推导过程。尽可能地增加了新的传感原理和新型传感器的内容。在电测技术方面尽量避免与专业的其它课程(如电子技术基础、计算机原理及应用、…) 在内容上的重复,作了较大的增、删和调整。

全书共分十六章。第一章为非电量电测技术的基本知识。第二章至第十五章按工作原理分类介绍各种类型传感器的基本原理及其典型应用。第十六章为非电量电测系统,着重介绍信号的传输、转换和处理,使读者能建立一个比较系统与完整的非电量电测系统的概念。对终端设备和标定作了必要的介绍。

全书总学时为77学时(不包括实验),比初版减少了23学时。本书主要作为高等学校电磁测量技术与仪表专业的教材。书中各章有一定的独立性,可供其它专业根据需要选用不同的章节。本书也可供从事检测、控制技术等有关的技术人员参考。

本书的修订工作仍由沈阳工业大学严钟豪、浙江大学谭祖根担任主编,参加编写的有沈阳工业大学杨维明、浙江大学钱浚霞、赵阳。主审由哈尔滨工业大学郭振芹担任。

由于非电量电测技术涉及的知识面非常广泛,而我们的水平有限,了解面和理解上又有极大的局限性,因此,在内容选择上,安排上,会有不妥之处,恳切希望读者指正。

编 者

1988年6月

目 录

绪论	1	§ 5-4 电容式传感器的结构与特点	109
§ 0-1 非电量电测技术在国民经济中的作用	1	§ 5-5 测量电路	112
§ 0-2 非电量电测系统的组成	2	§ 5-6 电容式传感器的应用	117
§ 0-3 传感器在科学技术中的地位	3	§ 5-7 静电式传感器	120
§ 0-4 非电量电测技术的发展趋势	4	第六章 压电式传感器	121
§ 0-5 本课程内容以及与其它课程的关系	5	§ 6-1 压电式传感器的工作原理	121
第一章 非电量电测技术的基本知识	7	§ 6-2 压电材料和它的主要特性	126
§ 1-1 测量的概念和测量方法	7	§ 6-3 压电元件常用的结构形式	127
§ 1-2 测量误差及其分类	8	§ 6-4 测量电路	128
§ 1-3 测量系统的静态特性	10	§ 6-5 压电式传感器的应用	131
§ 1-4 测量系统的静态误差	14	第七章 磁电式传感器	134
§ 1-5 测量系统的动态特性	18	§ 7-1 基本原理和结构	134
§ 1-6 机电模拟和变量分类	25	§ 7-2 磁电式传感器设计中的几个问题	135
第二章 电阻式传感器	30	§ 7-3 磁电式传感器的应用	137
§ 2-1 电阻应变式传感器	30	§ 7-4 双向传感器统一理论	139
§ 2-2 半导体应变片及压阻传感器	52	第八章 光电式传感器	149
§ 2-3 电位计式传感器	56	§ 8-1 基本工作原理	149
第三章 电感式传感器	58	§ 8-2 光电传感器的基本元件	149
§ 3-1 电感式传感器	58	§ 8-3 新型光电元器件	159
§ 3-2 差动变压器	74	§ 8-4 光电传感器的应用	168
§ 3-3 电感式传感器的应用	83	第九章 热电式传感器	173
第四章 电涡流式传感器	85	§ 9-1 热电阻	173
§ 4-1 电涡流式传感器的工作原理	86	§ 9-2 热敏电阻	175
§ 4-2 电涡流的形成范围	88	§ 9-3 P-N 结型温度传感器	177
§ 4-3 电涡流式传感器的设计	91	§ 9-4 热电偶	179
§ 4-4 被测体材料形状和大小对传感器灵敏度的影响	95	§ 9-5 辐射式温度传感器	185
§ 4-5 测量电路	96	第十章 磁弹性式传感器	190
§ 4-6 其它形式的电涡流式传感器	99	§ 10-1 压磁效应	190
§ 4-7 电涡流式传感器的应用	100	§ 10-2 磁弹性式传感器的工作原理	191
第五章 电容式传感器	102	§ 10-3 磁弹性式传感器的结构和制造工艺	192
§ 5-1 电容式传感器的工作原理及结构	102	§ 10-4 磁弹性式传感器的特性	195
§ 5-2 电容式传感器的静态特性	103	第十一章 磁敏元件及其传感器	197
§ 5-3 电容式传感器的等效电路	109	§ 11-1 霍尔元件及其传感器	197
		§ 11-2 磁敏电阻	207
		§ 11-3 结型磁敏管	211

IV

第十二章 频率式传感器	220	§ 14-3 力平衡式加速度传感器	272
§ 12-1 振筒式频率传感器	220	第十五章 其它的传感器及检测技术	276
§ 12-2 振膜式频率传感器	224	§ 15-1 超声波检测	276
§ 12-3 振弦式频率传感器	225	§ 15-2 同位素检测	287
§ 12-4 石英晶体频率传感器	231	§ 15-3 微波检测	294
第十三章 数字式传感器	234	§ 15-4 激光检测	297
§ 13-1 感应同步器	234	§ 15-5 生物传感器	300
§ 13-2 计量光栅	248	第十六章 非电量电测系统	303
§ 13-3 磁栅	259	§ 16-1 信号处理电路	304
§ 13-4 角数字编码器	262	§ 16-2 信号的传输	329
第十四章 力平衡式传感器	266	§ 16-3 终端设备	333
§ 14-1 反馈测压系统	266	§ 16-4 微处理机和微型计算机的应用	337
§ 14-2 力平衡式差压变送器	266	§ 16-5 标定	338

绪 论

§ 0-1 非电量电测技术在国民经济中的作用

在科学技术的发展过程中，一些研究成果，必须通过实验来证实它的结果，这就需要有-定的测量手段来完成；在工业生产过程中，为了保证能正常、高效率的生产，也要有一定的测量手段进行检查或监视，这些测量手段就是仪器仪表。中国有句古话：“工欲善其事，必先利其器”，用这句话来说明仪器仪表在科学技术中的重要性是很恰当的，所谓“事”，就是指现代化科学技术，而“器”则是指仪器仪表、工具等。所以说现代化的仪器仪表是科学实践和生产实践的必要手段，它的水平高低，也是科学技术现代化的重要标志，没有现代化的仪器仪表，要发展国民经济是会有一定困难的。

关于仪器仪表，最早是机械式仪表，以后发展到光学的，电学的，…等，而这些发展也是随着科学技术的发展而发展的，因为每当科学技术要前进一步，就要求能提供新的测试手段，这样就促进了仪器仪表的发展；而科学技术的成果也为发展新型的仪器仪表提供了条件。近二、三十年来，由于电子技术的飞速发展，对电量的测量技术相应地得到提高，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，如机械量（位移、尺寸、力、振动、速度等），热工量（温度、压力、流量、物位等），成分量（化学成分、浓度等）和状态量（颜色、透明度、磨损量、裂纹等），因而促使人们研究用电测的方法来测量非电量，这样就形成了一门叫做“非电量电测技术”的测试技术。非电量电测技术包括两方面的内容：一是研究用电测方法测量非电量的仪器仪表，另一是研究如何能正确和快速地测得非电量的技术。

由于非电量电测技术具有测量精度高，反应速度快，能够自动、连续地进行测量，可以进行遥测，便于自动记录，可以与电子计算机联接进行处理，可采用微处理机做成智能仪器等优点，所以很快地在各个科学技术部门得到广泛的应用，并陆续发展了各种类型的非电量电测仪器。特别是现代科学技术的测试都是由静态向动态发展，非电量电测技术更显出了它的优越性。

在机械制造工业中，以机床为例来看，以前只是测量一些静态或稳态下的性能参数，而现在提出了要测量动态特性，如在切削状态下的动态稳定性、自激现象、加工精度等。因此就要利用压电加速度计、测力仪和速度传感器等非电量电测仪器测量刀架、床身等有关点的振动、机械阻抗等参数来检验其动特性，找出薄弱环节，提出改进意见。又如对切削力的大小和变化进行可靠的检测，可监视刀具的磨损、工件表面质量的变化，防止机床过载，控制切削过程的稳定性，同时通过切削力的测量，可为研究金属切削原理、制定切削用量、设计机床和夹具提供必要的切削力数据。在自动化机床中，采用了大量的非电量电测仪器在生产过程中检验工件尺寸、形状和表面质量，还被用作自动反馈系统中的敏感元件（如光栅、磁尺…等）来控制机床的行程、起动、停止和换向。在研制农业机械中，要对拖拉机和其它农业机械进行大量的试验工作，如测量履带拖拉机大梁的工作应力分布，牵引力和悬杆应力的

9AD384 02

大小, 牵引效率, 轴的传递功率和强度、行驶加速度等, 这些量可以用非电量电测技术来解决。

在电力、石油、化学工业中, 通常有两类参数必须加以检测。一类是为了保证生产过程能正常高效地进行, 对工艺参数(如温度、压力、流量等)进行检测和控制。例如化工厂的合成塔中氮气和氢气合成氨, 压力和温度是这个化学反应的主要因素, 它们将影响化学反应速度, 必须加以控制, 而要控制则首先要能测量出过程中的数值。所以在一个自动化生产过程中, 必须采用非电量电测仪器, 以便进行自动控制和集中管理。另一类是动力设备的检测, 由于现代化工业的生产规模越来越大, 在高度集中的自动控制情况下, 为确保生产安全, 防止事故发生, 对于动力设备(作业机器)的检查, 成为十分重要的内容。例如对汽轮机的轴向位移和径向振动的监视, 对压力容器和蒸汽锅炉在运行中的泄漏、裂纹的检测, 这些均需要非电量电测仪器。目前在这方面已形成了监视系统或保护系统, 随着微处理机和微型电子计算机的发展, 现在又发展到故障自动诊断系统。

在轻工业部门, 现在也大量地采用了非电量电测技术, 以纺织工业为例, 在纺织机械中有很多运动的机件, 就是依靠这些机件的相互运动关系, 才能编织成产品。因此对一台纺织机来说, 必须检查机件间的相互运动关系是否正确, 如经编机成圈机件(包括钩针、沉降片、压板、导纱针)的编织运动, 织机的打纬运动等。要测量这些机构在工作瞬间的运动关系, 就需要非电量电测仪器把它们在运动过程中的相对位置测量出来并记录下来, 才能弄清楚。又如经纱张力的变化, 以前用机械式张力仪, 只能测出纱线在静态或低速时的张力(一般只能看出平均值), 精度较低, 难以看出波动幅值, 且不能记录; 现在采用应变式张力仪、电容式张力仪、电涡流式张力仪(这些都是非电量电测仪器), 不仅可以测得纱线张力变化的波形, 而且还可以测量高速经编机编织时经纱张力的变化。在造纸工业中, 也需要流量计、纸浆浓度计、白度计、湿度计等非电量电测仪器。

在国防工业中, 非电量电测仪器则用得更多, 好多新型的非电量电测仪器都是因国防工业的需要而发展起来的。例如研制一架飞机, 从设计、制造到样机试飞, 都要经过严格的测试。为了研究飞机的强度, 要在机身、机翼上贴上几百片的应变片; 为了研究它的特性, 必须进行多点激振和机械阻抗测定; 在试飞时要测量发动机的参数(转速、转矩、振动…等)以及机身上有关点的应力、温度、振动, 管道内的压力、流量等。对这些参数, 不仅是测量, 而且还要记录下来进行分析, 这就需要采用非电量电测技术。在导弹和卫星的研究制造过程中, 测量显得更重要, 一般对它的构件都要进行强度和动力特性的研究, 要测量有关点的应变、振动, 发动机的推力, 燃烧室和喷管的压力、温度, 管路中液体燃料的流量等。

在其它各科学研究和工程部门, 也都需要用非电量电测仪器测量有关的参数。

从上面的一些例子, 可以看出非电量电测技术的重要性及其应用的广泛性。

§ 0-2 非电量电测系统的组成

在现在的自动测量系统中, 各个组成部分常常以信息流的过程来划分, 一般可以分为: 信息的获得, 信息的转换, 信息的显示, 信息的处理。作为一个完整的非电量电测系统, 也包括了信息的获得、转换、显示和处理等几个部分。因为它首先要获得被测量的信息, 把它变换成电量, 然后通过信息的转换, 把获得的信息变换、放大, 再用指示仪或记录仪将信息

显示出来,有的还需要把信息加以处理。因此非电量电测系统,具体来说,一般包括传感器(信息的获得)、测量电路、放大器(信息的转换)、指示器、记录仪(信息的显示)等几部分,有时还有数据处理仪器(信息的处理),它们间的关系可用图0-1的框图来表示。

传感器(Transducer)是一个把被测的非电量变换成电量的装置,因此是一种获得信息的手段,它在非电量电测系统中占有重要的位置。它获得信息的正确与否,关系到整个测量系统的精度,如果传感器的误差很大,后面的测量电路、放大器、指示仪等的精度再高也将

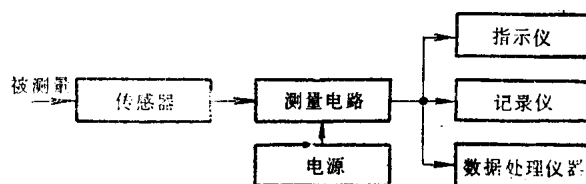


图0-1 非电量电测系统的组成

难以提高测量系统的精度。传感器以前也称为变送器、发送器、换能器,现在过程检测仪表装置中已统一称为传感器,而把输出为标准信号的传感器称为变送器(Transmitter),它在生物医学仪器、超声检测仪器中习惯上还称为换能器。

测量电路的作用是把传感器的输出变量变成电压或电流信号,使能在指示仪上指示或在记录仪中记录。测量电路的种类常由传感器的类型而定,如电阻式传感器需采用一个电桥电路把电阻值变换成电流或电压输出,所以它属于信号的转换部分。由于测量电路的输出信号一般比较小,为了能使指示仪工作或记录机构运动,常常要将信号加以放大,所以在测量电路中一般还带有放大器,这也是一种信息的转换。

测量的目的是使人们了解要测的数值,所以必须有显示装置,这就是信息的显示。显示的方式,目前常用的有三类:模拟显示、数字显示和图像显示。模拟显示就是利用指针对标尺的相对位置来表示读数,常用的有毫伏表、毫安表、微安表等指示器。数字显示是用数字形式来显示读数,实际上是一只专用的数字电压表、数字电流表或数字频率计。图像显示是用屏幕显示读数或者被测参数变化的曲线。在测量过程,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器有笔式记录仪(如电平记录仪、 $x-y$ 函数记录仪、电子电位差计等)、光线示波器、磁带记录仪、电传打字机等。记录仪记录信号的作用,在信息流过程中,它仍然属于信息的显示。

对于动态信号的测量过程,有时还需要对测得的信号数值加以分析和数据处理,例如复杂的波形要进行频谱分析,有时还要进行运算。属于这方面的仪器有频谱分析仪、波形分析仪、实时信号分析仪、快速傅里叶变换仪等,这一部分属于信息处理。

§ 0-3 传感器在科学技术中的地位

在上节中已经指出,传感器是一种获得信息的装置,它在非电量电测系统中占有重要的地位。近些年来,由于计算机技术的突飞猛进和微处理机的兴起,致使国民经济中的任何一个部门中,各种物理量、化学量和生物量形态的信息都有可能通过计算机来进行正确、及时地处理。但是各种大规模集成电路的计算机都要通过传感器来获得信息。所以有人把计算机比喻为一个人的大脑,传感器则是人的五官。

由于70年代初期,美国、日本及欧洲一些国家的决策人首先抓住了计算机而对传感器技

术略有偏废，如今尝到了由于传感器拖了后腿而使整个系统不能配套的苦头。传感器技术与计算机技术的发展很不平衡，因此近几年世界上掀起了一股“传感器热潮”，化大力气来发展传感器，如美国和欧洲传感器市场投资总值的年增长率为32%，这个增长率的速度是很快的。在这种“处理过剩，信息不足”的状况下，国外预测，传感器技术是80年代技术更新的重要技术，甚至领先于大规模集成电路技术。

我国随着四个现代化进程的加速，对传感器需求的增长速度也很快。60年代传感器技术的研究与制造比较集中在一些国防尖端部门与高等院校，到了70年代，一些能源、热电、化工、机械等行业应用传感器逐渐普遍，80年代初则在轻工、纺织、农业以及人们日常生活中的家用电器中传感器的需求量骤增，形成了一个宽广的传感器市场。但是我国目前生产的传感器，无论在品种上、数量上、质量上都远远满足不了市场的需要，因而一股国际上的“传感器热”也逐渐在我国出现。

根据传感器在科学技术中的地位和在非电量电测系统中的重要位置，在本书中用较大的篇幅来介绍各种传感器。

§ 0-4 非电量电测技术的发展趋势

非电量电测技术虽然已经得到广泛的应用，但是随着现代科学技术的发展，对它提出了愈来愈高的要求，因此得到了迅速的发展。当前除了不断提高性能、可靠性外，总的趋向是小型化、智能化、图像化、无接触化、多功能化。具体说，有以下几个方面。

一、不断提高仪器的性能、可靠性，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相应地在提高，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（几十个Pa）测量，超高压测量，高温高压下成分测量，高精度（0.01%）重量称重等，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60年代开始，都在对仪表可靠性进行研究，这方面内容包括仪表可靠性和故障率的数学模型和计算方法的研究；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对仪表整机性能的影响和确定整机可靠性的方法的研究等。

二、开发传感器的新型敏感元件材料

新型的传感器敏感元件材料的开发与应用是当前非电量电测技术中的一项迫切任务，因为非电量电测技术的应用领域已扩大到各个部门，要获得的信息种类又是那么多，同时进入到人们生活中去的仪器又要求有低廉的价格，因此必须开发新型的传感器敏感元件，特别是物性型的敏感材料，如半导体材料、陶瓷材料以及高分子聚合材料等。大家也在注意把各个专业领域中萌发出来的新型材料引入到传感器技术的领域中来，不断满足各种物理、化学和生物领域中提出来的新型传感器的需要，以及人民生活 and 家用电器要求各种优质廉价的传感器的需要。

三、微电子技术、微处理器与传感器结合，使仪器智能化

从70年代以大规模集成电路为基础的微处理器问世后，已逐步地应用到测量技术中。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。所谓智能传感器,就是这种传感器,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(包含微处理器)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,即使一个性能指标不高的传感器,做成智能化后,可大大地提高传感器的精度,同时还可以作温度补偿、线性化处理等一系列传感器功能优化工作。

四、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、二维甚至三维的仪器。现在已经研制出一些二维的传感器,如在第八章光电式传感器中要介绍的CCD光电传感器就是一个例子,它可以用来识别图形和文字。又如利用聚偏氟乙烯压电薄膜(它是一种高分子聚合物),可以测出一个物体的形状和它上面各点受压力的情况,这就形成一种三维的传感器,配合相应的测量电路和微处理器就得到物体的图形和各受压点的读数。

在有些场合,希望能在某一点同时测得两个参数,甚至更多的参数,因此就要求能有测量多参数的仪器,亦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。如利用钛酸钡—钛酸锶组成的多孔陶瓷,其电容量与温度有关,电阻量则与湿度成函数关系,这样从测得的电容和电阻分别可以知道温度和湿度值。

五、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讯的,现在也被用来作为非电量电测技术的一种手段,而且还在研究用其它的原理和方法来进行无接触式的测量。

六、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(超高压、超高温、超低温)和特种参数(如识别颜色、味觉、嗅觉)等,因此促使人们不断地在探讨新的测量机理,以研制新型原理的传感器和仪表。这方面目前除研究利用新的物理效应,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、嗅、味五官感觉,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14~15种混杂的气味中找出特定的一种气味;它能感受普通人嗅觉千万分之一的稀释液的气味。又如鸟的方位感觉很强,一种海燕能从4910km外飞回来,对这种归巢性研究,希望能得到一种方位传感器。

§ 0-5 本课程内容以及与其它课程的关系

非电量电测技术的内容包括信息获得、变换、显示、处理所需的仪器和测试技术,因此

本课程首先介绍了非电量电测技术的一些基本特性、测量误差方面的基本知识。然后较详细地叙述了将非电量转换成电量的各类传感器及其测量电路。第三部分介绍了组成非电量电测系统的仪器仪表,以及微处理机和计算机在测量系统中的应用。

由于本课程中将非电量转换成电量的方法很多,同时还有测量、放大电路和显示仪器,因此与它有联系的课程较多。直接与本课程有关的基础有数学、物理学、工程力学、电工学、电子学、仪器零件、自动控制理论、数字技术、计算机等,尤其是物理学、电工学和电子学等课程的关系更为密切,因为传感器的原理主要是基于各种物理现象和物理效应的,而测量电路和放大、变换电路又是以电工学和电子学为基础的。因此在学习本课程时,必须对上述课程有一定的基础。如果要进一步学习和研究传感器的设计、制造,还需要有一定的仪表材料、仪表制造工艺、误差理论、化学和生物学等方面的知识。因为不同的传感器所采用的材料包括黑色金属、有色金属、工程塑料、陶瓷材料、半导体材料以及各种特殊材料(如恒弹性材料、高磁导率材料、高分子材料、生物功能材料等);从工艺上看,也包括机械加工、电加工、化学加工以及各种特殊工艺(如电子束焊、贴片、绕线等);从原理来看,涉及到各种物理效应、化学反应和生物功能。因此可以说,非电量电测技术是一门综合性课程,涉及各方面的知识,需要有良好的基础知识和广泛的科学技术知识。

第一章 非电量电测技术的基本知识

§ 1-1 测量的概念和测量方法

一、测量的概念和定义

测量是人们借助于专门的设备,通过实验的方法,对被测对象收集信息、取得数量概念的过程。它也是一个比较过程,即将被测量与和它同性质的标准量进行比较,获得被测量为标准量的若干倍的数量概念(标准量应该为国际或国内所公认的性能稳定的量)。

上述定义用数学公式表示,则为

$$A = \{A\}[A] \quad (1-1)$$

式中 A ——被测量;

$[A]$ ——所选被测量的单位;

$\{A\}$ ——在所选单位下被测量的数值。

测量的结果可以表现为一定的数字,也可以表现为一条曲线或者显示成某种图形等。但无论其表现形式如何,测量结果总包含有两个部分:其一是数值的大小及其符号(正、负),其二是相应的单位。表示测量结果时,不注明单位,该结果将无意义。

一切测量过程包括比较、示差、平衡和读数。

测量过程的核心是比较,但在近代测量中,大量遇到的除了比较过程外,还必须进行各种变换。变换的目的有二:其一,由于人的感官能直接给出定量概念的被测量不多,极大多数被测量都要变换为某个中间变量,然后才能给出定量的概念。例如,人的感官对温度只能给出定性的冷暖概念。为了得到定量的概念,可以利用物质热胀冷缩的原理,把温度量变换为中间变量——长度,然后进行比较和测量。在这种情况下,变换是实现测量的必要手段,是为了有效地进行测量。其二,随着生产和科学技术的发展,对测量的要求愈来愈高,不仅要能够进行静态测量,还要求进行动态测量,在线测量,对测量精度的要求也不断提高。因此,传统的测量方法往往不能满足这些新的要求。例如,机械式的传递系统(如压力弹簧管),由于它固有的惯性,不适用于快速的动态测量。又如模拟量的表示方法很难分辨出1/100或更小的差异。因此,在近代测量系统中,愈来愈多的把非电量变换为电量,把模拟量变换成数字量,然后进行测量;或者采用电子示波器或磁带记录仪来测量动态参数。

变换更是非电量电测技术的核心。非电量电测技术就是将各种非电量的被测量变换为电参量,然后进行测量的技术,使这些被测量具有快速、直观、遥测以及自动测量等优点。

二、测量方法

(一) 直接测量和间接测量

1. 直接测量 用事先经标定有分度的仪表对被测量进行测量,从而得出被测量的数值,这种测量称为直接测量。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。电测技术中有许多采用直接比较法的例子。非电量电测技术中几乎非用间接比较

法不可。例如应变式测力仪中，先由弹性体把力变换为形变，再用应变计将形变变换为电阻值的变化，然后与标准电阻相比较。测量时应由标准测力计标定分度。

2. 间接测量 间接测量是对几个与被测量有确定函数关系的物理量进行直接测量，然后通过代表该函数关系的公式、曲线或表格求出未知量，这类测量称为间接测量。现代测量中，通过检测元件检出被测量，然后通过信息分析处理部件（运算放大器或微处理机）进行数据分析处理，最终得到未知被测量值。间接测量随着测量技术的进步应用愈来愈广泛。

（二）偏差法、零位法和微差法

1. 偏差法 利用测量仪表的指针相对于刻度的偏差位移直接表示被测量的数值，称为偏差法。由于刻度的精确度不能做得很高，其测量精度一般不高于0.5%。

2. 零位法 利用指零机构的作用，使被测量和已知标准量两者达到平衡，根据指零机构示值为零来确定被测量等于该已知的标准量值。这种方法中测量结果的误差主要取决于标准量的误差，因此测量精度比偏差法高。

3. 微差法 微差法是偏差法和零位法的综合应用。被测量的大部分用零位法和标准量相平衡抵消，其剩余部分，即两者的差值再用偏差来测量。微差法的典型例子就是用不平衡电桥来测量电阻。

§ 1-2 测量误差及其分类

测量不可避免地总有误差，这是因为测量设备、仪表、测量对象、测量方法、测量者本身都不同程度受到本身和周围各种因素的影响，并且这些影响因素也在经常不断地变化着。其次，被测量对仪器施加作用，才能使仪器给出测量结果。但是测量对象和测量仪器之间的作用是相互的，测量仪器对测量对象的反作用不可避免地会改变被测对象的原有状态。例如，在测量电压或电流时，测量仪表的接入就改变了信号源的负载状态。在温度测量时，热量可以通过温度传感器从被测量物体上传导出来，从而使其温度下降。因此测量结果所反映的并不是被测对象的本来面貌，而只是一种近似。所以测量结果不可能准确地等于被测量的真值。所谓真值，是指在一定的时间及空间条件下，某物理量所体现的真实数值。因此测量的目的是为了求得被测量的真值的逼近值。在合理的前提下，这个值愈逼近真值愈好。误差分类如下：

（一）按误差的表示方法可分为

1. 绝对误差 某一物理量的测量值 x 与真值 A_0 的差值称为绝对误差 Δ_x 。

$$\Delta_x = x - A_0 \quad (1-2)$$

在实验室测量和计量工作中常用修正值来表示，测量值加上修正值就可得到真值，故有

$$a_c = A_0 - x \quad (1-3)$$

式中 a_c ——修正值。

比较式 (1-2) 和式 (1-3) 可知，修正值与绝对误差大小相等、符号相反，即

$$a_c = -\Delta_x \quad (1-4)$$

由于真值是无法求得的，所以一般均用基准器的量值代表真值，叫做约定真值，它与真值之差可以忽略不计。为简化计，有时用“真值”这个词代替“约定真值”。

在实际测量中，不允许频繁地动用基准或标准。经常是通过多级计量检定网来逐级传递

标准量值。这样，都是以上一级基准器的量值 A 当作近似真值，又叫做实际值，以 A 表示。

习惯上，把代表的示值与被测量的约定真值（或实际值）之间的差值也称为误差。示值 x 与 A 之差记为 Δ_x ， $\Delta_x = x - A$ 。

2. 相对误差 为了说明测量精确度的高低，常采用相对误差的表示形式，相对误差有：

（1）实际相对误差 δ_A 实际相对误差是用绝对误差 Δ_x 与被测量实际值 A 的百分比来表示的相对误差，即

$$\delta_A = \frac{\Delta_x}{A} \times 100\% \quad (1-5)$$

（2）示值相对误差 δ_x 示值相对误差是用绝对误差 Δ_x 与仪器示值 x 的百分比值来表示的相对误差，即

$$\delta_x = \frac{\Delta_x}{x} \times 100\% \quad (1-6)$$

（3）满度（或引用）相对误差 δ_n 满度相对误差（简称满度误差）是用绝对误差 Δ_x 与仪器的满度值 x_n 的百分比值表示的相对误差，即

$$\delta_n = \frac{\Delta_x}{x_n} \times 100\% \quad (1-7)$$

由于 δ_n 是用绝对误差 Δ_x 与一个常数 x_n （量程上限）的比值表示的，所以实际上给出的是绝对误差。当 Δ_x 取最大值时的满度相对误差常用来确定仪表的精度等级。

（二）按误差的性质分类

1. 系统误差 它是指服从某一确定规律（如定值、线性、多项式、周期性等函数规律）的误差。其误差值不变的称为恒定系统误差。其它的称为变值系统误差。

产生系统误差的原因有：由于测量所用的工具（仪器、量具等）本身性能不完善；由于测量设备和电路等安装、布置、调整不得当；由于测量人员感觉器官和运动器官不完善或不良习惯；由于在测量过程中因温度、气压等环境条件发生变化；由于测量方法不完善；或者由于测量所依据的理论本身不完善等原因。总之，系统误差的特征是：系统误差出现的规律性和产生原因的可知性。所以应尽可能预先了解各种系统误差的成因，并设法消除其影响和确定或估计出未能消除的系统误差值。

在一个测量系统中，测量的准确度由系统误差来表征。系统误差愈小，则表明测量准确度愈高。

2. 随机误差 它是指服从大数统计规律的误差。产生它的原因因为很多影响量的微小变化的总和所造成，难以具体分析。对其总和目前可用统计规律（如正态分布、均匀分布、离散双值分布、辛普松分布等）描述。随机误差表现了测量结果的分散性，通常用精密度表征随机误差的大小。随机误差越大，精密度越低，反之，随机误差越小，测量的精密度越高，亦即表明测量的重复性好。

精确度是反映仪器的综合指标。精确度高要求准确度高，精密度也高。也就是说必须使系统误差和随机误差都小。但是在实际测量中，精密度高，准确度不一定很高，因为可以存在较大的系统误差。然而，如果准确度很高，则精密度一定很高。精密度与准确度的区别可以用图 1-1 射击的例子来说明。图 1-1 a 表示弹着点很分散，相当于精密度很差；图 1-1 b

表示精密度虽然很好,但准确度不高;图 1-1 c 表示精密度和准确度都很好。

为了定量表示精确度,在工程测量中引入了一个表示测量结果可靠程度的概念——精确度等级(简称精度等级),它用 A 来表示。 A 以一系列标准百分数进行分档。这个数值通常就是仪表在规定工作条件下,其最大绝对允许误差 $\Delta_{\max}$ 相对于仪表测量范围的百分数。它可以用下式来表示

$$A = \frac{\Delta_{\max}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1-8)$$

式中 $x_{\max}, x_{\min}$ ——测量范围的上、下限值。

(三) 按误差与被测量的关系分类

1. 定值误差 定值误差也称加和误差。当被测量 x 为零时,而输出量 y 不为零,则此误差称为零位误差。这种误差的特点是它不随被测量大小而变化,亦即对被测量而言是一个定值 Δ_0 。这种误差可以是系统误差,也可以是随机误差。

2. 累积误差 累积误差也称倍率误差。它是指在整個测量范围内随被测量 x 成比例变化的误差,即

$$\Delta_s = \gamma_s x \quad (1-9)$$

式中 γ_s ——无量纲系数。

图 1-2 a 所示为仪表灵敏度发生变化引起的累积误差。图 1-2 b 为灵敏度随机变化引起的累积误差。

(四) 按被测量与时间的关系分类

1. 静态误差 在被测量不随时间变化时所测得的测量误差称为静态误差。

2. 动态误差 在被测量随时间变化过程中进行测量时所产生的附加误差称为

动态误差。动态误差是由于测量系统(或仪表)的各种惯性对输入信号变化响应上的滞后,或输入信号中不同频率成分通过测量系统时,受到不同的衰减和延迟所造成的误差。动态误差的大小为动态测量和静态测量所得误差的差值。

§ 1-3 测量系统的静态特性

一个测量系统(仪表或装置),它所测量的各种物理量的状态常常是不一样的。在某段时间内,被测物理量的值可能十分稳定,而在另一段时间内,该物理量的值可以是随时间而变化的。因此,一个测量系统(仪表或装置),由于输入信号的这种不同性质,就有所谓静

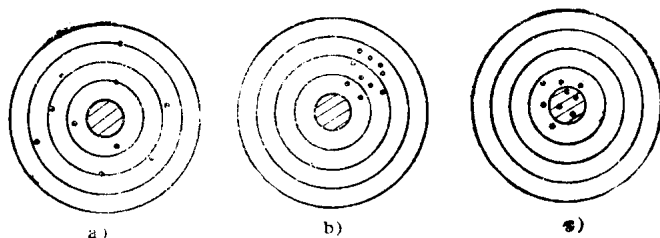


图1-1 射击举例

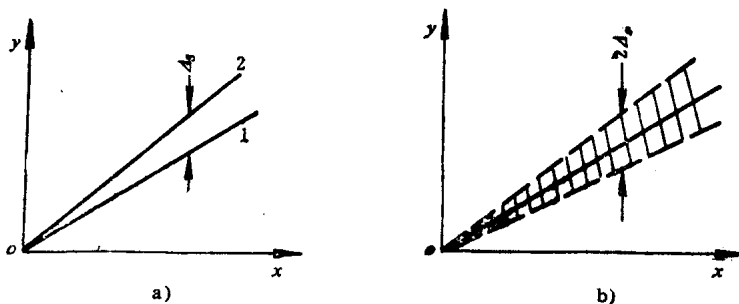


图1-2 累积误差

态特性和动态特性。测量系统的输入信号的物理形式可以是机械量,也可以是热工量、电磁量、光学量、...,但不论对何种物理形式的信号,都存在着静态特性和动态特性。

非电量电测系统(仪表)通常要同时满足静态和动态的要求,因此其各环节、各单元的动、静态特性也要满足要求。传感器是非电量电测系统(仪表)的重要组成部分,因而对传感器的静态特性和动态特性的分析研究也很重要。本节所讨论的是非电量电测仪表(系统)的静态特性。但是,分析的方法和所得的结论对于传感器来说也是适用的。

静态特性表示测量仪表在被测物理量处于稳定状态时的输出-输入关系。衡量测量仪表静态特性的性能指标是线性度、灵敏度、分辨率、迟滞、重复性和量程。

一、线性度

对于没有迟滞、蠕变效应的理想测量系统(如理想仪表),其静态特性可以由下列方程式来表示

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \cdots + a_nx^n \quad (1-10)$$

式中 x ——输入物理量;

y ——输出量;

$a_0, a_1, a_2, \cdots, a_n$ ——系数。

从式(1-10)可见,一般的静态特性是由线性项($a_0 + a_1x$)和 x 的高次项所决定。当 $a_0 \neq 0$ 时,表示即使在没有输入的情况下,仍有输出,通常称为零点偏移(零偏)。式(1-10)可能有四种情况(见图1-3)。

1. 理想情况 在这种情况下,式(1-10)中的零偏 a_0 被校准($a_0 = 0$), x 的高次项为零($a_2, a_3, \cdots, a_n = 0$),方程式变为线性方程式, $y = a_1x$,如图1-3 a所示。此时, $a_1 = y/x = k$,称为测量系统的灵敏度。

2. 如图1-3 b所示 当式(1-10)中只有奇次项时,即
 $y = a_1x + a_3x^3 + a_5x^5 + \cdots$
 这种情况,在原点附近的相当范围内,输出-输入特性基本成线性。对应的曲线有如下特性
 $y = -y(-x)$

3. 当式(1-10)的高次项中只有偶次项时,所得曲线不对称,如图1-3 c所示。

4. 普遍情况 对应特性如图1-3 d所示。

在实际使用时,如果非线性方程式中 x 的幂次不高,则在输入量变化范围不大的条件下,可把实际曲线的某一段用

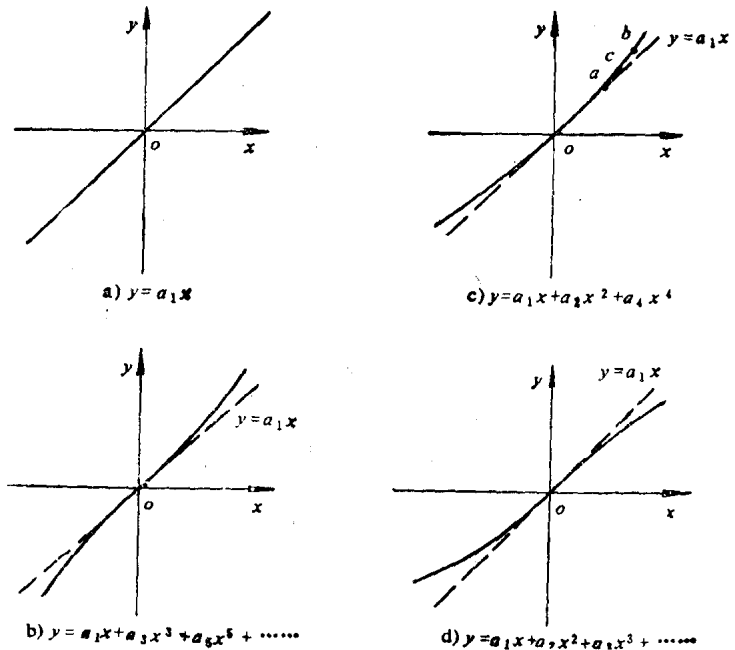


图1-3 测量系统的静态特性

a) 理想线性 b) 只有奇次项的非线性 c) 只有偶次项的非线性
 d) 普遍情况下的非线性