

新编电气与电子信息类本科规划教材·自动化专业

现代电气检测技术

金立军 钱政 关永刚 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

新编电气与电子信息类本科规划教材·自动化专业

现代电气检测技术

金立军 钱 政 关永刚 编著

钱家骊 主审

電子工業出版社·

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书的内容覆盖了电气设备现代检测方法的研究及现代试验装置和测试系统开发等两个新的领域,既展示了现代电气检测技术,同时也介绍了与此相关的传感技术、总线技术、电磁兼容技术和故障诊断等专业知识,反映了电气设备运行与检测的内在联系和特点。

全书共分为 8 章,包括传感技术、基本测试系统、测控系统总线、电磁兼容技术、电气设备在线监测技术、电气设备诊断技术等。本书的内容总结了作者的研究成果,并参阅了大量文献资料,能够较全面地反映本学科国内外研究的先进成果,注重理论联系实际。

本书可作为大、专院校电气工程专业的教材,也可作为从事电气工作的科研与工程技术人员的自学和参考用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

现代电气检测技术 / 金立军, 钱政, 关永刚编著. —北京: 电子工业出版社, 2007.9

(新编电气与电子信息类本科规划教材·自动化专业)

ISBN 978-7-121-04402-1

I. 现… II. ①金…②钱…③关… III. 电气设备—检测—高等学校—教材 IV. TM07

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 136810 号

责任编辑: 冯小贝

印 刷: 北京市通州大中印刷厂

装 订: 三河市万和装订厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 13.5 字数: 346 千字

印 次: 2007 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 20.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010)88258888。

前 言

随着我国现代化建设事业的迅速发展,电气工程领域在取得巨大成就的同时,也面临着新的挑战。各类性能先进、结构合理、功能完备的电气设备不断涌现,了解和控制电气设备的运行参数和运行状况的技术也越来越复杂。除了传统的电气测量技术之外,现代检测技术还包含了现代试验方法的研究和现代试验装置及系统的开发这两个新的领域,融合了传感技术、测控技术、总线技术、电磁兼容技术、电气设备的在线监测、故障诊断技术等内容,它们相互渗透、相互依存,形成了现代综合型的检测系统。

检测与试验是研究创新及开发创新的重要手段,许多重大的发明、创新均来源于试验研究。现代检测与试验技术可提高学生对实践的兴趣,认识到现代检测与试验的关键技术所在,可显著地提高学生的动手能力,突破传统技术的束缚。近年来,大学教育偏重于理论教学的“软化”教育,由于人们观念上对分数的重视和实验室现有条件的限制,学生的动手能力未有显著的提高。本教材着眼于现代检测技术,一方面可扩大学生的视野,另一方面可提高学生的实际工作能力,达到提高实践教学的“硬化”教育作用。

现代电气检测技术,是大专院校电气工程专业教学的重要专业课程,也是研制现代测量仪表及电气测试系统的研究人员必备的基础技能,即使是从事一般电气技术的工作人员,掌握各种仪表的原理和使用技术、了解电气测试系统的构成也是十分必要的。

现代电气检测技术是一门专门的科学技术,它涉及标准要求、检测方法、检测仪器和设备等许多方面,因为不论是电气设备的安装、调试、运行、检修,还是对电气产品进行检验、分析、鉴定,都会遇到有关检测方面的技术问题。因此,现代电气测量知识是电气技术人员必备的基础知识。

全书共8章,其中第1章、第8章由金立军编写;第2章、第3章由钱政编写;第4章、第5章由关永刚编写;第7章由关永刚、金立军编写;第6章为大家共同编写;最后由金立军统稿。撰写时融合了作者多年来的研究成果,参阅了大量文献资料,力求做到先进性和实用性并重。本书分别讲解了传感技术、基本测量系统、测控系统总线、电磁兼容技术、现代常用测量仪器、电气设备在线监测技术、电气设备诊断技术等内容。

本书由清华大学钱家骊教授主审,钱教授为保证本书的质量做了许多指导性工作。在写作过程中,黄瑜琰副教授为本书提出了很多宝贵意见,袁征、王永鑫等也为本书做了大量的工作。在此一并致以衷心的感谢。

尽管大家对本书的编审付出了很大努力,仍然难免存在缺点、错误,恳请广大读者指正。

编者

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 传感技术	(1)
1.2 测控系统总线	(2)
1.3 电磁兼容技术	(3)
1.4 在线监测技术	(3)
1.5 电气设备诊断技术	(4)
第 2 章 传感技术	(6)
2.1 传感技术概述	(6)
2.1.1 传感器的作用和地位	(6)
2.1.2 传感器的分类	(7)
2.1.3 传感技术的发展趋势	(7)
2.2 传感器的特性	(8)
2.2.1 传感器的静态特性指标	(8)
2.2.2 传感器的动态特性指标	(12)
2.3 现代电气测量中常用的传感器	(17)
2.3.1 电量传感器	(17)
2.3.2 非电量传感器	(19)
2.3.3 其他传感器	(29)
2.4 智能传感器	(31)
2.5 GPS 的原理	(33)
2.5.1 GPS 概述	(33)
2.5.2 GPS 工作原理及定位方法	(35)
2.5.3 GPS 信号接收机的工作原理及分类	(36)
2.6 GPS 在电力系统中的应用	(37)
2.6.1 相量测量	(37)
2.6.2 故障测距	(37)
2.6.3 雷电监测系统	(38)
2.6.4 故障保护	(38)
第 3 章 基本测量系统	(39)
3.1 测量系统概述	(39)
3.1.1 测量系统的设计原则	(39)
3.1.2 测量系统的设计方法	(39)

3.1.3	测量系统的组成	(40)
3.2	现代电气测量系统中常用的微控制器	(41)
3.2.1	微控制器的发展和分类	(41)
3.2.2	常用的微控制器系列	(42)
3.3	数据采集与处理电路	(46)
3.3.1	电桥电路	(46)
3.3.2	滤波电路	(47)
3.3.3	放大电路	(49)
3.3.4	数据采集电路	(53)
3.3.5	数据采集系统的通用设计	(54)
3.4	数据与图形的显示	(56)
3.4.1	LED 显示器及接口设计	(56)
3.4.2	LCD 显示器及接口设计	(59)
3.5	数据与图形的打印	(61)
3.6	键盘输入接口	(62)
3.6.1	键盘的特点与防抖	(62)
3.6.2	独立式键盘的接口设计	(62)
3.6.3	矩阵式键盘的接口设计	(63)
第 4 章	测控系统总线	(65)
4.1	测控系统总线概述	(65)
4.1.1	测控装置与计算机互连总线	(65)
4.1.2	测控装置内部总线	(67)
4.1.3	现场总线	(69)
4.2	RS-232 和 RS-485 总线	(73)
4.2.1	串行通信的基本知识	(73)
4.2.2	RS-232 串行通信接口标准	(75)
4.2.3	RS-422/RS-485 串行通信接口标准	(78)
4.3	CAN 总线	(83)
4.3.1	CAN 总线的主要特点	(83)
4.3.2	CAN 总线通信	(84)
4.3.3	CAN 接口电路	(84)
第 5 章	电磁兼容技术	(89)
5.1	电磁干扰的危害	(89)
5.2	电磁干扰源	(90)
5.2.1	自然干扰和人为干扰	(90)
5.2.2	周期干扰和脉冲干扰	(91)
5.2.3	差模干扰和共模干扰	(91)
5.3	电磁干扰的传播途径	(92)

5.3.1	传导	(93)
5.3.2	辐射	(94)
5.4	电磁兼容技术	(95)
5.4.1	印制电路板的设计	(95)
5.4.2	屏蔽	(97)
5.4.3	滤波	(102)
5.4.4	接地	(106)
5.4.5	隔离	(111)
5.4.6	瞬态骚扰的抑制	(112)
第6章	现代常用测量仪器	(119)
6.1	多功能数字万用表	(119)
6.2	示波器	(123)
6.2.1	示波器的用途和基本工作原理	(123)
6.2.2	TDS1000 和 TDS2000 系列数字存储示波器	(124)
6.3	数字高斯计	(142)
6.4	阻抗分析仪	(145)
6.5	频谱分析仪	(148)
6.5.1	扫频式频谱分析仪	(148)
6.5.2	频谱分析仪的基本工作原理	(149)
6.5.3	频谱分析仪的主要参数	(150)
6.6	近场探头	(151)
第7章	电气设备在线监测	(154)
7.1	高压开关柜的在线监测	(154)
7.1.1	高压开关柜在线监测与故障诊断系统	(154)
7.1.2	在线监测原理	(155)
7.1.3	高压开关柜在线监测与故障诊断实例	(166)
7.2	电气设备绝缘在线检测技术	(170)
7.2.1	局部放电故障定位	(170)
7.2.2	局部放电脉冲电流额度的数字测量	(176)
第8章	电气设备诊断技术	(178)
8.1	故障诊断与状态维修技术	(178)
8.2	专家系统	(180)
8.2.1	专家系统原理	(180)
8.2.2	专家系统应用实例	(183)
8.3	人工神经网络	(186)
8.3.1	神经网络原理	(186)
8.3.2	神经网络应用实例	(190)

8.4 模糊理论 (192)

8.4.1 模糊理论简介 (192)

8.4.2 模糊理论应用实例..... (194)

8.5 小波变换 (196)

8.5.1 小波变换的概念 (196)

8.5.2 小波变换应用实例..... (200)

8.6 故障诊断方法比较 (203)

参考文献 (205)

第1章 绪 论

电测量主要指对电流、电压、电功率、电能、相位、频率、电阻、电感、电容及电路时间常数、介质损耗等基本电学量和电路参数进行的测量。磁测量则主要指对磁场强度、磁感应强度、磁通量、磁导率、介质的磁滞损耗及涡流损耗等基本磁学量和介质磁性参数进行的测量，电测量和磁测量统称为电磁测量或电气测量。

对于传统的电气测量技术，研究的是各种电磁量的测量方法，测量中所配置的仪表和仪器设备及其结构与原理，测量时的操作技术，以及如何根据所测出的数据进行处理，从而求出测量结果和测量误差。

随着科学技术的发展，现代电气检测技术涉及的领域越来越广。除了传统的电气测量技术之外，还包含了传感技术、测控技术、总线技术、电磁兼容、故障诊断等内容。这些技术之间相互渗透、相互依存，形成了现代综合型的测量系统，并具有准确度高、系统性强、操作方便和智能化等特点。本书在现代传感技术、测量系统、测控总线技术、电磁兼容等理论基础上，全面介绍了电气设备检测方法和电气设备诊断技术。

现代电气检测技术，一直是大专院校电气工程专业教学的重要专业课程，也是开发研制检测仪表及电气测试系统的研究人员必备的基础技能。即使是从事一般电气技术或者其他专业工程领域的工作人员，掌握各种仪表的原理和使用技术、了解电气检测系统的构成也是十分必要的。因为不论是电气设备的安装、调试、运行、检修，还是对电气产品进行检验、分析、鉴定，都会遇到检测方面的技术问题。因此，现代电气检测知识是电气技术人员必备的基础知识。

1.1 传感技术

传感器就是能感受规定的被测量，并按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置，通常由敏感元件和转换元件组成。其中，敏感元件是指传感器中能直接感受（或响应）被测量的部分，转换元件是指传感器中将直接感受（或响应）的被测量转换成适于传输（或测量）的电信号部分。

现代检测技术的三大基础是信号采集、传输和处理技术，通信技术，以及计算机技术。信号采集系统的重要部件就是传感器，并且置于系统的最前端。传感器的好坏对测试系统的质量起着决定性作用。

当今传感器技术的主要发展动向是：开展基础研究，重点研究传感器的新原理、新材料和新工艺；实现传感器的微型化、阵列化、集成化和智能化。从当前的高新技术发展趋势来看，传感技术发展方向具体表现在以下几个方面：

- **新现象与新效应。**研究发现新现象与新效应是传感器技术发展的重要工作，是研究开发新型传感器的基础。例如有报道指出，美国国家实验室的研究人员正在研制变

色传感器,当存在目标物质时,传感器由蓝色变成红色。参照细胞膜的模型,可针对一种特定的生物目标设计传感器。一旦识别出目标物质,膜将由蓝色变成红色,提示有目标物质存在。

- **新材料。**传感器材料是传感器技术的重要基础,由于材料科学的进步,人们可制造出各种新型传感器。目前,人们已在采用硅或金属和非金属合成的化合物半导体等敏感材料、陶瓷材料、非晶化或薄膜化磁性材料和智能材料(包括生物体材料、形状记忆合金、形状记忆陶瓷和形状记忆聚合物等)等来研制传感器。
- **微型化、量子化。**采用微细加工技术(包括离子束、电子束、分子束、激光束、化学刻蚀等微电子加工技术)制造各种新型传感器,例如,利用半导体技术制造出硅微传感器,利用薄膜工艺制造出快速响应的气敏、湿敏传感器,以及利用溅射薄膜工艺制成压力传感器,等等。
- **系统化、集成化、多功能化、多维化。**随着半导体技术的发展,现在已经将原先分开的敏感元件与信号处理及电源部分制作在同一基片上,从而使检测及信号处理一体化、集成化,这样可以有效提高生产率。例如,利用光电转换原理组成网状阵列,将电信号转换成光学图像的显示器件。为了进一步简化,现在已经出现了多功能传感器,使一种传感器可以同时测量多种参数或具有多种功能。数据融合技术是指建立在综合处理多个测试参数、多个数据信息的基础上而实现的数据融合,已经广泛应用于系统工程中。对于多维传感、智能传感、光信息传感等,必须构成复杂的传感系统,才能充分发挥各自的作用。
- **向智能化发展。**随着微处理器芯片的发展,其性价比逐渐提高,已广泛内置在各种传感器中。在此基础上再利用人工神经网络、人工智能和先进的信息处理技术(如传感器信息融合技术、模糊理论等),可以使传感器具有更高级的智能。传感器的智能化是一门现代综合技术,它把传感器变换、调理、采集、处理、存储、输出等多种功能集成一体,具有自校准、自补偿、自诊断、自动量程、人机对话、数据自动采集存储与处理等能力,又具有分析、判断、自适应、自学习等功能。这大大提高了传感器的测量准确度和方便性,从而可以完成图像识别、特征检测、多维检测等复杂任务。

1.2 测控系统总线

总线在电气检测系统中是指传送信息的公共通道。采用总线技术,可以大大简化系统结构,增加系统的开放性、兼容性、可靠性和可维护性。总线是以计算机和微处理器为核心的测控系统的重要组成部分,其性能对整个测控系统的性能有重大影响。配备标准接口后,设计者可以任意组合完成所要求的监控与诊断系统,从而简化组建过程,降低系统成本,提高效率。

智能仪表技术及现场总线技术的发展,是电气设备检测系统向网络化、智能化、集成化方向发展的必然趋势。例如,变电站基于现场 CAN 总线的智能保护检测与监控局域网络系统,可实现变电站电气设备的测量、通信、保护、监控、管理等功能的一体化。

测控系统正朝着高效、高速、高精度和高可靠性及自动化、智能化和网络化方向发展,

测控总线将为实现这些目标而起到重要作用。目前已展开了 Internet-Intranet-Internet 网络连接标准的研究与开发,以尽可能利用现有的万维网(WWW)技术,将采集到的数据和控制参数直接放到 HTML(超文本标记语言)文档中,使远程用户可以通过 Internet 对测量或监测过程进行访问,或控制远程实验室内的智能设备。这将为开发开放型、全分布式、智能化的测控网络系统创造条件。

测控总线是指以组成测量和控制系统为主要目标而开发的总线。自数字计算机问世以来,各种总线标准不断推出,如 GP-IB 接口总线、RS-232 串行通信总线、VXI 总线,以及 VEM 总线、CAMAC 总线、PXI 总线、Compact PCI 总线、Fire Wire 总线,等等。现代检测及检测系统的发展趋势是标准总线计算机平台、功能强大的软件及应用总线技术的模块化仪器设备的有机结合。这种结合极大增强了自动测试设备的功能与性能。

在现代计算机测试系统中,总线技术越来越受到重视。因此,在测试系统研制中,选择好的测试系统平台总线,不仅有助于系统最终以较低成本满足更高的性能要求,而且可以使系统更加容易扩充、升级及保护用户的投资效益。

1.3 电磁兼容技术

电磁兼容是指设备或系统在所处的电磁环境中能正常工作且不对该环境中任何其他事物构成不能承受的电磁骚扰的能力。电磁兼容技术是一门迅速发展的交叉学科,涉及电子、计算机、通信、航空航天、铁路交通、电力、军事,涉及人们生活的各个方面。

由于电网容量增大、输配电电压增高,以及电力系统中的继电保护、电网控制、通信设备的广泛应用,因此以计算机和微处理器为基础的电气检测系统的电磁兼容问题也变得十分突出。例如,集电气测量、继电保护、通信等功能于一体的变电所综合自动化设备,通常将其安装在变电所高压设备的附近。该设备能正常工作的先决条件就是它能够承受变电所中在正常操作或事故情况下产生的极强的电磁干扰。

随着电力系统自动化水平的提高,电磁兼容技术的重要性日益显示出来。电气检测系统的电磁兼容技术的主要内容包括:

- **电磁环境评价。**即通过实测或数字仿真等手段,对设备在运行时可能受到的电磁干扰水平(幅值、频率、波形等)进行估计。这是电磁兼容技术的重要组成部分。
- **电磁干扰耦合路径。**判断干扰源产生的电磁干扰通过何种路径到达被干扰的对象。
- **电磁抗扰性评价。**研究电力系统中各种敏感的设备仪表(如继电保护、自动装置、计算机系统、电能计量仪表等)耐受电磁干扰的能力。
- **抗干扰措施,电磁干扰的产生和耦合。**敏感设备是不可能完全避免电磁干扰的。一般比较经济合理的解决办法是在敏感设备上应用抗干扰措施。
- **电能质量。**研究频率变化、谐波、电压闪变、电压骤降等对用户设备性能的影响。

1.4 在线监测技术

电气设备中基本量的检测是电气检测的重要任务,基本量通常包括电流、电压、功率

因素、绝缘电阻、温升等基本参数。一些参数是不能靠人的感官觉察的物理量,因此对其进行测量时离不开仪表。早期电气设备基本量的测量所使用的仪表都是机械模拟式的,以后由于电气技术、电子技术及计算机技术的不断进步,现代电气设备中基本量的检测方法也在迅速发展,它的发展过程大体可分为以下几个阶段:

- 在 20 世纪 50 年代以前,电气检测所使用的仪表基本上以机械式的模拟指示仪表为主。由于仪表仪器元件质量的提高,仪表生产工艺的不断改善,加上有关测量理论、测量方法的进步,这种传统的机械式的模拟指示仪表已经达到了相当高的水平,以电流表为例,其灵敏度可以达到 10^{-9} A。因此,这种仪表至今仍被广泛应用。
- 20 世纪 50 年代左右,随着电子技术和控制技术的发展,在电气检测领域,除了机械式的模拟指示仪表之外,开始发展电子式的模拟指示仪表(或称电子测量仪表),其中以高频或超高频电压表、示波器和记录仪为典型代表,集中体现了电子仪表的特色。随后,出现了晶体管和集成电路,它们促进了数字技术的进步,并成功地应用到测量仪器中。之后又出现了电子式的数字仪表,这种仪表不但有了新的显示方式,而且为测量数据的传输开辟了一条新的途径。
- 到 20 世纪 70 年代初,微处理器和微型计算机开始问世,特别是单片机的广泛应用,诞生了许多智能仪器。所谓智能仪器就是在传统的仪表仪器基础上,内置微处理器或单片机,使之在测量功能和仪表性能方面产生了根本性的变化。
- 进入 20 世纪 80 年代以后,计算机及其控制技术、传感技术、测控技术、总线技术、电磁兼容等相关技术的发展更加迅速,仪器仪表和检测技术也随之打上了时代的烙印,开始发展具有高度系统集成综合型测试系统。这样,使得测量装置精度高、抗干扰能力强、数据处理便捷,并且操作方便、功能全面。

在电气检测技术的发展过程中,虽然出现了新一代的仪表,但是并没有完全淘汰旧的一代的仪表,而是各自发挥自身的特点;并在不同的场合使用,从而满足不同的需要。因此,现代电气检测技术的研究范围,既包括了传统的机械式和电子式的模拟指示仪表,也包括数字显示和智能化的仪表,以及现代综合型的测试系统设备。

1.5 电气设备诊断技术

电气设备是组成电力系统的基本元件,在运行中受到电、热、机械、环境等各种因素的作用,其性能逐渐劣化,最终导致故障。电气设备特别是大型高压设备,如果发生突发性停电事故,会造成巨大的经济损失和不良的社会影响。

提高电气设备的可靠性,一方面可提高电气设备的质量,选用优质材料及先进工艺,优化设计,合理选择设计裕度,并进行严格的型式试验及出厂试验考核,力求在工作寿命期内将故障发生率降到最低。另一方面,应对电气设备进行必要的检查和维修,以确保电气设备的可靠运行,即现行的状态维修,是目前正在发展的以状态监测(通常是在线监测)和故障诊断为基础的维修方式。

随着电子技术、计算机技术、光电技术、信号处理技术和各种传感技术的发展,可以对电气设备进行在线的状态监测,及时取得各种即使是很微弱的信息。对这些信息进行处理

和综合分析后,根据其数值的大小及变化趋势,对设备的可靠性随时做出判断和对设备的剩余寿命做出预测,从而能早期发现潜在的故障,必要时可提供预警或规定的操作。

状态监测(在线监测)与故障诊断技术的特点是可以对电气设备在运行状态下进行连续或随时的监测与判断,因此可以弥补电气产品在出厂试验或运输安装过程中的疏漏。采取状态监测与故障诊断技术后,可以使预防性维修向预知性维修(即状态维修)过渡,从“到期必修”过渡到“该修则修”。

国外对电气设备状态监测与故障诊断技术的研究始于20世纪60年代。但直到20世纪70~80年代,随着传感、计算机、光纤、电子等高新技术的发展与应用,设备在线诊断技术才得到真正的迅速发展。加拿大、日本、俄罗斯等国陆续研制了油中溶解气体及变压器、发电机、气体绝缘封闭组合电器(GIS)等局部放电漏电的在线监测系统。

我国也早已认识到电气设备状态监测与故障诊断技术的重要性。在20世纪60年代就提出过不少带电试验的方法,但由于操作复杂,测量结果分散性大,因此没有得到推广。20世纪80年代以来,随着高新技术的发展与应用,我国的电气设备在线诊断技术也得到了迅猛发展。由于我国的工业发展迅速,用电一直紧张,加之部分设备的故障率较高,因此对于推行在线诊断技术以提高电力系统的运行可靠性更为迫切。国内的高等院校和电力部门科研院所的不少专业人员,都相继开展了这方面的研究。自1985年以来,由电力部主持,定期召开全国电力设备绝缘带电测试、诊断技术交流会,有力地推动了状态监测与故障诊断技术的发展,从而使我国的电气设备状态监测与故障诊断技术的研究与国际同步进行。

故障诊断是一门综合学科,它必须在深入了解设备的设计、制造、结构材质等资料的基础上,全面掌握安装、运行、检修的情况,并结合电气的、化学的、物理的试验进行综合判断及设备的全过程的系统分析,才能正确识别故障类型并对故障部件正确定位。故障诊断可分为两类:

- **系统诊断。**系统诊断就是检查电力系统的某些部分,而该系统通常是一组联系紧密的部件的集合体,要确定故障发生的时间、范围、故障的精确位置。由于系统的庞大、部件数量的繁多,故系统诊断较为复杂。
- **装置诊断。**装置诊断较系统诊断简单,仅需诊断出故障元件及其发生故障的原因,电气设备的故障诊断就属于这一类诊断。

电气设备的故障诊断利用了通过各种状态检测方法获得的设备与装置的状态信息,这些信息可分为静态状态量和动态状态量。静态状态量也就是原始信息量,它包括设备的基本参数、结构特征、主要部件和材料;特别是原始资料,包括出厂的试验报告、现场安装调试记录、调试报告、交接验收资料等。如果这些资料不全或数据(如测试温度、湿度、环境干扰、主要部件调整更换等)不准确,就难以和检测的动态状态量进行比较分析,也就很难得出正确的结论。

随着电力工业的发展,电气设备检修技术将更具经济性和实用性。电气设备的维修则由过去的计划检修向状态维修方向发展。围绕锅炉、汽轮机、发电机、变压器、断路器等主要电力设备,展开设备寿命管理与预测工作,对设备可靠性技术、设备状态监测、故障诊断技术及信息管理与决策的开发、研制和应用等诸多问题,必将逐步解决。

第2章 传感技术

传感技术、通信技术和计算机技术是现代信息技术的三大基础技术，传感技术则被认为是现代信息技术的源头，具体到现代电气测量领域，传感技术也在其中日益发挥巨大作用。本章内容将对传感技术的概念、特性及其在电力系统中的应用进行阐述。

2.1 传感技术概述

中华人民共和国国家标准 GB7665—1987 对传感器（transducer/sensor）的定义是

能感受规定的被测量并按照一定规律转换成可用输出信号的器件或装置，通常由敏感元件和转换元件组成。其中，敏感元件是指传感器中直接感受或响应被测量的部分；转换元件是指传感器中能将敏感元件或响应的被测量转换成适于传感器或被测量的电信号部分。

2.1.1 传感器的作用和地位

根据国标的定义和传感技术自身的内涵，应当从传感器的作用、传感器的工作原理及传感器的输出信号形式三个方面来理解与把握传感技术。也就是说，认识传感器必须从其作用、功能上入手，分析它是用来测什么“量”的、基于什么敏感机理感受被测量的，并通过什么样的转换装置或信号调理电路才能够给出可用的电信号输出。

以图 2.1 的电位器式压力传感器为例。这个传感器的作用是测量气体压力，而其敏感机理的关键环节是真空膜盒。气体压力的变化将使膜盒产生位移，经放大传动机构带动电刷在电位器上滑动，从而引起电阻的变化。这个电阻变化即可反映出被测压力的大小。如果在电位器两端施加直流电压，则可直接采集电位器的输出电信号进行分析处理。这就是一个传感器的完整工作过程。

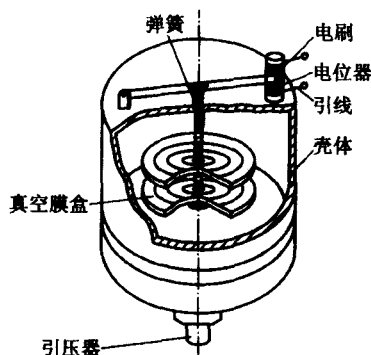


图 2.1 电位器式压力传感器示意图

人类的日常生活、生产活动和科技研究均离不开测量。测量功能实质上就是人们感觉

器官的延伸与替代。如果把计算机看成是自动化系统的“大脑”，则传感器则可形象地比喻成自动化系统的“五官”。可见，传感技术是信息获取的首要环节。如果没有传感器对原始参数进行准确、可靠、实时地测量，那么无论后续信号处理功能多么强大，都没有任何实际意义。

美国早在 20 世纪 80 年代就开始重视传感器的研究，20 世纪 90 年代将传感技术列为 22 项关键技术之一。而日本曾把传感技术列为十大技术之首。因此，大力发展传感技术在任何时候都是重要的和必要的。

2.1.2 传感器的分类

传感器的分类方法很多，最常用的是按照工作原理或被测量来分类。

2.1.2.1 按工作原理分类

传感器按其敏感机理一般可分为物理型、化学型和生物型三大类。物理型传感器是利用某些敏感元件的物理性质或某些功能材料的物理性能研制的传感器，如压阻式传感器等。化学型传感器是利用电化学反应原理，把无机或有机化学的物质成分、浓度等转换为电信号的传感器，如离子敏传感器等。生物型传感器则是近年来新兴且发展很快的传感器，它是利用生物活性物质的选择性来识别和测定生物化学物质的传感器，如荧光生物传感器等。

2.1.2.2 按照被测量分类

按传感器的被测量进行分类，能够很方便地表示传感器的功能。按照这种分类方法，传感器可以分为温度、压力、流量、加速度传感器等。

两种分类方法都有缺点，都只强调了一个方面。按工作原理分类，很难将敏感机理和被测量直接联系起来；而按照被测量分类，又难以看出采用了什么样的敏感机理。因此，通常的传感器命名方法将工作原理和被测参数结合在一起，先说工作原理，后说被测参数，如硅压阻式压力传感器、电容式加速度传感器等。

2.1.3 传感技术的发展趋势

科学技术的发展使得人们对传感技术越来越重视，因此对传感器的开发成为目前最热门的研究课题之一。传感技术的发展趋势可从以下两方面来看：

- 一是开发新材料、新工艺和新型传感器；
- 二是通过传感器与其他学科的交叉融合，实现传感器的多功能、高精度、集成化和智能化。

2.1.3.1 基于新材料、新工艺和新机理的传感技术

传感器的工作原理是各种物理、化学或生物效应和定律。由此启发研究人员进一步探索具有新效应的敏感功能材料，并以此研制具有新原理的新型传感器，这是发展高性能、多功能、低成本和小型化传感器的重要途径。而加工技术的微精细化在传感技术的研究和生产过程中占据了越来越重要的地位，越来越多的研究人员认为微机械传感器的研究将掀起下一次的工业革命。

2.1.3.2 集成化、智能化、多功能传感器的研究

传统传感器一般为单个参数测量的传感器,随着科学技术的进步,利用一个传感器实现多个参数测量已成为可能,多功能化传感器呈现快速发展的趋势。而随着微处理器技术的进步,将传感器的信息获取功能与微处理器信息分析、处理功能结合在一起的智能化传感器体现出了强大的生命力,自诊断、自检测、自校验功能的实现使得智能化传感器占据了广阔的应用空间。集成化传感器的发展则是伴随着集成电路技术的快速发展而产生的,它也在传感器的发展趋势中占据了一席之地。

2.2 传感器的特性

传感器的特性是指传感器输入量和输出量之间的对应关系。通常把传感器的特性分为两种:

- 静态特性
- 动态特性

下面我们具体针对各种静态特性和动态特性指标进行讨论。

2.2.1 传感器的静态特性指标

2.2.1.1 传感器静态特性的一般描述

传感器静态特性是指被测量 x 不随时间变化或随时间变化程度远慢于系统固有的最低阶运动模式的变化程度时,测量系统输出 y 与输入 x 之间的函数关系,通常的表达形式为

$$y = \sum_{i=0}^n a_i x^i \quad (2.1)$$

式中, a_i 为传感器的标定系数。

当输出与输入间的关系为 $y = a_0 + a_1 x$ 时,传感器静态特性为直线, a_0 为零位输出, a_1 为静态增益。通常情况下,零位是可以补偿的,从而使传感器的静态特性变为 $y = a_1 x$,这时的传感器为线性传感器。

传感器的静态特性是通过静态标定或静态校准的过程获得的。

2.2.1.2 传感器的主要静态特性指标

传感器的主要静态特性指标包括:测量范围、量程、静态灵敏度、分辨力与分辨率、时漂和温漂、线性度、迟滞、非线性迟滞、重复性、传感器的测量误差等。下面我们一一进行阐述。

1. 测量范围

传感器所能测量到的最小被测量(输入量) $x_{\min}$ 与最大被测量(输入量) $x_{\max}$ 之间的范围称为传感器的测量范围,即 $[x_{\min}, x_{\max}]$ 。

2. 量程

量程就是传感器测量范围的上、下限值之差, 即 $x_{\max} - x_{\min}$ 。量程与测量范围的区别在于, 测量范围是一个区间, 而量程是一个数。

3. 静态灵敏度

被测量单位变化引起的输出量变化, 称为静态灵敏度。它的几何意义就是输入/输出图上被测点的斜率, 反映出输出量对输入量的响应能力。

静态灵敏度是传感器的重要性能指标。对于传感器中的敏感元件而言, 通常情况下敏感元件不仅受到输入量的影响, 还受到多种干扰量的影响, 因此必须通过静态灵敏度对敏感元件的性能进行判别。敏感元件对输入量的灵敏度一定要远大于对干扰量的灵敏度。

4. 分辨力与分辨率

传感器的输入/输出关系在整个测量范围内不可能处处连续, 输入量变化太小的时候, 输出量可能不会发生变化。对于某个测点而言, 只有当输入量变化超过某个数值时, 输出量才会发生变化, 这就是分辨力的概念。也就是说, 能够使输出发生变化的最小输入变化量为分辨力。传感器在最小测点处的分辨力通常称为阈值或死区。

考虑到在整个工作范围内, 各测点的分辨力是不一样的, 因此取量程范围内的最大分辨力为传感器的分辨力, 其与满量程之比则为传感器的分辨率。

5. 时漂和温漂

当传感器的输入和环境温度不变时, 输出量随时间变化的现象称为传感器的时漂, 这是反映传感器稳定性的指标。

而由外界环境温度变化而引起的输出量的变化称为传感器的温漂, 温漂包括零点温漂和灵敏度漂移, 分别表示传感器的零点和灵敏度随温度的变化。

6. 线性度

对于线性系统来说, 输入/输出之间应当是直线关系。但受各种原因的影响, 输入/输出之间并不是一条直线。实测曲线和参考直线不吻合程度的最大值称为线性度, 如图 2.2 所示。

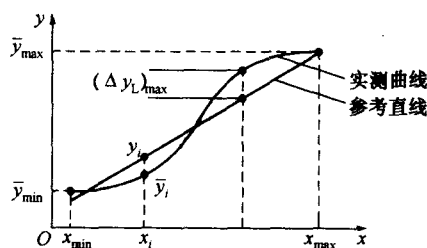


图 2.2 线性度示意图

线性度的计算公式为

$$\xi_L = \frac{(\Delta y_L)_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (2.2)$$