

电力设备测量

——传感与测控技术

成永红 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

电力设备测量——传感与测控技术

成永红 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

为了满足电力设备状态检测技术发展的需要,本书从传感和测控技术角度,详细介绍如何进行电力设备状态检测、如何开发适合于电力设备运行现场的监测系统,以期推动状态检测技术的发展。全书共分为两大部分:第一部分为电力设备状态检测传感技术,从传感器的静态和动态特性入手,介绍了电力设备检测中常见的电磁量传感器、非电物理量传感器以及化学量传感器,详细讨论了它们的结构特性、材料、工作原理、性能和用途等;第二部分为电力设备状态检测测控技术,从信号、系统、信号分析方法入手,详细介绍了数据采集系统的硬件以及实时信号采集技术、测控系统总线技术和虚拟仪器技术,并针对电力设备检测与诊断的特点介绍了电磁兼容与干扰抑制技术和电力设备监控与诊断的新技术与新方法。

本书适于电力系统及其相关单位从事电力设备设计、生产、运行的技术人员学习参考,也可供在校高年级本科生、研究生作为学习的教材。

图书在版编目(CIP)数据

电力设备测量——传感与测控技术/成永红编. —北京:中国电力出版社, 2002

ISBN 7-5083-1219-8

I. 电... II. 成... III. 电力系统-电气设备-电气测量 IV. TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 064620 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京市铁成印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2003 年 4 月第一版 2003 年 4 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.5 印张 302 千字

印数 0001—3000 册 定价 22.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前 言

近年来我国电力工业得到了飞速发展，我国的总发电量已排列世界第二位，但人均拥有装机容量还落后于发达国家，要满足国民经济发展的需要，就必须在加快装机容量的增长速度的基础上，提高电力系统的运行可靠性。

随着电力设备电压等级的提高、单机容量的增大，电力设备运行的可靠性问题越来越突出。大型电力设备供电覆盖面广，一旦发生故障，造成的直接和间接经济损失十分巨大。为了确保电力设备的安全运行，我国已经建立起一套完整的预防性试验体系，为保证电力设备的安全运行起到了重要作用。目前我国已经从电力设备数量增加阶段进入到运行质量提高的阶段，对电力设备运行管理水平和运行可靠性提出了更高的要求，从而孕育了电力设备在线检测技术。电力设备在线检测技术是一种利用运行电压来对高压设备绝缘状况进行试验的方法，它可以大大提高试验的真实性与灵敏度，可以及时发现绝缘缺陷，它在很多方面弥补了仅靠定期停电预防性试验的不足，是电力设备检测与诊断的发展方向。

电力设备的在线检测不再是基于标准仪器的测量过程，而是建立在特征信号的现场提取基础上的信号采集、信号传输、信号分析和故障诊断的现代测量技术。现代科学技术的发展强有力地推动着电力设备检测与诊断技术的发展，一些最新技术，如：传感技术、光纤信号传输技术、现场总线技术、数字信号分析处理技术、软件技术等，已经在电力设备的检测中得到应用，使电力设备的检测水平明显提高。本书从传感和测控技术的角度来描述如何更好地构建电力设备在线检测系统，以期为我国电力能源工业的发展作出贡献。

全书分上、下篇，共十章。上篇为电力设备测量传感技术，包括：传感技术概述、电力设备检测用非电物理量传感器、电力设备检测用电磁量传感器、电力设备检测用化学量传感器等章节，从传感器的静态和动态特性入手，介绍了电力设备检测中常见的电磁量传感器、非电物理量传感器和化学量传感器，详细讨论了它们的结构特性、材料、工作原理、性能和用途等；下篇为电力设备测量测控技术，包括：测控技术基础、数据采集技术、测控系统总线、虚拟仪器技术、电磁兼容与干扰抑制技术、状态监控与故障诊断等章节，从信号与系统入手，详细介绍了数据采集系统的构成与实时采集技术、测控系统总线技术和虚拟仪器技术，并针对电力设备检测与诊断的特点介绍了电力设备测量中的干扰抑制技术和电力设备检测与诊断技术的发展。本书第五、六章由山西经济管理干部学院计算机系荣命扬同志执笔。西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室主任谢恒堃教授、西北电力试验研究院毛凤麟研究员对本书的编写给予了指导，在此表示感谢。

限于编者的水平，本书存在着许多不足，恳请从事电力设备检测研究和从事传感与测控研究的专家和读者提出宝贵意见，以便今后改正。

编者

2002 年 11 月

目 录

前言

绪论	1
----------	---

上 篇



电力设备测量传感技术

第一章 传感技术概述	5
第一节 传感器的作用与分类	5
第二节 传感器的静态和动态特性	7
第二章 电力设备检测用非电物理量传感器	17
第一节 热敏传感器	17
第二节 流速和流量传感器	29
第三节 压力、振动与位移传感器	37
第三章 电力设备检测用电磁量传感器	49
第一节 磁敏传感器	49
第二节 光纤电压、电流传感器	54
第三节 高频电流传感器	58
第四节 超宽频带局部放电传感器	60
第四章 电力设备检测用化学量传感器	64
第一节 气敏传感器	64
第二节 湿敏传感器	72

下 篇



电力设备测量测控技术

第五章 测控技术基础	82
第一节 信号	82

第二节 系统	85
第三节 信号分析	88
第六章 数据采集技术	96
第一节 数据采集系统	96
第二节 信号放大	100
第三节 采样保持	103
第四节 模数转换	104
第七章 测控系统总线	112
第一节 测控系统总线概述	112
第二节 GP-IB 接口总线	116
第三节 RS-232 串行通信总线	120
第四节 VXI 总线	125
第五节 其它总线系统	136
第八章 虚拟仪器技术	143
第一节 虚拟仪器概述	143
第二节 虚拟仪器硬件系统	146
第三节 虚拟仪器系统软件平台	151
第九章 电磁兼容与干扰抑制技术	155
第一节 电磁兼容性概述	155
第二节 滤波技术	166
第三节 接地技术	174
第四节 屏蔽技术	179
第十章 状态监控与故障诊断	184
第一节 故障诊断基础	184
第二节 神经网络识别技术	191
第三节 模糊诊断技术	197
第四节 专家诊断系统	201
参考文献	206



随着电力设备电压等级的提高、装机容量的增大,对电力设备运行可靠性的要求越来越高,相应地对电力设备检测与诊断技术提出了更高的要求。中国科学技术白皮书(第五号)《中国科学技术政策指南》提出的电力能源领域发展的战略目标是:“提高供电可靠性、质量和经济性,建立设备和电网故障诊断和监测系统……改进输电在线监测技术、城市供电技术。”所以在现代测试技术的基础上,进一步提高电力设备的检测技术和水平,对确保电力设备安全运行具有重要意义。

一、电力设备老化及其特征量

任何电力设备在制造、运输、安装、运行、检修等过程中不可避免地会造成绝缘损伤,特别是在长期运行过程中,电力设备受到电场、热场、机械应力、化学腐蚀以及环境条件等的影响,电力设备绝缘的品质逐渐劣化,最终导致电力设备绝缘系统的破坏。

不同绝缘缺陷表征特征不同,通常绝缘系统的缺陷可以分成两大类:①集中性缺陷,指缺陷集中于绝缘的某个或某几个部分,例如局部受潮、局部机械损伤、绝缘内部气泡、瓷介质裂纹等,它又分为贯穿性缺陷和非贯穿性缺陷,这类缺陷的发展速度较快,因而具有较大的危险性;②分布性缺陷,指由于受潮、过热、动力负荷及长时间过电压的作用导致的电气设备整体绝缘性能下降,例如绝缘整体受潮、充油设备的油变质等,它是一种普遍性的劣化,是缓慢演变而发展的。

电力设备绝缘老化是在一定的外界因素的作用下产生的,这些外界因素(如电、热、机械应力、环境因素)常称为老化因子:

(1) 电老化是指在电场长期作用下电力设备绝缘系统中发生的老化。随着外施电压的增加,绝缘系统中的放电加强,放电量和放电重复率增加,导致电老化速度加快,绝缘寿命降低。电老化机理很复杂,它包含放电引起的一系列物理和化学效应。

(2) 热老化是指在热效应的长期作用下电力设备绝缘系统中发生的老化,有机绝缘材料在热的作用下发生热降解,导致绝缘材料的结构变化,使其电气性能和机械性能劣化。随着温度的上升,绝缘的热老化速度迅速增加。不同的绝缘材料受温度的影响程度不一样,在室温下绝缘系统的老化极其缓慢。

(3) 机械老化是指固体绝缘系统在运行过程中受到各种机械应力的作用发生的老化。机械老化过程是绝缘材料在机械应力的作用下微观缺陷发生规则运动,形成微裂缝并逐渐扩大而导致的。机械应力产生的微裂缝在强电场作用下将引发局部放电,从而加速绝缘系统的破坏。

(4) 环境老化是指在水分、氧气、阳光辐射、化学尘埃等自然环境条件下和在高海拔地理条件下导致的绝缘系统表面老化,特别是当有机高聚物表面沉积污秽物后,在水和强



电场的作用下将产生强烈的污秽放电，导致绝缘表面产生破坏。

电力设备的老化过程是多因子共同作用的结果，其作用过程极其复杂。例如发电机在运行过程中就可能受到热、电、机械应力等因子的作用，变压器在运行过程中可能受到电、热、化学因子的作用等等。

表征不同绝缘系统劣化程度有不同特征量。通常表征绝缘特征的量有两类：①直接表征绝缘剩余寿命的特征量，如耐电强度、机械强度；②间接表征绝缘剩余寿命的特征量，如绝缘电阻、介质损耗因数、泄漏电流、局部放电量、油中气体色谱、油中微水含量等等。直接特征量是通过破坏性试验方法得到的，而间接特征量可以通过非破坏性试验得到。随着对不同老化因子作用规律研究的深入，提出了一些新的表征绝缘品质的特征量，如红外热像、第二电流激增电压、交联聚乙烯材料的直流分量、超高频放电频谱、超声振动特性等等。

绝缘老化是时间和老化因子的函数，绝缘劣化的程度要根据其性能的变化来确定。当绝缘性能的指标达到某些极限值时，绝缘已不能在工作电压下正常使用，其寿命达到使用极限，这些性能指标值称为绝缘寿命的阈值或判据。绝缘检测与诊断就是通过各种不同的方法，检测出表征绝缘性能的有关参数，并给出适当的判断。

二、电力设备检测与诊断技术的发展

为了确保电力设备的安全运行，电力设备在制造和运行过程中均需要进行严格的检测。电力设备在运行前和运行中的检测主要有：交接试验、预防性试验和在线监测。通过试验可以基本掌握电气设备绝缘的情况，以便及早发现其隐含的缺陷，并根据需要安排维护与检修，保证设备的正常运行。

常规的预防性试验一般以年为一周期单位。电力设备在运行过程都强制按规定、按时进行预防性试验，但事故仍不可避免地时有发生，其主要原因是由于现有的预防性试验是一个周期试验，在一个试验周期间隔时间内难以保证不发生故障。由于绝大多数故障在事故前都有先兆，这就要求发展一种连续或选时的监测技术，在线监测就是在这种情况下诞生的。

电力设备在线检测技术近年来得到了飞速发展。在线检测技术是一种利用运行电压来对高压设备绝缘状况进行试验的方法，它可以大大提高试验的真实性与有效性，及时发现绝缘缺陷。采用在线检测的方法可以根据设备的绝缘状况的好坏来选择不同的检测周期，使试验的有效程度明显提高。在线检测是对电力设备进行有效绝缘诊断的前提，将在线检测积累的大量数据和预防性试验检测的数据相结合，用各种数值分析方法可以进行全面的综合分析判断，进而发现和捕捉早期缺陷、预测绝缘寿命，从而减小因预防性试验间隔长所带来的诊断上的偏差。

电力设备的状态监控与故障诊断技术发展到今天，已不再局限于对单一对象、单一模型的具体化研究，而是已过渡到从系统的角度，用系统工程的理论在更普遍的意义上研究它的一般概念、内在机理、框架构成、系统层次结构及全息信息交换策略以及功能模块自适应性实施方案。



状态监控与故障诊断系统已作为设备本身和运行过程的一个重要的不可分割的组成部分。一方面,基于状态描述的信号采集和信号处理、信息集成和故障分析理论在现代数学、物理化学方法的支持下不断发展;另一方面,一些诸如传感技术、光纤技术、人工神经网络、模糊诊断技术、专家系统、计算机技术等新的分析方法的突破与应用,使得智能监控与诊断技术得到了飞速发展,使电力设备的检测水平明显提高。

三、电力设备现代测试技术

电力设备现代测试系统通常是由传感器系统、信号采集系统、分析诊断系统组成。传感器系统用于感知所需要的电气参量或非电气参量。目前常用的传感器有电磁传感器、力学量传感器、声参数传感器、热参数传感器、化学量传感器等;信号采集系统是将传感器得到的模拟量转换成数字量进行传输,应用数字滤波技术对采集到的信号进行滤波处理,抑制和消除外界干扰和背景噪声,提取真实信号,并进行信号的还原。光电转换和光纤传输的引入有效地解决了高压隔离的问题;分析诊断系统利用神经网络技术、模糊诊断技术、专家分析技术等方法对其进行分析、处理和诊断,得到所测电力设备绝缘的当前状态,并根据需要进行绝缘诊断和预期寿命评估。

监测与诊断技术的根本任务是识别设备系统的运行状态。监测与诊断过程分为信号检测、特征提取、状态判别与分类、趋势预测等几项基本内容。在监测过程中,状态判别主要关心的是设备系统的整体状况,而在故障诊断中,状态分类则是在发现设备异常后,对故障进行深入地分析,以确定故障发生的部位、严重程度及原因,为诊断决策提供依据。一个完整的电力设备监控系统应该包括信号检测、特征提取、模式识别和趋势预测四大部分功能:

(1) 信号检测。信号是系统信息的载体,监测与诊断时首先应根据特定的诊断目的,选择最能表征设备工作状态的信号进行检测。一般检测得到的工作状态信号被称为诊断信息的初始模式。监测与诊断中常用的检测信号有振动、噪声、压力、温度、气体成分、水分含量、超声、红外热像等非电信号;泄漏电流、绝缘电阻、介质损耗、局部放电、超宽频带局部放电等电信号以及数字电路中的状态码信息。为了使检测信号中待检故障的信息容易提取,实施信号检测时必须慎重考虑信号类型、传感器、以及测点分布等检测方式的选择。总的检测原则是尽可能提高初始模式的信噪比。

(2) 特征提取。在计算机监测与诊断系统中,特征提取是一系列的数据处理过程。特征提取的主要任务是将初始模式向量进行维数压缩,去掉初始模式中的噪声和冗余信息,融合来自各个信道的故障信息,强化和提取故障特征,形成待检模式。根据不同的诊断对象和目的,信号检测和特征提取的针对性极强,只有对诊断对象的性质和工作机理有充分的了解,才有可能采用最有效的信号检测与特征提取方法。

(3) 模式识别。模式识别的任务是将待检模式与样板模式(故障档案)进行比较,明确其所属类别。为此需要建立判别函数,规定判别准则并力争使误判率最小。在故障诊断技术中,常用的模式识别方法有两种:①统计模式识别;②模糊模式识别。统计模式识别方法与人脑进行模式识别的思维方式差别较大,而基于模糊数学原理的模糊模式识别则和

人脑的判别方式类似。

(4) 趋势预测。在状态监测技术中,趋势预测主要用于估计故障的传播、发展,并对设备的劣化趋势作出预报。趋势预测是事故预防和进行无破坏性监测的重要手段。尽管设备在各种因素的影响下,其状态发展通常表现得杂乱无章,然而,其状态发展趋势却总是受内部隐含的规律所支配,总会表现出一定的必然性。在状态监测中,经常使用并且有效的预测方法是利用时序模型进行状态预测,时序模型反映了不同时刻观测值的相关性,即状态变化的惯性,这种惯性现象实际上反映了设备运行状态的变化趋势。

电力设备绝缘老化主要是由电、热、机械和环境等因子引起的,要对绝缘状态作出准确评价,必须要采用各种检测方法,以追踪探测这些因子何时达到有害的程度。实际系统中,传感器的类型和数量取决于具体的监测任务,对于某些特殊的诊断内容,可能还需要一些辅助的信号测量装置。如果能有效地监控电力设备中热、电、机械诸因子的表征参数,则可以通过作用因子值与老化相关的经验公式的诊断与分析,确定其对绝缘寿命的影响。

现代检测与诊断系统的核心是计算机或微处理器,大量的信号数据处理、分析以及诊断决策是由软件来完成的,计算机或微处理器是通过总线与前端传感器和信号调理单元相连接,利用总线技术可以构建成有别于传统意义的虚拟测量仪器。在组建电力设备检测系统时,必须认真考虑电磁兼容问题,严重的现场电磁干扰可能导致测量无法进行。近年来,随着传感器技术、信号采集技术、数字分析技术和计算机技术的发展和运用,电力设备检测技术得到了飞速发展。本书以信号采集、信号传输、信号分析、信号诊断为主线,上篇着重介绍电力系统中常用的传感器,如电压传感器、电流传感器、温度传感器、超声传感器、红外传感器、压力传感器、位移传感器、气体传感器、湿度传感器等等;下篇将介绍数据采集技术、测控系统总线技术、虚拟仪器技术以及电磁兼容技术,在此基础上再讨论电力设备诊断技术。

上 篇

电力设备测量传感技术



第一章 传感技术概述

第一节 传感器的作用与分类

GB 7665—87《传感器通用术语》，传感器（transducer/sensor）定义为“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”；敏感元件（sensing element）指传感器中能直接感受（或响应）被测量的部分；转换元件（transduction element）指传感器中能直接感受（或响应）的被测量转换成适于传输和（或）测量的电信号部分。

对自然现象的定量认识，先要通过传感器获取信息（一次信息），然后通过处理获取到的信息，弄清自然现象的本质。现代测量技术的三大基础是信号的采集、传输和处理技术，即传感技术、通信技术和计算机技术。信号采集系统的首要部件是传感器，且置于系统的最前端。

在电力设备检测与诊断系统中，传感器的作用相当于人的五官。人们对检测与诊断的要求越高，系统对传感器的依赖性就越大。传感器对系统的功能起着决定性的作用，要提高电力设备检测与诊断水平，首先需要解决传感技术。

传感器的分类法有多种，用得较多的分类法有两种：①按将外界输入的信号变换为电信号采用的效应分类；②按输出量分类。按所采用的效应进行分类，大致可以分为三类：利用物理效应进行变换的物理传感器；利用化学反应进行变换的化学传感器；利用生物效应进行变换的生物传感器。在实际使用过程中人们关心的传感器的输出量，按输出量进行分类可将传感器分为位移、速度、角速度、加速度、力、力矩、压力、流速、液面、温度、湿度、电压、电流、电磁、热、光、气体成分、浓度等等，详见表 1-1。

表 1-1

传 感 器 分 类 表

一级类别	二级类别	三级类别	四级类别
物理量传感器	力学量传感器	压力传感器	差压传感器、绝对压力传感器、静态压力传感器、动态压力传感器、真空压力传感器

续表

一级类别	二级类别	三级类别	四级类别
物理量传感器	力学量传感器	力传感器	测力传感器、重量称重传感器
		力矩传感器	
		速度传感器	角速度传感器、线速度传感器
		加速度传感器	角加速度传感器、力加速度传感器、振动传感器、冲击传感器
		流量传感器	质量流量传感器、体积流量传感器
		位移、位置传感器	线位移传感器、角位移传感器、物（液）位移传感器
		尺度传感器	姿态传感器、厚度传感器、角度传感器、面积传感器、烧蚀厚度传感器、表面粗糙度传感器
		密度传感器	
		粘度传感器	
		浊度传感器	
		硬度传感器	
	热学量传感器	温度传感器	
		热流传感器	
		热导率传感器	
	光学量传感器	可见光传感器	
		红外光传感器	
		紫外光传感器	
		照度传感器	
		色度传感器	
		图像传感器	
		激光传感器	
	磁学量传感器	磁场传感器	
		磁通传感器	
	电学量传感器	电流传感器	
		电场传感器	
		电场强度传感器	
	声学量传感器	超声波传感器	
		声压传感器	
		噪声传感器	
		声表面波传感器	
	射线传感器	X射线传感器	
		β 射线传感器	
		γ 射线传感器	
		辐射量传感器	
		离子活度传感器	



续表

一级类别	二级类别	三级类别	四级类别
化学量传感器	离子传感器	pH 值传感器	
	气体传感器	气体成分传感器	
		气体分压传感器	
		水分传感器	
	湿度传感器	露点传感器	
生物量传感器	生化量传感器		
	生理量传感器		



第二节 传感器的静态和动态特性

一、传感器的静态特性

(一) 线性度

传感器的理想输入与输出关系是一条直线，即 $y = a_0x$ ，而实际上许多传感器的输入-输出特性是非线性的，在静态情况下，如果不考虑滞后和蠕变效应，一般可以将输入-输出特性表示为

$$y = f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n$$

式中： x 为输入信号； y 为输出信号； a_0 为零位输出； a_1 为传感器线性灵敏度； $a_2, \cdots, a_n$ 为传感器的非线性系数。

实际传感器的输入-输出曲线与理论上的直线不吻合的程度，在线性传感器中称线性度。线性度可以表示为传感器的正反行程的平均校准曲线与线性理论直线之间的最大偏差量的绝对值与满量程（FS）输出值之比，即

$$\xi_L = \frac{|\Delta Y_L|_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\%$$

式中： ξ_L 为线性度； $|\Delta Y_L|_{\max}$ 为输出平均值与理论值的最大偏差绝对值； Y_{FS} 为满量程输出值。

使用非线性特性的传感器时，通常用一条直线近似地代表实际的非线性特性，这种方法称为传感器非线性特性的“线性化”。所采用的直线称为拟合直线，实际特性曲线与拟合直线之间的偏差称为传感器的非线性误差。显然，非线性误差是以拟合直线或理想直线作基准直线计算出来的，基准线不同，计算出来的线性度也不同。

(二) 迟滞

迟滞表示传感器在输入值增长的过程（正行程）和减少的过程（反行程）中，同一输入量时输出值的差别，如图 1-1 所示，它是传感器的一个性能指标，该指标反映了传感器的机械部件和结构材料等存在的问题，如轴承摩擦、灰尘积塞、间隙不适当、螺钉松动、



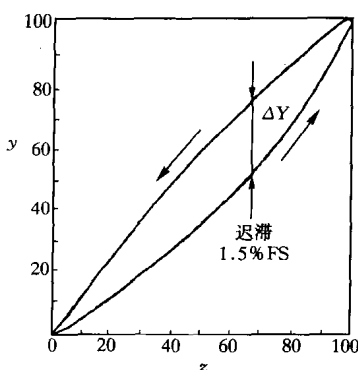


图 1-1 传感器的典型迟滞特性

元件磨蚀（或碎裂）以及材料的内摩擦等。迟滞大小通常由实验确定。用整个检测范围内的最大迟滞值 $(\Delta Y_H)_{\max}$ 与理论满量程输出值之比的百分数表示，即

$$\xi_H = \frac{(\Delta Y_H)_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\%$$

（三）阈值和分辨率

传感器的输入量 Δx 变小时，输出量 Δy 也变小，当 Δx 减小到某一值时，则观察不到输出量的变化，这时的 Δx 称为传感器的阈值。

当传感器的输入从非零的任意值缓慢增加，只有在超过某一输入增量后输出才有变化，这个输入增量称为传感器的分辨率。分辨率说明了传感器可测出的最小的输入变量，而阈值则说明了传感器可测出的最小输入量。阈值大的传感器，其迟滞必然大，但分辨率不一定差。

（四）灵敏度

线性传感器的校准线的斜率就是静态灵敏度，它是传感器的输出量变化 (Δy) 和输入量变化 (Δx) 之比，即

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

如位移传感器，当位移量 (Δx) 为 $1\mu\text{m}$ 时，输出量 (Δy) 为 0.2mV ，则灵敏度 (K) 为 $0.2\text{mV}/\mu\text{m}$ 。非线性传感器的灵敏度通常用拟合直线的斜率表示。非线性特别明显的传感器，其灵敏度可用 dy/dx 表示，也可用某一小区域内的拟合直线的斜率表示。

（五）重复性

传感器的输入按同一方向变化时，连续重复检测所得的输入-输出特性曲线不重复，产生不重复的原因和产生迟滞的原因相同。重复性误差 (ΔR) 通常用输出最大不重复误差 $(\Delta_{\max})$ 与满量程输出 (Y_{FS}) 之比的百分数表示，即

$$\Delta R = \frac{\Delta_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\%$$

式中： $\Delta_{\max}$ 为正行程多次测量的各个测试点输出值的最大偏差 $(\Delta_{1\max})$ ，以及反行程多次测量的各个测试点输出值之间的最大偏差 $(\Delta_{2\max})$ ，再取这两个最大偏差中之较大者。显然，不重复误差越小，重复性越好。

二、传感器的动态特性

即使传感器的静态性能很好，但当被检测物理量随时间变化时，由于传感器的输出量不能很好地追随输入量快速变化，可能导致高达百分之几十甚至百分之百的动态误差，因此在选择、使用传感器时，要特别注意其动态特性。

（一）动态特性的数学模型

对于线性系统的动态响应研究，最广泛使用的数学模型是普通线性常系数微分方程。

对于任意线性系统,可用高阶常系数线性微分方程描述为

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x$$

式中: $x = x(t)$ 表示输入信号; $y = y(t)$ 表示输出信号; a_i 和 b_i 分别决定于传感器的某些物理参数,除 $b_0 \neq 0$ 外,通常 $b_1 = b_2 = \cdots = b_m = 0$ 。

常见的传感器其物理模型通常可能分别用零阶、一阶和二阶的常微分方程描述其输入-输出动态特性,分别称为零阶环节、一阶环节和二阶环节,或零阶、一阶和二阶传感器,即

零阶传感器:
$$a_0 y = b_0 x$$

一阶传感器:
$$a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x$$

二阶传感器:
$$a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x$$

显然,阶数越高,传感器的动态特性越复杂。零阶传感器在测量上是理想传感器,因为不管 $x = x(t)$ 如何变化,其输出总是与输入成简单的正比关系。严格地说,零阶传感器不存在,只能说有近似的零阶传感器,最常见的是一阶和二阶传感器。

(二) 一阶系统的动态响应

对于输入-输出信号为一阶常系数的常微分方程描述的传感器,其表达式可以改写为

$$\left(\tau \frac{dy}{dt} + 1 \right) y = kx$$

式中:时间常数 $\tau = a_1/a_0$; 系统的静态灵敏度 $k = b_0/a_0$ 。

1. 一阶系统的零输入响应

当输入信号 $x = x(t)$ 为 0 时,其零输入响应为

$$y = ce^{-t/\tau}$$

式中:常数 c 由起始条件 $y_0 = y(0)$ 决定,即有 $c = y_0$ 。

2. 一阶系统的冲激响应

对于冲激函数 (δ 函数, $\delta(t) = \begin{cases} \infty & (t=0) \\ 0 & (t \neq 0) \end{cases}$), 求解上述方程可得一阶系统的冲激响应为

$$h(t) = y_{\delta}(t) = \frac{k}{\tau} e^{-t/\tau}$$

在冲激信号出现的瞬间 (即 $t=0$), 响应函数也突然跃升,其幅度与 k 成正比,而与时间常数 τ 成反比,在 $t>0$ 时作指数衰减, τ 越小衰减越快,响应的波形也越接近冲激信号。

3. 一阶系统的阶跃响应

若输入的是一个单位阶跃信号 $u(t) = \begin{cases} 0 & (t \leq 0) \\ 1 & (t > 0) \end{cases}$, 则其输出信号的阶跃响应为

$$y_u = k(1 - e^{-t/\tau})$$

这时传感器的响应要等到 $t \rightarrow \infty$ 时才能达到最终的稳态值,当 $t = \tau$ 时,传感器的响

应将达到 $y(\tau) = k(1 - e^{-1}) = 0.632k$, 即达到稳态值的 63.2%, τ 越小, 响应越接近阶跃函数。

4. 一阶系统的频率响应特性

将频率不同而幅度相等的正弦信号输入传感器, 其输出信号的幅度及相位与频率之间的关系称频率响应特性。频率响应可由频率响应函数表示, 它由幅频和相频特性组成。从微分方程中可以解得, 其中幅频特性为

$$H(\omega) = \frac{k}{\sqrt{\omega^2 \tau^2 + 1}}$$

相频特性为

$$\theta(\omega) = -\arctan(\omega\tau)$$

一阶系统描述的传感器, 其动态响应特性的优劣主要取决于时间常数 τ 。显然, τ 越小越好, τ 小时, 阶跃响应的上升过程快, 频率响应的截止频率高。

(三) 二阶系统的动态响应

表示二阶系统输入-输出信号动态关系的二阶常微分方程可以写为

$$\left(\frac{1}{\omega_n^2} \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{2\xi}{\omega_n} \frac{dy}{dt} + 1 \right) y = kx$$

式中: 静态灵敏度 $k = b_0/a_0$; 无阻尼固有频率 $\omega_n = \sqrt{a_0/a_2}$; 阻尼比 $\xi = a_1/z \sqrt{a_0/a_2}$ 。

1. 二阶系统的零输入响应

当输入信号为 0 时, 二阶系统由于起始条件而形成的输出为零输入响应。

若 $\xi > 1$, 则响应 $y = c_1 e^{-(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1})\omega_n t} + c_2 e^{-(\xi - \sqrt{\xi^2 - 1})\omega_n t}$

若 $\xi = 1$, 则响应 $y = c_1 e^{-\xi\omega_n t} + c_2 t e^{-\xi\omega_n t}$

若 $\xi < 1$, 则响应 $y = c e^{-\xi\omega_n t} \sin(\sqrt{1 - \xi^2} \omega_n t + \theta)$

当 $\xi \geq 1$ 时, 由于阻尼作用较强, 故零状态响应不呈振荡现象; 当 $\xi < 1$ 时, 由于阻尼弱, 故而呈现衰减振荡, 振荡频率为 $\sqrt{1 - \xi^2} \omega_n$, 称为阻尼固有频率, 该频率与外界信号无关, 仅决定于本身的参数; 当无阻尼 ($\xi = 0$) 时, 则振荡频率为无阻尼固有频率 ω_n , 在理论上它不衰减。

2. 二阶系统的冲激响应

在 $t = 0$ 时, 有一冲激函数 $\delta(t)$ 输入起始静止的二阶系统, 其输出的冲激响应为

当 $\xi > 1$ (过阻尼) 时, $\frac{y}{\omega_n k} = \frac{1}{2\sqrt{\xi^2 - 1}} (e^{-(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1})\omega_n t} - e^{-(\xi - \sqrt{\xi^2 - 1})\omega_n t})$

当 $\xi = 1$ (临界阻尼) 时, $\frac{y}{\omega_n k} = \omega_n t e^{-\omega_n t}$

当 $\xi < 1$ (欠阻尼) 时, $\frac{y}{\omega_n k} = \frac{1}{\sqrt{1 - \xi^2}} e^{(-\xi\omega_n t)} \sin(\sqrt{1 - \xi^2} \omega_n t)$

它们相应的响应曲线如图 1-2 所示。

3. 二阶系统的阶跃响应

一个起始静止的二阶系统, 当输入信号为单位阶跃信号时, 其输出的阶跃响应为