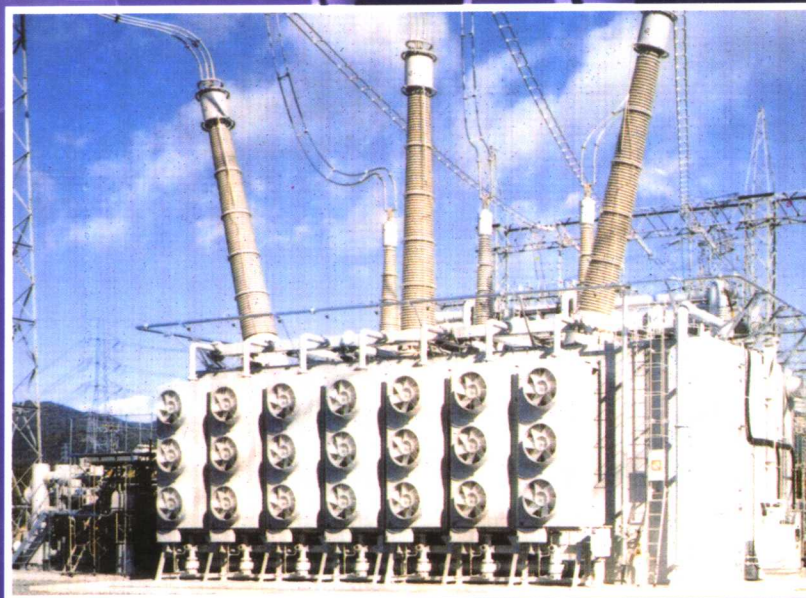


● 现代工业自动化技术应用丛书

测控技术 在电力设备在线检测中的应用

成永红 陈 玉 陈小林 等编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

现代工业自动化技术应用丛书

测控技术 在电力设备在线检测中的应用

成永红 陈 玉 陈小林 等编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



内 容 提 要

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,如何提高电力设备的在线检测水平是解决这一问题的关键。

本书主要探讨传感与测控技术在电力设备在线检测中的应用,全书共分7章。第1章主要介绍电力设备在线检测与诊断技术的现状与未来的发展;第2章介绍传感器技术在电力设备在线检测中的应用;第3章介绍嵌入式系统在电力设备在线检测中的应用;第4章介绍虚拟仪器技术在电力设备在线检测中的应用;第5章介绍网络技术在电力设备在线检测中的应用;第6章介绍电磁兼容与干扰抑制技术及其应用;第7章介绍电力设备故障诊断技术。

本书可供从事电力设备设计、生产、运行的技术人员阅读,也可供相关院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

测控技术在电力设备在线检测中的应用 / 成永红等编著.

—北京:中国电力出版社,2006

(现代工业自动化技术应用丛书)

ISBN 7-5083-4219-4

I. 测... II. 成... III. 测量系统:控制系统—应用—电力系统—电气设备—在线—检测 IV. TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 031252 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>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2006年7月第一版 2006年7月北京第一次印刷

1000毫米×1400毫米 B5开本 15.25印张 305千字

印数 0001—4000册 定价 25.00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)

序 言



现代工业自动化技术是信息社会中的关键技术和核心技术之一。自动化技术促进了人类文明的发展。实现工业生产自动化可以提高系统性能、改善劳动条件、减轻劳动强度、大幅提高生产率、节约能源、提高产品质量和经济效益。自动化设备可以代替人完成各类高危作业。

现代工业自动化系统已呈现开放性、智能化、信息化与网络化的特点，它融合了自动化技术、信息技术、现代控制技术、网络技术、通信技术、先进制造技术及现代管理学等诸多学科的先进技术，需要各学科的专家及工程技术人员通力合作，从而实现多学科专业知识与系统集成、形成实现现代工业自动化发展的手段或模式。

为了推广现代工业自动化技术的应用，总结、发展和提高我国工业自动化技术的应用水平，培养高水平的工程技术人员，帮助工作在生产第一线的工程技术人员能够及时拓展知识结构，较全面地了解和掌握现代工业自动化领域中的最新技术和应用，中国电力出版社组织编写了《现代工业自动化技术应用丛书》。

一、丛书的编写宗旨

团结组织工业自动化领域的专家、学者、科技工作者、工程技术人员和团体，共谋策划与编写，促进我国工业自动化技术的繁荣和发展。

二、丛书的编写原则

1. 以技术应用为主。理论与实践密切结合，通过剖析工程实例，介绍最新技术和产品的应用，以适应工业现场的需要。可操作性强。
2. 丛书各分册均以现场应用实际或范围划分。各分册之间既相互联系又自成体系。
3. 编委会特邀请该领域有扎实理论基础并富有实践经验的专家、学者和工程技术人员来承担编写工作。

三、丛书读者对象

以工程技术人员为主要读者对象，也适宜科研人员和大专院校师生参考。

我们相信《现代工业自动化技术应用丛书》的出版必将对我国工业自动化技术的应用起到积极作用。编写出版《现代工业自动化技术应用丛书》对于我

们是一种全新的尝试，难免存在一些问题，希望广大读者给予支持和帮助，我们的联系方式是 mo_bingying@cepp.com.cn。同时，热忱希望各行业从事工业自动化及相关技术的专家、学者、工程技术人员借此机会积极参与，将您在工作实践中获得的丰富经验总结出来，共同为提高我国工业自动化技术的应用水平做出贡献。

**《现代工业自动化技术应用丛书》
编委会**

前 言



现代工业自动化技术融合了传感技术、信息技术、控制技术、计算机技术等，强力推动着现代工业的技术进步，也推动着电力设备在线检测与诊断技术的发展。

任何电力设备在制造、运输、安装、运行、检修等过程中都不可避免地会造成一定的损伤，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，电力设备绝缘和机械结构的品质逐渐劣化，最终将导致电力设备的破坏。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。目前针对电力设备的检测主要有：交接试验、预防性试验和在线监测。

交接试验是在电力设备运至现场、安装调试完成以后、移交用户之前进行的试验，以保证在制造、运输、安装等过程中电力设备的完好性；预防性试验是在电力设备运行过程中定期进行的试验，所有的电力设备都要强制按规定、按时进行，由于预防性试验是一个周期性试验，在一个试验周期间隔时间内难以保证不发生故障。鉴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，在线检测技术就是一种在运行电压下对电力设备运行状况进行连续监测的方法，它可以根据设备的运行状况来选择不同的检测周期，大大提高试验的真实性与有效性，可以及时发现电力设备的劣化或故障情况。

一个电力设备在线检测系统通常是由传感单元、信号采集单元、分析诊断单元三大部分组成。传感单元用于感知所需要测量的电力设备状态特征参量，根据电力设备状态在线检测的需要，目前常用的传感器有电磁、力学量、超声、温度、气体传感器等；信号采集单元用于将传感器得到的被测对象的物理化学量进行信号调理和采集，并传输到采集控制计算机中还原为原始物理化学参量，在电力设备运行状态下进行采集传输必须考虑强电磁环境下的电磁兼容问题，以确保采集信号的正确与准确性；分析诊断单元借助于各种信号分析处理技术，对采集得到的各种电力设备的特征参量进行数学处理，分析其变化规律，并进行电力设备状态诊断。

目前已经有不少关于电力设备在线检测与诊断原理和软件开发关键技术方面的书籍，为科研人员开发检测装置提供了重要的理论和技术参考。为了提升电力设备在线检测系统的开发水平，本书试图从工业自动化的角度，通过大量实际开发成功的例子，介绍如何高效构建适用于不同电力设备的在线检测系统。全书分为7章。第1章为概述，重点介绍电力设备在线检测技术的发展趋势；第2章为传感器技术在电力设备在线检测中的应用，着重介绍电力设备在线检测常用的电磁量、非电量、化学量传感器的设计、选型和开发技术，并给出了不同传感器在电力设备局

部放电测量、超宽频带测量、发电机定子绕组缺陷检测、断路器触头行程测量、变压器油气分析中的应用实例；第3章为嵌入式系统在电力设备在线检测中的应用，着重介绍基于单片机、基于DSP、基于可编程ASIC的检测系统的设计技术，并给出了基于单片机的交联聚乙烯电缆直流法绝缘在线检测系统、基于DSP和MCU的断路器综合在线检测系统、基于FPGA的局部放电信号高速采集单元的开发实例；第4章为虚拟仪器技术在电力设备在线检测中的应用，着重介绍基于文本开发语言和基于图形化开发语言的虚拟仪器设计技术，并给出了基于CVI软件技术的气体绝缘变电站局部放电检测系统和基于LabVIEW软件技术的变电站外绝缘检测系统的设计开发实例；第5章为网络技术在电力设备在线检测中的应用，着重介绍串行总线、现场总线以及工业以太网技术，并给出了基于串行总线的前置单元和通信单元的设计实例，以及CAN总线、LonWorks总线、工业以太网在电力设备检测中的应用实例；第6章为电磁兼容与干扰抑制技术及其应用，着重介绍了电力设备在线检测装置开发中实用的模拟信号与电源的滤波技术、模拟/数字电路以及印制板的接地技术、屏蔽技术等；第7章为电力设备故障诊断技术，着重介绍目前常用的人工神经网络、模糊诊断、专家诊断系统应用的关键技术，并以变压器诊断为例，给出了相应的分析诊断实例。本书可供从事电力设备设计、生产、运行的技术人员及大学相关专业高年级本科生、研究生使用。

本书中引用了大量的开发实例，这些实例主要来源于电力设备电气绝缘国家重点实验室在电力设备在线检测与诊断方面的研究成果，同时本书还参考并归纳了国内外一些资料文献中提供的开发实例，这些成果融入本书之中，为本书增色不少，在此作者表示衷心地感谢。除了署名的主要编著者外，参加本书编著工作的还有：谢小军、赵勇、胡学胜、朱哲蕾等同志，他们在繁重的学习和科研任务下，结合他们的科研工作撰写了本书的部分章节，谢小军参与编写了第2、7章，赵勇参与编写了第3、5章，胡学胜参与编写了第3章，朱哲蕾参与编写了第7章。同时还要感谢研究生王贤清、石山、吕一航、张少峰、任成燕、孟永鹏、曲晨、赵磊等为本书资料收集和书稿整理方面所作出的贡献。

电力设备在线检测与诊断技术发展很快，同时一些技术规范尚未确定，这给本书的编写带来了很大困难，鉴于作者的水平，本书中难免有错误和疏漏之处，敬请广大读者批评指正！

编者

目 录



序言

前言

第1章 概述	(1)
--------------	-----

第2章 传感器技术在电力设备在线检测中的应用	(6)
------------------------------	-----

2.1 传感器概述	(6)
2.1.1 传感器的定义与分类	(6)
2.1.2 传感器的基本静态和动态特性	(7)
2.2 电力设备检测用电磁量传感器	(11)
2.2.1 电力设备检测中常用的电磁量传感器	(11)
2.2.2 泄漏电流检测用微电流传感器	(16)
2.2.3 超宽频带传感器的设计及其在局部放电检测中的应用	(19)
2.3 非电量传感器及其在电力设备检测中的应用	(25)
2.3.1 电力设备检测中常用的非电量传感器	(25)
2.3.2 超声传感器在大型电机定子绕组缺陷检测中应用	(31)
2.3.3 位移传感器在断路器触头行程检测中应用	(36)
2.4 电力设备检测中用化学传感器	(39)
2.4.1 气敏传感器	(39)
2.4.2 湿敏传感器	(42)
2.4.3 气敏传感器在变压器油气分析中的应用	(44)

第3章 嵌入式系统在电力设备在线检测中的应用	(48)
------------------------------	------

3.1 嵌入式系统的概述	(48)
3.2 基于单片机的监测系统的设计	(51)
3.2.1 单片机概述	(51)
3.2.2 单片机在交联聚乙烯(XLPE)电缆直流叠加法绝缘在线监测系统中的应用与实现	(57)
3.3 基于DSP的在线检测系统的设计	(64)
3.3.1 DSP概述	(64)
3.3.2 基于DSP和MCU断路器综合在线检测单元的设计	(67)

3.4 基于可编程 ASIC 在线检测系统的设计	(73)
3.4.1 ASIC 概述	(73)
3.4.2 基于 FPGA 的局部放电信号高速采集单元设计	(80)
第4章 虚拟仪器技术在电力设备在线检测中的应用	(93)
4.1 虚拟仪器概述	(93)
4.1.1 虚拟仪器	(93)
4.1.2 虚拟仪器的构成	(95)
4.1.3 虚拟仪器的未来发展	(96)
4.2 虚拟仪器硬件系统	(98)
4.2.1 虚拟仪器的硬件构成	(98)
4.2.2 通用接口仪器控制系统构成	(99)
4.2.3 VXI 总线仪器	(99)
4.2.4 PXI 总线仪器	(100)
4.3 基于文本式开发语言的虚拟仪器设计	(101)
4.3.1 虚拟仪器的文本式开发语言	(101)
4.3.2 基于 CVI 的 GIS 局部放电在线检测系统的设计	(102)
4.4 基于图形化开发语言的虚拟仪器设计	(117)
4.4.1 虚拟仪器的图形化开发语言	(117)
4.4.2 基于 LabVIEW 的变电站外绝缘在线检测系统的设计	(119)
第5章 网络技术在电力设备在线监测中的应用	(126)
5.1 网络技术概述	(126)
5.1.1 网络拓扑	(126)
5.1.2 网络系统结构	(127)
5.1.3 工业控制系统的发展	(129)
5.1.4 变电站综合在线监测系统的典型网络模型	(130)
5.2 串行总线技术及其应用	(131)
5.2.1 串行通信基础	(131)
5.2.2 典型串行总线	(133)
5.2.3 基于 RS-485 总线的高压容性设备在线监测通信应用实例	(134)
5.3 现场总线技术及其应用	(142)
5.3.1 现场总线简介	(142)
5.3.2 基于 CAN 总线的断路器在线监测通信应用实例	(146)
5.4 工业以太网	(158)
5.4.1 工业以太网基础	(158)

5.4.2 工业以太网技术在变电站在线监测系统中的应用	(164)
第6章 电磁兼容与干扰抑制技术及其应用	(170)
6.1 电磁兼容性概述	(170)
6.1.1 电磁兼容的定义和研究内容	(170)
6.1.2 电磁干扰	(172)
6.1.3 电磁兼容试验	(176)
6.2 实用干扰抑制技术	(181)
6.2.1 滤波技术	(181)
6.2.2 接地技术	(185)
6.2.3 屏蔽技术	(192)
6.3 干扰抑制技术应用实例	(194)
6.3.1 静电——放电抗扰度实验	(194)
6.3.2 电快速瞬变脉冲群抗扰度实验	(195)
第7章 电力设备故障诊断技术	(198)
7.1 故障诊断概述	(198)
7.1.1 信号检测	(199)
7.1.2 特征提取	(199)
7.1.3 模式识别	(200)
7.1.4 趋势预测	(201)
7.2 模糊诊断	(201)
7.2.1 模糊诊断原理	(201)
7.2.2 电力变压器模糊诊断技术	(207)
7.3 基于人工神经网络的诊断技术	(211)
7.3.1 人工神经网络的原理	(211)
7.3.2 人工神经网络在变压器油气分析中的应用	(216)
7.4 专家诊断系统	(219)
7.4.1 专家系统概述	(219)
7.4.2 电力变压器故障诊断专家系统	(225)
参考文献	(230)

第1章 概 述

1. 我国电力工业的发展

近20年来,我国电力工业得到了较快发展,连续上了两个台阶,净增装机容量270GW。继1981年发电装机容量跨上100GW台阶后,1995年突破200GW,到1997年底全国发电装机容量达到250GW,2000年装机容量突破300GW,2004年装机容量突破400GW,我国现在总发电量排列世界第二位。根据我国的能源政策,至少在今后的10~20年内,电力的弹性指数将继续保持在0.8左右,预期到2010年、2020年将分别达到650GW和950GW。我国将在2015年形成以三峡为中心的全国联合电网和比较合理的电源结构,实现西北与华中、西北与华北、华中与南方、华中与华北的电网互联,基本实现全国联网,形成世界上最大的联合电网;现已经建成或正在建设一些直流输电工程,5年内,我国直流输电将在世界名列前茅,预期到2020年,将成为世界直流输电的头号大国;我国水电装机容量到2010年力争达到155GW以上,逐步超过美国而居世界第一;我国第一条也是世界第一条的高海拔官亭至兰州东变电站750kV输变电示范工程已于2005年9月底建成并投运,并在未来20年内逐步建成西部地区更高一级输电网。国家正在规划建设1000kV高压试验示范工程,以及西南水电外送的 ± 800 kV直流输电工程。根据世界电力发展规律并结合中国的资源和技术供应情况,对2020年的电源结构的规划设想是:在950GW中,煤电为600GW,占63%(电量3万亿kWh,占4.3万亿kWh的70%);水电200GW,占21.1%(电量为7000亿kWh,占16%);另有抽水蓄能电站25GW,占2.6%;核电40GW,占4.2%(电量2600亿kWh,占6%);气电70GW,占7.3%(电量3000亿kWh,占7%);新能源15GW,占1.5%(电量400亿kWh,占1%)。2020年前后,国家电网公司将建成以华北、华中、华东为核心,覆盖各大电源基地和主要负荷中心的特高压骨干网架,有效引导大煤电、大水电和大核电的集约化开发,充分实现全国范围内的资源优化配置。我国电力工业已开始从大电网、大机组、超高压、高自动化阶段进入到优化资源配置、实施全国联网建设的新阶段。

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。继美国、加拿大2003年8月14日发生的大面积停电事故后,2003年夏季西欧地区相继发生了若干次大面积停电事故:8月28日,英国伦敦和英格兰

东部部分地区停电, 2/3 的地铁陷入瘫痪, 25 万人被困在地铁里; 9 月 23 日, 瑞典和丹麦大面积停电, 波及 200 万用户; 9 月 28 日意大利发生大面积停电造成 550 万人停电 18 小时。2003 年美国、加拿大及西欧一系列严重的停电事故引起了社会对该地区电力安全的关注。停电给社会经济、生活各方面带来了巨大的负面影响, 迫使各国政府开始慎重考虑电力安全及其相关问题。大型电力设备供电覆盖面广, 一旦发生故障, 将造成非常巨大的直接和间接经济损失。解决这一问题的关键是: 如何提高电力设备的在线监测与诊断水平。从技术角度, 目前国内外关注这一问题的焦点是: 如何表征电力设备绝缘系统的劣化规律、如何评价电力设备绝缘系统的剩余寿命、如何提高电力设备绝缘系统的服役性能、如何加强电力设备绝缘系统的寿命管理。

2. 电力设备在线检测与诊断技术现状

电力设备在线检测是建立在对电力设备运行状态各部件劣化规律认识的基础上, 根据得到的能够表征其变化规律的特征参量进行的带电检测, 这种测量可以是连续的, 也可以是断续的, 根据检测的特征参量与剩余寿命之间的关系可以进行故障或状态诊断, 进而进行寿命评估。

电力设备在运行过程中的劣化是一个漫长的过程, 绝大多数电力设备发生故障在事故前都有显现的先兆, 而目前现行的预防性试验一般以一年为一周期, 由于试验周期比较长, 难以及时发现故障的先兆。电力设备在线检测技术的出现大大提高了电力设备试验的真实性与灵敏度, 可以及时发现电力设备故障。所以国际电工界近年来一直致力于研究电力设备在线检测与诊断新技术, 特别在 20 世纪 90 年代各国均投入大量的人力和物力开展相关的研究, 在检测理论和技术等方面均取得了重要突破, 主要表现在以下几方面。

(1) 绝缘多因子老化方面。国际上在绝缘材料及其体系的单一因子老化方面进行了广泛的研究, 提出了一些老化模型, 例如, 由于温度促进老化的热老化模型 (Arrhenius 指数模型), 放电产生老化的电老化模型 (幂倒数律模型), 机械力引起老化的幂倒数模型。对一些绝缘材料提出了多因子老化寿命模型, 这些模型是建立在小试样或绝缘系统取样试验的基础之上, 对于运行中的大型电力设备, 要运用这些模型是很困难的。历年 CIGRE 均有多篇论文提出采用多种方法研究不同缺陷引起的绝缘故障特征, 并建立相应的信息库以判断故障缺陷种类、确定电力设备故障原因。大型电力设备绝缘在运行中受到电、热、机械应力及各种环境因子的作用, 其老化过程十分复杂, 进行这种多因子老化的试验研究相当困难, 目前大多限于定性讨论。

国内对大型电力设备老化机理开展了研究, 特别是对大型发电机绝缘系统开展了深入地多因子 (电、热、机械等) 顺序作用和联合作用下的性能变化规律和老化机理研究, 已经取得了阶段性成果, 对提高电力设备的检测准确度起到了重要

作用。

(2) 在线检测与诊断技术方面。近年来,发电机、变压器、气体绝缘组合电器(GIS)、交联聚乙烯电缆等关键电力设备的在线监测与诊断技术是电工学科领域各国学者研究的热点。各国研究者开发了一些在线监测设备,多数采用单一参量进行监测,较少采用多参量综合检测的方法去研究电力设备在运行过程中绝缘状态变化规律。

国外在检测技术方面发展较快,已经将一些新的检测技术(如:超高频局部放电检测、超声波绝缘缺陷检测、气相色谱油气在线检测、光纤温度在线测量、光电测量等)以及一些新的数字信号分析技术(数字滤波、神经网络、小波分析、专家系统、模糊诊断、模式识别等)用于绝缘检测中,取得了良好的效果。

国内也在开展电力设备在线监测和绝缘诊断技术的研究,不仅已经成功地将数字信号分析技术应用到电力设备检测中,开发了大型发电机故障放电检测系统、大型发电机超声水循环检测系统、变压器局部放电检测系统、变压器气相色谱诊断专家系统、GIS超高频局部放电检测系统、绝缘缺陷超声检测仪、超高压交联聚乙烯电缆直流分量在线检测装置等,而且在超宽频带局部放电检测理论与技术、电力设备放电性故障红外热诊断技术等方面进行了比较多的研究工作。

(3) 剩余寿命评估方面。20世纪80年代中期,美国、加拿大、日本开始了以绝缘状态诊断为主的评估剩余寿命的研究。连续数届国际大电网年会都把提高电力设备可靠性、延长使用寿命作为讨论主题。研究表明:电力设备的寿命与运行时间、起停次数、绝缘泄漏电流及介质损耗角正切增量有关,对一些特定的电力设备,最大放电量也可用于有效评定剩余寿命;同时也有研究表明:很多非破坏性试验参量都不能很好地反映老化状态,只有局部放电或与局部放电有关的参量才能指示老化状态。国内也开展了相关研究工作,正在寻找反映绝缘状态特性量组以及绝缘剩余寿命与特征量之间的对应关系。到目前为止,国内外尚未找到有效评估大型电力设备绝缘寿命的方法。

3. 电力设备在线检测与故障诊断技术未来发展

(1) 电力设备劣化规律研究朝着多因子老化研究方向发展。电力设备绝缘的劣化过程是一个在多因子(包括电、热、机械、化学、环境等因子)协同作用下的非线性过程,以往的研究工作主要是单一因子作用下劣化规律的研究,近年来发展到研究多因子顺序作用和多因子协同作用下劣化规律,多因子协同作用下老化规律的研究能更真实地反映电力设备在运行过程中所受到的应力作用情况,今后将会更多地对电力设备进行多因子老化规律研究,只有在这方面取得突破性进展才能有效地提高电力设备检测与诊断水平。

(2) 电力设备检测突破传统测量参量,积极寻找新的表征劣化规律的特征参量。通过长期的、艰苦的电力设备绝缘老化试验研究,已经寻找到一些能够表征电

力设备劣化规律的新的特征参量,如:表征发电机主绝缘劣化的新特征参量组(局部放电偏斜度、超宽频带局部放电、第二电流激增点、超声声速等)。这方面的研究工作还在继续,研究工作的进展对提高检测与诊断的准确性将起到积极推动作用。

(3) 新的测控技术在电力设备在线检测中将得到更多的应用。电力设备检测技术的发展,经历了基于单片机的检测装置(不具有诊断功能)阶段,到基于DSP技术的检测装置(具备初步的诊断功能)阶段,再到基于计算机技术的检测系统(具备了较强的诊断功能)阶段,现正向基于新型总线技术和网络技术的综合检测系统发展。现代科学技术的进步强有力地推动着电力设备检测与诊断技术的发展,一些最新检测技术,如传感技术、光纤技术、信号采集与处理技术、计算机技术、总线技术等,迅速在电力设备的检测中得到应用,使电力设备的综合检测水平明显得到提高。

(4) 电力设备故障诊断向综合诊断与寿命评估方向发展。以往电力设备诊断主要停留在基于规程的阈值判断水平上,对电力设备绝缘剩余寿命研究几乎是空白。近年来在电力设备诊断与寿命评估技术研究方面得到了发展,突破了传统的阈值诊断方法,大量采用现代数学方法和信号处理方法,如小波分析、时频分析、分形分析、神经网络、模糊诊断、专家系统等,从而有力地推动了电力设备诊断向基于状态描述的信号处理、信息集成和故障分析方向发展,使得智能监控与诊断成为可能,并有助于使检测与诊断系统作为电力设备运行过程监控的一个重要的、不可分割的组成部分。

(5) 电力设备在线检测与诊断设备向高度集成方向发展。从电力设备检测的集成性角度来看,已不再局限于对单一对象、单一模型的具体化研究,而是从单台设备、单参数的检测与诊断阶段,向多设备、多参数检测与诊断方向发展,并且有可能在网络的平台上实现变电站内电力设备的综合在线检测与诊断,从而为电力系统自动化提供更高的技术平台。

4. 工业自动化技术促进了电力设备状态检测技术的发展

近年来,工业自动化技术得到了高速发展,特别是在传感器技术、通信技术、现代控制技术、微电子技术、计算机技术等方面取得了突破性进展,使得建立在工业自动化技术基础之上的智能测控技术向着智能化、信息化与网络化方向发展,大大促进了各行业领域的相关技术进步。

电力设备在线检测与诊断是建立在工业自动化技术基础之上的,工业自动化技术全面支撑着电力设备状态检测与监测技术的发展。要实现电力设备运行监测,首先需要提取电力设备在运行过程中的各种表征其状态特性的特征参量,这需要使用各种各样的传感器,如电压传感器、电流传感器、微电流传感器、局部放电传感器、超高频局部放电传感器、超宽频带局部放电传感器、压力传感器、温度传感

器、直线位移传感器、角位移传感器、振动传感器、流量传感器、超声传感器、声振动传感器、气体传感器、湿度传感器等等；其次，需要采用各种信号调理技术，如各种硬件滤波技术（带通、带阻、低通、高通滤波）、信号多级放大技术、信号衰减技术、峰值采样保持技术；第三，需要采用各种信号采集与传输技术，以保证能够有效采集到电力设备状态信号，如：模拟信号采集与传输、数字信号采集与传输、高频信号实时采集技术、多路采集与控制技术、高低压电磁隔离技术、光电隔离技术、信号传输总线技术、控制总线技术、机箱总线技术、光电传输技术；第四，需要采用各种抗干扰技术，以提高采集信号的可信性与准确性，如：屏蔽技术、搭接技术、接地技术、电缆屏蔽接地技术、电源滤波技术、背景噪声抑制技术、干扰相位识别技术、软件滤波技术（有限冲激响应滤波、无限冲激响应滤波、自适应滤波、小波去噪技术等）、布板技术等；第五，需要应用各种信号特征分析技术，以提取信号的数字特征供进一步分析用，如：信号时域指纹分析技术、信号频域指纹分析技术、信号时频分析技术、信号小波提取技术、信号分形分析技术等；第六，还需要采用一些诊断与预测技术，通过采集地各种的特征信号进行电力设备的状态分析和寿命预测，如神经网络分析与诊断技术、模糊诊断技术、专家系统分析技术、非线性寿命预测技术等等。

电力设备的在线监测与诊断集成应用了大量工业自动化技术，是通常工业控制系统所不能比拟的，它存在着极其特殊性，它融合了诸多工业自动化中的先进技术。本书试图从工业自动化技术应用的角度，来论述如何综合应用各种工业自动化技术实现电力设备在线监测与诊断。

第2章 传感器技术在电力设备在线检测中的应用

2.1 传感器概述

2.1.1 传感器的定义与分类

传感器是现代检测和控制装置的重要组成部分,在电力设备检测与诊断系统中,传感器起着获取检测信息与转换信息的重要作用。根据国家标准 GB 7665—1987,传感器定义为:“能感受规定的被测量并按照一定规律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,敏感元件指传感器中能直接感受(或响应)被测量的部分;转换元件指传感器中能将敏感元件输出转换为适于传输和测量的电信号部分。当人们对检测与诊断要求越高,系统对传感器的依赖性越大,传感器对系统的功能起决定性作用。要提高电力设备检测与诊断水平,首先需要解决的是传感技术问题。

传感器的种类繁多,不胜枚举。传感器有很多种分类方法,常用的分类法有两种,一是按将外界输入的信号变换为电信号采用的效应分类,二是按输入量分类。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。按输入量进行分类也就是按用途进行分类,下面列出这种分类法的若干类型:

- (1) 机械量:力参量、质量、力、扭矩、应力、……
- (2) 热工量:热量、温度、压力、流量、流速、……
- (3) 电学量:电流、电压、电阻、……
- (4) 化学量:pH 值、气体成分、液体成分、……
- (5) 光学量:光强、光通量、辐射能量、……

往往同一机理的传感器可以测量多种物理量,如电阻性传感器可以用来测量温度、位移、压力等物理量,而同一种被测物理量又可以采用多种不同类型的传感器来测量,如位移量,可以采用电容式、电感式、电位计式等传感器来检测。因此,需要对传感器的基本性能有所了解,以满足在设计或选用的需要。

2.1.2 传感器的基本静态和动态特性

在实际检测系统中,可以通过传感器的静态特性和动态特性来表征传感器性能的优劣。所谓静态特性是指传感器所固有的特性,动态特性是指传感器对输入信号的实际响应特性。在传感器设计和选型时,必须同时兼顾传感器的静态特性和动态特性。只有这样,才能使我们的检测、控制比较准确、可靠。

1. 传感器的静态特性

衡量传感器静态特性的重要指标有:线性度、分辨率、灵敏度、阈值、重复性、迟滞等。

(1) 线性度。理想的传感器输入与输出关系应呈线性,而实际上许多传感器的输入-输出特性是非线性的。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绝对值满量程(FS)输出值之比:

$$\xi_L = \frac{|\Delta Y_L|_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (2-1)$$

式中, ξ_L 表示线性度; $|\Delta Y_L|_{\max}$ 表示输出平均值与理论值的最大偏差绝对值; Y_{FS} 表示满量程输出。

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。

(2) 分辨率和灵敏度。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。分辨率表达了传感器的最小可测出的输入变量。

灵敏度(K)是传感器输出量增量(Δy)和输入量增量(Δx)之比。线性传感器的灵敏度就是拟合直线的斜率,即

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (2-2)$$

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。

(3) 阈值。阈值是指传感器实际有效测量的范围,包括能够测量的最大值和最小值。阈值说明了传感器的有效工作范围,阈值范围大的传感器,但分辨率不一定差。

(4) 重复性与迟滞。重复性是指传感器在同样工作条件下的输入和输出特性的变化情况,通常用重复性误差来表示。重复性误差(ΔR)可以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

$$\Delta R = \frac{\Delta_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (2-3)$$