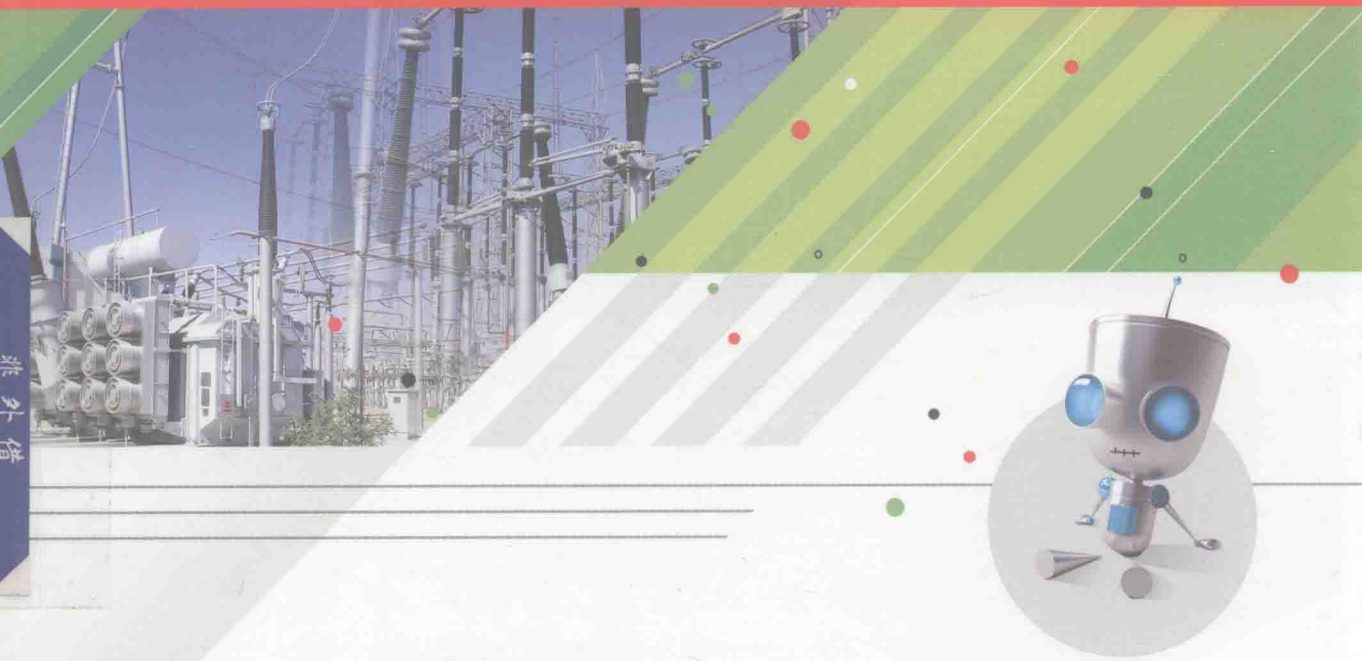





普通高等教育“十三五”规划教材
电气工程、自动化专业规划教材

电气测试技术

◆ 黄新波 主编



 中国工信出版集团

 电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十三五”规划教材
电气工程、自动化专业规划教材

电气测试技术

黄新波 主 编
卢 健 副主编



电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书在内容的编写上,力求将传统测量方法、工具与最新的电气测试技术、仪器仪表相结合,同时结合了电气测试领域课题研究的实际案例。本书共 11 章,主要内容包括绪论、电气测试技术基础、电气测试系统、传感器技术、数字化测量技术、通信技术、数据分析中心软件、电磁兼容试验、电气测试技术设计实例分析、电气测试安全技术、电气测试技术的新发展。本书还提供配套电子课件。

本书可作为电气工程、自动化、测控技术与仪器等专业本科生的教材,也可作为相关学科研究生的参考用书,还可作为从事相关领域的科研工作者的工具用书。

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

电气测试技术 / 黄新波主编. — 北京: 电子工业出版社, 2018.3

电气工程、自动化专业规划教材

ISBN 978-7-121-32413-0

I. ①电… II. ①黄… III. ①电气测量—高等学校—教材 IV. ①TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 183540 号

策划编辑: 王晓庆

责任编辑: 靳 平

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市京南印刷厂

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: 19.5 字数: 577 千字

版 次: 2018 年 3 月第 1 版

印 次: 2018 年 3 月第 1 次印刷

定 价: 45.00 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, 88258888。

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

本书咨询联系方式: (010)88254113, wangxq@phei.com.cn。

前 言

随着国家智能制造、互联网+等现代科技行业的发展，新型传感器、仪器仪表、通信方法和测试手段也随之不断更新与发展。为适应这种变化和现实需要，本书在内容的编写上，力求将传统测量方法、工具与最新的电气测试技术、仪器仪表相结合，既重视电气测试技术基本内容的阐述，又突出与电气领域相结合的特色。同时，本书内容结合了作者在电气测试领域课题研究的实际案例，使学生在掌握电气测试的基本方法和技术的基础上，进一步掌握其在工程中的实际应用。重视技术的工程应用并以案例教学的形式体现是本书的一大亮点，也是作者探索如何撰写适用于“创新创业”教育教材的一种手段。

全书共分 11 章：第 1 章介绍了电气测试技术的意义、测试对象及未来发展方向；第 2 章介绍了电气测试中常用电工仪表的分类及测量误差处理方法；第 3 章介绍了电气测试系统的组成及经典测试工具；第 4 章介绍了电气测试中常用传感器的原理、分类、应用及发展趋势；第 5 章介绍了电气测试中信号处理、数字化转换、抗干扰技术及数据预处理方法；第 6 章介绍了电气测试系统中使用的通信方式、通信协议及智能变电站中的通信案例；第 7 章介绍了电气测试系统中常用的专家软件、故障诊断算法及智能变电站中的故障诊断案例；第 8 章介绍了电气测试系统电磁兼容（EMC）的相关实验项目；第 9 章介绍了电气测试中主要电气设备的测试技术，并给出设计实例；第 10 章介绍了常见的电气测试事故及安全措施；第 11 章结合动态误差修正、传感器自评估、多传感器数据融合、虚拟测试、物联网、智能云、大数据等技术，介绍了电气测试技术的新发展。

本书可作为电气工程、自动化、测控技术与仪器等专业本科生的教材，也可作为相关学科研究生的参考用书，还可作为从事相关领域的科研工作者的工具用书。

本书提供配套电子课件，请登录华信教育资源网（<http://www.hxedu.com.cn>）注册下载，也可联系编辑（010-88254113，wangxq@phei.com.cn）索取。

本书由黄新波教授担任主编、卢健博士担任副主编，参与编写工作的还有朱永灿、赵隆等教师，同时还有李文君子、张瑜、陈丽、王岩妹、廖明进、赵伟强、郭剑锋、刘斌、吴孟魁、肖杰、薛卜玮、张斌、朱海涛、张周熊、石杰、邓凸、姬林垚、乔卫中、陈子良、郑心心、李弘博、魏雪倩、王海东、张杰、司伟杰、刘新慧、张慧莹等硕士研究生参与了本书的资料收集、整理和校对工作。

感谢本书参考文献的相关作者，感谢为本书编写提供技术资料的个人和单位。

本书的出版得到陕西省重点科技创新团队计划（2014KCT-16）、陕西省科学技术研究发展计划项目（2014XT-07）、国家科技型中小企业技术创新基金（13C26216105825）等课题的资助及陕西省“电气工程及其自动化”专业综合改革试点（陕教高〔2014〕15号）的大力支持，在此表示衷心感谢。

电气测试技术是一个迅速发展的多学科交叉技术领域，受作者学识水平所限，书中疏漏欠妥之处在所难免，恳请读者批评指正。作者联系方式：hxb1998@163.com。

作 者

目 录

第 1 章 绪论	1	3.2 动态特性	34
1.1 电气测试技术	1	3.4 电气测试工具	38
1.2 电气测试技术发展历程	2	3.4.1 万用表	38
1.3 电气测试关键技术	3	3.4.2 兆欧表	39
1.4 电气测试技术应用与未来发展	5	3.4.3 电流测试仪表	40
思考题	5	3.4.4 电压测试仪表	41
第 2 章 电气测试技术基础	6	3.4.5 通用电子示波器	42
2.1 电气测量基本概念	6	3.4.6 智能化数字存储示波器	43
2.2 电气测试常用电工仪表	6	3.4.7 频谱分析仪	44
2.2.1 电工仪表分类	6	3.4.8 逻辑分析仪	45
2.2.2 电工仪表基本功能	7	3.5 本章小结	46
2.2.3 电工仪表基本性能	8	习题	46
2.3 电气测量方法	10	习题答案	46
2.4 测量误差分析与处理	11	参考文献	48
2.4.1 误差的研究目的	11	第 4 章 传感器技术	50
2.4.2 误差的概念	11	4.1 传感器概述	50
2.4.3 误差的表示方法	11	4.1.1 传感器的定义	50
2.4.4 误差的来源	12	4.1.2 传感器的组成	50
2.4.5 误差的性质	13	4.1.3 传感器的分类	50
2.4.6 疏失误差及其判断准则	14	4.1.4 传感器的性能要求	51
2.4.7 测量误差的处理	17	4.1.5 传感器的应用	52
2.4.8 误差的合成与分配	19	4.2 电阻应变片式传感器	52
2.4.9 最佳测量条件与方案的确定	21	4.2.1 电阻应变片式传感器原理及特性	52
2.5 本章小结	22	4.2.2 电阻应变片式传感器的分类	55
习题	22	4.2.3 电阻应变片式传感器的测量及应用	55
习题答案	23	4.3 电感式传感器	60
参考文献	25	4.3.1 自感式传感器	60
第 3 章 电气测试系统	27	4.3.2 差动变压器式传感器	63
3.1 电气测试系统的组成	27	4.3.3 涡流式传感器	66
3.2 电气测试的基本结构	29	4.4 电容式传感器	68
3.2.1 直接变换型结构	29	4.4.1 电容式传感器的原理及特性	68
3.2.2 平衡变换型结构	30	4.4.2 电容式传感器的分类	69
3.2.3 差动变换型结构	30	4.4.3 电容式传感器的测量及应用	70
3.3 电气测试输入-输出特性	31	4.5 热电偶传感器	72
3.3.1 静态特性	31		

4.5.1	热电偶传感器的原理及特性	72	5.2	滤波器	115
4.5.2	热电偶传感器的分类	72	5.2.1	滤波器的主要指标	116
4.5.3	热电偶传感器的测量及应用	73	5.2.2	滤波器的类型	117
4.6	热电阻传感器	75	5.3	模拟信号放大器	121
4.6.1	热电阻传感器的原理及特性	75	5.3.1	运算放大器的主要指标	122
4.6.2	热电阻传感器的分类	75	5.3.2	仪用放大器	122
4.6.3	热电阻传感器的测量及应用	76	5.3.3	差动放大器	123
4.7	光电式传感器	78	5.3.4	高输入阻抗放大器	125
4.7.1	光电式传感器的原理及特性	78	5.3.5	程控增益放大器	125
4.7.2	光电式传感器的分类	79	5.3.6	隔离放大器	127
4.7.3	光电式传感器的应用	81	5.3.7	精密放大器	128
4.8	红外线传感器	82	5.4	集成模拟多路开关	129
4.8.1	红外线传感器的原理及特性	82	5.4.1	模拟开关的主要指标	129
4.8.2	红外线传感器的分类	82	5.4.2	增强型 MOSFET 开关电路	130
4.8.3	红外线传感器的应用	83	5.4.3	集成模拟开关	130
4.9	光纤传感器	84	5.4.4	模拟多路开关电路	132
4.9.1	光纤传感器的原理及特性	84	5.5	A/D 转换器	132
4.9.2	光纤传感器的分类	85	5.5.1	A/D 转换器的基础理论	132
4.9.3	光纤传感器的应用	86	5.5.2	A/D 转换器的主要指标	133
4.10	压电式传感器	87	5.5.3	集成 A/D 转换器及其应用	133
4.10.1	压电式传感器的原理及特性	88	5.6	微控制器	134
4.10.2	压电式传感器的分类	89	5.6.1	单片机	134
4.10.3	压电式传感器的测量及应用	90	5.6.2	DSP	134
4.11	霍尔传感器	93	5.6.3	ARM	135
4.11.1	霍尔传感器的原理及特性	93	5.6.4	FPGA	135
4.11.2	霍尔传感器的分类	94	5.7	D/A 转换器	135
4.11.3	霍尔传感器的测量及应用	95	5.7.1	D/A 转换的原理	135
4.12	其他传感器	96	5.7.2	D/A 转换器的主要指标	136
4.12.1	烟雾传感器	96	5.7.3	集成 D/A 转换器及其应用	137
4.12.2	日照强度传感器	97	5.8	人机交互设计	138
4.12.3	半导体式传感器	98	5.8.1	键盘接口技术	138
4.12.4	雷达传感器	99	5.8.2	LED 显示技术	138
4.13	传感器的智能化与发展	100	5.8.3	LCD 显示技术	139
4.13.1	智能传感器的原理及特性	100	5.8.4	数据通信技术	140
4.13.2	智能传感器的实现	101	5.9	抗干扰设计	140
4.13.3	智能传感器的应用与发展	103	5.9.1	电磁干扰	140
习题		104	5.9.2	干扰的抑制	141
习题答案		107	5.9.3	电源干扰的抑制	144
参考文献		114	5.10	数据预处理	145
第 5 章 数字化测量技术		115	5.10.1	数字滤波方法	145
5.1	概述	115	5.10.2	消除奇异项	147

5.10.3	消除趋势项	148	习题答案	208
5.10.4	数据的平滑处理	149	参考文献	209
5.10.5	标度变换算法	150		
5.10.6	越限报警处理	152		
5.11	本章小结	154	第8章 电磁兼容试验	213
习题		154	8.1 EMC 试验技术发展	213
习题答案		155	8.2 EMC 试验项目	214
参考文献		157	8.2.1 静电放电抗扰度试验	216
第6章 通信技术		158	8.2.2 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验	218
6.1	概述	158	8.2.3 浪涌抗扰度试验	220
6.2	通信方式	158	8.2.4 射频辐射抗扰度试验	223
6.2.1	有线通信方式	158	8.2.5 工频磁场抗扰度试验	224
6.2.2	无线通信方式	161	8.2.6 脉冲磁场抗扰度试验	227
6.3	通信协议	163	8.2.7 阻尼振荡磁场抗扰度试验	228
6.3.1	总线协议	163	8.3 本章小结	230
6.3.2	以太网协议	164	思考题	230
6.4	通信功能设计实例	167	习题	230
6.4.1	箱式变电站在线监测系统	167	习题答案	231
6.4.2	箱式变电站通信方式	168	参考文献	231
6.4.3	箱式变电站通信协议	171		
6.5	本章小结	173	第9章 电气测试技术设计实例分析	233
习题		173	9.1 概述	233
习题答案		174	9.2 主要电气设备的测试技术	233
参考文献		175	9.2.1 发电机主要参数的电气测试	233
第7章 数据分析中心软件		177	9.2.2 输电线路主要参数的电气测试	234
7.1	专家软件的作用	177	9.2.3 变压器主要参数的电气测试	235
7.2	软件开发基础	178	9.2.4 断路器主要参数的电气测试	236
7.2.1	面向对象的设计	178	9.2.5 其他电气设备一些参数的电气 测试	237
7.2.2	可选编程语言	179	9.3 实例分析	238
7.2.3	数据库管理	179	9.3.1 断路器机械特性在线监测装置 设计实例	238
7.3	数据分析基础	180	9.3.2 绝缘电阻测试仪设计实例	252
7.3.1	数据预处理	180	9.4 本章小结	261
7.3.2	故障诊断算法	186	思考题	261
7.4	智能变电设备在线监测实例	193	习题	262
7.4.1	系统介绍	193	习题答案	262
7.4.2	软件设计	193	参考文献	263
7.4.3	软件实现	203		
7.5	本章小结	207	第10章 电气测试安全技术	264
思考题		207	10.1 电气测试事故	264
习题		208	10.1.1 电气事故的特点	264
			10.1.2 电气测试不当对人的影响	264
			10.1.3 电气测试不当对设备的影响	266

10.2 电气测试安全措施·····	266	11.7 智能云技术·····	287
10.2.1 电气安全测试标准·····	266	11.8 大数据·····	289
10.2.2 被测电气设备的安全措施·····	268	11.9 本章小结·····	292
10.2.3 电气测试常用的安全措施·····	270	思考题·····	292
10.3 电气测试人员的安全要求·····	273	习题·····	292
10.4 本章小结·····	274	习题答案·····	292
思考题·····	274	参考文献·····	293
习题·····	275	附录 A 测试仪表设计工具表·····	295
习题答案·····	275	附录 B 软件开发工具表·····	296
参考文献·····	275	附录 C 分度表·····	297
第 11 章 电气测试技术的新发展·····	277	C.1 铂电阻分度表·····	297
11.1 概述·····	277	C.2 铜电阻分度表·····	297
11.2 动态误差修正技术·····	278	C.3 铜—康铜热电偶分度表·····	298
11.3 传感器自评估技术·····	279	C.4 铂铑 10—铂热电偶分度表·····	298
11.4 多传感器数据融合技术·····	281	C.5 镍铬—镍硅热电偶分度表·····	299
11.4.1 数据融合技术的概念·····	281	C.6 镍铬—铜镍热电偶分度表·····	299
11.4.2 数据融合在厂用变电站智能辅助 系统管控平台中的应用实例·····	282	附录 D 电气测试技术常用符号表·····	300
11.5 虚拟测试技术·····	283	附录 E 电气测试技术英文简称汇总表·····	302
11.6 物联网技术·····	285		

第1章 绪 论

1.1 电气测试技术

电气测试技术广泛应用于国民经济和科学技术的各个领域，其相关技术是电气领域相关工作人员的必备知识。电气测试技术除了运用电子测量原理、方法和设备对各种电气参量进行测试，还通过各种敏感器件和检测装置获取电气设备运行状态参数及故障信息，是保障电气设备稳定运行的必备手段。近几十年来计算机技术和微电子技术迅猛发展，新型传感器、物联网、智能云等高新技术不断涌现，电气测试技术迎来了新的发展机遇。

1. 电气测试的意义

电力系统由发电、变电、输电、配电、用电五大环节组成，涵盖了发电机、架空线、变压器、电力开关、互感器等各种电力设备，是一个十分庞大的系统。在该系统运行过程中，不仅要合理分配发电、用电比例，还要确保电能质量、保证用户的正常用电，必须不间断地对电压、电流、频率、电功率等运行参数进行测量，以得出合理的发电、输电、配电运行方案并调度执行。

同时，电力设备长期处于电磁场、热场、机械变形、化学腐蚀及其他恶劣环境下，会出现绝缘水平降低、机械结构变形、化学成分变化等异常情况，这些改变在短期内可能不会影响电力系统的正常运行，但随着运行时间加长，会演变成短路、断路、失效等恶性故障，直接危害到电力系统的稳定性和安全性。这就需要通过利用各种检测元件和装置对各种设备运行状态和环境进行有效的监测，及时获取信息并处理异常状况。

2. 电气故障的类别

通常将电气设备的电气故障分类如下。

1) 损害性故障和预告性故障

损害性故障是设备已经发生损坏的严重故障，如电机绕组断线、变压器匝间绝缘击穿等。对于这类故障，在排除掉造成设备损坏的各种非正常因素之后，可以通过修复或更换设备消除故障。

一些故障属于预告性故障，如电力电缆绝缘水平下降、电机温升偏高等。虽然相应的设备尚未损坏，还可以短时间内继续使用。但如果长此下去，将影响设备的正常性能，甚至演变成损坏性故障。

2) 使用故障和性能故障

电气设备的某些故障对设备本身影响不大，但会导致设备不能满足使用要求，这种故障称为使用故障。例如，因发电机本身原因输出的电压和频率偏低，虽对发电机本身影响不大，但不能满足电力系统对电压和频率的要求。

有些故障虽然不影响使用，但对设备性能有一定的影响，这类故障称为性能故障。例如，只要变压器输出电压正常，就不影响设备正常使用。但若变压器空载损耗增加，说明变压器内部铁芯存在问题，该故障会增加变压器内部发热，降低变压器本身的性能。

电气故障的原因是多种多样的，表征劣化程度的指标也各有不同，其故障特性分类并不明确，需要根据设备实际运行环境进行多方法、多角度的综合分析。

3. 电气测试对象

为了保证电力系统良好运行,需要在发电、变电、输电、配电、用电等环节进行必要的电气参数测试,获取各环节相关电力设备的各种运行与维护参数。各个环节中须进行测试的对象众多,且同一对象往往还涉及多种测试参数。例如,发电环节中的汽轮发电机,离线试验主要项目涉及定子绕组的绝缘电阻/直流电阻、转子绕组的绝缘电阻/直流电阻、转子绕组交流耐压等;带电监测内容主要有定子监测、转子监测、励磁机/永磁机监测、励磁变压器监测等。

对每一部件单元的监测又可能包含多个被测量。例如,发电机定子监测需要测量的特征量包括端部的磁屏蔽、铜屏蔽温度,铁芯温度,绕组端部振动,局部放电,定子绕组温度。

输电环节中的输电线路离线试验主要项目涉及绝缘电阻、杆塔接地电阻、红外线测温等;在线监测内容主要有气象监测、导线温度监测、微风振动监测、等值覆冰厚度监测、导线舞动监测、导线风偏监测等。对每一监测内容都可能包含多个被测量。例如,输电线路微风振动监测需要测量的特征量包括导地线振幅、导地线频率、导地线振动时间、导地线振动波形。

变电环节中的变压器离线试验主要项目涉及绕组连同套管的直流电阻、绕组连同套管的交流耐压等;在线监测内容主要包括铁芯、绕组、套管、变压器油、风机、油泵、油色谱等。其中,变压器套管需要测量的特征量包括电容性电流、等值电容、介质损耗因数。

断路器作为电力系统中重要的开关设备,其离线试验主要项目涉及绝缘电阻、交流耐压、单相导电回路电阻、油断路器操作机构等;在线监测主要内容包括分合闸线圈电流、触头行程时间特性、储能电机电流、SF₆气体密度、电气特性等。其中,触头行程时间特性监测需要测量的特征量包括分合闸时间、速度、行程等。

1.2 电气测试技术发展历程

从 1743 年俄国学者 L.B.黎赫曼制造出第一台有刻度的验电器开始,测试技术经过了两百多年的发展,实现了由简单到复杂、由单一化的仪器仪表到复杂的测试系统的过程。这些发展是依靠着多方面的技术进步共同驱动的,如传感技术、数字化处理技术、信息通信技术、分析诊断技术等。

1. 古典测试技术

从 1836 年出现的可动线圈式检流计、可动磁针式检流计开始,一直到 20 世纪 40 年代,这一时期被称为古典式电工仪器仪表阶段。在这一阶段,电工学理论得到了很大发展,库仑定律、安倍定律、毕奥-萨伐尔定律、法拉第电磁感应定律和麦克斯韦电磁场理论先后被提出并验证。上述理论及新材料的出现,使得古典式电工仪器仪表在测试对象范围及测量精度方面都有了很大突破。

2. 系统测试技术

20 世纪 50 年代到 70 年代期间,数字电子技术和微型计算机技术经历了从萌芽到迅速发展的时期。在它们的推动下,电气测试技术也不断进步,特别是 20 世纪 70 年代出现的故障诊断算法思想,标志着电气测试系统故障诊断技术的开端。另外,模拟电测仪器仪表也被逐步出现的智能仪器、PC 仪器、VXI 仪器、虚拟仪器等微型化仪器代替。20 世纪 80 年代电气测试技术向系统级发展,其中最为代表的在线监测系统可以在一次设备带电的工况下自动进行信号采集、数据分析、数据存储,并以所需要的方式输出测试结果。20 世纪 90 年代末至 21 世纪初,系统级电气测试设备不断地应用于各个领域,电力行业中几乎所有环节都引入了在线监测系统,关键电力设备运行参数的测试和评估逐步开展。

3. 智能电网电气测试技术

2009年5月,在北京召开的“2009特高压输电国际会议”上正式发布了中国建设“坚强智能电网”的概念,我国的智能电网建设便开启了一个新的篇章。智能电网是一个极其复杂的大系统,对其实施有效监控十分艰难。根据控制学要求,对一个系统实施有效控制,必须首先能够通过直接或间接的手段对该系统进行有效地监测。电气测试技术在智能电网系统监测、分析、控制中起着基础性作用,是保证智能电网可观测性和可控性的前提,其作用如图1-1所示。

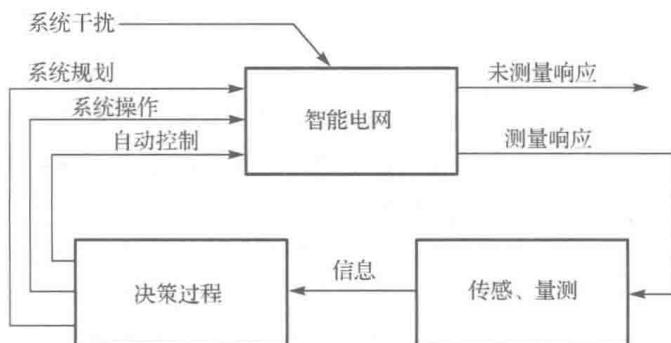


图 1-1 智能电网测试技术作用

相比于传统的电力系统,以智能电网为背景的现代电气测试技术在诸多领域都有所突破,大量的新型传感器、物联网、高速通信网络、高精度同步对时系统、故障诊断算法、智能云技术等不断被采用,使设备状态评估与故障预警也成为可能,广域电力系统的可观测性和可控性也得到大幅度提升,进而为避免电力系统的非计划停电事故提供了坚实的信息基础。

1.3 电气测试关键技术

电气测试系统通常由传感器、信号调理电路、A/D 转换电路、微处理器、人机接口、上位机软件组成。除信号采集、数据存储、显示等常规功能外,坚强智能电网构架下的先进电气测试系统还具有设备运行状态分析、寿命预测等高级功能,相关技术体系涵盖了信号检测、特征提取、模式识别和趋势预测等几大关键点。

1. 信号检测

电气测试系统根据特定的诊断目的,所选的检测信号须有效地反映设备的特征状态。为了使信号中的信息被精确提取,检测时必须慎重考虑信号类型、传感器特性及测试点分布等,检测方式的选择应尽可能考虑提高信噪比及稳定性。

在电气测试系统中,根据信息流的过程,信号检测环节一般可划分为传感器、检测电路、输出单元三大部分,其中检测电路又包括了信号调理电路、A/D 转换等部分,信号检测环节如图 1-2 所示。



图 1-2 信号检测环节

传感器是把被测量转换成为与之有确定对应关系且便于应用的某些物理量(通常为电量或电参数)的检测装置。传感器获得信息的准确与否,关系到整个测试系统精度的高低,如果传感器输出原始信号误差很大,即使后续调理电路等环节的精度再高,也可能难以满足整个测试系统的精度要求。

信号调理电路的作用是把传感器输出的变量转换成电压或电流信号，使之与指示仪或记录仪的输入类型和范围相匹配，或者能够作为系统的检测或反馈信号。例如，电阻式传感器要通过电桥电路把电阻值转换成电流或电压输出，由于输出信号一般比较微弱，通常要将信号进行放大处理，所以在测量电路中一般还带有放大电路。

输出单元可以是指示仪、记录仪、累加器、报警器等。若输出单元是显示器或记录仪，则该测试系统为自动监测系统；若输出单元是计数器或累加器，则该测试系统为自动计量系统；若输出单元是报警器，则该系统为自动保护系统或自动诊断系统。

2. 特征提取

电气测试系统中诸如声音信号、数字图像等通常都具有高维的数据信息，在处理此类数据之前，通常要对其进行降维，即特征提取。特征提取就是将高维数据转换成有意义的低维数据的过程。

由于特征提取减轻了维数灾难和其他高维空间的意外性质，所以在电气测试系统的众多方面都有着重要的应用。传统上，特征提取技术分为线性特征提取与非线性特征提取。主成分分析、线性辨别分析与因素分析等属于线性特征提取技术；松弛最大方差展开法、核模糊主成分分析算法、联想多层自动编码器等属于非线性特征提取技术。由于电气测试系统的数据很可能是高度复杂非线性的，非线性特征映射技术可提供线性映射技术所不具有的优势。

3. 状态判别与分类

设备的运行状态关系着整个电网的稳定工作，因此要对设备状态进行判别。目前，电力设备的诊断分类技术可分为人工诊断与计算机辅助诊断两大类。

1) 人工诊断

人工诊断是技术人员根据维修经验与理论，按照相关标准对设备进行状态评估与分类。其中，阈值判断是电气设备状态判别与分类的常规方法，但该方法具有一定的缺陷：

- (1) 判断标准过于简单，仅包含静态阈值。
- (2) 判断状态过于简单，仅包含“合格”与“超标”两种，不能进行详细的动态划分。
- (3) 项目试验周期界定模糊，不便操作。

2) 计算机辅助诊断

计算机辅助诊断是通过人工智能技术采集设备状态、分析决策，能够有效地减少主观随意性，提高决策的科学性。人工智能技术是当前电气设备状态判断与分类的有效方法，目前模糊控制、神经网络、专家知识、小波变换等人工智能算法已经开始应用于电气测试系统中，该类诊断技术具有特征提取、模式识别、模式分类及推理的能力，可用来提取设备状态特征、状态识别和故障诊断。随着现场测试数据的逐渐累积，可进一步对智能算法和模型进行完善和修正，为制定更为科学的诊断标准提供依据。

4. 趋势预测与寿命评估

电气设备运行趋势预测与剩余寿命评估有利于科学合理地安排设备检修和提高设备的可用率，电气测试系统应具有对设备运行状态进行实时在线评估和剩余寿命在线预测的功能。趋势预测主要面向故障的传播、发展，并对设备的劣化趋势做出预报，是事故预防和进行无破坏性检测的重要手段。在电气测试系统中，较为有效的预测方法是利用时序模型进行状态预测，其反映了不同时刻观测值的相关性，而这种相关现象实际上反映了设备运行状态的变化趋势。

寿命预测是指设备在规定的运行工况下能够安全运行的时间，对合理地组织生产、适时淘汰并及时购置替换设备都具有重要的意义。寿命预测可分为早期预测和中晚期预测。早期预测主要是用来确定设备的设计寿命或计算寿命，主要以理论计算方法进行；中晚期预测是指设备累计运行时间已接近

或超过设计寿命,通过其历史运行状态、测试数据作为依据,评估设备还能够继续安全运行的时间,即设备的剩余寿命。

1.4 电气测试技术应用与未来发展

电气设备测试技术主要是对电力系统各环节中设备的关键参数的测量,该技术通过信号采集、信号处理、数据通信、数据库、状态分析等功能模块,获取电气设备的运行状态,实现对电力设备的故障判别及设备劣化趋势的预判,现已应用于包括发电机、变压器、断路器、电容器、电抗器、电压互感器、电流互感器、电力电缆、输电线路、铁塔在内的各类电气设备。

电气测试技术的发展依赖于众多相关学科的理论与技术,现代科学的发展在不断促进着电气测试技术进步的同时,也不断地给测试手段提出了更高的要求,测试技术也越来越多地将各相关学科最新成果进行融合使用。尤其是近年来,计算机软件技术和微电子技术的进步,促使微型传感器、集成传感器和智能传感器取得了迅速的发展,加之信息通信技术和数字处理技术的快速发展,使电气测试技术取得了跨时代的进步。其主要体现在仪器仪表的数字化、多功能化和小型化,系统级测试方案的集成化、智能化、网络化。未来测试技术的发展主要体现在以下5个方面。

1. 测试精度更高

例如,在尺寸测试方面,已经提出了纳米级的要求,且纳米级的测量还不是单一方向的测量,而是实现3维坐标的空间测量;在电压、电流相位测量方面,相关测试装置的角差测量精度达到了 0.001° ;在时间测量方面,分辨率已经达到飞秒级,相对精度达 10^{-14} 。

2. 测试范围更大

在常规测量方面,测试技术是比较可靠的。而在一些极端参数的测试方面,测试系统的测试范围将不断扩大,如何保障精度与可靠性成为重要的着眼点。

3. 测试功能更强

随着社会的发展,需要测试的领域不断扩大,电气测试环境和条件越来越复杂,需要测量的参数也不断增多,对测试系统的功能提出了更高的要求。例如,有的测试要求仪器仪表具备联网测量功能,不但要求在不同的地域完成同步测量,还要求同时保证极高的精度和可靠性。

4. 集成化、智能化水平更高

目前,电气测试设备主要完成信息的采集、显示与传输,数据分析与判断主要通过人工或后台来实现。将来数据采集、分析、计算、故障分析、预警、数据协议转换和数据加密等模块将会逐步嵌入到现场电气测试设备中,设备的智能化和集成化水平将更高。

5. 故障诊断及状态评估

电气测试是进行电力设备运行维护的有效手段。基于在线监测与离线检修两种电气设备测试技术,发展电力设备故障诊断及状态评估体系,为设备运行状况诊断及寿命预测提供准确的依据,也是电力企业及科研机构今后的重点研究内容。

思 考 题

1. 电气测试是保障电力安全,避免电力事故的有效方法,请结合自身经历或所学课程简述电气测试的意义。
2. 谈谈你对电气测试技术的认知及其未来的发展方向。

第2章 电气测试技术基础

测量可以帮助人们发现事物发展的一般规律，在有关理论的指导下，利用仪器和设备尽量准确地获取被测参数的真实值。所谓电气测量，就是将被测的电量、磁量或电参数与同类标准量进行比较，从而确定出被测量大小的过程。因不同测量方法引起的测量误差大小各不相同，在电气测量中，除了根据测量对象正确选择和使用仪器仪表外，还必须采取合理的测量方法，掌握正确的操作技能，以便尽可能地减小测量误差。

2.1 电气测量基本概念

1. 电气测量的含义

测量是人类对自然界客观事物取得数量概念的一种认识过程。在这一过程中，人们借助专门的设备，并通过实验的方法，将被测量与已知的标准量进行比较，以测量单位表示被测量的大小。

电气测量是根据电磁现象的基本规律，用电工仪器、仪表对各种电磁量、电路参数、电信号特性等进行测量。随着自动化程度的不断提高，许多非电量也可通过相应的转换装置变成电磁量以便进行测量，所以电气测量的应用越来越广泛。

2. 电气测量的内容

- (1) 基本电磁量的测量，如电流、电压、功率、电能和磁通量。
- (2) 电路参数的测量，如电阻、电感、电容、阻抗、品质因数、损耗因数。
- (3) 电信号特性的测量，如测量信号的波形、频率及相位等。
- (4) 非电量参数，如绝缘油的气体成分、负荷原件温度、环境温/湿度等。

3. 电气测量的过程

1) 准备阶段

首先要明确被测对象的性质及测量目的，然后选定测量方式、测量方法及相应的测量仪器、仪表。

2) 测量阶段

建立测量仪器、仪表所必需的测量条件，慎重地进行操作，认真记录测量数据。

3) 数据处理阶段

根据记录的数据，考虑测量条件的实际情况，进行数据处理，以求得测量结果和测量误差。

总之，一个完整的测量过程通常必须具有3部分：被测对象、测量方法和测量设备。

2.2 电气测试常用电工仪表

2.2.1 电工仪表分类

1. 指示仪表

指示仪表的特点是能将被测量转换为仪表可动部分的机械偏转角，并通过指示器直接指示出被测量的大小，故又称直读式仪表。

按工作原理分类,指示仪表主要有磁电系仪表(C)、电磁系仪表(T)、电动系仪表(D)及感应系仪表(G);按使用方法分类,指示仪表有安装式、便携式两种。安装式仪表是固定安装在开关板或电气设备面板上的仪表,又称面板式仪表;按被测量的名称分类,指示仪表有电流表、电压表、功率表、电能表、频率表、转速表等;按准确度等级分类,指示仪表共有0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0七级;按所处环境温度分类,指示仪表有A、B、C三组类型。A组仪表适用于环境温度 $0\sim 40^{\circ}\text{C}$;B组仪表适用于 $-20\sim 50^{\circ}\text{C}$;C组仪表适用于 $-40\sim 60^{\circ}\text{C}$;按被测电流种类分类,指示仪表有交流仪表、直流仪表、交直流两用仪表。

2. 比较仪表

比较仪表是一种通过被测量与同类标准量进行比较,再确定被测量大小的仪表,其分为直流比较仪表和交流比较仪表两大类,如直流单臂电桥、直流双臂电桥、数字电桥、指零仪等。常用的测量单位及其符号如表2-1所示。

表2-1 常用的测量单位及其符号

名称	符号	名称	符号	名称	符号
千安	kA	瓦特	W	毫欧	m Ω
安培	A	兆乏	Mvar	微欧	$\mu\Omega$
毫安	mA	千乏	kvar	相位角	($^{\circ}$)
微安	μA	乏	var	功率因数	—
千伏	kV	兆赫	MHz	无功功率因数	—
伏特	V	千赫	kHz	微法	μF
毫伏	mV	赫兹	Hz	皮法	pF
微伏	μV	兆欧	M Ω	亨	H
兆瓦	MW	千欧	k Ω	毫亨	mH
千瓦	kW	欧姆	Ω	微亨	μH

3. 数字式仪表

数字式仪表是一种采用数字测量技术,以数码的形式直接显示出被测量大小的仪表。数字式仪表的种类很多,常用的有数字式电压表、数字式万用表、数字式频率表等。

2.2.2 电工仪表基本功能

测量仪表(测试系统、传感器等)是实现测量的技术手段,虽然其结构类型不同,但在实现测量任务时所具备的基本功能却是一致的。一般来说,测量仪表都具有变换、选择、标准量保存、运算比较、显示及通信6种功能。

1. 变换功能

变换是指把被测量按一定的规律转变成便于传输或处理的另一种物理量的过程。测量的关键在于被测量和标准量的比较。被测量能直接与标准量比较的场合不多,通常将被测量和标准量预先变换成两者都便于检测和比较的某个中间量 w ,再进行比较。例如,用水银温度计测量室温时,室温(被测量)被变换成玻璃管内水银柱的热膨胀位移,而温度的标准量是玻璃管上的刻度。将被测量和标准量都变换成同性质的线位移量后进行比较。可见,通过变换才能实现测量,或使测量更为方便。因而,测量仪表的变换功能是整个测量技术的核心。

变换元件的功能图如图2-1所示,设被测量为 x ,经变换后输出

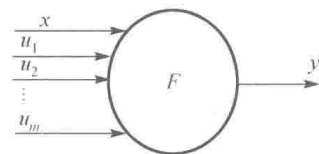


图2-1 变换元件的功能图

量为 y ，它们之间的函数关系为

$$y = F(x) \quad (2-1)$$

显然，最简单、最理想的变换规律是输出量 y 与被测量 x 呈线性关系，即 $y = kx$ ，但这只是理想情况，线性变换是变换的一种特殊形式。

2. 选择功能

在实际的测量系统中，除了被测量 x 外，还有许多其他影响量 u_1, u_2, \dots, u_m 等以不同方式和程度影响输出量 y ，如图 2-1 所示。实际上，测量仪表的输出量与输入量之间的关系是多变量函数关系，即

$$y = F(x, u_1, u_2, \dots, u_m) \quad (2-2)$$

测量仪表除了特定的输出与输入的关系外，不希望 u_1, u_2, \dots, u_m 等影响量对 y 起作用。因此，仪表应具有选择有用信号、抑制其他一切无用信号的功能。

3. 标准量保存功能

任何一个测量仪表都保存有标准量（或标准中间量），以便直接或间接地与被测量比较。在模拟仪表中，标准量一般以仪表的刻度（盘）形式予以保存；而数字仪表中，一般以特定的脉冲或标准时间段作为标准量保存下来。

显然，测量仪表所保存的标准量精度的高低，将直接影响该仪表的精度。

4. 运算比较功能

一般经变换后的被测量，能直接或间接地与测量仪表所保存的标准量进行比较。在模拟仪表中，比较过程由测量者对刻度（盘）的读数来完成；而数字仪表中，将被测的模拟量转换成数字量（A/D 转换），最终由显示器来显示被测量的数值。

目前，大多数测量仪表都包含有极强的运算功能，如备有微处理器的传感器。

5. 显示功能

测量的最终目的就是将测量结果用便于人眼观察的形式表示出来。因此，显示功能是人机联系的一种基本功能。它将测量结果以指针的转角、记录的位移、数字及符号、文字或图像显示出来。测量仪表有模拟显示和数字显示两种显示方式。

6. 通信功能

随着电工仪表的智能化发展，通信功能成为了电工仪表的一项重要功能。由于测量环境的复杂性，根据仪表实际运行的环境，设计出适用的通信功能，用于传输测量数据。目前，电工仪表常用的有 RS-485、GPRS、3G、Wi-Fi、红外及蓝牙等通信方式。

2.2.3 电工仪表基本性能

评价仪表的品质指标是多方面的，但作为仪表的基本性能，主要是衡量仪表测量能力的指标，如精确度、稳定性、测量范围、输入-输出特性等。

1. 上/下切换值、切换中值及切换差

上切换值：在输入变量由小增大时，使输出信号状态改变的输入信号值。

下切换值：在输入变量由大减小时，使输出信号状态改变的输入信号值。

切换中值：上切换值和下切换值的中值。

切换差（差障）：上切换值和下切换值之间的代数差。

切换中值是位式作用仪表所在系统的控制目标值。切换差越小，意味着仪表越灵敏。但在输入变量经常变动时，输出信号改变过分频繁也未必有利，应视具体情况选择切换差的大小。引起切换差的原因主要有传动机构的间隙、运动部件间的摩擦和磁性元件间的磁滞现象。

2. 测量范围、测量上下限和量程

测量范围是指测量仪表按规定的精确度进行变换的被测量范围，其最低值和最高值分别称为测量下限和测量上限，简称为下限和上限。

测量范围表示法：下限值至上限值，如 $0\sim 100^{\circ}\text{C}$ 。

量程：测量上限值和下限值的代数差。

3. 精确度和相对百分误差

测量值与真值接近的程度称为精度（精确度）。

仪表的精度通常用相对百分误差（又称引用相对误差） γ_0 来衡量，其中， Δx_i 表示绝对误差，由被测值 x_i 与真值 x_0 的差值决定

$$\gamma_0 = \frac{|\Delta x_i|}{x_0} \times 100\% = \frac{|x_i - x_0|}{x_0} \times 100\% \quad (2-3)$$

精度等级是指仪表在规定的工作条件下允许的最大相对百分误差。代表精度等级的数字越小，仪表的精度越高。

4. 稳定性

仪表指示值稳定性的指标有两个：一是时间上的稳定性，以稳定度表示；二是仪表外部环境和工件条件变化所引起的示值不稳定，以各种影响系数来表示。

1) 稳定度 η

仪表的稳定度是由仪表内部的随机变动因素引起的。例如，仪表内部的某些因素因周期性变动、漂移或机械部分的摩擦力变化等引起仪表的示值变化。通常它以精密度的数值和时间长短一起表示。例如，电压波动在 8h 内引起示值变化为 1.3mV，则可写成稳定度 $\eta = 1.3\text{mV}/8\text{h}$ 。

2) 环境影响

使用仪表时的周围环境，如室温、大气压、振动等外部状态变化引起仪表示值的变化，以及电源电压、波形、频率等工作条件变化引起仪表示值变化，统称为环境影响，用影响系数表示。

5. 灵敏度和灵敏限

灵敏度是表征测量仪表对被测量变化的灵敏程度，是指仪表在稳态条件下输出变化与输入变化的比值，用 S 表示。

$$S = \Delta\alpha / \Delta X \quad (2-4)$$

式中， $\Delta\alpha$ 为仪表输出示值的变化量； ΔX 为被测参数的变化量。

S 是仪表静态特性曲线上的各点斜率，若输入-输出特性为线性特性，则 S 为常数，否则为变量。 S 是有量纲的。

灵敏限是引起仪表示值可见变化的被测参数的最小变化量。灵敏限又称分辨率，它表示测量仪表响应或分辨输入量微小变化的能力。一般来说，仪表的灵敏限应不大于仪表允许绝对误差的一半。允许绝对误差为量程与精度等级乘积的相对百分误差。

6. 死区

死区是指当测量仪表输入量发生变化时，不会引起输出量可察觉变化的有限区间。在这个区间内，