

THE HANDBOOK FOR ELECTRICAL ENGINEER

电气工程师手册

《电气工程师手册》编辑委员会 编
周鹤良 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

TM-62/45

2008

电气工程师手册

《电气工程师手册》编辑委员会 编
周鹤良 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

本书为综合性电气技术工具书。主要包括电气工程基础、电工设备与电工材料、电力系统、电能应用、电气控制与自动化等5部分,全面、系统地介绍了电气工程各专业主要技术内容,反映了电气工程各领域发展的前沿技术,既有理论性,又有实践性。主要为读者提供相关或相邻专业的技术知识和常用的数据资料,在日常工作和学习中起到备查、提示和指导的作用。

本书内容全面、实用便查、注重发展、作者权威,适合从事电气工作的技术人员使用,也可供其他有关专业人员和高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

电气工程师手册/《电气工程师手册》编辑委员会
编. —北京:中国电力出版社, 2008

ISBN 978-7-5083-5459-0

I. 电… II. 电… III. 电气工程-技术手册 IV. TM-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第053915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>

策划编辑:周娟 责任编辑:齐伟 高军 杨淑玲 吕允英

责任印制:陈焊彬 责任校对:罗凤贤

北京盛通印刷股份有限公司印刷·各地新华书店经售

2008年4月第1版·第1次印刷

787mm×1092mm 1/16·111.75印张·3300千字

定价:168.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

本社购书热线电话(010-88386685)

《电气工程师手册》

编辑委员会

名誉主任委员：饶芳权

主任委员：周鹤良

副主任委员：赵争鸣 徐德鸿 荣命哲 程时杰
徐殿国 刘广峰

委员：(按篇名顺序排序)

詹琼华 倪光正 李盛涛 王友功

孙亲锡 王小海 陈隆道 荣命哲

钟力生 陈乔夫 夏胜芬 孙剑波

辜承林 曹晓珑 钱照明 徐德鸿

陈昌渔 周双喜 王西田 周羽

王革华 赵争鸣 涂光瑜 陈陈

刘东 程时杰 程浩忠 徐殿国

赵荣祥 陈辉明 金天均 李胜川

陈立铭 赵光宙 韦巍 耿英三

成永红 王凌云 贺益康 章玮

秘书长：周娟 奚大华

前 言

电气工程主要研究在电能生产、传输及其使用过程中，各类电气设备和系统设计、制造、运行、测量和控制等方面的工程技术。电能作为现代最主要的二次能源，在生产和生活中获得了极广泛的应用，其生产和传输已形成“电力工业”，运行与管理的科技含量迅速提高；同时，电能的生产、传输、使用及其控制设备，也在不断地发展或更新，逐步与电子计算机技术、微电子技术、电力电子技术相结合，形成新型的电工技术与设备，电气工程在国民经济发展中正发挥着越来越重要的作用。为了向电气工程领域的工作者提供更好的服务，2005年开始，中国电工技术学会和中国电力出版社共同组织该领域的知名专家、学者和教授，编辑出版《电气工程师手册》（以下简称《手册》）。

该《手册》全面、系统地介绍了电气工程各专业主要技术内容，既有理论性，又有实践性，是一本综合性电气技术工具书，主要为读者提供相关或相邻专业的技术知识和常用数据资料，在日常工作和学习中起到备查、提示和指导的作用。该《手册》的出版必将为广大电气工程技术人员提供更便利、更快捷的帮助。

《手册》在编写过程中本着“内容全面、实用便查、注重发展、作者权威”的方针，具有以下特点：

1. 内容全面，语言简练。《手册》高度概括了电气工程各专业最基本、最常用以及最新的技术内容，用简练的语言对电气工程所涉及专业领域中的复杂系统进行了归纳总结，尽量做到卷小面广。

2. 实用便查，方便读者。《手册》收录了电气工程师最常用的数据和资料，按专业进行了归纳整理，方便广大电气专业工作者在实际工作中查阅。

3. 注重发展，突出新技术。《手册》在编写过程中结合电气领域的新发展以及新标准、新技术，尽量使书中的内容反映最前沿电气技术发展，尤其是在电力电子技术和新能源发电（核能发电、风力发电、太阳能光伏发电、生物质能发电）等领域都做了全新的阐述。

4. 作者权威，数据准确。《手册》由中国电工技术学会组织编写，由原机械工业部电业局局长、现中国电工技术学会名誉理事长周鹤良担任主编，汇集了清华大学、浙江大学、上海交通大学、华中科技大学、西安交通大学和哈尔滨工业大学等全国知名高校和科研院所的著名专家教授，代表了国内电气工程领域的最高水平。

值此《手册》出版之际，谨向参与《手册》编纂出版工作的全体编审人员及有关单位表示诚挚的感谢。在此，特别鸣谢三垦力达电气（江阴）有限公司和杭申控股集团有限公司对该《手册》出版工作给予的大力支持。对于书中存在的不妥或缺陷，恳请广大读者提出宝贵意见，以便今后修订和完善。



编辑说明

在科学技术迅猛发展的今天，科技创新已成为国家发展的重要战略。快速发展的电气技术，使原有电气工程方面的工具书难以满足现代科技人员的现实需要，他们迫切希望了解电气工程各专业领域的科研成果、设计经验和动态，获得最新的技术资料，以解决实际工作中遇到的各种问题。为满足广大读者需求，中国电工技术学会和中国电力出版社共同组织国内知名高校和科研院所的权威专家教授编纂了此书《电气工程师手册》。

一、篇目框架结构

《电气工程师手册》按照电气工程基础、电工设备与电工材料、电力系统、电能应用、电气控制与自动化的顺序编排，共分5部分28篇。

第1部分电气工程基础 包括常用数据与资料、电气工程理论基础、高电压物理基础、电气安全4篇。

(1) 常用数据与资料包括计量单位和量纲、物理常数和常用材料物理性能、电工标准、数学公式等章节。

(2) 电气工程理论基础包括电磁现象及其物理规律性、电磁场的分析与计算、电磁场优化设计基础、电网络分析、电网络综合、磁路、电子技术基础、电能质量、电磁兼容等章节。

(3) 高电压物理基础包括电介质的极化、电导与损耗，气体放电的基本物理过程，气体间隙的击穿强度，气体中的沿面放电，液体和固体介质的击穿等章节。

(4) 电气安全包括电气安全常用名词术语，安全电压与安全电流，电气装置的接地和接零，电气装置的绝缘、屏护和间距，防雷保护，触电急救等章节。

第2部分电工设备与电工材料 包括电工材料、电气测量和仪表、开关电器、限制电器、变压器与互感器、电机、电线电缆、电力电子器件与设备、高电压试验技术9篇。

(1) 电工材料包括绝缘材料，半导体材料，导体和超导材料，电工合金，磁性材料，特殊光、电功能材料等章节。

(2) 电气测量和仪表包括电气测量概论、电量测量、磁量测量、非电量的测量、常用电测仪表、自动测试系统等章节。

(3) 开关电器包括开关电器基础、低压开关电器、高压开关电器、成套开关设备等章节。

(4) 限制电器包括电抗器、电压互感器和电流互感器、避雷器等章节。

(5) 变压器与互感器包括变压器的额定值、技术标准，变压器原理，变压器的设计要点，变压器试验，干式电力变压器，变流（整流）变压器，互感器等章节。

(6) 电机包括基础知识、同步电机、异步电机、直流电机、控制电机、新型特种电机、电机的运行与控制、电机的选择与维护等章节。

(7) 电线电缆包括裸电线与裸导体制品、绕组线、电气装备用绝缘电线、电气装备用电缆、输配电电力电缆、通信电缆、光纤和光缆等章节。

(8) 电力电子器件与设备包括概论、电力电子器件、电力电子电路、电力电子技术应用和装置等章节。

(9) 高电压试验技术包括高电压试验基本要求、交流高电压试验设备、直流高电压试验设备、冲击电压发生器、冲击电流发生器、稳态高电压的测量、冲击高电压的测量、绝缘监测和诊断等章节。

第3部分电力系统 包括火力发电与水力发电，核能发电，新能源发电，输电系统，配电系统，电力系统继电保护、通信及监测与控制，电力系统规划与电力市场7篇。

(1) 火力发电与水力发电包括火力发电、水力发电、发电厂电气系统等章节。

(2) 核能发电包括核能发电概述,核能发电的理论基础,压水堆核电厂系统,压水堆核电厂仪表和控制系统,核电厂安全,核电厂的调试、运行和退役等章节。

(3) 新能源发电包括概论、风力发电、太阳能光伏发电、生物质能发电、地热发电、海洋能发电等章节。

(4) 输电系统包括输电系统概述、交流输电、高压直流输电、输电线路、变电所等章节。

(5) 配电系统包括配电系统的组成及基本结构,配电系统的分析模型及信息模型,配电系统中的开关、变压器及线路设备,配电系统电源、负荷及电能质量,配电自动化及配电管理系统,配电系统节能与需求侧管理,配电设备及系统试验等章节。

(6) 电力系统继电保护、通信及监控与控制包括电力系统继电保护、电力系统通信、电力系统调度自动化、电力系统自动控制等章节。

(7) 电力系统规划与电力市场包括电力负荷预测、电力系统电源规划、电力网络规划、电力市场、需求侧管理等章节。

第4部分电能应用 包括电气照明、电加热、电化学与电池3篇。

(1) 电气照明包括电气照明技术基础、电气照明系统、智能电气照明网络、电气照明的典型应用等章节。

(2) 电加热包括电加热概论、电阻加热、电弧炉、感应加热、特殊加热设备等章节。

(3) 电化学与电池包括电化学基础及应用、电化学应用技术、化学电源等章节。

第5部分电气控制与自动化 包括自动控制与系统、电器设备智能化、电力设备在线检测与故障诊断、楼宇自动化、电气传动控制5篇。

(1) 自动控制与系统包括总论、经典控制理论、现代控制理论、智能控制、其他控制技术、自动控制系统等章节。

(2) 电器设备智能化包括电器设备智能化概论、电器设备的智能监控、电器的智能操作、电器智能化的关键共性技术、电器智能化技术在配电网自动化中的应用等章节。

(3) 电力设备在线检测与故障诊断包括电力设备在线检测与诊断概述、发电机在线检测与诊断、电力变压器在线检测与诊断、GIS在线检测与诊断、断路器在线检测与诊断、电力电缆在线检测与诊断、避雷器在线检测与诊断、绝缘子在线检测与诊断、电容型设备在线检测与诊断、电力设备状态诊断与寿命评估技术等章节。

(4) 楼宇自动化包括楼宇自动化的一般概念、常用检测装置与执行装置、楼宇自动化监控系统、楼宇自动化系统通信协议、系统集成、系统设计与主要产品介绍等章节。

(5) 电气传动控制包括概述、直流调速传动、交流调速传动、电气传动控制设备、电气传动应用实例等章节。

二、特点

内容全面,语言简练;实用便查,方便读者;注重发展,突出新技术;作者权威,数据准确。

三、读者对象

《电气工程师手册》是一部全面系统概括电气工程各专业主要技术内容的综合性工具书,主要适用大专(或相当于工程师)及以上水平从事电气工作的技术人员,也可供其他有关专业人员和高等院校的师生参考。

四、作者介绍

《电气工程师手册》由中国电工技术学会组织编写,汇集了清华大学、浙江大学、上海交通大学、华中科技大学、西安交通大学和哈尔滨工业大学等全国知名高校和科研院所的著名专家教授,代表了国内电气工程的最高水平。各篇的主编、执笔和主审的署名均置于相应篇首。

三垦力达电气推动中国电气传动领域的发展

1986年,香港力达企业集团的创始人陆斐董事长以企业家独特的判断力,将日本三垦的VVVF电源产品引入到中国大陆并命名为变频器。从而推动了交流变频调速在中国电气传动领域的应用与发展。1999年香港力达有限公司在中国江阴成功设立了三垦力达电气(江阴)有限公司,将三垦变频技术、生产及严格的品质管理体系引入中国,并引进了整条生产流水线和完善的检测设备,同时加强了市场推广和扩大销售网络,通过20多年的努力,奠定了稳定的三垦用户群体;同时也建立了良好的技术服务体系,并为中国培养了大批变频器应用人才。

2003年9月日本三垦入股三垦力达电气(江阴)有限公司,企业走上了自主研发的发展道路。公司于2005年4月在上海张江高科技园区成立了技术研发部,将三垦力达定位成三垦变频器的研发、生产基地,掀开了企业发展的新篇章。

三垦变频器一直与世界微计算机控制技术、电力半导体技术、交流调速控制理论同步发展,并率先实现产品化。在第一个推出了基于GTR(大功率晶体管)的V系列变频器后,相继推出了基于16位单片机的高可靠性MF系列变频器,第一个推出了具有液晶显示面板及针对化纤行业卷绕横动扰动功能的L系列变频器,率先推出了基于无速度传感器矢量控制技术及32位RISC的高性能、静音式I系列通用变频器,并针对中国巨大的恒压供水行业需求,第一个推出了恒压供水专用选购件IWS,可通过一台变频器控制多台水泵实现变频泵固定方式或循环方式运行,在中国变频恒压供水领域取得了优异的业绩。

SAMCO-VM05系列变频器是三垦推出的五代高性能、多功能静音式通用变频器,它具有过载能力为150%和120%两个系列,最大功率达到315kW。在通用变频器的基础上又推出了卷绕行业专用变频器HALLMARK-WD系列、高速纺织专用变频器HALLMARK-HW系列及专用于EPS应急电源的HALLMARK-IU系列电源,将变频器技术从调速领域拓宽到了电源领域。

2006年三垦力达推出了高可靠性的SUPERDRIVE-A7系列高压变频器。采用单元串联式结构,双32位高性能DSP及FPGA的控制技术为其先进的控制功能提供了强有力的支持。6kV系列最大功率2500kW、10kV系列最大功率4500kW。在电源设计上采用双回路冗余技术、在功能上具有控制电源上电开机自检、自动的节能功能提高了电机的运行效率,可实现进一步节能、自动节能计算功能帮助用户实时掌握节约电费的情况、正反转的转速跟踪功能实现了风机类负载在自由运转状态下的起动、人性化的操作界面设计使用户操作更直观方便、完善的保护功能大大地减小了故障的发生、低电压补偿功能使输入电源即使发生瞬时停电也能实现不停机的可靠运行、基于模糊控制理论的智能PID控制技术使用户可方便地实现高性能的闭环控制。从此三垦力达电气(江阴)有限公司成为国内为数不多的集高低压变频器的技术研发、生产及市场营销为一体的专业变频器生产厂家。

2008年三垦力达推出了代表当今最新技术的SAMCO-SVC06系列高性能、高端低压通用变频器。此系列变频器采用先进的无速度传感器矢量控制技术,先进的电机参数辨识及在线估计技术,先进的磁链估计技术,无论是在调速范围还是在动态响应、控制精度及低频转矩上均得到了很大的提高。无速度传感器控制模式下,调速范围达1:200(以50Hz为基准)、电流环响应速度达2000rad/s、速度环响应达100rad/s、速度控制精度达 $\pm 0.05\%$,在低频时的转矩输出为150% 1min及瞬时200%的转矩输出能力;有速度传感器控制模式下,调速范围达1:1000(以50Hz为基准)、电流环响应速度达2000rad/s、速度环响应达250rad/s、速度控制精度达 $\pm 0.01\%$ 。除了优越的控制性能外,它还具有优越的控制功能,可方便地实现速度控制、位置控制及转矩控制,可广泛地应用于印刷、造纸、机床、搬运机械等高精度、高性能应用场合。

三垦力达始终走在行业的前列,为行业发展做出了表率。三垦力达第一个将变频器商品化并引入国内市场,使国内企业与世界同步认识和应用电力电子高科技产品,为行业的形成奠定了基础。并且成立了自己的行业协会,为中国培养了大批变频器应用和销售推广人才也让更多客户享受到了高科技为他们带来的效益。

“引进来,走出去”是中国变频器企业成功发展的必经之路。我们即将进一步引入新技术,将之用于新型变频器的研发及以变频器产品为核心,拓展到相关的电力电子产品的研发、生产与销售中去,而不仅仅是局限在变频器这一个领域的发展将成为三垦力达未来的发展方向。

杭申控股集团有限公司

杭申集团创建于1996年，以2000元资本、5个人、为上海华通开关厂生产电器胶木配件、产值仅几万元起家。之后进入低压电器行业，经过40多年艰苦创业，励精图治，百折不挠，坚持科技创新，走研发制造中、高档产品之路，核心竞争力不断提升，在上千家制造企业中脱颖而出，成为低压电器行业重点骨干企业之一。随后，杭申集团跳跃式发展，人力、物力、财力等综合实力大增，2003年收购了苏州变压器厂，2004年又收购了已有百年历史的“中华老字号”上海华通开关厂，一举拓展了电气主业，主导产品覆盖了252kV以下的高低压电器元件、高低压成套开关设备、变压器等，拥有“杭申”电气、“华通”开关、“江灵”变压器在国内享有盛誉的三大知名品牌。杭申商标为中国驰名商标，已成为集研发、制造、销售为一体的著名电气专业制造企业，是中国电气工业100强企业。

杭申集团总部地处杭州市萧山区，下设杭州之江开关股份有限公司、上海华通开关厂有限公司、苏州杭申星州变压器有限公司等12家子公司，在杭州、上海、苏州、南宁、泰国曼谷等建有专业生产制造基地。现有职工1600余人，占地面积28万m²，总资产20亿元，净资产7亿元，2007年销售预计达15亿元。杭州之江开关股份有限公司专业生产“杭申”牌HS系列智能型万能式断路器、智能型塑料外壳式断路器、智能型剩余电流动作断路器、智能型双电源自动切换装置、微型断路器、交流接触器、负荷隔离开关、电涌保护器等低压电器产品及高低压成套开关设备，其中HS系列万能式断路器为中国名牌产品；上海华通开关厂有限公司专业生产“华通”牌126kV、252kV GIS为代表的智能型高压电器产品及高压断路器和隔离开关等；苏州杭申星州变压器有限公司专业生产“江灵”牌35kV级及以下油浸式、干式电力变压器、磁性调压器、特种变压器、电抗器、非晶合金变压器等产品。产品畅销全国各地，大量用于国家重点工程，并出口加拿大、伊朗、泰国、俄罗斯、新加坡等十多个国家。

杭申集团十分重视人才与创新，分别与浙江大学、西安交通大学、清华大学、河北工业大学、华北电力大学、东北电力大学、上海电器科学研究所(集团)有限公司、西安高压电器研究所、天津电气传动设计研究所、武汉高压电器研究院、中国电力科学研究院等国家重点大学、科研单位建立了长期的合作关系，共同研发高新技术产品。杭申集团还建立了国家级博士后工作站、省级技术研发中心，是国家级高新技术企业，拥有一大批包括享受国务院特殊津贴的资深专家在内的中高级专业技术人员，自主研发的产品始终处于国内领先水平，多次获得国家级、省级科技成果进步奖和新产品奖，拥有近百项专利，强大的技术实力为企业的快速持续发展奠定了雄厚的基础。

杭申集团1998年通过了ISO 9000质量管理体系认证，之后又通过了ISO 14000环境管理体系、二级计量检测体系及企业标准化良好行为AAA级等认证，全面推行了卓越绩效管理，是机械工业管理进步示范企业。杭申集团多年来投巨资进行技术改造，从德国、美国、日本、瑞士、意大利引进了近百台世界最先进的加工、试验设备，针对HS系列低压断路器定制了目前国内最先进的全智能、全自动化装配检测流水线，实现了设计、加工、制造网络化，检测自动化，保证了产品的制造精度、工艺一致性和质量稳定可靠，产品均按国家规定取得了CCC认证和生产许可证，获质量信得过、无投诉产品称号，是质量诚信明星企业，全国诚信经营信誉十佳企业。

向国际品牌挑战，创民族电气品牌，一直是杭申人的梦想。杭申集团“十一五”期间将继续加大投入力度，继续走创新道路，继续深化品牌建设，立志通过几年、十几年甚至几十年把杭申打造成世界名牌，把公司建成世界一流的电气设备制造供应商。

目 录

前言
编辑说明

第 1 篇 常用数据与资料

第 1 章 计量单位和量纲	3	3.2.3 地方标准	22
1.1 法定计量单位	3	3.2.4 企业标准	23
1.2 常用的物理量的单位	4	3.3 国际标准和国外先进标准	23
1.3 单位换算关系	12	3.3.1 国际标准	23
1.3.1 时间和空间的单位换算	12	3.3.2 国外先进标准	23
1.3.2 力学单位换算	13	3.3.3 产品质量认证	23
1.3.3 热学单位换算	14	3.3.4 国际标准的编号	23
1.3.4 电学和磁学单位换算	15	3.4 标准文献及其检索	23
1.3.5 光学和声学单位换算	15	3.4.1 标准文献的作用及其概况	23
1.3.6 核反应和电离辐射单位换算	15	3.4.2 标准文献的检索	24
第 2 章 物理常数和常用材料物理性能	16	3.4.3 标准文献数据库	24
2.1 物理常数数据	16	3.5 电工标准	24
2.1.1 物理和电学的常数表	16	3.5.1 常用的电工标准	24
2.1.2 常用电磁波谱频率区段	16	3.5.2 标准电压	25
2.1.3 大气压力、温度与海拔的关系	16	3.5.3 标准电流	26
2.2 常用材料的物理性能	17	3.5.4 标准频率	26
2.2.1 常用电工导体材料的电性能	17	第 4 章 数学公式	28
2.2.2 常用绝缘材料的电性能	18	4.1 数学常数	28
2.2.3 常用固体材料的机械性能	19	4.2 阶乘、排列和组合、二项式定理	28
2.2.4 部分液体材料的性能	20	4.3 复数	28
2.2.5 部分气体材料的性能	20	4.4 常用函数	28
第 3 章 电工标准	22	4.5 矩阵	30
3.1 标准和标准化的基本概念	22	4.6 微积分	31
3.1.1 标准的定义	22	4.7 矢量	38
3.1.2 标准化的定义	22	4.8 近似计算和数值计算	40
3.2 中国标准的分级和代号	22	4.9 概率和统计	42
3.2.1 国家标准	22	参考文献	44
3.2.2 行业标准	22		

第 2 篇 电气工程理论基础

第 1 章 电磁现象及其物理规律性	47	1.3 超导体	48
1.1 物质的导电性	47	1.4 等离子体	49
1.1.1 金属导电	47	1.5 电磁效应	49
1.1.2 气体导电	47	1.5.1 电热效应	49
1.1.3 液体导电	47	1.5.2 热电效应	49
1.2 物质的磁性	48	1.5.3 光电效应	50
1.2.1 顺磁质	48	1.5.4 霍尔效应	50
1.2.2 抗磁质	48	1.5.5 磁阻效应	50
1.2.3 铁磁质	48	1.5.6 压电效应	50

1.5.7 电化学效应	51	3.2 电磁场优化设计的确定类优化算法	66
1.5.8 磁光效应	51	3.2.1 最速下降法	66
1.5.9 电光效应	51	3.2.2 牛顿法	66
1.5.10 磁共振	51	3.2.3 共轭梯度算法	66
1.6 生物电磁效应	52	3.2.4 变尺度法	66
1.6.1 生物系统的电磁特性	52	3.2.5 模式搜索法	67
1.6.2 生物电磁技术	52	3.2.6 包维尔算法	67
第2章 电磁场的分析与计算	53	3.2.7 可变多面体算法	67
2.1 电磁场物理模型的构成	53	3.2.8 惩罚函数法(外点法)	67
2.1.1 电磁场的基本物理量——源 量和场量	53	3.3 电磁场优化设计的随机类优化算法	67
2.1.2 电磁场中的媒质及其电磁参数	53	3.3.1 模拟退火算法	67
2.2 电磁场的基本定律	54	3.3.2 基因算法	68
2.2.1 法拉第电磁感应定律	54	3.3.3 禁忌算法(Tabu Search Method)	68
2.2.2 安培环路定律	54	3.3.4 粒子群算法	68
2.2.3 电磁场的基本方程组——麦克斯 韦方程组	54	3.4 表面响应模型及其在电磁场优化 设计中的应用	68
2.3 静电场的分析与计算	54	3.4.1 表面响应模型	68
2.3.1 静电场的基本方程组	54	3.4.2 基于表面响应模型的快速全局 优化算法	68
2.3.2 两种媒质分界面上的边界条件	54	3.4.3 基于径向函数的表面响应模型	69
2.3.3 场分布	54	3.5 矢量优化问题及矢量优化算法	69
2.4 恒定电流的电场和磁场分析 与计算	56	3.5.1 矢量优化问题	69
2.4.1 恒定电场的基本方程组 及其分析	56	3.5.2 矢量优化问题的 PARETO 解	69
2.4.2 恒定磁场的基本方程组	57	3.5.3 矢量优化问题适值的确定	69
2.4.3 两种媒质分界面上的边界条件	57	3.5.4 矢量优化算法的评价标准	70
2.4.4 场分布	57	第4章 电网络分析	71
2.5 电路参数——电阻、电感 和电容	58	4.1 概述	71
2.5.1 电阻与接地电阻的计算	58	4.1.1 电路元件	71
2.5.2 电感——自感和互感的计算	59	4.1.2 电源	71
2.5.3 电容的计算	60	4.1.3 支路中电流、电压的参考方向 与关系式	72
2.6 电磁能量和电磁力	61	4.1.4 基尔霍夫定律	72
2.6.1 电磁能量	61	4.1.5 电路的简化	72
2.6.2 电磁力	61	4.2 电路分析的基本方法及定理	73
2.7 动态电磁场与电磁波	62	4.2.1 支路电流法	73
2.7.1 基本方程组与导出方程组	62	4.2.2 回路电流法	73
2.7.2 电磁辐射	62	4.2.3 节点电压法	73
2.7.3 均匀平面电磁波	62	4.2.4 叠加定理	74
2.7.4 集肤效应、邻近效应和 电磁屏蔽	63	4.2.5 戴维南定理和诺顿定理	74
2.7.5 涡流损耗、磁滞损耗和 电介质损耗	64	4.3 正弦交流电路	74
2.7.6 导引电磁波	64	4.3.1 正弦交流电流	75
第3章 电磁场优化设计基础	66	4.3.2 周期交流电量的有效值	75
3.1 电磁场优化设计的数学模型和 分析方法	66	4.3.3 正弦交流电量的相量表示	75
3.1.1 电磁场优化设计的数学模型	66	4.3.4 正弦交流电路中的元件欧姆定律	75
3.1.2 电磁场优化设计的分析方法	66	4.3.5 基尔霍夫定律的相量形式	76
3.1.3 电磁场优化设计的主要内容	66	4.3.6 正弦交流电路的阻抗、导纳	76
		4.3.7 正弦交流电路的功率计算	77
		4.4 谐振、互感及三相交流电路	77
		4.4.1 电路的谐振	77
		4.4.2 互感耦合电路	78
		4.4.3 对称三相正弦交流电路	78

4.5 双端口网络	79	7.1.4 集成运算放大器	102
4.5.1 双端口网络的参数	80	7.2 基本放大电路	103
4.5.2 双端口网络的等效电路	80	7.3 集成运放组成的运算电路	105
4.5.3 双端口网络的连接	80	7.4 放大器的频率特性	106
4.5.4 回转器和负阻抗变换器	81	7.4.1 晶体管和场效应晶体管的 频率特性	106
4.6 电路的过渡过程	81	7.4.2 阻容耦合放大器频率特性	106
4.6.1 换路定则和初始条件	81	7.4.3 运算放大器的频率特性	107
4.6.2 一阶电路	82	7.5 正弦信号发生器	107
4.6.3 二阶电路	84	7.5.1 文氏电桥正弦振荡器	107
4.7 分布参数电路	85	7.5.2 三点式正弦振荡器	107
4.7.1 均匀传输线方程	85	7.5.3 石英晶体正弦振荡器	108
4.7.2 无反射长线	86	7.5.4 压控振荡器	108
4.7.3 无畸变长线	86	7.6 功率放大器	109
4.7.4 无损耗长线	86	7.6.1 甲类功率放大器	109
第5章 电网络综合	87	7.6.2 乙类功率放大器	109
5.1 概述	87	7.6.3 甲乙类功率放大器	109
5.1.1 综合	87	7.7 电源电路	110
5.1.2 滤波器	87	7.7.1 单相整流电路	110
5.2 归一化和去归一化	87	7.7.2 线性直流稳压电源	110
5.3 逼近问题	88	7.7.3 开关稳压电源	111
5.3.1 基本概念和基本约束	88	7.8 信号处理和变换电路	111
5.3.2 频率变换与元件变换	88	7.8.1 有源滤波器	111
5.4 无源网络的实现	89	7.8.2 调制解调器	113
5.4.1 无源策动点函数实现	89	7.8.3 集成锁相环	113
5.4.2 模拟滤波器的无源实现	90	7.8.4 D/A转换器	113
5.5 模拟RC滤波器的有源实现	90	7.8.5 A/D转换器	114
5.5.1 直接实现法	91	7.9 逻辑门电路和组合逻辑电路	115
5.5.2 级联实现	91	7.9.1 TTL集成门电路	115
5.6 灵敏度分析	91	7.9.2 CMOS集成门电路	116
5.6.1 相对灵敏度	91	7.9.3 半加、全加和二进制加法器	116
5.6.2 滤波器常用灵敏度	91	7.9.4 编码器和译码器	117
5.6.3 多参数灵敏度	92	7.9.5 数据选择器和数据分配器	117
第6章 磁路	93	7.9.6 奇偶校验器	118
6.1 磁路与磁路基本定律	93	7.10 触发器和时序逻辑电路	118
6.1.1 磁路及其构造	93	7.10.1 触发器	118
6.1.2 磁路的物理量与参数	93	7.10.2 寄存器和移位寄存器	118
6.1.3 磁路欧姆定律	93	7.10.3 计数器	119
6.1.4 磁路基尔霍夫定律	94	7.10.4 顺序脉冲发生器	119
6.2 恒定磁通磁路	94	7.11 脉冲电路	120
6.2.1 正、逆问题的分析与计算	94	7.11.1 模拟比较器和非正弦信号 发生器	120
6.2.2 无分支磁路的计算	94	7.11.2 逻辑门组成的非正弦信号 发生器	121
6.3 交变磁通磁路	95	7.11.3 555集成定时器	121
6.3.1 无分支正弦交变磁通磁路的分析	95	7.11.4 555集成定时器组成的脉冲 发生器	121
6.3.2 含铁心线圈电路的分析	97	7.11.5 单稳态触发器	121
6.3.3 交变磁通磁路的分析	98	7.11.6 施密特触发器	122
6.4 永磁磁路	98	7.12 RAM和ROM	122
第7章 电子技术基础	100	7.12.1 RAM	122
7.1 半导体器件	100		
7.1.1 晶体二极管	100		
7.1.2 晶体三极管	101		
7.1.3 场效应晶体管	101		

7.12.2 ROM	123	8.6.3 电压波动与闪变的测量	129
7.13 可编程逻辑器件	123	8.6.4 电压波动与闪变的抑制技术	129
7.13.1 低密度可编程逻辑器件	123	8.7 电压暂降与短时间中断	129
7.13.2 高密度可编程逻辑器件	124	8.7.1 概述	129
第8章 电能质量	125	8.7.2 电压暂降与短时间中断的危害	129
8.1 电能质量概论	125	8.7.3 电压暂降与中断的特征量检测 方法	129
8.1.1 电能质量定义	125	8.7.4 电压暂降与中断的抑制	130
8.1.2 电能质量分类	125	第9章 电磁兼容	131
8.1.3 电能质量标准	125	9.1 概述	131
8.2 供电电压偏差	125	9.1.1 噪声与电磁干扰源	131
8.2.1 概述	125	9.1.2 电磁干扰耦合途径	133
8.2.2 电压偏差过大的危害	126	9.2 屏蔽	135
8.2.3 供电电压偏差的测量	126	9.2.1 屏蔽原理	135
8.2.4 供电电压偏差的控制	126	9.2.2 屏蔽效能及计算	135
8.3 电力系统频率偏差	126	9.2.3 屏蔽体设计	137
8.3.1 概述	126	9.3 接地	140
8.3.2 频率偏差的危害	126	9.3.1 概述	140
8.3.3 频率偏差的测量	126	9.3.2 安全地系统	140
8.3.4 频率偏差调整与控制	127	9.3.3 信号地系统	140
8.4 电压三相不平衡	127	9.3.4 屏蔽地系统	142
8.4.1 概述	127	9.4 滤波	144
8.4.2 三相不平衡产生的危害	127	9.4.1 概述	144
8.4.3 电压三相不平衡的测量仪器	127	9.4.2 EMI 滤波器设计	145
8.4.4 电压三相不平衡的控制	128	9.4.3 EMI 滤波器的布局和装配	153
8.5 波形畸变与电力谐波	128	9.4.4 直流电源去耦滤波器设计	153
8.5.1 概述	128	9.5 电磁兼容标准与测量	154
8.5.2 谐波的影响与危害	128	9.5.1 电磁兼容测量单位及换算	154
8.5.3 谐波的测量	128	9.5.2 电磁兼容标准	155
8.5.4 电力谐波的抑制技术	128	9.5.3 电磁兼容测量	157
8.6 电压波动与闪变	129	参考文献	163
8.6.1 概述	129		
8.6.2 闪变的发生与危害	129		

第3篇 高电压物理基础

第1章 电介质的极化、电导与损耗	167	1.4 电介质的损耗	171
1.1 电介质的极化	167	1.4.1 电介质的等效电路和相量图	171
1.1.1 电子位移极化	167	1.4.2 气体介质中的损耗	172
1.1.2 离子位移极化	167	1.4.3 液体和固体介质中的损耗	172
1.1.3 转向极化	167	1.4.4 介质损耗在电气工程应 用中的意义	173
1.1.4 空间电荷极化	167	1.5 复合介质的相对介电常数与 介质损耗	173
1.2 电介质的相对介电常数 ϵ	168	第2章 气体放电的基本物理过程	174
1.2.1 气体介质的相对介电常数	168	2.1 带电质点的产生与消失	174
1.2.2 液体介质的相对介电常数	168	2.1.1 气体中电子和正离子的产生	174
1.2.3 固体介质的相对介电常数	169	2.1.2 气体中负离子的形成	175
1.2.4 相对介电常数在电气工程 应用中的意义	169	2.1.3 带电质点的消失	175
1.3 电介质的电导	169	2.2 放电的电子崩阶段	176
1.3.1 气体介质的电导	170	2.2.1 非自持放电和自持放电的 不同特点	176
1.3.2 液体介质的电导	170		
1.3.3 固体介质的电导	171		

2.2.2 电子崩的形成	176	3.5.3 影响 SF ₆ 击穿场强的因素	194
2.2.3 影响电子碰撞电离系数 α 的因素	177	3.5.4 快速暂态过电压下的击穿	195
2.3 自持放电的条件	177	3.6 提高气隙击穿电压的措施	196
2.3.1 pd 值较小时的自持放电	177	3.6.1 改善电场分布	196
2.3.2 pd 值较大时的自持放电	178	3.6.2 减弱电离过程	197
2.3.3 电负性气体的情况	179	第 4 章 气体中的沿面放电	198
2.4 不均匀电场中的气体放电	180	4.1 界面的典型电场分布	198
2.4.1 稍不均匀电场和极不均匀电场的不同特点	180	4.2 均匀电场中的沿面放电	198
2.4.2 极不均匀电场中的电晕放电	180	4.3 极不均匀电场中的沿面放电	199
2.4.3 不均匀电场中放电的极性效应	182	4.3.1 具有强垂直分量时的沿面放电	200
2.5 雷电放电的发展过程	183	4.3.2 具有弱垂直分量的沿面放电	201
第 3 章 气体间隙的击穿强度	185	4.4 受潮表面的沿面放电	202
3.1 稳态电压下的击穿	185	4.4.1 表面凝露对沿面放电的影响	202
3.1.1 均匀电场中的击穿	185	4.4.2 淋雨对沿面放电的影响	203
3.1.2 稍不均匀电场中的击穿	185	4.5 污秽绝缘表面的沿面放电	204
3.1.3 极不均匀电场中的击穿	186	4.5.1 污闪的发展过程	204
3.2 雷电冲击电压下的击穿	187	4.5.2 影响污闪电压的因素	205
3.2.1 冲击电压的标准波形	187	4.5.3 污秽等级的划分	205
3.2.2 放电时延	187	4.5.4 防止污闪的措施	206
3.2.3 50% 击穿电压及冲击系数	188	第 5 章 液体与固体介质的击穿	207
3.2.4 伏-秒特性	188	5.1 液体介质的击穿	207
3.3 操作冲击电压下的击穿	189	5.1.1 液体介质的击穿机理	207
3.3.1 操作冲击电压下击穿的 U 形曲线	189	5.1.2 影响液体介质击穿的因素	207
3.3.2 操作冲击电压的推荐波形	190	5.1.3 提高液体介质击穿强度的方法	209
3.3.3 长空气间隙在操作冲击电压作用下的击穿强度	190	5.2 固体介质的击穿	210
3.4 大气条件对气隙击穿的影响	191	5.2.1 电击穿	210
3.4.1 空气密度校正因数 and 湿度校正因数	191	5.2.2 热击穿	211
3.4.2 海拔的影响	192	5.2.3 电化学击穿	213
3.5 SF ₆ 气体间隙的击穿	192	5.3 组合绝缘	214
3.5.1 均匀和稍不均匀电场中的击穿	192	5.3.1 介质之间的兼容性	214
3.5.2 极不均匀电场中的击穿	194	5.3.2 油-屏障绝缘与油纸绝缘的特点	215
		5.3.3 多层介质中的电场	215
		5.3.4 电场的调整方法	216
		参考文献	218

第 4 篇 电 气 安 全

第 1 章 电气安全常用术语	221	方式与 TN-C-S 方式	224
第 2 章 安全电压与安全电流	222	3.1.5 单独接地、共同接地和重复接地	226
2.1 安全电压及其有关因素	222	3.1.6 特殊接地	227
2.2 安全电流及其有关因素	222	3.1.7 保护方式选择	229
2.3 跨步电压与接触电压及其有关因素	222	3.2 接地装置	230
2.3.1 跨步电压	222	3.2.1 接地装置材料的选择	230
2.3.2 接触电压	222	3.2.2 接地装置的安装	230
第 3 章 电气装置的接地与接零	223	3.2.3 接地电阻及其测量	230
3.1 电气装置的接地与接零概述	223	第 4 章 电气装置的绝缘、屏护和间距	232
3.1.1 工作接地、保护接地和保护接零	223	4.1 绝缘	232
3.1.2 接地与接零的技术要求	223	4.2 屏护	232
3.1.3 保护接地的 IT 方式与 TT 方式	223	4.3 间距	232
3.1.4 保护接零的 TN-S 方式、TN-C			

第5章 防雷保护	234	5.2.2 人身防护	236
5.1 雷电与过电压的有关概念	234	5.3 供电系统对高功率电磁脉冲的防护	236
5.1.1 常用名词术语	234	5.3.1 高功率电磁脉冲的产生与危险	236
5.1.2 雷电与过电压	234	5.3.2 供电系统对高功率电磁脉冲的防护	236
5.1.3 雷电的一般规律与危害	234	第6章 触电急救	238
5.2 电气装置的防雷	234	参考文献	240
5.2.1 防雷设备	234		

第5篇 电 工 材 料

第1章 绝缘材料	243	2.1.3 N型和P型半导体	259
1.1 绝缘材料概论	243	2.2 元素半导体	261
1.1.1 绝缘材料的介电性能	243	2.2.1 硅、锗单晶的主要技术参数及选用	261
1.1.2 绝缘材料的老化	244	2.2.2 硅单晶中杂质的扩散	261
1.1.3 绝缘材料应用中需要注意的问题	244	2.2.3 非晶硅和多孔硅	262
1.1.4 绝缘材料的分类和用途	245	2.3 化合物半导体	263
1.2 气体和液体电介质	245	2.3.1 III-V族化合物半导体	263
1.2.1 气体电介质和真空绝缘	245	2.3.2 II-VI族化合物半导体	263
1.2.2 液体电介质(绝缘油)	246	2.3.3 其他化合物半导体	264
1.3 无机绝缘材料	247	2.4 固溶体半导体	264
1.3.1 玻璃	248	2.4.1 镓砷磷和镓铝砷	264
1.3.2 陶瓷	248	2.4.2 碲镉汞($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$)	264
1.3.3 石棉	249	2.4.3 碲铋铋 $[(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_3]$ 和碲硒铋 $[\text{Bi}_2(\text{Se}_{1-x}\text{Te}_x)_3]$	265
1.3.4 云母及其制品	249	2.5 其他半导体材料	265
1.3.5 绝缘氧化膜	249	2.5.1 半导体超晶格材料	265
1.4 纤维材料与浸渍纤维制品	250	2.5.2 磁性半导体	265
1.5 绝缘纸、纸板与复合纸	250	2.5.3 有机半导体	265
1.5.1 植物纤维绝缘纸	250	第3章 导体和超导材料	266
1.5.2 合成纤维绝缘纸	250	3.1 导电金属材料	266
1.5.3 无机纤维绝缘纸	251	3.1.1 导电金属材料的一般性质	266
1.5.4 复合纸	251	3.1.2 铜与铜合金	266
1.5.5 绝缘纸板	252	3.1.3 铝和铝合金	267
1.6 绝缘漆、胶和熔敷粉末	252	3.1.4 复合导体	268
1.6.1 绝缘漆	252	3.2 电炭制品和其他导电材料	268
1.6.2 灌注胶和包封胶	253	3.2.1 电刷	268
1.6.3 熔敷粉末	253	3.2.2 碳棒、石墨和碳纤维	269
1.7 层压制品	253	3.2.3 导电胶和导电银浆	269
1.7.1 层压板	253	3.2.4 覆铜箔层压板	269
1.7.2 层合管	254	3.3 超导材料	270
1.7.3 层合棒和引拔棒	254	3.3.1 超导现象	270
1.8 电工塑料与橡胶	254	3.3.2 超导体分类	271
1.8.1 电工橡胶	254	3.3.3 超导材料	271
1.8.2 电工软塑料、热塑性弹性体和热收缩材料	255	3.3.4 超导体材料的应用	272
1.8.3 热塑性硬塑料	255	第4章 电工合金	273
1.8.4 热固性塑料	256	4.1 电阻合金	273
1.9 电工塑料薄膜	257	4.1.1 电阻合金概述	273
第2章 半导体材料	258	4.1.2 可变电阻和固定电阻用电阻合金的性能	273
2.1 半导体材料概述	258	4.2 电热合金	274
2.1.1 半导体材料的分类与物理性质	258		
2.1.2 能带结构与本征半导体	258		

4.2.1 电热合金概述	274	5.4.1 磁记录和记忆介质	289
4.2.2 电热合金的品种与性能	274	5.4.2 磁头材料	289
4.3 电触头材料	275	5.5 特殊磁性材料	290
4.3.1 电触头分类及其对材料的要求	275	5.5.1 磁温度补偿合金	290
4.3.2 电触头材料的特性及用途	275	5.5.2 微波磁性材料	290
4.3.3 触头的连接	276	5.5.3 非晶态磁性材料	290
4.4 熔体材料	277	5.5.4 磁滞伸缩材料	290
4.4.1 熔体材料的分类及其选用	277	第6章 特殊光、电功能材料	291
4.4.2 常用熔体材料	277	6.1 基于光电效应的光电材料	291
4.4.3 熔体的外形与额定电流	278	6.1.1 光电导材料	291
4.5 热双金属材料	278	6.1.2 光敏电阻材料	292
4.5.1 热双金属简介	278	6.1.3 光电阴极材料与光电二极管	292
4.5.2 热双金属的材料	278	6.1.4 红外光电导探测器材料	292
4.5.3 热双金属元件的选用和制造中的 注意事项	279	6.1.5 太阳能电池材料	292
4.6 热电材料和热电偶	279	6.2 能把其他能量转变为光能的 发光材料	293
4.6.1 热电偶原理与材料特性	279	6.2.1 电(场)致发光材料	293
4.6.2 标准型热电偶和补偿导线	279	6.2.2 荧光材料和磷光体	293
第5章 磁性材料	281	6.2.3 激光器材料	294
5.1 磁性材料的特性和分类	281	6.3 铁电、压电和热释电材料	294
5.1.1 磁性材料的基本特性	281	6.3.1 压电材料	294
5.1.2 磁性材料的分类	281	6.3.2 铁电体	295
5.2 永磁材料	282	6.3.3 驻极体和液晶材料	296
5.2.1 永磁材料的特性	282	6.4 基于电性对外界因素的敏感材料	297
5.2.2 常用永磁材料	283	6.4.1 电压敏感材料	297
5.3 软磁材料	285	6.4.2 热敏及 PTC 材料	297
5.3.1 纯铁与低碳钢	285	6.4.3 力敏材料	298
5.3.2 热(冷)轧硅钢片	286	6.4.4 湿敏材料	298
5.3.3 铁镍合金	286	6.4.5 气敏材料	298
5.3.4 铁钴合金	288	6.4.6 磁敏电阻材料	299
5.3.5 软磁铁氧体	288	参考文献	300
5.4 磁记录和磁记忆材料	289		

第6篇 电气测量和仪表

第1章 电气测量概论	303	1.4.2 测量误差的来源及分类	307
1.1 测量的概念	303	1.4.3 测量误差的表示方法	307
1.1.1 测量	303	1.4.4 误差的综合	307
1.1.2 测量方法	303	第2章 电量测量	309
1.1.3 测量过程	303	2.1 概论	309
1.2 测量单位	303	2.2 电路基本电量的测量	309
1.2.1 单位和单位制	303	2.2.1 中等量值电压和电流的测量	309
1.2.2 有效数字	304	2.2.2 大电流的测量	310
1.3 电学量具	305	2.2.3 高电压的测量	311
1.3.1 标准电池	305	2.2.4 小电流和低电压的测量	312
1.3.2 标准电阻	305	2.2.5 直流功率和电能测量	312
1.3.3 标准电感	306	2.2.6 单相交流功率和电能测量	313
1.3.4 标准电容	306	2.2.7 三相交流功率和电能测量	314
1.3.5 频率标准	306	2.2.8 功率因数测量	315
1.4 测量误差	306	2.3 电路基本电参数的测量	315
1.4.1 相关名词术语	307	2.3.1 直流电阻的一般测量	315

2.3.2 直流电阻的精确测量	315	4.5.1 成分分析仪的组成及性能	344
2.3.3 交流电阻的测量	319	4.5.2 粉尘测量	344
2.3.4 电容参数测量	319	4.6 物位测量	345
2.3.5 电感、互感参数测量	319	4.7 机械量测量	346
2.3.6 电路元件等效阻抗的测量	320	4.7.1 机械量测量仪表组成	346
2.3.7 时间、频率和相位的测量	321	4.7.2 力测量	346
2.3.8 高频电参数的测量	321	4.7.3 转矩测量	346
2.4 非正弦电压、电流的测量	322	4.7.4 位移量测量	348
第3章 磁量测量	323	4.7.5 速度测量	348
3.1 磁量测量概述	323	4.7.6 机械振动量的测量	348
3.1.1 磁量及其测量方法	323	4.8 噪声测量	351
3.1.2 基本磁量以及测量技术分类	324	第5章 常用电测仪表	353
3.1.3 空间磁通的测量方法——电磁 感应法	324	5.1 电气测量仪表	353
3.1.4 空间磁密的测量方法——电磁 效应法	326	5.1.1 模拟仪表	353
3.1.5 空间弱磁场的测量方法——磁 饱和法	327	5.1.2 数字仪表	353
3.1.6 精密测量磁场的方法——磁共 振法	328	5.2 电气测量仪表的配套附件	355
3.1.7 恒定弱磁场的测量方法——超 量子磁强计	329	5.2.1 电量变送器	355
3.1.8 恶劣条件下磁场的测量方法—— 磁光效应磁强计	329	5.2.2 电压互感器	355
3.2 磁性材料静态磁性测量	329	5.2.3 电流互感器	357
3.2.1 静态磁化特性	329	5.2.4 分流器	357
3.2.2 磁化装置、试样与退磁	331	5.2.5 分压器	357
3.2.3 闭合磁路测量	331	5.3 电位差计和电桥	357
3.2.4 开磁路测量	331	5.3.1 电位差计	357
3.2.5 基本磁参量的测量(磁化强度和 居里点、磁各向异性、 磁致伸缩)	331	5.3.2 无源电桥	357
3.2.6 静态磁性的自动测量	332	5.3.3 有源电桥	357
3.3 磁性材料动态磁性测量	332	5.4 函数信号发生器和标准源	357
3.3.1 动态磁化特性及其磁参数	332	5.4.1 函数信号发生器	357
3.3.2 动态磁化曲线测量	332	5.4.2 标准信号源	357
3.3.3 磁滞回线测量	332	5.5 计数器和示波器	358
3.3.4 铁损耗测量	333	5.5.1 电子计数器	358
3.3.5 高频磁特性测量	335	5.5.2 模拟示波器	359
第4章 非电量的测量	336	5.5.3 数字示波器	359
4.1 概论	336	5.5.4 频谱分析仪	359
4.2 温度与热通量测量	337	5.5.5 逻辑分析仪	359
4.2.1 温度测量及温度表	337	5.6 常用电能仪表	360
4.2.2 热通量的测量	340	5.6.1 电能仪表	360
4.3 压力和真空度的测量	340	5.6.2 直流电能仪表	360
4.3.1 压力的测量	340	5.6.3 感应式电能表	360
4.3.2 真空度测量和常用真空计及标准	340	5.6.4 电子式电能表	360
4.4 流量测量	341	5.6.5 电能质量仪	360
4.4.1 流量测量概述	341	5.6.6 电量测量仪表的校验装置	360
4.4.2 质量流量计	342	第6章 自动测试系统	361
4.5 成分分析	344	6.1 概论	361
		6.1.1 智能仪器	361
		6.1.2 虚拟仪器	361
		6.1.3 自动测试系统	361
		6.2 GPIB 系统	362
		6.2.1 GPIB 标准	362
		6.2.2 GPIB 系统结构	362
		6.2.3 GPIB 系统的信号线	363
		6.2.4 GPIB 系统的消息分类	363