

21世纪学科发展丛书·电工学

丛书主编 周光召

现代工业 文明之源

山东人民出版社

前言

2000年10月10日出版

现代历史始于20世纪初叶。在新世纪来临之际,回顾刚刚过去的20世纪,虽然人类经历了两次世界大战的浩劫,但是科学技术却蓬勃发展,给人类的物质文明带来巨大进步。这一进步的标志,就是以电工发展为源头之一的第三次产业革命。当然,科学技术的进步也有负面作用,如环境污染、资源的过度开发等。为了克服这些负面作用,又引发出许多新的技术。

首先要说明的是“电工”这个词。大致说来,在第二次世界大战结束以前,英语国家称之为 Electrical Engineering,我国称做电机工程。也许是汉语常用两个字构词,才用“电机工程”的。可是,电机一词又特指发电机、电动机等设备,它的涵义狭小多了。不过那时人们已经习惯了电机工程这个词,不会把它限制在狭义的“电机”里。

第二次世界大战结束以后,英语国家出现了另一个词“电子工程”。这表示他们的电工程的涵义变小了。我国也采用“电子工程”一词。对于电工程,我国似无统一名称,有用“电气工程”(据日本文)、“电力工程”的,“电

11105 68

机工程”一词逐渐少用。在我国国家一类学科里，称做“电工”，它包括“电磁领域的客观规律及其应用技术，以及电力生产和电工制造两大生产体系”（据《中国大百科全书·电工卷》）。

既然“电力工程”和“电子工程”曾经统一在“电气工程”名下，“电力工程”里也势必含有许多“电子工程”的内容，电力电子器件、电力工业的微波通信等，都是例子。

电工技术，来源于电磁学理论。远古时候，人类必然看到了自然界的雷电。早在公元前 4 至 3 世纪我国出现的《管子》一书中，就曾记载了磁石吸铁的现象。可是直到 18 世纪 30 年代，才确定了只有两种电荷；到 1785 年，才第一次发现了关于静电力的定量定律即库仑定律。19 世纪初，意大利物理学家伏打发明了伏打电堆即电池。正是由于这个划时代的发明，物理学家方能用直流电源做实验，研究各种电磁现象。其中最著名的发现有：1820 年，丹麦的奥斯特发现电流的磁效应；不久，法国的安培发现了电流之间的作用力的规律；英国的法拉第发现电磁感应定律，他还提出了“场”的概念；1864 年，英国的麦克斯韦发展了法拉第的思想，提出了统一的电磁场理论，预见了电磁波的存在；1888 年，德国的赫兹用实验方法产生出电磁波，麦克斯韦的电磁场理论最终确立。

从上面的叙述可以看到，19 世纪是电磁学蓬勃发展的世纪。电磁学的应用也跟着发展起来，举其大者：19 世纪 30 年代发明了电报（库克、惠斯通），60 年代有了越洋电报通信，70 年代发明了电话（贝尔），90 年代发明了无线电通信（马可尼）。30 年代以后，直流和交流发电机陆续问世，并与照明技术互相促进。那时直流电动机已能驱动轮船和车辆。到了 80 年代，三相异步电动机（特斯

拉)问世,同时,出现了交流发电厂。电工的发展和它的广泛应用,互为因果。史家认为,第三次产业革命,开始于以电工业、化学工业和内燃机为特征的19世纪末叶,这是对电工程的最高评价。

进入20世纪后,电力工业迅速发展起来。其主要标志有:大容量发电机(火电厂的汽轮发电机单机容量达1000兆瓦,我国制造的达600兆瓦),超高压(750千伏,我国为500千伏),远距离(上千公里)输电和大电力系统。例如葛洲坝水电站,可以把电能送到上海:先用电力电子装备把交流电变成500千伏的直流电压,用长达1080公里的直流输电线传到上海,再用电力电子装备变成交流电供上海使用。但在长江洪水时,葛洲坝坝内坝外落差大大降低,发电能力也将极大减少。我国有4个跨省大电力系统,省电力系统也不小。它们都是非常复杂的系统,其实现,应当归功于材料工业、电工制造工业的进步,电力系统理论的发展,自动控制理论和计算机技术的引入。20世纪初发明了真空三极管;1928年,布莱克从电路角度提出负反馈概念。这些对自动控制的发展起了极大的推动作用。1946年,第一台数字计算机ENIAC制成;1948年,发明了晶体管;20世纪50年代末,出现了集成电路。这些发明,极大地促进了包括电力工业在内的各行各业的发展,并使个人计算机进入普通百姓家庭,改变着人们的生活方式。20世纪60年代起,直流输电、电机转速控制等的需要,促进了电力电子器件的研究,新型器件层出不穷,发展势头至今不衰。

新型能源的开发是电力工业发展的另一方面内容。石油、天然气等燃料估计在21世纪内可能被耗尽。我国的石油资源并不丰富。美国不开发自己的石油,目的显然是想保存本国的石油资源。寻找新能源已成为20世纪

前言

电工科学界的奋斗目标之一。太阳能取之不尽。太阳能电池能把光能转变为电能,它在我国西部地区有着广阔的发展前景。美国科学家计划在太空建造太阳能电站,用微波把电能送到地球。燃料电池的一部分燃料是空气,是一种有开发前途的电池,问题是成本太高,目前只在宇航事业里得到应用。一旦成本下降,便可用来驱动汽车。想像一下全世界亿万辆汽车都使用它时,空气将变得清洁,能创造出巨大的经济效益。受控热核聚变,能将原子能转变为电能,这已受到包括我国在内的各大国的重视。它的燃料氘从海水中提取,可谓取之不尽。这些崭新的电能,有望在 21 世纪获得推广或实现。

本书的内容包括电工学的基础部分和电工新技术。

电力工业的发展,是和电工基本理论的发展分不开的。电工的基本理论来源于电磁学,但是它已形成自己的理论体系。工程电磁场理论不等同于电磁学,虽然二者的基本原理相同,但工程电磁场理论面对的是复杂的电工实际。例如如何设计电磁设备,探测材料内部的缺陷和损伤,研究用计算机分析工程电磁场的有效方法等等,都是工程电磁场理论要解决的问题,也是促进它发展的动力。研究电力线路的高电压、大电流和广播、移动电话、寻呼机的辐射对邻近电信线路的干扰机理,并寻找消除干扰的措施,已形成“电磁兼容”的新学科。电磁场理论还广泛应用于医疗领域,如脑电、心电的研究,磁共振成像新技术,电磁场热疗法等。

电路理论是电工技术独有的基础理论。许多电工问题,例如某些工厂谐波污染的治理,滤波器设计,电路故障的诊断,都应用电路理论来解决。电路理论又和其他学科有着密切关系。数学的图论、混沌(20 世纪发现的重大新现象之一)、非线性现象的研究方法等,都在电路理

论里得到广泛的反映和应用。电路理论也促进着这些理论的发展,例如振荡电路的研究对非线性理论和自动控制理论的发展,都起到良好的作用。电路容易设计和制作,最便于在实验室里用来模拟、研究各种新现象。例如用电路研究混沌时,证明了费根鲍姆常数的存在。

发展新技术,永远是保持一门学科生命力的一个重要条件。超导体、等离子体就是有广阔应用前景的新技术。1908年,荷兰科学家曼内斯创造了绝对温度4开的低温,把氦气液化。1911年,他又发现汞在4.2开时出现超导现象。寻找高温超导体(高温是相对绝对温度零度说的)的高温纪录,在20世纪可以说得上是你追我赶,日新月异。最初的发现,是1986年瑞士IBM公司两位科学家用业余时间(当然无资助)研究出来的。高温超导体研究的进展,在以下方面将发挥重要作用:用超导导线制作电工设备;用超导线圈通电流后储藏磁场能量;制造悬浮式(离开地面行驶)火车。这些技术的应用已经小规模地实现了。我国已经造出了小容量超导发电机和悬浮式火车。在京沪高速铁路的建设上,悬浮火车的方案已得到政府的关注。

由朗缪尔于1928年命名的等离子体,是似电中性的、电离了的气体,被称为固、液、气三态以外的物质第四态。受控热核聚变必须在高温等离子体中实现。20世纪50年代,前苏联科学家创造了托克马克,沿用至今,仍是最有效的受控热核聚变装置。各大国一直致力于这方面的研究。我国也制造了一个小型托克马克,进行探索。低温等离子体在集成电路的刻蚀,在环保(如消除烟气)、材料加工、军工技术、医疗等方面,得到越来越多的应用。

超导体、等离子体新技术,是从物理学发展来的,正如最初电工从电磁学发展来的一样。因此,超导体、等离

前言

子的基本原理也应纳入电工基本理论。科学技术从来都不是画地为牢、固步自封的,而是各门学科互相渗透、互相促进,这是学科不断发展的源泉之一。电工学科将继续吸收其他学科之长,同时积极地把电工技术的应用拓展于其他领域,迎着新世纪不断前进。

《21 世纪学科发展丛书》编辑委员会、 出版委员会名单

一、丛书主编、副主编

主 编:周光召

常务副主编:张玉台

副 主 编:徐善衍 常志海 张 泽 宋南平
宫本欣 马 阳

二、丛书编辑委员会

主 任:庄逢甘

副主任:闵桂荣 杨 乐 张 泽 宫本欣 马 阳

委 员:(按姓氏笔画排序)

王 铸 孙永大 刘 珩 朱道本 仲增墉
陈学振 张 鲁 汪稼明 李慧政 金明善
周 济 胡序威 赵 逊 相重扬 徐世典
谢荣岱 薛全福

各分册编审委员会主任(名单略)

三、丛书出版委员会

主 任:宫本欣

副主任:陈学振 张 鲁 李慧政

委 员:(按姓氏笔画排序)

王 铸 王昭顺 尹 铭 史 彬 刘传喜
张力军 宋德万 隋千存 董 正 韩 春
鲁颖淮

序

周光召

人类已跨进了新的千年,21世纪的曙光将给全球带来灿烂辉煌的新篇章。回顾过去的20世纪,科学技术的创新与进步引发了人类经济、社会的巨大变革,由此又带来了全球翻天覆地的变化。马克思曾在《资本论》中指出:“生产力的发展,归根结底总是来源于发挥着作用的劳动的社会性质,来源于社会内部的分工,来源于智力劳动特别是自然科学的发展”,人类社会实践有力地证实了这一精辟论断。

随着科学技术在近现代的蓬勃发展,新思维、新理念、新发现推动着新兴学科、交叉学科不断涌现。许多传统学科一方面派生出新的分支学科,另一方面又在与其他学科的融合中形成新的综合性学科。展望21世纪,信息科学技术、生物科学技术、纳米科学技术将成为发展迅速,带动社会经济技术快速进步的前沿学科。环境、能源、材料、航天、海洋等科学技术将继续发展,解决人类面临的持续发展课题。社会进步和经济发展的需求为人类今后如何驾驭科学技术的骏骑,如何继续攀登科技巅峰提出了新的课题。

一个国家的科技水平不仅体现在少数科学家的科技成就中,更要体现在广大群众对科学技术的理解、掌握和应用之中。“科技先行,以人为本”有赖于公众科技文化素质整体水平的提高。因此,弘扬科学精神、传播科学知识和科学方法

就成为科技工作者又一不可推卸的、任重而道远的职责。中国科学技术协会作为党领导下的科技群团组织，肩负着促进学科发展、推动科技进步和普及科学知识、提高全民科技文化素质的重要责任。编写《21世纪学科发展丛书》是使这种重要责任有机融合的一次新尝试。科学普及的对象可分为若干社会群体，其中青少年群体的科普教育尤为重要，因为他们是21世纪的后备人才，是攀登科技高峰的生力军。让广大青少年了解自然科学和技术科学的发展历程、卓越成就，对人类文化、社会、经济发展的巨大贡献，培养他们对科学技术的兴趣、爱好，以及为科技事业献身的精神，是老一辈科技工作者义不容辞的责任，也是我们编撰此套丛书的初衷所在。因此，专家学者们对编著此套丛书表现了极大的热情与关注。68个全国性学会参与了丛书的组织编写，很多院士、知名科学家在百忙中亲自挥笔，运用通俗的语言、生动的描绘、深入浅出的方式，将科学的奥秘揭示给读者。全套丛书介绍了60多个不同学科的起源、发展历程、著名科学家、重大科技成就，以及未来学科发展的态势，为广大读者特别是高中以上文化程度的各阶层读者提供了一套科学性、知识性、前瞻性、趣味性和可读性相统一的科普读物。希望通过浏览这套丛书，不仅能够帮助广大青少年读者拓宽知识领域，而且对于他们选择未来发展方向起到引导和参考作用。同时，此套丛书通俗易懂，也适合其他不同社会群体的干部与公众阅读。丛书将由山东省出版总社于2001年分两批出版发行。

跨入21世纪的中华民族将面临重新崛起的机遇和挑战，衷心地祝愿充满希望的一代丰获知识的硕果，为我国的繁荣富强贡献出才智和力量，作出无愧于伟大中华的重大业绩！

2001年1月16日

目 录

第一篇 电路

第一章 电路元件——电路大厦的建筑构件	1
第一节 电阻、电容能用来测量温度、压力等物理量吗?	2
第二节 基本半导体器件	5
第三节 电力电子器件	7
第四节 电源、受控电源和反馈	11
第二章 谐振和滤波	17
第一节 谐振和相反相成的元件	18
第二节 谐振电路应用举例	22
第三节 能挑选电信号的滤波器	25
第三章 电路的拓扑分析和故障诊断	29
第一节 图论——数学的一个分支	30
第二节 等效电阻的拓扑算法	33
第三节 输电线路行波故障定位	35
第四节 发电机和变压器局部放电故障的定位	38
第四章 非线性电路里的一些特殊现象	41

目
录

第一节	世界上有没有线性电路元件?	42
第二节	竖立的铅笔容易倒下	43
第三节	用相图研究动态电路的定性分析法	44
第四节	没有交流电源能产生交流电的振荡 电路	47
第五节	电路里的奇怪跳跃现象	50
第六节	谐波和次谐波	51
第七节	非线性电路里的混沌	52
第五章	神经网络和最优化	57
第一节	神经网络是模拟人脑的模型吗?	58
第二节	优化问题	62
第三节	模拟退火算法	63
第四节	遗传算法是研究生物遗传吗?	66

第二篇 电磁场

第六章	电磁场基本规律	71
第一节	电功率是由导线内部传送至负载 的吗?	72
第二节	位移电流会产生磁场	76
第三节	电磁感应	78
第四节	电磁波的辐射	81
第五节	奇异的镜像	85
第六节	不转的线圈能产生旋转磁场	86
第七节	磁悬浮列车无翼而飞行	89
第七章	电磁场数值计算	93
第一节	场的数值模拟技术	95
第二节	电力设备与电磁装置的优化设计	99
第三节	无损检测与辨识	102
第八章	电磁环境	105

第一节	地电位与阻性耦合	107
第二节	磁干扰与感性耦合	110
第三节	静电感应与容性耦合	114
第四节	辐射耦合	115
第五节	屏蔽与防护	116
第九章	生物医学电磁技术	119
第一节	脑电与心电的电流场与磁场	121
第二节	磁共振成像与 X 线成像技术	123
第三节	场热疗与理疗技术	125

第三篇 电工新技术

第十章	等离子体和脉冲功率技术	127
第一节	无处不在的等离子体	128
第二节	等离子体的一些特性	133
第三节	高温等离子体	140
第四节	低温等离子体	152
第五节	脉冲功率技术	158
第十一章	超导电工学	173
第一节	概述	174
第二节	超导体的基本性质	182
第三节	超导理论的发展	188
第四节	超导技术在电工领域中的应用及前景	193

第一篇 电 路

第 1 章

21 世纪学科发展丛书

电路元件——电路大厦的建筑构件

美轮美奂的古代宫殿、庙宇，由少数几种建筑材料如木、石、砖等建成。五彩缤纷的图画，由红、黄、蓝三原色合成。复杂的电路，例如电视机的密密麻麻的电路，也是由少数电路元件组成的。因此，我们首先介绍一下电路元件。

第一节 电阻、电容能用来测量温度、压力等物理量吗？

医生用温度计测体温，用血压计测血压，他看到的却是水银柱高度的变化。人们测量电流时，看到的是电表指针偏转的角度。既然高度、角度能用来测量温度、压力和电流，那么用电阻、电容的变化来测量非电量就毫不希奇了。电（学）量既便于测量，测量结果又便于用作控制信号（例如报警信号），因此，“非电量的电量测”得到广泛应用，且已成为一门学科。

金属电阻器和半导体电阻器的导电性能，受各种物理因素（如温度、压力等）的影响，或者说它们的电阻

对这些物理因素敏感。利用这一性质，人们制造出热敏、压敏等电阻器。

早在 1871 年，西门子公司就利用铂做温度计。1834 年，M. 法拉第发现硫化银有较大的负温度系数，即电阻率随温度的升高而降低。直到 20 世纪 30 年代，才制成硫化银热敏电阻器。1954 年，P. 哈依曼开发出以钛酸钡为主的、具有正温度系数（PTC）的热敏电阻器，用于过热保护、报警等。用锰、钴等的氧化物制成的有负温度系数的热敏电阻（NTC），它的温度系数可达 $[-1 \sim -6]\%$ 每 $^{\circ}\text{C}$ ，对温度变化很敏感。这种热敏电阻器可用来测量和监控温度、测量流速（散热与流速有关）等。

压（力）敏电阻器对外加压力敏感。1954 年，C.S. 史密斯发现硅、锗有压阻效应。例如，单晶硅受力后，晶格变形，引起电阻率改变。这种压敏电阻器非常灵敏，主要用于测量应力和应变。

另外一种（电）压敏电阻器对电压很敏感。例如用碳化硅（SiC）、氧化锌（ZnO）制成的压敏电阻器，电压低于某个“阈值电压”时，压敏电阻器的电阻很大；高于“阈值电压”时，电阻很小。它们多用于保护电工设备。例如用碳化硅制成的避雷器，和被保护的电器并联着。在正常电压下，避雷器的电阻很大，对设备的工作没有影响。雷击时，电压特别高，避雷器的电阻极大地降低，雷击电流主要流过避雷器，从而保护了电工设备。

19 世纪末，发现了磁场影响电阻的现象。20 世纪中期，磁阻材料随着半导体研究的发展而发展。例如半导体碲化铟（InSb）、砷化铟（InAs）的磁阻效用就很显著，可用来制作磁敏电阻器。磁敏电阻器可用来测量

位移：在物体上装上磁铁；磁铁随物体位移时，邻近的磁敏电阻器因磁场变化引起电阻变化，从而测出位移。

另外还有光敏电阻器，用于遥感、红外探测等；气敏电阻器，用于石油、探矿等工业部门；湿敏电阻器，可检测湿度，如用于大型空调设备的湿度检测。

在两片金属板之间放上绝缘物（例如空气、纸），就构成电容器。电容器的电容 C 按下式计算：

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{d}, \quad \epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{法每米} \quad (1-1)$$

式中， C 的单位是法（F）； S 是极板面积，单位是平方米； d 是极板间距离，单位是米； ϵ_0 是空气的电容率； ϵ_r 是绝缘物的相对电容率，是一纯数。由于此式中的空气电容率的值很小，而法这单位太大，所以常用单位是微法（ μF ）、皮法（ pF ）。电子电路里作滤波用的电解电容器，其电容值可达几千、上万微法，算是很大的电容量了。20 世纪 70 年代，出现了一种双电层电容器，由集电极、多孔电极、工作电解质组成。它的电容量特别大，单位体积的电容量可达 3 法每立方厘米，容易得到几十法的电容量，这是很大的进展。它主要用于微型计算机。到了 90 年代末，用碳纳米材料做电容器，可以得到一千多法的电容量。

电容量由式（1-1）决定。改变面积、极板间距离或介质的电容率，电容量随之变化。转动可动极板可使有效极板面积改变，收音机里的可变电容器就是据此制成的。又可以据式（1-1）改变极板间距离制作传感器。电容式压力传感器由 3 个金属片构成两个电容。中间金属片受力位移时，一个电容的极板间距离增加，电容量减少；另一个的距离减小，电容量增加。测出两个