



普通高等教育“十二五”规划教材

超导电力基础

唐跃进 任丽 石晶 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

超导电力基础

唐跃进 任丽 石晶 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本教材为普通高等教育“十二五”规划教材。根据超导技术的应用及发展,编者结合已经开设的课程实践,不断改进教学方案、调整体系结构,最终形成了本教材目前的体系和内容。

本教材共分9章,内容主要包括超导体的基本电磁特性、高温超导体的特殊性、从超导物理走向超导应用中所解决的各种电磁问题以及低温技术等超导应用相关的基础知识;超导磁体的电磁设计要点以及超导磁体在加速器、磁约束核聚变、核磁共振成像等超导强磁场应用的物理原理;超导电机、超导变压器等超导电力装置的原理、特点以及发展现状;教材还简要介绍了超导量子干涉器及其在微弱电磁测量中的应用原理。

本教材主要面向电气工程学科的本科生和研究生,也可作为从事超导电力研究或对超导电力有兴趣的技术人员、管理人员学习超导基础知识的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

超导电力基础/唐跃进,任丽,石晶编. —北京:中国电力出版社,2011.10

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-2238-7

I. ①超… II. ①唐…②任…③石… III. ①超导电技术-高等学校-教材 IV. ①TN101

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第213474号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2012年2月第一版 2012年2月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 15印张 361千字

定价 27.00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

前言

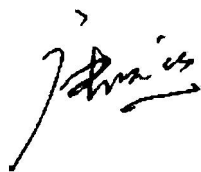
超导技术的应用领域非常广泛,大致可分为超导电子学应用和超导电工学应用两大类。在超导电工中,包括利用超导体产生强磁场、实现磁悬浮以及主要面向电力行业的超导电力技术。基于超导技术的精密测量则是可应用于多个学科的基础性技术。就超导电力而言,世界上已经有了若干超导电力装置的示范样机和示范工程,它们包括超导电机、超导电缆、超导变压器、超导限流器、超导磁储能系统等。在美国的电网发展战略规划(GRID2030)以及智能电网建设计划中均将超导电力列为重要的发展方向。在我国,关注超导电力技术的电力公司和电气设备制造企业越来越多,在电气工程学科开设超导技术相关课程的高等学校也在增加。

本教材共分9章,内容主要包括超导体的基本电磁特性、高温超导体的特殊性质、从超导物理走向超导应用中所解决的各种电磁问题以及低温技术等超导应用相关的基础知识;超导磁体的电磁设计要点以及超导磁体在加速器、磁约束核聚变、核磁共振成像等超导强磁场应用的物理原理;超导电机、超导变压器等超导电力装置的原理、特点以及发展现状。教材还简要介绍了超导量子干涉器及其在微弱电磁测量中的应用原理。考虑到电气工程学科的知识结构,教材在超导基础理论部分力求结论明晰,尽量避免或省略了需要固体物理、量子力学、热力学等知识的理论分析和公式推导。同时,由于本教材定位于学习超导电力的基础知识,也舍弃了对超导磁体、超导电力装置的具体设计和实现技术的介绍。本教材主要面向电气工程学科的本科生和研究生,也可作为从事超导电力研究或对超导电力有兴趣的技术人员、管理人员学习超导基础知识的参考书。教材中章节标题标注有“*”的部分,本科生课程可以不作学习安排。

唐跃进负责教材总体构成和内容取舍,并撰写第1~6章和第9章;任丽撰写第8章;石晶撰写第7章。在编写过程中,编者参阅了大量的国内外书籍和学术论文,在超导基础知识部分,从体系、内容到讲解思路都从日本出版的几本教材中吸取了不少经验。作者谨向相关的书籍和论文作者表示感谢。由于篇幅所限,书末仅列出了部分主要参考书籍。

感谢西南交通大学王家素教授、王素玉教授和华北电力大学王银顺教授对书稿提出了若干有益的建议,指出了不少具体的错误和不妥之处。在本教材编写和修订过程中,两次获得华中科技大学教学改革基金项目的支持,特此致谢。

因编者的专业所限,本教材中难免存在不足乃至错误的地方,切望读者予以指正。



华中科技大学

强电磁工程与新技术国家重点实验室

2011年8月7日



目 录

前言

1 绪论	1
1.1 超导技术的发展历程	1
1.2 超导应用技术	4
1.3 超导电力基础的教学重点	8
2 超导现象和基础理论	9
2.1 基本的超导现象	9
2.2 超导电流表达式	20
2.3 超导应用相关的重要特征参数	24
2.4 第Ⅰ类和第Ⅱ类超导体	30
2.5 超导电性的微观理论*	39
复习要点	45
3 高温超导体	46
3.1 引言	46
3.2 高温超导体的晶格结构	48
3.3 高温超导体的晶格结构特征	55
3.4 各向异性晶格结构对电磁特性的影响	57
3.5 载流子浓度对超导性能的影响	64
3.6 高温超导体的超导机制	65
复习要点	66
4 从物理走向应用的超导电磁问题	67
4.1 引言	67
4.2 磁通流阻和磁通钉扎	68
4.3 磁通运动	73
4.4 交流损耗	77
4.5 超导稳定性	87
4.6 超导导线	90
4.7 磁通动力学简介*	96
复习要点	100
5 超导应用中的低温技术	101
5.1 引言	101
5.2 低温介质	102
5.3 制冷机	106
5.4 传热	109

5.5	超导装置的低温系统	118
5.6	低温测量	124
5.7	低温材料	128
	复习要点	128
6	超导磁体及其应用	130
6.1	引言	130
6.2	超导磁体的电磁特性	133
6.3	超导磁体的电磁设计要点	135
6.4	超导磁体的失超保护	137
6.5	超导装置的电流引线	140
6.6	超导磁体的应用	143
	复习要点	157
7	超导电力应用技术	158
7.1	引言	158
7.2	超导电机	159
7.3	超导变压器	162
7.4	超导输电电缆	165
7.5	超导限流器	167
7.6	超导磁储能系统	174
7.7	超导磁悬浮飞轮储能	181
7.8	超导变电站	184
	复习要点	185
8	超导电力中的实验技术	186
8.1	引言	186
8.2	超导导线的性能评价要点	186
8.3	超导体临界参量的测量	188
8.4	超导体其他参量的测量	191
8.5	超导电力装置试验	194
	复习要点	202
9	约瑟夫森效应和超导量子干涉器*	203
9.1	约瑟夫森效应	203
9.2	约瑟夫森结的电磁特性	211
9.3	超导量子干涉器及其磁场测量原理	216
9.4	超导量子干涉器在弱磁测量中的应用	223
9.5	约瑟夫森效应和超导量子干涉器的其他应用	228
	复习要点	229
	参考文献	230

1 绪 论

教学提示

本章宏观地介绍超导现象的发现、发展历程,以及超导技术的应用意义等,试图描绘超导技术,特别是超导电力的整体图像,同时介绍课程教学的基本体系和重点内容框架。

1.1 超导技术的发展历程

1.1.1 超导现象的发现

人类对未知事物的好奇心、对更美好的东西的追求心是社会不断进步的主要原因之一。正是人类对获取更低温度的不断追求才发现了超导现象。自 1877 年成功液化氧气(临界温度 90K, $0\text{K} = -273^\circ\text{C}$)后,氮气(77.3K)、氦气(27.2K)、氢气(20.4K)也相继液化成功。1908 年,荷兰科学家昂尼斯(K. Onnes)成功实现了氦气的液化,获得了 4.2K 的极低温。

昂尼斯获得 4.2K 的低温后测量了金属在极低温下的电阻变化情况。当时人们已经知道金属导体的电阻随温度的下降而减小,但在极低温下电阻如何变化仍是未知数。对此的预测形成了两种观点,如图 1-1 所示。一种观点以杜瓦(J. Dewar, 低温物理学家, 恒温器——杜瓦瓶的发明者)为代表,认为电阻因热运动电子和障碍物的冲突而产生,温度的下降使热运动减弱、冲突减少,因此,电阻将随温度的下降而减小,在绝对零度时为零;一种观点以开尔文(L. Kelvin, 伟大的物理学家, 绝对温度的创始人, 静电场计算电像法的发明人)为代表,认为电子是受热能的作用才成为自由电子,在极低温领域,随着温度降低电子脱离原子而自由运动的可能性越来越小,因此,极低温下电阻呈增大趋势。昂尼斯的实验结果证明上面的两种预测都不完全符合实际情况。实际上,一般金属的电阻随温度的下降而减小,在极低温下趋近于一个有限值——剩余电阻,如图 1-2 所示,而且纯度越高的金属剩余电阻越小。

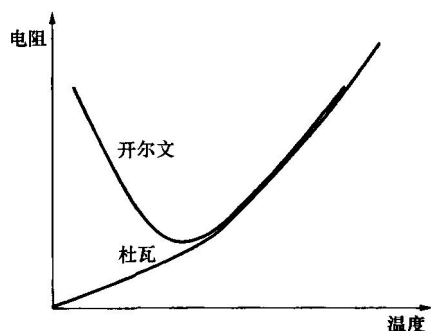


图 1-1 极低温下金属电阻变化的预想趋势

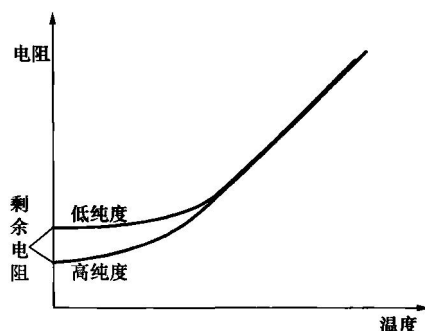


图 1-2 金属的低温电阻特性

1911 年，当昂尼斯测量汞（Hg）在极低温下的电阻温度特性时发现，当冷却到 4.2K 时汞的电阻突然消失了，如图 1-3 所示。之后他又测得锡在 3.7K、铅在 7.2K 时电阻也变为零。根据这些实验结果，他认为这时的导电电子已经变化到了一种新的状态，并将其

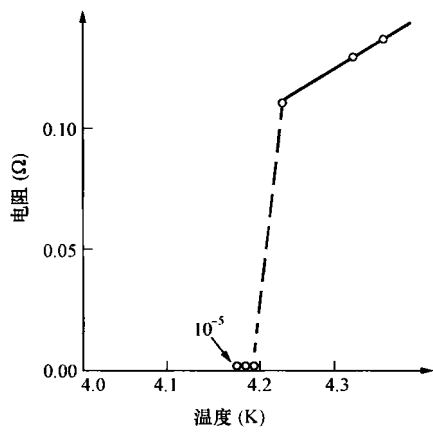


图 1-3 汞的电阻温度特性

命名为超导态（Superconducting State）。随后，人们又发现了在低温下电阻变为零的多种金属和金属化合物，也发现这些物质除了零电阻外还具有若干特殊的物理特性，如迈斯纳效应、磁通量子效应、约瑟夫森效应，以及异常的比热容不连续变化、异常的电磁波吸收特性等。于是，科学家们将具有这些特性的物质称为超导体（Superconductor），超导体所具有的特殊物理特性统称为超导电性（Superconductivity），并定义电阻不等于零时的超导体是处于正常态（Normal Conducting State/Normal State），超导体从正常态转换到超导态的温度称为临界温度（Critical Temperature）。

1.1.2 超导体的种类

随着对超导现象研究的进一步深入，人们又陆续发现有多种金属具有超导电性。表 1-1 给出了具有超导电性的元素和只有在高压或薄膜状态才呈现超导电性的元素。近百年来，人们一直没有放弃探索新的具有更高临界温度的超导体的努力，现已发现的超导体种类达 1000 种以上。除了表 1-1 所示的纯金属之外，NbTi、Nb₃Sn 等合金或金属化合物、有机物、金属氧化物等多种类型的物质均具有超导电性。图 1-4 以部分常用的超导体为代表描述了人们发现具有更高临界温度的超导体的历程。目前对新型超导体的探索仍在进行中。

表 1-1 具有超导电性的元素

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
H							He
Li	Be	B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg	Al*	Si**	P	S	Cl	Ar

I a	II a	III a	IV a	V a	VI a	VII a	VII a			I b	II a	III b	IV a	V b	VI b	VII b	VIII b
K	Ca	Sc	Ti*	V*	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn*	Ga*	Ge**	As	Se**	Br	Kr
Rb	Sr	Y**	Zr*	Nb*	Mo*	Tc*	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd*	In*	Sn*	Sb**	Te**	I	Xe
Cs**	Ba**	La	Hf*	Ta*	W*	Re*	Os	Ir	Pt	Au	Hg*	Tl*	Pb*	Bi**	Po	At	Rn
	Ra	Ac	Th*	Pa*	U*	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	

* 超导元素。
* * 在高压或薄膜状态具有超导电性的元素。

对超导体有不同的分类方式。从材料学的角度按物质类别分类较为科学。在超导应用中常按临界温度的高低分为低温超导体和高温超导体。学术上对于高温超导和低温超导的分界线有不同意见,有文献认为临界温度低于 25K 的是低温超导,高于 25K 的是高温超导。也有的认为应从超导机理上来区分。目前,从工程应用的习惯上,低温超导一般指纯金属、合金以及金属化合物,应用时要用液氮冷却,高温超导体一般指铜基金属氧化物超导体,用液氮冷却就可以应用。新发现的铁基金属氧化物超导体目前还没研制出可用于工程实践的导线。本教材中的“高温超导体”都是指铜基金属氧化物类超导体。

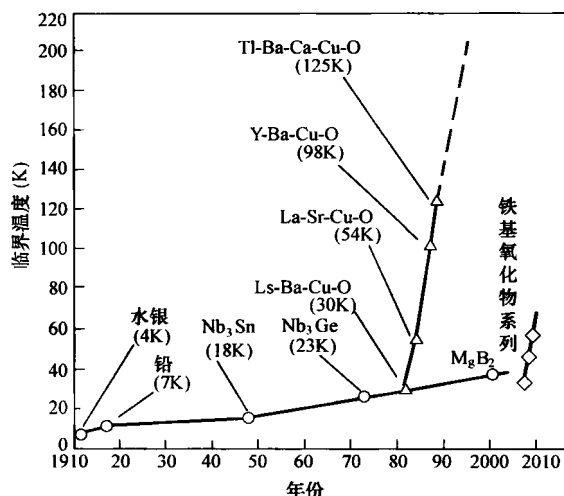


图 1-4 发现不同临界温度超导体的里程碑式历程

- 金属、合金、金属化合物类;
- △—铜基氧化物系列—高温超导体;
- ◇—铁基氧化物系列

根据电磁特性,超导体又可分为第Ⅰ类和第Ⅱ类。前者一旦外部磁场超过某一磁场值(临界磁场),则立即转变为正常态。后者具有两个不同含义的临界磁场值,下临界磁场和上临界磁场。外部磁场在下临界磁场以下时,其电磁特性和第Ⅰ类超导体相同。随着磁场的增加超过下临界磁场值后,超导体成为超导态和正常态共存的状态,只有当磁场达到上临界磁场时,超导体才完全转变为正常态。第Ⅰ类超导体的临界磁场均较低,难以实际应用于工程性装置,而第Ⅱ类超导体的上临界磁场较高。但是,纯净的理想第Ⅱ类超导体的临界电流低,很容易产生磁通流阻,工程应用价值也较低。超导体中含有微观杂质和缺陷的非理想第Ⅱ类超导体具有抑制磁通流阻的能力,实际工程应用的都是非理想的第Ⅱ类超导体。

1.1.3 超导技术发展史上的里程碑

自超导现象被发现之后,科学家们从四个不同的方面推进着超导技术的进步:①继续寻找具有更高临界温度的超导体;②探究超导现象发生的物理机理;③研究超导体除了具有零电阻特性之外的其他性质;④探索超导体的应用,包括将超导体制作成可用的线材、块材、薄膜等工程实用性材料。这些探索是漫长而艰难的,但有时的峰回路转也常常给人希望的曙光。在超导技术的发展过程中,以下发现和进步具有里程碑式的意义,其中多项发现和理论被授予诺贝尔奖。

(1) 1911 年,昂尼斯发现超导现象,获得 1913 年诺贝尔奖。

(2) 1933 年,发现迈斯纳效应。迈斯纳效应证明超导体不仅仅是理想导体,而且是一类具有特殊性质的物质。作为超导体的基本特性之一,迈斯纳效应常被用来检验一种材料是否是超导体。

(3) 1935 年,提出伦敦方程式。伦敦方程式给出了迈斯纳效应的理论解释,发现了磁通穿透超导体的基本模式,提出了穿透深度这一重要概念。

(4) 1950 年, G-L 理论的建立。G-L 理论确立了超导电子的波动特性和相干长度概念。G-L 理论的创立人之一——朗道因超流氦研究和超导物理研究获 1962 年诺贝尔奖。

(5) 1950 年, 发现同位素效应。同位素效应表明晶格在超导电性中发挥着重要的作用, 这对于超导理论研究的发展具有重要的意义。

(6) 1955 年, 形成库珀对概念。库珀对的概念表明电子与晶格的作用可以通过电声子的相互作用形成对, 而且, 这种电子对具有玻色子特性。

(7) 1957 年, 确立 BCS 理论。该理论的提出者巴丁、库珀、施瑞弗因此获得 1972 年诺贝尔奖。BCS 理论以库珀对为基础, 从微观上对超导电性作出了较为完整的解释。其中, 巴丁已于 1956 年因发现晶体管效应而获得诺贝尔奖, 成为到目前为止获得两次诺贝尔奖的唯一一人。

(8) 1957 年, 阿布里科索夫建立了第 II 类超导体理论, 与 G-L 理论创立人之一的金兹堡一起获得 2003 年诺贝尔奖。第 II 类超导体打开了超导应用技术的大门。

(9) 1961 年, 发现磁通量子效应。磁通量子效应的发现既检验了超导微观理论 (BCS 理论) 的正确性, 又为分析超导应用中的电磁问题提供了依据, 该效应本身也有重要的应用价值。

(10) 1962 年, 发现约瑟夫森效应, 发现者因此获得 1973 诺贝尔奖。约瑟夫森效应的发现为超导弱电领域的应用奠定了基础。

(11) 1982 年左右开发成功交流用超导线材。交流用超导线材的成功开发打破了超导只能应用于直流的局限, 对于超导电力应用具有极大的意义。

(12) 1986 年, 发现铜基金属氧化物超导体, 发现者获 1987 年诺贝尔奖, 创造了获奖速度最快的纪录。这类超导体的临界温度超过了液氮温度, 相对于纯金属和金属合金而言, 因其临界温度高而被称为高温超导体。高温超导为超导技术的应用带来了新的希望, 并由此掀起了超导应用研究热潮。

(13) 1990 年左右, Bi 系高温超导线材试制成功。高温超导体虽然种类繁多, 但目前还只能制作 Bi 系和 Y 系高温超导导线 (带材), 且制作方法多样, 各有特色。高温超导线制造技术还在发展之中。

(14) 2001 年, 发现临界温度达 40K 的化合物超导体—— MgB_2 。目前已经开发出 MgB_2 导线。

(15) 2008 年, 发现了铁基金属氧化物超导体。

在强电应用技术方面, 20 世纪 50 年代主要是用于获得稳态强磁场; 自 70 年代开始研制直流用超导电力装置; 80~90 年代前期, 主要集中于低温超导电力装置的研制。从 20 世纪 90 年代后期开始, 除若干需要高强磁场的应用装置之外, 主要着力于研究高温超导电力装置。

1.2 超导应用技术

1.2.1 超导技术的应用领域

超导体的各种特殊特性具有广阔的应用前景。从超导体的基本特性来说, 可以看出有

如下的应用领域：电阻为零可以用于电流的无损传输，获得有阻导体无法获得的永久电流、产生强磁场、获得很高的谐振 Q 值；迈斯纳效应可以应用于磁屏蔽；约瑟夫森效应以及磁通量子效应可以应用于微弱电磁测量、电子学等。这些应用领域包含了高端科技、电工电力、交通、军事、医疗卫生等众多领域。

图 1-5 给出了超导技术的主要应用领域，从该图可以看到超导技术有广阔的应用前景。在超导应用技术中，一般将应用于强电的超导技术称为超导电工技术，将应用于信息、电子学等弱电领域的超导技术称为超导电子技术。

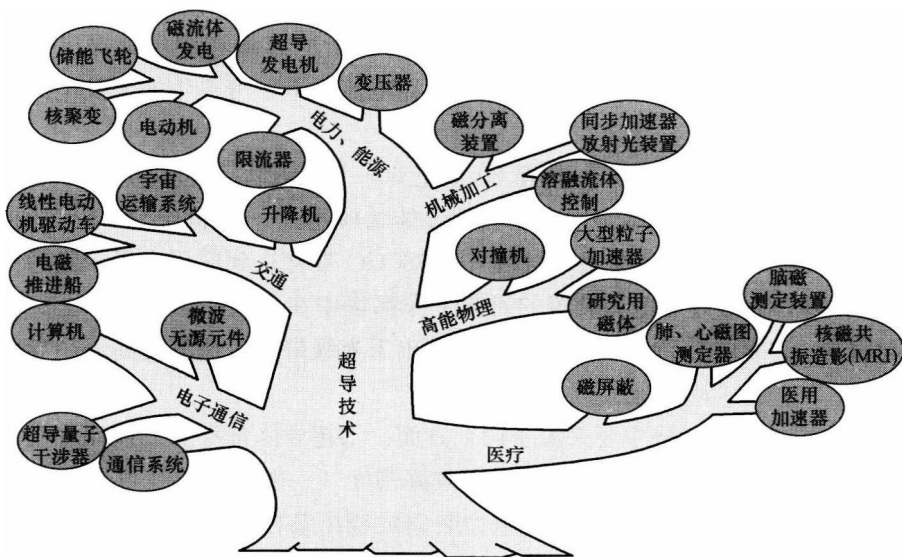


图 1-5 超导技术的应用领域

1.2.2 超导电工技术

极端地讲，所有电气设备中的导体都可以使用超导体。但是，由于现在发现的超导体只能运行在低温状态，必须有一套低温系统维持超导体处于超导态，低温系统需要消耗冷却功率，这无疑会影响超导电气设备的经济性。为获得良好的技术经济效益，超导技术还只用于使用常规导体难以获得的那些高参数、高性能设备，如获得强磁场、电感储能等。用于电力系统的超导电力装置也只有容量大到一定程度后才具有经济性。现在的超导电工技术主要可分为获得高磁场强度的超导磁体技术和超导电力技术。超导磁体技术已经得到了广泛的应用，如加速器、磁约束核聚变用超导托卡马克、科学研究用高场磁体、核磁共振谱仪、核磁共振成像仪等，在磁分离、磁悬浮等方面也有很好的发展前景。

1.2.3 超导电力

(1) 电力工业面临的重大技术课题。电力工业是国家的基础产业。中国的电能在全能源中所占的比重、人均用电量与发达国家相比均还相距甚远，中国电力工业的发展总体上仍处于一个高速增长时期。在西电东送、南北互供、全国联网的电力发展格局下，中国已拥有当今世界上最高运行电压的交直流电网，将构成以特高压交直流为骨干网架的国家

电网,形成世界上最大规模的远距离输电,成为世界上规模最大的同步电网(华北—华中—华东同步电网)。

在能源资源枯竭、环境破坏严重的双重压力下,寻找并开发清洁能源、节能降耗、提高能源利用效率已成为人类可持续发展和生存延续必须解决的重大问题。中国的新能源发电正在高速增长,核电迎来了一个新的发展期,核聚变研究已成为发展未来能源的重要内容。提高电网的运行效率、提高电能的使用效率、发展智能电网已成为中国电力工业面临的重要战略任务。

在电力工业高速发展的同时,无论是在社会生产对电力供给的依赖性上,还是在人们日常生活对电力供给的期待值上,现代社会对电力供给的容量和质量都提出了更高的要求。中国的电力工业在电力安全、电能质量、短路电流水平、可再生能源发电并网等方面都面临着技术挑战。

(2) 超导电力装置的技术特点。早在 20 世纪 60~70 年代,人们就开始了超导电力装置的研究工作。早期的研究基本集中在低温超导体的应用上。20 世纪 90 年代后期,特别是进入 21 世纪以来,第一代高温超导材料——BSCCO 带材达到应用水平,除超导磁储能系统(SMES)外,一般超导电力装置的研制工作都集中在使用高温超导体上。现在第二代高温超导材料——YBCO 涂层导体也成功开发出千米级带材,这将使高温超导电力技术再上一个台阶。

超导电力装置的技术优势主要来源于两个方面:①超导体自身的低损耗(直流下为零电阻,交流时有交流损耗);②超导导线的高载流密度(一般超导导线可承载的电流密度比常规导体高两个数量级以上)。这使得电力装置的绕组结构更紧凑、绕组或导体的载流密度更高,自身的损耗和发热量更小,从而使得装置的体积小、质量轻,可实现更高的磁场强度。但是,超导装置需要低温系统以维持超导态。维持低温环境不仅要消耗能量,与常规电力装置的冷却系统相比较,低温系统的构成更复杂,成本更高。超导电力装置是否具有应用优势,主要取决于上述技术优势是否足以弥补使用超导技术所带来的附加技术难度和经济成本。一般评估,电力装置的容量达到一定程度后,采用超导技术就会具有优势。部分对体积、质量、或是性能上有特殊要求的场合,使用超导技术也是一种有力的技术手段。例如,据美国超导公司评估,如果使用超导技术,8~10MW 的海上风力发电机将能大大减轻质量,降低对塔架、机组安装与维修的成本和技术要求。各种具体的超导电力装置的技术特点简述如下:

1) 超导电机。超导绕组可以实现高的磁场强度。超导体应用于电机,可以提高气隙磁通密度,甚至省略铁芯。在产生相同的感应电动势的条件下,提高气隙磁通密度将减少切割磁通的导体长度,这使得电机的绕组安匝数下降,电感减小。上述因素使超导电机体积小、质量轻、同步感抗小、出力范围大。

2) 超导电缆。超导电缆利用超导体的高载流密度,与常规电缆相比较,在相同的电压等级下,其输送能力可提高 5~10 倍,或在较低电压等级上输送相同容量。体现在电力系统应用上,可以利用相同的输电走廊输送更大的电能,也可以简化电网结构、降低电网的电压等级从而获取若干附加的技术经济效益。

3) 超导变压器。与常规变压器相比较,超导变压器的体积小、质量轻、效率高,而且不使用绝缘油,具有防爆、阻燃的特点。

4) 超导限流器。超导限流器也是受到广泛关注的一种超导电力装置。现在已经研制出多种形式的超导限流器。随着电力电子器件及技术的发展,超导限流器必须应对非超导的常规限流手段的强力竞争。

5) 超导磁储能。超导磁储能可以在四象限独立地对电力系统进行有功、无功功率补偿,可有效地提高电力系统稳定性,改善供电品质,提供不间断电源,也可以利用其储能功能在短时电压恢复、潮流控制等装置中发挥作用,是一种具有采用常规储能技术难以实现的性能优越的超导电力装置。与其他超导电力装置不同的是,为了提高储能密度,超导磁储能系统需要工作在较高磁场,因此若干研究工作仍然采用低温超导材料。近年来,高温超导磁储能系统的研究工作也取得了很大进展。

随着技术的发展,超导电力装置必将逐步进入电力行业,构成含超导装置的电力系统,也可能出现由多种超导装置构成的超导电力综合系统,如超导变电站等。2010年,美国提出了构建超级变电站的示范工程计划,该项工程拟通过超导电缆等超导装置实现三个局域电网的联网运行,如图1-6所示。在美国的电网发展战略规划(GRID2030)中,也提出了用超导技术构建骨干电网的宏大构想。

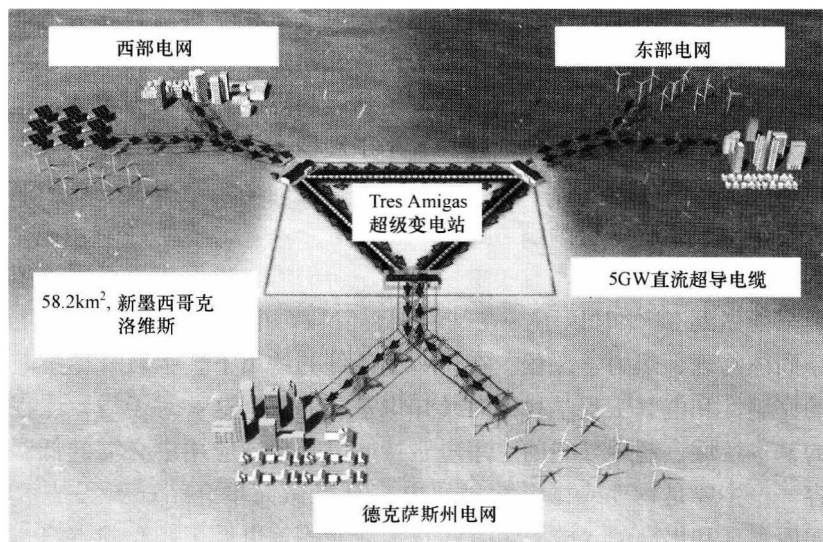


图1-6 美国计划建设的基于超导技术的超级电网互联站

(3) 超导电力装置的应用前景。比较电力工业的技术需求和超导电力的技术特点,可以说超导技术是解决现代电力系统一系列重大问题的新途径,美国在智能电网建设方案中,也把超导电力技术列在了重要地位。表1-2给出了与21世纪电力工业所面临的主要问题相对应的超导电力装置。可以看出,针对每一个问题,与现有的采用常规导体技术的解决方案相对应,都有一种甚至多种超导电力装置能为问题的解决提供新的技术手段。

表 1-2 与 21 世纪电力工业所面临的主要问题相对应的超导电力装置

	关键课题	主要对应策略及常规技术	主要对应的超导装置
电源	应用分散电力系统	新能源、热电联供、系统运行管理技术	超导储能
	提高发电效率	高温高效燃烧技术、新发电方式	超导发电机
	提高设备利用率	调节负荷峰值、改善负荷曲线特性	超导储能
输配电系统	远距离大容量输电	稳定性控制、直流输电、FACTS 技术	超导储能、超导限流器
	各大电网间联网	直流输电、稳定性控制、短路电流的抑制	超导储能、超导限流器
	电网投资的合理化	保证可靠性的电网合理化、评估机制	超导电缆
	高密度送电	绝缘技术、紧凑的结构、小型化	超导电缆、超导限流器
	高质量供电	补偿滤波技术、储能技术、电力变换技术	超导储能
	提高电网效率	高电压输电、电网结构优化	超导电缆、超导变压器
其他	改善负荷特性	用户侧管理 (DSM) 技术、储能技术	超导储能
	节省资源、保护环境	节能、利用新能源、可再生能源	各类超导电力装置

1.3 超导电力基础的教学重点

根据国家学位委员会对电气工程学科的定义, 电气工程学科培养有关电能生产、传输直至使用的全过程中, 各种电气设备和系统的设计、制造、运行、测量、控制等方面的科学研究、工程技术、管理人才。因此, 本课程虽然以超导电力技术为主体, 也包含了超导磁体技术。此外, 基于约瑟夫森效应的超导量子干涉器在检测微弱电磁信号方面具有常规技术难以获得的优势, 利用超导体表面电阻小这一特性的高频谐振腔也在加速器中获得应用, 这两者也属于电气工程学科的学习、研究对象。

按照现行的宽口径培养体系, 对于电气工程学科的本科生而言, 可用于超导电力的课时有限, 一般只能做到 32 学时以下。在基础课程阶段, 电气工程学科的学生一般没有开设量子力学、固体物理、热力学课程。在这两个条件的约束下, 本教材尽量兼顾了超导应用基础体系的完整性和电气工程学科课时及知识基础的限制这一对矛盾, 课程的重点是学习超导电性的基本特性、超导导线的应用电磁特性以及超导应用中必需的低温知识。理论性较强的内容——主要是物理或材料学科的内容都只做简单介绍; 工程技术性太强的内容, 如具体如何实现和提高超导电力装置的技术性能等等也做了相当的省略; 超导电子学应用部分没有纳入本课程。

对于面向本科生的教学安排, 如果以学习基础知识为主, 则可重点学习第 2~5 章; 如以拓展视野为主, 可以简化前几章的内容, 以第 6~8 章的框架结合当时的发展状况参考一些最新的文献资料。第 9 章从拓展知识领域的视角出发, 介绍了超导技术在微弱电磁信息检测方面的内容, 本科生课程可以不讲授此章。



2 超导现象和基础理论

教学提要

本章学习基本的超导现象以及超导现象产生机理的基础理论。理解超导理论需要量子力学、固体物理、热力学等方面的知识,而电气工程学科几乎没有开设这类基础课程。同时,作为工程应用的专业课程,课时数有限,也不可能细致地推导众多的数学方程。因此,本章只重点介绍一些结论,对于公式推导方面没有去寻根刨底地表述。读者如果有兴趣对超导理论作更深入的了解,可参阅超导理论方面的专著。一般而言,电气工程学科的教学重点在 2.1~2.4 节。

2.1 基本的超导现象

与超导应用技术直接相关的超导现象主要有理想导电性、迈斯纳效应、磁通量子效应以及约瑟夫森效应。本节主要介绍理想导电性和迈斯纳效应,这两个特性是超导体最基本的性质,是判断一种物质是否是超导体的判据,也是与超导电力关系最密切的两个特性。磁通量子效应将在 2.3 节中介绍,约瑟夫森效应则将在第 9 章中介绍。

2.1.1 理想导电性

零电阻是超导体最基本的特性之一。由于无法从理论上很好地解释电阻为什么变为零,在发现超导现象的初期,超导体电阻为零的真实性受到了怀疑,是否只是因为残余电阻太小以至于超出了测量仪器的可测量范围呢?为此,昂尼斯以及其他一些研究者进行了永久电流实验。

在图 2-1 所示的闭合回路中,假设磁场是均匀的,根据基尔霍夫定律,有

$$-A \frac{dB}{dt} = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (2-1)$$

式中: A 为闭合回路所包围的面积; B 为回路内的磁通密度; i 、 R 、 L 分别为回路电流、电阻、电感。

如果回路电阻为零,那么

$$Li + AB = \text{常数} \quad (2-2)$$

电流不变,回路内部的磁通量也不会变;回路内的磁场没有变化,则回路中的电流也没有改变。

图 2-1 (a) 所示为一个超导体构成的闭合回路,当超导体还处于正常态时加磁场,使回路包含一定的磁通,然后冷却使该超导体变成超导态。撤去磁场,使外部磁通变为零。由于闭合回路中的磁通不能变化,闭合回路中必然产生感应电流 $i(0)$ 以维持穿过回路的磁通量不变,如图 2-1 (b) 所示。该感应电流的衰减规律为

$$i(t) = i(0)e^{-(R/L)t}$$

(2-3)

闭合回路的电感可以准确计算，根据磁场或电流的衰减情况可以测量回路电阻的大小。

昂尼斯用铅（Pb， $T_c=7.4\text{K}$ ）进行了著名的永久电流实验。在图 2-2 中，线圈用铅丝绕成，并且置于液氮（LHe）中冷却到超导态。线圈充电后，切断开关 S1 的同时接通开关 S2。利用磁力计测量线圈中的电流产生的磁场，根据磁场的变化可测得电流的变化。如果铅处于正常态，电流在 10^{-5}s 内就会完全衰减。实验结果表明：处于超导态的铅丝绕组的电流几乎完全不衰减。此后，又有其他研究者也进行了类似的试验，最长的永久电流纪录达 2 年之久。通过电流衰减测定的超导金属的电阻率小于 $10^{-26}\Omega\cdot\text{m}$ ，比铜在室温下的电阻率 $10^{-8}\Omega\cdot\text{m}$ 要低 18 个数量级。因此，超导体的电阻确实可看作零，是一种理想导体。

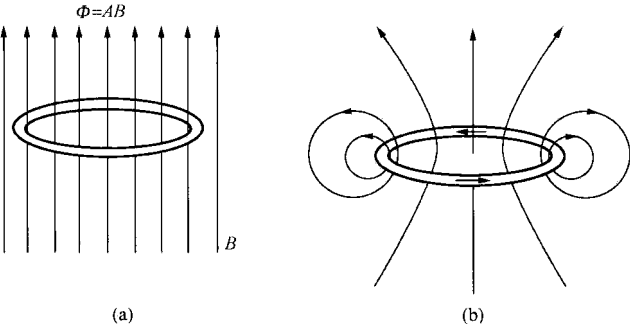


图 2-1 超导闭合电路中的磁通量

(a) 常态时，加磁场，冷至超导态；(b) 撤去磁场后

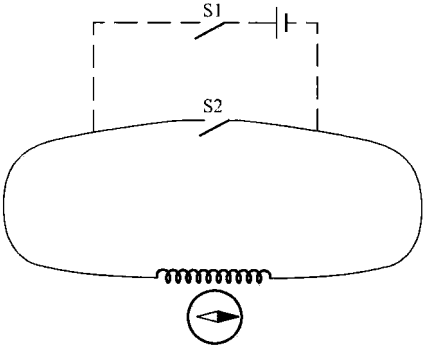


图 2-2 永久电流试验

2.1.2 超导体的临界值

(1) 临界温度。超导体电阻变为零时的温度为超导体的临界温度（Critical Temperature）。临界温度定义为在电流和磁场为零的条件下超导体呈现超导电性的最高温度，超导体在临界温度以下处于超导态，在临界温度以上则处于正常态。临界温度是一个物质常数，不同的超导体具有不同的临界温度，同一种材料在相同的条件下其临界温度有严格的确定值。在已发现的超导材料中，单一金属超导体的临界温度较低，临界温度最高的金属 Nb，其临界温度为 9.3K。合金或金属化合物的临界温度一般高于单一金属。目前常用的金属类

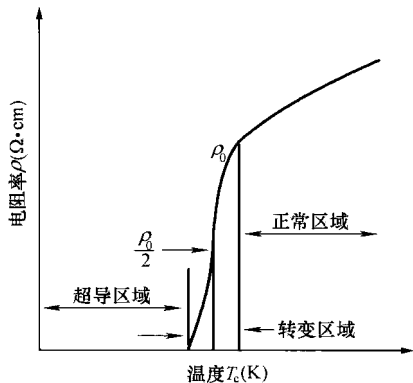


图 2-3 超导体电阻率和温度的关系

超导材料有合金 NbTi、金属化合物 Nb₃Sn、Nb₃Al 等。2001 年，日本科学家发现了临界温度为 40K 左右的金属化合物材料 MgB₂。有若干金属氧化物超导体的临界温度超过了液氮（LN₂）温度（77K），最高临界温度已经超过 130K。由此也产生了高温超导体、低温超导体的说法。

如图 2-3 所示，从超导体的电阻率开始大幅下降到最终变为零的过程是在一个有限的温度间隔内完成的，这个温度间隔称为转变宽度，间隔大小与材料的纯度、晶体的完整性和样品内部应力状态等

多种因素有关。图 2-4 所示为纯与不纯的金属 Sn 的转变过程对比。纯金属的转变宽度很窄，而含有杂质的金属、金属化合物的转变宽度则较宽。针对超导体具有转变宽度这一现象，临界温度一般被定义为：以开始急剧下降时的电阻率 (ρ_0) 为基准，电阻率下降到该基准值的 1/2 时所对应的温度。有的超导体难以观测到电阻率急剧下降的点，图 2-5 所示的高温超导的转变过程就是这样。对于这类超导体，则以电阻为零时的温度为临界温度。对于电阻为零的判断与测量准确度通常以电阻率 $2 \times 10^{-13} \Omega \cdot m$ 为标准，电阻率低于这一数量级时，认为超导体处于超导态，否则为正常态。

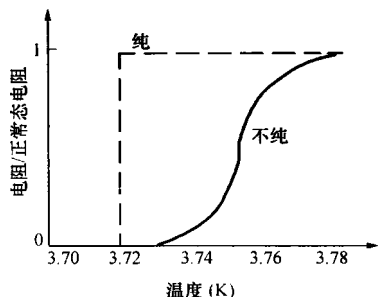


图 2-4 纯与不纯金属 Sn 的转变过程

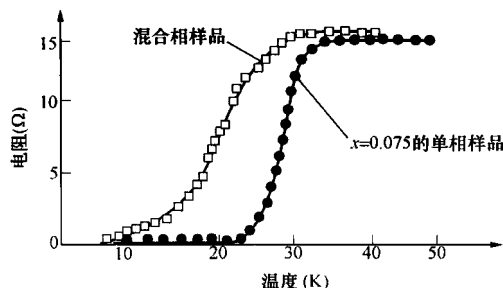


图 2-5 高温超导体的转变过程

[(La_{1-x}Ba_x)₂CuO₄] 的电阻温度特性]

(2) 临界磁场。自从超导体被发现，人们就尝试利用超导体电阻为零的特性制造磁体（线圈）。磁体是超导应用中最常用的形式。核磁共振成像仪中所用的是稳态磁场磁体，变压器绕组、电机绕组之类也可看成是具有动态特性的磁体。虽然早期用超导材料制造磁体的尝试未能成功，但也由此发现超导电性在一定的磁场强度下会消失。这一磁场值称为临界磁场（Critical Magnetic Field）。临界磁场的定义为在零磁场下超导凝聚能（正常态与超导态之间的自由能密度之差）所对应的磁场强度。临界磁场也是一个物质常数，其大小因超导体的材质不同而不同，同一材料具有确定的临界磁场值。临界磁场还是温度的函数，即

$$H_c(T) = H_{c0} \left[1 - \left(\frac{T}{T_{c0}} \right)^2 \right] \quad (2-4)$$

式中： H_{c0} 为绝对零度时的临界磁场值； T_{c0} 为在零磁场时的临界温度。

图 2-6 所示为超导体临界磁场的温度特性。有磁场作用时，超导体的临界温度也会发生变化。

(3) 临界电流密度。实验发现，当通过超导体的电流达到一定的电流密度时，超体会转变为正常态，这说明超导体有一个临界电流密度。由于实用超导材料中会含有非超导体物质，在工程应用上更关注的是临界电流。临界电流密度、临界电流不是纯粹的物质参数，它与材料的实际构成成分乃至材料的制作工艺过程相关。临界电流和临界磁场紧密相关。希尔斯比（F. B. Silsbee）法则认为：超导体承载电流时会产生磁场，当这一磁场达到超导体的临界磁场时，超导电性被破坏。当图 2-7 所示半径为 r 的超导导线中流过电流 I 时，在超导导线表面产生磁场，其值为

$$H_i = \frac{1}{4\pi} \times \frac{2I}{r} \quad (2-5)$$