

高温超导技术 系列丛书

高温超导直线电机

High Temperature Superconducting Linear Motors

金建勋 著



科学出版社

高温超导技术系列丛书

高温超导直线电机

High Temperature Superconducting Linear Motors

金建勋 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以发展高温超导直线电机为目标,以高温超导永磁直线同步电机为重点,全面介绍了直线电机、高温超导电机和高温超导直线电机的原理与技术。内容主要包括:高温超导应用技术,各种高温超导电机,尤其是高温超导直线电机的工作原理、相关技术及发展和应用状况。

本书可供从事应用超导技术和电机技术研究工作的科技工作者,电工、电力、交通、国防等领域的工程技术人员,电机及相关设备研制和生产行业的技术人员,以及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

高温超导直线电机=High Temperature Superconducting Linear Motors/
金建勋著. —北京:科学出版社,2011

(高温超导技术系列丛书)

ISBN 978-7-03-027612-4

I. 高… II. 金… III. 高温-超导体-直线电机-研究 IV. TM359.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 089283 号

责任编辑:裴 育 杨 然 / 责任校对:刘小梅
责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

陈海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 6 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2011 年 6 月第一次印刷 印张:21

印数:1—2 500 字数:411 000

定价:70.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介



金建勋,教授,出生于北京。1985年毕业于北京钢铁学院(现为北京科技大学)物理化学系金属物理专业。自1991年起开始从事高温超导研究,分别在澳大利亚新南威尔士大学和卧龙岗大学获得硕士学位和博士学位。自1997年起,先后作为研究员和高级研究员,在澳大利亚从事高温超导及其应用技术研究。2005年回国并继续从事应用超导与电工技术研究。曾主持过多项政府、大学及工业研究项目,在应用超导领域有大量原创性工作及多项技术发明专利,在国际学术刊物和会议上发表学术论文数百篇,并参与了大量国内外学术活动,获得多项奖励。

前 言

自高温超导现象于 1986 年被发现后,高温超导材料、机理和应用迅速得到深入和广泛的研究。超导学及超导应用技术的研究,进入了新的发展阶段,尤其是超导应用技术突破了其实际使用的经济性壁垒,使实际操作可在技术相对简单和运行成本较低条件下实现。超导研究与超导应用技术的发展,先后经历了自 1911 年开始的基本探索认识阶段,以及自 1958 年开始的应用技术初期准备阶段,随着高温超导材料的发展及与之相关的材料、低温、电力、电子、测试、控制及仪表仪器设备领域技术的发展,超导应用技术现已开始进入大规模实际应用的初期开发阶段。高温超导体的无直流电阻损耗和高传导电流密度等基本应用特征,使其在强电应用领域具有普遍适用性和显著高效的优越性,并且在一些特定的领域里,具有常规导体技术无法实现的功能。节能高效、技术优越和潜在的经济价值,使高温超导技术展现了强劲的生命力,并已成为 21 世纪重点研究和发展的的高新技术。目前,超导应用技术正向高温超导材料及其装置的实用化方向发展,并将是今后相当长的一个时期内,人类科技发展最重要的研究和应用技术领域之一。

高温超导体的发展,使众多领域中的装置技术有了高效节能的新技术方案,也为应用广泛的直线电机技术的发展带来了新的契机。高温超导体可以以高效绕组或磁体等形式应用于直线电机,更可有效地使直线电机动子悬浮,进行无摩擦的高效驱动,从而实现了一类新型的高效直线电机。本书介绍了直线电机的原理和控制技术及高温超导电机技术,进而对以永磁直线同步电机为主要模式的直线电机进行理论分析,并在此基础上对引入高温超导体的不同技术方案进行了全面的探讨。内容还包括直线电机的电磁分析、控制技术和优化设计等。考虑到大多数电机技术领域的专家和学者,对高温超导技术不甚了解,故对高温超导相关技术做了较详细的介绍。本书所呈现的完整内容和全面分析,望能为今后直线电机尤其是高温超导直线电机的研究和实用化技术的发展提供重要的指引和参考依据。

本书在撰写过程中,得到了电机专家朱建国教授和郭有光博士的支持,以及

郑陆海、赵会斌、徐伟和张海燕等的积极协助,特此感谢!

高温超导电机应用技术现已开始从实验研究阶段,向意义重大的实用化开发和实际应用方向发展。由于高温超导电机技术的研究内容新、发展快,加之本书又是第一部全面解释高温超导直线电机的著作,书中难免有不当之处,望读者谅解并批评指正。



2011年1月

目 录

前言

第 1 章 高温超导应用基础	1
1.1 高温超导简介	1
1.1.1 超导的发现与发展	1
1.1.2 超导的基本特性	3
1.1.3 高温超导材料的发现与特性	13
1.2 高温超导材料	23
1.2.1 高温超导块材	23
1.2.2 高温超导带材	27
1.2.3 其他超导体	36
1.3 高温超导材料的应用特性	40
1.3.1 高温超导块材的应用特性	40
1.3.2 高温超导带材的应用特性	46
1.3.3 高温超导薄膜的应用特性	52
1.3.4 高温超导体的强电应用特性	54
参考文献	75
第 2 章 直线电机原理与控制技术基础	89
2.1 直线电机简介	89
2.2 直线电机的原理与分类	93
2.2.1 直线电机的原理	93
2.2.2 直线电机的分类	98
2.3 直线电机常用控制技术	101
2.3.1 坐标变换	102
2.3.2 空间矢量脉宽调制技术	106
2.3.3 直线电机控制技术	115
2.4 直线电机常用控制算法	124
2.4.1 PID 控制算法	124

2.4.2	自适应控制	126
2.5	无传感器控制技术	128
2.5.1	无传感器控制技术简介	128
2.5.2	典型无传感器控制技术	130
	参考文献	132
第3章	高温超导电机技术	136
3.1	高温超导电机技术简介	136
3.2	高温超导同步旋转电机	136
3.2.1	基本结构和工作原理	136
3.2.2	高温超导同步电机技术和特性分析	138
3.3	高温超导异步旋转电机	145
3.3.1	基本结构和工作原理	145
3.3.2	高温超导感应电机技术和特性分析	146
3.4	高温超导磁阻旋转电机	149
3.4.1	基本结构和工作原理	149
3.4.2	高温超导磁阻电机技术和特性分析	151
3.5	高温超导磁滞旋转电机	153
3.5.1	基本结构和工作原理	153
3.5.2	高温超导磁滞电机技术和特性分析	154
3.6	高温超导永磁旋转电机	156
3.6.1	基本结构和工作原理	156
3.6.2	高温超导永磁电机技术和特性分析	157
3.7	高温超导直流旋转电机	159
3.7.1	基本结构和工作原理	159
3.7.2	高温超导直流电机技术和特性分析	164
3.8	高温超导旋转电机发展现状与趋势及应用前景	166
3.8.1	高温超导直流旋转电机发展现状与趋势及应用前景	166
3.8.2	高温超导交流旋转电机发展现状与趋势及应用前景	167
3.9	高温超导直线电机	175
	参考文献	176
第4章	直线电机实验技术与方法	180

4.1	直线电机实验技术简介	180
4.2	直线电机特性的仿真分析	181
4.2.1	直线电机模型与仿真分析基础	181
4.2.2	高温超导磁悬浮直线推进系统的基本结构和原理	188
4.2.3	永磁直线同步电机的特性与分析	189
4.2.4	直线感应电机的实验特性与分析	199
4.3	永磁直线同步电机模型装置实验系统	207
4.3.1	永磁直线同步电机模型装置	207
4.3.2	基于变频器和虚拟仪器的变频控制驱动系统	207
4.3.3	基于单片机的步进控制驱动系统	211
4.3.4	基于计算机的步进控制驱动系统	214
4.4	直线电机控制方法与实验分析	218
4.4.1	永磁直线同步电机伺服控制	218
4.4.2	永磁直线同步电机开环控制及分析	235
4.4.3	永磁直线同步电机闭环控制及分析	241
4.4.4	小结	245
4.5	基于虚拟仪器的直线电机测控方法	246
4.5.1	虚拟仪器简介	246
4.5.2	基于虚拟仪器的控制信号源的实现	247
4.5.3	基于虚拟仪器的直线电机测控方法	255
4.5.4	基于虚拟仪器的永磁直线同步电机开环控制系统	260
4.5.5	基于虚拟仪器的永磁直线同步电机闭环控制系统	264
4.5.6	小结	282
	参考文献	283
第5章	高温超导直线电机与磁悬浮技术	285
5.1	高温超导直线电机技术简介	285
5.2	高温超导直线电机模型	287
5.2.1	直线电机的高温超导原理	287
5.2.2	高温超导块材磁体次级直线同步电机	289
5.2.3	高温超导线圈初级直线同步电机	297
5.2.4	高温超导线圈磁体次级直线同步电机	299

5.2.5	高温超导块材直线磁阻同步电机	300
5.2.6	高温超导线圈初级直线异步电机	303
5.2.7	全超导型高温超导直线同步电机	303
5.3	高温超导磁悬浮技术	304
5.3.1	超导永磁斥力型	304
5.3.2	电动斥力型	311
5.3.3	电磁吸引型	311
5.4	高温超导直线电机和磁悬浮系统发展及应用	313
5.4.1	高温超导直线电机	313
5.4.2	高温超导磁悬浮系统	320
5.4.3	高温超导直线电机和磁悬浮系统的应用前景	321
	参考文献	323

第 1 章 高温超导应用基础

1.1 高温超导简介

1.1.1 超导的发现与发展

1908 年荷兰莱顿(Leiden)大学的卡末林·昂内斯(K. H. Onnes)教授成功地将氦气液化,达到了 4.2K 的低温。1911 年,昂内斯发现水银(汞)的电阻在液氦低温条件(4.15K)下,水银的电阻突然降为零^[1]。随后的持续电流实验证实,此时的电阻率约为 $10^{-23} \Omega \cdot \text{cm}$,而良导体铜在 4.2K 时的电阻率约为 $10^{-9} \Omega \cdot \text{cm}$,远大于此时水银的电阻率。因此,当温度降低到 4.2K 以下时,可以认为水银的电阻突然消失了。这一发现标志着人类对超导研究的开始。低温条件下物质电阻突然消失的现象,称为超导电性的零电阻现象。典型的电阻-温度($R-T$)实验曲线反映出,当温度降低到特定的临界点 T_c 时,电阻陡降为零。 T_c 称为临界温度,它是最重要的超导临界参量之一。1913 年,人们发现铅是超导临界温度 $T_c = 7.2\text{K}$ 的超导体。17 年后,人们发现铌具有更高的超导临界温度 $T_c = 9.2\text{K}$,这也是目前元素超导体 T_c 的最高值。在元素、合金和化合物中,人们逐渐发现了大量具有上述零电阻现象的物质。

1933 年,迈斯纳(W. Meissner)和奥克森费尔德(R. Ochsenfeld)发现超导体具有完全抗磁性,又称为迈斯纳效应^[2],即当超导体处于超导态时,其内部磁感应强度为零,并且与先加磁场再降温至超导态,还是先进入超导态再加磁场的过程无关。这和理想导体的性能大不一样。在迈斯纳效应发现之前,人们一直将超导体视为理想导体。这一发现表明,超导体除具有零电阻特性外,还具有完全抗磁性。这两个特性就是超导体的两个基本特性。迈斯纳效应还表明,超导态是一种热力学状态,可用一些热力学的研究方法进行研究。继迈斯纳效应之后,1934 年,高特(C. J. Gorter)和开西米尔(H. B. Casimir)提出了二流体模型^[3]。1935 年,伦敦兄弟(F. London 和 H. London)提出了著名的伦敦方程^[4],这一方程能描述超导体的零电阻特性及迈斯纳效应,同时引入了穿透深度的概念,即外磁场在超导体中的衰减长度。

在 20 世纪五六十年代,超导研究取得了突破性进展。在理论方面,1950 年,金兹堡(V. L. Ginzburg)和朗道(L. D. Landau)提出了一个基于二级相变的使用序

参数描述超导的唯象理论,被称为金兹堡-朗道(G-L)理论^[5];1953年,皮帕德(A. B. Pippard)引入非局域超导电动力学,发展了伦敦理论,并提出超导相干长度的概念^[6];1957年,巴丁(J. Bardeen)、库珀(L. N. Cooper)、施瑞费(J. R. Schrieffer)等基于同位素效应、超导能隙等重要实验结果,提出了超导的微观理论,即著名的BCS理论^[7],从而解决了超导微观机理问题;但由于BCS理论是弱耦合理论,对描述强耦合作用的情况有所缺陷,伊里士伯格(G. M. Elishberg)和麦克米兰(W. L. McMillan)等又发展了超导的强耦合理论^[8];1957年,阿布里科索夫(A. A. Abrikosov)在超导正常态负界面能情况下,求解G-L方程,从而预言了第二类超导体及磁通点阵的存在,戈尔柯夫(L. P. Gorkov)则证明G-L方程可由微观理论导出,故也将G-L理论和阿布里科索夫及戈尔柯夫的理论通称为GLAG理论^[9];1962年,约瑟夫森(B. D. Josephson)在理论上预言了超导的隧道效应,库珀对的隧道效应即约瑟夫森效应^[10~13]。在电声机理发展的同时,人们还提出了其他的机制,如里特尔(Little)的一维激子配对理论及金兹堡的二维激子配对理论等,但均未在实验中得到证实。

这期间在超导物理实验方面也有许多重要工作,例如,1950年,麦克斯韦(E. Maxwell)和雷诺(C. A. Reynolds)发现了超导的同位素效应;1953~1960年,他们利用各种实验方法对超导体的研究表明,在电子激发谱中存在能隙;1961年,磁通量子化被观测证实;1963年,实验证实约瑟夫森效应;1967年,观察到超导处于混合态下的磁通晶格;自1964年起对宏观量子干涉现象也进行了大量的研究。这一系列重要的实验工作对超导理论发展及超导材料的发展,产生了重要的指导意义。

在超导物理特性研究工作进行的同时,超导材料的探索工作也十分活跃,它对物理特性的研究及应用起到了良好的促进作用。超导材料从大的方面可分为两类,即常规超导体和非常规超导体。前者能较好地用BCS理论及相关的传统理论予以解释;而后者则较难解释,这就为超导研究提出了许多新的问题。常规超导体主要包括元素超导体、合金和化合物超导体,如NbTi、具有NaCl面心立方结构的超导材料和具有A₁₅结构的超导材料。自20世纪70年代以来,人们发现了一系列非常规超导体,如有机超导体、重费米(Fermi)子超导体、磁性超导体、低载流子浓度超导体、超晶格超导体和非晶超导体等。其中,低载流子浓度超导体包括氧化物超导体、简并半导体(如GeTe、SnTe)、低维层状化合物(如NbSe₂、NbS₂)及硫硒碲化合物等。1986年,缪勒(K. A. Müller)和贝德罗兹(J. G. Bednorz)发现了高T_c铜氧化物超导体,揭开了可在液氮温区之上工作的“高温超导体”研究的序幕,并且引发了全世界范围的超导研究热潮。自1987年液氮区高温超导氧化物被发现后,超导装置和器件对制冷技术的要求大大降低,超导强电装置和电子器件的实用化展现了更光明的前景。

从纯元素到高温超导氧化物,目前已发现了上千种超导体,而良导体如 Cu、Ag、Au 温度降低到极低温度的条件下,仍不出现零电阻现象。纯元素中 Nb 的 T_c 最高约为 9K; 超导合金 NbTi 的 T_c 约为 9K; 化合物 Nb₃Sn 的 T_c 约为 18K; Nb₃Ge 膜的 T_c 约为 23K。1987 年发现 Y 系高温超导氧化物的 T_c 约为 90K, Bi 系高温超导氧化物的 T_c 约为 110K。高温超导氧化物的 T_c 大于 77K, 即在液氮 (77K) 条件下具有超导电性。因此, 高温超导材料的发现, 使超导电性的实验研究和超导装置的运行操作, 摆脱了昂贵的和苛刻的液氮低温条件。

通常, 人们把金属、合金和化合物超导体称为常规超导体、传统超导体或低温超导体; 把临界温度较高的氧化物陶瓷超导体称为高温超导体。常规超导体都是简单结构, 而高温超导体则是由复杂畸变的钙钛矿结构组成。其他超导体还有在有机物中发现的 C₆₀、2001 年发现的金属间化合物 MgB₂ 和 2006 年发现的 Fe-基超导体等。

2001 年 3 月初, 日本科学家报道, 二元材料 MgB₂ 在 39K 左右表现出超导特性。这个发现迅速引起了世界范围内的研究热潮。对 MgB₂ 超导体性质的研究进展非常迅速, 对其超导体机理的认识也不断深化。理论计算表明, 在 MgB₂ 中不只有一个能带跨越费米面, 而且电声耦合所造成的费米面失稳, 完全可能在两个能带的费米面处产生能隙, 这一点是 MgB₂ 超导体与传统超导体的不同之处。有关两个能隙的图像已经在比热、核磁共振、电子隧道谱和角分辨光电子谱的实验中得到证实。有关两个能隙是如何形成以及如何影响超导特性则是目前有关 MgB₂ 超导体研究的热点。MgB₂ 超导体在 20K 左右的温度, 8 万倍于地球磁场的情况下, 可以承载很大的超导电流, 并且能耗极低; MgB₂ 材料的价格低廉, 而且比陶瓷特性的氧化物高温超导体容易加工成型; 此外, MgB₂ 超导体的超导相干长度较长, 容易制备用于微弱电磁信号检测的超导量子干涉器件, 具有较好的应用前景。

在超导物理及材料研究探索工作进行的同时, 超导应用研究方面也出现了大量有成效的工作, 如超导磁体、超导电力设备、超导量子干涉仪等电子器件已逐渐商品化和工业化。原有的低温超导体需要很低的操作温度, 限制了超导的实际应用, 高温超导体的发现为超导的实际应用带来了新的希望。

1.1.2 超导的基本特性

1. 零电阻现象

19 世纪末液化气体的实验技术取得了突破性进展, 曾一度被视为“永久气体”的空气于 1895 年被液化。1898 年, 杜瓦(J. Dewar)首次把氢气变成液体氢, 液化点为 -253℃; 在利用液体空气和液氢的基础上, 当时的实验室已能实现 -259℃。

1908年,昂内斯经过长期努力实现了氦气的液化。在1个大气压下,测得氦气的液化点是4.25K。但如果降低液氦的蒸气压,那么随着蒸气压的下降,液氦的沸点也会相应降低(减压降温法)。通过昂内斯和莱顿大学实验室研究人员的努力,终于获得了4.25~1.15K当时所能达到的最低温度,从而为研究低温下的物理特性开辟了广阔的前景。

随着温度的降低,金属的电导率,即电阻率的倒数,会变大。在4.25~1.15K的低温度区下,莱顿实验室的研究人员观察到一些金属的电导率会显著增加,进而在1911年拉开了人类研究超导现象的序幕。当他们在观察低温下水银电导率变化时,在4.2K附近发现水银的电阻突然消失了。经过多次实验发现,当温度下降时,水银的电阻先是平缓地减小,而在4.2K附近电阻突然降为零^[1]。实际上,水银的电阻值与在摄氏零度时水银的电阻值之比,由大约为1/500突然下降到小于百万分之一,这时的水银电阻实际上可视为零。昂内斯把这种显示出超导电性的物质状态定名为超导态。此后,他们又发现许多其他金属也具有超导电现象。经过多次实验,昂内斯指出:在4.2K以下,水银进入一个新的物态。在这种新物态中,通常用超导体一词表示当冷却到一定温度以下时,能表现出超导电性的材料。当超导体显示出超导电性时,超导体处于超导态,否则处于正常态。超导体失去电阻时的温度称为超导转变温度或临界温度,以 T_c 表示。

2. 迈斯纳效应

直到1933年,人们从零电阻现象出发,一直把超导体和完全导体或称无阻导体,完全等同起来。在完全导体中不能存在电场,即 $E=0$,于是有

$$-\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times E = 0 \quad (1-1)$$

这就是说,在完全导体中不可能有随时间变化的磁感应强度 B ,即在完全导体内部保持着它失去电阻时样品内部的磁场,可以认为磁通分布被“冻结”,外加磁场的变化不能改变“冻结”在完全导体内部的磁通分布。

完全导体有其特殊的磁性质,但1933年德国物理学家迈斯纳和奥克森费尔德的磁测量实验表明,超导体的磁性质与完全导体不同,该实验否定了“冻结”概念。这一实验表明:不论是在没有外加磁场还是有外加磁场的情况下,只要 $T < T_c$,超导体则进入超导态,在超导体内部总有 $B=0$ 。所以,不能把超导体和完全导体等同起来。除了零电阻特性外,超导体还有其独特的磁场特性。当施加一外加磁场时,在超导体内部不出现净磁通密度的特性称为完全抗磁性或称为迈斯纳效应^[2]。超导体的磁状态是热力学状态,即在给定的条件下(如 T, H),它的状态是唯一确定的,与达到这一状态的具体过程无关。

迈斯纳效应给出超导体一个特有的磁场特性:在超导体内 $B=0$ 。由于 $B=\mu_0 H$, 则 $B=0$ 可以有两种描述, $\mu=0$ 或 $\mu=1$, 超导体表面流过抗磁电流产生反向磁场将外磁场抵消。

对于 $\mu=1$ 的描述, 此时面电流 j 像交变场中感应的涡旋电流一样, 只不过这里的交变频率为零, 且电流不随时间变化。在这个描述方法中要注意的是, B 和 H 之间没有不同, 在超导体内二者都消失。因此, 从外部引入的电流与外加磁场感应的电流之间没有不同。

对于 $\mu=0$ 的描述, 在这个描述方法中, H 被定义为

$$B = \mu_0(H + M) = \mu_0(1 + \chi)H \quad (1-2)$$

因为 $B=0$, 所以 $\chi=-1$, 式中的 M 被认为是真实物体的磁矩。与外加磁场有关的电流永远不出现, 电流只能是外部引入的或者是在环中的闭合电流。

以上两种描述方法不同, 各有优缺点。使用 $\mu=1$ 的描述方法处理磁场中超导体的问题, 往往比较复杂, 但可以得到更多物理本质的特性。目前无法测量出感应的面电流, 故无法确定 μ 是等于 0 还是 1, 这两种描述方法都有一定的参考价值。

迈斯纳效应的发现揭示了超导态的一个本质: 超导体内部磁感应强度 B 必须为 0, 这是自然界一个特有的规律。因此, 所谓超导态, 必须同时具有 $\rho=0$ 和 $B=0$ 两个条件。单纯的 $\rho=0$, 并不能保证有迈斯纳效应, 而 $B=0$ 必须要求 $\rho=0$, 因此 $\rho=0$ 是存在迈斯纳效应的必要条件。为了保证超导体内部 $B=0$, 必须有一个无阻(即 $\rho=0$)的表面电流以屏蔽超导体内部, 这个屏蔽外磁场的电流叫做迈斯纳电流。这样似乎 $B=0$ 比 $\rho=0$ 更重要, 其实不然, 因为 $\rho=0$, 则要求超导体内 $E=0$, 而 $B=0$ 只保证在超导体内没有感应电场, 并不能保证任何情况下 $E=0$ 都成立。从 $\rho=0$ 、 $B=0$ 的超导态转变到 $\rho \neq 0$ 和 $B \neq 0$ 的正常态, 不同物质都有各自的特征参数: 临界温度 T_c 、临界磁场 $H_c(T)$ 、临界电流密度 $J_c(T)$ 。 T_c 、 $H_c(T)$ 和 $J_c(T)$ 统称超导电性。

3. 临界温度

如前所述, 1911 年实验发现水银在 4.2K 附近, 电阻突然消失。后来的实验发现这并不是水银的独有特性, 许多元素和化合物在各自特有的转变温度 T_c 下都具有超导电性, 并用 T_c 表示开始失去电阻时的临界温度。测量 T_c 主要有电测法和磁测法两种。电测法是利用零电阻效应, 磁测法是利用超导体的磁性质来测量 T_c 。电阻也有不是陡降的情况, 存在电阻转变区间, 即零电阻温度 T_c' 和起始转变温度 T_c'' 。由正常态向超导态的过渡是在一个温度间隔内完成的, 也就是电阻下降到零的过程, 是在一个有限的温度间隔内完成的, 称这个温度间隔为转变宽度 ΔT_c 。通常把电阻下降到正常态电阻值约一半时所处的温度定为 ΔT_c 。 ΔT_c 的大小取决于材料的纯度、晶体的完整性和超导体内部的应力状态等因素。高温超导

体临界温度 T_c ，一般是指零电阻温度。在不同的 T_c 下，周期表中有相当一部分元素会出现超导电性。 T_c 是物质常数，同一种材料在相同的条件下有严格的确定值。

1913年，人们发现铅是 T_c 为 7.2K 的超导体。17年后，人们发现铌具有更高的 T_c 为 9.2K，这也是目前元素超导体的 T_c 最高值。在元素、合金和化合物中，人们逐渐发现了大量具有上述零电阻现象的物质。20世纪70年代，人们发现使用非晶化方法可改变金属和合金的 T_c 。超导合金和化合物的种类繁多，NaCl 结构和 $A15(A_3B)$ 型化合物具有很高的 T_c ， Ge_3Nb 薄膜具有最高的 T_c 为 23.2K。

1975年，安德鲁斯(K. Andres)发现化合物 $CeAl_3$ 的低温比热系数 γ 值为 $1620\text{mJ}/(\text{mol} \cdot \text{K}^2)$ ，比普通金属大 200 倍，这说明 $CeAl_3$ 中电子的有效质量是自由电子的 200 倍，所以称之为重费米子化合物。1979年，斯泰格利士(F. Steglich) 研究小组发现重费米子化合物 $CeCu_2Si_2$ 是超导体，到 1991 年又发现了两个新的重费米子超导体。从重费米子超导体的物理性质可以看出^[14]，所有这些重费米子超导体的临界温度 T_c 都很低。从实用性观点看，它们的重要性并不明显，但对凝聚态物理，特别是对超导电性研究领域的发展却具有十分重大的意义。

1986年，缪勒和贝德罗兹发现 La-Ba-Cu-O 氧化物中可能存在高温超导电性，他们发现当温度降低到 35K 时 La-Ba-Cu-O 的电阻陡降，到 13K 时电阻完全消失。这就揭开了高温超导电性研究的新篇章，将超导体的范围从金属材料扩展到氧化物陶瓷材料。随后，美籍华人朱经武等和中国科学院的赵忠贤等几乎同时各自独立地研制出 Y-Ba-Cu-O 陶瓷超导体，其临界温度 T_c 达到 90K，液氮的温度禁区(77K)奇迹般地被突破了。

随后，米切尔(C. Michel)等制备出不含稀土元素的 Bi-Sr-Ca-Cu-O 氧化物超导体，它有两个相，临界温度分别为 85K 和 110K。盛正直等发现 Tl-Ba-Ca-Cu-O 氧化物超导体， T_c 为 125K。1993年，菩提林(S. N. Putilin)和希林(A. Schilling)等又发现了 $T_c = 135\text{K}$ 的 (Hg-Ba-Ca-Cu-O) 氧化物超导体，至今汞系氧化物超导体还保持着最高的临界转变温度。

4. 临界磁场

零电阻现象发现之后，昂内斯随后又发现超导体在一定的外磁场作用下会失去超导电性。昂内斯发现超导体之后，就立刻想到做一个没有损耗的磁体，但是他用一个磁场加到超导体上之后，当磁场达到一定值时，超导体就恢复了电阻，回到正常态。1913年，昂内斯曾试图用超导铅线绕制超导电磁体，但他发现，当超导铅线中的电流超过某一临界值时，超导线会转变为正常态。1914年，他又发现超导态可以被外加磁场破坏。假如把磁场平行地加到一根细长的超导棒上，在一定的磁场强度下，棒的电阻突然恢复。当超导体处在低于 T_c 的任一确定温度下时，若外加磁场强度 H 小于某一确定数值 H_c ，则超导体具有零电阻；当 $H > H_c$ 时，电阻

突然出现,超导态被破坏,转变为正常态。使超导体电阻恢复的磁场值称为临界磁场 H_c 。在 $T < T_c$ 的不同温度下, H_c 的值是不同的,但 $H_c(0)$ 是物质常数。这里所说的电阻突然恢复,仅存在于很纯的、无应力的金属中,而且所用的测量电流要很小,如果存在杂质和应力等,则在超导体不同处有不同的 H_c ,因此电阻恢复将在一个较宽的范围内完成。和定义 T_c 一样,通常把 $R=R_n/2$ 相应的磁场称为临界磁场,其中 R_n 是在超导转变前的电阻。合金、化合物超导体以及高温超导体的临界磁场转变很宽,定义临界磁场的方法很多,除定义 H_c 为 $R=R_n/2$ 时的磁场外,也有定义为 $90\%R_n$ 或者 $10\%R_n$ 的,还有将 $R-H$ 转变正常态直线部分延长与转变主体部分延长线交点相应的磁场定义为 H_c 。 H_c 称为超导体的临界磁场,它是温度的函数,记为 $H_c(T)$,并有如下经验公式:

$$H_c(T) = H_c(0)[1 - (T/T_c)^2] \quad (1-3)$$

式中, $H_c(0)$ 为 $T=0K$ 时超导体的临界磁场,不同材料的 $H_c(0)$ 值不同。对于临界磁场可分以下两种类型讨论。

类型 1: 在 $H-T$ 相区, T_c 以下,临界磁场 $H_c(T)$ 随温度的下降而增加。当外磁场小于 $H_c(T)$ 时,超导体内部无磁通穿过;当外磁场超过 $H_c(T)$ 时,超导体返回到正常态,磁场完全穿透超导体。人们常常用宏观的磁化强度 M 与外磁场 B 的关系曲线来表示这种类型的穿透行为,如图 1-1(a) 所示。这种类型的超导体称为第一类超导体。

类型 2: 当外磁场低于下临界磁场 $H_{c1}(T)$ 时,无磁场穿透超导体;当外磁场高于上临界磁场 $H_{c2}(T)$ 时,超导体返回到正常态,磁场完全穿透超导体。当外磁场强度介于 $H_{c1}(T)$ 和 $H_{c2}(T)$ 之间时,存在部分磁通穿透,超导体内部形成相当复杂的微观结构——正常态和超导态共存的混合态。该类型超导体的磁化曲线如图 1-1(b) 和 (c) 所示,此类超导体称为第二类超导体。

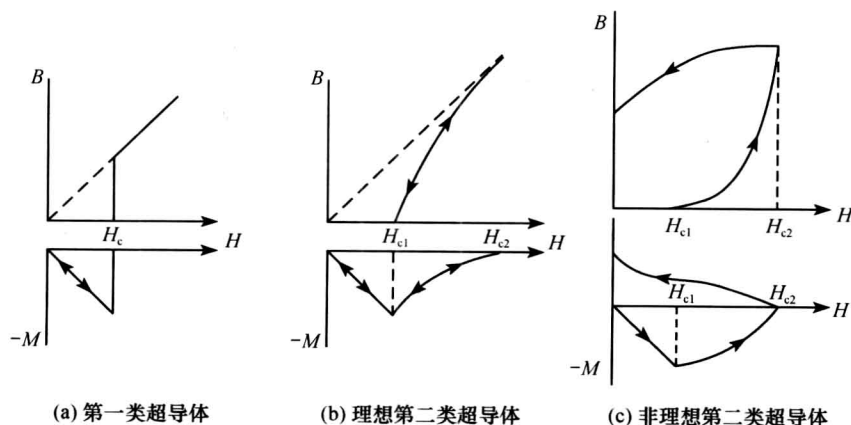


图 1-1 第一类和第二类超导体的磁化曲线