



中外物理学精品书系

引进系列 · 32

Flux Pinning in Superconductors

超导体中的磁通钉扎

〔日〕松下照男 (Teruo Matsushita) 著

索红莉

张子立

〔日〕倪宝荣

刘志勇

译



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

中外物理学精品书系

引进系列 · 32

Flux Pinning in Superconductors

超导体中的磁通钉扎

〔日〕松下照男 (Teruo Matsushita) 著

索红莉

张子立

〔日〕倪宝荣

刘志勇

译



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

著作权合同登记号 图字：01-2012-7367

图书在版编目(CIP)数据

超导体中的磁通钉扎=Flux Pinning in Superconductors/(日)松下照男著;索红莉等译. —北京:北京大学出版社,2014.12

(中外物理学精品书系)

ISBN 978-7-301-25150-8

I. ①超… II. ①松… ②索… III. ①超导体—磁通线点阵 IV. ①TM26

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 272374 号

Translation from English language edition:

Flux Pinning in Superconductors

by Teruo Matsushita

Copyright © 2007 Springer Berlin Heidelberg

Springer Berlin Heidelberg is a part of Springer Science+Business Media

All Rights Reserved

书 名: 超导体中的磁通钉扎

著作责任者: [日]松下照男(Teruo Matsushita)著

索红莉 张子立 [日]倪宝荣 刘志勇 译

责任编辑: 王剑飞

标准书号: ISBN 978-7-301-25150-8/O · 1033

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> 新浪官方微博:@北京大学出版社

电子信箱: zpup@pup.pku.edu.cn

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62765014
出版部 62754962

印 刷 者: 北京中科印刷有限公司

经 销 者: 新华书店

730 毫米×980 毫米 16 开本 27.5 印张 520 千字

2014 年 12 月第 1 版 2014 年 12 月第 1 次印刷

定 价: 82.00 元

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

举报电话: 010-62752024 电子信箱: fd@pup.pku.edu.cn

“中外物理学精品书系”

编委会

主任：王恩哥

副主任：夏建白

编委：（按姓氏笔画排序，标*号者为执行编委）

王力军	王孝群	王牧	王鼎盛	石兢
田光善	冯世平	邢定钰	朱邦芬	朱星
向涛	刘川*	许宁生	许京军	张酣*
张富春	陈志坚*	林海青	欧阳钟灿	周月梅*
郑春开*	赵光达	聂玉昕	徐仁新*	郭卫*
资剑	龚旗煌	崔田	阎守胜	谢心澄
解士杰	解思深	潘建伟		

秘书：陈小红

序 言

物理学是研究物质、能量以及它们之间相互作用的科学。她不仅是化学、生命、材料、信息、能源和环境等相关学科的基础，同时还是许多新兴学科和交叉学科的前沿。在科技发展日新月异和国际竞争日趋激烈的今天，物理学不仅囿于基础科学和技术应用研究的范畴，而且在社会发展与人类进步的历史进程中发挥着越来越关键的作用。

我们欣喜地看到，改革开放三十多年来，随着中国政治、经济、教育、文化等领域各项事业的持续稳定发展，我国物理学取得了跨越式的进步，做出了很多为世界瞩目的研究成果。今日的中国物理正在经历一个历史上少有的黄金时代。

在我国物理学科快速发展的背景下，近年来物理学相关书籍也呈现百花齐放的良好态势，在知识传承、学术交流、人才培养等方面发挥着无可替代的作用。从另一方面看，尽管国内各出版社相继推出了一些质量很高的物理教材和图书，但系统总结物理学各门类知识和发展，深入浅出地介绍其与现代科学技术之间的渊源，并针对不同层次的读者提供有价值的教材和研究参考，仍是我国科学传播与出版界面临的一个极富挑战性的课题。

为有力推动我国物理学研究、加快相关学科的建设与发展，特别是展现近年来中国物理学家的研究水平和成果，北京大学出版社在国家出版基金的支持下推出了“中外物理学精品书系”，试图对以上难题进行大胆的尝试和探索。该书系编委会集结了数十位来自内地和香港顶尖高校及科研院所的知名专家学者。他们都是目前该领域十分活跃的专家，确保了整套丛书的权威性和前瞻性。

这套书系内容丰富，涵盖面广，可读性强，其中既有对我国传统物理学发展的梳理和总结，也有对正在蓬勃发展的物理学前沿的全面展示；既引进和介绍了世界物理学研究的发展动态，也面向国际主流领域传播中国物理的优秀专著。可以说，“中外物理学精品书系”力图完整呈现近现代世界和中国物理

科学发展的全貌,是一部目前国内为数不多的兼具学术价值和阅读乐趣的经典物理丛书。

“中外物理学精品书系”另一个突出特点是,在把西方物理的精华要义“请进来”的同时,也将我国近现代物理的优秀成果“送出去”。物理学科在世界范围内的重要性不言而喻,引进和翻译世界物理的经典著作和前沿动态,可以满足当前国内物理教学和科研工作的迫切需求。另一方面,改革开放几十年来,我国的物理学研究取得了长足发展,一大批具有较高学术价值的著作相继问世。这套丛书首次将一些中国物理学者的优秀论著以英文版的形式直接推向国际相关研究的主流领域,使世界对中国物理学的过去和现状有更多的深入了解,不仅充分展示出中国物理学研究和积累的“硬实力”,也向世界主动传播我国科技文化领域不断创新的“软实力”,对全面提升中国科学、教育和文化领域的国际形象起到重要的促进作用。

值得一提的是,“中外物理学精品书系”还对中国近现代物理学科的经典著作进行了全面收录。20世纪以来,中国物理界诞生了很多经典作品,但当时大都分散出版,如今很多代表性的作品已经淹没在浩瀚的图书海洋中,读者们对这些论著也都是“只闻其声,未见其真”。该书系的编者们在这方面下了很大工夫,对中国物理学科不同时期、不同分支的经典著作进行了系统的整理和收录。这项工作具有非常重要的学术意义和社会价值,不仅可以很好地保护和传承我国物理学的经典文献,充分发挥其应有的传世育人的作用,更能使广大物理学人和青年学子亲身体会我国物理学研究的发展脉络和优良传统,真正领悟到老一辈科学家严谨求实、追求卓越、博大精深的治学之美。

温家宝总理在2006年中国科学技术大会上指出,“加强基础研究是提升国家创新能力、积累智力资本的重要途径,是我国跻身世界科技强国的必要条件”。中国的发展在于创新,而基础研究正是一切创新的根本和源泉。我相信,这套“中外物理学精品书系”的出版,不仅可以使所有热爱和研究物理学的人们从中获取思维的启迪、智力的挑战和阅读的乐趣,也将进一步推动其他相关基础科学更好更快地发展,为我国今后的科技创新和社会进步做出应有的贡献。

“中外物理学精品书系”编委会 主任
中国科学院院士,北京大学教授

王恩哥

2010年5月于燕园

原版序言

目前,超导电性作为一种可以通过提高能量利用率来阻止环境恶化的技术已经引起人们的广泛关注。超导电性实际应用的可行性取决于以下几点:超导体能够传输的最大电流密度、传输过程中的能量损耗以及超导体可以承受的最大磁场强度等,这些因素与超导体中量子化磁通线的钉扎有直接的关系。本书详细地阐述了相关知识,从磁通钉扎的基本物理理论到由磁通钉扎引起的各种电磁现象,这些知识于那些对超导应用感兴趣的读者会有一定的帮助。

出于这样的目的,1994年作者出版了本书的日文版。从那时到现在,高温超导体的研究和发展有了很大地进步,尤其是2001年一种新的超导体—— MgB_2 的发现,使得超导电性的研究向着应用的要求稳步地深入。其实,新型超导体和传统合金导体中的磁通钉扎现象并没有本质的不同。因此,将要出版的英文版与已经出版的日文版相比没有什么大的变化,仅仅增加了对新型超导体中一些现象的介绍。

以下是对每一章节内容的大概介绍。

第一章以金兹堡-朗道(Ginzburg-Landau)理论为基础,介绍了在第II类超导体中对磁通钉扎和电磁现象起决定作用的各种基本超导特性。特别是超导序参数的相梯度的单一性,它阐释了量子化的磁通线中心必须处于正常态以保证约瑟夫森(Josephson)电流不发散这一理论。当磁通线由于受到洛伦兹力的作用而移动时,感应的电场会引起核心处正常电子的运动,产生能量损耗,同时该核心处的结构也受磁通钉扎的影响。本章还讨论了对上临界场起决定作用的动能因素,这将帮助读者理解在Nb-Ti中的人工Nb钉扎中心处的动能钉扎机制,第六章给出了相关知识的详细讨论。

第二章讨论了临界态模型,这一模型的讨论是理解超导体中不可逆电磁现象的必要条件。由于磁通线受到洛伦兹力作用时会感应产生欧姆电阻,所以我们在欧姆电阻的基础上介绍不可逆理论。另外,超导体中的损耗有一个滞后的非欧姆特性,我们也讨论了这一现象产生的原因。临界态模型给出了电流密度和磁场强度之间的关系,我们用麦克斯韦方程解释超导体中的这一电磁关系。读者也将了解到在超导体中可以用临界态模型描述超导体中的不可逆磁化和交流损耗。此外,超导体的抗磁效应也将是一个很重要的课题。

第三章讨论了各种电磁现象,包括在第二章中没有涉及的几何效应和动力学现象。在交流磁场、磁通跃迁以及表面不可逆场叠加的情况下,我们对直流伏

安特性做了修正,并在一个很宽的温度变化范围内讨论了直流磁化系数。另外,当交流磁场作用于尺寸小于钉扎相干长度的超导体时,损耗会发生一种与临界态模型预言相背离的不正常地减小,这一钉扎相干长度称为坎贝尔(Campbell)交流穿透深度。这要归因于限制在钉扎势阱中的可逆磁通运动,它与进出钉扎势阱的磁通线引起的磁滞损耗相反。在高温超导体中由于磁通线的热运动,超导电流被在时间上有略有延迟的磁通钉扎所维持,我们将其称为磁通蠕动现象。在不可逆场的磁场中,临界电流密度将减少到零。本章也阐述了对不可逆场的理论起决定作用的因素,这一结果也用在第八章所涉及的高温超导体讨论中。

第四章介绍了当柱状或带状超导体置于纵向磁场中时,超导电流流动时所产生的各种现象,并解释了电流平行于磁场时的无洛伦兹力(force-free)的模型。尽管这一模型主张无洛伦兹力状态是材料本身所固有的状态,但是我们观察到在纵向磁场中临界电流密度依赖于磁通钉扎强度,这与在横向磁场中观察到的情况相似,这表明:在没有钉扎效应时,无洛伦兹力状态是不稳定的。通过导入一个由平行电流而引起的磁通线格子的变形,我们就能得到一个能量的增加,而这个能量增加可以导出反作用力矩,临界电流密度将由力矩和钉扎力之间的平衡决定。我们将用磁通线的运动解释在感应电场中观察到的 Josephson 方程的破坏现象。在有阻态(resistive state)中一个负区域电场的特殊螺旋结构也可以用由反作用力矩感应的磁通运动来解释。在各种情况的应用中,临界电流密度是决定超导体性能的一个关键参数,因此这一参数的测量方法是非常重要的。

临界电流密度是决定超导材料在不同磁场下是否可以应用的重要指标,因此了解超导电流密度的测量方法是非常重要的。第五章详细地介绍了不同的测试方法,包括传输法和磁场法。这些方法表明在超导体中磁通线和电流的分布可以由 Campbell 方法测出,这一方法也适用于对第三章中提到的可逆磁通线的分析。但是,如果在测量小于钉扎相干长度的超导体时使用包括 Campbell 法在内的交流磁场法,则临界电流密度会被过高地估计。本章对高估的原因进行了分析,并在其基础上,提出了一个正确的修正方法。

第六章从理论上计算了各种缺陷和单个磁通线之间钉扎相互作用的机理、元钉扎力以及各个缺陷作用的总和等。这些包括凝聚能相互作用、弹性相互作用、磁场相互作用和动能相互作用等,其中特别研究了在 Nb-Ti 中的非超导 α -Ti 薄层中尽管有一个明显的邻近效应,但是磁通钉扎强度仍然很强的原因。动能相互作用被用来解释在人工合成的 Nb-Ti 材料的 Nb 层中达到非常高的电流密度的钉扎机制。本章还讨论了可以用来提高钉扎效应的钉扎中心的形状。

第七章讨论了与元钉扎力和钉扎中心的数量相关的总钉扎力密度的求和理论。对于求和的理论,我们将按照它们发展的历史顺序罗列出来。由于钉扎相

互作用磁滞损耗的本质与钉扎力的阈值密切相关,这一根本性的问题最初是由统计学提出的,然后才出现了与动力学相关的理论。Larkin 和 Ovchinnikov 解决了最基本的问题,他们发现磁通线格子中不存在长程有序。但是,将他们的理论和实验进行比较时会发现很多矛盾,他们的理论没有清晰地解释与磁滞损耗相关的磁通运动不稳定性原因。在相干能近似理论中用到了统计方法,在不考虑长程有序的情况下,基础问题兼容性和磁通运动不稳定性问题得到了解决,并且将该理论与实验数据进行了一系列的比较。除此之外,本章还解释了商业化超导体在高场下的饱和现象,并且将实验结论与 Kramer 模型进行了比较。同时,对分析磁通蠕动有重要作用的理论化的钉扎势能等问题也在本章进行了讨论。

第八章讨论了高温超导体的各种特性。由超导性的 CuO_2 层和绝缘层组成的二维晶体结构可使得高温超导体表现出非常高的各向异性,这使得高温超导体内部磁通线的状态非常复杂。本章回顾了在有钉扎的磁通系统中各种相变及其可能的机制,其中详细地讨论了在钉扎中起到非常重要作用的一些相变。例如与临界电流密度峰值效应相关的有序态和有序态之间的相变,与不可逆场有关的玻璃态和液态之间的相变等。我们将讨论影响这些相变的条件,不仅包括磁通钉扎强度和超导体各向异性,而且还包括样品尺寸和电场。诸如 Y-123, Bi-2212 和 Bi-2223 等,这些已经在实际中应用的超导材料的钉扎特性和近期研究进展是本章讨论的重点。

2001 年发现了 MgB_2 超导体。这一超导体与合金超导体相比有较高的临界转变温度,同时它不像高温超导体那样受弱连接和磁通蠕动影响强烈,因此这一超导体在今后将有很大的应用前景。事实上,在这一超导体发现后不久其临界电流密度就有了很大程度的提高。第九章回顾了 MgB_2 超导体中由晶界引起的钉扎机制,并讨论了决定临界电流密度的机制。本章还对 MgB_2 未来的发展进行了概述,并通过比较其凝聚能与 Nb-Ti 和 $\text{Nb}_3\text{-Sn}$ 的差别,讨论了 MgB_2 的实际应用潜力。

为了有助于读者理解磁通钉扎和由钉扎引起的各种电磁现象,本书的内容建立在磁通钉扎机制和基本物理学原理的基础上。

另外,本书还针对一些在很多章都有涉及的问题进行了综合的分析和讨论,例如,超导体的尺寸大小是我们关注的一个重点。当超导体的尺寸小于钉扎相干长度时,低维下的钉扎会变得非常高效,从而导致临界电流密度峰值效应的消失。在这种情况下由于小的钉扎势,不可逆场要小于块材值,同时在电磁效应中磁通运动变得可逆,从而导致交流损耗在很大程度上的降低,这使得采用交流磁场法测量时,测得的临界电流密度严重偏高。在本书讨论的在各种钉扎现象中出现的关于最小化能量损耗的不可逆热力学概念也是值得注意的一个话题。另

外一个例子是由洛伦兹力引起的磁通运动和在第四章中提到的由 force-free 引起的自旋的磁通运动之间的矛盾,前者是对机械系统的分析,而后者不是,且磁通运动垂直于能量输运方向,但这一矛盾与 force-free 扭矩不是力矩这一事实有关。

本书附录中有很多有助于读者理解书中内容的资料,而且每章之后的习题和详细的答案也可以更好地帮助读者理解本书的相关内容。

最后,感谢 T. Beppu 女士,她为本书绘制了所有电子图片且在制作电子文档上也提供了很大的帮助。在此也感谢伍伦贡大学(Wollongong University)的 T. M. Silver 博士,俄亥俄州立大学(Ohio State University)的 E. W. Colling 教授,以及为本书英文版做校对的布鲁克海文国家实验室(Brookhaven National Laboratory)的 L. Cooley 博士。

译者前言

超导现象自 1911 年发现以来受到科学界的广泛关注,其零电阻特性所带来的低能耗效应在能源问题日益严重的今天得到了更大的重视。从最初的低温合金超导体到 1986 年发现的钙钛矿型高温超导体,再到 2001 年发现的 MgB_2 超导材料,超导材料的多样化为其应用提供了广阔的空间。由于制约超导体实际应用的主要因素之一是其可以承载的临界电流密度,而在第二类超导体中,超导体的临界电流密度与其磁通钉扎效应密切相关,所以对超导研究者而言,详细了解超导体的磁通钉扎效应是非常必要的。

1994 年日文版初次发行时,主流的磁通钉扎理论已经得到了长足的发展,日文版中即对 1986 年发现的高温超导材料的磁通钉扎理论进行了详细的介绍。在英文版发行时,又对 2001 年发现的 MgB_2 超导材料的磁通钉扎性能进行了补充。但是对绝大部分中国读者来说,阅读以上两种文字的原稿毕竟是一件较费力的事情,我们希望本书的出版能满足更广大的中国科研工作者和普通读者的需要。

本书以 Ginzburg-Landau 理论为基础,首先介绍了对超导特性起着决定作用的磁通钉扎和基本电磁理论,并以此为出发点描述了临界态模型和各类电磁现象。随后讨论了在特定磁场下,理想的一维超导体和二维平面超导体中超导电流的各种输运现象,并分析了不同测试方法对其结果的影响。之后本书对不同缺陷与磁通线的相互作用所产生的钉扎效应进行了详细的讨论,其中包括元钉扎力作用及其求和问题。最后分析了这些理论在高温超导和 MgB_2 两种超导材料中的实际应用。

本书既理论性较强,而又密切联系实际应用,需要读者对凝聚态物理有基本的了解,并具备一定的数学计算能力。如果读者需要补充和扩展这些方面的知识,可以参阅书中的相关参考文献。我们相信本书的出版对提升我国的超导理论与超导材料的实用化具有重要的意义。

最后,作者衷心感谢北京工业大学材料科学与工程学院郭志超博士(参与编译和校对第一、二章)、刘敏老师(参与编译和校对第三、四章)、田辉博士(参与编译和校对第五、六章)、马麟老师(参与编译和校对第七、八章)、王毅老师(参与编译和校对第九章)和徐燕博士(参与编译和校对答案及附录)等人。他们在本书的翻译过程中花费了大量的时间和精力进行录入和校稿等工作。此外特别感谢

超导界的各位同仁对该译著的关注和大力支持,他们在该书的翻译中对部分物理词汇、公式以及图表做了大量的校正。本书的出版是集体智慧的结晶。

由于译者的时间和水平有限,翻译中的疏漏和错误在所难免,敬请读者和同行不吝指正。

全体译者

2014年1月于北京

译者简介

索红莉 北京工业大学材料科学与工程学院教授,博士生导师,北京市特聘教授。2000年于北京工业大学获工学博士学位,曾在瑞士日内瓦大学物理学院凝聚态物理与应用物理研究所做博士后研究及任高级教授助理工作6年。现已发表学术论文150余篇,被SCI收录100余篇,授权专利50余项(其中2项美国专利)。曾获北京市科技进步二等奖。2003年获美国国际低温材料大会最佳文章大奖,其博士论文获得2003年教育部全国百篇优秀博士学位论文,协助指导的博士论文入选2011年全国百篇优秀博士论文。入选2008年教育部新世纪优秀人才计划,所带领的团队入选2012年北京市创新团队。作为项目负责人承担了国家973计划、863计划、国家和北京市自然科学基金及国家教委等多项科研项目的研究工作。主要研究方向包括功能陶瓷氧化物和超导材料薄膜制备与性能研究、二硼化镁超导线带材的制备与超导电性研究以及金属合金和复合材料的机械变形、织构及表面研究等,涉及和涵盖材料学、冶金、化学和凝聚态物理学的多学科研究交叉领域。

张子立 工学博士,现为美国国家高磁场实验室 Schuler 博士后研究员。曾在博士期间由国家留学基金委资助到英国剑桥大学进行了为期两年的博士学习。主要研究方向为聚合物对超导体合成以及性能的影响。现已发表学术论文21篇,SCI和EI收录12篇,特别是在 Crystal Growth & Design 和 CrytEng-Comm 上发表的4篇文章被选做杂志封面文章。2013年6月获得北京工业大学校优秀博士论文。

[日]**倪宝荣** 工学博士,日本福冈工业大学教授,研究生院院长。专攻高温超导材料学、超导工程学、超导物理和电磁学等研究方向。已在 Physical Review B, Physica C 以及 Japanese Journal of Applied Physics 等著名学术杂志发表论文50余篇。曾担任日本福冈工业大学国际交流委员会主席、日本福冈工业大学信息处理中心主任以及中国科学院物理研究所客座研究员等多项职务。

刘志勇 工学博士,现任教于河南师范大学物理系,硕士研究生导师。主要从事超导材料和超导物理方面的研究,在 MgB_2 超导材料和铁基超导材料的制备和理论研究方面取得了丰富的成果,发表了多篇学术论文。

内 容 简 介

本书主要讲述了普遍存在于金属超导体、高温超导体和 MgB_2 超导体等材料中的磁通钉扎机制、特性和由磁通钉扎所引起的电磁现象,利用源于非超导杂质或晶界的凝聚能相互作用和 Nb-Ti 中人工 Nb 钉扎的动能相互作用对超导体的磁通钉扎机制进行了阐释。书中详细地论述了与临界电流密度相关的求和理论,也讨论了由磁通钉扎所引起的磁滞和交流损耗。该交流损耗源于非超导杂质中电子运动的阻尼损耗,而该运动则源于磁通运动引起的电场,读者将了解到为什么这个原因也能造成磁滞型的交流损耗。书中讨论了高温超导体中磁通钉扎对涡旋相图的影响,另外描述了超导体的各向异性、晶粒尺寸、电场强度等对不可逆场的影响。本书也介绍了最近一段时期的各种高温超导体和 MgB_2 超导体临界电流特性的研究进展。

本书还涉及以下方面:电流和磁场平行时与约瑟夫森效应偏离的现象,与临界态模型预言偏离的钉扎势阱中的可逆磁通运动,用于建构解释磁通钉扎现象中的临界态模型而提出的最小能量损耗概念等。在芯丝非常细的多芯导线中,交流损耗的减少主要来自于二维钉扎中起主导作用的可逆磁通运动。书中提出的最小能量损耗的概念也可以用来解释磁通蠕动时决定不可逆磁通束大小的理论。

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 超导现象	(1)
1.2 超导体的种类	(2)
1.3 London 理论.....	(5)
1.4 Ginzburg-Landau(G-L)理论	(7)
1.5 磁特性	(13)
1.5.1 磁通量子化	(14)
1.5.2 下临界场附近	(15)
1.5.3 上临界场附近	(19)
1.6 表面超导电性.....	(25)
1.7 Josephson 效应	(26)
1.8 临界电流密度.....	(29)
1.9 磁通钉扎效应.....	(32)
习题	(32)
参考文献	(33)
第二章 超导体的基本电磁现象	(35)
2.1 电磁方程.....	(35)
2.2 磁通流动.....	(38)
2.3 磁滞损耗机制.....	(43)
2.4 临界态模型的特性及其应用范围.....	(46)
2.5 不可逆现象.....	(46)
2.6 抗磁效应.....	(55)
2.7 交流损耗.....	(64)
习题	(68)
参考文献	(69)
第三章 各种电磁现象	(71)
3.1 几何效应	(71)
3.1.1 超导线材中的交流损耗	(71)
3.1.2 椭圆横截面超导线材和薄带材中由交流电带来的损耗	(74)

3.1.3 横向磁场	(75)
3.1.4 旋转磁场	(77)
3.2 磁通动力学现象	(79)
3.3 交流磁场的叠加	(81)
3.3.1 整流效应	(81)
3.3.2 可逆磁化	(83)
3.3.3 异常横向磁场效应	(84)
3.4 磁通跳跃	(87)
3.5 表面不可逆性	(90)
3.6 直流磁化率	(99)
3.7 可逆的磁通移动	(105)
3.8 磁通蠕动	(116)
习题	(126)
参考文献	(127)
第四章 纵向磁场效应	(129)
4.1 纵向磁场效应概述	(129)
4.2 磁通切割模型	(134)
4.3 force-free 态的稳定性	(140)
4.4 磁通线移动	(146)
4.5 临界电流密度	(155)
4.6 普遍的临界态模型	(159)
4.7 有阻态	(162)
习题	(172)
参考文献	(173)
第五章 临界电流密度的测量方法	(175)
5.1 四引线法	(175)
5.2 直流磁化法	(177)
5.3 Campbell 法	(179)
5.4 其他的交流感应法	(185)
5.4.1 三次谐波分析	(185)
5.4.2 交流磁化率的测定	(188)
习题	(194)
参考文献	(194)
第六章 磁通钉扎机制	(195)
6.1 元钉扎与求和问题	(195)

6.2	元钉扎力	(196)
6.3	凝聚能相互作用	(198)
6.3.1	非超导杂质	(198)
6.3.2	晶粒边界	(205)
6.4	弹性相互作用	(212)
6.5	磁相互作用	(216)
6.6	动能相互作用	(217)
6.7	钉扎特性的增强	(218)
	习题	(220)
	参考文献	(220)
第七章	磁通钉扎特性	(223)
7.1	磁通钉扎特性	(223)
7.2	磁通线格子的弹性模量	(226)
7.3	求和问题	(229)
7.3.1	统计学理论	(230)
7.3.2	动力学理论	(236)
7.3.3	Larkin-Ovchinnikov 理论	(240)
7.3.4	相干势能近似理论	(244)
7.4	与实验结果的对比	(248)
7.4.1	定性比较	(248)
7.4.2	定量比较	(256)
7.4.3	求和理论中存在的问题	(257)
7.5	饱和现象	(259)
7.5.1	饱和与不饱和问题	(259)
7.5.2	Kramer 模型	(261)
7.5.3	Evetts 等人的模型	(263)
7.5.4	模型与实验结果的比较	(265)
7.5.5	雪崩式移动(avalanching flow)模型	(268)
7.6	峰值效应和相关现象	(270)
7.7	钉扎势能	(279)
	习题	(281)
	参考文献	(282)
第八章	高温超导体	(286)
8.1	超导体的各向异性	(286)
8.2	磁通线的相图	(289)