

超导磁体设计基础

南和礼 著

Foundation of Superconducting Magnet Design



國防工業出版社

National Defense Industry Press

超导磁体设计基础

周炳文 著

Foundation of Superconducting Magnet Design



清华大学出版社
Tsinghua University Press

超导磁体设计基础

Foundation of Superconducting Magnet Design

南和礼 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

超导磁体设计基础/南和礼著. —北京:国防工业出版社, 2007. 11

ISBN 978-7-118-05355-5

I. 超... II. 南... III. 超导磁体—设计 IV. TM26

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 137305 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

京南印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 7 1/4 字数 182 千字

2007 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 25.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革

开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金
评审委员会**

国防科技图书出版基金 第五届评审委员会组成人员

主任委员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 程洪彬

秘书长 程洪彬

副秘书长 彭华良 蔡 镭

委 员 于景元 王小谟 甘茂治 刘世参
(按姓氏笔画排序)

杨星豪 李德毅 吴有生 何新贵

佟玉民 宋家树 张立同 张鸿元

陈冀胜 周一宇 赵凤起 侯正明

常显奇 崔尔杰 韩祖南 傅惠民

舒长胜

本书主审委员 赵凤起

前 言

磁体设计是强电领域的重要任务之一,随着超导技术的发展,超导磁体的应用也得到极大的开拓。超导磁体不但在一些领域取代了或正在取代着常规磁体的角色,而且还开辟了常规磁体无法实现的新领域。

磁体设计的基础问题是在安全的电流密度下计算磁场和电流,确定磁体的类型和尺寸。优化设计就是最大限度地提高性价比,在保证安全可靠的前提下降低制作成本。超导磁体的设计除了常规磁体设计的内容,还需要更深层次的一系列相关问题的解决。

超导磁体从磁体形状上分为螺管形磁体、鞍形磁体、跑道形磁体、D形磁体及各种组合磁体;从磁场形状上分为梯度场磁体、匀场磁体、二极磁体、四极磁体等多极磁体;功能上分为高场磁体、储能磁体、磁共振磁体、偏转磁体、探测器磁体、聚变磁体等。超导磁体设计工作是强磁场领域的基础性工作,从广义的角度看,超导磁体的设计不但包括满足空间磁场要求的磁体类型、磁体尺寸和工作电流的确定,而且还包括对所设计磁体的运行稳定性及安全性的判断,因此超导磁体的设计涉及了电工原理、低温工程、材料性质、参量计算、模拟分析、优化技术等诸多问题。本书主要是从宏观的角度去观察并研究超导磁体,在介绍超导磁体的性质及特点的基础上,着重阐述超导磁体系统的设计原理及设计中所包含的相关问题的定量解决方法。其基本脉络为,将超导磁体设计及相关问题划分为几个主要部分,从数学分析着手,提出处理问题的途径,并给出计算方法。本书主要讨论与中心思想密切相关的问题,对相关联的物理概念也作了简要介绍。书中列举了几种不同类型的超导磁体的设计计算方法,用实例说明了具体的计算过程。

随着超导技术的发展,超导磁体从少为人知逐渐被人们认知,对相关人才的需求越来越大。在超导强磁技术蓬勃发展的今天,超导磁体的应用范围越来越广,需要不断提高作为基础性工作的超导磁体设计的水平,将设计工作在计算、配置、优化及安全性评价等方面更上一层。本书的目的是试图给读者提供一个较为完整的超导磁体设计工作的基础图像。考虑到本书中有些方程的求解较为困难,因此对其中部分问题作了适当的分析说明。那些以工程设计为主要工作的读者可在阅读时暂时忽略这部分而直接关注解的形式和结论;对数学分析感兴趣的读者,这一部分的叙述或许能够提供一点求解该类问题的方法或路径。

超导磁体的设计包含了大量的计算工作,单纯的人力计算已经远远不能满足需要。掌握先进的数学工具,利用适宜的计算程序进行计算可以大大提高工作效率并提高计算的准确度。市场上出售的计算软件可以帮助我们解决一些复杂的问题,另外,应该看到这些软件大多并不是为自己的具体问题设计的,即存在一个与工作目标衔接和配套的问题。有条件的设计工作者需要结合各自的工作内容逐渐建立起自己的程序库并不断加以充实。

本书主要讨论不含磁介质的稳态磁体系统,其中第2章、第3章、第4章及第6章是本书的重点,它们属于在超导磁体设计工作中需要特殊考虑的问题。附录为亥姆霍兹线圈参数数值表。对于相关物理量计算的详细论述,可参考专门的书籍、论文和软件包。

书中各物理量的单位如未做说明则一律按国际单位制(SI)处理。

本书相关章节的内容承蒙西南物理研究院朱学武教授勘正,中国科学院电工研究所夏平畴教授对全书整体构思提出了宝贵建议,涉及的实验工作得益于中国科学院电工研究所超导磁体技术组和低温技术组的帮助,在此一并致谢。

书中难免有不当之处,恳请读者批评指正。

目 录

第 1 章 基础知识	1
1.1 历史回顾	1
1.2 超导体及超导线材	2
1.3 超导线材的临界特性	6
1.4 超导磁体的低温环境	8
1.5 稳定问题	10
1.6 电感计算	15
1.7 电磁力和应力	17
1.8 超导磁体设计的相关问题	20
1.9 场形和配置	23
第 2 章 超导磁体的设计方法	28
2.1 超导磁体设计概述	28
2.2 超导磁体设计的图形基础	33
2.3 单一线材超导磁体的设计	36
2.4 两种及两种以上线材超导磁体的设计	39
2.5 两种线材不同电流超导磁体的设计	42
2.6 高温超导磁体的设计	44
2.7 匀场磁体的设计	47
第 3 章 应用问题	56
3.1 螺管绕组	56
3.2 亥姆霍兹线圈	60

3.3	鞍形绕组	62
3.4	分立绕组	67
3.5	高温超导带材绕组	73
3.6	综合问题一:对极绕组	77
3.7	综合问题二:空间范围可调节的匀场磁体	80
3.8	综合问题三:微型螺管形高温超导带材储能磁体 的优化问题	83
3.9	磁场计算问题	86
第4章	超导磁体失超计算及保护问题	94
4.1	基础工作	95
4.2	NbTi 磁体失超过程的解析分析	97
4.3	NbTi 磁体失超过程的模拟分析	106
4.4	失超保护方法	122
4.5	程序扩展	125
第5章	耦合问题	128
5.1	多绕组磁体系统的耦合	128
5.2	超导磁体的分段保护	133
5.3	超导磁体的次级线圈保护	141
第6章	超导磁体运行的主要部件及其闭环运行	146
6.1	电流引线	146
6.2	超导开关	164
6.3	超导磁体的闭环运行	175
6.4	电源	179
附录	亥姆霍兹线圈参数数值表	181
参考文献		211

CONTENTS

Chapter 1	Basic Knowledge	1
1.1	Background	1
1.2	Superconducting Materials, Wires and Cables	2
1.3	Critical Properties of Superconducting Materials	6
1.4	Cryogenic environment of Superconducting Magnets	8
1.5	Stability	10
1.6	Calculation of Inductance	15
1.7	Force and Stress	17
1.8	Relative Items about Design	20
1.9	Field Shapes and Winding Configurations	23
Chapter 2	Design Philosophy	28
2.1	General Points to Superconducting Magnet Design	28
2.2	Graphic Basis of Design	33
2.3	Design Method of a Superconducting Magnet with a single Wire	36
2.4	Design Method of a Superconducting Magnet with Different Wires	39
2.5	Design Method of a Superconducting Magnet With Two Different Wires in Different currents	42
2.6	Design Method of a HTS Magnet	44

2. 7	Design Method of Superconducting Magnets with a Uniform Field	47
Chapter 3	Examples	56
3. 1	Solenoids	56
3. 2	Helmholtz coils	60
3. 3	Saddle Coils	62
3. 4	Solenoid Assembly Constructed from a Number of Discrete Sections	67
3. 5	HTS Pancake Coils	73
3. 6	Special Problem 1 :Cusp-mode Coils	77
3. 7	Special Problem 2 :Coil assembly with Adjustable Uniform Areas	80
3. 8	Special Problem 3 :Optimization of Micro SMES Solenoids Using HTS Tapes	83
3. 9	Field Calculation for Torus and Race Track Coils	86
Chapter 4	Quench and Protection	94
4. 1	Basic Work	95
4. 2	Analysis of a Quenching Process for a NbTi Magnet	97
4. 3	Simulating Analysis of a Quenching Process for a NbTi Magnet	106
4. 4	Quench Protection	122
4. 5	Expanding of the Computer Program	125
Chapter 5	Coupling	128
5. 1	Coupling of a System with a Number of Coils	128
5. 2	Protection by Subdivision	133

5. 3	Protection by a Coupled Secondary	141
Chapter 6	Basic Components and Operation in Persistent Current Mode	146
6. 1	Current Leads	146
6. 2	Superconducting Switches	164
6. 3	Operation in Persistent Current Mode	175
6. 4	Power Sources	179
Appendix	Table of the Parameter Values of Helmholtz Coils	181
References		211

第1章 基础知识

1.1 历史回顾

荷兰低温物理学家昂纳斯(Onnes, Heike Kamerlingh, 1853—1926)于1908年将氦气液化,1911年研究汞在低温下的电阻跃变从而发现了超导电性,开创了人类认知的新领域;其后,迈斯纳(Meissner)等人发现了超导体在超导态具有完全排磁通效应(迈斯纳效应),对超导电性有了更全面的认识。1957年,巴丁(Barddeen)等人提出了超导微观理论(BCS理论),阐述了超导电性的微观机理,并继而由麦克米伦(McMillan)发展为强耦合理论。20世纪80年代高温超导氧化物的发现,使超导材料的研制和超导机理的探讨转入了一个更加活跃的时期^[1,2]。

在发现超导电性的初期阶段,那些具有零电阻的金属载流能力极小,无法获得实际应用。20世纪60年代,Bell实验室孔茨勒(Kunzler)等人研制出使用 Nb_3Sn 导体制作的磁体产生高达8T以上的磁场^[3],使实用型超导材料的研制出现转机;其后,斯特克利(Stekly)在稳定性判据方面做了开创性的工作,继而研究人员提出了导线的稳定化方法,才使得超导磁体的应用得到迅速发展。

由于超导磁体具有高电流密度,可以满足高场强、高均匀度或高梯度的要求,已经应用在工业、医疗、交通运输、环境保护、电力系统、科学研究等领域。伴随着低温技术的发展,超导磁体系统的性价比有了很大的提高,使得其应用的普及率得以提高。当前,已经形成了超导磁体系列产品,建成了中心场强超过50T的混合型超导磁体,不均匀度达 10^{-7} 的900MHz(对应的磁感应强度为

21.14T)的核磁共振装置,大型粒子对撞机和受控核聚变装置正在升级换代中,为揭示物质世界的秘密和新能源的探索工作发挥着不同寻常的作用。

1.2 超导体及超导线材^[4,5]

超导体分为第一类超导体和第二类超导体。第一类超导体其界面能为正,临界磁场最多不超过0.1T。第二类超导体其界面能为负,临界磁场较高,在具有超导性的化学元素中,只有少数几种属于第二类超导体,如铌、钒和钽,这些纯元素由于晶格中没有缺陷,其临界磁场并不能达到可以制作超导线材的程度,这样的第二类超导体称为理想第二类超导体;另外一种第二类超导体,其晶格中存在位错和脱溶相,称为非理想第二类超导体,一些经特殊工艺处理的化合物属于这一类,如铌钛、铌三锡、YBCO($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$)。

图1.1~图1.3分别画出了第一类超导体、理想第二类超导体和非理想第二类超导体的磁化曲线。这些曲线都是在一定温度下的 $B-H$ 关系。在第一类超导体的 $B-H$ 曲线中, H 由0到 H_c 为迈斯纳态, H 大于 H_c 为正常态。在第二类超导体的 $B-H$ 曲线中, H 由0到 H_{c1} 为迈斯纳态,由 H_{c1} 到 H_{c2} 为混合态, H 大于 H_{c2} 为正常态。迈斯纳态和混合态都是超导态。在 H_c 点、 H_{c1} 点和 H_{c2} 点发生的相变均为二级相变。对于第二类超导体, H_{c1} 称为下临界磁场, H_{c2} 称为上临界磁场,二者为热力学温度(θ)的函数。其近似公式为

$$\begin{cases} H_{c1}(\theta) = H_{c1}(0) \left(1 - \frac{\theta^2}{\theta_c^2}\right) \\ H_{c2}(\theta) = H_{c2}(0) \left(1 - \frac{\theta^2}{\theta_c^2}\right) \end{cases} \quad (1.1)$$

式中 $H_{c1}(0)$ 、 $H_{c2}(0)$ 分别为0K时的下临界磁场和上临界磁场; θ_c 为超导体的临界温度。理想第二类超导体的临界电流是由 H_{c1} 决

定的,而非理想第二类超导体的临界电流是由 H_{c2} 决定的。非理想第二类超导体具有高得多的传输电流能力。两类超导体的磁化曲线的区别在于,前者的磁化曲线是可逆的,后者的磁化曲线是不可逆的(这种不可逆性称为回滞现象)。非理想第二类超导体的回滞现象是由晶格中的缺陷造成的。缺陷使得超导体内部的磁通线呈现不规则的排列,说明缺陷即是对磁通线产生钉扎力的物质基础。钉扎力越强,回滞现象越严重,临界电流就越大。

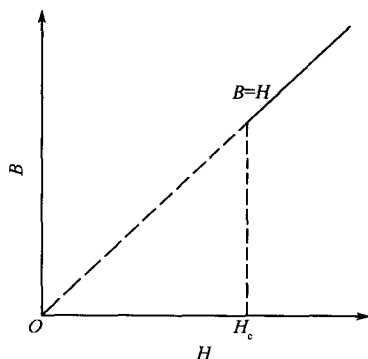


图 1.1 第一类超导体的磁化曲线

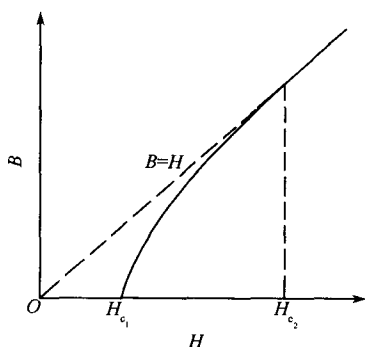


图 1.2 理想第二类超导体的磁化曲线

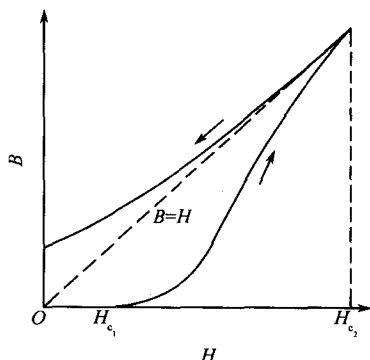


图 1.3 非理想第二类超导体的磁化曲线

实用的超导材料都是由非理想第二类超导体制作的。较早的