

中国加拿大高等教育项目资助

材料科学翻译丛书

[美] DAVID JILES 著

肖春涛 译

磁学及磁性材料导论 and Magnetic Materials

兰州大学出版社

中国加拿大高等教育项目资助材料科学翻译丛书

磁学及磁性材料导论

(第二版)

[美国] DAVID JILES 著

肖春涛 译

图书在版编目(CIP)数据

磁学及磁性材料导论/(美)吉利斯(Jiles,D.)著;
肖春涛译. —兰州:兰州大学出版社,2003
(中国加拿大高等教育项目资助材料科学翻译丛书)
ISBN 7-311-02230-4

I. 磁... II. ①吉...②肖... III. ①磁学②磁性材料
IV. TM271

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 069943 号

磁学及磁性材料导论

[美]DAVID JILES 著

肖春涛 译

兰州大学出版社出版发行

兰州市天水路 308 号 电话:8912613 邮编:730000

E-mail:press@onbook.com.cn

<http://www.onbook.com.cn>

兰州残联福利印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张:24.25

2003 年 8 月第 1 版 2003 年 8 月第 1 次印刷

字数:563 千字 印数:1~1000 册

ISBN7-311-02230-4 定价:36.00 元

《磁学及磁性材料导论》

(第二版)

原作者: [美] David Jiles
原出版社: Chapman & Hall
原书号: ISBN 0-412-79860-3
翻译: 肖春涛

内容简介

本书在第二版中进行了详细的修订,以完全适应在过去的六年里学科的发展。前半部分的章节概括了磁学基础知识的论述,希望对磁学有所了解的科学工作者和工程技术人员可以将她作为一本初级教程。这些章节还附有六十多个磁学中的典型问题。后半部分的章节,回顾了磁学的四个重要技术领域——硬磁材料和软磁材料、磁记录和材料的磁检测,近年来最引人注目的进展。后面的这些章节还为业内的专业研究人员提供了磁性材料中最重要领域的述评。这样一来,本书应该对学生和专业人士都有所助益。

本书所涵盖的范围包括:磁场,磁化强度,磁测量,磁性材料,磁特性,磁畴,畴壁,磁畴运动过程,磁有序,电子磁矩,磁性量子理论,软磁材料,硬磁材料,磁记录和材料的磁检测。每一章的末尾给出了发表在主要磁学刊物上的内容广泛的最新参考文献。这就使读者能够迅速接触到磁学中更加专业化的文献资料。

原作者简介

David Jiles: 美国能源部艾姆斯实验室的资深物理学家。他还是爱荷华州立大学材料科学与工程系的教授以及电子与计算机工程系的教授。

自然科学中几乎没有比磁学
更难理解的学科。

——大不列颠百科全书

第一版序

多年来在磁学这一学科中出现了许多优秀的教科书。其中少不了 Bozorth 的《Ferromagnetism》(1950)、Chikazumi 的《Physics of Magnetism》(1964)和 Cullity 的《Introduction to Magnetic Materials》(1972)。可是,如今却没有一本最新的综合性磁学教科书。因此,我希望我这本书能满足这一需求。这是一本面向磁学入门者的书,我期望它能被采用,能够在磁学及磁性材料专业本科生毕业班上使用,或者用作研究生教材。我还希望这本书能够对于那些由于各种原因刚开始接触磁学,并需要一本初级综合读物的研究人员也能有所助益。为此,本书提供了内容广泛的磁学参考文献,我认为这个文献目录能够帮助读者迅速地接触到磁学这门学科里最重要的学术论文。当然,对磁学专业学者来说,现在已有不少上乘的专著,其中首推 Wohlfarth 的四卷本丛书《Ferromagnetic Materials》。

本书是作为一个整体来构思的,第一章到第十一章讲述了磁学的基本原理,第十二章到第十六章则介绍了主要的实际应用。我采取的方法是:首先在大多数读者熟悉的、普通的宏观尺度上研究磁现象,然后逐渐过渡到较小尺度上的磁现象,探索如何对在较大尺度上观察的结果进行解释。我希望这样能使不同类型的读者,不论是物理学工作者、材料科学工作者,还是电气工程师都感到兴趣。这种方法的一个长处是,有可能从唤醒读者的阅历出发而不是通过抽象的概念来介绍这一学科。这样也更易于维持读者的阅读兴趣,不至于使他或她翻开本书的第一章就遭遇艰深晦涩的概念。

物理学工作者或许主要关注第九、十和十一章中讨论的微观现象,材料科学工作者和冶金学工作者可能对第六、七和八章中描述的磁畴运动过程以及它们如何受微结构的影响更感兴趣。电气工程师一定更熟悉第一、二和五章中的磁场计算和磁特性模拟。可是,我希望不论是哪个群体的学者,都能对我们这门学科的应用感兴趣,因为正是这些应用,体现出我们这门学科的存在价值。当今社会迫切需要具有磁学技能的科学家和工程师,是因为磁学在磁记录、永磁体、电工硅钢、软磁材料以及材料检验和测量等方面有着广泛的应用;而不是由于磁学是一门引人入胜和艰难高深的学科。不过,话说回来,磁学正是这样一门非常引人入胜,而且也相当深奥的学科。

磁学单位制的选用,引起了一系列问题,不熟悉这门学科的人对此很难理解掌握。发表在学术期刊上的文章大多数是用 CGS (高斯)制撰写的。采用这种单位制的好处是自由空间的磁导率为 1,而且磁场的单位——奥斯特的大小对实际应用非常方便。可是,在电磁学中广泛采用的却是索末菲惯用制。它的优点是 SI 单位制完全兼容,但苦于存在一个严重的缺陷,因为自由空间的磁导率会出现在许多方程中,还有一个累赘的数值—— 12.56×10^{-7} 亨利每米。其实,这个数值并没有什么实际意义,只不过是当我们定义各个单位,尤其是选择安培的单位时所产生的结果。但是在这本书中我还是选择了索末菲惯用制,因为它是纯物理和应用物理国际联合会推荐的单位制,也因为它是将来会一统天下的单位制。然而,要把取自学术刊物和专著的每一幅图表都转换成这个单位制是不现实的。而且也没有必要,因为

从事磁学工作的人员必须学会在两种单位制中左右逢源，并得心应手。因此本书以后展示的许多图表都保持了其原始的单位。我在 1.2.6 节中也给出了转换因子，以便读者很快熟悉这些单位制。

最后，我想借此机会，对许多在我撰写本书的过程中，给予我建议和帮助的朋友和同事表示诚挚的谢意。尤其要感谢的是：D. L. Atherton，是他鼓励我动手写这本书的；感谢 S. B. Palmer、F. J. Friedlaender 和 C. D. Graham Jr，他们阅读了全部书稿；还有 D. K. Finnemore、R. D. Greenough、K. A. Gschneidner Jr、W. Lord、B. Lograsso、K. J. Overshott、J. Mallinson、R. W. McCallum、A. J. Moses 和 E. Williams，他们在一些章节中给我提供了宝贵的建议。

David Jiles
于爱荷华州艾姆斯市

第二版序

任何一个作者,都会怀着愉悦的期盼和勉为其难的复杂心情,面对翻新著作版本的需求。出第二版的想法是非常令人惬意的,但一想到要承担相当多的重写任务,就不免让人缩手缩脚。然而在过去的六年里,磁学和磁性材料的巨大进步使得确有必要出第二版,以跟上时代的步伐。特别是在磁记录领域,自第一版以来记录密度已提高了九倍,使我确信关于磁记录的绝大多数讨论都相当过时。不仅如此,还发现了全新的和改良型的永磁体,比如钐—铁—氮;以及不同形式的软磁材料,尤其是人工结构材料,如磁电阻多层膜;在模型化和计算机模拟方面也取得了显著的进步,所以复杂情形下的三维磁场计算现在已被看作是常规研究,而几年前只有专家才能胜任这样的工作。磁力显微术的发展,使人们在小到几十纳米的尺度上的磁性描述方面取得了迅速的进步。此外,所有这些进步都出现在如此短的时间之内,证明了当今磁学领域里的巨大活力。

在为第二版做准备的过程中,我时刻牵挂着两类截然不同的读者,试图给他们都能提供必需的信息。第一类读者是那些刚刚选修第一门磁学课程的学生。对这类读者,我特地增加了三十个带有完备答案和解释并精心编制的问题,还拓展了一些基础课程的素材。例如交变磁场和材料磁化强度的磁极模型、安培“束缚”电流模型如今也包括在内,再加上其它一些素材,就给学生提供了范围更广的磁学基本概念。第二类读者,包括了磁学和磁性材料领域的专业研究人员,他们可能要用本书作为参考资料。对这类读者来说,最新的信息以及关键文献的索引是必不可少的。因此我全面修订和更新了关于硬磁材料和软磁材料、磁记录以及用于材料评估的磁测量等方面的章节。为了容纳所有这些新增加的素材,不得不删掉了第一版中关于超导的一章。

我衷心感谢帮助我修改书稿的许多朋友和同事。我知道,要能一一查找出所有的错误,确实是一件非常费时费力的事,所以我十分感激花费宝贵的时间帮我修改这本书的专家学者。我也盼望新版书的读者对书中表达不清、甚至有不该有的谬误之处提出批评或改正意见。在为新版书提出宝贵设想和意见的学者当中,我要特别铭记感谢的有: A. Aharoni、D. L. Atherton、P. Bissell、G. Booth、R. Chantrell、B. R. Coles、W. D. Corner、S. Foner、F. Friedlaender、H. Gill、R. D. Greenough、A. Hernando、J. Jakubovics、G. A. Jones、A. Morrish、M. Munschau、K. O'Grady、L. G. Rubin、M. J. Sablik、F. Salas、B. K. Tanner 和 C. A. Wert, 他们提供了极为卓越的见解。磁学是一门博大精深的学科,任何个人很难跟得上她的发展步伐,因此,在为第二版精选最新颖和最重要素材的过程当中,上列诸位学者敏锐的判断力就是我的指路明灯。

最后,每当我回想起为撰写这本书而忘我工作的那段日子,我就对我的妻子 Helen 和我们的四个孩子 Sarah、Elizabeth、Andrew 和 Richard,在我从事这项事业的过程中所表现的宽容忍耐充满了感激之情。

David Jiles

一九九七年一月于爱荷华州艾姆斯市

前 言

当你研究本书中错综复杂的磁学问题的时候,你会发现学习的旅程是从你最熟悉的电流通过导线、指南针在磁场中转动、以及磁棒互相吸引或排斥这样的起跑线上开始的。随着学习进程的深入,为了理解实验观察的结果,我们必须迅速揭开表层、钻入材料内部,不断增加放大倍数,研究越来越精微的细节,来解释发生的物理过程。正是用了这样的学习方法,使我们从块状磁体($10^{23}\sim 10^{26}$ 个原子)深入到磁畴范围($10^{12}\sim 10^{18}$ 个原子),然后再进一步探索畴壁尺度($10^2\sim 10^3$ 个原子)的物理过程。在临界现象中,还会经常涉及原子数甚至更小(10个原子或更少)的局域化排列的行为。于是就出现了单个原子的磁矩是如何产生的问题。于是,我们就必须研究一个电子绕一个原子核作轨道运动的行为特征,从而深入到原子内部去寻求答案。接下来遇到的一个问题是,为什么相邻原子的磁矩会规则排列?要回答这个问题,我们就得再向前迈进一步,考虑相邻原子上两个电子之间的量子力学交换作用。至此,我们就走到了磁学基础知识学习阶段的终点。随后我们就要问一问自己,这些知识究竟如何才能为我们所利用?从第十二章到第十五章的几章里,我们考察了磁学的最重要的用途。不必惊讶这些用途都涉及铁磁性。因为铁磁学很可能是磁学这门学科的一个最重要的分支,大多数科学研究、甚至其它形式的磁性研究,最终都是用来帮助我们进一步理解铁磁性的,使我们既能研制出具有改良性能的新型磁性材料,也能使我们更好地利用现有的材料。

我在本书中采用了一种不同寻常的格式,在每一节里,我都用一个问题作先导,并在随后的讨论中加以解答。很多朋友说这种方法很好,可以使读者把注意力集中到将要讨论的主题上来,每一节的目的就很清楚明确。于是我决定保留原稿中的这种格式,我也知道在教科书中这种方法是不合常规的,但我希望它对读者有益。

鸣 谢

非常感谢作者和出版商允许我在本书中复制下列图表。

1.3

P. Ruth (1969) *Introduction to Field and Particle*, Butterworths, London.

1.9

G. V. Brown 和 L. Flax (1964) *Journal of Applied Physics*, **35**, 1764.

2.5

J. A. Osborne (1945) *Physical Review*, **67**, 351.

3.1

D. O. Smith (1956) *Review of Scientific Instruments*, **27**, 261.

3.2, 3.5, 3.6

T. R. McGuire 和 P. J. Flanders (1969) *Magnetism and Metallurgy* (A. E. Berkowitz 和 E. Kneller 主编), Academic Press, New York.

3.4

S. Chikazumi (1964) *Physics of Magnetism*, Wiley, New York.

3.9

B. I. Bleaney 和 B. Bleaney (1976) *Electricity and Magnetism*, Oxford University Press, Oxford.

4.1

F. W. Sears (1951) *Electricity and Magnetism*, Addison-Wesley, Reading, Mass.

4.5

J. Fidler, J. Bernardi 和 P. Skalichy (1987) *High Performance Permanent Magnet Materials* (S. G. Sankar, J. F. Herbst 和 N. C. Koon 主编), Materials Research Society.

4.6

C. Kittel (1986) *Introduction to Solid State Physics*, 第六版, Wiley, New York. R. J. Elliott 和 A. F. Gibson (1974), *An Introduction to Solid State Physics and its Applications*, MacMillan, London.

4.8, 5.2

A. E. E. McKenzie (1971) *A Second Course of Electricity*, 第二版, Cambridge University Press.

5.7

E. W. Lee (1955) *Rep. Prog. Phys.*, **18**, 184. A. E. Clark 和 H. T. Savage (1983) *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **31**, 849.

- 6.4 H. J. Williams, R. J. Bozorth 和 W. Shockley (1940) *Physical Review*, **75**, 155。
- 6.6 C. Kittel (1986) *Introduction to Solid State Physics*, 第六版, Wiley, New York。
- 6.7 R. M. Bozorth (1951) *Ferromagnetism*, Van Nostrand, New York。
- 6.8 C. Kittel 和 J. K. Galt (1956) *Solid State Physics*, **3**, 437。
- 7.1 C. Kittel (1949) *Reviews of Modern Physics*, **21**, 541。
- 7.4 R. W. Deblois 和 C. D. Graham (1958) *Journal of Applied Physics*, **29**, 931。
- 7.6 S. Chikazumi (1964) *Physics of Magnetism*, Wiley, New York。
- 8.2 M. Kersten (1938) *Probleme der Technische Magnetisierungs Kurve*, Springer-Verlag, Berlin。
- 8.5 K. Hoselitz (1951) *Ferromagnetic Properties of Metals and Alloys*, Oxford University Press, Oxford。
- 8.8, 8.9 J. Degaugue, B. Astie, J. L. Porteseil 和 R. Vergne (1982) *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **26**, 261。
- 8.10 A. Globus, P. Duplex 和 M. Guyot (1971) *IEEE Transactions on Magnetics*, **7**, 617。A. Globus 和 P. Duplex (1966) *IEEE Transactions on Magnetics*, **2**, 441。
- 8.12 S. Chikazumi (1964) *Physics of Magnetism*, Wiley, New York。
- 9.2, 9.3 C. Kittel (1986) *Introduction to Solid State Physics*, 第六版, Wiley, New York。
- 9.5 P. Weiss 和 R. Forrer (1929) *Annalen der Physik*, **12**, 279。
- 9.6 D. H. Martin (1967) *Magnetism in Solids*, Illife Books, London。
- 9.7, 9.9, 9.10 G. E. Bacon (1975) *Neutron Diffraction*, 第三版, Clarendon Press, Oxford。
- 9.8 J. Crangle (1977) *The Magnetic Properties of Solids*, Edward Arnold, London。
- 9.11

- G. L. Squires (1954) *Proceedings of the Physical Society of London*, **A67**, 248。
- 9.12
D. Cribier, B. Jacrot 和 G. Parette (1962) *Journal of the Physical Society of Japan*, **17-BIII**, 67。
- 9.14
B. D. Cullity (1972) *Introduction to Magnetic Materials*, Addison-Wesley, Reading, Mass。
- 9.17
C. Kittel (1986) *Introduction to Solid State Physics*, 第六版, Wiley, New York。
- 9.19
J. A. Hofman, A. Pashkin, K. J. Tauer 和 R. J. Weiss (1956) *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, **1**, 45。
- 9.20
D. H. Martin (1967) *Magnetism in Solids*, Illife Books, London。
- 9.21
S. B. Palmer 和 C. Isci (1978) *Journal of Physics F. Metal Physics*, **8**, 247。 D. C. Jiles 和 S. B. Palmer (1980) *Journal of Physics F. Metal Physics*, **10**, 2857。
- 9.22
R. D. Greenough 和 C Isci (1978) *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **8**, 43。
- 10.6, 10.7
H. Semat (1972) *Introduction to Atomic and Nuclear Physics*, 第五版, Holt, Rinehart and Winston, New York。
- 11.1
D. H. Martin (1967) *Magnetism in Solids*, Illife Books, London。
- 11.5
J. Crangle (1977) *The Magnetic Properties of Solids*, Edward Arnold, London。
- 11.6
W. E. Henry (1952) *Physical Review*, **88**, 559。
- 11.10
B. D. Cullity (1972) *Introduction to Magnetic Materials*, Addison-Wesley, Reading, Mass。
- 11.11, 12.1
R. M. Bozorth (1951) *Ferromagnetism*, Van Nostrand, New York。
- 11.12
A. Fert, P. Grunberg 和 A. Barthelmy (1995) *J. M. M. M.*, **140**, 1。
- 12.2, 12.3, 12.13, 12.21
G. Y. Chin 和 J. H. Wernick (1980) *Ferromagnetic Materials*, Vol. 2, (E. P. Wohlfarth 主编), North Holland, Amsterdam。
- 12.4
M. F. Litmann (1971) *IEEE Transactions on Magnetism*, **7**, 48。
- 12.5, 12.6

- M. F. Litmann (1967) *Journal of Applied Physics*, **38**, 1104。
- 12.7
E. Adams (1962) *Journal of Applied Physics*, **33**, 1214。
- 12.8, 12.9, 12.10, 12.11
C. Heck (1972) *Magnetic Materials and their Applications*, Crane, Russak and Company, New York。
- 12.14, 12.16, 12.18
F. E. Luborsky (1980) *Ferromagnetic Materials, Vol. 1*, (E. P. Wohlfarth 主编), North Holland, Amsterdam。
- 12.15, 12.17
获准复制于 Allied Signal Company, Morristown, New York。
- 12.22, 12.23
J. H. Swisher 和 E. O. Fuchs (1970) *Journal of the Iron and Steel Institute*, August。
- 12.26
G. W. Elman (1935) *Electrical Engineering*, **54**, 1292。
- 13.9
获准于 H. A. Davies。
- 13.4, 13.5, 13.6, 13.7, 13.8, 13.9
D. J. Craik (1971) *Structure and Properties of Magnetic Materials*, Pion, London。
- 13.10, 13.11
R. J. Parker 和 R. J. Studders (1962) *Permanent Magnets and their Applications*, Wiley, New York。
- 13.12, 13.13, 13.14
R. A. McCurrie (1982) *Ferromagnetic Materials, Vol. 3*, (E. P. Wohlfarth 主编), North Holland, Amsterdam。
- 13.16, 13.17
M. McCaig 和 A. G. Clegg (1987) *Permanent Magnets in Theory and Practice*, 第二版, Pentech Press, London。
- 13.19
获准于 H. A. Davies。
- 14.2, 14.5
E. Grochowshi 和 D. A. Thompson (1994) *IEEE Trans. Mag.*, **30**, 3797。
- 14.6, 14.7
R. M. White (1985) *Introduction to Magnetic Recording*, IEEE Press, New York。
- 15.2
R. S. Tebble, I. C. Skidmore 和 W. D. Corner (1950) *Proceedings of the Physical Society*, **A63**, 739。
- 15.3
G. A. Matzkanin, R. E. Beissner 和 C. M. Teller, Southwest Research Institute, Report No.

NTIAC-79-2。

15.6

R. A. Langman (1981) *NDT International*, **14**, 255。

15.12

R. E. Beissner, G. A. Matzkanin 和 C. M. Teller, Southwest Research Institute, Report No. NTIAC-80-1。

15.15

W. E. Lord 和 J. H. Hwang (1975) *Journal of Testing and Evaluation*, **3**, 21。

符号术语表

A	磁矢量势
A	面积
	亥姆霍兹能量
	交换硬度系数 ($= E_{\text{ex}}/az$)
a	距离
	晶格间距
	线圈或螺线管的半径
α	平均场常数
$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$	磁矢量相对于外加磁场的方向余弦
B	磁感应强度
B_g	气隙中的磁感应强度
$B_1(x)$	x 的布里渊函数
B_R	剩余磁感应强度
B_s	饱和磁感应强度
$\beta_1, \beta_2, \beta_3$	测量方向相对于外加磁场的方向余弦
C	电容
	居里常数
c	光速
χ	磁化率
D	电位移矢量
D	螺线管直径
d	直径
δ	畴壁厚度

E	电场强度
E	能量
e	电子电荷
	磁畴内的自发应变
E_a	各向异性能
E_{ex}	原子的交换能
$E_{ex,vol}$	单位体积的交换能 ($= NE_{ex}$)
$E_{ex,nn}$	每个最近邻自旋的交换能 ($= E_{ex}/Z$)
E_f	费密能
E_H	磁场能 (塞曼能)
E_{Hall}	霍尔电场
E_{loss}	能量损耗
E_p	势能
E_σ	应力能
ϵ	电容率、介电系数
ϵ_0	自由空间电容率
ϵ_{pin}	畴壁钉扎能
η	磁动势
F	磁场因子
F	力
f	频率
	电流因子
G	吉布斯自由能
g	光谱劈裂因子
	朗德劈裂因子
γ	旋磁比
	单位面积的畴壁能

H	磁场强度
h	普朗克常数
H_c	矫顽力
	临界场
H_{cr}	剩磁矫顽力
H_d	退磁场
H_e	外斯平均场
H_{eff}	有效磁场
H_g	气隙中的磁场
I	磁极化强度
	磁化强度
i	电流
J	电流密度
	总的原子角动量量子数
J	交换常数
j	总的电子角动量量子数
$\mathcal{J}$	最近邻磁矩之间的耦合作用
J_{atom}	一个原子中的一个电子与几个最近邻原子中的电子的交换积分
J_{ex}	交换积分；两个电子间的交换作用
K	各向异性常数
	孔脱 (Kundt) 常数
	磁滞方程中的钉扎系数或损耗系数
k_B	玻耳兹曼常数
K_{u1}	单轴晶系的第一各向异性常数
K_{u2}	单轴晶系的第二各向异性常数
K_1	立方晶系的第一各向异性常数
K_2	立方晶系的第二各向异性常数