

电机用电工钢

[英]菲利普·贝克利 著
裴瑞琳 李淑慧 张延松 译



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

电机用电工钢

[英] 菲利普·贝克利 著
裴瑞琳 李淑慧 张延松 译



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书展示了电工钢发展历程、功能原理、制造工艺、冲片影响分析、应用技术、测量技术和标准制订等,本书也覆盖了成本-质量等实用性问题,介绍了软磁复合材料、非晶硅和微晶材料等。通过阅读本书,电气设计工程师可更好地了解电工钢特性,并在机械设计中更好地运用这些特性。

图书在版编目(CIP)数据

电机用电工钢 / (英) 菲利普·贝克利著;裴瑞琳, 李淑慧, 张延松译. —上海: 上海交通大学出版社, 2018
ISBN 978-7-313-18191-6

I. ①电… II. ①菲… ②裴… ③李… ④张… III. ①电工钢 IV. ①TM275

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 262567 号

Electrical Steels for Rotating Machines
By Philip Beckley

Original English Language Edition published by The IET, Copyright 2002, All Rights Reserved
This simplified Chinese Edition published by Shanghai Jiao Tong University Press, Copyright 2018, All Rights Reserved
上海市版权局著作权合同登记: 图字 09-2013-724 号

电机用电工钢

著 者: [英] 菲利普·贝克利	译 者: 裴瑞琳 李淑慧 张延松
出版发行: 上海交通大学出版社	地 址: 上海市番禺路 951 号
邮政编码: 200030	电 话: 021-64071208
出 版 人: 谈 毅	
印 制: 上海盛通时代印刷有限公司	经 销: 全国新华书店
开 本: 710 mm×1000 mm 1/16	印 张: 17
字 数: 317 千字	
版 次: 2018 年 3 月第 1 版	印 次: 2018 年 3 月第 1 次印刷
书 号: ISBN 978-7-313-18191-6/TM	
定 价: 98.00 元	

版权所有 侵权必究
告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系
联系电话: 021-61453770

译者序

电工钢也称硅钢片(或矽钢片),是产量最大的软磁磁性材料之一,主要用作各种电动机、发电机和变压器的铁芯。它的生产工艺复杂、制造技术严格,国外的生产技术都以专利形式加以保护。当前,电工钢已在中国广泛地使用,国内数家大型钢铁企业已具备量产各种不同厚度和牌号的电工钢产品的能力。然而,系统深入地研究电工钢在电机中应用技术的书籍,国内目前还很缺少,非常荣幸能将英国 Philip Beckley 教授的《电机用电工钢》译著带给各位读者。

在本书中,Philip Beckley 教授向读者展示了电工钢发展历程、功能原理、制造工艺、冲片影响分析、应用技术、测量技术和标准制订等。借鉴他个人丰富的商业经验,本书中也覆盖了成本-质量等实用性问题。另外,本书还涵盖了软磁复合材料、非晶硅和微晶材料等。

本书由上海英磁新能源科技有限公司裴瑞琳博士、上海交通大学李淑慧教授和张延松副教授翻译完成,上海交通大学博士研究生汪喆、王洪泽和顾彬协助完成了本书的翻译工作,上海英磁新能源工程师张翔建和陈丽玲负责协助校对和整理文稿。

在翻译本书的过程中,我们力求忠实、准确地反映原著的风格和内容。鉴于译者水平和时间所限,译文中存在的不妥和不足之处,敬请广大读者不吝指正。

前 言

本书的目的在于使电气设计工程师更好地了解电工钢特性以及如何能够在机械设计中更好地运用这些特性。希望电气设计工程师通过了解磁特性、制造方法、物理性质和成本之间的相互影响,能够做出对于机械结构与运作的理性判断。

本书没有尝试去深度钻研物理冶金理论,但已足以清楚地说明事实上发生了什么,而又是哪种可追溯的原因导致了它的发生。

殷切希望通过阅读这本书,电气工程师与材料供应商之间的联系更加富有成效,并使所有人受益。

致 谢

诚挚感谢 COGENT POWER Ltd. (原欧洲电工钢 EES), 允许使用其出版物中的大量材料数据、图片及表格。

也要感谢:

英国专利局, 图 3.3。

美国专利局, 图 3.3。

前英国钢铁研究协会, 图 3.6。

学校科学评论(*School Science Review*), 1960 年 6 月, 图 3.8(c)。

美国材料学会, 图 3.10。

Laughton-Warne 电气工程师手册的编者, 表 6.1。

沃尔夫森中心, 加的夫, 第 9 章中图。

英斯特朗公司, 图 10.56。

沃尔夫森中心, 图 12.2(b)。

英国标准协会, 图 14.1 和图 14.2。

还要感谢 David Rodger 和 Faris Al-Naemi, 他们在第 9 章中对有限元分析工作的见解。

目 录

第 1 章 概论	001
1.1 铁的性质	003
1.2 铁磁畴	004
1.3 能量储存	004
参考文献	007
第 2 章 电工钢的功能	008
2.1 引言	008
2.2 力放大	008
2.3 单位	009
2.4 激励-响应	010
2.4.1 励磁磁场	010
2.4.2 磁化、磁感	011
参考文献	012
第 3 章 电工钢的发展历史	013
3.1 提高磁化效率的途径	016
3.1.1 叠片	016
3.1.2 提高电阻率	016
3.1.3 提纯	018
3.1.4 增加晶粒尺寸	019
3.1.5 晶粒取向	019
3.1.6 消除应力	021
3.1.7 拉应力涂层	021
3.2 可用途径回顾	021

第4章 制造工艺	022
4.1 炼铁	022
4.2 通用制造工艺	024
4.2.1 脱碳处理	024
4.2.2 脱硫处理	027
4.3 冷轧工艺	027
4.4 热处理	030
4.4.1 全退火的影响	030
4.5 晶粒生长	031
4.5.1 方法一：长时间、加热、软化	031
4.5.2 方法二：特定晶粒生长	031
4.6 硬度控制	033
4.6.1 硬度的概念	033
4.7 罩式退火	034
4.7.1 优点	034
4.7.2 缺点	034
4.8 炉内控制	034
4.8.1 途径A	035
4.8.2 途径B	035
4.9 饱和器	035
4.10 发蓝	038
4.11 本章小结	039
第5章 涂层和绝缘	041
5.1 种类及应用	043
5.1.1 纯有机涂层	043
5.1.2 半有机涂层	044
5.1.3 纯无机涂层	044
5.2 涂层新技术——打印涂层	044
5.3 着蓝氧化涂层	046
5.4 无涂层	047
5.5 辊涂涂层	047
5.6 常规涂层分类	048
5.7 涂层和小电机	048

5.8	冲片性	048
5.9	抗腐蚀性	048
5.10	耐热性	049
5.11	叠片系数	049
5.12	焊接性能	050
5.13	涂层评价	050
	参考文献	050
第 6 章	材料	051
6.1	性能	051
6.2	应用	051
6.3	工作条件	052
6.4	与磁导率相关的问题	052
6.4.1	磁导率的表达式	054
第 7 章	冲裁及铁芯叠片影响	055
7.1	剪切应力及晶粒变形引起的磁性能退化	055
7.2	毛刺的产生	056
7.3	形状-稳定性	057
7.3.1	冲裁过程中的非平衡应力	057
7.3.2	进料钢不平整,或存在应力	058
7.4	铁芯装配	058
7.4.1	叠片间短路电流的产生导致涡流增加,铁损增加	060
7.4.2	应力的产生	060
第 8 章	高频应用	061
8.1	新兴应用	061
8.1.1	电机控制	061
8.1.2	交流发电机	062
8.1.3	磁轴承	062
8.1.4	牵引电机	063
8.2	材料	063
8.2.1	传统的电工钢	063
8.2.2	非晶材料	065

8.2.3	钴铁	066
8.2.4	复合材料	066
8.2.5	铁氧体	066
8.3	新需求带来的影响	067
8.3.1	效率	067
8.3.2	塑造铁芯需求	068
8.3.3	测试	069
8.3.4	逆变器的类型	070
8.3.5	脉冲波形的负面影响	070
8.3.6	测试	070
8.3.7	测试开展	071
8.4	回顾和展望	071
	参考文献	071
第 9 章	有限元设计方法	073
9.1	简介	073
9.2	有限元法	073
9.2.1	有限元公式	074
9.2.2	材料属性	076
9.2.3	磁化曲线用于有限元方案	076
9.2.4	磁滞和铁损	077
9.3	电磁 CAD 系统	077
9.3.1	有限元计算步骤	078
9.4	总评	081
9.5	有限元的前景	083
	参考文献	084
第 10 章	检测	086
10.1	磁性能	086
10.1.1	铁损	086
10.2	测试方法	086
10.2.1	测试框架	089
10.2.2	激励电源	089
10.2.3	功率表	089

10.2.4	磁感强度计	089
10.2.5	空气磁通补偿	090
10.3	回线长度	091
10.4	密度	092
10.5	爱泼斯坦测试综述	092
10.6	单片测试法	093
10.6.1	样品尺寸	093
10.6.2	磁路回线	094
10.6.3	单片法的特殊考虑	096
10.7	励磁	096
10.8	空气磁通补偿	100
10.9	在线测试	100
10.10	环绕/非环绕系统	101
10.11	钢带的横截面区域	104
10.12	地球磁场	104
10.13	挑战	104
10.14	其他测试设备	105
10.14.1	圆环测试	105
10.14.2	便携测试装置	107
10.14.3	随机遍历系统	109
10.14.4	电子倍增器	109
10.14.5	电桥方法	109
10.15	旋转损耗	110
10.16	其他性能测试以及损耗	111
10.16.1	视在功率—VAs	111
10.16.2	磁导率	112
10.16.3	直流电流测量	112
10.17	完全磁滞回线	114
10.17.1	基准点	114
10.17.2	矫顽力	115
10.18	直流-交流混合励磁	116
10.19	铁芯	117
10.20	高强度电工钢	117
10.21	非晶态金属	118

10.22	可溯性	118
10.23	设备可靠性	118
10.24	表面绝缘	118
10.25	测试方法	119
10.25.1	英国标准测试	119
10.25.2	富兰克林测试法	121
10.25.3	施密特测试法	123
10.26	电机仿真实验	125
10.26.1	测试程序	125
10.26.2	结论发现	128
10.26.3	叠片宽度	130
10.26.4	特殊干净表层	131
10.26.5	退火气氛	131
10.26.6	电机修复	131
10.26.7	影响	131
	参考文献	146
 第 11 章 成本和质量控制		147
11.1	实际成本	148
11.2	特殊应用实例	149
11.2.1	暖风机电机	149
11.2.2	车床电机	150
11.2.3	150 kW 大型风机	150
11.3	同牌号钢材本身功能特性分布	150
 第 12 章 竞争品种		152
12.1	镍钢	152
12.2	钴钢	153
12.3	非晶合金	153
12.4	微晶合金	154
12.5	复合材料	155
12.6	空气超导	155
	参考文献	156

第 13 章 厚度评定	157
13.1 磁测量	157
13.2 在线测量	159
13.3 β 射线	160
13.4 X 射线	160
13.5 锯 241	161
13.6 组数据加权	162
13.7 不锈钢标准	162
13.8 合金补偿	164
13.9 发展趋势	164
13.10 电阻法	165
13.11 磁测量法	165
13.12 剖面	166
参考文献	166
第 14 章 标准详析	167
14.1 英国国家标准 BS 6404(1986)第 1 篇——磁性材料分类	167
14.2 英国国家标准 BSEN.10126(1996)——半工艺状态的冷轧电工 非合金钢片和钢带规范	168
14.3 英国国家标准 BS EN 10165(1996)——半工艺状态的冷轧电工 合金钢片和钢带规范	168
14.4 英国国家标准 BS 6404(1986)第 8.4 节——全退火状态的冷轧 无取向磁性钢片和钢带规范	169
14.5 英国国家标准 BS EN 10107(1996)——全工艺状态的晶粒 取向磁钢片和钢带的规范	169
14.6 英国国家标准 BS EN 10265(1996)——具有特定的机械性能和 磁导率钢片和钢带的规范	169
14.7 英国国家标准 BS EN 60404 - 2(1998)——用爱泼斯坦方圈 测量电工钢片和钢带磁性能的方法	169
14.8 英国国家标准 BS 6404 Pt 3(1992)——用单片测试仪测量 磁钢片和钢带磁性能的方法	170
14.9 英国国家标准 BS EN 60404 - 4(1997)——钢铁直流磁特性 测量方法	171
14.10 英国国家标准 BS 6404(1991)第 11 篇——磁钢片和磁钢带表面	

绝缘电阻的试验方法	172
14.11 英国国家标准 BS 6404(1993)第 12 篇——层间隔热涂层保温性能的评定方法指南	172
14.12 英国国家标准 BS 6404(1996)第 13 篇——电钢板和钢带的密度、电阻率和叠片系数的测量方法	172
14.13 英国国家标准 BS 6404 第 20 篇(1996)——绝缘涂层的电阻和耐热等级规范	172
14.14 英国国家标准 BS EN 10251(1997)——电工钢片和钢带几何特性的测定方法	173
14.15 英国国家标准 BS 6404 第 8.8 节(1992)——中频用薄磁钢带规范	173
14.16 英国国家标准 BS EN 10252(1997)——磁钢片和钢带在中频下磁性能的测量方法	173
14.17 英国国家标准 BS 6404(1994)第 8.10 节——继电器用磁材料(钢铁)规范	173
14.18 英国国家标准 BS 6404(1986)第 7 篇——开磁路中磁性材料矫顽力的测量方法	173
14.19 通信地址	174
第 15 章 数据和曲线	175
15.1 无取向完全退火钢	175
15.2 无取向非全退火钢	200
15.3 晶粒取向钢	220
附件 术语解释	234
附录 换算系数	245
附录 常用公式	246
附录 符号表	248
参考文献	250
索引	251

第1章 概论

>>>

远距作用是宇宙中的奥妙之一。万有引力、电场力和磁场力都可以透过真空和各种材质产生作用。

重力是人们日常生活中非常熟悉的一部分,哲学家们花了很长时间才意识到要考虑力的存在。实际上,力对物体的作用经历了一个缓慢的发展过程才以量化的形式出现。

古时通过干燥衣物摩擦产生表面静电荷和火花,人们知道了电场力的存在。自古以来,人们就知道在干燥的天气摩擦琥珀和丝绸可观察到电效应。

在古代,很少观察到磁现象。北极的极光非常有趣,但是几乎没有其他现象使人们联想到磁性。传说在古代土耳其的一个地方(Magnesia),牧羊人发现他们铁制的拐杖会被某些岩石吸引(见图 1.1)。然后这个地区的名字就与这种作用联系到了一起,而“magnetism”这个单词也被收录到词典里。

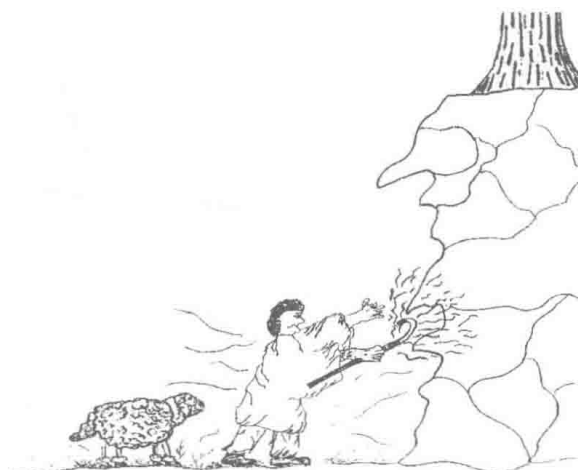


图 1.1 牧羊人体验磁场力的经历

最终这种现象被利用起来,当用线把这些天然磁石悬挂起来,它们会展现方向性。悬浮的磁体会自己转动到一个点,指向南北方向。天然磁石逐渐被用作最初的航海指南针(见图 1.2)。观察发现,钢针与天然的磁体摩擦后会被磁化,被磁化的钢针可以更好地作为罗盘组件使用。磁针可以和软木塞联合使用以便于漂浮在水面上,自由的支撑使得磁针的运动更加稳定。

从这样一个简单的现象开始,磁学逐渐发展成了一门科学,伽利略(1564—1642)和吉尔伯特(1544—1603)开展了相关研究。

一般认为天然磁矿石被磁化是受到雷击的影响。雷击过程中,上百万安培的

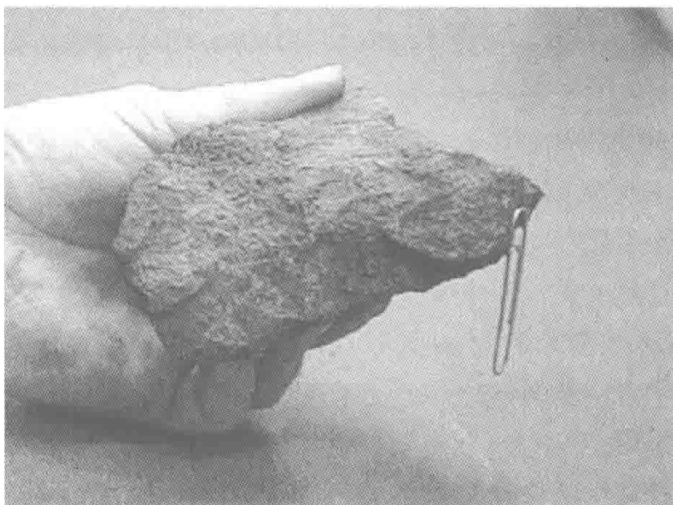


图 1.2 天然磁石

电流从很小的面积内流入地球。地球上被磁化区域的不断变大和世界范围的雷击表明,磁铁岩保持未被磁化状态的概率是很小的。就像工程师所知道的那样,一旦可磁化的材料变成了永磁体,那么它在后来使用过程中恢复成零磁通状态的可能性是很小的。

最初进行的磁性实验让人们产生了磁极的想法。同名磁极互相排斥,异名磁极互相吸引(见图 1.3)。当磁体自由悬浮时,磁体的“寻北极”一端是指向地理北极的。

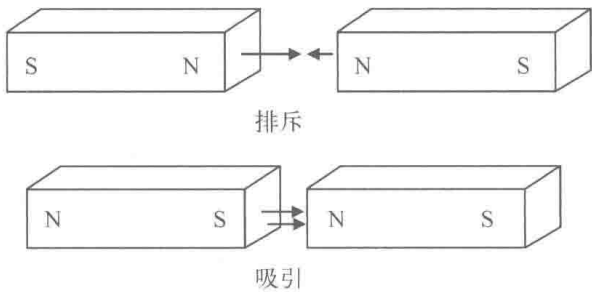


图 1.3 同极相斥,异极相吸

原电池的发展和稳定电流的产生(伽伐尼和伏打)为奥斯特观察电流流入导体时影响指南针运动的实验提供了基础。指南针运动的多少和方向与通入电流的大小和方向有关。很快,电磁铁——通有电流的线圈被制造出来。

法拉第时代,一系列伟大的实验表明:时变磁场会在附近的电路中感应出电流,时变电流会在独立的导体中产生电动势。法拉第定律表述了我们今天所熟知的电磁连续介质。

法拉第定律可以表述为:

- (1) 当导体相对磁场运动时,导体中会产生电动势。
- (2) 电动势的大小和磁通量变化速率成正比。

需要注意的是,楞次定律要求感应电流产生的磁场总是反抗引起感应电流的那个磁场的。如果不是这样,那么永动机将成为可能,热力学定律将不会成立。

这一系列发现启示我们,载流导体——不是通有电流的金属或氧化物磁体,是不是也会产生相同的效果? 更进一步,也许不是地球内部包含一个巨大的磁体来产生地磁场的,如图 1.4 所示。实际上,一般认为是地球的液态金属核心起到发电机的作用产生地磁场。这种说法的确切机理还不清楚,但是已有很多解释性理论。可以表明,史前地磁场的极性已经反转过很多次,这可以从古代壁炉岩石“冻结”的磁性得到证明。混沌理论可以在适当的时间尺度内解释地磁场的这种古怪行为。

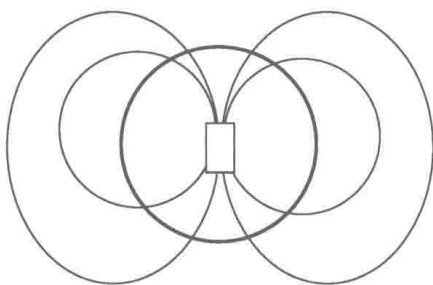


图 1.4 地球周围的地磁场就像是一个埋在其内部的短条形磁铁产生的

1.1 铁的性质

可以通过磁化铁和钢来研究磁场强度的大小。硬钢一旦被磁化就会一直保持磁性。软铁很容易被磁化,但是当激励磁场去掉后它的磁性也会消失。一块软铁没有明显的磁性,不能单独吸起磁针或表现得像磁铁一样。

电磁学中最伟大的突破是发现了电流可以产生磁场,变化的磁场也会诱导磁场中的导体产生电流。这些发现的扩展是,两个电流系统会产生各自的磁场并且相互作用,就像永磁体那样产生相互作用力。

电子的发现给人们展现了一幅从电子流角度考虑电流的画面。这个发现确实意味着一套连贯的理论整合到一起,并且有很强的预测能力。这引发了一个问题,铁条里的电子能不能被激活来产生磁场。对铁原子和其他金属原子结构的详细研究表明,实际上是铁晶格中的电子自旋产生磁场。

此外,如果要观察到强大的外部效应,需要控制电子自旋在空间中的分布。这确实发生了,但成分不多。贝特的研究发现只有当原子参量落入某个范围,电子自旋才会自发地取向一致(见图 1.5)。热力学经验表明,无论何时只要较低的能态空闲,那么其自然特性会优先占领它。

铁、钴、镍都是主要的铁磁性材料。非铁磁性材料对磁场力展示出很微弱的反