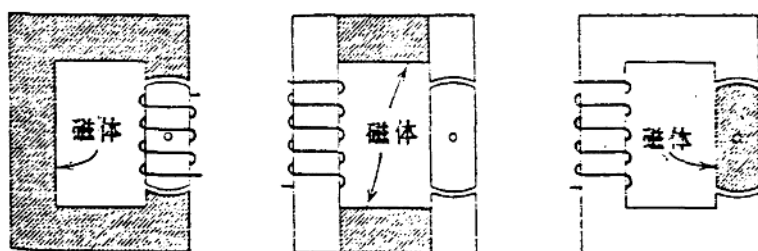


永磁材料工艺与应用设计手册

朱明岐 刘代琦 姜书英
赵育恒 罗广川 陈国华

译

(内部资料)



全国磁性材料与器件行业协会

编者按：

本书是根据美国永磁专家R. J. Parker的《Advance Permanent magnets》原著译翻译^{出来}而成。此书比较系统，全面地论述了永磁体的制备工艺和应用设计，对永磁材料的生产者和使用者均有参考价值，根据此书的内容，我们认为取名为《永磁材料工艺与应用设计手册》为妥。

本书第一、二、三、四、五章由朱明歧先生、刘代珪女士翻译，第六章由姜书英先生翻译、第七章由赵育恒先生翻译、第八章由罗广川先生翻译、第九章由陈国华先生翻译。

本书由朱明歧先生提供原著和进行部分翻译工作，特此致谢。

本书如有翻译和校稿中错误请指正。

第一章 前言及历史展望

- 1.1 前言
- 1.2 永磁的早期历史
- 1.3 永磁工业的成长
- 1.4 性能改进及日益变化的应用模式
- 1.5 原材料冲击
- 1.6 展望未来

1.1 前言

现代永磁体对磁电器件及系统的大小、效率、稳定性和成本有重要影响。今天永磁体在工业品、消费品和国防产品等广泛范围中成为必不可少的元件。

本章前言部份旨在展示：我们正处于永磁学的形成和发展之中。如要真切地把握今天的技术和我们的地位以评估未来，那么我们就有必要回顾早期的历史并审度以往开发和使用的早期磁体的技术。大大改进的性能已使磁体解决许多设计问题，今天全世界的磁体市场已超过10亿美元。性能提高和市场间的关系是个令人有趣的课题。关心永磁体性能的发展是国际性的，各工业化国家均在开发和生产。对于许多复杂的装置和系统，我们发现特性参数受永磁体可供性能的限制。这促使世界各国政府和各主要工业公司对永磁体研究和开发进行投资。本章将描述在关键装置中永磁体与日俱增的重要性和日益变化的应用实例。

由于永磁体能量密度的提高，它在许多非传统器件和能量转换系统中获得了应用。

在本章历史展望的最后部份是，放眼未来，注视可能产生的更好性能及永磁体在我们这个能量守恒和能量转换极为重要的变化世界里的应用。

1.2 永磁体的早期历史

永磁体的早期历史是相当神秘的。人类早期不仅对使用天然出现的磁体即“磁石”具有浓厚兴趣，并大约三世纪前人类就在制造人工磁体时而竟然获得了强磁体。

永磁体工业中，目前主要性能系列的开发及主要应用领域全是二十世纪的产物。但是在很早的记载史中，人们就发现了人类试图使用和理解磁体的文献。在古代唯一能获得的磁性材料是“磁石”或“吸铁石”，天然磁石是一种磁铁矿(Fe_3O_4)，在天然状态就有磁性，该材料取名为magnets因为它在Thessaly的某个地区Magnesia发现的，公元前100—200年古希腊哲学家们提到了磁石的吸引力。

第一块人工磁体是通过磁石磁化或“接触”的铁针。人类最早的磁学应用可能是指南针。在约公元1200年，在一首法国诗歌中载有接触磁化的铁针被一漂浮的稻草支撑着。图1.1出示了一张约公元1637年的制造罗盘磁针的图片。这可能是人类最早的磁体工厂。其他文献显示，较好的磁体大约公元500年出现在中国。最早对磁体的系统报道是William Gilbert在1600年的经典论文。Gilbert描述了如何给磁石配上软铁的设尖以增加接触时的吸力，但是他细致地注意到，这种配备在一定的距离不增加吸引力。图1.2出示了包复顶端的或“被装备的”磁石。

Gilbert有3种能把永磁特性赋予铁和钢的办法。第一种是用磁石进行接触，第二种是锻打沿地磁场南北指向的钢材试样。Gilbert注意到了铁丝如果沿南北方向拉伸也可磁化，但是沿东西方向，不能磁化，Gilbert描述的第三种方法是将火红的热铁棒放在地磁场中让它冷却，铁棒会磁化。他进一步注意到，不加热的铁棒，让它长期沿地磁场搁置，会获得磁性。方法2需要一些形变，方法1和方法2如果有振动也可能被增强。

磁学随之而来的巨大进展是由于1825年Sturgeon和其他人员极有兴趣地进行了合金磁性实验。有些工作者报道非磁性黄铜可能通过接触和锤打能被磁化，许多推测怀疑铁在黄铜中达到一定的数量，其贡献磁性的是否是非铁元素。当Sturgeon发现当时流通中的银元有磁性之后，他得出结论，各种带锌的铜、银和金合金都是磁性的。他相信磁性效应不是由于铁引起的。这一工作在某种意义上确是个里程碑，说明合金性能是由除了组元单独性能以外的其他东西所引起的。这一新的思想对现代永磁体的发展是根本性的。

到1967年，德文手册记录了磁性合金可以由非磁性材料和磁性材料的非磁性合金主要是铁所组成。例如1901年报道了Heusler合金，它比起以前的磁体具有卓越的性能。典型Heusler合金的成份为10~30% Mn和9~15% Al，其余为Cu。

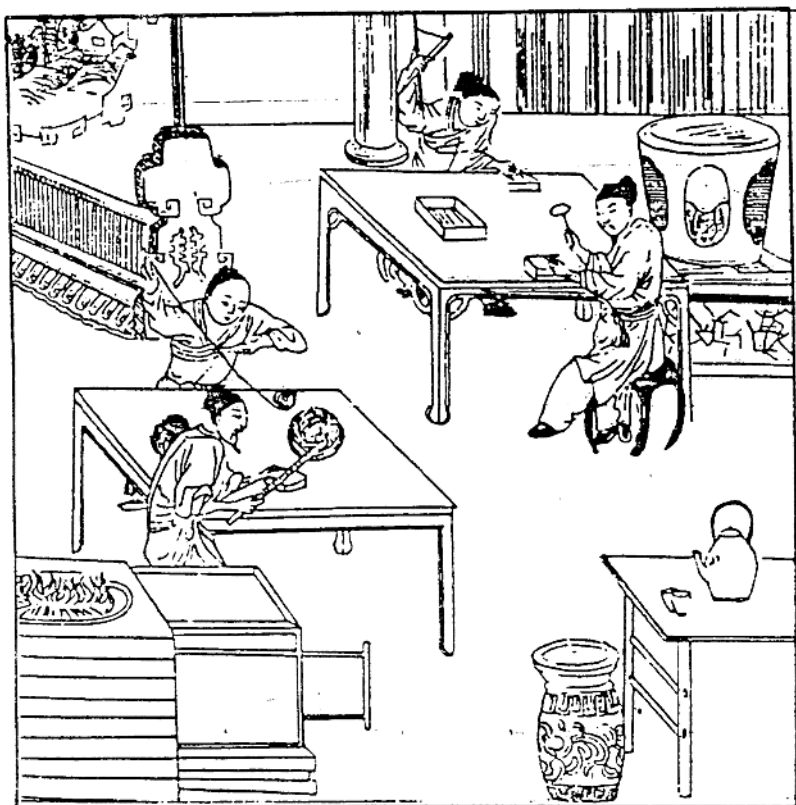


图1.1 在此幅1637年图片中，工匠们正在制造罗盘磁针。
中国自公元500年起能制造好的钢材。



图1.2 Gilbert's 包覆的或“被装备”的磁石

1917年日本发现了钴钢合金,这是非常重要的。1938年也是日本的Kato和Takei开发了完全不同类型的由粉末氧化物制成的磁体。这一开发是现代铁氧体之先驱,但是类似的磁体或许于1760年由英国Gowin Knight制出。根据1779年公布资料Knight看来是将铁屑放在水中,使之前后作用好几个小时以获得细微铁氧化物悬浮物,这样制得了所需的氧化物。然后Knight再用亚麻油混合,模压成各种形状,在炉中焙烤,最后用当时的最佳接触磁化法磁化。

永磁体的早期历史从某一时期所获得的成就来看是很了不起的,因为我们今天知道和使用的法则对他们来说那时仍处于萌芽状态。

1.3 永磁工业的发展

永磁工业在过去的世纪中经历了实质性的世界范围发展。1955年生产了约12,000吨永磁,估计价值约1亿美元,产量中较大的比例是AlNiCo类磁体。1985年世界产量已增长到约180,000吨,估计价值约为10亿美元,这些化合物的吨位年增长为12%。该工业在转入新的性能系列中生机勃勃,如同表1.1所估计,铁氧体已成为主导性的性能系列,因它的价廉和无需使用战略材料。

30年来英国、欧洲和日本产值都有了巨大的增长,表1.2出示了按地区估计的1985年产值。

实际上今天生产的磁体共有四大类:AlNiCo、铁氧体、稀土钴、稀土铁和各种各样的其它类磁体如Vicalloy,铁钴Lodex, Cunife和粘结磁体。

表1.1 按类别估计的产值(1985)

类 别	产值(兆美元)	百分比
铝镍钴	150	15.0
铁氧体	675	67.5
稀土	125	12.5
其他	50	5.0
	1000	100.0

表1.2 按地区估计的产值(1985)

地 区	产值(兆美元)	百分比
美 国	300	30.0
欧 洲	185	18.5
日 本	415	41.5
其 它	100	10.0
	1000	100.0

生产厂有100多家，美国约有20家。这些厂家提供数以百计的各种牌号的性能，不少彼此间仅稍有差异。这些牌号及磁性能和物理性能示于附录2。

1.4 性能改进和日益变化的使用模式

跟踪性能改进之历史并把它与人类对永磁学的应用联系起来，那确是饶有趣味的。图1.3示出了实验室MG0e值性能与时间的关系。图中表明了永磁史上三个重要的里程碑。第一个出现在上世纪，带有不稳定问题的微弱磁体应用于那些不得不采用永磁来发挥功能的装置中。第二个里程碑出现在40年代，永磁性能提高到了能在性能上和经济上与电磁铁相竞争的程度。在场声器和小型特殊直流电机中，永磁体获得了广泛的应用，商品化工业迅速成长。70年代具有深远意义的重要里程碑出现了，性能几乎提高了10倍。电机和扬声器约占总用量的75%。

在第7章中，谈及应用时会发现极多类型的电机，其中大多不使用永磁，但是很多可能使用磁体来提高其功能值，因此能指望有个极大的增长，这是因为电机功能使用和电输入控制特性的变化。例如：计算机外围设备电机的要求会采用竞争技术来配置“读写”磁头，如步进电机或者线性音圈型电机。

我们正在目睹冲击传统电机市场的几种技术的会聚。长期来对交流电机和直流电机而言这两个市场一直是不同的，不相重叠的。今天这种区别往往是不清楚的，的确我们也许正向着通用型电机发展，在那类电机中带鼠笼的运动磁体转子在配置的定子中旋转。

表1.3 按装置统计的磁体市场

用途	产值百分比
小电机	60
扬声器	15
通讯	8
电子管	7
新产品和其它	6
机械功装置	4

表1.4 永磁直流电机使用总结

设 备	消耗量(兆美元) 平均年增长率 %		
	1984	1990	1984-1990
计算机和办公设备	477	1884	27.0
消费品	759	3547	29.3
工业和仪表	367	1253	22.6
军事和航天	190	379	12.2
总计	1765	7063	26.0

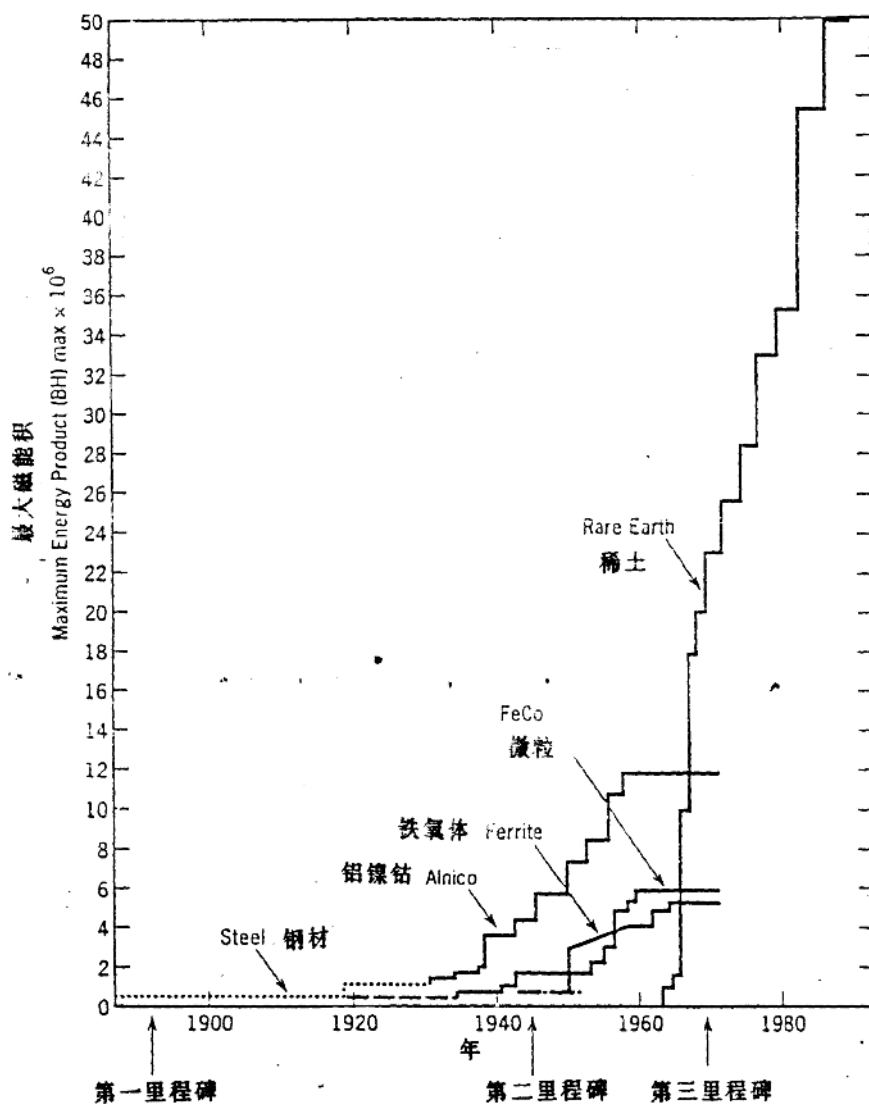


图1.3 性能开发过程的进展

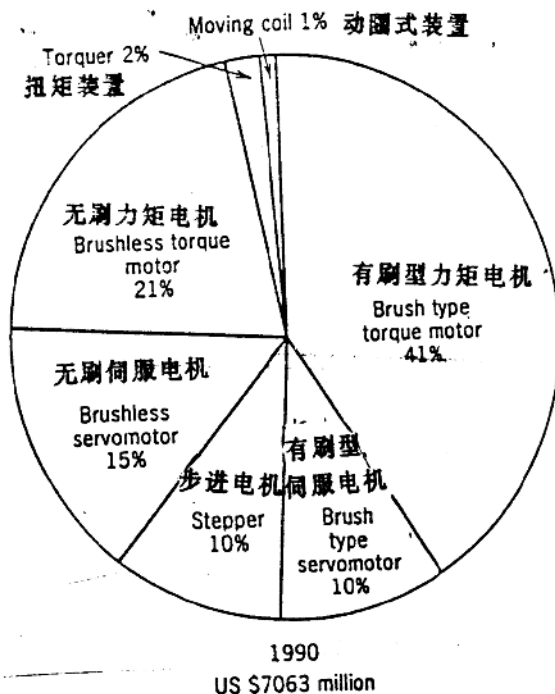
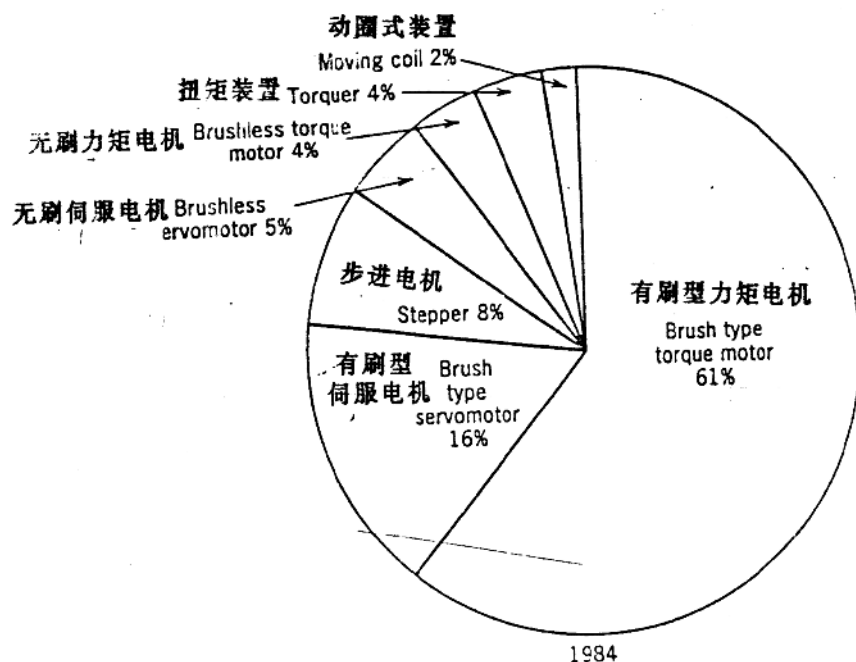


图1.4 永磁电机市场趋势

稀土磁体的出现在历史了首次使永磁提供电磁铁不可能或者不容易解决的新办法，永磁作为一种独特的元件降临于世。这些新磁体的体积效率使设计者重新构想磁路和设计装置，并获得提高价值的工作参数，从几个例子来看，尽管原材料相当昂贵但是新磁体成本仍有些合理性。

利用比例法则就很清楚：在小型装置中，永磁体比电磁铁有较大的优点。永磁体建立场能的能力不管比例如何始终保持恒定，当我们按比例缩小电磁铁的时候，我们发现导体电流密度随比例因子逆向增加，这样我们就遇到了不可克服的冷却问题。当永磁体设计成较大器件时，我们发现30~40MG0e的永磁具有优于电磁铁特性的体积效率，没有任何励磁损失。传统上永磁体被局限在低功率器件中，但是现在明显趋向于将永磁应用在较大的设备中。

在高性能体中大为改善的单位质量磁矩导致一门新的运动控制工业的诞生：稀土磁体对改变办事速度的微电子技术确是个伙伴元件。图1.3 出示性能开发过程的进展：

关于各种器件中应用模型的数据世界有关厂家可以提供，表1.3是1985年汇编估计的应用用量。当然在电能转换成机械能中产生力或力矩是永磁体使用的最主要的领域。电这种器件可以作为直线起动异步机工作或者根据其电输入，作为无刷直流电机或步进电机运行。

关于永磁体电机市场的潜在增长和动态特性的例子，Neidhart对该市场作了很好分析并于1985年公布于众，该分析估计1985年小电机市场超过50亿美元，实际上每年增长5%，表1.4按电机类型对1985年使用的永磁直流电机进行了细分并出示了到1990年的估计增长量。直流永磁电机的总增长预定为26%，有些类型如属于消费产品范畴的家用电机预计年增长率为超为100%。

在图1.4中说明了按电机类所预示的发展趋势。直流无刷电机的趋势是显见的，直流永磁电机的增长某种程度上是以交流电机为代价的。人们可以指望交流电机生产厂相当容易地使其设备适用于生产无刷力矩电机。无刷类电机的这种可能中心特点使它有资格适用于许多未来应用。

在某个方面，人们可能对永磁体的性能/成本关系提出要求，这将会使感应式交流电机改换成感应起动异步电机；直线起动电机没有任何转子损耗，因此提高了

效率和功率因素。那时交流电机和直流电机的差异可能完全消失，永磁体就可能实际上应用于所有电机中。

1.5 原材料冲击

永磁材料商品化的成功与否是与成本、可供性及组份元素的资源地理分布有着密切的联系。比如铁氧体所需元素十分普通、成本低廉而且非战略性。在AlNiCo磁体中，70年代的钴危机很大程度上影响了该类磁体的下降。1972年AlNiCo的磁体占国内磁体工业的4%，到1982年AlNiCo磁体仅为该工业的7%。

SmCo_5 和 $\text{Sm}_2(\text{CoFe})_{17}$ 磁体的商品化严重地受两种因素限制，一是很高的钴百分比，另一是Sm在稀土矿中的百分比如此之小。据测算全世界可供应的Sm总产量(以磅计)仅能够满足世界永磁需要量的1~2%。但是由于显著的磁能密度，其价值大约为该工业的15%。

稀土钴磁体把我们引向仅在很窄的特殊使用领域才具有成本——效果性的高能磁体。他们受原材料的限制，因此不能成为主要的性能系列。NdFeB的原材料情形就非常有利了。该系统无钴，供应铁和硼的工业体系十分完善，容易支撑NdFeB磁体的发展，因此我仅需关注铈资源。

由于稀土元素在周期表中的位置及电子层的相似性，它们难以分离。正是这个特征它获得了稀土名字。从可获量或者地壳的百分比来看，他们比许多我们不认为是稀少的元素如铜和铅更为丰富。稀土元素在商品化上开采的矿石中可以找到，最主要的是bastnasite和独居石，尽管许多稀土元素相当丰富，但是有经济开采价值的精矿并不是如此之普遍。开采Bastnasite主要在美国和中国，而独居石的开采在澳大利亚，马来西亚和印度。

稀土工业是根据稀土氧化物而不是纯工业元素来报道产量的。当该工业报道已知的储量时，它指的是经济开采的资源。现美国在稀土氧化物生产方面具有领导地位，在加州Pass小经营的Moly Corp公司目前是主要的生产厂，预计能供应自由世界稀土氧化物市场的一半左右。

从已知的储量来看，中国被认为拥有全球储量的85%，从矿的Nd含量来看，中国的储量可能超过600万吨 Nd_2O_3 。中国在某一方面将是主要的供应者，并且正越来越有兴趣办合资企业来吸引资本用于开发生产设备。

表1.5给出两大矿系的每一种单个元素的百分比及估计产量。矿石中的相对丰富性可能影响单个元素的成本，稀土工业的早期产品是由元素族构成的，叫做混合稀土。单个元素的市场仅存在了20年左右。随着对单个元素的兴趣形成，生产厂需要一个元素加以平衡的市场才能分离任何一种元素。由于分离技术问题，甚至今天普通的办法是分离所有的元素并试图用稀土矿天然出现的元素比例来解决需求。

虽然现在存在着相当大的Nd市场，但是预计磁体中Nd的使用将是最大的。许多稀土生产厂和一些磁体制造厂正积极地开辟各种途径生产Nd金属和NdFe合金。看来最有希望的办法是钙热氧化工艺，还原工艺和金属热还原工艺。后者工艺用钠金属在氯化钙槽中还原Nd₂O₃以获取金属。供给磁体生产厂的Nd价格对NdFeB磁体的发展将有较大的影响。

由于涉及的因素很多，Nd金属可能变化很大，比如增长率和对其他稀土元素的需求，还有根据产量、纯度、投资和经营观点来选择的最佳工艺技术。

1.6 展望未来

很清楚有强有力的理由说使用永磁体超过电磁体。永磁体在工业中的发展至少象电器制造业一样快速。然而在某些领域，似乎确定了他们蓬勃发展的地位。一个领域就是运动控制工业，随着办公室自动化和工厂自动化，提高质量和生产率的关键往往是电驱动系统。我们的驱动系统不受电子数字指令速度的限制而受到发挥工作功能的转换机构的制约。高能永磁体可以决定如何快速地将磁头在磁盘上运动或者在数控机床中实现每秒多少个动作，航天器及工厂中的各类气动和液压装置正在被可靠性、成本和功能得到改进的电磁体所代替。在运输和能量转换方面，永磁体在未来的能量方面可能充分发挥关键性作用。

通讯工作继续需要加以改善。我们必须成为关注磁学的系统思想家，在研究和开发中需要共同协作，应该拓展研究所的角色。美国仍在永磁科学中具有领导地位，部份得益于军事基金，但是通常实施很慢。

今天有了新的开发速度，以往在重大的新性能的开发间需要经历15~20年的间隔。今天我们每一、二年就可得到新的性能，研究人数和会议上发表的论文数目急速增加。这是传统磁体公司难以设想的，或许那时重要的开发间需要的时间太长了，以致因没有什么东西出现使研究开发消失殆尽。

看来富有意义的另一趋势是磁体生产厂集成永磁磁路的建立。伴随这种较新的高能密度材料,磁化温度稳定性和测量这些复杂问题启示人的日益需要一个永磁磁路特性责任源。例如,用粘结材料似乎很容易采用先进的模具系统既形成磁体又形成磁路高导磁率导磁元件。

关于单位性能的改进,如第二章所述,它受到元素和合金的饱和磁化强度的限制,从组份来看,或许最大磁能积为 $(25 \times 10^3)^2/4$ 或 $150 \times 10^6 (BH)_{\max}$ 。目前NdFeB已达到这,如大值的三分之一。根据稀土化合物看来有理由指望开发或许是16kG级Br的材料,如果我们能使Hc达到 $1/2 Br$ 水平(约8kOe),那么就会导致64MG0e非常有用的永磁体的诞生。那会出现断裂退磁曲线,但是对于那些磁通密度是品质因素的应用将是非常有用的,这样的应用包括扬声器和涡流装置。

几十年来开发中大多数强调要搞清楚微观结构是如何提高了Hci水平。具有同样重要性的将是集中开发高Br而矫顽力适中的材料,这类磁体将更易于磁化,甚至可以适用于那些电子控制限制启动冲击电流及必须具有一定条件的电机所接受。

当人们考虑稀土钴和铁化合物的单晶各向异性物时,我们注意到在块状磁体中有可能获得高得多的Hci。随着我们更多地了解矫顽力机制,我们能指望块状磁体中大为提高的Hci水平。这在应用中是有趣的,例如电机,那里磁体往往暴露于比本身自退磁场高得多的外部物中。

NdFeB磁体的未来由于其性能的潜力十分有利的原材料情况似乎特别光辉灿烂。但是笔者认为在可预见的未来铁氧体仍将是主导材料。铁氧体将与NdFeB共存,NdFeB或许以各种形式占磁体工作的40%。10年内SmCo₅, Sm₂(Co-Fe)₁₇和AlNiCo磁体仅在特殊的应用中较为重要。

从长远来看,可以期待高能永磁体将导致极为有趣的新的磁电技术的出现,其中有一个领域机械能密度将高于常规的电磁能;而且趋近现在我们用超导技术所获得的50~100MG0e的永磁是可能的并且这类磁体如果是由富裕的元素,合理的成本所制成的,那么可能提供新一类磁电能量转换器,这些器械只涉及永磁体和导电材料。

表 1.5 稀土可供性(美国矿产局)

稀土氧化物	离子吸附矿 加洲		独居石 澳洲	
	% Reo	Prod T	% Reo	Prod T
镧 Lanthanum	32.00	7840	23.90	2390
铈 Cerium	49.00	12,005	46.03	4603
镨 Praseodymium	4.40	1078	5.05	505
钕 Neodymium	13.50	3308	17.38	1738
钐 Samarium	0.50	123	2.53	250
铕 Gadolinium	0.30	74	1.49	149
铈 Dysprosium	0.03	7	.69	69
其它 Other Reo	0.27	65	2.93	293
总计 Total	100.00	24,500	100.00	10,000

参考文献

- [1] E. N. da C. Andrade, Early History of the Permanent Magnet, Endeavour XVII(65) (1958); Reprinted in R. J. Parker and R. J. Studders, Permanent Magnets and Their Applications, (John Wiley, New York, 1962).
- [2] H. A. Neidhart, Small Motor Market Trends (IEEE, 1985).
- [3] R. J. Parker, Paper No. II-5, 6th International Workshop on Rare Earth-Cobalt Permanent Magnets and their Applications, 1982.

第二章 磁学和永磁体

- 2.1 引言
- 2.2 单位制、定义和转换系数
- 2.3 磁滞回线
- 2.4 退磁因子和磁路概念
- 2.5 永磁体和电磁学
- 2.6 能量关系
- 2.7 晶粒边界条件和品质因素

2.1 引言

第一章中的早期历史讲述了早期人们是如何获得有用磁体性能的，这是相当了不起的功绩，因为当时几乎没有什么定义或测量，而这些对贡献者之间的交流是如此之重要。

本章我们要介绍贯穿本书采用的单位制，定义和定量测试程序。同时介绍些重要的关系，包括电磁学、能量转换和磁路概念。

2.2 单位制、定义和转换系数

为了便于理解、评估和比较永磁体，首先要求对磁场和材料的磁性状态进行定量测定。在磁性材料中，磁极被早期科学家选为基本量，但是它是不能被测出的物理量，就如电子的质量和电荷一样，我们必须记住永磁远先于电流存在。一个单位磁极就是一个极，它是真空中同极相距1cm时排斥的达因，磁化场H的这个单位在CGS制中称为奥斯特。

用同样的方式，材料的磁性状态可通过给定横截面中的单位磁极数来描述，这种测量就叫做磁化强度并用符号I表示(或有时用J)。在图2.1的棒状磁体中，一端 m 个单位北极，另一端 m 个单位南极，长度 l ，横截面 a ，磁化强度I可以看作 m/a 。法拉第认为环绕这样一根棒状磁体的空间充满无源的假想“磁力线”穿过磁极，每对极产生一根磁力线，磁力线习惯从北极出发回到南极。所有的磁力线被称为总磁通量，

单位面积的磁力线称作磁通密度 B 。当磁性材料置于磁场中时，该磁感应 B 由两部分组成。磁场 H 产生的磁力线和磁性材料引起的磁力线，后者称作磁化强度 I 。因此：

$$B = \phi/A = \mu_0 H + 4\pi I \quad (2.1)$$

系数 4π 起因于这样的事实：在离单位极的单位距离，建立一个单位场。单位场存在于包围磁极的单位半径球面上，球面积等于 4π 。在使用永磁的工程工作中， $4\pi I$ 常用内禀磁化强度 B_i 表示。磁场通常与磁感应方向同或相反，磁感应、材料的磁化强度和磁场三者式为：

$$B = B_i \pm \mu_0 H \quad (2.2)$$

B_i 和 H 的相对贡献极大地影响永磁材料的磁化、退磁、稳定性和测量。 μ_0 叫做磁导率，在CGS制中 μ_0 的值为1，在SI制中 μ_0 的值为 $4\pi \times 10^{-7}$ 韦/安米(Wb/A·m)。 B 、 H 和 B_i 都是矢量，但是我们使用时，他们往往平行或反平行，因此我们能以标量形式使用。在SI制中， B 和 B_i 单位相同，都是韦伯/米²，(Wb/m²)或特斯拉(T)。

H 单位为安培/米(A/m)。在CGS制中，普通单位是麦克斯韦/厘米²，但是他们的名字不同。 B 和 B_i 用高斯(GS)， H 用奥斯特(Oe)。在自由空间 B 和 H 并不是独立的，而有着 $B = \mu_0 H$ 的关系，在磁性材料中 B 和 H 可以独立地变化。

目前磁性单位和术语处于过渡期，CGS制广泛使用了约半个世纪，但是由于SI单位在科学上具有更广的容纳性，现正强烈转向SI制。有些国家SI制已被法律所规定，表2.1比较了两种单位制中的单位和符号，磁学中使用SI制存在一些基本问题，一部分是由于 B 和 H 在数值上的巨大差异。我们发现我们的仪表与韦伯和特斯拉有关，我们不在 H 轴上转换就不能画出读数，回复磁导率不转换就不能直接画出。磁感应和磁化强度不能按同样的比例画出，因为他们的单位分别是特斯拉和安培/米。

图2.2用 $\mu_0 H$ 而不是 H ，在 X 轴上画出退磁曲线。在CGS制中，因 μ_0 是个不变系数，因此我们就有习惯的退磁曲线。对于 B ， B_i 和 $\mu_0 H$ 使用SI单位分特斯拉(dT)，在两种单位制间就形成了一一对应的数关系，只有 H 和 $(BH)_{\max}$ 有数差异。但如在退磁场中使用 $\mu_0 H$ 1/10特斯拉而不是 H 奥斯特，则 $(BH)_{\max}$ 能换算成一一对应关系。CGS单位制的30MG0e磁体在SI单位制中磁能积为30dT²，用这种数关系而作图的技术

对许多人是很有帮助的,在这段时期两种单位制看来要经历很长的过渡期。今天大多工程工似乎仍用CGS单位,多数论文仍用CGS制提交,或许使用CGS单位的简明性目前优于SI制的基本价值。基于这些原因本书将使用CGS制,但是在用SI单位解决问题时可以参考表2.2的转换系数。

2.3 磁滞回线

设定有一块永磁材料,如图2.3所示。磁体置于磁化的轭铁中,这样磁场 H 可以控制并能逆转。若标样未磁化,从点 O 开始施加正 H 场。 B 作为 H 的函数而被画出就有曲线 OP ,称初始磁化曲线。如果磁场减少到零, B 不会降到零,而保持一个值 B_r 。要使 B 降到零必须施加一个反向场,这个值被定义为矫顽力 H_c 。如果给标样施加正向和负向 H 值循环几次,就获得了对称性回线: $PBrH_cP'Br'H_c'P$ 。该曲线就是磁感应曲线或磁滞回线,它是评估磁性材料的基础。若设置传感器来正确地确定 H 和 B ,就能容易地获得内禀磁滞回线 $QBrH_{ci}Q'Br'H_{ci}'Q$ 。注意当 H 增加时,能获得越来越大的回线面积。最后 H 足以高到让材料饱和。饱和时, B_r 和 H_o 是个恒定值,称作剩磁(B_r)和矫顽力 H_c 。饱和时磁化强度(Q 的水平)也恒定,在每一点上两个曲线不同,相差 H 值,即: $B = B_i \pm H_o$ 。

大多数装置和系统中,永磁体工作在磁滞回线的第二象限,即在 B_r 和 H_c 之间。但对于磁化问题,我们需要第一象限的数据,磁体在与外部磁场相互作用时往往被迫进入第三象限。此外,磁体有时应用在磁滞装置中,在该装置设计过程中的回线总面积是很重要的。

磁感应与磁化场 H 之比称为磁导率 μ ,磁导率在磁滞回线的磁化和退磁部分的不同点上变化很广,我们尤其对初始磁导率 μ_i ,微分或最大磁导率 μ_d 和可逆磁导率有兴趣。初始磁导率是磁化曲线在第一象限的初始斜率,如图2.4所示。微分磁导率是 H 在任一点小变量 $\Delta B / \Delta H$ 之比,沿磁化曲线点 A 的 $\Delta B / \Delta H$ 最大,因为曲线呈现了最大的转折,有时用 μ_d 估计第二象限性能。正如考查图2.3中磁滞回线时所注意的一样,当给饱和磁体施加一个退磁场时,磁感应 B 将在第二象限沿大回线下跌。如果在磁感应到达图2.4的 C 点时,减少退磁场,那么磁感应强度一般不会沿大回线返回,而是沿新的路径 CD 返回。另一种办法是,以某一适中的强度使退磁场发生变化,磁感应强度将沿内部小回线如 DD_1 走,这样可能形成无数内部回线,这