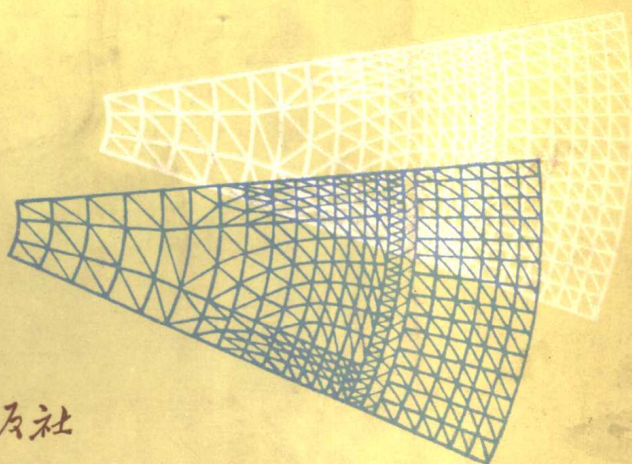


稀土永磁电机的 分析与优化

蒋宗荣 徐国华 等 著

XI TU YONG CI DIAN JI
DE FEN XI YU YOU HUA

中国科学院科学基金资助的课题



西北电讯工程学院出版社

稀土永磁电机的分析与优化

蒋宗荣 徐国华等 著

中国科学院科学基金资助的课题

西北电讯工程学院出版社

1986

内 容 简 介

应用稀土永磁电机是新一代航空及航天用电机的一个重要发展方向。本书是“稀土永磁电机拓扑有限元分析与拓扑优化设计”研究课题理论工作的一部分,内容包括:稀土永磁材料的发展及其在航空电机中的应用;稀土永磁电机的数值分析及有关理论;稀土永磁电机的优化设计。

本书从理论、方法到应用自成体系,算例简练易懂。可供有关专业的研究人员、工程技术人员和大专院校师生阅读参考。

稀土永磁电机的分析与优化

蒋宗荣 徐国华等 著

西北电讯工程学院出版社出版发行

西北电讯工程学院印刷厂印刷

新华书店经销

开本 787×1092 1/16 印张 74/16 字数 172 千字

1986 年 10 月第一版 1986 年 10 月第一次印刷 印数 1—1,500

统一书号: 15322·70

定价: 1.70 元

前 言

六十年代中期,第一块稀土磁体在美国空军材料研究所诞生,它以 $18 \times 10^6 \text{Gs} \cdot \text{Oe}$ 的极历磁能积引起了应用界的广泛兴趣。在不到二十年的短短时间里,稀土永磁体的发展已经经大了三代:第一代稀土磁体(R_1Co_5);第二代稀土磁体(R_2Co_{17});第三代稀土磁体(Nd-Fe-B)。目前第三代稀土磁体的最大磁能积达 $45 \times 10^6 \text{Gs} \cdot \text{Oe}$,这一数值相当于当前最好的铝镍钴永磁体的5倍,最好的铁氧体永磁体的10倍以上。

在稀土磁体的应用方面,近年来的发展也十分迅速。当前,机电工业、电子工业、医疗卫生、工业驱动等许多部门,越来越广泛地应用各种不同类型的稀土磁体,并已取得了极为明显的技术和经济效益。

电机是稀土磁体一个重要的应用场合,稀土磁体的特异优越性能(高的矫顽力、极大的磁极积)使它特别适用于航空及航天电机。可以预言,稀土永磁电机将成为新一代航空及航天用能电机的一个重要发展方向;而第三代稀土磁体的出现,为其推广地面应用开辟了无限广阔前景。

我国稀土矿藏量约占全世界稀土矿藏量的80%以上,被誉为“稀土王国”;稀土磁体的性能已进入国际先进水平。因此,研究各类稀土永磁电机的性能与设计,开发稀土磁体的应用,具有十分重要的意义。本书的作者们在中国科学院科学基金的资助下,在以往工作的基础上,从1983年以来,开展了对“航空稀土永磁电机拓扑有限元分析与拓扑优化设计”这一课题的研究工作。本论文集是该课题理论工作的一部分。其中部分论文已先后在国内外杂志或会议上发表过。

本论文集的内容大致可分为以下三方面:稀土永磁材料的发展及其在航空电机中的应用;稀土永磁电机磁场的数值分析及有关理论;稀土永磁电机的优化设计。

本论文集从理论、方法到应用自成体系,算例简练易懂,可供大专院校有关专业师生及有关厂、所的工程技术人员参考。

因本书中所引用的资料都发表于贯彻实施法定计量单位之前,为保持其原貌,以及为了与国外某些资料作对比,书中所用计量单位未按法定计量单位予以修正,请读者阅读时注意。

感谢西北电讯工程学院出版社的大力支持,使本论文集得以迅速出版。

由于时间仓促和水平有限,有的工作还不够成熟,有待于进一步探讨研究,错误不当之处,敬请读者不吝指正。

作者 1986年6月

目 录

稀土永磁材料的发展	蒋宗荣	(1)
稀土永磁及其在航空电机中的应用	李钟明	(10)
拓扑、图论与有限元	徐国华 宋国乡	(16)
拓扑有限元法的数据前处理	徐国华 颜毅华	(20)
一维场的拓扑有限元分析	徐国华 宋国乡 施浒立	(27)
二维场的拓扑有限元分析	宋国乡 施浒立 徐国华	(33)
用拓扑有限元法研究稀土永磁电机磁场问题	李钟明 颜毅华 宋国乡	(37)
矩形槽气隙磁场的拓扑有限元解	宋国乡 赵华孟 郑 勇	(44)
稀土永磁发电机及其磁场的有限元分析	蒋宗荣 李钟明	(49)
力矩电机磁场的有限元分析	宋国乡 黄鹤新 李钟明	(56)
XJF-1稀土永磁发电机磁场的有限元计算	蒋宗荣 李钟明	(61)
二维电机磁场的边界元解	徐国华 王家礼	(68)
非线性磁场问题拓扑有限元方程的一种迭代解法	徐国华 施浒立 颜毅华	(77)
稀土永磁发电机优化设计研究——网点复合形法	颜毅华 李钟明 徐国华 施浒立	(90)
关于稀土永磁同步发电机多目标优化设计问题的研究	蒋宗荣 徐国华 肖维荣 杨泰乾	(100)
电机设计中的摄动优化初探	宋国乡	(108)

稀土永磁材料的发展

蒋 宗 荣

一、概 述

稀土元素是指镧系中第 57~71 的 15 个元素(La 镧, Ce 铈, Pr 镨, Nd 钕, Pm 钷, Sm 钐, Eu 铕, Gd 钆, Tb 铽, Dy 镝, Ho 钬, Er 铒, Tm 铥, Yb 镱, Lu 镥), 这些元素由于其含量稀少, 用途也不十分明确, 因此, 过去常被作为矿渣抛弃。近年来逐渐发现它的特殊功能。在很多场合, 几乎起着奇迹般功能。最先在冶炼中, 稀土元素有增强金属强度的性能, 后来在化工、医药等方面也发现有特殊功能。近年来, 在我国农业上也得到广泛应用, 对提高植物抗寒性, 增加产量都有显著效果。尤其是在提高硬磁材料的矫力 μ 及磁能积方面, 更是发展迅速。

我国稀土资源极其丰富, 矿藏量占全世界 85% 以上。如表 1 所示。可谓“稀土不稀”, 故被称为“稀土王国”。并且近年来应用逐渐广泛。在永磁材料方面, 我们的冶炼和研制已跃入国际先进行列。表 2 以铁氧体、铝镍钴、钐钴 R_1Co_5 、钐钴 R_2Co_{17} 及钕铁硼五种材料的最大磁能积 $(B \cdot H)_{max}$ 为例, 与国外水平作了比较。

表 1 稀土矿藏量

地 区	贮量(t, 稀土氧化物)	百 分 比 %
中 国	>37,000,000	85.5
北 美 洲	> 4,000,000	9.2
澳大利亚	> 850,000	0.8
其它(欧美)	> 1,950,000	4.5

表 2 五种永磁材料最大磁能积比较

$(BH)_{max}$ (MGs·Oe) 材料 国名(厂名)	铁氧体 $MO \cdot Fe_2O_3$	铝镍钴 $AlNiCo$	钐 钴 R_1Co_5	钐 钴 R_2Co_{17}	钕铁硼 $NdFeB$
日本(金属)	4.1	11.0	26~30	38	40
日本(住友)	3.7		25~28	36	45
美 国	3.5	13.5	24~30	35	44.5
西 德	3.2				40
中 国	3.4	13.6	34~31	37	42.2

由此可见,我国当前对稀土永磁材料研究水平,仅次于日本,美国。所以稀土磁钢在我国应用是有很大前途的。

二、国外稀土永磁材料发展情况

六十年代中期,当时在美国俄亥俄州空军材料实验室工作的 Karl Strnat 及其在通用电器公司研究开发中心的合作者们,首先发现了具有优异永磁性能的 SmCo_5 化合物,其磁能积为 $18\text{MGs}\cdot\text{Oe}$,约为铁氧体的 6 倍。此化合物具有创记录的高永磁特性,因此立刻吸引了广大研究者的注意。在随后的十年间对 1:5 型稀土-钴化合物进行了广泛的研究。烧结磁体的工艺有了很大的改进, SmCo_5 磁体的磁能积最高已达 $24\text{MGs}\cdot\text{Oe}$ 。

(1) 2:17 型磁体的出现

众所周知,作为优良的永磁体必须满足下列三个要求:①高的饱和磁化强度;②居里温度必须高于室温;③有强的磁晶单轴各向异性。在广泛研究稀土-钴、稀土-铁系金属化合物的初期,人们已注意到 R_2Co_{17} 型化合物的饱和磁化强度甚至比 1:5 型的还高, R_2Co_{17} 的居里温度也高于 R_1Co_5 的。可惜,作为 2:17 型化合物的代表,最早进行研究的 R_2Co_{17} 相在室温下不具有单轴各向异性,而是易磁面。正是由于这一缺点,使人们放弃继续对 2:17 型化合物进行研究,而都转向了 1:5 型化合物。一直到七十年代初,人们发现 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 相具有单轴各向异性,只不过其各向异性场度较低,仅为 SmCo_5 的百分之几。和 1:5 相不同,存在 R_2Fe_{17} 相,其饱和磁化强度比 R_2Co_{17} 的还高,但居里温度很低,于是发展了 $\text{R}_2(\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x)_{17}$ 型化合物。1973~1976 年间出现了 $\text{Sm}(\text{Co}_{0.85}\text{Fe}_{0.05}\text{Cu}_{0.10})_3$ 的化合物,磁能积达 $26\text{MGs}\cdot\text{Oe}$ 。此后的发展,导致含多种过渡金属、成分更为复杂的 2:17 型二元化合物。1977 年 TDK 电子公司宣布制成磁能积 $30\text{MGs}\cdot\text{Oe}$ 的 2:17 型磁体,含 15%Fe 和 1.5%Zr。1979 年报导了成分为 $\text{Sm}(\text{Co}_{0.85}\text{Fe}_{0.23}\text{Cu}_{0.06}\text{Zr}_{0.02})_{7.7}$ 的磁体,其磁能积达到 $33\text{MGs}\cdot\text{Oe}$ 。以后虽不断有所改进,但性能终未有更大的突破,仍远低于理论预期的极限值 $60\text{MGs}\cdot\text{Oe}$ 。与此同时,发展了一类高矫顽力、低温度系数的 2:17 型磁体。其典型成分是用某种重稀土元素部分置换 Sm,即 $(\text{Sm}_{1-z}\text{X}_z)(\text{Co}, \text{Fe}, \text{Cu}, \text{M})_y$, 其中 $\text{X}=\text{Gd}, \text{Tb}, \text{Dy}, \text{Ho}, \text{Er}, \text{Tm}$, $\text{M}=\text{Zr}, \text{Hf}$ 。适当选择 Z 值,可使磁通随温度的变化显著减小,例如 $\text{Sm}_{1.2}\text{Er}_2(\text{Co}_{0.88}\text{Fe}_{0.22}\text{Cu}_{0.02}\text{Zr}_{0.02})_{7.22}$, 当 $Z=0.4$ 时, $25\sim 150^\circ\text{C}$ 温度区的温度系数 $\alpha=-0.0045\%/^\circ\text{C}$ 。

此外,开发了各类混合稀土磁体。为制作各种异形磁体又发展了专门的粉末粘结工艺,从而出现了多种系列的粘结磁体。

如果 SmCo_5 算是第一代稀土永磁的话,那么 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 要算第二代稀土永磁了。今天,这两类稀土磁体在各主要工业国都已进行商品生产,年产量达几百吨、上千吨,稀土永磁广泛用于需要强磁场,但空间却有限的场合,例如军事上的各种微波器件和无线电通讯,各类永磁电机和测绘仪用的平面电机,磁选、磁悬浮、磁密封、磁力矩传动,快速打印器的电磁打印,微型扬声器和轻便耳机等方面。此外,一些特殊场合,例如同步辐射光源所用的摆动磁体,新一代核磁共振医疗成像系统用磁体也都离不开稀土永磁。然而 Sm-Co 磁体昂贵的价格限制了它的大量使用和推广。例如,汽车上的起动机,现在靠电瓶驱动电磁式电动机, Sm-Co 磁体完全能做成较小的、更可靠的永磁式起动机。美国通用汽车公司确实曾经考虑过

把稀土磁体作此用途,但最后被否决了,成本高是主要原因。

1978年因扎伊尔发生战争影响到钴的供应,暴发了所谓钴危机,市场上钴的现货价格飞涨八倍。此外,钴是航天、航空所需高温合金的重要成分,故被划为战略物资,出于经济和战略的考虑,无钴永磁材料的研究加速了,不含钴的第三代稀土永磁钕-铁-硼磁体遂在上述背景下应运而生。

(2) 钕-铁-硼——第三代稀土永磁

1983年6月,日本住友特殊金属公司在大阪宣布制成了创纪录的高磁能积磁体,它是一种 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 三元稳定化合物,磁能积高到 $36.5\text{MGs}\cdot\text{Oe}$ 。1983年11月在匹兹堡召开第29届磁学及磁性材料会议(简称3M会议)上,住友的佐川真人详细报导了 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 化合物的成分和制作工艺。在同一个会上美国通用汽车公司的Croat等则报导了成分相似、但用熔体快淬法制造的材料,其磁能积达到 $15\text{MGs}\cdot\text{Oe}$ ⁵¹。他们的目的在于开发适宜作汽车马达用的永磁材料。实际上,除通用汽车公司外,类似的研究工作同时也在由美国海军研究局资助的一些实验室内进行着,并取得了肯定的结果。

在佐川做了直率得令人吃惊的报告后,西方各国的许多企业在私下宣称,他们正在制作这种性能优良的烧结磁体。据住友宣称,专门生产Nd-Fe-B烧结磁体的工厂于1983年10月投产,月产量是2t。商品牌号是Neomax,目前生产Neomax-27H, Neomax-30H, Neomax-35H三种规格其性能可从有关资料查到。此外诸如信越、东芝、日立、TDK、SONY等公司都在埋头研制此种磁体,但因涉及专利,故对外不提供磁体,而是做成器件出售。美国坩埚公司据称1984年底也开始正式生产商品磁体,牌号是Crumax。在欧洲诸如西德的真空冶炼公司等也将开始新磁体的商品生产。至于快淬磁体的生产,目前世界上只有美国通用汽车公司独家经营,牌号是Magnequench,据称通用汽车公司已投资6,800万美元建立Magnequench磁体的专门生产厂。由于商业竞争,各公司对有关钕-铁-硼磁体的产量、价格都秘而不宣。

蕴藏于第三代稀土永磁中的这种潜在可能性已经对世界各国磁体的生产者和使用者带来了“冲击”。1985年3月在美国蒙特利市召开的国际学术讨论会名为“钕-铁-硼永磁材料对永磁使用者和生产者的冲击”,不是没有原因的。的确,Nd-Fe-B磁体的出现,在学术界和工业界已造成了一股强劲的“旋风”,它迅速改变着永磁研究、生产和应用各个领域的格局。

看来,日本的战略目标是用电Nd-Fe-B磁体取代大部分的Sm-Co磁体,估计到九十年代末,需求量约1200t,产值四千万美元,这是Nd-Fe-B市场容量的低限。美国的战略目标除用电Nd-Fe-B取代当前的AlNiCo和铁氧体外,将广泛地用永磁体取代电磁体,特别在汽车工业方面。估计九十年代末的总需求量可达25000t,价值超过八亿美元。面对日美的战略部署,欧洲也积极行动起来,1984年10月25日在欧洲经济共同体总部所在地布鲁塞尔举行了 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 永磁体的科学、技术、工业及经济前景的讨论会,除学术讨论和对日美情况的分析外,主要是商量战略对策。看来,欧洲将兼顾日、美的两种战略目标。会议强调指出,过去几十年来,欧洲的磁学基础研究繁荣昌盛,特别是在法国和荷兰。在同一时期内,美国,更多的是日本,则集中力量在开发和应用方面。相比之下,欧洲落后了,痛感有必要动员欧洲在磁体研究和开发上的技术潜力,急起直追。要不失时机地加强对三元稀土-铁材料的研究,抓住新的稀土铁磁体所提供的机会,组织研究力量和财政支持,要和日、美较量,务使欧洲能分享磁学研究和革新的成果!

表3和表4分别表明Nd-Fe-B永磁和2:17Sm-Co永磁的磁性能、物理性能的比较。

表3 Nd-Fe-B与2:17Sm-Co磁体磁性能的比较

合金	M_s Gs	B_r kGs	MH_c kOe	BH_c kOe	$(BH)_{max}$ MGs·Oe	T_c °C	$\frac{\Delta B}{B_r}/^{\circ}\text{C}$
$\text{Nd}_{15}\text{Fe}_{77}\text{B}_8$	1300	12.50	12.40	10.90	36.3	312	-0.126
2:17Sm-Co	1250	11.50	6.90	6.50	31.0	880	-0.04

表4 Nd-Fe-B与2:17Sm-Co磁体物理性能的比较

合金	密度 d g/cm ³	电阻率 ρ $\mu\Omega\cdot\text{cm}$	维氏硬度 HV	弯曲强度 MPa	热膨胀系数 $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
$\text{Nd}_{15}\text{Fe}_{77}\text{B}_8$	7.4	144	600	250	3.4(水平方向) -4.9(垂直方向)
2:17Sm-Co	8.4	90	550	120	7.0(水平方向) 14.0(垂直方向)

目前搜集到1984年上半年日本永磁材料的生产情况,有关数据列于表5中,括号内数据是与上一年同期相应数据的百分比值。为方便计,有关金额从日元换算成人民币,兑换率取100日元=1.0925元(人民币)。铁氧体永磁占永磁总产量的95.5%,占总产值的62%。 AlNiCo 和Fe-Cr-Co等铸造永磁的产量占第二位,但产值却低于稀土永磁而居第三位,产量仅占永磁总产量0.62%的稀土永磁,其产值占总产值的21.69%,居第二位。就单位重量的价格而论,铁氧体最低,每公斤仅8.4元(人民币),稀土磁体每公斤的平均价格为453.8元(人民币),远高于铁氧体,略低于铂-钴、铂-铁或18K金磁体。

表5 1984年1~6月日本永磁材料生产情况

指标 永磁参数	产量(t)	产量比值(%)	产值 (百万元人民币)	产量比值(%)	单位重量平均价格	
					元(人民币) /(kg)	(日元)/(g)
铁氧体永磁	32,915(118)	95.5	277.4(127)	62.24	8.41(108)	0.77
稀土永磁	213(188)	0.62	96.67(177)	21.69	453.82(94)	41.54
铸造永磁	1,332(111)	3.87	70.57(110)	15.83	52.99(99)	4.85
其它永磁	2(100)	0.01	1.07(126)	0.24	535.33(126)	49.00
总计	34,462(118)		445.71(132)		12.89(112)	1.18

括号中的数字值得注意,它说明各类磁体产量、价格的增减趋势。从产量看,稀土永磁的增长最快,比前一年同期增88%,远高于铁氧体的增长率18%;就产值而言,稀土永磁的增长也居首位(77%),铁氧体产值的增长率是27%,居第二位,但仍低于平均增长率32%。应强调指出,稀土永磁由于生产批量扩大,生产工艺改进,其单位重量的平均价格明显下降,比一年前降低约6%。

为评价稀土、铁氧体、铸造永磁等主要磁体的价格与性能,计算了单位体积的平均价格和单位价格所对应的平均磁能积,相应结果列于表6。不难看出,尽管稀土永磁单位体积的磁能积比铁氧体的高约6.3倍,但以1984年的单位体积磁体、单位价格对应的磁能积而论,

铁氧体的却远高于稀土永磁的。但到目前为止，由于 NdFeB 磁能积继续提高，而价格在不断下降，这一数值又有新变化。

表 6 各类永磁材料性能与价格的比较

比较参数		铁氧体永磁	稀土永磁 R_1Co_5	铸造永磁
平均值	$(BH)_m, \text{MGs} \cdot \text{Oe}$	4.0	25.0	5.0
	比重, (g/cm^3)	5.0	8.0	7.3
单平均位价格	$(\text{日元}/\text{cm}^3)$	3.85	329.0	35.4
	元(人民币)/ (cm^3)	0.042	4.283	0.387
单平均位性能	$(BH)_m/(\text{日元})$	1.039	0.064	0.141
	$(BH)_m/\text{元(人民币)}$	95.10	5.86	12.91

钕铁硼磁体市场分析

由于钕铁硼磁体是1983年出现的，因此目前的市场仍很小，但其潜力是巨大的。表 7 给出了稀土永磁的市场情况，从表可知 R-Co 磁体仅占永磁市场的17%，但是增长的趋势很快。日本的稀土永磁产量 1984 年比 1981 年增长了近 250%。总的分析看，R-Co 的市场在逐步扩大，铝镍钴的市场在逐年下降。而在稀土永磁市场中，Nd-Fe-B 磁体又突飞猛进地发展。图 1 为 Nd-Fe-B 市场预测。估计 1985 年世界总产量可达 6000t。1990 年 Nd-Fe-B 磁体总产值可达 2 亿美元，占永磁市场的12%。

表 7 永磁体市场结构

	1981年 (%)	1985年 (%)	增长率 (%)
铝镍钴	39	31	-18
铁氧体	49	62	+13
稀 土	12	17	+15

钕铁硼磁体价格分析

由于磁体价格受多种因素影响，此处仅给出平均价格预测及分析。据分析，在未来几年内， Nd_2O_3 价格可达 5~7 美元/kg，Nd 为 15~20 美元/kg，Nd-Fe-B 磁体为 60~85 美元/kg，即 1~2 美元/MGs·Oe。目前典型 SmCo_5 价格约 100 美元/kg。图 2 给出了各种永磁体的相对价格。

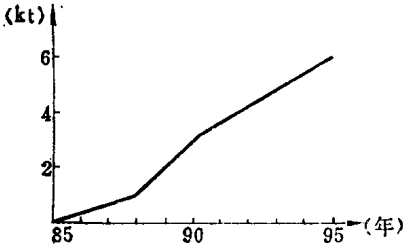


图 1 1985~1995年Nd-Fe-B 市场预测

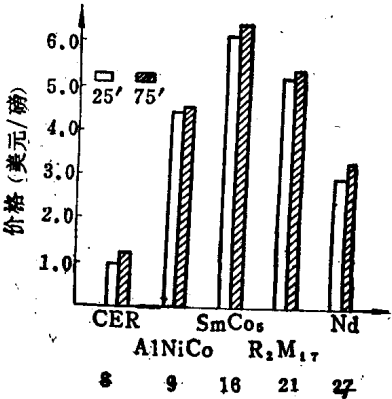


图 2 永磁体相对价格

铁钕硼磁体的应用

钕铁硼的出现无疑给磁体应用带来巨大好处。这是由于它的比重低于 SmCo_5 , 磁能积优于 Sm-Co , 而且不含稀缺昂贵的钴, 价格比 Sm-Co 便宜许多。主要缺点是居里点低 ($T_c \approx 310^\circ\text{C}$) 和磁感应值的温度损失大。这些缺点正在得到克服。

Nd-Fe-B 磁体可用来做汽车启动电机, 已到实用阶段。每辆汽车用一个启动机, 世界总的需求量之大是惊人的。

另一个较大的用途是各种微型电机, 包括伺服电机、有刷电机、无刷电机等, 这些电机在办公设备、计算机外围设备中都大量使用。据报导, 美国数据产品公司 (Dataproducts) 于 1981 年 4 月开始批量生产使用 Nd-Fe-B 磁体的打印机, 于 1984 年 9 月份生产的打印机, 其中所用的永磁体将全部改用 Nd-Fe-B 磁体。

总的趋势

从会议内外得到的总的信息看, 钕铁硼材料是未来十多年来永磁材料发展的重点课题之一。磁体价格会逐年下降, 产量会稳步上升, 市场占有率会逐步扩大, 并推动应用研究的发展。许多稀土金属生产厂已扩大金属钕的生产, 永磁厂也在扩大生产稀土永磁及钕铁硼永磁的生产能力, 准备满足新的市场需要。

美国通用汽车公司 (GM) 已完成钕铁硼磁体厂的初步建设, 并已投入少量生产, 总投资为 6800 万美元, 预计 1987 年正式投产, 计划年产量为 450t 磁体。美国印第安那通用技术公司 (IG Technologies) 已将稀土永磁的生产能力扩大一倍。电能公司正在着手建一个新的稀土永磁车间。托马斯公司 (Thomas Skinner Inc.) 正在购买厂房扩建稀土永磁生产线。为了竞争, 这两个公司 (EEC 和 T.S) 组成了一个“磁体系统集团” (Magnet Systems Group) 专门经营磁体器件, 如磁电机、高级电机等用的永磁器件。

上述各公司的扩大生产, 据了解均是为了适应钕铁硼材料的发展。总之, 今后钕铁硼永磁材料肯定会得到很大发展, 诚如一位发言者所断言: “钕铁硼的潜力是无穷的, 未来的生产者就是相信它的巨大潜力的人”。

三、国内的研究、生产状况

我国稀土永磁的研制始于七十年代初, 比国外起步晚了起码五年, 最先只有可数的几个单位进行研制, 目前从事稀土永磁研究、生产的单位已不下数十个, 遍及许多省、市。骨干单位都属于冶金、有色、电子等产业部门。下面分别简述研制和生产两方面的状况。

(1) 研制状况

就研究水平而论, 虽然基本上属于仿制, 但与国际水平相差不大, 若以时间滞后而论, 在七十年代滞后约一年, 进入八十年代差距缩小到不超过半年, 在个别领域, 甚至出现过暂时的领先, 如辐射取向环, 加重稀土的 2:17 型低温系数磁体等, 都是我国首创。近几年, 由于开放政策, 加强了国际技术交流, 信息交换及时, 因此与国际水平间差距进一步缩小, 第二代稀土永磁的研制就是最好的例证。

1983 年 9 月日本代表在北京国际稀土永磁会上宣布了新磁体的优异性能, 当即引起国内磁学界的普遍重视。但对该磁体的成分、工艺仅在讨论、猜测。同年 11 月 29 届 3M 会议前夕,

Strnat 教授作为审稿人, 首先收到了佐川报告的全文, 这是新磁体制作工艺的首次透露。作为友好交往, Strnat 和 Ray 教授分别复制该报告并先后寄给我国, 所以国内几乎与29届3M会议的参加者们同时得知佐川报告的内容。所不同的是佐川在会上只作了报告, 并未散发全文。钢研院收到佐川的全文后, 当即复制寄送科学院物理所、包头冶金研究所、跃龙化工厂等有关单位。此外钢铁学院等兄弟单位也及时得有复印件。国内的研制工作开始了, 不到两个月即取得可喜的结果。在1984年2月底的北京讨论会上, 钢研院、科学院、钢铁学院及包冶所等单位均报导了初步的研制结果, 磁能积分别为 39, 36 和 34 MGs·Oe, 3月初在包头规划会上钢研院报导了, 40.3 MGs·Oe 的磁能积, 七月末包冶所宣布达到 42 MGs·Oe, 十月钢研院宣布达到 43.2 MGs·Oe, 同年十一月西南磁学研究所亦达到 42.8 MGs·Oe。此外, 提高居里温度, 还原扩散工艺, 生产廉价磁体等工作都取得可喜的进展。我国赴日讲学人员于1984年底带回富钆混合稀土-铁-硼烧结磁体的详细资料后, 不到半月, 即取得良好结果。最近1409所, Nd-Fe-B 的工作温度达 120°C, 磁能积达 36 MGs·Oe 磁损 8%。

总之, 在稀土永磁的研究方面, 仿制有余, 独创不足, 尽管时间滞后缩小, 但毕竟仍是跟在别人后面, 亦步亦趋。

(2) 生产状况

表 8 国产(钢研院)稀土永磁体的性能和价格

磁体类别	性能				价格 元(人民币) /kg
	B_r (kGs)	H_c (kOe)	$(B \cdot H)_{max}$ (MGs·Oe)	α_{Br} (%/°C)	
SmCo ₅	9.95	9.0	23.5	-0.045	800~1000
粘结CmCo ₅	6.0	5.0	10.0	-0.058	以元件出售
SmCo ₅ (R/D)	9.4	9.0	22.5	-0.045	800
PrCo ₅	10.0	9.5	24.0		800~1000
(SmPr)Co ₅	10.3	9.4	24.3	-0.045	800~1000
(SmMn)Co ₅	9.8	6.1	22.8	-0.06	以元件出售
Ce(Co,Cu,Fe) ₃	7.6	4.7	14.0	-0.09	~300
粘结Ce(Co,Cu,Fe) ₅	3.5	2.5	4.0		以元件出售
Sm(Co,Cu,Fe) ₇	10.0	6.0	24.0	-0.034	1200~1500
(SmCe)(Co,Cu,Mn) ₇	8.5	6.5	18.0		以元件出售
Sm(Co,Cu,Fe,Zr) _{7.5}	11.1	6.35	30.4		1000~1200
Sm(Co,Cu,Fe,Zr) _{7.5}	11.0	9.700	28.0		
粘结2:17型	7.5	6.5	14.0	-0.03	以元件出售
(CmGd)Co ₅ (R/D)	7.3	6.1	15.0	-0.14	
(SmHo)Co ₅ (R/D)	6.7	5.3	10.5	-0.005	~1800
(SmEr)Co,Cu,Fe,Zr) _{7.5}	9.9	5.8	22.6	-0.005	
Nd ₁₅ Fe ₇₃ B ₇	13.6	8.85	43.2	-0.125	
GYRM-40C	13.0~13.5	7.5~9.0	38~43	-0.125	
GYRM-35C	11.8~12.5	≥7.5	33~36	-0.125	400~800
GYRM-30C	11.2~11.9	≥7.5	28~32	-0.125	
GYRM-27C	10.0~11.2	≥7.5	25~28	-0.125	

从品种看,似乎与国外差距不大,国外有的,我们基本都有,性能也与国外的不相上下。作为例子,将钢研院研制的各类稀土永磁产品及其实验室性能列于表8。表中也列出相应磁体的估计价格。众所周知,各类稀土永磁一般均以元件出售,很少以重量计价,故表中所列价格仅供参考。

至于产量,则与国外的差距极大。据粗略的估计,稀土永磁的年产量仅二十来吨,和日、美等国的产量相差一个量级以上!这同稀土资源大国的称号极不相称。问题的症结就在于价格昂贵,难于大量推广使用。故用户多限于军工部门,订货的批量小,规格品种却极为繁多。此外,制粉和烧结工艺并不要特殊的专门设备,结果国内各研究单位往往同时小批量供货,既是研究者,也是生产者,于是逐渐造成今天作坊式小生产的局面。一些单位的附属生产车间,虽然年产几吨磁体,但所用工艺和设备完全是实验室原型的简单放大,未摆脱手工作业。所以各批产品性能的一致性、稳定性差,成品率低,产品尺寸受限制,公差大,根本不适应大批量生产的要求。以大电机所需磁体的订货为例,就因为缺少制作大块磁体和精加工外形尺寸的相应设备和充磁设备,只得作罢。第三代稀土永磁因其高性能,低价格、预计将很快取代Sm-Co、铸造永磁,甚至铁氧体的部分领地。面对稀土永磁生产量猛增的前景,我国稀土永磁生产工艺流程和设备的落后性更将暴露无遗。

四、几点结论

综上所述,我们不难得出下面几点结论:

1. 自从六十年代后期出现第一块稀土永磁体之后,其优越的磁性能引起了永磁体各个应用领域的极大兴趣。此后,应用领域的要求,不断促进稀土永磁体的发展和磁性能的提高;而稀土永磁体磁性能的不断提高又使得各种永磁器件的性能日益改善。在不到20年的短短的时间里,稀土永磁体的发展已经经历了三代,即:第一代 R_1Co_5 ,其最大磁能积达 $30 \times 10^6 \text{Gs} \cdot \text{Oe}$;第二代 R_2Co_{17} ,其最大磁能积达 $37 \times 10^6 \text{Gs} \cdot \text{Oe}$;第三代Nd-Fe-B,其最大磁能积达 $45 \times 10^6 \text{Gs} \cdot \text{Oe}$ 。

2. 第三代稀土永磁体Nd-Fe-B的出现,在磁学界和工业界已造成了一股强劲的“旋风”,它迅速改变着永磁体研究、生产和应用的格局。由于它极大的磁能积和较小的比重,可使永磁器件变得更小、更轻;由于它不含价格较为昂贵的战略物资钴(Co),价格便宜,因而使其在地面推广应用方面潜力巨大,市场广阔。

3. 中国是一个稀土大国,稀土磁体的研制近年来发展也十分迅速,其各种性能指标基本与国际先进水平相接近,品种规格也较齐全。但在稀土永磁体的生产方面与先进的工业国家(如美、日等)相比差距较大,由于价格昂贵,难于推广使用,致使稀土磁体的年产量仅20吨左右,与美、日等相差一个数量级;稀土永磁体的生产工艺流程和工装设备普遍落后,未能摆脱手工作业。这些方面尚需付出极大的努力以改变其落后面貌。

参考文献

1. 本间基文:磁性材料的最近动向,《国际应用磁学会议资料》,1984,12。
2. 《住友特种金属简》及《Neomax》产品说明书。

3. 罗阳：当代磁性材料的发展及应用，《西南应用磁学研究所》，1984。
4. 罗阳：重要国际会议有关 Nd-Fe-B 磁性材料情况简介，《西南应用磁学研究所》，1984。
5. B. Botoux, The appropriation of Nd-Fe-B magnets in permanent magnet business,《1984年应用磁学会议资料》。

稀土永磁及其在航空电机中的应用*

李 钟 明

[提要] 本文从稀土永磁的特性出发,论述了它在航空电机中应用的适应性,指出了稀土永磁电机的发展前景。

一、稀土永磁对航空电机的适应性

众所周知,永磁电机具有效率高、结构简单、工作可靠等一系列优点,不论在地面或航空都有广泛的应用。迄今为止,大量用于电机工程的永磁材料是铝镍钴永磁和铁氧体永磁两大类,而这两类磁钢在航空应用上都存在严重的局限性。铝镍钴永磁的最大缺点就是其矫顽力低,不能适应具有强烈退磁场下的动态工作场合,在航空上,往往用铝镍钴永磁来做成功率较小的直流电动机和同步发电机;铁氧体永磁的磁能积小,且其剩磁感应的温度系数可达0.2%,所以对于要求体积小、重量轻、温度变化范围广的航空电机,几乎没有应用。

稀土永磁的出现,为永磁电机的发展及其在航空中的应用,开辟了新的广阔前景。

稀土永磁的优异性能,主要表现在以下四个方面:

1. 具有高的矫顽力,特别是高的内禀矫顽力($R_1\text{Co}_5$ 的内禀矫顽力可大于20000 Oe)。
2. 具有很高的磁能积(目前, Nd-Fe-B 的最大磁能积可高于 $40 \times 10^3 \text{Gs} \cdot \text{Oe}$)。
3. 大多数稀土永磁体的退磁曲线是一条直线,其内禀磁化强度在极大的退磁场下基本保持不变——即 $dM/dH = 0$ 。
4. 在振动、冲击等机械负荷下,其磁性能比较稳定。

稀土永磁的上述特性,使其十分适应在航空电机中的应用。这是因为:

1. 航空电机在满足性能要求的前提下,要求其体积小、重量轻。为达到这些要求,航空电机往往采用高磁性、高强度、耐高温的优质材料;力求提高电机的工作转速;选择比较高的电磁负荷、甚至不惜缩短电机的使用寿命。

稀土永磁体极大的磁能积,将有效地缩小各类电机的体积,并减轻重量。以稀土永磁同步发电机为例,磁钢体积可用下式表示:

$$V_M = 225 \frac{P_N \cdot \sigma \cdot K_{ad} \cdot K_F}{f \cdot K_u \cdot K_\phi \cdot C \cdot (B \cdot H)_{\max}} \cdot 10^3 (\text{cm}^3)$$

式中: P_N ——电机的额定功率;

σ ——漏磁系数;

K_{ad} ——电枢磁势直轴分量折算到转子磁势的系数;

K_F ——短路时折算到每极的永磁体磁势为直轴电枢反应磁势的倍数;

* 本文曾刊登于《磁性材料及器件》1981, No1。

f ——频率；

K_u ——由相对电压 U_N/E_0 和功率因数大小决定的电压系数，与发电机外特性硬度有关；

K_g ——气隙磁场波形系数；

C ——最大磁能利用系数；

$(B \cdot H)_{\max}$ ——最大磁能积，对具有直线退磁曲线的稀土永磁 $(B \cdot H)_{\max} = \frac{B_r \cdot H_c}{4}$ 。

由于稀土永磁的 B_r 和 H_c 都很大，故提供同样大小的功率，可以比其它永磁体的体积小得多，这就有利于缩小电机的体积和重量。当代高能稀土永磁体的最大磁能积，约为铝镍钴永磁的 5~7 倍，铁氧体永磁的 10 倍；其单位体积所提供的励磁能量，约为电励磁电机的 10 倍左右。

电机的输出功率与转速成正比，而稀土永磁的应用可使电机在更高的转速下运行。常见的稀土永磁同步发电机的转子结构有径向磁钢式和轴向磁钢式两种(图1)。当发电机在最高转速下运行时，紧圈在发电机最高转速下起到保持其内包容件的作用。显然，这种结构相当于一个实心转子，适宜于高速运行。据报导，美国于

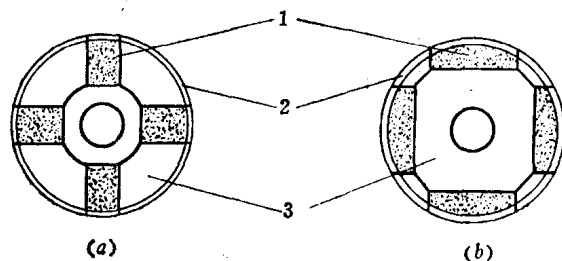


图1 稀土永磁电机转子的径向磁钢(a)和横向磁钢(b)
1—稀土永磁体；2—紧圈；3—导磁体

1974 年制成一台功率为 100kVA、转速高达 60000 r/min 的稀土永磁同步发电机。

2. 航空电机一般工作在具有强烈退磁场的动态场合(如发电机短路,电动机的起动与反转等),低矫顽力的铝镍钴永磁为克服由此产生的强烈祛磁作用,必须相应增大永磁体磁化方向的长度,这就增大了电机的体积和重量。而稀土永磁体具有极高的矫顽力,其内禀磁感应强度在极大的祛磁磁场下基本保持不变,使得它特别适应于具有强烈祛磁的动态工作场合,可以做成大功率的永磁发电机,1977 年美国通用电气公司制成的 150 kVA 稀土永磁航空用起动发电机即为一例。

3. 航空电机需要在强烈振动、冲击、恒加速等机械负荷下可靠工作,故所用的永磁材料必须在这种情况下保持磁性能稳定,而稀土永磁恰好在较高的机械负荷下具有磁性能的稳定性。

综上所述,不难看出稀土永磁是十分适应于在航空电机中的应用。从这一点出发,下面对几个主要的航空永磁电机作简要的分析。

二、稀土永磁在航空电机中的应用

我们分别以航空变速恒频电源系统(VSCF)、高压直流电源系统(HVDC)、航空直流电动机等几个方面,来分别讨论稀土永磁电机的应用情况:

1. 稀土永磁在 400Hz 变速恒频电源系统中的应用

目前,大型飞机上的电源,恒速恒频系统(CSCF)占有主导地位。这种供电系统用液压恒速装置实现恒速,但由于这种装置由上千个精密另件组成,加工复杂,维修困难,造价

很高。到六十年代,随着电子技术的发展,出现了 VSCF 系统。该系统由发动机直接与发电机耦合,发出变频交流电,然后通过电子变频器变换成 400Hz 恒频交流电。

由普通线绕转子发电机构成的 VSCF 系统的原理图如图 2 所示:

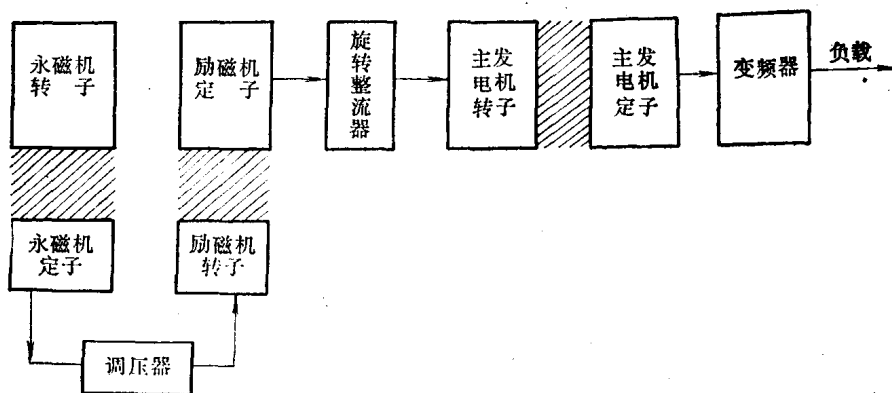


图 2 线绕转子发电机 VSCF 系统

这一系统由于重量大,电磁惯性大,无线电干扰大等原因,未能得到实际推广应用。

六十年代末期,稀土永磁问世,用稀土永磁发电机组成的 VSCF 系统被提出来了。由稀土永磁发电机组成的 VSCF 系统如图 3 所示。

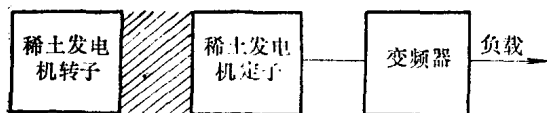


图3 稀土永磁发电机构成的 VSCF 系统

稀土永磁发电机构成的 VSCF 系统打破了传统的三级励磁的型式;并由于稀土永磁体很高的磁能积,转子易实现高速,使这种系统的重量指标得到改善;稀土永磁发电机在起动状态可作为同步电动机运行,兼作起动电动机,使系统的组成环节减少,提高了可靠性。

美国空军委托通用电气公司研制的 150kVA 稀土永磁起动/发电机,于 1977 年投入全面试验,转速为 12000~21000r/min。该发电机的基本数据如下:

转子结构: 横向磁钢结构, 七段拼合;

转子长: 17.78 cm;

转子直径: 16.51 cm;

极数: 14;

磁钢尺寸: $1.86 \times 2.26 \times 2.45 (\text{cm}^3)$, 共 98 块;

磁钢性能: $B_r = 8700 \text{Gs}$; $H_c = 8500 \text{Oe}$;

$$(B \cdot H)_{\max} = 18 \times 10^6 \text{Gs} \cdot \text{Oe}$$

由稀土永磁发电机组成的 VSCF 系统有较高的功率,重量指标可与 CSCF 系统相竞争,无疑,它将是一种具有发展前途的飞机交流电源系统。

2. 稀土永磁在飞机高压直流电源系统中的应用

HVDC 系统是四十年代提出来的设想,当时由于存在高压直流电机的高空换向和高压开关电弧这两个问题无法解决,使这种系统当时没有得到发展。

电子技术的发展,为解决上述两个问题提供了可能;稀土永磁体的出现,更使 HVDC 系