

磁性材料在微特电机中
应用技术与市场信息

会议录
(二)

机械电子工业部微特电机专业情报网
机械电子工业部磁性材料及器件专业情报网

一九九〇年九月

磁性材料在微特电机中应用
技术及市场信息会议录

编辑 机电部 微特电机专业情报网
出版 磁性材料及器件专业情报网
印刷 四川德阳新华印刷厂 1990年9月

7/15 ✓

目 次

▲综 论▲

快淬 NdFeB 粘结永磁的开发与市场预测	黄钢祥 (1)
中国稀土永磁电机的开发	蒋宗荣 (7)
当代永磁材料及其展望	李国栋等 (15)
永磁体在微特电机中的应用	徐锦华 (18)
粘结永磁材料在电机中应用的新技术	马昌贵 (22)
粘结稀土永磁及在步进电机上的应用	祝景汉 (26)
各向同性粘结 NdFeB 磁体在无刷电机上的应用	朱明歧等 (30)
永磁小电机及材料	蔡志平 (33)
石英钟表步进电机用永磁材料	黄付贵 (35)
国外钕铁硼永磁在微特电机中的应用	姜书英等 (38)
钕铁硼永磁在微特电机中的应用与展望	董德言等 (40)
钕铁硼永磁材料及其应用开发	贾 强 (44)

▲材料及工艺研究▲

NdFeB 永磁材料的高温特性	林德等 (49)
烧结 NdFeB 永磁体的热稳定性	吴良宏 (52)
用于电子表步进马达的高 H_c 稀土永磁体	何水校 (57)
微电机用的粘结稀土钴磁体	申绪芳等 (60)
永磁电机用的铁氧体磁体的压制	仇仪俊 (62)
高能积各向同性铁氧体磁环的生产工艺	卜福昌 (66)
高 B_r 高 H_c 铁氧体磁体的研制	殷人伟 (68)
新型微特电机用塑磁体的生产工艺讨论	杨声贵等 (73)
数控电火花线切割加工稀土永磁元件	蒋 华 (75)

▲应用研究▲

REPМ在音圈电机和步进电机中的应用	陈子茂 (78)
高矫顽力钕铁硼永磁在直流力矩电机中的应用	罗发扬 (81)
饼式电机与铁氧体材料	杨国本 (86)
直线马达及其使用的永磁体	胡国光 (90)
永磁材料在微电机中应用的若干问题	林其壬等 (93)
永磁材料在汽车小型电机中应用研究	黄文中 (96)
各向异性压延成型的塑性永磁的应用	杨世清等 (99)
永磁电机对磁体性能的要求	张自强 (101)
铁氧体永磁在微特电机中的应用实例	郭德深 (102)

▲电机技术▲

高效节能稀土永磁同步电动机起动问题研究	米春亭 (104)
FOXT53—6型稀土永磁高效节能纺织电动机	(109)

快淬NdFeB粘结永磁的开发与市场预测

黄钢祥 (上海钢铁研究所)

本篇主要综述了国内外快淬Nd-Fe-B粘结永磁的应用开发和生产状况及市场预测,并对国内稀土粘结永磁应用开发和生产状况提出几个方面研究工作的建议。

一、前言

随着科学技术的发展,稀土永磁材料的研究迅速进展,60年代末发现了1:5SmCo永磁,70年代研制成2:17SmCo永磁,80年代初,第三代稀土永磁Nd-Fe-B永磁诞生了。M. Sagama等人采用了粉末冶金技术, J. J. Craot和R. W. Lee等人采用快速旋凝急冷技术和粘结、热压技术。目前,这两种工艺生产的Nd-Fe-B永磁已经进入了大规模的应用开发和大批量生产阶段。本篇主要介绍国内外快淬Nd-Fe-B粘结永磁应用开发、生产状况、原材料供应、应用领域和市场预测。

二、国内外快淬粘结永磁研制与生产状况

国外许多公司非常重视粘结永磁的研究和应用开发,尤其是美日两国,投入巨资,相继建成具有相当能力的专业生产线。自60年代发展到现在,已经形成了几个系列的粘结永磁: 1) 各向同(异)性Ba(Sr)铁氧体; 2) 1:5型和2:17型SmCo永磁; 3) 各向同(异)性Nd-Fe-B系磁体。当今,日本已有60~70家粘结永磁生产厂,其中有十几家公司稳定生产稀土粘结永磁,这十几家公司生产粘结Nd-Fe-B磁体的磁粉主要来自美国GM公司,他们希望能实现快淬磁粉

的国产化,以利于日本粘结Nd-Fe-B永磁的进一步发展。

日本的粘结永磁开始于60年代,而几家公司从事稀土粘结永磁研究开始于60年代后期,到70年代初,粘结稀土永磁已进入大量生产阶段。精工爱普松是日本粘结稀土永磁最大的生产工厂,他可以代表整个日本粘结稀土永磁工业的发展,粘结R-Co磁体的产量已占全日本的60%以上,现在也同时生产各向异性粘结Nd-Fe-B永磁,并且成功的开发了粘结稀土永磁在办公室自动化装置、音响装置、放映装置等方面的微电机上的广泛应用。日立公司是日本最大的永磁材料生产厂,曾与GM公司签了合同,用日立公司快淬法生产Nd-Fe-B磁粉,从而使日立公司成了仅次于美国GM公司在日本生产Nd-Fe-B粘结磁粉的生产基地。同时,他们非常重视研制各向异性粘结Nd-Fe-B永磁,采用MQ-III磁体破碎粉末,进行取向粘结, $(BH)_{\max} = 120 \sim 128 \text{ kJ/m}^3$,有希望取代Sm₂Co₁₇型粘结磁体。

GM公司是专门生产粘结稀土永磁的公司,其产品是基于该公司独特的制粉技术,在日本享有很高的信誉,除了开发耐热高性能的粘结SmCo永磁外,在Nd-Fe-B永磁防锈、防氧化方面取得了突破性的成绩,已基本上解决了粘结Nd-Fe-B永磁的防锈问题,并开始生产NN-5型粘结Nd-Fe-B永磁。日本大同特殊钢公司是一家永磁材料的综合性生产厂,该公司不仅生产Np-6和Np-8

结Nd-Fe-B永磁产品，而且从87年夏天开始生产和销售由自己开发成功的“NEO-QUENOHC”粘结Nd-Fe-B用颗粒原料，这种颗粒原料的价格（~2万日元/kg）为粘结SmCo永磁原料的2/3，较便宜，月销售额为1亿日元；其注射型粘结磁体产品性能为 $(BH)_{max} = 32 \sim 48 \text{kJ/m}^3$ ，而压缩型的 $(BH)_{max}$ 可达 $56 \sim 72 \text{kJ/m}^3$ 。1988年夏，日本大同特殊钢公司在取得GM公司湿热成型Nd-Fe-B永磁(MQ-I和MQ-II)的生产销售权的同时，和GM公司进行原料制造技术和塑料加工技术合作，以便能在1989年夏季大批量投产，争取到1992年年产达到60亿日元，该种磁体不需要磨加工，特别是适合制造无刷电机用环形或瓦形等高性能低成本的粘结磁体。

美国GM公司是磁性材料行业的新成员，也是美国生产粘结Nd-Fe-B系永磁的最主要的厂家。该公司以发明快淬法生产而闻名世界，并且有80%的快淬Nd-Fe-B粉末出售于世界各地，20%的快淬粉末制作粘结磁体，用于该公司生产的汽车启动马达和其它电机上。1985年，该公司在Ukiah (Calif., U.S.A.)建立了20000平方英尺的快淬实验工厂，安装了以适应较大规模生产的喷射铸造设备，1986年下半年，在Anderson新建的耗资7000万美元的15400平方米的工厂中开始正式投产，车间安装了6台GM公司自行设计的第6代快淬机，据说每台生产能力为45kg/h。1987年9月起，MQ-I产品的生产能力达到6~7吨/月，1988年仅在销售快淬粉末已达100吨左右。

OSM公司是美国能量转换装置公司的子公司，该公司虽然原来不生产磁体，但是已公开声称，他们成功地开发了以Nd-Fe-B为基的快淬永磁材料，据说这类磁体的成份和工艺与GM公司不同。这种称为Hi-ReM磁体是一种宏观各向同性的永磁材料。该磁

体的磁性能为 $(BH)_{max} = 124 \text{kJ/m}^3$ ，第2象限的B-H曲线是呈直线，优于GM公司的结果，但是，目前还不足以达商品化，因此在筹建年产量为10吨的生产线。

美国的3M公司除经营电器等产品之外，还生产铁氧体粉末及其粘结磁体，也生产 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 的永磁体。该公司对Nd-Fe-B永磁感兴趣，在引入粘结Nd-Fe-B永磁体产品生产之前，没有一种材料使该公司在市场占一席之地。Xolox公司是美国最大的注射型永磁生产厂家，1987年，采用GM公司的MQ粉末，开发了Neobond-50的注射成型Nd-Fe-B粘结磁体产品。Xolox公司认为，如果这种粘结磁体应用在计算机软盘驱动装置和泵用无刷电机，Nd-Fe-B粘结永磁在许多新应用领域的市场将逐渐扩大。IG公司是美国最大的永磁生产公司，目前不仅生产粘结铁氧体，而且还在开发Nd-Fe-B磁体。坩埚磁性制品公司也正在开发粘结Nd-Fe-B永磁。另外，美国Eleatrolyme公司也宣称已开发成功 $(BH)_{max} = 48 \sim 72 \text{kJ/m}^3$ 新型粘结磁体；其 $H_{ci} = 1120 \sim 1200 \text{kA/m}$ ，1987年末进入了大生产阶段，表1、2是粘结Nd-Fe-B的磁性能。

我国稀土永磁的研究工作起步较早，烧结Nd-Fe-B永磁研究和生产基本跟上世界发展的步伐。国内现有烧结Nd-Fe-B生产厂80~100家，Nd-Fe-B永磁研究和生产主要单位有30多家，生产能力已达到100吨/年以上，而实际产量仅20~30吨，1987年的年产量约为50~100吨。稀土粘结永磁主要有上海跃龙化工厂、上海磁钢厂、国营新奕电工厂和国营4390厂生产，生产能力估计不超过10吨/年，然而快淬Nd-Fe-B制造技术和粘结磁体研究和应用开发仍处于实验室阶段。1988年下半年，北京钢铁总院和上海钢铁研究所分别鉴定了快淬Nd-Fe-B制取设备、工艺和粘结磁体，该材料成份和工艺与

GM公司稍有不同,设备也仅仅是实验性设备。目前,上海钢研所正在研制1~3kg级的中试性设备;设备热调试已完成,现已进入

工艺调试阶段,预计明年可有小批量快淬Nd-Fe-B粉末及粘结磁体进入国内外市场。

表1 注射法生产的粘结Nd-Fe-B磁体性能

生产厂家 性能	Cosmo-TME	Daido steel	Sumitomo Bakelite	Nippon steel	Xolox (U.S.A)
$(BH)_{max}$ (kJ/m ³)	43.2	32.0~48.0	32.0	33.6	36.0
B_r (T)	0.49	0.42~0.50	0.415	0.45	0.45
H_{CB} (kA/m)	344	240~376	312	288	312
H_{CJ} (kA/m)	1080	1040~1200	—	696	1120
B_r 温度系数(%/°C)	-0.20	-0.15	—	—	-0.20
密度(g/cm ³)	5.0	4.9~5.0	5.6	4.8	4.9
基体	PA	PA	—	—	—

表2 模压法生产的粘结Nd-Fe-B磁体性能

生产厂家 性能	Nippon steel	Daido steel	Seiko Epon	实验室结果 (GM,U.S.A)	MQ-1 (GM,U.S.A)
$(BH)_{max}$ (kJ/m ³)	80.8	56~72	64~80	76.0	70.0
B_r (T)	0.69	0.56~0.65	0.69~0.72	0.68	0.64
H_{CB} (kA/m)	456	400~440	360~480	456	456
H_{CJ} (kA/cm)	912	1040~1200	640~800	1200	1168
B_r 温度系数(%/°C)	—	-0.15	—	—	-0.192
密度(g/cm ³)	6.0	5.6~6.1	—	6.3	6.0
基体	—	—	环氧树脂	环氧树脂	环氧树脂

推算:

$$B_r = v \cdot B_{r_0}$$

(v 是磁性颗粒的体积百分比, B_{r_0} 是粉末磁性材料的剩磁值)

三、粘结NdFeB永磁的特点

快淬Nd-Fe-B粘结是GM公司发明的,它具有 H_{cJ} 高(≥ 112 kA/m)、不可逆退磁损失小和磁各向同性特点,热稳定性和抗氧化性均优于粉末烧结Nd-Fe-B永磁。粘结磁体的性能取决于磁粉的性能和磁粉与粘结剂的比例。D.M.Hopstock报告指出,粘结各向同性Nd-Fe-B磁体的剩磁 B_r 由下式

对于高矫顽力各向异性Nd-Fe-B材料,由于退磁场低于480kA/m时,第二象限的内禀 $B-H$ 曲线大约是一条直线,如果所有磁性参数用相同单位表示,那么内禀曲线的斜率 K 约为0.20,这样 H_c 和 $(BH)_{max}$ 可由下列两式推算:

$$H_0 = \nu B_p / (1 + \nu)$$

$$(BH)_{max} = 1/4 B_p H_p$$

$$= 1/4 \nu^2 B_p^2 / (1 + \nu)$$

快淬Nd-Fe-B永磁粉末不仅具有电机等器件工作所需要的磁性能,而且还适应于大批量生产的条件并具有一系列优点。

快淬Nd-Fe-B的磁性能、稳定性、可加工性、使用性等几方面的综合因素,决定了快淬Nd-Fe-B永磁在整个永磁应用领域中的地位。

四、应用领域及其市场预测

粘结稀土永磁的广泛应用,促进了这类材料研制和生产步伐,日本是世界上粘结永磁生产和应用最多的国家之一,占据绝对优势。从1980年到1988年,稀土粘结永磁产量从8.0吨左右,剧增到130吨(其中包括Nd-Fe-B粘结磁体30吨),而且GM公司投资建成了年产450吨的快淬Nd-Fe-B生产厂。由此证明,粘结稀土永磁应用领域的需求量是相当巨大的。表3是日本稀土粘结永磁1986年应用情况。

近年来,由于GM公司粘结Nd-Fe-B材料的大批量生产,使粘结永磁的价格和性能方面均有了突破性的进展,从而进一步扩大了粘结永磁的应用范围。B.J. Lehman认为,汽车制造领域是各向同性粘结Nd-Fe-B的巨大的潜在市场,在每辆汽车中,一般要有30个部位需要使用永磁体。据说,欧洲80年代最豪华级轿车上已经使用70只微电机,完成轿车上的各种机械动作。目前,虽然汽车上基本使用的是铁氧体永磁,但随着汽车本身的小型化、轻量化和高性能化,对汽车中使用的磁体的性能要求越来越高。Nd-Fe-B粘结永磁被认为是最合适的。美国GM公司曾在汽车启动机上应用MQ-11磁体,结果电机重量减轻了一半(4.2kg),这

有助于节能,并且提高电机工作性能。同时,GM公司也介绍了粘结Nd-Fe-B永磁在汽车上的其他应用,其使用数量共计有59~70件/辆。

在计算机外围设备中应用需求量也是很大的。如音圈电机、步进马达、主轴电机、驱动电机和各种打印机上应用(如打印锤、送纸电机、送带电机、打印头)。此外,家用电器方面的应用,如烘干机、电剃刀、录音机、电冰箱、电视机、电话、玩具、空调机、吸尘器和电动工具等。表4是美国Xolox公司粘结Nd-Fe-B永磁的应用实例。表5是预测1993年各类Nd-Fe-B永磁的潜在的应用市场。

磁体的价格和性能决定其应用领域及市场大小,长期以来,用户和生产者对磁体的价格和性能有着不同的看法,而磁体的价格可以根据市场供求关系作相应调节。为了了解用户与生产者对Nd-Fe-B粘结磁体承受的价格,Stackpole公司进行了专门的调查,以60kJ/m³的粘结Nd-Fe-B永磁与12kJ/m³、2s/磅的铁氧体永磁相比较的结果列于表6中。总的说来,市场可接受的平均价格在84s/kg左右。磁体售价越低,竞争力越强,其应用的产品越多。因此,许多磁体用户极为关心GM公司的快淬Nd-Fe-B粉末价格的变化,1986年在日本试销的价格为65s/kg,以后由于日元升值,其价格略有上涨,1987年到1992年GM公司的快淬Nd-Fe-B的价格预测如表7。

从上述稀土粘结磁体应用领域和粘结Nd-Fe-B永磁的市场价格测定及其实际应用,我们可以看到,随着科技进步,粘结Nd-Fe-B永磁的应用开发和部分取代SmCo或铁氧体永磁,粘结Nd-Fe-B永磁需求量必将不断增长,据报道,我国“八·五”期间要新开发粘结永磁材料(包括稀土和铁氧体永磁)为录像机、汽车电机和微特

表3 日本稀土粘结永磁市场(1986年数据统计)

分 类	产 品	塑 料 粘 结			橡 胶 粘 结			塑 料	橡 胶
		件 数	重 量	产 值	件 数	重 量	产 值	粘 结	粘 结
		百万件	吨	百万日元	百万件	吨	百万日元	日元/克	日元/克
音 响	扬声器、送话器、拾音器	0.5	2.0	60	—	—	—	35	—
旋 转 机 器	传真机、复印机、马达	20	18.4	570	—	—	—	35-38	—
	录象机、激光唱机、照相机、录音机马达、电唱机马达	5	4.9	150	0.2	0.3	1.0	35-38	35
	录相机驱动马达	8	8.4	270	—	—	—	35-38	—
	传 感 器	10	13.2	420	1.0	1.2	40	35-38	36
	其他：机器人、家用电器、并向装置	8	8.3	270	—	—	—	35-38	—
通 讯 测 量	电测：仪器、仪表	3	4.5	140	—	—	—	35-40	—
	打印机、打印头	3	5	160	—	—	—	35-40	—
	继电器开关	5	3.3	110	—	—	—	35-40	—
应用机械	健康器械	1.5	2.5	75	—	—	—	35	—
合 计		64	70.5	2225	1.2	1.5	50		—

表4 Xolox公司粘结Nd-Fe-B永磁应用实例

用 途	打 印 机	x-y 记 录 仪	电 子 钟	步 枪、手 枪
形 状	矩 形 条	管 瓦 形	圆 环	小 圆 柱
被取代材料	CERAMIC 5	CERAMIC 6	取向粘结铁氧体永磁	AiNiCo 6
原 因	价格及性能	价格及性能	容易生产	价 格
磁体重量	0.1 磅	0.029 磅	0.0002磅	0.006 磅
价格/磅	45 \$	38 \$	55 \$	75 \$

表5 1993年Nd-Fe-B永磁应用市场预测

Nd-Fe-B应用领域	军用市场	计算机音 圈电机	计算机非 音圈电机	机床工具	高性能音 响系统	电器电机及小 功率电动工具	汽车电机及机 行机构
磁体成型特征	烧 结	烧 结	粘 结	烧 结	烧 结	粘 结	粘 结
(BH) _m (kJ/m ³)	240	256	96~128	240	240	64~80	64~80
所占整个Nd-Fe-B市场的比例(%)	2.04	6.12	10.20	14.2	18.77	22.45	26.53

电机配套的高性能铁氧体粘结永磁和稀土粘结永磁，年需求量为1200吨，而目前除中、低档粘结铁氧体和不足于10吨的SmCo粘结永磁之外，国内紧缺高性能粘结铁氧体永磁和粘结稀土永磁，尤其是粘结稀土永磁大规

模和大批量生产仍属于空白。国内快淬Nd-Fe-B粘结永磁研究成果尽早取代部分进口SmCo粘结永磁和高性能铁氧体永磁，不仅可以为国家节约大量外汇，而且可以促进我国粘结稀土永磁工业生产的发

表6 (BH)_{max}为60kJ/m³磁体用户接受价格表

市场部分	回答者(数目)	平均价格 (\$/kg)
市场总体	74	84
电机	36	79
电机厂	29	79
非电机厂	7	77
计算机驱动器	1	33
机器人	1	88
家用电器/功率工具	1	66
环境控制	2	55
医疗(非MRI)	2	121
非电机	38	86
器械	9	90
音响	7	90
分离设备	8	84
垫材/密封	2	77
医疗(非MRJ)	2	88
磁耦合	8	77
MRI	2	99

表7 GM公司快淬Nd-Fe-B粉末价格预测趋势

类别	1987年	1989年后	1990年后	1992年后
各向同性	10 日元/克	—	—	5~6 日元/克
MQ粉	32 千/磅	—	—	17 \$/磅
各向异性	15~18 日元/克	12~13 日元/克	<12 日元/克	—
MQ粉	50 \$/磅	40 \$/磅	<38 \$/磅	—

五、结束语

从国内外粘结稀土永磁的发展情况来看,我国应该加速研究和开发的步伐,建议开展下列几方面的研究工作。

(1) 进行快淬Nd-Fe-B粘结磁体应用开发研究。

(2) 研究大批量生产快淬Nd-Fe-B制取设备。

(3) 研究和完善快淬Nd-Fe-B稳定生

产的制备工艺。

(4) 研制和开发高稳定性(150℃以上使用)的粘结永磁及其系列化产品。

(5) 研究各向异性快淬Nd-Fe-B粉末制备工艺和设备,

参考文献

- [1] 《永磁动态》1988年1月15日 P8
- [2] 《永磁动态》1988年3月15日 P6~16
- [3] 《粘结永磁体的市场发展及制备工艺咨询报告》1988年, P23~63
- [4] 《永磁动态》1988年12月15日, P6~7
- [5] 《永磁动态》1988年5月15日, P11
- [6] 唐与谋主编《稀土磁体开发和市场预测》1988年 P45~46
- [7] 《日经产业新闻》1987年8月21日
- [8] 《日刊工业新闻》1988年7月6日
- [9] 严俊玺《稀土》1988年No1, P62~66
- [10] 《永磁动态》1988年8月15日 P4
- [11] R.W. McCallam, JP61~243154
- [12] 《科技信息快报》1988年No1, P19
- [13] 《工业稀有金属》1988年No94, P60~62
- [14] R.W. Leel et al 《IEEE Trans. on Magn.,》MAG-21 (5) (1985) 1958~1963
- [15] 罗阳等《第一届全国Nd-Fe-B永磁会议会议》论文, 1986年10月
- [16] H. Nakamura et al 《第十届国际稀土永磁及应用学术会议》会议论文(日本, 京都)1989年5月 Part I P315
- [17] Ton Velentine 《Magnet》, (1986) P6
- [18] T. Shimoda 《第三届Nd-Fe-B材料对永磁使用者、生产者和原料供应的冲击》会议论文, (1987)
- [19] 黄钢祥《上海钢研》1988年 No5, P46~52
- [20] 刘增民《磁性材料及器件》20(4)1989 P31~38
- [21] 《IEC Publication》404-1, Megnetic Materials Part I
- [22] 张德武《仪表材料》18(6)(1987)P378~381
- [23] B.J. Lehman 《第三届Nd-Fe-B材料对永磁使用者、生产者和原料供应的冲击》会议论文(1987年)
- [24] John Ormerod et al, 《Metal Powder Report》Sept, (1986)695~697
- [25] 罗阳, 《稀土》1988年 No6, P42~51

中国稀土永磁电机的开发

蒋宗荣 (西北工业大学稀土永磁电机研究室)

一、概 述

众所周知,中国是稀土王国,稀土资源占全世界储藏量的80%以上,稀土矿的开采量占世界第一,稀土冶炼技术在上世界先进地位,稀土永磁材料的研制水平仅次于美、日。开发稀土产品已列入我国九大科技优先发展领域和“七·五”、“八·五”规划的重点项目。所以在中国开发稀土永磁电机是具有其独特的优越性及不可估量的远大前途。

由于稀土磁钢有极大的磁能积和矫顽力。做成稀土电机后,具有体积小,重量轻,特性硬,工作可靠等独特的优点,并且稀土电机不需要激磁功率,效率高,对交流电机来说,功率因数高,无功损耗小。所以美国道尔顿大学教授,现任国际稀土学会主席 Stanat曾深刻地指出:“稀土永磁体的出现,意味着电机工业面临着革命性的变化”。现在,稀土永磁、功率电子器件、微型计算机被公认为电机工业发展的三大支柱。

二、稀土电机的特殊性

有人认为稀土永磁电机(亦称稀土电机)与一般永磁电机没有什么两样。结果性能并不见得有所提高,有的反而下降,白白浪费了昂贵的稀土材料。所以对稀土电机的认识,也是随着不断的设计、研制、生产、和使用过程逐渐加深发展起来的。因此要较好地

了解稀土电机的发展与开发,必须掌握稀土电机的特殊性。

稀土磁钢性能的最大特点是矫顽力极大,是 $AlNiCo$ 的10倍以上,铁氧体的3倍以上,而剩磁与 $AlNiCo$ 相仿,是铁氧体的3倍以上,内禀矫顽力 H_{c1} ;可达 H_{cB} 的2~3倍,退磁曲线($B-H$ 曲线)呈线性。而钕铁硼磁钢的居里点较低($350\sim 450^{\circ}C$),工作温度仅在 $100^{\circ}C\sim 150^{\circ}C$ 。并且稀土磁钢的物理性、抗压不抗拉等性能,直接影响稀土电机特殊的结构形式,加工工艺,设计方法及使用场合。由于其矫顽力极大,所以做成磁极的厚度可以很薄,而由于脆,又不能太薄,在离心力大时需要保护装置等。所以稀土电机自出现以来,随着认识的不断加深,不断改革创新,出现很多不同结构形式。以下从结构、工艺及设计三方面来叙述。

1、稀土永磁电机的特殊结构形式 一般永磁电机常用的整体星形转子结构及爪形转子结构,在稀土电机中由于磁钢很厚等,不适宜用。改成径向励磁结构,这种结构与一般凸极式电机相似,将稀土磁钢直接粘合在铁心上。如图1,当转子较大,转速较高,

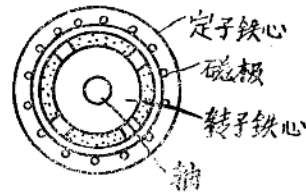


图1

离心力过大时，磁钢外表面可加非磁性保护环，这样造成气隙较大，但对稀土电机来说，因其矫顽力大，气隙磁场往往工作在 $0.6Br$ 处，才接近最大磁能积 $(BH)_{max}$ 。所以是允许的，这种结构在交流发电机，无刷电动机中应用较多。对直流电机，转子边是电枢与换向器。则磁极与机壳直接粘合，作为定子。如图2，一般不需要其他保护装置。

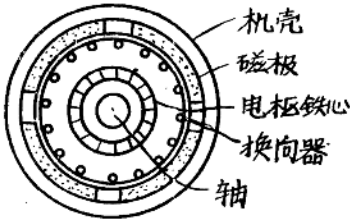


图2

径向励磁结构常用在四极以下电机中，其气隙磁场不高。对四极以上，功率较大的电机，则采用切向励磁结构。如图3，这种结

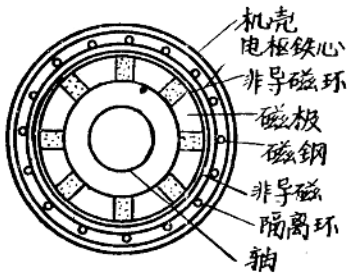


图3

构，可有二个磁钢有效面并联提供一个气隙磁场，所以电机的气隙磁场较高，磁路按排较为合理。磁钢利用率亦将提高，为了减小磁钢内侧面的漏磁，需用非导磁环与转轴隔开，在大型高转速电机中，由于离心力较大，转子外表面需采用非导磁环保护。因此电机结构较复杂，漏磁系数较大(1.25~1.5)为着提高磁钢利用率，出现一种轴向励磁结构，如图4，这种结构磁钢二个有效面都能直接提供气隙磁场。电枢做成盘式绕组，电

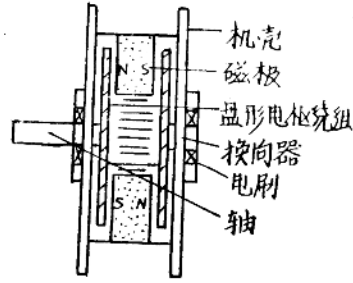


图4

机外形成扁平形。在汽车驱动电机，电动摩托车及磁盘驱动器等场合应用较为适宜。稀土电机的特殊结构形式还很多，如聚磁结构，并串联复合励磁结构等。这里不一一介绍。但一个共同的特点，磁路较一般永磁机复杂，气隙较大，漏磁回路更为复杂。

2、稀土永磁电机加工工艺的特殊性

由于稀土电机的磁钢一般都比较薄，而且又脆又硬，只能用磨、切割等方法加工。增加了稀土电机的成本。大批量生产时，磁钢加工则需用模制成形后，再进行特制的成形磨，一次加工成功。当前尚有提出用定向浇筑，无余量铸造等方法直接成形，及快淬模压成形等方法，都在不断发展中。装配工艺上，由于稀土磁钢内禀矫顽力特大，电机整体充磁，很难使磁钢饱和。因此，成形后先冲磁，然后再组合装配。工艺上也与一般永磁体有些不同，这些工艺，随着稀土电机的发展也在不断发展创新。

3、稀土永磁电机的磁场分析及设计的特殊性

由于稀土电机漏磁回路比较复杂，一般磁路计算不易算准，如切向励磁结构，将有九条不同性质的漏磁回路，很难算准，影响设计的正确性，尤其是稀土永磁交流电机中气隙磁场是交流与永磁场的复合，磁路又处在极度饱和，是一种非线性动态磁场，计算的难度更大，所以稀土电机的磁场分析及设计，采用有限元法进行分析及用

“场”、“路”相结合的CAD优化设计较为适宜。提高了设计的正确性与磁钢的利用率,降低了成本。为了使程序包进一步规格化,提高其功效。采用拓扑有限元法取得显著成效。近年来,在三场(磁场、热场、应力场)综合分析及结构形状优化等设计方法已形成CAD程序包。对非线性动态场的分析与计算,运用状态变量法与复数变量法等,对稀土电机进行动态仿真,提高了稀土电机特性的计算精度与设计正确度,为稀土永磁电机的深入研究打下了理论基础。

三、稀土永磁电机的优越性

由于稀土永磁电机不需要电激磁。因此没有激磁线圈与铁心。并且在达到同样气隙磁场情况下,磁钢体积较原来磁极所占位置小,又没有损耗,不发热。因此,达到同样输出特性情况下,整机的体积重量可以减小30%以上。反之,同样体积重量情况下,输出功率增大50%以上。如表1所列。

表1 六种不同种类的电机

电机类型	条件	电激磁	稀土永磁
航空双流发电机	1200W	6.5kg	2.1kg
航空无刷电动机	250克/台	10W	25W
汽车用起动机	同体积重量	375W	1500W
直流杯形电枢伺服电机	相同体积	4W	10W
陀螺马达	功量矩=1000	输入功率 8W	输入功率 4W
直流换向器电机	50,100W, 800W	$\eta=60\%$ 相同输出尺寸 缩小一个机座号	$\eta=90\%$

由以上六种电机实测结果可以充分看出:无讨哪一种类型,稀土永磁电机比一般电激磁电机体积小,重量轻,输出功率大,即比功率 kW/kg 大30~50%以上。

由于稀土永磁电机没有激磁损耗,因此功率比一般电机高,并且磁极本身不发热,在同样的温升条件下,稀土电机的允许输出功率将更大,因此,效率将更高。如XJF—1型航空双流发电机。功率为1200VA,原效率65%,改用稀土永磁电机后,效率提高到

83%。沈阳工业大学研制的2kVA太阳能发电机,效率达到94%。

由于稀土磁钢矫顽力 H_c 特大,一般达到800kA/m,所以稀土电机往往处在强励磁高饱和状态。因此,电机特性非常硬,以同步发电机来说,一般电激磁同步发电机的电压变动率 $\Delta u=30\sim 50\%$,而稀土电机在5~10%,对电动机来说,则机械特性十分硬,转速很稳。因此,也带来一些不便,调压与调速比较困难。主要依靠电子电路来实现调压与调速。

由于稀土磁钢性能比较稳定,抗压力特大(2000kg/cm²),但比较脆,机械上加保护装置后,能耐大的机械冲击。所以,稀土电机可做成高转速,20000~60000转/分,最高可达15万转/分,(如鱼雷艇上主轴马达),转子部分无激磁绕组与电接触,结构简单,工作可靠,寿命长。因此,同样输出功率情况下,电机可以做得更小。美国洛克希德公司研制成功5兆瓦,25000转/分激光武器用的电源发电机,仅重250公斤,比功率达到100kW/kg,其他电机很难实现。

四、稀土永磁电机在国内外的 发展概况

由于起始阶段的稀土磁体价格昂贵,故一开始只用于军用。1972年,美国就制成功率为400~1200VA的稀土永磁小功率航空发电机,用于航空发动机点火系统和无人驾驶飞机上的电源发电机,到七十年代中期,美国已先后研制成大功率的稀土永磁航空发电机(如40kW航空高压直流发电机,60kVA、100kVA的稀土永磁航空同步发电机),以发展新型的飞机电源系统(如高压直流系统和变速恒频系统)。八十年代初期,一台功率密度极大(17kW功率,重量仅170磅)稀

土永磁无刷直流电动机用于阿波罗登月飞船，驱动翼面。船用方面，300kW的稀土电动机用来直接驱动桨叶，取代了巨型柴油机。

据国外专家预测，新一代航空、航天用各种电机，大部分将采用稀土永磁电机，1990年以后将逐渐推广应用。

八十年代中期，随着第三代稀土磁钢的出现，美、日、西德等国开始研制稀土永磁汽车起动电动机，以取代老式的串激直流起动机。1985年，美国通用汽车公司制成小批量稀土起动机，并装车使用，他们还计划拨款自己筹办稀土永磁公司，生产为自己配套的钕铁硼磁体。西德和日本也先后制成车用稀土永磁电动机，这种产品不仅性能优越，而且体积小，重量轻（同样的功率，体积重量可减小1/3）。近年来，世界工业先进国在稀土永磁电机的应用开发上有两个极为重要的方面：第一是开始在用电大户上（如轻纺机械、矿用机械、数控机床等）探索稀土电机应用的可能性，以谋取大幅度地节约能源；第二是发展智能电机（如单片机控制的无刷直流电动机）用于冰箱、洗衣机等家用电器产品，制成节电型冰箱、节电型洗衣机，去年的《世界发明》、《电机技术》等杂志都报导了日、美、苏等有关的动向。

国内对稀土永磁电机的应用开发起步比国外较晚，但是与国外情况相同，也是在军用上开始的。目前，国内有关的厂、所、院校，已先后制成多种不同功率的稀土永磁航空发电机、无刷直流发电机、有刷直流发电机，但到目前为止，除我校一台小功率稀土永磁发电机已用于无人飞机外，其他产品尚无实际应用。

在民用开发上，先后在医疗器件、精密仪表、计算机外设、发电系统等方面，已有多种产品开发成功，但仅是小量生产，尚未形成大批量。如航空部六一八所开发的稀土

永磁牙钻电机、航空部012技校开发的电动开颅器等均已通过鉴定，并开始由有关工厂小批量投入；由东方电机厂、清华大学、绵阳机电部九所等共同合作研制的功率为120kVA的大型发电机副励磁机，其技术先进程度达国际水平；清华大学协助，通县微电机厂开发汽车用各种稀土永磁电机，已得到较好的经济效益，并准备销往国外；沈阳工业大学特种电机研究所近年来也开发了较多品种的稀土电机；哈尔滨工业大学也较早地致力于稀土永磁电动机和稀土永磁步进电动机的研究和开发，取得不少成果，研制成多种产品；上海电气化成套所制成数控机床用稀土永磁调速电机，并已通过鉴定；航空部曙光电机厂研制成功多种稀土直流电动机；西北工业大学近年来已开发了九种稀土永磁电机，有些已投产应用。总之，国内已有众多的单位在进行稀土电机民用开发上探索，但成效不显著，这里价格是一个原因，也还有其它多方面原因。

与国外情况类似，近年来，国内也有些单位，开始探索在用电大户上推广应用稀土电机的可能性，以缓和国内能源短缺的严重情况。

应该特别指出，国家对稀土开发已越来越重视，并且作为能源工程列入“七五”和“八五”重点规划。1984年在北京举行的国际稀土博展会上，国家领导同志亲临大会作了：“稀土应用前途光明，要充分利用我国丰富稀土资源，立足国内，搞好开发应用”的重要指示。上海市科委，成立了专门的稀土永磁电机应用研讨会，致力于稀土电机应用的开发，航空部成立了稀土永磁电机协作网（常设于西北工业大学），决心在航空和民用上积极推广稀土电机。可以预言，我们在稀土电机推广应用的前景是好的，估计近几年来将会有较大的发展。逐渐扭转出口稀土矿的不良局面，而转变为出口稀

土电机等稀土产品，以创收更多的外汇。

五、稀土永磁电机在 民用中开发

第三代稀土永磁体的出现，为稀土永磁电机的民用开发展示了美好的前景。实际上，即使是利用第一、第二代钕钴磁钢，在某些场合（如医疗器械、精密仪表等）的开发应用也是有经济效益和社会效益的。电动牙钻机、电动开烦器就是用的钕钴永磁材料。因为这类产品一般功率都很小，属于微电机系列，稀土磁钢的用量极少，而产品的性能改善却十分可观。目前在仪器仪表上用的铝镍钴永磁电机改用稀土电机之后，由于磁钢用量的减少，其单价不会比老产品贵，很有被取代的可能。

我们认为，在稀土永磁电机的民用开发上，首先要做好以下几个方面的工作：

第一，要有政府部门的重视，由政府部门积极领导并认真组织有关的厂、所、院校组成设计→试制→生产→使用一条龙，发挥各自的优势。开始阶段，政府部门拨出一定的款项支持开发，而且一抓到底。这是最为重要的。

第二，一定要认真贯彻国家稀土办提出的稀土应用开发的方针。“实事求是，讲究效益，立足国内，放眼世界。”这里面有一系列的工作要求。首先要有求实、讲效益的精神。稀土应用的效益应该从两方面来看，一是节约能源，这是经济效益，二是提高性能，这里也是经济效益，也有社会效益。其次要有统盘的安排，要有远期的目标。要放眼世界，一定要把输出稀土矿的局面转变为出口稀土电机等产品，利用我们丰富的资源，制成高质量的产品销到国外去。这里还有一个极其重要的问题，就是要选好突破口，就

是稀土应用的第一仗可从在用电大户上开始，如研究节能的纺织电机、矿用电机等作突破口。

稀土永磁电机推广应用的领域是十分广阔的，下面仅就一些主要应用场合作简要的介绍。

1、稀土永磁高效节能电动机

能源危机已成为世界性的大问题，中国的能源尤其紧张。节能已成当务之急，而工农业中耗电的75%以上是电能。尤其是异步电动机，将占3/4。这种电机结构简单、工作可靠、价格便宜是它的独特优点，但效率不高，功率因数低，尤其是中小型电动机。所以如何保持其原有的特点，提高其效率与功率因数，大家都做了不少工作。稀土磁钢的出现，开辟了一条新的途径。在鼠笼转子边增加适量的稀土永磁，利用其极大矫顽力，在交变磁场中不会失磁，及转子边在起动过程频率变化的特点，达到异步起动同步运行的目的，成为有一定起动转矩的稀土永磁同步电动机，提高了运行时的效率与功率因数。部分取代异步电动机是完全可能的，我们已在用电大户纺织电动机及矿用电动机二个项目中进行尝试。因为这两种电机需要长期不间断工作，所以节能效果特别显著。每台电机所增加的稀土磁钢费用在一年半时间的节电费中即可收回。因此经济效益及社会效益均很显著。以我们研制的FOXT-53-6型高效节能纺织电动机为例：额定功率为300kW，电压380V，转速1000转/分，效率达93%，功率因数 >0.95 ，起动转矩1.7倍，过载能力2.5倍。以陕西省为例：现有纺织电机约6万台（0.8kW—13kW）其中40%为F053-6型纺织电机，若全部改用我校已研制成功的FOXT-53-6型0.8kW电机，效率可提高25.5%，如以每天每台电机运转20小时全年320天工作日计算，则每年共可节约电0.3亿度。以目前陕西纺织行业每度电费为

0.12元计算,每年可节约电费400万元左右。同时,由于功率因数提高35.7%,每年可节省无功电力约4620万千瓦·小时,以每千乏节省电力设备费100元计算,可节省约72万元/年,所以全省每年可获经济效益470万元左右。每台电机改为稀土永磁电机,需增加200元钕铁硼永磁体,故改用FOXT-53-6钕铁硼高效节能电机,全省需增加投资480万元。但该项投资基本可在一年节电费用中收回,以后每年将获得节电效益约470万元。FOXT-53-6型纺织电动机已经在陕西省国棉五厂试用认可,并通过航空航天部技术鉴定。同样对5kW 380V矿用鼓风电动机进行改型,成为稀土永磁高效节能电动机,输出功率提高13%,效率提高24%,功率因数提高22%,获得显著节能效果。这种高效节能电动机,一旦全面推广,将大幅度节省能源,获得不可估量的经济效益与社会效益。

2、汽车电机(包括电动自行车,电动摩托车,电动汽车) 稀土电机在国外已经用于汽车,并打算用稀土电机取代全部汽车电机(如门、窗的开关,发电机,起动机,雨刮,吸尘,空调机,风扇等),一辆豪华型大轿车上电机可多达40多台。所以汽车对电机的需求是十分迫切的。若以一辆汽车10台电机计算,到1990年,我国汽车年产量约为100万辆,那么至少需要有1000万台电机与其配套,可见其用量之大。

目前,国内已有不少单位,正在以汽车起动机为中心,进行汽车用稀土永磁电机的研究开发。汽车用的稀土永磁起动机即将进行装车试验,可调压的稀土永磁发电机已有样机,正在申报专利。

汽车用门、窗开关,刮水器,暖风器等驱动电动机,都需要扁平型盘式电动机,这种电动机由于气隙较大,最适用稀土永磁轴向励磁盘式绕组电动机。它不单位体积小重

量轻,并且效率高,所以在以电瓶作电源的电动汽车,电动摩托车,电动船及电动自行车上作动力电机比其他类型电动机,具有更长的使用时间及延长电瓶寿命的功效,很有发展前途。这种盘式直流电动机我们已有不同功率的系列产品,可以批量提供生产。

3、数控机床用宽调速电机 发展柔性制造系统,大力推广应用数控机床,以提高劳动生产率,提高产品质量,这是国家“七五”期间的重点攻关项目之一。我国机械制造工业装备落后,至今不少工厂仍是以相当于国外五十年代的机床为主体,数控机床的比例小得可怜。这种状态严重地影响着产品质量和劳动生产率的提高。现用的数控机床上,不论是主轴传动或进给系统的传动,都以铁氧体永磁电机为主体,由于这种磁钢磁性能比较低,导致电机体积重量过大。若改用稀土永磁宽调速电机,将明显地缩小体积重量,并能改善性能。稀土电机在这个领域内的应用前景,也是十分广阔的。

4、各种医疗器械上用的稀土永磁电机 现代电动医疗器械的应用正在日益增多,如牙钻,耳钻,开颅器,以及用于截肢的骨锯,开胸用的胸锯,这些器械上使用的电机,要求小而轻,对可靠性的要求很高。无疑,稀土永磁电机是这类器械中使用最合适的。而且,对每一个医院来说,需要配备这类器械的数量并不多,故对目前来说,稀土电机价格较高的矛盾也显得不十分突出,具有较大的开发潜力。近年来,国内有些单位已研制成功稀土永磁牙钻电机和稀土永磁电动开颅器。研制稀土永磁耳钻电机的工作正在进行。

另外,由于稀土永磁的磁强场,使其在各种疾病的磁疗中得到广泛应用。如核磁共振等,用量较大,稀土永磁电机在医疗器械中的应用前景十分美好。

5、各种精密仪器和自动化仪表中应用

的微型电机 仪器仪表工业中应用着大量的永磁电机。以往,这类永磁电机都用铝镍钴永磁,稀土永磁的出现,国内外已开始采用稀土电机来取代老式的铝镍钴电动机。由于高性能的铝镍钴永磁本身价格也较贵(300元/公斤),所以被稀土永磁取代后,因为其用量相对减少,所以稀土电机的价格比原来的铝镍钴电机还有可能便宜。

6、其他 如大型发电机的励磁机、副励磁机;风力发电机;车船用无刷电机;各种用途的力矩电动机等采用稀土永磁,也是很有前途的。

六、我们的研究工作情况

西北工业大学从一九七八年开始,进行稀土永磁电机的设计理论研究和各类稀土电机的研制开发,该项工作居国内先进水平。我校的稀土永磁电机研究室,是国内唯一从事稀土永磁电机设计研究的专门研究机构。现将研究工作简要情况介绍如下:

1、在稀土永磁电机的设计方法研究方面 多年来,我们一直致力于从场的观点出发,研究各类稀土永磁电机的设计理论和方法,在国内外首创拓扑有限单元法。目前,我们可以对各种类型的稀土永磁电机进行精确的磁场、温度场、应力场的拓扑有限元分析,并在这种分析的基础上,进行稀土永磁电机的场、路结合的优化设计工作,使设计的产品能按不同用户的要求得到最佳方案。

研究室先后在国内有关杂志上发表有关论文20多篇;发表国际论文7篇;正式出版了国内第一部《稀土永磁电机的分析和优化》论文集;在国内多次开设稀土永磁电机

CAD设计短训班;完成了多项国家任务及国家自然科学基金资助的重大研究项目;为国内十多个厂、所设计过各类稀土永磁电机;先后多次获得陕西省、航空部、国家经委和国家稀土办的科技成果奖。《稀土永磁电机的分析和优化》被评为一九八七年陕西省十大科技成果之一。

2、在稀土永磁电机的研制方面 我校稀土永磁电机研究室,是国内研制成功的稀土永磁电机品种最多的单位,曾获国家经委和全国稀土办的先进集体奖。先后研制成功的产品见附表。

西北工业大学稀土永磁电机研究室有教授、副教授等八名研究人员,有十多名研究生共同从事研究工作,室内配有专用的小型计算机三台,有各种实验测试设备。校内有相同学科教研室、研究室、实验室可以互相支援,并且对稀土磁钢有专门研究还有工厂配合生产,条件充备,研制力量较强,我们愿与国内外同行共同合作,为开发与创新稀土永磁电机事业共同奋斗,作出更大的贡献。

参 考 文 献

- (1) Borger William, Permanent Magnet Synchronous Motors for Aircraft Transient Performance, U.IECEC, 1982
- (2) M.A.Pahaman, Design and Analysis of Large Permanent Magnet Synchronous Motors, Proceedings of the Eighth International Workshop on REPM and Their Applications, 1985
- (3) Binns, S.K.J., Hybrid Permanent Magnet Synchronous Motors, Proc. IEE, 1987
- (4) 蒋宗荣、徐国华,“稀土永磁电机分析与优化”,西北电讯工程学院出版社,1981年
- (5) 李革等,“高起动转矩高效率的稀土永磁同步电动机”中小型电机,1986,3

附录 瑞士永磁电机产品 Introduction of RPM Motors

序号 No.	名称 Type	额定功率 (W) Rated Power	额定电压 (V) Rated Voltage	额定电流 (A) Rated Current	额定转速 (rpm) Rated Speed	额定效率 (%) Efficiency	尺寸 (mm) Size	重量 (kg) Weight	用途 Application
1	双速发电机 DC & AC Generator	1200 VA	DC, 28 V AC, 36 V 3 ϕ , 400 Hz	DC, 30 A AC, 4 A	12000	>85	ϕ 80 x 120	2.2	航空 航天 小功率主电源发 电机。 Aviation Spaceflight
2	同步发电机 Synchronous Generator	5000 VA 800 VA	200 V, 3 ϕ , 800 Hz 36 V, 3 ϕ , 400 Hz	AC, 8 A AC, 7 A	12000	>92 >87	ϕ 110 x 100 ϕ 80 x 90	4.0 2.0	
3	汽车启动电机 Automobile Starting motor	1500 W	DC, 12 V	DC, 125 A	2400	>50	ϕ 85 x 280	7.5	汽车启动机。 Automobile
4	无刷直流陀螺电机 Brushless Gyroscopic-Motor	4.7 W	DC, 28 V	DC, 0.154 A	30000	>92	ϕ 35 x 27	0.21	各种直流陀螺 仪。
5	直游杯形起板伺服 电动机 DC, Cup-Winding Servo-Motor	10 W 12 W	DC, 12 V DC, 28 V	DC, 1.2 A DC, 0.5 A	4000 12000	>70 >80	ϕ 38 x 96 ϕ 28 x 53	0.25 0.15	机器人、计算机 外设、仪表音响 设备。 Computer Robot etc.
6	直游无刷电动机 DC, Brushless Motor	25 W	DC, 28 V	<2 A	12000	>45	ϕ 36 x 94	0.25	小功率驱动电 机。
7	高效节能电动机 High-Efficiency & Saving-Energy Motor	800 W	AC, 380 V 3 ϕ , 50 Hz	1.2 A	1000	>93	ϕ 270 x 180	56	纺织机械及机床 驱动装置。 Textile Machinery
8	煤矿风扇电动机 Coal Mine Motor	5500 W	AC, 380 V 3 ϕ , 50 Hz	13 A	3000	>93	ϕ 270 x 395	60	风机, 泵机。
9	直游盘式电动机 DC, Thin Rotor Motor	10 W	12 V	1.8 A	3000	48	ϕ 80 x 30	0.42	汽车用空调、 风扇、列车器、 窗门升降、暖风 等。
		20 W	12 V	2.8 A	3000	60	ϕ 105 x 30	0.55	
		50 W	12 V	6.8 A	3000	65	ϕ 135 x 35	1.60	
		120 W	24 V	7 A	3000	71	ϕ 160 x 40	1.70	
		160 W	24 V	9 A	4000	75	ϕ 160 x 58	2.50	