

磁性材料在微特电机中 应用技术与市场信息

会议录 (一)

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 应用技术与市场信息

会 议 录

(一)

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

目次

综 述

永磁材料在微特电机中的应用	杨国本 (1)
永磁材料在微特电机上的应用及发展	王静华 (9)
永磁材料在航空航天电机中的应用和发展趋势	刘祝标 (12)
汽车用永磁电动机对永磁体的要求和前景	王水驰 (16)
论永磁电机对永磁材料的要求	陈海镇 (19)
经济型永磁直流电动机对永磁铁氧体的要求	秦文惠 (24)
粘结永磁体在电机中的应用	李 晋 (27)
高性能铁氧体在永磁直流电机中的应用	邱国平 (30)
锶铁氧体橡胶永磁体及其在永磁直流微电机中的应用	曾 磊 (33)

专题研究

永磁材料在印制绕组直流电动机中的应用与探析	梁翠莲 (37)
钕铁硼永磁高速电动机	刘长安 (41)
稀土永磁AC伺服电动机及其应用	唐苏亚 (43)
铁氧体和塑料粘接永磁体在录音机电机上的应用	郭 祥 (46)
高 μ H _c 低温度系数 N_d-F —B永磁材料在混合式步进电动机中的应用	钱志刚 (48)
钕铁硼材料在永磁低速同步电动机上的应用	王 铨 邹显光 (52)
NFB 稀土永磁材料在盘式直流伺服测速机组中的应用	曾又凡 (55)
新型的稀土电动自行车电机	陈爱珊 权军 (60)
稀土永磁起动机可行性设计与开发论证	王凤昌 (62)
自起动稀土永磁交流电动机	武震声 胡永丰 (66)
提高铁氧体永磁直流电动机出力的途径	安跃军 (68)
轴向励磁式永磁转子结构的选择	李慈和 (71)
永磁减速起动机设计研究与结构方案论证	王凤昌 赵建强 (74)
外转子型永磁风力发电机设计	张稼丰 马大华 (77)
永磁同步伺服电动机的设计	周长进 李万明 王庆春 (81)
爪极式永磁转子步进电机电感的分析与计算	戴文进 (86)
微驱动永磁双坐标直线步进电动机	程树康等 (92)
电流型逆变器供电的交流永磁伺服电动机转矩分析	莫会成 邵晓强 (95)
新型软磁合金 $Ni_{55}W_2TiAl$ 的热处理及其应用	顾德夫 (100)
关于永磁体 P 值的讨论	罗发扬 (103)
从最大回复磁积评价稀土永磁电机	冯明星 (109)

磁测与充磁

永磁电动机磁场分布测试装置	赵德玺 (111)
永磁直流量矩电机用稀土永磁体的有效测试方法	罗发扬 (114)
电机磁钢的多极充磁	张菊宝 (119)
永磁电机的交流充磁方法	周振祥 (121)
HD型充磁机及其应用	杨振敏 (124)

永磁材料在微特电机中的应用

航空航天部长沙磁性材料厂 杨国本

永磁直流微特电机新品种的开发和生产与永磁材料的特性和经济价格分不开的。对永磁材料的磁特性及微特电机对永磁材料的要求与选择进行分析研究,使微特电机的研制与生产和永磁材料的研制、生产互相结合起来,特别是促使广泛应用的磁能积在 4MGOe 以上的高性能永磁铁氧体材料早日国产化及高性能的钕铁硼稀土永磁及粘结永磁成本降低,以便为各种微特电机的开发、应用提供优良的永磁材料,使微特电机得到更大的发展。

一、微特电机对永磁材料的要求

永磁电机具有以下特点:

- (1) 由于采用永久磁铁来励磁,因此电机没有磁损耗,从而大大地提高了电机的效率。
- (2) 由于没有励磁绕组,因而电机结构简单,体积小、重量轻,同时还可以提高电枢的电磁负荷。

另外,由于永磁体在电机工作时,承受去磁磁场,因而直流微特电机对永磁材料有如下的基本要求:

(1) 磁性能高,材料的剩余磁感应强度 B_r 及工作点的最大磁能积 $(B \cdot H)_{\max}$ 尽可能高,才能保证电机有较高的磁密 B_a , 提供更大的工作磁势,同时,减少漏磁。

(2) 材料的磁感应矫顽力 H_{CB} 及内禀矫顽力 H_{JC} 要高,从而保证永磁微电机有良好的抗去磁作用及稳定性。这是因为:

① 当电机运转的时候,电机磁路的磁阻反复发生变化或在运转过程中受到较强的去磁作用,导致工作点在回复线上往复变动,即永磁体发出的能量是变化的。

② 永磁体的 H_{CB} 越高,则 H_a 越大,磁体提供的工作磁场越稳定,见图 1, 所能克服自身的去磁能力就越强。因而磁体可设计得更薄、更小。

③ 由于永磁体具有温度系数,而低温退磁状态随永磁体材料特性和导磁系数而变化,为克服低温去磁,要求材料 H_{JC} 尽可能地大。

(3) 保证去磁曲线基本为一直线(或电机工作点附近为一直线),使直线部分的斜率与回复磁导率基本一致,从而保证微电机有恒定的输出及稳定的转速。

(4) 具有良好的磁稳定性和化学稳定性。

(5) 机械,物理性能要好。

(6) 价格要具有竞争性,有利于实现规模生产。这是工业批生产精密微特电机所考虑的一个主

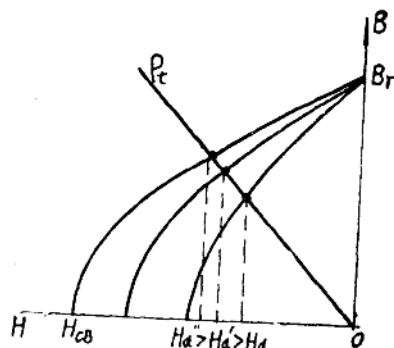


图1 永磁体的 H_a

要因素。

二、永磁材料在微特电机中的应用

1. 微特电机使用的永磁材料种类与应用情况如表 1 所示。

从表 1 可见：目前微电机中大量使用的是铁氧体永磁，特别是高性能高矫顽力铁氧体永

表 1

材料种类	使用电机	使用程度	备 注
永磁铁氧体	录音机微电机、复印机、录像机、电子计算机、机器人及汽车微电机	主要使用	(1) H_{CB} 高 (2) 价格低
金属铝镍钴 永 磁	录像机微电机、电子计算机、汽车、机器人微电机	部分使用 少量使用	$AlNiCo-5$ 特性 $B_r = 12000Gs$ $H_{CB} = 600Oe$ $(B \cdot H)_{max} = 5.0MGOe$
稀土永磁 钕铁硼永磁	录像机电机、计算机电机 饼式电机 汽车电机 音圈电机	少量使用 部分使用 部分使用 少量使用	(1) $P < 10W$ 小型节能 (2) $P > 8kW$ 大功率电机成本低、体积小、节省资源
粘接永磁	录音机电机 计算机电机 玩具电机 摩托车电机 自行车电机 汽车电机 步进电机、打印机、录像机、自动控制微电机	大量使用 大量使用 大量使用 部分使用 部分使用 部分使用 大量使用	(1) 磁性能可调 (2) 形状复杂 (3) H_{CB} 大 (4) 尺寸精度高

磁。同时，粘接永磁材料也将被大量使用。

2. 各类永磁材料特性及价格对比如表 2 所示。

表 2

材 料 特 性	铝 镍 钴 (AlNiCo)	铁 氧 体 (Y30以上)	稀 土 钴 (RCO)	钕 铁 硼 (NdFeB)
$(B \cdot H)_{max}(MGOe)$	5~10	3.3~4.7	9~27	25~36
$B_r(kg)$	5.6~10.5	3.8~4.5	6~10.5	10.5~12.5
$H_{CD}(KOe)$	0.4~0.7	2.5~3.8	6~8	8.4~8.7
$T_c(^{\circ}C)$	750	460	500~750	*320
$\alpha\%/^{\circ}C$	-0.05	-0.18	-0.05	-0.13
密度(g/cm ³)	7.3	4.8	8.4	7.4
价格(美元/kg)	24	3.5~5.0	120	105
能积单价比 (美元/kg·MGOe)	2.4	1.0	4.0	3.6

从表 2 可见：

①高性能永磁铁氧体 (Y₃₀以上)， H_{CB} 为金属磁 (AlNiCo) 的 7~8 倍，而能积单价比为后者的 40%；

②永磁铁氧体与稀土钴永磁相比, 虽然 H_{CB} 低50%, 但能积单价却为后者的1/4;

③永磁铁氧体与钕铁硼相比, 其 B_r 为后者的1/3, H_{CB} 为40%, 但其居里温度 T_c 却比后者高140℃, 因而稳定性好;

④钕铁硼永磁与稀土钴永磁相比, 虽然磁性能参数高, 但 T_c 却低430℃, 同时易氧化。

表 3

材料 百分比 用途	永磁铁 氧 体	钕铁钴	稀土永磁	粘接永磁
家用电器电机	85%	2%	3%	1%
计算机电机	78%	3%	17%	2%
办公室自动化电机	80%	2%	14%	4%
汽车电机	95%	2%	2%	1%
平 均	84.6%	2.25%	9%	5.2%

3. 永磁材料在微特电机中应用的 比例
如表 3 所示;

从表 3 可见:

①铁氧体永磁应用在整个微特电机中所使用的永磁材料中所占比例最大, 平均为 85%;

②对于稀土钴 (含钕铁硼) 永磁及粘接永磁目前国际上的应用仅占 9% 和 5% 的比例;

③在汽车电机中, 铁氧体永磁使用高达95%, 但钕铁硼及粘接永磁的应用, 则正在迅速增长。

4. 永磁直流微特电机特性与永磁材料应用表, 见表 4。

从表 5 可见:

①得到大量应用的永磁铁氧体材料是具有高矫顽力 H_{CB} 的 Y_{30BH} , Y_{35BH} , $FB4B$, $FB5H$ (日本TDK) 等牌号材料。其去磁曲线在微电机负载工作线附近均近似为一直线。

②钕铁硼永磁及粘接永磁 (含稀土) 的应用目前正在大力开发利用, 现在对铁氧体的取代率为 5%。随着价格的下降, 特别是 NdFeB 对铁氧体的取代率将不断增加, 并将主要应用于精密微特电机中。

三、铁氧体永磁的特点与应用

1. 铁氧体永磁的特点。

高性能永磁铁氧体在直流微特电机中之所以能得到广泛应用, 是因为它具有以下主要特点:

(1) 有相当高的矫顽力 H_{CB} , 故特别适用于微特电机场合, 因而由磁后效引起的电机工作磁场变化将是很小的。时间稳定性好, 同时电机的低温退磁较小。

(2) 最大磁能积 $(B \cdot H)_{max}$ 虽然不大, 但最大回复磁能积 (即工作点磁能积) 却很大。所以它特别适宜做动态下工作的永磁体。

(3) 电阻率比金属磁高很多, 更适合在高频下使用。

(4) Y_{30} 以上铁氧体永磁, 退磁曲线很大一部分为直线 (见表 4), 其斜率基本与回复曲线重合, 其磁能利用率高, 从而保证微电机有恒定的输出功率及稳定的转速。

(5) 磁及化学稳定性好。居里温度 T_c° 比钕铁硼高140℃, 抗热去磁性能好, 不氧化。几种永磁体的 B_r 的温度系数如表 5 所示。

铁氧体永磁的 $\alpha = -0.19$ 虽然较大, 但磁体一装上电机后, 工作点的磁场 B_d 的变化可以是一个常数, 而且能作到很小。

(6) 制造工艺比较简单, 价格便宜具有竞争力, 如前所述其能积单价比 (高性能 Y_{30} 以

序号	电机品种	电机特性	材料种类	永磁材料特性	去磁曲线	备注
1.	玩具微电机	功率, $P < 10W$	Y10T	$B_r \geq 2000Gs$ BHc: 1600~2000 Oe (BH) _{max} : 0.8~1.2 MGoe		各向同性钕系磁氧 体材料
2.	电动剃鬚刀电机	同上	Y10T			
3.	录音机微电机	①噪声小 ②转速平稳	Y10TA Y10TB	$B_r \geq 2000Gs$ BHc: 1700~2000 Oe (BH) _{max} : 1.4~1.7 MGoe		Y10TA-同性 Sr-Co 永磁材料 Y10TB-强抗反磁成型磁体
4.	VTR微电机		Y30BH	B_r : 3800~4000 Gs BHc: 2800~3300 Oe (BH) _{max} : 3.4~3.8 MGoe		永磁材料系列参数性能 Tc: 450~460°C α%/°C: 0.18~0.20
5.	电动自行车微电机	① $P \geq 110W$ ② 斜式电机 ③ 转速 380 转/分	(FB4B, FB5H) (日本 T.D.K)	FB4B: B_r : 3.90~4.10 KGs BHc: 3~3.4 KGs (BH) _{max} : 3.5~4.1 MGoe FB5H: B_r : 3.15~4.15 KGs BHc: 3.5~3.8 KGs (BH) _{max} : 3.6~4.0 MGoe		
6.	汽车空调微电机					
7.	汽车刮水器电机					
8.	汽车起动机电机	① P : 1.1~1.7kW (起动力率) ② 瞬间强电流	Y35-B-H	B_r : 4.1~4.3 KGs; BHc: 3.15~3.45 KGs (BH) _{max} : 4.2~3.8 MGoe		汽车微电机 ① 用 S-M (强磁氧体) 取代 至量下降 4% ② 用 S-M 取代效率提高 20%
9.	轿车起动机电机					
10.	电动轿车直流电机	① P : 100~500W ② 电机转速 ③ 无电抗干扰小 ④ 寿命 (1万小时)	FB5B (日本 T.D.K)	B_r : 4.1~4.3 KGs BHc: 3.2~3.5 KGs (BH) _{max} : 4.1~4.5 MGoe		
11.	平面电机					
12.	节能盘式电机		FB5N (日本 T.D.K)	B_r : 4.3~4.5 KGs BHc: 2.7~3.0 KGs (BH) _{max} : 4.3~4.7 MGoe		
13.	斜式电机					
14.	摩托车、汽车、拖拉机 发电机		Y35	B_r : 4~4.4 KGs; BHc: 2.1~2.8 KGs (BH) _{max} : 3.8~4.2 MGoe		
15.	小型船舶发电机		FB4A(日本)	B_r : 4~4.2 KGs; BHc: 2~2.4 KGs (BH) _{max} : 3.8~4.2 MGoe		

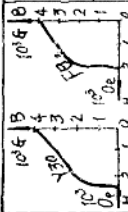
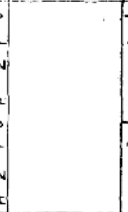
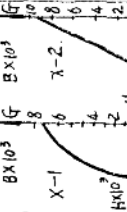
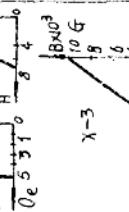
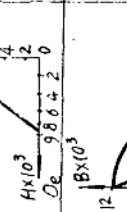
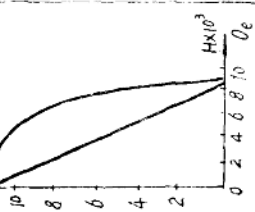
16.	复印机电机	① 小型 ② 重量轻	Y30	Br: 3.0~4.2 KGS BH: 2~2.7 KOe (BH) _{max} : 3.3~3.7 MGoe		驱动微电机
17.	电子计算机电机	③ 控制性能优越	FB2 (日本TDK)			伺服微电机
18.	机器人电机		Y30 Y35			伺服微电机
19.	平面电机 轿车启动电机 发电机电机	① P: 1KW	FB5N (TDK)	Br: 4.3~4.5 KGS BH: 2.7~3.0 KOe (BH) _{max} : 4.3~4.7 MGoe		日本TDK研制生产世界性能最高的SrCa各向异性永磁铁氧体材料
20.	钟表步进电机 PM型步进电机 HB型步进电机 无刷磁盘电机 磁簧接象机调焦电机 FD磁头存取微电机 磁头录象机 自动冷暖调整微电机	1. 小型 轻便 2. 效率高 功率密度大 3. 转矩小 4. 启动电压小 5. 过载能力大 6. 损耗低 温升低 7. 抗磁能力强 8. 换向性好 转动平稳 9. 高频响应好 10. 功耗低 省电	稀土塑料磁体 (含NdFeB) (BH) _{max} : 4~14 MGoe Br 4~9 Hg 4~7 X-1 (BH) _{max} : 8~11 MGoe (CGCa) Br: 6000Gs Hg: 4000 X-2 (BH) _{max} : 15~19 MGoe (SGPC) Br: 8000Gs Hg: 7000 Oe X-3 (BH) _{max} : 18~21 MGoe (5mC) Br: 8800 G Hg: 8000 Oe * X-1~3 为稀土钕磁性能 Tc: 500°~750°C; α%/°C: -0.05	  	特点: ① 磁性能可调 ② 矫顽力大 ③ 保持磁性能水气 ④ 产品尺寸精度高 ⑤ 作成各种复杂产品 ⑥ 重量轻 ⑦ 电枢效率提高 50% 重量减轻 40% ⑧ 可切削加工 对应取样快 ⑨ 电枢效率高 (100%~100%) 磁性能稳定 ⑩ 易制成薄壁磁体	
21.	有刷直流电机 无刷电机 汽车启动机 汽车电机 新型省圈电机 电子计算机电机 磁盘机电机 自行车电机 电动车电机	1. P=750W 2. n=2000 RPM 3. α=200W	NaFeB磁体	(BH) _{max} : 24~28 MGoe Br: 10400 G Hg: 8400 Oe (BH) _{max} : 28~32 MGoe Br: 11500 G Hg: 8500 Oe Tc: 320°C α%/°C: -0.13		作成薄壁式 洗衣机主机电机 可制成 NaFeB 塑料磁体 汽车微电机用 NaFeB 取代重量下降 70% 同时减低油耗, 节约铜线节电。效率提高 30% 以上。

表 5

序 号	材 料	$\alpha(\%/^{\circ}\text{C})(0\sim 300^{\circ}\text{C})$	$\alpha(\%/^{\circ}\text{C})(\text{低温})$
1	铝镍钴(AINiCo)	-0.019	+0.033
2	锶铁氧体($\text{Sr}\cdot\text{M}$)	-0.19	-0.19(-60~0 $^{\circ}\text{C}$)
3	稀土钴(SmCo_6)	-0.05	-0.05(-100~0 $^{\circ}\text{C}$)
4	钕铁硼(NdFeB)	-0.13	-0.13

• 各种粘结永磁体的 B_r 的 α 同表 6。

上产品)为金属磁的40%,为稀土钴的1/4,为钕铁硼的27%。

因此,对于永磁直流微特电机选用永磁材料的一个基本原则是对中等功率($\leq 500\text{W}$)的电机,永磁铁氧体能满足设计要求的,就优先选用,以保证电机在具有较高机电特性的同时还具有较低的生产成本。

2. 按使用整机来划分,永磁铁氧体在微特电机中的应用如表 6 所示:

表 6

类 别	电 机 品 种	材 料 牌 号
汽车电机 (包括摩托车和拖拉机)	①起动机电机②燃料泵电机③定时电机④车窗升降电机⑤刮雨器电机⑥风扇电机⑦观后视镜驱动电机⑧可动前照灯驱动电机⑨充发电机等共15个微电机。	Y_{30BH} Y_{35BH} $FB4B$ $FB4X$ $FB5H$ $FB5B$ $FB5N$
录音机	①主动轮电机②卷带电机	Y_{10TB}
录像机	①磁头驱动电机②主动轮电机③卷带电机④加载电机	Y_{30BH} Y_{35} Y_{35BH} $FB4X$ $FB5H$ $FB5B$
空调器	风扇电机	Y_{30BH} $FB4N$
全自动洗衣机	定时电机	$Y_{10T}\sim Y_{15}$
办公设备 (静电复印、电子复印、电子打字机)	①驱动电机②送纸电机③透镜系统驱动电机④分检电机⑤风扇电机⑥磁辊驱动电机⑦字头及字盘用电机⑧选字机构用电机等	Y_{30} Y_{30BH} Y_{35} $FB5N$ $FB5B$ $FB4N$
计算机外设	①磁盘驱动电机②磁头驱动电机③风扇电机④主动轮电机⑤卷带电机⑥送带电机⑦送头电机⑧驱动电机	Y_{30} Y_{30BH} Y_{35BH} $FB5B$ $FB5N$

注:FB型为日本TDK永磁材料牌号。

3. 永磁铁氧体材料的选择

(1) 材料种类的选择 可供要求高性能永磁铁氧磁体微电机的材料有两种。

① ($B-H$) 退磁曲线有弯曲点的钕永磁铁氧体 ($B_r\cdot M$), 其 H_{CB} 较低, 如图 2。

② ($B-H$) 退磁曲线没有弯曲点的锶永磁铁氧体 ($S_r\cdot M$), 其 H_{CB} 高。

从图 2 可见, $B_r\cdot M$ 材料去磁曲线存在弯曲点 A 点, 在电机设计时, 为了得到最大磁势, 其工作点几乎被选在 A 点的附近, 磁体性能随温度变化较明显, 同时工作去磁场 H_d 较小, 对于在动态磁路中工作是不利的。并且 H_{CB} 比 $S_r\cdot M$ 低。而锶永磁铁氧体相反, 由于去磁曲线无弯曲点, 因而磁体性能随温度变化比较小, 同时 H_d 比 $B_r\cdot M$ 高, 因而对磁性能要求较高的精密微特电机均选用了 $S_r\cdot M$ 永磁铁氧体材料。

③从去磁曲线看 $S_r \cdot M$ 材料不仅无弯曲点 A ，而且直线部分的斜率基本与回复曲线重合；对于 $B_a \cdot M$ 材料则不十分重合。因此对微电机选用各向异性的 $S_r \cdot M$ 材料最合适。

(2) 钕永磁铁氧体材料的选择
 $S_r \cdot M$ 材料有三种系列，一是高 B_r ，高 $(B \cdot H)_{max}$ 材料；二是高 H_{CB} 及 H_{ci} ，高磁能积的材料；第三种是高 B_r 、高 H_{CB} 、 $(B \cdot H)_{max}$ 的材料。对于这三种材料的选择，我们以瓦形永磁电机为例分析材料的磁能利用率。

①磁能利用率与 $S_r \cdot M$ 材料性能的关系如表7所示。

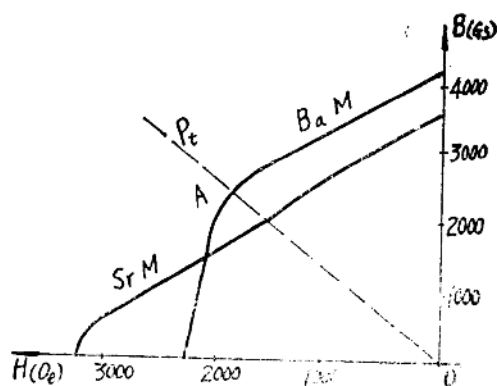


图2 $Y_{30}-Ba \cdot M$, $S_r \cdot M$ 的去磁曲线

表 7

牌 号	$B_r(KG_o)$	$H_{CB}(KO_o)$	$(B \cdot H)_{max}(MGO_o)$	$WK(MGO_o)$	$\Delta W\%$	材 料
Y_{25}	3.8	1.74	2.73	1.25	46	$B_a \cdot M$
Y_{35BH}	3.62	2.76	2.72	2.42	89	$S_r \cdot M$
Y_{30BH}	4.16	3.13	3.61	3.00	83	$S_r \cdot M$

注： W_k ——磁瓦的工作磁能积

ΔW ——磁瓦的磁能利用率

$$\Delta W = \frac{W_k}{(B \cdot H)_{max}} \times 100\%$$

从表7可见，高 H_{CB} 的永磁铁氧体材料作微电机磁体不但电机性能稳定，而且较大幅度地提高了磁体的利用率，可高达89%。而 H_{CB} 低材料，虽然 $(B \cdot H)_{max}$ 与高 H_{CB} 材料一样，但电机磁体利用率却很低，仅有46%，且电机抗去磁能力弱，稳定性不好。

②根据上面的分析，对性能要求较高的微特电机应该选用矫顽力 H_{CB} 高的各向异性钕铁氧体永磁材料，以保证磁体高的利用率及电机良好稳定性。

同样，从表6中可见：

①微特电机使用的铁氧体永磁主要是高性能的 Y_{30} ， Y_{30BH} ， Y_{35} 材料；特别是高 H_{CB} 的材料 Y_{30BH} 、 Y_{35BH} 及日本的TDK的 $FB4X$ 、 $FB5N$ 等材料。

②微特电机重量越轻，体积越小或输出功率越大，则主要选用材料性能为 $B_r \geq 4100G_o$ ， $H_{CB} \geq 3000O_o$ ， $(B \cdot H)_{max}$ ：4.0~4.5MGO_o的 Y_{35} 、 Y_{35BH} ，与日本TDK的 $FB5B$ ， $FB5H$ ， $FB5N$ 等材料。

4. 中国与日本TDK高性能永磁铁氧体性能对比如表8所示。

(1) 我国目前能够投入规模工业生产的主要为 Y_{30} 材料；对于 Y_{30BH} 高矫顽力材料生产规模就相当有限了，“七·五”末期即1990年全国预计产量也超不过1000吨。

(2) 至于 Y_{35} 材料，目前国内没有一个工厂能够投入规模生产，对于高 B_r ，高 H_{CB} ，高 $(B \cdot H)_{max}$ 的日本TDK生产的 $FB5N$ 及 $FB5B$ 三高材料，我国更为一个空白了。这需要从日本引进工业生产技术才能解决。

表 8

产品牌号 (TDK)	$B_r(\text{KG}_s)$	$H_{CB}(\text{KOe})$	$(B \cdot H)_{\max}$ (MGOe)	材料牌号 (中国)	$B_r(\text{KG}_s)$	$H_{CB}(\text{KOe})$	$(B \cdot H)_{\max}$ (MGOe)
FB ₂	3.75~3.95	1.8~2.2	3.3~3.7	Y ₃₀	3.8~4.2	2.0~2.7	3.3~3.7
FB ₃ X	3.6~3.9	2.8~3.1	2.9~3.5	Y _{25BH}	3.6~3.9	2.2~2.7	3.0~3.4
FB ₃ B	3.4~3.7	2.8~3.2	2.8~3.2	Y _{25BH}			
FB ₄ A	4.0~4.2	2.0~2.4	3.8~4.2	Y ₃₅	4.0~4.4	2.2~2.8	3.8~4.2
FB ₄ B	3.9~4.1	3.0~3.4	3.5~4.1	Y _{30BH}	3.8~4.0	2.8~3.0	3.4~3.8
FB ₄ X	4.1~4.3	2.8~3.1	4.0~4.4				
FB ₄ H	3.6~3.8	3.3~3.6	3.0~3.5	Y _{25BH}			
FB ₄ N	4.2~4.4	2.1~2.5	4.2~4.6				
FB ₅ E	3.55~3.75	3.25~3.55	2.9~3.3	Y _{25BH}			
FB ₅ H	3.95~4.15	3.5~3.8	3.6~4.0				
FB ₅ B	4.1~4.3	3.15~3.45	4.1~4.5	*Y _{40BH}			
FB ₅ N	4.3~4.5	2.7~3.0	4.3~4.7	*Y ₄₀			

• 我国暂无此材料。

表 9

工 厂	品 种	
	Y ₃₀	Y _{30BH}
北京矿冶研究院实验工厂	✓	
金川电子器材厂	✓	✓
上海磁性材料厂	✓	
长沙磁性材料厂	✓	✓
天津磁性材料总厂	✓	
徐州磁性材料厂	✓	✓
江西磁性材料厂	✓	
梅县磁性材料厂	✓	✓
马鞍山磁性材料厂	✓	

(3) 从表 8 可见, 日本 TDK 生产的微特电机用铁氧体永磁都是高 H_{CB} 材料。因而目前国际市场主要是由日本控制。

5. 我国高性能永磁铁氧体(Y₃₀, Y_{30BH})的生产制造厂如表 9 所示。

至于稀土永磁(含钕铁硼)及粘接永磁(塑料和橡胶)的特点及其在微特电机中的应用与前景另有专文论述。

永磁材料在微特电机上的应用及发展

南京微分电机厂 王静华

微型永磁电动机由于具有体积小、重量轻、转矩大、功耗低、易于控制等优点，因而作为控制和驱动电动机，广泛应用于军事设备、宇航器具、计算机外部设备、遥控设备、声象设备、仪器仪表、数控机床、办公机械、家用电器和汽车工业各个领域，是一类典型的量大面广、多品种的产品。

近几年来由于半导体技术、微处理机和电机控制系统有了重大进展，钕铁硼磁钢的研制成功及其性能的不断改进，因此可以预料，永磁电动机的使用范围还将继续扩大，需要量必将进一步增长。据美国 *Electronicst* 公司预测，美国永磁直流小电动机市场平均增长率将达23%。近年来，日本微型永磁电动机发展很快，其产量占微电机产量的70%以上。

目前永磁电动机采用的永磁材料主要有三种：即铁氧体、铝镍钴和稀土磁钢。铁氧体磁钢是五十年代发展起来的，由于它的价格便宜，目前不少电机仍采用铁氧体磁钢。六十年代稀土磁钢问世，首先开发的是钐钴磁钢 SmCO_5 ，其最大磁能积为23兆高奥，七十年代初期研制的 $\text{Sm}_2\text{CO}_{17}$ 最大磁能积可达33兆高奥。1983年开发的第四代永磁材料——钕铁硼，则是目前永磁材料中磁能积较高的，其最大磁能积达50.6兆高奥。由于用永磁材料制造的微特电机具有体积小、重量轻、效率高、结构简单和易于加工等优点，所以它在微特电机中已得到越来越广泛的应用，发展速度也相当快，下面对几种比较典型的永磁微型电动机的发展情况分别叙述。

一、永磁电流电动机

近年来永磁直流电动机得到迅速发展，主要原因是由于：

- ① 携带式电子器具的需要量急增。
- ② 永磁材料迅速发展，提供了各种廉价优质的磁钢品种。
- ③ 电子技术的迅速发展，从而扩大了这类电机的应用领域。
- ④ 电动驱动玩具的不断增长。

由于上列各种原因，当前永磁直流小电动机将要取代电励磁直流小电动机。目前，美国机座外径为8英寸及其以下的电励磁直流小电动机，除了交直流两用整流子电机以外，大部分都已改用永久磁钢励磁。

二、永磁直流伺服电动机

对速度控制要求高的系统中，为了降低电动机惯量，减少启动时间常数，提高快速性，采用了几种高性能永磁直流伺服电动机：电枢采用印刷绕组的直流伺服电动机；电枢绕组安置在无槽铁芯上的无槽直流伺服电动机；电枢绕组制成空心杯式的空心杯电枢直流伺服电动机三种。为了消除有刷直流电动机由于整流子和碳刷所带来的诸如寿命、噪音、火花干扰等问题，采用了一种没有电刷的无刷直流伺服电动机。

① 印刷绕组直流伺服电动机 定子磁场由永久磁钢提供，转子绕组为印刷绕组，一般呈薄片圆盘形(也有呈圆筒形)，用银石墨电刷，换向器端镀一层耐磨材料，电枢直接安在电枢中

心部位的导体上进行换向,其电枢电感很小,大致在10至100微亨的数量级,机电时间常数已达1.2毫秒,寿命在2000小时以上。

② 无槽电枢直流伺服电动机 与普通直流电动机差别仅在电枢铁芯是光滑、无槽的圆柱体,定子励磁一般采用高磁能的永久磁钢,这种电动机适宜在低压大电流下工作。无槽电动机转动惯量低,起动转矩大,反应快,力矩波动小(一般有槽电动机力矩波动7~10%,力矩电动机2~7%,无槽电动机1~3%),起动灵敏度高,转速平稳,低速运行均匀,换向良好等优点。目前输出功率在几十瓦至10千瓦以内,机电时间常数为5至10毫秒。

③ 空心杯电枢直流伺服电动机 是由永磁定子和绕在非磁性转子上的电枢绕组组成,旋转部件只是空心杯绕组、轴和换向器。由于在转子里面没有沉重的铁芯,即减少了惯量,减少了电枢电感时间常数。杯形转子电动机在国外已系列生产,功率由零点几瓦至5千瓦,多用于航空航天机器人、高精度自动控制系统和测量装置之中,用途广泛,是今后直流伺服电动机的发展方向。

三、永磁直流力矩电动机

永磁直流力矩电动机属于伺服电动机范畴,目前国内外均已系列生产。直流力矩电动机是一种用直流电信号控制的力矩电动机,它的结构和原理与普通伺服电动机基本相同,为了输出转矩和降低转速,通常采用直径/长度 $\gg 1$ 的大内孔的盘式结构,它是可以不经齿轮等减速机构而直接驱动负载的低速伺服电动机,它与伺服电动机相比具有高精度、高耦合刚度、大的转矩与惯性矩之比,快速反应、高线性度、高精度低速运行,结构简化、体积小、重量轻、维护简便等许多优点。力矩电机采用稀土钴代替铝镍钴时重量减轻、力矩加大,时间常数减小,所以稀土材料的开发对力矩电动机提供了广阔的前途。

四、无刷直流电动机

无刷直流电动机是电子技术与电机技术相结合的新产品,它以电子换向装置代替传统的电刷(换向器),提高了直流电动机的工作可靠性和寿命期限,特别适宜于工作在高真空、高压、高振动、易爆炸等一般直流电动机难以运行的工作环境。无刷直流电动机配以专门的控制线路后,稳速精度可达0.05%。由于无刷直流电动机在性能上保持了一般直流微电机的优点,又避免了缺点,具有调速范围宽、起动迅速、机械特性和调节特性线性度好,寿命长、可靠性高、无换向火花产生的无线电干扰等优点,已在录像机和办公机器中使用的比例逐年增加,这两个领域已占90%以上。

近几年来日本无刷直流电动机的产量逐年增加,均年增长率在60%左右,据美国GS电气公司预料,今后十余年内,随着集成电路的发展,直流电动机将要变成无刷直流电动机,由于上述原因,无刷直流电动机有了竞争力,在市场上有了新地位。

五、步进电动机

步进电动机按结构分有永磁式、混合式和反应式三大类,目前应用较广泛的主要是永磁式和混合式步进电动机两大类,它们在办公自动化设备中应用越来越广泛。

永磁式步进电动机转子是由永磁材料制成,步距角比较大,是较便宜的一种步进电动机。混合式步进电动机转子外径和定子内径都冲有许多齿,定子与反应式步进电动机完全相同,转子由圆柱形磁钢(环形)和二段铁芯组成,这种电动机既可做小步距角和较高的起动频率,又具有永磁控制功率小,有较强的内阻尼,能实现断电后自动定位的优点,缺点是结构复杂。

由于计算机外部设备的电子化,国外已大量应用永磁式和混合式步进电动机,国内也出

现大量需要的趋势，步进电动机在计算机磁盘驱动以及其他小功率场合中得到广泛应用，随着稀土磁钢在步进电动机中的应用，特别是高性能的稀土材料可以实现步进电动机的小型化、薄型化，所以今后步进电动机市场将继续扩大。据统计，目前世界步进电动机需求量在1亿台以上，并且还以超过25%的速度增长着，经调查，这类电动机在国内市场容量也达30万台，庞大的步进电动机国际市场和正在我国迅速扩大的步进电动机应用的现实，值得我们生产厂加以考虑。国际市场对步进电机需求量很大，我们如能瞄准国际市场，解决步进电动机的质量，永磁材料及批量生产的技术问题，大量出口步进电动机，前景是乐观的。

六、汽车电动机

汽车工业的发展，其零配件必不可少，而电动机是汽车电气的关键元件，缺少电机，汽车的先进性就无法评价。近年来汽车上电机的用量在逐年增加，微特电机在汽车上的应用是随着汽车的产量和汽车零部件电气化程度而增加的，要提高汽车产量，扩大销路，就必须使汽车具有多功能和高质量。一般的小汽车上大约用15台小电机，而高级豪华型轿车上将使用40台以上，而汽车上使用的电动机大部分是永磁直流电动机，由于钕铁硼磁钢的研制成功及性能的不断改进，对发展汽车电机起到了一定的促进作用，永磁电机将夺取汽车电机的大部分市场。据日本资料报道，近年来世界汽车平均年产量为3300万台，其中日本的年产量就占了1/3，如果按每台汽车需用10台永磁直流电动机计算，全世界每年需要的永磁直流电动机数量将达3.3亿台，这个数字是惊人的。据日本东芝公司预测，汽车用电动机将占日本小电动机年产量的20~25%，占日本直流电动机年产量的25~30%，从这里可以看出，永磁直流电动机有着广阔的发展前景。

我国汽车工业近几年来发展亦很迅速，1985年长春、湖北二汽、南京、济南、北京、上海等七大汽车制造厂总产量达24.13万辆，1990年全国总产量将达100万辆，如果每台上用10台电动机，那么每年就需要电机1000万台，这个数字是相当可观的。稀土材料的出现，对电机工业带来了新的活力，它将使电机向微、轻、薄、高效化发展，其中盘式结构产品得到迅速发展，应用领域不断扩大。

综上所述，随着新技术的不断采用，永磁电动机在品种、数量、质量方面都快速发展，应用领域不断扩大，如在电声设备方面，永磁电机将取代目前大部分交流电动机和电励磁直流电动机。在增量运动和计算机外部设备、机床控制等方面，永磁电机将夺取了大部分市场，所以提高永磁电机性能价格比，追求最佳经济效益，永磁电机除技术性能需要达到系统要求外，省材料、省能源、追求包括运转费在内的经济性，是今后很重要的经济指标。这就需要从设计、制造及生产技术等诸方面进行综合考虑，永磁直流电动机是目前国际上产量最大的产品，磁性材料在电机成本中占重要的比重，寻求价廉物美的新型永磁材料是十分重要的课题。

永磁材料在航空航天电机中的应用和发展趋势

北京125厂 刘祝标

航空航天永磁电机的发展与高性能永磁材料的发展密切相关。由于永磁材料本身具有得天独厚的特点,非常适应航空航天电机工作条件,所以受到航空航天电机工业界的青睐并得到广泛应用。本文就此谈谈它们的开发应用和发展趋势。

一、永磁材料在航空航天电机中的应用

现代大型飞机上用电器总功率达数百千瓦,各种电机有五十多种类型,多达几百台。飞机上应用的电机便有主电源发电机、驱动电动机、变流机、控制电机等五类。

随着半导体和微电子技术日趋成熟,它们与传统电机的有机结合,使得高压直流系统、无刷直流电动机以及变速恒频发电机等都达到了可以在飞机上应用阶段。新型材料诸如稀土钴永久磁铁的开发,也使电机的结构和性能得到较大的改进。作为电机用的永磁材料要求剩磁高、矫顽力高及最大磁能积高,称为三高。常用的有铝镍钴、稀土钴和铁氧体三类,其中铝镍钴永磁材料历史悠久,磁性能稳定,综合性能较好,所以被现代航空航天电机广为采用,稀土钴永磁材料具有优越的性能(三高),且磁性能稳定等特点,航空航天电机应用这种材料尤其有吸引力。现就航空航天永磁电机国内外应用状况介绍如下:

1. 国内应用状况

航空航天工业部125厂是国内最大的航空航天微电机研制厂。迄今为止,该厂已经研制二十余种航空航天永磁电机。用在歼击机上的有SBL-500和SBL-185三相变流机,材料 AlNiCo_4A ;用在无人驾驶飞机上的有DZ-D-44永磁定时直流电动机,材料 AlNiCo_8 ;用在一般飞机上的有YZD-35A永磁直流电动机,材料 AlNiCo_5 、20SYK01永磁直流电动机,材料 AlNiCo_5 、HZD-0.003积分永磁直流电动机,材料 AlNiCo_5 、834.001永磁直流电动机,材料为低 COAlNiCo_5 、JZ-18、130CYD-4、55LY-3和200LY-100永磁直流量矩电动机,材料均为 AlNiCo_5-2 ;用在空对空导弹上的有55LXG301永磁力矩电动机,材料 AlNiCo_5 、59X48SY301-LD永磁有限转角力矩电动机,材料 AlNiCo_2-3 、328和28TZ301磁滞电动机,材料分别为2J27和2J23;用在宇航自动控制上的有HZD-1.2、HZD-2.3和HZD-3.5A永磁直流电动机,材料分别为 AlNiCo_5 和 AlNiCo_3 、ZD-800航空稀土直流电动机,材料稀土钴;航空稀土永磁直流量矩电动机,材料稀土钴;用在航空照相机上的有YZD-10永磁直流电动机,材料稀土钴。

航空航天工业部115厂是国内最大的航空航天电源电机研制厂。它已研制成30千伏安和40千伏安永磁无刷交流发电机,所用材料为稀土钴;40瓦~几百瓦永磁变流机,所用材料为铝镍钴。另外与南京航空航天大学合作正在研制变速恒频交流发电机,所用材料为稀土钴。

135厂研制的36ZWS301稀土永磁无刷直流电动机,所用材料为YX-24稀土钴。

西工大研制的航空双流发电机,所用材料为稀土钴。

此外象185厂、3015厂、哈工大、北航、南航等大学、研究所、工厂都在积极利用稀土永磁及其它永磁材料研制航空航天用的高性能永磁电机。

2. 国外应用状况

(1) 美国 火星上软着陆的美国“海盗”号宇宙飞船在控制其下降状态的机电节流阀上采用4台英兰德公司生产的OF-1312A型稀土永磁力矩电动机。该电机密封在焊接壳体里与节流阀联接。通过齿轮与滚珠丝杆联接,将转动转换成直线位移,改变火箭电动机推力以实现飞船的软着陆。

宇宙飞船在空间飞行时一些干扰因素会改变其飞行姿态,为了控制飞船的飞行姿态,保证飞行轨道,飞船上设有反作用飞轮和角动量飞轮。美国戈达德空间飞行中心设计了一种反作用飞轮,这是一台无铁心稀土永磁无刷力矩电动机。

美国依摩松公司为F-5飞机研制的一个APQ-159火控雷达,为了在天线驱动力矩电机的外形和尺寸不变的情况下力矩增加50%,为此,采用了英兰德公司生产的QT-2403型稀土永磁力矩电动机。

陆军通用动力公司的地空弹“刺激者”的操纵面采用钕钴电动机驱动。这是生产型导弹首次应用钕钴电动机的一例。

美国研制中心新一代战斗机F-18已用稀土钴直流力矩电动机代替电动液压泵来驱动雷达天线。

美国西蒙兹精密产品公司用最大功率为2.5千伏安的小型钕钴永磁发电机作为航空发动机点火系统及发动机控制系统的电源,以满足航空发动机严格的振动及高温环境的要求,如F-15战斗机的F-100喷气发动机采用了该公司生产的钕钴永磁发电机作为点火系统及控制系统的电源。此外,该公司还研制功率400~2000瓦的钕钴永磁直流发电机,用于遥控飞行器。

美国通用电气公司从1974年开始研制钕钴永磁变速恒频起动发电机,其功率为150千瓦。作为起动机时,可产生26公斤米力矩,推动18000~25000公斤级的喷气发动机。

(2) 英国 卢卡斯航空分公司研制成钕钴永磁高频发电机,用于无刷发电机的励磁磁机。

(3) 日本 日本神钢电机公司研制一台由涡轮直接驱动的3.5千伏安高速钕钴永磁发电机,用于28伏直流系统。

(4) 苏联 已研制成0.1~3千瓦航空永磁励磁整流子电动机,所用材料为钕钴。还研制成1千瓦航空永磁同步电动机,所用材料为钕钴。

二、航空航天永磁电机的优点

航空航天电机要求体积小、外形巧和重量轻、可靠性,是航空航天电机设计时的四大重要指标,而用铝镍钴和稀土钴永磁材料来制做的永磁电机正符合上述各项要求。

(1) 用铝镍钴制做的航空航天电机之优点:铝镍钴是磁性能稳定,综合性能较好的一种永磁材料,具有高的剩磁,适中的矫顽力和大的磁能积。特别是具有高的时间、温度稳定性,温度系数为0.02%/℃,居各种磁性材料之冠。机械强度比之稀土钴较高。从它的出现到现在已经经历了半个多世纪,经过各国科学家的不断深入研究,铝镍钴永磁材料的化学成份、合金牌号和工业化生产工艺已趋成熟标准化,能很好地控制生产,用它制成的永磁体代替电机电磁绕组作为恒定磁场,可以使电机之体积、重量、损耗和发热等得到明显的改善,而且其结构简单,便于加工。控制电机基本如此。

永磁同步电机不需励磁绕组和电刷滑环,这是一大优点。目前国产的航空三相变流机

中的交流发电机，就是铝镍钴磁钢的永磁同步发电机。

(2) 用稀土钴制做的航空航天电机之优点：①体积小，重量轻，功率大。如：125厂研制的YZD-800航空稀土永磁电动机，该机是一种低压27伏直流电机，由于改定子励磁为稀土永磁，使电机外径由原来的80毫米减小到64毫米，体积减少了46%，重量由3公斤减小到2.3公斤。②效率高，结构简单，可靠性好。电机采用稀土钴的2000瓦交流50Hz航空发电机，效率高达87%；将稀土永磁发电机转子做成一个圆柱体，转子上没有绕组、旋转整流器及励磁机，不需要专门冷却设备，因此结构简单，有利于提高可靠性。③响应快。由于稀土钴永磁转子比铝镍钴电动机的绕组转子小，因此转子的转动惯量小，响应快。在相同的功率下，前者为后者的五倍。

三、存在问题和解决办法

1. 稀土钴永磁材料生产批量小，工艺性差，强度低，不能机加工，磨削差（掉粒），线切割加工成本高，产品均匀性不高。因此需要改进加工性能，寻找最佳的化学成份，改善磁性能及化学、物理等性能，如采用多元化合物、混合稀土等；改善工艺方法：一方面是改善获得稀土钴永磁粉的方法，如采用还原扩散法，研究真空喷镀及蒸发技术；另一方面是进一步改善粉末冶金法，如采用液相烧结等来降低应力及微裂纹，从而提高性能，降低成本；对于铝镍钴则要提高磁能积和矫顽力，以满足航空航天永磁电机的多方面要求。

2. 退磁困难。这就需要设计退磁设备，研究退磁方法。如国营185厂根据电工原理LC串联谐振电路的原理，设计制成了退磁装置，该装置在铝镍钴航空电机上应用，效果良好。

3. 磁路设计及计算方法困难。这需要研究，不过现在国内外已有不少现成经验可取。比方说，由于钕钴磁钢磁特性及电机结构的特点，用传统的“路”的方法进行钕钴永磁力矩电动机磁路设计时磁阻、磁通难以准确计算。125厂对70LY301钕钴永磁力矩电动机用模型实验和磁路计算相结合的方法，很能解决问题。又比方说，由于钕钴永磁发电机的磁极结构较复杂，磁场分布也复杂，用传统的计算方法来计算漏磁将产生很大的误差，国外流行的是用有限元法，通过数字计算机来计算磁场，这在航空航天电机中是个新课题，应重视研究这一方法。

4. 当前永磁材料——钕钴和铝镍钴价格都比较高。钕钴每公斤900元；铝镍钴每公斤300~500元。这主要是生产费用高，成品率较低所致，应当进一步改进工艺，提高成品率，降低成本。

5. 要重视焊接加工工艺的研究。成功设计永磁发电机的关键是套环制造，而套环制造的关键是磁性段及非磁性段的焊接技术，因为焊缝的质量对电机的磁性能及机械性能均影响重大，美国在研制中，把焊接技术作为一个重点课题专门研究；还要重视试验技术的研究。因为永磁发电机在高转速下运行，在装配前对套环及转子圆盘需要专门试验，以确定其结构强度和稳定性。对整个转子要进行自旋试验来确定其结构及磁性能的稳定性。因此对试验用的各种夹具的材料、结构和有关的测试方法也需进行研究。

四、发展趋势

永磁材料更新换代很快，由古老的各种永磁合金到铁氧体，由永磁铁氧体材料到铝镍钴、稀土钴永磁材料，近几年来，钕铁硼永磁体又在飞跃发展。当然也绝不会就此停止。科学实验证明：稀土金属与其他金属或半金属元素，可形成种类繁多的金属化合物，目前已测定了晶体结构的二元稀土金属化合物的数目约有1800种，随着研究进一步广泛和深入，这个数目将不断增加，其中有许多具有某些特殊优异的性能，是很有发展前景的新型功能材料，如磁性材料。