



Conference Publication Number 136

Small Electrical Machines

一九七六年伦敦小电机会议译文集



编 译 说 明

由英国电气工程师协会等学术团体联合主持的小电机会议于一九七六年三月三十日至三十一日在英京伦敦举行。收入会议文集的报告共三十一篇，不少内容涉及各类小型和微型电机的设计、特性分析、材料、工艺和目前水平，对国内微特电机广大科研人员和工人有一定的参考作用。《一九七六年伦敦小电机会议译文集》就是该文集的全译。

在我们组织编译本《译文集》的过程中，得到了西安微电机研究所同志们的大力支持，及时送来了译校好的稿子九篇，我们谨向西安微电机研究所以及所有参加译校工作的同志们表示谢忱。

由于人力有限，外文和专业知识不够，特别是文中所提到的某些国外情况，一些新技术不熟悉，加之参加译校工作的同志科研工作甚为繁重，有时只能以业余时间为主参加译校，因此本《译文集》中译校不当之处一定很多，敬希读者不吝指正，提出宝贵意见。

一九七八年十二月

目 录

1. 快速响应直流伺服电动机述评	1
2. 钕钴永磁直流伺服电动机的发展	12
3. 炭素纤维在小型整流子电动机中的应用	24
4. 永磁步进电动机和无刷直流电动机原理及其应用	31
5. 无刷低惯量电动机	41
6. 无刷直流电动机在航天中的应用	49
7. 无刷直流量矩电动机的性能和设计	59
8. 使用高能铁氧体的电子换向式电动机	68

9.	交流测速发电机——应市场的需要而进行设计	79
10.	泵用单相同步电动机	88
11.	低噪音风机的整体设计	96
12.	小型串激电动机的噪音	107
13.	特殊的电动机结构	116
14.	轴向磁通磁阻式电动机	125
15.	盘式电枢直流电动机及其应用	133
16.	电磁谐振电动机	141
17.	磁滞电动机——运行模式与试验	152
18.	固体控制的磁滞电动机	159
19.	研制和设计高性能永磁同步电动机中的一些问题	167
20.	变速串激电动机	172
21.	永磁同步电动机的动态特性	178
22.	涡流电动机在低速控制中的应用	186
23.	饱和磁路中的电磁力	194
24.	磁饱和步进电动机和磁阻式电动机的特性	203
25.	使用复合等值电路进行电机的数字计算机设计和特性计算	213
26.	永磁式和反应式步进电动机的静态转矩：比较评论	219
27.	步进电动机设计中的转矩——惯量比	228
28.	交磁阻步进电动机的瞬态性能	243
29.	永磁式步进电动机的计算机模拟	255
30.	混合式步进电动机牵出转矩特性	268
31.	陀螺仪中使用的小电机	277

快速响应直流伺服电动机述评

前 言

本文用“快速”一词指机械时间常数小于10毫秒的电动机的响应时间，即空载电动机达到最终转速的93.2%所需要的时间。

六十年代以来，应计算机用户希望缩短磁带信息存取时间的要求，而发展了快速响应直流伺服电动机。由于市场上能够提供控制用的廉价半导体，这些方面的要求得到了极大的满足。目前可以提供的电动机的时间常数小至0.4毫秒，峰值扭矩高达100牛顿米，几乎能完全满足计算机并在某种程度上满足机床工业的需要。

特 性

快速响应直流伺服电动机，本质上与通常的直流伺服电动机是一样的，其特性可用同样的基本定律推知。根据这些定律，推导了各种电动机常数的表达式，因此能够确定电动机的特殊功用。制造厂给出所有这些常数，用户可据以推知很宽条件范围内电动机的特性。尽管快速响应的直流电动机极少在一个速度下连续运行，许多制造厂仍然给出了电动机的连续运行时的输出功率。

确定电动机特性的诸参数可由两个基本方程式导出，即：

$$e = B l v$$

$$F = B l I$$

式中 B —— 磁通密度

l —— 导体长度

v —— 导体的线速度

F —— 作用力

I —— 流经导体的电流

B. E. Hall (Unimatic Engineers, Ltd, UK): A review of fast response dc servo motors, 1-4.

实际运算中

$$Blv = \frac{Z\Phi P\omega}{2\pi n}$$

式中 Z —— 导体数 ω —— 角速度
 P —— 极数 Φ —— 每极磁通
 n —— 并联支路数

因此

$$e = K_e \omega$$

$$\text{式中 } K_e = \frac{Z\Phi P}{2\pi n}$$

K_e 是电动机的电压常数或电势常数，单位是伏/弧度/秒。

$$\text{另外还有 } BlI = \frac{Z\Phi P}{2\pi n} I$$

因此， 转矩 $= K_t I$

$$\text{这里 } K_t = \frac{Z\Phi P}{2\pi n}$$

K_t 是电动机的转矩常数，单位是牛顿米/安。

注意：当用 SI 单位制（国际单位制）时， K_e 和 K_t 数值上是相等的。假如采用的是英制单位，则 $K_t = 1.3548 K_e$ 。

$$\text{稳态时 } V = \omega K_e + Ir$$

式中 r —— 运行状态下的端电阻，

V 和 I —— 输入电压和电流。

$$\text{如果 } \text{电磁转矩} = I K_t$$

$$\text{那么 } V = \omega K_e + \frac{rT}{K_t}$$

假如 T_o 是电动机的输出转矩, T_f 是库仑摩擦转矩, T_d 是由于粘性摩擦、风摩擦和涡流损耗等引起的总的转矩的损失, 那么

$$T = T_o + T_f + T_d$$

T_d 与转速成正比, 因此可以通过一个常数 K_d 来表示,

$$T = T_o + T_f + K_d \omega$$

于是
$$V = K_e \omega + \frac{r}{K_t} (T_o + T_f + K_d \omega)$$

$$\omega = -\frac{T_o}{\frac{K_e K_t}{r} + K_d} + \frac{V \frac{K_t}{r} - T_f}{\frac{K_e K_t}{r} + K_d} \quad (1)$$

这个表达式确定了所加电压 V 恒定时转矩和转速的关系。这是有附带条件的, 即在运行条件下 r 是稳定的。因为所有的系数都是恒定的, 因此能够导出斜率为

$$R_m = \frac{1}{\frac{K_e K_t}{r} + K_d} \quad (2)$$

各种电压数值的一族线性的转矩 - 转速曲线。

这个斜率就是电动机的转速调整率, 并且用符号 R_m 来表示, 单位是弧度/牛顿·米秒。

根据公式(1), 在制动状态下, 当 $\omega = 0$ 时,

$$T_o = \frac{V K_t}{r} - T_f$$

空载时
$$\omega_o = R_m \left(\frac{V K_t}{r} - T_f \right)$$

如果
$$\frac{V K_t}{r} > T_f$$

$$R_m = \frac{r \omega_0}{V K_t}$$

或者

$$R_m = \frac{\omega_0}{T_s}$$

式中 ω_0 —— 空载转速，

T_s —— 制动转矩。

再根据公式(2)，若

$$\frac{K_e K_t}{r} > K_d$$

则，

$$R_m \approx \frac{r}{K_t^2} \quad (3)$$

这个表达式的倒数就是我们经常讲的（另阻抗电源时的）“粘性阻尼系数”。应当注意，对一个特定的电动机尺寸来说，只要该系数是固定的，它就是确定 r 和 K_t 之比的有效手段。

对用户来说帮助最大的另一项常数，是确定电动机动特性的常数。

电动机的动态方程式是：

$$V = L \frac{dI}{dt} + I r + K_e \omega$$

式中 L —— 电枢的电感。

$$\text{另外} \quad T = K_t I = J \frac{d\omega}{dt}$$

为简化起见，不包括摩擦和阻尼的影响。在任一情况下，其与惯性转矩相比，都是很小的。

经过变换，由这些方程可给出传递函数

$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{1}{K_e \left(\frac{J r}{K_e K_t} s + 1 \right) \left(\frac{L}{r} s + 1 \right)}$$

L/r 是电动机的电气时间常数。在多数电动机设计中，它是很小的，因此 $L/r \ll 1$ 。

用 T_m 代替 Jr / KeK_t ，传递函数可简化为

$$\frac{1}{Ke (ST_m + 1)}$$

式中， T_m 是机械时间常数，或者说是电动机达到最终转速的 63.2% 所需要的时间。

因为 r / K_t^2 是 R_m (见 3 式)，

所以 $T_m = J R_m$ (4)

应当注意， r 是系统的总电阻，它还应当包括直流电源的内阻。

如果用 $j\omega$ 代替 s ，我们可以画出整个频率范围内的响应。

在 $2\pi f = 1 / T_m$ 点，输出和输入之比下降了 3 分贝，我们把这个频率叫做截止频率，并表示为

$$f_b = \frac{1}{2\pi T_m}$$

对设计者来说，更有用的参数是功率比，它被定义为：

$$\frac{T_p^2}{J_M} = 4\omega_s^2 J_L$$

式中的 ω_s 是初始加速度， J_L 和 J_M 是负载和电动机的转动惯量， T_p 是电动机给出的峰值扭矩。用这个表达式的优点是电动机和负载的常数是分开的。假如已知负载惯量和加速度，可以根据电动机制造厂提供的功率比来选择所需电动机。实际上还有其它的一些因素，妨碍用这一技术来选择电动机。

结构特点

快速响应电动机的结构特点可以分为这样三大类：圆柱形电枢

(即无槽电枢*)电动机；盘式电枢电动机、壳式或杯形电枢电动机。所有这些电机都有永久磁钢的磁场。

圆柱形电枢

最早的伺服电动机是通过改变磁场的激磁来实现控制的。电枢由一个恒流电源供电。这种类型中最普通的是分裂磁场电动机(split-field motor)，这种电机磁场的两半都是由高真空电子管放大器供电的。在平衡状态下，磁场两半的激磁是相等的，这会引起相当大的功率损耗，因此限制了它只能用于几百瓦以下输出功率的场合。通过改变电枢的直径，从电枢长的75%到50%甚至30%，来减小惯量。再则，由于磁场绕组电感很大，线圈的利用率很低，使得电动机的时间常数很大，响应时间为100毫秒是很普通的。

随着比较好的永磁材料的出现，现在多采用电枢电流控制。用钕铁氧体磁钢产生磁场。这种材料的矫顽力很大，不仅允许在装配之前充磁而且还使得所用的磁钢可非常短。

为了保留其优于感应电动机运行转速较高的优点，多数小电机是两极的，最高转速至少达500弧度/秒；要求较高驱动电压的中等尺寸的电动机，有4极或6极的迭绕组，转速为300弧度/秒；最大的电动机可以采用12极，以产生100弧度/秒范围内的转速。

由于反转时电刷之间的电压是驱动电压的两倍，所以 ωK_0 的数值，必然与换向片间的击穿电压有关。

一般电枢的导体嵌绕在槽内，有一种设计的导体被密封固定于电枢的外表面，以减小电感。

典型的电阻值在0.2到1.5欧姆，电感值在0.7到4毫亨范围内变动。

在电枢的铁心中产生涡流和磁滞损耗，这些都包括在阻尼系数 K_0 之中。即使在最大的电动机之中，这些损耗仅为可以获得的总连续转矩的5%，但这些损耗是随着电动机尺寸的增加而快速增大。

* 译者注。

碳刷与通常的电动机所用的没有多大的差别只是碳刷含有50%的银，可降低刷压降，含有50%的银使电刷硬度大大增加并引起换向器有比较大的磨损和噪音。

碳刷的压力必须控制，以使碳刷在整个工作寿命内把压力保持在严格的限制之内。碳刷压力太小，碳刷跳动引起火花而发生电蚀；压力太大，机械磨损增加。制造厂所报的寿命是1000到5000小时。寿命变化很大，取决于换向器转速、绕组电感、大气压力和污染、负载工作循环、以及湿度。使用寿命随转速的增加下降很快。300弧度/秒时的寿命仅为100弧度/秒时的25%。在精密速度控制应用中，电动机直接驱动负载，转轴的同心度是很重要的。为了保证同心度，应当用精密球滚动轴承套圈，它的内圈和外圈之间的不同心度不大于0.003到0.0035毫米。为了减小扭转柔性的影响，相对于电动机尺寸来说，电动机的轴的直径必须尽可能的大，建议轴的直径不小于12毫米。

盘式电枢

与圆柱形电枢和杯型电枢相反，盘式电枢的直径大于长度。有效导体径向地通过圆盘，切割轴向磁场。

现在市售的这种电动机有两种型式，一种是用标准的电磁线绕制的电枢，另一种是用薄金属片形成的导体。后一种方案起源于采用印制电路技术的绕组，故叫做“印制”电动机。

线绕式电枢是采用带销钉的成型器而制成的，然后再和径向的换向器相联接，在封装之前，将成型器拔出。

印制电枢的导体是将厚度为0.2毫米左右的方形铜片或铝片冲制而成的。这些冲片放于浸渍环氧玻璃纤纸板的任一边，将环氧部分地加压固化。把板子的中心孔和外周的边缘去掉，并将导体的端部焊接起来，形成一个连续的波绕组或迭绕组（图1）。可以将三对冲片串迭在一起。环氧最后完全固化。

盘形电枢的直径从60毫米到260毫米不等厚度从2毫米到10毫米，最常用的直径是90、170、和190毫米。

典型的电阻是0.5到1欧姆，电感为25~75微亨。

所有盘式电枢电动机都有永久磁钢磁场，除少数例外。一般采用六极、八极和十极的排列，磁极的数目比圆柱形或杯型电枢多得多。这是为了减小在圆盘外周的绕组端部长度。磁钢是铝镍钴合金，在电动机装配后充磁。现在广泛采用的还是有比较高的矫顽力的钕铁氧体尽管磁能积较低，却可在装配之前充磁。

盘式电枢由于不含铁，因此比圆柱形电枢轻得多。然而，这一优点却由于其旋转半径比较大，不起作用的绕组端部的一半集中在圆盘的外周，因而对降低惯量未带来好处。因为电枢不含铁，所以无齿槽效应、磁滞损耗和铁心饱和。从理论上讲，没有这些限制应当允许使用大的峰值电流，但在实际上超过50安（大约五倍满载电流）常行不通。峰值电流大会引起金属合金磁钢去磁，且会因电枢反应使 K_t 值下降。

冲制型的电枢在和碳刷直接接触期间，由于导体的热容量很小，也可能发生过热。这些极限在运行中实际上很少才会出现，因为峰值电流常常受驱动电动机的电子控制器的尺寸限制（由于价格原因）。

主要由于盘式电枢的圆周速度比较高，导体中的涡流损耗与尺寸差不多的圆柱形电枢和杯型电枢相比都要大；对于导体为矩形截面的冲片制成的电枢来说尤为如此。虽然在冲制电枢类型中，为了便于制造加工是采用迭绕组或波绕组，但在大多数盘式电枢中采用波绕组。

采用一对碳刷是最普通的。为了降低换向表面的电流密度，也常采用两对碳刷。这在热容量小的冲制型电枢中，是一个重要因素。

线绕式电枢所用的径向或表面换向器与冲制式电枢的区别在于，冲制式电枢中电刷直接在导体上运行。与圆柱形电枢一样，宜采用压降比较低的银石墨碳刷，虽然它的硬度会使冲制式电枢中所用的导体寿命缩减到仅几千小时。

冲制式电枢电动机连续运行或高速运行时，采用纯石墨碳刷能够

降低导体的磨损。在这种结构中，用通常的球滚动轴承套圈，会使轴向运动难于控制。这就常引起是否在电枢和磁钢间，留足够间隙的问题。与圆柱形电枢一样，转轴直径不少于12毫米，能大大减小柔性的影响。

杯形电枢

这种电动机的名称众说不一，有叫网式电动机的，有叫兰式、壳式的，最近又叫做动圈式电动机。电枢的形式如图2所示。这是用标准铜线或铝线绕的。电枢的直径大约是它长度的30%到50%。与端匝的一半位于电枢外周上的盘式电枢相比，杯形电枢的端匝位于与有效匝数相同的半径上，结果使惯量大大下降。

与盘式电枢一样，电枢中无铁，因而没有磁饱和或齿槽效应的影响。早期的设计中，由于缺乏支撑铁心，电枢的机械强度大大下降。随着浇注树脂和玻璃纤维等材料的上市，又因绕组可密封于树脂壳里，机械强度再也不成问题了。

杯形电枢的涡流损耗比较小，在数值上与圆柱形电枢中的涡流损耗相似。

典型的电阻是1欧姆，电感为50微亨。

由一种铝镍钴合金提供永久磁钢磁场，在气隙中可获得最大的磁通密度。

电刷和换向器结构与圆柱形电枢中所用相似。在100弧度/秒时，电刷的寿命估计为3500小时。

因为这种电动机电枢的惯量，仅约为圆柱形电枢或盘式电枢惯量的10%，因此电动机的带宽可高达200赫兹。当用于带宽高达这个频率的系统中时，转轴的柔性变成了重要问题。因此，转轴的材料、直径、长度均甚重要。负载和测速机之间的距离必须很小。所以常用低惯量光学测速盘并将其与轴径尽可能大的电动机驱动端的负载紧密地装在一起。这种安排可确保电动机电枢和负载间或电动机电枢和测速盘之间的任一谐振不少于5千赫——远在该系统的带宽之外。

三类电动机的特性，按电动机的重量分为三组进行比较，并列于表1中。表中，是对材料成本相似的电动机进行比较的。

表1 三种类型电动机的性能比较

电动机尺寸	电动机重量 (公斤)	电动机型式	机械时间常数 (毫秒)	峰值转矩① T_p (牛顿米)	加速度② (弧度/秒 ²)	电枢惯量 (公斤米 ² × 10 ⁻⁵)	功率比 (千瓦/秒)
小电机 (小于5公斤)	1	圆柱形	8.3	1.1	20676	2.66	45.5
	1.63	杯型	2.3	1.6	166666	0.48	533
	2.5	圆盘形	9	1.4	18040	3.88	50.5
中型电机 (大于5公斤 小于15公斤)	5.5	圆柱形	9.4	14	5000	140	140
	8.5	杯形	0.5	5.65	65700	0.43	7423
	13.5	盘式	10	16	6670	120	213
大电机 (大于20公斤)	30	盘式	7	48	6666	360	640
	43	杯型	4.1	42	11052	190	928
	47.7	圆柱形	9.0	135	1534	4400	414

注：①峰值转矩 $T_p = 5 \times \text{连续转矩}$

②当负载惯量 = 电动机惯量 J_M 时最大理论加速度 $Acc = T_p / 2J_M$ 。



图1 盘式电极

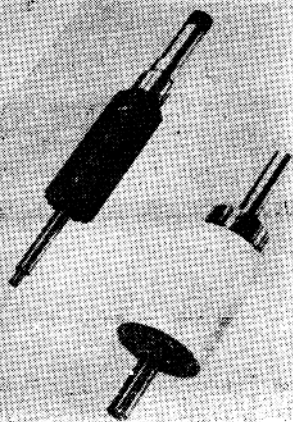


图2 杯形电极

一四二一所 王宏谋译

钐钴永磁直流伺服电动机的发展

提 要

本文描述了空间应用的钐钴永磁直流伺服电动机的发展, 简要地讨论了稀土合金与其它现代永磁材料有关的磁特性, 特别考虑了磁场强度和能积。这些特性是商业上现有的其它永磁合金所无法比拟的。本文还讨论伺服电动机的参数。根据材料的磁特性设计的电动机能使那些参数得到很大的改善或调整。

引 言

由于钐钴合金在商业上的发展, 近来电动机应用的永磁材料范围有了增加, 钐是周期表中稀土族的一种元素, 这种元素同钴结合形成一种在磁特性上有重大改进的硬磁材料, 研究也揭示了其它稀土钴化合物和合金, 例如: 具有进一步提高了磁特性的镨钴合金和使基本材料成本降低的铈-混合稀土-钴合金。

钐甚昂贵, 主要由于精炼成本的缘故。但是可以相信, 这种精加工的磁钢部件的生产成本将与其它普通磁性材料的生产成本差不多。

磷铈镧矿砂是一种矿物, 若干有关的稀土元素族都是从这种矿砂精炼出来的。这种磷铈镧矿砂比战略上稀少的钴的来源丰富得多。

磁 性 能

钐钴 5 材料优于其它硬磁材料的突出之处是其磁性能 (见图 1 的祛磁曲线)。图中收集了不同厂商的资料, 将性能相同的材料归并在

R. Lynch (Lucas Aerospace, Ltd, U.K.): The development of samarium cobalt permanent magnet dc servomotors, 5-10.

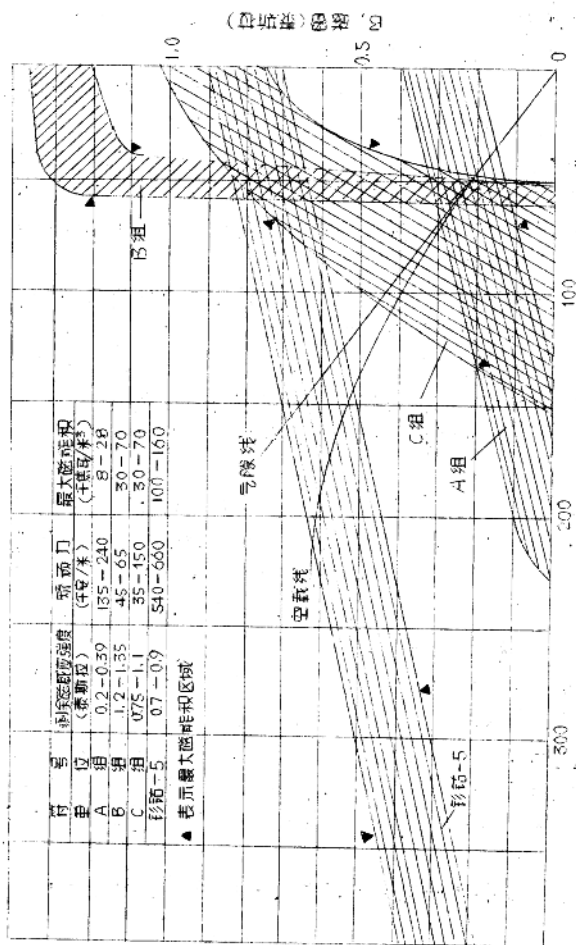


图 1 祛磁曲线

图 1 祛磁曲线

一起，并且考虑了公差和非取向或各向同性的影响而分了组。

BH线的纵轴说明了各材料组之间不同的磁密值，而其对应的磁场强度可由横轴求得。同时给出了各组典型的磁能积。

但是在选定的工作点，磁能积($B \times H$)可决定所需材料的体积，磁钢尺寸即磁钢的长度和截面积则由相关的B·H值确定。

A组和钕钴5材料的工作点在祛磁曲线上，而B组和C组的工作点对于象电动机等动态应用而言，则应在回复线上。通常，曲线上所选位置的BH乘积应相当于单位体积的最大磁能积，而当工作点在回复线上时该点的位置则由祛磁场来确定。

A组是陶瓷-铁氧体系材料，多用于价格低廉、大批量生产的电机中。永磁体制品相当便宜，但是体积大、磁化温度系数也较大。

A组祛磁曲线的形状与钕钴5相同，但磁能积低得多。欲使其达到与用钕钴5的电动机有相同的性能，电枢周围铁氧体永磁体的用量依长度（即磁场方向—译注）和面积衡量约为钕钴5永磁体的二倍。

当永磁体的长度和面积与钕钴5相等时，则磁密约为用钕钴5时的一半。因此，电动机的转矩也成比例地减少，但是若调整齿槽宽度即增加电负荷则可有所提高，二者的大致比值如下：若钕钴5电动机为1个单位，则铁氧体电动机转矩=0.7，峰值功率=0.5，机械时间常数=2，电时间常数=1.4。

B组材料为高剩磁低矫顽力铝镍钴(Alnico*/Alcomax)**系材料，工作点在回复线上。陡峭的祛磁曲线要求所选的点能保持磁场强度，以使电机在最大允许电流下能经受得住电枢反应的影响。磁能积对于所选磁场强度 H_m 十分敏感。因此可供选用的最大值应按接近 H_m/H_c 的倍数下降，式中 H_c 是矫顽力。磁钢长度较长、以及

* Alnico，相当于我国一机部部标JB1588-75中的LNG13。

——译注

** Alcomax，相当于我国一机部部标JB1588-75中的LNG40。

——译注