

步进电机控制技术入门

BU JIN DIAN JI KONG ZHI JI SHU RU MEN

● 王鸿钰 编著

● 同济大学出版社



步进电机控制技术入门

王鸿钰 编著

同济大学出版社

内 容 提 要

本书从实际应用出发,将步进电机与控制技术有机地结合在一起。本书主要介绍一些与步进电机控制技术有关的基础知识、常用驱动电路、开环与闭环控制、参数测试方法以及用微机控制步进电机的一般原理和程序设计思想。最后,比较详细地介绍了步进电机在打字机、计算机外部设备和数控机床等领域中的应用。

本书可供自动控制领域里的工程技术人员和应用步进电机的人员阅读,也可供大专院校有关专业的师生学习参考。

责任编辑:解明芳

封面设计:李志云

步进电机控制技术入门

王鸿钰 编著

同济大学出版社出版

(上海四平路1239号)

新华书店上海发行所发行

吴县人民印刷二厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 7.375 字数: 214千字

1990年9月第1版 1990年9月第1次印刷

印数: 1—3,000 定价: 4.90元

ISBN 7-5608-0393-8/TH·7

前 言

步进电机是机电一体化产品中的关键组件之一，是一种性能良好的数字化执行元件。随着计算机应用技术、电子技术和自动控制技术在国民经济各个领域中的普及与深入，步进电机的需要量越来越大。有资料说明，世界上步进电机的年产量以 10% 以上的速度增长。国内对步进电机的需求同样也与日俱增。实际工作中，很多工程技术人员和技术工人都希望比较全面地了解步进电机及其控制技术。作者曾在专业期刊上发表过一些关于步进电机的文章，收到过不少同志的来信。信中也反映了这种要求。而国内介绍这方面内容的书比较少，专业期刊上介绍的内容又往往偏深，或不成系统，对非专业人员不一定合适。针对上述情况，编写了这本入门书。

本书共分九章。第一章~第四章介绍步进电机的结构、工作原理、驱动电路和动静态特性。第五章~第七章介绍使用步进电机的开环系统和闭环系统，以及用微机控制步进电机的一般原理和程序设计思想。第八章介绍步进电机参数的测试。第九章介绍如何选用步进电机和步进电机在打字机、计算机外部设备、数控机床等领域中的应用。

本书承蒙上海市电气自动化研究所陈孝威高级工程师审阅，在此表示感谢。对曾经支持、鼓励过作者写就本书的同志，也一并表示深切谢意。

王鸿钰

1989年10月

目 录

第一章 步进电机	1
§ 1-1 磁阻式步进电机	2
§ 1-2 永磁式步进电机	7
§ 1-3 混合式步进电机	9
§ 1-4 特种步进电机	12
第二章 静转矩特性	15
§ 2-1 静转矩特性	15
§ 2-2 由负载转矩引起的位置误差	17
§ 2-3 激磁方案的选择	19
§ 2-4 用一组齿轮把负载连接到步进电机	25
§ 2-5 用丝杆把负载连接到步进电机	27
§ 2-6 步进电机系统转动惯量的折算	30
第三章 动态特性	32
§ 3-1 低速区的失步转矩和静转矩之间的关系	33
§ 3-2 高速工作的步进电机	38
§ 3-3 混合式电机的失步转矩/频率特性	40
§ 3-4 磁阻式电机的失步转矩/频率特性	50
§ 3-5 机械谐振与阻尼	59
第四章 驱动电路	71
§ 4-1 单极性驱动电路	72
§ 4-2 双极性驱动电路	74
§ 4-3 双线绕组驱动	76
§ 4-4 高低压驱动	82
§ 4-5 斩波驱动	85
§ 4-6 调频调压驱动	87

§ 4-7	细分驱动	87
§ 4-8	驱动电路性能比较和电路实例	92
第五章	开环控制	96
§ 5-1	启停频率	97
§ 5-2	加速和减速工作	99
§ 5-3	开环控制的实现	106
§ 5-4	加速、减速能力的改进	114
第六章	闭环控制	117
§ 6-1	换相角	118
§ 6-2	转子位置检测	124
§ 6-3	波形检测控制系统实例	131
第七章	以微处理器控制的步进电机系统	136
§ 7-1	开环控制的软件与硬件	137
§ 7-2	以微处理器控制的开环系统	148
§ 7-3	以微机和硬件控制器控制的开环系统	163
§ 7-4	基于微处理机的闭环控制	185
第八章	步进电机参数的测试	191
§ 8-1	转子惯量的测量	191
§ 8-2	电感的测量	196
§ 8-3	步距精度的测量	199
§ 8-4	直流电阻与绕组温升的测量	200
§ 8-5	静态特性的测量	201
§ 8-6	动态特性的测量	202
第九章	步进电机的应用	209
§ 9-1	步进电机的选择	209
§ 9-2	步进电机在电脑打字机中的应用	211
§ 9-3	步进电机在计算机外部设备中的应用	216
§ 9-4	步进电机在数控机床中的应用	224
§ 9-5	步进电机在其他领域的应用	226
参考文献		228

第一章 步进电机

步进电机的品种规格很多,按照它们的结构和工作原理可以划分为磁阻式(也称反应式或变磁阻式)电机、混合式电机、永磁式电机和特种电机等四种主要型式。尽管一台电机的内部几何形状不完全相同或者完全不相同,但总能以其中的一种来描述它的特性,因此,我们把注意力集中在这四种基本型式的步进电机上。

首先我们要了解步进电机是怎样工作的。图 1.1 是说明磁阻式步进电机工作原理的示意图。它的定子上有六个极,转子有四个极。定子磁极上绕有三组绕组,每组绕组由相互串联的两个线圈构成。一组绕组叫做一相。因此,图 1.1 所示的电机为三相步进电机。直流电源通过开关 I、II 和 III,驱动电流流过绕在定子上的绕组。状态(1),开关 I 闭合,A 相通电。由于 A 相绕组受到激磁,空气隙里出现如箭头所示的磁场。A 相上的两个定子磁极与两个转子齿对准,转子处于平衡状态。若再闭合开关 II 激励 B 相,如状态(2)所示, B 相的定子磁极以同样的方式产生磁场。在磁力线的张力作用下,产生逆时针方向的转矩。于是,转子沿逆时针方向转过一个固定的角度,到达状态(3)。图中,转过的角度为 15° 。如果现在打开开关 I,去掉 A 相的激磁,转子将再转 15° ,到达状态(4)。因此,转子的角位置可以用这种开关方式进行控制。若开关以某种时序转换,则转子就能以步进运动的方式连续旋转;若进一步使时序转换的速度可调,则平均速度也能用这种开关方式进行控制。

实际上,驱动步进电机的开关是晶体管,开关信号由数字集成电路或微机产生。通过前面的介绍可以看到,步进电机是一种把开关激励的变化变换成为精确的转子位置增量运动的执行机构。与能够实现类似功能的其他部件相比,使用步进电机的控制系统有下面几个明显的优点:

- (1) 通常不需要反馈就能对位置或速度进行控制。

- (2) 位置误差不会积累。
- (3) 与数字设备兼容。

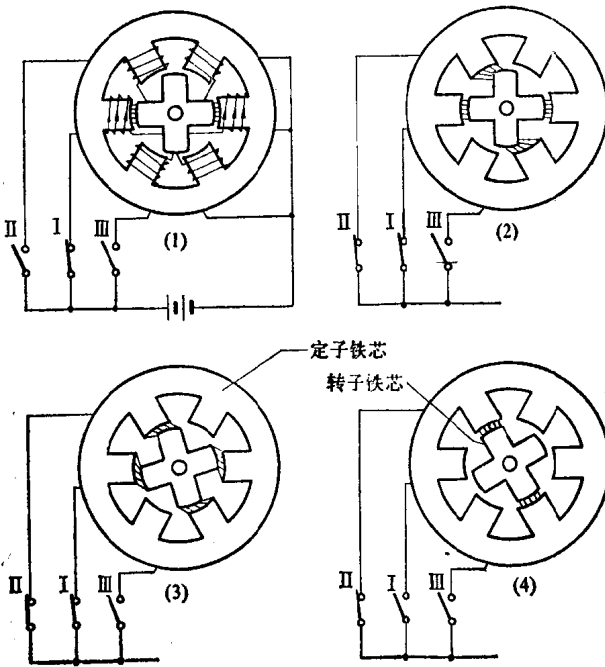


图 1.1 磁阻式步进电机的工作原理示意图

因上述原因，故计算机外部设备和类似系统广泛使用各种不同型式的步进电机。

§ 1-1 磁阻式步进电机

图 1.2 是国内常见的三相磁阻式步进电机的剖面图。电机定子的每两个相对的极组成一相，极上绕组反向串联，以此形成 N-S 极。电机的转子圆周上均布 40 个小齿，故其齿距角 $\theta_z = 360/40 = 9^\circ$ 。

(一) 单三拍工作

这种工作方式与前面介绍的方式略有差异。为便于说明，在三对极中任选一对为 A 相，通电励磁后建立以 A-A' 为轴线的磁场，

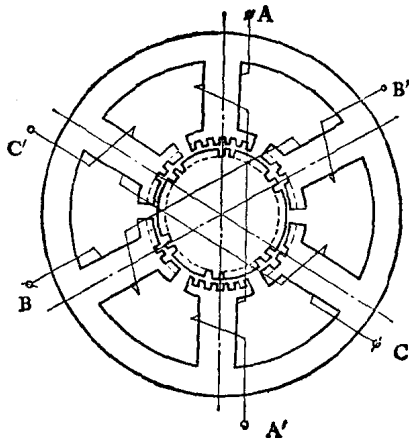


图 1.2 A 相通电定转子对齐情况

其磁路分布如图 1.3 (a) 所示。转子齿在磁场力的作用下与定子齿对齐(对齐状态见图 1.2)。此时与 A 相隔 60° 的极上,其小齿与转子齿错开 $60/9 = 6(2/3)$, 即错开 $2/3$ 齿距角。而相隔 120° 的极上小齿与转子齿错开了 $120/9 = 13(1/3)$, 即错开 $1/3$ 齿距。若切断 A 相, 同时接通 B 相, 建立以 B-B' 为轴线的磁场[其磁路分布如图 1.3(c)]。此时, 转子齿在磁场作用下逐步与 B 相定子齿对齐。转子齿相对于 A 相定子齿转动 $1/3$ 齿距角, 即 3° 。同理, 当 B 相通电转换为 C 相通电[磁路如图 1.3(e)]时, 转子齿相对于 B 相齿再前进一步, 转动又一个 $1/3$ 齿距角。当 C 相通电转换为 A 相通电时, 转子齿再走 $1/3$ 齿距角。对 A 相定子齿来说, 向前转动了 $(1/3) + (1/3) + (1/3) = 1$ 个齿距角, 即 9° 。这时, 转子齿与 A 相定子齿重新对齐。

电流以上述方式切换三次, 磁场旋转一周, 转子向前转过一个齿距角。因此, 这种工作方式叫做三相单三拍工作方式。这时, 步距角 θ_b (度) 为:

$$\theta_b = 360 / (mz) \quad (^\circ) \quad (1.1)$$

式中: m ——定子相数; z ——转子齿数。

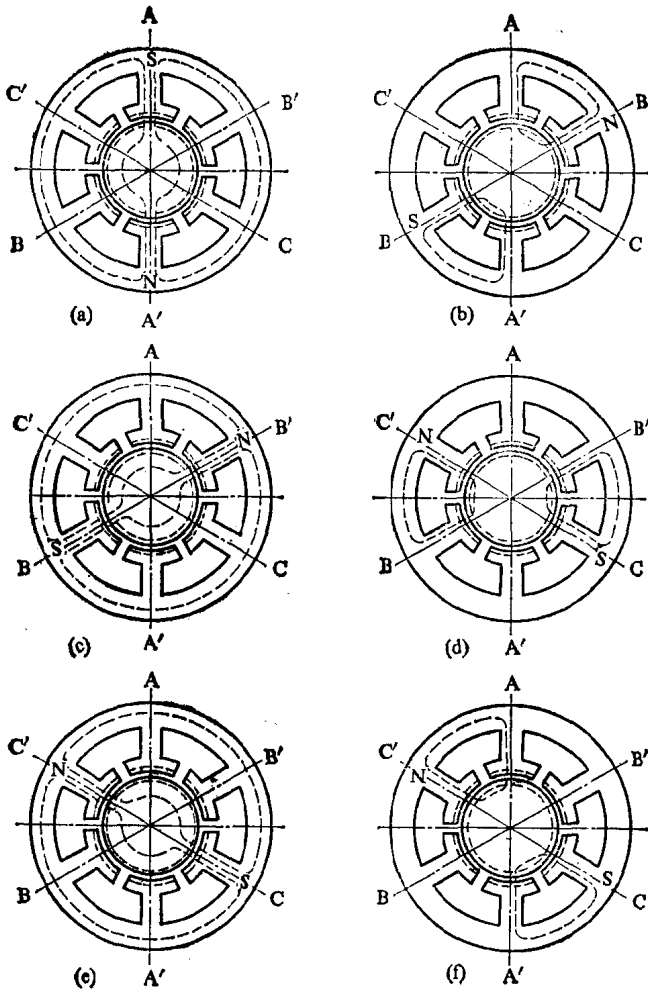


图 1.3 六拍分配方式的磁场图形

(二) 三相六拍工作

最初以 A 相通电, 转子齿与 A 相定子齿对齐, 磁路如图 1.3(a) 所示。第二拍, A 相继续通电, 同时接通 B 相。由 A、B 两相各自建立的磁场合成以 $C'-C$ 为轴线的合成磁场[图 1.3(b)]。这时, 转子

齿既不对准 A 相,也不对准 B 相,而是对准 A、B 两极轴线的角等分线,使转子齿相对于 A 相定子齿转过 $1/6$ 齿距,即 1.5° 。第三拍, A 相切断,仅 B 相保持接通。这时,由 B 相建立的磁场与单三拍时 B 相通电的情况一样,见图 1.3(c)。转子齿相对于 A 相定子齿转了 3° 。同理,第四拍保持 B 相通电,再接通 C 相,……。绕组励磁以 A—AB—B—BC—C—CA—A 时序(或反时序)转换 6 次,磁场旋转一周,转子前进一个齿距,每次切换均使转子转动 1.5° ,故这种通电方式称为三相六拍工作方式。其步距角 θ_s 为:

$$\theta_s = 360 / (2 mz) = 180 / (mz) \quad (^\circ) \quad (1.2)$$

(三) 双三拍工作

这种工作方式每次都有两相导通,两相绕组处在相同电压之下,以 AB—BC—CA—AB(或反之)方式通电,故称为双三拍工作方式。以这种方式通电,转子齿所处的位置相当于六拍控制方式中去掉单三拍后的三个位置,具体磁路见图 1.3(b)、(d)和(f)。它的步距角计算公式与单三拍时的公式相同。

由上述分析可知,要使磁阻式步进电机具有工作能力,最起码的条件是定子极分度角不能被齿距角整除,且应满足下列方程:

$$\text{极分度角/齿距角} = R + k \cdot \frac{1}{m}$$

进一步化简得齿数 z :

$$z = q(mR + k) \quad (1.3)$$

式中: m ——相数; q ——每相的极数; k —— $\leq (m-1)$ 的正整数;

R ——正整数,为 0、1、2、3……。

按选定的相数和不同的极数,由上式就可推算出转子齿数。

(四) 多段磁阻式步进电机

多段磁阻式步进电机沿着它的轴向长度分成磁性能上独立的几段,每一段都用一组绕组励磁,形成一相。因此,三相电机有三段。

电机的每一段都有一个定子,它们固定在外壳上;转子制成一体,并由电机两端的轴承支撑;为了与外部负载连接,转子上有一根伸出来的轴(图1.4)。每段定子上都有许多磁极,相绕组绕在这些极

上;相邻磁极以反向缠绕,使得磁极的径向磁场方向相反。沿电机的轴向长度看,每段的转子齿都是排齐的,但不同段所对应的定子齿之间有不同的相对位置。因此,A段里的定子齿和转子齿对齐时(设最初A相通电),B段和C段里的定子齿与转子齿则不对齐。若激励磁从A相变化到B相,结果将使B段里的定子齿和转子齿对齐,转子转动一步。

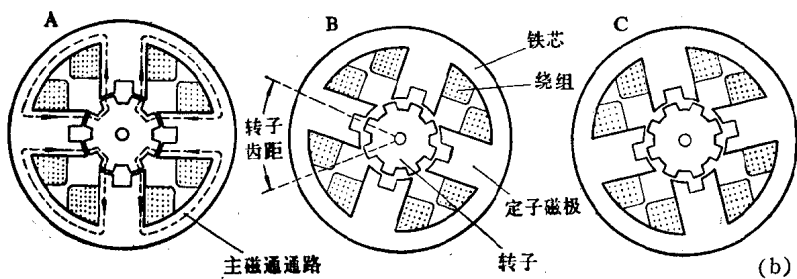
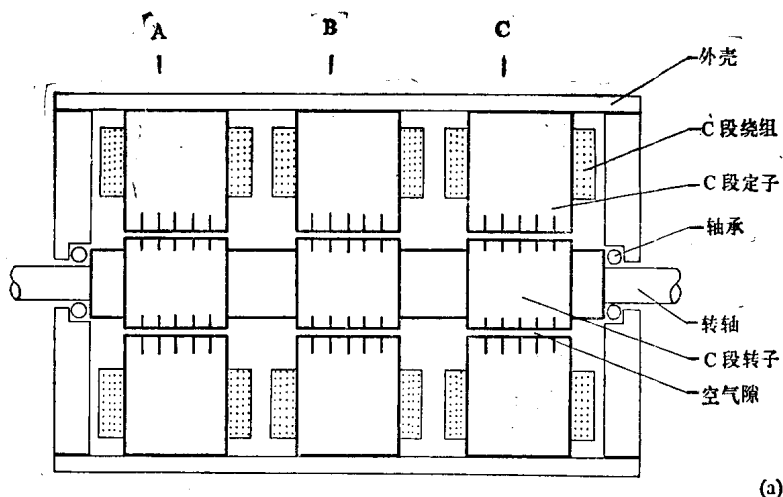


图 1.4 三段磁阻式步进电机的剖面图
(a) 与轴平行的剖面;(b) 与轴垂直的剖面

去掉 B 相励磁而激励 C 相,则电机以同一方向再走一步。再激励 A 相,则再走一步, A 段里的定子齿和转子齿再一次完全对齐。

激磁的三次变化使转子转动三步或一个转子齿距；不断按序改变激磁，电机就可连续旋转。这就是多段电机的基本工作原理。

段数增多对制造者来说很方便，但是，相绕组越多，需要的驱动电路也越多，因此，付出的驱动电路费用随之增加。另一方面，段数大于3时，实际性能并没有太多改善。

§ 1-2 永磁式步进电机

转子上安装永久磁钢的步进电机叫做永磁式步进电机。这一部分介绍永磁式爪极步进电机。下一部分介绍另一种转子上安装永久磁钢的混合式步进电机。

爪极电机的剖视图如图 1.5 所示。它的定子由几个金属盒叠成。齿由圆形金属片冲出。然后，将这个圆片拉成钟状，齿被拉到里面形成爪极。定子的每一段由连结在一起的两个钟形罩壳构成，两者的齿相互“啮合”。金属盒里面绕有激磁线圈。在这种电机里，定子齿或爪极由在定子线圈里流过的电流产生不同极性的磁场。转子的圆柱形磁钢也具有如图 1.6 所示的磁化极性。对 7.5° 步距而言，典型的极数为 24。这种类型的电机通常有两段。若两个定子段里的转子磁化状态是对齐的，则两段里的定子齿将错开 $1/4$ 齿距。

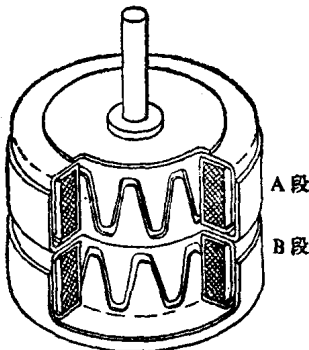


图 1.5 爪极永磁式电机的剖视图

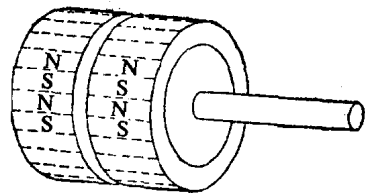


图 1.6 转子磁化图

激磁线圈可以以双向通电的两相方式或单向通电的四相方式绕制。以四相方式绕制时，相 1 和相 3 形成双线绕组，放在 A 段里。

相2和相4双线绕组放在B段里。相1和相3以产生符号相反的磁极极性的方式连接；相2和相4也如此。图1.7是四相方案和两相方案的励磁时序。在两相方案中，外加的电流是交流方波。下面利用图1.8说明这种电机以两相排列时的工作原理。让我们看A段里转子磁极和定子齿的位置关系。开始，转子处在状态(1)位置。以正向电流激励A相，产生图中所示的磁极。很明显，依靠磁力线的张力，转子将向左运动。状态(2)是A相受正向激励的平衡位置。下一步，A相截止，B相以正向电流激励。因为B段里的定子齿相对A段里的齿错开1/4齿距，故转子将在同一方向进一步受到驱动。状态(3)是这次激励的结果。为了进一步使转子向左运动，应撤消B相激励，并以反向电流使A相励磁。于是，转子转到下一个状态(4)，…。这就是它的步进动作过程。

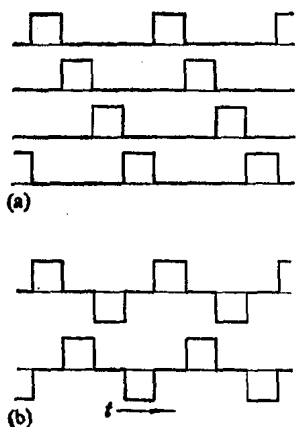


图 1.7 通入爪极永磁式电机的电流波形
(a) 四相电机；(b) 两相电机

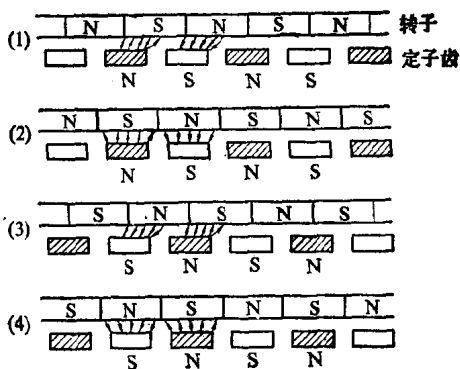


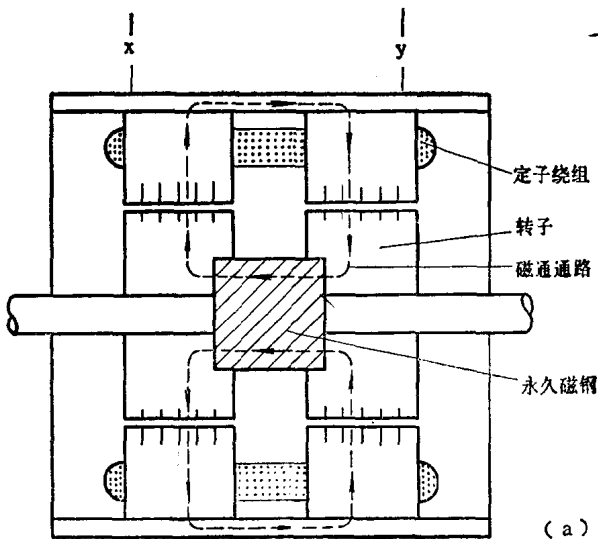
图 1.8 爪极永磁式电机里的步进动作过程

爪极电机具有制造成本低等优点，故应用比较广泛。如：用作送纸机构和字车机构的动力源，小规模磁盘驱动器中的磁头驱动电机等。

§ 1-3 混合式步进电机

与磁阻式步进电机一样，混合式电机也由定子和转子两部分组成。常见的定子有8个极或4个极，极面上均布一定数量的小齿；极上线圈能以两个方向通电，形成A相和 \bar{A} 相，B相和 \bar{B} 相。它的转子也由圆周上均布一定数量小齿的两块齿片等组成。这两块齿片相互错开半个齿距。两块齿片中间夹有一只轴向充磁的环形永久磁钢。很明显，同一段转子片上的所有齿都具有相同极性，而两块不同段的转子片的极性相反。图1.9是电机里两种磁场通路的示意图。

图1.9(a)是由转子上的永久磁钢磁场产生的磁通回路；图1.9(b)是在电机X、Y两处剖开的剖面图。每相绕组绕在8个定子磁极中的4个极上，如：绕组A绕在1、3、5、7磁极上，则绕组B绕在2、4、6、8磁极上；而且，每相相邻的磁极以相反方向绕，即，如果绕组A以正向电流激励，则3和7磁极的磁场径向向外，而1和5磁极的磁场径向向内。B相与A相的情况类似。因此，整个电机的通电情况与磁场方向可用表1.1加以概括。至于电机里的转矩，这由气隙中的两种磁场共同作用产生。



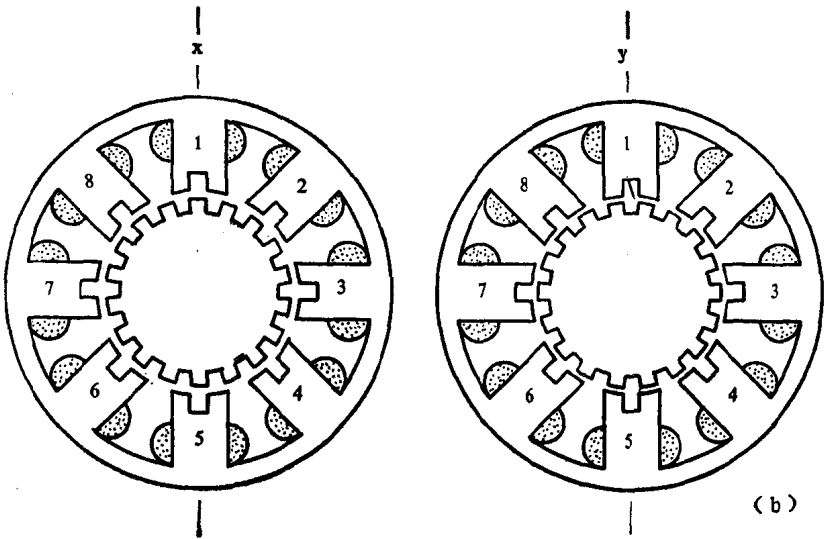


图 1.9 混合式电机的剖面图
(a) 平行轴的剖面; (b) 垂直轴的剖面

表 1.1

绕 组	电 流 方 向	磁极磁场的方向	
		径向出	径向入
A	正	3,7	1,5
A	负	1,5	3,7
B	正	4,8	2,6
B	负	2,6	4,8

让我们看图 1.10, 这是四相混合式步进电机以圆周展开的剖面模型。上图是转子 S 极所处的剖面, 下图是 N 极剖面。图中, 定子齿距和转子齿距相同。先考虑磁极 I 和磁极 III 下面的磁场。定子线圈通电后, 磁极 I 产生 N 极, 磁极 III 产生 S 极。它们构成的磁场分布情况如实线所示。同一图中的虚线表示永久磁钢产生的磁通通路。

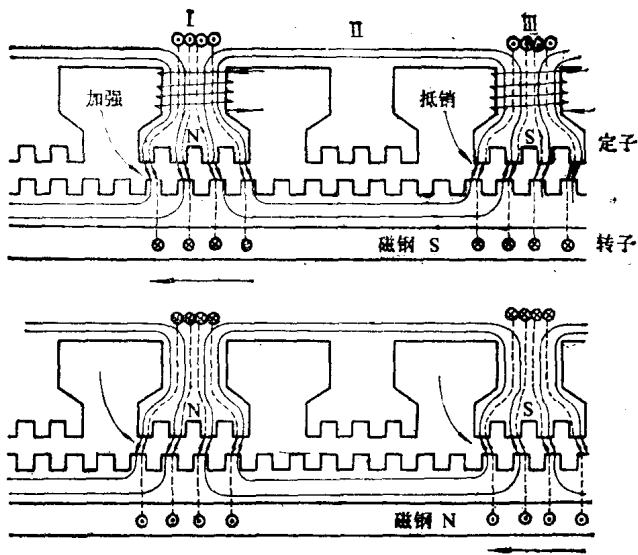


图 1.10 说明混合式电机工作原理的剖面展开图

因为 N 极这段的转子齿和 S 极转子齿相互错开半个齿距，所以，仅靠定子电流磁场并不能像磁阻式电机那样产生有意义的转矩。但是，把永久磁钢产生的磁场叠加上去，情况完全变了。因为磁极 I 下面的两个磁场相互增强，因此，将产生朝左的驱动力；而磁极 III 下面的两个分量相互抵销，向右的力大大削弱。再看下图，磁极 III 下面的定子磁场和转子磁场方向相同，磁极 I 下面的磁场方向相反，所以，也产生同样方向的力。最终得到向左的合力。转子在驱动力的作用下，将转过 $1/4$ 齿距，驱动力降为零，达到平衡位置。

如果切断磁极 I、III 的激磁，同时向磁极 II、IV 上的线圈通入电流，分别产生 S 极和 N 极。转子将向左再走一步。按照特定的时序激磁，如： $A-\bar{B}-\bar{A}-B-A-\dots$ ，电机就能沿逆时针方向连续旋转。改变激磁时序，以 $A-B-\bar{A}-\bar{B}-A-\dots$ 激磁，电机将沿顺时针方向连续旋转。

典型的混合式步进电机是四相 200 步的电机，步距角为 1.8° ；