

功率步进电动机的驱动

《功率步进电动机的驱动》编写组

机械工业出版社

3.6

- $f_{\phi \max}$ ——控制绕组最高通断电重复工作频率;
 E_G ——高压直流电源电压;
 E_D ——低压直流电源电压;
 i_p ——控制绕组电流;
 I_{PN} ——控制绕组额定电流;
 $I_P(\infty)$ ——控制绕组稳态电流, $I_P(\infty) \leq I_{PN}$;
 K_c ——电流上冲倍数;
 t_r ——控制电流波形的前沿时间;
 t_f ——控制电流波形的后沿时间;
 t_q ——电路换向关断时间或晶闸管关断时间;
 t_c ——电路提供的换向时间或回路关断时间;
SCR——普通晶闸管或高频晶闸管;
GTO——可关断晶闸管;
SCR₁——高压晶闸管;
SCR₂——低压晶闸管;
BG——晶体三极管;
BG_g——高压晶体管;
BG_d——低压晶体管;
 V_{cc} ——电源电压;
 V_{RM} ——集成电路的开门电平;
 V_{GM} ——集成电路的关门电平;
 $\perp$ ——晶闸管 (SCR、GTO) 驱动电源主电源的地; 晶体管驱动电源的直流地;
 $\perp$ ——晶闸管、GTO 驱动电源的控制电源地;
 I_H ——晶闸管、GTO 的维持导通电流;
 I_{HS} ——晶闸管、GTO 的掣住电流;
 B ——磁通密度、谐振回路衰减系数;
 K_b ——电机磁路的饱和系数;

前 言

本书是根据参加“步进电动机及其驱动系统”攻关的西安微电机研究所、西安微电机厂、天津大学、华中工学院等单位的倡议而编写的，它是全国攻关成果的总结。编写本书的目的是希望通过总结和提高，使攻关成果能尽快得到推广应用，以促进本行业和国民经济的发展。

本书主要论述功率步进电动机驱动电源，重点讨论高频晶闸管驱动电源，对其余驱动电源则分别叙述其特点，以便突出重点，避免重复。本书的专业性和实践性较强，第三、四、五章对高频晶闸管驱动电源基本工作原理、主电路分析计算、元件参数设计和高抗干扰触发系统设计原则，作了较详细的论述，在第七章论述了它的调试与故障分析。书中所介绍的三种步进电动机驱动电源的一些电路环节和抗干扰的措施具有普遍意义，可用于其他电子电路。本书可供从事电机及电子技术、自动控制等工作的技术人员和大专院校有关专业师生参考。

本书由华中工学院贾正春、许锦兴主编。由西安微电机研究所张丽娟、宁守信编写第一章，许锦兴编写第三、四、五章，并对第二、六、七章作了修改，天津大学张立编写第八章，西安微电机厂樊学武、王玉琨和范敬康编写第九章，贾正春编写第二、六、七、十章并对全书作了修改与补充。

华中工学院陶绪楠、陶醒世副教授对全书进行了审校，西安微电机研究所副总工程师平友尧、副所长韩维新、西安

微电机厂副总工程师彭博谋等对编写该书作了大量的组织与联系工作。在编写过程中还得到华中工学院副教授王敬义、林奕鸿和讲师秦忆、李光斌等的具体帮助，在此谨致以衷心感谢。

由于国内外还没有这方面的专著可供参考，加之有些问题的理论研究还有待进一步探讨，书中肯定有许多不当甚至错误之处，恳请读者批评指正。

常用符号表

m	—— 步进电动机相数;
m_a	—— 一个分配循环的状态数。分配循环的节拍数;
m_b	—— 分配循环的运行拍数;
β_b	—— 以度表示的步距角;
θ	—— 以电角度表示的失调角;
z_r	—— 转子齿数;
J_r	—— 转子转动惯量;
J_F	—— 折算到电机轴上的负载转动惯量;
T_j	—— 步进电动机的输出转矩;
$T_{j\max}$	—— 步进电动机的最大静转矩;
T_F	—— 折算到电机轴上的负载转矩;
f	—— 控制脉冲频率, 衡量步进电动机的技术指标时都是控制脉冲的重复频率;
$f_{\max}$	—— 指步进电动机的最高连续运行频率或最高重复工作频率、步进驱动系统的最高工作频率;
f_q	—— 步进电动机的起动频率或突跳频率;
f_{q0}	—— 空载突跳频率;
f_1	—— 自动升降频电路的输入频率;
f_2	—— 自动升降频电路的输出频率;
Δ	—— 脉冲当量;
Δr	—— 自动升降频控制误差;
τ	—— 自动升降频电路的时间常数、控制电流的最小脉冲宽度;
cp	—— 数字脉冲或信号源输入脉冲分配器的脉冲列;
cp'	—— 脉冲分配器输出的时序脉冲;
L_m	—— 控制绕组电感随转角变化的基波幅值;
$L_{\max}$	—— 控制绕组的最大电感;
$L_{\min}$	—— 控制绕组的最小电感;
L_p	—— 控制绕组的平均电感;
r_p	—— 控制绕组电阻;

目 录

前言

常用符号表

第一章 功率步进电动机	1
第一节 概述	1
第二节 功率步进电动机结构	2
第三节 功率步进电动机工作原理	6
第四节 步进电动机的主要性能指标	11
第五节 功率步进电动机的选择	20
第二章 功率步进电动机驱动的一般问题	29
第一节 步进电动机控制系统	29
第二节 脉冲分配器	32
第三节 自动升降频控制	48
第四节 步进电动机矩频特性与驱动电源的关系	61
第五节 一种多功能的脉冲信号装置	66
第三章 功率步进电动机晶闸管驱动电源的基本工 作原理	82
第一节 高频晶闸管的工作原理与特点	82
第二节 高低压供电的晶闸管驱动电路方案	90
第三节 晶闸管驱动电源主电路工作原理	95
第四节 高频晶闸管驱动电源的特点	102
第四章 晶闸管主电路工作过程的分析	108
第一节 概述	108
第二节 高压回路的开通	109
第三节 电容 C_1 的放电	113
第四节 低压回路的开通	115

第五节	低压回路换流	121
第六节	能量反馈	123
第七节	辅助换流	126
第八节	异常情况下的低压换流和能量反馈过程	128
第五章	晶闸管主电路的设计计算	135
第一节	电路最高工作频率的计算	135
第二节	电感、电容参数选择	140
第三节	步进电动机控制电流波形计算	145
第四节	晶闸管、二极管的选择	149
第五节	电阻元件及熔断器的选择	158
第六节	设计计算举例	162
第六章	触发系统及其抗干扰问题	170
第一节	晶闸管主电路对触发电路的要求	170
第二节	干扰的来源	173
第三节	晶闸管驱动电源接受干扰的分析	176
第四节	抑制干扰的措施	183
第五节	高抗干扰触发系统原理电路分析	185
第六节	电流传感器与检测灵敏度	200
第七章	晶闸管驱动电源的调试与故障分析	203
第一节	触发电路的调试	203
第二节	主电路调试	211
第三节	故障与分析	217
第八章	可关断晶闸管驱动电源	227
第一节	可关断晶闸管的原理与特性	227
第二节	GTO 驱动电源的原理	236
第三节	GTO 驱动电源主电路分析	246
第四节	GTO 驱动电源的触发关断控制系统	259
第九章	晶体管驱动电源	271
第一节	概述	271

VI

第二节	晶体管驱动电源的控制方式	272
第三节	晶体管驱动电源主电路	286
第四节	大功率晶体管的保护	291
第五节	抗干扰与控制系统	295
第六节	晶体管驱动电源的典型电路	300
第七节	特种控制电路	304
第十章	功率步进电动机驱动装置的供电	310
第一节	概述	310
第二节	步进电动机的供电电源容量	315
第三节	多台电机驱动系统的电源容量	324
第四节	主变压器设计计算	327
第五节	整流滤波电容的估算	336

第一章 功率步进电动机

第一节 概 述

步进电动机是一种将电脉冲信号转换成相应的角位移或线位移的电磁机械装置，是一种输出与输入数字脉冲对应的增量驱动元件。通俗地讲，当外加一个电脉冲信号于步进电动机的控制装置时，其转轴就转过一个角度或前进一步。一个一个地送入电脉冲，该电动机就会一步一步地转动或移动。这种电动机的运动形式与通常均匀旋转的电动机不同，它是步进式运动，故称为步进电动机，有时也叫脉冲电动机。

步进电动机具有下述特点：

1) 输入脉冲数与其位移量有严格的对应关系，步距误差不会积累。

2) 稳定运行时的转速与控制脉冲的频率有严格的对应关系。

上述这些关系，在负载能力范围内不因电流、电压、负载大小、环境条件的波动而变化。

3) 控制性能好，在一定的频率下，能按控制脉冲的要求快速起动、停止和反转。改变控制脉冲频率，电动机转速可以在很宽的范围内平滑调节。因此，步进电动机可广泛用于数模转换、速度控制和位置控制系统，是开环控制系统理想的执行元件。与采用其他伺服元件组成的闭环系统比较，这种系统可以省去反馈传感器、放大器、积分器和数模转换器等，使系统结构简单、性能稳定、工作可靠和成本低廉。

步进电动机类型很多，主要有反应式、永磁式、永磁感应子式、机械谐波式、章动式、电磁谐波式、滚切式以及若干混合式等。不同类型的电机，其原理也各不相同，根据不同的使用要求，应选择合适的电机。反应式步进电动机结构简单、工作可靠、寿命长、起动频率和运行频率高，应用最为广泛。

反应式小功率步进电动机，早已为人们所熟悉，并已在化工、通信及其他自动控制系统中广泛应用。而功率步进电动机，输出转矩大，不需要力矩放大装置就能直接带动较重负载，特别适用于中、小型数控机床和其他较大型的工程机械上，以简化传动系统的结构、提高系统精度，所以近年来受到重视和发展。实际上，功率步进电动机并没有严格的界限，国内习惯上将机壳外径大于 110mm、静力矩大于或等于 0.5 kgf·m 的步进电动机称之为功率步进电动机。

为了适应机械工业发展的需要，近年来我国已经研制成功六相反应式功率步进电动机系列及配套驱动电源。该系列电机包括机壳外径为 130、160、200mm，最大静转矩从 0.5 至 5 kgf·m 共八个规格的产品。目前已用于数控机床、冲床自动送料机构、自动裁剪机、雷达天线等各种场合，效果良好。

本章着重介绍反应式功率步进电动机的结构、原理及主要性能指标。

第二节 功率步进电动机结构

反应式功率步进电动机结构通常分为轴向分相、圆周分相和混合分相三种类型。根据磁路结构不同，又可分为轴向气隙和径向气隙两种。圆周分相轴向气隙结构见图1-1，铁心

如果选用叠片结构,必须径向叠片,制造工艺非常复杂。如果采用整块硅钢磁路,则高频运行时,铁心涡流和磁滞损耗大,电机温升高,动态性能指标不好。另外气隙调整困难,精度不容易保证,目前已很少采用。

圆周分相径向气隙结构最为简单,图 1-2 示出一台三相反应式步进电动机的典型结构。定转子铁心均用硅钢片迭成,采用每相两个磁极,定子上共六个磁极,每个极上分布有小齿。定子磁极上嵌有三相绕组,径向相对的两个磁极上绕组串联组成一相。转子沿圆周也有很多小齿,齿数由设计要求决定,与电机的相数和步距角有关,图中转子 40 齿,转子上没有绕组。

功率步进电动机的相数一般较多,国内功率步进电动机多为五相或六相。五相功率步进电动机

结构与图 1-2 电动机相似,只是定子磁极数为 10,转子齿数也根据设计要求而不同。六相功率步进电动机由于相数较多,在有特定步距角要求时,安排成单段式径向气隙磁路有

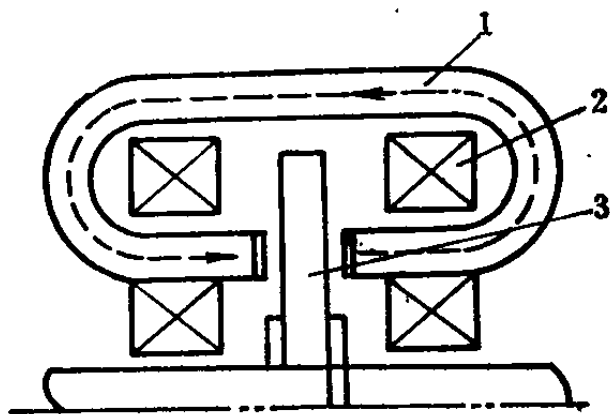


图1-1 圆周分相轴向气隙结构

1—定子 2—控制绕组 3—转子

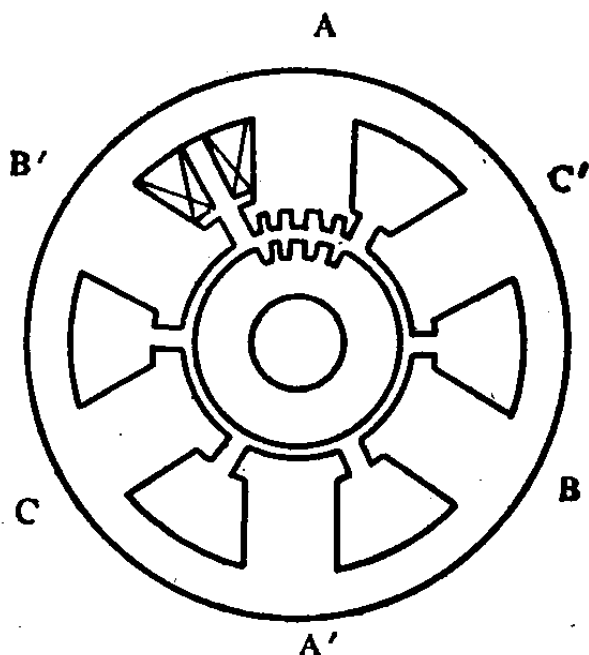


图1-2 圆周分相径向
气隙结构

困难，故采用多段式结构，通常为两段式和三段式两种。两段式结构是把如图 1-2 所示的二个三相步进电动机组合起来，在轴向分成两段，圆周上相互错开半个齿距。每段铁心布置三相绕组，其中一段布置 A、C、E 三相绕组，另一段布置 B、D、F 三相绕组。转子也分两段，但不错位。这种结构的优点是冲片可以和三相步进电动机通用；由于相邻相是布置在两段铁心上，绕组之间的互感很小，可改善绕组中的电流波形，提高步进电动机的动态性能。

同理，如果将每段定子铁心布置两相控制绕组，即定子有四个大极，转子上分布 40 个小齿，轴向分成三段，每段在径向错开 $\frac{1}{3}$ 齿距，就构成了三段式六相功率步进电动机，如图 1-3 所示。这种结构的电机，绕组之间互感影响将减至更小，在同一段铁心内不会有两相同时进行换流，因此，电流波形畸变不大，对提高电机输出转矩、起动频率和运行频率

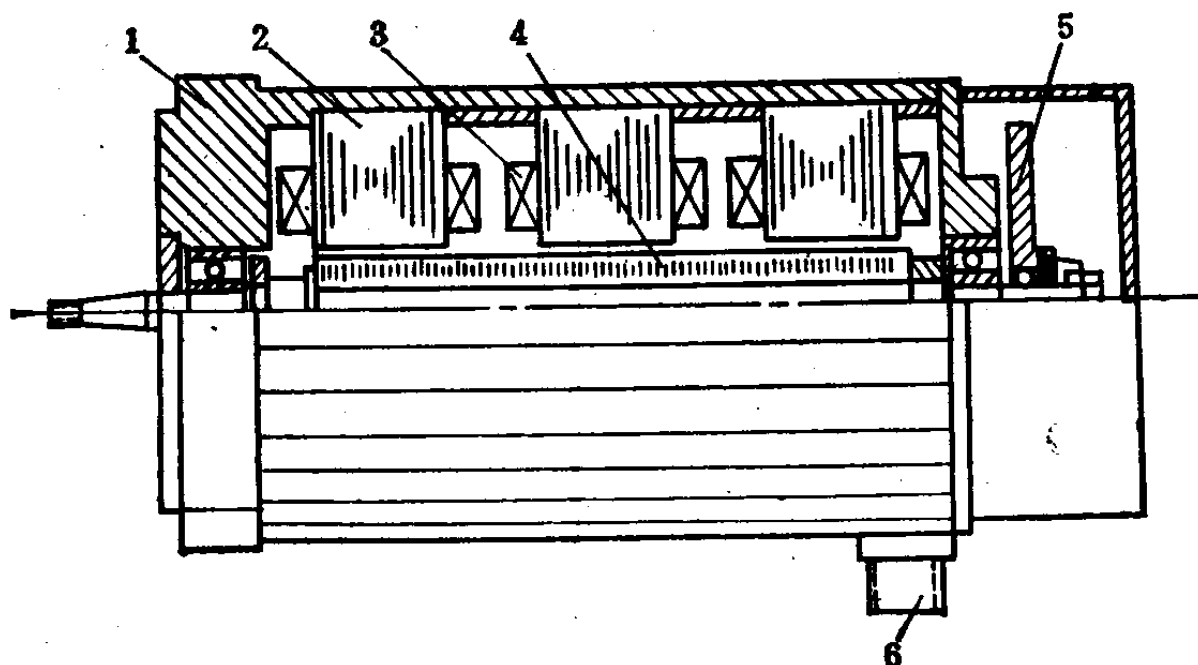


图1-3 三段六相功率步进电动机

1—机壳 2—定子 3—控制绕组 4—转子 5—阻尼盘 6—出线盒

均有好处。一般来讲，多段式结构电机，外形细长，刚性较差，装配工艺也比单段式复杂。然而对直径较大而长度又不太长的三段式六相功率步进电动机，只要布置合理，工艺上采取相应措施提高电机刚度，仍能保持良好的技术经济性能。

上述例子中，定子每相为一对磁极，也可以采用每相多对磁极。极对数增加，由于控制绕组每极安匝数变化不大，所以用铜量增加。但定、转子磁轭高度可以减小，即转子铁心重量可以减少。对步进电动机而言，高频运行时温升主要来自铁耗，极数增加对降低高频时的温升有利。另外，极数增加，每相通电时在圆周上受力点增加，使受力均匀，对减小电机的振动和噪声有利。随着极数增加，放置绕组的空间位置也需要相应增加，电机结构尺寸增大，所以，应从有效材料利用率及性能指标综合考虑，适当选择，六相功率步进电动机的磁极数，通常选取 $2p = 4$ 。

采用径向磁路结构，也可以每相为一段，每段之间在径向互相错开 $\frac{1}{m}$ 齿距（ m 为相数），这样各相在磁路上都是独立的。这种结构对于相数较多的电机，显得外形细长，刚性差，绕组端部空间利用率低，故一般不采用。

在一般情况下，步进电动机的暂态过程，是一个振荡过程。尤其在低频段这个特点更为突出。在某些频段，由于存在低频振荡，控制精度和转矩明显下降，甚至造成失步，在许多应用场合，振荡是不允许的。为了消除运行中的低频振荡，在电动机的非轴伸端装有机电阻尼器。机械阻尼器由装在轴承上的惯性盘、固定在轴上的摩擦片、压紧弹簧及拼紧螺母等组成。调整拼紧螺母改变弹簧压力，可以改变阻尼程

度。阻尼本身是一门技术，对于功率步进电动机尤为重要。近年来，国外也有采用电气阻尼办法，如附加一个能够增大磁通和减小绕组电感的固定磁通源，在磁极之间放置永久磁铁以减小漏磁。还有一种方法称为“自适应性阻尼法”，是选取电动机电流波形的各种参数，以确定最佳阻尼所需的延迟时间，使用电流反馈来调节电机的阻尼。步进电动机在负载运行时，由于有些机械负载相当于一个阻尼系统，也能改善电机的振荡情况。

第三节 功率步进电动机工作原理

步进电动机的电磁结构不同，其工作原理也有所不同。现以反应式步进电动机为例说明它的工作原理。反应式步进电动机的工作原理与反应式同步电动机一样，是利用凸极转子横轴磁阻与直轴磁阻之差所引起的反应力矩而转动的。为了便于叙述，先用一台最简单的三相反应式步进电动机为例，说明其工作原理。图 1-4 是一三相反应式步进电动机，定子有六个磁极，极面上不带小齿。每个磁极上带有集中绕组，径向相对的两磁极上的绕组串联起来组成一相。转子有四个齿，齿宽等于定子极靴宽，但无绕组。当 A 相绕组通以直流电时，产生由图 1-5 a) 虚线所表示的磁通，转子齿 1、3 在磁力线的作用下，被定位于与 A 相磁极对齐的位置。为了使

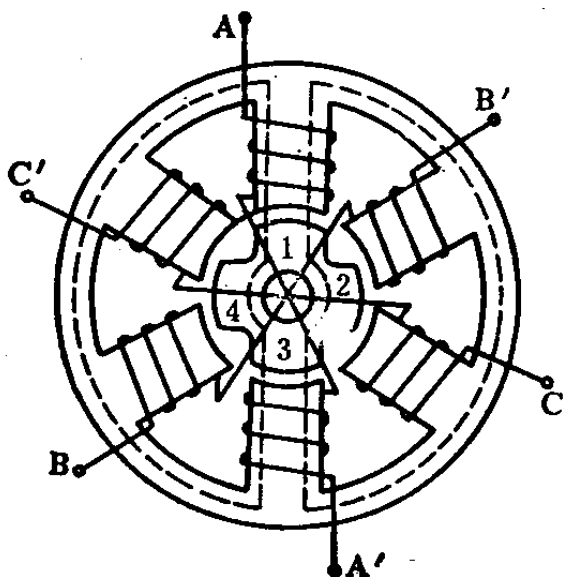


图1-4 三相反应式步进电动机结构原理

转子齿 1、3 在磁力线的作用下，被定位于与 A 相磁极对齐的位置。为了使

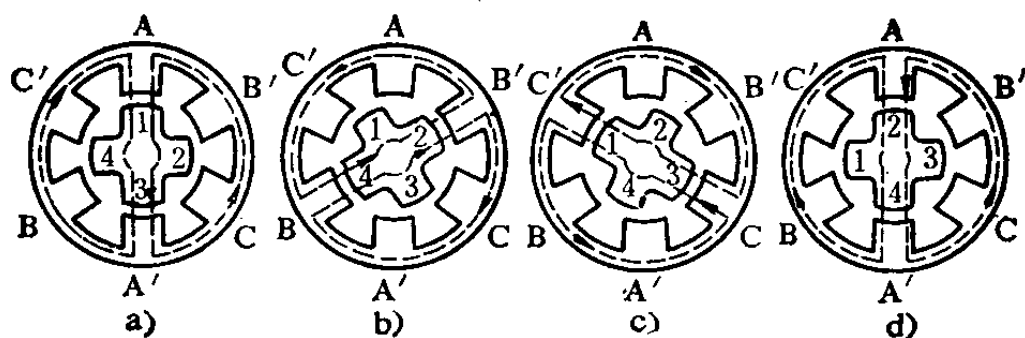


图1-5 “三相三拍”供电示意

转子产生“步进”动作,必须改变定子控制绕组的通电状态,此时,若A相控制绕组断电,并接通B相控制绕组,处于受B相控制绕组所建立的磁场影响最大的转子齿2、4,在电磁力的作用下,就会以反时针方向朝B相磁极转去,直至转子齿2、4与B相磁极对齐为止,见图1-5 b)。即在定子控制绕组通电状态改变之后,转子朝反时针的方向转动一个角度,此角度称为步进电动机的步距角,以 β_b 表示。当B相控制绕组断电、C相控制绕组通电时,如上所述,转子又会以反时针的方向转过一个步距角,此时,转子齿1、3和定子C相磁极对齐,见图1-5 c)。同理, C相控制绕组断电、A相控制绕组接通电时,转子将沿着相同的方向又转过一个步距角,转子齿2、4和定子A相磁极对齐,见图1-5 d)。由此可见,步进电动机控制绕组经过一个完整的通电循环之后,转子将转过一个齿距,本例中为90度。对于具有四个齿的转子,当控制绕组经过四次完整的通电循环之后,转子恰好转过一周。一个循环内的通断电节拍数称为循环拍数,以 m_c 表示,其值等于控制绕组的相数或相数的倍数。依此,步进电动机的步距角

$$\beta_b = \frac{360}{z_r m_c} \quad (1-1)$$

式中 z_r —— 转子齿数;

m_a —— 通断电循环拍数, 有时也称分配循环的状态数。

本例中, $z_r = 4$, $m_a = 3$, 步距角为

$$\beta_s = \frac{360^\circ}{4 \times 3} = 90^\circ / 3 = 30^\circ$$

上述控制绕组的通电次序为 A—B—C—A, 即正相序, 转子将沿着反时针方向转动, 实现了步进电动机的正转。如果将控制绕组的通电次序改变为 A—C—B—A, 按照上述的分析方法可以证明, 步进电动机的转子将沿着顺时针方向转动, 实现了步进电动机的逆转。

上述步进电动机控制绕组以 A—B—C—A (或 A—C—B—A) 的方式通电, 这只是三相步进电动机通电方式或励磁方式之一, 还可以按 AB—BC—CA—AB 的方式通电, 其结果与 A—B—C—A 通电方式相似; 另一种通电方式是 A—AB—B—BC—C—CA—A。前面 A—B—C—A 或 AB—BC—CA—AB 的通电方式称为三相三拍的供电方式或三相三拍的励磁方式。后者 A—AB—B—BC—C—CA—A 称为三相六拍的供电方式 (或励磁方式), 可以使步进电动机获得更小的步距角。

如果将控制绕组按 A—AB—B—BC—C—CA—A 的方式进行通断电, 即先接通 A 相控制绕组, 接着又接通 B 相控制绕组, 继而断 A 相控制绕组, 使 B 相控制绕组单独通电, 然后又接通 C 相控制绕组……如此等等, 这时转子的位置也相应发生变化, 见图 1-6。可以看出, 步进电动机的转子位置较前述的 A—B—C—A 多了一个中间位置, 此位置的转子齿都不与磁极相对齐, 而与两相控制绕组都通电的情况相对

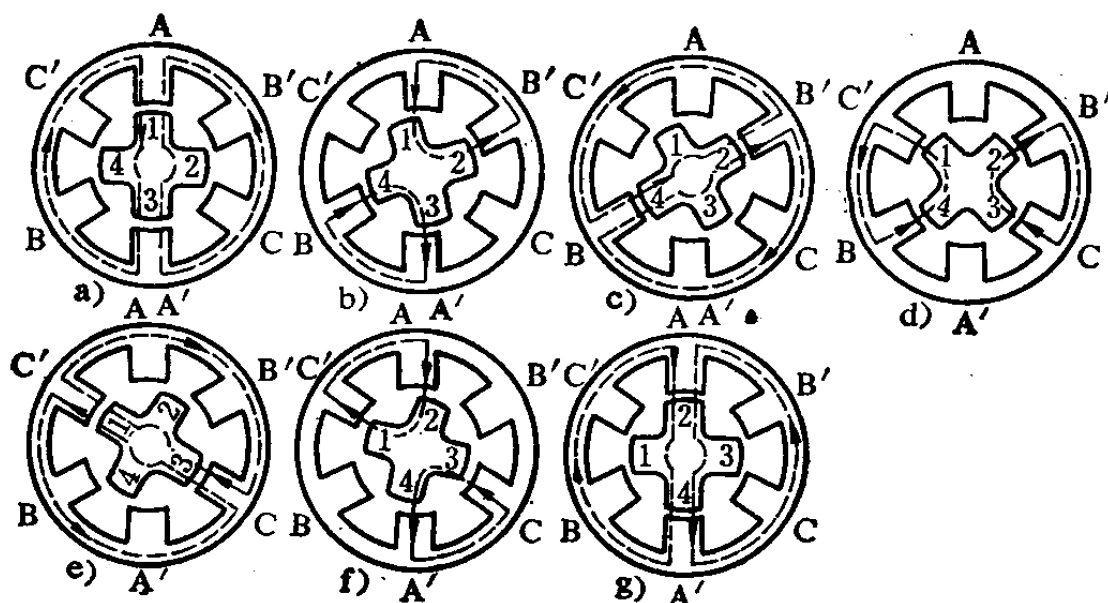


图1-6 “三相六拍”供电示意

应。因此，步进电动机的步距角较前者减少了一半。定子控制绕组一个完整的通断电循环拍数，已由原来的三拍增至六拍。故此，对于图 1-4 的电动机，步距角

$$\beta_b = \frac{360^\circ}{z, m_a} = \frac{360^\circ}{4 \times 6} = 15^\circ,$$

各相控制绕组的通断电情况，见图1-7。

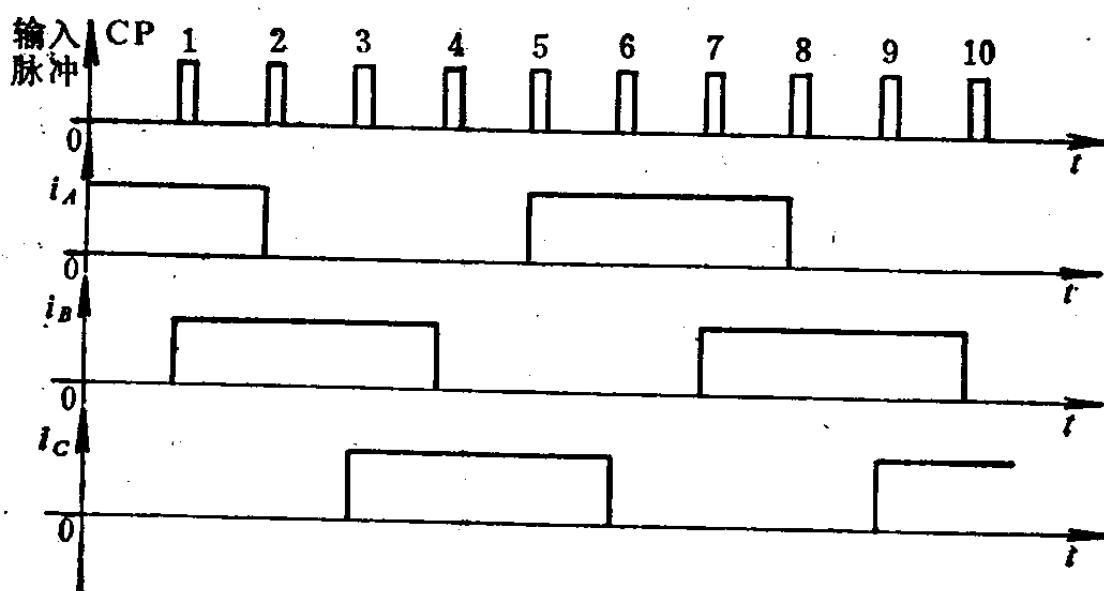


图1-7 “三相六拍”各相绕组通断电波形