



陈理璧编著

步进电动机及其应用

上海科学技术出版社

步进电动机及其应用

陈理璧 编著

上海科学技术出版社

步进电动机及其应用

陈理璧 编著

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所发行 江苏溧水印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 10.75 字数 249,000

1985年6月第1版 1985年6月第1次印刷

印数 1—13,700

统一书号: 15119·2399 定价: 1.70 元

内 容 提 要

本书主要介绍我国自己设计发展的步进电动机的主要特性与特点,重点放在结构、特性与应用。考虑实际应用的需要,对步进电动机的静态、稳态、过渡状态的三基本工作状态作了扼要的阐述,并对电机的各重要参数与动静特性的关系给予较详细的分析,这对了解电机性能和考虑确定应用系统都有一定帮助。此外,有关步进电动机的品种、特点、驱动电源以及维修也都有重点介绍;实际应用方面罗列了40余项实例供读者借鉴。最后附录步进电动机的数学模型,可供有兴趣研究的专业技术人员参考。

本书适合从事步进电动机和自动控制技术的具有中专以上文化水平的技术人员阅读;也可供大专院校专业师生参考。

前 言

我国对步进电动机的研制还是较早的,在五十年代,清华大学、华中工学院和华南工学院就进行了基础研究;此后,上海交大、北京工大、合肥工大等也都先后开展了卓有成效的科研工作。但由于各种原因,发展还是缓慢的,其原因不外乎当时仅以复制国外样机为主,加上实际应用中对这类电机的性能及其应用不甚了解;或由于使用不当而使颇有成果的革新项目被夭折。总之,不能如使用一般交流电动机那样得心应手,运用自如。

本书重点介绍我国自己设计发展的步进电动机的主要特性及特点,以及如何结合这些特性、特点来正确选择、应用电机和考虑系统设计;同时也介绍一些常见故障与维修要点,期望在各领域及各行业应用实践中能有利进一步扩大、普及。因此,本书适合于步进电动机应用单位的操作、管理技术人员,以及对步进电动机有兴趣研究的中级科技工作者;对大专院校电机专业的师生也有点滴参考价值。

本人从事步进电动机的研制工作近 20 年,在设计和推广应用的过程中一直得到有关用户的密切配合和支持,逐步积累了不少资料。因此,本书的酝酿过程是与用户分不开的,一方面用户提供有关步进电动机的使用、维修问题与若干具体经验;另一方面又迫切需要关于步进电动机的特性、特点及其在实际选择、应用方面的资料,这就给了我极大的鼓励与鞭策。

本书在写作过程中,工程师吴创裕同志对第六章部分内容提供了建设性的建议;其他各章的大量文字校订工作是由工程师汝晓中同志帮助完成的;程绮兰同志提供部分外文资料并帮助图稿整校工作,特此一并表示感谢。同时也向各有关用户及其他给予支持的同志表示谢忱。

由于本人水平有限,资料的积累也不一定齐全系统,更因在业余时间断断续续匆忙写成,疏漏和差错之处在所难免,盼望读者予以批评指正。

陈 理 璧 1983 年 10 月 1 日

目 录

第一章 步进电动机的基本型式	1
第一节 总论	1
第二节 螺线管和棘轮型步进电动机	3
第三节 永磁步进电动机	4
第四节 反应式步进电动机	6
第五节 磁路混合式步进电动机	14
第二章 步进电动机的基本工作状态	18
第一节 基本工作状态分类	18
第二节 静态	19
第三节 极限同步状态(连续频率曲线)	20
第四节 非极限同步状态(频率特性曲线)	21
第五节 过渡状态	22
第三章 步进电动机参数的确定与动静特性关系	25
第一节 工作电流的选择	25
第二节 转子直径和铁心有效长度的选择	31
第三节 线路电压的选择	34
第四节 齿数的选择	36
第五节 齿形和齿槽比的选择	36
第六节 磁路分析	45
第七节 绕组的选择	49
第八节 气隙的选择	51
第九节 相数的选择	55
第十节 步进电动机的估算	58
第四章 步进电动机两大特点	64
第一节 振动、噪音及阻尼方法	64
第二节 发热与频率关系	71
第五章 特种步进电动机	75
第一节 特微型永磁步进电动机	75
第二节 机电混合式步进电动机	78
第三节 直线和平面步进电动机	80
第六章 步进电动机驱动电源	84
第一节 驱动电源的组成	84
第二节 环行分配器	85

第三节 功率放大电路	92
第七章 步进电动机应用	99
第一节 同步系统	99
一、独立同步系统	100
(1) 石英钟表(100) (2) 单路电报真迹传真机(101)	
二、高精度同步系统	103
(1) 电子雕花机(103) (2) 齿轮毛坯挤压成形机(104) (3) 钟表游丝、发条成型机(104)	
三、复杂同步系统	104
(1) 超声切面显像仪(104) (2) 激光测距随控系统(105)	
第二节 直线及角位系统	105
一、计算机外部设备的输纸机构	106
二、数控分度头	111
三、自动翻牌机	111
四、数控磨床	112
第三节 点位系统	112
一、精密自动分步重复照相机	112
二、数控钻床	114
三、控制打字机	115
四、自动绕线机	119
第四节 连续轨迹控制系统	119
一、综述	119
二、电火花线切割机床	121
三、数控绘图机	123
四、电子绣花机	125
五、几点说明	126
第五节 其他应用举例	127
(1) 无齿轮变速装置(127) (2) 同步联结装置(127) (3) 加法器(减法器)(128) (4) 乘法器(除法器)(128) (5) 微波天线位置自动控制(128) (6) 函数变换器(128) (7) 压延轧辊间隙控制(128) (8) 脉冲幅度自动测定装置(129) (9) 脉冲宽度自动测定装置(129) (10) 脉冲频率自动测定装置(129) (11) 电阻自动测定装置(129) (12) 换向器自动修刻机(129) (13) 火车飞轮轮面检修机(130) (14) 遥控排油电动机冲程角(130) (15) 轴承自动紧固控制(132) (16) 拉力强度试验机的控制(132) (17) 边缘位置的自动控制(132) (18) 数控点焊机(133) (19) 数控椭圆齿轮成形机(133) (20) 自动跟踪描图机(134) (21) 火焰切割机的自动控制(134) (22) 输送带传动机构的自动控制(134) (23) 彩色胶卷、照片冲洗机(134) (24) 尼龙抽丝盘激光钻孔(135)	
第八章 步进拖动系统的维修	136
第一节 驱动电源的故障分析	136
第二节 步进电动机的故障分析	137
第三节 定子的修理	139
第四节 转子的修理	142
附录 步进电动机的数学模型	144
第一节 引言	144

第二节	一般动态方程式	144
第三节	电磁转矩表达式	147
第四节	旋转物体动力方程式	148
第五节	多定子反应式步进电动机动态模型	148
第六节	磁路混合式步进电动机动态模型	157
第七节	单定子反应式步进电动机动态模型	161

第一章 步进电动机的基本型式

第一节 总 论

自动化技术的发展是现代化和新自动化系统建立的必要条件。由于数字电子计算机的推广应用,自动化技术的研究和详细分析受到特别重视,且与数字系统的结合最为成功。而步进电动机是离散型自动化执行元件,它在系统中能实现下列功能:变换脉冲数为转轴的角位移;起电磁制动轮、电磁差分器、电磁减速器和角位移发生器等作用。

步进装置的类型很多,按其作用原理和结构,原则上可以分为两大类:

第一类:电磁的,即一个绕组的(极少有二个或三个绕组的)电机,且具有旋转的或直线运动的电枢。这里输出轴和电磁电枢之间有机联系,如螺线管和棘轮型步进电动机。

第二类:具有多相绕组,包括具有一相绕组的在内,且定转子之间仅有电磁联系的电机。这种电机其结构类似无触点电机,在旋转部分和不动部分之间没有机械联系,因而具有最好的快速性和可靠性。近年来这种电机在工业上被广泛用来作为状态指示元件、状态伺服元件和功率伺服拖动元件,得到了很快的发展。

本书主要讨论第二类电机及其应用方面的问题。

一、分类

定转子间仅有电磁联系的步进电动机按转子的型式可分为永磁转子(或激磁转子)电机和反应式转子电机,简称永磁式和反应式。前者的转子用永久磁钢制成,或具有通过滑环供以直流电激磁的特殊绕组;后者的转子无绕组,由软磁材料制成,且有显极(齿)。多相控制绕组则放置在定子上,它可以嵌在一个定子上为单定子结构,或嵌在几个定子上成多定子结构。多定子电机的定子数可以等于相数(非共磁路),也可以少于相数(共磁路)。永磁转子或激磁转子电机的相数不超过二相或三相;而反应式转子电机的相数近年来做到五相或六相的,苏联甚至做到八相的。

控制绕组放在一个定子上或多个定子上的电机各有优缺点,各国的观点不同,故结果也有差异。苏联喜欢把永磁电机制成二定子电机,认为它比单定子永磁电机具有更高的起动频率;德国则近来又发展了多(三)相永磁转子步进电动机;美国和日本发展和应用多定子反应式转子步进电动机;我国则不同,走的是另一种路子,重点发展单定子多相步进电动机,以及以它为基础的多定子多相步进电动机,并且均在工业上得到较好的应用。这是因为单定子步进电动机结构简单、便于制造,且能获得较好的性能。

二、电子变换器(亦称电子驱动线路或驱动电源)

步进电动机为了便于控制,不是直接用交流市电,而是用控制脉冲(单一码),于是不能形成连续的旋转磁场。为了使电机能旋转或步进,就要形成旋转磁场,这就必须依靠变换器来完成。变换器分机械的和电子的(亦称电子驱动线路),每输入一个控制脉冲,变换器就变换一次,绕组换相,磁场轴线则转过一定的角度。同时在同步转矩的作用下,转子每走完一

个步距角 θ_b ，控制绕组按同方向换接，磁场轴线和转子的旋转都应按严格规定的次序进行。当控制绕组按相反方向换接时，则磁场和转子反转。电子变换器换接控制绕组实际上起整流子和滑环的作用。

事实上，电子变换器不仅对输入的控制脉冲进行逻辑分配，还要把控制讯号的电流按同一形式进行放大，并送入控制绕组，进行激磁。

二相、三相、四相步进电动机的绕组与驱动线路的功放部分接线，以及表明三极管换接次序的电压极性，如图 1-1、图 1-2 和图 1-3 所示。

图中当定子绕组连接成三角形时，图 1-1(b) 的电子变换器接法相当于图 1-1(c) 的机械接法；而当绕组连接呈星形时，图 1-2(a) 的接法相当于图 1-2(b)。若图 1-2(a) 的电子变换器中的三极管串接成 1-2'、2'-3、3-1'；1'-2、2-3'、3'-1 等等，就得到图 1-2(c) 的电压极性图。图 1-2(b) 的机械换向器整流子的扇形绝缘板，为 $\gamma=60^\circ$ 。图 1-2(d) 的电压极性相当于三极管按下列转换次

序：3'-1-2'；1-2'；1-2'-3；2'-3；2'-3-1'；3-1'；3-1'-2；1'-2；1'-2-3'；2-3'；2-3'-1；3'-1；3'-1-2' 等等。如果扇形绝缘板为 $\gamma=30^\circ$ ，那么也可以从机械转换器得到。

有时对每种接线图要区分基本脉冲串和辅助脉冲串。实际上，基本脉冲串是用来建立绕组的对称换接的，这时任一瞬间绕组是处在同一相数电压下。如图 1-1(d)、(e)，图 1-2(c)，图 1-3(b)。而辅助脉冲串则说明绕组的不对称换接，此时在不同时间内处在电压下的相数总会有不同的相数，如图 1-2(d)，图 1-3(c)。

如果控制脉冲从外电源进入（即外变换器），那么步进电动机就处在同步旋转状态。当整流子由别的可调节的电动机拖动时，同样状态可以从机械变换器上得到，此时步进电动机转子将与拖动电机的转子同步旋转。这就是同步联接系统。

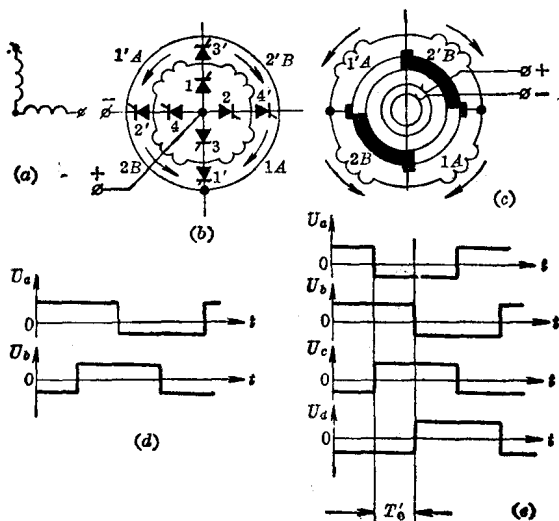


图 1-1 二相步进电动机的驱动电源

(a) 绕组接成星形；(b) 多角形接线；(c) 机械整流器馈电；(d)、(e) 二相绕组均匀磁场时变换器的电压极性

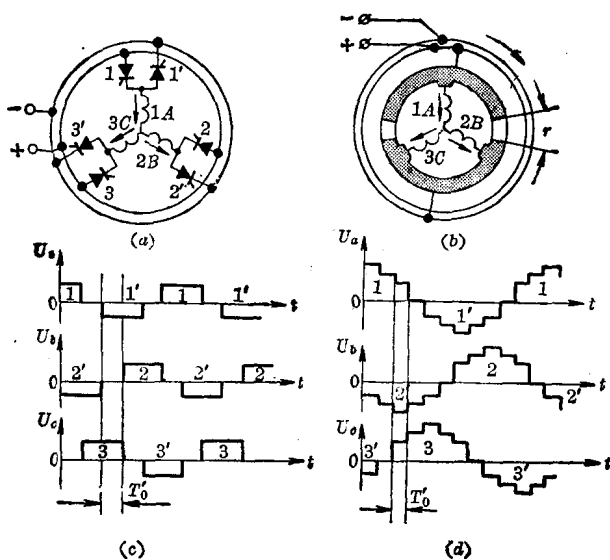


图 1-2 三相步进电动机的驱动电源

(a) 三相电子变换器接线；(b) 机械变换器；(c) 六拍电压极性；(d) 十二拍电压极性

如果脉冲发生器处在电机转轴上(内变换器),那么就得到具有不动电枢的无接触直流电动机了。此时旋转速度则由外加电压决定。如果把旋转板与步进电动机的转子轴联结起来,带有机电变换器的电机将同直流电机一样工作。

因此,在转轴上附有脉冲发生器的步进电动机既可按同步电机状态工作,又可按直流电机状态工作,这取决于进入驱动线路的脉冲是从外程序上来,还是与自动变换器相通。

根据这个原理,则可构成步进拖动的局部闭环系统,即在脉冲发生器电路中接入一可逆计数器。具体是从发生器来的脉冲经过计数器到驱动线路,再到电机,且在计数器内预置了 N 数指令。当系统工作时,使输入的脉冲数不断与计数器中预置 N 数相比较,若输入脉冲数与预置数 N 相等,则驱动线路锁住,电机也停转,电机转子的转角正比于预置数 N 。步进电动机进行起动和工作象直流电机一样;而脉冲选定后的停车是靠不动的磁场来实现的。步进电动机在局部闭环系统里的速度可能大大超过开环,因此仅受刹车状态的条件限制。

三、步距角

转子在空间的单位步距角 θ_s ,是由所有 m 个绕组在一相电压变化周期内转换 k 次和磁极对数 p 所决定

$$\theta_s = 2\pi / kp \quad (1-1)$$

所有绕组同时换接理解为一拍,在电流达稳定值时磁场轴线在空间将旋转一定的角度。因此,在计算 k 时,每当 n 个控制绕组同时换接应认为是一拍。若换接的绕组不与相数一致,那么所有 m 个绕组换接的总拍数 $k = k'm$, 这里 k' 是一个绕组在电压变化的周期内换接的次数。因此, k 表明在电压变化的周期内步进电动机的电磁状态数。在 k 拍下转子在空间移动二倍极角度。

所以根据电压极性图可决定驱动线路的拍数。例如:图 1-1(d)、(e)均为四拍;图 1-2(c)、(d)为六、十二拍;图 1-3(b)、(c)为四拍和八拍。

转子步距角 θ_s 和旋转角度 θ 化成电角度,则与一般电机相同,等于极对数乘以空间角度值

$$\begin{aligned} \theta &= \theta_s p = 2\pi / k \\ \theta &= n \theta_s p = 2\pi np / k \end{aligned} \quad (1-2)$$

第二节 螺线管和棘轮型步进电动机

这种步进电动机属于第一类的,电磁型的,是步进电动机的锥型。它仅靠电磁作用还不能使电机转子产生步进运动,必需加装相应的机械装置,才能使转子获得步进转动的能力。

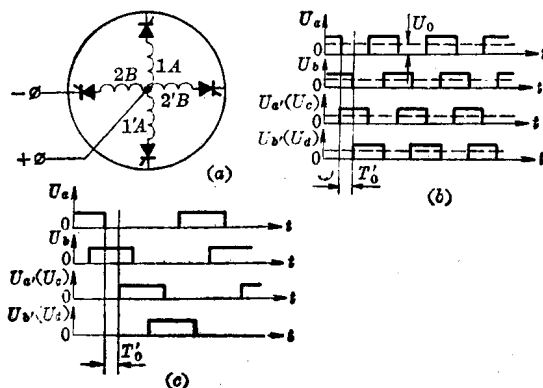


图 1-3 二相和四相步进电动机的单极性脉冲电源
(a) 绕组接线; (b) 四拍电压极性; (c) 八拍电压极性

螺线管和棘轮型步进电动机用许多不同型式的开关和执行器,通过螺线管作用的原理产生步进运动。一台螺线管棘轮型步进电动机通常由用弹簧复位的螺线管,以及棘爪和棘

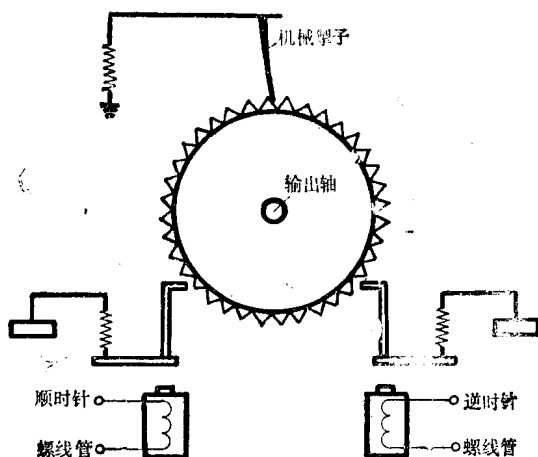


图 1-4 双向旋转的棘轮型步进电动机结构原理示意图

轮等组成,其简单构成原理如图 1-4 所示。其实这样的装置并不是真正的步进电动机,因为它不象一般电机那样按电磁原理来运行的。

图中所示的是能正反两个方向旋转的,因而有二套推动棘轮的装置,但它们不能同时工作。工作时,线圈每激磁一次,棘轮被推动一次,同时转轴由螺管推前一步,然后由棘爪定位在一定位置上。不过,许多螺线管型的步进电动机都是只能单向前进的简单结构。由于机械部分的限制和线圈影响,电机不可能高速步进。

因此,这种步进电动机仅能在性能要求不高的地方,它的优点是:静态同步力矩高;能抗振动和过冲击;价廉。它的缺点是:步进速率低;机械结构限制了寿命。

第三节 永磁步进电动机

下面介绍的是第二类型的。永磁步进电动机也称永磁转子型步进电动机,它也包括激磁转子型,苏联统称为有效转子型。理论上可以制成多相,实际上则以一相或二相为多,近来也有制成三相的。

一、单定子结构

单定子一相、二相和三相步进电动机结构的横剖面如图 1-5 所示。

单定子永磁步进电动机的这些结构不同于有集中绕组的同步电机,一般在定子上布置了 m 相控制的集中绕组,定子齿数 $N_s = 2mp$, 即比转子极数大 m 倍。步进电动机绕组节距 $y = m$ (m 为相数)。

电机转子激磁通常由永久磁钢来完成。激磁绕组转子可以近似地认为,绕组空间和激磁绕组磁动势在恒定电流密度时正比于直径平方,而永久磁钢的磁动势近似地认为正比于直径的一次方。当转子直径减小时,转子齿层的利用率增加了。随着转子齿层利用率的提高,就可能减小转子直径来得到电动机最高的起动频率。因此,在设计时最好取具有最大单位磁能积的硬磁合金管状结构。目前,这种合金暂时只能制成简单的几何形状,随着工艺的进步和使用需要,可生产星形转子结构,或采用拼块粘接结构把磁钢粘合在转轴上。当然最简单的转子可由铁磁性能差一点的材料制成,不过电机的起动频率也将相应低一些。

具有电枢绕组的激磁转子型电机用于二相或三相。其相数和换接相数则受变换器的复杂程度限制,一般希望采用只能建立最简单的矩形电压脉冲形式的变换器。

图 1-1(a)、(d) 指出了二相步进电动机的绕组和基本脉冲串电压极性。当绕组以恒定频率 f 换接时,电流瞬时变化建立了磁场的空间离散位移,其平均速度等于频率为

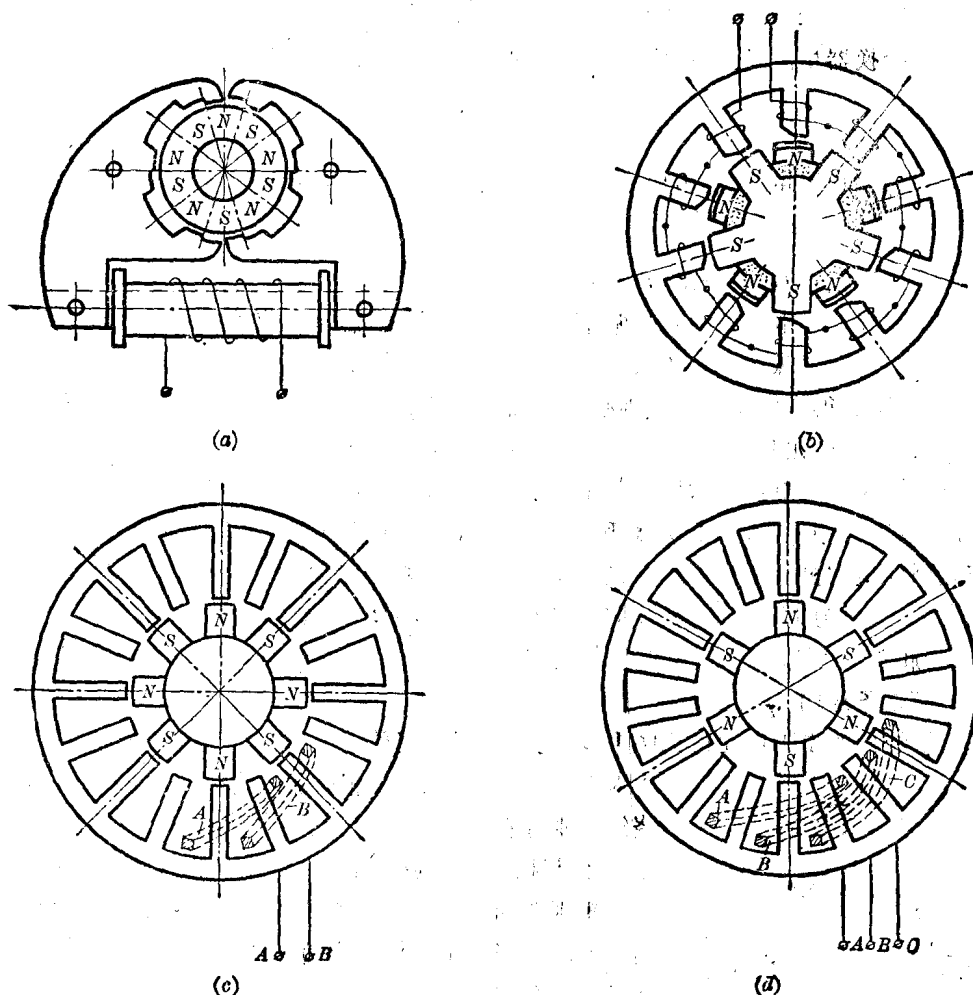


图 1-5 永磁步进电动机单定子结构剖面图

(a)、(b) 单相定向旋转, $\theta_s = 36^\circ$; (c) 二相; (d) 三相

$f_t = f/k$ 的正弦电流的均匀旋转磁场的速度。这种步进电动机与同步电机的不同之处, 仅在于磁场和转子旋转的不均匀性。图 1-1(b) 表示二相绕组电机的线路, 这是实际使用的驱动线路。每相分成二个正对称元件(1A—1'A; 2B—2'B), 而所有元件则按直流电机电枢绕组型式连接成多角形。但当元件连接成星形[见图 1-3(a)], 变换器线路就可简化了(功率元件数成倍减少), 并可用单极性电流脉冲供电给绕组[图 1-3(b)]。此时, 在定子上得到与不同极性系统同样的磁动力, 正如二相不分开绕组的二相电压脉冲系统供电时一样[见图 1-1(a)、(d)]。按照这个原则, 若步距元件等于二, 且具有分相绕组的[见图 1-1(b) 和 1-3(a)]应该是属于二相, 而不是四相。

单极性电压图见图 1-3(b), 可以表示成二个二相双极性图($U_a U_b$ 和 $U'_a U'_b$), 加上所有绕组的常数项 U_0 。电压 U'_a 和 U'_b 相对于 U_a 和 U_b 180° 相位差, 并相似于图 1-1(c) 的电压极性。在 1A、1'A 和 2B、2'B 的绕组里电流常数项的最终磁动力等于零。具有电流常数项的绕组, 与双极性线路里具有同样磁动力的绕组相比, 损耗增加一倍。这是由于这个电流必需减小 $\sqrt{2}$ 倍, 则力矩减小 2 倍, 要保持同样力矩就得加大电流。但是实际上应用的却是单

极性线路,这主要是此时电子变换器可以较简单,因而也更可靠。

在对称变换器里,对具有永磁转子(也包括激磁转子)的步进电动机的拍数等于相数的2倍,且

$$\theta_b = \pi / mp \quad \theta = \pi / m \quad (1-3)$$

在不对称变换器里,单相电压变化一周期内拍数一般增加 a 倍 ($k=2am$), 且

$$\theta_b = \pi / am p \quad \theta = \pi / am \quad (1-4)$$

式中: a ——具有各种连接绕组数的线路状态数。

对于二相和三相电动机的 a 通常不大于 2。此时,虽然转轴速度和电动机功率仍不变,但单位步距角与基本脉冲串相比减少到一半,而频率却提高约一倍。

因此,为了获得小单位步距角则必需增加极对数 p 。通常,这在永磁或激磁转子电动机会产生很大的困难,尤其是在这些电动机的单定子结构中更是如此。当时间常数不变时,步进电动机的快速性由电机的惯性矩大小所决定,就是在给定负载转矩下选用尽量小的转子直径。因此,定子孔径、最大极对数和最小步距角受最小的齿高和齿宽所限制,而最小的齿高和齿宽则要根据机械强度和损耗条件来定。所以,单定子电动机的 θ_b 角相对于基本脉冲串是较大的,一般为 $15 \sim 45^\circ$, 其相应的极对数 p 为 $6 \sim 2$ 。若要继续减小 θ_b , 只能依靠增加 p , 亦即增加转子直径,这样就又损失了快速性。

二、两定子结构

二定子结构的步进电动机见图 1-6, 它不同于二相单定子结构。这种结构是在一个机

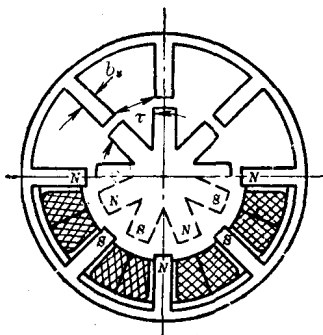


图 1-6 步进电动机二定子结构

壳内有二个定子,且在一根转轴上有二个星形转子,而二相绕组分别处在各自独立的定子上。每相又可以分成二个半相。相与相之间的磁路无关——非共磁路型,而公共轴上的力矩则迭加。转矩相位差是依靠定子铁心间的错位或同轴星形转子间的半个极分度而形成的。图 1-6 的分划线表出了第 2 个转子相对于定子的位置。这种结构的电动机,其绕组是集成的(节距 $y=1$, $\theta_b = \frac{\pi}{N_s}$), 齿数 $N_s = 2p$, 亦即定子是每极一齿。

与单定子结构相比,其 N_s 多一倍。若按最小定子齿宽来设计电动机时,则可减小定子内孔,或增加极对数,或减小单位步距角。因此,二定子电动机有较高的起动频率。但是其轴向长度却增加了,而且在减小外径时还要加长轴向长度,这将使制造工艺变得复杂。

其驱动线路和电压极性同单定子结构一样。

大功率的步进电动机一般采用激磁转子结构,此时驱动线路也要复杂一些。

第四节 反应式步进电动机

反应式步进电动机由于其结构简单和经久耐用,所以是目前应用最普及的一种步进电动机。这种电动机按变磁阻原理工作,于是有的国家又称之为变磁阻步进电动机。

其优点是: 力矩-惯性比高; 步进频率高; 频率响应快; 不通电时转子能自由转动; 机械

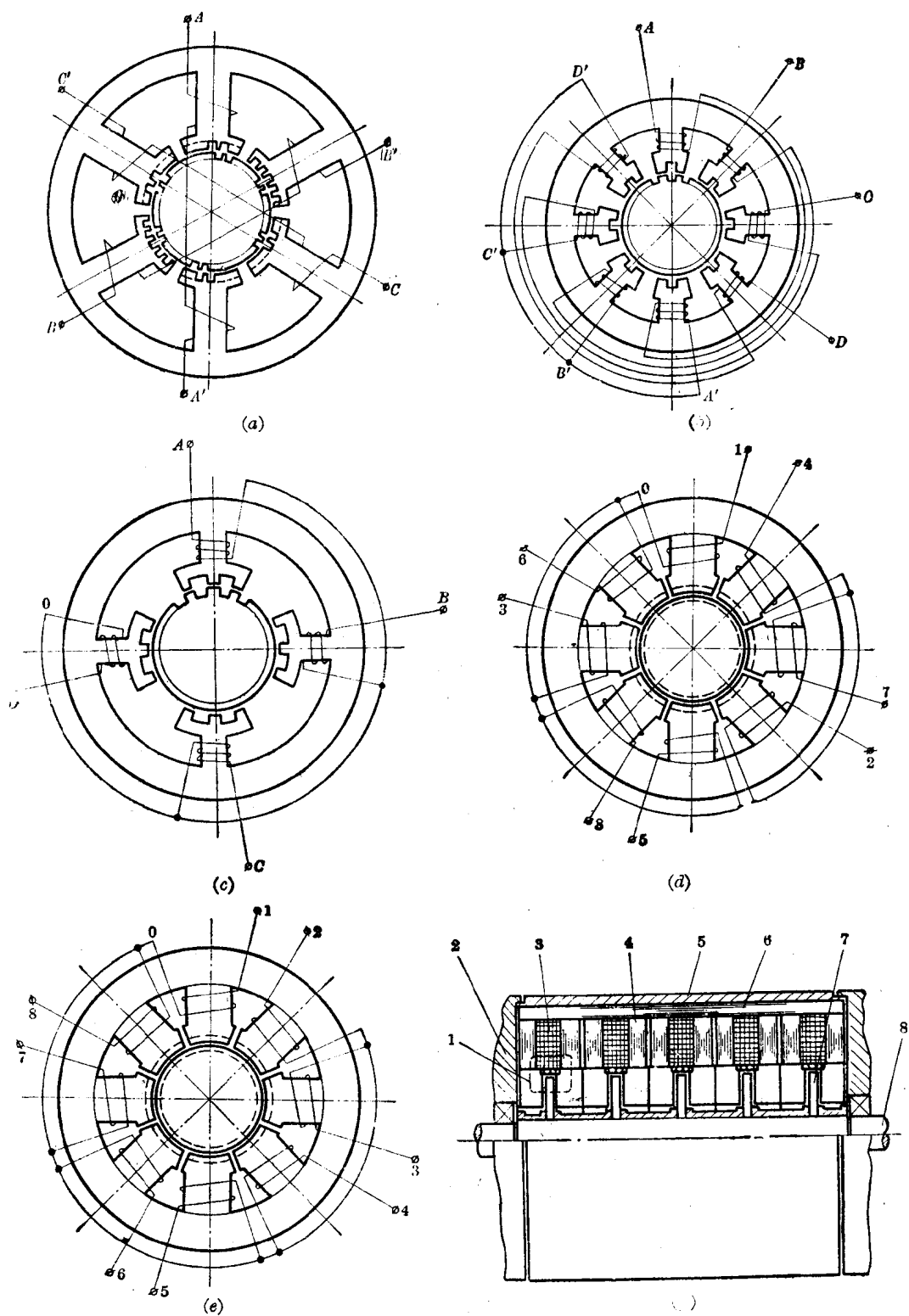


图 1-7 反应式步进电动机结构图

(a) 三相; (b) 四相对称磁路; (c) 四相不对称磁路; (d) 具有小单边力八相;
 (e) 具有大单边力八相; (f) 多定子五相反应式轴向分相

结构简单、寿命长;能双向旋转;有适量阻尼;正常电机无失步区。缺点是:不通电时无定位力矩;每步有振荡和过冲。

一、结构

反应式步进电动机结构种类繁多,且有共磁路和非共磁路之分。本文重点介绍应用最广泛的共磁路结构的工作原理,其特性和特点将分别在第三章和第四章详细介绍。

反应式步进电动机的结构如图 1-7 所示。

反应式步进电动机一般在定子上嵌有几组控制绕组,每组绕组为一相,但至少要有三相以上,否则不能形成起动力矩。绕组形式为集中绕组,嵌在定子的大极上,每个大极上有多个小齿呈梳状。转子是软磁材料制成的带齿的圆柱体。定子上的小齿和转子齿有相同的分度数,即称为齿距,且齿形相似。定子大极的中心线即齿的中心线或槽的中心线。绕组一般由单极性脉冲供电,可使用基本脉冲串和辅助脉冲串进行换接(相)工作。双极性脉冲供电如图 1-2 所示。

齿距角 θ_z 可由下式表示

$$\theta_z = 2\pi / N_r \quad (1-5)$$

式中: N_r ——转子齿数。

反应式步进电动机的运动是利用电磁力的正切项,它由定转子齿间场的弯曲磁力线的张量而产生的,推动转子进入最大磁导率位置。工作时,气隙磁场可用高次齿谐波来模拟,磁极对数由场的第一次齿谐波所决定,且等于转子齿数 N_r 。所以,转子单位空间步距角为

$$\theta_b = 2\pi / N_r k \quad (1-6)$$

在对称变换绕组时,对于矩形单极性脉冲电压,拍数 k 等于相数 m 。所以

$$\theta_b = 2\pi / N_r m \quad (1-7)$$

在不对称变换绕组时(即辅助脉冲串时), $k = am$, 式中 a 与永磁转子电机一样,取决于各种接入绕组的线路状态数,如细分线路的状态数。一般 $a = 2$,但在细分状态中 a 等于线路的细分数。

定子上的小齿和转子齿可以制成的最小宽度,如 $b_{s,\min} = 0.37 \text{ mm}$,比永磁转子小得多,使能在较小的定子内径上有较多的工作极数,即定子齿数 N_s 。因此,同类机座号的反应式步进电动机的步距角要比永磁转子电机小得多,常用的步距角值为 0.5° 、 0.9° 、 1.0° 、 1.5° 和 1.8° 。

这类步进电动机常被称为减速步进电动机。因为这类电动机的工作原理类似于低速同步电机,就是定子磁场旋转 360° 时,转子步进一个齿距,类似于同步电机定子磁场旋转 360° 时,转子前进定转子齿数差。减速步进电动机的名称常见于苏联有关文献。苏联以四相步进电动机著称,有对称磁路和不对称磁路的结构,并发展了对称和不对称磁路的八相步进电动机。美国也以四相见长,但为了消除电动机的振荡现象,常在转子内放置磁场为轴向的磁钢,以增加阻尼,结构有点象感应子式的同步发电机,故又把该种电机称为感应子式步进电动机,就是目前所谓的混合式,这将在下一节论述。而我国是从三相反应式步进电动机发展起来的,尤其以单定子结构见长,也发展了单定子的四相、五相和六相,以及单定子三相为基础的二定子结构的六相步进电动机,也有多定子结构。

二、工作原理

这里仅以单定子三相反应式步进电动机为例。

转子有 40 个齿, 定子有六个等分的大磁极, 极上嵌有集中绕组, 二个相对的极组成一相, 其绕组接成 N-S 极 [见图 1-7(a)]。根据式 (1-5) 得知, 其齿距角为

$$\theta_z = 2\pi/N_r = 2\pi/40 = 9^\circ$$

(1) 单三拍工作方式

这是构成最简单的基本脉冲串, 即 A、B、C、A…。按这种方式运行时, 电动机在任一瞬间都是一相绕组处于一相电压下。

在三对极中任选一对极为 A 相, 通电激励后即建立以 A-A' 为轴线的磁场, 该磁场通过由定转子所组成的磁路, 并使转子齿在磁场力的作用下与定子齿对齐 (见图 1-8)。此时与 A 相相隔 60° 的极上, 其小齿与转子齿错开 $60^\circ/9^\circ = 6\frac{2}{3}$, 即错开 $2/3$ 齿距。而相隔 120° 的极上小齿与转子齿错开了 $120^\circ/9^\circ = 13\frac{1}{3}$, 即错开 $1/3$ 齿距。其 A 相定子齿与转子齿对齐的情形从图 1-8 可见, 而其具体磁路则如图 1-9(a) 所示。因此, 可以确定与 A 相相隔 120° 的极就是 B 相。同理与 B 相相隔 120° 的极就是 C 相。接着, 在 A 相切断的同时 B 相接通, 即所谓换接, 建立了以 B-B' 为轴线的磁场。此时转子齿在磁场作用下与 B 相定子齿对齐, 而其磁路分布见图 1-9(c)。此时, 转子齿相对于 A 相定子齿移前 $1/3$ 齿距, 即 3° 前进了一步。同理, 当 B 相通电换接为 C 相通电时磁路见图 1-9(e)], 转子齿相对于 B 相齿前进了一步, 即 $1/3$ 齿距, 而相对于 A 相定子齿则前移了 $1/3 + 1/3 = 2/3$ 齿距, 即 6° 。最后, 当 C 相通电换接为 A 相通电时, 转子齿又与 A 相定子齿对齐。此时, 转子齿对 C 相定子齿前移了 $1/3$ 齿距, 而对 A 相定子齿来说, 则前移了 $1/3 + 1/3 + 1/3 = 1$ 个齿距, 即 9° 。

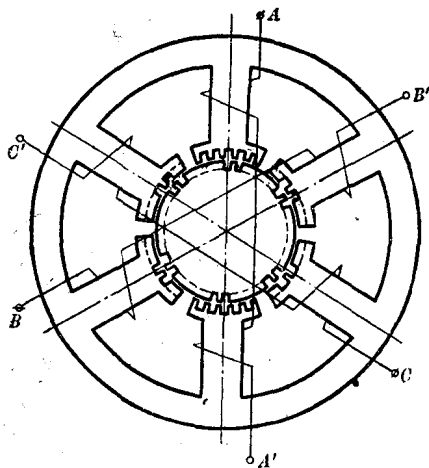


图 1-8 A 相通电定转子对齐情况

总之, 通电方式为 A-B-C-A, 电流切换三次, 磁场旋转一周, 转子则前进了一个齿距角。每次切换后, 转子齿都与定子齿对齐。这种通电方式就称单三拍。

电流切换一次转子移动的角度称为空间单位步距角, 简称步距角或步距 (以 θ_b 表示), 为齿距角的 $1/m$, m 为相数, 亦即切换次数与相数相等时,

$$\theta_b = \theta_z / m \quad (1-8)$$

代入公式 (1-6) 即得

$$\theta_b = 2\pi / mN_r \quad (1-9)$$

式中 $m=k$, 因此, 此种线路只要单极性的就行了。

(2) 六拍工作方式

若换一种通电方式, 即采用辅助脉冲串。第一次 A 相通电, 转子齿与 A 相定子齿对齐, 磁路如前一样见图 1-9(a); 第二次 A 相继续通电, 再接通 B 相, 建立以 B-B' 为轴线的磁场。此时, A、B 二相所建立的磁场合成以 C'-C 为轴线的合成磁场, 见图 1-9(b)。但是这与 C'-C 的磁场有区别, 仅是一种假想的轴线。因为此时在 C'-C 极上并无磁力线通过, 而是集中在 A、B 相的四个磁极下, 故磁场合力是垂直于 C'-C 轴线上, 所以转子齿既不对正 A 相, 也不对正 B 相, 而是对正 A、B 二极轴线的角等分线上, 致使转子齿相对于 A 相定子