

步进电动机 及其驱动控制系统

刘宝廷 程树康 等编著



哈尔滨工业大学出版社

步进电动机及其驱动控制系统

刘宝廷 程树康 等编著

哈尔滨工业大学出版社

内 容 简 介

本书系统地论述步进电动机的结构、工作原理,以及理论研究和工程设计计算方法,给出相应程序和计算实例;介绍步进电动机驱动控制器的原理、相关理论和方法,给出若干实例;介绍相应的测试方法、选择电动机的原则,以及若干应用实例。

本书可作为高等院校电机、自动控制及工业企业自动化等专业的教材和教学参考书,可供有关研究、设计和应用技术人员参考。

步进电动机及其驱动控制系统

Bujindiandongji jiqi Qudongkongzhixitong

刘宝廷 程树康 等编著

*

哈尔滨工业大学出版社出版发行

哈尔滨工业大学印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 20.375 字数 470 千字

1997 年 11 月第 1 版 1997 年 11 月第 1 次印刷

印数 1—4 000

ISBN 7-5603-1268-3/TM·19 定价 25.00 元

前 言

近年来,随着电子器件和永磁材料的发展,步进电动机的研究、生产及应用保持着良好的发展势头,步进电动机系统已成为机电一体化元件和组件中应用广泛、产量较大的一个机种。

本书前四章着重介绍步进电动机的结构类型、特点,以及不同机型的工作原理和线性解析,实用的研究设计计算方法,相关程序和计算实例;第五章至第九章侧重叙述步进电动机驱动控制器的原理,工程设计中的相关技术和方法,并给出实用性的具体实例;第十章至第十二章分别介绍步进电动机的测试技术、选择原则,以及具体应用实例。

书中内容在理论与实际并重的前提下,力求反映国内外最新的技术动态,其中部分内容是作者实际工作中的经验和研究成果的总结。

本书第一章至第四章、第十章至第十二章由程树康、郑萍、崔淑梅、宋凯编写,第五章至第九章由刘宝廷、宋立伟编写。周华完成了电机部分的实例计算,刘洪源完成了驱动控制部分的实例设计。全书由程树康统编。

本书成稿后曾作为本科生和研究生教材试用,付印前又做了必要的修改和充实。籍出版之际,向关心和支持本书出版的师长及同仁表示衷心的感谢。

由于编著者水平和经验所限,书中难免存在疏漏,欢迎指正。

编著者

1997年5月

目 录

第一章 步进电动机概述

- 1-1 步进电动机及其发展 (1)
- 1-2 步进电动机的特点及应用 (1)
- 1-3 步进电动机的类型 (5)

第二章 步进电动机的工作原理及线性解析

- 2-1 三相混合式步进电动机的工作原理及线性解析 (11)
- 2-2 多相混合式步进电动机的工作原理及线性解析 (19)
- 2-3 三相反应式步进电动机的工作原理及线性解析 (21)
- 2-4 永磁步进电动机的工作原理及线性解析 (28)
- 2-5 直线步进电动机的工作原理及线性解析 (32)

第三章 步进电动机的研究设计计算方法

- 3-1 引言 (38)
- 3-2 基于气隙比磁导法的工程计算法 (39)
- 3-3 基于气隙比磁导法的工程计算实例 (40)
- 3-4 齿层比磁导法 (57)
- 3-5 步进电动机磁系统分析示例 (89)

第四章 步进电动机动态特性的基础理论

- 4-1 步进电动机的基本方程 (99)
- 4-2 PM 型和 VR 型步进电动机的动态方程 (100)
- 4-3 步进电动机的传递函数 (104)
- 4-4 过渡响应 (106)
- 4-5 步进电动机的矩频特性 (109)
- 4-6 VR 型步进电动机及其驱动系统的动态模型 (112)
- 4-7 VR 型步进电动机牵出特性的计算 (115)
- 4-8 HB 型步进电动机起动特性的实例计算 (117)

第五章 步进电动机的驱动

- 5-1 步进电动机驱动器 (134)
- 5-2 步进电动机驱动的特点及功率器件的选择 (135)
- 5-3 单电压驱动 (137)
- 5-4 单电压串电阻驱动 (140)
- 5-5 双电压驱动 (142)
- 5-6 高低压驱动 (145)
- 5-7 斩波恒流驱动 (147)

5-8	高压管输入信号的耦合	(150)
5-9	H 桥驱动	(153)
5-10	多相桥驱动	(154)
5-11	升频升压驱动	(156)
5-12	集成模块式驱动器	(157)
5-13	细分驱动	(159)
5-14	续流电路的讨论	(164)
5-15	驱动器的保护电路	(167)
第六章 环形分配器		
6-1	概述	(170)
6-2	三相步进电动机环形分配器 CH250	(171)
6-3	EPROM 在环形分配器中的应用	(172)
6-4	四相步进电动机环形分配器	(173)
6-5	五相混合式步进电动机环形分配器	(177)
6-6	三相混合式步进电动机环形分配器	(179)
6-7	通用环形分配器	(181)
6-8	用小规模电路组成环形分配器	(182)
第七章 驱动器电路实例		
7-1	自激式斩波恒流驱动器线路	(185)
7-2	L297 及 L298 组成的集成模块式驱动器	(192)
7-3	升频升压驱动线路	(198)
第八章 步进电动机微机控制		
8-1	MCS-51 单片机系统	(202)
8-2	单片机系统与步进电动机驱动器之间的接口方法及方向控制	(203)
8-3	用软件实现环形分配器的功能	(207)
8-4	步进电动机的速度控制	(209)
8-5	步进电动机的点-位控制	(210)
8-6	步进电动机的加减速控制	(212)
第九章 步进电动机的闭环控制		
9-1	概述	(217)
9-2	编码器	(218)
9-3	转换角与超前角	(219)
9-4	旋转方向的检测	(220)
9-5	超前角在步进电动机闭环控制中的作用	(221)
9-6	转换角及脉冲注入对四相步进电动机闭环响应的影响	(224)
9-7	步进电动机使用时间延迟反馈的闭环控制	(225)
9-8	步进电动机闭环控制的实验结果	(228)
9-9	采用编码器反馈的闭环点-位控制器	(229)

第十章 步进电动机的测试	
10-1 步进电动机测试技术的发展状况及意义	(233)
10-2 步进电动机的基本测试项目及方法	(233)
10-3 步进电动机测试装置	(241)
10-4 步进电动机测试线路实例	(249)
第十一章 步进电动机的选择方法	
11-1 步进电动机的机械驱动机构	(254)
11-2 负载的估算	(255)
11-3 系统设计常用计算式	(257)
11-4 步进电动机的选择程序	(260)
11-5 步进电动机选择计算实例	(261)
第十二章 步进电动机的应用实例	
12-1 办公自动化机器中的应用	(264)
12-2 计测机器中的应用	(266)
12-3 自动化机器中的应用	(267)
12-4 机器人中的应用	(268)
附录 I 气隙比磁导数据库	(269)
附录 II 齿层比磁导法程序	(277)
附录 III 国内外步进电动机性能示例	(308)
附录 IV 常用功率器件及芯片	(311)
参考文献	(316)

第一章 步进电动机概述

1-1 步进电动机及其发展

步进电动机又称脉冲电动机或阶跃电动机,国外一般称为 Step motor 或 Stepping motor、Pulse motor、Stepper servo、Stepper,等等。

目前,随着电子技术、控制技术以及电动机本体的发展和变化,传统电机分类间的界面越来越模糊。笔者认为这是机电一体化元件组件的必然趋势。就传统的步进电动机来说,步进电动机可以简单地定义为,根据输入的脉冲信号,每改变一次励磁状态就前进一定角度(或长度),若不改变励磁状态则保持一定位置而静止的电动机。从广义上讲,步进电动机是一种受电脉冲信号控制的无刷式直流电动机,也可看作是在一定频率范围内转速与控制脉冲频率同步的同步电动机。

步进电动机的机理是基于最基本的电磁铁作用,其原始模型起源于 1830 年至 1860 年间。1870 年前后开始以控制为目的的尝试,应用于氢弧灯的电极输送机构中。这被认为是最初的步进电动机。此后,在电话自动交换机中广泛使用了步进电动机。不久又在缺乏交流电源的船舶和飞机等独立系统中广泛使用。

20 世纪 60 年代后期,在步进电动机本体方面随着永磁材料的发展,各种实用性步进电动机应运而生,而半导体技术的发展则推进了步进电动机在众多领域的应用。在近 30 年间,步进电动机迅速地发展并成熟起来。从发展趋向来讲,步进电动机已经能与直流电动机、异步电动机,以及同步电动机并列,从而成为电动机的一种基本类型。

我国步进电动机的研究及制造起始于本世纪 50 年代后期。从 50 年代后期到 60 年代后期,主要是高等院校和科研机构为研究一些装置而使用或开发少量产品。这些产品以多段结构三相反应式步进电动机为主。70 年代初期,步进电动机的生产和研究有所突破。除反映在驱动器设计方面的长足进步外,对反应式步进电动机本体的设计研究发展到一个较高水平。70 年代中期至 80 年代中期为成品发展阶段,新品种高性能电动机不断被开发。自 80 年代中期以来,由于对步进电动机精确模型做了大量研究工作,各种混合式步进电动机及驱动器作为产品广泛利用。

1-2 步进电动机的特点及应用

步进电动机是较早实用的典型的机电一体化元件组件。步进电动机本体、步进电动机驱动器和控制器构成步进电动机系统不可分割的三大部分。其系统框图如图 1-1 所示。

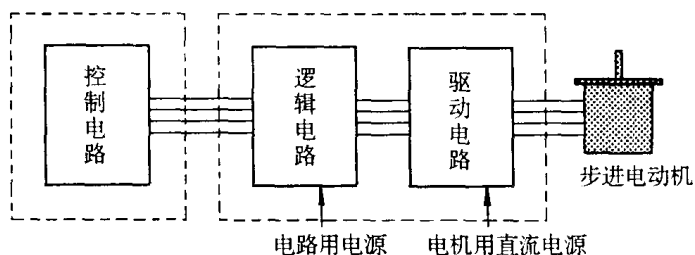


图 1-1 步进电动机系统框图

一、步进电动机的特色

步进电动机具有自身的特色,归纳起来有:

- (1)可以用数字信号直接进行开环控制,整个系统简单廉价。
- (2)位移与输入脉冲信号数相对应,步距误差不长期积累,可以组成结构较为简单而又具有一定精度的开环控制系统,也可在要求更高精度时组成闭环控制系统。
- (3)无刷,电动机本体部件少,可靠性高。
- (4)易于启动、停止、正反转及变速,响应性也好。
- (5)停止时,可有自锁能力。
- (6)步距角选择范围大,可在几十角分至 180° 大范围内选择。在小步距情况下,通常可以在超低速下高转矩稳定运行,通常可以不经减速器直接驱动负载。
- (7)速度可在相当宽范围内平滑调节。同时用一台控制器控制几台步进电动机可使它们完全同步运行。
- (8)步进电动机带惯性负载的能力较差。
- (9)由于存在失步和共振,因此步进电动机的加减速方法根据利用状态的不同而复杂化。
- (10)不能直接使用普通的交直流电源驱动。

二、步进电动机的常用术语

1. 步距角

指每给一个电脉冲信号电动机转子所应转过的角度的理论值。步距角

$$\theta_b = \frac{360^\circ}{m_1 z_r} \quad (1-1)$$

式中 z_r ——转子齿数;

m_1 ——运行拍数,通常等于相数或相数的整数倍,即 $m_1 = km$;

m ——电动机相数。

2. 齿距角

相邻两齿中心线间的夹角,通常定子和转子具有相同的齿距角。齿距角

$$\theta_s = \frac{360^\circ}{z_r} \quad (1-2)$$

3. 矩角特性

矩角特性是指不改变各相绕组的通电状态,即一相或几相绕组同时通以直流电流时,电磁转矩与失调角的关系,即 $T = f(\theta)$,如图 1-2 所示。

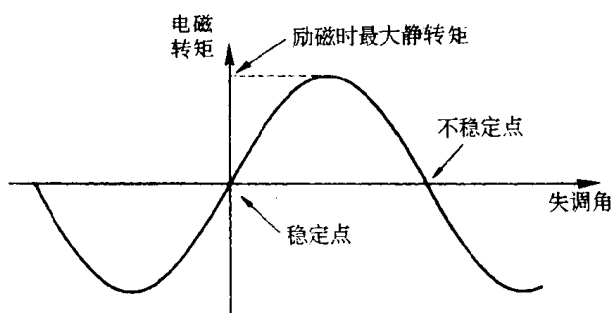


图 1-2 矩角特性

4. 失调角

失调角是指转子偏离零位的角度。

5. 零位或初始稳定平衡位置

指不改变绕组通电状态,转子在理想空载状态下的平衡位置。

6. 最大静转矩

矩角特性上转矩最大值 T_k 称为最大静转矩。

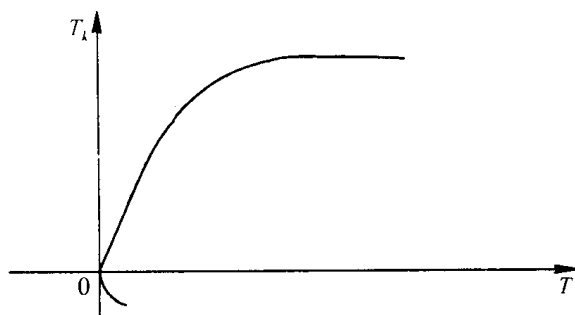


图 1-3 最大静转矩特性

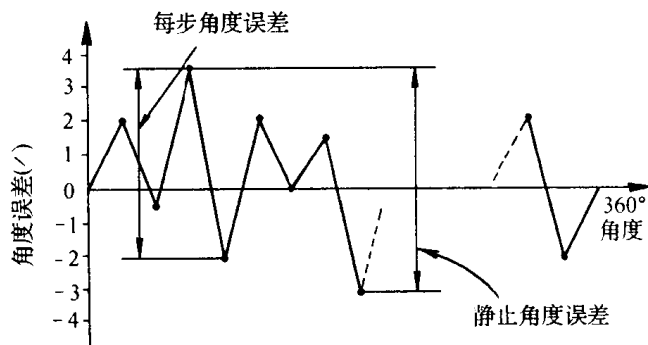
7. 最大静转矩特性

绕组电流改变时,最大静转矩与相应电流的关系 $T_k = f(I)$ 为最大静转矩特性,如图 1-3 所示。

8. 精度

步进电动机的精度有二种表示方法,一种用步距误差最大值来表示,另一种用步距累计误差最大值来表示。

最大步距误差是指电动机旋转一周内相邻两步之间最大步距和理想步距角的差值,用理想步距的百分数表示。

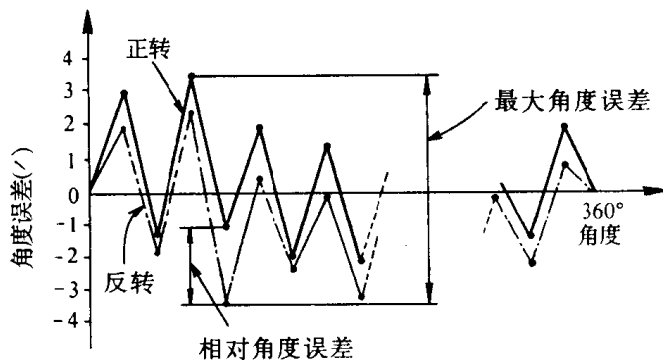


(a)

最大累计误差是指任意位置开始经过任意步之间,角位移误差的最大值,如图 1-4 所示。

9. 响应频率

在某一频率范围内步进电动机可以任意运行而不会丢失一步,则这一最大频率称为响应频率。通常用起动频率 f_s 来作为衡量的指标。它是指在一定负载下直接起动而不失步的极限频率,称为极限起



(b)

图 1-4 角度误差

动频率或突跳频率。

10. 运行频率

指拖动一定负载使频率连续上升时,步进电动机能不失步运行的极限频率。

11. 起动矩频特性

在给定的驱动条件下,负载惯量一定时,起动频率与负载转矩之间的关系称为起动矩频特性,又称牵入特性。

12. 运行矩频特性

在负载惯量不变时,运行频率与负载转矩之间的关系称为运行矩频特性,又称牵出特性。矩频特性如图 1-5 所示。

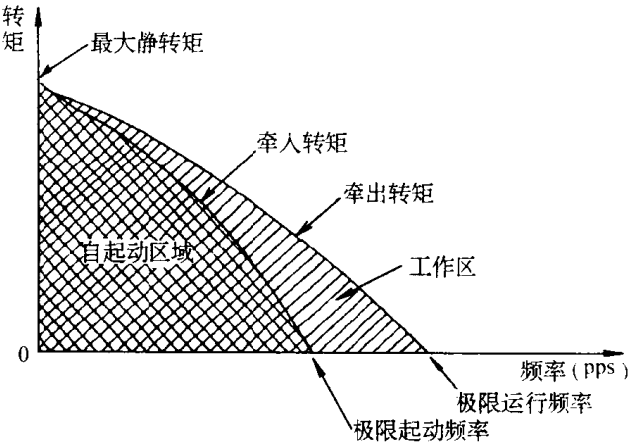


图 1-5 矩频特性

13. 惯频特性

在负载力矩一定时,频率和负载惯量之间的关系,称为惯频特性。惯频特性分为起动惯频特性和运行惯频特性。如图 1-6 所示。

14. 单步响应

单步响应是指步进电动机在带电不动的情况下,改变一次脉冲电压,转子由起动到停止的运动轨迹,如图 1-7 所示。

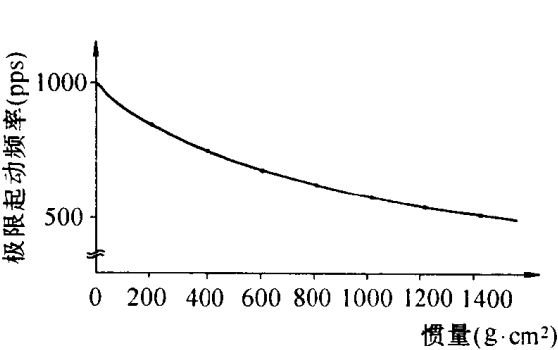


图 1-6 惯频特性

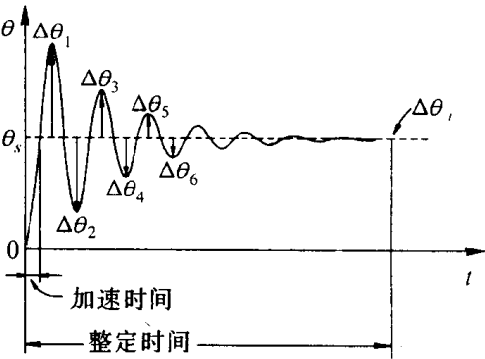


图 1-7 单步响应

三、应 用

自本世纪中叶,步进电动机的应用渗透到数字控制的各个领域,尤其在 NC(数控)机械中广泛利用其开环控制的特点。近十几年来,步进电动机在 OA 机器(Office Automation)、FA 机器(Factory Automation)和计算机外部设备等领域作为控制用电动机和驱动用电动机而被广泛使用。图 1-8 是一份精密小型电动机生产量的统计图表,从中可

可以看出步进电动机在精密小型电动机中是一种应用最为广泛的机种。

步进电动机典型的应用见表 1-1。

步进电动机的性能主要由静转矩、动转矩和角度精度来评价,但应用场合不同则对其性能要求各异。比如,打印机和传真机用电动机主要重视转矩,而 FDD(Floppy Disk Drive) 和 HDD (Hard Disk Drive) 用电动机则更重视角度精度。

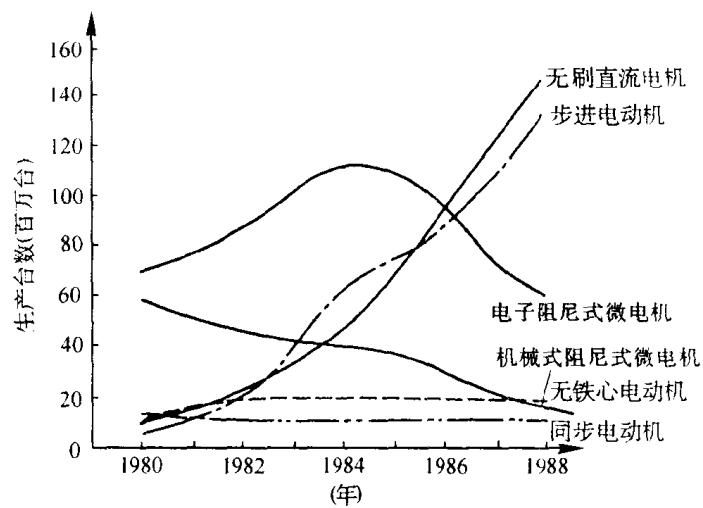


图 1-8 精密小型电动机生产量示例

表 1-1 典型应用

计算机外设	磁盘驱动	HB,PM
	磁头驱动	HB,PM 直线
	打印机	HB,PM
	XY 绘图仪	HB,PM 直线
事务机器	复印机	HB,PM
	传真机	
工业计测仪器	记录仪	HB,PM, VR
工作机械	数控机床	HB,VR
	机器人	

1-3 步进电动机的类型

从广义上讲,步进电动机的类型分为机械式、电磁式和组合式三大类型。按定义本书仅介绍电磁式步进电动机。

从结构特点进行分类,一般常使用的电磁式步进电动机主要有表 1-2 所示的类型。在小型电动机中,一般多段结构型式较少采用,绕组形式多为圆周分布型和轴向环形线圈型。图 1-9 是 VR 型多段结构轴向环形线圈型示意图。图 1-10 是 VR 型多段圆周分布

表 1-2 主要结构类型

旋转电机	反应式步进电动机 (VR 型)
	永磁式步进电动机 (PM 型)
	混合式步进电动机 (HB 型)
直线电机	VR 型
	PM 型
	HB 型

绕组型示意图。图 1-11 为 PM 型环形线圈电动机结构示意图。图 1-12 是 VR 型直线电动机示意图。如前所述,步进电动机种类繁多,本节就其中典型的几种电动机结构,即 VR 型、PM 型、HB 型和直线 PM 型加以说明。

1. HB 型步进电动机的结构(Hybrid)

HB 型步进电动机从构造来看由定子部件、转子部件、机壳和端盖四部分组成,如图 1-13 所示。

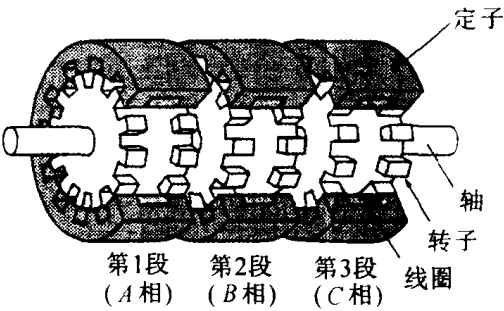


图 1-9 VR 型多段环形线圈结构

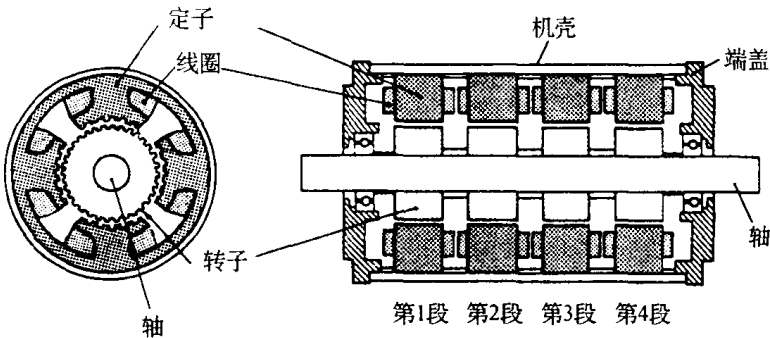


图 1-10 VR 型多段分布绕组结构

(1) 定子部件

定子部件包括定子铁心、绕组和绝缘材料。一般定子铁心使用无方向性硅钢片叠压而成。硅钢片的厚度从损耗及冷加工性出发多采用 0.5mm 和 0.35mm 厚的材料。从减小冷加工时内径误差以求得较高尺寸精度,以及从损耗和加工性来看,采用高性能硅钢片为好,但这也使价格增高。

定子铁心上有若干大极齿,在每个大极齿上设计有若干小齿,如图 1-13 所示。

在相邻大极齿的槽内放置绕组,大批量生产时,通常由自动绕线机直接绕制。在

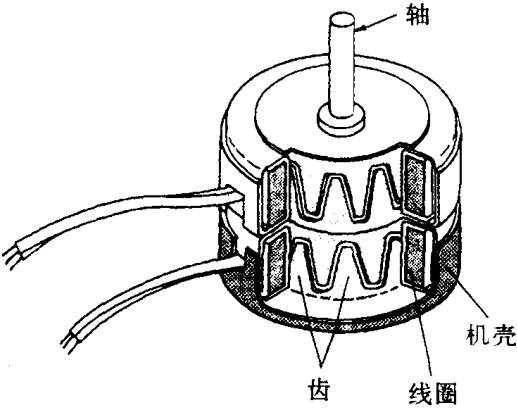


图 1-11 PM 型环形线圈结构

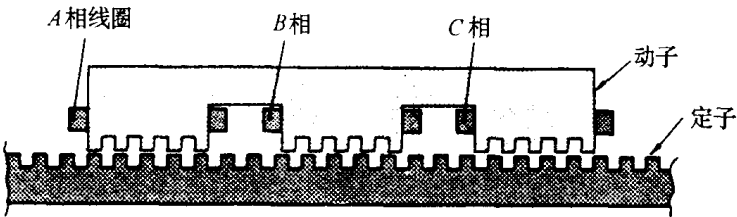


图 1-12 VR 型直线步进电动机

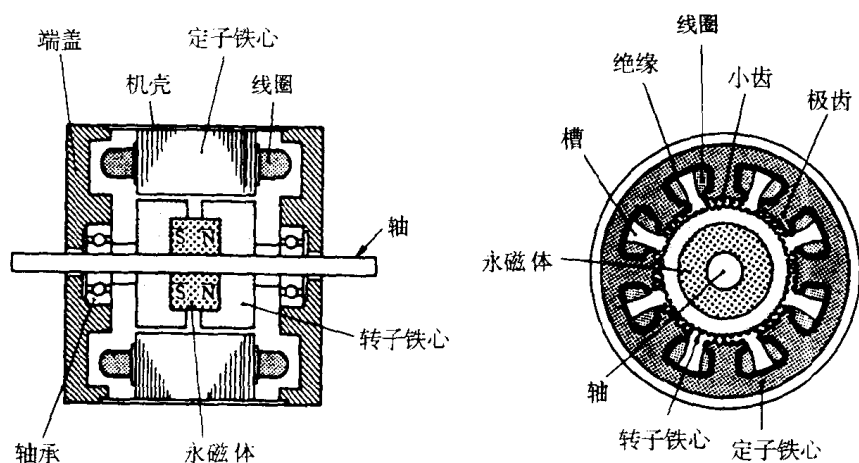


图 1-13 HB 型步进电动机结构示意图

槽内放置槽绝缘,以保护线圈。

(2) 转子部件

转子部件由转子铁心、永磁材料和轴组成。转子铁心通常使用硅钢片,也有使用块状电工钢或粉末冶金材料的。使用硅钢片时其加工制造方法和定子铁心相同,需采用冷冲压后叠压成型。转子铁心必须选用磁损耗小的材料。块状电工钢的导磁性较好,但齿的加工量较大。使用粉末冶金材料时,由于可使用模具烧结成型,造价相对要低,但由于这种材料的饱和磁密一般在 $1.2 \sim 1.3 \text{ T}$,所以磁密不能设置过高。

如图 1-14 所示,该种电动机的转子铁心分为二个部分,二端的铁心相差 $\frac{1}{2}$ 个齿距装配而成。永磁材料如图 1-13 所示为轴向充磁的圆环形。一般使用铝镍钴、稀土钴或钕铁硼材质,性能上有余量时可使用廉价的铁氧体材料。

转子轴应根据转子铁心自重、轴端受力以及磁拉力等因素来决定。通常使用不导磁的不锈钢材料。

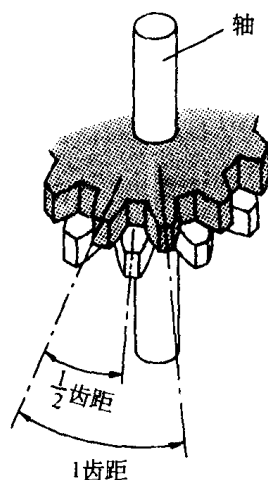


图 1-14 转子示意图

(3) 机壳

机壳的作用有三个,即加强电机的刚度、保护电机和构成定子铁心的部分磁路。一般由铁磁材料做成圆筒形,表面防锈处理。机壳二端和端盖配合部应精加工到配合尺寸。

(4) 端盖

端盖起支撑转子保证气隙的作用。一般使用铝合金或粉末冶金材料,用模具一次成型。同样,为保证小气隙的要求,对机械加工的同心度、椭圆度等应予足够重视。

2. VR 型步进电动机结构(Variable Reluctance)

VR 型步进电动机的结构与 HB 型类似,如图 1-15 所示。其不同之处是转子铁心为一

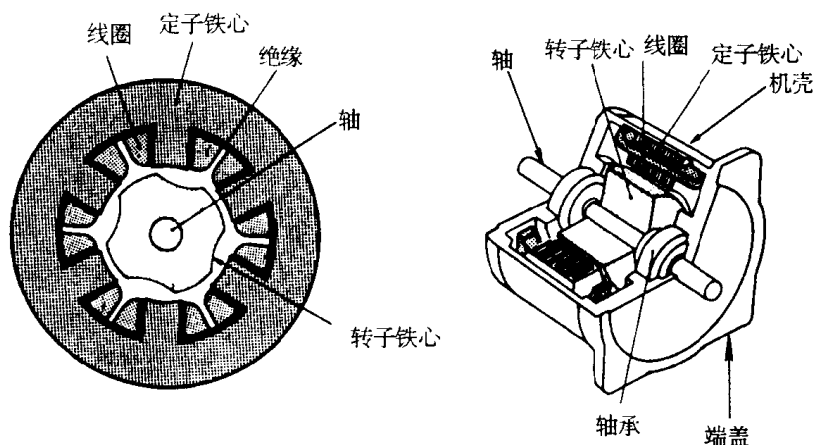


图 1-15 VR 型步进电动机结构示意图

个铁心,不分割为二块,同时转子上不使用永磁材料。其材料和制造方法和 HB 型相同。

3. PM 型步进电动机(Permanent Magnet)

图 1-16 是 PM 型电动机的示意图。其转子由永磁材料和轴组成,转子上没有 HB 型步进电动机那样的齿。永磁材料圆周方向充磁。材料一般使用铁氧体和铝镍钴居多。通常为大步距步进电动机。使用铁氧体时多为每步 7.5° 和 15° ,使用铝镍钴时常为每步 45° 和 90° 。

4. PM 型直线步进电动机

PM 型直线步进电动机由固定子和可动子二部分组成,这种结构的电动机因永磁材料的形状和配置、线圈的位置等有不同种类。比较典型而且结构简单的电动机示意如图 1-17。

其定子铁心形成主磁路,相当于把旋转型 VR 或 HB 电动机的定子铁心在一维空间展开。其可动子由励磁线圈以及形成永磁材料和主要磁路的铁心组成,完成直线运行。

5. 单相步进电动机

这种步进电动机在仪器仪表中被广泛使用,近年来,以单相永磁步进电动机的发展最为显著。其特点是:

- (1) 结构简单,成本低。
- (2) 易小型化、微型化。

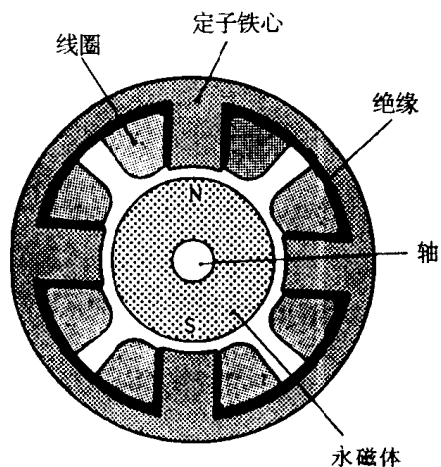


图 1-16 PM 型步进电动机示意图

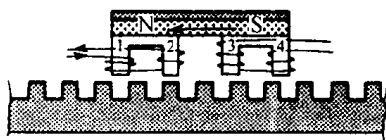


图 1-17 PM 型直线步进电动机

(3) 驱动电路简单。

(4) 工作电压可以很低,平均耗电量小。

图 1-18 是双偏心一对极单相永磁步进电动机结构示意图,由高导磁材料制成的定子铁心、沿径向磁化成一对极永磁转子以及励磁线圈所组成。图 1-19 是凹坑式单相永磁步进电动机。

上述单相永磁步进电动机的步距角均为 180° ,也可以将转子充磁为多对极,其步距角可以成倍地减小。图 1-20 为三对极的单相永磁步进电动机。

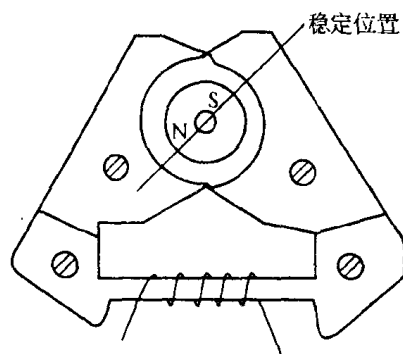


图 1-18 双偏心单相永磁步进电动机

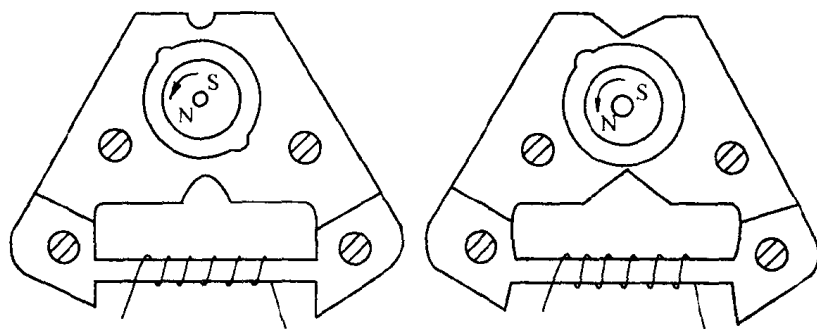
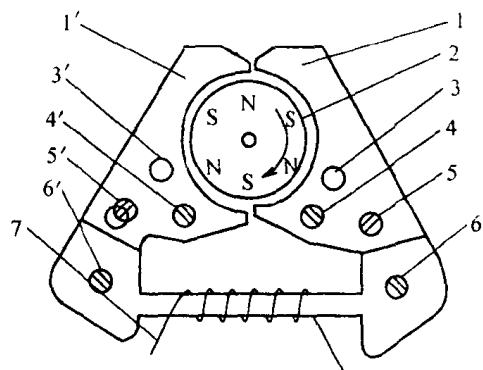


图 1-19 凹坑式单相永磁步进电动机



1,1'—定子铁心;2—转子永磁体;3,3'—定子回转中心销钉;4,4'—定子固定螺钉;5,5'—偏心调节销钉;6,6'—线圈铁心固定螺钉;7—线圈

图 1-20 三对极双偏心可调的单相永磁步进电动机

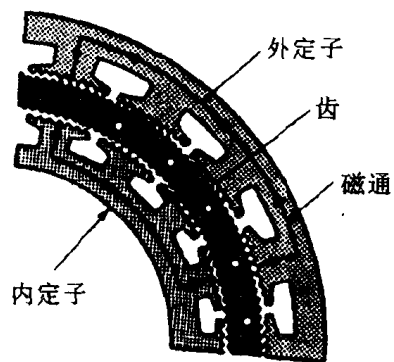


图 1-21 双气隙杯形转子 VR 型步进电动机

6. 其它结构的步进电动机

近来,作为步进电动机的一种技术动向,是追求高转矩和控制的高精度化,因而相继出现了一些新结构电机。多重定转子结构即为其中之一。图 1-21 是双气隙杯形转子 VR 型电动机示意图。这种电动机的结构特点是在转子内外圆二侧均设置定子,以得到更大的转矩,一般和位置传感器配合使用,构成闭环控制系统,是一种理想的直接驱动电动机,也可作为高转矩步进电动机使用。