

直线步进电动机 的原理控制和应用

丁志刚 编著

SN



SN

机械工业出版社

直线步进电动机的原理控制和应用

丁志刚 编著



机械工业出版社

北京 1994

(京)新登字 054 号

内 容 提 要

本书首先深入浅出地介绍了各种直线步进电动机的结构、工作原理以及它们的静态和动态运行特性。然后介绍有关它们的逻辑控制线路和单片机控制。最后详细地介绍了它们的应用实例。这些应用实例都是作者在科研和开发应用产品中优选出来的。读者可以按书中所给的实例数据进行仿制。也可以作为设计新直线步进电动机应用系统可信赖的参考资料。

本书的特点是:起点较低,非本行的科技人员也能够自学成才。但有些理论分析却是当今世界行家都公认是最新的,水平不低。这将有助于电工科技界的行家们深入探讨这类电动机特性的新发展。本书可作为电机和自动化仪器仪表等专业学生的教科书。对于有志于开发有关高科技产品的工程技术人员也是一本很好的自学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

直线步进电动机的原理控制和应用/丁志刚编著. —北京:

机械工业出版社, 1994. 7

ISBN 7-111-04712-5

I. 直… II. 丁志刚编著 III. 步进电动机
IV. TM559.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 04227 号

出版人:马九荣(北京市百万庄南街一号 邮政编码 100037)

责任编辑:于苏华 李承荫 封面设计:李伟

北京凯通印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1994 年 7 月第 1 版·1994 年 7 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16·7.5 印张·180 千字·120 页

0001—5000 册

定价 10.00 元

前 言

直线步进电动机是一种把电信号直接转换成直线步进运动的驱动装置。给它一个电脉冲,它就会在空间按照指令给定的步距走一步,并准确地锁定在所希望的位置上。

在需要精密直线运动的地方,人们希望有一种高速、高定位精度、高可靠性的数字直线运动随动系统的驱动装置,来代替过去那种间接地由旋转步进电动机,经过一套中间转换机构而得到直线运动的装置。直线步进电动机结构简单,不需要中间转换机构,可动部分重量轻,惯性小,能够做到高速,高可靠性,又没有积累的定位误差,是一种理想的高定位精度的直线运动驱动装置。

近几年来,微电子技术、集成电路和微型计算机的迅速发展,使得直线步进电动机的控制发生了突飞猛进的变化,提高这种直线运动驱动器的运行特性,特别是增加了它的智能性,降低了成本,从而开拓了广泛的应用领域。今天人们可以看到这种直线运动驱动器已经应用到许多工业控制系统中。特别是在计算机外围设备中,已经形成了批量商品。例如美国惠普公司生产的 HP7225A 型和 HP9872A 型 X-Y 绘图仪,IBM 公司生产的一种高速打印机印头驱动以及微型计算机磁盘的磁头驱动都已采用了这种直线运动驱动器。此外,日本和瑞士的 BBC 公司也都早已生产了这种直线运动驱动器。从发展的眼光看,除上述应用领域外,在集成电路制作、晶片元件排列、焊接封装等工业生产流水线上,在智能仪器仪表、智能机械手和机器人中,都需要用到这种高定位精度、高可靠的直线运动驱动器。直线步进电动机很容易和微型计算机相结合,组成各种高科技智能仪器和智能机械手、机器人以及很多智能化电动工具和数控机床设备。因而很容易用它们来构成柔性机械制造加工生产全盘自动化系统(CMIS 系统)。可见直线步进电动机是一种很有发展前途的高科技直线运动驱动装置。

本书首先深入浅出地介绍一下有关直线步进电动机的结构和工作原理以及它们的运行特性,然后介绍和它们有关的控制线路,其中包括一些以微型计算机为控制器核心的开环控制系统和闭环控制系统。并提出了有关设计、制作和应用方面注意的问题,为有关科技人员使用或设计制作有关直线步进电动机及其控制系统打好理论基础。

本书可作为电机和自动化仪器仪表专业学生的教科书,是计算机外围设备制造和维修人员,以及工业生产自动化流水线制作和维修人员的重要参考书。对于有志于开发有关直线运动高科技产品的工程技术人员,也是一本很好的参考书。

目 录

前 言

第一章 直线步进电动机结构和工作原理	(1)
第一节 引言	(1)
第二节 变磁阻式直线步进电动机	(1)
一、结构和工作原理	(1)
二、设计和控制方面的问题	(2)
第三节 混合式直线步进电动机	(3)
一、结构和工作原理	(3)
二、设计和控制方面的问题	(6)
第四节 两种类型直线步进电动机的特性比较和选用	(8)
第二章 直线步进电动机的静态特性	(10)
第一节 静态力移特性和静稳定区	(10)
第二节 力移特性和气隙磁导的关系	(11)
一、气隙磁导分析	(11)
二、力移特性 $F_e = f(x_e)$	(12)
第三节 定位误差分析	(14)
一、负载阻力所引起的位置误差	(14)
二、控制绕组断电时定位误差分析	(15)
三、磁路饱和的影响	(16)
第四节 励磁方案的选择和电机静态特性的关系	(18)
一、变磁阻式步进电动机	(18)
二、混合式步进电动机	(18)
三、微步驱动方案	(19)
第三章 直线步进电动机低速运行特性	(20)
第一节 单脉冲运行分析	(20)
一、动稳定区	(20)
二、起动时电机的最大负载力	(20)
三、自由振荡过程	(21)
第二节 连续脉冲运行分析	(22)
一、低频振荡和机械谐振分析	(23)
二、减小直线步进电动机低频振荡的方法	(24)
第四章 直线步进电动机高速运行特性	(25)
第一节 极限起动速率和极限停止速率	(25)
一、步进电动机的起动过程	(25)
二、极限起动频率的估算	(26)
第二节 极限连续运行频率和电机的极限力速特性	(27)
一、混合式两相步进电动机的力速特性	(28)

二、变磁阻式三相直线步进电动机的力速特性	(31)
第三节 最佳控制	(32)
第五章 直线步进电动机的逻辑控制电路	(34)
第一节 引言	(34)
第二节 逻辑电路的脉冲源	(34)
一、常频脉冲源	(34)
二、有加减速控制功能的脉冲源	(35)
第三节 数字逻辑电路	(37)
第四节 功率驱动器	(40)
一、设计依据	(41)
二、抑制电路	(41)
三、使导通相电流快速增长的过励电路	(43)
第六章 直线步进电动机微机控制系统	(45)
第一节 引言	(45)
第二节 开环控制系统	(47)
一、变磁阻式步进电动机开环控制系统	(47)
二、二相(四相)混合式直线步进电动机微机开环控制系统	(56)
第三节 闭环控制系统	(68)
一、引言	(68)
二、位置控制闭环系统	(68)
三、速度和加速度闭环控制系统	(73)
四、采用电流检测的闭环系统	(79)
第七章 直线步进电动机的应用	(87)
第一节 应用领域	(87)
一、在计算机外围设备中的应用	(87)
二、在数控设备中的应用	(87)
三、在情报设备中的应用	(87)
第二节 直线步进电动机初步设计实例	(88)
一、电机设计的技术要求	(88)
二、主要尺寸的初步估算	(88)
三、磁路计算	(88)
第三节 三相变磁阻式直线步进电动机单片微机控制实例分析	(93)
一、三相步进电机微机控制系统	(93)
二、三相步进电机控制程序设计	(97)
三、三相步进电机最佳运行控制	(100)
第四节 混合式直线步进电动机单片微机控制在X-Y绘图仪中应用实例分析	(106)
一、X-Y绘图仪中的直线步进电机控制系统	(106)
二、程序设计	(109)
参考文献	(114)

第一章 直线步进电动机结构和工作原理

第一节 引言

直线步进电动机是一种电脉冲信号直接转换成微步直线运动的驱动装置。给它一个电脉冲,它就会在空间按照指令给定的步距相应地走一步,并准确地锁定在所希望的位置上。它可将数字脉冲输入转换成模拟输出的直线运动。它是数控系统和计算机控制系统中理想的直线运动驱动元件。直线步进电动机结构简单,可动部分重量轻、惯性小、无漂移、无累积定位误差,在开环控制的条件下,就能够做到高速、高定位精度,是一种理想的高科技直线运动驱动器。

尽管直线步进电动机的设计方案很多,内部几何形状可以是各种各样,但就其工作原理的实质来说,直线步进电动机大致可归纳为两大类型:即变磁阻式直线步进电动机和混合式直线步进电动机。下面将分别介绍它们的结构和工作原理。

第二节 变磁阻式直线步进电动机

一、结构和工作原理

变磁阻式直线步进电动机内部的磁场力,仅由通入各相绕组的脉冲电流产生。这种步进电动机至少有三相绕组。当某一相或两相绕组有脉冲电流通过时,这些相绕组磁势产生的磁通,总是往磁阻最小的路径跑。根据磁力线具有力图缩短磁通路径以减小磁阻增大磁导的本性,电机定、动子之间将存在着一种使磁通通路磁阻尽量变小的倾向磁力,拉着电机动子到达该磁通对应的磁路磁阻最小的位置,因而使电机动子产生步进运动。图 1-1 是三相变磁阻式直线步进电动机的原理结构图。定子部分通常是一条矩形叠片式铁心,上下两边开有很多均匀分布的平行槽。动子是由一对绕有三相绕组的 E 形铁心组成。这两个 E 形铁心,对称地安装在条形定子铁心两边。三相绕组的联接如图 1-1b 所示,被相绕组包围的铁心部分称为电机动子的磁极,每个磁极表面通常开有和定子齿距 τ_1 相同的若干齿槽。动子上三个铁心柱之间的距离称为动子的极距 P_1 ,它和定子齿距 τ_1 之间的关系如图 1-1c 所示,必须满足下列关系式

$$P_1 = (M + \frac{1}{3})\tau_1 \quad (1-1)$$

式中 M —— 任意整数。

当 A 相绕组通入脉冲电流,而其他相绕组电流为零时, A 相铁心柱中的磁通最大,所受的磁力最大,因此电机动子的位置主要由 A 相的磁极齿对齐定子齿的位置来决定。因为此时 A 相磁通对应的磁路磁阻最小。如果三相绕组按 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ 顺序轮流通电励磁时,则动子就以 $\tau_1/3$ 的步距作步进移动。所谓步距,就是每通一次电脉冲,动子在空间移动的距离。每改变一次通电状态,动子就移动一步,俗称运行一拍。如果运行 m 拍后,动子正好移动一个齿距 τ_1 ,则该步进电动机的步距分辨率便为 $R = \tau_1/m$ 。当三相步进电动机以三相三拍制运行时,我们就说它获得 $\tau_1/3$ 的分辨率。若采取 $A \rightarrow (A+B) \rightarrow B \rightarrow (B+C) \rightarrow C \rightarrow (C+A) \rightarrow A$ 的方式顺序通电,此时该电机就可以获得 $\tau_1/6$ 的分辨率。可见提高位移分辨率的办法有: (1) 减小齿距 τ_1 。(2) 增加运行拍数或增加相数。(3) 采用步距细分电路。

图 1-2 是一台四相变磁阻式直线步进电动机。定子部分可以和上述定子结构完全相同,而动子是由四个铁心柱加套上四相绕组组成,各相极之间的距离和定子齿距之间的关系,应遵守

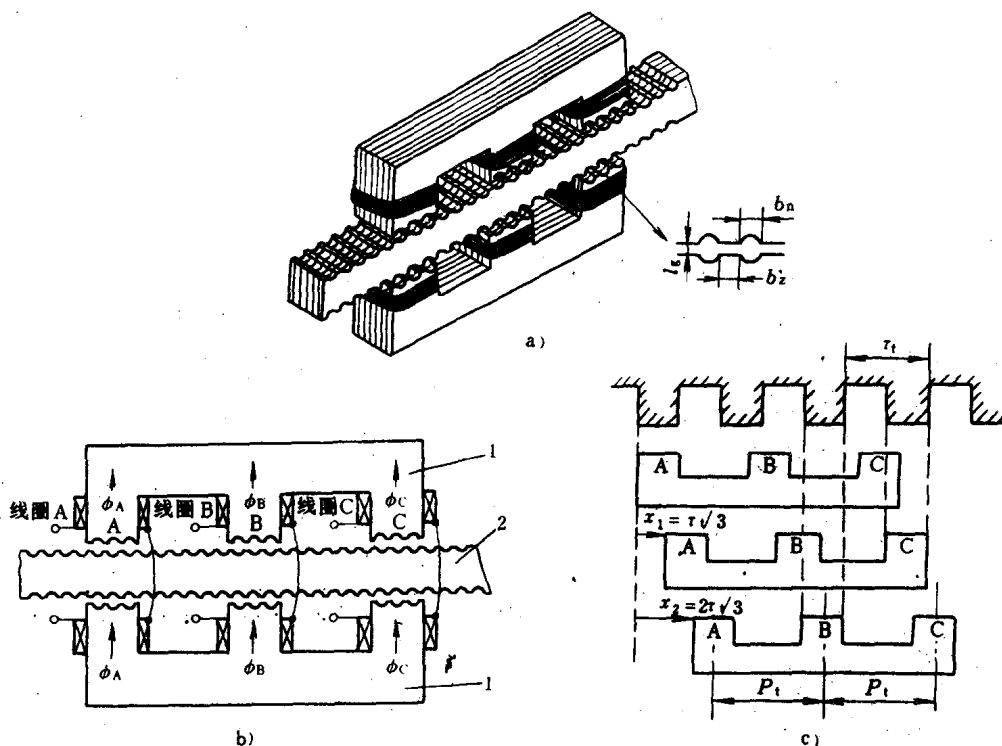


图 1-1 三相变磁阻式直线步进电动机的原理结构

1—动子 2—定子

下式规定,即

$$P_t = (M + \frac{1}{4})\tau_t$$

当该电机作四相八拍运行时,其最小步距为 $\tau_t/8$

如果电机为 m 相绕组,则 $P_t = (M + \frac{1}{m})\tau_t$,而该电机的最小步距为 $1/(2m)$ 可见,同样的定子齿距 τ_t ,电机相数越多,其最小步距越小,步进运动越平稳,但电机驱动电路越复杂,成本越高。

二、设计和控制方面的问题

这种步进电动机的运行性能主要决定于电机的磁场强度。高磁通值能够保证电动机在它的步位上具有高静态力(或稳定力)。有关静态力和场强之间的关系在第二章将有更多的讨论。在这章我们只需要考虑如何能使极磁场强度最大。在定子和动子齿完全对齐的位置上如图 1-1c,这时电机的主磁路的磁阻,是处在它的最小值。当对应极相绕组中的电流值很小时,在定子和动子铁心中的磁通密度是小的。但当绕组电流增加时,铁心中磁通密度会迅速增加,很快就会达到它的饱和水平。此后再增加绕组中的电流,磁通值的增加收益很小。极磁场强度另一个限制是来自绕组电流的热效应。绕组铜耗散发出来的热功率正比于绕组中电流的平方。因此绕组的温升随着

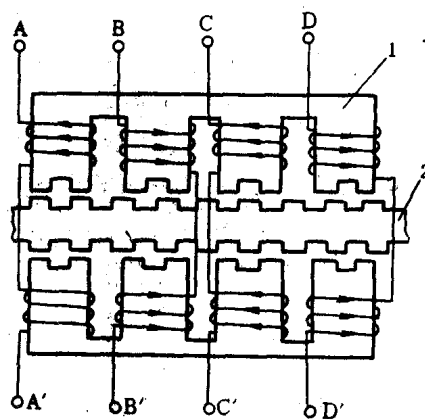


图 1-2 四相变磁阻式直线步进电动机

1—动子 2—定子

电流的增加而迅速地增加。在大多数应用中,绕组绝缘经受温升的能力限制了电流的额定值。对于良好的变磁阻式电机的设计来说,极磁通密度和绕组温升两者都是重要的。我们希望在额定绕组电流时,电机定子和转子铁心中的磁通值正好都达到它们的饱和水平。

磁阻式步进电动机一般只需要单极性开关电路就能够控制它的运行。图 1-3 所示为一台三相变磁阻式步进电动机的驱动电路图。每相绕组都有自己独立的驱动电路,它是由低功率的相控制信号来控制的。这个控制信号可能需要经过若干个开关放大器,才能达到所要求的功率水平。

由于足够高的基极电流,使得开关型半导体三极管处于饱和导通,使相绕组励磁。在这种情况下,直流电源电压施加在这个串联的相绕组和限流电阻的联合体上。由于三极管的饱和电压降很小(一般为 $0.1 \sim 0.3V$),所选的直流电源电压 V_s , 当它施加在这相总的串联电阻上时,产生的正好是绕组的额定电流,即

$$V_s = I_N(r + R)$$

式中 r —— 相绕组的电阻;

R —— 限流用的附加电阻。

通常相绕组存在相当大的电感,因此绕组的电气时间常数 (L/r) 是大的,这对于电动机高速运动来说,电流上升太慢,因而需要增加一定的限流电阻 R 。当然随着限流电阻增加,电源电压也要相应地成正比的增加,然而却可以减少相电气时间常数,使电机能够在一个较宽广的速度范围内很好地运行。这就是限流电阻 R 的另一个重要作用。

相绕组电感存在的另一个后果是相电流不能瞬时地被开关切断。如果开关三极管的基极驱动电压突然被移开,则一个大的感应电压将出现在三极管的集电极和发射极之间,对驱动电路会造成永久性破坏。这可以通过为相电流提供交流电流路径,即所谓续流电路来避免上述故障的可能性。因为当开关三极管被切断时,相电流能够连续地流过由续流二极管和续流电阻 R_1 提供的路径。

如果所建立的相电流在它的额定值时,那么在三极管开关打开时,跨接在开关三极管的最大电压 V_{cemax} , 将发生在这个瞬时,电流 I 还没有开始衰减就流过这个续流电阻 R_1 , 所以这个最大的集电极和发射极之间的电压(忽略其中二极管的管压降时)为

$$V_{cemax} = V_s + R_1 I$$

因此,相电流在续流回路中衰减,开关打开时储存在相电感中的磁能也散发在续流回路中的电阻上(绕组电阻 r + 限流电阻 R + 续流电阻 R_1)。

第三节 混合式直线步进电动机

一、结构和工作原理

混合式步进电动机内部的磁场推力,不仅和各相绕组通入的控制脉冲电流有关,而且还和

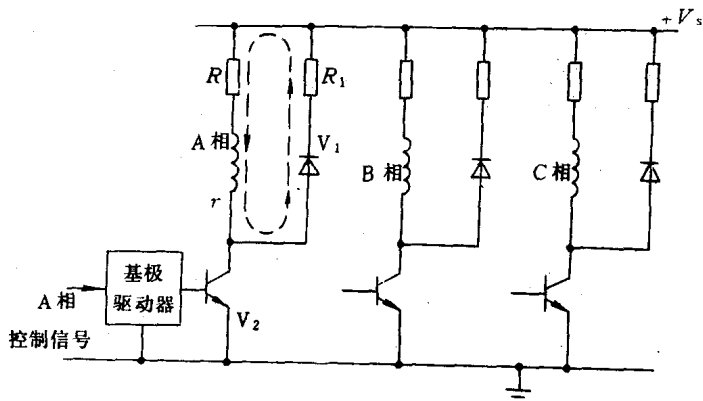


图 1-3 三相变磁阻式步进电动机的驱动电路

R — 限流电阻 r — 绕组电阻 R_1 — 续流电阻

V_1 — 续流二极管 V_2 — 开关三极管

内部存在的固定磁场大小有关。在它内部的固定磁场,通常是由永久磁铁提供,如图 1-4 所示。当然,也可以用通有固定直流电流的励磁线圈来产生。随着各相控制绕组中的电流发生变化,使得各极下的磁场位置发生变化,因而带动步进电动机动子产生直线步进运动。

图 1-4 是一台两相平板型混合式直线步进电动机的原理结构。定子是由开有等距齿槽的叠片铁心组成,齿距(或槽距)为 τ_t 。动子是由永久磁铁再加上“Π”形电磁铁 EMA 和 EMB 组成。电磁铁 EMA 具有磁极 1 和 2;电磁铁 EMB 具有磁极 3 和 4。每个极上一般都有几个平行齿(图 1-4 所示每极上有两个齿)。其齿距要求和定子的齿距相等均为 τ_t 。电磁铁的铁心是由硅钢片叠成。各磁极中心线之间的距离,称为极距 P 。磁极 1 和磁极 2 之间的极距 P_{1-2} ,以及磁极 3 和磁极 4 之间的极距 P_{3-4} ,均可由下式表示,即

$$P_{1-2} = P_{3-4} = (M + \frac{1}{2})\tau_t$$

$$\text{则 } S_K = (M + \frac{1}{2})\tau_t - b_p$$

式中 M ——任意可选的正整数;

b_p ——磁极宽度。

这样就可以保证极 1 的齿和定子齿对齐时,极 2 的齿中心正好对着定子槽中心。而磁极 2 和磁极 3 之间的极距 P_{2-3} 就必须满足下式,即

$$P_{2-3} = (K + \frac{1}{4})\tau_t - b_p$$

$$\text{则 } G_K = (K + \frac{1}{4})\tau_t - b_p$$

式中 K ——任意可选的正整数。

这样就可以保证当极 1 齿中心正对着定子齿中心时,极 3 和极 4 的齿中心分别正好都处在定子齿中心和槽中心之间,为电机下一步步进运动做好位置准备工作。

永久磁铁磁通的路径是通过电磁铁,越过电磁铁和定子之间的空气隙和定子自身的磁路形成的主磁路回路。当电磁铁没有电流时,永久磁铁向所有的磁极提供了大致相等的常值磁通 $\phi_m/2$ 。这里 ϕ_m 是永久磁铁提供的总磁通。各极下气隙中的磁通方向如图 1-5a 中虚线所示,在这个条件下,动子上没有任何水平推力,动子可以稳定在任何随机位置上。

1. 单相轮流通电励磁时的工作原理

当电磁铁 EMA 线圈中通入正向电流 I_A 励磁时,在图中用 $\odot$ 和 $\otimes$ 来表示,则由该电流励磁产生的磁通路径如图 1-5a 中实线所示。此时极 1 下的磁通 $\phi_1 \approx \phi_m/2 + \phi_A$ 设 $\phi_A \approx \phi_m/2$ 则 $\phi_1 \approx \phi_m/2 + \phi_A = \phi_m$,而极 2 下的磁通 $\phi_2 \approx \phi_m/2 - \phi_A \approx 0$;极 3 和极 4 下的磁通大致仍为 $\phi_m/2$ 。显然,此时极 1 所受的磁力最大,极 2 所受磁力几乎为零,极 3 和极 4 所受磁力由动、定子齿的相对位置所决定,其水平方向的分力大致大小相等,方向相反,相互抵消,因此动子的运动由极 1 所受的磁力决定。最后,极 1 必定运动到和定子齿对齐为止,如图 1-5b 所示(极 1 对齐定子齿 1')。因为只有在齿对齿的情况下, ϕ_m 对应磁路的磁导最大,这时动子所受的水平磁推力为零,动子就处在稳定平衡的位置上。动子由图 1-5a 过渡到图 1-5b 时,动子已经向右移动了 $1/4$ 齿距,即 $\tau_t/4$ 。如果接下去通电方式变成图 1-5c 所示,则同样可分析得到下述结论:极 4 受磁力最

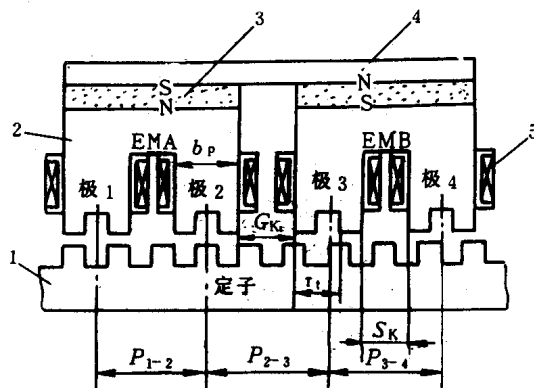


图 1-4 两相平板型混合式直线步进电动机

1—定子 2—动子 3—永久磁铁
4—轭铁 5—励磁线圈

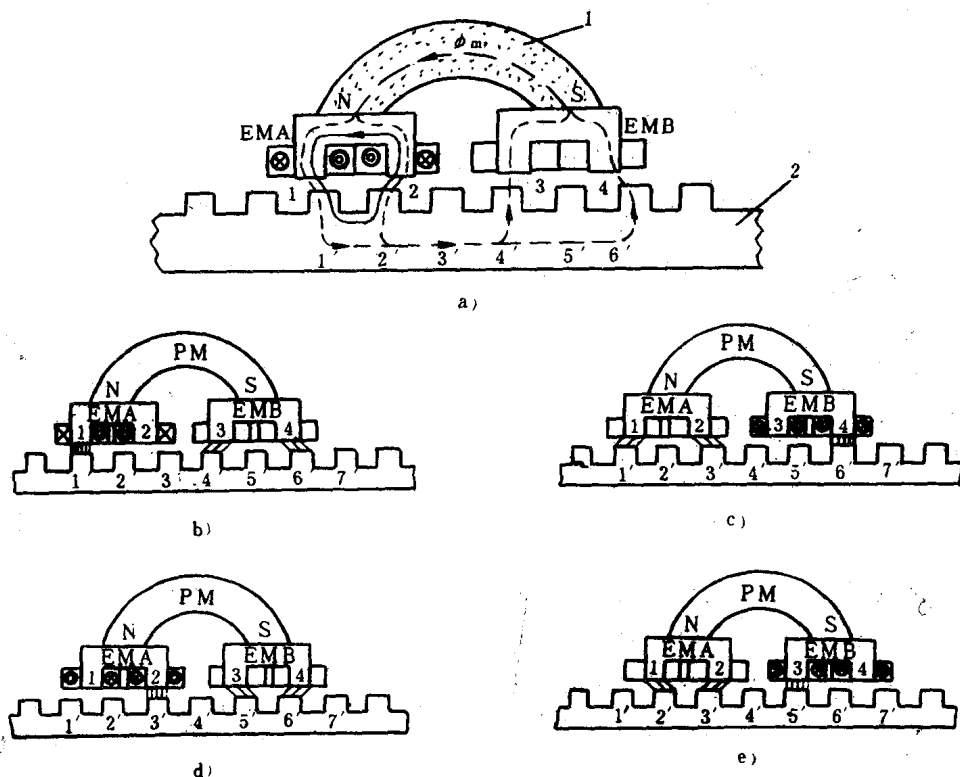


图 1-5 混合式步进电动机单相轮流通电励磁时的工作原理

a) 磁通路径, 1—转子 2—定子

b) 状态 1, 线圈 A 通正向电流

c) 状态 2, 线圈 B 通正向电流

d) 状态 3, 线圈 A 通负向电流

e) 状态 4, 线圈 B 通负向电流

大, 并必然使极 4 对准定子齿 6'; 此时转子又向右移动了 $\tau_r/4$ 距离。同样可以分析图 1-5d 和图 1-5e 的情况我们可得到如下结论: 当单相通电方式按图 1-5e $\rightarrow$ d $\rightarrow$ c $\rightarrow$ b $\rightarrow$ e... 顺序进行, 则转子就会以 $\tau_r/4$ 步距向左移动。通电方式以四种变化状态为周期称为四拍制运行。每经过四种通电方式变化, 转子就会移动一个齿距 τ_r 。各相线圈通电的规律如图 1-6 所示。

2. 两相同时励磁分析

单相轮流通电励磁工作方式的缺点是电机的净推动力小、阻力大、运行速度有限。其主要原因是当电机由图 1-5b 过渡到图 1-5c 状态时, 由于极 1 下有永久磁铁提供的磁通在作用, 极 1 和定子齿 1' 之间实际上存在着相当大的吸力, 阻止转子向右运动。如果当线圈 B 通以正电流时, 在线圈 A 中同时通入反向电流, 这就有利于转子从状态图 1-5b 过渡到状态图 1-5c,

因为这时极 1 下的磁通近似为零, 没有阻力存在, 这就是两相绕组同时通电的优点之一。根据这个设想, 各相线圈的电流波形变成如图 1-7 中实线所示的波形。

如果让线圈 A 通入余弦电流, 同时让线圈 B 通入正弦电流 (如图 1-7 中虚线所示), 则在 $0 \sim \pi/2$ 范围内, 线圈 B 中的电流从零逐渐增大到它的最大值, 使得极 4 下的磁通由 $\phi_m/2$ 逐渐增

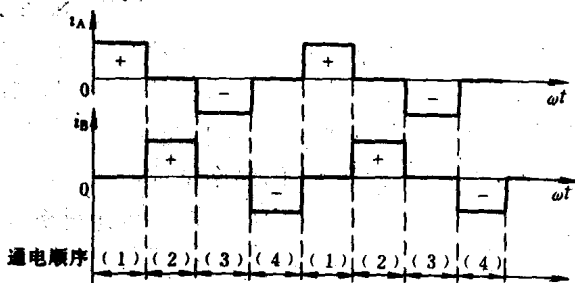


图 1-6 单相轮流通电励磁时各相绕组的电流波形

大到 ϕ_m , 而极 3 下的磁通逐渐由 $\phi_m/2$ 下降到零。同时极 1 下的磁通随着 i_A 下降而下降, 配合线圈 B 使动子如同同步电机一样平滑均匀地向右移动。当电流交变一次, 动子就移过一个齿距 τ_t 。

当 A 相电流由最大值下降到零, B 相电流由零上升到最大值时, 动子沿轨道推进了 $\tau_t/4$ 。如果在 A 相电流由最大值下降下来的同时, B 相电流由零开始上升, 当它们的值达到相等时, 则动子对应地正好移过 $\tau_t/8$ 。如果将上述 A 相和 B 相的正、余弦电流每个周期都用 40 个等宽不等幅的脉冲群代替, 如图 1-8 所示, 则每个脉冲的宽度为 9° (电角度)。

如果当 $\omega t = 0$ 时各相电流为

$$i_A = I_{Am} \cos 0^\circ = I_{Am}$$

$$i_B = I_{Bm} \sin 0^\circ = 0$$

设此时动子位置在 $x = 0$ 处。当 $\omega t = 9^\circ$ 时, 两相电流为

$$i_A = I_{Am} \cos 9^\circ = I_m \cos 9^\circ$$

$$i_B = I_{Bm} \sin 9^\circ = I_m \sin 9^\circ$$

则步进电动机就会相对于原来的位置移动了 $\tau_t/40$, 此时步距为 $1/40$ 齿距。可见电机的步距分辨率比原来提高了 10 倍。

上述把一个周期的正、余弦电流细分成 40 个等宽不等幅的脉冲群的电路, 称为细分电路。利用微型计算机可以很方便地完成比上述精细得多的细分任务。目前对于实际齿距为 1mm 的步进电动机, 通过微机细分的方法, 已经实现 0.001mm 微步的分辨率, 这就显示出用微机控制两相同时通电励磁方式的优越性。

二、设计和控制方面的问题

1. 结构分析

图 1-9 表示出六种常用的结构型式。

图 1-9a 是单边扁平型结构。这种结构定子常是一块开有平行槽的条形铁心平板, 动子常是用一块条形永久磁铁和放在它两端的两个 Π 形铁心的电磁铁装配而成矩形滑块。铁心均可采用电工钢片叠压而成。铁心损耗小, 但漏磁比较大。要保证定、动子之间的间隙象圆筒型一样小而均匀比较困难。由于结构是单边型, 定、动子之间存在着很大的单边磁拉力, 通常比其水平推力的 10 倍还要大, 因而会造成较大的阻力、振动和噪声。这种结构型式主要的优点是结构简单, 零部件少, 动子惯性小, 铁心可用硅钢片叠压而成, 涡流损耗小, 电气阻尼小, 高速能力强。

图 1-9b 为双扁平型结构。两个相同的如图 1-9a 中的单边型动子结构, 对称地安装在条形双边开有均匀等距平行槽的定子铁心的两边, 如安装得好, 可以做到使上述单边磁拉力不存在。这种结构型式显然比图 1-9a 所示的结构性能好, 但零部件数约为单边型的两倍, 成本比较高。

图 1-9c 为圆筒型结构。磁路对称性好, 容易做到基本上没有单边磁拉力, 漏磁少, 铁心和线圈的利用率高, 所以推力对动子重量比值最大。圆筒型结构的平行槽用普通车床就可以加工

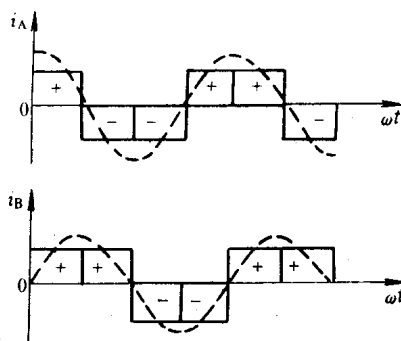


图 1-7 两相同时通电时的电流波形

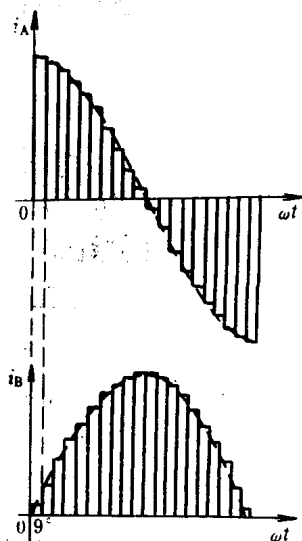


图 1-8 用脉冲群来代替正、余弦波

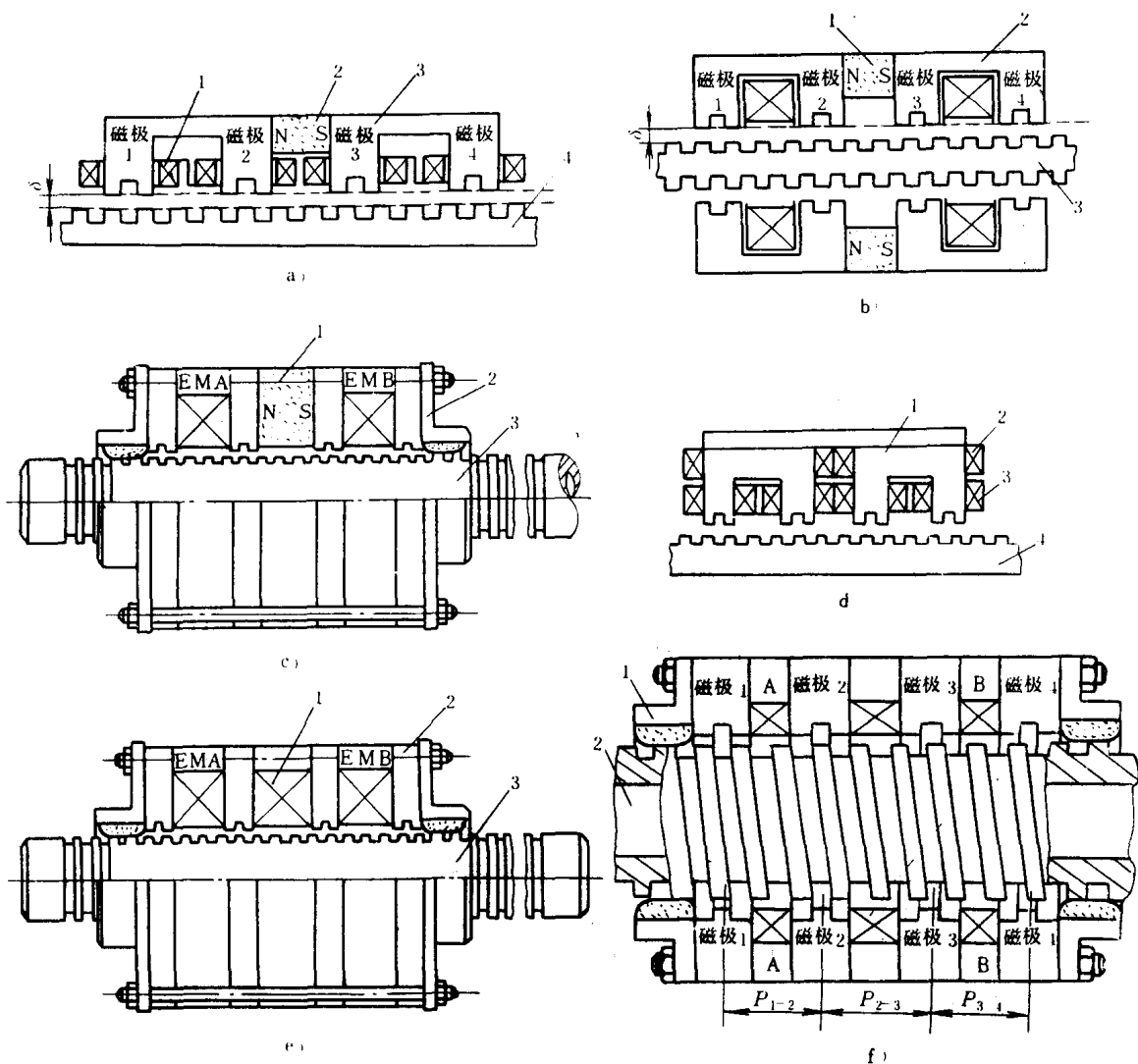


图 1-9 混合式直线步进电动机结构分析

- a) 1—线圈 2—永久磁铁 3—动子 4—定子
 b) 1—永久磁铁 2—动子 3—定子
 c) 1—永久磁铁 2—动子 3—定子
 d) 1—定子 2—励磁线圈 3—控制线圈 4—定子
 e) 1—励磁线圈 2—动子 3—定子
 f) 1—动子 2—定子

成形, 不象扁平型结构必须要用铣床铣槽, 加工成本低。

图 1-9d 是将图 a 中的永久磁铁部分用直流电流励磁的方式来代替, 图 e 是将图 c 中的永久磁铁用环形线圈通以直流电来取代, 它们都称为电磁式混合型直线步进电动机。这类步进电动机, 励磁可以通过改变励磁电流来调节, 从而可以灵活地改变步进电动机的机械特性, 可以灵活地设计出不同推力和吸力要求的各种步进电机而不会受到永久磁铁磁性的限制。

图 1-9f 是一种最近发展起来的电磁式螺旋型直线步进电动机的结构。这种结构的特点是用普通的车床就可以连续加工成形, 不需要象平行槽结构那样断续逐条地加工槽形, 加工成本很低, 而电机性能还可以得到改善。

2. 控制线路要点

从混合式直线步进电动机的工作原理得知,混合式步进电动机需要一个双极性控制电源,适合于混合式直线步进电动机的三极管桥式驱动电路的一个典型实例如图 1-10 所示。

根据所需要的电流极性,成对的开关三极管对相绕组的

正向励磁,就要接通三极管 V_1 和 V_4 ,以便电流路径由电源通过三极管 V_1 到相绕组及限流电阻 R ,然后经过三极管 V_4 回到电源。在相反的情况下,接通三极管 V_2 和 V_3 ,以便电流朝相绕组相反的方向流动。在桥中的四个开关三极管需要独立的基极驱动器来放大这两种(正的和负的)相控制信号,这信号要通过光隔离管来传递。详细驱动电路分析见后续有关章节。图 1-10 中四个两极管的桥,它们相反地并联在开关三极管上,以提供续流回路,图 1-10 中虚线说明在打开三极管 V_1 和 V_4 后,瞬时续流经过二极管 V_6 和 V_7 的路径情况。这续流路径包括直流电源在内,因此某些储存在相绕组电感中的能量,在打开开关时,被返回到电源。由此引起改善整个系统效率的效果表明双极性桥式驱动电路胜过单极性驱动。在双极性驱动电路中,续流比单极性驱动电路衰减更迅速,因为直流电源反对它们,因此,在双极性电路中不需续流电阻。

3. 双轴向和三轴向直线步进电动机

以上介绍的都是单轴向直线步进电动机,实际上有些地方需要电机在平面作二维轨迹运动和三维轨迹运动。例如目前国内外已经批量生产的平面绘图机,它是由两个上述初级动子安装在同一动子机架上组成的平面绘图机驱动器,如图 1-11 所示,两个初级动子运动的轴线是相互垂直的。

为了使平面电动机能够在平面上作二维的步进运动,必须使次级台板上开有相互垂直的槽齿,因而形成了如图 1-11 所示的格子式的次级台板。

三轴向直线步进电动机,可作为智能机械手的驱动器。它可在双轴向平板电动机动子上再加上一个可沿高度方向步进移动的圆柱形直线步进电动机,其结构大致如图 1-12 所示。

第四节 两种类型直线步进电动机的特性比较和选用

直线步进电动机的选用,要根据应用要求来决定。不能无条件地说所有的情况下一种型式

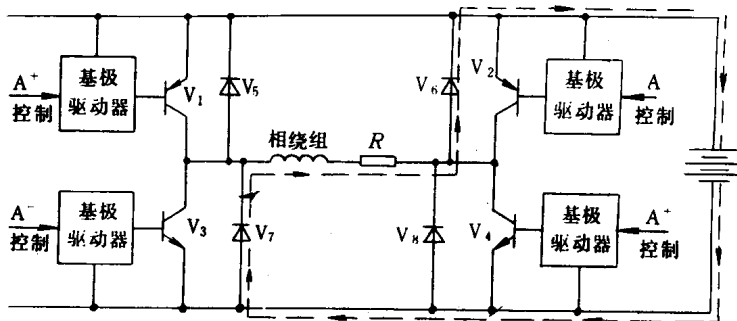


图 1-10 一相三极管桥式双极性驱动电路

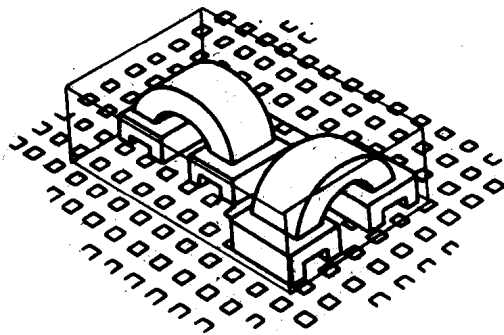


图 1-11 双轴向直线步进电动机
(平面步进电动机)

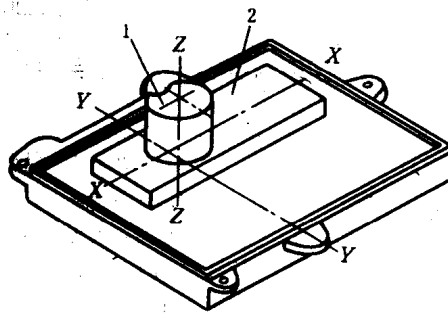


图 1-12 三轴向直线步进电动机
1 - Z轴电动机 2 - XY轴电动机

比另一种型式好。混合式容易实现微步控制,细分线路简单,当需要高分辨率定位的场合,混合式可能是很大的优点。在相同体积的情况下,混合式产生的最大推力比变磁阻式大。可见,在工作空间有限制的条件下,在需要小步距大推力的应用中,混合式步进电动机是必然的选择。永磁式混合式步进电动机在不加控制电流的情况下,永久磁铁磁通会产生一定的锁定力,以保留动子在所希望的步距位置上,这对于失电时必须保持在所希望位置的用户来说是一种很有用的特性。

变磁阻式直线步进电动机,结构比混合式简单,没有永久磁铁,加工工艺简单,只需要单极性电源,而混合式需要双极性电源。因此,变磁阻式步进电动机的控制电路比混合式的简单,总的成本低,可靠性高,耗电省,因为电机始终处在开关运行状态。在不需要微步距的场合,总是优先考虑成本低廉的变磁阻式直线步进电动机。

第二章 直线步进电动机的静态特性

直线步进电动机,在某种固定励磁状态下所具有的特性,称为静态特性。在实际工作过程中,直线步进电动机几乎总是处在动态情况下运行。但是静态特性对于步进电动机的运行性能,特别是对于低速运行有决定性的作用,是了解和分析步进电动机的一切运行性能的基础,因此我们首先分析步进电动机的静态特性。

第一节 静态力移特性和静稳定区

在不改变某相通电状态时,动子所受的水平推力 F_e 和动子位置 x 之间的关系: $F_e = f(x_e)$ 称为力移特性。

如果动子每个极靴上不止一个齿(如图 2-1)所示,则动子的位置可用动子左端第一个齿的中心线和定子齿中心线之间的距离 x 来表示,或者用电角度 x_e 表示。一个齿距相当于电角度 2π 。 F_e 的正方向取作 x_e 增大的方向。如图 2-1 表明,在一相通电时,极下动子齿和定子齿对齐时, $x_e = 0, F_e = 0$ 。当动子齿正对着定子槽时,相当于 $x_e = \pm \pi$,此时 F_e 也等于零。当 $0 < x_e < \pi$ 时, $F_e < 0$; 当 $-\pi < x_e < 0$ 时, $F_e > 0$ 。

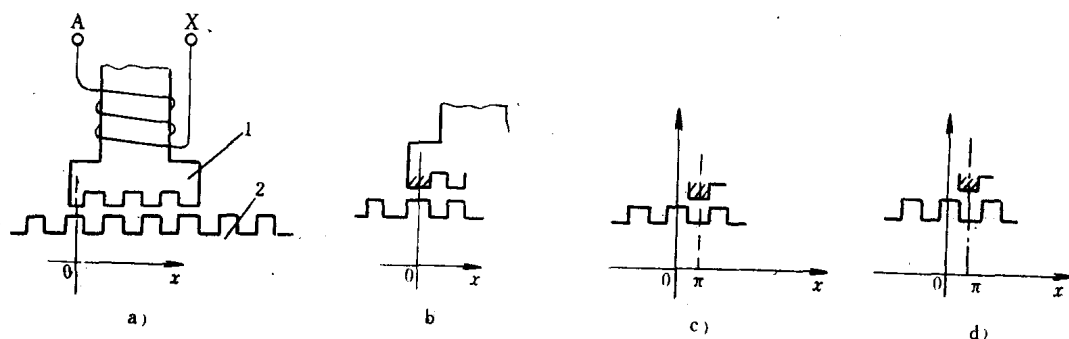


图 2-1 静态力和动子位置的关系

- a) 1—动子 2—定子 b) $x_e = 0$ $F_e = 0$
c) $x_e = \pm \pi$ $F_e = 0$ d) $0 < x_e < \pi$ $F_e < 0$

从上面可以看出, F_e 随 x_e 作周期性变化,变化的周期是一个齿距,即为 2π 电角度。 F_e 的变化波形比较复杂,与气隙、动子和定子的槽形、齿形以及磁路的饱和程度有关。实验表明:通常直线步进电动机的静态力移特性 $F_e = f(x_e)$ 接近正弦波形。因此在许多问题分析中,常常把直线步进电动机的静态力移特性用等值的正弦波形来表示,如图 2-2 所示。

在静态情况下,例如,在保持一相通电励磁不变的情况下,动子有一个确定的稳定平衡位置。如果在外力作用下使动子偏离它的稳定平衡位置,但没有超出 $x_e = \pm \pi$ 电角度范围,则当外力消除后动子仍回到原来的位置上,这种平

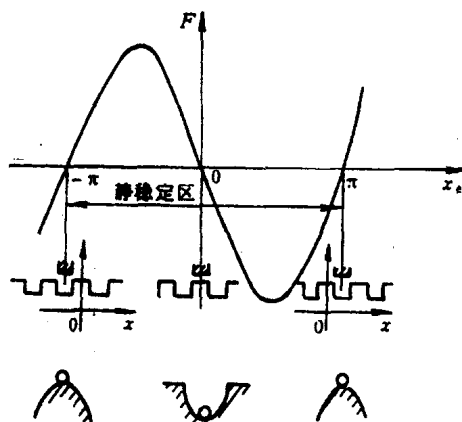


图 2-2 动子的静稳定区和力移特性

衡点就称作稳定平衡点,就好象小球处在锅底的情况。如果上述外力消除后动子不能回到原来位置就称为不稳定的平衡点,就好象球放在山巅上的情况。分析表明,在 $x_c = 0, \pm 2\pi, \pm 4\pi$ 等点上时,动子是处在静态稳定平衡点;当动子处在 $x_c = \pm \pi, \pm 3\pi, \pm 5\pi$ 等点上时,动子处在不稳定平衡点。从静态力移特性上看,一个稳定平衡点总是处在两个不稳定平衡点之间,而相邻的两个不稳定平衡点之间的区域构成了动子的静态稳定区,如图 2-2 所示。很显然,如果外力的作用使动子偏离平衡点,但只要不超过它的静态稳定区,当外力消除后,动子会回复到原来的位置。如果动子偏离超出静态稳定区,当外力除去后,动子就不可能回到原来的稳定平衡点,而将处在别的静态稳定区所对应的稳定平衡点上,与原来的平衡点位置相差的距离为齿距的整数倍或电角度 2π 的整数倍。

第二节 力移特性和气隙磁导的关系

直线步进电动机的水平推力(磁拉力) F_c 的产生和它的气隙磁导变化有关。动子稳定平衡的位置,总是和气隙磁导的最大值相对应。因此直线步进电动机气隙磁导的分析和计算与力移特性的分析和计算有密切关系。

一、气隙磁导分析

设动子在一极下气隙的总磁导是 Λ , 一个齿距范围内单位铁心长度的气隙磁导称为比磁导,用 g 表示。则

$$\Lambda = Z_d l g \quad (2-1)$$

式中 l ——铁心计算长度(cm);

Z_d ——动子一个极上的齿数,如图 2-3 中, $Z_d = 4$, (一般总是 $Z_d \geq 2$);

g ——比磁导, (H/cm)。

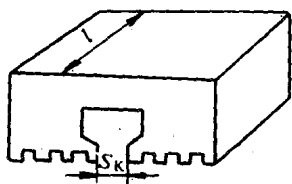


图 2-3 电磁铁铁心

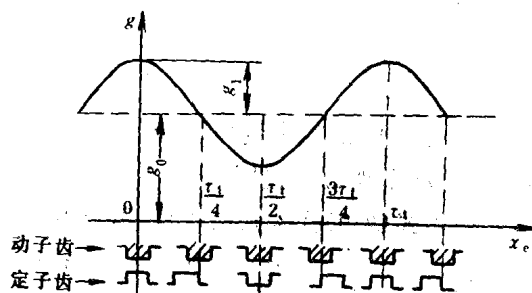


图 2-4 比磁导与动子位置关系

气隙比磁导 g 的值与定、动子齿中心线之间的距离 x 有关,是 x 的周期性函数。设齿距为 τ_c , 相当于 2π 电弧度,当 $x = 0$ 时, $x_c = 0$ (参看图 2-4), $g(0) = g_{\max}$; 当 $x = \tau_c/2$ 时, $x_c = \pi$, 对应的 $g(\tau_c/2) = g_{\min}$ 。用式子表示为

$$g = g_0 + g_1 \cos x_c + g_2 \cos 2x_c + \dots \quad (2-2)$$

对于工程计算来说,可近似地认为

$$g = g_0 + g_1 \cos x_c \quad (2-3)$$

$$\left. \begin{aligned} g_0 &= (g_{\max} + g_{\min})/2 \\ g_1 &= (g_{\max} - g_{\min})/2 \end{aligned} \right\} \quad (2-4)$$