

步进电动机电力拖动

科学技术文献出版社重庆分社

步进电动机电力拖动

中国科学技术情报研究所重庆分所编译

科学技术文献出版社重庆分社

1980年·重庆

步进电动机电力拖动

中国科学技术情报研究所重庆分所	编	译
科学技术文献出版社重庆分社	出	版
重庆市市中区胜利路91号		

四川省新华书店重庆发行所	发	行
科学技术文献出版社重庆分社印刷厂	印	刷

开本: 787×1092 1/32	印张: 4.875	字数: 15万
1980年7月第一版	1980年7月第一次印刷	
科技新书目: 164—118	印数: 5000	

书号: 15176·422

定价: 0.55元

内 容 提 要

本书系译自全苏科技情报所编的《科学总结》丛书“电力拖动和工业设备自动化”部分，第六分册——步进电动机电力拖动。书中综述了仪用和拖动用步进电动机电力拖动的主要发展方向和应用范围；分析了开环、闭环步进电力拖动的工作情况和结构，研究方法，提高位移精度和改变步距值的措施；介绍了旋转运动、直线运动和复合运动的步进电动机的分类及基本结构；讨论了控制线路及其主要元件的构成原则，阐述了控制线路和步进电动机的计算方法等。

引 言

步进电力拖动是个多元件系统，通常包括执行步进电动机、功率放大器（逆变器）、输入信息变换器、输入指令程控装置和反馈元件。

步进拖动同利用连续作用电动机的拖动不同，其主要特点是能实现精确位移，行程终端坐标固定，无累积误差。同时，总的位移量是严格等于输入指令数的各单元步进位移之和，因此步进拖动最适合工作于由数字计算机实行控制的场合。

步进拖动的这一特点决定了它主要在数字程控金属切削机床和工艺过程自动控制系统执行机构方面的应用。因此，进一步改善这些系统的步进拖动极为重要和必要。

步进拖动现阶段在理论发展和应用实践方面的主要课题是提高快速性和改善运动品质，亦即要减小动、静态误差，降低运动过程中和完成位移之后速度变化的幅度和时间。要解决这些任务不仅需要改进拖动各个元件的计算和设计，而且还需要改进控制结构和所用的控制方法。

步进电力拖动的特有特点无论在各元件和整个拖动系统的数学描述、计算理论和设计方面，还是在拖动的构成方面均带来一定的复杂性。因此，近来为解决这些问题，广泛应用现代计算技术以对步进拖动进行分析和综合，以及发展微处理机技术以在不降低可靠性和拖动质量-尺寸指标的情况下扩大程序装置功能的可能性。

本书主要取材于苏联《电工学和动力学》文摘（Реферативный журнал «Электротехника и энергетика»）1972—1976年所收录的材料而编写的，其中反映了步进电力拖动的一些最新发展趋向。

目 录

引言

第一章 步进电动机

1. 步进电动机的工作原理、特性和分类…………… (1)
2. 旋转运动步进电动机…………… (7)
3. 直线运动步进电动机…………… (22)
4. 步进电动机的计算方法…………… (30)
5. 成品步进电动机的参数和特性…………… (34)

第二章 步进电动机控制线路

6. 控制线路的一般设计原则…………… (40)
7. 输入信息变换器…………… (43)
8. 功率放大器和电压变换器…………… (54)
9. 反馈元件…………… (66)

第三章 精密步进电力拖动

10. 金属切削机床和一般工业机械的开环步进
电力拖动…………… (70)
11. 有位置反馈和速度反馈的步进电力拖动…………… (80)
12. 具有电气分步的步进电力拖动…………… (88)

第四章 步进电力拖动的理论和计算问题

13. 数学研究方法…………… (94)
14. 步进电力拖动的控制方法和工况…………… (103)
15. 改善运动质量的方法…………… (119)

结论

参考文献

第一章 步进电动机

1. 步进电动机的工作原理、特性和分类

任何一种电气机械换能器，只要在其周期重复地两个或两个以上的可能状态中均能产生同步转矩或同步力，并能定向地转换到下一个稳态，那末均可用作步进电动机。

现有步进电动机的工作原理是以绕组的脉冲激磁或转换，不连续地改变电机或电磁装置工作气隙中电磁场状态作为基础的^[1]。

通常，同步型步进电动机是一个 m 相的电机^[2]，其绕组由阶梯状电压激磁（图1）。一般来说，采用单极性（很少用不同极性）的矩形脉冲。在控制部件输入端每加入一个统一编码脉冲，相当于步进电动机进行一次换相操作，使电机气隙中磁场的分布图象移动一定的角度或距离^[3]。与此同时，运动部件稳态平衡位置在空间上也发生移动，从而使运动部件位移一步（图2）。

可以按照对称转换和不对称转换，依次逐个移动通电各

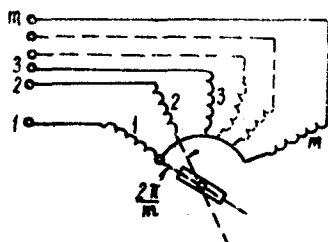


图1 步进电动机工作原理

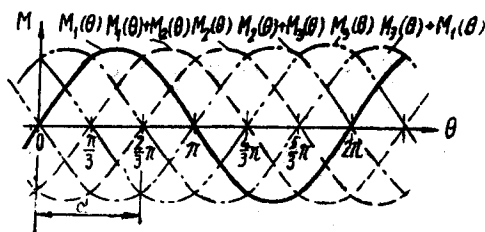


图2 三相步进电动机在不同转换方法时的静态同步转矩特性

相组合。对称转换时，每一组合为相等的奇相数或为相等的偶相数，例如由特性 $M_1(\theta)$ 转换到 $M_2(\theta)$ 、 $M_3(\theta)$ 等等，或由特性 $M_1(\theta) + M_2(\theta)$ 转换到 $M_2(\theta) + M_3(\theta)$ 、 $M_3(\theta) + M_1(\theta)$ 等等。不对称转换时，每一组合中奇相数和偶相数依次交替，例如由特性 $M_1(\theta)$ 转换到 $M_1(\theta) + M_2(\theta)$ ，然后再转换到 $M_2(\theta)$ 、 $M_2(\theta) + M_3(\theta)$ 等等。各种转换形式(对称的和不对称的)的总数对具体 m 相电机而言为：

$$m \text{ 为偶数时, } \frac{m(m-2)}{2};$$

$$m \text{ 为奇数时, } \frac{m(m-1)}{2}。$$

在某些场合下，换到新的转换形式（例如由对称换到非对称转换时）会使单步的步距大小发生变化，并且可能的步距大小总共会有 $(m-1)$ 个^[4]。

步进电动机各相换接的形式用换接拍数 n 来表示，它等于通电各相组合逐个移动到与起始组合重合时亦即一个换接周期内的通电各相组合的个数。

如果在给定的换接周期中可能的组合用圆周上等距的点来表示，则在一个周期内可转过一转（例如，当相邻相轮流

激磁时)或转过 n 转(当相隔一或两相激磁时)。这个回转的转数同换接始点数 S 一致。这些相的换接形式应用于 $m > 3$ 的步进电动机中^[1]。一般情况下,步距大小(电弧度)由下式确定:

$$\alpha = \frac{2\pi S}{n}。$$

机械步距一般为:

$$\alpha_M = \begin{cases} \frac{2\pi S}{pn} & \text{——用于旋转运动步进电动机,} \\ \frac{\tau S}{n} & \text{——用于直线运动步进电动机,} \end{cases} \quad (1)$$

式中 p 是转子极对数; τ 是极距(齿分度)。

步进电动机运动部件的稳定状态在每一可能的通电各相组合情况下相当于电动机磁系统的电磁能为最大。当运动部件偏离于这个稳态时,开始受到力的作用,迫使其返回到最近的稳态。这些力的大小(转矩 M 或牵引力 F)等于系统内所储电磁能对偏离量大小(机械的:角度 θ_M 或位移 x_M)的微分,即:

$$M(\theta) = \frac{dW_{\Theta}(\theta)}{d\theta_M} \text{——对于旋转运动步进电动机,}$$

$$F(x) = \frac{dW_{\Theta}(x)}{dx_M} \text{——对于直线运动步进电动机。}$$

这些静态同步力的特性在空间上按照极距大小严格地周期变化,并且通常有无穷多谐波频谱^[2]:

$$M(\theta) = \sum_{v=1}^{\infty} M_v \sin(v\theta + \varphi_v);$$

$$F(x) = \sum_{v=1}^{\infty} F_v \sin(vx + \chi_v),$$

式中 v 是谐波分量序号； $0, x$ 是运动部件的角度坐标或直线位移坐标的即时值； φ_v, χ_v 是第 v 次谐波相对所选定的计算起始点的起始相位。

实际上，仅考虑级数的前几项（图3），而优先考虑的又只是第一次谐波（图2）。其幅值取决于最大静同步转矩 $M_{\text{макс}}$ 或最大静同步力 $F_{\text{макс}}$ 。在这种情况下，静转矩和力的特性明显地区别开运动部件的稳定区 $\theta_{\text{уст}}, \chi_{\text{уст}}$ 和不稳定区 $\theta_{\text{неуст}}, \chi_{\text{неуст}}$ 。在没有负载时，稳态平衡点周期重复的角度为 2π ，并且静特性和横坐标轴有交点，此时微分 $dM(\theta)/d\theta$ 和 $dF(x)/dx$ 有正值（如 θ 和 x 理解为运动部件和不动部件的极的偏差量）或有负值（如 θ 和 x 理解为坐标的即时值）^[1]。

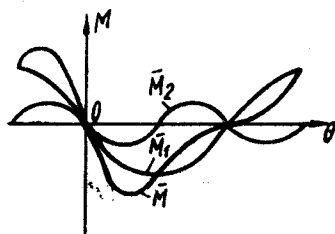


图3 静同步转矩 $M = M_1 + M_2$ 特性 (M_1 是第一次谐波, M_2 是第二次谐波) 分解为级数

当存在负载转矩 M_H 或负载力 F_H 的时候，瞬时换相并静特性作出相应电角位移 $\alpha = 2\pi S/n$ 而实现单步的条件是：

$$\theta_{\text{уст}}, (\chi_{\text{уст}}) \leq \theta_{\text{неуст}}, (\chi_{\text{неуст}}) + \frac{2\pi}{n}.$$

此时，必需的换接拍数和允许负载之间的关系为：

$$M_H, (F_H) \leq M_{\text{макс}}, (F_{\text{макс}}) \cos \frac{\pi}{n}.$$

步进电动机有两种基本工况：静态工况，此时不发生换相，其中一个可能的相组合长期受到激磁；位移工况，由各相组合逐个依次激磁来实现。在第一种工况下，步进电动机的工作性能取决于静同步力特性（参阅图2和3）。负载特性如上所述决定于换接形式和静同步力曲线形状（参阅图2和3）。此时步进电动机运动部件停在稳定平衡点^[6]上的准确度，取决于负载大小 $M_H, (F_H)$ 和静同步力特性的陡度^[7]。当展开分解级数的前几项来近似力特性时，最大误差取决于静误差 θ_H 或 χ_H ：

$$\theta_H = \pm \arcsin \frac{M_H}{M_{\text{макс}}};$$

$$\chi_H = \pm \arcsin \frac{F_H}{F_{\text{макс}}}.$$

位移工况根据换接频率变化规律分成转换频率按任意跳变规律变化的加速工况和频率平滑变化工况。在第一种情况

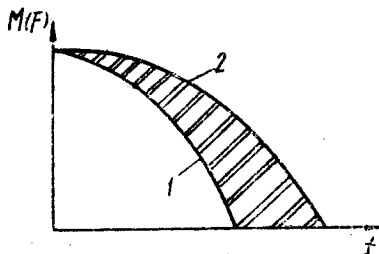


图4 步进电动机极限动特性（1）和极限机械特性（2）

- 分 类 特 征
1. 原 型
 2. 电动机输出端运动形式
 3. 运动 - 不动部件间联系形式
 4. 变换能量的方法和能量传到运动部件的方法
 5. 磁系统激磁方式
 6. 磁系统激磁电源
 7. 相数和运动方式
 8. 定子和转子叠片数
 9. 运动部件位移坐标个数
 10. 磁通闭合回路形式

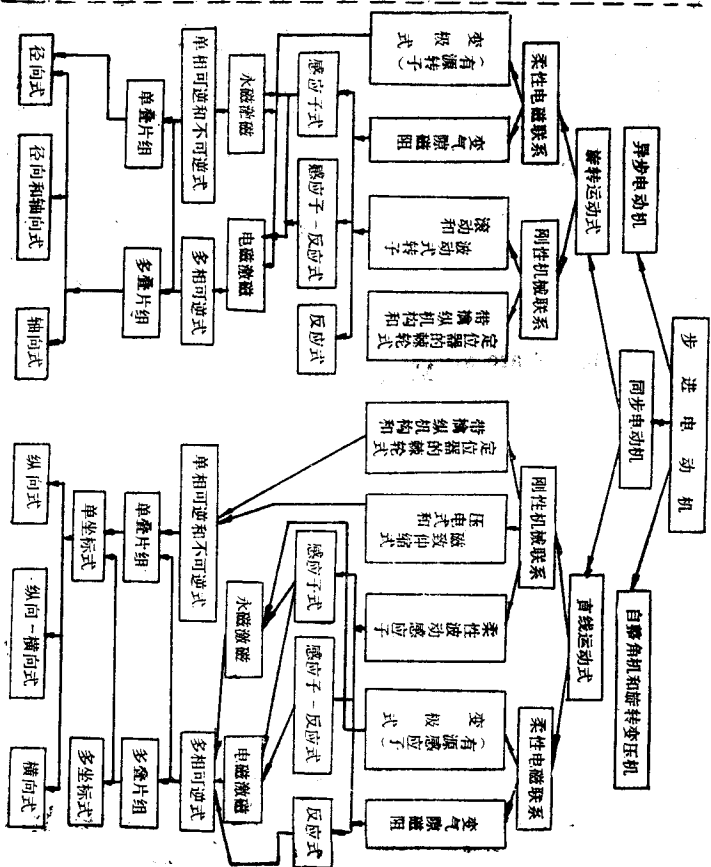


图 5 步进电动机分类

下步进电动机工作性能取决于极限动态特性^[8](图4曲线1),而在第二种情况下则取决于极限机械特性(图4曲线2)。

在换接频率为跳变时,工作区受极限动特性限制,并取决于步进电动机参数、负载力和惯性。换接频率平滑变化时由于消除了负载惯性和步进电动机惯性的影响而扩大了工作区(图4中的阴影区)。在后一种情况下,负载特性取决于步进电动机参数和按频率调节相电压的方法。

步进电动机本身在不同电源时有不同的分类特性^[1,9-11]。例如有的采用电磁能变换方法作分类基础^[1],有的根据相数和磁路激磁方法进行分类^[10]。由于所采用的标准缺乏共性,所以必须采用附加分类特性,例如步距大小、单独被换接的控制绕组数、绕组振荡阻尼方法等。

在下面介绍的分类中,将熟知的分类特征综合在一起并作了补充,从而可包括新型的电动机例如直线运动步进电动机和多坐标步进电动机等在内。

2. 旋转运动步进电动机

到目前为止,输出轴作旋转运动的电动机仍占绝大多数,步进电动机的情况亦如此。根据任何类型电动机原理——异步的、同步的和自整角机的——制造的步进电动机,均利用将指令脉冲变换成输出轴的不连续旋转(参阅图5)。实际上只是在按同步电动机原理构成的步进电动机中,才利用输出杆的直线运动而不用附加的运动系统变换器。

按异步电动机原理构成步进电动机时,如果是线绕式转子而其相数等于定子相数而且满足 $m \geq 2$ 的条件,则不要求对结构其它附加的改变。这种电动机的步进工作原理是以定子和转子的同步供电而其磁场作单向旋转为基础的。在这种情况下,定子和转子磁极互相之间在磁场旋转时仍是静止不动

的，而当轴上外加机械扰动时，电动机就产生静态同步转矩。为了实现由控制部件发出的指令实现步进位移，应使定子或转子供电压有瞬时相位移，从而导致转子磁极和定子磁极的不一致，亦即导致电动机作出完成步进位移的反应。通常，步距的大小为 $15-60^{\circ}$ [12, 13]。

实现自整角机步进工作时也利用了类似的原理。其中亦可使用单相转子再加装与转子相绕组垂直放置的阻尼回路 [14, 15]。

与最常用的同步型步进电动机相比较，步进工作的异步电动机和自整角机在完成步进的准确性方面和快速性方面均要差些，但却具有许多优点。今将主要优点分述于下：

——消耗功率同负载有关，空载时为最小；

——在其它条件相同仅由矩形电压供电的情况下静同步转距大；

——编制每一步距的位移规律简单；

——适用于大量生产的、价格低廉的系列电机，这一点对于用于象水利土壤改良设施自动化的分支拖动系统来说就特别重要。

同步步进电动机按运动部件和不动部件之间的联系可分成具有刚性机械联系的电动机和柔性磁联系的电动机。

刚性机械联系的步进电动机的最简单结构是，借助棘轮机构、推杆、擒纵器、定位器等将电磁铁衔铁的往复运动 [16] 或往复旋转运动 [17] 转换为输出轴的不连续的单方向转动。这些结构的特点是控制简单，因为一个电磁铁只要有一个控制开关就够了；在可逆运行的情况下也祇多用五个控制开关。这就是为什么它比其它类型的步进电动机诞生早得多的原因，因为当时电子换接器件还未获得广泛普及。这些电动

机的优点是消耗功率少，结构紧凑和步距精确度高。与电磁型步进电动机相比，明显的缺点是结构部件复杂、快速性差和寿命有限，但是在许多装置，如象计时器、指示器等，这些缺点无关紧要，所以至今还在继续使用。

今天，改进这类电机的主要方向是发展结构部件、提高快速性和可靠性^[18, 19]。快速性最高达到了频率100—150赫。

以滚动和柔性波动式转子电机为基础制成的定子-转子间刚性联系的步进电动机，其快速性最高。如图6所示滚动式转子的步进电动机结构，其中四极圆柱形定子1上绕有集中绕组2，并轮流接到电源电压 U 上。软磁性圆柱转子3偏心地放在定子膛孔中（偏心度 ξ ）。当定子磁场步进旋转时，转子顺着膛孔滚动，同时围绕本身的轴作减速步进旋转，并通过齿轮传动装置传至输出轴^[20]。

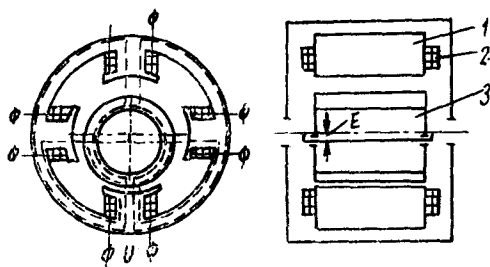


图6 有径向滚动转子的步进电动机

这类步进电动机的端面式结构^[21]如图7所示。在壳体1内，沿着圆周放置着柱形导磁体——定子磁极2，其上装有绕组3，通常由 m 相线圈组成。在轴4上，铰接地装着具有两个环状齿槽6和7的端面盘式转子5，第一个齿槽可沿与定子相连的齿环8滚动，而第二个齿槽可沿固定在转子轴上的端面

齿轮9滚动。齿槽6和齿环8的齿数相同，齿槽7和齿轮9的齿数相差不多。当线圈逐次激磁时，转子盘倾斜一定的 θ 角，沿着圆周滚动，使轴4产生减速的步进旋转。为降低振动的大小，采用定子两端而各装一转子的结构方式^[22]。

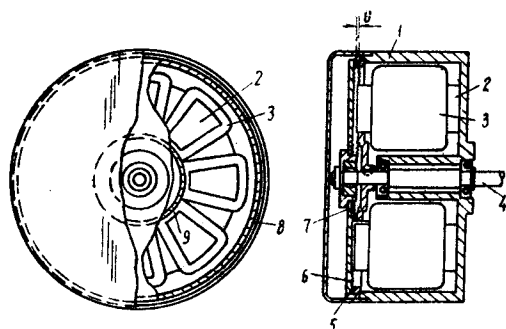


图7 有端面滚动转子的步进电动机

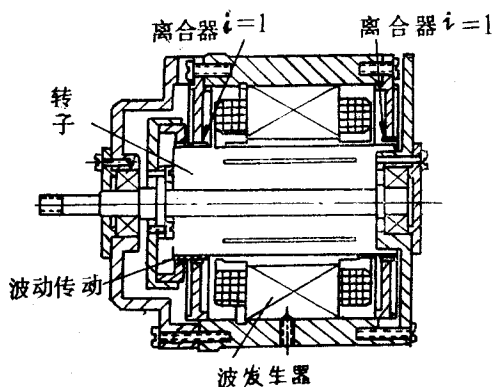


图8 有柔性波动转子的步进电动机

具有柔性波动转子的步进电动机的结构实例如图8所示。定子磁场靠柔性软磁薄壁转子的波发生器产生。为防止软磁元件的转动，采用传速比 $i=1$ 的齿轮离合器。经减速的步进旋转通过波齿轮传动装置传到轴上^[23]。

这类步进电动机的优点是质量比较小而转矩大、快速性高、保持转矩大和准确度高(达到 ± 5 分)、单位步距小(转一转达到1000步或更多)^[24]。与定子和转子柔性电磁联系的步进电动机相比，它的尺寸比较小，但是这时要求有小模数的齿轮传动装置，由于制造工艺上复杂，实际制作相当困难^[25, 26]。

波动式步进电动机的单位指标可按下述数据来评价：在尺寸 50×56 毫米、频率1200赫时，所生转矩为 550×10^{-4} 牛顿·米，消耗功率15瓦，轴每转一转完成1600步^[23]。

偏心滚动转子和波动转子步进电动机是基于转子和定子之间的柔性磁联系，但转子的位移与工作气隙相垂直。然而，最普遍的一类步进电动机，是转子位移同工作气隙相平行的电机，亦即在普通同步电动机基础上制成的电机。按照能量变换方法的不同，可以分成变极的步进电动机（带有源转子）和变工作气隙磁阻的步进电动机（带无源转子）。

通常，变极步进电动机为多极结构，其转子或者装有永久磁铁或者装有激磁绕组。图9示出了有源转子式四相双极步进电动机的绕组接线和定-转子相互作用的原理。图中两

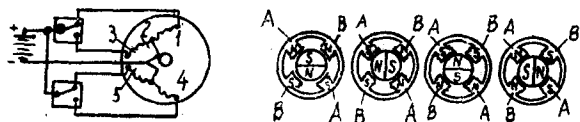


图9 有源转子式变极步进电动机