

图解 →



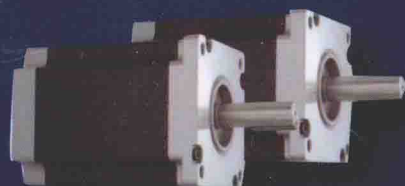
步进电机和伺服电机 的应用与维修

杜增辉 孙克军 编著

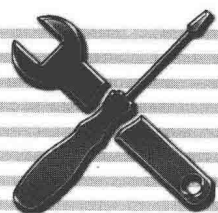


TUJIE

BUJIN DIANJI HE SIFU DIANJI
DE YINGYONG YU WEIXIU



化学工业出版社



步进电机和伺服电机 的应用与维修

杜增辉 孙克军 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

图解步进电机和伺服电机的应用与维修/杜增辉,
孙克军编著. —北京: 化学工业出版社, 2015.9
ISBN 978-7-122-24652-3

I. ①图… II. ①杜…②孙… III. ①步进电机—应用
②步进电机—维修③伺服电机—应用④伺服电机—维修
IV. ①TM35②TM383.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 162382 号

责任编辑: 卢小林
责任校对: 边涛

文字编辑: 项激
装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 三河市万龙印装有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张 10 $\frac{1}{4}$ 字数 270 千字 2016 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究

前言

FOREWORD

步进电机和伺服电机应用的领域非常广泛，从工控机到各种数控机床等多种领域。步进电机在一些要求控制相对不高的场合得到了大量应用，伺服电机在一些要求精准控制的场合应用广泛。在使用过程中也会出现各种各样的故障。通过科学的方法、行之有效的措施，迅速判断故障发生的原因，随时解决出现的问题，既是保证步进电机和伺服电机及其控制系统安全、可靠运行，提高设备使用率的关键所在，也是使用过程中亟待解决的问题，本书正是为满足读者这一需要而编写的。

本书分别从步进电机和伺服电机的原理入手，介绍了步进电机和伺服电机的选型及经常应用的电机规格和参数，以供选用时参考，接着介绍了步进电机和伺服电机的维护要点和方法，着重介绍了步进电机及其配套驱动系统常见故障分析以及典型维修实例，把当前应用最为广泛的伺服电机作为主要篇幅进行介绍，包括伺服电机及其配套伺服系统的常见故障分析以及大量典型维修实例介绍。

本书突出了先进性、实用性，旨在提高解决问题的快速性与针对性，克服盲目性和片面性，达到多、快、好、省的维修效果。本书可供从事步进电机和伺服电机相关设计、维修、调试、使用的各类技术人员学习，又可作为相关专业在校师生的参考书。

本书由杜增辉和孙克军编著，第1、第2章由河北科技大学孙克军编写，第3~6章和附录由石家庄椿凯动力传输机械有限公司杜增辉编写。全书由杜增辉统稿。

由于作者水平有限，书中难免有不妥之处，殷切希望广大读者提出批评、指正。

编著者

目 录

CONTENTS

第1章 步进电机原理 001

1.1 步进电机的用途与特点	001
1.1.1 步进电机的用途	001
1.1.2 步进电机的特点	002
1.1.3 步进电机的种类	002
1.2 步进电机的基本结构与工作原理	003
1.2.1 反应式步进电机	003
1.2.2 永磁式步进电机	008
1.2.3 混合式步进电机	009
1.3 反应式步进电机的特性	011
1.3.1 步进电机的静态运行特性	011
1.3.2 步进电机的动态特性	015
1.4 步进电机的主要性能指标	020
1.5 步进电机的驱动电源	021
1.5.1 对驱动电源的基本要求	021
1.5.2 驱动电源的组成	021
1.5.3 驱动电源的分类	022
1.5.4 单电压型驱动电源	022
1.5.5 高、低压切换型驱动电源	022
1.5.6 电流控制的高、低压切换型驱动电源	023
1.5.7 细分电路电源	024
1.5.8 双极性驱动电源	024
1.6 步进电机的控制原理与应用	025
1.6.1 步进电机的控制原理	025
1.6.2 步进电机的加减速定位控制	027
1.6.3 步进电机的应用	027

第2章 伺服电机原理 029

2.1 伺服电机概述	029
2.1.1 伺服电机的用途与分类	029
2.1.2 自动控制系统对伺服电机的基本要求	029
2.2 直流伺服电机	030
2.2.1 直流伺服电机的工作原理与结构特点	030
2.2.2 直流伺服电机的控制方式	035

2.2.3	直流伺服电机的静态特性	037
2.2.4	直流伺服电机的动态特性	039
2.3	交流伺服电机	041
2.3.1	概述	041
2.3.2	两相交流伺服电机的基本结构与工作原理	042
2.3.3	两相交流伺服电机的控制方式	044
2.3.4	两相交流伺服电机的静态特性	045
2.3.5	两相交流伺服电机的动态特性	049
2.3.6	两相异步伺服电机的额定值	050
2.3.7	两相异步伺服电机的主要性能指标	050
2.4	伺服电机的应用	052

第3章 步进电机和伺服电机选型

054

3.1	步进电机选型	055
3.1.1	步进电机选型步骤	055
3.1.2	步进电机选型实例	055
3.2	伺服电机选型	056
3.2.1	伺服电机选型步骤	056
3.2.2	伺服电机选型实例	057

第4章 步进电机和伺服电机维护与保养

062

4.1	步进电机维护要点与保养步骤	062
4.1.1	步进电机检查维护要点	062
4.1.2	步进电机连接保养要求和步骤	062
4.2	伺服电机维护要点与保养步骤	063
4.2.1	伺服电机维护要点	063
4.2.2	伺服电机保养要求与步骤	064

第5章 步进电机及驱动故障分析与维修实例

066

5.1	步进电机及驱动故障类型分析	066
5.1.1	反应式步进电机及驱动故障类型分析	066
5.1.2	永磁式步进电机及驱动故障类型分析	067
5.1.3	混合式步进电机及驱动故障类型分析	070
5.2	步进电机及驱动故障维修实例	070
5.2.1	反应式步进电机及驱动维修实例	070
5.2.2	永磁式步进电机及驱动维修实例	082
5.2.3	混合式步进电机及驱动维修实例	084

第6章 伺服电机及伺服系统故障分析与维修实例

085

6.1 直流伺服电机及伺服系统故障分析与维修实例	085
6.1.1 直流伺服电机及伺服系统故障分析	085
6.1.2 直流伺服电机及伺服系统故障维修实例	093
6.2 交流伺服电机及伺服系统故障分析与维修实例	110
6.2.1 交流伺服电机及伺服系统故障分析	110
6.2.2 交流伺服电机及伺服系统故障维修实例	135
附录 CNC 常用术语中英文对照表	149
参考文献	157

第 1 章

步进电机原理

1.1 步进电机的用途与特点

1.1.1 步进电机的用途

随着自动控制系统和计算装置的不断发展,在普通旋转电机的基础上产生出多种具有特殊性能的小功率电机,它们在自动控制系统和计算装置中分别作为执行元件、检测元件和解算元件,这类电机统称为控制电机。显然,从基本的电磁感应原理来说,控制电机和普通旋转电机并没有本质上的差别,但普通旋转电机着重于对启动和运行状态的力能指标的要求,而控制电机则着重于特性的高精度和快速响应。

各种控制电机从它们的外表看差不多都是一个圆柱体,中间有一根转轴,体积一般都比较小,因此控制电机是一种微电机。从它们完成的任务来看,各种控制电机又各不相同,有的用来带动自动控制系统中的机构运动,有的用来量测机械转角或转速,有的可以进行三角函数运算,有的可以进行积分或微分运算等。

各种控制电机的用途和功能尽管不同,但基本上可划分为信号元件和功率元件两大类。凡是用来转换信号的都为信号元件,又称为量测元件;凡是把信号转换成输出功率或把电能转换为机械能的都为功率元件,又称为执行元件。若以电源分类,控制电机有直流和交流两类。

步进电机是一种用电脉冲信号进行控制,并将电脉冲信号转换成相应的角位移(或线位移)的一种控制电机。步进电机又称为脉冲电机。

一般电机都是连续旋转的,而步进电机则是一步一步转动的,它是由专用电源供给电脉冲,每输入一个电脉冲信号,电机就转过一个角度,如图 1-1 所示。步进电机也可以直接输出线位移,每输入一个电脉冲信号,电机就走一段直线距离。它可以看成是一种特殊运行方式的同步电机。

步进电机的运动形式与普通匀速旋转的电机有一定的差别,它的运动形式是步进式的,所以称为步进电机。又因其绕组上所加的电源是脉冲电压,有时也称它为脉冲电机。

由于步进电机是受脉冲信号控制的,所以步进电机不需要变换,就能直接将数字信号转换成角位移或线位移,因此它很适合于作为数字控制系统的伺服元件。

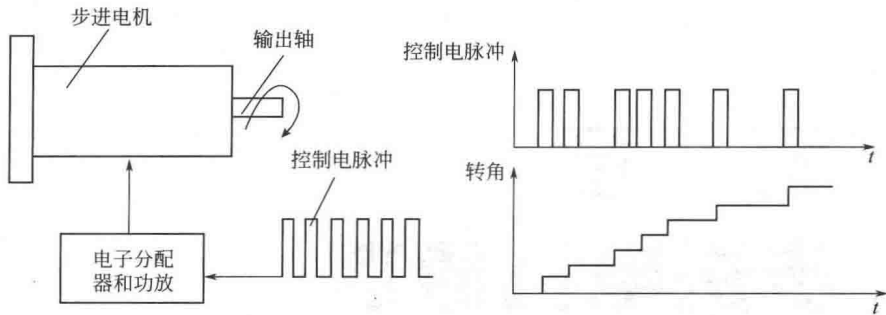


图 1-1 步进电机的功用

近年来, 步进电机已广泛地应用于数字控制系统中, 例如数控机床、绘图机、计算机外围设备、自动记录仪表、钟表和数/模转换装置等。相应其研制工作进展迅速, 步进电机的性能也有较大的提高。

1.1.2 步进电机的特点

(1) 步进电机的优点

① 步进电机的角位移量 (或直线位移量) 与电脉冲数成正比, 所以步进电机的转速 (或线速度) 也与脉冲频率成正比。在步进电机的负载能力范围内, 其步距角和转速大小不受电压波动和负载变化的影响, 也不受环境条件如温度、气压、冲击和振动等影响, 它仅与脉冲频率有关。因此, 步进电机适于在开环系统中作执行元件。

② 步进电机控制性能好, 通过改变脉冲频率的高低就可以在很大范围内调节步进电机的转速 (或线速度), 并能快速启动、制动和反转。若用同一频率的脉冲电源控制几台步进电机时, 它们可以同步运行。

③ 步进电机每转一周都有固定的步数, 在不丢步的情况下运行, 其步距误差不会长期积累, 即每一步虽然有误差, 但转过一周时, 累积误差为零。这些特点使它完全适用于数字控制的开环系统中作为伺服元件, 并使整个系统大为简化, 而又运行可靠。当采用了速度和位置检测装置后, 它也可以用于闭环系统中。

④ 有些类型的步进电机在停止供电状态下还有定位转矩, 有些类型的步进电机在停机后某些相绕组仍保持通电状态, 也具有自锁能力, 不需要机械制动装置。

⑤ 步进电机的步距角变动范围较大, 在小步距角的情况下, 往往可以不经减速器而获得低速运行。

由于以上这些特点, 步进电机日益广泛地应用于数字控制系统中, 例如数控机床、绘图机、自动记录仪表、数/模转换装置以及航空、导弹、无线电等工业中。

(2) 步进电机的缺点

步进电机的主要缺点是效率较低, 并且需要配上适当的驱动电源供给电脉冲信号。一般来说, 它带负载惯量的能力不强, 在使用时既要注意负载转矩的大小, 又要注意负载转动惯量的大小, 只有当两者选取在合适的范围时, 步进电机才能获得满意的运行性能。此外, 共振和振荡也常常是运行中出现的问题, 特别是内阻尼较小的反应式步进电机, 有时还要加机械阻尼机构。

1.1.3 步进电机的种类

步进电机的种类很多, 按运动形式分有旋转式步进电机、直线步进电机和平面步进电

机。按运行原理和结构形式分类,步进电机可分为反应式、永磁式和混合式(又称为感应子式)等。按工作方式分类,步进电机可分为功率式和伺服式,前者能直接带动较大的负载,后者仅能带动较小负载。其中反应式步进电机用得比较普遍,结构也较简单。

当前最有发展前景的是混合式步进电机,其有以下四个方面的发展趋势:继续沿着小型化的方向发展;改圆形电机为方形电机;对电机进行综合设计;向五相和三相电机方向发展。

1.2 步进电机的基本结构与工作原理

1.2.1 反应式步进电机

(1) 反应式步进电机的基本结构

反应式步进电机是利用反应转矩(磁阻转矩)使转子转动的。因结构不同,又可分为单段式和多段式两种。

① 单段式。又称为径向分相式。它是目前步进电机中使用得最多的一种结构形式,如图1-2所示。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,否则不能形成启动力矩。定子的磁极数通常为相数 m 的2倍,每个磁极上都装有控制绕组,绕组形式为集中绕组,在定子磁极的极弧上开有小齿。转子由软磁材料制成,转子沿圆周上也有均匀分布的小齿,它与定子极弧上的小齿有相同的分度数,即称为齿距,且齿形相似。定子磁极的中心线即齿的中心线或槽的中心线。

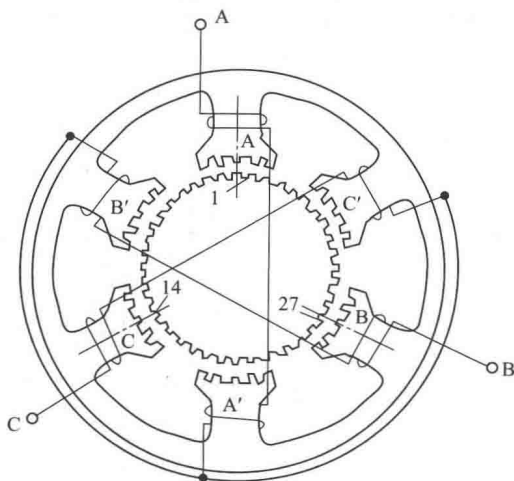


图 1-2 单段式三相反应式步进电机
(A 相通电时的位置)

单段式反应式步进电机制造简便,精度易于保证;步距角也可以做得较小,容易得到较高的启动和运行频率。其缺点是,当电机的直径较小,而相数又较多时,沿径向分相较为困难。另外这种电机消耗的功率较大,断电时无定位转矩。

② 多段式。又称为轴向分相式。按其磁路的特点不同,又可分为轴向磁路多段式和径向磁路多段式两种。

a. 轴向磁路多段式步进电机的结构如图1-3所示。定、转子铁芯沿电机轴向按相数 m 分段,每一组定子铁芯中放置一环形的控制绕组。定、转子圆周上冲有形状相似、数量相同的小齿。定子铁芯(或转子铁芯)每相邻段错开 $1/m$ 齿距。

这种步进电机的定子空间利用率较好,环形控制绕组绕制方便。转子的转动惯量低、步距角也可以做得较小,启动和运行频率较高。但是在制造时,铁芯分段和错位工艺较复杂,精度不易保证。

b. 径向磁路多段式步进电机的结构如图1-4所示。定、转子铁芯沿电机轴向按相数 m 分段,每段定子铁芯的磁极上均放置同一相控制绕组。定子铁芯(或转子铁芯)每相邻两段错开 $1/m$ 齿距;对每一段铁芯来说,定、转子上的磁极分布情况相同。也可以在一段铁芯上放置两相或三相控制绕组,相当于单段式电机的组合。定子铁芯(或转子铁芯)每相邻两段则应错开相应的齿距。

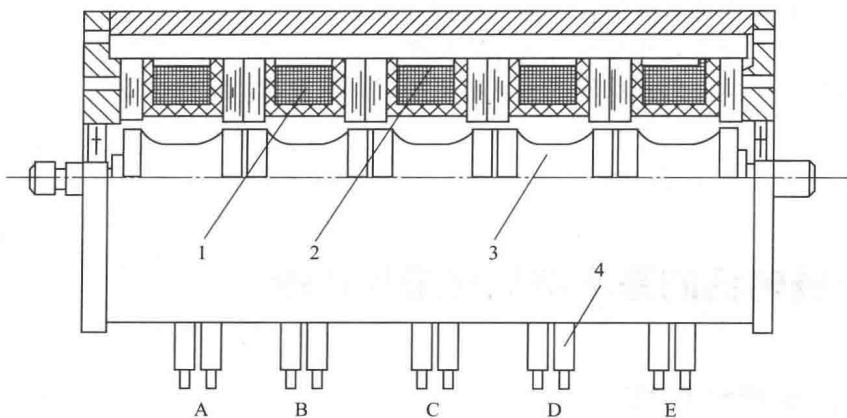


图 1-3 多段式轴向磁路反应式步进电机

1—线圈；2—定子；3—转子；4—引线

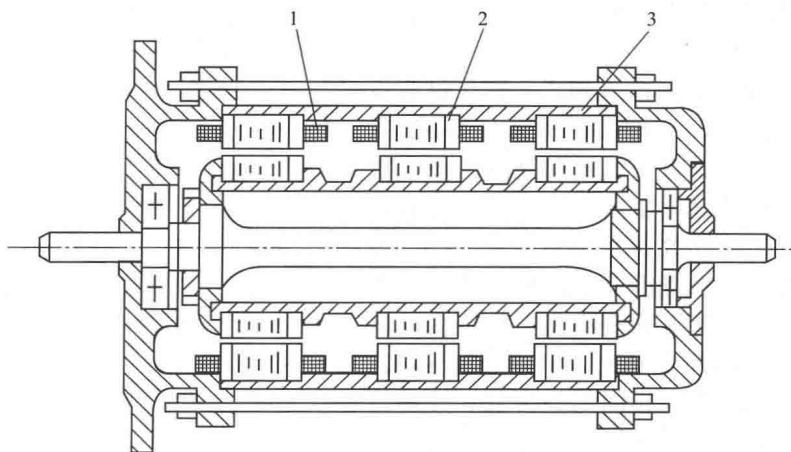


图 1-4 多段式径向磁路反应式步进电机

1—线圈；2—定子；3—转子

这种步进电机的步距角可以做得较小，启动和运行频率较高，对于相数多且直径和长度又有限制的反应式步进电机来说，在磁极布置上要比以上两种灵活，但是铁芯的错位工艺比较复杂。

(2) 反应式步进电机的工作原理

图 1-5 所示为一台最简单的三相反应式步进电机的工作原理图。它的定子上有 6 个极，每个极上都装有控制绕组，每两个相对的极组成一相。转子是 4 个均匀分布的齿，上面没有绕组。反应式步进电机是利用凸极转子交轴磁阻与直轴磁阻之差所产生的反应转矩（或磁阻转矩）而转动的，所以也称为磁阻式步进电机。下面分别介绍不同通电方式时，反应式步进电机的工作原理。

① 三相单三拍通电方式。反应式步进电机采用三相单三拍通电方式运行，其工作原理如图 1-5 所示，当 A 相控制绕组通电时，气隙磁场轴线与 A 相绕组轴线重合，因磁通总是要沿着磁阻最小的路径闭合，所以在磁力的作用下，将使转子齿 1 和 3 的轴线与定子 A 极轴线对齐，如图 1-5 (a) 所示。同样道理，当 A 相断电、B 相通电时，转子便按逆时针方向转过 30° 角度，使转子齿 2 和 4 的轴线与定子 B 极轴线对齐，如图 1-5 (b) 所示。如再使 B 相断电、C 相通电时，则转子又将在空间转过 30° ，使转子齿 1 和 3 的轴线与定子 C 极轴

线对齐,如图 1-5 (c) 所示。如此循环往复,并按 A→B→C→A 的顺序通电,步进电机便按一定的方向一步一步地连续转动。步进电机的转速直接取决于控制绕组与电源接通或断开 的变化频率。若按 A→C→B→A 的顺序通电,则步进电机将反向转动。

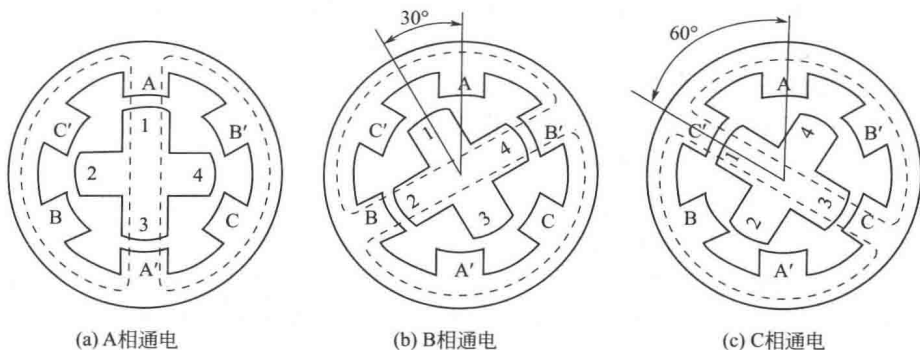


图 1-5 三相反应式步进电机的工作原理图
1~4—转子齿

步进电机的定子控制绕组每改变一次通电方式,称为一拍。此时步进电机转子所转过的空间角度称为步距角 θ_s 。上述通电方式,称为三相单三拍运行。“三相”即三相步进电机,具有三相定子绕组;“单”是指每次通电时,只有一相控制绕组通电;“三拍”是指经过三次切换控制绕组的通电状态为一个循环,第四次换接重复第一次的情况。很显然,在这种通电方式时,三相反应式步进电机的步距角 θ_s 应为 30° 。

三相单三拍运行时,步进电机的控制绕组在断电、通电的间断期间,转子磁极因“失磁”而不能保持自行“锁定”的平衡位置,即失去了“自锁”能力,易出现失步现象;另外,由一相控制绕组断电至另一相控制绕组通电,转子则经历启动加速、减速至新的平衡位置的过程,转子在达到新的平衡位置时,会由于惯性而在平衡点附近产生振荡现象,故运行的稳定性差。因此,常采用双三拍或单、双六拍的控制方式。

② 三相双三拍通电方式。反应式步进电机采用三相双三拍通电方式运行,其工作原理如图 1-6 所示,其控制绕组按 AB→BC→CA→AB 顺序通电,或按 AB→CA→BC→AB 顺序通电,即每拍同时有两相绕组同时通电,三拍为一个循环。当 A、B 两相控制绕组通电时,转子齿的位置应同时考虑到两对定子极的作用,只有当 A 相极和 B 相极对转子齿所产生的磁拉力相平衡时,才是转子的平衡位置,如图 1-6 (a) 所示。若下一拍为 B、C 两相同时通电时,则转子按逆时针方向转过 30° 。到达新的平衡位置,如图 1-6 (b) 所示。

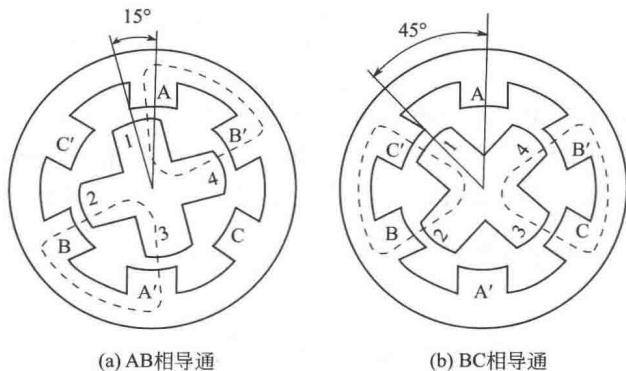


图 1-6 三相双三拍通电方式工作原理图
1~4—转子齿

由图 1-6 可知,反应式步进电机采用三相双三拍通电方式运行时,其步距角仍是 30° 。但是三相双三拍运行时,每一拍总有一相绕组持续通电,例如由 A、B 两相通电变为 B、C 两相通电时,B 相始终保持持续通电状态,C 相磁拉力试图使转子逆时针方向转动,而 B 相磁拉力却起阻止转子继续向前转动的作用,即起到了一定的电阻尼作用,所以步进电机工作比较平稳。而在三相单三拍运行时,由于没有这种阻尼作用,所以转子达到新的平衡位置容易产生振荡,稳定性不如三相双三拍运行方式。

③ 三相单、双六拍通电方式。反应式步进电机,采用三相单、双六拍通电方式运行的工作原理如图 1-7 所示,其控制绕组按 $A \rightarrow AB \rightarrow B \rightarrow BC \rightarrow C \rightarrow CA \rightarrow A$ 顺序通电,或按 $A \rightarrow AC \rightarrow C \rightarrow CB \rightarrow B \rightarrow BA \rightarrow A$ 顺序通电,也就是说,先 A 相控制绕组通电;以后再 A、B 相控制绕组同时通电;然后断开 A 相控制绕组,由 B 相控制绕组单独接通;再同时使 B、C 相控制绕组同时通电,依此进行。其特点是三相控制绕组需经 6 次切换才能完成一个循环,故称为“六拍”,而且通电时,有时是单个绕组接通,有时又为两个绕组同时接通,因此称为“单、双六拍”。

由图 1-7 可知,反应式步进电机采用三相单、双六拍通电方式运行时,步距角也有所不同。当 A 相控制绕组通电时,与三相单三拍运行的情况相同,转子齿 1、3 和定子极 A、A' 轴线对齐,如图 1-7 (a) 所示。当 A、B 相控制绕组同时通电时,转子齿 2、4 在定子极 B、B' 的吸引下是转子沿逆时针方向转动,直至转子齿 1、3 和定子极 A、A' 之间的作用力与转子齿 2、4 和定子极 B、B' 之间的作用力相平衡为止,如图 1-7 (b) 所示。当断开 A 相控制绕组,而由 B 相控制绕组通电时,转子将继续沿逆时针方向转过一个角度,使转子齿 2、4 和定子极 B、B' 对齐,如图 1-7 (c) 所示。若继续按 $BC \rightarrow C \rightarrow CA \rightarrow A$ 的顺序通电,步进电机就按逆时针方向连续转动。如果通电顺序变为 $A \rightarrow AC \rightarrow C \rightarrow CB \rightarrow B \rightarrow BA \rightarrow A$ 时,步进电机将按顺时针方向转动。

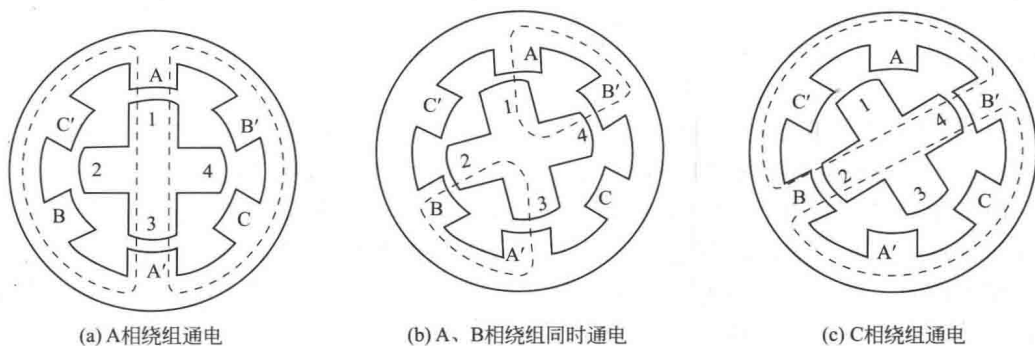


图 1-7 单、双六拍运行时的三相反应式步进电机
1~4—转子齿

在三相单三拍通电方式中,步进电机每一拍转子转过的步距角 θ_s 为 30° 。采用三相单、双六拍通电方式后,步进电机由 A 相控制绕组单独通电到 B 相控制绕组单独通电,中间还要经过 A、B 两相同时通电这个状态,也就是说要经过二拍转子才转过 30° ,所以,在这种通电方式下,三相步进电机的步距角 $\theta_s = \frac{30^\circ}{2} = 15^\circ$,即单、双六拍运行时的步距角比三拍通电方式时减小一半。

由以上分析可见,同一台步进电机采用不同的通电方式,可以有不同的拍数,对应的步距角也不同。

此外,六拍运行方式每一拍也总有一相控制绕组持续通电,也具有电磁阻尼作用步进电

机工作也比较平稳。

上述这种简单结构的反应式步进电机的步距角较大，如在数控机床中应用就会影响到加工工件的精度。图 1-2 中所示的结构是最常见的一种小步距角的三相反应式步进电机。它的定子上有 6 个极，分别绕有 A-A'、B-B'、C-C' 三相控制绕组。转子上均匀分布 40 个齿。定子每个极上有 5 个齿。定、转子的齿宽和齿距都相同。当 A 相控制绕组通电时，转子受到反应转矩的作用，使转子齿的轴线和定子 A、A' 极下齿的轴线对齐。因为转子上共有 40 个齿，其每个齿的齿距角为 $\frac{360^\circ}{40} = 9^\circ$ ，而定子磁极的极距为 $\frac{360^\circ}{6} = 60^\circ$ ，定子每个极距所占的转子齿数为 $\frac{40}{6} = 6\frac{2}{3}$ ，不是整数。同理，定子一个极距所占的齿距数也不是整数，如图 1-8 所示。由于相邻磁极间的转子齿不是整数，因此，当定子 A 极面下的定、转子齿对齐时，定子 B' 极和 C' 极面下的齿就分别和转子齿依次有 $1/3$ 齿距的错位，即 3° 。同样，当 A 相控制绕组断电，B 相控制绕组通电时，这时步进电机中产生沿 B 极轴线方向的磁场，在反应转矩的作用下，转子按顺时针方向转过 3° 。使转子齿的轴线和定子 B' 极面下齿的轴线对齐，这时，定子 A 极和 C 极面下的齿又分别和转子齿依次错开 $1/3$ 齿距。依此类推，若控制绕组持续按 A→B→C→A 顺序循环通电，转子就沿顺时针方向一步一步地转动，每拍转过 3° ，即步距角为 3° 。若改变通电顺序，即按 A→C→B→A 顺序循环通电，转子便沿逆时针方向同样以每拍转过 3° 的方式转动。此时为单三拍通电方式运行。若采用三相单、双六拍的通电方式运行时，即按与前面分析的 A→AB→B→BC→C→CA→A 顺序循环通电，同样步距角也要减少一半，即每拍转子仅转过 1.5° 。

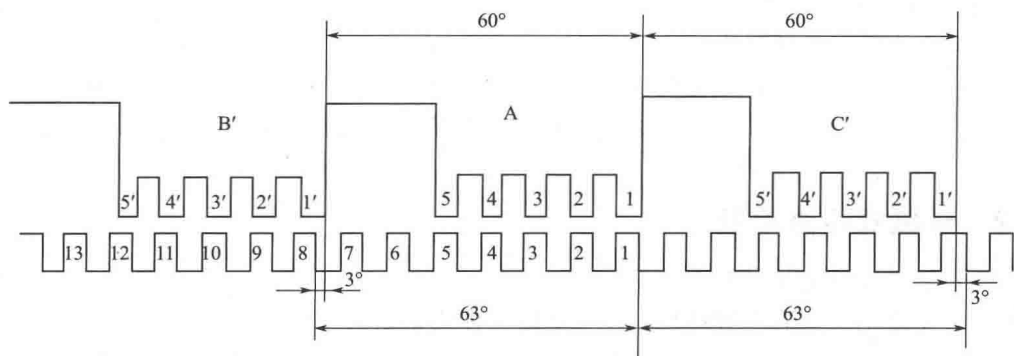


图 1-8 三相反应式步进电机的展开图
(A 相绕组通电时)

通过以上的分析可知，为了能够实现“自动错位”，反应式步进电机的转子齿数 Z_r 不能任意选取，而应满足一定的条件。因为在同一相的几个磁极下，定、转子齿应同时对齐或同时错开，才能使同一相的几个磁极的作用相加，产生足够的反应转矩，而定子圆周上属于同一相的极总是成对出现的，所以转子齿数应是偶数。另外，在定子的相邻磁极下，定、转子齿之间应错开转子齿距的 $\frac{1}{m}$ 倍 (m 为步进电机的相数)，即它们之间在空间位置上错开 $\frac{360^\circ}{mZ_r}$ 角，这样才能在连续改变通电状态下，获得连续不断的运动。由此可得三相反应式步进电机转子齿数应符合下式条件

$$Z_r = 2p \left(K \pm \frac{1}{m} \right)$$

式中， $2p$ 为反应式步进电机定子极数，即一相控制绕组通电时在电机圆周上形成的磁

极数； m 为步进电机的相数； K 为正整数。

由以上分析可知，反应式步进电机的步距角 θ_s 的大小是由转子的齿数 Z_r 、控制绕组的相数 m 和通电方式所决定的。它们之间存在以下关系

$$\theta_s = \frac{360^\circ}{mZ_r C} = \frac{2\pi}{mZ_r C}$$

式中， C 为状态系数，当采用单三拍和双三拍通电方式运行时， $C=1$ ；而采用单、双六拍通电方式运行时， $C=2$ 。

如果以 N 表示步进电机运行的拍数，则转子经过 N 步，将经过一个齿距。每转一圈（即 360° 机械角），需要走 NZ_r 步，所以步距角又可以表示为

$$\theta_s = \frac{360^\circ}{NZ_r} = \frac{2\pi}{NZ_r}$$

$$N = Cm$$

若步进电机通电的脉冲频率为 f （拍/s 或脉冲数/s），则步进电机的转速 n 为

$$n = \frac{60f}{mZ_r C} \quad \text{或} \quad n = \frac{60f}{NZ_r}$$

式中， f 的单位是 s^{-1} ； n 的单位是 r/min 。

由此可知，反应式步进电机的转速与拍数 N 、转子齿数 Z_r 及脉冲的频率 f 有关。相数和转子齿数越多，步距角越小，转速也越低。在同样脉冲频率下，转速越低，其他性能也有所改善，但相数越多，电源越复杂。目前步进电机一般做到六相，个别的也有做成八相或更多相数。

同理，当转子齿数一定时，步进电机的转速与输入脉冲的频率成正比，改变脉冲的频率，可以改变步进电机的转速。

增加转子齿数是减小步进电机步距角的一个有效途径，目前所使用的步进电机转子齿数一般很多。对于相同相数的步进电机，既可以采用单拍或双拍方式，也可以采用单、双拍方式。所以，同一台步进电机可有两种步距角，如 $3^\circ/1.5^\circ$ 、 $1.5^\circ/0.75^\circ$ 、 $1.2^\circ/0.6^\circ$ 等。

1.2.2 永磁式步进电机

(1) 永磁式步进电机的基本结构

永磁式步进电机也有多种结构，图 1-9 是一种典型结构。它的定子为凸极式，定子上有两相或多相绕组，转子为一对或几对极的星形磁钢，转子的极数应与定子每相的极数相同。图中定子为两相集中绕组（AO、BO），每相为两对极，因此转子也是两对极的永磁转子。

(2) 永磁式步进电机的工作原理

由图 1-9 中可以看出，当定子绕组按 $A \rightarrow B \rightarrow (-A) \rightarrow (-B) \rightarrow A \dots$ 的次序轮流以直流脉冲时（如 A 相通入正脉冲，则定子上形成上下 S、左右 N 四个磁极），按 N、S 相吸原理，转子必为上下 N、左右 S，如图 1-9 所示。若将 A 相断开、B 相接通，则定子极性将顺时针转过 45° ，转子也将按顺时针方向转动，每次转过 45° 空间角度，也就是步距角 θ_s 为 45° 。一般来说，步距角 θ_s 的值为

$$\theta_s = \frac{360^\circ}{2mp}$$

式中， m 为相数； p 为转子极对数。

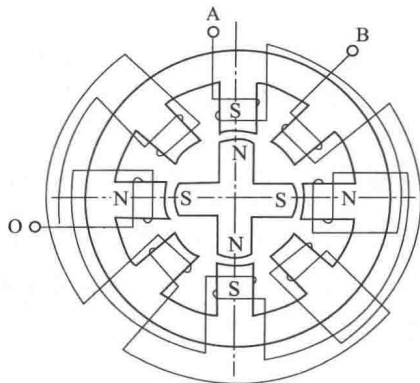


图 1-9 永磁式步进电机

上述这种通电方式为两相单四拍。由以上分析可知，永磁式步进电机需要电源供给正、负脉冲，否则不能连续运转。一般永磁式步进电机的驱动电路要做成双极性驱动，这会使电源的线路复杂化。这个问题也可以这样来解决，就是在同一个极上绕两套绕向相反的绕组，这样虽增加了用铜量和电机的尺寸，但简化了对电源的要求，即电源只要供给正脉冲就可以了。

此外，还有两相双四拍通电方式 [即 $AB \rightarrow B(-A) \rightarrow (-A)(-B) \rightarrow (-B)A \rightarrow AB$] 和八拍通电方式。

永磁式步进电机的步距角大，启动和运行频率低。但是它消耗的功率比反应式步进电机小，在断电情况下有定位转矩，有较强的内阻尼力矩。

星形磁极的加工工艺比较复杂，如采用图 1-10 所示的爪形磁极结构，将磁钢做成环形，则可简化加工工艺。这种爪极式永磁步进电机的磁钢为轴向充磁，磁钢两端的两个爪形磁极分别为 S 和 N 极性。由于两个爪形磁极是对插在一起的，从转子表面看，沿圆周方向各个极爪是 N、S 极性交错分布的，极爪的极对数与定子每相绕组的极对数相等。爪极式永磁步进电机的运行原理与星形磁钢结构的相同。

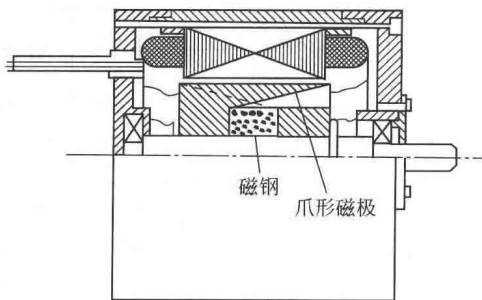


图 1-10 爪极式永磁步进电机

永磁式步进电机具有以下特点。

- ① 大步距角，例如 15° 、 22.5° 、 30° 、 45° 、 90° 等。
- ② 启动频率较低，通常为几十到几百赫兹（但是转速不一定低）。
- ③ 控制功率小。
- ④ 在断电情况下有定位转矩。
- ⑤ 有强的内阻尼力矩。

1.2.3 混合式步进电机

混合式步进电机（又称感应子式步进电机）既有反应式步进电机小步距角的特点，又有永磁式步进电机效率高、绕组电感比较小的特点。

(1) 两相混合式步进电机的结构

图 1-11 为混合式步进电机的轴向剖视图。它的定子铁芯与单段反应式步进电机基本相同，即沿着圆周有若干凸出的磁极，每个磁极的极面上有小齿，机身上有控制绕组；定子控制绕组与永磁式步进电机基本相同，也是两相集中绕组，每相为两对极，控制绕组的接线如图 1-12 所示。

转子中间为轴向磁化的环形永久磁铁，磁铁两端各套有一段转子铁芯，转子铁芯由整块钢加工或用硅钢片叠成，两段转子铁芯上沿外圆周开有小齿，其齿距与定子小齿齿距相同，两端的转子铁芯上的小齿彼此错过 $1/2$ 齿距，如图 1-13 所示。定、转子齿数的配合与单段反应式步进电机相同。

图 1-13 (a) 所示的 S 极铁芯段截面图即为图 1-11 中的 I—I 截面；图 1-13 (b) 所示的 N 极铁芯段截面图即为图 1-11 中的 II—II 截面。在图 1-13 (a) 所示的 S 极铁芯段截面图中，当磁极 1 下是齿对齿时，磁极 5 下也是齿对齿，气隙磁阻最小；磁极 3 和磁极 7 下是齿对槽，气隙磁阻最大。

此时，在图 1-13 (b) 所示的 N 极铁芯段截面图中，磁极 1' 和磁极 5' 下，正好是齿对槽，磁极 3' 和磁极 7' 下，正好是齿对齿。可见，两端的转子铁芯上的小齿彼此错过 $1/2$

齿距。

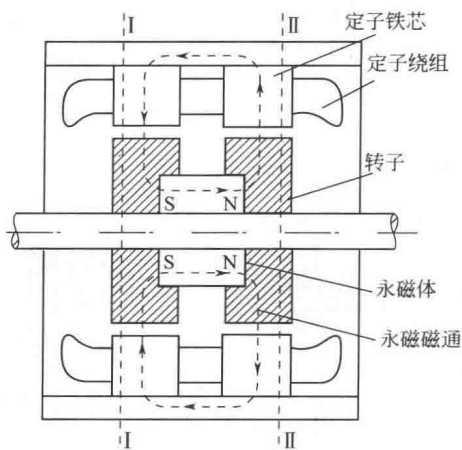


图 1-11 混合式步进电机的轴向剖视图

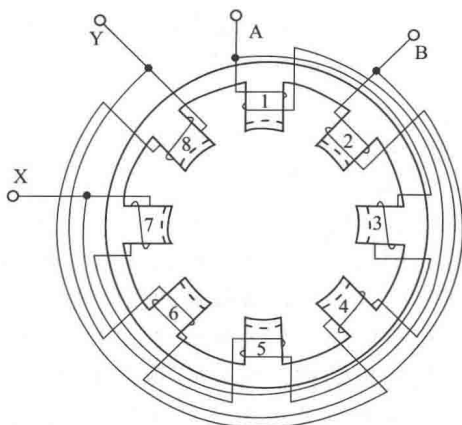


图 1-12 混合式步进电机绕组接线图

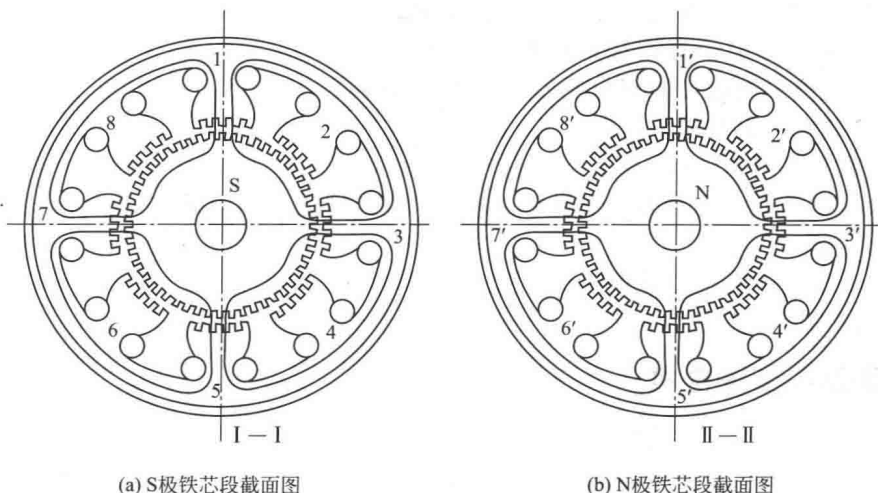


图 1-13 铁芯段的横截面图

混合式步进电机作用在气隙上的磁动势有两个：一个是由永久磁钢产生的磁动势；另一个是由控制绕组电流产生的磁动势。这两个磁动势有时是相加的，有时是相减的，视控制绕组中的电流方向而定。这种步进电机的特点是混入了永久磁钢的磁动势，故称为混合式步进电机。

(2) 两相混合式步进电机的工作原理

转子永久磁铁的一端（如图 1-11 中 I—I 端）为 S 极，则转子铁芯整个圆周上都呈 S 极性，如图 1-13 (a) 所示。转子永久磁铁的另一端（如图 1-11 中 II—II 端）为 N 极，则转子铁芯整个圆周上都呈 N 极性，如图 1-13 (b) 所示。当定子 A 相通电时，定子 1、3、5、7 极上的极性为 N、S、N、S，这时转子的稳定平衡位置就是图 1-13 所示的位置，即定子磁极 1 和 5 上的齿与 I—I 端上的转子齿对齐，而定子磁极 1' 和 5' 上的齿与 II—II 端上的转子槽对齐；定子磁极 3 和 7 上的齿与 I—I 端上的转子槽对齐，而定子磁极 3' 和 7' 上的齿与 II—II 端上的转子齿对齐。此时，B 相 4 个磁极（2、4、6、8 极）上的齿与转子齿都错开 1/4 齿距。