



机电类 **新技师** 培养规划教材

# 特种电机与控制

TEZHONG DIANJI YU KONGZHI

中国机械工业教育协会

组编

全国职业培训教学工作指导委员会  
机电专业委员会

王铁成 主编

赠送 电子教案



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

机电类新技师培养规划教材

# 特种电机与控制

中国机械工业教育协会  
全国职业培训教学工作指导委员会机电专业委员会 组编  
王铁成 主编



机械工业出版社

本教材是根据中国机械工业教育协会和全国职业培训教学工作指导委员会机电专业委员会组织制定的技师教学计划和教学大纲编写的。本教材的主要内容包括：步进电动机、单相电动机、测速发电机、自整角机、旋转变压器、伺服电动机、无刷直流电动机、磁阻电机、直线电动机。

本教材的教学计划和大纲是依据《国家职业标准》中对技师的要求制定的，内容立足岗位，以必需够用为度，符合职业教育的特点和规律。本教材配有教学计划和大纲、电子教案，可供高级技校、技师学院、高等职业院校等教育培训机构使用。

## 图书在版编目（CIP）数据

特种电机与控制/王铁成主编. —北京：机械工业出版社，2009.7

机电类新技师培养规划教材

ISBN 978-7-111-27680-7

I. 特… II. 王… III. 电机—控制系统—技术培训—教材 IV. TM301.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2009）第 117792 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：王英杰 王振国 责任编辑：王华庆

版式设计：张世琴 封面设计：王伟光

责任印制：洪汉军

三河市国英印务有限公司印刷

2009 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·10.5 印张·257 千字

0001—4000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-27680-7

定价：22.00 元

凡购本书，如有缺页，倒页，脱页，由本社发行部调换

销售服务热线电话：(010) 68326294

购书热线电话：(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话：(010) 88379761

封面无防伪标均为盗版

## 机电类新技师培养规划教材 编审委员会名单

- 主任** 郝广发 季连海
- 副主任** 刘亚琴 徐 彤 周学奎 何阳春 林爱平 李长江  
李晓庆 刘大力 张跃英 董桂桥
- 委员** 于正明 王 军 王 德 王兆山 王英杰 付志达  
冯小平 李 涛 李全利 许炳鑫 张正明 杨君伟  
何月秋 何秉戌 周冠生 孟广斌 郝晶卉 贾恒旦  
徐卫东 凌爱林 奚 蒙 章振周 梁文侠 喻勋良  
曾燕燕
- 策划组** 王英杰 徐 彤 何月秋 荆宏智
- 本书主编** 王铁成
- 本书参编** 李 琦 李泽芳 康顺安 王雨婷

# 前 言

随着全球知识经济的快速发展，我国工业化建设也呈现迅猛发展之势，因而技术工人十分缺乏。为了顺应形势的发展要求，我国出台了一系列大力发展职业教育的政策：劳动和社会保障部颁布了最新《国家职业标准》，继续实行职业准入制度，并将国家职业资格由三级（初、中、高）改为五级（初、中、高、技师、高级技师），对技术工人的工作内容、技能要求和相关知识进行了重新界定。教育部根据国务院“大力开展职业教育”的精神进行了职业教育的改革，高职学院、中职学校相应地改制、扩招，以培养更多的技术工人。

经过几年的努力，技术工人在数量上的矛盾在一定程度上得到缓解，但在结构比例上的矛盾突显出来。高级工、技师、高级技师等高技能人才在技术工人中的比重远远低于发达国家，而且他们年龄普遍偏大，文化程度偏低，学习高新技能比较困难。为打破这一局面，加快数量充足、结构合理、素质优良的技术技能型、复合技能型和知识技能型高技能人才的培养，劳动和社会保障部提出的“新技师培养带动计划”，即在完成“3年50万”新技师培养计划的基础上，力争“十一五”期间在全国培养技师和高级技师190万名，培养高级技工700万名，使我国从“世界制造业大国”逐步转变为“世界制造业强国”。为此，劳动和社会保障部决定：除在企业中培养和评聘技师外，要探索出一条在技师学院中培养技师的道路来。中国机械工业教育协会和全国职业培训教学工作指导委员会经研究决定，制定机电行业的技师培养方案。

在上述原则的指导下，中国机械工业教育协会和全国职业培训教学工作指导委员会机电专业委员会组织30多所高级技校、技师学院和企业培训中心等单位，经过广泛的调研论证，决定首批选定五个工种（职业）——模具工、机修钳工、电气维修工、焊工、数控机床操作工作为在技师学院培养技师的试点。对学制、培养目标、教学原则、专业设置、教学计划、教学大纲、课程设置、学时安排、教材定位、编写方式等，参照《国家职业标准》中相关工种对技师和高级技师的要求，结合各校、各地区企业的实际，经过历时三年的充分论证，完成了教学计划和教学大纲的制定和审定工作，并明确了教材编写的思想。

使用本套“机电类新技师培养规划教材”在技师学院培养技师，招收的学员必须符合的条件：已取得高级职业资格（国家职业资格三级）的高级技校的毕业生，或具有高级职业资格证书的本职业或相近职业的人员。本套教材的编写充分体现“教、学、做”合一的职教办学原则，其特点如下：

（1）教材内容新，贴合岗位实际，满足职业鉴定要求。当今国际经济大格局的进程加快了各类型企业的先进加工技术、先进设备和新材料的使用，作为技师必须适应这种要求，教材中也相应增加了新知识、新技术、新工艺、新设备等方面的内容。另外，教材的内容以《国家职业标准》中对技师和高级技师的知识技能要求为基础，设置的实训项目或实例从岗

位的实际需要出发,是生产实践中的综合性、典型性的技术问题,既最大限度地体现学以致用目的,又满足学生毕业考工取得职业资格证书的需要。

(2) 针对每个工种(职业),均编写一本《相关工种技能训练》。随着全球化进程的加快,我国的生产力发展水平和职业资格体系应与国际相适应,因此技师应该是具有高超操作技能的复合型人才。例如,模具工技师不应仅是模具工方面的行家里手,还应懂得车、铣、数控、磨、刨、镗和线切割、电火花等加工,以适应现代制造业的发展趋势,故此《相关工种技能训练(模具工)》中,就包含上述内容。其他工种与此类似。

(3) 理论和技能有机结合。劳动和社会保障部颁布的“新技师培养带动计划”中明确指出“建立校企合作培养高技能人才”的制度,现在许多技师学院从企业中聘请具有丰富实践经验的工程技术人员作为技能课教师,各专题理论与实践融合在一起的编写方式,更适于这种教学制度。

(4) 单独编写了两本公共课教材——《实用数学》和《应用文写作》。新时代对技师的要求不仅是技术技能型人才,还应是知识技能型甚至是复合技能型的高技能人才,有一定的数学理论基础和写作能力是新技师必备的素质。《实用数学》运用微积分知识分析解决生产中的实际问题,少推理,重应用;《应用文写作》除介绍普通事务文书、经济文书、法律文书、日常事务文书的写法外,还教授科技文书的写法,其中科技论文的写法对于技师论文的写作会有很大裨益。

(5) 绝大部分书配有电子教案。电子教案包括教学计划、教学大纲、每章的培训目标、内容简介、重点难点,教师上课的板书,本章小结、配套习题及答案等等。

(6) 练习题是国家题库及各地鉴定考题的综合归纳和提升。

本套教材的编写得到了各技师学院、高级技工学校领导的高度重视和大力支持,编写人员都是职业教育教学一线的优秀教师,保障了这套教材的质量。在此,对为这套教材出版给予帮助和支持的所有学校、领导、老师表示衷心的感谢!

本教材由王铁成任主编,李琦、李泽芳、康顺安、王雨婷参编。

由于编写时间和编者水平所限,书中难免存在不足或错误,敬请广大读者不吝赐教!

中国机械工业教育协会  
全国职业培训教学工作指导委员会  
机电专业委员会

# 目 录

## 前言

## 第一章 步进电动机 ..... 1

第一节 概述 ..... 1

第二节 步进电动机的工作原理 ..... 2

第三节 步进电动机的结构和分类 ..... 4

一、反应式步进电动机 ..... 5

二、永磁式步进电动机 ..... 6

三、感应子式永磁步进电动机 ..... 6

四、直线式步进电动机 ..... 6

第四节 步进电动机的运行特性 ..... 7

一、静态运行特性 ..... 7

二、单脉冲运行 ..... 9

三、连续脉冲运行 ..... 11

第五节 步进电动机的驱动电源 ..... 12

一、对驱动电源的基本要求 ..... 12

二、驱动电源的组成 ..... 13

三、驱动电源的分类 ..... 14

第六节 步进电动机的参数、选择与使用 ..... 16

一、步进电动机的参数与产品 ..... 16

二、步进电动机的选择与使用 ..... 16

第七节 步进电动机的应用 ..... 17

复习思考题 ..... 18

## 第二章 单相电动机 ..... 20

第一节 单相异步电动机的基本知识 ..... 20

一、单相异步电动机的特点 ..... 20

二、单相异步电动机的分类与基本结构 ..... 20

三、单相异步电动机的工作原理 ..... 21

四、单相异步电动机的机械特性 ..... 21

第二节 分相式单相异步电动机 ..... 22

一、电阻起动单相异步电动机 ..... 22

二、电容起动单相异步电动机 ..... 23

三、电容运行单相异步电动机 ..... 24

四、电容起动与运行单相异步电动机 ..... 25

第三节 罩极式单相异步电动机 ..... 26

第四节 单相换向器式电动机 ..... 27

第五节 单相异步电动机的调速控制 ..... 29

一、自耦变压器调速 ..... 29

二、外接电抗器、电容器调速 ..... 29

三、抽头调速 ..... 30

四、晶闸管调压调速 ..... 31

第六节 单相异步电动机的应用 ..... 31

一、通风换气用单相异步电动机 ..... 31

二、洗衣机用单相异步电动机 ..... 32

三、泵用单相异步电动机 ..... 32

复习思考题 ..... 33

## 第三章 测速发电机 ..... 34

第一节 测速发电机的作用和要求 ..... 34

第二节 直流测速发电机 ..... 35

一、直流测速发电机的工作原理 ..... 35

二、直流测速发电机产生误差的原因和

改进方法 ..... 36

第三节 交流测速发电机 ..... 38

一、同步测速发电机 ..... 38

二、异步测速发电机 ..... 39

三、产生误差的原因及改进方法 ..... 40

四、负载阻抗对输出特性的影响 ..... 43

五、异步测速发电机的线性误差和相位

误差 ..... 43

第四节 霍尔效应与测速发电机 ..... 44

一、霍尔元件 ..... 44

二、霍尔效应测速发电机 ..... 45

三、霍尔效应无刷直流测速发电机 ..... 45

第五节 测速发电机的应用举例 ..... 47

复习思考题 ..... 49

## 第四章 自整角机 ..... 51

第一节 概述 ..... 51

第二节 力矩式自整角机的结构和运行性能 ..... 52

一、力矩式自整角机的结构 ..... 52

二、力矩式自整角机的工作原理 ..... 53

三、力矩式自整角机的主要技术指标 ..... 54

四、多台自整角接收机的并联使用 ..... 54

第三节 力矩式自整角机的应用举例 ..... 55

一、用于位置指示器 ..... 55

二、用于调节执行机构转速的定值器 ..... 55

第四节 控制式自整角机的结构和运行性能 .....	55
一、控制式自整角机的结构 .....	56
二、控制式自整角机的工作原理 .....	56
三、控制式自整角机的主要技术指标 .....	57
四、多台自整角变压器的并联使用 .....	57
第五节 差动自整角机的结构和运行原理 .....	58
一、差动自整角机的结构 .....	58
二、差动自整角机的运行原理 .....	59
三、差动自整角机的应用举例 .....	60
第六节 无接触式自整角机 .....	62
第七节 双通道自整角机 .....	63
复习思考题 .....	65
<b>第五章 旋转变压器</b> .....	<b>66</b>
第一节 概述 .....	66
一、用于解算装置中的旋转变压器 .....	66
二、在随动系统中使用的旋转变压器 .....	67
第二节 旋转变压器的结构特点 .....	67
第三节 正余弦旋转变压器的工作原理 .....	68
一、工作原理 .....	68
二、正余弦旋转变压器的负载运行 .....	69
三、正余弦旋转变压器的主要技术指标 .....	71
第四节 线性旋转变压器 .....	72
一、一次侧补偿的线性旋转变压器 .....	72
二、二次侧补偿的线性旋转变压器 .....	73
三、单绕组线性旋转变压器 .....	74
四、旋转变压器的误差及其改进方法 .....	75
第五节 旋转变压器的应用举例 .....	76
一、矢量求解与坐标变换 .....	76
二、反三角函数运算 .....	79
三、变量的四则运算 .....	80
四、函数的微分和积分运算 .....	82
第六节 感应移相器 .....	84
一、感应移相器的工作原理 .....	85
二、具有补偿电阻的感应移相器 .....	86
三、感应移相器的应用举例 .....	86
第七节 多极旋转变压器和感应同步器 .....	88
一、多极旋转变压器 .....	88
二、感应同步器 .....	89
复习思考题 .....	91
<b>第六章 伺服电动机</b> .....	<b>92</b>
第一节 概述 .....	92
第二节 直流伺服电动机 .....	93
一、结构和分类 .....	93
二、控制方式 .....	93
三、工作原理和运行特性 .....	93
第三节 两相伺服电动机 .....	95
一、结构 .....	95
二、控制方式 .....	95
三、两相伺服电动机和直流伺服电动机的性能比较 .....	96
第四节 直流力矩电动机 .....	97
一、概述 .....	97
二、结构和性能 .....	98
第五节 交流同步伺服电动机 .....	100
一、永磁式同步伺服电动机 .....	100
二、磁阻式同步伺服电动机 .....	101
三、磁滞式同步伺服电动机 .....	102
第六节 伺服电动机的应用举例 .....	104
复习思考题 .....	107
<b>第七章 无刷直流电动机</b> .....	<b>108</b>
第一节 概述 .....	108
第二节 永磁无刷直流电动机的基本构成 .....	108
一、电动机本体 .....	109
二、转子位置检测装置 .....	110
三、电子换向电路 .....	111
第三节 永磁无刷直流电动机的工作原理 .....	111
第四节 永磁无刷直流电动机的性能与应用 .....	112
一、性能 .....	112
二、机械特性和调节特性 .....	113
三、应用 .....	114
第五节 无刷直流电动机调速系统 .....	115
一、系统的控制方式 .....	115
二、调速系统 .....	118
三、航空双通道无刷直流电动机调速系统 .....	119
复习思考题 .....	121
<b>第八章 磁阻电机</b> .....	<b>122</b>
第一节 磁阻电机的结构和工作原理 .....	122
一、结构 .....	122
二、工作原理 .....	123
第二节 磁阻电机驱动系统的特点 .....	124
第三节 SR 电机的控制方式 .....	125



一、角度控制·····	125	复习思考题·····	145
二、电流斩波控制·····	126	<b>第九章 直线电动机</b> ·····	146
三、电压斩波控制·····	126	<b>第一节 直线感应电动机</b> ·····	146
四、实用控制方式·····	127	一、直线感应电动机的主要类型和基本 结构·····	146
<b>第四节 开关磁阻电动机的功率变换器</b> ·····	128	二、直线感应电动机的基本工作 原理·····	148
一、功率变换器常见的主电路形式·····	128	三、直线感应电动机的工作特性·····	149
二、功率开关器件和续流二极管的 选用·····	131	四、直线感应电动机的边缘效应·····	149
三、主电路设计实例·····	132	<b>第二节 直线直流电动机</b> ·····	150
<b>第五节 开关磁阻电动机传动系统的反馈   信号检测</b> ·····	133	一、永磁式直线直流电动机·····	151
一、位置信号的检测·····	134	二、电磁式直线直流电动机·····	152
二、速度信号的检测·····	135	<b>第三节 直线和平面步进电动机</b> ·····	153
三、电流信号的检测·····	137	一、直线步进电动机·····	153
<b>第六节 开关磁阻发电机</b> ·····	139	二、平面步进电动机·····	155
一、开关磁阻发电机的组成·····	139	<b>第四节 直线电动机应用举例</b> ·····	155
二、开关磁阻发电机的工作原理·····	140	一、高速列车·····	155
三、开关磁阻发电机的控制策略·····	141	二、笔式记录仪·····	156
<b>第七节 SR 电机的应用</b> ·····	142	三、自动绘图机·····	156
一、SR—S/G 系统·····	142	复习思考题·····	157
二、双通道 SR—S/G 系统·····	143	<b>参考文献</b> ·····	158

# 第一章 步进电动机

## 本章应知

1. 了解步进电动机的工作特点、控制系统对步进电动机的要求。
2. 了解步距角的概念，如何获得小步距角，明确步距角大小的决定条件。
3. 了解步进电动机速度与方向如何改变。
4. 了解反应式步进电动机的工作原理以及三相单三拍、双三拍通电方式。
5. 了解步进电动机的动稳定区、最大负载转矩（起动转矩）。
6. 了解步进电动机的起动频率、连续运行频率。了解步进电动机的起动转矩特性和惯频特性。
7. 了解驱动电源的组成、各种驱动电源形式要求。
8. 进行三相单、双六拍单转向和双转向运行的步进电动机驱动电源的逻辑分析。

## 本章应会

1. 掌握反应式、永磁式、反应式永磁步进电动机实物结构。
2. 掌握反应式、永磁式反应式永磁步进电动机的结构特点、适用场合。
3. 掌握步进电动机的静态运行特性、静稳定区、最大静转矩。
4. 根据所选步进电动机类型，选用相应的驱动电源，确定步进电动机的相关项目和技术参数，进行步进电动机的运行调试。正确选用合适的步进电动机。
5. 步进电动机主要参数的检测方法，进行主要参数检测。

## 第一节 概述

步进电动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控制电动机。它由专门电源供给电脉冲，每输入一个脉冲，步进电动机就移进一步。它的运动形式是步进式的，所以称为步进电动机。又因其绕组上所加的电源是脉冲电压，有时也称其为脉冲电动机。步进电动机的工作状态相对不易受电源、环境条件及负载波动的影响，它可以工作于步进状态和连续状态。改变脉冲相序和频率可调整步进电动机的转向与转速。它的调速范围较宽且平滑性较好，步距误差无长期累积现象，结构简单，运行稳定可靠，广泛用于自动控制系统，尤其是在数字控制系统中作为执行元件。从应用方面来看，步进电动机在执行电动机中占有相当重要的位置。对步进电动机的要求包括：

- 1) 步距角精度高，能够准确地将脉冲信号转换为角位移或直线位移。
- 2) 起动频率和运行频率满足系统要求，运行稳定。连续调整工作频率时，步进电动机应能及时跟上工作频率的变化，不能出现“失步”及严重的振荡现象。
- 3) 产品通用性强，功耗低，效率高。
- 4) 具有较强的负载驱动能力。在某些场合，当步进电动机停转时，还要求有足够的定位转矩。

## 第二节 步进电动机的工作原理

以反应式步进电动机为例来说明步进电动机的工作原理。

反应式步进电动机是利用磁阻转矩使转子转动的，是我国目前使用最广泛的步进电动机形式。

图 1-1 所示为一台三相反应式步进电动机的工作原理。它的定子上有 6 个磁极，每个磁极上都装有控制绕组，每组相对的两极组成一相。4 个均匀分布的齿为转子齿，上面没有绕组。当 A 相控制绕组通电时，因磁通要沿着磁阻最小的路径闭合，将使转子齿 1、3 和定子极 A、A' 对齐，如图 1-1a 所示。A 相断电、B 相控制绕组通电时，转子将在空间转过  $30^\circ$ ，即步距角  $\theta_s = 30^\circ$ 。转子齿 2、4 与定子极 B、B' 对齐，如图 1-1b 所示。如再使 B 相断电、C 相控制绕组通电，转子又在空间转过  $\theta_s = 30^\circ$ ，使转子齿 1、3 和定子极 C、C' 对齐，如图 1-1c 所示。如此循环往复，并按 A—B—C—A 顺序通电，电动机便按一定的方向转动。电动机的转速取决于控制绕组与电源接通或开断变化的频率。若按 A—C—B—A 的顺序通电，则电动机将反向转动。

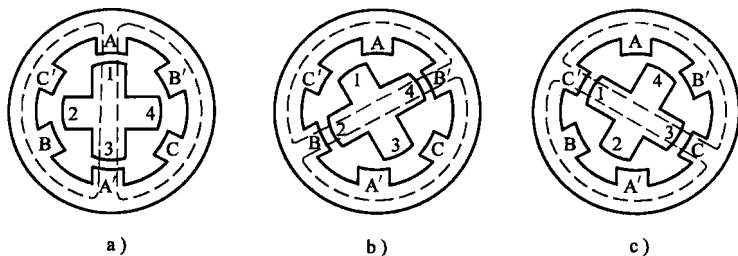


图 1-1 三相反应式步进电动机的工作原理

定子控制绕组每改变一次通电方式，称为一拍。上述的通电方式称为三相单三拍。“单”是指每次只有一相控制绕组通电；“三拍”是指经过 3 次切换控制绕组的通电状态为一个循环。

三相步进电动机除了单三拍通电方式外，还经常工作在三相单、双六拍通电方式，如图 1-2 所示。这时通电顺序为 A—AB—B—BC—C—CA，或是 A—AC—C—CB—B—BA—A。也就是说，先 A 相控制绕组通电；以后 A、B 相控制绕组同时通电；然后断开 A 相绕组，由 B 相控制绕组单独通电；再使 B、C 相控制绕组同时通电，依此进行。在这种通电方式下，定子三相控制绕组需经过 6 次切换通电状态才能完成一个循环，故称为“六拍”，并在通电时，有时是单个控制绕组通电，有时又为两个控制绕组同时通电，因此称为“单、双六拍”。

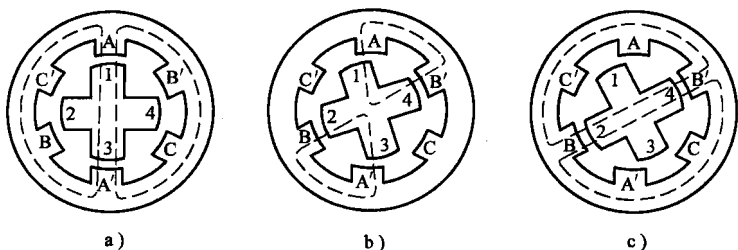


图 1-2 单、双六拍运行时的三相反应式步进电动机

在这种通电方式下,步距角也有所不同。如图 1-2 所示,当 A 相控制绕组通电时和单三拍运行的情况相同,转子齿 1、3 和定子极 A、A' 对齐,如图 1-2a 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' 的吸引下使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 1-2b 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 1-2c 所示。若继续按 BC—C—CA—A 的顺序通电,步进电动机就按逆时针方向转动。如通电顺序变为 A—AC—C—CB—B—BA—A 时,电动机将按顺时针方向旋转。

在单三拍通电方式中,步进电动机每一拍转过的步距角为  $30^\circ$ 。采用单、双六拍通电方式后,步进电动机由 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  $30^\circ$ 。所以,在这种通电方式下,三相步进电动机的步距角  $\theta_s = 30^\circ/2 = 15^\circ$ 。

同一台步进电动机,因通电方式不同,运行时的步距角  $\theta_s$  也是不同的。采用单、双六拍通电方式时,步距角要比单拍通电方式时减小  $1/2$ 。

在实际使用中,单三拍通电方式由于在切换时一相控制绕组断电而另一相控制绕组开始通电,容易造成失步。此外,由单一控制绕组通电吸引转子时,也容易使转子在平衡位置附近产生振荡,运行的稳定性较差,所以很少采用。通常将它改为“双三拍”通电方式,即按 AB—BC—CA—AC 的通电顺序运行。这时每个通电状态均为两相控制绕组同时通电。在双三拍通电方式运行时,它的步距角应和单三拍通电方式时相同,也是  $30^\circ$ 。

上述这种简单结构形式的反应式步进电动机具有较大的步距角,如果使用在数控机床中就会影响到加工精度,为此,必须采用小步距角、特性较好的步进电动机。图 1-3 所示的结构是最常用的一种小步距角的三相反应式步进电动机。

图 1-3 所示的三相反应式步进电动机,它的定子上有 6 个极,上面装有 A、B、C 三相控制绕组。转子上均匀地分布着 40 个齿。定子每个极面上也各有 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,电动机中产生沿 A 极轴线方向的磁场。因磁通要按磁阻最小的路径闭合,使转子受到磁阻转矩的作用而转动,直至转子齿和定子 A 极面上的齿对齐为止。因转子上总共有 40 个齿,每个齿的齿距为  $360^\circ/40 = 9^\circ$ ,而每个定子磁极的极距为  $360^\circ/6 = 60^\circ$ ,所以每一个极距所占的齿距数不是整数。从图 1-4 给出的三相反应式步进电动机定、转子齿展开图中可以看出,当 A 极面下的定、转子齿对齐时,B'极和 C'极面下的齿就分别和转子齿相错  $1/3$  的转子齿距,即  $3^\circ$ 。

反应式步进电动机的转子齿数  $Z_r$  基本上是由步距角的要求所决定的。但是为了能够实现“自动错位”,转子的齿数必须满足一定的条件,而不能是任意数值。当定子的相邻极为相邻相时,在某一极下,若定、转子的齿对齐时,则要求在相邻极下的定、转子齿之间应错开转子齿距的

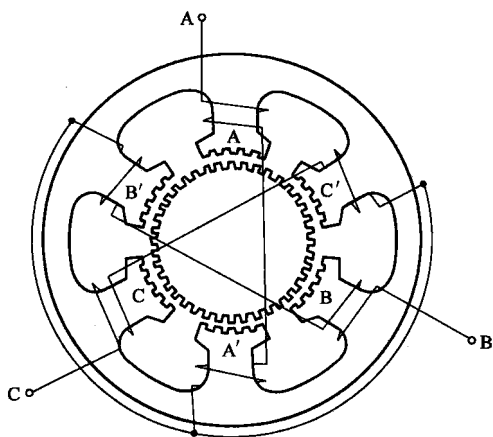


图 1-3 小步距角的三相反应式步进电动机

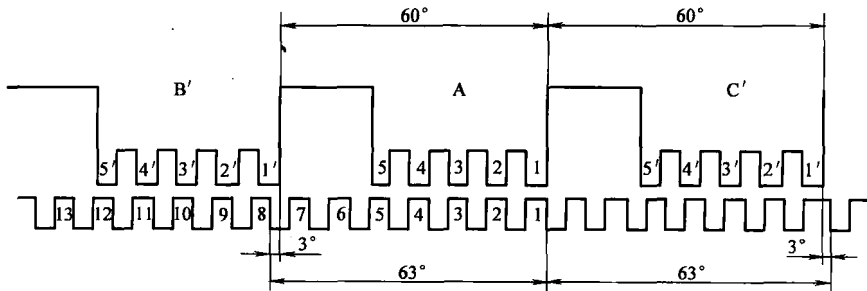


图 1-4 三相反应式步进电动机的定、转子齿展开图

$1/m$ ，即它们之间在空间位置上错开  $360^\circ/mZ_r$ 。由此可得出这时转子齿数应符合式 (1-1) 的条件

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

式中  $2p$ ——反应式步进电动机的定子极数；

$m$ ——电动机的相数；

$k$ ——正整数。

从图 1-4 可以看出，若断开 A 相控制绕组而由 B 相控制绕组通电，这时的电动机中产生沿 B 极轴线方向的磁场。在磁阻转矩的作用下，转子按顺时针方向转过  $3^\circ$ ，使定子 B 极面下的齿和转子齿对齐，相应定子 A 极和 C 极面下的齿又分别和转子齿相错  $1/3$  的转子齿距。当控制绕组按 A—B—C—A 顺序通电循环时，转子就沿顺时针方向以每一拍转过  $3^\circ$  的方式转动，此时为单三拍通电方式运行。

若采用三相单、双六拍通电方式运行，即按 A—AB—B—BC—C—CA—A 顺序循环通电，步距角也减小  $1/2$ ，即每拍转子仅转过  $1.5^\circ$ 。

由以上分析可知，步进电动机的步距角  $\theta_s$  的大小是由转子的齿数  $Z_r$ 、电动机的相数  $m$  和通电方式所决定的。它们之间存在以下关系

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

式中  $c$ ——通电状态系数。

当采用单拍或双拍方式时， $c=1$ ；而采用单、双拍方式时， $c=2$ 。

若步进电动机通电的脉冲频率为  $f$ （即每秒的拍数或每秒的步数），则步进电动机的转速为

$$n = \frac{60f}{mZ_r c} \quad (1-3)$$

式中， $f$  的单位是  $s^{-1}$ ， $n$  的单位是  $r/min$ 。

步进电动机除了可以做成三相外，也可以做成二相、四相、五相、六相或更多相数。由式 (1-2) 可知，电动机的相数和转子齿数越多，则步距角  $\theta_s$  就越小。从式 (1-3) 又可知，这种电动机在脉冲频率一定时，转速也越低。但电动机相数越多，相应电源就越复杂，造价也越高。所以，步进电动机一般最多做到六相，只有个别的电动机才做成更多的相数。

### 第三节 步进电动机的结构和分类

步进电动机种类繁多，按其运动形式分为旋转式步进电动机和直线式步进电动机两大

类；按其工作原理又可分为反应式、永磁式和感应子式永磁步进电动机 3 类。

### 一、反应式步进电动机

反应式步进电动机有单段式和多段式两种形式。

#### 1. 单段式

单段式又称为径向分相式，它是目前步进电动机中使用最多的一种结构形式，如图 1-3 所示。定子的磁极数通常为相数的两倍，即  $2p = 2m$ ；每个磁极上都装有控制绕组，并接成  $m$  相；在定子磁极的极面上开有小齿；转子沿圆周也有均匀分布的小齿，它们的齿形和齿距完全相同。这种结构形式使电动机制造简便，精度易于保证；步距角又可以做得较小，容易得到较高的起动和运行频率。其缺点是：在电动机的直径较小而相数又较多时，沿径向分相较为困难。此外电动机消耗的功率较大，断电时无定位转矩。

#### 2. 多段式

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反应式和径向磁路多段反应式两种。

轴向磁路多段反应式步进电动机的结构如图 1-5 所示。定、转子铁心均沿电动机轴向按相数分段，每一组定子铁心中间放置一相环形的控制绕组；定、转子圆周上冲有齿形相近和齿数相同的均布小齿槽；定子铁心（或转子铁心）每相邻段错开  $1/m$  齿距。

这种结构使电动机的定子空间利用率较高，环形控制绕组绕制方便，转子的惯量较低，步距角也可以做得较小，因此起动和运行频率较高。但制造时铁心分段和错位工艺复杂，精度不易保证。

径向磁路多段反应式步进电动机的结构如图 1-6 所示。定、转子铁心沿电动机轴向按相数分段，每段定子铁心的磁极上均放置同一相控制绕组。定子的磁极数量是由结构考虑决定的，最多可与转子齿数相等，少则可为 2 极、4 极、6 极等。定、转子圆周上有齿形相近并且齿距相同的齿槽。每一段铁心上的定子齿都和转子齿处于相同的位置。转子齿沿圆周均布，并为定子齿数的倍数。定子铁心（或转子铁心）每相邻两段错开  $1/m$  齿距。这种结构相对于相数多而直径和长度又有限制的反应式步进电动机来说，在磁极的布置上要比以上两种结构灵活。它的步距角同样可以做得较小，并使电动机的起动和运行频率较高，但铁心段的错位工艺较复杂。

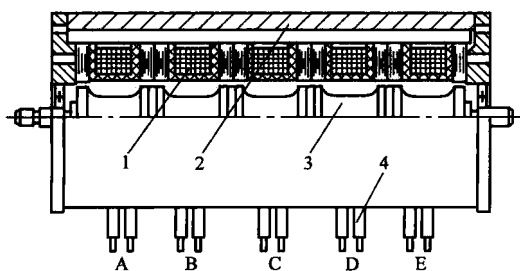


图 1-5 轴向磁路多段反应式步进电动机的结构  
1—线圈 2—定子 3—转子 4—引出线

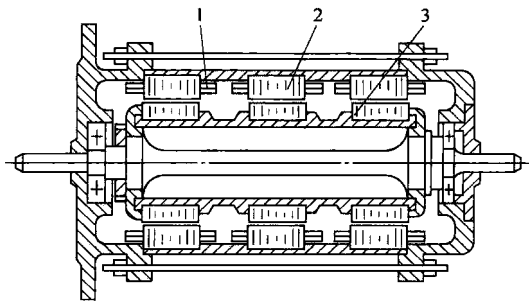


图 1-6 径向磁路多段反应式步进电动机  
1—线圈 2—定子 3—转子

## 二、永磁式步进电动机

永磁式步进电动机也有多种结构,图1-7所示为一种典型的结构,它的定子是凸极式,装设两相或多相绕组;转子是一对极或多对极的星形永久磁钢。转子的极数应与定子每相极数相同。图1-7中,定子为两相集中绕组,每相有2对磁极,因此转子也是2对极的永磁转子。

这种电动机的步距角较大,起动和运行频率均较低,并且还需要采用正、负脉冲供电。但它消耗的功率比反应式步进电动机小,又具有定位转矩。

## 三、感应子式永磁步进电动机

感应子式永磁步进电动机的结构如图1-8所示。它的定子结构与单段反应式步进电动机相同,转子由环形磁钢和两端铁心组成。两端转子铁心的外圆周上有均布齿槽,彼此相错 $1/2$ 齿距。定、转子齿数的配合与单段反应式步进电动机相同。

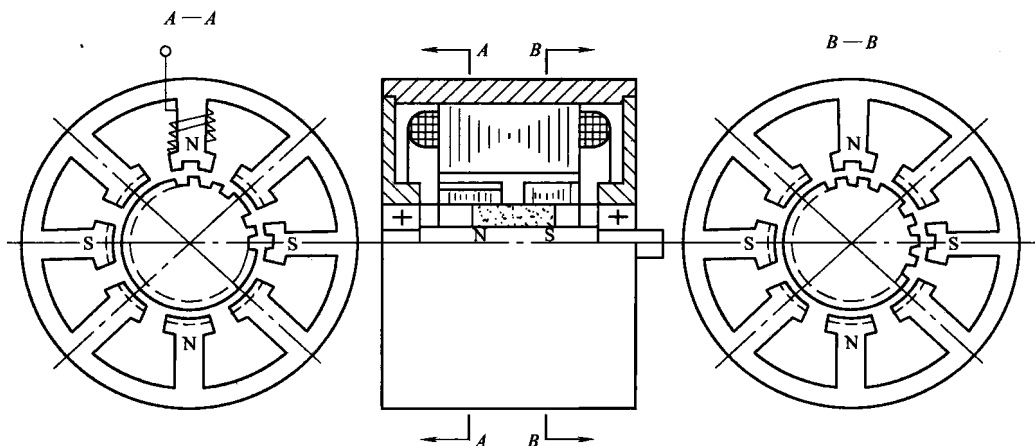


图1-8 感应子式永磁步进电动机的结构

这种电动机可做成较小的步距角,因而也有较高的起动和运行频率,消耗的功率较小,并有定位转矩。它兼有反应式和永磁式步进电动机两者的优点。但它需要由正、负脉冲供电,在制造工艺上也较为复杂。

## 四、直线式步进电动机

直线式步进电动机是将电脉冲信号转换成某些特定部件的直线平面上的位移量,以实现相应的定位和轨迹控制。

直线式步进电动机以反应式和混合式为主。以反应式为例,在结构上 $m$ 相直线步进电动机的转子齿与定子齿在相邻的磁极下依次错开 $1/m$ 齿距。图1-9中,反应式直线步进电动机的相数 $m=3$ ,由于A、B、C三相线圈的空间

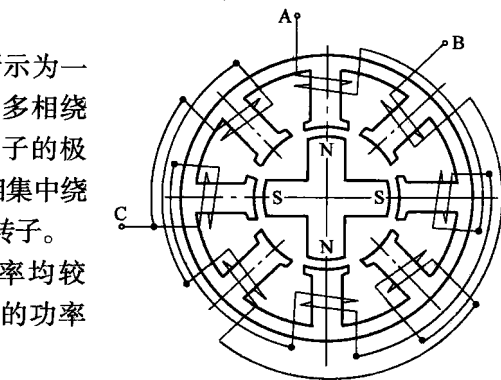


图1-7 永磁式步进电动机

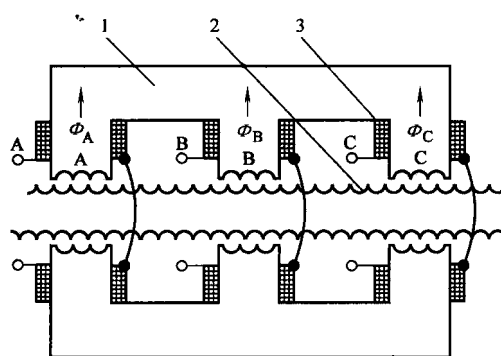


图1-9 反应式直线步进电动机

1—转子 2—定子 3—线圈

排列顺序已固定，所以电动机的直线步进方向取决于所加脉冲的相序。按 A—B—C 循环分配脉冲时，转子左移（定子相对右移）。若采用单、双六拍脉冲励磁时，步距角减半，方向控制与单三拍时相同。

多台直线式步进电动机配合气垫技术可构成平面步进电动机，用于高精度平面绘图仪或其他精密设备中实现轨迹控制。

## 第四节 步进电动机的运行特性

步进电动机的工作状态包括静态、稳态和过渡状态。静态是指定子绕组中通以直流电流且改变绕组通电方式的状态。稳态包括低频的步进状态和高频脉冲下的连续运行状态，一般限定脉冲频率低于连续运行的极限频率。如果连续运行频率与运行极限频率相等，则称为电动机处于极限频率状态。过渡状态主要出现于所施加的电脉冲有突然的变化时，电动机介于两种相对稳定状态之间的运行状态。典型的过渡状态包括电动机的起动、制动与反转过程的中间状态。下面以反应式步进电动机为例说明步进电动机的运行特性。

### 一、静态运行特性

步进电动机的静态运行是指通电状态不变，电动机处于稳定状态下。静态运行特性是分析步进电动机运行性能的基础，它包括电动机的矩角特性、最大静转矩及矩角特性族。

#### 1. 矩角特性

(1) 初始平衡稳定位置 它是指步进电动机在空载情况下，控制绕组中通以直流时转子的最后稳定平衡位置。从理论上讲，此时电动机的静转矩（电磁转矩）为零。

(2) 失调角 它是指步进电动机偏离初始稳定平衡位置的电角度。在反应式步进电动机中，转子一个齿距所对应的电角度应为  $2\pi$ 。

(3) 矩角特性 在不改变通电状态，也就是控制绕组电流不变时，步进电动机的静转矩与转子失调角的关系，即  $T=f(\theta)$ ，称为矩角特性。

静转矩的正方向取  $\theta$  增大的方向。如图 1-10 所示，当一相通电，该极下定、转子正好对齐，即  $\theta=0$  时，静转矩  $T=0$ ；若转子齿正对定子槽中间，既  $\theta=\pi$  时，静转矩  $T=0$ ；当  $\theta>0$  时， $T$  为负值； $\theta<0$  时， $T$  为正值。

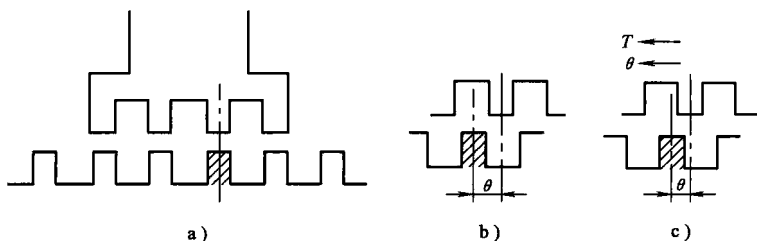


图 1-10 不同失调角时的静转矩

a)  $\theta=0, T=0$  b)  $\theta=\pi, T=0$  c)  $\theta>0, T>0$

反应式步进电动机的静转矩可由电动机的机电能量转换原理得出。若不计电动机磁路铁心部分磁场能量变化的影响，则只需考虑气隙磁场能量的变化即可。若忽略定、转子铁心中的磁位降，则每极控制绕组的磁动势即是电动机单边气隙磁动势，再略去气隙比磁导中谐波



的影响, 则可得步进电动机的静转矩为

$$T = -Z_s Z_r L F_\delta^2 \lambda_1 \sin \theta \quad (1-4)$$

式中  $Z_s$ ——定子每极的齿数;

$Z_r$ ——转子的齿数;

$L$ ——电动机铁心的长度;

$F_\delta$ ——电动机的单边气隙磁动势;

$\lambda_1$ ——电动机的气隙比磁导的基波分量。

式(1-4)表示了步进电动机的静转矩  $T$  与失调角  $\theta$  的关系, 即矩角特性, 如图 1-11 所示。理想的矩角特性曲线是一个正弦波形。

由步进电动机的矩角特性可知, 在静转矩的作用下, 转子有一定的稳定平衡位置。若电动机空载, 则稳定平衡位置对应于  $\theta = 0$  处, 而  $\theta = \pm \pi$  处则为不稳定平衡位置。两个不稳定平衡点之间的区域即  $-\pi < 0 < \pi$ , 构成静稳定区, 如图 1-11 所示。

## 2. 最大静转矩

矩角特性上, 静转矩(绝对值)的最大值称为最大静转矩。由式(1-4)可知, 当一相控制绕组通电时, 在  $\theta = \pm 90^\circ$  时有最大静转矩  $T_{sm}$ , 则

$$T_{sm} = Z_s Z_r L F_\delta^2 \lambda_1 \quad (1-5)$$

若为多相控制绕组同时通电状态时, 最大静转矩为

$$T_{sm} = K Z_s Z_r L F_\delta^2 \lambda_1 \quad (1-6)$$

式中  $K$ ——转矩增大系数。

当两相控制绕组同时通电状态,  $K = 2 \cos(\pi/m)$ ; 当三相控制绕组同时通电状态,  $K = 1 + 2 \cos(\pi/m)$ 。

在一定通电状态下, 最大静转矩与绕组内电流的关系  $T_{sm} = f(I)$ , 称为最大静转矩特性, 如图 1-12 所示。

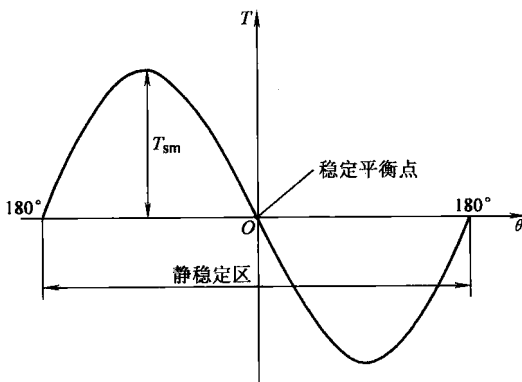


图 1-11 步进电动机的矩角特性

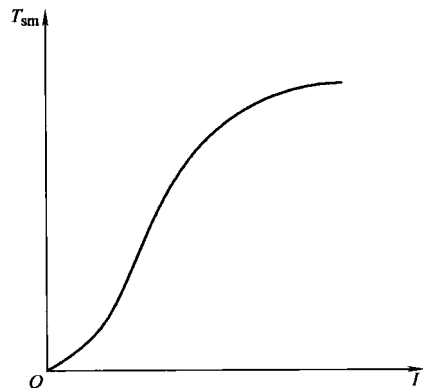


图 1-12 最大静转矩特性

由式(1-6)可看出, 当电动机不饱和时, 最大静转矩  $T_{sm}$  与控制绕组中电流  $I$  的二次方成正比。电流稍大时, 由于受到磁路饱和的影响气隙磁动势  $F_\delta$  增加变慢, 最大静转矩  $T_{sm}$  的上升就低于电流的二次方关系; 电流很大时, 由于磁路过饱和,  $F_\delta$  增加很少,  $T_{sm}$  也就上升甚微, 呈饱和状态。这一变化趋势在图 1-12 中清楚可见。