

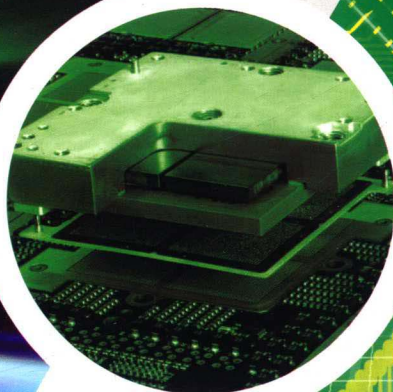


全国高等职业教育“十三五”规划教材

电气控制与PLC技术应用教程

主编 侍寿永

- 以工程项目为载体，按教学做一体化模式编写
- 知识够用，由浅入深，注重强调知识的实用性
- 实例讲解，通俗易懂，项目均易于操作和实现



电子课件下载网址 www.cmpedu.com



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

全国高等职业教育“十三五”规划

电气控制与 PLC 技术应用教程

主 编 侍寿永

副主编 于建明 史宜巧

参 编 居海清 薛 岚

吴会琴 王 玲

主 审 成建生



机械工业出版社

本书介绍了机电设备继电器-接触器控制系统常用电气元器件的结构、外形及工作原理和西门子 S7-200 SMART PLC 的基础知识及其编程与应用。通过 5 个工程应用载体和大量案例及实训项目, 通俗易懂地介绍了机电设备生产线电气控制系统中电气原理图的设计、分析和故障诊断方法及 S7-200 SMART PLC 的位逻辑指令、功能指令、模拟量指令、网络通信指令及顺序控制系统的编程与应用。

本书中的实训项目为相应机电设备或生产线控制系统的子项目, 并配有详细的电路原理图、控制程序及调试步骤, 并且每个实训项目经简化后容易操作与实现, 旨在让读者通过对本书的学习, 能尽快地掌握机电设备及生产线的控制方法和原理及具备一定的 PLC 编程和应用的技能。

本书可作为高等职业院校电气自动化、机电一体化、数控技术等相关专业及技术培训的教材, 也可作为工程技术人员自学或参考用书。

本书配有授课电子课件, 需要的教师可登录 www.cmpedu.com 免费注册, 审核通过后下载, 或联系编辑索取 (QQ: 1239258369, 电话: 010-88379739)。

图书在版编目 (CIP) 数据

电气控制与 PLC 技术应用教程 / 侍寿永主编. —北京: 机械工业出版社, 2017.6
全国高等职业教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-111-56533-8

I. ①电… II. ①侍… III. ①电气控制—高等职业教育—教材②PLC 技术—高等职业教育—教材 IV. ①TM571.2②TM571.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 070611 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 颖 责任编辑: 王 颖

责任校对: 张艳霞 责任印制: 李 飞

北京振兴源印务有限公司印刷

2017 年 6 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·15.25 印张·368 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-56533-8

定价: 39.90 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: (010) 88379833

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: (010) 88379649

机工官博: weibo.com/cmp1952

教育服务网: www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网: www.golden-book.com

全国高等职业教育规划教材

电子类专业编委会成员名单

主 任 曹建林

副 主 任 张中洲 张福强 董维佳 俞 宁 杨元挺 任德齐
华永平 吴元凯 蒋蒙安 梁永生 曹 毅 程远东
吴雪纯

委 员 (按姓氏笔画排序)

于宝明	王卫兵	王树忠	王新新	牛百齐	吉雪峰
朱小祥	庄海军	刘 松	刘 勇	孙 刚	孙 萍
孙学耕	李菊芳	杨打生	杨国华	何丽梅	邹洪芬
汪赵强	张静之	陈子聪	陈东群	陈必群	陈晓文
邵 瑛	季顺宁	赵新宽	胡克满	姚建永	聂开俊
贾正松	夏西泉	高 波	高 健	郭 兵	郭 勇
郭雄艺	黄永定	章大钧	彭 勇	董春利	程智宾
曾晓宏	詹新生	蔡建军	谭克清	戴红霞	

秘 书 长 胡毓坚

出版说明

《国务院关于加快发展现代职业教育的决定》指出：到 2020 年，形成适应发展需求、产教深度融合、中职高职衔接、职业教育与普通教育相互沟通，体现终身教育理念，具有中国特色、世界水平的现代职业教育体系，推进人才培养模式创新，坚持校企合作、工学结合，强化教学、学习、实训相融合的教育教学活动，推行项目教学、案例教学、工作过程导向教学等教学模式，引导社会力量参与教学过程，共同开发课程和教材等教育资源。机械工业出版社组织全国 60 余所职业院校（其中大部分是示范性院校和骨干院校）的骨干教师共同策划、编写并出版的“全国高等职业教育规划教材”系列丛书，已历经十余年的积淀和发展，今后将更加结合国家职业教育文件精神，致力于建设符合现代职业教育教学需求的教材体系，打造充分适应现代职业教育教学模式的、体现工学结合特点的新型精品化教材。

“全国高等职业教育规划教材”涵盖计算机、电子和机电三个专业，目前在销教材 300 余种，其中“十五”“十一五”“十二五”累计获奖教材 60 余种，更有 4 种获得国家级精品教材。该系列教材依托于高职高专计算机、电子、机电三个专业编委会，充分体现职业院校教学改革和课程改革的需要，其内容和质量颇受授课教师的认可。

在系列教材策划和编写的过程中，主编院校通过编委会平台充分调研相关院校的课程体系，认真讨论课程教学大纲，积极听取相关专家意见，并融合教学中的实践经验，吸收职业教育改革成果，寻求企业合作，针对不同的课程性质采取差异化的编写策略。其中，核心基础课程的教材在保持扎实的理论基础的同时，增加实训和习题以及相关的多媒体配套资源；实践性较强的课程则强调理论与实训紧密结合，采用理实一体的编写模式；涉及实用技术的课程则在教材中引入了最新的知识、技术、工艺和方法，同时重视企业参与，吸纳来自企业的真实案例。此外，根据实际教学的需要对部分课程进行了整合和优化。

归纳起来，本系列教材具有以下特点：

- 1) 围绕培养学生的职业技能这条主线来设计教材的结构、内容和形式。
- 2) 合理安排基础知识和实践知识的比例。基础知识以“必需、够用”为度，强调专业技术应用能力的训练，适当增加实训环节。
- 3) 符合高职学生的学习特点和认知规律。对基本理论和方法的论述容易理解、清晰简洁，多用图表来表达信息；增加相关技术在生产中的应用实例，引导学生主动学习。
- 4) 教材内容紧随技术和经济的发展而更新，及时将新知识、新技术、新工艺和新案例等引入教材。同时注重吸收最新的教学理念，并积极支持新专业的教材建设。
- 5) 注重立体化教材建设。通过主教材、电子教案、配套素材光盘、实训指导和习题及解答等教学资源的有机结合，提高教学服务水平，为高素质技能型人才的培养创造良好的条件。

由于我国高等职业教育改革和发展的速度很快，加之我们的水平和经验有限，因此在教材的编写和出版过程中难免出现问题和疏漏。我们恳请使用这套教材的师生及时向我们反馈质量信息，以利于我们今后不断提高教材的出版质量，为广大师生提供更多、更适用的教材。

机械工业出版社

前 言

随着“工业 4.0”和“中国制造 2025”的提出,我国需要大批量从事工程技术的人才,而高职学生将会占有较大比重,一本适用的教材对于人才培养又起着举足轻重的作用。本书根据高职高专人才培养目标,结合高职学生学情和课程项目化教学改革方向,本着“项目驱动、教学做一体化”的原则编写而成。

机电设备和自动化生产线是工业制造业中不可或缺的生产设备,其电气控制系统的性能直接影响产品质量。而 PLC 早已成为自动化控制领域的重要设备之一,它常常与继电器、传感器、变频器、人机界面等配合使用,构成功能齐全、操作简单方便的自动控制系统。S7-200 SMART PLC 是国内广泛使用的 S7-200 PLC 的更新换代产品,它继承了 S7-200 PLC 的诸多优点,其指令系统与 S7-200 基本相同,还增加了以太网和信号板,因此,在国内必将得到更为广泛的应用。为此,编者结合多年的工程经验及电气自动化的教学经验,在企业技术人员大力支持下编写了本书,旨在使读者能较快地掌握机电设备及生产线的控制方法和原理,具备一定的 PLC 编程和应用技能。

本书共分为 5 章,较为全面地介绍了电气控制系统常用电气元器件的结构与原理、三相异步电动机的典型电气控制和西门子 S7-200 SMART PLC 的基础知识及其编程与应用。

第 1 章介绍了电气控制系统中部分常用电气元器件的结构、原理和三相异步电动机的结构与工作原理、点动与连续运行的控制方法及电气控制系统故障排除方法。

第 2 章介绍了电气控制系统中部分常用电气元器件的结构、原理和三相异步电动机正反转、减压起动、调速及制动等典型控制的原理与方法。

第 3 章介绍了 PLC 的基本知识、编程及仿真软件的应用以及 S7-200 SMART PLC 的位逻辑指令及定时器和计数器指令的应用。

第 4 章介绍了数据的类型及数据处理、数学运算、模拟量等指令及顺控系统程序设计方法。

第 5 章介绍了程序控制指令及通信指令的应用。

为了便于教学和自学,并能激发读者的学习热情,本书中的案例和实训项目均较为简单,且易于操作和实现。为了巩固、提高和检阅读者所学知识,各章均配有习题与思考题。

本书是按照项目化教学的思路进行编排的,具备一定实验条件的高职院校可以按照编排的顺序进行教学。本书电子教学资料包中提供了很多项目参考程序、参考资料和应用软件,为不具备实验条件的学生或工程技术人员自学提供方便,其相关资源可在机械工业出版社教材服务网(www.cmpedu.com)下载。

本书的编写得到了淮安信息职业技术学院领导和自动化学院领导的关心和支持,朱静高级工程师在本书编写过程中给予了很多帮助并提供了很好的建议,同时,江苏农业装备有限公司和沙钢淮钢集团也为本书提供了很多工程案例,在此表示衷心的感谢。

本书由淮安信息职业技术学院侍寿永担任主编,于建明、史宜巧担任副主编,居海清、薛岚、吴会琴、王玲参编,成建生担任主审。

由于编者水平有限,加之时间仓促,书中难免有疏漏之处,恳请读者批评指正。

编 者

目 录

出版说明

前言

第 1 章 卧式车床的电气控制

（低压电器及控制电路 1） 1

1.1 卧式车床简介 1

1.1.1 型号含义 1

1.1.2 主要结构及运动形式 1

1.1.3 电气控制系统的组成 2

1.2 三相交流异步电动机 3

1.2.1 三相交流异步电动机的组成 3

1.2.2 三相交流异步电动机的铭牌 4

1.2.3 三相交流异步电动机的工作原理 5

1.3 常用低压电器之一 8

1.3.1 刀开关 9

1.3.2 低压断路器 10

1.4 实训 1 冷却泵电动机的手动控制 12

1.5 电磁式低压电器的构成 13

1.6 常用低压电器之二 15

1.6.1 接触器 15

1.6.2 按钮 18

1.6.3 熔断器 20

1.6.4 热继电器 21

1.7 低压电器的安装附件及配线原则 23

1.7.1 低压电器的安装附件 23

1.7.2 低压电器的配线原则 24

1.8 实训 2 主轴电动机的连续运行控制 25

1.9 常用低压电器之三 27

1.9.1 变压器 27

1.9.2 互感器 31

1.9.3 指示灯 32

1.10 实训 3 照明及指示电路控制 33

1.11 实训 4 机床电气识图与故障

诊断 35

1.12 习题与思考题 43

第 2 章 卧式镗床的电气控制

（低压电器及控制电路 2） 45

2.1 卧式镗床简介 45

2.1.1 型号含义 45

2.1.2 主要结构及运动形式 45

2.1.3 电气控制系统的组成 45

2.2 常用低压电器之四 48

2.2.1 行程开关 48

2.2.2 接近开关 50

2.2.3 光电开关 51

2.2.4 转换开关 51

2.3 实训 5 进给电动机的可逆运行控制 53

2.4 电动机的起动方法及原理 56

2.4.1 直接起动 56

2.4.2 减压起动 56

2.5 常用低压电器之五 59

2.5.1 时间继电器 59

2.5.2 中间继电器 60

2.5.3 电压继电器 61

2.5.4 电流继电器 62

2.5.5 速度继电器 62

2.6 实训 6 主轴电动机的减压起动控制 63

2.7 电动机的调速方法及原理 66

2.7.1 变极调速 67

2.7.2 变频调速 68

2.7.3 变转差率调速 69

2.8 电动机的制动方法及原理 69

2.8.1 机械制动·····	69	的 PLC 控制·····	129
2.8.2 电气制动·····	70	3.9 习题与思考题·····	133
2.9 实训 7 主轴电动机的调速 控制·····	72	第 4 章 注塑机系统的 PLC 控制 (S7-200 SMART PLC 功能 指令)·····	135
2.10 实训 8 主轴电动机的制动 控制·····	75	4.1 注塑机简介·····	135
2.11 习题与思考题·····	78	4.2 数据类型及寻址方式·····	136
第 3 章 平面磨床的 PLC 控制 (S7-200 SMART PLC 基本 指令)·····	80	4.3 数据处理指令·····	138
3.1 平面磨床简介·····	80	4.3.1 传送指令·····	138
3.1.1 型号含义·····	80	4.3.2 比较指令·····	141
3.1.2 主要组成及作用·····	80	4.3.3 移位指令·····	144
3.1.3 电气控制系统的组成·····	81	4.3.4 转换指令·····	146
3.2 PLC 简介·····	84	4.3.5 时钟指令·····	150
3.2.1 PLC 的产生与定义·····	84	4.4 实训 13 液压泵电动机的 PLC 控制·····	152
3.2.2 PLC 的特点及发展·····	85	4.5 运算指令·····	156
3.2.3 PLC 的分类及应用·····	86	4.5.1 数学运算指令·····	156
3.2.4 PLC 的结构与工作过程·····	87	4.5.2 逻辑运算指令·····	160
3.2.5 PLC 的编程语言·····	88	4.6 实训 14 显示系统的 PLC 控制·····	162
3.2.6 S7-200 SMART PLC 硬件·····	90	4.7 模拟量·····	164
3.2.7 编程及仿真软件·····	96	4.7.1 模拟量模块·····	165
3.3 位逻辑指令·····	99	4.7.2 模拟量模块的接线·····	165
3.3.1 触点指令·····	99	4.7.3 模拟量的地址分配·····	166
3.3.2 输出指令·····	100	4.7.4 模拟值的表示·····	166
3.3.3 逻辑堆栈指令·····	100	4.7.5 模拟量的读写·····	167
3.3.4 取反指令·····	102	4.7.6 模拟量的组态·····	167
3.3.5 置位、复位和触发器指令·····	102	4.8 实训 15 温度系统的 PLC 控制·····	168
3.3.6 跳变指令·····	104	4.9 顺序设计法及顺控指令·····	171
3.4 实训 9 冷却泵电动机的 PLC 控制·····	105	4.9.1 顺序控制系统·····	171
3.5 实训 10 工作台移动电动机的 PLC 控制·····	112	4.9.2 顺序功能图·····	172
3.6 定时器及计数器指令·····	119	4.9.3 顺控指令 SCR·····	179
3.6.1 定时器指令·····	119	4.10 实训 16 注塑机系统的 PLC 控制·····	183
3.6.2 计数器指令·····	121	4.11 习题与思考题·····	187
3.7 实训 11 砂轮主轴电动机减压 起动的 PLC 控制·····	124	第 5 章 面漆线系统的 PLC 控制 (S7-200 SMART PLC 程序控制 及通信指令)·····	189
3.8 实训 12 工作台转动电动机			

5.1 面漆线系统简介·····	189	5.6.1 通信概述·····	209
5.2 跳转及子程序指令·····	189	5.6.2 USS 通信·····	211
5.2.1 跳转指令·····	189	5.6.3 以太网通信·····	217
5.2.2 子程序指令·····	190	5.6.4 自由口通信·····	222
5.3 实训 17 水循环系统的 PLC 控制·····	193	5.7 实训 19 传输系统的 PLC 控制·····	227
5.4 中断指令·····	199	5.8 实训 20 网络系统的 PLC 控制·····	232
5.5 实训 18 送风系统的 PLC 控制·····	204	5.9 习题与思考题·····	235
5.6 通信指令·····	209	参考文献·····	236

第 1 章 卧式车床的电气控制（低压 电器及控制电路 1）

1.1 卧式车床简介

机床是将金属毛坯加工成机器零件的机器，它是制造机器的机器，所以又称为“工作母机”或“工具机”，习惯上简称为机床。

车床是机械加工业中应用最为广泛的一种机床，约占机床总数的 25%~50%。在各种车床中，应用最多的就是卧式车床。

卧式车床主要用来车削外圆、内圆、端面和螺纹等，还可以安装钻头或铰刀等进行钻孔、扩孔、铰孔和滚花等项的加工。

1.1.1 型号含义

卧式车床的型号含义如图 1-1 所示。

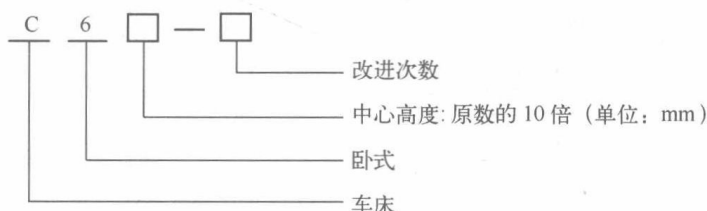


图 1-1 卧式车床的型号含义

1.1.2 主要结构及运动形式

卧式车床主要由床身、主轴变速箱、挂轮箱、进给箱、溜板箱、溜板与刀架、尾架、光杠和丝杠等部分组成，如图 1-2 所示。

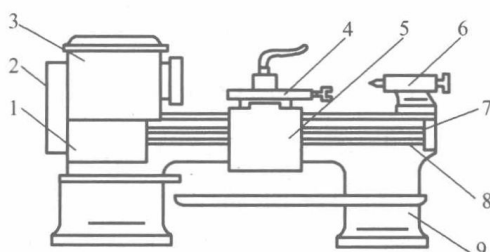


图 1-2 卧式车床结构示意图

1—进给箱 2—挂轮箱 3—主轴变速箱 4—溜板与刀架 5—溜板箱 6—尾架 7—丝杠 8—光杠 9—床身

车床在加工各种旋转表面时必须具有切削运动和辅助运动。切削运动包括主运动和进给

运动；而切削运动以外的其他运动皆为辅助运动。

车床的主运动为工件的旋转运动，由主轴通过卡盘或顶尖去带动工件旋转，它承受车削加工时的主要切削功率。

车床的进给运动是刀架的纵向或横向直线运动，其运动形式有手动和机动两种。加工螺纹时工件的旋转速度与刀具的进给速度应有严格的比例关系，所以车床主轴箱输出轴经挂轮箱传给进给箱，再经光杠传入溜板箱，以获得纵、横两个方向的进给运动。

车床的辅助运动有刀架的快速移动和工件的夹紧与放松。

1.1.3 电气控制系统的组成

图 1-3 是卧式车床 C620 电气控制原理图，是机床电气控制类较为简单的一个电气原理图，对初学者来说有点复杂，但是，如果利用“化整为零”的方法进行学习则简单多了。

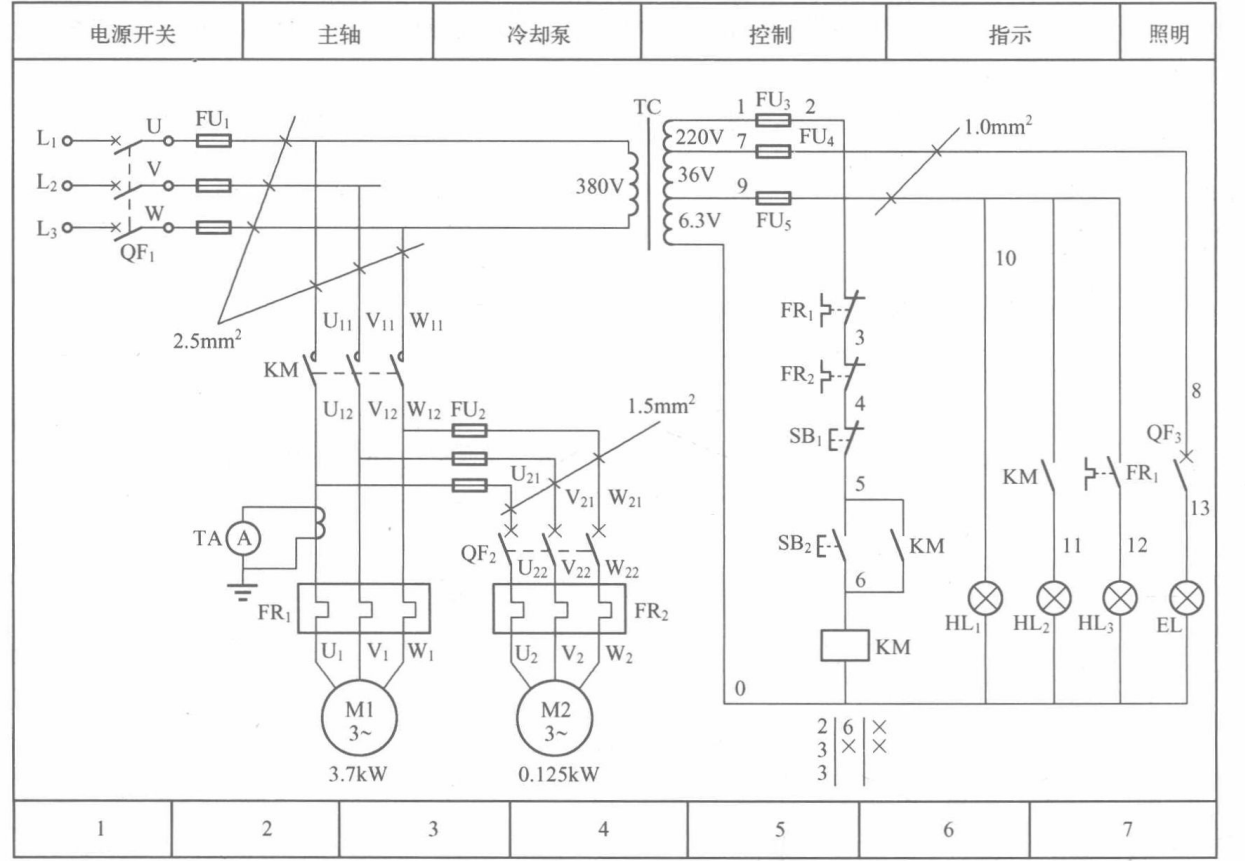


图 1-3 卧式车床 C620 电气原理图

从图 1-3 中可以看出，图中最上一行分成若干列，在每列中用汉字标注其正下方电气元件的名称或相应原理图在整个电气原理图中的作用；图中最下一行也相应分成若干列，在每列中按顺序用阿拉伯数字加以标注，即给整个电气原理图分成若干个区，便于用户或维护者使用和阅读。

电气原理图一般分成主电路（对应图 1-3 中的 1 至 4 区）、控制电路（对应图 1-3 中的 5 至 6 区）、辅助电路（如图 1-3 中的 6 至 7 区），辅助电路的详细介绍见 1.10 节。

1.2 三相交流异步电动机

电动机是一种将电能转化为机械能的电力拖动装置，它为机床和很多动力系统提供原动力。三相交流异步电动机因其结构简单、制造方便、运行可靠、价格低廉等一系列优点，在各行各业中应用最为广泛。

1.2.1 三相交流异步电动机的组成

三相交流异步电动机主要由定子和转子组成，定子是静止不动的部分，转子是旋转部分，在定子与转子之间有一定的气隙，笼型三相交流异步电动机的结构如图 1-4 所示。

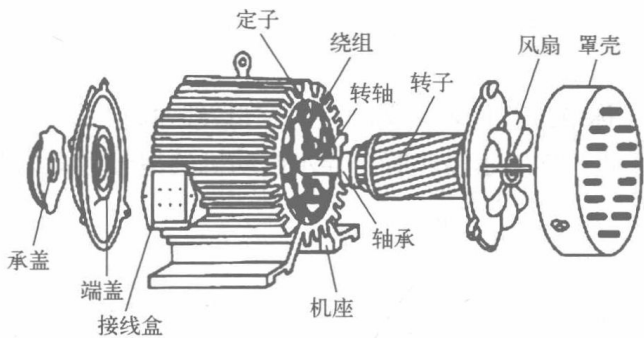


图 1-4 笼型三相交流异步电动机结构

1. 定子

异步电动机的定子由机座、定子铁心和定子绕组三部分组成。

(1) 机座

机座的作用主要是为了固定与支撑定子铁心，必须具备足够的机械强度和刚度。另外它也是电动机磁路的一部分。

(2) 定子铁心

定子铁心是异步电动机磁路的一部分，铁心内圆上冲有均匀分布的槽，用以嵌放定子绕组。为降低损耗，定子铁心用 0.5mm 厚的硅钢片叠装而成，硅钢片的两面涂有绝缘漆。

(3) 定子绕组

定子绕组是三相对称绕组，当通入三相交流电时，能产生旋转磁场，并与转子绕组相互作用，实现能量的转换与传递。

2. 转子

异步电动机的转子是电动机的转动部分，由转子铁心、转子绕组及转轴等部件组成。它的作用是带动其他机械设备旋转。

(1) 转子铁心

转子铁心的作用和定子铁心的作用相同，也是电动机磁路的一部分，在转子铁心外圆均匀地冲有许多槽，用来嵌放转子绕组。转子铁心也是用 0.5mm 的硅钢片叠压而成，整个转子铁心固定在转轴上。

(2) 转子绕组

三相交流异步电动机按转子绕组的结构可分为绕线式转子和笼型转子两种，较为常用的是笼型三相交流异步电动机，本书后续内容若无特殊说明则均为笼型电动机。

3. 气隙

异步电动机的气隙一般为 0.12~2mm。异步电动机的气隙过大或过小都将对异步电动机的运行产生不良影响。若气隙过大则降低了异步电动机的功率因数；若气隙过小则装配困难，转子还有可能与定子发生机械摩擦。

1.2.2 三相交流异步电动机的铭牌

异步电动机的机座上都有一个铭牌，铭牌上标有型号和各种额定数据。

1. 型号

为了满足工农业生产的不同需要，我国生产多种型号的电动机，每一种型号代表一系列电动机产品。

型号是选用产品名称中最有代表意义的大写字母及阿拉伯数字表示的，例如，Y 表示异步电动机，R 代表绕线式，D 表示多速等。异步电动机的型号含义如图 1-5 所示。

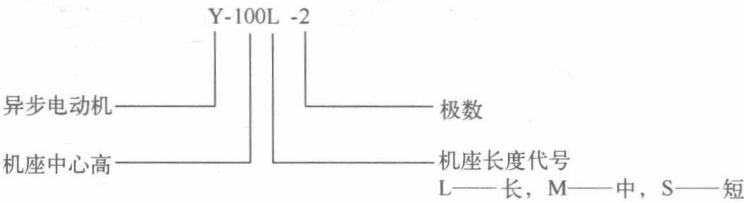


图 1-5 异步电动机的型号含义

2. 额定值

额定值是设计、制造、管理和使用电动机的依据。

- 1) 额定功率 P_N : 是指电动机在额定负载运行时，轴上所输出的机械功率，单位为 W 和 kW。
 - 2) 额定电压 U_N : 是指电动机正常工作时，定子绕组所加的线电压，单位为 V。
 - 3) 额定电流 I_N : 是指电动机输出功率时，定子绕组允许长期通过的线电流，单位为 A。
 - 4) 额定频率 f_N : 我国的电网频率为 50Hz。
 - 5) 额定转速 n_N : 是指电动机在额定状态下转子的转速，单位为 r/min。
 - 6) 绝缘等级: 是指电动机所用绝缘材料的等级。它规定了电动机长期使用时的极限温度与温升。温升是绝缘允许的温度减去环境温度（标准规定为 40℃）和测温时方法上的误差值（一般为 5℃）。
 - 7) 工作方式: 电动机的工作方式分为连续工作制、短时工作制与断续周期工作制三类，选用电动机时，不同工作方式的负载应选用对应工作方式的电动机。
- 此外，铭牌上还标明绕组的相数与接法（接成 Y 或 Δ ）等。对绕线式转子异步电动机，还标明转子的额定电势及额定电流。

3. 铭牌举例

以 Y 系列三相交流异步电动机的铭牌为例，如表 1-1 所示。

表 1-1 三相交流异步电动机的名牌

三相交流异步电动机					
型号	Y90L-4	电压	380V	接法	Y
功率	1.5kW	电流	3.7A	工作方式	连续
转速	1400r/min	功率因数	0.79	温升	75℃
频率	50Hz	绝缘等级	B	出厂年月	×年×月
×××电机厂		产品编号	重量	千克	

1.2.3 三相交流异步电动机的工作原理

1. 旋转磁场的产生

所谓旋转磁场就是一种极性和大小不变，且以一定转速旋转的磁场。理论分析和实践证明，在对称三相绕组中流过对称三相交流电时会产生这种旋转磁场。

(1) 对称三相绕组

所谓对称三相绕组就是三个外形、尺寸、匝数都完全相同、首端彼此间隔 120°、对称地放置到定子槽内的三个独立的绕组。下面以最简单的对称三相绕组为例来进行分析。

按图 1-6 的外形，顺时针方向绕制三个线圈，每个线圈绕 N 匝。它们的首端分别用字母 U_1 、 V_1 、 W_1 表示，末端分别用 U_2 、 V_2 、 W_2 表示。线圈采用的材料和线径相同。这样，每个线圈呈现的阻抗是相同的。线圈又分别称为 U 、 V 、 W 相绕组。

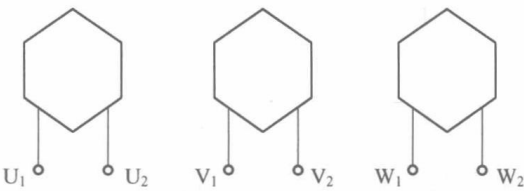


图 1-6 对称三相绕组的线圈

图 1-7a 是三相绕组的端面布置图。在定子的内圆上均匀地开出 6 个槽，并给每个槽编上序号，将 U_1U_2 相绕组放进 1 号和 4 号槽中； V_1V_2 相绕组放进 3 号和 6 号槽中； W_1W_2 相绕组放进 5 号和 2 号槽中。由于 1、3、5 号槽在定子空间互差 120°，分别放入 U 、 V 、 W 相绕组的首端，这样排列的绕组，就是对称三相绕组。

将各相绕组的末端 U_2 、 V_2 、 W_2 联结在一起，首端 U_1 、 V_1 、 W_1 分别接到三相电源上，可以得到对称三相绕组的 Y 接法，如图 1-7b 所示。

(2) 对称三相电流

由电网提供的三相电压是对称三相电压，由于对称三相绕组组成的三相负载是对称三相负载，每相负载的复阻抗都相等，所以，流过三相绕组的电流也必定是对称三相电流。

对称三相电流的函数式表示为：

$$\begin{aligned} i_u &= I_m \sin \omega t \\ i_v &= I_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ i_w &= I_m \sin(\omega t + 120^\circ) \end{aligned}$$

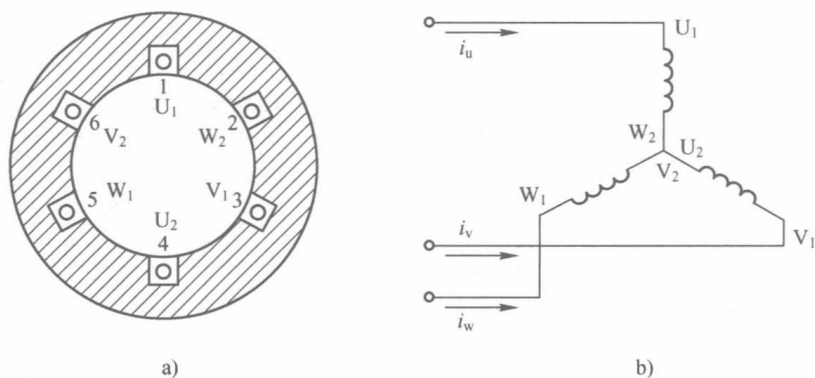


图 1-7 三相对称定子绕组

a) 端面图 b) Y型接法

对称三相电流的波形如图 1-8 所示。

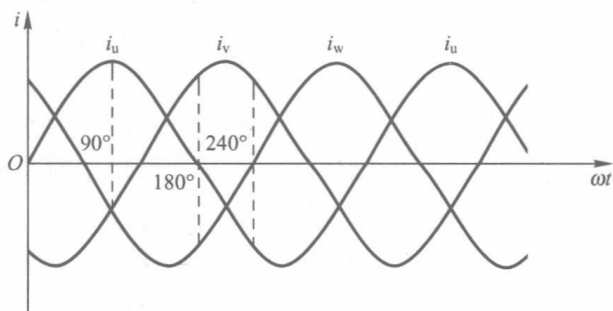


图 1-8 对称三相电流波形图

(3) 旋转磁场的产生

由于三相电流随时间的变化是连续的，且极为迅速，为了能考察它所产生的合成磁效应，说明旋转磁场的产生，在此选定 $\omega t=90^\circ$ 、 $\omega t=180^\circ$ 、 $\omega t=240^\circ$ 等 3 个特定瞬间，以窥全貌，如图 1-9 所示。规定：电流为正值时，从每相线圈的首端入、末端出；电流为负值时，从末端入、首端出。用符号“ $\odot$ ”表示电流流出，用“ $\times$ ”表示电流流入。由于磁力线是闭合曲线，对它的磁极的性质作如下假定：磁力线由定子进入转子时，该处的磁场呈现 N 极磁性；反之，则呈现 S 极磁性。

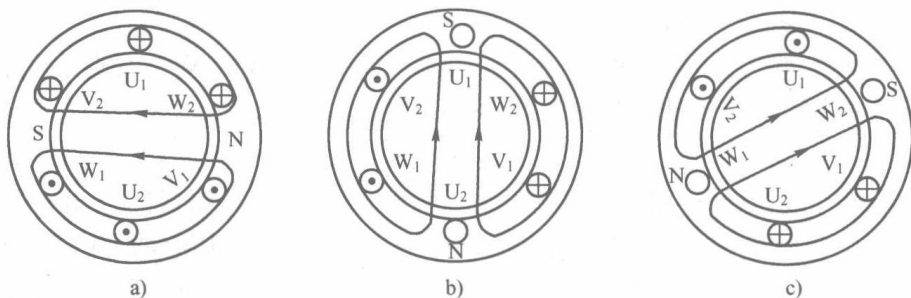


图 1-9 两极旋转磁场的产生

a) $\omega t=90^\circ$ b) $\omega t=180^\circ$ c) $\omega t=240^\circ$

先看 $\omega t=90^\circ$ 这一瞬间，由电流瞬时表达式和波形图均可看出，此时： $i_u = I_m > 0$ ，

$i_v = i_w = -\frac{1}{2}I_m < 0$ ，将各相电流方向表示在各相线圈剖面图上，如图 1-9a 所示。从图看出， V_2 、 U_1 、 W_2 均为电流流入， W_1 、 U_2 、 V_1 均为电流流出。根据右手螺旋定则，它们合成磁场的磁力线方向是由右向左穿过定、转子铁心，是一个二极（一对极）磁场。用同样方法，可画出 $\omega t=180^\circ$ 、 $\omega t=240^\circ$ 这两个特定瞬间的电流与磁力线分布情况，分别如图 1-9b 和图 1-9c 所示。

依次仔细观察图 1-9a、b、c 就会发现这种情况下建立的合成磁场，既不是静止的，也不是方向交变的，而是如一对磁极在旋转的磁场。且随着三相电流相应的变化，其合成的磁场在空间按 $U_1 \rightarrow V_1 \rightarrow W_1$ 顺序旋转（图中为顺时针方向）。

由上面的分析可得出如下的结论：

- 当三相对称电流通入三相对称绕组，必然会产生一个大小不变，且在空间以一定的转速不断旋转的旋转磁场。
- 旋转磁场的旋转方向是由通入三相绕组中的电流的相序决定的。即当通入三相对称绕组的对称三相电流的相序发生改变时，即将三相电源中的任意两相绕组接线互换，旋转磁场就会改变方向。

旋转磁场转速的大小是多少呢？从图 1-9 所示的情况可看出，当三相电流变化一个周期，旋转磁场在空间相应地转过 360° 。即电流变化一次，旋转磁场转过一转。因此可得出：电流每秒钟变化 f 次（即频率），则旋转磁场每秒钟转过 f 转。由此可知旋转磁场为 1 对磁极情况下，其转速 n_0 (r/s) 与交流电流频率 f 的是相等的，即 $n_0 = f$ 。

如果将三相绕组按图 1-10 所示排列。U 相绕组分别由两个线圈 $1U_1-1U_2$ 和 $2U_1-2U_2$ 串联组成。每个线圈的跨距为 $1/4$ 圆周。用同样的方法将 V 相和 W 相的两个线圈也按此方法串联成 V 相和 W 相绕组。用上述方法决定三相电流所建立的合成磁场，可以发现仍然是一个旋转磁场。不过磁场的极数变为 4 个，即为两对磁极，并且当电流变化一次，可以看出旋转磁场仅转过 $1/2$ 转。依次类推，如果将绕组按一定规则排列，可得到 3 对、4 对或 p 对磁极的旋转磁场。并可看出旋转磁场的转速 n_0 与磁极对数 p 之间是一种反比例关系。即具有 p 对磁极的旋转磁场，电流变化一个周期，磁场转过 $1/p$ 转，它的转速为：

$$n_0 = \frac{f}{p} \text{ (r/s)} = \frac{60f}{p} \text{ (r/min)}$$

用 n_0 表示旋转磁场的这种转速，称为同步转速。

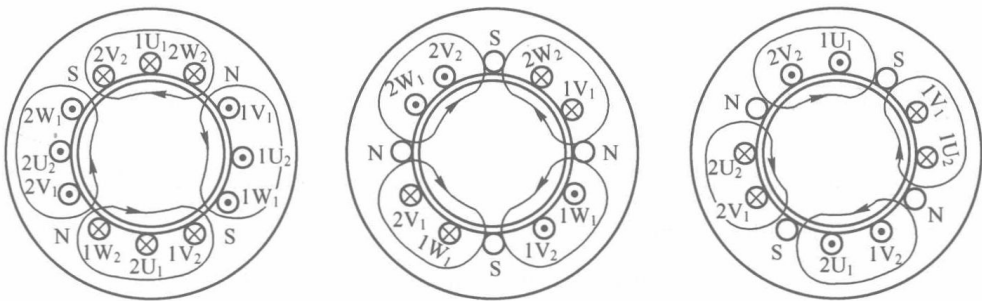


图 1-10 四极旋转磁场示意图

2. 三相异步电动机的工作原理

图 1-11 是三相异步电动机的原理图。定子上装有对称三相绕组，在圆柱体的转子铁心上嵌有均匀分布的导条，导条两端分别用铜环把它们联结成一个整体。当定子接通三相电源后，即在定、转子之间的气隙内建立了一同步速为 n_0 的旋转磁场。磁场旋转时将切割转子导体，根据电磁感应定律可知，在转子导体中将产生感应电势，其方向可由右手定则确定。磁场顺时针方向旋转，导体相对磁极为逆时针方向切断磁力线。转子上半边导体感应电势的方向为出来的，用“ $\odot$ ”表示；下半边导体感应电势的方向为进去的，用“ $\otimes$ ”表示。因转子绕组是闭合的，导体中有电流，电流方向与电势相同。载流导体在磁场中要受到电磁力，其方向由左手定则确定，如图 1-11 所示。这样，在转子导条上形成一个顺时针方向的电磁转矩。于是转子就跟着旋转磁场顺时针方向转动。从工作原理看，不难理解三相异步电动机为什么又叫感应电动机了。

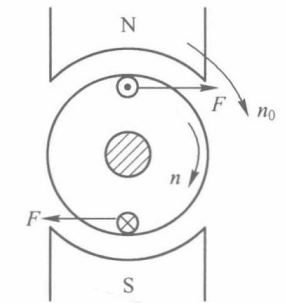


图 1-11 三相异步电动机的工作原理

综上所述，三相异步电动机能够转动的必备条件之一是电动机的定子必须产生一个在空间不断旋转的旋转磁场，二是电动机的转子必须是闭合导体。

3. 转差率

异步电动机中，转子因旋转磁场的电磁感应作用而产生电磁转矩，并在电磁转矩的作用下而旋转，那么转子的转速是多少？与旋转磁场的同步转速相比又如何呢？

转子的旋转方向与旋转磁场的转向相同，但转子的转速 n 不能等于旋转磁场的同步转速 n_0 ，否则磁场与转子之间便无相对运动，转子就不会有感应电势、电流与电磁转矩，转子也就根本不可能转动了。因此，异步电动机的转子转速 n 总是略小于旋转磁场的同步转速 n_0 ，即与旋转磁场“异步”转动，所以称这种电动机为“异步”电动机。若三相异步电动机带上机械负载，负载转矩越大，则电动机的“异步”程度也越大。在分析中，用“转差率”这个概念来反映“异步”的程度。 n_0 与 n 之差称为“转差”。转差是异步电动机运行的必要条件。将其与同步转速之比称为“转差”，用 s 表示。

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0}$$

转差率是异步电动机的一个基本参数。一般情况下，异步电动机的转差率变化不大，空载转差率在 0.005 以下，满载转差率在 0.02~0.06 之间。可见，额定运行时异步电动机的转子转速非常接近同步转速。

1.3 常用低压电器之一

凡是能自动或手动接通和断开电路，以及对电路或非电路现象能进行切换、控制、保护、检测、变换和调节的元件统称为电器。我国现行标准将电器按电压等级分为高压电器和低压电器。凡工作在交流 50Hz、额定电压 1200V 及以下和直流额定电压 1500V 及以下电路中的电器称为低压电器。

低压电器按控制作用分执行电器（如电磁铁）、控制电器（如继电器）、主令电器（如按钮）、保护电器（如熔断器）；按动作方式分自动切换电器（如接触器）、非自动切换电器