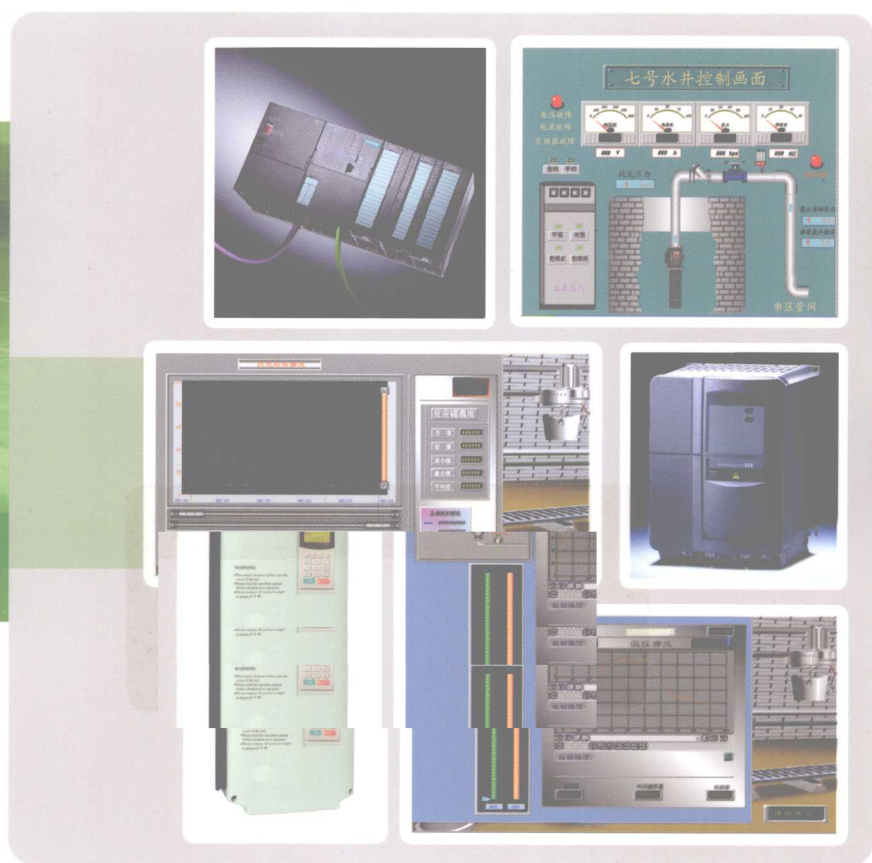


变频器、PLC 及组态软件 实用技术速成教程

BIANPINQI PLC JI ZUTAIRUANJIAN
SHIYONG JISHU SUCHENG JIAOCHENG



姚福来 孙鹤旭 杨鹏 等编著

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



变频器、PLC及组态软件 实用技术速成教程

姚福来 孙鹤旭 杨鹏 等编著

目 录

第一章 变频器的应用

第一节 变频器的概述

第二节 变频器的分类

第三节 变频器的组成

第四节 变频器的应用

第五节 变频器的选型

第六节 变频器的安装

第七节 变频器的调试

第八节 变频器的维护

第九节 变频器的故障排除

第十节 变频器的应用案例

习题一

习题二

习题三

习题四

习题五

习题六

习题七

习题八

习题九

习题十

附录

附录一

附录二

附录三

附录四

附录五

附录六

附录七

附录八

附录九

附录十

附录十一

附录十二

附录十三

附录十四

附录十五



机械工业出版社

北京机械工业出版社 地址：北京市西城区百万庄大街24号 邮编：100037 电话：(010) 68993821

本书对电气自动化、仪器仪表、过程控制等相关专业在实际工作中最常用的变频器、软起动器、伺服电动机、步进电动机、PLC、组态软件、触摸屏等装置和软件进行了深入浅出的讲解，本书力求看懂即会的写作风格，书中的案例均为实际应用项目，并兼顾过程控制和电气控制两大领域。本书还对占社会用电量很大的水泵风机变频调速进行了量化的节能分析，对该领域存在的问题及模糊概念和错误的节能做法进行了剖析，给出了该领域至今为止最前沿的量化节能测算、量化节能设计和量化节能控制技术，并给出了如何在已经有变频器的泵站继续深度节能的方法。本书力求使学习者在短期内基本掌握实际工作中最常用的一些实用知识，为自动化专业大中专毕业生、本科毕业生、研究生及爱好者快速提高成绩提供帮助。本书可作为自动化专业的短期速成培训教材或自学教材，适于高中以上文化程度的读者使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

变频器、PLC 及组态软件实用技术速成教程/姚福来等编著. —北京:机械工业出版社, 2010.3

ISBN 978-7-111-29856-4

I. ①变… II. ①姚… III. ①变频器-教材②可编程序控制器-教材
IV. ①TN773②TM571.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 030484 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: 吉玲 林春泉 责任编辑: 王荣 封面设计: 马精明

责任校对: 陈延翔 责任印制: 李妍

北京外文印刷厂印刷

2010 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·27.25 印张·672 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-29856-4

定价: 59.80 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

社服务中心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010) 88379649

读者服务部: (010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

前 言

对于一些初学者或实际经验少的电气自动化工作者来说,要掌握新知识,靠死记硬背是最伤脑筋的事。如何在理解的基础上掌握重点,以点带面,触类旁通,迅速得心应手地进入实战状态,是目前多数电气自动化工作者所必须掌握的学习方法,尤其是在各种新产品层出不穷的今天,这一问题就变得更加突出。

大家可能还记得,在20世纪90年代初,手机是一件需要使用者掌握一段时间的复杂物品。因为它的说明书非常厚,每一项功能试一下就得需要不少时间,现在手机的复杂程度就更不用说了,然而现在的年轻人却丝毫也不觉得它有多麻烦。这是为什么呢?原因很简单,因为经常使用手机,人们就总结出一个规律:不论手机有多少功能,它的主要功能是通信联络,所以几乎必须掌握的知识顺序是:第一是接打电话,第二是收发短信,说明书中其他的功能(游戏、闹钟、音乐、上网、GPS等)就不是掌握手机的必需的知识,对于初学者就是这样。

其实,很多电气自动化领域的产品和手机发展的情况差不多,每一类也都有一些基本的特点和存在共性的地方。比如,对于变频器来说,有些厂家的变频器可以设置的参数就有上千个,每一个参数肯定也有一定的道理,而对于90%以上的实际应用项目,需要自己配置参数可能只需掌握10多个就够了。PLC的情况也是一样,它的编程语句可能有上百条,对于初学者来讲,可能掌握20多条就够应付大多数的工程应用。组态软件、触摸屏、同步随动控制器等其他自动化产品的情况也基本类似。

本书的思路是以基本够用为出发点,以大量的实际案例去说明如何使用这些知识。

本书对电气自动化、仪器仪表、过程控制等相关专业在实际工作中最常用的变频器、软起动器、伺服电动机、步进电动机、PLC、组态软件、触摸屏等装置和软件进行了由浅入深的讲解。本书力求看懂即会的写作风格,书中的案例均为实际应用项目,并兼顾过程控制和电气控制两大领域。本书还对占社会用电量很大的水泵风机变频调速进行了量化的节能分析,对该领域存在的问题及模糊概念和错误的节能做法进行了剖析,给出了该领域至今为止最前沿的量化节能测算、量化节能设计和量化节能控制技术,并给出了如何在已经有变频器的泵站继续深度节能的方法。

本书第4章的部分内容由孙鹤旭教授编写,第14章的部分内容由杨鹏教授编写,第8章、第24章的部分内容由张艳芳高级工程师编写,第21章的部分内容由姚泊生工程师编写,第17章和第18章的部分内容由张艳彬工程师编写,第5章的部分内容由王红霞工程师编写,其余部分均由姚福来研究员编写。本书部分章节的内容由姚雅明同学负责打印并文字校正,在此一并表示感谢。

编 者

2010年5月

目 录

前言

第 1 章 三相交流电动机的基本知识	1	压方法的速查表	45
1.1 三相交流电动机的基本原理	1	第 4 章 通用变频器的基本知识	48
1.2 三相交流电动机的反向运行	5	4.1 通用变频器的主电路结构	48
1.3 三相交流电动机的极数	6	4.2 正弦波脉宽调制 (SPWM) 方式和 实现方法	49
1.4 三相交流电动机的几种类型	9	4.3 变频器的谐波和应对措施	51
1.5 三相交流电动机定子绕组的基本 知识	11	4.4 输入输出电抗器的估算	53
1.6 三相交流电动机的几种外部和内部 联结方式	15	4.5 变频器输入输出电压、电流和功率的 测量	53
1.7 三相交流电动机常用参数的计算和 估算	19	4.6 变频器的基本使用方法	55
第 2 章 三相交流电动机的调速方法	21	4.6.1 变频器的选型	55
2.1 三相交流电动机的转速	21	4.6.2 变频器的主要动力和控制接线	55
2.2 三相交流电动机的效率	21	4.6.3 变频器的基本参数设定	55
2.3 三相交流电动机的调速方法	23	4.6.4 变频器的外形	56
2.3.1 改变极对数 p 的调速方法	23	4.7 变频器的散热问题和无功补偿问题	56
2.3.2 改变转差率 s 的调速方法	27	4.8 变频器的 V/F 控制	57
2.3.3 改变频率 f 的调速方法	34	4.9 变频器的矢量控制	59
2.4 三相交流电动机的外部调速方法	39	4.10 制动电阻的计算和估算	60
2.4.1 电磁转差离合器	39	4.11 变频器中的 PID 及电源反接问题	62
2.4.2 液力耦合调速器	40	第 5 章 富士 G (P) 11 变频器的基本 使用方法	63
2.4.3 液粘调速离合器	40	5.1 目的	63
2.4.4 机械调速器	41	5.2 需要掌握的要领	63
第 3 章 高中压三相交流电动机的减压 改造	42	5.3 变频器外形	63
3.1 三相交流电动机的 $1Y-1\Delta$ 转换减压 方法	42	5.4 变频器型号及总体框图	63
3.2 三相交流电动机的 $1Y-nY$ 减压 方法	43	5.5 变频器接线	66
3.3 三相交流电动机的 $1\Delta-n\Delta$ 减压 方法	44	5.6 参数设定	69
3.4 三相交流电动机的 $nY-m\Delta$ 减压 方法	44	5.7 数据快速查询和运行状态监视	71
3.5 三相交流电动机的 $m\Delta-nY$ 改压 方法	45	5.8 变频器的使用高度及散热问题等 事项	71
3.6 三相交流电动机 $\Delta-Y$ —并—串改		第 6 章 西门子 MM440 通用变频器的 使用方法	73

6.6	参数设定	78	8.9.9	计量的准确性及推算方法	117
6.7	变频器的降容使用问题	82	8.9.10	风机站目标电耗的测算	123
第7章 ABB ACS550 变频器的基本			8.10	用“目标电耗”节能理论对水泵	
使用方法		84		风机站进行控制	124
7.1	目的	84	8.10.1	调速泵站的目标电耗运行方法	
7.2	需要掌握的要领	84		(以流量为控制点)	125
7.3	变频器外形	84	8.10.2	调速泵站的目标电耗运行方法	
7.4	变频器型号	84		(以转速为控制点)及稳定性	129
7.5	变频器的接线及浮地问题	84	第9章 水泵风机调速运行的稳定性和		
7.6	参数设定	89	稳定判据		135
7.7	其他注意事项	92	9.1	水泵风机定速运行的稳定性问题和	
第8章 水泵风机调速定律和调速器				稳定区域确定	135
配备原则		93	9.2	水泵风机调速后的稳定判据	139
8.1	引言	93	9.3	水泵风机的过载问题	142
8.2	水泵风机站电耗分析及目标电耗的		9.4	水泵风机的频繁切换问题	143
	概念	94	9.4.1	恒压供水的原理	143
8.3	节电比例的计算	97	9.4.2	频繁起停问题	143
8.4	节电比例可实现的必要条件	97	9.5	需要注意的其他问题	144
8.5	水泵风机站节能工作的5项原则	98	第10章 PID控制器		145
8.6	以电耗最低为目标的“目标电耗”		10.1	PID控制器的基本原理	145
	节能技术	98	10.2	PID控制器主要参数的作用	145
8.7	调速定律和切换定律	100	10.3	PID控制器的主要接线及外形	146
8.8	调速设备的数量原则和选取原则	103	10.4	IAO型PID控制器的快速入门	147
8.9	用“目标电耗”节能理论对水泵风机		10.4.1	目的	147
	站进行节能测算	103	10.4.2	需要掌握的要领	147
8.9.1	对已经使用了变频器运行的泵站		10.4.3	外形	147
	进行节电潜力测算	103	10.4.4	型号说明	147
8.9.2	对没有使用变频器运行的泵站		10.4.5	接线端子	148
	进行节电潜力测算	105	10.4.6	用IAO系列PID控制器实现	
8.9.3	对已经使用了变频器运行的泵站			恒压控制	148
	进行节电潜力测算(调速器数量		10.4.7	参数设定	149
	不足)	107	10.4.8	参数调整	150
8.9.4	对已经使用了变频器的泵站进行		10.4.9	注意事项	151
	节电潜力测算(缺少大小泵		第11章 软起动器		152
	搭配)	110	11.1	软起动器的基本原理	152
8.9.5	分析使用了变频器节能不明显的		11.2	软起动器的基本参数	152
	泵站(调速器过多)	112	11.3	软起动器的基本接线和外形	152
8.9.6	分析使用了变频器反而更费电的		11.4	CMC型软起动器的快速入门	153
	泵站	113	11.4.1	目的	153
8.9.7	对用阀门调节的单台水泵进行		11.4.2	需要掌握的要领	153
	节电潜力测算	114	11.4.3	外形	154
8.9.8	中央空调泵站的节能分析	115	11.4.4	接线图	154

11.4.5	参数设定	156	14.1.12	定时器指令	180
11.4.6	指示灯说明	158	14.1.13	大于等于 (\geq) 指令	180
第 12 章 伺服电动机及伺服电动机 控制器		159	14.1.14	等于 (=) 指令	180
12.1	交流伺服电动机驱动器的原理	159	14.1.15	小于 (<) 指令	180
12.2	交流伺服电动机驱动器的接线及 外形	159	14.1.16	大于 (>) 指令	181
12.3	A4 系列伺服驱动器的快速入门	160	14.1.17	小于等于 (\leq) 指令	181
12.3.1	目的	160	14.1.18	上升沿动作 (P) 指令	181
12.3.2	需要掌握的要领	160	14.1.19	下降沿动作 (N) 指令	181
12.3.3	外形	161	14.1.20	秒脉冲程序指令	181
12.3.4	A4 系列伺服驱动器的型号 说明	161	14.1.21	PID 闭环控制指令	182
12.3.5	接线端子布局	161	14.2	编程器及快速熟悉编程的方法	182
12.3.6	动力接线端子	161	14.3	不需要编程工具的小型通用逻辑 模块	183
12.3.7	旋转编码器接线	163	第 15 章 西门子 S7-200 系列 PLC		184
12.3.8	I/O 接口 X5	164	15.1	目的	184
12.3.9	面板及功能	166	15.2	需要掌握的要领	184
12.3.10	速度控制模式	167	15.3	S7-200 系列 PLC 的外形	184
12.3.11	位置控制模式	167	15.4	中央处理单元 (主模块) 各部分的 功能	184
第 13 章 步进电动机及驱动装置		170	15.5	扩展模块的外形	185
13.1	步进电动机的原理	170	15.6	扩展模块的连接方法	185
13.2	步进电动机的参数、接线及外形	172	15.7	中央处理单元的连接方法及 I/O 地址	186
13.3	ST 系列步进电动机驱动器	173	15.8	数字量输入/输出扩展模块的连接 方法及地址分配	187
13.3.1	目的	173	15.9	模拟量输入/输出扩展模块的连接 方法及地址分配	187
13.3.2	需要掌握的要领	173	15.10	编程设备的连接方法	188
13.3.3	外形	173	15.11	PLC 的硬件配置与编程举例	189
13.3.4	接线端子	174	15.12	PID 控制的使用方法	198
13.3.5	参数设定	174	15.13	浮点数的转换及使用方法	209
第 14 章 PLC 的基本知识		176	第 16 章 西门子 S7-300 系列 PLC		210
14.1	梯形图编程指令	177	16.1	目的	210
14.1.1	逻辑“与”指令	177	16.2	需要掌握的要领	210
14.1.2	逻辑“或”指令	178	16.3	S7-300 系列 PLC 的组成	210
14.1.3	立即输出指令	178	16.4	S7-300 系列 PLC 的组网	212
14.1.4	置位指令	178	16.5	输入/输出扩展卡的连接方法	212
14.1.5	复位指令	178	16.6	S7-300 系列 PLC 的编程器连接及 地址排列规律	213
14.1.6	数据传送指令 (MOV)	179	16.7	S7-300 系列 PLC 的应用案例与 编程	214
14.1.7	加法指令 (ADD)	179	16.8	S7-300 系列 PLC 的 PID 应用与 编程	224
14.1.8	减法指令 (SUB)	179			
14.1.9	乘法指令 (MUL)	179			
14.1.10	除法指令 (DIV)	179			
14.1.11	计数器指令	180			

16.9	程序的复制、上传与浮点运算	229	调试应用	286	
第 17 章	欧姆龙 CP1H 系列 PLC	232	19.8	使用 SyncPos Motion Controller 卡时 需要注意的问题	287
17.1	目的	232	19.9	MC206 同步控制器的外形及接口 说明	289
17.2	需要掌握的要领	232	19.10	MC206 同步控制器的应用案例及 编程方法	293
17.3	CP1H 系列 PLC 的外形	232	第 20 章	TD200 人机界面	299
17.4	中央处理单元 (主模块) 各部分的 功能	232	20.1	目的	299
17.5	扩展模块的外形及连接方法	233	20.2	需要掌握的要领	299
17.6	中央处理单元的连接方法及 I/O 地址	233	20.3	TD200 的主要功能	299
17.7	数字量输入/输出扩展模块连接方法 及地址分配	234	20.4	TD200 的外形	299
17.8	模拟量输入/输出扩展模块连接方法 及地址分配	235	20.5	TD200 与 S7-200 的接线	300
17.9	中央处理单元和扩展单元的整体 编排规律	235	20.6	TD200 的编程	300
17.10	编程设备的连接方法	236	第 21 章	MT506 触摸屏	314
17.11	PLC 的硬件配置与编程举例	236	21.1	目的	314
17.12	模拟量信号的使用与编程	243	21.2	需要掌握的要领	314
17.13	程序下载	250	21.3	eView 系列触摸屏的外形	314
第 18 章	欧姆龙 CJ1M 系列 PLC	253	21.4	与 PC 及 PLC 的接口	314
18.1	目的	253	21.5	eView 触摸屏编程软件的运行	316
18.2	需要掌握的要领	253	21.6	触摸屏的型号及通信设置	316
18.3	CJ1M 系列 PLC 的组成	253	21.7	数字量的显示	319
18.4	输入/输出扩展卡的接线布局	255	21.8	数字量输出	321
18.5	输入/输出模块的地址分配	256	21.9	运行状态显示	324
18.6	CJ1M 系列 PLC 与编程 PC 的连接	257	21.10	起停控制	329
18.7	CJ1M 系列 PLC 的编程	257	21.11	文字显示	333
18.8	模拟量信号的使用与编程	268	21.12	文件保存下载及离线模拟	335
18.9	程序下载	279	第 22 章	“组态王”组态软件	338
第 19 章	Danfoss 和 Trio 同步 控制器	281	22.1	目的	338
19.1	目的	281	22.2	需要掌握的要领	338
19.2	需要掌握的要领	281	22.3	组态王的运行与通信设置	338
19.3	SyncPos Motion Controller 卡的外形及 接口	281	22.4	建立“变量”与 PLC 的连接	344
19.4	SyncPos Motion Controller 卡的连接 方式	282	22.5	建立新画面	347
19.5	VLT5000 变频器的接线	283	22.6	添加文本显示	347
19.6	SyncPos Motion Controller 卡的使用及 编程方法	283	22.7	模拟量显示	348
19.7	SyncPos Motion Controller 卡的现场		22.8	模拟量及数据的输出	350
			22.9	按钮控制输出	351
			22.10	设备运行状态指示	358
			22.11	程序下载	359
			22.12	注意事项	360
			第 23 章	西门子 WinCC 组态软件	361
			23.1	目的	361

23.2	需要掌握的要领	361	自动控制系统	401	
23.3	WinCC 编程软件运行及通信设置	362	24.9.1	用 S7-300 组成的无线遥控遥调网络	401
23.4	添加与 PLC 连接的“变量”	366	24.9.2	通信模块的配置	402
23.5	添加新画面	371	24.9.3	通信的编程	402
23.6	添加静态文本	371	24.9.4	用 S7-200 组成的无线遥控遥调网络	404
23.7	添加模拟量及数据显示	373	24.10	一种廉价的双机热备方案	407
23.8	输出模拟量及数据	374	24.11	一种简单的闭环模拟控制方法	408
23.9	添加按钮控制	375	24.12	程序的加密和产权保护	409
23.10	添加设备状态显示	378	24.13	PLC 之间的数据传输	413
23.11	通信卡及运行设置	380	24.14	两套无法通信设备间的数据传递	415
23.12	减少组态软件变量标签数量的技巧	380	第 25 章 控制系统的抗干扰与故障分析		
第 24 章 实际应用案例		382	故障分析	416	
24.1	变频恒压控制	382	25.1	抗干扰措施	416
24.2	恒温度控制	385	25.1.1	共模干扰	416
24.3	恒流量控制	386	25.1.2	其他方式的信号传输干扰	417
24.4	成分控制	387	25.1.3	通信干扰	417
24.5	张力控制	388	25.1.4	四线制传感器与两线制传感器的信号连接与转换	419
24.5.1	张力测量	388	25.1.5	隔离模块的电源隔离及共用问题	420
24.5.2	用于张力控制的离合器和制动器	389	25.1.6	变频器干扰	420
24.5.3	有张力测量的张力控制	390	25.1.7	电源干扰	422
24.5.4	无张力测量传感器的张力控制	391	25.1.8	传感器输出信号的抗干扰	422
24.6	同步控制	391	25.1.9	控制器的开关量输入	422
24.6.1	PROFIBUS 总线的配置	392	25.1.10	电路控制失效	422
24.6.2	PROFIBUS 总线中的数据传输	395	25.2	信号线的选择与屏蔽接地问题	423
24.6.3	闭环同步控制	398	25.3	故障分析	423
24.7	传统的套准控制及一种全新型的套准控制	398	25.4	防雷措施	424
24.8	负载分配控制	400	参考文献	425	
24.9	用 PLC 和电台组成的无线遥控遥调				

三相交流电动机的基本知识

了解三相交流电动机的基本知识,对于更快更好地理解三相交流电动机的控制方法具有事半功倍的作用,有些模糊的概念和费解的方法将会变得简单明了和通俗易懂,所以本章先从三相交流电动机的基本知识说起。

1.1 三相交流电动机的基本原理

19 世纪初,英国科学家法拉第用一个小磁棒在一个闭路绕组周围一晃,发现在绕组中有电流产生,从此人类发现了电磁感应现象,这个现象表明机械能和电能可以互相转化,也表明了电和磁之间的相互转换原理。在这一原理的启发下,发电机和电动机最终走上了人类的舞台,揭示了人类电气时代的到来。基于这一原理,19 世纪末,美国发明家特斯拉发明了交流电动机。

中学物理中有两个这样的实验,第一个实验如图 1-1 所示,用手顺时针转动 U 形磁铁,N 极和 S 极两个磁极形成的磁场也同时发生旋转,这时磁铁中间的铝框也沿着同一方向转动起来,并且手转动得越快,铝框也就转得越快。

第二个实验如图 1-2 所示,U、V、W 分别为 3 个相同的绕组,3 个绕组互呈 120° 放置,它们中间装有一个可以旋转的铝框,当把 3 个绕组接入三相交流电时,可以看到铝框就转了起来,这说明通有三相交流电的 3 个绕组也产生了旋转磁场,所以铝框转了起来。

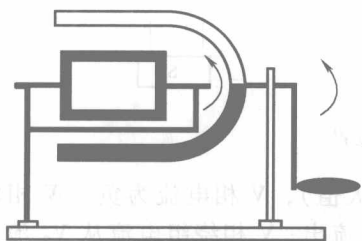


图 1-1 磁场旋转转化为机械旋转的实验

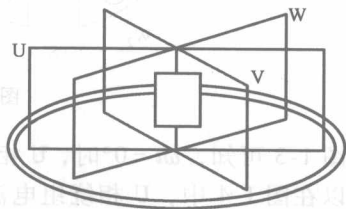


图 1-2 三相交流电动机的旋转原理

那么,为什么通有三相交流电的 3 个绕组能产生旋转磁场呢?先从三相交流电流的特点说起,三相交流电流的表达式如下所示:

$$i_U = I_m \cos \omega t \quad (1-1)$$

$$i_V = I_m \cos(\omega t - 120^\circ) \quad (1-2)$$

$$i_W = I_m \cos(\omega t - 240^\circ) \quad (1-3)$$

式中, I_m 为电流的最大值; ωt 为随时间变化的电角度; i_U 为流过 U 相绕组的电流; i_V 为流过 V 相绕组的电流; i_W 为流过 W 相绕组的电流。式 (1-1) ~ 式 (1-3) 表明 U、V、W 三相电流在时间上相差 120° 电角度,三相交流电的电流波形如图 1-3 所示。

假设 U 相绕组的首端为 U_1 ，末端为 U_2 ；V 相绕组的首端为 V_1 ，末端为 V_2 ；W 相绕组的首端为 W_1 ，末端为 W_2 。当 U 相电流 i_U 为正时，表示电流从首端 U_1 流入，从末端 U_2 流出；当 U 相电流 i_U 为负时，表示电流从末端 U_2 流入，从首端 U_1 流出。同理，当 V 相电流 i_V 为正时，表示电流从首端 V_1 流入，从末端 V_2 流出；当 V 相电流 i_V 为负时，表示电流从末端 V_2 流入，从首端 V_1 流出。当 W 相电流 i_W 为正时，表示电流从首端 W_1 流入，从末端 W_2 流出；当 W 相电流 i_W 为负时，表示电流从末端 W_2 流入，从首端 W_1 流出。电流流入时用“ \oplus ”表示（类似于看到箭的尾部，箭背向而去），电流流出时用“ \ominus ”表示（类似于看到箭的箭头，箭迎面而来）。

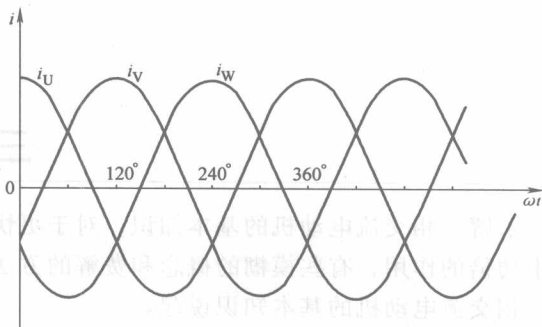


图 1-3 三相交流电的电流波形

以 $\omega t = 0^\circ$ 、 $\omega t = 60^\circ$ 、 $\omega t = 120^\circ$ 、 $\omega t = 180^\circ$ 、 $\omega t = 240^\circ$ 、 $\omega t = 300^\circ$ 、 $\omega t = 360^\circ$ 7 个时刻来分析 U、V、W 相 3 个绕组中电流的流向，以及由电流流向所带来的磁场的变化情况。

画出 $\omega t = 0^\circ$ 时，U、V、W 相 3 个绕组中电流的流向，如图 1-4 所示。

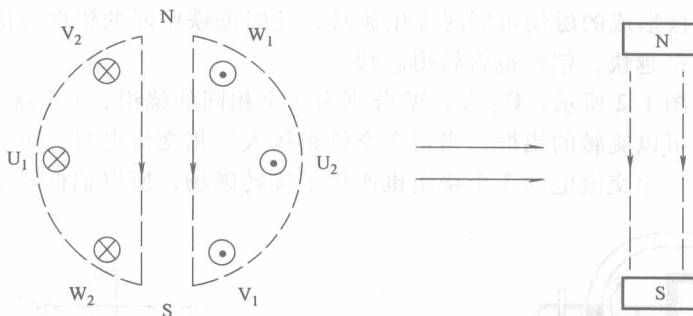


图 1-4 $\omega t = 0^\circ$ 时的磁场位置

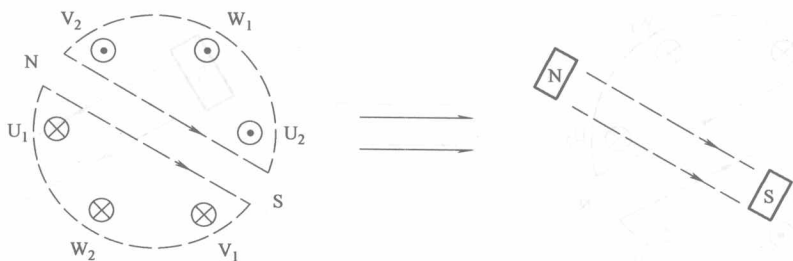
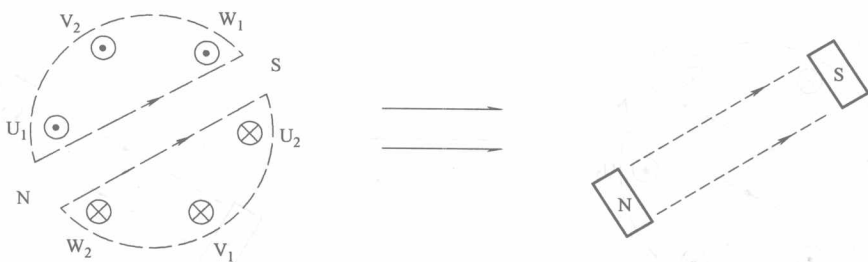
由图 1-3 可知， $\omega t = 0^\circ$ 时，U 相电流为正（且为最大值），V 相电流为负，W 相电流为负，所以在图 1-4 中，U 相绕组电流从 U_1 流入，从 U_2 流出；V 相绕组电流从 V_2 流入，从 V_1 流出；W 相绕组电流从 W_2 流入，从 W_1 流出。根据右手定则，三相绕组形成的合成磁场为两极磁场，磁场的方向由上向下，上方为 N 极，下方为 S 极。

画出 $\omega t = 60^\circ$ 时，U、V、W 相 3 个绕组中电流的流向，如图 1-5 所示。

由图 1-3 可知， $\omega t = 60^\circ$ 时，U 相电流为正，V 相电流为正，W 相电流为负（且为负向最大值），所以在图 1-5 中，U 相绕组电流从 U_1 流入，从 U_2 流出；V 相绕组电流从 V_1 流入，从 V_2 流出；W 相绕组电流从 W_2 流入，从 W_1 流出。根据右手定则，磁场方向与 $\omega t = 0^\circ$ 时的磁场相比，逆时针旋转了 60° 。

画出 $\omega t = 120^\circ$ 时，U、V、W 相 3 个绕组中电流的流向，如图 1-6 所示。

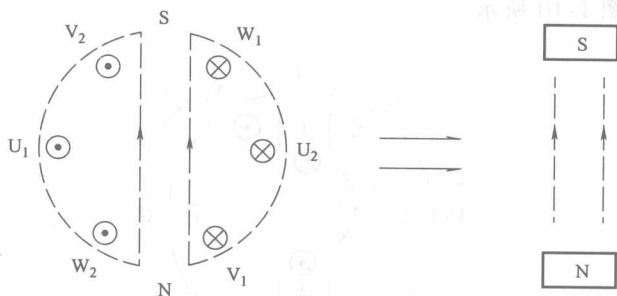
由图 1-3 可知， $\omega t = 120^\circ$ 时，U 相电流为负，V 相电流为正（且为正向最大值），W 相电流为负，所以在图 1-6 中，U 相绕组电流从 U_2 流入，从 U_1 流出；V 相绕组电流从 V_1 流

图 1-5 $\omega t = 60^\circ$ 时的磁场位置图 1-6 $\omega t = 120^\circ$ 时的磁场位置

入, 从 V_2 流出; W 相绕组电流从 W_2 流入, 从 W_1 流出。根据右手定则, 磁场又沿逆时针方向旋转了 60° , 如图 1-6 所示。

画出 $\omega t = 180^\circ$ 时, U、V、W 相 3 个绕组中电流的流向, 如图 1-7 所示。

由图 1-3 可知, $\omega t = 180^\circ$ 时, U 相电流为负 (且为负向最大值), V 相电流为正, W 相电流为正, 所以在图 1-7 中, U 相绕组电流从 U_2 流入, 从 U_1 流出; V 相绕组电流从 V_1 流入, 从 V_2 流出; W 相绕组电流从 W_1 流入, 从 W_2 流出。根据右手定则, 磁场又沿逆时针方向旋转了 60° , 如图 1-7 所示。

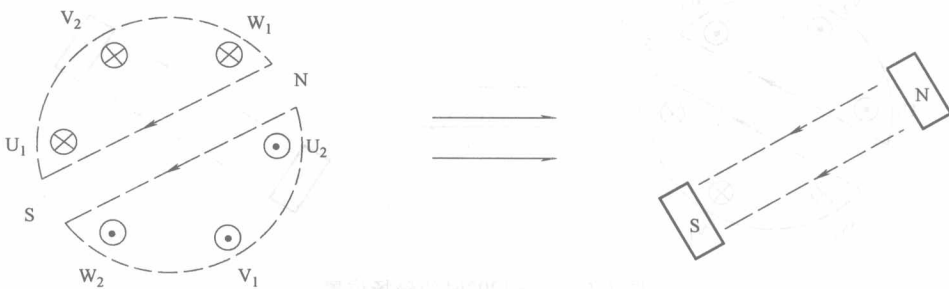
图 1-7 $\omega t = 180^\circ$ 时的磁场位置

同理, 画出 $\omega t = 240^\circ$ 时, U、

V、W 相 3 个绕组中电流的流向, 如图 1-8 所示; 画出 $\omega t = 300^\circ$ 时, U、V、W 相 3 个绕组中电流的流向, 如图 1-9 所示; $\omega t = 360^\circ$ 时 U、V、W 相 3 个绕组中电流的流向, 与图 1-4 所示 $\omega t = 0^\circ$ 时的流向相同。

从图 1-4 ~ 图 1-9 可以看出, 虽然 U、V、W 相 3 个绕组没有运动, 但是它们通入交流电后形成的磁场却沿逆时针方向旋转, 相当于图 1-1 中用人工方法将一个 N 极和一个 S 极磁铁旋转形成的磁场。

下面, 再来分析一下图 1-2 中铝框的电流和受力情况。处于旋转磁场中的铝框, 由于与旋转磁场存在相对运动, 铝框作为导体因切割磁场而产生感应电动势, 由于铝框为闭合回

图 1-8 $\omega t = 240^\circ$ 时的磁场位置图 1-9 $\omega t = 300^\circ$ 时的磁场位置

路，在该感应电动势的作用下，铝框中将有电流流过，如果不考虑感应电动势与电流之间的相位差，则电流的方向与感应电动势的方向相同。以 $\omega t = 0^\circ$ 时刻为例，铝框处于静止状态，如图 1-10 所示。

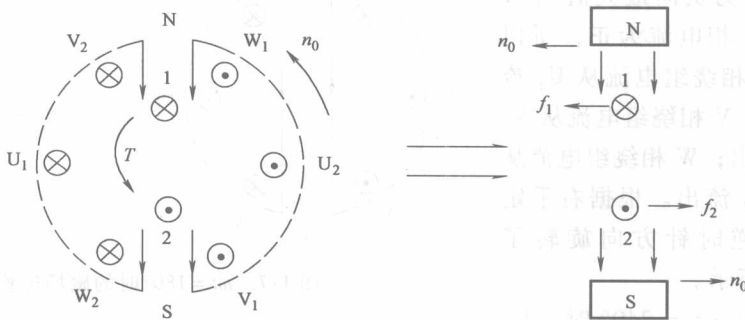
图 1-10 $\omega t = 0^\circ$ 时铝框的受力分析

图 1-10 中，U、V、W 相 3 个绕组形成的旋转磁场以 n_0 转速逆时针旋转，静止的铝框切割磁场。根据右手定则，铝框中的导体 1 产生流入电流，铝框中的导体 2 产生流出电流，假设该电流为 i_2 ，根据电磁力定律，流过电流的导体 1 和导体 2 必然会受电磁力的作用，电磁作用力的方向可以用左手定则确定，导体 1 受向左方向的力，导体 2 受向右方向的力，在铝框上合成为沿逆时针方向的转矩，该转矩方向与旋转磁场的方向相同，所以铝框沿逆时针方向旋转。铝框在其他位置的分析与此类似，只要铝框与旋转磁场之间存在相对运动，也就是说两者不同步（或称异步），电磁力就会存在，铝框就会旋转，当然铝框转轴的阻转矩要

小于电磁转矩。

1.2 三相交流电动机的反向运行

用上述同样的方法分析容易得出, 调换 U、V、W 相 3 个绕组中任意两个接入交流电的顺序, 磁场的旋转方向就将变为顺时针方向, 这也是三相交流电动机可以通过对调任意两个绕组的接线位置就可以改变电动机旋转方向的原因。调换 V 和 W 相两个绕组接入的电源, $\omega t = 0^\circ$ 时, U、V、W 相 3 个绕组中电流的流向与图 1-4 所示的流向相同。

$\omega t = 0^\circ$ 时, U 相电流为正, V 相电流为负, W 相电流为负, 所以 U 相绕组电流从 U_1 流入, 从 U_2 流出; V 相绕组电流从 V_2 流入, 从 V_1 流出; W 相绕组电流从 W_2 流入, 从 W_1 流出。根据右手定则, 三相绕组形成的合成磁场为两极磁场, 磁场的方向由上向下, 上方为 N 极, 下方为 S 极。

$\omega t = 60^\circ$ 时, U、V、W 相 3 个绕组中电流的流向与图 1-9 所示的流向相同。

由图 1-3 可知, $\omega t = 60^\circ$ 时, U 相电流为负, V 相电流为负, W 相电流为正, 所以 U 相绕组电流从 U_1 流入, 从 U_2 流出; 由于 V 相绕组与 W 相绕组的电源进行了对调, V 相绕组电流从 V_2 流入, 从 V_1 流出; W 相绕组电流从 W_1 流入, 从 W_2 流出。根据右手定则, 磁场方向与 $\omega t = 0^\circ$ 时的磁场相比, 顺时针旋转了 60° 。

$\omega t = 120^\circ$ 时, U、V、W 相 3 个绕组中电流的流向, 如图 1-8 所示的流向相同。

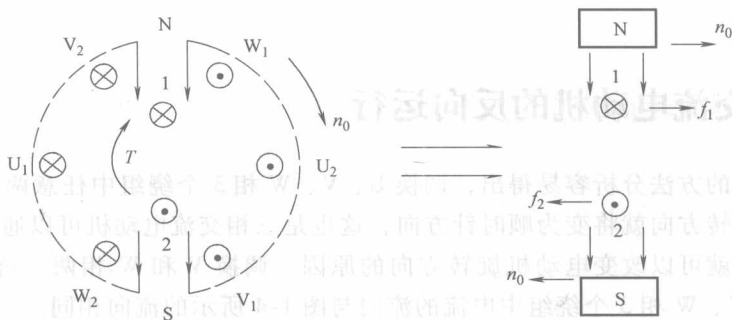
$\omega t = 120^\circ$ 时, U 相电流为负, V 相电流为负, W 相电流为正, 所以 U 相绕组电流从 U_2 流入, 从 U_1 流出; 由于 V 相绕组与 W 相绕组的电源进行了对调, V 相绕组电流从 V_2 流入, 从 V_1 流出; W 相绕组电流从 W_1 流入, 从 W_2 流出。根据右手定则, 磁场又沿顺时针方向旋转了 60° , 如图 1-8 所示。

同理, 可以画出 $\omega t = 180^\circ$ 、 240° 、 300° 、 360° 时, V 相绕组与 W 相绕组的电源对调后, U、V、W 相 3 个绕组中电流的流向, 并根据右手定则, 确定出磁场的方向, 分别与图 1-7、图 1-6、图 1-5 和图 1-4 所示的流向相同。

通过以上分析可以看出, 对调 V、W 相两个绕组接入的电源后, 旋转磁场变为顺时针方向。

下面, 再来分析一下 $\omega t = 0^\circ$ 时铝框的电流和受力情况。处于旋转磁场中的铝框, 由于与旋转磁场存在相对运动, 铝框作为导体因切割磁场而产生感应电动势, 由于铝框为闭合回路, 在该感应电动势的作用下, 铝框中将有电流流过, 如果不考虑感应电动势与电流之间的相位差, 则电流的方向与感应电动势的方向相同。以 $\omega t = 0^\circ$ 时刻为例, 铝框处于静止状态, 如图 1-11 所示。

图 1-11 中, U、V、W 相 3 个绕组形成的旋转磁场以转速 n_0 顺时针旋转, 静止的铝框切割磁场。根据右手定则, 铝框中的导体 1 产生流入电流, 铝框中的导体 2 产生流出电流, 假设该电流为 i_2 , 根据电磁力定律, 流过电流的导体 1 和导体 2 必然会受电磁力的作用, 电磁作用力的方向可以用左手定则确定, 导体 1 受向右方向的力, 导体 2 受向左方向的力, 在铝框上合成为沿顺时针方向的转矩, 该转矩方向与旋转磁场的方向相同, 所以铝框开始顺时针旋转。铝框在其他位置的分析与此类似, 只要铝框与旋转磁场之间存在相对运动, 也就是说两者不同步 (或称异步), 电磁力就会存在, 铝框就会旋转, 铝框的旋转方向与 V、W 相

图 1-11 $\omega t = 0^\circ$ 时铝框的受力分析

两个绕组的电源线对调前的旋转方向相反。

实际中,通过对调三相交流电动机任意两相绕组所接电源的顺序,就可以实现三相交流电动机的反向运行。

1.3 三相交流电动机的极数

其实,图 1-2 就是一个三相两极异步电动机的原始结构, U、V、W 相绕组就是定子绕组,铝框就是转子绕组,所谓两极是指在定子旋转磁场中有两个磁极,一个 N 极和一个 S 极,也称为极对数 p 为 1。由于磁极是成对出现的,所以只有两极、四极、六极等交流电动机,而没有三极、五极、七极等交流电动机。

按照上面两极交流电动机的绕组排布规律,再加入一组 U、V、W 相绕组,仍按上述顺序均匀分布于定子圆周上,并按以下两种联结方式接线,这样就可以组成一个四极交流电动机。

1) 两组 U、V、W 相绕组顺并:

第一个 U 相绕组的首端接第二个 U 相绕组的首端作为首端,第一个 U 相绕组的末端接第二个 U 相绕组的末端,如图 1-12 所示;第一个 V 相绕组的首端接第二个 V 相绕组的首端作为首端,第一个 V 相绕组的末端接第二个 V 相绕组的末端作为末端;W 相绕组与此相同,由于每个绕组的直线边是产生磁场和电动势的有效部分,所以称直线边为有效边。图 1-12 中,单匝绕组可以由单根线绕成一匝,也可以是由多根线并联绕成一匝。

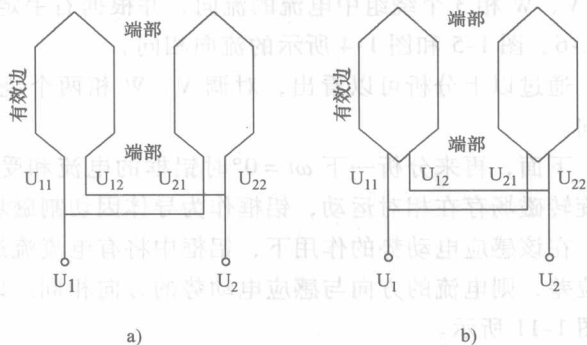


图 1-12 两组绕组的顺并

a) 单匝绕组 b) 多匝绕组

2) 两组 U、V、W 相绕组顺串:第一个 U 相绕组的首端作为首端,第一个 U 相绕组的末端接第二个 U 相绕组的首端,第二个 U 相绕组的末端作为末端,如图 1-13 所示;第一个 V 相绕组的首端作为首端,第一个 V 相绕组的末端接第二个 V 相绕组的首端,第二个 V 相

绕组的末端作为末端；第一个 W 相绕组的首端作为首端，第一个 W 相绕组的末端接第二个 W 相绕组的首端，第二个 W 相绕组的末端作为末端。

以 $\omega t = 0^\circ$ 、 $\omega t = 60^\circ$ 、 $\omega t = 120^\circ$ 、 $\omega t = 180^\circ$ 、 $\omega t = 240^\circ$ 、 $\omega t = 300^\circ$ 、 $\omega t = 360^\circ$ 7 个时刻来分析四极交流电动机中电流的流向以及磁场的变化情况。同两极交流电动机中 U、V、W 相绕组的安置顺序一样，将两组 U、V、W 相共 6 个绕组沿圆周均匀分布。

第一组 U、V、W 相绕组：U₁₁ 和 U₁₂ 为一个绕组，U₁₁ 为首端，U₁₂ 为末端；V₁₁ 和 V₁₂ 为一个绕组，V₁₁ 为首端，V₁₂ 为末端；W₁₁ 和 W₁₂ 为一个绕组，W₁₁ 为首端，W₁₂ 为末端；第二组 U、V、W 相绕组：U₂₁ 和 U₂₂ 为一个绕组，U₂₁ 为首端，U₂₂ 为末端；V₂₁ 和 V₂₂ 为一个绕组，V₂₁ 为首端，V₂₂ 为末端；W₂₁ 和 W₂₂ 为一个绕组，W₂₁ 为首端，W₂₂ 为末端。

假设两组 U、V、W 相绕组采用顺串方式，U₁₁ 接 U 相首端，U₁₂ 接 U₂₁，U₂₂ 接 U 相末端；V₁₁ 接 V 相首端，V₁₂ 接 V₂₁，V₂₂ 接 V 相末端；W₁₁ 接 W 相首端，W₁₂ 接 W₂₁，W₂₂ 接 W 相末端。

画出 $\omega t = 0^\circ$ 时，6 个绕组中电流的流向，如图 1-14 所示。

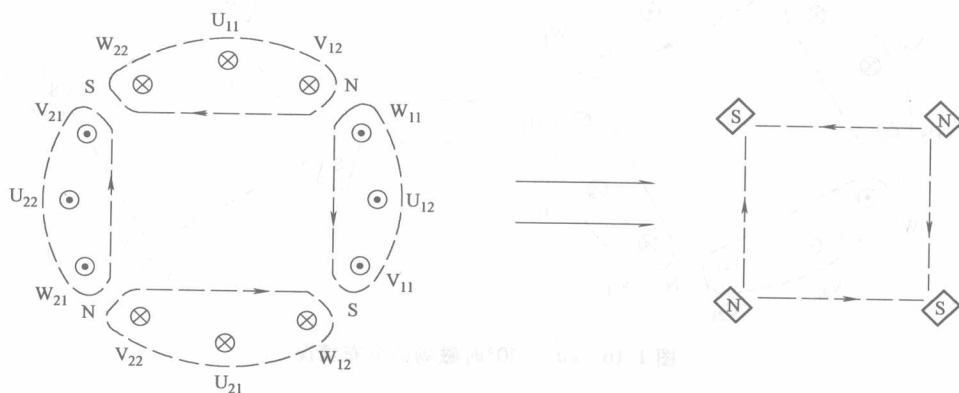


图 1-14 $\omega t = 0^\circ$ 时磁场的分布情况

由图 1-3 可知， $\omega t = 0^\circ$ 时，U 相电流为正（且为最大值），V 相电流为负，W 相电流为负，所以在图 1-14 中，第一组 U 相绕组电流从 U₁₁ 流入，从 U₁₂ 流出；第一组 V 相绕组电流从 V₁₂ 流入，从 V₁₁ 流出；第一组 W 相绕组电流从 W₁₂ 流入，从 W₁₁ 流出；第二组 U 相绕组电流从 U₂₁ 流入，从 U₂₂ 流出；第二组 V 相绕组电流从 V₂₂ 流入，从 V₂₁ 流出；第二组 W 相绕组电流从 W₂₂ 流入，从 W₂₁ 流出。根据右手定则，三相绕组形成的合成磁场为 4 极磁场，两个 N 极和两个 S 极的位置如图 1-14 所示。

画出 $\omega t = 60^\circ$ 时，6 个绕组中电流的流向和磁场位置，如图 1-15 所示。

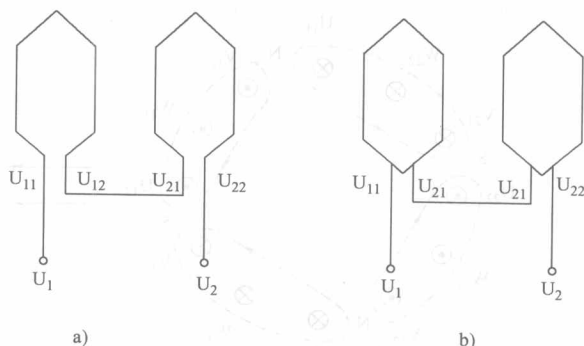
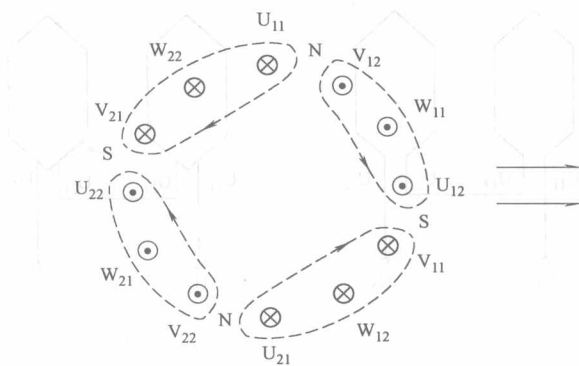


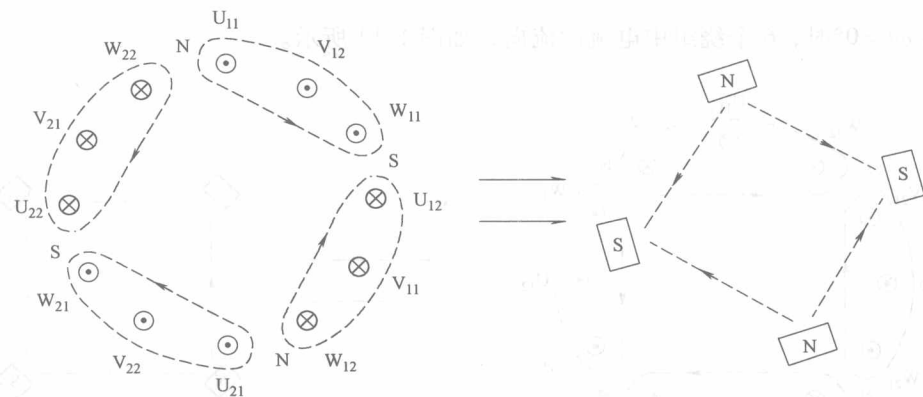
图 1-13 两组绕组的顺串

a) 单匝绕组 b) 多匝绕组

图 1-15 $\omega t = 60^\circ$ 时磁场的分布情况

由图 1-3 可知, $\omega t = 60^\circ$ 时, U 相电流为正, V 相电流为正, W 相电流为负 (且为负向最大值), 所以在图 1-15 中, 第一组 U 相绕组电流从 U_{11} 流入, 从 U_{12} 流出; 第一组 V 相绕组电流从 V_{11} 流入, 从 V_{12} 流出; 第一组 W 相绕组电流从 W_{12} 流入, 从 W_{11} 流出; 第二组 U 相绕组电流从 U_{21} 流入, 从 U_{22} 流出; 第二组 V 相绕组电流从 V_{21} 流入, 从 V_{22} 流出; 第二组 W 相绕组电流从 W_{22} 流入, 从 W_{21} 流出。根据右手定则, 确定出三相绕组形成的合成磁场为四极磁场, 两个 N 极和两个 S 极, 磁场的位置比 $\omega t = 0^\circ$ 时逆时针旋转了 30° , 如图 1-15 所示。

画出 $\omega t = 120^\circ$ 时, 6 个绕组中电流的流向, 如图 1-16 所示。

图 1-16 $\omega t = 120^\circ$ 时磁场的分布情况

由图 1-3 可知, $\omega t = 120^\circ$ 时, U 相电流为负, V 相电流为正 (且为正向最大值), W 相电流为负, 所以在图 1-16 中, 第一组 U 相绕组电流从 U_{12} 流入, 从 U_{11} 流出; 第一组 V 相绕组电流从 V_{11} 流入, 从 V_{12} 流出; 第一组 W 相绕组电流从 W_{12} 流入, 从 W_{11} 流出; 第二组 U 相绕组电流从 U_{22} 流入, 从 U_{21} 流出; 第二组 V 相绕组电流从 V_{21} 流入, 从 V_{22} 流出; 第二组 W 相绕组电流从 W_{22} 流入, 从 W_{21} 流出。根据右手定则, 确定出三相绕组形成的合成磁场为四极磁场, 两个 N 极和两个 S 极, 磁场的位置比 $\omega t = 60^\circ$ 时逆时针旋转了 30° , 如图 1-16 所示。

$\omega t = 180^\circ$ 、 $\omega t = 240^\circ$ 、 $\omega t = 300^\circ$ 和 $\omega t = 360^\circ$ 等 5 个时刻 6 个绕组中的电流向和磁场位置, 不再画出。

由于该 4 极交流电动机由两组 U、V、W 相绕组顺串组成, ωt 电角度每转过 60° , 两对