

双证融通系列丛书

# 变频器应用 简明教程

李方园 钟晓强 主编



双证融通系列丛书

免费电子资源下载

# 变频器应用简明教程

主编 李方园 钟晓强



机械工业出版社

本书是“维修电工培训与电类人才培养”双证融通系列丛书之一，专门解决维修电工（中高级）在工作岗位中应用变频器产品时所出现的一系列问题。本书对变频器入门、输送带变频控制、泵与搅拌机变频控制、风机变频 PID 控制、起重机主电动机变频矢量控制和变频器故障排除的所有内容，进行了逐个剖析；由浅入深，从应知到应会，从实战任务训练到项目设计实例进行了详细论述。

本书以三菱电机自动化（上海）有限公司最新 700 系列变频器为例，设置了一个个可以操作的环节和项目。

本书可作为高职高专电气自动化、机电一体化、楼宇智能化等专业的课程教材，也可作为广大电工技术爱好者、求职者、下岗再就业者、职业培训人员的参考用书。

免费下载电子课件，网址：<http://www.cmpbook.com>。

## 图书在版编目（CIP）数据

变频器应用简明教程/李方园，钟晓强主编. —北京：机械工业出版社，2012.9

（双证融通系列丛书）

ISBN 978-7-111-39522-5

I. ①变… II. ①李…②钟… III. ①变频器-教材  
IV. ①TN773

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 196505 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：林春泉 责任编辑：赵 任

版式设计：姜 婷 责任校对：刘秀丽

封面设计：路恩中 责任印制：杨 曦

北京京丰印刷厂印刷

2012 年 10 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·14.5 印张·357 千字

0 001—3 000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-39522-5

定价：36.00 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

教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售一部：(010)68326294

机工官网：<http://www.cmpbook.com>

销售二部：(010)88379649

机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线：(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

# 序

本套“维修电工培训与电类人才培养”双证融通系列丛书（简称双证融通系列丛书）是在全社会大力推进“工学结合、产学合作”的大环境下推出的。丛书以服务为宗旨，以就业为导向，以提高学生（学员）素质为核心，以培养学生（学员）职业能力为本位，全方位推行产学合作，强调学校（培训机构）与社会的联系，注重理论与实践的结合，将分层化国家职业标准的理念融入课程体系，将国家职业资格标准、行业标准，融入课程标准。

目前，在很多高职院校、应用型本科中都有“电气自动化技术”专业，其对应的第一岗位就是电气设备及其相关产品的设计与维护，对应的考证为维修电工（中高级）。因此，本丛书以目前在各类高校中针对国家职业标准重新修订的“电类人才培养”教学计划为基础，将职业标准融入到课程标准中，并力求使各课程的理论教学、实操训练与国家职业标准的应知、应会相衔接对应，力求做到毕业后零距离上岗。

电类人才的培养目标定位于培养具有良好思想品德和职业道德，具备较为坚实的文化基础知识和电专业基础知识，要求学生能适应电气自动化行业发展的需要，成为电气控制设备和自动化设备的安装、调试与维护的高素质、高技能专业人才。根据这一培养目标制定了教学计划，除了能够做到学历教育与职业资格标准的完全融合外，还具有一定的前瞻性、拓展性，既满足当前岗位要求，又体现未来岗位发展要求；既确保当前就业能力，又为学生后续可持续发展提供基础和保障；既包含职业资格证书的内容，又保证学历教育的教学内容；既符合教育部门对电气自动化技术毕业生的学历培养要求，又符合人力资源与社会保障部对“维修电工中（高）级”职业技能鉴定的要求。

本丛书推出7门“双证融通”课程，每门课程均有电子资源免费下载，它们分别是：

- (1) 电工电子技术简明教程
- (2) 数控机床电气控制简明教程
- (3) AUTOCAD 工程绘图简明教程
- (4) 电力电子技术简明教程
- (5) 三菱 PLC 应用简明教程
- (6) 西门子 PLC 应用简明教程
- (7) 变频器应用简明教程

特别感谢宁波市服务型教育重点专业建设项目（电子电气专业）的出版资助，同时也感谢机械工业出版社电工电子分社、浙江工商职业技术学院为丛书的策划与推广提供了必不可少的帮助。

李方园

2012年7月

# 前 言

“变频器应用”是目前高职高专电气自动化、机电一体化和楼宇智能化等专业所必学的课程之一。本书是双证融通系列丛书之一，是专门解决维修电工（中高级）在工作岗位中应用变频器产品所出现的一系列问题。

本书从维修电工（变频器应用方向）的岗位出发，按照项目导入、任务驱动的原则共设置了六个讲座，对包括变频器入门、输送带变频控制、泵与搅拌机变频控制、风机变频PID控制、起重机主电动机变频矢量控制和变频器故障排除进行逐个剖析，由浅入深，从应知到应会，从实战任务训练到项目设计实例，把变频器几乎所有的功能都一一囊括进去。

本书全面阐述了变频器的基本工作原理、应用方案和维护技巧，并以三菱电机自动化（上海）有限公司最新700系列变频器为例，设置了一个个可以操作的环节和项目，让读者可以“举一反三”。

本书由李方园、钟晓强主编，郑振杰、胡焕啸、张东升、叶明、陈亚玲、陈贤富、沈阿宝、陈亚珠、李伟庄、章富科、方定桂、刘军毅、吴於、黄章明等参加编写。

在本书的编写过程中，得到了三菱电机自动化（上海）有限公司、宁波中华纸业有限公司、宁波钢铁有限公司、常州米高电子科技有限公司等厂家相关人员帮助并提供了相当多的典型案例和维护经验；同时在编写过程中参考和引用了国内外许多专家、学者最新发表的论文和著作等资料，中国传动网为本书提供了最新的项目案例，在此一并致谢！

作者

2012年7月10日

## 缩略语注释

VVVF (或 VF)	变频调速器
PWM	脉宽调制
SPWM	正弦波形脉宽调制
PAM	脉幅调制
PU	三菱变频器操作面板及参数单元 (FR-PU04-CH/FR-PU07)
FR-D700 或 D700	三菱变频器 FR-D700 系列
FR-A700 或 A700	三菱变频器 FR-A700 系列
Pr.	三菱变频器参数编号
PU 运行	使用 PU (操作面板/FR-PU04-CH/FR-PU07) 的运行
外部运行	使用控制电路信号的运行
组合运行	使用 PU 和外部操作组合进行的运行
FR-DU07	三菱 A700 变频器的操作面板
PG	旋转编码器
PTC	热敏电阻
R/S/T	三相交流输入电源
U/V/W	交流电输出到电动机
VD1/VD2/VD3..	变频器整流二极管/续流二极管
S1/S2/S3..	变频器逆变 IGBT
N	在一般情况下指的是中性线, 即零线
N -	与 P + 成对出现, 指的是通用变频器中间直流母线负端
P 或 P +	通用变频器中间直流母线正端
PE	保护接地
DI1/DI2/DI3..	通用变频器的多功能输入端子 1、2、3 等
DO1/DO2/DO3..	通用变频器的多功能输出端子 1、2、3 等
COM	通用变频器的控制信号输入公共端
A/B/C	通用变频器的故障继电器输出端子 A/B/C
AI1/AI2/AI3..	通用变频器的模拟量输入端子 1、2、3 等
Udc/Vdc	通用变频器的直流母线电压
QF	断路器
KM	接触器
R <sub>L</sub>	变频器上电缓冲电阻
S <sub>L</sub>	变频器上电缓冲电路接触器开关
PC	三菱变频器 +24V 输出端
SD	三菱变频器 0V 输出端
M	电动机
AM	三菱变频器模拟量输出端子

# 目 录

序	2.1.5 脉冲给定	42
前言	2.1.6 通信给定	42
缩略语注释	2.2 变频器的运转指令方式	43
第1讲 变频器入门	2.2.1 运转指令方式概述	43
1.1 变频器的基本工作原理	2.2.2 操作面板键盘控制	43
1.1.1 交流异步电动机和同步电动机的调速	2.2.3 端子控制	43
1.1.2 不同调速方式的工作原理	2.2.4 通信控制	47
1.1.3 变频调速原理	2.2.5 运转指令方式之间的切换	47
1.1.4 变频器 U/f 曲线定义	2.3 技能训练一：三菱 D700 变频器端子的简单接线	48
1.2 变频器的基本硬件结构	2.3.1 D700 变频器主电路端子的接线	48
1.2.1 交直交变频器的基本构造	2.3.2 实战任务 5：在三菱 D700 变频器输入侧/输出侧增加接触器	49
1.2.2 主回路	2.3.3 D700 变频器控制端子输入信号的熟悉	50
1.2.3 控制回路	2.3.4 实战任务 6：三菱 D700 变频器的控制逻辑切换与控制端子接线	52
1.2.4 变频器输出波形	2.3.5 实战任务 7：三菱 D700 变频器的模拟量输入跳线的设置	54
1.3 技能训练一：三菱 D700 变频器的试运行	2.4 技能训练二：三菱 D700 变频器运行模式的操作	55
1.3.1 认识三菱 D700 变频器	2.4.1 运行模式功能与参数 Pr. 79 的设置	55
1.3.2 实战任务 1：1.5kW 三菱 D700 变频器带电动机试运行	2.4.2 实战任务 8：运行指令方式为面板的三菱 D700 变频器启/停操作	57
1.3.3 实战任务 2：三菱 D700 变频器的各类参数操作	2.4.3 实战任务 9：运行指令方式为外部端子的三菱 D700 变频器启/停操作	60
1.3.4 实战任务 3：三菱 D700 变频器 U/f 曲线设定及测定	2.5 项目设计实例：输送带电动机的变频控制系统	64
1.4 技能训练二：变频器主电路元器件检测	思考与练习	68
1.4.1 变频器主回路器件损坏常用判断方法	第3讲 泵与搅拌机的变频控制	69
1.4.2 实战任务 4：用万用表检查变频器的功率模块	3.1 变频调速系统的基本特性	70
思考与练习	3.1.1 机械特性曲线	70
第2讲 输送带电动机的变频控制	3.1.2 负载的机械特性分类	71
2.1 变频器的频率给定方式		
2.1.1 频率给定方式概述		
2.1.2 操作面板键盘给定		
2.1.3 接点信号给定		
2.1.4 模拟量给定		

3.1.3 负载的运行工艺分类 .....	72	D700 变频器 PID 控制 .....	121
3.1.4 变频器的容量选择 .....	74	4.4 技能训练二：三菱 D700 变频 PID	
3.2 变频器的起动制动方式与适应负载		控制电路的设计 .....	125
能力 .....	75	4.4.1 D700 变频器 PID 操作 .....	125
3.2.1 变频器的起动制动 .....	75	4.4.2 D700 变频器 PID 构成与动作 .....	126
3.2.2 变频器的适应负载方式 .....	79	4.4.3 实战任务 15：三菱 D700 变频器	
3.3 技能训练一：三菱 D700 变频器端子的		通过内置 PID 实现温度控制 .....	128
复杂接线 .....	86	4.5 项目设计实例：中央空调变频风机	
3.3.1 变频器数字量输出端子概述 .....	86	控制系统 .....	130
3.3.2 实战任务 10：D700 变频器多功能		思考与练习 .....	135
输出端子操作 .....	88	<b>第 5 讲 起重机电机的变频矢量</b>	
3.3.3 实战任务 11：D700 变频器模拟量		<b>控制</b> .....	137
输出端子操作 .....	91	5.1 变频器的矢量控制与通信 .....	138
3.4 技能训练二：针对特殊负载的三菱		5.1.1 变频器矢量控制原理 .....	138
D700 变频器参数设置 .....	93	5.1.2 开环矢量控制方式 .....	140
3.4.1 D700 变频器手动转矩提升		5.1.3 变频器的串口通信 .....	144
操作 .....	93	5.1.4 ModBus 总线 .....	146
3.4.2 D700 变频器加减速的功能		5.2 变频器制动原理与设计 .....	147
选择 .....	94	5.2.1 变频器制动原理 .....	147
3.4.3 实战任务 12：D700 变频器对电动		5.2.2 变频器能耗制动的设计 .....	148
机的热保护功能设置 .....	95	5.2.3 变频器能耗制动的应用 .....	150
3.4.4 实战任务 13：对 D700 变频器设置		5.3 技能训练一：三菱 A700 变频器的开环	
跳变频率 .....	96	矢量与通信控制 .....	152
3.5 项目设计实例：化工厂泵与搅拌机的		5.3.1 实战任务 16：认识三菱 A700	
变频控制系统 .....	98	变频器 .....	152
思考与练习 .....	102	5.3.2 实战任务 17：A700 变频器离线	
<b>第 4 讲 风机的变频节能 PID 控制</b> .....	105	自动调整 .....	156
4.1 流体工艺的变频 PID 设计 .....	106	5.3.3 实战任务 18：A700 变频器在线	
4.1.1 流体及其机械 .....	106	自动调整 .....	158
4.1.2 流体 PID 控制的形式 .....	106	5.3.4 开环矢量控制的实施步骤 .....	159
4.1.3 各种流体工艺的不同变频		5.3.5 实战任务 19：三菱 FX PLC	
控制 .....	109	通过通信卡控制三台 A700	
4.2 变频器在锅炉、空调风机中		变频器 .....	160
的应用 .....	113	5.4 技能训练二：三菱 A700 变频器与	
4.2.1 变频器在锅炉引风机控制系统		制动单元及电阻的连接 .....	167
中的应用 .....	113	5.4.1 实战任务 20：A700 变频器与	
4.2.2 变频器在中央空调风机中的		专用外接制动电阻器的连接 .....	167
应用 .....	115	5.4.2 实战任务 21：A700 变频器与	
4.3 技能训练一：温度传感器、仪表及		制动单元 FR-BU、MT-BU5	
其 PID 控制 .....	118	的连接 .....	168
4.3.1 温度传感器及其相关仪表的		5.5 项目设计实例：起重机电机	
选型 .....	118	变频控制系统 .....	170
4.3.2 实战任务 14：基于温控仪的三菱		思考与练习 .....	176

## 第 6 讲 变频器维护与典型故障

处理 .....	179	6.4.3 轧机变频器过载的分析处理 .....	197
6.1 变频器的日常维护 .....	180	6.5 变频器散热器过热故障的处理 .....	198
6.1.1 变频器的日常检查 .....	180	6.5.1 变频器散热器过热故障现象 .....	198
6.1.2 实战任务 22: 三菱 D700 变频器 易耗件寿命信息的获取 .....	182	6.5.2 变频器散热的结构分析与 故障定位 .....	199
6.1.3 实战任务 23: 三菱 D700 变频器 冷却风扇的拆装 .....	184	6.5.3 卷染机变频器散热器的过 热分析处理 .....	200
6.1.4 变频器故障与报警的分类与 排除 .....	186	6.6 变频器驱动电动机的轴承故障 处理 .....	201
6.1.5 实战任务 24: 三菱 D700 变频器 报警/故障的复位与确认 .....	188	6.6.1 电动机轴承的故障现象 .....	201
6.2 变频器输入缺相的处理 .....	189	6.6.2 轴电压和轴电流引起的异常 问题 .....	201
6.2.1 变频器输入缺相故障现象 .....	190	6.6.3 总结归纳 .....	203
6.2.2 变频器输入缺相的检测方法 .....	190	6.7 变频器过电流故障的处理 .....	204
6.2.3 风机变频器输入缺相分析 处理 .....	192	6.7.1 变频器过电流的故障现象 .....	204
6.3 变频器输出缺相的处理 .....	192	6.7.2 轴电压和轴电流引起的异常 问题 .....	205
6.3.1 变频器输出缺相故障现象 .....	193	6.7.3 总结归纳 .....	207
6.3.2 缺相故障的原理与分析 .....	193	附录 .....	209
6.3.3 变频器输出缺相的分析处理 .....	193	附录 A 三菱 D700 变频器主要参数 一览表 .....	209
6.4 轧机变频器过载的处理 .....	195	附录 B 维修电工考证(变频器部分) 应知应会题库 .....	215
6.4.1 轧机变频器过载故障现象 .....	195	参考文献 .....	223
6.4.2 变频器过载的主要原因、解决 对策与故障定位 .....	196		

# 第1讲 变频器入门

## 【导读】

变频器主要用于交流电动机转速的调节，是理想的调速方案。变频调速以其自身所具有的调速范围广、调速精度高、动态响应好等优点，在许多需要精确速度控制的应用中发挥着提高产品质量和生产效率的作用。除此之外，变频器还有显著的节能效果，不仅在相关工业设备，在民用产品中，也起到了节约电费、提高设备性能的作用，在保护环境等方面的优势也得到了用户的普遍认可和广泛应用。



应  
知

- ※了解交流电动机的调速方式
- ※熟悉变频调速的基本原理及其优点
- ※掌握恒压频比工作方式及其特点
- ※掌握变频器的电路基本结构

- ☆能对三菱公司 D700 变频器带电动机试运行
- ☆能对三菱公司 D700 变频器的各类参数进行操作
- ☆能对三菱公司 D700 变频器 U/f 曲线进行设定及测定
- ☆能用万用表来检查变频器的功率模块是否正常



应  
会

## 1.1 变频器的基本工作原理

### 1.1.1 交流异步电动机和同步电动机的调速

#### 1. 异步电动机

三相异步电动机要旋转起来的先决条件是具有一个旋转磁场，三相异步电动机的定子绕组就是用来产生旋转磁场的。三相电源相与相之间的电压在相位上是相差  $120^\circ$  的，三相异步电动机定子中的三个绕组在空间方位上也互差  $120^\circ$ ，这样，当在定子绕组中通入三相电源时，定子绕组就会产生一个旋转磁场，其产生的过程如图 1-1 所示。图 1-1 中分四个时刻来描述旋转磁场的产生过程。电流每变化一个周期，旋转磁场在空间旋转一周，即旋转磁场的旋转速度与电流的变化是同步的。

旋转磁场的转速为  $n = 60f/p$

式中， $f$  为电源频率 (Hz)； $p$  是磁场的磁极对数； $n$  的单位是：每分钟转数。

根据此式可以知道，电动机的转速与磁极数和使用电源的频率有关。

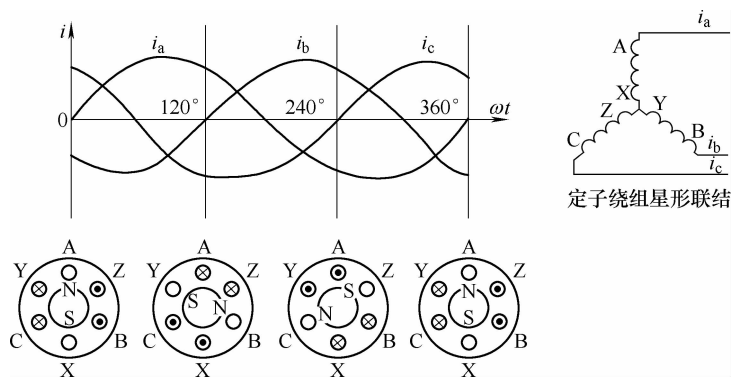


图 1-1 三相异步电动机原理

定子绕组产生旋转磁场后，转子导条（鼠笼条）将切割旋转磁场的磁力线而产生感应电流，转子导条中的电流又与旋转磁场相互作用产生电磁力，电磁力产生的电磁转矩驱动转子沿旋转磁场方向以  $n_1$  的转速旋转起来。一般情况下，电动机的实际转速  $n_1$  低于旋转磁场的转速  $n$ 。因为假设  $n = n_1$ ，则转子导条与旋转磁场就没有相对运动，就不会切割磁力线，也就不会产生电磁转矩，所以转子的转速  $n_1$  必然小于  $n$ 。为此称这种结构的三相电动机为异步电动机。图 1-2 所示为异步电动机的内部结构。

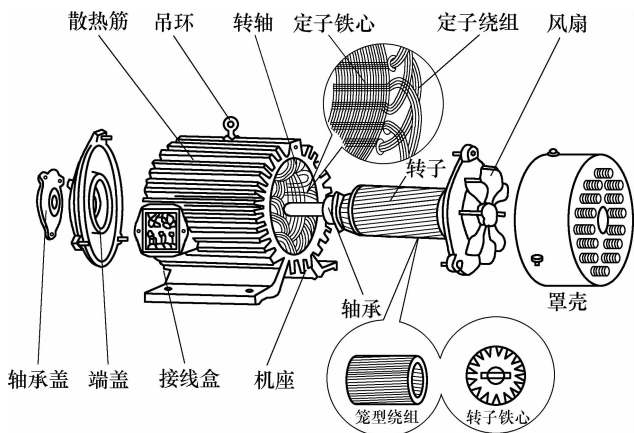


图 1-2 异步电动机的内部结构

## 2. 同步电动机

同步电动机和其他类型的旋转电动机一样，由固定的定子和可旋转的转子两大部分组成。一般分为转场式同步电动机和转枢式同步电动机。

图 1-3 给出了最常用的转场式同步电动机的结构模型，其定子铁心的内圆均匀分布着定子槽，槽内嵌放着按一定规律排列的三相对称交流绕组。这种同步电动机的定子又称为电枢，定子铁心和绕组又称为电枢铁心和电枢绕组。转子铁心上装有制成一定形状的成对磁极，磁极上绕有励磁绕组，通以直流电流时，将会在电动机的气隙中形成极性相间的分布磁场，称为励磁磁场（也称主磁场、转子磁场）。气隙处于电枢内圆和转子磁极之间，气隙层的厚度和形状对电动机内部磁场的分布和同步电动机的性能有重大影响。

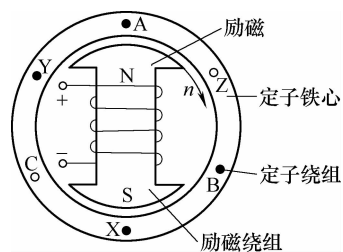


图 1-3 转场式同步电动机的结构模型

除了转场式同步电动机外，还有转枢式同步电动机，其磁极安装于定子上，而交流绕组分布于转子表面的槽内，这种同步电动机的转子充当了电枢。图中用 AX、BY、CZ 三个在空间错开 120 电角度分布的线圈代表三相对称交流绕组。

## 3. 交流电动机的调速

交流电动机比直流电动机经济耐用得多，因而被广泛应用于各行各业，是一种量大面广的传统产品。在实际应用场合，往往要求电动机能随意调节转速，以便获得满意的使用效果，但交流电动机在这方面比起直流电动机就要逊色得多，于是不得不借助其他手段达到调速的目的。根据感应电动机的转速特性表达式可知，它的调速方式有三大类：频率调节、磁极对数调节和转差率调节。从而出现了目前常用的几种调速方法，如变极调速、调压调速、电磁调速、变频调速、液力耦合器调速、齿轮调速等（见图 1-4）。

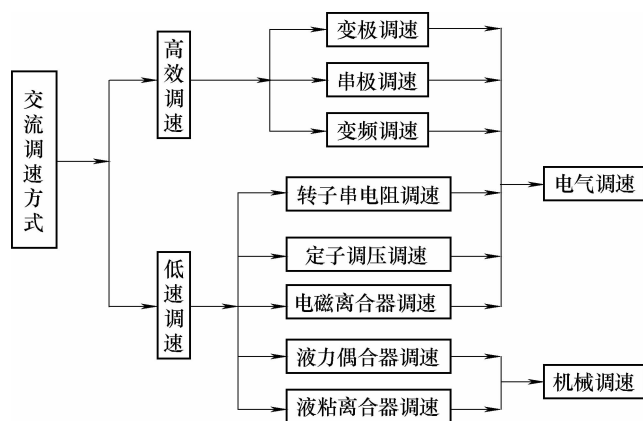


图 1-4 交流电动机主要调速方式分类图

基于节能角度，通常把交流调速分为高效调速和低效调速。高效调速指基本上不增加转差损耗的调速方式，在调节电动机转速时转差率基本不变，不增加转差损失，或将转差功率以电能形式回馈电网或以机械能形式回馈机轴；低效调速则存在附加转差损失，在相同调速工况下其节能效果低于不存在转差损耗的调速方式。

属于高效调速方式的主要有变极调速、串级调速和变频调速；属于低效调速方式的主要有滑差调速（包括电磁离合器调速、液力偶合器调速、液粘离合器调速）、转子串电阻调速和定子调压调速。其中，液力偶合器调速和液粘离合器调速属于机械调速，其他均属于电气调速。变极调速和滑差调速方式适用于笼型异步电动机，串级调速和转子串电阻调速方式适用于绕线转子异步电动机，定子调压调速和变频调速既适用于笼型，也适用于绕线转子异步电动机。变频调速和机械调速还可用于同步电动机。

液力偶合器调速技术属于机械调速范畴，它是将匹配合适的调速型液力偶合器安装在常规的交流电动机和负载（风机、水泵或压缩机）之间，从电动机输入转速，通过偶合器工作腔中高速循环流动的液体，向负载传递力矩和输出转速。只要改变工作腔中液体的充满程度即可调节输出转速。

液粘离合器调速是指利用液粘离合器作为功率传递装置完成转速调节的调速方式，属于机械调速。液粘离合器是利用两组摩擦片之间接触来传递功率的一种机械设备，如同液力偶合器一样安装在笼型感应电动机与工作机械之间，在电动机低速运行的情况下，利用两组摩擦片之间摩擦力的变化无级地调节工作机械的转速，由于它存在转差损耗，是一种低效调速方式。

## 1.1.2 不同调速方式的工作原理

### 1. 异步电动机的变极调速

变极调速技术是通过采用变极多速异步电动机实现调速的。这种多速电动机大都为笼型转子电动机，其结构与基本系列异步电动机相似，现国内生产的有双、三、四速等几类。

变极调速是通过改变定子绕组的极对数来改变旋转磁场同步转速进行调速的，是无附加转差损耗的高效调速方式。由于极对数 $p$ 是整数，它不能实现平滑调速，只能有级调速。在供电频率 $f=50\text{Hz}$ 的电网， $p=1、2、3、4$ 时，相应的同步转速 $n_0=3000\text{r/min}、1500\text{r/min}、1000\text{r/min}、750\text{r/min}$ 。改变极对数是用改变定子绕组的接线方式来完成的如图1-5所示，图1-5a的 $p=2$ ，图1-5b和图1-5c中的 $p=1$ 。双速电动机的定子是单绕组，三速和四速电动机的定子是双绕组。这种改变极对数来调速的笼型电动机，通常称为多速感应电动机或变极感应电动机。

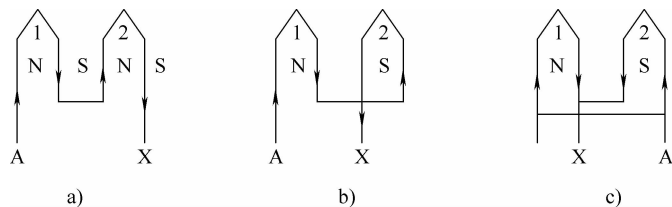


图 1-5 定子绕组改接变极对数示意图

a)  $p=2$  b)  $p=1$  c)  $p=1$

多速电动机的优点是运行可靠，运行效率高，控制线路很简单，容易维护，对电网无干扰，初始投资低。缺点是有级调速，而且调速级差大，从而限制了它的使用范围。它适合于按2~4档固定调速变化的场合，为了弥补有级调速的缺陷，有时与定子调压调速或电磁离合器调速配合使用。

## 2. 电磁调速

电磁调速技术是通过电磁调速电动机实现调速的技术。电磁调速电动机（又称滑差电动机）由三相异步电动机、电磁转差离合器和测速发电机构成，三相异步电动机作为原动机工作。该技术是传统的交流调速技术之一，适用于容量在 0.55 ~ 630kW 范围内的风机、水泵或压缩机。

电磁离合器调速是由笼型感应电动机和电磁离合器一体化的调速电动机来完成的，把这种调速电动机称为电磁离合器电动机，又称滑差电动机，属于低效调速方式。电磁调速电动机的调速系统，主要由笼型感应电动机、涡流式电磁转差离合器和直流励磁电源三个部分组成如图 1-6 所示，直流励磁电源功率较小，通过改变晶闸管的控制角改变直流励磁电压的大小来控制励磁电流。它以笼型异步电动机作为原动机，带动与其同轴连接的电磁离合器的主动部分，离合器的从动部分与负载同轴连接，主动部分与从动部分没有机械联系，只有磁路相通。离合器的主动部分为电枢，从动部分为磁极，电枢是一杯状铸铜体，磁极则由铁心和励磁绕组构成，绕组与部分铁心固定在机壳上不随磁极旋转，直流励磁不必经过集电环而直接由直流电源供电。当电动机带动电枢在磁极磁场中旋转时，就会感生涡流，涡流与磁极磁场作用产生的转矩将使电枢牵动磁极拖动负载同向旋转，通过控制励磁电流改变磁场强度，使离合器产生大小不同的转矩，从而达到调速的目的。

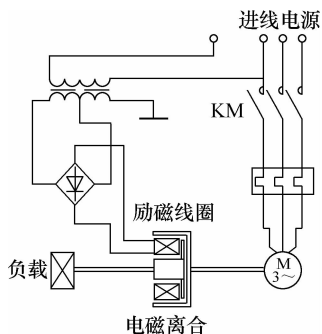


图 1-6 电磁调速示意图

磁离合器的优点是结构比较简单，可无级调速，维护方便，运行可靠，调速范围也比较宽，对电网无干扰，它可以空载起动，对需要重载起动的负载可获得容量效益，提高了电动机的运行负载率。它的缺点是高速区调速特性软，不能全速运行；低速区调速效率比较低。它适用于调速范围适中的中小容量电动机。

## 3. 定子调压调速

定子调压调速是用改变定子电压实现调速的方法来改变电动机的转速，调速过程中它的转差功率以发热形式损耗在转子绕组中，属于低效调速方式。由于电磁转矩与定子电压的平方成正比，改变定子电压就可以改变电动机的机械特性，与某一负载特性相匹配就可以稳定在不同的转速上，从而实现调速功能。供电电源的电压是固定的，它用调压器来获得可调压的交流电源。传统的调压器有饱和电抗器式调压器、自耦变压器式调压器和感应式调压器，主要用于笼型感应电动机的减压起动，以减少起动电流。晶闸管是交流调压调速的主要器件，它利用改变定子侧三相反并联晶闸管的移相角来调节转速，可以做到无级调速。

调压调速的主要优点是控制设备比较简单，可无级调速，初始投资低，使用维护比较方便，可以兼作笼型异步电动机的减压起动设备。它的缺点是调速效率比较低，低速运行调速效率更低；调速范围窄，只有对风机和泵类工作机械调速可以获得较宽的调速范围并减少转差损耗；调速特性比较软，调速精度差；对电网干扰也大。它适用于调速范围要求不宽，较长时间在高速区运行的中小容量的异步电动机。

## 4. 转子串电阻调速

转子串电阻调速是通过改变绕线转子感应电动机转子串接附加外接电阻从而改变转子电

流使转速改变的方式进行调速的如图 1-7 所示,为减少电刷的磨损,中等容量以上的绕线转子感应电动机还设有提刷装置,当电动机起动时接入外接电阻以减少起动电流,不需要调速时移动手柄可提起电刷与集电环脱离接触,同时使三个集电环彼此短接起来。

串电阻调速的优点是技术成熟,控制方法简单,维护方便,初始投资低,对电网无干扰。它的缺点是转差损耗大,调速效率低;调速特性软,动态响应速度慢;外附加电阻不易做到无级调速,调速平滑性差。它适合于调速范围不太大和调速特性要求不高的场合。

### 5. 变频调速

变频调速是通过改变异步电动机供电电源的频率  $f$  来实现无级调速的,其接线简单,如图 1-8 所示。电动机采用变频调速以后,电动机转轴直接与负载连接,电动机由变频器供电。变频调速的关键设备就是变频器,变频器是一种将交流电源整流成直流后再逆变成频率、电压可变的变流电源的专用装置,主要由功率模块、超大规模专用单片机等构成。变频器能够根据转速反馈信号调节电动机供电电源的频率,从而可以实现相当宽频率范围内的无级调速。

### 6. 调速方式汇总

根据实际应用效果,交流电动机的各种调速方式的一般性能和特点见表 1-1。

表 1-1 交流电动机的各种调速方式的一般特性和特点

调速方式	转子串电阻	定子调压	电磁离合器	液力耦合器	液粘离合器	变极	串极	变频
调速方法	改变转子串电阻	改变定子输入调压	改变离合器励磁电流	改变耦合器工作腔充油量	改变离合器摩擦片间隙	改变定子极对数	改变逆变器的逆变角	改变定子输入频率和电压
调速性质	有级	无级	无级	无级	无级	有级	无级	无级
调速范围	50% ~ 100%	80% ~ 100%	10% ~ 80%	30% ~ 97%	20% ~ 100%	2,3,4, 档转速	50% ~ 100%	5% ~ 100%
响应能力	差	快	较快	差	差	快	快	快
电网干扰	无	大	无	无	无	无	较大	有
节电效果	中	中	中	中	中	高	高	高
初始投资	低	较低	较高	中	较低	低	中	高
故障处理	停车	不停车	停车	停车	停车	停车	停车	不停车
安装条件	易	易	较易	场地	场地	易	易	易
适用范围	绕线转子异步电动机	绕线转子异步电动机、笼型异步电动机	笼型异步电动机	笼型异步电动机、同步电动机	笼型异步电动机、同步电动机	笼型异步电动机	绕线转子异步电动机	异步电动机、同步电动机

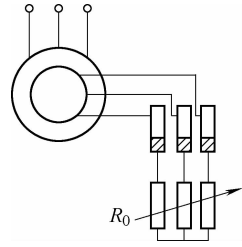


图 1-7 串电阻调速转子电路示意

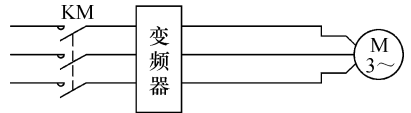


图 1-8 变频调速原理

### 1.1.3 变频调速原理

交流电动机不论三相异步电动机还是三相同步电动机，它们的转速  $n$  公式为

$$n_0 = 60f/p \text{ (同步电动机)} \quad n = n_0(1-s) = 60f/p(1-s) \text{ (异步电动机)} \quad (1-1)$$

式中， $f$  是频率 (Hz)； $p$  是极对数； $s$  是转差率 (0~3% 或 0~6%)。

由转速公式可见，只要设法改变三相交流电动机的供电率  $f$ ，就十分方便地改变了电动机的转速  $n$ 。比改变极对数  $p$  和转差率  $s$  两个参数简单得多，特别是近 20 多年来，交流变频调速器得到了突飞猛进的发展，使得三相交流电动机变频调速成为当前电气调速的主流。

实际上仅仅改变电动机的频率并不能获得良好的变频特性。例如：标准设计的三相异步电动机，380V，50Hz。如果电压不变，只改变频率，会出现什么问题？380V 不变，频率下调 (<50Hz)，会使电动机气隙磁通  $\Phi$  (约等于  $U/f$ ) 饱和；反之，380V 不变，频率向上调 (>50Hz)，则使磁通减弱。所以，真正应用变频调速时，一般需要同时改变电压和频率，以保持磁通基本恒定。因此，变频调速器又称为 VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) 装置。

#### 1. 感应电动机稳态模型

根据电动机学原理，在下述三个假定条件下 (即忽略空间和时间谐波、忽略磁饱和、忽略铁损)，感应电动机的稳态模型可以用 T 型等效电路表示，如图 1-9a 所示。

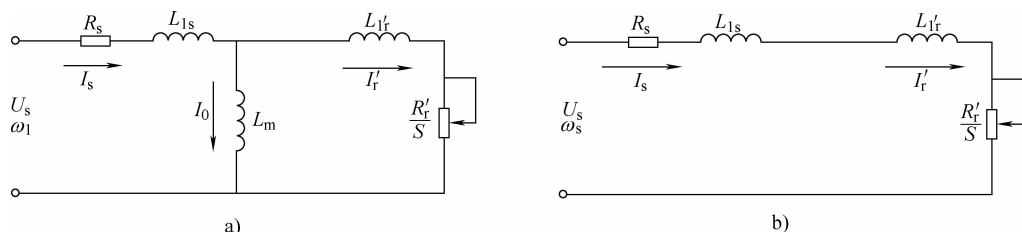


图 1-9 感应电动机等效电路

a) 感应电动机 T 型等效电路 b) 感应电动机简化等效电路

图 1-9a 中的各参数定义如下：

$R_s$ 、 $R'_r$ ——定子每相电阻和折合到定子侧的转子每相电阻；

$L_{1s}$ 、 $L'_{1r}$ ——定子每相漏感和折合到定子侧的转子每相漏感；

$L_m$ ——定子每相绕组产生气隙主磁通的等效电感，即励磁电感；

$U_s$ 、 $\omega_1$ ——定子相电压和供电角频率；

$I_s$ 、 $I'_r$ ——定子相电流和折合到定子侧的转子相电流。

忽略励磁电流，则得到如图 1-9b 所示的简化等效电路。

因此，电流公式可表示为

$$I_s \approx I'_r = \frac{U_s}{\sqrt{\left(R_s + \frac{R'_r}{s}\right)^2 + \omega_1^2 (L_{1s} + L'_{1r})^2}} \quad (1-2)$$

已知感应电动机传递的电磁功率

$P_m = \frac{3I_r'^2 R_r'}{s}$ , 同步机械角速度  $\omega_{m1} = \omega_1/n_p$ , 则感应电动机的电磁转矩为

$$T_e = \frac{P_m}{\omega_{m1}} = \frac{3I_r'^2 R_r'}{s} \frac{n_p}{\omega_1} = \frac{3U_s^2 n_p R_r'}{s \left[ \left( R_s + \frac{R_r'}{s} \right)^2 + \omega_1^2 (L_{1s} + L_{1r}')^2 \right]} \omega_1 \quad (1-3)$$

感应电动机的每极气隙磁通为

$$\Phi_m = \frac{E_g}{4.44f_1 N_s K_{Ns}} \approx \frac{U_s}{4.44f_1 N_s K_{Ns}} \quad (1-4)$$

式中,  $E_g$  是气隙磁通在定子每相中感应电动势的有效值;  $f_1$  是定子频率 (Hz);  $N_s$  是定子每相绕组串联匝数;  $K_{Ns}$  是定子基波绕组系数。忽略定子电阻和漏磁感抗压降, 则认为定子相电压  $U_s = E_g$ 。

对  $T_e$  公式对  $s$  求导, 并令  $dT_e/ds = 0$ , 可求出对应于最大转矩时的临界静差:

$$s_m = \frac{R_r'}{\sqrt{R_s^2 + \omega_1^2 (L_{1s} + L_{1r}')^2}} \quad (1-5)$$

最大转矩为

$$T_{e\max} = \frac{3U_s^2 n_p}{2\omega_1 [R_s + \sqrt{R_s^2 + \omega_1^2 (L_{1s} + L_{1r}')^2}]} \quad (1-6)$$

## 2. 转速开环的感应电动机变压变频调速 (VVVF)

变压变频调速是改变同步转速的调速方法, 同步转速随频率而变化, 为了达到良好的控制效果, 常采用电压-频率协调控制 (即  $U/f$  控制), 并分为基频 (额定频率) 以下和基频以上两种情况。

### (1) 基频以下调速

以便充分利用电动机铁心, 发挥电动机产生转矩的能力, 在基频以下采用恒磁通控制方式, 要保持  $\Phi_m$  不变, 当频率  $f_1$  从额定值  $f_{1N}$  向下调节时, 必须同时降低  $E_g$ , 即采用电动势频率比为恒值的控制方式。然而, 绕组中的感应电动势是难以直接控制的, 当电动势值较高时, 可以忽略定子电阻和漏磁感抗压降, 而认为定子相电压  $U_s \approx E_g$ , 则得

$$\frac{E_g}{f_1} = \text{常值} \quad (1-7)$$

这是恒压频比的控制方式, 其控制特性如图 1-10 所示。

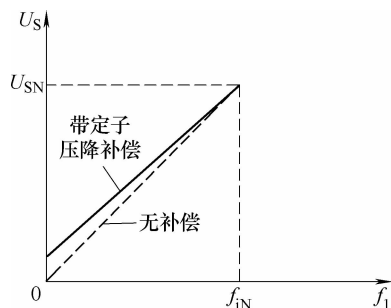


图 1-10 恒压频比控制特性

低频时,  $U_s$  和  $E_g$  都较小, 定子电阻和漏磁感抗压降所占的分量相对较大, 可以人为地抬高定子相电压  $U_s$ , 以便补偿定子压降, 称作低频补偿或转矩提升。

### (2) 基频以上调速

在基频以上调速时, 频率从  $f_{1N}$  向上升高, 但定子电压  $U_s$  却不可能超过额定电压  $U_{SN}$ , 只能保持  $U_s = U_{SN}$  不变, 这将使磁通与频率成反比地下降, 使得感应电动机工作在弱磁状态。