



高等职业教育“十一五”规划教材

高职高专电子信息类系列教材

# 变频器应用技术

李方园 主 编



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

高等职业教育“十一五”规划教材

高职高专电子信息类系列教材

# 变频器应用技术

李方园 主 编

张 池 副主编

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书从变频器使用者的角度出发,从理论到实践、从设计到应用,由浅入深地阐述了变频器基础知识、使用功能、使用系统的设计、节能应用、设备控制及应用、总线控制及维护经验。

本书最大的特点就是按照使用者了解和应用变频器的渐进过程,分为入门篇、设计篇、应用篇和维护篇,结合生产工艺和机械装备的实际应用,详细介绍了变频器的使用范围、工作原理及行业经验,力图将变频器在应用中所涉及的重点言简意赅地呈现给读者。

本书可作为高职高专院校电气自动化技术专业、机电一体化技术专业、自动控制专业及相关专业的教材,也可供机电技术和电气技术人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

变频器应用技术/李方园主编. —北京:科学出版社,2008  
(高等职业教育“十一五”规划教材·高职高专电子信息类系列教材)  
ISBN 978-7-03-022249-7

I. 变… II. 李… III. 变频器-基本知识 IV. TN773

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 081937 号

责任编辑:孙露露/责任校对:耿耘

责任印制:吕春珉/封面设计:东方人华平面设计部

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

铭浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2008年7月第一版 开本:787×1092 1/16

2008年7月第一次印刷 印张:14 3/4

印数:1—4 000 字数:339 000

定价:22.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62138978-8212

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

## 前 言

变频器调速技术是集自动控制、微电子、电力电子、通信等技术于一体的高科技技术，它以很好的调速、节能性能，在各行各业中获得了广泛的应用。随着工业的快速发展，变频器的应用也经历了从初级到高级、从传统控制到先进控制的过程，变频器在节能应用、设备控制中所扮演的角色越来越重要。

随着维修电工（高级、技师）对于变频器的使用、操作和设计要求越来越高，“变频器应用技术”在高职高专教育中的课程改革迫在眉睫。为了更好地适应高职高专学生对于变频器知识的掌握和理解，本书进行了大胆的改革和尝试。从变频器使用者的角度出发，从理论到实践、从设计到应用由浅入深地阐述了变频器的基础知识、使用功能、使用系统的设计、节能应用、设备控制、总线控制及维护经验。

本书共分4篇。入门篇包括第1、2两章。第1章主要介绍了变频器的基础知识，包括交流电机的调速方式、异步电机的变频调速原理、变频器的电路结构和变频器的分类与特点；第2章主要介绍了变频器使用功能，包括变频器的控制方式、频率给定方式、运转指令方式和启动制动方式。设计篇即第3章介绍了变频器使用系统的基本设计原理，包括转速控制应用、PID控制应用和通信控制应用，同时介绍了变频控制柜设计的基本要点。应用篇主要从节能、设备控制和总线控制3个方面着手，包括第4~6章。第4章介绍了变频节能应用的必要性，并列举了给、排水系统的变频器节能应用、暖通空调系统的变频器节能应用、注塑机的变频器节能应用和变频家电的应用；第5章介绍了变频设备控制的应用，从基本特点出发依次阐述了变频器在机械加工设备中的应用、变频器在定位控制中的应用和变频器在电梯控制中的应用；第6章介绍了变频器的总线应用，从变频总线系统的组成到变频器与ProfiBus组成的总线控制系统、变频器与CC-Ling组成的总线控制系统一一展现给读者。本书的最后一部分是维护篇，即第7章，主要介绍了变频器维护经验，包括变频器维护基本要点以及具体的故障排除案例（过压、过流、过载原因、缺相、通信故障等），如何查找原因及进行故障定位。

本书由李方园、张池、张小冰、储海燕共同编写。本书配套教学资源可到科学出版社网站（[www.abook.cn](http://www.abook.cn)）下载。本书在编写过程中得到了张永惠、陈隆慈教授的大力支持，三菱变频器、艾默生变频器、西门子变频器、安川变频器等厂家相关人员提供了相当多的典型案例和调试经验。同时，在编写本书过程中，我们参考和引用了国内外许多专家、学者、工程技术人员发表的论文、著作等资料，在此一并表示感谢。

由于作者水平有限，在编写过程中难免存在不足和错误，希望广大读者给予批评、指正，我们将不胜感谢。变频器市场规模的逐渐扩大，产品的日渐丰富，技术的异彩纷呈，这些都使得变频器的应用案例更新速度加快，因此作者恳请各位业内人士：如果您有好的应用案例或者想更正书中需要商讨的任何细节，都请致信、致电给作者。主编联系邮箱：[muzi\\_woody@163.com](mailto:muzi_woody@163.com)。

# 目 录

## 前言

## 第 1 篇 入门篇

<b>第 1 章 变频器基础知识</b> .....	2
1.1 交流电机的调速方式 .....	2
1.2 交流异步电机的调速原理 .....	8
1.3 变频器的电路结构 .....	18
1.4 变频器的分类与特点 .....	32
本章小结 .....	38
思考与练习题 .....	38
<b>第 2 章 变频器使用功能</b> .....	39
2.1 变频器的控制方式 .....	39
2.2 变频器的频率给定方式 .....	53
2.3 变频器的运转指令方式 .....	61
2.4 变频器的启动制动方式 .....	64
本章小结 .....	73
思考与练习题 .....	74

## 第 2 篇 设计篇

<b>第 3 章 变频器使用系统设计</b> .....	78
3.1 变频调速系统的设计原理 .....	78
3.2 转速控制应用 .....	91
3.3 PID 控制应用 .....	101
3.4 通信控制应用 .....	111
3.5 变频控制柜的设计 .....	119
本章小结 .....	126
思考与练习题 .....	127

## 第 3 篇 应用篇

<b>第 4 章 变频器的节能应用</b> .....	130
4.1 变频节能的典型应用 .....	130
4.2 给、排水系统的变频器节能控制 .....	132
4.3 暖通空调系统的变频节能控制 .....	136

4.4	注塑机变频节能应用 .....	143
4.5	变频家电的节能应用 .....	148
	本章小结 .....	149
	思考与练习题 .....	150
<b>第5章</b>	<b>变频器的设备控制及应用 .....</b>	<b>152</b>
5.1	变频设备控制的基本特点 .....	152
5.2	变频器在机械加工设备中的应用 .....	154
5.3	变频器在定位控制中的应用 .....	161
5.4	变频器在电梯中的应用 .....	165
	本章小结 .....	174
	思考与练习题 .....	174
<b>第6章</b>	<b>变频器的总线控制 .....</b>	<b>176</b>
6.1	变频总线系统的组成 .....	176
6.2	变频器与 Profibus 组成的总线控制系统 .....	180
6.3	变频器与 CC-Link 组成的总线控制系统 .....	188
	本章小结 .....	194
	思考与练习题 .....	195
<b>第4篇 维护篇</b>		
<b>第7章</b>	<b>变频器维护经验 .....</b>	<b>198</b>
7.1	变频器维护基本要点 .....	198
7.2	过压原因及故障定位 .....	203
7.3	过流原因及故障定位 .....	210
7.4	过载原因及故障定位 .....	216
7.5	缺相原因及故障定位 .....	219
7.6	通信故障原因及故障定位 .....	223
	本章小结 .....	227
	思考与练习题 .....	228
	<b>参考文献 .....</b>	<b>229</b>



# 第1篇 入门篇

变频器是把工频电源变换成各种频率的交流电源以实现电机变速运行的设备，它已经伴随着交流电机的无级调速而逐渐普及到各行各业。交流变频调速技术是强弱电混合、机电一体的综合性技术，硬件结构上分成功率转换和弱电控制两大部分，软件上则衍生了恒压频比控制、矢量控制和DTC控制。

# 第 1 章

## 变频器基础知识

### 【内容提要】

交流电机比直流电机经济耐用得多，因而被广泛应用于各行各业。在实际应用场合，往往要求交流电机能随意调节转速，以便获得满意的使用效果，但它在这方面比起直流电机来就要逊色得多，于是人们不得不借助其他手段达到调速目的。根据交流电机的转速特性可知，交流调速方式有 3 大类：频率调节、磁极对数调节和转差率调节。

本章介绍了交流异步电机的变频调速原理，包括  $U/f$  控制、矢量控制和 DTC 控制。同时还介绍了变频器的基础结构知识，即功率转换和弱电控制两大部分。最后阐述了变频器的分类及发展趋势。

### 1.1 交流电机的调速方式

#### 1.1.1 异步电机和同步电机的概念

##### 1. 异步电机

三相异步电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，三相异步电机定子中的 3 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 4 个时刻来描述旋转磁场的产生过程。电流每变化一个周期，旋转磁场便在空间旋转一周，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； $p$  是磁场的磁极对数； $n$  的单位是  $r/min$ 。根据此式可知，电机的转速与磁极对数和使用电源的频率有关。

定子绕组产生旋转磁场后，转子导条（笼型条）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



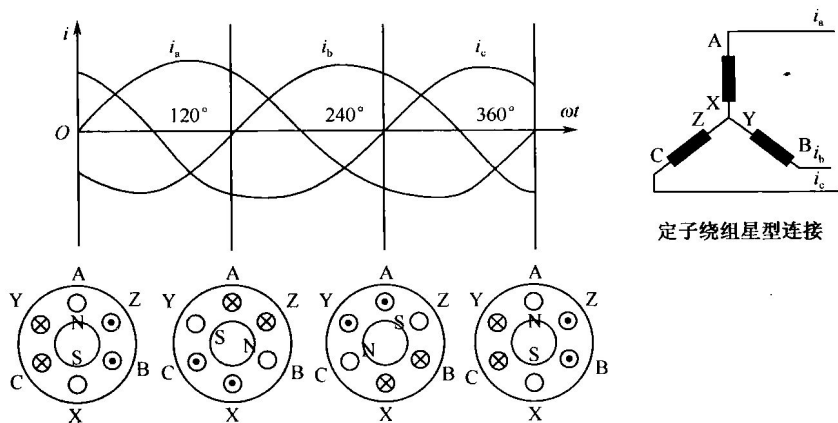


图 1.1 三相异步电机原理

结构的三相电机为异步电机。

## 2. 同步电机

同步电机和其他类型的旋转电机一样，都是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机和转枢式同步电机。

图 1.2 给出了最常用的转场式同步电机的结构模型，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机内部磁场的分布和同步电机的性能有重大影响。

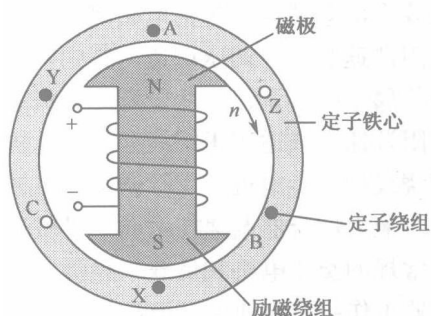


图 1.2 转场式同步电机的结构模型

除了转场式同步电机外，还有转枢式同步电机，其磁极安装于定子上，而交流绕组分布于转子表面的槽内，这种同步电机的转子充当了电枢。图中用 AX、BY、CZ 这 3 个在空间错开  $120^\circ$  电角度分布的线圈代表三相对称交流绕组。

## 3. 交流电机的调速

交流电机比直流电机经济耐用得多，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，往往要求电机能随意调节转速，以便获得满意的使用效果，但交流电机在这方面比起直流电机来就要逊色得多，于是人们不得不借助其他手段达到调速目的。根据感应电机的转速特性可知，它的调速方式有 3 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，如图 1.3 所示。

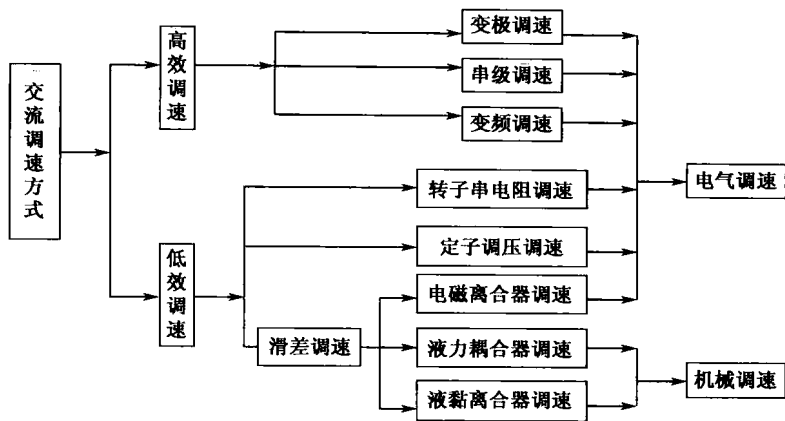


图 1.3 交流电机主要调速方式分类

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、液力耦合器调速、液黏离合器调速）、转子串电阻调速和定子调压调速。其中，液力耦合器调速和液黏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机，串级调速和转子串电阻调速方式适用于绕线型异步电机，定子调压调速和变频调速既适用于笼型，也适用于绕线型异步电机。变频调速和机械调速还可用于同步电机。

液力耦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耦合器安装在常规的交流电机和负载（风机、水泵或压缩机）之间，从电机输入转速，通过液力耦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。

液黏离合器调速是指利用液黏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。液黏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，如同液力耦合器一样安装在笼型感应电机与工作机械之间，在电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，因此是一种低效调速方式。

## 1.1.2 交流电机的调速方式

### 1. 异步电机的变极调速

变极调速技术是通过采用变极多速异步电机实现调速的。这种多速电机大都为笼型转子电机，其结构与基本系列异步电机相似，现国内生产的有双速、三速、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  $n_0=3000、1500、1000、750\text{r/min}$ 。改变极对数是用改变定子绕组的接线方式来完成的（见图 1.4），图 1.4 (a) 所示的  $p=2$ ，图 1.4 (b) 和图 1.4 (c) 中的  $p=1$ 。双速电机的定子是单绕组，三速和四速电机的定子是双绕组。这种改变极对数来调速的笼型电机，通常称为多速感应电机或变极感应电机。

多速电机的优点是运行可靠，运行效率高，控制线路简单，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。适合于按 2~4 挡固定调速变化的场合，为了弥补有级调速的缺陷，它有时与定子调压调速或电磁离合器调速配合使用。

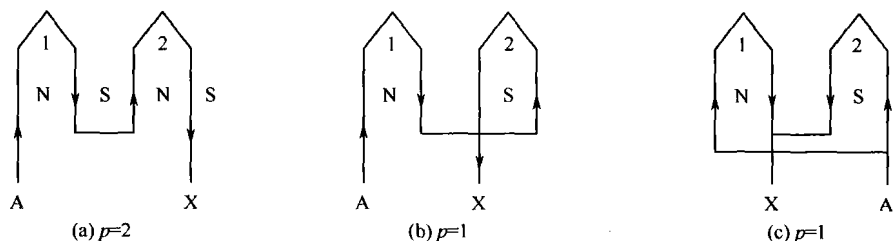


图 1.4 定子绕组改接变极对数示意图

## 2. 电磁调速

电磁调速技术是通过电磁调速电机实现调速的技术。电磁调速电机（又称滑差电机）由三相异步电机、电磁转差离合器和测速发电机组成，三相异步电机作为原动机工作。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机和电磁离合器一体化的调速电机来完成的，把这种调速电机称为电磁离合器电机，又称滑差电机，属于低效调速方式。电磁调速电机的调速系统主要由笼型感应电机、涡流式电磁转差离合器和直流励磁电源等 3 部分组成（见图 1.5），直流励磁电源功率较小，通过改变晶闸管的控制角以改变直流励磁电压的大小来控制励磁电流。它以笼型电机作为原动机，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

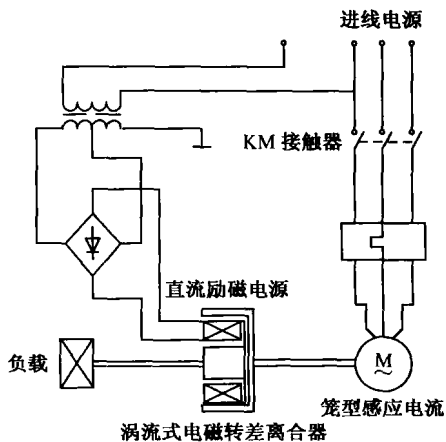


图 1.5 电磁调速示意图

枢包括电枢铁心和电枢绕组，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，直流励磁不必经过滑环而直接由直流电源供电。当电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。

电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，它可以空载启动，对需要重载启动的负载可获得容量效益，提高电机运行负载率。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，适用于调速范围适中的中、小容量电机。

### 3. 串级调速

串级调速的典型调速系统有两种：一种是电气串级调速系统；另一种是电机串级调速系统。电气串级调速电路是由异步电机转子一侧的整流器和电网一侧的晶闸管逆变器组成。用改变逆变器的逆变角来调节异步电机转速，将整流后的直流电通过逆变器转换成具有电网频率的交流电，将转差功率回馈电网。电机串级调速电路是把转子整流后的直流作为电源接到一台直流电机的电枢两端，用调节励磁电流来调节异步电机转速，直流电机与异步电机同轴相接，将转差功率变为直流器的输入功率与异步电机一起拖动负载，使转差功率回馈机轴。电机串级调速的范围不大，又增加了一台直流电机，使系统复杂化，应用不多。电气串级调速系统比较简单，控制方便，应用比较广泛。

串级调速的主要优点是调速效率高，可实现无级调速，初始投资不大。缺点是对电网干扰大，调速范围窄，功率因数也比较低，与转子串电阻相比，主要是它的效率优势。

### 4. 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电压的交流电源。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机的减压启动，以减少启动电流。晶闸管是交流调压调速的主要形式，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，可以兼作笼型电机的降压启动设备。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，适用于调速范围要求不宽，较长时间在高速区运行的中、小容量的异步电机。

### 5. 转子串电阻调速

转子串电阻调速是通过改变绕线型感应电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（见图 1.6），为减少电刷的磨损，中等容量以上的绕线型感应电机还设有提刷装置，当电机启动时接入外接电阻以减少启动电流，不需要调速时移动手柄可提起电刷与集电滑环脱离接触，同时使 3 个集电滑环彼此短接起来。

转子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。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；外接附加电阻不易做到无级调速，调速平滑性差，适合于调速范围不太大和调速特性要求不高的场合。

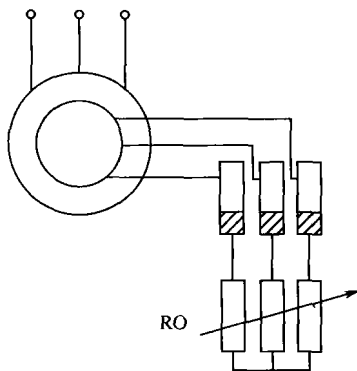


图 1.6 转子串电阻调速电路示意

### 6. 变频调速

变频调速是通过改变异步电机供电电源的频率  $f$  来实现无级调速的，其原理如图 1.7 所示，电机采用变频调速以后，电机转轴直接与负载连接，电机由变频器供电。变频调速的关键设备就是变频器，变频器



图 1.7 变频调速原理

是一种将交流电源整流成直流后再逆变成频率、电压可变的交流电源的专用装置，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。

## 1.1.3 调速方式汇总

根据实际应用效果，将交流电机的各种调速方式的一般性能和特点汇总于表 1.1 中。

表 1.1 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	液黏离合器	变极	串级	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 挡转速	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
节能效果	中	中	中	中	中	高	高	高

续表

调速方式	转子串电阻	定子调压	电磁离合器	液力耦合器	液黏离合器	变极	串级	变频
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	绕线型异步电机	绕线型异步电机 笼型异步电机	笼型异步电机	笼型异步电机、同步电机	笼型异步电机、同步电机	笼型异步电机	绕线型异步电机	异步电机、同步电机

## 1.2 交流异步电机的调速原理

交流电机不论是三相异步电机还是三相同步电机，它们的转速为

$$N_0 = 60f/p(\text{同步电机}); \quad N = N_0(1-s) = 60f/p(1-s)(\text{异步电机})$$

式中， $f$  为频率； $p$  为极对数； $s$  为转差率（0~3%或0~6%）。

由转速公式可见，只要设法改变三相交流电机的供电频率  $f$ ，就可十分方便地改变电机的转速  $N$ ，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，使得三相交流电机变频调速成为当前电气调速的主流。

实际上仅仅改变电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机、380V、50Hz，如果电压不变，只改变频率，会产生以下问题：380V 不变，频率下调（<50Hz），会使电机气隙磁通  $\varphi$ （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。

### 1.2.1 感应电机稳态模型及基于稳态模型的控制方法

#### 1. 感应电机稳态模型

根据电机学原理，在下述 3 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），感应电机的稳态模型可以用 T 型等效电路表示，如图 1.8（a）所示。

图 1.8（a）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；

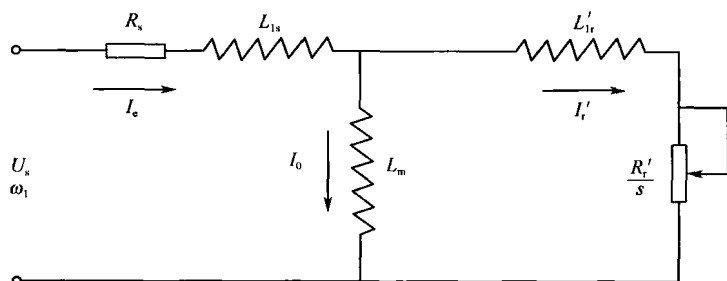
$I_s$ 、 $I'_r$ ——定子相电流和折合到定子侧的转子相电流；

下标 s——stator（定子）；

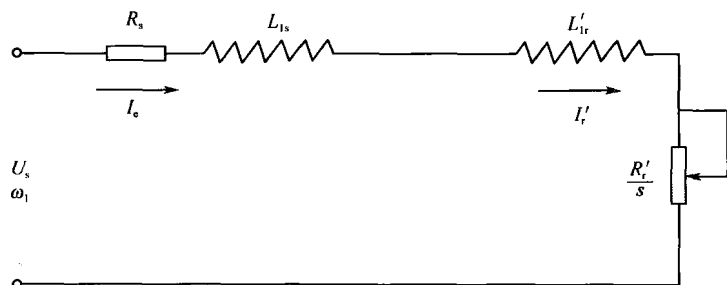
下标 r——rotor（转子）。

忽略励磁电流，则得到如图 1.8（b）所示的简化等效电路。

因此，电流公式可表示为



(a) 感应电机T型等效电路



(b) 感应电机简化等效电路

图 1.8 感应电机等效电路

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

已知感应电机传递的电磁功率为

$$P_m = \frac{3I'^2_r R'_r}{s}$$

同步机械角速度  $\omega_{m1} = \omega_1 / n_p$ ，则感应电机的电磁转矩为

$$T_e = \frac{P_m}{\omega_{m1}} = \frac{3I'^2_r R'_r}{s} \cdot \frac{n_p}{\omega_1} = \frac{3U_s^2 n_p R'_r}{s \left[ \left(R_s + \frac{R'_r}{s}\right)^2 + \omega_1^2 (L_{1s} + L'_{1r})^2 \right] \omega_1}$$

感应电机的每极气隙磁通为

$$\Phi_m = \frac{E_g}{4.44 f_1 N_s K_{N_s}} \approx \frac{U_s}{4.44 f_1 N_s K_{N_s}}$$

式中， $E_g$  为气隙磁通在定子每相中感应电动势的有效值； $f_1$  为定子频率； $N_s$  为定子每相绕组串联匝数； $K_{N_s}$  为定子基波绕组系数。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为

$$s_m = \frac{R'_r}{\sqrt{R_s^2 + \omega_1^2 (L_{1s} + L'_{1r})^2}}$$

最大转矩为

$$T_{\text{emax}} = \frac{3U_s^2 n_p}{2\omega_1 \left[ R_s + \sqrt{R_s^2 + \omega_1^2 (L_{1s} + L'_{1r})^2} \right]}$$

## 2. 转速开环的感应电机变压变频调速 (VVVF)

变压变频调速是改变同步转速的调速方法, 同步转速  $n_1$  随频率而变化,

$$n_1 = \frac{60}{2\pi n_p}$$

式中,  $n_p$  为电机极对数, 下同。

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

为了充分利用电机铁心, 发挥电机产生转矩的能力, 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

$$\frac{E_g}{f_1} = \text{常值}$$

这是恒压频比的控制方式, 其控制特性如图 1.9 所示。

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, 称为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, 使得感应电机工作在弱磁状态。

把基频以下和基频以上两种情况的控制特性画在一起, 如图 1.10 所示。如果电机在不同转速时所带的负载都能使电流达到额定值, 即都能在允许温升下长期运行, 则转矩基本上随磁通变化而变化。按照电力拖动原理, 在基频以下, 磁通恒定, 转矩也恒定, 属于“恒转矩调速”性质, 而在基频以上, 转速升高时磁通减小, 转矩也随着降低, 基本上属于“恒功率调速”。

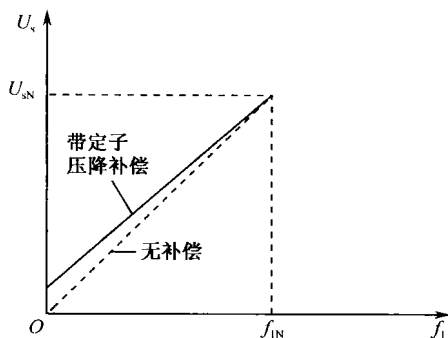


图 1.9 恒压频比控制特性

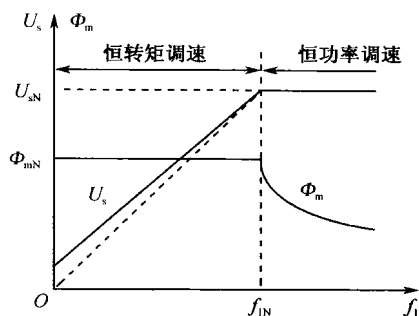


图 1.10 感应电机变压变频调速的控制特性



## 3. 恒压频比时的机械特性

基频以下须采用恒压频比控制，感应电机的电磁转矩为

$$T_e = 3n_p \left( \frac{U_s}{\omega_1} \right)^2 \frac{s\omega_1 R'_r}{(sR_s + R'_r)^2 + s^2 \omega_1^2 (L_{1s} + L'_{1r})^2}$$

当  $s$  很小时，可忽略上式分母中含  $s$  各项，则

$$T_e \approx 3n_p \left( \frac{U_s}{\omega_1} \right)^2 \frac{s\omega_1}{R'_r} \propto s$$

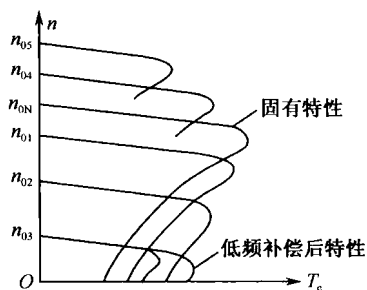
由此可以推导出带负载时的转速降落

$$\Delta n = sn_1 = \frac{60}{2\pi n_p} s\omega_1 \approx \frac{10}{\pi n_p^2} \frac{R'_r T_e}{\left( \frac{U_s}{\omega_1} \right)^2} \propto T_e$$

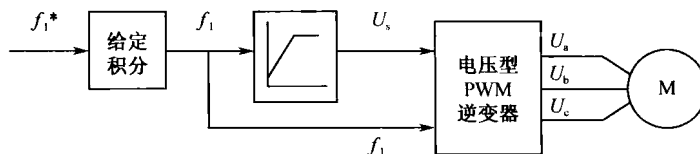
由此可见，当  $U_s/\omega_1$  为恒值时，对于同一转矩  $T_e$ ， $\Delta n$  基本不变。这就是说，在恒压频比的条件下改变频率  $\omega_1$  时，机械特性基本上是平行下移，如图 1.11 (a) 所示。将最大转矩改写为

$$T_{\text{emax}} = \frac{3n_p}{2} \left( \frac{U_s}{\omega_1} \right)^2 \frac{1}{\left[ \frac{R_s}{\omega_1} + \sqrt{\left( \frac{R_s}{\omega_1} \right)^2 + (L_{1s} + L'_{1r})^2} \right]}$$

可见最大转矩  $T_{\text{emax}}$  是随着  $\omega_1$  的降低而减小的。频率很低时， $T_{\text{emax}}$  很小，电机带负载能力减弱，采用低频定子压降补偿，适当地提高电压  $U_s$ ，可以增强带负载能力。



(a) 感应电机变压变频调速机械特性



(b) 感应电机转速开环变压变频调速系统结构原理

图 1.11 感应电机变压变频调速机械特性及结构原理

在基频  $f_{1N}$  以上变频调速时，电压  $U_s = U_{sN}$  不变，机械特性方程式可写成