

# 变频器

# 原理与维修

BIANPINQI YUANLI YU WEIXIU

李方园 编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

# 变频器原理与维修

李方园 编著

机械工业出版社

本书从变频器初学者的角度出发,按照项目导入、任务驱动的原则,对包括食品输送带、冶金辊道传动、损纸带式输送机、化学品电动机、双变频离心机和轧机等在内的十个项目一一讲述,并对每个项目以三菱电机自动化有限公司最新的变频器 A700 为例给出了具体的硬件接线和参数设置。除此之外,本书还介绍了变频控制系统的设计与招标。同时,对于变频器维修技术人员,本书详细介绍了变频器主电路、驱动电路和开关电源的工作原理及具体电路,并通过变频器过电流、过电压、过热和过载等故障实例进行一一解答,对于维修人员解决故障,提高维修水平是一本不可多得的指导书,具有非常大的现实指导意义。

本书深入浅出、图文并茂,既适合高职院校的电气自动化、机电一体化、应用电子技术等相关专业的学生作为教材和指导书使用,同时也适合广大中高级电工人员和自动化工程技术人员阅读。

## 图书在版编目(CIP)数据

变频器原理与维修/李方园编著. —北京:机械工业出版社, 2010. 3  
ISBN 978-7-111-29808-3

I. ①变… II. ①李… III. ①变频器—理论②变频器—  
维修 IV. ①TN773

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 028651 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:张世琴  
封面设计:张静 责任校对:张晓蓉 责任印制:乔宇  
北京铭成印刷有限公司印刷

2010 年 5 月第 1 版第 1 次印刷  
184mm × 260mm · 20.5 印张 · 505 千字  
0001—3000 册  
标准书号: ISBN 978-7-111-29808-3  
定价: 46.00 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

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

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。本书将以变频器基础及维修为主线，通过详细介绍案例，进一步让读者了解变频器的工作原理及系统结构。本书还探讨了变频调速系统在各行业中的应用案例，进一步为广大的变频器使用者进行变频自动化应用、开拓视野提供最新的资讯。同时，本书结合变频器的主电路、驱动电路和开关电源等介绍，从变频器维修者的角度出发提供了详细的案例。

本书从变频器初学者的角度出发，按照项目导入、任务驱动的原则，对包括食品输送带、冶金辊道传动、损纸带式输送机、化学品电动机、双变频离心机和轧机等在内的十个项目一一讲叙，并对每个项目以三菱电机自动化(上海)有限公司最新的变频器 A700 为例，给出了具体的硬件接线和参数设置。

本书通俗易懂，对于每一个项目，从项目背景、知识讲座、技能实训到最后的项目解决方案和案例分析一一展开，阐述详细。因此，通过本书的学习，不仅能了解一般变频器及控制系统的设计过程、设计要求、应完成的工作内容和具体设计方法，同时也有助于进一步熟悉变频器的维修和维护过程。

本书共有 20 个项目，前 10 个项目以三菱公司最新的变频器 A700 作为载体，详细介绍了其工作原理、硬件设计与参数设置；第 11 和 12 个项目为变频器的设计与招标项目，以 AB 变频器为载体进行了详细介绍；第 13~20 个项目以变频器的维修为落脚点，详细介绍了变频器主电路、驱动电路和开关电源的工作原理及具体电路，并通过变频器过电流、过电压、过热和过载等故障实例来进行一一解答，具有非常大的现实指导意义。

本书在编写过程中，不仅得到了张永惠教授的大力支持，而且还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的帮助，提供了相当多的典型案例和维护经验。本书在编写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。另外陈亚玲、叶明、陈贤富、沈阿宝、陈亚珠、李伟庄、章富科、方定桂、刘军毅、戴琴、王永行、刘伟红等参与了编写，作者在此一并致谢。

作 者  
2009 年 11 月

# 目 录

前言	
项目 1 食品输送带的变速控制	1
1.1 项目背景及要求	1
1.2 知识讲座:变频调速原理	2
1.3 技能实训:三菱 A700 变频器的 安装与简单调试	10
1.4 项目解决方案	16
项目 2 冶金辊道传动的变速控制	21
2.1 项目背景及要求	21
2.2 知识讲座:频率给定和运转指令	22
2.3 技能实训:变频器 A700 运行模 式选择	34
2.4 项目解决方案	39
项目 3 损纸带式输送机变频控制	42
3.1 项目背景及要求	42
3.2 知识讲座:变频器的端子功能	43
3.3 技能实训:变频器 A700 控制端 子的接线与设置	51
3.4 项目解决方案	60
项目 4 化学品电动机的变频控制	65
4.1 项目背景及要求	65
4.2 知识讲座: $V/f$ 控制	66
4.3 技能实训:变频器 A700 的转矩 提升与热保护	75
4.4 项目解决方案	83
项目 5 塑料挤出机的无速度传感 器矢量控制	87
5.1 项目背景及要求	87
5.2 知识讲座:无速度传感器矢量 控制方式	88
5.3 技能实训:变频器 A700 无传感 器矢量调试	96
5.4 项目解决方案	101
项目 6 变频恒压供水	105
6.1 项目背景及要求	105
6.2 知识讲座:变频 PID 控制	106
6.3 技能实训:变频器 A700 的 PID 控制	113
6.4 项目解决方案	117
项目 7 塔机起升电动机的制动 控制	119
7.1 项目背景及要求	119
7.2 知识讲座:变频器的制动原理 与方式	120
7.3 技能实训:变频器 A700 制动 单元及电阻的连接	129
7.4 项目解决方案	131
项目 8 高速复卷机的变频通信 控制	138
8.1 项目背景及要求	138
8.2 知识讲座:变频器的通信控制	139
8.3 技能实训:变频器 A700 的通 信端子连接与参数设置	141
8.4 项目解决方案	144
项目 9 双变频离心机的原理 与应用	147
9.1 项目背景及要求	147
9.2 知识讲座:离心机双变频的组成	148
9.3 技能实训:变频器 A700 的直流 供电方式	157
9.4 项目解决方案	160
项目 10 轧机变频器的速度与转 矩控制	163
10.1 项目背景及要求	163
10.2 知识讲座:矢量控制与转矩控制	163
10.3 技能实训:变频器 A700 矢量 控制与转矩控制	172
10.4 项目解决方案	177

<b>项目 11 水泥厂变频控制电路设计</b>	分析·····	257
<b>项目</b> ·····	16.3 案例分析一:工业水洗机变频器过电压维修·····	263
11.1 项目背景及要求·····	16.4 案例分析二:茶叶机变频器恒速运行过电压维修·····	267
11.2 知识讲座:变频调速系统的设计·····	16.5 案例分析三:制动单元跳闸·····	269
11.3 技能实训:电气控制电路的绘制·····	<b>项目 17 变频器过电流故障维修</b> ·····	274
11.4 项目解决方案·····	17.1 项目背景及要求·····	274
<b>项目 12 矿业变频器的招标项目</b> ·····	17.2 知识讲座:变频器过电流故障分析·····	274
12.1 项目背景及要求·····	17.3 案例分析一:电振电动机的变频器过电流故障·····	277
12.2 技术标书一:变频器产品介绍·····	17.4 案例分析二:罐车变频器过电流故障·····	281
12.3 技术标书二:投标方案对招标文件的响应情况·····	17.5 案例分析三:变频器电流传感器故障·····	286
12.4 技术标书三:方案描述·····	<b>项目 18 变频器过载故障维修</b> ·····	290
12.5 技术标书四:设备清单·····	18.1 项目背景及要求·····	290
<b>项目 13 变频器主电路维修</b> ·····	18.2 知识讲座:变频器过载及其定位·····	291
13.1 项目背景及要求·····	18.3 案例分析一:输送带电动机变频器过载·····	292
13.2 知识讲座:变频器主电路的构成与分类·····	18.4 案例分析二:轧机过载·····	295
13.3 案例分析一:东元变频器主电路检修·····	<b>项目 19 变频器过热故障维修</b> ·····	298
13.4 案例分析二:富士变频器主电路检修·····	19.1 项目背景及要求·····	298
<b>项目 14 变频器的驱动电路维修</b> ·····	19.2 知识讲座:变频器过热故障分析·····	298
14.1 项目背景及要求·····	19.3 案例分析一:收卷变频器过热故障维修·····	301
14.2 知识讲座:驱动电路故障分析·····	19.4 案例分析二:卷染机变频器散热器过热·····	303
14.3 案例分析一:富士 P11 变频器驱动电路维修·····	19.5 案例分析三:富士变频器风扇控制故障·····	307
14.4 案例分析二:英威腾变频器驱动电路维修·····	<b>项目 20 变频器缺相故障维修</b> ·····	312
14.5 案例分析三:台达变频器驱动电路维修·····	20.1 项目背景及要求·····	312
<b>项目 15 变频器开关电源维修</b> ·····	20.2 知识讲座:变频器缺相故障分析·····	312
15.1 项目背景及要求·····	20.3 案例分析一:水泵输出缺相·····	316
15.2 知识讲座:开关电源原理·····	20.4 案例分析二:变频器输入缺相·····	318
15.3 案例分析一:康沃变频器开关电源维修·····	<b>参考文献</b> ·····	321
15.4 案例分析二:英威腾开关电源维修·····		
<b>项目 16 变频器过电压故障维修</b> ·····		
16.1 项目背景及要求·····		
16.2 知识讲座:变频器过电压故障		

# 项目1 食品输送带的变速控制

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。在实际应用场合，往往要求交流电动机能随意调节转速，以便获得让人满意的使用效果，但它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。本项目通过食品输送带的变频控制方案来了解变频器最简单的应用。

## 1.1 项目背景及要求

### 1.1.1 项目背景

在食品机械中，传输系统被大量地使用，比如蛋糕烘烤前必须由传输带进行送料，并按照烘烤工艺匀速地通过烘烤箱，这里面就涉及两个传送设备，即送料输送带和烘烤线输送带，如图 1-1 所示。

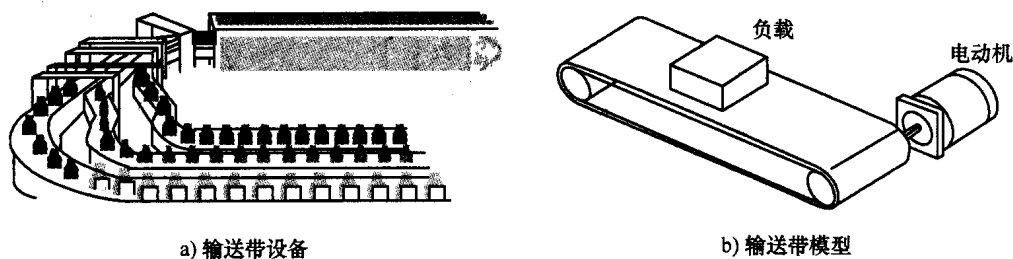


图 1-1 食品输送带设备及模型

以前，食品输送带设备调速基本都采用手动机械式有级变速（比如更换带轮大小或者齿轮箱变速比等），非常不方便。而作为交流调速最重要的驱动装置-变频器，借助其优点已经在食品输送设备中发挥着越来越重要的作用。比如变频调速起动大都是从低速开始，频率较低，这样可以避免牛奶瓶、啤酒瓶的摔倒；加、减速时间可以任意设定（加、减速比较平缓，起动电流较小，因此可以进行较高频率的起停）；变频调速很容易实现电动机的正、反转，只需要改变变频器内部逆变管的开关顺序，即可实现输出换相，也不存在因换相不当而烧毁电动机的问题。

### 1.1.2 控制要求

现在要求对该食品输送带采用交流变频控制，已知输送带采用三相笼型异步电动机 1.5kW，三相交流 380V，请设计合理的控制方案。具体要求如下：

- 1) 变频器直接安装在现场，以方便控制；
- 2) 变频器操作直接采用自身的操作面板进行各种控制，以节约成本；
- 3) 变频器通过接触器来实现上电和断电控制；

4) 根据工艺要求设置输送的加速度和最快速度。

## 1.2 知识讲座：变频调速原理

### 1.2.1 交流电动机的调速方式

#### 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 1-2 所示。图 1-2 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(r/min)。根据此式我们知道，电动机的转速与磁极数和使用电源的频率有关。

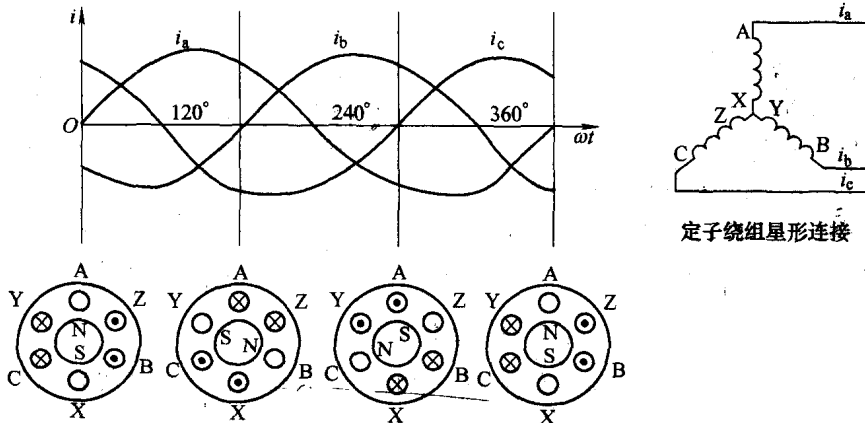


图 1-2 三相异步电动机原理

定子绕组产生旋转磁场后，转子导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  $n_0$ ，因为假设  $n_0 = n_1$ ，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  $n_0$ ，为此我们称这种结构的三相电动机为异步电动机。

#### 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。

除了转场式同步电动机外，还有转极式同步电动机，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 1-3 中用 AX、BY、CZ 三个在空间错开  $120^\circ$  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，以便获得让人满意的使用效果，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、定子调压调速、电磁离合器调速、变频调速、液力耦合器调速、齿轮调速等，如图 1-4 所示。

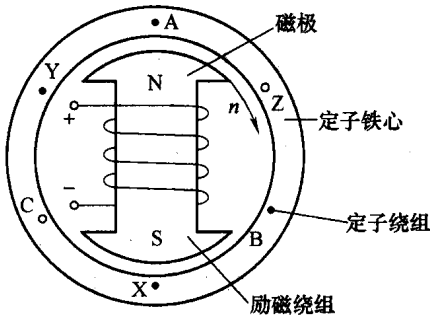


图 1-3 同步电动机的结构模型

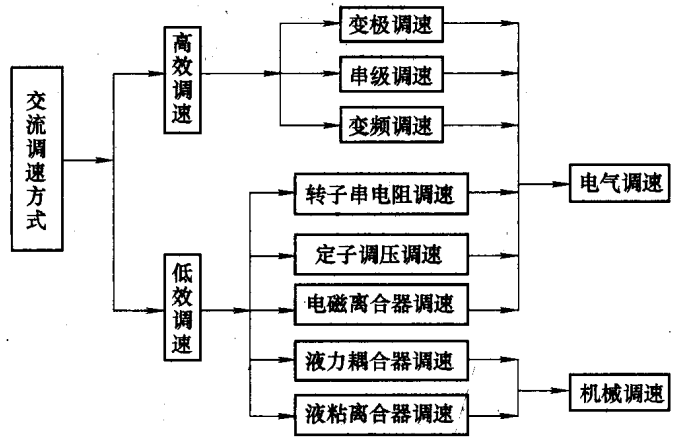


图 1-4 交流电动机主要调速方式分类图

基于节能考虑，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、液力耦合器调速、液粘离合器调速）、转子串电阻调速和定子调压调速。其中，液力耦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型异步电动机，定子调压调速和变频调速既适用于笼型异步电动机，也适用于绕线型异步电动机。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，如同液力耦合器一样安装在笼型感应电动机与工作机械之间，在电动机等速运行的情况下，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，因而是一种低效调速方式。

## 1.2.2 交流电动机的调速方式

### 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 $n_0=3000、1500、1000、750\text{r/min}$ 。改变极对数是用改变定子绕组的接线方式来完成，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。

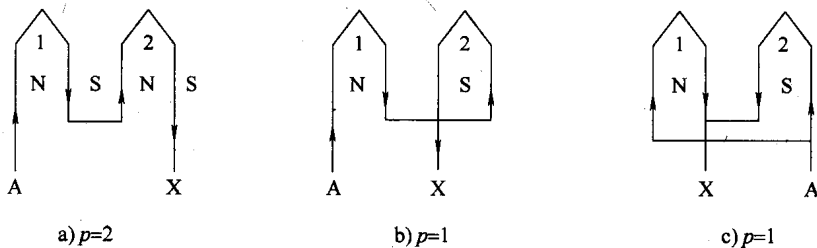


图1-5 定子绕组改接变极对数示意图

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。多速电动机适合于按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组成，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，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。它以笼型电动机作为原动机，带动与其同轴接连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，直流励磁不必经过滑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。

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，提高电动机运行负载率。电磁离合器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。因此，电磁离合器适用于调速范围适中的中小容量电动机。

### 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；另一种是电动机串级调速系统。电气串级调速电路是由异步电动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动机转速，将整流后的直流通过逆变器变换成具有电网频率的交流，将转差功率回馈电网。电动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动机的电枢两端，用调节励磁电流来调节异步电动机转速，直流电动机与异步电动机同轴相接，将转差功率变为直流电动机的输入功率与异步电动机一起拖动负载，使转差功率回馈机轴。电动机串级调速的调速范围不大，又增加了一台直流电动机，使系统复杂化，因而应用不多。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。串级调速的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比较明显。

### 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，可以兼作笼型异步电动机的降压启动设备。调压调速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。因此，调压调速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。

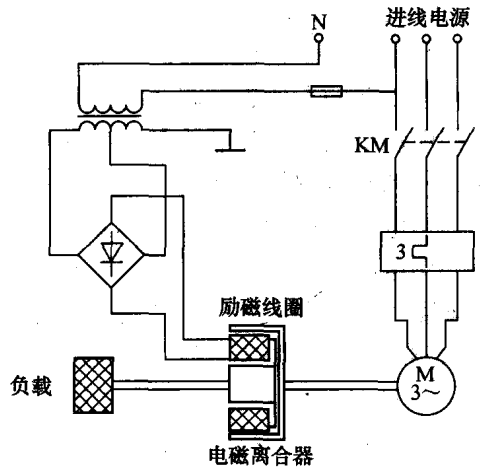


图 1-6 电磁调速示意图

### 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型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滑环脱离接触,同时使三个集电滑环彼此短接起来。

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。串电阻调速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。因此,串电阻调速适合于调速范围不太大和调速特性要求不高的场合。

### 6. 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,其原理如图 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。

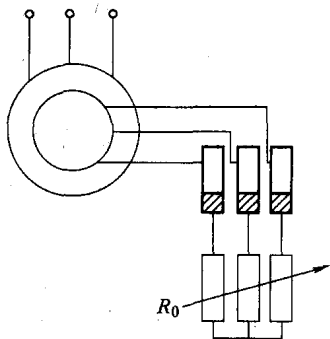


图 1-7 串电阻调速转子电路示意

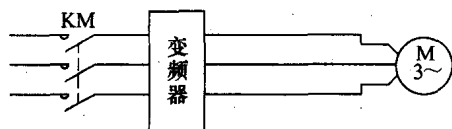


图 1-8 变频调速原理

### 7. 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汇总于表 1-1 中。

表 1-1 调速方式的一般性能和特点

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 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

(续)

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	绕线型异步电动机	绕线型异步电动机、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	绕线型异步电动机	异步电动机、同步电动机

### 1.2.3 交流异步电动机的调速原理

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

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

式中， $f$  为频率(Hz)； $p$  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动机的  $f$ ，就可十分方便地改变电动机的转速  $n$ ，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，会产生什么问题？380V 不变，频率下调(<50Hz)，会使电动机气隙磁通  $\varphi$  (约等于  $V/f$ ) 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 1-9a 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；

$L_{ls}$ 、 $L'_{lr}$ —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

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

已知感应电动机传递的电磁功率

$P_m = 3I_r'^2 R_r' / s$ , 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

$$T_e = \frac{P_m}{\omega_{m1}} = \frac{3I_r'^2 R_r'}{s} \cdot \frac{n_p}{\omega_1}$$

$$= \frac{3U_s^2 n_p R_r'}{s \left[ \left( R_s + \frac{R_r'}{s} \right)^2 + \omega_1^2 (L_{1s} + L_{1r}')^2 \right] \omega_1}$$

感应电动机的每极气隙磁通为

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

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 (Hz);  $N_s$  为定子每相绕组串联匝数;  $K_{Ns}$  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  $U_s = E_g$ 。

$T_e$  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:

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

最大转矩为

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

## 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  $V/f$  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

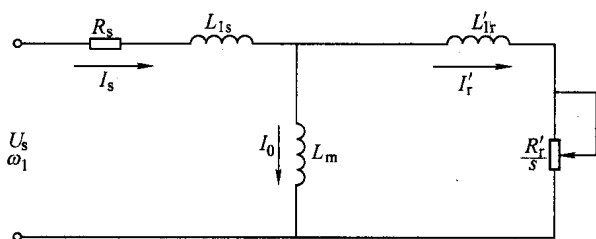
$$\frac{E_g}{f_1} = \text{常值}$$

这是恒压频比的控制方式, 其控制特性如图 1-10 所示。

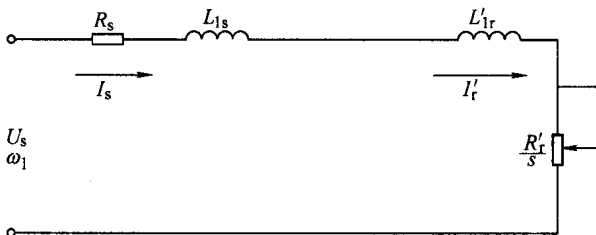
低频时,  $U_s$  和  $E_g$  都较小, 定子电阻和漏磁感抗压降所占的分量相对较大, 可以人为地抬高定子相电压  $U_s$ , 以便补偿定子压降, 称作低频补偿或转矩提升。

### (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



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 1-9 感应电动机等效电路

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1-11所示。如果电动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，转速升高时磁通恒减小，转矩也随着降低，基本上属于“恒功率调速”。

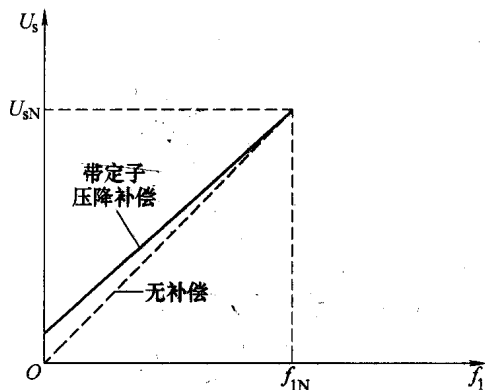


图1-10 恒压频比控制特性

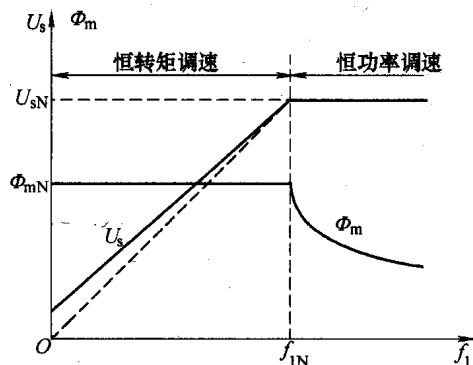


图1-11 感应电动机变压变频调速的控制特性

### 3. 恒压频比时的机械特性

基频以下须采用恒压频比控制，感应电动机的电磁转矩为

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

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  $\Delta n$  为

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

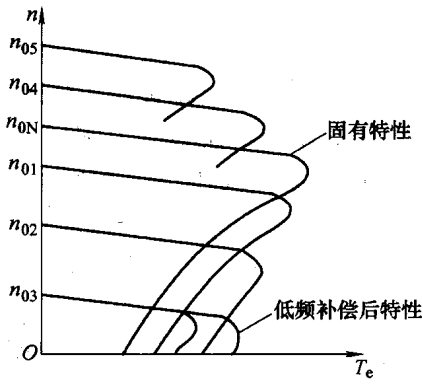
由此可见，当  $U_s/\omega_1$  为恒值时，对于同一转矩  $T_e$ ， $\Delta n$  基本不变。这就是说，在恒压频比的条件下改变频率  $\omega_1$  时，机械特性基本上是平行下移，如图1-12a所示。将最大转矩改写为

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

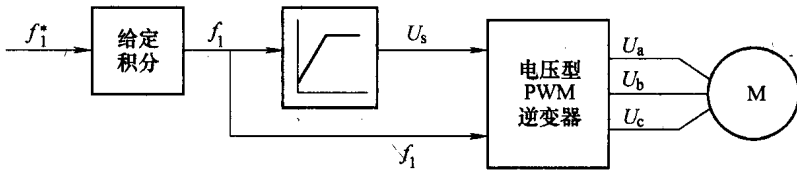
可见最大转矩  $T_{e_{\max}}$  是随着  $\omega_1$  的降低而减小的。频率很低时， $T_{e_{\max}}$  很小，电动机带载能力减弱，采用低频定子压降补偿，适当地提高电压  $U_s$ ，可以增强带载能力。

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

$$T_e = \frac{3U_{sN}^2 n_p R'_r}{s \left[ \left( R_s + \frac{R'_r}{s} \right)^2 + \omega_1^2 (L_{1s} + L'_{1r})^2 \right] \omega_1}$$



a) 感应电动机变压变频调速机械特性



b) 感应电动机转速开环变压变频调速系统结构原理

图 1-12 感应电动机变压变频调速机械特性及结构原理

而最大转矩表达式可改写成

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

当角频率  $\omega_1$  提高时，同步转速随之提高，最大转矩减小，机械特性上移，而形状基本不变。由于频率提高而电压不变，气隙磁通势必减弱，导致转矩的减小，但转速却升高了，可以认为输出功率基本不变。

图 1-12b 为感应电动机转速开环变压变频调速系统结构原理图，一般称为通用变频器，被广泛应用于调速性能要求不高的场合。为了避免突加给定造成的过电流，在频率给定后设置了给定积分环节。由于转速开环，现场调试工作量小，使用方便，但转速有静差，低速性能欠佳。

总之，V/f 控制是为了得到理想的转矩-速度特性，基于在改变电源频率进行调速的同时，又要保证电动机的磁通不变的思想而提出的，通用型变频器基本上都采用这种控制方式。V/f 控制变频器结构非常简单，但是这种变频器采用开环控制方式，不能达到较高的控制性能，而且在低频时，必须进行转矩补偿，以改变低频转矩特性。

### 1.3 技能实训：三菱 A700 变频器的安装与简单调试

#### 1.3.1 三菱 A700 变频器

从包装箱取出 1.5kW 三菱变频器 A700，如图 1-13 所示，检查正面盖板的容量铭牌和机身侧面的定额铭牌，确认变频器型号，产品是否与订货单相符，机器是否有损坏。



**【要求】** 了解三菱 A700 变频器的铭牌，能进行变频器的拆装。

**【训练】**

第一步，观察三菱 A700 变频器的铭牌，如图 1-14 所示，并从铭牌中理解三菱变频器的命名规则，如图 1-15 所示。

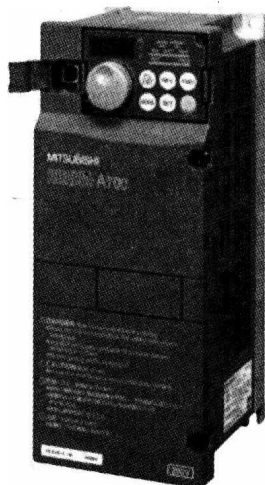


图 1-13 三菱 A700 变频器外观

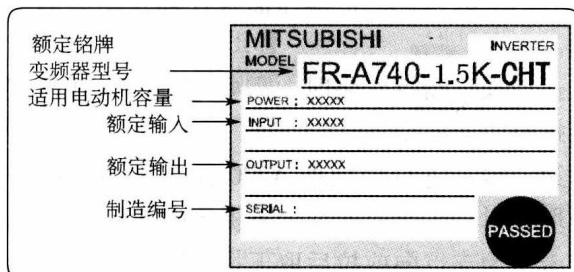


图 1-14 三菱 A700 变频器铭牌

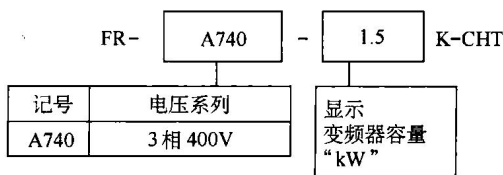


图 1-15 三菱 A700 变频器命名规则

从命名规则中可以知道，用于交流电动机传动的变频器的容量非常重要，在一般情况下，电动机容量与变频器容量必须匹配，否则会出现过电流、过载等异常现象。表 1-2 所示为三菱 A700 变频器与电动机匹配对应表。

表 1-2 三菱 A700 变频器与电动机匹配对应表

适用电动机	适用变频器	适用电动机	适用变频器
0.4	FR-A740-0.4K-CHT	75	FR-A740-75K-CHT
0.75	FR-A740-0.75K-CHT	90	FR-A740-90K-CHT
1.5	FR-A740-1.5K-CHT	110	FR-A740-110K-CHT
2.2	FR-A740-2.2K-CHT	132	FR-A740-132K-CHT
3.7	FR-A740-3.7K-CHT	150	FR-A740-150K-CHT
5.5	FR-A740-5.5K-CHT	160	FR-A740-160K-CHT
7.5	FR-A740-7.5K-CHT	185	FR-A740-185K-CHT
11	FR-A740-11K-CHT	220	FR-A740-220K-CHT
15	FR-A740-15K-CHT	250	FR-A740-250K-CHT
18.5	FR-A740-18.5K-CHT	280	FR-A740-280K-CHT
22	FR-A740-22K-CHT	315	FR-A740-315K-CHT
30	FR-A740-30K-CHT	355	FR-A740-355K-CHT
37	FR-A740-37K-CHT	400	FR-A740-400K-CHT
45	FR-A740-45K-CHT	450	FR-A740-450K-CHT
55	FR-A740-55K-CHT	500	FR-A740-500K-CHT