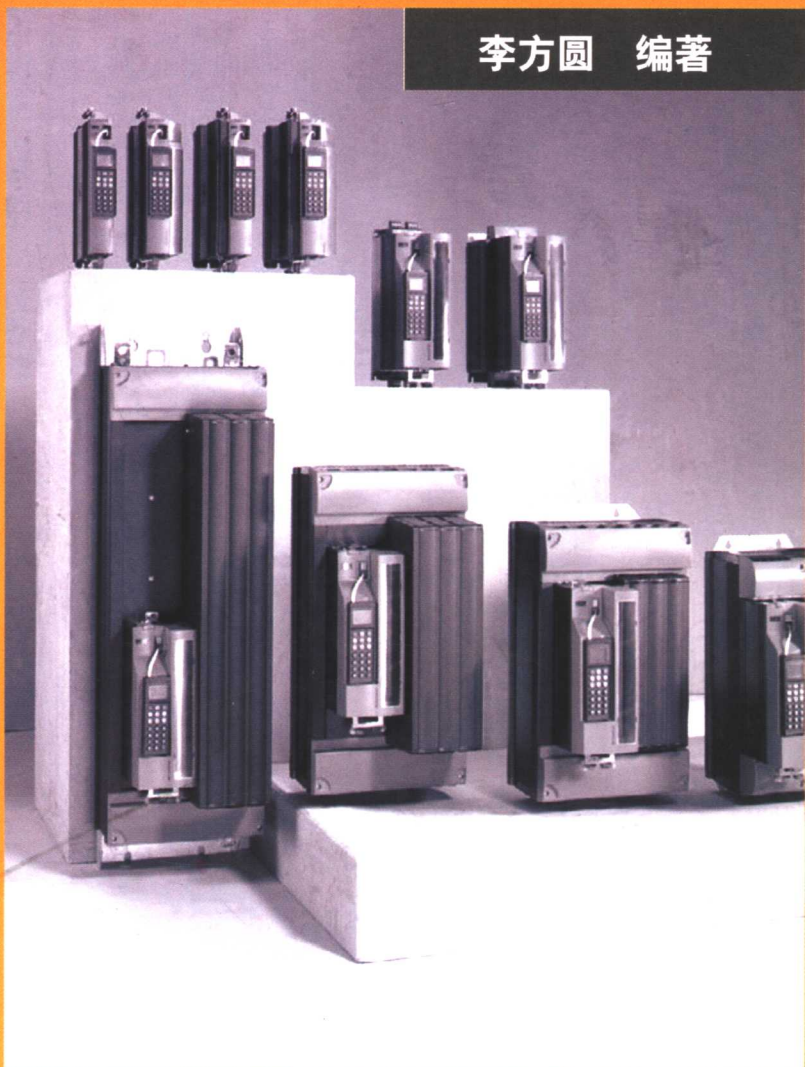
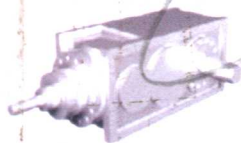
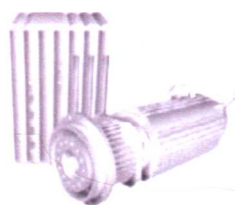
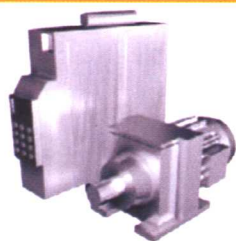




DIANPINQI HANGYE YINGYONG SHIJIAN

变频器行业应用实践

李方圆 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

变频器行业应用实践

李方圆 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内容提要

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的调速原理与结构分析、变频器的方式设置与功能分析、变频器行业应用的设计原理,以及变频器在通用机械行业、在轻工业、在重工业中、在公用事业和民用产品中的应用。本书最大的特点是将行业应用进行分类,结合生产工艺和机械装备的实际,对变频器的使用范围、工作原理及行业应用经验进行介绍,并力图将变频器行业应用所涉及的方方面面以言简意赅的方式呈现给读者。书中列举了大量不同类型变频器的实际应用方案及其参数设置,还以翔实的列表数据说明了变频器行业应用的效果和产生的社会效益。

本书可供变频器的销售与技术服务人员、厂矿设计院等企事业单位的相关电气技术人员以及大专院校的师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

变频器行业应用实践/李方园编著. —北京:中国电力出版社,
2006

ISBN 7-5083-4046-9

I. 变… II. 李… III. 变频器—应用—研究 IV. TN773

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 001230 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2006 年 5 月第一版 2006 年 5 月北京第一次印刷

1000 毫米×1400 毫米 B5 开本 48.5 印张 998 千字

印数 0001—3000 册 定价 74.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前 言



变频器是对交流电动机（异步电动机或同步电动机）进行转速调节的驱动装置，是目前公认的交流电动机最理想、最有前途的调速装置。它具有卓越的调速性能、显著的节能作用和优秀的工艺控制方式，是广大企业进行设备技术改造和传动产品更新换代的理想装置。

自 20 世纪七八十年代被引进我国以来，变频器经历了从低级到高级、从低容量到高容量、从手动控制到自动控制的过程，已经作为节能应用与速度工艺控制中越来越重要的自动化设备，并在实际生产中得到了快速发展和广泛的应用。无论是在通用机械、轻工业、重工业，还是在公用事业和民用产品中，变频器都在发挥着重要的作用。

作者自 1995 年至今一直从事变频器的设计和应用工作，并长期追踪国内外变频器技术的最新发展，在变频器的设计和应用方面获得了一定的经验，在变频器行业企业家论坛等学术会议和《变频器世界》等行业杂志上已经发表论文超过 50 篇。本书是作者在多年来的实践经验基础上，参考最新的国内外技术资料，编著的一本变频器在行业上的应用实践手册，力图为广大从事变频器应用的变频器销售与技术服务人员、厂矿设计院等企事业单位的电气技术人员和相关院校的师生提供一本实用的技术参考书。

本书共分七章。第一章主要介绍变频器的调速原理和结构分析，内容包括交流电动机的调速方式和变频调速原理、变频器的主电路和控制电路结构，以及中高压变频调速原理。第二章主要介绍变频器的方式选择，包括变频器的控制方式、频率给定方式、命令通道方式、起制动方式以及各种运行方式。第三章主要介绍变频器的设计原理，并从转速设计、PID 设计、张力设计、通信设计、制动设计及行业专用变频器等方面介绍了变频器的具体控制原理和应用案例。第四章主要介绍在通用机械上变频器的基本概念和使用原理。第五章主要介绍变频器在包括造纸行业、印刷包装行业、纺织行业、塑料行业等轻工行业中的应用。第六章主要介绍变频器在冶金及金属加工、石油石化、电力能源、机械加工、起重等重工业方面的应用。最后，在第七章里介绍了变频器在交通、水工业、中央空调和 HVAC、电梯等公用事业和民用产品中的应用。

本书具有下列主要特点：① 简明扼要地阐述了变频器的原理和应用技术，并以此为前提结合实际工程案例，使理论在案例中得到验证；② 以“变频器原理 - 变频器功能 - 变频器设计 - 变频器应用”为主线，由浅入深地介绍了变频器在行业上的实际应用案例；③ 以“通用机械”、“轻工业”、“重工业”、“公用事业和民

用产品”4块涵盖所有变频器应用行业，条理分明，行业分类清晰，案例突出；④在应用中将生产工艺、技术装备等变频器的应用背景进行了介绍，以方便用户理解，使得变频器的作用和需要性在行业中更加突出。

在本书的编写过程中，得到了张永惠教授的大力支持，许多变频器厂商及相关人员也提供了相当多的典型案例和维护经验，同时，在本书的编写中曾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，作者在此一并致谢。

由于水平有限，书中难免存在疏漏、不足和错误，恳请广大读者批评指正，作者将不胜感谢。随着变频器应用的日渐增多和变频器技术的发展，如果您有好的应用案例或者想更正书中的案例以及有需要商讨的任何细节，都烦请致信作者。希望本书能成为变频器行业应用的交互平台、实践基地！

编者

目 录



前言

第一章 变频器的调速原理和

结构分析 1

- 第一节 交流电动机的调速
方式 1

- 第二节 异步电动机变频调速的
控制原理 9

- 第三节 同步电动机变频调速的
控制原理 23

- 第四节 变频器的主电路和
功率器件 33

- 第五节 变频器的控制电路和
算法分析 50

- 第六节 变频器的分类和发展
趋势 56

- 第七节 变频器对电网和电动机
的影响 64

- 第八节 中高压变频器的拓扑结构和
控制原理 73

第二章 变频器的方式设置和

功能分析 84

- 第一节 变频器的控制方式 84

- 第二节 变频器的频率给定
方式 103

- 第三节 变频器的运转指令
方式 112

- 第四节 变频器的启动和制动
方式 116

- 第五节 变频器的运行方式 132

- 第六节 变频器的适应负载
方式 139

- 第七节 变频器的端子功能、安装
接线及电磁兼容性问题
..... 148

- 第八节 变频器的调试监控和
故障处理 166

第三章 变频器行业应用的

设计原理 183

- 第一节 变频调速系统的基本
特性 183

- 第二节 变频调速系统的转速
设计 196

- 第三节 流体工艺的变频系统
设计 203

- 第四节 张力控制的变频系统
设计 209

- 第五节 变频器的通信设计 220

- 第六节 变频器的制动设计 249

- 第七节 行业专用变频器的应用
设计 262

- 第八节 变频控制柜的设计 284

第四章 变频器在通用机械行业中

的应用 292

- 第一节 通用机械与变频器 292

- 第二节 泵的变频器应用 298

- 第三节 风机的变频器应用 315

- 第四节 压缩机的变频器应用
..... 331

第五节 分离机械的变频器	
应用	352

第五章 变频器在轻工业中的应用

369

第一节 变频器在造纸行业的应用	369
第二节 变频器在纸塑加工和印刷包装行业的应用	401
第三节 变频器在纺织印染行业的应用	441
第四节 变频器在塑料行业的应用	491
第五节 变频器在其他轻工行业的应用	508

第六章 变频器在重工业中的应用

517

第一节 变频器在冶金行业的应用	517
第二节 变频器在石油石化行业的应用	579
第三节 变频器在煤炭和电力行业的应用	

应用	595
第四节 变频器在机械加工设备上的应用	608
第五节 变频器在起重设备上的应用	619
第六节 变频器在其他重工业中的应用	648

第七章 变频器在公用事业和民用产品中的应用

659

第一节 变频器在交通行业的应用	659
第二节 变频器在水工业中的应用	674
第三节 变频器在中央空调和采暖通风空调 (HVAC) 系统的应用	715
第四节 变频器在电梯中的应用	735
第五节 变频器在其他民用产品中的应用	761

参考文献

767

第一章 变频器的调速原理 和 结 构 分 析

第一节 交流电动机的调速方式

目前较常用的交流电动机有两种：一是交流异步电动机，二是交流同步电动机。前者为最常用的。中国各类电动机的装机容量已超过 4 亿 kW，其中异步电动机约占 90%。

一、异步电动机和同步电动机的概念

(一) 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° 的，三相异步电动机定子中的 3 个绕组在空间方位上也互差 120° ，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。三相异步电动机原理如图 1-1 所示。在图 1-1 中，分 4 个时刻描述了旋转磁场的产生过程。电流每变化一个周期，旋转磁场在空间也旋转一周，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

$$n = 60f/p \quad (1-1)$$

式中 f ——电源频率；

p ——磁场的磁极对数；

n ——转速 (r/min)。

根据式 (1-1) 我们知道，电动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（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，我们称这种结构的三相电动机为异步电动机。

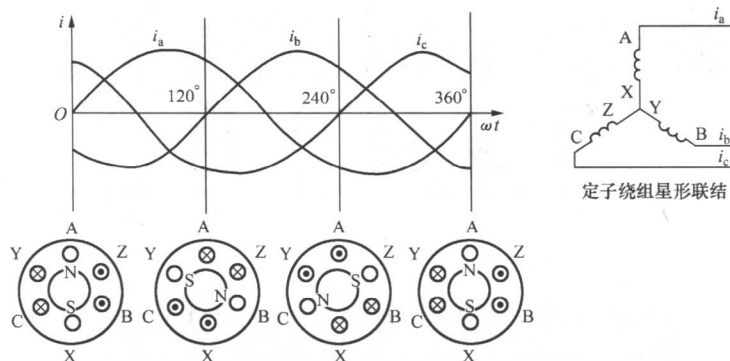


图 1-1 三相异步电动机原理

(二) 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 1-2 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。

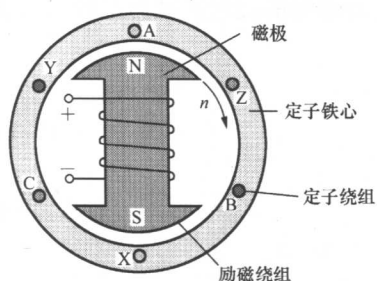


图 1-2 转场式同步电动机的结构模型

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 1-2 中用 3 个在空间错开 120° （电角度）分布的线圈 AX、BY、CZ 代表三相对称交流绕组。

(三) 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而言就要逊色得多，于是不得不借助其他手段达到调速的目的。根据异步电动机的转速特性表达式可知，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，如变极调速、串级调速、定子调

压调速、转子串电阻调速、电磁离合器调速、变频调速、液力耦合器调速、液粘离合器调速等,如图1-3所示。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,不增加转差损耗,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耗,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。

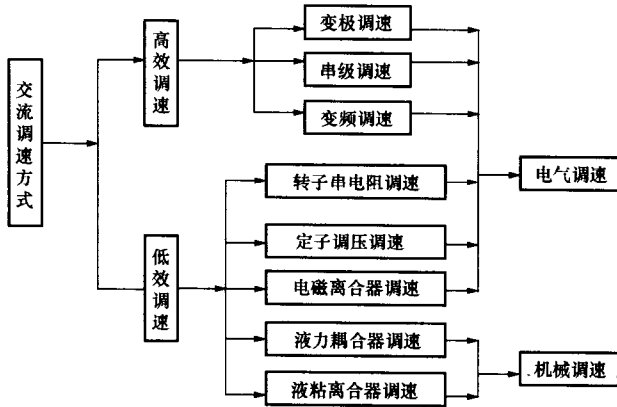


图 1-3 交流电动机常用的调速方法

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,向负载传递转矩和输出转速。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异步电动机与工作机械之间,在电动机恒速运行的情况下,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。

二、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3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（见图1-4），图1-4a的 $p=2$ ，图1-4b和图1-4c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转子电动机，通常称为多速异步电动机或变极异步电动机。

多速电动机的优点是运行可靠，运行效率高，控制电路很简单，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挡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。

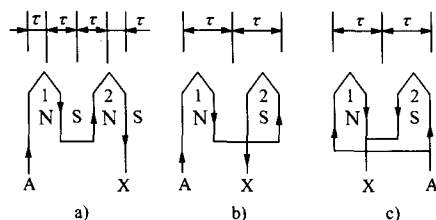


图1-4 定子绕组改接变极对数示意

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

三、电磁离合器调速

电磁离合器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异步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，主要由笼型异步电动机、涡流式电磁转差离合器和直流励磁电源等部分组成（见图1-5）直流励磁电源功率较小，通过改变晶闸管的触发延迟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之间没有机械联系，只有磁路相通。离合器的主动部分为电枢，从动部分为磁极，电枢是一个杯状铸铜体，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。

电磁离合器的优点是结构简单、可无级调速、维护方便、运行可靠、调速范围宽、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、提高电动机运行负载率；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。电磁离合器适用于调速范围适中的中小容量电动机。

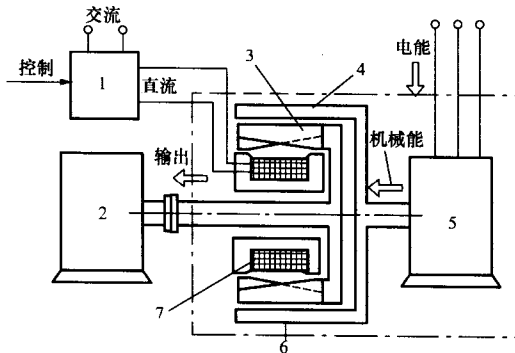


图 1-5 电磁调速系统示意图

- 1—直流励磁电源 2—负载 3—磁极 4—电枢 5—笼型异步电动机
6—涡流式电磁转差离合器 7—励磁绕组

四、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电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，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。与转子串电阻调速相比，串级调速的优势主要是效率高。

五、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，在调速过程中，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二次方成正比，因此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。电网供电的电压是固定的，所以，一般是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，主要用于笼型异步电动机的减压起动，以减少起动电流。晶闸管控制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触发延迟角来调节转速，可以做到无级调速。

定子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。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；对电网干扰大。定子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。

六、转子串电阻调速

转子串电阻调速是通过改变绕线转子异步电动机转子串联外接附加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转子异步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3个集电环彼此短接起来。

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。转子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。

七、变频调速

U/f 恒定、速度开环控制的通用变频调速系统和滑差频率速度闭环控制系统，基本上解决了异步电动机平滑调速的问题。然而，当生产机械对调速系统的动/静态性能提出更高要求时，上述系统还是比直流调速系统略逊一筹。原因在于，其系统控制的规律是从异步电动机稳态等效电路和稳态转矩公式出发推导出的稳态值控

制,完全不考虑过渡过程,系统在稳定性、起动及低速时转矩动态响应等方面的性能尚不能令人满意。

考虑到异步电动机是一个多变量、强耦合、非线性的时变参数系统,很难直接通过外加信号准确控制电磁转矩,但若以转子磁通这一旋转的空间矢量为参考坐标,利用从静止坐标系到旋转坐标系之间的变换,则可以把定子电流中励磁电流分量与转矩电流分量变成标量独立开来,进行分别控制。这样,通过坐标系变换重建的电动机模型就可等效为一台直流电动机,从而可像直流电动机那样进行快速的转矩和磁通控制,图1-6 转子串电阻调速电路即矢量控制。

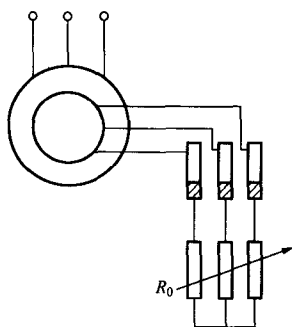


图1-6 转子串电阻调速电路

和矢量控制不同,直接转矩控制屏弃了解耦的思想,取消了旋转坐标系变换,简单地通过检测电机定子电压和电流,借助瞬时空间矢量理论计算电机的磁链和转矩,并根据与给定值比较所得差值,实现磁链和转矩的直接控制。

尽管矢量控制与直接转矩控制使交流调速系统的性能有了较大的提高,但是还有许多领域有待研究,如磁通的准确估计或观测、无速度传感器的控制方法、电机参数的在线辨识、极低转速包括零速下的电机控制、电压重构与死区补偿策略、多电平逆变器的高性能控制策略等。

由于工业生产的发 展,冶金轧机、电气机车、电梯等的出现要求传动电动机能快速正反转、起动转矩大、快速制动、停位准确、调速范围大、精确度高、响应快,因此在传统调速中一直采用直流电动机,而且运行了几十年。但由于直流电动机的换向器及电刷在大容量方面问题较多,而且维护量大,因此,1970年以后已逐步被交流同步电动机及异步电动机变频调速代替。

与直流电动机相比,交流变频调速具有下列优点:

1. 单机容量不受限制

众所周知,直流电动机由于换向能力限制了其容量和速度,极限容量和速度之积为 $106\text{kW} \cdot \text{r/min}$,如厚板轧机主传动直流电动机功率为 $2 \times 800\text{kW}$ ($50/100\text{r/min}$)时已达到极限值;而交流电动机单机容量突破这一限制,达到 $2 \times 11000\text{kW}$,为设备提供更大动力。

2. 体积小,重量轻,占地面积小

交流电动机结构简单,体积小,重量轻,占地面积小;而直流电动机不仅单机体积大,为减少转动惯量,还常采用双电枢串联方式,占地面积很大。例如,日本某钢厂用交流变频同步电动机替代原三电枢直流电动机,电动机功率同为 1125kW ,交流电动机仅用了原直流电动机占地面积的 $1/3$ 。交流电动机由于结构简单、坚固,因此有可能与机械合为一体,形成机电一体化产品。例如,轧钢机地下卷取芯棒可作为同步电动机的转子。

3. 转动惯量小

以某钢铁厂 2050mm 热连轧机为例，直流主传动电动机为 $2 \times 450\text{kW}$ (250/578r/min) 双电枢传动，转动惯量为 $76.8\text{t} \cdot \text{m}^2$ ，而交流主传动电动机为 9000kW (250/578r/min) 单电枢传动，转动惯量为 $17.2\text{t} \cdot \text{m}^2$ ，仅为直流电动机的 1/4.5。

4. 动态响应好

由于交流电动机转动惯量大大减小，而且交流电动机没有换向火花对过载能力的限制，电动机可以具有更大动态加速电流，因此，交流变频同步电动机较直流电动机有更好的动态响应特性，如某钢铁厂 2050mm 热连轧机交流电动机把速度响应时间由原来的 120ms 提高到了 80ms。

5. 维护简单化

由于交流电动机无需换向器，维护量大大减小，相比而言德国厚板轧机直流主传动年维修量为 145h，而采用交流传动后只需 36h，仅为直流传动的 1/4。

6. 节约能源

交流同步电动机的效率比直流电动机提高 2% ~ 3%，以某钢铁厂 1150 初轧机改造为例，原直流传动容量为 $2 \times 4500\text{kW}$ ，功率消耗为 $2 \times 343\text{kW}$ ，冷却水消耗为 $2 \times 110\text{t/h}$ ；而采用交流传动，电动机容量增大到 $2 \times 5000\text{kW}$ ，冷却水消耗仅为 $2 \times 59\text{t/h}$ ，仅为原直流电动机的 54%。采用交流电动机后，每吨钢电耗节约 15% 以上，而产量则提高 30%。

八、调速方式汇总

各种调速方式的一般性能和特点见表 1-1。

表 1-1 各种调速方式的一般性能和特点

调速方式	调速方法	调速性质	调速范围 (%)	响应能力	电网干扰	节电效果	初始投资	故障处理	安装条件	适用范围
转子串电阻	改变转子串联电阻	有级	50 ~ 100	差	无	中	低	停车	易	绕线转子异步电动机
定子调压	改变定子输入电压	无级	80 ~ 100	快	大	中	较低	不停车	易	绕线转子异步电动机、笼型异步电动机
电磁离合器	改变离合器励磁电流	无级	10 ~ 80	较快	无	中	较高	停车	较易	笼型异步电动机
液力耦合器	改变耦合器工作腔充油量	无级	30 ~ 97	差	无	中	中	停车	场地	笼型异步电动机、同步电动机

续表

调速方式	调速方法	调速性质	调速范围 (%)	响应能力	电网干扰	节电效果	初始投资	故障处理	安装条件	适用范围
液粘离合器	改变离合器摩擦片间隙	无级	20 ~ 100	差	无	中	较低	停车	场地	笼型异步电动机、同步电动机
变极	改变定子极对数	有级	2, 3, 4 挡转速	快	无	高	低	停车	易	笼型异步电动机
串级	改变逆变器的逆变角	无级	50 ~ 100	快	较大	高	中	停车	易	绕线转子异步电动机
变频	改变定子输入频率和电压	无级	5 ~ 100	快	有	高	高	不停车	易	异步电动机、同步电动机

第二节 异步电动机变频调速的控制原理

三相异步电动机和三相同步电动机，它们的转速 n 公式为

$$n_0 = 60f/p \quad (\text{同步电动机})$$

$$n = n_0(1-s) = 60f/p(1-s) \quad (\text{异步电动机}) \quad (1-2)$$

式中 f ——频率；

p ——极对数；

s ——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频率 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。近二十多年来，由于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输入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。如果输入电压不变，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 φ (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。

一、感应电动机稳态模型及基于稳态模型的控制方法

(一) 感应电动机稳态模型

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),感应电动机的稳态模型可以用T形等效电路表示,如图1-7所示。

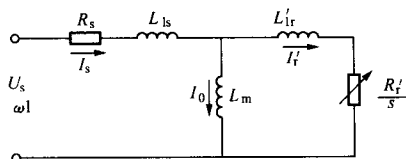


图 1-7 感应电动机 T 形等效电路

图 1-7 中的各参数定义如下:

R_s 、 R_r' ——定子每相电阻和折算到定子侧的转子每相电阻;

L_{ls} 、 L_{lr}' ——定子每相漏感和折算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 、 ω_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,得到图 1-8 所示的简化等效电路。

电流公式可表示为

$$I_s \approx I_r' = \frac{U_s}{\sqrt{\left(R_s + \frac{R_r'}{s}\right)^2 + \omega_1^2 (L_{ls} + L_{lr}')^2}} \quad (1-3)$$

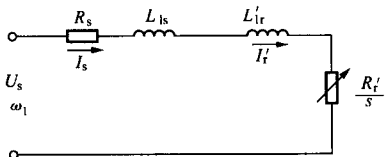


图 1-8 感应电动机简化等效电路

感应电动机传递的电磁功率 $P_m = 3I_r'^2 R_r' / s$, 同步机械角转速 $\omega_{m1} = \omega_1 / n_p$, 则感应电动机的电磁转矩为

$$T_e = \frac{P_m}{\omega_{m1}} = \frac{3n_p I_r'^2 \frac{R_r'}{s}}{\omega_1 \left[\left(R_s + \frac{R_r'}{s}\right)^2 + \omega_1^2 (L_{ls} + L_{lr}')^2 \right]} \quad (1-4)$$

感应电动机每极气隙磁通为

$$\Phi_m = \frac{E_g}{4.44f_1 N_s k_{Ns}} \approx \frac{U_s}{4.44f_1 N_s k_{Ns}} \quad (1-5)$$

式中 E_g ——气隙磁通在定子每相中感应电动势的有效值;

f_1 ——定子频率;

N_s ——定子每相绕组串联匝数;

k_{Ns} ——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 $U_s \approx E_g$ 。

将式(1-4)对 s 求导,并令 $\frac{dT_e}{ds} = 0$, 可求出对应于最大转矩时的临界静差为