

CONG RUMEN
DAO GAOSHOU

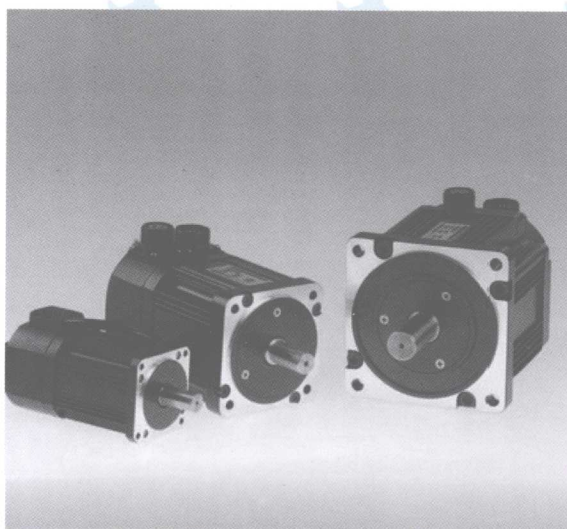
电工高技能人才
从入门到高手 系列书



初级工入门的向导
中级工进步的阶梯
高级工的必修课
技师手中的有利工具
高级技师授课的实用教材

交流调速系统 应用与维修

宋家成 张东亮 张春雷 段俊龙 主编



 中国电力出版社
www.cepp.com.cn

电工高技能人才从入门到高手系列书

交流调速系统 应用与维修

宋家成 张东亮 张春雷 段俊龙 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是《电工高技能人才从入门到高手系列书》之一。本书结合生产实际,着重介绍了变频调速的基本原理和控制电路。同时对交流调速中的一些新技术和新理论进行了详细介绍。

本书共分七章,分别介绍了交流调速系统的组成、特点及性能比较,调压、调阻、调磁调速,绕线式异步电动机的串级调速,变频调速,变频器的应用与维修,无换向器电动机调速,“四新推广站”矢量控制与直接转矩控制技术等基本内容。

为了使读者真正看懂弄通,考虑到本书的读者对象是工人,本书力求文字通俗易懂,图文并茂,引用技术数据实用、准确,从而达到直观性、可操作性、科学性、完整性、系统性、知识性的统一。

本书可供维修电工和常用电动机检修工的初级工、中级工、高级工及技师、高级技师阅读学习,是青年工人自学电气维修技术的理想用书。

图书在版编目(CIP)数据

交流调速系统应用与维修/宋家成等主编. —北京: 中国电力出版社, 2008

(电工高技能人才从入门到高手系列书)

ISBN 978-7-5083-7649-3

I. 交… II. 宋… III. 交流电机-调速 IV. TM340.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 094590 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>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 1 月第一版 2009 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13 印张 326 千字

印数 0001—3000 册 定价 25.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

《电工高技能人才从入门到高手系列书》

编 委 会

主 任 宋家成

副 主 任 张春雷 李祥新

编 委 (按姓氏笔画排列)

于文磊 王 艳 朱 昱 张东亮

宋 宇 安学立 宋家成 张 勇

张春雷 李祥新 尚红卫 郝 健

段俊龙 游国祖 韩鸿鸾 薛文介

《交流调速系统应用与维修》

编 写 组

主 编 宋家成 张东亮 张春雷 段俊龙

编写人员 王延华 蒋东晖 肖明运 李清玲

刘 丽 曾宪禄

主 审 蒋 立

编写说明

一、读者对象和编写目的

本系列书主要针对：

- (1) 维修电工初级、中级、高级、技师、高级技师 5 个级别。
- (2) 常用电机检修工初级、中级、高级、技师、高级技师 5 个级别。

重点内容为上述两个工种国家职业标准中的实用技术部分，主要目的是让读者学到一些真正的实用技术、操作和修理技能。因为这两个工种的国家标准中，交叉内容较多，因此在编写中特别注意分配了各分册的内容，两个工种的读者在选择时，可根据自己的需要选购。

本系列书可作为：初级工入门的向导、中级工进步的阶梯、高级工的必修课、技师手中的有利工具、高级技师授课的实用教材。

二、编写方法和内容

《电工高技能人才从入门到高手系列书》共七册，分别为《常用电工电子器件基本知识》、《电机选用安装与故障检修》、《常用机电设备电气维修》、《电机绕组重绕与改绕》、《直流调速系统应用与维修》、《交流调速系统应用与维修》、《数控机床电气维修》。

虽然本系列书按《维修电工》和《常用电机检修工》的国家职业标准编写，但绝不是仅为应付考试而简单整理的习题和答案。而是对每一个命题都遵循从易到难、从理论到实际操作和维修技术、从初级到高级、从基础到高级复杂技术这样的顺序编写的，目的是让读者能学到真正的技术，掌握真正的技能。考虑到技术工人考工定级问题，每个命题都从低级到高级作了详细论述，只要充分理解这些内容，答案都包含在里边。

本系列书不是以工人技术等级划分，而是以命题来分册的。也就是说一个或几个相近的命题分在一册。这样的分册方法不仅有利于读者学习阅读，而且还可以节约资金。例如，在高级工技能要求中，维修电工电路测绘技术，有继电接触控制电路的测绘。而在技师技能要求中，应能够测绘具有双面印刷线路的电子线路板，并绘出原理图。如果按等级分册，读者想学习电路测绘技术，就必须买两本书，而且学习的思路容易断档。而按命题分册，只要读者买一本书就可以把继电接触、单面和双面印制电路板测绘技术一气学完。这样可使学习思路不断档而且还能省钱。

为了使读者真正看懂弄通，考虑到本系列书的读者对象是工人，参与编写的大学教授、博士、工程技术人员和高级技师等人员特将高深的理论和复杂的技术用最通俗的语言写出来，使本系列书自始至终保持着通俗易懂的编写风格。

三、“四新”推广站和“绝技绝活”

部分分册在最后一章设立了“四新”推广站和“绝技绝活”。“四新”推广站主要是介绍和跟踪国内、国际最新出现的新工艺、新材料、新技术、新设备。使读者能紧跟不断发展的技术水平和知识，学习到国内、国际的“四新”技能。

随着数字技术、电力电子技术的快速发展,各种高性能微处理器的应用,使交流调速迅速步入全数字化进程。目前,以各种电力半导体器件构成的变频器驱动交流电动机的调速系统,有替代直流电动机调速系统的趋势。由于交流调速系统不断显示出优越性和巨大的社会效益及经济效益,从而使交流电动机变频调速系统具有越来越旺盛的生命力。近期交流调速技术不断地向各个控制领域延伸,应用范围不断扩大,已成为当今的技术热点之一,为使读者能尽快理解和掌握这门技术,并能较好地应用,我们编写了《交流调速系统应用与维修》一书。《交流调速系统应用与维修》是《电工高技能人才从入门到高手系列》书之一,读者对象是维修电工初级、中级、高级工及其技师、高级技师。

交流调速的方法很多,有传统的变极调速、调压、调阻、调磁调速、串级调速,也有现代的调压调速、变频调速、无换向器电动机调速及计算机控制调速等。因为一些传统的交流调速设备的社会保有量还相当大,为了使读者有一个较为系统的交流调速的知识,我们简要地编写了传统的交流调速的技术,如变极调速、调压、调阻、调磁调速、串级调速的控制方法和维修技术。但是本书重点介绍了变频器(变频调速)和无换向器电动机的调速。由于这些新技术普及时间比较短,因此有很多维修电工朋友在理解、使用和维修方面遇到了一些困难。根据这种情况,本书用了三章的篇幅介绍了变频调速的基本原理和控制电路,并详细介绍了关于交流调速中的一些新技术和新理论。

本书共分七章,第一章为交流调速系统的组成、特点及性能比较;第二章介绍了调压、调阻、调磁调速方法及性能比较;第三章为绕线式异步电动机的串级调速的特性及调速系统实例;第四章为变频调速,这一章详细介绍了变频调速的基本原理和各种变频调速的基本电路,调试方法和电路维修方法,为第五章进行了铺垫;第五章为变频器的应用与维修;第六章为无换向器电动机的基本原理、特性和常见故障的检修方法;第七章介绍了“四新推广站”矢量控制与直接转矩控制技术。

在交流调速系统中,当前最热门的技术是矢量控制和直接转矩控制技术。但广大维修电工,大部分人还不了解矢量控制和直接转矩控制的基本概念和控制方法,为此,在第七章重点介绍了矢量控制的基本思想与概念。解释了在本书第五章中经常提到的交流电机数字控制技术和 MCS-51、MCS-96 单片机、TMS320C2000DSP 数字信号处理器等芯片,主要是为排除故障,检查芯片提供方便。

为了使读者真正看懂弄通,考虑到本书的读者对象是工人,本书力求文字通俗易懂,图文并茂,引用技术数据实用、准确,有较强的直观性和可操作性,努力做到科学性、完整性、系统性、知识性相统一。

由于编者水平有限,疏漏和错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

Contents 目 录

编写说明	1
前言	1
第一章 概 述	
第一节 交流调速系统的组成、特点及应用	1
一、交流调速系统的组成(1) 二、交流调速系统的特点与应用(2)	
第二节 交流调速方法及性能比较	2
一、交流调速方法(2) 二、性能比较(3)	
第二章 调压、调阻、调磁调速	
第一节 异步电动机调压调速	4
一、调压调速的机械特性(4) 二、调压调速的效率及功率损耗(4) 三、晶闸管移相调压调速(5) 四、晶闸管脉冲调压调速(7) 五、变极调压调速(7)	
第二节 绕线式异步电动机转子串联电阻调速	8
第三节 电磁调速异步电动机调速	9
一、结构特点及工作原理(9) 二、机械特性与调速系统的组成(9)	
第三章 绕线式异步电动机的串级调速	
第一节 串级调速原理及基本类型	11
一、原理(11) 二、基本类型(12)	
第二节 转子整流器	13
一、第一工作状态(13) 二、第二工作状态(15) 三、第三工作状态(16)	
第三节 串级调速的特性	17
一、调速特性(17) 二、转矩特性(18) 三、机械特性(19) 四、机械特性曲线的绘制(21)	
第四节 串级调速系统的效率及功率因数	23
一、效率(23) 二、功率因数(24)	
第五节 串级调速系统主回路主要设备的参数计算与选择	26
一、异步电动机容量的选择(26) 二、转子整流器的参数计算与元件选择(26) 三、逆变器的参数计算与元件选择(27) 四、平波电抗器电感量的计算(28) 五、启动方式的选择(29) 六、继电器接触器控制电路的设计(30)	
第六节 晶闸管低同步串级调速系统实例	31
一、系统的组成及工作原理(31) 二、系统的调试(35) 三、常见故障与维修(38)	
第七节 串级调速系统的其他方案	39
一、纵续控制与差相控制(39) 二、采用强迫换相逆变器的串级调速(40) 三、超同步串级调速(41) 四、机械串级调速(42)	

第四章 变频调速

第一节 变频调速的原理、方法及机械特性	43
一、调速原理(43) 二、调速方法与机械特性(43)	
第二节 交一直一交变频调速	46
一、串电感式电压变频调速(46) 二、具有辅助晶闸管换流的电压型变频调速(49)	
三、串联二极管式电压型变频调速电路(51) 四、串联二极管式电流型变频电路(52)	
第三节 交—交变频调速	56
一、矩形电压波交—交变频调速电路(56) 二、锯齿波电压交—交变频调速(58)	
三、正弦电压波交—交变频电路(59) 四、矩形电流波交—交变频电路(61) 五、正弦电流波交—交变频电路(62)	
第四节 自关断型元件逆变电路	63
一、晶体管斩波调压逆变电路(63) 二、功率 MOSFET 逆变器(64) 三、可关断晶闸管逆变电路(65)	
第五节 晶闸管变频调速的应用实例	67
一、系统组成及工作原理(67) 二、系统的调试与运行(74) 三、常见故障与检修(75)	

第五章 变频器的应用与维修

第一节 概述	76
一、变频器的基本概念(76) 二、变频器的发展过程(77) 三、变频器的应用范围及分类(78)	
第二节 通用变频器结构原理	84
一、电力电子器件(84) 二、变频器电路工作原理(90)	
第三节 通用变频器配套设备的选用	95
一、电源设备的配置(95) 二、交、直流电抗器(99) 三、无线电噪声滤波器(102)	
四、制动电阻单元的选用(103)	
第四节 通用变频器的应用与选择	105
一、通用变频器的主要性能(105) 二、变频器的选择(114) 三、变频器的应用(117)	
第五节 通用变频器的使用安装	122
一、变频器的安装(122) 二、变频器的运行(124)	
第六节 通用变频器的维修	125
一、变频器的维护保养(125) 二、变频器的故障诊断与分析(126) 三、变频器使用和维修的几点经验(131)	

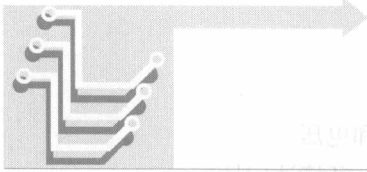
第六章 无换向器电动机调速

第一节 概述	133
一、基本结构(133) 二、工作原理(134)	

第二节 无换向器电动机用各种类型的位置传感器·····	136
一、光电式位置传感器(136) 二、磁敏式位置传感器(136) 三、接近开关式位置传感器(137) 四、谐振式位置传感器(137) 五、高频耦合式位置传感器(138) 六、各种位置传感器的比较(138)	
第三节 无换向电动机的换流·····	139
一、电容强迫换流(139) 二、自然换流(140) 三、断续换流(140) 四、由电流断续换流到反电动势换流的过程(140)	
第四节 无换向器电动机运行特性及调速方法·····	141
一、运行特性(141) 二、调速方法(142)	
第五节 Indramat 无换向器电动机调速系统·····	142
一、系统的组成及工作原理(142) 二、系统的调试与运行(146) 三、常见故障与检修(148)	

第七章 “四新推广站”矢量控制与直接转矩控制技术

第一节 矢量控制概述·····	150
一、交流电动机变频调速与变频控制方式(150) 二、矢量控制理论的提出(152) 三、矢量控制中的坐标变换(153) 四、矢量控制的基本思路与实现(154)	
第二节 交流电动机数字控制技术·····	155
一、模拟与数字电动机控制(155) 二、MCS-51 八位单片机(156) 三、MCS-96 十六位单片机(157) 四、TMS320C2000 DSP 控制器(159) 五、电动机的数字控制(161)	
第三节 异步电动机矢量控制·····	162
一、异步电动机的数学模型(162) 二、异步电动机的几种等效电路(164) 三、异步电动机在不同坐标系上的数学模型(166) 四、异步电动机矢量控制基本方程(168) 五、异步电动机调速数字控制系统结构及软件设计(169)	
第四节 永磁同步电动机矢量控制·····	170
一、概述(170) 二、永磁同步电动机坐标变换(171) 三、永磁同步电动机稳态运行(174) 四、永磁同步电动机矢量控制(175) 五、永磁同步电动机空间矢量 PWM 控制(180) 六、伺服控制系统结构、软硬件设计与特性(183)	
第五节 直接转矩控制技术·····	186
一、直接转矩控制基本原理(186) 二、定子电压矢量与定子磁链(187) 三、直接转矩控制系统(190) 四、无速度传感器直接转矩控制(193)	



第一章

概述

在变频器出现以前，直流调速的性能指标优于交流传动调速系统，故直流调速系统一直在调速领域内居首位。但直流电动机的机械整流器和电刷的故障多，维护保养工作量大，电动机安装环境受到限制和难以向大容量、高转速及高电压方向发展。自 20 世纪 70 年代以来，随着电子技术和自动控制技术的迅速发展以及高性能的电力电子产品的出现，阻碍交流调速技术发展的一些因素相继克服，原直流调速系统领先的一些技术性能，如宽广的调速范围、较高的稳速精度、快速的动态响应和四象运行等方面，交流调速都已与其相媲美；又由于交流电动机本身具有结构简单、坚固耐用、运行可靠和惯性小等优点，可以适应于许多直流调速无法胜任的场合，因此，交流调速在电气传动领域中已越来越占重要的地位，甚至已出现“以交代直”的新局面。

第一节 交流调速系统的组成、特点及应用

一、交流调速系统的组成

交流调速系统是通过功率变换器改变输出电压、电流和频率等参数来给交流电动机提供调速电源进行转速调节的交流拖动系统，如图 1-1 所示。

功率变换器一般用晶闸管、大功率晶体管、功率 MOSFET 等新型功率器件。一般有四种形式：

1. AC/DC

由定压定频的交流电变换为直流的功率变换器，称为顺变器或直流器。

2. DC/DC

由定压直流变换为可调直流电压的功率变换器，称为斩波器，相当于直流脉调压方式。

3. DC/AC

由可调直流电变换为可调频率的交流电，称为逆变器或变频器。

4. AC/AC

由定压定频的交流电变换为可调压调频的交流电，称为循环交变频器。

由前三种组成的功率变换器，称为交一直一交变频器或间接式变频器，它是先将工频交流电通过整流器变成直流电，再经过逆变器，将直流电变换为可控频率的交流电。由第四种组成的功率变换器，称为交—交变频器或直接式变频器，它的主电路由不同的晶闸管整流电路组合而成，在各整流组中，随移相控制角为固定或按正弦规律变化，输出的交流电有方波与正弦波

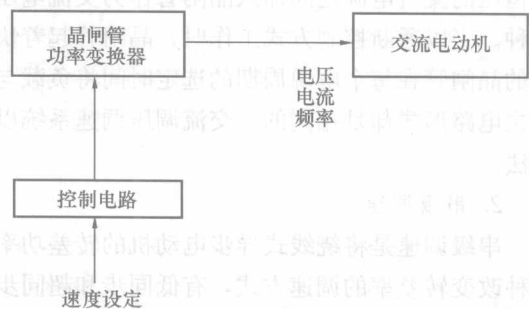


图 1-1 交流调速拖动系统框图



两种波形。

二、交流调速系统的特点与应用

1. 特点

- (1) 可以扩大交流电动机的容量，提高交流电动机的转速和电压。
- (2) 交流电动机结构简单、坚固耐用、经济可靠、惯性小、环境适应性广。
- (3) 故障较少，维护方便。
- (4) 交流调速系统具有同直流调速系统一样好的特性，并且克服了直流调速系统的缺点，同时也充分发挥了交流电动机本身固有的优点。

2. 应用

交流调速系统可以用于高精度、高速化的生产机械，泵、空气压缩机和电梯等无齿轮化的生产机械以及冶金等大容量的生产机械中。另外，交流调速系统还可用于数控机床和机器人用的小功率伺服电动机等。由于交流调速技术独特的优势，因此近年来，在拖动系统中得到了快速的推广。

第二节 交流调速方法及性能比较

一、交流调速方法

交流调速的方法很多，有传统的变极调速、串级调速，也有现代的调压调速、变频调速、无换向器电动机调速、工业计算机控制调速等。

1. 调压调速

调压调速是通过改变交流电动机定子绕组电压进行调速的。晶闸管交流调压是在负载电路与恒压的交流电源之间加入晶闸管作为交流电压的控制器，其控制方式有通断控制和相位控制两种。当以通断控制方式工作时，晶闸管起着快速接触器的作用。在相位控制方式时，作为开关的晶闸管在每个电源周期的选定时间将负载与电源接通。虽然这两种控制方式不同，但它们的主电路形式却是相同的。交流调压调速系统以相位控制方式为主，是一种改变转差率的调速方法。

2. 串级调速

串级调速是将绕线式异步电动机的转差功率回馈到电网的一种比较经济的调速方法，也是一种改变转差率的调速方式，有低同步和超同步两种串级调速方式。低同步串级调速目前应用比较普遍，不仅可以运行在电动状态，还可以运行在再生发电制动状态。

3. 变频调速

变频调速是改变电源频率来改变转速的调速方法，分为交—直—交和交—交变频调速两种方式。它所使用的功率器件已从普通晶闸管发展到快速晶闸管、可关断晶闸管、大功率晶体管和功率 MOSFET 等；控制电路从分立元件向大规模集成电路和微机控制发展。

4. 矢量控制

矢量控制是模拟直流电动机控制特点对交流电动机进行控制的。它是把交流电动机的定子电流分解成磁场定向坐标的磁场电流分量和与之相垂直的转矩电流分量并加以控制，从而使交流电动机获得和直流电动机一样的控制性能。矢量控制有磁场定向式和滑差频率控制式两种。

5. 无换向器电动机

无换向器电动机又称晶闸管电动机。由于它是用位置检测器及晶闸管代替了相当于直流电

动机的电刷和换向器，因此无换向器电动机的原理和特性与直流电动机类似。它实质上是一种自控式变频调速的同步电动机，没有失步现象发生，并具有同步电动机功率因数好的特点，若采用反电动势自然换流方法，可以省去强迫换流电路。

6. 微处理机控制

在交流调速领域中，是以微处理机为核心的控制系统单元，并且具有监视、保护、诊断及自恢复功能。

二、性能比较

各种交流调速系统的性能比较见表 1-1。

表 1-1 各种交流调速系统的性能比较

电动机品种	异步电动机					同步电动机
调速系统名称	调压调速系统	变极调速系统	调磁调速系统	串级调速系统	变频调速系统	无换向器电动机调速系统
调速方式	调定子交流电压	改变定子磁极对数	调离合器励磁电压	调转子电动势	调定子交流频率及电压	无换向器电动机调速系统
功率交换方式	交—交	—	—	转子交—直—交	交—直—交	调电枢电压
运转范围	两象限，四象限	一象限	两象限，四象限	两象限	两象限，四象限	四象限
可逆运转方式	有触点，无触点	有触点	有触点，无触点	有触点	有触点，无触点	无触点
制动运转方式	直流能耗反接	机械	机械	能耗	反接，直流能耗	发电反接
调速范围	1.5:1~10:1	2:1~4:1	3:1~10:1	2:1~4:1	2:1~10:1	零至全速
噪声	小	小	小	小	小	小
体积	较小	小	较小	一般	较大	一般
维护	方便	方便	方便	方便	方便	方便
价格	便宜	最便宜	便宜	较贵	贵	一般
特点及应用	容量小，效率极差，适用于起重机械、泵、风机等负载	控制简单，但为有级调速，适合于机床等转速粗调场合	控制装置简单，价廉，但低速时效率低	中、大容量，适用于恒功率负载	调速范围广，平滑，特别适应多电动机协调运转	调速范围广，适用于要求调速性能及特殊需要（如高转速）等场合

异步电动机的调压、调阻和调磁调速分别是通过改变异步电动机的定子电压，改变转子内串联的电阻大小及控制离合器励磁电流的大小来实现的。这三种调速方式具有装置简单、性能稳定等优点，但它们都属于转差能耗调速方式，其转差功率全部消耗在转子回路中，从而使电动机在低速时发热严重、效率较低。

第一节 异步电动机调压调速

一、调压调速的机械特性

异步电动机在参数恒定及转差率保持不变时，其输出转矩与定子绕组所加电压的平方成正比。异步电动机定子调压时的机械特性如图 2-1 所示。在图 2-1 (a) 中，改变定子电压 U_1 时，电动机的同步转速 n_0 和临界转差率 s_m 都保持不变，最大转矩 M_{max} 与 U_1 的平方成正比。

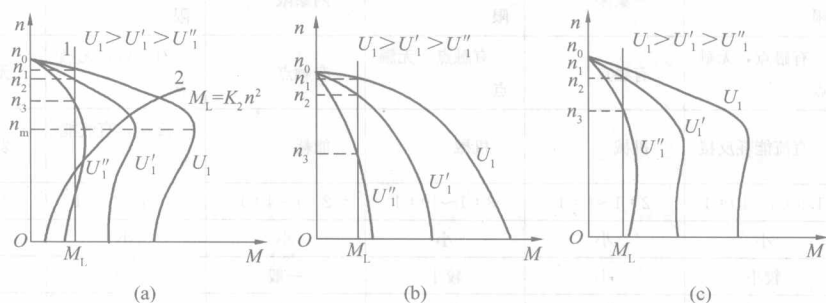


图 2-1 异步电动机定子调压时的机械特性

(a) 普通转子；(b) 高阻转子；(c) 具有频敏特性的转子

对于恒转矩负载特性曲线 1， M_L 为一常数，由于稳定运行段的机械特性较硬，故调速范围窄；对于通风机类负载特性曲线 2， $M_L = K_2 n^2$ ， K_2 为常数，可以获得较低的稳定运行速度和较宽的调速范围。为扩大恒转矩负载时的调速范围并减小低速的转子电流，可在绕线式异步电动机的转子回路中串联适量的电阻或频敏变阻器。图 2-1 (b)、(c) 分别为高电阻转子和具有频敏特性转子的异步电动机调压时的机械特性。对于鼠笼式异步电动机，可将转子鼠笼由铸铝改为电阻率较大的黄铜条作为转子绕组，从而可以获得同样的效果。

二、调压调速的效率及功率损耗

1. 效率

忽略电动机定子与转子的一些损耗，调压调速时的效率 η 可近似写为

$$\eta = 1 - s = \frac{p}{60f_1} n \quad (2-1)$$

式中 s ——转差率；

n ——电动机转速, r/min;

f ——电源频率, Hz;

p ——电动机的极对数。

由式(2-1)可知,在电源频率 f 和极对数 p 不变的情况下,异步电动机调压调速时的效率与其转速成正比,转速越低,效率越低。另外,若在低速时增大极对数 p 可提高效率。

2. 功率损耗

对于不同负载特性,可用下式表示为

$$M_L = Cn^\alpha \quad (2-2)$$

式中 C ——常数;

α ——负载指数, $\alpha=0$ 、1、2 分别表示恒转矩负载、转速与转矩成比例的负载以及转速与转矩平方成比例的负载。

电动机的转差功率损耗系数为

$$\frac{P_s}{P_{2\max}} = s(1-s)^\alpha \quad (2-3)$$

式中 P_s ——电动机转差功率;

$P_{2\max}$ ——电动机的最大机械输出功率。

在不同性质负载时的转差功率系数曲线如图 2-2 所示。由式(2-3)可以看出,当 $s=1/(\alpha+1)$ 时, $P_s/P_{2\max}$ 最大。当 $\alpha=2$ 时,转差功率损耗系数最小。因此,异步电动机的定子调压调速用于转矩与转速的平方成正比的通风机类负载最合适,而对于恒转矩负载则不宜在低速下长期运行。

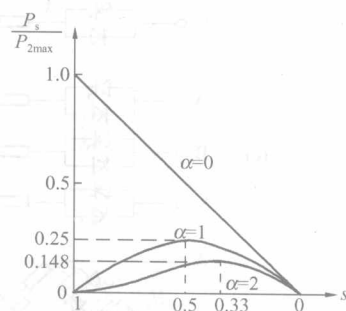


图 2-2 不同性质负载时的转差功率系数曲线

三、晶闸管移相调压调速

1. 晶闸管单相移相调压电路

常用晶闸管单相移相调压电路及特点见表 2-1。

表 2-1 常用晶闸管单相移相调压电路及特点

名称	反并联	混合反并联	二极管桥	混合桥式
电路及波形图				
晶闸管承受的最大电压	正向 $\sqrt{2}U_2$ 反向 $\sqrt{2}U_2$	正向 $2\sqrt{2}U_2$; 反向 0	正向 $\sqrt{2}U_2$ 反向 0	正向 $\sqrt{2}U_2$ 反向 0
晶闸管平均电流	$\frac{\sqrt{2}}{\pi} I$	$\frac{\sqrt{2}}{\pi} I$	$\frac{\sqrt{2}}{\pi} I$	$\frac{\sqrt{2}}{\pi} I$
特点及应用	(1) 输出电压及电流波形对称。 (2) 两个晶闸管触发电路无公共点。 (3) 可用一个双向晶闸管代替。 (4) 适合各种负载	(1) 输出波形正负不对称。 (2) 使用的晶闸管少, 触发电路简单。 (3) 适用于无变压器小容量场合及三相交流调压用	(1) 使用的晶闸管元件少, 触发电路简单。 (2) 可以使用耐压低的管子。 (3) 有二极管压降, 增加损耗。 (4) 为使晶闸管可靠关断, 应选用关断时间短的管子	(1) 触发电路有公共点, 较简单。 (2) 有二极管压降, 增加损耗。 (3) 可以使用耐压低的管子



应用最多的是由两个晶闸管反并联（或由一个双向晶闸管）组成的调压电路。这种调压电路在感性负载下可靠有效工作的条件为移相范围为 $\varphi \leq \alpha \leq \pi$ （其中， φ 为负载的阻抗角）；触发脉冲为宽脉冲或高频脉冲序列，宽脉冲的宽度或高频脉冲序列持续的电角度为 $\pi - \alpha$ 。

2. 晶闸管三相移相调压电路

晶闸管三相移相调压电路是由各种单相移相调压电路（见表 2-1）构成的。常用的三相移相调压电路及其输出波形如图 2-3 所示。

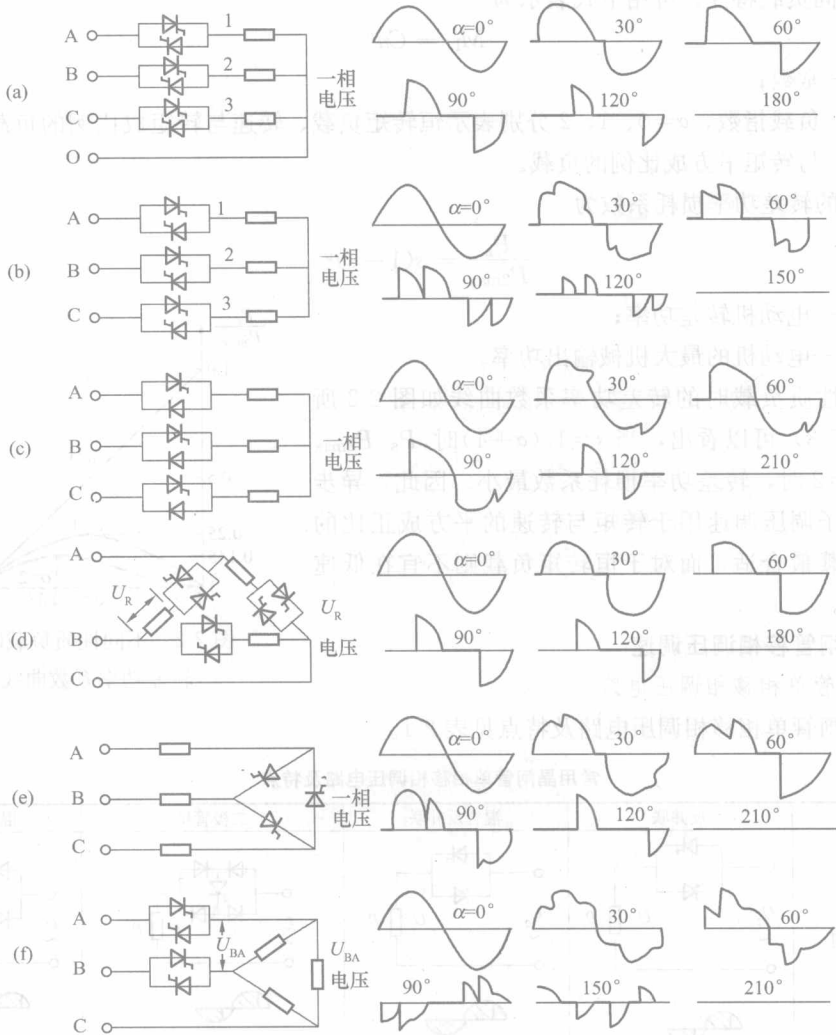


图 2-3 常用的三相移相调压电路及其输出波形

(a) 带中线的星形三相交流调压电路；(b) 不带中线的星形三相交流调压电路；(c) 不带中线的星形三相半控交流调压电路；(d) 三角形接法的交流调压电路；(e) 由三只晶闸管组成的交流调压电路；(f) 晶闸管数量较少的交流调压电路

图 2-3 (a) 是带中线的星形三相交流调压电路，它是三个单相反并联电路组合，每相的工作情况与单相反并联电路相同，要求触发移相为 180° 。这种电路的缺点是存在三次谐波和高次谐波电流，三次谐波占的比例较大，且同相位。在中线中有较大的三次谐波电流，对供电电网