

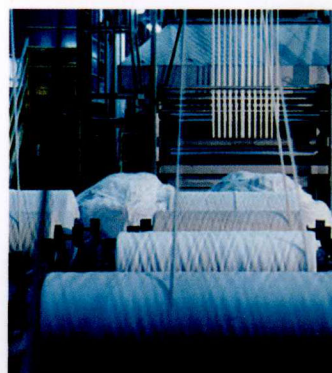


Rockwell
Automation

罗克韦尔自动化技术丛书

AB变频器 及其控制技术

主 编 孙 刚 张 涛
副主编 唐继英 汤荣秀



本书主要介绍了变频调速技术的基本概念,常用电力电子器件的结构和特性,通用变频器的结构组成以及工作原理,以美国罗克韦尔自动化公司出品的 PowerFlex 40 变频器为主线,系统地介绍了该型号变频器的基本操作、功能设置、控制电路设计、PLC 的控制以及采用 DeviceNet 网络的控制功能。

本书本着“够用为度、循序渐进”的原则,将电力电子技术、变频器的知识相融合,并引入基于 PLC、工业网络对变频器控制的论述,使大家对变频器的使用有一个全面的了解。

本书可以作为高职高专院校自动化类专业的教学用书和 AB 品牌变频器培训教材,也可供工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

AB 变频器及其控制技术/孙刚,张涛主编. —北京:机械工业出版社,2012.1

罗克韦尔自动化技术丛书

ISBN 978-7-111-37125-0

I. ①A… II. ①孙…②张… III. ①变频器—电气控制 IV. ①TN773

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 006885 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:张沪光

版式设计:霍永明 责任校对:张晓蓉

封面设计:鞠 杨 责任印制:杨 曦

北京双青印刷厂印刷

2012 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·13.75 印张·337 千字

0 001—4 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-37125-0

定价:34.00 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

销售二部:(010)88379649

教材网:<http://www.cmpedu.com>

读者购书热线:(010)88379203

封面防伪标均为盗版

前 言

随着电力电子技术的发展，基于变频器对电动机调速的技术已在各行各业中得到了广泛的应用。美国罗克韦尔自动化公司是全球领先的工业自动化解决方案供应商，变频器也是其主要产品之一。随着罗克韦尔自动化大学项目的不断推进，很多院校已经把 AB 品牌的变频器产品引入到教学中。鉴于市面上关于 AB 品牌变频器的书籍凤毛麟角，为方便教学，在多次修订的讲义基础上编写了此书。

本书共分为 8 章。第 1 章主要介绍了常用的电动机调速技术，通过对比，使我们对变频器调速有一定的认识；第 2 章主要介绍了常用的电力电子器件的结构、特性和使用方法以及通用变频器的结构组成和工作原理；第 3 章主要介绍了 AB 品牌的 PowerFlex 40 系列变频器操作面板的使用、参数设定方法等基本知识；第 4 章主要介绍了 PowerFlex 40 系列变频器的起动、停止控制方式，频率给定基本功能参数的设置和多段速、PID、加减速控制等高级功能参数的设置；第 5 章主要介绍了变频调速控制电路的控制方式及设计方法；第 6 章主要介绍了基于 AB 品牌 MicroLogix PLC 对变频器的控制功能；第 7 章主要介绍了变频器的安装、调试、维护与维修的基本知识；第 8 章主要介绍了基于 DeviceNet 网络对变频器的控制功能。

在本书的编写中，唐继英编写了第 1、2 章，孙刚编写了第 3、4、5 章和附录 A，汤荣秀编写了第 6 章，张涛编写了第 7、8 章和附录 B、C，还有李金霞、韩春贤也参加了编写，全书由孙刚统稿。在编写过程中，罗克韦尔自动化公司大学项目部的李磊先生、吕颖珊小姐给予了大力支持和帮助，在此表示感谢。对在罗克韦尔自动化实训室辛勤工作的平乐民、陈将、刘赛、种庆丰、高超等同学表示感谢。

由于编者水平有限，特别是对 AB 品牌变频器在实际应用中的积累很不够，书中难免出现错误和不妥之处，敬请广大读者批评指正。

作者
2011 年 6 月

目 录

前言

第 1 章 变频调速技术概述	1
1.1 直流电动机调速	1
1.2 交流电动机调速	1
1.2.1 三相交流异步电动机的调速方式	2
1.2.2 交直流调速比较	5
1.3 变频调速	5
1.3.1 变频调速发展简史	5
1.3.2 交流电动机变频调速的特点	6
习题一	7
第 2 章 通用变频器的基础知识	8
2.1 变频器常用开关器件	8
2.1.1 电力电子器件的基本模型	8
2.1.2 功率二极管	9
2.1.3 晶闸管	9
2.1.4 门极关断晶闸管	11
2.1.5 功率晶体管	11
2.1.6 功率场效应晶体管	12
2.1.7 绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)	13
2.2 通用变频器的基本结构	14
2.2.1 主电路结构与工作原理	15
2.2.2 变频器的控制电路	25
2.3 变频器的分类与发展趋势	27
2.3.1 变频器的分类	27
2.3.2 主流变频器制造厂商及型号	28
2.3.3 新型通用变频器的发展趋势	29
习题二	30
第 3 章 PowerFlex 变频器的基本操作	32
3.1 罗克韦尔 PowerFlex 系列变频器简介	32
3.1.1 PowerFlex 系列变频器的优点	32
3.1.2 PowerFlex 系列变频器的部分产品	33
3.2 认识 PowerFlex 40 变频器	35
3.2.1 PowerFlex 40 变频器的外观	36
3.2.2 PowerFlex 40 变频器的主要特点	37
3.2.3 PowerFlex 40 变频器的产品目录号	37
3.3 PowerFlex 40 变频器的安装与接线	38
3.3.1 打开机盖	38

3.3.2 安装注意事项	39
3.3.3 最小安装距离	39
3.3.4 接地要求	39
3.3.5 熔断器和断路器的使用	40
3.3.6 起动、停止电动机的要求	40
3.4 PowerFlex 40 变频器的接线端子	40
3.4.1 主电路接线端子	40
3.4.2 控制回路接线端子	42
3.5 PowerFlex 40 变频器操作面板的使用	44
3.5.1 操作面板的外观和菜单分组的说明	44
3.5.2 PowerFlex 40 变频器 LED 指示灯状态的说明	44
3.6 PowerFlex 40 变频器的参数设置	45
3.6.1 变频器的参数分组	45
3.6.2 PowerFlex 40 变频器的参数设置方法	47
3.7 变频器的选用	48
3.7.1 变频器的分类	48
3.7.2 选择变频器的类型	49
3.7.3 选择变频器的容量	50
3.7.4 PowerFlex 40 变频器的选择	50
3.8 变频器外围设备	52
3.8.1 安装变频器外围设备的目的	52
3.8.2 外围设备的作用	52
习题三	55
第 4 章 PowerFlex 40 变频器的主要功能与设置	56
4.1 变频器的主要功能参数与设置	56
4.1.1 变频器的起动控制方式	56
4.1.2 变频器的频率给定方式	58
4.1.3 变频器的停止模式	63
4.1.4 变频器的 PID 控制功能	65
4.1.5 变频器的其他常用功能及参数设置	70
4.2 操作训练 变频器的频率给定方式	76
4.2.1 变频器的电位计给定	76
4.2.2 内部频率给定	77
4.2.3 外部 0 ~ 10V 电压给定	78
4.2.4 外部 4 ~ 20mA 模拟量给定	78
4.2.5 外部数字量多段速给定	80
4.2.6 其他频率命令源	81
4.3 操作训练 变频器的起动控制方式	83
4.3.1 用控制面板起动键的起动	83
4.3.2 二线控制方式	84
4.3.3 三线控制方式	85
4.4 操作训练 加/减速时间、加/减速方式、跳跃频率的功能认识	86
4.4.1 加/减速时间的认识	86

4.4.2 第二加/减速时间的设置与切换	87
4.4.3 加/减速方式的识别 (S 曲线方式应用)	87
4.4.4 跳跃频率的识别	87
4.5 操作训练 PID 功能的识别	87
4.5.1 选择目标值和反馈值信号源	87
4.5.2 根据 PID 运行接线图接线	88
4.5.3 比例控制输出的计算与测试	88
4.5.4 观察积分参数的控制效果	89
习题四	89
第 5 章 变频调速控制电路的设计	91
5.1 变频调速控制电路的控制方式及设计方法	91
5.1.1 变频调速控制电路的控制方式	91
5.1.2 变频调速控制电路的设计方法	91
5.2 变频器的控制电路	94
5.2.1 变频器的正转控制电路	94
5.2.2 变频器的正反转控制电路	96
5.2.3 变频器的多段速控制	98
5.2.4 变频工频切换控制	100
5.2.5 外接两地升降速控制	102
习题五	103
第 6 章 变频器的 PLC 控制	104
6.1 PLC 与变频器的连接	104
6.1.1 PLC 与变频器的连接方法与注意事项	104
6.1.2 PowerFlex 40 变频器与 MicroLogix 1500 PLC 的连接	106
6.2 变频器正反转的 PLC 控制	107
6.2.1 控制要求	107
6.2.2 设计方案	107
6.2.3 变频器的参数设定	109
6.2.4 接线与运行	109
6.3 小车自动往返的 PLC 控制	110
6.3.1 项目内容和适用场合	110
6.3.2 控制要求	110
6.3.3 设计方案	110
6.3.4 PLC 的 I/O 地址分配	111
6.3.5 PLC 控制程序设计	111
6.3.6 变频器的参数设置	114
6.3.7 接线运行	115
6.4 多段速调速的 PLC 控制	115
6.4.1 项目内容和适用场合	115
6.4.2 设计方案	115
6.4.3 变频器的参数设置	116
6.4.4 PLC 控制程序设计	117
6.4.5 接线与运行	121

6.5 PLC 变频器联机实现顺序控制和延时控制	122
6.5.1 项目内容与要求	122
6.5.2 设计方案	122
6.5.3 PLC 控制程序设计	123
6.5.4 变频器的参数设置	125
6.5.5 接线与运行	125
6.6 变频与工频切换的 PLC 控制	125
6.6.1 项目内容与要求	125
6.6.2 设计方案	126
6.6.3 变频器的参数设置及 PLC 的 I/O 分配表	127
6.6.4 PLC 控制梯形图程序及控制过程分析	128
6.6.5 接线与运行	130
6.7 PLC 变频器联机实现电动机的模拟信号连续控制	130
6.7.1 项目内容和要求	130
6.7.2 PowerFlex 40 变频器的模拟量频率给定方式	131
6.7.3 接线注意事项	131
6.7.4 硬件电路设计	131
6.7.5 PLC 的 I/O 地址分配表	132
6.7.6 PLC 的控制程序	133
6.7.7 变频器的参数设定	134
6.7.8 接线与运行	134
习题六	135
第 7 章 变频器的安装调试与维护维修	136
7.1 变频器的安装调试	136
7.1.1 变频器的安装的要求	136
7.1.2 变频器的配线	137
7.1.3 变频器的抗干扰问题	140
7.1.4 变频调速系统的调试	141
7.2 变频器的日常维护	142
7.2.1 变频器的日常检查	142
7.2.2 变频器的定期检查	142
7.2.3 变频器主要部件的定期维护	143
7.3 变频器的故障检查与维修	143
7.3.1 故障测试与故障原因判断	143
7.3.2 故障维修实例	145
7.3.3 PowerFlex 40 变频器的常见故障和处理措施	146
习题七	148
第 8 章 PowerFlex 40 变频器的网络控制	149
8.1 DeviceNet 网络简介	149
8.2 基于 DeviceNet 的变频器控制网络的构建	151
8.2.1 变频器控制网络的拓扑结构	151
8.2.2 联网所需的设备	152
8.2.3 联网设备的参数设置	154

8.3 使用 RSLinx 软件进行通信组态	155
8.4 DeviceNet 网络的组态	157
8.4.1 DeviceNe 网络的扫描	157
8.4.2 设置变频器的属性参数	158
8.4.3 组态 DeviceNet 网络扫描器 1756-DNB	160
8.5 编写梯形图程序	164
8.5.1 新建工程	164
8.5.2 对硬件设备进行组态	165
8.5.3 标签的确定	166
8.5.4 输入梯形图程序	169
8.5.5 变频器的网络控制运行	169
习题八	171
附录	172
附录 A PowerFlex 40 变频器的参数表	172
附录 B 22-COMM-D 适配器的逻辑命令字	208
附录 C 22-COMM-D 适配器的逻辑状态字	209
参考文献	210

第 1 章

变频调速技术概述

电动机是用来拖动某种生产机械的动力设备，所以需要根据工艺要求调节其转速。将调节电动机转速以适应生产要求的过程称为调速，而用于完成这一功能的自动控制系统称为调速系统。

1.1 直流电动机调速

目前，调速系统分为交流调速系统和直流调速系统。由于直流调速系统的调速范围广、静差率小、稳定性好以及具有良好的动态性能，因此在一个很长的时期内，直流电动机调速系统在电气传动领域占据主导地位。下面简单介绍直流电动机调速的方法和特点。

(1) 改变电枢回路电阻调速

当负载一定时，随着串入的外接电阻 R 的增大，电枢回路总电阻增大，电动机转速就降低。

(2) 改变电枢电压调速

连续改变电枢供电电压，可以使直流电动机在很宽的范围内实现无级调速。例如，可以采用晶闸管变流器供电的调速方法。

(3) 减弱磁通调速

电动机的转速与磁通 Φ 成反比，即当磁通减小时，转速升高；反之，则降低。额定运行的电动机，其磁路已基本饱和，即使励磁电流增加很大，磁通增加也很少，从电动机的性能考虑也不允许磁路过饱和。因此，改变磁通调速只能是额定值向下调，即减弱磁通调速，也称弱磁升速。

改变电枢回路电阻调速方法虽然设备简单，调节方便，但是调速范围小、转速稳定性差，调速效率较低。目前，这种调速方法很少采用了，仅在有些起重机、卷扬机及电车等调速性能要求不高或低速运转时间不长的传动系统中使用。弱磁调速范围不大，往往是和调压调速配合使用，在额定转速以上做小范围的升速。改变电枢电压调速是直流电动机调速系统中应用最广的一种调速方法。自动控制的直流调速系统往往以调压调速为主。

1.2 交流电动机调速

直流电动机拖动和交流电动机拖动先后诞生于 19 世纪，但由于技术上的原因，在很长

一段时间内，占整个电力拖动系统约 80% 的不变速拖动系统中，采用的是交流电动机，而在需要进行调速控制的拖动系统中，则基本上采用的是直流电动机。

直至 20 世纪 70 年代中期，随着电力电子技术、微电子技术和控制理论的发展，电力半导体器件和微处理器的性能不断提高，使得交流调速系统应用的比例逐年上升，在各工业部门中，使得交流调速系统逐步取代直流调速系统，以达到节能、缩小体积、降低成本的目的。

三相异步电动机的转速公式为

$$n = \frac{60f}{p}(1 - s) \tag{1-1}$$

式中， n 、 f 、 s 、 p 分别表示转速、输入频率、电动机转差率、电动机磁极对数。

由式 (1-1) 可知，三相交流异步电动机有三种调速方案，包括改变转差率调速、改变电动机的磁极对数调速、改变供电频率的变频调速。

1.2.1 三相交流异步电动机的调速方式

1. 改变转差率调速

(1) 串级调速方法

串级调速是指绕线式电动机转子回路中，串入可调节的附加电动势来改变电动机的转差，达到调速的目的。大部分转差功率被串入的附加电动势所吸收，再利用产生附加电动势的装置，把吸收的转差功率返回到电网或转换能量加以利用。根据转差功率吸收利用方式，串级调速可分为电动机串级调速、机械串级调速及晶闸管串级调速形式，采用晶闸管串级调速的较多。串级调速方法可将调速过程中的转差损耗回馈到电网或生产机械上，效率较高；装置容量与调速范围成正比，投资省，适用于调速范围在额定转速 70% ~ 90% 的生产机械上。调速装置故障时，可以切换至全速运行，避免停产；但是晶闸管串级调速功率因数偏低，谐波影响较大。

本方法适合于风机、水泵及轧钢机、矿井提升机、挤压机上使用。晶闸管串级调速电气原理如图 1-1 所示。

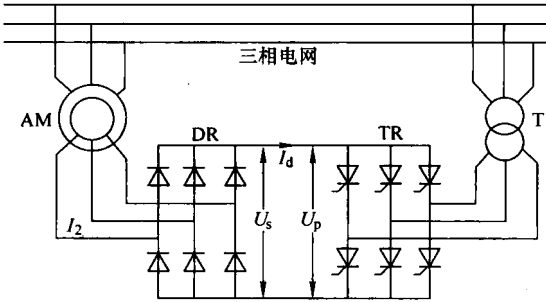


图 1-1 晶闸管串级调速电气原理图

(2) 绕线式电动机转子串电阻调速方法

绕线式电动机转子串入附加电阻，使电动机的转差率加大，使电动机在较低的转速下运行。串入的电阻越大，电动机的转速越低。

此方法设备简单、控制方便，但转差功率以发热的形式消耗在电阻上，属于有级调速，机械特性较软。绕线式电动机转子串电阻调速示意图如图 1-2 所示。

(3) 定子调压调速方法

当改变电动机的定子电压时，可以得到一组不同的机械特性曲线，从而获得不同的转速。由于电动机的转矩与电压二次方成正比，因此最大转矩下降很多，其调速范围较小，一般笼型电动机难以应用。为了扩大调速范围，调压调速应采用转子电阻值大的笼型电动机，

如专供调压调速用的力矩电动机，或者在绕线式电动机上串联频敏电阻。为了扩大稳定运行范围，当调速在2:1以上的场合时应采用反馈控制以达到自动调节转速的目的。

调压调速的主要装置是一个能提供电压变化的电源，目前常用的调压方式有串联饱和电抗器、自耦变压器以及晶闸管调压等几种。

晶闸管调压方式为最佳。这种调速方法电路简单，易实现自动控制；调压过程中转差功率以发热形式消耗在转子电阻中，效率较低。调压调速一般适用于 100kW 以下的生产机械。

晶闸管定子调压调速示意图如图 1-3 所示。

(4) 电磁调速电动机调速方法

电磁调速电动机由笼型电动机、电磁转差离合器和直流励磁电源（控制器）三部分组成。电磁转差离合器调速是在普通的笼型异步电动机轴上安装一个电磁转差离合器，再通过由晶闸管控制装置控制离合器绕组的励磁电流的大小来实现调速的一种方法。

在电磁转差离合器调速系统中，异步电动机本身并不调速，调节的是电磁转差离合器的转速。电磁调速电动机的调速特点是装置结构及控制线路简单、运行可靠、维修方便，调速平滑、无级调速，对电网无谐波影响，但速度遗失大、效率低。

本方法适用于中、小功率，要求平滑动、短时低速运行的生产机械。电磁调速电动机调速方法示意图如图 1-4 所示。

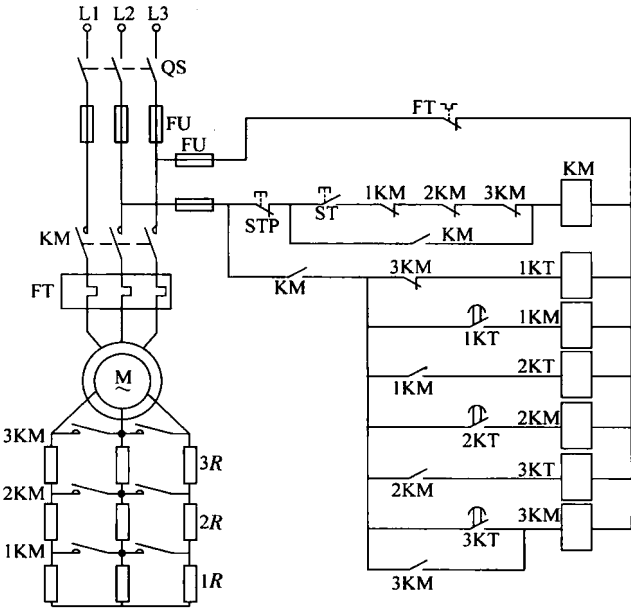


图 1-2 绕线式电动机转子串电阻调速示意图

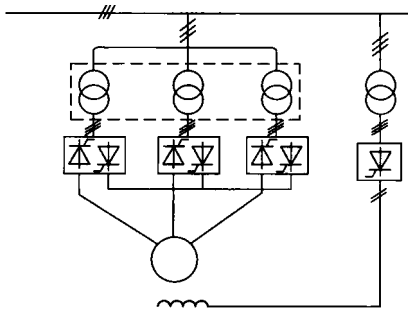


图 1-3 定子调压调速示意图

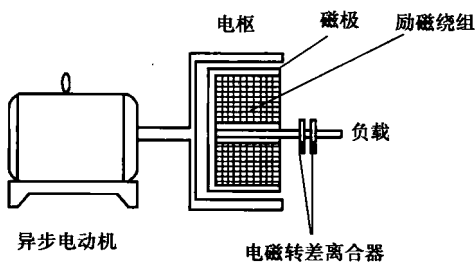


图 1-4 电磁调速电动机调速方法示意图

2. 改变电动机的磁极对数调速

在机床加工过程中，为了获得较宽的调速范围，均采用“双速电动机”或“多速电动机”。

机”。“双速电动机”或“多速电动机”通过改变电动机的磁极对数进行调速，改变磁极对数调速方法就是通过改变定子绕组的接线方式来改变笼型电动机定子磁极对数，达到调速的目的，这种方法调速具有较硬的机械特性，稳定性良好；无转差损耗，效率高；接线简单、控制方便、价格低；属于有级调速，级差较大，不能获得平滑调速；可以与调压调速、电磁转差离合器配合使用，获得较高效率的平滑调速特性。

本方法适用于不需要无级调速的生产机械，如金属切削机床、升降机、起重设备、风机、水泵等。双速电动机变极调速控制电路如图 1-5 所示。

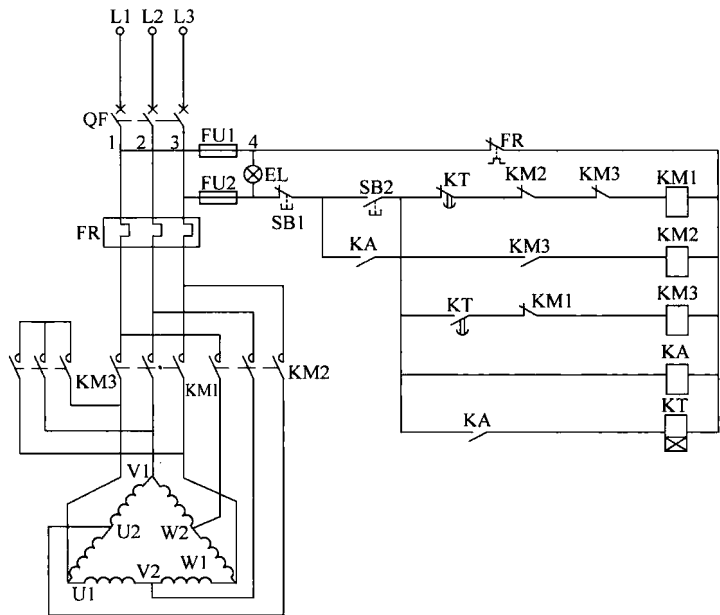


图 1-5 双速电动机变极调速控制电路

3. 变频调速方法

变频调速是改变电动机定子电源的频率，从而改变其同步转速的调速方法。变频调速系统主要设备是提供变频电源的变频器。变频器可分成交-直-交变频器和交-交变频器两大类，目前国内大都使用交-直-交变频器。采用变频调速方法，效率高，调速过程中没有附加损耗；应用范围广，可用于笼型异步电动机；调速范围大、特性硬、精度高；但技术复杂、造价高、维护检修困难。

本方法适用于要求精度高、调速性能较好的场合。图 1-6 所示是变频调速在矿井提升机中的应用方案示意图。

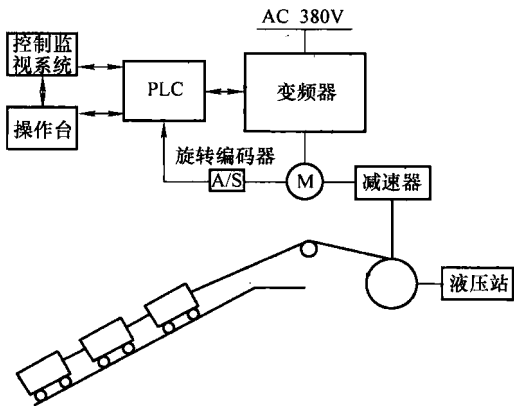


图 1-6 矿井提升机变频调速方案

1.2.2 交直流调速比较

众所周知,直流调速系统具有较为优良的静、动态性能指标。下面对交流变频调速系统与直流调速系统做一比较。

在很长的一个历史时期内,调速传动领域基本上由直流电动机调速系统所垄断。直流电动机虽有调速性能好的优势,但也有一些固有的难于克服的缺点,主要是机械式换向器带来的弊端。在直流调速系统中,由于直流电动机具有电刷和换向器,因而必须对其进行定期检查。另外,电动机安装环境受到限制。例如,不能在有易燃、易爆气体及尘埃多的场合使用。相对直流电动机而言,交流电动机就不存在这些问题,主要表现为以下几点:

1) 直流电动机的单机容量一般为12~14MW,还常制成双电枢形式;而交流电动机的单机容量却可以数倍于它。

2) 直流电动机由于受换向器的限制,其电枢电压最高只能做到一千多伏,而交流电动机可做到6~10kV。

3) 直流电动机受换向器部分机械强度的约束,其额定转速随电动机额定功率而减小,一般仅为每分钟数百转到一千多转,而交流电动机的达到每分钟数千转。

4) 直流电动机的体积、重量要比同等容量的交流电动机大,价格也高。

最后,特别要指出的是交流调速系统在节约能源方面有着很大的优势。一方面交流拖动的负载在总用电量中占一半或一半以上的比重,这类负载实现节能,可以获得十分可观的节电效益。另一方面交流拖动本身存在可以挖掘的节电潜力。在交流调速系统中,选用电动机时往往留有一定余量,电动机又不总是在最大负载情况下运行;如果利用变频调速技术,轻载时,通过对电动机转速进行控制,就能达到节电的目的。工业中大量使用的风机、水泵、压缩机等,其用电量约占工业用电量的50%,如果采用变频调速技术,既可大大提高其效率,又可减少10%的电能消耗。

1.3 变频调速

随着电力电子技术、计算机技术、自动控制技术的迅速发展,电气传动技术面临着一场历史革命,即交流调速取代直流调速和计算机数字控制技术取代模拟控制技术已成为发展趋势。电动机交流变频调速技术是当今节电、改善工艺流程以提高产品质量和改善环境、推动技术进步的一种主要手段。变频调速以其优异的调速和起制动性能,高效率、高功率因数和节电效果,广泛的适用范围及其他许多优点而被国内外公认为最有发展前途的调速方式。

1.3.1 变频调速发展简史

交流电动机控制系统是以交流电动机为执行元件的速度、转矩或位置控制系统的总称。与直流电动机相比,交流电动机具有转速高、功率大、结构简单、运行可靠、体积小、价格低等一系列优点,但从控制系统的角度,由于交流电动机是一个多变量、非线性对象,其控制远比直流电动机复杂,因此在一个很长的时期内,直流电动机控制系统始终在电气传动领域占据主导地位。

二次大战后,随着晶闸管技术的出现,有人提出了变频技术,并用晶闸管实现了早期的

电流型变频器。但是这种电流型变频器电流变形大、谐波高、效率低，应用并不广泛。

20 世纪 70 年代末，由于微电子技术的迅猛发展，MOSFET（金属氧化物半导体场效应晶体管）、IGBT（绝缘栅双极型晶体管）、BJT（双结型晶体管）等电力电子器件被实用化，晶体管 PWM（脉宽调制）开始取代传统的晶闸管控制，使得高频、低损耗的变频控制成为了可能。

这一技术的进步使得基于传统电动机模型与经典控制理论的方波永磁同步电动机（BLDCM, Brush Less DC Motor, 也称为无刷直流电动机）交流伺服驱动系统与 U/f 控制的变频调速系统被迅速实用化，并陆续地出现了实用型的交流伺服与变频器产品，如德国 SIEMENS 公司的 6SC610 系列交流伺服驱动器、日本 FANUC 公司的 s 系列交流伺服驱动器及日本 YASKAWA（安川）、三菱等公司早期的交流伺服与变频器产品等。

这些早期的交流伺服与变频器产品是基于传统的电动机模型与控制理论，从交流电动机的静态特性出发对交流电动机进行的控制，它们较好地解决了交流电动机的平滑调速问题，为交流控制系统的快速发展与普及奠定了基础。以上产品由于结构简单、控制容易、生产制造成本低，至今仍然有所应用。

在 20 世纪 50 ~ 60 年代，德国学者提出了矢量控制技术。但是由于运算电路过于复杂，无法在工程上实现，直到 90 年代后期，计算机微型化和运算速度的不断提高，实现了高速计算，首先基于空间矢量技术把电动机的有效电压提高了 15%。后来在此基础上，实现了矢量控制和直接转矩控制。

日本学者又在矢量控制的基础上，构造了状态观测器并提出了一系列算法，实现了电动机转子磁链位置的估算，实现了无速度传感器的矢量控制，从而降低了成本，提高了系统的可靠性。

1.3.2 交流电动机变频调速的特点

变频调速在调频范围、静态精度、动态品质、系统效率、完善的保护功能、容易实现自动控制 and 过程控制等诸方面是以往的调压调速、变极调速、串级调速、转差调速和液力耦合器调速等无法比拟的。对于速度控制，目前变频调速可以逼真直流调速的特性，而交流调速中的电动机维护量小，价格便宜，这是直流电动机无法做到的。变频调速是目前最理想、最有前途的调速方案。

近几十年来变频调速已在钢铁、冶金、石油、化工、纺织、化纤、轻工、造纸、橡胶、塑料、电力、水务等行业中得到广泛应用。低压电动机变频调速应用已非常普及和成熟。高压电动机变频调速也正在被人们关注和逐步应用。交流电动机变频调速除了有卓越的调速性能之外，还有显著的节约电能和保护环境等重大作用，是企业技术改造和产品更新换代的理想调速装置。

变频调速节电效果显著，尤其在风机、水泵上。根据风机及水泵所耗功率与转速的三次方成正比的原理。若所需要风量减少 20%，则相应的电动机转速应降低 20%，实际转速为 80%，则 $(0.8)^3 \approx 51\%$ ，风机节能可达 50%。如降低一半转速，则 $(0.5)^3 \approx 13\%$ ，可望节电 87%。基于这一原理，采用变频调速控制方式来调节风量或流量，这在节电上是行之有效的办法。

据估计，电气产品对环境污染的影响约占 30% 左右，因此节省电能，减少浪费在环境

保护方面意义重大。如节约电能，可以少建火电厂，少发电，即减少排放 SO_2 、 CO_2 及灰尘，减少大气环境污染；牵引变频机车应用，不用燃煤和烧油，减少排放污染；发展城市轨道交通（地铁和磁悬浮列车）和燃料电池汽车，减少 CO_2 排放；提倡采用电动自行车（无刷直流电动机、自制式变频调速），停用燃油助动车等。

交流变频调速的优异特性主要表现在以下几个方面：

- 1) 调速时平滑性好，效率高；低速时，静差率较小，相对稳定性好；
- 2) 调速范围较大，精度高；
- 3) 起动电流低，对系统及电网无冲击，节电效果明显；
- 4) 变频器体积小，便于安装、调试和维修简便；
- 5) 易于实现过程自动化。

变频调速的不足之处主要在于以下两点：

- 1) 必须有专用的变频电源，目前造价较高；
- 2) 在恒转矩调速时，低速段电动机的过载能力大为降低。

变频调速技术作为高新技术、基础技术和节能技术，已经渗透到经济领域的所有技术部门中。在变频调速技术方面，许多企业急需应用变频调速技术改造传统的产业和节约能源，提高产品质量以获得较好的经济效益和社会效益。所以学习变频调速知识，掌握变频调速技术，是大势所趋。

习 题 一

- 1-1 直流电动机调速有哪几种常用方法，各有什么特点？在实际应用中，以什么调速方法为主？
- 1-2 交流电动机调速有哪几种调速方案？目前，最有前途的交流电动机调速方法是什么？
- 1-3 交流变频调速有哪些优异特性？

第 2 章

通用变频器的基础知识

变频器是一种静止的频率变换器，可将电网电源频率 50Hz 交流电变成频率可调的交流电，作为电动机的电源装置。使用变频器可以节能、提高产品质量和劳动生产率等。下面具体介绍与变频器相关的基础知识，包括电力电子器件、通用变频器主电路、通用变频器的控制功能和控制方式、变频器的分类与发展趋势等。

2.1 变频器常用开关器件

20 世纪 70 年代，由于半导体技术的飞速发展，开始出现能够承受较高电压和较大电流的半导体开关器件，并逐渐地发展成一门新的学科——电力电子学。人们梦寐以求的变频调速技术开始出现，到 80 年代不断地完善成为能够实用的产品，并迅速地普及开来，得到了广泛的应用。

在电力电子电路中，能够实现电能的变换和控制的半导体电子器件称为电力电子器件 (Power Electronic Device)，因为能够承受较高电压和较大电流，也把它称为功率器件。变频器常用开关器件属于电力电子器件，它是变频器电路中的核心器件，变频技术就是建立在电力电子技术基础之上的。在低压交流电动机的传动控制中，应用最多的功率器件有 GTO (Gate Turn-off Thyristor, 门极关断晶闸管)、GTR (大功率晶体管)、IGBT (绝缘栅双极型晶体管) 以及智能模块 IPM (Intelligent Power Module)，后面两种器件集 GTR 的低饱和电压特性和 MOSFET (场效应晶体管) 的高频开关特性于一体，是目前通用变频器中最广泛使用的主流功率器件。为了更好地理解 IGBT 以及智能功率模块 (IPM)，有必要按照电力电子器件的发展顺序 (不可控 - 半控 - 全控) 逐一地了解这些器件。

2.1.1 电力电子器件的基本模型

1. 电力电子器件的基本模型与特性

在对电能的变换和控制过程中，电力电子器件可以抽象地看成如图 2-1 所示的理想开关模型。它有 3 个电极，其中 A 和 B 代表开关的两个主电极，K 是控制开关通断的控制极。它只工作在“通态”和“断态”的两种情况，在通态时其电阻为零，断态时其电阻无穷大。

电力电子器件的基本特性如下：

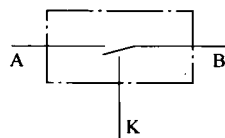


图 2-1 电力电子器件的理想开关模型

- 1) 电力电子器件一般都工作在开关状态；
- 2) 电力电子器件的开关状态由外电路（驱动电路）来控制；
- 3) 在工作中器件的功率损耗（通态、断态、开关损耗）很大。

为保证不会因损耗散发的热量导致器件温度过高而损坏，在其工作时一般都要安装散热器。

2. 电力电子器件的分类

按器件的开关控制特性可以分为以下三类：

- 1) 不可控器件：器件本身没有导通、关断控制功能，需要根据电路条件决定其导通、关断状态的器件称为不可控器件。如功率二极管（Power Diode）；
- 2) 半控型器件：通过控制信号只能控制其导通，不能控制其关断的电力电子器件称为半控型器件。如晶闸管（Thyristor）及其大部分派生器件。
- 3) 全控型器件：通过控制信号既可控制其导通又可控制其关断的器件，称为全控型器件。如门极关断晶闸管（Gate-Turn-Off Thyristor）、功率场效应晶体管（Power MOSFET）、绝缘栅双极型晶体管（Insulated-Gate Bipolar Transistor）等。

2.1.2 功率二极管

功率二极管（Power Diode）也称为半导体整流器，简称 SR。它是 20 世纪最早获得应用的不可控电力电子器件，在中、高频整流、逆变以及低压高频整流的场合发挥着积极的作用，具有不可替代的地位。

功率二极管的基本结构和工作原理与普通二极管一样。以半导体 PN 结为基础，由一个面积较大的 PN 结和两端引线以及封装组成。从外形上看，主要有螺栓型和平板型两种，如图 2-2a 所示，其结构和电气符号如图 2-2b 和 c 所示。

功率二极管的主要类型如下：

1) 普通二极管：普通二极管又称整流管，多用于开关频率在 1kHz 以下的整流电路中，其反向恢复时间在 $5\mu\text{s}$ 以上，额定电流达数千安，额定电压达数千伏以上。

2) 快恢复二极管：反向恢复时间在 $5\mu\text{s}$ 以下的称为快恢复二极管。快恢复二极管从性能上可分为快速恢复和超快速恢复二极管两种。

3) 肖特基二极管：肖特基二极管是一种金属同半导体相接触形成整流特性的单极型器件，其导通压降的典型值为 0.4 ~ 0.6V，而且它的反向恢复时间短，为几十纳秒，但反向耐压在 200V 以下。它常被用于高频低压开关电路或高频低压整流电路中。

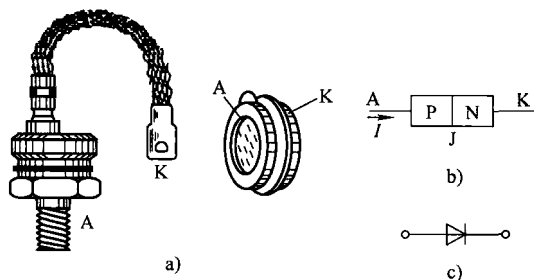


图 2-2 功率二极管的外形、结构和电气图形符号
a) 外形 b) 结构 c) 电气符号

2.1.3 晶闸管

1. 晶闸管简介

晶闸管包括普通晶闸管（SCR, Silicon Controlled Rectifier）、快速晶闸管（FST）、双向