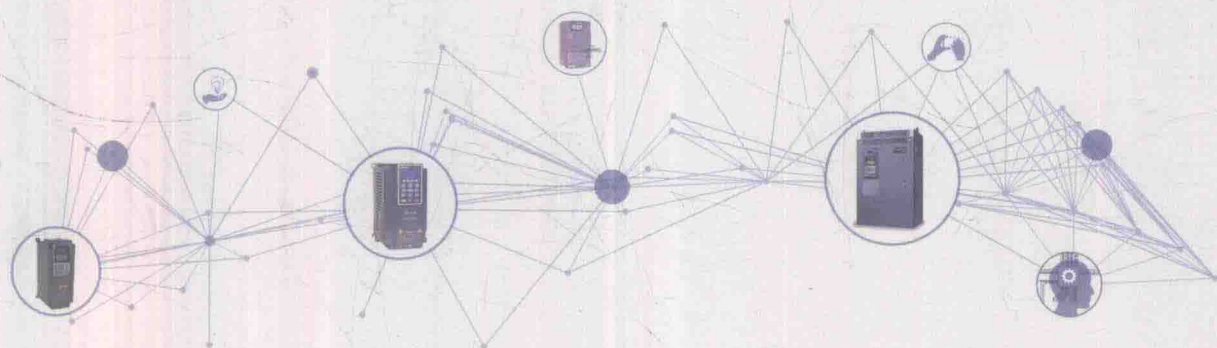


智能科学与技术丛书

行业专用变频器的 智能控制策略研究

李方园 著



科学出版社

智能科学与技术丛书

行业专用变频器的智能 控制策略研究

李方园 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要介绍行业专用变频器的一种控制策略研究,即通过人工智能的方式来获取知识,并用于特殊行业的变频控制。本书共5章,第1章为通用变频器控制策略,从异步电动机的动态模型出发介绍旋转磁场及其等效电路、坐标变换、动态模型的状态空间模型,同时对PWM控制、IGBT桥式电压型逆变电路、SPWM控制方法、电流控制型感应电动机的解析逆控制等进行了阐述。第2~5章,通过常见的模糊控制、神经网络、粒子群算法等方法对四种行业专用变频器,即机床主轴变频器、泵类专用变频器、造纸专用变频器和压缩机专用变频器的智能控制策略进行研究,弥补了行业应用中的通用变频器缺陷,满足了行业用户的需求。本书内容由浅入深,从基础的人工智能理论出发,通过构建可操作的、创新的模型来验证行业专用变频器的智能控制策略,为行业专用变频器的研究提供了新的思路。

本书主要面向变频器研究开发人员、变频器系统集成工程师、智能工厂规划设计人员,也可供电气自动化专业的高校学生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

行业专用变频器的智能控制策略研究/李方园著. —北京:科学出版社, 2018

ISBN 978-7-03-056588-4

I. ①行… II. ①李… III. ①变频器—智能控制—研究 IV. ①TN773

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第035198号

责任编辑:孙露露 常晓敏 / 责任校对:陶丽荣

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>

北京虎彩文化传播有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年3月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2018年7月第二次印刷 印张:11 3/4

字数:266 000

定价:79.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈虎彩〉)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62138978-2010

版权所有,侵权必究

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

前 言

本书创新性地运用人工智能的成熟理论和技术,很好地实现了机床主轴变频器、泵类专用变频器、造纸专用变频器和压缩机专用变频器等在多个方面的理论验证和仿真,是变频器设计 and 应用领域的应用创新成果,符合“智能制造”的发展路径。

本书主要介绍了行业专用变频器的一种控制策略研究,即通过人工智能的方式来获取知识,并用于特殊行业的变频控制。全书共分 5 章,第 1 章介绍通用变频器控制策略,变频器通过恒压频比的控制方式,实现了良好的机械特性;以等腰三角波作为载波,输出 SPWM 波;以坐标变换的基本思路,推演了变频器的矢量控制;建构了变频器系统的 MATLAB 模型,进行可观性、可控性判断以及各种波形的仿真。第 2~5 章,通过常见的模糊控制、神经网络、粒子群算法等对四种行业专用变频器,即机床主轴变频器、泵类专用变频器、造纸专用变频器和压缩机专用变频器的控制策略进行研究,弥补了行业应用中的通用变频器缺陷,满足了行业用户的需求。例如,针对双主轴加工中心的转矩脉动现象,提出了基于 SVPWM 的直接转矩控制方法;在碱回收锅炉的汽包液位控制中,采用了模糊 PID 控制;采用 Elman 神经网络,提出了一种基于神经网络的纸机车速预测方法,对某造纸厂实际历史数据进行仿真预测;在解决变频压缩机主机故障中,把 SOM 神经网络应用在压缩机故障诊断中,并由变频器进行故障动作。

本书内容由浅入深,从基础的人工智能理论出发,通过构建可操作的、创新的模型来验证行业专用变频器的智能控制策略,为行业专用变频器研究提供了新的思路。本书的研究可运用于行业专用变频器的设计,通过知识库、模糊控制、神经网络等设计方法,对变频器的控制方式进行重新组织,并使之不断改善性能,最终提高变频器的适用性。

本书作者是浙江工商职业技术学院的教师,长期从事变频器的理论研究与教学、实践应用与推广,在机床、造纸和压缩机等行业有十余年的企业经验,又有在高校从事人工智能的研究经历,在行业专用变频器领域积累了丰富的经验,相信本书的出版对于企业技术人员和高校、科研院所的相关研究者都有一定的指导意义。

基于人工智能在近年来的快速发展,本书借鉴了部分专家学者的理论成果,在此一并表示感谢。希望本书的出版能扩大作者研究成果的受众面,也会对变频器的工艺应用和节能推广使用起到很好的推动作用。

由于作者水平有限,书中难免出现疏漏和不足之处,敬请读者批评指正。

目 录

第 1 章 通用变频器控制策略	1
1.1 三相异步电动机的基本控制模型	1
1.1.1 三相异步电动机概述	1
1.1.2 三相异步电动机的电磁感应	2
1.1.3 三相异步电动机的等效电路	3
1.1.4 三相异步电动机的变频控制	5
1.2 IGBT 桥式逆变电路的变频 PWM 控制	10
1.2.1 PWM 控制概述	10
1.2.2 IGBT 桥式电压型逆变电路	12
1.2.3 SPWM 控制方法	15
1.3 变频器的矢量控制	15
1.3.1 矢量控制系统原理	15
1.3.2 坐标变换的基本思路	16
1.3.3 异步电动机在 α 、 β 坐标系上的数学模型	19
1.3.4 电流控制型感应电动机的解析逆控制	23
1.4 通用变频器系统的 MATLAB 仿真分析	24
1.4.1 变频器输出端系统的可观性与可控性仿真	24
1.4.2 Simulink 环境下的变频器系统仿真	29
第 2 章 机床主轴变频器的智能控制策略	33
2.1 机床主轴变频器应用概述	33
2.1.1 机床主轴结构及设计	33
2.1.2 机床主轴传动的三种配置方式	35
2.1.3 机床主轴变频驱动时转矩与功率关系	36
2.2 数控铣床主轴电动机的智能控制	38
2.2.1 数控铣床主轴电动机的驱动问题	38
2.2.2 数控铣床主轴电动机的参数自辨识	40
2.2.3 基于模糊逻辑规则的定子电阻 R_s 估计	44
2.2.4 基于模糊神经网络的定子电阻 R_s 辨识	47
2.3 双主轴加工中心的 SVPWM-DTC 智能控制	50
2.3.1 双主轴加工中心的转矩脉动现象	50
2.3.2 SVPWM 调制技术原理	53
2.3.3 SVPWM 算法实现	55
2.3.4 基于空间矢量脉宽调制的直接转矩控制系统	59

2.3.5	基于 SVPWM 的直接转矩系统仿真研究	60
第 3 章	泵类专用变频器的智能控制策略	65
3.1	变频器在泵类负载中的应用	65
3.1.1	泵类概述	65
3.1.2	变频器在泵上的节能应用	67
3.1.3	变频器在泵类负载上的控制特点	69
3.1.4	泵类负载的常规 PID 控制	70
3.2	基于改进型 PID 的供水泵变频控制	72
3.2.1	积分分离 PID 控制算法在原水泵站中的应用	72
3.2.2	变速积分 PID 控制算法在变频器休眠过程中的应用	74
3.2.3	不完全微分 PID 控制算法在多段闭环控制设定中的应用	78
3.3	锅炉给水泵液位模糊控制	83
3.3.1	碱回收锅炉概述	83
3.3.2	汽包液位在给水量作用下的动态特性	84
3.3.3	碱回收锅炉汽包液位模糊 PID 控制	86
3.4	基于模糊神经网络 PID 的水泵流量控制	94
3.4.1	水泵流量控制系统分析	94
3.4.2	模糊 PID 控制面临的问题	94
3.4.3	BP 神经网络 PID 控制面临的问题	96
3.4.4	模糊神经网络 PID 控制的解决思路	100
3.5	基于 PSO-PID 的自动加药泵变频控制	101
3.5.1	净水加药自动控制系统概述	101
3.5.2	粒子群算法概述	102
3.5.3	计量泵流量 PSO-PID 算法	103
第 4 章	造纸专用变频器的机器学习控制策略	109
4.1	造纸行业专用变频器概述	109
4.1.1	造纸行业概述	109
4.1.2	造纸行业变频传动的配置与控制原理	111
4.2	概率神经网络在涂料背辊速差控制中的应用	112
4.2.1	涂布施胶变频器速差控制的难点	112
4.2.2	概率神经网络基础	115
4.2.3	涂料背辊速差控制的 PNN 神经网络结构	118
4.2.4	施胶涂布变频器的速差控制 MATLAB 仿真	123
4.3	基于卡伯值预测模型的变频电动阀控制	125
4.3.1	卡伯值概述	125
4.3.2	纸厂蒸煮过程的卡伯值软测量传统模型建构	127
4.3.3	卡伯值软测量模糊控制器的建构	130
4.3.4	数据分析	135

4.3.5 基于卡伯值控制的变频电动阀	136
4.4 基于 Elman 模型的连续配浆变频控制	138
4.4.1 连续配浆系统概述	138
4.4.2 Elman 神经网络基础	139
4.4.3 基于 Elman 神经网络的纸机车速预测	140
4.4.4 改进型 Elman 神经网络	144
第 5 章 压缩机专用变频器的智能控制策略	145
5.1 压缩机负载的数学模型	145
5.1.1 压缩机概述	145
5.1.2 活塞往复压缩机负载的数学模型	146
5.1.3 螺杆压缩机的数学模型	149
5.2 压缩机交流永磁同步电动机的模糊控制	154
5.2.1 压缩机采用交流永磁同步电动机的原因	154
5.2.2 交流永磁同步电动机的种类及其结构	155
5.2.3 交流永磁同步电动机的基本方程	157
5.2.4 交流永磁同步电动机参数和等效电路	160
5.2.5 模糊 PID 控制的设计实现	162
5.3 SOM 神经网络在压缩机故障类别中的应用	165
5.3.1 压缩机故障概述	165
5.3.2 SOM 神经网络诊断方法	165
5.3.3 压缩机故障诊断	169
5.3.4 采集数据样本与模拟	172
参考文献	178

第 1 章 通用变频器控制策略

三相异步电动机是通用变频器的主要控制对象，其定子与转子之间通过电磁感应联系，根据转子对定子的影响不变的原则进行频率等效折算、电流等效折算，确保折算前后转子磁动势不变、各功率不变。变频器通过恒压频比的控制方式，实现良好的机械特性；以等腰三角波作为载波，输出 SPWM 波。本章以坐标变换的基本思路，推演变频器的矢量控制；建构变频器系统的 MATLAB 模型，进行可观性、可控性判断以及各种波形的仿真。

1.1 三相异步电动机的基本控制模型

1.1.1 三相异步电动机概述

在所有类型的交流电动机中，三相异步电动机在工业中是最常见的。这种电动机非常经济、耐用、可靠，其功率范围可以从几瓦一直到几百兆瓦。图 1-1 所示为三相异步电动机的外观。

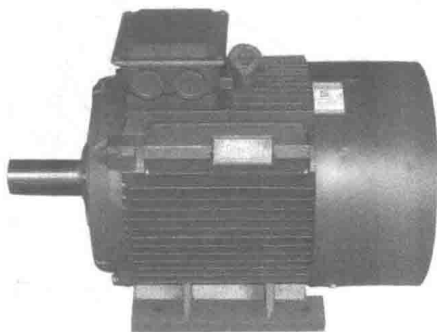


图 1-1 三相异步电动机外观

按照转子绕组结构的不同，三相异步电动机可分为绕线型和笼型两种。

绕线型转子异步电动机的转子绕组和定子绕组一样，也是按一定规律分布的三相对称绕组，可以连接成 Y 形或 Δ 形。一般小容量电动机连接成 Δ 形，大、中容量电动机连接成 Y 形。转子绕组的 3 条引线分别接到 3 个滑环上，用一套电刷装置引出来，其目的是把外接的电阻或电动势串联到转子回路，用以改善电动机的调速性能及实现能量回馈等，如图 1-2 所示。

笼型转子异步电动机的转子绕组则与定子绕组大不相同，它是一个自行短路的绕组。在转子的每个槽里放置一根导体，每根导体都比转子铁芯长，在铁芯的两端用两个端环把所有的导条都短路连接，形成一个短路的绕组。如果把转子铁芯拿掉，剩下的绕

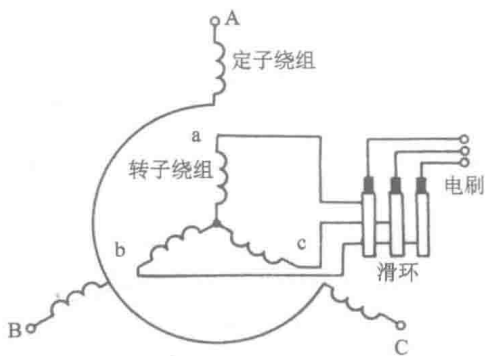


图 1-2 绕线转子异步电动机的定、转子绕组

组形状像一个松鼠笼子，如图 1-3（a）所示，因此又叫笼型转子。导条材料有用铜的，也有用铝的。如果导条用的是铜材料，就需要把事先做好的裸铜条插入转子铁芯上的槽里，再把铜端环套在两端伸出的铜条上，最后将铜条和铜端环焊接在一起。如果导条用的是铝材料，就用熔化了的铝液直接浇铸在转子铁芯的槽里，连同端环、风扇一次铸成，如图 1-3（b）所示。

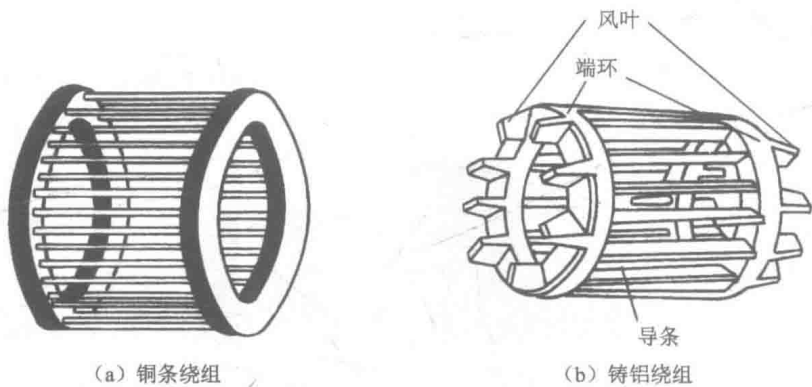


图 1-3 笼型转子

1.1.2 三相异步电动机的电磁感应

三相异步电动机的定子与转子之间是通过电磁感应联系的，定子相当于变压器的一次绕组，转子相当于二次绕组。

当三相异步电动机的定子绕组接到对称三相电源时，定子绕组中就通过对称三相交流电流，三相交流电流将在气隙内形成按正弦规律分布，并以同步转速 n_1 旋转的磁动势建立主磁场，如图 1-4 所示。这个旋转磁场切割定、转子绕组，分别在定、转子绕组内感应出对称的定子电动势、转子绕组电动势和转子绕组电流。

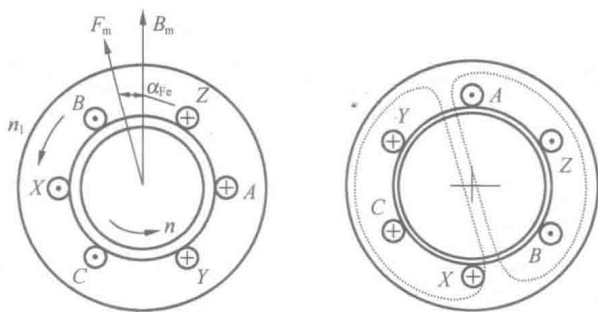


图 1-4 电磁场示意

空载时,轴上没有任何机械负载,异步电动机所产生的电磁转矩仅克服了摩擦、风阻的阻转矩,所以是很小的。电动机所受阻转矩很小,则其转速 n 接近同步转速 n_1 ,转子与旋转磁场的相对转速就接近于零,即 $n_1 - n \approx 0$ 。在这样的情况下可以认为旋转磁场不切割转子绕组,则 $E_{2s} \approx 0$ (“s”下标表示转子电动势的频率,与定子电动势的频率不同), $I_{2s} \approx 0$ 。由此可见,异步电动机空载运行时定子上的合成磁动势 F_1 即是空载磁动势 F_{10} ,则建立气隙磁场 B_m 的励磁磁动势 F_{m0} 就是 F_{10} ,即 $F_{m0} = F_{10}$,产生的磁通为 Φ_{m0} 。

励磁磁动势产生的磁通绝大部分同时与定子绕组交链,称为主磁通。主磁通参与能量转换,在电动机中产生有用的电磁转矩。主磁通的磁路由定转子铁芯和气隙组成,它受磁路饱和的影响,为非线性磁路。此外,有一小部分磁通仅与定子绕组相交链,称为定子漏磁通。漏磁通不参与能量转换并且主要通过空气闭合,受磁路饱和的影响较小,在一定条件下漏磁通的磁路可以看作线性磁路。

图 1-5 所示为异步电动机的定子、转子电路。为了方便分析定子、转子的各个物理量,其下标为“1”者是定子侧,“2”者为转子侧。

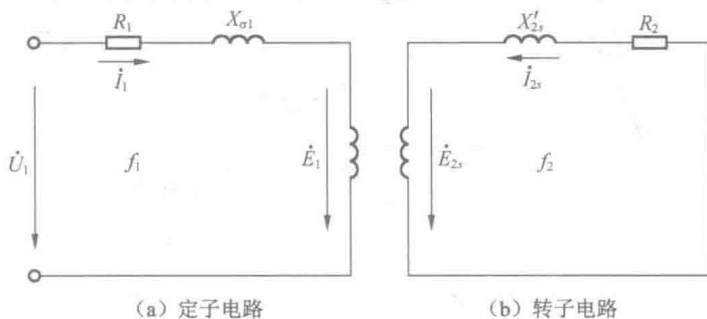


图 1-5 异步电动机的定、转子电路

1.1.3 三相异步电动机的等效电路

异步电动机定、转子之间没有电路上的联系,只有磁路上的联系,不便于实际工作的计算。为了能将转子电路与定子电路作直接的电的连接,要进行电路等效。等效要在不改变定子绕组的物理量(定子的电动势、电流及功率因数等),而且在转子对定子的影响不变的原则下进行,即将转子电路折算到定子侧,同时要保持折算前后转子磁动势不变,以保证磁动势平衡不变和折算前后各功率不变。

在图 1-5 中,将频率为 f_2 的旋转转子电路折算为与定子频率 f_1 相同的等效静止转子

电路，称为频率折算。转子静止不动时，转差率 $s=1$ ， $f_2=f_1$ 。因此，只要将实际上转动的转子电路折算为静止不动的等效转子电路，便可达到频率折算的目的。

电势的折算：

$$E_{2s} = sE_2 \quad (1-1)$$

实际运行的转子电流折算：

$$I_{2s} = \frac{E_{2s}}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{2\sigma})^2}} = \frac{sE_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{2\sigma})^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{(R_2/s)^2 + X_{2\sigma}^2}} = I_2 \quad (1-2)$$

推导出

$$\frac{R_2}{s} = r_2 + \frac{1-s}{s} R_2 \quad (1-3)$$

从式 (1-3) 可以看出，附加电阻 $\frac{1-s}{s} R_2$ 的物理意义在于模拟电动机转轴上总的机械功率。由于频率折算前后转子电流的数值未变，所以磁动势的大小不变。同时磁动势的转速是同步转速，与转子转速无关，所以频率折算保证了电磁效应的不变。频率折算后的电路如图 1-6 所示（转子折算值上均加 “'” 表示）。

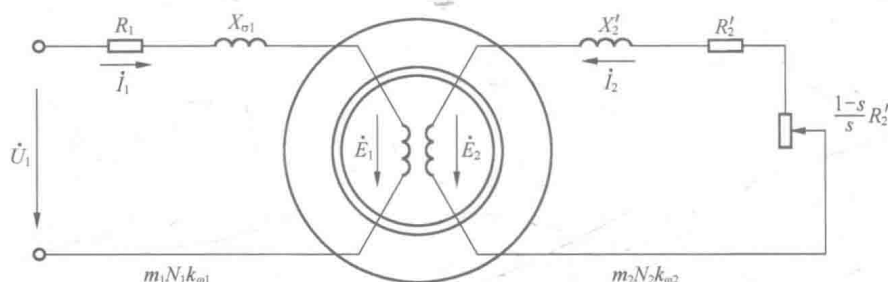


图 1-6 转子绕组频率折算后的异步电动机的定、转子电路

进行频率折算以后，虽然已将旋转的异步电动机转子电路转换为等效的静止电路，但还不能把定、转子电路连接起来，因为两个电路的电动势还不相等。和变压器的绕组折算一样，异步电动机绕组折算也就是人为地用一个相数、每相串联匝数以及绕组系数和定子绕组一样的绕组，代替相数为 m_2 、每相串联匝数为 N_2 以及绕组系数为经过频率折算的转子绕组。但仍然要保证折算前后转子对定子的电磁效应不变，即转子的磁动势、转子总的视在功率、铜耗及转子漏磁场储能均保持不变。

(1) 电流折算

$$\begin{aligned} I_2 m_2 N_2 k_{\omega 2} &= I_2' m_1 N_1 k_{\omega 1} \\ I_2' &= \frac{m_2 N_2 k_{\omega 2}}{m_1 N_1 k_{\omega 1}} I_2 = \frac{I_2}{k_i} \\ \dot{I}_1 + \dot{I}_2' &= \dot{I}_0 \end{aligned}$$

(2) 电势折算

$$E_2' = \frac{N_1 k_{\omega 1}}{N_2 k_{\omega 2}} E_2 = k_e E_2$$

(3) 阻抗折算

$$m_2 I_2^2 R_2 = m_1 I_2'^2 R_2'$$
$$R_2' = \frac{N_1 k_{\omega 1}}{N_2 k_{\omega 2}} \frac{m_1 N_1 k_{\omega 1}}{m_2 N_2 k_{\omega 2}} R_2 = k_e k_i R_2$$
$$x_{2\sigma}' = k_e k_i x_{2\sigma}$$

根据折算前后各物理量的关系，可以做出折算后的 T 形等效电路，如图 1-7 所示。

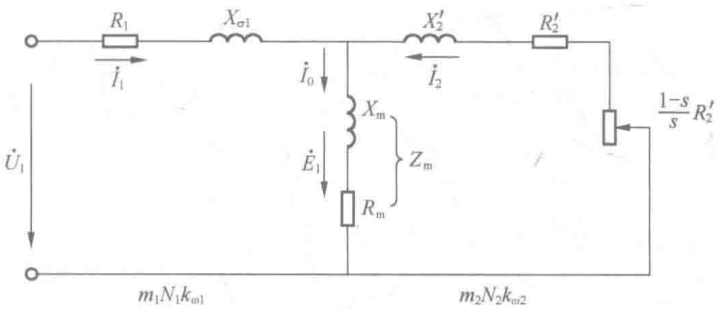


图 1-7 三相异步电动机的 T 形等效电路

1.1.4 三相异步电动机的变频控制

交流变频调速技术是目前三相异步电动机最成熟、最先进的调速方式。变频器既要处理巨大电能的转换（整流、逆变），又要处理信息的收集、变换和传输，因此它的共性技术必定分成功率转换和弱电控制两大部分。功率转换要解决与高压大电流有关的技术问题和新型电力电子器件的应用技术问题，弱电控制要解决基于现代控制理论的控制策略和智能控制策略的硬件、软件开发问题，目前主流的变频器都是采用全数字控制技术。

通用变频器的基本构造如图 1-8 所示。

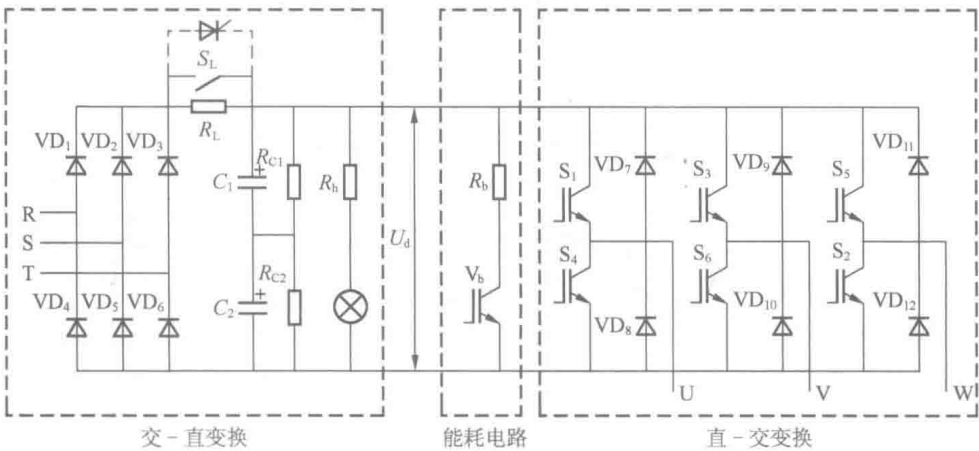


图 1-8 通用变频器的基本构造

1. 主回路的构成

通用变频器的主回路包括整流部分、直流环节、逆变部分、制动或回馈环节等部分。

1) 整流部分：通常又被称为电网侧变流部分，是把三相或单相交流电整流成直流电。常见的低压整流部分是由二极管构成的不可控三相桥式电路或由晶闸管构成的三相可控桥式电路。

2) 直流环节：由于逆变器的负载是异步电动机，属于感性负载，所以在中间直流部分与电动机之间总会有无功功率的交换，这种无功功率的交换一般都需要中间直流环节的储能元件（如电容或电感）来缓冲。

3) 逆变部分：通常又被称为负载侧变流部分，它通过不同的拓扑结构实现逆变元件的规律性关断和导通，从而得到任意频率的三相交流电输出。常见的逆变部分是由六个半导体主开关器件组成的三相桥式逆变电路。其半导体器件一般采用 IGBT 来作用，如图 1-9 所示。IGBT 是 GTR 与 MOSFET 组成的达林顿结构，即一个由 MOSFET 驱动的厚基区 PNP 晶体管， R_N 为晶体管基区内的调制电阻。IGBT 的驱动原理与电力 MOSFET 基本相同，是一个场控器件，通断由栅射极电压 u_{GE} 决定。

导通： u_{GE} 大于开启电压 $U_{GE(th)}$ 时，MOSFET 内形成沟道，为晶体管提供基极电流，IGBT 导通。

导通压降：电导调制效应使电阻 R_N 减小，使通态压降小。

关断：栅射极间施加反压或不加信号时，MOSFET 内的沟道消失，晶体管的基极电流被切断，IGBT 关断。

优点：高输入阻抗；电压控制、驱动功率小；开关频率高；饱和压降低；电压、电流容量较大，安全工作频率宽。

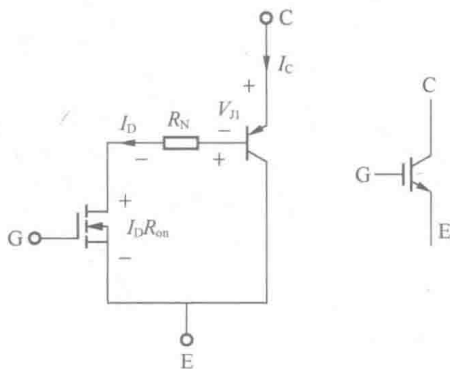


图 1-9 IGBT 原理

4) 制动或回馈环节：由于制动形成的再生能量在电动机侧容易聚集到变频器的直流环节，形成直流母线电压的泵升，因此需及时通过制动环节将能量以热能形式释放或者通过回馈环节转换到交流电网中去。

制动环节在不同的变频器中有不同的实现方式，通常小功率变频器都内置制动环节，即内置制动单元，有时还内置短时工作制的标配制动电阻；中功率段的变频器可以内置制动环节，但属于标配或选配（需根据不同品牌变频器的选型手册而定）；大功率

段的变频器其制动环节大多为外置。而回馈环节，则大多属于变频器的外置回路。

2. 控制回路

控制回路包括变频器的核心软件算法电路、检测传感电路、控制信号的输入输出电路、驱动电路和保护电路。现在以某通用变频器为例介绍控制回路。如图 1-10 所示，通用变频器控制回路包括以下几部分。

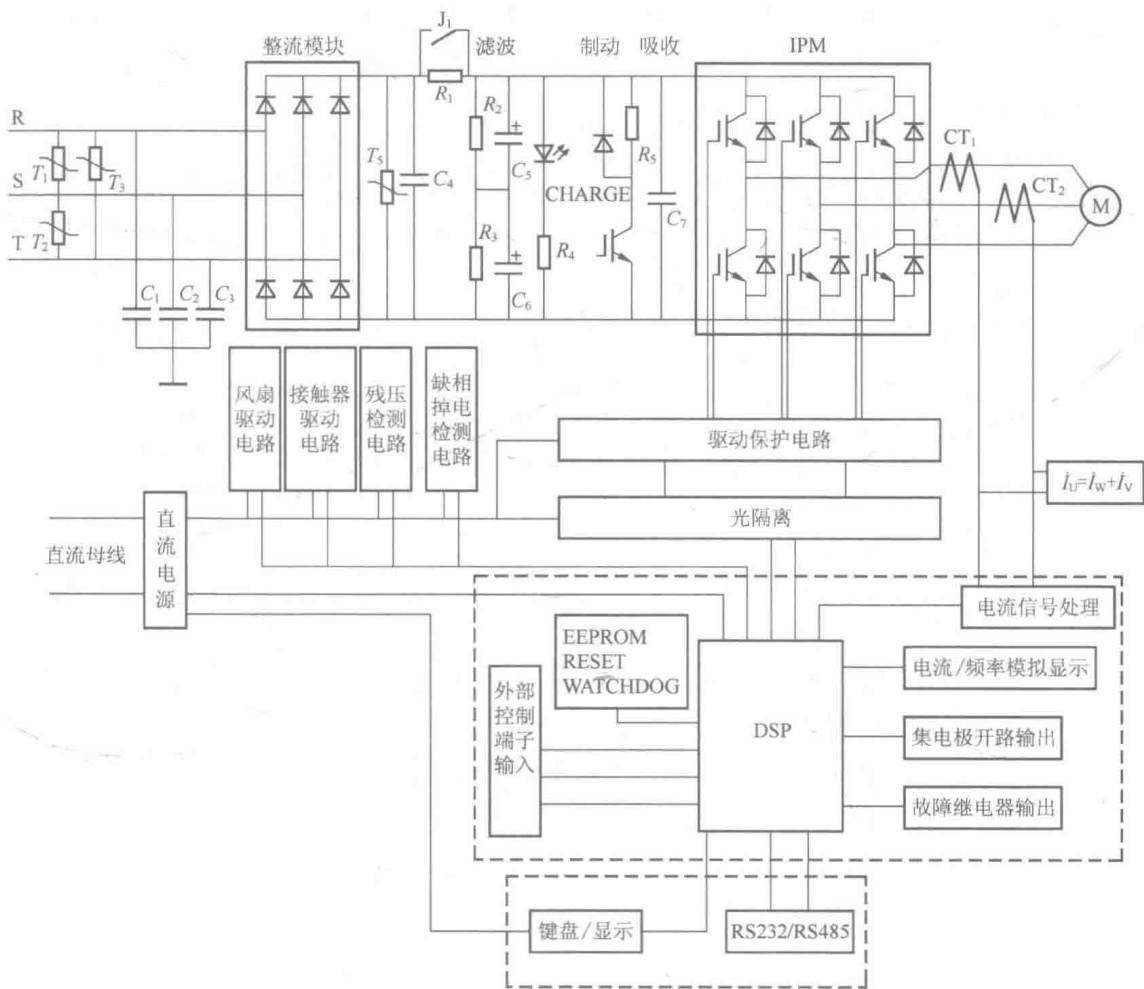


图 1-10 通用变频器控制回路图

(1) 直流电源

变频器的辅助电源采用直流电源，具有体积小、效率高等优点。电源输入为变频器主回路直流母线电压或将交流 380V 整流，通过脉冲变压器的隔离变换和变压器副边的整流滤波可得到多路输出直流电压，其中+15V、-15V、+5V 共地，±15V 给电流传感器、运算放大器等模拟电路供电，+5V 给 DSP 及外围数字电路供电；相互隔离的四组或六组+15V 电源给 IPM 驱动电路供电；+24V 为继电器、直流风机供电。

(2) DSP（数字信号处理器）

变频器采用的 DSP 通常为 TI 公司的产品，如 TMS320F240 系列等。它主要完成电

流、电压、温度采样，六路 PWM 输出，各种故障报警输入，电流、电压、频率设定信号输入，以及电动机控制算法的运算等功能。

(3) 输入输出端子

变频器控制电路输入输出端子包括：输入多功能选择端子、正反转端子、复位端子等；继电器输出端子、开路集电极输出多功能端子等；模拟量输入端子，包括外接模拟量信号用的电源（12V、10V 或 5V）及模拟电压量频率设定输入和模拟电流量频率设定输入；模拟量输出端子，包括输出频率模拟量和输出电流模拟量等，用户可以选择 0/4~20mA 直流电流表或 0~10V 的直流电压表，显示输出频率和输出电流，也可以通过功能码参数选择输出信号。

(4) SCI 口

TMS320F240 支持标准的异步串口通信，通信波特率可达 625kb/s。具有多机通信功能，通过一台上位机可实现多台变频器的远程控制和运行状态监视功能。

(5) 操作面板部分

DSP 可通过 SPI 口，与操作面板相连，完成按键信号的输入、显示数据输出等功能。

3. 恒压频比控制下的机械特性

通用变频器一般采用恒压频比控制，由变频器带动异步电动机带载稳态运行时，转矩输出为

$$T_l = 3n_p \left(\frac{U_1}{\omega_1} \right)^2 \frac{s\omega_1 R'_2}{(sR_1 + R'_2)^2 + s^2 \omega_1^2 (L_1 + L'_2)^2} \tag{1-4}$$

式（1-4）表明，对于同一负载要求，即以一定的转速 n_A 在一定的负载转矩 T_{LA} 下运行时，电压和频率可以有多种组合，其中恒压频比（ $U_1 / \omega_1 = \text{恒值}$ ）是最容易实现的，它的变频机械特性基本上是平行下移，硬度也较好，能满足一般的调速要求，但是低速带载能力还较差，需对定子压降实行补偿。图 1-11 中虚线为补偿定子压降后的机械特性。

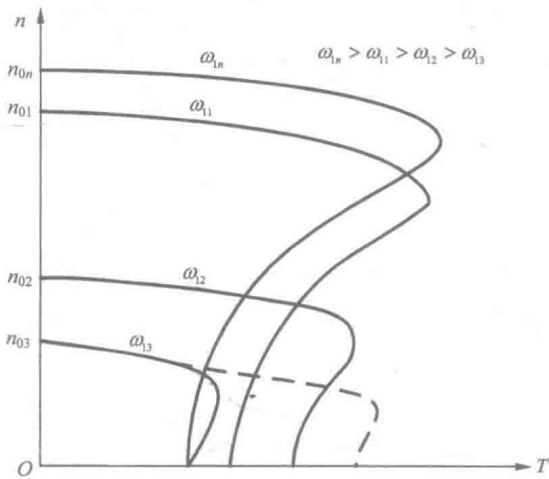


图 1-11 恒压频比变频调速的机械特性

为了近似地保持气隙磁通不变,以便充分利用电动机铁芯,发挥电动机产生转矩的能力,如图 1-12 所示,在基频以下采用恒压频比控制,实行恒压频比控制时,同步转速自然也随着频率变化,其公式为

$$n_0 = \frac{60\omega_1}{2\pi n_p} \quad (1-5)$$

因此带负载时的转速降落为

$$\Delta n = sn_0 = \frac{60}{2\pi n_p} s\omega_1 \quad (1-6)$$

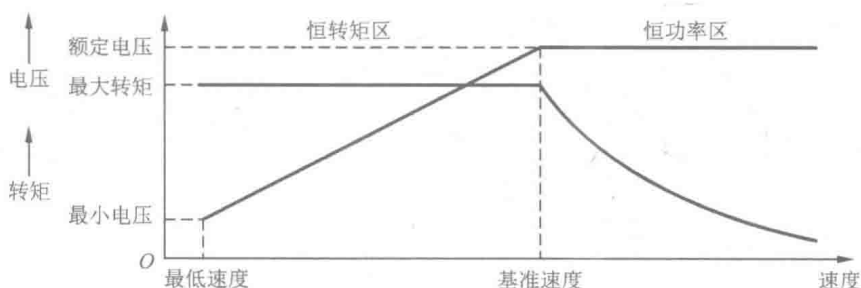


图 1-12 变频器的转矩-速度、电压-速度特性

在机械特性近似直线段上,可以导出

$$s\omega_1 \approx \frac{R'_2 T_e}{3n_p \left(\frac{U_1}{\omega_1}\right)^2} \quad (1-7)$$

由此可见,当 U_1/ω_1 为恒值时,对同一转矩 T , $s\omega_1$ 是基本不变的,因而 Δn 也是基本不变的,和其他直流他励电动机调速时的特性变化情况近似,所不同的是,当转矩达到最大值以后,转速再降低,特性就折回来了,而且频率越低转矩越小,如图 1-13 所示。

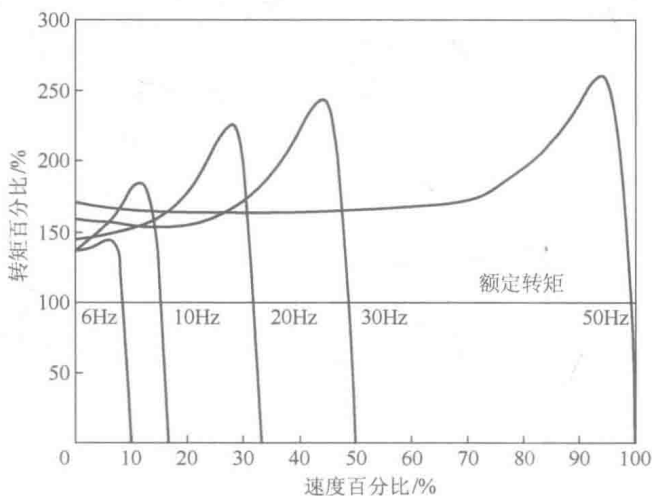


图 1-13 变频器的负载机械特性

对式 (1-4) 整理可得出 U_1/ω_1 为恒值时最大转矩 T_{emax} 与角频率 ω_1 的关系为

$$T_{\text{emax}} = \frac{3}{2} n_p \left(\frac{U_1}{\omega_1} \right)^2 \frac{1}{\frac{R_1}{\omega_1} + \sqrt{\left(\frac{R_1}{\omega_1} \right)^2 + (L_1 + L'_2)^2}} \quad (1-8)$$

可见, T_{emax} 是随着 ω_1 的降低而减小的, 频率很低时, T_{emax} 太小将限制调速系统的带载能力, 采用定子压降补偿, 适当提高电压 U_1 可以增强带载能力, 如将图 1-14 所示的原恒压频比曲线 1 (虚线所示) 适当提高电压 V_0 后变成新压频比曲线 2 (实线所示)。

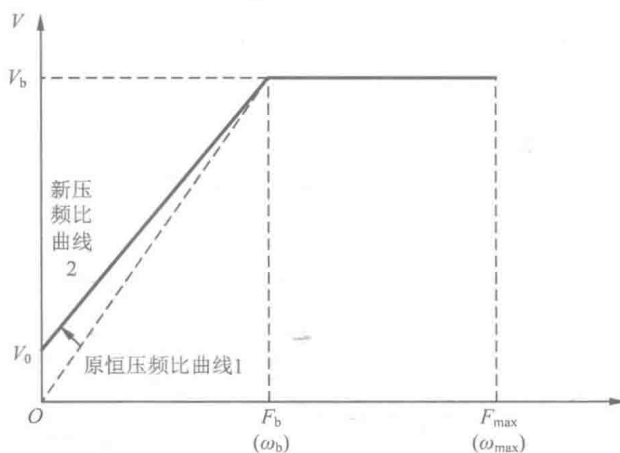


图 1-14 定子压降补偿

1.2 IGBT 桥式逆变电路的变频 PWM 控制

1.2.1 PWM 控制概述

图 1-15 所示是三种冲量相等而形状不同的窄脉冲, 其中, 冲量定义的窄脉冲的面积, 将这三种冲量加在具有惯性的环节上时, 惯性环节的输出响应波形基本相同。

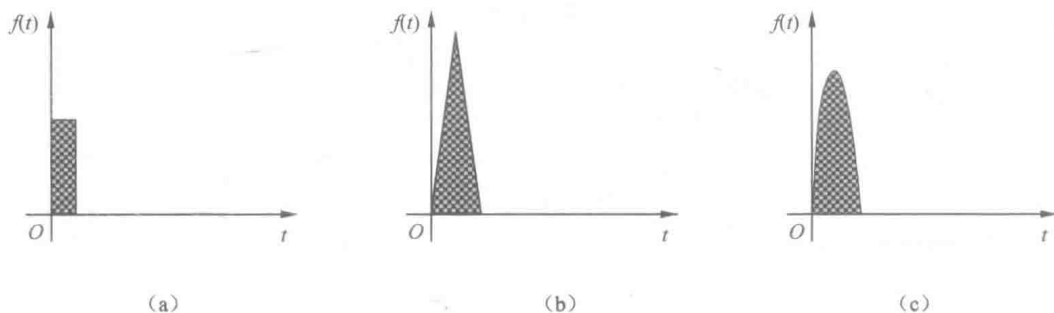


图 1-15 冲量相同而形状不同的各种窄脉冲

在各种窄脉冲中, PWM (pulse width modulation, 脉宽调制) 脉冲是其中一种容易实现的方式, 即通过对一系列脉冲的宽度进行调制来等效地获得所需要的波形 (含形状