# 智能控制
## 在变频传动系统中的应用

ZHINENG KONGZHI ZAI BIANPIN CHUANDONG XITONG ZHONG DE YINGYONG

曾允文 编

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

# 智能控制在变频传动系统中的应用

曾允文编

机 械 工 业 出 版 社

全书共分8章：第1章为变频传动系统概要，第2章为智能控制绪论并附混沌控制简介，第3章为模糊控制理论与应用基础，第4章为神经网络控制理论与应用基础，第5章为遗传算法理论与应用基础，第6章为智能控制在改进变频电源中的应用，第7章为智能控制在改进控制系统性能中的应用，第8章为智能控制在改进负载性能中的应用。

本书对研究智能控制在变频传动应用方面的工程师具有借鉴意义，对相关大专院校学生也有一定参考价值。

**图书在版编目（CIP）数据**

智能控制在变频传动系统中的应用/曾允文编. —北京：机械工业出版社，2012.3

ISBN 978-7-111-37611-8

Ⅰ.①智… Ⅱ.①曾… Ⅲ.①变频器—智能控制 Ⅳ.①TN773

中国版本图书馆CIP数据核字（2012）第034008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：罗 莉 责任编辑：罗 莉

版式设计：霍永明 责任校对：姜 婷

封面设计：陈 沛 责任印制：乔 宇

北京瑞德印刷有限公司印刷（三河市胜利装订厂装订）

2012年5月第1版第1次印刷

169mm×239mm·16 印张·325千字

0001—3000册

标准书号：ISBN 978-7-111-37611-8

定价：49.80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

社服务中心：(010)88361066

销售一部：(010)68326294

销售二部：(010)88379649

读者购书热线：(010)88379203

网络服务

门户网：http://www.cmpbook.com

教材网：http://www.cmpedu.com

**封面无防伪标均为盗版**

# 前　言

智能控制是在无人干预的情况下，能自主地驱动智能机器实现控制目标的自动控制技术，是一门新兴的学科。它的应用极为广泛，遍及自然科学和社会科学各个领域，大到复杂的航天航空装置、机器人、电力系统、商业营运等；小到家用电器中的洗衣机、空调器等，都起着极为有效有益的作用。其中包含了变频传动装置，这也是应用甚为广泛的领域。

目前智能控制在许多领域已有专著讲述在该领域的应用成果，但在变频传动系统尚缺乏有关的编著，本人有见于此，不揣浅陋，收集整理有关资料，编成这本《智能控制在变频传动系统中的应用》一书，以供有关人员阅读和参考。

根据变频传动系统的性质和范围及现有智能控制应用资料，本书的内容归纳为两类：

1. 智能控制理论与应用基础　讲述模糊控制、神经网络控制和遗传算法的基本理论与应用，其深度和广度以符合变频传动系统控制的要求为基准。由于混沌控制很多文献未把它列入智能控制，故未单独列为一章，但应用资料中也有用于变频传动的，而且还可以与智能控制融合应用，所以在本书中也作了简介。

2. 智能控制技术在变频传动系统中的应用　讲述的范围是围绕变频传动系统组成部分的改进，分三个方面：一是对变频电源；二是对控制系统；三是对负载。先提出该部分存在的问题，再用智能控制实例阐述改进的方案及其效果。

全书共分8章：第1章为变频传动系统概要，第2章为智能控制绪论，并附混沌控制简介，第3章为模糊控制理论与应用基础，第4章为神经网络控制理论与应用基础，第5章为遗传算法理论与应用基础，第6章为智能控制在改进变频电源中的应用，第7章为智能控制在改进控制系统性能中的应用，第8章为智能控制在改进负载性能中的应用。

本书属于汇编性质，参考和引用了许多文献资料，谨对原编著者致以衷心的感谢。由于地址不详等因素未能一一联系上，深表歉意，请予见谅。

本书编者水平有限，在全书内容的编排和对文献的理解等方面，均有许多不当之处，请读者和专家不吝指正。

编　者

# 目　录

前言
第 1 章　变频传动系统概要 …… 1
1.1　变频传动概述 …… 1
1.1.1　传动的意义和历史 …… 1
1.1.2　两种电气传动的竞争 …… 1
1.1.3　变频调速一枝独秀 …… 2
1.1.4　变频传动的定义与几个术语的区分 …… 3
1.1.5　变频传动系统的组成 …… 4
1.2　变频电源 …… 5
1.2.1　概述 …… 5
1.2.2　交-直-交电压型变频器 …… 5
1.2.3　交-直-交电流型变频器及交-交变频器 …… 6
1.2.4　变频器的谐波与对策 …… 8
1.3　电动机 …… 16
1.3.1　异步电动机的结构和工作原理 …… 16
1.3.2　异步电动的转矩、转速和机械特性 …… 17
1.3.3　异步电动机的运行 …… 19
1.3.4　同步电动机 …… 23
1.4　变频传动的负载 …… 24
1.4.1　负载的机械特性 …… 25
1.4.2　主要生产机械的特点及其负载特性 …… 27
1.4.3　变频传动稳定运行与机械特性的配合 …… 32
1.4.4　电动机、变频器功率的选择 …… 33
1.5　控制系统 …… 35
1.5.1　概述 …… 35
1.5.2　转速、电流双闭环控制系统 …… 35
1.5.3　转差频率控制系统 …… 36
1.5.4　矢量变换控制系统 …… 37
1.5.5　直接转矩控制系统 …… 40
1.6　变频传动系统的发展趋势 …… 43
附录 …… 43
附录 1　矢量控制动态方程[9] …… 43
附录 2　直接转矩控制动态方程[9] …… 44
参考文献 …… 45

**第 2 章　智能控制引论** …… 46
2.1　智能控制的定义和分类 …… 46
2.1.1　智能控制的定义 …… 46
2.1.2　智能控制的结构理论与分类 …… 47
2.1.3　智能控制的特点与传统控制的关系 …… 48
2.2　智能控制的应用范围及在变频传动系统中的应用 …… 49
2.3　混沌控制简介 …… 51
2.3.1　混沌和混沌理论 …… 51
2.3.2　混沌的产生 …… 52
2.3.3　混沌的定义及特点 …… 53
2.3.4　混沌控制的目标和方法 …… 54
附录——名词解释 …… 56
参考文献 …… 59
**第 3 章　模糊控制理论与应用基础** …… 60
3.1　概述 …… 60
3.1.1　模糊控制的意义 …… 60
3.1.2　模糊控制系统的结构与工作原理 …… 61
3.1.3　模糊控制的优缺点 …… 61
3.2　模糊集合和输入精确量模糊化 …… 62
3.2.1　模糊集合和隶属函数 …… 62
3.2.2　模糊集合的运算 …… 66
3.2.3　输入量精确值模糊化 …… 68
3.3　知识库与模糊控制规则 …… 69
3.3.1　知识库 …… 69
3.3.2　模糊控制规则的建立 …… 70
3.3.3　模糊控制规则的形式 …… 71
3.3.4　模糊控制规则的设计 …… 71
3.4　模糊推理 …… 72
3.4.1　常用模糊语句 …… 72
3.4.2　模糊关系与模糊矩阵 …… 73
3.4.3　模糊推理法 …… 75
3.4.4　模糊关系方程 …… 76
3.5　解模糊化 …… 77
3.5.1　重心法 …… 77
3.5.2　加权平均法 …… 77
3.5.3　最大隶属度法 …… 77
3.5.4　中位数法 …… 78
3.6　模糊控制系统的分类和举例 …… 78
3.6.1　模糊控制系统的分类 …… 78

3.6.2 模糊控制系统举例 …… 79
3.7 模糊控制的应用 …… 84
3.8 模糊 PID 控制器 …… 85
3.8.1 传统 PID 控制器工作特点 …… 85
3.8.2 模糊 PID 控制器 …… 86
附录——名词解释 …… 91
参考文献 …… 92
**第 4 章 神经网络控制理论与应用基础** …… 93
4.1 人工神经网络概述 …… 93
4.1.1 人脑神经网络与神经元 …… 93
4.1.2 人工神经网络与神经元 …… 94
4.1.3 人工神经网络的应用 …… 94
4.2 神经网络的分类与基本模型 …… 95
4.2.1 神经网络的分类和功能 …… 95
4.2.2 神经网络基本模型 …… 95
4.2.3 感知器 …… 97
4.3 神经网络的学习方法 …… 97
4.3.1 有导师学习（监督学习） …… 98
4.3.2 无导师学习（无监督学习或自组织学习） …… 99
4.3.3 再励学习 …… 99
4.4 感知器学习算法与多层感知器 …… 99
4.5 BP 神经网络 …… 101
4.5.1 BP 神经网络的拓扑结构 …… 101
4.5.2 BP 算法 …… 101
4.6 RBF 神经网络 …… 108
4.7 反馈型神经网络 …… 109
4.7.1 Hopfield 神经网络 …… 109
4.7.2 Boltzmann 学习机网络 …… 110
4.7.3 Kohonen 神经网络 …… 110
4.8 竞争学习神经网络 …… 111
4.8.1 基本原理 …… 111
4.8.2 竞争学习神经网络的实现 …… 112
4.9 神经网络控制的应用 …… 112
4.9.1 神经网络的优越性与应用领域 …… 112
4.9.2 神经网络系统辨识 …… 113
4.9.3 神经网络自适应控制 …… 114
4.9.4 神经网络预测控制 …… 116
4.9.5 神经网络控制器 …… 116
4.10 单神经元 PID 控制 …… 116

4.11　神经网络 PID 控制器 …… 118
4.11.1　神经网络 PID 控制器的结构 …… 118
4.11.2　神经网络 PID 控制器控制算法 …… 118
4.11.3　仿真实例 …… 118
4.12　模糊神经网络控制系统 …… 119
附录 …… 120
附录 1　符号说明 …… 120
附录 2　名词解释 …… 121
参考文献 …… 122
**第 5 章　遗传算法理论与应用基础** …… 123
5.1　概述 …… 123
5.1.1　遗传算法是新的全局优化搜索算法 …… 123
5.1.2　遗传算法主要概念解释及与生物学及实际问题的对应关系 …… 124
5.2　遗传算法的基本内容 …… 125
5.2.1　选取与设定初始群体 …… 125
5.2.2　参数编码 …… 126
5.2.3　适应度函数的计算 …… 126
5.2.4　遗传操作设计 …… 126
5.2.5　终止条件 …… 128
5.2.6　小结 …… 129
5.3　模式定理和积木假说 …… 129
5.3.1　模式定理 …… 129
5.3.2　积木（基因块）假说 …… 130
5.3.3　遗传算子对模式的影响 …… 130
5.4　遗传算法的实现 …… 131
5.5　遗传算法特点 …… 134
5.6　遗传算法举例 …… 135
5.7　免疫算法 …… 137
5.7.1　概述 …… 137
5.7.2　IGA 的主要步骤 …… 138
5.7.3　免疫克隆算法 …… 139
5.8　遗传算法的应用 …… 140
5.9　基于遗传算法的 PID 控制技术 …… 141
5.9.1　PID 控制概述 …… 141
5.9.2　采用遗传算法的 PID 控制方法 …… 141
5.10　遗传算法与人工神经网络结合的应用 …… 142
5.10.1　概述 …… 142
5.10.2　采用遗传算法的神经网络应用示例 …… 142
5.10.3　结束语 …… 144

参考文献 …… 144
**第 6 章 智能控制在改进变频电源中的应用** …… 145
6.1 SPWM 变频电源 …… 145
6.1.1 神经网络控制用于改进 SPWM 逆变器的优化 …… 146
6.1.2 模糊控制与 PID 控制结合的控制系统 …… 151
6.1.3 混沌随机 TPWM 低载波频率逆变器 …… 155
6.2 SVPWM 变频器 …… 158
6.2.1 神经网络法在 SVPWM 技术中的改进应用 …… 158
6.2.2 IA 在 SVPWM 逆变器控制中的应用 …… 161
6.3 变频器中整流器的改进 …… 167
6.3.1 整流器改进的必要性 …… 167
6.3.2 基于神经元控制的 SVPWM 整流器直接功率控制 …… 168
附录——名词解释 …… 173
参考文献 …… 173
**第 7 章 智能控制在改进控制系统性能中的应用** …… 175
7.1 概述 …… 175
7.1.1 控制系统的技术指标 …… 175
7.1.2 智能控制对改进控制系统性能的作用 …… 176
7.2 转速、电流双闭环系统和转差频率控制系统的改进 …… 176
7.2.1 概述 …… 176
7.2.2 PLC 模糊神经网络变频调速系统 …… 177
7.3 矢量控制系统的改进 …… 183
7.3.1 概述 …… 183
7.3.2 智能控制方案简介 …… 184
7.3.3 模糊 PID 异步电动机矢量控制 …… 184
7.3.4 免疫遗传模糊神经网络的永磁同步电动机矢量控制 …… 190
7.4 直接转矩控制系统的改进 …… 196
7.4.1 概述 …… 196
7.4.2 遗传算法模糊自适应异步电动机直接转矩控制 …… 197
7.4.3 模糊控制永磁同步电动机直接转矩控制 …… 205
参考文献 …… 209
**第 8 章 智能控制在改进负载性能中的应用** …… 210
8.1 金属切削机床 …… 210
8.1.1 概述 …… 210
8.1.2 加工过程的神经网络自适应控制 …… 211
8.2 电力机车 …… 215
8.2.1 引言 …… 215
8.2.2 采用遗传算法的受电弓优化设计 …… 216
8.3 起重机 …… 220

8.3.1　引论 …… 220
8.3.2　模糊 PID 控制器在起重机纠偏系统中的应用 …… 220
8.4　电梯 …… 225
8.4.1　引言 …… 225
8.4.2　遗传算法电梯群控 …… 225
8.5　变频空调器 …… 228
8.5.1　引言 …… 228
8.5.2　模糊控制变频空调器 …… 228
8.6　多电动机群控 …… 234
8.6.1　引言 …… 234
8.6.2　神经网络的多电动机同步协调控制 …… 234
8.7　注塑机 …… 237
8.7.1　引言 …… 237
8.7.2　注塑成型智能监控系统的研究 …… 238
参考文献 …… 243

# 第 1 章

# 变频传动系统概要

## 1.1 变频传动概述

### 1.1.1 传动的意义和历史

传动是指由原动机带动生产机械运转，以完成一定的生产任务，是一种功率传送的过程。古时人类利用畜力拉车、磨面，就是畜力传动，牲畜是原动机，车和磨盘是生产机械，属于原始的传动方式，用途极为有限。18 世纪发明蒸汽机、内燃机等原动机后，传动进了一大步，利用蒸汽机、内燃机作原动机，带动各种机械生产，使生产产品多样化和效率大为提高，用途范围急剧增加，这种传动属于机械传动。19 世纪发明了电动机，由于使用方便、效率更高、装置轻小、占地面积小等一系列优点，很快取代了那些笨重的原动机进行传动，这便是电气传动或称电力拖动，使人类进入电气传动时代，对人类进步具有重大的历史意义。

### 1.1.2 两种电气传动的竞争

进入电气传动时代存在两种传动方式：一种是采用直流电动机为原动机的直流传动，另一种是采用交流电动机为原动机的交流传动，它们之间产生了竞争，首先是直流传动独领风骚。由于生产的需要，传动系统必须有调速的功能，例如车辆运行有快和慢的需要，机床切削加工有高速和低速的要求。直流电动机能满足要求，它可以通过调节电压或励磁任意改变速度，简单方便而且是无级调速。而交流电动机在很长时期内还无法调速，只能凭带轮或齿轮箱去手动改变速度，装置笨重，功率损耗也大，因此直流调速得以称雄一时。随后交流电动机调速方法一一发现，形势大为改观。

原来交流电动机传动，生产上普遍采用笼型异步电动机，这种电动机具有结构简单坚固、体积小、重量轻、维护简便、价格低廉，能适应恶劣工作环境。而直流电动机却有着不可克服的缺点：首先，结构复杂、体积较大，导致价格较高；其次，具有换向器和电刷，经常要清理和置换，增加了维护工作量，且不适应潮湿、粉尘多的环境，特别是有可燃气体的场合，电刷与换向器之间产生的火花会引起爆

炸。两相对比，人们必然会欢迎交流传动，于是它得到广泛的应用，发展到今日已在很多领域取代直流传动。

### 1.1.3　变频调速一枝独秀

在交流传动领域中，存在着几种调速方式，它们的调速原理是根据电动机的下列转速公式来划分的：

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

式中　$n$——转速（r/min）

$f$——电源频率（Hz）

$p$——极对数

$s$——转差率，对于同步电动机 $s=0$。

从式（1-1）可知，只要改变 $f$、$s$ 或 $p$ 任一个参数，即可改变转速（调速）。

（1）改变 $f$ 即为变频调速，其优点下面详述。

（2）改变 $p$ 为变极调速，可以看出，只能有少数几档速度，且属于有级调速，应用范围很小，只在那些不需多档或无级调速的场合作为调速手段。有了变频调速之后，此种方式很少使用。

（3）改变转差率 $s$ 调速，属于无级调速，实现方法常用的有两种；

1）调压调速方式，这种方式用改变串入电动机定子三相绕组的电阻或电抗来改变施加于电动机的电压，从而实现调速，与此同时，电动机运行的转差率也就跟着改变，故属于改变转差率调速。此种方式在串联阻抗上存在着显著的功率损耗，还有调速范围不宽、机械特性很软的缺点，有了变频调速之后，这种方式也已很少使用。

2）转差离合器调速，这种调速是利用电动机和负载之间装着的转差离合器改变电动机速度，也属于调节转差率调速，虽可在一定范围内调速，但同时也存在转差损耗、特性软的缺点；特别是装置十分庞大笨重，现已废止采用。

回头再看看改变频率 $f$ 的变频调速有哪些优点：

1）可以平滑无级调速，其范围可从几赫兹到上万赫兹；

2）转差率很小，故损耗很小，效率较高；

3）机械特性较硬，调速精度较高；

4）用于笼型异步电动机，可以充分发挥该型电动机的长处。

根据上述优点，可见变频调速是一种理想的调速方式。

在此补充说明一点，异步电动机还有一种绕线转子电动机，它的转子与笼型电动机转子不同。笼型电动机的转子为铸铝短路式绕组，而绕线转子电动机的转子却嵌上三相绝缘绕组，可有两种调速方式：一种是通过电刷和集电环与分段电阻相连，目的是减小起动电流和产生较大的起动转矩，并可通过改变电阻进行调速。很

明显，它和上述调压调速相似，存在损耗大、效率低、特性软、调速范围小等缺点，体积也显著庞大。另一种是通过电刷与集电环和一个与转子电动势同频率、同相位的外加电动势相连，改变此电动势的大小或相位而进行调速，称为串级调速，可以克服前一种方式的缺点。但是存在低速运行过载能力低、功率因数较低、设备复杂庞大、成本高的缺点，目前逐渐被淘汰。

根据以上所述，变频调速与其他交流调速传动相比，可说是一枝独秀，技压群芳。

### 1.1.4　变频传动的定义与几个术语的区分

**1. 变频传动的定义**

采用变频调速的交流传动就是本书所述的变频传动（Variable Frequency Drive），变频传动是一种通过改变输入电源频率的方式来控制交流电动机，从而驱动负载完成生产任务的技术。上面总结变频调速的优点就是变频传动的优点，一般来说，异步电动机变频调速是专指笼型异步电动机，交流电动机还有同步电动机，采用变频调速其效果基本与异步电动机的相同，故同步电动机传动也属于变频传动，其优缺点后面将有讲述。

自从 20 世纪 50 年代末晶闸管诞生后，60 年代交付生产的变频调速装置相继产生，随着时间的流逝，迄今已有半个世纪；依托着电力电子技术、电气传动技术、控制理论和计算机技术等学科不断地发展丰富，变频调速已从昔日的谐波严重、调速范围不宽、效率不高、应用不广等“原始”状态，发展到今天的开关器件不断更新换代，脉宽调制（PWM）技术日益成熟，近代控制理论得到应用，计算机引入，促使变频调速的控制性能、操作安全性不断地提高完善，应用遍及各行各业，新型变频器不断涌现，因此不仅可取代昔日称雄调速领域的直流调速，而且有一统调速领域之势。表 1-1 示出变频传动范围，可见应用极为广阔。

**2. 变频传动与几个术语的区分**

（1）变频传动系统与变频调速系统

这两个术语内容是一致的，但是变频调速系统有不包含负载的意思，而变频传动系统则明确包含负载，即被驱动的生产机械。

（2）变频传动与电气传动

变频传动是电气传动中的一类，不宜混淆和互相代用。

（3）变频传动系统与运动控制系统

运动控制是国外将电气传动改用的新术语，由电源部分、执行器部分和控制器部分组成，其中控制器接收上位计算机的指令，完成执行器运动控制和管理。因此该术语富有时代特色，按此，变频传动系统属于运动控制系统的一种。

4）变频传动与机电一体化

机电一体化是指生产机械与配电、电子控制结合为一体，和变频传动有相同的

内容，但变频传动的负载超过机电一体化的范围，而且没有生产机械设计方面的内容。

**表 1-1　变频调速技术应用范围及用途**

| 变频器传动的效能 | 应 用 领 域 | 主要相关技术 | 适用变频器 |
|---|---|---|---|
| 节能 | 风扇、鼓风机、泵、提升机、挤压机、搅拌机、传送带、工业用洗衣机 | 为提高运行可靠性，台数控制和调速控制并用 | 通用变频器 |
| 提高生产率 | 提升机、起重机、机床、食品机械、挤压机和自动仓库 | 运行程序或加工工艺的最佳速度，原有设备的增速运行，运转可靠性提高 | 通用变频器、专用变频器 |
| 提高产品质量 | 风扇、鼓风机、泵、机床、食品机械、造纸机、薄膜生产线、钢板加工生产线、印制电路板基板钻孔机、高速雕刻机 | 平滑加减速，加工对象所需最佳速度选定，高精度转矩控制，高精度定位停止，无转矩脉动，高速传动 | 通用变频器、系统用矢量控制变频器、高速通用变频器 |
| 设备合理化，少维护，低成本，机械的标准化、简单化与工厂自动化（FA） | 搬送机械，金属加工机械、纤维机械，造纸生产线、薄膜生产线、钢板加工生产线 | 原有设备的增速运行，高精度转矩控制，多台电动机联动运行，多台电动机联动比例运行，提高运转可靠性，传送控制 | 通用变频器、通用矢量控制变频器、系统用矢量控制变频器 |
| 改善或适应环境 | 空调机、风扇、鼓风机、压缩机、电梯 | 静音化，平滑加减速，使用防爆电动机、安全性等技术 | 通用变频器、专用变频器 |

综上所述，如果认为交流传动可以取代直流传动，变频传动又是交流传动硕果仅存的一种优胜者，那么变频传动将接近可取代电气传动和运动控制这两个术语了。

### 1.1.5　变频传动系统的组成

变频传动系统由变频电源（变频器）、交流电动机、负载和控制系统四个部分组成，如图 1-1 所示。其中电动机与负载之间，有的是直接连接，有的是通过称之为传动机构的带轮或齿轮连接，不属于主要组成部分。下面将分别讲述四个主要组成部分。

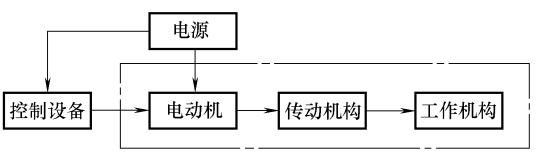



图 1-1　变频传动系统

## 1.2　变频电源

### 1.2.1　概述

变频电源也就是变频器，它是变频传动系统的核心，提供传动的功率，也是调速功能的根源。变频器分为交–交变频器和交–直–交变频器两大类。所谓交–交变频器，就是交流电进入变频器直接变成三相频率可调的交流电输出，故称为交–交变频器，如图 1-2a 所示。所谓交–直–交变频器就是交流电输入，经整流器整流成直流电，然后经过滤波环节，再进入逆变器，逆变成三相频率可调的交流电，故称为交–直–交变频器，如图 1-2b 所示。交–直–交变频器又分电压型（大电容滤波）和电流型（大电感滤波）两类。目前广泛使用的主要是交–直–交电压型变频器，电流型和交–交变频器已日渐减少，故本书所讲述的变频传动属于交–直–交电压型变频器。由于电力电子技术的高度发展，新的开关器件绝缘栅双极型晶体管（IGBT）和集成门极换流晶闸管（IGCT）以及它们的模块，加上计算机应用，使此类变频器性能更为完善，因此获得广泛的应用。由于交–直–交电压型变频器变频功能由逆变器部分实现，习惯把此种变频器直接称为逆变器。

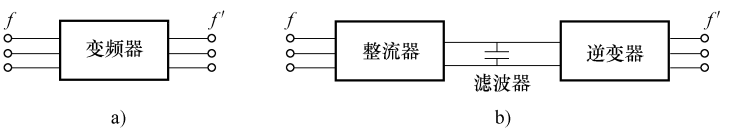



图 1-2　变频器分类
a）交–交变频器　b）交–直–交变频器

变频器还可按额定电压分为低压变频器和高压变频器，低压变频器输出电压为 380/220V，适配常用的电动机，将低压变频器和配电与控制设备组装成一体，称为通用变频器，使用十分方便，国内外市场上大量供应。高压变频器适配高压电动机，电动机电压分为三个等级：3kV、6kV、10kV。高压变频器的主电路结构除了传统三相桥式外，还有功率单元串联等结构形式。

近年来，除了传统结构的变频器，还涌现一些新型变频器。例如矩阵式变频器可以取代传统的交–交变频器；还有软开关变频器可以减少开关损耗，向现有的硬开关变频器提出了挑战。这类变频器进一步改善，很有广阔的使用前景。

### 1.2.2　交–直–交电压型变频器

图 1-3 所示为一六拍交–直–交电压型三相变频器拓扑结构，左侧为二极管不控整流器，提供直流电源；中间为大电容滤波，以获得平直的直流；右侧为逆变器。

逆变器用 6 个 IGBT $VI_1 \sim VI_6$ 构成三相逆变桥（称为六拍三相桥），$VI_1$、$VI_3$、$VI_5$ 为共阳极组，$VI_2$、$VI_4$、$VI_6$ 为共阴极组；每个桥臂由两个 IGBT 串联，从连接点引出三相接线。把一个周期 $T$ 等分为 360°（参看图 1-4），将 $VI_1 \sim VI_6$ 以相隔 60°的电角度依次导通，每个 IGBT 导通 180°；任一时刻有三个 IGBT 导通，同桥臂的另一个 IGBT 必须关断；这样工作下去，逆变器便可对三相负载 $Z_a \sim Z_c$ 输出三相交流。调节触发频率（$T$ 时间长短），便可调节输出交流的频率，其波形如图 1-4 所示。改变直流电压 $U_d$ 便可改变逆变器输出交流电压，从而完成变压变频（VVVF）的功能。

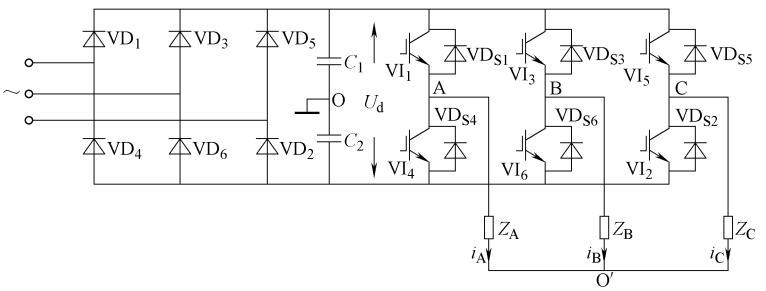



图 1-3　电压型变频器拓扑结构

IGBT 是新一代电力电子器件，属全控型，即导通及关断均可控制；且电压、电流等级均很高，工作频率也很高，栅极损耗很小，为其他全控型，如大功率晶体管（GTR）和门极关断（GTO）晶闸管所不及，故为高、低压变频器所广泛采用。在大电流场合，可采用另一种新一代开关器件 IGCT。

采用此类器件的电压型变频器具有不需要换相电路，动态响应快，抗干扰能力较强，且适于调制工作等优点，故在高、低压变频器中得到广泛应用。

在此请读者注意，由于改变频率的功能是在逆变器中完成，因此一般来说，逆变器就是指交–直–交变频器，特别是电压型，以下各章说逆变器就是指电压型变频器。

### 1.2.3　交–直–交电流型变频器及交–交变频器

**1. 交–直–交电流型变频器**

交–直–交电流型变频器的结构和工作原理与电压型变频器的相似，逆变器亦为六拍三相桥，只是直流环节用大电感滤波，如图 1-5a 所示。

由于大电感滤波，输出电流呈矩形波，而电压则随负载而变化，如图 1-5b 所示。由于大电感的存在，对抗负载短路的功能很强，这是此类变频器的优点。但大的电抗器沉重且造价高乃是缺点。

变频器的逆变器部分常采用晶闸管作为开关器件，晶闸管是最早开发成功的器

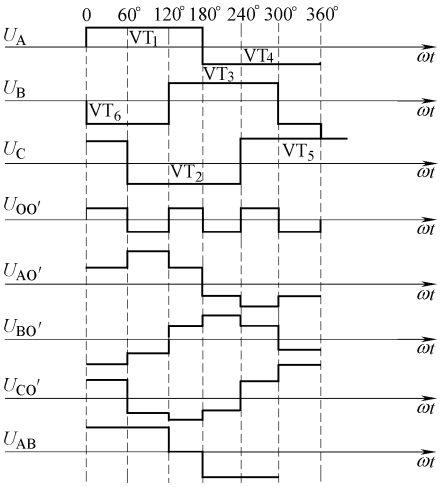



图 1-4　电压型三相变频器输出波形

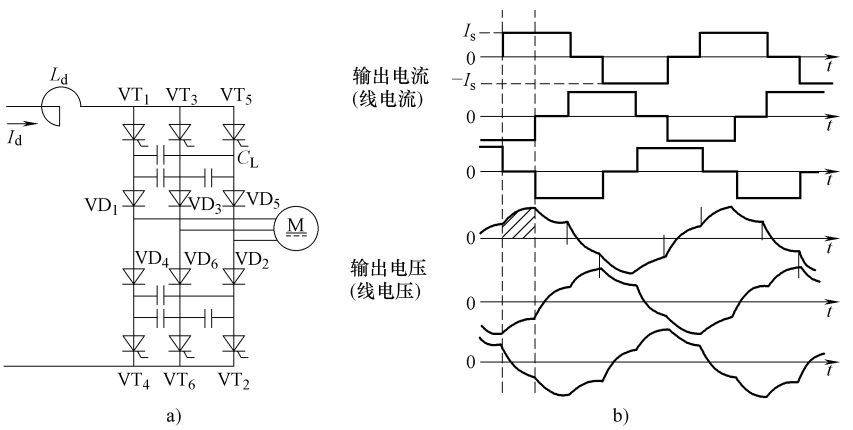



图 1-5　交–直–交电流型变频器
a）电路　b）输出电压、电流波形

件，属于半控型，即只能控制其导通；导通以后要用换相电路对其阴极施以反向电压，才能将其关断，因此增加了变频器的损耗和复杂性。

基于以上所述，现在电流型变频器少有采用。

**2. 交–交变频器**

交–交变频器是将某一固定频率的交流电直接变换为频率可调的交流电，除了能调频，还要求能调压，其基本原理可用图 1-6a 单相变频器说明，由正、反两组可控整流器反并联组成。两组输入交流电，设正组整流器导通工作，反组整流器关断，则在正组输出电压 $E_p$ 作用下，负载电压上端为正、下端为负。隔一定时间关