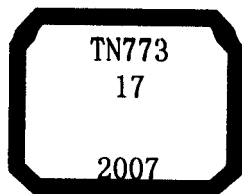


变频器应用教程

张燕宾 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



变频器应用教程

张燕宾 编著



机械工业出版社

本书介绍了低压变频器的基本原理及其主要功能,讲述了异步电动机的变频调速系统在使用过程中需要注意的问题,并具体分析了变频调速系统在不同类型负载中应用的要点,最后就变频调速的经济效益问题进行了比较详细的论述。

图书在版编目 (CIP) 数据

变频器应用教程/张燕宾编著. —北京:机械工业出版社, 2007. 1

ISBN 7-111-20307-0

I. 变... II. 张... III. 变频器—教材 IV. TN773

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 131374 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:李振标 版式设计:冉晓华 责任校对:申春香

封面设计:陈沛 责任印制:洪汉军

北京瑞德印刷有限公司印刷

2007 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

140mm × 203mm · 12.125 印张 · 2 插页 · 321 千字

0001—4000 册

定价:28.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379765

封面无防伪标均为盗版

前 言

2003年7月，我曾出了一本《实用变频调速技术培训教程》，迄今已经三年多了，出版社问我：“是否修改一部分，出第2版？”我反复考虑后回答说：“干脆重写吧。”

我决定重写的理由主要有以下几个方面：

首先是在这过去的三年多里，我又主讲了数十遍。每讲一次，我都要根据学员们的反映和自己新的体会进行修改。经过了数十次的修改，早已面目全非了。

其次，部分中专或职高的老师告诉我，他们用我的书作了教材。我很感不安，因为我写的东西没有一本真正适合作教材的。那本《培训教程》从内容上说比较适合，但标题却用的是顺口溜，作为教材，多少有点另类的感觉。

此外，曾遇到过几位同行，他们也和我一样，做着变频调速的推广普及工作，也用了那本《培训教程》。他们觉得，书中的部分顺口溜不容易深切领会，毋庸讳言，也有部分顺口溜是颇为牵强的。

所以想趁着这次改写的机会，就按常规方式重写吧。

在编写过程中，也征求过部分同志的意见。有人说，原书中对于各种故障的判断流程，虽然在讲解时显得枯燥，但很有参考价值，建议保留。也有人说，原书中对于PLC的简单介绍，通俗易懂。对于没有接触过PLC的人十分有用，也建议保留。

以上两部分内容，都作为附录，保留了下来。

在此，谨向所有提出过意见的同志表示衷心的感谢！

作 者

目 录

前言

第 1 章 变频器的主电路	1
1.1 三相交流异步电动机简介	1
1.1.1 三相交流异步电动机的结构和原理	1
1.1.2 变频调速原理	3
1.2 电动机在能量转换中的平衡关系	4
1.2.1 电动机从电网取用电能时的平衡关系	5
1.2.2 转子从定子侧吸收能量的平衡关系	8
1.2.3 负载得到机械能的平衡关系	12
1.3 交-直-交变频器的主电路及其演变	13
1.3.1 交-直-交变频器的结构与原理	13
1.3.2 逆变器件的工作条件与发展	15
1.4 变频器的输出电压与频率	22
1.4.1 变频调速出现的新问题	22
1.4.2 变频与变压	25
1.4.3 变频变压的具体方法	27
1.4.4 正弦脉宽调制的实现	29
1.5 交-直-交变频器的主电路	31
1.5.1 整流与滤波	31
1.5.2 逆变电路	35
1.5.3 进一步认识主电路	42
1.6 变频器的功率因数	47
1.6.1 变频器的输入电流	47
1.6.2 功率因数的定义	47
1.6.3 提高功率因数的方法	49
1.7 主电路的干扰问题	52
1.7.1 变频器的干扰源	52

1.7.2 电路耦合引起的干扰	52
1.7.3 感应耦合引起的干扰	54
1.7.4 电磁辐射引起的干扰	56
1.8 主电路的测量	58
1.8.1 输出电压的测量	58
1.8.2 输入电流的测量	61
1.8.3 输入功率的测量	62
1.9 小结	63
1.10 复习思考题	65
第2章 电动机变频后的带负载特性	67
2.1 异步电动机的机械特性	67
2.1.1 异步电动机的自然机械特性	68
2.1.2 异步电动机的人工机械特性	70
2.2 V/F 控制方式	72
2.2.1 低频时带负载能力下降的原因	72
2.2.2 保持带负载能力不变的方法	74
2.2.3 负载变化对电动机磁路的影响	76
2.3 U/f 线的选择与调整	79
2.3.1 基本频率及其调整	79
2.3.2 转矩补偿后的电流变化规律	81
2.3.3 准确预置 U/f 比举例	82
2.3.4 补偿不当举例	84
2.4 矢量控制方式	86
2.4.1 矢量控制的基本思想	86
2.4.2 应用矢量控制方式的基本要领	88
2.4.3 矢量控制的特点与应用	89
2.5 变频调速的有效转矩线	92
2.5.1 有效转矩线的概念	92
2.5.2 $f_x \leq f_N$ 的有效转矩线	95
2.5.3 $f_x > f_N$ 的有效转矩线	96
2.6 拖动系统的传动机构	98
2.6.1 常见的传动机构	98
2.6.2 传动系统的折算	99

2.6.3 调整传动比在实际工作中的应用	102
2.7 变频拖动系统的基本规律	105
2.7.1 变频拖动系统必须满足的条件	105
2.7.2 电动机调速时的功率变化	106
2.7.3 负载调速时的功率变化	108
2.7.4 电动机的额定转矩与额定转速的关系	111
2.7.5 传动比在拖动系统中的作用	113
2.8 变频器的选型	116
2.8.1 变频器容量的选择	116
2.8.2 负载工况与变频器容量的关系	118
2.8.3 一台变频器带多台电动机系统	122
2.8.4 变频器的类别与选择	123
2.9 小结	125
2.10 复习思考题	126
第3章 变频器的常用功能	128
3.1 变频器的控制通道	128
3.1.1 变频器的控制框图	128
3.1.2 变频器的面板	130
3.1.3 外接控制端子	131
3.2 模拟量频率给定	134
3.2.1 频率给定线	134
3.2.2 任意频率给定线的预置	134
3.2.3 正、反转的频率给定线	137
3.2.4 频率给定的限制功能	138
3.3 频率的外接数字量给定	142
3.3.1 升速、降速端子的功能及使用	142
3.3.2 升速、降速端子的其他活用	144
3.3.3 多挡转速控制	146
3.4 电动机的起动与加速	148
3.4.1 异步电动机的起动	148
3.4.2 加速时间与起动电流	153
3.4.3 变频器的其他加速功能	155
3.4.4 起动的相关功能	156

3.5 变频减速和制动	158
3.5.1 电动机的自由停机	158
3.5.2 电动机的变频停机	159
3.5.3 减速时间与直流电压	160
3.5.4 变频器的其他减速功能	162
3.5.5 直流制动	163
3.5.6 停机的相关功能	164
3.6 制动电阻和制动单元	166
3.6.1 能耗电路的作用与工况	166
3.6.2 制动电阻的选择	168
3.6.3 制动单元的基本原理	172
3.7 变频器的主要保护功能	174
3.7.1 过载保护	174
3.7.2 过电流保护	177
3.7.3 过电压和欠电压保护	179
3.7.4 自动电压调整功能	181
3.7.5 其他保护功能	182
3.7.6 自动重合闸功能	183
3.8 小结	184
3.9 复习思考题	185
第4章 变频调速系统的控制	187
4.1 变频器的外接主电路	187
4.1.1 外接主电路的配置	187
4.1.2 主要电器的选择	189
4.2 电动机的正、反转控制电路	192
4.2.1 电动机的起动	192
4.2.2 电动机的反转	195
4.3 外接控制端子的应用	196
4.3.1 多挡转速控制	196
4.3.2 专用输出端子的应用	199
4.3.3 综合应用举例	201
4.4 多单元拖动系统的同步控制	203
4.4.1 同步控制的概念	203

4.4.2	生产机械实例	204
4.4.3	同步控制电路	205
4.5	变频与工频的切换控制	209
4.5.1	切换控制的要点	209
4.5.2	切换的控制电路举例	211
4.5.3	水泵的切换控制	213
4.6	变频器的闭环控制	217
4.6.1	闭环控制的目的	217
4.6.2	PID 调节的概念	220
4.6.3	变频器的 PID 功能	225
4.6.4	闭环控制的实施	227
4.6.5	闭环控制的起动问题	230
4.6.6	多台变频泵的 PID 控制	233
4.7	PID 控制的应用举例	234
4.7.1	中央空调及其冷却水系统	234
4.7.2	冷却水系统的变频调速	236
4.8	小结	238
4.9	复习思考题	240
第 5 章	变频器在各类负载中的应用	242
5.1	应用变频器的基础知识	242
5.1.1	变频器的额定数据	242
5.1.2	变频器的功能设置	243
5.1.3	变频器的功能预置	246
5.2	恒转矩负载的变频调速	247
5.2.1	恒转矩负载的特点	247
5.2.2	恒转矩负载的低速运行与起动	249
5.2.3	恒转矩负载的调速范围	251
5.2.4	恒转矩负载的功能预置要点	254
5.3	重力负载的变频调速	256
5.3.1	重力负载及其特点	256
5.3.2	变频调速系统的四象限运行	257
5.3.3	溜钩的防止	260
5.3.4	发生故障时的应急措施	264

5.3.5 桥式起重机大车的控制特点	265
5.4 恒功率负载的变频调速	267
5.4.1 恒功率负载的特点	267
5.4.2 变频调速系统的主要问题	268
5.4.3 电动机功率与传动比的确定	269
5.4.4 卷绕机械变频调速要点	271
5.5 机床的变频调速	273
5.5.1 机床的机械特性	273
5.5.2 卧式车床及拖动系统	275
5.5.3 变频调速的改造实例	276
5.5.4 龙门刨床的刨台运动	281
5.5.5 刨台运动的变频调速	284
5.6 二次方律负载的变频调速	286
5.6.1 二次方律负载的特点	286
5.6.2 风机变频调速要点	288
5.6.3 水泵变频调速的功能预置	290
5.7 恒压供水系统	291
5.7.1 恒压供水的目的	291
5.7.2 恒压供水的实例	292
5.7.3 暂停功能	294
5.7.4 变频器的功能预置实例	296
5.8 小结	297
5.9 复习思考题	299
第6章 变频调速的经济效益	300
6.1 拖动系统的节能空间	300
6.1.1 工频运行的浪费	300
6.1.2 大马拉小车的节能空间	302
6.2 调速方法与节能效果	304
6.2.1 变速运行的节能空间	304
6.2.2 调速方法与节能潜力	306
6.2.3 异步电动机的调速方法与功耗	308
6.2.4 变频调速最节能	312
6.3 变频调速的节能措施	313

6.3.1	异步电动机的电流 - 电压曲线	313
6.3.2	大马拉小车的节能措施	318
6.3.3	电能的回馈	321
6.4	从水泵管路的流体功率看节能	324
6.4.1	水泵管路的基本模型和节能的考察部位	324
6.4.2	管路的基本特性与工作点	327
6.4.3	流体功率的节能分析	330
6.5	从电动机的轴功率看节能	334
6.5.1	电动机的负载功率	334
6.5.2	水泵效率引出的差异	336
6.6	从电功率看水泵管路的节能	337
6.6.1	水泵低速运行的核心问题	337
6.6.2	功能预置与节能效果	338
6.7	风机的变频节能	339
6.7.1	风机的特性和工作点	339
6.7.2	风量的调节方法与比较	340
6.7.3	风机变频调速系统要点	342
6.8	全面评价变频调速的经济效益	343
6.8.1	故障率减少的效益	343
6.8.2	设备寿命延长的效益	343
6.8.3	产品质量提高的效益	345
6.8.4	意外惊喜带来的效益	347
6.9	家电的变频调速	347
6.9.1	变频调速系统的特点	347
6.9.2	家用电器变频调速的其他优点	349
6.10	小结	350
6.11	复习思考题	351
附录		352
附录 A 部分故障的判断流程		352
A.1	过载跳闸的判断流程	352
A.2	过电流跳闸的判断流程	354
A.3	过电压跳闸的判断流程	356
A.4	欠电压跳闸的判断流程	356

A. 5	低压断路器跳闸的判断流程	357
A. 6	过热跳闸的判断流程	358
A. 7	机械振动的判断流程	358
附录 B	变频器与 PLC 的配合	360
B. 1	PLC 的基本电路	360
B. 1. 1	电源电路	360
B. 1. 2	信号输入电路	361
B. 1. 3	信号输出电路	362
B. 1. 4	PLC 的“软继电器”	363
B. 2	PLC 的梯形图	365
B. 2. 1	梯形图	365
B. 2. 2	编程语言	365
B. 3	变频器的 PLC 控制电路举例	366
B. 3. 1	正转控制电路	366
B. 3. 2	正、反转控制电路	369
B. 3. 3	与工频的切换控制	370

第 1 章 变频器的主电路

1.1 三相交流异步电动机简介

1.1.1 三相交流异步电动机的结构和原理

1. 结构

三相交流异步电动机是所有电动机中结构最简单的一种，其通用型的外形如图 1-1a 所示。

(1) 定子 定子铁心由硅钢片叠成，铁心槽中安置三相绕组。所谓三相绕组，就是三组在空间位置上互差 $2\pi/3$ (120°) 电角度的绕组，如图 1-1b 所示。图 1-1b 是示意图，实际绕组是做成分布式的。

(2) 转子 转子铁心也由硅钢片叠成，铁心槽中安置短路绕组，主要有两种：

1) 笼型转子 转子绕组由铜导条或铝导条构成，两端由铜环或铝环将所有导体短路，如图 1-1c 所示。转子绕组不必和外电路相连，故结构十分简单坚固，是电力拖动领域应用得最多的一种。

2) 绕线转子 转子绕组和定子绕组类似，也是三相绕组。三相绕组的一端连接成星形 (Y)；另一端接到三个集电环，并通过与集电环紧密接触的三个电刷和外部的电阻相接。就是说，它可以把外部的电阻通过电刷和集电环串联到转子电路中去，如图 1-1d 所示。

2. 电动机旋转原理

如图 1-2b 所示，将在时间上互差 $2\pi/3$ (120°) 电角度的三

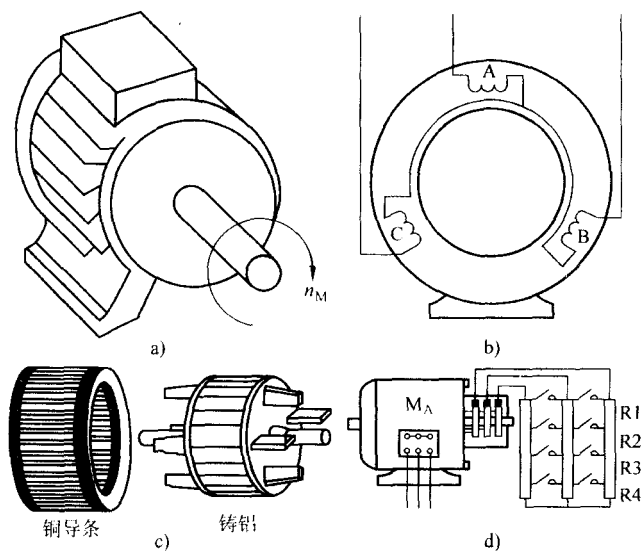


图 1-1 异步电动机的结构

a) 外形 b) 定子 c) 笼型转子 d) 绕线转子

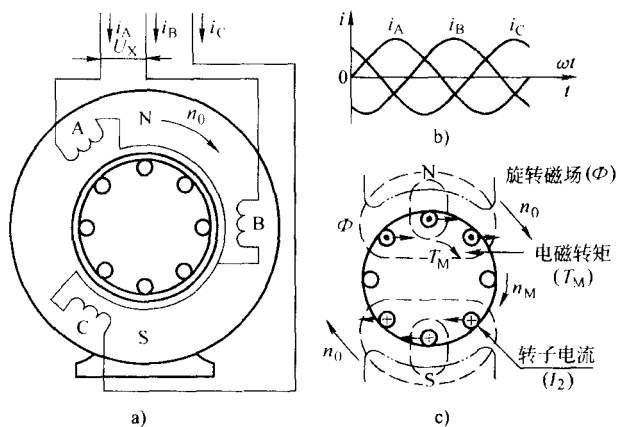


图 1-2 三相交流异步电动机的旋转原理

a) 三相绕组 b) 三相交变电流 c) 旋转原理

相交流电通入到空间上也互差 $2\pi/3$ (120°) 电角度的三相绕组中, 所产生的合成磁场是一个旋转磁场, 旋转的转速称为同步

转速，如图 1-2a 所示。

旋转磁场要被静止着的转子绕组切割，转子绕组中将产生感应电动势和感应电流，其方向由右手定则来判定。转子绕组中的电流又和定子的旋转磁场相互作用，产生电磁力和电磁转矩，方向由左手定则决定，如图 1-2c 所示。由图可知，电磁转矩的方向和旋转磁场的方向相同。在电磁转矩的作用下，转子将旋转起来。因为转子产生感应电动势和感应电流的前提条件是转子绕组必须切割旋转磁场，所以转子的转速总要低于旋转磁场的转速，故称为异步电动机。

1.1.2 变频调速原理

1. 异步电动机的基本公式

(1) 同步转速 即旋转磁场的转速，计算公式如下：

$$n_0 = \frac{60f}{p} \quad (1-1)$$

式中 n_0 ——同步转速 (r/min)；

f ——电源电压的频率 (Hz)；

p ——磁极对数。

式 (1-1) 表明，当电动机的磁极对数一定时，同步转速与电源电压的频率成正比；而在额定频率下，同步转速与磁极对数的关系见表 1-1。

表 1-1 同步转速与磁极对数的关系

磁极对数	1 (2 极)	2 (4 极)	3 (6 极)	4 (8 极)	6 (12 极)
同步转速 / (r/min)	3000	1500	1000	750	500

(2) 转差 即转子转速与同步转速之差。

$$\Delta n = n_0 - n_M \quad (1-2)$$

式中 Δn ——转差 (r/min)；

n_M ——转子转速 (r/min)。

(3) 转差率 转差与同步转速之比，称为转差率

$$s = \frac{\Delta n}{n_0} = \frac{n_0 - n_M}{n_0} \quad (1-3)$$

式中 s ——转差率。

(4) 转子转速 n_M 由式 (1-1) 和式 (1-3) 推导如下:

$$n_M = n_0 (1 - s) = \frac{60f}{p} (1 - s) \quad (1-4)$$

2. 变频可以调速

由式 (1-4) 知, 改变电源电压的频率 f , 就改变了旋转磁场的转速 (同步转速), 也就改变了电动机输出轴的转速:

$$f \downarrow \rightarrow n_0 \downarrow \rightarrow n_M \downarrow$$

所以, 调节频率可以调速, 并且可以无级调速, 如图 1-3 所示。

变频器就是一种可以任意调节其输出电压频率, 使三相交流异步电动机实现无级调速的装置。

例如, 对于一台 $2p = 4$ 的电动机, 有

$$f_x = 0 \sim 50\text{Hz}$$

$$\rightarrow n_0 = 0 \sim 1500\text{r/min}$$

$$\rightarrow n_M = 0 \sim 1440\text{ r/min}$$

生产机械常常需要无级调速, 而在变频器问世之前, 异步电动机是无法实现无级调速的。这使它的调速性能远逊于直流电动机。

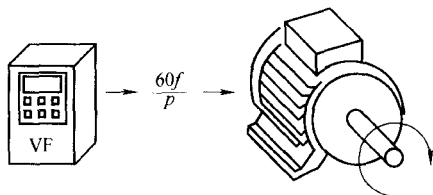


图 1-3 变频可以调速

其实, 变频可以调速的原理, 是从异步电动机发明之日起就知道了的。但异步电动机发明于 1898 年, 而变频器达到能够普及应用的阶段, 却直到 20 世纪 80 年代才得以实现, 中间相隔了近一个世纪!

1.2 电动机在能量转换中的平衡关系

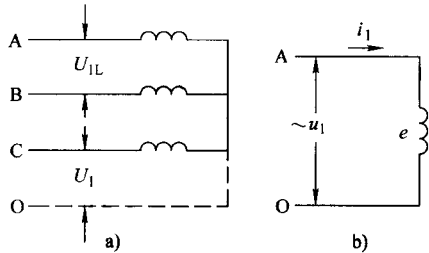
任何能源的作功过程, 永远是施加能源的一方, 克服接受能

源一方反作用的过程，或者说，施加能源的一方总是在克服反作用的过程中作功的。

1.2.1 电动机从电网取用电能时的平衡关系

1. 能量的载体

是电动机定子的三相绕组电路，如图 1-4a 所示。由于电动机的三相电流是平衡的，所以为了简便起见，常用如图 1-4b 所示的一相等效电路来代替。



2. 平衡要点

(1) 作用的一方
电源电压。

(2) 反作用的一方
定子绕组的反电动势。

(3) 作功的标志
电路中有电流。

3. 电动机的定子绕组从电源吸取电能时的反作用

定子电流产生的旋转磁场，也要被定子绕组所

“切割”，并产生感应电动势。因为是定子绕组“切割”了自身产生的磁场，所以是自感电动势，具有阻碍电流变化的性质。就是说，它的作用是和外加电压相反的，构成了对外加电压的反作用，通常称为反电动势。

4. 反电动势的大小

(1) 瞬时值 感应电动势的瞬时值和磁通的变化率成正比：

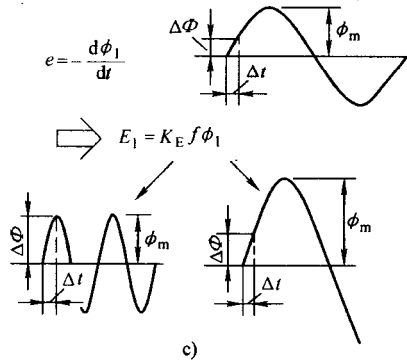


图 1-4 定子绕组的等效电路

a) 定子三相电路 b) 一相等效电路
c) 电动势与频率的关系