



高等职业技术教育机电类专业规划教材  
机械工业出版社精品教材

# 变频器应用基础

## 第2版

石秋洁 主编 / 张燕宾 主审



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

电子课件

# 变频器应用基础

第2版

主编 石秋洁

副主编 肖平 陈忠仁

参编 唐锋 何亚军

主审 张燕宾



NLIC2970862379



机械工业出版社  
地址：北京市西城区百万庄大街22号 邮政编码：100037  
网 址：[www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com) [www.cmpbook.com/gb13253](http://www.cmpbook.com/gb13253)  
电 话：(010) 88390533 (010) 88390533 (010) 88390533  
传 真：(010) 88390533 (010) 88390533 (010) 88390533  
邮 箱：[nlc@zjzx.com](mailto:nlc@zjzx.com)

本书主要内容包括：认识变频器，变频与变压，变频调速时电动机的机械特性，提高转矩的方法，变频器的各种频率参数，变频器的加速与减速，变频器的控制端子及外接控制电路，变频调速系统闭环控制，变频器的安装、调试及干扰防范，变频调速拖动系统的设计，风机、水泵类负载变频调速应用实例，其他各类负载变频调速应用实例，变频器与其他设备的通信，高压变频及其应用，以及附录。

本书的特点是：将实验、实操融入到各项节目中，在实验中提出问题、验证问题。本书从实用、实操的角度分析讲解，淡化理论，便于理解和接受。应用部分邀请变频专家编写，内容既新颖实用，又避免了理论计算。

本书可作为高职、中职和培养技能型人才的本科院校的电气、机电类专业的教材，也可作为短期培训班的教材，还可供相关工程技术人员参考。

为方便教学，本书配有免费电子课件及模拟试卷等，凡选用本书作为授课教材的学校，均可来电索取。咨询电话：010-88379375；电子邮箱：[cmpgaozhi@sina.com](mailto:cmpgaozhi@sina.com)。

### 图书在版编目（CIP）数据

变频器应用基础/石秋洁主编. —2 版. —北京：机械工业出版社，  
2012. 12

高等职业技术教育机电类专业规划教材 机械工业出版社精品教材  
ISBN 978-7-111-40243-5

I. ①变… II. ①石… III. ①变频器 - 高等职业教育 - 教材  
IV. ①TN773

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 257223 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：于 宁 责任编辑：于 宁 王宗锋

版式设计：霍永明 责任校对：张 媛

封面设计：鞠 杨 责任印制：乔 宇

北京机工印刷厂印刷（三河市南杨庄国丰装订厂装订）

2013 年 1 月第 2 版第 1 次印刷

184mm×260mm·16 印张·395 千字

0 001—3 000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-40243-5

定价：30.00 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 教 材 网：<http://www.cmpedu.com>

销 售 一 部：(010) 68326294 机 工 网 站：<http://www.cmpbook.com>

销 售 二 部：(010) 88379649 机 工 官 博：<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线：(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

# 前　　言

本书第1版是2003年出版的高等职业技术教育机电类专业规划教材。它以介绍变频器应用为主要内容，并且第一次构架了变频器应用的教学体系，也是该类教材的第一个版本。随着更多的学校将《交流调速》改成了《变频器应用基础》，该教材受到了广大师生的热烈欢迎，近10年来，先后重印16次。随着变频应用技术的不断成熟，其应用领域也在不断扩展，因此迫切需要对该教材在内容和形式上进行补充和更新。

本书第2版以任务驱动形式编写，从解决问题的方面入手，切入项目或任务，并且补充了大量的实例、实验，不论是在形式还是在内容上都有了一个很大的飞跃。

本书补充了大量实验，在实验的构思上，尽量采用简单的设备，以兼顾到设备不全的学校。如PID闭环实验，在实验构思上摆脱了依靠成套设备的局限，反馈信号取自电位器，同样可以完成PID调节。

本书由广东省中山市中等专业学校石秋洁高级讲师任主编，广东省中山职业技术学院的肖平副教授、陈忠仁副教授任副主编，参加编写的还有广东明阳龙源电力电子有限公司的唐锋工程师和广东省中山职业技术学院的何业军老师。其中，石秋洁编写项目四、五、六、七、十、十二、十三及附录，并对全书进行了统稿；肖平编写项目一、二、三、九；陈忠仁编写项目十一；唐锋编写项目十四；何业军编写项目八。

本书由湖北省宜昌市自动化研究所张燕宾高级工程师主审。

在该书的编写过程中，还得到了广东明阳龙源电力电子有限公司的孙文艺、卢章辉两位副总经理和广东中山华源机电设备有限公司曾华春总经理的大力协助，在此一并表示衷心的感谢！

12	第1章 变频器概述	1
12	1.1 变频器的基本组成	1
12	1.2 变频器的主要控制方式	3
12	1.3 变频器的分类	5
12	1.4 变频器的应用	7
12	1.5 变频器的选型	9
12	1.6 变频器的安装与接线	11
12	1.7 变频器的使用与维护	13
12	1.8 变频器的故障与排除	15
12	1.9 变频器的节能与改造	17
12	1.10 变频器的应用设计	19
12	1.11 变频器的应用设计示例	21
12	1.12 变频器的应用设计小结	23
12	1.13 变频器的应用设计思考题	25
12	1.14 变频器的应用设计参考文献	27
12	1.15 参考文献	29
12	1.16 附录	31
12	1.17 附录A 变频器主要参数表	33
12	1.18 附录B 变频器主要控制端子功能表	35
12	1.19 附录C 变频器主要保护功能表	37
12	1.20 附录D 变频器主要电气连接图	39
12	1.21 附录E 变频器主要控制接线图	41
12	1.22 附录F 变频器主要控制端子功能表	43
12	1.23 附录G 变频器主要保护功能表	45
12	1.24 附录H 变频器主要电气连接图	47
12	1.25 附录I 变频器主要控制接线图	49
12	1.26 附录J 变频器主要控制端子功能表	51
12	1.27 附录K 变频器主要保护功能表	53
12	1.28 附录L 变频器主要电气连接图	55
12	1.29 附录M 变频器主要控制接线图	57
12	1.30 附录N 变频器主要控制端子功能表	59
12	1.31 附录O 变频器主要保护功能表	61
12	1.32 附录P 变频器主要电气连接图	63
12	1.33 附录Q 变频器主要控制接线图	65
12	1.34 附录R 变频器主要控制端子功能表	67
12	1.35 附录S 变频器主要保护功能表	69
12	1.36 附录T 变频器主要电气连接图	71
12	1.37 附录U 变频器主要控制接线图	73
12	1.38 附录V 变频器主要控制端子功能表	75
12	1.39 附录W 变频器主要保护功能表	77
12	1.40 附录X 变频器主要电气连接图	79
12	1.41 附录Y 变频器主要控制接线图	81
12	1.42 附录Z 变频器主要控制端子功能表	83
12	1.43 附录AA 变频器主要保护功能表	85
12	1.44 附录BB 变频器主要电气连接图	87
12	1.45 附录CC 变频器主要控制接线图	89
12	1.46 附录DD 变频器主要控制端子功能表	91
12	1.47 附录EE 变频器主要保护功能表	93
12	1.48 附录FF 变频器主要电气连接图	95
12	1.49 附录GG 变频器主要控制接线图	97
12	1.50 附录HH 变频器主要控制端子功能表	99
12	1.51 附录II 变频器主要保护功能表	101
12	1.52 附录JJ 变频器主要电气连接图	103
12	1.53 附录KK 变频器主要控制接线图	105
12	1.54 附录LL 变频器主要控制端子功能表	107
12	1.55 附录MM 变频器主要保护功能表	109
12	1.56 附录OO 变频器主要电气连接图	111
12	1.57 附录PP 变频器主要控制接线图	113
12	1.58 附录QQ 变频器主要控制端子功能表	115
12	1.59 附录RR 变频器主要保护功能表	117
12	1.60 附录TT 变频器主要电气连接图	119
12	1.61 附录UU 变频器主要控制接线图	121
12	1.62 附录VV 变频器主要控制端子功能表	123
12	1.63 附录WW 变频器主要保护功能表	125
12	1.64 附录XX 变频器主要电气连接图	127
12	1.65 附录YY 变频器主要控制接线图	129
12	1.66 附录ZZ 变频器主要控制端子功能表	131
12	1.67 附录AA 变频器主要保护功能表	133
12	1.68 附录BB 变频器主要电气连接图	135
12	1.69 附录CC 变频器主要控制接线图	137
12	1.70 附录DD 变频器主要控制端子功能表	139
12	1.71 附录EE 变频器主要保护功能表	141
12	1.72 附录FF 变频器主要电气连接图	143
12	1.73 附录GG 变频器主要控制接线图	145
12	1.74 附录HH 变频器主要控制端子功能表	147
12	1.75 附录II 变频器主要保护功能表	149
12	1.76 附录JJ 变频器主要电气连接图	151
12	1.77 附录KK 变频器主要控制接线图	153
12	1.78 附录LL 变频器主要控制端子功能表	155
12	1.79 附录MM 变频器主要保护功能表	157
12	1.80 附录OO 变频器主要电气连接图	159
12	1.81 附录PP 变频器主要控制接线图	161
12	1.82 附录QQ 变频器主要控制端子功能表	163
12	1.83 附录RR 变频器主要保护功能表	165
12	1.84 附录TT 变频器主要电气连接图	167
12	1.85 附录UU 变频器主要控制接线图	169
12	1.86 附录VV 变频器主要控制端子功能表	171
12	1.87 附录WW 变频器主要保护功能表	173
12	1.88 附录XX 变频器主要电气连接图	175
12	1.89 附录YY 变频器主要控制接线图	177
12	1.90 附录ZZ 变频器主要控制端子功能表	179
12	1.91 附录AA 变频器主要保护功能表	181
12	1.92 附录BB 变频器主要电气连接图	183
12	1.93 附录CC 变频器主要控制接线图	185
12	1.94 附录DD 变频器主要控制端子功能表	187
12	1.95 附录EE 变频器主要保护功能表	189
12	1.96 附录FF 变频器主要电气连接图	191
12	1.97 附录GG 变频器主要控制接线图	193
12	1.98 附录HH 变频器主要控制端子功能表	195
12	1.99 附录II 变频器主要保护功能表	197
12	1.100 附录JJ 变频器主要电气连接图	199
12	1.101 附录KK 变频器主要控制接线图	201
12	1.102 附录LL 变频器主要控制端子功能表	203
12	1.103 附录MM 变频器主要保护功能表	205
12	1.104 附录OO 变频器主要电气连接图	207
12	1.105 附录PP 变频器主要控制接线图	209
12	1.106 附录QQ 变频器主要控制端子功能表	211
12	1.107 附录RR 变频器主要保护功能表	213
12	1.108 附录TT 变频器主要电气连接图	215
12	1.109 附录UU 变频器主要控制接线图	217
12	1.110 附录VV 变频器主要控制端子功能表	219
12	1.111 附录WW 变频器主要保护功能表	221
12	1.112 附录XX 变频器主要电气连接图	223
12	1.113 附录YY 变频器主要控制接线图	225
12	1.114 附录ZZ 变频器主要控制端子功能表	227
12	1.115 附录AA 变频器主要保护功能表	229
12	1.116 附录BB 变频器主要电气连接图	231
12	1.117 附录CC 变频器主要控制接线图	233
12	1.118 附录DD 变频器主要控制端子功能表	235
12	1.119 附录EE 变频器主要保护功能表	237
12	1.120 附录FF 变频器主要电气连接图	239
12	1.121 附录GG 变频器主要控制接线图	241
12	1.122 附录HH 变频器主要控制端子功能表	243
12	1.123 附录II 变频器主要保护功能表	245
12	1.124 附录JJ 变频器主要电气连接图	247
12	1.125 附录KK 变频器主要控制接线图	249
12	1.126 附录LL 变频器主要控制端子功能表	251
12	1.127 附录MM 变频器主要保护功能表	253
12	1.128 附录OO 变频器主要电气连接图	255
12	1.129 附录PP 变频器主要控制接线图	257
12	1.130 附录QQ 变频器主要控制端子功能表	259
12	1.131 附录RR 变频器主要保护功能表	261
12	1.132 附录TT 变频器主要电气连接图	263
12	1.133 附录UU 变频器主要控制接线图	265
12	1.134 附录VV 变频器主要控制端子功能表	267
12	1.135 附录WW 变频器主要保护功能表	269
12	1.136 附录XX 变频器主要电气连接图	271
12	1.137 附录YY 变频器主要控制接线图	273
12	1.138 附录ZZ 变频器主要控制端子功能表	275
12	1.139 附录AA 变频器主要保护功能表	277
12	1.140 附录BB 变频器主要电气连接图	279
12	1.141 附录CC 变频器主要控制接线图	281
12	1.142 附录DD 变频器主要控制端子功能表	283
12	1.143 附录EE 变频器主要保护功能表	285
12	1.144 附录FF 变频器主要电气连接图	287
12	1.145 附录GG 变频器主要控制接线图	289
12	1.146 附录HH 变频器主要控制端子功能表	291
12	1.147 附录II 变频器主要保护功能表	293
12	1.148 附录JJ 变频器主要电气连接图	295
12	1.149 附录KK 变频器主要控制接线图	297
12	1.150 附录LL 变频器主要控制端子功能表	299
12	1.151 附录MM 变频器主要保护功能表	301
12	1.152 附录OO 变频器主要电气连接图	303
12	1.153 附录PP 变频器主要控制接线图	305
12	1.154 附录QQ 变频器主要控制端子功能表	307
12	1.155 附录RR 变频器主要保护功能表	309
12	1.156 附录TT 变频器主要电气连接图	311
12	1.157 附录UU 变频器主要控制接线图	313
12	1.158 附录VV 变频器主要控制端子功能表	315
12	1.159 附录WW 变频器主要保护功能表	317
12	1.160 附录XX 变频器主要电气连接图	319
12	1.161 附录YY 变频器主要控制接线图	321
12	1.162 附录ZZ 变频器主要控制端子功能表	323
12	1.163 附录AA 变频器主要保护功能表	325
12	1.164 附录BB 变频器主要电气连接图	327
12	1.165 附录CC 变频器主要控制接线图	329
12	1.166 附录DD 变频器主要控制端子功能表	331
12	1.167 附录EE 变频器主要保护功能表	333
12	1.168 附录FF 变频器主要电气连接图	335
12	1.169 附录GG 变频器主要控制接线图	337
12	1.170 附录HH 变频器主要控制端子功能表	339
12	1.171 附录II 变频器主要保护功能表	341
12	1.172 附录JJ 变频器主要电气连接图	343
12	1.173 附录KK 变频器主要控制接线图	345
12	1.174 附录LL 变频器主要控制端子功能表	347
12	1.175 附录MM 变频器主要保护功能表	349
12	1.176 附录OO 变频器主要电气连接图	351
12	1.177 附录PP 变频器主要控制接线图	353
12	1.178 附录QQ 变频器主要控制端子功能表	355
12	1.179 附录RR 变频器主要保护功能表	357
12	1.180 附录TT 变频器主要电气连接图	359
12	1.181 附录UU 变频器主要控制接线图	361
12	1.182 附录VV 变频器主要控制端子功能表	363
12	1.183 附录WW 变频器主要保护功能表	365
12	1.184 附录XX 变频器主要电气连接图	367
12	1.185 附录YY 变频器主要控制接线图	369
12	1.186 附录ZZ 变频器主要控制端子功能表	371
12	1.187 附录AA 变频器主要保护功能表	373
12	1.188 附录BB 变频器主要电气连接图	375
12	1.189 附录CC 变频器主要控制接线图	377
12	1.190 附录DD 变频器主要控制端子功能表	379
12	1.191 附录EE 变频器主要保护功能表	381
12	1.192 附录FF 变频器主要电气连接图	383
12	1.193 附录GG 变频器主要控制接线图	385
12	1.194 附录HH 变频器主要控制端子功能表	387
12	1.195 附录II 变频器主要保护功能表	389
12	1.196 附录JJ 变频器主要电气连接图	391
12	1.197 附录KK 变频器主要控制接线图	393
12	1.198 附录LL 变频器主要控制端子功能表	395
12	1.199 附录MM 变频器主要保护功能表	397
12	1.200 附录OO 变频器主要电气连接图	399
12	1.201 附录PP 变频器主要控制接线图	401
12	1.202 附录QQ 变频器主要控制端子功能表	403
12	1.203 附录RR 变频器主要保护功能表	405
12	1.204 附录TT 变频器主要电气连接图	407
12	1.205 附录UU 变频器主要控制接线图	409
12	1.206 附录VV 变频器主要控制端子功能表	411
12	1.207 附录WW 变频器主要保护功能表	413
12	1.208 附录XX 变频器主要电气连接图	415
12	1.209 附录YY 变频器主要控制接线图	417
12	1.210 附录ZZ 变频器主要控制端子功能表	419
12	1.211 附录AA 变频器主要保护功能表	421
12	1.212 附录BB 变频器主要电气连接图	423
12	1.213 附录CC 变频器主要控制接线图	425
12	1.214 附录DD 变频器主要控制端子功能表	427
12	1.215 附录EE 变频器主要保护功能表	429
12	1.216 附录FF 变频器主要电气连接图	431
12	1.217 附录GG 变频器主要控制接线图	433
12	1.218 附录HH 变频器主要控制端子功能表	435
12	1.219 附录II 变频器主要保护功能表	437
12	1.220 附录JJ 变频器主要电气连接图	439
12	1.221 附录KK 变频器主要控制接线图	441
12	1.222 附录LL 变频器主要控制端子功能表	443
12	1.223 附录MM 变频器主要保护功能表	445
12	1.224 附录OO 变频器主要电气连接图	447
12	1.225 附录PP 变频器主要控制接线图	449
12	1.226 附录QQ 变频器主要控制端子功能表	451
12	1.227 附录RR 变频器主要保护功能表	453
12	1.228 附录TT 变频器主要电气连接图	455
12	1.229 附录UU 变频器主要控制接线图	457
12	1.230 附录VV 变频器主要控制端子功能表	459
12	1.231 附录WW 变频器主要保护功能表	461
12	1.232 附录XX 变频器主要电气连接图	463
12	1.233 附录YY 变频器主要控制接线图	465
12	1.234 附录ZZ 变频器主要控制端子功能表	467
12	1.235 附录AA 变频器主要保护功能表	469
12	1.236 附录BB 变频器主要电气连接图	471
12	1.237 附录CC 变频器主要控制接线图	473
12	1.238 附录DD 变频器主要控制端子功能表	475
12	1.239 附录EE 变频器主要保护功能表	477
12	1.240 附录FF 变频器主要电气连接图	479
12	1.241 附录GG 变频器主要控制接线图	481
12	1.242 附录HH 变频器主要控制端子功能表	483
12	1.243 附录II 变频器主要保护功能表	485
12	1.244 附录JJ 变频器主要电气连接图	487
12	1.245 附录KK 变频器主要控制接线图	489
12	1.246 附录LL 变频器主要控制端子功能表	491
12	1.247 附录MM 变频器主要保护功能表	493
12	1.248 附录OO 变频器主要电气连接图	495
12	1.249 附录PP 变频器主要控制接线图	497
12	1.250 附录QQ 变频器主要控制端子功能表	499
12	1.251 附录RR 变频器主要保护功能表	501
12	1.252 附录TT 变频器主要电气连接图	503
12	1.253 附录UU 变频器主要控制接线图	505
12	1.254 附录VV 变频器主要控制端子功能表	507
12	1.255 附录WW 变频器主要保护功能表	509
12	1.256 附录XX 变频器主要电气连接图	511
12	1.257 附录YY 变频器主要控制接线图	513
12	1.258 附录ZZ 变频器主要控制端子功能表	515
12	1.259 附录AA 变频器主要保护功能表	517
12	1.260 附录BB 变频器主要电气连接图	519
12	1.261 附录CC 变频器主要控制接线图	521
12	1.262 附录DD 变频器主要控制端子功能表	523
12	1.263 附录EE 变频器主要保护功能表	525
12	1.264 附录FF 变频器主要电气连接图	527
12	1.265 附录GG 变频器主要控制接线图	529
12	1.266 附录HH 变频器主要控制端子功能表	531
12	1.267 附录II 变频器主要保护功能表	533
12	1.268 附录JJ 变频器主要电气连接图	535
12	1.269 附录KK 变频器主要控制接线图	537
12	1.270 附录LL 变频器主要控制端子功能表	539
12	1.271 附录MM 变频器主要保护功能表	541
12	1.272 附录OO 变频器主要电气连接图	543
12	1.273 附录PP 变频器主要控制接线图	545
12	1.274 附录QQ 变频器主要控制端子功能表	547
12	1.275 附录RR 变频器主要保护功能表	549
12	1.276 附录TT 变频器主要电气连接图	551
12	1.277 附录UU 变频器主要控制接线图	553
12	1.278 附录VV 变频器主要控制端子功能表	555
12	1.279 附录WW 变频器主要保护功能表	557
12	1.280 附录XX 变频器主要电气连接图	559
12	1.281 附录YY 变频器主要控制接线图	561
12	1.282 附录ZZ 变频器主要控制端子功能表	563
12	1.283 附录AA 变频器主要保护功能表	565
12	1.284 附录BB 变频器主要电气连接图	567
12	1.285 附录CC 变频器主要控制接线图	569
12	1.286 附录DD 变频器主要控制端子功能表	571
1		

# 目 录

<b>前言</b>	36
<b>项目一 认识变频器</b>	37
<b>任务一 变频的内涵</b>	37
一、变频调速的原理	1
三、变频器的构成框图	3
<b>任务二 变频器的主电路</b>	4
一、变频器的分类	4
二、交一直一交变频器的主电路	5
三、逆变原理	7
四、变频器中的半导体开关器件	8
<b>任务三 变频器操作实验</b>	10
一、变频器面板及工作模式介绍	11
二、变频器的面板操作及运行	14
三、变频器的外部运行、组合运行	16
<b>任务四 变频器相关内容拓展</b>	17
一、变频器的应用	17
二、变频器的外接主电路、各元器件的作用及选择	18
三、实物变频器的内部构成解析	20
项目小结	21
思考题	21
<b>项目二 变频与变压</b>	23
<b>任务一 变频与变压概述</b>	23
一、异步电动机的平衡方程	23
二、变频也需变压	26
三、变频变压的实现方法	27
<b>任务二 变频器主电路参数的测量</b>	30
一、输出电压的测量	31
二、输入电流的测量	32
三、功率的测量	33
项目小结	33
思考题	34
<b>项目三 变频调速时电动机的机械特性</b>	35
<b>任务一 异步电动机及各类负载的机械特性</b>	35
一、异步电动机的机械特性	35
<b>项目四 提高转矩的方法</b>	47
<b>任务一 V/F 控制</b>	47
一、V/F 控制的程度	47
二、V/F 控制功能的选择	48
三、转矩补偿时 $U/f$ 值的验证	49
四、补偿不当举例	50
<b>任务二 矢量控制</b>	50
一、直流电动机与异步电动机调速上的差异	51
二、矢量控制中的等效变换	51
三、变频器矢量控制的基本思想及反馈	53
四、V/F 控制与矢量控制的区别	54
五、使用矢量控制的要求	54
<b>任务三 传动机构的作用</b>	55
一、拖动系统的组成	55
二、传动机构的作用及系统参数折算	56
<b>任务四 基本频率、电动机磁极对转矩的影响</b>	58
一、基本频率对转矩的影响	58
二、不同磁极的电动机有效转矩的差别	59
三、转矩提高的综合思考	60
项目小结	61



思考题	62	任务三 变频/工频切换控制电路	105
<b>项目五 变频器的各种频率参数</b>	63	一、继电器控制电路	105
任务一 各种频率参数的意义及验证	63	二、变频器自带的切换功能	106
一、各种频率参数的意义	63	项目小结	108
二、常见频率参数的功能验证	64	思考题	109
<b>任务二 多挡转速频率的控制和验证</b>	65	<b>项目八 变频调速系统闭环控制</b>	111
一、多挡转速频率的控制	65	任务一 PID 控制的基本知识	111
二、多挡转速运行验证	66	一、闭环控制	111
三、多挡转速的 PLC 控制验证	68	二、PID 调节	112
<b>任务三 程序控制</b>	69	三、传感器接线及目标值的设置	113
一、程序控制概述	69	方式	115
二、程序运行方式验证	70	<b>任务二 PID 闭环调节实验</b>	117
项目小结	74	一、反馈值取自电位器时的操作	117
思考题	74	二、有实验设备时的操作	118
<b>项目六 变频器的加速与减速</b>	76	项目小结	120
任务一 加速及起动	76	思考题	121
一、工频起动与变频起动	76	<b>项目九 变频器的安装、调试及干扰防范</b>	122
二、加速时间	77	任务一 变频器的安装及布线	122
三、加速模式	79	一、变频器的设置环境	122
<b>任务二 减速与停机</b>	80	二、变频器的安装	123
一、减速时电动机工作在发电状态	80	三、变频器的布线	124
二、减速时的泵升电压	81	<b>任务二 变频器的功率因数和改善措施</b>	126
三、制动电阻和制动单元的作用	82	一、变频器输入电流中的高次谐波	126
四、制动电阻的选择	82	二、高次谐波对功率因数的影响	127
<b>任务三 变频器的保护功能</b>	83	<b>任务三 变频器的抗干扰措施</b>	128
一、过载和过电流保护	83	一、外界对变频器的干扰	129
二、电压保护	85	二、变频器对周边设备的干扰和对策	129
三、自动重合闸	85	<b>任务四 变频调速系统的调试及常见故障</b>	132
项目小结	86	一、变频调速系统的调试	132
思考题	87	二、变频调速系统故障原因分析	133
<b>项目七 变频器的控制端子及外接控制电路</b>	88	项目小结	134
任务一 变频器的控制端子	88	思考题	135
一、变频器的输入控制端子	88	<b>项目十 变频调速拖动系统的设计</b>	136
二、变频器的输出控制端子	94	任务一 变频调速系统设计的基本知识	136
<b>任务二 变频器控制端子功能验证</b>	97	一、变频调速系统设计的基本要求	136
一、监视器输出信号的应用验证	97	二、变频调速系统中电动机的有效转矩线和有效功率线	138
二、自锁、加减速端子和封锁输出的应用验证	99	<b>任务二 恒转矩负载变频调速系统的二类设计</b>	139
三、模拟量输入端子的应用实验	100	一、恒转矩负载的基本特点	139
四、实现电动机正反转的几种方法	102		
五、多功能端子的应用	103		



二、系统设计的主要问题	140
三、电动机和变频器的选择	143
<b>任务三 恒功率负载变频调速系统的 设计</b>	<b>144</b>
一、恒功率负载的基本特点	144
二、系统设计的主要问题	145
三、电动机和变频器的选择	148
<b>任务四 二次方律负载变频调速系统的 设计</b>	<b>149</b>
一、二次方律负载的基本特点	149
二、系统设计的主要问题	149
三、电动机与变频器的选择	150
项目小结	151
思考题	152
<b>项目十一 风机、水泵类负载变频调速 应用实例</b>	<b>153</b>
<b>任务一 变频调速的节能</b>	<b>153</b>
一、节能的几种情况	153
二、节能的计算	156
<b>任务二 风机和空气压缩机的变频调速</b>	<b>157</b>
一、风机的变频调速	157
二、空气压缩机的变频调速	159
<b>任务三 恒压供水系统</b>	<b>162</b>
一、单机的恒压供水系统	162
二、PLC 控制的 1 控 3 的恒压供水 系统	164
三、变频器自带的恒压供水控制	165
<b>任务四 水泵的变频调速</b>	<b>168</b>
一、中央空调冷却水的变频调速 系统	168
二、水位控制的变频调速系统	171
项目小结	173
思考题	174
<b>项目十二 其他各类负载变频调速 应用实例</b>	<b>175</b>
<b>任务一 多单元同步的变频调速系统</b>	<b>175</b>
一、概述	175
二、手动微调的同步控制	175
三、自动微调的同步控制	176
<b>任务二 起重机械的变频调速</b>	<b>178</b>
一、起重机械中的电动机运行状态	178
二、再生电能的处理	179
三、溜钩的防止	180
<b>任务三 车床主轴的变频调速</b>	<b>182</b>
一、普通车床的大致构造	182
二、普通车床主运动的负载性质	182
三、计算实例	183
<b>任务四 龙门刨床的变频调速</b>	<b>186</b>
一、龙门刨床的构造与工作特点	186
二、刨台运动的变频调速	187
项目小结	189
思考题	190
<b>项目十三 变频器与其他设备的通 信</b>	<b>191</b>
<b>任务一 通信的基础知识</b>	<b>191</b>
一、数据通信方式	191
二、数据传送方向	193
三、传送介质	193
四、串行通信接口标准	193
<b>任务二 三菱系列变频器的 RS-485 通 信</b>	<b>194</b>
一、数据格式	194
二、数据定义	196
三、三菱 PLC 串行数据通信	196
四、变频器通信设置	198
<b>任务三 变频器与其他自动化设备通信 实验</b>	<b>199</b>
一、触摸屏与变频器的通信	199
二、PLC 与变频器的通信	203
项目小结	208
思考题	209
<b>项目十四 高压变频及其应用</b>	<b>211</b>
<b>任务一 高压变频器的组成原理</b>	<b>211</b>
一、高压变频器的分类	211
二、单元串联高压变频器的构成	214
三、高压变频器的应用领域	216
<b>任务二 高压变频器的操作及常见功能</b>	<b>216</b>
一、常见产品界面介绍	216
二、高压变频器的操作	218
<b>任务三 应用举例</b>	<b>220</b>
一、发电厂引风机变频改造	220
二、高压变频器在冶金企业中的应用	222
项目小结	224
思考题	225

---

附录	.....	226
附录 A 简易实验台的制作	.....	226
一、需要的材料和元器件	.....	226
二、实验台的制作	.....	226
附录 B 三菱 FR-A700 变频器简介	.....	227
一、三菱 FR-A700 变频器端子图	.....	227
二、三菱 FR-A700 变频器端子说明	.....	227
三、三菱 FR-A700 变频器主要功能	.....	
说明	.....	230
附录 C 森兰变频器简介	.....	243
一、森兰 SB60G 系列变频器端子图	.....	243
二、森兰 SB60G 系列变频器控制回路	.....	
端子说明	.....	243
三、森兰 SB60G 系列变频器主要功能	.....	
说明	.....	244
参考文献	.....	248

## 认识变频器

## 项目一

## 一、学习目标

- 1) 了解变频器的内涵、变频器的组成原理。
- 2) 了解异步电动机的结构、常见开关元器件的种类。
- 3) 掌握变频器的接线、常规操作、参数测量。

## 二、问题的提出

变频可以节能，这是一般人都有的认识，变频为什么可以节能，变频的真正内涵是什么？变频器是如何工作、如何组成、如何操作的？这些是本项目所要解决的问题。

## 任务一 变频的内涵

随着变频空调、变频冰箱走入成千上万普通百姓的生活，人们对变频的认识就是节能，至于为什么能节能，大多数人并不关心。下面以空调为例来说明变频与不变频的区别。

**普通空调：**当室内实际温度与设定温度有差别时，压缩机起动工作，两温度差逐步缩小，直至它们基本相等时，压缩机停止工作。当室内实际温度与设定温度再度不同时，压缩机又起动，如此周而复始，以保证室内实际温度基本维持在一恒定的范围以内。可以看到：普通空调工作时压缩机的工作速度一定，它是以额定转速运行的。

**变频空调：**当室内实际温度与设定温度有差别时，压缩机起动工作，随着两温度差逐步缩小，压缩机的转速逐步降低，直至室内实际温度与设定温度基本相等时，压缩机以低速运转，维持一个低水平的制冷量，以保证室内实际温度基本维持在一恒定的范围以内。可以看到：变频空调工作时压缩机的速度是变化的，这就是它与普通空调的区别所在。

变频的内涵就是给电动机调速。

## 一、变频调速的原理

## 1. 异步电动机的结构

异步电动机由定子、转子及其他附件组成。

1) 定子。异步电动机的定子由定子铁心和三相绕组构成，其中，三相绕组在空间上互差  $2\pi/3$  电角度均匀地安放在定子铁心的槽内。三相绕组按适当方式（星形或三角形）连接后与三相电源相接，自电源吸取电功率。

2) 转子。异步电动机的转子主要由转子铁心和转子绕组构成，它是电动机输出机械能、带动负载旋转的部分。其中，转子绕组自行闭合，不与电源相接；转子的功率是由定子吸取的电功率经电磁感应得来的。根据转子绕组的形式不同，异步电动机又可以分为笼型和绕线转子型两种。



## 2. 异步电动机的旋转原理

1) 旋转磁场。在空间上互差  $2\pi/3$  电角度的三相定子绕组  $U_1-U_2, V_1-V_2, W_1-W_2$  中通入在时间上互差  $2\pi/3$  相位角的三相交变电流  $i_U, i_V, i_W$  后，它们的合成磁场将是一个旋转磁场。两极旋转磁场示意图如图 1-1 所示。

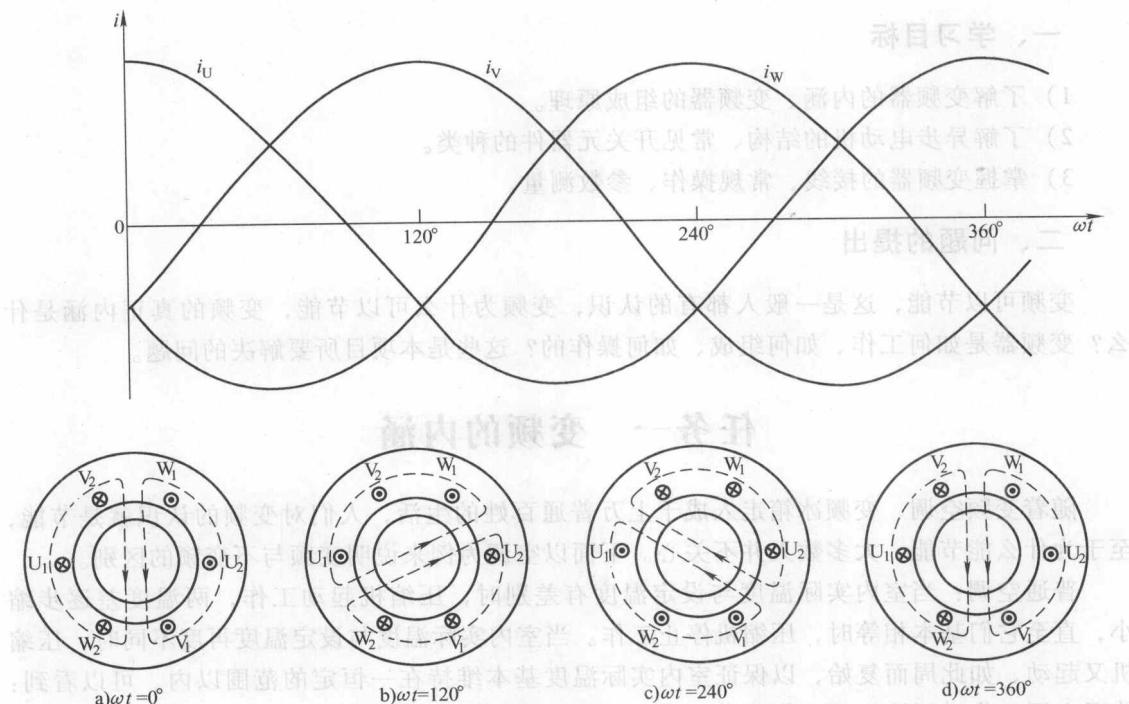


图 1-1 两极旋转磁场示意图

磁场旋转的转速（即同步转速） $n_0$  可用下式表示：

$$n_0 = \frac{60f_1}{p} \quad (1-1)$$

式中， $f_1$  为电流的频率； $p$  为旋转磁场的磁极对数。

由式 (1-1) 知，如果频率可以调节成  $f_x$  的话，则同步转速  $n_{0x}$  也随之调节成

$$n_{0x} = \frac{60f_x}{p}$$

这是变频调速的基本原理。

2) 异步电动机的旋转。在图 1-2 中，转子绕组切割旋转磁场，可以看做是磁场静止、转子绕组向反方向旋转切割磁力线，由右手定则可判断转子绕组中的电流方向，如图中所示。根据左手定则，载流的转子绕组在磁场中受到电磁力的作用，形成电磁转矩  $T$ ，在  $T$  的作用下转子“跟着”定子的旋转磁场旋转起来。

3) 转差率。由于转子绕组和旋转磁场之间必须有相对运动，转子绕组才能切割磁力

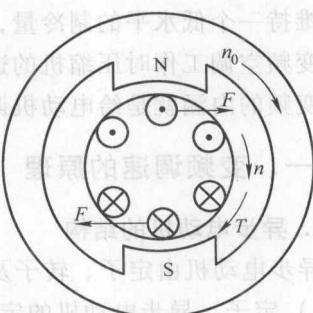


图 1-2 异步电动机的工作原理图



线，才能产生感应电流，从而产生电磁转矩，因此转子转速  $n$  与旋转磁场转速  $n_0$  之间一定存在着一个差值，我们把这个差值叫转差，用  $\Delta n$  表示，即

$$\Delta n = n_0 - n$$

转差  $n_0 - n$  的存在是异步电动机运行的必要条件。如果频率调节为  $f_x$ ，则转差  $\Delta n_x$  可用下式表示：

$$\Delta n_x = n_{0x} - n_x \quad (1-2)$$

式中， $n_{0x}$ 、 $n_x$  分别为频率为  $f_x$  时的同步转速及转速。

转差  $n_0 - n$  与同步转速  $n_0$  的比值称为转差率，用  $s$  表示，即

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0}$$

转差率的大小同样也能反映转子转速和电动机的工作状态，由上式可知：

$$n = n_0 (1 - s) = \frac{60f_1}{p} (1 - s) \quad (1-3)$$

电动机在额定状态时，转子转速  $n$  通常与  $n_0$  相差不大，因此额定转差率一般都比较小，其范围  $s_N = 0.01 \sim 0.05$ 。例如：某 4 极（2 对磁极）电动机，在额定状态时，同步转速  $n_0 = 1500\text{r}/\text{min}$ ，额定转速  $n_N = 1460\text{r}/\text{min}$ ， $s_N \approx 0.027$ 。不同功率、不同磁极时的  $n_0$ 、 $n_N$  之间的关系见表 1-1。

表 1-1 不同功率、不同磁极时的  $n_0$ 、 $n_N$  之间的关系

$p$	$2p$	$n_0 / (\text{r}/\text{min})$	$n_N / (\text{r}/\text{min})$	$\Delta n / (\text{r}/\text{min})$	$s$	备注
1	2	3000	2900	100	0.033	5.5 ~ 7.5 kW
			2930	70	0.023	11 ~ 18.5 kW
			2970	30	0.01	45 ~ 160 kW
2	4	1500	1460	40	0.027	11 ~ 15 kW
			1470	30	0.02	18.5 ~ 30 kW
			1480	20	0.013	37 ~ 315 kW
			960	40	0.04	3 ~ 5.5 kW
3	6	1000	970	30	0.03	7.5 ~ 30 kW
			980	20	0.02	37 ~ 250 kW

## 二、变频器的构成框图

变频器是一种将工频交流电转换成任意频率交流电的仪器，并且可以拖动电动机带负载运行，因此它又是一个驱动器。变频器的构成框图如图 1-3 所示。

### 1. 主电路

输入：R、S、T 接工频电源。

输出：U、V、W 接电动机。

变频器首先将工频交流电整流成直流，再经过逆变将直流变成交流，在逆变的过程中实现频率的改变，通常主电路的电流很大。

### 2. 控制电路

控制电路是指图 1-3 中除主电路以外的部分。

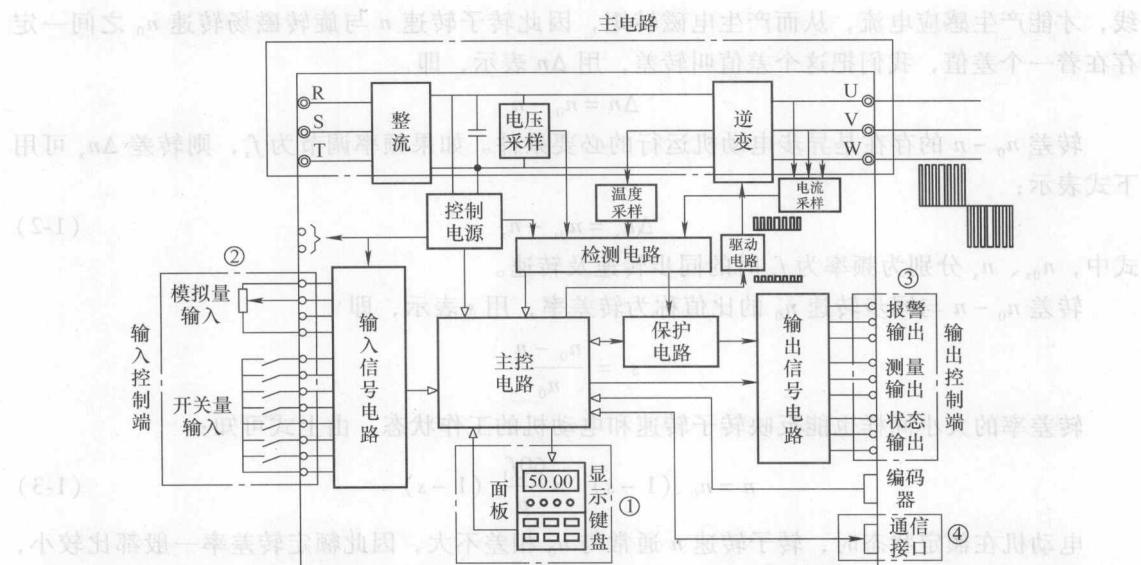


图 1-3 变频器的构成框图

1) 输入：有面板、输入控制端子、通信接口三种方式。给变频器的指令，如给定频率（希望变频器输出的频率）、起动信号等通过某一种输入端口进入变频器的CPU，从而实现对逆变电路的控制。

2) 输出：有面板、输出控制端子两种方式。

变频器的输出频率、错误信号、工作状态可以通过上述端口输出。在输入/输出的过程中，具体选择哪种设备，可以通过操作模式（也叫控制通道）的选择来完成。图1-3中：面板①主要用于近距离、基本控制；输入输出控制端子②和③主要用于远距离、多功能控制；通信接口④主要用于多电动机、系统控制。

3) 驱动电路：逆变电路主要由6只逆变管组成的逆变桥组成，逆变管始终处在交替的导通、关断状态。控制逆变管的导通、关断信号由CPU经计算确定，再由驱动电路使其具有一定的驱动功率，从而驱动逆变管工作。

4) 保护电路：变频器在工作过程中实时采样主电路的直流电压、输出电流及逆变管的温度，一旦出现超标，保护电路将给出过电压、过电流及高温报错并关断逆变管，通过输出设备给出错误报警及错误代码。

## 任务二 变频器的主电路

### 一、变频器的分类

#### 1. 按照变频器的用途来分

1) 专用变频器。专用变频器是针对某一种（类）特定的控制对象而设计的，这种变频器均是在某一方面的性能比较优良，如风机用变频器、水泵用变频器、电梯及起重机械用变频器、中频变频器等。



2) 节能型变频器和通用变频器。常见的中小容量变频器主要有两大类：节能型变频器和通用型变频器。

① 节能型变频器。由于节能型变频器的负载主要是风机、泵等二次方律负载，它们对调速性能的要求不高，因此节能型变频器的控制方式比较单一，一般只有V/F控制，功能也没有那么齐全，但是其价格相对要便宜些。

② 通用型变频器。通用变频器是变频器家族中数量最多、应用最广泛的一种，通用型变频器主要用在生产机械的调速上。生产机械对调速性能的要求（如调速范围，调速后的动、静态特性等）往往较高，若调速效果不理想则会直接影响到产品的质量，所以通用型变频器必须使变频后电动机的机械特性符合生产机械的要求。因此这种变频器功能较多，价格也较贵。它的控制方式除了V/F控制，还使用了矢量控制技术。因此，在各种条件下均可保持系统工作的最佳状态。除此之外，高性能的变频器还配备了各种控制功能，如PID调节、PLC控制、PG闭环速度控制等，为变频器和生产机械组成的各种开、闭环调速系统的可靠工作提供了技术支持。

## 2. 按变频器的主电路结构来分

1) 交—交变频器。它是将频率固定的交流电源直接变换成频率连续可调的交流电源，其主要优点是：没有中间环节，变换效率高。但其连续可调的频率范围窄，一般在额定频率的1/2以下( $0 < f < f_N/2$ )，故主要用于容量较大的低速拖动系统中。

2) 交—直—交变频器。它是先将频率固定的交流电整流后变成直流，再经过逆变电路，把直流电逆变成频率连续可调的三相交流电，由于把直流电逆变成交流电较易控制，因此在频率的调节范围以及变频后电动机特性的改善等方面，都具有明显的优势。目前，使用最多的通用型变频器均属于交—直—交变频器。

另外，从滤波方式来分，可以分为电压型变频器和电流型变频器。

## 二、交—直—交变频器的主电路

对于使用最广泛的交—直—交变频器来说，从结构上可将其分成整流、逆变和制动三部分。交—直—交电压型变频器主电路如图1-4所示。

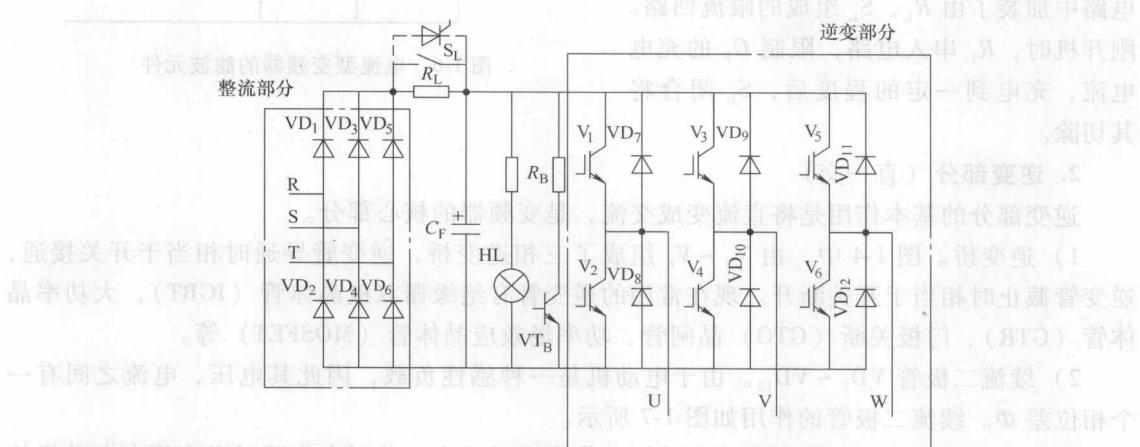


图1-4 交—直—交电压型变频器主电路



现对图 1-4 中各部分的作用作如下说明。

### 1. 整流部分（交一直）

整流器是变频器中用来将交流变成直流的部分，它可以由整流单元、滤波电路及开启电流吸收回路组成。

1) 整流单元： $VD_1 \sim VD_6$ 。图中的整流单元是由  $VD_1 \sim VD_6$  组成的三相整流桥，它们将工频 380V 的交流电整流成直流，该平均直流电压可用下式表示：

$$U_D = 1.35 U_L = 1.35 \times 380V = 513V$$

2) 滤波电路： $C_F$ 。图中滤波电容  $C_F$  的作用是对整流电压进行滤波，使直流电压保持平稳。值得指出的是， $C_F$  是一个大容量的电容器，它是电压型变频器的主要标志，它通常是由多个同规格的小容量电容器并、串联而成。滤波电容及均压电阻如图 1-5 所示。由于电容参数的离散性， $C_1$ 、 $C_2$  的值不会完全相等，为均衡  $C_1$ 、 $C_2$  两端的电压，并入了均压电阻  $R_{C1}$ 、 $R_{C2}$ ，若  $C_1 < C_2$  则  $U_{C1} > U_{C2}$ ，此时通过  $R_{C1}$ 、 $R_{C2}$  的充电电流相对较大，以保证  $C_1$ 、 $C_2$  两端的电压基本相等。

如果均压电阻总是被烧坏，则最可能的原因是与其并联的电容器有损坏。

对电流型变频器来说，滤波的元件是电感。电流型变频器的滤波元件如图 1-6 所示。

3) 开启电流吸收回路： $R_L$ 、 $S_L$ 。在电压型变频器的二极管整流电路中，由于在电源接通时， $C_F$  中将有一个很大的充电电流，该电流有可能烧坏二极管，容量较大时还可能形成对电网的干扰，影响同一电源系统的其他装置正常工作，所以在电路中加装了由  $R_L$ 、 $S_L$  组成的限流回路。刚开机时， $R_L$  串入电路，限制  $C_F$  的充电电流，充电到一定的程度后， $S_L$  闭合将其切除。

### 2. 逆变部分（直一交）

逆变部分的基本作用是将直流变成交流，是变频器的核心部分。

1) 逆变桥。图 1-4 中，由  $V_1 \sim V_6$  组成了三相逆变桥，逆变管导通时相当于开关接通，逆变管截止时相当于开关断开。现在常用的逆变管有绝缘栅双极晶体管（IGBT），大功率晶体管（GTR）、门极关断（GTO）晶闸管、功率场效应晶体管（MOSFET）等。

2) 续流二极管  $VD_7 \sim VD_{12}$ 。由于电动机是一种感性负载，因此其电压、电流之间有一个相位差  $\Phi$ 。续流二极管的作用如图 1-7 所示。

当  $u_1$ 、 $i_1$  同相时，电源做功，电动机工作在电动状态，此时电容通过逆变管向电动机放电。

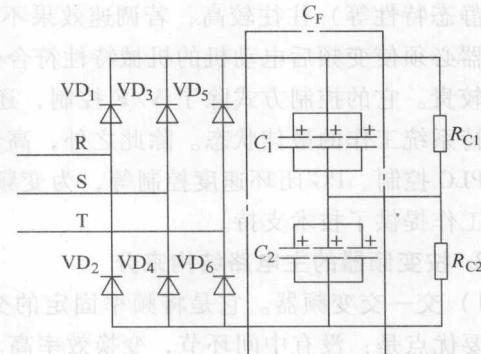


图 1-5 滤波电容及均压电阻

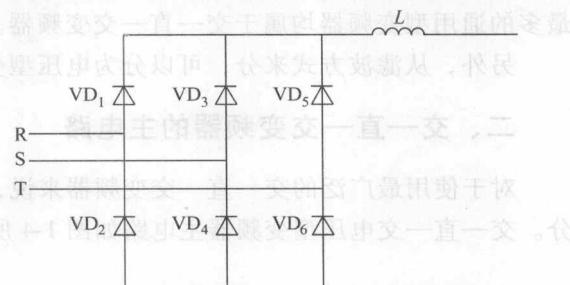


图 1-6 电流型变频器的滤波元件

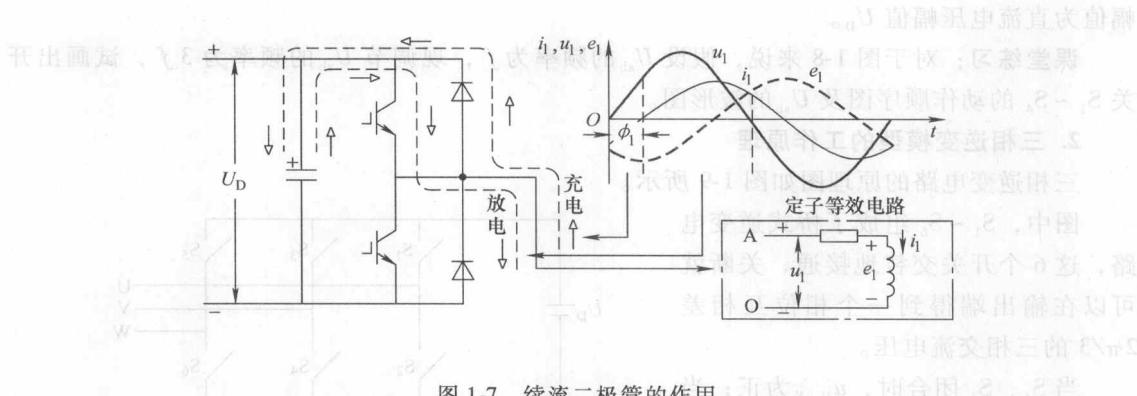


图 1-7 续流二极管的作用

当  $u_1$ 、 $i_1$  反相时，电动机做功，电动机工作在发电状态，此时电动机通过续流二极管向电容充电。

大家都知道，发电状态时，电动机是将自己储存的能量回馈电网，但在变频器中，由于直流部分将电动机与电源分开，电动机的能量只能给电容充电，如果电动机持续工作在发电状态，就有可能使直流侧过电压。

### 3. 制动部分

(1) 制动电阻  $R_B$  变频调速在降速时处于再生制动状态，电动机是将自己储存的能量回馈电网，但回馈的能量到达直流电路，会使  $U_D$  上升，这是很危险的。因此，需要将这部分能量消耗掉，电路中的制动电阻  $R_B$  就是用于消耗该部分能量，如图 1-4 所示。

(2) 制动单元 制动单元由大功率晶体管  $VT_B$  及采样、比较和驱动电路构成，其功能是为放电电流  $I_B$  流过  $R_B$  提供通路。当直流侧电压升高到极限值时  $VT_B$  导通， $R_B$  接入放电回路，如图 1-4 所示。

## 三、逆变原理

在组成交一直一交变频器的各电路中，逆变电路的工作较为复杂，现通过下述模型予以说明。

### 1. 单相逆变模型的工作原理

在图 1-8 所示的单相逆变电路的原理图中，当  $S_1$ 、 $S_4$  同时闭合时， $U_{ab}$  电压为正。 $S_2$ 、 $S_3$  同时闭合时， $U_{ab}$  电压为负。

开关  $S_1 \sim S_4$  轮番通断，可以将直流电压  $U_D$  逆变成交流电压  $u_{ab}$ 。

可以看到在交流电变化的一个周期中，一个臂中的两个开关，如  $S_1$ 、 $S_2$  交替导通，每个开关导通  $\pi$  电角度。因此，交流电的周期（频率）可以通过改变开关通断的速度来调节，交流电压的

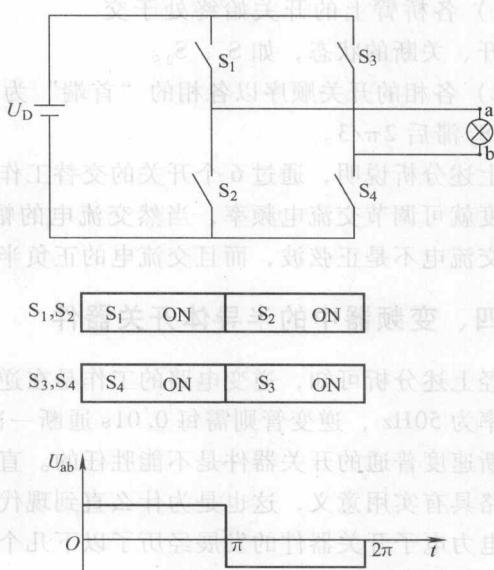


图 1-8 单相逆变电路的原理图



幅值为直流电压幅值  $U_D$ 。

**课堂练习：**对于图 1-8 来说，假设  $U_{ab}$  的频率为  $f$ ，现调节  $U_{ab}$  的频率为  $3f$ ，试画出开关  $S_1 \sim S_4$  的动作顺序图及  $U_{ab}$  的波形图。

## 2. 三相逆变模型的工作原理

三相逆变电路的原理图如图 1-9 所示。

图中， $S_1 \sim S_6$  组成了桥式逆变电路，这 6 个开关交替地接通、关断就可以在输出端得到一个相位互相差  $2\pi/3$  的三相交流电压。

当  $S_1$ 、 $S_4$  闭合时， $u_{U-V}$  为正；当  $S_3$ 、 $S_2$  闭合时， $u_{U-V}$  为负。

用同样的方法可得：

$S_3$ 、 $S_6$  同时闭合和  $S_5$ 、 $S_4$  同时闭合，得到  $u_{V-W}$ ； $S_5$ 、 $S_2$  同时闭合和  $S_1$ 、 $S_6$  同时闭合，得到  $u_{W-U}$ 。

为了使三相交流电  $u_{U-V}$ 、 $u_{V-W}$ 、 $u_{W-U}$  在相位上依次相差  $2\pi/3$ ；各开关的接通、关断需符合一定的规律，其规律在图 1-9b 中已标明。根据该规律可得  $u_{U-V}$ 、 $u_{V-W}$ 、 $u_{W-U}$  波形如图 1-9c 所示。

观察 6 个开关的位置及波形图，可以发现以下两点：

1) 各桥臂上的开关始终处于交

替打开、关断的状态，如  $S_1$ 、 $S_2$ 。

2) 各相的开关顺序以各相的“首端”为准，互差  $2\pi/3$  电角度。如  $S_3$  比  $S_1$  滞后  $2\pi/3$ ， $S_5$  比  $S_3$  滞后  $2\pi/3$ 。

上述分析说明，通过 6 个开关的交替工作可以得到一个三相交流电，只要调节开关的通断速度就可调节交流电频率，当然交流电的幅值可通过  $U_D$  的大小来调节。需要说明的是，这个交流电不是正弦波，而且交流电的正负半周之间有  $\pi/3$  的死区，如图 1-9c 所示。

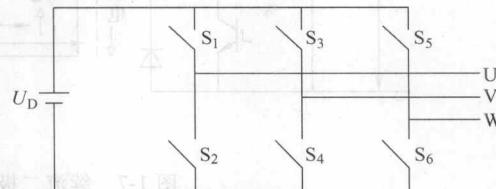
## 四、变频器中的半导体开关器件

经上述分析可知，逆变电路的工作是在逆变管高频率的通断下完成的。如果输出的交流电频率为 50Hz，逆变管则需每 0.01s 通断一次（通断频率为 100Hz），参见图 1-9。如此高的通断速度普通的开关器件是不能胜任的。直到大功率晶体管开关器件技术成熟，才使得逆变电路具有实用意义，这也是为什么直到现代变频器才得以推广应用的原因。

电力电子开关器件的发展经历了以下几个阶段。

### 1. 门极关断 (GTO) 晶闸管

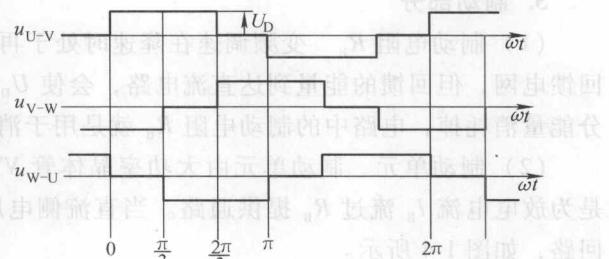
门极关断晶闸管是在普通晶闸管 (SCR) 的基础上发展而来的。从结构上来说，它有三



a) 结构图

$S_1$	$S_2$	$S_1$ ON	$S_2$ ON	$S_1$ ON
$S_3$	$S_4$	$S_4$ ON	$S_3$ ON	$S_4$ ON
$S_5$	$S_6$	$S_5$ ON	$S_6$ ON	$S_5$ ON

b) 开关的通断规律



c) 波形图

图 1-9 三相逆变电路的原理图

个极：阳极（A）、阴极（K）、门极（G），其工作特点是：它是通过门极信号进行接通和关断的晶闸管，其工作特点如下。

（1）导通条件 在门极和阴极之间加一正向电压，即 G (+)、K (-)，GTO 晶闸管导通。

（2）关断条件 在门极和阴极之间加一反向电压，即 G (-)、K (+)，GTO 晶闸管关断。

GTO 晶闸管基本电路如图 1-10 所示。GTO 晶闸管可以方便地通断，是一种无触点开关，因此成为逆变电路中的主要开关元件。但是 GTO 晶闸管的关断需极大的反向脉冲，控制容易失败，工作频率也不够高，所以 GTO 晶闸管在中小容量变频器中已经被新型的大功率晶体管（GTR）所取代，但是在大容量变频器中，GTO 晶闸管以其工作电流大、耐压高的特性，仍得到普遍应用。

## 2. 大功率晶体管（GTR）

1) 结构。大功率晶体管又叫双极型晶体管（BJT），GTR 在结构上常采用达林顿结构的形式，即由多个晶体管复合组成大功率的晶体管，同时还可将反相续流二极管与 GTR 组成一个模块。GTR 模块的内部电路如图 1-11 所示。

GTR 也像普通的晶体管一样，有三个极，分别是基极（B）、发射极（E）、集电极（C）。

2) GTR 的工作特征。像普通的晶体管一样，GTR 也有三种工作状态，即放大、饱和、截止。在电力电子应用领域中，GTR 主要工作在开关状态，即饱和和截止状态。

由于 GTR 工作在大功率电路中，因此管子的功耗是一个不容忽视的问题，GTR 在截止和饱和状态时其功耗是很小的，但是在放大状态时其功耗将增大百倍，因此，逆变电路中的 GTR 在交替切换的过程中是不允许在放大区稍做停留的。GTR 具有自关断能力，还具有开关时间短、饱和压降低、安全工作区宽等特点，因此广泛用于交流调速、变频电源中。在中小容量的变频器中，它曾一度占据了主导地位。GTR 所需的驱动功率较大，故基极驱动系统较复杂，从而使工作频率难以提高，这是 GTR 存在的不足之处。

## 3. 功率场效应晶体管（MOSFET）

MOSFET 与场效应晶体管一样，也有三个极，分别是源极（S）、漏极（D）和栅极（G），管子的连接及工作特性也基本与场效应晶体管一样。MOSFET 是一个电压控制型器

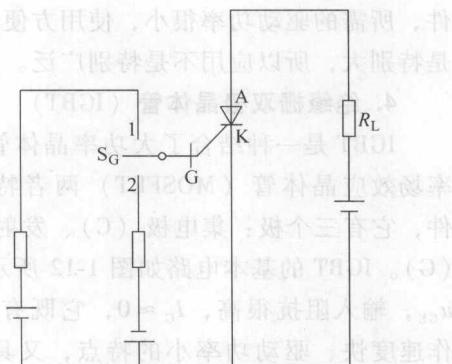


图 1-10 GTO 晶闸管基本电路

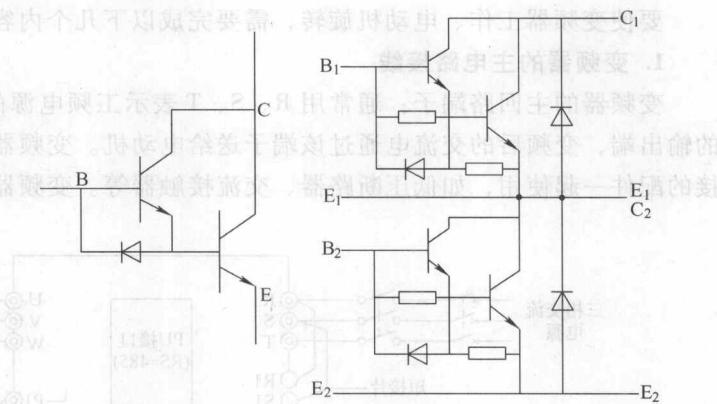


图 1-11 GTR 模块的内部电路