易学易懂自动化技术丛书

图解变频器维修

TUJIE BIANPINQI WEIXIU

李方园　等编著



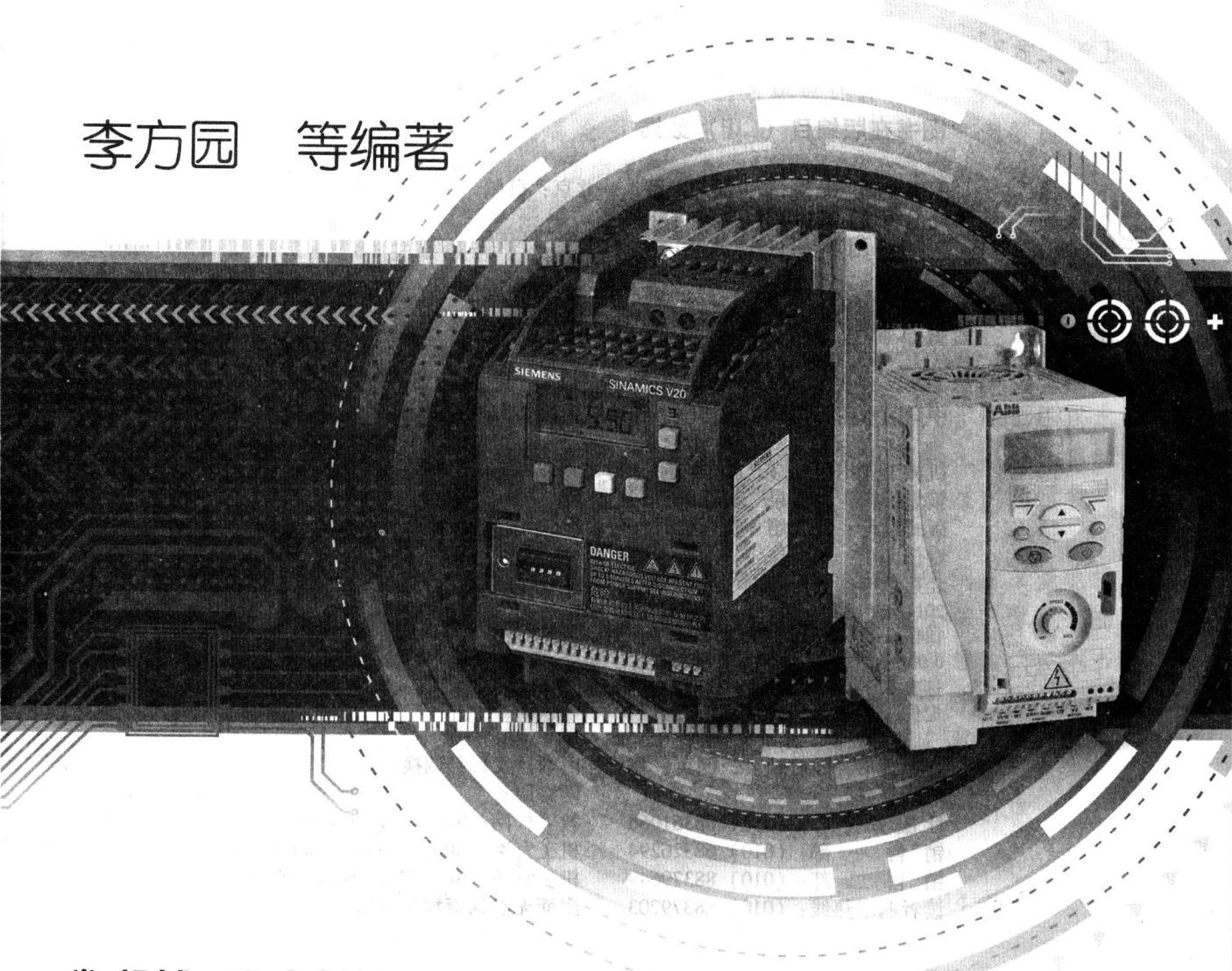
机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

学易懂自动化技术丛书

图解变频器维修

TUJIE BIANPINQI WEIXIU

李方园　等编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书从变频器设计、使用以及维修人员的实际需要出发，在广泛吸收国外先进设计思想、先进标准的基础上，在介绍通用变频器理论的基础上，对当前市场上主流的西门子、ABB 和三菱等公司变频器的规格、控制系统设计、功能、参数、操作、工程案例等方面的内容进行了全面而系统的介绍。本书通过案例解说的方式，功能说明深入细致，理论联系实际，面向工程应用，读者能所读即所用。除此之外，本书还详细介绍了变频器主电路、驱动电路和开关电源的工作原理及具体电路，并通过变频器过电流、过电压、过热和过载等故障实例来进行一一解答，具有非常大的现实指导意义。

本书深入浅出、图文并茂，可作为广大自动化技术人员、中高级电工的实践指导用书，也可作为高职院校的电气自动化、机电一体化、应用电子技术等相关专业的教材和指导书使用。

图书在版编目（CIP）数据

图解变频器维修/李方园等编著. —北京：机械工业出版社，2014.2
（易学易懂自动化技术丛书）
ISBN 978-7-111-45659-9

Ⅰ.①图… Ⅱ.①李… Ⅲ.①变频器-维修-图解 Ⅳ.①TN773-64

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 022880 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：赵 任
版式设计：常天培 责任校对：张莉娟
责任印制：刘 岚
北京京丰印刷厂印刷
2014 年 5 月第 1 版·第 1 次印刷
184mm×260mm·22.75 印张·574 千字
0 001—3 000 册
标准书号：ISBN 978-7-111-45659-9
定价：57.00 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	机工官网：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

一直以来，工业领域是节能减排的重点对象。在能源成本不断上涨的今天，电力电子器件的发展和推广应用则是实现工业高效节能的重要技术手段。作为节能利器的变频器产品，通过采用更先进的电力电子器件得到优化，从而帮助用户在实际应用中将节能技术发挥到极致。变频器除了节能，更多的是应用在工艺调速方面，即为生产和生活服务，提高生产效率和增加生活的舒适度。

本书以变频器原理和维修为主线，在介绍通用变频器理论的基础上，对当前市场上主流的西门子、ABB、三菱等公司变频器的规格、控制系统设计、功能、参数、操作、工程案例、维护维修等方面的内容进行了全面而系统的介绍。本书通过案例解说的方式，功能说明深入细致，理论联系实际，面向工程应用。

本书共18讲。第1讲主要介绍了通用变频器的工作原理、电路结构、U/f控制和矢量控制方式等。第2～4讲主要概述了三菱、西门子、ABB等公司3个品牌的变频器，并举例介绍了变频器的简单操作和应用。第5讲介绍了变频器制动方式、能耗制动的应用方案、回馈制动的原理与案例。第6讲主要介绍了变频器矢量控制与转矩控制、三菱A700变频器的矢量与转矩控制、台达变频器转矩控制应用等。第7、8讲介绍了变频器与PLC、HMI的通信控制。第9、10讲介绍了变频器的两个典型工程应用，即恒压供水和电梯控制。第11～18讲以变频器的维修为落脚点，详细介绍了变频器主电路、驱动电路和开关电源的工作原理及具体电路，并通过变频器过电流、过电压、过热和过载等故障实例来进行一一解答，具有非常大的现实指导意义。

在本书的编写过程中，不仅得到了张永惠教授的大力支持，而且还得到了三菱电机公司、西门子公司、ABB公司、宁波中华纸业有限公司、宁波钢铁有限公司、常州米高电子科技有限公司等相关人员的帮助，并提供了相当多的典型案例和维护经验。在本书的编写中参考和引用了国内外许多专家、学者最新发表的论文和著作等资料。

参加编写的还有陈亚玲、叶明、陈贤富、沈阿宝、陈亚珠、李伟庄、章富科、方定桂、郑振杰、胡焕啸、张东升、钟晓强、徐咏梅等。

作　者

2014年3月

目　录

前言

缩略语

第 1 讲　通用变频器入门 …… 1

1.1　变频调速原理 …… 1

1.2　变频器的电路结构 …… 9

1.3　频率给定和运转指令 …… 12

1.4　U/f 控制与矢量控制 …… 17

第 2 讲　三菱变频器及其应用 …… 25

2.1　三菱变频器 700 系列简要介绍 …… 25

2.2　三菱 D700 变频器的试运行 …… 28

2.3　三菱 D700 变频器运行模式的操作 …… 38

2.4　三菱 A700 变频器的开环矢量控制 …… 46

第 3 讲　西门子变频器及其应用 …… 54

3.1　西门子变频器概述 …… 54

3.2　MM4 系列变频器的外部接线与操作 …… 60

3.3　6SE70 变频器的参数设置 …… 76

3.4　SINAMICS S120 的调试 …… 80

第 4 讲　ABB 变频器及其应用 …… 85

4.1　ABB 变频器概述 …… 85

4.2　ACS510 变频器的操作与应用 …… 91

4.3　ACS550 变频器的操作与应用 …… 97

4.4　ACS800 变频器的操作与应用 …… 105

第 5 讲　变频器的制动功能与应用 …… 111

5.1　变频器的制动原理与方式 …… 111

5.2　三菱 A700 变频器的制动应用 …… 120

5.3　三菱 A700 变频器在塔机起升中的应用 …… 123

5.4　三菱 A700 变频器在卧螺离心机中的应用 …… 129

第 6 讲　变频器的矢量与转矩控制 …… 135

6.1　变频器矢量控制与转矩控制 …… 135

6.2　三菱变频器 A700 矢量与转矩控制 …… 138

6.3　台达变频器转矩控制方式的应用 …… 149

第 7 讲　变频器与 PLC 的通信控制 …… 155

7.1　变频器的通信控制 …… 155

7.2　三菱变频器 A700 的通信 …… 159

7.3　西门子 MM4 系列变频器与 S7-200 进行通信 …… 166

7.4　西门子变频器与 S7-300 进行 PROFIBUS 通信 …… 171

第 8 讲　变频器与 HMI 的通信控制 …… 180

8.1　西门子 MM440 变频器与 HMI 直接通信 …… 180

8.2　西门子 S120 变频器与 HMI 直接通信 …… 185

8.3　三菱变频器与触摸屏的通信 …… 188

第 9 讲　变频器工程应用一：恒压供水 …… 194

9.1　变频恒压供水的原理 …… 194

9.2　三菱 A700 变频器在单泵供水中的应用 …… 200

9.3　多泵变频系统的设计 …… 205

第 10 讲　变频器工程应用二：电梯控制 …… 222

10.1　电梯的变频控制方案 …… 222

10.2　安川 L1000A 变频器在电梯中的应用 …… 226

10.3　变频电梯的节能应用 …… 239

10.4　变频电梯的蓄电池运行方案 …… 241

第 11 讲　变频器主电路及其维修 …… 245

11.1　变频器主电路的构成与分类 …… 245

11.2　案例分析一：东元变频器主电路检修 …… 257

11.3　案例分析二：富士变频器主电路检修 …… 261

第 12 讲　变频器驱动电路及维修 …… 264
12.1　驱动电路故障分析 …… 264
12.2　案例分析一：富士 P11 变频器驱动电路维修 …… 268
12.3　案例分析二：英威腾变频器驱动电路维修 …… 270
12.4　案例分析三：台达变频器驱动电路维修 …… 272
12.5　案例分析四：安川变频器驱动电路维修 …… 274
第 13 讲　变频器开关电源及其维修 …… 279
13.1　变频器开关电源原理 …… 279
13.2　案例分析一：康沃变频器开关电源维修 …… 282
13.3　案例分析二：英威腾开关电源维修 …… 285
第 14 讲　变频器过热故障维修 …… 288
14.1　变频器过热故障分析 …… 288
14.2　案例分析一：ABB 变频器过热故障维修 …… 292
14.3　案例分析二：富士变频器散热风机控制故障 …… 294
第 15 讲　变频器缺相故障维修 …… 298
15.1　变频器缺相故障分析 …… 298
15.2　变频器的电压检测电路 …… 302
15.3　案例分析一：水泵输出缺相 …… 308
15.4　案例分析二：变频器输入缺相 …… 310
第 16 讲　变频器过电压故障维修 …… 313
16.1　变频器过电压故障分析 …… 313
16.2　案例分析一：茶叶机变频器恒速运行过电压维修 …… 319
16.3　案例分析二：制动单元跳闸 …… 320
第 17 讲　变频器过电流故障维修 …… 325
17.1　变频器过电流故障分析 …… 325
17.2　案例分析一：电振电动机的变频器过电流故障 …… 328
17.3　案例分析二：罐车变频器过电流故障 …… 332
17.4　案例分析三：变频器电流传感器故障 …… 336
第 18 讲　变频器过载故障维修 …… 340
18.1　变频器过载及其定位 …… 340
18.2　案例分析一：输送带电动机变频器过载 …… 343
18.3　案例分析二：轧机过载 …… 345
附录 …… 348
附录 A　MM420-2.2kW(380V)驱动电路与开关电源电路图 …… 348
附录 B　三菱 A700 变频器主要参数列表 …… 351
参考文献 …… 357

缩　略　语

VVVF	Variable Voltage Variable Frequency，即变频器
VF	是 VVVF 的简称，指变频器
U/f	变频器最常见的控制方式，即恒压频比
DTC	变频器的一种控制方式，即直接转矩控制，为 ABB 公司率先使用
IGBT	绝缘门极双极型晶体管
GTR	大功率晶体管
GTO	门极关断晶闸管
PG	编码器
PLG	安川电机对编码器的称呼，同 PG
MODBUS	MODICON 公司首先提出的一种通信协议，现为标准协议之一
PROFIBUS	西门子公司首先提出的一种通信协议，现为标准协议之一
USS	西门子专用通信协议
RTU	Remote Terminal Unit 方式，MODBUS 的一种
MCT	MOS 控制晶闸管
PIC	功率集成电路
IPM	智能功率模块
PID	闭环控制，包括 P（比例）、积分（I）和微分（D）环节
Pr.	三菱变频器参数号
Group	ABB 变频器的参数组
PLC	可编程序控制器
DCS	集散控制系统
HMI	人机界面，包括触摸屏和组态软件
FR-Configurator	三菱变频器的 PC 通信软件
PU	三菱变频器的操作键盘
PMU	西门子 6SE70 的参数设置单元（即操作键盘）
Starter	西门子变频器的 PC 通信软件之一
Scout	西门子变频器的 PC 通信软件之一
STEP 7	西门子 S7-300/400 PLC 编程软件
STEP 7 Micro/WIN	西门子 S7-200 PLC 编程软件

第 1 讲

通用变频器入门



交流电动机比直流电动机经济耐用得多，因而被广泛地应用于各行各业。在实际应用场合，往往要求交流电动机能随意调节转速，以便获得满意的使用效果，但它在这方面比起直流电动机就要逊色得多，于是不得不借助其他手段达到调速目的，其中变频器是最有前途的调速方式。通用变频器一般都是采用交直交的方式组成，其主电路包括整流部分、直流环节、逆变部分、制动或回馈环节等；控制电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。在使用变频器时，需要正确设置频率给定方式和运转指令。本讲主要介绍了通用变频器的工作原理、电路结构、U/f 控制和矢量控制方式等。

1.1 变频调速原理

1.1.1 交流电动机的调速方式

1. 异步电动机

三相异步电动机要旋转起来的先决条件是具有一个旋转磁场，三相异步电动机的定子绕组就是用来产生旋转磁场的。三相电源相与相之间的电压在相位上是相差 120°的，三相异步电动机定子中的 3 个绕组在空间方位上也互差 120°，这样，当在定子绕组中通入三相电源时，定子绕组就会产生一个旋转磁场，其产生的过程如图 1-1 所示。图 1-1 中分 4 个时刻来描述旋转磁场的产生过程。电流每变化一个周期，旋转磁场在空间旋转一周，即旋转磁场的旋转速度与电流的变化是同步的。

旋转磁场的转速为：$n = 60f/P$

式中，f 为电源频率；P 是磁场的磁极对数；n 的单位是：每分钟转数。根据此式我们知道，电动机的转速与磁极数和使用电源的频率有关。

定子绕组产生旋转磁场后，转子导条（鼠笼条）将切割旋转磁场的磁力线而产生感应电流，转子导条中的电流又与旋转磁场相互作用产生电磁力，电磁力产生的电磁转矩驱动转

子沿旋转磁场方向以 n_1 的转速旋转起来。一般情况下，电动机的实际转速 n_1 低于旋转磁场的转速 n。因为假设 $n = n_1$，则转子导条与旋转磁场就没有相对运动，就不会切割磁力线，也就不会产生电磁转矩，所以转子的转速 n_1 必然小于 n。为此称这种结构的三相电动机为异步电动机。

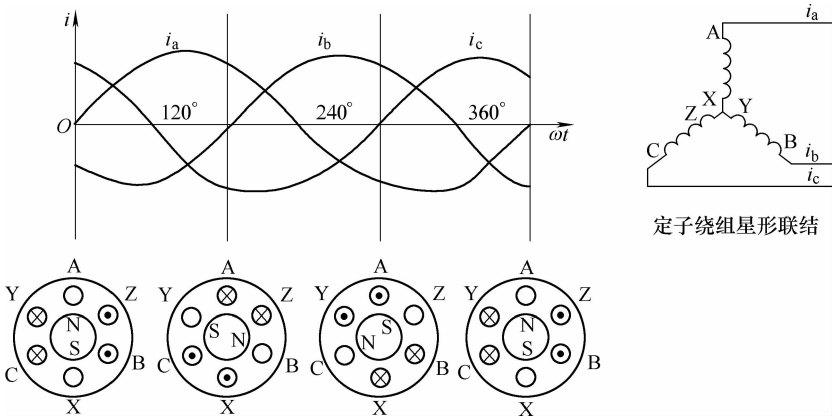


图 1-1　三相异步电动机原理

2. 同步电动机

同步电动机和其他类型的旋转电动机一样，由固定的定子和可旋转的转子两大部分组成。一般分为转场式同步电动机和转枢式同步电动机。

图 1-2 给出了最常用的转场式同步电动机的结构模型，其定子铁心的内圆均匀分布着定子槽，槽内嵌放着按一定规律排列的三相对称交流绕组。这种同步电动机的定子又称为电枢，定子铁心和绕组又称为电枢铁心和电枢绕组。转子铁心上装有制成一定形状的成对磁极，磁极上绕有励磁绕组，通以直流电流时，将会在电动机的气隙中形成极性相间的分布磁场，称为励磁磁场（也称主磁场、转子磁场）。气隙处于电枢内圆和转子磁极之间，气隙层的厚度和形状对电动机内部磁场的分布和同步电动机的性能有重大影响。

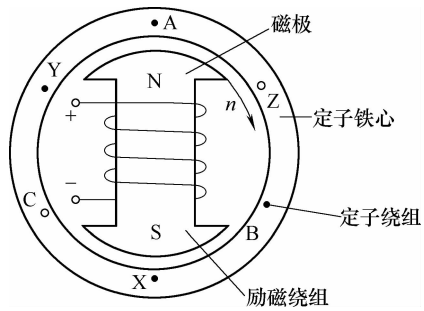


图 1-2　同步电机的结构模型

除了转场式同步电动机外，还有转枢式同步电动机，其磁极安装于定子上，而交流绕组分布于转子表面的槽内，这种同步电动机的转子充当了电枢。图 1-2 中用 AX、BY、CZ 3 个在空间错开 120 电角度分布的线圈代表三相对称交流绕组。

3. 交流电动机的调速

交流电动机比直流电动机经济耐用得多，因而被广泛应用于各行各业，是一种量大面广的传统产品。在实际应用场合，往往要求电动机能随意调节转速，以便获得满意的使用效果，但交流电动机在这方面比起直流电动机而言就要逊色得多，于是不得不借助其他手段达到调速目的。根据感应电动机的转速特性表达式可知，它的调速方式有三大类：频率调节、磁极对数调节和转差率调节。从而出现了目前常用的几种调速方法，如变极调速、调压调速、电磁调速、变频调速、液力耦合器调速、齿轮调速等（见图 1-3）。

基于节能角度，通常把交流调速分为高效调速和低效调速。高效调速指基本上不增加转

差损耗的调速方式，在调节电动机转速时转差率基本不变，不增加转差损失，或将转差功率以电能形式回馈电网或以机械能形式回馈机轴；低效调速则存在附加转差损失，在相同调速工况下其节能效果低于不存在转差损耗的调速方式。

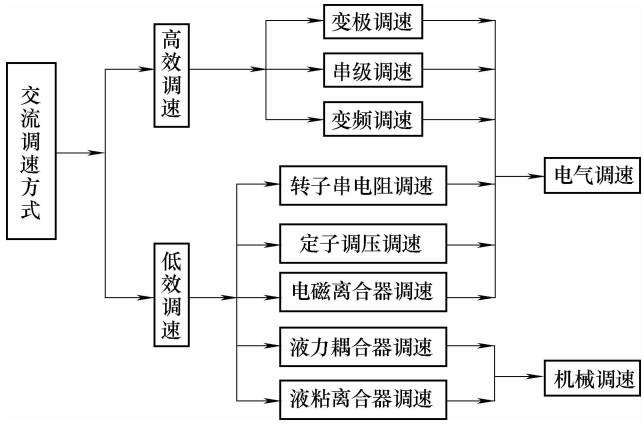


图 1-3　交流电动机主要调速方式分类图

属于高效调速方式的主要有变极调速、串级调速和变频调速；属于低效调速方式的主要有滑差调速（包括电磁离合器调速、液力耦合器调速、液粘离合器调速）、转子串电阻调速和定子调压调速。其中，液力耦合器调速和液粘离合器调速属于机械调速，其他均属于电气调速。变极调速和滑差调速方式适用于笼型异步电动机，串级调速和转子串电阻调速方式适用于绕线转子异步电动机，定子调压调速和变频调速既适用于笼型，也适用于绕线转子异步电动机。变频调速和机械调速还可用于同步电动机。

小贴士

液力耦合器调速和液粘离合器调速属于机械调速范畴。前者是将匹配合适的调速型液力耦合器安装在常规的交流电动机和负载（风机、水泵或压缩机）之间，电动机全速运行，通过改变耦合器工作腔中高速循环流动液体的充满程度，即可调节输出转速。后者是利用两组摩擦片之间接触来传递功率的一种机械设备，如同液力耦合器一样安装在笼型感应电动机与工作机械之间，在电动机全速运行的情况下，利用两组摩擦片之间摩擦力的变化无级地调节工作机械的转速。

1.1.2　交流电动机的几种常见调速方式

1. 异步电动机的变极调速

变极调速技术是通过采用变极多速异步电动机实现调速的。这种多速电动机大都为笼型转子电动机，其结构与基本系列异步电动机相似，现国内生产的有双、三、四速等几类。

变极调速是通过改变定子绕组的极对数来改变旋转磁场同步转速进行调速的，是无附加转差损耗的高效调速方式。由于极对数 p 是整数，它不能实现平滑调速，只能有级调速。在供电频率 $f=50\text{Hz}$ 的电网，$p=1$、2、3、4 时，相应的同步转速 $n_0=3000\text{r/min}$、1500r/min、1000r/min、750r/min。改变极对数是用改变定子绕组的接线方式来完成的（见图 1-4），图

1-4a 的 $p=2$，图 1-4b 和图 1-5c 中的 $p=1$。双速电动机的定子是单绕组，三速和四速电动机的定子是双绕组。这种改变极对数来调速的笼型电动机，通常称为多速感应电动机或变极感应电动机。

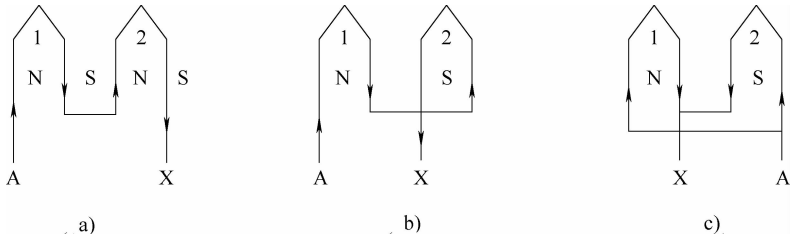


图 1-4　定子绕组改接变极对数示意图

a）$p=2$　b）$p=1$　c）$p=1$

多速电动机的优点是运行可靠，运行效率高，控制电路很简单，容易维护，对电网无干扰，初始投资低。缺点是有级调速，而且调速级差大，从而限制了它的使用范围。适合于按 2 ~4 档固定调速变化的场合。为了弥补有级调速的缺陷，有时与定子调压调速或电磁离合器调速配合使用。

2. 电磁调速

电磁调速技术是通过电磁调速电动机实现调速的技术。电磁调速电动机（又称滑差电动机）由三相异步电动机、电磁转差离合器和测速发电机组成，三相异步电动机作为原动机工作。该技术是传统的交流调速技术之一，适用于容量在 0. 55 ~ 630kW 范围内的风机、水泵或压缩机。

电磁离合器调速是由笼型感应电动机和电磁离合器一体化的调速电动机来完成的，把这种调速电动机称为电磁离合器电动机，又称滑差电动机，属于低效调速方式。电磁调速电动机的调速系统，主要由笼型感应电动机、涡流式电磁转差离合器和直流励磁电源 3 个部分组成（见图 1-5），直流励磁电源功率较小，通过改变晶闸管的触发延迟角改变直流励磁电压的大小来控制励磁电流。它以笼型电动机作为原动机，带动与其同轴接连的电磁离合器的主动部分，离合器的从动部分与负载同轴连接，主动部分与从动部分没有机械联系，只有磁路相通。离合器的主动部分为电枢，从动部分为磁极，电枢是一杯状铸铜体，磁极则由铁心和励磁绕组构成，绕组与部分铁心固定在机壳上不随磁极旋转，直流励磁不必经过集电环而直接由直流电源供电。当电动机带动电枢在磁极磁场中旋转时，就会感生涡流，涡流与磁极磁场作用产生的转矩将使电枢牵动磁极拖动负载同向旋转，通过控制励磁电流改变磁场强度，使离合器产生大小不同的转矩，从而达到调速的目的。

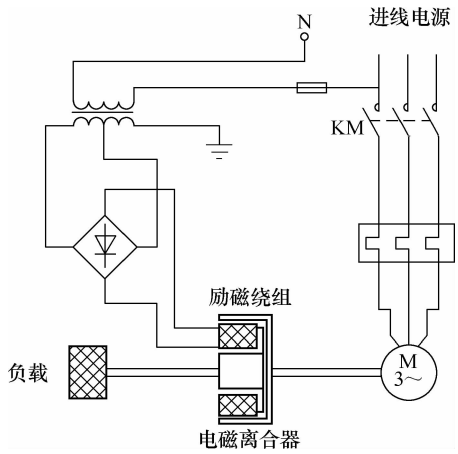


图 1-5　电磁调速示意图

磁离合器的优点是结构比较简单，可无级调速，维护方便，运行可靠，调速范围也比较宽，对电网无干扰，它可以空载起动，对需要重载起动的负载可获得容量效益，提高电动机

运行负载率。缺点是高速区调速特性软，不能全速运行；低速区调速效率比较低。适用于调速范围适中的中小容量电动机。

3. 转子串电阻调速

转子串电阻调速是通过改变绕线转子感应电动机转子串接附加外接电阻从而改变转子电流使转速改变的方式进行调速的（见图 1-6），为减少电刷的磨损，中等容量以上的绕线转子感应电动机还设有提刷装置，当电动机起动时接入外接电阻以减少起动电流，不需要调速时移动手柄可提起电刷与集电环脱离接触，同时使 3 个集电环彼此短接起来。

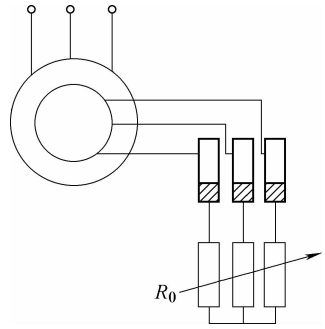


图 1-6　串电阻调速转子电路示意

串电阻调速的优点是技术成熟，控制方法简单，维护方便，初始投资低，对电网无干扰。缺点是转差损耗大，调速效率低；调速特性软，动态响应速度慢；外接附加电阻不易做到无级调速，调速平滑性差。适合于调速范围不太大和调速特性要求不高的场合。

4. 变频调速

变频调速是通过改变异步电动机供电电源的频率 f 来实现无级调速的，其原理如图 1-7 所示，电动机采用变频调速以后，电动机转轴直接与负载连接，电动机由变频器供电。变频调速的关键设备就是变频器，变频器是一种将交流电源整流成直流后再逆变成频率、电压可变的变流电源的专用装置，主要由功率模块、超大规模专用单片机等构成，变频器能够根据转速反馈信号调节电动机供电电源的频率，从而可以实现相当宽的频率范围内的无级调速。

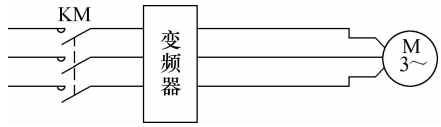


图 1-7　变频调速原理

5. 调速方式汇总

根据实际应用效果，交流电动机的各种调速方式的一般性能和特点汇总见表 1-1。

表 1-1　调速方式的一般特性和特点

调速方式	转子串电阻	定子调压	电磁离合器	液力耦合器	液粘离合器	变极	串极	变频
调速方法	改变转子串电阻	改变定子输入调压	改变离合器励磁电流	改变耦合器工作腔充油量	改变离合器摩擦片间隙	改变定子极对数	改变逆变器的逆变角	改变定子输入频率和电压
调速性质	有级	无级	无级	无级	无级	有级	无级	无级
调速范围	50% ~100%	80% ~100%	10% ~80%	30% ~97%	20% ~100%	2，3，4，档转速	50% ~100%	5% ~100%
响应能力	差	快	较快	差	差	快	快	快
电网干扰	无	大	无	无	无	无	较大	有
节电效果	中	中	中	中	中	高	高	高
初始投资	低	较低	较高	中	较低	低	中	高
故障处理	停车	不停车	停车	停车	停车	停车	停车	不停车
安装条件	易	易	较易	场地	场地	易	易	易
适用范围	绕线转子异步电动机	绕线转子异步电动机，笼型异步电动机	笼型异步电动机	笼型异步电动机，同步电动机	笼型异步电动机，同步电动机	笼型异步电动机	绕线转子异步电动机	异步电动机，同步电动机

1.1.3 交流异步电动机的调速原理

交流电动机不论三相异步电动机还是三相同步电动机，它们的转速 n 为

$$n = n_0 = 60f/p \text{（同步电动机）} \tag{1-1}$$

$$n = n_0(1-s) = 60f/p(1-s) \text{（异步电动机）} \tag{1-2}$$

式中，f 为频率；p 为极对数；s 为转差率（0～3%或0～6%）；n_0 为同步转速。

由转速公式可见，只要设法改变三相交流电动机的供电频率 f，就十分方便地改变了电动机的转速 n。比改变极对数 p 和转差率 s 两个参数简单得多，特别是近20多年来，交流变频调速器得到了突飞猛进的发展，使得三相交流电动机变频调速成为当前电气调速的主流。

实际上仅仅改变电动机的频率并不能获得良好的变频特性。例如：标准设计的三相异步电动机，380V，50Hz。如果电压不变，只改变频率，会产生什么问题？380V不变，频率下调（<50Hz），会使电动机气隙磁通 φ（约等于U/f）饱和；反之，380V不变，频率向上调（>50Hz），则使磁通减弱。所以，真正应用变频调速时，一般需要同时改变电压和频率，以保持磁通基本恒定。因此，变频调速器又称为VVVF（Variable Voltage Variable Frequency）装置。

1. 感应电动机稳态模型

根据电机学原理，在下述3个假定条件下（即忽略空间和时间谐波、忽略磁饱和、忽略铁损），感应电动机的稳态模型可以用T形等效电路表示，如图1-8a所示。

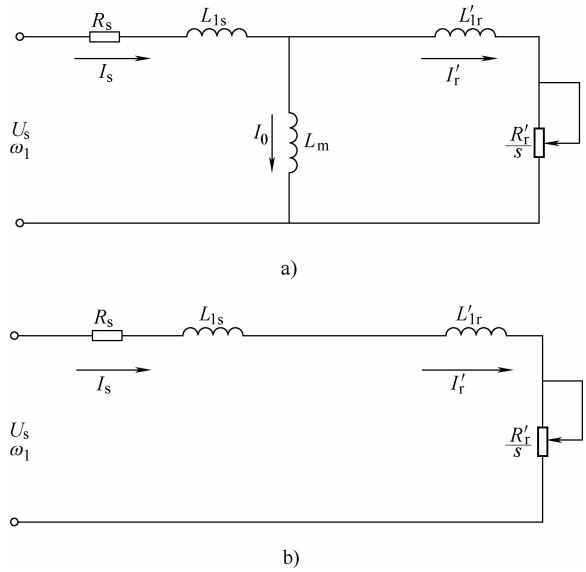


图1-8 感应电动机等效电路

a）感应电动机T形等效电路 b）感应电动机简化等效电路

图1-8a中的各参数定义如下：

R_s、R'_r为定子每相电阻和折合到定子侧的转子每相电阻；

L_{1s}、L'_{1r}为定子每相漏感和折合到定子侧的转子每相漏感；

L_m 为定子每相绕组产生气隙主磁通的等效电感，即励磁电感；

U_s、ω_1 为定子相电压和供电角频率；

I_s、I'_r为定子相电流和折合到定子侧的转子相电流。

忽略励磁电流，则得到如图1-8b所示的简化等效电路。

因此，电流公式可表示为

$$I_s \approx I'_r = \frac{U_s}{\sqrt{\left(R_s + \frac{R'_r}{s}\right)^2 + \omega_1^2 (L_{1s} + L'_{1r})^2}} \tag{1-3}$$

已知感应电动机传递的电磁功率

$P_m = \dfrac{3I'^2_r R'_r}{s}$，同步机械角速度 $\omega_{m1} = \omega_1 / n_p$，则感应电动机的电磁转矩为

$$T_e=\frac{P_m}{\omega_{m1}}=\frac{3I_r'^2R_r'}{s}\frac{n_p}{\omega_1}=\frac{3U_s^2n_pR_r'}{s\left[\left(R_s+\frac{R_r'}{s}\right)^2+\omega_1^2\ (L_{1s}+L_{1r}')^2\right]\omega_1} \tag{1-4}$$

感应电动机的每极气隙磁通为

$$\varphi_m=\frac{E_g}{4.44f_1N_sK_{Ns}}\approx\frac{U_s}{4.44f_1N_sK_{Ns}} \tag{1-5}$$

式中，E_g 为气隙磁通在定子每相中感应电动势的有效值；f_1 为定子频率；N_s 为定子每相绕组串联匝数；K_{Ns}为定子基波绕组系数。

忽略定子电阻和漏磁感抗压降，则认为定子相电压 $U_s=E_g$。

对 T_e 公式对 s 求导，并令 $dT_e/ds=0$，可求出对应于最大转矩时的临界静差：

$$s_m=\frac{R_r'}{\sqrt{R_s^2+\omega_1^2\ (L_{1s}+L_{1r}')^2}} \tag{1-6}$$

最大转矩为

$$T_{emax}=\frac{3U_s^2n_p}{2\omega_1\left[R_s+\sqrt{R_s^2+\omega_1^2\ (L_{1s}+L_{1r}')^2}\right]} \tag{1-7}$$

2. 转速开环的感应电动机变压变频调速

变压变频调速是改变同步转速的调速方法，同步转速随频率而变化，为了达到良好的控制效果，常采用电压-频率协调控制（即 U/f 控制），并分为基频（额定频率）以下和基频以上两种情况。

（1）基频以下调速

为了充分利用电动机铁心，发挥电动机产生转矩的能力，在基频以下采用恒磁通控制方式，要保持 φ_m 不变，当频率 f_1 从额定值 f_{IN}向下调节时，必须同时降低 E_g，即采用电动势频率比为恒值的控制方式。然而，绕组中的感应电动势是难以直接控制的，当电动势值较高时，可以忽略定子电阻和漏磁感抗压降，而认为定子相电压 $U_s\approx E_g$，则得

$$\frac{E_g}{f_1}=\text{常值} \tag{1-8}$$

这是恒压频比的控制方式，其控制特性如图 1-9 所示。

低频时，U_s 和 E_g 都较小，定子电阻和漏磁感抗压降所占的分量相对较大，可以人为地抬高定子相电压 U_s，以便补偿定子压降，称作低频补偿或转矩提升。

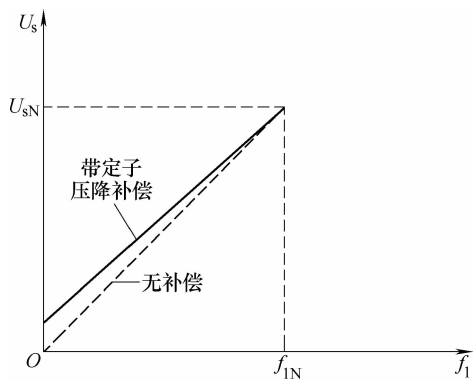


图 1-9　恒压频比控制特性

（2）基频以上调速

在基频以上调速时，频率从 f_{IN}向上升高，但定子电压 U_s 却不可能超过额定电压 U_{SN}，只能保持 $U_s=U_{SN}$不变，这将使磁通与频率成反比地下降，使得感应电动机工作在弱磁状态。

把基频以下和基频以上两种情况的控制特性画在一起，如图 1-10 所示。如果电动机在不同转

速时所带的负载都能使电流达到额定值，即都能在允许温升下长期运行，则转矩基本上随磁通变化而变化。按照电力拖动原理，在基频以下，磁通恒定，转矩也恒定，属于“恒转矩调速”性质，而在基频以上，转速升高时磁通恒减小，转矩也随着降低，基本上属于“恒功率调速”。

3. 恒压频比时的机械特性

基频以下须采用恒压频比控制，感应电动机的电磁转矩为

$$T_e = 3n_p\left(\frac{U_s}{\omega_1}\right)^2 \frac{s\omega_1 R_r'}{[(sR_s + R_r')^2 + s^2\omega_1^2(L_{1s} + L_{1r}')^2]} \tag{1-9}$$

当 s 很小时，可忽略上式分母中含 s 各项，则

$$T_e \approx 3n_p\left(\frac{U_s}{\omega_1}\right)^2 \frac{s\omega_1}{R_r'} \propto s$$

由此可以推导出带负载时的转速降落 Δn 为

$$\Delta n = sn_1 = \frac{60}{2\pi n_p} s\omega_1 \approx \frac{10}{\pi n_p^2} \frac{R_r' T_e}{\left(\frac{U_s}{\omega_1}\right)^2} \propto T_e$$

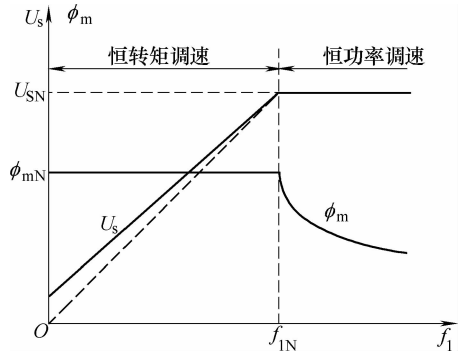


图 1-10　感应电动机变压变频调速的控制特性

由此可见，当 U_s/ω_1 为恒值时，对于同一转矩 T_e，Δn 基本不变。这就是说，在恒压频比的条件下改变频率 ω_1 时，机械特性基本上是平行下移，如图 1-11a 所示。将最大转矩改写为

$$T_{emax} = \frac{3n_p}{2}\left(\frac{U_s}{\omega_1}\right)^2 \frac{1}{\left[\frac{R_s}{\omega_1} + \sqrt{\left(\frac{R_s}{\omega_1}\right)^2 + (L_{1s} + L_{1r}')^2}\right]} \tag{1-10}$$

可见最大转矩 T_{emax} 是随着 ω_1 的降低而减小的。频率很低时，T_{emax} 很小，电动机带载能力减弱，采用低频定子压降补偿，适当地提高电压 U_s，可以增强带载能力。

在基频 f_{1N} 以上变频调速时，电压 $U_s = U_{SN}$ 不变，机械特性方程式可写成

$$T_e = \frac{3U_{SN}^2 n_p R_r'}{s\left[\left(R_s + \frac{R_r'}{s}\right)^2 + \omega_1^2 (L_{1s} + L_{1r}')^2\right]\omega_1} \tag{1-11}$$

而最大转矩表达式可改写成

$$T_{emax} = \frac{3U_{SN}^2 n_p}{2\omega_1\left[R_s + \sqrt{R_s^2 + \omega_1^2 (L_{1s} + L_{1r}')^2}\right]} \tag{1-12}$$

当角频率 ω_1 提高时，同步转速随之提高，最大转矩减小，机械特性上移，而形状基本不变。由于频率提高而电压不变，气隙磁通势必减弱，导致转矩的减小，但转速却升高了，可以认为输出功率基本不变。

图 1-11b 为感应电动机转速开环变压变频调速系统结构原理图，一般称为通用变频器，被广泛应用于调速性能要求不高的场合。为了避免突加给定造成的过电流，在频率给定后设置了给定积分环节。由于转速开环，现场调试工作量小，使用方便，但转速有静差，低速性能欠佳。

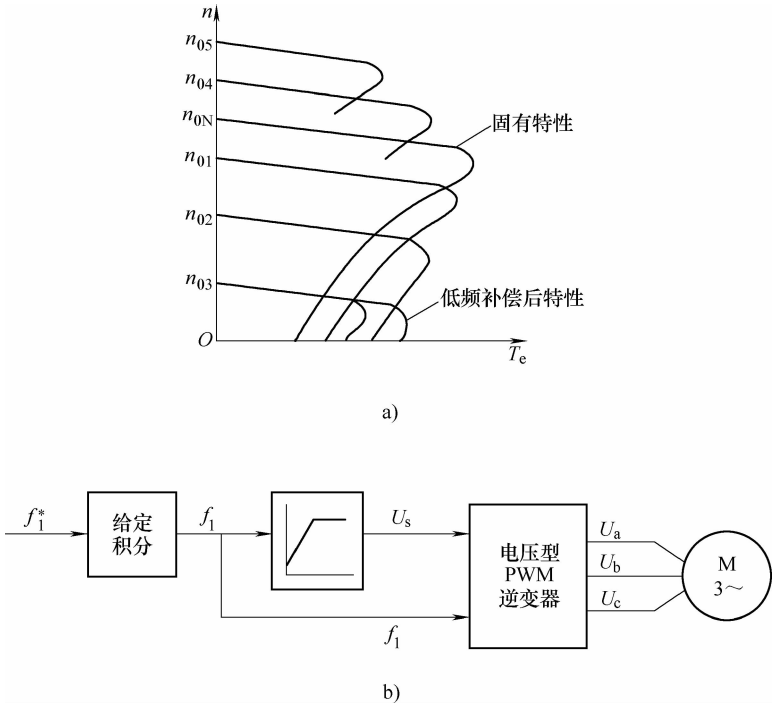


图 1-11　感应电动机变压变频调速机械特性及结构原理

a）感应电动机变压变频调速机械特性　b）感应电动机转速开环变压变频调速系统结构原理

1.2　变频器的电路结构

1.2.1　通用变频器的基本构造

交流变频调速技术是强弱电混合、机电一体的综合性技术，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。前者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，后者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、软件开发问题。

通用变频器一般都是由交直交的方式组成，主回路如图 1-12 所示。在图 1-12 中，VT_1 ~ VT_6 是主开关器件，VD_1 ~ VD_6 是全桥整流电路中的二极管；VD_7 ~ VD_{12} 这 6 个二极管为续流二极管，作用是消除晶体管开关过程中出现的尖峰电压，并将能量反馈给电源；L 为平波电抗器，作用是抑制整流桥输出侧输出的直流电流的脉动使之平滑。晶体管 VT_1 ~ VT_6 的开关状态由基极注入的电流控制信号来确定。

1.2.2　变频器主回路

通用变频器的主电路包括整流部分、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。而对中压大容量的整流部分则采用多重化 12 脉冲以上的变流器。

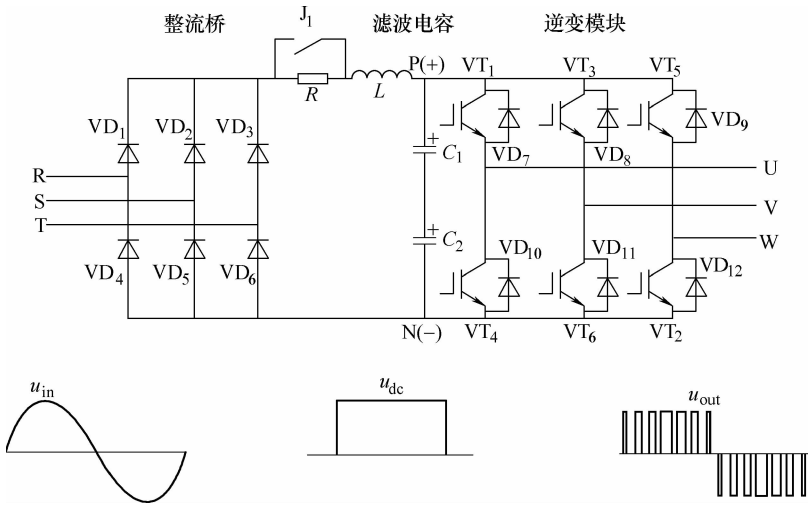


图 1-12　通用变频器的基本构造

（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，因此在中间直流部分与电动机之间总会有无功功率的交换，这种无功能量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 6 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，如图 1-13 所示。IGBT 是 GTR 与 MOSFET 组成的达林顿结构，一个由 MOSFET 驱动的厚基区 PNP 型晶体管，RN 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。

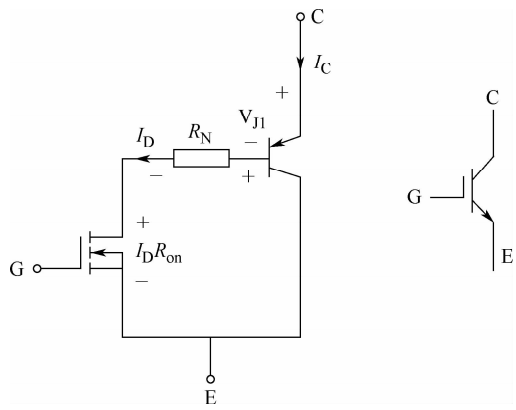


图 1-13　IGBT 原理

导通：U_{GE} 大于开启电压时，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。

（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