

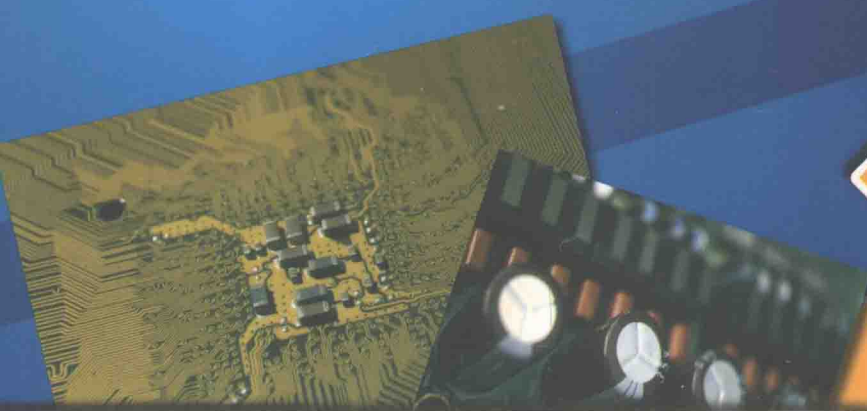


普通高等教育“十二五”规划教材
全国高职高专规划教材·机械设计制造系列

变频技术及应用

BIANPIN JISHU JI YINGYONG

黄华 主编



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材
全国高职高专规划教材·机械设计制造系列

变频技术及应用

黄 华 主 编
吴 硕 副主编
任亚军 刘国钰 参 编



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

在世界能源日益紧缺的今天,变频器以其节能、高效的优点,广泛应用于自动化的各个领域。

本书以西门子 MM440 变频器和三菱 FR-E700 变频器为例,以基本操作和工程应用为重点,通过典型工程项目的形式,介绍了变频器的基本使用方法和操作技能。本书共分四个项目,每个项目均有项目背景、控制要求、知识链接、技能训练和项目设计方案。

本书可用作高等职业院校电气自动化技术专业、机电一体化技术专业等相关专业的教材,也可供工矿企业的电气技术人员、中高级电工、设备操作人员使用参考。

图书在版编目(CIP)数据

变频技术及应用/黄华主编. —北京:北京大学出版社, 2013. 1

(全国高职高专规划教材·机械设计制造系列)

ISBN 978-7-301-21932-4

I. ①变… II. ①黄… III. ①变频技术—高等教育—教材 IV. ①TN77

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 004914 号

书 名: 变频技术及应用

著作责任者: 黄 华 主编

策 划 编 辑: 温丹丹

责 任 编 辑: 温丹丹

标 准 书 号: ISBN 978-7-301-21932-4/TP · 1270

出 版 发 行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62765126 出版部 62754962

网 址: <http://www.pup.cn> 新浪官方微博: @北京大学出版社

电 子 信 箱: zyjy@pup.cn

印 刷 者: 北京富生印刷厂

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 9 印张 219 千字

2013 年 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 20.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-62752024 电子信箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

交流变频调速技术是 20 世纪 80 年代迅速发展起来的一种新型电力传动调速技术。交流变频调速用于交流异步电动机的调速,具有高效、节能、调速范围大、机械特性硬、精度高和运行可靠等优点,因此在多个行业中得到了广泛的应用。在我国目前掌握变频调速设备维护和安装调试的维修电工奇缺。

本书按照辽宁装备制造职业技术学院“六化”办学理念、“工厂化”办学要求,依据机电类专业高技能型人才培养要求,以及高职教育的教学要求和办学特点,突破传统学科教育对学生技术应用能力培养的局限,以理论和实训一体化模式构建教学体系。本书的主要特点如下。

1. 以工学结合、“教学做”一体为指导思想,结合现代社会对人才的需求,以国家最新的《维修电工国家职业标准》为依据,突出了工艺要领和操作技能的培养。

2. 充分利用新的科学技术成果,体现现代科学的发展趋向,符合工程实际状况,富有时代气息,体现了职业岗位的需要,能够反映行业发展趋势,融入新内容、新知识、新技术、新规范。

3. 内容项目化、工程化。

本书由黄华任主编,吴硕担任副主编,任务一由吴硕、任亚军编写;任务二由吴硕编写,任务三由黄华编写,任务四由刘国钰编写。

本书在编写过程中得到了沈阳鼓风机集团单伟高级工程师以及辽宁装备制造职业技术学院马广君、马鸣鹤两位老师的指点,在此表示感谢。在本书编写过程中,参考了有关资料和文献,在此向作者表示衷心感谢。

由于编者水平有限,且时间仓促,书中难免有疏漏、错误和不足之处,恳请读者批评指正。

编 者
2012 年 12 月

本教材配有教学课件,如有老师需要,请加 QQ 群(279806670)或发电子邮件至 zyjy@pup.cn 索取,也可致电北京大学出版社:010-62765126。

目 录

项目一 自动化生产线输送带的变频控制	1
1.1 项目背景及控制要求	1
1.2 知识链接:变频器原理及基本应用	2
1.3 技能训练:变频器的安装、接线与操作	26
1.4 项目设计方案	40
项目二 车床主轴的变频调速	44
2.1 项目背景及控制要求	44
2.2 知识链接:变频器的输入和输出端子	45
2.3 技能训练:熟悉变频器 I/O 端子	66
2.4 项目设计方案	76
项目三 变频恒压供水	83
3.1 项目背景及控制要求	83
3.2 知识链接:变频器的其他功能及选择	85
3.3 技能训练:变频器闭环 PID 控制	90
3.4 项目设计方案	100
项目四 卧式螺旋离心机的控制系统	107
4.1 项目背景及控制要求	107
4.2 知识链接:多传动变频的组成与通信	108
4.3 变频器的故障	121
4.4 技能训练一:FR-A700 变频器的直流供电方式	123
4.5 技能训练二:变频器的通信	125
4.6 项目解决方案	133
参考文献	138

项目一 自动化生产线 输送带的变频控制

变频器主要用于交流电动机的转速调节。与传统的调速技术相比，变频调速具有极大的优越性，整个调速系统体积小、重量轻、控制精度高、保护功能完善、工作安全可靠、操作过程简便、通用性广，使传动控制系统具有优良的性能。与常规的不调速电动机拖动相比，用变频调速装置驱动电动机去拖动风机、水泵及其他机械时，节能效果十分可观。本项目通过介绍生产线输送带的变频控制方案来了解变频器的最简单应用。

本项目的学习目标如下。



知识目标

- (1) 了解交流电动机的调速方式；
- (2) 熟悉变频调速的基本原理及其优缺点；
- (3) 掌握变频器中常用的电力电子器件；
- (4) 掌握变频调速的控制方式；
- (5) 掌握变频器主电路结构及各部分工作电路的工作原理。



技能目标

- (1) 能对通用变频器进行简单接线；
- (2) 能进行变频器的简单调试，并能设置相应的变频器参数；
- (3) 能采用不同的运行模式来解决简单的变频调速项目。



职业素养目标

树立安全用电意识，并能从电动机调速系统的发展轨迹来看待变频器在实际工程中的应用背景。

1.1 项目背景及控制要求

1.1.1 项目背景

在很多的生产线中，都要用到皮带输送机，它可以快速地传送生产过程中的产品和配件等，能够使产量和生产效率大大提高。例如，在自动化生产线的分拣结构中（如图 1-1 所示），传送带是不可缺少的部分，而在传送带上应用变频器工艺控制系统具有以下三个

优点。

(1) 提高生产效率。通过设定变频器的频率，可控制传送带生产线的速度，从而达到提高生产率的目的。

(2) 可利用现有设备。电动机的启动和停止是由操作台上的外部按钮控制。

(3) 可用一台变频器来控制多台电动机驱动。这些电动机均并接到一台变频器上，通过变频器的频率设定可以保证多台电动机同步运行。

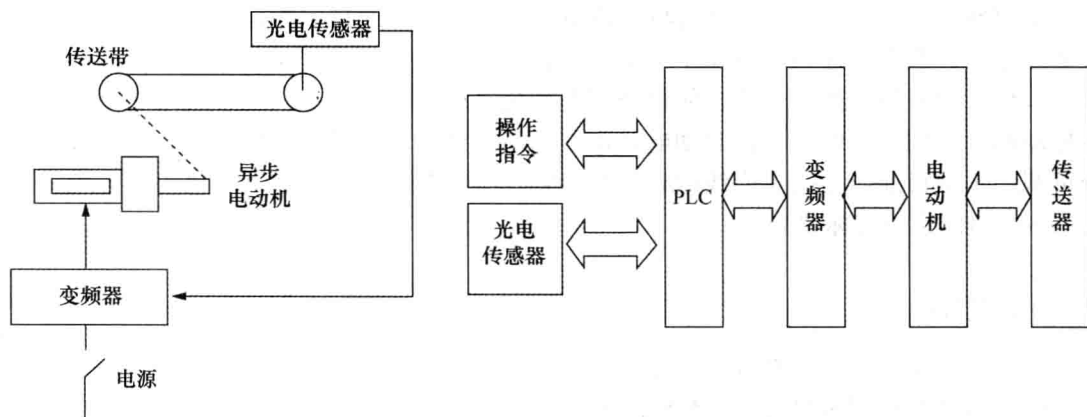


图 1-1 传送带工艺过程示意图

1.1.2 控制要求

现在要求该传送带采用变频控制，已知传送带采用三相鼠笼异步电动机，容量为 0.75kW，三相交流为 380V，请设计合理的控制方案，具体要求如下。

- (1) 变频器的启动由按钮和光电传感器的检测信号来控制。
- (2) 能进行正转与反转控制，且通过操作台上的按钮进行控制，不采用变频器的面板操作。
- (3) 电动机的频率是通过电位器设定的。
- (4) 根据工艺要求设置传送带加速度和最快速度。

1.2 知识链接：变频器原理及基本应用

1.2.1 交流调速的基本知识

1. 异步电动机转速公式

三相交流电动机中，一个十分重要的“角色”便是旋转磁场，它是三个交变磁场合成的结果。这三个交变磁场的特点如下。

- (1) 产生磁场的交变电流在时间上互差三分之一周期 ($T/3$)，这是由三相交流电源

本身的特点所决定的。

(2) 三个磁场的轴线在空间位置上互差 $2\pi/3$ 电角度，这可以通过三相绕组在定子铁芯中的安排来实现。

旋转磁场的转速称为同步转速，由式 (1-1) 决定

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

式 (1-1) 中， n_0 ——同步转速，r/min；

f ——异步电动机的频率，Hz；

p ——电动机极对数。

而异步电动机之所以被冠以“异步”二字，是因为其转子的转速 n_M 永远也跟不上旋转磁场的转速 n_0 。两者之差称为转差：

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

式 (1-2) 中， Δn ——转差，r/min。

转差与同步转速之比，称为转差率：

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

由式 (1-1) 和式 (1-3)，可以推导出：

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

2. 异步电动机调速方案

从式 (1-4) 中可知，异步电动机的调速方案有以下几种。

(1) 改变磁极对数

这种方法可以通过改变定子绕组的接法来实现。此法的缺点是十分明显的：一台电动机最多只能安置两套绕组，每套绕组最多只能有两种接法，所以最多只能得到 4 种转速，与无级调速相去甚远。

(2) 改变转差率

这种方法适用于绕线转子异步电动机，通过滑环与电刷改变外接电阻值来进行调速。显然，这是通过改变在外接电阻中消耗能量的多少来调速的，不利于节能。此外，由于增加了滑环与电刷，故增加了容易发生故障的薄弱环节。

(3) 改变频率

改变电流的频率 f ，就可以改变旋转磁场的转速（同步转速），也就改变了电动机输出轴的转速。可见，调节频率可以调速，并且可以无级调速。变频器就是一种可以任意调节其输出电压和频率，使三相交流异步电动机实现无级调速的装置。变频调速时，从高速到低速都可以保持有限的转差率，因此变频调速具有高效率、宽范围和高精度的调速性能。可以认为变频器调速是交流电动机的一种比较合理和理想的调速方法。

但变频调速出现了一个新问题：当频率下降时，电动机的输出功率将随转速的下降而下降，但输入功率和频率之间却并无直接关系。于是在输入和输出功率之间将出现能量的失衡，这种失衡必将反映在传递能量的磁路中。所以，要说清楚变频变压的问题，必须从电动机的能量传递环节入手。

3. 异步电动机能量传递过程

电源的三相交变电流通入电动机定子的三相绕组后,其合成磁场是一个旋转磁场,转速是 n_0 。旋转磁场被转子绕组(鼠笼条)切割,转子绕组中产生感应电动势 E_2 和感应电流 I_2 。感应电流又和旋转磁场相互作用,便产生电磁转矩 T_M ,在 T_M 的作用下,转子将以转速 n_M 旋转。由于只有在切割旋转磁场的情况下,转子绕组才可能产生感应电动势 E_2 和感应电流 I_2 。而如果转子的转速和同步转速相等的话,转子绕组将不再切割磁力线,也不会产生感应电流和转矩,转子便失去了旋转的动力。因此,转速 n_M 永远小于同步转速 n_0 ,两者之差称为转差,用 Δn 表示,具体说明如下。

(1) 输入功率

三相交流异步电动机的输入功率就是从电源吸取的电功率,用 P_1 表示,计算公式如下:

$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos\varphi_1 \quad (1-5)$$

式(1-5)中, P_1 ——输入功率, kW;

U_1 ——电源相电压, V;

I_1 ——电动机的相电流, A;

$\cos\varphi_1$ ——定子绕组的功率因数。

(2) 电磁功率

定子输入功率中减去定子绕组的铜损 p_{Cu1} 和铁损 p_{Fe1} 后,将全部转换成传输给转子的电磁功率 P_M ,计算公式如:

$$P_M = 3E_1 I_1 \cos\varphi_1 \quad (1-6)$$

式(1-6)中, P_M ——电磁功率, kW;

E_1 ——定子每相绕组的反电动势, V。

定子绕组的反电动势是定子绕组切割旋转磁场的结果,其有效值计算如下:

$$E_1 = 4.44K_E f N_1 \Phi_1 \quad (1-7)$$

式(1-7)中, N_1 ——定子每相绕组的匝数;

Φ_1 ——定子每对磁极的磁通, Wb;

K_E ——绕组的电势系数。

式(1-7)表明,当频率一定时, E_1 的大小直接反映了磁通 Φ_1 的大小。

(3) 转子侧的电磁功率

转子是通过电磁感应得到从定子传递过来的电磁功率的,其大小由式(1-8)计算:

$$P_M = 3E'_2 I'_2 \cos\varphi_2 \quad (1-8)$$

式(1-8)中, E'_2 ——转子等效绕组每相电动势的折算值, V;

I'_2 ——转子等效绕组相电流的折算值, A;

$\cos\varphi_2$ ——转子等效绕组的功率因数。

此处,所谓转子的等效绕组,是一组效果与实际绕组(鼠笼条)完全相同的假想绕组,其结构与定子绕组相同。等效绕组中的各物理量都缀以“'”,是转子等效绕组切割旋转磁场的结果,其有效值计算如下:

$$E'_2 = 4.44K_E f N_1 \Phi_1 \quad (1-9)$$

比较式(1-7)和式(1-9)可以看出,由于转子等效绕组的结构和定子绕组完全相同,因此:

$$E'_2 = E_1$$

(4) 输出功率

电动机的输出功率就是轴上的机械功率，其大小由式(1-10)计算：

$$P_2 = \frac{T_M n_M}{9550} \quad (1-10)$$

电磁转矩是转子电流与磁通相互作用的结果，其大小计算如下：

$$T_M = K_T \Phi_1 I'_2 \cos\varphi_2 \quad (1-11)$$

当电动机的工作频率 f_x 下降时，各部分功率的变化情形如下。

(1) 输入功率

在式(1-5)中，与输入功率 P_1 有关的各因子中，除 $\cos\varphi_1$ 略有变化外，其他都和 f_x 没有直接关系。因此，可以认为， f_x 下降时， P_1 基本不变。

(2) 输出功率

由于在等速运行时，电动机的电磁转矩 T_M 总是和负荷转矩相平衡，所以，在负荷转矩不变的情况下， T_M 也不变。而输出轴上的转速 n_x 必将随 f_x 下降而下降，由式(1-10)知，输出功率 P_2 也随 f_x 的下降而下降。

(3) 电磁功率

当输入功率 P_1 不变而输出功率 P_2 减小时，传递能量的电磁功率 P_M 必然增大。这意味着磁通 Φ 也必然增大，并导致磁路饱和。这是异步电动机在电流频率下降时出现的一个特殊问题。

(4) 保持磁通不变的准确方法

由式(1-7)可知，反电动势的大小既和频率大小成正比，也和磁通的振幅值（或有效值）成正比。所以，如果能保持：

$$\frac{E_1}{f_1} = \text{const} \quad (1-12)$$

则磁通 Φ_1 将保持不变。但反电动势 E_1 是线圈自身产生的，无法从外部控制其大小，故式(1-12)所表达的条件将难以实现。由定子的一相等效电路可知，定子绕组的阻抗压降 ΔU 所占比例较小，因此，用比较容易从外部进行控制的外加电压 U_1 来近似地代替反电动势 E_1 是具有现实意义的。即：

$$\frac{U_1}{f_1} = \text{const} \rightarrow \Phi_1 = \text{const} \quad (1-13)$$

1.2.2 变频器的控制方式

目前，变频器中常用的控制方式有：V/F控制、矢量控制、直接转矩控制以及一些智能控制方式等。下面仅对前三种控制方式作介绍。

1. V/F控制

在上述内容已经介绍了在采用变频调速时，通常希望保持电动机每极的磁通量为额定值，并保持不变。这是因为：磁通小，铁芯没有被充分利用；磁通过大，将会使铁芯深度饱和，导致励磁电流急剧增大，使绕组过热损坏电动机。那么，如何保证磁通不变呢？

由以前所学知识可知，异步电动机定子绕组电压平衡方程式为：

$$\begin{cases} U = -E + \Delta U \\ E = 4.44fk_{w1}N\Phi_m \end{cases} \quad (1-14)$$

式(1-14)中, U ——加在定子每相绕组上的电压, V;

E ——每相绕组的反电动势, V;

ΔU ——定子阻抗压降, V;

f ——定子频率, Hz;

k_{w1} ——与绕组有关的结构常数;

N ——定子每相绕组串联匝数;

Φ_m ——每极气隙磁通量, Wb。

由于 $4.44k_{w1}N$ 为常数, ΔU 往往可以忽略, 故根据式(1-14)有:

$$U \approx E \propto f\Phi_m \quad (1-15)$$

下面分两种情况讨论。

(1) 额定频率以下调速 ($f \leq f_n$)。当 f 小于额定频率时, 为保证磁通 Φ_m 不变, 由式(1-14)可知, 必须使 $E/f = \text{常数}$ 。由于定子反电动势不易直接控制, 由式(1-15)可知, 通过控制 U 即可控制 E , 即有: $U/f = \text{常数}$, 由于在额定频率以下调速时磁通恒定, 所以转矩恒定, 其调速属于恒转矩调速。

(2) 额定频率以上调速 ($f \geq f_n$)。电动机工作在额定频率时, 其定子电压为额定电压, 所以要在额定频率以上调速时, U 只能保持不变。由式(1-15)可知, 磁通随频率升高而降低, 最大转矩减少, 电动机输出功率基本不变, 其调速属于恒功率调速。

2. 矢量控制

矢量控制实现的基本原理是通过测量和控制异步电动机定子电流矢量, 根据磁场定向原理分别对异步电动机的励磁电流和转矩电流进行控制, 从而达到控制异步电动机转矩的目的。具体方法是异步电动机的定子电流矢量分解为产生磁场的电流分量(励磁电流)和产生转矩的电流分量(转矩电流)分别加以控制, 并同时控制两个分量之间的幅值和相位, 即控制定子电流矢量, 所以称这种控制方式称为矢量控制方式。

矢量控制方式又有基于转差频率控制的矢量控制方式、无速度传感器矢量控制方式和有速度传感器矢量控制方式等。这样就可以将一台三相异步电动机等效为直流电动机来控制, 因而获得与直流调速系统同样的静、动态性能。矢量控制算法已被广泛地应用在 SIEMENS、ABB、GE、Fuji 等国际化大公司变频器上。目前, 新型矢量控制通用变频器中已经具备异步电动机参数自动检测、自动辨识、自适应功能, 带有这种功能的通用变频器在驱动异步电动机进行正常运转之前可以自动地对异步电动机的参数进行辨识, 并根据辨识结果调整控制算法中的有关参数, 从而对普通的异步电动机进行有效的矢量控制。

现在以异步电动机的矢量控制为例说明控制过程。首先, 通过电动机的等效电路来得出一些磁链方程, 包括定子磁链、气隙磁链、转子磁链, 其中, 气隙磁链是连接定子和转子的。一般的感应电动机转子电流不易测量, 所以通过气隙来中转, 把它变成定子电流。其次, 有一些坐标变换, 先是通过 $3/2$ 变换, 变成静止的 $d-q$ 坐标, 然后通过前面的磁链方程产生的单位矢量来得到旋转坐标下的类似于直流电动机的转矩电流分量和磁场电流分量, 这样就实现了解耦控制, 加快了系统的响应速度。最后, 再经过 $2/3$ 变换, 产生三相交流电去控制电动机, 这样就获得了良好的性能。

3. 直接转矩控制

和矢量控制系统一样,直接转矩控制也是分别控制异步电动机的转速和磁链,而且采用在转速环内设置转矩内环的方法,以抑制磁链变化对转速子系统的影响。因此,转速与磁链子系统也是近似解耦的。

转矩和磁链都采用直接反馈的控制,从而避开了将定子电流分解成转矩和励磁分量的做法,省去了旋转坐标变换,简化了控制器的结构,但却带来了转矩脉动,因而限制了调速范围。

选择定子磁链作为被控制的磁链,而不像矢量控制系统那样选择转子磁链。这样一来,稳态的机械特性虽然差一些,却能使控制性能不受转子参数变化的影响,这是优于矢量控制的主要方面。

4. 各种控制方式的特点及应用

(1) V/F 控制

V/F 控制变频器结构简单、成本低、机械特性硬度好,能满足传动机构的平滑性调速的要求。但是这种调速控制方式,在低频时,由于电压较低,转矩受定子阻抗压降影响较为明显,使最大输出转矩减少,此时必须进行转矩补偿,以改变低频转矩特性。另外,这种变频器采用开环控制方式,不能达到较高的控制性能,故 V/F 控制一般用于通用性变频器,在风机、泵类机械的节能运转及生产线输送带的传动中常采用 V/F 控制的变频器。

(2) 矢量控制

矢量控制具有动态响应快、调速范围宽、低频转矩大、控制灵活等优点,使得异步电动机调速可以获得和直流电动机相媲美的调速性能。同时,矢量控制也存在着系统结构复杂、通用性差(一台变频器只能带一台电动机,而且与电动机特性有关)等不足之处。

(3) 直接转矩控制

不同于矢量控制,直接转矩控制具有鲁棒性、转矩动态性好、控制结构简单、计算简便等优点,它在很大程度上解决了矢量控制中结构复杂、计算量大、对参数变化敏感等问题。然而作为一种诞生不久的新理论、新技术,直接转矩控制方式自然有其不完善不成熟之处:一是在低速时,由于定子电阻变化而带来了一系列问题,主要是定子电流和磁链的畸变非常严重;二是低速时转矩脉动大,因而限制了调速范围。

1.2.3 变频器常用电力电子器件

1. 门极可关断晶闸管——GTO

门极可关断晶闸管用 GTO 表示,具有耐压高、电流大等优点,同时又具有自关断能力、使用方便等优点,是理想的高电压、大电流开关器件。目前, GTO 的容量已经达到 3 000 A/4 500 V。

(1) GTO 的结构

门极可关断晶闸管有三个电极:阳极 A、阴极 K 和门极 G。GTO 在电路中的符号如图 1-2 (a)所示。

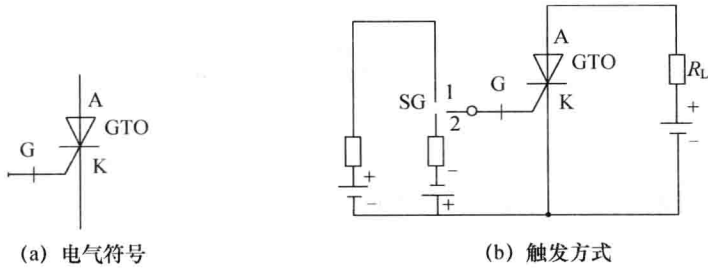


图 1-2 门极可关断晶闸管

(2) GTO 的工作原理

在门极加上正电压或正脉冲，如图 1-2 (b) 中将开关 SG 投向位置“1”，则 GTO 导通。其后即使撤销信号，GTO 也保持导通状态。

如果在门极 G 和阴极 K 之间加入反向电压或较强的反向脉冲，可使开关 SG 投向位置“2”，致使 GTO 关断。

(3) GTO 变频器特点

GTO 具备可关断能力，可以应用脉宽调制技术来实现变频调速。

由于 GTO 开关频率较低，通常低于 1kHz，故在中小容量变频器中已基本不用；但其基本结构与晶闸管相同，故具有高电压、大电流的特点。迄今 GTO 最高水平已超过 10kA，12kV，所以成为高电压、大容量变频器中的主要逆变器件。

2. 电力晶体管——GTR

(1) GTR 的结构

电力晶体管是由两个或多个晶体管复合而成的复合晶体管（达林顿管，也称为大功率晶体管 GTR 或双极晶体管 BJT）构成，如图 1-3 所示。复合后的集电极就作为 GTR 的 C 极，复合后的发射极就作为 GTR 的 E 极，复合后的基极就作为 GTR 的 B 极。达林顿管结构可以是 PNP 型也可以是 NPN 型，其性质由驱动管来决定，如图 1-3 所示。其中 V_1 为驱动管， V_2 为输出管。



图 1-3 达林顿管结构

(2) GTR 的工作原理

我们用图 1-4 所示的共射极开关电路来说明器件的工作原理。

当 GTR 的基极输入正向电压时，GTR 导通，此时发射结处于正向偏置状态 ($U_{BE} > 0$)，集电结也处于正向偏置状态 ($U_{BC} > 0$)。

当基极输入反向电压或零时，GTR 的发射结和集电结都处于反向偏置状态 ($U_{BE} < 0$, $U_{BC} < 0$)。在这种情况下，GTR 处于截止状态。

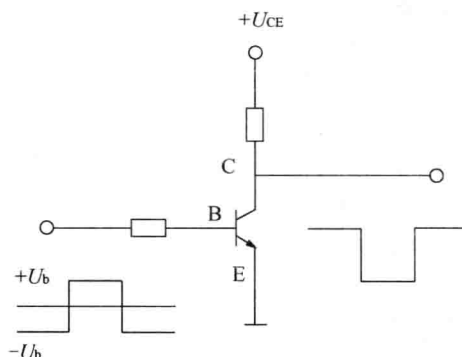


图 1-4 GTR 的开关电路

(3) 以 GTR 为逆变管的变频器的特点

① 输出电压。可以采用脉宽调制方式，故输出电压为幅值等于直流电压的强脉冲序列。

② 载波频率。GTR 由于开通和关断时间较长，故允许的载波频率较低，大部分变频器的上限载波频率约为 $1.2 \sim 1.5 \text{ kHz}$ 。

③ 电流波形。由于载波频率较低，故电流的高次谐波成分较大。这些高次谐波电流将在硅钢片中形成涡流，并使硅钢片相互间因产生电磁力而振动。又因为载波频率处于人耳对声音较为敏感的区域，故电动机有较强的电磁噪声。

④ 输出转矩。因为电流中高次谐波的成分较大，故在 50 Hz 时，电动机轴上的输出转矩与工频运行时相比，略有减小。

3. 电力场效应晶体管——Power MOSFET

(1) 电力 MOSFET 的结构

电力场效应晶体管，也称功率场效应晶体管，简称电力 MOSFET (Power MOSFET)。电力 MOSFET 有三个电极，分别为栅极 G、源极 S 和漏极 D。根据导电沟道，电力 MOSFET 分为 P 沟道和 N 沟道。电力 MOSFET 的电气符号如图 1-5 所示。

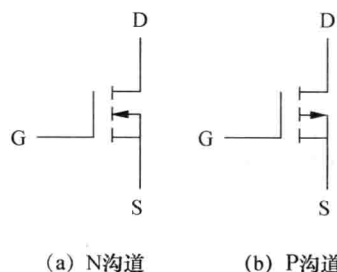


图 1-5 电力 MOSFET 的电气符号

(2) 电力 MOSFET 的工作原理

栅极 G、源极 S 间的控制信号是电压信号 U_{GS} 。当 U_{GS} 为负值或为零时，电力 MOSFET 处于截止状态。

若在栅极、源极间加正电压 U_{GS} ，当 U_{GS} 大于 U_T (开启电压) 时，漏极和源极导电。

U_{GS} 超过 U_T 越多, 导电能力就越强, 漏极电流 I_D 也越大。

(3) 功率场效应晶体管变频器的特点

用功率场效应晶体管作为变频器的逆变器件时, 由于载波频率较高, 故电动机的电流波形较好, 不再有电磁噪声, 是比较理想的功率器件。

但迄今为止, 功率场效应晶体管的额定电压和额定电流都还不够大, 因此只能作为电压较低 (如 220 V)、容量较小的变频器逆变器件。

4. 绝缘栅双极晶体管——IGBT

绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 是 GTR 和电力 MOSFET 相结合的产物, 既具有开关速度快、输入阻抗高、热稳定性好、所需驱动功率小且驱动电路简单等优点, 又具有通态压降小、耐压高及承受电流大等优点, 是发展最快而且最有前途的一种复合器件。IGBT 在电动机控制、中频电源、开关电源以及要求速度快、损耗低的领域中得到了广泛的应用。

(1) IGBT 的结构

IGBT 有三个电极, 栅极 G、集电极 C 和发射极 E, 图 1-6 为 IGBT 的简化等效电路和电气图形符号。图 1-6 (a) 表明, IGBT 是以 GTR 为主导器件、电力 MOSFET 为驱动器件的达林顿结构的器件, 图中 R_N 为 PNP 晶体管基区内的调制电阻。N 沟道的 IGBT 的图形符号如图 1-6 (b) 所示, 对于 P 沟道的 IGBT, 其图形符号中的箭头方向与 N 沟道的 IGBT 相反。

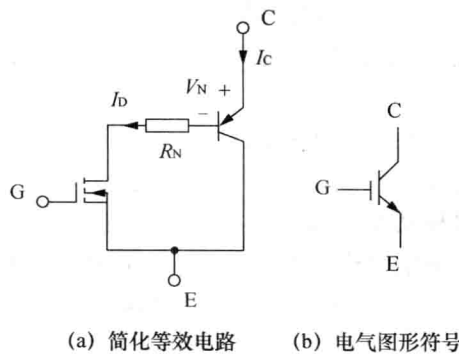


图 1-6 IGBT 简化等效电路和电气图形符号

(2) IGBT 的工作原理

IGBT 的驱动原理与电力 MOSFET 基本相同, IGBT 的开通和关断由栅极、发射极电压 U_{GE} 决定。

在栅极、发射极间加正向电压 U_{GE} , 当 U_{GE} 大于开启电压 $U_{GE(th)}$ 时, 电力 MOSFET 内形成沟道, 为晶体管提供基极电流, 从而使 IGBT 导通。当栅极、发射极间施加反向电压或不加信号时, 电力 MOSFET 内的沟道消失, 晶体管的基极电流被切断, 因此 IGBT 关断。

(3) IGBT 变频器的特点

① 载波频率高。大多数变频器的载波频率可在 3~15 kHz 的范围内任意调节, 载波频率高的结果是电流的谐波成分减小。

② 功耗减小。由于 IGBT 的驱动电路取用电流极小，几乎不消耗功率。而 GTR 基极回路的取用电流常常是安培级的，消耗的功率不可小视。

③ 瞬间停电可以不停机。IGBT 的栅极电流极小，停电后，栅极控制电压衰减较慢，IGBT 管不会立即进入放大状态。因此，在瞬间停电后，变频器允许自动重合闸，而可以不必跳闸。

1.2.4 变频器的组成、结构框图

交流变频调速技术是强弱电混合、机电一体的综合性技术，既要处理巨大的电能的转换（整流、逆变），又要处理信息的收集、变换和传输，因此它的共性技术分成功率转换和弱电控制两大部分。前者要解决与高电压大电流有关技术问题和新型电力电子器件的应用问题，后者主要解决基于现代理论的控制策略和智能控制策略的硬件、软件开发问题，目前状况下主要是全数字控制技术。

1. 变频器的组成

变频器是把电压和频率固定的交流电变成电压和频率可调的交流电的一种电力电子装置，其实际电路相当复杂，图 1-7 所示为变频器的内部组成框图。

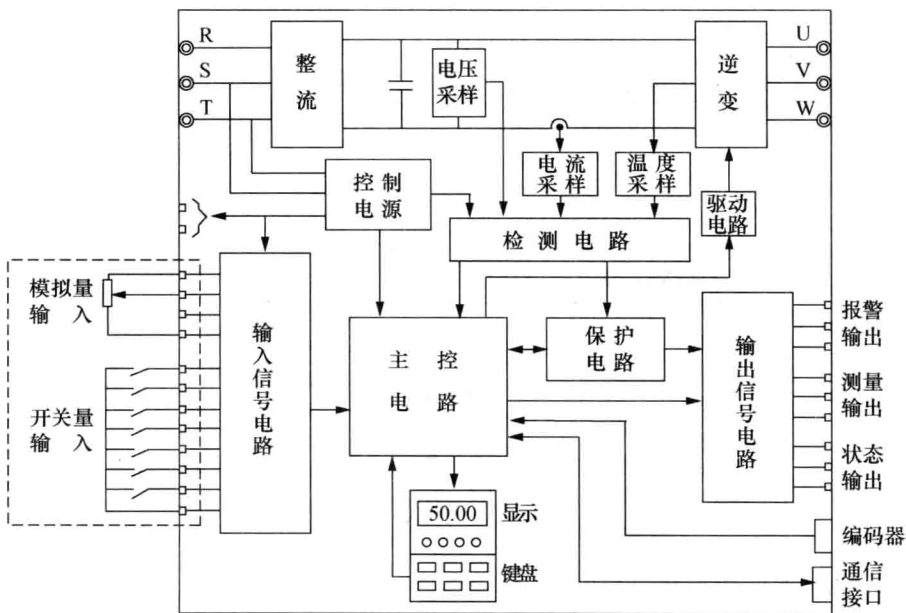


图 1-7 变频器的内部组成框图

从图 1-7 中可以看出，变频器内部主要由以下几部分组成。

(1) 主电路单元

主电路单元包括整流和逆变两个主要功率变换单元。电网电压由输入端（R、S、T）输入变频器，经整流器整流成直流电压。整流器通常是由二极管构成的三相桥式整流，直流电压由逆变器逆变成交流电压，交流电压的频率和电压大小受逆变管驱动信号控制，由输出端输出（U、V、W）到交流电动机。

直流中间电路要对整流电路的输出进行滤波，以减少电压或电流的波动。这种直流中

间电路也称为滤波电路。对电压型变频器来说，整流电路的输出为直流电压，可通过大容量的电容对输出电压进行滤波。通常采用电解电容，并且根据变频器的容量的要求，将电容进行串、并联使用，来获得所需的耐压值和容量。

(2) 驱动控制单元

驱动控制单元主要包括 PWM 信号分配电路、输出信号电路等。其主要作用是产生符合系统控制要求的驱动信号，驱动控制单元又受中央处理器的控制。

(3) 中央处理单元

中央处理单元包括控制程序、控制方式等部分，是变频器的控制中心。外部控制信号、内部检测信号、用户对变频器的参数设定信号等先送到中央处理器，再对变频器进行相关的控制。

(4) 保护及报警单元

保护及报警单元主要通过检测变频器的电压、电流、温度等信号。当出现异常或故障时，该单元将改变或关断逆变器的驱动信号，使变频器停止工作，实现对变频器自我保护。

(5) 参数设定与监视单元

参数设定和监视单元主要由操作面板组成，用于对变频器的参数设定和监视变频器当前的运行状态。

2. 变频器的主电路

目前使用的变频器绝大多数为交—直—交变频器，交—直—交变频器的主电路如图 1-8 所示。

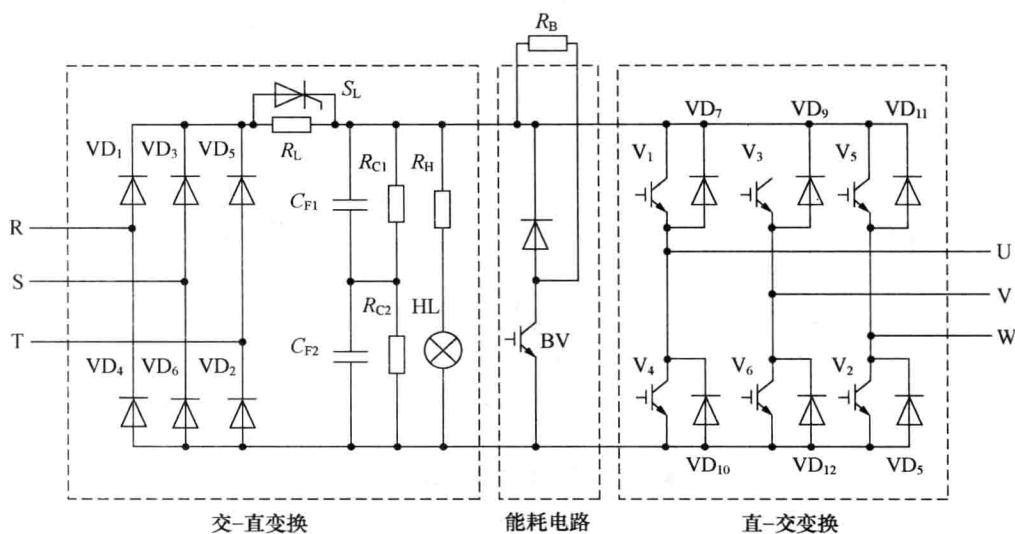


图 1-8 交-直-交变频器的主电路

由图 1-8 可见，主电路主要由整流电路、滤波电路和逆变电路三部分组成。

(1) 交—直部分

① 整流电路（ $VD_1 \sim VD_6$ ）。整流电路由 $VD_1 \sim VD_6$ 组成三相可控整流桥，将三相交流电整流成直流，平均直流电压为： $U_D = 1.35U_L = 1.35 \times 380 = 513$ （V），其中， U_L 为电