

高等学校通用教材

# 制冷空调与能源 动力系统新技术

李红旗 马国远 刘忠宝 主编

ZHILENG KONGTIAO YU NENGYUAN  
DONGLI XITONG XINJISHU



北京航空航天大学出版社

78.58562

273

高等学校通用教材

# 制冷空调与能源 动力系统新技术

李红旗 马国远 刘忠宝 主编

北京航空航天大学出版社

## 内 容 简 介

本书是一本有关制冷和空调产品的新技术、新应用以及相关知识的综合性教材,包括变频技术、传感器技术、空气源热泵技术、地源热泵技术、蓄冷技术、制冷剂替代知识、特种制冷空调技术、燃料电池技术和压缩机应用基础等内容。每部分内容独立成文,不仅囊括了近年来国内外制冷空调领域的一些新发展、新动向和实用知识,而且还全面介绍了相关领域的一些最新进展、前沿技术和作者近年来的研究成果。

本书可作为高等院校建筑环境与工程专业及热能与动力工程专业本科生、研究生的教材或参考用书,也可供制冷、空调领域的专业技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

制冷空调与能源动力系统新技术/李红旗等主编.

北京:北京航空航天大学出版社,2006.9

ISBN 7-81077-785-8

I. 制… II. 李… III. 制冷—空气调节器—高等学校—教材 IV. TB657.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 085584 号

## 制冷空调与能源动力系统新技术

李红旗 马国远 刘忠宝 主编

责任编辑 宋淑娟

\*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083) 发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail:bhpress@263.net

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

\*

开本:787×960 1/16 印张:20.75 字数:465 千字

2006 年 9 月第 1 版 2006 年 9 月第 1 次印刷 印数:2 000 册

ISBN 7-81077-785-8 定价:28.00 元

# 前言

制冷空调行业是我国改革开放以来发展最快、对人民生活影响最大的行业之一。多年来制冷空调及其相关技术的研究不断深入,产品日新月异。国家和社会对制冷空调产品的要求不断提高,制冷空调产品的应用领域正在不断扩展,出现了许许多多新的前沿课题和研究成果。新能源的使用、环境保护、能源节约、全球温升等关乎国计民生的新形势无不对制冷空调专业提出新的研究方向和发展要求。

在这种形势下,如何适应社会需要、改进高等院校制冷空调专业的教学、培养对社会有用的人才就成为每个高校所面临的课题。北京工业大学制冷学科部近年来面向本科生、研究生开设了制冷空调综合知识核心技术讲座课程,目的在于弥补现有教学体系在这方面的不足,以及向学生传授一些以往教材中所没有的新技术和综合知识。

该课程开设数年来取得了良好效果,受到了学生的普遍欢迎。但因一直以来受教材缺乏的困扰,对于一些前沿技术和热点课题往往或是没有教材,或是过于单一而不适合本课程的需要。因此,为了配合相应本科生和研究生的教学工作,我们集学科部全体教师的力量编写了本教材。

本书共分10章,包括变频技术、传感器技术、空气源热泵技术、地源热泵技术、蓄冷技术、制冷剂替代技术、特种制冷空调技术、燃料电池技术和制冷压缩机应用技术等近年来制冷空调行业的热点问题和综合知识。

本书由李红旗、马国远和刘忠宝任主编,其中第1、2章由王蕴华编写,第3章由马国远编写,第4章由底冰编写,第5章由姜明健编写,第6~8章由刘忠宝编写,第9章由郭航编写,第10章由李红旗编写。本书的文字编排工作由张兰负责,在此一并致谢。

由于水平有限,书中错误和不足之处在所难免,敬请读者指正。

编著者

2005年9月于北京工业大学

# 目 录

## 第 1 章 变频技术

1.1 变频技术简介 .....	1
1.2 变频技术的发展 .....	1
1.3 变频器的组成 .....	2
1.4 脉宽调制技术 .....	5
1.5 变频器的选择 .....	9
1.6 变频技术在空调系统中的应用.....	12
1.7 变频技术在洗衣机中的应用.....	16
1.8 压缩机变频调速控制.....	18
1.9 变频器市场展望.....	20

## 第 2 章 传感器

2.1 传感器概念.....	22
2.2 传感器分类.....	23
2.3 传感器的性能和评价.....	23
2.4 热电阻传感器.....	25
2.5 热敏电阻.....	27
2.6 湿敏电阻传感器.....	30
2.7 红外线传感器.....	33
2.8 传感器在电冰箱压缩机保护中的应用.....	33
2.9 热敏电阻在空调温度控制中的应用.....	34

## 第 3 章 空气源热泵新技术

3.1 空气源热泵空调机组的现状与展望.....	35
3.2 空气源热泵空调机组除霜技术的研究.....	43
3.3 寒冷地区用热泵空调机组的研制.....	56
3.4 寒冷地区用热泵空调机组的试验研究.....	64

## 第4章 地源热泵

4.1 地源热泵发展的历史	75
4.2 地埋管地源热泵	77
4.3 地下水地源热泵	85
4.4 地表水地源热泵	87

## 第5章 空调蓄冷技术

5.1 概 论	89
5.2 蓄冰设备	95
5.3 空调蓄冷系统	112

## 第6章 制冷剂替代技术

6.1 概 述	122
6.2 制冷剂的特点及其表示方法	124
6.3 臭氧层	125
6.4 温室气体和温室效应	127
6.5 评价制冷剂的几个环境指标	127
6.6 CFCs 制冷剂的替代	128
6.7 HCFCs 制冷剂的替代	133

## 第7章 特种车辆空调技术与汽车空调系统仿真

7.1 概 述	141
7.2 环境对装甲车辆舱室内温度及人体热负荷的影响	142
7.3 装甲、坦克车辆空调装置用能系统	143
7.4 微环境控制(调节)与整车环境控制(调节)有效性对比与分析	144
7.5 装甲、坦克车辆整车环境控制(调节)系统研究	146
7.6 装甲、坦克车辆微环境控制(调节)系统研究	180
7.7 汽车空调系统仿真	199
7.8 结 论	210

## 第8章 新型节能环保空调制冷技术

8.1 除湿水蒸发冷却技术	213
8.2 固体吸附制冷技术	220

---

8.3	固体吸附床传热传质动态模型仿真 .....	230
8.4	总 结 .....	242
<b>第 9 章 燃料电池</b>		
9.1	概 述 .....	245
9.2	燃料电池的种类和特点 .....	247
9.3	燃料电池的热力学基础 .....	254
9.4	燃料电池在中国的发展 .....	255
9.5	航天用燃料电池技术 .....	263
9.6	燃料电池电动车 .....	265
<b>第 10 章 空调压缩机应用基础</b>		
10.1	概 述 .....	277
10.2	制冷压缩机基础知识 .....	280
10.3	全封闭空调压缩机的工作原理 .....	287
10.4	全封闭空调压缩机的使用 .....	292
10.5	全封闭空调压缩机的应用设计 .....	299
10.6	全封闭空调压缩机的故障分析与诊断 .....	309
10.7	结束语 .....	320

# 第 1 章 变频技术

## 1.1 变频技术简介

变频技术是一种把固定频率的交流电变成不同频率的交流电的转换技术。它可以把交流电变成直流电后再逆变成不同频率的交流电,也可以把直流电变成交流电后再变成直流电。总之这一切都是只有频率的变化,而没有电能的变化。

变频技术主要有以下几种类型:

① 交一直变频技术,即整流技术。它是通过二极管整流、二极管续流,或通过晶闸管、功率晶体管可控整流来实现交一直功率转换。

② 直一直变频技术,即斩波技术。它是通过改变电力电子器件的通断时间,即改变脉冲的频率,或改变脉冲的宽度,达到调节直流平均电压的目的。

③ 直—交变频技术,亦称逆变技术。振荡器利用电子放大器件将直流电变成不同频率的交流电甚至电磁波。逆变器则利用功率开关将直流电变成不同频率的交流电。如果输出的交流电的频率、相位、幅值与输入的交流电的相同,则称为有源变频技术;否则称为无源变频技术。

④ 交—交变频技术,亦称移相技术。它通过控制电力电子器件的导通与断开时间,达到交流无触点开关、调压和调速等目的。

随着微电子学、电力电子技术、计算机技术和自动控制理论不断发展,变频技术已进入一个崭新的时代,其应用也越来越普遍。从开始的整流、直—交流逆变等,已发展到高压直流输电、不同频率电网系统的连接、静止无功功率补偿和谐波吸收、超导电抗器的电力储存等,这些技术在机械、运输、化工、家用电器、国防等领域得到了广泛的应用。如超导磁悬浮列车、高速铁路、电机调速、变频空调、变频洗衣机、变频微波炉、变频电冰箱;军事通信、导航、雷达等。

## 1.2 变频技术的发展

以晶闸管为代表的电力电子器件出现于 20 世纪 50 年代。贝尔实验室 1956 年发明了晶闸管,1958 年通用电气公司推出商品化产品。晶闸管主要是电流控制型开关器件。纵观变频技术的发展,其中主要以电力电子器件的发展为基础。第一代是以电流来控制大功率的变换;但其开关频率低,只能导通而不能自关断。



第二代电力电子器件以电力晶体管(GTR)和门极关断(GTO)晶闸管为代表,在20世纪60年代发展起来。它是一种电流型自关断的电力电子器件,可方便地实现变频、逆变和斩波,其开关频率只有1~5 kHz。

第三代电力电子器件以双极性绝缘栅晶体管(IGBT)和电力场效应晶体管(MOSFET)为代表,在20世纪70年代开始应用。它是一种电压(场控)型自关断的电力电子器件,具有在任意时刻用基极(栅极或门极)信号控制导通和关断的功能。其开关频率达到了20 kHz甚至200 kHz以上,为电气设备的高频化、高效化及小型化创造了条件。

第四代电力电子器件,有出现于20世纪80年代末的智能化功率集成电路(PIC),以及出现于20世纪90年代的智能功率模块(IPM)和集成门极换流晶闸管(IGCT)。它们都实现了开关频率的高速化、低导通电压的高性能化及功率集成电路的大规模化,其中包括了逻辑控制、功率、保护、传感及测量等电路功能。

经过40多年的发展,电力电子技术已成为一门多学科的边缘技术,它包含交流电路、电力电子器件、计算机辅助设计、模拟电子学和数字电子学、微型计算机、控制理论、超小规模集成电路、高频技术和电磁兼容等。

电力电子技术的发展方向是:高电压大容量化、高频化、组件模块化、小型化、智能化和低成本化。应用的技术有:脉宽调制(PWM)、滑模控制、非线性变换、功能控制及交流电动机矢量控制、直接转矩控制、模糊控制和自适应控制等。

随着电力电子技术的发展,变频技术也日新月异。应用最广的是变频器,它将向着高集成化、高频化、高可靠性、数控化和低成本的方向发展。

## 1.3 变频器的组成

变频器的组成如图1-1所示。变频器由主回路、控制回路和保护回路构成。

主回路的作用是直接给异步电动机提供调频调压电源。控制回路的作用是根据预先设定或由闭环反馈信号(输出量向输入端反馈运行信号作为比较或控制信号)来控制主回路,使主回路按照一定规律调节电压与频率并输出。保护回路则为变频器的各个部分提供完善的保护,如当过流、过载、过电压等故障出现时对变频器的保护,它使变频器的工作具有更高的可靠性。

### 1.3.1 主回路的组成及作用

主回路的类型较多,以电压型变频器为例,如图1-2所示。主回路由整流器、平波电路和逆变器构成。

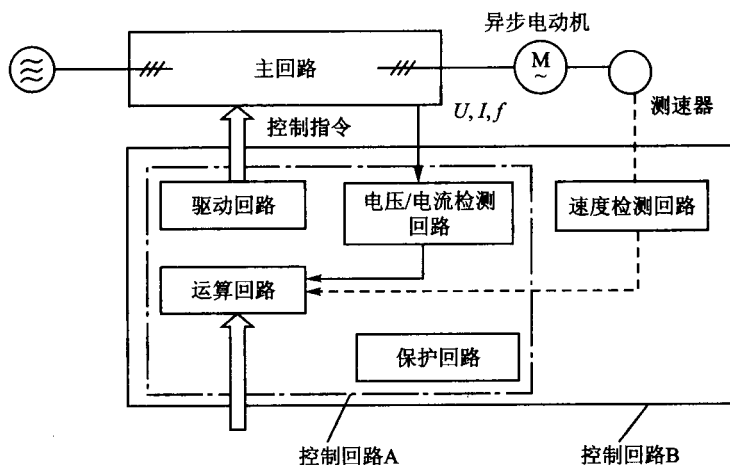


图 1-1 变频器的组成

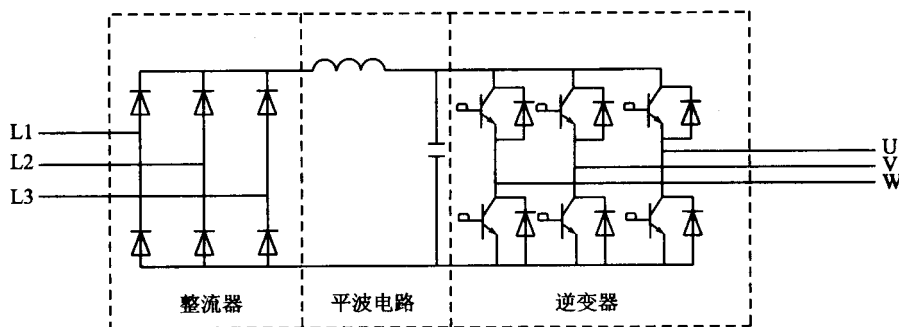


图 1-2 电压型变频器主回路

### 1. 整流器

把工频交流电通过大功率二极管三相桥式整流变成直流的部分即为整流器。整流器的主要工作元件除了使用大功率二极管外,还可用晶闸管构成可控整流器。

### 2. 平波电路

经整流后的直流电压和电流的脉动幅度较大,经过平波电路处理可很好地抑制电流脉动,使用大容量的电容器能较好地抑制电压波动。

### 3. 逆变器

把整流后的直流电压再变为交流电压的部分即为逆变器。逆变器包括以下功能：一是根据一定的规律始终对运行信息进行监测和比较以确定控制关系；二是将平波电路处理后的直流电压、电流逆变成电压、频率均按特定要求变化的交流电压、电流。

#### 1.3.2 控制回路

控制回路由下列回路构成：对频率、电压谐波控制的运算回路，主回路的电压/电流检测回路，驱动回路，电动机的速度检测回路，变频器和电动机的保护回路。

控制回路在没有接收电机转速检测信号而根据设定运行参数工作时，为开环状态；若将电机运行的速度信号也作为控制信号，则控制回路工作在闭环状态。闭环控制精确度高，如可达到精确的速度控制等。

##### 1. 运算回路

将检测回路中的电流、电压信号同反馈的速度信号、转矩信号进行比较并运算，决定逆变器的输出电压与频率。

##### 2. 电压/电流检测回路

检测出主回路的一些主要电压值和电流值，这种检测要通过一定种类的传感器来实现，如霍尔元件等。

##### 3. 驱动回路

将运算回路输出的控制信号放大，控制主回路主开关元件按照特定规律导通与关断。

##### 4. 速度检测回路

速度检测器检测出转速信号并输入给运算回路，经比较及运算后，再由运算回路输出转速指令。

##### 5. 保护回路

对主电路进行安全监测，进行过压、过流、过载的保护，保证变频器和异步电动机安全运行。现在的控制电路已基本实现了数字化控制。

#### 1.3.3 保护回路的组成及作用

保护回路分为变频器保护与电机保护两部分。

## 1. 变频器保护

变频器保护包括下列部分:瞬时过电流保护、瞬时断电保护、过载保护、再生过电压保护、接地过电流保护以及冷却风机异常保护,等等。

当负载发生短路时,流过变频器元件的电流超过允许值,瞬时过电流保护环节将切断电源,瞬间停止变频器工作;当变频器电流出现异常时,也切断电源,停止运行操作。

当负载过大或电机发生故障时,变频器电流就会超过额定值,当持续时间超过规定时间值时,过载保护环节会执行保护操作。

当变频器控制电机快速减速,常会发生再生功率直流回路电压过高,这时再生过电压保护环节会进行保护操作。

如果出现几十毫秒以上的瞬间停电,也将导致控制回路误动作使主回路断电,这时,瞬时断电保护环节动作。

冷却风机出现故障时会导致电路系统温度升高,出现误操作,因此,保护回路中也设有风机异常情况的保护。

## 2. 电机保护

当异步电机过载时,电机内的温度传感器会检测出信号并进行过载保护;当电机超速运行时,由测速器测出并进行保护操作。

电机保护回路还设有防止失速过电流保护和防止失速再生过电压保护。

# 1.4 脉宽调制技术

## 1.4.1 PAM 与 PWM 输出控制方式

### 1. 脉幅调制(PAM)

因为逆变器输出的交流电压振幅值等于直流电压值( $U_m = U_d$ ),因此,实现既变频也变压的最简易方法是在调节频率的同时,也调节直流电压。设  $f_N$  为调制前的频率,  $T_N$  为调制前的周期,  $U_{DN}$  为调制前的直流电压,则调制前逆变电路的输出电压波形如图 1-3(a)所示。

又设  $f_x$  为调制后的频率,  $T_x$  为调制后的周期,  $U_{Dx}$  为调制后的直流电压,则调制后逆变电路的输出电压波形如图 1-3(b)所示。

这种方法的特点是变频器在改变输出频率的同时,也改变了电压的振幅值,故称为脉幅调制,常用 PAM(Pulse Amplitude Modulation)表示。

PAM 需要同时调节两个部分,即整流部分和逆变部分,调节时两者之间还必须满足电压

调节比和频率调节比间一定的关系,所以控制电路比较复杂。

## 2. 脉宽调制(PWM)

在每个半周期内,把输出电压的波形分割成若干个脉冲波,每个脉冲的宽度为  $t_1$ ,每两个脉冲间的间隔宽度为  $t_2$ ,则脉冲的占空比为  $R$ ,即

$$R = \frac{t_1}{t_1 + t_2} \quad (1-1)$$

这时,电压的平均值和占空比成正比,所以在调节频率时,如果不改变直流电压的幅值,而只改变输出电压脉冲的占空比,也同样可以实现既变频又变压的效果,如图 1-4 所示。其中,图(a)为调制前的波形,图(b)为调制后的波形。与图(a)相比,图(b)的电压周期增大(频率降低),电压脉冲的幅值不变,而占空比则减小,故平均电压降低。

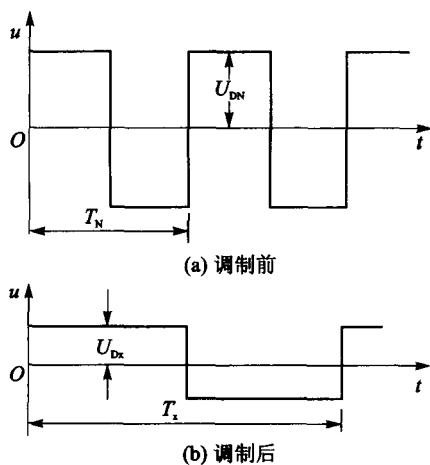


图 1-3 脉幅调制的输出电压

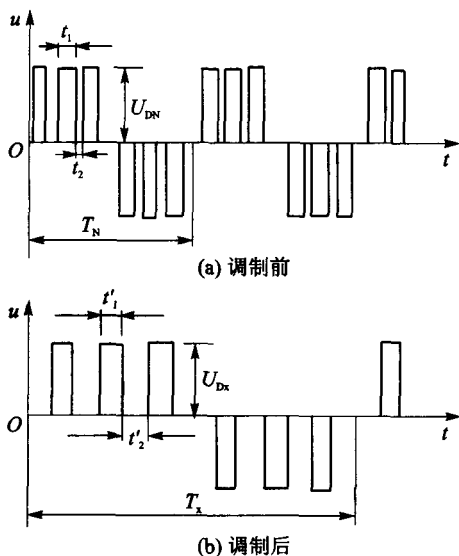


图 1-4 脉宽调制的输出电压

这种方法的特点是变频器在改变输出频率的同时,也改变输出电压的脉冲占空比(幅值不变),故称为脉宽调制,常用 PWM(Pulse Width Modulation)表示。

PWM 只须控制逆变电路便可实现,与 PAM 相比,可使控制电路简化许多。

不论是 PAM 还是 PWM,其输出电压和电流的波形都是非正弦波,具有许多高次谐波成分。为了使输出电流的波形接近于正弦波,从而提出了正弦波脉宽调制的方法。

## 1.4.2 正弦波脉宽调制 (SPWM)

### 1. SPWM 的概念

在进行脉宽调制时,使脉冲系列的占空比按正弦规律来安排。当正弦值为最大值时,脉冲的宽度也最大,而脉冲间的间隔则最小。反之,当正弦值较小时,脉冲的宽度也小,而脉冲间的间隔则较大,如图 1-5 所示。

这样的电压脉冲系列可以使负载电流中的高次谐波成分大为减小,称为正弦波脉宽调制。

SPWM 脉冲系列中,各脉冲的宽度以及相互间的间隔宽度是由正弦波(基准波或调制波)和等腰三角波(载波)的交点来决定的。具体分析方法如下所述。

### 2. 单极性 SPWM 法

调制波和载波如图 1-6(a)所示,曲线 1 是正弦调制波,其周期决定于所需要的频率调节比  $k_f$ , 振幅值决定于电压调节比  $k_u$ 。曲线 2 是采用等腰三角波的载波,其周期取决于载波频率,振幅不变,其值为  $k_u=1$  时正弦调制波的振幅值,每半周期内所有三角波的极性均相同(即单极性)。调制波和载波的交点,决定了 SPWM 脉冲系列的宽度和脉冲间的间隔宽度,所得的脉冲系列如图 1-6(b)所示。由图可知,每半周期内的脉冲系列也是单极性的。

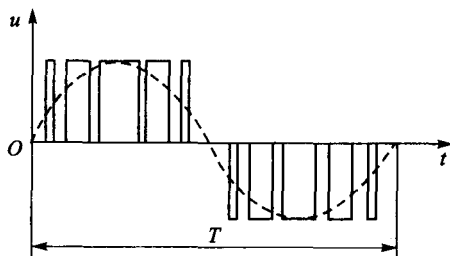


图 1-5 SPWM 的输出电压

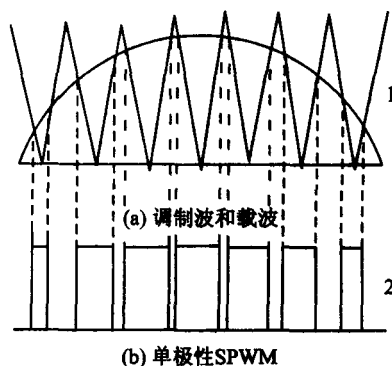


图 1-6 单极性调制

单极性调制的工作特点是每半个周期内,逆变桥同一桥臂的两个逆变器件中,只有一个器件按脉冲系列的规律时通时断地工作,而另一个完全截止;但在另半个周期内,两个器件的工况正好相反。流经负载  $Z_L$  的便是正、负交替的交变电流,如图 1-7 所示。

### 3. 双极性 SPWM 法

调制波和载波仍为正弦波,其周期决定于频率调节比  $k_f$ , 振幅决定于电压调节比  $k_u$ , 如图 1-8(a) 中曲线 1 所示。载波为双极性的等腰三角波, 其周期取决于载波频率, 振幅不变, 其值与  $k_u=1$  时正弦波的振幅值相等。调制波与载波的交点决定了逆变桥输出相电压的脉冲系列, 此脉冲系列也是双极性的, 如图 1-8(b) 所示。但是, 当由相电压合成为线电压 ( $u_{ab}=u_a-u_b$ ;  $u_{bc}=u_b-u_c$ ;  $u_{ca}=u_c-u_a$ ) 时, 所得到的线电压脉冲系列却是单极性的, 如图 1-8(c) 所示。

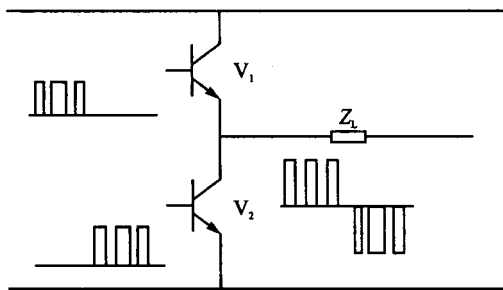


图 1-7 单极性调制的特点

双极性调制的工作特点是逆变桥在工作时, 同一桥臂的两个逆变器件总是按相电压脉冲系列的规律交替地导通和关断, 而流过负载  $Z_L$  的则是按线电压规律变化的交变电流, 如图 1-9 所示。

### 4. 实施 SPWM 的基本要求

在实施 SPWM 时要求做到:

- 实时计算出调制波(正弦波)和载波(三角波)所有交点的时间坐标, 根据计算结果, 有序地向逆变桥中各逆变器件发出“通”和“断”的操作指令。
- 调节频率时, 一方面, 使调制波与载波的周期同时改变; 另一方面, 使调制波的振幅随频

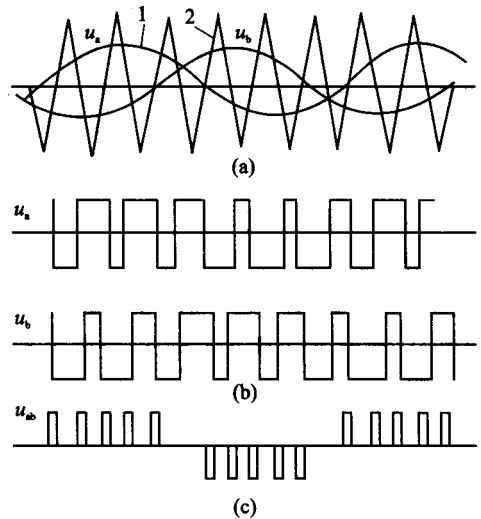


图 1-8 双极性调制

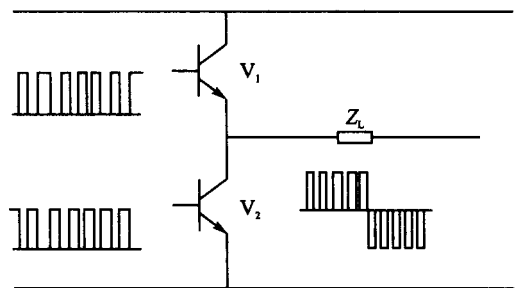


图 1-9 双极性调制的特点

率改变,而载波的振幅则不变。所以,每次调节后,所有交点的时间坐标都必须重新计算。

目前,在计算机技术和大规模集成电路高速发展的基础上,已经开发出能够满足要求的SPWM波形的专用集成电路。

### 1.4.3 SPWM 的电流波形

SPWM 的电流波形具有高次谐波成分,如图 1-10 所示。这些高次谐波电流可产生下列影响:

- 电流的谐波分量将产生附加转矩,使电机轴上的有效输出转矩减小。
- 谐波电流中的载波频率分量将引起电机铁芯的振动而产生电磁噪声。
- 载波频率分量的谐波电流具有较强的辐射能力,会影响其他电子设备的正常使用。

提高载波频率,可使负载电流的波形向正弦波逼近,从而减小电流的高次谐波分量,如图 1-10(b) 所示。

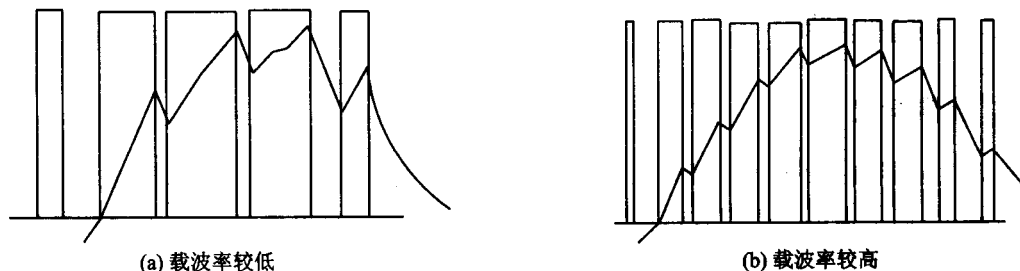


图 1-10 SPWM 调制后的电流波形

载波频率的大小是由逆变器件的工作频率(决定于其开通与关断时间)决定的。

当用大功率晶体管(GTR)作为逆变器件时,载波频率在 2 kHz 以下,电流的谐波分量较大,电机的有效输出转矩略小,并且有轻微的电磁噪声。

当用绝缘栅双极晶体管(IGBT)作逆变器件时,载波频率可达 15 kHz,电流波形已相当平滑,高次谐波分量很小,故电动机的有效输出转矩大,基本无噪声。

## 1.5 变频器的选择

选用变频器时要充分了解所用变频调速系统的目的、变频调速系统的使用场合以及负载特性的具体情况,并从输出电压、输出频率、容量、保护条件、 $U/f$ (电压/频率)输出模式、电网与变频器的切换、瞬停再启动等诸方面因素进行综合考虑,进而选择出符合要求的变频器。



## 1.5.1 变频器输出电压与输出频率选择

### 1. 输出电压选择

变频器的输出电压可按电机的额定电压选定。对于高压电机,如 3 kV 级的高压电机,在选配变频器时,可使用变压器进行电压匹配。

### 2. 输出频率选择

变频器的最高输出频率根据机种的不同有不同的值,最高频率有 50 Hz,60 Hz,120 Hz 以及 200 Hz 等,有的甚至更高。变频范围在 0~50 Hz 的变频器,一般其调速范围在额定转速之间,大容量通用变频器均属于此类。最高输出频率超过 50 Hz 的变频器,由于输出电压不变并且为恒功率特性,因此,要注意在高速区转矩的减小。

进行频率选择时,可根据由变频器使用目的所确定的最高输出频率来选择变频器。

## 1.5.2 容量选择

### 1. 容量含义

通常变频器的主要技术指标以适用电机功率(kW)、输出容量(kVA)和额定输出电流(A)表示。其中,额定输出电流为变频器可以连续输出的最大交流电流有效值,不管用于何种用途,都不允许电流连续流过值超过此值。

输出容量指由在三相情况下的额定输出电压与额定输出电流决定的三相视在功率。适用电机功率是以 2,4 极标准电机为对象,表示在输出额定电流以内可以传动的电机功率。鼠笼式电机是 2 极(即一对极)电机,变频调速系统能很经济地与鼠笼式异步电机构成控制调速配合使用。通常将变频器功率选得比实际配用电机功率更大一些。

### 2. 根据电机电流选择变频器的容量

使用 6 极以上的电机或多台电机并联运转时,如果仅用适用电机功率来选择变频器已变得不准确时,则应根据电动机的额定电流来选择变频器,或者根据电机实际运行的电流最大值来选择变频器。可用式(1-2)的关系来决定变频器的容量,即

$$I_{INV} \geq \sum nKI_m \quad (1-2)$$

式中:  $I_{INV}$ ——变频器的额定输出电流, A;

$I_m$ ——电机的额定电流, A;

$K$ ——修正系数,小容量电机时  $K$  取 1,大容量电机时  $K$  取 1.1;

$n$ ——并联运转的电机总台数。