



普通高等教育城市轨道交通“十二五”规划教材

CHENGSHI GUIDAO JIAOTONG
DIANLI QIANYIN YU KONGZHI

城市轨道交通 电力牵引与控制

主编 王俭朴
主审 王书林



国防工业出版社
National Defense Industry Press

内 容 简 介

本书系统地阐述了城市轨道交通电力牵引的基本原理、组成和结构。本书共分9章,主要介绍了牵引理论基础、电力电子器件及其应用、三相交流异步电动机的控制策略(包括矢量控制和直接转矩控制)、斩波电路、逆变电路、城市轨道交通车辆的主传动控制、城市轨道交通供电系统与车辆电气设备,对电力牵引传动与电磁兼容也做了一些介绍。

本书可作为铁路机车车辆专业、轨道交通车辆专业、电力牵引专业与电气传动专业的本、专科生教材,也可作为从事轨道交通牵引与控制方面技术工作的工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

城市轨道交通电力牵引与控制/王俭朴主编,一北京:国防工业出版社,2011.12

ISBN 978-7-118-07760-5

I. ①城... II. ①王... III. ①城市铁路—电力牵引

IV. ①U239.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第251256号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 17¼ 字数 328千字

2011年12月第1版第1次印刷 印数 1—3000册 定价 32.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

从 1890 年 12 月 18 日世界上第一条真正的电气化地下铁路诞生以来,城市轨道交通车辆几乎都已经采用了电力牵引,随着科学技术和城市化的发展,大运量的轨道交通在现代大城市中的重要作用尤显突出。在 21 世纪的今天,众多交流传动的电力机车、高速列车、城市轨道车辆在不同的环境和条件下成功地运行着,这表明交流电动机牵引控制技术的日益成熟。重视城市轨道车辆牵引传动技术课程的教学,是高校培养 21 世纪高素质电力牵引传动的车辆工程技术人才的迫切要求,但是同样对城市轨道车辆牵引传动技术的教学提出了新的挑战。城市轨道车辆牵引传动技术荟萃了电力电子、计算机检测与控制、电动机与电器制造等学科的先进技术。在教学过程中必须及时反映城市轨道车辆牵引传动技术课程的相关技术的最新成果,才能保持教学内容、教学方法和教学手段的先进性。本书主要介绍了黏着控制的一些先进控制方法、交流电动机的矢量控制与直接转矩控制、斩波电路以及逆变电路、车辆的直流和交流传动控制等,将基本理论和最新的发展技术相结合,向从事电力牵引传动及其相关专业师生提供了一本内容详实而全面的教科书。同时该书也可供从事电力牵引的车辆工程技术人员使用。

本书共分 9 章,内容安排如下:第一章绪论介绍了电气牵引传动国内外发展概况、电气传动的 PWM 控制技术;第二章牵引理论基础,论述了轨道车辆的黏着、蠕滑的概念,牵引与制动,空转、滑行与黏着控制、黏着控制的理论知识以及一些先进的黏着控制方法和牵引参数的选择;第三章电力电子器件及其应用,详细介绍了可关断晶闸管(GTO)、绝缘栅双极晶体管(IGBT)和智能功率模块(IPM)的结构原理和应用;第四章三相交流异步电动机的控制策略,着重介绍了电动机的统一控制理论、矢量控制的基本概念、交流电动机的坐标系及其空间矢量概念、异步电动机按磁通定向的矢量控制原理、异步电动机按磁通定向的矢量控制系统、异步电动机的直接转矩控制原理和定子磁链的观测模型;第五章斩波电路,主要介绍了 6 种基本的斩波电路:降压斩波电路、升压斩波电路、升降压斩波电路、Cuk 斩波电路、Sepic 斩波电路和 Zeta 斩波电路的工作原理;第六章逆变电路,介绍了逆变电路的工作原理、正弦波脉宽调制逆变电路(SPWM)、三点式(三电平)逆变电路、IGBT 与 GTO 在逆变电路中的应用和缓冲电路;第七章主要介绍了城市轨道交通车辆的主

传动控制,包括车辆直流传动控制、车辆交流传动控制、空电联合制动中空气制动的指令传输与控制;第八章城市轨道供电系统与车辆电气设备,主要介绍了城市轨道供电系统、受流器、辅助电源和车辆电器;第九章电力牵引传动与电磁兼容,主要介绍了牵引传动与电磁兼容的关系和影响。

全书由王俭朴执笔编写,南京工程学院赵素芳参与编写第一章,苏州大学谢门喜参与编写第三章,兰州交通大学缪仲翠参与编写第五章,大连交通大学朱建伟参与编写第九章。南京工程学院王书林副教授主审并提出了许多宝贵的意见。

本书是在参考了国内外文献的基础上,结合编者自身多年的教学和研究成果编写而成的。对于参考文献的出处在书中已经说明,在此,对这些作者表示诚挚的感谢。另外,本书的出版得到了国防工业出版社和南京工程学院车辆工程系各位老师的鼓励和支持,在此表示衷心的感谢!

本书配有教学课件,可发邮件至 wangjianpu114@163.com 索取。

由于编者学识和能力所限,书中内容难免有不当之处,敬请有关专家和各位读者给予批评指正。

编者

2011年8月于南京

目 录

第一章 绪论	1
第一节 电气牵引传动国内外发展概况	1
第二节 电气牵引传动的控制技术	4
第二章 牵引理论基础	9
第一节 黏着与蠕滑	9
第二节 牵引与制动	19
第三节 空转、滑行与黏着控制	30
第四节 牵引参数的选择	41
习题与思考题	46
第三章 电力电子器件及其应用	48
第一节 可关断晶闸管	48
第二节 绝缘栅双极晶体管	59
第三节 智能功率模块功率	67
第四节 电力电子器件对轨道交通变流技术的影响	74
习题与思考题	81
第四章 三相交流异步电动机的控制策略	83
第一节 电动机的统一控制理论	83
第二节 矢量控制的基本概念	85
第三节 交流电动机的坐标系及其空间矢量概念	86
第四节 异步电动机按磁通定向的矢量控制原理	93
第五节 异步电动机按磁通定向的矢量控制系统	99
第六节 异步电动机的直接转矩控制	105
第七节 定子磁链的观测模型	114

习题与思考题	120
第五章 斩波电路	121
第一节 降压斩波电路	121
第二节 升压斩波电路	131
第三节 升降压斩波电路和 Cuk 斩波电路	135
第四节 Sepic 斩波电路和 Zeta 斩波电路	137
第五节 复合斩波电路和多相多重斩波电路	138
习题与思考题	146
第六章 逆变电路	148
第一节 逆变电路的工作原理	149
第二节 正弦脉宽调制逆变电路	154
第三节 三点式(三电平)逆变电路	167
第四节 IGBT 与 GTO 在逆变电路中的应用	173
第五节 缓冲电路	177
习题与思考题	182
第七章 城市轨道交通车辆的主传动控制	183
第一节 车辆直流传动控制	183
第二节 车辆交流传动控制	202
第三节 空电联合制动中空气制动的指令传输与控制	215
习题与思考题	222
第八章 城市轨道供电系统与车辆电气设备	223
第一节 城市轨道供电系统	223
第二节 受流器	231
第三节 辅助电源	243
第四节 车辆电器	250
习题与思考题	255
第九章 电力牵引传动与电磁兼容	257
第一节 电磁兼容的基本概念	258

第二节 电磁干扰量及其传播途径	258
第三节 电气化铁路的电磁干扰问题	260
第四节 电力牵引系统的干扰	262
第五节 改善电磁兼容的措施	264
习题与思考题	266
参考文献	267

第一章 绪 论

第一节 电气牵引传动国内外发展概况

电气传动是指以各类电动机为动力的传动装置与系统。因电动机种类的不同,有直流电动机传动(简称直流传动)、交流电动机(无特别说明时,以下均指三相交流电动机)传动(简称交流传动)、步进电动机传动(简称步进传动)、伺服电动机传动(简称伺服传动)等。如众所周知,直流电动机尽管比交流电动机结构复杂、成本较高、维修保养费用较贵,但其调速性能很好,所以,在调速传动领域中一直占据主导地位。然而,由于电力电子技术的迅速发展,使电气传动发生了重大的变革,即交流调速传动迅猛发展,电气传动交流化的新时代已经到来。

交流电动机与直流电动机相比,有结构简单、牢固、成本低廉等许多优点,缺点是调速困难。现在,借助于电力电子技术已经很好地解决了交流电动机调速问题,采用矢量控制和直接转矩控制之后,交流调速传动已进入与直流调速传动相媲美、相竞争并逐渐占据主导地位的时代。在第四章,主要介绍交流异步电动机的控制策略。据日本早年统计,1975年销售的交流调速装置与直流调速装置之比为1:3,而到了1985年,反了过来,成为3:1。这种趋势,近10多年来发展更快。20世纪末,在工业发达国家,交流调速就已占据主导地位。

纵观交流调速传动发展的过程,大致是沿着三个方向发展的:一个是取代直流调速实现少维修、省力化为目标的高性能交流调速;另一个是以节能为目的的,改恒速为调速,适用于风机、泵类、压缩机等通用机械的交流调速;第三个是直流调速难以实现的特大容量、高电压、极高转速领域的交流调速。

交流调速方式是按交流电动机转速公式建立的。对于同步电动机、磁阻式电动机等,其转速为

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

式中 p ——电动机极对数;

f ——定子电源频率(Hz)。

而对于笼型或绕线转子异步电动机,其转速为

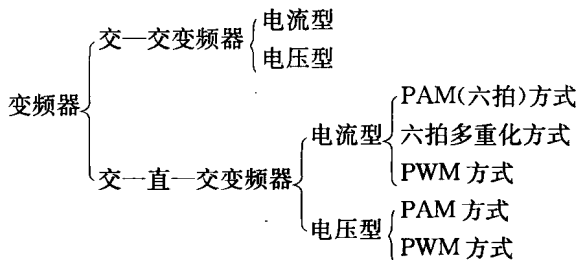
$$n = \frac{60f}{p}(1-s) \quad (1-2)$$

式中 s ——转差率。

因此,原则上讲,改变极对数 p 、改变转差率 s 和调节频率 f 都可以调速。但众所周知,对于同步电动机,在运行中改变极对数会引起失步,因此只能调频调速;而对于异步电动机,以上三种方法虽均可以采用,但是变极调速是有级调速,而改变转差率 s 为目的的各种调速方法,如定子调压调速、电磁调速(滑差电动机)、转子变电阻(或斩阻)调速都是耗能型调速方法,只有变频调速是最为理想的调速方法。近代,借助于电力电子技术,许多种新的调速方法得到了迅速的发展,诸如串级调速、双馈电动机变频调速、无换向器电动机、交流步进传动系统、交流伺服系统等。这些新的交流调速方法,各有不同的特点,不同的应用领域,不同的发展因缘、过程与前景。但是,串级调速与双馈电动机是使用传统的绕线转子异步电动机,转子绕组需由集电环引出,有电刷与集电环的电接触问题;无换向器电动机是同步电动机结构,除小功率无换向器电动机,转子为永磁式,甚至不需要转子位置检测器外,一般,大功率无换向器电动机不但有电刷与集电环的电接触问题,而且还要增加转子位置检测装置;至于步进电动机和交流伺服系统是有特殊结构的特殊机种,应用范围也小。在电力电网中应用最普遍的是标准系列的普通笼型异步电动机和同步电动机。这些电动机使用变频器进行变频调速是最为合理的。因此,变频调速是交流调速中最理想、最有发展前途、发展最快的一种方法。

变频调速是以变频器向交流电动机供电,并构成开环或闭环系统。变频器是把固定电压、固定频率的交流电变换为可调电压、可调频率的交流电的变换器。变换过程中没有中间直流环节的,称为交—交变频器,有中间直流环节的称为交—直—交变频器。直流可以认为是频率为零的交流,由直流变为定频定压或调频调压交流电的变换器,称为逆变器。因此,交—直—交变频器通常由整流器(AC-DC 变换)、中间直流储能电路和逆变器(DC-AC 变换)构成。

变频器有多种,常用的变频器分类如下:



其中,电压型 PWM 方式交—直—交变频器发展最快。PWM 变频器迅速发展的原因:一是变频器所用的半导体开关器件不断地发展;二是 PWM 控制技术的日臻完善。

电力半导体开关器件主要有普通晶闸管(Thyristor,曾称可控硅元件(Silicon

Controlled Rectifier, SCR)、门极关断晶闸管(Gate Turn Off thyristor, GTO 晶闸管)、双极晶体管(Bi-junction Transistor, BJT)或称大功率晶体管(Giant Transistor, GTR)、绝缘栅双极晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)、场效应晶体管(MOSFET)、集成门极换向晶闸管(Integrated Gate Commutated Thyristor, IGCT)、智能功率模块(Intelligent Power Module, IPM)等。在第三章,主要介绍 GTO、IGBT、IPM 的结构和性能。

IGBT 综合了 MOSFET 和 GTR 的优点,既有 MOSFET 电压控制型器件驱动功率小、开关频率较高(一般为 20kHz 以下)的特点,又有 GTR 电压电流值较大的长处。因此,在中等容量的变频器、逆变器中,得到了广泛的应用。然而目前,在高电压(4500V 以上)和大电流(2000A 以上)范围,还不得不使用 GTO 晶闸管。但 GTO 晶闸管的开关频率较低(一般为 200Hz 以下),驱动功率较大,需要复杂的门极驱动电路和昂贵的吸收电路。IGCT 是以 GTO 晶闸管为基础的改良器件,它将 GTO 晶闸管芯片与反并联二极管及门极驱动电路集成在一起,具有电流大、电压高、开关频率高、损耗低的特点,又可以省去复杂的吸收电路,是取代 GTO 晶闸管的新型器件。IPM 是混合集成功率器件,它由高速、低耗的 IGBT 芯片和优化的栅极驱动及保护电路(短路保护、过电流保护、过热保护和欠电压锁定)构成,可简化设计,提高系统可靠性。

此外还发展了将半导体开关器件与其周围器件(续流二极管等)构成的电路集成于一片芯片上的逆变器模块(Invertor Modular),以及将整流电路、逆变器电路、检测电路、保护电路等集成于一体的功率集成电路(Power Integrated Circuit, PIC)等。几种主要半导体开关器件的开关频率、输出容量与应用领域如图 1-1 所示。

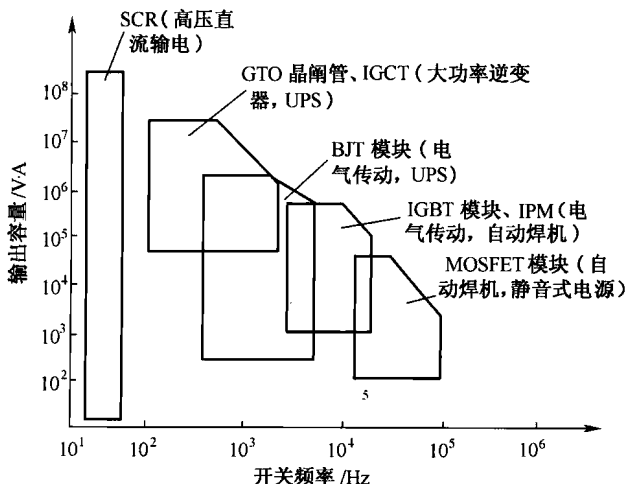


图 1-1 几种主要半导体开关器件的输出容量、开关频率及其主要应用领域

电力电子技术不仅促使交流传动迅速发展,同时也促使直流传动得到了新的发展。例如,以往普遍应用的是晶闸管相控整流一直流电动机调压调速系统,现在也发展了全波不控整流—PWM斩波一直流电动机调压调速系统。开关磁阻电动机也是由直流斩波器供电的。这种电动机由反应式步进电动机发展而来,定子为凸极式,上面绕有定子集中绕组;转子也是凸极结构,由硅钢片叠成,没有转子绕组,但转子上安装一个位置检测器,由位置检测器检出的转子位置信号去控制直流斩波器,顺序地切换供给定子绕组的直流脉冲电流,形成旋转磁场使转子转动。直流斩波器不存在逆变器同一桥臂两个半导体开关器件同时导通造成的直通短路问题,因而可靠性高、成本也比较低。目前正在努力设法取消转子位置检测器和消除低速时转矩脉动的问题。

总之,由于电力电子技术的进步,使电气传动的各个方面都发生了或正在发生着根本性的变化。近几年来,国外已将电气传动改名为运动控制,并认为运动控制分为三个组成部分:电源部分、执行器部分和控制器部分。电源部分主要由电力电子器件构成,用以形成和控制各种形式的电能供给执行器;执行器则将电能变换为机械能,形成转矩(旋转运动)或机械力(直线运动);控制器接收上位计算机的指令,完成执行器运动控制和管理等。运动控制比电气传动一词更具有时代的特色,它是适应工业自动化、办公室自动化和家庭自动化而产生的一门新兴学科,正在迅速发展。

第二节 电气牵引传动的控制技术

直流斩波电路与三相逆变电路是城市轨道交通车辆电力牵引系统中广泛应用的电力电子电路,直流斩波电路用于构成驱动直流电动机的调压调速主电路和辅助电路的前级。斩波电路是把恒定直流电压变换成为负载所需的直流电压的变流电路。它通过周期性地快速通、断,把恒定直流电压斩成一系列的脉冲电压,改变这一脉冲列的脉冲宽度或频率就可调节输出电压的平均值。斩波电路还可以用来调节电阻的大小和磁场的强弱。作为直流电动机调速的有效手段,斩波电路广泛应用于城市轨道交通车辆和其他电动运输车辆,第五章主要介绍6种基本斩波电路:降压斩波电路、升压斩波电路、升降压斩波电路、Cuk斩波电路、Sepic斩波电路和Zeta斩波电路,其中前两种是最基本的电路,还有复合斩波电路——不同基本斩波电路组合;多相多重斩波电路——相同结构基本斩波电路组合。第六章主要介绍逆变电路的工作原理。

在电气传动中,广泛地应用PWM控制技术。PWM控制技术是利用半导体开关器件的导通与关断把直流电压变成电压脉冲列,并通过控制电压脉冲宽度或周期以达到变压目的,或者控制电压脉冲宽度和脉冲列的周期以达到变压变频目

的的一种控制技术。

早在 20 世纪 30 年代,欧洲一些国家的电气化铁路,就曾利用多台交流和直流旋转电动机,实现了将来自电网的单相工频电能变为三相调频电能,驱动感应电动机作为电力机车的牵引电动机。但是装置十分复杂、笨重,价格也很昂贵。50 年代,又曾采用水银整流器、引燃管和闸流管等离子器件,构成静止式变频器,但这些器件的管压降大,同时有控制性能差、体积大、水冷却、寿命短等缺点。60 年代开始用电力半导体器件构成逆变电路,实现了高性能、高效益的轨道车辆交流传动。由全控型电力电子器件构成的逆变电路不必另设半控型电力电子器件需要的强迫换流电路,主电路相当简单,结构犹如一个逆方向工作的可控整流电路,把直流电能变为可变频调压的交流,送给单相或三相等负载。而且采用不同的全控型电力电子器件如 GTR、GTO、IGBT 时,其主电路没有原则差别,差别主要在于门极(栅极)控制电路和保护方法有所不同。第六章主要介绍逆变电路的原理以及应用。

半导体开关器件和 PWM 控制技术构成的 PWM 斩波器可完成直流一直流电压变换(DC-DC 变换),如图 1-2 所示。图 1-2(a)所示为 PWM 降压斩波器,输入直流电压 U_d 经开关器件 VT 斩波(即 PWM 控制)后,再经电抗器 L 滤波及二极管 VD 续流,降低为直流电压 U_L 。图 1-2(b)所示为 PWM 升压斩波器,当开关器件 VT 导通时,电能以磁场能量的方式储存于电抗器 L_1 中,当 VT 截止时,在 L_1 上产生的感应电动势 e_{L1} 与 U_d 相加,经 VD_2 后得 U'_d 。显然 $U'_d > U_d$ 。 U'_d 经 L_2 、C 滤波后得输出电压 U_L ;当 VT 再次导通时, VD_2 截止,保持 U_L 。只要 L_1 有足够的储能,即可使 $U_L > U_d$ 。改变脉冲的宽度或周期,在输入电压 U_d 不变的情况下,可以改变输出直流电压 U_L 的大小,达到调压的目的。这种 DC-DC“功率变压”广泛地

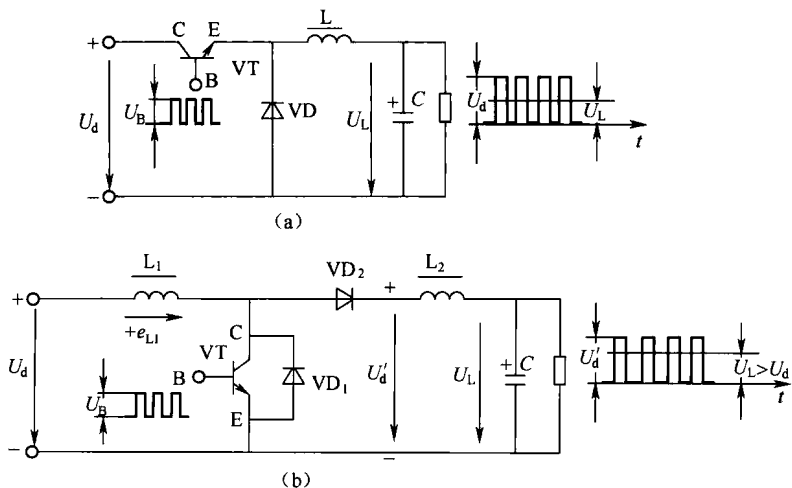


图 1-2 DC-DC 变换(直流 PWM 斩波器)

(a) PWM 降压斩波器; (b) PWM 升压斩波器。

应用于开关稳压电源、UPS 以及步进电动机、直流电动机调速传动系统中；在交流变频调速系统中，当输入电压过高或过低时，也需要在中间变换环节上进行降压或升压的 DC-DC 变换。

在交流变频调速传动中，用变频器进行“功率变频”。但变频的同时也必须协调地改变电动机的端电压，否则电动机将出现过励磁或欠励磁，这是众所周知的。为此，用于交流电气传动中的变频器实际上是变压 (Variable Voltage, VV) 变频 (Variable Frequency, VF) 器，即 VVVF。所以，通常也把这种变频器称为 VVVF 装置或 VVVF。与此相对应的，还有定压 (CV)、定频 (CF) 变换器，简称 CVCF 装置或 CVCF，通常作为定压定频电源使用。CVCF 可以认为是 VVVF 固定于某一点运行时的一种特殊工况。VVVF 控制技术分为两种。

一种是把 VV 与 VF 分开完成，如图 1-3 所示。

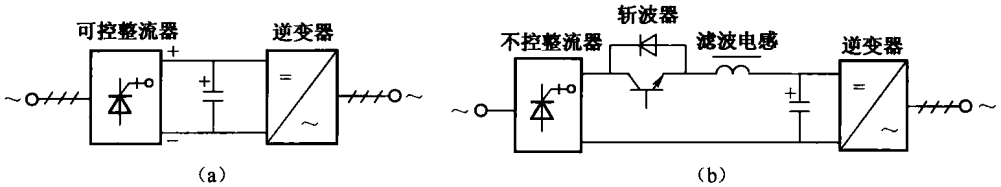


图 1-3 PAM 方式

(a) 可控整流—逆变方式；(b) 不控整流—斩波—逆变方式。

图 1-3(a)是在把交流电整流为直流电的同时进行相控调压，而后逆变为可调频率的交流电；图 1-3(b)则是把交流电整流为直流电之后用 PWM 斩波器调压，然后再将直流逆变为可调频率的交流。总之，图 1-3 中，前面的环节用来改变直流电压的幅值，后面的环节用来改变频率。这种前后分开控制的 VVVF 控制技术称为脉冲幅值调制 (Pulse Amplitude Modulation) 方式，简称 PAM 方式。

另一种是将 VV 与 VF 集中于逆变器一起来完成的，即前面为不可控整流器，中间直流电压恒定，而后由逆变器既完成变频又完成变压，如图 1-4 所示。

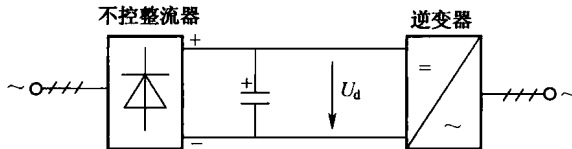


图 1-4 PWM 方式

这种控制技术称为脉冲宽度调制 (Pulse Width Modulation) 方式，简称 PWM 方式。在 VVVF 控制技术发展的早期均采用 PAM 方式，这是由于当时的半导体器件是普通晶闸管等半控型器件，其开关频率不高 (参见图 1-1)，所以逆变器输出的交流电压波形只能是方波。而要使方波电压的有效值随输出频率的变化而改变，只能靠改变方波的幅值，即只能靠前面的环节改变中间直流电压的大小。随着

全控型快速半导体开关器件 BJT、IGBT、IPM、GTO 晶闸管、IGCT 等的发展,才有可能发展为 PWM 方式。这时,整流器无需控制,简化了电路结构,而且由于以全波整流代替了相控整流,因而提高了输入端的功率因数,减小了高次谐波对电网的影响。此外,由于输出电压波形由方波改进为 PWM 波,减少了低次谐波,从而解决了电动机在低频区的转矩脉动问题,也降低了电动机的谐波损耗和噪声。尽管如此,由于大功率、高电压的全控型开关器件 GTO 晶闸管、IGCT 的价格还较昂贵,所以,为了降低成本,在数百千瓦以上的大功率变频器中,有时仍需要使用以普通晶闸管为开关器件的 PAM 方式。

至于 PWM 控制技术(又称 PWM 波生成法, PWM 法)又有许多种,并且还在不断发展中。但从控制思想上分,可以把它们分成四类:等脉宽 PWM 法、正弦波 PWM 法(SPWM 法)、磁链追踪型 PWM 法和电流跟踪型 PWM 法。等脉宽 PWM 法是为了克服 PAM 方式中逆变器部分只能输出频率可调的方波电压而不能调压的缺点而发展来的,是 PWM 法中最为简单的一种,如图 1-5 所示。它每一脉冲的宽度均相等。改变脉冲列的周期可以调频,改变脉冲的宽度或占空比可以调压,采用适当控制方法即可使电上输出电压中除基波外,还包含较大的谐波分量。

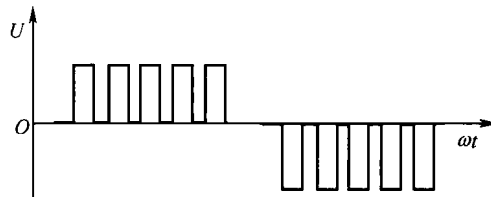


图 1-5 等脉宽 PWM 法

SPWM 法是为了克服等脉宽 PWM 法的缺点而发展来的。它从电动机供电电源的角度出发,着眼于如何产生一个可调频调压的三相对称正弦波电源。具体方法如图 1-6 所示,是以一个正弦波作为基准波用一系列等幅的三角波(称为载波)与基准正弦波相交(图 1-6(a)),当基准的正弦波高于三角波时,使开关器件导通,在正弦波低于三角波时,使开关器件截止,由此,使逆变器的输出电压波为图 1-6(b)所示的脉冲列,其特点是,在半个周期中等距、等幅(等高)、不等宽,总是中间的脉冲宽,两边的脉冲窄,各脉冲面积与该区间正弦波下的面积成比例,这样,输出电压中低次的谐波分量显然可以大大减小。

还有许多与上述 SPWM 法类似的 PWM 法,如梯形波与三角波相交的方法,马鞍型波与三角波相交的方法(又称三次谐波注入法)等,据不完全统计已发表的有 10 余种之多。它们的着眼点在于如何使变频器的输出电压更好地获得三相对称的正弦波或者提高基波电压值。因而,这些方法都可以认为是 SPWM 法的衍生方法,可归入 SPWM 法一类。

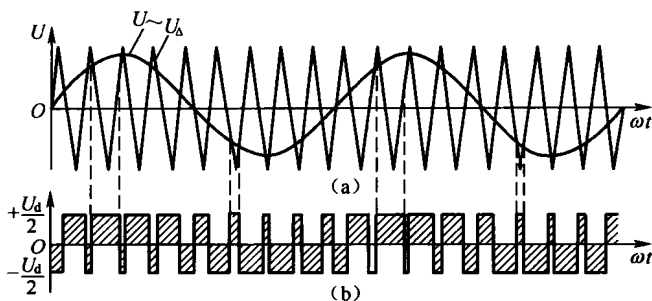


图 1-6 SPWM 法

(a) 正弦波与三角波; (b) 逆变器输出电压波。

磁链追踪型 PWM 法与 SPWM 法不同,它是从电动机的角度出发的,着眼点在于如何使电动机获得圆磁场。它是以三相对称正弦波电压供电时交流电动机的理想磁链圆为基准,用逆变器不同开关模式所产生的实际磁链矢量来追踪基准磁链圆,由追踪的结果决定出逆变器的开关模式,形成 PWM 波。当然,这样所形成的 PWM 波也必然是三相对称的正弦波。SPWM 法与磁链追踪型 PWM 法,由于着眼点不同,所建立的数学模型也完全不同。磁链追踪型 PWM 法的数学模型是建立在电动机统一理论、电动机轴系坐标变换理论基础上的。它把电动机看成是一个整体加以处理,所得数学模型简单,便于由微机实现实时处理,从而可使控制系统结构简单,实时性强,能获得更好的性能。

上述三种 PWM 法都是控制输出电压的电压型逆变器,而电流追踪型 PWM 法虽然也采用电压型逆变器的主电路结构,却是控制输出电流的电流型逆变器。其基本思想是将电动机定子电流的检测信号与正弦波电流给定信号用比较器进行比较,如果实际电流大于给定值,则通过逆变器的开关动作使之减小;反之,则使之增大。这样,实际电流波形围绕给定的正弦波作锯齿状变化,而且开关器件的开关频率越高,电流波动就越小。使用这种方法,电动机的电压数学模型改成电流模型,可使控制简单,动态响应加快,还可以防止逆变器过电流。因而,近年来在交流调速和伺服系统中使用这种 PWM 控制方法的也屡有报导。

本书从牵引理论基础、电力电子器件、交流异步电动机的控制策略矢量控制 (VC) 和直接转矩控制 (DTC)、斩波电路、逆变电路、城市轨道交通车辆的主传动控制、城市轨道供电系统和车辆电气设备等诸多方面,论述了轨道车辆电力牵引系统力求追踪飞速发展的轨道车辆电力牵引技术。电气牵引传动的矢量控制、直接转矩控制、斩波电路、逆变电路、PWM 控制技术是电气牵引传动自动控制领域大家关心的热点,本书以后各章将逐步展开讨论。

第二章 牵引理论基础

目前,绝大多数城市轨道交通车辆属于钢轮钢轨式,运行的任何一种工况,都依赖于车轮和钢轨的相互作用力。

在钢轮钢轨式城市轨道交通车辆中,牵引动力由牵引电动机通过传动机构,传递给动车的动力轮对(动轮),由车轮和钢轨的相互作用,产生使车辆运动的反作用力。根据物理学中关于摩擦的概念,轮轨之间的切向作用力就是静摩擦力。最大静摩擦力是钢轨对车轮的反作用力的法向分力与静摩擦系数的乘积。但实际上,动轮与钢轨间切向作用力的最大值比物理学上的最大静摩擦力要小一些,情况也更复杂一些。在分析轨道车辆的轮轨相互作用时,通常引入两个十分重要的概念:“黏着”和“蠕滑”。

第一节 黏着与蠕滑

一、黏着

牵引力有车钩牵引力和轮周牵引力之分。车钩牵引力指的是机车牵引车辆的纵向力,也称挽钩牵引力,以 F_g 表示,欧美一些国家以它作为牵引力的计算标准,它比较容易测量。计算牵引重量时用它也比较方便。但是,在计算列车运行速度和运行时间的时候要以整车为分离体,车钩牵引力不过是机车和车辆之间相互作用的内力,所以车钩牵引力 F_g 不是使整个列车发生运动或加速的外力。

在钢轨上运行的列车与外界的接触对象主要是空气和钢轨(电力牵引时还有接触网)。真正能使列车发生运动和加速的人为的外力,目前只能来自于钢轨(轮轨接触点)。

机车是一种能量转换装置。不论是电力机车的电能,还是内燃机车和蒸汽机车的燃料化学能,都是通过动力装置的作用,最终转变成机械能,并传递到动轮上。但是,动力装置作用在动轮上的力矩是机车的一种内力矩。如果动轮不压在钢轨上,那么,动轮只能自身旋转,而不能使机车运动。因此,使机车牵引车辆沿轨道运行的外力肯定来自钢轨和轮周。由于它作用于动轮轮周(踏面),所以,通常称为轮周牵引力。我国、俄罗斯以及从苏联独立出来的其他国家以轮周牵引力作为牵引力计算的标准。

对于轮周牵引力的产生必须具备下列两个条件。

- (1) 机车动轮上有动力传动装置传来的旋转力矩。
- (2) 动轮与钢轨接触并存在摩擦作用。

这个力的产生过程如下：图 2-1 为动车以速度 v 在平直轨道上运行时一个动轮对的受力情况（忽略内部各种摩擦阻力）。为了更清楚地表示，图中将接触的动轮与钢轨稍稍分开画出。只为一个动轮对作用在钢轨上的正压力，又称为轮对的轴重。牵引电动机作用在动轮上的驱动转矩 M_i ，可以用一对力形成的力偶代替。力 F'_i 和 F_i 分别作用在轮轴中心的 O 点和轮轨接触处的 O' 点，其大小为 $F'_i = F_i = M_i/R_i$ ， R_i 为动轮半径。

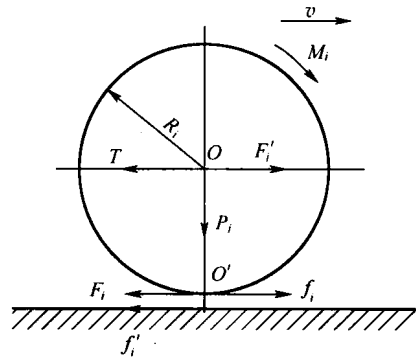


图 2-1 动轮对受力分析

在正压力 P_i 的作用下，车轮和钢轨的接触部分紧压在一起。切向力 F_i 使车轮上的 O' 点具有向左运动的趋势，并通过 O' 点作用在钢轨上。 f'_i 表示车轮作用在钢轨上的力，其值 $f'_i = F_i$ 。由于轮轨接触处存在着摩擦，车轮上 O' 点向左运动的趋势将引起向右的静摩擦力 f_i ，即钢轨对车轮的反作用力，其值 $f_i = f'_i$ ， f_i 称为轮周牵引力。因此，车轮上的 O' 点受到两个相反方向的力 F_i 和 f_i 的作用，而且

$$f_i = F_i \quad (2-1)$$

所以， O' 点保持相对静止，轮轨之间没有相对滑动，在力 F'_i 的作用下，动轮对作纯滚动运动。

由于正压力而保持动轮与钢轨接触处相对静止的现象或轮轨接触的这种状态称为“黏着”。黏着是一种现象、状态，黏着状态下的静摩擦力又称为黏着力。

轮轨间的黏着与静力学中的静摩擦的物理性质十分相似。实际上轮轨间的问题相对比较复杂，车轮和钢轨在很大的压力作用下都有变形，轮轨间实际是椭圆面接触而非点接触，不存在理想的瞬时转动中心；机车运行中不可避免地要发生冲击和各种振动，车轮踏面又是圆锥形，所以车轮在钢轨上滚动的同时必然伴随微小的纵向和横向滑动。即实际不是纯粹的“静摩擦状态”，而是“静中有微动”或“滚中有微滑”；在运行过程中，由于牵引力和惯性力不是作用在同一水平面内，造成机车前后车轮作用于钢轨的垂直载荷不均匀分配。所以，轮轨间纵向水平作用力的最大值实际上与运动状态有关系，而且比物理上的“最大静摩擦力”要小得多。因此，在铁路牵引和制动理论中，在分析轮轨间纵向力问题时，不用“静摩擦”这个名词，而以“黏着”来代替。相应地，在黏着状态下轮轨间纵向作用力的最大值就称为黏着力。