

生产机械的 变频调速

SHENGCHAN JIXIE DE BIANPIN TIAOSU

张永惠 张燕宾 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



生产机械的变频调速

张永惠 张燕宾 主编



机械工业出版社

前 言

机械工业出版社电工电子分社先后出版了几十种变频器应用方面的书籍，在推广变频调速这一新技术方面，作出了重要贡献。通过市场调研，了解到读者希望能看到变频器在各行各业应用的书，在使用变频器时，遇到问题能有所参照。

《变频器世界》杂志社的张永惠主编在编辑杂志的过程中，也力图把不同行业在变频器应用方面的文章汇编到一起，以利于做具体工作的工程师们查阅，和出版社的愿望不谋而合。因此，大家聚到一起编写了本书。

本书中的各章，均为各行各业在变频调速应用方面的领军人物所写，所有章节又都是作者亲历的记述，在变频调速的应用技巧和使用效果方面，都有十分精辟的阐述。可以说，这是本书的一大特点。

本书对于各行业在应用变频器方面的指导意义自不待言，即使对于不同行业的变频调速的实践者，也有相当的参考价值。

本书由张永惠主编负责组稿和最终审定，张燕宾主编负责对各篇文章的文字与格式进行修改。第1章由上海同济大学的袁登科、陶生桂编写，第2章由北京印刷机械研究所的韩晓良编写，第3章由沈阳理工大学的李岩编写，第4章由北京冶金自动化研究院的马竹梧编写，第5章由长沙矿山研究院的张永惠、山东新风光电子科技有限公司的郭培彬、北京利德华福电气技术有限公司的潘海滨编写，第6章由北京市市政设计研究总院的陈运珍、中国市政工程东北设计研究总院闫善政、张生、大连市供水公司陈立志、大连市自来水总公司李勤等编写，第7章由西安热工研究院的徐甫荣编写，第8章由山东新风光电子科技有限公司的周加胜、尹彭飞、吴海涛、中国石油天然气管道工程公司的杜庆山等编写。

由于水平有限，本书的疏漏之处在所难免，诚恳地接受读者的批评和指正。

编 者

2011 年 5 月

目 录

前言

第1章 城市轨道交通车辆的变压变频调速

1.1 概述	1	1.2.4 交流电气传动系统的控制策略	16
1.1.1 城市轨道交通车辆的用途与种类	1	1.2.5 典型实例	24
1.1.2 城市轨道交通车辆的特点与性能要求	1	1.3 城市轨道交通车辆的静止辅助电气系统	34
1.1.3 城市轨道交通车辆的电气系统	2	1.3.1 静止辅助电气系统简介	34
1.2 城市轨道交通车辆的变压变频调速系统	3	1.3.2 静止辅助电气系统方案	34
1.2.1 变压变频调速系统方案	3	1.3.3 典型车辆辅助电气系统方案实例	34
1.2.2 交流异步牵引电动机的控制要求	11	参考文献	37
1.2.3 交流异步牵引电动机的数学模型	12		

第2章 印刷机械设备的变频调速

2.1 概述	38	2.3.2 变频器和伺服电动机联合应用 实例	49
2.1.1 印刷机械设备的主要功能和分类	38	2.3.3 在椭圆包本机闯页工位上的应用 实例	50
2.1.2 印刷机械设备的特点和要求	39	2.3.4 在不干胶间歇印刷机上的应用 实例	50
2.1.3 印刷机械设备应用变频调速概况	40	2.3.5 在分切机上的应用实例	51
2.2 变频器在印刷机械设备上的应用	41	2.3.6 在小型平版印刷机上的应用实例	51
2.2.1 变频器用于主传动的调速	41	参考文献	52
2.2.2 变频器用于张力控制系统	43		
2.2.3 变频器用于单张纸平版印刷机	46		
2.3 变频器技术应用发展前景	48		
2.3.1 变频器大规模应用实例	48		

第3章 塔式起重机的变频调速

3.1 概述	53	3.3 变频器控制部分的选择	58
3.1.1 塔机的特点	53	3.3.1 塔吊起升变频控制	58
3.1.2 我国使用塔机的情况	53	3.3.2 塔吊回转机构变频器控制方式	65
3.1.3 现在国际上塔机的生产状况	54	3.3.3 电气原理图设计	67
3.1.4 国产塔机发展展望	54	参考文献	68
3.2 塔机的起升机构及设计方案	55		

第4章 钢铁设备的变频调速

4.1 概述	69	4.1.2 变频调速在钢铁工业中应用的 进展	70
4.1.1 钢铁生产流程及对交流调速的 要求	69	4.1.3 变频调速在钢铁工业中的实际	

应用	74	4.6.1 高炉的生产工艺流程	100
4.2 变频调速在原料场设备中的应用	75	4.6.2 高炉鼓风机48MW大型同步电动机 静止变频软启动自动控制系统	100
4.2.1 原料场的生产工艺流程	75	4.6.3 高炉料车式上料设备变频调速 系统	106
4.2.2 变频调速在斗轮堆取料机中的 应用	76	4.6.4 高炉探尺设备变频调速系统	108
4.2.3 变频调速在定量给料装置(CFW) 中的应用	81	4.6.5 高炉冲渣循环水泵变频调速系统	113
4.3 变频调速在焦化设备中的应用	83	4.6.6 高炉铸铁机变频调速系统	113
4.3.1 焦化的生产工艺流程	83	4.6.7 高炉出铁场除尘风机变频调速 系统	113
4.3.2 煤气鼓风机高压变频调速系统	84	4.7 变频调速在炼钢设备中的应用	116
4.3.3 干熄焦循环风机变频调速系统	86	4.7.1 转炉炼钢工艺流程	116
4.3.4 高压氨水压力自动控制变频调速 系统	88	4.7.2 转炉炉体倾动变频调速系统	117
4.4 变频调速在烧结设备中的应用	89	4.7.3 转炉氧枪升降的变频调速控制 系统	122
4.4.1 烧结的生产工艺流程	89	4.7.4 炼钢厂泵类负荷与风机变频调速 系统	125
4.4.2 圆盘给料机驱动电动机的变频调速 及其控制系统	89	4.8 变频调速在连续铸钢设备中的应用	132
4.4.3 一、二混料机的驱动电动机的变频 调速软启动控制系统	90	4.8.1 连续铸钢工艺流程	132
4.4.4 主抽风机驱动用同步电动机的变频 调速软启动控制系统	91	4.8.2 钢水包回转台旋转变频调速系统	133
4.4.5 除尘风机高压变频调速系统	92	4.8.3 结晶器振动变频调速系统	133
4.4.6 余热回收风机驱动电动机的变频 调速及其控制系统	94	4.8.4 拉矫机变频调速系统	134
4.5 变频调速在球团设备中的应用	95	4.8.5 连铸喷雾冷却供水系统变频调速	137
4.5.1 球团的生产工艺流程	95	4.8.6 电磁搅拌变频控制系统	138
4.5.2 球团竖炉煤气加压风机变频调速 系统	96	4.8.7 连铸火焰切割机变频调速系统	140
4.5.3 链蓖机-回转窑抽风机高压变频调速 系统	98	4.8.8 方坯去毛刺机变频调速系统	141
4.6 变频调速在高炉设备中的应用	100	4.9 变频调速在轧钢设备中的应用	143
		4.9.1 轧钢工艺流程简述	143
		4.9.2 轧钢主传动变频调速系统	149
		4.9.3 轧制辅助传动变频调速系统	170
		参考文献	185

第5章 矿山设备的变频调速

5.1 变频器在牙轮钻机设备中的应用	187	5.2.4 交流变频调速传动系统	190
5.1.1 概述	187	5.2.5 应用实例1: 国产首台150WK-10B 10m ³ 交流驱动电铲	190
5.1.2 应用实例	187	5.2.6 应用实例2: 国产WK-20共用直流 母线变频调速大型矿用电铲	191
5.1.3 系统的主要优点	188	5.2.7 电气传动系统的比较	192
5.1.4 应用效果	188	5.3 变频器在矿井提升机设备中的应用	195
5.2 变频器在电铲设备中的应用	189	5.3.1 概述	195
5.2.1 概述	189	5.3.2 提升机对电气传动系统的要求及 原矿井提升机拖动系统的构成、	
5.2.2 电铲运行工况及对电气传动的 要求	189		
5.2.3 直流传动系统	190		

主要特点和存在的问题	195	5.5 矿井空气压缩机变频调速	226
5.3.3 低压 (380V) 变频调速交流提升机 实例	197	5.6 矿井皮带运输机变频调速	232
5.3.4 高压 (3kV/6kV) 交流变频调速 提升机实例	203	5.6.1 引言	232
5.4 矿井通风机的变频调速	215	5.6.2 应用案例 1: 成都佳灵电气有限公司 的基茨系列高压变频器在煤矿皮带 运输机的应用	232
5.4.1 概述	215	5.6.3 应用案例 2: 利德华福高压变频器 在力拓铁矿石输送带的应用	237
5.4.2 矿井通风机的同步电动机变频 调速	217	5.7 变频器在矿浆管道输送中的应用	240
5.4.3 矿井通风机的异步电动机变频 调速	222	参考文献	241

第 6 章 变频器在水泵中的应用

6.1 变频器在源水取水泵站中的应用	243	项目中的广泛运用	251
6.2 变频器在城市给水处理厂站中的应用	246	6.4.7 变频器在污水深度处理工艺中节能 降耗的广泛应用	252
6.3 变频器在污水处理厂中的运用	247	6.4.8 变频器在给排水及工业废水处理中 的应用	252
6.3.1 概述	247	6.4.9 变频器在水处理中的应用	252
6.3.2 SBR 工艺曝气系统的设计	248	6.4.10 变频器在城市高层楼群二次供水 中的应用	252
6.3.3 潜水泵和脱水机变频的效果	249	6.5 DFC 型交流电动机转子侧变频调速装置 应用	253
6.3.4 污水处理中加药量的控制	249	6.5.1 转子变频调速的主电路结构	253
6.4 变频器在其他各种设备中的应用及 效果	249	6.5.2 转子变频调速原理	253
6.4.1 变频器在电厂给排水设备中的 应用	249	6.5.3 斩波器控制的工作原理	254
6.4.2 变频器在城市雨污水排放泵站中的 应用	250	6.5.4 逆变器的控制	254
6.4.3 再生水处理厂配水泵变频调速的 应用	250	6.5.5 起动控制	255
6.4.4 变频器在泄洪闸门启闭机节能降耗 改造项目中的广泛应用	251	6.5.6 转子侧变频调速的优点	255
6.4.5 变频器在南水北调工程各输水泵站 工程中的大量选用	251	6.5.7 DFC 型交流电动机转子侧变频调速 装置简介	255
6.4.6 变频器在大型泵站节能降耗改造		参考文献	256

第 7 章 火力发电厂辅机设备的变频调速

7.1 概述	257	作用	262
7.1.1 火力发电厂的基本任务	257	7.1.6 火力发电厂辅机变频调速节能改造 形势	262
7.1.2 火力发电厂的主要参数和指标	257	7.2 火力发电厂辅机变频调速节能改造 可行性分析	263
7.1.3 火力发电厂的生产流程和主要 设备	259	7.2.1 火力发电厂风机水泵调速运行的 必要性和优越性	263
7.1.4 火力发电厂的主要生产系统	259		
7.1.5 火力发电厂的主要辅机设备及其			

7.2.2 火力发电厂风机水泵变频调速运行性能分析	269	7.4.1 给水泵	305
7.2.3 火力发电厂风机水泵变频调速节能改造方案设计	277	7.4.2 循环水泵	315
7.2.4 变频调速系统技术方案的经济性评价和比较	282	7.4.3 凝结水泵	322
7.3 火力发电厂风机变频调速	287	7.4.4 灰浆(渣)泵	325
7.3.1 火力发电厂风机的分类	287	7.5 火力发电厂其他辅机设备的变频调速	328
7.3.2 火力发电厂风机的类型	288	7.5.1 磨煤机的变频调速	328
7.3.3 火力发电厂风机的变频调速	293	7.5.2 给粉机的变频调速	329
7.4 火力发电厂水泵变频调速	305	7.5.3 给煤机的变频调速	332
		7.5.4 空冷风机的变频调速	336
		参考文献	337

第8章 石油机械设备的变频调速

8.1 概述	338	8.5.2 油水分离的控制过程	350
8.2 钻井设备变频器的应用	338	8.5.3 原工频控制的弊端	350
8.2.1 钻机的概况及特点	338	8.5.4 变频控制的过程	350
8.2.2 钻机变频的应用	339	8.5.5 变频改造后的效果	351
8.3 采油设备的变频改造	341	8.6 混输泵的变频改造	351
8.3.1 概述	341	8.6.1 概述	351
8.3.2 应用情况	342	8.6.2 变频控制方案	352
8.4 注水泵的变频改造	347	8.6.3 应用效果	353
8.4.1 概述	347	8.7 输油泵的变频改造	353
8.4.2 原工频控制存在的问题	347	8.7.1 概述	353
8.4.3 变频改造的要求及目的	348	8.7.2 变频节能原理	354
8.4.4 节电效果分析	348	8.7.3 变频控制方式	354
8.5 油水分离设备的变频应用	349	8.8 结束语	356
8.5.1 概述	349	参考文献	356

第 1 章 城市轨道交通车辆的变压变频调速

1.1 概述

自从 20 世纪下半叶以来，随着世界范围内城市化发展的快速进程，各国城市区域逐渐扩大，城市人口快速上升。这对各国城市就业、住房和交通等方面提出了严峻的挑战。城市交通的发展状况对城市功能的发挥和城市发展带来正面和负面的影响，为了使城市各项功能活动正常、高效运行，为了保护城市生态环境、实现城市社会经济的可持续发展，世界各国都纷纷把解决城市公共交通问题摆在了一个重要的位置上。

1.1.1 城市轨道交通的用途与种类

1. 城市轨道交通的用途

城市公共交通系统包括公共汽车、出租汽车、地铁、轻轨、市郊铁路、磁浮铁路等多种交通形式。城市轨道交通是指列车或者车辆以电力为动力，在专门铺设的钢轨轨道上或者沿着导向轨运行的城市公共交通方式。世界范围内各大城市轨道交通多年来的运营实践表明，城市轨道交通具有运能大、速度快、安全准时、乘坐舒适、节约能源、能够有效地缓解地面交通拥挤和环保等优点。其中最为显著的特点体现在载运客流大，例如，轻轨一般为 2 万 ~ 3 万人次/h，地铁是 4 万 ~ 6 万人次/h。

2. 城市轨道交通的种类

城市轨道交通种类繁多，如按主传动系统中牵引电动机的种类可分为采用直流牵引电动机的直传动轨道车辆与采用交流异步牵引电动机的交流传动轨道车辆；按牵引力产生的方式可分为钢轮钢轨旋转电动机轨道车辆与直线电动机轨道车辆，后者还有不与钢轨接触的磁浮式轨道车辆等。

1.1.2 城市轨道交通的特点与性能要求

1. 城市轨道交通的特点

作为用以运送乘客的载运工具，人们对城市轨道交通车辆性能的要求较高，例如：在车辆启动加速过程中要考虑乘客的适应能力与舒适度，为此对最大加速度和加速度的变化率（称为冲击率）提出要求；要满足快速运行与制动的要求，对平均启动加速度和制动加速度等也都提出较为严格的要求。

2. 城市轨道交通的性能要求

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，该切向作用力是物理学上的静摩擦力。“粘着”是用来描述由于轮轨之间的正压力而保持动轮与钢轨接触处相对静止的现象，此时的静摩擦力称为粘着力，这是车辆正常运行的情况。当电动机驱动转

矩过大时,将会破坏这种粘着关系,轮轨之间会出现相对滑动,即“空转”。此时,轮轨之间的作用力将变为滑动摩擦力,使传递切向力的能力大大削弱,同时会造成动轮踏面与轨面之间的严重擦伤,因此必须尽量避免动轮的空转现象。粘着力最大值与正压力之间的系数为粘着系数,该系数由轮轨之间的物理状态、车辆运行的速度和状态以及动车有关部件的状态等诸多因素共同确定。简单地说,可通过改善轮轨之间的粘着系数、调节牵引电动机的转矩来保证车辆的正常运行。

除了上述的牵引动力外,轨道交通中的列车在运行时还将受到车轮与轨面之间的滚动摩擦、车轮与钢轨间的滑动摩擦、空气阻力等基本阻力以及在坡道、曲线和隧道等运行时的附加阻力,阻力曲线如图 1-1 中 R 所示。车辆起动时要求动车能够快速地进行加速,所以希望牵引电动机在低速时能够提供较大的牵引力。随着车辆运行速度的提高,电源提供的功率也在逐步增加,但由于从供电电源获得的电能是有限的,所以当输出功率达到额定值时,最多只能维持在该功率不变的情况下进行提速。随着现代社会的进步,要求轨道交通的速度要提高,这就要求牵引系统在恒功率区的速度比较高。恒功率区最高速度与最低速度之比通常在 2~3 之间,而对于某些电力机车驱动,则有可能达到 6。当电动机运行速度上升到一定程度时,为了进一步提高车辆的运行速度,电动机不得不降功率运行,此时功率与速度乘积不变。而电动机运行速度最高值要受到机械运动系统设计能力的限制。总的说来,无论电气牵引具体形式是直流传动还是交流传动,都要满足上述的牵引性能要求。

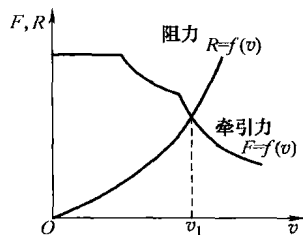


图 1-1 阻力曲线与牵引曲线

1.1.3 城市轨道车辆的电气系统

城市轨道车辆电气系统包括车辆上的各种电气设备及其控制电路。按作用和功能可以分为主传动电气系统和静止辅助电气系统。主传动电气系统是为整个车辆提供行走动力和电制动动力的高电压、大电流、大功率的电气系统,包括牵引电动机及与其相关的电气设备。辅助电气系统是为保证车辆正常运行所必须设置的向辅助电气设备供电的电气系统,常见的辅助电气设备有空气压缩机、通风机、车辆照明等。

1. 城市轨道车辆的主传动电气系统

主传动电气系统通常根据采用牵引电动机的不同分为直流传动电气系统与交流传动电气系统。

直流传动电气系统采用直流牵引电动机,主要是通过可调直流电源实施调压控制,具有良好的调速性能。但是直流电动机本身固有的体积大、维修量大、故障较多等缺点一直困扰着直流传动系统。交流异步电动机具有功率密度更高、速度更高、结构更为牢固、几乎无需维修等优点,但是一直未能实施高性能的调速,所以长期以来主要应用在不需调速或者在较小范围内调速的应用场合,未能在车辆电气传动系统中应用。随着近代电力电子器件和控制技术的迅猛发展、微电子技术的快速更新和换代及交流电动机统一理论的发展和高性能控制策略的研究(目前,已经广泛地采用磁场定向矢量控制技术和直接转矩控制技术),采用交流异步电动机的交流电气传动系统已经可以取得与直流电气传动相媲美的调速性能,所以交流电气传动调速系统很自然地要取代直流电气传动系统。目前,城市轨道车辆大都是采用交

流异步牵引电动机的交流传动系统。

2. 城市轨道交通车辆的静止辅助电气系统

静止辅助电气系统是将直流供电网压通过变流装置供给辅助电气设备用电的电气系统（多数是220V/380V工频交流电气设备）。早期轨道车辆的辅助电气系统采用旋转式的电动机—发电机机组来实现变流，不仅体积大而且效率低，当电力电子器件发展起来后很快被静止式电力电子变流装置替代了，因而称为静止式辅助电气系统。辅助电气系统可根据用电系统要求的容量和特性的不同而采用不同的形式，见后面结合具体实例进行的阐述。

1.2 城市轨道交通车辆的变压变频调速系统

1.2.1 变压变频调速系统方案

城市轨道交通的动车组采用直流供电系统（750V或1500V），如图1-2所示，其主电路是典型的直-交系统结构。

网压波动的直流电经受电弓装置引入到车上，通过由滤波电感 L_1 和支撑电容 C 构成的低通滤波器后，变成了恒定的直流电压。图1-2中的DC/AC是两电平电压型牵引逆变器，它将直流电能转换成交流电能以满足交流牵引电动机的需求。1台牵引逆变器同时向4台牵引电动机供电，以满足车辆动力需求。

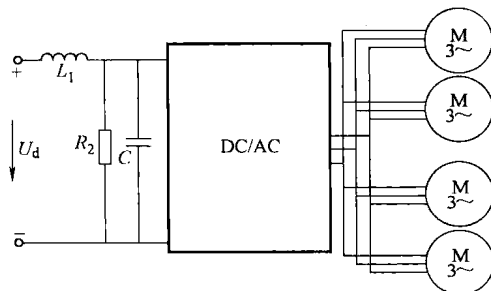


图1-2 城市轨道交通车辆直流供电交流传动系统

1. 电力电子器件与常用电路拓扑

(1) 电力电子器件的发展

电力电子器件是现代电力电子变流装置的核心，其发展过程先后经历了不控型器件——半控型器件——全控型器件的发展阶段。

二极管是典型的不控型半导体器件，因其单向导电的工作特性而被广泛应用于整流电路中，并在斩波电路中用作续流元件，在逆变器中用作反馈元件。开通可控型的晶闸管（Silicon Controlled Rectifier, SCR）属于半控型器件，由门极触发脉冲触发导通之后，就无法通过门极信号使其关断。如使其关断，必须将其导通电流降至维持电流以下。门极可关断晶闸管（Gate Turn Off Thyristor, GTO）开辟了电力电子器件的新时代，它是第一代全控型器件，可以通过门极信号控制其导通与关断，但是它属于电流驱动型的器件，驱动功率较大，开关速度较慢，并且在具体应用中需要复杂的缓冲吸收回路。全控型器件金属氧化物场效应半导体晶体管（Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, MOSFET）是电压控制型的多数载流子器件，开关速度快，在高频场合得到了广泛应用。而全控型器件中的绝缘栅双极型晶体管（Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT）兼有前两者的优点。在轨道交通电力牵引领域广泛采用IGBT是必然趋势，这是因为IGBT器件有以下特点：

- 1) 开关损耗小，允许使用较高的开关频率；
- 2) 吸收电路小型化，甚至无需吸收电路，从而简化了逆变器主电路；
- 3) 绝缘式模块结构便于设计与组装，简化了装置结构；

- 4) 开关转换均匀, 提高了稳定性和可靠性;
- 5) 并联简单, 便于标定变频器功率等级;
- 6) 作为电压驱动型器件, 只需简单的控制电路即可实现良好的保护功能。

随着 IGBT 性能的迅速发展, IGBT 模块的电压等级和电流容量在不断提高, 如图 1-3 所示。1991 年生产出的电压等级为 1200V/300A 的小型 IGBT 模块, 很快取代了在工业通用变频器中所用的双极型晶体管; 1993 年出现的 1700V/300A 的 IGBT 模块, 在城市电车上获得了推广应用; 到 2000 年后更是出现了 1700V/2400A、3300V/1200A 和 6500V/600A 的高压 IGBT, 随即在高压大功率场合中迅速得以应用。

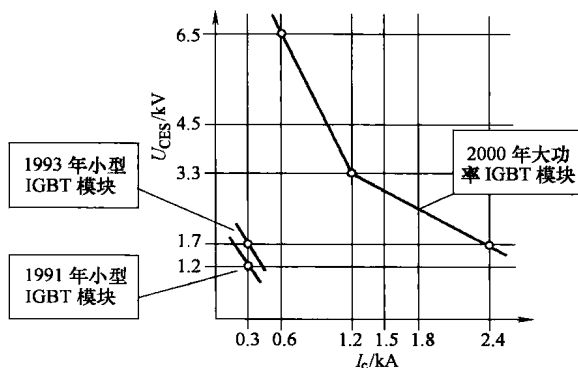


图 1-3 IGBT 在轨道牵引领域的应用

随着城市的发展, 城市轨道交通供电网压制也从早期的 DC600V 和 DC750V

发展为 DC1500V 网压制, 以适应大城市大客流量发展的需要。网压的提高对电力电子器件的电压等级提出了更高的要求, 而高压绝缘栅双极晶体管 (High Voltage IGBT, HVIGBT) 模块性能优越, 加之其为绝缘型模块, 整机的结构设计紧凑轻巧, 且采用了低感母线技术与软门极的驱动技术并解决了热循环的寿命问题, 所以被迅速应用到铁道与城市地铁轨道车辆中, 并成为轨道电力牵引系统中应用的主导元件。

图 1-4 给出了各种半导体电力电子器件作为电路开关使用时的电路结构。由图可以明显看出, 采用 IGBT 可以大大简化电路的复杂程度, 提高电路运行的可靠性。

(2) 常用电路拓扑

应用现代电力电子器件的各种变流装置对不同形式的电能 (直流与交流) 进行变换, 主要有 AC-DC、DC-DC、DC-AC 和 AC-AC 4 类变换装置, 因为它们工作在开关状态, 所以可以进行高效率的能量变换。

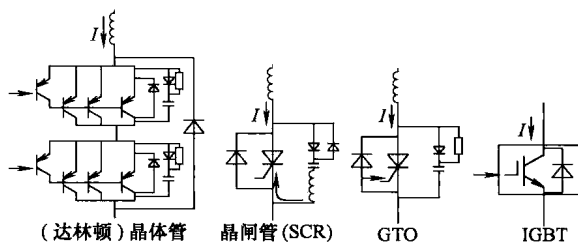


图 1-4 电力电子器件作为开关用的电路结构

1) AC-DC 整流电路。整流电路包括: ①采用二极管进行不控整流, 直流电压不可控, 随着交流输入和负荷的大小而变化; ②采用半控型晶闸管进行相控整流, 直流电压通过控制晶闸管的导通角得到控制, 但是网侧功率因数较低, 特别是输出电压较低的时候更加明显; ③采用全控型器件进行 PWM 整流, 在保证输出直流电压得到控制的同时, 可以有效地改善交流输入侧的电流波形, 以实现功率因数接近 1 的控制; ④多重化整流电路, 为了尽量减小交流侧输入电流中的谐波成分, 提高交流电流的正弦度, 并降低输出电压中存在的脉动成分, 减小滤波电感的电感量, 特将几个整流桥多重化连接在一起使用。后两者在现代轨道交通中都得到了较多的应用。

2) DC-DC 变换电路。DC-DC 变换电路通过电力电子器件的高频开关动作, 或者将直

流电压进行斩波然后经过滤波得到稳定的直流电压,如图1-5a的降压变换器与图1-5b的升压变换器;或者先将直流电压变换成交流电压,然后经过整流得到不同极性和不同电压的直流电压,如图1-5c的串联谐振高频链DC-DC变换电路。

有时在电源与负荷之间连接有多个基本斩波电路,称之为多相多重斩波电路。该电路虽然结构上复杂一些,但是电流的脉动降低,合成频率为相数的倍数;如果有一相斩波器故障,其余相还能够继续运行,所以总体的可靠性提高了。

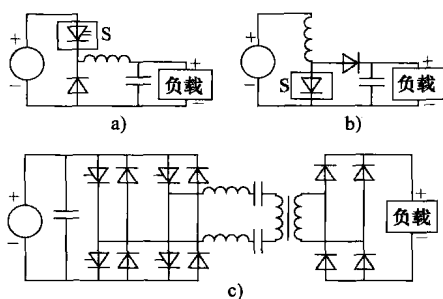


图1-5 几种常见的DC-DC变换器

3) DC-AC 逆变电路。直-交逆变器根据中间直流回路储能环节的不同可以分为大电容储能的电压型逆变器和大电感储能的电流型逆变器。图1-6给出了两电平电压型逆变器的主电路结构,其中,中间直流环节由电感 L 和电容 C 进行滤波,并同时由大电容 C 进行储能,从负荷侧看,变流装置内阻很小,相当于电压源,使逆变器的输出电压被箝位为矩形波,与负荷性质无关。由于直流电压基本不变,为了输出可变电压可变频率(Variable Voltage Variable Frequency, VVVF)交流电源,需要对逆变器实施脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)控制,以便同时调节输出交流电的幅值和频率。

4) AC-AC 变换电路。AC-AC 变换器将交流电源变换成电压、频率和相数与输入侧交流电源不同的交流电。有两种典型的交-交变换装置:①从交流电源直接变换生成新的交流电源的直接变换电路;②经交-直、直-交和高频环节电路等组合构成的间接变换电路。针对传统交-交周波变换器输出频率较低(低于供电频率的一半)的缺点,自20世纪80年代开始,有学者对矩阵式变流器进行研究,其结构如图1-7所示。矩阵式变流器采用双向半导体开关器件,拓宽了输出频率范围,并且没有中间直流回路的大电容和大电感,体积较小,是一种有发展前景的变流器。

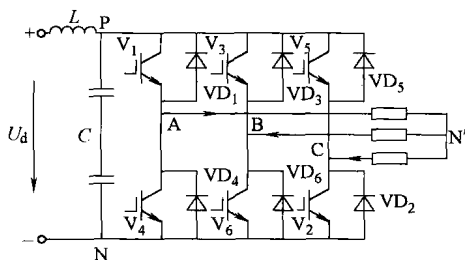


图1-6 两电平电压型逆变器

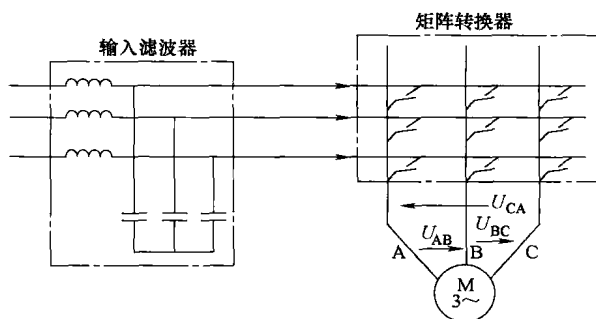


图1-7 三相矩阵式变流器

2. 交流传动系统的核心部件——牵引逆变器

牵引逆变器是交流电气变频调速装置的核心部件,它能实现能量从直流向交流的转换,中间直流回路的形式可以是采用大电感储能的电流环节,也可以是采用大电容储能的电压环节,且后者已经得到了广泛的应用。电压型逆变器的具体形式可以采用传统的两电平电压型逆变器,也可以是三电平或者多电平的电压型逆变器结构。其中,两电平电压型逆变器电路

结构最为简单,控制也最为简单,可靠性相对较高,所以在器件耐压满足应用环境需要的前提下,一般都尽可能采用它;在器件耐压不能满足需求或者为了改善输出电压、电流波形的场合中,可以采用三电平或更多电平的逆变器。下面以两电平电压型逆变器为例分析逆变器的工作原理。

(1) 电压型逆变器工作方式

图 1-6 给出了三相两电平电压型逆变器主电路的结构,每一相有上下两个桥臂,每个桥臂采用一个主管 V 和与其反并联的续流二极管 VD 构成。该电压型逆变器有两种工作方式:

1) 120° 导通方式,在任何时刻都只有不同相的两只主管导通。同一相的两只主管在一个周期内各导通 120° ,它们之间切换时分别有 60° 的间隙时间。当某相没有主管导通时,该相的感性电流经该相的续流二极管流通。一个周期内的各主管工作模式按照图 1-8 的顺序循环工作。由图 1-8 可以看出,每次的换相都是

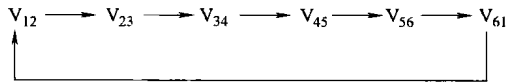


图 1-8 120° 导通型运行方式

是在上面三个桥臂内或下面三个桥臂内(按照 A 相—B 相—C 相)依次进行,因此称为横向换相。在 120° 导通方式中,由于同一桥臂中上下两个主管有 60° 的间隙,所以不存在同一相上

下直通短路的问题,对换流安全有利,但主管利用率较低,因此一般情况下电压型逆变器不采用这种工作方式。

2) 180° 导通方式,任何时刻都有不同相的三只主管导通。同一相上下两个桥臂上的主管交替导通,各自导通半个周期 180° 。一个周期内各主管工作模式按照图 1-9 的顺序循环工作。由图 1-9 可以看出,每次换相都是

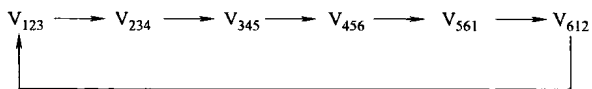


图 1-9 180° 导通型运行方式

是在同一相上下两个桥臂之间进行的,因此又称为纵向换相。同相中上下两桥臂中的两只主管称为互补管(即控制脉冲是互反的),它们轮流导通。在换流瞬间,为了防止同一相上下两臂的主管同时导通而引起直流电源的短路,通常采用“先断后通”的方法,即先给应关断的主管关断信号,待其关断后留一定时间裕量,然后再给应导通的主管开通信号,两者之间留有一个短暂的死区时间。

(2) 能量传递的三种方式

假定三相电流方向如图 1-6 所示,以 A 相为例:

1) 若 A 相电流流经两只主管,例如 A 相电流从电源正端流经 $V_1 \rightarrow$ A 相负荷 $\rightarrow N' \rightarrow$ B 相负荷 $\rightarrow V_6 \rightarrow$ 电源负端,那么能量从直流电源流向负荷。

2) 若 A 相电流流经一个主管和一个续流二极管,例如 A 相电流流经 $V_1 \rightarrow$ A 相负荷 $\rightarrow N' \rightarrow$ B 相负荷 $\rightarrow VD_3$,此时能量通过续流二极管进行续流。

3) 若 A 相电流流经两只续流二极管,例如 A 相电流从电源负端流经 $VD_4 \rightarrow$ A 相负荷 $\rightarrow N' \rightarrow$ B 相负荷 $\rightarrow VD_3 \rightarrow$ 电源正端,那么能量从负荷流向直流电源。

(3) 方波运行工况

当逆变器运行于上述的 180° 导通方式下,一个周期内三相输出电压波形如图 1-10 的 a、b、c 所示,其相电压为方波,三相依次相差 120° 电角度,此时的线电压如图 1-10d 所示。当

负荷为三相对称负荷时,可以推出下式:

$$u_{N'N} = \frac{1}{3}(u_{AN} + u_{BN} + u_{CN}) \quad (1-1)$$

$u_{N'N}$ 描述了负荷电压中共模电压的大小,如图1-10f所示。图1-10e给出了以负荷中性点为参考电位的相电压波形,可以看出其波形为6阶梯波,故此工况又称为6阶梯波工况。此时针对6阶梯波相电压进行傅立叶级数展开,可以得到下式:

$$\begin{aligned} u_{AN'} &= \frac{2U_d}{\pi} \left(\sin\omega t + \frac{1}{5}\sin 5\omega t + \frac{1}{7}\sin 7\omega t \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{11}\sin 11\omega t + \frac{1}{13}\sin 13\omega t + \dots \right) \quad (1-2) \\ &= \frac{2U_d}{\pi} \left(\sin\omega t + \sum_n \frac{1}{n} \sin n\omega t \right) \end{aligned}$$

可以看出,输出的相电压波形中除了基波分量以外,还含有大量的奇次谐波分量,尤其是低次谐波分量较多,从而使相电流中含有较多的谐波分量,见图1-10g,与正弦电流波形相差较大。同时从式(1-2)可以看出,相电压的大小仅与中间直流回路电压有关,当中间直流电压不

变时,输出电压也就不能改变。在对交流电动机进行变频调速的早期,为了输出交流电动机所需的VVVF交流电源,均采用两级变流装置:第一级为可控整流以获得可调节的直流电压;第二级为方波逆变器进行变频。当将PWM技术引入到交流调速系统对电压型逆变器实施PWM控制时,通过一级变流装置就可以获得所需的VVVF电源,不仅减少了能量变换的环节,提高了效率,并且还可以获得更加快速的调节过程,调速性能更好,所以此后采用PWM控制的电压型逆变器占据了大多数应用场合。图1-10h中给出了方波运行工况时中间直流回路的电流波形,从中可以看出:直流回路中明显含有6倍基波频率的脉动电流。PWM控制运行时逆变器的直流回路电流为高频脉动电流,中间环节采用大电容,可以有效吸收这些脉动电流,以减小中间直流电压的脉动。

3. 牵引逆变器的PWM控制技术

在输入侧直流电压一定的情况下,方波逆变器输出的交流电压不可调节,采用PWM控制技术,逆变器相电压为一系列等幅不等宽的电压脉冲,从而可以对输出电压基波分量进行控制。

PWM调制方法主要有:正弦脉宽调制技术(Sinusoidal PWM, SPWM)、空间矢量脉宽调制技术(Space Vector PWM, SVPWM)、特定次谐波消去脉宽调制技术(Selected Harmonics Elimination PWM, SHEPWM)、电流跟踪PWM控制技术等方法。下面以两电平电压型逆变器为例分析前2种PWM方法。

(1) 正弦脉宽调制技术(SPWM)

正弦脉宽调制技术以正弦电压波形作为逆变器输出的期望波形,以频率比正弦波高得多

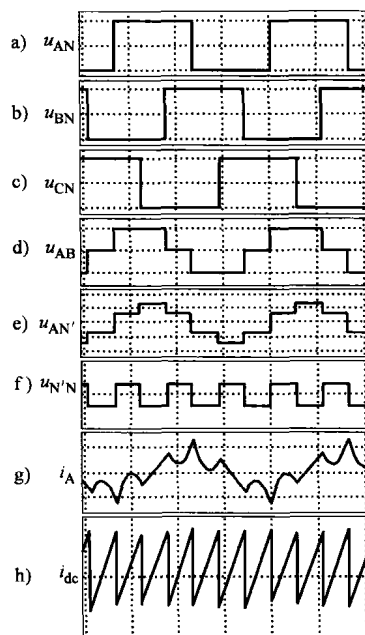


图1-10 方波运行工况下各物理量的波形

的等腰三角波作为载波 (Carrier wave), 如图 1-11a 中 u_t , 并用频率和期望波相同的正弦波作为调制波 (Modulating wave), 如图 1-11a 中 u_{rA} 、 u_{rB} 、 u_{rC} 。当调制波与载波相交时, 由它们的交点确定逆变器开关器件的通断时刻 (正弦波大于三角波时, 上桥臂的主管导通, 下管关断; 反之则反), 从而获得在正弦调制波的半个周期内呈两边窄中间宽的一系列等幅不等宽的矩形波, 如图 1-11b、c、d 所示。图 1-11e 给出了输出线电压波形, 正负脉冲的幅值均为直流侧电压, 对其进行频谱分析, 可以知道其中的基波分量就是具有期望幅值和频率的正弦波。

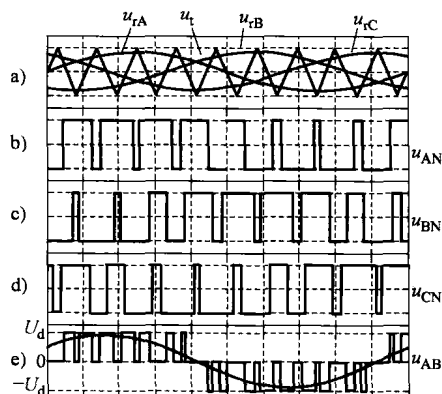


图 1-11 正弦脉宽调制 (SPWM) 技术原理

在 SPWM 中, 三角载波频率 f_c 与正弦调制信号频率 f_r 的比值为 $N = f_c/f_r$, 称为载波比, 根据 N , 可以将 SPWM 调制方式分为异步调制和同步调制。

1) 异步调制 ($N \neq \text{常数}$)。随着正弦调制信号频率 f_r 的改变, N 不是一个常数的调制方式称为异步调制。通常情况是 f_c 保持不变, 这样可以充分利用主管的开关频率, 此时在正弦信号波的半周期内, PWM 波形的脉冲个数不固定, 相位也不固定, 正负半周期的脉冲不对称, 输出电压中的谐波分量要多一些。但是如果 N 足够大, 那么谐波分量还是比较小的。

2) 同步调制 ($N = \text{常数}$)。随着调制信号频率 f_r 的改变, N 始终是一个常数, 即是说三角载波和正弦参考波信号波始终保持同步 (此时三角载波的频率会随着 f_r 的变化而变化)。在三相 SPWM 中, 共用一个三角载波, 且取 N 为 3 的奇数倍, 这样可以使三相输出电压波形对称, 且输出电压中无偶次谐波分量。

基本同步调制方式导致正弦波形频率变化时, 三角载波的频率变化范围很大, 对此改进的方法是分段同步调制, 如图 1-12 所示。

从图 1-12 中可以看出, 该方法是把 f_r 变化范围划分成若干个频段, 每个频段内保持 N 恒定, 不同频段中 N 不同。如: 在 f_r 较高的频段采用较低的 N , 使载波频率不致过高; 而在 f_r 较低的频段采用较高的 N , 使载波频率不致过低。这样可以保持三角载波的频率 (主管开关频率) 始终在一个比较稳定的范围内, 以获得更好的性能。还有一种非常普遍的做法, 就是在低频工作时采用异步调制方式——保持三角载波的频率不变, 工作在高频时再切换到同步调制方式, 这样可以把两者的优点结合起来。

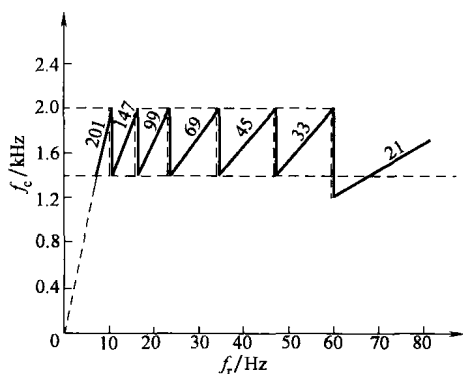


图 1-12 分段同步调制开关频率示意图

在 SPWM 中, 有一个重要的技术指标——调制比 m 。参考图 1-11, 通常定义调制比 $m = u_{rm}/u_{tm}$, 为图中正弦参考波形的幅值与三角载波幅值的比值。当 $m \leq 1$ 时, 存在规律 $u_{phm} = mU_d/2$, 其中 U_d 为直流环节的电压, u_{phm} 为逆变器输出相电压基波分量幅值, 即在图 1-11 中三角载波的幅值为 1 的前提下, 令 $u_{rm} = m$, 那么在逆变器的输出侧就可以得到基波幅值为

$u_{phm} = mU_d/2$ 的相电压, 故 $m \leq 1$ 的区域称为线性调制区域; 当 $m > 1$ 时, 逆变器进入非线性调制区域, 逆变器输出电压逐渐饱和, 此时不能在其输出侧得到上述与 m 成正比例的电压 u_{phm} , 而是比其要小一些。当逆变器工作在方波工况下时, 可获得最大输出电压, 此时 $u_{phm} = 2U_d/\pi$ 。

(2) 空间矢量脉宽调制 (SVPWM)

空间矢量脉宽调制源于交流电动机定子磁链跟踪的思想。它宜于数字控制器实现, 且有输出电流波形更好、直流回路的电压利用率更高等特点。现在不仅在交流电动机的控制中, 而且在三相电力系统等领域中也得到了广泛的应用。

1) 电压空间矢量的定义。根据定子三相电压分量可以定义定子电压空间矢量如下:

$$U_s = 2[u_a(t) + u_b(t)e^{j\frac{2\pi}{3}} + u_c(t)e^{j\frac{4\pi}{3}}]/3 = u_\alpha + ju_\beta \quad (1-3)$$

当定子三相电压为对称的正弦电压时, 式 (1-3) 定义的电压矢量是一个幅值恒定且与相电压峰值相等的空间矢量, 矢量端点的运动轨迹是一个圆, 运动的角速度为相电压的电角频率。根据电机学原理, 电压的积分是磁链, 而只有幅值不变, 相角连续变化的电压空间矢量才能产生理想的圆形定子磁链, 这在逆变器供电情况下是不可能的。但是通过不断地切换逆变器各电压矢量从而引导定子磁链走出准圆形的轨迹是可行的, 这就是空间矢量 PWM 的思路。两电平电压型逆变器输出的基本电压空间矢量如图 1-13 所示。

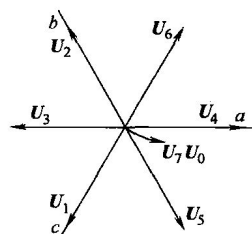


图 1-13 两电平电压型逆变器的基本电压空间矢量

使用 S_a 、 S_b 、 S_c 分别表示图 1-6 两电平电压型逆变器中开关管 V_1 、 V_3 和 V_5 的开关状态 (1 为开通, 0 为关断), 而 V_2 、 V_4 及 V_6 的状态分别与 S_a 、 S_b 、 S_c 相反。这样, 三个二进制位共有 8 种组合, 该逆变器共有 8 个电压矢量, 表 1-1 为主管各种开关状态与各基本电压矢量的对照表。

表 1-1 各基本电压矢量的标记

开关状态	U_i							
	U_0	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_7
S_a, S_b, S_c	000	001	010	011	100	101	110	111

8 个电压矢量中: U_0 与 U_7 为零电压矢量; 其余 6 个为非零电压矢量, 幅值均为 $|U_i| = 2U_d/3$ 。

2) SVPWM 原理。SVPWM 可以理解为: 当控制系统根据交流电动机的运行状态计算得到一个期望电压空间矢量 u_g 后, 如何控制电压型逆变器, 使其在一个控制周期 t_g 内实际输出的电压空间矢量对时间的积分与 $u_g t_g$ 相等。

通常的 SVPWM 算法是: 根据 u_g 所处的空间扇区位置确定好准备输出的基本电压空间矢量, 如图 1-14a 所示, 选取非零电压矢量 U_4 与 U_6 , 分别记它们的作用时间为 t_1 和 t_2 , 则有

$$U_4 t_1 + U_6 t_2 = u_g t_g \quad (1-4)$$

根据式 (1-4) 就可以计算出 t_1 和 t_2 如下:

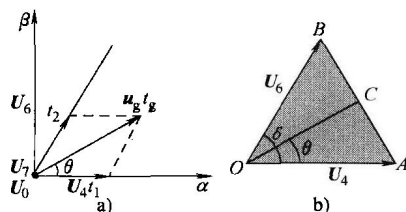


图 1-14 空间矢量脉宽调制技术示意图
a) 电压矢量合成方法 b) 合成电压矢量范围

$$t_1 = \frac{3}{2} t_g \left(\frac{u_g \cos \theta}{U_d} - \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{u_g \sin \theta}{U_d} \right) \quad (1-5)$$

$$t_2 = \sqrt{3} t_g \frac{u_g \sin \theta}{U_d}$$

式(1-5)为各电压矢量作用的时间,一般情况下, $t_1 + t_2 \leq t_g$, 那么多余的时间 t_0 就平均分配在两个零电压矢量 u_0 和 u_7 上, 而它们的作用并不会影响到逆变器输出电压矢量的积分。

$$t_0 = t_g - (t_1 + t_2)$$

当输出的 PWM 波形对称性比较好时, 电压谐波就比较少。图 1-15 给出了最为常见的 SVPWM 波形。

3) SVPWM 的特征。从式(1-5)可以看出, 随着期望电压矢量 u_g 幅值的增加, 各基本电压矢量的作用时间也在增加, 当 $t_1 + t_2 = t_g$ 时, U_4 和 U_6 合成的电压矢量就是它们能够合成的最大电压空间矢量 u_g , 此时电压矢量的端点就在图 1-14b 的线段 AB 上。从图 1-14b 中可以看出, 根据 SVPWM 算法在任何一个空间位置都可以合成的电压矢量幅值为 $(\sqrt{3}/2) \times (2U_d/3) = \sqrt{3}U_d/3$ 。按照前一节的 SPWM 定义的调制比, 可以得到此时的调制比 $m = (|u_g|)/(U_d/2) = 2/\sqrt{3} \approx 1.155$, 这就是 SVPWM 的线性调制区域的最大调制比。与正弦调制 SPWM 线性区域的最大调制比 $m = 1$ 相比, SVPWM 可以更好地利用中间直流电压, 其利用率提高了 15.5%。随着期望电压矢量的进一步增加, $t_1 + t_2 > t_g$, 逆变器不能合成相应的电压矢量, 此时一般的处理方法是按比例同步减小按式(1-5)计算出的 t_1 与 t_2 , 以保证实际合成的电压矢量与期望的电压矢量在同一个方向上。

有文献对 SPWM 和 SVPWM 之间的关系进行过研究, 根据这些研究可以推导出图 1-16 所示的基于 SPWM 的 SVPWM 实现算法, 即: 在原有 SPWM 的三相正弦调制波中同时加入一个零序分量 u_z^* 。

$$u_z^* = (1 - 2\lambda) - (1 - \lambda)u_{\max}^* - \lambda u_{\min}^* \quad (1-6)$$

式中, $u_{\max}^*$ 、 $u_{\min}^*$ 分别表示三相正弦参考波中的最大值与最小值; λ 表示两个零电压矢量中 U_0 的分配比例, 为 0~1 之间一实数。

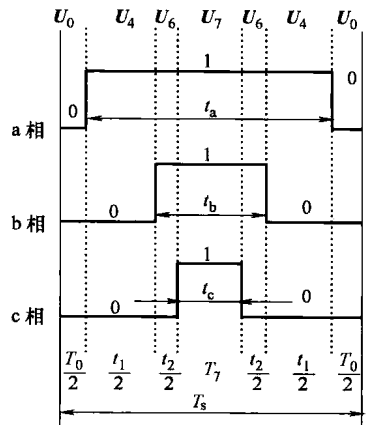


图 1-15 SVPWM 中各电压矢量的时间分配图

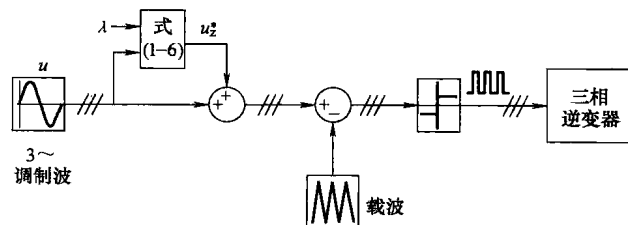


图 1-16 基于 SPWM 的 SVPWM 算法示意图