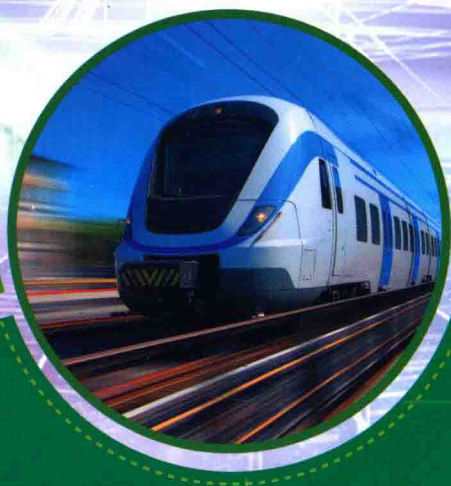




普通高等院校车辆工程专业卓越特色系列规划教材

轨道车辆电力电子技术

吴鑫 主编



科学出版社

普通高等学校车辆工程专业卓越特色系列规划教材

轨道车辆电力电子技术

吴 鑫 主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书作为普通高等学校车辆工程专业卓越特色系列规划教材之一, 主要内容包括: 轨道车辆中常用的电力电子元器件、相控整流电路、直直变换器、逆变技术、PWM 脉冲整流器、软开关技术、轨道车辆主电路等。本书内容在理论上偏重基础, 在实践上与轨道车辆的具体主电路和电力电子装置相结合。

本书可作为轨道车辆专业及相关专业的本科生教材, 也可从事轨道车辆中主电路及电力电子装置等设备检修及维护的工程技术人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

轨道车辆电力电子技术/吴鑫主编. —北京: 科学出版社, 2016.3

普通高等学校车辆工程专业卓越特色系列规划教材

ISBN 978-7-03-046017-2

I. ①轨… II. ①吴… III. ①轨道车辆-电力电子技术-高等学校-教材
IV. ①U270.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 246204 号

责任编辑: 毛 莹 朱晓颖 张丽花/ 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 霍 兵 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 3 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016 年 3 月第一次印刷 印张: 23

字数: 557 000

定价: 66.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

电力电子技术(Power Electronics)是以电力为对象的电子技术,是一门利用电力电子器件对电能进行转换与控制的新兴学科,是电气工程中电力、电子和控制三大主要领域之间的边缘学科。主要内容包括电力电子器件(Power Electronic Device)、电力电子(功率)变流技术(Power Conversion Technique)(包括改变电压、电流、频率及变换相数等)和控制技术。电力电子技术与微电子技术、材料科学、电机工程、自动控制技术等相辅相成、快速发展,成为电气工程领域最为活跃的一个分支。在太阳能、风能等清洁能源发电,直流输电,轨道车辆,船舶推进,电机节能应用,交直流供电电源,弧焊电源、电镀及电加工,中频感应加热,机器人控制等领域,乃至社会日常生活等诸多方面有应用。电力电子学是电气工程学科的基础平台课程,是电力电子装置、轨道车辆牵引传动系统、轨道车辆装备、开关电源、自动控制、变频调速等课程的先行课程。

“轨道车辆电力电子技术”是轨道车辆系列课程中的先行基础课程,是为更好地理解“轨道车辆供电牵引系统与设备”、“轨道车辆辅助电气系统与设备”等轨道车辆后续课程打下一定的基础。本书也是《轨道车辆供电牵引系统与设备》、《轨道车辆辅助电气系统与设备》等教材的配套教材。随着动车组的引进和国产化,以及轨道车辆中电力电子装置所占比重的大幅提高,对其内部结构及关键技术的消化、吸收和再创新的需求也日益迫切。本书旨在对轨道车辆中常见的电路结构进行基础性和原理性的讲解,有利于电力电子技术在轨道车辆上的普及和推广。

本书学时为 32~48,介绍一些常用的电力电子知识,包括电力电子器件、相控式整流技术、直直变换技术、逆变技术、PWM 脉冲整流器以及这些技术在轨道车辆上的应用。主要内容包括:

第 1 章 电力电子元器件

本章主要介绍电力电子器件的基本概念、半导体物理基础、电力二极管、晶闸管(SCR)、门极可关断晶闸管(GTO)、电力场效应晶体管(电力 MOSFET)、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)、智能功率模块(IPM)以及电力电子中常用的电阻、电感、电容元件和电力电子的一些基本名词和概念。本章应重点掌握 IGBT 及其在轨道车辆上的应用。各种电力电子器件的特性曲线是学生最费解的,也是最不愿意学的,但对于电力电子装置的维修工作却至关重要,因此本章增加了一些半导体的基础知识,并且要求学生初步学会从半导体器件的内部结构和基本原理去理解一些典型器件的特性曲线,提高学习兴趣。由于电感、电容元件在电力电子中经常使用,与电力电子器件特性曲线也紧密相连,如密勒效应、位移电流等,因此增加了该小节。

第 2 章 相控整流技术

相控整流是各种电能变换电路的基础,其实内容最简单,学生却往往认为内容最多、最难。本章主要介绍相控整流技术的基本概念、单相不可控整流电路、单相半波整流电路、单相桥式全控整流电路、单相桥式半控整流电路、三相半控整流电路和三相桥式整流电路、变压器漏感的影响及相控有源逆变的条件等。本章的重点是波形分析,然后才是电量计算和电路性能的评价。难点是负载的不同导致输出波形的变化,特别是 R-L 负载。本章还增加了整

流电路的触发电路和同步问题的讲解,与学生的电力电子实验和实验台相对应。此外,还介绍了轨道车辆电力电子装置经常出现的倍流整流电路等。另外,讨论了相控整流的谐波及功率因数,便于与后面轨道车辆的脉冲整流产生的谐波相联系和对比。由于篇幅所限,对于整流电路的保护及元件选择计算等工程设计内容未写入本章。

第3章 直直变换技术

本章主要介绍电力电子技术中直流斩波电路的工作原理,基本斩波电路(降压、升压、升降压变换)、多象限直流变换器、多相多重直直变换器、带隔离变压器的直直变换器、斩波电路的控制方式以及直直变换器在轨道车辆上的应用。其中基本直直变换器是基础,尤其要掌握电路的工作原理和电感的伏秒特性等基本原理和推导方法。

第4章 逆变技术

本章主要介绍无源逆变的原理、分类、SPWM 技术、特性谐波消去 PWM 控制、电流滞环跟踪 PWM 控制、电压空间矢量 PWM 控制、多重化逆变电路、两点式和三点式逆变器,以及轨道车辆中逆变器的典型结构和控制功能。为进一步理解轨道车辆的电机逆变器和辅助逆变器打下基础。

第5章 PWM 脉冲整流器

本章介绍脉冲整流器的基本原理及分类、相控式和斩控式整流及有源逆变的区别,重点介绍轨道车辆上常见的电压型 PWM 脉冲整流器的工作原理,包括整流、有源逆变、升压的工作原理,两电平和三电平 PWM 脉冲整流器的特点及在轨道车辆上的典型应用。由于篇幅所限,对脉冲整流器的参数计算、中点电位平衡、瞬态电流控制仿真等没有写入本章。

第6章 软开关技术

本章介绍软开关的基本概念,并对动车组中出现的软开关技术,如零电压开关 PWM 变换器(ZVS-PWM)和零电流开关 PWM 变换器(ZCS-PWM)及其在轨道车辆设备中的应用进行了介绍。

第7章 轨道车辆主电路

本章介绍轨道车辆主电路的基本结构和牵引变流器的组成,包括 CRH₁~CRH₅ 几种车型的主电路的基本结构及主变流器,以及脉冲整流器、电机逆变器及直流环节电路的工作原理。还介绍了 HXD₁~HXD₃ 等型号的电力机车的主电路。并简单介绍了一些主电路的共性问题,如直流环节的共用问题、保护问题、多重化及载波移相技术、接地故障检测问题、电磁兼容性 & 接地问题。目的是让读者了解电力电子技术在轨道车辆应用的一些基本知识。由于篇幅所限,对主电路各个部件参数的选择、计算和仿真没有写入本章。

本书是针对轨道车辆专业的本科生教材。本书的写作确实有一定的难度,由于车辆专业学生电气基础较差,需要在基础方面写得比较详细,又要与轨道车辆电力电子装置结合,还要与学生实验相结合,而且篇幅又有限。因此本书力求既偏重基础,又与轨道车辆相结合,同时与学生电力电子实验结合。本书也适合于其他与车辆专业相关的教学和动车组高技班等学员的培训,可根据学时选讲本书内容。

由于电力电子技术博大精深，涉及的领域和内容非常广泛，不可能面面俱到。本书旨在有限的篇幅中，介绍一些与轨道车辆电力电子技术有关的最基本概念和基础知识，如轨道车辆的牵引变流器等装置的电路结构及元器件，力求读者对轨道车辆电力电子技术有一定的了解并掌握一些最基本的概念。

多年的教学经验表明，教材过于精简不适合电气基础较差的车辆专业本科生。学生反映偏难，也会使他们过多地去查找资料，并失去学习兴趣。本书为了给读者提供较为详尽和完整的参考资料，在基础理论部分引用了许多著名专家学者已有的论文、著作等文献和成果，在参考文献中均已注明。另外，原铁道部、青岛四方机车车辆股份有限公司等提供了很多资料，在此表示衷心的感谢。尤其要感谢北京交通大学电气工程学院的刘志刚老师。青岛四方机车车辆股份有限公司的龚明、焦京海、余进等电气专家也对本书的写作帮助很大，指定本人从事动车组主电路的参数计算及脉冲整流器、电机逆变器等牵引传动控制仿真的课题，并给予了指导意见，对本书的编写起到了较大的促进作用，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限、时间仓促及篇幅的限制，书中难免有疏漏和不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

2015年9月

目 录

前言

第 1 章 电力电子元器件	1
1.1 基本概念	1
1.2 半导体物理基础	6
1.2.1 导体、半导体、绝缘体	6
1.2.2 本征半导体、P 型半导体、N 型半导体	7
1.2.3 PN 结原理	8
1.3 电力二极管	14
1.3.1 电力二极管的基本特性	15
1.3.2 二极管在轨道车辆上的主要应用	17
1.4 晶闸管	19
1.4.1 晶闸管的结构与工作原理	19
1.4.2 晶闸管的基本特性	22
1.4.3 晶闸管的驱动	27
1.5 门极可关断晶闸管	28
1.6 电力场效应晶体管	32
1.6.1 电力场效应管(电力 MOSFET)的结构与工作原理	32
1.6.2 电力 MOSFET 的特性与参数	34
1.6.3 电力 MOSFET 使用中的保护措施	39
1.7 绝缘栅双极型晶体管(IGBT)	40
1.7.1 IGBT 的工作原理与特性	40
1.7.2 IGBT 的门极驱动	49
1.7.3 IGBT 的使用与维护	56
1.8 智能功率模块	71
1.9 电阻元件、电感元件与电容元件	73
1.9.1 电阻	73
1.9.2 电感	74
1.9.3 电容	77
思考题	83
第 2 章 相控整流技术	86
2.1 概述	86
2.1.1 整流电路的分类	86
2.1.2 整流电路的一些基本概念	86
2.1.3 可控整流电路的一般结构和特点	87
2.1.4 整流电路的通用分析方法	88

2.2	单相整流电路	89
2.2.1	单相半波不可控整流电路	89
2.2.2	单相半波可控整流电路	90
2.2.3	单相桥式全控整流电路	91
2.2.4	单相桥式半控整流电路	96
2.2.5	单相全波整流电路	99
2.3	三相整流电路	99
2.3.1	三相半波可控整流电路	99
2.3.2	三相桥式全控整流电路	102
2.4	相控整流的滤波	104
2.4.1	电容 C 滤波电路	104
2.4.2	电感 L 滤波电路	104
2.4.3	L-C 滤波电路	105
2.5	整流变压器漏感的影响	105
2.5.1	换相过程与换相重叠角	105
2.5.2	换相压降 ΔU_d 的计算	106
2.5.3	换相重叠角 γ 的计算	106
2.6	相控整流及有源逆变原理	108
2.6.1	整流和有源逆变的基本原理	108
2.6.2	晶闸管相控整流电路实现有源逆变的基本原理	108
2.6.3	相控整流电路实现有源逆变(晶闸管-直流电动机系统)	110
2.6.4	相控整流电路实现有源逆变的条件	111
2.6.5	相控有源逆变的一些概念	112
2.6.6	交直交变频器中的相控有源逆变	112
2.7	相控整流的触发电路	113
2.7.1	单结晶体管触发电路	114
2.7.2	正弦波触发电路	116
2.7.3	锯齿波触发电路	117
2.7.4	触发电路的同步问题	119
2.8	其他整流电路	120
2.8.1	倍压整流电路	120
2.8.2	倍流整流电路	121
2.8.3	同步整流电路	122
2.9	相控整流电路的谐波及功率因数分析	123
2.9.1	谐波及无功功率的危害	123
2.9.2	相控整流谐波分析基础	123
2.9.3	相控整流功率因数分析	124
	思考题	126

第 3 章 直直变换技术	129
3.1 直流斩波电路的工作原理	130
3.1.1 电感的伏秒平衡原理	130
3.1.2 电容的安秒平衡原理	132
3.2 基本斩波电路	133
3.2.1 降压变换器	133
3.2.2 升压变换器	139
3.2.3 升降压变换器	145
3.2.4 Cuk 斩波电路、Sepic 斩波电路和 Zeta 斩波电路	151
3.3 多象限直直变换器	155
3.3.1 桥臂式二象限直直变换器(A 型变换器)	155
3.3.2 混合桥式二象限直直变换器(B 型变换器)	157
3.3.3 四象限直直变换器(H 型变换器)	158
3.4 多相多重直直变换器	158
3.5 带隔离变压器的直直变换器	161
3.5.1 隔离变压器	161
3.5.2 各种带隔离变压器的直直变换器	164
3.6 斩波电路的控制方式	173
3.7 轨道车辆的直流斩波器	174
思考题	176
第 4 章 逆变技术	178
4.1 无源逆变原理	178
4.1.1 逆变的基本概念	178
4.1.2 逆变器的组成与分类	178
4.1.3 单相电压型逆变电路	180
4.1.4 单相电流型逆变电路	182
4.1.5 三相桥式逆变电路	183
4.2 脉冲宽度调制的理论基础	186
4.3 正弦脉冲宽度调制	187
4.3.1 SPWM 的基本原理	187
4.3.2 SPWM 调制的控制脉冲产生方法	192
4.3.3 SPWM 的调制方法	194
4.3.4 三相 SPWM 逆变工作原理	196
4.3.5 SPWM 对脉宽调制的制约条件	197
4.3.6 异步调制、同步调制及分段同步调制	200
4.4 特定谐波消去法 PWM 控制	203
4.5 电流滞环跟踪 PWM 控制	204
4.6 电压空间矢量 PWM 控制	206
4.6.1 电动机电压空间矢量的表示	207
4.6.2 电动机电压空间矢量与磁链空间矢量的关系	208

4.6.3 两点式电机逆变器的 SVPWM	209
4.7 逆变器的多重化	214
4.8 两电平逆变器和三电平逆变器	216
4.9 轨道车辆的电机逆变器	220
4.9.1 电机逆变器的结构组成及技术参数	220
4.9.2 电机逆变器的传感及监控功能	229
思考题	235
第 5 章 PWM 脉冲整流器	237
5.1 脉冲整流器的基本原理及分类	237
5.1.1 交直交系统的相控式与斩控式整流及有源逆变方案	237
5.1.2 PWM 脉冲整流器的工作原理及分类	238
5.2 电压型 PWM 脉冲整流器	242
5.2.1 单相电压型 PWM 脉冲整流器的主电路结构及工作原理	242
5.2.2 主要方程式及相量图	243
5.2.3 工作模式及能量关系	246
5.2.4 三相电压型脉冲整流器主电路结构及工作原理	249
5.2.5 脉冲整流器的升压模式	249
5.2.6 单相脉冲整流器的控制	250
5.3 单相两电平与三电平脉冲整流器	254
5.3.1 单相两电平 PWM 脉冲整流器	254
5.3.2 单相三电平 PWM 脉冲整流器	255
5.4 轨道车辆的脉冲整流器	258
思考题	275
第 6 章 软开关技术	277
6.1 软开关的基本原理	277
6.1.1 硬开关存在的问题	277
6.1.2 软开关的基本概念	278
6.1.3 软开关的基本实现环节	278
6.1.4 软开关的分类	280
6.1.5 电感 L 和电容 C 的谐振工作原理	283
6.2 轨道车辆中常见的软开关的工作原理	286
6.2.1 零电压开关 PWM 变换器(ZVS-PWM)	286
6.2.2 零电流开关 PWM 变换器(ZCS-PWM)	293
思考题	296
第 7 章 轨道车辆主电路	297
7.1 轨道车辆主电路的基本结构	297
7.1.1 主电路的基本结构	297
7.1.2 牵引变流器的基本组成	298
7.2 动车组的主电路	300
7.2.1 CRH ₁ 动车组主电路	300

7.2.2	CRH ₂ 动车组主电路	303
7.2.3	CRH ₃ 动车组主电路	310
7.2.4	CRH ₅ 动车组主电路	314
7.2.5	CRH ₃₈₀ 系列动车组介绍	322
7.3	HXD ₁ 、HXD ₂ 、HXD ₃ 电力机车的主电路	323
7.3.1	HXD ₁ 电力机车主电路	323
7.3.2	HXD ₂ 电力机车主电路	324
7.3.3	HXD ₃ 电力机车主电路	326
7.4	轨道车辆主电路的一些共性问题	328
7.4.1	直流环节的共用与独立使用问题	328
7.4.2	直流环节保护电路	329
7.4.3	多重化、载波移相及谐波抑制问题	330
7.4.4	轨道车辆的接地故障检测问题	335
7.4.5	电磁兼容性 & 接地问题	339
	思考题	348
	参考文献	350
	附录 轨道车辆电力电子常用术语索引	353

第 1 章 电力电子元器件

电力电子技术是与电力学、电子学和控制理论三个学科关系十分密切的边缘学科。它横跨电子、电力和控制三个领域，如图 1-1 所示。电力电子技术是主要研究如何有效地使用电力电子器件，应用电路和设计理论及分析开发工具，实现对电能的高效能变换和控制的一门技术，它包括对电压、电流的频率和波形的变换。其中，计算机是电子学中最大的一个分支学科，并逐步自成体系，在轨道车辆的复杂电力电子装置的控制中广泛应用。

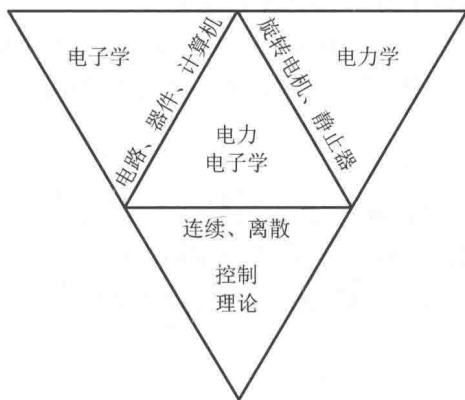


图 1-1 电力电子学与其他学科的关系

电力电子技术的两大分支是电力电子器件的制造技术和电力电子器件的应用技术，即交流技术。电力电子技术的主要内容包括电力电子器件、电力电子的变流技术和控制技术。

轨道车辆电力电子技术的主要内容是研究电力电子技术及其在轨道车辆上的应用。

1.1 基本概念

电力电子器件是指可直接用于处理电能的主电路，实现电能变换或控制的电子器件，通常专指电力半导体器件。和普通半导体器件一样，目前电力半导体器件所用的主要材料仍然是硅。由于电力电子器件具有体积小、重量轻、功耗小、效率高、响应快等特点，用它构成的变流装置可靠性高、寿命长、容易维护，特别是它可节约能源，所以得到飞速的发展。

1. 电力电子器件的特征

电力电子器件，也称为(功率或电力)开关管，与信息电子中的半导体器件相比，电力电子器件有如下特点：

- (1) 功率远大于信息电子器件，从毫瓦级到兆瓦级。电压和电流等级是其最重要的参数。
- (2) 电力电子电路与信息电子电路不同，因电压、电流等级高，为减小功率损耗，在电力电子电路中，电力电子器件都工作在开关状态(相当于普通晶体管的饱和与截止状态)，因而动态特性(开关特性)也是很重要的参数，有时甚至是最重要的参数。电力电子技术中，电力半导体器件的工作方式为开关方式，工作状态分为：①静态，分为通态(on)和断态(off)；②动态，分为开通(Turn on)和关断(Turn off)。半导体开关管与接触器等金属开关的区别是：

①金属开关的导通电阻很低, 通态电压降几乎为 0V, 而半导体开关管通态时有 1V 以上的电压降; ②金属开关断态时基本无漏电流, 而半导体器件断态时有一定漏电流; ③金属开关频率低, 一般一秒只能通断几次, 而半导体开关频率可以达到数千赫兹到数兆赫兹; ④金属开关电流是双向流动的, 而通常半导体开关管电流是单方向流动的。

(3) 需要用驱动电路进行驱动。

(4) 需要散热器冷却, 包括风冷、水(油)循环强迫式风冷、相变式(沸腾)冷却等。

2. 主要损耗

电力电子器件的功率损耗包括静态损耗和开关损耗。静态损耗又包括通态损耗和断态损耗。

(1) 通态损耗: 导通时器件上有一定的通态压降。

(2) 断态损耗: 阻断时器件上有微小的断态漏电流流过。通常电力电子器件的断态漏电流极小, 因而通态损耗是器件功率损耗的主要因素。对于某些器件, 驱动电路向其注入的功率也是造成器件发热的原因之一。

开关损耗包括开通损耗和关断损耗。

(1) 开通损耗: 在器件开通的转换过程中产生的损耗。

(2) 关断损耗: 在器件关断的转换过程中产生的损耗。

当器件开关频率较高时, 开关损耗会随之增大而可能成为器件功率损耗的主要因素。

3. 分类

1) 按开关控制性能分类

(1) 不控型器件: 无控制极, 器件的导通与关断完全由其在主电路中承受的电压和电流决定, 正偏置导通、反偏置关断, 如电力二极管(D)。

(2) 半控型器件: 控制极(门极)只能控制管子导通而不能控制管子关断, 器件的关断完全由其在主电路中承受的电压和电流决定, 如晶闸管(SCR)及其家族器件(FST、RCT、TRIAC、LCT)。

(3) 全控型器件: 通过控制极(门极或称基极或称栅极)是否施加驱动信号, 既能控制管子导通, 又能控制管子关断, 如 GTO、GTR、IGBT、MOSFET 及其他新型场控器件 MCT、IGCT、SIT、SITH、IPM 等。

与不控型器件对应, 半控型和全控型器件都称为可控器件。

2) 按器件内部载流子参与导电的种类分类

(1) 单极型器件: 开关频率高, 只有一种载流子(空穴或自由电子)参与导电, 如 MOSFET、SIT 等。缺点是导通电阻大、容量小, 优点是开关频率高, 通常是电压驱动型。

(2) 双极型器件: 有两种载流子参与导电, 如二极管、晶闸管、GTO、GTR、IGCT、SITH 等。因为双极型器件存在电导调制效应, 所以容量大, 但存在载流子的扩散和复合等问题, 开关频率低。

(3) 复合型器件: 由 MOSFET 与晶体管、晶闸管等双极型器件复合而成, 如 IGBT、IPM、MCT 等。它把单极型器件的高开关频率、电压驱动的优点与双极型器件的具有电导调制效应和大容量的优点结合起来, 是对开关频率和容量的折中, 因此整体性能最好。

3) 按门极驱动信号的种类(电流、电压)分类

(1) 电流控制型器件: 如晶闸管、GTO、GTR、IGCT、SITH 等。

(2) 电压控制型器件: 如 MOSFET、IGBT、IPM、SIT、MCT 等。

电压控制型器件的驱动功率要远小于电流控制型器件，驱动电路也简单，工作频率高。

此外，按照施加在电力电子器件的控制端和公共端的有效信号的波形分类，分为脉冲触发型(晶闸管)和电平控制型(MOSFET、GTR、IGBT 等)。

4. 常见的电力电子器件的开关频率和容量

各种常见的电力电子器件的开关频率和容量，如图 1-2 所示。开关频率和容量不同，应用的场合就不同。例如，晶闸管虽然开关频率低，还是半控型器件，但目前还是容量最大的器件，发电厂依然在使用。而电力 MOSFET 开关频率高，但容量小。目前容量和开关频率的乘积比较高的是 IGBT，而且是电压驱动型器件，在各领域得到了广泛的应用。

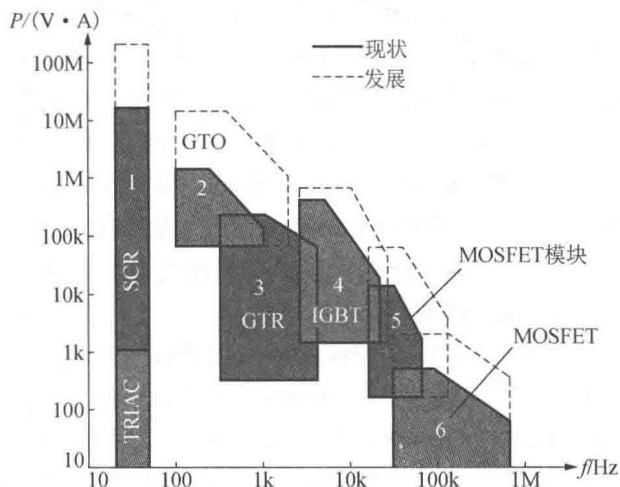


图 1-2 各种常见电力电子器件的容量和开关频率

5. 电力电子器件的发展与电力电子学的发展的关系

电力电子技术包括电力电子器件的制造技术和电力电子器件的应用技术(变流技术)两部分。电力电子器件制造技术的发展决定着电力电子技术的发展。电力电子器件性能越优越，电力电子电路就越简单、可靠。同时，电力电子技术的发展又促进了电力电子器件制造技术的发展。晶闸管诞生前，称为电力电子技术的史前期或黎明期。电力电子技术还没有完全独立为一门学科，属于模拟电路的范畴。

晶闸管诞生后(1957 年美国 GE 公司发明)，电力电子技术逐渐形成了独立的理论，并逐渐从模拟电路中独立出来，成为一门独立的学科。电力电子技术进入传统的电力电子技术时代，电能的变换从此进入以电力半导体器件组成的变流器时代。传统的电力电子学的特点是以低频技术为主，以晶闸管(SCR)为核心。晶闸管属于第一代电力电子器件，缺点是开关频率低，是门极不可关断的半控型器件，但主要优点是目前仍然是容量最大的器件，在低频、大容量的场合如发电厂，仍然采用晶闸管。晶闸管及其派生器件仍广泛应用于各种变流器，并且还在发展中，其派生器件如快速 SCR、逆导 SCR(RCT)、双向 SCR(TRIAC)、不对称 SCR(ASCR)形成一个 SCR 大家族，在相当长的一段时间不会退出历史舞台。

随着变流技术的发展和应用的需，迫切需要门极可关断的电力电子器件(全控型器件)，因此出现了第二代电力电子器件，包括电力晶体管(GTR)、可关断晶闸管(GTO)、电力场效应晶体管(MOSFET)等。第二代电力电子器件的优点是门极可关断，属全控型器件，缺点是容量和高频率的矛盾没有解决。例如，MOSFET 是单极型，电压驱动，开关频率高，缺点

是其属于单极型器件,无电导调制效应,导通电阻大,只适合小容量的场合,而且这个矛盾无法解决。而 GTO 和 GTR 是双极型全控型器件,优点是具有电导调制效应,导通电阻小,容量大,可以通大电流;缺点是因为两种半导体载流子的扩散和复合,开关频率低,电流越大开关频率越低,这个矛盾始终无法解决。例如, GTO 虽然开关频率高于 SCR,但容量小于 SCR,而且是电流驱动型,驱动电路复杂。

此后,电力电子器件朝全控型、高频化方向不断发展,出现了集高频、高压和大电流于一身的复合型电力电子器件,即第三代电力电子器件,包括性能优异的复合型器件如 IGBT 和智能器件(Intelligent Power Module, IPM)、MCT、HVIC 等,其中最具代表性的是绝缘栅极双极型晶体管(IGBT)(1983 年诞生)。第三代电力电子器件的特点是把单极型器件的高开关频率、电压驱动等优点和双极型器件的大容量的优点结合在一起,互相取长补短,在开关频率和容量方面折中。例如,IGBT 是单极型 MOSFET 和双极型 GTR 的复合,通过 MOSFET 驱动 GTR,兼有 MOSFET 的高开关频率和 GTR 的容量大两方面的优点,而且 IGBT 容量大于 GTR。而 MOS 控制晶闸管(MOS Controlled Thyristor, MCT)是 MOSFET 驱动晶闸管的复合器件,集场效应晶体管与晶闸管的优点于一身,被认为是性能最好、最有发展前途的一种新器件,但目前还未广泛应用。未来的电力电子器件将在理论、结构和工艺等方面不断创新,电压、电流和开关频率三大参数将不断提高。

IGBT 的诞生标志着电力电子技术从传统的电力电子技术时代已经完全进入现代电力电子技术时代。现代电力电子技术的特点是以高频技术为主,以高频化、全控型器件为基础,朝着模块化、高频化、控制技术数字化和绿色化方向发展。以可关断晶闸管(GTO)、电力晶体管(GTR)、电力场效应晶体管(电力 MOSFET)、绝缘栅极双极型晶体管(IGBT)、静电感应晶体管(SIT)、静电感应晶闸管(SITH)、集成门极换流晶闸管(IGBT)、MOS 控制晶闸管(MCT)等形成一个新型的全控型电力电子器件的大家族。

6. 电力电子器件的发展趋势

电力电子器件的发展趋势主要体现在以下几方面。

1) 制作材料新型化

以硅晶体为基础的电力开关管随结构设计和制造工艺的不断完善,其开关性能接近由材料特性决定的理论极限。依靠新型材料来提高性能,如砷化镓(GaAs)、镓铝砷(GaAlAs)、碳化硅(SiC)和金刚石等是未来电力器件发展的一个主要趋势。其中以碳化硅最有前途。研究表明,用碳化硅制作的电力电子器件的性能要比硅器件优良得多。有人预言, SiC 是 21 世纪最好的电力电子半导体材料。SiC 有如下优点:①SiC 的禁带宽度宽,其固有的最高工作结温可达到 600°C ;②对于相同掺杂浓度的材料,其 PN 结耐压可以做得更高,易于达到 $5\sim 10\text{kV}$,也就是说,对于相同耐压的器件,其导通电阻可以做得更小,可以通更大的电流;③SiC 的导热性更好;④SiC 的本征载流子密度比硅小很多,故 SiC 器件承受反向高压时漏电流小。但由于 SiC 材料和功率器件的机理、理论和制造工艺方面还有许多问题,目前仍未能普遍采用 SiC 材料制造电力电子器件。

2) 各种电力电子器件将朝着大容量和高频率方向发展

20 世纪 70 年代,电力电子器件评价的主要标准是大容量;20 世纪 80 年代,器件的发展追求高频化,评价器件的主要标准是功率与频率的乘积;20 世纪 90 年代,器件的发展追求高性能化,即大容量、高频率、易驱动、低损耗,因此评价器件的主要标准是容量、开关速度、驱动功率、通态压降、芯片利用率等。为了实现这一高性能化目标,出现了许多重要的

工艺,如平面工艺、大规模集成工艺、多层金属化、厚膜技术和高能量技术,工艺和技术将得到突飞猛进的发展,并可望有新的突破。在中、高压功率应用中,高压 IGBT 正逐步取代传统 GTO,而传统 GTO 的巨大改进,则产生了集成门极换流晶闸管(IGCT)技术。

3) 各种电力电子器件将向模块化、复合化方向发展

目前先进的模块(如 IPM)包括开关元件、与其反并联的续流二极管、驱动、自保护等多个单元,一致性和可靠性越来越高。模块的电压、电流及频率都将进一步提高,体积可望随新材料的出现而减小,功率集成模块能以较低的成本或更高的可靠性深入各个领域,进而取代一大批分立式电力电子器件。

7. 电力电子器件和电力电子技术在轨道车辆上的应用

电力电子器件的典型应用是在电解(有色金属和化工原料需要直流电解)、牵引(动车组、电力机车、电传动的内燃机车、地铁机车、城市无轨电车等轨道车辆)和直传动(轧钢、造纸等)三大领域。

随着电力电子器件和电力电子技术的发展,轨道车辆电传动也随着发展,从最早出现的蒸汽机车,逐渐发展为内燃机车、电力机车和现在的动车组。从早期的直-直传动(直流发电机或直流供电→直流电动机)发展到交-直传动(交流发电机或交流供电→硅整流→直流电动机)。早期的交-直传动采用功率二极管整流,晶闸管问世后,便被成功地应用在内燃机车或电力机车的交-直系统的相控调压与地铁车辆的直流系统的斩波调压。交-直机车的缺点是直流或脉流牵引电机的功率限制,功率因数低,谐波大,制造、维护困难。

随着全控型器件的进步和发展,特别是 GTO 的发展,又出现了先进的交-直-交传动系统(交流供电→硅整流→逆变器→交流电动机),并逐步取代交-直系统。与交-直系统相比,交-直-交传动系统的交流电机功率大、转矩高、功率因数高、启动过载能力强,簧下重量轻,黏着性能好,维修工作量小。利用脉冲宽度调制(PWM)技术,可实现变压变频(VVVF)和能量的双向流动。目前,GTO、IGBT/IPM 等高频大功率器件广泛地应用在交流传动电力机车和动车组中。日本新干线动车组就是最好的实例,从 1964 年的 0 系列到 2004 年的 800 系列,其间经历了二极管、SCR、GTO、IGBT/IPM 等器件应用技术的不断更新和进步,动车组性能也不断提高。德国 ICE 系列主要采用 GTO 元件,后在 ICE3 车上的变流器采用 IGBT。

大功率器件的高频化使整流器从功率因数低、谐波大的相控式整流转变为功率因数高(接近±1)、谐波小的斩控式整流(四象限脉冲整流器)。电机逆变器体积越来越小,效率越来越高,控制方式也从模拟式、数字式发展到计算机控制(包括嵌入式计算机、DSP、CPLD 等)。大功率器件的高频化也促进了电机逆变器控制系统的发展,从标量控制发展到矢量控制(VC)和直接转矩控制(DTC)系统,控制精度不断提高。使轨道车辆朝更加高效节能、变流装置小型轻量化、机电一体化和智能化方向发展。

在轨道交通领域,新型大功率半导体器件 IGBT/IPM 具有开关频率高、损耗小、无二次击穿、可不用吸收电路、控制简单、开关频率高,变频器和滤波器体积、重量小等优点,取代 GTO 已成为趋势。“中华之星”动车组的主变流器采用 GTO 元件,而国产的动车组“蓝箭”、“中原之星”和“先锋”采用的都是 IGBT/IPM 元件。目前,国内通过引进技术、消化、吸收并再创新的 CRH₁~CRH₅ 系列、CRH₃₈₀ 系列动车组和 HXD 系列电力机车的牵引变流器都采用 IGBT/IPM 器件,进一步改善了牵引传动系统的性能。

总之,电力电子器件是电力电子技术发展的决定性因素,而电力电子技术的发展,又为动车组等轨道车辆的变流和传动技术的发展不断注入新的生机。

1.2 半导体物理基础

1.2.1 导体、半导体、绝缘体

半导体,顾名思义,就是导电能力介于导体(金属)和非导体(绝缘体)之间的物质,如硅、锗、硒、灰锡、金刚石及大多数金属氧化物和硫化物都是半导体。其中砷化镓和碳化硅是很有前途的功率器件半导体材料。

人们通常用电阻率 ρ 来区分导体、半导体和绝缘体,导体的电阻率为 $10^{-8} \sim 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$;绝缘体的电阻率为 $10^8 \sim 10^{12} \Omega \cdot \text{m}$;而半导体的电阻率为 $10^{-6} \sim 10^8 \Omega \cdot \text{m}$ 。

实际上,这种粗略的分类不太严谨。例如,绝缘体的电压超过一定范围时,可能在绝缘体表面发生闪络现象或在绝缘体内部发生击穿现象,也可以导电。又如,某些结构完整且不含杂质的半导体也具有与绝缘体不相上下的高电阻率,而当它们含有足够浓度的某些特殊杂质时,电阻率又会下降到金属电阻率的范围,甚至比有些导电性欠佳的金属导体的电阻率还要低。半导体的导电能力还与某些外部条件有关。与金属和绝缘体相比,半导体的电阻率对环境温度、光照、外加磁场和电场、通电电流的大小都有一定关系。半导体的电阻率有一定的可变性和可控性,人们通过掺杂、外加电场、光照等手段控制其导电性,而金属导体可控性却很小,这也是电力电子器件都采用半导体的原因。

二极管就是一个PN结,在半导体上利用掺杂工艺形成PN结,掺杂工艺通常包括合金法、扩散法和离子注入法等。平衡状态的PN结通常由P区、N区和中间的空间电荷区(也称为势垒区、阻挡层或耗尽层)组成。通常PN结内部包括P区的大量掺杂载流子-空穴(多子)和少量本征载流子-电子(少子)及少量本征空穴,N区的大量掺杂载流子-电子(多子)和少量本征载流子空穴(少子)及少量本征电子,空间电荷区的正离子(N区)和负离子(P区)。空穴和电子是可移动的载流子,而正、负离子是不可移动的。

金属中的载流子为自由电子,是金属原子结合成固体时释放出来供全体原子共有的最外层电子,即价电子。为了将这些外层价电子与被各原子束缚着、不能导电的内层电子相区别,人们将这些外层价电子称为载流子。这些价电子即便是在热力学零度下也是自由的,密度较大,与原子密度同数量级,且不随温度变化而明显改变,典型值为 $10^{28} \sim 10^{29} / \text{m}^3$ 。

载流子在电场中的定向运动叫漂移运动,如图1-3所示,根据微分形式的欧姆定律:电流密度 $J = \gamma E$,而

$$\gamma = \frac{1}{\rho} = \frac{J}{E} = \frac{I}{S \cdot E} = \frac{Q}{S \cdot E \cdot \Delta t} = \frac{q \cdot S \cdot d \cdot n}{S \cdot E \cdot \Delta t} = \frac{q \cdot n \cdot \bar{u}}{E} = q \cdot n \cdot \mu \quad (1-1)$$

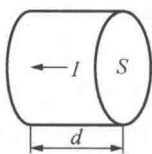


图1-3 单位时间电流流过的圆柱体

其中, γ 为电导率,为电阻率 ρ 的倒数; J 为电流密度; E 为电场强度; S 为导体横截面积; Q 为单位时间流过的电荷量; Δt 为单位时间; d 为单位时间流过电荷的圆柱体的长度; q 为电子的电量; n 为电子密度; $\bar{u}$ 为电子定向运动平均速度。

因此金属导体的电导率 γ 为

$$\gamma = q \cdot n \cdot \mu \quad (1-2)$$

其中, q 为电子的电量; n 为导电电子的密度; μ 为导电电子的迁移率。迁移率为导电电子