

动车组系列培训教材·机械师

动车组

DONGCHEZU

电力电子技术基础

吴鑫主编



北京交通大学出版社
<http://www.bjtup.com.cn>

动车组系列培训教材·机械师

动车组电力电子技术基础

吴 鑫 主编

北京交通大学出版社

内 容 简 介

本书共分8章,分别介绍了在动车组主电路和电气设备上经常出现的电力电子器件、相控整流、直直变换、逆变技术、脉冲整流器、软开关、电磁兼容等基本概念和原理,并与动车组CRH₁、CRH₂、CRH₃和CRH₅的主电路、主变流器、辅助变流器和充电机等具体实例及动车组电气系统及设备的一些常见故障相结合,使读者能了解动车组的主要电气设备的电路结构和工作原理,并学会用电力电子器件和各种电能变换电路的基本概念和原理对具体问题进行分析。

本书是“动车组牵引供电系统及设备”和“动车组辅助电气系统与设备”的电力电子理论基础教材。本教材可以为动车组牵引供电和辅助电气等后续课程的学习打下基础。

本书可作为铁路动车组机械师上岗理论培训教材,也可供动车组高级班学员、轨道车辆类学生和相关工程技术人员参考使用。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

动车组电力电子技术基础/吴鑫主编. —北京:北京交通大学出版社,2013.8

(动车组系列培训教材·机械师)

ISBN 978-7-5121-1559-0

I. ①动… II. ①吴… III. ①动车-电力电子技术-技术培训-教材 IV. ①U266
②TM76

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第181855号

策划编辑:贾慧娟 陈跃琴 吴桂林

责任编辑:陈跃琴 特邀编辑:李运文

出版发行:北京交通大学出版社

电话:010-51686414

北京市海淀区高粱桥斜街44号

邮编:100044

印刷者:北京时代华都印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印张:20.25 字数:505千字

版 次:2013年8月第1版 2013年8月第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-5121-1559-0/U·143

印 数:1~2000册 定价:40.00元

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评,我们表示欢迎和感谢。

投诉电话:010-51686043, 51686008; 传真:010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

《动车组系列培训教材·机械师》

编 委 会

顾 问：王梦恕 施仲衡
主 任 孙守光
副 主 任 刘志明 章梓茂
委 员 宋永增 史红梅 陈淑玲 贾慧娟
本书主编 吴 鑫

出版说明

2005年，在铁道部的安排下，北京交通大学根据国外动车组设计资料、国内外技术交流文件，编写了动车组培训讲义，并对从事动车组运用的在职技术人员进行培训；随着中国高速动车组事业的飞速发展，到2010年，该讲义已经修订4版，先后培训了设计制造企业和运用部门各类人员4000多人。

为适应动车组机械师专业人才培养的需要，北京交通大学机械与电子控制工程学院、北京交通大学出版社，在铁道部有关部门的指导下，组织北京交通大学铁道部动车组理论培训基地的教师，在南车青岛四方机车车辆股份有限公司、北车长春轨道客车股份有限公司、北车唐山轨道客车有限责任公司和青岛四方庞巴迪铁路运输设备有限公司等单位领导和专家的大力支持下，编写了本套“动车组系列培训教材·机械师”。

教材编写突出理论与实用相结合的原则。本着“理论通俗易懂，实操图文并茂”的原则，系统介绍了4种高速动车组的基本原理和结构组成。

本系列教材的出版，得到中国工程院王梦恕院士的关注和首肯，以及北京交通大学学校领导、专家、教授的指导和支持，在此一并致谢。

北京交通大学机械与电子控制工程学院为该系列教材的出版，投入了大量的人力、物力和财力支持。

本系列教材从2012年1月起陆续出版，包括《动车组概论》、《动车组车体结构与车内设备》、《动车组转向架》、《动车组制动系统》、《动车组电力电子技术基础》、《动车组供电牵引系统与设备》、《动车组辅助电气系统与设备》、《动车组运行控制系统》、《动车组车内环境控制系统》、《动车组控制与管理系统》、《动车组司机室》、《动车组运用与维修》。

希望本套教材的出版对高速动车组的发展，对提高动车组的安全运行和维修、维护水平有所帮助。

动车组系列培训教材编写委员会
2012年5月

院士推荐

中国高速铁路近年来发展迅速，按照铁路中长期发展规划，到2020年，全国铁路运营里程将由目前的9.1万 km增加到12万 km，其中时速200～350 km的客运专线和城际铁路将达到1.8万 km，投入运营的高速动车组将达到1 000组。

高速铁路涉及诸多高新技术领域，其中作为铁路运输主要装备的高速动车组是这些高新技术应用的综合体现，它涉及系统集成技术、新型车体技术、高速转向架技术、快速制动技术、牵引传动技术、自动控制技术、网络与信息技术等。大量新技术装备的创新和应用，极大地提高了铁路客货运输的能力和快速便捷的出行，但在实际使用中对于现有参与运营、维修、管理等各类人员提出了更高、更新的要求，以确保高速铁路运营过程的安全与可靠性。目前相对于我国高速铁路里程建设速度，对于在实际运营、管理中迫切需求的大量技术人才培养明显滞后，因此会在高速铁路的长期运营中存在严重的安全隐患，温州“7·23”事故已经给了我们一个沉痛的教训。另外，相对于高速铁路建设发展的需求，目前能够满足高速铁路运营、维修人才培养需求的优质教材也存在严重不足，尚不能满足我国高速铁路发展对各类人才培养的需要。

北京交通大学机械与电子控制工程学院作为“铁道部高速动车组理论培训基地”和北京市动车组优秀教学团队所在单位，已长期从事有关铁道车辆专业的教学与科研工作，不但学术水平高，而且教学经验丰富。从2005年开始结合我国高速动车组技术的引进、消化、吸收和创新项目及高速列车国家科技支撑项目，进行研究和实践，取得了许多成果。在参考了国内外动车组设计资料、与国内外有关设计、制造、管理局等方面进行了相关技术和学术交流，在广泛听取来自企业和运用部门提出应加快对运营单位各专业人员进行岗位培训要求的基础上，组织相关专家、教授、高级技师等进行高速动车组运营工程师、技师培训讲义的编写，在内容的适用性、安全性、可靠性与全面性方面保持与国际高速动车组技术同步，并承担由铁道部下达的各项培训任务，至今已为各单位培训高速动车组运营、维修、管理人才4 000余人，为保证我国快速发展的高速铁路事业做出了相应的贡献。

今天，这套倾注了众多专家、教授、技师及铁路部门有关领导和工程技术人员大量心血的“动车组系列培训教材·机械师”即将由北京交通大学出版社付梓面世。这套教材的出版，恰逢其时，我们有理由相信它能够为促进我国高速铁路动车组的安全可靠运营和维护提供一个良好的支撑！

祝我国的高速铁路事业进一步健康、蓬勃、快速发展。

中国工程院院士

2012年5月

前 言

电力电子技术 (power electronic technology) 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。电力电子技术包括如下三大部分: ①电力电子器件 (power electronic device); ②电力电子 (功率) 变流技术 (power conversion technique), 包括改变频率、电压、电流及变换相数等; ③控制技术。

电力电子学可以认为是应用在电力技术领域中的电子学, 它是电气工程中电力、电子和控制三大主要领域之间的边缘学科。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。电能是人类所有能源中最优质的能源, 也是最容易控制和转换的, 而电力电子技术就是进行电能转换的技术, 具有强大的生命力, 并且不断向前发展。电力电子技术不但在动车组的牵引传动和电力电子装置上广泛应用, 而且在太阳能、风能等清洁能源发电、直流输电、电力机车、城市轻轨交通、矿井提升、船舶推进、电机变频调速与节能应用、交直流供电电源、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都有广泛的应用。

本课程“动车组电力电子技术基础”是动车组系列课程中的基础课程, 也是为了更好地理解“动车组供电牵引系统与设备”、“动车组辅助电气系统与设备”等动车组后续课程打下一定的基础。随着动车组的引进和国产化, 以及动车组电力电子装置在动车组所占比重的大幅提高, 对其内部结构及关键技术的消化、吸收的需求也日益迫切。本教材着重对在动车组中常见的电路结构和工作原理进行基础性和原理性的讲解。

本书学时为 8 ~ 32 个学时, 可以根据不同的学习对象对内容进行选讲。书中主要介绍动车组常用的电力电子知识, 包括电力电子元器件基础、相控整流技术基础、直直变换技术基础、逆变技术基础、PWM 脉冲整流器、软开关技术基础、动车组主电路和电磁兼容性基础等, 各章主要内容如下。

第 1 章“电力电子元器件基础”: 本章主要介绍电力电子元器件的基本概念、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) 以及电力电子的一些基本名词和概念, 本章应重点掌握 IGBT 的特性, 它在动车组上得到了广泛的应用。

第 2 章“相控整流技术基础”: 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、单相半波可控整流电路、单相桥式全控整流电路、单相桥式半控整流电路、三相半波可控整流电路和三相桥式全控整流电路。本章的重点是波形分析, 然后才可以进行电量计算和电路性能的评价。其中难点是负载的不同导致输出波形的变化, 特别是 R-L 负载, 并介绍一些机车上常见的整流电路故障。

第 3 章“直直变换技术基础”: 本章主要介绍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、带隔离变压器的直直变换器、斩波电

路的控制方式和动车组上常见的直直变换器。尤其要掌握基本直流斩波电路的工作原理和电感的伏秒特性等基本概念和原理。

第4章“逆变技术基础”：本章主要介绍无源逆变的原理、SPWM技术、电压空间矢量PWM控制、逆变器的多重化，两点式逆变器和三点式逆变器，动车组的电机逆变器，为进一步理解动车组上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”：本章主要介绍脉冲整流器的基本原理及分类、动车组上常见的电压型PWM脉冲整流器的工作原理、两电平和三电平脉冲整流器的特点及应用，为进一步理解动车组上的网侧变流器及其实现整流和有源逆变的原理打下基础。

第6章“软开关技术基础”：本章主要介绍软开关的基本概念，并对动车组中常见的软开关技术，如零电压开关PWM变换器（ZVS-PWM）和零电流开关PWM变换器（ZCS-PWM）在动车组设备中的应用。

第7章“动车组主电路”：本章主要介绍CRH₁~CRH₅几种车型的主电路的基本结构及牵引变流器，包括脉冲整流器、电机逆变器及直流环节电路的工作原理。

第8章“电磁兼容性基础”：本章主要介绍动车组中所涉及的一些电磁兼容性的问题，比如滤波、布线、接地等方法，目的是让读者掌握一些电磁兼容性的基本概念和原理。

本书是动车组维修方面的理论培训教材，适合于动车组机械师班、动车组高技班等学员，可以根据学时对本书内容选讲。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，本书只介绍一些与动车组上电力电子装置有关的最基本的概念和基础知识，比如动车组上变流器等装置的基本电路结构及元器件，力求读者掌握一些最基本的概念和对动车组的变流器等装置有一定的了解，并学会用基本的概念和原理对实际的问题进行分析。本书可以作为维修人员入门的初级教材，因此本书更适合于初学者。

本书为了给读者提供较为详尽和完整的参考资料，特别是基础理论部分引用了许多著名学者的已有的论文、著作等文献和成果，还有原铁道部、青岛四方机车车辆股份有限公司等单位提供的技术资料，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。

由于作者水平有限、时间仓促及篇幅所限，书中难免有疏漏和不妥之处，恳切希望读者批评指正。

吴鑫
2013.7.20

目 录

第 1 章 电力电子器件基础	1
1.1 基本概念	1
1.2 半导体物理基础	5
1.2.1 导体、半导体、绝缘体	5
1.2.2 本征半导体、P 型半导体、N 型半导体	6
1.2.3 PN 结原理	8
1.3 电力二极管	13
1.3.1 电力二极管的基本特性	14
1.3.2 电力二极管的基本应用	15
1.4 晶闸管	18
1.4.1 晶闸管的结构与工作原理	18
1.4.2 晶闸管的基本特性	20
1.4.3 晶闸管的驱动及保护	25
1.5 门极可关断晶闸管 (GTO)	29
1.6 电力场效应晶体管 (电力 MOSFET)	33
1.6.1 电力 MOSFET 的结构与工作原理	33
1.6.2 电力 MOSFET 的特性与参数	35
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	48
1.7.3 IGBT 的使用与维护	56
1.8 智能功率模块 (IPM)	70
第 2 章 相控整流技术基础	73
2.1 基本概念	73
2.1.1 整流电路的分类	73
2.1.2 整流电路的一些基本概念	73
2.1.3 可控整流电路的一般结构和特点	74
2.1.4 整流电路的通用分析方法	75
2.2 单相整流电路	76
2.2.1 单相半波不可控整流电路	76
2.2.2 单相半波可控整流电路	77

2.2.3	单相桥式全控整流电路	78
2.2.4	单相桥式半控整流电路	83
2.3	三相整流电路	85
2.3.1	三相半波可控整流电路	85
2.3.2	三相桥式全控整流电路	88
2.4	相控整流的滤波	89
2.5	相控整流及有源逆变原理	91
2.6	相控整流的触发电路	95
2.7	整流电路的故障检测、维修方法	97
2.7.1	相控整流常见故障原因分析	97
2.7.2	相控整流故障判断方法	99
第3章	直直变换技术基础	101
3.1	直流斩波电路的工作原理	102
3.1.1	直流斩波电路稳定性分析	102
3.1.2	电感的伏秒平衡原理	104
3.2	基本斩波电路	106
3.2.1	降压变换器	106
3.2.2	升压变换器	110
3.2.3	升-降压变换器	113
3.2.4	Cuk 斩波电路、Sepic 斩波电路和 Zeta 斩波电路	117
3.3	多象限直流变换器	120
3.3.1	桥臂式二象限直流变换器 (A 型变换器)	121
3.3.2	混合桥式二象限直直变换器 (B 型变换器)	122
3.3.3	四象限直直变换器 (H 型变换器)	123
3.4	带隔离变压器的直直变换器	123
3.4.1	隔离变压器	123
3.4.2	各种带隔离变压器的直直变换电路	127
3.5	斩波电路的控制方式	135
3.6	动车组的直直变换器	136
第4章	逆变技术基础	140
4.1	无源逆变原理	140
4.1.1	单相全桥电压型逆变电路	142
4.1.2	三相桥式逆变电路	144
4.2	脉冲宽度调制 (PWM) 的理论基础	148
4.3	正弦脉冲宽度调制 (SPWM)	148
4.3.1	SPWM 的基本原理	148
4.3.2	SPWM 调制的控制脉冲产生方法	153
4.3.3	SPWM 的调制方法	155

4.3.4	三相 SPWM 逆变工作原理	157
4.3.5	SPWM 对脉宽调制的制约条件	158
4.3.6	异步调制、同步调制及分段同步调制	160
4.4	电压空间矢量 PWM 控制 (SVPWM)	163
4.4.1	电动机电压空间矢量的表示	164
4.4.2	电动机电压空间矢量与磁链空间矢量的关系	165
4.4.3	两点式电机逆变器的 SVPWM	166
4.5	逆变器的多重化	171
4.6	两点式逆变器和三点式逆变器	174
4.7	动车组的电机逆变器	177
4.7.1	电机逆变器的结构组成及技术参数	177
4.7.2	电机逆变器的传感及监控功能	186
第 5 章	PWM 脉冲整流器	193
5.1	脉冲整流器的基本原理及分类	193
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	193
5.1.2	PWM 脉冲整流器的工作原理及分类	195
5.2	电压型 PWM 脉冲整流器	197
5.2.1	单相电压型 PWM 脉冲整流器主电路结构及工作原理	197
5.2.2	主要方程式及相量图	198
5.2.3	工作模式及能量关系	200
5.2.4	三相电压型脉冲整流器主电路结构及工作原理	202
5.2.5	脉冲整流器的升压模式	203
5.2.6	单相脉冲整流器的控制	204
5.3	两电平与三电平脉冲整流器	207
5.4	动车组的脉冲整流器	213
5.5	动车组变流器的检修方法	226
第 6 章	软开关技术基础	231
6.1	软开关的基本原理	231
6.1.1	软开关的基本概念	231
6.1.2	软开关的基本环节	232
6.1.3	电感 L 和电容 C 的谐振工作原理	233
6.1.4	软开关的种类	236
6.2	动车组中常见的软开关的工作原理	237
6.2.1	零电压开关 PWM 变换器 (ZVS - PWM)	237
6.2.2	零电流开关 PWM 变换器 (ZCS - PWM)	245
第 7 章	动车组主电路	249
7.1	CRH ₁ 动车组主电路	249
7.1.1	CRH ₁ 动车组主电路结构	249

7.1.2	CRH ₁ 动车组牵引变流器	250
7.2	CRH ₂ 动车组主电路	252
7.2.1	CRH ₂ 动车组主电路结构	252
7.2.2	CRH ₂ 动车组牵引变流器	256
7.3	CRH ₃ 动车组主电路	261
7.3.1	CRH ₃ 动车组主电路结构	261
7.3.2	CRH ₃ 动车组牵引变流器	263
7.4	CRH ₅ 动车组主电路	268
7.4.1	CRH ₅ 动车组主电路结构	268
7.4.2	CRH ₅ 动车组牵引变流器	270
第 8 章	电磁兼容性基础	277
8.1	电磁兼容概述	278
8.2	电磁兼容的控制技术	279
8.2.1	用电路和器件抑制电磁干扰	280
8.2.2	滤波	280
8.2.3	屏蔽	283
8.2.4	搭接	284
8.2.5	布线	285
8.2.6	接地	287
8.2.7	电气隔离	296
8.2.8	静电防护	300
附录 A	动车组电力电子常用术语索引	302
附录 B	思考题	307
参考文献	309

第 1 章 电力电子器件基础

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

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 $\text{mW} \sim \text{MW}$ 。电压和电流等级是其最重要的参数。

(2) 电力电子器件，也称为（功率）开关管。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）。半导体的开关管和接触器等金属开关的区别是：①金属开关的导通电阻很低，而半导体开关管有 1V 以上的电压降；金属开关断态时，基本无漏电流，而半导体器件处于断态时有一定漏电流。②金属开关频率低，一般一秒只能通断几次，而半导体开关管频率可以达到 $\text{kHz} \sim \text{MHz}$ ；③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。而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。此外，对某些器件来讲，驱动电路向其注入的功率也是造成器件发热的原因之一。

(3) 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（门极或基极或栅极）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，只有一种载流子参与导电，如 MOSFET、SIT 等。缺点是导通电阻大、容量小；但优点是开关频率高，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因素，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大容量和具有电导调制效应的优点结合起来，对容量和开关频率比较折中，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 1-1 所示。开关频率和容量不同，应用的场合就不同。比如晶闸管虽然开关频

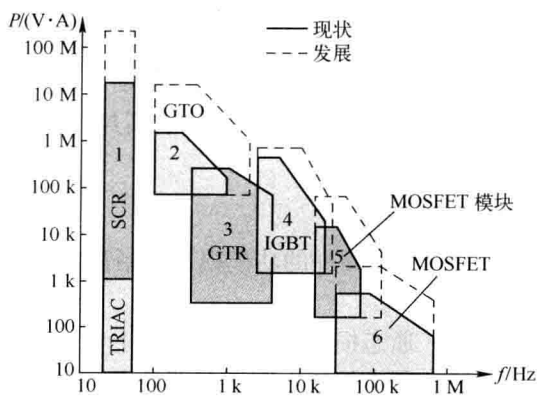


图 1-1 各种常见电力电子器件的容量和开关频率

率低，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都比较高的是 IGBT，而且是电压驱动型器件，在各领域得到了广泛的应用。

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，逐渐从模电中独立出来，成为一门独立的学科，电力电子技术从此进入传统的电力电子技术时代，电能的变换从此进入到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，比如发电厂，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求，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，缺点是高容量和高频率的矛盾没有解决。比如 MOSFET 是单极型，电压驱动，开关频率高，但缺点是属于单极型器件，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，但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。比如 GTO 虽开关频率高于 SCR，但容量却小于 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，其中最具有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。比如 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 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)、绝缘栅级双极型晶体管(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(IGCT)、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

以硅器件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:①碳化硅的禁带宽度宽,其固有的最高工作结温可达到 600℃;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 5~10 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;③碳化硅的导热性更好;④碳化硅的本征载流子密度比硅小很多,故碳化硅器件的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碳化硅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(电流与电压的乘积);20 世纪 80 年代,器件的发展追求高频化,评价器件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,而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可能深入到各个领域,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电力机车、动车组等轨道车辆的应用

电力电子器件典型应用是在电解(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)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、维修工作量小, 功率因数高、启动过载能力强, 簧下重量轻, 黏着性能好。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, 期间经历了二极管、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(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、控制简单等优点, 变频器和滤波器体积、重量小, 取代GTO已成为趋势。“中华之星”功率组的主变流器则采用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、消化和吸收的CRH₁~CRH₅系列动车组的牵引变流器完全都采用IGBT/IPM器件, 进一步改善了传动系统性能。

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、金刚石等及大多数金属氧化物和硫化物都是半导体, 其中砷化镓(GaAs)和碳化硅(SiC)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, 导体的电阻率约在 $10^{-8} \sim 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ 的