



全国铁道职业教育教学指导委员会规划教材
高等职业教育电力机车专业“十二五”规划教材



机车

电力电子技术

刘敏军 王秀珍 主编

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

责任编辑 阚济存
封面设计 冯龙彬

JICHE DIANLI DIANZI JISHU

高等职业教育电力机车专业“十二五”规划教材

电力机车总体及走行部
电力机车运用与规章
电力机车制动机
电力机车乘务作业
电力机车控制
电力机车电机
电力机车电器
列车行车安全装置
电力机车检修
列车牵引计算
机车电力电子技术



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

地址：北京市西城区右安门西街8号
邮编：100054
网址：<http://www.tdpress.com>

ISBN 978-7-113-14390-9



9 787113 143909 >

定价：34.00 元

全国铁道职业教育教学指导委员会规划教材
高等职业教育电力机车专业“十二五”规划教材

机车电力电子技术

刘敏军	王秀珍	主 编
卢大民	陈燕萍	副主编
	李文亮	主 审

中国铁道出版社

2012年·北京

内 容 简 介

本书是高等职业教育电力机车专业“十二五”规划教材,详细地介绍了电力电子技术理论及其在电力机车上的应用等方面知识,全书共分 11 章,内容包括:绪论、电力电子器件、相控整流电路、斩波电路与逆变电路、交流调压电路、触发电路与驱动电路、电力机车控制系统单元电路、电力机车控制电源柜、电力机车电子控制柜和微机控制柜、电力机车其他电子电路、电子电路常见故障分析与应急处理。每章有学习指导、复习与思考题,帮助学生自我学习、巩固和提高。另外还附有本课程教学大纲、实验指导书及其大纲,对任课教师还提供电子教案。

本书是高等职业技术教育电力机车专业教材,也可作为成人教育、高职高专教师、电力机车运用与检修工程技术人员用参考书。

图书在版编目(CIP)数据

机车电力电子技术/刘敏军,王秀珍主编. —北京:
中国铁道出版社,2012.6

高等职业教育电力机车专业“十二五”规划教材
ISBN 978-7-113-14390-9

I. ①机… II. ①刘… ②王… III. ①电力机车—电
力电子技术—高等教育—教材 IV. ①U264

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 111203 号

书 名: 机车电力电子技术
作 者: 刘敏军 王秀珍 主编

策 划: 阚济存

责任编辑: 阚济存

编辑部电话: 010-51873133

电子信箱: td51873133@163.com

编辑助理: 杜丽君

封面设计: 冯龙彬

责任校对: 胡明锋

责任印制: 李 佳

出版发行: 中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)

网 址: <http://www.51eds.com>

印 刷: 北京新魏印刷厂

版 次: 2012年6月第1版 2012年6月第1次印刷

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16 印张: 15.5 插页: 1 字数: 390 千

印 数: 1~3 000 册

书 号: ISBN 978-7-113-14390-9

定 价: 34.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社读者服务部联系调换。

电 话: 市电(010) 51873170, 路电(021) 73170(发行部)

打击盗版举报电话: 市电(010) 63549504, 路电(021) 73187

前 言

《机车电力电子技术》是高等职业教育电力机车专业“十二五”规划教材,是根据车辆工程专业(电力机车方向)教学计划,“机车电力电子技术”课程教学基本要求编写的。本书较为详细地介绍了电力电子技术理论及其在电力机车上的应用等方面知识,全书共分11章,内容包括:绪论、电力电子器件、相控整流电路、斩波电路与逆变电路、交流调压电路、触发电路与驱动电路、电力机车控制系统单元电路、电力机车控制电源柜、电力机车电子控制柜和微机控制柜、电力机车其他电子电路、电子电路常见故障分析与应急处理。每章有学习指导、复习与思考题。另外还附有本课程教学大纲、实验指导书及其大纲。

本书的特点是:

1. 在吸收有关教材的长处及本领域新技术内容的基础上,注重课程内容的整合、精选,突出重点,力图打破“高不成,低不就”的局面。
2. 结合电力电子技术的最新发展和国内最新车型编写教材内容。
3. 内容丰富,适应性强,各校可根据本校学生毕业去向选择教学内容。
4. 每章有学习指导、复习与思考题,使教师的教、学生的学更有目的性和针对性。另外还附有本课程教学大纲、实验指导书及其大纲。
5. 本书提供了电子教案(可通过电子邮箱联系索取:minjunliu_jx@163.com)。

本书由华东交通大学刘敏军、包头铁道职业技术学院王秀珍主编,天津铁道职业技术学院卢大民、湖南铁路科技职业技术学院陈燕萍副主编。其中第1章、第2章、课程教学大纲由华东交通大学刘敏军编写,第3章、实验指导书、实验教学大纲由包头铁道职业技术学院王秀珍编写,第4章、第5章由湖南铁路科技职业技术学院陈燕萍编写,第6章由太原铁路机械学校白亚林编写,第7章、第9章由郑州铁路职业技术学院金光编写,第8章由西安铁路职业技术学院武欣编写,第10章、第11章由天津铁道职业技术学院卢大民编写。本书由郑州铁路局郑州机务段高级工程师李文亮担任主审。

在本书的编写、定稿过程中,得到了作者所在单位专家、教授,现场单位有关工程技术专家的大力支持和帮助,并提出了许多宝贵的意见和建议,在此表示衷心感谢。

本书在编写过程中,参阅和利用了大量的文献资料,在参考文献中一一列出,对原作者一并致谢。

限于作者水平,加上时间仓促,疏漏和不妥之处在所难免,热诚欢迎广大读者批评指正。

编 者

2012年5月

目 录

1 绪 论	1
学习指导	1
1.1 电力电子器件的发展	1
1.2 电力电子技术的发展	2
1.3 交流电动机控制技术的发展	3
1.4 我国电力机车的发展	3
复习与思考题	5
2 电力电子器件	6
学习指导	6
2.1 大功率整流二极管	6
2.2 半控型电力电子器件——晶闸管	7
2.3 门极关断晶闸管(GTO 晶闸管)	12
2.4 功率晶体管(GTR)	18
2.5 功率 MOS 场效应晶体管(功率 MOSFET)	20
2.6 绝缘栅双极晶体管(IGBT)	25
2.7 MOS 控制晶闸管(MCT)	29
2.8 功率集成电路(PIC)	33
2.9 电力电子器件的冷却与保护	36
复习与思考题	47
3 相控整流电路	48
学习指导	48
3.1 概 述	48
3.2 单相桥式整流电路	48
3.3 单相全控桥式整流电路	53
3.4 三相可控整流电路	56
复习与思考题	61
4 斩波电路与逆变电路	62
学习指导	62
4.1 斩波电路	62
4.2 逆变电路	67

4.3 缓冲电路	82
复习与思考题	82
5 交流调压电路	83
学习指导	83
5.1 概 述	83
5.2 晶闸管交流开关	83
5.3 晶闸管单相交流调压电路	84
5.4 晶闸管三相交流调压电路	85
复习与思考题	88
6 触发电路与驱动电路	89
学习指导	89
6.1 概 述	89
6.2 晶闸管触发电路	90
6.3 GTO 门极驱动电路	94
6.4 GTR 门极驱动电路	97
6.5 功率 MOSFET 门极驱动电路	98
6.6 IGBT 驱动与保护技术	100
复习与思考题	104
7 电力机车控制系统单元电路	105
学习指导	105
7.1 检测单元	105
7.2 控制单元	113
7.3 触发系统元件	120
复习与思考题	124
8 电力机车控制电源柜	125
学习指导	125
8.1 SS ₉ 型电力机车的控制电源柜	125
8.2 HXD ₃ 型电力机车的 DC 110 V 电源装置	132
复习与思考题	138
9 电力机车电子控制柜和微机控制柜	139
学习指导	139
9.1 SS ₄ 改型电力机车电子控制柜	139
9.2 SS ₉ 型电力机车微机控制柜	167
9.3 HXD ₃ 型电力机车电子系统	187
复习与思考题	194

10 电力机车其他电子电路	196
学习指导	196
10.1 显示诊断装置	196
10.2 劈相机起动电路	197
10.3 列车运行监控记录装置	199
10.4 SS ₉ 型电力机车逻辑控制单元(LCU)	206
复习与思考题	209
11 电子电路常见故障分析与应急处理	210
学习指导	210
11.1 控制电源柜的常见故障判断及处理	210
11.2 SS ₄ 改型电力机车电子控制柜常见故障判断及处理	211
11.3 SS ₈ 型电力机车微机控制柜常见故障判断及处理	214
11.4 SS ₉ 型电力机车微机控制柜的使用维护和常见故障判断及处理	219
11.5 HXD ₃ 型电力机车电气故障分析及处理	222
复习与思考题	223
附录 A 《机车电力电子技术》课程教学大纲	224
附录 B 《机车电力电子技术》课程实验指导书	227
附录 C 《机车电力电子技术》课程实验教学大纲	235
参考文献	237

1 绪 论

学习指导

通过对本章的学习,了解电力电子器件、电力电子技术、交流电动机控制技术和我国电力机车的发展概况。

1.1 电力电子器件的发展

在电力机车的电力牵引系统中,为了完成从直流到直流或直流到交流的电能变换与控制,大量应用各种电力电子器件。

1947年,第一只晶体管的研制成功,开创了半导体固态电子学;20世纪50年代功率半导体二极管的出现,提高了整流电路的效率,到1958年,美国通用电气公司(GE)首先研制成功第一只工业用晶闸管,并用它替代整流二极管,使得交流电能变换出电压大小与极性均可控的直流电,由直流电转变成交流电的逆变电路随之出现,标志着电力电子技术的诞生,并开始进入以电力电子器件为主的变流技术时代。

电子技术朝两个方向发展:一是对信息处理的微电子技术,其发展的特点是集成度越来越高,集成规模越来越大;二是对电能进行转换与控制的电力电子技术,其发展的特点是晶闸管的派生器件越来越多,功率越来越大。近年来,微电子技术与电力电子技术在各自发展的基础上相结合,产生了一批工作频率高,具有门极全控性能的功率集成器件,它们的品种越来越多,功率越来越大,性能越来越好,已经形成了庞大的电力电子器件家族“树”,如图1.1所示。

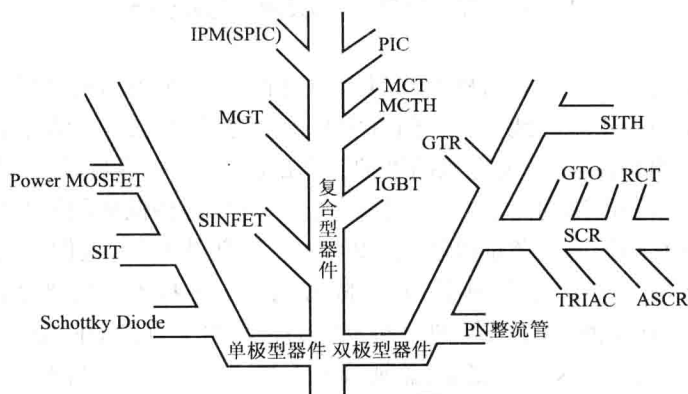


图 1.1 电力电子器件家族“树”

电力电子器件有许多种类和不同的分类方式。

按器件内部载流子参与导电的种数不同,分三大类:一是单极型器件,只有一种载流子,即

只有多数电子载流子参与导电的半导体器件。二是双极型器件,有空穴和电子两种载流子参与导电的半导体器件。三是复合型器件,由单极型器件与双极型器件复合集成的器件。

按开通、关断方式不同,也分三大类:一是不可控型器件,它们是二端口器件,器件的开断取决于施加在器件阳极、阴极间的电压:正向导通,反向关断,流过器件的电流是单方向的。如大功率二极管(Power Diode)、快速恢复二极管(Fast Recovery Diode)及功率肖特基二极管(Schottky Diode)。二是半控型器件,它们是三端口器件,除了阳极、阴极外,还增加了一个控制门极。它们不仅具有单向导电性,而且还可以方便地控制其开通。但该类器件一旦开通,不容易控制其关断。如晶闸管及其派生出的双向逆导晶闸管。三是全控型器件,它们也是三端口器件,除了可以方便地控制其开通外,还能很方便地控制其关断。如 20 世纪 70 年代出现的 GTR、GTO、Power MOSFET、IGBT、MCT 以及 20 世纪 80 年代出现的 PIC、IPM 等。

不同类型的电力电子器件具有不同的性能,双极型器件如 SCR、GTO、GTR、SITH 等,它们的通态压降较低,阻断电压高,电流容量大,适用于中大容量的变流设备。其电压和电流的定额都达 10^3 级。在双极型器件中除静电感应晶闸管(SITH)为电压控制型器件外,其余的均为电流控制型器件,其控制性能不如单极型器件,功耗也比较大。

单极型器件的主要优点是:仅有多数载流子导电,无少数载流子存储效应,因而开关时间短,一般为纳秒数量级(典型值为 20 ns)。例如,电压 1 000 V,电流 200 A 的电力 MOSFET,开关时间仅 13 ns。输入阻抗很高,通常大于 40 M Ω ,故又称为电压控制型器件。电流具有负的温度系数,温度上升时电流下降,因而器件具有良好的电流自动调节能力,不易产生局部过热,所以二次击穿的可能性极小,这一点与双极型器件根本不同。其不足之处是导通压降高、电压和电流定额都比双极型器件小。

复合型器件既有如 GTR、SCR 等双极型器件的电流密度高、导通压降低等优点,又有 MOSFET 等单极型器件输入阻抗高、响应速度快的优点。因此越来越引起高度重视。目前已经开发的这种器件有:肖特基注入 MOS 门极晶体管(SINFET)、绝缘栅双极晶体管(IGBT)、MOS 控制晶体管(MGT)、MOS 控制晶闸管(MCT 或 MCTH)以及功率集成电路(PIC)和智能型功率集成电路(SPIC)、智能型功率模块(IPM)等。

1.2 电力电子技术的发展

20 世纪 60 年代以前,直流电动机由于具有良好的起动性能和调速性能,获得了广泛应用,在各个领域的应用处于统治地位。但随着生产技术的不断发展,直流电动机的缺点逐步显示出来,由于换向器的存在,使直流电机的维护工作量加大,单机容量、最高转速以及使用环境都受到限制,人们开始转向结构简单、运行可靠、便于维护、价格低廉的异步电动机,但异步电动机的起动,尤其是它的调速问题难以解决。20 世纪 30 年代开始,人们就致力于交流调速技术的研究,但进展缓慢。20 世纪 60 年代以后,随着电力电子技术的突飞猛进的发展,异步电动机的调速问题也得到了彻底的解决,进而推动电力机车由交传动向交流传动的发展。

电力电子技术的前身是汞弧整流器、晶闸管变流技术。1957 年晶闸管(SCR)的诞生标志着电力电子技术的问世。1960~1980 年为电力电子技术第一代,其特征是以晶闸管及其相控变流技术为代表,又称整流器时代。1980~1990 年进入了以大功率晶体管(GTR)、可关断晶闸管(GTO)等自关断电力电子器件及逆变技术为代表的第二代,又称逆变时代。1990 年以后进入以复合型电力电子器件及变频技术为代表的第三代,由于复合型电力电子器件具有快速

关断、工作频率高等特点,其典型代表是绝缘栅双极晶体管(IGBT)。第三代变频技术和变频器得到空前发展,故又称为变频时代。本世纪将进入电力电子智能化时代,其特点是电力电子器件进一步采用微电子集成电路技术,实现电力电子器件和装置的智能化。

1.3 交流电动机控制技术的发展

随着电力电子技术的飞速发展,交流电动机控制技术也取得了突破性进展。由于交流电动机是多变量、强耦合的非线性系统,与直流电动机相比,转矩控制要困难得多。在 20 世纪 70 年代初提出的矢量控制理论解决了交流电动机的转矩控制问题,应用坐标变换将三相系统等效为两相系统,再经过按转子定向的同步旋转变换实现了定子电流励磁分量与转矩分量之间的解耦,从而达到对交流电动机的磁链和电流分别控制的目的。这样就可以将一台三相异步电动机等效为直流电动机来控制,因而获得了与直流调速系统同样优良的静、动态性能,开创了交流调速与直流调速相竞争的时代。

直接转矩控制是 20 世纪 80 年代中期提出的又一转矩控制方法,其思路是把电机与逆变器看作一个整体,采用空间电压矢量分析方法在定子坐标系进行磁通、转矩计算,通过磁通跟踪型脉宽调制(PWM)逆变器的开关状态直接控制转矩。因此,无需对定子电流进行解耦,免去了矢量变换的复杂计算,控制结构简单,便于实现全数字化。

无速度传感器控制技术是 20 世纪末研究出来的另一种交流电动机控制技术,该控制技术不需要检测硬件,也免去了传感器带来的环境适应性、安装维护等麻烦,提高了系统可靠性,降低了成本。

微处理机引入控制系统,促进了模拟控制系统向数字控制系统的转化,数字化技术使得复杂的矢量控制得以实现,大大简化了硬件,降低了成本,提高了控制精度,而自诊断功能和自调试功能的实现,又进一步提高了系统的可靠性,节约了大量人力和时间,操作、维护都更加方便。微机运算速度的提高、存储器的大容量化,将进一步促进数字控制系统取代模拟控制系统,数字化已经成为控制技术的方向。

随着现代控制理论的发展,交流电动机控制技术的发展方兴未艾,非线性解耦控制、人工神经网络自适应控制、模糊控制等各种新的控制策略正在不断涌现,展现出更为广阔的前景,必将进一步推动交流调速技术的发展。

1.4 我国电力机车的发展

我国电气化铁路从 1958 年开始筹建,1961 年 8 月 15 日,宝鸡—凤州段 91 km 电气化铁路通车。我国电力机车的研究与铁道电气化同步,也始于 1958 年。经历了 50 多年的不懈努力,我国的电气化铁路得到了迅速发展,电力机车的研究、生产已经成为世界上一支不可忽视的力量。目前我国已形成了 4 轴、6 轴、8 轴的韶山型系列电力车型谱,已经有 SS_1 、 SS_3 、 SS_4 (SS_{4B} 、 SS_4 改)、 SS_5 (SS_{6B})、 SS_7 (SS_{7B} 、 SS_{7C} 、 SS_{7E} 、 SS_{7F})、 SS_8 、 SS_9 (SS_9 改)等交传动系列干线客货运电力机车和 HXD₂、HXD₃ 型大功率交流机车投入运营,实现了牵引动力从交传动到交流传动的发展。我国电气化里程于 2001 年末已达到了 17 000 km 以上,跃居亚洲第一、世界第三,电气化率为 24%;到 2005 年底,电气化里程已达到 20 151 km,电气化率达到 26.7%。到 2010 年,铁路营业里程达到 95 000 km,其中电气化里程达到 40 000 km,客运

专线9 800 km,铁路电气化率达到40%。

我国电力机车的发展大体经历了四个阶段:

第一阶段是从1958年到20世纪70年代末,共20多年。这一阶段是我国电力机车发展的起步期。第一台干线电力机车由湘潭电机厂(负责电气和总装)、株洲田心机车车辆工厂(负责机械部分)共同研制。1958年试制成功韶山型引燃管整流器式电力机车,该车参照前苏联H60型电力机车设计。1969年,株洲电力机车工厂与株洲电力机车研究所共同研制了一台SS₂型电力机车。从此,我国电力机车从无到有,从模仿前苏联的技术入手,经过三次大的技术改造,生产出了性能稳定、运行可靠的SS₁型电力机车,作为客货牵引力的主型干线机车。到1988年止,共生产了SS₁型机车828台。

第二阶段是从20世纪70年代末到80年代末。这是我国电力机车发展的成长期。这一阶段发展的主要目标是:研制我国自己的相控机车,提高机车功率和可靠性,充分发挥电力机车的优越性。这时期的代表机型是SS₃和SS₄型电力机车。

SS₃型电力机车采用调压开关级间平滑调压方式,是调压开关调压向相控调压过渡的方案。这种调压方式实现了调压开关无弧断开,提高了工作可靠性,既保留了调压开关调压功率因数高、整流电压脉动小、对通信干扰小的优点,又具有平滑无级调压、能充分利用机车黏着重量的优点。但由于该调压方式仍采用调压开关作级间转换,主电路结构较复杂。目前,利用引进技术已将SS₃机车改进为全相控方式(即SS_{3B}型或SS₃4000型),改进的项目主要包括:①8级级间平滑调压改为三段不等分桥相控调压、机车特性控制;②两级电阻制动改为加馈电阻制动;③中心销牵引装置改为低位平拉杆牵引装置等。

SS₄型电力机车是我国自行研究的第一代重载货运、全相控调压、B₀转向架机车。该车由相同的两节机车组成,每节车上只用一台劈相机,用一台通风机作先导机,当劈相机故障时该通风机代替劈相机为辅助机组提供三相电源。该车从性能指标上已达到我国货运主型电力机车的要求。由于该车从20世纪80年代处开始研制,其技术水平仍属于20世纪70年代开发研究的层次,且由于运输需要,从样机到大批量生产的过程太短,初期生产的158台车至今留有一些技术问题没有彻底解决。针对早期存在的质量问题,1993年对原SS₄型机车进行了重大改进,俗称SS₄改型(SS_{4C}、SS₄改)。改进的主要项目有:①四段桥相控改为不等分三段桥相控;②加装功率因数补偿装置;③二级电阻制动改为加馈电阻制动;④恒流、恒压控制改为恒流准恒速特性控制;⑤加装空转(滑行)保护装置和轴重转移补偿装置;⑥Z形低位斜拉杆牵引装置改为推挽式低位斜拉牵引装置等。

第三阶段是从20世纪90年代中期到21世纪初,这段时间是我国电力牵引发展的全盛期。通过消化吸收和应用6K、8K等国外电力机车的先进技术,开始自主研发交流传动技术,我国电力机车的研发水平有了长足进步。在这一阶段,电力机车的开发年年出新,机型全面换代,所采用的新技术主要有:①8K机车的电子控制柜、大功率晶闸管及硅机组、受电弓、空气断路器、预布线、预布管工艺、单边刚性齿轮传动及滚动抱轴承结构;②6K机车的3B₀转向架;③SS_{6B}机车的ZD114型牵引电动机;④8K机车的牵引装置;⑤车载微机控制系统;⑥列车供电技术;⑦轮对空心轴高速传动技术;⑧LCU逻辑控制单元等。结合我国传统的牵引电动机并联的主电路型式,应用新技术相继研制或改进了SS₅、SS₈、SS_{3B}、SS₆、SS_{6B}、SS₇、SS₄改、SS_{4B}、SS_{7C}、SS_{7D}、SS_{7E}、SS₉型等交直传动电力机车和AC4000型交—直—交传动电力机车,以及DJ、DJ₁、DJ₂型等交流传动电力机车。

第四阶段开始于2004年,我国“十一五”计划确立了大力发展轨道交通的宏伟蓝图,拉开

了我国铁路建设飞速发展的序幕,大力扩展我国铁路网规模和提高机车车辆技术装备水平的发展战略为牵引动力的大发展引来了又一次飞速发展的黄金时期,使我国牵引机车动力和运载工具进入了一个升级换代期。近几年来,我国铁路牵引动力和运载工具发生了巨大变化,以高速动车组和大功率交流传动客货运电力机车为标志的铁路运输装备的升级换代,引发电力牵引技术的巨大进步与飞跃;以单机值乘、长交路轮乘制为标志的乘务制度实施,引发了机车运用技术与管理制度的变革。

当然,单靠我们自己的力量,自主摸索研发生产动车组和先进的交流传动机车已远远不能满足铁路运输的发展,必须借助外部力量,引进国外先进技术和成熟运用经验,快速扩充我国铁路路网规模,提高路网档次质量,快速完成机车车辆运载工具的技术升级换代。在这样的背景下,我国提出了“引进先进技术,联合设计生产,打造中国品牌”的发展思路,积极采用“先进、成熟、经济、适用、可靠”的技术和标准。2004年以来,我国先后与日本、德国、法国等合作,引进了世界一流大功率交流传动技术和动车组技术,同时进行一些国产化改造工作,进展比较顺利。中国北车集团大连机车车辆有限公司与日本东芝、中国南车集团株洲电力机车有限公司与德国西门子、中国北车集团大同电力机车有限公司与法国阿尔斯通等公司研发生产了我国新一代大功率交流传动电力机车,最大持续功率为 $9\,600\sim 10\,000\text{ kW}$,轴重 $(23+2)\text{ t}$ 、牵引定数 $20\,000\text{ t}$,最高时速为 200 km 的大功率交流传动重载电力机车,命名为“和谐型”(HXD型)。HXD₃型为我国大连机车车辆有限公司与日本东芝联合设计生产的6轴交流传动机车,HXD₁、HXD₂为我国株洲电力机车有限公司与德国西门子、大同电力机车有限公司与法国阿尔斯通公司联合设计生产的8轴交流电力机车。从2006年开始到现在有1 000多列的大功率交流传动电力机车投入运用,拉开了我国牵引动力从交传动到交流传动的序幕,使我国电力牵引技术水平进入一个新的时代,达到了世界先进水平。

复习与思考题

1. 简述电力电子器件、电力电子技术、交流电动机控制技术的发展历程。
2. 简述我国电力机车的发展概况及发展趋势。

2 电力电子器件

学习指导

通过本章学习,主要掌握电力电子器件大功率整流二极管、晶闸管、GTO 晶闸管、绝缘栅双极晶体管 IGBT、功率集成电路 PIC 的结构、原理、特性及其应用,了解功率晶体管 GTR、功率 MOSFET、MOS 控制晶闸管 MCT 的结构、原理、特性以及电力电子器件的冷却和保护方法。

2.1 大功率整流二极管

变流装置中不仅要用大功率的晶闸管变流器件,同时还要用大功率 ZP 型硅整流二极管,它的工作原理、伏安特性曲线等虽然与中小功率整流二极管相似,但它的主要参数的规定、选择原则等却有不同,与 KP 型晶闸管相似,因此在选用时应加以注意。

1. 结构与伏安特性

(1) 结构

目前大功率的整流二极管,外形结构与晶闸管相似,可分为螺旋式和平板式,而平板式又分为风冷式和水冷式。二极管仅有阳极 A 与阴极 K。螺旋式二极管的阳极紧栓在铝制散热器上。

(2) 伏安特性

二极管的阳极与阴极间的电压和流过管子的电流关系称为伏安特性如图 2.1 所示。当施加在阳极与阴极正向电压从零开始逐渐增大时,开始阳极电流很小,这一段特性曲线很靠近横坐标。当正向电压超过 0.5 V 时,阳极电流急剧上升,管子正向导通。如果电路中不接限流元件,则二极管最终将会烧损。

当二极管施加反向电压时,起始段的反向漏电电流很小,而且随着反向电压的增加,反向漏电电流只稍微增大,但当反向电压加至反向不重复峰值电压 U_{RSM} 时,反向漏电电流开始急剧增加。同样,如果对反向电压不加限制的话,二极管将被击穿而损坏。

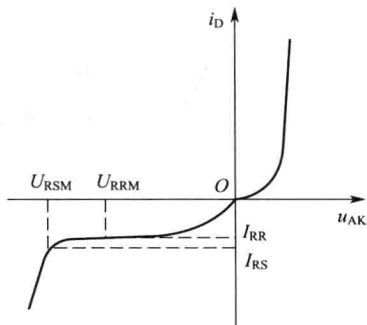


图 2.1 大功率二极管伏安特性

2. 主要参数

(1) 额定正向平均电流 $I_{\text{D(AV)}}$

在额定的环境温度为 40 °C 和标准散热条件下,元件 PN 结温度稳定且不超过 140 °C 时,所允许长时间连续流过 50 Hz 正弦半波的电流平均值。将此电流值规定系列的电流等级就是元件的额定正向平均电流 $I_{\text{D(AV)}}$,简称额定电流。

(2) 反向重复峰值电压 U_{RRM}

在额定结温条件下,取元件反向伏安特性不重复峰值电压 U_{RSM} 的 80% 称为反向重复峰值

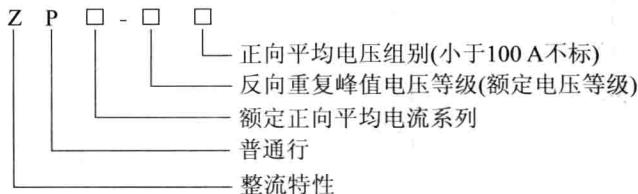
电压 U_{RRM} 。将 U_{RRM} 值取规定的电压等级就是该元件的额定电压。

(3) 正向平均电压 $U_{D(AV)}$

在额定的环境温度为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和标准散热条件下,元件通过 50 Hz 正弦半波额定正向平均电流时,元件阳、阴极之间电压的平均值,取规定系列组别称为正向平均电压 $U_{D(AV)}$,简称管压降,一般在 $0.5\sim 1\text{ V}$ 之间。

3. 型号及选择的原则

(1) 型号



(2) 选择原则

选择 $I_{D(AV)}$ 的原则:在规定的室温和冷却条件下,二极管发热不超过额定值,只要所选的管子额定电流有效值 I_{Dn} 大于管子在电路中可能流过的最大电流有效值 I_{Dmax} 即可。考虑到半导体元件的过载能力比一般电机电器产品小得多,因此选择时考虑 $1.5\sim 2$ 倍的安全余量是必要的,即

$$I_{Dn} = 1.57 I_{D(AV)} = (1.5 \sim 2) I_{Dmax}$$

$$I_{D(AV)} = (1.5 \sim 2) I_{Dmax} / 1.57$$

选择 U_{RRM} 的原则:选择大功率二极管 U_{RRM} 的原则与选择晶闸管相同,即所选的二极管额定电压应为二极管在所工作的电路中可能承受到的最大反向瞬时值电压的 $2\sim 3$ 倍,即

$$U_{RRM} = (2 \sim 3) U_{Dmax}$$

选择 $U_{D(AV)}$ 的原则:根据设计要求,选取所规定的相应系列组别。除特殊要求外,容量在 100 A 以下通常不考虑管压降组别。管压降越小,元件发热与损耗也越小,相应价格就越高。

此外,大功率二极管在使用中应注意的事项与下节要介绍的晶闸管相同。

2.2 半控型电力电子器件——晶闸管

晶闸管(Thyristor)是硅晶体闸流管的简称,俗称可控硅(SCR),其正式名称应是反向阻断三端晶闸管。除此之外,在普通晶闸管的基础上还派生出许多新型器件,它是工作频率较高的快速晶闸管(Fast Switching Thyristor, FST)、反向导通的逆导晶闸管(Reverse Conducting Thyristor, RCT)、两个方向都具有开关特性的双向晶闸管(TRIAC)、门极可以自行关断晶闸管(Gate turn off thyristor, GTO)、门极辅助关断晶闸管(Gate Assisted turn off thyristor, GATO)及用光信号触发导通的光控晶闸管(Light Controlled Thyristor, LCT)等。

2.2.1 晶闸管的结构与工作原理

晶闸管的外形及图形符号如图 2.2 所示,是三端四层半导体开关器件,共有 3 个 PN 结, J_1 、 J_2 和 J_3 ,如图 2.3(a)所示。其电路符号如图 2.3(b)所示, A(anode)为阳极, K(cathode)为阴极, G(gate)为门极或控制极。若把晶闸管看成由两个三极管 $VT_1(P_1N_1P_2)$ 和 $VT_2(N_1P_2N_2)$ 构成,如图 2.3(c)所示,则其等值电路可表示成图中虚线框内的两个三极管。对三

极管 VT_1 来说, P_1N_1 为发射结 J_1 , N_1P_2 为集电结 J_2 ; 对于三极管 VT_2 , P_2N_2 为发射结 J_3 , N_1P_2 仍为集电结 J_2 ; 因此 $J_2(N_1P_2)$ 为公共的集电结。当 A、K 两端加正电压时, J_1 、 J_3 结为反偏置, 中间结为正偏置。晶闸管未导通时, 加正压时的外加电压由反偏置的 J_2 结承担, 而加反压时的外加电压则由 J_1 、 J_3 结承担。

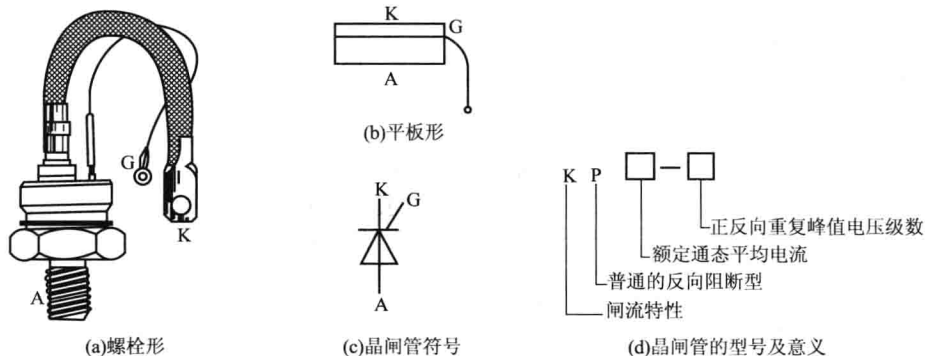


图 2.2 晶闸管的外形及图形符号

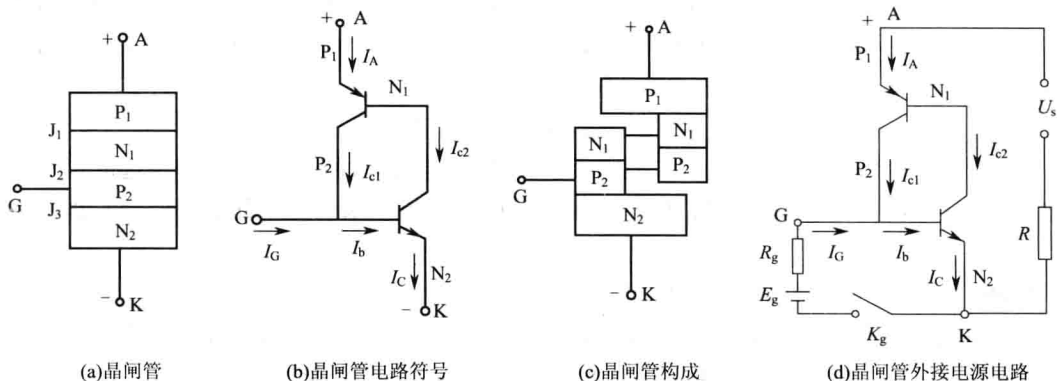


图 2.3 晶闸管的结构

如果晶闸管接入如图 2.3(d) 所示外电路, 外电源 U_s 正端经负载电阻 R 引至晶闸管阳极 A, 电源 U_s 的负端接晶闸管阴极 K, 一个正值触发控制电压 E_g 经电阻 R_g 后接至晶闸管的门极 G, 如果 $VT_1(P_1N_1P_2)$ 的集电极电流分配系数为 α_1 , $VT_2(N_1P_2N_2)$ 的集电极电流分配系数为 α_2 , 那么对 VT_1 而言, VT_1 的发射极电流 I_A 的一部分 $\alpha_1 I_A$ 将穿过集电结 J_2 , 此外, J_2 受反偏电压作用, 要流过反偏饱和电流 i_{CB01} , 因此图 2.3(d) 中 I_{C1} 的可表示为

$$I_{C1} = \alpha_1 I_A + i_{CB01} \quad (2.1)$$

同理对 VT_2 而言, VT_2 的发射极电流 I_C 的一部分 $\alpha_2 I_C$ 将穿过集电结 J_2 此外, J_2 受反偏置电压作用, 要流过反偏饱和电流 i_{CB02} , 因此, 图 2.3(d) 中的 I_{C2} 可表示为

$$I_{C2} = \alpha_2 I_C + i_{CB02} \quad (2.2)$$

由图 2.3(d) 中可以看出

$$I_A = I_{C1} + I_{C2} = \alpha_1 I_A + i_{CB01} + \alpha_2 I_C + i_{CB02} = \alpha_1 I_A + \alpha_2 I_C + I_0 \quad (2.3)$$

式中, $I_0 = i_{CB01} + i_{CB02}$ 为 J_2 结的反向饱和电流之和, 或称为漏电电流。

再从整个晶闸管外部电路来看, 应有

$$I_A + I_G = I_C \quad (2.4)$$

由式(2.3)和式(2.4),可得到阳极电流为

$$I_A = \frac{I_0 + \alpha_2 I_G}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (2.5)$$

晶闸管外加正向电压 U_{AK} , 但门极断开, $I_G = 0$ 时, 中间结 J_2 承受反偏电压, 阻断阳极电流, 这时 $I_A = I_C$ 很小, 由式(2.5)得

$$I_A = I_C = \frac{I_0}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \approx 0 \quad (2.6)$$

在 I_A 、 I_C 很小时晶闸管中电流分配系数 α_1 、 α_2 也很小, α_1 、 α_2 都随电流 I_A 、 I_C 的增大而增大。如果门极电流 $I_G = 0$, 在正常情况下, 由于 I_0 很小, $I_A = I_C$ 仅为很小的漏电流, $\alpha_1 + \alpha_2$ 不大, 这时的晶闸管处于阻断状态。一旦引入了门极电流 I_G , 将使 I_A 增大, I_C 增大, 这将使电流分配系数 α_1 、 α_2 变大, α_1 、 α_2 变大后, I_A 、 I_C 进一步变大, 又使 α_1 、 α_2 变得更大。在这种正反馈作用下使 $\alpha_1 + \alpha_2$ 接近于 1, 晶闸管立即从断态转为通态。内部的两个等效三极管都进入饱和导电状态, 晶闸管的等效电阻变得很小, 其通态压降仅为 $1 \sim 2$ V, 这时的电流 $I_A \approx I_C$; 则由外电路电源电压 U_S 和负载电阻 R 限定, 即 $I_A \approx I_C \approx U_S / R$ 。一旦晶闸管从断态转为通态后, 因 I_A 、 I_C 已经很大, 即使撤除门极电流 I_G , 由于 $\alpha_1 + \alpha_2 \approx 1$, 由式(2.5)可知 $I_A = I_C$ 仍然会很大, 晶闸管仍继续处于通态, 并保持由外部电路所决定的阳极电流 $I_A = I_C = U_S / R$ 。

2.2.2 晶闸管的特性

晶闸管阳极与阴极间的电压和阳极电流的关系, 称为晶闸管的伏安特性。晶闸管的伏安特性位于第一象限的是正向伏安特性, 位于第三象限的是反向伏安特性, 如图 2.4 所示。其主要特性表现如下。

(1) 在正向偏置下, 开始器件处于正向阻断状态, 当 $U_{AK} = U_{AO}$ 时, 发生转折, 经过负阻区由阻断状态进入导通状态。从图 2.4 中可以看到, 这种状态的转换, 可以由电压引起(电压触发导通), 也可以由门极电流引起(门极触发导通)。

(2) 当 $I_{G2} > I_{G1} > I_G$ 时, $U_{A2} < U_{A1} < U_{AO}$, 且一旦触发导通后, 即使去掉门极信号, 器件仍能维持导通状态不变。这时二极管、三极管所没有, 晶闸管所特有的性质, 称为自锁或擎住特性。可见, 晶闸管一旦导通, 门极就失去控制作用。因此, 触发电流常采用脉冲电流, 而无须采用直流电流。

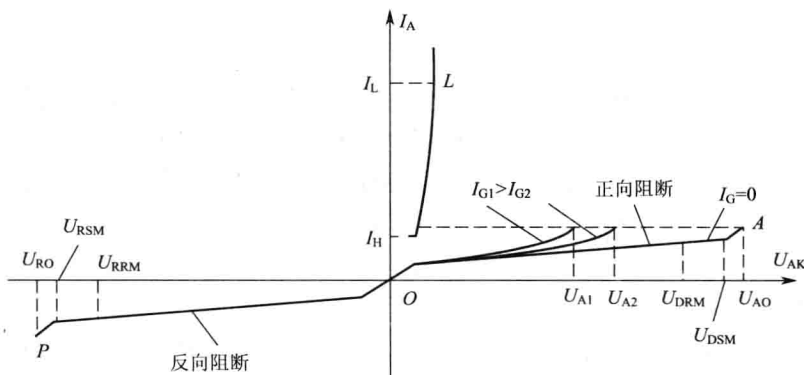


图 2.4 晶闸管的阳极伏安特性

OA—正向阻断状态; A—转折点; U_A —转折电压; U_{DRM} —断态重复值电压; U_{DSM} —断态不重复峰值电压;

I_L —擎住点; I_L —擎住电流; OP—反向阻断状态; P—击穿点; U_{RO} —击穿电压;

U_{RSM} —反向不重复峰值电压; U_{RRM} —反向重复值电压; H—关断点; I_H —维持电流