

DIANLI DIANZI JISHU



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电力电子技术

康劲松 陶生桂 主编



101010101010101000101010101010100010100

1000101010101010101010101010101010101010

10

10

10

10

10

10

10

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

内 容 简 介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,重点阐述了电力电子技术基础知识和应用技术。书中吸收了电力电子技术领域的最新研究成果,并介绍了电力电子技术在电力牵引车辆的典型应用。主要内容包括:典型电力电子器件的原理、特征和应用技术,直流斩波电路、整流电路、逆变电路、交-交变换电路的结构、工作原理、参数计算和分析方法,PWM控制技术,软开关技术基础,电力电子技术在车辆电力牵引中的典型应用等。

本书适用于电气工程及其自动化专业、自动化专业、机电一体化专业及其他相关专业的大学生。也可作为从事电力、电气自动化、轨道交通和电动汽车电力传动等领域的工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术/康劲松,陶生桂主编. —北京:
中国铁道出版社,2010.12
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-113-11846-4

I. ①电… II. ①康…②陶… III. ①电力电子学-
高等学校-教材 IV. ①TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 000967 号

书 名: 电力电子技术
作 者: 康劲松 陶生桂 主编

责任编辑: 阚济存 电话: 010-51873133 电子信箱: td51873133@163.com 教材网址: www.tdjiaocai.com
封面设计: 冯龙彬
责任校对: 焦桂荣
责任印制: 陆 宁

出版发行: 中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)
网 址: <http://www.tdpress.com>
印 刷: 三河市兴达印务有限公司
版 次: 2010年12月第1版 2010年12月第1次印刷
开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16 印张: 14.25 插页: 4 字数: 359 千
印 数: 000 1~3 000 册
书 号: ISBN 978-7-113-11846-4
定 价: 28.00 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)

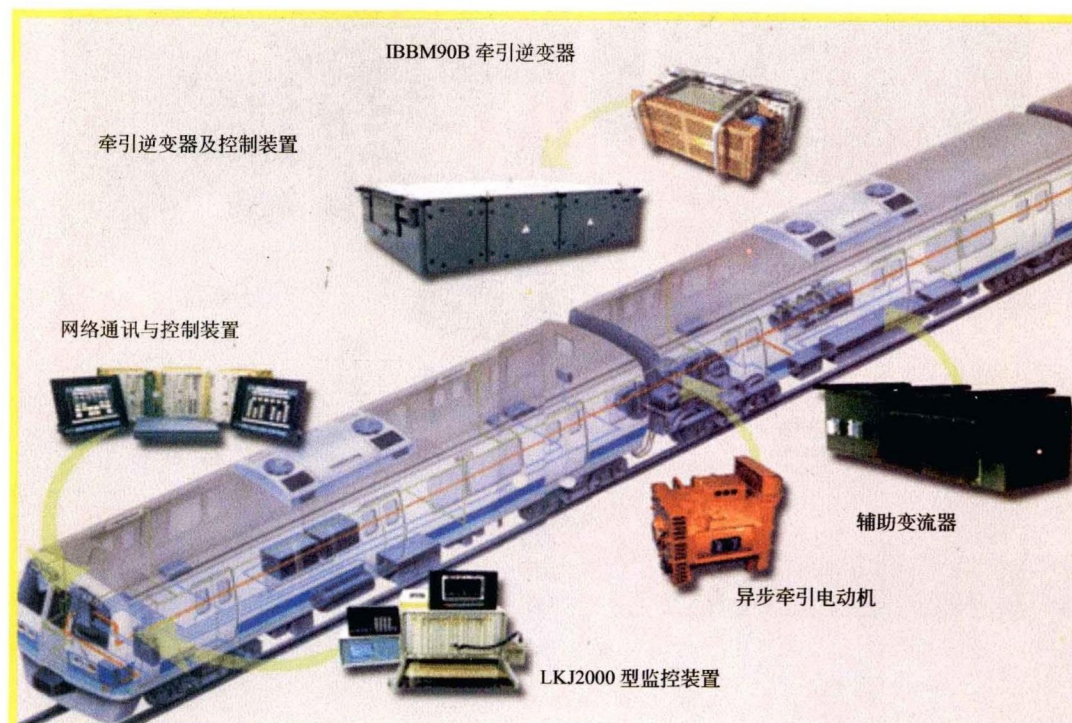
打击盗版举报电话: 市电(010) 63549504, 路电(021) 73187



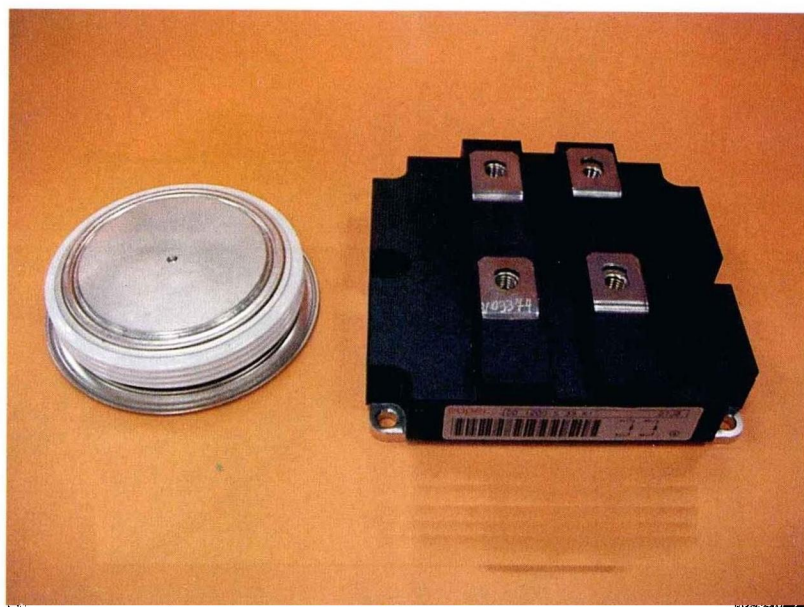
彩图 1 电力电子器件“大餐”



彩图 2 中国“和谐号”CRH₁, CRH₂, CRH₃, CRH₅ 型动车组



彩图 3 轨道车辆牵引传动系统结构

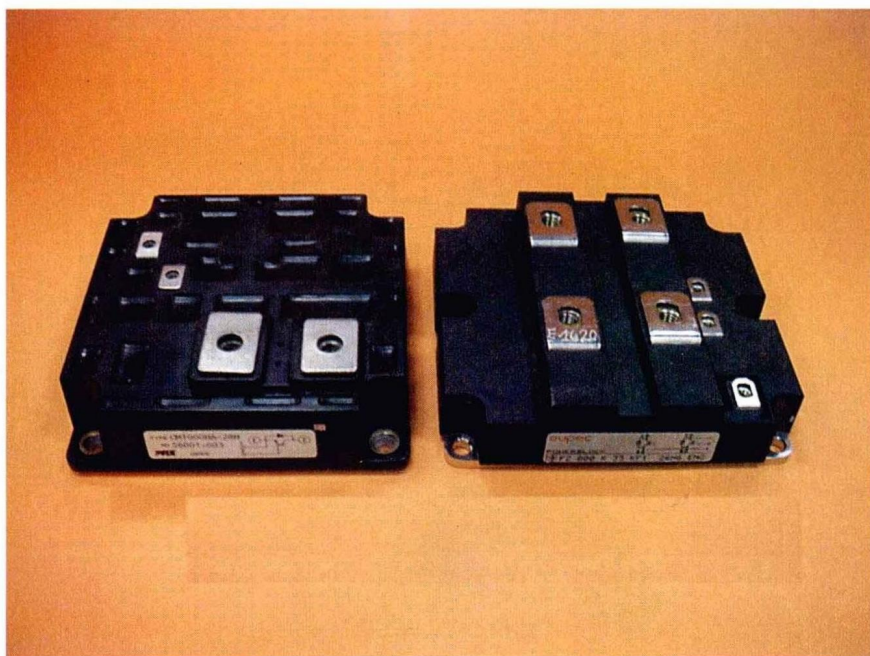


彩图 4 电力电子二极管
左:4 500 V、800 A 紧密封装二极管
右:1 700 V、1 200 A 模块化二极管



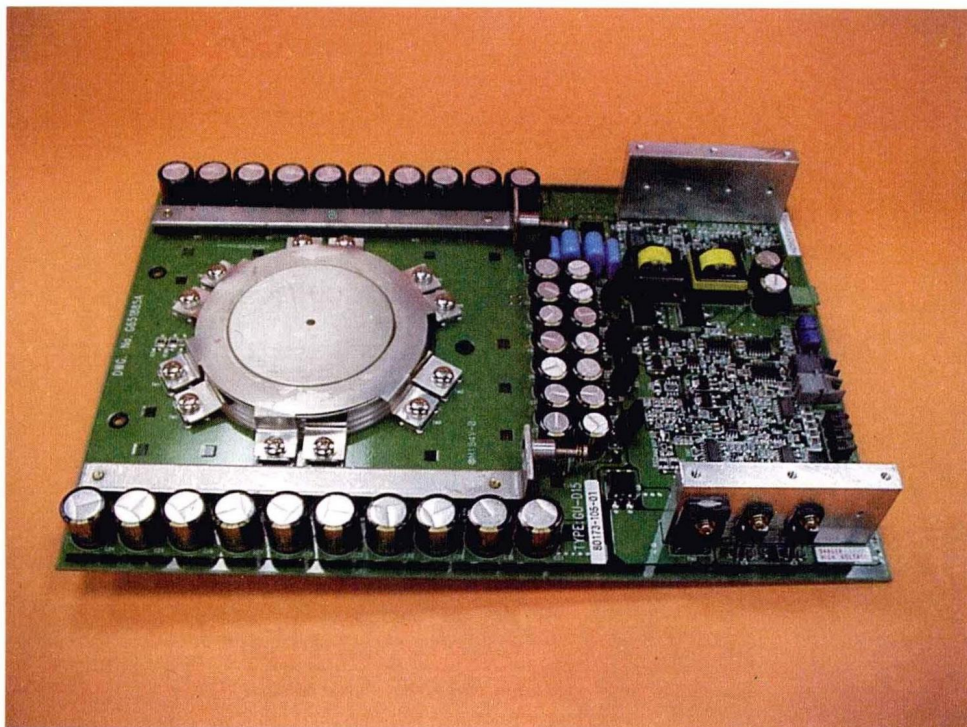
彩图 5 晶闸管

左:4 500 V、800 A 晶闸管
右:4 500 V、1 500 A 晶闸管



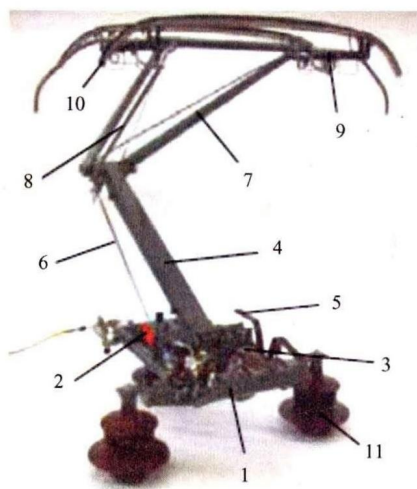
彩图 6 IGBT

左:1 700 V、1 200 A 模块化 IGBT
右:3 300 V、1 200 A 模块化 IGBT



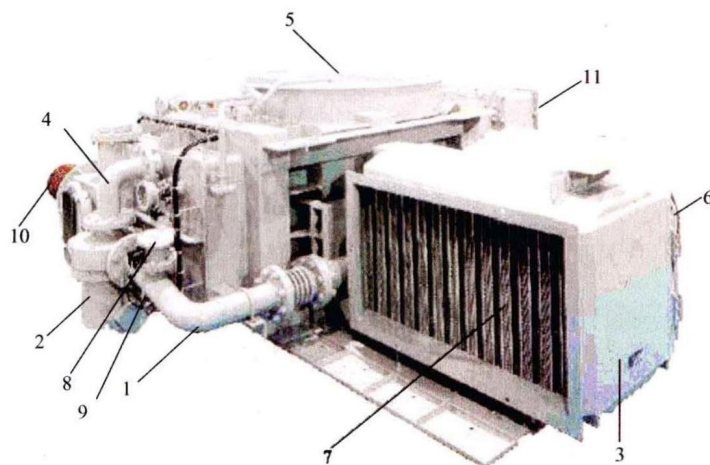
彩图 7 6 500 V、1 500 A 对称型 IGBT

IGCT=改进型 GTO+ 集成门极电路+反并联二极管(可供选择的)



- 1—底架；
- 2—阻尼器；
- 3—升弓装置；
- 4—下臂；
- 5—弓装配；
- 6—下导杆；
- 7—上臂；
- 8—上导杆；
- 9—弓头；
- 10—滑板；
- 11—绝缘子

彩图 8 DSA250 型单臂受电弓实物图

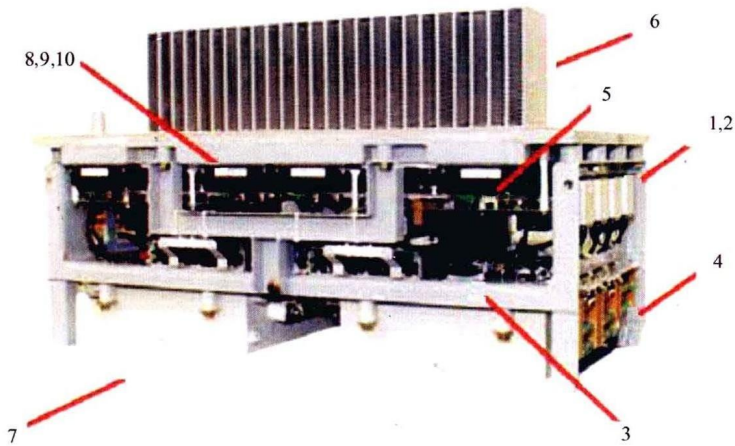


彩图 9 ATM9 型牵引变压器实物图

1—热油出油管输入油冷却器；2—电动油泵；3—油冷却器；4—热油吸入油管；
5—变压器绕组；6—冷却风入口；7—油冷却器散热片及热风出口；8—油流继电器；
9—温度继电器；10—原边线路侧套管；11—接线端子

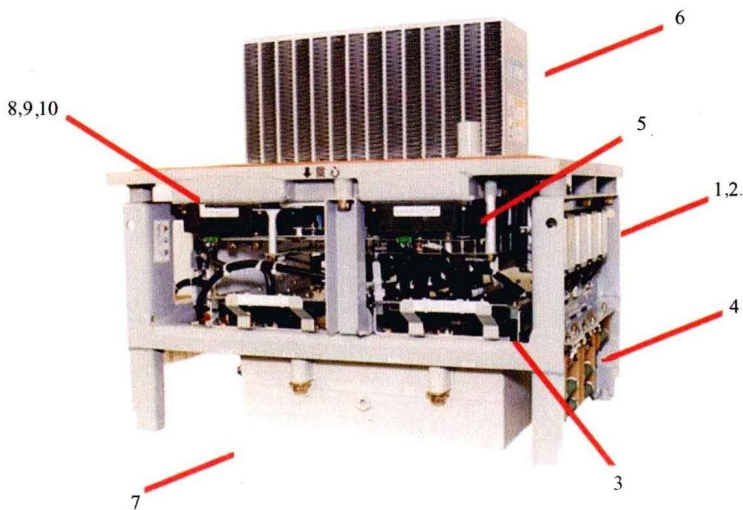


彩图 10 CRH2 牵引变流器实物图



彩图 11 脉冲整流器实物图

1—吸收电容器；2—吸收电阻器；3—驱动接口电路板；4—平衡电阻器；5—复合母线；6—散热器；
7—支撑电容；8—IPM；9—嵌位二极管；10—吸收二极管

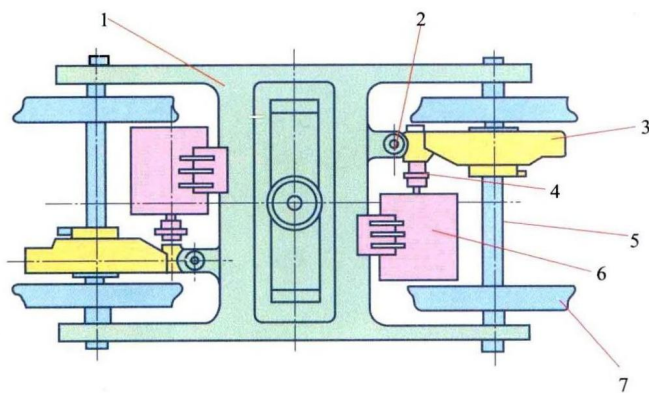


彩图 12 逆变器功率模块实物图

1—吸收电容器；2—吸收电阻器；3—驱动接口电路板；4—平衡电阻器；5—复合母线；6—散热器；
7—支撑电容；8—IPM；9—嵌位二极管；10—吸收二极管

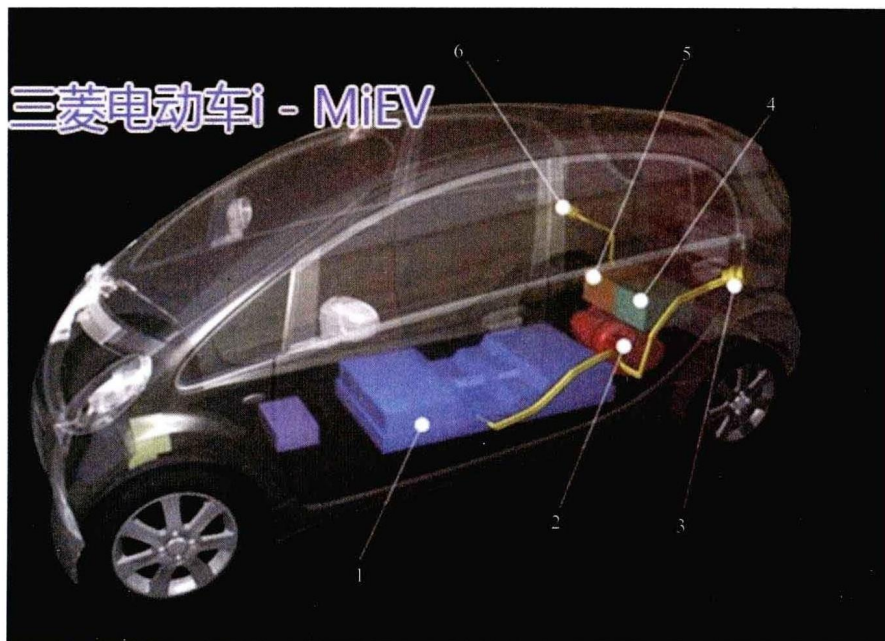


彩图 13 牵引电机实物图



彩图 14 牵引电机安装位置图

1—转向架；2—齿轮箱固定装置；3—齿轮箱；4—齿轮弯曲轴万向接头；
5—轮轴；6—主电机；7—车轮



彩图 15 三菱纯电动汽车动力系统配置图

1—锂离子电池组；2—电动机；3—快速充电插头；4—车载充电器；5—电机驱动器；6—家用充电插头

前 言

电力电子技术是应用电力电子器件对电能进行变换与控制的一种现代技术,是一门 20 世纪后期新兴的边缘学科。电力电子技术具有高效、节能的优点,已广泛地应用和渗透到能源、环境、制造业、交通运输业、国防以及日常生活等各个领域,并体现出作为核心关键技术的重要性。

电力电子技术是高等学校工科电气工程及其自动化专业和自动化专业学生必修的一门专业基础课程,也是与电力、交通、新能源等有关的高科技领域的工程技术人员必须掌握的重要技术。

编者在从事多年电力电子技术教学和科研工作的基础上编写了本书。本书是一部侧重于阐述电力电子技术基础知识和应用技术的综合教材;结合了电力电子技术领域的最新成果,补充了最新知识点,并介绍了电力电子技术在现代电力牵引车辆的典型应用;本书吸收了原铁路院校沿用教材《电力电子技术》和上海市“九五”重点教材《城市轨道车辆电力传动》的部分内容。本书力求突出基本理论与基本方法,论述上先易后难、由浅入深,注重讲清基本概念,循序渐进,并结合典型应用予以分析介绍,以期望读者对电力电子技术的基本理论与实际应用有较深入的理解。

本书的内容安排如下:绪论阐述了电力电子技术学科的形成、电力电子技术的发展及应用领域,并介绍了电力电子技术在轨道交通领域的发展与应用;第 1 章是本书的基础,介绍了各种典型的电力电子器件,重点介绍现代应用广泛的自关断器件原理和主要电气特性;第 2 章至第 5 章分别阐述了四类基本变换电路,包括直流斩波电路、整流电路(包括有源逆变电路)、无源逆变电路、交流变换电路的原理、结构和参数计算方法;第 6 章介绍了电力电子电路的 PWM 控制技术;第 7 章介绍了电力电子软开关技术;第 8 章介绍了电力电子器件的驱动技术及缓冲电路;第 9 章介绍了电力电子技术在电力牵引车辆中的典型应用。

本书由同济大学康劲松、陶生桂主编,徐国卿副主编,邵丙衡主审。本书编写人员分工如下:陶生桂编写了第 3 章,徐国卿编写了第 6 章、第 7 章和第 9 章第 1 节、5 节,剩余各章节由康劲松编写,全书由康劲松进行了统稿工作。

根据编者的教学经验,本书是按照 54 学时的教学内容进行了精选,考虑到各个学校相应专业对课程要求的不同,在实际教学中可选用部分内容,对于学时为 36 学时教学,可删去带 * 的选学内容。本课程对电力电子技术专业术语做了英文标注,每章都附有英文习题,并配有多媒体双语教学课件,更适合于当前大学教学应用。

本课程是一门实践性很强的课程,建议开设 8 学时以上实验课程,培养学生掌握运用理论分析并解决实际问题的能力。

西南交通大学连级三、郭世明,北京交通大学叶斌,铁道科学研究院吴茂杉,大连交通大学叶家金,同济大学陈效国等许多同行专家曾对此书做过历史性贡献,在此表示深切谢意。本书

整理、绘图得到牛一川、景诗毅等研究生的大力协助,特此表示感谢。

限于我们的学识和信息,本书虽力求完善,但错误和不足之处难免存在,殷切期望专家和读者给以批评和指正。

编 者

2010 年 12 月

目 录

绪 论	1
0.1 什么是电力电子技术	1
0.2 电力电子技术的发展概况	2
0.3 电力电子技术的应用	3
0.4 电力电子技术在轨道交通中的发展和应用	4
0.5 本书知识结构	5
1 电力电子器件的原理与特性	6
1.1 电力电子器件的分类与应用	6
1.2 功率二极管(PD)、功率三极管(GTR)、功率场效应管(Power MOSFET)	9
1.3 晶闸管(SCR)	19
1.4 门极可关断晶闸管(GTO)、门极换流晶闸管(GCT)	25
1.5 绝缘栅双极晶体管(IGBT)、智能功率模块(IPM)	31
1.6 新型电力电子器件	38
Problems	41
2 直流斩波电路	43
2.1 直流斩波器的工作原理及控制方式	43
2.2 降压斩波电路	45
2.3 升压斩波电路	47
2.4 升降压斩波电路	48
2.5 多象限斩波电路及多相多重斩波电路	49
2.6 降压斩波电路输入滤波器的参数设计*	52
Problems	56
3 整流电路	57
3.1 单相整流电路	57
3.2 三相整流电路	67
3.3 交流侧电抗对整流电路的影响	76
3.4 有源逆变	80
3.5 多相整流电路的谐波分析	92
3.6 整流电路的功率因数及其改善方法*	95
3.7 PWM 整流电路	100
Problems	104
4 逆变电路	106
4.1 逆变电路的基本类型	107
4.2 单相电压型逆变电路	107

4.3	三相电压型逆变电路	110
4.4	多电平电压型逆变电路*	119
4.5	电流型逆变电路	123
4.6	多重逆变电路*	129
	Problems	132
5	交-交变换电路	134
5.1	单相交流调压电路	134
5.2	三相交流调压电路	139
5.3	相控交-交变频	143
5.4	矩阵变换器*	147
	Problems	151
6	PWM 控制技术	152
6.1	PWM 基本原理	152
6.2	SPWM 控制技术	154
6.3	SPWM 的调制方式	158
6.4	追踪型 PWM 控制技术	163
	Problems	166
7	软开关技术	167
7.1	软开关的原理	167
7.2	软开关技术	168
7.3	软开关典型应用*	171
	Problems	177
8	电力电子器件的驱动和缓冲电路	178
8.1	晶闸管触发电路	178
8.2	门极可关断晶闸管(GTO)的门控电路	182
8.3	功率 MOSFET 驱动电路	184
8.4	IGBT 驱动电路	185
8.5	电力电子器件的缓冲电路	191
	Problems	199
9	电力电子技术的应用*	200
9.1	城市轨道交通车辆直流牵引系统	200
9.2	城市轨道交通车辆交流牵引系统	204
9.3	城市轨道交通车辆辅助电源系统	209
9.4	高速动车组交流牵引系统	212
9.5	电动汽车的典型应用	216
	参考文献	222

绪 论

电能人类的生产和生活中扮演着重要的角色,它的应用几乎涉及生产和生活的每一个角落:工业、交通、军事、尖端科技、医疗等等。据统计,到 2010 年,有 80% 的电能都是经过变换后应用于实际工作的。我们需要随时改变电能的类型(交流、直流),改变电压、电流的大小来适应各种环境的需要。电力电子技术是实现将各种能源高效率地变换成高质量电能,是节能、环保和提高生活质量的重要手段,已经成为弱电控制与强电运行之间,信息技术与先进制造技术之间,传统产业实现自动化、智能化、节能化、机电一体化的桥梁。电力电子的突出特点是高效、节能,是现代能源、工业和国防的重要支撑技术。因此,无论是高技术应用领域,还是各种传统产业,乃至照明、家电等与人民日常生活密切相关的应用领域,电力电子技术已无所不在。

0.1 什么是电力电子技术

根据美国 W. Newell 在 1974 年的描述,电力电子技术是电力学、电子学和控制理论三个学科交叉而形成的,如图 0-1 所示,并且这一观点得到了学术界的普遍接受。

电力电子技术在能量的产生和使用之间建立了一个联系,它可以使不同的负载得到所期望的最佳能量供给形式和最佳控制,同时保证了能量传递的高效率。电力电子变换的功率可以大到几百兆瓦甚至吉瓦,也可以小到几瓦甚至瓦级以下。例如,我国铁路牵引网采用 25 kV/50 Hz 的单相交流电源,给交流电力机车供电时,其电压和频率都要进行变换;上海城市轨道交通牵引网为 1 500 V 直流电源,要给城轨车辆供电时,同样要经过变换。变换的途径就是通过电力电子器件和电力电子电路。图 0-2 是一个典型的电力电子电路框图。电源的电能通过电力电子器件经过变换之后传输给负载,控制器把反馈信号与最初设定参考值相比较,通过改变驱动信号,满足不同负载对于电能的需求。

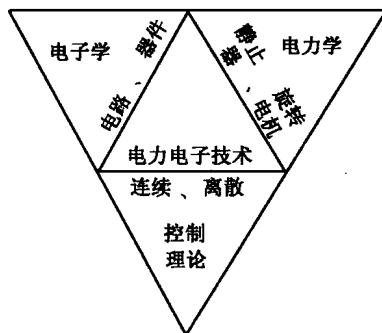


图 0-1 电力电子技术的描述

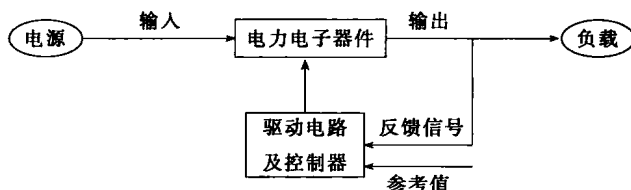


图 0-2 电力电子电路框图

通过电力电子技术进行电能变换的主要特征是功率器件工作在开关状态,这与模拟电子

技术中使用功率放大电路实现的电能变换并不相同,后者变换效率低下,并不属于电力电子技术

技术的范围。

电力电子技术主要包含有以下几个部分:

(1)电力电子器件:功率二极管(PD)、晶闸管(SCR)、门极可关断晶闸管(GTO)、绝缘栅双极晶体管(IGBT)等,分为不控型、半控型和全控型 3 类。

(2)电力电子变换电路:斩波(DC/DC 变换)、整流(AC/DC 变换)、逆变(DC/AC 变换)、交流变换(AC/AC 变换)4 大类型的基本变换电路。

(3)电力电子电路的外围电路:驱动电路、缓冲电路、保护电路等。

电力电子技术涉及的知识领域也十分广阔。如图 0-3 所示,电力电子技术把强电领域和弱电控制领域进行了很好的结合,突出了以弱电控制强电的特征。

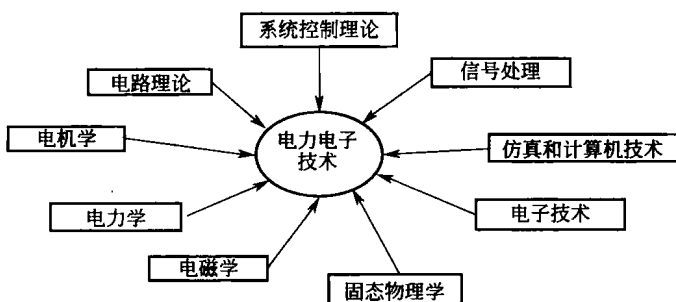


图 0-3 电力电子技术所涉及的知识领域

0.2 电力电子技术的发展概况

电力电子技术是以电力为对象的电子技术,这是一门利用电力电子器件对电能进行转换与控制的新型学科。电力电子技术包括电力电子器件、变流电路和控制电路 3 大部分。电力电子器件是电力电子技术发展的物质基础。

1947 年,贝尔实验室发明了晶体管,引发电子技术的一场革命,半导体二极管开始应用于电力领域,催化了电力电子技术的产生。1956 年,贝尔实验室发明了晶闸管,1957 年美国通用电气公司生产出了第一只晶闸管,1958 年晶闸管开始商业化,其优良的电气性能和控制性能开辟了电力电子技术的新时代。

尽管晶闸管具有优越的性能,但它只能控制开通,关断则需要依靠外界条件,所以属于半控型器件,其应用受到了一定的限制。到了 1970 年以后,传统的电力电子器件已由普通的晶闸管派生出了快速晶闸管、逆导晶闸管(RCT)、双向晶闸管(TRIAC)、不对称晶闸管(ASCR)等器件,从而形成了一个晶闸管大家族。与此同时,各类晶闸管的电压、电流、 du/dt 、 di/dt 等参数定额都有很大提高,开关特性也有很大改善,到此时传统的电力电子技术已发展到了比较成熟的地步。20 世纪 70 年代后期,以门极可关断晶闸管(GTO)、电力晶体管(GTR)、功率场效应管(Power MOSFET)为代表的全控型器件迅速发展。这些器件既可以控制开通,也可以控制关断,并且开关速度高于晶闸管。这种控制方式与数字电子技术和计算机技术结合,进一步促进了电力电子技术的快速发展。

20 世纪 80 年代以后,人们利用复合工艺将各类具有优势的器件复合在一起,推出了一系列性能更加优越的器件,如绝缘栅双极晶体管(IGBT)、集成门极换流晶闸管(IGCT)等。IG-

BT 是 MOSFET 和 GTR 的复合,兼有 MOSFET 驱动功率小、速度快的优点和 GTR 通态压降小、载流能力强的优点,性能优越,已成为现代电力电子技术主导器件之一。与 IGBT 相对应,IGCT 是 MOSFET 与 GTO 的复合,兼备 MOSFET 和 GTO 两种器件的优点。同时出现了静电感应型电力电子器件:静电感应晶体管(SIT)、静电感应晶闸管(SITH)。

电力电子器件经过半个多世纪的发展,取得了辉煌的成就,但与微电子领域高度的集成化相比,电力电子技术仍处于分立元件时代。1997 年,美国海军提出了电力电子积木(PEBB)的概念。该概念主张使用标准化的电力电子单元,一台电力电子装置由许多电力电子单元组装而成,由于设计的标准化和模块化,电力电子装置的维护将变得十分简单。1998 年,美国电力电子系统中心(CPES)正式提出了电力电子集成技术的思想,其核心是研制集成的电力电子模块。

现代电力电子技术除了不断向高电压、大电流方向发展外,在器件、电路及其控制技术方面与传统的电力电子技术相比有如下特点:

(1)集成化:几乎所有全控型器件都由许多具有相同功能的单元胞管并联集成。例如一个 1 000 A 的 GTO 元件,其内部是由近千个单元 GTO 胞管并联集成;一个 40 A 的功率 MOSFET 由上万个单元并联集成。

(2)高频化:目前 GTO 的工作频率可达 1~2 kHz,电力晶体管 GTR 可达 2~5 kHz,IGBT 可达 20 kHz,功率 MOSFET 可达 100 kHz 以上,静电感应晶体管 SIT 则达到 10 MHz 以上,这标志着电力电子技术已进入高频化时期。

(3)全控型:电力电子器件实现全控化,即元件本身具有门极自关断能力,这是现代电力电子器件在功能上的重大突破。上述 GTO、GTR、SITH、功率 MOSFET、SIT 以及 IGBT、MGT、MCT 等都实现了全控化,从而避免了传统电力电子器件关断时所需要的强迫换流电路。

(4)电路“弱电化”,控制技术数字化:全控型器件及其高频化的功能促进了电力电子电路的弱电化。PWM 电路、谐振变换电路以及高频斩波电路,这些本来只用于弱电领域的电路,如今已成为电力电子电路的重要形式。随着微型计算机等微电子技术 with 电力电子技术的结合,控制电力电子电路的技术也逐步数字化。

(5)多功能化和智能化:传统电力电子器件只有开关功能,多数用于整流,而现代电力电子器件的品种增多、功能扩大、使用范围拓宽,不但具有开关功能,有的还具有放大、调制、振荡以及逻辑运算和保护等功能,因而使电力电子器件多功能化,甚至智能化。

(6)专用化:为了进一步提高器件的功能和降低成本,国际上出现了电力电子器件的专用化集成电路(ASIC)以及专用的智能化功率集成模块(IPM)。IPM 不仅把功率开关器件 IGBT 和驱动电路集成在一起,而且还内置有过电压,过电流和过热等故障检测电路。它由高速低功耗的管芯和优化的门极驱动电路以及快速保护电路构成。即使发生负载事故或使用不当,也可以保证 IPM 自身不受损坏。这些器件集中了上述全控化、弱电化、智能化等多种优点。

0.3 电力电子技术的应用

电力电子技术的应用十分广泛,在工业、交通运输、电力系统、国防领域和民用领域的典型应用如表 0-1 所示。