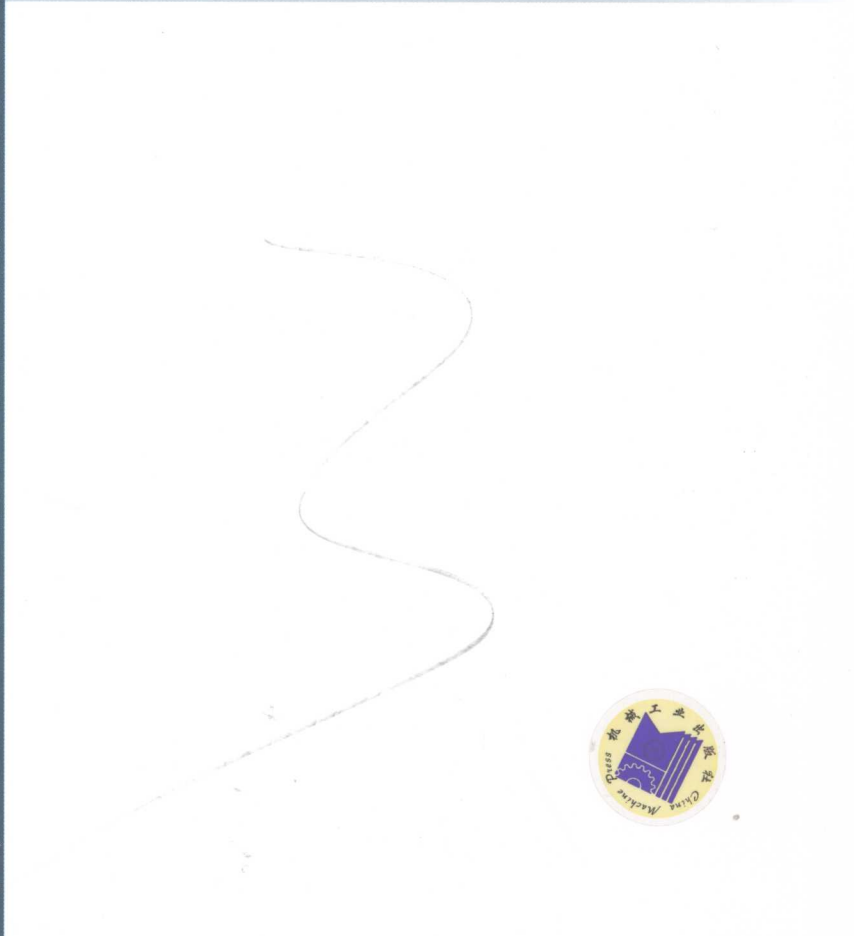




# 现代 电力电子器件 原理与应用技术

徐德鸿 主编



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



现代

# 电力电子器件 原理与应用技术

王兆安 主编

机械工业出版社



ISBN 7-111-01111-1

TN303/43

2008

# 现代电力电子器件 原理与应用技术

徐德鸿 主编

机械工业出版社

机械工业出版社

北京机械工业出版社

本书力图以通俗易懂的方式,介绍电力电子器件的原理与应用技术,重点介绍了PN结原理,二极管、功率场效应晶体管(MOS-FET)、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)、晶闸管、集成门极换向晶闸管(IGCT)的原理、特性、保护、驱动等。根据现代电力电子器件发展的特点,本书还介绍了NPT、PT、Trench结构,逆阻型IGBT等器件概念和SiC二极管、CoolMOS、同步整流器等新技术,另外结合器件的特点,介绍了相应的典型功率变换电路。

本书可作为电力电子与电气传动专业及相关专业的工程技术人员和研究生的参考书,也可作为从事开关电源、变频器、逆变器、UPS等电力电子装置开发、设计工程技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代电力电子器件原理与应用技术/徐德鸿主编. —北京:机械工业出版社, 2008. 1

ISBN 978-7-111-23022-9

I. 现... II. 徐... III. 电力系统—电子器件 IV. TN303

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第194751号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:孙流芳 版式设计:冉晓华 责任校对:姜婷

封面设计:姚毅 责任印制:洪汉军

北京瑞德印刷有限公司印刷(三河市明辉装订厂装订)

2008年3月第1版第1次印刷

169mm×239mm·7.125印张·274千字

0001—4000册

标准书号:ISBN 978-7-111-23022-9

定价:27.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换  
销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379768

封面防伪标均为盗版

# 前 言

电力电子器件是一种能够实现电能高效率应用和精确控制的电力半导体器件，是电力电子技术的基础。自1948年美国贝尔实验室肖克莱发明了能够放大电信号的晶体管以来，电力电子器件经历了半个多世纪的发展。功率器件经历从结型控制器件（如晶闸管、功率GTR、GTO晶闸管）到场控器件（如功率MOSFET、IGBT、IGCT）的发展历程。由于电力电子技术的广泛应用，在过去的10年中，电力电子器件的技术取得了显著的进步，如超级结概念的引入使得功率MOSFET的特性取得革命性的提高，沟槽型（Trench）栅极结构、场终止型结构（Field Stop）概念的出现，使功率MOSFET、IGBT的性能取得了显著的提高。IGBT发展最令人振奋，性价比持续提高，并实现了高压化，成为当今应用最广泛的电力电子器件。将GTO晶闸管与MOSFET相结合的集成门极换向晶闸管（IGCT）的出现消除了人们对于GTO晶闸管使用复杂性的恐惧，成为GTO晶闸管的换代产品。最令人期待的电力电子器件是碳化硅（SiC）功率器件，SiC肖特基（Schottky）二极管从实验室进入了工业批量生产。由于SiC功率器件具有硅功率器件无法取代的独特优势，是21世纪最有发展潜力的电力电子器件。

本书力图以通俗易懂的方式，从电力电子器件原理出发，将电力电子器件的新结构和原理介绍给大家，并结合电力电子器件的特点，介绍器件的应用技术，包括器件的选型、驱动、保护、电力电子变换电路。本书分为6章。第1章介绍电力电子器件分类、电力电子器件及应用技术发展概况。第2章介绍PN结原理，二极管的特性，整流二极管、快恢复二极管、肖特基二极管、SiC二极管，二极管的应用技术，包括吸收电路、散热设计。第3章介绍功率场效应晶体管，包括功率场效应晶体管结构、特性与参数、栅极的驱动与保护、栅极驱动电路、功率MOSFET新发展，还介绍功率MOSFET应用实例，如集成PWM控制芯片、隔离型DC-DC变换器、板载电源（Point of Load）、同步整流器（SR）等。第4章介绍绝缘栅双极型晶体管（IGBT），包括IGBT结构、特性与参数、驱动与保护，结合IGBT发展趋势，介绍NPT、PT、Trench结构和逆阻型IGBT等概念，典型的驱动电路及驱动IC，IGBT的应用系统。第5章介绍晶闸管，包括器件的结构原理、特性、触发电路、保护与容量扩展、应用实例。第6章介绍可关断晶闸管，在介绍门极关断（GTO）晶闸管结构、原理的基础上，重点介绍集成门极换向晶闸管（IGCT），包括IGCT的特性与参数、开关特性、驱动技术、应用技术、IGCT三电平逆变器。

本书可作为电力电子与电气传动专业及相关专业的研究生的参考书，也可作为从事开关电源、变频器、逆变器、UPS等电力电子装置开发、设计工程技术人员参考书。希望本书的出版能对国内广大从事电力电子与电气传动、电源技术的科研人员了解电力电子器件原理及应用技术以及电力电子器件发展状况有所帮助，在促进我国电力电子产品性能的提高方面发挥一点作用。

徐德鸿拟定了本书的章、节目录和编写大纲，撰写了第1章绪论，并负责全书各章节的统稿。于玮编写了第2章，张艳军编写了第3章，朱选才编写了第4章，朱朝霞编写了第5章，李睿编写了第6章。

本书中引用了国内外许多专家、学者的著作、论文等文献，在此表示衷心的感谢。

本书的出版得到了机械工业出版社孙流芳编审的大力支持，特此致以衷心的感谢。

由于作者水平和所见资料有限，书中难免有疏漏和不妥之处，恳切希望读者批评指正。

作者

# 目 录

## 前言

## 第 1 章 绪论 ..... 1

- 1.1 什么是电力电子技术 ..... 1
- 1.2 电力电子器件简介 ..... 2
- 1.3 电力电子技术的发展与展望 ..... 4

## 第 2 章 功率二极管 ..... 9

### 2.1 半导体基础 ..... 9

#### 2.1.1 概述 ..... 9

#### 2.1.2 能带 ..... 9

#### 2.1.3 N 型半导体与 P 型半导体 ..... 10

#### 2.1.4 半导体中的电流 ..... 12

#### 2.1.5 PN 结 ..... 12

#### 2.1.6 PN 结的反向击穿 ..... 14

#### 2.1.7 PN 结的电容效应 ..... 15

### 2.2 功率二极管 ..... 16

#### 2.2.1 功率二极管的性能参数 ..... 18

#### 2.2.2 功率二极管的稳态伏安特性 ..... 19

#### 2.2.3 PIN 功率二极管的开关特性 ..... 19

#### 2.2.4 快速恢复二极管的开通关断特性 ..... 20

#### 2.2.5 改善二极管反向恢复特性的方法 ..... 24

#### 2.2.6 功率二极管的分类 ..... 25

### 2.3 功率碳化硅肖特基二极管在高频 Boost 功率因数校正电路中的应用 ..... 31

## 2.4 功率二极管的散热措施 ..... 34

### 2.4.1 功率二极管的热平衡 ..... 34

### 2.4.2 功率二极管的散热 ..... 35

### 2.4.3 散热器的选择与设计 ..... 37

### 2.4.4 散热器的冷却方式 ..... 39

## 第 3 章 功率场效应晶体管

### (Power MOSFET) ..... 41

### 3.1 结构与工作原理 ..... 41

#### 3.1.1 基本结构与工作原理 ..... 41

#### 3.1.2 多元集成结构的影响 ..... 43

### 3.2 MOSFET 的工作特性 ..... 43

#### 3.2.1 静态特性 ..... 43

#### 3.2.2 动态特性 ..... 46

#### 3.2.3 安全工作区 ..... 48

#### 3.2.4 温度稳定性 ..... 49

### 3.3 栅极的驱动与保护 ..... 51

#### 3.3.1 栅极驱动特性 ..... 51

#### 3.3.2 栅极驱动电路 ..... 54

#### 3.3.3 并联应用 ..... 58

#### 3.3.4 使用中的保护措施 ..... 58

### 3.4 功率 MOSFET 新进展 ..... 60

#### 3.4.1 CoolMOS ..... 60

#### 3.4.2 低压低通态电阻 MOSFET ..... 62

### 3.5 功率 MOSFET 应用实例 ..... 64

#### 3.5.1 集成 PWM 控制芯片 ..... 64

#### 3.5.2 PWM 控制 DC-DC 变换器基础 ..... 71

#### 3.5.3 LLC 谐振变换器 ..... 80

#### 3.5.4 单相功率因数校正 ..... 84

#### 3.5.5 板载电源 ..... 86

3.5.6 同步整流 .....	89	4.6 IGBT 的使用 .....	123
<b>第4章 绝缘栅双极型晶体管</b>		4.6.1 IGBT 的选择 .....	123
(IGBT) .....	92	4.6.2 IGBT 的使用 .....	126
4.1 IGBT 的结构原理 .....	92	4.7 逆变器的基本知识 .....	128
4.1.1 双极型晶体管 .....	92	4.7.1 单相半桥逆变器 .....	129
4.1.2 IGBT 基本结构 .....	96	4.7.2 单相全桥逆变器 .....	133
4.1.3 IGBT 与功率 MOSFET 的 比较 .....	97	4.7.3 三相逆变器 .....	136
4.2 IGBT 的工作原理 .....	97	4.7.4 空间矢量调制 (SVM) .....	138
4.2.1 IGBT 的阻断原理 .....	97	4.7.5 逆变器的控制 .....	146
4.2.2 IGBT 的导通原理 .....	98	4.8 IGBT 的应用实例 .....	153
4.2.3 IGBT 的擎住效应 .....	99	4.8.1 数字式 UPS .....	153
4.3 IGBT 的特性 .....	100	4.8.2 变频调速系统 .....	156
4.3.1 IGBT 的静态特性 .....	100	4.8.3 高频感应工业加热电源 .....	159
4.3.2 IGBT 的转移特性 .....	101	<b>第5章 晶闸管</b> .....	161
4.3.3 IGBT 的开关特性 .....	102	5.1 普通晶闸管 .....	161
4.3.4 IGBT 的开关过程 .....	103	5.1.1 结构与工作原理 .....	161
4.3.5 IGBT 的结电容特性 .....	105	5.1.2 伏安特性 .....	163
4.3.6 IGBT 的损耗特性 .....	106	5.1.3 主要参数 .....	164
4.3.7 IGBT 的安全工作区 .....	108	5.2 特殊晶闸管 .....	165
4.4 IGBT 的驱动和保护 .....	109	5.2.1 高频晶闸管 .....	166
4.4.1 IGBT 的驱动条件和主要 特性 .....	109	5.2.2 双向晶闸管 .....	166
4.4.2 几种常用 IGBT 分立驱动 电路 .....	111	5.2.3 逆导晶闸管 .....	167
4.4.3 IGBT 集成驱动芯片 .....	112	5.2.4 光控晶闸管 .....	169
4.4.4 IGBT 的保护电路和缓冲 电路 .....	115	5.3 晶闸管的触发电路 .....	170
4.5 几种新型 IGBT 介绍 .....	118	5.3.1 对触发电路的要求 .....	170
4.5.1 IGBT 制造技术的发展 历史 .....	118	5.3.2 触发电路的种类 .....	171
4.5.2 穿通 (PT) 型 IGBT .....	120	5.3.3 集成触发电路 .....	171
4.5.3 非穿通 (NPT) 型 IGBT 特性 .....	120	5.4 晶闸管的保护与容量 扩展 .....	175
4.5.4 逆阻型 IGBT .....	121	5.4.1 过电压保护 .....	175
4.5.5 沟槽终止 (TS) 型与 场终止 (FS) 型 IGBT .....	122	5.4.2 过电流保护 .....	176
		5.4.3 晶闸管的串并联 .....	177
		5.5 晶闸管应用实例 .....	179
		5.5.1 单相桥式全控相控整流 电路 .....	179
		5.5.2 三相桥式全控相控整流	



电路 .....	182	6.3.4 IGCT 关断参数 .....	203
5.5.3 整流电压的谐波分析 .....	189	6.3.5 IGCT 的安全工作区 .....	203
<b>第 6 章 可关断晶闸管 (GTO 晶闸管 与 IGCT) .....</b>	<b>192</b>	6.3.6 IGCT 的主要技术指标 .....	204
6.1 门极关断 (GTO) 晶闸管的 结构与工作原理 .....	193	6.4 IGCT 的门极驱动技术 .....	205
6.1.1 导通原理 .....	193	6.4.1 IGCT 门极驱动单元 的供电 .....	206
6.1.2 关断原理 .....	194	6.4.2 IGCT 门极驱动单元的光 接口 .....	206
6.1.3 GTO 关断时门极静态伏安 特性 .....	194	6.5 IGCT 在多电平变换器中 的应用 .....	207
6.1.4 GTO 的失效原理 .....	195	6.5.1 多电平变换器的 主电路拓扑 .....	208
6.1.5 GTO 的主要参数 .....	195	6.5.2 基于 IGCT 的三电平 中性点钳位 (NPC) 式 变换器 .....	209
6.1.6 GTO 的门极驱动电路 .....	196	6.5.3 基于 IGCT 的三电平 NPC 式变换器的空间 矢量 PWM 控制 .....	210
6.1.7 GTO 的串并联 .....	197	6.6 基于 IGCT 的多电平 变换器的缓冲电路 .....	213
6.2 集成门极换向晶闸管 (IGCT) 的结构与工作原理 .....	198	6.6.1 三电平 NPC 式 逆变器的缓冲电路 .....	213
6.2.1 IGCT 的结构和 特点 .....	198	6.6.2 IGCT 的三电平 NPC 式逆变器缓冲 电路的设计 .....	214
6.2.2 IGCT 的开通和 关断机理 .....	200	<b>参考文献 .....</b>	<b>217</b>
6.3 IGCT 特性参数 .....	201		
6.3.1 IGCT 阻断参数 .....	201		
6.3.2 IGCT 通态参数 .....	201		
6.3.3 IGCT 开通参数 .....	203		

# 第1章 绪论

## 1.1 什么是电力电子技术

电力电子技术通俗地说就是利用半导体器件实现电能的高效率应用的技术。因此，电力电子技术的基础是电力半导体器件，或称谓电力电子器件。1948年美国贝尔实验室肖克莱等人发明了能够放大电信号的晶体管，开创了半导体电子学。实际上，晶体管不仅可以放大信号，也可以进行功率变换，如功率放大器。如果将晶体管工作在开关工作方式，并通过控制晶体管导通状态或关断状态在一个周期中持续时间，就可以实现输出功率大小的控制。目前广泛采用的功率器件，如功率场效应晶体管（MOSFET）、绝缘栅双极型晶体管（IGBT）、晶闸管都发展自晶体管。因此晶体管诞生也标志着电力电子技术学科发展的基础已经建立。历史上曾对电力电子技术学科的形成发挥关键作用的要数晶闸管的出现。1957年美国通用电气公司在晶体管的基础上发明了晶闸管，晶闸管是一个可控的固态的单向开关，可以实现大功率的应用，因此很快被应用在整流电路，实现交流电能到直流电能的变换和调节。后来，又被应用到直流电能到交流电能的变换，采用晶闸管的变流装置迅速推广。1974年美国学者 W. Newell 提出了电力电子学（Power Electronics）的定义，并用倒三角形对电力电子学作了描述（见图 1-1）。倒三角形寓意电力电子技术是由电气工程与技术、控制理论、电子科学与技术三大学科交叉而形成的，这一观点已被学术界普遍接受。

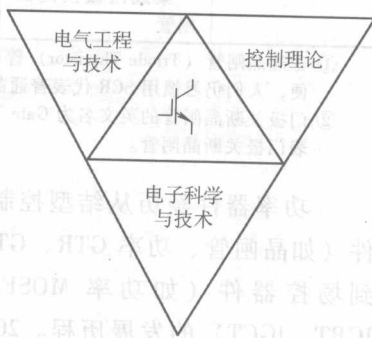


图 1-1 电力电子学的定义示意图

电力电子技术是依靠电力电子器件实现电能的高效率的变换与控制，或者对电机运动的精密控制的一门学科。电力电子技术是现代社会的支撑科学技术，几乎进入社会的各个方面：电气化、汽车、飞机、自来水供水系统、电子技术、无线电与电视、农业机械化、计算机、电话、空调与制冷、高速公路、航天、互联网、成像技术、家电、保健科技、石化、激光与光纤、核能利用、新材料制造。电力电子技术在推动科学技术和经济的发展中发挥着越来越重要的作用。

## 1.2 电力电子器件简介

按照载流子导电类型分, 电力电子器件可分为双极型、单极型和混合型器件。双极型器件采用两种载流子导电, 具有耐压高、通态压降低的特点, 适合于高压大容量的应用; 单极型器件采用单一载流子导电, 具有开关速度快和驱动方便的特点, 适合于小功率的应用; 混合型器件结合了双极型器件和单极型器件的优点。表 1-1 给出典型电力电子器件的分类和用途。

表 1-1 典型电力电子器件的分类和用途

载流子导电类型	器件名称	英文名	用途	说明
双极型器件	二极管	Diode	整流、能量回馈、续流	分为整流二极管和快速二极管
	功率晶体管	GTR	已被 IGBT 代替	
	普通晶闸管	Thyristor, SCR <sup>①</sup>	整流、逆变	高压大容量
	门极关断晶闸管	GTO <sup>②</sup>	大容量逆变	已被 IGCT 替代
单极型器件	功率场效应晶体管	MOSFET	DC-DC 变换	小功率, 但适合高功率密度的应用
混合型器件	绝缘栅双极型晶体管	IGBT	逆变、DC-DC 变换、整流	应用十分广泛
	集成门极换向晶闸管	IGCT	大容量逆变	GTO 的进化

① 普通晶闸管 (Triode Thyristor) 曾称为硅可控整流器 (Silicon Controlled Rectifier, SCR), 为书写方便, 人们仍习惯用 SCR 代表普通晶闸管。

② 门极关断晶闸管的英文名为 Gate Turn-off (GTO) Thyristor, 为书写方便起见, 人们习惯用 GTO 代表门极关断晶闸管。

功率器件经历从结型控制器 (如晶闸管、功率 GTR、GTO) 到场控器件 (如功率 MOSFET、IGBT、IGCT) 的发展历程。20 世纪 90 年代又出现了智能功率模块 (IPM)。智能功率模块是将一个或多个功率器件与驱动、保护、电隔离等电路集成在一个硅片或一个基板上, 形成了电力电子集成化的概念。大功率、高频化、高效率、驱动场控化成为功率器件发展的重要特征。图 1-2 给出电力电子器件的

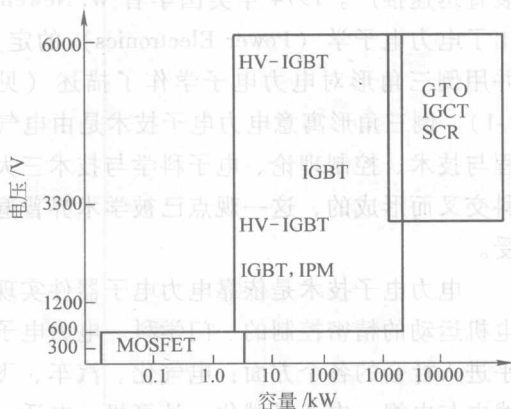


图 1-2 电力电子器件水平 (电压、容量)

电压等级和功率的水平，图 1-3 给出电力电子器件应用概况。

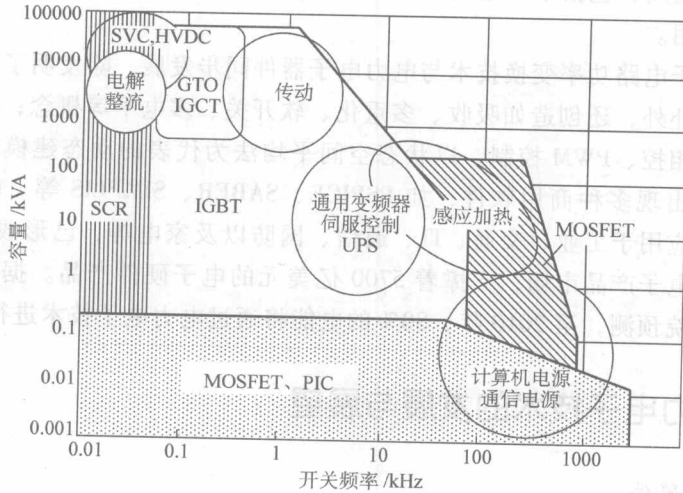


图 1-3 电力电子器件应用概况

功率 MOSFET 的问世，打开了高频应用的大门。功率 MOSFET 主要应用在电压低于 600V、功率从数百毫瓦到数千瓦的场合，广泛应用于计算机电源、通信电源、微型充电器、微型电机控制等场合。

绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 综合了功率 MOSFET 和双极型功率晶体管两者的优势，电压为 600V ~ 6.5kV，适合功率从数千瓦到数兆瓦的应用场合。IGBT 已经成为最具有发展前景的功率器件，应用于逆变器、不间断电源 (UPS)、通用变频器、电力机车传动、大功率开关电源、感应加热电源等。

在 IGBT 出现以前，功率晶体管应用于开关电源、不间断电源 (UPS)、变频器、感应加热电源。但目前功率晶体管几乎已被 IGBT 所替代。

晶闸管是最古老的功率器件，晶闸管目前仍是容量最大的功率器件，主要应用在高压大容量整流、大功率电动机调速、无功补偿、直流输电等。由于晶闸管没有自关断能力，需要借助电网或负载进行换相，因此在逆变应用场合逐渐被 IGBT、GTO、IGCT 等代替。GTO 是在晶闸管基础上发展起来的全控型电力电子器件，目前的电压电流等级可达 6kV、6kA。

GTO 开关速度较低，损耗大，需要庞大的缓冲电路和门极驱动电路，增加系统的复杂性和成本，使其应用受到限制。集成门极换向晶闸管 (IGCT) 综合功率 MOSFET 和晶闸管两者的优势。IGCT 继承了晶闸管的高阻断能力和低通态压降的特点。与 GTO 相比，IGCT 的关断时间降低了 30%，功耗降低了 40%，另外驱动功率显著下降。目前 IGCT 容量已达到 6.5kV、4kA，适合功率从数百

千瓦到数十兆瓦的应用场合。IGCT 替代 GTO 已成为必然。IGCT 同样主要面向高压大容量应用，包括中压电动机调速、电力牵引、风力发电、直流输电、固体短路器等应用。

电力电子电路功率变换技术与电力电子器件同步发展，除发明了众多功率变换的电路拓扑外，还创造如吸收、多重化、软开关、多电平概念；在控制技术方面出现了相控、PWM 控制、以状态空间平均法为代表的动态建模理论；在仿真手段方面出现多种商用软件，如 PSPICE、SABER、SIMPLIS 等。电力电子技术已广泛地应用于工业、交通、IT、通信、国防以及家电等，已形成了全球 600 亿美元电力电子产品市场，支撑着 5700 亿美元的电子硬件产品。据美国国家电力科学研究院预测，至 2010 年，80% 的电能将通过电力电子技术进行处理。

### 1.3 电力电子技术的发展与展望

#### 1. 功率器件

功率器件的发展是电力电子技术发展的基础。功率 MOSFET 至今仍是最快速的功率器件，减少其通态电阻仍是今后功率 MOSFET 主要研究方向，长期以来没有太大的突破。直到 1998 年，英飞凌公司应用超级结（Super Junction）的概念，通过引入等效漂移区，

在保持阻断电压能力的前提下，有效地减少了 MOSFET 的导通电阻，这种 MOSFET 被称为 CoolMOS，如图 1-4 所示。比如 600V 耐压的 CoolMOS 的通态电阻仅为普通 MOSFET 的 1/5。与其他

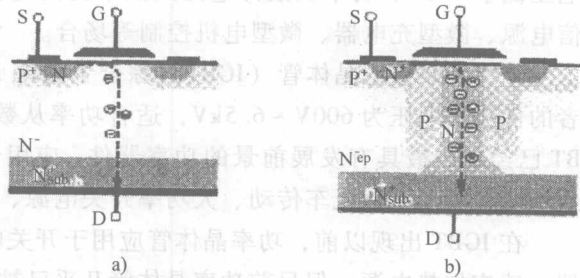


图 1-4 CoolMOS 与普通 MOSFET 结构的比较  
a) 普通 MOSFET 结构 b) CoolMOS 结构

器件相比，MOSFET 没有二次击穿，可谓最易使用的功率开关器件，它在低电压中小功率电源、固体开关等中得到广泛的应用。

IGBT 综合了场控器件快速性优点和双极型器件低通态压降的优点。IGBT 的高压、大容量也是长期以来的研究目标。1985 年，人们认为 IGBT 的极限耐压为 2kV，而目前已达到 6.5kV。IGBT 的阻断电压上限不断刷新。采用 IGBT 改造 GTO 变频装置，可以显著减少装置的体积和损耗。IGBT 的阻断电压的提高，使其能覆盖更大的功率应用领域，如 IGBT 替代 GTO 改造原有电气化电力机车的变频器。IGBT 正在不断地蚕食晶闸管、GTO 的传统应用领地，在大功率应用场合极具渗透力。对于应用于市电的电力电子装置的低压 IGBT，其主要性能提高目

标是降低通态压降和提高开关速度。近年来出现了沟槽栅结构，显著减少了导通电阻。如何提高 IGBT 的可靠性，如采用压接工艺等，也是今后的重要课题。

面临 IGBT 的追赶，ABB 公司与三菱公司合作开发了 GTO 的更新换代产品：IGCT，如图 1-5 所示。IGCT 通过分布集成门极驱动、浅层发射极等技术，器件的开关速度有一定的提高，同时显著地减少了门极驱动功率，方便了应用。可以预计，GTO、IGCT 将面临 IGBT 的严峻竞争，IGCT 的出路

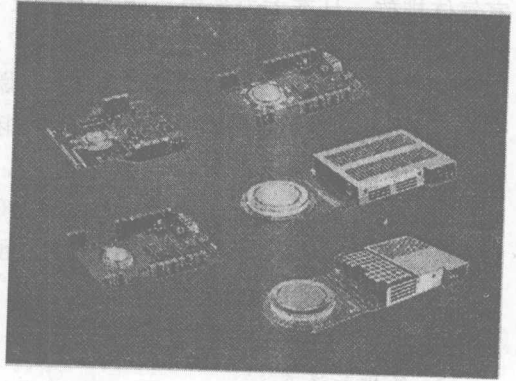


图 1-5 ABB 公司开发的 IGCT

是高压、大容量化，可能在未来的柔性交流输电系统（FACTS）应用里寻找出路。

SiC 功率器件是 21 世纪最有发展潜力的电力电子器件。SiC 材料的耐压是硅材料的 10 倍，热导率是硅材料的 3 倍，工作结温愈  $200^{\circ}\text{C}$ 。SiC 功率器件的开关频率将显著提高，通态损耗和开关损耗减至硅功率器件的  $1/10$ 。由于热导率和结温提高，因此散热器设计变得容易，构成的装置体积变得更小。由于 SiC 器件的禁带宽、结电压高，较适合于制造场控型器件。目前 600V 的 SiC 肖特基（Schottky）二极管产品，由于具有几乎零反向恢复过程，已经在计算机电源中得到实际应用。SiC MOSFET 的研究开发正在进行之中，预计不久将面世。SiC 功率器件将广泛应用于开关电源、电动汽车等场合。SiC 器件将成为 21 世纪电力电子技术的新驱动力。

## 2. 再生能源与环境保护

现代社会对环境造成了严重的污染，温室气体的排放引起了国际社会的关注。大量的能源消耗是温室气体排放的主要原因。发达国家的长期工业化过程是造成温室气体问题的主要原因。然而，改革开放以来，我国的能源消费量急剧上升，二氧化碳排放量也有较大增加。1995 年我国由能源活动引起的二氧化碳排放量约为 28 亿 t，在全球温室气体排放总量中，约占 12%，位居第二。按照我国目前以煤为主的能源方案，预计不久，我国的二氧化碳排放量就可能超过美国，成为世界上第一排放量国家。

1997 年在日本京都召开的“联合国气候变化框架公约”会议上，通过了著名京都议定书 COP3，即温室气体排放限制议定书。通过国际社会的努力，2005 年京都议定书正式生效。2007 年在德国召开的 G8 会议上，确认在 2050 年温室气体减排 50% 的目标。京都议定书将对中国经济和世界经济的发展产生深远的影响。扩大再生能源应用比例和大力采用节能技术是实现京都议定书目标的十分

关键和有效措施。日本、德国、澳大利亚积极推广再生能源和节能技术，减少温室气体排放。日本大力采用新能源发电技术，光伏发电装机容量将从1999年的20万kW，至2010年将增加到480万kW；风力发电装机容量将从1999年的8万kW，至2010年将增加到300万kW。燃料电池将从1999年1.2万kW增加到2010年的220万kW。到2010年，再生能源和新能源占总能源消耗的比例将从1999年的1.2%增加到2010年的3%。

我国也十分重视再生能源的开发，2006年我国实施了《再生能源法》。2005年我国累计风电装机容量为120万kW，预计2010年累计风电装机容量为500万kW，2020年累计风电装机容量为3000万kW。光伏、风力、燃料电池等新能源发电技术推动电力电子技术的应用，并形成电力电子技术的巨大市场。

### 3. 低排放汽车

根据美国国家电力科学研究院的报告，纯电动汽车与汽油汽车的一次能源利用率之比为1:0.6。因此，发展电动汽车可以提高能源的利用率，同时减少温室气体和有害气体的排放。电动汽车的关键技术是电池技术和电力电子技术。铅酸蓄电池价格低，但能量密度低、体积大，一次充电的持续里程低，可充电次数少。目前国际上正在开展新型电池，如锂电池、镍氢电池等的研发工作。将汽油驱动和电动驱动相结合的混合动力汽车已在日本问世，如丰田公司Prius和本田公司Insight混合动力汽车。图1-6所示为混合动力汽车的驱动结构。据称它可减少油

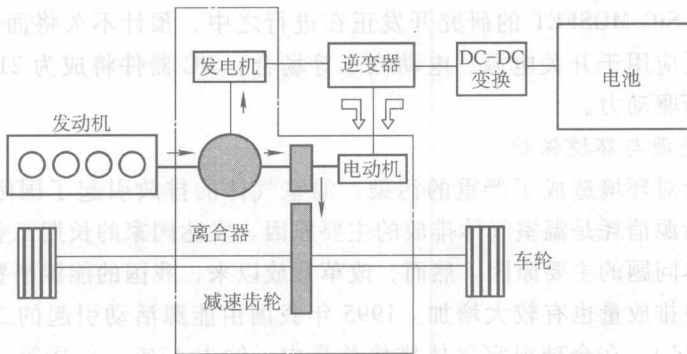


图 1-6 混合动力汽车的结构

耗50%，将排放量减至汽油汽车的1/10。日本政府采取补贴的方式支持混合动力汽车的销售。混合动力汽车的产业化前景已引起美国汽车行业的注意，美国正在探讨混合动力汽车的开发，以免失去混合动力汽车的市场。近年来，燃料电池汽车作为远景的理想环保的交通工具，燃料电池的开发也成为国内外研究的热点。图1-7所示为燃料电池电动汽车的结构。高能量密度燃料电池的低成本化、

高可靠性是主要的突破目标。我国也十分重视电动汽车研究开发,预计在5~10年内实现电动汽车的产业化。电动汽车产业将带动如电动机驱动逆变器、能量管理双向DC-DC变换器、辅助电源、充电器等电力电子产品的需求。

#### 4. 电力电子技术在电力系统中的应用

目前在国际上正在进行一场解放电力系统的革命,即实现电力市场(Deregulation)。英国已成功地实现了电力市场,我国与美国、日本、欧洲等国正在推进这一改革。电力市场的概念是将发电方与供电

方相分离,发电方与供电方从垄断走向社会化。通过引入竞争,促进供电质量和水平的提高,降低电价。电力市场将促进分散供电系统的发展,可大幅度地减少电力输送的能耗,同时提高了电力系统的安全性,有利于能源的多样化的实施,对国家安全有利;有利于采用再生能源、环保发电技术。从技术层面来讲,电力市场的引入将出现按质论价的电能供应方式的出现,产生对电力品质改善装置,如不间断电源(UPS)、静止无功补偿装置(SVC)、静止无功发生器(SVG)、动态电压恢复器(DVR)、电力有源滤波器(APF)、限流器、电力储能装置、微型燃气发电机(Micro Gas Turbo)等新需求;再生能源、环保发电技术等分散发电将需要交直流变流装置。电力市场将是FACTS技术全面应用成为现实,带动高压直流输电(HVDC)、背靠背装置(BTB)、统一潮流控制器(UPFC)等电力电子技术的应用。图1-8是应用FACTS技术的电力系统示意图。

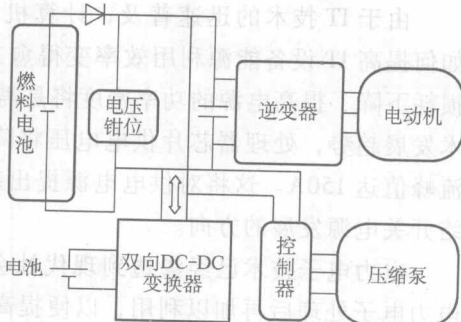


图 1-7 燃料电池电动汽车的结构

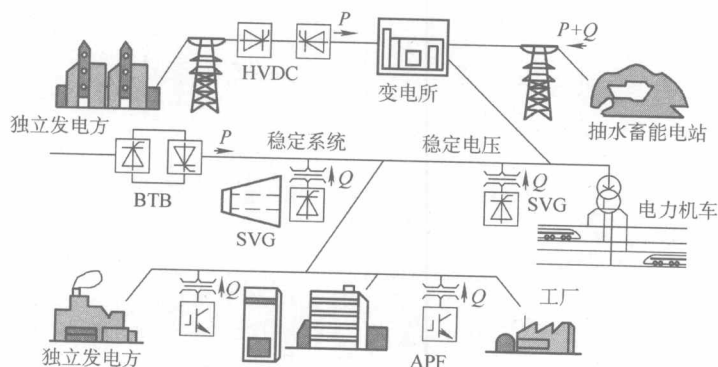


图 1-8 应用 FACTS 技术的电力系统



5. IT 产业

由于 IT 技术的迅速普及，计算机、网络设备、办公设备的电力消耗剧增，如何提高 IT 设备能源利用效率变得愈来愈重要。电源效率的提高、轻载或待机损耗下降、提高电源的功率密度将是需要解决的重要课题。随着集成电路制造技术发展趋势，处理器芯片供电电压将降到 0.5 ~ 0.8V，功耗约为 80 ~ 140W，电流峰值达 150A。这将对供电电源提出新的挑战。电源的标准化将是计算机、网络开关电源发展的方向。

电力电子技术已经渗透到现代社会的各个方面，未来 90% 的电能均需通过电力电子处理后再加以利用，以便提高能源利用的效率、提高工业生产的效率、实现再生能源的最大利用。电力电子技术将在 21 世纪为建设一个节能、环保、和谐的社会发挥重要的作用。

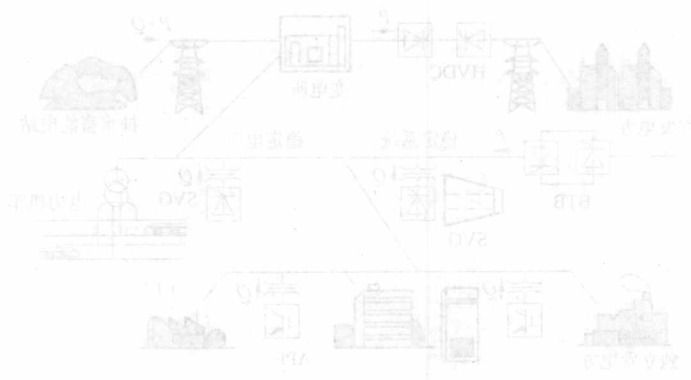


图 1-8 应用 FACTS 技术的电力系统