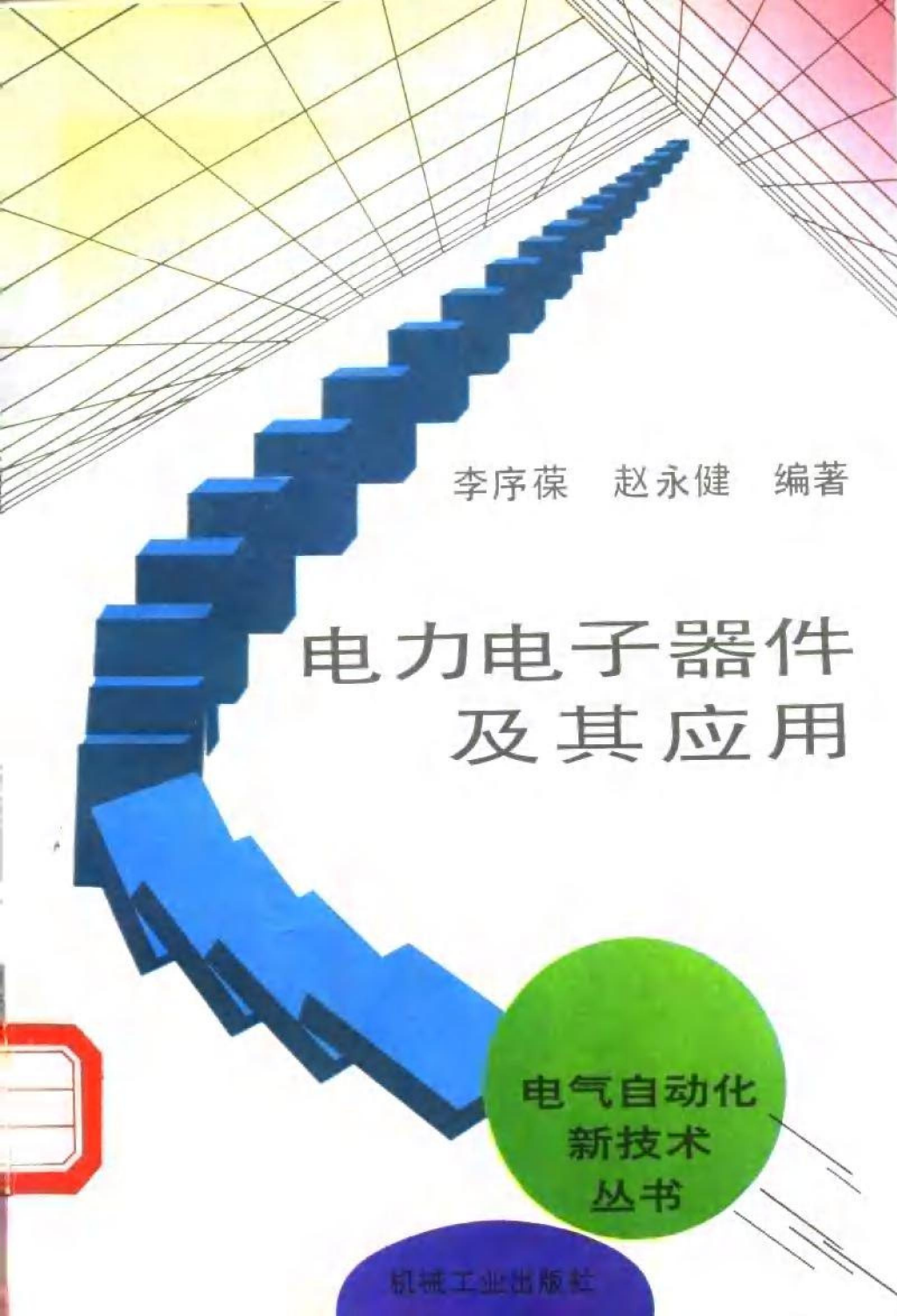




李序葆 赵永健 编著

电力电子器件 及其应用

电气自动化
新技术
丛书

机械工业出版社

TN 103
L 334

724677

电气自动化新技术丛书

电力电子器件及其应用

李序葆 赵永健 编著



21113001074606



机械工业出版社



本书以器件为核心,重点介绍了功率二极管、普通晶闸管、电力晶体管、可关断晶闸管、功率场控晶体管、绝缘栅双极晶体管、静电感应晶体管和功率集成电路等的原理、结构、特性和参数。此外,从应用的角度出发,介绍了与其相关的应用技术、新型电路、控制策略,以及典型的应用实例。

本书可供应用电力电子技术的工程技术人员阅读,也可供大专院校有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子器件及其应用/李序葆,赵永健编著. —北京:机械工业出版社,1996

(电气自动化新技术丛书)

ISBN 7-111-05338-9

I. 电… I. ①李… ②赵… I. 电力系统-电子器件
IV. TN103

中国版本图书馆CIP数据核字(96)第16809号

出 版 人: 马九荣 (北京市百万庄南街1号 邮政编码100037)
责任编辑: 孙流芳 版式设计: 张世琴 责任校对: 孙志筠
封面设计: 姚 毅 责任印制: 卢子祥

三河市宏达印刷厂印刷 · 新华书店北京发行所发行

1996年12月第1版第1次印刷

850mm×1168mm¹/₃₂ · 13.75印张 · 356千字

0 001—4 500册

定价: 26.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

《电气自动化新技术丛书》

序 言

科学技术的发展，对于改变社会的生产面貌，推动人类文明向前发展，具有极其重要的意义。电气自动化技术是多种学科的交叉综合，特别在电力电子、微电子及计算机技术迅速发展的今天，电气自动化技术更是日新月异。毫无疑问，电气自动化技术必将在建设“四化”、提高国民经济水平中发挥重要的作用。

为了帮助在经济建设第一线工作的工程技术人员能够及时熟悉和掌握电气自动化领域中的新技术，中国自动化学会电气自动化专业委员会和中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会联合成立了《电气自动化新技术丛书》编辑委员会，负责组织编辑《电气自动化新技术丛书》。丛书将由机械工业出版社出版。

本丛书有如下特色：

一、本丛书是专题论著，选题内容新颖，反映电气自动化新技术的成就和应用经验，适应我国经济建设急需。

二、理论联系实际，重点在于指导如何正确运用理论解决实际问题。

三、内容深入浅出，条理清晰，语言通俗，文笔流畅，便于自学。

本丛书以工程技术人员为主要读者，也可供科研人员及大专院校师生参考。

编写出版《电气自动化新技术丛书》，对于我们是一种尝试，难免存在不少问题和缺点，希望广大读者给予支持和帮助，并欢迎大家批评指正。

本丛书选题将随新技术发展不断扩充。凡属电气自动化领域新技术均可作为专题撰写新书。我们也面向社会公开征稿，欢迎自列选题投稿。来稿或索取稿约请函寄 300180 天津市津塘路 174 号天津电气传动设计研究所转《电气自动化新技术丛书》编辑委员会。

《电气自动化新技术丛书》
编辑委员会

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会成员

主任委员：陈伯时

副主任委员：喻士林 夏德铃 李永东

委员：（以姓氏笔划为序）

王 炎	王文瑞	王正元
刘宗富	孙 明	孙武贞
孙流芳	过孝瑚	许宏纲
朱稚清	夏德铃	陈伯时
陈敏逊	李永东	李序葆
张 浩	张敬民	周国兴
涂 健	蒋静坪	舒迪前
喻士林	霍勇进	戴先中

《电气自动化新技术丛书》

出版基金资助单位

机械工业部天津电气传动设计研究所

深圳华能电子有限公司

北京电力电子新技术研究开发中心

天津普辰电子工程有限公司

前 言

电力电子技术是以电力为对象的电子技术，它的主要任务是对电能进行控制和变换。电力电子技术是当代高新技术的重要内容之一，是机电一体化的重要组成环节。已成为信息产业和传统产业之间的重要桥梁，成为支持多项高新技术发展的基础技术，它将为进一步节能、节材、提高生产效率提供强有力的手段。

随着微电子技术、电力电子技术以及计算机技术的发展，不断涌现出新型的电力半导体器件，并以器件特征为依据将电力电子技术划分为传统电力电子技术和现代电力电子技术两个阶段。前者以半控型电力半导体器件（SCR）为核心，带动了整流领域的飞速发展；后者以全控型器件（GTR、GTO、功率 MOSFET、IGBT、SIT 等）为核心，带动了逆变领域的飞速发展。

本书较系统地介绍了电力半导体器件的发展概貌，尤其侧重于全控型器件。除了论述器件的原理、结构、特性之外，还从应用的角度出发介绍了与其相关的应用技术、新型电路、控制策略以及典型的应用实例。

本书以器件为核心，介绍了功率二极管、晶闸管（SCR）、电力晶体管（GTR）、可关断晶闸管（GTO）、功率场控晶体管（功率 MOSFET）、绝缘门极晶体管（IGBT）、静电感应晶体管（SIT）以及功率集成电路（PIC）等。在应用技术方面，主要介绍了新型器件的驱动电路、保护电路、缓冲电路、串并联应用电路以及冷却散热措施等。在控制策略方面，介绍了传统电力电子技术中的相控技术和现代电力电子技术中的 PWM 技术和零损耗开关谐振技术，以及由它们构成的相控整流电路、DC—DC 斩波变换电路、DC—AC PWM 逆变电路、双零谐振开关变换电路等。还根据各类器件的不同特点，介绍了典型的应用实例。

本书力求概念清晰、结构严谨、深入浅出、内容新颖、理论联系实际、务求实用。

本书由《电气自动化》杂志主编李序葆高级工程师和山东工业大学赵永健教授合作编写。

在编写过程中，陈伯时教授和喻士林教授级高级工程师给予了具体的指导和帮助，得到了许多同仁们的关怀和支持，参阅了许多同行专家的论著文献，在此一并致谢。

由于作者水平所限，书中谬误之处在所难免，敬请同行专家、广大读者指教。

作 者

1996年2月

目 录

《电气自动化新技术丛书》序言

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 电力电子技术	1
1.2 电力半导体器件	3
1.3 变流电路与控制技术	6
1.4 电力电子技术的应用与未来	7
第 2 章 功率二极管	10
2.1 PN 结	10
2.1.1 PN 结的形成	10
2.1.2 PN 结的单向导电性	12
2.1.3 PN 结的反向击穿	13
2.1.4 PN 结的电容效应	14
2.2 二极管的特性与参数	16
2.2.1 伏安特性	16
2.2.2 开关特性	17
2.2.3 性能参数	19
2.3 二极管的分类与参数实例	20
2.3.1 普通二极管	20
2.3.2 快恢复二极管	20
2.3.3 肖特基二极管	24
2.4 散热措施	26
2.4.1 散热的原理与重要性	26
2.4.2 散热器及其安装	27
第 3 章 晶闸管	31
3.1 普通晶闸管	31
3.1.1 结构与工作原理	31

3.1.2	特性	34
3.1.3	参数	38
3.2	特殊晶闸管	42
3.2.1	高频晶闸管	42
3.2.2	双向晶闸管	43
3.2.3	逆导晶闸管	47
3.2.4	光控晶闸管	50
3.3	晶闸管的触发电路	52
3.3.1	对触发电路的基本要求	52
3.3.2	触发电路的型式	54
3.3.3	单结晶体管触发电路	54
3.3.4	集成化触发电路	58
3.4	相控整流电路	61
3.4.1	移相控制技术	61
3.4.2	单相桥式全控整流电路	63
3.4.3	三相半波可控整流电路	71
3.4.4	三相桥式全控整流电路	78
3.4.5	整流电压的谐波分析	85
3.5	逆变电路	87
3.5.1	基本原理	87
3.5.2	单相桥式并联逆变电路	92
3.5.3	三相桥式并联逆变电路	95
3.5.4	单相串联逆变电路	97
3.6	晶闸管的保护与容量扩展	98
3.6.1	过电压保护	98
3.6.2	过电流保护	101
3.6.3	晶闸管的串并联	102
第4章	电力晶体管 (GTR)	106
4.1	电力晶体管的结构	106
4.2	特性与参数	110
4.2.1	静态特性与参数	110
4.2.2	动态特性与参数	116
4.2.3	二次击穿与安全工作区	118

4.2.4	温度特性与散热	121
4.3	GTR 的驱动与保护	124
4.3.1	驱动电路的设计原则	124
4.3.2	基极驱动电路的基本型式	125
4.3.3	过电流的检测与保护	129
4.3.4	实用驱动电路举例	133
4.4	缓冲电路	138
4.4.1	概述	138
4.4.2	耗能式缓冲电路	140
4.4.3	馈能式缓冲电路	142
4.5	脉冲宽度调制 (PWM) 技术	145
4.5.1	PWM 技术原理	145
4.5.2	SPWM 波形成电路	151
4.5.3	SPWM 波的软件生成方法	157
4.5.4	SPWM 波专用集成芯片	164
4.6	PWM DC—AC 逆变器	173
4.6.1	单相逆变器	173
4.6.2	三相逆变器	174
4.6.3	封锁时间对输出电压的影响	175
4.7	准谐振软性开关变流器	177
4.8	交流变频调速	179
4.8.1	概述	179
4.8.2	变频调速的原理与特性	181
4.8.3	变频调速系统	186
第 5 章	功率场效应晶体管 (Power MOSFET)	204
5.1	结构与工作原理	204
5.1.1	基本结构与工作原理	204
5.1.2	功率的扩展	205
5.1.3	多元集成结构的影响	208
5.2	特性与参数	208
5.2.1	静态特性与参数	208
5.2.2	动态特性与参数	213
5.2.3	安全工作区	216

5.2.4	温度稳定性	219
5.2.5	与 GTR 的比较	221
5.3	栅极的驱动与保护	222
5.3.1	栅极驱动特性	222
5.3.2	栅极驱动电路	227
5.3.3	并联应用	233
5.3.4	使用中的保护措施	235
5.4	DC—DC 变流器	237
5.4.1	常用 DC—DC 变流电路	237
5.4.2	集成 PWM 控制器芯片	250
5.4.3	电流控制 PWM 技术	261
5.4.4	准谐振软性开关 DC—DC 变流器	270
5.5	功率 MOSFET 应用举例	277
5.5.1	开关式稳压电源	277
5.5.2	高频自激振荡电源	281
5.5.3	其他应用	282
第 6 章	可关断晶闸管 (GTO)	283
6.1	结构与工作原理	283
6.1.1	结构	283
6.1.2	GTO 开通原理	284
6.1.3	GTO 关断原理	285
6.1.4	GTO 的失效原理	287
6.2	特性与参数	288
6.2.1	静态特性	288
6.2.2	动态特性	291
6.2.3	主要参数	293
6.3	GTO 的缓冲电路	297
6.3.1	缓冲电路的作用	297
6.3.2	缓冲电路的工作原理	298
6.3.3	缓冲电路的参数估算与安装工艺	302
6.4	门极控制技术	304
6.4.1	门极驱动特性	304
6.4.2	门极控制信号波形分析	308

6.4.3	门极驱动型式	310
6.4.4	门极控制电路实例	311
6.5	GTO 的串并联	318
6.5.1	GTO 的串联使用	318
6.5.2	GTO 的并联使用	319
6.6	GTO 的过电流保护	322
6.6.1	过电流的产生与 GTO 的过电流特性	322
6.6.2	状态识别过电流保护法	323
6.6.3	桥臂互锁保护法	327
6.6.4	逆变器的过电流保护	328
6.6.5	门极电路的过电流保护	334
6.7	GTO 应用实例	338
6.7.1	磁通控制的 GTO 逆变器变频调速系统	338
6.7.2	具有复合制动功能的 GTO 斩波调速系统	344
6.7.3	快速响应、大容量 GTO 逆变器	347
第 7 章	绝缘栅双极晶体管 (IGBT)	350
7.1	原理与特性	350
7.1.1	IGBT 的工作原理	350
7.1.2	基本特性	353
7.2	门极驱动	362
7.2.1	驱动条件	362
7.2.2	驱动电路	365
7.2.3	IGBT 专用驱动模块	370
7.3	IGBT 的保护	376
7.4	IGBT 应用实例	384
7.4.1	静音式变频调速系统	384
7.4.2	工业加热电源	388
7.4.3	不间断电源 (UPS)	392
7.4.4	有源功率滤波器	392
第 8 章	功率集成电路及其他新型电力半导体器件	394
8.1	功率集成电路	394
8.1.1	概述	394
8.1.2	高压集成电路	394

8.1.3 智能功率集成电路	395
8.2 其他新型电力半导体器件	406
8.2.1 静电感应晶体管 (SIT)	406
8.2.2 静电感应晶闸管 (SITH)	409
8.2.3 MOS 控制晶闸管	414
参考文献	420

第1章 绪 论

1.1 电力电子技术

电力电子技术已成为一门新兴的高新技术学科，是一门利用电力电子器件对电能进行控制和转换的学科。美国电气和电子工程师协会(IEEE)的电力电子学会对电力电子技术的阐述是：“有效地使用电力半导体器件，应用电路和设计理论以及分析开发工具，实现对电能的高效能变换和控制的一门技术，它包括电压、电流、频率和波形等方面的变换”。

电力电子技术的内容包括三个方面：电力电子器件，变流电路和控制电路。它与多种学科密不可分，可用图 1-1 形象地表示电力电子技术与其他学科的联系。总体上说，电力电子技术是电力、电子、控制三大电

气工程技术领域之间的交叉学科，是一门多学科相互渗透的综合性技术学科。今后，随着科学技术的发展，必将与现代控制理论、材料科学、微电子技术、计算机技术以及电机工程等领域发生更加密切的关系。

由于当代许多高新技术离不开电能，离不开表征电能的电压、电流、频率、波形和相位等若干基本参数的控制与转换，而电力电子技术能够对这些参数实现精确的控制与高效能的处理，所以电力电子技术这项高新技术还是其他多项高新技术的发展基础。

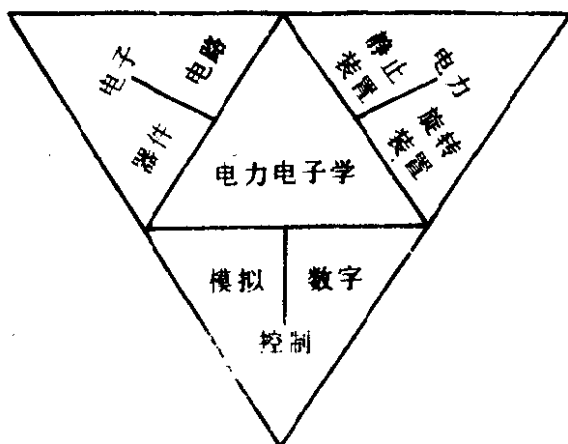


图 1-1 电力电子技术与其他学科的联系

电力电子技术的纪元始于1956年普通晶闸管的问世,由于其功率处理能力的突破,于是以晶闸管为核心的,对电力处理的庞大分支从电子技术中分离出来,形成了电力电子技术;而其余部分仍保持其小功率的特点,进行信息处理,称为微电子技术。在电力电子技术近40年的发展进程中,明显地分为两个阶段。1980年前的一段时间是以普通晶闸管为核心,衍生出若干派生器件,功率越来越大,性能日臻完善,技术趋于成熟。其主要特点是器件为半控型的,即通过门极控制信号只能控制其开通,而不能控制其关断;在控制技术上采用移相控制技术;结构形式上基本上是分立元件。在这一时期,在中大功率范围内的各种静止变流器和电动机的传动系统一直使用这些电路,如直传动、电化学电源、机车牵引等方面。尽管在电压、电流两方面,晶闸管系列器件仍有着一定的发展余地,但因下述几项缺点阻碍了它们的继续发展。

(1) 由于是半控型器件,因此要想关断这些器件必须另用由电感、电容和辅助电源组成的强迫换相电路,结果使得整机体积增大、重量增加、效率降低、可靠性下降;

(2) 由于立足于分立式结构,使得工作频率难以提高,一般情况下低于400Hz,大大限制了它的应用范围;

(3) 由于相控角的变化使网侧及负载上的谐波严重,不但电路功率因数低,而且对电网产生“公害”。

这一阶段常称为传统电力电子技术阶段。随着生产的发展,要求有新的器件和电路出现,以改进和取代传统的电力电子技术。

70年代后期,各种高速、全控型的器件先后问世,如可关断晶闸管(GTO)、电力晶体管(GTR)、功率场控晶体管(功率MOSFET)、绝缘栅双极晶体管(IGBT)、静电感应晶体管(SIT)、静电感应晶闸管(SITH)、MOS晶闸管(MCT)等。变流装置中的普通晶闸管逐渐被这些新型器件取代,新的结构紧凑的变流电路随之出现,许多早期的变流方式再次焕发青春,过去难以实现的控制方式也得以实现。这一切使电力电子技术具有了全新的面