



国际电气工程先进技术译丛

 Springer

# 功率半导体器件 —— 原理、特性和可靠性

Semiconductor Power Devices: Physics,  
Characteristics, Reliability

Josef Lutz

(德) Heinrich Schlangenotto

Uwe Scheuermann

Rik De Doncker

著

卞抗 杨莺 刘静

陈治明

译  
校



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

013046767

TN303

59

国际电气工程先进技术译丛

# 功率半导体器件—— 原理、特性和可靠性

Josef Lutz

Heinrich Schlangenotto

(德)

Uwe Scheuermann

著

Rik De Doncker

卞抗 杨莺 刘静 译

陈治明 校



机械工业出版社

TN303

59



北航

C1652485

01304282

本书介绍了功率半导体器件的原理、结构、特性和可靠性技术，器件部分涵盖了当前电力电子技术中使用的各种类型功率半导体器件，包括二极管、晶闸管、MOSFET、IGBT和功率集成器件等。此外，还包含了制造工艺、测试技术和损坏机理分析。就其内容的全面性和结构的完整性来说，在同类专业书籍中是不多见的。

本书内容新颖，紧跟时代发展，除了介绍经典的功率二极管、晶闸管外，还重点介绍了MOSFET、IGBT等现代功率器件，颇为难得的是收入了近年来有关功率半导体器件的最新的成果。本书是一本精心编著，并根据作者多年教学经验和工程实践不断补充更新的好书，相信它的翻译出版，必将有助于我国电力电子事业的发展。

本书的读者对象包括在校学生、功率器件设计制造和电力电子应用领域的工程技术人员及其他相关专业人员。本书适合高等院校有关专业用作教材或专业参考书，亦可被电力电子学界和广大的功率器件和装置生产企业的工程技术人员作为参考书之用。

Translation from the English language edition:

*Semiconductor Power Devices: Physics, Characteristics, Reliability*

by J. Lutz, H. Schlangenotto, U. Scheuermann, R. De Doncker.

©Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011.

Springer is a part of Springer Science + Business Media.

All Rights Reserved.

本书中文简体字版由Springer授权机械工业出版社独家出版。版权所有，侵权必究。

本书版权登记号：图字01-2011-5307号

### 图书在版编目 (CIP) 数据

功率半导体器件：原理、特性和可靠性 / (德) 卢茨 (Lutz, J.) 等著；卞抗，杨莺，刘静译. —北京：机械工业出版社，2013.4

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文：Semiconductor Power Devices: Physics, Characteristics, Reliability  
ISBN 978-7-111-41727-9

I. ①功… II. ①卢…②卞…③杨…④刘… III. ①功率半导体器件  
IV. ①TN303

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 042499 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑：付承桂 责任编辑：闫洪庆 任鑫

版式设计：霍永明 责任校对：张媛

责任印制：乔宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2013年6月第1版第1次印刷

169mm × 239mm · 28 印张 · 578 千字

0 001—3 000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-41727-9

定价：98.00 元



凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心：(010)88361066 教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售一部：(010)68326294 机工官网：<http://www.cmpbook.com>

销售二部：(010)88379649 机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线：(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

## 译者的话

本书是根据德国 J. Lutz、H. Schlangenotto、U. Scheuermann 和 R. De Doncker 所著的第 1 版《Semiconductor Power Devices: Physics, Characteristics, Reliability》(2011 年出版) 翻译的。

作者 J. Lutz 博士是 Chemnitz 科技大学的教授, H. Schlangenotto 博士是 Darmstadt 科技大学的教授, R. De Doncker 博士是亚琛工业大学的教授。他们长期从事功率半导体器件的研究和教学工作, 在业内享有盛誉。U. Scheuermann 博士在德国 Semikron 公司从事功率半导体器件的开发研究工作, 特别在封装、可靠性和系统集成方面做出了重要贡献。

本书系统地阐述了各种功率半导体器件的原理和特性, 详细地介绍了它们的设计、工艺、测试、可靠性以及损坏机理。书中介绍的功率半导体器件涵盖了各种二极管、晶闸管, 以及现代功率器件 MOSFET 和 IGBT 等。论述中特别注重对这些现代功率器件研发新成果的评价。本书对该专业的师生和从事功率半导体器件的研发、生产和应用的工程技术人员很有帮助, 是该领域难得一见的好书。

本书前言、第 1~6 章由原西安电力电子技术研究所高级工程师卞抗翻译, 第 7~10 章和附录 A~E 由西安理工大学副教授杨莺博士翻译, 第 11~14 章由西安理工大学副教授刘静博士翻译, 全书由西安理工大学陈治明教授校阅。限于译者水平, 书中难免有误译和欠妥之处, 敬请读者批评指正。

在本书的翻译出版过程中得到了清华大学自动化系顾廉楚教授的支持和指导, 在此表示衷心感谢。西安理工大学的译者和校者也借此机会对学生李峰、梁洪甲、张欢欢、高占军、黄磊等的协助表示感谢。

译者

## 前 言

电力电子技术在工业和社会中变得越来越重要。它有显著提高电力系统效率的潜力，而这是很重要的。为了发掘这一潜能，不论是开发或改进器件的工程师，还是电力电子技术领域的应用工程师，都需要理解功率半导体器件的基本原理。另外，因为半导体器件只有在适当的环境下才能实现它的正常功能，为了可靠的应用，连接技术、相关材料的封装技术和冷却问题都必须加以考虑。

本书的读者包括学生和功率器件设计及电力电子技术应用领域工作的工程师。本书侧重于现代半导体开关器件（例如功率 MOSFET 和 IGBT），以及必需的续流二极管。在实践中，工程师可以从本书中对某个器件的内容入手展开工作。每一个章节先开始描述器件的结构和通用特性，然后针对其物理工作原理仔细加以阐述。深入地讨论所需的半导体物理原理，pn 结的工作原理和基本工艺技术。这些题目在本书中有深入分析，所以本书对半导体器件的专业人士也具有价值。

本书中的某些题目是第一次在关于功率器件的英文教科书中仔细阐述。在器件物理中，我们将详细讨论现代功率器件里用来控制正向和开关特性的发射极复合。我们会给出关于发射极复合特性参数影响的详细讨论。另外，基于对用于可靠性应用的封装技术重要性的认知日益增强，本书还包含了关于封装和可靠性的章节。在电力电子系统的开发中，工程师们经常会遇到失效及其没有预见到的后果，以及为了查找失效的根本原因而费时工作。所以，本书还给出了关于从长期实践中获得的失效机理和供电电路中的振荡效应的章节。

本书是 J. Lutz 在 Chemnitz 科技大学有关“功率器件”的讲义，以及早前 H. Schlangenotto 在 Darmstadt 科技大学于 1991~2001 年有关“功率器件”的讲义的基础上编写而成的。基于这些讲义和附加的关于新器件、封装、可靠性和失效机制的大量内容，Lutz 于 2006 年发表了德文教科书《Halbleiter-Leistungsbau-elemente—Physik, Eigenschaften, Zuverlässigkeit》。这本英文教科书不是德文版的简单翻译，而是增添了大量新的内容。

关于半导体性质和 pn 结的章节，以及 pin 二极管章节的一部分内容是由 H. Schlangenotto 改写和充实的。J. Lutz 增添了关于晶闸管、MOSFET、IGBT 和失效机理的章节。U. Scheuermann 撰写了关于封装技术、可靠性和系统集成的章节。R. De Doncker 提供了作为核心器件的功率器件的介绍。所有的作者都为其他非他们主笔的章节做出了贡献。

一些功率器件领域的学者在本书编写过程中提供了翻译、建议和评论上的支持，并进行了有益的讨论。这些学者包括 ABB 半导体公司的 Arnost kopta、Stefan

Linder 和 Munaf Rahimo, BMW 公司的 Dieter Polenov, 英飞凌 (Infineon) 公司的 Thomas Laska、Anton Mauder、Franz-Josef Niedernostheide、Ralf Siemieniec 和 Gerald Soelkner, 斯德哥尔摩皇家工学院 (KTH Stockholm) 的 Martin Domeij 和 Anders Hallén, SATIE 公司的 Stephane Lefebvre, Secos 公司的 Michael Reschke, Semikron 公司的 Reinhard Herzer 和 Werner Tursky, SiCED 公司的 Wolfgang Bartsch, 不来梅 (Bremen) 大学的 Dieter Silber, 罗斯托克 (Rostock) 大学的 Hans Günter Eckel。开姆尼茨 (Chemnitz) 科技大学的几位本科生和博士生也为本书提供了支持, 他们是 Hans-peter Felsl、Birk Heinze、Roman Baburske、Marco Bohlländer、Tilo Pollera Matthias Baumann 和 Thomas Basler。亚琛工业大学 (RWTH Aachen) 的 Thomas Blum 和 Florian Mura 翻译了关于 MOSFET 的章节, Mary-Joan Blümich 为英文文字进行了润色。最后, 作者向为本书提供了重要意见和讨论的众多其他电力电子技术的学者和学生致谢。

- 德国开姆尼茨, Josef Lutz
- 德国新伊森堡, Heinrich Schlangenotto
- 德国纽伦堡, Uwe Scheuermann
- 德国亚琛, Rik De Doncker

2010年3月

# 目 录

译者的话

前言

<b>第 1 章 功率半导体器件——高效电能变换装置中的关键器件</b> .....	1
1.1 装置、电力变流器和功率半导体器件 .....	1
1.1.1 电力变流器的基本原理 .....	2
1.1.2 电力变流器的类型和功率器件的选择 .....	3
1.2 使用和选择功率半导体 .....	6
1.3 功率半导体的应用 .....	8
参考文献 .....	11
<b>第 2 章 半导体的性质</b> .....	14
2.1 引言 .....	14
2.2 晶体结构 .....	16
2.3 禁带和本征浓度 .....	18
2.4 能带结构和载流子的粒子性质 .....	21
2.5 掺杂的半导体 .....	25
2.6 电流的输运 .....	33
2.6.1 载流子的迁移率和场电流 .....	33
2.6.2 强电场下的漂移速度 .....	37
2.6.3 载流子的扩散和电流输运方程式 .....	39
2.7 复合-产生和非平衡载流子的寿命 .....	40
2.7.1 本征复合机理 .....	41
2.7.2 复合中心上的复合和产生 .....	43
2.8 碰撞电离 .....	49
2.9 半导体器件的基本公式 .....	54
2.10 简单的结论 .....	57
参考文献 .....	59
<b>第 3 章 pn 结</b> .....	65
3.1 热平衡状态下的 pn 结 .....	65
3.1.1 突变结 .....	67
3.1.2 缓变结 .....	72
3.2 pn 结的 $I$ - $V$ 特性 .....	75
3.3 pn 结的阻断特性和击穿 .....	82
3.3.1 阻断电流 .....	82
3.3.2 雪崩倍增和击穿电压 .....	84



3.3.3	宽禁带半导体的阻断能力	92
3.4	发射区的注入效率	93
3.5	pn结的电容	99
	参考文献	101
<b>第4章</b>	<b>功率器件工艺的简介</b>	<b>103</b>
4.1	晶体生长	103
4.2	通过中子嬗变来调整晶片的掺杂	105
4.3	外延生长	106
4.4	扩散	107
4.5	离子注入	112
4.6	氧化和掩蔽	116
4.7	边缘终端	118
4.7.1	斜面终端结构	118
4.7.2	平面结终端结构	120
4.7.3	双向阻断器件的结终端	121
4.8	钝化	122
4.9	复合中心	123
4.9.1	用金和铂作为复合中心	123
4.9.2	辐射引入的复合中心	125
4.9.3	Pt和Pd的辐射增强扩散	128
	参考文献	128
<b>第5章</b>	<b>pin二极管</b>	<b>132</b>
5.1	pin二极管的结构	132
5.2	pin二极管的 <i>I-V</i> 特性	133
5.3	pin二极管的设计和阻断电压	134
5.4	正向导通特性	139
5.4.1	载流子的分布	139
5.4.2	结电压	141
5.4.3	中间区域两端之间的电压降	142
5.4.4	在霍尔近似中的电压降	143
5.4.5	发射极复合、有效载流子寿命和正向特性	144
5.4.6	正向特性和温度的关系	151
5.5	储存电荷和正向电压之间的关系	152
5.6	功率二极管的开通特性	153
5.7	功率二极管的反向恢复	155
5.7.1	定义	155
5.7.2	与反向恢复有关的功率损耗	160
5.7.3	反向恢复:二极管中电荷的动态	163
5.7.4	具有最佳反向恢复特性的快速二极管	170



5.8 展望	183
参考文献	184
<b>第 6 章 肖特基二极管</b>	<b>187</b>
6.1 金属-半导体结的原理	187
6.2 肖特基结的 $I$ - $V$ 特性	188
6.3 肖特基二极管的结构	190
6.4 单极型器件的欧姆电压降	191
6.5 SiC 肖特基二极管	194
参考文献	199
<b>第 7 章 双极型晶体管</b>	<b>200</b>
7.1 双极型晶体管的工作原理	200
7.2 功率双极型晶体管的结构	201
7.3 功率晶体管的 $I$ - $V$ 特性	202
7.4 双极型晶体管的阻断特性	203
7.5 双极型晶体管的电流增益	205
7.6 基区展宽、电场再分布和二次击穿	209
7.7 硅双极型晶体管的局限性	211
7.8 SiC 双极型晶体管	211
参考文献	212
<b>第 8 章 晶闸管</b>	<b>214</b>
8.1 结构与功能模型	214
8.2 晶闸管的 $I$ - $V$ 特性	217
8.3 晶闸管的阻断特性	218
8.4 发射极短路点的作用	219
8.5 晶闸管的触发方式	220
8.6 触发前沿扩展	221
8.7 随动触发与放大门极	222
8.8 晶闸管关断和恢复时间	224
8.9 双向晶闸管	226
8.10 门极关断 (GTO) 晶闸管	227
8.11 门极换流晶闸管 (GCT)	231
参考文献	233
<b>第 9 章 MOS 晶体管</b>	<b>235</b>
9.1 MOSFET 的基本工作原理	235
9.2 功率 MOSFET 的结构	236
9.3 MOS 晶体管的 $I$ - $V$ 特性	237
9.4 MOSFET 沟道的特性	238
9.5 欧姆区域	241
9.6 现代 MOSFET 的补偿结构	242

9.7	MOSFET 的开关特性	246
9.8	MOSFET 的开关损耗	249
9.9	MOSFET 的安全工作区	250
9.10	MOSFET 的反并联二极管	251
9.11	SiC 场效应器件	255
9.12	展望	257
	参考文献	258
<b>第 10 章</b>	<b>IGBT</b>	<b>260</b>
10.1	功能模式	260
10.2	IGBT 的 $I-V$ 特性	262
10.3	IGBT 的开关特性	263
10.4	基本类型: PT-IGBT 和 NPT-IGBT	265
10.5	IGBT 中的等离子体分布	268
10.6	提高载流子浓度的现代 IGBT	269
10.6.1	高 $n$ 发射极注入比的等离子体增强	270
10.6.2	无门锁元胞几何图形	273
10.6.3	“空穴势垒”效应	273
10.6.4	集电极端的缓冲层	275
10.7	具有双向阻断能力的 IGBT	276
10.8	逆导型 IGBT	278
10.9	展望	280
	参考文献	280
<b>第 11 章</b>	<b>功率器件的封装和可靠性</b>	<b>283</b>
11.1	封装技术面临的挑战	283
11.2	封装类型	284
11.2.1	饼形封装	286
11.2.2	TO 系列及其派生	287
11.2.3	模块	290
11.3	材料的物理特性	295
11.4	热仿真和热等效电路	297
11.4.1	热力学参数和电参数之间的转换	297
11.4.2	一维等效网络	302
11.4.3	三维热网络	304
11.4.4	瞬态热阻	305
11.5	功率模块内的寄生电学元件	307
11.5.1	寄生电阻	307
11.5.2	寄生电感	308
11.5.3	寄生电容	311
11.6	可靠性	313

11.6.1	提高可靠性的要求	313
11.6.2	高温反向偏置试验	316
11.6.3	高温栅极应力试验	317
11.6.4	温度湿度偏置试验	318
11.6.5	高温和低温存储试验	318
11.6.6	温度循环和温度冲击试验	319
11.6.7	功率循环试验	321
11.6.8	其他的可靠性试验	336
11.6.9	提高可靠性的策略	337
11.7	未来的挑战	337
	参考文献	340
<b>第12章</b>	<b>功率器件的损坏机理</b>	<b>344</b>
12.1	热击穿——温度过高引起的失效	344
12.2	浪涌电流	346
12.3	过电压——电压高于阻断能力	349
12.4	动态雪崩	354
12.4.1	双极型器件中的动态雪崩	354
12.4.2	快速二极管中的动态雪崩	355
12.4.3	具有高动态雪崩能力的二极管结构	363
12.4.4	动态雪崩：进一步的任务	366
12.5	超过 GTO 的最大关断电流	366
12.6	IGBT 的短路和过电流	367
12.6.1	短路类型 I、II、III	367
12.6.2	短路的热、电应力	371
12.6.3	过电流的关断和动态雪崩	377
12.7	宇宙射线造成的失效	380
12.8	失效分析	385
	参考文献	387
<b>第13章</b>	<b>功率器件的感应振荡和电磁干扰</b>	<b>392</b>
13.1	电磁干扰的频率范围	392
13.2	LC 振荡	394
13.2.1	并联 IGBT 的关断振荡	394
13.2.2	阶跃二极管的关断振荡	396
13.3	渡越时间振荡	398
13.3.1	等离子体抽取渡越时间 (PETT) 振荡	399
13.3.2	动态碰撞电离渡越时间 (IMPATT) 振荡	405
	参考文献	408
<b>第14章</b>	<b>电力电子系统</b>	<b>410</b>
14.1	定义和基本特征	410

14.2 单片集成系统——功率 IC .....	412
14.3 印刷电路板上的系统集成 .....	415
14.4 混合集成 .....	417
参考文献 .....	422
<b>附录 A Si 与 4H-SiC 中载流子迁移率的建模参数 .....</b>	<b>424</b>
<b>附录 B 雪崩倍增因子与有效电离率 .....</b>	<b>426</b>
<b>附录 C 封装技术中重要材料的热参数 .....</b>	<b>429</b>
<b>附录 D 封装技术中重要材料的电参数 .....</b>	<b>430</b>
<b>附录 E 常用符号 .....</b>	<b>432</b>

# 第 1 章 功率半导体器件——高效 电能变换装置中的关键器件

## 1.1 装置、电力变流器和功率半导体器件

在一个竞争的市场中，可依靠自动化和过程控制来提高技术装置的生产率。最初，为了提高产量而扩大生产规模或者减少劳动密集型的工序，以节省成本。今天，注意力集中在能源的效率上，因为全球意识到气候的变化，而最重要的是，问题还与能源价格的提高和能源的安全性以及城市化进程的加快有关。所以可以预期，在未来的几十年里，发展更多的电气装置的趋势将会延续和加速。因此，高效处理电能的需求将显著增加。

自从有了电力系统并被作为关键的应用技术后，可以将电能从一种形式变成另一种形式，也就是有了可以进行电能变换的器件，在技术上有了重大的突破。例如，若没有变压器，大功率电能的产生、传输和分配是不可能的。有趣的是，今天很少有人知道，若没有最初被称为二次发电机（secondary generator）<sup>[Jon04]</sup>的这一发明，我们就不可能创造如此高效安全和（当地）环境清洁的电源。当然，作为变压器或者通常说的电磁器件，只能变换电压或者控制电抗，它们在自动化系统中的应用依然受到限制。在电气化的初期，频率和相位的控制只能用机电变换设备（即电动机、发电机）来实现。然而，这些设备毕竟笨重，需要维护；且损耗高、昂贵。此外，这些机电产品控制带宽窄。因此，它们通常工作在固定的给定值上。今天，大多数自动化和过程控制系统要求更加灵活的能量变换方法来改变动态电压或者调节电流、频率和相角等。

现在，电力电子技术是最先进的电能变换技术，它具有高度灵活性和高效率两个特点。作为一个工程领域，大约在 50 年以前，依靠所谓的硅可控整流器，即今天大家都知道的晶闸管<sup>[Owe07, Hol01]</sup>的开发和市场引入，电力电子技术就已经存在了。显然电力电子技术和功率半导体器件是紧密相连的领域。确实，在它的操作手册中，IEEE 电力电子技术学会把电力电子技术的领域定义为：“这个技术涵盖了电子元器件的有效使用，电路理论的应用和设计技术，以及分析工具的发展，其对象是电能的高效电子变换、控制和调节”<sup>[PEL05]</sup>。

简单地说，电力电子装置是一个采用功率半导体器件的高效率的能量变换工具。图 1-1 给出了一个电力电子装置的示意图。

电气传动是电力电子装置的一个特殊门类。图 1-2 给出了电气传动的框图。电气传动用于驱动系统、发电装置（风力机）、工业和商业的传动，例如用于加热通

风和空调装置中，以及运动控制。在电气传动中，机电能量变换器的控制是纳入电力电子变流器的控制范畴中的，而从控制的视角来看，机电能量变换器是一个非常精密的负载。大多数涉及电力电子变流器技术的研究机构也从事电气传动技术的研究，因为这个领域一直是电力电子变流器的最大应用领域之一（体现在已安装的表现功率上）<sup>[Ded06]</sup>。在不久的将来，尽管在光伏装置和计算机电源中，电力变流器的应用不断增加，但是可以预期，传动将依然占主导地位。

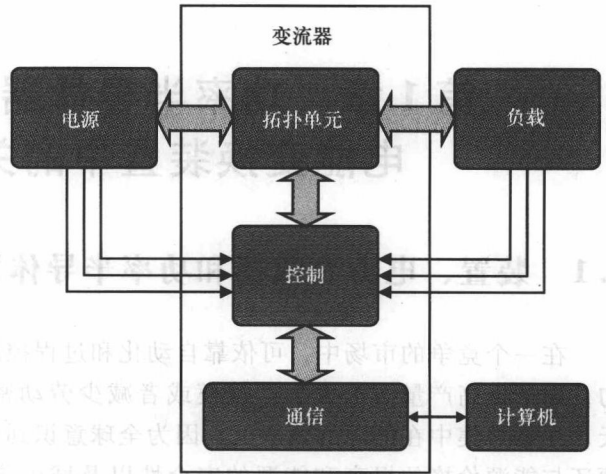


图 1-1 在电源和负载之间，电力电子装置以一种高效率的方式变换和控制电能（连接电源和负载的传感器以及信息和通信环节通常是集成的）

大多数专家预言，当前的传动产业市场将继续扩大，并将打入新兴市场，例如风力机，更多的电动船舶和飞行器，以及电动交通工具，即火车、有轨电车、无轨电车、汽车、轻便摩托车以及自行车等。

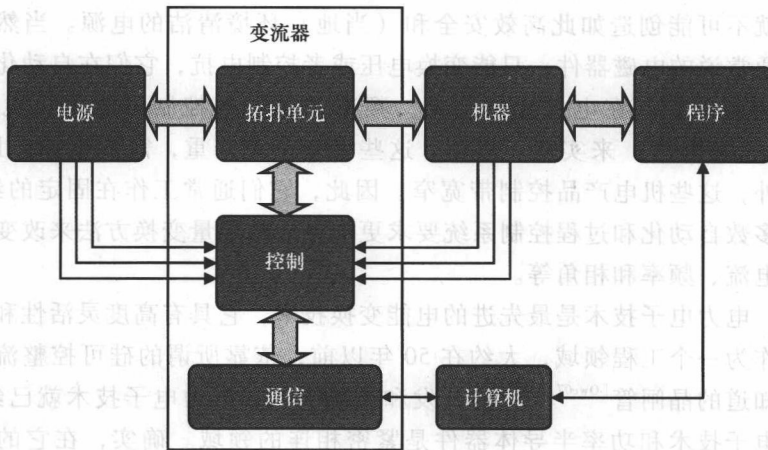


图 1-2 高动态电气传动装置，由电力电子变流器和电机或者和带有专用的控制电能转换成机械运动的传动装置组成

### 1.1.1 电力变流器的基本原理

当考虑现代电力电子变流器的运行原理和拓扑时，从图 1-1 所示的普通电力电子变流器的框图中能看到更多的详细情况。从根本上来讲，制造电力电子变流器需要三种类型的元器件：

- 1) 有源器件，即功率半导体器件，它能开通和关断变流器中的能流。这种器

件工作在关断状态（正向阻断或反向阻断）或是工作在开通状态（导通）。

2) 无源元件，即变压器、电感器和电容器，它们在变流器装置中暂时储存能量。根据其工作频率、电压、冷却方式和集成的水平，来选用不同的磁性材料、电介质和绝缘材料。对于给定的额定功率，变流器较高的工作（开关）频率就能用较小的无源元件。

3) 控制单元，即模拟和数字电子设备，信号变换器、处理器和传感器，用它们控制变流器中的能量流，使内部变量（电压、电流）跟随计算的参考信号而变动，这个信号按照外部的指令保证变流器所需的性能（这个指令是通过数字通信链路获得的）。今天大多数控制单元也给出状态信息和装置电平的诊断功能。

作为电力电子变流器应该高效地变换电能（效率大约为95%），功率器件不能选择线性工作状态。更确切地说，器件是以开关方式工作的。因此，在电源领域里做一个区分，电力变流器被称为“开关型电源”。它是用来控制和变换流过变流器的电能的，所有电力变流器背后的基本构思是把连续的能量流切割成能量小包，处理这些小包，并输送能量，在输出端使之又重新成为另一种连续的能量流。所以，电力变流器是真正的功率信息处理机。在这种情况下，所有变流器拓扑必须遵守基本的电路理论原理。最重要的原理是，电能只能通过开关网络进行有效交换，即当能量是在两个元件之间交换时，储存在电容器或电压源中的能量应该被转移到电感器或电流源中。

正如在指导准则和标准，例如 IEEE519—1992<sup>[IEE92]</sup> 和 IEC61000-3-6<sup>[IEC08]</sup> 中所描述的，为了保护电源和负载，在变流器的输入端和输出端的能流必须是连续的，而且几乎不受谐波和电磁噪声干扰的。为了使能流连续，滤波器是必要的。需要指出的是，在许多应用场合，滤波器可能是电源或者负载的组成部分。为了尽可能降低滤波器的成本，可采用国际标准，并提高效率。逆变器、DC-DC变流器和整流器的控制单元倾向于在固定的开关频率下开关功率器件，采用有时被称为占空比控制的脉宽调制（PWM）技术。基本的电路理论和元器件设计表明，提高开关频率可使无源元件和滤波器缩小。因此，所有的变流器设计都要力求做到在提高开关频率的同时，尽可能减少变流器的总成本。然而，正如下一部分将要讨论的那样，提高开关频率会影响变流器的效率。因此，在所用的材料和生产成本以及效率之间，必须找到一个平衡。注意，效率也决定了变流器整个寿命周期内变流过程中的能源成本。

### 1.1.2 电力变流器的类型和功率器件的选择

电力电子变流器有各种各样的分类方法。现在用电力电子技术的知识，将电能从交流变成直流（整流器），从直流变成直流（DC-DC变流器），以及从直流变回到交流（逆变器）都是可以的。

虽然有些变流器能直接将交流电变成交流电（矩阵变流器和周波变流器），但绝大多数AC-AC变流是用整流器和逆变器的串联来完成的。因此，大多数变流器



至少具有一个直流环节，在不同的变流阶段暂时储存能量，如图 1-3 所示，根据所用的直流环节的类型，变流器可分成为电流源和电压源变流器。电流源变流器用一个电感器以磁能的形式来储存能量，并且在直流环节中以近似于恒定的电流工作。相对应地电压源变流器用一个电容器来保持直流电压的恒定。

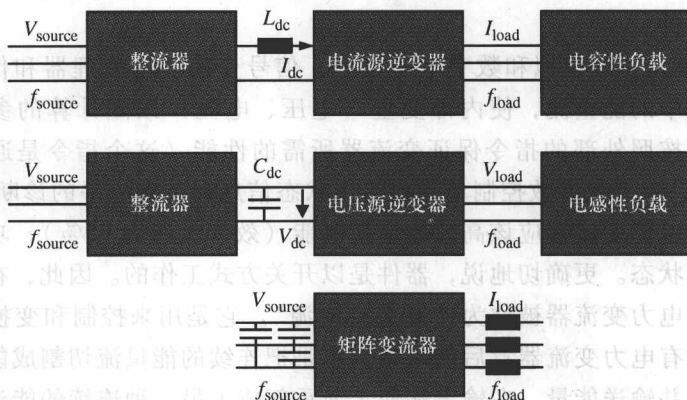


图 1-3 直流环节变流器和矩阵变流器能够在（三相）交流电源和

负载之间变换电能。大部分变流器是整流器和逆变器的组合

对于交流电源和负载，变流器具有电网电流或负载电流的基本分量过零的有利条件。这些变流器被称为电网换相变流器或负载换相变流器，并常见于可控整流器

和大功率谐振变流器以及使用晶闸管的同步电机传动中。图 1-4 给出了一个三相桥式整流器。详细的分析显示，这些变流器产生网侧谐波和相当大的滞后的无功功率<sup>[Moh02]</sup>。因此，为了保持大功率供电的质量，需要大型滤波器和无功功率（被称为 VAR）补偿电路。由于这些滤波器会产生损耗，并且需要相当多的投资成本，电网换相（整流器）电路慢慢地逐步被淘汰，而选择用有源关断功率半导体器件的强迫换相电路来替代。这些功率半导体器件是功率晶体管（MOSFET、IGBT）或者可关断晶闸管（GTO、IGCT）。有源整流器电路（实际上逆变器工作在整流模式）可以不要无功补偿器，并且减少或者不要谐波滤波器。

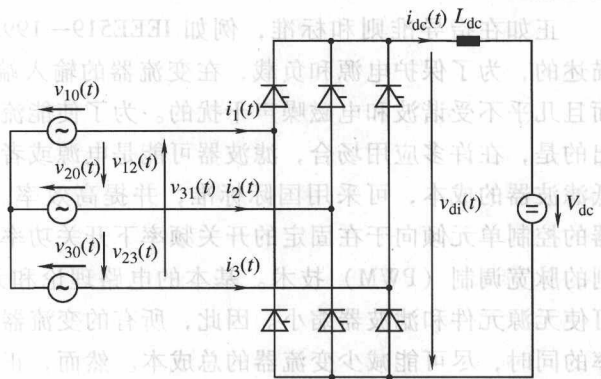


图 1-4 用晶闸管组成的电网换相整流器原理电路

然而，不仅仅变流器的类型（整流器、逆变器、直流变直流的变流器），而且所选择的拓扑的类型（电压源或者电流源）对所需的半导体器件的特性和类型也有重大的影响。图 1-5 给出了一个三相电流源逆变器和一个三相电压源逆变器的电

路，并指出了这些器件运行上的差别。

在电流源变流器中，器件需要有正向和反向阻断能力。这些器件被称为对称电压阻断器件。虽然对称阻断关断器件的确存在，但实际上，反向阻断能力通常是与有源关断半导体开关（晶体管或可关断晶闸管）以串联方式连接或者集成一个二极管来实现的。因此，在这种情况下，与不对称阻断的器件相比较，必须允许有更高的导通损耗。如在本书中将要描述的那样，根据功率半导体开关的原理，对称阻断关断器件（具有集成的反向阻断pn结）的设计以某种方式与晶闸管为基础的结构有关（参看第8章和第10章10.7节）。因为这些器件更适合于大功率应用（电压在2.5kV以上），某些大功率变流器制造商在大功率（10MVA以上）电流源变流器中仍然在使用对称器件（GCT）<sup>[Zan01]</sup>。这种变流器的主要优势是电流源变流器能耐受住内部和外部的短路。

电压源变流器需要一个逆导器件，因为在它们的交流终端必定要驱动感性负载。所以为了避免电压尖峰，当器件关断电流时，需要续流通道。通过连接或者集成一个反并联的二极管到关断器件上，半导体开关的反向导通或续流能力就能实现。因为附加的结与主关断器件不是串联的，所以在变流器的电流通道上不会产生附加的电压降。因此，用现代的器件工艺，电压源变流器比电流源变流器有更高的效率，特别在部分负载的情况下<sup>[Wun03]</sup>。确实在部分负载下电流源变流器在变流器的直流环节中仍然有一个大的循环电流，而电压源工作在电流降低了的情况下，甚至工作在直流环节电容器带着满电压的情况下。

实际上，由于直流环节电容器比直流环节电感器损耗低，所以电压源变流器的尺寸比电流源变流器可以小很多。此外，大部分的负载和电源是感性的（在开关频率下）。因此，电压源变流器不需要附加的阻抗或者滤波器，而电流源变流器在它的输出端，则需要电容器。考虑到所有这些工程的细节，人们能够理解发展电压源变流器比发展电流源变流器更为有利。器件制造商对于这个市场前景已经作出了反应，他们充分利用能更好兼顾导通和开关损耗的非对称晶体管和晶闸管，从而大大提高效率和降低冷却成本。图1-5a给出了大多数电压源变流器的拓扑，这种拓

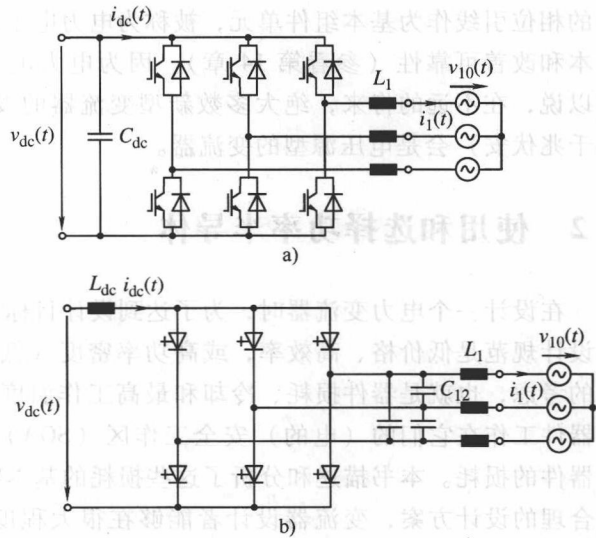


图1-5 (a) 电压源逆变器 (VSI) 和  
(b) 电流源逆变器 (CSI) 原理电路