



电气信息学科创新人才培养系列

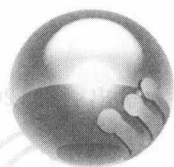
电力电子电路设计

◎ 钟炎平 主编

电子设计专家倾心策划与撰写
创新实践教学与人才培养模式



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>



电气信息学科创新人才培养系列

电力电子电路设计

钟炎平 主编

钟炎平 陈耀军 赖向东 编著

主编 钟炎平

主编 钟炎平



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

图书在版编目(CIP)数据

电力电子电路设计/钟炎平 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2010年4月
ISBN 978-7-5609-6081-4

I. 电… II. 钟… III. 电力系统-电子电路-电路设计 IV. TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 045053 号

电力电子电路设计

钟炎平 主编

策划编辑:沈旭日

责任编辑:沈旭日

责任校对:李 琴

封面设计:刘 卉

责任监印:熊庆玉

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:武汉众心图文激光照排中心

印 刷:湖北新华印务有限公司

开本:787 mm×1092 mm 1/16

印张:18.5

字数:450 000

版次:2010年4月第1版

印次:2010年4月第1次印刷

定价:29.80元

ISBN 978-7-5609-6081-4/TM·123

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

内容简介

Abstract



本书主要包括四部分内容。第一部分为第 1 章,介绍常用的电力电子器件的特性及其驱动和缓冲电路设计;第二部分包括第 2、3、4、5、6 章,介绍直流—直流变换器设计,内容包括硬开关、软开关主电路参数设计,控制电路设计,以及直流变换器的系统设计。第三部分包括第 7、8、9 章,介绍直流—交流变换器设计,内容包括逆变主电路参数设计、控制电路和系统设计。第四部分为第 10 章,内容为基本的谐波抑制和无功补偿电路设计。

本书可用做电气信息类专业高年级学生的教材或教学参考书,亦可供参与电子设计竞赛的学生及工程技术人员参考。

前言 Preface



电力电子技术是一门涵盖电力技术、电子技术、控制技术等多学科互相渗透的边缘性、综合性技术学科。电力电子技术以电能变换作为研究对象,利用功率半导体器件,按照一定的工作模式,对电能进行变换和控制,包括电压(电流)大小、频率、波形、相位的变换和控制。

电力电子技术的研究内容包括交流一直流、直流一直流、直流一交流、交流一交流的变换技术。无论对电能进行何种形式的变换,都是依据一定的电路形式进行的,这些电路包括了控制电路、驱动电路、缓冲电路,以及承受大功率的主电路等,把它们一并称为电力电子电路。

本书从设计的角度,介绍了电力电子技术中各部分组成电路的设计方法,力求实用。主要包括四部分内容。第一部分为电力电子器件的特性及其驱动和缓冲电路设计(第1章),第二部分为直流一直流变换器设计(第2、3、4、5、6章),第三部分为直流一交流变换器设计(第7、8、9章),第四部分为基本的谐波抑制和无功补偿电路设计(第10章)。各部分的主要内容均包括主电路结构的选择、功率器件的选取、控制电路设计、驱动和保护电路设计、变压器设计及元件参数的计算等内容。重点在第二、第三两部分内容。

本书不是一本系统、全面介绍电力电子技术的基本原理、基本电路的教科书。电力电子技术包含的内容很多,由于篇幅的限制,除本书所涉及的内容外,对其他电力电子电路没有进行介绍。即使在所涉及的内容中,也没有面面俱到,而是有选择性地突出了重点的、相信会是读者感兴趣的内容。

钟炎平同志编写了第2~6章,陈耀军同志编写了第7~10章,赖向东同志编写了第1章。全书由钟炎平同志任主编,负责全书的统稿工作。

作者对本书所引用的参考文献的编著者表示衷心感谢。

在本书的出版过程中,得到华中科技大学出版社有关编辑的大力支持,为本书的审校作了大量深入细致的工作,在此表示感谢!

由于作者水平有限,书中难免有错误和疏漏之外,敬请读者批评指正。

作者

2009年9月于空军雷达学院

目录 Content



第 1 章 电力电子电路中的基本元器件	(1)
1.1 功率二极管	(1)
1.1.1 结构与工作原理	(1)
1.1.2 特性与参数	(2)
1.1.3 快恢复功率二极管	(4)
1.1.4 基本应用	(5)
1.1.5 缓冲与保护	(7)
1.2 大功率晶体管	(7)
1.2.1 结构与工作原理	(8)
1.2.2 特性与参数	(8)
1.2.3 驱动电路	(10)
1.2.4 缓冲与保护	(13)
1.3 功率场效应晶体管	(15)
1.3.1 结构与工作原理	(15)
1.3.2 特性与参数	(16)
1.3.3 驱动电路	(18)
1.4 绝缘栅极双极型晶体管	(25)
1.4.1 结构与工作原理	(25)
1.4.2 特性与参数	(26)
1.4.3 驱动电路	(28)
1.4.4 缓冲与保护电路	(31)
1.5 智能功率模块	(32)
1.5.1 工作原理	(32)
1.5.2 基本性能	(33)
设计与思考一	(34)
第 2 章 硬开关直流变换器设计	(35)
2.1 降压型变换器设计	(35)
2.1.1 主电路结构及工作原理	(35)
2.1.2 器件选择与参数计算	(36)
2.2 升压型变换器设计	(38)
2.2.1 主电路结构及工作原理	(38)
2.2.2 器件选择与参数计算	(39)
2.3 降压-升压型变换器设计	(39)

2.3.1	主电路结构及工作原理	(39)
2.3.2	器件选择与参数计算	(40)
2.4	单端正激变换器设计	(41)
2.4.1	主电路结构及工作原理	(41)
2.4.2	器件选择与参数计算	(42)
2.4.3	其他正激变换器	(43)
2.5	单端反激变换器设计	(44)
2.5.1	主电路结构及工作原理	(44)
2.5.2	器件选择与参数计算	(45)
2.5.3	设计中应注意的事项	(46)
2.6	推挽变换器设计	(46)
2.6.1	电路结构及工作原理	(46)
2.6.2	变压器的磁芯偏磁	(47)
2.6.3	器件选择与参数计算	(47)
2.7	半桥变换器设计	(48)
2.7.1	主电路及工作原理	(48)
2.7.2	器件选择与参数计算	(49)
2.8	全桥变换器	(50)
2.8.1	主电路结构及工作原理	(50)
2.8.2	偏磁及其抑制	(50)
2.8.3	器件选择与参数计算	(51)
2.9	高频功率变压器的设计	(51)
2.9.1	正激式变换器的高频变压器设计	(51)
2.9.2	反激式变换器的高频变压器设计	(53)
2.9.3	推挽式、桥式电路的高频变压器设计	(54)
2.10	直流变换器主电路的比较	(55)
	设计与思考二	(56)
第3章	软开关直流变换器设计	(57)
3.1	软开关技术概述	(57)
3.1.1	硬开关及其局限性	(57)
3.1.2	软开关技术的实现策略	(57)
3.1.3	软开关技术的分类	(59)
3.2	准谐振变换器	(60)
3.2.1	零电流和零电压谐振开关	(60)
3.2.2	零电流开关准谐振变换器	(61)
3.2.3	零电压开关准谐振变换器	(64)
3.3	零开关 PWM 变换器	(66)
3.3.1	ZCS PWM 变换器	(66)
3.3.2	ZVS PWM 变换器	(67)
3.4	零转换 PWM 变换器	(69)

3.4.1	零电压转换 PWM 变换器	(69)
3.4.2	零电流转换 PWM 变换器	(71)
3.5	PWM 软开关全桥变换器	(74)
3.5.1	移相控制 ZVS PWM 全桥变换器	(74)
3.5.2	移相控制 ZVZCS PWM 全桥变换器	(76)
	设计与思考三	(78)
第 4 章	直流变换器控制电路设计	(79)
4.1	电压型 PWM 集成控制器	(79)
4.1.1	基本组成、型号及特点	(79)
4.1.2	SG3525A/3527A 型 PWM 集成控制器	(81)
4.1.3	TL494 型 PWM 集成控制器	(84)
4.2	电流型 PWM 集成控制器	(87)
4.2.1	工作原理、型号及特点	(87)
4.2.2	单端输出电流型控制芯片 UC3842	(90)
4.3	PFM 集成控制器	(93)
4.3.1	型号及其特点	(93)
4.3.2	UCX860 的内部结构和基本特性	(93)
4.3.3	UCX861~UCX868 的内部结构和基本特性	(94)
4.4	移相式全桥 PWM 集成控制器	(96)
4.4.1	型号及其特点	(96)
4.4.2	UC3875 移相式集成控制器	(97)
4.4.3	UC3879 移相式集成控制器	(101)
4.4.4	UC3879 与 UC3875 的比较	(103)
4.5	集成控制器中的误差放大器	(103)
4.6	数字控制技术	(105)
4.6.1	数字控制概述	(105)
4.6.2	单片机在电源中的应用	(105)
4.6.3	单片机的控制方式	(107)
	设计与思考四	(108)
第 5 章	开关电源中的其他功能电路设计	(109)
5.1	输入软启动电路	(109)
5.1.1	由晶闸管组成的输入软启动电路	(109)
5.1.2	由继电器组成的输入软启动电路	(109)
5.2	电流信号的取样检测电路	(110)
5.2.1	电流信号取样的基本模式	(110)
5.2.2	电流信号取样的主要方法	(111)
5.3	开关电源的保护电路	(112)
5.3.1	输入电压的检测与保护电路	(112)
5.3.2	过流保护电路	(113)
5.3.3	过热保护电路	(115)

5.4 提高开关稳压电源效率的途径	(116)
5.4.1 开关电源效率降低的原因	(116)
5.4.2 提高开关电源效率的主要措施	(117)
5.5 开关电源的噪声及其抑制	(120)
5.5.1 噪声的产生	(120)
5.5.2 噪声的传递方式	(121)
5.5.3 噪声的抑制	(122)
5.5.4 噪声抑制实例分析	(126)
设计与思考五	(127)
第6章 直流开关稳压电源系统设计	(128)
6.1 直流开关稳压电源的组成、特点和分类	(128)
6.1.1 直流开关稳压电源的组成和特点	(129)
6.1.2 开关稳压电源的分类	(130)
6.2 开关稳压电源的主要技术指标	(131)
6.3 开关稳压电源的系统设计	(132)
6.3.1 主电路形式的选择	(132)
6.3.2 脉宽调制器工作点的选择	(134)
6.3.3 功率开关器件的选择	(135)
6.3.4 变换器工作频率的选择	(136)
6.3.5 其他部分电路的设计	(136)
6.3.6 开关电源的调试	(137)
6.4 27 V 硬开关直流电源设计	(137)
6.4.1 技术指标	(137)
6.4.2 电路设计	(137)
6.5 48 V/10 A 软开关直流电源设计	(143)
6.5.1 电源的主要技术指标	(143)
6.5.2 主电路设计	(143)
6.5.3 控制电路及保护电路	(144)
6.5.4 驱动电路	(147)
6.5.5 电流检测电路	(147)
6.5.6 参数设计	(148)
6.5.7 本电源的特色	(154)
设计与思考六	(154)
第7章 逆变器主电路结构及原理分析	(155)
7.1 单相方波逆变器	(155)
7.1.1 单相推挽式方波逆变器	(155)
7.1.2 单相桥式方波逆变器	(157)
7.2 单相正弦脉宽调制技术	(161)
7.2.1 几个基本概念	(161)
7.2.2 双极性 SPWM	(163)

7.2.3	单极性 SPWM	(164)
7.2.4	单极倍频 SPWM	(165)
7.3	三相逆变器	(167)
7.3.1	三相桥式方波逆变器	(167)
7.3.2	三相 SPWM 逆变器	(170)
7.4	输出滤波器的设计	(172)
7.4.1	常用滤波器结构及工作原理	(172)
7.4.2	LC 低通滤波器截止频率的确定	(173)
7.4.3	LC 滤波器基于无功功率最小的设计	(175)
7.4.4	滤波器对逆变器工作电流及输出电压的影响	(176)
	设计与思考七	(178)
第 8 章	逆变器控制电路设计	(179)
8.1	SPWM 波产生方法	(179)
8.1.1	采样方法	(180)
8.1.2	模拟 SPWM 波的实现	(184)
8.1.3	基于 EPROM 的 SPWM 波产生方法	(187)
8.1.4	全数字 SPWM 实现	(190)
8.2	逆变电源控制系统设计	(197)
8.2.1	逆变电源常用控制方法	(197)
8.2.2	PID 控制原理及其实现	(202)
8.2.3	控制系统检测电路、保护电路及抗干扰设计	(208)
	设计与思考八	(216)
第 9 章	逆变电源系统设计	(218)
9.1	逆变电源组成及性能指标	(218)
9.1.1	逆变电源组成	(218)
9.1.2	逆变电源的性能指标	(219)
9.2	三相 400 Hz 逆变电源设计	(219)
9.2.1	概述	(219)
9.2.2	主电路设计	(220)
9.2.3	控制、驱动电路设计	(223)
9.2.4	系统软件设计	(234)
9.3	几种逆变电源的设计方案	(240)
9.3.1	一种简单实用的太阳能逆变器	(240)
9.3.2	一种单相正弦车载电源	(242)
9.3.3	一种多功能输出开关电源	(243)
	设计与思考九	(245)
第 10 章	谐波抑制与无功补偿	(246)
10.1	无功补偿和谐波抑制技术	(246)
10.1.1	无功功率和谐波的检测技术	(246)
10.1.2	一种基于单片机的无功补偿控制器的设计	(256)

- 10.1.3 电能质量调节器(UPQC) (260)
- 10.2 单相功率因数校正 (265)
 - 10.2.1 有源功率因数校正器的工作原理 (265)
 - 10.2.2 UC3854/ UC3855 原理及其应用 (267)
 - 10.2.3 功率因数校正器 UCC28019 及其应用 (277)
- 设计与思考十 (282)
- 参考文献 (283)

第 1 章 电力电子电路中的基本元器件



电力电子(Power Electronics)技术是以电力电子器件为基础对电能进行控制、转换和传输的技术,是现代电子技术的一个重要分支,包括电力电子器件制造应用技术、变流电路技术和控制电路技术三大部分,其中以电力电子器件的制造应用技术为最基本的技术。因此,了解电力电子器件基本工作原理、结构和电气参数,学会正确安全使用电力电子器件是进行电力电子电路设计的关键。

电力电子器件种类繁多,各种器件都具有其自身的特点,并对驱动、保护和缓冲电路有一定的要求。一个完善的驱动、保护和缓冲电路是安全、成功使用器件的关键,也是本章重点讲述的部分。

电力电子变换电路常用的功率半导体器件有功率二极管、大功率晶体管、功率场效应晶体管、绝缘栅双极型晶体管,以及智能功率模块等。在这些开关器件中,二极管属不控型开关器件,其他均属全控型开关器件。其中,大功率晶体管属电流驱动型开关器件,其余为电压驱动型开关器件。

1.1 功率二极管

二极管是一种由 PN 结构成的器件。功率二极管是一种 PN 结面积比较大的二极管(一般指电流容量在 1 A 以上的二极管),多用硅材料做成,分为低频功率二极管和高频功率二极管两种。低频功率二极管主要用于 50 Hz 电源整流电路。高频功率二极管,主要用于高频整流电路、传递无功功率的续流电路和功率开关的缓冲电路。目前比较成熟的产品有 PN 型、PIN 型快恢复二极管和功率肖特基二极管。

1.1.1 结构与工作原理

二极管的核心是 PN 结,PN 结最基本的特性是单向导电性。因此,二极管最适合做成将交流电变为直流电的整流二极管。在 PN 结两端加上电极引线和管壳后就可制成半导体二极管,其符号如图 1.1.1(a) 所示。PN 结的 P 端引线称为阳极(Anode)A,PN 结的 N 端引线称为阴极(Cathode)K。当二极管(即 PN 结)接上正向电压(简称正偏)时,如图 1.1.1(b) 所示,阳极 A(P) 接电源 E 正端,阴极 K(N) 接电源负端,二极管导电,电流可以从 A(P) 流至 K(N);当二极管即 PN 结接上反向电压(简称反偏)时,如图 1.1.1(c) 所示,A(P) 接电源负端,K(N) 接电源正端,二极管不导电(简称截止或阻断)。

1. 正向接法

如图 1.1.1(b) 所示,PN 结(半导体二极管)在正向电压接法下(简称正偏),外加电压所产生的外电场 E 。与内电场 E_i 方向相反,因此 PN 结的内电场被削弱。其 PN 结等效正向电阻很

小,管子两端正向电压降仅1 V左右(大电流硅半导体电力二极管压降超过1 V,小电流硅二极管压降仅0.7 V,锗二极管压降约0.3 V)。这时的二极管在电路中相当于一个处于导通状态(通态)的开关。

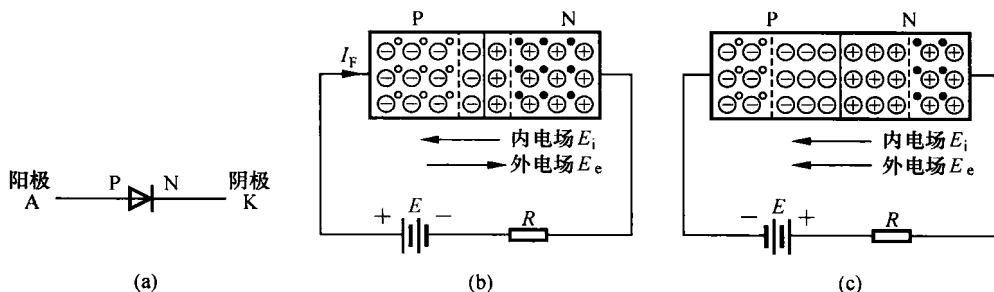


图 1.1.1 二极管的符号及正、反向接法
(a) 符号;(b) 正向接法;(c) 反向接法

2. 反向接法

如图 1.1.1(c) 所示,PN 结(半导体二极管)在反向电压接法下(简称反偏),外加电压所产生的外电场 E_e 与原内电场 E_i 方向相同。因此,外电场使原内电场增强,其 PN 结等效正向电阻很大,因此反偏时二极管电流极小。这个电流称为二极管的反向电流,也称为反向饱和电流 I_S 。

1.1.2 特性与参数

1. 静态特性

实际二极管的静态伏-安特性曲线如图 1.1.2 所示,从中可看出以下两个问题。

① 二极管正向导电时必须克服阈值电压 V_{th} (又称死区电压、门限电压、门坎电压)。当外加电压小于阈值电压时,外电场还不足以克服 PN 结内电场。因此,正向电流几乎为零。硅二极管的阈值电压 V_{th} 约为 0.5 V,锗二极管的约为 0.2 V。在外加电压大于 V_{th} 后内电场被大大削弱,电流才会迅速上升。

② 二极管外加反向电压时仅在外加反向电压 V_{RC} 不超过某一临界击穿电压 V_{RBR} 时才会使反向电流 I_R 保持为反向饱和电流 I_S 。实际二极管的反向饱和电流 I_S 是很小的,但是,在外加反向电压超过 V_{RBR} 后二极管被电击穿,反向电流会迅速增加。工作时若无特殊的限流保护措施,二极管被电击穿后将造成 PN 结的永久损坏而丧失单向导电能力。为防止二极管出现电击穿,通常只允许施加于二极管的最高反向工作电压 V_R 为其击穿电压 V_{RBR} 的 1/2。

在高频开关状态下,PN 结的高频等效电路如图 1.1.3 所示。其中, R 表示 PN 结的电阻, C 表示 PN 结的电容。 R 、 C 不仅与二极管本身结构和工艺有关,还与外加电压方向有关。当 PN 结处于正偏时 R 为正向电阻,其值很小,结电容 C 很大。当 PN 结处于反偏时, R 为反向电阻,其值

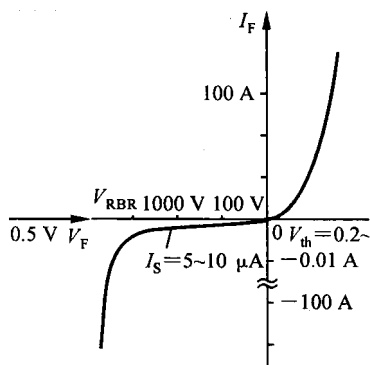


图 1.1.2 二极管伏-安特性

很大,但这时结电容很小。由图 1.1.3 可知,由于存在结电容 C ,当二极管从导通状态(C 很大存储电荷多)转到截止阻断状态时,需要一定的时间,即在消失存储电荷 Q 以后,二极管才能恢复反向阻断电压的能力而处于截止状态,然后在反向电压作用下,仅流过很小的反向饱和电流 I_S 。

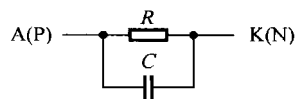


图 1.1.3 PN 结高频等效电路

2. 主要参数

(1) 最大允许反向重复峰值电压 V_{RRM}

最大允许反向重复峰值电压 V_{RRM} 是指二极管能够允许的瞬时峰值电压的最大值,也定义为二极管的额定电压 V_{RR} 。显然 V_{RRM} (或 V_{RR}) 应小于二极管的反向击穿电压 V_{RBR} 。

(2) 额定电流 I_{FR}

二极管的额定电流定义为其额定发热所允许的正弦半波电流的平均值。当二极管采用规定的散热器,并在规定的环境温度和散热条件下工作时,通过其中的正弦半波电流平均值 I_{FR} ,不应使其管芯 PN 结温升超过允许值。

(3) 最大允许全周期均方根正向电流 I_{Frms}

当二极管流过半波正弦电流的平均值为 I_{FR} 时,与其发热等效的全周期均方根正向电流为 I_{Frms} 。

若正弦电流的最大值为 I_m ,则正弦半波电流平均值为

$$\begin{aligned} I_{FR} &= \frac{1}{T} \int_0^{T/2} I_m \sin(\omega t) dt = \frac{1}{T\omega} \int_0^{\pi} I_m \sin(\omega t) d(\omega t) \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_m \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{1}{\pi} I_m \end{aligned} \quad (1-1-1)$$

式中, I_m 为正弦电流的峰值, T 为正弦波周期,角频率

$$\omega = 2\pi f = 2\pi/T \quad (1-1-2)$$

全周期均方根电流

$$I_{Frms} = \frac{\pi}{2} I_{FR} = 1.57 I_{FR} \quad (1-1-3)$$

如果手册上给出某功率二极管的额定电流 I_{FR} 为 100 A,则由式(1-1-1)、式(1-1-2) 可得允许通过正弦半波的幅值电流 $I_m = \pi I_{FR} = 314$ A。允许通过任意波形的有效值为 $I_{Frms} = 1.57 I_{FR} = 157$ A。式(1-1-1)、式(1-1-3) 表明:额定电流为 100 A 的二极管可以通过幅值为 314 A 的半波正弦电流,可以在全周期内通过任意波形的有效值为 157 A 的电流,其功耗发热不会超过允许值。

(4) 最大允许非重复浪涌电流 I_{FSM}

这是二极管所允许的半周期峰值浪涌电流。该值比二极管的额定电流要大得多。实际上它体现了二极管整流器抗短路冲击电流的能力。显然浪涌电流必须限制在短路时间以内,例如, $8.3 \sim 10$ ms ($f = 60 \sim 50$ Hz 的半周期),在此期间过流保护系统可望切断短路电流。

(5) 最大允许 PN 结结温 θ_{jm} 和管壳温度 θ_{cm}

最大允许 PN 结的结温 θ_{jm} 通常为 $150 \sim 200$ °C,管壳温度取决于二极管的功耗和结 - 壳热阻、壳 - 散热器热阻及环温。

(6) 结 - 壳热阻 R_{jc} 、壳 - 散热器热阻 R_{cs} (°C/W)

这些参数用于设计散热系统和选择散热器,必须指出:功率半导体器件所允许的电流极限参数与其散热器大小有关。因现代电力电子开关器件本身的尺寸都不大,其散热能力对于安全

发散其内部功耗的热量来说太小,故必须设置适当的散热器。

(7) 反向恢复时间 t_{rr}

如图 1.1.4(a) 所示,二极管外电路有正电压 V_{SF} ,二极管正偏导通时,阳极 A 电位高于阴极 K 电位,二极管在电源电压 V_{SF} 作用下经外电阻 R 、电感 L 流过正向电流 $I_D = I_F$,这时二极管两端电压降 V_D 很低(1~2 V),PN 结电容存储电荷 Q 。如果在 $t = t_1$ 时(见图 1.1.4(e)),外电源电压突然反向(反偏)为 V_{SR} ,如图 1.1.4(b) 所示,二极管电流为零($t = t_2$)时,PN 结电容存储的电荷 Q 并不能立即消失,二极管电压仍为 V_D (1~2 V),二极管仍然具有导电性,在反向电压 V_{SR} 作用下,反向电流 I_R 从零增加到最大值 I_{RM} ($t = t_3$)时,反向电流 I_R 使存储电荷逐渐消失, V_D 降为零。然后,PN 结反向阻断能力逐渐恢复,反向等效电阻迅速增大而使反向电压 V_D 增大到 V_{RM} ,反向电流则从 I_{RM} 衰减到二极管的反向饱和电流 I_S (微安级电流)。如果在 t_4 时反向电流已衰减到 $10\% I_{RM}$,则图 1.1.4(e) 所示的时间段 t_{rr} ($t_{rr} = t_4 - t_2 = t_a + t_b$) 定义为二极管反向恢复时间。在 t_{rr} ($t_2 \rightarrow t_4$) 期间,二极管处于反向电流导电状态,因此,二极管正向导电电流为零后它并不能立即具有阻断反向电压的能力,必须再经历 t_{rr} 时间后才能恢复其阻断反向电压的能力。

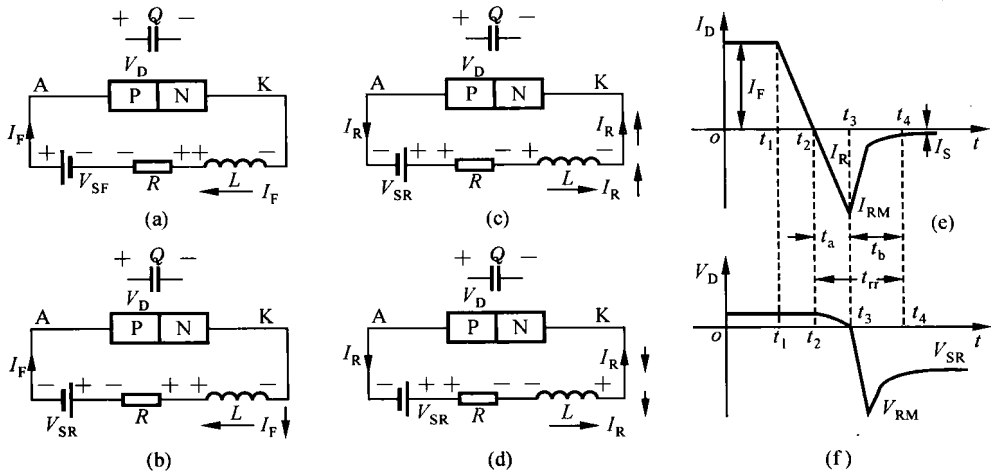


图 1.1.4 二极管开关特性

(a) $0 \leq t \leq t_1$; (b) $t_1 \leq t \leq t_2$; (c) $t_2 \leq t \leq t_3$; (d) $t_3 \leq t \leq t_4$; (e) 电流波形; (f) 电压波形

二极管从导通到截止(阻断反向电压)的过渡过程期间的反向恢复时间 t_{rr} 、最大反向电流值 I_{RM} ,与二极管 PN 结电容的大小、导通时正向电流 I_F 所对应的存储电荷 Q 、电路参数,以及反向电流 di/dt 等都有关。普通二极管 $t_{rr} = 2 \sim 10 \mu\text{s}$,快速恢复二极管的 t_{rr} 为几十至几百 ns,超快恢复二极管的 t_{rr} 仅为几 ns。 t_{rr} 值愈小则二极管的工作频率的上限可以愈高。

1.1.3 快恢复功率二极管

用于电力变换和电力控制电路中的功率二极管,正向导通流过额定电流 I_{FR} 时的电压降 V_{FR} 一般不超过 1~2 V,相对于变换电路的额定工作电压要小得多,因此在分析计算电力变换电路特性和波形时二极管正向电压降 V_{FR} 一般可忽略不计。但额定正向电流时的功耗及其发热却不容忽略,在电力电子变换器中功率半导体器件的功耗、发热及散热都是需要妥善处理的问题。

1. 快恢复二极管

迅速由导通状态过渡到关断状态的PN结整流管称为快恢复二极管(Fast Recovery Diode, FRD),其特点是反向恢复时间短,一般小于 $5\ \mu\text{s}$,故也称为开关二极管。用于高频整流、斩波和逆变。电流由1 A到数百安,电压由数十伏到数千伏。

目前有PN型和PIN型两种结构的快恢复整流二极管。在同等容量下,PIN型结构具有开通压降低、反向快速、恢复性能好的优点。不足之处是,PIN型二极管具有硬恢复特性,而PN型结构则具有软恢复特性。定量来说,当导通电流为1 A时,反向恢复时间为几十纳秒到几百纳秒,在额定工作电流下,其反向恢复时间也只有几百微秒到几微秒。一般,二极管的耐压越高,电流越大,恢复时间就越长,导通压降就越高。

快恢复二极管主要用于开关频率不太高($20\sim 50\ \text{kHz}$)的整流模块的输出整流。常用的小电流快恢复二极管有FR101~FR107(1 A, $50\sim 1000\ \text{V}$)、FR301~FR307(3 A, $50\sim 1000\ \text{V}$)等,可用于辅助开关电源的输出整流。

国产大功率快恢复二极管的参数范围为 $50\sim 1000\ \text{A}$, $100\sim 2000\ \text{V}$ 。

2. 超快恢复二极管

用外延法生产的二极管比用扩散法生产的二极管具有更快的开关速度,它们都用掺金或铂来控制恢复时间 t_{rr} 的大小,使恢复时间 t_{rr} 小于 $50\ \text{ns}$,称为超快恢复二极管(Ultra-Fast Recovery Diodes, UFRD),又称为高性能快速恢复二极管(Hiper Fast Soft Recovery Epitaxial Diodes, Hiper FRED)。超快恢复二极管具有软恢复过程,可减小因反向恢复造成的 du/dt 、 di/dt 和电压尖峰,降低EMI(电磁干扰)。FRED一般用于开关频率在 $50\ \text{kHz}$ 以上的整流模块的输出整流。

3. 肖特基二极管

肖特基二极管由半导体硅材料(N型)与金属进行面接触而构成。半导体N型二极管是采用现代工艺进行掺杂,以使金属与N型硅材料大面积均匀接触而制成的。所以,肖特基二极管在整流过程中无少数载流子参加,既消除了电荷存储现象,又能瞬间完成反向恢复过程。与普通硅二极管比较,它具有下列性能特点。

① 不是利用PN结的单方向导电特性,而是利用金属与半导体接触过程的势垒电势的整流作用而导电,只产生多数载流子而无少数载流子,故反向恢复时间远小于相同定额的二极管,一般只有数十纳秒,而且与反向 di/dt 无关。因此可在更高频率下工作。

② 具有较低的正向压降($0.3\sim 0.8\ \text{V}$),典型值为 $0.55\ \text{V}$,所以导通损耗小。因此,广泛应用于低电压大电流电源中。

③ 肖特基二极管电流定额从1 A到数百安,并且很容易通过并联而扩大容量,即不需要加均流电阻,可直接并联,亦可两只配对并联后封装成组件。

④ 反向漏电流较大和工作电压较低(一般小于 $150\ \text{V}$)是肖特基二极管的缺点。由于该管存在较大的反向电流,故既会使整流效率降低,又会使整流过程中有较大的纹波电流流出。为了限制肖特基二极管的反向电流,工作电压不能过高。

1.1.4 基本应用

在低压大电流的开关电路应用中,肖特基二极管是十分理想的开关器件,它不仅开关特性

好,允许工作频率高,且正向压降相当小($< 0.5 \text{ V}$),在大电流、低电压的电力电子变换系统中应是首选器件。

半导体电力二极管属于功率最大的半导体器件,现在其最大额定电压、电流在 6 kV 、 6 kA 以上。当然,额定电压最高的二极管的额定电流不一定最高,反之亦然。选用二极管的主要依据是,二极管的参数。一般半导体器件手册中都给出不同型号二极管的各种参数以便选用。下面是二极管在电力电子变换系统的几种基本应用。

1. 整流

利用二极管正偏时单向导电、反偏时截止的不对称非线性特性(见图 1.1.2),可实现整流变换,如图 1.1.5(a) 所示,这是二极管最基本、最广泛的应用。

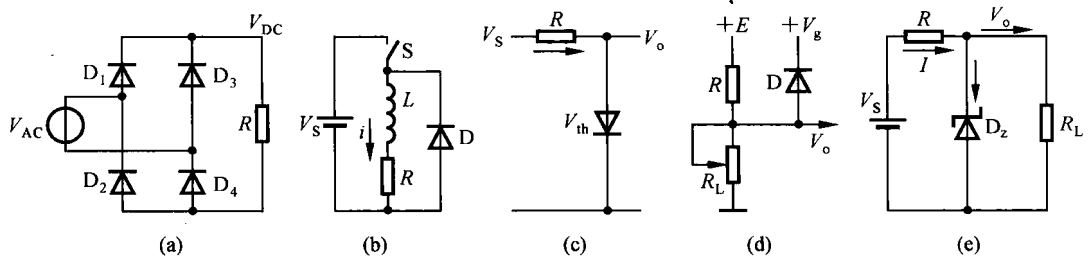


图 1.1.5 二极管的整流、续流、限幅、钳位和稳压应用

(a) 整流;(b) 续流;(c) 限幅;(d) 钳位;(e) 稳压

2. 续流

如图 1.1.5(b) 所示,当开关 S 切断电感电路时,为防止电感产生很高的反电势 $e = L di/dt$ 而损坏设备,接入一个二极管 D ,使电感电流有一个继续流动的回路,使开关管 S 关断时,其两端电压不会超过电源电压 V_S ,从而避免了因电感断流而在开关器件两端出现高电压的情况。

3. 限幅

当输入信号电压 V_S 变化范围很大时,为了使信号电压的幅值能够限制在某个范围之内可采用如图 1.1.5(c) 所示二极管限幅电路。当输入电压 V_S 低于二极管阈值电压 V_{th} 时二极管截止不导通,信号全部输出, $V_o = V_S$; 当 $V_S \geq V_{th}$ 时,二极管导通,二极管电压被限制为正向导通电压。一个硅管的正向导通电压约为 0.7 V ,一个锗管的正向导通电压约为 0.3 V 。几个二极管串联可得到不同的限幅值。

4. 钳位

如图 1.1.5(d) 所示,当负载电阻 R_L 改变时,只要二极管 D 处于正偏导通状态,输出端电压 V_o 就等于电源电压 V_g 加二极管正向电压降 V_F ,即 $V_o = V_g + V_F$,而与负载无关,即 V_o 被钳位到 $V_g + V_F$ 。当然,要保持二极管总是处于正偏导通状态, R_L 不能过小, R_L 太小,则流过 R 上的电流过大,当 R 上的电压降太大以致 $(E - RI) < V_g$ 时,二极管反偏截止, V_o 将随 R_L 的改变而改变,钳位电路失去作用。