

# Electronic design

[ 全国大学生电子设计竞赛指导系列 ]

## 全国大学生电子设计竞赛 硬件电路设计 **精解**

◎ 陈永真 韩梅 陈之勃 编著



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

全国大学生电子设计竞赛指导系列

# 全国大学生电子设计竞赛 硬件电路设计精解

陈永真 韩 梅 陈之勃 编著

NL

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

全国大学生电子设计竞赛为大学生提供了理论与实践相结合的一个绝好机会。本书作者将多年的科研、教学和产品研发的独特性设计思路进行归纳整理,多次成功应用于全国大学生电子设计竞赛中。这些独特的设计思路不仅对普通高校的电子设计竞赛指导教师有所帮助,而且可为大学生的工作实践打下良好的基础。

本书详细地讲述了电子元器件与基本电子线路;数字控制与数字显示;放大器的设计;线性稳压、稳流与电子负载设计;函数发生器的设计;音频功率放大器的设计;开关电源的设计与逆变器的设计,并给出了常规设计方法和非常规思路的设计方法。

本书读者对象为参加全国大学生电子设计竞赛的高校学生、指导教师,也可以是电气、电子工程师,科研人员,或从事电子技术领域的技术人员和广大电子爱好者,还可以作为大学生从校园到职场的技术领域的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

全国大学生电子设计竞赛硬件电路设计精解/陈永真,韩梅,陈之勃编著. —北京:电子工业出版社,2009.4

(全国大学生电子设计竞赛指导系列)

ISBN 978-7-121-08547-5

I. 全… II. ①陈… ②韩… ③陈… III. 电子电路-电路设计-竞赛-高等学校-自学参考资料  
IV. TN702

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第041657号

策划编辑:柴燕

责任编辑:韩玲玲

印刷:北京市李史山胶印厂

装订:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开本:787×1092 1/16 印张:18.25 字数:467.2千字

印次:2009年4月第1次印刷

印数:4000册 定价:35.00元

凡所购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

## 丛 书 序

一个普通的省属本科学校在历届全国大学生电子设计竞赛中能够取得优异的成绩，甚至竞赛名次能够排在参赛的“211”学校、第一批本科学校之前是难能可贵的。究其原因，除了学校相关部门的大力支持外，主要在于指导教师的敬业精神、扎实的理论基础和深厚的工程实践功底。

本系列丛书的编著者中有具有 40 余年电子兴趣爱好并兼具 20 余年电子技术专业从教经验的老教师，也有“80 后”的年轻教师，他们以活跃的思维和超群的实践能力完成了教学任务并参加了国家“863”计划中的电动汽车等重大专项课题的研究。这些人指导的参赛队伍在所参加的两届全国大学生电子设计竞赛中创造了两次国家二等奖、四次省特等奖的优异成绩。

本系列丛书将这些电子设计经验丰富的指导教师的设计经验、教训和处理问题的技巧整理成文，以飨读者。如果读者能够从本丛书有所收获，将是笔者的最大荣幸。

陈永真  
于辽宁工业大学

## 前 言

全国大学生电子设计竞赛是做什么的？一般看来，全国大学生电子设计竞赛是全国、各省高校的参赛队的电子设计竞赛的竞技，是指导教师的新、奇、特设计思路的充分展示，更是对各高校之间的电子技术教学、科研水平的检验，现在已成为高校评估的必不可少的项目之一。正因为如此，全国各高校对全国大学生电子设计竞赛越来越重视。

对参赛学生而言，通常可以直接看到的是竞赛获奖证书、所在学校的奖励政策等。事实上，无论对学校还是对参赛学生，全国大学生电子设计竞赛的意义已经远不止这些。通过多年来对全国大学生电子设计竞赛的指导和赛后思考，作者认为，从更深远的意义考虑，对于参赛学校而言，全国大学生电子设计竞赛是提高教师教学水平、改进教学的好方法之一，通过参赛，可以找到教学中的不足；对于参赛学生而言，全国大学生电子设计竞赛更是大学生获得电子设计能力、巩固所学知识、把所学的理论首次指导实践的最好机会。通过参加竞赛，参赛学生可以找到学习过程中的不足，找到努力的方向，为毕业后从事专业技术工作打下更好的基础，为提高就业质量做好准备。

2008年，由美国的次贷危机引发的全球性金融危机已经触发了全球性的经济危机，在这个大背景下，我国的经济也受到冲击，对于大学生来说就是找工作更难了。是大学生过剩了吗？事实并非如此，在大学生找不到工作的同时，企业也在为找不到工程技术人才而发愁。从表面上看，这两件事是矛盾的，但是仔细分析看，这两件事却是紧密相关的。那么问题出在哪儿？问题就出在大学生在学校期间的实践机会太少了，学生几乎成为“考试机器”，很多学习优秀的学生除了考试之外别的什么也不会做。

作者认为，作为电气、电子类学生，不仅要学好书本上的理论知识，还要在实践能力、分析问题和解决问题的能力上狠下工夫，利用课余时间多参与与电气、电子有关的实践活动，锻炼自己的实践能力和创新精神。

很多学生可能会说，我不知道做什么，也没人指导我，我还没有玩电子线路的经济能力和环境。那么，全国大学生电子设计竞赛为这些学生提供了良好的机会。首先，通过学校为参赛学生提供的赛前培训，不仅可以获得工程设计的培训，而且还能够得到电子线路设计、制作、调试的培训与锻炼。不仅如此，在赛前培训和整个竞赛过程中，所需的器件、测试设备和实践环境都是由学校提供的，参赛学生基本上不需要经济和物质上的准备，只需全身心地投入。抓住全国大学生电子设计竞赛的机会，总是会有收获的。

如果参赛学生在指导教师的指导下能够在四天的时间里独立实现所要求的内容，则可以相信，这些学生在求职时会比没有参加过全国大学生电子设计竞赛的学生具有明显的优势。作者及作者的合作者指导过的学生在事后求职时，能够很清楚地说明所参加竞赛的内容、理论和实践方面的解决方法，用人单位一般很看重学生的这段经历，也会优

先录用这样的学生。

众所周知，当今的世界进入了信息时代，似乎工业革命所带来的技术和知识被信息技术所淡化，所以某“211”学校的老师就提出了“电烙铁+万用表时代已经过时”的观点，也就是说硬件电路不再重要。在这样的思潮冲击下，各高校的硬件电路教学逐渐淡化，出现了在全国大学生电子设计竞赛中硬件电路不景气的局面，但制造业对求职者的硬件设计能力还是很看重的，因为制造业很缺乏硬件电路工程师！

因此，本书以硬件电路为主线，讲述了在与电子设计竞赛相关的领域中如何用硬件电路实现实体要求的思路和电路设计精解。

为了让大多数省属高等院校学生在参加全国大学生电子设计竞赛时能够取得比较理想的成绩，作者将多年来指导电子设计竞赛的实践和多年来电子线路教学、科研的经验总结为本书，奉献给读者。

本书的主要设计思路为：利用常规的集成电路并结合新颖的设计思路，获得性能优异的设计作品；建议省属高校参赛学生与指导教师利用自己的现有资源和基本技能取得更好的竞赛成绩，积累参赛经验，锻炼队伍，使参赛学生获得电子线路的设计、制作和调试能力，为毕业后就业打下良好的基础。

本书的另一个目的是，让这本书不仅能成为电子设计竞赛的有价值的参考书，也能成为学生从校园到职场的指导性参考书。

本书共8篇，21章。第1篇，电子元器件与基本电子线路；第2篇，数字控制与数字显示；第3篇，放大器的设计；第4篇，线性稳压、稳流与电子负载设计；第5篇，函数发生器的设计；第6篇，音频功率放大器的设计；第7篇，开关电源的设计；第8篇，逆变器的设计。感谢作者所在单位辽宁工业大学及渤海船舶职业技术学院给予本书的大力支持。

书中难免存在不足或疏漏之处，敬请广大读者批评指正。

编著者

# 目 录

## 第 1 篇 电子元器件与基本电子线路

第 1 章 电子元器件性能分析	3
1.1 二极管	3
1.1.1 二极管的反向恢复特性	3
1.1.2 二极管的正向电压特性与肖特基二极管	7
1.2 晶体管	9
1.2.1 共发射极电流增益( $h_{fe}$ )多大为好?	9
1.2.2 开关的应用	9
1.2.3 线性应用	9
1.2.4 高频应用	10
1.2.5 功率应用	11
1.3 功率晶体管	11
1.4 功率 MOSFET	12
1.4.1 功率 MOSFET 的原理分析	12
1.4.2 功率 MOSFET 的应用注意事项	16
1.5 铝电解电容器	17
1.5.1 购买铝电解电容器时需要注意的问题	17
1.5.2 铝电解电容器在应用中需要注意的问题	20
1.6 其他电容器	22
第 2 章 基本电子线路单元设计与制作	23
2.1 为单片机供电的 5V 电源的制作	23
2.1.1 稳压器的选择	23
2.1.2 整流器电路的选择	23
2.1.3 整流变压器的选择	24
2.1.4 滤波电容器的选择	26
2.1.5 热设计	26
2.1.6 其他元件的选择	26
2.1.7 整机完整电路	26
2.2 为运算放大器供电的对称电源的制作	27

2.2.1	集成稳压器的选择	27
2.2.2	整流器电路与元件的选择	27
2.2.3	整流变压器的选择	28
2.2.4	滤波电容器的选择	28
2.2.5	热设计	28
2.2.6	整机完整电路	28
2.2.7	其他电路元件的选择	29
2.2.8	电路调节要点	29
2.3	数字控制的0~25V/1A可调稳压电源的制作	29
2.3.1	稳压器的选择	29
2.3.2	是电位器调节输出电压还是数字控制输出电压?	30
2.3.3	控制方式和步进电压的选择	31
2.3.4	输出电压检测电阻的参数选择	31
2.3.5	如何调节到0V	31
2.3.6	继电器的控制	32
2.3.7	整流器电路与滤波电容器的选择	33
2.3.8	整流变压器的选择与输出电压切换	33
2.3.9	热设计	35
2.3.10	其他电路元件的选择	35
2.4	程控模块与继电器切换电路的制作	35

## 第2篇 数字控制与数字显示

<b>第3章</b>	<b>用硬件电路数控的实现方案精解</b>	<b>39</b>
3.1	用硬件电路数控技术问题的提出及设计思路	39
3.2	用硬件电路数控技术的最简单的实现方式	40
3.2.1	拨码开关简介	40
3.2.2	利用拨码开关实现数字控制电路单元	41
3.3	用硬件电路程控及数控技术的硬件电路设计	43
3.3.1	十进制加减计数器简介	43
3.3.2	利用十进制加减计数器级联构成十进制多位计数器单元	45
3.3.3	溢出的防止	46
3.4	可能出现的问题及解决方法	48
<b>第4章</b>	<b>数字显示</b>	<b>49</b>
4.1	电压的数字显示	49
4.1.1	应用商品数字电压表的数字显示	49
4.1.2	自制数字电压表	50
4.2	电流的数字显示	51
4.2.1	数字电压表的量程	51



4.2.2 电流检测电阻 .....	52
4.2.3 数字电压表的电源 .....	52
4.2.4 交流电流的测量 .....	53

### 第3篇 放大器的设计

<b>第5章 与电子设计相关的运算放大器部分电路设计制作精解 .....</b>	<b>57</b>
5.1 测量放大器设计 .....	57
5.1.1 测量放大器原理 .....	58
5.1.2 实际的解决方案详解 .....	60
5.1.3 测量放大器的电磁兼容与电路板设计 .....	61
5.1.4 制作调试要点 .....	62
5.2 集成运算放大器增益程控化 .....	63
5.2.1 通过改变反馈电阻实现集成运算放大器增益的程控化 .....	63
5.2.2 测量放大器增益的程控化 .....	64
5.3 比较器的应用 .....	66
5.3.1 集成运算放大器用作比较器存在的问题 .....	67
5.3.2 比较器的典型应用中需要注意的问题 .....	67

### 第4篇 线性稳压、稳流与电子负载设计

<b>第6章 线性集成稳压器 LM317、LM337 详解 .....</b>	<b>71</b>
6.1 LM317 详解 .....	71
6.2 LM337 详解 .....	74
<b>第7章 线性稳压电路设计 .....</b>	<b>77</b>
7.1 LM317/337 的典型应用及注意事项 .....	77
7.1.1 可调输出电压集成稳压器的典型应用 .....	77
7.1.2 布线方式造成的负载效应与减小措施 .....	78
7.1.3 最小负载电流 .....	78
7.1.4 输入端与输出端电压、输出端与调整端的反极性保护 .....	79
7.2 集成稳压器并联的解决方案 .....	79
7.2.1 理论依据 .....	80
7.2.2 实现时需要注意的问题 .....	81
7.3 跟踪电源 .....	81
7.4 可调稳压电路 .....	83
7.5 高精度线性稳压电路 .....	85
<b>第8章 线性稳流电路设计 .....</b>	<b>86</b>
8.1 作为恒流源应用的集成稳压器的选择与分析 .....	86

8.2	集成稳压器作为恒流源应用的一般方法	87
8.3	恒流值的调节	87
8.3.1	恒流值的调节原理	87
8.3.2	问题及解决方案	89
8.4	带有限压功能的恒流源的实现	90
8.4.1	National 推荐的解决方案	90
8.4.2	改进的调压、调流的解决方案	90
8.5	数字控制电流源	92
8.5.1	2005 年全国大学生电子设计竞赛中的数控电流源	92
8.5.2	实际可用的解决方案	95
8.6	恒流型电子负载	97
8.7	数控恒流型电子负载的实现	97
8.7.1	基本思路	97
8.7.2	实现方法	97
8.8	用集成稳压器替代恒流二极管	99

## 第 5 篇 函数发生器的设计

<b>第 9 章</b>	<b>模拟函数发生器电路设计</b>	<b>103</b>
9.1	函数发生电路 MAX038 详解	103
9.1.1	封装、引脚功能及内部原理框图	103
9.1.2	基本功能的实现	105
9.1.3	MAXIM 的评估电路	107
9.2	应用函数发生电路 MAX038 的频率及占空比的数字控制	111
9.2.1	频率的数字控制	111
9.2.2	占空比的数字控制	113
9.3	应用函数发生电路 MAX038 实现正弦波、方波和三角波发生电路	113
9.4	耳机放大器的利用	114
9.4.1	耳机放大器简介	114
9.4.2	耳机放大器 TPA152 基本电路	115
9.4.3	耳机放大器 TPA152 性能分析	116
9.4.4	TPA152 作为驱动放大器的应用	118
<b>第 10 章</b>	<b>数字函数发生器电路设计</b>	<b>120</b>
10.1	利用计数器、EPROM、DAC 的思路	120
10.2	基本设计思路	120
10.3	基本电路结构	121
10.4	EPROM 中的函数表格	122
10.5	提高频率的思路	126
10.6	本章小结	128

## 第6篇 音频功率放大器的设计

<b>第11章 线性功率放大器设计制作精解</b> .....	133
11.1 电子设计竞赛对音频功率放大器的基本要求 .....	133
11.2 音频功率放大器效率分析与高效率的获得 .....	133
11.3 用线性电路实现的方案 .....	133
11.4 功率放大器的选择 .....	134
11.5 DC/DC 变换器的选择 .....	138
11.6 控制策略的考虑与基本实现方法 .....	139
<b>第12章 开关型功率放大器设计精解</b> .....	144
12.1 开关型音频功率放大器基本原理 .....	144
12.2 开关型音频功率放大器的基本实现 .....	144
12.3 应用通用集成电路实现开关型音频功率放大器 .....	145
12.3.1 三角波发生电路 .....	145
12.3.2 PWM 调制的电路结构 .....	145
12.3.3 输出级与输出滤波器的电路结构 .....	146
12.3.4 完整电路 .....	147
12.3.5 信号变换电路 .....	148
12.3.6 本章小结 .....	148

## 第7篇 开关电源的设计

<b>第13章 电子设计竞赛中开关电源的常规解决方案精解</b> .....	151
13.1 电子设计竞赛中开关电源的特点 .....	151
13.2 开关电源基础 .....	151
13.2.1 基本变换器及特点 .....	151
13.2.2 开关电源的基本电路结构 .....	152
13.3 开关电源的损耗与效率分析 .....	154
13.3.1 开关元件的开关损耗 .....	154
13.3.2 开关元件的导通损耗 .....	155
13.3.3 磁性元件损耗 .....	155
13.3.4 电路结构对效率的影响 .....	155
13.3.5 工作状态对效率的影响 .....	156
13.4 软开关技术分析 .....	156
13.4.1 准谐振技术 .....	156
13.4.2 有源钳位技术 .....	157
13.4.3 全桥移相零电压开关技术 .....	157
13.4.4 半桥 LLC 谐振变换器 .....	157
13.5 高效率开关电源设计思路 .....	158

13.6	开关型电源的低噪声设计 .....	158
13.7	利用 UC3843 控制 MOSFET 构成升压型 DC/DC 变换器 .....	159
13.7.1	电路结构的确定 .....	159
13.7.2	控制电路的选择 .....	159
13.7.3	电路参数的设计 .....	159
13.7.4	DC/DC 变换器的完整电路 .....	162
13.7.5	电路板图设计 .....	162
13.7.6	电路的调试 .....	163
<b>第 14 章</b>	<b>2007 年竞赛试题分析 .....</b>	<b>164</b>
14.1	试题 .....	164
14.2	电源变压器与整流滤波电路解析 .....	166
14.2.1	整流电路结构的选择 .....	166
14.2.2	整流器的选择 .....	166
14.2.3	滤波电容器的选择 .....	167
14.2.4	整流输出电压 .....	167
<b>第 15 章</b>	<b>2007 年电子设计竞赛试题应用升压型变换器的解决思路 .....</b>	<b>168</b>
15.1	电路 .....	168
15.2	电路参数设计 .....	168
15.2.1	电路工作状态的选择 .....	168
15.2.2	主要元件的选择 .....	171
<b>第 16 章</b>	<b>利用 PWM 控制 IC 与带有隔离变压器的推挽变换器的解决方案精解 .....</b>	<b>175</b>
16.1	基本参数的确定 .....	175
16.2	电路及参数的确定 .....	175
16.2.1	开关管最大电流 .....	175
16.2.2	负载临界电流和变压器激磁电流 .....	176
16.3	主要元件参数的选择 .....	176
16.3.1	开关管的选择 .....	176
16.3.2	输入旁路电容器的选择 .....	176
16.3.3	变压器参数设计 .....	177
16.3.4	输出整流器的选择 .....	179
16.3.5	输出滤波电容器的选择 .....	179
16.3.6	输出滤波电感器的选择 .....	179
16.3.7	其他电路参数的选择 .....	179
16.3.8	其他 .....	179
<b>第 17 章</b>	<b>利用 PWM 控制 IC 与带有自耦变压器的推挽变换器详解 .....</b>	<b>180</b>
17.1	电路与电路原理 .....	180
17.1.1	电路 .....	180

17.1.2	电路原理 .....	180
17.2	基本参数的确定 .....	182
17.2.1	开关管最大电流 .....	182
17.2.2	负载临界电流和变压器激磁电流 .....	182
17.3	主要元件参数的选择 .....	182
17.3.1	开关管的选择 .....	182
17.3.2	输入旁路电容器的选择 .....	183
17.3.3	变压器参数设计 .....	183
17.3.4	输出整流器的选择 .....	185
17.3.5	输出滤波电容器的选择 .....	185
17.3.6	输出滤波电感器的选择 .....	185
17.3.7	其他电路参数的选择 .....	186
<b>第 18 章</b>	<b>电子设计竞赛中开关电源的特殊解决方案精解 .....</b>	<b>187</b>
18.1	低纹波电压开关稳压电源设计实例(应用准谐振技术) .....	187
18.1.1	NCP1207 简要原理 .....	187
18.1.2	应用 NCP1207A/B 需要考虑的问题 .....	191
18.1.3	用 NCP1207A/B 构成的准谐振式开关电源设计 .....	200
18.2	应用 SEPIC 变换器的解决方案 .....	204
18.2.1	SEPIC 变换器的演化过程与原理 .....	204
18.2.2	芯片的选择与芯片简介 .....	205
18.2.3	应用电路 .....	208
18.2.4	参数的确定 .....	208
<b>第 8 篇 逆变器的设计</b>		
<b>第 19 章</b>	<b>单相正弦波逆变电源设计 .....</b>	<b>213</b>
19.1	常规思路的单相正弦波逆变电源设计 .....	213
19.2	基本性能要求 .....	213
19.3	解决方案的基本思路 .....	214
19.3.1	50Hz 逆变 .....	214
19.3.2	50Hz 正弦波逆变器 .....	214
19.3.3	多重 50Hz 矩形波逆变组合的解决方案 .....	214
19.3.4	直-交-直-交功率变换形式 .....	218
19.4	高频逆变电路与控制电路设计 .....	218
19.4.1	控制方式 .....	219
19.4.2	工作在 100% 占空比控制方式时的有效值电流的降低 .....	220
19.4.3	旁路电容器的作用 .....	221
19.5	高频变压器设计 .....	222
19.5.1	变压器的结构 .....	222
19.5.2	变压器设计 .....	224

19.6	输出整流滤波电路 .....	225
19.7	输出侧逆变电路与驱动电路设计 .....	225
19.8	正弦信号的产生与正弦化脉冲宽度调制的设计 .....	226
19.8.1	正弦波振荡器 .....	226
19.8.2	三角波发生电路 .....	227
19.8.3	脉冲宽度调制电路 .....	229
19.8.4	电路参数的确定 .....	229
19.8.5	死区时间的设置与实现 .....	229
19.9	输出参数的更改与元器件的选择 .....	231
<b>第 20 章</b>	<b>三相正弦波逆变电源设计 .....</b>	<b>232</b>
20.1	常规的设计思路 .....	232
20.2	逆变器与驱动电路设计思路 .....	232
20.2.1	逆变器与驱动电路设计思路 .....	232
20.2.2	电路板图的设计 .....	234
20.2.3	开关频率的选择 .....	236
20.3	控制电路单元设计思路简介 .....	236
20.4	PWM 电路设计 .....	237
20.5	死区时间的设置与实现 .....	238
20.6	计数器与 D/A 变换器组合实现三相正弦波基准电压 .....	240
20.7	计数器与权电阻组合方式 .....	244
20.7.1	“基准”正弦波电压产生原理 .....	244
20.7.2	单相“基准”正弦波发生器 .....	244
20.7.3	三相参考正弦波发生器 .....	246
20.8	输出滤波器设计 .....	248
20.9	稳定输出电压设计思路 .....	249
20.10	负载不对称与负载缺相保护 .....	249
20.11	隔离变压器与整流器部分的解决方案 .....	250
20.12	本章小结 .....	251
<b>第 21 章</b>	<b>非常规思路的单相正弦波逆变电源设计 .....</b>	<b>252</b>
21.1	非常规思路的单相正弦波逆变电源设计之一(线性集成功率放大器应用) .....	252
21.1.1	集成功率放大器型号的选择 .....	252
21.1.2	LM3886 的应用设计实例 .....	259
21.1.3	应用 LM4780 构成的逆变器设计 .....	261
21.1.4	应用线性集成功率放大器实现三相逆变器的解决方案 .....	267
21.2	非常规思路的单相正弦波逆变电源设计之二(D 类音频功率放大器的应用) .....	267
21.2.1	LM4651/2 简介 .....	267
21.2.2	应用 LM4651/2 的解决方案详解 .....	272
<b>参考文献</b>	.....	<b>278</b>

# · 第 1 篇 ·

## 电子元器件与基本电子线路





# 第1章 电子元器件性能分析

电子设计竞赛中需要应用各种各样的电子元器件。尽管电子元器件从分类上主要有电阻器、电容器、电感器、二极管、晶体管、线性集成电路、数字集成电路、开关、继电器、连接器等，但是每一种类型的电子元器件都有不同的特性，特别是二极管、晶体管和线性集成电路，其种类很多，特性各种各样。为了使所涉及的电子线路具有尽可能好的特性，就必须清楚地了解电子元器件的特性。在这一章中，将主要分析二极管、晶体管和电容器的特性。



## 1.1 二极管

通过电子技术基础的学习，可以知道二极管的主要作用是整流、单向导电和稳压。随着电子设计竞赛内容越来越丰富，二极管的作用也越来越多。特别是在开关功率变换应用中，二极管工作于大电流、高电压的高速开关状态，这样其开关特性就不能不考虑。不仅如此，在一些工作电压不高的应用场合，需要二极管具有尽可能低的导通电压。这些都是电子技术基础课程中没有详尽解释的，但在此仅对二极管的开关特性进行详尽的说明。

### 1.1.1 二极管的反向恢复特性

二极管的反向恢复特性主要有反向恢复时间、反向恢复电荷、反向恢复峰值电流和软度系数。

二极管的反向恢复特性如图 1-1 所示。

二极管是少数载流子导电器件，正向导通二极管在外电路施加反向电压后由于少数载流子的存在而不能立即关断，需要将少数载流子消除干净方能关断。导通的二极管的正向电流开始下降，当其电流下降到零时，由于二极管中的少数载流子仍然存在，所以它仍保持导通，只不过变成了反向导通。二极管的反向导通与电子技术基础中的二极管的反向阻断似乎是矛盾的，但是实际上，电子技术基础课程中所涉及的仅仅是稳态过程或者忽略了少数载流子的作用。必须记住的是，一旦二极管中的少数载流子清除干净，二极管必然变为阻断状态。

在二极管中的少数载流子被逐渐清除的过程中，二极管进入反向导通状态，其电流从阴极流向阳极，最终达到反向恢复电流峰值  $I_{RRM}$ 。随后二极管的反向电流开始回升，说明其中的少数载流子即将被清除干净。当二极管的反向恢复电流接近零时，可以认为其反向恢复过程结束，这个过程所经历的时间为反向恢复时间。

在二极管的反向恢复过程中，反向恢复电流与时间的积分就是二极管的反向恢复电荷  $Q_r$ 。