

 电源系列丛书

# 稳定电源基本原理 与工艺设计

曲学基  
王增福 编著  
曲敬锐

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



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

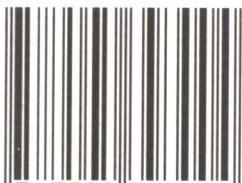
# 稳定电源基本原理与工艺设计



## 电源系列丛书

- UPS 供电系统应用手册
- 稳定电源电路设计手册
- 稳定电源实用电路选编
- 稳定电源基本原理与工艺设计
- 新型稳压电源及应用实例
- 模块化 DC/DC 实用电路精选

ISBN 7-5053-9300-6



9 787505 393004 >



责任编辑：魏永昌

李 玮

封面设计：徐海燕

本书贴有激光防伪标志，凡没有防伪标志者，属盗版图书。

ISBN 7-5053-9300-6/TN·1914 定价：49.00 元

电源系列丛书

# 稳定电源基本原理与工艺设计

曲学基 王增福 曲敬铠 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书介绍了稳定电源中常用的元器件和电路,以及串联反馈调整型稳压电源的工作原理、设计和制作。以此为基础,使读者在对串联反馈调整型稳定电源有初步认识后,能够更容易地了解其他类型稳定电源的工作原理和设计方法。为了弥补各种电源专业书籍中存在的不足,本书以很多篇幅介绍了稳定电源工艺设计方面的知识,如电源变压器的设计与制作、印刷电路板的设计与制作、电源的布线与焊接、稳定电源的散热和各类机箱的设计、稳定电源可靠性预测和设计等。希望此书能对工程技术人员设计和制作高质量的稳定电源提供帮助。

本书适用于初、中级电子工程专业的技术人员和大、中专院校相关专业的师生,对业余的电子技术爱好者也有参考价值。

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

稳定电源基本原理与工艺设计/曲学基,王增福,曲敬铠编著. —北京:电子工业出版社,2004.1  
(电源系列丛书)  
ISBN 7-5053-9300-6

I. 稳... II. ①曲...②王...③曲... III. 稳定电源 IV. TN86

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 100709 号

责任编辑:魏永昌 李 玮

印 刷:北京市天竺颖华印刷厂

出版发行:电子工业出版社 www.phei.com.cn

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:32.25 字数:826 千字

版 次:2004 年 1 月第 1 版 2004 年 1 月第 1 次印刷

印 数:5000 册 定价:49.00 元

凡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。  
联系电话:(010)68279077。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。

## 前 言

从《稳定电源实用手册》一书在 1994 年出版以来,时间已过近 10 年。在这 10 年中,电源技术又有了新发展,特别是随着各种新型集成器件的大量出现,使稳定电源的性能指标日趋先进,线路更加简单,在安装、调试和维修等方面更加方便。为了适应广大读者的需求,本书在《稳定电源实用手册》的基础上进行了较大的变动,删除了各类稳定电源的工作原理,读者若需要这些知识,可参阅这类电源的专业书刊。为了叙述的连贯性,本书中仅保留了串联反馈调整型晶体管稳压电源一章。有了对串联反馈调整型晶体管稳压电源的了解,就会比较容易地理解例如开关型稳压电源、集成稳压器稳压电源及可控硅稳压电源等多种类型电源的工作原理。另外,本书对串联反馈调整型晶体管稳压电源的设计和制作进行了较为详细的介绍,希望对读者能有所帮助。

电源是各类电子设备的重要组成部分。它为电子设备提供能源,是电子设备中发热量最大且发热最集中的部分。所以,稳定电源的散热设计对提高电源乃至整套电子设备的工作可靠性显得尤为重要。然而,在大量的电源专业书籍中缺少这方面的内容。本书将稳定电源的散热设计单独列为一章加以重点介绍,弥补了其他电源专业书籍在这方面的不足。

如果没有一部高质量的电源,则难以保证电子设备的正常工作。然而,许多工程技术人员在设计和制作稳定电源时,通常只注重电源技术指标的实现,却忽视了电源的可靠性预测和可靠性设计,导致电源工作经常出现故障,大大缩短了电源的工作寿命。一个产品的质量好坏是由其设计决定的,要想得到高质量的稳定电源,必须在电源电路的设计过程中进行可靠性预测和可靠性设计。本书重点介绍了如何按国家标准的要求进行稳定电源的可靠性预测和可靠性设计。这些工艺方面的设计在目前的稳定电源专业书籍中很少提及,这恰恰是本书的特色,希望这方面的论述能对读者有所帮助。

本书共分五章,书后还附有附录。第 1 章绪论,介绍了稳定电源的发展和类型,并对稳定电源的技术指标进行说明。第 2 章为稳定电源常用的一些元器件及电路,对常用元器件和电路的特性及其选用原则进行介绍。第 3 章为串联反馈调整型晶体管稳压电源的工作原理、设计和制作。第 4 章为稳定电源的散热设计,提出稳定电源在设计过程中应考虑散热问题、散热设计原则及各类机箱结构相应的散热设计方法。此章内容也适用于电子设备的散热设计。第 5 章为稳定电源的可靠性预测和可靠性设计。以国家军用标准 GJB299—87《电子设备可靠性预测手册》为标准,介绍了稳定电源中常用元器件的选择方法及可靠性预测与可靠性设计。并且对优选电路和边缘性能设计、过应力防护设计、三防(防潮、防盐雾和防霉菌)设计和电源的电磁兼容性进行了简要说明。本书最后是八个附录,为读者提供了部分国产集成稳压器的电子特性参数,某些新型器件和模块电源的电参数,以及部分国内外集成稳压器、运算放大器 and 常用半导体器件型号对照表等。

本书由曲学基、王增福、曲敬铠编著,参与本书编写工作的还有魏永昌、董辉、宋玉杰、王春祥、刘志勤、张友强、吴思凯、徐京春、李治国、李照星、吴兆民、秦学春、刘月明及周晓晖等。在此特别感谢电子工业出版社的魏永昌、李玮同志,他们为本书的编著和出版做了大量的工作。

由于编者水平有限,书中难免有不当或不足之处,诚请广大读者批评指正。

编 者  
2003 年

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 电源稳定问题的提出	1
1.2 引起稳定电源输出不稳的主要原因	2
1.3 稳定电源的技术指标	2
1.4 稳压电源的分类	5
第 2 章 稳定电源常用的一些元器件及电路	6
2.1 半导体二极管	6
2.2 半导体稳压二极管	7
2.3 恒流二极管	8
2.4 半导体三极管	9
2.5 VMOS 功率场效应管	14
2.6 单结晶体管	17
2.7 可控硅	18
2.8 可关断可控硅(GTO)	38
2.9 绝缘栅双极晶体管(IGBT)	47
2.10 其他元器件	56
2.11 整流滤波电路	65
2.12 低频放大电路	79
2.13 直流放大器	89
2.14 触发器及脉冲形成电路	92
2.15 模块电源	102
第 3 章 串联反馈调整型晶体管稳压电源	142
3.1 串联反馈调整型晶体管稳压电源的工作原理	143
3.2 串联反馈型晶体管稳压电源的设计与计算	155
3.3 串联反馈型晶体管稳压电源的制作	178
3.4 串联反馈型晶体管稳压电源的调试	193
3.5 串联反馈型晶体管稳压电源的维护与修理	197
3.6 小功率电源变压器的设计与制造	200
第 4 章 稳定电源的散热设计	221
4.1 概述	221
4.2 热流动方式	222
4.3 传导散热	223
4.4 辐射散热	229
4.5 对流散热	233
4.6 强制风冷散热	240
4.7 强气流风冷散热系数的计算	243

4.8	机箱的热设计 .....	244
4.9	大机柜的散热设计 .....	249
4.10	强制水冷散热 .....	252
4.11	热容 .....	256
4.12	热设计程序 .....	259
<b>第5章</b>	<b>稳定电源的可靠性预测和可靠性设计 .....</b>	<b>261</b>
5.1	可靠性概述 .....	261
5.2	可靠性预测 .....	261
5.3	电子元器件的选用和控制 .....	355
5.4	优选电路和边缘性能设计 .....	379
5.5	过应力防护设计 .....	386
5.6	三防设计 .....	387
5.7	电源的电磁兼容性 .....	389
<b>附录 A</b>	<b>部分国产集成稳压器的电参数特性 .....</b>	<b>393</b>
<b>附录 B</b>	<b>两种典型 GTO 产品的特性参数 .....</b>	<b>430</b>
<b>附录 C</b>	<b>绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 及其模块的性能参数 .....</b>	<b>431</b>
<b>附录 D</b>	<b>模块电源的主要性能参数 .....</b>	<b>437</b>
<b>附录 E</b>	<b>部分国内外集成稳压器型号对照表 .....</b>	<b>456</b>
<b>附录 F</b>	<b>集成运算放大器国内外型号对照表 .....</b>	<b>460</b>
<b>附录 G</b>	<b>常用半导体器件国内外型号对照表 .....</b>	<b>471</b>
<b>附录 H</b>	<b>国外常用半导体器件参数表 .....</b>	<b>486</b>
	<b>参考资料 .....</b>	<b>507</b>

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 电源稳定问题的提出

稳定电源是各种电子电路的动力源,被人誉为电路的心脏。人所皆知,所有用电设备,包括电子仪器仪表、家用电器等,对供电电压都有一定的要求。例如,有的电视机要求 220V 的电网供电电压变化不能超过  $\pm 10\%$ ,即从 198V 到 242V 之间。如果超出这个范围,电视机就不能正常收看,甚至会因电压过高而烧坏电视机。至于精密电子仪器,对供电电压保持稳定不变的要求就更加严格。为解决用电设备要求供电稳定,而市电电网又难以保证的供求矛盾,人们便研制了各种各样的稳定电源。所谓“稳定”是指电压或电流的变化小到可以允许的程度,并不是绝对不变的。

说到稳压问题,可以追溯到 19 世纪,爱迪生发明电灯时,就曾考虑过稳压器。到 20 世纪初,就已经出现了铁磁稳压器及相应的技术文献。电子管问世不久,就有人设计了电子管直流稳压器。在 20 世纪 40 年代后期,电子器件与磁饱和元件相结合,构成了电子控制的磁饱和交流稳压器,至今还在应用。20 世纪 50 年代,随着半导体工业的飞速发展,晶体管的诞生使串联调整型晶体管稳压电源成了直流稳压电源的中心,这种局面一直维持到 20 世纪 60 年代中期。这种电源虽然性能优良,但它最大的弱点是由于功率调整管与负载串联,并且晶体管工作在线性区域,稳压器的输出电压调节与稳定借助于功率晶体管上电压降的调整来实现,因而在输出电压低、电流大的场合,效率非常低且功率晶体管发热也很厉害,散热便成了很大的问题。随着半导体技术的进步,电子设备开始从分立元器件进入集成电路时代,体积日益减小,装机密度不断提高,规模容量逐渐增大。这种晶体管串联型常规电源难以满足形势发展的的问题日益显露。20 世纪 60 年代后期,科技工作者对稳定电源技术进行了一次新的总结,使开关电源和可控硅电源得到了快速的发展。与此同时,将稳压器的大部分元器件都集成在一块硅基片上的集成稳压器也在不断发展。从 1967 年美国 Bob Widlar 发明了第一块集成稳压器  $\mu A723$  至今,集成稳压器品种之多、系列之全使人们刮目相看。简述之,以电子计算机为代表的要求供电电压低、电流大的电源大都是由开关电源担任的;要求供电电压高、电流大的设备的电源由可控硅电源代之;要求控电电流小、电压低的仪器仪表或家用电器都采用集成稳压器。至于一些对电源稳定度要求很高的精密测量仪器或在其他高电压、小电流的供电场合,仍摆脱不了串联型晶体管稳压电源。

除稳压器外,稳定电源还包括稳流器。稳流器的功能是稳定负载电流。因为在实际生活中,有一些用电设备要求流过的电流保持稳定。对稳流器的研究比稳压器晚一些,但就其工作原理来说,稳流器和稳压器很相似。完全可以说,稳流实质上是稳定某一个与负载电流成比例的电压。如果这个电压稳定,与之成比例的电流自然也就稳定了。这样,让负载电流流过一个可以认为是不变的精密电阻,在精密电阻上产生的电压与负载电流成比例,想办法使这个电压稳定,负载电流也就稳定了。不过,在具体制作时,稳流器比稳压器要复杂些,问题还要多一些。



## 1.2 引起稳定电源输出不稳的主要原因

前面讲过,稳定电源的输出电压或电流,是相对稳定而非绝对不变的,它只是变化很小,小到可以允许的范围之内。那么产生这些变化的原因有哪些呢?不难想像,一是因电网输入电压不稳定所导致。电网供电有高峰期和低谷期,不可能始终稳定如初。二是因为供电对象而引起的,即由负载变化形成的。如果负载短路,负载电流会很大很大,电源的输出电压会趋近于零,时间一长还会烧坏电源;如果负载开路,没有电流流过负载,输出电压就会升高。即使不是这两种极端情况,负载电阻有微小的变化也会引起稳定电源输出电压或电流的变化。三是由稳定电源本身条件促成的。构成稳定电源的元器件质量不好,参数有变化或完全失效时,就不可能有效地调节前两种原因引起的波动。还有,元器件因受温度、湿度等环境影响而改变性能也会影响稳定电源输出不稳。

一般地说,稳定电源电路的设计首先要考虑前两种因素,并针对这两种因素设计稳定电源中放大器的放大量等。在选择元器件时,要重点考虑第三个因素。但在设计高精度稳定电源时,必须要高度重视第四个因素。因为在高稳定电源中,温度系数和漂移这两个关键的技术指标的好坏都是由这个因素所决定的。

## 1.3 稳定电源的技术指标

衡量一台稳定电源的好坏,一方面要从功能角度看,即容量大小(输出电压和输出电流)、调节范围及效率高低等,人们称之为使用指标。另外,还要从外观形状及体积重量等直观形象来看,这些称为非电气指标。更重要的是要看它的质量高低,即输出量的稳定程度,它需要定量地描述,称之为质量指标。下面介绍稳压器常用的一些质量指标。

### 1.3.1 描述输入电压影响输出电压的几种指标形式

#### 1. 稳压系数

稳压系数有绝对稳压系数和相对稳压系数两种。绝对稳压系数表示负载不变时,稳压电源输出直流变化量  $\Delta U_o$  与输入电网电压变化量  $\Delta U_i$  之比,即

$$K = \frac{\Delta U_o}{\Delta U_i}$$

它表示输入电网电压变化  $\Delta U_i$  引起多大输出电压的变化。所以绝对稳压系数  $K$  值越小越好。 $K$  越小,说明同一  $\Delta U_i$  引起的  $\Delta U_o$  越小,也就是输出电压越稳定。这种表示方法在工程设计中常常用到。但是,在稳定电源中更重视相对稳压系数。相对稳压系数  $S$  表示在负载不变时,稳压器输出直流电压  $U_o$  的相对变化量  $\Delta U_o/U_o$  与输入电网电压  $U_i$  的相对变化量  $\Delta U_i/U_i$  之比,即

$$S = \frac{\Delta U_o/U_o}{\Delta U_i/U_i}$$

一般情况下,如果不特别说明,稳压系数通常是指相对稳压系数  $S$ ,而不是绝对稳压系数  $K$ 。

## 2. 电网调整率

它表示输入电网电压由额定值变化 $\pm 10\%$ 时,稳压电源输出电压的相对变化量,有时也以绝对值表示。一般稳压电源的电网调整率等于或小于 $1\%$ 、 $0.1\%$ ,甚至 $0.01\%$ 。

有的直流稳压电源规定电网电压不是变化 $\pm 10\%$ ,这时会有特别的说明。

## 3. 电压稳定度

负载电流保持为额定范围内的任何值,输入电压在规定的范围内变化所引起的输出电压相对变化 $\frac{\Delta U_o}{U_o}$ (百分值),称为稳压器的电压稳定度。有的部门把这项技术指标更具体地规定为在额定输出电压时,当电网电压由额定值变化 $\pm 10\%$ ,负载电流从零变化到最大值时,引起输出电压的变化程度。

### 1.3.2 负载对输出电压影响的几种指标形式

#### 1. 负载调整率(也称电流调整率)

在额定电网电压下,负载电流从零变到最大时,输出电压的最大相对变化量,常用百分数表示。有时也用绝对变化量表示。

#### 2. 输出电阻(也称等效内阻或内阻)

在额定电网电压下,由于负载电流变化 $\Delta I_L$ 引起输出电压变化 $\Delta U_o$ ,则输出电阻为

$$R_o = \left| \frac{\Delta U_o}{\Delta I_L} \right|$$

### 1.3.3 纹波电压的几种指标形式

#### 1. 最大纹波电压

在额定输出电压和负载电流下,输出电压的纹波(包括噪声)的绝对值大小,通常以峰-峰值或有效值表示。

#### 2. 纹波系数 $\gamma(\%)$

在额定负载电流下,输出纹波电压的有效值 $U_{rms}$ 与输出直流电压 $U_o$ 之比,即

$$\gamma = \frac{U_{rms}}{U_o} \times 100\%$$

#### 3. 纹波电压抑制比

纹波电压抑制比是指在规定的纹波频率(例如 $50\text{Hz}$ )下,输入电压中的纹波电压 $U_{i\sim}$ 与输出电压中的纹波电压 $U_{o\sim}$ 之比,即

$$\text{纹波电压抑制比} = \frac{U_{i\sim}}{U_{o\sim}}$$

### 1.3.4 温度漂移和温度系数

环境温度的变化影响元器件参数的变化,从而引起稳压器输出电压的变化,称为温度漂移。常用温度系数表示温度漂移的大小。温度每变化 $1^{\circ}\text{C}$ 引起输出电压值的变化 $\Delta U$ 。称为绝对温度系数,单位是 $\text{V}/^{\circ}\text{C}$ 或 $\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ 。温度每变化 $1^{\circ}\text{C}$ 引起的输出电压相对变化 $\frac{\Delta U_0}{U_0}$ 称为相对温度系数,单位是 $\%/^{\circ}\text{C}$ 。

### 1.3.5 漂移

稳压器在输入电压、负载电流和环境温度保持一定的情况下,元件参数的不稳定也会造成输出电压的变化,慢变化叫做漂移,快变化叫做噪声。介于二者之间叫做起伏。在一般使用中只考虑漂移就可以了。

表示漂移的方法有两种。一种是用在指定时间内输出电压值的变化 $\Delta U_0$ ;另一种是用在指定时间内输出电压的相对变化 $\frac{\Delta U_0}{U_0}$ 。考察漂移的时间可以定为 $1\text{min}$ 、 $10\text{min}$ 、 $1\text{h}$ 、 $8\text{h}$ 或更长。

只有在精度较高的稳压器中,才有温度系数和温漂两项指标。

### 1.3.6 响应时间

所谓稳压器的响应时间,是指在负载电流突然变化时,稳压器的输出电压从开始变化到到达新的稳压值之间的一段调整时间。例如一个稳压器,输出电压 $15.00\text{V}$ ,输出电阻 $10\text{m}\Omega$ ,那么输出电流变化 $\Delta I_0 = 1\text{A}$ 时,输出电压应该下降到 $14.99\text{V}$ 。可是输出电流“突然”变化 $1\text{A}$ 时,输出电压并不是“马上”变到 $14.99\text{V}$ 。可能是经过“一段时间”才慢慢地降到 $14.99\text{V}$ ;也可能降得比 $14.99\text{V}$ 更低,再逐渐回升到 $14.99\text{V}$ ;还可能在 $14.99\text{V}$ 上下摆动几次,最后才稳定到 $14.99\text{V}$ 。总之,从开始变化起,直至到达新的稳压值为止,这段时间叫做响应时间。交流稳压器,大多都有响应时间这项指标,614型电子交流稳压器的响应时间为 $0.5\text{s}$ 。

在直流稳压器中,则是用在矩形波负载电流时的输出电压波形来表示这个特性,称为过渡特性。

### 1.3.7 失真

这项指标是交流稳压器特有的。交流稳压器的输入电网电压尽管是正弦波形,但是由于使用了铁磁饱和线圈等非线性元件,输出电压就不一定是正弦波形了。这种现象就是波形畸变,也称失真。

### 1.3.8 稳定度

一般地说,稳定度是指在某一条件下输出电压的相对变化 $\frac{\Delta U_0}{U_0}$ 。如果不注明条件而泛谈稳定度,那就应该是在所有允许使用条件下,或者说是在最恶劣的情况下输出电压的最大相对变化 $\frac{\Delta U_0}{U_0}$ 。

因为稳压器输出电流变化的因素与引起稳压器输出电压变化的因素完全一样。所以稳流

器的指标和稳压器的指标一一对应。不过有一点应该注意,在稳压器中内阻越小越好,而在稳压器中内阻则是越大越好。输出电阻大,说明当负载电阻变化时,输出电压变化很大,而引起的输出电流变化却很小,这正是稳流的结果。

## 1.4 稳压电源的分类

稳压器的分类没有明确的含义和界限,一般都是按照习惯或通用的方法进行的,在此简单介绍几种。

以稳压器稳定的对象来分类,可以分为交流稳压器和直流稳压器两种。交流稳压器输出电压是交流的,直流稳压器输出电压是直流的,两者通常都用交流电网供电。在设计、制造和使用,一般都把变压器、整流器和滤波器看成稳压器的一部分,作为一个整体来考虑。

以稳压器的稳定方式来分类,可以分为参数稳压器和反馈调整型稳压器两种。参数稳压器主要是利用元器件的非线性实现稳压。例如,仅用一只电阻和一只硅稳压管就能构成参数稳压器。反馈调整型稳压器是一个负反馈闭环自动调整系统,它把稳压器输出电压的变化量,经过取样、比较放大、再反馈给控制调整元器件,使输出电压得到补偿而趋近于原值,从而达到稳压。

以稳压器的调整元器件与负载的连接方式来分类,可以分为并联稳压器和串联稳压器两种。调整元器件与负载并联的叫做并联稳压器或分流式稳压器。它通过改变调整元器件流过电流的多少来适应输入电网电压的变化及负载电流的变化,以保持输出电压的稳定。这种稳压器效率较低,只有某些专用场合才适用。调整元器件与负载串联的稳压器叫做串联稳压器。在这种稳压器中,调整元器件串接于输入端和输出端之间,输出电压就依靠调整元器件改变自身的等效电阻来维持恒定。调整元器件如果是晶体管,就是我们通常所说的晶体管串联调整型稳压器。

以调整元器件的工作状态来分类,可以分为线性稳压器和开关稳压器。调整元器件工作在线性状态的是线性稳压器,调整元器件工作在开关状态的是开关稳压器。开关稳压器又有很多分类,例如自激式、他激式、脉冲调宽式、频率调整式、斩波式、推挽式、半桥式、全桥式、单端正激式及单端反激式等。

以调整元器件的品种来分类,可以分为辉光放电管稳压器、稳压管稳压器、电子管稳压器、晶体管稳压器及可控硅稳压器等。

此外,还有其他的分类方法。例如,集电极输出型稳压器,发射极输出型稳压器;高精度稳压器,高压稳压器,低压稳压器;通用稳压器,专用稳压器等。

稳压器的分类有时也是错综交织的。例如,一台稳压器可以同时是直流、闭环反馈、线性调整、串联、晶体管集电极输出、专用、高精度稳压器。但一般不必这样说明,只要表示出其主要特点就行。

## 第2章 稳定电源常用的一些元器件及电路

### 2.1 半导体二极管

半导体二极管是由一个PN结加上相应的电极引线和管壳做成的。由于二极管所用的半导体材料不同,有锗二极管、硅二极管和砷化镓二极管之分。二极管的PN结有点接触型、面接触型和平面型三种结构。由于点接触型PN结的面积很小,不能承受高的反向电压和大的电流,但其极间电容很小,适用于高频信号的检波、脉冲电路或微小电流的整流。平时我们所用的检波二极管就属于此类。面接触型二极管,由于PN结面积大,能承受较大的电流,适用于整流,整流二极管就是这种类型。平面型则多用于开关、脉冲和超高频。

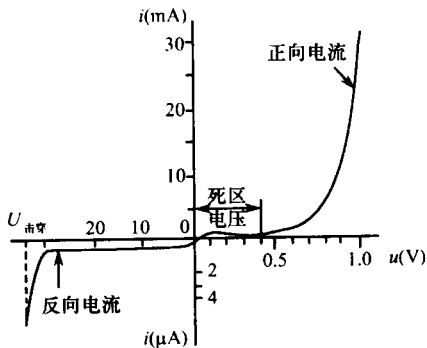


图 2-1 半导体二极管的伏安特性

根据固体物理中有关对PN结的研究,二极管的正向电流可以用如下公式表示

$$i = I_S(e^{\frac{qu}{kT}} - 1) \quad (2-1)$$

式中  $i$ ——二极管正向电流;

$I_S$ ——二极管反向饱和电流;

$T$ ——热力学温度,单位是 K(例如,在室温  $25^\circ\text{C}$  时,  $T = 273\text{K} + 25\text{K} = 298\text{K}$ );

$q$ ——电子电荷量,等于  $1.602 \times 10^{-19}\text{C}$ ;

$k$ ——玻耳兹曼常数,等于  $1.38 \times 10^{-23}\text{J/K}$ ;

$u$ ——正向电压;

$e$ ——为自然对数的底。

#### 2.1.2 半导体二极管的主要参数及其定义

由于各类二极管的作用不同,其技术参数的侧重点也有差异,下面以在稳定电源中最常用的硅整流二极管、硅开关二极管为例进行论述。

##### 1. 硅整流二极管的主要参数

(1) 额定正向整流电流  $I_F$ (平均值): 在规定的使用条件下,在电阻性负载的正弦半波整流电路中,允许连续通过半导体整流二极管的最大工作电流。

(2)正向电压降  $U_F$ (平均值):半导体整流二极管通过额定整流电流时,在两极间产生的电压降。

(3)反向漏电流  $I_B$ (平均值):半导体整流二极管在正弦半波最高反向工作电压下的漏电流。

(4)最高反向工作电压  $U_R$ (峰值):等于或小于三分之二的半导体整流二极管的击穿电压  $U_B$  值。

(5)击穿电压  $U_B$ (峰值):半导体整流二极管反向为硬特性时,其反向伏安特性曲线急剧弯曲点的电压值;如果为软特性时,则其值为给定的反向漏电流下的电压值。

(6)额定结温  $T_{JM}$ ( $^{\circ}C$ ):半导体整流二极管在规定的使用条件下所允许的最高结温。

## 2. 硅半导体开关二极管的主要参数

(1)最大正向电流  $I_M$ :在额定功率下,允许通过二极管的最大正向脉冲电流。

(2)额定正向电流  $I_F$ :在额定功率下,允许通过二极管的最大正向直流电流。

(3)正向压降  $U_F$ :开关二极管通过正向电流时在两极间产生的压降。

(4)击穿电压  $U_B$ :二极管的反向伏安特性急剧弯曲点的电压值。

(5)最高反向工作电压  $U_R$ :通过二极管的反向漏电流为  $I_R$  时,在两极间产生的电压降。

(6)反向漏电流  $I_R$ :在二极管两端加上反向工作电压  $U_R$  时,通过二极管的电流。

(7)额定功率  $P_M$ :二极管结温不高于  $150^{\circ}C$  时所能承受的最大功率。

(8)二极管零偏电容  $C_0$ :在零偏压下,二极管两端的电容。

(9)反向恢复时间  $t_{rr}$ :二极管由正向导通状态急剧切换到截止状态,从输出脉冲下降到零开始到反向脉冲电流至最大反向电流的 10% 所需要的时间。

### 2.1.3 半导体二极管的简易判别方法

利用万用表的电阻挡能够判别二极管的好坏及极性。

用万用表的  $R \times 100$  或  $R \times 1k$  挡测量二极管,红表笔接二极管的负极,黑表笔接二极管的正极。这时,万用表测量的是二极管的正向电阻,它应该是几百欧至几千欧。反过来,把红表笔接二极管的正极,黑表笔接二极管的负极。此时,万用表测量的是二极管的反向电阻,它应该大于几百千欧。如果不知道二极管的极性,用以下方法也很容易判断。如果测量电阻比较小,只有几百欧或几千欧,黑表笔(万用表的负端)所接二极管的那一个极是正的,红表笔所接的那一个极是负的;相反,如果万用表测量电阻很大,大于几百千欧,此时红表笔(万用表的正端)与二极管相接的是正极,黑表笔相接的为负极。

被测二极管正反向电阻值的差别越大越好,如果差不多,说明二极管性能不好或已损坏。

## 2.2 半导体稳压二极管

稳压二极管实质上也是一个半导体二极管。前面讲过,半导体二极管正向导通,反向只有很小的漏电流,可以认为是开路。但是,当反向电压加大到一定数值时,反向电流突然上升,此后电压只要有少量增加,反向电流就会增加很多,这种现象称为击穿。稳压二极管就是利用这种特性稳压的。

稳压二极管在稳定电源中的作用是提供一个稳定的电压,其用途分两种,一种是用来构成参数稳压器,另一种是作为反馈型稳压电源的基准电压源。

半导体稳压二极管的主要参数有如下几项：

(1) 稳定电压  $U_Z$ ：在稳压范围内，通过规定的反向电流，在极间产生的电压降叫稳定电压。一般稳压管的稳压范围不大。同一种型号的各稳压管之间，稳定电压也不同。同一个稳压管工作电流不同时，稳定电压也有所变化。

(2) 动态电阻(内阻)  $r_Z$ ：在测试电流下，稳压二极管的电压微变量与通过稳压二极管电流微变量的比值叫动态电阻，也叫内阻。常用的稳压管的内阻大约在几十欧左右，最小的有几欧，大的达到百欧。内阻越小越好。

(3) 最大工作电流  $I_{ZM}$ ：在最大耗散功率下，稳压二极管允许通过的电流。

(4) 最大耗散功率  $P_{ZM}$ ：在给定的使用条件下，稳压二极管允许承受的最大功率。

(5) 电压温度系数  $C_{TV}$ ：在测试电流下，稳定电压的相对变化与环境温度的绝对变化的比值。常用的稳压管的温度系数约在  $10^{-4}/^{\circ}\text{C}$  数量级。稳定电压很低的稳压管温度系数是负的，稳定电压很高的稳压管温度系数是正的。

(6) 反向测试电流  $I_Z$ ：测试反向参数时，给定的反向电流。

(7) 正向压降  $U_F$ ：稳压二极管正向通过规定的电流时，极间产生的压降。

(8) 正向测试电流  $I_F$ ：测试稳压二极管正向参数时，给定的电流。

(9) 反向漏电流  $I_R$ ：稳压二极管在规定的反向电压下，产生的漏电流。

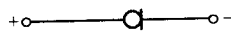
(10) 电压漂移  $B_{V1}$ ：在给定的测试条件下，稳定电压在一定时间间隔内变化的百分比。

(11) 最高结温  $T_{JM}$ ：稳压二极管在工作状态下，PN 结的最高温度。

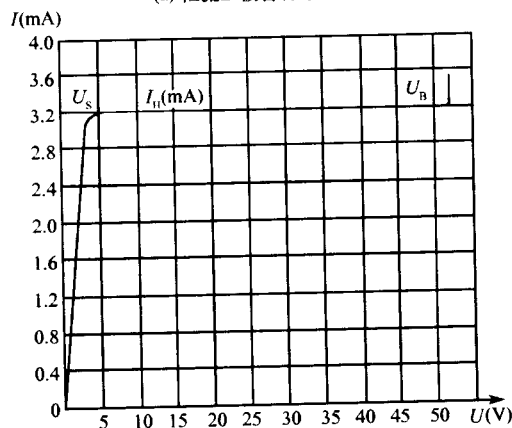
使用稳压二极管时应该注意，有些参数不能超过手册中给出的值，例如最高工作电流和最大耗散功率等，否则会烧坏稳压二极管。

## 2.3 恒流二极管

恒流二极管也是一种半导体器件。它的伏安特性如图 2-2 所示。恒流二极管两端的电压超过电压  $U_S$  后，通过恒流二极管的电流就稳定在  $I_H$  附近。 $U_S$  叫做起始电压， $I_H$  叫做恒定电流。这两项是恒流管最基本的使用参数。恒流二极管的特性正好与稳压二极管相反。二极



(a) 恒流二极管符号



(b) 伏安特性

图 2-2 恒流二极管的伏安特性

管两端的电压变化很大时,二极管的电流变化很小。动态电阻(电压变化与电流变化之比) $r_D$ 很大,而且是越大越好。

恒流二极管的极限参数是击穿电压  $U_B$ 。使用时,恒流二极管两端的电压不得高于它,否则可能被烧毁。

恒流二极管的电流与环境温度有密切关系。外加电压一定时,温度每变化  $1^\circ\text{C}$  所引起恒流二极管电流的相对变化称为恒流二极管的温度系数。

恒流二极管在稳定电源中的用途主要是对作为基准电压的稳压管进行恒流供电,以保证稳压管的电流稳定。另外,它还可以作为直流放大器的集电极负载,以提高电压放大量。

恒流二极管是近几年来出现的新产品,几种产品的特性见表 2-1。

表 2-1 几种恒流二极管的特性

参 数	$I_H$	$U_S$	$U_B$	$r_D$	电流温度系数
单 位	mA	V	V	M $\Omega$	$1/^\circ\text{C}$
型 号					
2DH01D	$0.1 \pm 0.05$	$\leq 0.8$	$\geq 50$	$\geq 8$	$10^{-3}$
2DH1D	$(1 - 0.05) \sim (1 + 0.5)$	$\leq 3.0$	$\geq 50$	$\geq 1.0$	$-3 \times 10^{-3}$
2DH10D	$10 \pm 0.5$	$\leq 5.5$	$\geq 50$	$\geq 0.08$	$-3 \times 10^{-3}$
2DH15D	$15 \pm 0.5$	$\leq 6.0$	$\geq 50$	$\geq 0.04$	$-3 \times 10^{-3}$

## 2.4 半导体三极管

半导体三极管是由两个 PN 结构成的半导体器件。由于两个 PN 结有不同的组合方式,半导体三极管可分为 NPN 型和 PNP 型两大类。制造半导体三极管的材料有锗和硅,所以半导体三极管又有锗管和硅管之分。另外,因制造半导体三极管采用的工艺不同,可以做出高频管(3MHz 以上)和低频管(3MHz 以下),以及大、中、小功率管。

在稳定电源电路中,大功率晶体管主要用做调整元器件或推动放大级;小功率管主要用做放大电路、保护电路、恒流源电路、转换电路及开关电源中的脉冲电路。

在设计稳定电源时,常用到半导体三极管的一些参数及特性曲线,下面简单地介绍一下。

### 2.4.1 半导体三极管的特性曲线

测试半导体三极管特性的电路如图 2-3 所示。把三极管各电极的各种电压与电流的相互

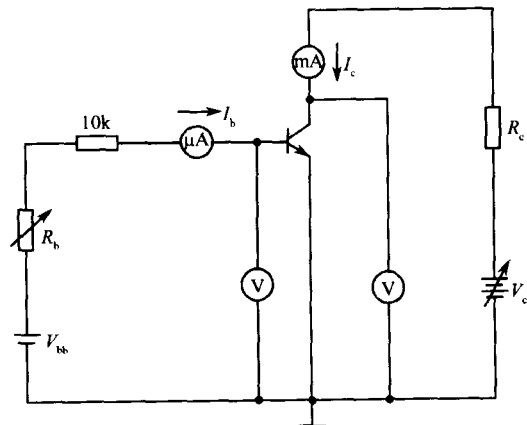


图 2-3 半导体三极管特性测试电路



关系描绘成曲线,便是三极管的特性曲线。

半导体三极管特性曲线分输入和输出两种。输入特性曲线是指把三极管的集-射极电压  $U_{ce}$  固定在某一个值上,反映基极电流  $I_b$  与发射极电压之间的关系,如图 2-4 所示。图中左边三条为锗管的,右边一条为硅管的。

半导体三极管输出特性曲线,指的是把基极电流  $I_b$  固定在某一个点,反映三极管集电极电流  $I_c$  与集-射极电压  $U_{ce}$  之间关系的曲线。从输出特性曲线中可以看出,三极管的工作状态可以划分成三个区域,如图 2-5 所示。

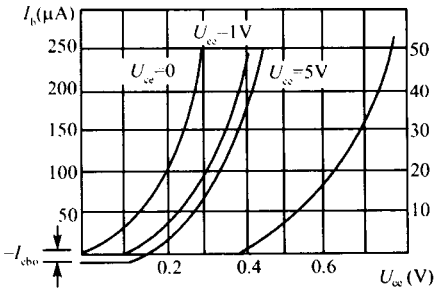


图 2-4 半导体三极管输入特性

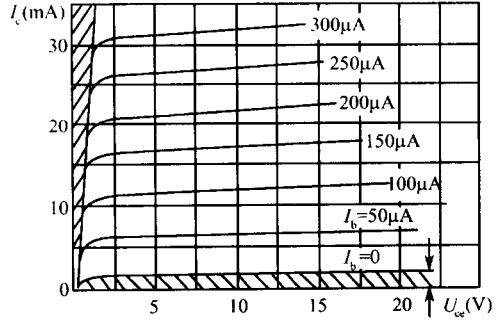


图 2-5 半导体三极管输出特性曲线

其中,  $I_b = 0$  曲线以下的阴影部分叫做截止区。截止区的特点是,三极管的两个 PN 结都处于反向偏置,因此没有放大作用。此时,三极管的内阻很大,相当于开关断开。

靠近左边的阴影部分是饱和区。它的特点是两个 PN 结都处于正向偏置,基-射极电压近似为零。此时,即使继续增大基极电流  $I_b$ ,集电极电流  $I_c$  也不会再增大了,三极管同样失去了放大作用,相当于开关接通,三极管内阻很小。

开关电源就是在这两种状态下工作的,当电源的输出电压因电网或负载某一个方面的影响而下降时,通过反馈控制系统,使调整三极管处于饱和区,输入电压通过三极管直接加到电源的输出端,使输出电压趋向于上升;相反,当电源电压上升时,三极管工作在截止区,使输入电压无法加到输出端,输出电压因此而下降,使稳压电源的输出电压始终保持稳定。

在饱和区和截止区之间是放大区。三极管工作在这个区域时,集电极电流  $I_c$  是由基极电流  $I_b$  控制着, $I_b$  增大时  $I_c$  便增大, $I_b$  减小时  $I_c$  也减小,而且两者总是相差  $\beta$  倍。 $\beta$  叫做电流放大倍数。稳定电源中的各种放大器及串联型稳压电源中的调整三极管都工作在这个区域内。

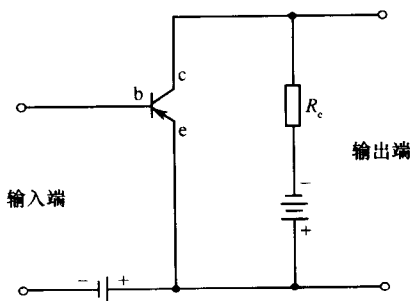


图 2-6 共发射极电路

## 2.4.2 半导体三极管三种基本接法

半导体三极管有三种基本接法:共发射极、共集电极和共基极。不同接法的输入端和输出端各不相同,但它们的工作原理是基本相同的。所谓共发射极是指发射极接地,如图 2-6 所示。这种电路既具有电压增益,又具有电流增益,所以得到了最广泛的应用。

共集电极电路也叫射极跟随器,如图 2-7 所示。它的电流增益与共发射极电路近似相等,电压增益小于或等于 1,输入电压与输出电压极性相同、幅值相等,