

直流稳压电源的原理和设计

王 鸿 麟 编 译

人 民 邮 电 出 版 社

内 容 提 要

本书以英文版《电子设备的电源供给》(*Power Supplies for Electronic Equipment*, 1973年版, 作者J.R.Nowicki) 为基础, 并补充了开关稳压电源及其它有关资料编译而成。主要对并联稳压器、串联稳压器、稳流器及开关稳压器的的工作原理和设计方法作了较详细的介绍。

本书读者对象为从事设计和使用半导体电子电源设备的技术人员和工人, 也可供大专院校有关专业教学参考。

直流稳压电源的原理和设计

王鸿麟 编 译

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本: 787×1092 1/32 1981年5月 第 一 版

印张: 8 28/32 页数: 142 1981年5月河北第一次印刷

字数: 200 千字 印数: 1—14,000 册

统一书号: 15045·总2456—有5193

定 价: 0.92 元

编译者的话

许多电子设备要由直流稳压电源供电。随着电子技术的发展，新型稳压电源不断出现。现在，电子设备不仅可采用晶体管线性稳压电源，而且可采用开关型直流稳压电源。

目前广大技术人员希望更多地了解各类直流稳压电源的基本原理和设计方法。为此，根据洋为中用的原则，以《电子设备的电源供给》(*Power Supplies for Electronic Equipment*, 1973年版，作者 J. R. Nowicki) 第二卷前两章为基础编译了这本书。在编译过程中，为了便于广大读者阅读，对各类稳压器的的工作原理作了必要的补充，并且列举了大量的设计实例。另外，根据国内外有关技术资料对各类开关型稳压器的设计方法和实际应用作了较多的补充。

本书可供从事稳压电源设计和应用的技术人员阅读，也可作为大专院校有关专业的教学参考书。

本书承南开大学物理系董孝义、关信安同志和邮电部北京设计所杨震中同志审校，七机部五〇二研究所廖炯生同志提供了一些技术资料，在此一并表示感谢。由于本人水平有限，书中缺点和错误在所难免，希广大读者批评指正。

编译者 1980年1月

目 录

引 言	(1)
一、稳压电源的作用和组成	(1)
二、稳压电源的基本工作原理	(2)
三、稳压电源的基本分类	(5)
第一章 并联稳压器的原理与设计	(6)
第一节 稳压管的特性	(6)
一、稳压管的基准电压	(7)
二、稳压管的额定工作电流与动态电阻	(8)
三、稳压管的额定功率与散热器设计	(9)
四、稳压管的温度系数	(12)
第二节 稳压管并联稳压器的原理与设计	(13)
一、最简单的并联稳压器的的工作原理	(13)
二、设计步骤	(19)
三、设计实例	(22)
四、改进的稳压管并联稳压器	(27)
五、稳压管并联稳压器的简单评价	(48)
第三节 晶体管并联稳压器的原理与设计	(49)
一、最基本的晶体管并联稳压器	(49)
二、输出电压高于基准电压的晶体管并联稳压器	(60)
三、多管并联稳压器	(65)
四、晶体管并联稳压器的简单评价	(76)

第二章 串联稳压器的原理与设计	(78)
第一节 最简单的串联稳压器的原理与设计	(79)
一、基本工作原理.....	(79)
二、实际电路设计.....	(84)
三、改进电路.....	(88)
第二节 带有单管电压放大器的串联稳压器	(93)
一、输出电压接近基准电压的串联稳压器.....	(93)
二、输出电压高于基准电压的串联稳压器.....	(102)
三、带有前置稳压器或稳流电源负载的串联稳压 器的原理与设计.....	(105)
第三节 带有差动放大器的串联稳压器	(118)
一、基本电路.....	(119)
二、经过改进的电路.....	(123)
三、带有差动放大器的高压串联稳压器.....	(124)
第四节 具有双路输出电压和输出电压调整范围较 宽的串联稳压器	(127)
一、双路串联稳压器.....	(128)
二、输出电压调整范围较宽的串联稳压器.....	(130)
第五节 晶体管串联稳压器的保护电路	(135)
一、限流保护电路.....	(135)
二、断流保护电路.....	(143)
三、负载转换保护电路.....	(151)
四、调整管失控保护电路.....	(151)
第三章 稳流电源及其在稳压器中的应用	(154)
第一节 四端稳流电源	(156)
一、晶体管四端稳流电源的基本电路.....	(156)
二、利用稳压管稳压的晶体管四端稳流电源.....	(157)

三、利用稳压管稳压的四端稳流电源的改进电路	(159)
四、四端稳流电源的实际电路	(161)
第二节 两端稳流电源	(163)
一、最基本的两端稳流电路	(163)
二、互补型稳流电路	(167)
三、双互补型稳流电路	(171)
第三节 反馈式稳流电源与反馈式稳流/稳压电源	(172)
一、反馈式稳流电源	(172)
二、反馈式稳流/稳压电源	(174)
第四章 开关型稳压电源的原理与设计	(177)
第一节 串联晶体管开关型稳压电源	(178)
一、主回路的原理与设计	(178)
二、控制电路的工作原理	(189)
三、实际电路的设计	(210)
第二节 晶体管直流变换器开关型稳压电源	(220)
一、单管直流变换器开关型稳压电源	(220)
二、推挽式直流变换器开关型稳压电源	(228)
第三节 可控硅开关型稳压电源	(233)
一、可控硅相控开关稳压电源	(233)
二、斩波式可控硅开关稳压电源	(242)
第四节 组合式开关型稳压电源	(249)
一、晶体管开关稳压器与晶体管线性稳压器构成 的组合式稳压电源	(249)
二、可控硅开关稳压器与晶体管线性稳压器构成 的组合式稳压电源	(251)
第五节 集成化开关稳压电源	(254)

一、集成化开关稳压电源的基本特性	(254)
二、集成化开关稳压电源设计举例	(257)
附录一 本书所用国外晶体管的主要参数	(260)
附录二 本书所用国外稳压管的主要参数	(262)
附录三 本书所用国外二极管的主要参数	(263)
附录四 符号说明	(263)

引言

一、稳压电源的作用和组成

电子设备一般是由整流器供电的。当交流电网电压或负载电流变化时，整流器输出电压也会随之发生变化。但是，许多电子设备，比如精密的电子测试仪器、自动控制装置和电子计算机等，都要求直流电源电压稳定不变，否则，将造成测量和计算误差，或引起自动控制装置工作不稳，甚至根本无法工作。为了供给稳定的直流电压，必须采用直流稳压电路。直流稳压电路与整流器和滤波器合

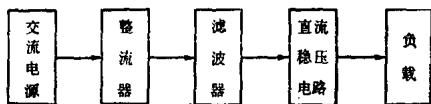


图 0-1 直流稳压电源方框图

在一起，构成直流稳压电源，其方框图如图0-1所示。

如果在整流器的前面加入交流稳压器，稳定交流输入电

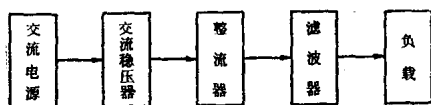


图 0-2 稳定整流器输入电压的稳压电源方框图

压，如图0-2所示，也能使整流器的输出电压稳定。不过，当负载变化

时，这种稳压电源的输出电压有较大的变化，所以，这种稳压电源只能适用于固定负载。

在实际应用中，如果需要负载电流保持稳定，可以采用稳流电路。在电源电压和负载阻抗发生变化的情况下，稳流电路能够使负载电流保持不变。

二、稳压电源的基本工作原理

对于理想的稳压电源来说，不管输入电压、负载或温度如何变化，输出电压都应保持不变，并且在任一频率上，输出阻抗都应当为零。理想稳压器的调整特性曲线（即输出电压 V_o 与负载电流 I_L 的关系曲线）如图 0-3 所示。实际上，稳压器不可能完全具有这种理想特性。

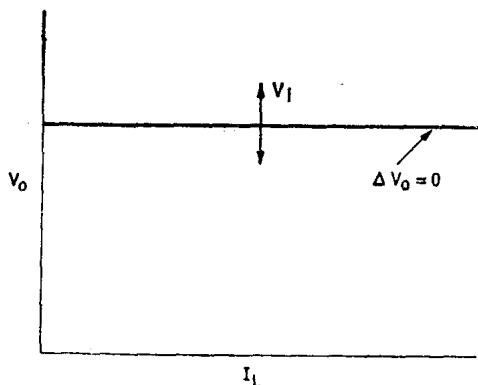


图 0-3 理想稳压器的调整特性曲线

稳压器的基本工作原理可用图 0-4 所示的基本等效电路来说明。

从该电路可以清楚地看出，当输入电压 V_i 和负载电流 I_L

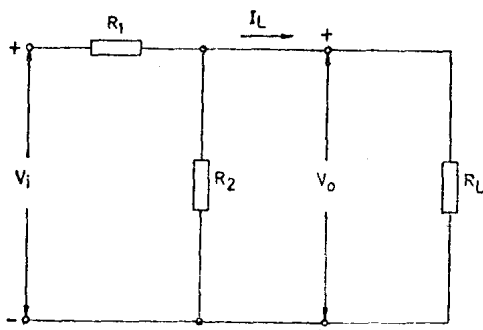


图 0-4 稳压器的基本等效电路

变化时，只要适当调整电阻 R_1 或 R_2 的阻值，输出电压 V_o 就能保持稳定不变。如果 R_1 采用固定电阻， R_2 采用可变电阻，那么，当输入电压 V_i 保持不变而负载电阻 R_L 减小时，必然引起负载电流 I_L 增加，因而流过电阻 R_1 的电流也增加， R_1 两端的降压增加，从而使输出电压 V_o 降低。此时，如果增大电阻 R_2 的阻值，可以使流过电阻 R_2 的电流 I_{R_2} 减小，这样就能维持流过电阻 R_1 的总电流不变，输出电压 V_o 也可维持不变。同样，假设负载电阻 R_L 不变而输入电压 V_i 增加时，只要减小电阻 R_2 的阻值，增加流过电阻 R_2 的电流，从而增加流过电阻 R_1 的电流，使电阻 R_1 两端的降压增大，也可保持输出电压 V_o 不变。在这种电路中，由于能够调整输出电压 V_o 的电阻 R_2 与负载 R_L 并联，所以这类稳压器叫做并联稳压器。如果 R_2 采用固定电阻， R_1 采用可变电阻，因输入电压 V_i 或负载电流 I_L 变化而使输出电压 V_o 升高时，只要适当增加电阻 R_1 的阻值，就能使 R_1 两端的降压增加，从而使输出电压 V_o 保持不变。如果由于输入电压或负载电流变化而使输出电压降低时，只要适当减小电阻 R_1 的阻值，使 R_1 两端的降压减小，也能使输出电压 V_o 保持不变。在这种电路中，由于能够调整输出电压的电阻 R_1 与负载 R_L 串联，所以这类稳压器叫做串联稳压器。如果电阻 R_1 用开关元件代替，再增加适当的脉冲发生器和滤波器，就组成了开关稳压器。开关元件通常采用晶体管和可控硅等有源器件。脉冲发生器根据输出电压的变化来改变其工作状态或频率，以控制开关元件导通或截止的时间。滤波器能使输出电压比较平稳。

当输入电压 V_i 、负载电流 I_L 和温度 T 变化时，稳压器输出电压 V_o 将发生变化，因此，输出电压 V_o 可表示为输入电压 V_i 、负载电流 I_L 和温度 T 的函数。它们之间的关系可由下式给出：

$$dV_o = \left(\frac{\partial V_o}{\partial V_i} \right) dV_i + \left(\frac{\partial V_o}{\partial I_L} \right) dI_L + \left(\frac{\partial V_o}{\partial T} \right) dT \quad (0-1)$$

稳压器的稳压系数 S 表示负载电流和温度保持不变时，输出电压变化量与输入电压变化量之比，即：

$$S = \left(\frac{\partial V_o}{\partial V_i} \right)_{I_L \text{ 和 } T \text{ 不变}} \quad (0-2)$$

在负载电流 I_L 和温度 T 保持不变的条件下，输出电压变化的百分数（等于输出电压变化量 ΔV_o 与输出电压 V_o 之比）与引起输出电压变化的输入电压变化的百分数（等于输入电压变化量 ΔV_i 与输入电压 V_i 之比）之比称为稳压器的电压调整率 S_F ，即：

$$\begin{aligned} S_F &= \left(\frac{\partial V_o}{V_o} / \frac{\partial V_i}{V_i} \right)_{I_L \text{ 和 } T \text{ 不变}} \\ &= \frac{V_i}{V_o} \left(\frac{\partial V_o}{\partial V_i} \right)_{I_L \text{ 和 } T \text{ 不变}} \end{aligned} \quad (0-3)$$

稳压器的输出电阻 R_o 表示输入电压和温度保持不变时，输出电压变化量与负载电流变化量之比，即

$$R_o = - \left(\frac{\partial V_o}{\partial I_L} \right)_{V_i \text{ 和 } T \text{ 不变}} \quad (0-4)$$

即使输入电压和负载电流都保持不变，温度的变化也会引起稳压器输出电压漂移。温度变化对输出电压的影响可用温度系数来表示。温度系数 S_T 表示输入电压和负载电流保持不变时，输出电压变化量与温度变化量之比，即

$$S_T = \left(\frac{\partial V_o}{\partial T} \right)_{V_i \text{ 和 } I_L \text{ 不变}} \quad (0-5)$$

因此，公式(0-1)也可以写成：

$$dV_o = S dV_i - R_o dI_L + S_T dT \quad (0-6)$$

三、稳压电源的基本分类

稳压器的基本作用是消除或减弱输入电压、负载电流和温度变化对输出电压的影响。为了完成这个作用，可以采用各种类型的稳压电路。根据所采用的调整元件不同，稳压器可分为电子管稳压器、晶体管稳压器、稳压管稳压器和可控硅稳压器等；根据调整元件与负载连接的方法不同，可分为并联稳压器和串联稳压器；根据调整元件工作状态的不同，可分为线性稳压器和开关稳压器。

各种稳压器的基本原理都是相同的。但是，半导体稳压器比电子管稳压器有许多明显的优点，比如，调整元件的正向压降小，额定电流大，不需要灯丝电源等。特别是目前半导体器件已广泛应用，各种半导体设备都需要低电压大电流的稳压电源，因此，半导体稳压器也已获得广泛应用。不过，当晶体管线性稳压器的调整管工作于放大状态时，耗散功率较大，因而稳压器的效率较低。如果使调整管工作于开关状态，耗散功率就可以大大减小，稳压器的效率便能显著提高。同时，还可以选用小功率晶体管作为调整元件，这样，散热器的面积可减小，稳压器的体积和重量也就会相应减小。由于调整管工作于开关状态的开关型稳压器具有上述种种优点，所以，它已逐渐得到广泛应用。

第一章 并联稳压器的原理与设计

最基本的并联稳压器如图1-1所示。它由串联降压电阻 R_1 和并联调整元件组成。小功率的并联稳压器经常采用稳压管作

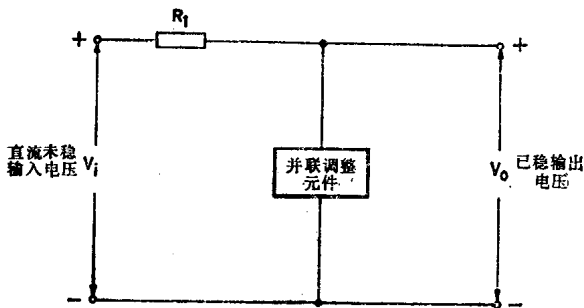


图 1-1 最基本的并联稳压器

调整元件，一些较复杂的稳压器，也往往采用稳压管并联稳压器作基准电源。为了更好地理解稳压管并联稳压器的的工作原理，首先介绍一下稳压管的基本特性。

第一节 稳压管的特性

稳压管是一种硅二极管，通常也称为齐纳二极管。但是，实际上，许多稳压管并不是利用齐纳效应来获得稳压作用的，所以，采用稳压管这个名称更为确切。

一、稳压管的基准电压

稳压管的正向伏安特性与普通硅二极管完全一样，而反向伏安特性则与普通硅二极管不尽相同。在稳压管中，当外加反向电压较低时，反向电流很小，并且，反向电流值与外加反向

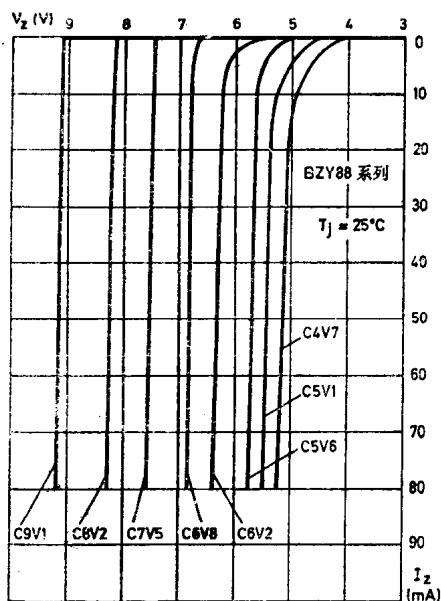


图 1-2 BZY88 系列稳压管的反向伏安特性曲线

电压高低无关。但是，一旦外加反向电压达到稳压管的击穿电压时，稳压管的电流就会急剧增加。此时，稳压管两端的电压却保持不变。BZY88 系列稳压管的反向伏安特性曲线如图 1-2 所示。稳压管与普通硅二极管反向特性的主要差别在于：稳压管击穿以后的特性曲线比较陡直，而且，稳压管的击穿电压一般比普通硅二极管要低。稳压管的击穿电压通常称为基准电压。对

于每一种稳压管来说，在给定反向电流和环境温度的条件下，基准电压都是确定的。

在实际应用中，稳压管都工作于反向击穿区域。稳压管反向击穿主要是由于加在二极管耗尽层上的强电场所造成的。稳压管的反向电流等于表面漏电流与少数载流子产生的电流之和。当外加反向电压较低时，即使反向电压稍微增加一些，载流子的数目并不增加，因而反向电流也不会增加。当外加反向

电压较高时，在强电场作用下，少数载流子（ P 区中的电子和 N 区中的空穴）的运动速度大大增加。高速运动的少数载流子可能与晶体结构的外层电子发生碰撞，使外层电子得到能量。这样，获得足够能量的外层电子就会脱离原子核的束缚，形成电子-空穴对，使载流子的数目增加。这些被撞出的载流子在强电场的作用下，也以很高的速度运动，这样，又可以撞出更多的载流子。这种连锁反应造成反向电流的急剧增加。稳压管的这种击穿现象与雪崩很相似，所以叫做雪崩击穿。

在耗尽层很窄的稳压管中，如果外加反向电压很高，少数载流子的运动速度也会大大增加，不过，这时由于耗尽层很窄，少数载流子与晶体结构的外层电子发生碰撞而产生连锁反应的机会不多，难以产生更多的载流子，所以，不存在雪崩击穿现象。但是，在这种情况下，由于耗尽层很窄，电场强度很大，能够把晶体结构的外层电子强制拉出，使载流子的数目急剧增加，从而使反向电流急剧增加。这种现象通常叫做齐纳击穿。一般来说，基准电压大于7伏的稳压管会产生雪崩击穿；基准电压低于5伏的稳压管会产生齐纳击穿；基准电压为5~7伏的稳压管，将同时产生雪崩击穿和齐纳击穿。

二、稳压管的额定工作电流与动态电阻

从图1-2可以看出，在击穿区域中，反向电流 I_r 变化时，稳压管两端的电压 V_r （即稳压管的击穿电压）也发生变化。稳压管的基准电压变化量 ΔV_r 与反向电流变化量 ΔI_r 之比称为稳压管的动态电阻。显然，稳压管的动态电阻越小，反向电流变化对基准电压的影响越小。稳压管的动态电阻值与基准电压、工作电流有关。一般来说，工作电流愈大，基准电压愈高，则动态电阻愈小。从图1-2还可以看出，基准电压高于7伏的稳压

管，反向伏安特性曲线更为陡直，基准电压基本上不受反向电流变化的影响，因此，动态电阻很小。基准电压低于7伏的稳压管，在击穿区域中，当反向电流较小时，反向伏安特性具有很强的非线性，反向电流变化对基准电压的影响较大，因此，动态电阻较大。当反向电流较大时，反向伏安特性逐渐趋于陡直，反向电流变化对基准电压的影响减小，因此，动态电阻较小。基准电压不同的稳压管，动态电阻也不一样。

为了减小反向电流变化对稳压管基准电压的影响，当采用基准电压低于7伏的稳压管时，应将工作电流适当选得大一些。当采用基准电压高于7伏的稳压管时，即使额定工作电流选得很小，工作电流变化对基准电压的影响也很小。

三、稳压管的额定功率与散热器设计

温度变化对半导体器件的影响很大，因此，稳压管的平均功率不应超过额定值。稳压管的最大允许耗散功率 $P'_{Z(max)}$ 由下式给出：

$$P'_{Z(max)} = V_Z I_{Z(max)} \quad (1-1)$$

式中， V_Z 为稳压管的基准电压； $I_{Z(max)}$ 为最大允许反向电流。根据给定的稳压管最大允许耗散功率能够决定最大允许反向电流。例如，基准电压为10伏的稳压管，如果最大允许耗散功率为10瓦，那么，最大允许反向电流应为10瓦/10伏=1安。

当环境温度升高时，稳压管最大允许额定功率应适当减小，否则会损坏稳压管。制造厂家一般只给出室温时（25°C）的额定功率。在任意给定温度的条件下，稳压管的最大允许额定功率可根据稳压管额定功率与环境温度的关系曲线（图1-3）求出。比如室温时最大允许耗散功率为1瓦的稳压管，当环境温度升高到50°C时，最大允许耗散功率应降到0.82瓦。

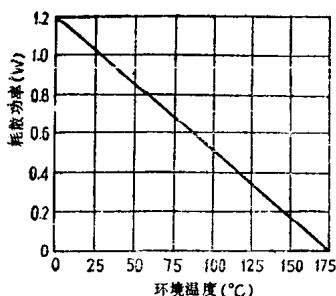


图1-3 稳压管耗散功率与环境温度的关系

对于大功率稳压管来说，耗散功率更不准超过额定值，以免发生超过最高允许结温（175°C）的现象。因此，大功率稳压管应采用适当的散热器。加装散热器后，稳压管的最大允许耗散功率 $P'_{x(max)}$ 可由下式算出：

$$P'_{x(max)} = \frac{T_{i(max)} - T_{amb}}{R_{th(j-amb)}} \quad (1-2)$$

式中， $T_{i(max)}$ 为最高允许结温， T_{amb} 为环境温度， $R_{th(j-amb)}$ 为 $p-n$ 结到周围环境之间的总热阻。热阻是两点间温差的热系数，表示耗散功率为 1 瓦时给定两点之间的温差。在稳压管中，除了散热器具有一定的热阻，能够帮助 $p-n$ 结散热以外，稳压管的管壳、管壳与散热器之间的绝缘垫圈以及 $p-n$ 结本身都具有一定的热阻，也都能帮助 $p-n$ 结散热。把这些元件的热阻象串联电阻那样相加起来，就等于 $p-n$ 结到周围环境之间的总热阻，即：

$$R_{th(j-amb)} = R_{th(j-mb)} + R_{th(i)} + R_{th(h)} \quad (1-3)$$

式中， $R_{th(j-mb)}$ 是 $p-n$ 结到管壳之间的热阻，也就是 $p-n$ 结本身的热阻； $R_{th(i)}$ 是管壳到散热器之间的热阻，也就是绝缘体的热阻； $R_{th(h)}$ 是散热器到周围环境之间的热阻，也就是散热器的热阻。通常 $p-n$ 结本身的热阻 $R_{th(j-mb)}$ 和绝缘体的热阻 $R_{th(i)}$ 都是一定的，因此，稳压管的最高允许环境温度主要由散热器的热阻决定。由不同材料制成的散热器，其面积与热阻的关系如图1-4所示。

在实际设计中，散热器的热阻应根据稳压管的最大允许耗