

ZHILIUWENYADIANYUANHEWENLIUYUAN

# 直流稳压电源 和稳流源

天津科学技术出版社

# 直流稳压电源和稳流源

彭日知 编著

天津科学技术出版社

# 直流稳压电源和稳流源

彭日知 编著

\*

天津科学技术出版社出版

天津市赤峰道124号

天津新华印刷一厂印刷

天津市新华书店发行

\*

开本787×1092毫米 1/32 印张 4 1/2 字数92,000

一九八〇年一月第一版

一九八〇年一月第一次印刷

印数 1 — 12,500

统一书号: 15212·6 定价: 0.44元

# 前 言

在电子技术中，晶体管直流稳压电源是一种用途很广的电子部件。实验室设备、各种通信和广播装置、各式各样的电子仪器、电子计算机、自动控制系统等等都需要直流稳压电源。

在晶体管直流稳压电源和集成运算放大器中，恒流源电路用的很多。在测量技术和自动化仪表中，恒流源的应用也很广泛。还可用恒流源电路来控制蓄电池的充电和放电、调节电镀电流、建立恒定的电磁场、启动直流电动机等等。

本书的目的，试图对晶体管直流稳压电源和恒流源的一些基本电路的工作原理作一个分门别类的比较系统的综述。

本书假设读者对半导体的导电机理，半导体二极管、晶体管和场效应管的特性和主要参数，整流、滤波、放大、正弦波振荡、多谐振荡和逆换流等电路已有一些初步基础。数学只用到简单的微分概念。因此，理工科大学生和具有中学以上程度的电工及电子技术人员都可参考。

由于编者学识有限，书中的错误和缺点一定不少，希望广大读者和专家们指正。

编 著 者

# 目 录

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 绪论                               | 1  |
| 第一章 硅稳压管                         | 6  |
| 第一节 硅稳压管——运用于反向有限击穿状态的特殊<br>硅二极管 | 6  |
| 第二节 稳压管的主要参数                     | 7  |
| 第三节 稳压管动态电阻的测量                   | 10 |
| 第二章 稳压管稳压电路和射极输出器稳压电路            | 13 |
| 第一节 稳压管稳压电路的工作原理                 | 13 |
| 第二节 稳压管稳压电路的设计举例                 | 18 |
| 第三节 射极输出器稳压电路                    | 19 |
| 第三章 带有比较放大环节的线性稳压电路              | 23 |
| 第一节 串联型线性稳压电路的工作原理               | 23 |
| 第二节 串联型线性稳压器的电路结构                | 25 |
| 第三节 串联型线性稳压电路的改进                 | 26 |
| 第四节 稳压电源的电压稳定度                   | 30 |
| 第五节 稳压电源的负载稳定度                   | 33 |
| 第六节 稳压电源的温度系数                    | 36 |
| 第七节 调整管的失控原因和防止方法                | 39 |
| 第八节 带比较放大环节的并联型线性稳压电路            | 44 |
| 第九节 串联型线性稳压电路的设计举例               | 47 |
| 第四章 恒流源器件与恒流源电路                  | 56 |
| 第一节 半导体恒流二极管                     | 57 |

|            |                                        |           |
|------------|----------------------------------------|-----------|
| 第二节        | 魏氏恒流源电路 .....                          | 59        |
| 第三节        | 魏氏恒流源电路的其它形式 .....                     | 62        |
| 第四节        | 威尔逊恒流源电路 .....                         | 64        |
| 第五节        | 贾格恒流源电路 .....                          | 66        |
| 第六节        | 桥式恒流源电路 .....                          | 68        |
| 第七节        | 双环恒流源电路 .....                          | 69        |
| 第八节        | 实用的恒流源电路 .....                         | 70        |
| 第九节        | 由集成运放器组成的精密恒流源 .....                   | 72        |
| 第十节        | 用运放器组成的多重精密恒流源 .....                   | 76        |
| 第十一节       | 各种恒流源的比较 .....                         | 77        |
| <b>第五章</b> | <b>稳压器的过电流保护 .....</b>                 | <b>79</b> |
| 第一节        | 晶体管限流型保护电路 .....                       | 79        |
| 第二节        | 差动放大兼限流保护 .....                        | 82        |
| 第三节        | 晶体管截流型保护电路 .....                       | 84        |
| 第四节        | 正反馈截流型过电流保护 .....                      | 87        |
| <b>第六章</b> | <b>双向稳压电源和输出电压宽程可调的稳压<br/>电源 .....</b> | <b>91</b> |
| 第一节        | 经济的双向稳压电源 .....                        | 91        |
| 第二节        | 输出电压宽程可调的稳压电源 .....                    | 93        |
| <b>第七章</b> | <b>新型的电压基准电路 .....</b>                 | <b>97</b> |
| 第一节        | 富氏电压基准电路 .....                         | 97        |
| 第二节        | 动态电阻很低的电压基准电路 .....                    | 101       |
| 第三节        | 魏德拉电压基准电路 .....                        | 104       |
| 第四节        | 用发光二极管和硅晶体管所组成的电压基准电路<br>.....         | 105       |
| 第五节        | 用集成运放器和稳压管组成的精密电压基准电路<br>.....         | 107       |

|      |                        |     |
|------|------------------------|-----|
| 第六节  | 用恒流二极管和精密电阻器所组成的电压基准电路 | 111 |
| 第八章  | 线性直流稳压电源的集成电路          | 113 |
| 第一节  | 单块集成线性直流稳压电源           | 113 |
| 第二节  | 用集成运放器作比较放大环节的线性直流稳压电源 | 118 |
| 第三节  | 用集成运放器变单向稳压电源为双向稳压电源   | 121 |
| 第四节  | 用低压集成运放器来组成高压稳压电源      | 123 |
| 第九章  | 开关型直流稳压电源              | 126 |
| 第一节  | 多谐振荡式开关型稳压器            | 127 |
| 第二节  | 具有逆变环节的开关型稳压器          | 129 |
| 附录   | 滤波电容器的电容量的估算           | 132 |
| 参考文献 |                        | 134 |

# 绪 论

二十世纪七十年代是电能越来越被广泛利用的时代。电力已经成为发展工农业生产的重大因素。各种能源，无论是水能、化学能、地下热能、原子能……，都正在被大量地开发、转换成为电能。很明显，四个现代化包括电气化。随着四个现代化的迅猛发展，我国的电气化事业必将日益繁荣昌盛。

在发电厂采用恒压制发电的历史条件下，电源的一个重要质量指标是电压稳定度。电动机、电灯、电炉、广播电台和电视台、无线电和电视接收机、扩音机、录音机、电子显微镜、电子计算机以及各种电子仪器等等没有不要求电源电压稳定的。这是因为如果电源电压不稳，则上述的这些电机电器、电子设备等就不能很好地工作甚至无法工作。例如，供给某些电灯的电压如果高于额定值，则灯丝蒸发较快，电灯的寿命将缩短；而如果低于额定值，则灯的亮度就较差。又如，一部电视接收机的供电电压如果不时波动，则图像就将产生各种变形，使接收质量受到很大影响。再如，电子计算机、粒子加速器和质谱仪等的供电电源电压如果不是高度稳定，则这些精密设备的工作就将产生误差甚至故障。为了保证某些现代化的测量仪器的测量精确度能够达到0.01%，常常要求仪器个别环节的供电电源电压稳定度必须达到0.001%，即比测量精度高一个数量级。

但各种电机电器、仪器设备对电源电压稳定度的要求并非都是一样。某些精密仪器要求电源电压必须高度稳定（例如，电压波动小于 $\pm 0.05\%$ ）才能正常工作。但更多的仪器仅要求电源电压相当稳定（例如，电压波动小于 $\pm 0.5\%$ ）就可满意地工作。还有大量的电器设备在电源电压一般稳定（例如，电压波动不超过 $\pm 3\%$ ）的条件下就可顺利运转。因此，为各种仪器设备配置稳压电源时，应视不同情况，区别对待。稳压等级低了当然不行，但过高也没有必要，反而造成浪费。

电源电压不稳的主要原因有二：一是电网的交变电压不稳。大多数的小功率发电厂不能保证它们的输出电压有合理的稳定度。装有输出电压调整器的大功率发电站所发送出来的交变电压，虽然在厂内和厂附近可以保持相当稳定，但在离厂较远地方的电压就不稳定了。由于用户众多，各式各样的电机电器不时接入和切出，电流变化频繁。负载重时电流大，这时耗费在变压器内部阻抗和线路阻抗上的电压降也大，致使供电电压低于额定值。反之，负载轻时则供电电压将高于额定值。在大电网中，可以观察到一种缓慢的电压变动和一种瞬时的电压跳动。前者是由于各种负载的渐增或渐减，其持续时间由几分钟到几小时不等；后者则是由于某些大容量用电装置的启动或切出，其持续时间约为十分之几秒到几秒钟。电网电压的波动，各地不同。一般情况，电网电压波动 $\pm 10\%$ 是常见的。标称 220 伏的电网电压在负载轻时可高达 242 伏，而在尖峰负荷时则低到 190 伏甚至更低。

直流电压不稳则还有另一原因。众所周知，现在有很多直流电源是由交流电源经过整流滤波而来。但是，整流变压

器、整流元件和滤波元件都存在内部阻抗，电流流过它们时将在它们的内部阻抗上产生电压降。这些内阻抗上的电压降将随负载电流的大小而变。因此，即使电网电压很稳，但整流滤波后的直流电压还要随负载的轻重而变。当负载由空载变到满载时，带滤波器的整流器的直流输出电压可能下降20%或者更多。

这样看来，为了获得稳定的直流电压，必须在整流滤波的后边，增设一套直流稳压装置，然后送给直流用电设备（例如电子仪器）。

从交流稳压到直流稳压，已经发展出来很多类型的稳压器。它们之中，有利用非线性电阻的，有利用机械方法的，有利用铁磁的，有利用电子管和离子管的，还有利用微电机、继电器、接触器、光电元件和电子放大器的复合装置的，等等。它们的功率从不及一瓦到几百千瓦不等。由于半导体技术和集成电路的飞速发展，上述的这些稳压器都有被半导体稳压器完全取代的趋势。

晶体管直流稳压电源的体积小，重量轻，功耗少，寿命长。它的职能如下：

（1）当电网电压波动致使整流滤波后的直流电压不稳时，它可起调节作用。输入电压高时，它多截去一段；输入电压低时则少截，使稳压后的直流输出电压达到很高的稳定度。

（2）它对直流电压随负载电流的变化也能调整。负载重时，稳压器上的电压降就自动减少；反之就增多。它可以提供出一个内阻抗很小的直流稳压电源，起最好的退耦作用。

(3) 它本身同时也是一个出色的滤波器。但不应用稳压器去完全代替电容滤波器。因为稳压器需要照顾的电压变化和电压脉动的范围越宽, 则损失在稳压器中的电压和电功率就越大, 输出电流就越受到限制。目前, 直流电源中采用铁心电感器来滤波的已经日益减少, 但用电解电容器来滤波的仍然很多。

采用各种温度补偿方法, 可以将晶体管直流稳压电源的输出电压的温漂减到很小。

在科学实验和各种技术领域, 有许多需要稳定电流的地方。例如, 高度稳定的电磁场、恒定的电镀电流、给蓄电池充电的恒定充电电流等等。这些都应该用恒流源电路来供应。在测量技术中, 某些元件的测试(例如大批电阻器阻值的测试和分级)、接触电阻的测量等工作也需要用到恒流源电路。在电子电路中, 特别在集成电路中, 有许多需要直流压降小但同时交流动态电阻大的场合。例如, 稳压管稳压电路中的限流电阻, 放大器中的集电极负载电阻, 差动放大器中的两射极公共电阻, 射极输出器中的射极电阻等等都是。这些, 最好都用恒流源电路来代替。在工业自动化仪表中, 也经常用到恒流源。

恒流原本是稳压的对偶物。恒流、稳压二者可以相辅相成, 互相促进, 但不能互相代替。恒流源电路可使稳压电源的质量更加提高, 而稳压电源则可使恒流源电路大大简化。在恒压制供电的历史条件下, 稳压电源当然应用最多最广, 但恒流源电路的发展也不可限量。试想, 大容量的直流电动机和某些电炉如果都改用恒流源电路来启动, 则不但可以省去许多笨重的启动设备, 还可同时提高这些电机电器的启动

质量。

因此，不但需要小功率的恒流源，也需要大功率的恒流源；不但需要小功率的精密恒流源，大功率的精密恒流源也需要（例如粒子加速器中的稳定电磁场）。已经发展出来许多种恒流源电路。可以预料，随着电子技术和集成电路的更进一步的发展，还会有更多更好的恒流源电路发展出来。

# 第一章 硅稳压管

## 第一节 硅稳压管——运用于反向有限击穿状态的特殊硅二极管

普通硅二极管的典型掺杂密度为每立方厘米本征硅内掺入 $10^{15}$ 个杂质原子。若掺杂密度提高到每立方厘米本征硅内掺入 $10^{18}$ 个杂质原子时，则这个PN结的空间电荷区中的离子密度就增加了。在外加反向电压的作用下，结上的电场强度很高，可达到 $2 \times 10^7$ 伏/米。这个强电场可直接把电子从共价键中拉出来，产生大量的空穴电子对，从而将这个PN结反向击穿。这种击穿称为齐纳击穿。发生齐纳击穿前，一定要串联适当的限流电阻R将被反向击穿的硅二极管的电流限制在某一安全值以下，则这种反向击穿也是一种健康的、

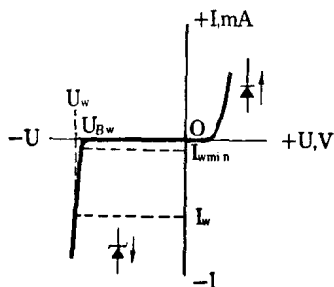


图1 硅稳压管的全部伏安特性曲线

可为电子技术所利用的正常工作状态。如果没有预先的限流措施，则这个管子一旦被击穿后，它的反向电流就将猛烈增长，由原来可以自动恢复的齐纳击穿顷刻间发展为不可逆转的热击穿，将管子烧毁。

在安全的齐纳击穿范围内，只需稍微增加外施的反向电压，就可大量增加管子的反

向电流。这种二极管，反向击穿伏安特性曲线的恒压部段，要比这管或普通二极管的正向伏安特性曲线陡峭很多（图1）。因此，大家就利用这种二极管的反向击穿恒压部段作为一种最简单的电压基准，而称它为齐纳二极管或简称齐纳管或稳压管。

## 第二节 稳压管的主要参数

稳压管的主要参数有：

### 一、稳定电压 $U_w$

由图1可见，当加在稳压管上的反向电压由零起渐增到 $U_{BW}$ 时，管子被击穿，管电流开始激增。但限流电阻 $R$ 将限定它的数值为 $I_w$ 。同 $I_w$ 相对应的管电压就是这个稳压管的稳定电压 $U_w$ 。 $U_w$ 随P区和N区的掺杂密度以及两种杂质原子在PN结的交界面上的分布情况而不同。因此，即使是同一型号的稳压管，这一批量的 $U_w \approx U_{BW}$ 可能不同于另一批量的 $U_w$ ，所以生产厂家为各个型号的稳压管的稳定电压 $U_w$ 都规定一个变化范围。例如，稳压管2CW14的 $U_w$ 划定为6~7.5伏。

### 二、最小稳压电流 $I_{wmin}$

$I_{wmin}$ 就是稳压管在它的稳压范围内的最小管电流值（见图1）。管电流比 $I_{wmin}$ 再小就不能稳压。

### 三、最大耗散功率 $P_M$

最大耗散功率 $P_M$ 与稳压管的散热情况和最高工作温度有关。 $P_M$ 能够决定稳压管可允许的最大工作电流 $I_{WM}$ ，其计算公式为：

$$P_M = U_w I_{WM}$$

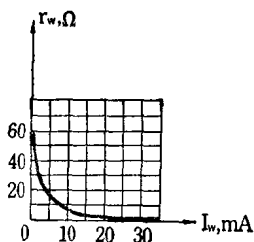


图2 稳压管的动态电阻 $r_w$ 对管电流 $I_w$ 的关系曲线

#### 四、动态电阻 $r_w$

在稳压管的稳压工作范围内，加在稳压管两极上的反向电压微变量 $\Delta U_w$ ，对相应的管电流微变量 $\Delta I_w$ 之比称为稳压管的动态电阻 $r_w$

$$r_w = \frac{\Delta U_w}{\Delta I_w} \quad (1)$$

$r_w$ 越小说明稳压管的稳压性能越好。图2为稳压管2DW7C的动态电阻 $r_w$ 对管电流 $I_w$ 的关系曲线。由这图可见，最初 $r_w$ 是随着 $I_w$ 的增加而减小的。但 $r_w$ 减小到某一定数值以后，就不再显著减小了。

#### 五、电压温度系统 $\alpha_T$

稳压管的电压温度系数 $\alpha_T$ 指管子温度变化 $1^\circ\text{C}$ 时它的稳定电压 $U_w$ 变化的百分数。例如，2CW19稳压管的 $U_w$ 为12伏，它的 $\alpha_T$ 为 $+0.095\%/^\circ\text{C}$ 。因此，温度上升 $5^\circ\text{C}$ 时，稳压管的稳定电压 $U_w$ 将上升 $\frac{0.095}{100} \times 12 \times 5 = 0.057$ 伏 = 57毫伏。

不同型号的稳压管有不同的电压温度系数 $\alpha_T$ 。稳压值低的稳压管的杂质浓度较大，它的P区和N区有截然明确的分界面（通过精确控制杂质原子的注入深度来达到），它的空间电荷区比较窄。因此，低的反向电压就可在这种PN结面上造成能把电子直接从共价键中拉出来的强电场，产生很多电子-空穴对，从而导致齐纳击穿。温度升高时，半导体晶格中的共价键电子的动能增加了，强电场拉出这些价电子使之自由所需要的能量减少了。因此，齐纳击穿电压随着温度的

升高而降低，故低压稳压管的 $\alpha_T$ 为负值。

反之，稳压值高的稳压管的空间电荷区比较宽。在强的反向电场作用下，P区边缘中的少数载流子（电子）被向N区加速而获得足够的动能，它们碰撞空间电荷区中的共价键电子使之自由而成为二次电子，这些二次电子和初次电子一起又重新被电场加速直至也获得足够的动能，它们又碰撞出新的更多的二次电子。……这样一连串连锁反应的结果是管电流突然猛增，于是发生了雪崩击穿。

温度上升时，半导体晶格原子的混乱的热运动加剧了，自由电子被电场加速的平均自由路程缩短了，它们在各次加速运动中所能获得的平均动能减少了。因此，二次电子的倍增率降低了。所以，在较高温度时，必须提高反向电压才能产生雪崩击穿。故稳压值较高的稳压管的电压温度系数 $\alpha_T$ 为正值。

稳定电压 $U_w$ 在5伏以下的稳压管主要是齐纳击穿。 $U_w$ 在8伏以上的稳压管主要是雪崩击穿。 $U_w$ 在5至8伏之间的稳压管的击穿机理则与半导体的掺杂密度及杂质原子在PN结面两侧的分布情况有关。兼有大致同等份量的齐纳击穿与雪崩击穿的稳压管的电压温度系数 $\alpha_T$ 有可能等于零。

不管是齐纳击穿还是雪崩击穿，许多文献常常不加区别而一概统称所有的硅稳压管为齐纳二极管或齐纳管。

稳定电压 $U_w$ 较高的稳压管常是由一个雪崩稳压管串联一个正向运用的硅二极管所组成，这是因为硅二极管的电压温度系数是负的，它可抵消雪崩稳压管的正温度系数的一部分或全部，从而使这种稳压管的总的 $\alpha_T$ 变小。

2DW7系列稳压管的稳定电压为5.8伏至6.5伏，它们的

管芯是用平面扩散工艺做在同一块单晶硅小片上的两个同样的PN结背靠背串联而成。2DW7系列的稳压管有三个管脚，正常用1、2两脚，靠近管帽上白点的那个脚接电源正端。3为备用脚，通常不用。1或2脚损坏时，才用3脚，同1（或2）脚作无温度补偿的稳压管用。

由于稳压管的电流是在反向击穿状态下所发生的雪崩式的电流，因此，它的噪声电平是较高的，这是它的一个缺点。

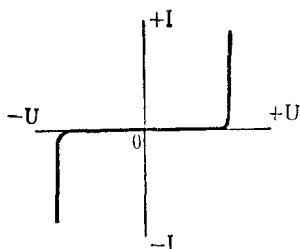


图3 对称稳压管的全部伏安特性曲线

但直到今天，它仍然是应用最多的电压基准。

目前，电子工业发达的国家生产稳定电压从1.5伏至200伏以上、功率从250mW至50W的各种型号的稳压管，包括上述的2DW7系列的对称稳压管在内。

对称稳压管的全部伏安特性曲线如图3所示。

### 第三节 稳压管动态电阻的测量

如上所述，稳压管是在其反向击穿伏安特性曲线上工作的，这段曲线看来似乎颇直，其实并不是一条直线，它的各个点上的斜率是不相同的。因此，为了比较两个同型号稳压管的动态电阻 $r_w$ ，应该在它们的反向击穿伏安特性曲线上，围绕同一个电流的工作点作同样范围的交流变化，来分别测量它们在工作点的斜率，这样才能公允地判断出它们 $r_w$ 的高低。

同样，谈论两个不同型号的稳压管的动态电阻时，也应