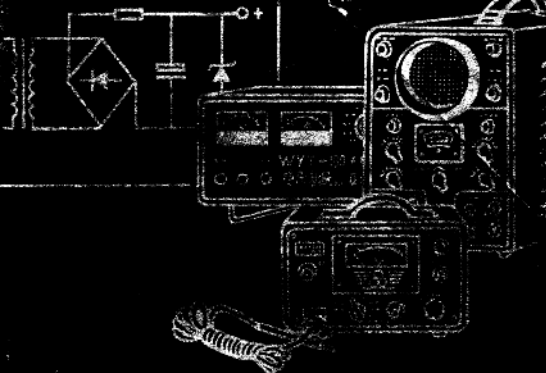




电子设备电源

（第二版）

湖北人民出版社

序 言

所有的电子设备都需要电源，其绝大多数为直流电源。除少数设备用电池（直流电）供电外，大多数电子设备由交流市电供电，经过变换而成为所需要的直流电源。

电子设备除应满足所需要的输出电压、输出电流，具有一定的稳定度和可靠性外，还应尽可能地减小单位输出功率的体积、重量和成本。随着集成电路尤其是大规模、超大规模集成电路的广泛应用，使得电子设备的体积大大缩小，但电源的体积却相对地越来越大。因此，减小电源的体积和重量就成了电源技术发展中所要解决的一个重要任务。

电子设备的电源种类很多。就稳压电源来说，根据调整器件的工作状态可分为线性调整式和开关调整式两大类。线性调整式稳压电源稳压性能好，得到了广泛应用。但是这种电源的缺点是调整器件功耗大、电源效率低，适用于小功率设备。开关式稳压电源调整器件工作在开关状态，功耗小，效率高，单位体积的输出功率大，是改善电源笨重状态的一种有效途径。随着高反压大功率晶体管的出现，这种电源近年来发展很快。

电子设备的供电方式大致可分为两种，一种是集中式，由一两个变压器输出多种电压，一般小型设备和部分中型设备多采用这种方式。有些大中型电子设备采用分散式供电，每一两种电压由一套电源供电，有的一种电压又为多套电源供

电,这种方式通用性强,便于专业分工,缺点是总的体积大,成本高。

对于集中放置的大型专用电子设备,甚至一个电子工程系统,采用集中统一供电更合适些,其突出优点是可以采用更为合理的稳压方式。比如,由一个总的高频电源(或称一次电源)输出几组直流稳定电压,再馈送到各机柜。对于要求稳压性能较高的有关部分再进行二次稳压。这种方式可以大大减少变压器、整流器和滤波器的种类、数量并能减小其体积,降低调整功耗。当传输距离较远时,也可以采用交流传输,或者交直流传输相结合。

掌握各部分负载对电源指标的要求是合理设计电源的前提,盲目追求电源的高指标并无实际意义。例如,晶体管、电阻等器件有关参数的温度系数一般为 $10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ 左右,电源电压的缓慢变化和温度变化的影响十分相似。不少电子电路对电源电压的快变化,如纹波电压的影响比较敏感。在设计负载部分的电路时,要尽可能地减少电压种类,降低对电源指标的要求。这样就便于选择更合适的电源电路,使整机电路设计得更加合理。选用与设计的电源电路应力求简单,过于复杂,不但不经济,还会降低可靠性。

以上所述,也许对初搞电源的读者有所裨益。

许遐义、邓家银等同志曾经参加过本书的编写工作。编写过程中还得到了不少单位和同志的指导和帮助,并提出了宝贵意见。在此表示衷心感谢。

由于我们的理论水平不高,实践经验有限,书中定有不少缺点错误,敬希读者批评指正。

一九八〇年四月

目 录

序言

第一章 线性调整稳压电源	(1)
一、概述	(1)
(一) 稳压电源的主要电性能指标	(1)
(二) 低压电源系列和等级	(3)
(三) 硅稳压管	(4)
(四) 大功率晶体管	(5)
二、并联稳压器	(7)
(一) 硅稳压管稳压器	(8)
(二) 晶体管并联稳压器	(11)
三、串联稳压器	(14)
(一) 无放大器的串联稳压器	(14)
(二) 有放大器的串联稳压器	(18)
(三) 有辅助电源的串联稳压器	(20)
(四) 稳压器的自激与响应	(24)
(五) 过流保护电路	(28)
(六) 串联稳压电路的改进	(30)
四、其他形式的稳定电路	(35)
(一) 通用电源	(35)
(二) 次高压串联稳压电路	(37)
(三) 稳流器	(38)
(四) 集成稳压器	(39)

五、串联稳压器的设计	(40)
(一) 设计步骤	(40)
(二) 设计举例	(44)
第二章 开关调整稳压电源	(48)
一、晶体管的开关特性	(48)
(一) 纯阻负载时的开关特性	(48)
(二) 电抗负载时的开关特性	(52)
二、串联开关稳压器	(56)
(一) 晶体管串联开关稳压器	(56)
(二) 可控硅开关稳压器	(61)
三、调宽式稳压变换器	(66)
(一) 变换器主回路形式	(66)
(二) 变换器的控制电路	(78)
(三) 调宽式变换器的设计	(85)
四、其他形式的变换器	(88)
(一) 晶体管自激变换器	(88)
(二) 可控硅并联变换器	(90)
(三) 串联变换器	(92)
五、大型设备的整机供电方式	(95)
(一) 专用设备的供电方式	(95)
(二) 应急供电	(98)
第三章 整流和滤波	(100)
一、二极管整流器	(100)
(一) 概述	(100)
(二) 纯阻负载整流电路	(102)
(三) 感性负载整流器	(118)
(四) 容性负载整流器	(128)

(五) 倍压整流电路	(133)
二、可控硅整流器	(137)
(一) 可控硅整流电路	(137)
(二) 负载电压和纹波系数	(150)
(三) 触发电路	(152)
三、滤波器	(158)
(一) 概述	(158)
(二) 滤波电路	(159)
(三) 滤波电容器的选用	(166)
(四) 整流器的设计	(168)
第四章 变压器设计	(171)
一、电源变压器的工作原理	(171)
(一) 无损耗变压器空载工作情况	(171)
(二) 无损耗变压器负载工作情况	(173)
(三) 实际变压器工作情况	(174)
(四) 变压器的功率和效率	(177)
二、电源变压器的设计	(178)
(一) 设计步骤	(178)
(二) 设计举例	(196)
三、三相变压器的设计	(204)
(一) 在各种连接情况下的电参数关系	(206)
(二) 设计三相变压器应注意的问题	(206)
(三) 三相小功率变压器设计步骤	(207)
四、滤波阻流圈的设计	(208)
(一) 直流滤波阻流圈的设计	(208)
(二) 交流滤波阻流圈的设计	(212)
(三) 空心电感的设计	(215)

第五章 电源的结构与散热	(275)
一、电源结构的特点	(275)
(一) 易于散热	(275)
(二) 防止电磁耦合	(276)
(三) 合理布线	(276)
(四) 重量要均衡	(277)
二、电源的散热	(277)
(一) 散热的途径	(277)
(二) 常用的散热措施	(279)
三、晶体管的散热	(284)
(一) 晶体管内部结构与散热器的关系	(285)
(二) 装有散热器的功率晶体管的热态分析	(286)
(三) 自然冷却条件下散热器的设计	(288)
(四) 强制风冷条件下散热器的设计	(292)
(五) 设计散热器时应考虑的几个问题	(294)
(六) 国产散热器	(298)
第六章 电源的干扰及调试	(309)
一、开关电源的干扰及其抑制	(309)
(一) 干扰产生的原因	(309)
(二) 干扰的抑制	(320)
二、电源的调试	(327)
(一) 晶体管串联稳压电源的调试	(327)
(二) 变换器电源的调试	(330)
(三) 可控硅整流电源的调试	(332)

第一章 线性调整稳压电源

一、概 述

(一) 稳压电源的主要电性能指标

1. 电压稳定度 S_v :

在所有其他影响量保持不变时，由于输入电压的变化所引起的输出电压的相对变化量。

输出电压输出电流均为额定值，输入电压由标称值分别阶跃 $\pm 10\%$ (50赫) 或 $\pm 5\%$ (≥ 400 赫)，在输出电压到达稳态之后10秒钟内，测出输出电压的相对变化。在负载电流为零时，重复上述测量。取其最大值。

2. 负载稳定度 S_i :

在所有其他影响量保持不变时，由于负载电流的变化所引起的输出电压的相对变化量。

输入电压相对标称值升高 10% (50赫) 或 5% (≥ 400 赫) 及降低 10% (50赫) 或 5% (≥ 400 赫)，负载电流在额定值到零之间进行阶跃变化，分别在输出电压到达稳态之后10秒钟内，迅速测出输出电压的相对变化量。取其最大值。

3. 纹波电压 U_{ripple} :

输出电压中所包含的交流分量；

输入电压为标称值及输入电压相对标称值变化 $\pm 10\%$ (50赫)或 $\pm 5\%$ (≥ 400 赫), 负载电流为额定值及零时, 分别在示波器上观测输出电压上叠加的交流分量的峰—峰值, 取其最大值。

4. 温度系数 K_T :

在所有其他影响量保持不变时, 由于环境温度的变化, 所引起的输出电压的每度变化量。

输入电压为标称值, 输出电压负载电流均为额定值时, 恒温箱由室温变化到最高使用温度及由室温变化到最低使用温度, 每变化 10°C , 热平衡后进行测量, 求出每度所引起的输出电压相对变化量。取其最大值。

5. 输出阻抗 Z_o :

在交变负载下, 输出端的交流电压和交流电流之比。

输入电压为标称值, 输出电压为额定值, 负载电流为额定值的 80% , 正弦调制负载的频率范围为 $20\text{赫}\sim 1\text{兆赫}$, 其电流幅度小于输出电流额定值的 10% , 用示波器分别测出输出端的交流电压幅度 $u_o \sim$ 与无感电阻 R 上的交流电压幅度 $u_i \sim$, 按公式 $Z_o = \frac{u_o \sim}{u_i \sim} R$, 算出输出阻抗。

6. 过冲幅度和暂态恢复时间:

由于某一影响量瞬变而引起输出电压超出稳压区称为过冲, 过冲幅度为输出电压偏离额定值的幅值。输出电压从第一次离开稳压区到最后进入稳压区的时间间隔称为暂态恢复时间。

输出电压负载电流均为额定值, 输入电压由标称值分别阶跃 $\pm 10\%$ (50赫)或 $\pm 5\%$ (≥ 400 赫)及输入电压为标称

值，输出电压为额定值，负载电流由零到额定值来回阶跃时，用示波器测出输出电压的变化幅度及暂态恢复时间。

7. 效率 η :

输出功率与输入有功功率之比。

输入电压为标称值，输出电压输出电流均为额定值时，测出输入电压、输入电流、功率因数、输出电压、输出电流，按下式计算 η :

$$\eta = \frac{U_o I_o}{U_i I_i \cos \phi} \times 100\%$$

(二) 低压电源系列和等级

1. 电压系列:

3V, 5V*, 6V, 12V*, 15V, 18V, 24V*, 30V, 36V, 48V。

标有“*”者为优选电压。

2. 电流系列:

0.2A, 0.5A, 1A, 2A, 3A, 5A, 10A, 20A, 50A, 100A。

3. 低压电源等级:

低压电源可分三级，其主要电性能指标见下表:

指 标 名 称	I		II			III		
电压稳定度 S_V	$\leq 10^{-4}$		$\leq 10^{-3}$			$\leq 10^{-2}$		
负载稳定度 S_L	$\leq 5 \times 10^{-4}$		$\leq 5 \times 10^{-3}$			$\leq 5 \times 10^{-2}$		
纹波电压 $U_{OP-P}(mV)$	1	2	1	2	3	1	2	3
	≤ 0.5	≤ 1	≤ 1	≤ 5	≤ 10	≤ 10	≤ 50	≤ 100
温度系数 K_T	$\leq 5 \times 10^{-5}/^{\circ}C$		$\leq 5 \times 10^{-4}/^{\circ}C$			/		

[注]，I级电源温度系数要求偏高，应 $\leq 1 \times 10^{-5}/^{\circ}C$ 比较合适。

线性调整式稳压电源的稳压性能很容易达到Ⅱ级和Ⅲ级，采用标准稳压管和两级电压放大器，甚至一级放大器的电路，达到Ⅰ级指标也并不难。对于电子设备来说，真正需要Ⅰ级指标的是极少数。而且电流很小，比如作基准电压用。当电流较大时，很短一段导线就会使负载稳定度严重变坏。晶体管线性稳压电源，一般使用于负载电流5安以下，输出功率小于100瓦的场合。

(三) 硅稳压管

1. 硅稳压管的特性

硅稳压管是由硅材料制成的二极管，它的正向特性与一般的硅二极管无什么差别，作为稳压器件，要使它工作在反向击穿状态，利用了击穿区电流急剧增加的这种特性。由于P—N结做得很薄，反向击穿后载流子在加速电场作用下所获得的速度，达不到产生倍增效应的速度，所以不会产生象普通二极管那样的损坏性击穿，只要将功耗限制在允许值以内，也不会出现热损坏。

硅稳压管的电路符号和伏—安特性如图1-1所示。由伏—安特性看出，硅稳压管反向击穿后，电流急剧增大而电压变化却很小，利用这一特

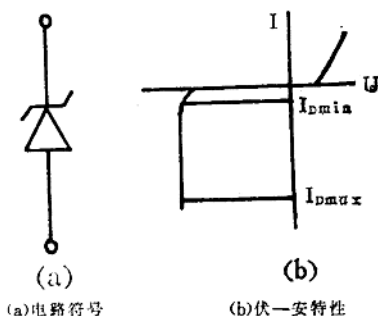


图1-1 硅稳压管的电路符号和伏—安特性

性即可实现稳压。

2. 硅稳压管的参数

稳定电压：每种稳压管在一定的稳定电流下具有一定的稳定电压，现在已有1伏到几百伏的稳压管。

最大稳定电流：环境温度在 50°C 以下时，稳压管允许的最大工作电流。高于 50°C 时，每升高 1°C ，此值应降低1%。

最小稳定电流：稳压范围的下限电流，一般为0.5—1毫安。

动态电阻：在稳压范围内，电压变量与电流变量之比，一般为几欧到几十欧。

电压温度系数：就是环境温度变化 1°C 时，稳定电压的相对变化量。普通稳压管为 $3\sim 10\times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ ，标准稳压管为 $1\sim 10\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 。由于温度系数与工作电流有关，使用标准稳压管时，应使工作电流等于规定值。

（四）大功率晶体管

大功率晶体管是稳压电源中常用的主要器件之一。为了正确使用大功率晶体管，需了解其有关参数和特性。

1. 晶体管的击穿电压

晶体管的击穿电压主要有：发射极开路，集电极—基极间反向击穿电压 BV_{CBO} ，基极开路，集电极—发射极间反向击穿电压 BV_{CEO} 及基极—发射极间串接电阻，集电极—发射极间反向击穿电压 BV_{CER} 。 $BV_{CBO} > BV_{CER} > BV_{CEO}$ 。在基极和发射极间加反偏压时，集电极和发射极间的最高电压 BV_{CEB} ，介于 BV_{CBO} 和 BV_{CER} 之间。只要基极和发射极PN结没有电流，也就是 $I_{CBO}(\tau_b + R_{DE})$ 小于基极和发射极PN

结的阀电压 U_{EB0} 与外加反偏压之和, 则 BV_{CER} 或 BV_{CEB} 与 BV_{CBO} 十分接近。此处的 r_b 应视为多个微分电阻的串并联, 离基极欧姆电极最远处部分的微分电阻值最大, I_{CBO} 在这一部分产生的内部压降最大, 最容易使这部分的 PN 结出现正偏。锗管的阀电压几乎为零, 所以即使把基极和发射极短路, 仍有电流从基区流入发射区, 对这部分电流就有放大作用, 因此 BV_{CER} 总是低于 BV_{CBO} 。硅管的阀电压较大, I_{CBO} 又很小, 只要基极和发射极间的并联电阻较小时, BV_{CER} 接近或几乎等于 BV_{CBO} 。当反偏压较高时, 锗管的 BV_{CEB} 几乎等于 BV_{CBO} 。

所谓击穿电压是指 I_{CBO} 或 I_{CEO} 上升到某一数值时的电压值, 只要晶体管的结温在允许范围内, 晶体管不会损坏, 这种击穿通常称为一次击穿。因为 I_{CBO} 或 I_{CEO} 与温度有关, 又称这种击穿为热击穿。当外加电压继续升高, 使反向 PN 结出现较明显的倍增效应 (少数载流子的) 时, 或者由于过热等原因, 都会使晶体管出现负阻效应, 即电压降低, 电流增大, 这种击穿电压称为二次击穿电压。二次击穿的时间稍微一长, 就会使晶体管出现不可逆的损坏性击穿。二次击穿特性的好坏是晶体管的一项重要指标。制造晶体管的材料和工艺对二次击穿特性有很大影响。二次击穿的机理尚未完全弄清。晶体管在感性回路工作时, 应特别注意二次击穿问题。

2. 饱和电压

大功率晶体管饱和电压的高低对晶体管的功耗和电源的效率有很大影响, 对于连续式调整电源尤为明显。一般锗管和部分硅管的饱和电压 U_{CES} 较低, 有些硅管的 U_{CES} 较高,

此值一般是在最大集电极电流的条件下给出的，并且与基极电流值有关。当集电极电流不大于管子的最大电流的 $\frac{1}{2} \sim \frac{2}{3}$ 时，一般硅管的饱和电压为0.5~1伏，锗管为0.3~0.5伏。在选取管子的最大工作电流时应注意这一点。

3. 最大功耗

手册中所给出的最大功耗，是指在规定的散热条件下，环境温度为20℃时的值。当工作在最高环境温度40℃，再考虑到机内温升时，在自然散热状态，晶体管的实际功耗不可取得太大，锗管的最大实际功耗一般取手册中最大值的 $\frac{1}{3}$ 左右，硅管取 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$ 。硅管的最高工作结温一般不高于125℃，锗管不高于85℃。

4. 晶体管的安全工作区

考虑到晶体管的截止区后，晶体管的安全工作区如图1—2所示。结温越高，安全工作区越小，应根据实际的最高结温来确定安全工作区。

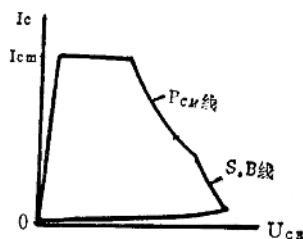


图1—2 晶体管的安全工作区

二、并联稳压器

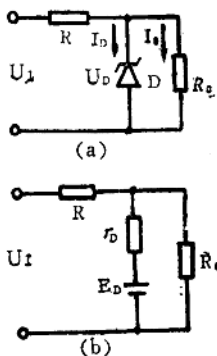
调整器件与负载并联的稳压电路称为并联稳压器。因为调整器件与负载是并联的，所以负载发生过载与短路时不会

损坏调整器件。并联稳压器的缺点是效率低，只适于作小功率稳压电源。

(一) 硅稳压管稳压器

1. 稳压电路

硅稳压管稳压器又称参数稳压器。其电路及等效电路示于图 1—3。图中， U_1 为稳压器输入电压， r_D 为稳压管的动态电阻， U_D 为稳压管两端的工作电压， E_D 为其电动势， R_0 为等效负载电阻。由于 r_D 比限流电阻 R 和等效负载电阻 R_0 小得多，所以输入电压的变化 ΔU_1 主要降在 R 上；负载电流的变化 ΔI_0 主要由稳压管电流的变化来补偿，或者说主要由电阻为 r_D 的电源 E_D 来提供。



(a) 稳压电路 (b) 等效电路

图 1—3 硅稳压管稳压电路

根据等效电路，可求得对输入电压的稳定度为：

$$S_V \approx \frac{r_D}{R} \cdot \frac{\Delta U_1}{U_0} \quad (1-1)$$

对负载的稳定度为：

$$S_I \approx \frac{r_D I_0}{U_0} = \frac{r_D}{R_0} \quad (1-2)$$

为了进一步提高对输入电压的稳定度，可以采用如图

1—4所示的两级稳压电路。其电压稳定度为：

$$S_V \approx \frac{r_{D1} r_{D2} \Delta U_1}{R_1 R_2 U_0} \quad (1-3)$$

负载稳定度仍用(1—2)式计算， r_D 用 r_{D2} 代入。

用动态电阻极大的恒流管代替限流电阻，可以极大地提高电压稳定度。恒流二极管实质上就是栅—源极接在一起的耗尽型场效应晶体管，由于工作在零栅压状态，

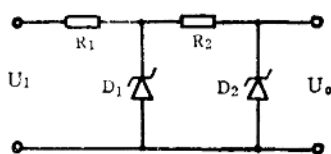


图1—4 两级稳压电路

其电流值即为饱和电流，此电流几乎与漏—源两端的电压无关，这就相当于一只阻值为几百千欧到兆欧数量级的限流电阻。恒流管的电流温度系数为 $-1 \sim -5 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ 。图1—5为由恒流管组成的稳压电路。

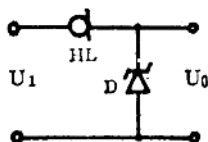


图1—5 使用恒流管的稳压电路

2. 稳压器的效率

设输入电压的变化率为 k ，输入电压 U_1 的脉动系数为 γ ，稳压器的最大输入功率为 P_{1max} ，根据图1—3可求得：

$$P_{1max} = \frac{(1+k)U_1 - U_0}{R} (1+k)U_1 \quad (1-4)$$

$$R = \frac{(1-k-\gamma)U_1 - U_0}{I_{Lmax} + I_{Dmin}} \quad (1-5)$$

将(1—5)式代入(1—4)式，再对 P_{1max} 求极值，可求得 U_1 的最佳值为：

$$U_1 = \frac{(1+k) + \sqrt{(1+k)(2k+\gamma)}}{(1+k)(1-k-\gamma)} U_0 \quad (1-6)$$

假定 $k=\gamma=10\%$ ，忽略 I_{Dmin} ，则得 $U_1=1.9U_0$ ，稳压器的效率 $\eta=23\%$ ，可见并联稳压器的效率是很低的。

若以额定输入功率为条件， k 和 γ 的值不变，则有：
 $U_1=1.8U_0$ ， $\eta=33\%$ 。若 $k=10\%$ ， $\gamma=5\%$ 时，则得： $U_1=1.65U_0$ ， $\eta=37\%$ 。适当地减小 γ 值有利于提高效率。

采用恒流管的硅稳压管稳压器，由于输入电流是恒定的，它不随输入电压的变化而变化，因此效率较高一些。输入电压只须满足下式即可。

$$(1-k-\gamma)U_1 - U_s \geq U_0 \quad (1-7)$$

式中， U_s 为恒流二极管的恒流起始电压，恒流电流越大， U_s 越高。

上述有关公式同样适用于由晶体管组成的并联稳压电路。

3. 稳压电路的设计

硅稳压管稳压电路的设计方法应根据使用场合和已知条件而定。当稳压器的输入为稳压电源时，只需选定一个合适的工作电流值，便可决定限流电阻的阻值。如果负载电流是变化的，应保证稳压管的电流工作在允许的范围内。

当输入电压 U_1 为整流滤波电源时，并且是待定量，可取 $U_1=(1.8\sim 2.5)U_0$ ，考虑到滤波电容器的耐压等级，可使最高输入电压小于15伏、25伏或50伏等。为设计滤波器的方便， U_1 的脉动电压可按半峰值计算。知道 U_1 、 I_{Omax} 和 I_{Omin} 后，考虑到稳压管的电压偏差，限流电阻按下式选取：