



## 译者的话

---

开关电源技术是一门运用半导体功率器件实现电能的高效率变换、将粗电变换成精电，以满足供电质量要求的技术。由于在开关电源中半导体功率器件工作在高频开关方式，因此它具有高效率、高功率密度、高可靠性。由于开关电源的突出优点，开关电源更替线性电源是发展的必然趋势。近年来，由于微型计算机的普及，通信行业的迅猛发展，推动了开关电源技术的进步和产业的迅速发展。

开关电源技术设计涉及半导体功率器件应用技术、电子技术、自动控制理论、热分析与设计等，因此是一门多学科交叉的应用性技术。本书特点是以实用性为目标，强调工程设计和方法的介绍。在介绍了开关电源电路拓扑的选取、变压器和电感设计、功率驱动电路、反馈补偿参数的设计、保护电路的基础上，深入介绍同步整流、无损吸收电路、波形整形等减少开关电源损耗的先进技术。通过大量实例介绍开关电源的设计步骤和设计方法。因此本书适合于从事开关电源设计和应用的技术人员系统地掌握开关电源的设计方法。

本书翻译过程中得到了机械工业出版社孙流芳先生的指导和帮助，在此表示衷心的感谢。由于译者水平有限，译文不当之处，欢迎批评、指正。

译者

# 前 言

《开关电源设计指南》是一本由一位应用工程设计者写给同行们的书。在多年的电源设计工作中，伴随着电子产品日新月异的发展，从工业控制到卫星系统，不论是系统设计还是系统优化等方面，作者都获得了大量的经验。本人使用的很多方法涉及到电源快速设计以外的东西以及它们对设计的影响。

《开关电源设计指南》第 4 版用高效功率变换领域最新的技术内容对第 3 版内容作了更新。这些新技术的应用使电源的效率提高到 90%~95%。本书将对开关电源中主要的损耗以及减少这些损耗的先进技术作详尽的讨论，包括同步整流、无损吸收电路、有源钳位。同时也对控制方法、噪声抑制、最优 PCB 布局等内容作了更新。

跟第 3 版一样，不论是初学者还是经验丰富的工程师，都可以在第 4 版里找到他们需要的内容。本书内容通过精心安排，使得读者可以任意查阅自己所希望深入了解的部分。书中所附的设计流程，使得工程师可以在 1 周内完成一个典型的电源设计，从而将预期的设计周期缩短数个星期。

这本书不以追求深奥的学术理论为目标，而是给电源领域的工程师们提供一套可靠、实用的设计方法。本书所提供的方法和实例可以迅速应用到读者自己的设计中去。

作 者

# 绪 论

对于那些希望更好地理解电源工作过程的工程师来说，这是一本非常宝贵的辅助书籍，从而可以更有效地使用 悦阅工具。随着 悦阅工具的广泛应用以及各种设计方法资源的全球化，电源行业的竞争日趋激烈，从而使一些典型产品的设计周期从一年以上缩短到几个月。所以对于设计工程师来说，找到并运用所需的信息，而避免长时间大量的学习是很重要的。

《开关电源设计指南》（第 圆版）是用一种非常独特的方式编写的。如果遵循正确的方法，可以极大地缩短一个电源设计的周期。通过对电源系统工作过程的直观描述，并附加常用的电路方法，这本书可以帮助任何一个拥有电子知识的人快速地设计一个非常复杂的开关电源。

《开关电源设计指南》是作者与其他电源设计工程师们一起长时间工作的结晶，书中不仅包含了他们的电源设计方法，也包括了本人的设计方法。

《开关电源设计指南》的体系结构

《开关电源设计指南》第 圆版的结构跟第 员版一样，遵循可靠、实用的体系结构。这种便于应用的编排方式可以帮助读者迅速地找到他们所需要的内容，而不必从头至尾阅读全书。另外，书中提供的电源设计流程遵循了那些经验丰富的电源设计者们所采用的设计过程。同时，各章节的介绍按照循序渐进的原则。本书还覆盖了更为深入的电源设计方面，包括磁性元件、反馈控制等等，也以按部就班的形式给予介绍，从而帮助读者减少设计错误的可能性。

本书介绍的设计结果可能是一个较为保守的设计方案，可以通过实际调整参数来提高电源的性能。在有关章节中，将对它具体给予讨论。

为了取得最佳的效果，建议读者遵循以下步骤：

员 悦阅第 员章：电源在系统中的作用和电源设计流程。这章向读者阐述了电源在整个系统中的作用和电源设计技术指标。

圆 悦阅你所关心的电源章节的引言部分（线性、~~非线性~~开关或高效率）。

猿 悦阅遵循设计流程图给出的顺序，并从书中找到相关的部分。在每一章节中，阅读子电路的基本工作原理，然后从一般的工业设计方法中挑选出能够满足要求的最佳设计方案。

源 悦阅将自己的工作条件代入书中给出的设计公式中，计算出各个元器件值和容量。

缘 悦阅将获得的子电路结果放到总电路框图中，然后继续下一个子电路的设计。

远 悦阅在设计的最后（估计需要 愿- 员圆 悦阅），阅读 员 悦阅布置部分并开始搭建样机。

苑 悦阅调试并测试样机。

愿为最后的产品发布确定物理结构以及电气设计。

附录提供了在电源设计中所需的一些常用技术，同时也为那些希望进一步了解有关知识的设计者们提供了更多的细节。在进行开关电源设计时，需要参考附录中开关电源设计基础知识。第 9 章描述了怎样进一步提高电源的整体效率。

总而言之，这是一本工程师写给同行们的书，希望读者会觉得受益匪浅。

# 第 1 章 电源在系统中的 作用和电源设计流程

电源在一个典型系统中担当着非常重要的角色。从某种程度上，可以看成是系统的核心。电源给系统的电路提供持续的、稳定的能量，使系统免受外部的干扰，并防止系统对其自身作出伤害。如果电源内部发生故障，不应造成系统的故障。

然而，电源如此重要的作用并没有得到应有的重视。在设计一个系统时，电源系统总是首先被搁置在一边，直到设计最后才考虑电源的问题。出现这种现象的原因主要有两个，第一，没有人愿意接触这个东西，因为所有的人都想设计更能令人振奋的电路，并且拥有电源方面专门知识的工程师很少；第二，在系统调试阶段，一般由通用电源提供系统所需的电能，只有在产品集成的时候才会有人说：“啊呀，我们忘了设计电源了！”很多时候，指派来设计电源的人在电源设计方面却只有很少的经验，并且在产品投产前，只有很少的时间去学习电源设计。

这种情况可以导致“永久的影响”。简单地说，就是“谁设计，谁修理（终身）”。难怪没有人愿意接触电源设计，不愿意接受电源设计的任务。

## 1.1 从提问开始

为了得到一个好的设计，在开始设计以前，必须首先提出很多问题。问题越早被提出来，越有利于后面的设计。同样，这些问题的提出可以避免在设计后期遇到很多难题，这些难题可能是由于缺少交流和预见性而产生的。一些基本的问题包括如下：

从市场角度考虑

需要提供给系统何种形式的电源？对于每个电源系统来说，有很多种不同的设计方法。对应每种方法，都有哪些不利的工作条件。

如果在市场上出售，系统必须满足何种安全规程和射频干扰、电磁干扰（EMI/EMC）标准？这不仅将影响电气方面的设计，还会影响结构设计。

系统的维护要求是什么？这将决定采取何种保护措施和结构设计，以满足应用的要求。

产品的工作环境是什么？包括温度范围、环境射频（EMI）水平、灰尘、湿度、冲击、振动以及其他的物理条件。

当产品的一部分发生故障时，产品性能的降额程度是多少？这将决定电源供电结构和保护策略，对于系统来说，这是非常必要的。

从产品其他部分的设计者角度考虑

在设计的系统中，所用到的集成电路技术是什么？如果不知道它们是如

何损坏的，那么也就不能采取有效的措施对其进行保护。

负载电流的最大和最小极限值是多少？负载电流是否存在冲击性的特征，例如发动机、视频监视器、脉冲负载等。经验表明，估计值往往要比实际情况低一些，所以常常需要在估计值基础上再加 20% 的裕量。同时还需要知道的是电路能够承受的电源电压最大波动是多少。这决定了输出交叉调节和反馈补偿的设计策略，从而满足负载的要求。

系统中是否包含对噪声尤其敏感的电路？它们包括数模转换器、模数转换器、视频监视器等等。这表明电源也许需要额外的滤波措施或者电源的开关频率需要与某些敏感电路的工作频率同步。

电源的各部分电路是否需要以一定的先后顺序投入运行，以实现电源的可靠工作？

在整个装置里，分配给电源的空间有多大以及是何种形状？一般来说，这部分空间很小，所以应该为电源争取到合理的空间。

系统对于电源是否有特殊的接口要求？其中包括故障中断等，几乎所有的电路都有这个需要。

这些问题详细说明了电源的工作环境，为开始设计打下了良好的基础，也是构成电源设计规范的基础。

## 电源结构

最终产品中的电源结构必须满足产品规范。电源系统的作用是将能量有效地分配给产品中的各个部分，并能够满足其需要。要实现这样的目标，在产品中可以采用一个或多个的电源系统结构。

对于那些由一个功能模块组成，并且在使用过程中不可分的产品，例如移动电话、阴极射线管（CRT）监视器、无线电接收器等等，传统的方法是采用集中电源系统。这里，产品包含一个集中电源，并直接输出给产品的各个部分。实际上，一个集中电源系统内部往往包含多路电源输出，从而满足负载需要独立电源供电或满足供电先后顺序的要求。

对于那些由不同的模块组成，并且在使用过程中可以重新装配的产品，比如印制电路板（PCB）板卡笼型结构、移动电话基站等等，选用分布电源系统更为合适。这种类型的系统包含一个主电源，它将能量提供给母线，并由母线分配给产品各个部分。每个部分所需要的电能由小型的板载电源模块提供。这样，在系统的连接器及供电线上的电压降就不会影响到各部分电路供电电压的质量。

集中电源系统显然具有较高的效率。分布电源系统由两级或多级串联而成，整个电源系统的效率是两级或多级电源变换效率的乘积。例如两级电源变换效率均为 80%，电源串联以后整个系统的效率是 64%。

典型的电源系统往往是这两种电源系统的结合，并可能同时采用开关电源和线性电源两种技术。

一个能够完全满足其他领域的工程师和管理者要求的电源系统几乎是不可能的，这里的要求包括了成本、空间以及重量。理想的电源能够满足各种应用要求，功率密度为无穷大，同时成本趋于零。显然，实际情况需要作出折中的选择。

## 1.1 选择适用的电源技术

一旦电源系统的结构被确定下来，设计者接下来要做的是为系统中的每一路电源选择适用的技术。在设计的前期阶段，这个过程也许会在选择供电系统结构和电源技术之间反复进行。影响这个阶段设计的主要因素是：

1. 成本。

2. 重量和尺寸。

3. 在产品内部会有多少热量产生。

4. 输入电源特性。

5. 负载的噪声容限。

6. 电池寿命（如果产品是便携式的）。

7. 需要输出电压的组数及输出特性。

8. 产品投向市场的时间。

在电源系统中经常考虑到的三种常用电源技术是：

1. 线性电源。

2. 脉宽调制（PWM）开关电源。

3. 高效率的谐振开关电源。

以上技术都有其各自的优势，需要综合考虑上面提及的各种因素，权衡利弊，才能决定满足最终产品需要的最优技术。电源行业已经将以上每一种技术成功地应用到一定的产品领域，下面进行详细的叙述。

### 1.1.1 线性电源

线性电源主要应用在对发热和效率要求不高的应用场合，或者要求低成本及设计周期短的情况。线性电源作为板载电源广泛应用于分布电源系统中，特别是当配电电压低于 100V 时。对于离线式产品，在线性电源的前一级必须能够提供与交流电源可靠的电隔离。线性电源的输出电压只能低于输入电压，并且每个线性电源只能产生一路输出。线性电源的效率在 70% ~ 80% 之间。损耗以热的形式耗散。

### 1.1.2 PWM 开关电源

PWM 开关电源在使用时比线性电源具有更高的效率和灵活性。我们可以在便携式产品、航空和自动化产品、仪器仪表、离线式产品中发现它们的踪影，它们通常应用于要求高效率和多组电源电压输出的场合。开关电源的重量要比线性电源轻得多。因为对于相同的输出功率，开关电源的散热器要小得多。但是开关电源的成本较高，而且需要较长的开发周期。

### 1.1.3 高效率的谐振开关电源

高效率的谐振开关电源由基本的 PWM 开关电源演变而来。它主要应用于需

要电源具有更轻的重量和更小的体积，并且对电磁噪声（干扰）有严格要求的场合。通常应用于航空电子设备、航天电子设备、便携式设备及模块电源。谐振开关电源的缺点是需要更长的开发周期，并且比其他两种电源的成本要高。

除作为板载电源外，线性电源正逐渐从工业界淡出，朝着开关电源方向发展。随着谐振或准谐振开关电源技术逐渐成熟，它们的设计也变得越来越容易。为了便于选择，表 1-1 比较了各种电源的技术特点。

表 1-1 四种电源技术的比较

	线性变换器	谐振开关变换器	谐振变换器 开关变换器	准谐振 开关变换器
价格	低	高	高	最高
重量	高	中偏低	中偏低	中偏低
电磁噪声	无	高	居中	居中
效率	70%~80%	75%~85%	75%~85%	75%~85%
多路输出	无	有	有	有
产品开发周期	一个星期	1~2 个人工月 <sup>①</sup> 2~3 个人工月 <sup>②</sup>	1~2 个人工月 <sup>①</sup> 2~3 个人工月 <sup>②</sup>	1~2 个人工月 <sup>①</sup> 2~3 个人工月 <sup>②</sup>

① 具有一定的电源设计经验和必备装备。

② 使用本书时。

## 1.1 了解电源系统设计指标

在正式开始设计电源以前，设计者必须首先确定电源系统设计指标。设计指标作为电源最终必须达到的性能目标，使得电源所服务的整个产品达到整体性能要求。一旦电源系统设计指标确定以后，就不可随意更改，只有在产品的需求发生重大变动时，才能对它进行修改。

在确定设计指标时，电源设计者必须首先弄明白什么是合理的需要，以及什么是理想化的需要。不懂电源的工程师提出的电源指标要求往往是成本太高、体积太大，或者不能满足目前技术的需要。电源设计者应该要求其他的工程师、管理人员、市场人员充分考虑他们所提出的技术指标要求是否符合实际情况。

电源系统的技术指标基于问题而确定，这些问题一开始是由那些与产品设计相关的其他部门提出来的。可以预计一些指标会发生变化，比如在各个子系统所需的电流。在设计过程中，常常需要给电源的输出电流增加 10%~20% 的裕量，以解决这些不可避免的需求增长。同时，分配给电源系统的空间和成本总会比所需的要小，所以协商是不可避免的。因为电源系统是产品的支柱，它的设计会随着产品其他部分设计的变化而作出更改。这使得在一个产品中，电源总是在最后被设计出来。在设计初期，意识到这些潜在的困难，将有助于在计划后期避免时间上的延迟。

为了得到良好的设计指标，设计者必须首先了解在电源领域里使用的术语。这些电源参数都可以在常规的测试条件下测得，具体如下所示。

## 输入电压

灾<sub>输入电压</sub> 预期产品在超过 100% 的运行时间里所输入的电压。

灾<sub>最低输入电压</sub> 运行时预期的最低输入电压。

灾<sub>最高输入电压</sub> 运行时预期的最高输入电压。

频率 直流, 交流, 脉冲等。

除了常规的说明以外, 装置也包括在一些异常条件下运行的技术指标, 包括:

失压 输入电压完全消失的一段时间 (离线运行的典型时间是 100% 相当于 100%)。

浪涌 定义输入电压超出预期最高电压 灾<sub>浪涌</sub> 的时间段, 在这段时间里, 电源必须能够承受这个浪涌电压, 并正常工作。

瞬态 具有很高的电压尖峰 (包括正与负尖峰), 这是输入电源系统的特征。

紧急运行状态 出现异常情况时的运行要求, 这可能是因为此功能对操作者的安全至关重要, 电源必须运行, 除非它自身已损毁。

## 输入电流

限<sub>最大平均输入电流</sub> 最大平均输入电流。它的最大极限值可以由安全管理机构来定义。

## 输出电压

灾<sub>额定输出电压</sub> 额定输出电压 (理想)。

灾<sub>最小输出电压</sub> 保证负载不被切断的最小输出电压。

灾<sub>最大输出电压</sub> 保证负载线路正常运行的最大输出电压。

灾<sub>极限电压</sub> 负载遭到破坏时的极限电压。

电压纹波 (由开关电源产生) 这是峰峰值电压, 它的频率和大小应该能被负载所接受。

## 输出电流

限<sub>额定输出电流</sub> 额定输出电流。

限<sub>最小输出电流</sub> 在正常运行情况下, 最小输出电流。

限<sub>最大极限电流</sub> 负载短路时的最大极限电流。

描述输出端任何非正常负载特征, 包括冲击的负载, 如电动机、电动机等等。还有那些作为整个系统一部分的负载, 如示波器、手机等, 这些负载随时可能会从系统移走或加入。

动态负载响应时间: 当加上阶跃负载时, 电源系统响应需要的总时间。

电压调整率: 输入电压变化时, 输出电压的变化率, 即

电压调整率  $\frac{\text{最高输出电压} - \text{最低输出电压}}{\text{额定输出电压}}$  灾<sub>电压调整率</sub> 灾<sub>电压调整率</sub> 灾<sub>电压调整率</sub>

负载调整率: 负载电流从半载到额定负载时, 输出电压的变化率, 即

满载时输出电压  $V_{full}$  原半载时输出电压  $V_{half}$  伊秉国(豫)  
 负载调整率  $\gamma = \frac{V_{full} - V_{half}}{V_{full}}$  额定负载时输出电压  $V_{nom}$  伊秉国(豫)  
 (页码)

总效率：这将决定系统有多少热量产生，以及在结构设计时是否应考虑采用散热片。

总效率  $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$  伊秉国(豫)  
 (页码)

## 保护

- 输入加熔断器保护。
- 输出过电流监视。
- 过电压保护。
- 输入端低压封锁。
- 系统发生故障时的降额特性和维修原则。

产品工作和储存的环境温度范围

## 安全管理问题

- 最高耐压。
- 绝缘电阻。
- 相关因素（互锁、绝缘等级、冲击、标记等）。

电磁干扰(射频干扰 磁干扰)由管理机构制定，是产品必须满足的标准。

- 传导 线性滤波。
- 辐射 物理布局和机壳。

电源的特殊功能。包括所有微机系统都必须有的上电复位和掉电信号、远程关断、输出电压和电流设计、上电顺序、状态信号等。

以上这些为开始设计一个电源打下了良好的基础。技术指标为设计过程指明了方向，并且在设计过程中有助于指导设计者。

## 常规电源设计方法：介绍一种模块化的电源设计方法

所有的电源设计者在设计电源时，都遵循一种普遍的模式。按照这种模式，每一步的设计实际上是为下一步的设计打下基础，并指导设计者以最小的工作量达到既定的目标。本书介绍一种包含两个步骤的设计方法：首先，它将电源分割成几个功能块，这些功能块可以用模块化的方法设计；第二，它描述了如何按照顺序将模块设计出来，并且能够简化后面的组合过程。对于每个模块不同的应用场合，书中列出了一些电源设计者经常采用的典型工业设计方法，可以进一步帮助读者理解。每个模块都包含了相关的设计公式。从这些公式里，可以很快地计算出元器件的参数。这是一个连贯的、合理的设计流程，未知的量是最少的。这种方法经过合理的组织，即使是没有经验的设计者也可以在 1 周以内设计出一个“专业”水准的电源简图，它占整个设计过程 1/3 的时间。一些物理设计，如实

验电路的构建、低噪声的 PCB 布局、变压器绕线技术等，在整个例子里也都有介绍。由于一些物理因素的存在，总会产生一些问题，这不仅仅是针对没有经验的设计者，对于经验丰富的设计者，也有同样的问题出现。希望这些实用的例子能够有助于将问题减少到最低程度。所有的电源，不管它是线性的，还是开关的，总是遵循一般的设计流程。由于半导体工业技术的成熟和集成水平的提高，线性电源主要通过例子给出。开关电源的设计流程相对而言要复杂一些。在相关的章节里会对其作详细的介绍。一般的方法如下：

1. 为产品选择一个合适的技术和拓扑。

2. 根据设计指标和要求，完成电源“黑箱”的近似估计。估算包括半导体器件的功率损耗、峰值电流和电压，并且可以告诉设计者所选择的拓扑是否合理，以及是否有必要进行其他的选择。同时读者可以申请得到在电路试验阶段所需的半导体样品。

3. 按照设计流程图，一步步地设计电源。

4. 用书中结构布局和设计部分所介绍的技术搭建电路试验板。

5. 试验，再试验！测试电源是否符合设计指标要求。如果不能满足要求，需要对设计作一些修改。做一些“在线”测试，这样就可以知道这些修改对电源性能的影响。将产品接到电源，并对其进行传导测试，以防止任何交互影响的产生。正式将产品提交到批准机构以前，一定要测出与安全标准和 EMC 辐射相关的参数。

6. 确定物理结构设计，包括产品的物理包装、散热片的设计及 PCB 设计。

7. 对最后的产品作 EMC 测试，以得到正式批准，这里可能需要作一些改动。但是如果你已经在前面的设计步骤中做了这些工作，那么这些都是次要的。

8. 发布产品。

## 11.1 对电源设计软件的一点评论

目前有大量基于软件的电源设计工具，尤其是针对开关电源设计。很多软件是由半导体公司开发出来的，并且针对他们自己研制的开关电源集成电路。这些集成电路包含了电源的驱动和控制线路。这种类型的软件包只能有针对性地设计产品，但是不适用于一般的电源设计。由这些公司提供的设计在成本、重量、设计时间方面做了优化，并为他们制造的电源集成电路设计了外围电路。

电路仿真公司提供了一些比较常用的开关电源设计软件包。但是必须谨慎对待这些基于软件的开关电源设计工具。设计者应该对软件得出的结果和由设计公式得出的结果进行比较，这种比较可以让设计者确定这些公司是否理解了开关电源的设计。记住，大部分设计数字电路的工程师认为设计一个开关电源只是复制电路图而已。

在电源设计过程中，软件包模糊了设计者的水平差异。为了使产品的应用范围尽可能的广泛，这些软件得到的结果是非常保守的。对于经验丰富的设计者，

这只是第一步。他知道怎样在一定范围内优化结果，以提高电源的性能。所有适用的公式和软件结果只能是估计值。总而言之，软件只能引导设计者得到一个可以工作的结果，但对于系统来说，不是最优的。

## 规范所需的基本测试设备

电源，尤其是开关电源，需要设计者检查一些在其他电子领域里不常测量的参数。除了交流变换到直流的电压，设计者还需要查看交流和直流电流及波形，并作频谱分析。提到这点的时候，你的脑子里也许会闪过一大笔的开支，但是一些基本的设备花费在几百美元以下。设备可以分为必需的和可选择的。但在有些场合，要用到所有的设备，不管你是买或者租用它们。

### 必需的测试设备

需要一个带宽较宽或者更高带宽的示波器。对于开关电源设计来说，带宽尤其重要。数字示波器对于一些关键波形，可能会丢失重要的瞬态信息，所以要谨慎使用数字示波器。

在示波器上使用的差分电压探头。

需要一个交流电流万用表，测量有效值的功能可选。

需要一个交流或者直流的电流探头，设计开关电源时尤其需要。一些合适的仪器如 Tektronix 公司的 2878 或 2879 探头，或者用更好的仪器。

需要一个可以用来模拟输入电源的实验电源。这个电源也许是一个很大的直流电源，比所需要的有更高的电压、电流等级。对于离线式电源系统，可以使用带有超过所需电流等级的自耦变压器。

注意：在测试时，必须将所有的设备从地线隔离。

### 可选的测试设备

需要一个频谱分析仪。在电源提交检测机构前，可以用其测试电源的电磁干扰特性。由于建立一个完整的测试实验室也许会很昂贵，所以建议使用第三方的实验室。

需要一个测量有效值的功率表，可以用来测试效率和功率因数。这对于离线式电源来说是需要的。

## 第 0 章 线性电源介绍

最初的可调电源就是线性电源。它利用有源器件导通电阻的可变性将输入电压降至设定的输出电压，但是线性电源在工作时会以发热的形式损耗大量能量，尽管它在电气意义上是一个“静音”的电源。

线性电源在效率要求不高的应用场合中广泛使用，包括强制风冷设备，也包括那些对电气噪声很敏感而需要“静音”电源的仪器设备，如音频和视频放大器、接收器等。线性电源也广泛用作板载电源，当板上仅需几瓦功率时，电源损耗的功率可通过一个小散热片耗散，如果需要与交流输入电源隔离，可以接一个交流变压器或模块电源。

总的说来，在输出功率小于 1W 的应用场合，线性电源有它的用武之地，1W 以上，散热器会变得既大又贵，则开关电源会更有吸引力。

### 0.1 线性电源基本工作原理

不论是线性电源还是更为复杂的开关电源，电源的基本工作原理都是相同的。所有电源都有一个闭环负反馈，这个负反馈环就是用于稳定输出电压。图 0-1 所示为串联线性电源的主要组成部分。

线性电源都是降压式的，也就是输入电压必须高于所设计的输出电压。线性电源有两种类型：并联式电源和串联式电源。并联式电源的电压调整单元与负载并联，与负载并联的稳压管分流负载电流，使输入电压或负载电流变化时保持负载电压稳定。常见的例子就是由稳压二极管构成的稳压电源。串联式电源比并联式电源效率高，它的电压调整单元采用有源器件并串联在输入电源和负载之间。

串联调整单元工作在线性模式，这意味着调整单元不是设计成全导通或全关断工作模式，而是处于“部分导通”状态的工作模式。负反馈环路决定调整单元的导通程度，以维持输出电压稳定。

负反馈环路的核心是一个高增益的运算放大器，称作电压误差放大器，用它来持续地对输出电压和稳定的基准电压之间作比较，当输出仅有几毫伏误差时，通过改变串联调整单元的导通电阻，即可调整输出。稳定的电压基准接在运算放大器正输入端，且通常比输出电压低，分压后的输出电压接近电压基准，并接到运算放大器的负输入端。因此，在额定输出电压时，分压后的输出电压等于基准电压。

电压误差放大器的增益使电压基准和输出电压之间的差值（误差电压）被放大很多倍，放大后的误差电压直接控制串联调整单元的导通电阻，以维持额定的

输出电压。如果负载增加，输出电压会下降，则放大器的输出将增加，使更多的电流流向负载；同样地，如果负载减少，输出电压会上升，则放大器的输出将使调整单元流向负载的电流减少。

电压误差放大器对输出变化的响应速度和输出电压的控制精度取决于误差放大器的反馈环补偿设计。负反馈补偿的大小由分压电阻和接到电压误差放大器负输入端与输出端之间的电阻大小决定。它决定了直流增益的大小和输出电压的精度，同时也决定了放大器高频时的增益和带宽，也就是决定了对负载变化的响应时间或称瞬态响应时间。

线性电源的工作过程很简单。所有电源，包括更为复杂的开关电源，它们内部的调节电路基本是一样的。电压负反馈实现电源最重要的功能——输出电压的稳定。

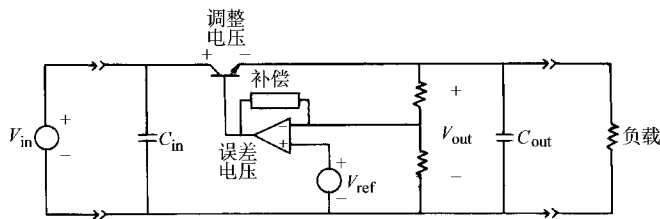


图 10-1 基本线性电源

## 10.1 线性电源设计的总体考虑

目前，高集成度的三端稳压集成块能轻易满足大部分板载和小功率电源的应用场合，尽管有些应用场合要求有比三端稳压集成块更大的输出电流和更强的功能。

通常，集成稳压电源的设计和传统分立元件线性电源的设计在方法上有很多共同点，但也存在差异。最终设计必须满足极限工作条件及相关的参数。遗憾的是，很多工程师忽视了它们，并在生产以后才发现产品不能在整个指标范围内正常工作。

首先要考虑的是调整电压，调整电压就是工作时输入电压和输出电压之间的电压降，它会影响后续设计，必须首先考虑这个调整电压，以确定此线性电源能否满足系统的要求，因为线性电源的  $10\% \sim 20\%$  以上功率损耗是在这个电压降上。这个损耗可由下列公式计算：

$$P_{\text{调整}} = (V_{\text{in}} - V_{\text{out}}) I_{\text{out}} \quad (10-1)$$

如果系统不能将最高环境温度时由损耗所产生的热量散发掉，就必须设计另一种方案。这个损耗决定了调整管上需要用多大的散热器。

一种快速估计热分析将告诉设计者，线性电源是否有足够的裕量满足产品在允许的最高工作环境温度下的要求，附录 10 是有关这个热分析的内容。

第二个主要考虑的问题是线性电源某个特定拓扑的最小电压差。这个电压是

线性电源能够承受的最小调整电压，低于这个电压，线性电源就超出了调整范围。它仅仅与调整管取得驱动电流和电压的方式有关。常见的正电压线性电源使用一个  $NPN$  双极型功率调整晶体管（见图 4-10a）。调整晶体管工作时所需的基射极电压，是从它自身的集射极电压获得的。对于  $NPN$  调整管而言，这是实际的最小调整电压。这决定了调整电压不能低于  $NPN$  调整管的基射极电压（约为  $V_{BE}$ ）加上所有基极驱动器件（晶体管和电阻）上的压降，对于三端稳压电源，如  $78XX$  系列，这个电压是  $V_{BE} + V_{R_b}$ 。通常设计正电源输出时使用  $NPN$  调整晶体管，这个电压差可能还要高。在输入电压与输出电压的差值小于  $V_{BE} + V_{R_b}$  的应用场合，建议使用低电压差调整电源。这种电路采用  $PNP$  调整晶体管，它从输出电压取得基射极电压，而不是从调整电压或输入电压取得（见图 4-10b），这使得调整管有最小  $V_{BE}$  的电压差。孕沟道 负载也可以应用在这里，并且电压差接近于零伏。

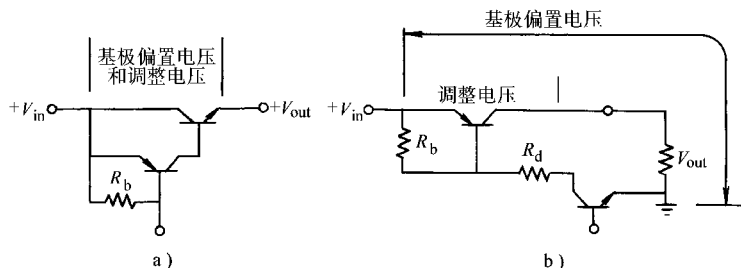


图 4-10 调整管对电压降的影响  
a)  $NPN$  调整管 b)  $PNP$  调整管（低电压降）

在正常工作，输入电压低到接近输出电压时，此电压差将带来一个驱动问题。如果是通过隔离变压器供电，在电压最低时（最低交流电压）就会出现这种情况。低电压差调整电源（如  $LM317$ ）允许调整管工作在更低的交流输入电压下。低电压差调整电源也广泛用作开关电源输出端的后级调整器。在开关电源中，效率非常重要，所以调整电压降需要控制在最低值。这里，低电压差调整电源将比传统的基于  $NPN$  管的线性电源减少数瓦损耗。如果应用中调整电压总是不低于  $V_{BE}$ ，则可使用传统的线性电源（如  $78XX$ ）。

另一个要考虑的是所使用的调整管类型。从调整电压的损耗来看，使用双极型功率晶体管或功率 MOSFET 没有任何区别，区别在于驱动电路。如果调整电压比较高，控制器（通常是接地的电路）必须从输入或输出电压拉出电流到地，对单个双极型调整功率管，这个电流是

$$I_{B_{adj}} = \frac{V_{adj}}{R_{adj}} \quad (4-10)$$

双极型调整功率晶体管的驱动功率损耗是

$$P_{adj} = V_{adj} I_{B_{adj}} \quad (4-11)$$

这个驱动损耗可能会很大。调整管可以接一个驱动晶体管，以增加调整管的

⊖ 原文误为低于  $V_{BE}$  ——译者注

有效增益，从而减少驱动电流，或者采用直流驱动电流比双极型功率晶体管小的功率晶体管。然而，功率晶体管的栅极需要高达几伏特的电压驱动，这会大大增加电压差。在绝大多数线性电源的应用场合，就效率而言，带吸收的调整管和功率晶体管之间几乎没有差别，而双极型晶体管比功率晶体管便宜得多，且不易振荡。

线性电源是一个成熟的技术，因而半导体制造商通常会将电源集成在产品中，而且不仅仅局限于集成单个线性电源，对有些应用场合，还加入外围电路来满足其要求，否则就要根据实际应用定制，在下面章节的设计实例中会总结几种不同的方法。

## 图 10-1 线性电源设计实例

线性电源可以设计成满足各种成本和功能的要求，以下的设计举例表明了线性电源设计可以是很基本的，也可以是相当复杂的。对增强型场效应管电源的设计只作简略介绍，因为集成电路数据手册一般都有详细介绍。由于线性电源功率损耗相对较大，所以热是个主要问题。有些热分析和设计在例子中已经给出。这方面进一步的考虑请参考附录 B。

### 图 10-2 基本分立元件的线性电源设计

在运算放大器出现以前，这种类型的线性电源很普遍，它可以使用户节省设计成本。它的缺点包括温度漂移及输出电流范围有限。

#### 稳压二极管并联调整电源

这种稳压器典型地用在负载小于 100mA 的局部电压调节中，串联电阻置于输入电压和稳压二极管之间，用来限制流向负载和二极管的电流，稳压二极管补偿负载电流的变化。稳压电压值会随着温度漂移，漂移特性在很多稳压二极管参数手册中已给出。它的负载调整能力对大多数集成电路电源来说已经够用，但它的损耗比串联型的线性电源更大，这是因为它设置在最大负载电流状态，而负载往往没有这么大。稳压二极管稳压电源电路见图 10-2。

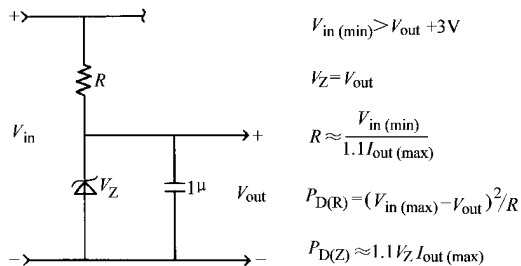


图 10-2 稳压二极管的稳压电路

#### 单晶体管串联型线性电源

将一个晶体管加到基本二极管稳压电路，可以利用双极型晶体管具有增益的优势。晶体管接成射极跟随器，可以在稳压二极管的电流比较小的情况下，向负载提供很大的电流。此时，晶体管基本上是一个误差放大器（见图 10-3）。当负载电流增加时，使基极的电压提高，晶体管的导通程度也增加，因而使电压恢复到原来的值。可以通过选择晶体管的容量来满足负载和调整电压损耗的要求，