

线性稳压器的基本知识解析

长期以来，线性稳压器一直得到业界的广泛采用。在开关模式电源于上世纪 60 年代后成为主流之前，线性稳压器曾经是电源行业的基础。即使在今天，线性稳压器仍然在众多的应用中广为使用。下面我们就来就针对线性稳压器的基本知识作一一相关介绍。

一、线性稳压器的基本概念

线性稳压器 (Linear Regulator) 使用在其线性区域内运行的晶体管或 FET，从应用的输入电压中减去超额的电压，产生经过调节的输出电压。其产品均采用小型封装，具有出色的性能，并且提供热过载保护、安全限流等增值特性，关断模式还能大幅降低功耗。

二、线性稳压器的工作原理

我们从一个简单的例子开始。在嵌入式系统中，可从前端电源提供一个 12V 总线电压轨。在系统板上，需要一个 3.3V 电压为一个运算放大器 (运放) 供电。产生 3.3V 电压最简单的方法是使用一个从 12V 总线引出的电阻分压器，如图 1 所示。这种做法效果好吗？回答常常是“否”。在不同的工作条件下，运放的 VCC 引脚电流可能会发生变化。假如采用一个固定的电阻分压器，则 ICVCC 电压将随负载而改变。此外，12V 总线输入还有可能未得到良好的调节。在同一个系统中，也许有很多其他的负载共享 12V 电压轨。由于总线阻抗的原因，12V 总线电压会随着总线负载情况的变化而改变。因此，电阻分压器不能为运放提供一个用于确保其正确操作的 3.3V 稳定电压。于是，需要一个专用的电压调节环路。如图 2 所示，反馈环路必需调整顶端电阻器 R1 的阻值以动态地调节 VCC 上的 3.3V。

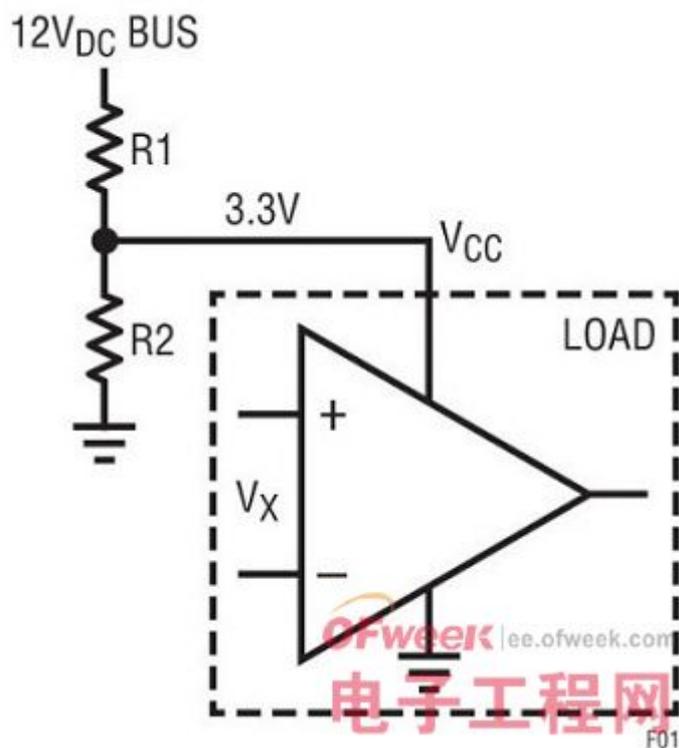


图 1 电阻分压器采用 12V 总线输入产生 3.3VDC

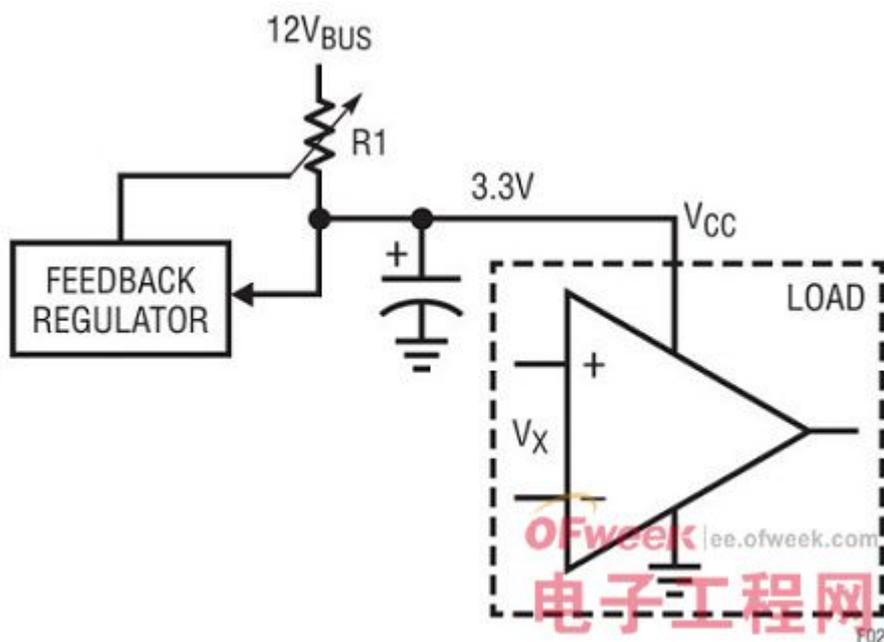


图 2 反馈环路调整串联电阻器 R1 的阻值以调节 3.3V

此类可变电阻器可利用一个线性稳压器来实现，如图 3 所示。线性稳压器使一个双极性或场效应功率晶体管 (FET) 在其线性模式中运作。这样，晶体管起的作用就是一个与输出负载相串联的可变电阻器。从概念上说，如需构建反馈环路，可由一个误差放大器利用一个采样电阻器网络 (RA 和 RB) 来检测 DC 输出电压，然

后将反馈电压 V_{FB} 与一个基准电压 V_{REF} 进行比较。误差放大器输出电压通过一个电流放大器驱动串联功率晶体管的基极。当输入 V_{BUS} 电压下降或负载电流增大时, V_{CC} 输出电压下降。反馈电压 V_{FB} 也将下降。因此, 反馈误差放大器和电流放大器产生更多的电流并输入晶体管 $Q1$ 的基极。这将减小电压降 V_{CE} , 因而使 V_{CC} 输出电压恢复, 这样一来 $V_{FB}=V_{REF}$ 。另一方面, 如果 V_{CC} 输出电压上升, 则负反馈电路采取相似的方式增加 V_{CE} 以确保 3.3V 输出的准确调节。总之, V_O 的任何变化都被线性稳压器晶体管的 V_{CE} 电压所消减。所以, 输出电压 V_{CC} 始终恒定并处于良好调节状态。

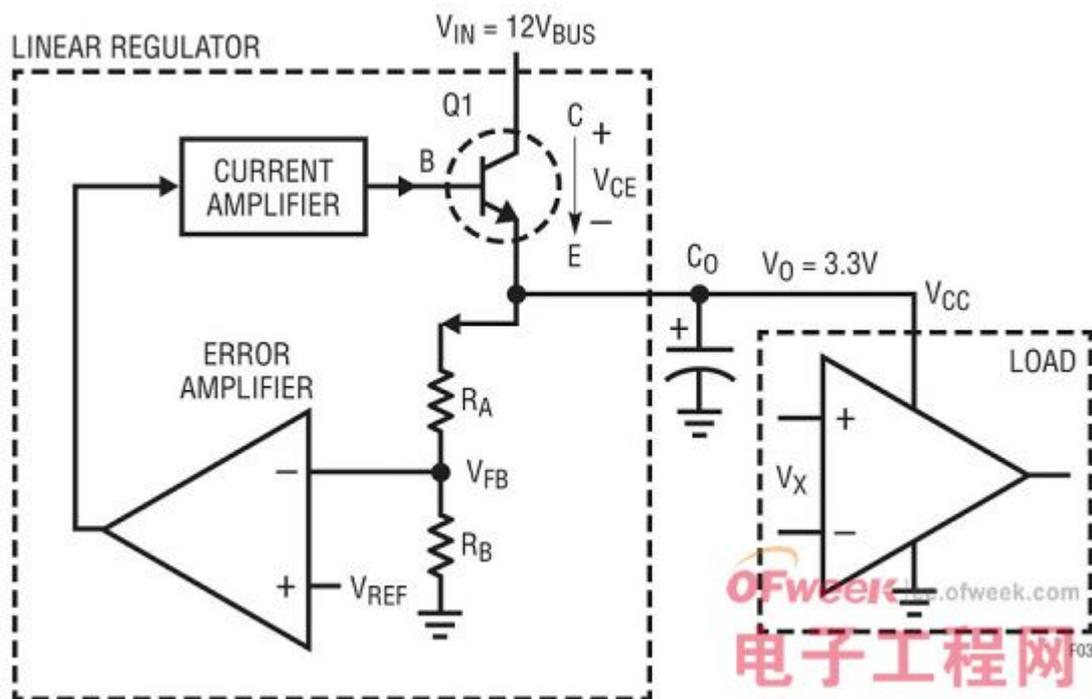


图 3 线性稳压器可实现一个可变电阻器以调节输出电压

三、线性稳压器的特点

所谓的抗短路能力要求, 是指在相关材料的短路条件下, 稳压器不损坏。稳压器的抗短路能力包括承受短路的耐热能力和承受短路的动稳定能力两个方面。

压差和接地电流值定了后就可确定稳压器适用的设备类型。五大主流线性稳压器每个都具有不同的旁路元件 (passelement) 和独特性能, 电压差和接地电流值主要由线性稳压器的旁路元件 (passelement) 确定。分别适合不同的设备使用。

即使没有输出电容也相当稳定, 它比较适合电压差较高的设备使用, 规范 NPN 稳压器的优点是具有约等于 PNP 晶体管基极电流的稳定接地电流。但较高的压差使得这种稳压器不适合许多嵌入式设备使用。

NPN 旁路晶体管稳压器是一种不错的选择, 对于嵌入式应用而言, 因为它压差小, 容易使用。不过这种稳压器仍不适合具有很低压差要求的电池供电设备使

用，因为它压差不够低。高增益 NPN 旁路管可使接地电流稳定在几个毫安，而且它公共发射极结构具有很低的输出阻抗。

其中的旁路元件就是 PNP 晶体管。输入输出压差一般在 0.30.7V 之间。因为压差低，PNP 旁路晶体管是一种低压差稳压器。因此这种 PNP 旁路晶体管稳压器非常适合电池供电的嵌入式设备使用。不过它大接地电流会缩短电池的寿另外，PNP 晶体管增益较低，会形成数毫安的不稳定接地电流。因为采用公共发射极结构，因此它输出阻抗比较高，这意味着需要外接特定范围容量和等效串联电阻 (ESR 电容才干够稳定工作。

四、线性稳压器的优劣势分析

线性稳压器使用在其线性区域内运行的晶体管或 FET, 从应用的输入电压中减去超额的电压，产生经过调节的输出电压。其产品均采用小型封装，具有出色的性能，并且提供热过载保护、安全限流等增值特性，关断模式还能大幅降低功耗。

长期以来，线性稳压器一直得到业界的广泛采用。在开关模式电源于上世纪 60 年代后成为主流之前，线性稳压器曾经是电源行业的基础。即使在今天，线性稳压器仍然在众多的应用中广为使用。

1. 线性稳压器的优势分析

除了简单易用之外，线性稳压器还拥有其他的性能优势。电源管理供应商开发了许多集成型线性稳压器。典型的集成线性稳压器只需要 V_{IN} 、 V_{OUT} 、FB 和任选的 GND 引脚。图 4 示出了一款典型的 3 引脚线性稳压器 LT1083, 它是凌力尔特公司在 20 多年前开发的。该器件仅需一个输入电容器、输出电容器和两个反馈电阻器以设定输出电压。几乎所有的电气工程师都可以运用这些简单的线性稳压器来设计电源。

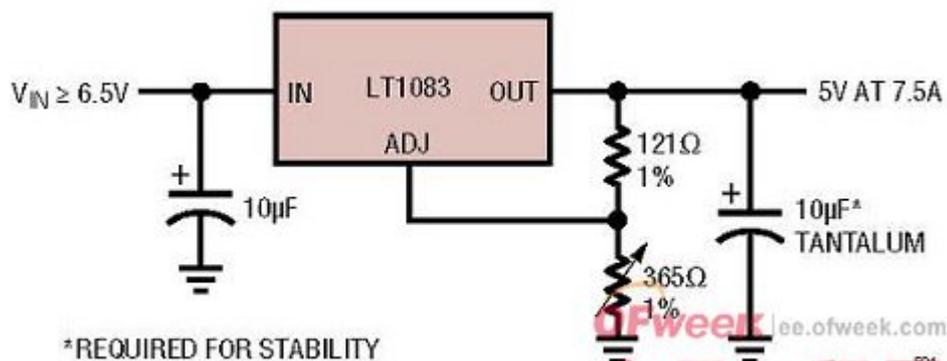


图 4 集成型线性稳压器实例：只有 3 个引脚的 7.5A 线性稳压器

2. 线性稳压器的缺点分析

线性稳压器会消耗大量的功率。采用线性稳压器的一个主要缺点是其运行于线性模式之串联晶体管 Q1 会有过大功率耗散。如前文所述，线性稳压器从概念上讲是一个可变电阻器。由于所有的负载电流都必须经过串联电阻器，故其功率耗散为 $P_{LOSS} = (V_{IN} - V_O) I_O$ 。在该场合中，线性稳压器的效率可由下式快速估算：

$$\eta_{LR} = \frac{P_{OUTPUT}}{P_{OUTPUT} + P_{LOSS}} = \frac{V_O \cdot I_O}{V_O \cdot I_O + (V_{IN} - V_O) \cdot I_O} = \frac{V_O}{V_{IN}}$$

于是在图 1 所示的例子中，当输入为 12V 且输出为 3.3V 时，线性稳压器的效率仅为 27.5%。在此场合中，82.5% 的输入功率完全浪费掉了，并在稳压器中产生了热量。这意味着晶体管必须具备在最坏情况下（最大 V_{IN} 和满负载）处理其功率/热耗散的热能力。因此，线性稳压器及其散热器的尺寸可能很大，特别是在 V_O 远远低于 V_{IN} 的时候。如图 5 所示，线性稳压器的最大效率与 V_O/V_{IN} 之比成比例。

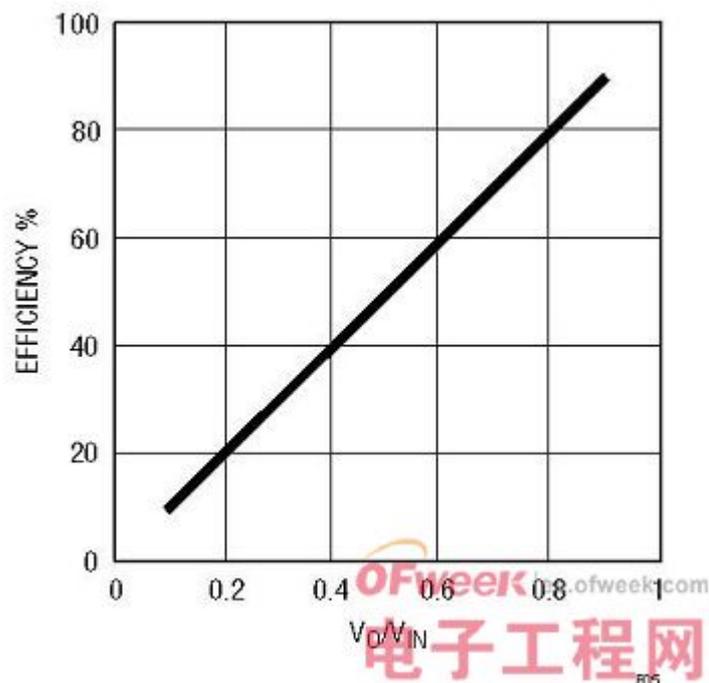


图 5: 线性稳压器的最大效率与 V_O/V_{IN} 之比的关系。

另一方面，线性稳压器可以在 V_O 接近 V_{IN} 的情况下具有非常高的效率，然而，线性稳压器 (LR) 存在另一个局限性，即 V_{IN} 和 V_O 之间的最小电压差。LR 中的晶体管必须在其线性模式中运作。于是，其在双极型晶体管的集电极至发射极

两端或 FET 的漏极至源极两端需要一个确定的最小电压降。当 V_0 过于接近 V_{IN} 时, LR 也许不再能够调节输出电压。那些能够在低裕量 ($V_{IN}-V_0$) 条件下工作的线性稳压器被称为低压差稳压器 (LDO)。

另外, 还有一个明显之处就是线性稳压器或 LDO 只能提供降压 DC/DC 转换。在那些要求 V_0 电压高于 V_{IN} 电压, 或者需要从一个正 V_{IN} 电压产生负 V_0 电压的应用中, 线性稳压器显然是不起作用。

五、线性稳压器的应用

线性稳压器的主要应用体现在以下几个方面:

1. 简单/低成本的解决方案。线性稳压器和 LDO 简单易用, 特别适合于那些具有低输出电流、热应力不很关键的低功率应用。无需外部功率电感器。

2. 低噪声/低纹波应用。对于那些对噪声敏感的应用(例如: 通信和无线电设备)而言, 最大限度地抑制电源噪声是非常关键的。线性稳压器具有非常低的输出电压纹波(因为没有频繁接通和关断的组件), 而且线性稳压器还可以拥有非常高的带宽。所以, 几乎不存在 EMI 问题。有些特殊的 LDO(比如: 凌力尔特的 LT1761LDO 系列)在输出端的噪声电压低至 $20\ \mu\text{VRMS}$ 。这么低的噪声水平 SMPS 几乎是不可能实现的。即使采用 ESR 非常低的电容器, SMPS 的输出纹波往往也将达到 mV 级。

3. 快速瞬态应用。线性稳压器反馈环路一般都是内置的, 因此无需外部补偿。相比于 SMPS, 线性稳压器通常具有较宽的控制环路带宽和较快的瞬态响应。

4. 低压差应用。对于那些输出电压接近输入电压的应用来说, LDO 可能比 SMPS 更有效。有非常低压差 LDO (VLDO), 例如: 凌力尔特的 LTC1844、LT3020 和 LTC3025, 这些器件可提供 20mV 至 90mV 的压差电压和高达 150mA 的电流。最小输入电压可低至 0.9V。由于 LR 中没有 AC 开关损耗, 因此 LR 或 LDO 的轻负载效率与其满负载效率很相近。SMPS 常常因其 AC 开关损耗的缘故而具有较低的轻负载效率。在轻负载效率同样十分关键的电池供电型应用中, LDO 可提供一种优于 SMPS 的解决方案。

六、常用线性稳压器的技术分析

电压差和接地电流值主要由线性稳压器的旁路元件 (pass element) 确定, 电压差和接地电流值定了后就可确定稳压器适用的设备类型。目前使用的五大主流线性稳压器每个都具有不同的旁路元件 (pass element) 和独特性能, 分别适合不同的设备使用。

标准 NPN 稳压器的优点是具有约等于 PNP 晶体管基极电流的稳定接地电流, 即使没有输出电容也相当稳定。这种稳压器比较适合电压差较高的设备使用, 但较高的压差使得这种稳压器不适合许多嵌入式设备使用。

对于嵌入式应用而言，NPN 旁路晶体管稳压器是一种不错的选择，因为它的压差小，而且非常容易使用。不过这种稳压器仍不适合具有很低压差要求的电池供电设备使用，因为它的压差不够低。它的高增益 NPN 旁路管可使接地电流稳定在几个毫安，而且它的公共发射极结构具有很低的输出阻抗。

PNP 旁路晶体管是一种低压差稳压器，其中的旁路元件就是 PNP 晶体管。它的输入输出压差一般在 0.3 到 0.7V 之间。因为压差低，因此这种 PNP 旁路晶体管稳压器非常适合电池供电的嵌入式设备使用。不过它的大接地电流会缩短电池的寿命。另外，PNP 晶体管增益较低，会形成数毫安的不稳定接地电流。由于采用公共发射极结构，因此它的输出阻抗比较高，这意味着需要外接特定范围容量和等效串联电阻 (ESR) 的电容器才能够稳定工作。

由于 P 沟道 FET 稳压器具有较低的压差和接地电流，因此被广泛用于许多电池供电的设备。该类型稳压器将 P 沟道 FET 用作它的旁路元件。这种稳压器的电压差可以很低，因为很容易通过调整 FET 尺寸将漏-源阻抗调整到较低值。另一个有用的特性是低的接地电流，因为 P 沟道 FET 的“栅极电流”很低。然而，由于 P 沟道 FET 具有相对大的栅极电容，因此它需要外接具有特定范围容量与 ESR 的电容器才能稳定工作。

N 沟道 FET 稳压器非常适合那些要求低压差、低接地电流和高负载电流的设备使用。用于旁路管采用的是 N 沟道 FET，因此这种稳压器的压差和接地电流都很低。虽然它也需要外接电容才能稳定工作，但电容值不用很大，ESR 也不重要。N 沟道 FET 稳压器需要充电泵来建立栅极偏置电压，因此电路相对复杂一些。幸运的是，相同负载电流下 N 沟道 FET 尺寸最多时可比 P 沟道 FET 小 50%。