

## 简介

这篇报告告诉你如何理解LDO的一些术语和定义, 如稳压块的压降, 静态电流, 待机电流, 效率, 瞬态响应, 线性/负载调整率, 电源纹波抑制比, 输出噪声电压, 精度, 功耗等。而且在介绍每一个概念时都给出了例子加以说明。

## 1 压降

压降被定义为输入电压与输出电压之间的差, 当输入电压下降到一定程度时输出电压将不再维持在一个恒定的电压。该点发生在输入电压不断接近输出电压时。

图1是一个典型的LDO电路, 在非调整区域PMOS可以看作一个电阻, 电压降下量可以表示为

$$V_{\text{dropout}} = I_o \cdot R_{\text{on}}$$

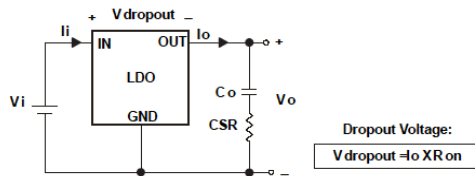


Figure 1. Typical Application Circuit of LDO Regulator

举个例子, 下图是TPS76733的输入输出特性, 输出1A的时候它的压降是350mV, 从输入电压是3.65V的时候输出电压就开始下降从2V到3.65V是该LDO的非调整区域。输入电压如果低于2V将不会有输出, 也就是说LDO不动作。比较低的电压降有利于提高LDO的效率。

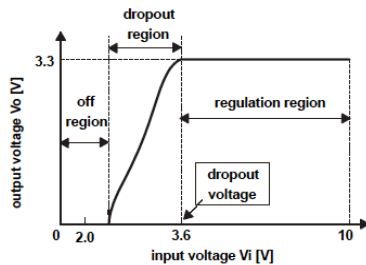


Figure 2. Dropout Region of TPS76733 (3.3 V LDO)

## 2 静态电流

静态电流, 也被叫做流向地的电流, 定义为输出电流与输入电流的差。图3定义了静态电流 $I_q = I_i - I_o$ 。减小静态电流有助于提高LDO的效率。

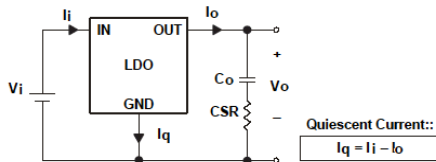


Figure 3. Quiescent Current of LDO Regulator

静态电流由调整管的偏置电流(比如说参考电压消耗电流, 采样电阻消耗电流, 误差放大器消耗电流)和驱动调整管基极的电流组成它的大小主要由调整管, LDO的结构, 和环境温度决定。

对于双级型晶体管, 静态电流随着负载电流成比例的增加, 因为双级型晶体管是电流驱动器件。另外在非调整区域, 由于发射极和基极寄生电流路径的影响静态电流也会增加, 该寄生电流路径是由于基极电压比输出电压低所引起的。

对于MOS管, 静态电流几乎不随负载的变化而变化, 几乎是一个恒定值, 因为MOS管是电压驱动器件。对采用MOS管的LDO来说对静态电流有贡献的只有参考电压的消耗, 采样电阻消耗电流, 误差放大器消耗电流。在应用中如果对静态电流的消耗比较苛刻的话, 最好是采用MOS管作为调整管的LDO

### 3 待机电流

待机电流是指带有使能信号的LDO,当该信号关闭的时候LDO消耗的电流。参考电压和误差放大器同样也处于不供电的状态,在待机模式的时候,请参考图4

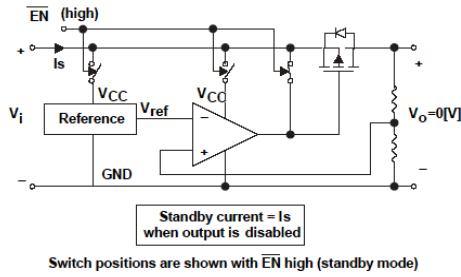


Figure 4. Standby Current of LDO Regulator

### 4 效率

LDO的效率与输入输出电压,静态电流有关,计算公式如下

$$\text{效率} = \frac{V_o \cdot I_o}{(I_o + I_q) \cdot V_{in}} \times 100\%$$

为了尽可能提高效率,必须使压降和静态电流尽可能小。另外输入和输出电压之间的差也应该尽可能小,因为LDO的消耗 $= (V_i - V_o) \cdot I_o$ 如果不考虑负载的话,输入输出电压的差是决定效率的一个至关重要的参数。

#### 例子

- 1、在下面的条件下3.3V的LDO TPS76933最低的效率是多少?输入电压范围3.6~4.5V,输出电流范围是80mA~100mA最大的静态电流是17uA,最低的效率是多少?

$$\text{Efficiency} = \frac{100 \text{ mA} \cdot 3.3 \text{ V}}{(100 \text{ mA} + 17 \text{ } \mu\text{A}) \cdot 4.5 \text{ V}} \times 100 = 73.3 \%$$

- 2、如果输入电压范围是3.6~4V在上面的同样条件下,最低的效率又是多少?

$$\text{Efficiency} = \frac{100 \text{ mA} \cdot 3.3 \text{ V}}{(100 \text{ mA} + 17 \text{ } \mu\text{A}) \cdot 4 \text{ V}} \times 100 = 82.5 \%$$

### 5 瞬态响应

瞬态响应被定义为在输出阶跃电流条件下,输出电压的最大允许变化量

瞬态响应通常与输出电容大小,其等效ESR,旁路电容,最大允许负载电流大小有关

瞬态电压的变化量可以定义为:

$$\Delta V_{tr, \max} = \frac{I_{o, \max}}{C_o + C_b} \Delta t_1 + \Delta V_{ESR}$$

$\Delta t_1$ 与LDO闭环带宽有关,  $\Delta V_{ESR}$ 是由于输出电容的ESR导致的变化量的大小,实际应用决定了这个值应该多小。

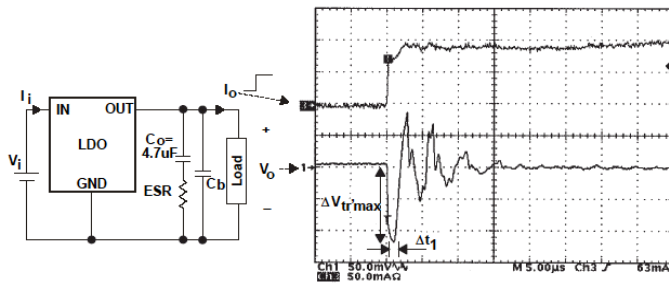


Figure 5. Transient Response of 1.2-V, 100 mA LDO Regulator

图5是一个1.2VLDO的瞬态响应过程，输出电容的大小为4.7uF，瞬间负载吸收将近90mA的电流，电压最大的下降量为120mV，如图所示。随后在1us的时间里LDO控制环路对负载电流的变化做出相应( $\Delta t_1=1\mu s$ )，LDO的带宽决定了 $\Delta t_1$ 大小，最后17us之内输出电压达到稳定状态。

为了获得更好的瞬态响应，LDO需要更宽的带宽，更大的输出容量，低ESR电容(当然要满足CSR要求)

## 6 线性调整率

线性调整率是一个反映输入电压变化的时候对输出电压的影响的一个量，被定义为

$$\text{Line regulation} = \frac{\Delta V_o}{\Delta V_i}$$

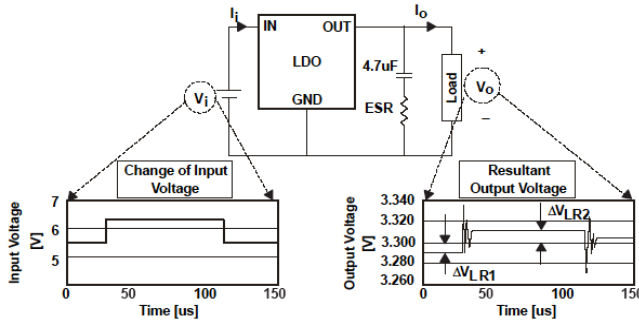


Figure 6. Line Transient Response of TPS76933

图6是TPS76933输入电压瞬态响应结果，左边是输入电压，右边是输出电压，由于输入电压的变动，输出电压有轻微的变化，图7是输出电压对输入电压的图示，虚线是由于输入的变化引起输出的变化图示。增加LDO的开环增益有助于提高线性调整率(该段为概略翻译)

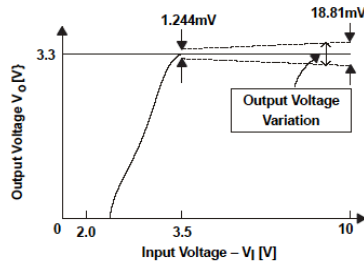


Figure 7. TPS76933 Output Voltage With Respect to the Input Voltages

## 7 负载调整率

负载调整率是衡量LDO在负载电流变动的情况下，输出电压保持恒定的一种能力。被定义为

$$\text{Load regulation; } \frac{\Delta V_o}{\Delta I_o}$$

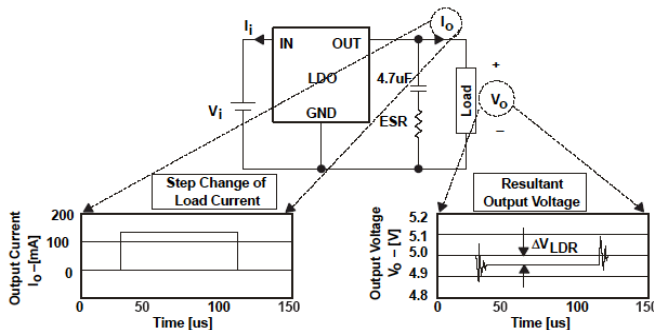


Figure 8. Load Transient Response of TPS76350

输出电压最大的变动情况是负载电流从0变到它允许的最大值或者最恶劣值。如图8所示。负载调整率取决于 $\Delta V_{LDR}$ 。因为负载调整率同线性调整率一样是一个稳定的参数。图9是TPS76350 5VLDO的输出电压对输出电流的曲线。提高开环增益有助于改善负载调整率。

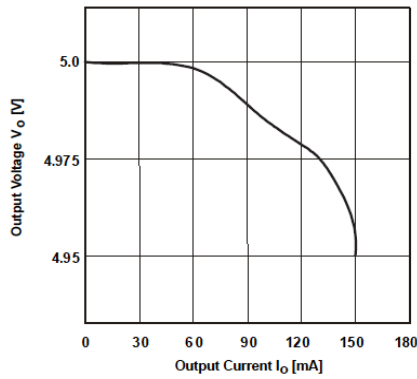


Figure 9. TPS76350 LDO Regulator Output Voltage With Respect to Output Currents

### 8 纹波抑制比

电源噪声抑制比也被叫做纹波抑制比。是衡量LDO对输入电压电源变动抑制的一种能力，与线性调整率不同的一点是，纹波抑制比需要考虑很宽的频率范围。

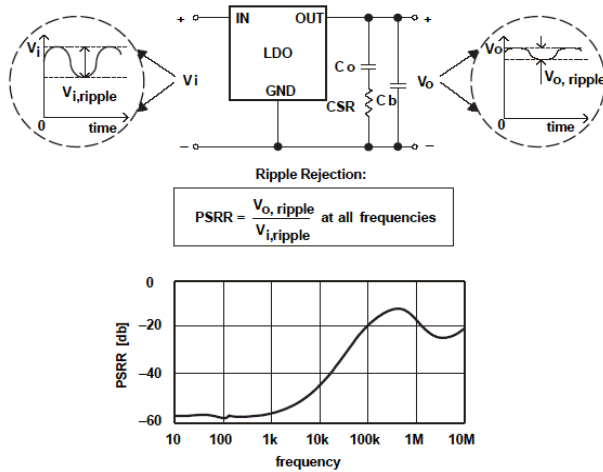


Figure 10. Power Supply Rejection

纹波抑制比的定义：

$$PSRR = \frac{V_{o,ripple}}{V_{i,ripple}} \text{ at all frequencies (所有频点)}$$

举个例子，频带为100kHz到1MHz范围内的纹波抑制比对于DC/DC电源给线性电源供电的结构来说非常重要，因为DC/DC电源纹波频率正好在这个范围之内。图10所示的100kHz到1MHz范围内LDO的纹波抑制比就不怎么好。

控制环路往往是决定纹波抑制比的主要因素，大的输出电容，低ESR，追加旁路电容能够改善纹波抑制比。当然前提条件是能够满足CSR的要求。

### 9 输出噪声电压

输出噪声电压是指在一定的频率范围内噪声电压RMS值(通常是10Hz到100kHz)。在负载一定的条件，输入电压没有噪声，考察输出电压的噪声。该噪声只有LDO所产生。

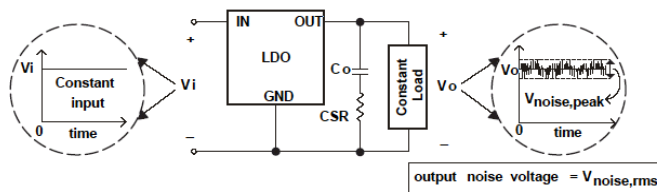


Figure 11. Output Noise Voltage

大多数的噪音是由LDO内部参考电压产生的，正常的噪音电压范围为100到500uV。TI-TPS764\*\*系列LDO提供了一个端子外接一个旁路电容以减少输出噪音。该旁路电容与内部电阻组成低通滤波器减少输出噪音。使用0.01uF的旁路电容和4.7uF的输出电容TI-TPS764\*\*系列LDO就能将输出噪音限制在50uV以下。

### 10 LDO的不稳定性

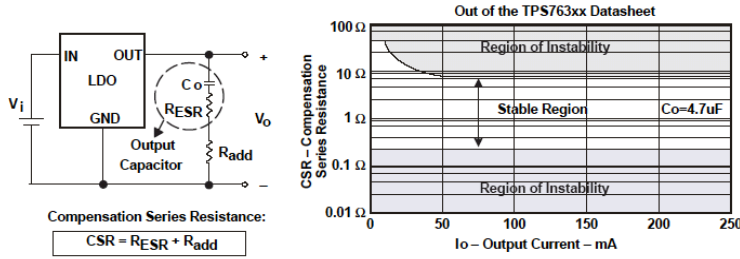


Figure 12. Stable Range of CSR

LDO厂商通常会提供LDO的CSR对输出电流的特性曲线。因为CSR的大小影响LDO的稳定性。CSR的大小等于输出电容ESR的大小与追加电阻大小之和。

$$CSR = R_{ESR} + R_{add}$$

如果输出电容ESR太小的话，可以串一个电阻。图12是CSR与输出电流特性曲线，还有一个名字“死亡通道”该图可以看出CSR值必须在0.2Ω到9Ω之间，这样LDO才够稳定。固体钽电容，铝电容，陶瓷电容都可以做为输出电容使用只要满足CSR要求。

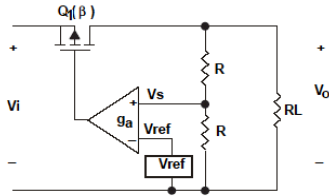


Figure 13. LDO Regulator

### 11 精度

考虑到LDO线性调整率，负载调整率，参考电压漂移，误差放大器电压漂移，外部取样电阻的精度，温度系数等综合参数的总体影响，我们有了精度这个概念。

$$Accuracy \approx \frac{|\Delta V_{LR}| + |\Delta V_{LDR}| + \sqrt{\Delta V_{o,ref}^2 + \Delta V_{o,a}^2 + \Delta V_{o,r}^2 + \Delta V_{TC}^2}}{V_o} \times 100 \quad (9)$$

对LDO输出电压变化影响最大的是温度。因为参考电压和误差放大器对温度的变化比较敏感。其次是电阻的精度。线性调整率，负载调整率，增益误差对精度的影响只有1%到3%

#### 例子

在下面的条件下，图13LDO的精度是多少？  
 温度范围：0~125℃  
 温度系数：100ppm/℃  
 采样电阻的精度：0.25%  
 负载调整率和线性调整率分为±5mV和±10mV  
 参考电压的精度为1%

输出电压计算公式：

$$V_o = \frac{R + R}{R} V_{ref} = 2V_{ref}$$

$$\Delta V_{TC} = \text{Temperature Coefficient} \cdot (T_{max} - T_{min}) \cdot V_o$$

$$= (100\text{ppm}/^\circ\text{C})(125^\circ\text{C})(3.3\text{ V}) = 41.2\text{ mV}$$

$$\Delta V_{o,r} = (0.25\% \text{ of } V_o + 0.25\% \text{ of } V_o) V_{ref}$$

$$= (0.005)(3.3) \left(\frac{3.3}{2}\right) = 27\text{ mV}$$

$$\Delta V_{o,ref} = \frac{2R}{R} V_d = 2 \left(\frac{3.3}{2}\right) 0.01 = 33\text{mV}, \text{ where } V_d = V_{ref} \times 0.01 = \left(\frac{3.3}{2}\right) \times 0.01$$

所以LDO总的精度为：

$$Accuracy \approx \frac{10\text{mV} + 5\text{mV} + \sqrt{(33\text{mV})^2 + (27\text{mV})^2 + (41.2\text{mV})^2}}{3.3\text{ V}} \times 100 \approx 2.25\%$$

## 12 功耗和节点温度

大多数的LDO为了确保能够正常动作都会指定它的最大节点温度。最大节点温度范围之内，LDO不会损坏。为了保证节点温度不至于过高，LDO的功耗必须限定在一定的范围之内。有必要计算最大允许功耗 $P_{Dmax}$ 和实际功耗 $P_D$ 。很显然 $P_D$ 必须小于等于 $P_{Dmax}$ 。

$$P_{D(max)} = \frac{T_{Jmax} - T_A}{R_{\theta JA}} \quad (10)$$

这里， $T_{Jmax}$ 为节点最高温度  
 $T_A$ 为环境温度  
 $R_{\theta JA}$ 为节点温度到环境温度的热阻

LDO功耗计算公式：

$$P_D = (V_i - V_o) \times I_o \quad (11)$$

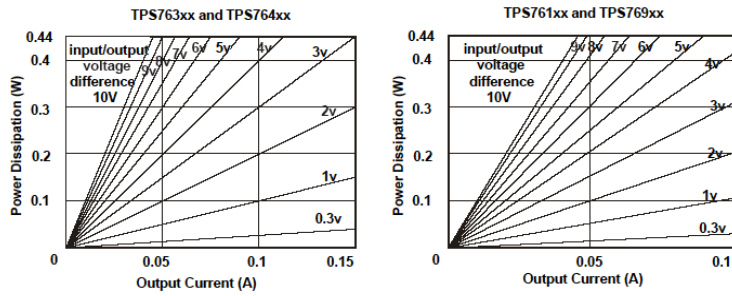


Figure 14. Power Dissipation vs Output Current

图14是TI几个LDO的功耗在不同的输入输出压差的情况下与输出电流关系曲线。  
最大功耗使用公式10计算，实际功耗用公式11计算。最大功耗不能超过图示的安全使用领域。如果节点温度超过165°C LDO将会关闭输出，温度降到140°C之后输出又会恢复，LDO也能够正常动作。

## 13 总结

这篇应用讲述了LDO的一些基本概念和参数定义。

## 射频和天线设计培训课程推荐

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;我们于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

易迪拓培训课程列表: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/129.html>



### 射频工程师养成培训课程套装

该套装精选了射频专业基础培训课程、射频仿真设计培训课程和射频电路测量培训课程三个类别共 30 门视频培训课程和 3 本图书教材;旨在引领学员全面学习一个射频工程师需要熟悉、理解和掌握的专业知识和研发设计能力。通过套装的学习,能够让学员完全达到和胜任一个合格的射频工程师的要求...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/110.html>

### ADS 学习培训课程套装

该套装是迄今国内最全面、最权威的 ADS 培训教程,共包含 10 门 ADS 学习培训课程。课程是由具有多年 ADS 使用经验的微波射频与通信系统设计领域资深专家讲解,并多结合设计实例,由浅入深、详细而又全面地讲解了 ADS 在微波射频电路设计、通信系统设计和电磁仿真设计方面的内容。能让您在最短的时间内学会使用 ADS,迅速提升个人技术能力,把 ADS 真正应用到实际研发工作中去,成为 ADS 设计专家...



课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/ads/13.html>



### HFSS 学习培训课程套装

该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程,是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装,可以帮助您从零开始,全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装,更可超值赠送 3 个月免费学习答疑,随时解答您学习过程中遇到的棘手问题,让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>



## CST 学习培训课程套装

该培训套装由易迪拓培训联合微波 EDA 网共同推出,是最全面、系统、专业的 CST 微波工作室培训课程套装,所有课程都由经验丰富的专家授课,视频教学,可以帮助您从零开始,全面系统地学习 CST 微波工作的各项功能及其在微波射频、天线设计等领域的设计应用。且购买该套装,还可超值赠送 3 个月免费学习答疑...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/24.html>



## HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书,课程从基础讲起,内容由浅入深,理论介绍和实际操作讲解相结合,全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程,可以帮助您快速学习掌握如何使用 HFSS 设计天线,让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

## 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程,培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合,全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作,同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习,可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



### 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年,10 多年丰富的行业经验,
- ※ 一直致力并专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 经验丰富的一线资深工程师讲授,结合实际工程案例,直观、实用、易学

### 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>