

***Application Note 1643 Optimizing Feedforward Compensation In Linear  
Regulators***



Literature Number: ZHCA303

# 在线性稳压器中优化前馈补偿

美国国家半导体公司  
应用注释 1643  
Chester Simpson  
2007年5月



## 引言

所有的线性稳压器都会采用一个反馈环路，按需要控制传到负载的电流，以维持输出电压在正确的稳压值上。对反馈环路进行补偿，可以为环路增益过单位增益（零dB）交点频率时提供合适的相位裕度。

在输出电压可调且由外置电阻分压器设定的情况下，采用称之为前馈补偿的技术可产生超前相位，从而部分抵消由内部极点造成的相位滞后影响，最终增加相位裕度。应当注意，并非所有线性稳压器都需要前馈补偿，但是本应用注释针对那些会受益于该技术的应用作了解释（大多数应用会受益）。

## 线性稳压器环路基础

所有的线性稳压器都采用相似的控制拓扑（参见图1）。

采用直通晶体管器件将电流送到负载。误差放大器根据R1和R2结点的输出反馈电压来控制该电流。环路的作用总是能强迫误差放大器输入端的电压等于固定的参考电压。控制环路以这种方式维持输出端为标称电压值，由下式给出：

$$V_{OUT} = V_{REF} (1 + R1/R2)$$

## 环路补偿

控制环路通常是在误差放大器处作本地补偿，在某些情况下，也可利用输出电容的ESR来增加一些正向超前相位。在大多数“可调节输出”的线性稳压器中（其中电阻R1和R2

都在芯片外置），电容可跨接在R1上以增加前馈补偿，这也增加超前相位。

R1、R2和C<sub>FF</sub>形成一对零极点，其中零点位置的频率总是低于极点频率。零极点对的频率可由下式给出：

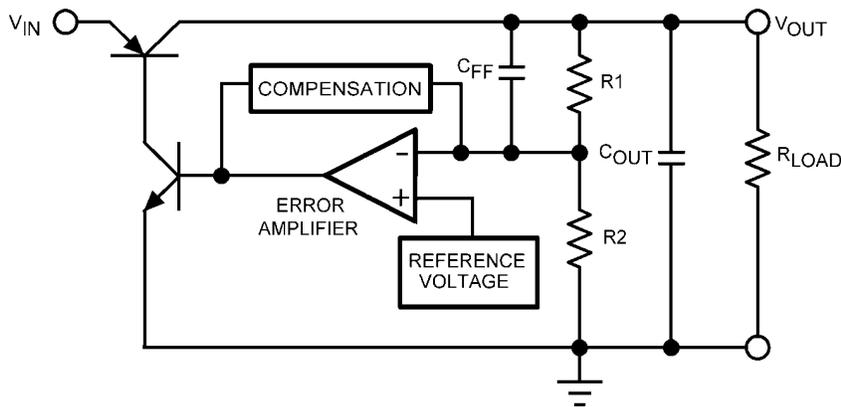
$$F_{ZERO} = 1 / 2 \times \pi \times C_{FF} \times R1$$

$$F_{POLE} = 1 / 2 \times \pi \times C_{FF} \times (R1 // R2)$$

应注意到，只有零点才会增加有益的超前相位，极点只会增加相位延迟，从而会抵消相位的提前。为了提高相位裕度，零极点对的最佳位置在单位增益频率处，在该频率处零点可增加最大的超前相位，同时极点得到最小的相位滞后效应。获得的净正向超前相位是在单位增益点处的两个值之差。

由此可得出结论，当零极点互相远离时（当R1 >> R2时发生），可获得最大益处。当R1变得越来越小时，极点频率朝更接近零点频率的方向移动，最终当R1 = 0时完全抵消极点的影响。

因此，R1/R2的比率越高，极点和零点分隔的距离越远，所获得的潜在超前相位就越多。这意味着，将输出电压对参考电压的比值设得更高时（正是R1/R2的比率才比较重要，而实际的输出电压值并不重要），前馈补偿会变得更加有效。图2说明了对于选择的R1/R2比率所能获得的最大正向超前相位。



30022801

图1. 基本的线性稳压器

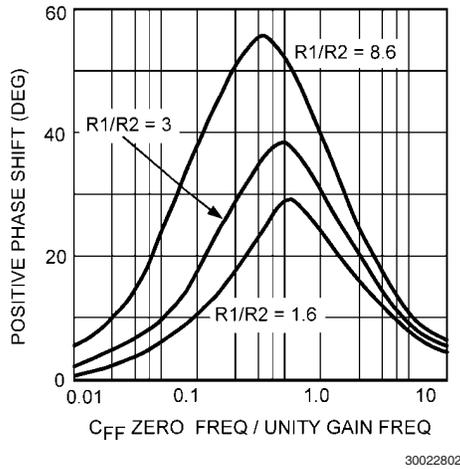


图2. 不同R1/R2比率的正向超前相位

值得重视的是，随着R1/R2的比值降低，不仅可能的最大超前相位会减少，而且能获得的有效范围也会变得更窄。这点指出了—个不可避免的事实：前馈补偿在较高输出电压处工作表现较佳，在输出电压较低时，效果受到限制。然而，当增加的相位裕度低至10~15度时，仍能改善稳定性和建立时间。

与单位增益频率相关的零点频率的定位可将 $C_{FF}$ 提供的超前相位最大化。如图所示，当零点位于约0.3至0.6倍的单位增益频率中央时，可获由 $C_{FF}$ 形成的典型峰值效应。

大致上正确的是，对于多数线性稳压器，将前馈结构的零点频率设在约30kHz至100kHz之间，是个良好的开端。

但是，稳压器带宽的变化取决于工艺类型和设计拓扑的类型。而且，许多线性稳压器的环路带宽也会随负载电流而变化。由于这些原因，所以只有针对具体应用，采取仿真测试板不断精细地调试 $C_{FF}$ 值，使其在单位增益频率处产生最大的超前相位，才可得到最佳的性能。

## 优化前馈补偿

增加前馈补偿的目的是为了增加相位裕度，将其定义为单位增益相移和-180度两者之差，在-180度处环路开始变得不稳定。这意味着相位裕量为20度的设计在单位增益频率处具有-160度的总相移。了解相位裕量的一种常见方法是直接测量环路增益/相位。实现该方法的一种技术就是断开环路，并通过信号注入来读取环路增益/相位，如图3所示。

在所示的电路中，反馈环路在R1的顶部断开。插入一个10欧姆的电阻，通过频谱分析仪向环路强行输入一个交流信号。在电阻的顶部和底部测量信号幅度，幅值的比率限确定了在该频率处的环路增益。也可用频谱分析仪测量两个信号间的相移，进而可计算相位裕度。

经常会用到该方法，但是它也存在一些缺点：建立过程耗时，通常难以得到可重复的测试结果，因为许多变量都会影响测试数据（如仪器的校准，探针的频率特性和隔离变压器等）。被称之为突变负载测试的间接测试法更加简单，并可优化补偿提供非常可靠的数据。

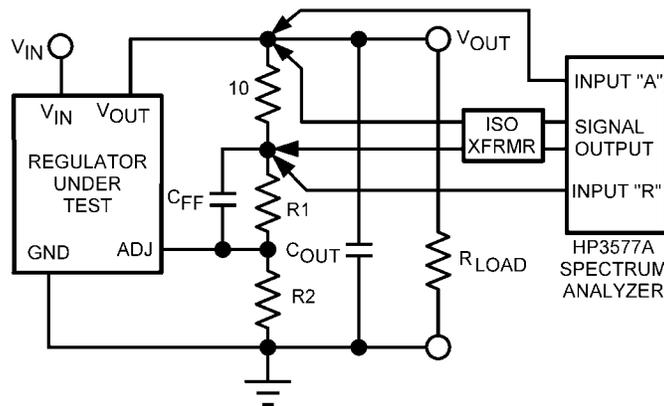


图3. 环路增益/相位测量系统

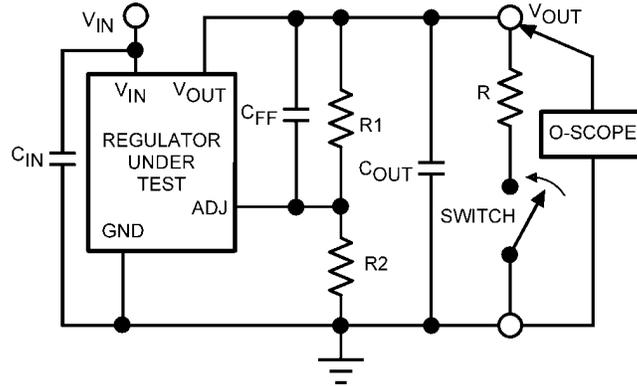
## 突变负载测试

突变负载测试是一种测试方法，当负载电流从一种水平突然变化到另一种水平时，需要控制环路校正这种变化。在突变负载期间观察输出电压的表现特性，可以得到非常精确的相位裕度指示，也可用于补偿的调整。

通常，负载突变之后在输出端看到的振铃数量会随着相位裕度的减少而增加。为实现输出端上最少的振铃和最短的

“建立时间”而优化补偿，可得到最佳的相位裕度。

因为大多数稳压器在较高负载电流时带宽也随之提高，最常用的突变负载测试方法是尽可能迅速地将负载电流从最小值改变为最大值（针对应用而言）。图4为一种实现方法。



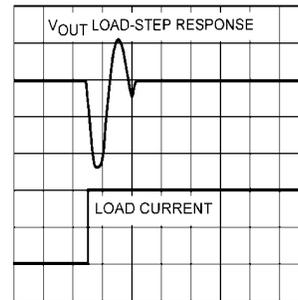
30022804

图4. 突变负载测试电路

测试的重要事项：

1. 根据具体应用选择“R”以获得最大负载电流。
2.  $C_{IN}$ 必须为低ESR的高品质电容，可防止 $V_{IN}$ 源电压的振铃现象，振铃在突变负载测试期间会反射到输出端，并提供错误的的数据。采用钽电容或者Osccon电解电容是个好的选择， $C_{IN}$ 容值至少是 $47\mu F$ 。为得到最佳结果，采用容值大于 $1\mu F$ 的高品质陶瓷电容与之并联，可确保非常低的源阻抗以供测试。
3. 可使用任何机械式接触器开关，能产生没有反弹的快速连接。采用夹子引脚端。
4. 可以将N-FET用作开关，但是一般情况下无法给出与采用机械接触器一样迅速的电流上升时间。
5. 应设定示波器在单事件触发方式，以便在输出电压波形的下降沿进行扫描。在线性稳压器中，该瞬态的典型时延范围从几个微秒到几十个微秒。在大多数情况下它不会超过50微秒。

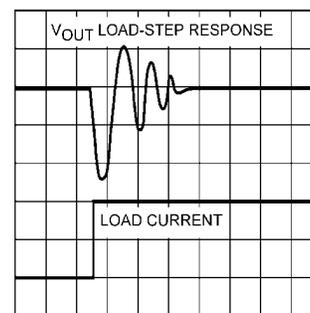
当负载电流突然增加时（此时开关闭合）输出电压会下降，然后环路校正并完全开通功率器件以强迫输出电压返升至标称值。随着输出电压到达标称值，它将会略微过冲，然后恢复平稳状态。具有优化补偿的控制环路将显示出类似于图5的瞬态响应。



30022805

图5. 优化的输出电压瞬态响应

当相位裕度降低后，输出电压将出现振铃的增加和延长的建立时间，如图6所示。



30022806

图6. 次优化的输出电压瞬态响应

优化 $C_{FF}$ 值时应记住其对相位裕度的影响是有限的：不是每个稳压器都能有最佳的瞬态响应。在大多数情况下，输出瞬态在少于3个或者4个振荡脉冲后消失是可以接受的。 $C_{FF}$ 的

最佳值可以将振铃量降到最低，并可为 $V_{OUT}$ 提供最短的建立时间。

# 注释

## 注释

对于上述任何电路的使用，美国国家半导体公司不承担任何责任且不默示任何电路专利许可。美国国家半导体公司保留随时更改上述电路和规格的权利，恕不另行通知。  
 想了解最新的产品信息，请访问我们的网址：[www.national.com](http://www.national.com)。

### 生命支持策略

未经美国国家半导体公司的总裁和首席律师的明确书面审批，不得将美国国家半导体公司的产品作为生命支持设备或系统中的关键部件使用。特此说明：

1. 生命支持设备/系统指：(a) 打算通过外科手术移植到体内的生命支持设备或系统；(b) 支持或维持生命，依照使用说明书正确使用时，有理由认为其失效会造成用户严重伤害。
2. 关键部件是在生命支持设备或系统中，有理由认为其失效会造成生命支持设备/系统失效，或影响生命支持设备/系统的安全性或效力的任何部件。

### 禁用物质合规

美国国家半导体公司制造的产品和使用的包装材料符合《消费产品管理规范（CSP-9-111C2）》以及《相关禁用物质和材料规范（CSP-9-111S2）》的条款，不包含CSP-9-111S2限定的任何“禁用物质”。  
 无铅产品符合RoHS指令。



**National Semiconductor**  
**Americas Customer**  
**Support Center**  
 Email: [new.feedback@nsc.com](mailto:new.feedback@nsc.com)  
 Tel: 1-800-272-9959

**National Semiconductor**  
**Europe Customer Support Center**  
 Fax: +49 (0) 180-530 85 86  
 Email: [europe.support@nsc.com](mailto:europe.support@nsc.com)  
 Deutsch Tel: +49 (0) 69 9508 6208  
 English Tel: +44 (0) 870 24 0 2171  
 Français Tel: +33 (0) 1 41 91 8790

**National Semiconductor**  
**Asia Pacific Customer**  
**Support Center**  
 Email: [ap.support@nsc.com](mailto:ap.support@nsc.com)

**National Semiconductor**  
**Japan Customer Support Center**  
 Fax: 81-3-5639-7507  
 Email: [jpn.feedback@nsc.com](mailto:jpn.feedback@nsc.com)  
 Tel: 81-3-5639-7560

## 重要声明

德州仪器(TI) 及其下属子公司有权在不事先通知的情况下, 随时对所提供的产品和服务进行更正、修改、增强、改进或其它更改, 并有权随时中止提供任何产品和服务。客户在下订单前应获取最新的相关信息, 并验证这些信息是否完整且是最新的。所有产品的销售都遵循在订单确认时所提供的TI 销售条款与条件。

TI 保证其所销售的硬件产品的性能符合TI 标准保修的适用规范。仅在TI 保证的范围内, 且TI 认为有必要时才会使用测试或其它质量控制技术。除非政府做出了硬性规定, 否则没有必要对每种产品的所有参数进行测试。

TI 对应用帮助或客户产品设计不承担任何义务。客户应对其使用TI 组件的产品和应用自行负责。为尽量减小与客户产品和应用相关的风险, 客户应提供充分的设计与操作安全措施。

TI 不对任何TI 专利权、版权、屏蔽作品权或其它与使用了TI 产品或服务的组合设备、机器、流程相关的TI 知识产权中授予的直接或隐含权限作出任何保证或解释。TI 所发布的与第三方产品或服务有关的信息, 不能构成从TI 获得使用这些产品或服务的许可、授权、或认可。使用此类信息可能需要获得第三方的专利权或其它知识产权方面的许可, 或是TI 的专利权或其它知识产权方面的许可。

对于TI 的产品手册或数据表, 仅在没有对内容进行任何篡改且带有相关授权、条件、限制和声明的情况下才允许进行复制。在复制信息的过程中对内容的篡改属于非法的、欺诈性商业行为。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任。

在转售TI 产品或服务时, 如果存在对产品或服务参数的虚假陈述, 则会失去相关TI 产品或服务的明示或暗示授权, 且这是非法的、欺诈性商业行为。TI 对此类虚假陈述不承担任何责任。

TI 产品未获得用于关键的安全应用中的授权, 例如生命支持应用(在该类应用中一旦TI 产品故障将预计造成重大的人员伤亡), 除非各方官员已经达成了专门管控此类使用的协议。购买者的购买行为即表示, 他们具备有关其应用安全以及规章衍生所需的所有专业技术和知识, 并且认可和同意, 尽管任何应用相关信息或支持仍可能由TI 提供, 但他们将独力负责满足在关键安全应用中使用其产品及TI 产品所需的所有法律、法规和安全相关要求。此外, 购买者必须全额赔偿因在此类关键安全应用中使用TI 产品而对TI 及其代表造成的损失。

TI 产品并非设计或专门用于军事/航空应用, 以及环境方面的产品, 除非TI 特别注明该产品属于“军用”或“增强型塑料”产品。只有TI 指定的军用产品才满足军用规格。购买者认可并同意, 对TI 未指定军用的产品进行军事方面的应用, 风险由购买者单独承担, 并且独力负责在此类相关使用中满足所有法律和法规要求。

TI 产品并非设计或专门用于汽车应用以及环境方面的产品, 除非TI 特别注明该产品符合ISO/TS 16949 要求。购买者认可并同意, 如果他们在汽车应用中使用任何未被指定的产品, TI 对未能满足应用所需要求不承担任何责任。

可访问以下URL 地址以获取有关其它TI 产品和应用解决方案的信息:

	产品		应用
数字音频	<a href="http://www.ti.com.cn/audio">www.ti.com.cn/audio</a>	通信与电信	<a href="http://www.ti.com.cn/telecom">www.ti.com.cn/telecom</a>
放大器和线性器件	<a href="http://www.ti.com.cn/amplifiers">www.ti.com.cn/amplifiers</a>	计算机及周边	<a href="http://www.ti.com.cn/computer">www.ti.com.cn/computer</a>
数据转换器	<a href="http://www.ti.com.cn/dataconverters">www.ti.com.cn/dataconverters</a>	消费电子	<a href="http://www.ti.com/consumer-apps">www.ti.com/consumer-apps</a>
DLP® 产品	<a href="http://www.dlp.com">www.dlp.com</a>	能源	<a href="http://www.ti.com/energy">www.ti.com/energy</a>
DSP - 数字信号处理器	<a href="http://www.ti.com.cn/dsp">www.ti.com.cn/dsp</a>	工业应用	<a href="http://www.ti.com.cn/industrial">www.ti.com.cn/industrial</a>
时钟和计时器	<a href="http://www.ti.com.cn/clockandtimers">www.ti.com.cn/clockandtimers</a>	医疗电子	<a href="http://www.ti.com.cn/medical">www.ti.com.cn/medical</a>
接口	<a href="http://www.ti.com.cn/interface">www.ti.com.cn/interface</a>	安防应用	<a href="http://www.ti.com.cn/security">www.ti.com.cn/security</a>
逻辑	<a href="http://www.ti.com.cn/logic">www.ti.com.cn/logic</a>	汽车电子	<a href="http://www.ti.com.cn/automotive">www.ti.com.cn/automotive</a>
电源管理	<a href="http://www.ti.com.cn/power">www.ti.com.cn/power</a>	视频和影像	<a href="http://www.ti.com.cn/video">www.ti.com.cn/video</a>
微控制器 (MCU)	<a href="http://www.ti.com.cn/microcontrollers">www.ti.com.cn/microcontrollers</a>		
RFID 系统	<a href="http://www.ti.com.cn/rfidsys">www.ti.com.cn/rfidsys</a>		
OMAP 机动性处理器	<a href="http://www.ti.com/omap">www.ti.com/omap</a>		
无线连通性	<a href="http://www.ti.com.cn/wirelessconnectivity">www.ti.com.cn/wirelessconnectivity</a>		
	德州仪器在线技术支持社区		<a href="http://www.deyisupport.com">www.deyisupport.com</a>

邮寄地址: 上海市浦东新区世纪大道 1568 号, 中建大厦 32 楼 邮政编码: 200122  
Copyright © 2011 德州仪器 半导体技术 (上海) 有限公司