

***Application Note 1733 Load Transient Testing Simplified***



Literature Number: ZHCA335

# 负载瞬态测试的简化

美国国家半导体公司  
应用注释1733  
Chester Simpson  
2007年11月7日



## 引言

负载瞬态测试是用于即时分析系统环路稳定性最简单的诊断手段：作为电压调节器对负载电流变化的响应，输出电压的直观表现与相位裕度直接相关。本文将示范如何进行简单的负载瞬态测试，以及如何根据测试的结果估计相位裕度。

## 电压调节

实际上所有电子器件都要求电源电压保持在特定的容差范围内，即使负载电流发生变化。而电压调节器提供了这样的固定电压（图1）。

通过电阻分压器感测输出电压，误差放大器调节电流源  $I_{REG}$  以将输出保持在标称电压上。

随着所需的负载电流从零至满载的变化，电压调节器必须能保持其输出电压恒定，即使负载电流的变化发生在相对较短的时间内：负载电流中的这种突然变化称之为负载瞬态。定义电压调节器在负载瞬态期间保持其输出电压恒定的能力为负载瞬态响应。

只要负载电流变化缓慢，很容易保持输出电压恒定。但是当负载电流“阶跃”变化足够快时，输出电压也会变化。

当负载电流产生变化时用输出电压改变的程度来定义负载瞬态性能。

理解负载瞬态的关键原理如下：

- 1) 将电压调节器用作压控电流源，驱动到负载的电流（从输出反馈的电压调节电流源）。调节器的电流源在零时间内不会被改变，所以可推断出，如果我们使负载电流足够快地变化，它将迫使输出电压也产生改变。其变化的程度取决于调节器的速度，输出电容的数量和类型，以及负载电流变化的  $di/dt$  速率。
- 2) 在调节器控制环路对负载变化进行调节的时间内，唯一提供前一个稳态负载电流值和新值之间差别的是输出电容。所以，控制负载瞬态期间输出电压的关键在于输出电容，这些电容的电气特性会明显影响瞬态响应。
- 3) 调节器控制环路的响应越快，在环路校正至新负载电流值之前输出电容电压的变化就越少。因此可知，较快的调节器可采用较小的输出电容（可以节省成本）来保持相同的  $V_{OUT}$  容差范围。

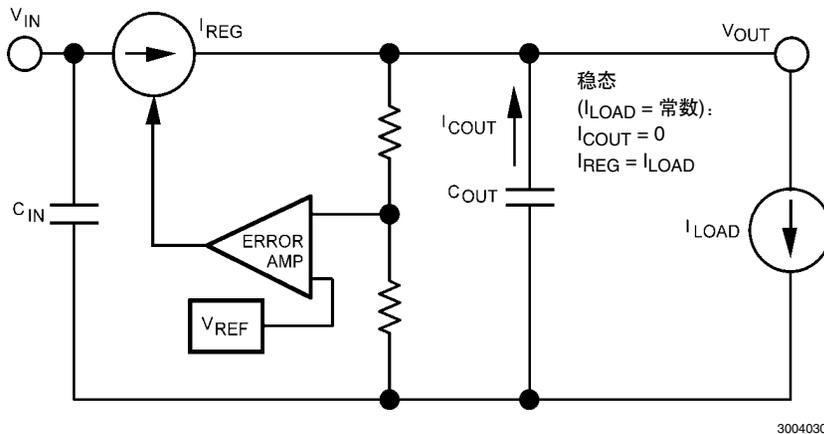


图1. 基本电压调节器的工作

## 负载瞬态的解析

为了观察负载瞬态如何工作，我们将分析一个实例，其中负载电流在基本上为零的时间内，从 $I_{L1}$ 变化到更高数值（ $I_{L2}$ ）（图2）。

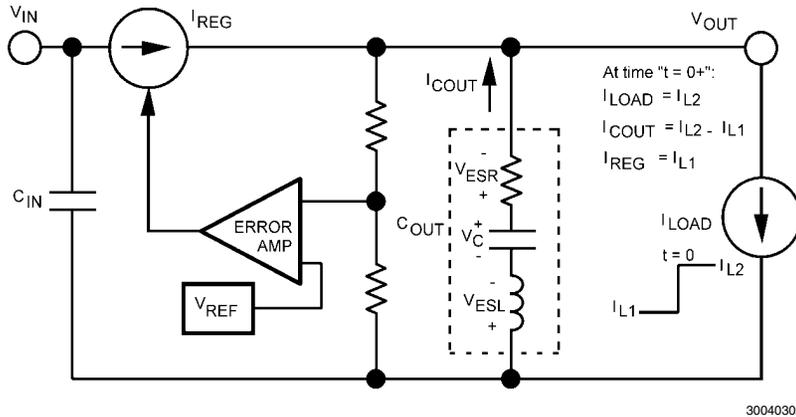


图2. 调节器响应负载电流的变化

调节器的电流源（ $I_{REG}$ ）不会立即变化，因此在“ $t = 0^+$ ”时（即负载增加至 $I_{L2}$ 的时刻）， $I_{REG} = I_{L1}$ 。通过简单的结点分析，可得知要求输出电容提供：

$$I_{COUT} = I_{L2} - I_{L1}$$

$C_{OUT}$ 将继续提供部分负载电流，直到控制环路调节 $I_{REG}$ 为新值 $I_{L2}$ ，使得电容上的电压随着放电而下降。 $C_{OUT}$ 上的电压由于电容的ESR（等价串联电阻）和ESL（等价串联电感）上的压降而降低。

## 输出电压瞬态响应

如图2所示，电容包含了寄生电阻（称之为“ESR”代表等价串联电阻），同时也包含了寄生电感（称之为“ESL”代表等价串联电感），它们都会影响瞬态响应。图3表示当负载电流非常迅速地增加时在线性稳压器的输出端上记录的实际电压波形（与图2所示的例子类似）：

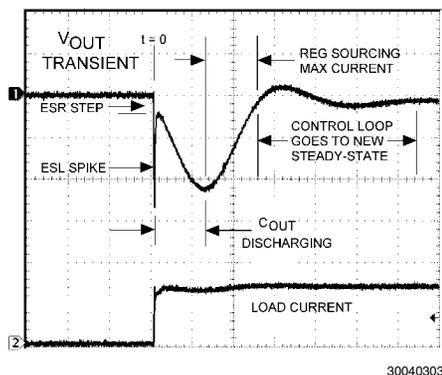


图3. 输出电压瞬态

可以看出ESL造成狭窄的尖峰电压，在极大程度上取决于负载电流的上升时间：负载变化得越快，输出电压波形上的ESL尖峰就会越大。尖峰仅存在于负载电流变化期间，因为电感仅响应变化的电流而产生电压：

$$V = L \times di/dt$$

当负载电流到达新值（ $I_{L2}$ ）时，ESL电压尖峰将结束。负载电流瞬态的上升时间越快，在输出电容以及连到负载的印刷板线迹上就会出现更多的临界电感。大数值陶瓷电容具有非常低的ESR和ESL值，通常放在有快速上升负载响应要求的器件的负载端口。如果将它们用在电压调节器的输出端还可改善瞬态响应。

无论 $C_{OUT}$ 正在输出（或者吸收）电流，输出电容的ESR会造成输出电压的变化。如波形中的“ESR阶跃”所示。在控制环路增加 $I_{REG}$ 之前的时间内，ESR上的压降和 $C_{OUT}$ 放电量都降低了输出电压。

最后，误差放大器开始增加 $I_{REG}$ 以响应 $V_{OUT}$ 的压降。应注意到， $I_{REG}$ 的值一般不会直接达到新值 $I_{L2}$ ，相反，误差放大器通常将电流源完全导通以驱动输出电压上升（通常达到电流限值）。于是，在大多数情况下，输出电压在标称值上有过冲，然后回落，最后锁定到新的平衡状态（在图3中可观察到这种建立过程）。 $V_{OUT}$ 建立的独特表现可精确地表示出相位裕度（在下一节中详细讲述）。

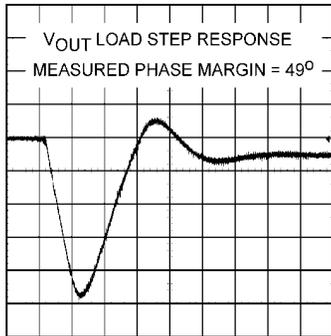
当控制环路到达新的稳定状态条件（其中调节器的电流源正提供 $I_{L2}$ ），输出电容不再为负载提供电流。有一点很重要，“ESR阶跃”是在负载瞬态期间稳压输出中的直流电压变化。ESR阶跃十分明显，意味着在必须满足容许的最大“电压容差窗口”来设计调节电压时，ESR亦是一个重要的

考虑因素。高性能铝和钽电解电容已专门制造出来以符合超低ESR应用的要求。

## 瞬态响应和相位裕度

当负载电流突然变化时，控制环路的工作点是“未定”的，并且会强制它达到一个新的工作点。在这个转换期间输出电压波形的表现精确地指示了在新工作点环路具有的相位裕度。

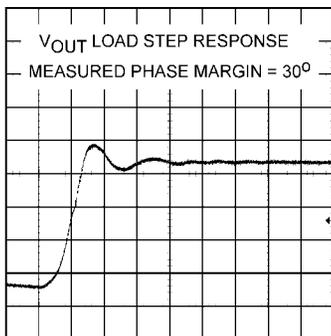
为了更好地说明这点，产生快速负载电流阶跃时电压调节器的输出波形如图4所示。采用网络分析仪测量了相位裕度，确定为 $49^\circ$ ：



30040304

图4. 相位裕度为 $49^\circ$ 时的输出电压瞬态响应

现象被称之为“临界阻尼”，意思是振荡仅在单个完全振铃中就消失殆尽。这是理想的性能，因为它提供了可能的最快建立时间（和非常好的稳定性）。在图5中，我们可看到如果将相位裕度减少至 $30^\circ$ 时瞬态响应的性能是如何劣化的：

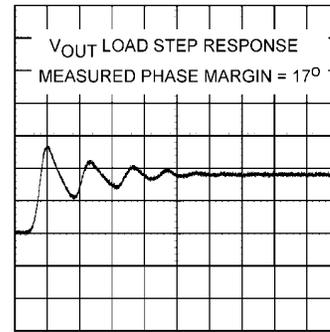


30040305

图5. 相位裕度为 $30^\circ$ 时的输出电压瞬态响应

现在，瞬态发生后建立特性表现出多一点的振铃（在负载变化后产生的较高直流电平是由这种特定器件略差的负载调节造成的，而与相位裕度或瞬态响应无关）。可发现即使相位裕度仅为 $30^\circ$ ，建立过程十分清楚，能被大多数应用所接受。

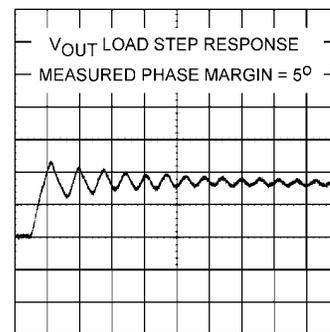
然而，如果相位裕度进一步减小到 $17^\circ$ ，我们可看到环路的建立过程开始显示出更多明显的振铃（图6）：



30040306

图6. 相位裕度为 $17^\circ$ 时的输出电压瞬态响应

可观察到振铃开始表现出正弦波振荡的形式，在相位降低至仅为 $5^\circ$ 时，这种情况更为明显（图7）：



30040307

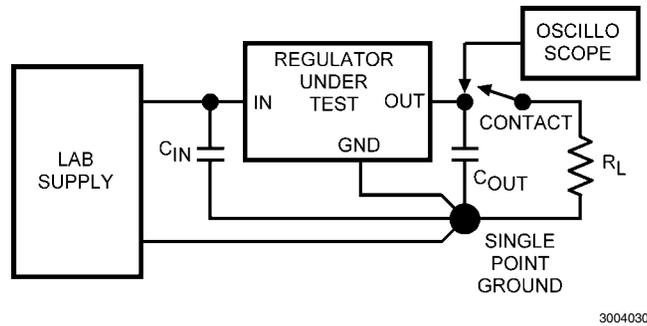
图7. 相位裕度为 $5^\circ$ 时的输出电压瞬态响应

在相位裕度仅为 $5^\circ$ 时，波形表现出几乎不能停止的清楚的正弦波形。这就告诉设计者相位裕度是如此之低，环路正处于持续振荡的边缘。随着相位裕度的减少，在输出电压波形中的逐渐变化可以说明，设计者如何仅通过负载瞬态测试来预测相位裕度。无需特别的仪器就可很容易地实现。在下节中将说明这是如何实现的。

## 手工测试负载瞬态

仅通过连接（或断开）到调节器输出端的负载电阻并观察 $V_{OUT}$ 中的变化就可实现“负载阶跃”（图8）。

手工测试方法为检查相位裕度和瞬态响应提供了一种简单快速的方法，但是其不能调节负载电流脉冲的上升时间。电流脉冲的 $di/dt$ 速率主要由与负载电阻串联的引线电感来确定。



30040308

图8. 用于手工检测负载瞬态响应的电路

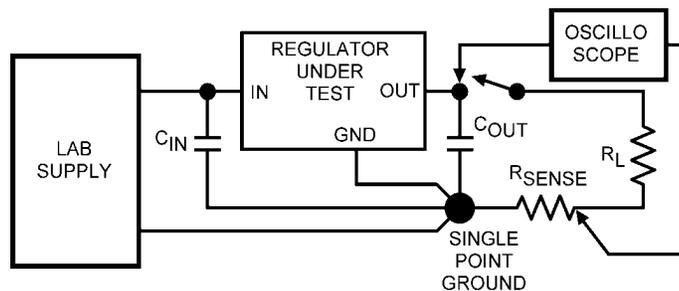
## 检测负载瞬态时获得精确数据的指南

1. 标注为“接触点”的开关可以是机械开关或两个夹线引脚的末端。也可将负载电阻焊接到印刷板的接地焊盘上并搭接到输出端以产生负载脉冲。
2. 必须将输出电容的负端用作所有连接的单点接地端。
3. 用来读取输出波形的示波器必须直接跨接在 $C_{OUT}$ 上。
4. 采用有扫描捕捉功能的存储示波器（TEKTRONIX TDS 3014或者类似的设备）。设置示波器在瞬变负向时触发，因为在输出端连接负载的瞬间将会下降。
5. 输入电容 $C_{IN}$ 必须足够大，以防止施加负载阶跃时输入源到待测调节器之间产生振铃。在输入端出现的任何高频振铃都会传导，并出现在输出波形上。为了防止发生这种情况， $C_{IN}$ 的选择非常重要：推荐 $C_{IN}$ 为约100  $\mu\text{F}$ 的陶瓷电容，并与至少为1000  $\mu\text{F}$ 的超低ESR电解电容相并联。这些电容的地端都必须直接连接到单点接地端。

6. 进行瞬态负载测试的负载电阻用金属氧化物或者金属薄膜电阻工作表现最佳，因为它们都是无感的。
7. 如果要在示波器上测量电流阶跃，建议采用电阻而不是一个电流探针。（图9）在 $R_{SENSE}$ 上观察到的电流脉冲上升沿将会激活示波器的触发端。

应该采用检测电阻，这是因为，即使很好的电流探针，它的带宽限制也使其不能够精确测量超出50A/ $\mu\text{s}$ 压摆率的电流波形上升沿。在测量中采用了50 m $\Omega$ 的金属薄膜电阻。确认将该电阻的接地端直接连接到输出电容的负端，在接地结点和电阻之间的电感会感应出振铃。

两个波形比较如图10所示，一个是0.1A-3A负载阶跃（在50 m $\Omega$ 电阻上测量）的实际电流，另一个是用Tektronix AM503电流探针测量的相同电流。测得负载电流的变化速率约为75A/ $\mu\text{s}$ （在大约40 ns内上升3A）。



30040309

图9. 采用感测电阻来测量负载电流

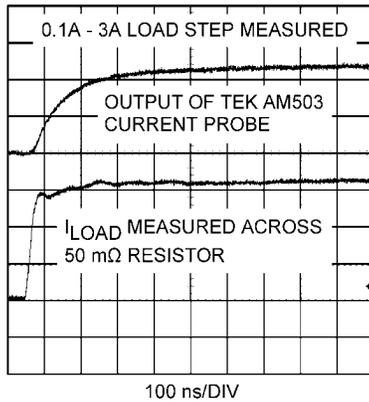


图10. 比较说明电流探针的带宽限制

如图所示，电流探针测量的波形说明，当测量极快的电流变化时，由于带宽限制会产生一个缓慢且平滑的边沿。

手工测量提供了评估环路稳定性的简单技术，但是这种方法的主要限制是电流阶跃的上升和下降时间不可调节。下一节将讲述如何建立具有可调节压摆率的电子负载。

## 电子负载瞬态检测器

可以建立一种低成本的电子负载，使用户能调整负载电流的上升和下降时间（图11）。

电路采用N-FET（N沟场效应管）Q1作为开关，在栅极驱动下导通时能使电流流过负载电阻（R10）。应选择R10以提供Q1导通时所需的负载电流。在需要电流波形时用50 mΩ电阻（R11）来检测电流（如果不需要电流监控也可将其删除）。Q1可以采用具有低导通电阻和良好开关特性的任何优质N-FET。因为检测器通常工作在低占空比，FET中的功耗并不是很大，PCB铜箔可为大多数应用提供足够的散热性能。采用C6和R9来降低Q1切换时产生的振铃。

U1是自由振荡器，其频率通过R2来调节。U2是被U1单击触发的，单击的导通时间通过R6来调整。采用R2和R6，可以改变负载脉冲的频率和占空比。对于所示的元件数值，可将频率从大约130 Hz调整到大约2 kHz，以及调整脉冲宽度从大约20 μs到400 μs。

通过改变加在Q1栅极上电压的上升和下降时间，可调整负载电流脉冲的上升和下降时间。因为U2的输出驱动Q1的栅极，使该电压上升和下降时间变缓的RC网络对负载电流脉冲的di/dt变化率提供所需的调整。R8与C5一起可以减缓栅极电压的上升时间，而R7与C5一起可减缓下降时间（D1和D2隔离了上升和下降驱动信号，所以能对它们单独调节）。

必须基于所需的上升/下降时间来调整C5数值：为获得可能的最快上升时间（50A/μs或更高），可省略C5。为获得较慢的上升时间（如0.5A/μs），可采用大约0.1 μF的电容值，采用R7和R8一起产生每个边沿的压摆率。

当选择C5时，应注意到对Q1栅极的驱动是非对称的：U2的输出上拉至大约11V，但是仅会被下拉到地。所以，FET在导通时比关闭时有更强的栅极驱动，这会使负载脉冲的上升沿比下降沿更快。

表1说明，对于不同的C5数值，可通过调节R7和R8，从最小值至最大值来得到负载电流脉冲的压摆率。由0A到3A的负载电流脉冲得到该数据。

如果上升边沿和下降边沿需要相等的时间：对于任何给定的C5值，上升沿具有更宽的最小/最大压摆率范围。因此，应选择C5使得所需的下降沿压摆率在表1列出的范围内，然后调节R7，直到下降沿压摆率正确，并调节R8，得到与下降沿相匹配的上升沿。

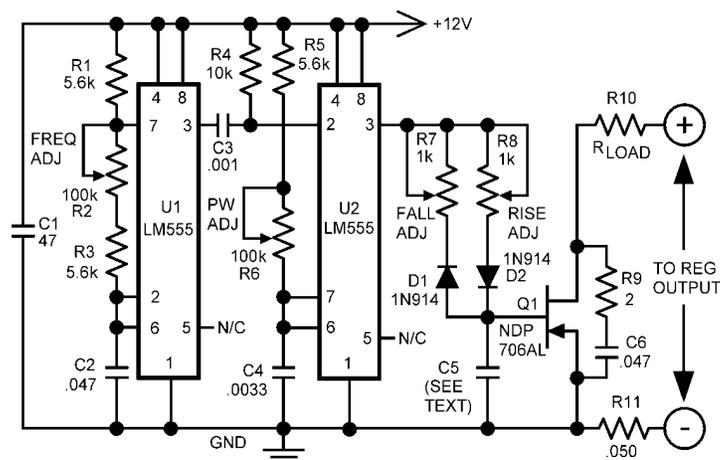


图11. 电子负载瞬态检测器

表1. 不同C5值时的负载电流脉冲的压摆率

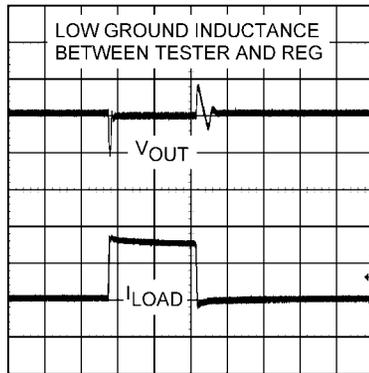
C5数值	上升沿 (A/μs)		下降沿 (A/μs)	
	最小值	最大值	最小值	最大值
0	0.50	85	2.2	15
1000 pF	0.45	75	1.9	12
0.01 μF	0.38	70	1.5	11
0.047 μF	0.25	50	0.75	10
0.1 μF	0.21	38	0.50	7.5

30040314

## 使用电子负载检测器的指南

1. 将从输入到输出通过FET电流路径的所有迹线长度减至最短。该路径中的电感会使上升时间变差并产生振铃。
2. 采用如金属薄膜电阻或金属氧化物的低感电阻作为负载和检测电阻。
3. 检测器负端至调节器输出负端的地线连接最为关键：测量 $V_{OUT}$ 的示波器探针的接地引线连到 $C_{OUT}$ 的接地端。测量电流检测电阻（R11）的探针接地端连到检测电阻的负端。这两个结点之间的电气连接必须为低感抗，否则会产生振铃，使得电流波形失真。若有必要，将电流检测电阻移至调节器的接地端（在 $C_{OUT}$ 的负端），使得示波器接地点之间不存在地弹跳。

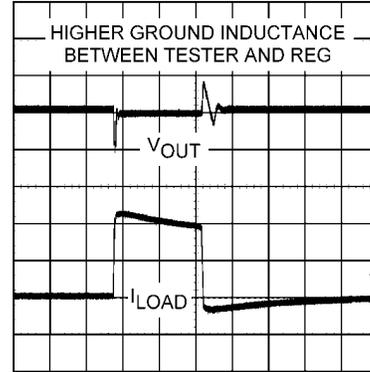
为了说明两个接地点之间的电感造成的地弹跳效果，图12的瞬态波形图表示了调节输出和R11上测得的电流波形。在这种情况下，通过 $\frac{1}{4}$ "宽和 $\frac{3}{4}$ "长的铜箔将检测器负载端的负极连到调节器的输出电容负极，其感抗相当低：



30040312

图12. 在脉冲检测器和待测调节器之间采用低电感地线连接的瞬态波形

为了增加接地引线电感的数量，除了采用2"的18号线作为连接调节器输出电容的负端和脉冲检测器的负端之间的接地引线（比首次测试中采用的短引线具有更高的电感），在图12中表示了重复的相同测量。图13为负载电流波形中的劣化情况，这是由于2"线电感上产生的电压导致的地弹跳，从而造成电流检测电阻上连接的示波器探针的接地端与测量输出电压的探针之间产生地弹跳。



30040313

图13. 在脉冲检测器和待测调节器之间增加接地电感产生的负载电流波形失真

与图12相比较，可发现图13中的电流波形显示在两个方向中都出现过量的过冲，同时峰值幅度也比实际值要大。对图12仔细检查后发现电流波形也表现出非常轻微的过冲（接地引线电感的效果），因为没有任何引线会是零感抗。但是当电感过大时，就会破坏读取的精度（图13）。这解释了为什么当采用两个示波器探针时，必须小心使得接地端互相之间不会产生地弹跳现象。

# 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