

# 在 DC/DC 转换器中采用陶瓷或电解输出电容器 – 为什么不能兼用呢?

作者: Michael Score

高级技术组成员, 现场应用工程

## 引言

在几乎所有需要长电池寿命、低发热量及满足能源之星 (ENERGY STAR®) 指导方针的终端设备中, 都采用了开关电源。当设计开关电源时, 决定使用哪种类型的输出电容器是一件很困难的事情。

电解电容器具有高等效串联电阻 (ESR), 这使得功率损耗很高且瞬态响应过差, 因而无法在负载响应要求严苛的场合中使用。然而, 电解电容器在高偏置电压条件下拥有稳定的电容, 而且价格便宜。

陶瓷电容器具有非常低的 ESR, 但其电容在高偏置电压下大幅减小, 而且大数值陶瓷电容器的价格会很昂贵。在许多降压型转换器中, 陶瓷电容器的有效电容有可能不到其额定电容的一半。

如今的降压型转换器通常只采用一种类型的输出电容器, 因为针对不同的电容和 ESR 进行设计将变得过于困难。这造成许多设计人员被迫采用诸如聚合物或钽等更加昂贵的电容器类型, 此类电容器可提供低于电解电容器的 ESR, 但没有陶瓷电容器那么低。现在, 通过运用新型设计工具, 只需短短几分钟便可做好使用混合型输出电容器来实现稳定设计的准备。为了阐明该原理, 本文将描述采用混合型输出电容器进行的 DC/DC 电源设计。

## 在负载条件下发生输出变化的原因

第一步需要弄清输出电容器在系统所起的作用。图 1 给

出了理想化波形, 并示出了输出电容器特性产生的影响以及它们在负载瞬变过程中出现的位置。

负载瞬变时出现的尖峰主要是由输出电容器的等效串联电阻 (ESR) 或阻抗在非常高的频率下引起的。固定的电感器电流斜坡导致电感器中的大部分瞬变扰动产生过冲和下冲。<sup>[1]</sup> 另外, 从负载阶跃瞬变的恢复过程也会引发过冲和下冲。要想最大限度地减少这些低频误差, 则需仰仗输出电容器中存储的电能和电压环路响应时间。因此, 应拥有宽环路带宽、低 ESR 以及足够的输出电容 (以提供充足的电能存储), 这一点很重要。

在负载条件下保持低噪声输出涉及两个主要的因素: 1) 稳压器将具有多大的过冲和下冲; 2) 在开关频率下出现的纹波电压有多大。峰值过冲 / 下冲约为负载阶跃电流乘以输出电容器在环路交叉频率下的阻抗 ((1) 式)。该式强调了在环路交叉频率 ( $f_c$ ) 下拥有低输出电容器阻抗对于实现低过冲或下冲的重要性。环路交叉频率通常被定为开关频率的十分之一。较高的环路交叉频率可最大限度地抑制过冲 / 下冲。

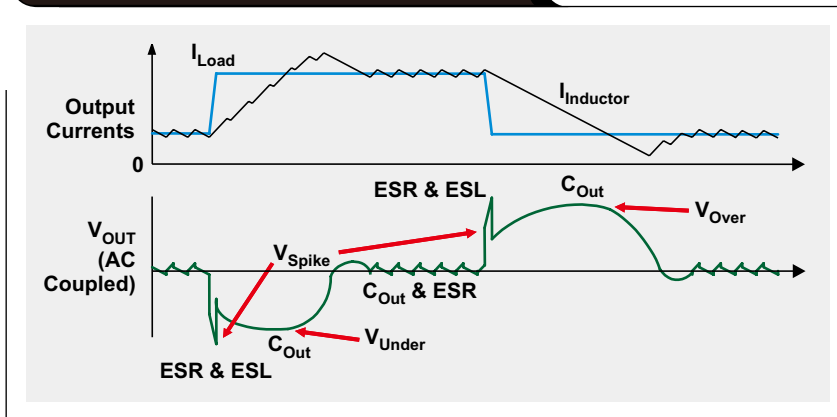
$$V_{\text{OVER/UNDER SHOOT}} \approx \Delta I_{\text{OUT}} \times Z_{\text{OUT}}(f_c) \quad (1)$$

输出纹波电压的一种近似计算法为: 输出电容器在开关频率下的阻抗乘以峰至峰电感器电流。<sup>[2]</sup>

$$V_{\text{RIPPLE}} \approx I_{\text{L(P-P)}} \times Z_{\text{OUT}}(f_{\text{SW}}) \quad (2)$$

(2) 式表明: 输出纹波电压可通过减小峰至峰电感器电流 (其通过增加电感值来控制) 得以降低。

图 1: 理想化的负载瞬变曲线图



然而，这种做法是存在缺陷的。大幅降低纹波的一种更为有效的方法是减小输出电容器在开关频率下的阻抗。用于纹波电压的阻抗处在一个高得多的频率上，因为开关频率是环路交叉频率的十倍左右。

为了尽量地降低负载瞬变情况下的纹波和过冲电压，稳压器需要一个宽的环路交叉频率。此外，还应具有用于能量存储的足够电容，而且输出电容器的阻抗在整个频率范围内应当很低。

### 输出电容器最大限度地减小输出阻抗

最理想的是：输出电容器非常大（以存储充足的能量），并在环路交叉频率和开关频率条件下具有非常低的阻抗。聚合物电容器和钽电容器具有大的数值和低 ESR，但是它们价格昂贵，而且 ESR 仍然不如陶瓷电容器低。电解电容器非常适合以低成本获得大电容值，然而，其具有较大的 ESR 和 ESL。这使它们不适用于要求高输出阶跃性能の場合。

陶瓷电容器具有非常低的 ESR 和 ESL，从而使其成为实现优良瞬态性能的绝佳选择，但它们在电容值上存在局限性。22  $\mu\text{F}$  及以下数值的陶瓷电容器相对便宜。陶瓷电容器的有效电容随着偏置电压的增加而减小，这使其更加难以提供针对大负载阶跃的足够能量存储。我们采用 TDK SEAT 软件获得了图 2 中给出的曲线，以显示  $V_{\text{BIAS}}$  对有效电容的影响。当偏置电压为 12 V 时，两个额定电容值为 22  $\mu\text{F}$  的陶瓷电容器减小至 19  $\mu\text{F}$  和 16  $\mu\text{F}$ 。请注意，来自同一家供应商的两个 22  $\mu\text{F}$ 、25 V、X7R 型电容器具有迥异的  $V_{\text{BIAS}}$  曲线，因此一定要核对实际的  $V_{\text{BIAS}}$  曲线。

借助相同的软件，图 3 示出了 22  $\mu\text{F}$  和 47 nF 陶瓷电容器的阻抗与频率之间的关系曲线。22  $\mu\text{F}$  电容器在 100 kHz 及更高的频率上具有低阻抗，但其未提供足够的能量存储。可以把电解电容器与 22  $\mu\text{F}$  陶瓷电容器相并联，以在低于 100 kHz 的频率条件下提供低阻抗。在低频条件下电解电容器是合乎需要的，因为其具有很大的电容，而增设一个并联的小陶瓷电容器将降低源于开关噪声的电磁干扰 (EMI)。

选择了一个 47 nF 陶瓷电容器，原因是它在 20 MHz 及更高的频率上具有低于

22  $\mu\text{F}$  电容器的阻抗。增加的 47 nF 电容非常之小，因而不会影响稳定性。黑色曲线显示了 22  $\mu\text{F}$  和 47 nF 电容器并联组合的阻抗。图 3 把 22  $\mu\text{F}$  陶瓷电容器显示为阻抗的主导曲线（贯穿大部分频段）。然而，在低频条件下电解电容器居主导地位，而在非常高的频率下则是 47 nF 陶瓷电容器起支配作用。

图 2：不同的 22  $\mu\text{F}$ 、25 V、X7R 型陶瓷电容器的有效电容

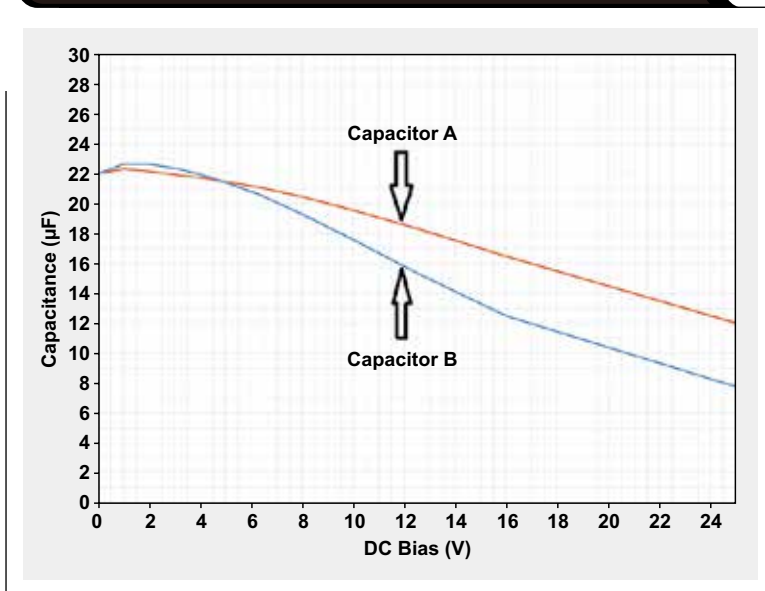
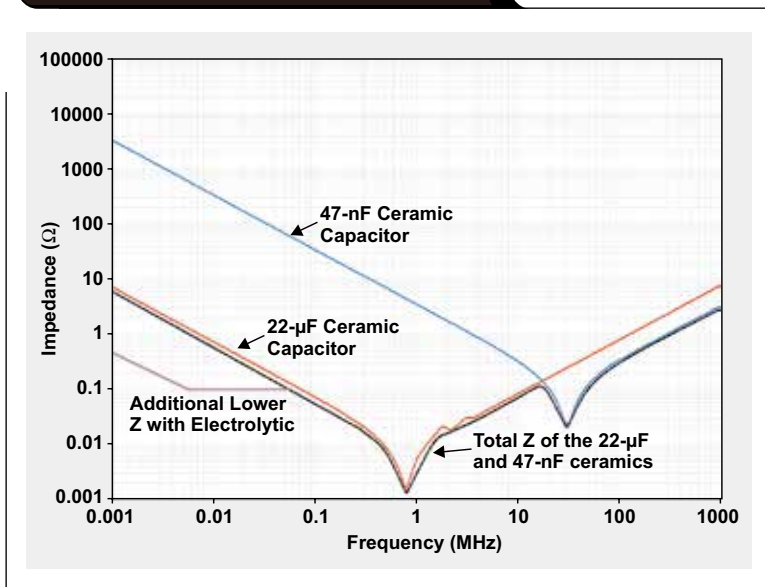


图 3：陶瓷电容器和电解电容器的阻抗



采用混合型输出电容器的设计可在极宽的频率范围内提供最低的输出阻抗。不过，降压型稳压器反馈环路的补偿因此变得很难计算。由于源自陶瓷电容器的较低 ESR 和电容与来自电解电容器的较高 ESR 和电容组合在了一起，因此重要的是考虑极点 / 零点的位置。电感器和每个电容器提供了不同的极点 / 零点位置。TI 的 WEBENCH<sup>®</sup> 软件单独地考虑了每条路径，这使得设计比人工计算更加容易和稳健。

### 混合型电容器设计示例

我们为一款降压型稳压器选择了混合型电容器设计，该稳压器具有 24 V (±20%) 的输入电压和 12 V/6 A 的输出电压。关注的重点是利用低成本解决方案获得上佳的瞬态响应。

您既可将要求输入 WEBENCH 面板中，也可以直接输入到选定稳压器的产品网页上的面板中。就本例而言，选择的是 LM25117 降压型控制器，而且输入条件在产品网页上输入。在启动设计之后，一个高级选项部分将出现在左侧，如图 4 所示。这款设计需要良好的瞬态性能，因此勾选“user preferred frequency”框，并在其下面的方框中输入“500 kHz”以提供一个宽的环路交叉频率。在“Output Cap Options”下方选择“Mixed”，然后点击“Update”以启动一个允许使用 500 kHz 频率和混合型输出电容器的新设计。这些选择在图 4 中用红色圆圈标出。

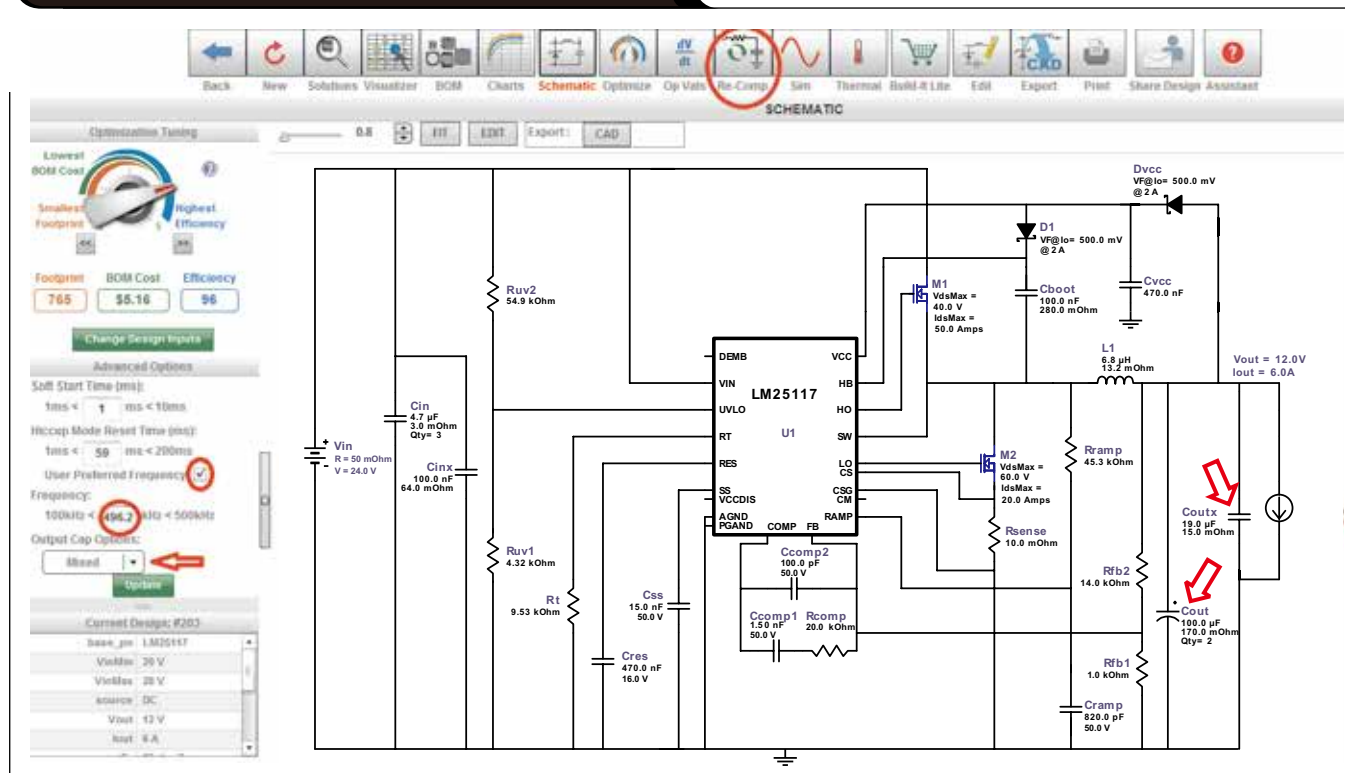
在点击原理图以放大视图之后，即可变更原理图上的组件（通过在相应组件上双击鼠标来完成）。在此场合中，双击电感器 (L1) 以选择一款成本略低的选项。每个输出电容器（图 4 中的红箭头）针对期望的电解电容器与陶瓷电容器之混合进行变更。C<sub>OUT</sub> 更改为两个 100 μF 的电解电容器（取自该设计工具的数据库），而 C<sub>OUTX</sub> 则改为一个陶瓷电容器。数据库中有一些合适的陶瓷电容器。然而，此设计工具并没有图 2 和图 3 中所示的 22 μF 陶瓷电容器。双击 C<sub>OUTX</sub> 电容器并随后选择“Create Custom Part”（窗口的底部）。用一个 19 μF 陶瓷电容器来代替 22 μF 的典型值，以针对在 12 V 偏置电压下减小的电容进行调节，并为 ESR 输入了 15 mΩ，这给印制线增加了少量的电阻。

在变更了输出电容器之后，点击“Re-Comp”钮（图 4，用红圈标出）以查看博德图并更改补偿。

在下一页上，图 5 中的蓝色曲线示出了总的环路幅值和相位，而橙色曲线则显示了功率级响应。该工具标示了混合型输出电容器设计的功率级的极点和零点位置以及功率级增益曲线。

选定设计的稳定性是足够的，但我们的目标是获得较宽的交叉频率。WEBENCH 补偿设计器 (WEBENCH Compensation Designer) 可实现自动补偿，并提供了用于选择交叉频率、增益裕量和相位裕量范围的选项。然而在本例中，（接下页）

图 4：采用混合型输出电容器的电路原理图



(续上页) 却选择了手动补偿作为替代来实施补偿极点和零点的控制。“Edit Poles/Zeroes”选项允许移动补偿极点和零点及自动变更组件值,以满足极点/零点位置要求。“Zero1”从 5.3 kHz 减低至 2.8 kHz 以提高交叉频率,并消除 1 kHz 频率下的某些相位下降。Pole1 保持在其最初的 80 kHz 频率附近是可以接受的。

把补偿零点移动至 2.8 kHz 将交叉频率从 21 kHz 提高至 56 kHz。相位裕量减小至 65°, 增益裕量至 15 dB, 这仍然是一款非常稳定的设计。稳定性结果在图 6 中用圆圈标出。选择“Apply Changes to Design”钮可更新原理图。

图 5: 采用混合型输出电容器的初始博德图 (在功率级幅值曲线上显示了极点和零点)

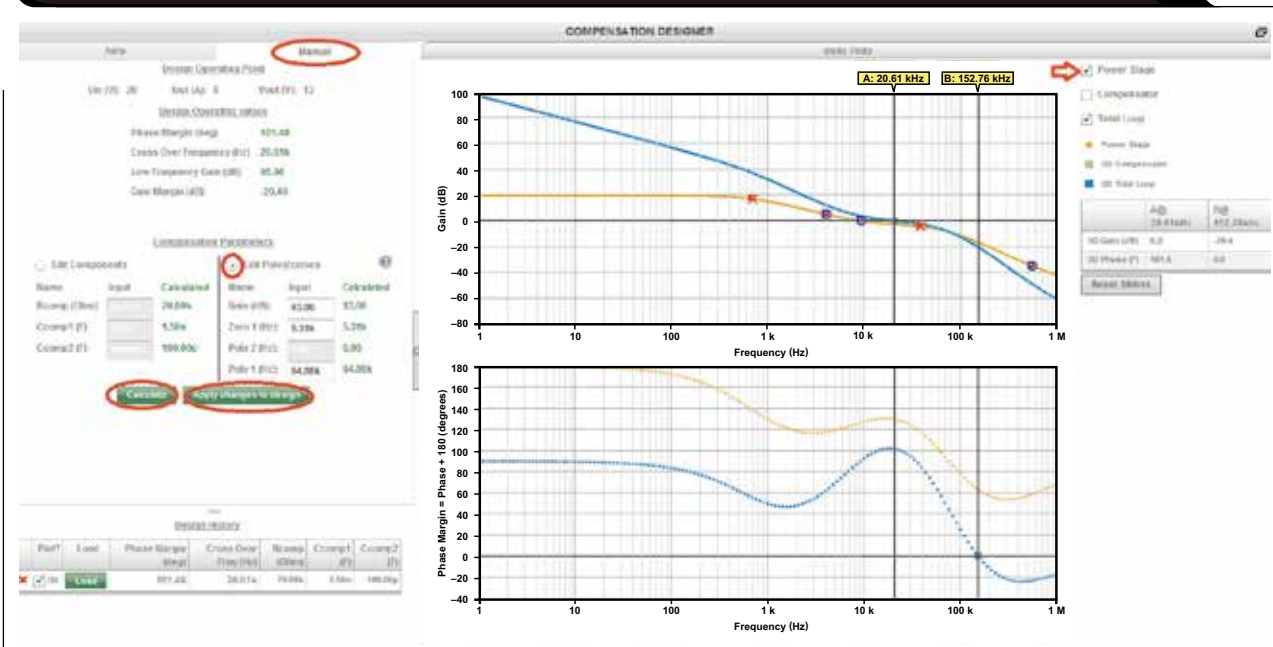


图 6: 在手动补偿之后, 采用混合型输出电容器的博德图显示了增加的带宽和充足的相位裕量

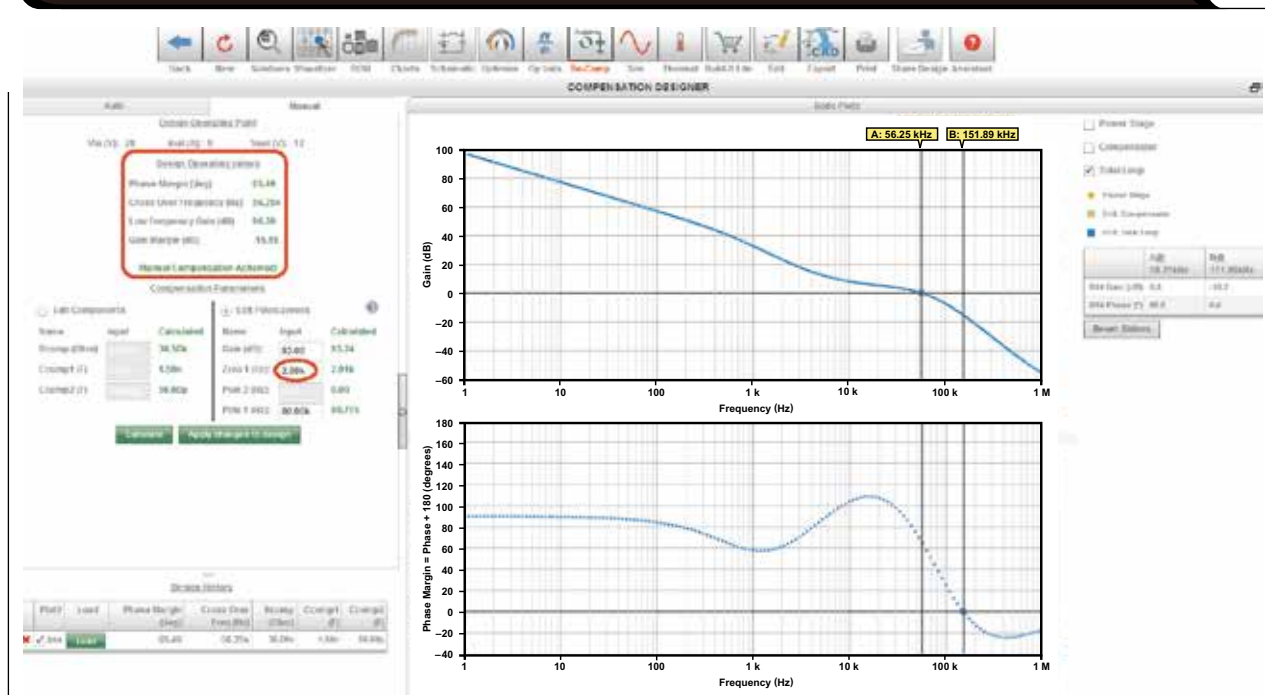
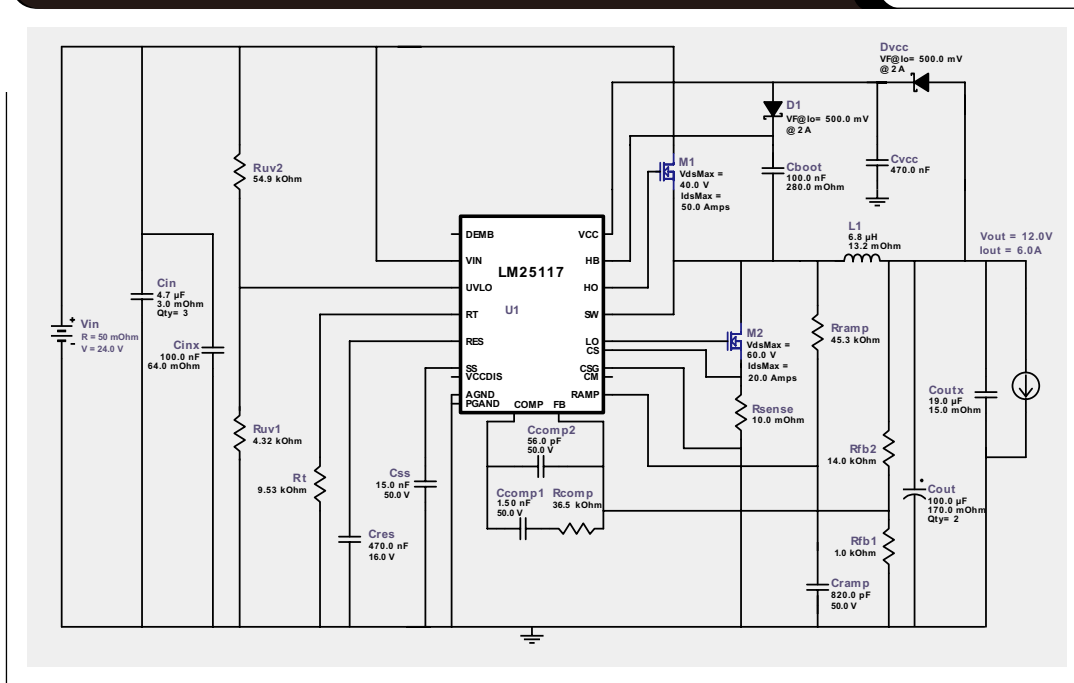


图 7: 最终的 WEBENCH 原理图 (采用混合型输出电容器)



最终的电路原理图示于图 7。如果系统尚不具备大容量去耦电容, 则应在输入端上增设一个电解电容器以提供额外的体电容。假如需要的话, 可给输出增添一个图 3 所示的 47 nF 电容器以降低 EMI。

### 结论

输出电容器在整个频率范围内的低阻抗以及一个高的环路交叉频率可提供优良的瞬态响应。同时采用陶瓷和电解输出电容器能够最大限度地减小整个频率范围内的电容器阻抗。陶瓷电容器是高频段的最佳选择, 而大数值电解电容器则适合低频范围。靠纸和笔来完成一款采用混合型输出电容器的稳定设计是极其困难的, 但是 WEBENCH 电源设计器 (WEBENCH Power Designer) 则可帮助设计人员轻而易举地采用混合型电容器进行设计并通过重新补偿来改善性能。

### 参考文献

- 1、作者: Briditte Hauke, 《降压型转换器功率级的基本计算》, 应用笔记 (SLVA477A), 德州仪器, 2012 年 8 月。

- 2、作者: Surinder P Singh, 《降压型开关稳压器的输出纹波电压》, 应用笔记 (SLVA630A), 德州仪器, 2014 年 10 月。

### 相关网站

一般信息:

[www.energystar.gov/product.tdk.com/en/technicalsupport/seat](http://www.energystar.gov/product.tdk.com/en/technicalsupport/seat)

产品信息:

**LM25117**  
**CSD18504Q5A**

WEBENCH® Design Center:

[www.ti.com/webench](http://www.ti.com/webench)

订阅 AAJ:

[www.ti.com.cn/subscribe-aaaj](http://www.ti.com.cn/subscribe-aaaj)

TI Designs 参考设计库提供完整的设计方案，由资深工程师团队精心创建，支持汽车、工业、医疗、消费等广泛应用的设计。在这里，您能找到包括原理图、物料清单、设计文件及测试报告的全面设计方案。登陆TI Designs，找寻更多适合您的参考设计！简单设计，从TI起步。

马上登录 [ti.com.cn/tidesigns](http://ti.com.cn/tidesigns) 查询最适合您的设计文档。



WEBENCH® 设计中心: 易于使用且可提供定制结果的设计工具。  
PowerLab™ 参考设计库, 包含了近千个适用于所有应用的参考设计。  
电源在线培训课程

[www.ti.com.cn/webench](http://www.ti.com.cn/webench)  
[www.ti.com.cn/powerlab](http://www.ti.com.cn/powerlab)  
[www.ti.com.cn/powertraining](http://www.ti.com.cn/powertraining)

## WEBENCH® Designer My Designs

输入您的供电要求:

直流  交流

输入电压: 最小 14.0 V, 最大 22.0 V

输出电压: 3.3 V

输出电流: 2.0 A

环境温度: 30 °C

多负载: Power Architect

单输出: 开始设计

WEBENCH® Designer My Designs

输入电压: 最小 14.0 V, 最大 22.0 V

输出电压: 3.3 V

输出电流: 2.0 A

环境温度: 30 °C

**SIMPLE SWITCHER®**

开始设计 ▶

德州仪器在线技术支持社区

[www.deyisupport.com](http://www.deyisupport.com)

中国产品信息中心 免费热线:

800-820-8682

TI新浪微博



[weibo.com/tisemi](http://weibo.com/tisemi)

## 热门产品

DAC8760	用于 4-20mA 电流回路应用的单通道、16 位、可编程电流/电压输出 DAC
DAC7760	单通道、12 位可编程电流输出和电压输出 DAC
ADS1247	极低噪声、精密 24 位 模数转换器
ADS1120	具有串行外设接口的低功耗、低噪声、16 位 ADC
ISO7242	四通道 2/2 25Mbps 数字隔离器
ISO7631FM	4kV <sub>PK</sub> 低功耗三通道、150Mbps 数字隔离器
TPS54062	4.7V 至 60V 输入、50mA 同步降压转换器
TLK105L	工业温度、单端口 10/100Mbps 以太网物理层
SN65HVD255	CAN 收发器具有快速循环次数, 可用于高度已加载网络

了解更多, 请搜索以下产品型号:

DAC8760



## 重要声明

德州仪器(TI) 及其下属子公司有权根据 JESD46 最新标准, 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, 并有权根据 JESD48 最新标准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 保证其所销售的组件的性能符合产品销售时 TI 半导体产品销售条件与条款的适用规范。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。除非适用法律做出了硬性规定, 否则没有必要对每种组件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 组件或服务的组合设备、机器或流程相关的 TI 知识产权中授予的直接或间接版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中 TI 信息的重要部分, 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。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任或义务。复制第三方的信息可能需要服从额外的限制条件。

在转售 TI 组件或服务时, 如果对该组件或服务参数的陈述与 TI 标明的参数相比存在差异或虚假成分, 则会失去相关 TI 组件或服务的所有明示或暗示授权, 且这是不正当的、欺诈性商业行为。TI 对任何此类虚假陈述均不承担任何责任或义务。

客户认可并同意, 尽管任何应用相关信息或支持仍可能由 TI 提供, 但他们将独自负责满足与其产品及其应用中使用 TI 产品相关的所有法律、法规和安全相关要求。客户声明并同意, 他们具备制定与实施安全措施所需的全部专业技术和知识, 可预见故障的危险后果、监测故障及其后果、降低有可能造成人身伤害的故障的发生机率并采取适当的补救措施。客户将全额赔偿因在此类安全关键应用中使用任何 TI 组件而对 TI 及其代理造成的任何损失。

在某些场合中, 为了推进安全相关应用有可能对 TI 组件进行特别的促销。TI 的目标是利用此类组件帮助客户设计和创立其特有的可满足适用的功能安全性标准和要求的终端产品解决方案。尽管如此, 此类组件仍然服从这些条款。

TI 组件未获得用于 FDA Class III (或类似的生命攸关医疗设备) 的授权许可, 除非各方授权官员已经达成了专门管控此类使用的特别协议。

只有那些 TI 特别注明属于军用等级或“增强型塑料”的 TI 组件才是设计或专门用于军事/航空应用或环境的。购买者认可并同意, 对并非指定面向军事或航空航天用途的 TI 组件进行军事或航空航天方面的应用, 其风险由客户单独承担, 并且由客户独自负责满足与此类使用相关的所有法律和法规要求。

TI 已明确指定符合 ISO/TS16949 要求的产品, 这些产品主要用于汽车。在任何情况下, 因使用非指定产品而无法达到 ISO/TS16949 要求, TI 不承担任何责任。

	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.cn/consumer-apps">www.ti.com.cn/consumer-apps</a>
DLP® 产品	<a href="http://www.dlp.com">www.dlp.com</a>	能源	<a href="http://www.ti.com.cn/energy">www.ti.com.cn/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应用处理器	<a href="http://www.ti.com.cn/omap">www.ti.com.cn/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>

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
Copyright © 2015, Texas Instruments Incorporated