

# 将运算放大器连接至高速 DAC

## 第 3 部分：简化电流源 DAC

作者：Jim Karki, 德州仪器 (TI) 高性能模拟实验室研究组成员

### 简化型运算放大器接口

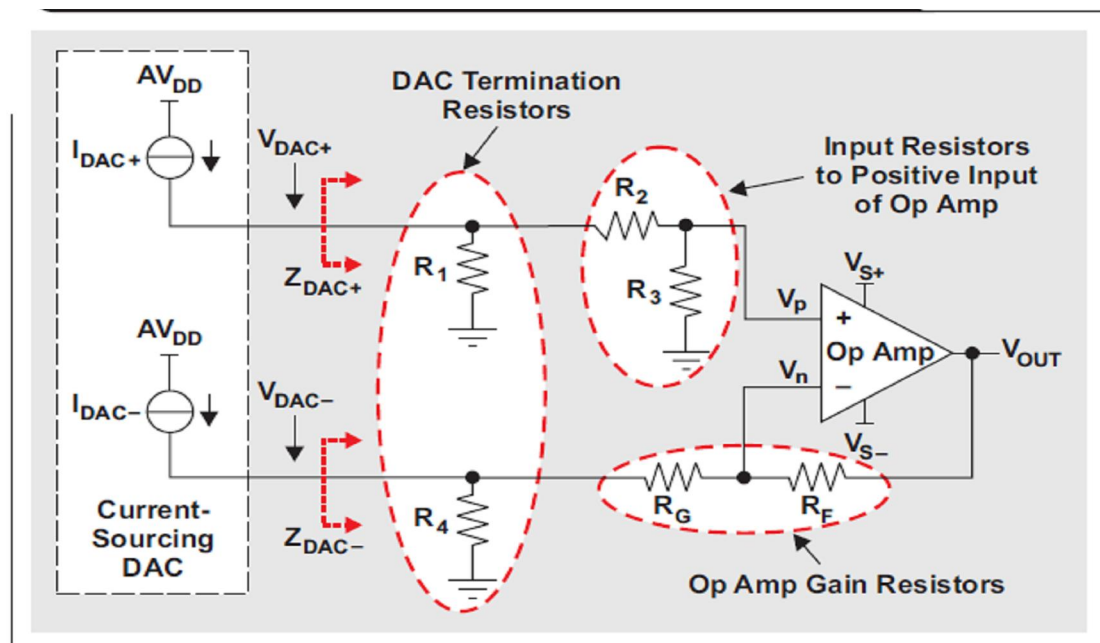
参考文献 3 介绍了一款不要求负参考电压 ( $V_{REF}$ ) 的电流源 DAC/运算放大器接口。尽管该建议电路设计提供了一款较好的有效解决方案，但必须注意的是：如果 DAC 的最大兼容电压作为运算放大器输入 ( $V_{DAC+}$ ) 正端的设计目标，则负端 ( $V_{DAC-}$ ) 的 DAC 电压将会违反最大兼容输出电压，因为存在最初并不那么明显的偏置。下面的讨论，将对出现这种偏置的原因进行解释，并提出一种解决问题的简单方法。之后，我们将讨论在 DAC 和运算放大器之间插入一个滤波器的方法。有关全部设计的其他详情，请参阅参考文献 3。

图 17 显示了该建议电路，其命名法与参考文献 3 稍有不同，目的是为了同本系列文章第 1 部分和第 2 部分中所介绍的一些电路相一致。

- $I_{DAC+}$  和  $I_{DAC-}$  为 DAC 的电流输出。
- $R_1$  和  $R_4$  用于调节阻抗，以使 DAC 输出匹配设计目标。
- $R_2$  和  $R_3$  为运算放大器正输入的输入电阻。
- $R_G$  和  $R_F$  为运算放大器的增益设置电阻。
- $V_{DAC+}$  和  $V_{DAC-}$  为 DAC 输出的电压。
- $V_p$  和  $V_n$  为运算放大器的输入端子。
- $V_{S+}$  和  $V_{S-}$  为运算放大器的电源。

运算放大器为电路的有源放大器组件，其被配置为一个差动放大器。

图 17 无负参考电压的电流源 DAC/运算放大器接口



在没有负参考电压的情况下，DAC 输出电压不会在接地电位以下摆动，而仅完成正摆动。在运算放大器的正端，电压由 DAC ( $I_{DAC+}$ ) 的电流设定，而阻抗由  $Z_{DAC+} = R1 \parallel (R2 + R3)$  表示。在负端，计算出准确的电压并不容易，因为运算放大器的动作，其让得  $V_n$  接近等于  $V_p$ 。

请您思考最小和最大 DAC 电压。在正端， $I_{DAC+} = 0$  的最小电压为  $0V$ ， $I_{DAC+}$  满量程时最大电压为  $I_{DAC+(FS)} \times Z_{DAC+}$ 。在负端， $I_{DAC-} = 0$  的最小电压为：

$$V_n \times \frac{R_4}{R_4 + R_G}$$

因为 DAC 输出为互补，因此  $I_{DAC-} = 0$  时， $I_{DAC+}$  为满量程。利用

$$V_p = V_{DAC+} \left( \frac{R_3}{R_2 + R_3} \right)$$

和  $V_n = V_p$  进行转换和重排，得到下面负端的最小电压

$$V_{DAC-(min)} = V_{DAC+(max)} \left( \frac{R_3}{R_2 + R_3} \right) \times \left( \frac{R_4}{R_4 + R_G} \right)$$

$I_{DAC-}$  为满量程时的最大电压为  $I_{DAC-(FS)} \times R_4 \parallel R_G$ 。因为正端电流为零 ( $I_{DAC+} = 0$ )，正端对负端的最大电压没有影响。

上述计算的结果是：相对  $V_{DAC+}$ ， $V_{DAC-}$  有一点小的 DC 电平正向移动。参考文献 3 的设计方程式说明了这种正向移动的原因，因此运算放大器输出电压零对称。如果设计把正端 ( $V_{DAC+}$ ) 的最大兼容输出电压作为目标，则这种正向移动便会导致超出负端 ( $V_{DAC-}$ ) 的兼容输出电压；因此我们应该将一个更低的电压用作设计目标。由于设计方程式的交互性质，我们无法找到一个封闭形式方程式来计算  $V_{DAC+}$  的最大允许电压，其本质上意味着要开始设计就必须要知道  $Z_{DAC+}$  的目标阻抗。解决这一问题的简单方法是根据参考文献 3 建立一个 Excel® 工作表，用于计算组件值和 DAC 输出电压。我们可以不断尝试不同的  $Z_{DAC+}$  值，直到获得一个可以接受的结果为止。若要查看举例工作表，请访问 <http://www.ti.com/lit/zip/slyt368>，然后点击“打开”，便可在线查看 WinZip® 目录（也可以点击“保存”下载该 WinZip 文件，以便离线使用）。之后，请打开文件 DAC\_Source\_to\_Op\_Amp\_Wksht\_Part3.xls，然后选择“Simplified VDAC-Calculation”工作表栏。

作为如何使用工作表进行设计的一个例子，我们假设会用到第 2 部分中叙述的一个 PMOS DAC，其兼容输出电压范围为  $-1.0 V$  到  $+1.25 V$ 。由于 DAC 电压只为正，我们将一个从  $0V$  到  $1.25V$  的小电压范围作为目标，并且会用到基于参考文献 3 的相同工作表。

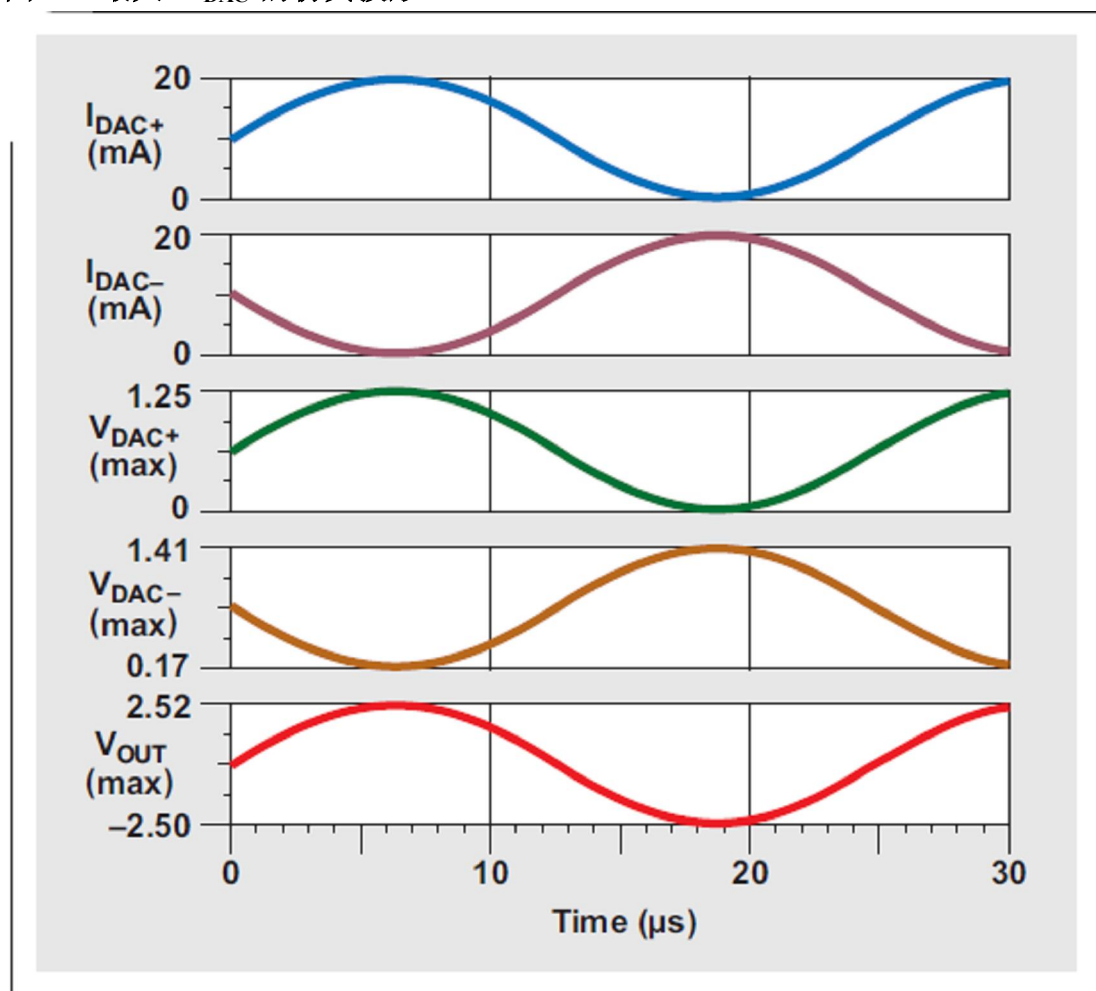
同本系列文章第 1 部分和第 2 部分中的举例一样，DAC 的满量程输出设定为 20mA。我们想得到一个 5-VPP、DC 耦合、单端输出信号，但这一次使用了图 17 所示电路。假定  $I_{DAC\pm} = 20 \text{ mA}$  且  $V_{DAC\pm} = 1.25 \text{ V}_{PP}$ ，则可计算得到目标阻抗为  $Z_{DAC\pm} = 62.5 \Omega$ 。我们的放大器选择使用 THS3095 电流反馈运算放大器，而  $R_F$  设定为  $750 \Omega$ 。需要输入到工作表中的其他项为增益，其为：

$$\frac{V_{OUT}}{2 \times I_{DAC\pm}} = 125 \Omega,$$

以及拉姆达 ( $\lambda$ )，其被设定为 0.2（见参考文献 3 第 5 页）。

输入这些变量以后，工作表显示下列计算值： $R_G = 425.64 \Omega$ 、 $R_1 = 121.80 \Omega$ 、 $R_2 = 24.36 \Omega$ 、 $R_3 = 104.02 \Omega$  以及  $R_4 = 85.13 \Omega$ 。最接近标准 1% 值为  $R_G = 422 \Omega$ 、 $R_1 = 121 \Omega$ 、 $R_2 = 24.3 \Omega$ 、 $R_3 = 105 \Omega$  以及  $R_4 = 84.5 \Omega$ 。在仿真中使用这些值得到  $V_{DAC-(max)} = 1.408 \text{ V}$ ，其超出了兼容输出电压，需要降低该值。图 18 显示了仿真波形。

图 18 最大  $V_{DAC}$  的仿真波形

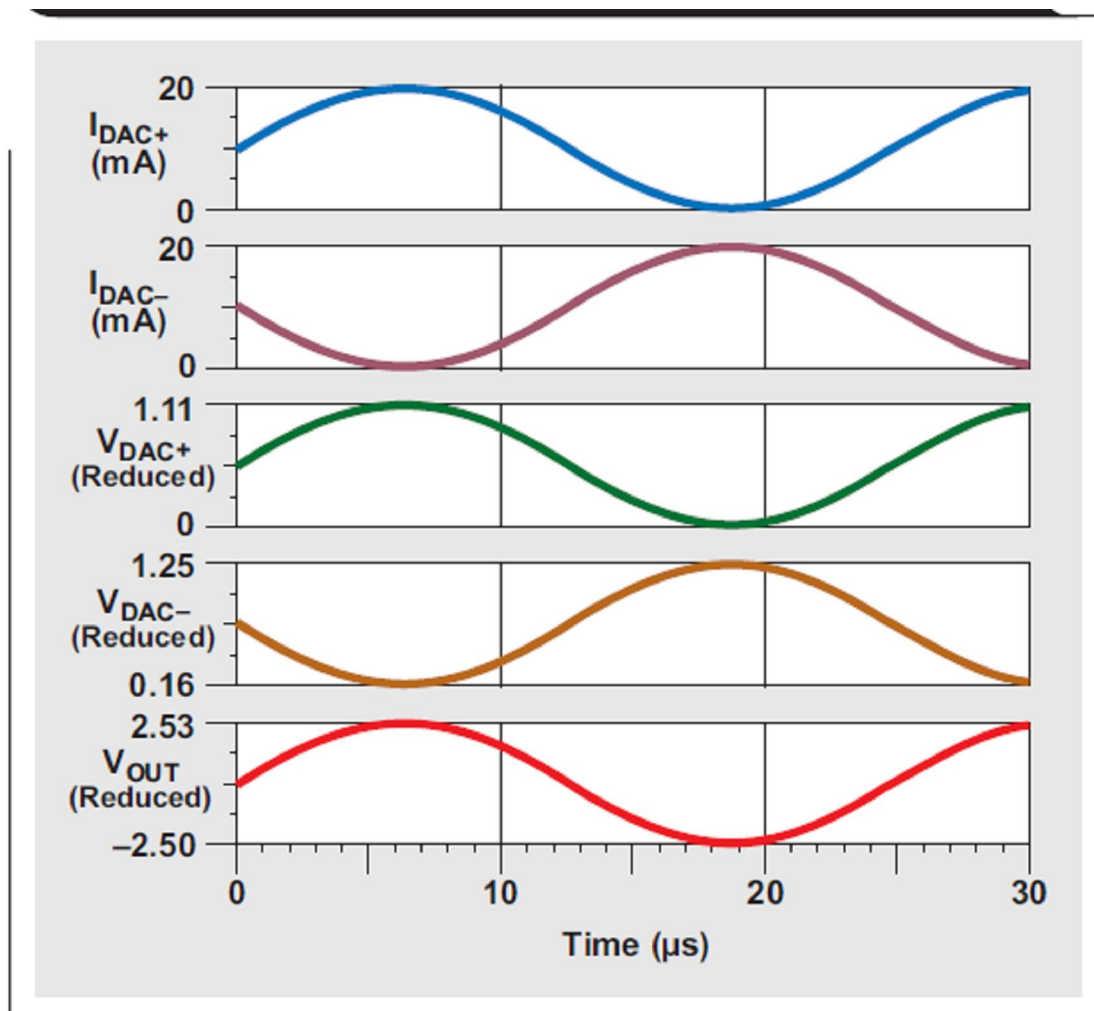


把目标  $Z_{DAC\pm}$  降至  $55 \Omega$  得到一个  $0 \text{ V}$  到  $+1.1 \text{ V}$  的更低目标电压范围。 $Z_{DAC\pm} = 55 \Omega$  且没有其他改变的情况下，工作表显示下列计算值： $R_G = 377.03 \Omega$ 、 $R_1 =$

94.83Ω、R<sub>2</sub>=18.97Ω、R<sub>3</sub>=111.98Ω 以及 R<sub>4</sub>=75.41Ω。最接近标准 1% 值为R<sub>G</sub>=374Ω、R<sub>1</sub>=95.3Ω、R<sub>2</sub>=19.1Ω、R<sub>3</sub>=113Ω 以及 R<sub>4</sub>=75Ω。我们再次对该电路进行仿真，所得波形（请参见图 19）表明刚好达到兼容输出电压规范。忽略 DC 偏置的情况下，AC 正弦波的振幅在 V<sub>DAC+</sub> 和 V<sub>DAC-</sub> 相同。因此，使用精确电阻值时，我们可以通过使用首次计算结果并用如下公式进行第二次尝试，缩短迭代过程：

$$Z_{\text{DAC}+} = \frac{V_{\text{DAC}+(\text{max})} - V_{\text{DAC}-(\text{min})}}{I_{\text{DAC}\pm(\text{max})}}$$

图 19 低 V<sub>DAC</sub> 的仿真波形



在举例工作表中，标示为“迭代法”的上部区域用于简单实验和误差；而标示为“更短方法”的下部区域将首次尝试的结果用于第二次尝试，其在本例中会聚为相同结果。

若要查看本例中电路的 TINA-TI™ 仿真情况，敬请访问 <http://www.ti.com/lit/zip/slyt368>，然后点击“打开”在线查看 WinZip 目录（也

可以点击“保存”下载 WinZip 文件，以便离线使用)。如果您已经安装 TINA-TI 软件，则您可以打开 Simplified\_DAC\_Source\_Interface 文件。TSC 查看举例。若想下载安装免费版 TINA-TI 软件，请访问 [www.ti.com/tina-ti](http://www.ti.com/tina-ti)，然后点击“下载”按钮。该文件中的仿真电路和波形表明电路按照预期进行仿真。 $I_{DAC+}$  和  $I_{DAC-}$  为 DAC 电流， $V_{DAC+}$  和  $V_{DAC-}$  为 DAC 输出端形成的电压，而  $V_{OUT}$  为放大器的输出。电流源 DAC 和运算放大器为利用 SPICE 宏构建的理想组件，意在表明所用方程式对理想组件有效。根据选用器件的不同，实际性能也各异。

### DAC 图像滤波器考虑因素

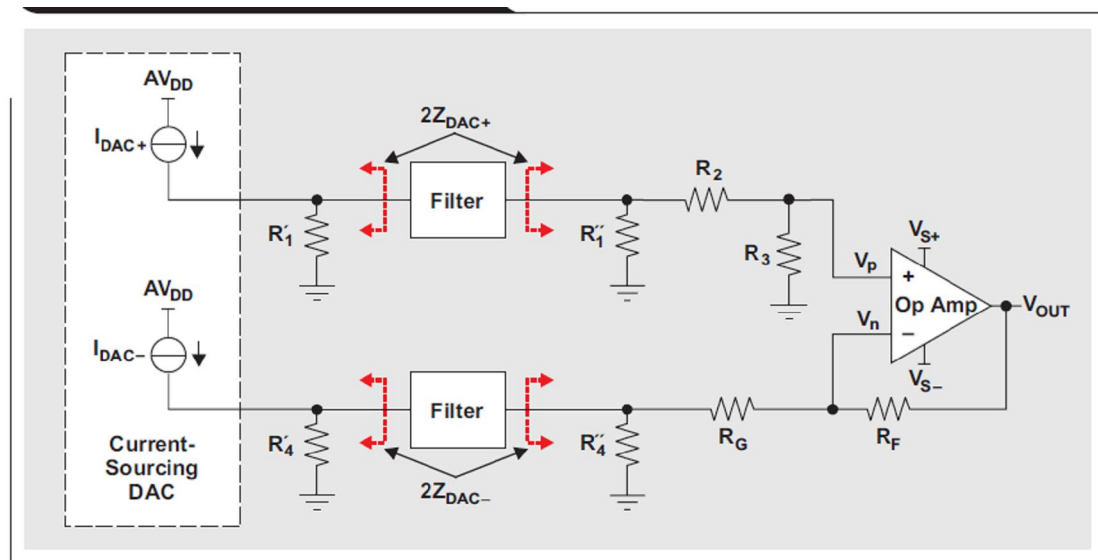
第 1 部分讨论了使用一个滤波器来去除 DAC 采样图像的需求，并建议若想获得最佳性能应在运算放大器之前将滤波器直接安装在 DAC 输出端。此处的情况一样。如第 1 部分所述，在滤波器的输入和输出阻抗得到平衡时，一般会更容易找到实现滤波器的标准组件值。图 20 显示了一个建议电路实现，其中  $R_1$  和  $R_4$  在滤波器任意一端已经被质数和双质数组件代替，因此

$$R_1 = R'_1 \parallel R''_1,$$

以及

$$R_4 = R'_4 \parallel R''_4.$$

图 20 插入 DAC 图像滤波器



假设  $R_1$  和  $R_4$  已知，并且附加限制滤波器任意一端上出现的阻抗为  $2Z_{DAC\pm}$ ，则使用下列方程式可得到许多新的值：

$$R'_1 = 2Z_{\text{DAC}+} \quad (39)$$

$$\frac{1}{R_1''} = \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R'_1} \quad (40)$$

$$R'_4 = 2Z_{\text{DAC}-} \quad (41)$$

$$\frac{1}{R_4''} = \frac{1}{R_4} - \frac{1}{R'_4} \quad (42)$$

在电子制表软件中，很容易解出这些方程式。若要查看举例 Excel 工作表，请访问 <http://www.ti.com/lit/zip/slyt368>，然后点击“打开”，在线浏览 WinZip 目录（也可以点击“保存”下载 WinZip 文件，以便离线使用）。之后，请打开文件 DAC\_Source\_to\_Op\_Amp\_Wksht\_Part3.xls，然后选择 Simplified VDAC– with Filter 工作表栏。与前述 Simplified VDAC– Calculation 工作表类似，标示为“滤波器迭代法”的上面区域用于简单试验和误差；标示为“滤波器短方法”的下面区域将首次试验的结果用于第二次试验，其在本举例中会聚为同一结果。

请参考第 1 部分查看 SPICE 仿真结果，其显示了匹配阻抗与非匹配阻抗的对比效果。

## 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 保修的范围内, 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 的数据手册或数据表, 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。

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

放大器	<a href="http://www.ti.com.cn/amplifiers">http://www.ti.com.cn/amplifiers</a>
数据转换器	<a href="http://www.ti.com.cn/dataconverters">http://www.ti.com.cn/dataconverters</a>
DSP	<a href="http://www.ti.com.cn/dsp">http://www.ti.com.cn/dsp</a>
接口	<a href="http://www.ti.com.cn/interface">http://www.ti.com.cn/interface</a>
逻辑	<a href="http://www.ti.com.cn/logic">http://www.ti.com.cn/logic</a>
电源管理	<a href="http://www.ti.com.cn/power">http://www.ti.com.cn/power</a>
微控制器	<a href="http://www.ti.com.cn/microcontrollers">http://www.ti.com.cn/microcontrollers</a>

### 应用

音频	<a href="http://www.ti.com.cn/audio">http://www.ti.com.cn/audio</a>
汽车	<a href="http://www.ti.com.cn/automotive">http://www.ti.com.cn/automotive</a>
宽带	<a href="http://www.ti.com.cn/broadband">http://www.ti.com.cn/broadband</a>
数字控制	<a href="http://www.ti.com.cn/control">http://www.ti.com.cn/control</a>
光纤网络	<a href="http://www.ti.com.cn/opticalnetwork">http://www.ti.com.cn/opticalnetwork</a>
安全	<a href="http://www.ti.com.cn/security">http://www.ti.com.cn/security</a>
电话	<a href="http://www.ti.com.cn/telecom">http://www.ti.com.cn/telecom</a>
视频与成像	<a href="http://www.ti.com.cn/video">http://www.ti.com.cn/video</a>
无线	<a href="http://www.ti.com.cn/wireless">http://www.ti.com.cn/wireless</a>

邮寄地址: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
Copyright © 2006, Texas Instruments Incorporated