

# 运算放大器增益稳定性

## 第 1 部分：一般系统分析

作者：**Miroslav Oljaca**，德州仪器 (TI) 高级应用工程师和 **Henry Surtihadi**，模拟设计工程师

### 稳态正弦波分析和 Bode 图

在讨论本文的主题以前，我们最好简要回顾一下正弦频率分析和 Bode 图的概念。在本系列文章中将不断用到这两个概念。

通过测定其正弦输入信号响应来描述某个电路的方法一般较为有用。通过求和各种频率的正弦信号，傅里叶分析可用于重构任何周期信号。因此，电路设计人员可以通过描述其宽频率范围正弦激励响应，收集电路对各种输入信号响应的相关信息。

某个线性电路由具体频率的正弦输入信号驱动时，该输出信号也为相同频率的正弦信号。正弦波形的复合图可用于将输入信号表示为：

$$V_1(t) = V_1 \times e^{j(\omega t + \phi_1)},$$

而输出信号可表示为：

$$V_2(t) = V_2 \times e^{j(\omega t + \phi_2)}$$

$V_1$  和  $V_2$  分别为输入和输出信号的振幅； $\phi_1$  和  $\phi_2$  分别为输入和输出信号的相位。输出信号与输入信号的比为传输函数，即  $H(j\omega)$ 。在正弦稳态分析中，传输函数可以表示为：

$$H(j\omega) = |H(j\omega)| \times e^{j\phi(\omega)} \quad (1)$$

其中  $|H(j\omega)|$  为传输函数的振幅，而  $\phi$  为相位。两个均为频率的函数。

描述传输函数的振幅和相位如何随频率变化的一种方法是将它们绘制成图。传输函数的振幅和相位图被称作“Bode 图”。Bode 图的振幅部分将方程式 2 给出的表达式以线性标尺绘制成图：

$$|H(j\omega)|_{dB} = 20 \log_{10} |H(j\omega)| \quad (2)$$

Bode 图的相位部分将方程式 3 给出的表达式绘制成图（同样为线性标尺）：

$$\phi = \angle H(j\omega) \quad (3)$$

沿对数频率轴，绘制振幅和相位图。

将传输函数的振幅而非线性振幅的对数值绘制成图，其好处是能够使用近似线来近似传输函数。这些近似线可在无需使用方程式 2 来计算准确振幅的情况下快速地绘制，同时仍然可以使用相当的精确度来表示传输函数的振幅。

例如，一阶（单极）传输函数，

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}}, \quad (4)$$

其中  $\omega_0$  为系统的角截止频率。方程式 4 传输函数的分贝振幅可以通过方程式 5 描述为：

$$|H(j\omega)|_{\text{dB}} = 20 \log \left| \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}} \right| \quad (5)$$

传输函数  $H(j\omega)$  为角频率  $\omega$  的复函数。要计算该振幅，需要使用函数的真实和虚构部分：

$$|H(j\omega)|_{\text{dB}} = 20 \log \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}} \quad (6)$$

方程式 6 表明在低于  $\omega_0$  的某个频率下，该振幅接近 1 V/V 或者 0 dB。在  $\omega = \omega_0$  频率下，该振幅降到  $1/\sqrt{2} = 0.707$ ，即大约 -3 dB。该频率以上，振幅以 -20 dB/10 速率滚降。

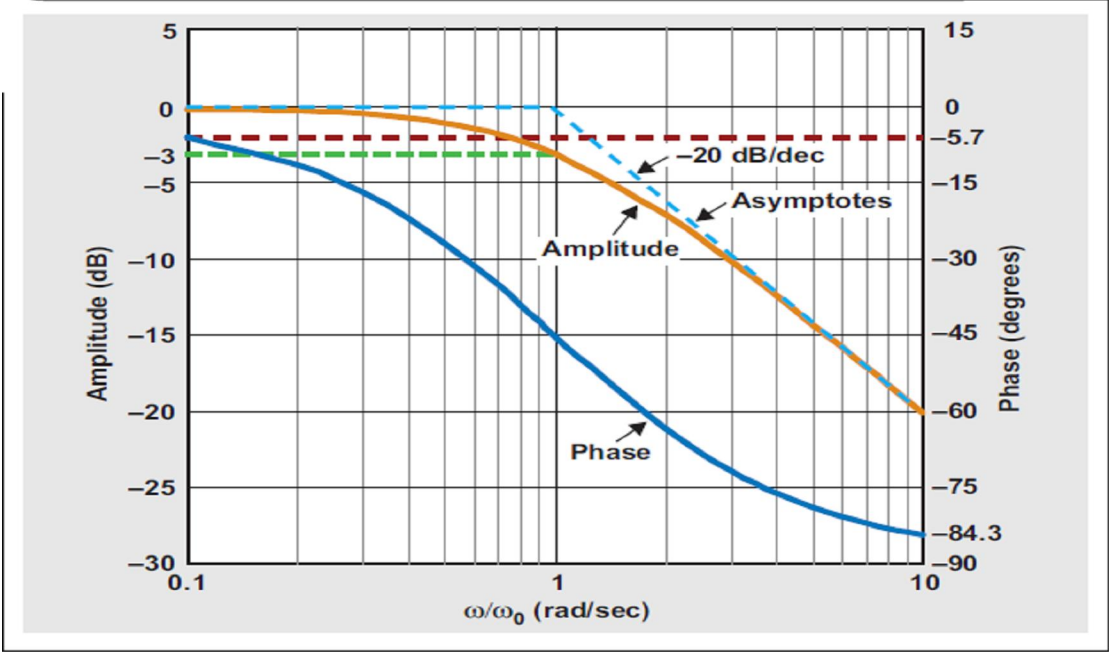
传输函数的真实和虚构部分可用于计算相位响应：

$$\phi(\omega) = -\tan^{-1} \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right). \quad (7)$$

类似地，频率低于  $\omega_0$  时，相位为  $0^\circ$ 。频率  $\omega = \omega_0$  时，相位为  $-45^\circ$ 。最后，频率高于  $\omega_0$  时，相位在  $-90^\circ$  呈平衡状态。

图 1 显示了刚刚描述的一阶传输函数的 Bode 图。请注意，使用两条近似线简化传输函数的振幅图。在两条近似线交叉处，简化振幅曲线偏离实际振幅约 3dB。在低于或高于  $\omega_0$  的一些频率下，误差可以忽略不计。

图 1 单极传输函数的 Bode 图



### 推导非反相和反相传输函数

为了简单起见，本文中的反馈网络均显示为电阻网络。但是，使用复合反馈网络代替这些电阻时，此处的分析也同样有效。

图 2 描述了一款典型的非反相运算放大器结构。放大器的闭环增益由两个电阻设定：反馈电阻  $R_F$  和输入电阻  $R_I$ 。反馈给反馈点的输出电压量  $V_{OUT}$  由参数  $\beta$  表示。反馈点为运算放大器的反相输入。如前所述， $\beta$  网络是一种简单的电阻反馈网络。由图 2 可得， $\beta$  可定义如下：

$$\beta = \frac{V_{FB}}{V_{OUT}} = \frac{R_I}{R_I + R_F} \quad (8)$$

图 2 典型的反馈非反相运算放大器电路

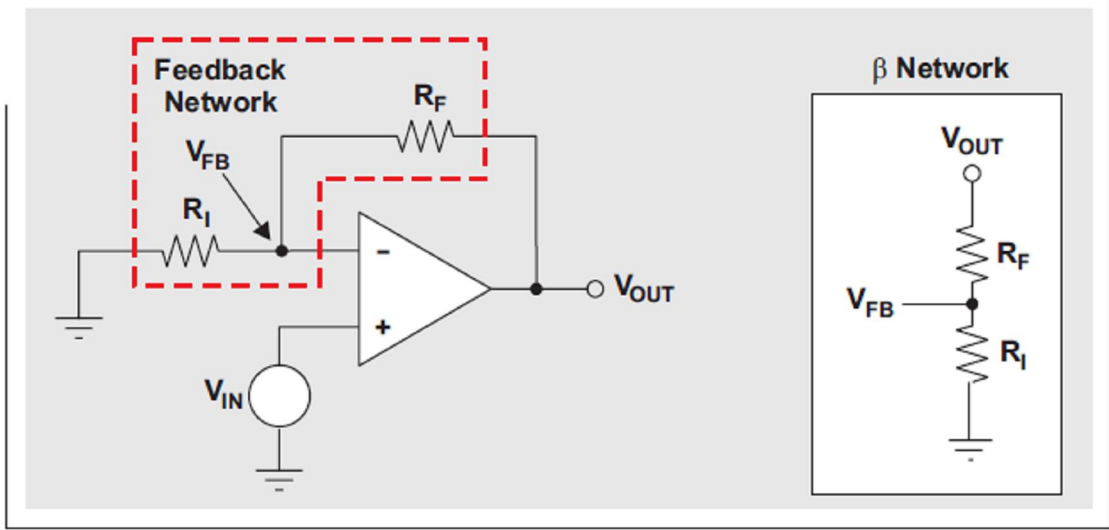


图 3 显示了图 2 所示电路的控制环路模型。参数  $A_{OL}$  为运算放大器的开环增益，所有运算放大器产品说明书中都指定了这一参数。图 3 的控制环路模型可用于将闭环增益表达如下：

$$A_{CL} = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{A_{OL}}{1 + \beta \times A_{OL}}. \quad (9)$$

假设这一模型为一阶系统，则作为角频率函数的运算放大器开环增益可描述如下：

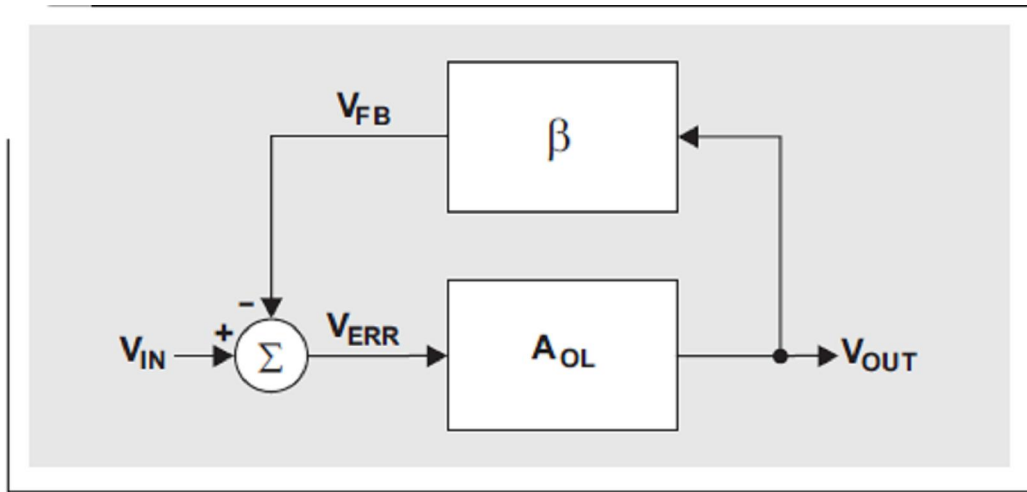
$$A_{OL}(j\omega) = \frac{A_{OL\_DC}}{1 + j \frac{\omega}{\omega_0}}. \quad (10)$$

方程式 10 的参数  $A_{OL\_DC}$  为低频率或 DC 电平下运算放大器的开环增益。运算放大器的主极点由角频率  $\omega_0$  设定，即  $f_0 = \omega_0/2\pi$ 。

图 4 显示了方程式 10 的开环增益表达式的 Bode 图。该图使用一些近似曲线来构建简化版实际开环响应。现在可以通过使用方程式 10 代替参数  $A_{OL}$  来表示频率域中方程式 9 的闭环增益。经过几个代数步骤，闭环传输函数可以写为：

$$A_{CL}(j\omega) = \frac{\frac{A_{OL\_DC}}{1 + \beta \times A_{OL\_DC}}}{1 + j \frac{\omega}{\omega_0} \times \frac{1}{1 + \beta \times A_{OL\_DC}}}. \quad (11)$$

图 3 非反相运算放大器电路的控制环路模型



$A_{CL}(j\omega)$  是角频率  $\omega$  的复函数。我们还记得，要计算该振幅，需要使用与得到方程式 6 时相同的方法，且需用到函数的真实和虚构两部分：

$$|A_{CL}(j\omega)|_{dB} = 20 \log \frac{\frac{A_{OL\_DC}}{1 + \beta \times A_{OL\_DC}}}{\sqrt{1 + \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \times \frac{1}{(1 + \beta \times A_{OL\_DC})^2}}} \quad (12)$$

如果用  $2\pi f$  代替角频率  $\omega$ ，则方程式 12 的闭环传输函数可以写为：

$$|A_{CL}(jf)|_{dB} = 20 \log \frac{\frac{A_{OL\_DC}}{1 + \beta \times A_{OL\_DC}}}{\sqrt{1 + \frac{f^2}{f_0^2} \times \frac{1}{(1 + \beta \times A_{OL\_DC})^2}}} \quad (13)$$

图 4 开环增益与典型运算放大器的频率对比

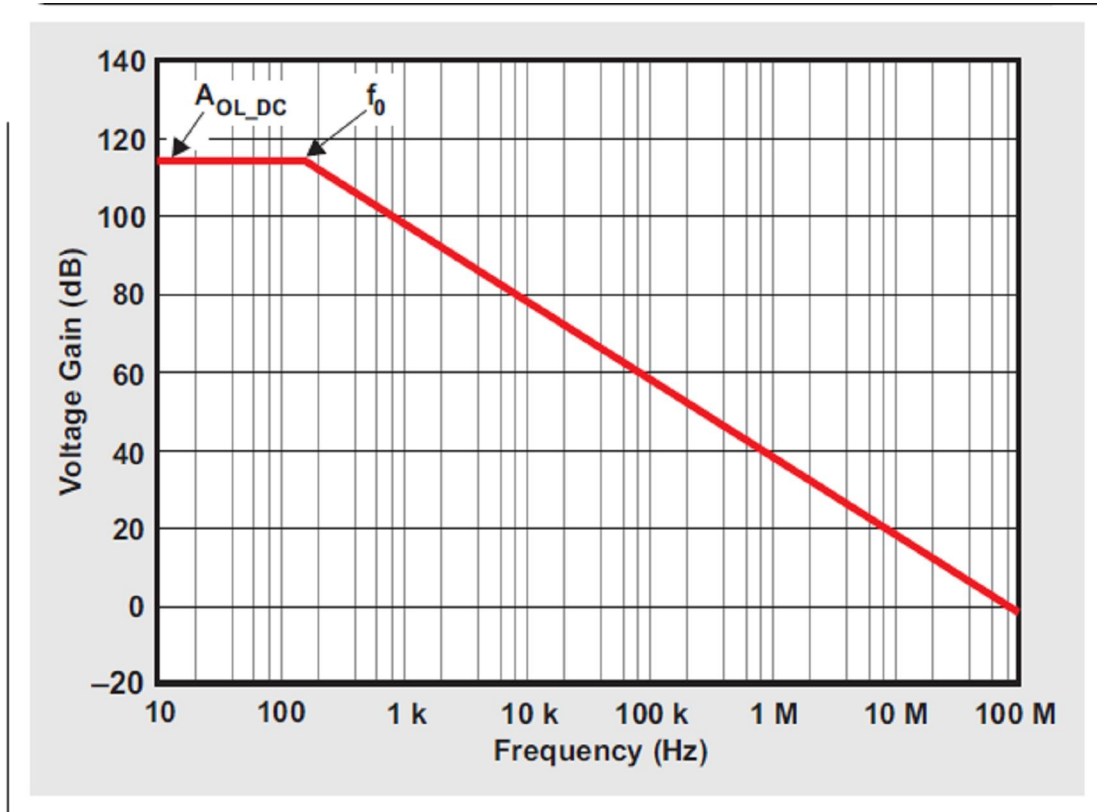
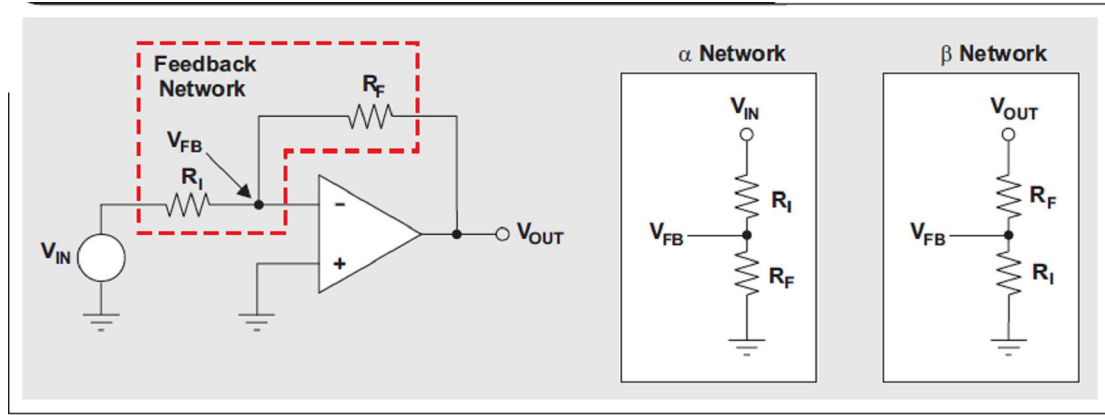


图 5 显示了一个典型的反相运算放大器结构。与非反相结构分析一样，可以使用简单的电阻网络，其可以使用更复杂的函数来代替。放大器的闭环增益再次由两个电阻设定：反馈电阻  $R_F$ ，以及输入电阻  $R_I$ 。反馈至反相输入的输出电压  $V_{OUT}$ ，再次以  $\beta$  表示。在反相结构中，有一个到达反相节点的附加信号，其为输入信号的结果。这一信号的数量以  $\alpha$  表示。

图 5 典型反馈反相运算放大器电路



就反相运算放大器结构而言， $\alpha$  定义如下：

$$\alpha = \frac{V_{FB}}{V_{IN}} = \frac{R_F}{R_I + R_F}, \quad (14)$$

而  $\beta$  由方程式 8 定义。

图 6 显示了图 5 所示电路的控制环路模型。该模型可用于表达电路的闭环增益：

$$A_{CL} = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{-\alpha \times A_{OL}}{1 + \beta \times A_{OL}}. \quad (15)$$

将方程式 10 的  $A_{OL}$  项代入方程式 15 中，得到闭环增益表达式，其依赖于角频率：

$$A_{CL}(j\omega) = \frac{-\alpha \frac{A_{OL\_DC}}{1 + \beta \times A_{OL\_DC}}}{1 + j \frac{\omega}{\omega_0} \times \frac{1}{1 + \beta \times A_{OL\_DC}}} \quad (16)$$

如前所述，传输函数  $A_{CL}(j\omega)$  为角频率  $\omega$  的复函数。要计算该振幅，必须再次用到函数的真实和虚构两个部分：

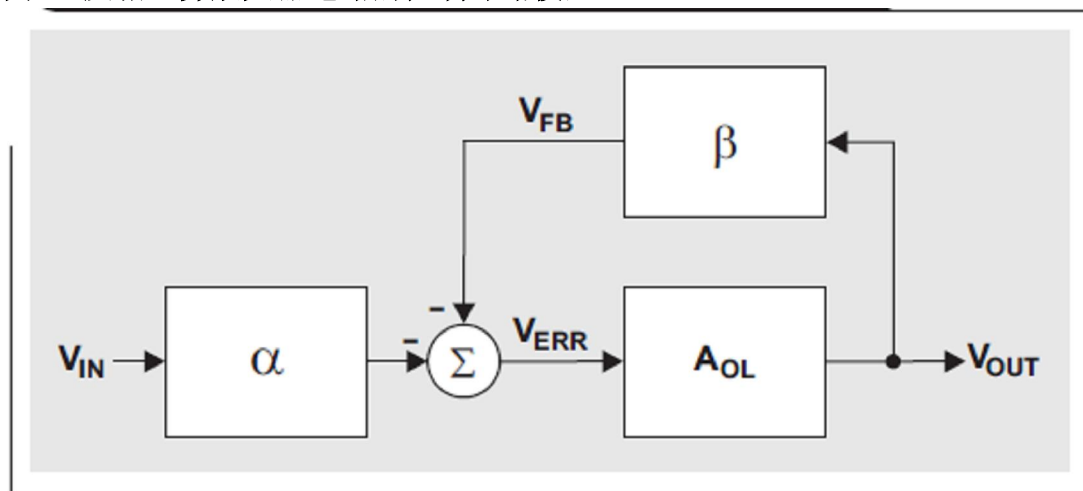
$$|A_{CL}(j\omega)|_{dB} = 20 \log \frac{\alpha \frac{A_{OL\_DC}}{1 + \beta \times A_{OL\_DC}}}{\sqrt{1 + \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \times \frac{1}{(1 + \beta \times A_{OL\_DC})^2}}} \quad (17)$$

如果用  $2\pi f$  代替角频率  $\omega$ ，则方程式 17 的闭环传输函数可以改写为：

$$|A_{CL}(jf)|_{dB} = 20 \log \frac{\alpha \frac{A_{OL\_DC}}{1 + \beta \times A_{OL\_DC}}}{\sqrt{1 + \frac{f^2}{f_0^2} \times \frac{1}{(1 + \beta \times A_{OL\_DC})^2}}} \quad (18)$$

假设存在一个运算放大器的一阶响应，则非反相和反相增益放大器的完整闭环方程式则分别以方程式 13 和方程式 18 表示。

图 6 反相运算放大器电路的控制环路模型



## 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