

固定阈值在超声波测距车载应用中的使用

作者: Arun T. Vemuri,

德州仪器 (TI) 基尔比实验室系统工程师

引言

在超声波测距车载应用中, 例如: 超声波泊车辅助 (UPA) 和盲点探测 (BSD) 等, 系统发射的超声波被周围物体反射回来。系统接收反射波 (回波), 然后将物体的回波振幅与某个阈值比较, 从而实现探测物体的目的。物体越靠近系统, 其回波也越强。因此, 阈值随时间而变化, 是一种相对常见的情况。本文将向您论述, 该阈值无需变化, 可以保持固定不变。

超声波测距

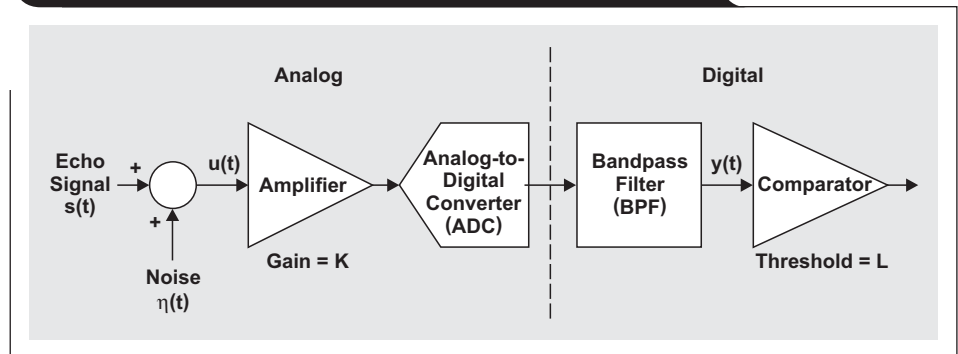
小轿车中使用的高级驾驶员辅助系统 (ADAS) 便是一种超声波测距应用。安装在车载前后保险杠和后视镜上的超声波传感器发射出超声波, 然后接收周围物体反射回来的超声波。超声波的传播时间 (飞行时间) 用于计算到物体的距离, 从而帮助驾驶员泊车: 寻找泊车点, 或者探测驾驶员盲点区域内的物体。车载前后保险杠安装的传感器达到 4 个之多, 另外, 每个后视镜上还各装有一个传感器。

在超声波高级驾驶员辅助系统中, 压电式传感器一般用于将电信号转换为超声波, 然后再把反射回来的超声波转换为电信号。接受反射回波时, 压电式超声波传感器的低接收机灵敏度通常会导致电信号非常微弱。

图 1 显示了用于处理回波电压的典型信号链。TI PGA450-Q1 是一款集成车载超声波传感器信号调节器, 适用于 UPA 系统等应用。

超声波接收机接收到的回波信号 $s(t)$ 被噪声破坏。图 1 所示输入相关噪声 $\eta(t)$ 为外部环境噪声和所有信号链组成部分的和, 其与时间 (t) 相关。被破坏的信号 $u(t)$ 经由放大器使用增益 K 放大, 然后通过一个模数转换器 (ADC) 被数字化。数字化的 AM 信号经过一个带通滤波器 (BPF) 按线路传输。该滤波器主要用于改善信号的信噪比。把经滤波后的信号 $y(t)$ 与阈值 L 比较, 以探测某个物体的存在。BPF 的后面一般会有一个振幅解调器, 其将信号转换为基带, 以进行比较。但是, 本文为了方便说明, 我们忽略了这种解调器。因此, 探测物体的关键是阈值 (L) 的选择。那么, 我们如何选择 L 呢?

图 1 使用回波处理探测物体的 ADAS



回波振幅

发射器产生的超声波为一系列载波频率下的正弦波脉冲, 并以声压级 (SPL) 来描述。SPL 的计算方法如下:

$$SPL = 20 \log_{10} \left(\frac{P_{rms}}{P_{ref}} \right), \quad (1)$$

其中, P_{rms} 为 RMS 声压, 而 P_{ref} 为基准声压。常用基准声压为 $20 \mu\text{Pa}$, 即 $0.0002 \mu\text{bar}$ 。

传感器对某个物体产生的超声波 SPL, 取决于物体到传感器的距离。特别需要请注意的是, 声压同距离成反比例关系:

$$p \propto \frac{1}{d},$$

其中, p 为声波压力, 而 d 为物体到传感器的距离。超声波传感器规范说明了 30cm 距离的 SPL。由该值, 利用这一距离定律, 我们便可以计算出任意距离 x 的 SPL:

$$\frac{P_{30_rms}}{P_{x_rms}} = \frac{x}{30}, \quad (2)$$

其中, x 为传感器和物体之间的距离, 并且 $x > 30 \text{ cm}$ 。因此, x 距离的 SPL 为:

$$SPL_x = SPL_{30} - 20 \log_{10} \left(\frac{x}{30} \right).$$

也就是说，超声波从传感器传播到物体过程中，会损失声压。

声波从物体反射回来，返回到传感器，声压进一步损失。另外，由于空气和物体都会吸收一部分声压，所接收回波的 SPL 可以通过方程式 3 进行近似计算。具体方程式请见本页末尾处，方程式中 α 为空气吸收系数。请注意，空气吸收的 SPL 与声波在空气中传播的距离与成正比。换句话说，SPL 损失与 x 成正比。我们使用因数 2，是因为声波在传感器和物体之间传播两次——一次从传感器到物体，一次从物体到传感器。根据方程式 1，传感器接收的回波脉冲的声压计算方法如下：

$$p_{\text{echo_rms}} = p_{\text{ref}} \times 10^{\frac{\text{SPL}_{\text{echo}}}{20}} \quad (4)$$

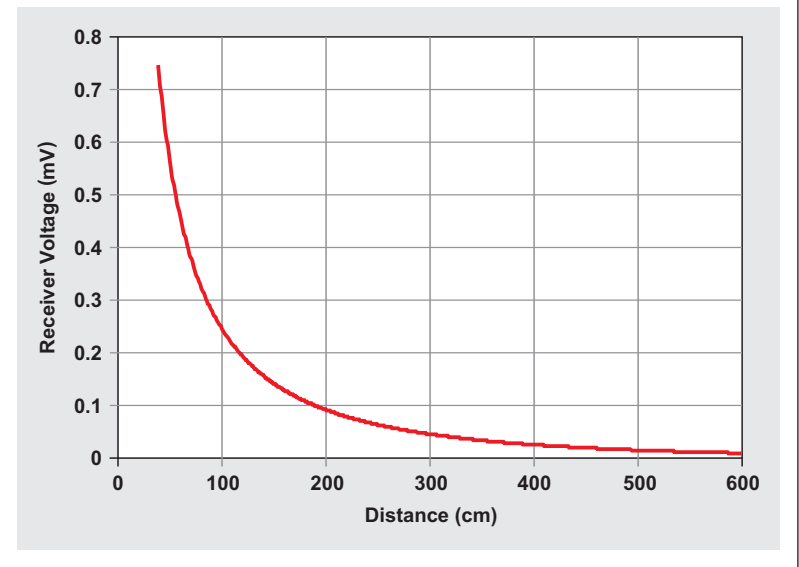
超声波接收机将接收到的声波转换为电信号。转换过程受到接收机灵敏度 (dB) 的影响。1 μPa 声压产生 10 V 时，接收机灵敏度为 0 dB。因此，利用方程式 5 和 6，可以把以 dB 表示的接收机灵敏度转换为 $\text{V}/\mu\text{Pa}$ 。

$$\text{RxSensitivity_dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{\gamma \text{ V}/\mu\text{Pa}}{10 \text{ V}/\mu\text{Pa}} \right), \quad (5)$$

其中， γ 为以 $\text{V}/\mu\text{Pa}$ 为单位的接收机灵敏度。方程式 5 可以重写为：

$$\gamma \text{ V}/\mu\text{Pa} = 10^{\frac{\text{RxSensitivity_dB}}{20} + 1} \quad (6)$$

图 2 接收机电压为物体到传感器距离的函数



我们可以将方程式 4、5 和 6 组合为方程式 7（见本页末尾），以计算超声波接收机产生的电压。方程式 7 可以简写为：

$$\gamma_{\text{echo_rms}} = K p_{\text{ref}} \times \frac{30}{2x \times 10^{0.1\alpha x}}, \quad (8)$$

其中，增益 (K) 为一个常量。

方程式 8 表明，随着物体到传感器的距离 x 增加，回波电压下降。换句话说，物体越靠近，回波振幅变大，而物体远离时，回波振幅变小。

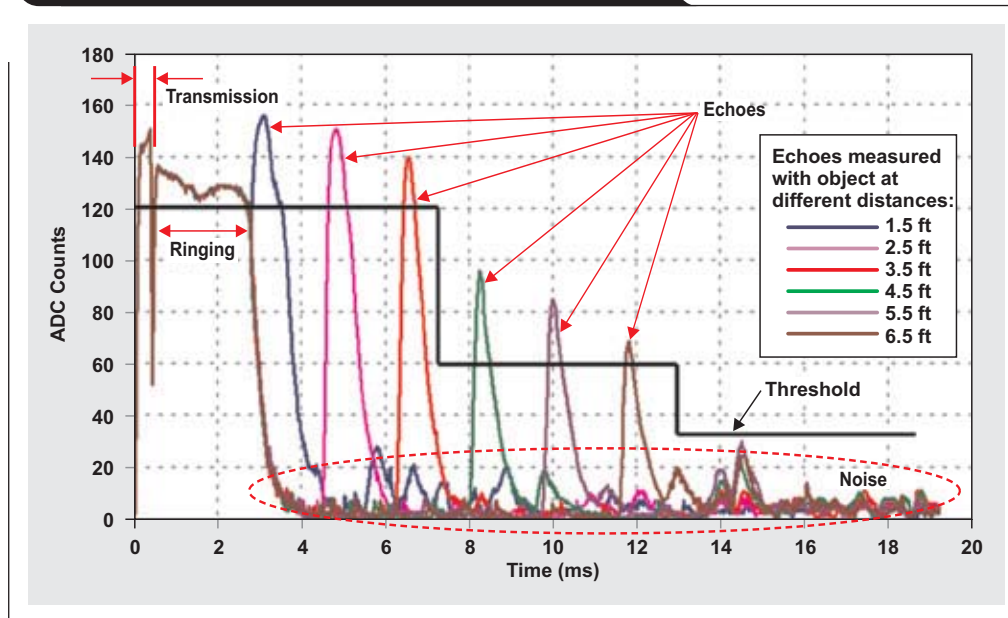
图 2 表明，接收到的电压与物体到传感器的距离有关，假设参数取值情况如下：

- 30cm 距离时发射 SPL= 106 dB
- 空气吸收=1.3 dB/m
- 物体吸收=0 dB
- 接收机灵敏度=-85 dB

$$\text{SPL}_{\text{echo}} = \text{SPL}_{\text{transmitted}} - 20 \log_{10} \left(\frac{2x}{30} \right) - 2\alpha x - \text{SPL}_{\text{absorbed by object}}, \quad (3)$$

$$\gamma_{\text{echo_rms}} = p_{\text{ref}} \times 10^{\frac{\text{SPL}_{\text{transmitted}} - 20 \log_{10} \left(\frac{2x}{30} \right) - 2\alpha x - \text{SPL}_{\text{absorbed by object}} + \text{RxSensitivity_dB}}{20}} + 1 \quad (7)$$

图 3 一个可能阈值方案的解调回波信号波形



可变阈值方案

前一小节表明，从物体接收到的回波的振幅，会随物体到传感器的距离增加而减小。另外，由图1我们知道，回波处理路径的输入信号为 $u(t) = s(t) + \eta(t)$ ，其中 $s(t)$ 为回波信号，而 $\eta(t)$ 为输入相关噪声。换句话说，回波信号振幅不仅随距离增加而减小，并且会被噪声破坏，而回波处理系统只能通过处理回波信号来探测某个物体的存在。选择阈值时，一种常用的方法是阈值方案。使用这种方法时，阈值随时间而变化。特别是，超声波刚被发射出来时，阈值较大，之后，随着经过时间的增加而减小。这种方法的基本原理是，利用信号振幅的可预测衰变，确定阈值大小：越靠近物体，回波和阈值越大，从而实现物体探测。离物体越远，回波和阈值就越小。

图3描述了可变阈值方法的概念。该图显示了不同距离时物体回波解调举例。TI PGA450-Q1 评估模块的一个测试装置用于收集波形数据。该图显示了一种可能的阈值方案。

尽管这种可变阈值方案方法原则上有效，但它存在两个缺点：

- 1、可变阈值方案要求器件内部有存储器，以将时间与阈值关系存储至方案表中。如果阈值有 3 个可能的取值（如图 3 所示），则该表就会有 6 种可能的输入。另外，对于车载中使用的高级驾驶员辅助系统 (ADAS) 来说，用户需要输入多种可能的传感器安装位置，因为传感器可以安装于车载保险杠或者后视镜上任何位置。例如，如果一个传感器有 10 个可能的安装位置，那么器件就需要存储多达 60 个位置数据。这就增加了器件的成本，因为要求使用更多的存储空间。

- 2、在车载保险杠和后视镜上安装好传感器后，系统制造厂商会“校准”方案表。校准过程就是确定各个阈值，以及切换阈值的时间。这种校准通常是一项耗时费钱的工作，特别是一个表中需要多个输入数据时更是这样。

总之，可变阈值方案的主要缺点是，它增加了超声波测距系统的总成本。

固定阈值

可变阈值方法使用基于时间变化的阈值，与这种方法不同的是，固定阈值方法将信号噪声用作基线。系统噪声用于确定阈值，这样物体不存在就不对其进行探测。

另外，由图 1 我们知道，回波处理路径输入信号为 $u(t) = s(t) + \eta(t)$ 。回波信号是一系列载波频率 $f_c(t)$ 下的正弦波脉冲，其计算方法如下：

$$s(t) = S \times \sin(2\pi f_c t), \quad (9)$$

其中， S 为回波信号振幅。因此，方程式 10 给出了放大信号的 RMS 值：

$$s_{\text{rms}} = \frac{KS}{\sqrt{2}} \quad (10)$$

请注意，这种一连串的脉冲仅短暂出现，从而让信号振幅看似受到长时间调制。

带通滤波器 (BPF) 的 $y(t)$ 输出可以表示为:

$$y(t) = f(\text{BPF}) \rightarrow \{f(\text{ADC}) \rightarrow K[s(t) + \eta(t)]\}, \quad (11)$$

其中, $f(\text{BPF})$ 为 BPF 的数字滤波器函数, 而 $f(\text{ADC})$ 为 ADC 的量化函数。假设回波信号的基准时间为 $t_0 = 0$ (通常为发射器发射超声波的时间), 则 $y(t) < L$ 、 $t_{\text{end}} < t < t_{\text{object}}$ 和 $y(t_{\text{object}}) \geq L$, 并且 t_{end} 大于零且为所发射脉冲初始脉冲群的末尾时, 则可以声明 t_{object} 时探测到物体的存在。问题是, “我们可以选择使用一个固定阈值, 弃用可变阈值方案吗?” 要回答这个问题, 我们可以利用方程式 12, 并假设 t 为一个瞬间值, 从而照顾到各个噪声组成部分:

$$\eta(t) = \eta_{\text{ext}}(t) + \eta_{\text{amp}}(t) + \frac{1}{K} \eta_{\text{ADC}}(t) + \frac{1}{K} q(t) + \frac{1}{K} \eta_{\text{BPF}}(t) \quad (12)$$

变量定义如下:

K = 放大器增益

$\eta_{\text{ext}}(t)$ = 外部噪声

$\eta_{\text{amp}}(t)$ = 放大器噪声

$\eta_{\text{ADC}}(t)$ = ADC 电路噪声

$q(t)$ = ADC 量化

$\eta_{\text{BPF}}(t)$ = BPF 计算数学误差

各个噪声组成部分彼此不相关。另外, 我们假设每个噪声组成部分为零平均值和非零方差高斯。把方程式 9 和 12 代入方程式 11 后, BPF 输出变为:

$$\begin{aligned} y(t) &= f(\text{BPF}) \rightarrow \{f(\text{ADC}) \rightarrow K[S \times \sin(2\pi f_c t) + \eta(t)]\} \\ &= KS \times \sin(2\pi f_c t) + f(\text{BPF}) \rightarrow [K\eta_{\text{ext}}(t) + K\eta_{\text{amp}}(t) + \eta_{\text{ADC}}(t) + q(t) + \eta_{\text{BPF}}(t)]. \end{aligned} \quad (13)$$

根据方程式 9, BPF 噪声的 RMS 为:

$$\eta_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{Q} \times \frac{f_c}{f_s} \times \left[(K\eta_{\text{ext}})^2 + (K\eta_{\text{amp}})^2 + \eta_{\text{ADC}}^2 + q^2 + \eta_{\text{BPF}}^2 \right]}, \quad (14)$$

其中, Q 为 BPF 的品质因数, f_s 为 ADC 采样频率, 而所有噪声项均为 RMS 值。知道方程式 14 所表示噪声的 RMS, 并假设 6.6 波峰因数的情况下, 所选阈值为:

$$L = 6.6 \sqrt{\frac{1}{Q} \times \frac{f_c}{f_s} \times \left[(K\eta_{\text{ext}})^2 + (K\eta_{\text{amp}})^2 + \eta_{\text{ADC}}^2 + q^2 + \eta_{\text{BPF}}^2 \right]}.$$

上述方程式可以表示为:

$$L = 6.6K \sqrt{\frac{1}{Q} \times \frac{f_c}{f_s} \times \left[\eta_{\text{ext}}^2 + \eta_{\text{amp}}^2 + \frac{\eta_{\text{ADC}}^2 + q^2 + \eta_{\text{BPF}}^2}{K^2} \right]}. \quad (15)$$

换句话说，我们可以利用方程式 15 选择固定阈值。图 4 显示了使用固定阈值的举例回波响应。

使用这种方法的一个明显优点是，它仅需要存储一个输入数据。如果一个传感器有 10 个可能的安装位置，只需总共存储 10 个输入数据便可。相比前面介绍的可变阈值方法，存储空间需求减少了 6 倍。请注意，如果放大器增益 (K) 改变，方程式 15 同样也提供了一种调节阈值的机制。

方程式 15 提供了一种确定阈值大小的分析方法。一般而言，需要利用噪声分析确定阈值大小。进行噪声分析的一种替代方法是，使用一个阈值对车载上安装的传感器进行校准。可将物体放置到传感器规定测距范围的最远处，然后完成测距校准。

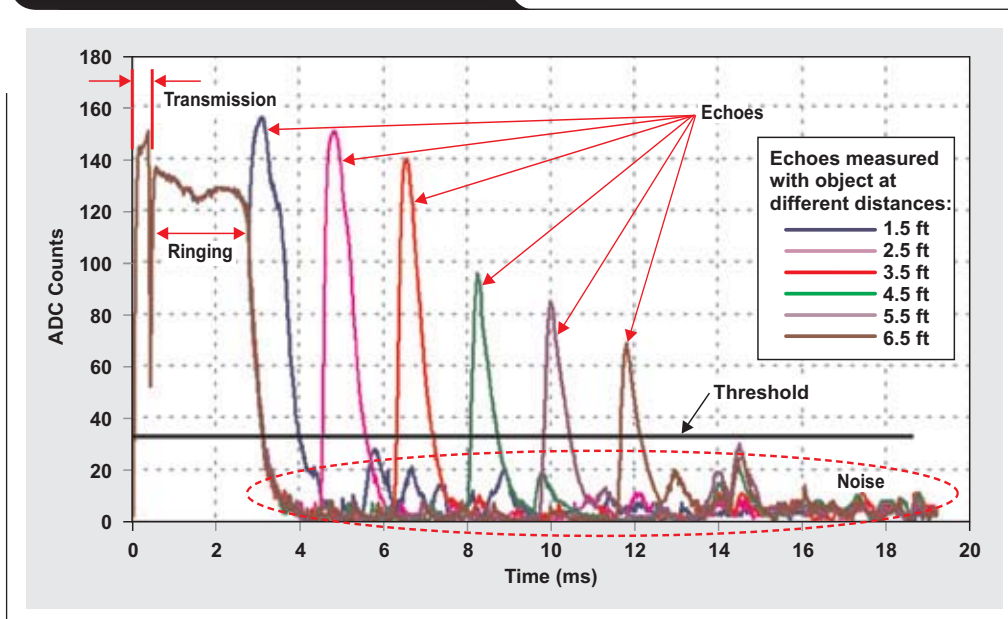
所选择的阈值需足够大，以在没有物体时超过处理后信号的噪声值，并确保仅在存在物体时信号能够穿过该阈值。请注意，在使用这种方法选择阈值时，也应考虑 BPF 衰减。最后，为了提高物体探测系统的稳健性，信号的振幅必须在某段时间大于固定阈值。

相关网站

amplifier.ti.com

www.ti.com/product/PGA450-Q1

图 4 使用固定阈值处理回波数据



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

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 © 2012 德州仪器 半导体技术 (上海) 有限公司