

电阻温度检测器的模拟线性化

作者: Bruce Trump,
德州仪器 (TI) 技术专家组成员

电阻温度检测器 (RTD) 常用于工业和科学温度测量。最为常见的类型是纯铂 (Pt) 线, 或者将纯铂金浓缩为基板上的薄片。它们都利用了这种贵金属电阻随温度而变化的属性。这种属性, 在低温到 800°C 以上高温范围, 都非常稳定和有效, 可以实现各种物理配置、电阻范围和精确度 1。常用的表示法“Pt100”, 表示 0°C 时 100Ω 电阻。Callendar-Van Dusen 方程描述了 RTD 电阻和温度之间的关系,

其各个值定义如下:

R_0 为 0°C 时 100Ω 电阻 (Pt100)

$$A = 3.9083 \times 10^{-3}$$

$$B = -5.775 \times 10^{-7}$$

$T > 0^\circ\text{C}$ 时, $C = 0$, 或者 $T < 0^\circ\text{C}$ 时, $C = -4.23225 \times 10^{-12}$ 。

约 0.39%/°C 时, Pt100 RTD 的电阻随温度而增加。尽管它们远比热电偶线性, 但是每 100°C 测量范围, RTD 有约 0.38% 的明显二阶非线性 (参见图 1)。这种非线性通常可以通过数字方法得到纠正, 但有许多应用的 RTD 是完全的模拟处理和线性化。

本文将为您介绍一种实现 RTD 线性化的模拟技术。这种技术还用于桥接传感器, 例如: 测压组件等。本文的一些原则, 也适用于其他有二阶非线性的比率测量器件, 也即输出与激励电压或电流成正比的所有传感器或者系统。

图 2 中较为夸张的曲线图表明, 温度系统随温度升高而减小, 从而在中间形成一个向上的弓形。0°C 以上时, Pt100 的标准化数据具有一种完全二阶即抛物线函数。假设在两个末端温度处进行校准, 则其产生的误差在中点温度处达到最大。

当 RTD 由一个电流源激励时, 得到的 RTD 电压与电阻成正比, 从而产生相同的非线性。但是, 如果激励电流随 RTD 温度上升而逐渐增

图 1 Pt100 RTD 电阻与温度的曲线关系

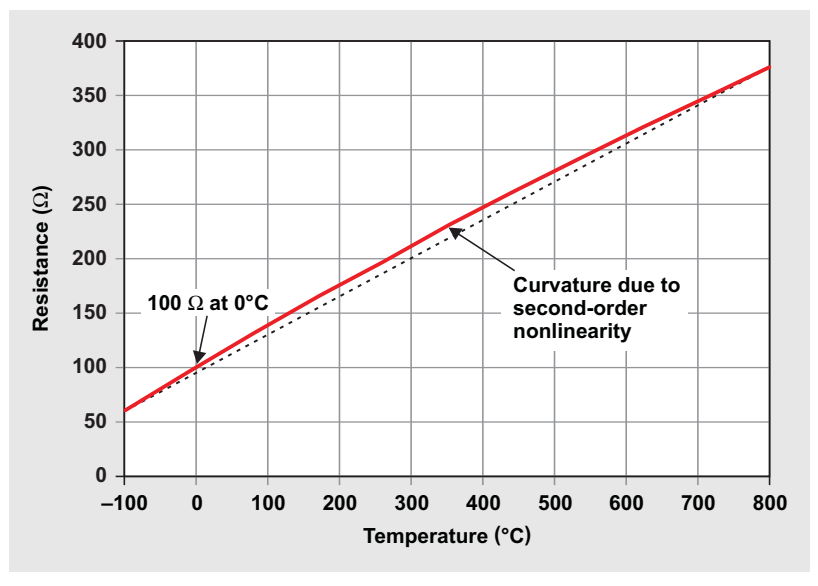
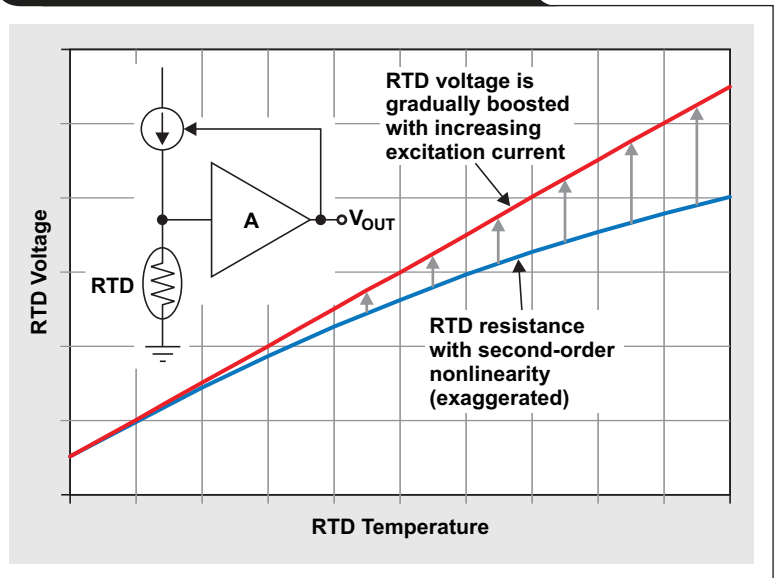


图 2 RTD 电压与温度的关系曲线图



加，则这种非线性可以得到大大降低。图 2 显示了一个不断增加的激励电流，其来自增强的 RTD 电压的输出。实际上，该电流是正反馈的受控电流。它产生了一种有趣的“先有鸡还是先有蛋”现象：放大器输出被线性化时，放大器输入端的 RTD 电压被线性化，反之亦然。正确的正反馈量才可同时实现上述两种线性化。

当对正反馈进行优化时，一种更小的 S 形误差仍然存在，且具有大约相等的正负值，其在 1/4 和 3/4 满量程时达到最大值（参见图 3）。这种基本三阶非线性并非来自于 RTD，而是这种线性化技术的副产品。它的大小取决于线性化选择的温度范围。图 3 显示了 -100°C 到 +800°C 温度范围（相差 900°C）的初始非线性误差。中间量程的 3.7% RTD 非线性降至约 ±0.11%，仅为原来的 1/33。温度范围更小时，这种改善情况会更加明显，200°C 范围时可减少 150 倍之多，即减少至原来的 1/150。

使用正反馈会增加电路不稳定的可能性。但是，这种反馈量非常的小，小到对常用电路的稳定性几乎没有影响。

图 4 显示了一种 RTD 的实际实现方法。R1 提供主激励电流，其来自于 VREF（一个稳定的电压参考）。R5 提供来自 A1 输出的激励电流的温变组件。R2、R3 和 R4 设置要求的放大器增益和补偿，以产生需要的输出电压范围。该例子中的德州仪器（TI）OPA188*，是一种新型低噪声、截波稳定式运算放大器，它让电路产生的误差小到可以忽略不计。它拥有非常低且稳定的补偿电压，让其能够升级到 TI OPA277 精密型工业放大器。

我们可以使用迭代技术，计算出实现最佳校正所需的电阻器值。许多设计人员可能会使用一些颇具创造性的计算方法或者近似法，对这种电路进行优化。通过求解涉及 RTD 电压、RTD 电阻、VREF、R1、R5 和 VOUT 的结点方程式，得到一个封闭解是可能的。具体如下：

$$V_{RTD} = V_{REF} \times \frac{R_{RTD} \times R5}{R_{RTD} \times R5 + R1} + V_{OUT} \times \frac{R_{RTD} \times R1}{R_{RTD} \times R1 + R5}$$

图 3 RTD 误差百分比与温度曲线对比关系图

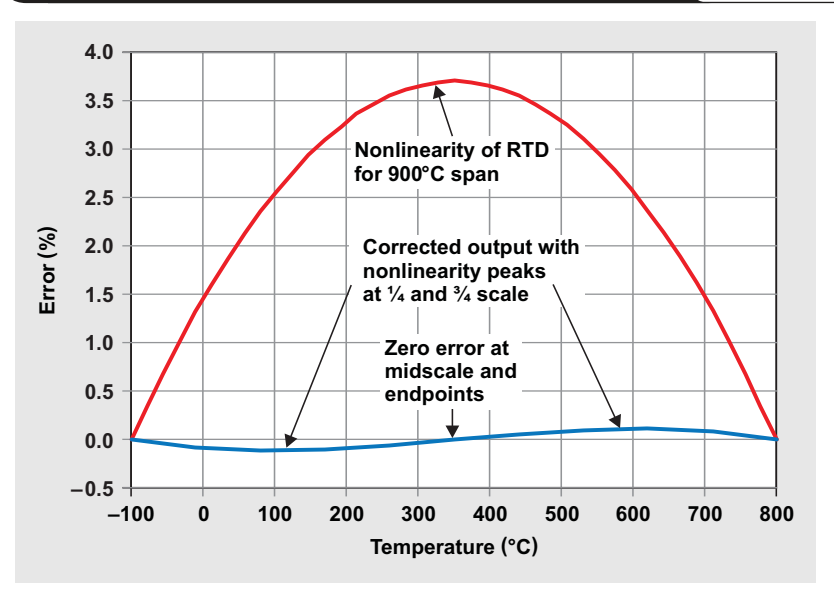
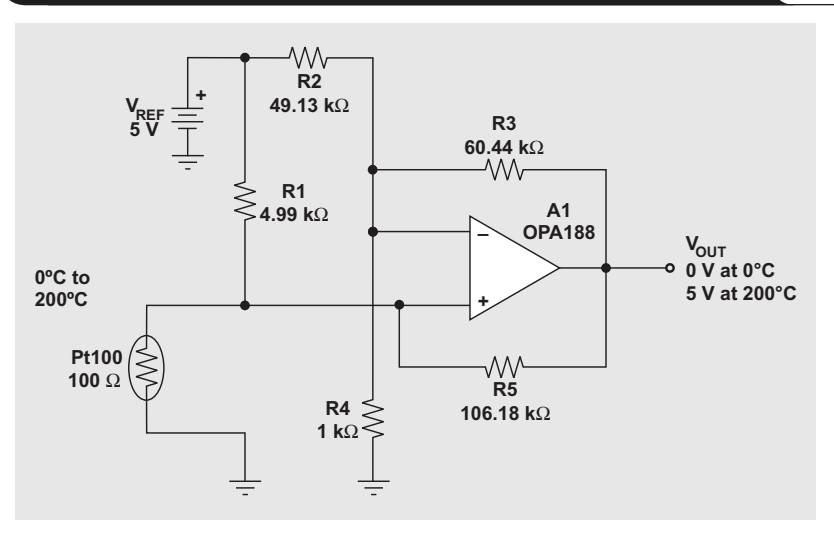


图 4 误差补偿典型 RTD 配置



要在校正末端温度和中点温度下实现零误差，必须满足三个条件。我们可以将前面方程式写成三个独立的变体，用以描述这三种零误差条件。同时求解这三个变体方程式，得到唯一一个未知变量 R_5 的值。中点温度的 RTD 电阻并非为两个末端电阻的一半。该中点条件是求解最佳线性校正的关键。

数学计算得到三个 R_5 值；只有一个是正确的电阻值。 R_5 的表达式很长，因此本文没有列出来。若想下载有关计算方法的 Excel® 工作表，请访问 <http://www.ti.com/lit/zip/SLYT442>，点击“打开”在线浏览 WinZip® 目录（您也可以点击“保存”下载 WinZip 文件离线使用）。

然后，打开文件 RTD_Linearization_v7.xls，可查看计算方法工作表。这种封装解理论上让人满意，并且避免了可能出现的收敛性问题，但是其结果实际上与迭代计算得到的结果一样。

由于常常会要求精确的非标准值，因此实用的实现方法通常要求对电阻进行微调以进行校准。SPICE 模拟可帮助确定最接近标准值的实际性能。上面列出的下载 WinZip 文件，还在 TINA-TI™ SPICE 文件中包括了两个 RTD 模拟例子。一个文件基于运算放大器实现 RTD 线性化，另一个文件则基于测量放大器。SPICE RTD 模拟器的更多详情，请参见《参考文献 2》。

图 5 显示了随着校准温度范围的上升 RTD 的未校正非线性情况。最低温度到最高温度相差 500°C 时，该温度范围扩大约 2%。对这种非线性进行补偿的 RTD 激励电流的变化，约为非线性的四倍。因此， 500°C 测量跨度时，低量程温度到满量程，激励电流增加约 8%。

低电阻 RTD 连接，是保持这种电路精确度的关键。正因如此，如 Pt1000 或者 Pt5000 等高电阻 RTD 可能最为实用。利用四线（或者开尔文）连接 RTD 和一个附加运算放大器时，可以消除线阻产生的误差。

三线 RTD 连接的集成测量放大器，可以提供一种替代解决方案（参见图 6）。在三线连接中，两个

图 5 RTD 误差激励电流校正

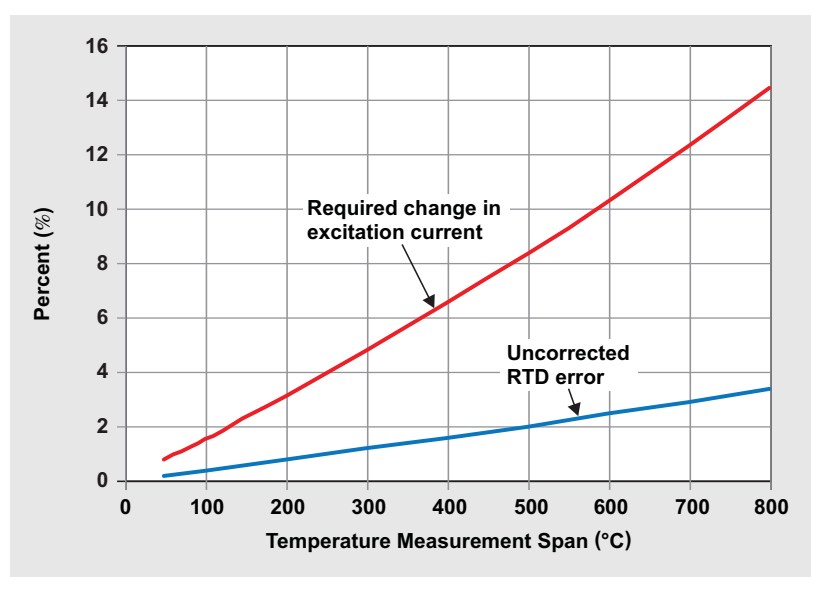
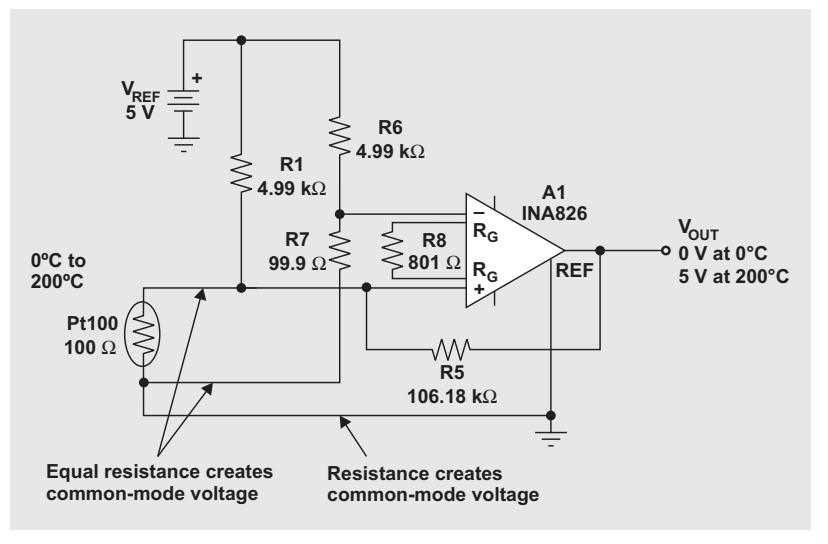


图 6 三线 RTD 连接放大器



连接用于 RTD 接地端。线阻相同的相等电流，形成共模输入电压，而其受到测量放大器的抑制。接地线连接的电流也会形成共模电压。注意，信号连接的电流并非完全相等。它们会因 R_5 的线性校正电流变化而不同。但是，这种配置消除了线阻带来的大部分误差。

其他传感器类型

如变形测量器和测压组件等桥接传感器，常常要求使用类似的技术来实现线性化。尽管电压激励也常常会用于这些

表1、RTD 和桥接传感器的 TI 集成电路部分清单

产品	传感器类型	激励电流	输出	特性
XTR105	RTD	双1mA电流	4到20mA	电阻器可编程范围和线性化
XTR106	压力桥接	电压	4到20mA	校正正或负二阶非线性
XTR108	RTD	双可编程电流	4到20mA或电压	可编程激励电流和线性化
XTR112	高阻抗RTD	双100- μ A电流	4到20mA	Pt1000 RTD激励
XTR114	高阻抗RTD	双250- μ A电流	4到20mA	Pt5000 RTD激励
PGA309	压力桥接	可编程电压	电压	线性化数控模拟信号路径

应用，但概念是一样的。激励电压因放大器输出电压不同而各异。这些传感器会有一种向下的弓形非线性，其要求激励电压随压力上升而下降。另外，非线性可能会有明显的个体差异，因此需要进行单个校准。

集成解决方案

TI 在一些为 RTD 和桥接传感器设计的集成电路中，使用可变激励进行线性化（参见表 1）。一些电路专为那些双线、4 到 20mA 电流环路输出的遥感器而设计。XTR106 和 PGA309 均拥有电压激励，是许多变形测量器型桥接传感器应用的首选。尽管是为某些具体的传感器类型而设计，但经过改进以后，这些器件已经可以成功地用于各种传感器应用，并且使用或者不使用可变激励，都可以实现线性化。

参考文献

- 1、电阻温度计。维基百科（在线）。网址：http://en.wikipedia.org/wiki/Resistance_thermometer
- 2、《SPICE精密Pt100 RTD模拟器的开发》，作者：Thomas Kuehl，发表时间 2007年 5 月 28 日，EN-Genius Network:analogZONE:acquisitionZONE（在线）。网址：http://www.analogzone.com/acqt_052807.pdf
- 3、《测压计对高度的线性响应》，作者：Bruce C. Trump.，发表时间1994年3月3日，EDN（在线），网址：<http://www.edn.com/archives/1994/030394/05di5.htm>

相关网站

www.ti.com/product/partnumber（用INA826、OPA277、OPA2188、PGA309、XTR105、XTR106、XTR108、XTR112 或者XTR114代替网址中的“partnumber”）

Excel 电子数据表和 TINA-TI™ 模拟举例支持文件：
www.ti.com/lit/zip/SLYT442

TI Worldwide Technical Support

Internet

TI Semiconductor Product Information Center Home Page

support.ti.com

TI E2E™ Community Home Page

e2e.ti.com

Product Information Centers

Americas	Phone	+1(972) 644-5580
Brazil	Phone	0800-891-2616
Mexico	Phone	0800-670-7544
	Fax	+1(972) 927-6377
	Internet/Email	support.ti.com/sc/pic/americas.htm

Europe, Middle East, and Africa

Phone	
European Free Call	00800-ASK-TEXAS (00800 275 83927)
International	+49 (0) 8161 80 2121
Russian Support	+7 (4) 95 98 10 701

Note: The European Free Call (Toll Free) number is not active in all countries. If you have technical difficulty calling the free call number, please use the international number above.

Fax	+ (49) (0) 8161 80 2045
Internet	support.ti.com/sc/pic/euro.htm
Direct Email	asktexas@ti.com

Japan

Phone	Domestic	0120-92-3326
Fax	International	+81-3-3344-5317
	Domestic	0120-81-0036
Internet/Email	International	support.ti.com/sc/pic/japan.htm
	Domestic	www.tij.co.jp/pic

Asia

Phone	
International	+91-80-41381665
Domestic	<u>Toll-Free Number</u>
Note: Toll-free numbers do not support mobile and IP phones.	
Australia	1-800-999-084
China	800-820-8682
Hong Kong	800-96-5941
India	1-800-425-7888
Indonesia	001-803-8861-1006
Korea	080-551-2804
Malaysia	1-800-80-3973
New Zealand	0800-446-934
Philippines	1-800-765-7404
Singapore	800-886-1028
Taiwan	0800-006800
Thailand	001-800-886-0010
Fax	+8621-23073686
Email	tiasia@ti.com or ti-china@ti.com
Internet	support.ti.com/sc/pic/asia.htm

Important Notice: The products and services of Texas Instruments Incorporated and its subsidiaries described herein are sold subject to TI's standard terms and conditions of sale. Customers are advised to obtain the most current and complete information about TI products and services before placing orders. TI assumes no liability for applications assistance, customer's applications or product designs, software performance, or infringement of patents. The publication of information regarding any other company's products or services does not constitute TI's approval, warranty or endorsement thereof.

A122010

DLP is a registered trademark and Auto-Track, E2E, FilterPro, Impedance Track, MSP430, OMAP, and SWIFT are trademarks of Texas Instruments. Acrobat and Reader are registered trademarks of Adobe Systems Incorporated. The *Bluetooth* word mark and logos are owned by the Bluetooth SIG, Inc., and any use of such marks by Texas Instruments is under license. Celeron is a trademark and StrataFlash is a registered trademark of Intel Corporation. Excel is a registered trademark of Microsoft Corporation. I²C Bus is a registered trademark of NXP B.V. Corporation. InfiniBand is a service mark of the InfiniBand Trade Association. WinZip is a registered trademark of WinZip International LLC. All other trademarks are the property of their respective owners.

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