

Ramesh Ramamoorthy
CC2000™ 微控制器应用
工程师
德州仪器

通过在 C2000™ Delfino™ 微控制器上实施分解器数字转换降低系统成本

简介

在典型的精密位置伺服控制系统中，分解器或编码器用于对控制单元提供轴位反馈。分解器比编码器更稳定可靠，能够承受合理范围内的环境污染和噪声。编码器的输出为脉冲序列形式，分解器的输出则为振幅调制正弦信号，需要额外的处理才能提取位置信息。本文说明了 TI 的 C2000 Delfino 微控制器如何有效地处理此类信号，以便在保持更高精度的情况下获取速度和位置反馈。

分解器是一个旋转变压器，一次绕组在转子中，两个二次绕组在定子中。这两个二次绕组的空间互差 90 度。因此，交链二次绕组的主磁通与转子位置的正弦和余弦成比例。如果一次绕组接受的励磁电压 $e_p = E_m \sin(\omega_c t)$ ，那么二次绕组中的感应电压（正弦和余弦）为：

$$e_{\text{sine}} = k \cdot E_m \sin(\omega_c t) \cdot \sin(\theta)$$

$$e_{\text{cosine}} = k \cdot E_m \sin(\omega_c t) \cdot \cos(\theta)$$

其中，

ω_c 为励磁频率

θ 为转子位置

k 为一次绕组和二次绕组之间的变比

为转子中的一次绕组供电是另一项任务。滑环虽然也能使用，但不够稳定。正因为如此才在相同定子和转子的一端以同心方式构建了一个辅助变压器，由定子容纳一次绕组并从外部源接受励磁，由转子容纳二次绕组并按图 1 所示向分解器的一次绕组提供馈送。

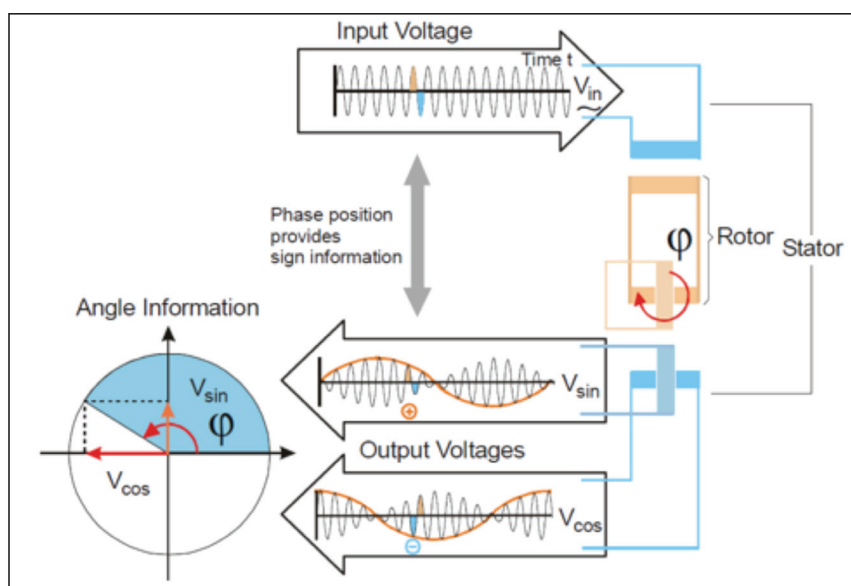


图 1：分解器功能方框图

分解器的设计难题

由于分解器的输出信号彼此之间存在三角相关性，因此可以按照下述简单数学方式提取转子位置信息：

$$\theta = \tan^{-1}(e_{\text{sine}} / e_{\text{cosine}}) \rightarrow 1$$

此类数学方式的准确性受公式右侧参数质量的影响，也就是二次电压。由于电气相移、二次绕组之间的变比不匹配以及二次绕组之间的正交机械偏差，这种方式可能会存在误差。除了这些原生问题以外，本底噪声、控制电路中的增益不匹配和非线性以及载波质量问题也能导致一定程度的误差。因此，设计控制硬件和软件时应该小心谨慎，尽量避免此类误差。

简单方法

最简单直接的方法是实施公式 1。对峰值状态下的二次信号值进行取样是比较合理的，这样可以确保较高的信噪比，然后按图 2 所示将其用在公式 1 中。

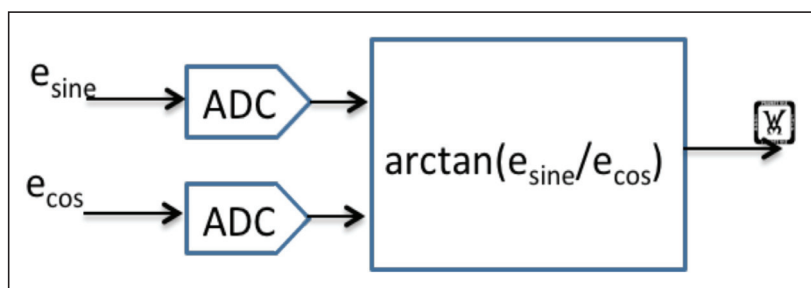


图 2：简单实施方案

然而，这种简单方法在质量方面稍显不足。考虑到系统噪声，估算角度会存在较多抖动，正因为如此才需要滤波器。遗憾的是，滤波器会带入相位滞后，它随着速度的变化而产生线性差异，因而不合适。因此需要观测器，它不仅能够在不造成相位滞后的情况下过滤输出抖动，还能提高估算精度，除此以外还可用于估算转子速度。

观测器

观测器用于跟踪参数，其目的是在各种动态条件下都确保最低的观测误差。因此需要一个参考值和一个估算值，然后根据观测到的误差采取纠正措施。可以将观测器设想成能够将负载转矩的作用考虑在内，以便最大限度地缩短响应时间，但接下来还是需要负载惯性，从而使其独立加载，因此在该评估中不考虑这种情况。在这种特定情况下，观测器实际上成为了一个需要少许功能块以执行某些任务的 PLL，如图 3 所示。

信号清理 - 带通滤波器

要让观测器稳定可靠，其输入参数应该尽可能精准。在模数转换器（ADC）读取之前，来自分解器的正弦和余弦反馈可能会因为反馈处理硬件的本底噪声、动态偏移及增益变化而受到潜在的影响。将这些信号通过带通 FIR 滤波器传递即可对上述影响中的大部分进行补偿，该滤波器的通带约等于载波频率，带宽至少为轴速的两倍。这样可将 FIR 输出信号的频谱

限制为 $F_c + F_b$ 和 $F_c - F_b$ ，从而有效摆脱反馈信号中的动态 DC 漂移和大部分的白色噪声。此过程额外提高了这些信号的精度，从而有效增强了公式 1 中分子和分母的准确性。采样频率越高且带宽越低，精度就会越高。在考虑 CPU 负载时，比较实际的做法是设置采样频率上限和 FIR 滤波器阶序，最高转子速度要求则设定了带宽限制。FIR 滤波器的阶序较低时，难以进行通带的精确定位，因此带宽会比所需的水平要高一些。在所有这些条件的约束下，精度仍然会有所提高。然而，这还不是没有抖动的，仍然需要滤波器。

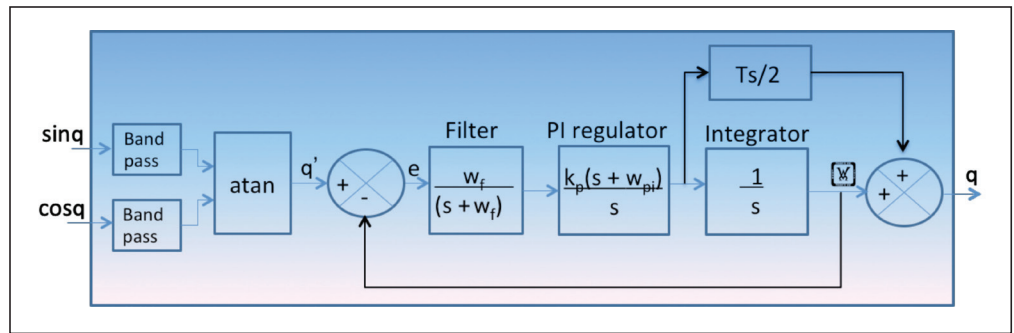


图 3: 控制方框图

小数式抽样

为了利用 ADC 的满量程并提高信噪比，在 FIR 输出不接近于周期峰值时可以将其忽略。因此，可以只在达到周期峰值的情况下执行 FIR 操作，从而产生 2N:1 的自然小数式抽样（考虑其中一个峰值时）或 N:1 的自然小数式抽样（考虑两个峰值时）。采用 2N:1 的小数式抽样时，采样频率与载波频率同步，因此会将信号解调为对应于轴速的频率 (F_b)；采用 N:1 的小数式抽样时，解调的信号载波频率对应于它的周期峰值，极限为 F_b 。在 N:1 的情况下，需要额外的逻辑来区分正载波峰值和负载波峰值。小数式抽样率减半会导致每载波周期的样本数翻倍，但如何取舍还需要根据 CPU 容量及系统要求进行权衡。

误差计算

比较直接的方法是找到反馈信号的相切弧线，然后将其与观测到的值对比。另一种主流方法是利用输入信号的正弦和余弦对估算角度的正弦和余弦进行通分，然后从一个中减去另一个，数学表达方式如下：

$$\sin(\theta - \phi) = \sin \theta \cdot \cos \phi - \cos \theta \cdot \sin \phi$$

当 $\theta \sim \phi$ 时，

$$\sin(\theta - \phi) \sim \theta - \phi$$

在第二种方法中，当参考值和估算值相差较多时，误差与正弦成比例并且变得具有非线性（和第一种方法不同）。如果误差角度在第二或第三象限内，可能会延长第二种方法的响应时间。在正常工作环境下，可能不会出现如此大的误差。然而，此试验中采用了相切弧线法，从而提高了其线性的可信度。

滤波器

虽然信号通过带通滤波器传递，但基带内的任意噪声还是能穿过，从而使最终结果失真。简单的一阶滤波器即可将这种影响降至最低。由于源信号与误差信号（DC）相比具有动态变化（斜坡），因此过滤误差信号能降低噪声影响，同时还不造成任何相移或失真。

带通延迟补偿

FIR 滤波器输出的延迟与抽头数量成比例，无论输入频率是多少。如果有 N 个载波样本和 $N+1$ 个 FIR 滤波器抽头，则延迟为 $N \cdot T_s/2$ ，其中 T_s 为采样时间。由于 N 个样本分布在一个载波周期内，因此将有半个载波周期的延迟。对于这一点，可根据转子当前的估算速度予以补偿，如方框图中所示。

环路调优

系统的开环传递函数如下：

$$\frac{W(s)}{e(s)} = \frac{k_p w_f (s + w_{pi})}{s^2 (s + w_f)}$$

图 4 中展示了它的根轨迹图

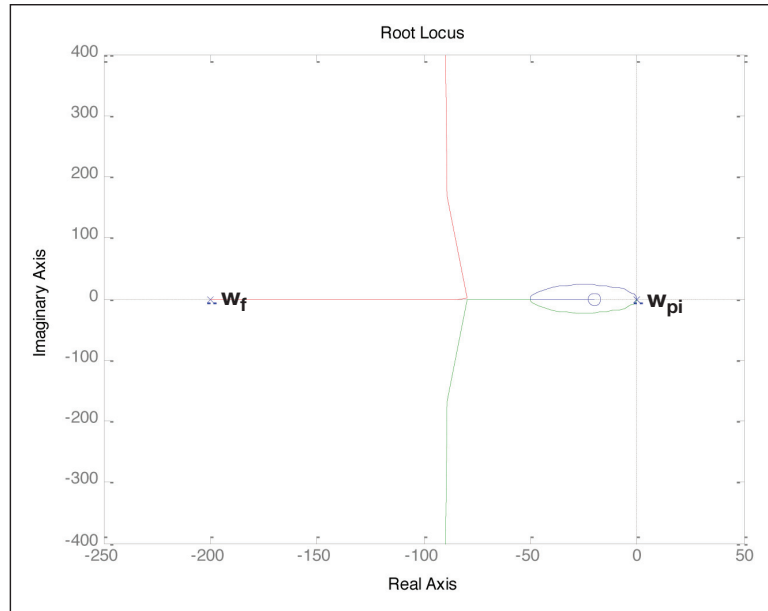


图 4： 分解器电站的根轨迹图

$$\frac{W(s)}{q(s)} = \frac{K (s + w_z)}{(s + w_{p1}) (s^2 + 2d w_n s + w_n^2)}$$

根据所需的噪声过滤等级，可选择 ω_f 。对于环路稳定性， ω_{pi} 需要小于 ω_f 。

闭环传输函数如下：

该观测器的稳定状态误差与转子加速度成比例。如果为 k_p ，选择一个较高的值，则可将此误差最小化。为 K_p, w_z, w_{p1}, δ 和 w_n ，选择合适的值即可将瞬态响应和过滤等级调至较优水平。

试验设置

为评估分解器接口的总体性能（包括硬件和软件），采用了绝对编码器作为参考。因此，测试台包括一台电机、一个绝对编码器和一个分解器。

硬件接口

图 5 展示了分解器的硬件原理图。分解器的一次绕组接受的正弦励磁电压为 $10V_{p-p}$ ，频率为 10KHz。该励磁电压利用定时器输出的正弦 PWM 生成，并分两级过滤，从而产生明显清洁且没有谐波的正弦波。此信号显示为 PWM_dither，通过 GPIO 接地。来自分解器的反馈在经过调整之后可限定在 C28 的 ADC 范围内。

由于偏移/增益中的漂移，这一阶段可能会产生误差，但是其中一部分可通过 FIR 滤波器加以处理。因此，在选择组件时应该小心谨慎。

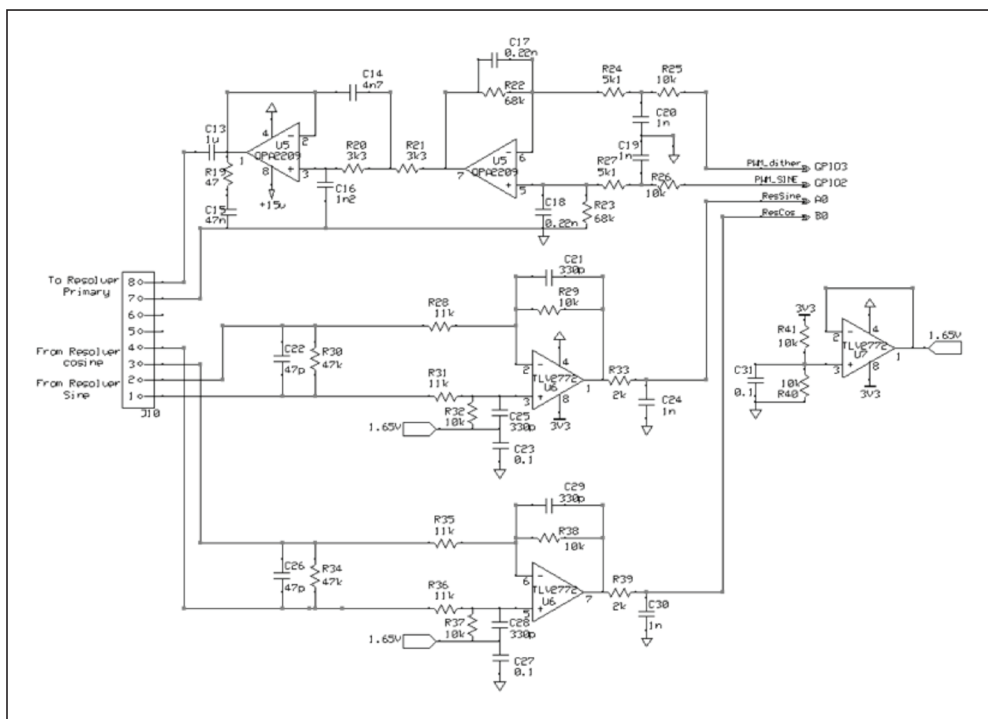


图 5： 硬件原理图

软件接口

反馈的采样频率为 160KHz（8 次过采样），每个载波正弦波获得 16 个样本。经过初始偏移补偿之后，这些反馈会通过控制方框图进行传递，如图 3 所示，然后获得角度估算值。在 Delfino MCU (TMS320F28335) 中，此过程会在 CPU 中实施。载波也会以这一速率更新，ADC 采样的实例会经过定位，以便在峰值状态下捕获来自分解器的调制反馈。

测试规程

在任何给定测试的过程中，电机都保持断开状态，转子则保持静止。将获取并比较分解器和绝对编码器的估算位置。对于任何给定位置，绝对编码器都将提供单个唯一值，分解器则提供一系列彼此略有不同的值。分解器输出的平均值会与编码器输出进行比较，以获取平均误差，然后会计算编码器输出与其均值相比最差情况下的偏差，以获取系统噪声或数字化误差。如果此误差较小，分辨率和性能就会较高。将在整个旋转周期内针对各种不同的转子位置重复进行此测试，图 6 即为 Delfino MCU 的结果曲线图。

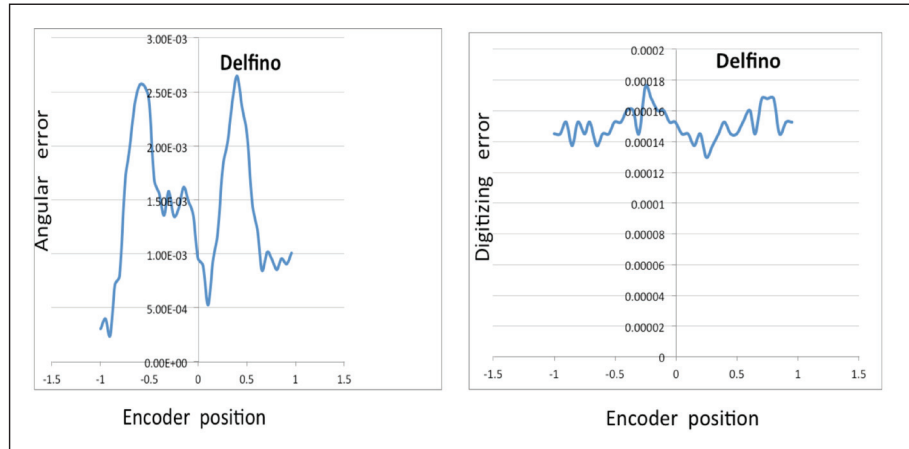


图 6 (a) Delfino 系统误差

(b) Delfino 数字化误差

表 1 最差情况下的测试结果

Device	System Error (Analog Front End)		Digitizing Error (Noise)		ENOB
	Mean Abs Error (arc min)		Error Deviation (arc min)		
	Min	Max	Min	Max	
Delfino- 28335	2.63672	28.59192	1.40076	1.89514	13.476

可能会发现一点，最大平均误差约为 25 弧秒。需要对此进行纠正，以处理编码器初始化过程中引入的误差。开始测试之前，如果分解器输出约为零，则将编码器输出手动复位为零，以此在分解器和编码器之间设置一个数据线。但是这样会使得误差值在各种位置情况下都为正数。如果数据的设置使得误差在整个周期内都在正负两边均衡摇摆，那么最大误差将只有 12 弧分左右。必须注意，此误差是分解器系统中所有误差的总和，包括机械、电气、电子、量化和数字舍入误差。使用 Delfino 器件时，测得的分辨率高于 13 位。可以提取额外的数据位，但可能无法代表实际角度，因为它们不一致，会导致许多误差 LSB。

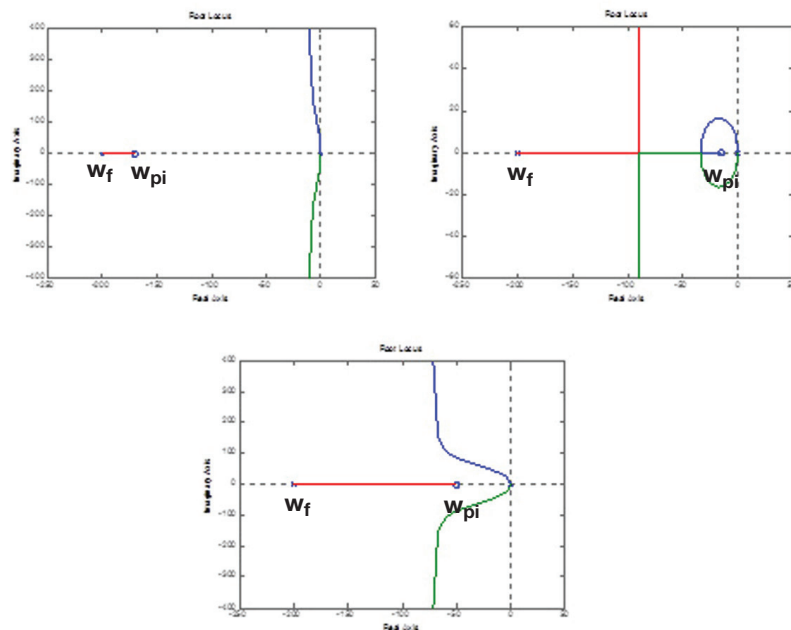


图 7： 根据开环极点进行开环零点定位的根轨迹分析。

开环参数的放置影响

开环系统中的可调参数为环路增益 (K_p)、零点 (ω_{pi}) 和极点 (ω_f)。考虑到此处的极点和零点分布, ω_{pi} 需要小于 ω_f 才能保持闭环稳定性。总体而言, 如有任何闭环极点更接近于原点, 都将导致系统减速。如果 ω_{pi} 接近 ω_f (如图 7(a) 所示), 原点处的开环极点将略微左移, 从而分离为复杂的一对, 并且对所有 K_p 而言都基本接近原点。另一方面, 如果 ω_{pi} 接近零点 (如图 7(b) 所示), 对所有 K_p 而言, 将会有有一个主导的闭环极点接近原点。因此需要一个中间值, 如图 7(c) 所示。选择了合适的 K_p , 就会获得良好的性能。

K_p 较低时, 闭环极点接近原点, 过滤效果占优势。通过试验也可验证这一点。然而, 有些较为棘手的样本会偶尔表现出影响数字化误差的情形。

表 2 最差情况下的 CLA/CPU 负载* (依据闭环算法)

Device	With Filter Type	Clock Cycles	Math Type
Delfino- 28335	16th order FIR	285	FPU

*测试条件: 编译器 v6.1.0, 代码优化 -1

安全方面

检查正弦和余弦反馈的健全状况很重要, 因为整个系统的准确性都建立在这一基础之上。有可能信号已经退化或断开连接, 控制系统应该要知晓此类现象。可对反馈执行一项简单的三角法, 以检验 $\sin^2 \theta' + \cos^2 \theta'$ 是否等于常数。允许有较小的差异, 以适应噪声和偏移的影响。与此类似, 也需要监测环路误差。正常情况下, 此误差应该接近于零。实际的电机驱动装置拥有一定的惯性, 因此不太可能出现异常速度变化。任何较大的角度误差都表明环路出现了故障, 需要对此进行识别。

结论

本文利用 Delfino 器件对分解器数字转换进行了综合评估, 在载波为 10KHz 的情况下测得的精度为 13 位。此功能可作为独立解决方案在外引脚较低的低成本器件上实施, 也可作为大型电机控制系统的一部分在外引脚较高的器件上实施。可就采样频率进行权衡取舍, 以便根据要求调整 CPU 负载。

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.

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 & 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