

闭环电机控制：旋转分解器及编码器介绍

作者：Rick Zarr，高速信号与数据路径技术专家

前言

您的电机是否以预期速度旋转？闭环电机控制系统会继续回答这个问题，因为只要有电机旋转的地方就会实施闭环系统，这是一个趋势。无论终端系统是汽车（采用电脑控制转向的辅助平行泊车），是人造卫星（调整卫星角度以锁定特定信号），还是工厂机械（取放机器），位置反馈传感器都是总体电机控制系统中的固有元件。电机控制种类繁多，本文将讨论两种围绕位置传感器实施模拟信号链的控制方案：分解器和编码器。

分解器

在讨论分解器信号链解决方案之前，首先考虑它的基本工作原理，如图 1 所示。分解器（这里是一个发送器单元）由三个不同的线圈绕组构成，即参考、正弦 (SIN) 和余弦 (COS) 绕组。参考绕组是一次绕组，其可通过称之为旋转变压器的变压器，由应用于该变压器一次侧的 AC 电压励磁。旋转变压器随后将电压发送至变压器的二次侧，因此无需电刷或套环。这样可提升分解器的整体可靠性和稳定性。

参考绕组安装在电机轴上。在电机旋转时，SIN 和

COS 绕组的电压输出会随轴位置发生变化。SIN 和 COS 绕组安装角度相对于该轴相互相差 90° 。参考绕组旋转时，参考绕组与 SIN/COS 绕组之间的角度差会发生变化，可表示为 θ 旋转角或图 1 中的 θ 。在 SIN 和 COS 绕组上感应到的电压等于参考电压乘以 SIN 绕组和 COS 绕组的 θ 角。

感应到的输出电压波形如图 2 所示。图中显示了 SIN 和 COS 绕组除以参考电压的规范化电压输出信号。传统参考电压通常介于 1 至 26V 之间，而输出频率范围则是 800Hz 至 5 kHz。¹

现在可以确定对适当信号链器件的要求。信号链必须为双极性，因为信号会摆动至接地以下（图 2）。它

图 1. 分解器发送器单元的简化机械原理图

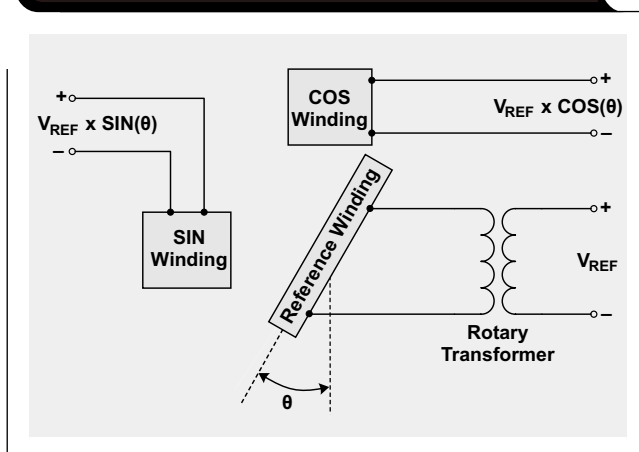
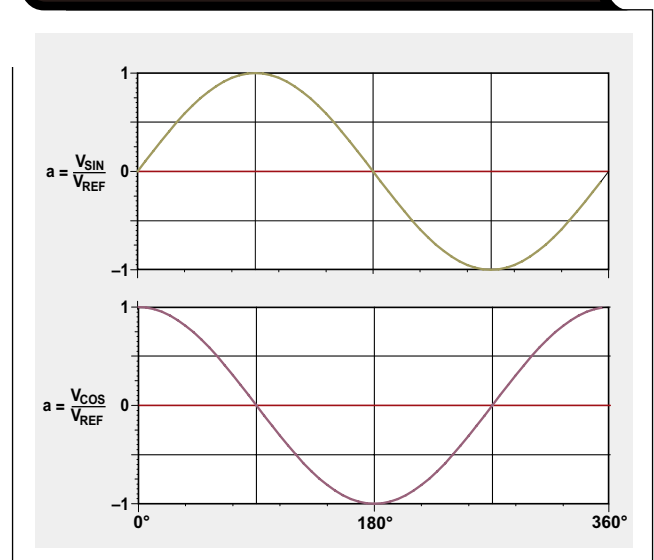
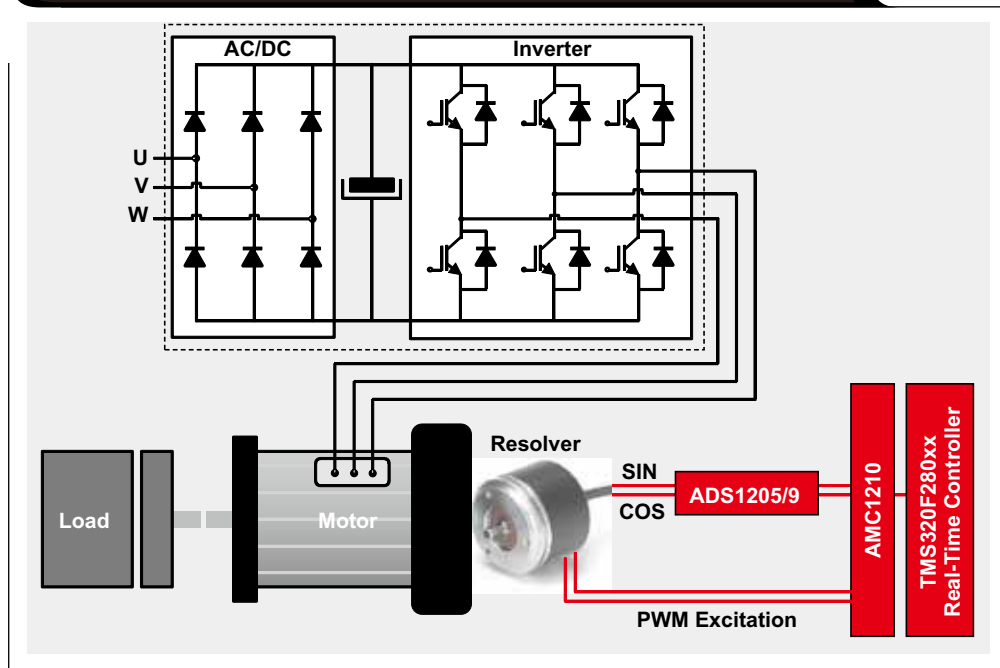


图 2. SIN 和 COS 绕组的标准化输出电压



必须同时对两个通道进行采样，转换高达 5kHz 的信号，并针对分解器为参考绕组提供 AC 电压。最佳的解决方案是为两个通道各实施一个 $\Delta-\Sigma$ 调制器。 $\Delta-\Sigma$ 调制器可在极高频率（在 10 至 20MHz 范围）下进行采样，因此经 $\Delta-\Sigma$ 调制后的输出要进行平衡和滤波后才可获得可接受的分辨率。

图 3. 分解器控制环系统的简化方框图



在提供参考电压或 AC 励磁电源时，首选方法是将脉宽调制 (PWM) 信号直接应用于分解器。德州仪器 (TI) 针对这种实施方案提供了一种推荐解决方案。数据转换器（例如 ADS1205 或 ADS1209）是 $\Delta-\Sigma$ 调制器的首选，因为这两个器件都能直接连接分解器的 SIN 与 COS 绕组。此外，数据转换器还可连接四通道 sinc 滤波器 / 积分器，为参考绕组实现 PWM 信号发生器输出，例如 AMC1210。最后还需要一个数字信号处理器 (DSP) 或实时控制器来处理除电机控制系统外的各种信号。这里可选用 TI 基于 C28x 的 C2000™ Piccolo™ F2806x 微控制器。图 3 是一个典型的信号链解决方案。

总之，分解器是一款非常稳定的控制系统位置传感器，不仅支持高精度，而且还可提供很长的使用寿命。分解器的缺点是其最大旋转速度。由于分解器信号频率通常小于 5kHz，因此电机速度需要小于 5,000 转每分钟。

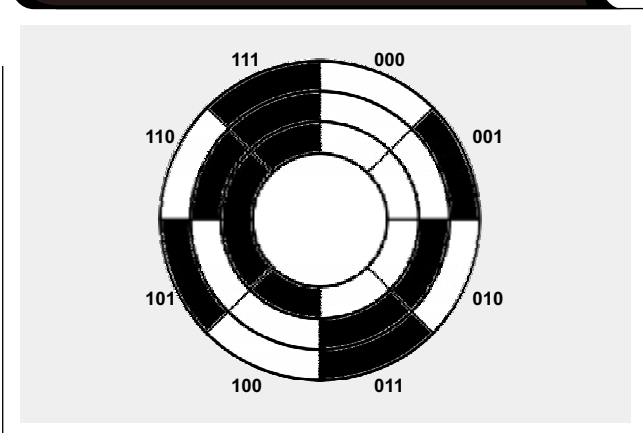
编码器

与分解器的情况类似，在讨论信号链实施方案之前，首先要了解编码器的物理及信号输出特性。编码器通常有两种：线性与旋转。线性编码器用于只按一个维度或方向运动的方案，可将线性位置转换为电子信号，通常与致动器配合使用。旋转编码器用于围绕轴心运动的方案，可将旋转位置或角度转化为电子信号。由于旋转编码器与电机一起使用（电机围绕轴心旋转），因此本文不涉及线性编码器。

要理解旋转编码器的原理，首先要考虑基本的光学旋转编码器。光学编码器具有支持特定模式的磁盘，安装在电机轴上。磁盘上的模式既可阻止光，也可允许光通过。因此，还需要使用一个发光发送器和一个光电接收器。接收器的信号输出能够与电机的旋转位置相关联。

常见的旋转编码器有三种：绝对位置值、增量 TTL 信号以及增量正弦信号。对于绝对位置值旋转编码器而言，磁盘上的模式可根据其位置分成非常具体的模式。例如，如果绝对位置编码器具有 3 位输出，那么它就将具有平均分布的八个不同模式（图 4）。这是在磁盘上而且是平均分布的，因此每个模式的间距是 $360^\circ / 8 = 45^\circ$ 。现在，对于 3 位绝对位置值旋转编码器而言，可以判断 45° 范围内的旋转电机位置。

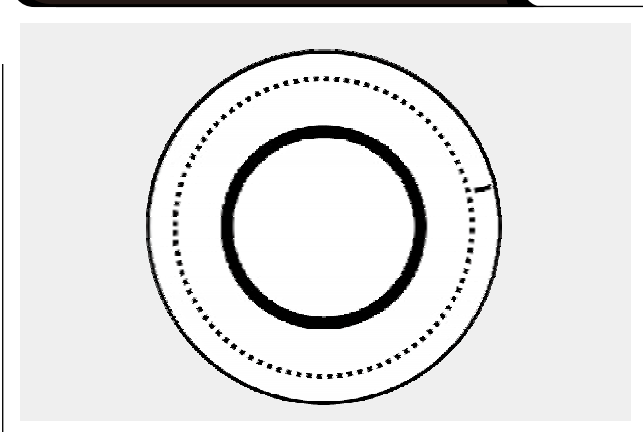
图 4. 3位绝对位置值旋转编码器实例



绝对位置值旋转编码器的输出已针对数字接口进行了优化，因此不需要模拟信号链。

对于增量 TTL 旋转编码器而言，磁盘上的模式输出数字高或数字低，即 TTL 信号。如图 5 所示，TTL 输出磁盘的模式与绝对位置值旋转编码器相比比较简单，因为它只需表现数字高或数字低。除了 TTL 信号外，还有一个对于确定电机当前旋转位置很重要的参考标

图 5. 增量 TTL 旋转编码器实例

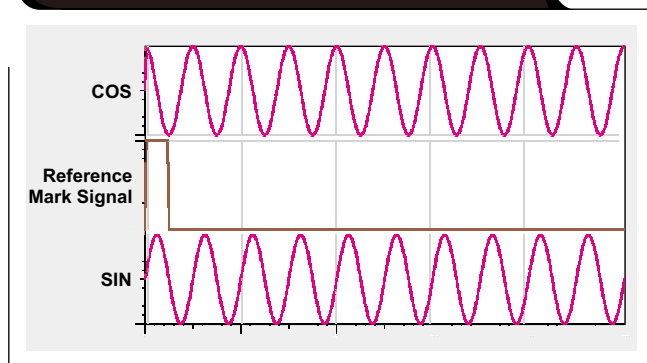


记。可将参考标记视作 0° 角度。因此，对数字脉冲进行简单计数即可确定电机的确切旋转位置。

图 5 显示了电机轴一次旋转中的多个周期。编码器制造商可提供每转 50 至 5,000 个周期的增量 TTL 旋转编码器（和增量正弦旋转编码器）。与绝对位置值旋转编码器一样，输出已经是数字格式，因此不需要模拟信号链。

对于增量正弦旋转编码器而言，输出和磁盘模式与 TTL 信号编码器非常相似。顾名思义，其输出不是数字输出，而是正弦波输出。实际上，它具有正弦及余弦输出以及参考标记信号，如图 6 所示。这些输出都是模拟信号，因此需要模拟信号链解决方案。

图 6. 增量正弦旋转编码器的建模输出



与增量 TTL 输出类似，在一次旋转中有多个信号周期。例如，选择单次旋转有 4,096 个周期的编码器连接以 6,000 转每分钟的速度旋转的电机，所得的正弦和余弦信号频率计算如下。

$$f_{\text{sine/cosine}} = \frac{\text{Periods}}{\text{Revolution}} \times \frac{\text{Revolutions}}{\text{Minute}} \times \frac{1 \text{ Minute}}{60 \text{ Seconds}}$$

$$= \frac{4,096}{1} \times \frac{6,000}{1} \times \frac{1}{60} = 409.6 \text{ kHz}$$

本实例中的信号链解决方案需要具备至少 410kHz 的带宽。由于这是闭环控制系统，因此必须将时延控制在最小范围内或者完全消除。通常，编码器输出为 1Vp-p，而且正弦和余弦输出是差分信号。

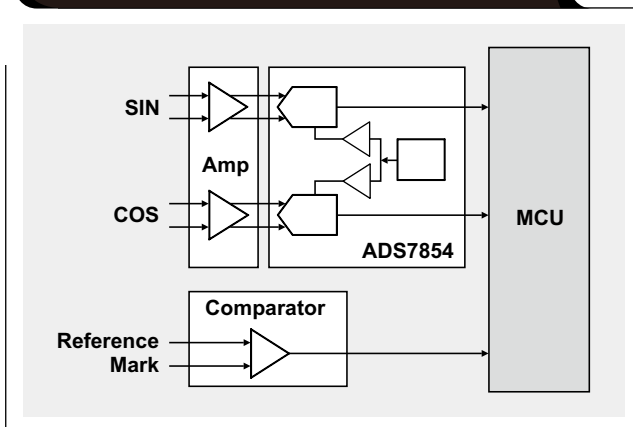
对模拟信号链解决方案的典型要求是：

- 两个同时采样的模数转换器 (ADCs)：一个用于正弦波输出，一个用于余弦波输出。
- 无系统时延：需要 400kHz 以上的带宽，因此 ADC 必须最少能处理每通道 800 kSPS 的速率。

- 支持 1V 左右满量程的 1-V_{p-p} 差分输入可优化 ADC 的满量程范围或 ADC 满量程范围的输入信号放大。
- 一个参考标记信号比较器。

TI 的最佳解决方案是 ADS7854 系列逐次逼近寄存器 (SAR) ADCs (图 7)。这种 SAR-ADC 具有两个同步

图 7. 增量正弦旋转编码器的简化信号链解决方案



采样通道、一个内部参考和 1-MSPS 的每通道输出数据速率，可满足特定需求。它与比较器及全差分放大器联用，可驱动 ADC。

ADS7854 是一个 14 位 ADC，如果正弦增量旋转编码器在单次旋转中具有 4,096 个周期，那么测量步进的总数可通过以下方式计算。

$$\begin{aligned} \text{Number of Steps} &= 2^{(\text{ADC Resolution})} \times \frac{\text{Periods}}{\text{Revoluion}} \\ &= 2^{14} \times 4,096 = 16,384 \times 4,096 \\ &= 67,108,864. \end{aligned}$$

这样可在实施该方案时为设计人员提供 26 位的分辨率，或不足 5.36×10^{-6} 度的旋转位置误差精度。

结论

电机控制反馈路径中的旋转 / 位置传感器有两种常用实施方案：分解器和编码器。我们从模拟信号链角度针对分解器或编码器对几个控制系统的反馈路径和输出信号特性进行了评估，以确保信号完整性和最佳性能。

参考资料

1. 高级微控制器公司 (AMCI)，“什么是分解器？”，请访问：www.amci.com/tutorials/tutorialswhat-is-resolver.asp;
2. 德州仪器 (TI)。“光学编码器的双通道数据采集系统，12 位、1MSPS”，TI Prevision Verified Design。(2013 年 6 月 6 日)。请访问：www.ti.com/2q14-tipd117。
3. Delta Computer Systems，“分解器基础知识”，请访问：www.deltamotion.com/support/
4. HEIDENHAIN 宣传册，“旋转编码器”，2013 年 11 月，第 13 页。请访问：www.heidenhain.com/。

相关 Web 站点

www.ti.com/2q14-ads1205
www.ti.com/2q14-ads1209
www.ti.com/2q14-amc1210
www.ti.com/2q14-ads7854

订阅 AAJ:

www.ti.com/subscribe-aaj

TI Designs 参考设计库提供完整的设计方案，由资深工程师团队精心创建，支持汽车、工业、医疗、消费等广泛应用的设计。在这里，您能找到包括原理图、物料清单、设计文件及测试报告的全面设计方案。登陆TI Designs，找寻更多适合您的参考设计！简单设计，从TI起步。

马上登录 TI.COM.CN/TIDESIGNS 查询最适合您的设计文档。



WEBENCH® 设计中心: 易于使用且可提供定制结果的设计工具。
PowerLab™ 参考设计库, 包含了近千个适用于所有应用的参考设计。
电源在线培训课程

www.ti.com.cn/webench
www.ti.com.cn/powerlab
www.ti.com.cn/powertraining

WEBENCH® Designer My Designs

Clocks	Filters	传感器
电源	FPGA/μP	LED

输入您的供电要求:

直流 交流

最小 最大

输入电压 14.0 V 22.0 V

输出 3.3 V 2.0 A

环境温度 30 °C

多负载 单输出

Power Architect **开始设计**

WEBENCH® Designer My Designs

最小 最大

输入电压 14.0 V 22.0 V

输出 3.3 V 2.0 A

环境温度 30 °C

SIMPLE SWITCHER®

开始设计 ▶

德州仪器在线技术支持社区

www.deyisupport.com

中国产品信息中心 免费热线:

800-820-8682

TI新浪微博



e.weibo.com/tisemi

热门产品

DAC8760	用于 4-20mA 电流回路应用的单通道、16 位、可编程电流/电压输出 DAC
DAC7760	单通道、12 位可编程电流输出和电压输出 DAC
ADS1247	极低噪音、精密 24 位 模数转换器
ADS1120	具有串行外设接口的低功耗、低噪声、16 位 ADC
ISO7242	四通道 2/2 25MBPS 数字隔离器
ISO7631FM	4kV _{PK} 低功耗三通道、150MBPS 数字隔离器
TPS54062	4.7V 至 60V 输入、50mA 同步降压转换器
TLK105L	工业温度、单端口 10/100Mbs 以太网物理层
SN65HVD255	CAN 收发器具有快速循环次数, 可用于高度已加载网络

了解更多, 请搜索以下产品型号:

DAC8760



重要声明

德州仪器(TI)及其下属子公司有权根据 JESD46 最新标准,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,并有权根据 JESD48 最新标准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 保证其所销售的组件的性能符合产品销售时 TI 半导体产品销售条件与条款的适用规范。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。除非适用法律做出了硬性规定,否则没有必要对每种组件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 组件或服务的组合设备、机器或流程相关的 TI 知识产权中授予的直接或间接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中 TI 信息的重要部分,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。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任或义务。复制第三方的信息可能需要服从额外的限制条件。

在转售 TI 组件或服务时,如果对该组件或服务参数的陈述与 TI 标明的参数相比存在差异或虚假成分,则会失去相关 TI 组件或服务的所有明示或暗示授权,且这是不正当的、欺诈性商业行为。TI 对任何此类虚假陈述均不承担任何责任或义务。

客户认可并同意,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与其产品及其在其应用中使用 TI 产品相关的所有法律、法规和安​​全相关要求。客户声明并同意,他们具备制定与实施安全措施所需的全部专业技术和知识,可预见故障的危险后果、监测故障及其后果、降低有可能造成人身伤害的故障的发生机率并采取适当的补救措施。客户将全额赔偿因在此类安全关键应用中使用任何 TI 组件而对 TI 及其代理造成的任何损失。

在某些场合中,为了推进安全相关应用有可能对 TI 组件进行特别的促销。TI 的目标是利用此类组件帮助客户设计和创立其特有的可满足适用的功能安全性标准和要求的终端产品解决方案。尽管如此,此类组件仍然服从这些条款。

TI 组件未获得用于 FDA Class III (或类似的生命攸关医疗设备)的授权许可,除非各方授权官员已经达成了专门管控此类使用的特别协议。

只有那些 TI 特别注明属于军用等级或“增强型塑料”的 TI 组件才是设计或专门用于军事/航空应用或环境的。购买者认可并同意,对并非指定面向军事或航空航天用途的 TI 组件进行军事或航空航天方面的应用,其风险由客户单独承担,并且由客户独力负责满足与此类使用相关的所有法律和法规要求。

TI 已明确指定符合 ISO/TS16949 要求的产品,这些产品主要用于汽车。在任何情况下,因使用非指定产品而无法达到 ISO/TS16949 要求, TI 不承担任何责任。

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应用处理器	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 © 2013 德州仪器 半导体技术 (上海) 有限公司

重要声明

德州仪器(TI) 及其下属子公司有权根据 JESD46 最新标准, 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, 并有权根据 JESD48 最新标准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 保证其所销售的组件的性能符合产品销售时 TI 半导体产品销售条件与条款的适用规范。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。除非适用法律做出了硬性规定, 否则没有必要对每种组件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 组件或服务的组合设备、机器或流程相关的 TI 知识产权中授予的直接或隐含权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中 TI 信息的重要部分, 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。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任或义务。复制第三方的信息可能需要服从额外的限制条件。

在转售 TI 组件或服务时, 如果对该组件或服务参数的陈述与 TI 标明的参数相比存在差异或虚假成分, 则会失去相关 TI 组件或服务的所有明示或暗示授权, 且这是不正当的、欺诈性商业行为。TI 对任何此类虚假陈述均不承担任何责任或义务。

客户认可并同意, 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与其产品及其应用中使用的 TI 产品相关的所有法律、法规和安全相关要求。客户声明并同意, 他们具备制定与实施安全措施所需的全部专业技术和知识, 可预见故障的危险后果、监测故障及其后果、降低有可能造成人身伤害的故障的发生机率并采取适当的补救措施。客户将全额赔偿因在此类安全关键应用中使用任何 TI 组件而对 TI 及其代理造成的任何损失。

在某些场合中, 为了推进安全相关应用有可能对 TI 组件进行特别的促销。TI 的目标是利用此类组件帮助客户设计和创立其特有的可满足适用的功能安全性标准和要求的终端产品解决方案。尽管如此, 此类组件仍然服从这些条款。

TI 组件未获得用于 FDA Class III (或类似的生命攸关医疗设备) 的授权许可, 除非各方授权官员已经达成了专门管控此类使用的特别协议。

只有那些 TI 特别注明属于军用等级或“增强型塑料”的 TI 组件才是设计或专门用于军事/航空应用或环境的。购买者认可并同意, 对并非指定面向军事或航空航天用途的 TI 组件进行军事或航空航天方面的应用, 其风险由客户单独承担, 并且由客户独力负责满足与此类使用相关的所有法律和法规要求。

TI 已明确指定符合 ISO/TS16949 要求的产品, 这些产品主要用于汽车。在任何情况下, 因使用非指定产品而无法达到 ISO/TS16949 要求, TI 不承担任何责任。

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.cn/consumer-apps
DLP® 产品	www.dlp.com 能源 www.ti.com.cn/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应用处理器	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 © 2014, 德州仪器半导体技术(上海)有限公司