

Application Note 336 Understanding Integrated Circuit Package Power Capabilities



Literature Number: ZHCA391

理解集成电路封装的功率性能

美国国家半导体公司
应用注释336
Charles Carinalli
Josip Huljev
2002年9月



引言

和其它任何集成电路一样,美国国家半导体公司的接口电路的短期的和长期的可靠性,都强烈依赖于器件所处的环境条件。除机械和环境因素之外,电气和热应力对集成电路的可靠性影响是最大的。在每个接口电路的数据手册中最大绝对值和推荐工作条件栏目的下方,都特别注明所有这些应力问题。

然而,通过了解应用情况,显然电气应力条件比热应力条件更容易理解。无论如何不能低估电气应力的重要性,但很清楚,应把更多的关注和理解放在热应力上。美国国家半导体公司接口电路的热应力及其应用是本应用注释讨论的主题。

影响器件可靠性的因素

图1所示的著名"浴盆"曲线表示故障率随时间变化的关系。与所有(机械或者电气的)系统硬件相似,接口集成电路的可靠性遵循这条曲线。与该曲线相关的关键问题分别是早期失效、故障率和使用寿命。

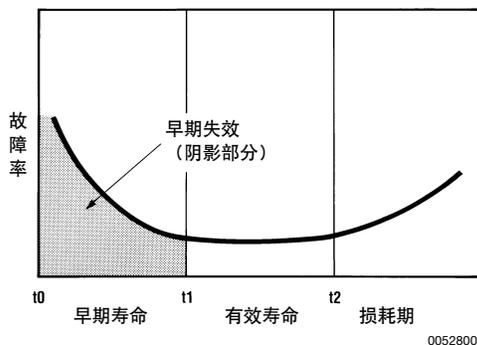


图1. 故障率随时间的变化

早期失效,从时间 t_0 至 t_1 (早期寿命)表现出高故障率,受到系统应力条件的影响要远大于温度,并且随着应用的不同变化也很大。导致早期失效的主要应力因素是电气瞬态和噪声,机械冲击和过高的温度。绝大多数的故障都是在器件测试、预烧、板卡装配和处理以及初始系统测试和工作中发现的。尽管现有大量文献讨论的关于集成电路中早期失效的问题很重要,可是这超出了本应用注释的范围。

故障率是指在给定的时间内(例如,每百万小时)预期发生故障的器件数目。平均无故障时间(MTBF)是指在一个器件发生故障之后,下一个器件发生故障之前预期的平均时间(以小时为单位)。关于器件可靠性方面的这两个主要的"测量单位"是成反比关系的:

$$MTBF = \frac{1}{\text{Failure Rate}}$$

尽管"浴盆"曲线表现了总体故障率随时间的变化关系,有效的故障率仍可被定义为在曲线的平坦区域中单位时间内发生故障器件的百分比。这个区域被称之为有效寿命。范围在时间 t_1 到 t_2 之间或者从早期失效结束到损耗期的开始这段时间。有效寿命可能会短至几年,但如果在系统开发时采用充分的设计裕度,通常也会高达十年以上。

影响有效寿命许多因素包括:压力、机械应力、热周期和电气应力。然而,在器件的有效寿命期间,裸片温度在触发损耗期开始起着同样重要的作用。

故障率随时间和温度变化的关系

集成电路故障率与时间和温度之间的关系是已经确定的事实。这些故障事件的发生可以通过阿列纽斯模型来说明。作为集成电路老化测试,该模型通过了有效的认证和广泛的应用,阿列纽斯模型假定性能参数的降低是随时间作线性变化的,同时MTBF是与温度应力相关的函数。温度相关性是一个定义事件发生概率的指数函数。由此得到一个方程,用来表征给定温度应力下的寿命时间或者MTBF与不同温度下的其它MTBF之间的关系。这两个MTBF的比率被称之为加速因子 F ,可用下列公式定义:

$$F = \frac{X_1}{X_2} = \exp \left[\frac{E}{K} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \right]$$

这里: X_1 = 在结温 T_1 下的故障率

X_2 = 在结温 T_2 下的故障率

T = 结温,单位是开氏绝对温度

E = 热激发能量,单位是电子伏特(eV)

K = 玻尔兹曼常数

然而,上式中关于故障率的结温(芯片温度)的急剧加速效应如图2所示,其中列举了三种不同的激发能量。该图清晰明了地解释了结温与器件故障率之间的重

故障率随时间和温度变化的关系（续）

要关系。例如，对于0.99eV线，结温上升曲线为30度，当结温从130度变化到160度，相应的故障率会增加10倍。

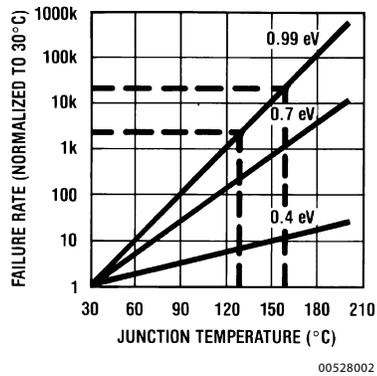


图2. 故障率是与结温相关的函数

器件的散热性能

有许多因素会影响集成电路的散热性能。为了更好地理解这些性能，我们必须了解热量从集成电路封装向外迁移的主要路径。在图3和图4中我们将其列了出来。图3为装配在印刷电路板上的集成电路横截面图。

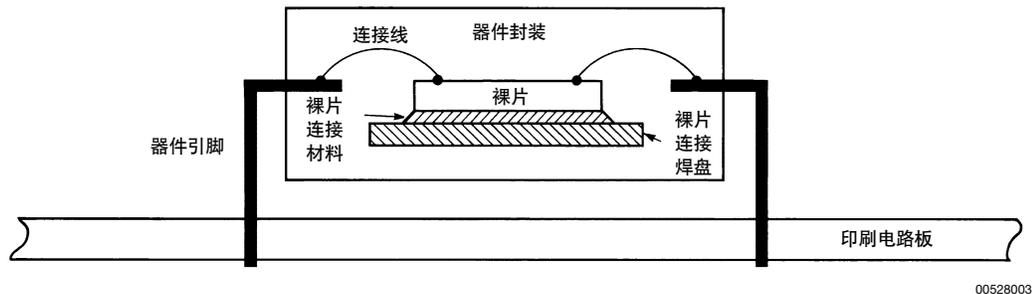


图3. 集成电路焊接到印刷电路板（截面图）

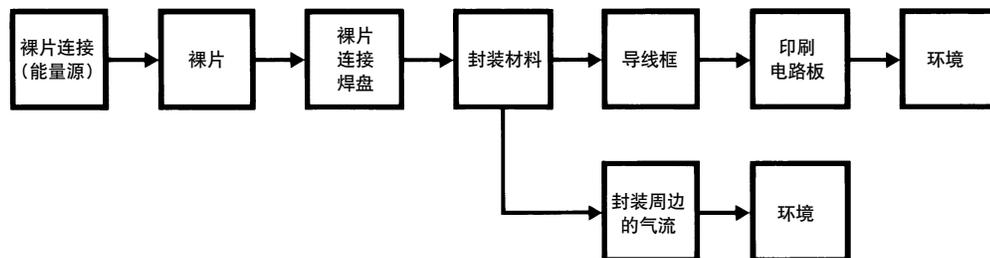


图4. 散热流程图（主要路径）

图4表示在热能源头，即集成电路的结点处产生的热量从芯片迁移到最终的散热区，亦即周边环境的流程图。一共有两条主要路径。第一条路径是从裸片到裸片连接焊盘，环绕封装材料，封装导线框，印刷电路板，最终到周围环境。第二条路径是从封装直接到周边空气中。

提高图4流程图中的任一环节上的散热性能，最终会显著提高器件的散热性能。然而，将所有这些特性都体现在一个等式中，可以确定集成电路/封装/环境条件的总体散热性能。表达该关系的等式如下：

$$T_J = T_A + P_D (\theta_{JA})$$

这里： T_J = 裸片的结温

T_A = 邻近器件的环境温度

P_D = 全部功耗（以瓦为单位）

θ_{JA} = 结点到环境的热阻

θ_{JA} ，自器件结点到环境温度的热阻，由集成电路制造商测试和规定。美国国家半导体利用特殊的工具和方法来测量和监测该参数。所有接口电路的数据表详细说明了特定器件在给定条件下所能提供的封装散热特性和性能。这些封装功率值直接与结点到环境的热阻或 θ_{JA} 相关。

尽管美国国家半导体提供了这些热管理额定值，然而对终端用户来说，如何使用这些数值对于在应用接口器件的系统开发中提高散热性能是极为重要的。

确定器件的工作结温

利用上述公式来确定实际最差情况下的器件工作结温就变得直接明了。一旦给定封装的散热性能 θ_{JA} ，最差情况下的工作环境温度 T_A (max)，只剩下器件的功耗值 P_D 是未知参数。在该参数的计算过程中，必须考虑集成电路本身的功耗，也必须加上由外围负载造成的封装内部功耗。与处于动态（开关）条件下的负载相关的功耗也必须考虑到。例如，与电感或者电容相关的功耗在静态或动态（例如1MHz）条件下是明显不同的。

总封装功率为600mW的器件，在封装内温度为70°C，热阻为63°C/W时的结温为108°C。

$$T_J = 70^\circ\text{C} + (63^\circ\text{C/W}) \times (0.6\text{W}) = 108^\circ\text{C}$$

下一个问题显然是，“108°C是否安全？”

最大的容许结温

什么是可接受的最大工作结温，这是个很难回答的问题。许多公司都会根据公司的政策来确定各自的标准。然而，半导体行业已经开发出一些根据器件封装类型的实际标准。这些数值之所以能被很好地接受，是因为其与合理（可接受）的器件使用寿命相关，也就是和故障率有关。

美国国家半导体采纳这些业界广泛应用的标准。对于装配在模制封装内的器件，最大可容许的结温是150°C。若这些器件是封装在陶瓷或者DIP腔体内，则最大可容许的结温是175°C。之所以温度不同，是因为封装类型不相同。在封装腔体内与裸片封装接口相关的热应力要远远小于模制封装内相应的热应力，在模制封装中，集成电路芯片与封装材料直接相关。

让我们采用这个新信息和热等式来构建可以显示出给定封装类型的安全热（功率）工作区域。图5为这种图的一个实例。该图的终点很容易确定。对于16引脚的模制封装，最大容许温度为150°C；在这一点上不允许存在任何功耗。在25°C处的功率容量是1.98W，从下列计算中可得到该值：

$$P_D @ 25^\circ\text{C} = \frac{T_J(\text{max}) - T_A}{\theta_{JA}} = \frac{150^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}}{63^\circ\text{C/W}} = 1.98\text{W}$$

这两点之间的斜线等于热阻倒数的负值。也可以用降额因子来表示：

$$\text{Derating Factor} = -\frac{1}{\theta_{JA}}$$

已经提到图5是16引脚模制DIP封装器件的安全散热工作区域图。只要限定最大环境温度（在前例中为70°C）的垂直线和最大的器件封装功率（600mW）的交叉点在最大封装散热性能线以下，结温将维持在低于150°C，亦即模制封装的温度限制。如果环境温度和封装功率的交叉点落在这条线上，最大结温将是150°C。产生在高于该线的任何交叉点将会导致结温超过150°C。这不是一个合适的工作条件。

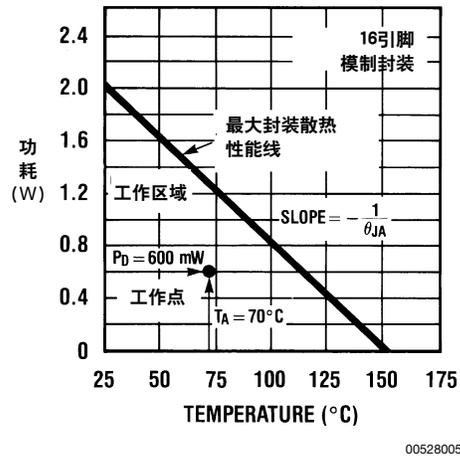


图5. 封装功率容量与温度之间的关系

所有接口电路的散热性能都表示为带一个给定降额因子，在25°C静止空气环境下的功率容量。简言之，在25°C以上，环境温度每上升一度，以单位是mW/°C的降额因子表征的封装功率容量都会减小。在我们的例子中，63°C/W的 θ_{JA} 相当于降额因子15.9mW/°C。

影响封装热阻的因素

正如先前所讨论的，改善两个主要散热路径中的任何一个都会改善结点到环境上的总体热阻。本节讨论热阻中受集成电路制造商影响的那些成份。也会讨论受到集成电路最终用户影响的总体热阻中的那些因素。理解这些问题会是比较漫长的过程，包括理解芯片功率容量，以及采取何种措施以确保可能的最佳工作条件，从而能得到最佳的全面可靠性。

裸片尺寸

把16引脚DIP封装热阻作为集成电路裸片尺寸的函数，如图6所示。很明显，随着芯片尺寸增加，热阻减小——这直接导致以更大的面积来耗散给定的功率。

影响封装热阻的因素（续）

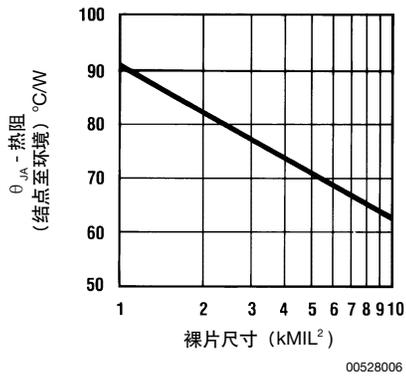


图6. 热阻与裸片尺寸的关系

引脚数目

对于多引脚数目的封装，例如塑料四方扁平封装 (PQFP)，图7所示为大量不同封装引脚数目的热阻变化范围，其中引脚数目从44至160。采用更大的封装可得到更好的散热效果。观察到的数值取决于裸片和相应的引脚座尺寸。

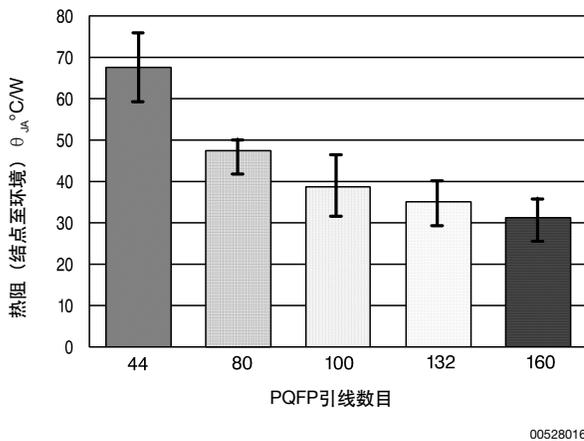


图7. PQFP系列封装的热阻。

数据点上的栅表明了热阻的变化。

该变化取决于器件尺寸和裸片连接引脚座尺寸。

导线框材料

图8所示为导线框材料（裸片连接和器件引脚）对热阻的影响。该图将16引脚的DIP与铜导线框，Kovar导线框和42号合金导线框作了比较-这些都是业界通常使用的

导线框材料。显然，导线框材料的热传导率对于封装的功率性能具有重要的影响。美国国家半导体公司的接口电路模制封装率先采用铜导线框。

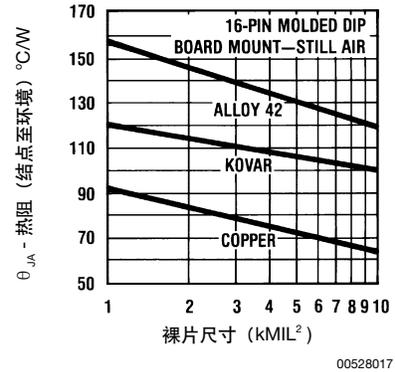


图8. 热阻与导线框材料的关系

电路板安装与插座安装的比较

集成电路发热的主要耗散途径之一就是通过器件的引脚。因此，就容易理解图9所示的结果。它将16引脚封装焊在印刷电路板（电路板安装）的热阻与相同封装安在插座（插座安装）上的热阻进行比较。在印刷电路板和器件之间放置一个插座给散热流路径增添了额外的环节。因而会增加总体热阻。美国国家半导体的接口电路的散热性能都以电路板安装为前提条件。如果将器件放置在插座上，应该将散热容量减少大约5%至10%。

观察到的电路板安装的热阻实例如图10所示。在该例中，安装在1盎司铜箔印刷电路板上，采用三种TO-263封装的典型热阻如图所示。可以看到，热阻快速下降，虽然铜箔表面区域进一步增大时，得益会减小。

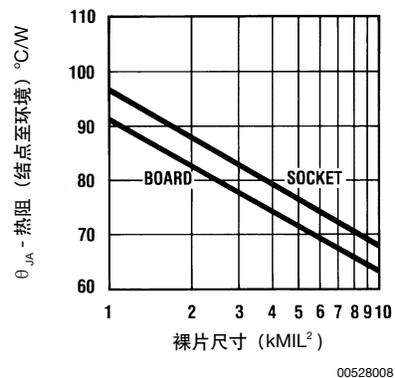
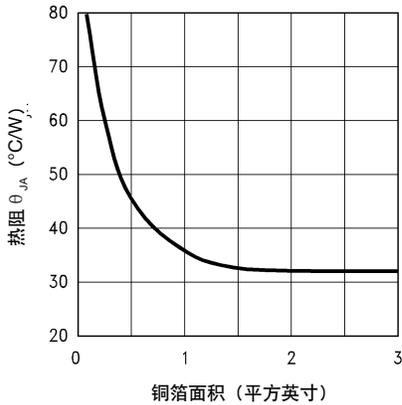


图9. 热阻与电路板安装或插座安装的关系

影响封装热阻的因素（续）



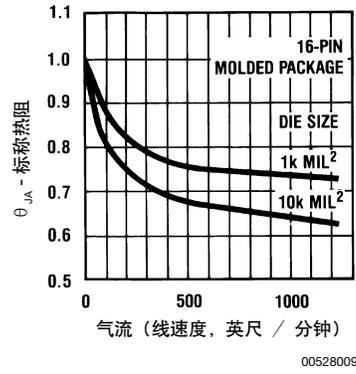
00528018

*对于具有大额定电流 (>3A) 的产品，热阻可能会更小。更多信息请查阅产品数据手册。

图10. 安装在1盎司 (0.036mm) 印刷电路板铜箔上3, 5和7引脚TO-26封装的热阻 (典型值*)

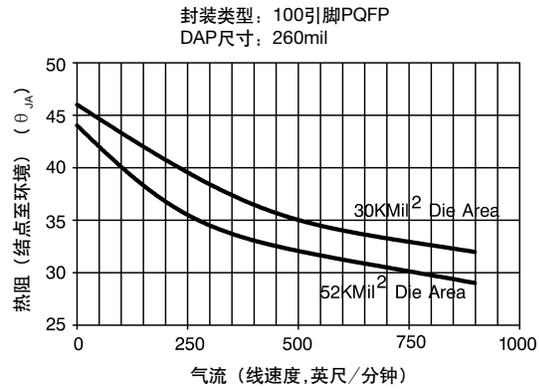
气流

当采用大功率而又无法降低环境温度时，下一步能做的最佳措施是在封装附近提供气流。电路板上的器件周围的强制对流可以分为层流和乱流。从层流到乱流的转换发生在典型速率为每分钟180英尺 (180LFPM) 时。在层流中，流体颗粒沿着光滑的路径流动，而另一方面，乱流表征为涡流 (edded) 状的无规则运动，其中颗粒被连续地重新排列和混合。采用乱流可以实现更多的热量传输。图11和图12分别解释了气流对16引脚DIP和100引脚PQFP封装热阻的影响。美国国家半导体的接口电路数据手册的散热额定值针对静止的空气环境。



00528009

图11. 热阻与气流的关系 (16引脚DIP封装)



00528019

图12. 安装在JEDEC散热板上100引脚PQFP上方的气流影响。封装的裸片安装尺寸为260 x 260mil。数据也说明两种不同器件尺寸的影响。

影响封装热阻的因素 (续)

其它因素

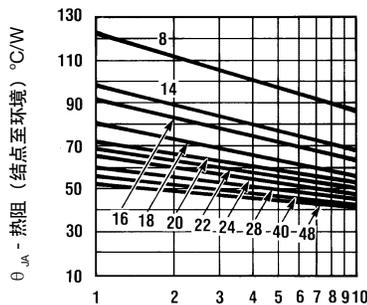
还存在大量其它影响热阻的因素。其中最重要的因素是在印刷电路板和散热区安装IC晶片时使用的导热环氧树脂。通常仅在极高的功率应用中才需要用到该技术。

在结点到环境的热阻 (θ_{JA}) 和结点到壳体的热阻 (θ_{JC}) 差别之间存在一些混淆。实际结点温度的最佳测量是结点到环境的数值, 因为几乎所有的系统都工作在一个开放的空气环境中。结点到环境的热阻变得重要的唯一条件是当整个系统封入均热块, 环境温度实际上是壳体温度。这仅适用在特殊例子中, 是规则之外的特例, 因此, 在本应用注释中不做过多描述。

美国国家半导体封装性能

图13和图14是美国国家半导体接口电路系列产品的最常用封装的散热特性组合图。图13是铜导线框模制封装的组合。图14是使用合金裸片连接的陶瓷(腔体)DIP封装的组合。这些图代表电路板安装在静止空气中的散热性能。另外, 也是最后一点, 在这些图中注意到热阻变化的趋势。随着器件引脚的数目增加, 在DIP中的热阻会降低。请参考热阻流程图, 至此, 趋势是很明显的。

模制 (N封装) DIP* 铜导线框 —— HTP裸片连接
电路板安装 —— HTP裸片连接电路板安装 —— 静止气流



00528010

* 8 到 20 引脚 0.3 mil 线宽的封装
22引脚0.4 mil 线宽
24到40引脚0.6 mil 线宽

图13. 热阻与裸片尺寸及封装类型的关系 (模制封装)

在接口电路数据手册上的额定值

总而言之, 所有美国国家半导体接口产品都定义了功耗 (散热) 性能。可以在数据手册中绝对最大值部分中查询相关信息。在本应用注释中所示的散热信息显示了指定封装表征的平均数据。实际热阻变化从 $\pm 10\%$ 到 $\pm 15\%$, 这是由于封装质量, 裸片形状, 裸片厚度和在裸片上的热源贡献等波动造成的。在接口数据手册中列举的数值比应用注释中看到的平均值反映出15%的安全裕度。确保总体封装功率维持在特定的水平下, 从而保证最大结点温度不会超过封装最大值。

封装功率额定值是指25°C环境温度下的最大功率, 在超过25°C环境温度时具有关联的降额因子。很容易确定温度升高时的功率性能。在环境温度超过25°C时, 温度每上升一度, 在25°C下标定的功率便以降额因子减少。例如, 在给定的产品数据手册中可见:

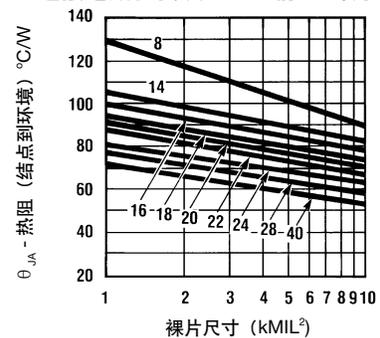
最大功率* 25°C
腔体封装 1509mW
模制封装 1476mW

注释: 腔体封装在超过25°C时以10mW/C降额; 模制封装在超过25°C时以11.8mW/C降额。

如果在最大环境温度70°C下使用模制封装, 封装功率容量为945mW。

$$P_D @ 70^\circ\text{C} = 1476 \text{ mW} - (11.8 \text{ mW}/^\circ\text{C}) \times (70^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) \\ = 945 \text{ mW}$$

腔体 (J封装) DIP* 合金裸片
连接电路板安装 —— 静止气流



00528011

*从8到20引脚0.3mil线宽的封装
22引脚0.4mil线宽
24到48引脚0.6mil线宽

图14. 热阻与裸片尺寸及封装类型 (腔体封装) 的关系

注释

对于上述任何电路的使用，美国国家半导体公司不承担任何责任且不默示任何电路专利许可。美国国家半导体公司保留随时更改上述电路和规格的权利，恕不另行通知。
想了解最新的产品信息，请访问我们的网址：www.national.com。

生命支持策略

未经美国国家半导体公司的总裁和首席律师的明确书面审批，不得将美国国家半导体公司的产品作为生命支持设备或系统中的关键部件使用。特此说明：

1. 生命支持设备/系统指：(a) 打算通过外科手术移植到体内的生命支持设备或系统；(b) 支持或维持生命，依照使用说明书正确使用时，有理由认为其失效会造成用户严重伤害。
2. 关键部件是在生命支持设备或系统中，有理由认为其失效会造成生命支持设备/系统失效，或影响生命支持设备/系统的安全性或效力的任何部件。

禁用物质合规

美国国家半导体公司制造的产品和使用的包装材料符合《消费产品管理规范 (CSP-9-111C2)》以及《相关禁用物质和材料规范 (CSP-9-111S2)》的条款，不包含CSP-9-111S2限定的任何“禁用物质”。
无铅产品符合RoHS指令。



National Semiconductor
Americas Customer
Support Center
Email: new.feedback@nsc.com
Tel: 1-800-272-9959

www.national.com

National Semiconductor
Europe Customer Support Center
Fax: +49 (0) 180-530 85 86
Email: europe.support@nsc.com
Deutsch Tel: +49 (0) 69 9508 6208
English Tel: +44 (0) 870 24 0 2171
Français Tel: +33 (0) 1 41 91 8790

National Semiconductor
Asia Pacific Customer
Support Center
Email: ap.support@nsc.com

National Semiconductor
Japan Customer Support Center
Fax: 81-3-5639-7507
Email: jpn.feedback@nsc.com
Tel: 81-3-5639-7560

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 © 2011 德州仪器 半导体技术 (上海) 有限公司