

# 高功率汽车应用中降压转换器的热设计问题

Marshall Beck  
Applications Engineer

## 引言

汽车设计越来越需要性能更高的电子元件，同时需要降低印刷电路板 (PCB) 成本。这一趋势使得单板上的信号处理运行速度 (和密度) 有所提高。运行速度的提升进而提高了对更紧凑电源的需求，以便为元件布线提供空间。虽然高性能、高密度电源可以节省 PCB 空间，但它们也会产生热量并降低周围所安装器件的散热能力，这推动了对能够使相邻器件具有更高热裕度的低损耗电源转换器的需求。

近年来，由于半导体设计和布局的改进，可以开发出支持更高功率应用的更高效转换器。更高的转换器效率还可以实现更快的开关频率，从而使设计工程师能够缩小电源解决方案的尺寸，并通过减小元件尺寸和减少其数量来降低成本。

经改进的转换器控制方案进一步减少了无源器件数量 (图 1)，而不影响噪声或瞬态性能，并释放了转换器周围的空间以排布器件或改进热管理。

USB Type-C™ 是一个汽车用例，其中 2MHz 转换器运行允许在电路板各层中留出额外的空间，用于额外的充电诊断。提高转换器效率意味着产生的热量更少，从而可以将电源解决方案部署在空气流量很小的塑料外壳中。此外，集成电路 (IC) 的最高工作温度提高至 150°C (或更高)，可进一步增强转换器在需要 105°C 或更高环境温度额定值的应用中的能力。

## 使用倒装芯片封装管理热量

无论降压转换器的效率如何，功率级都会产生损耗。电源转换器损耗会导致器件结温升高，从而妨碍在较高环境温度下的安全运行。针对高环境温度的转换器设计需要适当的热管理，以确保不超过转换器的建议最大额定结温，从而防止转换器使相邻器件升温。

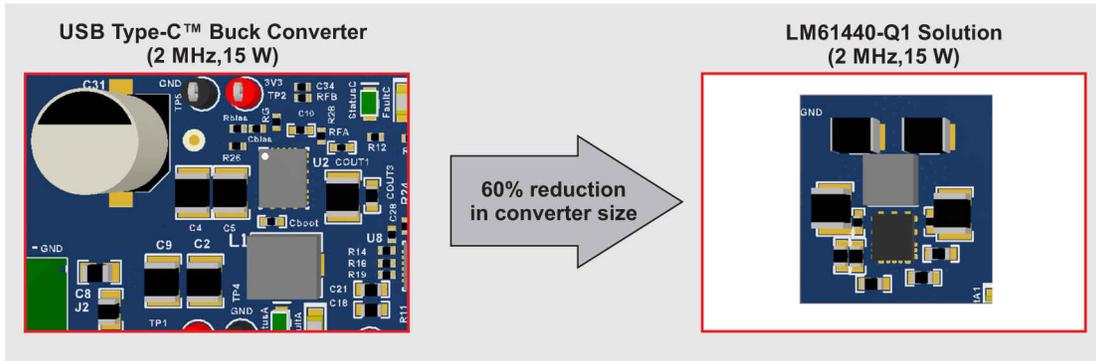


图1. 使用 LM61440-Q1 降压转换器减小解决方案面积

许多半导体制造商正在采用倒装芯片封装设计来实现转换器。倒装芯片器件通常采用 Quad Flat No-lead (QFN) 封装，在半导体芯片与引线框之间实现低电感连接。这在热性能和噪声性能之间实现了良好的平衡。但是，封装的底部可能没有散热焊盘，这会降低其散热效率。不过，对于倒装芯片器件，可以通过芯片与引线框之间的铜连接实现高效的热传导（图 2 和图 3）。

为了避免温度过度升高，有必要提供一条从着陆焊盘远离器件的高导热路径。连接到器件焊盘的宽引线可以在元件层中实现散热。密集的 PCB 布局会阻碍元件层有效散热，尤其是对于低效（高温）相邻器件。如图 3 所示，各个内层的散热通常比元件层的散热更有效。如果将散热过孔连接到已连接到器件电源或回路引脚的铜上，则可以实现散热。然后，这些通孔将连接到 IC 下方的铜平面，从而增加有效的铜散热面积。在放置过孔时，务必最大程度地减少热瓶颈，同时为电源引脚提供最高的过孔数量和最低的热阻（图 2）。

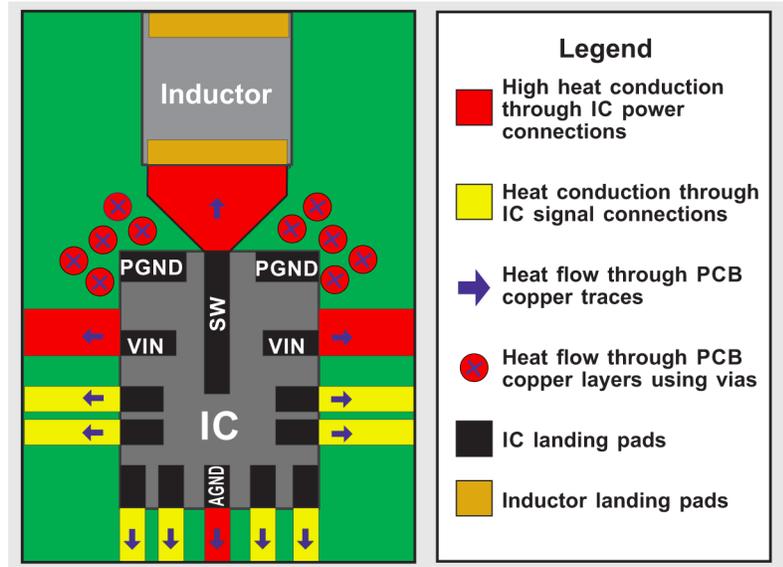


图2. 用于 PCB 层散热的倒装芯片内核到封装热传导路径的顶视图

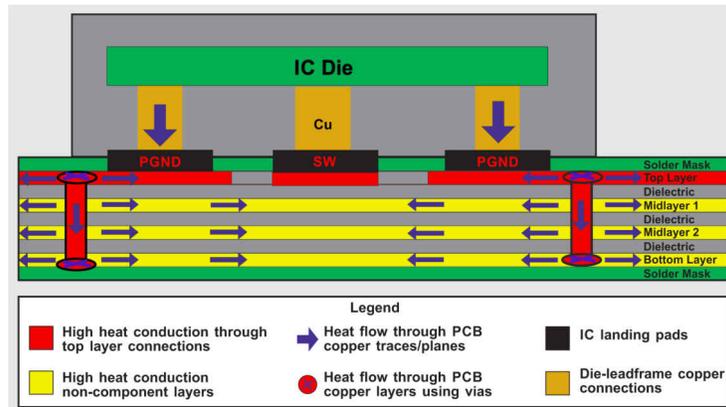


图3. 倒装芯片内核到封装热传导路径的电路板层视图

### 电路板结构影响

散热过孔将从安装在 PCB 上的器件带走热量。使用导热材料填充过孔会降低其热阻率。如果无法填充过孔，则平衡过孔铜面积和数量可实现有效的热流。<sup>[1]</sup>

使 IC 正下方的层尽可能厚并尽可能靠近元件层（通过最大程度地增大铜厚度并最大程度地减小电介质分离）可最有

效地导热并减少电磁干扰 (EMI)。总电路板尺寸通常必须为特定的高度，因此电路板层叠可能需要更改。

铜厚度将有利于提高电路板的热性能（图 4），这可以通过转换器的有效结至环境热阻抗  $R_{\theta JA}$  进行量化。

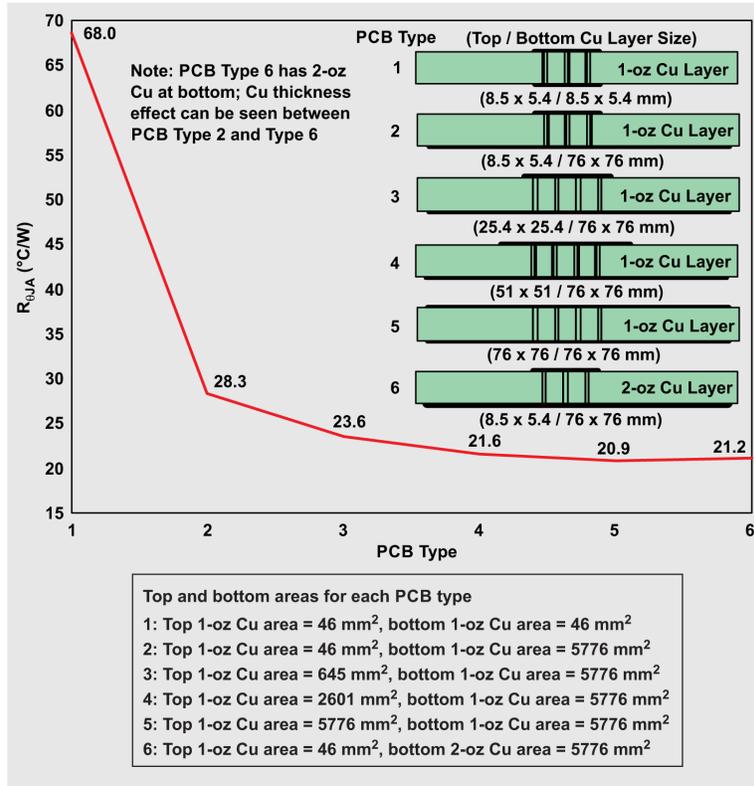


图 4. 演示 1oz 和 2oz PCB 覆铜层重量之间的热影响

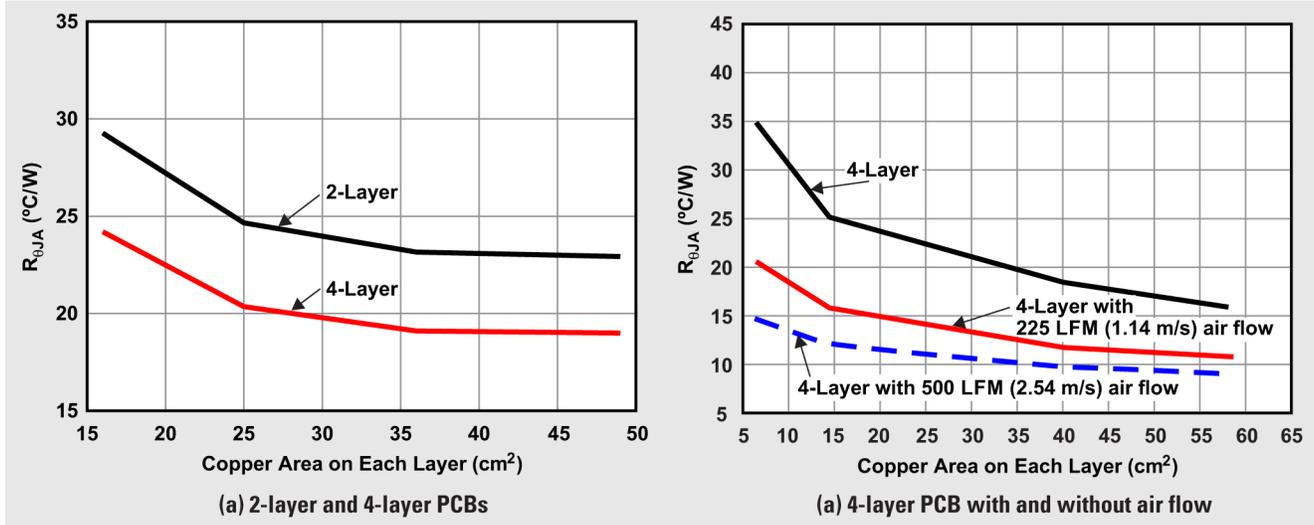


图 5. 铜面积对热性能  $R_{\theta JA}$  的影响

## 铜面积和热性能

PCB 布局是影响功率转换器热性能的最大因素，封装热指标紧随其后。 $R_{\theta JA}$  指标描述了电路板的热性能。它对环境空气与转换器内核上半导体 P-N 结之间的热阻进行量化。 $R_{\theta JA}$  的主要影响因素是可用于散热的有效铜面积。

图 5 展示了可用铜面积对  $R_{\theta JA}$  的影响，其中通过针对每次  $R_{\theta JA}$  测量等量减少两层和四层 PCB 的铜面积来收集数据。这些数据可以确定更多铜面积对热性能的影响。测得的器件  $R_{\theta JA}$  可以提供器件能够运行的环境温度的估算值。

## 估算转换器的结温

转换器的数据表中提供了电子器件工程联合委员会 (JEDEC) 标准板的仿真  $R_{\theta JA}$ 。JEDEC 板通常具有非常小的引线，这对于导热性而言并不理想 (图 6)。着陆垫到引线或铜平面连接可实现热传导。实际上，会连接到中间层的较大铜区域，从而使仿真  $R_{\theta JA}$  显得过于保守。

要通过实验估算电路板的  $R_{\theta JA}$ ，请注意给定功率条件下 IC 外壳温度的上升情况 ( $\Delta T$ )。一种更好的功率条件是降压转换器的输出电感器具有低损耗，但存在足以通过热像仪建立梯度以进行测量的功率损耗。即使安装正确，热电偶由于其散热倾向，通常也会对外壳顶部进行不准确的温度测量。根据测得的效率  $\eta$  (在相同的环境温度下)，公式 1 可以计算转换器和电路板  $R_{\theta JA}$  中的功率损耗 ( $\Delta P$ )，如下所示：

$$R_{\theta JA} = \frac{\Delta T}{\Delta P} \approx \frac{T_{Case} - T_{Amb}}{(1 - \eta) \times P_{IN}} \quad (1)$$

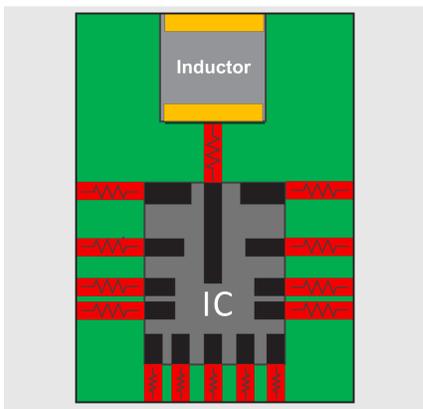


图 6. 用于表征器件的  $R_{\theta JA}$  的高热阻 JEDEC 板

虽然效率计算确实包括电感器损耗 (这不会导致 IC 温度直接上升)，但电感器和 IC 之间确实会发生热共享。转换器不是唯一的热源。对于具有较低损耗或较低偏置电流的电感器， $R_{\theta JA}$  近似值变得更加准确。要进一步改进该估算，可能需要对功率级的体二极管进行正向偏置，以加热 IC，从而消除电感器的影响。然后，二极管的压降和偏置电流将用于功率损耗 ( $\Delta P$ )。

在计算中必须考虑转换器的 FET 温度系数。FET 的漏源导通电阻 [ $R_{DS(on)}$ ] 在设计的最高环境温度 ( $T_{A\_max}$ ) 下将是最差的。FET  $R_{DS(on)}$  增大会导致效率在高环境温度下降低 ( $\eta_H$ )。公式 2 表示设计的最大额定环境温度下的转换器功率损耗  $\Delta P_H$ ：

$$\Delta P_H = (1 - \eta_H) \times P_{IN} \quad (2)$$

公式 3 用于估算最高环境温度  $T_{A\_max}$  下的最坏情况结温

$$T_J = T_{A\_max} + R_{\theta JA} \times \Delta P_H \quad (3)$$

## 测量转换器结温面临的挑战

在封闭的温度室中测量转换器结温可能很困难。使用热电偶可能是无效的，因为它会从封装顶部带走热量。这使得电流或电压测量成为确定转换器结温的替代方法。

转换器的每个引脚上都有一个静电放电二极管，用于保护器件免受静电放电的影响。此外，某些引脚之间可能有 FET；例如，PGOOD 引脚和接地之间连接了一个开漏 FET。表征该 FET 体二极管上的压降可以得出结温的近似值。<sup>[2]</sup> 不幸的是，由于 IC 中的开关波形 (有时是 IC 布局)，表征 IC 中的二极管并不总是一个清晰的过程。此外，二极管测量不得影响器件的正常运行。

## IC 级的进一步散热优化

由于冷却限制，电源转换器的热性能可能会出现。这些问题通常在原型设计阶段后期发生。幸运的是，许多转换器的开关频率是可以改变的。原型构建可以允许采用较慢频率转换器所需的更大或额外的元件占位件。

开关频率会严重影响转换器的功率损耗。如果设计接近建议的最大工作条件，则开关频率调整可以提供快速解决方案来解决该问题。降低开关频率将减少转换器中的交流损耗 (开关损耗)，因为这些损耗与转换器中的寄生 FET 电

容及其充电和放电的开关频率直接相关。此外，电感器中的损耗将会下降<sup>[4]</sup>，但电感器磁芯材料将决定下降幅度。

图 7 展示了较快频率转换器无法在与较慢频率转换器相同的环境温度和输出功率下运行。开关频率选择应平衡给定应用的器件性能和总体成本。<sup>[5]</sup>

提高设计热性能的另一个简单设计更改是选择合适的电感器。改用损耗更低的电感器将提高转换器设计效率。交流和直流的具体损耗取决于电感器结构和功率条件。可以通过查看电感器的数据表来确定电感器损耗及其随转换器规格的变化。

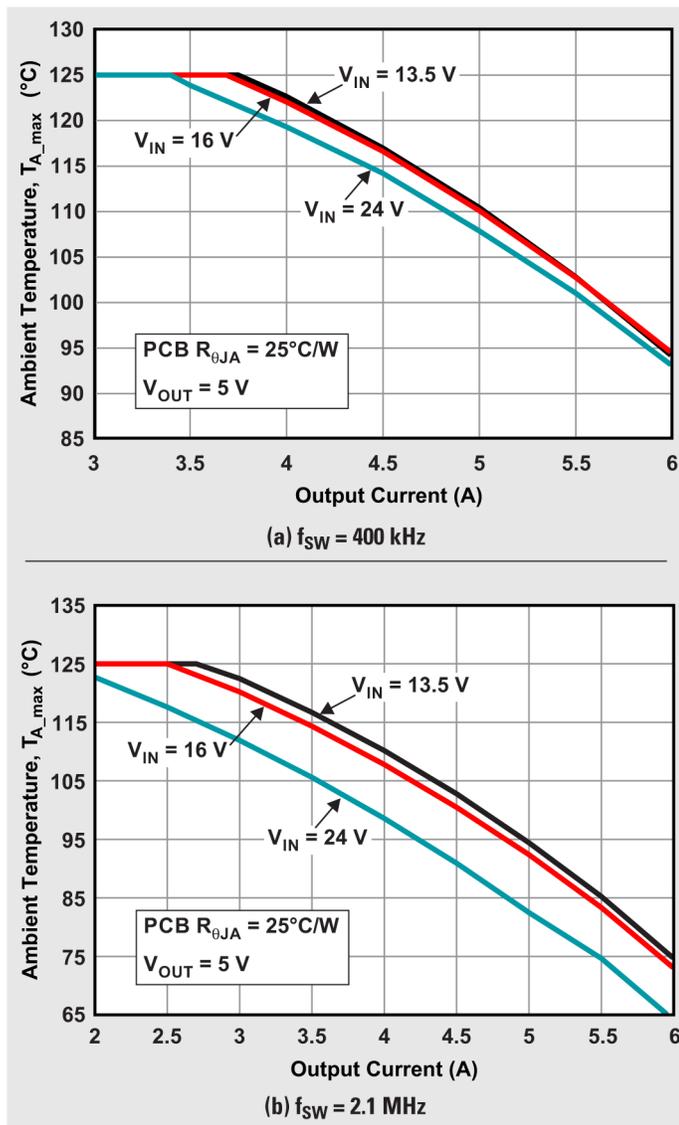


图 7. LM61460-Q1 转换器的输出功率降额曲线

除电感器选择之外，电感器放置也是影响电路板热性能的一个因素。有时，选择的电感器可以最大限度地减小解决方案尺寸并提高电源的 EMI 性能。该电感器通常具有非常小的物理尺寸和较高的直流电阻。这将导致电感器发热，尤其是在降压转换器输出电流较高时。对于开关节点面积较小的设计而言，这可能是一个问题，因为电感器会塞满转换器并使其充满热量。

转换器设计应平衡 EMI 噪声和热性能。如果采用具有合理的直流电阻和开关节点面积的电感器（以便能够向外传导电感器的热量），则可以降低转换器的  $R_{\theta JA}$ 。随着 EMI 标准变得更加严格，务必仔细考虑开关节点面积的大小，因为其大小将直接影响降压转换器的辐射噪声特征，降压转换器的能量通常会处于 EMI 扫描最严格的区域（FM 频段）。

## 结论

按照本文中介绍的技术，可以在构建第一个原型板之前估算转换器设计的热性能。这样便可将所构建的项目更快地推向市场，并避免日后出现热问题。在需要考虑热性能的设计中，本文概述的技术可用于进一步提高热性能并完成 PCB 项目。

## 参考文献

1. Anthony Fagnani, “优化 TPS54424/TPS54824 HotRod™ QFN 封装布局以改善热性能”，德州仪器 (TI) 应用报告 (SNVA839)，2018 年 11 月。
2. John Tucker, “采用 28 引脚 HTSSOP 封装的 SWIFT™ 直流/直流转换器的热性能”，德州仪器 (TI) 应用报告 (SLVA201)，2005 年 2 月。
3. Robert Kollman, “电源设计小贴士：避免电感器磁芯损耗引起烧毁”，EE Times 文章，2009 年 7 月 13 日。
4. Richard Nowakowski 和 Brian King, “选择直流/直流转换器的最佳开关频率”，EE Times，2006 年 10 月 25 日。
5. Marshall Beck, “EMI 滤波器元件及其针对汽车直流/直流稳压器的非理想因素”，模拟设计期刊 (SLYT782)，2019 年 12 月。

## 相关网站

### 基本信息:

“AN-2026 PCB 设计对 SIMPLE SWITCHER® 电源模块热性能的影响”，德州仪器 (TI) (SNVA424A)，2013 年 4 月。

Anthony Fagnani，“了解倒装芯片 QFN (HotRod™) 封装和标准 QFN 封装的性能差异”，德州仪器 (TI) 应用报告 (SLVAEE1)，2019 年 7 月。

Denislav Petkov，“采用直流/直流电源模块的实用性热设计”，德州仪器 (TI) 应用报告 (SNVA848A)，2019 年 11 月。

具有 USB 3.0 数据支持的 CISPR 25 5 类 USB Type-C™ 端口参考设计 (TIDA-00987)

Darvin Edwards 和 Hiep Nguyen，“半导体和 IC 封装热指标”，德州仪器 (TI) 应用报告 (SPRA953C)，2016 年 4 月。

Arief Hernadi，“采用超小型 HotRod 倒装芯片封装的 PCB 热设计（无散热焊盘）”。TI 技术日演示文稿，2019 年。

### 产品信息:

LM61460-Q1

**重要声明:** 本文所提及德州仪器 (TI) 及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。建议客户在订购之前获取有关 TI 产品和服务的最新和完整信息。TI 对应用帮助、客户的应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不负任何责任。有关任何其它公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的认可、保证或授权。

所有商标均为其各自所有者的财产。

© 2020 Texas Instruments Incorporated



ZHCT404A

## 重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2023，德州仪器 (TI) 公司