

摘要

封装内部和外部的温度都会对器件的特性产生很大影响。封装内芯片的温度会影响器件的功能和可靠性。器件封装也可能变得过热，从而给用户带来安全问题。由于上述原因以及其他原因，必须认真检查印刷电路板的热属性。无论是覆铜厚度还是层数，PCB 设计中还有许多不同方面都会影响电路板的热特性。本文档将介绍 PCB 设计中散热方面的许多最佳实践和经验法则。然后，本文档将通过一项实际实验来检验这次深入讨论，该实验将测量两个不同 AM263x 评估模块 (EVM) 的结温。我们会查看实验结果，并证明两个 EVM 中的不同热设计选择对热性能有何影响。



备注

虽然本文档包含的是关于 AM263x 器件和 AM263x 评估模块的具体信息和测试，但整个应用手册中描述的热设计原则适用于所有 Sitara™ 微控制器。

内容

1 引言	3
1.1 如何使用本应用手册.....	3
1.2 术语表.....	3
2 热阻概述	5
2.1 结温与环境温度间的关系.....	5
2.2 封装定义的热阻特性.....	6
2.3 电路板定义的热阻.....	6
3 影响热性能的电路板设计选择	8
3.1 散热过孔.....	8
3.2 电路板尺寸.....	10
3.3 气流、散热和外壳.....	10
3.4 覆铜厚度.....	11
3.5 发热器件的相对位置.....	11
3.6 层数.....	12
3.7 热路径中断.....	12
4 热设计最佳实践回顾	13
5 AM263x EVM 热比较 (借助数据)	14
5.1 测试设置和材料.....	14
5.2 测量记录软件.....	15
5.3 AM263x EVM 比较.....	16
5.4 测量结果.....	17
6 使用热模型	27
7 参考	27

插图清单

图 1-1. 应用手册章节流程图.....	3
图 2-1. 电气与热节点分析.....	5
图 2-2. 系统的热阻.....	6
图 2-3. 系统的基本热阻.....	6
图 2-4. $R_{\theta BA}$ 的细分.....	7
图 3-1. 散热过孔的等效热阻图.....	8
图 3-2. AM263x controlCARD 散热过孔.....	9
图 3-3. LP-AM263x 热像仪.....	11
图 3-4. TMDS263CNCD 热像仪.....	12
图 5-1. 测试设置图.....	14
图 5-2. 日志记录软件概要流程图.....	16
图 5-3. AM263x 控制卡盖子温度读数.....	18
图 5-4. AM263x LaunchPad 盖子温度读数.....	19
图 5-5. AM263x 控制卡器件在环境温度扫描范围内的工作功率.....	20
图 5-6. 无负载时的 AM263x 控制卡温度.....	22
图 5-7. AM263x 控制卡和 LaunchPad 在不同环境温度下的结温.....	23
图 6-1. 热仿真流程.....	27

表格清单

表 1-1. 术语表和首字母缩略词定义.....	3
表 3-1. 热设计考虑因素.....	8
表 3-2. AM263x EVM 散热过孔比较.....	9
表 3-3. AM263x EVM 电路板尺寸比较.....	10
表 3-4. AM263x EVM 外部冷却比较.....	10
表 3-5. AM263x EVM 覆铜厚度比较.....	11
表 3-6. AM263x EVM 层数比较.....	12
表 5-1. AM263x EVM 比较.....	16
表 5-2. AM263x 控制卡在极端温度下的功率测量.....	20
表 5-3. 热阻计算.....	21
表 5-4. AM263x 数据表封装热特性.....	21
表 5-5. 环境温度和结温的测量值.....	24

表 5-6. 近似温度读数趋势线.....26
表 5-7. 极端环境温度下的近似结温.....26

商标

Sitara™ is a trademark of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

备注

本文档介绍了在设计电路板时散热方面的一些最佳实践。为了更准确地表示系统的热特性，请将器件热模型和电路板属性导入到热仿真程序中。有关使用热模型的更多信息，请参阅节 6。

1.1 如何使用本应用手册

许多因素都会影响器件的结温。因此，了解哪些 PCB 设计选择会影响热阻并进而影响结温，这一点很重要。

- **第 3 章：热阻概述**
 - 热阻概述介绍了系统中要考虑的所有热阻，以及 PCB 设计如何严重影响结温与环境温度之间的热阻。
- **第 4 章：影响热性能的电路板设计选择**
 - 在设计 PCB 时需要考虑许多因素。本章详细介绍了某些因素如何影响器件散热和降低结温的能力。这里详细介绍了两种不同 AM263x EVM 的设计选择，并在每个部分中分别介绍了每个因素及最佳实践。
- **第 5 章：热设计最佳实践回顾**
 - 本章将每个设计因素的所有最佳实践合并到一个页面中，以便快速轻松地查看。
- **第 6 章：AM263x EVM 热比较 (借助数据)**
 - 这里开发了一个测试脚本，以使用两个不同的 AM263x EVM 在整个环境温度扫描范围内测量结温。结果详细说明了两个 EVM 之间的 PCB 设计差异如何影响结温与环境温度之间的热阻。此外，这里还记录了整个环境温度扫描期间的工作功率和热阻。
- **SoC 功耗估算工具**
 - 每个 Sitara MCU 都在器件产品页面的**设计工具和仿真**部分下提供了一个关联的功率估算工具 (PET)。PET 用于估算器件在所设计系统的工作条件下的功耗。
- **第 7 章：使用热模型**
 - PCB 设计完成后，最佳实践是将设计和任何外壳导入到热仿真软件中。PET 输出提供功耗的估计值，进而可用于生成更真实的系统热模型。仿真可以使用 SoC 热模型来计算给定系统和环境参数的结温。器件热模型可以在器件产品页面的**设计工具和仿真**部分中找到。

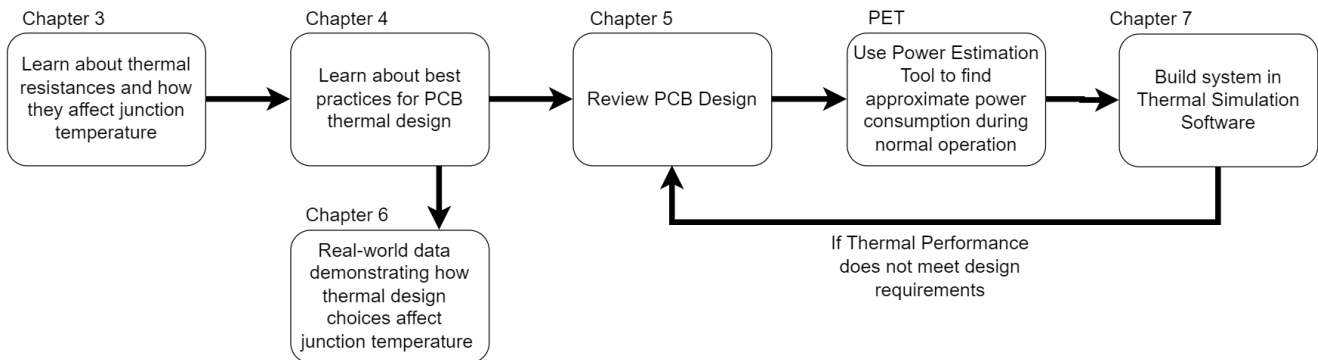


图 1-1. 应用手册章节流程图

1.2 术语表

表 1-1. 术语表和首字母缩略词定义

术语	定义
结温	封装内裸片上热点附近的温度
环境温度	系统周围自然空气的温度
盖子 (外壳) 温度	封装周围材料的温度

表 1-1. 术语表和首字母缩略词定义 (continued)

术语	定义
R^{\ominus}_{JA}	结温与环境温度之间的热阻
R^{\ominus}_{JC}	结温与外壳 (盖子) 温度之间的热阻
R^{\ominus}_{CA}	外壳 (盖子) 温度与环境温度之间的热阻
R^{\ominus}_{JB}	结温与电路板温度之间的热阻
R^{\ominus}_{BA}	电路板温度与环境温度之间的热阻
R^{\ominus}_{Via}	散热过孔阵列的热阻
R^{\ominus}_{Cu}	平面覆铜的横向热阻
R^{\ominus}_{FR-4}	结温与环境温度之间的热阻
R^{\ominus}_{SA}	PCB 表面区域与环境温度之间的热阻
热电偶	两个导体之间的结点, 可产生电压, 具体取决于可映射至特定温度值的材料
AEC-Q100	AEC-Q100 由美国汽车电子协会制定, 通过这项认证, 即表明器件能够在给定温度范围内承受应力测试并保证质量水平和可靠性。
本文中使用的首字母缩写词	
SoC	片上系统
JEDEC	联合电子器件工程设计委员会
LP	LaunchPad 开发套件
CC	控制卡开发套件
RTI	提供计时器功能的实时中断模块

2 热阻概述

2.1 结温与环境温度间的关系

在了解热设计的复杂性之前，务必要先了解电路板上的不同相关温度。热像仪上突出显示的温度是封装盖上的温度，而决定器件功能的是封装下方的温度，具体来说是在芯片上热点附近的区域或**结温 (T_J)**。结温受到许多因素的影响，但结温与系统周围自然空气的温度或**环境温度 (T_A)** 之间存在明显的关系。结温与环境温度之间的关系可以通过热特性来定义： $R_{\Theta JA}$ 或结温与环境温度之间的热阻。

$$\frac{T_{\text{Junction}} - T_{\text{Ambient}}}{\text{Operating Power (Watts)}} = R_{\Theta JA} \left(^\circ\text{C/W} \right) \quad (1)$$

热特性可以用类似于简单电路的方式来表示。从这个角度来看，“欧姆定律”仍然适用于热“电路”。器件的工作功率（以瓦特为单位）类似于电路的电流，而两个温度之间的热阻为电阻。

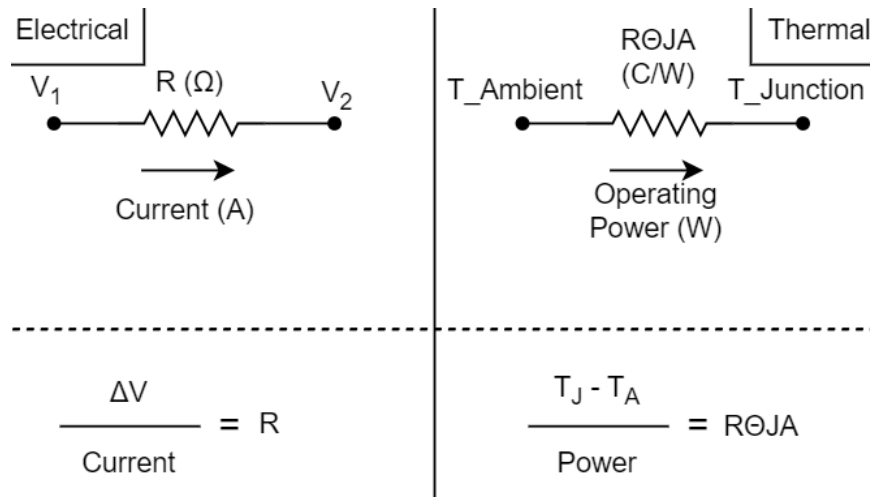


图 2-1. 电气与热节点分析

备注

$R_{\Theta JA}$ 不是一个恒定值，并在很大程度上取决于 PCB 设计。

[AM263x Sitara™ 微控制器数据表](#) 列出了热阻特性值，但这些值并不能完全呈现所有情况。数据表中的热阻特性基于电子器件工程联合委员会 (JEDEC) 所定义 2S2P 系统对应的特定测试条件。

备注

由于数据表中的热阻值基于 [JEDEC 定义的双信号和双电源层 \(2S2P\) 系统](#)，因此请勿使用这些值来计算已知环境温度或盖子温度下的结温，这一点非常重要。AM263x 有一个热管理器模块，该模块在芯片热点附近有两个热检测 ADC，用于记录结温。

2.2 封装定义的热阻特性

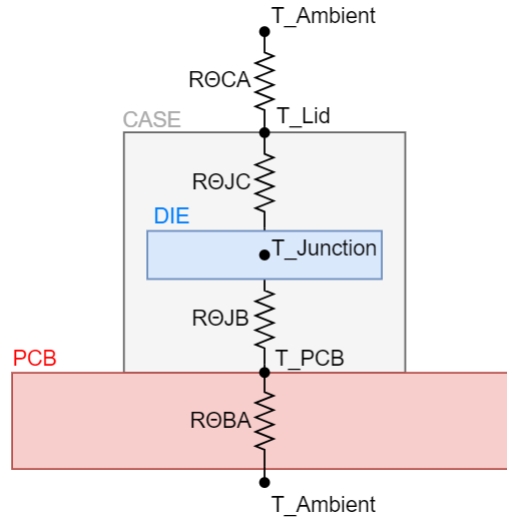


图 2-2. 系统的热阻

$R_{\theta JA}$ 取决于许多因素，其中一些热阻特性在系统设计中是恒定的。图 2-2 展示了系统中的各种热阻。恒定特性由从裸片到封装外壳外部的散热能力定义。结与电路板之间的热阻由 $R_{\theta JB}$ 定义，而结与外壳（盖子）之间的热阻由 $R_{\theta JC}$ 定义。封装盖子还在盖子与环境温度之间存在热阻，即 $R_{\theta CA}$ 。由于 AM263x 只有一种封装类型，因此 $R_{\theta JC}$ 和 $R_{\theta JB}$ 是恒定的。 $R_{\theta CA}$ 可以通过对盖子吹气来降低。

图 2-3 展示了热阻的概要电路表示，而不管它们是否因设计而异。

备注

为了降低片上系统 (SoC) 的结温，必须选择有助于 PCB 散热的系统设计，或者必须引入气流以帮助降低电路板/外壳到环境的热阻。有关电路板定义的热阻的更多信息，请参阅节 2.3。

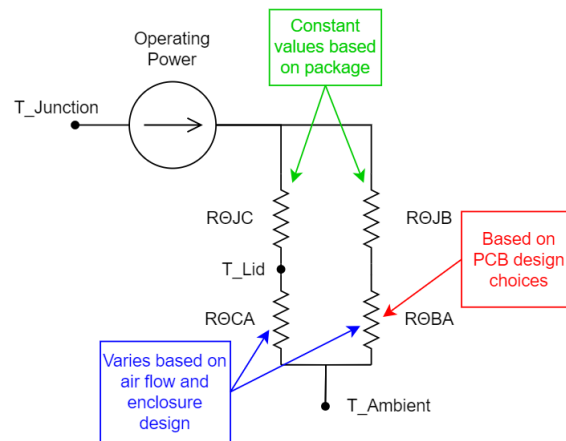


图 2-3. 系统的基本热阻

2.3 电路板定义的热阻

PCB 的设计与结温和环境温度之间的差异密切相关。理想的目标是使结温尽可能接近环境温度，但当热量无法有效地从 SoC 散发出去时，结温和环境温度之间的差值将会增大。电路板与环境温度之间的热阻可以分为四个单独的热阻，这些热阻的值会因系统设计而异：

- 散热过孔的热阻 ($R_{\theta Via}$)
- 铜平面的热阻 ($R_{\theta Cu}$)

- FR-4 层压板的热阻 ($R_{\Theta_{FR-4}}$)
- 电路板表面区域与环境温度的热阻 ($R_{\Theta_{SA}}$)

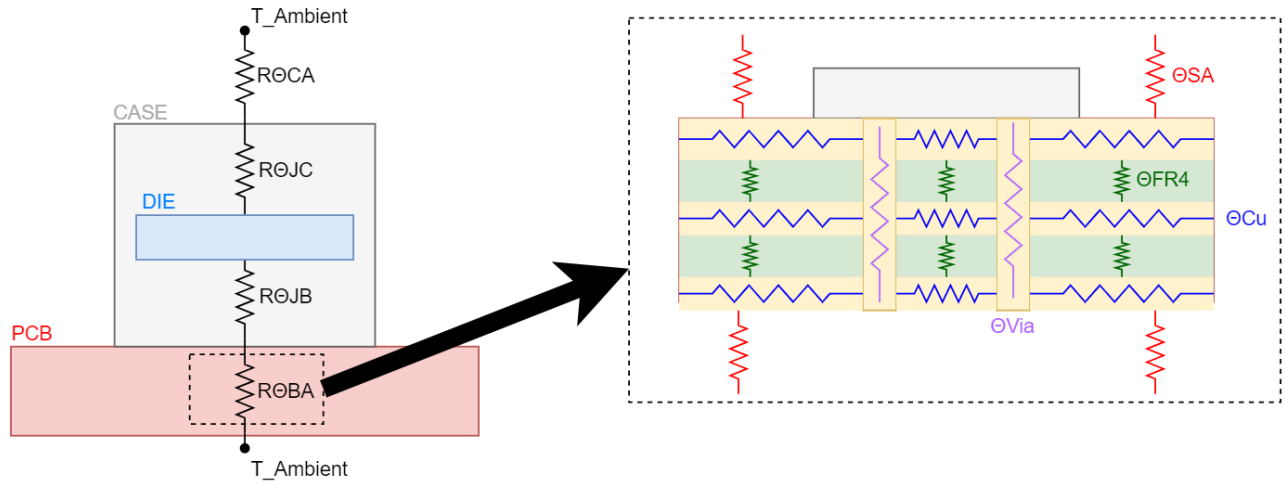


图 2-4. $R_{\Theta_{BA}}$ 的细分

不难想象，一些简单的设计选择如何帮助降低 $R_{\Theta_{BA}}$ ，从而降低 $R_{\Theta_{JA}}$ 。可帮助改善热性能的一些设计选择示例包括增加散热过孔的铜量、增加额外的铜层或增大电路板尺寸。有关影响热性能的设计选择的全面分解，请参阅节 3。

3 影响热性能的电路板设计选择

PCB 的热设计可能会影响设计的各个方面：

表 3-1. 热设计考虑因素

Factor (降额系数)	说明
功能/可靠性	系统能否在预期的温度范围内工作？
成本	出于散热考虑而做出的变化是否会导致电路板成本过高？
重量	重量限制是否会限制散热选项？
用户体验	用户在操作过程中触摸电路板是否会被烫伤？

设计 PCB 时必须考虑上述所有因素。有很多有效的解决方案可以限制系统的 $R_{\Theta JA}$ 。在检查电路板的热设计时，应考虑以下设计选择：

- 散热过孔的位置、尺寸和数量
- 电路板尺寸
- 气流、散热和外壳
- 接地层覆铜厚度
- 发热器件的相对位置
- Number 层数
- 限制热路径中断

3.1 散热过孔

散热过孔阵列实现可以说是 AM263x 热设计的重中之重，因为除非 BGA 封装使用散热器，否则散热过孔是 BGA 封装的唯一散热连接。AM263x 的散热过孔采用接地回路过孔的形式，并连接到 BGA 的每个 VSS 引脚。

散热过孔的热阻 ($R_{\Theta \text{vias}}$) 与 SoC 下方所有散热过孔的总热阻相关。每个单独的散热过孔类似于一个电阻器，其中所有电阻器的等效电阻类似于许多并联电阻器。与并联电阻器数量增加与等效电阻间的关系类似，每增加一个散热过孔，等效热阻也会变小。例如，在单个过孔的热阻为 $50^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 的情况下，图 3-1 展示了散热过孔数量与等效热阻之间的关系（假设所有过孔具有完全相同的属性）。

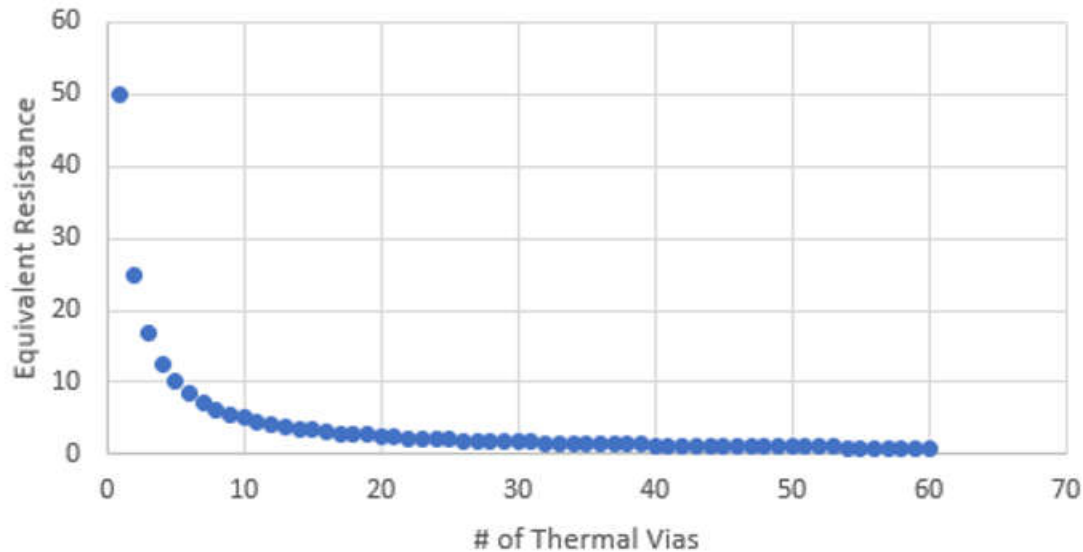


图 3-1. 散热过孔的等效热阻图

单个散热过孔的热阻由散热过孔的尺寸决定。一般来说， $R_{\Theta \text{vias}}$ 可以通过以下公式估算：

$$\frac{1}{\lambda(\text{Cu})} \left(\frac{\text{Length}}{\text{Area}} \right) = R_{\Theta \text{ Single Via}}$$

其中， λ (Cu) 是铜的电导率，即 $4W/(m \cdot K)$ ，而长度是指过孔的长度，因此散热过孔面积的公式为：

$$\pi * [(Drill\ Hole\ Radius)^2 - (Drill\ Hole\ Radius - plating\ thickness)^2]$$

图 3-2 展示了散热过孔阵列的示例，其中过孔直径为 8mil 并且从 BGA 到散热过孔的布线宽度为 10mil。

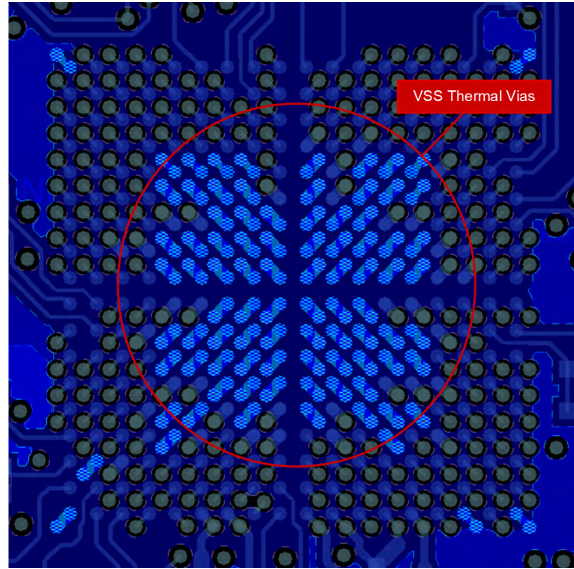


图 3-2. AM263x controlCARD 散热过孔

为了获得最佳热性能，请遵循以下做法：

- 在 BGA 的每个 VSS 引脚上使用过孔
- 从 BGA 到过孔使用尽可能宽的迹线
- 使用尽可能大的钻孔直径
- 用导热材料填充散热过孔

表 3-2. AM263x EVM 散热过孔比较

测量值	TMDSCNCD263	LP-AM263
散热过孔数量	90	90
钻孔直径	8mil	8mil
镀层厚度	35um	20um 至 30um
导热材料填充过孔	树脂填充	空腔

3.2 电路板尺寸

电路板尺寸很重要，因为电路板越大，接地层用于散热的覆铜就越大，同时电路板还提供了更大的表面积来将热量从电路板表面扩散到周围空气。但增大电路板总尺寸并不一定会带来更好的热性能，因为还必须考虑电路板的其它热特性。电路板可能表面积很大，但**热路径中出现中断或瓶颈**，从而导致电路板表面积带来的热阻回报可以忽略不计。此外，即使电路板很大，如果**所有主要散热器都在同一区域**，那么结果也将是热性能更差。

为了获得最佳热性能，请遵循以下做法：

- 使电路板尽可能大。
- 将 SoC 放置在远离电路板边缘的位置

表 3-3. AM263x EVM 电路板尺寸比较

测量值	TMDSCNCD263	LP-AM263
电路板尺寸	105.76mm x 82.81mm + 6.09mm HSEC 长度	195.58mm x 58.42mm
表面积近似值	9,300mm ²	11,400mm ²
SoC 与电路板边缘之间的距离	13.39mm	22.89mm

3.3 气流、散热和外壳

有一些外部因素会影响结温与环境温度之间的热阻。如果系统设计为带有外壳，则必须考虑新的额外热阻。现在，以前结与环境空气之间的热阻只是结温与外壳内空气之间的热阻。环境温度的任何变化都会对结温产生更大的影响。务必要通过改善系统其他区域的热阻，抵消外壳带来的额外热阻。

当系统放在外壳内时，要改善系统的热性能，一种方法是引入气流。通过在外壳开口处安装风扇，可以尽可能地减小外壳导致的热阻。此外，气流通常会降低封装盖或 PCB 本身等外部表面区域的热阻。

在解决散热问题时，一般解决方案是安装散热器。但是，应该注意的是，使用散热器只会降低结温与外壳温度之间的热阻。如果 PCB 具有显著散热缺陷，那么无法仅通过添加散热器来解决。

为了获得最佳热性能，请遵循以下做法：

- 使用针对热性能进行优化的外壳
- 在外壳设计中添加风扇
- 在 BGA 箱盖上安装散热器
- 保持空气持续稳定地流向系统

表 3-4. AM263x EVM 外部冷却比较

测量值	TMDSCNCD263	LP-AM263
空气流动	不适用	不适用
散热器	不适用	不适用
外壳	不适用	不适用

3.4 覆铜厚度

覆铜厚度对于热性能非常重要，因为接地覆铜负责散发从散热过孔传导而来的热量。覆铜厚度与每平方英尺的覆铜重量有关。通常，PCB 的覆铜厚度为 0.5oz/sq ft 或 1.0oz/sq ft。

$$\frac{1}{\lambda(Cu)} \left(\frac{Length}{Width * Thickness} \right) = R\theta (Copper\ layer)$$

其中， $\lambda(Cu)$ 是铜的导电率，即 $4W/(m \cdot K)$ ，而长度和宽度是指铜平面的长度和宽度。

为了获得最佳热性能，请遵循以下做法：

- 尽可能扩大每个铜层的面积
- 使用较重的铜层

表 3-5. AM263x EVM 覆铜厚度比较

测量值	TMDSCNCD263	LP-AM263
接地层覆铜厚度	1.26mil	1.26mil
覆铜重量	1oz/sq ft	1oz/sq ft

3.5 发热器件的相对位置

AM263x 器件并不是 PCB 上唯一发热的封装器件。务必要有意识地将所有发热元件分开放置，否则会导致电路板与环境温度之间的热阻增加。发热元件示例包括但不限于：

- 其他处理器或微控制器
- 电源管理集成芯片 (PMIC)
- 稳压器
- LIN 和以太网 PHY

为了获得最佳热性能，请遵循以下做法：

- 确保 PCB 上已知发热器件之间有足够的距离。

图 3-3 展示了 LaunchPad 如何在设计上将低压降 (LDO) 稳压器的热辐射与 AM263x 器件分开。AM263x 控制卡在 SoC 附近采用发热封装设计，但该封装负责向 SoC 提供 25MHz 时钟。在这种情况下，工作时钟的信号完整性比影响热阻更重要。由于控制卡遵循本文档中列出的其他热设计规则，因此很容易忽略 SoC 附近的一个发热封装的潜在影响。图 3-4 展示了 AM263x 控制卡的热像仪视图。

备注

以下图像拍摄是使用热像仪拍摄的，其中 AM263x 器件以最大功耗用例运行且电路板在 25°C 的环境温度下保温 15 分钟。

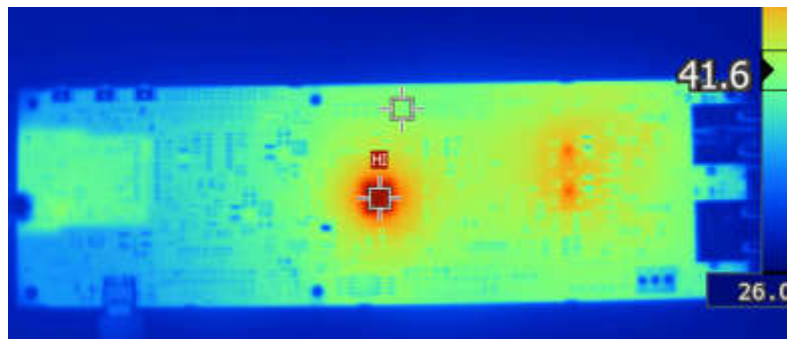


图 3-3. LP-AM263x 热像仪

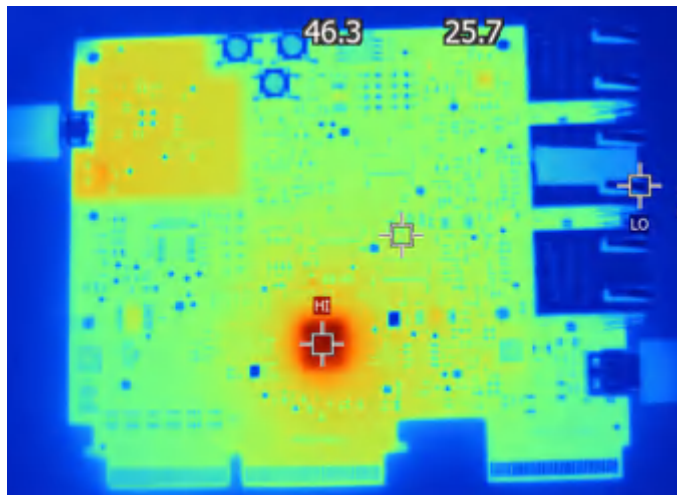


图 3-4. TMD5263CNCD 热像仪

3.6 层数

与增加覆铜厚度类似，增加接地层覆铜量来提升散热也会显著提高热性能。增加总层数通常也会降低热阻，但如果不包含接地层，结果就不会很明显。

如果系统设计为少于 6 层（2 个接地层），那么通过其他设计选择来尽可能地减少 PCB 的所有其他散热问题至关重要。

为了获得最佳热性能，请遵循以下做法：

- 增加总层数。
- 增加接地层覆铜量

表 3-6. AM263x EVM 层数比较

测量值	TMDSCNCD263	LP-AM263
总层数	10	6
接地层	4	2

3.7 热路径中断

与管道变窄会阻碍水流类似，迹线和过孔切口也会导致散热瓶颈。应检查电路板上的每个接地层，以确保热路径不存在中断。多个过孔排列成一条线或阵列可能会在接地层上形成切口，这将对离开 SoC 的热流产生负面影响。

为了获得最佳热性能，请遵循以下做法：

- 检查每个接地层，并确保没有覆铜切口会阻碍热量流动。

4 热设计最佳实践回顾

可以查看以下列表来检查电路板设计是否遵循了优化 SoC 散热的基本规则。此列表列出了节 3 中每个电路板设计选择小节的经验法则。

备注

对于最坏的热情况，需要考虑所有系统设计细节，包括外壳特性和是否存在气流。

为了获得最佳热性能，请遵循以下做法：

- **散热过孔**
 - 在 BGA 的每个 VSS 引脚上使用过孔。
 - 在狗骨扇出配置中从 BGA 到过孔使用尽可能宽的迹线。
 - 使用尽可能大的钻孔直径。
 - 用导热材料填充散热过孔。
- **电路板尺寸**
 - 使电路板尽可能大。
 - 将 SoC 放置在远离电路板边缘的位置。
- **气流和散热**
 - 使用针对热性能进行优化的外壳。
 - 在外壳设计中添加风扇。
 - 在 BGA 箱盖上安装散热器。
 - 保持空气持续稳定地流向系统。
- **覆铜厚度**
 - 尽可能扩大每个铜层的面积。
 - 使用较重的铜层。
- **发热器件的相对位置**
 - 确保 PCB 上已知发热器件之间有足够的距离。
- **层数**
 - 增加总层数。
 - 增加接地层覆铜量。
- **热路径中断**
 - 检查每个接地层，并确保没有覆铜切口会阻碍热量流动。

5 AM263x EVM 热比较 (借助数据)

5.1 测试设置和材料

用于此热测量过程的材料如下：

- MPI Thermal ThermalAir TA-5000A 精密温度强制系统
 - 利用恒定的气流来控制外壳内的环境温度
- 两个 National Instruments USB-TC01 温度输入设备
 - 用于记录环境温度和 AM263x 盖子温度随时间变化的数据
- 两个 T 型热电偶探头
 - T 型热电偶温度探头能够精确测量 -185°C 至 300°C 范围的温度
- 密封亚克力热处理室
 - 允许通过 ThermalAir 系统调节环境温度
- AM263x 控制卡评估模块
- AM263x LaunchPad 评估模块

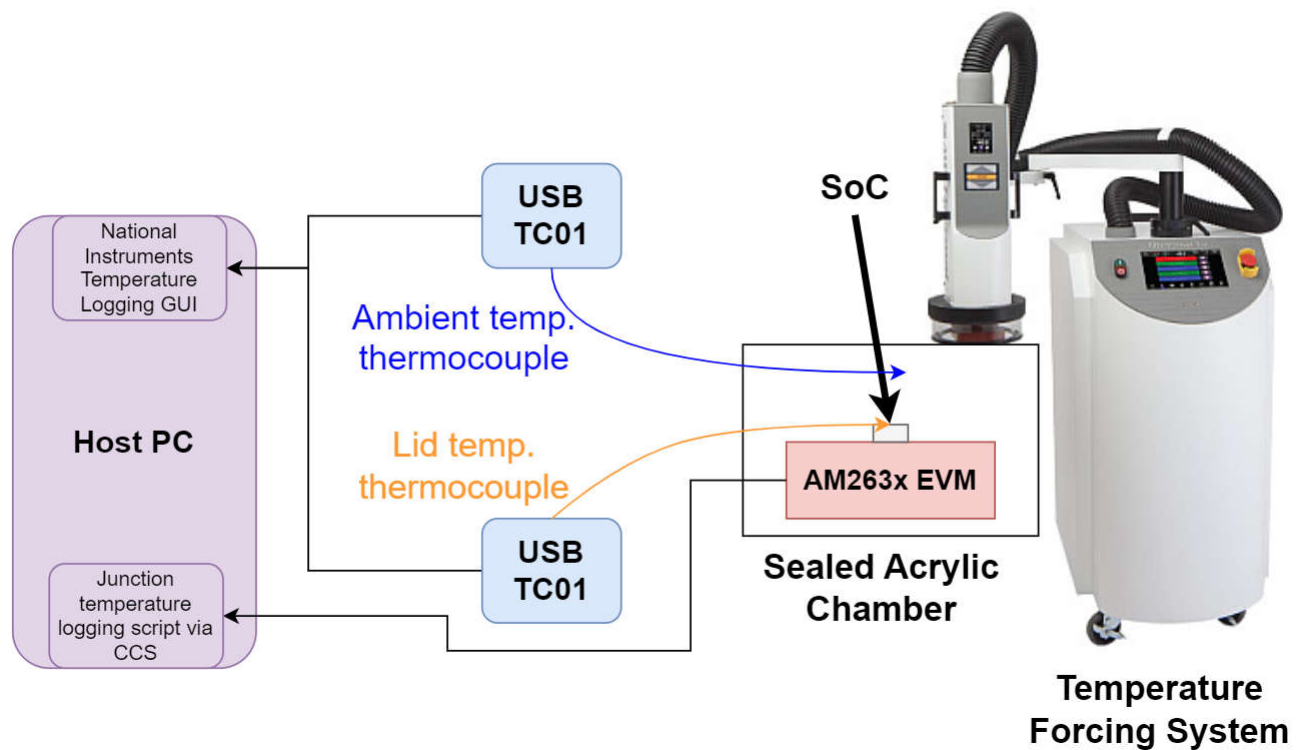


图 5-1. 测试设置图

为了进行热测量，评估模块放置在亚克力外壳内，使其位于 ThermalAir 系统的通风口下方。其中一个热电偶探头放置在 AM263x 器件封装盖的中间并使用 Kapton 胶带固定。另一个探头用电路板上方的 Kapton 胶带固定到 EVM，以记录系统的环境温度。两个热电偶探头都连接到 NI USB-TC01 设备以记录热测量值。USB-TC01 设备被编程为每十秒记录一次所连探头的温度。

ThermalAir 系统可控制空气流速和温度。对于这些测量，空气流速设置为 12.0SCFM。有一个脚本用于配置 ThermalAir 喷嘴输出的气流温度。该脚本每 10 分钟将气流的温度增加 5°C ，一直从 -50°C 增加到 165°C 。应注意，外壳内的环境温度将与气流温度不同。在脚本开始运行之前，ThermalAir 设置为输出 -50°C 的空气，直到外壳达到约 -30°C 的稳定环境温度。

评估模块使用将在 R5 内核上运行的两个不同程序。第一个程序被加载到 R5F_0 上，负责每隔十秒记录一次内部结温。第二个程序被加载到内核上，以模拟该特定内核上的满负载。此过程中进行的测量包括以下情况：仅在 R5F_0 上运行日志记录脚本时、在 R5F_0 上运行日志记录脚本且 R5F_1 以满负载运行时，以及在 R5F_0 上运

行日志记录脚本且 R5_1/2/3 以满负载运行时。AM263x 控制卡设计为带有 INA228 功率监测器，除了记录结温外，还可以每十秒记录一次工作功率，以便观察不同结温和环境温度值下的功耗。AM263x LaunchPad 没有 INA228 功率监测器，因此针对此 EVM 未记录这些值。

与任何测试环境一样，必须考虑一些变量。在每个 EVM 上的三项测试过程中，EVM 和温度探头均没有移动，但 LaunchPad 和控制卡的测试设置存在差异。温度探头和 EVM 本身相对于气流喷嘴的位置大致相同，但并不是位于完全相同的位置上。此外，由于这些测试是在多天内进行的，因此实验室的温度并不是恒定的，并且对外壳内的环境温度读数有很小的影响。

5.2 测量记录软件

以下部分介绍了环境温度扫描期间在 EVM 上运行的测量日志记录脚本。在日志记录开始之前，已配置 TSENSE 内部结温探头。

为了启用温度控制器，需要将 TOP_CTRL_TSENSE_CFG 寄存器中的 TMPSOFF、BGROFF、AIPOFF 和 SNSR_MX_HIZ 中的以下位复位。内部温度传感器有两个，分别是 TSENSE0 和 TSENSE1，并都位于器件的热点附近。SENSOR_SEL 寄存器用于控制各个传感器的启用。对于每个选定的传感器，FSM 需要 51 到 54 个时钟周期来启动序列。在 TSENSE_CFG_ENABLE 位被置位后，就会自动启动温度测量。有关热管理器的更多信息，请参阅 [AM263x Sitara™ 微控制器技术参考手册](#) 中的热管理器一章。

该程序使用 RTI 计时器模块来在测量读数之间启动一个 10 秒计时器。有关 RTI 计时器模块的更多信息，请参阅 [AM263x Sitara™ 微控制器技术参考手册](#) 中的计时器模块一章。

AM263x 控制卡具有两个 INA228 功率监控器，用于测量 3.3V 和 1.2V 电压轨电流。AM263x 通过 I2C 命令与 INA228 功率监控器通信。有关在 AM263x 控制卡上配置 INA228 器件的更多信息，请参阅 [使用 INA226/INA228 监控 AM263x MCU 上的总线电压和功率测量](#)。

节 5.2 以流程图形式简要展示了测量记录程序概要。

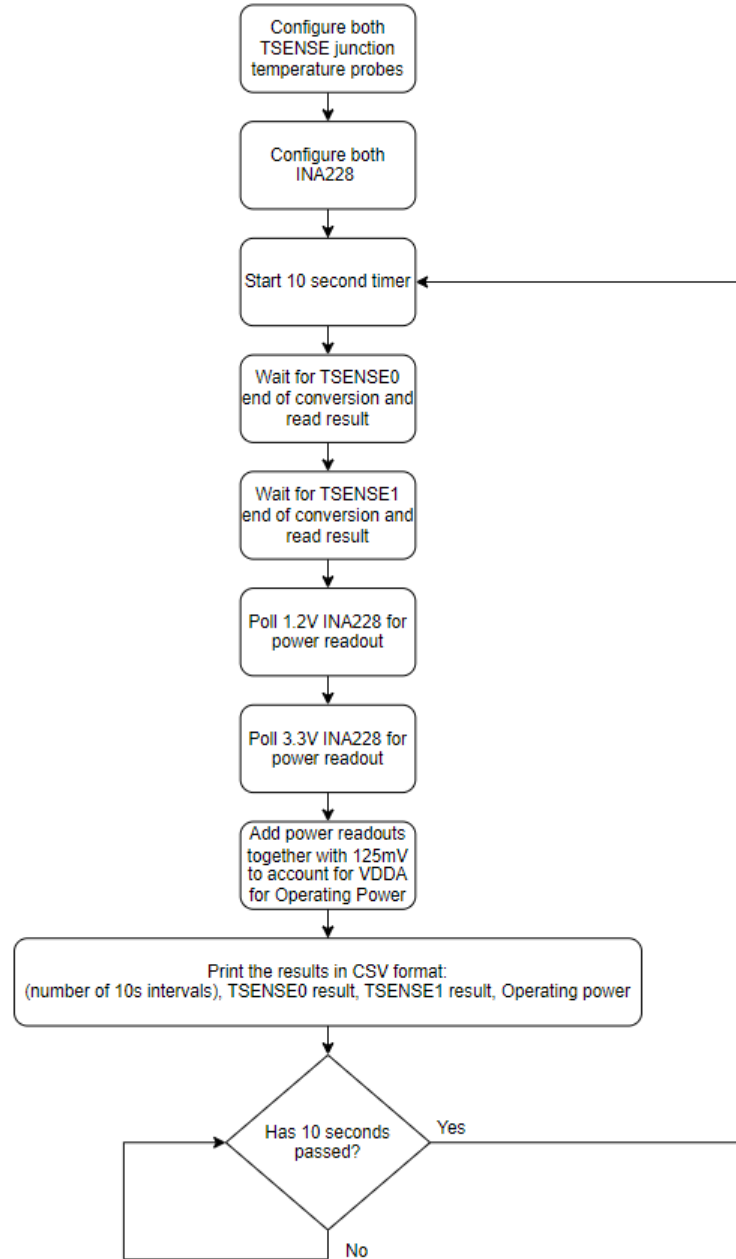


图 5-2. 日志记录软件概要流程图

5.3 AM263x EVM 比较

用于观察结温与环境温度间关系的两个 EVM 是 AM263x 控制卡和 AM263x LaunchPad。这两种系统具有不同的品质和设计选择，这些会影响 AM263x SoC 的热性能。表 5-1 详细说明了 PCB 设计中的相关差异。

表 5-1. AM263x EVM 比较

测量值	TMDSCNCD263	LP-AM263
散热过孔数量	90	90
钻孔直径	8mil	8mil
镀层厚度	35um	20um 至 30um
导热材料填充过孔	树脂填充	空腔
电路板尺寸	105.76mm x 82.81mm + 6.09mm HSEC 长度	195.58mm x 58.42mm

表 5-1. AM263x EVM 比较 (continued)

测量值	TMDSCNCD263	LP-AM263
表面积近似值	9,300mm ²	11,400mm ²
SoC 与电路板边缘之间的距离	13.39mm	22.89mm
接地层覆铜厚度	1.26mil	1.26mil
覆铜重量	1oz/sq ft	1oz/sq ft
总层数	10	6
接地层数	4	2

根据比较表可以推导出，AM263x 控制卡的热性能将优于 AM263x LaunchPad。尽管 Launchpad 的表面积稍大，但控制卡具有四个接地层以改善散热。如果将 PCB 的接地层设计为原来的两倍，则应该会对结温和环境温度之间的关系产生非常明显的影响。

5.4 测量结果

备注

有关散热设计最佳实践的简要列表，请参阅节 4。测试结果举例说明了具有相同 SoC 的两个不同 EVM 的热设计选择如何影响热性能。

以下各小节详细介绍了热测试过程中各种测量和计算的结果。在这些部分中，图形中将 AM263x 控制卡 EVM 称为 CC 并将 AM263x LaunchPad EVM 称为 LP。这些图形还将仅在 R5_0 上运行日志记录脚本时的测试配置称为 <EVM>_noLoad。当其他内核以满负载运行时，对于第一个 R5FSS 集群上满负载的情况，图形中将这此线称为 <EVM>_Load，而对于两个集群上都满负载的情况，则称为 <EVM>_Load123。

5.4.1 盖子温度读数

无论 R5 内核的利用率如何，盖子温度读数都保持相对一致，并且在整个环境温度范围内几乎没有变化。由于封装定义的 $R_{\theta JC}$ 值，LP 和 CC SoC 盖子读数预计几乎相同。图表之间的差异可归因于封装上不同数量的胶带以及热电偶探头的位置，这两者都会影响外壳与环境空气温度之间的热阻，即 $R_{\theta CA}$ 。

备注

ThermalAir 系统编程为在每个温度下保持 10 分钟，然后再递增 5°C。thermalAir 气流输出从 -50°C 开始，逐渐升高至 165°C。这样产生的环境温度范围约为 -30°C 至 118°C。

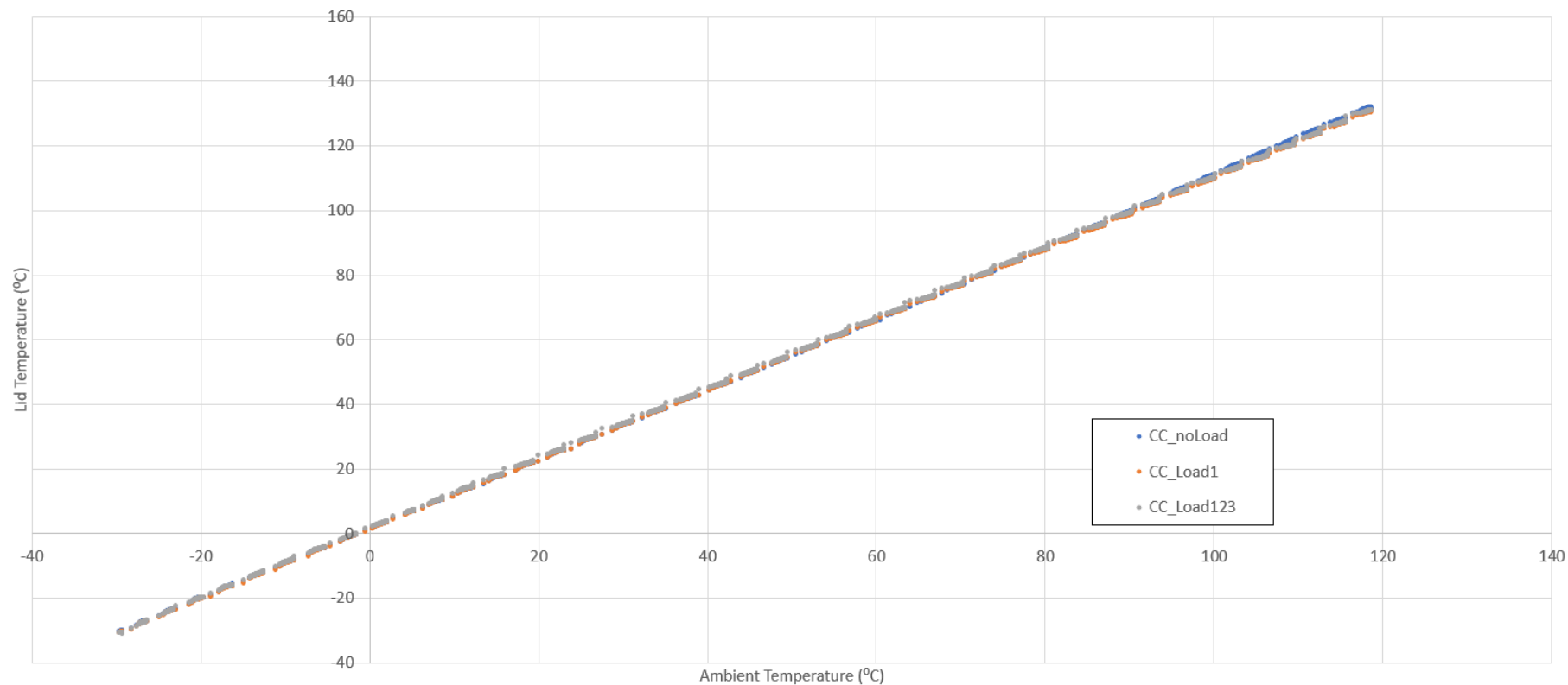


图 5-3. AM263x 控制卡盖子温度读数

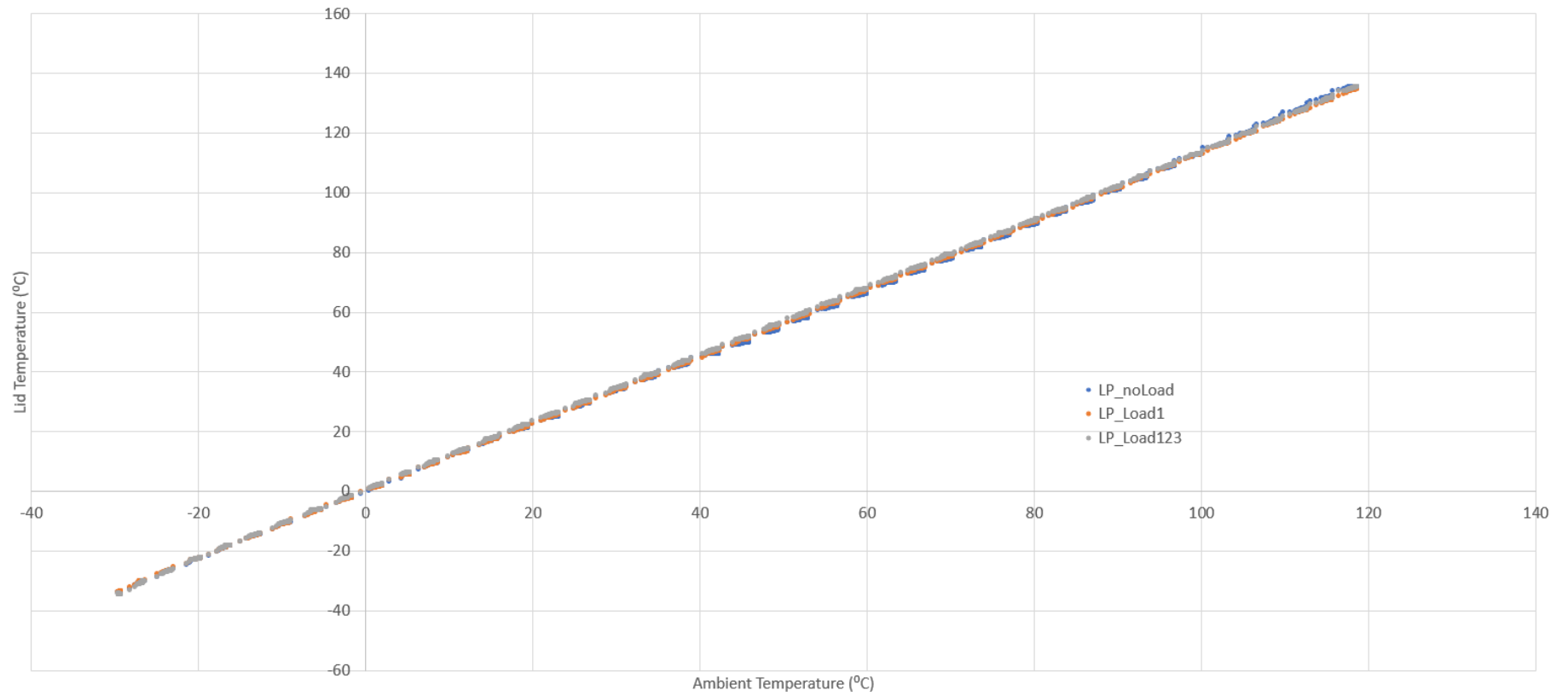


图 5-4. AM263x LaunchPad 盖子温度读数

5.4.2 温度范围内的功率读数

在测量过程中，通过轮询两个 INA228 功率监测器以确定 1.2V 和 3.3V 电源轨工作功率来记录工作功率。这两个值相加后再加上 125mV，以计算 VDDA 电源轨的工作功率。

工作功率在四种不同的配置下进行记录。前三个配置在封装上包含 Kapton 胶带，用于测量盖子温度。这三个配置包括以下情况：仅在 R5_0 上运行日志记录脚本 (CC_NoLoad)、在 R5_0 上运行日志记录脚本且 R5_1 以满负载运行 (CC_Load1)、在 R5_0 上运行日志记录脚本且 R5_1/2/3 以满负载运行 (CC_Load123)。功率测量的最终配置是封装顶部没有 Kapton 胶带时，由于外壳温度与环境温度之间的热阻 (即 $R_{\theta CA}$) 降低，导致工作功率明显降低。

表 5-2. AM263x 控制卡在极端温度下的功率测量

ThermalAir 气流输出	环境温度读数	CC_noLoadNoTape 功率	CC_noLoad 功率	CC_Load1 功率	CC_Load123 功率
-50°C	-29.4°C	1.21W	1.30W	1.32W	1.36W
165°C	118.6°C	1.60W	1.71W	1.73W	1.77W

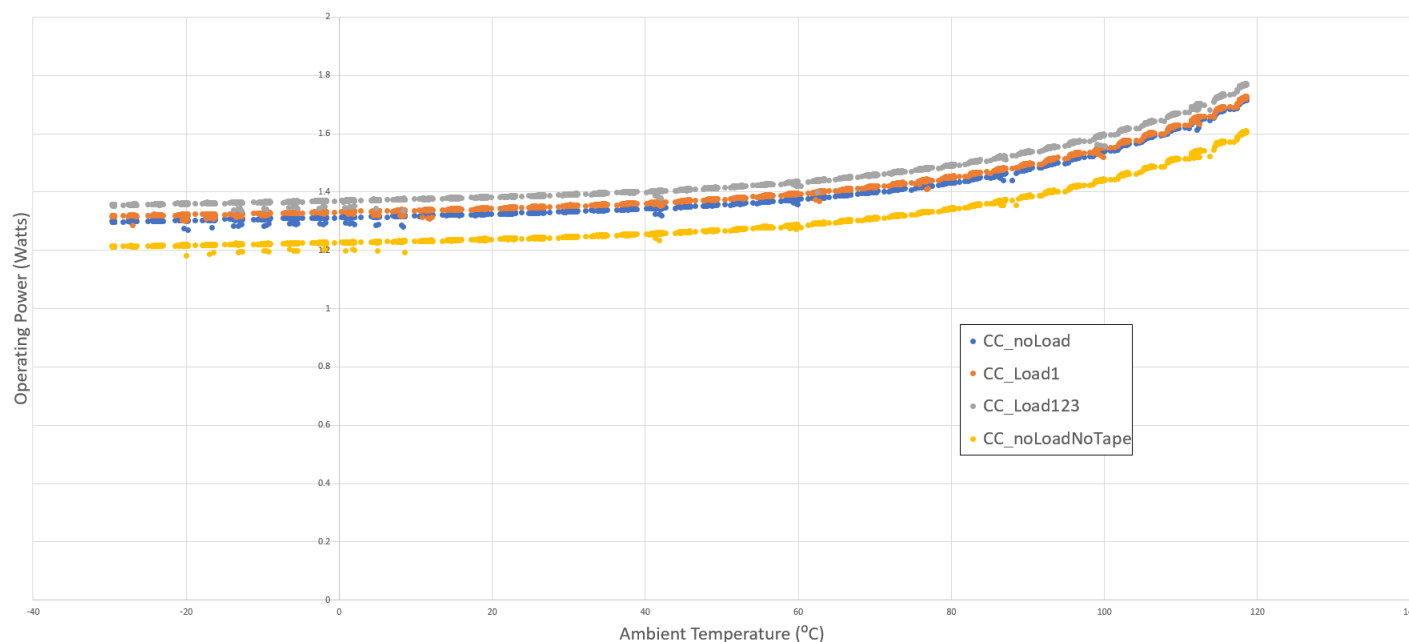


图 5-5. AM263x 控制卡器件在环境温度扫描范围内的工作功率

5.4.3 计算得出的热阻值

由于控制卡允许在环境温度扫描期间记录工作功率，因此可以使用以下公式计算结温与环境温度之间的热阻 ($R_{\theta JA}$)：

$$\frac{T_{\text{Junction}} - T_{\text{Ambient}}}{\text{Operating Power (Watts)}} = R_{\theta JA} \left(^\circ\text{C/W} \right) \quad (2)$$

表 5-3 展示了 $R_{\theta JA}$ 的最大计算值和平均计算值。AM263x Sitara™ 微控制器数据表 包含一个描述封装散热特性的表格。表 5-4 展示了封装散热特性表格的摘录。在此表中，可以找到基于 JEDEC 定义的 2S2P 系统的热阻值，其中系统处于最坏的器件功耗情况下。当气流速度为每秒 1、2 和 3 米时，最坏情况下的 $R_{\theta JA}$ 值 $^\circ\text{C/W}$ 分别为 12.9 $^\circ\text{C/W}$ 、11.8 $^\circ\text{C/W}$ 和 11.1 $^\circ\text{C/W}$ 。对于非模拟的实际实验，根据环境温度扫描期间测量值计算出的 $R_{\theta JA}$ 最大值与数据表中最坏情况下的器件功耗值一致。虽然 $R_{\theta JA}$ 的最大值接近数据表中的最坏情况规格，但 $R_{\theta JA}$ 的平均值要低得多。

备注

每个测量配置只运行一次，并且每个模块测量的变化会导致 $R_{\theta JA}$ 的计算值也发生变化。

表 5-3. 热阻计算

测量值	$R_{\theta JA}$ 最大值 ($^\circ\text{C/W}$)	$R_{\theta JA}$ 平均值 ($^\circ\text{C/W}$)
仅 CC 日志记录脚本且 SoC 上无 Kapton 胶带	11.32	7.33
仅 CC 日志记录脚本	11.88	8.16
CC 日志记录脚本 + 负载内核 1	11.14	7.91
CC 日志记录脚本 + 负载内核 1、2、3	11.19	7.95

表 5-4. AM263x 数据表封装热特性

参数	热阻说明	$^\circ\text{C/W}$	气流 (m/s)
$R_{\theta JC}$	结至外壳	5.6	不适用
$R_{\theta JB}$	结至电路板	5.7	不适用
$R_{\theta JA}$	结至自然通风	18.6	0
$R_{\theta JA}$	结至流动空气	12.9	1
		11.8	2
		11.1	3

5.4.4 记录的结温和环境温度

在温度扫描期间，温度扫描程序在每个 ThermalAir 输出温度下保持 10 分钟。而保温时间使环境温度和结温达到稳定。由于从 -50°C 递增到 165°C 有 44 个 10 分钟保温步骤，因此每次测量扫描大约有 26,400 秒或大约 2,640 个 10 秒的间隔。日志记录脚本也每 10 秒测量一次环境温度 (Tamb)、盖子温度 (Tlid) 和结温 (TSENSE0)，从而得出图 5-6。

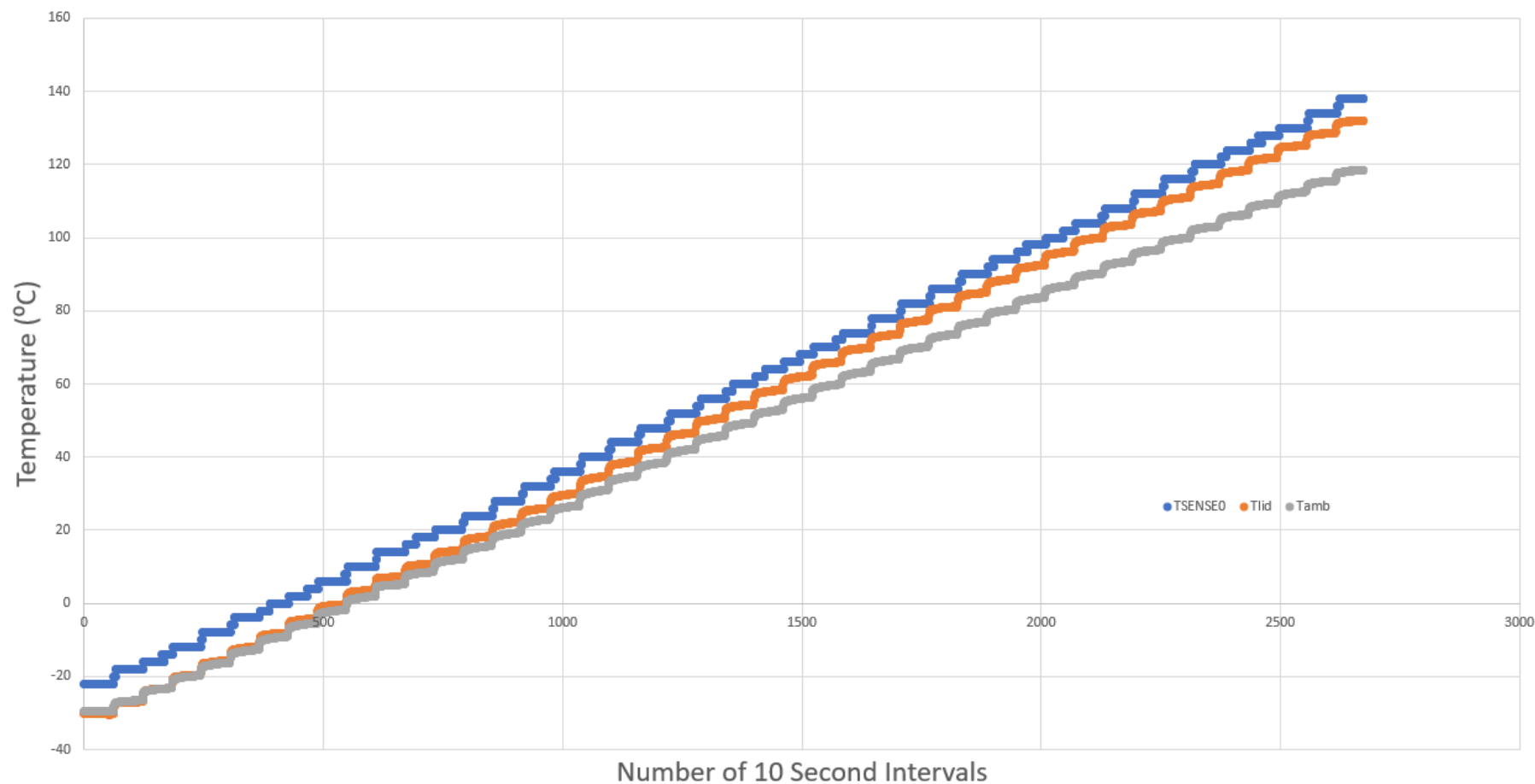


图 5-6. 无负载时的 AM263x 控制卡温度

由于图中温度上升区域不如完全浸渍的温度那么重要，这里创建了图 5-7 和表 5-5 来更准确地表示给定环境温度下的平台结温读数。

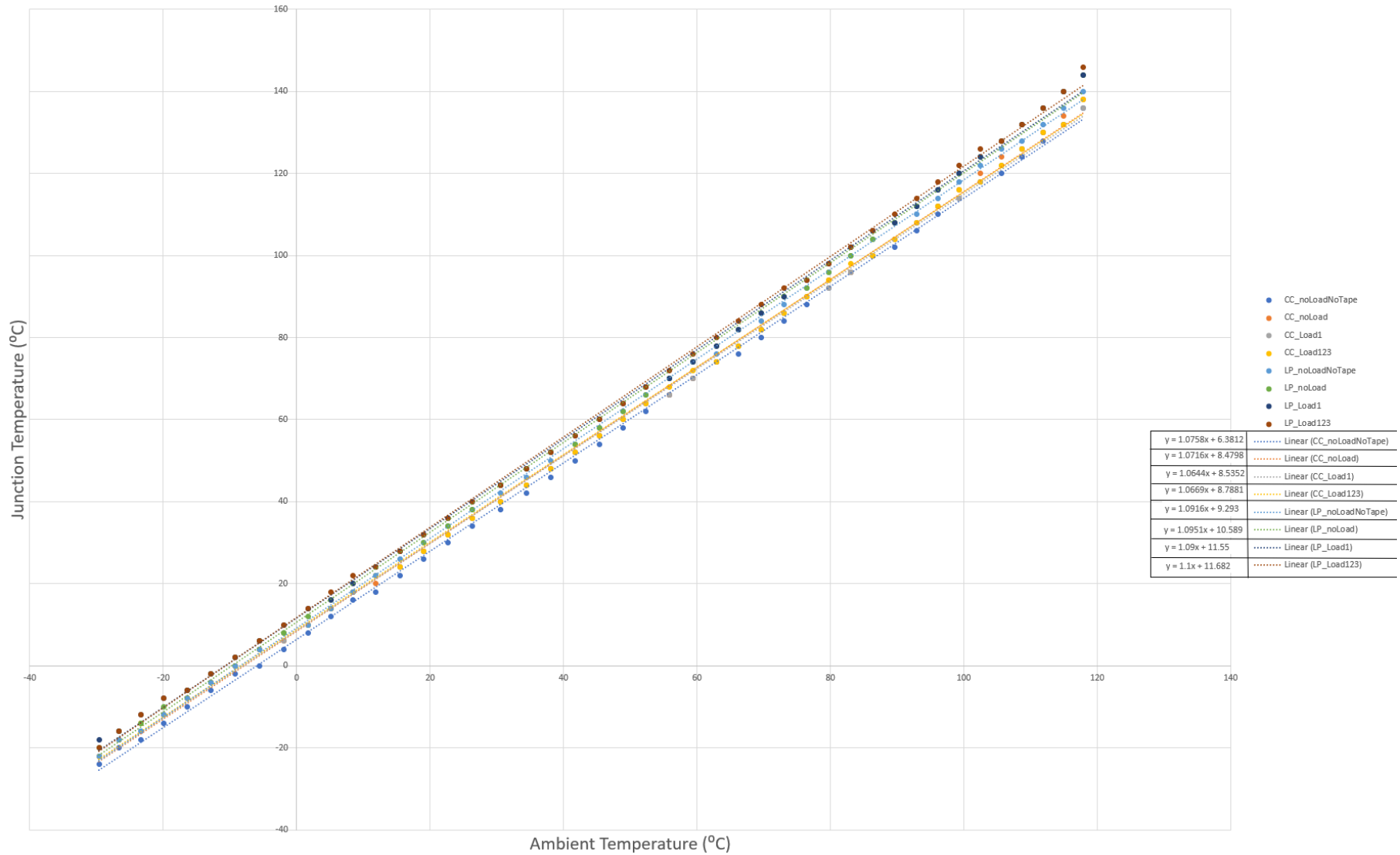


图 5-7. AM263x 控制卡和 LaunchPad 在不同环境温度下的结温

表 5-5. 环境温度和结温的测量值

ThermalAir 输出 (°C)	环境温度(°C)	TMDSNCD263 在 TSENSE0 处的结温				LP-AM263 在 TSENSE0 处的结温			
		无负载且无 Kapton 胶带 (°C)	无负载 (°C)	负载内核 1 (°C)	负载内核 1/2/3 (°C)	无负载且无 Kapton 胶带 (°C)	无负载 (°C)	负载内核 1 (°C)	负载内核 1/2/3 (°C)
-50	-29.6	-24	-22	-22	-22	-22	-20	-18	-20
-45	-26.6	-20	-18	-18	-18	-18	-16	-16	-16
-40	-23.3	-18	-14	-16	-14	-16	-14	-12	-12
-35	-19.9	-14	-12	-12	-12	-12	-10	-8	-8
-30	-16.4	-10	-8	-8	-8	-8	-6	-6	-6
-25	-12.9	-6	-4	-4	-4	-4	-2	-2	-2
-20	-9.3	-2	0	0	0	0	2	2	2
-15	-5.5	0	4	4	4	4	6	6	6
-10	-1.9	4	6	6	8	8	8	10	10
-5	1.7	8	10	10	10	10	12	14	14
0	5.1	12	14	14	14	14	16	16	18
5	8.4	16	18	18	18	18	20	20	22
10	11.9	18	20	22	22	22	24	24	24
15	15.4	22	24	24	24	26	28	28	28
20	19.0	26	28	28	28	30	30	32	32
25	22.7	30	32	32	32	34	34	36	36
30	26.3	34	36	36	36	38	38	40	40
35	30.6	38	40	40	40	42	44	44	44
40	34.4	42	44	44	44	46	48	48	48
45	38.1	46	48	48	48	50	52	52	52
50	41.8	50	52	52	52	54	54	56	56
55	45.4	54	56	56	56	58	58	60	60
60	48.9	58	60	60	60	62	62	64	64
65	52.4	62	64	64	64	66	66	68	68
70	55.9	66	66	66	68	70	70	70	72
75	59.4	70	70	70	72	74	74	74	76
80	62.9	74	74	74	74	76	78	78	80
85	66.2	76	78	78	78	82	82	82	84
90	69.7	80	82	82	82	84	86	86	88
95	73.0	84	86	86	86	88	90	90	92
100	76.4	88	90	90	90	92	92	94	94
105	79.8	92	94	92	94	96	96	98	98
110	83.1	96	96	96	98	100	100	102	102
115	86.4	100	100	100	100	104	104	106	106
120	89.6	102	104	104	104	108	108	108	110
125	92.9	106	108	108	108	110	112	112	114
130	96.1	110	112	112	112	114	116	116	118
135	99.3	114	116	114	116	118	120	120	122
140	102.5	118	120	118	118	122	124	124	126

表 5-5. 环境温度和结温的测量值 (continued)

ThermalAir 输出 (°C)	环境温度(°C)	TMDSNCD263 在 TSENSE0 处的结温				LP-AM263 在 TSENSE0 处的结温			
		无负载且无 Kapton 胶带 (°C)	无负载 (°C)	负载内核 1 (°C)	负载内核 1/2/3 (°C)	无负载且无 Kapton 胶带 (°C)	无负载 (°C)	负载内核 1 (°C)	负载内核 1/2/3 (°C)
145	105.6	120	124	122	122	126	128	128	128
150	108.7	124	126	126	126	128	132	132	132
155	111.9	128	130	130	130	132	136	136	136
160	115.0	132	134	132	132	136	140	140	140
165	117.9	136	138	136	138	140	144	144	146

5.4.5 极端环境温度下计算得出的结温

由于节 5.1 中所述的测试环境限制，该过程的测量值仅考虑了约 -30°C 至 130°C 的环境温度范围。图 5-7 的趋势线可用于推断出数据，以近似计算给定电路板配置、R5 内核利用率和环境温度下的结温。

表 5-6 展示了不同配置下结温与环境温度之间的关系趋势线。

表 5-6. 近似温度读数趋势线

配置	结温趋势线方程
仅 CC 日志记录脚本且 SoC 上无 Kapton 胶带	$y = 1.0758(x) + 6.3812$
仅 CC 日志记录脚本	$y = 1.0716(x) + 8.4798$
CC 日志记录脚本 + 负载内核 1	$y = 1.0644(x) + 8.5352$
CC 日志记录脚本 + 负载内核 1、2、3	$y = 1.0669(x) + 8.7881$
仅 LP 日志记录脚本且 SoC 上无 Kapton 胶带	$y = 1.0916(x) + 9.293$
仅 LP 日志记录脚本	$y = 1.0951(x) + 10.589$
LP 日志记录脚本 + 负载内核 1	$y = 1.09(x) + 11.55$
LP 日志记录脚本 + 负载内核 1、2、3	$y = 1.1(x) + 11.682$

通过将 125 代入任何表 5-6 公式，可以近似计算出 125°C 等极端环境温度下的结温。例如，充分利用时的 AM263x LaunchPad 可以用公式 $y = 1.1(x) + 11.682$ 表示。因此，在环境温度为 125°C 且 R5 内核完全利用的情况下，LP-AM263x 的结温约为 149.18°C 。

这里使用趋势线方程计算得出了 AM263x 在极端环境温度下的结温近似值，如表 5-7 中所示。

表 5-7. 极端环境温度下的近似结温

测量值	-40°C 环境温度下的近似结温	125°C 环境温度下的近似结温
仅 CC 日志记录脚本且 SoC 上无 Kapton 胶带	-36.65°C	140.86°C
仅 CC 日志记录脚本	-34.38°C	142.43°C
CC 日志记录脚本 + 负载内核 1	-34.04°C	141.59°C
CC 日志记录脚本 + 负载内核 1、2、3	-33.89°C	142.15°C
仅 LP 日志记录脚本且 SoC 上无 Kapton 胶带	-34.37°C	145.74°C
仅 LP 日志记录脚本	-33.21°C	147.48°C
LP 日志记录脚本 + 负载内核 1	-32.05°C	147.80°C
LP 日志记录脚本 + 负载内核 1、2、3	-32.32°C	149.18°C

正如“EVM 比较”一章中预测的那样，由于接地层数量的增加，AM263x 控制卡具有更好的热性能。有关设计 PCB 以获得最佳热性能时的最佳实践和经验法则的完整列表，请参阅节 4。

6 使用热模型

使用 MentorGraphics Flotherm 或 ANSYS ICEPAK 等热建模软件打开模型并构建用于仿真的热环境。该软件允许您构建整个情形和边缘情况来估算热性能。另外，根据用户需要，仿真可以很简单，也可以很详细。例如，可以使用一个 JEDEC 定义的简单 2S2P (两个金属平面和两个信号层) 测试板对 SoC 的热性能进行仿真。Sitara 微控制器器件数据表的“封装热特性”部分提供了基于 2S2P 系统的值。

要将器件的特性导入仿真中，需要热模型。所有 Sitara 微控制器都以 Electronics Cooling XML (ECXML) 文件的形式提供了 SoC 热模型。该文件类型由 JEDEC 确定，用作向最终用户交换电子热系统级仿真模型的标准。热模型准确地表示了整个 SoC 设计，从而准确地表示了结温和盖子温度。热模型仍需要在仿真软件中进行额外的配置和设置，以提供系统热分布的最佳近似值。

为了获得最佳热仿真结果，应将 PCB 设计以及外壳和气流属性导入仿真软件中。此外，应使用特定于器件的功率估算工具来估算 SoC 运行期间的工作功率。估算得出的工作功率随后可与热模型结合使用，从而更准确地表示热分布。

图 6-1 展示了构建精确系统以进行热建模的流程。

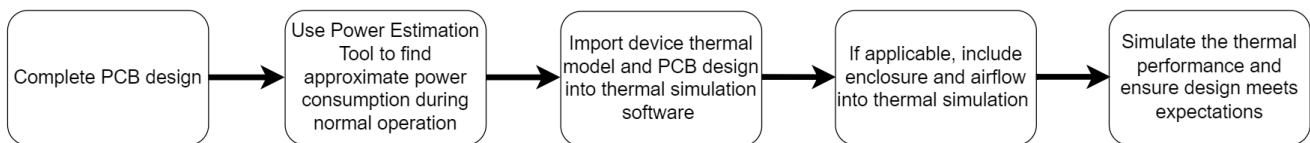


图 6-1. 热仿真流程

7 参考

除了本文档外，还可以从 www.ti.com 下载以下参考资料。

- [AM2634 Sitara™ 微控制器](#)
- [AM263x 硬件设计指南](#)
- [AM263x Sitara™ 微控制器数据表](#)
- [AM263x Sitara™ 微控制器技术参考手册](#)
- [AM263x Sitara™ 微控制器器件勘误表](#)
- [LP-AM263 工具页面](#)
- [TMDSCNCD263 工具页面](#)

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