

Application Note

TMCS1143 DVF 封装的热分析



Carolus Andrews

摘要

在现代电气化系统中，功率密度的急剧提升以及 PCB 铜箔用量的减少，为 TMCS114x 系列等封装内霍尔效应电流传感器构筑了严苛的热环境。本文对 TMCS1143 传感器中使用的 DVF 封装进行了全面的热分析。本文研究了两种互补的特性评估方法：(1) 基于电流的传统方法：通过对稳态电流温度数据进行最佳曲线拟合来推导结温；(2) 替代方法：使用隔离式温度传感器 IC ISOTMP35R 直接监测环境温度和引线框温度。结果表明，在超出低电流工作范围后，引线框中耗散的功率会迅速超越静态芯片功率，这会导致传统的 JEDEC 模型低估结温。在较高功率下，引线框温度升高与结温之间表现出线性关系，产生的有效热阻约为 5°C/W，该热阻在 TMCS143 评估模块的测试温度范围内保持一致。

内容

1 简介.....	2
2 动机与讨论.....	3
3 方法.....	4
4 结果.....	6
5 总结.....	11
6 参考资料.....	11

插图清单

图 3-1. 改装后的 TMCS1143EVM，顶视图.....	4
图 3-2. 改装后的 TMCS1143EVM，底视图.....	4
图 3-3. PCB 上的 TMP118 柔性电缆放置位置.....	4
图 3-4. 实验系统方框图.....	5
图 4-1. TMCS1143EVM 上 DVF 封装的结温随时间变化曲线.....	7
图 4-2. 带有 COBF 的 TMCS114x 的典型结温， $T_A = 25^{\circ}\text{C}$	8
图 4-3. 带有 COBF 的 TMCS114x 的典型结温， $T_A = 125^{\circ}\text{C}$	8
图 4-4. 计算出的 $R_{\theta JA}$ 与总功率间的关系 (25°C 和 125°C)	9
图 4-5. 计算出的 $R_{\theta JLF}$ 与总功率间的关系 (25°C 和 125°C)	9
图 4-6. 整个电流范围内的 ISOTMP35R 与引线框基准温度误差间的关系.....	10

表格清单

表 4-1. 室温电流扫描结果.....	6
表 4-2. 125°C 温度电流扫描结果.....	7

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

随着全球电气化进程的加速，电流测量系统的应用正在迎来爆发式增长。这些系统承担着关键功能，包括反馈控制、过流保护、GaN FET 过零检测以及高级监测应用。与此同时，功率密度仍然是重中之重，各类产品的解决方案都在追求随着世代更迭不断缩减占用空间。这种趋势的叠加造就了一个充满挑战的热环境：随着功率密度的增加，元件密度随之增加，印刷电路板铜箔含量因封装尺寸缩小而减少，同时累积的热量导致环境温度升高。因此，精准确定半导体器件的最大安全工作极限，已成为保障可靠系统设计的核心要求。

本文探讨了 TMCS114x 产品系列所采用的 DVF 封装在多种参考框架下的结温行为。对于结温的特性评估，本文既展示了通过最佳拟合曲线进行的基于电流的传统方法，也提出了检查器件本身产生的功耗与引线框中产生的功耗叠加关系的一种替代特性评估方法。电流仍然是提供给最终用户用于定义安全工作区的典型值，但其适用性因电路板结构的不同而存在显著差异。而基于电流的方法仍然主导行业标准。如果设计能在最大电流规格下保持稳态运行，则从可靠性角度来看，热设计考量通常可不再列为最高优先级。

作为一种替代方法，本文通过直接测量环境温度和引线框温度对结温进行特性评估。通过考察器件内部的两大热源（器件本身的静态功耗以及引线框中产生的功耗）可实现此设计。其使用 ISOTMP35R 增强型隔离式温度传感器集成电路实现。ISOTMP35R 集成了一个具有 5kVRMS 耐压能力的隔离栅，并整合了一个在 -40°C 至 150°C 工作范围内具有 $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ 斜率的模拟温度传感器。虽然该方法仍基于标准 TMCS 系列评估模块的原始布局进行测试，但其为用户提供了一种基于应用的方法，用于更精细地监测和控制结温。本文探讨了通过最佳拟合曲线实现的基于电流的传统方法以及替代结温特性评估方法。

2 动机与讨论

热工作极限与设计约束

封装内霍尔效应器件在最高 125°C 的环境温度下工作，而芯片结温可承受高达 165°C 的温度。之所以需要更高的结温额定值，是因为即使在器件的最高环境温度工作点，检测电流的内部功率耗散也会产生额外的热量。设计人员通常掌握的热数据限制为 125°C 最高环境温度规格和标准 JEDEC 热指标。要在该环境温度下达到规定的最大电流，PCB 布局必须复制器件评估模块或测试装置的铜箔体积与重量。这一要求带来一个实际的挑战：为了展示器件峰值性能，评估板通常比实际应用中的尺寸要大。霍尔效应传感器的评估模块通常与用于热参数特性评估的标准 JEDEC 参考板存在显著差异。这些差异在应用于实际设计时会引入热指标的偏差。

影响真实最大电流能力的因素

封装内霍尔传感器的电流热管理涉及多个相互依赖的因素：

- **引线框电阻 (和形状)**：不同制造批次间引线框电阻的差异会直接影响内部功耗。由于各 IC 制造商有不同的设计选择和优化，此参数在多供应商器件中往往并不一致。选择熔断型还是非熔断型引线框也可能影响该值，其中熔断型引线框方案在较高电流值下通常表现更佳。
- **PCB 铜箔特性**：PCB 输入侧的铜箔重量、层数和走线用量会显著影响散热效果。这些因素决定了热量从器件散发出去的效率。
- **外部散热硬件**：压接端子、散热器、铜缆布线以及这些元件的热分布特征，共同构成了整体散热路径。这些元件未经优化时会产生额外的热量。
- **电缆热暴露**：对于连接器件输入端并导通电流的电缆，暴露在高温环境下与暴露在环境温度（非高温环境）条件下之比，会影响总散热效果。
- **环境工作温度**：在任何电流流动之前的基线温度，决定了结温升高的起点。

JEDEC 热模型及其在霍尔传感器中的应用

JEDEC 热模型以 R_{θ} 参数为特征，是估算器件温度点的行业标准。最常用的参数是 $R_{\theta JA}$ ，该参数将环境温度与芯片结温相关联。该参数简化了结温的估算：仅需一次环境温度测量，即可直接计算出典型条件下的结温。

JEDEC 标准针对特定参考 PCB 布局对这些参数进行特性评估，而与该布局的任何偏差都会给计算得出的热响应带来误差。

将标准 JEDEC 热模型应用于封装内霍尔传感器时，存在一个关键限制。JEDEC 特性评估假设芯片静态电流耗散是模型中的主要热源。对于大电流下的霍尔传感器，这一假设不再成立：引线框的功耗成为主要热源，而静态电流的功耗贡献变得微不足道。主要热源的这种变化会导致在大电流条件下，热响应与标准 JEDEC 模型出现偏差。

这种行为并非永久性的，随着 IC 功耗的变化，热系数也会随之变化。随着电流减小和引线框功率耗散降低，芯片热贡献的相对重要性逐渐增加。在零电流（静态工作）时，热模型会收敛回更符合原始 JEDEC 特性评估的值，就像在放大器低信号电平下偏移误差占主导地位一样。

3 方法

本实验对 TMCS1143EVM 进行了改装，以在多个位置安装 ISOTMP35R 传感器，旨在进行梯度测量并评估各种方案，以在应用中成功再现所需的温度。此外，还使用了一个安装在柔性电缆上的 TMP118 传感器，并通过 Kapton 胶带将其直接固定至待测的 TMCS1143 引线框。采用多个传感器的目的是考察应用中的各种放置位置，并寻找能够最紧密跟踪 TMP118 所测引线框温度的传感器。下面的图 3-1 和图 3-2 分别显示了印刷电路板顶层和底层的 Altium 呈现 3D 图，而图 3-3 显示了 TMP118 在引线框上的放置位置。

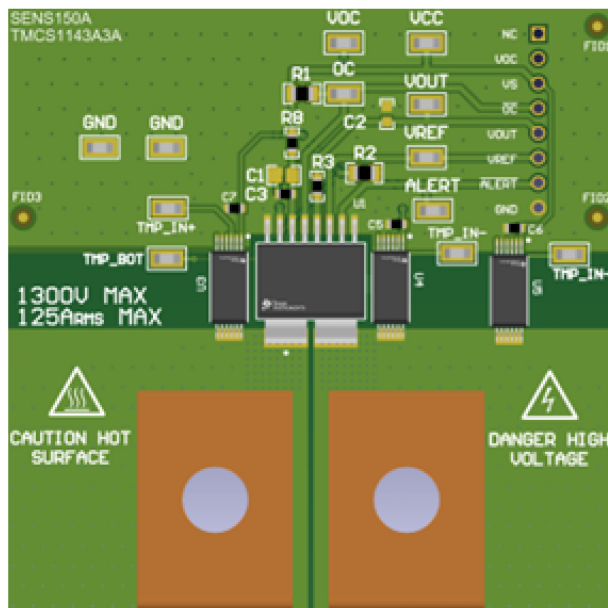


图 3-1. 改装后的 TMCS1143EVM，顶视图

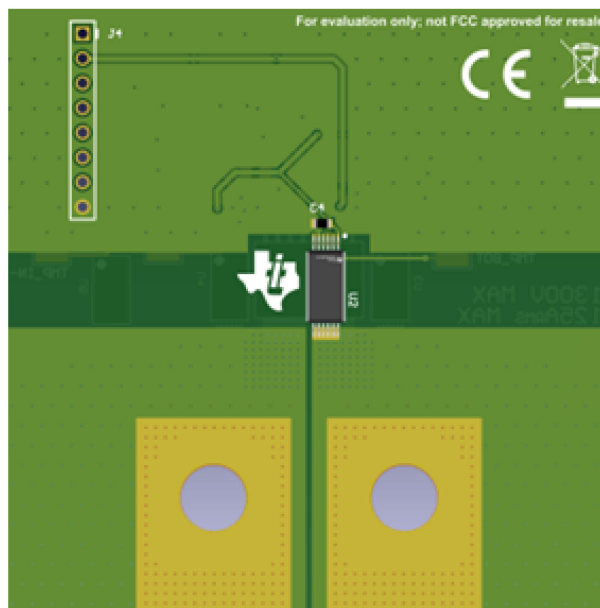


图 3-2. 改装后的 TMCS1143EVM，底视图



图 3-3. PCB 上的 TMP118 柔性电缆放置位置

对于电流传输，在负载共担模式下采用两个并联 Keysight N7971A 电源，以构建能够生成高达 200A 电流的单电源。IN+ 和 IN- 侧各采用了约 4 英尺的 2AWG EastPenn 焊接电缆，这些电缆从电源的共同输出点引出，并通过 Amphenol 的 8mm RADSOK 快速断开系统进行端接。随后，将另一组约 1 英尺 (也是 2AWG) 的较短电缆与 RADSOK 组连接，并通过带有标准不锈钢紧固件的 Penn Union SLU125 压接端子连接至电路板输入端。每个 ISOTMP35 均通过 Keysight 34401A DMM 在慢速 6 位模式下进行测量，以帮助测量噪声平均值。所有测试均在实验室环境温度或 125°C 的 Test Equity 115A 烘箱中进行。该烘箱已经过校准，精度为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。需要注意的是，此处所使用焊接电缆的额定温度为 105°C；在温度升高的情况下，这些电缆产生的热量可能会在一定程度上降低 125°C 时器件的整体潜力，但选择它们是因为系统需要电缆具备柔韧性以满足电缆管理要求。图 3-4 中所示为此设置的系统方框图。结温通过内部验证工具测得，具体方法是通过与器件连接的 TI-SCB 将器件置于内部测试模式。

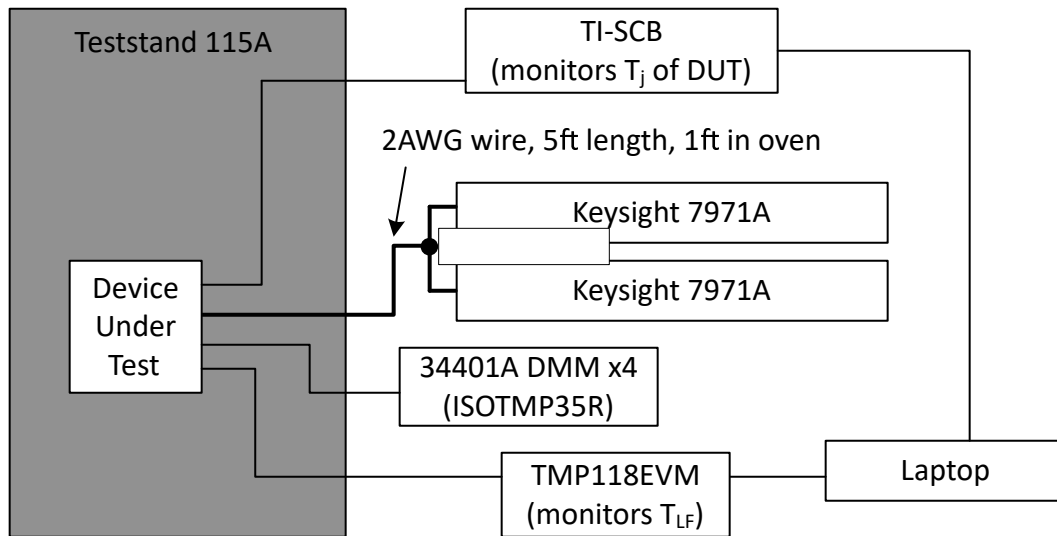


图 3-4. 实验系统方框图

4 结果

对于每一项实验，均运行 3 个独立的器件，然后对其结果求平均值，以提供每个数据点的典型响应。室温测试结果如表 4-1 所示，125°C 时测试结果如表 4-2 所示。请注意，加粗显示的数值表示 **TMP118** 采集的数据已超出其相应数据表中的推荐值范围。虽然 **TMP118** 在高达 125°C 时的精度为 $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ ，但我们接受这些测量值可能因包含额外误差而超出此精度裕度的情况。对于 **ISOTMP35R**，IN+ 表示 IN+ 多边形 (U3) 上、与 **TMCS1143** 相邻的传感器，IN- 表示 IN- 多边形 (U4) 上、与 **TMCS1143** 相邻的器件，BOT 表示放置在 IN+ 多边形 (U2) 上、**TMCS1143** 下方的器件，REF 表示放置在 IN- 多边形上、与 **TMCS1143** (U5) 保持一定距离的传感器。

表 4-1. 室温电流扫描结果

	电流 (A)													
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	125	137.33
ISOTMP35R , IN+	23.51	23.74	24.75	27.11	29.89	33.76	38.39	44.17	50.94	59.27	68.43	79.39	99.07	115.08
ISOTMP35R , IN-	23.70	23.96	25.00	27.42	30.26	34.22	38.83	44.73	51.40	59.85	69.00	80.15	99.57	116.25
ISOTMP35R , BOT	23.64	23.95	24.91	27.42	31.16	35.73	41.18	48.10	56.10	65.92	76.99	90.26	114.08	136.27
ISOTMP35R , REF	23.58	23.76	24.83	27.07	28.85	32.03	35.66	40.36	45.49	52.13	59.07	67.56	81.88	93.46
TMP118 (°C)	24.04	24.39	25.56	28.23	31.47	35.83	41.49	48.02	56.12	64.59	75.85	89.42	113.19	138.41
结温, TJ (°C)	26.73	27.08	28.56	31.95	35.66	41.02	47.81	55.92	65.48	77.35	91.07	107.34	136.62	164.37
LF 电阻 (μΩ)	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270
LF 功率 (W)	0	0.027	0.108	0.243	0.432	0.675	0.972	1.323	1.728	2.187	2.7	3.267	4.219	5.092
IQ 功率 (W)	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036
总功率 (W)	0.036	0.063	0.144	0.279	0.468	0.711	1.008	1.359	1.764	2.223	2.736	3.303	4.255	5.062

表 4-2. 125°C 温度电流扫描结果

	电流 (A)									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	85.667
ISOTMP35R , IN+	121.95	122.22	122.85	124.24	126.19	128.85	132.11	136.11	140.82	143.49
ISOTMP35R , IN-	122.08	122.39	123.27	124.80	127.06	129.83	133.42	137.80	142.99	145.91
ISOTMP35R , BOT	121.97	122.35	123.41	125.26	127.71	131.41	135.78	141.13	147.46	151.09
ISOTMP35R , REF	122.21	122.41	122.92	123.96	125.30	127.21	129.52	132.36	135.71	137.55
TMP118 (°C)	122.79	123.15	124.20	125.98	128.62	132.15	136.51	141.96	148.42	152.02
结温, TJ (°C)	125.35	125.86	127.34	129.83	133.37	138.15	144.07	151.31	160.00	165.02
LF 电阻 (μΩ)	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365
LF 功率 (W)	0	0.0365	0.146	0.3285	0.584	0.9125	1.314	1.7885	2.336	2.679
IQ 功率 (W)	0.0363	0.0363	0.0363	0.0363	0.0363	0.0363	0.0363	0.0363	0.0363	0.0363
总功率 (W)	0.036	0.073	0.182	0.365	0.620	0.949	1.350	1.825	2.372	2.715

测试通过提供的电流的结温

分析结温的第一种方法是测试电流随时间变化的情况。这种方法在一定程度上忽略了热公式的瞬态，根据最佳拟合曲线测试电流的稳态值。下面的图 4-1 展示了多个电流幅值下各种电流阶跃响应的热效应。请注意，对于 TMCS114x 范围内的大多数电流阶跃，热瞬态在 20 分钟后基本处于收敛状态。

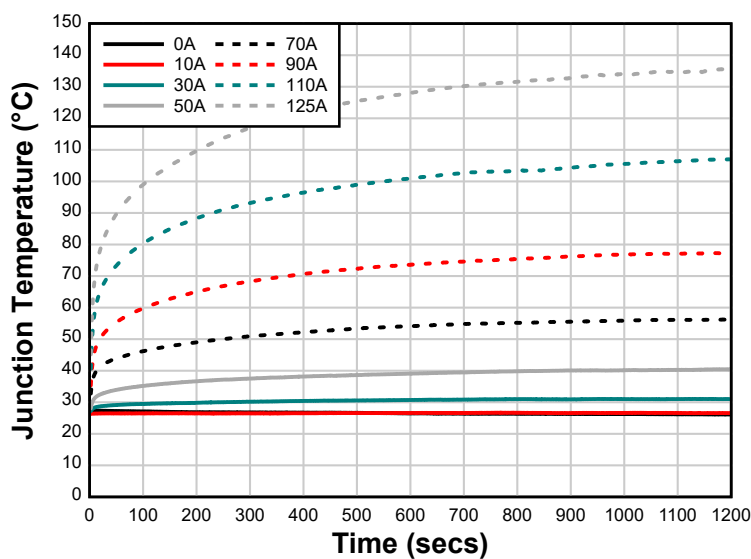


图 4-1. TMCS1143EVM 上 DVF 封装的结温随时间变化曲线

对于每条曲线，一旦达到热稳定状态，就会记录内部结温的直流值并在中图 4-2 绘制。图中还计算并给出了二阶最佳拟合曲线 (COBF)，只要设计布局的热分布曲线与 TMCS1143EVM 的热分布曲线在合理范围内，设计人员便可据此轻松跟踪典型结温。125°C 时也重复了此过程，这些结果如图 4-3 所示。

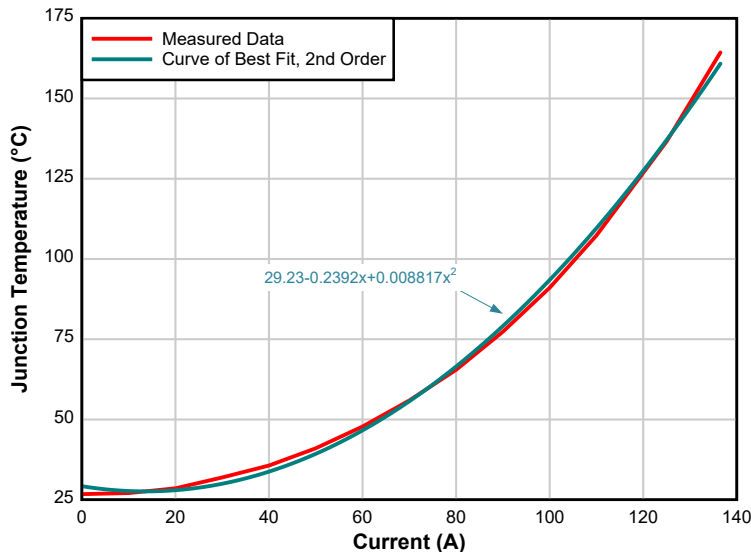


图 4-2. 带有 COBF 的 TMCS114x 的典型结温， $T_A = 25^\circ\text{C}$

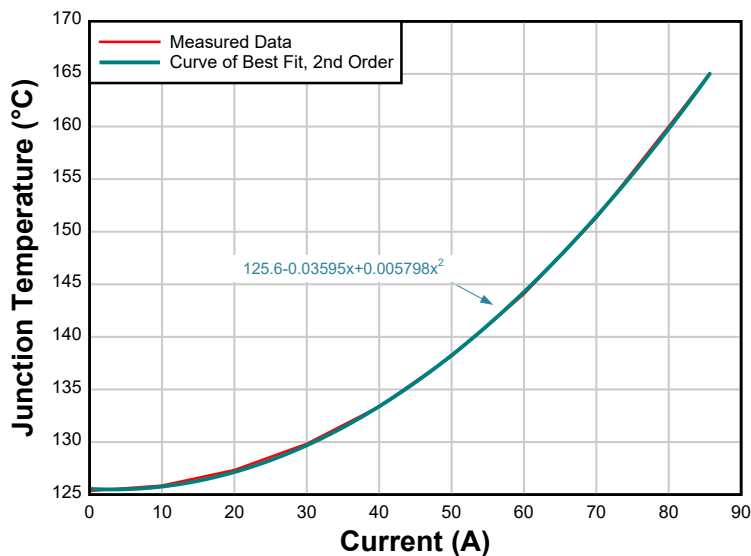


图 4-3. 带有 COBF 的 TMCS114x 的典型结温， $T_A = 125^\circ\text{C}$

我们还在 [TMCS1123 霍尔效应电流传感器热分析](#) 中详细介绍了这种方法以及 DVG 和 DVF 封装的额外数据图。

测试通过环境和引线框条件的结温

通过节 4 中采集的测量值，可以执行分析结温与环境温度或引线框之间的热传递特性所需的一切。从输入功率的角度来看，我们需要分析两种特征：器件的静态电流和引线框上产生的功率。

静态电流提供的功率本质上是相对静态的。不过，该值可能会随着电源电压的变化或数据表中给出的 I_Q 分布而发生变化。表 1 和表 2 中的表格值是根据提供的 3.3V 电源以及数据表中给出的 I_Q 的 11mA 典型值计算得出的值。

还必须调整引线框提供的功率。对于室温测试，所有电流值均采用 $270\mu\Omega$ 的标准值。但是，对于 125°C 情况，还必须考虑输入导体电阻温漂，在高温下会额外增加 $95\mu\Omega$ 的电阻，总电阻为 $365\mu\Omega$ 。对于上述每个数值，均通过标准公式计算引线框中产生的功率

$$P_{LF} = I_{LF} \times R \quad (1)$$

将这些值相加并应用于标准 JEDEC 模型，以观察当引线框中产生额外功率时，系数值的变化情况。图 4-4 展示了结温随测量环境温度变化的观察结果，计算公式为

$$T_J = T_A + R_{\theta JA} \times (P_{LF} + P_{IQ}) \quad (2)$$

而图 4-5 展示了结温随测量引线框温度变化的观察结果，使用公式

$$T_J = T_{LF} + R_{\theta JLF} \times (P_{LF} + P_{IQ}) \quad (3)$$

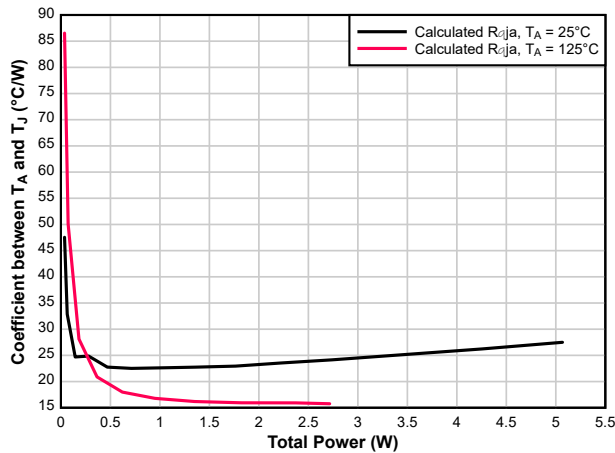


图 4-4. 计算出的 $R_{\theta JA}$ 与总功率间的关系 (25°C 和 125°C)

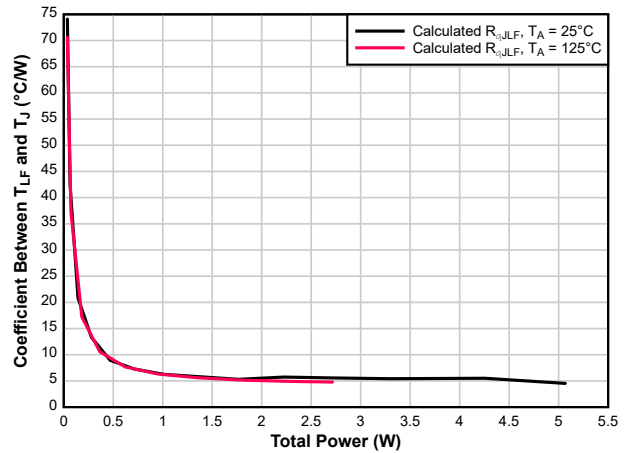


图 4-5. 计算出的 $R_{\theta JLF}$ 与总功率间的关系 (25°C 和 125°C)

可以观察到，这两个梯度均出现了预测的行为：在总功耗值约为 1W 时，系统会收敛为一组新的线性值，与引线框中产生的大部分功率一致；而对小于 1W 的值，该系数失去线性关系，并呈现反比关系。这是因为引线框提供的功率在数量级上已不再大到可以忽略静态电流产生的静态功耗。可以观察到，当引线框中产生的功率趋于零时，对于环境曲线，该系数逐渐收敛为一个与原始 $R_{\theta JA}$ 本质上相对接近的值。不同系数之间的差异归因于位置： I_Q 产生的功率来自器件本身，因此相较于在封装内物理位置较远处的引线框发热，其对结温产生的影响要大得多。

对于环境曲线，可以观察到，虽然 25°C 和 125°C 曲线均收敛为一个相对稳定的值，但两者并未收敛至同一个值。这可能是由于此处环境温度的复杂性，以及采用标准实验室温度进行室温实验的简单方法所致。由于器件自身的自发热，导致其附近的实际环境温度发生微观层面的变化，这很可能使问题更加复杂。

在这些测量结果中，更值得关注的曲线是引线框与结温之间的系数相关性。在 25°C 和 125°C 情况下，生成的曲线几乎完全相同，均收敛至 5°C/W 的评估模块平均值。这种温度独立性表明，只要设计人员能够精准测量引线框的温度，就可以完全脱离环境温度的干扰，直接估算出结温。通过测试该过程中使用各 ISOTMP35 的结果，组装在电路板底部的器件表明，在几乎所有情况下，引线框测量值的测量精度均可在 1.5°C 内，如图 4-6 所示。

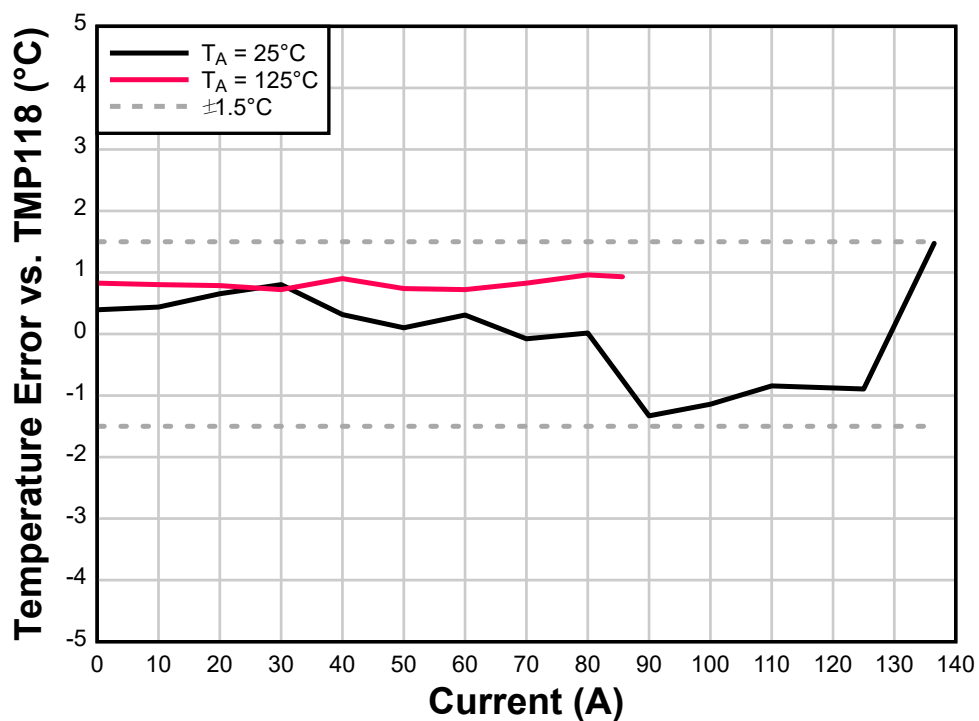


图 4-6. 整个电流范围内的 ISOTMP35R 与引线框基准温度误差间的关系

5 总结

功率密度的急剧提升以及随之而来的 PCB 铜箔用量缩减，为 TMCS114x 系列等封装内霍尔效应电流传感器构筑了严苛的热环境。虽然基于传统 JEDEC 标准的 $R_{\theta ja}$ 模型可提供便捷的一阶结温估算，但其假设芯片静态功耗是主要的热源。本文中的测量结果表明，在这些器件的电流典型值下，引线框中耗散的功率很快就会超过静态功耗，并从根本上改变热响应。因此，当布局或铜箔分布偏离用于生成 JEDEC 参数的参考电路板时，仅依赖单次环境温度测量可能会导致显著的误差。

使用 ISOTMP35R 等隔离式温度传感器 IC 直接监测引线框温度，可以实现一种稳健的结温估算替代方法。数据表明，引线框温度升高与结温之间存在线性关系，其有效热阻约为 **5°C/W**，且该值在室温 (25°C) 和高温 (125°C) 环境下均保持一致。

总体而言，该研究验证了以引线框为核心的热模型，结合直接温度测量，提供了一种更准确且便于设计的方法，用于评估 TMCS114x 霍尔效应传感器在高密度功率应用中的安全工作极限。未来的工作可将这种方法扩展至其他封装类型、不同体积与重量的铜箔区域，并探索利用测得的引线框温度实现动态限流的主动热补偿技术。

6 参考资料

1. 德州仪器 (TI)，[半导体和 IC 封装热指标](#) 应用手册。
2. 德州仪器 (TI)，[TMCS1123 霍尔效应电流传感器热分析](#)，应用手册。

重要通知和免责声明

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、与某特定用途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安全、安保法规或其他要求。

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 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 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。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月