

Application Note

将印刷电路板覆铜迹线用作电流检测
分流电阻器

Paul Stanfel, Mitch Morse

Current and Position Sensing

摘要

电流检测电阻器用于准确地测量流过负载的电流。为了正确地完成此测量，电阻器（也称为分流电阻器）需要与负载串联。不过，对于极大的电流，使用分流电阻器来测量电流有一些缺点。由于功耗会与电流的平方成比例变化，因此如果负载会消耗大电流，与其串联的分流电阻器可能很快会变得效率低下，因为分流电阻器会消耗功率，而不是让功率输送到负载，这就需要更加稳定的电阻器来处理该功率。本应用手册详细说明了使用一段印刷电路板 (PCB) 覆铜迹线作为分流电阻器来代替更传统的表面贴装技术 (SMT) 分流电阻器的优缺点。实际上，尽管覆铜迹线的成本远低于 SMT 电阻器，但它非常容易受到温度波动的影响。要想实现精确的电流测量，就必须对温度波动进行补偿。PCB 制造容差在严格控制 and 文档记录方面，也可能难以达到 SMT 电阻器容差所具备的水准。

内容

1 简介.....	3
2 试验过程.....	4
3 结果.....	8
3.1 室温.....	8
3.2 温度室测试.....	14
4 硬件版本 B.....	16
5 总结.....	20
6 参考文献.....	20
7 修订历史记录.....	21

插图清单

图 2-1. 版本 A 的第一个电路板.....	4
图 2-2. 版本 A 的第二个电路板.....	5
图 3-1. 八种迹线配置下 INA190 输出的预期值与实际值.....	8
图 3-2. 100mil 底部分接迹线的横截面图.....	10
图 3-3. IPC 标准规定了最小 PCB 覆铜迹线厚度，但没有规定最大厚度.....	11
图 3-4. 六种迹线配置的电阻与电流关系图.....	12
图 3-5. 三种迹线配置的温度与电流关系图.....	13
图 3-6. 四种温度下的 100mil 底部分接电阻与电流关系图.....	14
图 3-7. 三种迹线配置的最大电阻与温度关系.....	14
图 4-1. 版本 B 电路板.....	16

表格清单

表 3-1. 平均误差百分比 - 室温.....	9
表 3-2. SEM 分析确定的迹线厚度.....	10
表 3-3. 平均误差百分比 - 室温 (调整后).....	11
表 3-4. 平均误差百分比 - 温度受控.....	15
表 4-1. 100mil 厚度较薄迹线的误差百分比.....	17
表 4-2. 考虑 PCB 厚度误差的可能校准过程.....	17
表 4-3. 100mil 校准结果.....	18
表 4-4. 200mil 迹线的 100mil 校准结果.....	18
表 4-5. 100mil 扩展接地层校准结果.....	19

表 4-6. 8mil 校准结果.....	19
表 4-7. INA181 校准结果.....	19
表 4-8. 平均误差百分比：电路板 1 上的 8mil 迹线.....	20

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

电流检测电阻器是现代电源系统中的重要元件，可实现对电流的精确监测。传统方案中采用分立式分流电阻器进行电流监测，策略性地将其与负载串联放置。然而，在要求高电流测量的应用中，传统分流电阻器会表现出局限性。由于功耗与电流的平方成正比，分流电阻器在较高电流下可能会变得效率低下，会消耗原本可输送给负载的大量功率，因此需要更大、更稳定的电阻器设计。

本应用报告详细介绍了一种新型电流检测方法：利用一段印刷电路板 (PCB) 覆铜迹线作为分流电阻器。这一技术具有潜在的优势，包括减少元件数量、降低寄生电感和改善热管理。然而，其中也存在一些挑战，例如控制迹线厚度、考虑电阻的温度系数以及尽可能减少电流引起的电阻变化。初始结果展示了与迹线厚度控制和稳定性相关的限制。随后的硬件修订版（尤其是修订版 B）旨在缓解这些问题并展示此方法的实用性。本报告概述了 PCB 迹线电流检测的优缺点，说明了设计注意事项，并展示了初始和修订后硬件实现的试验结果。

2 试验过程

该过程用于确定使用覆铜迹线作为分流电阻器的可行性和性能，其涉及到测试多个不同的覆铜迹线的宽度、长度和几何形状。试验设置如图 2-1 和图 2-2 所示。这两个电路板统称为“版本 A”。

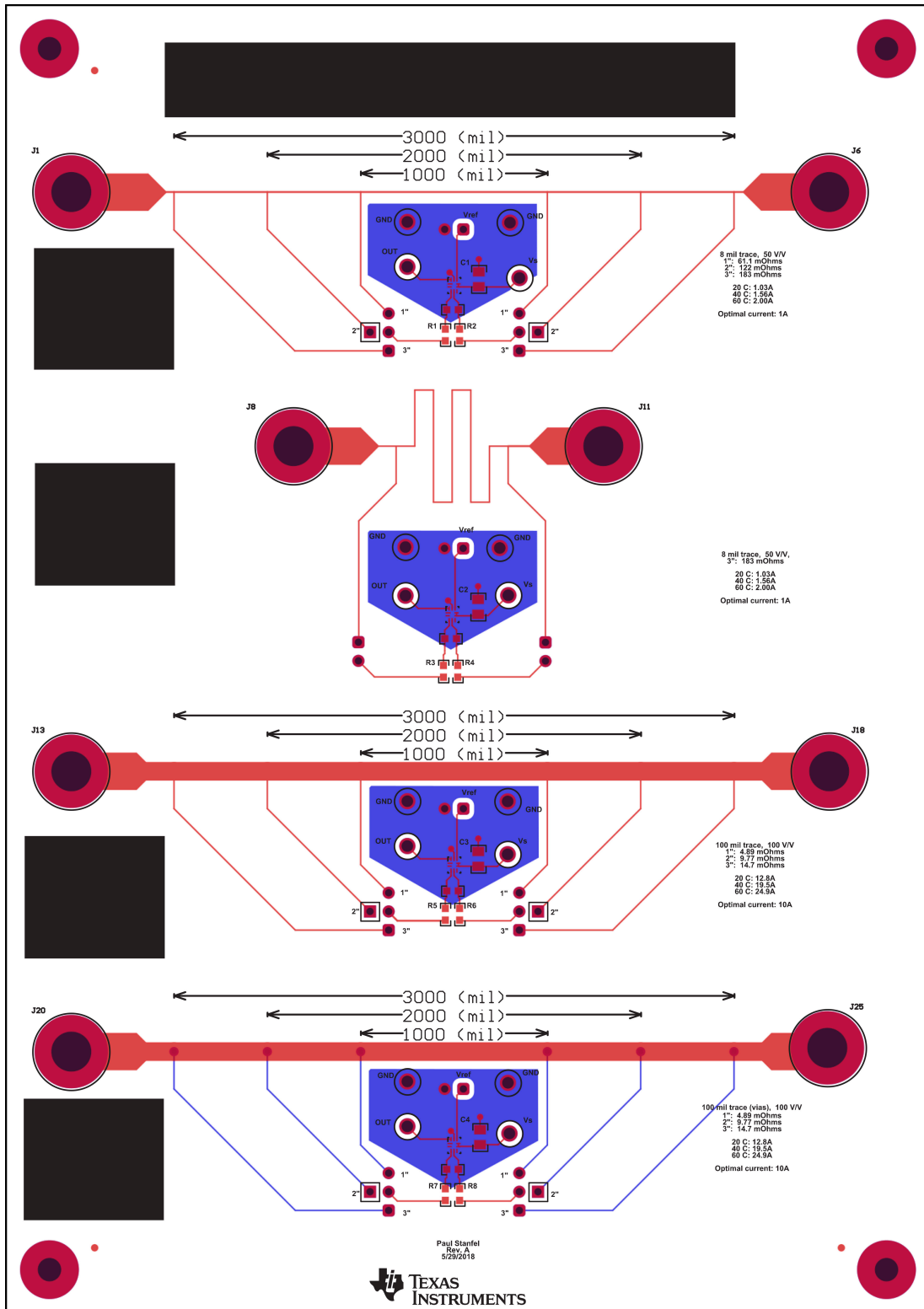


图 2-1. 版本 A 的第一个电路板

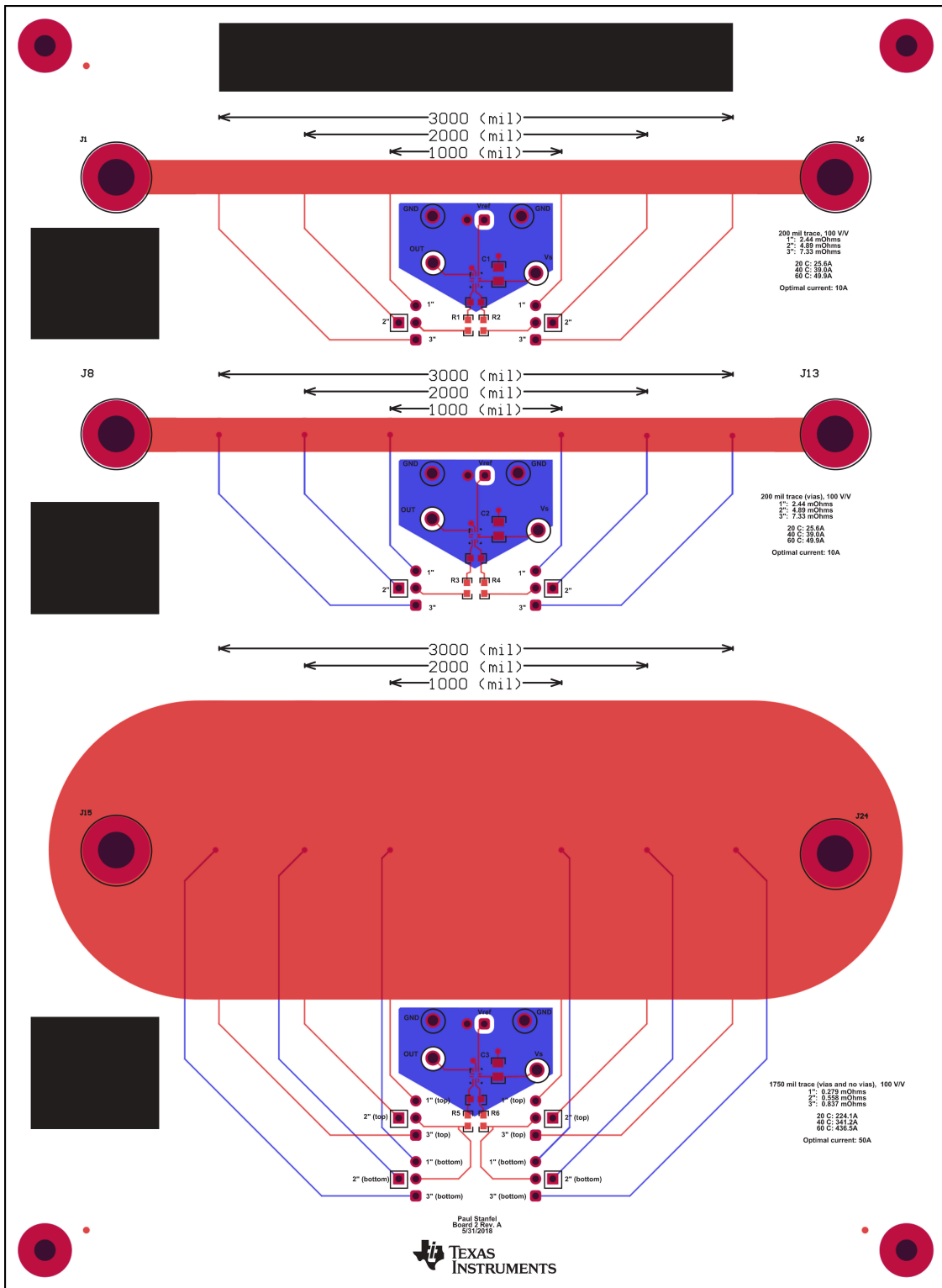


图 2-2. 版本 A 的第二个电路板

这里总共测试了四个迹线宽度：8mil、100mil、200mil 和 1750mil。以上全部迹线都分别在一英寸、两英寸和三英寸长度下进行了测试，并有电流流过。此外，各迹线均从迹线底部（红色层上迹线的下缘）抽头并从中间通孔连接到另一层（蓝色层）。在本文档中，“分接点”是指覆铜迹线上使用差分放大器测得电压的位置。如果温度和尺寸已知，那么便可以计算出两点之间的电阻。这里在迹线的底部和中间选择了分接点，以便调查检测线路位置对电压测量的影响。流过导体的电流大小与导线的电阻成反比，这意味着理论上中间的电压测量值与其他位置的

测量值不同。与到达迹线中间位置相比，电流必须流经更多的覆铜才能到达迹线底部，因此受到的电阻更大。这里通过使用迹线上的不同分接点测试了多个长度，展示迹线的线性度。如果迹线电阻呈线性变化，那么三英寸分接点处产生的电阻是一英寸分接点处的三倍。另外，图 2-1 中还显示了所谓的“方形”几何形状（顶部往下的第二个迹线）。这是一个 8mil 迹线，旨在检查更改电流路径对总体电阻测量造成的影响。

覆铜迹线分流分接点通过覆铜迹线检测线路连接到 INA190 仪表放大器。INA190 系列器件是电压输出、电流分流监控器（也称为电流检测放大器），常用于过流保护、针对系统优化的精密电流测量或闭环反馈电路。该系列器件可感测分流电阻在 -0.1V 至 $+40\text{V}$ 共模电压范围内的压降，与电源电压无关。共有五种固定增益可供选择： 25V/V 、 50V/V 、 100V/V 、 200V/V 或 500V/V 。由于输入偏置电流较低，因此选择了 INA190，以提高电压测量精度。对于每个迹线，在多个已知电流下，记录了每个点（距离迹线底部和中间一英寸、两英寸和三英寸）的 INA190 输出，并使用电流和放大器的增益值，将其转换成了电阻测量值。通过制造商提供的电流宽度计算器，可以确定每个迹线可承受的最大电流电平。这里使用了四个不同的电流（1A、5A、10A 和 50A）来计算保持迹线温度升高 20°C 以内的最小迹线宽度。这些宽度经过了向上取整，以获得能够安全处理给定电流的迹线宽度，并且这些电流也被定义为测试特定迹线所需的最大电流。8mil 迹线可承载 1A 电流，100mil 迹线可承载 5A 电流，200mil 迹线可承载 10A 电流，1750mil 迹线可承载 50A 电流。假设电源电压约为 5V，选择 INA190 增益设置是为了在最大电流流过电阻器时，防止覆铜迹线电阻器饱和。100mil、200mil 和 1750mil 迹线均使用增益为 100V/V 的 INA190 A3，而 8mil 迹线使用增益为 50V/V 的 INA190 A2。

通过从给定的 INA190 输出计算电阻，可以展示覆铜迹线电阻随电流电平增加而变化的情况。此外，这些测试都是在温度受控的环境下使用四种不同的环境温度水平重复执行的： 0°C 、 25°C 、 55°C 和 85°C 。虽然 25°C 在传统上被视为室温，但是本例中的 25°C 设置与此处称为室温的情况不同，因为 25°C 是温度控制值，而“室温”是指测量是在温度受控环境之外完成的。在四种不同温度水平下进行测试反映了电阻随温度的变化情况。对于这些测试，仅使用了三英寸测试点，但同样也测试了中间和底部分接点。

电流阶跃测量通过调整与迹线串联的电子负载以拉取所需电流电平来获得。为了获得精确的结果，这里使用万用表测量了与迹线和电子负载串联的精密电阻器上的电压，以准确确定有多少电流流过迹线。尽管迹线上由电阻器和万用表组合测得的实际电流会在一个小的正负电流值范围内变化，但每个迹线最初都使用电子负载所指定的 0A 进行测试。共模电压设置为约 5V。

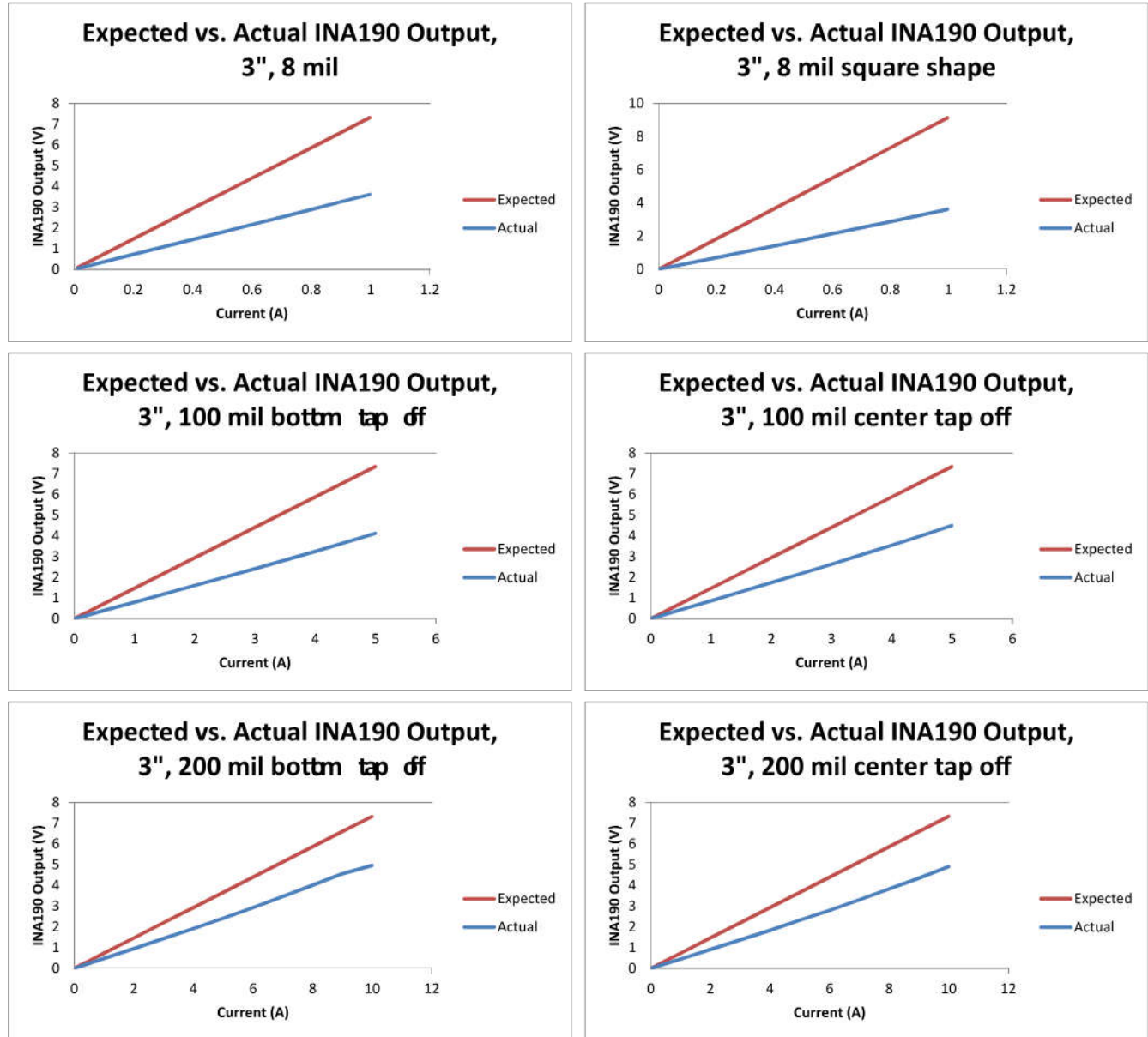
尽管图 2-1 和图 2-2 中并未显示，但是 TMP235 温度传感器是通过一段导热胶带粘贴到每个迹线中间的。TMP23x 器件是高精度 CMOS 集成电路线性模拟温度传感器系列，其输出电压与温度成比例。此传感器上覆盖有隔热胶带，从而进一步增加与迹线的接触并与周围环境隔绝。此传感器获取关于迹线温度的数据，以确定温度对迹线电阻和性能的影响。在 0A 电流阶跃条件下获得的温度数据用作基准温度测量值，旨在解释可能导致迹线温度与环境温度之间出现差异的任何变量，尤其是在更加受控的环境中。

在数据收集过程中，根据环境温度控制对结果进行分组。获取数据的过程相对比较简单。对于室温测量，该过程涉及到电流大致按照对数形式从 0A 逐渐增加到每个迹线的最大电流电平。在移到下一个电流阶跃时，记录了一英寸、两英寸和三英寸位置的 INA190 输出。然后，使用 TMP235EVM 评估软件来监测 TMP235 传感器的温度输出，直到温度停止升高。在该点，以 2Hz 采样率记录了 50 个温度样本并取平均值，以确定迹线温度。在测试过程中，所测最后一个分接点与温度记录之间发生了可能不容忽视的温度升高，这意味着 INA190 输出可能在温度稳定过程中发生了变化。为此，该过程针对温度受控测试进行了细微修改。由于这些测试都是在温度室内执行的，因此首先使用了 TMP235 来确保在任何测试开始之前迹线已经使用环境室温度进行了均衡。然后，使用较少的电流阶跃再次从 0A 到最大值的范围内进行扫描。不过，这种情况下，在 INA190 输出和 TMP235 输出稳定之前，没有记录任何值。节 3 详细介绍了这两种测试设置的结果。

3 结果

3.1 室温

通过对每个阶跃进行精确的电流测量，可以使用电流迹线电阻计算器计算每个迹线的 INA190 输出。计算器可以计算出在给定宽度和长度条件下每个迹线的理论可行电阻。在 0A 电流阶跃条件下获得的温度数据理解为环境温度，并计入此理论可行电阻值。这里假定迹线具有 1oz 厚度的覆铜。通过分析与此预期值的偏差，可以了解使用覆铜迹线作为分流电阻器的可行性。图 3-1 以图表形式显示了三英寸测量中所有测量迹线在室温（非受控温度环境）下的这些偏差。对于一英寸和二英寸位置，这些图表几乎完全相同，因此已在这里忽略。表 3-1 显示了每个迹线的平均误差。这些误差不包括 0A 的误差百分比值，因为此电流电平很小，以至于一些迹线的百分比误差接近 20000%，部分原因是 INA190 的失调误差。表 3-1 中的电路板 1 和电路板 2 是指同一版本的不同迭代，其中每个版本都包含三块电路板，而每块电路板都具有相同的布局。



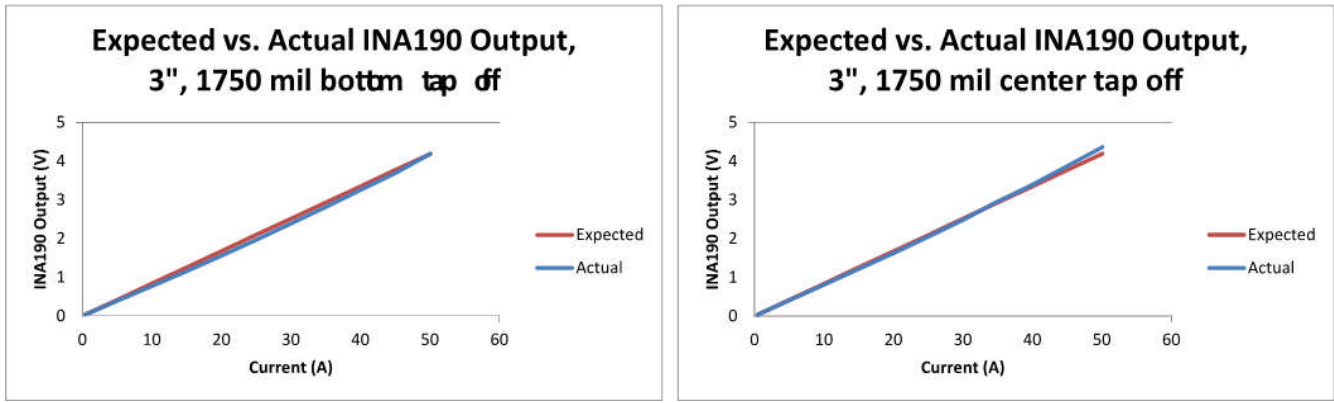


图 3-1. 八种迹线配置下 INA190 输出的预期值与实际值

表 3-1. 平均误差百分比 - 室温

迹线	平均误差百分比			平均值
	1"	2"	3"	
8mil	-51.95%	-53.64%	-53.20%	-52.93%
8mil 方形 ⁽¹⁾	-	-	-58.01%	-58.01%
100mil 底部分接, 电路板 1	-43.08%	-44.20%	-48.73%	-45.34%
100mil 底部分接, 电路板 2	-54.77%	-55.05%	-54.52%	-54.78%
100mil 中间分接	-38.53%	-39.25%	-39.15%	-38.98%
200mil 底部分接	-31.10%	-32.09%	-32.36%	-31.85%
200mil 中间分接	-35.01%	-35.27%	-35.36%	-35.21%
1750mil 底部分接	1.48%	-1.25%	-3.44%	-1.07%
1750mil 中间分接	0.90%	-1.49%	0.58%	0.00%

(1) 方形迹线在三英寸处仅有一个分接点。

没有明显误差的迹线只有 1750mil 迹线。在低电流电平 (小于 1A) 时, 1750mil 迹线具有正误差, 但从 1A 到 50A 范围内, 误差变为负值。所有其他迹线都具有很大的误差, 不过这些误差非常一致。另外, 可以注意到电路板 1 和电路板 2 上的测量值之间存在差异, 如两个 100mil 底部分接数据点所示。最后, 在迹线中间测量的值不同于在迹线底部测量的值。不过, 该影响无法预测。一些是更好的近似值, 但另一些则是更差的近似值。100mil 迹线显示了最大的差异, 误差差异为 6.36%。1750mil 迹线也在中间分接处具有更好的近似值。

为了确定大误差出现的原因, 我们将其中一个电路板切成两半并使用扫描电子显微镜 (SEM) 进行分析。对迹线横截面的 SEM 分析表明, 迹线厚度远大于订购时假定的 1oz/ft² 覆铜。图 3-2 显示了其中一个迹线横截面, 而表 3-2 显示了实际的迹线厚度。

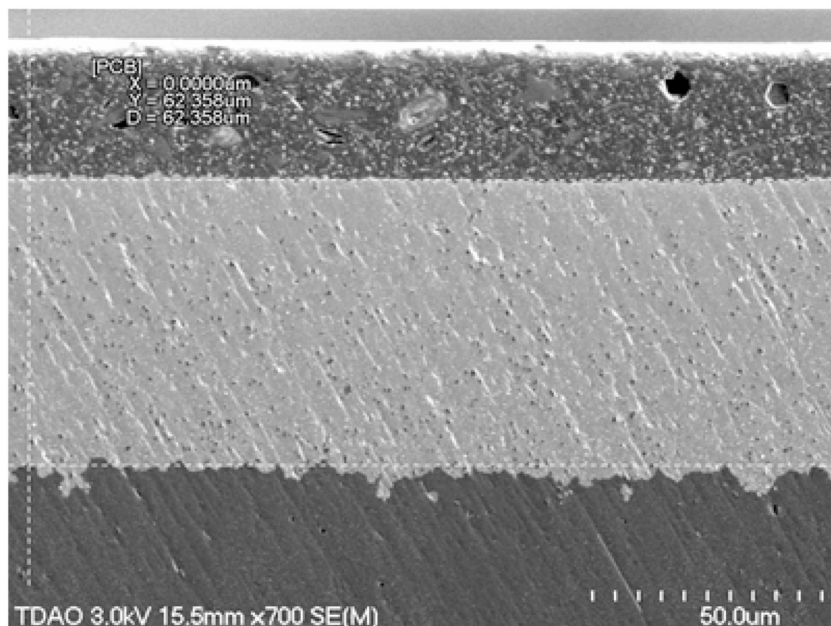


图 3-2. 100mil 底部分接迹线的横截面图

表 3-2. SEM 分析确定的迹线厚度

PC 板	厚度 (μm)	厚度 (oz/ft ²)	宽度 (mm)	宽度 (mil)
100mil 底部	63.5	1.82	2.50	98.4
100mil 中间	62.4	1.79	2.28	89.8
1750mil	41.7	1.20	44.58	1755.1
200mil 中间	62.1	1.78	4.78	188.2
200mil 底部	61.2	1.76	4.33	170.5

如表 3-2 所示，与可行的 1oz (34.8 μm) 相比，部分迹线的厚度几乎是预期值的两倍。迹线越厚，电阻就越小，这就说明了为什么一些迹线误差百分比位于 -40% 至 -50% 范围。

联系 PCB 制造商后找出了相关的原因，即较小覆铜迹线的厚度远大于预期值。由于 PCB 外层的覆铜工艺，周围覆铜较少的图案通常会更厚。100mil 和 200mil 迹线由于与其他覆铜图案相对隔离，因此厚度较大。不过，1750mil 迹线足够大，受这种影响较小，因此厚度与预期值更为接近。国际电子工业联接协会 (IPC) 发布的标准就充分证明了这一点。IPC 标准规定了最小覆铜迹线厚度，但没有规定最大厚度。实际上，这就意味着任何用作分流电阻器的迹线的电阻值都始终小于预期值，且迹线宽度越小，这种影响就越显著。图 3-3 中显示了相关的 IPC 标准。(表格经 IPC 许可复制)。

Minimum Surface Conductor Thickness = a + b - c

Where:

a = Absolute copper foil minimum (IPC-4562 nominal less 10% reduction).

b = Average copper plating thickness (e.g. 20µm [787 µin] for Class 1 and Class 2; 25 µm [984 µin] for Class3).

c = A maximum variable processing allowance reduction.

Table 3-14 External Conductor Thickness after Plating

Weight ^{1,4}	Absolute Cu Min. (IPC-4562 less 10% reduction) (µm) [µin] ⁵	Plus average plating for Class 1 and 2 (20 µm) [787 µin] ² FOR REFERENCE PURPOSES ONLY	Plus average plating for Class 3 (25 µm) [984 µin] ² FOR REFERENCE PURPOSES ONLY	Maximum Variable Processing Allowance Reduction ³ (µm) [µin] FOR REFERENCE PURPOSES ONLY	Minimum Surface Conductor Thickness after Processing (µm) [µin]	
					Class 1 & 2	Class 3
1/8 oz.	4.60 [181]	24.60 [967]	29.60 [1,165]	1.50 [59]	23.1 [909]	28.1 [1,106]
1/4 oz.	7.70 [303]	27.70 [1,091]	32.70 [1,287]	1.50 [59]	26.2 [1,031]	31.2 [1,228]
3/8 oz.	10.80 [425]	30.80 [1,213]	35.80 [1,409]	1.50 [59]	29.3 [1,154]	34.3 [1,350]
1/2 oz.	15.40 [606]	35.40 [1,394]	40.40 [1,591]	2.00 [79]	33.4 [1,315]	38.4 [1,512]
1 oz.	30.90 [1,217]	50.90 [2,004]	55.90 [2,201]	3.00 [118]	47.9 [1,886]	52.9 [2,083]
2 oz.	61.70 [2,429]	81.70 [3,217]	86.70 [3,413]	3.00 [118]	78.7 [3,098]	83.7 [3,295]
3 oz.	92.60 [3,646]	112.60 [4,433]	117.60 [4,630]	4.00 [157]	108.6 [4,276]	113.6 [4,472]
4 oz.	123.50 [4,862]	143.50 [5,650]	148.50 [5,846]	4.00 [157]	139.5 [5,492]	144.5 [5,689]

Note 1. Starting foil weight of design requirement per procurement documentation.

Note 2. Reference: Average Cu Plating Thickness

Class 1 = 20 µm [787 µin] Class 2 = 20 µm [787 µin] Class 3 = 25 µm [984 µin]

Note 3. Process allowance reduction does not allow for rework processes for weights below 1/2 oz. and above, the process allowance reduction allows for one rework process.

Note 4. For copper foil above 4 oz., utilize the formula provided in 3.6.2.15.

Note 5. For foil weights not listed in Table 3-14, the absolute copper minimum shall be calculated using the following algorithms. For microns (µm) use [(34.3 X Weight) X 0.9] and for [µin] microinches use [(1.35 X Weight) X 0.9] X 1000.

图 3-3. IPC 标准规定了最小 PCB 覆铜迹线厚度，但没有规定最大厚度

同一电路板上迹线宽度的差异导致难以确定方形迹线是否会影响迹线电阻，尽管第二个版本中重新检查了该比较，详见节 4。

根据表 3-2 中的数据，我们修改了迹线电阻的预估值，以尝试更好地匹配试验结果。厚度不再设置为 1oz 覆铜，而是按照表 3-2 中的条目进行设置。此外，由于之前的电阻测量假定环境温度为 25°C，因此新的温度设置为 TMP235 在 0A 电流阶跃条件时读取到的任何温度。表 3-3 显示了调整后的结果。

表 3-3. 平均误差百分比 - 室温 (调整后)

迹线	平均误差百分比			平均值
	1"	2"	3"	
100mil 底部分接	-10.11%	22.22%	0.61%	4.24%
100mil 中间分接	-13.09%	18.92%	6.69%	4.17%
200mil 底部分接	3.14%	1.70%	1.18%	2.01%
200mil 中间分接	9.38%	8.68%	8.61%	8.89%
1750mil 底部分接	21.87%	18.80%	16.10%	18.92%
1750mil 中间分接	21.17%	18.51%	20.92%	20.20%

完成调整过程后，各迹线的误差都出现了显著下降，不过 1750mil 迹线除外，该迹线的误差出现了显著增加。表 3-1 中所示的中间分接点与底部分接点之间的差异也不那么明显，但 1750mil 迹线中该差异甚至反而变得明显。

由于覆铜迹线在电流通过时会发热，因此记录了覆铜迹线相对于其上通过电流的推算电阻。在整个测量过程中，迹线可能会持续升温，如节 2 中所述。这一事实可能会导致误差。根据后续测试中观察到的情况，温度均衡过程中额外迹线发热的影响很可能导致了最大约 0.5mΩ 的电阻差异。图 3-4 显示了迹线电阻随电流的变化情况。8mil 迹线没有对应的温度数据。

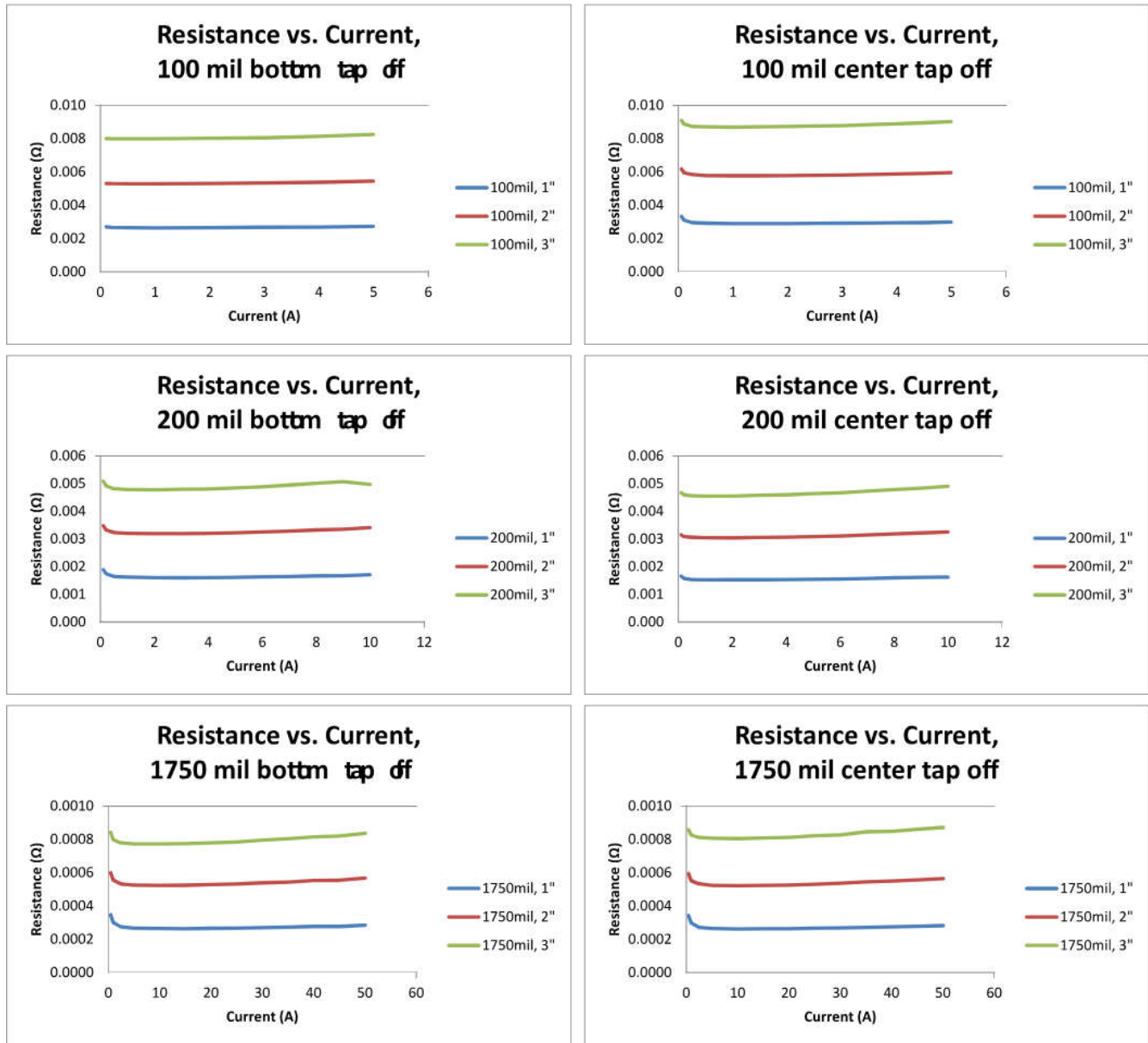
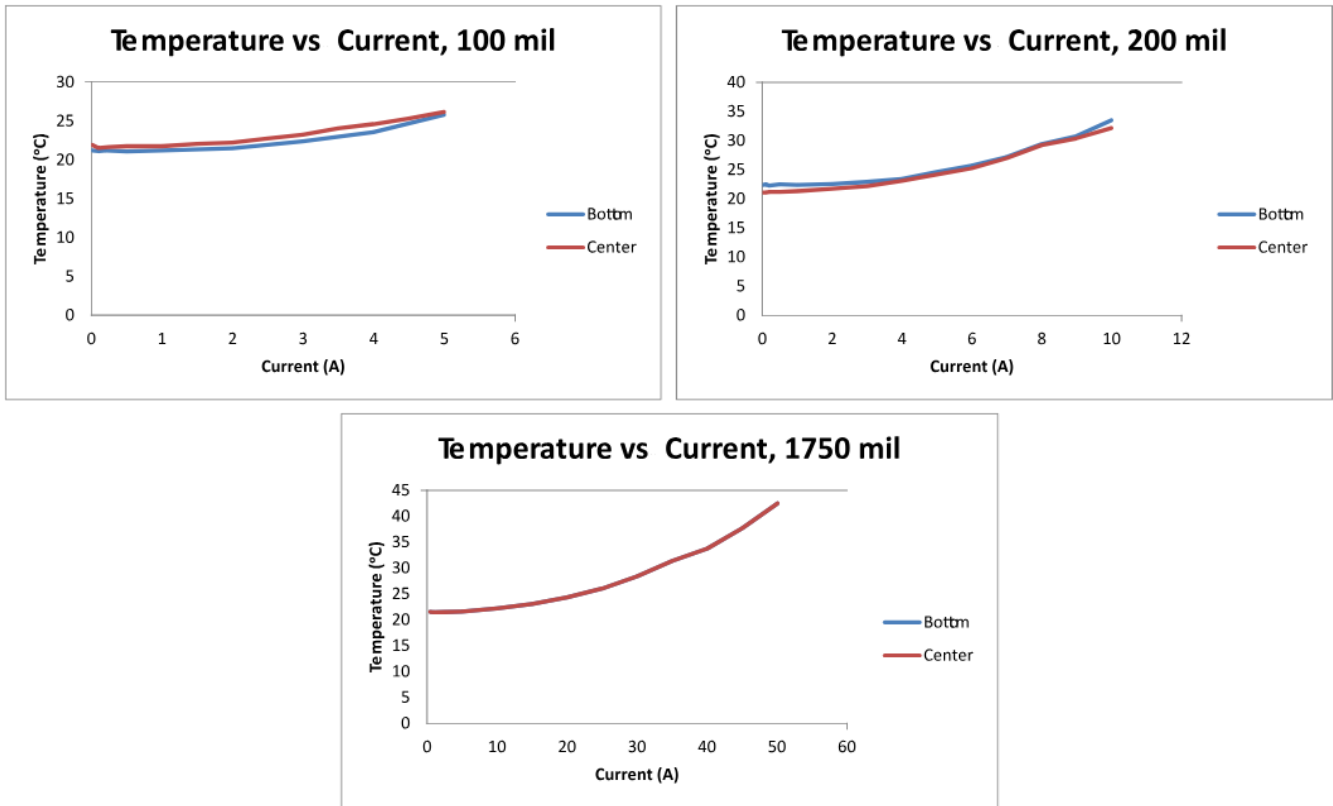


图 3-4. 六种迹线配置的电阻与电流关系图

从这些图中可以看到，对于小电流值，迹线电阻呈现出非线性行为，但在某一点后，电阻会大致随电流呈线性变化。这很可能是由于 INA190 偏移误差在输出较小时影响较大。迹线开始线性变化的点取决于迹线的尺寸，例如 100mil 迹线在大约 0.1A 时开始线性变化，200mil 迹线在大约 0.2A 时开始线性变化，而 1750mil 迹线在大约 2.5A 时开始线性变化。务必记住这一重要信息，因为这种行为表明，仅仅让电流通过迹线就会影响电阻。在任何采用覆铜迹线的应用中，都必须考虑迹线电阻以该方式实现稳定所需的时间。

最后，电路板上连接的温度传感器指示了迹线温度随着电流增加的变化情况。对于获得的大多数器件，预计都会出现强劲的上升趋势。对于较小的迹线，无法完全确认是否与传感器充分接触，并且温度结果可能因周围的 PCB 而发生偏斜。不过，在传感器记录到的迹线温度停止升高之前，没有记录温度数据，因此这些值在理论上应代表着所有变化均已发生后的稳定读数。图 3-5 显示了迹线温度图。



备注

1750mil 对应的两个曲线几乎无法区分。

图 3-5. 三种迹线配置的温度与电流关系图

这里选择了最大电流值，以使温度从环境温度升高约 20°C。图 3-5 中的很多图并非如此。不过，宽度类似的迹线确实具有类似的温度升高现象。这种温度未按预期升高的情况很可能是由前文讨论的制造容差导致，否则不会很显著，因为温度升高计算涉及多个假设以及舍入误差。

3.2 温度室测试

为了确定温度变化对覆铜迹线分流电阻器的影响，这里将迹线置于了温度室来控制环境温度。由于迹线测量之间电路板达到温度室内温度所需的时间增加，因此在温度室内采集的数据点有所减少。另外这里仅考虑了间距为三英寸的情况。与室温测量类似，可以将电阻变化相对于电流绘制成图。这时观察到了相对于室温的类似趋势，对应的图形如图 3-6 中所示。100mil 底部分接图用于展示整个温度范围内的变化，因为每种宽度的迹线在这方面表现类似。

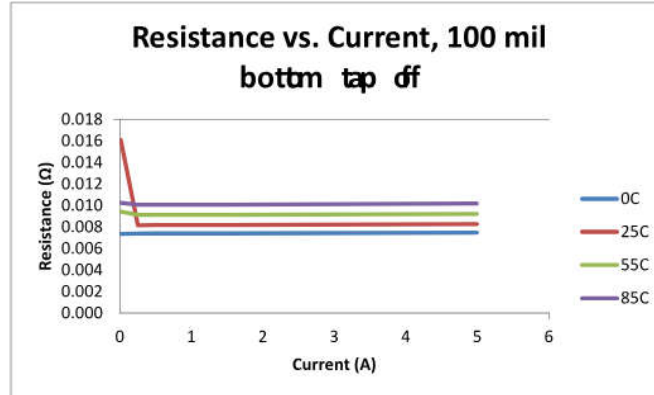


图 3-6. 四种温度下的 100mil 底部分接电阻与电流关系图

图 3-6 中的图显示，当环境温度升高时，电阻也随之增加，这与预期的结果以及之前的结果是一致的。通过绘制出每种迹线相对于环境温度的最大记录电阻，图 3-7 展示了电阻随温度的变化情况。图中并未包含 0A 时测量的电阻。

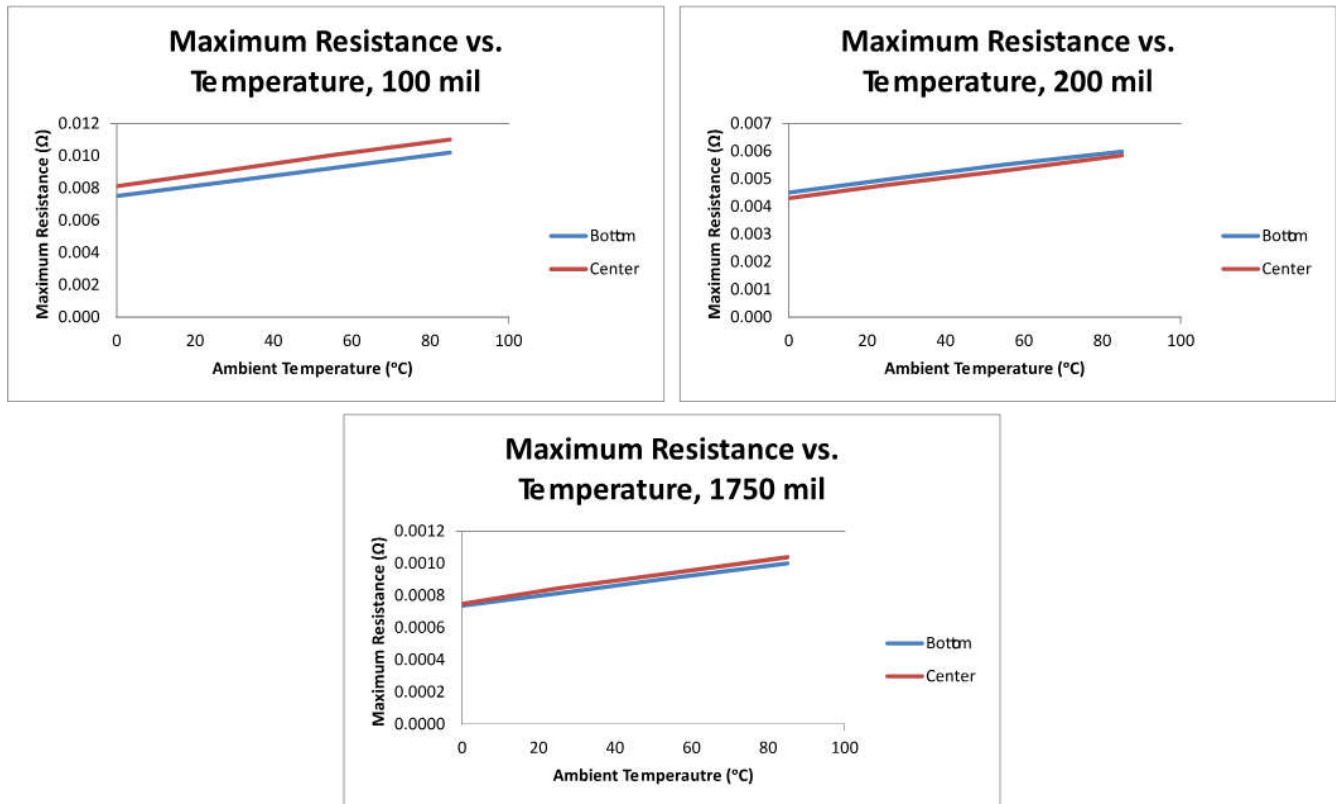


图 3-7. 三种迹线配置的最大电阻与温度关系

图 3-7 中的图显示，随着环境温度升高，测量到的电阻也在增加。这是一个需要注意的重要因素，因为在使用覆铜迹线分流电阻器的应用中，必须考虑工作温度，以便执行正确的校准。与室温环境中一样，此次计算了一系列温度范围内的平均误差百分比，如表 3-4 中所示。

表 3-4. 平均误差百分比 - 温度受控

迹线	平均误差百分比				平均值
	0°C	25°C	55°C	85°C	
100mil 底部分接	-49.51%	-44.19%	-37.75%	-31.31%	-40.69%
100mil 中间分接	-45.34%	-39.47%	-32.25%	-25.63%	-35.67%
200mil 底部分接	-39.70%	-33.17%	-25.74%	-20.07%	-29.67%
200mil 中间分接	-42.29%	-35.89%	-28.71%	-21.30%	-32.05%
1750mil 底部分接	-13.72%	-4.75%	6.39%	16.92%	1.21%
1750mil 中间分接	-10.72%	-1.29%	10.24%	21.46%	4.93%

表 3-4 中的值展示了可能的设计考量。随着温度升高，除 1750mil 迹线以外的所有迹线都会出现误差减少。1750mil 迹线的最低误差出现在 25°C 处。原因在于电阻随温度的升高而增加。由于除 1750mil 迹线以外的所有迹线，因 PCB 制造工艺原因，初始电阻都远低于预期值，因此随着温度升高和电阻增加，它们会逐渐接近最佳值。在工作温度远高于 25°C 的应用中，根据温度升高情况，可以使用较小的迹线。

4 硬件版本 B

节 3 中得出的结果最初意味着，如果无法控制迹线的真实厚度以及覆铜在电流流过时改变电阻这一倾向，则在实际应用中使用覆铜迹线分流电阻器并不可行。不过，图 4-1 显示了另一种设计版本以及一种替代的试验设置，该试验设置展示了如何避免之前讨论的问题。此设计称为“版本 B”。

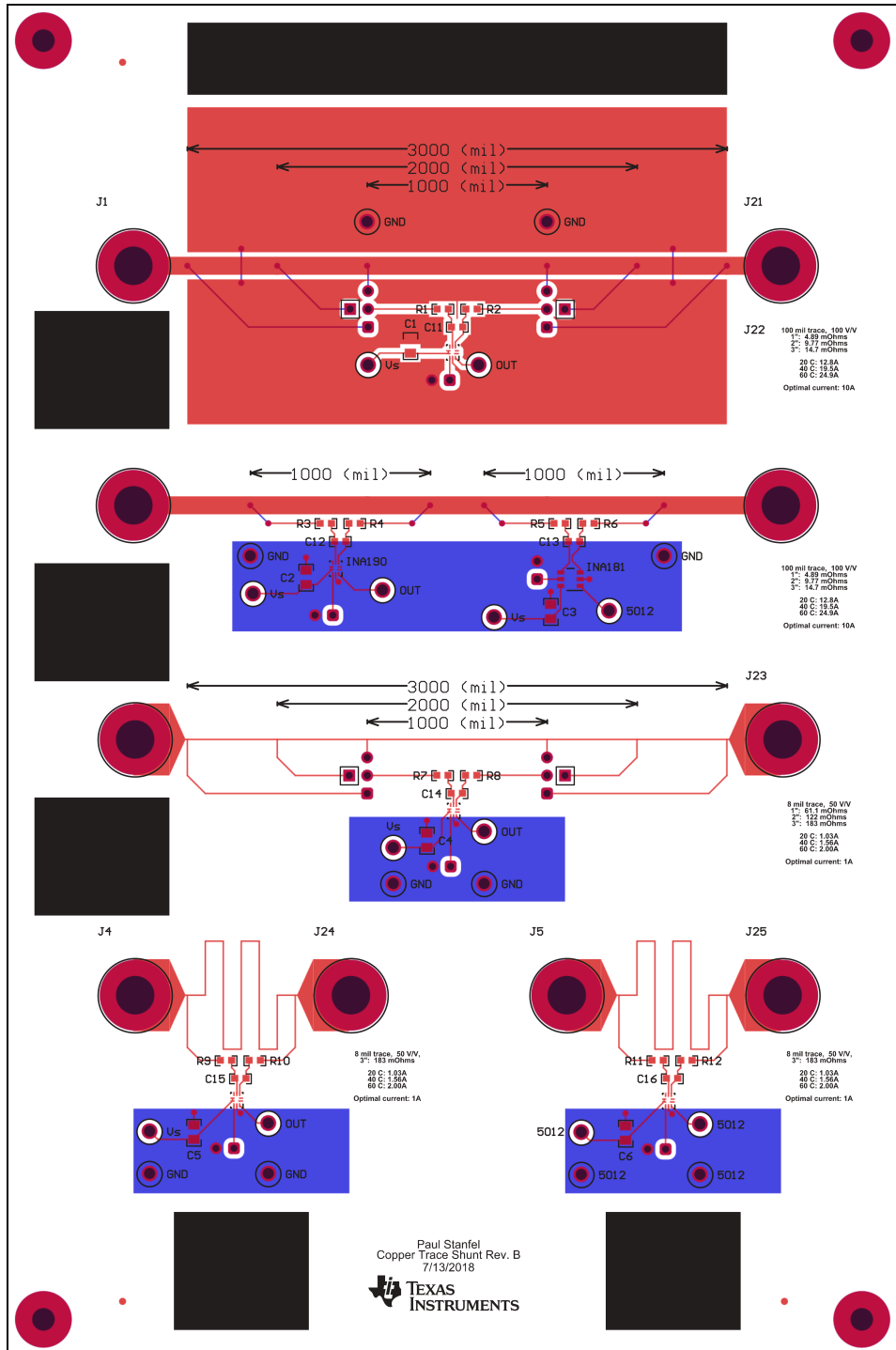


图 4-1. 版本 B 电路板

顶部的迹线 (请参阅图 4-1) 尝试向 100mil 迹线周围添加大量的覆铜 (扩展接地层)，以减少 PCB 制造误差的影响。第二个迹线是一个正常的 100mil 迹线，由 INA190 (与第一个版本中一样) 和 INA181 进行测量。INA181 电

流检测放大器专为成本优化型应用设计。该器件属于双向电流检测放大器（也称为电流分流监控器）系列，可在独立于电源电压的 $-0.2V$ 至 $+26V$ 共模电压范围内检测电流检测电阻器上的压降。INAx181 系列器件在四个固定增益器件选项中集成了匹配的电阻器增益网络： $20V/V$ 、 $50V/V$ 、 $100V/V$ 或 $200V/V$ 。此匹配的增益电阻网络可更大幅度地减少增益误差，并降低温漂。将 INA181 与 INA190 进行比较的原因是为了分析能否将覆铜迹线分流器与更低成本的 INA181 结合使用来开发成本更低但精度也更高的电流检测替代方案。对于此迹线，没有尝试调整迹线的厚度。相反，使用两点校准来尝试准确地预测器件的输出，而不管其实际厚度如何。此类校准也使用其他迹线宽度进行了测试。最后，图 4-1 中的最后三个迹线均是重复的 8mil 迹线，主要旨在观察单个电路板中迹线宽度不确定性所对应的影响。

表 4-1 显示了具有扩展接地层时 100mil 迹线的误差百分比结果。表 3-1 中再次给出 100mil 迹线误差只是为了进行比较，而图 4-1 中显示了没有接地层时 100mil 迹线的情况。和之前一样，“电路板 1”和“电路板 2”表示相同版本的不同电路板。

表 4-1. 100mil 厚度较薄迹线的误差百分比

迹线	平均误差百分比			平均值
	1"	2"	3"	
100mil 扩展接地层, 电路板 1	-16.71%	-20.29%	-23.22%	-20.07%
100mil 扩展接地层, 电路板 2	-18.25%	-21.43%	-24.64%	-21.44%
100mil, 电路板 1	-38.87%	-	-	-38.87%
100mil 底部分接	-42.96%	-44.08%	-48.38%	-45.14%
100mil 中间分接	-38.53%	-39.25%	-39.15%	-38.98%

即便与同一电路板上的迹线相比时，误差也显著减小，但仍然很大。不过，根据多个电路板的测试结果，误差似乎至少是一致的。这意味着这项技术是可行的，但不同制造商的不同电路板可能会产生不同的误差。此外，较大的接地层会占用很大的空间，基本上也就消除了使用较小的 100mil 迹线相较于使用 1750mil 迹线的优势，因为后一种选项会更为准确且占用的电路板面积大致相同。此试验的结果表明，覆铜层越连续，迹线厚度与预期值就越接近，并且获取正确值的电阻需要很大的迹线。

该电路板还用于确定可节省空间的简单校准过程的有效性。图 3-1 中所示的曲线表明，可将预期输出与实际输出之间的差异简单地视为增益误差。通过使用低电平和高电平电流对迹线进行校准，理论上可以预测实际曲线上的任何输出。受到多个因素影响，此过程会有些复杂。首先，如图 3-4 中所示，当电流流过迹线时，电阻会发生改变。这意味着，根据进行测量的时间，校准曲线可能存在偏斜。在一些情况下，记录的输出稳定时间超过 5 分钟。此外，如果不同电路板之间的迹线厚度存在显著差异，则制造商需要单独校准每块电路板，批量校准过程会导致不准确。最后，以这种方式进行校准不支持与校准温度的偏差而导致的的变化。

要确定两点校准方法的可行性，第一步是使用切合实际的过程。表 4-2 显示了 4 种可能的设置，不同设置之间的区别在于收集的数据点的多少、是否允许校准输出测量达到稳定，以及是否允许测试输出达到稳定。每个设置均用于预测 2.5A 电流流过迹线时 INA190 的输出。另外还提供了使用该校准时的预测与实际输出之间的误差百分比。这些数据均使用图 4-1 中的“普通”100mil 迹线测量获得。

表 4-2. 考虑 PCB 厚度误差的可能校准过程

设置	数据点数量	校准输出是否稳定？	测试输出是否稳定？	误差百分比
最大数据点	4	是	否	-1.85%
减少数据点	2	是	否	-1.24%
降低温度影响	2	否	否	-0.58%
最大温度影响	2	否	是	-2.25%

第一个设置采用了四个校准数据点，其中三个位于低电平电流范围内。这种设置最不切实际，因为在实际应用中，等待四个不同的校准点稳定后再进行记录是不可行的。在实际应用中，电流通过迹线的时间通常足够长，足以使迹线达到均衡温度。在温度稳定前记录测试输出会导致不准确的实际运行条件仿真。为此，第二个和第三个设置也不切实际。第四个选项最为可行：最少的数据点、最短的校准过程等待时间，以及长时间流过的测试电流。不幸的是，此过程误差最大，但却是唯一一种可在现实中大量实现的选项。

为了测试校准过程，这里使用记录的数据点计算了校准曲线的斜率和截距。可以使用这些数字预测电流，从而反向计算 INA190 的输出。由于实际电流是已知的，因此通过计算误差百分比可以揭示校准的有效性。校准的第一个迹线是用于获取表 4-2 数据的 100mil 迹线。使用的校准电流为 0.1A 和 5A 或 10A。使用的四个测试电流如下：0.01A、2.5A、5.5A 和 7A。对于每一个测试电流，均会等待 INA190 输出稳定后再进行记录。为了全面地检查此技术的功能，这里使用了版本 B 中的 100mil 迹线来预测版本 A 中 200mil 迹线的 INA190 输出。表 4-3 和表 4-4 显示了对应的结果。校准数据从版本 B 的电路板 1 获得。

表 4-3. 100mil 校准结果

电路板	最大校准点	误差百分比			
		0.01A	2.5A	5.5A	7A
版本 B 电路板 1	5A	-36.31%	-1.16%	2.11%	4.03%
版本 B 电路板 2	5A	-12.72%	-1.58%	1.46%	3.53%
版本 A 电路板 1	5A	-98.76%	-1.87%	1.98%	4.55%
版本 B 电路板 1	10A	-20.52%	-4.57%	-1.49%	0.35%
版本 B 电路板 2	10A	15.20%	-4.97%	-2.12%	-0.14%
版本 A 电路板 1	10A	-81.22%	-5.25%	-1.62%	0.85%

表 4-4. 200mil 迹线的 100mil 校准结果

电路板	最大校准点	误差百分比			
		0.02A	5A	10A	20A
版本 A 电路板 1	5A	-79.87%	18.01%	24.96%	49.92%
版本 A 电路板 1	10A	-55.87%	13.92%	20.54%	44.57%

通过测试两个不同的校准点，展示了可以如何根据预测的电流来调整校准。100mil 迹线可以处理 5A 电流，同时保持在温度升高 20°C 的相对任意限制范围内。校准至更大的电流可以更准确地预测更大的电流，但难以推断较小的电流。另外，用于不同宽度和版本的迹线时，校准预测的精度也会受到严重影响。这是正常情况，因为这时引入了更多可能导致偏离校准条件的因素。

此校准过程也用于具有扩展接地层的迹线，以及 8mil 迹线。表 4-5 和表 4-6 显示了对应的结果。用于 8mil 迹线的两个校准点是 0.02A 和 1A。

表 4-5. 100mil 扩展接地层校准结果

* 这些电流会导致某些输出出现饱和，在这种情况下对应的值会留空。

电路板	最大校准点	长度	误差百分比			
			0.01A	2.5A	5.5A*	9.5A*
电路板 1	5A	1in	800.08%	3.00%	4.57%	10.73%
		2in	65.48%	-0.64%	2.29%	-
		3in	-28.81%	11.92%	-	-
电路板 2	5A	1in	796.22%	2.47%	3.63%	10.24%
		2in	81.88%	-1.63%	0.75%	-
		3in	-29.23%	10.39%	-	-

表 4-6. 8mil 校准结果

* 前两个电路板使用 1.5A 的电流，而后三个电路板使用 1.2A 的电流来避免输出饱和。

电路板	误差百分比			
	0.005A	0.5A	0.95A	1.5A、1.2A*
版本 B 电路板 1, 1”	12.99%	-0.72%	0.89%	3.51%
版本 B 电路板 2, 1”	4.06%	-2.03%	-0.45%	2.00%
版本 B 电路板 2, 3”	9.91%	1.59%	2.71%	3.58%
版本 B 电路板 1, 方形	-1.85%	-14.46%	-12.97%	-11.69%
版本 A 电路板 1, 方形	-9.70%	-8.71%	-7.10%	-5.83%

最后，使用 INA181 进行了校准。该过程与用于 INA190 的方法相同，唯一的区别是使用了不同的器件。这里仅使用此校准技术检查了 100mil 迹线。表 4-7 显示了对应的结果。

表 4-7. INA181 校准结果

电路板	最大校准点	误差百分比			
		0.01A	2.5A	5.5A	7A
版本 B 电路板 1	5A	-99.90%	-0.12%	2.24%	4.47%
版本 B 电路板 1	10A	-99.90%	-2.93%	-0.71%	1.44%
版本 B 电路板 2	5A	-52.27%	-0.89%	1.61%	3.66%
版本 B 电路板 2	10A	-27.50%	-3.68%	-1.32%	0.66%

前述表格中的数据展示了两点校准流程的几个限制。从一个电路板获取的校准点通常能够用于预测同一版本其他电路板的输出。不过，对于不同版本的电路板，由于 PCB 制造随时间推移的不确定性，精度会显著降低。INA181 在性能表现上还似乎相当于甚至优于 INA190。这意味着可以使用 INA181 来代替 INA190 并获得类似的结果，至少在通过校准补偿偏差时可以如此操作。

最后，版本 B 提供了机会来重新检查迹线形状对电阻的影响。表 4-8 显示了这些试验的结果，格式类似于表 3-1。

表 4-8. 平均误差百分比：电路板 1 上的 8mil 迹线

迹线	平均误差百分比			平均值
	1"	2"	3"	
8mil	-51.95%	-53.64%	-53.20%	-52.93%
8mil 方形左侧	-	-	-58.01%	-58.01%
8mil 方形右侧	-	-	-51.80%	-51.80%

虽然存在差异，但要确定这些变化是由迹线形状引起的还是由厚度差异造成的，却颇具挑战性。从相同形状的迹线具有不同的平均值（右侧与左侧）这一事实可以看出，此差异是因为之前讨论的同一容差造成的，或者至少是因为迹线形状带来的任何电阻差异不足以克服厚度偏差的影响。

所有结果都显示极小的电流值具有大得多的误差百分比，但这是 INA190 和 INA181 的失调误差造成的正常现象。即使对于传统的 SMT 电阻器，这些问题通常也会出现。

5 总结

用覆铜迹线代替普通分流电阻器有多项优势。一项优势是降低实现成本。另一项优势是覆铜迹线可以处理大电流，具体取决于迹线尺寸。但必须在这些优势与以下情况之间进行权衡：在 PCB 制造过程中，覆铜迹线厚度非常容易发生变化，并且环境条件以及迹线中电流导致的温度变化可能会影响电阻测量。

覆铜迹线分流电阻器不适用于任何需要高精度的应用。要确保迹线电阻合理接近预期值，唯一的方法是使用没有间隙且尺寸非常大的连续迹线。这也是可用于处理大电流的唯一迹线。

另外，对于优化成本比优化精度更重要的应用，可以使用两点校准方法来补偿制造误差。然而，由于 PCB 制造商无法完全控制电路板上的覆铜量，因此随着制造的电路板越来越多，通过校准提供的近似效果会明显变差。在电流较大时，校准预测也会变差，因为这些电流更易导致迹线升温，从而导致与预期值的偏差增大。

同时经证实，一些因素在实现覆铜迹线分流电阻上并不那么重要。采用不同的分接点（底部或中间）时，测量值之间并没有显著差异。另外，迹线形状似乎对迹线的总体电阻没有太大影响，但这一点很难得到确凿证明。

虽然覆铜迹线是 SMT 分流电阻器的一种实惠替代方案，但用它来测量电流时必须小心谨慎。使用此方法的方案无法保证一定能够按预期工作，并且需要调整校准常数以应对可变性。

6 参考文献

- IPC-6012 中的 IPC 表格，未经 IPC 许可不得复制。

7 修订历史记录

Changes from Revision * (January 2022) to Revision A (April 2026)	Page
• 更新了“简介”部分.....	3

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