

红外热成像在电子领域的应用

作者：Sat Sandhu，美国福禄克公司

电子电路和元器件具有各种各样的形状和形式。所有电子器件工作时都有电流通过，从而发生功耗。这种功耗的主要表现形式是热量。所以，所有电子设备的设计、测试、验证以及故障诊断中的一项关键因素就是热管理。随着电路复杂性越来越高、尺寸越来越小，电子设备热管理在设计阶段以及随后的测试、验证和故障诊断阶段的重要性更为凸显。

热成像摄像机(TI)是对电子电路及元器件的热模式生成图像的理想工具。与接触式温度测量设备相比，热成像主要拥有两方面的优势：

1. 无需接触电路或元器件即可测量温度，从而确保物体的温度不受影响。
2. 能够观察大面积或整个电路或元器件，而不仅限于测量某个点。

什么是热成像？

所有物体都会辐射红外能量(IR)。辐射的红外能量与物体温度成正比，所以随物理温度升高而增大。大多数现代化热像仪使用二维探测器检测这种红外能量并将其转换为电信号。然后可将该数据储存在热像仪的存储器中。通过利用颜色表示不同的温度，即可在热像仪的屏幕上以热像图的形式将该数据显示出来。可对辐射热像仪进行校准，使其能够将红外能量转换为显示表面温度。

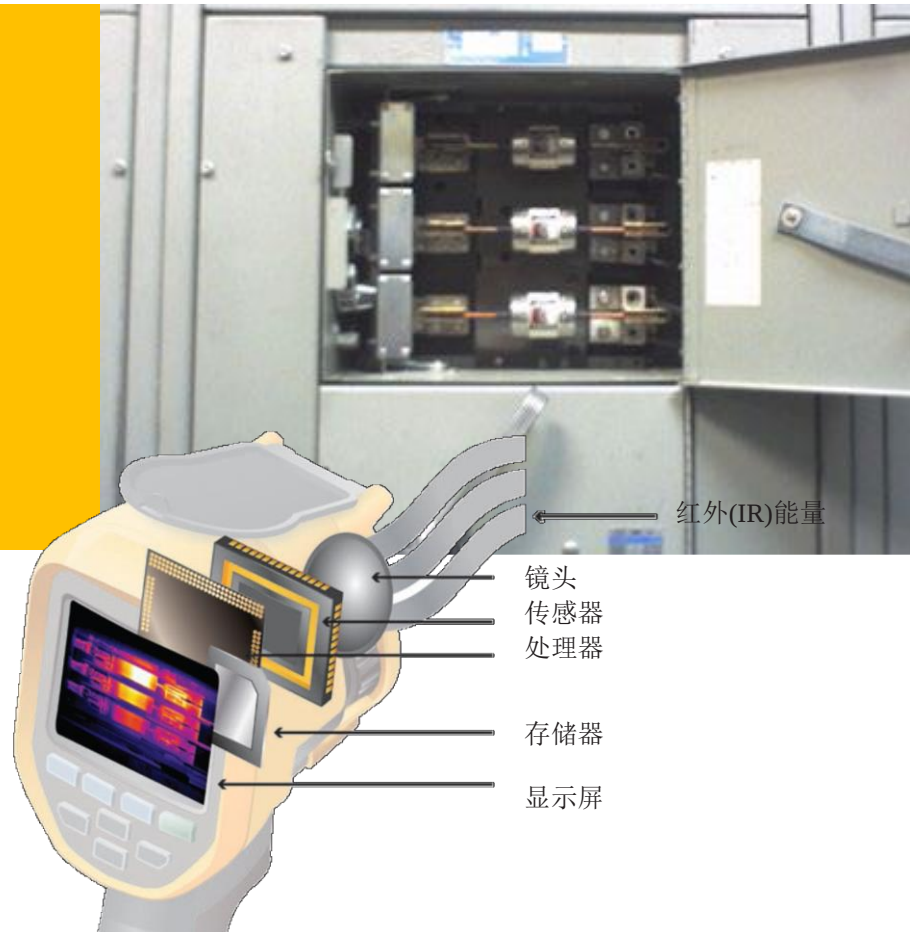
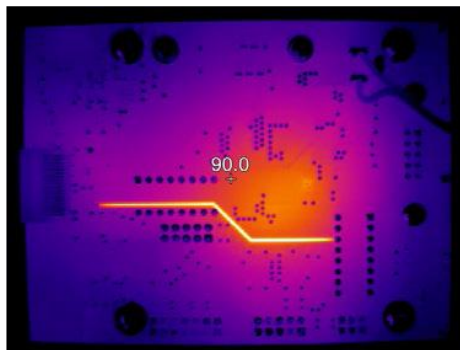
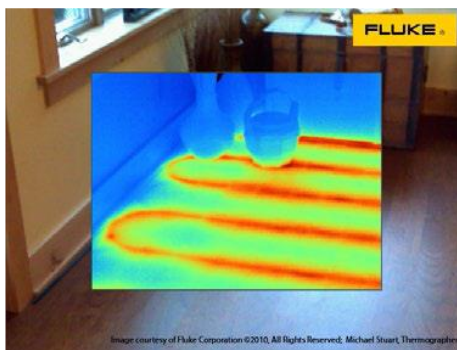


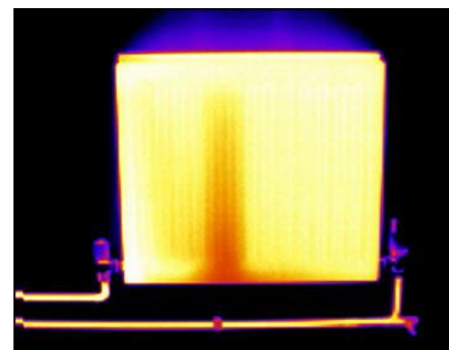
图 1. 热像仪剖析图



电路板



地暖



散热器

图 2. 热图像实例

什么是电子电路和元器件？

电子电路和元器件具有各种各样的形状和形式。元器件包括电阻、电容和电感等无源器件，也包括晶体管和二极管等有源器件。集成电路是一种单片器件，其中包括由有源器件和无源器件构建的电子电路。混合电路是通常由 IC 和元件构成的电路，特别是电感或大电容等元件体积较大或者不能制作成单片 IC 时。印刷电路组件(PCA)被定义为印刷电路板(PCB)，其上安装电气元器件之后形成电子电路。PCA 上也可以安装混合器件。大多数电子电路往往是 PCA。表贴技术(SMT)是一种直接将元器件安装在 PCB 之上的方法，而不是传统上通过过孔将元器件安装到 PCB。此类元器件称为表贴器件(SMD)，一般体积小得多。尽管元器件和电路的类型非常多，但如前所述，在工作时都发热，因此就需要进行热管理。

电子电路中的热源是什么？

输入到任何电子或电气电路的功率都是以热的形式消耗掉的。这种散热将造成其温度高于环境温度。温升与许多因素有关。主要因素是器件的热阻；其他因素包括热管理、散热器、强制风冷等。排除其他因素，我们仅考虑热阻的例子。一个电阻的功耗为 300 mW (0.3 W)，其热阻额定值为 150 K/W。那么造成的温升为 $0.3 \times 150 = 45^\circ\text{C}$ 。假设环境温度为大约 20°C ，意味着该电阻的温度将为 65°C 左右。如果电阻的工作温度范围是，比如说 -55°C 至 $+155^\circ\text{C}$ ，那么元件的温度为 65°C 可能不成问题。然而，对于其他元件，功耗与热阻的组合可能会造成其工作温度接近其额定工作范围。

此外，我们还需要考虑电路中的其他热源：短路、高速开关，尤其是器件超频时。

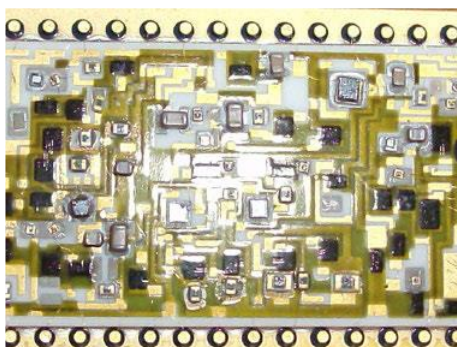
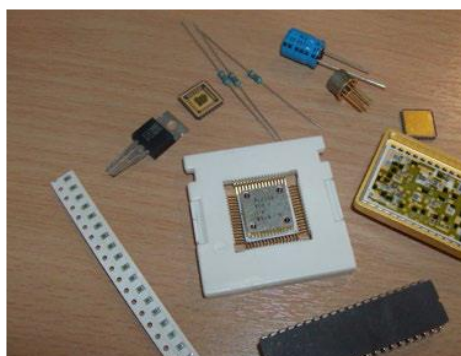


图 3. 电子元器件、混合电路和 PCA 实例。

热量为什么重要？

通常认为，元器件的工作温度较高时会对元器件和电路造成较高的应力。进而造成漏流增大、电压漂移较大、传输延迟增大，以及材料中的化学反应加剧。所有这些因素将造成：

安全隐患：较大的故障风险、性能降低以及较高的元器件温度共同作用，也会带来安全隐患。

热像仪的发展

随着过去 15 年红外热成像技术的进步，热像仪



图 4.PCA 的热像图

寿命较短：有大量数据表明，电子部件的寿命随温度升高而缩短。虽然可靠性工程提供了许多评估产品寿命的工具，但从平均故障时间 (MTTF) 或平均故障间隔时间 (MTBF) 来讲，寿命随温度升高而降低，产品温度是计算中一项主要且关键的参数。尽管基于阿仑尼乌斯 (Arrhenius) 方程来建立模型进而确定可靠性的效果存在大量讨论和争议，但一项无可辩驳的事实是温度升高确实影响寿命。通用的经验法则则是温度每升高 10 °C，寿命将减半。

较大的故障风险：与寿命缩短一样，也有大量数据表明温度升高也会增大故障风险。结点就是其中的一个例子。不同金属的热系数不同，热循环会在结点中产生应变和裂纹。

降低性能：温度升高也会影响电子电路的总体性能。增大开关时间、降低电阻、增大漏流，所有这些因素足以改变电子电路的总体性能。

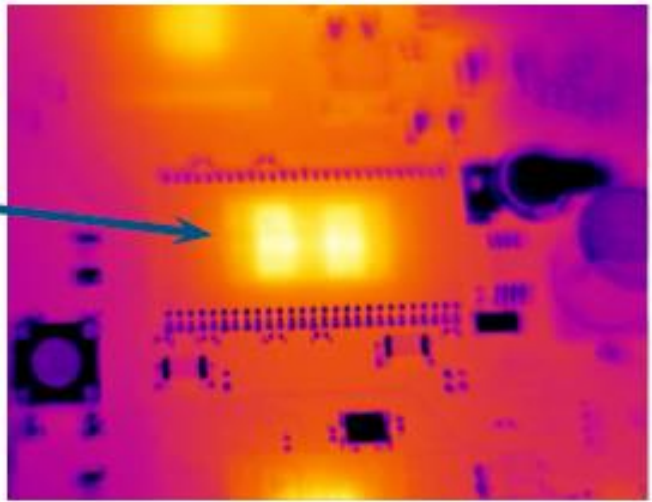


图 5. PCA 上一片 IC 的放大图像

的价格已经大幅下降。同时大家也公认，建模和 CAD/CAM 设计在过去 30 年间取得了显著进步，然而对设计进行真正的验证仍然需要工作电路。现在，能够以经济的价格对电子电路进行方便、快速地热分析。

典型的成像方式

由于热成像摄像机检测的是红外辐射，后者又是电磁辐射，所以成像的关键方面非常类似于可见光照相机。

所用镜头和探测器分辨率的组合很大程度上决定了我们得到的图像，我们能够得到的总视场角、空间分辨率。下图 4 中为完整电路板的图像，但 IC (圆圈中) 呈现出明显不同的热模式。当我们使用不同的镜头或不同视场进行观察时，现在可以看出两种清晰的热模式，如图 5 所示。这是因为该设备有两片存储器。

发射率的影响

如上所述，所有物体都辐射红外能量，后者与物体温度成正比。但不同材料和表面光洁度会影响发射的 IR 能量大小。例如，图 6 为一块未加电的电路板的可见光图像。在相同温度下，不同材料和光洁度发射的红外能量大小不同。为了说明这种效果，图 7 至图 9 是同一块电路板在三种不同环境温度下的热像图。图 7 中为正常的环境温度；图 8 中，将电路板放在低温箱中进行了冷却；图 9 中，将电路板放在高温箱中进行了加热。

在全部三幅图中，使用的温度刻度不同，为了提供良好的可见图像而进行了调整。每种情况下使用的实际刻度显示在图像的右侧。在每幅图中选择 3 个温度测量点，以说明发射率的影响。

1. 图像的右侧是背景的环境温度(19 °C)。
2. 右下侧的元件是一个 SD 卡支架，带裸金属盖。裸金属的发射率较低。
3. 左侧中部的器件是一个铁氧体磁芯，表面为发射率相对较高的哑光表面。



图 6. PCA 的可见光图像

图 7 中，在环境温度条件下，电路板的温度波动非常小，展布只有 3 度；图 8 中，电路板为低温，我们现在看到发射率较低的铁氧体磁芯的温度为 4 °C，SD 卡支架的温度略微低于 18 °C，仅比环境温度低 1 度；图 9 中，电路板为高温，发射率较高的铁氧体磁芯仍然为高温 (40.2 °C)，而 SD 卡支架的温度略低于 21 °C，仅比环境温度高不到 2 °C。所以，发射率较高的表面更接近其实际温度。低发射率表面的温度难以测量。这种环境下，裸金属的温度尤其难以测量，所以用户应避免试图从此类表面获取有意义的数据。

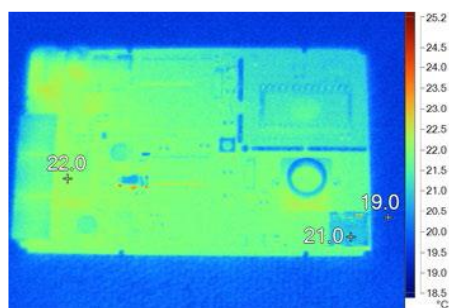


图 7

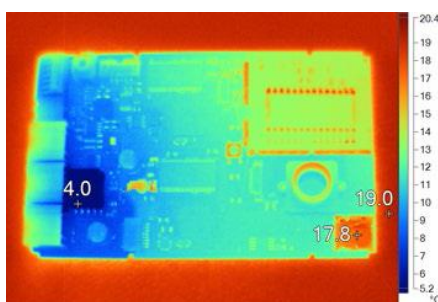


图 8

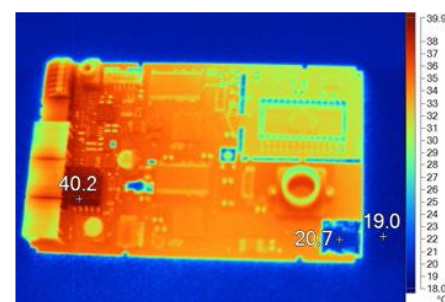
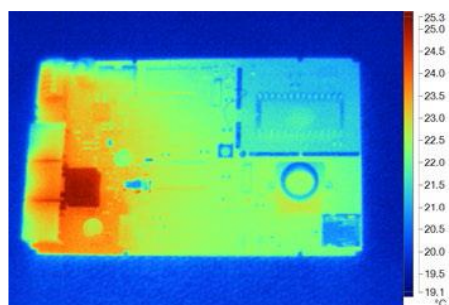
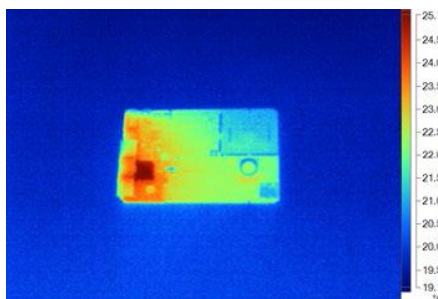


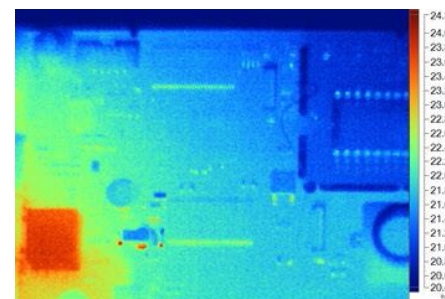
图 9



标准镜头



宽视场角



4 倍长焦镜头

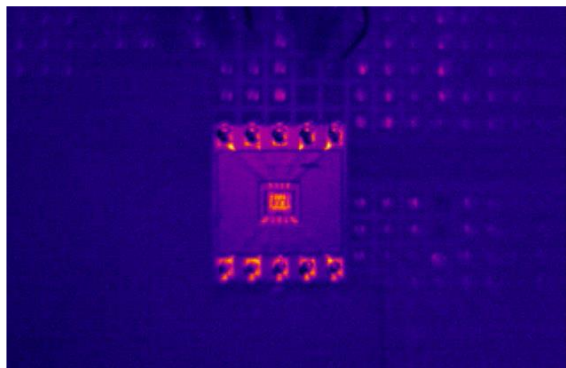


图 10. 未加电的电阻排

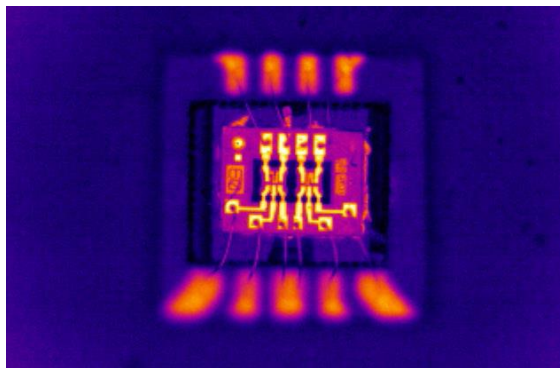


图 11. 未加电的电阻排，使用微距镜头

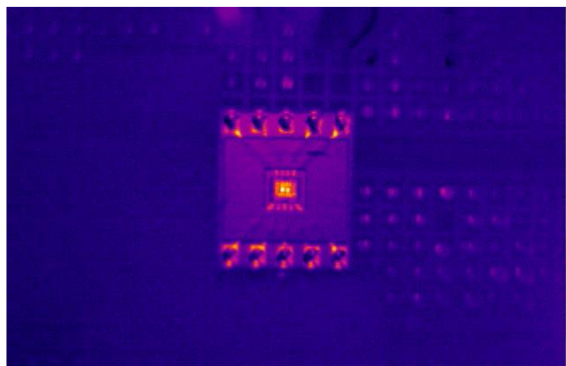


图 12. 加电的电阻排

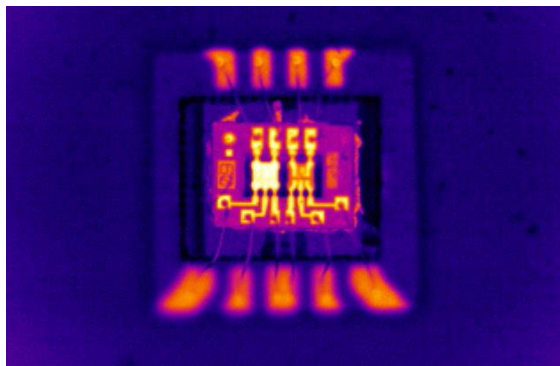


图 13. 加电的电阻排，使用微距镜头

镜头的影响

在使用热像仪分析电子电路时，拥有不同的视场角也非常重要。除了改变电路板与热像仪之间的距离外，使用不同的镜头能够更方便地提供更多细节和数据。

上图所示为使用标准镜头、广角镜头和长焦镜头拍摄的同一电路板。此外，微距镜头可提供丰富的细节信息。

案例分析：热成像在设计阶段的应用

所有的电子元器件厂商都必须对其产品进行测试，以确保符合规定条件下的预期性能，以及确定其典型的性能寿命。例如，表贴电阻制造商希望保证其提供的元器件的性能、可靠性和典型预期寿命。实现这一目的的最佳途径是在设计和开发阶段的关键点对电阻进行测试。电阻是限制电流或电压的主要器件，其功耗取决于施加的电流和电压。利用配备有微距镜头的红外照相机，观察被测电阻的典型热模式，能够使制造商获得关于电阻设计及其行为的大量

宝贵数据。这些热模式能够说明制造相关问题。

例如，图 10 所示为一个未上电的 AC/DC 转换器上的 $400\ \Omega$ 电阻，使用的是标准镜头。图 11 所示为同一元件，使用的是 25 微米微距镜头。如您所见，即使没有上电，微距图像也能够提供关于电阻的更多细节信息。接下来，我们为转换器上电并对其进行扫描，首先使用标准镜头(图 12)，然后再使用微距镜头(图 13)。用标准镜头捕获的图像没有显示出明显的问题。然而，利用 25 微米微距镜头将拥有更多的细节，显示电阻右侧比左侧的电流小得多。这就提供了进一步调查的空间。要么是电阻一侧的电流太大，要么是另一侧的电流太小。温度测量对于计算预期寿命至关重要。电阻的热模式可以详细到足以发现热斑。此类热斑极可能超出了元器件的规定工作温度范围，会加大材料中的应力，导致过早发生故障。利用热像图获得的信息，工程师就能够更改设计或制造过程，缓解引起热斑的应力点。

案例分析：热成像在验证阶段的应用

某个传感器公司有一块 PCA，设计用于为其传感器提供高水平的数据处理。在验证阶段，利用热像仪检查 PCA，注意到某个小元件上存在一个热斑。进一步调查发现该热斑位于某个器件上，温度大约为 85 °C (图 14)。除了安装有散热器的电源器件和处理器器件，电路板上其他元器件均为大约 65 °C 或更低。

由于该元件为一片电源控制器芯片，较大的电流全部通过外部元件，所以该芯片根本就不应该有非常大的功耗。所以就有必要调查一下是什么原因造成了功耗本应较低的部件中存在如此高的功耗。

由于 85 °C 的封装温度是在大约 23 °C 环境温度下测得的，那么环境温度为 60 °C 时，该部

件将预计达到 122 °C。这将非常接近该器件的规定最大结温 125 °C。

所以设计团队就申请查询了使用的全部测试参数。得到这些信息后，他们请求在 12 V 下重复进行测试。现在器件的温度不再特别高，测得为 42 °C。此时电路板上最高温度也低于 60 °C，要合理得多。遗憾的是，最终产品不能使用 12 V 工作，因为系统使用 24 V 电源。

在确定问题之后，考虑了各种方案来解决这一问题。由于时间、资源、成本及运营等综合原因，排除了重新设计电路板的可能——重新设计和更换元器件都需要成本。另外也没有可替代“罪魁祸首”的合适方案。主要的决策因素是，建模清晰表明仅凭重新设计难以实现较低的温度。

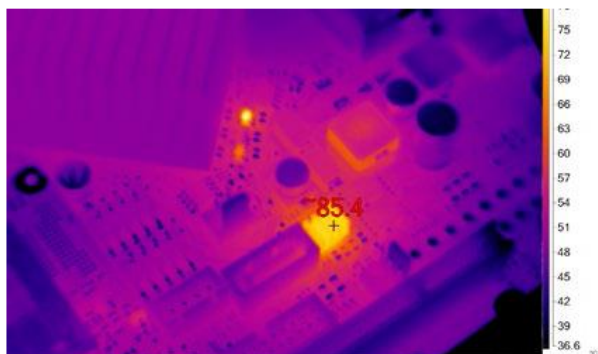


图 14. 上电的控制器芯片，大约为 85 °C

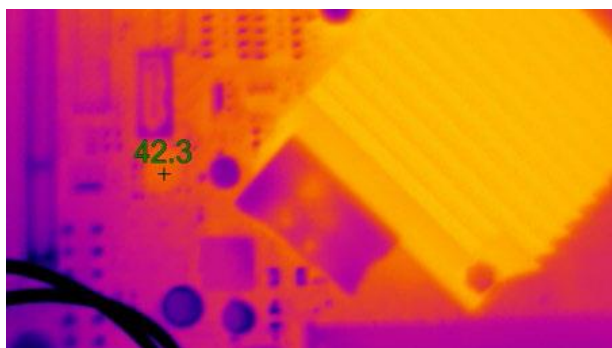


图 15. PCA，使用 12V 电源工作



图 16. 无散热器



图 17. 带散热器

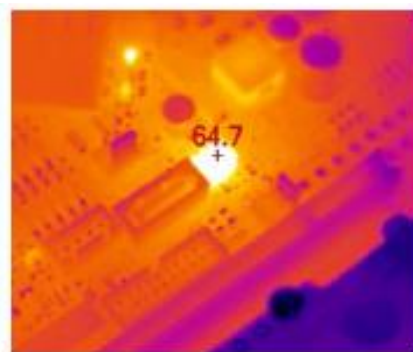


图 18. 使用散热器时的工作状况

另一个主要的解决方案是考虑 PCA 的热管理。由于仅涉及到一片器件，所以决定安装一个散热器。

增加的散热器提高了冷却效果，使封装拥有较低的温度。

总结

以上两个案例说明了热成像技术在电子电路热管理方面的应用。在两个案例中，如果使用接触式温度测量，将非常繁琐且非常消耗时间。此外，在电阻中电流不平衡的案例中，小尺寸意味着很难发现这种情况。在第二个案例中，如果探头接触到小尺寸的 IC，可能正好起到了冷却效果，所以很容易造成测得的温度略低。较低的温度值可能会造成忽略这一问题。

随着元器件的尺寸越来越小、性能越来越高，电子器件和电路的热管理变得越来越有用、越来越重要。热成像技术是帮助用户进行设计、验证及故障诊断的理想工具。

Sat Sandhu 是福禄克公司的热成像技术服务经理，负责欧洲、中东、非洲(EMEA)和亚太地区。**Sandhu** 在电子设计和热成像领域拥有超过 36 年的丰富经验。

福禄克，助您与世界同步！®

Fluke Corporation
PO Box 9090, Everett, WA 98206 U.S.A.

Fluke Europe B.V.
PO Box 1186, 5602 BD
Eindhoven, The Netherlands

更多信息请致电：
In the U.S.A.(800) 443-5853 or
Fax (425) 446-5116
In Europe/M-East/Africa +31 (0) 40 2675 200 or
Fax +31 (0) 40 2675 222
In Canada (800)-36-FLUKE or
Fax (905) 890-6866
From other countries +1 (425) 446-5500 or
Fax +1 (425) 446-5116
Web access: <http://www.fluke.com>

©2017 Fluke Corporation.
技术指标如有更改，恕不另行通知。
美国印刷。2/2017 6008947a-en

未经福禄克书面许可，严禁篡改本文内容。