

用于感测能量密度的、新型超薄器件

作者: P. THERY, F. RAUCOULES CAPTEC Enterprise
J. M LALANNE..... Le Channel, LLC

摘要

常规的热通量（也称热流密度，简称热流）板是无源的温度差传感器。当它们的一边被暴露在热流上时，它们的填充材料担当热阻。嵌入的热电偶测量的电动势比例于在板两测的温度差，且依次比例于热流，只要在测量判读中没有其它的热现象被涉及和全部的误差源被考虑。

常规的热流传感器已被在各工业领域使用近50年，包括农业和农业气象学。它们仍然存在显著的缺点。这种器件的灵敏度依赖于能量的转移方式：传导、对流或辐射。代表性的，如果常规的传感器是被安装在支架上或支架中，它们测量的是热流中的对流部分。校准应须参照当地的参考标准，以便适合各自的使用条件。

在农业学中，当测量通过土壤中的热流时，常规热流传感器的表面会有不利因素。因为土壤的热特性取决于水的吸收和蒸发，所以传感器的热流读数是相当的一致。此外，传感器自身的顶部积水会影响测量精度，所以常规的热流传感器非常的不适宜测量土壤中的热流密度。

新的专利（EU patent: PCT/FR02/04033）技术，是可以不依赖于任何温度的测量，且直接测量裸露物质的能量密度：传导、对流或辐射。它已经被验证，由暴露在热流一面的高导热材料和另一面的绝热材料构成的一对电极产生的电压比例于其两面的能量密度差。由于没有涉及温度测量，因此不需要等待通过物质的温度梯度的稳定过程。

由于排除了传感器中必须的热阻抗，这个技术允许设计的传感器不受热流测量所有可预见干扰。因此，我们能使用基于这个技术的、且区别于热传感器家族的、名为“超薄的传感器”作为热通量传感器。

上述是在评论超薄传感器在农艺学、特别是在测量土壤中的热通量应用之前，简要地描述了常规热流传感器和超薄热流传感器的主要差别。

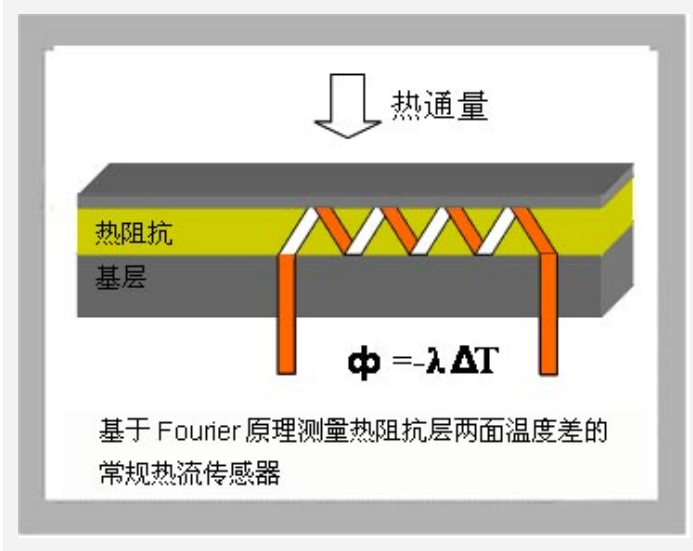
1. 常规热通量传感器

大多数的热流传感器是基于热阻抗层原理的无源器件。常规热流传感器的典型结构是由附在热接收器（金属基层）上的热阻抗材料层组成。当与基层相对的另一面被与之垂直的热流中照射时，热阻抗层将吸收部分能量且发展为温度梯度。这个温度差可能非常的小，但是能由热电元件——实质上是串联的热电偶——探测到。每个热电偶获得非常小的信号，但是当串联在一起的众多的热电偶的累计信号将足够的大，可以产生可用的读数。

常规的热流传感器必须是敏感于、且被关联到巨大的热质量的微小温度差，它们是被处在多种误差源的照射中。这些误差源之一是依赖于温度的阻抗材料的热传导性，热电偶需在特定的温度段才有良好的线性且需要仅在一个方向具有稳定的热流量。常规热流传感器的长的响应时间，典型的测量需要几秒，有时是分钟，且需要在稳态热流期间。上述阐明了常规热流传感器的主要缺点。

常规热流传感器被用于众多的领域，包括：墙壁保温和空气调节控制过程，化学工业的化学反应和状态改变，纺织品隔热，霜冻探测和混凝土凝固，以及农业中的土壤中的热流。尽管这些传感器已存在数十年，但它们的缺点和需要在各自使用条件下的单独校准限制了它们的应用和进一步的发展。

图 1：常规热流传感器



2. 直接响应热流密度的器件

超薄热流传感器是由位于中间的低导热材料金属薄片和被涂覆在其两面的高导热材料沉积层构成的器件（见图 2）。涂覆材料的一面被能量照射，而另一面的背面覆盖有热屏障。照射的能量流量差引起一个电势能，它能容易地产生微小的电流。这个电流比例于能量流量。

在没有滤波器或其它的热屏障时，超薄传感器是响应其被照射的全部的热流。事实上，它是测量出现在其内部的热流（密度）平衡的传感器。

零读数表示了传感器两面的入射和溢出的能量传输是相等的。这个器件的灵敏度，用于获得在 W/m^2 的净热流读数，其特点是不依赖于传感器的温度和能量传送方式。

这些器件无需安装平面或热接收器。它们能安装在表面或环绕覆盖在管道上，或侵入在液体中，或简单地悬挂在空气中。当被安装在表面时，它们与常规的传感器相比，是不敏感于空气缝隙的。

由于它们不需要稳定的温度梯度，超薄热流传感器的响应时间是非常的快速，其典型值是 25 ms。因此，它们能被用于不稳定热流或探测如突发的辐射热流。

因为往往能量损失的增加，导致热流的升高，常规热流传感器的灵敏度将降低。这是因为它们的线性与温度有着密切的关系，这也就是为什么温度是校准规程中的重要标准。因为超薄传感器不是基于温度测量和在热阻抗层没有能量的积累，故它们能提供非常高的线性，且它们的分辨率可以保证在数千 kW/m^2 的量程内不被改变。

校准：超薄传感器使用和常规传感器相同的规程，也就是使用一个已知能量的标准热流垂直照射于传感器的一面，且有计划地消除周围环境的其它任何互相影响。即便其另一面不关联于它的使用条件，超薄传感器仍将提供适合于其它任意能量传输方式或在不同条件下（如温度）的正确读数。

3. 应用于农业气象和土壤热流

在农业气象学中为了优化作物灌溉、特别是缺水区域，测量土壤中的热流是非常重要的。在描述表面温度、露的形成或结霜条件、以及土壤热平衡的重要部分：热存储等的产生方式中，正确地土壤热流测量是非常重要的。

测量土壤中的热流是非常困难的任务。生来，土壤就是多相的、非均匀介质，具有随时间和水含量变化的属性。潮湿的土壤，其变化的热属性构成了复合问题的特性和热流测量困难的原因。另外的难点是来自传感器和土壤之间的空气或水的缝隙，以及来自制造商提供的和在土壤中那些确定的校准系数的差异。

超薄热流传感器在测量土壤热流时，呈现的几个关键优势超过常规热流传感器。

由于超薄传感器测量传导、或对流、或传导与对流的组合热流迁移时具有相同的精度。因此，超薄传感器被埋入地

图 2：超薄热流传感器

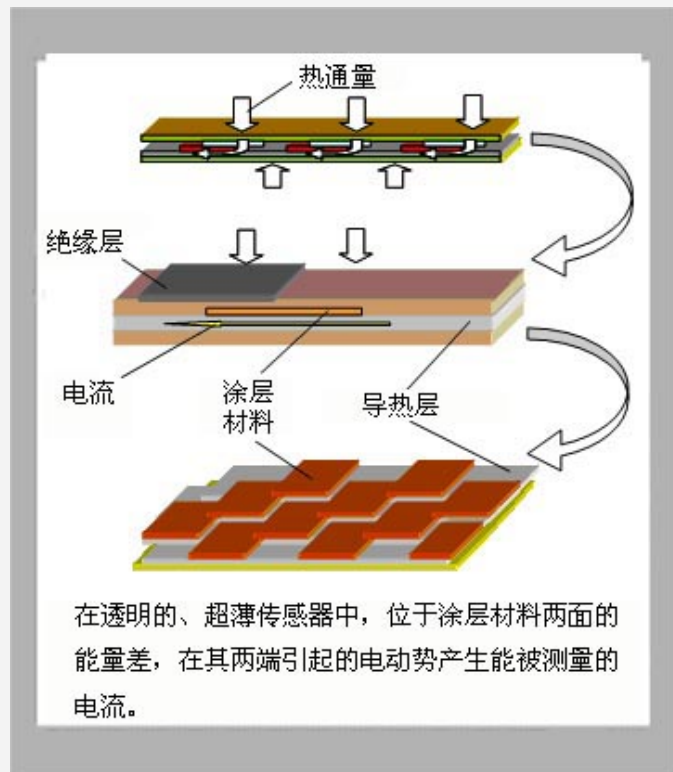
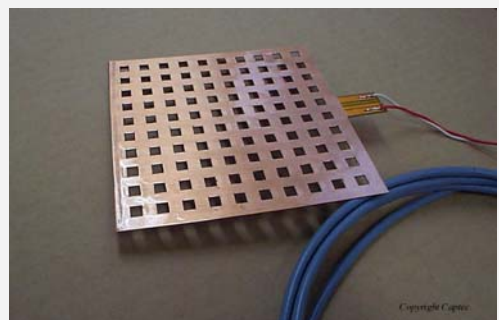


图 3：超薄土壤热流传感器



下测量通过土壤的热流时，无论传导、对流能量迁移的各自百分率，均能提供相同的读数。所以，超薄传感器的精确性不依赖于其与土壤间被压紧接触的紧密程度。

当被埋入土壤中，超薄传感器不受其环境时常变化的影响，特别是由潮湿引起的土壤热导率的变化影响。超薄传感器保持仅响应其被照射的能量流量的变化。这个关键性的优点超过常规的传感器，更加适合于宽范围变化的土壤热导率的热流测量。

存在的另一个问题是传感器自身顶部水的吸附。它实际上是改变了热流传感器的被照射程度，甚至使热流越过埋在土壤中的传感器。为了减轻上述传感器顶部的水积聚风险，特殊设计的超薄传感器增加了适合于土壤特性的方孔（见图 3）。在常规传感器上增加这种方孔将极大地影响其精度，这是因为将给传感器的分辨率带来巨大的偏差。

4. 应用于城市气候学中的能量平衡

日本的 Urban Climate Group of CREST（Core Research for Evolution Science and Technology）在几个月之前开始了城市气候中能量和水平衡的详细分析，包括一个单独的植被绿洲作用的实验¹。这个项目是使用了一个 1/5 比例的室外城市模型。

为了准确地测定能量平衡，他们已经进行了一系列的单位面积上全部平面的导热热流测量，使用了非常薄的、单面常规传感器和超薄传感器。两种器件均被小心地涂上一层相同的材料以防止干扰。

初步观测，在相同的时间没有给出零读数。更进一步的观测显示零读数发生在黎明时相同的瞬间，但在有扬尘、特别是在阳光充足的白天以后存在重大的差距。

在阳光充足的白天以后的扬尘，在这个期间热被积累在地面中（在这个项目中实际上是混凝土快），在两种材料（混凝土和空气）的接触表面测量的热流能量值存在着重大的差异。黎明，在夜晚地面冷却下降后，能量值的差异将大大地被减小。

依据原理，超薄传感器测量照射在其上的、全部流向和全部迁移方式的热流。但是常规传感器，即便是非常薄的，是仍然依赖于测量越过其热阻层的温度。这是当传感器位于两种材料的表面，且被综合的能量照射时呈现较大能量差异的原因。

这个能量值的较大的差别，更加体现了超薄传感器的优势。

5. 结论

由于常规传感器所具有源自其热阻层的温度测量的缺点，超薄传感器是主要的可替换选择之一。

由于它们不属于热传感器家族，当使用时需要关注的是相关的校准过程的品质和使用实际测量给出的读数的变化条件，也就是说在其被照射表面的全部能量流量的平衡。

由于灵敏度不依赖于能量的迁移方式和温度，由于线性持续从 W/m^2 的分数直至几千 kW/m^2 的流量和响应时间允许不稳定流量的测量，基于这个新技术的热流传感器的应用范围实际上是非常的巨大。

让我们推荐一些应该测量但至今还没有使用的應用。

图 4：巨大的超薄热流传感器
（厚度：0.4 mm）



¹ 关于这个项目的更多的信息，请访问：<http://www.indiana.edu/~iauc/IAUC0006.pdf>.