



## 技术说明

### 浅析红外热像仪的精度与不确定性概念

当你无法清楚了解测量仪器所导出测量数据的敏感性级别和精度，便很难相信这些数据，而红外热像仪常常会被归到这一测量仪器的类别之中。而且，在讨论红外热像仪的测量精度时，常常会用到一些令人困惑不已、产生误解的复杂术语和行话。最终使一些研究人员完全对这些工具绕行走。不过也因此，他们会与其在研发热测量应用所具有的潜在优势失之交臂。在下面的讨论中，我们会避免使用技术术语，以直白的语言阐述红外热像仪在测温上的不确定性，让你对此有基本的了解，从而帮助你理解红外热像仪标定流程和精度。

#### 热像仪精度规格与不确定性方程式

你可能会注意到，大多数红外热像仪的数据规格手册上的精度规格会显示为 $\pm 2^\circ\text{C}$ 或读数的2%。这一规格数据是基于广泛采用的名为“平方和根值”(RSS)不确定性分析技术结果。它的概念是一个计算温度测量公式每个变量的局部误差值，取每个误差项的平方，然后将其全部相加，最后取其平方根值。虽然这个公式听起来复杂，但其实很简单。从另一方面来讲，局部误差值的确定可能会很难。

“局部误差”来自于典型红外热像仪温度测量公式中多个变量中的一个，包括：

- 发射率
- 反射的环境温度
- 透过率大气温度

- 热像仪的响应值
- 校准器(黑体)的温度精度

一旦确定上述各个值的“局部误差”响应值，那么整个误差公式就是：  
总误差 =  $\sqrt{\Delta T1^2 + \Delta T2^2 + \Delta T3^2}$  ... 以此类推  
其中， $\Delta T1$ 、 $\Delta T2$ 、 $\Delta T3$ ...是测温公式中变量的局部误差值。

那为何公式是这样的？事实证明，随机的误差值有时是在同一个方向上相加，使你离正确值的偏差越来越远；有时，误差值又是在相反方向上相加，相互抵消。所以，采用“平方和根植”是计算总误差值最适合的方法，并一直作为FLIR红外热像仪数据规格表上的显示数据。



图1 - 位于美国佛罗里达州尼斯维尔的FLIR温度记录校准实验室

这里需要说明的是，目前所讨论的计算值有效的条件是只有当热像仪用于实验室或户外短距离范围(20米以内)。由于大气吸收因素，还有影响程度较小的发射率因素，距离变长会增加测量值的不确定性。当红外热像仪的研发工程师在实验室条件下对大部分现代的红热像仪系统采用“平方和根值”的分析方法时，所得结果近似为 $\pm 2^\circ\text{C}$ 或2% — 因此成为热像仪规格参数中使用的合理精度率。但是，实践表明，诸如FLIR X6900sc的高性能的热像仪比FLIR E40的经济型热像仪的精度效果要好，因此，我们仍需要做些工作来更好地解释这一观察结果。

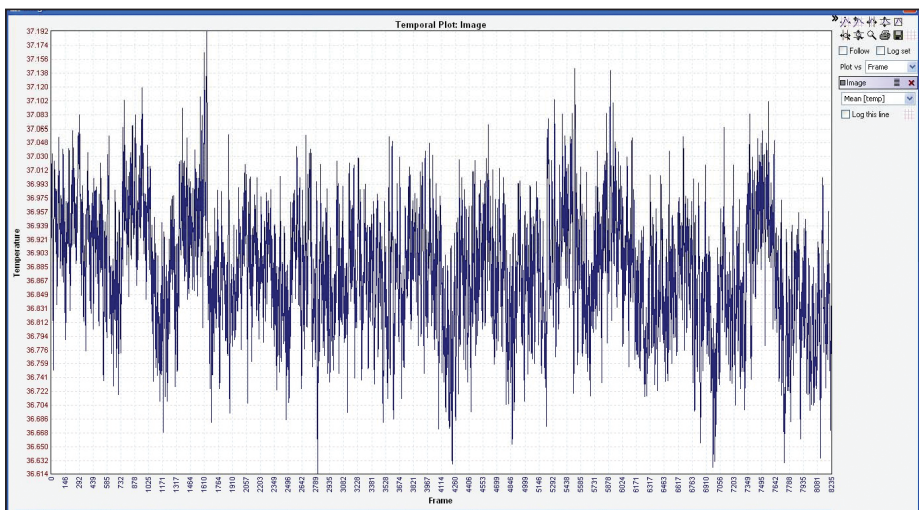


图2 - 观测37 °C黑体时典型FLIR A325sc红外热像仪的响应值。

### 实验室测量值和±1 °C或1%精度

在本节内容中，我们会发现在观察已知发射率和温度的物体时，热像仪实际产生的温度测量值。此类物体一般指代为“黑体”。在引用已知发射率和温度的物体的理论概念前，你可能听说过这个术语。黑体的这一概念也用来指代一些实验室设备。图1显示的是FLIR校准实验室里1/4圈的21个以上腔式黑体。

实验室测量值的不确定性包括将校准热像仪指向校准的黑体，并画出随时间变化的温度变化。虽然经过仔细的校准，但在测量中总会出现一些随机误差。所产生的数据集可以对精度和精确性进行量化。请参见图2的校准黑体测量值结果。

图2的图形显示的是FLIR A325sc红外热像仪在室内距离0.3米观测37 °C黑体的2小时以上的数据结果。

热像仪每秒记录一次温度。数据图形是图像中所有像素的平均值。数据直方图虽然显示得更清楚，但大部分的数据点都位于36.8 °C至37 °C之间。记录的最宽温度范围是从36.6 °C至37.2 °C。

我们来看下这个数据，所有像素平均值的预期精度可能达到0.5 °C。有些人可能甚至会声称FLIR A325sc等使用相同探测器的其他热像仪的精度为±1 °C。不过，也有些人可能会辩称，上面图形显示的是所有像素的平均值，可能并不能代表个别的像素。

了解所有像素彼此有多一致的一种方法为观察标准差和时间。如图3所示。该图形显示出其典型的标准差小于0.1 °C。突破到0.2 °C左右的偶然情况也是因为热像仪进行了单点校准。单点校准是自校准流程中的一种类型，是所有采用微测辐射热计的红外热像仪都必须定期执行的流程。

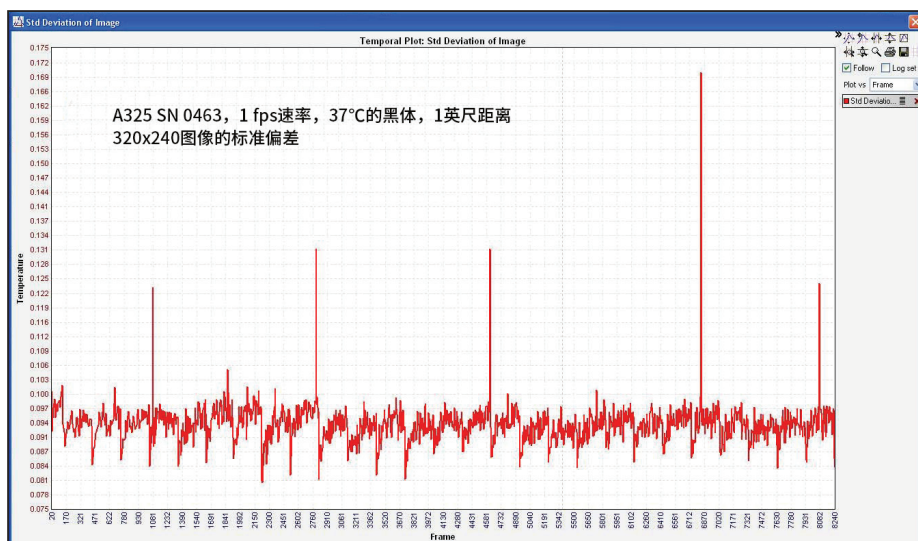


图3 - 观测37 °C黑体时典型FLIR A325sc红外热像仪的标准差。

到目前为止，我们讨论的都是非制冷型微测辐射热计红外热像仪采集的数据。那么高性能量子探测器红外热像仪的结果会有何不同？

图4显示的是典型3-5 μm带锑化铟 (InSb)探测器的红外热像仪，比如FLIR X6900sc。该热像仪的规格文档中标明，该测试精度为±2 °C或2%。在下图中，你会发现数据在这些规格范围内：该天的精度读数约0.3 °C，精确性读数约0.1 °C。但为什么偏移误差是在0.3 °C？这可能是因为在黑体的校准、热像仪的校准或第2节中提到的局部误差术语造成的。另一种可能是热像仪只在测量开始的时候进行了简单的暖机。如果光学镜头或机身的内部没有产生温度变化，那么可能会抵消温度测量值。

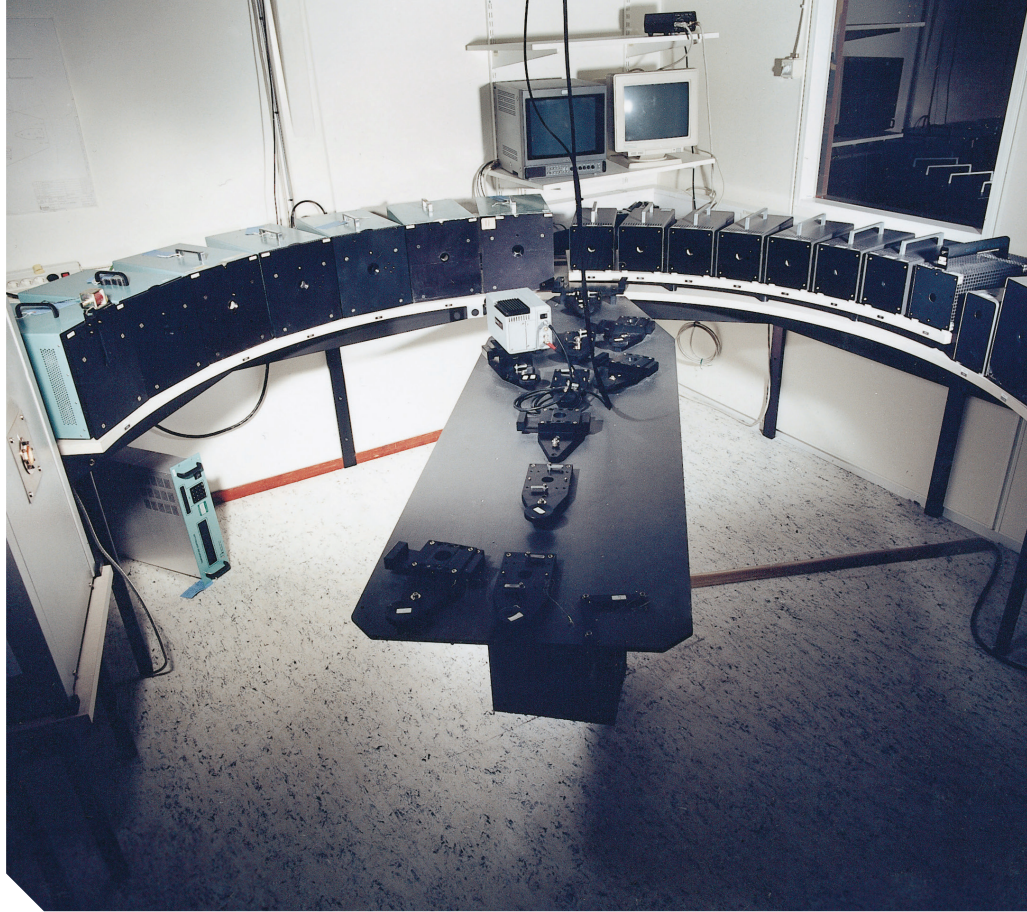
我们从这两个校准测试中可以得出这样的结论，微测辐射热计红外热像仪和光子计数量子探测器红外热像仪可能经过出厂校准，在典型的室内环境下，观测已知发射率的37 °C物体时的精度小于1 °C。

### 环境温度补偿

出厂校准的一个最关键步骤是环境温度补偿。无论是热探测器红外热像仪还是量子探测器红外热像仪，都会对落在探测器上的总红外能量做出响应。如果热像仪的设计精良，大部分能量都来自于物体：极少是来自热像仪本身。但是，不可能完全消除探测器和光程周围材料的影响。没有适当的补偿，机身或镜头的任何温度变化都可能明显改变热像仪提供的温度读数。

实现环境温度补偿最好的方法是从最多3个不同位置测量热像仪和光程的温度。然后将测量数据并入校准公式中。这样可以确保整个工作温度范围的准确读数(一般为-15 °C至50 °C)。这对将用于室外的热像仪来说尤为重要，否则的话便会受到温度波动的影响。和环境温度补偿一样重要的是，在进行关键测温前要对热像仪进行完全的预热。同时，也要确保热像仪和镜头没有直接曝露于光照或其他热源下。改变热像仪和光学镜头的温度会对测量的不确定性产生不利影响。

我们应该注意到，并非所有的热像仪制造商在他们的校准过程中都会进行环境温度补偿。如果对环境温度偏移补偿做的不好，这些热像仪的数据可能出现明显的错误——偏差可能在10 °C



FLIR Systems的校准室。

以上。因此，在购买红外热像仪前，一定要询问其有无进行过校准，以及如何执行的校准。

### 其他测量值考量因素

无论与热像仪的校准有无直接的相关性，某些考量因素，如发射率和距离系数比都可能影响热像仪的精度。发射率设置错误或测试条件不合适会影响热像仪能否正确测量物体。

发射率——或者说是物体发射而非反射红外能量的能力——必须占比合理。这意味着要花时间确定物体的发射率以及将此信息输入热像仪。也意味着要注意物体是否完全反射，并在进行测量前是否要采取解决措施(如使用不反射涂层涂抹物体表面)。所有的FLIR红外热像仪都提供了合适发射率的定义方法。如果你出错了，FLIR研发软件能够帮助你在分析过程中(实时查看或后期分析)更改发射率。更改可以在整个图像上进行，也可以按区域更改。

另一个要考量的因素是距离系数比或覆盖目标对象的每一个像素的区域大小。比方说，使用25°默认镜头的FLIR A325sc测量60英尺外点亮的火柴。每一个像素占总场景的1平方英寸面积。但火柴头只有1/8平方英寸，远小于它所覆盖的像素。几乎像素中所有明显的红外能量实际上都来自火柴灰烬背后的区域。只有1/64是我们测量的灰

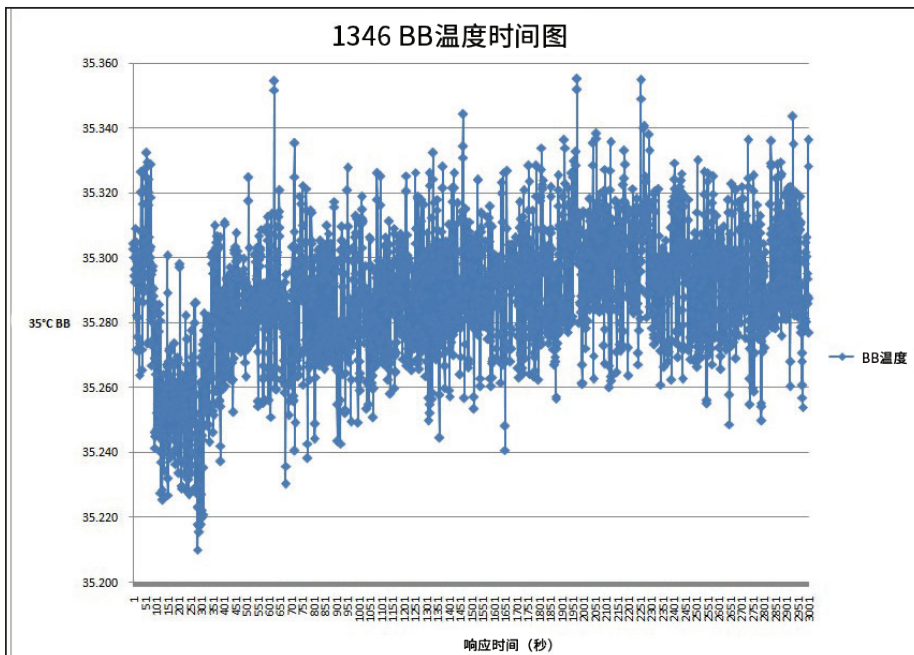


图4 - 观测35 °C黑体时典型碲化铟红外热像仪的响应值。



烬部分。如果背景是室内温度的话，热像仪报告的温度值可能会低于灰烬的温度值。

解决办法是在热像仪上装一个望远镜或是将它向目标物移近。可能使灰烬的距离系数比接近1:1比例。如果我们想要获得最近似的绝对温度精度，必须确保最小的测量物体区域完全占据10x10以上的像素。不过，即使考虑了单个像素或3x3像素网格的距离系数比，你也可能已经很靠近真实的测量值。

### 结论

如我们所见，“平方和根值”的不确定性分析方法可以确定红外热像仪的精度，使这些热像仪最多有2°C的边际误差。通过适当的校准和注意环境温度、发射率、距离系数比等因素，边际误差可能小于1°C。

最后要注意的一点是：本文中提供的信息主要基于出厂校准的红外热像仪。但用户可以进行物理性的校准，根据所讨论系统的不同，用户校准所需的工具和方法也可能各异。此外，如果能够进行一次良好的用户校准，

那么您便可以进行自定义的不确定性分析。



高速FLIR X690sc红外热像仪(左图)与入门级FLIR A325sc红外热像仪(右图)的精度都是 $\pm 2^\circ\text{C}$ 或2%。

如需了解有关热像仪或此应用的更多信息，  
敬请访问：

[www.flir.com/research](http://www.flir.com/research)

显示图像可能并不代表热像仪的实际分辨率。图像仅供说明之用。  
创建日期：2016年9月