

双色测温仪精度解析

编译：北京宇冠世纪科技有限公司

讹传：因为双色测温仪与被测材料的发射率无关，所以测温精度更高

真相：双色测温仪在一些应用中与发射率无关，但需要确保一重要条件，那就是：测试过程中发射率的比值必须始终保持恒定。一般而言，双色测温精度并不高。

事实上，当缺失了发射率恒定这一重要条件情况下，双色测温仪测温精度远低于同一响应波段或者临近波段的单色测温仪。

双色测温仪有限应用于光路受阻或发射率比值恒定的场合。

每个双色测温仪都有两个单一波长或者单“色”通道。其辐射亮度表示为：

$$(1) \quad I_{\lambda 1} = \varepsilon_{\lambda 1} L_{\lambda 1}$$

$$(2) \quad I_{\lambda 2} = \varepsilon_{\lambda 2} L_{\lambda 2}$$

式中：

$I_{\lambda 1}$ ，通道 1 的目标的辐射亮度（与温度非线性化关系）

$\varepsilon_{\lambda 1}$ ，通道 1 下目标的发射率

$L_{\lambda 1}$ ，与通道 1 相同温度下的黑体的辐射亮度

$I_{\lambda 2}$ ，通道 2 的目标的辐射亮度（与温度非线性化关系）

$\varepsilon_{\lambda 2}$ ，通道 2 下目标的发射率

$L_{\lambda 2}$ ，与通道 2 相同温度下的黑体的辐射亮度

双色测温仪中的“比值”表征是两个信号的比值，如果 $\varepsilon_{\lambda 1} = \varepsilon_{\lambda 2}$ ，发射率项可以消掉；如果 $\varepsilon_{\lambda 1} \neq \varepsilon_{\lambda 2}$ 就必须调整双色测温仪的坡度（slope）值。Slope = $\varepsilon_{\lambda 1} / \varepsilon_{\lambda 2}$ （有些测温仪上为两者比值的倒数）

为便于理解双色测温仪的精度有必要核实每个独立通道（单一颜色）的不确定度（精度）。

单色测温仪（或双色测温仪的单一通道）

单色测温仪从被测目标接收的红外辐射

$$(3) \quad I_{\lambda 1} = \varepsilon_{\lambda 1} L_{\lambda 1}$$

式中：

$I_{\lambda 1}$ ，目标的辐射亮度

$\varepsilon_{\lambda 1}$ ，目标的发射率

$L_{\lambda 1}$ ，相同温度，相同波长下的黑体的辐射亮度

如果目标是一个发射率为 1 的黑体，等式变为：

$$(4) \quad I_{\lambda 1} = L_{\lambda 1}$$

NIST 使用自己的黑体对 665nm 的光电高温计进行校检时通常不确定度如下（实际检测结果的好坏取决于待检测温仪）

表一

温度（°C）	不确定度°C（k=2）	温度（°F）	不确定度°F（k=2）
800	0.5	1472	0.9

1100	0.7	2012	1.3
1500	0.9	2732	1.6
1900	1.1	3452	2.0
2700	3.0	4892	5.4

注：k = 2，表示的是置信率为 95%，如图示的绿色数字表示 800℃这一温度点使用当前测温仪测量 100 次，其中有 95 次的概率测试误差会优于或等于 ±0.5℃。

示例 1，您送检一个相同波长的红外测温仪到 NIST，然后收到了一个类似上述的检测报告。那么在 NIST 黑体炉所产生 800℃这个温度点上，相较于 NIST 同一波长的光电高温计，您的高温计可能会有 95%的概率显示 800 - 0.5℃ 到 800 + 0.5℃（或者 1472 - 0.9°F 到 1472 + 0.9°F）区间的任一数值。

现在，假设您有两台与上述送检的仪器完全相同的测温仪刚好要送到 NIST 仪进行检定，那么在 800℃这一点 1#测温仪可能的读数为 800 - 0.5℃，2#测温仪可能的读数为 800 + 0.5℃，显然它们都在不确定度或精度之内。800℃这一点上两台测温仪瞄准同一黑体时测量误差头天可能是 0，第二天极有可能是 1℃。当然这是一种极端情形的假设。截止目前我们仍未讨论不同黑体（目标）和不同发射率对测试误差的影响。

发射率的灵敏度对不同工作波长的单色测温仪测试精度的影响

在我们考虑双色测温精度之前有必要先理解发射率灵敏度对单色测温仪测温结果的影响。到目前为止，我们仍然没有把发射率当作不确定度的来源进行讨论。本节将讨论这一重要问题。请注意，我们在前面提到了目标是 NIST 的黑体，这是因为用于校准的黑体必须测试校准不确定度，以避免任何发射率对误差的贡献。

下表给出了发射率偏离 1%（如黑体的实际发射率为 0.98，却设置为 0.99）的情况下，不同波长的单色测温仪在给定温度下的测量误差。

表二

温度(℃)	0.65μm	0.9μm	0.95μm	1.3μm	3.9μm
800	-0.5	-0.8	-0.8	-1.1	-3.0
1100	-0.9	-1.2	-1.3	-1.8	-4.7
1500	-1.5	-2.0	-2.2	-2.8	-7.4
1900	-2.2	-3.0	-3.3	-4.2	-10.4
2700	-4.1	-5.6	-6.1	-7.5	-16.9

温度(°F)	0.65μm	0.9μm	0.95μm	1.3μm	3.9μm
1472	-0.9	-1.4	-1.4	-2.0	-5.4
2012	-1.6	-2.2	-2.3	-3.2	-8.4
2732	-2.7	-3.6	-4.0	-5.0	-13.3
3452	-4.0	-5.4	-5.9	-7.6	-18.7
4892	-7.4	-10.1	-11	-13.5	-30.4

从表中可以清晰地看到，波长越短，发射率对单色测温仪的测试结果影响越小。同样也可以看到，即便发射率只有 1%的偏差仍然会引起较大的测量误差。有效波长 0.9μm 的红外测温仪测量 1500℃的黑体或者其它目标，在已知发射率偏差 1%的范围内，单独贡献的误差会达到 ±2℃（3.6°F）

不仅仅是发射率的不确定性，光路的传输有着同样的影响。

示例 2 测温仪的保护窗口上沉积有大量的灰尘和水汽导致透过率降低 1%，会产生与上表同样的误差。

测温仪接收到到的信号可用等式表示：

$$(5) \quad I_{\lambda_1} = t_{\lambda_1} \epsilon_{\lambda_1} L_{\lambda_1}$$

式中：

t_{λ_1} = 工作波长的透过率（这个参数在实验室标定时通常为 1）

目标的发射率仅降低 1%，窗口的透射率降低 1%，对与 1500℃ 的测试目标将会产生 -4℃（-7.2°F）的测量误差。

双色测温仪

我们了解了因计量、发射率、光路的透射率因素的影响而造成的单色测温仪测量的不确定度，现在我们尝试考虑这些因素对双色测温仪的影响。

坡度(发射率比值)灵敏度对双色测温仪测温精度的影响

如前述所言，当两个通道的发射率相等时，发射率项可以消掉。遗憾的是，双色测温仪必须为消掉发射率项付出代价，这个代价就是坡度灵敏度的影响。坡度灵敏度对双色测温的误差影响为其单色测温误差的 10 倍。两个单色通道测温值偏离 1 度（℃或°F），双色测温会达到 10 度（℃或°F）的偏差。

示例 3

你刚刚在 NIST 检定过 1 台双色测温仪，测温仪的一个通道的波长为 0.9μm，另外一个为 0.95μm。你把测温仪连接好，对准您实验室的黑体，你突然发现了异常误差。从我们上述讨论单色测温仪的误差来源，你清楚地知道当你送回到 NIST，对准黑体，在 1100℃ 这个点，一个通道的读数即便高 0.7℃，另外一个通道即便低 0.7℃，测试数值仍然在报告所列的不确定度之内！这种情况下，两个通道之间的温差达到 1.4℃，而双色测温的坡度灵敏度的误差影响为单色测温误差的 10 倍。出于焦虑，您再次携带刚刚检过的双色测温仪到 NIST 核对数据，你竟然也看到了 14℃ 的偏差。注意，此时任何一个单色通道的测量值仍落在报告所核定的不确定度之内。

当单色测温的误差处于上下偏差的两端时，通过等式 6 计算的双色误差结果如下：

换句话说：1100℃ 这个点通道 1 的测值为 1100.7，通道 2 的测值为 1099.3。这种情况下每个通道的测值仍在报告所核定的不确定度之内，但我们这时再看双色测温仪的不确定度：

所有的误差如下表所示（即便你回到 NIST 重新校准依然如此）

$$(6) \quad 1/T_{new} = 1/T_{old} + \left[\lambda_1 \lambda_2 / 14388 (\lambda_2 - \lambda_1) \right] \ln(\epsilon_{\lambda_2} / \epsilon_{\lambda_1})$$

表三

温度(°C)	U(°C) (单色)	U (双色) (°C)	U (双色) °F	坡度值
800	0.5	11.2	20.2	0.987
1100	0.7	15.8	28.4	0.989
1500	0.9	20.1	36.2	0.991
1900	1.1	24.6	44.3	0.993
2700	3.0	66.4	119.5	0.990

注：U（Uncertainty,k=2）

表中显示 1100℃ 的测温误差达到 15.8℃，注意此时我们还未考虑到自用黑体以及测试过程所带来的额外误差的影响。

现在让我们看下仅由于黑体或者目标发射率导致的误差。让我们假定你的双色测温仪在 NIST 1000℃ 检测结果非常好。你自用黑体发射率或许在 0.9μm 波段为 0.97，0.95μm 处为 0.98.，下表为根据等式（6）所计算出来的由于两个通道发射率不一致所产生的误差，见表四。其中通道 1 的发射率（ ϵ_1 ）= 0.97，通道二的发射率为（ ϵ_2 ）= 0.98

表四

通道一温度 (°C)	通道二温度 (°C)	通道一发射率	通道二发射率	坡度	比色温度 (°C)	误差(°C)
1000	1000	0.970	0.980	0.990	985.2	-14.8

发射率坡度为 0.99，刚校准的双色测温仪显示的读数低-14.8°C.另外本例中我们假设单色测温不存在我们此前讨论的误差（每个通道测试误差均为 0）

到目前位置，我们一直是把黑体作为双色测温仪的目标来讨论发射率的不一致引起的误差。实际应用中，被测目标在每一通道的发射率很难知晓或者测得，此外目标的发射率还可能随着时间和温度发生变化。

示例 4

假如您正在监视一种金属的加热过程，通道 1 在起始温度和终止温度的发射率分别为 0.78 和 0.83，通道 2 在起始温度和终止温度的发射率分别为 0.78 和 0.85，你希望将金属从 800°C 加热到 1100°C。在加热的开始阶段，一切都非常完美，发射率坡度为 1.在加热的终止阶段，发射率坡度为 $0.83/0.85=0.976$ ，利用（6）式，可以算出测温仪的读数将比终止温度低 33°C。如果我们用同波段的单色测温仪替代双色，由发射率 0.78 到 0.83 变化引起的误差为+7.8°C。显然在这个应用中，单色测温更为精确。

现在我们把其它可能的因素一起加进来考虑，比如不同生产商测温仪波长的微小差异，比如不同的黑体结构设计等等，如果我们试图在一工艺过程均衡的使用不同品牌的产品时将会在短时间内产生非常大的误差。

总体来说，双色测温仪对与解决目标不能充满市场的问题提供了较好的解决方案，但若是用于精确测温，相对单色测温仪而言，通常情况下精度并不高。