

红 外 测 温

翁 文 泉

(上海激光技术试验站)

自1800年发现红外线以来,到现在已有175年历史了,它的发现,不仅促进了太阳光谱学的研究,而且促进了热学和其他学科的发展,因此红外辐射一开始就受到人们的注意,但这些研究对当时的生产没有产生直接的影响,因此十九世纪前半叶,其发展是比较缓慢的;同时因为红外技术是一门综合技术,需要光学、电子学、精密机械等各种技术的密切配合,特别是其传感元件——红外探测器更依赖于半导体理论、晶体学和工艺的发展。所以红外技术经历了相当长的一段时间才成为一门专门的技术。

目前,红外技术在工业上应用最广泛的可以说是红外测温,其历史最早可追溯到1830年。当时诺毕立(Nobili)做出了第一只热电偶,使探测器有了突破。1833年曼劳尼(Melloni)将几只热电偶串联成热电堆,它的灵敏度比当时最好的温度计提高了四十倍,可测30呎之外的人体。在这以后的一百多年时间里,随着生产上对非接触连续测温的需要,逐步得到发展。实际上,每一种新型红外测温仪的出现都是由生产决定的。例如三十年代红外测温已开始用于冶金工业,但由于各种被测物的比辐射率不一样而造成测量误差,为减少比辐射率误差,于1940年出现了红外比色高温计[德国的阿德库(Ardocol)比色高温仪开始用于轧钢,其探测器是用两只硅光电池,测温范围 800°C — 1200°C]。1955年出现了三色高温仪(测温范围 1130°C — 1830°C)。又如随着微电子工业的发展,为寻求集成电路热耗散的最佳设计,1964年出现了红外显微镜,从而对0.001吋(25.4微米)的试件,实现了温度测量。

红外测温究竟有什么特点呢?

1. 精度高。能分辨 0.01°C 的温差,对常温下的被测物甚至可分辨到 0.002°C 。
2. 测速快。可以在几个毫秒时间内测出目标温度。
3. 不破坏被测温度场。一般温度计,如温差电偶等,均需与被测物体接触,达到热平衡后方可读出温度,这样就破坏了被测物的热分布。而红外测温仪是

非接触测量,不破坏温度场。

4. 可测小面积目标,目前可测量直径小至7.5微米的目标温度。

5. 测量距离可远可近,近者可达厘米,远的,在地面上可达数百米,如将红外测温仪装在人造卫星上,还可以测到千里之外地球表面温度及大气温度的垂直分布。

6. 测温范围广。目前国外产品可以从 -170°C 测到 3200°C 。

红外测温仪的最大特点是可以用来对快速活动的目标进行非接触测温,它已广泛用于冶金、机器制造、电力、橡胶、水泥、石油化工、纺织、塑料、玻璃、造纸、微电子工业的温度检测、温度监视和温度自动控制中。

我国自文化大革命以来,在毛主席的革命路线指引下,广大科技人员走到生产第一线,实现了“工人、干部和科技人员”与“生产单位、使用单位和研制单位”两个三结合,在以工人为主体的群众性的科研活动中,红外测温仪的研制和生产有了迅速的发展,并取得了一批成果,正在工业上推广应用。

譬如,的确凉生产中,热定型温度必须控制在 180°C 。温度过高布要发脆,过低则不挺括,且温度不均匀,色彩也就不匀称,因此温度控制是一个关键问题。上海工厂试用了亮度测温仪后,不仅使生产的自动化程度大大提高,而且提高了产品质量。

又如发电机预热气管的热焊,是利用两根管子相对转动所产生的摩擦热进行焊接的,焊接温度的控制决定了焊接质量。上海锅炉厂采用了红外报警监视焊接温度,从而实现了该车间的全部自动化,并保证了焊接质量。

再如在交通部门,红外测温仪器已成功地用来监测火车轮轴的过热情况,为消灭铁路交通事故做出了积极贡献。根据上海铁路局南翔列检段长期试用结果,这个红外热轴探测仪的误测率小于10%,漏测情况基本消除。

我们相信,随着自动化的发展,对红外测温仪的品种和数量,必将提出更多更高的要求,从而使红外测温

技术进一步普及和提高。

一、红外测温的理论基础 ——热辐射定律

红外测温是基于物体的热辐射。在十九世纪，人们用物理学手段观察红外辐射的各种现象，积累了大量的数据，不但获得了丰富的感性认识，而且产生了认识上的飞跃，总结出了理论。

红外辐射是什么呢？

大家知道，高于绝对零度（-273℃）的任何物体，其分子均处在不停的运动状态，由于分子的振动和转动就产生了红外辐射。红外辐射与可见光、微波、无线电波一样，是一种电磁波。其波长介于可见光与微波之间。一般规定：0.75微米到1000微米波长的电磁波叫红外辐射。

热辐射服从下面所述的几个基本定律。

1. 普朗克辐射定律

单位面积温度为 T 的物体，在 λ 到 $\lambda + d\lambda$ 波长范围内，发射到整个半球空间的功率可用普朗克定律表示：

$$P_i d\lambda = \varepsilon_{(\lambda, T)} f_{(\lambda, T)} d\lambda \quad (1)$$

式中， P_i 称分谱辐射率； $f_{(\lambda, T)} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T} - 1}$ ，称为普朗克函数， c_1, c_2 为常数， $c_1 = 3.741844 \times 10^4$ 瓦微米²/厘米²， $c_2 = 1.438833 \times 10^4$ 微米度(K)； $\varepsilon_{(\lambda, T)}$ 为物体的比辐射率，对于黑体 $\varepsilon = 1$ ，对于灰体 ε 为小于1的常数，对于一般物体， $\varepsilon_{(\lambda, T)}$ 不仅与材料及其表面光洁度有关，而且与材料的温度及所选的波长有关，一般说来，表面光滑的金属材料， $\varepsilon_{(\lambda, T)}$ 随波长的增加而下降，而非金属材料情况不一，各种颜色油漆，在3微米以上都是“黑”的，玻璃在4.8微米以上是不透明的，而在4.8—5.6微米，也是“黑”的。

2. 维恩位移定律

当物体温度升高时，分谱辐射率 P_i 的极大值向短波移动，极大值处的波长 λ_m 与温度 T 的关系由维恩定律来描述：

$$\lambda_m T = 2897.95 \text{ 微米度 (K)} \quad (2)$$

上式是在黑体情况下推得的。

3. 斯忒藩-玻耳兹曼定律

单位面积温度为 T 的物体发射到整个半球空间的功率 W 可用斯忒藩-玻耳兹曼定律来表示：

$$W = \int_0^{\infty} \varepsilon_{(\lambda, T)} f_{(\lambda, T)} d\lambda = \varepsilon_{(T)} \sigma T^4 \quad (3)$$

式中 σ 为斯忒藩-玻耳兹曼常数， $\sigma = 5.669606 \times 10^{-12}$

瓦/厘米²度⁴(K)。

(1)、(2)、(3)式可用图1表示。

上面介绍的三个定律，是红外测温的理论根据。

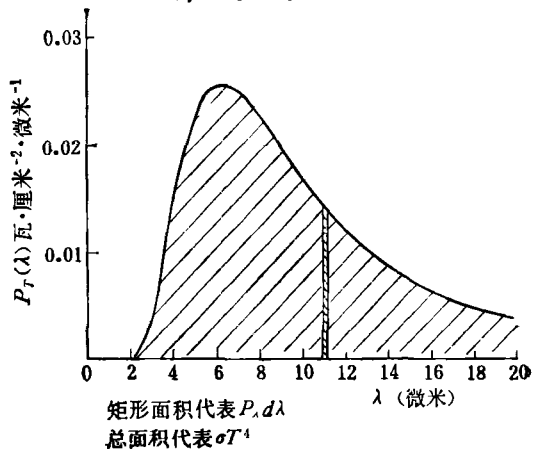
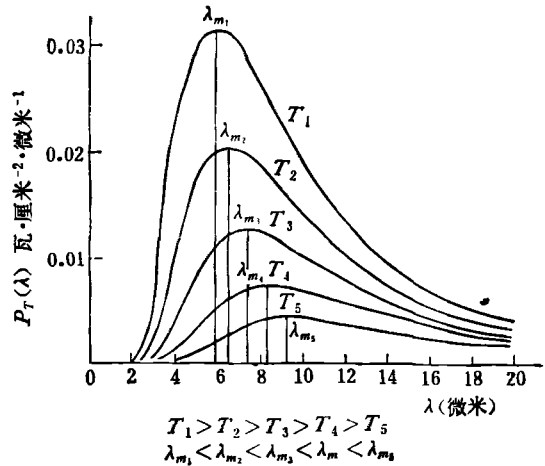


图1 黑体辐射的光谱分布

二、红外测温的基本原理

从上面的三个定律出发，有五种类型的测温仪。

1. 全辐射测温仪

它是通过测量波长从零到无穷大整个光谱范围内的辐射功率来确定温度的，如图2所示。由(3)式可见，物体表面辐射功率，不仅决定于温度，而且决定于物体表面的比辐射率 ε 。而不同物体的表面发射率差异很大，这就很难由测得的功率来单一地决定物体的温度，这要引进多少误差呢？

通常在仪器装好并校正后，要用黑体 ($\varepsilon = 1$) 定标，即得出黑体温度 T_c 与辐射功率 W 的对应关系，它们是：

$$W = \sigma T_c^4 \quad (4)$$

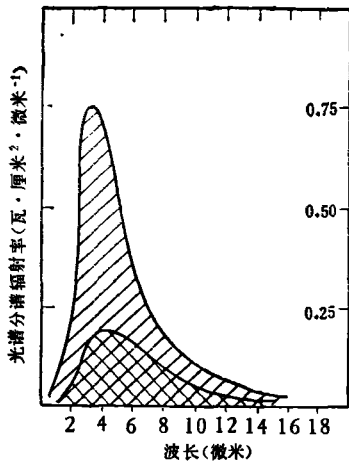


图2 全辐射测温所接收的热辐射

由(3),(4)式可见,仪器在定标和实测时,接收相同功率 W ,而它们的温度却有如下关系:

$$W = \sigma T_c^4 = \epsilon \sigma T^4,$$

即

$$T = \frac{T_c}{\sqrt[4]{\epsilon}} \quad \text{或} \quad T_c = \sqrt[4]{\epsilon} T. \quad (5)$$

譬如,将比辐射率为0.8的铁和比辐射率为0.1的铝,均加热到500℃,而黑体定标的仪器所读出的温度分别为:

$$T_c(\text{铁}) = \sqrt[4]{0.8} \times (500^\circ + 273^\circ) - 273^\circ = 457^\circ\text{C};$$

$$T_c(\text{铝}) = \sqrt[4]{0.1} \times (500^\circ + 273^\circ) - 273^\circ = 162^\circ\text{C}.$$

由此可见,因被测物体的比辐射率 $\epsilon < 1$,故仪器的读出温度,低于物体的真实温度。比辐射率愈小,误差愈大。

2. 单色测温仪(或分谱辐射测温仪)

它是通过测量某一波长范围(λ 到 $\lambda + \Delta\lambda$)内辐射功率来确定温度的,决定于

$$J = \int_{\lambda}^{\lambda+\Delta\lambda} \epsilon_{(\lambda, T)} f_{(\lambda, T)} d\lambda. \quad (6)$$

此值 J 可用图3表示,即为某一温度的光谱分布曲线在波长 λ 到 $\lambda + \Delta\lambda$ 范围内所包围的很窄的矩形面积。

同理可得黑体定标的单色测温仪的读出温度 T_c ,与物体的实际温度 T 之间的关系决定于^[1]:

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_c} = \frac{\lambda \ln \epsilon}{c_2}. \quad (7)$$

由此可见, λ 愈短,由比辐射率引进的误差愈小,所以单色测温仪一般工作于短波区,而根据维恩位移定律,分谱辐射功率极大值,随温度上升而向短波移动,因此欲在短波范围内接收到一定的功率,必须是在高温区,因此这种方法宜用来进行高温测量,且误差较小。

譬如,仪器波长选取为 $\lambda = 0.5$ 微米,测量发射率 ϵ 为0.8,温度为1500℃的铁水,黑体定标的仪器读出温度是多少呢?由(7)式可得

$$T_c = \left[\frac{1}{T} - \frac{\lambda \ln \epsilon}{c_2} \right]^{-1} = \left[\frac{1}{1500 + 273} - \frac{0.5 \times 2.3026 \times \log 0.8}{1.4388 \times 10^{-4}} \right]^{-1} - 273^\circ = 1464^\circ\text{C}.$$

同时,由于辐射能随温度变化的速度在短波处比较大,因此波长选得愈短精度愈高。

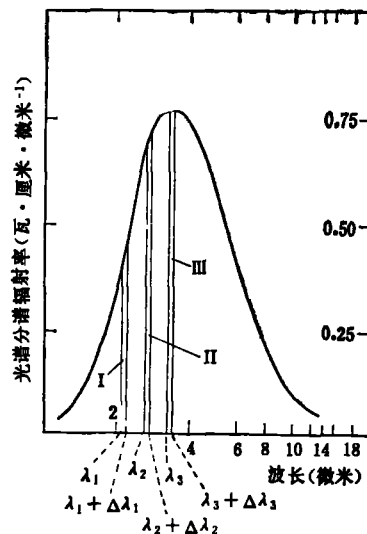


图3 单色、比色和三色法所接收的热辐射

显然,对于高温测量,波长可选取短的,这时单色测温仪优于全辐射测温仪。

上述两种方法的测温误差,均与比辐射率 ϵ 有关。 ϵ 愈小误差愈大。而用比色和三色法可减少比辐射率误差。

3. 比色测温仪

它又叫双波段或分谱辐射比测温仪,是通过测量两个波段(λ_1 到 $\lambda_1 + \Delta\lambda_1$ 和 λ_2 到 $\lambda_2 + \Delta\lambda_2$)的辐射功率的比值来确定温度的。

$$R = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_1+\Delta\lambda_1} \epsilon_{(\lambda, T)} f_{(\lambda, T)} d\lambda}{\int_{\lambda_2}^{\lambda_2+\Delta\lambda_2} \epsilon_{(\lambda, T)} f_{(\lambda, T)} d\lambda}. \quad (8)$$

此即图3中两个矩形面积的比值。

该法的比辐射率误差可推得为^[1]:

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_c} = \frac{\ln \epsilon_{\lambda_1} - \ln \epsilon_{\lambda_2}}{c_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)}. \quad (9)$$

式中 ϵ_{λ_1} 和 ϵ_{λ_2} 分别表示波长为 λ_1 、 λ_2 处的分谱比辐射率。

由此可见,若 $\varepsilon_{\lambda_1} = \varepsilon_{\lambda_2}$, 则 R 与比辐射率 ε 无关, 即对理想的灰体发射率误差接近于零。

若 $\varepsilon_{\lambda_1} < \varepsilon_{\lambda_2}$, 则读出温度低于物体的实际温度, 若 $\varepsilon_{\lambda_1} > \varepsilon_{\lambda_2}$, 则读出温度高于物体的实际温度。

譬如, 两波段分别为 $\lambda_1 = 2.05$, $\lambda_2 = 2.45$ 的双波段测温仪测量 424°C 的抛光铝, 若铝在 λ_1 和 λ_2 处的比辐射分别为 $\varepsilon_{\lambda_1} = 0.088$ 和 $\varepsilon_{\lambda_2} = 0.076$, 则测温仪测得的温度为

$$\begin{aligned} T_c &= \left[\frac{1}{T} - \frac{\ln \varepsilon_{\lambda_1} - \ln \varepsilon_{\lambda_2}}{c_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)} \right]^{-1} - 273^\circ \\ &= \left[\frac{1}{421^\circ + 273^\circ} - \frac{2.3026 \times \log 0.076 - \log 0.088}{1.4388 \times 10^{-4} \left(\frac{1}{2.05} - \frac{1}{2.45} \right)} \right]^{-1} - 273^\circ \\ &= 491^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

对于比色测温, 只要对被测材料作一调查, 选用适当的波段, 使两波段的比辐射率相差不大, 则比辐射率误差就可以很小。

然而还有一些材料(如抛光金属), 在某一波长范围, 比辐射率随波长变化很大, 但属线性变化, 则用三色测温比较理想。

4. 三色测温仪

依次取三个波段, 将第一、第三波段内辐射功率之积, 再除以第二波段辐射功率的平方, 此商即对应于所测的温度,

$$R = \frac{\left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_1 + \Delta\lambda_1} \varepsilon_{(\lambda, T)} f_{(\lambda, T)} d\lambda \right] \left[\int_{\lambda_3}^{\lambda_3 + \Delta\lambda_3} \varepsilon_{(\lambda, T)} f_{(\lambda, T)} d\lambda \right]}{\left[\int_{\lambda_2}^{\lambda_2 + \Delta\lambda_2} \varepsilon_{(\lambda, T)} f_{(\lambda, T)} d\lambda \right]^2} \quad (10)$$

即图 3 中矩形面积 I 与 III 之积, 除以面积 II 的平方所得之商。

由上式可见, 其比辐射率误差决定于

$$\frac{\varepsilon_{\lambda_1} \cdot \varepsilon_{\lambda_3}}{\varepsilon_{\lambda_2}^2} \quad (11)$$

设比辐射率 ε_{λ_1} , ε_{λ_2} , ε_{λ_3} 随波长线性变化, 即取 $\lambda_2 = \frac{1}{2}(\lambda_1 + \lambda_3)$ 时, 有

$$\varepsilon_{\lambda_1} = \varepsilon_{\lambda_2} \pm \Delta\varepsilon, \quad \varepsilon_{\lambda_3} = \varepsilon_{\lambda_2} \mp \Delta\varepsilon.$$

代入 (11) 式, 可得

$$\frac{\varepsilon_{\lambda_1} \cdot \varepsilon_{\lambda_3}}{\varepsilon_{\lambda_2}^2} = 1 - \left[\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon_{\lambda_2}} \right]^2 \quad (12)$$

所以, 只要 (12) 式中 $\left(\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} \right)^2 \ll 1$, 则测量结果就与比辐射率无关。

由此可见, 三色法在消除比辐射率误差上有独特的优点, 只要在所选的三波段处比辐射率线性变化, 则

比辐射率误差可以极小, 但是该法的精度和重复性均比二色法差。如果二色法的两波段选得好, 在消除发射误差上, 也有很好的结果。

上述几种方法的比较均侧重于比辐射率误差, 但如果单色法的波段 λ 选的恰当, 则其精度较高, 而全辐射法的优点是能对低温物体进行温度测量。

这些方法是基于被测物体的辐射功率, 或二、三个波段辐射功率的比值, 应用了两个辐射定律。维恩定律也可用来测温。

5. 最大波长法

由式 (2) 可得

$$T = \frac{2897.95}{\lambda_m}$$

因此, 可通过测量峰值波长 λ_m 来计算温度 T 。因为高温的光谱分布线的峰值处才比较尖锐, 所以此法宜用来测 3000°C 以上的高温。

该法也同样存在着比辐射率误差。

上述五种方法中的后两种应用较少, 一般测温仪均分属前三种, 也有介于前两者之间。

三、几种测温仪及其结构

高于 700°C 以上的物体, 其可见光辐射达到人眼可以感受的强度, 因此, 一位有经验的炼钢工人, 可以根据钢水的“白度”及钢材的“红度”来估计温度。

这里眼球就是光学系统, 以接收一定的辐射功率。视网膜就是探测器, 但它只对 0.4 到 0.75 微米波段的电磁辐射敏感; 视网膜受到刺激就发生一个电化学的作用, 从而产生一个信号传到大脑, 大脑就是该系统的显示器。

但是对低温物体, 由于辐射功率集中于红外波段, 人眼就无法接收, 而必需靠各种红外探测器。它们有各种响应波段, 有的探测器对所有波段都敏感, 这样就比视网膜的敏感范围扩大了。同时眼球孔径有限, 可以用光学系统接收更多的辐射功率以提高灵敏度, 并用电子显示系统直接显示温度, 以代替大脑的主观判断, 从而提高测温准确度。

红外系统就是由光学系统、探测器、电子显示系统以及安装它们的机械系统所组成。

1. 简易辐射测温仪

其光路如图 4 所示, 被测物的一定表面积在一定立体角的热辐射, 经球面(或抛物面)反射镜, 聚焦到探测器上。器件接收的热辐射功率 W 由下式决定:

$$W = \frac{1}{\pi} \sigma \frac{t_m \cdot d}{l^2} K \varepsilon T^4,$$

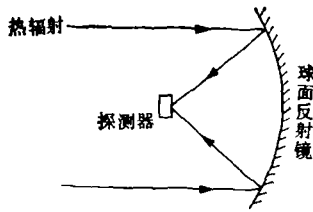


图4 简易辐射测温仪示意

或

$$W = \frac{1}{\pi} \sigma \frac{A_d \cdot A}{s^2} K \varepsilon T^4 \quad (13)$$

式中, $A_{物}$ 是物体被测的那部分面积 (与光轴垂直), A 是入射光孔的面积 (通常为为主镜面积), l 是物到主镜之间的距离, 即物距。 s 是像到主镜之间的距离, 即像距。 K 是光学系统的效率, A_d 是探测器的接收面积。

探测器用热电堆或硅光电池, 这些探测器直接把接收的热辐射变成电信号, 送仪表指示。

如用热电堆, 因其对所有波长的热辐射都能吸收, 即无选择性, 所以此简易辐射测温仪属全辐射型。

如用硅光电池, 其截止波长为 0.9 微米, 它能使之变成电信号的那部分辐射功率决定于

$$W = \frac{1}{\pi} P_{0-0.9}, \sigma \frac{A_{物}}{l^2} AK \varepsilon T^4 \quad (14)$$

式中 $P_{0-0.9}$, 为在 0—0.9 微米波长范围内辐射功率占全部波长范围总辐射功率之比值。

$$P_{0-0.9} = \frac{\int_0^{0.9} \varepsilon(\lambda, T) f(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda, T) f(\lambda, T) d\lambda} = \frac{\int_0^{0.9} \varepsilon(\lambda, T) f(\lambda, T) d\lambda}{\varepsilon \sigma T^4} \quad (15)$$

对于黑体, 上式可以通过查辐射手册求得。

因此, 用硅光电池做的简易测温仪, 近似单色型。

简易辐射测温仪的优点是结构简单, 不需光调制 (即斩光器), 也不需放大器, 探测器的输出信号直接送仪表指示, 但为获得一定的输出信号, 必须有足够的热辐射功率 W , 由 (13) 或 (14) 式可见, 必需 $A_{物}/l^2$ 要大。我们定义, 物距与被测物线度的比值称为“距离系数”, 可见这种简易辐射测温仪的距离系数较小。

2. 辐射测温仪

其原理属全辐射型, 如图 5 所示。

被测物的热辐射, 经透镜 (或反射镜) 系统聚焦到红外探测器上。探测器前的调制盘由电机带动, 以一定的频率旋转, 起斩光作用。当调制盘不挡光路时, 探测器接收到目标的热辐射。当调制盘挡住光路时, 探测器接收到调制盘的热辐射, 其差为:

$$\Delta W = \frac{1}{\pi} \sigma \frac{A_d \cdot A}{s^2} K (\varepsilon_1 T_1^4 - \varepsilon_2 T_2^4) \quad (16)$$

式中: T_1 和 T_2 分别为被测物和调制盘的温度, ε_1 和 ε_2 分别为被测物和调制盘的比辐射率。

(16) 式中, 没有考虑到调制盘的反射作用, 只能是一个近似公式。

探测器接收到交变的信号后, 电阻值 (或电容或端电压) 也交替地变化。在一定的偏压或偏流下, 辐射信号转换成电信号, 该信号由前置放大器放大后送入选频放大器, 选频放大器的输出信号幅度与被测目标的温度成比例, 将此讯号检波成直流信号, 并送至表头指示温度。

该仪器的缺点是: (1) 调制盘的温度与室温有关, 由 (16) 式可见, 在同样的目标温度情况下, 随着室温的改变, 探测器接收到的交变辐射功率 ΔW 也改变, 造成测量误差。(2) 接收一定的辐射功率时, 探测器的输出信号由元件性能决定; 而当环境温度改变时, 探测器性能也往往随之改变。因此, 欲使测量精度高, 可将探测器和调制盘置于恒温槽中。

如果红外探测器选用选择性的元件如碲镉汞, 则该仪器就介于全辐射和单色型之间, 这时调制盘温度变化对测量结果的影响比较小。何故呢? 因碲镉汞探测器的截止波长为 5.6 微米, 而处于室温的调制盘, 其辐射功率主要集中在 10 微米左右, 如图 6(a) 所示。探测器的输出信号由两部分构成: 一部分是接收目标辐射而产生的电信号, 为曲线①与②乘积所包围的面积, 即 $\int_0^{\infty} R_1 f(\lambda, T) d\lambda$ 。式中 R_1 为探测器的响应率 (接收单位辐射功率所产生的电压 (或电流)); 另一部分是接收调制盘的热辐射而产生的电信号, 为曲线①与③乘

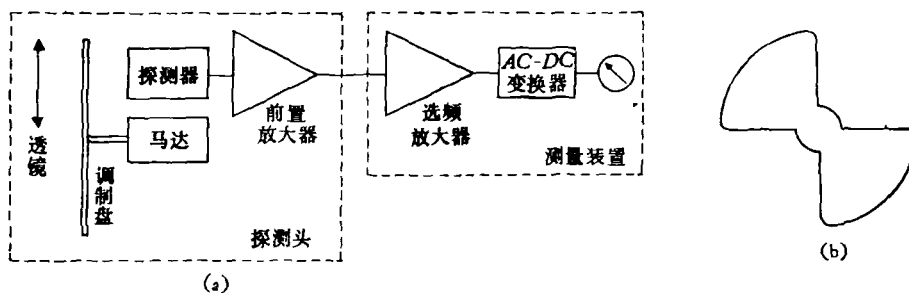


图5 全辐射测温仪简图

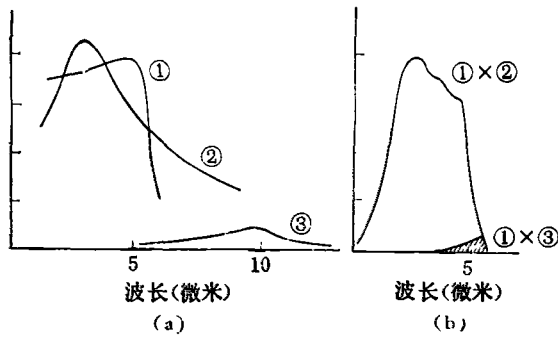


图6 热辐射及响应率的相关图
①——硅碳响应率；②——目标热辐射光谱分布；
③——调制盘热辐射的光谱分布

积所包围的面积，即 $\int_0^{\infty} R_{\lambda}(i, T) d\lambda$ 。由图6(b)可见，前者面积远大于后者，这样，调制盘的温度涨落对测量结果几乎没有什么影响。

3. 有室温补偿的辐射测温仪

此种测温仪^[1]，是用热敏电阻作室温敏感器，以抵消调制盘温度随环境温度变化所引进的误差，并用相敏检波来压缩有效噪声带宽，以提高灵敏度。

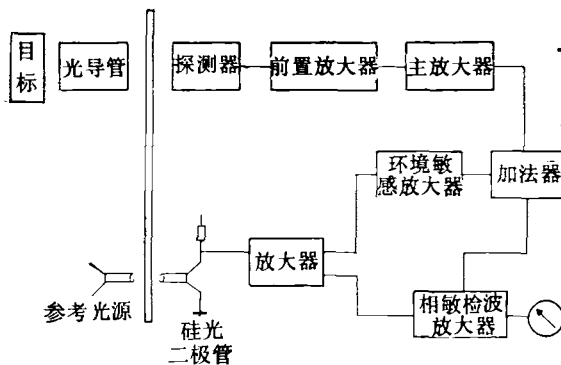


图7 有室温补偿的辐射测温仪

图7是该仪器的方框图，其中硅光电二极管与红外探测器的位置是对称的，它接收参考光源发出的光信号而产生一个与目标调制信号反相位的信号。该信号放大后，分成两路，一路作相敏检波的参考信号，另一路送至环境敏感放大器，用以补偿调制盘随环境温度变化所造成的辐射变化。当室温 T 增加时，(16)式中 ΔW 下降相当于调制盘辐射功率的基线上升，图8(a)的实线变为虚线，则主放大器输出幅度下降。而环境敏感放大器中的热敏电阻，是使该放大器的放大倍数随室温的升高而增加，相当于使其基线下降，如图8(b)所示。将主放大器的输出信号和环境敏感放大器的输出信号一起送到加法器中，只要环境敏感放大器调整得适当，就可使环境温度引起的基线变化互相抵消。由此获得良好的补偿，如图8(c)所示。在理想

的情况下，输出信号仅取决于目标温度而与调制盘的热辐射随室温所引起的变化无关。当然上述讨论只有在热敏电阻与调制盘的温度相同时才能成立。

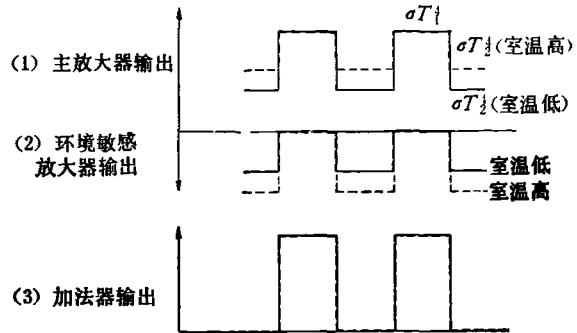


图8 室温补偿的原理

4. 电调制便携式测温仪

为克服调制盘作背景辐射对测量结果造成的影响，还可以用电调制的方法获得交流信号而省去调制盘，也省去了马达(或音叉)，使仪器小型化。

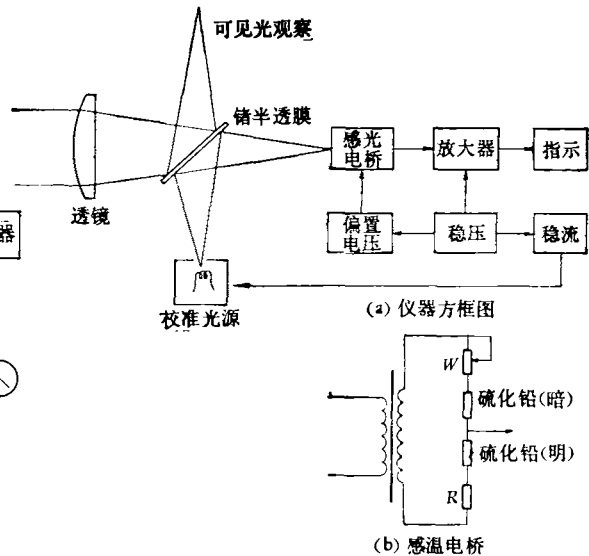


图9 电调制便携式测温仪

如图9所示，该仪器的核心部分是用1千赫的振荡器加在感光电桥上，该感光电桥由变压器、电阻 R 、电位器 W 以及两个硫化铅探测器组成，两个探测器有非常接近的暗电阻和电阻温度系数，其中一个探测器可以接收热辐射，而另一个仅作一个平衡桥臂，不接收热辐射。当没有辐射时，调节电位器，使电桥平衡， A 点输出为零；当有光照时，受光的那只探测器电阻下降，电桥失去平衡， A 点就有输出电压，其值对应于被测温度。

当环境温度改变时，探测器阻值改变或性能有所

变化而造成测量误差。为此，测量前需用仪器内部的标准光源来调整放大器的放大倍数，进行校准，以作补偿。

除了用截止波长较短的探测器和用热敏电阻补偿调制盘的热辐射等方法以外，克服调制盘热辐射对测量结果影响的方法还有很多，例如：(1) 将调制盘恒温；(2) 用一参考恒温源，如图 10 所示，调制盘交替地使参考源的热辐射反射到探测器上，或者使目标辐射直接照到探测器上，因调制盘的反射率很高而发射率很低，故调制盘的热辐射可略而不计，使目标的背景不再是调制盘，而是一个恒定的参考光源；(3) 用磁-光、声-光、电-光调制代替机械调制；除此之外，还有人造卫星的红外测温，采用了天体 (10^3K) 作背景的特殊调制技术。

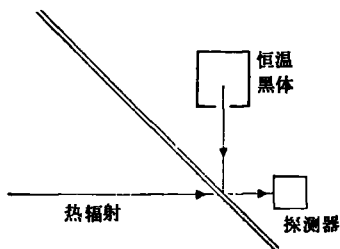


图 10 有参考源的辐射测温仪

上面介绍的几个方案中，对于探测器参数变化所造成的误差没有加以考虑。实际上，由于探测器的老化，偏置电压不稳定及环境温度的改变，都会使探测器的参数发生一定的变化，而引进误差，在恶劣环境中，甚至可使重复性很差，采用比较法可以解决这个问题。

5. 亮度测温仪

原理如图 11 所示，与光路成 45° 角的半透膜，使可见光透过，而使红外线反射，透过的可见光送至望远镜，供操作者瞄准目标。调制盘与入射光成 45° 角，调制盘叶片的反射率很高，它交替地让红外线通过和将参考光源的辐射反射到探测器上。所以，探测器的输出信号即为来自目标和光源的差值信号，经放大后，再

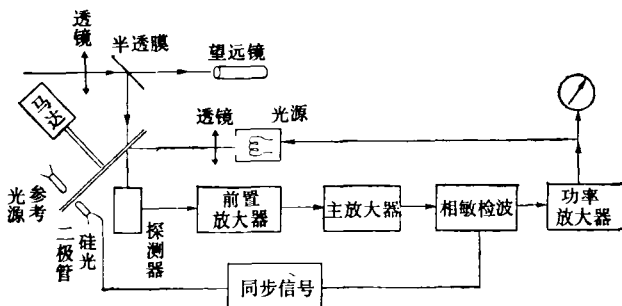


图 11 亮度测温仪

通过功率放大来控制光源电压，使探测器接收到的光源辐射功率跟随目标的辐射功率，而保持差值为零，此时，光源上供电电压，就对应于目标的温度。

6. 比色测温仪

比色测温仪的原理，前节已叙述了，这里介绍几种结构。

比色测温仪可以采用双元件，如图 12 所示。半透膜将热辐射分成两束，分别对应两个波段，并“照”到两个探测器上，然后求出输出信号的比值，这种仪器除具备辐射测温仪的优点外，也能在一定程度上消除比辐射率误差。但实际上很难找到性能完全一致的探测器，更难保证探测器的性能随环境温度的变化率完全一致，因而很难显示比色法的优点。

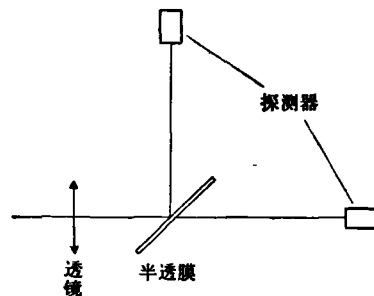


图 12 双元件的比色测温仪

通常采用单元件，即用一只探测器交替接收两个波段的辐射功率，并转换成两个电信号，再求其比值，而光学系统有双光路和单光路之分。

双光路如图 13 所示，调制盘将进来的热辐射斩光和反射而分成两路，此两路光分别通过两块滤光片 ($\lambda - \lambda_1 + \Delta\lambda_1$ 及 $\lambda_2 - \lambda_2 + \Delta\lambda_2$)，再经调制盘的另一叶片的反射而成一路，这时探测器的输出，对应于 $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 两个波段范围辐射功率的差值信号，经线路处理而转换成两个讯号的商。也可以在功率较大的那个光路上放置衰减片，调节衰减量，使射到探测器上两光束的功率相等，探测器的输出信号为零，则衰减片的衰减量与目标温度相对应。

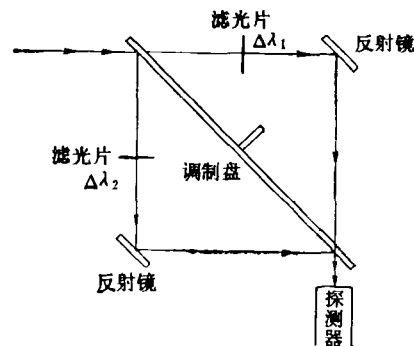


图 13 双光路比色测温仪

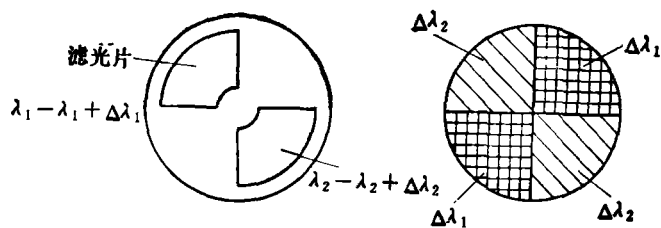


图 14 比色测温仪的调制盘

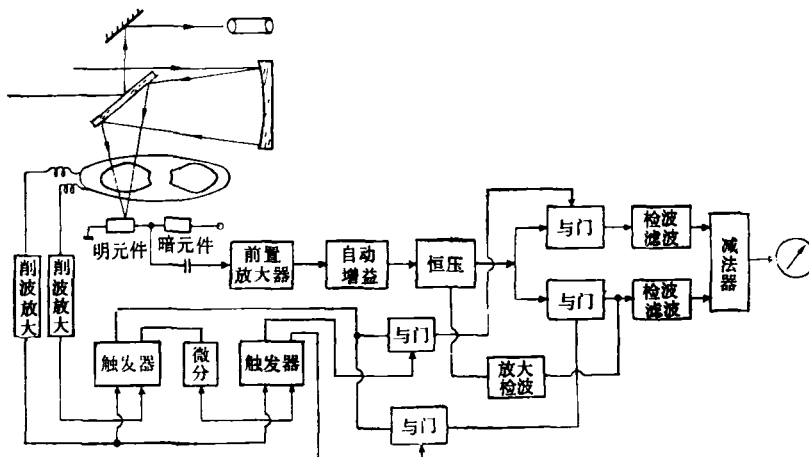


图 15 单光路比色测温仪方框图

单光路系统的调制盘如图 14 所示,两种滤光片各一块,镶于调制盘上,或两种滤光片各两块交替地镶于调制盘上,则探测器交替接收到两个波段的辐射功率,至于取这两个信号比值的方法很多,因篇幅有限,不作介绍。

图 15 是单光路比色测温仪的方框图。比色法的优点是:

- (1) 被测物可以不充满视场,光学系统可以局部遮挡;
- (2) 被测物的比辐射率的变化,可以得到补偿;
- (3) 光路中有烟雾、灰尘,只要两个波段选得好,使得两个波段的辐射在传输中的衰减相同,就不影响读数。对探测器,只要响应率在两波段的比值不变,而其他参数有变化时,不影响读数。

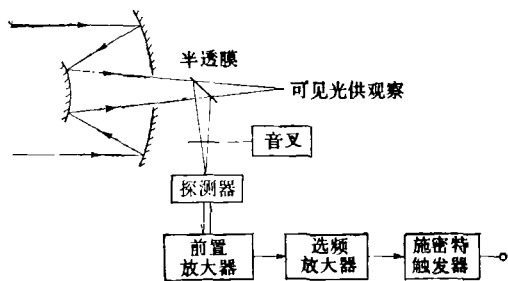


图 16 报警器方框图

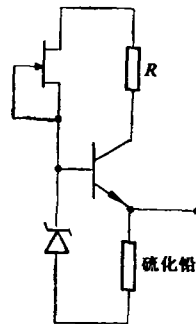


图 17 恒压偏置

上面介绍的是通用测温仪,下面再介绍两个专用设备。

7. 报警器

常常需要这样一种监视系统,当被测物超过一定温度时报警。这里所介绍的报警器是作温度控制开关,前面提到的预热管焊接就是它的一个应用。

该仪器如图 16 所示,和前述测温仪不同的是用音叉代替调制盘,省去了马达,而选频放大器的输出端是送到施密特电路。当被测物超过一定温度时,施密特电路触发,有输出信号报警。

为克服探测器阻值变化对输出电压的影响,这里探测器是用图 17 所示的恒压偏置方法,以获得较好的

稳定性。

8. 热轴探测仪

该仪器也是报警器的一例，它是铁路运输中检测列车的专用设备，通过测量轴箱的热辐射来判断各轴发热情况，轴箱超过某种温度 T ，将引起断轴事故。判定该报警温度的经验公式为：

$$T \geq 0.6T_0 + 45^\circ\text{C} \quad (17)$$

式中， T_0 为环境温度。

该仪器的探测头部的结构如图 18 所示。距离系数的大小是根据现场使用条件提出的，由于铁路运输界限的限制，必须离开轴箱 1.5 米。目前我国现有车辆的转向架型号繁多，轴箱位置各不相同，若要兼顾各种情况，仪器探测的轴箱面积必须选择适当，这里选择 20×20 毫米²。

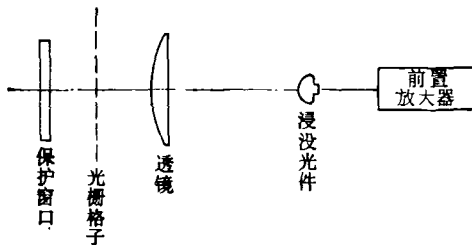


图 18 热轴探测的头部

如果仪器采用一般的调制方式，则放大器的输出信号正比于轴箱辐射功率与轴箱出现前系统所瞄准的物体（背景）的热辐射功率之差值。因此，即使温度相同的轴箱，由于“背景”不同，信号幅值也不相同。可见要正确判定热轴还必须要求背景稳定，这里我们是采用图 19 所示的光栅机械调制来解决的。光栅的机械调制的动片与定片平行紧贴，并垂直于系统光轴，放置于主透镜前的光路中。定片由支架固定，动片由极化继电器簧片带动，可相对于定片移动。当轴箱进入系统瞄准视场时，光栅开启，轴箱热辐射被系统所接收。轴箱一过，光栅立即关闭，此时系统接收的背景就是光栅叶片的辐射功率。由于背景温度为室温，对于同一列车，背景温度是相对稳定的。光栅动片的继电器是

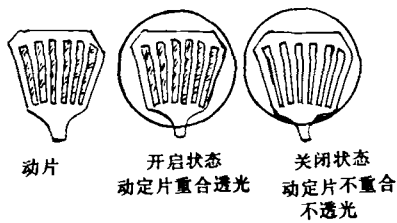


图 19 光栅格子

由装在铁轨上的两个磁头控制的。当车轮经过第一个磁头时，光栅开，车轮经过第二个磁头时，光栅关。

四、红外测温仪使用中若干问题

红外测温仪在使用上，必须注意下列问题，才能测准。

1. 因仪器有光学聚焦系统，测量时仪器置放的位置，必须满足下列关系：

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{l} = \frac{1}{f} \quad (18)$$

式中 l 为物距， s 为像距， f 为光学系统的焦距。

有些仪器，本身有像距或焦距调节系统，通过调节使仪器适应一定范围（物距）的测量。

根据比色测温的原理，其测温是决定于比值，故对这一点的要求可低一点。

2. 对于全辐射和单色测温仪，必须使被测物充满视场，满足：

$$\text{被测物的线度} \geq \omega \cdot l \quad (19)$$

式中 ω 为仪器的瞬时视场角。

3. 被测物（特别是表面反射率较高的目标）周围，如有太阳光、电灯光或较强的热源，应注意测温仪的置放位置，以避免它们的辐射经目标表面反射到测温仪中。必要时，需在仪器和目标之间，加上遮挡套筒，以避免之。

4. 被测物的表面发射率较低时，如用黑体定标的全辐射测温仪或单色测温仪进行测量时，则比辐射率的误差较大。此时可在被测表面涂上胶体石墨或黑漆来提高比辐射率。也可以对被测物直接定标，虽然只有相对意义，但在工业上还是有实用价值的，有的仪器还有发射率校正装置，使用时应将它调到已知的被测物比辐射率的数值上。

5. 环境温度改变时，全辐射测温仪中，探测器性能变化，单色测温仪中探测器响应率或滤光片的透过率变化，比色测温仪的两块滤光片的透过率的变化率不同或滤光片的波段选在探测器的截止波长附近（因探测器的截止波长与温度有关）均会造成误差。特别是环境温度较高时，甚至会使探测器不能正常工作，在此情况下，最好加上水冷套。

6. 对仪器使用的环境应有了解，如二氧化碳、水蒸汽较多时，将吸收红外某些波段的热辐射（如二氧化碳较多，则应避免选 4.2 到 4.4 微米的波段；而水蒸汽较多，则应避免选 5.6 到 8 微米的波段）。如灰尘、微粒较多时，则散射红外辐射，这些都会造成测量误差；此时应根据现场条件来选择红外测温仪的波段，或选用适当波段的比色测温仪。