

# 红外辐射测量系统线性度的 测定及校正方法

林 林

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海)

**摘要**——采用单对双孔径方法测量系统的线性度, 在数据处理中对比较参考值进行逐级修正, 应用于某一红外系统时, 线性度校正精度达  $2 \times 10^{-4}$  透射单位。

**关键词**——线性度测定, 红外辐射测量。

## 1. 引 言

红外辐射测量系统的线性度对于测量结果的可靠性起着重要的作用。引起系统非线性原因是多方面的, 除了光学, 机械, 电子学的因素以外, 探测器的非线性是主要的原因。对于探测器和系统的线性度测量方法, 有很多类型。本文着重介绍单对双孔径线性度测量法的基本原理及实验要点, 分析了采用这种方法对线性度测量带来的误差因素。并用实验结果证明这种方法的实验装置比较简单, 对不同的系统和探测器均可适用, 是一种有效的系统自校正方法, 经过校正, 系统的线性度可以提高一倍以上。

## 2. 双孔径线性度测量原理

对探测器和系统的线性度测量方法, 在可见光波长范围内, Sanders<sup>[1]</sup>曾做了综合的分析其中光辐射通量迭加法是一种不依赖于其它物理量的精确测量的方法, 其基本原理如下: 当入射的辐射通量为  $\Phi_1$  时, 系统的响应值为  $N_1$ , 当入射的辐射通量为  $\Phi_2$  时, 系统的响应值为  $N_2$ ; 当入射辐射通量为  $\Phi_1 + \Phi_2$  时, 则系统的响应值为  $N_{12}$ 。如果  $N_{12} = N_1 + N_2$ , 则在  $N_1, N_2$  和  $N_{12}$  中最小值和最大值之间系统是线性的。反之, 如果  $N_{12} \neq N_1 + N_2$ , 则系统是非线性的。对于  $N_1$  和  $N_2$  的平均值, 系统的线性度校正因子为  $N_{12}/(N_1 + N_2)$ 。将入射辐射通量的范围由大到小复盖整个工作范围, 就可得到系统在整个工作范围内的线性度。

光辐射通量的迭加可以通过多辐射源或多孔径来实现。多辐射源法的关键在于辐射源的稳定性,而多孔径法装置则比较复杂。Mielenz 和 Eckerle<sup>[2]</sup> 只用了一对双孔径和一对偏

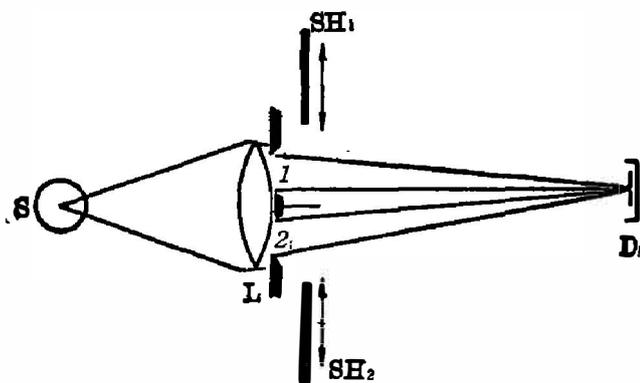


图 1 双孔径法原理图

Fig. 1 Double-aperture method.

振器来测量高精度分光光度计的线性度,但这种方法在每一级线性度测量过程中,没有对比较值本身的非线性提前加以校正,因而产生了测量误差。而且,如果在探测器参数和系统非线性之间没有直接的公式,这种方法就难以采用。本文介绍的是一对双孔径法,由于采用了逐级修正处理,提高了测量精度,而且不需了解探测器的特性,就可以直接测量系统的线性度,校正也很方便。

双孔径测量法的原理如图 1 所示。图

中 S 为光源, SH<sub>1</sub>、SH<sub>2</sub> 为挡板, D 为探测器, L 为透镜。

在光路中放置一个双孔径装置,孔径前的 SH<sub>1</sub> 和 SH<sub>2</sub>, 假设孔径 1 打开时,系统的响应为 T<sub>1</sub>; 孔径 2 打开时,系统的响应为 T<sub>2</sub>; 当两个孔径同时打开时,系统的响应为 T<sub>12</sub>。则非线性度表现为

$$\sigma = \left( \frac{T_{12}}{T_1 + T_2} \right) - 1; \quad (1)$$

如果系统是线性的,则  $\sigma = 0$ ; 否则,  $|\sigma| > 0$ 。当两个孔径的光通量接近相等时,  $(1 + \sigma)$  就可以作为线性度校正因子来校正 T<sub>1</sub> 和 T<sub>2</sub> 平均值的大小。

当入射的辐射通量为  $\Phi(\lambda)$ , 两个孔径大小相等,测得系统在  $\frac{\Phi}{2}$  时的非线性度为

$$\sigma\left(\frac{\Phi}{2}, \lambda\right) = \frac{T_{12}\left(\frac{\Phi}{2}, \lambda\right)}{T_1\left(\frac{\Phi}{2}, \lambda\right) + T_2\left(\frac{\Phi}{2}, \lambda\right)} - 1; \quad (2)$$

式(2)中,  $\lambda$  为测试时的工作波长,设系统以入射辐射通量为最大值( $\Phi_0$ )时的输出为参考点,即在这时的非线性度为零,系统在  $\frac{\Phi_0}{2}$  时的非线性度为

$$\sigma\left(\frac{\Phi_0}{2}, \lambda\right) = \frac{T_{12}\left(\frac{\Phi_0}{2}, \lambda\right)}{T_1\left(\frac{\Phi_0}{2}, \lambda\right) + T_2\left(\frac{\Phi_0}{2}, \lambda\right)} - 1. \quad (3)$$

将入射的辐射通量减小到  $\frac{\Phi_0}{4}$ , 这时两个孔径的响应值分别为 T<sub>1</sub>( $\frac{\Phi_0}{4}$ ,  $\lambda$ ) 和 T<sub>2</sub>( $\frac{\Phi_0}{4}$ ,  $\lambda$ )。系统在  $\frac{\Phi_0}{4}$  的非线性度为

$$\sigma\left(\frac{\Phi_0}{4}, \lambda\right) = \frac{T_{12}\left(\frac{\Phi_0}{4}, \lambda\right)}{T_1\left(\frac{\Phi_0}{4}, \lambda\right) + T_2\left(\frac{\Phi_0}{4}, \lambda\right)} - 1; \quad (4)$$

依次类推,可以得到

$$\sigma\left(\frac{\Phi_0}{2^{n-1}}, \lambda\right) = \frac{T_{12}\left(\frac{\Phi_0}{2^n}, \lambda\right)}{T_1\left(\frac{\Phi_0}{2^{n-1}}, \lambda\right) + T_2\left(\frac{\Phi_0}{2^{n-1}}, \lambda\right)} - 1, \quad (n=0, 1, \dots, N); \quad (5)$$

式(5)中,  $N$  为测量的级数. 在进行每一级的线性度测量时,  $T_{12}$  都是作为参考值来进行比较的, 由于其本身的非线性误差没有进行校正, 将影响下一级非线性度的精度, 因此计算前, 必须对  $T_{12}$  进行修正, 这就是前面提到的逐级修正法.

$$T_{12}\left(\frac{\Phi_0}{2^n}, \lambda\right) = \frac{1}{2} \left[ T_1\left(\frac{\Phi_0}{2^n}, \lambda\right) + T_2\left(\frac{\Phi_0}{2^n}, \lambda\right) \right] \cdot \left[ \sigma\left(\frac{\Phi_0}{2^n}, \lambda\right) \right], \quad (n=0, 1, 2, \dots, N); \quad (6)$$

设对  $T_{12}$  未修正时计算出的非线性度为  $\sigma_0$ , 每一级经过  $T_{12}$  修正而得出的非线性度  $\sigma$  为

$$\sigma\left(\frac{\Phi_0}{2^n}, \lambda\right) = \left\{ \prod_{i=1}^n \left[ 1 + \sigma_0\left(\frac{\Phi_0}{2^i}, \lambda\right) \right] \right\} - 1; \quad (n=1, 2, \dots, N); \quad (7)$$

设经过线性度校正的系统的响应值为  $T$ ,  $T_1$  和  $T_2$  的平均值为  $T_0$ , 则系统的线性度的校正值  $\Delta T$  为

$$\Delta T\left(\frac{\Phi_0}{2^n}, \lambda\right) = T\left(\frac{\Phi_0}{2^n}, \lambda\right) - T_0\left(\frac{\Phi_0}{2^n}, \lambda\right); \quad (n=1, 2, \dots, N); \quad (8)$$

$$T\left(\frac{\Phi_0}{2^n}, \lambda\right) = \left[ 1 + \sigma\left(\frac{\Phi_0}{2^n}, \lambda\right) \right] \cdot T_0\left(\frac{\Phi_0}{2^n}, \lambda\right); \quad (n=1, 2, \dots, N); \quad (9)$$

在  $N$  为不同值时, 可以得出一组  $T$  和  $T_0$  的对应关系, 然后用拟合方程对这组曲线进行逼近. 在本系统中, 采用二次多项式, 其拟合偏差小于  $10^{-4}$ .

$$T(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda)T_0 + c(\lambda)T_0^2; \quad (10)$$

根据式(10)可在计算机中对测试结果进行线性度的校正. 系统的线性度与系统的光学结构及其它参数(如测试波长, 狭缝宽度(对分光系统)等)有关, 因此, 必须测出不同条件下的非线性度, 并根据系统使用的不同条件来进行校正. 本文所进行的线性度测试系统, 其校正精度可达  $2 \times 10^{-4}$  透射单位.

### 3. 实验和误差分析

#### 3.1 实验装置和步骤

双孔径测试方法的测量装置主要是一个双孔径. 一块金属板上有两个上下排列的矩形或圆形的窗口(见图2)每个孔径可以用一个滑动的档板进行开闭, 可以手控或自动控制. Clarke<sup>[3]</sup> 对它的使用进行过详细的讨论, 当孔径关闭时, 没有光线漏过, 孔径的边缘是斜面的, 进行化学发黑, 可以减少本身镜面反射, 也可以防止光线从其表面再反射到光路中去. 将此装置插入适当的光路, 并校正其位置, 直到两个孔径的读数基本相同为止.

在放置双孔径装置的光路中同时插入一个衰减器, 即可变光栏, 用以调节入射辐射通量的大小, 每次调节时要使双孔径打开的读数相当于前一级单孔径的读数, 这样就可以依次得到各级的非线性度数据. 如果每个孔径的读数分别为  $T_1$ ,  $T_2$ ; 两孔径都打开时的读数为  $T_{12}$ , 两个孔径都关上的读数为  $T_0$ . 测量的顺序为  $T_0$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_{12}$ ,  $T_{12}$ ,  $T_2$ ,  $T_1$ ,  $T_0$ ... 以避免光源和系统漂移的影响. 对每一级重复测量 4~5 次, 然后根据  $T_0$  进行归一化, 求出

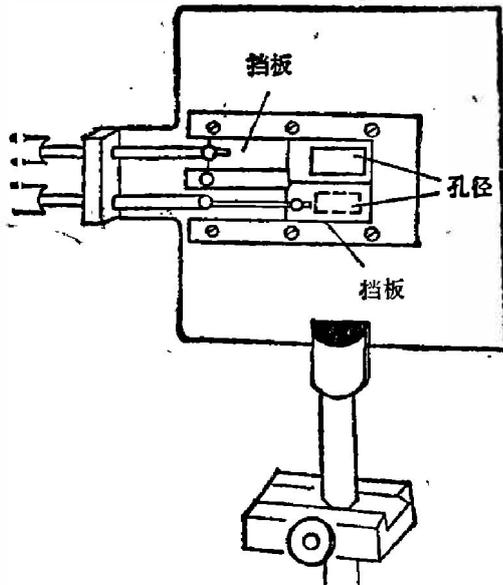


图2 双孔径测试装置

Fig. 2 Double-aperture apparatus.

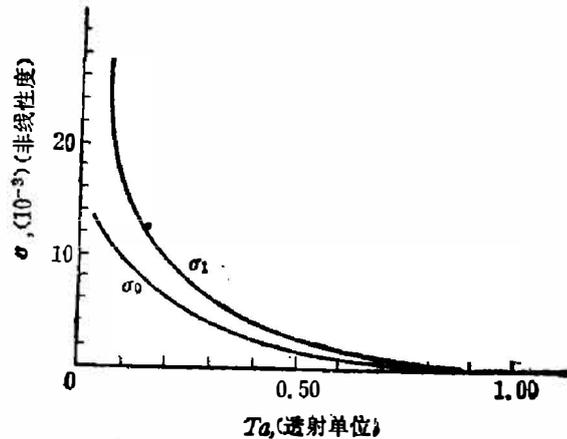


图3 典型的非线性度曲线

Fig. 3 Typical curve of nonlinearity.

平均的  $T_1$ ,  $T_2$  和  $T_{12}$ , 再进行非线性度的计算, 整个测量过程可由计算机自动控制。

上述方法是选取系统入射通量为最大时, 即输出取最大值时为参考点, 这样测出的数据点为输出的 50%, 25%, 12.5%……等, 集中在 50% 以下的区域, 为了补充 50% 以上区域的数据, 找出更适合的  $T$  和  $T_0$  的拟合方程, 也可选取其它的参考点, 并将结果补充到前面所测的数据组中去。

图3是对某一红外分光光度系统在  $2.5\mu\text{m}$  时测得的非线性度曲线。图中  $\sigma_0$  是未经  $T_{12}$  逐级修正的曲线,  $\sigma_1$  是经过对  $T_{12}$  逐级修正的曲线。

### 3.2 双孔径测量线性度的误差分析和校正精度

双孔径测量误差包括测量的偶然误差和测量方法本身所产生的系统误差, 对误差来源分析如下:

(1) 随机误差是由于辐射源、探测器噪声、电路噪声和环境波动等因素引起的。人们常常将噪声引起的随机误差看作为误差的主要来源, 实际上对于实验室的测量仪器, 这类误差可以通过增加测量的次数加以抑制, 本系统测量次数为 8 时, 偶然因素引起的非线性度的误差值为  $1 \times 10^{-4}$ 。

(2) 双孔径辐射通量不相等引起的误差

如果  $T_0$  是辐射通量为  $\frac{\Phi}{2}$  时的读数, 其校正值  $T$  为

$$T = a + bT_0 + cT_0^2 \quad (11)$$

如果  $T_{01}$  是孔径 1 在辐射通量为  $\frac{\Phi}{2} + \Delta\phi$  时的读数, 经过线性度校正, 校正值为  $T + \Delta T$ 。  
 $T_{02}$  是孔径在辐射通量为  $\frac{\Phi}{2} - \Delta\phi$  时的读数, 线性度校正后的值为  $T - \Delta T$ 。这样  $\Delta T$  就是两个孔径辐射通量不等而引起的校正误差。

从式(11)可求出

$$T_0 = f(T), \quad (12)$$

也可推导出,当  $T$  变化  $\Delta T$  时的  $T_0$  值:

$$T_{01} = f_1(T + \Delta T); \quad (13)$$

$$T_{02} = f_2(T - \Delta T); \quad (14)$$

由于两孔径辐射通量不等造成的非线性度误差  $\Delta\sigma_\phi$  为:

$$\Delta\sigma_\phi = \sigma - \sigma_\phi; \quad (15)$$

式 15 中  $\sigma$  为两个孔径辐射通量相等时求出的非线性度;  $\sigma_\phi$  为两个孔径辐射通量不等时求出的非线性度.

$$\sigma = \frac{T_{012}}{2T_0} - 1; \quad (16)$$

$$\sigma_\phi = \frac{T_{012}}{T_{01} + T_{02}} - 1; \quad (17)$$

$\bar{T}_0$  为两个孔径响应的平均值,  $T_{012}$  是两个孔径同时打开时的响应值. 将式(13)、(14)、(16)和(17)代入式(15)就可求出  $\Delta\sigma_\phi$  的大小. 对测试系统:

当  $T=0.5$  时,

$$\Delta T = 0.02, \quad \Delta\sigma_\phi = 4.75 \times 10^{-7};$$

当  $T=0.25$  时,

$$\Delta T = 0.02, \quad \Delta\sigma_\phi = 1.01 \times 10^{-6};$$

其中,  $T$  和  $\Delta T$  的单位均为透射单位,因此,当两个孔径之间的辐射通量差小于 4% 时,所产生的非线性度测量误差可以忽略不计.

### (3) 衍射和干涉误差

在长波红外区域两个孔径透过的辐射可能会产生衍射和干涉现象 Mielenz 和 Eeckrle<sup>[2]</sup> 给出了计算误差的方法,在最坏的情况下,由于两个孔径间的衍射和干涉引起的非线性度误差的绝对值  $|\sigma_d|$  为

$$|\sigma_d| = [\lambda^3 / 4\pi^4 \theta_0^2 r d^2 s] [1/k + k/k - 1] \quad k = s/d, \quad (18)$$

式(18)中,  $s$  是两个孔径的间距;  $r$  是辐射源对准直镜的张角;  $\theta_0$  是探测器对聚焦镜的张角;  $d$  是孔径直径;  $\lambda$  是波长. 根据本文所采用的双孔径装置和系统光学特性计算,在  $\lambda = 50 \mu\text{m}$  时,

$$|\sigma_d| = 1.7 \times 10^{-6}.$$

因此,由于双孔径的衍射和干涉引起的误差可以忽略不计.

### (4) 逐级测量的累计误差

根据式(7),前一级非线性度测量误差会影响以后各级的非线性度,其累计误差  $d\sigma_0$  为

$$d\sigma_0 \left( \frac{\Phi_0}{2^n}, \lambda \right) = \frac{\partial}{\partial \sigma_0} \prod_{i=1}^n \left[ 1 + \sigma_0 \left( \frac{\Phi_0}{2^i}, \lambda \right) \right] d\sigma_0, \quad (n=1, 2, \dots, N); \quad (19)$$

如果忽略二次和三次项,则有

$$d\sigma_0 \left( \frac{\Phi_0}{2^n}, \lambda \right) = \sum_{i=1}^n d\sigma_0 \left( \frac{\Phi_0}{2^i}, \lambda \right), \quad (n=1, 2, \dots, N); \quad (20)$$

经过测量,这项误差约为  $5 \times 10^{-4}$ .

## 3.3 线性度测量及校正的精度

考虑到随机误差,逐级测量的累计误差,衍射干涉和双孔径辐射通量不等的影 响,总的线性度测量不确定度为各项标准偏差的平方和的平方根,本系统的线性度测量不确定度约为  $1.6 \times 10^{-3}$ .

线性度校正的精度取决于:

$$[d(\Delta T)]^2 = (T_0 d\sigma)^2 + (\sigma dT_0)^2 + (dp)^2; \quad (21)$$

式(21)中  $dp$  是拟合函数的标准偏差.  $(\sigma dT_0)$  是读数的随机误差, 第一项  $(T_0 d\sigma)$  是非线性度测量引起的误差. 在本系统中, 当输入辐射通量为最大通量一半时, 线性度校正精度为  $2 \times 10^{-4}$  透射单位.

## 4. 结 论

双孔径线性度测量方法, 是一种不依赖其它严格物理量的自校正方法, 与多辐射源和多孔径法相比, 这种方法简单可行, 与传统的一对双孔径方法相比, 不需要了解探测器的具体特性及其与系统非线性的关系式. 由于在比较过程中, 对每级的参考值进行修正, 提高了测量的精度. 在  $2.5 \sim 50 \mu\text{m}$  的红外波段, 系统的线性度校正可达  $2 \times 10^{-4}$  透射单位.

致谢——这项工作得到 Dr. Jack Hsia 的有益指导和帮助, 作者对此表示感谢.

## 参 考 文 献

- [1] Sanders C. L., *Journal of Research of NBS-A Physics and Chemistry*, **76A**(1972)5: Sep-Oct. 437~453.
- [2] Klaus D. Mielenz and Ken L. Eckerle, *Appl. Opt.* 11(1972) 10, Oct. 2294~2303.
- [3] Clarke F. J. J. (NPL), *Journal of Research of NBS-A Physics and Chemistry* **76A**(1972)5: Sep-Oct. 375~403.

# DETERMINATION AND CORRECTION OF LINEARITY FOR INFRARED RADIATION MEASUREMENT SYSTEM

LIN LIN

(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica, Shanghai, China)

## ABSTRACT

One-pair double-aperture is used to measure the linearity of the infrared radiation measurement system. The application of cascade modifying method improves the nonlinearity measurement accuracy. The result shows that the deviation of linearity correction for an infrared system ( $2.5 \mu\text{m}$  to  $50 \mu\text{m}$ ) reaches  $2 \times 10^{-4}$  transmittance unit.