

光学光谱仪器光谱响应的校正原理 及其在光学光谱分析仪上的应用

杜 翰 彰

(中国科学院安徽光学精密机械研究所)

本文阐述了光学光谱仪器的不平坦光谱响应的校正原理,给出了光学光谱分析仪(OSA)系统测试灯光谱的方法。作为例子测试了氙灯光谱,并打印出氙灯光谱图,获得满意的结果。

传统的光谱测定方法有两种:一种是分光光度法,因它扫描时间长,对精密测量来说往往是一个严重的限制;另一种是摄谱法,它可以同时测得整个光谱,且可克服时间滞后的缺点,但手续烦琐,精度不高。综合两种方法,把光电手段的优点(高灵敏度、宽动态范围)和感光版的优点(同时探测多条谱线)结合起来,采用最佳、最先进的光学和电子技术,并配以多功能智能化控制处理系统,可组成现代最先进的光学光谱仪器(OSA)系统。OSA既具有光电倍增管那样的灵敏度、响应速度和方便性,又具有光谱感光版的快速、同时接收、光谱响应范围宽的优点,并对测得的光谱数据可进行实时处理、自动存储和显示打印,给出谱线的波长、强度、宽度和积分值(或光谱图的波长和强度数据)。由于具有这些特点,使得OSA特别适用于快速过程中弱光光谱的大量收集处理工作。

OSA带来的先进光谱测量技术在工业、农业和国防的许多部门以及光谱学研究领域都获得了广泛的应用。但是在许多光谱研究应用中,往往需要具有平坦光谱响应的光学光谱仪器,而实际上任何光学光谱分析仪器都有光谱响应不平坦问题,因而就有不平坦光谱响应的校正问题。

一、光学光谱仪器光谱响应的校正原理

1. 光学光谱仪器的探测畸变

(1) 分光装置 采用折射棱镜、衍射光栅、迈克耳孙干涉仪和各种滤光器的各种分光装置

物理

都有各自的光谱透过率,即有各自的光谱响应。

(2) 光探测器 绝大部分光探测器的光谱响应是不平坦的。人眼作为可见光的主观探测器件有它的视见函数,不仅有明视觉光谱响应,还有暗视觉光谱响应,不过现代光学光谱仪器不用人眼作探测器件罢了。基于光化学效应的各种感光底版也具有各不相同的不平坦感光光谱响应函数。光电探测器分为两大类:一类为光电发射器件;另一类为固体器件。每种光电探测器都有各自的不平坦光谱响应,例如2CU-L蓝硅光电池的相对光谱响应见图1。

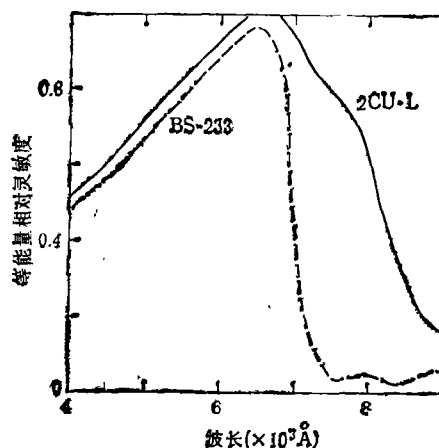


图1 宽光谱硅光电二极管响应

硅靶光导摄像管是硅二极管的二维阵列的光电发射式光电探测器。CCD器件是MOS型阵列的电荷耦合固体光电探测器。它们同样有各自的不平坦光谱响应。

2. 光学光谱仪器光谱响应的校正原理

OSA-WP4 光学光谱分析仪可用来测量各种辐射源的光谱强度,和RL82型自动多用大

气参量光谱照度计测量太阳光谱辐照度相似。下面介绍 RL82 型照度计的光谱响应和定标,以说明 OSA 系统的光谱响应及其校正原理。

对应 Land Sat-MSS (或 Land Sat-TM) 的卫片波段, RL82 型照度计采用 MSS 波段 (或 TM 波段) 的带通干涉滤光片。漫射器和滤光片是分光装置,它的光谱透过率是波长的函数,用 $F_{\text{分光}}(\lambda)$ 表示。硅光电池的光谱响应是波长的函数,用 $F_{\text{硅光}}(\lambda)$ 表示。硅光电池的灵敏度不均匀性函数与通道位置有关,用 $F_{\text{位置}}(X, Y)$ 表示。照度计的光谱响应既是波长的函数,又是通道位置的函数,故照度计总的光谱响应函数 $F_{\text{照度计}}(\lambda, X, Y)$ 应为

$$F_{\text{照度计}}(\lambda, X, Y) = F_{\text{分光}}(\lambda) \cdot F_{\text{硅光}}(\lambda) \cdot F_{\text{位置}}(X, Y). \quad (1)$$

从生产厂买到的溴钨灯经计量单位标定,提供距溴钨灯 1 m 远处光谱辐照度数据 $P_{\text{溴钨灯}}(\lambda)$ 。RL82 型照度计在实验室进行定标时,放置于距溴钨灯 1 m 远处的导轨上,通过放大器和记录仪,测得距溴钨灯 1 m 远处的各个通道的辐照度值 $H_{\text{溴钨灯}}(\lambda, X, Y)$ 。因此,

$$H_{\text{溴钨灯}}(\lambda, X, Y) = P_{\text{溴钨灯}}(\lambda) \cdot F_{\text{照度计}}(\lambda, X, Y), \quad (2)$$

即仪器校正因子 $CF(\lambda, X, Y)$ 为

$$CF(\lambda, X, Y) = P_{\text{溴钨灯}}(\lambda) / H_{\text{溴钨灯}}(\lambda, X, Y). \quad (3)$$

当用 RL82 型照度计在野外测天空漫射光谱辐照度时,实际测得天空漫射光谱辐照度值 $H_{\text{天空}}(\lambda, X, Y, \phi, \tau, \rho)$ 是落在漫射器上天空漫射光谱辐照度真实值 $P_{\text{天空}}(\lambda, \phi, \tau, \rho)$ 与 RL82 型照度计总光谱响应函数 $F_{\text{照度计}}(\lambda, X, Y)$ 的乘积,即

$$H_{\text{天空}}(\lambda, X, Y, \phi, \tau, \rho) = P_{\text{天空}}(\lambda, \phi, \tau, \rho) \cdot F_{\text{照度计}}(\lambda, X, Y), \quad (4)$$

式中辐照度的自变量 ϕ 是太阳天顶角, τ 是大气光学厚度, ρ 是地面反照率。

天空漫射光谱辐照度真实值 $P_{\text{天空}}(\lambda, \phi, \tau, \rho)$ 可由 (4) 式除以 (2) 式得到,即

$$\frac{H_{\text{天空}}(\lambda, X, Y, \phi, \tau, \rho)}{H_{\text{溴钨灯}}(\lambda, X, Y)} = \frac{P_{\text{天空}}(\lambda, \phi, \tau, \rho)}{P_{\text{溴钨灯}}(\lambda)},$$

$$P_{\text{天空}}(\lambda, \phi, \tau, \rho) = \frac{H_{\text{天空}}(\lambda, X, Y, \phi, \tau, \rho)}{H_{\text{溴钨灯}}(\lambda, X, Y)} \times P_{\text{溴钨灯}}(\lambda). \quad (5)$$

二、OSA 系统光谱响应的校正原理

1. OSA 系统的性能指标

OSA 系统采用 SIT500 型摄像机时,响应峰值处的灵敏度高达 15 个光子/计数。暗电流在高温 35°C 时仅为 2 nA, 在低温 -70°C 时小至 4 pA。由于 500 道同时曝光,且使用致冷机,因而信噪比较单道光学光谱仪器提高了很多倍。当线性度为 1% 时,动态范围可达 1/8000。每次整幅摄谱的曝光时间为 32 ms-20 min (-50°C)。二维扫描在 Y 方向可分为 1-256 段,每次显示最多为四段。选通脉冲宽度为 30 ns-200 ms。OSA 系统由于采用光栅多色仪和 SIT500 型摄像机,所以它的分辨率是由光栅多色仪的光栅线数、反射镜焦距和摄像机的总道数确定。例如,将 600 线光栅的 0.25 m 多色仪和 SIT500 型摄像机适当连接后,实际测得 OSA 系统的分辨率(光学通道宽度)为 1.4 Å/道,几何通道宽度的波长范围是由转动光栅扫描确定的。在上述例子中,每次整幅摄谱范围约为 700 Å。OSA 系统每次摄谱 500 个通道,包含 500 × 400 个硅二极管,即 20 万个像素,测到的是一段光谱 500 个数据。在上述例子中,连续摄谱 9-10 次,测得总光谱响应范围为 3000-9500 Å。

2. OSA 系统的光谱响应

OSA 系统作为光学光谱仪器,它的光谱响应也是不平坦的; OSA 系统的光谱响应曲线主要由下面三个因素确定。

(1) 光学色散系统的光谱透过率,它是波长的函数,设其为 $F_T(\lambda)$ 。

(2) SIT 500 型摄像管的二维阵列硅靶的每个硅光电二极管的光谱响应曲线,如图 2 所示,可见最灵敏处约在 4300 Å 附近。它对不同波长的光信号有不同值的加权。光谱响应是波长的函数,设它为 $F_C(\lambda)$ 。

(3) SIT 500 型摄像管的靶面灵敏度不均

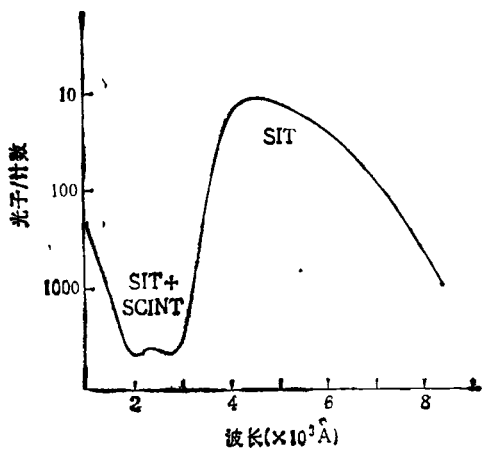


图2 SIT管光谱响应

匀性,它意味着同一波长同一光强的信号,由于成象在靶面不同位置,因而输出也不相同。靶面灵敏度不均匀性是靶面位置的函数,设它为 $F_B(X, Y)$ 。OSA 系统总的光谱响应函数 $F_{OSA}(\lambda, X, Y)$ 应为上述三个函数的乘积,表示为

$$F_{OSA}(\lambda, X, Y) = F_T(\lambda) \cdot F_C(\lambda) \cdot F_B(X, Y). \quad (6)$$

3. OSA 系统光谱响应的校正原理

OSA 系统的不平坦光谱响应会给测量带来畸变,光谱响应校正就是设法消除这种探测畸变。当用 OSA 系统测标准灯时,得到一个光谱 $H_{标准}(\lambda, X, Y)$, 原测试系统各个参数不改变,接着再测被测光源,得到一个光谱 $H_{被测}(\lambda, X, Y)$ 。若标准灯和被测光源的真实光谱分别为 $P_{标准}(\lambda)$ 和 $P_{被测}(\lambda)$, 则有

$$H_{标准}(\lambda, X, Y) = P_{标准}(\lambda) \cdot F_{OSA}(\lambda, X, Y), \quad (7)$$

$$H_{被测}(\lambda, X, Y) = P_{被测}(\lambda) \cdot F_{OSA}(\lambda, X, Y). \quad (8)$$

被测光源的真实光谱 $P_{被测}(\lambda)$ 可由(8)式除以(7)式得到,即

$$\frac{H_{被测}(\lambda, X, Y)}{H_{标准}(\lambda, X, Y)} = \frac{P_{被测}(\lambda)}{P_{标准}(\lambda)},$$

$$P_{被测}(\lambda) = \frac{H_{被测}(\lambda, X, Y)}{H_{标准}(\lambda, X, Y)} \times P_{标准}(\lambda). \quad (9)$$

由(9)式可看出,要想得到被测光源的真实光谱 $P_{被测}(\lambda)$, 关键是如何得到标准灯的真实物理

实光谱 $P_{标准}(\lambda)$ 。对于已知色温的标准灯的真实光谱 $P_{标准}(\lambda)$, 可以用普朗克黑体辐射公式来近似表示。单位波长增量的辐射出射度 $P_{标准}(\lambda)$ 为

$$P_{标准}(\lambda) = \frac{c_1}{\lambda^5 (\exp(c_2/\lambda T) - 1)} \quad (\text{W/m}^2), \quad (10)$$

式中

$$c_1 = 2\pi^5 c^2 h / 15 = 3.7418 \times 10^{-16} (\text{W} \cdot \text{m}^2),$$

$$c_2 = hc/k = 0.014388 (\text{m} \cdot \text{K}).$$

三、灯光谱的测试

被测光源是 SQ75 型超高压氙灯,其功率为 75W,工作电流为 3.5—5A(本实验为 4.2A),色温为 6000 K, 具有高亮度和高的发光效率,能辐射出从紫外到近红外的强烈的连续光谱,可见区光色极近似于日光。

由于 OSA 系统的光谱响应是不平坦的,所以可用已知色温的光强度标准灯来校正 OSA 系统的不平坦光谱响应为平坦响应。

本实验所用的 BDQ-8 光强度标准灯,其供电电流为 6.59A,供电电压为 105.9V,光强是 1180cd,属钨丝灯,标称色温为 2859K。

灯光谱测试方法如图 3 所示。

先摄氙灯光谱,后摄标准灯光谱,每次摄谱都需要扣除背景光,并把光谱数据存入光谱数据软盘。关于 OSA 系统的光谱响应校正程序和自动多幅作图程序,请分别参阅文献[1, 2]。使用校正程序软盘在 WP4 主机内对光谱数据软盘内存有的光谱进行校正,并存入原光谱数据软盘。使用作图程序软盘、光谱数据软盘、WP4 主机和打印机(或 X-Y 记录仪)便可打印(或画)出未校正和已校正的氙灯光谱图。

四、氙灯光谱图

氙灯测试的波长范围是 3668—8369 Å, 分七段摄取,每段谱宽 693 Å, 各段谱之间重叠约 25 Å。本实验所要测试的未做过光谱校正的氙灯相对光谱辐射出射度光谱图见图 4, 做光谱校正的氙灯相对光谱辐射出射度光谱图见图 5。

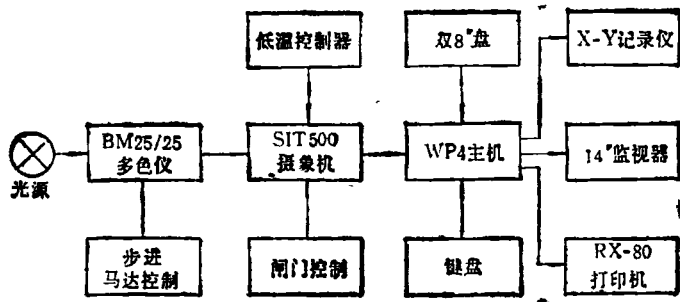


图3 灯光谱测试方法

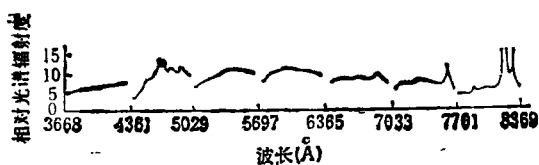


图4 未做校正的氙灯相对光谱辐射度光谱

由前面所述可知,用 OSA 系统测试光源光谱强度是很方便的。从图 4 可以看出,未做校正的各段氙灯光谱之间是衔接不上的,整个氙灯光谱是畸变的。而由图 5 可以看出,已做校正的各段氙灯光谱之间是衔接很好的,整个氙灯光谱是逼真的,可见区的光谱分布十分接近于日光,只是在 4700 Å 附近有个别较强的谱

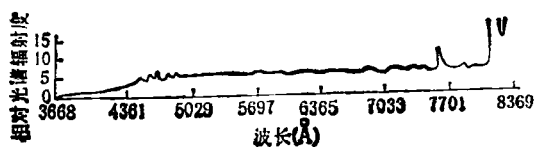


图5 已做校正的氙灯相对光谱辐射度光谱

线。这说明 OSA 系统的光谱响应校正原理和测试光源光谱方法是正确的,而且测试结果是准确的。不论 OSA 系统用于何种目的,凡是要进行光谱强度测试,都需要做光谱响应校正。不过绝对光谱强度测试条件比相对光谱强度测试条件更严格些。

- [1] 杜翰影等,光学与光谱技术, No. 3 (1986), 6.
 [2] 杜翰影等,光学与光谱技术, No. 1(1987), 46.

(上接第 750 页)

或精细结构常数或其他任何基本偶合常数会随时间改变或在不同宇宙中不同。它们是动力学的本征值,就如同运动常数一样对所有由虫孔相互连结的宇宙都相同。但是,和对由本征态叠加成的态进行测量所得的结果一样,任何这种自然常数的物理值只能由一个几率分布来预言,这个几率分布决定于虫孔的动力学。这样,将量子力学用于宇宙波函数时会遇到一个内在的问题。通常,几率分布被解释为在大量重复的实验中得出某一结果的可能性。但是,这类宇宙学问题不可能有任何可重复的实验。

几个月前,柯尔曼证明,如果在稀薄气体近似下来处理这一问题,这时绝大多数虫孔比普朗克长度大一个量级,则 λ 的几率分布是一双

指数函数 $\exp[\exp(3\pi/G\lambda)]$ 。因而,宇宙常数的几率分布在 $\lambda = 0$ 处有一无限高的峰。所以,等效宇宙常数在任何时刻和地点都完全不可能得到非零的测量结果。

乐观的宇宙学家认为,用这种新的虫孔计算,再应用适当的宇宙波函数,有可能对宇宙常数为零的情况给出可靠的解释。但是,尽管不少量子引力方案的确给出了有虫孔的解,可是存在虫孔是否是引力的量子理论的要求尚不清楚。此外,是否其它基本常数的几率分布也呈 δ 函数形式,从而也是可以预言的还存在着争论。

(邓祖淦根据 *Physics Today* 1989 年
第 3 期第 21—24 编译)