

# 一种色散相减型凹面全息光栅双单色仪

马仁宏 李静秋

(中国科学院长春光学精密机械研究所 长春 130022)

**摘要** 叙述了一种色散相减型凹面全息光栅双单色仪的结构原理、主要性能和仪器重要技术指标,进行了杂散光的测试;介绍了该仪器的实际应用。

**关键词** 色散相减 双单色仪 杂散光 线色散率 分辨率

## 1 引言

单色仪是进行光谱测试的核心仪器,它能产生光谱分析所需要的各种单色光,但也存在程度不同的杂散光。一般单色仪的杂散光水平多为 $10^{-2} \sim 10^{-4}$ ,这对许多高精度光谱测试工作是远远不够的。例如在激光喇曼光谱研究中,杂散光可能将极弱的喇曼讯号淹没,根本无法观测喇曼光谱;而在高吸光度物质光谱分析工作中,杂散光可能导致严重的测量误差。如果被测物质吸光度高于7Abs,而又不允许稀释,则单色仪的杂散光应该小于 $10^{-8}$ 。在这些情况下必须采用双单色仪以减小杂散光,这对微弱讯号光谱测量是至关重要的。

为了适应这种高精度光谱测试工作需要,我们研制了一种色散相减型凹面全息光栅双单色仪,并成功地应用在石油产品生产线上。

## 2 色散相减型双单色仪的结构原理

双单色仪是将两个单色仪连接起来使用的仪器,第一个单色仪的出射狭缝通常是第二个单色仪的入射狭缝。由于光线经过两个单色仪两次色散,因此从第二个单色仪出射狭缝射出的单色光光谱质量明显改善。

由于两个单色仪连接方式不同,它们的色散率、象差、角放大率和杂散光各不相同。根据色散性质,双单色仪一般分为色散相加型和色散相减型两大类。

在光谱辐射计量和喇曼光谱研究中,常常要求单色仪有较高的光谱分辨率和较低的杂散光,而选用色散相加型双单色仪。在色散相加系统中双单色仪的色散率和彗差是两个单色仪的色散率和彗差之和,分辨率有所提高,杂散光也有一定改善。而在石油化工、环保、医药等行业以及某些喇曼光谱研究中,并不要求特别高的光谱分辨率,但因样品吸光度很大,或喇曼散射强度很小,要求单色仪的杂散光水平必须降到非常低的水平,这时常常选用色散相减型双单色仪。在色散相减系统中,两个单色仪的彗差互相抵消,总色散率等于第一个单色仪的色散率,第二个单色仪主要起消除散光的作用,因此色散相减型双单色仪虽然分辨率没有多大提高,但杂散光却显著改善。

根据色散加法原理<sup>[1]</sup>,可以判断一个双单色仪是色散相加型还是色散相减型。设想在双单色仪入缝 $S_1$ 和出缝 $S_3$ 处各放置一个多色光源,它们将在中间狭缝 $S_2$ 形成两列光谱。如果两列光谱有相同指向,则双单色仪为色散相减型。如果两列光谱具有相反指向,则双单色仪为色散相加型。

设双单色仪的第一及第二单色仪线色散率分别为 $(dl/d\lambda)_1$ 和 $(dl/d\lambda)_2$ ;角色散率分别为 $(d\theta/d\lambda)_1$ 和 $(d\theta/d\lambda)_2$ ;聚焦物镜的焦距分别为 $(f_2)_1$ 和 $(f_2)_2$ ;横向放大率分别为 $\gamma_1$ 和 $\gamma_2$ ,则第一个单色仪的线色散率为:

$$(dl/d\lambda)_1 = (f_2)_1 \cdot (d\theta/d\lambda)_1 \cdot \gamma_1$$

双单色仪的总线色散率为:

$$dl/d\lambda = (f_2)_1 \cdot (d\theta/d\lambda)_1 \cdot \gamma_1 \cdot \gamma_2 \pm (f_2)_2 \cdot (d\theta/d\lambda)_2 \cdot \gamma_2 \quad (1)$$

当两个单色仪完全相同、且横向放大率 $\gamma_1 = \gamma_2 = 1$ 时,色散相加型双单色仪的总线色散率为第一个单色仪线色散率的二倍,即:

$$(dl/d\lambda)_{加} = 2 \cdot (dl/d\lambda)_1 \quad (2)$$

而色散相减型双单色仪的总线色散率为零,即:

$$(dl/d\lambda)_{减} = 0 \quad (3)$$

因此色散相减型双单色仪有时也称为零色散单色仪。但是,由于两个单色仪间有一中间狭缝,由第一个单色仪射出的光束不会再和其它波长的光复合起来,所以实际上双单色仪的总线色散率并不等于零,而等于第一个单色仪的色散率,即:

$$(dl/d\lambda)_{-} = (dl/d\lambda)_1 \quad (4)$$

双单色仪的总分辨率和总线色散率相似,当两个单色仪完全相同且 $r_1 = r_2$ 时,色散相加型双单色仪的总分辨率 $R_{加}$ 是一个单色仪分辨 $R_1$ 的二倍即:

$$R_{加} = 2R_1 \quad (5)$$

而色散相减型双单色仪的总分辨率 $R_{减}$ 等于第一个单色仪的分辨率:

$$R_{减} = R_1 \quad (6)$$

根据以上所述双单色仪的一般原理,我们设计了一台可在紫外区对有高吸收的石油产品进行在线监测的色散相减型凹面全息光栅双单色仪。

如所周知,平面光栅单色仪主要有四种基本类型、即 littorow 型、Ebert 型、Czerny - Turner 型和 Chupp - Grantz 型。而凹面光栅单色仪则有罗兰圆装置及罗兰圆外装置等多种。由于石油产品的吸收光谱在紫外区,单色仪光学元件的紫外损失较大,应尽量减少单色仪光学面数,所以我们选用闪耀波长在紫外区的凹面全息光栅,反射面少,杂散光低,结构简单。单色

仪装置采用 Seya-Namioka 型。

图1为仪器光学系统图。

光源  $A$  发出的光经前单色仪入射狭缝  $S_1$  后, 以入射角  $\alpha$  投射到光栅  $G_1$ , 经光栅色散后以衍射角  $\beta_1$  会聚到前单色仪出射狭缝  $S_2$ , 经平面反射镜  $M$  与后单色仪折叠串连。 $S_2$  同时是后单色仪的入射狭缝。由前单色仪色散的单色光以入射角  $\alpha_2$  投射到光栅  $G_2$ , 再以衍射角  $\beta_2$  会聚到后单色仪出射狭缝  $S_3$  处。波长扫描时, 保证两光栅同

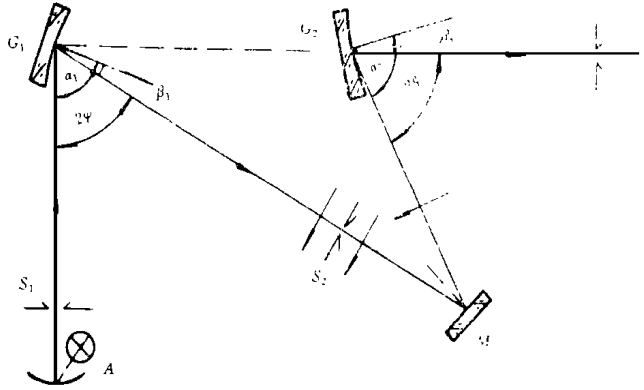


Fig. 1 Optical system of double monochromator

则在中缝  $S_2$  和出缝  $S_3$  给出相

同波长的单色光。根据前面所述色散加法原理, 在狭缝  $S_1$  和  $S_3$  处各放置一个多色光源, 它们在中间狭缝  $S_2$  处所形成的两列光谱如箭头所示, 具有相同指向, 因而该双单色仪为色散相减型。虽然色散与单单色仪相同, 但杂散光却大大减小。

由于 Seya-Namioka 型单色仪入射光束与衍射光束宽度不等, 光栅入射臂长与出射臂长不等, 因而单单色仪放大率不为 1。色散相减型双单色仪放大率变化更大。为了使双单色仪能量输出和光谱分辨率最佳, 双单色仪入缝  $S_1$ 、中缝  $S_2$ 、出缝  $S_3$  间必须满足以下关系:

$$S_2 = \frac{f_2}{f_1} \cdot \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} S_1 \quad (7)$$

$$S_3 = \left( \frac{f_2}{f_1} \cdot \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} \right)^2 \cdot S_1 \quad (8)$$

相应的光谱带宽为

$$\Delta \lambda = d S_1 \left( \frac{\cos \alpha}{f_1} \right)^2 / \frac{\cos \beta}{f_2} \quad (9)$$

式中

$d$ ——光栅常数;  $f_1$ ——凹面光栅入射臂长;  $f_2$ ——凹面光栅出射臂长。

平面光栅单色仪工作时, 要从连续光源中分出所需波长的辐射, 只要转动光栅, 入射狭缝和出射狭缝固定不动, 就可达到波长扫描目的, 机构结构简单。用凹面光栅构成单色仪时, 各种形式的罗兰圆装置不可能仅仅转动光栅来进行光谱扫描, 而 Seya-Namioka 型单色仪, 则可以在一定范围和条件下, 只转动光栅即可在出射狭缝得到所需波长精确聚焦的狭缝像, 因此也能和平面光栅单色仪一样, 利用正弦机构实现波长线性扫描。<sup>[2]</sup>

$$\lambda = \frac{2d}{m} \cos \Phi \cdot \sin \theta \quad (10)$$

式中:  $m$ ——光谱级次;  $\Phi$ ——光栅上入射与衍射光线夹角之半;  $\theta$ ——光栅转角。

在波长扫描过程中,为了保证双单色仪的两块光栅  $G_1$  和  $G_2$  严格同步,第一个单色仪的光栅  $G_1$  由正弦机构驱动,第二个单色仪的光栅  $G_2$  由和正弦杆相连的平行四边形机构驱动,如图2所示。平行四边形对边杆长严格相等,消除两光栅轴系晃动和铰链间隙,即可实现两光栅严格同步转动。

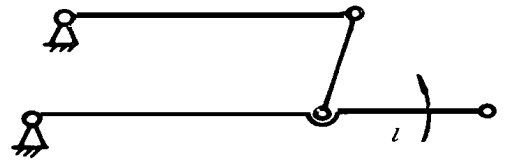


Fig. 2 Mechanics of parallelogram

但由于加工调试等因素,平行四边形对边杆长不可能完全相等,因此,平行四边形杆长应能微调,这对保证双单色仪的波长准确度和重复性是必要的。

### 3 双单色仪的杂散光

单色仪是用以获得窄带波长(单色)辐射的光学装置。然而在连续光照明时,它除了输出选定波长上一定通带的辐射外,还输出少量波长在该通带以外的辐射;同样,当用单色光照明单色仪时,它除了在该单色波长上有输出外,还有少量单色光散布在其它波长位置。这种在单色仪调定波长通带以外的少量辐射与单色仪调定波长上一定通带的辐射之比称为单色仪的杂散光。杂散光是导致光谱测量误差增大的重要因素。严重时,杂散光能够淹没微弱的光谱讯号,使光谱测量无法进行。所以对单色仪杂散光的研究一直受到人们重视。

影响单色仪杂散光的因素很多,如由光栅制造缺陷产生的鬼线及散射光;由光学元件表面疵病、灰尘及机械零件造成的散射;由光学系统多重色散产生的杂光等等。如前所述,本仪器采用凹面全息光栅,没有鬼线,散射光很小;Seya-Namioka型装置不产生多重色散;仪器内部严格清洁并涂黑;色散相减型双单色仪,加中间狭缝和挡光板,可以把杂光抑制到非常低的水平。

但是,由于杂散光测试讯号很微弱,存在许多实验技术上的困难。国际上通常采用美国材料试验协会(ASTM)规定的连续光截止滤光片法<sup>[3]</sup>或激光衰减片法<sup>[4]</sup>。

我们的测试装置见图3。

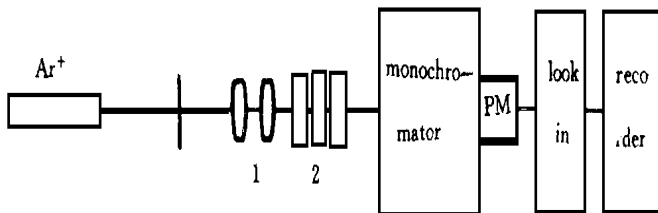


Fig. 3 Testing apparatus of stray light

用500mW  $Ar^+$  激光经扩束显微镜1精确聚焦在单色仪入缝中心,在光栅上得到一个强度按高斯分布的照明,并刚好充满光栅,将单色仪波长精确调定至514.5nm,使光束在出射狭缝对称分布,插入衰减片2,调节波长,使光电倍增管输出最大。测出单色仪主讯号  $S_{\pm}$  及零点讯号  $S_0$ ,将单色仪波长调至  $514.5 \pm 5nm$ ,移去衰减片,测量杂散光讯号  $S_{杂}$ 按下式计算杂散光:

$$SL = \frac{S_{杂} - S_0}{S_{\pm} - S_0} \times 10^{-n}$$

式中  $n$  —— 衰减片衰减系数。

在  $514.5 \pm 5\text{nm}$ , 该色散相减型全息凹面光栅双单色仪的杂散光为  $2 \times 10^{-10}$ 。

## 4 结果及应用

1992年至1994年先后研制四台套色散相减型全息凹面光栅双单色仪, 加极短光程吸收池, 用差式光谱法, 在兰州炼油厂润滑油生产线上进行在线测量, 监测石油产品中的芳烃含量, 成功地解决了吸光度高达7AbS石油产品不经稀释即可在线测量的技术关键。石油产品中芳烃含量的多少, 表征了石油产品精制浓度和油品质量。在石油产品生产过程中随时监测芳烃含量, 对石油产品生产过程中的质量监控、优化操作都具有十分重要的意义。利用光谱技术通过紫外分光测试, 可以确定油品中芳烃含量。但是由于吸光度高达7AbS, 用普通分光光度计测试需将样品稀释625倍, 这只能在实验室进行。在石油产品生产现场, 很难对油品进行精确稀释, 无法实现在线测试。

而用色散相减型凹面全息光栅双单色仪的在线测试装置则完全突破了以往采用现场取样、实验室稀释、费时费力的传统方法, 为光谱技术在石油工业在线测试开辟了一条新路。

仪器主要技术性能如下:

波长范围: 200 ~ 800nm

波长精度:  $\pm 0.3\text{nm}$

波长重复性: 0.15nm

光谱带宽: 0.5、1、2、5、10nm

相对孔径: 1/4.5

逆线色散: 4nm/mm

杂散光:  $10^{-10}(514.5 \pm 5\text{nm})$

测量范围: 0-7AbS

该仪器在石油生产现场苛刻条件下, 连续运行三年, 无故障率达97%以上, 性能稳定可靠, 准确率高。在炼油化工、环保、医药、化妆品等行业也将有广阔的应用前景。

### 参 考 文 献

- 1 Murty M V R K. Theory and Principles of Monochromators, Spectrometers and spectrographs. Optical Engineering, 1974, 13(1): 23 ~ 29
- 2 乌村辉郎. Fundamental Techniques for spectroscopy. 分光研究, 1977, 26(1): 29 ~ 45
- 3 Francis R J. Stray light. Silica Coating and Master Holographic Gratings, Pye Unicam Ltd, Cambridge, England, 1981
- 4 Verrill J F. The specification and measurement of scattered light from diffraction gratings. Optica Acta, 1978, 25(7): 531 ~ 547

## The Concave Holographic Grating Double Monochromator of Cancellation in Dispersion

MA Ren-Hong, LI Jing-Qiu

(*Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,*  
*Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022*)

### Abstract

The concave holographic grating double monochromator of cancellation in dispersion is described in this paper, including its principle, main performance, and the test of the stray light which is this instrument's important technology performance and practical application of this instrument.

**Key words:** Cancelling dispersion, Double monochromator, Stray light, Linear dispersion, Resolution

马仁宏 女, 1952年生, 1977年毕业于长春光学精密机械学院光学仪器专业, 1977年后在长春光机所从事光谱仪器设计工作。现职务工程师, 1988年获中国科学院科技进步二等奖, 曾在“仪器仪表学报”、“光谱仪器与分析”、“光机电信息”杂志发表文章。