

# 弱辐射光谱编码测量技术的研究

张凤生<sup>1</sup>, 叶 军<sup>1</sup>, 叶虎年<sup>2</sup>

(1. 青岛大学机电工程学院, 山东 青岛 266071;

2. 华中理工大学机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要**, 本文将多通道并行检测技术应用于常规的扫描型光谱仪, 基于国产 WDP500-2A 型平面光栅单色仪设计了光谱编码测量系统并进行了实验验证。该系统利用两块多狭缝编码模板分别取代原仪器中的入射狭缝和出射狭缝, 既增大了进入仪器的辐射通量, 又实现了多个光谱元同时测量的多通道优点, 大大提高了仪器分析弱辐射信号的能力。为简化编码运动机构, 文中设计了具有循环编码构形的编码模板。模板上的狭缝设计成圆弧状以便有效地补偿衍射光栅的光谱线弯曲, 减小测量误差。

**关键词**: 光学多通道技术; 调制光谱技术; S-矩阵

**中图分类号**: TH744.1 **文献标识码**: A

## 1 引言

弱辐射信号的光谱分析目前已成为人们深化认识自然的重要手段。目前, 弱辐射光谱的分析多是利用傅里叶变换光谱仪。但此类仪器对工作环境要求高, 价格昂贵, 仅限于实验室应用。而常规的扫描型光谱仪则无法胜任弱辐射分析, 因为仪器的基本结构“入射狭缝+色散元件+出射狭缝”极大地限制了辐射通量的有效利用, 信噪比极低。本文的研究工作旨在探索一种同时具有测量信噪比高, 抗干扰性能强, 成本低的弱辐射光谱分析方法。

## 2 测量原理<sup>[1~2]</sup>

光谱编码测量系统是以常规的扫描型光谱仪为基础构成的, 见图1。分别以多狭缝入射模板和出射模板取代原仪器中的入射狭缝和出射狭缝。采用入射模板增大了进入仪器的辐射通量, 出射模板实现多谱元编码测量, 即多通道测量, 从而改善测量信噪比。

### 2.1 编码测量

假设在入射光阑内有  $n$  条入射狭缝(即入射光阑宽度为单条狭缝宽度  $a$  的  $n$  倍), 出射光阑内有  $m$  条出射狭缝(即出射光阑所限定的谱面被分为  $m$  个光谱元  $\Delta\lambda$ )。由于对应于每一条入射狭缝均有  $m$  个待测光谱元, 因而共有  $n \cdot m$  待测光谱元。入射模板有  $n$  个不同的编码构形, 出射模板有  $m$  个不同的编码构形。两模板的编码构形共有  $n \cdot m$  种不同的组合, 相应得到  $n \cdot m$  个编码测量结果, 即探测器读数。

设  $v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in}$  是第  $i$  个入射模板编码构形,  $w_{j1}, w_{j2}, \dots, w_{jm}$  是第  $j$  个出射模板编码构形, 则相应的探测器读数为

$$\Psi_{ij} = \sum_{r=1}^n \sum_{s=1}^m v_{ir} \varphi_{rs} w_{js} + e_{ij}$$

$$1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m$$

式中  $\varphi_{rs}$  是由第  $r$  个入射狭缝入射的辐射的第  $s$  个光谱元的强度,  $e_{ij}$  是此次读数的探测器噪声。

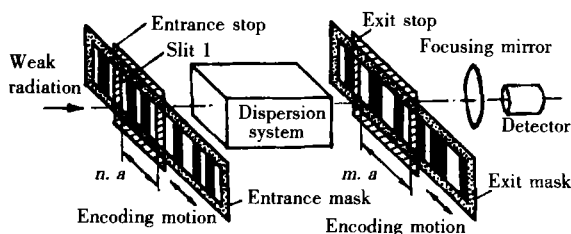


Fig. 1 Schematic diagram of spectral coding measurement ( $a$  means the width of single slit)

令  $\Psi = [\Psi_{ij}]$  是含有  $n \cdot m$  个测量值的  $n \times m$  矩阵,  $\Phi = [\varphi_r]$  是含有  $n \cdot m$  个被测光谱成分的  $n \times m$  矩阵,  $E = [e_{ij}]$  是  $n \times m$  误差矩阵,  $V = [v_{ir}]$  是描述入射模板构形的  $n \times n$  矩阵,  $W = [w_{\mu}]$  是描述出射模板构形的  $m \times m$  矩阵, 则编码测量的数学描述为

$$\Psi = V\Phi W^T + E \quad (1)$$

### 2.2 解码再现光谱

为了由式(1)解码求得  $\Phi$ , 对探测器噪声做如下假设: ①  $e_{ij}$  是独立于投射到探测器上的辐射强度的随机变量, 且  $E(e_{ij}) = 0$ ; ②  $E\{e_{ij}e_{kl}\} = \sigma^2 \delta(i, k) \cdot \delta(j, l)$ , 式中  $\sigma$  为均方根噪声电平。若  $V^{-1}$  和  $W^{-1}$  存在, 则  $\Phi$  的无偏估计  $\hat{\Phi}$  为

$$\hat{\Phi} = V^{-1}\Psi(W^{-1})^T \quad (2)$$

这一估计量的平均均方误差  $\bar{\sigma}$  为

$$\begin{aligned} \bar{\sigma} &= \frac{1}{nm} \sum_{r=1}^n \sum_{\mu=1}^m E\{(\hat{\varphi}_{r\mu} - \varphi_{r\mu})^2\} \\ &= \frac{\sigma^2}{nm} Tr(V^T V)^{-1} \cdot Tr(W^T W)^{-1} \end{aligned}$$

式中,  $Tr$  代表矩阵的迹。例如, 矩阵  $A$  的迹记作  $Tr(A)$ 。由此可得编码测量方法相对于常规光谱仪的信噪比增益  $G$  为

$$G = \left(\frac{\sigma^2}{\sigma}\right)^{1/2}$$

$$= [nm/Tr(V^T V)^{-1} \cdot Tr(W^T W)^{-1}]^{1/2} \quad (3)$$

合理选择矩阵  $V$  和  $W$  使  $G$  值远大于1, 即可提高测量信噪比。

光谱再现结果的分析:

$\hat{\Phi} = [\hat{\varphi}_{r\mu}]$  的行与入射狭缝一一对应, 第  $i$  行即代表由第  $i$  条入射狭缝入射辐射的光谱的一部分(波长宽度  $m \cdot \Delta\lambda$ )。每完成一次编码测量并解码, 所测得的辐射光谱范围即增加  $m \cdot \Delta\lambda$ 。实际测量中, 按所分析的光谱范围执行循环“编码测量并解码 → 调色散系统使光谱面中心波长增加或减小  $m \cdot \Delta\lambda$  → 再编码测量并解码”若干次, 即可获得一个光谱曲线族, 族中的每一曲线代表由相应入射狭缝入射的辐射的光谱分布。

特别地, 当入射辐射在入射光阑范围内是均匀分布时, 根据光谱仪的色散特性, 此时进入第  $r$  条入射狭缝并由第  $s$  条出射狭缝出射的光与进入第  $(r+t)$  条入射狭缝并由第  $(s+t)$  条出射狭缝出射的光具有相同的波长, 即  $\varphi_r = \varphi_{(r+t)(s+t)}$ 。设

图1中由位于入射光阑边缘处的狭缝1进入仪器的辐射在出射光阑处形成的  $m$  个光谱元为  $\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_{m-1}$ , 则此时共有  $(m+n-1)$  个未知谱元  $\varphi_{-(n-1)}, \dots, \varphi_{-1}, \varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_{m-1}$ ,  $\hat{\Phi}$  为

$$\hat{\Phi} = \begin{bmatrix} \hat{\varphi}_0 & \hat{\varphi}_1 & \dots & \hat{\varphi}_{m-1} \\ \hat{\varphi}_{-1} & \hat{\varphi}_0 & \dots & \hat{\varphi}_{m-2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \hat{\varphi}_{-(n-1)} & \hat{\varphi}_{-(n-2)} & \dots & \hat{\varphi}_{m-n} \end{bmatrix}$$

由此可得到各未知谱元的无偏估计, 即测量结果为

$$\hat{\varphi}_t = \begin{cases} \frac{1}{n} \sum_{r=1}^n \hat{\varphi}_{r(r+t)} & (0 \leq t \leq m-n) \\ \frac{1}{m-t} \sum_{r=1}^{m-t} \hat{\varphi}_{r(r+t)} & (m-n \leq t \leq m-1) \\ \frac{1}{n-|t|} \sum_{r=1}^{n+|t|} \hat{\varphi}_{r(r+t)} & (t < 0) \end{cases}$$

## 3 测量系统设计

### 3.1 光路设计

本文利用国产 WDP500-2A 型平面光栅单色仪设计了一个光谱编码测量系统, 光路设计如图2所示。其特点是:

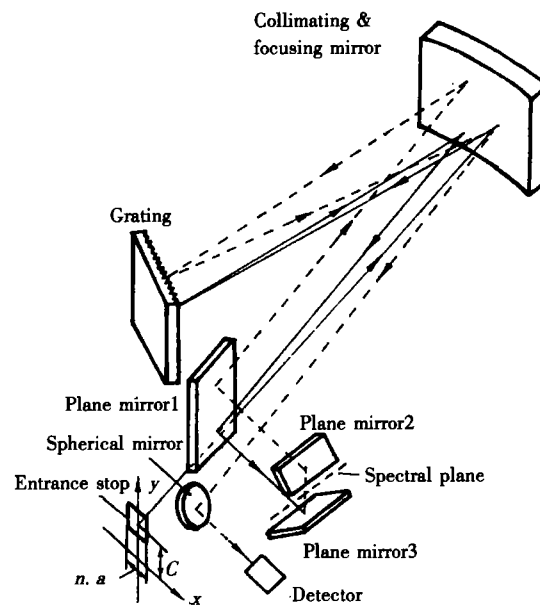


Fig. 2 Diagram of the optical system

①色散系统为 Littrow 型光学系统,采用离轴抛物镜作准直和光谱聚焦物镜,色散系统没有球差,彗差则是两镜的彗差相减,改善了谱线质量。②入射光阑中心偏离光栅主截面  $c$ ,两平面反射镜2和3相交成直角,其作用:一是折转光路180°,使两次编码后的辐射反向通过光学系统消色散,从而使其汇聚到较小受光面积的探测器上,减小噪声。二是使正、反向光路相互隔开以便探测器接收。

### 3.2 编码模板

(1)编码构形设计<sup>[3]</sup> 所谓编码构形就是模板上透光狭缝和不透光狭缝的排列顺序。编码构形的设计是基于循环  $S$ -矩阵。设计依据是:①循环  $S$ -矩阵是由1和0构成的方阵,矩阵元素1和0刚好对应于模板的透光狭缝和不透光狭缝;矩阵中的每一行都可由其前一行循环左移或右移一位而得到,使得编码测量过程大大简化。②基于  $S$ -矩阵的编码可应用快速阿达玛(Hadamard)变换解码,解码速度快。③  $\text{Trace}(S_n S_n^T)^{-1} = 4n^2 / (n + 1)^2 \approx 4$ 。

本文选取  $n = m = 15$ ,即入射模板和出射模板的设计均是基于15阶循环  $S$ -矩阵:

$$S_{15} = \begin{bmatrix} a_0 & a_1 & \dots & a_{13} & a_{14} \\ a_1 & a_2 & \dots & a_{14} & a_0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{14} & a_0 & \dots & a_{12} & a_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 000100110101111 \\ 001001101011110 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 100010011010111 \end{bmatrix}$$

基于  $S_{15}$ 设计的模板编码构形(入射模板和出射模板相同)见图3,模板每向左平移一个码元(即一个狭缝宽度)就变换一个编码构形。

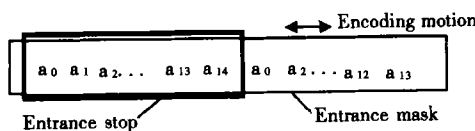


Fig. 3 Diagram of encoding configuration

(2)光谱线弯曲的补偿<sup>[4~5]</sup> 谱线弯曲是由色散元件的分光特性决定的,光栅的谱线弯曲示于图4。根据光栅衍射理论,与主截面成  $\alpha$  角的斜入射平行光束的光栅方程为

$$b \cdot \cos\alpha(\sin i_0 + \sin\theta_0) = k\lambda$$

式中  $b$  为光栅常数,  $k$  为光谱级次,  $\lambda$  为波长。微分上式并做如下变换:①由于色散系统的焦距  $f$  远大于入射狭缝高度,近似取  $\theta_0 = \theta_0$ ,  $\cos\alpha \approx 1$ ,

$\sin\alpha \approx \alpha = h/f$ ; ②将角度量代换为线量并积分;可得

$$x = k\lambda y^2 / (2bf\cos\theta_0) \quad (4)$$

可见,直入射狭缝的谱线弯曲成抛物线状。

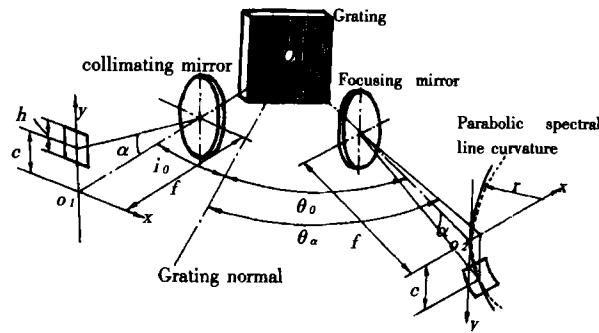


Fig. 4 Diagram of the spectral line curvature of grating (The plane  $O_1O_2$  is principal cross-section)

为了补偿谱线弯曲,应设计出射模板的狭缝弯曲成抛物线状。然而,由于谱线弯曲受多参数的影响,要完全补偿是不可能的。出射模板狭缝弯曲的设计是基于:①由于焦距  $f$  远大于入射光阑和出射光阑的尺寸,遍及整个入射光阑和出射光阑范围,谱线弯曲变化很小,依据闪耀波长  $\lambda_B$  计算;②为简化模板加工,以半径为  $r$  的弯曲狭缝来匹配抛物状的谱线弯曲。 $r$  的确定是利用式(4)计算弯曲谱线上的若干点,而后由最小二乘法求解  $r$ 。

综合上述分析,模板的具体设计参数如下:入射模板:  $n = 15$ ,直缝,缝宽  $d = 0.2$  mm,缝高  $h = 6$  mm。出射模板:  $m = 15$ ,圆弧状狭缝,缝宽  $d = 0.2$  mm,缝高  $h = 6$  mm,  $r = 90$  mm。

(3)模板加工 采用刻画照相法加工模板和光阑。加工过程:先利用“自动绘画刻图机”将模板图形的“负图”放大刻画到聚酯掩膜胶片上,然后用精密照相方法将“负图”缩小复制到超微粒干板上。干板玻璃基片厚1.52 mm,缝宽加工精度  $\pm 1 \mu\text{m}$ ,透光狭缝的透过率  $> 95\%$ ,不透光狭缝的透过率  $< 5\%$ 。

### 3.3 编码运动机构

由步进电机驱动精密丝杆,螺母带动模板移动并由导轨导向。主要设计参数:丝杆螺距1 mm,步进电机(KP56M1-501型)相数4,步距角  $0.9^\circ$ ,步进脉冲当量  $2.5 \mu\text{m}/\text{脉冲}$ 。

## 4 实验结果

实验条件:①探测器采用 WGT-1B 型微光硅光敏管(武汉大学研制);②入射光阑前加一光束调制器,调制频率100Hz。其作用:一是提高光电系统的抗干扰能力,抑制背景辐射;二是变直流信号为交流信号,便于信号处理;③高压汞灯(苏州产,汞灯电源 GGD50Hg)置于约2m 远的地方照射一毛玻璃片,测其漫射光谱;④用微机控制整个系统,包括编码机构控制、数据采集、解码再现光谱。

实验结果示于图5。(a)按常规的单缝扫描方式测得的结果(只利用入射模板和出射模板上的单狭缝,而遮蔽其它狭缝),(b)编码测量结果。

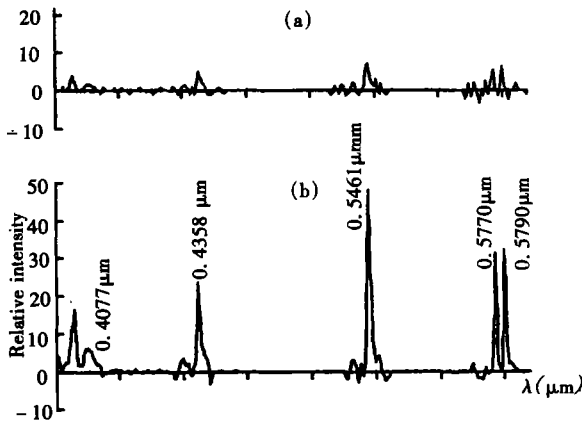


Fig. 5 Experimental results (a) obtained with conventional scanning spectrometer (b) obtained with encoding measurement

### 参考文献:

- [1] Harwit M, Sloane Neil J A. Hadamard transform optics[M]. INC.LTD;ACADEMIC PRESS,1979.
- [2] 吴继宗,等.阿达玛变换成像光谱技术的研究[J].1987,7(3):223-229.
- [3] 张凤生.编码成像光谱仪的编码构形设计与解码算法[J].青岛大学学报,1999,14(2):4-8.
- [4] 林中,范世福,光谱仪器学[M].北京:机械工业出版社,1989.
- [5] 张凤生.编码成像光谱仪的模板设计[J].华中理工大学学报,1995,23(11):31-36.

## Measuring technique of weak radiation spectrum

ZHANG Feng-sheng<sup>1</sup>, YE Jun<sup>1</sup>, YE Hu-nian<sup>2</sup>

(1. College of Electromechanical Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China;

2. College of Mechanical Science & Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The multichannel parallel measuring technique was successfully applied to conventional scanning spectrometer, and the spectral coded measuring system based on WDP500-2A plane grating monochromator has been developed and tested. With the entrance slit and exit slit of the monochromator replaced by two multislit encoding mask respectively, the system not only has high radiation flux but also achieves the advantage to measure multispectral elements simultaneously, all these have remarkably improved its performance to analyze the weak radiation spectrum. To simplify the encoding kinetic mechanism, the masks which have cyclic encoding configuration have been designed. The slits in the encoding mask have been made into the shape of circular arc so as to compensate the spectral line curvature of the grating and reduce the metering error effectively.

**Key words:** multichannel technology; modulation spectrometry; S-matrix;

**作者简介:**张凤生(1962—),男,河北廊坊市人。工学博士,副教授。1983年毕业于长春光学精密机械学院光学仪器专业。1993年于华中理工大学机械科学与工程学院获博士学位。主要从事测控技术,精密测量,智能仪器等方面的研究与开发工作。