

# Seya-Namioka系统真空紫外单色仪的 分辨能力及波长读数精度

王传基

**摘要:**本文分析了Seya-Namioka系统光学参数与离焦量的关系,为选取最佳光学参数提供了依据。同时,简要说明了影响谱线质量及波长读数精度的因素,并讨论了补偿波长读数误差的方法。

Seya-Namioka系统的真空紫外单色仪是迄今为止仍被广泛应用的一种真空紫外光谱仪器。它的主要优点是结构简单、紧凑。适用波段可由可见光向短波一直延伸到30-50nm。为了进一步了解这种单色仪的光学、机械性能,并为确定光学、机械参数提供依据,本文将着重分析该系统的光学参数对离焦的影响及影响波长读数精度的各项因素,并计算了分辨能力。为了说明这些分析的正确性,文内对计算结果和实测结果作了比较。

## 一、Seya-Namioka系统的光学参数

按Seya-Namioka提出的原理,光学系统如图1所示。由于这类仪器的主要特点之一是波长扫描时入缝和出缝的位置不变,即入射光束与出射光束的方向不变,因此,即使在零级谱线位置入缝、出缝、球面凹面光栅顶点三者都严格位于罗兰圆上。可是,当凹面光栅绕通过其顶点的垂直轴转动实现波长扫描时,入缝与出缝均将离开罗兰圆。故不同波长的谱线不可能全都严格地与出缝重合,必然存在离焦现象。问题是能否选择一组合理参数,使该单色仪在一定波段内产生的离焦尽可能小,从而保证该系统能获得满意的波长分辨能力。

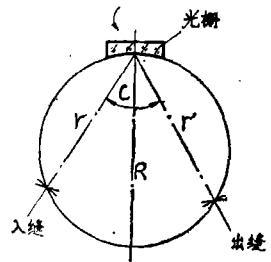


图 1

1952年, Seya<sup>[1]</sup>首先分析了光栅旋转时谱线的聚焦情况,并提出:如果入缝、出缝对光栅顶点的夹角(即光束偏向角C)接近70°时,该系统可在相当的波段范围内具有良好的聚焦特性。1959年, Namioka按此结构参数制成了第一台仪器,并作了更详细的分析<sup>[2]</sup>。以后,不同国家生产的这类仪器虽然都符合Seya上述结论,但所选用的参数值却略有区别。如美国生产的78-651型, C = 70°; 日本的SGV-50及美国的231型, C = 70°15', Γ = 0.8181R, Γ' = 0.8176R; 而在有的著作中<sup>[3]</sup>, 取 C = 70°30', Γ = Γ' = 0.8166R。为了选取一组最佳参数,下面将进一步分析上述参数对离焦的影响。

根据Namioka的推导,球面凹面光栅的聚焦条件为:

$$\Gamma' = \frac{\cos^2 \beta}{\frac{\cos \alpha + \cos \beta}{R} - \frac{\cos^2 \alpha}{\Gamma}}$$

$$\text{其中 } \alpha \text{ (入射角)} = \frac{C}{2} + \sin^{-1} \frac{\lambda}{2d \cos C/2}$$

由此求得:

$$\Gamma = R \frac{\cos^2 \beta_1 \cos^2 \alpha_1 - \cos^2 \beta_2 \cos^2 \alpha_2}{\cos^2 \beta_2 (\cos \alpha_1 + \cos \beta_1) - \cos^2 \beta_1 (\cos \alpha_2 + \cos \beta_2)}$$

其中  $\alpha_1 = \frac{C}{2} + \sin^{-1} \frac{\lambda_1}{2d \cos C/2}$

$$\alpha_2 = \frac{C}{2} + \sin^{-1} \frac{\lambda_2}{2d \cos C/2}$$

$$\beta_1 = C - \alpha_1, \quad \beta_2 = C - \alpha_2$$

取  $R = 1\text{m}$ ,  $d = \frac{1}{1200}\text{mm}$ ,  $\lambda_1 = 50\text{nm}$ ,  $\lambda_2 = 200\text{nm}$ , 可得下表:

$$\beta \text{ (衍射角)} = \frac{C}{2} - \sin^{-1} \frac{\lambda}{2d \cos C/2}$$

- $\lambda$ : 波长
- $d$ : 光栅刻线距
- $R$ : 光栅曲率半径
- $\Gamma$ : 入缝距
- $C$ : 光束偏向角
- $\Gamma'$ : 像距

如果光栅曲率半径  $R$  及光栅刻线距  $d$  已定, 则像距  $\Gamma'$  将随着波长  $\lambda$ 、光束偏向角  $C$  及入缝距  $\Gamma$  的变化而变化。这是一个包含三个变量的函数。在以往的分析中, 为了简化问题, 往往总是假定入缝位于光栅处于零位时的罗兰圆上, 即  $\Gamma = R \cos C/2$ , 这样, 对应一个  $C$  值, 就可以得到  $\Gamma'$  随波长  $\lambda$  变化的简单函数。如图 2 所示。显然,  $C$  角略有变化时, 离焦情况将有明显差别, 而且, 多数情况不能保证在  $50\text{--}300\text{nm}$  波段内有较小的离焦。

如果对应某个  $C$  值, 选择一个合适的  $\Gamma$ , 也即允许入缝可离开零位时的罗兰圆, 则多了一个变量, 就能使某二个要求的波长的离焦量为 0, 则整个波段的离焦量可望随之减小。为此, 将要求不离焦的两个波长值  $\lambda_1, \lambda_2$  代入上述像距公式, 并使分别求得的像距值相等, 即可求得对应某个  $C$  值的最佳入缝距  $\Gamma$  值。即

$$\Gamma_1' = \frac{\cos^2 \beta_1}{\frac{\cos \alpha_1 + \cos \beta_1}{R} - \frac{\cos^2 \alpha_1}{\Gamma}}$$

$$\Gamma_2' = \frac{\cos^2 \beta_2}{\frac{\cos \alpha_2 + \cos \beta_2}{R} - \frac{\cos^2 \alpha_2}{\Gamma}}$$

取  $\Gamma_1' = \Gamma_2'$

$$\therefore \frac{\cos^2 \beta_1}{\frac{\cos \alpha_1 + \cos \beta_1}{R} - \frac{\cos^2 \alpha_1}{\Gamma}} = \frac{\cos^2 \beta_2}{\frac{\cos \alpha_2 + \cos \beta_2}{R} - \frac{\cos^2 \alpha_2}{\Gamma}}$$

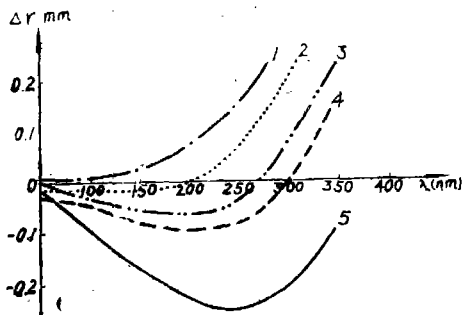


图 2

- 1  $C = 70^\circ 30'$
- 2  $C = 70^\circ 22'$
- 3  $C = 70^\circ 15'$
- 4  $C = 70^\circ 12'$
- 5  $C = 70^\circ$

C角	68°	69°	70°	70°15′	70°30′	71°	72°
$\Gamma$ mm	834	826.98	819.92	818.15	816.37	812.82	805.67

按上述各组参数求得的离焦曲线如图 3 所示:

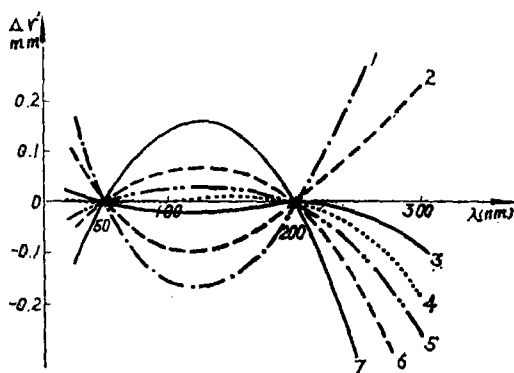


图 3

- 1  $C = 68^\circ$   $r = 834\text{mm}$       2  $C = 69^\circ$   $r = 826.98\text{mm}$       3  $C = 70^\circ$   $r = 819.92\text{mm}$   
 4  $C = 70^\circ 15'$   $r = 818.15\text{mm}$       5  $C = 70^\circ 30'$   $r = 816.37\text{mm}$       6  $C = 71^\circ$   $r = 812.82\text{mm}$   
 7  $C = 72^\circ$   $r = 805.67\text{mm}$

显然, 如果单色仪适用的波段是50—300nm, 则选用光束偏向角  $70^\circ$ — $70^\circ 30'$  都能取得满意的结果, 由于正入射真空紫外光谱仪器的主要工作波段是50—200nm, 则选取  $C = 70^\circ 15'$ ,  $\Gamma = 0.81815R$  是更为理想的。

## 二、谱线质量及分辨能力

Seya-Namioka系统与垂直入射系统(入射角 $\alpha < 10^\circ$ )相比, 由于入射角较大, 谱线象散及高级象差明显增大。因此, 谱线质量除了与离焦影响有关外, 与狭缝高度、光栅刻划面积及波长等均有关。这里, 不对各项因素的影响作详细的分析, 而是从计算谱线点列图的结果中作进一步的讨论\*。

取  $R = 998.8\text{mm}$ ,  $\Gamma = 817.12\text{mm}$ ,  $d = \frac{1}{1200}\text{mm}$ 。为了讨论问题方便, 先取入缝宽度及入缝高度均为零, 光栅刻划面积分  $30\text{mm}$  (高)  $\times 50\text{mm}$  (宽) 及  $30\text{mm}$  (高)  $\times 20\text{mm}$  (宽) 二种, 由波长为  $0$ 、 $58.4\text{nm}$ 、 $174.27\text{nm}$ 、 $253.7\text{nm}$  各谱线的点列图求得的谱线线宽如下表所示。

由下表可见:

1. 分辨率  $\frac{\lambda}{\Delta\lambda}$  随波长变化不大 (不超过20%)
2. 光栅宽度对分辨能力的影响是十分显著的。光栅宽度增加时, 刻线数增多, 理论分

\* 光线追迹计算由俞志成同志完稿

波 长λ(nm)		0	58.4	174.27	253.7
光栅刻划面积	谱线线宽mm	0.017	0.043	0.118	0.178
	半宽度mm	0.0385	0.0215	0.0559	0.089
30mm (高) × 50mm (宽)	分辨能力Δλ (nm)	0.007	0.018	0.047	0.074
	分辨率 $\frac{\lambda}{\Delta\lambda}$		3244	3708	3428
31mm (高) × 21mm (宽)	谱线线宽mm	0.003	0.007	0.019	0.029
	半宽度mm	0.0015	0.0035	0.0095	0.0145
	分辨能力Δλ(nm)	0.0012	0.0029	0.0079	0.012
	分辨率 $\frac{\lambda}{\Delta\lambda}$		20138	22059	21142

分辨率提高，但像差的影响也随之增大。在光栅宽度达20mm时，实际分辨率相当于理论分辨率  $\frac{W}{d} = \frac{20}{1/1200} = 24000$  的80%左右，接近极限分辨能力。而当光栅宽度达50mm时，分辨率  $\frac{\lambda}{\Delta\lambda}$  降到理论分辨率  $\frac{50}{1/1200} = 60000$  的6%。因此，如果希望该系统能提供尽可能高的分辨能力，则使用时应在光栅前加一个减小光栅宽度的光栏；如果不追求高的分辨能力，而要求系统输出尽可能高的光流，则光栅刻划面才允许被充分利用。

下面再比较入缝高为8mm（全高）与入缝高为0的计算结果（光栅刻划面积均为30mm（高）×20mm（宽））。

波 长λ(nm)		0	58.4	174.27	253.7
入缝高为0	谱线线宽mm	0.003	0.007	0.019	0.029
	分辨能力Δλ(nm)	0.0012	0.0029	0.0079	0.012
入缝高为8mm	谱线线宽mm	0.015	0.019	0.029	0.038
	分辨能力Δλ (nm)	0.0062	0.0079	0.012	0.0158

显然，入缝高度增大时，分辨能力亦将明显降低。因此，在调试仪器及应用这类仪器时，应尽可能减小入缝高度。

如果取入缝及出缝宽度均为0.015mm，则入缝高为8mm时下列各波长的分辨能力为：

波长λ(nm)	0	58.4	174.27	253.7
分辨能力Δλ(nm)	0.019	0.02	0.025	0.029

我们按上述参数实测了N-100真空紫外光谱仪121.57nm及149.26nm两条谱线的半高宽，相当于分辨能力为0.03nm。如图4所示。此结果与上述计算结果是十分接近的，并与国外同类仪器的水平是相当的。

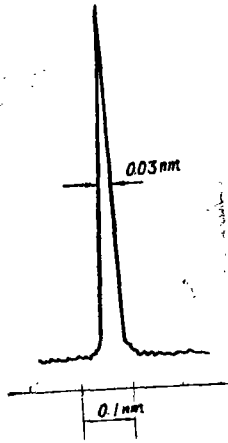


图 4

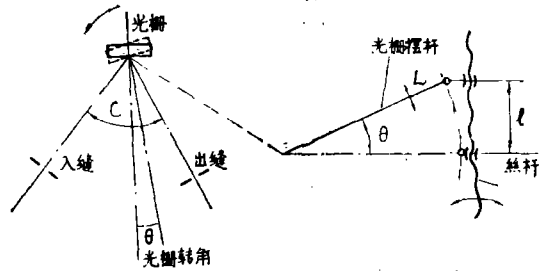


图 5

### 三、波长读数精度分析

#### 1. 影响波长读数精度的因素

实现波长扫描的机构为正弦机构,如图5所示,丝杠转动使螺母移动,推动摆杆转动,与摆杆同轴的光栅随之绕通过球面顶点的垂直轴转动,从而实现波长扫描。

出缝处单色光的波长:

$$\lambda = 2d \cos \frac{C}{2} \sin \theta$$

$$\text{或} \quad \lambda = 2d \cos \frac{C}{2} \times \frac{l}{L}, \quad l = n \cdot S$$

- 其中  $d$ : 光栅刻线距  $C$ : 光束偏向角  
 $\theta$ : 光栅转角  $L$ : 光栅摆杆长度  
 $l$ : 摆杆端点走过的行程  $S$ : 丝杠螺距  
 $n$ : 丝杠转过圈数

如果不考虑光栅刻线距  $d$  及光束偏向角  $C$  对波长读数精度的影响,则波长读数产生误差的原因可归结为光栅转角的误差。

影响光栅转角准确性的主要因素有: ①丝杠螺距累计误差  $\delta\lambda_1$ , ②丝杠轴向支承间隙  $\delta\lambda_2$ , ③丝杠螺母副空回  $\delta\lambda_3$ , ④摆杆端点与螺母接触的滑动面倾斜(滑动面与丝杠不垂直)  $\delta\lambda_4$ , ⑤摆杆长度误差  $\delta\lambda_5$ , ⑥零位时摆杆与丝杠不垂直  $\delta\lambda_6$ , ⑦温度变化时由于摆杆与丝杠材料不同引起的误差  $\delta\lambda_7$ 。

前四项误差使摆杆端点走过的行程  $l$  产生误差,但如果在结构上消除了丝杠轴的轴向支承间隙,而且,如果不考虑反向读数,则②、③两项可不考虑;第六项误差是安装时带来的误差,尽管光栅摆杆长度与摆杆端点走过的行程都是准确的,但由于零位时摆杆与丝杠不垂直,摆杆转过的角度与要求的角度  $\theta$  产生了偏差  $\delta\theta$ 。从以后的分析可知,这是一项重要的误差源。

以上各项误差源产生的波长读数误差可按下列各式求得(不考虑②、③两项)

$$\delta\lambda_1 = 2d \cos \frac{C}{2} \times \frac{n}{L} \delta S,$$

$\delta S$ 为螺距累计误差

$$\delta\lambda_4 = 2d \cos \frac{C}{2} \times \frac{1}{L} \delta l$$

$\delta l$ 为摆杆端点与螺母接触的滑动面在丝杠轴轴向的变化量。如图6所示。

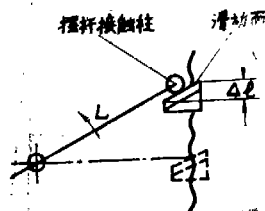


图6

$$\delta\lambda_5 = 2d \cos \frac{C}{2} \frac{nS}{L^2} \delta L = \frac{\lambda}{L} \delta L,$$

$\delta L$ 为摆杆长度误差

$$\delta\lambda_6 = 2d \cos \frac{C}{2} \cos\theta \times \delta\theta_6,$$

$\delta\theta_6$ 可由下式求得:

$$\sin(\theta + \delta\theta_6 + \psi) = \sin\theta + \sin\psi$$

$\psi$ 为零位时摆杆与丝杠的夹角与 $90^\circ$ 之差,称为零位误差角

$$\delta\lambda_7 = 2d \cos \frac{C}{2} \cos\theta \times \delta\theta_7$$

$\delta\theta_7$ 可由下式求得:

$$\frac{l + \Delta l}{L + \Delta L} = \sin(\theta - \delta\theta_7)$$

式中  $\Delta l = l \cdot \Delta t \cdot \alpha_{\text{丝杠}}$

$$\Delta L = L \cdot \Delta t \cdot \alpha_{\text{摆杆}}$$

$\alpha_{\text{丝杠}}$ 、 $\alpha_{\text{摆杆}}$ 分别为丝杠与摆杆所用材料的膨胀系数

$\Delta t$ : 温度变化量

如果取  $d = \frac{1}{1200}$  mm,  $C = 70^\circ 15'$ , 丝杠每转过一圈波长变化 5nm, 丝杠螺距为 1mm,

求得摆杆长度为 272.633mm; 如果取 300nm 处的波长读数精度为 0.02nm, 光栅转角  $\theta = 12.7135^\circ$ , 并设上述五项分误差大小相等, 则由

$$\delta\lambda = \sqrt{\delta\lambda_1^2 + \delta\lambda_4^2 + \delta\lambda_5^2 + \delta\lambda_6^2 + \delta\lambda_7^2}$$

$$\text{得 } \delta\lambda_1 = \delta\lambda_4 = \delta\lambda_5 = \delta\lambda_6 = \delta\lambda_7 = \frac{1}{\sqrt{5}} \delta\lambda = 0.009 \text{ nm}$$

由此求得各项单项误差的要求: 螺距累计误差  $\delta S = \pm 0.0018 \text{ mm}$ , 摆杆端点与螺母接触的滑动面在丝杠轴轴向的变化量  $\delta l = \pm 0.0018 \text{ mm}$ , 摆杆长度误差  $\delta L = \pm 0.008 \text{ mm}$ , 零位时摆杆与丝杠不垂直度误差  $\psi = \pm 1'$ , 允许的温度变化量 (摆杆材料为铝, 丝杠材料为钢)  $\Delta t = \pm 2.5^\circ$ 。

## 2. 误差的补偿

从上述分析可知, 为保证 0.02nm 的波长读数精度, 各项要求是相当高的。实际上, 一般都是将摆杆长度做成可调节的, 通过调节摆杆长度可使部分误差得到补偿, 从而可降低结

构的精度要求。

调节摆杆长度的办法只能补偿各误差因素中的系统误差部分，而且，并不是所有的系统误差都可以通过它得到完全补偿的。

上述五项因素中，除 $\delta\lambda_7$ 外都可以认为是系统误差。因此，通过调节摆杆长度都能得到改善。但是，由于摆杆长度的变化与波长变化的关系为 $\delta\lambda = \frac{\delta L}{L}\lambda$ ，因此，只有能使 $\delta\lambda$ 随波长线性变化的误差才能通过摆杆长度变化使波长变化量大小相等符号相反，从而得到补偿。如 $\delta\lambda_4$ ， $\delta\lambda_6$ 。而螺距累计误差由于往往具有周期变化的特点，因此，调节摆杆长度对这项误差不能完全补偿。至于 $\delta\lambda_8$ ，情况又有区别。如图7所示，由于存在零位误差角 $\psi$ ，摆杆端点走过 $l$ 时，摆杆摆过的角度 $\theta'$ 与要求的 $\theta$ 角有偏差 $\delta\theta$ ，摆杆长度变化 $\Delta L$ ，可使摆杆转角达到正确位置，但当摆杆返回零位时，却在零位处产生新偏差 $\delta\theta'$ ，所以，通过调节摆杆长度，只能在某个波长处使这项误差得到补偿。

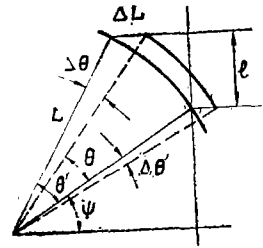


图7

为了确定允许的零位误差角，取不同的 $\psi$ 值，计算300nm处( $\theta = 12.7135^\circ$ )要求的摆杆修正量 $\Delta L$ ，并求出由此在零位处产生的新偏差 $\delta\theta'$ 及相当的波长读数误差 $\delta\lambda_8$ 。

$$\Delta L = \frac{l + L \sin \psi}{\sin(\theta + \psi)} - L$$

式中  $l = 60 \text{ mm}$ ,  $L = 272.633 \text{ mm}$

$\delta\theta'$ 可按下式求得：

$$\sin(\psi - \delta\theta') = \frac{L \sin \psi}{L + \Delta L}$$

$$\text{而 } \delta\lambda_8 = 2d \cos \frac{C}{2} \cos 0^\circ \times \delta\theta'$$

$\psi'$	2'	10'	30'	40'	50'	60'
$\Delta L (\text{mm})$	0.017	0.088	0.26	0.35	0.44	0.53
$\delta\theta' (")$	0.08"	0.19"	1.75"	3.1"	4.86"	7"
$\delta\lambda_8 (\text{nm})$	/	0.0013	0.012	0.021	0.033	0.047

从上表可见，零位误差角愈大，补偿后零位处的剩余误差就愈大，但只要在装配时，保证摆杆与丝杠的不垂直度小于30'其影响就可忽略。

### 3. 波长读数误差实测结果

我们在按上述要求装调好的第二台N-100真空紫外光谱仪上实测了58.43nm, 121.57nm, 149.26nm, 174.27nm, 243.14nm五根谱线的波长读数误差，五次读数如下表所示。

波长名义值 (nm)	实测读数 (nm)					平均值 (nm)	读数误差 (nm)	重复性 (nm)
58.43	58.44	58.44	58.45	58.44	58.45	58.44	+0.01	+0.01
121.57	121.56	121.56	121.56	121.56	121.56	121.56	-0.01	0
149.26	149.275	149.28	149.28	149.27	149.27	149.275	+0.015	±0.005
174.27	174.28	174.28	174.28	174.28	174.28	174.28	+0.01	0
243.14	243.14	243.13	243.14	243.13	243.13	243.13	-0.01	+0.01

读数误差曲线如图 8。

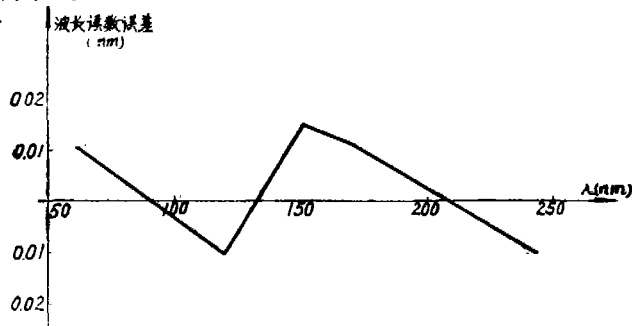


图 8

显然，经摆杆长度修正后，单向增加或减小的误差因素已被消除，剩余的误差主要是小周期变化的因素造成的。比较重要的是小周期螺距误差。实测丝杠副小周期螺距误差是  $2\mu\text{m}-4\mu\text{m}$ ，与上述  $0.01-0.02\text{nm}$  的波长读数误差是比较符合的。

本文在审核过程中陈星旦、陈今涌同志提出了不少宝贵意见，陈淑英、刘淑珍两位同志参加了仪器调整及测试工作，特此表示感谢。

#### 参 考 文 献

- [1] M.Seya; A New Mounting of Concave Grating Suitable for a Spectrometer, Sci.Light.,1952,2,8.
- [2] T.Namioka; Theory of the Concave Grating, J.O.S.A., 1959, 49, 951.
- [3] James A. R. Samson; Techniques of Vacuum Ultraviolet Spectroscopy, John Wiley & Sons, 1967, 72.

### Resolving Power and Wavelength Accuracy of a Seya-Namioka VUV Monochromator

Wang Chuanji

#### Abstract

This paper analyses in detail the optical parameters of Seya-Namioka system and its bearings on defocusing, which has provided the basis for determining optimum optical parameters. Factors influencing line image quality and wavelength accuracy are investigated and the method of compensating for wavelength errors is discussed.