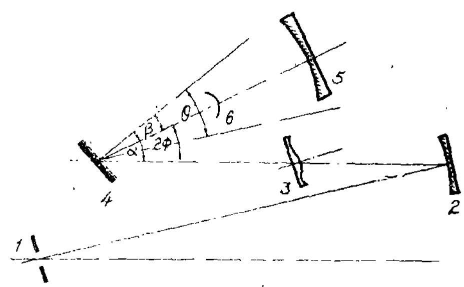
用于某一平面光栅摄谱仪1.5米相机中的旋转施米特校正板的计算

董 玉 华

摘要 本文讨论了该平面光栅摄谱仪 1.5 米相机的设计方案，给出了旋转施米特校正板的计算方法及其随光栅而旋转的转角之间的关系。

一、1.5米相机设计方案的考虑

1.5 米相机是该平面光栅摄谱仪的组成部份之一。其光学系统如下图所示：



1. 入射狭缝，2. 准直镜， 3. 施米特校正板 4. 平面光栅，5. 凹球面反射镜， 6. 谱板；θ为光栅转角、2ϕ为结构角，α为入射角，β为衍射角。

摄谱仪中所使用的光栅面积为 310 毫米 × 408毫米，工作波段为3300埃至11000埃，谱板长度为 250 毫米。要求光学系统成象质量必须满足在集中能量百分之八十的范围内弥散圆直径小于0.02毫米。

为获得不同的色散值，要求仪器同时配备 4 米和 0.5 米相机。

上述参数及要求导致 1.5 米相机的相对孔径为 1/4.5，视场角为 9.5 度，通光孔径在沿谱板长度方向达 900 毫米左右。

对于这样的参数以及如此之宽的光谱波段，如果全部使用透射光学元件作为照相物镜，不仅二级光谱难以校正，而且目前大尺寸的高质量的石英材料也是难以选到的，所以只能采取凹面反射镜作为照相物镜的主镜。我们知道：平面光栅工作于平行光路之中，它本身不产生象差。虽然抛物面反射镜对于位于无穷远的物体成象时不产生球差，同时设光栅面为系统的孔径光栏，并将其置于抛物面反射镜焦平面位置时，象散为零，但彗差与光栏位置无关，对于 9.5 度的视场，彗差值超出公差，可见采用抛物面反射镜作照相物镜是不适宜的。

凹球面反射镜对于位于无限远的物体成象，当将光栏（光栅）置于其曲率中心时，只产生球差和象面弯曲。在使用相应弯曲的谱板摄谱时，只要采用施米特校正板校正球差即可获得满意的成象质量。

校正板若置于衍射光路之中，且靠近光栅，不仅通光口径可以减小，轴外象差也不致过大，同时在拍摄不同波段的谱线时，不需要随光栅而转动。但当校正板靠近光栅时，遮栏了 4 米以及 0.5 米相机的光路，所以校正板距光栅的最短距离要受到限制，在允许的位置上（600毫米）校正板的通光孔径至少为450毫米，不仅材料难以选择，产生的轴外象差也难以

补偿。若将校正板置于入射光路之中，其通光孔径可以减小到340毫米，并且由于准直镜的视场很小，轴外象差可以忽略不计。

由光栅方程：

$$m\lambda = d(\sin\alpha + \sin\beta)$$

可知：入射角 α，衍射角 β 是随波长而变化的。入射到照相物镜主镜（凹球面镜）上的衍射光束口径：

$$D_{\lambda} = \frac{D_{准} \times \cos\beta_{\lambda}}{\cos\alpha_{\lambda}}$$

这表明照相物镜的相对孔径是随波长而变化的。因而在拍摄不同波段的谱线时，它所产生的球差值是不同的。但在校正板垂直于准直镜光轴的情况下，由准直镜照射到校正板上的各种波长的光束宽度都是相同的。为使校正板产生的球差值也如凹球面反射镜那样随波长而变化显然应当使入射在校正板上的光束宽度也随波长不同而变化，这就要求校正板随光栅而旋转。实际上，就是以校正板的大小不同的轴外球差补偿凹球面反射镜的轴上点的相应的球差。我们可以计算出校正板与光栅转角之间的对应关系。

二、施米特校正板的计算方法及计算结果

1．计算校正板的最大通光孔径

首先，根据选用的光栅的衍射效率确定使用的衍射级次及波段范围。其次，计算凹球面反射镜的轴上光束的最大与最小的通光孔径。

由光栅方程可以求出光栅转角 θ_{λ}：

$$\sin\theta_{\lambda} = \frac{m\lambda}{2d\cos\phi}$$

从而可求出各波长的入射角 α_{λ} 以及衍射角 β_{λ}：$\alpha_{\lambda} = \theta_{\lambda} \mp \phi$，$\beta_{\lambda} = \theta_{\lambda} \pm \phi$。

射入到凹球面反射镜上的光束宽度为：

$$D_{\lambda} = \frac{D_{准} \times \cos\beta_{\lambda}}{\cos\alpha_{\lambda}}$$

校正板垂直于准直镜光轴时的通光孔径最小，其值与准直镜的通光孔径相等。所以校正板的最大通光孔径值为：

$$D_{校大最} = \frac{D_{准} \times D_{最大}}{D_{最小}}$$

设校正板的最大转角为 $\gamma_{最大}$ 则

$$\cos\gamma_{最大} = \frac{D_{校最小}}{D_{校最大}} = \frac{D_{最小}}{D_{最大}}$$

2．求校正板各环带光线的象方孔径角

首先确定以 $0.85\,y_{校最大}$ 为校正板的中性带，($y_{校最大} = \frac{1}{2}D_{校最大}$)然后以 $0.85\,y_{最大}$ 为入射高度追迹凹球面反射镜的实际光线，求出 $\overline{L_{0.85}}$，同时可以求出孔径角 u_i，

$$\operatorname{tg} u_i = \frac{y_i}{L_{0.85} - X_i}$$

（其中 y_i 分别为1，0.7，0.5……各带光线在反射镜上的实际高度，X_i 分别为凹面镜

相应各带的矢高。)再以$\overleftarrow{L}_{0.85}$为物距，以$\overleftarrow{u}_i$为孔径角逆追凹球面反射镜的各带光线，求得凹面镜的$\overleftarrow{L'}_1$，$\overleftarrow{u'}_1$，$\overleftarrow{L'}_{0.7}$，$\overleftarrow{u'}_{0.7}$，$\overleftarrow{L'}_{0.5}$，$\overleftarrow{u'}_{0.5}$……实际上，$\overleftarrow{u'}_1$，$\overleftarrow{u'}_{0.7}$，$\overleftarrow{u'}_{0.5}$……是来自校正板的各带光线的孔径角经过光栅衍射之后所产生的相对于中心波长衍射角的变化量$\Delta\beta_i$，由光栅方程可以求出$\Delta\beta_i$所对应的各带光线入射角的变化量$\Delta\alpha_i$，而$\Delta\alpha_i$则是校正板为校正凹球面反射镜的球差所应产生的各带光线的象方孔径角。对于校正板的非球面而言，物方孔径角$u_i=0$，象方孔径角为u'_i，

$$u'_i=\frac{\Delta\alpha_i}{n'_i}$$

(n'为校正板的折射率)

3．非球面面形的求解

假如所需要的非球面而形可以用函数

$$x=f(y)$$

表示，取一直角坐标系，令x为光轴方向，y轴与x轴相垂直，取镜面顶点为坐标原点。我们可用多项式来代替函数$x=f(y)$由于镜面为轴对称非球面，因此，多项式中可只取y的偶次项，即：

$$x=ay^2+by^4+cy^6+dy^8+ey^{10}\cdots\cdots$$

同时，我们知道，非球面法线的斜率就是法线角ψ的正切值。即：

$$\frac{dx}{dy}=\mathrm{tg}\,\psi$$

$$\frac{dx}{dy}=2ay+4by^3+6cy^5+8dy^7+10ey^9\cdots\cdots$$

我们知道，

$\psi=I+u=I'+u'$（I为入射角，I'为折射角，所以$I=\psi-u$，$I'=\psi-u'$，按折射定律，$n'\sin I'=n\sin I$（n为校正板非球面物方折射率，n'为非球面象方折射率）

则　$n'\sin(\psi-u')\,n\sin(\psi-u)$

$$=n'\sin\psi\cos u'-n'\cos\psi\sin u'$$

$$=n\sin\psi\cos u-n\cos\psi\sin u$$

$$\sin\psi(n\cos u-n'\cos u')$$

$$=\cos\psi(n\sin u-n'\sin u')$$

$$\mathrm{tg}\,\psi=\frac{\sin\psi}{\cos\psi}=\frac{n\sin u-n'\sin u'}{n\cos u-n'\cos u'}$$

方程式中最高取至y的10次方项，那么方程式中只有a，b，c，d，e五个系数。已知：$a=\dfrac{1}{2\mathring{R}}$

$\mathring{R}$为非球面顶点的曲率半径，可由近轴公式求得。因此，只逆追三条光线(因$u'_{0.85}=0$)就可以列出四个方程式的联立方程组，采用高次消去法就可以依次解出e，d，c，b四个系数。从而得到校正板的非球面方程式：

$$X=8.56802\times10^{-7}y^2-1.12989\times10^{-12}y^4$$
$$-1.85453\times10^{-15}y^6+6.0001\times10^{-20}y^8-7.21313\times10^{-25}y^{10}$$

用此方程式追迹非球面光线表明几乎不需要做再次逼近。同时通过光谱仪计算程序追迹

整个系统实际光线证明这种方法计算的校正板确实较精确的补偿了凹球面反射镜的球差，使正个照相物镜的成象质量满足使用要求。可见这种方案及计算方法，在这种情况下是行之有效的。但当凹面镜的相对孔径增大时（如$F/2$），象质就明显变坏，这是因为为了校正凹球面反射镜的较大的球差，通过校正板各带的光线发散或会聚的程度必须增大，致使平面光栅处于过分发散或会聚的光束之中。在这种情况下，光栅本身要产生象散和彗差。同时校正板的其他轴外象差也要相应增大。可见这种方案也受到使用要求的限制。

对于计算中尤英奇，史光辉同志的帮助表示感谢。

参 考 文 献

[1] Robert G. Tull; Sky and Telescope, 1969, 38, 3, 156.
[2] 天津大学光仪系光学仪器教研室；光谱仪器学，(下册).