

全息凹面光栅平场摄谱仪的 光学设计及像差优化研究

卢 启 鹏

摘要: 本文利用全息凹面光栅像差理论, 提出了全息凹面光栅平场摄谱仪的光学设计方法, 推导了在平场像面获得评价像质的点列图分布的计算公式。以波像差系数的平方和为评价函数, 对全息凹面光栅的光学参量进行了优化设计, 并建立了相应的平场摄谱仪设计程序软件。

一、引 言

本世纪三十年代摄谱仪已基本形成系列, 但那时主要以棱镜摄谱仪为主体。第二次世界大战以后, 发展了光栅摄谱仪, 使得摄谱仪的性能得到较大提高。在凹面光栅系统中, 为获得较好像质的谱面, 以往常把接收谱面选在罗兰圆上, 在平面场接收光谱时将会引来较大的像差。近年来, 由于计算机的应用越来越广泛, 加上光电器件的不断更新, 新型光电元件不断出现 (如面阵 CCD 元件、光电二极管阵列、微通道板等), 使得光谱仪器的光电接收及自动处理光谱数据成为人们努力的目标。这就要求光谱仪的成像谱面能够在有限的平面上获得较好的像质。全息凹面光栅的出现, 给平场摄谱仪设计提供了极好的分光元件。在制作全息凹面光栅过程中, 可以通过选择记录光束波阵面的形状和方向较为方便地达到上述目的。全息光栅还有杂散光低、无鬼线、信噪比好、分辨本领高等优点; 并且由于全息凹面光栅把分光、准直以及聚焦集为一体, 可使光谱仪器结构更为简单, 这些使得全息凹面光栅越来越广泛地应用于光谱仪器的设计中。

本文在已有的全息凹面光栅理论^{[1][2][3]}基础上, 探讨了全息凹面光栅平场摄谱仪的光学系统的设计方法, 用横向像差的概念及点列图进行了平场摄谱仪像评价, 用詹重禧法对全息凹面光栅的记录参量进行了优化, 编制了相应的计算及绘图程序。利用程序软件可得到平场摄谱仪所要求的全息凹面光栅的记录参量, 波像差系数, 点列图, 还可对全息参数进行优化。

二、平场摄谱仪全息凹面光栅的设计

为了设计平场摄谱仪, 满足其各项要求, 首先要研究全息凹面光栅的成像特性。据 Chrisp 等人提出的全息凹面光栅波像差理论^{[3][4]}。由光程函数及费马原理, 我们得到光学系统的波像差表达式, 即:

$$w = \sum_{i,j,k} k_{ijk} w_{ijk} x_n^i y_n^j u_n^k \quad (1)$$

注: 本文作者的导师为陈今涌。

其中, w_{ijk} 为波像差系数, x_n, y_n 为光束在光栅上的坐标位置, u_n 为光束的视场角。

波像差系数 w_{ijk} 可表达为:

$$w_{ijk} = (M_{ijk} - \frac{m\lambda}{\lambda_0} H_{ijk}) x^i r^j \quad (2)$$

$$M_{ijk} = -a_{ijk} U^k - b_{ijk} U^{1k} \quad (3)$$

$$H_{ijk} = d_{ijk} U_d^k - c_{ijk} U_c^k \quad (4)$$

这里: $a_{ijk} = f_{ijk}(\alpha, r_m, r_s, l), b_{ijk} = f_{ijk}(\beta, r_m', r_s', l'),$

$c_{ijk} = f_{ijk}(\gamma, r_c, r_e, r_o), d_{ijk} = f_{ijk}(\delta, r_D, r_D, r_D),$

其中, α, β 为光线入射角和衍射角, r_m, r_m' 为子午方向的物距和像距, r_s, r_s' 为弧矢方向的物距和像距, l, l' 为主光线在对称平面上的物方截距和像方截距, γ, δ 为两激光记录源与光栅法线的夹角, r_c, r_e 为两记录源到光栅顶点的距离, m 为衍射级次, λ 为扫描波长, λ_0 为记录波长。

M_{ijk} 由全息光栅的结构参量决定, 表征由结构参量引起的波差分量, H_{ijk} 由全息光栅的记录参量给定, 表征全息记录参量引起的波差大小。设计的过程就是要选取 H_{ijk}, M_{ijk} 适当的配合, 达到具有最佳像质的平谱面要求。

对于(2)式, W_{100} 为零时, 得到光栅的基本方程, W_{200} 为零时, 表示光线在子午面上的聚焦条件, W_{020} 为零时, 表示弧矢面内光线的聚焦条件, W_{300} 则表征系统彗差大小。

图1表示了, 在平场摄谱仪中所使用全息凹面光栅的成像条件。此光栅应能在光谱工作范围内得到平场谱面 $A_1' A_2'$ 。平面 $A_1' A_2'$ 由 r_s 和 β_s 两参量决定。这时衍射光线应满足下面等式,

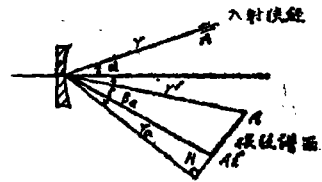


图1 单光栅平场摄谱仪光路示意图

$$r' = r_s / \cos(\beta_s - \beta) \quad (5)$$

设计中采用在预先工作光谱范围内 ($\lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda_2$) 像差积分值最小原理, 使主要像差在接收面 $A_1' A_2'$ 上尽可能的小。即满足

$$I_{ijk} = \int_{\beta_1}^{\beta_2} w_{ijk}^2 d\beta = \text{minimum} \quad (6)$$

具体表达为: $I_{200} = \int_{\beta_1}^{\beta_2} W_{200}^2 d\beta, I_{020} = \int_{\beta_1}^{\beta_2} W_{020}^2 d\beta_1$

$$I_{300} = \int_{\beta_1}^{\beta_2} W_{300}^2 d\beta$$

为满足(6)式应有,

$$\partial I_{200} / \partial r_s = 0, \quad \partial I_{200} / \partial H_{200} = 0, \quad \partial I_{020} / \partial H_{020} = 0, \quad \partial I_{300} / \partial H_{300} = 0.$$

依次解出上述积分和微分式, 并考虑到,

$k\lambda/\lambda_0 = (\sin\alpha + \sin\beta) / (\sin\delta - \sin\gamma)$ 就得到以下方程式。

$$\frac{A_1}{r_s} + B_1 - \frac{\lambda_0 H_{200} A_2}{\sigma} = 0 \quad (7)$$

$$- \frac{H_{200} A_3 \lambda_0}{\sigma} - B_2 - \frac{A_4}{r_s} = 0 \quad (8)$$

$$H_{020} = -c_1(\lambda_0/\sigma \cdot A_5) \quad (9)$$

$$H_{300} = -c_2(\lambda_0/\sigma \cdot A_6) \quad (10)$$

式中 σ 为全息光栅有效光栅常数, $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6$ 及 B_1, B_2 是由 $\beta_1, \beta_2, \beta_0, r, R$ 组成的函数式给出, c_1, c_2 由 $\beta_1, \beta_2, \beta_0, r, R$ 确定。

在给定 $r, \alpha, \lambda_{max}, \lambda_{min}, \lambda_0$, 和 σ 时通过解方程组(7)–(10)可得到 r_0 及 $r_{200}, H_{020}, H_{300}$ 的解。

由(4)式并考虑有效光栅常数 σ , 得到

$$\sigma = \lambda_0 / (\sin\delta - \sin\gamma) \quad (11)$$

$$H_{200} = \frac{\cos^2\gamma}{r_0} - \frac{\cos^2\delta}{r_D} - \left(\frac{\cos\delta}{R} - \frac{\cos\gamma}{R} \right) \quad (12)$$

$$H_{020} = \frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_D} - \frac{1}{R}(\cos\gamma - \cos\delta) \quad (13)$$

$$H_{300} = \frac{1}{r_0} \sin\gamma \cdot \cos\gamma \left(\frac{\cos\gamma}{r_0} - \frac{1}{R} \right) - \frac{1}{r_0} \sin\delta \cdot \cos\delta \left(\frac{\cos\delta}{r_D} - \frac{1}{R} \right) \quad (14)$$

解(11)–(14)方程组可得到全息参数 r_0, r_D, δ, γ 值。

根据以上推导, 在IBM PC机上用FORTRAN语言编制了计算程序。程序中采用优化的数值解法对非线性方程组进行求解。应用本程序对国外厂家给出的全息凹面光栅的参数进行了验算结果相符, 说明推导的公式、方程和编制的程序均是可靠的。程序框图如图2。

三、平场摄谱仪像质的评价

将上节确定的平场摄谱仪光学参数, 代入(2)和(1)式中可得出每个光学元件的波像差系数以及系统波像差值, 它可以表征摄谱系统的像质优劣, 但很不直观, 现在通常对光谱仪像质评价采用点列图来进行。

以往为获得光线的点列图大都采用光线追迹的方法, 这种方法与波像差无直接关系, 难以对光学系统进行分析, 并且运算量较大。本文直接利用波像差系数推导了系统的横向像差进而获得光线的点列图。

对于正入射情形, 把接收像面选为过子午焦线并垂直于对称平面, 此时, 像面上的横向像差可表达为:

$$\delta_x = -r_m' \left(\frac{dw}{dx} \right) \quad (15)$$

$$\delta_y = -r_m' \left(\frac{dw}{dy} \right) - \left(\frac{r_m'}{r_i'} - 1 \right) y \quad (16)$$

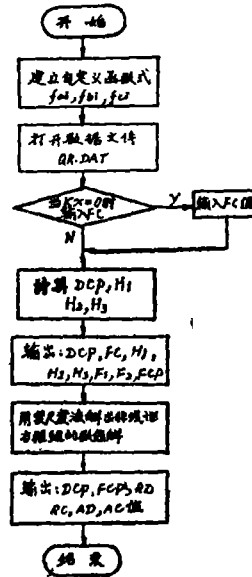


图2

其中 dw/dy , dw/dx 是波像差函数的偏导数

对于一般情形, δ_x , δ_y 较为复杂, 可表示为:

$$\delta_x = f_1(r_s', r_m', \beta, \alpha_n, y_n, \alpha, y, w, r_s, \beta_s) \quad (17)$$

$$\delta_y = f_2(r_s', r_m', \beta, \alpha_n, y_n, \alpha, y, w, r_s, \beta_s) \quad (18)$$

详细表达式见本论文。

式 (15)、(16) 可以适于多元件摄谱仪系统中正入射, 掠入射情形, 可以计算任意设置的像平面上的横向像差, 绘出谱面上光线点列图分布。

根据推导的结果, 在IBM PC机上用 FORTRAN 语言编制了适用于多元件光谱仪系统的像差计算程序SPPM·FOR, 它包括一个主程序START·FOR及四个子程序 GGG·FOR, AOSP·FOR, AOMO·FOR, COEF·FOR。用BASIC语言编制了绘制点列图的绘图程序SPSS·BAS。以上程序都是在IBM PC上编译并运行。

利用本程序对Tondt110 摄谱系统进行了试算, 波差系数, 点列图等主要评价结果与国外资料提供的数据非常吻合。

SPPM·FOR主程序START·FOR的结构框图如图3

SPSS·BAS程序结构框图如图4

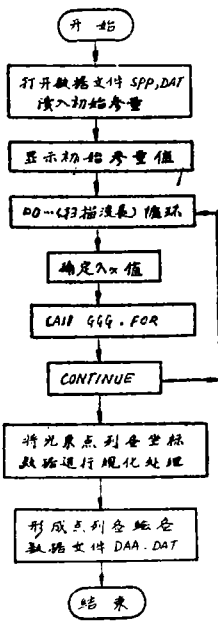


图3

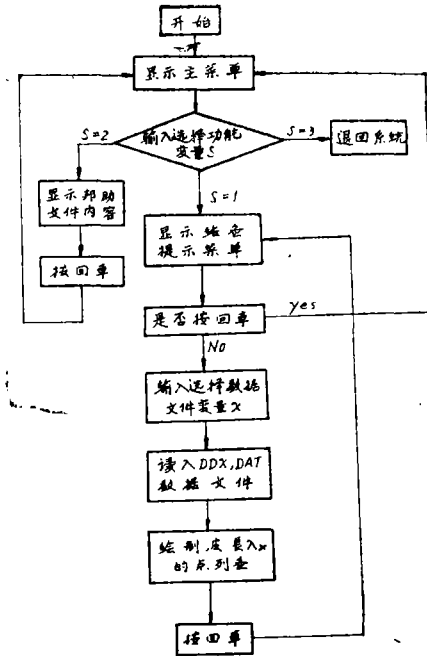


图4

四、全息凹面光栅平场摄谱仪像差优化

像差优化, 即光学自动设计是数学中的最优化方法在光学设计领域中的具体应用。优化的目的是在满足一定的约束条件下, 得到一个尽可能最佳的光学系统。本文采用詹重禧法对像差进行了优化。詹重禧法适于求解评价函数为平方和型式的优化问题, 比通常采用的阻尼最小二乘法有更快的收敛速度, 更小的计算量。

在光谱仪的光学设计中,应在整个工作波段上使波像差的平方和为最小,据此建立了光谱仪优化的评价函数,表达式为,

$$\Omega = \sum_{i,j,k}^4 V_{ijk} [\wedge_1 (w^2_{ijk})_{\lambda_1} + \wedge_2 (w^2_{ijk})_{\lambda_2} + \dots + \wedge_n (w^2_{ijk})_{\lambda_n}] \quad (19)$$

这里 \wedge_n 是波长为 λ_n 的像差加权因子, V_{ijk} 是每种像差类型的加权因子。这些量要根据各种像差对像质影响大小,以及对不同波长谱像质的要求来选定。具体设计时还要根据设计者的实际设计经验进行调整。

在编制优化程序中把权重因子分为人工权和自动权两部分。自动权由程序运行过程中自动给出,用以消除各种像差在数量级上的较大差别,不至使要优化的像差类型被忽略。人工权由用户来选定,为了着重校正好某几种像差,可以加大这几种像差的人工权。权重因子选择的是否恰当,直接影响对光学系统优化的结果。

本文采用詹重禧方法,用FORTRAN语言编制了程序,对单光栅的Seya-Namioka单色仪进行了优化设计,结果与国外资料^[5]的数据较为接近。说明程序是有效的。对单全息凹面光栅平场摄谱仪的光学系统进行了优化工作,波像差和点列图都有所改善。

此外还采用变尺度法以及增广乘法,编制了平场光谱仪的像差优化程序。并进行了一些讨论。

参 考 文 献

- [1] H.Nada, T.Namioka and M.Seya, J.Opt.S.A., 64, 1974 1043
- [2] N.K.Pavlychera, Sov.J.Opt.Technol., 46, 1979 394
- [3] Michael P.Chrip, Appl.Opt., 22, 1983 1508
- [4] Michael P.Chrip, Appl.Opt., 22, 1983 1915
- [5] A.Jakahashi and T.Katayama, J.O.S.A., 68, 1978 1254

An Optical Design of the Flat-field Spectrometer Using a Holographic Concave Grating and a Study of the Aberration Optimization

Lu Qipeng

Abstract

In this paper a method of designing flat-field spectrometer is proposed which uses a holographic concave grating and its aberration theory. The calculating formulae of spot diagrams are derived for the purpose of evaluating their performance on the imaging surface. The optical parameters of the holographic concave grating are optimized and also a software is established for the design.