

掠入射光栅单色器系统像差计算和分析

郭志英

摘要: 本文根据Michael P. Chrisp提出的平面对称光栅系统波象差理论,叙述了用象散参考面确定波像差,再由波像差得到最后像面的点列图分布之计算方法,并建立了计算程序。经运算表明,该方法得到的结果与光线追迹的结果相当符合。

一、概 述

单面光栅的十六种像差表达式已被人们熟悉。Namioka^[1]等人对此作过详细的论述。但这种方法不能用以解决组合光栅系统的成像问题。因为:(1)它假设光阑中心总是位于光栅的顶点上。而对于具有若干反射镜和光栅的实际系统来说,光阑可能处在系统的任何位置,离开对称面的光束将偏离某些光学元件的中点。(2)该方法用以确定波像差的参考面是无像散的。而实际系统中,特别是对于掠入射光学系统,由于像散的存在,实际波面再用球面波代替,计算所得的结果将是不准确的。为克服上述缺陷,Michael P. Chrisp^[2]提出了一种新的波像差理论,用像散面作为参考波面,用孔径光阑离光栅面的距离确定像差系数,将各反射镜和光栅的像差值在最后的像面上进行迭加。从而,通过类似于透镜系统所采用过的Seidel像差方法,讨论光栅系统的像差问题。

本文在Chrisp的工作基础上,得到了一整套像差系数表达式,并建立了相应的计算程序。它不仅适用于平面、柱面、球面、环面,而且还适用于抛物面、椭球面等机刻光栅、全息光栅与反射镜组成的系统。应用本程序可对若干数目的反射镜、光栅组成的光路进行像差计算。输出的结果,有各光学表面的像差和它们在最后像面上的迭加值,以及像面上的点列图分布。

二、波像差理论及像差系数

Chrisp文章的主要思想就是像差系数不仅与每个面的初始结构参数有关,而且还与各光学表面到达光阑的距离有关。这样就考虑了离轴光线通过系统时像差的影响。波前像差表达式为:

$$W = \sum_{i,j,k} k_{ijk} W_{ijk} x^i y^j \quad (1)$$

$$W_{ijk} = -a_{ijk}u^k - b_{ijk}u^i u^j - \frac{m\lambda}{\lambda_0} (d_{ijk}u_i^k - c_{ijk}u^k) \quad (2)$$

注:本文作者的导师为陈今涌。

※ 本文表1略,详见论文

其中, 系数 a_{ijk} , b_{ijk} , c_{ijk} , d_{ijk} 表达式见表1*.

$$\begin{aligned} a_{ijk} &= f_{ijk}(\alpha, r_m, r_s, l) \\ b_{ijk} &= f_{ijk}(\beta, r_m', r_s', l') \\ c_{ijk} &= f_{ijk}(\nu, r_c, r_o, r_d) \\ d_{ijk} &= f_{ijk}(\delta, r_D, r_D, r_D) \end{aligned}$$

α, β 为入射角和出射角, r_m, r_m' 为子午光束的物距和像距, r_s, r_s' 为弧矢光束的物距和像距, l, l' 为主光线(通过轴外物点)在对称面上的物方截距和像方截距, r_o, r_d 为全息光栅记录源到光栅顶点之距离, ν, δ 为两记录源与光栅顶点处法线的夹角。

展开的十六项象差系数分类情况如表2:

表 2

IN-PLANE	OFF-PLANE	
W_{100}	$W_{102}, W_{011}, W_{013}$	倾 斜 项
W_{200}, W_{020}	W_{202}, W_{022}	离 焦 项
W_{300}, W_{120}	$W_{111}, W_{031}, W_{211}$	慧 差 项
$W_{400}, W_{040}, W_{220}$		球 差 项

当一个系统由 g 个光学元件组成时,

$$[W_{ijk}]_g = [W_{ijk}]_1 + [W_{ijk}]_2 + \dots + [W_{ijk}]_g \quad (3)$$

当所计算的元件不与系统的光阑重合时, 其轴外点的八项象差系数要附加一个修正量 ΔW_{ijk} , 然后将

$$[W_{ijk}]_g = W_{ijk} + \Delta W_{ijk}$$

进行迭加, 得到最后像面的象差系数 $[W_{ijk}]_g$, 最后像面的波像差函数为:

$$\sum_{i,j,k} K_{ijk} [W_{ijk}]_g x^i y^j \quad (4)$$

像面上的像差分布为:

$$\begin{aligned} \delta_x &= -\frac{(r' - x \sin \beta)}{r' \cos \beta} \left[(r' - x \sin \beta) \frac{dW}{dx} - y \sin \beta \frac{dW}{dy} \right] \\ \delta_y &= -(r' - x \sin \beta) \frac{dW}{dy} \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $\frac{dW}{dx}, \frac{dW}{dy}$ 是波像差函数的偏导数。

三、像差计算程序

1. 结构及方框图

我们在 IBM-PC/XT 机上, 用 FORTRAN 语言编制了适用于各种面形和任意多面组成之系统的像差计算程序, 并用 BASIC 语言编制的程序绘出像面的点列图分布。整套程序

由一个主程序、4个子程序和2个数据文件组成，运行程序占计算机容量247K，4个子程序 *ELI*、*FOR*、*AOBO*、*FOR*、*AODO*、*FOR*、*COEFF*、*FOR* 功能如下：

(1) *ELI*、*FOR*，计算抛物面或椭球面的子午半径 R ，弧矢半径 P ，偏心率 e ，椭圆半长轴 a ，半短轴 b ，光线入射角 α ，出射角 β 。

(2) *AOBO*、*FOR*，由输入的光线偏角，面形参数，按单色器方式扫描公式，计算光栅的入射角 α ，衍射角 β 和光栅间距 D 。

(3) *AODO*、*FOR*，由输入的光线偏角，按摄谱仪方式计算光栅的入射角 α ，衍射角 β 和光栅间距 D 。并计算环面类反射镜的入射角 α ，出射角 β 。

(4) *COEFF*、*FOR*，计算每个面的像差系数。

主程序结构框图如图1。

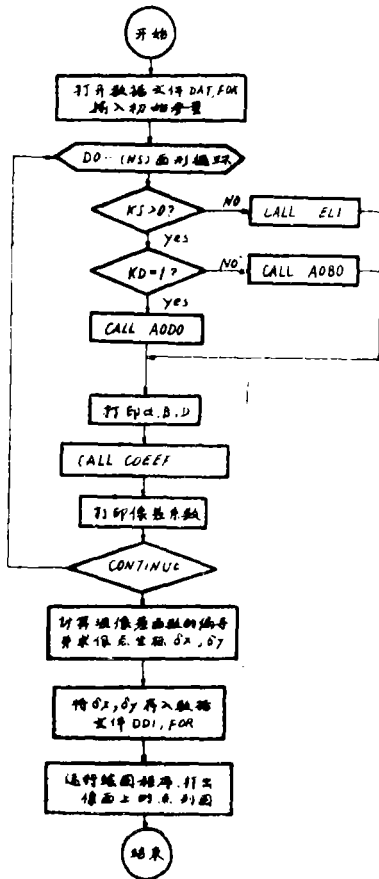


图1

而像差计算法却可对每个面的十六种像差系数进行计算。由于每项像差系数都代表着某种特定的像差类型，所以通过计算各面像差数值大小，可对系统进行像差分析，并可以用类似于透镜系统的方法，通过改变光阑位置，校正由于视场变化产生的轴外点像差。由计算表明，改变系统结构参数和光阑位置，可以直接得到各类像差的变化规律。从而为下一步进行系统优化工作开辟了切实可行的途径。

2. 计算实例和结论

本文作者对一系列光学系统进行了计算。

其中包括 Namioka^[1] 全息环面光栅系统和 Chrisp 的 x 光摄谱仪系统（球面光栅前加一环面镜）等，当选取与上述系统相同的结构参数时，所得的点列图形状和大小都与上述系统光线追迹的结果相当符合。尤其是对轴上物点，所得点列图与光线追迹结果几乎没有区别，对轴外物点情况，随着物高增大，点列图形状与追迹结果略有差别。这主要是由于本方法得到的像差系数只展开到4次项，而忽略了更高次像差所产生的影响。但从计算结果看出，这种误差是很小的。

应用本程序还计算了抛物镜——平面光栅系统。并将相同的结构参数与 Hunter^[2] 追迹的结果相比较，二者的形状相同，最大光斑尺寸在同一数量级。说明推导的像差系数及编制的程序均是正确的。

该方法利用波像差函数推导的像差系数比 Namioka 等对光程函数展开推导的像差系数具有更加明确的物理意义。它与光线追迹方法相比，也更简洁，明了。光线追迹方法只能得到最后像面的点列图，无法对系统的中间过程进行

参 考 文 献

- [1] T.Namioka, H.Nada and M.Seya, J.Opt.Soc.Am., 1974, 64, 1031—1036.
- [2] Michael P.Chrisp, Appl.Opt., 22, 1508(1983).
- [3] T.Namioka, H.Noda and M.Seya, J.Opt.Soc.Am., 1974, 64, 1037—1042.
- [4] M.P.Chrisp, Appl.Opt., 22, 1519(1983).
- [5] W.R.Hunter, Aberration.Reflecting Optics for Synchrotron Radiation (1981) 315, 19—29.

**Aberrations of Grazing Incidence Grating
Monochrometer System and Their Calculation**

Guo Zhiying

Abstract

In this paper we describe a treatment of calculating the wave front aberration with respect to an astigmatic reference surface according to Michael P.Chrisp's wave aberration theory of plane symmetric grating system the present the obtained spot diagrams on the last image surface and show the calculation programs. The calculation has shown that the results obtained by our method agree quite well with that calculated by ray tracing.