

二元光学工艺参数计算*

农文捷, 金 宁

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要:从光学设计软件 ZEMAX 的二元光学面位相方程出发, 理论分析和推导了二元光学的工艺参数, 并用计算机模拟出二元光学面的面形, 编制了适用于 ZEMAX 的二元光学工艺参数计算程序, 为光学设计和加工提供了参考。

关键字:二元光学; 位相方程; 金刚石车削加工; 红外光学; ZEMAX

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2004)06-0013-04

引言

二元光学由于它的独特的色散特性, 自 80 年代以来日益受到人们的重视^[3,5]。尤其在红外波段, 由于可用的光学玻璃材料比较少, 价格昂贵, 要消色差光学系统就必需要多种玻璃材料, 如果既要消色差又要消热差, 那么要用的玻璃材料种类更多。因此二元光学的色散特性首先被应用到了红外成像领域。可以认为, 二元光学在红外成像中的应用主要在于校正色差, 同时兼有校正其它像差的作用。

现代的光学设计软件的功能越来越强, 界面更是今非昔比, 目前主流的光学设计软件都有对二元光学支持, 也就是光学设计软件里面有二元光学面以供设计者使用。一般来说, 经过光学设计之后, 得到的二元光学参数仅仅是光学理论上的参数, 也就是二元光学面上的位相分布, 不是工艺参数, 并不能直接用于光学加工。本文通过理论上的分析, 并结合一个应用二元光学面的折衍混合红外消色差光学系统为例, 完成了二元光学从理论参数到工艺参数的转换计算, 为二元光学的设计和加工提供参考。

1 二元光学设计参数

二元光学元件是一个衍射元件, 要分析它的特性, 应该用实际的衍射理论, 一般应该应用是矢量衍射理论, 而光学设计软件的基本功能是光线追迹, 其理论依据是几何光学, 软件之所以能够支持需要用矢量衍射理论来分析的二元光学, 原因就在于光学设计软件对于二元光学面的模拟, 仅仅模拟了二元光学的位相延迟对入射光线的方向余弦的改变, 也就是对光线方向的改变, 而这一点, 正是二元光学对于光学成像方面作用。这种模拟方法, 把二元光学的作用与一个普通的光学元件等效了, 其实反映了一个众所周知的观点: 物理光学与几何光学是不矛盾的, 几何光学是物理光学在波长趋于 0 的近似。

以 ZEMAX 为例, ZEMAX 软件由于它的易用性, 这几年发展得非常快, 功能也很完善, 已经成为最普遍使用的光学设计软件了。本文以 ZEMAX 设计实例有一定的代表性。ZEMAX 模拟二元光学并不真正模拟二元光学面的矢高随着每个区的变化, 而是模拟二元光学面对于入射波不同部位的位相延迟。在 ZEMAX 中, 二元光学面引入的位相延迟函数为^[1]:

$$\Phi(\rho) = M \sum_i^N A_i \rho^{2i} \quad (1)$$

其中: M 为衍射级数, N 为位相函数的阶数, A_i 为每一个阶次的系数, ρ 为规一化径向坐标, 即:

$$\rho = \frac{\sqrt{(x^2 + y^2)}}{\rho_N} \quad (2)$$

其中: ρ_N 为规一化半径。以下计算中我们假设衍射级数 M 为 1, 因为这是最常用的情况。规一化半径 ρ_N 也为 1, 这样, ρ 就直接代表径向坐标, 方便数值计算。

$$A_i = (2\pi/\lambda_c)/a \quad (3)$$

* 收稿日期: 2004-05-26

式中: λ_c 为二元光学的设计波长, 一般也就是光学系统的中心波长。

我们知道, 二元光学面是有光焦度的, 其对波面的位相延迟使它的等效焦距为^[2]:

$$f_d = -1/(2a_1) \quad (4)$$

一般的来说, 二元光学玻璃材料在光学系统中主要用于消色差, 因此, 根据消色差原理, 设计的光学系统, 要首先知道二元光学元件的阿贝数, 二元光学元件的色散特性较为特殊, 它的阿贝数与基底材料无关,

$$v_d = \lambda_0/(\lambda_s - \lambda_l) \quad (5)$$

式中: λ_0 为中心波长, λ_s 为短波, λ_l 为长波。经过计算, 就可以确定二元光学元件所分配的光焦度, 进而确定参数 a_1 , 再根据光学系统像差校正的需要来确定 a_2 或更高次系数。直到二元光学元件的所以设计参数确定。

2 二元光学工艺参数的计算

与高次非球面类似, 二元光学元件的设计参数必将反映到工艺参数上, 否则设计将是没有意义的。在红外光学, 加工工艺一般为金刚石车削加工(Diamond turning), 则二元光学设计参数最终反映在车削刀具的进刀方程。二元光学面一般是在平面基底上加工成形, 它的工艺参数也就决定了在基底上形成的面形, 这个面形与菲涅尔透镜类似, 由一些环带透镜构成。

2.1 各环带的径向半径坐标

二元光学面各衍射环带的边界出现在位相函数值恰好为 2π 整数倍处, 即令式(1)等于 2π 的整数倍:

$$|A_1\rho^2 + A_2\rho^4 + \dots| = 2\pi k \quad (6)$$

式中: k 为环带序号, 由上式就可以求得各个环带的半径 ρ_k , 比如: 如果二元光学面只取前二项系数 (即第二项系数不应为 0 否则应只取第一项), 则可得到各环带半径为:

$$\rho_k = \sqrt{\frac{-A_1 - \sqrt{A_1^2 - 8\pi k A_2}}{2A_2}} \quad (7)$$

式中: 环带序号 k 从透镜中心往边缘递增, 直到达到所需口径 (或 $F/\#$) 为止。

一个二元光学面所需要的环带数为由面的口径和球各环带的大小决定, 一个近似公式为^[2]:

$$n_{\text{total}} = \left(\frac{D}{2r_1}\right)^2 = \frac{f}{8\lambda_0(f/\#)^2} \quad (8)$$

式(8)表明, 所需的环带数与所用的基底材料无关。把焦距公式(4)代入上式, 可得到:

$$n_{\text{total}} = \left(\frac{D}{2r_1}\right)^2 = \frac{-1}{16a_1\lambda_0(f/\#)^2}$$

运用以上公式, 就可以确定二元光学面与环带相关的工艺参数了, 为了说明加工工艺的难易程度, 把式(7)最边缘的两个环带半径相减, 并代入焦距公式, 就可得到最小的区域大小为:

$$(\Delta r)_{\min} \cong 2\lambda_0(f/\#) \quad (9)$$

这说明最小区域的大小是波长量级的, 它被称为最小特征尺寸, 是反映了二元光学加工难度的一个重要参数。

2.2 各环带的面形方程

二元光学的各个环带的面形是都非球面的一部分, 而且面形方程都不一样。因此有多少个环带就意味着刀具进刀方程变换多少次。一般来说, 由于整个面是轴对称的, 因此由一个截面的矢高方程也就决定了整个二元光学面的面形。也就是决定了二元光学面的工艺性。

与环带数的计算一样, 各个环带的面形方程的计算应该基于二元光学面的位相方程。环带面形应该使得面引入的位相延迟方程为式(1), 因此, 运用光程差与位相延迟的关系, 可得到二元光学面在整个半口径内的面形方程为:

$$z_{\text{binary}} = \frac{\lambda_c}{(N_0 - 1)} \left[\frac{1}{2\pi} \Phi(\rho) + \text{Int}\left(\frac{1}{2\pi} \Phi(\rho)\right) \right] \quad (10)$$

从式(10)我们可以推导出各个环带之间的台阶深度,即环带深度为:

$$\Delta = d_{\text{max}} = \lambda / (N_0 - 1) \quad (11)$$

这个深度也是衡量二元光学加工难度的一个重要参数。它使得通过二元光学面各个区的衍射光在衍射焦点得到加强。

3 计算实例

我们以一个实际设计并加工出来的用于长波红外 8~12 μm, 焦距为 166 的双片型折衍混合锗透镜为例, 说明这些工艺参数的具体意义, 同时也说明加工一个二元光学面所需要达到的工艺水平。

要对一个用于 8~12 μm 的锗透镜校正色差, 我们选择 10 μm 为中心波长, 由式(5)可得 $v_d = -2.5$, 而锗材料 $v_r = 990$, 经过消色差条件计算 我们得到 $f_d = 85748$, 由式(4)可以得到各个区的径向半径坐标为: $r_1 = 41.365$; $r_2 = 58.35$; $r_3 = 71.27$; $r_4 = 82.1$ 。

又从式(11)可以得到各环的最大深度为: $d_{\text{max}} = 0.0032$ 。

这样, 一个二元光学面的面形就完全确定了, 其面形如图 1 所示。图 2 为另一个设计结果的面形, 这也说明了设计参数对加工工艺难度的影响是决定性的。为了方便在设计过程中计算二元光学的工艺参数, 我们应用 VC++ 把以上公式编制成了一个扩展程序 BinarySag, 程序能够整合到 ZEMAX 软件界面中, 图 3 为程序的界面, 与 ZEMAX 界面是完全一致的。

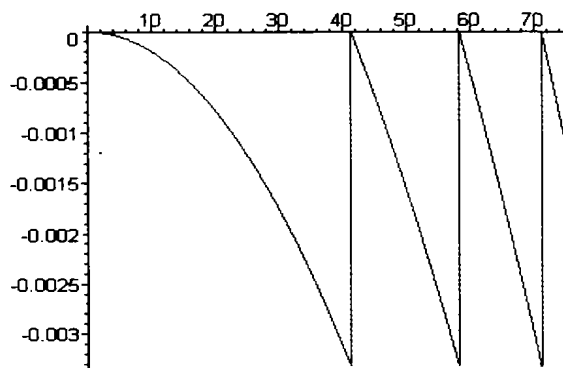


图 1 口径为 150mm 仅用 8 个区的折衍混合透镜
Fig.1 150mm hybrid refractive-diffractive lens
comprising of 8 zones

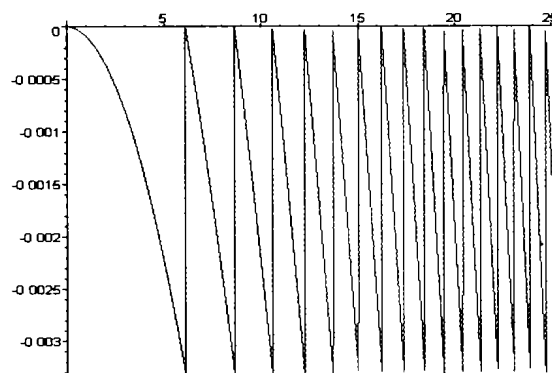


图 2 口径为 50mm 的折衍混合透镜, 用了 34 个区
Fig.2 50mm hybrid refractive-diffractive lens
comprising of 34 zones

4 结论

本文从 ZEMAX 光学设计软件的二元光学面设计方程出发, 推出了二元光学面的工艺参数, 完成了从设计参数到工艺参数的转换计算, 并根据以上公式, 编制了可以整合于 ZEMAX 软件的二元光学工艺参数扩展程序, 从而为光学设计的优化和加工工艺的选择、设计、优化提供了参照。

参考文献

- [1] ZEMAX Development Corporation. ZEMAX Optical Design Program User's Guide, Version January 6 2002. 2002. 213~214.
- [2] Max J. Raedl. Optical Design Fundamentals for Infrared Systems[M]. 2nd Edition. Bellingham, Washington: SPIE Press. 2001.
- [3] Missing M D, Morris G M. Diffractive optics applied to eyepiece design[J]. Appl. Opt., 1995, 34(14): 2452~2461.

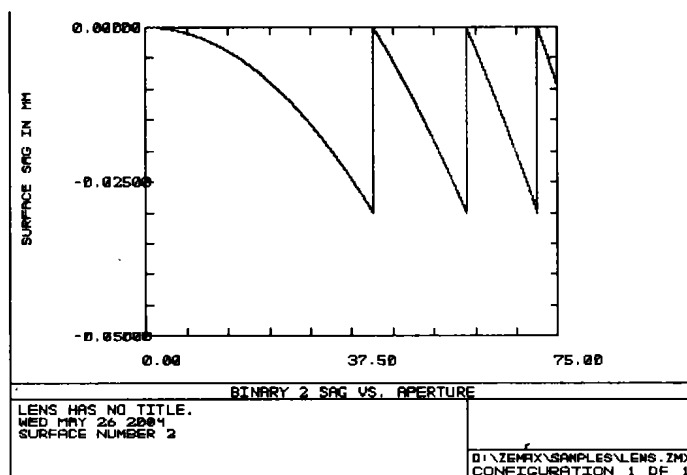


图 3 BinarySag 扩展程序界面
Fig.3 User interface of extension program BinarySag

- [4] 焦明印, 冯卓详. 实现消热差和消色差的衍射混合红外光学系统[J]. 光电子·激光, 2001(12): 1226~1229.
- [5] Swanson G I, Veldkamp W B. Infrared applications of diffractive optical elements[J]. *Proc.SPIE*, 1988, **883**: 155~158.

作者简介: 农文捷, 1980 年生, 南京理工大学电子工程与光电技术院毕业, 主要从事光学设计与软件开发工作。

Evaluation of Binary Optics Manufacturing Parameters

NONG Wen-jie, JIN Ning

(*Kunming Institute of Physics, Yunnan Kunming 650223, China*)

Abstract: Base on the Phase polynomial equation of Binary 2 surface in ZEMAX optical design software, the manufacturing parameters of Binary Optics were theoretically analyzed and their expressions were deduced. The surface forms of two examples were also stimulated by mathematical software, and the calculating procedure was also coded in to extension program accessible from ZEMAX extend menu.

Key words: binary optics, phase equation, diamond turning, infrared optics, ZEMAX

(上接第 12 页)

- [3] 谈和平, 崔国民, 阮立明, 等. 地物目标红外热像理论建模中的蒙特卡罗法与并行计算[J]. 红外与毫米波学报, 1998, **17**(6): 417~423.
- [4] 杨宝成, 沈国土, 毛宏霞, 等. 海面目标红外辐射场的理论模拟和计算软件[J]. 计算物理, 2001, **18**(3): 219~224.
- [5] 李本文, 陈海耿, 陶文铨. 二维复杂系统内直接交换面积的计算[J]. 东北大学学报自然科学版, 1997, **18**(1): 90~93.
- [6] R.西格尔, J.R.豪厄尔. 热辐射传热[M]. 曹玉璋, 黄素逸, 陆大有, 等译. 北京: 科学出版社. 1990, 603~604.

作者简介: 沈国土 (1970-), 男, 浙江人, 在职博士生, 从事红外特性理论模拟方面的研究。

Calculation of the Radioactive Transfer Coefficient by Iteration Method in Heat

Analysis

SHEN Guo-tu¹, YANG Bao-cheng¹, CAI Ji-guang¹, JIANG Jin¹, GAO Jing², XIA Zhang-geng², ZHU Wen-yong²

(1. *Key Laboratory for Optical and Magnetic Resonance Spectroscopy, East China Normal University Department of Physics, East China Normal University Shanghai 200062, China;*

2. *Department of Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China*)

Abstract: To get another method of calculating radioactive transfer coefficient, based on the concept of angle factors, the radioactive transfer coefficient was calculated by iteration method in light of the theory of energy conservation and of Lambert body assumption. The method was applied to the simulation of infrared radioactive fields of sea object and. It was proved that high efficiency was obtained and the difficult was decreased.

Key Words: radioactive transfer coefficient, angle factors, iteration method