

## 复杂光学系统鬼像分析的单向链表实现算法

胡福生<sup>1,2</sup>, 金光<sup>1</sup>, 张楠<sup>1,2</sup>

(1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2.中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘 要:** 光学系统的杂散光极易在系统内形成多个鬼像, 严重影响光束质量和传输特性。主要研究了复杂光学系统中折射面的多次反射和衍射面的多级衍射而形成的杂散光及其数学模型与计算方法, 提出了一种采用单向链表数据结构进行鬼像分析的更加简洁、高效的实现算法。编制了专门的杂散光分析软件, 实例计算表明, 采用该软件可以快速的分析含衍射元件的复杂光学系统的杂散光, 全面描述鬼像在像面的位置和能量分布, 分析结果对在光学系统设计阶段排除鬼像的潜在危害具有重要参考价值。

**关键词:** 鬼像; 杂光; 光线追迹; 光路模拟

中图分类号: O43 文献标识码: A 文章编号: 1007-2276(2007)03-0322-04

## Algorithm of list structure of ghost images analyzing in complicated optical systems

HU Fu-sheng<sup>1,2</sup>, JIN Guang<sup>1</sup>, ZHANG Nan<sup>1,2</sup>

(1.Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2.Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Stray light generated in optical system forms a lot of ghost images, which seriously influence the beam quality and propagation properties. The mathematical model and algorithm of stray light caused by multi-reflection and multi-order diffraction in complicated optical systems are discussed. A simpler and more efficient algorithm using list structure for ghost images analysis is mentioned. The analysis software has been programmed. As shown by the example, this software is available for quickly analyzing stray light in the complicated systems including diffraction components, and all of the ghost image positions with energy descriptions can be given by the software. The results is valuable to the design of optical systems.

**Key words:** Ghost images; Stray light; Ray tracing; Optical-path simulation

## 0 引 言

任何实际光学系统中都存在杂散光, 即存在于光学系统中的非预期光线, 它是光学系统中的有害光束。对于大面积光源来说, 杂散光的存在将在接收面上产生一个亮的背景, 引起对比度下降, 影响成像质量; 对于诸如一些高功率激光系统这样的小面积高亮

度光源, 杂散光不仅在接收面上, 而且在系统中产生光能相对集中的微小区域, 即鬼点或鬼像。接收面上的鬼像将对真正的成像信息造成危害, 引起接收器响应失常, 无法识别目标, 而光学系统内部的鬼像由于其光能的集中, 还会造成光学元件的永久性损伤<sup>[1-2]</sup>。

以往的杂散光分析一般采用对系统展开的方法,

收稿日期: 2006-06-05; 修订日期: 2006-08-20

作者简介: 胡福生(1981-), 男, 江西赣州人, 硕士生, 主要研究方向为遥感成像技术。Email: hufs\_1@163.com

导师简介: 金光(1958-), 男, 吉林长春人, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为天基空间光学成像技术。Email: jing@ciomp.ac.cn

即当光线从第一面入射到第二面,再反射回第一面时,后一个“第一面”作为第三面来处理。如果系统只有两个面,计算这一次反射鬼像就需要构造一个有三个面的新光学系统。这样计算若干个鬼像就要首先构造若干个鬼像系统,当光学系统结构比较复杂、面数较多时,采用这种方法将占用大量的时间和内存。因此,虽然国际上知名公司的商业软件如 ZEMAX、CODE V 等均具有分析杂散光的功能,但仍然以分析二次反射鬼像为主,这不能满足很多实际光学系统的要求。参考文献[1-4]提出采用二叉树这种数据结构来描述杂散光束的传播情况,可以有效地分析复杂光学系统的杂散光,但是采用这种数据结构无法分析由于多级衍射产生的杂散光,且软件编制上也比较复杂。参考文献[5]提出采用这种数据结构来分析含衍射器件光学系统的杂散光,但同样存在程序实现较复杂,运行效率较低的缺点。文中提出了一种新的思路,拟采用单向链表这种简单的数据结构来实现杂散光的分析,从而解决上述采用二叉树结构无法分析多级衍射产生的杂散光问题,同时还使软件结构更加简洁,程序实现更加高效。

## 1 杂散光分析的实现

当一束光入射到某光学表面,如果正常光路是透射,则反射光束将形成鬼像,每一束光经过一个透射表面将变为两束光,然后再对这两束光分别进行光线追迹,其中经过偶数次反射的光线最终将有可能到达像面,经过奇数次反射的光线将肯定到达不了像面。根据这种关系,可以采用单向链表数据结构,首先追迹出抽样光线经过 0 次反射(即在每个镜面都是正常透射)后到达像面的一条光路,然后对该光路的每一束光线追迹出其再经一次反射后的光路,依此类推,直到反射次数达到预先设定的值或者光线与下一个镜面不相交,停止追迹。图 1 为杂散光分析示意图,

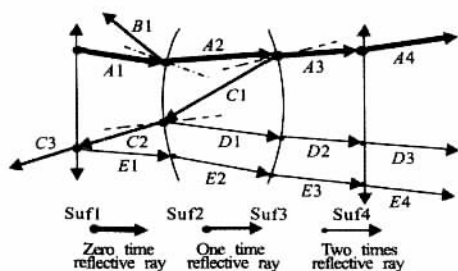


图 1 杂散光分析示意图

Fig.1 Illustration of stray light analyzing

图中每一条光路可用一个单向链表表示,单向链表中的每一个结点表示出射于某表面的一束光线,对这束光线的描述构成了该结点的数据域或数据成员,同时,每个结点有一个指针域用来指向产生该光束的来源光。光线的传播是携带能量的,当对抽样光线进行光线追迹时,光线通过不同的路径,经过拥有不同透射率与反射率的光学面后将会有能量的损失,设光线初始能量值为 1,经镜面透射能量损失 2%,经镜面反射能量损失 98%,则依次可计算出光线到达各光学镜面的能量值。图 1 显示了对抽样光线 A1 进行光线追迹的具体实现过程:

(1) 依据抽样光线 A1 追迹其正常透射经过每个镜面的光路 A1 A2 A3 A4,该光路中的每一束光线的反射次数均为 0;

(2) 以 A1 为来源光线,追迹其经过 1 次反射所得光路 B1,由于 B1 与镜面 1 没有相交,可以马上终止对该光路的追迹。然后以 A2 为来源光线,追迹其经过 1 次反射所得光路 C1 C2 C3;

(3) 分别以 1 次反射光路中的 C1、C2 为来源光线,追迹出其再经过一次反射的光路 D1 D2 D3 和 E1 E2 E3 E4。这两条光路中每束光线的反射次数均为 2。由于本系统只考虑到 2 次反射的情况,所以对 0 次反射光路中的 A2 光线经反射到达像面的所有光路就已经追迹完毕了,依此类推,可以将 0 次反射光路中的每一束光线经多次反射后到达像面的所有光路(即杂散光)全部追迹出来;

(4) 将光路信息存入数据库表,释放链表占用的动态内存。

## 2 杂散光分析软件的编制和实例计算

### 2.1 杂散光分析软件中的数据结构及具体算法

对光学系统中的杂散光进行分析,首先要获得系统光学参数。作者编制的程序中主要采用一种结构体和定义数个全局变量来分别描述镜面的参数以及系统外部参数。镜面参数结构体定义如下:

```
struct TSurface
{
    int SufType;
    double r, Refractivity, D;
    double K;
    bool IsDiffSuf;
    double Alfa[6];
```

```

double C[7];
int SufNum;
double Pos_X;
};

```

其中, SufType 表示镜面类别 (1 平面、2 球面、3 二次曲面、4 偶次非球面、5 光阑面、6 像面、7 衍射面);  $r$  表示曲率半径; Refractivity 表示折射率;  $D$  表示口径;  $K$  和  $Alfa$  表示二次曲面和偶次非球面的参数;  $C$  表示衍射面的相位系数; SufNum 表示面号; Pos\_X 表示镜面在光轴上的位置; IsDiffSuf 表示该面是否为衍射面。系统外部参数包括镜面总数量、能量衰减率、主波长、使用波长、最大衍射级次、视场角、需要计算的最高反射次数等, 本程序采用全局变量存储。

对抽样光线进行追迹可以得到数条经过不同路径到达像面的光路, 每条光路信息均可用一个单向链表来存储。笔者建立了如下实际光线杂散光分析的单向链表结点类型:

```

struct TSpaceRay
{
    double x,y,z,Alfa,Beta,Gamma;
    double Energy;
    int Reftime;
    int SufNum;
    struct TSpaceRay * parent;
    int DiffOrder;
    bool IsRefraction;
    bool IsDealed;
    bool IsTerminate;
};

```

其中,  $x,y,z$  表示光线在光学面上的交点; Alfa, Beta, Gamma 表示光线的方向余弦, 由此, 能唯一地确定一条光线; Energy 表示光线所代表的能量; SufNum 表示面号; Reftime 表示反射次数; DiffOrder 表示衍射级次; IsRefraction 表示是折射后的光线还是反射后的光线; IsTerminate 表示光路是否终止, 可能是发生全反射或与下一个镜面未交上导致光路终止; parent 指针指向该光线的来源光线, 通过该指针可以容易地找出整个光路路径。这里, 一个结点就代表出射于某表面的一条实际光线, 对一根光线的追迹需要计算其到达每个镜面的交点和方向余弦, 本算法采用实际光线计算公式进行求解, 只要能对光线进行合理的高密度抽样, 就能非

常真实地模拟出杂散光的传输过程及其对成像质量的影响。有关实际光线计算公式的详细论述请参阅参考文献[8]。图 2 给出了杂散光分析的流程图。

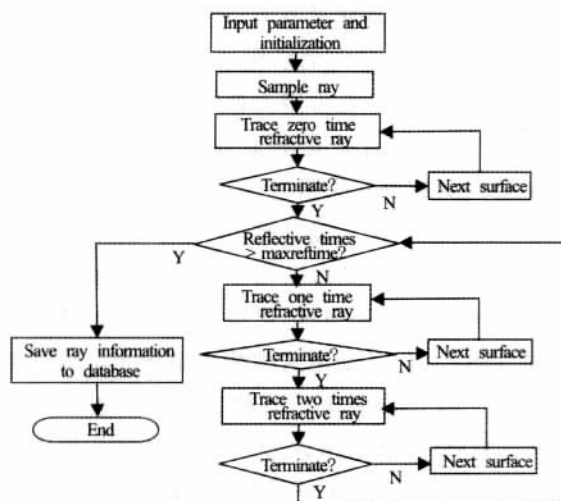


图 2 杂散光分析流程图

Fig.2 Flow chart of stray light analyzing

## 2.2 实例计算

基于以上数据结构与算法, 笔者编制了一般光学系统杂散光分析软件。软件首先按照一定的规则对入射光线进行合理的高密度抽样, 然后对每一根抽样光线在整个光学系统范围内进行追迹, 最终可以得到一系列到达像面的光束, 在 Matlab 中对这些光束的分布位置及其能量进行分析, 分析结果可以给光学系统设计者提供有价值的参考。

图 3 所示为一个包括 6 个镜面含 10 个有效面的

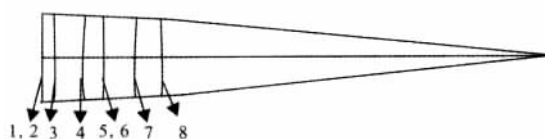


图 3 一个简单光学系统示意图

Fig.3 A simple optical system

简单光学系统, 其中 1 为光阑面, 2 为球面, 3 为偶次非球面, 4 为球面, 5 为基底面型是球面的衍射面, 6 为球面(也是 5 的基底面), 7、8 为球面(物面和像面未在图中标注)。以该系统为例, 采用所编制的软件对其进行 0° 视场杂光分析。图 4 列出了抽样光线数目为 3, 最大反射次数为 2 时杂散光分析的部分结果, 其中上半部分表格列出了所有到达像面的光束的坐标、方向余弦、能量、光路路径等信息, 下半部分表格列出了上面表格选定的一条光路经过每个镜面的坐标、方向余弦、能量等明细信息。

从图中表格的 Directory 列可以看出该光路经过的镜面,如经过二次反射的一条光路(1)~(2)~(3)~(4)~(5)~1~(6)~(5)~0~(4)~(5)~0~(6)~(7)~(8)~(9)~表示

的传输过程是:抽样光线经镜面 1 折射到 2,折射到 3,折射到 4,折射到 5,1 级衍射到 6,反射到 5,0 级衍射到 6,折射到 7,折射到 8,折射到像面。

Trace	Time	Refltime	Energy	X	Y	Z	Alfa	Beta	Gamma	Directory
20	2	0.0003335	0.000000E+000	-7.367658E+001	0.000000E+000	0.000000E+000	0.7738860	-0.6333249	0.0000000	(1)~(2)~(3)~(4)~(5)~1~(6)~(5)~0~(4)~(5)~0~(6)~(7)~(8)~(9)~
21	2	0.0003335	0.000000E+000	-7.430880E+001	0.000000E+000	0.000000E+000	0.7714583	-0.6362798	0.0000000	(1)~(2)~(3)~(4)~(5)~1~(6)~(5)~0~(4)~(5)~0~(6)~(7)~(8)~(9)~
22	2	0.0003076	0.000000E+000	-4.178904E+001	0.000000E+000	0.000000E+000	0.9220108	-0.3871641	0.0000000	(1)~(2)~(3)~(4)~(5)~1~(6)~(5)~1~(4)~
23	2	0.0003076	0.000000E+000	-4.178245E+001	0.000000E+000	0.000000E+000	0.9220327	-0.3871121	0.0000000	(1)~(2)~(3)~(4)~(5)~1~(6)~(5)~1~(4)~
24	2	0.0003076	0.000000E+000	-4.177586E+001	0.000000E+000	0.000000E+000	0.9220545	-0.3870601	0.0000000	(1)~(2)~(3)~(4)~(5)~1~(6)~(5)~1~(4)~
25	2	0.0003203	0.000000E+000	-2.966289E+001	0.000000E+000	0.000000E+000	0.9472248	-0.3205702	0.0000000	(1)~(2)~(3)~(4)~(5)~1~(6)~(5)~1~(4)~
26	2	0.0003203	0.000000E+000	-2.967727E+001	0.000000E+000	0.000000E+000	0.9467457	-0.3214822	0.0000000	(1)~(2)~(3)~(4)~(5)~1~(6)~(5)~1~(4)~

TraceLine	SuNum	Refltime	Energy	X	Y	Z	Alfa	Beta	Gamma	Created
130	1	0	1.0000000	0.000000E+000	1.000000E+001	0.000000E+000	1.0000000	0.0000000	0.0000000	2006-4-13
120	2	0	0.9800000	2.000801E-001	1.000000E+001	0.000000E+000	0.9999070	-0.0136359	0.0000000	2006-4-13
110	3	0	0.9604000	-1.920195E-001	9.937161E+000	0.000000E+000	0.9991955	-0.0401046	0.0000000	2006-4-13
100	4	0	0.9411920	6.739339E-001	9.661583E+000	0.000000E+000	0.9972659	-0.0738965	0.0000000	2006-4-13
90	5	0	0.9223682	-2.190154E-001	9.357254E+000	0.000000E+000	0.9969789	-0.0776728	0.0000000	2006-4-13
80	6	1	0.0184474	-2.190154E-001	9.357254E+000	0.000000E+000	-0.9853541	-0.1705205	0.0000000	2006-4-13
70	5	1	0.0180784	-2.190154E-001	9.357254E+000	0.000000E+000	-0.9853541	-0.1705205	0.0000000	2006-4-13
60	4	2	0.0003616	5.362584E-001	8.622683E+000	0.000000E+000	0.9131687	-0.4075817	0.0000000	2006-4-13
50	5	2	0.0003543	-1.115923E-001	6.680155E+000	0.000000E+000	0.9131687	-0.4075817	0.0000000	2006-4-13
40	6	2	0.0003473	-1.115923E-001	6.680155E+000	0.000000E+000	0.7693754	-0.6387969	0.0000000	2006-4-13
30	7	2	0.0003403	1.670481E-003	7.741563E-001	0.000000E+000	0.9061906	-0.4228695	0.0000000	2006-4-13
20	8	2	0.0003335	-1.358306E-002	-2.018597E+000	0.000000E+000	0.7738860	-0.6333249	0.0000000	2006-4-13

图4 对图3所示光学系统进行杂散光分析的部分结果

Fig.4 Part of the analysis results for a simple optical system in Fig.3 given by the analysis software

### 3 结束语

文中所述的采用单向链表数据结构进行杂散光分析软件的编制,既高效又简洁,基于此编写的数值模拟程序能对复杂光学系统中杂散光的传输过程进行模拟、分析,找出对杂散光贡献较大的关键表面、杂散光传输路径以及杂散光在像面的能量分布情况。在光学系统设计过程中,制造和测试全尺寸的光学组件是昂贵且费时的,因此利用计算机来模拟、分析初步设计方案,依据分析结果修改光学元件参数,可以大大减少设计时间,降低设计费用,具有实际应用意义。

#### 参考文献:

- [1] CEN Zhao-feng, HE Zhi-ping, LI Xiao-tong, et al. A computer modeling for stray light analysis based on geometrical optics[J]. Computer Engineering and Applications(岑兆丰,何志平,李晓彤,等.一种基于光线光学的杂光分析模型.计算机工程与应用), 2003, 23: 188-190.
- [2] HAO Yun-cai, XIAO Shu-qin, WANG Li-xia. Status and development of stray light elimination technology for space-

borne optical sensors[J]. Chinese Space Science and Technology(郝云彩,肖淑琴,王丽霞.星载光学传感器消杂光技术现状与发展.中国空间科学技术), 1995, 3: 40-50.

- [3] LI Xiao-tong, CEN Zhao-feng, HE Zhi-ping, et al. Data structure of stray light analyzing in high power laser systems[J]. Laser & Infrared(李晓彤,岑兆丰,何志平,等.大功率激光光学系统杂散光分析的数据结构.激光与红外), 2002, 32(5): 295-297.
- [4] CEN Zhao-feng, HE Zhi-ping, LI Xiao-tong, et al. Stray light analysis of optical system[J]. Optical Instruments(岑兆丰,何志平,李晓彤,等.光学系统中的杂光分析.光学仪器), 2003, 25(2): 12-15.
- [5] LI Xiao-tong, CEN Zhao-feng, LIU Hao-fei, et al. Paraxial analysis of stray light caused by multi-order diffraction and multi-reflection[C]//Proceedings of SPIE, High-Power Lasers and Applications III, 2005, 5627: 20-24.
- [6] Breault R P. Current technology of stray light[C]//Proceedings of SPIE, 1986, 675: 2-12.
- [7] LI Hui, LI Ying-cai. Mathematical and physical model for a simplified stray light analysis method[J]. Acta Photonica Sinica(李晖,李英才.一种简化杂光分析方法的数理模型.光子学报), 1996, 25(7): 665-672.
- [8] YUAN Xu-cang. Optical Design[M]. Beijing: Science Press(袁旭沧.光学设计.北京:科学出版社), 1983.