

# 透镜系统的镜面反射杂光的计算

## ——鬼像的模拟与分析

陈志勇

**摘要：**杂光是影响光学系统像质的重要因素之一。本文提出了一种计算透镜面反射杂光的方法：近轴近似法与有限光线追迹法的混合应用。介绍了鬼像的模拟与分析软件的功能及结构。最后以实例说明。

### 一、概 述

杂光，是指光学系统中除了成像光以外的所有非成像光能。鬼像是杂光的一种，是指由于物方存在小面积高亮度的目标经由非正常光路而在像面上形成的本来不存在的像。产生杂光的原因很多<sup>[1]</sup>，主要是光学系统各元件表面、边缘面、光阑面、镜筒和检测面的反射与散射造成的。其中以透镜表面的低级次多重反射最为重要，它是产生鬼像的主要原因。产生杂光的光源可以是在任意视场，任意位置，可以是大的漫射源如天空，也可以是小张角的源如太阳。杂光的危害很大，当杂光在像面均匀扩散时，它使像的对比度和传递函数下降，当像面出现鬼像时，往往会使人分辨不清正常像。

人们早就注意到杂光的危害，并作了一些研究。早些年工作多集中在对杂光的定性分析及具体仪器杂光的测量上，并产生了诸如黑斑法、点光源法的杂光测量方法。这些工作非常重要，但却很难对具体的设计工作做出直接指导，若在加工装校完的光学系统中出现了杂光，甚至鬼像，那损失就难以弥补了。因此，目前光学设计者有一个迫切要求，那就是在设计阶段能基本预知杂光的情况。近二十年来，光学设计的水平随着CAD的发展有了很大提高，杂光的问题也变得越来越突出了。而计算机的应用又为杂光的计算提供了强有力的工具，使一些复杂的计算如散射的模拟成为可能。因此，发达国家相继开始致力于用于工程设计的杂光计算分析软件的研制。如日本的中村泰博等人，用计算机模拟了鬼像的形成<sup>[2]</sup>，美国国防部等单位用大量投资研制出了一些专用分析软件<sup>[6]</sup>，并由此设计出不少杂光率很低的仪器。但在目前大型的光学设计软件中对杂光没有或只作简单的分析，如美国的CODE V光学软件仅能对二次反射杂光作近轴计算。国内在这方面的的工作见到的不多，浙江大学作过二次反射杂光率的近轴计算<sup>[3]</sup>。我们试图充实国内在这方面的的工作，针对镜面反射杂光的重要性和易于计算的特点，我们首先对其作了研究，提出了一种新的计算方法，并以此开发了一个适用于设计阶段的软件。

注：本文作者的导师为翁志成。

## 二、镜面反射杂光的计算

镜面的反射杂光主要是一次和二次的反射杂光。图 1 是眼底照相光学系统，作为一次反射杂光的例子，由于眼底的反射率很低，所以照明光束被物镜表面及眼角膜反射的杂光的影响很严重，除了要很好地对物镜面镀增透膜之外主要从光学结构设计方面下功夫。二次反射的情形如图 3 (a) 所示，下面我们就以二次反射为例说明杂光的计算方法。

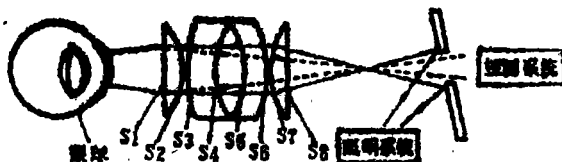


图 1 一次反射杂光例子 (反射面为 S1)

一个具有  $n$  个面 (包括光栏面、探测面) 的系统任取其两个面作为反射面，就可以得到  $C^2_n = n(n-1)/2$  个折反射系统，它们分别对物点成像于各自的像平面，有可能形成鬼像，习惯上称之为鬼像系统。分别求出各鬼像系统的杂光，累加起来就可求出总的杂光。通常计算一个鬼像系统的杂光有近轴近似法<sup>[4]</sup>和有限光线追迹法<sup>[5]</sup>。近轴近似法使用近轴近似公式并认为物面上一点的鬼像光束被真实像面所截，其光束截面上的照度是均匀的。其特点是简单，计算量小，但不够精确，只能用于定性分析。有限光线追迹法是将光束用有限根光线表示，通过实际追迹这些光线的成像情况，来模拟鬼像的形成。可见，追迹的光线越多，结果越逼近实际，但计算量也越大。

基于上述方法的优缺点，我们采用了一种混合式的计算方法，即先用近轴近似法作一定性分析，找出影响最大的几个鬼像系统，再用有限光线追迹法进行仔细的分析。具体方法是，用近轴公式 (式 1~2) 计算一个鬼像系统的几条光线，可以计算出该系统的参数如放大率  $M_1$ ，成像面与原像面的距离  $D$ 。在原像面的照度由式 (3) 给出。作有限光线追迹

$$u' = \frac{n}{n'} u + \frac{h}{r} \left(1 - \frac{n}{n'}\right) \quad (1)$$

$$h_2 = n_1 - d_1 u_1' \quad (2)$$

$$E = C \cdot t \cdot L \frac{M_1^2 ds}{D^2} \quad (t \text{ 为能量传播率, } L \text{ 为光源亮度, } ds \text{ 为微小光源面积}) \quad (3)$$

时，将参考面 (一般取第一个镜面) 等分成  $(2^n + 1) \times (2^n + 1)$  的网格点，( $n$  取  $\phi \sim 6$ ) 每一网格点代表一条光线，用斜光线追迹公式 (叠代法) 进行追迹。每个面的能量透过率和反射率按菲涅尔公式计算或用户自定义的函数计算。对于未镀膜的透镜面而言最简单的自定义函数如式 4~5

$$\text{面能量反射率 } \rho = \left(\frac{n' - n}{n' + n}\right)^2 \quad (4)$$

$$\text{面能量透过率 } \tau = 1 - \rho \quad (5)$$

具体追迹过程是按自内往外的顺序即先找到一个“中心”网格点，再以其为中心向外扩展，直到到达实际的边界，这样可以避免许多盲目的计算。实际计算中还采用了逐次加密逼近技

术。即在一遍追迹完成以后，可以对网格再细分一次，对“中心”附近的光线不再追迹，而用原来的追迹结果进行曲面拟合而得，只对边界附近的光线进行追迹。

这种混合算法，既保证了计算的精确性又节省了大量无意义的计算时间。以一个6片高斯物镜为例，其有14个面，有91个鬼像系统，若网格划分两次（ $n=2$ ）有25个网格点，设实际追迹光线为20根，需追迹1820根，这样的计算量是很大的。一般的IBM-PC微机简直无法胜任。

### 三、镜面反射杂光计算分析软件系统

采用上述方法，我们初步研制出了一个用于设计阶段的镜面反射杂光计算分析软件，其具有如下功能：（1）用近轴近似法计算各鬼像系统对轴上点光源的成像情况，排序出相对照度最大的前几个面，排序出各个面的影响度，给出可与点光源法相对应的杂光分布函数；

（2）用有限光线追迹法分析某一鬼像系统，可根据具体要求任意指定光源，任意指定精度，给出杂光像的模拟图，指出其是否形成鬼像（鬼像的判断标准是个有待研究的课题，这里采用用户自定义的标准）；（3）使用混合法综合分析，分析由（1）提供的几个最重要鬼像系统对三个代表性视场（0，0.7，1）的物点的成像情况。

软件的总体结构如图2。软件是在Micro VAX II计算机上实现的，采用了FORTRAN语言为主体语言，BASIC语言为辅助语言，应用了FORTRAN与BASIC的混合编程，使用了通用的GKS图形软件和VMS操作系统的SMG屏幕管理系统。

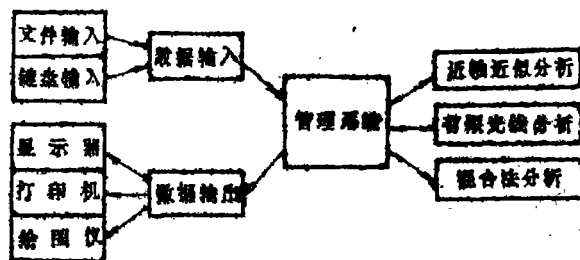


图 2

### 四、软件的验证与进一步的工作

用英国Kidger公司的光学设计软件Sigma的近轴分析结果与本软件的近轴分析结果作了比较，结果一致。用一个三片柯克物镜拍摄的实际像与该软件模拟出来的鬼像进行了比较，结果相当吻合，并找出了产生这些鬼像的面。用混合法分析的结果与直接用有限光线分析法分析的结果基本一致，表明混合法是有意义的。图3是一个分析结果。

进一步的工作是计划用该软件对由于鬼像造成研制失败的眼底电视光学系统进行分析，找出其产生鬼像的根源，寻找解决的方案。同时，扩充软件的功能，使其能用于分析由于透镜边缘面、镜筒壁等的反射引起的杂光，还要研究由散射引起的杂光，最后，将杂光分析引入到自动设计中。

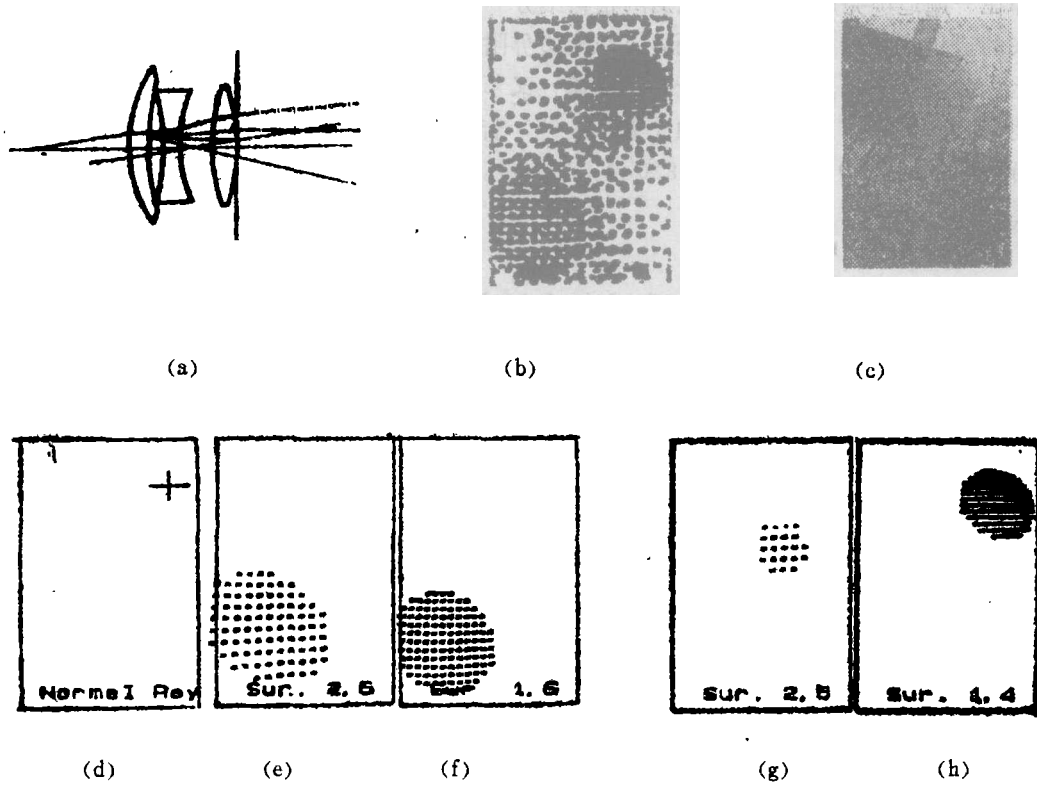


图3 软件分析结果与实验对照

- (a) 三片柯克物镜，焦距为28mm，虚线为正常光，实线为2-6面鬼像系统光线。
- (b) 用有限光线分析的鬼像模拟图
- (c) 实际拍摄的鬼像：光源为太阳光，视场角为 $XAN = 11.5^\circ$ ， $YAN = 17.5^\circ$ 在相机前方一米处置一块大黑布作为背景。
- (d) 正常像位置，用十字表示，
- (e) ~ (h) 用混合法分析出的最重要的四个鬼像系统的鬼像模拟图。

### 参 考 文 献

- [1] 刘瑞祥，光学机械，1977，No. 5，p11
- [2] 中村泰博，光学技术コンタクト，13，1975，No. 2，p18
- [3] 王子余等，光学仪器，1982，No. 2，p6
- [4] G. Smith; Optica.Acta, 1971, 18, No. 11, p815-827
- [5] A. G. Naylor; Canadian Jour. of Phys., 1970, 48, p2720-2729
- [6] C. Leinert and Klüppelberg; Appl. Opt., 13, p556-564, (1974)

**Calculation of Veiling Glare Due to  
Reflections Between Surfaces  
—Ghost Image Simulation and Analysis**

Chen Zhiyong

**Abstract**

Veiling glare is one of the important factors causing deterioration of image quality in optical systems. A new method, using the paraxial approximation and the finited ray tracing, is proposed in calculating veiling glare due to reflections from component surfaces. The function and structure of the software for the ghost image simulation and analysis are outlined. A real optical system was analysed as an example.