

光学系统中杂散辐射的分析

韩心志 吕咏

(哈尔滨工业大学航天工程与力学系, 黑龙江, 哈尔滨, 150001)

摘要 给出了一种可以用微机进行杂散辐射分析的简化的区域法杂散辐射分析法.

关键词 杂散辐射, 区域法, 杂散辐射抑制.

引言

光学系统中的杂散辐射使图像模糊、对比度和象质降低. 分析系统的杂散辐射有实验检测法和计算机分析法两种. 实验检测法费时而且代价很高, 对于大型的复杂系统, 由于价格昂贵, 很难应用; 另外, 它难以确定杂散辐射是如何通过系统传播的, 也难以确定系统内杂散辐射贡献最大的表面.

计算机分析法可以指出与系统有关的任何疵病, 计算机程序可以考虑系统内镀膜的双向反射比分布函数, 可进行设计平衡、参数分析和再设计. 虽然任何计算机程序都不太可能全面地考虑系统内的每一个细节, 也难于考虑诸如系统内部表面镀膜特性变化和由于失调或其它原因所产生的变化, 但计算机分析法对散射路径的分析, 可以提出最有价值的修改设计方案, 并否定不合理的设计.

1 杂散辐射的计算机分析及其简化

杂散辐射计算机分析法有蒙特-卡洛 (Monte-Carlo) 法和区域法两类. 蒙特-卡洛法是一种随机模拟法, 其实质是由随机性的不确定分析得到较为稳定的统计值. 应用于杂散辐射分析时, 是把辐射能量视为由大量独立的能束光线组成. 每一能束在系统内部的传递, 由一系列的随机函数确定. 能束的产生, 能束与光学表面或机械零件表面的交点, 以及被反射、吸收、透射与衍射等一系列的过程, 都是与随机函数有关的过程. 追迹一能束, 从进入系统开始, 到完全被吸收或射出系统之外, 或达到最终像面时才结束. 追迹一定量的能束光线数, 可以得到较稳定的统计结果. 辐射能的吸收、反射和到达接收像面的量, 以及杂散辐射系数, 都可以用最后的统计结果表示. 分析中模拟待解问题的随机过程的随机数可用专用的计算机程序产生, 并称为伪随机数.

蒙特-卡洛法分析杂散辐射,是全部采用数学模型计算的,原理简单,但计算量太大,另外,所要求计算的能束光线数正比于杂散辐射的透射比(即像平面上的辐射通量对进入系统的辐射通量之比).如果要求系统的杂散辐射透射比为 10^{-10} ,则平均追迹 10^{10} 条光线只有 1 条能到达像平面.为了得到可靠的统计结果,必须追迹更多的光线.这种方法的误差具有概率的性质.

区域法分析杂散辐射,定向光线从输入口开始,该输入口被分割成许多小的递增区域,辐射的能量正比于小分区的面积.程序追迹光线,从入口起,通过系统传播,到达探测器像面,或被衰减到某一最小值为止.由于这种方法使用数值积分,对于结构复杂的系统,由于细分的需要使计算量急剧增加.

无论使用哪种方法,在计算杂散辐射时都要求大量的输入数据.基本的输入数据包括:(1)系统的光学设计;(2)系统的机械设计,系统中零件的尺寸和形状;(3)各个有关表面的散射特性随辐射入射和出射角的变化.此外,还有辐射源的光谱分布、空间分布以及偏振等特性.

综上所述,要进行系统的杂散辐射分析,一般都要使用大型的高性能计算机.

目前,杂散辐射分析问题已引起国内广大光学传感器设计者的极大关注,特别是对航天光学遥感器和成像制导系统等高性能的光学系统,有必要编制一个简化的可在微机上使用的分析程序进行系统杂散辐射的预设计.

2 简化区域法杂散辐射分析程序的建立

应用区域法,辐射能从一个分区表面传向另一个表面时,传递式为

$$d\phi_c = L_s(\theta_0, \psi_0) dA_s \frac{\cos \theta_s dA_c \cos \theta_c}{R_{sc}^2}, \quad (1)$$

式(1)中, $d\phi_c$ 是所传递的微分功率, $L_s(\theta_0, \psi_0)$ 是辐射源区域的双向辐亮度; dA_s 和 dA_c 分别是辐射源和被散射照射的表面元面积; θ_s 和 θ_c 是从辐射源到被散射照射表面的视线和两个表面相应法线间的夹角; R_{sc} 是从辐射源到被散射照射表面间的距离.式(1)中的 $d\phi_c$ 可以改写为三个因子的积,即

$$\begin{aligned} d\phi_c &= \left\{ \frac{L_s(\theta_0, \psi_0)}{E(\theta_i, \psi_i)} \right\} \cdot \{E(\theta_i, \psi_i) dA_s\} \frac{\cos \theta_s dA_c \cos \theta_c}{R_{sc}^2} \\ &= BRDF(\theta_i, \psi_i; \theta_0, \psi_0) d\phi_s(\theta_i, \psi_i) d\Omega_{sc}, \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)中, $BRDF(\theta_i, \psi_i; \theta_0, \psi_0)$ 是散射表面的双向反射比分布函数,其中 θ_i, ψ_i 和 θ_0, ψ_0 分别是该表面上入射和出射光线的角度; $E(\theta_i, \psi_i)$ 和 $d\phi_s(\theta_i, \psi_i)$ 分别是辐射源表面(散射表面) dA_s 上入射的辐照度和辐射通量; $d\Omega_{sc}$ 是辐射源表面到被散射照射表面 dA_c 的投影立体角.降低这三个因子中的任何一个都可以降低杂散辐射的传播.如果其中任何一个因子为零,则散射表面(辐射源)和被散射照射表面间没有功率传递.实际上,只有第三个因子才可能降低到零.很明显,增大 R_{sc} 或 θ_s 和 θ_c , 降低 dA_c 都可以降低 $d\Omega_{sc}$. 问

题是要选择一种逻辑方案，使之尽可能地阻断直接散射到探测器的杂散辐射能量的途径，然后再对其余的路径降低 $d\Omega_{sc}$ 。

为简化分析过程假定下列条件：

(1) 光学系统是旋转对称的。

(2) 表面之间能量束传递基于一种近似，即双向反射比分布函数 ($BRDF$) 和投影立体角计算是对各表面中心进行的。辐射能在传播过程中，在到达光学系统的第一表面之前没有其它表面的遮挡。

(3) 挡光管环绕着光学系统。管上装有等间隔的挡光叶片环，而且叶片环的定位要使得在环间至少发生 2 次漫散射，从而把外部杂散辐射源的能量传递到第一个光学元件。

(4) 挡光管的镀膜是漫反射表面，如加有挡光叶片环，则将全部叶片环虚拟为一个园柱表面，以一个相应的等效双向反射比分布函数来考虑其对光线传播的影响，把该园柱面看作为一个具有低 $BRDF$ 值的反射表面。

(5) 光学系统的第一面，除具有成像功能外，还对从遮阳罩入射的杂散辐射起中继作用。对于在红外系统中常用的反射镜，例如，卡氏望远镜的主反射镜，假定按下式散射：

$$BRDF(\phi_i, \phi_o) = b[100(\cos \phi_i + \cos \phi_o)]^m, \quad (3)$$

式 (3) 中， b 和 m 是在某波长 λ_0 下测得的常数； ϕ_i 和 ϕ_o 分别是散射表面的光线入射角和出射角。

在上述假定条件下，在分析杂散辐射传播时，可以不再积分式 (2)，而转为研究一很细的辐射能束，该辐射能束具有入射辐射的全部特征，携带着全部入射能量。在进入光学系统后，与实际入射束具有相同的行为，如反射、衍射、透射和吸收等，但是，计算量大幅度下降了，即把积分运算简化为寻求代表辐射束的问题。在寻找代表辐射束时，考虑了 4 种可能的杂散辐射途径 (见图 1)。前 3 个途径来源于离轴辐射源的外部辐射；第 4 个途径来源于挡板壁的内部热辐射，对于红外系统，这是一个潜在的重要杂散辐射途径。所有的路径涉及到的散射，都在系统的第一个光学元件处进入系统的视场。其中，(a) 表示

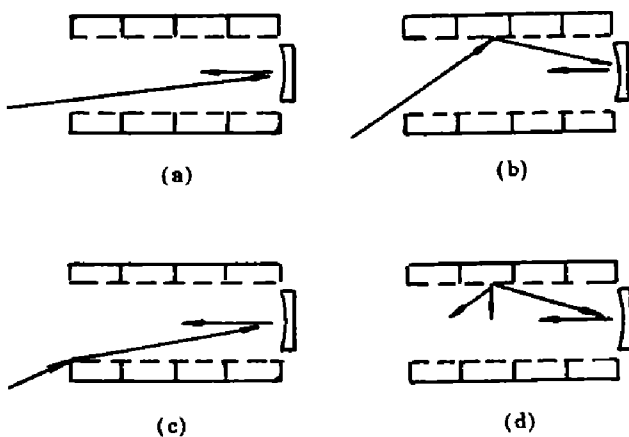


图 1 可能的散射途径

Fig. 1 The possible scattering path

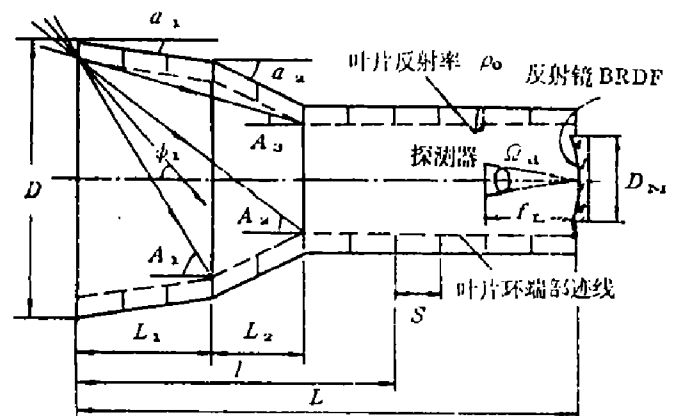


图 2 杂散辐射抑制系统

Fig. 2 The suppression system of stray radiation

单次散射；(b)是双次散射，可带或不带挡光叶片环；(c)是衍射散射；(d)是发射散射。

为了有效地抑制这些途径的杂散辐射，实际光学系统的结构多做成如图2所示形状。改变 α_1 、 α_2 和 D 的值，整个遮光罩可变成一阶锥前部，甚至整个遮光罩变成一个柱面。图2中，以 l 表示的长度是具有辐亮度 $N(\lambda)$ 的挡板筒部分。

追迹图1所示的4种杂散辐射至光学系统的第1个表面，然后，由此表面中继，通过光学系统而到达探测器。

3 边界条件及杂散辐射追迹

按图2，设入射辐射的方向为 ϕ_1 ，则可确定以下临界角度：

(1) A_1 ：如果 $90^\circ \geq \phi_1 \geq A_1$ ，则外来辐射仅辐照遮光罩的前锥体部份（最大长度 $L_0=L_1$ ）；

(2) A_2 ：如果 $A_1 \geq \phi_1 \geq A_2$ ，则前后锥体均被辐照，而遮光罩的园柱部份不被辐照（ $L_0=L_1+L_2$ ）；

(3) A_3 ：如果 $A_2 \geq \phi_1 \geq A_3$ ，则整个遮光罩（包括一部份园柱体）都将受到辐照（ $L_0 > L_1+L_2$ ）。如果 $\phi_1 \leq A_3$ ，则遮光罩园柱部份的入端被全口径辐照。

追迹入射辐射至遮光罩园柱部份入口，并计算出3个角度（见图3）。

如果从园柱入口投射的辐射角度 $\phi_2 < \phi_b$ ，则反射镜M被全口径辐照，否则部份口径被辐照。如果 $\phi_2 > \phi_c$ ，则M不被辐照。如果 $\phi_2 > \phi_t$ ，则遮光罩园柱部份被辐照。

给定尺寸 D_0 、 D_M 和 L_b ，则各临界角易于求出。给定图2中所示的数据，则按图4所示的计算机程序设计框图便可计算出到达探测器的杂散辐射能量。

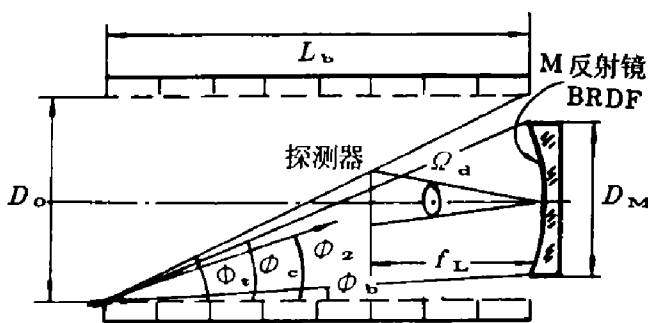


图3 临界角之确定

Fig. 3 Determination of critical angle

4 结语

对于光学系统，特别是工作于空中或空间的光学系统，场外强辐射源辐射的入侵（例如，太阳或地球）会使系统性能严重降低，甚至失效。因此，杂散辐射分析与抑制具有非常重要的意义。在这种情况下，往往要求杂散辐射透射比优于 10^{-10} 以上。

对于简单的系统，简化区域法杂散辐射分析能给出非常好的结果，可以设计出优质的抑制系统。如果系统很复杂，这种方法会出现一定的误差；但是作为一种系统的分析，仍然具有较大的使用价值。例如，确定系统中对杂散辐射最终贡献最大的表面，及杂散辐射随局外辐射入射角度变化而发生的变化等。由于这种方法简便，又可在一般微机上运行，比较适合用户的需要，并已取得很好的效果。

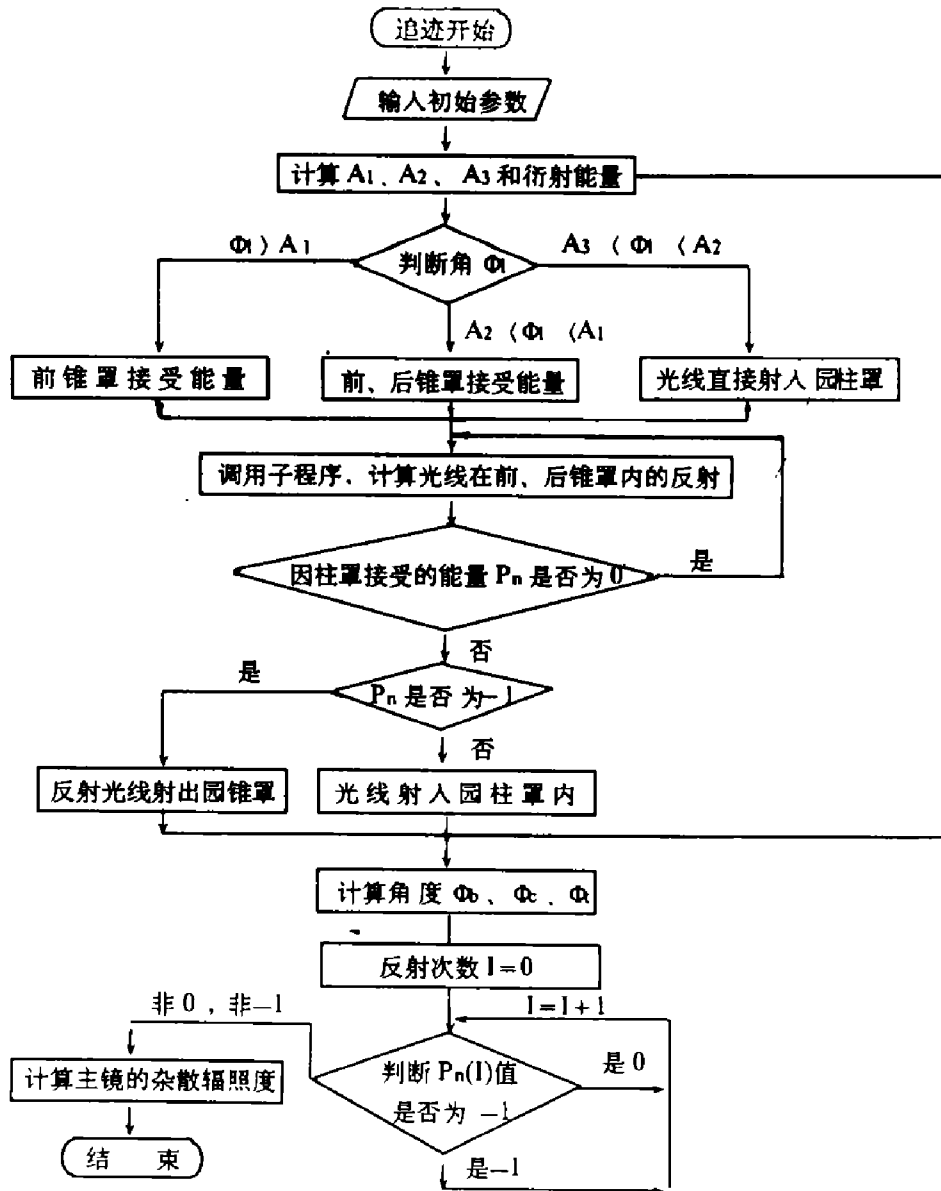


图 4 杂散辐射计算程序框图

Fig. 4 The program block diagram of stray radiation calculation

参考文献

- 1 Robert P Breault. *SPIE*, 1977,107:2
- 2 Jack A Bamberg. *SPIE*, 1983,384:109

ANALYSIS OF STRAY RADIATION IN OPTICAL SYSTEMS

Han Xinzhi Lu Yong

*(Department of Space Engineering and Mechanics, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150001, China)*

Abstract A simplified deterministic stray radiation analysis program, capable of meeting the needs of the applications and equipment at present and operating with a microcomputer is given.

Key words stray radiation, deterministic, stray radiation suppression.