

成像光学系统杂光系数分析与计算

孙林, 崔庆丰*

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 杂光系数是评价光学系统成像质量的重要指标之一。一般情况下,杂光系数只有在光学系统加工完成之后,才能运用实测方法得到,且如果实测结果不理想,需对光学系统的杂光抑制方法进行调整以增强其抑制效果。针对上述问题,提出了一种在光学设计阶段求得杂光系数的方法。该方法运用光学仿真软件 TracePro 为光学系统建模、分析和光线追迹,运用数学分析软件 Matlab 对仿真结果进行拟合,最终求出杂光系数。该方法的优点是将杂光系数的分析与计算提前,准确评价光学系统的杂光抑制能力。

关键词 成像系统; 杂光; 杂光系数; 成像光学系统; 杂光抑制

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.122901

Analysis and Calculation of Veiling Glare Index of Optical Imaging Systems

Sun Lin, Cui Qingfeng*

College of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract The veiling glare index is a key criterion used to evaluate the image quality of optical systems. In general, the stray light coefficient can only be obtained with the actual measurement method after the optical system is processed. If results of actual measurement are unsatisfactory, then the method of suppressing stray light in the optical system must be adjusted to optimize its suppression effect. To overcome these questions, this study proposes a method for solving the veiling glare index during optical design. This method employs TracePro software to establish and analyze the optical system as well as trace rays. Matlab software is used to fit the simulation results and solve the veiling glare index. The proposed method can successfully calculate and analyze the veiling glare index in advance and accurately evaluate the stray light suppression of the optical system.

Key words image system; stray light; veiling glare index; imaging optical system; stray light suppression

OCIS codes 110.1758; 110.3000; 290.2648; 290.1483; 220.4830

1 引言

在光学系统成像过程中,探测器上除了存在按正常光路进行成像的光以外,还存在少量非成像光束,这些非成像光束在探测器上扩散的现象称为杂光现象。杂光的存在会导致光学系统的成像质量下降^[1-3]。因此,在光学系统设计阶段需设计合理的杂光消除措施。在光学系统设计完成后,还需进行杂光测量。杂光系数和点源透过率(PST)是评价光学系统杂光抑制能力的两种主要指标。其中,PST主要针对强杂光光源,如太阳等。对于光学系统来说,

杂光光源为点源。如果观测目标为弱信号源,背景光和信号光能量在同一量级,此时杂光光源为面源,PST不再适用,因此需要引入杂光评价的另一个重要指标——杂光系数。目前,国内外对杂光的研究主要是针对光学系统 PST 的仿真分析和测量,仅有少量文献关注杂光系数的准确计算,且没有给出杂光系数的具体计算方法和仿真过程^[4-10]。

现有的杂光系数是在光学系统加工完成后,利用与之匹配光学系统的杂光系数测定仪进行测量获得^[11]。此方法所需的设备复杂,且不能指导系统的后续设计。若测得的杂光系数不能满足使用要求,

收稿日期: 2018-06-19; 修回日期: 2018-06-25; 录用日期: 2018-07-05

基金项目: 国家重大科技专项高分专项(51-H34D01-8358-13/16)

* E-mail: qf_cui@163.com

需对光学系统进行重新设计,增加或改进原系统的杂光消除措施。目前国内外研究人员对光机结构表面特性的研究较为成熟,所建立的表面散射模型也逐渐接近实际的散射情况^[12-13]。因此可通过软件模拟仿真的方法求取光学系统的杂光系数。

本文通过对光学系统杂光系数和 PST 相互联系的研究,提出一种在光学设计阶段求得杂光系数的方法。该方法运用光学仿真软件 TracePro 对光学系统进行简单机械结构设计,同时建立表面散射模型,通过设定合理的光线追迹阈值和采样数进行光线追迹。运用数学分析软件 Matlab 对光线追迹结果进行拟合。为了使计算得到的杂光系数值和实际测量得到的杂光系数更接近,根据具体拟合情况将拟合曲线进行多次分段插值,使计算结果与实际测量的得到的杂光系数相吻合。该方法可在光学设计阶段求出杂光系数,可以准确评价光学系统的杂光抑制能力,为光学系统进一步提高杂光抑制能力的后续设计提供参考。

2 基本原理与方法

杂光系数测定仪的主体是积分球,在其内壁上有一个吸收腔(黑体),它可用一个与积分球内表面有同样反射特性的白体置换。被测光学成像系统放置在和黑体目标相对方向的出口处,其前端深入到积分球内壁。测量杂光系数时,需根据光学成像系统物距和物方区域、像距和像方区域的具体情况制造出不同结构的杂光系数测定仪。此过程存在时间周期长、成本高等缺点,且实验环境要求高。杂光系数的定义式为^[3]

$$V = \frac{E_B}{E}, \quad (1)$$

式中: E_B 为像面上杂光的照度; E 为像面上信号光和杂光的总照度。除杂光系数外,还有一个重要的

杂光评价指标——点源透过率。点源透过率是一个与杂光光源离轴角 θ 有关的函数,点源透过率的定义式为^[3]

$$R_{\text{PST}}(\theta) = \frac{E_d(\theta)}{E_i(\theta)}, \quad (2)$$

式中: $E_d(\theta)$ 为探测器接收到的辐照度; $E_i(\theta)$ 为光学系统入口处的辐照度。上述两种杂光评价指标的区别在于:当太阳或行星等点光源作为杂散光源时,通常用点源透过率作为杂光评价指标;当环境背景、大气背景等面光源为杂散光源时,通常用杂光系数作为杂光评价指标。二者皆表征光学成像系统杂光抑制能力,故可相互转化,其关系为^[14]

$$V = \frac{8F^2}{\tau} \int_{\omega_0}^{\pi/2} R_{\text{PST}}(\theta) \cdot \sin \theta \cdot d\theta, \quad (3)$$

式中: F 为光学成像系统 F 数; τ 为光学成像系统透过率; ω_0 为用黑斑法测量杂光系数时黑斑的角半径; θ 为杂散光源的离轴角。杂光系数可通过点源透过率的函数关系进行求解。由(3)式可知,当已知光学系统 F 数和系统透过率时,若求出光学系统点源透过率与杂光光源离轴角的函数关系,便可计算出光学成像系统的杂光系数。

在光学仿真软件 TracePro 中建立光机结构模型和系统各个表面散射模型。其中,散射模型的参数越接近实际材料的散射数据,其仿真结果越可靠。目前国内外研究人员对物质表面散射模型的研究比较深入,故本研究根据物体表面的散射特性,建立了适合实际工程应用的 ABg 散射模型。求取光学成像系统点源透过率的原理如图 1 所示,离轴角为 θ 的杂散光源的照度为 E ,其在光学成像系统入口处的照度为

$$E_d(\theta) = E \times \cos \theta. \quad (4)$$

像面上的照度为 $E_i(\theta)$,将(4)式代入到(2)式,即可求出离轴角为 θ 时系统的点源透过率。

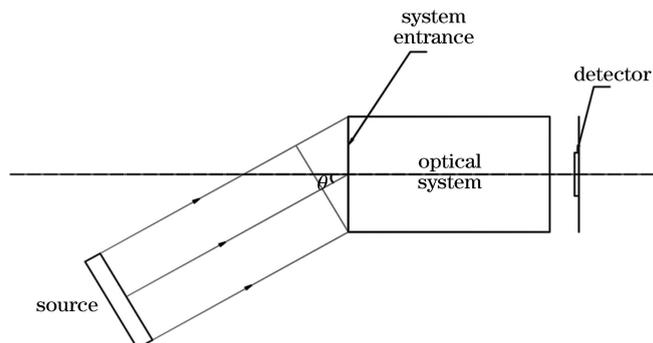


图 1 TracePro 软件分析原理图

Fig. 1 Schematic of TracePro software

将离轴角 θ 逐渐增大,记录不同离轴角时系统的点源透过率。将搜集到的数据用数学分析软件 Matlab 进行拟合,拟合出点源透过率 R_{PST} 和离轴角 θ 的函数关系表达式 $R_{\text{PST}}(\theta)$ 。将拟合表达式代入到(3)式,再根据光学系统 F 数和透过率 τ ,最终可以得到光学成像系统的杂光系数。

3 设计实例及结果分析

3.1 模型建立

所采用的 R-C 光学系统的具体参数为:焦距为 2400 mm, F 数为 9,半视场角为 0.4° ,如图 2 所示。

对于该系统增加简单的杂光消除措施^[12-13]。为了提高系统杂光抑制能力,对光学和机械元件进行表面处理,包括:1) 在光学透镜表面涂覆增透膜,使透镜的透过率达到 99.5%;2) 在反射镜表面涂覆高反膜,使反射镜的反射率达到 98%;3) 在机械元件表面涂覆黑色消光漆或将机械元件进行氧化发黑

表 1 材料表面 ABg 散射模型参数

Table 1 ABg parameters for the surface of each material

Device	A	B	g	Reflectivity	Transmissivity	Absorptivity
Reflector	0.003045	0.001	1	0.98		
Lens	0.0006372	0.0001	1		0.995	
Black paint	0.000465	0.001	3.5			0.95

3.2 光线追迹

在 TracePro 软件中对该系统建立表面散射模型后进行光线追迹。为了使计算更加精确,当离轴角在 1° 以内,每隔 0.1° 进行一次光线追迹;当离轴角大于 1° 时,每隔 1° 进行一次光线追迹,得到的点源透过率曲线如图 3 所示。

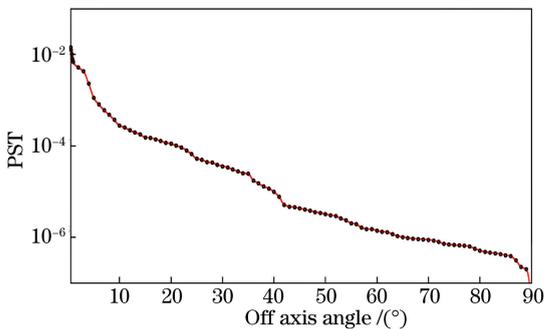


图 3 PST 仿真结果

Fig. 3 PST simulation results

从图 3 可以看出,该系统的 PST 在小离轴角范围内迅速减小。若直接运用 Matlab 拟合,所得的函数表达式将存在严重误差,对杂光系数的计算结果有严重的影响。因此,对该 PST 曲线作分段三次多

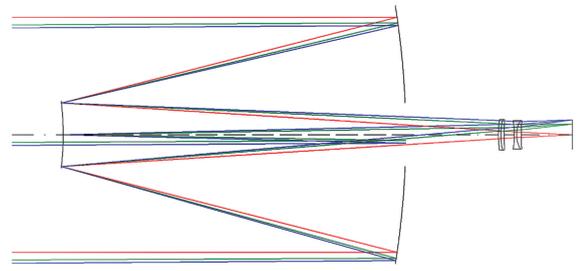


图 2 R-C 光学系统结构图

Fig. 2 Structure diagram of R-C optical system

项式插值后,再将曲线分为 $0.5^\circ \leq \theta \leq 3^\circ$ 和 $3^\circ < \theta \leq 90^\circ$ 前后两段分别进行插值拟合。

处理,其中涂覆黑漆可将机械表面吸收率提高至 95%,氧化发黑处理可将机械表面吸收率提高 40%~60%。

该系统中存在 2 个反射面和 4 个透射面,所以该系统的透过率为 $\tau = 0.98^2 \times 0.995^4 = 0.9413$ 。

在 TracePro 软件中建立光学系统表面散射模型,模型中每种材料表面的 ABg 散射模型的参数如表 1 所示^[4]。

1) 当 $0.5^\circ \leq \theta \leq 3^\circ$ 时, PST 曲线如图 4 所示,运用 8 次多项式拟合,拟合函数表达式为

$$R_{\text{PST}}(\theta) = a_1 \times \theta^8 + a_2 \times \theta^7 + a_3 \times \theta^6 + a_4 \times \theta^5 + a_5 \times \theta^4 + a_6 \times \theta^3 + a_7 \times \theta^2 + a_8 \times \theta + a_9, \quad (5)$$

式中: a_1, a_2, \dots, a_9 为 8 次多项式拟合系数,分别为 $-1.75 \times 10^{11}, 4.428 \times 10^{10}, -4.742 \times 10^9, 2.787 \times 10^8, -9.732 \times 10^6, 2.029 \times 10^5, -2375, 12.84, -0.007088$ 。

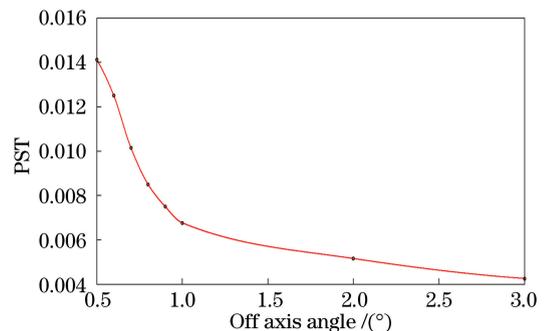


图 4 当 $0.5^\circ \leq \theta \leq 3^\circ$ 时 PST 仿真结果

Fig. 4 PST simulation results when $0.5^\circ \leq \theta \leq 3^\circ$

该拟合多项式的拟合精度为 5.955×10^{-5} , 将(5)式代入到(3)式, 计算可得此段杂光系数为 $V_1 = 0.138\%$ 。

2) $3^\circ < \theta \leq 90^\circ$ 时, PST 曲线如图 5 所示, 运用 2 次幂函数拟合, 拟合所得的表达式为

$$R_{\text{PST}}(\theta) = 4.081 \times 10^{-6} \times \theta^{-2.365} + 1.006 \times 10^{-5}. \quad (6)$$

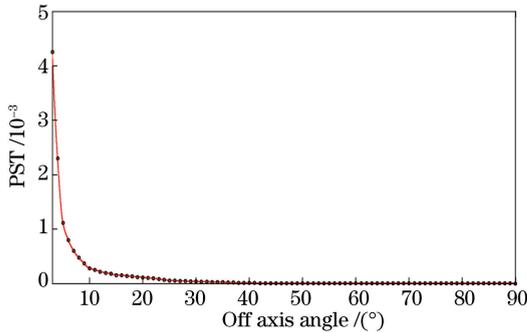


图 5 当 $3^\circ < \theta \leq 90^\circ$ 时 PST 仿真结果

Fig. 5 PST simulation results when $3^\circ < \theta \leq 90^\circ$

该拟合多项式的拟合精度为 3.16×10^{-5} , 将(6)式代入到(3)式, 计算可得此段杂光系数为 $V_2 = 2.241\%$ 。

系统杂光系数为 $V = V_1 + V_2 = 2.379\%$ 。

4 结 论

通过对杂光系数理论的研究, 提出一种在光学设计阶段计算杂光系数的方法。运用该方法对 R-C 光学系统进行仿真分析, 对结果运用分段三次多项式插值方法, 通过数值拟合求出了系统的杂光系数。在仿真过程中发现, 该方法计算得到的杂光系数的数值与数值拟合精度有关, 拟合精度越高, 仿真结果越接近实际光学系成像统的杂光系数数值。此方法可以在光学设计阶段准确评价光学系统杂光抑制能力。若结果显示系统的杂光抑制能力不理想, 可以及时改进系统杂光抑制的方案, 以提高系统的杂光抑制能力。

参 考 文 献

- [1] Zhu Y, Zhang X, Wu Y X, *et al.* Research on the optical design and stray light suppression for off-axis reflective space astronomical telescope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0822002.
朱杨, 张新, 伍雁雄, 等. 离轴反射式空间天文望远镜系统设计及其杂散光抑制研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(8): 0822002.
- [2] Niu J X, Zhou R K, Liu Z H, *et al.* Analysis of

stray light caused by thermal radiation of infrared detection system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(8): 2267-2271.

牛金星, 周仁魁, 刘朝晖, 等. 红外探测系统自身热辐射杂散光的分析 [J]. *光学学报*, 2010, 30(8): 2267-2271.

- [3] Fest E C. *Stray light analysis and control* [M]. Bellingham: SPIE Press, 2013.
- [4] Mei C, Zhou S Z, Yan P P, *et al.* Design of an outer baffle based on scattering model [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0122005.
梅超, 周泗忠, 闫佩佩, 等. 基于散射模型设计外遮光罩 [J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0122005.
- [5] Yan P P, Fan X W. Optical design and stray light analysis of R-C system [J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(4): 214-218.
闫佩佩, 樊学武. R-C 光学系统设计及杂散光分析 [J]. *红外技术*, 2011, 33(4): 214-218.
- [6] Huang Z Q, Xing T W. Principle and realization of baffle and vane's programmable design [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(4): 119-123.
黄智强, 邢廷文. 遮光罩和挡光环程序化设计的原理及实现 [J]. *光电工程*, 2006, 33(4): 119-123.
- [7] Liao Z B, Fu R M, Zong X Y. Optimal designing of baffle of star sensor [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(4): 987-990.
廖志波, 伏瑞敏, 宗肖颖. 星敏感器遮光罩的优化设计 [J]. *中国激光*, 2010, 37(4): 987-990.
- [8] Mei C, Zhou S Z, Ma M, *et al.* A new method of baffle design [J]. *Procedia Engineering*, 2011, 15: 4516-4520.
- [9] Li H, Li Y C. An optimum design method for the light shade of spaceborne optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1996, 25(10): 914-918.
李晖, 李英才. 星载光学系统遮光罩消杂光结构优化设计方法 [J]. *光子学报*, 1996, 25(10): 914-918.
- [10] Du B L, Li L, Xiao Q, *et al.* Optimum design of baffle for R-C telescope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(s2): 202-205.
杜保林, 李林, 肖琴, 等. R-C 望远镜遮光罩的优化设计 [J]. *光学学报*, 2009, 29(s2): 202-205.
- [11] China North Industries Group Corporation and China South Industries Group Corporation. Verification regulation for stray measuring device: GJB/J3354-98 [S]. Beijing: [s. n.], 1998-07-27.
中国兵器工业总公司. 杂光系数测定仪检定规程: GJB/J3354-98 [S]. 北京: [s. n.], 1998-07-27.
- [12] Breault R R. *Control of stray light* [M] // Michael

- Bass. Handbook of optics: Volume II . New York: McGraw-Hill, 1995.
- [13] Pompea S M, Breault R P. Black surfaces for optical systems [M] // Handbook of Optics: 2nd ed. Washington DC: Optical Society of America, 2000: 6-8.
- [14] Li H, Li Y C, Xue M Q. Relation between PST and veiling glare index based on black-spot method [J]. Acta Photonica Sinica, 1996, 25(10): 920-922. 李晖, 李英才, 薛鸣球. 光学系统黑斑法杂光系数和 PST 间的联系 [J]. 光子学报, 1996, 25(10): 920-922.