

“西光所建所六十周年暨《光子学报》创刊五十周年”专辑

引用格式: WANG Hu, CHEN Qinfang, MA Zhanpeng, et al. Development and Prospect of Stray Light Suppression and Evaluation Technology (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(7):0751406

王虎, 陈钦芳, 马占鹏, 等. 杂散光抑制与评估技术发展及展望(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(7):0751406

杂散光抑制与评估技术发展及展望(特邀)

王虎^{1,2,3}, 陈钦芳¹, 马占鹏^{1,2}, 闫昊昱^{1,2}, 林上民^{1,2}, 薛要克^{1,4,5}

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 中国科学院空间精密测量技术重点实验室, 西安 710119)

(4 中国科学院青年创新促进会, 北京 100037)

(5 北京航空航天大学, 北京 100191)

摘要:随着空间光学技术的快速发展以及光电探测器件性能的不不断提升, 高分辨率、多光谱、低探测阈值的遥感系统在航空、航天等领域的应用越来越广泛, 对光电载荷的杂光抑制能力与评价指标逐渐严苛, 杂散光抑制技术和仿真分析已成为不可缺少的环节之一。尽管杂散光的抑制与评估技术开展较早, 但仍然需要系统性方法体系引领该技术的发展, 以改变当前分散化、碎片化的研究现状。因此, 需要建立一体化的杂散光抑制与评估方法体系, 在杂散光抑制方案制订、抑制模型表面特性测量与建模、杂散光抑制效果仿真、杂散光测试及评估等四个关键技术模块进行深入研究。本文给出了一套整体技术路线, 为更好推进杂散光抑制与评估技术的发展和提供思路。

关键词:杂散光; 鬼像; 抑制技术; 双向反射分布函数; 点源透过率

中图分类号: TH74

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20225107.0751406

0 引言

杂散光是指由进入光学或电子光学系统的部分辐射所引起的在该系统像面上的有害光照度^[1], 包括来自该系统内部或外部的辐射。杂散光的存在会降低像面的对比度和信噪比, 严重时目标信号可能会被杂散光完全湮没, 造成光学成像或者探测的失效^[2-6]。实际光机系统的杂散光是由多种因素共同造成的, 分析过程比较复杂, 故针对不同探测要求和环境, 需要考虑不同种类的杂散光。

杂散光按照来源不同可分为三类: 视场外杂散光、视场内杂散光和内部热辐射杂散光^[7-10]。

1) 视场外杂散光是指杂散光光源来自光学系统视场外部, 如太阳、地气光(地球大气散射的太阳光)等进入系统, 经系统内部构件(光学表面和机械表面)的多次反射、折射、散射以及衍射到达探测器的非成像光线。此类杂散光广泛存在于各类光学仪器中, 目前相关研究较多。对于诸如星敏感器等对暗弱恒星目标探测的光学载荷则主要分析视场外杂光。

2) 视场内杂散光一方面是由于光学元件表面的粗糙度、表面疵病、表面污染等带来的残余反射、散射、衍射及结构件表面散射导致部分参与成像的光线在整机系统内部以非正常路径到达系统像面, 形成光噪声的非成像光线。另一方面是由成像光束形成鬼像, 即二次反射像, 是光学系统中任意两个表面反射所产生的位于焦面附近的附加像。理论上光线经过系统任意折射面后, 均会产生多次折射与反射, 而只要满足两表面出现往返性反射, 则会产生鬼像。鬼像也是一种杂光, 对鬼像的产生表面、鬼像的能量大小以及鬼像的位置分布的分析和抑制, 可以适当减小其对成像的影响, 进而达到更全面地抑制杂散光传输的目的。

3) 内部热辐射杂散光一般出现在红外系统, 在一定温度下此类系统内部元件会产生热辐射, 可能形成热噪声杂光, 从而引起探测器响应。此外, 红外光学系统多使用制冷型探测器, 则有可能出现冷反射现象,

基金项目: 国家重点研发计划(Nos.2021YFC2203501, 2021YFC2202104, 2021YFC2202100)

第一作者: 王虎(1975—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为空间敏感器光学技术、杂散光抑制与评估技术。Email: wanghu@opt.ac.cn

收稿日期: 2022-04-18; 录用日期: 2022-05-16

<http://www.photon.ac.cn>

即探测器自身像经反射后到达像面,形成新的背景噪声。随着红外探测系统的发展,以及人们对热辐射杂光研究的深入,内部杂光的研究将不再局限于长波红外波段。

近年来,随着光电探测器件灵敏度和探测阈值的不断提升,相应地对空间光学相机杂散光的抑制与评估提出了更高要求,因此杂散光技术的研究成为了国内外学者的关注重点。国外经过几十年发展,关于杂散光辐射研究已形成综合性学科,交叉并行发展。国内虽然起步晚,部分杂光研究内容滞后于国外,但是发展迅速,在仿真模拟和实验测量上取得了一定成果,目前已形成初步的杂散光仿真与测试体系,杂散光的抑制与评估已成为光机系统设计中不可缺少的重要组成部分。目前主要存在以下问题:

1)国内多家高校和科研院所各自需求为导向,对杂散光进行了分散化研究,侧重点各不相同,还未形成系统性的杂散光分析流程。

2)未对早期的部分算法和初级分析软件进行持续性深入研究和创新升级,导致国外杂光分析软件占据整个国内市场,还未出现一套国产通用的杂散光分析软件。

3)国内缺少统一、完整、全面的用于杂散光仿真分析的材料表面属性数据库,导致部分材料属性只能按照经验来设置,分析结果只能作为参考,不具备较强的可信度。

以推动我国高精度杂散光抑制与评估技术持续、系统发展以及相关杂散光理论快速应用实践为导向,本文按照杂散光的分析流程,归纳了杂散光抑制与评估技术的研究体系,对其中关键技术的国内外发展现状进行了总结与对比,汇总了各关键技术未来发展所面临的难点和挑战,为相关科研人员提供一套系统性的杂散光抑制与评估技术研究路线,有助于杂散光分析研究的高效开展,推动杂散光抑制与评估技术的总体发展。

1 杂散光关键技术与分析流程

目前杂散光问题的研究已经发展成为分支繁多、涉及学科很广的一门综合技术,其中关键技术可归纳为:杂散光抑制方案制订、抑制模型表面特性测量与建模(包含散射理论、涂层材料散射特性研究、表面质量(表面粗糙度、表面疵病)及表面清洁度、散射测量设备、杂散光抑制效果仿真、杂散光测试及评估^[1])。这四项关键技术可作为独立课题分别进行研究,同时各技术之间相互联系,不可分割。杂散光分析流程如图1所示

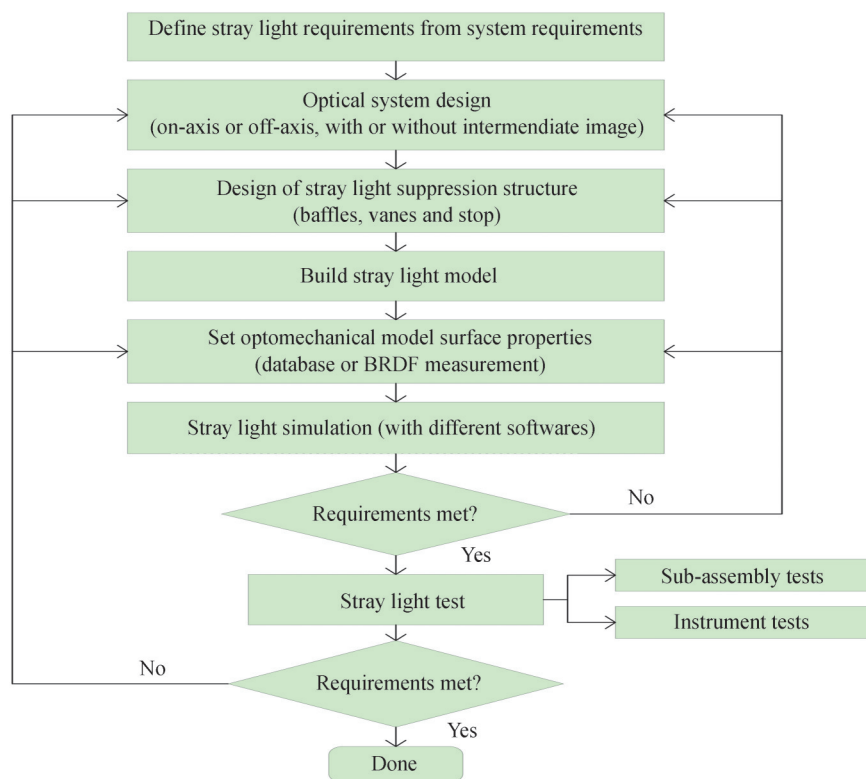


图1 杂散光分析流程

Fig. 1 Stray light engineering process flowchart

示。具体步骤为:

1)根据系统噪声抑制指标分配及杂光源和目标特性,确定杂散光的抑制要求,制定杂散光抑制总体方案,并在光机结构设计中进行相应杂散光抑制设计,包含遮光罩、挡光环的型式及消杂光光阑设计等。

2)抑制模型表面特性测量与建模是杂散光仿真分析的基础。依据散射相关理论,对不同涂层材料、基底及表面处理方式、不同清洁度的表面进行双向散射分布函数(Bidirectional Scattering Distribution Function,BSDF)测量,建立散射数据库。构建准确的杂散光分析模型,是杂散光分析的必要前提和基础。

3)杂散光抑制效果仿真是进行杂散光抑制的必要环节,在设计阶段仿真系统杂散光抑制水平,可对下一步的杂散光抑制方案优化迭代提供数据支撑,并对系统遮光罩、挡光环、表面消光涂层等杂光抑制手段给出优化改进措施^[12],避免在实物应用阶段才暴露出不可弥补的颠覆性错误,既减少研制时间又节约经费,在系统设计阶段以及实际工程研制中发挥着重要作用。

4)杂散光的测试可作为检测标准,准确评估系统的消杂光抑制效果,可反映系统的杂散光实际抑制水平。此外,依据系统的测量结果与杂散光抑制效果仿真数据进行比对,可进一步修正仿真模型。

2 杂散光抑制方案制订

2.1 杂散光辐射传输理论

杂散光通常以散射、反射等方式到达系统像面,其能量的传输过程符合基本辐射传输理论^[13],可以描述为光线到达一个物体表面后将部分能量传递到另一个物体表面的过程,每个过程都存在发射面和接收面,杂散光能量在这两个表面进行传输。因此,可把杂散光源分成多个微面元,到达像面微面元的积分总和即为到达像面的杂散光。杂散光基本辐射传输如图2所示, dA_s 为光源微面元, L_s 为其辐射亮度, dA_c 为接收微面元, θ_s 、 θ_c 分别为光源微面元和接收微面元各自法线与中心连线的夹角, R_{sc} 为两微面元中心连线的长度, $d\Omega_s$ 为光源微面元对于接收面元的立体角。

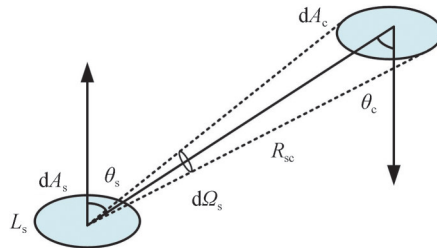


图2 基本辐射传输示意图^[13]
Fig. 2 Basic radiative transfer^[13]

经过辐射传输,微面元 dA_c 接收的由光源微面元 dA_s 发出的辐射通量 $d\Phi_c$ 为

$$d\Phi_c = dA_s \cdot L_s \cdot \cos\theta_s \cdot d\Omega_s = dA_s \cdot L_s \cdot \cos\theta_s \cdot \frac{dA_c \cdot \cos\theta_c}{R_{sc}^2} \quad (1)$$

对式(1)进行整理转化,可得

$$d\Phi_c = \left(\cos\theta_s \cdot \frac{dA_c \cdot \cos\theta_c}{R_{sc}^2} \right) \cdot \frac{L_s}{E_s} \cdot E_s \cdot dA_s = GCF \cdot BSDF \cdot d\Phi_s \quad (2)$$

式中,GCF是几何因子,定义为辐射源面元对于接收面元的投影立体角;BSDF是表面双向散射分布函数, $d\Phi_s$ 为光源面的辐射通量, E_s 是辐射源面元的辐照度。因此,要实现了对杂散光的抑制,即减小微面元 dA_c 接收辐射通量 $d\Phi_c$,可以通过以下措施实现:

1)减小GCF:减小每一级杂散光传递的GCF,通过设置遮光罩、挡光环、消杂光光阑等杂散光抑制结构阻拦杂光在系统内的传输路径。

2)降低BSDF:对处在光路中的光机结构表面进行特殊处理,如对非光学面的黑化处理,提高材料表面的吸收率,降低发射率;对光学表面镀膜,提高透射材料表面的透射率(或反射系统的反射率),降低散射率等。

3)减小 $d\Phi_s$,本质上是对上级杂散辐射源的出射能量的衰减。在减小GCF和BSDF的同时,辐射能量 $d\Phi_s$ 也同时在减小。此外,还可以通过采用带通滤光片、设置光阑低温工作等措施降低杂散光产生表面的温度,达到抑制探测系统内部杂光的目的;对于红外系统,除了降低自身辐射外,也可以采用遮光罩外表面镀金等措施,达到对内部表面杂散辐射的抑制。此外,光学系统入口要避免杂光光源直射,远离视场外部杂散光源^[14]。

2.2 杂散光抑制方法

图3为典型杂散光对图像的影响。杂散光抑制的目的是保证具有一定信噪比的成像质量,避免和减少非成像光线到达像面。在杂散光抑制方案制定时要考虑:1)目标、背景、光源等外部环境情况;2)系统内部热辐射及整体温度分布情况;3)系统的光机结构构型。综合考虑系统外部杂散光、内部鬼像以及对于红外系统有可能存在的冷反射、热辐射杂散光进行有效的抑制^[7]。按照杂散光的来源,给出了常规抑制方法以及相关抑制思路,如图4所示。

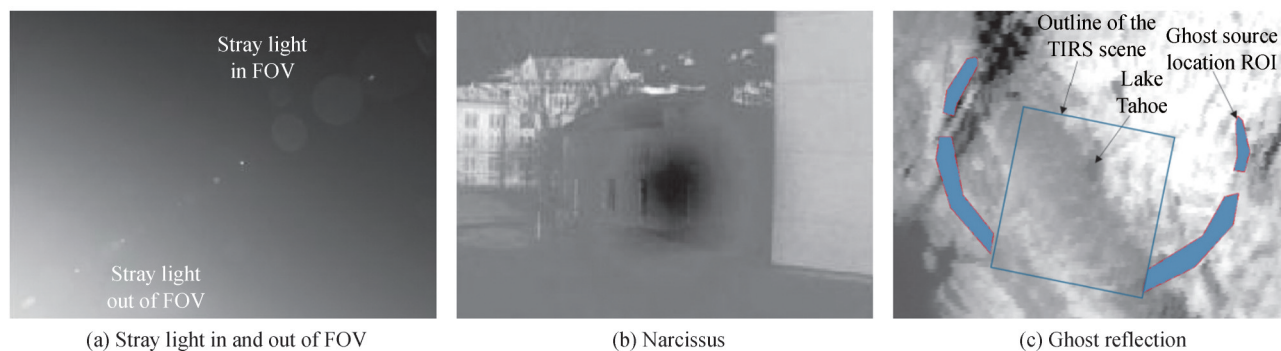


图3 典型杂散光现象^[7,9-10]
Fig. 3 Typical stray light phenomenon^[7,9-10]

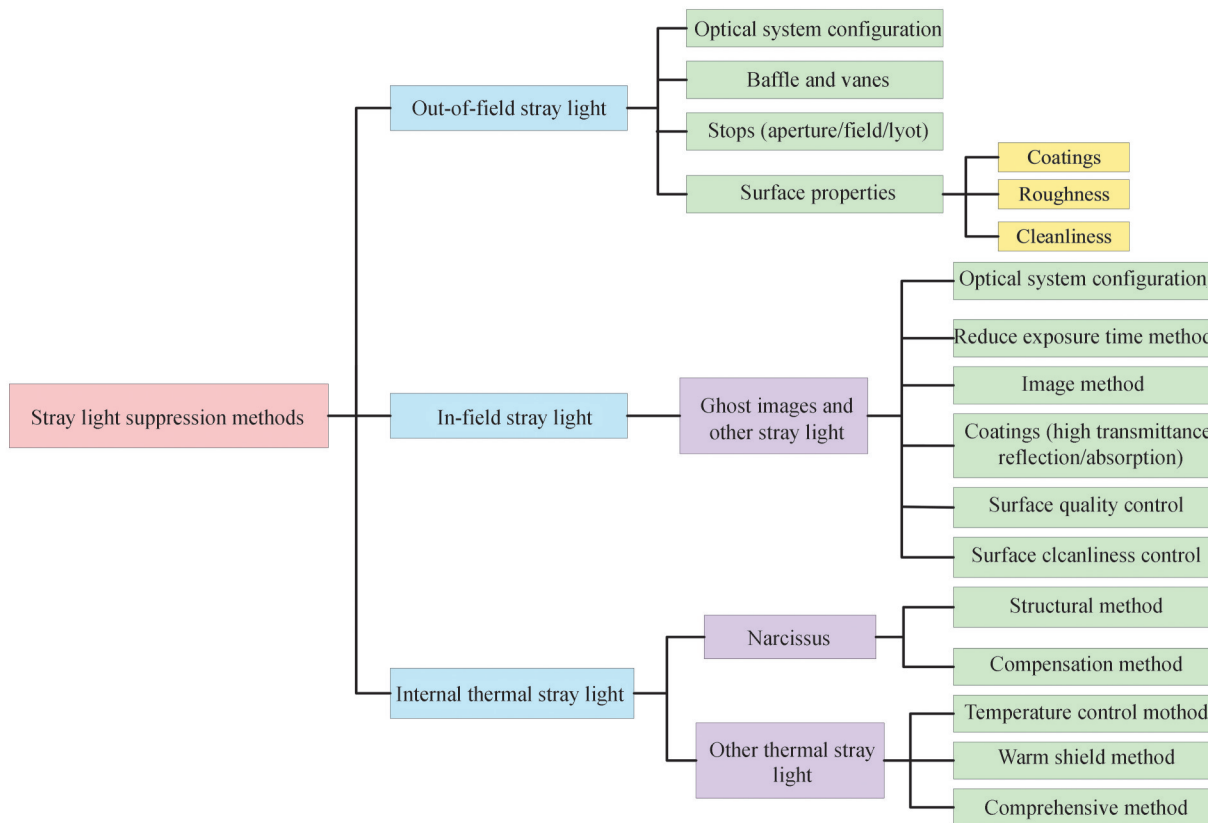


图4 杂散光抑制方法分类
Fig. 4 Classification of stray light suppression methods

此外,在某些特定情况下,还可以采用滤波法、相邻帧相减法、偏振法、数值孔径法及图像校正法等对杂散光进行抑制。

2.3 视场外杂散光抑制方法

2.3.1 光学系统构型

在整机系统中杂散光主要通过光学系统进行传递,即以镜面反射及散射的方式到达像面形成杂散光。因此,系统的光学设计与杂散光的传播紧密相关,选择合理的光学设计能够使杂散光的抑制事半功倍。光学系统设计时,对于杂散光的抑制应遵循以下三个原则:1)在不影响正常成像情况下,减少光学元件表面数,以减少表面产生反射及散射的机会;2)为避免出瞳杂散光到达像面,可适当增大光学系统的工作距离;3)在保证像质的基础上,使光学系统的入瞳位置尽量前移,在光学系统进光最小口径处限制杂光传输能量。在满足像质要求的同等条件下,离轴系统构型一方面由于可使大入射角度的杂光光线以更大离轴角反射从而难以到达探测器,另一方面还能避免次镜结构支撑杆引起的“星芒”现象。

“星芒”是强点光源入射到包含线性遮拦(或者小光圈)的光学系统后所产生的衍射现象,衍射发生在垂直线性遮拦处。图5(a)、(b)为同一场景人为改变不同方向镜头擦拭痕迹(手指划痕)引起的“星芒”现象,图5(c)、(d)是哈勃望远镜遇亮星“天狼星(Sirius)”引起的“星芒”现象^[15-16]。“星芒”的存在如同杂光一样会干扰其周边暗星的探测,故而离轴系统在杂光抑制上比同轴系统更具有优势。

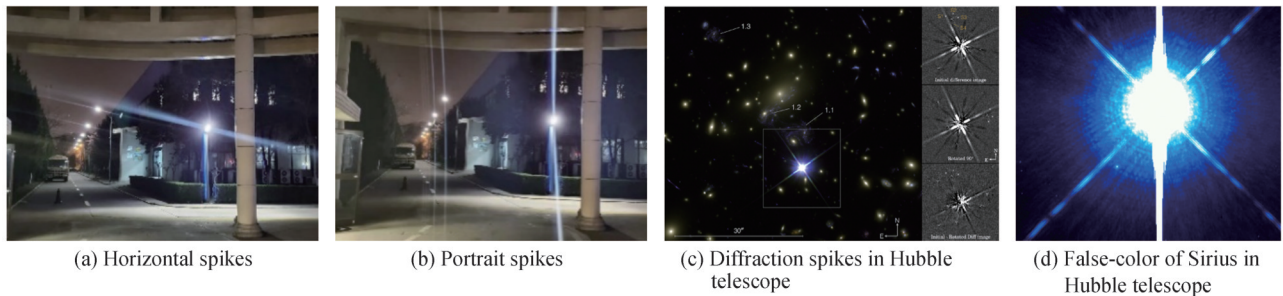


图5 衍射“星芒”现象分布图^[15-16]
Fig. 5 Distribution map of diffraction spikes^[15-16]

欧空局2015年发射的空间激光干涉天线(Laser Interferometer Space Antenna, LISA)引力波探测器^[17-19],在研制阶段其光学系统最早采用了同轴卡塞格林式望远结构构型,但同轴结构中次镜表面会产生后向反射和散射,即使将次镜中心部分开孔或使用高吸收涂层来抑制后向反射光,中心遮拦部分的圆形边界也会因为衍射效应产生一个泊松亮斑。而且同轴系统的次镜支撑结构位于光路中,次镜结构后向散射可直接到达探测器。考虑到苛刻的杂散光抑制要求,引力波探测望远镜系统选用了离轴四反结构构型以避免上述问题。图6(a)为“LISA”设计光路图,主镜 M_1 、次镜 M_2 分别为离轴抛物面和离轴双曲面,三镜 M_3 与四镜 M_4 均为球面。为有效抑制杂散光,可以在在 M_2 和 M_3 间加入一次像面并设置消杂光光阑。我国空间引力波探测“太极计划”^[20-21]中,望远系统的设计方案同样是类似离轴四反构型。

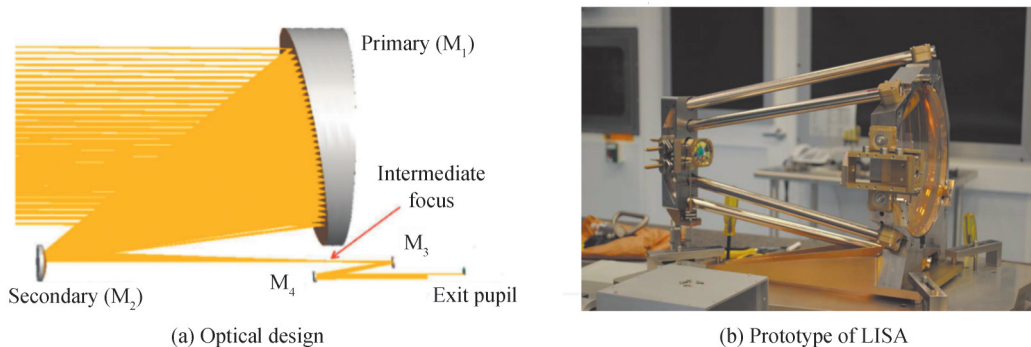


图6 LISA望远镜光学系统^[19]
Fig. 6 Optical system of LISA^[19]

2.3.2 遮光罩

遮光罩用来限制视场外光线,使任何直射到其内表面的光线经一次反射后不能进入光学系统入瞳。遮光罩通常位于整个系统的最前端,用以封闭系统并阻断杂散光路径。遮光罩越长,杂散光遮挡及吸收越多,进入整个系统的背景光(辐射)就越少。但是遮光罩过长会增加系统的体积和重量,因此合理选择遮光罩的尺寸尤为重要。考虑体积以及不同遮光效果,根据反射、吸收等衰减杂光途径设计反射式、遮挡式或者两者相兼顾的遮光型式,对遮光罩内部形状依据光学视场及探测器外形设计成立方锥型、立方体型、圆柱或圆锥型等常见形状以及为完成特定需求设计的不规则形状^[6,22-25],如图7所示。

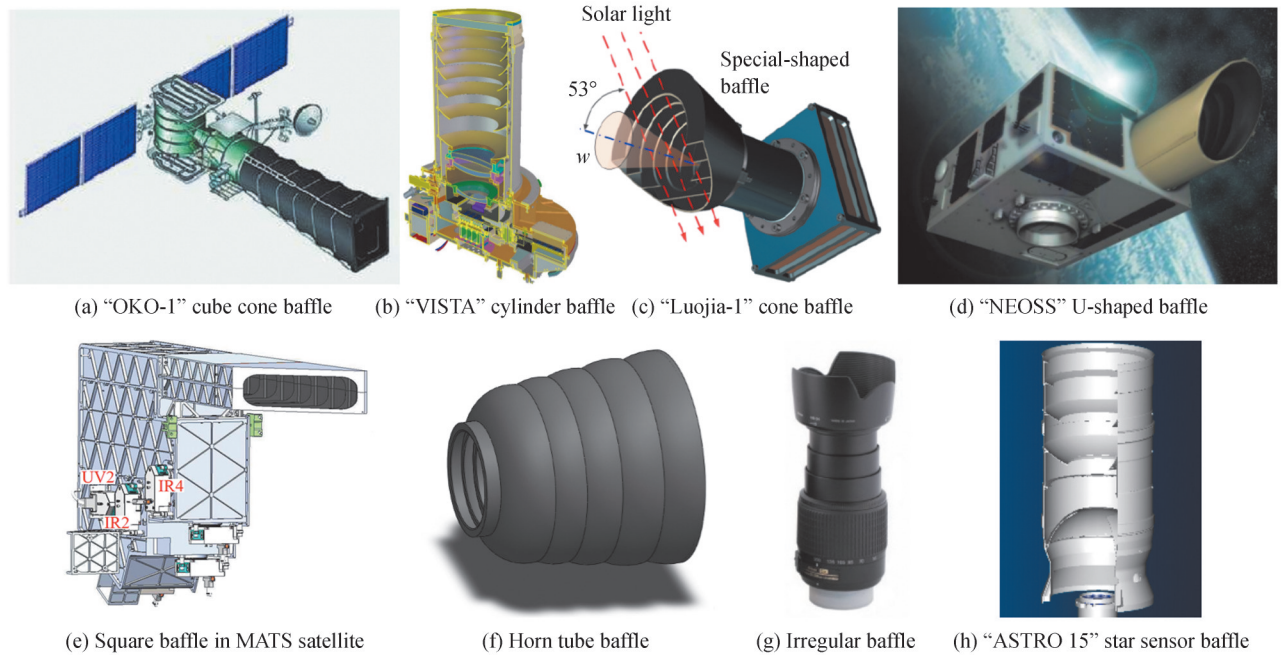


图7 不同形状遮光罩^[6,22-25]
Fig. 7 Different shapes of baffle^[6,22-25]

为进一步防止一次杂光进入光学系统,在遮光罩内设置若干挡光环(光栏),挡光环的作用是使一次杂散光完全消除,进入挡光环内的杂光部分被挡掉而被内壁吸收,其余杂光被反射进入其他相邻的挡光环挡掉。最终使一次杂散光在进入光学镜头前被完全消除。挡光环^[26]与遮光罩壁可构成半封闭状光陷阱,用以遮挡间接杂散光(反射光、散射光)传输路径并多次消减传输能量,对轴外大角度杂光十分有效。通过光线逆追击作图法确定挡光环的数量、高度、间距、倾角及倒角等参数。图8为圆锥形遮光罩及其内部挡光环分布示意图。

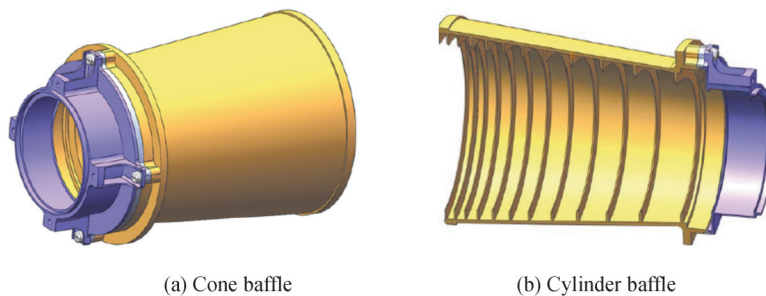


图8 外遮光罩内部挡光环结构示意图^[26]
Fig. 8 Structure of the vanes in the outer baffle^[26]

此外,还可以在一些机械结构关键表面设计消光螺纹或者蜂窝状吸光腔,用以增强散射和吸收面积,达到消减杂光能量的抑制效果。图9(a)为吴玲林等^[27]为瞄准镜设计的蜂窝状遮光罩,遮光板上设有蜂窝状遮光孔,如图9(b)所示,在保证不遮挡瞄准镜视线的前提下达到遮光效果,当光从瞄准镜侧前方入射时,大角度入射杂光会进入到蜂窝状遮光孔的孔壁上被遮挡,可防止其干扰正常瞄准;光入射瞄准镜后产生的部分反射光再次进入蜂窝状遮光孔的孔壁而被遮挡,使反射光减弱甚至消失,避免镜面反射光暴露枪手位置。图9(c)为何育林等^[28]提出的蜂窝状防眩光光学构件及教室照明灯具,通过光学构件本体侧壁的遮挡,使得柔光板处发射出的光线被限制,只有在光学构件正下方范围内才能看到柔光板,避免用户无意目视柔光板时光线直接照射到人眼,达到防眩光的目的。

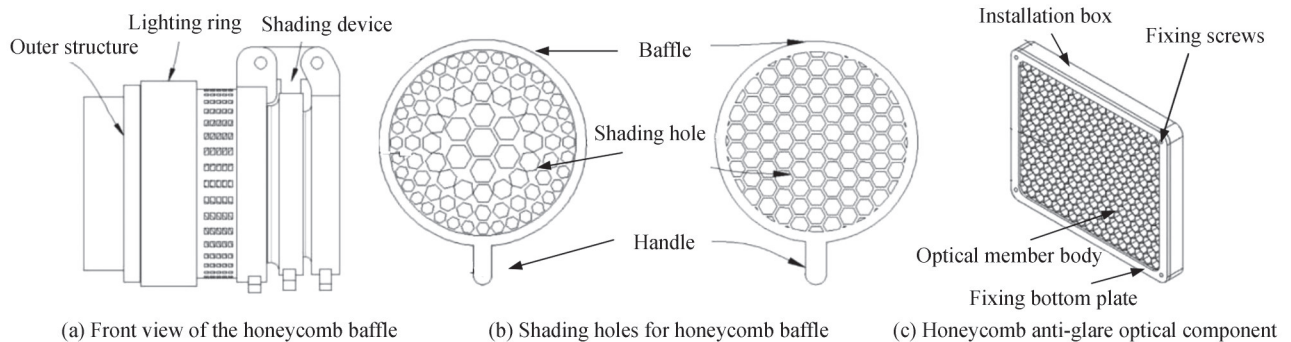


图9 蜂窝状挡光结构^[27-28]
Fig. 9 Honeycomb light blocking structure^[27-28]

图10(a)为林上民等研制的内壁为蜂窝状遮光罩实物图,遮光罩内部未设置挡光环,而是在内壁采用蜂窝状微结构以增大内壁吸收和散射面积。蜂窝结构虽然在一定程度上有助于减小杂散光,但众多蜂窝的累积等效壁厚端面以及底部粘接胶面形成的类镜面使其综合反射光影响比较明显,其只适用于对杂光抑制比要求较低的系统中。而且蜂窝状结构以及其与遮光罩内壁粘连的形式,增加了遮光罩内壁结构的复杂性,不易进行杂散光分析。哈尔滨工业大学陈学等^[29],利用蜂窝表面的反射,将单个蜂窝结构等效为正六棱柱,如图10(b)所示,以蒙特卡洛法为基础,获得蜂窝结构等效面的反射概率模型,计算分析遮光罩的抑制特性,结果表明:一级和二级蜂窝结构遮光罩对水平入射杂光的抑制分别达到 10^{-4} 和 10^{-9} 水平;杂散光漫入射(各个方向无规律入射)时,其对应消光抑制比分别为 10^{-2} 和 10^{-3} 水平。

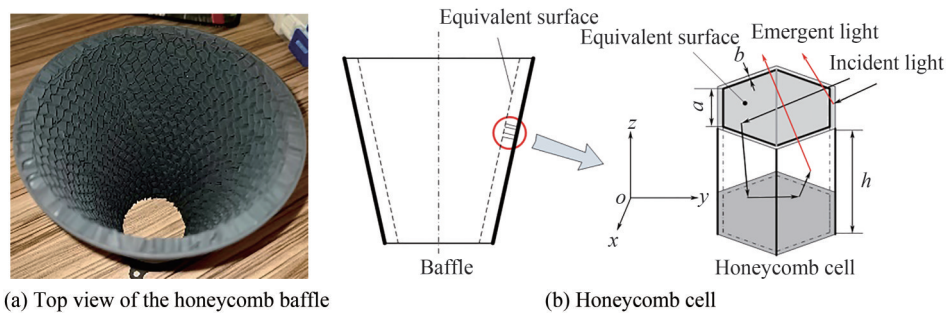


图10 蜂窝状遮光罩散射分析^[29]
Fig. 10 Scattering analysis of honeycomb baffle^[29]

传统型挡光环垂直于遮光罩内壁或者按照最佳规避杂光倾斜某一角度,挡光环两面往往涂覆高吸收涂层,对遮光罩内壁面积的增加有明显效果。遮光罩内部表面及挡光环所吸收的外部热量会导致整机系统温度升高,给内部热辐射杂光的抑制带来困难。对于太阳望远镜及地球同步遥感相机,太阳光直射入口,很可能会出现极端高温现象^[30]。因此在可见、红外共孔径多谱段探测系统或红外探测系统中,采用反射式挡光环,可以有效减少挡光环对热辐射的吸收,降低了系统的辐射杂光。图11(a)是椭球面反射挡光环反射光线示意图,椭圆焦点为P、S,经过点P的任意光线,再经过椭圆上任何一点Q、Q'或Q''后,入射角为 θ_i ,反射角为

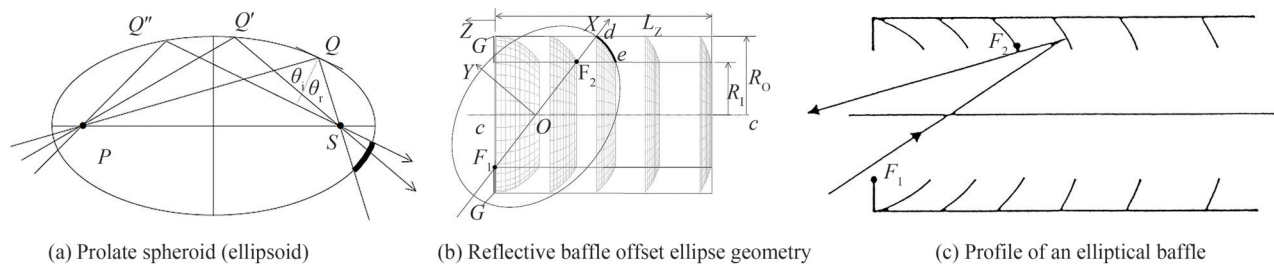


图 11 反射式遮光罩及内部挡光环设置^[31-32]
Fig. 11 Reflective baffles with vanes^[31-32]

θ_r , 反射光线则会过 S 点。若将焦点 S 设为入口位置, 则经表面反射返回 S 点的光线必然从入口出去。因此该类型遮光方式可以控制遮光罩温度的升高, 减少了红外杂散光。

遮光罩分为一级和多级, 主要区别在于对大角度视场外杂光的抑制上^[33]。大角度轴外杂光经一级遮光罩内表面反射, 有可能进入遮光罩及系统内部; 多级遮光罩主要针对在抑制角外有不同位置的杂光源, 如同时有月亮和地气光, 可用一个二级遮光罩分别抑制这两种不同的杂光源, 如图 12(a) 所示。从杂光抑制的方式考虑, 第一级遮光罩内壁可设置成镜面, 反射轴外大角度光线; 也可将其设置为第一级只针对大角度杂光, 第二级针对小角度及剩余抑制角度的杂光。总的来讲, 当存在多个杂光光源时, 多级遮光罩更具优势。单独的外遮光罩适用于透射式系统, 而折反式系统为提高杂光抑制效果, 则要设计内、外遮光罩^[34], 如图 12(b) 所示。

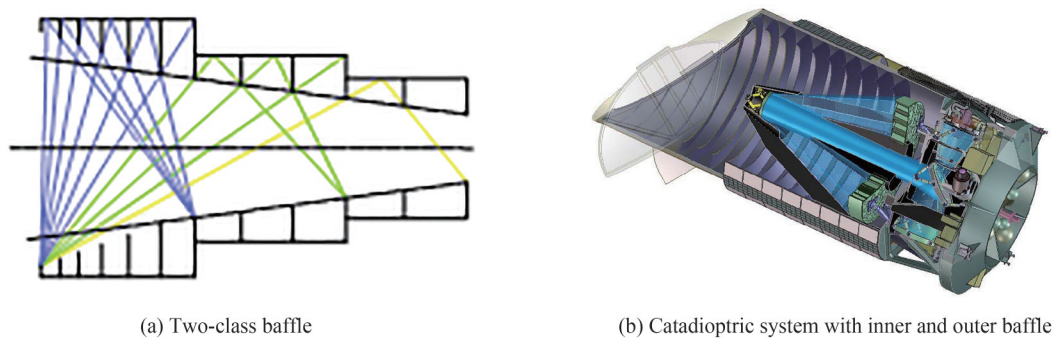


图 12 透射式二级三段式遮光罩与折反式内外遮光罩^[33-34]
Fig. 12 Transmissive two-class three-stage baffle and catadioptric system with inner and outer baffle^[33-34]

在传统遮光罩设计基础上, 中科院西安光机所林上民等^[35-37]对超轻型光机系统结构杂光抑制技术进行了研究, 通过对挡光环及刃口的优化设计, 将黑色涂层处理后的挡光环刃口宽度由原来一体化加工时的 0.2 mm 减小到 0.03 mm, 降低了所有挡光环刃口的累积反射面积, 测试结果如图 13(b)、(c) 所示, 该型遮光罩针对恒星等弱暗目标可大幅提升杂光抑制效率。同时, 对于近轴小视场光学系统而言, 如图 13(d) 所示的百叶窗式遮光罩, 不仅能够自动消除镜间热影响, 还具有高的结构稳定性和良好的杂散光抑制效果。

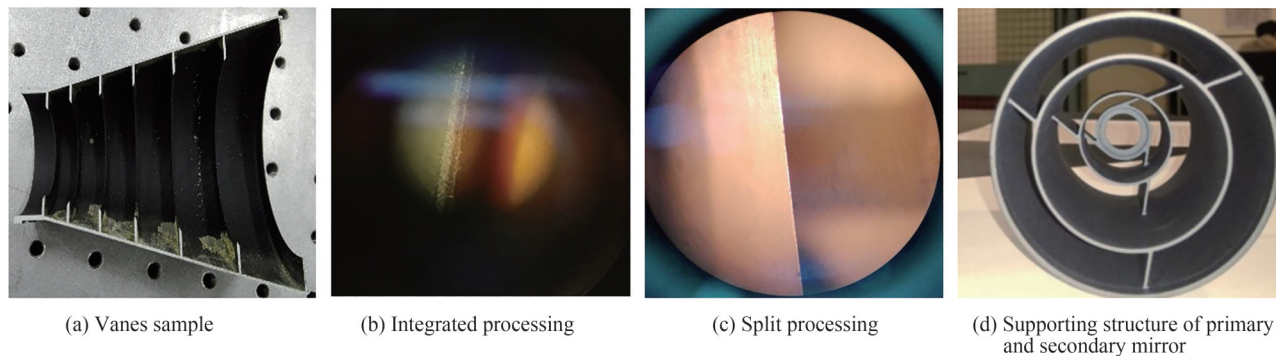
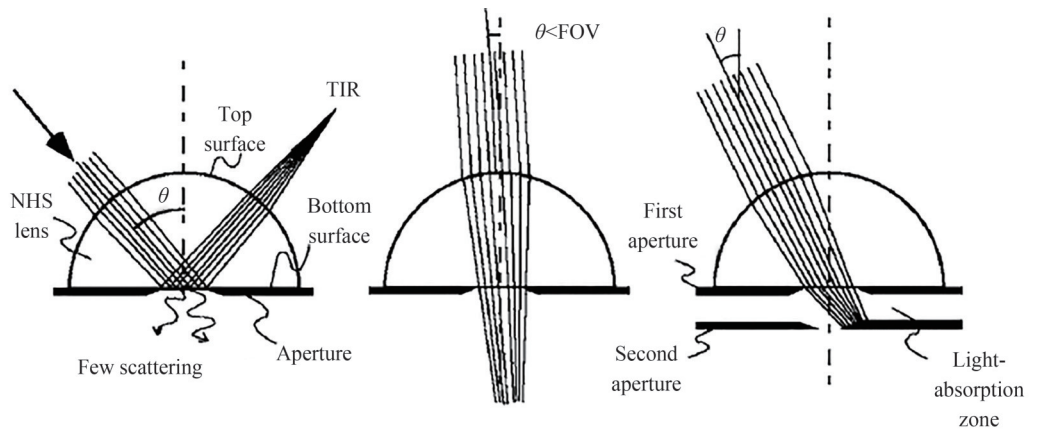
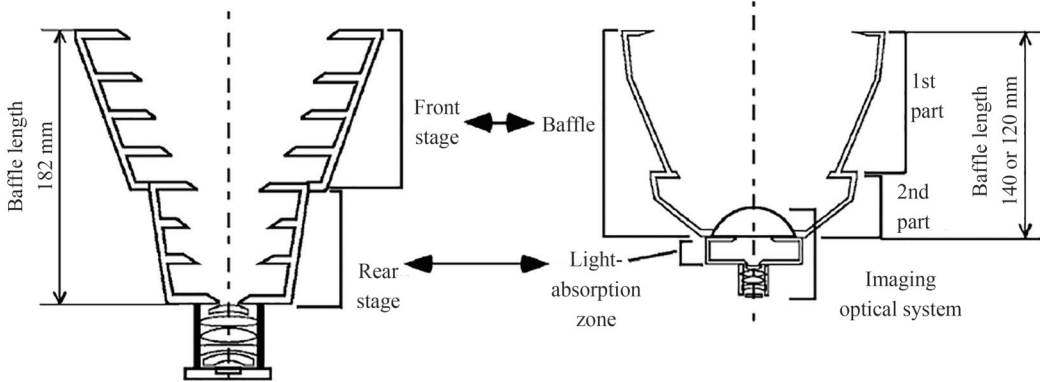


图 13 超轻型遮光罩^[35-37]
Fig. 13 Ultra-light baffle^[35-37]

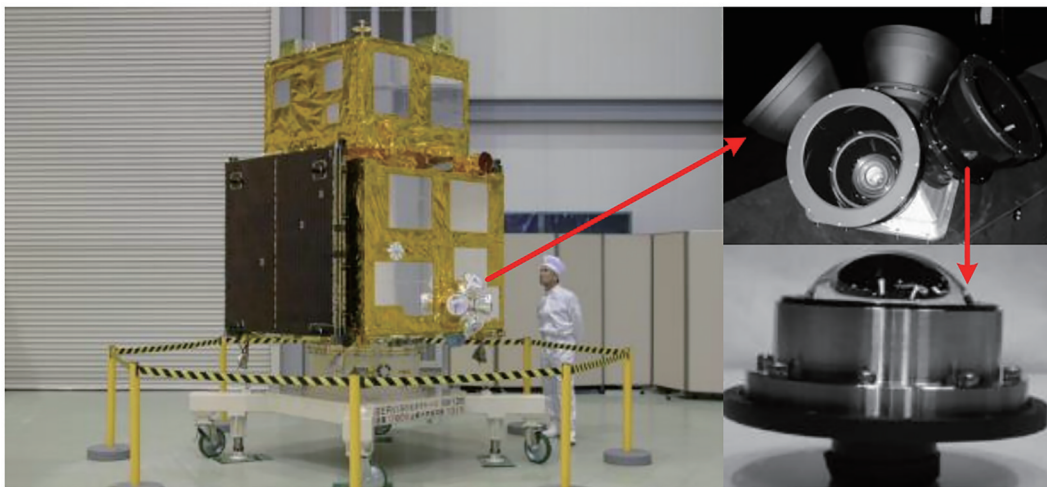
2003年,日本发射的“SERVIS-1”卫星星敏感器^[38]如图14所示,将光学系统第一个镜片设计成近半球形,利用大角度入射光线在半球透镜内会发生全反射的原理,把半球透镜作为“角度滤波器”使用,只有小于临界角的视场内光线可以通过,可有效缩减两级遮光罩的长度,使其仅为传统遮光罩长度的3/4。“SERVIS-2”卫星^[39]于2010年成功发射,在轨验证达到了预期对杂光的抑制效果。但该方案在系统前额外增加了球透镜,给系统设计带来了难度,同时球透镜也增加了系统重量。该杂光抑制方法并不适合所有的光学系统,后续未见类似应用报道。



(a) Light-shielding effect by total internal reflection



(b) Correspondence between conventional two-stage baffle and new baffle



(c) Picture of star sensors on SERVIS-1 awaiting its launch

图14 全反射技术与两级遮光罩的联合应用^[38-39]
 Fig. 14 Combined application of total reflection technology and two-stage hood baffle^[38-39]

随着大口径高分辨光学遥感器的发展,传统的固定式遮光罩尺寸和重量也相应变大,随动可展开遮光罩技术应运而生。该技术以收缩发射、在轨弹出的方式,同时满足了系统大口径尺寸和发射过程中火箭整流罩对遮光罩的空间约束。在轨后有序展开多层大面积薄膜遮光罩,实现杂光抑制效果控制及热控制性能。美国 Foster-Miller^[40]开发的一款可展开遮光罩,核心展开单元由卷尺弹簧组件构成,轴向、径向均可展开,有效隔绝了空间望远镜的环境热辐射,提高了对杂光的抑制效果。图 15(a)、(b)为展开前、后的照片。2021 年 12 月发射的 James Webb 太空望远镜^[41-42],同样采用了多层可展开遮阳罩的方式,有效隔绝来自太阳、地球的杂散光和热辐射。美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)下一代先进技术大口径空间望远镜(Advanced Technology Large Aperture Space Telescope, ATLAST)^[43]仍将采用可展开遮光罩技术,以保证对强光源的有效隔绝。

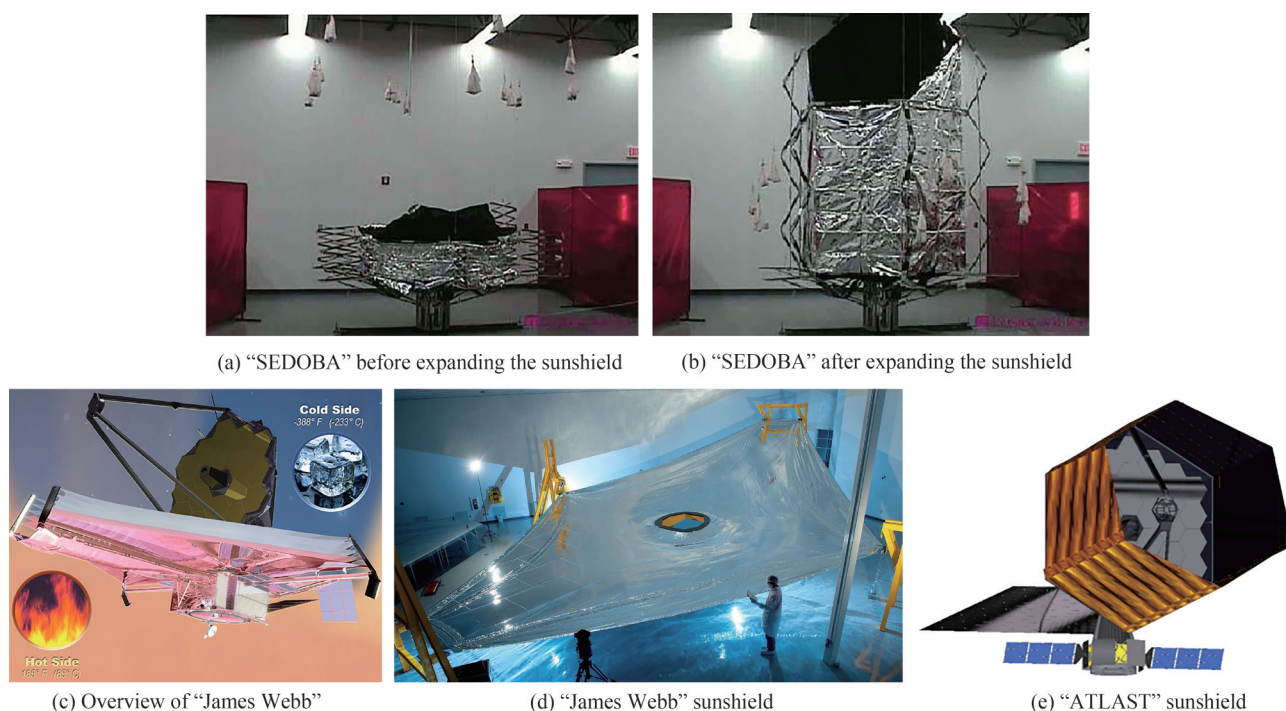


图 15 可展开型遮光罩^[40-42]
Fig. 15 Expandable sunshields^[40-42]

我国 2019 年发射的“高分七号”(GF-7)卫星^[44-46]前视相机也采用了可展开遮光罩结构,如图 16 所示,入轨前遮光罩折叠收拢,入轨后根据指令成功展开,标志着我国遥感相机可展开遮光罩技术取得了在轨零的突破。中科院西安光机所李创等^[47-51]对空间望远镜精密展开机构技术进行了持续性研究,如图 17 所示,研制的碳纤维杆盘绕式张拉整体展开结构,验证了可展开机构能压缩可展开功能;研制的六自由度调节机构,不仅可解决由于制造公差和外部干扰所导致的可展开望远镜展开后,次镜无法准确到达设计位置的问题,也能用于可展开遮光罩,可提高展开精度;研制的基于带状弹簧精密展开结构,如图 18 所示,具有展开精度高、结构简单、重量轻、可靠性高等优点,折叠时储存弹性应变能,为后续展开提供动力,并通过形状记忆合金的锁紧释放装置进行锁紧,释放后能够自行展开到工作位置并完成自锁。

我国 2019 年提出的太阳系近邻宜居行星的太空探索计划“觅音计划”^[52-53]光学系统将仿生技术和折纸方法相结合,依据自然界中花从花蕾至花朵的形状变化等同为遮光罩遮光面积的逐步增大,采用类似花萼和花瓣的配合结构,可提高对杂光的抑制效果,如图 19。采用正六边形底面、折展比为 8 的拓扑构型遮光罩方案,折叠后的包络空间和卫星星体空间保持一致,能够更好地利用空间。遮光结构选用两层薄膜,既可遮光又可隔热。

为了满足对太阳系外行星较大范围的探测需求,美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)^[54]提出了一种外形为太阳花状的天基可展开星体杂光遮星伞,其展开直径为 34 m,收拢直径小于 5 m,

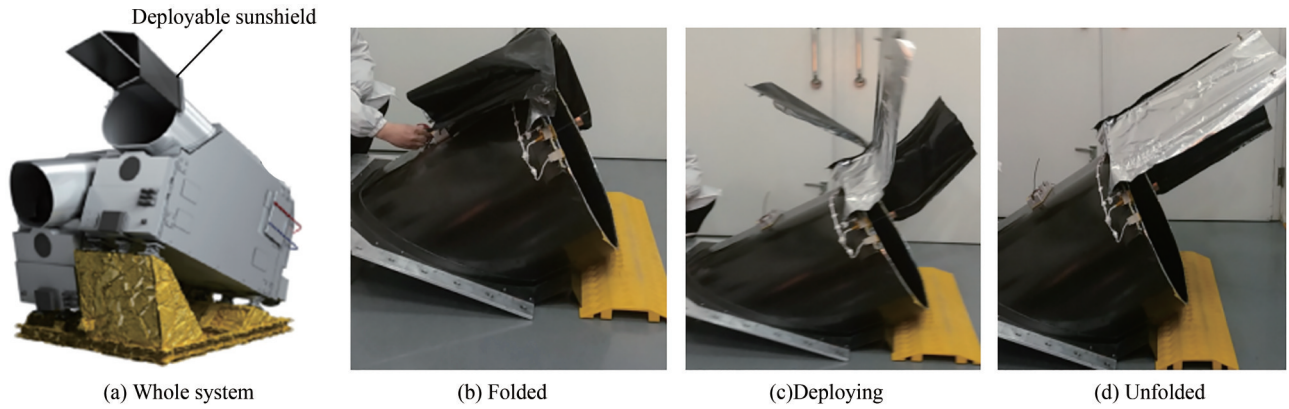


图 16 “高分七号”卫星遥感相机可展开遮光罩^[44-46]
 Fig. 16 Deployable sunshield on GF-7 satellite remote sensing camera^[44-46]

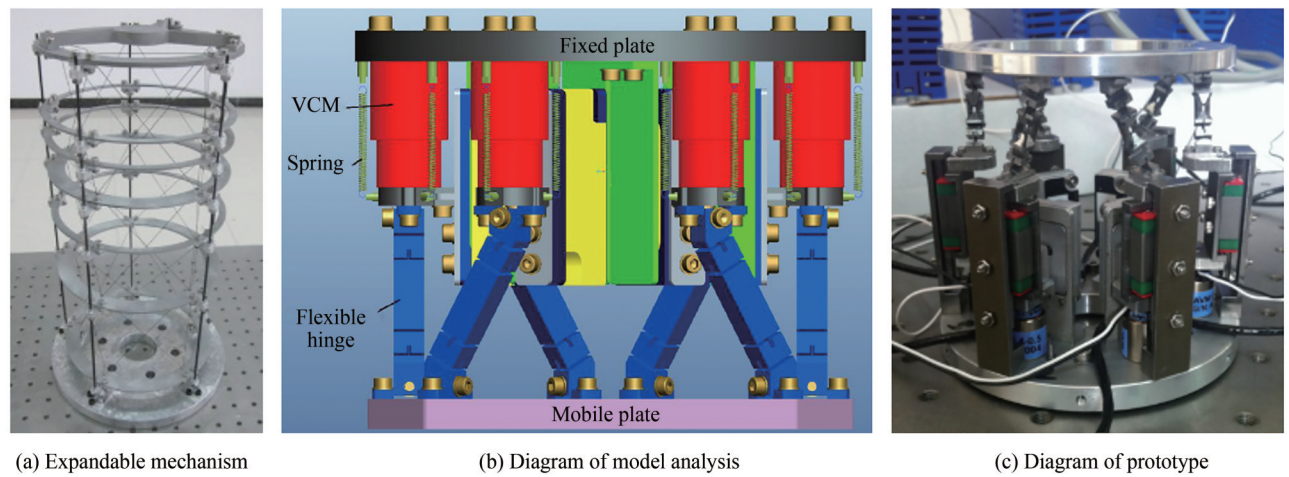


图 17 可展开机构及自由度调节机构^[47]
 Fig. 17 Adjustment system with hexapod structure^[47]

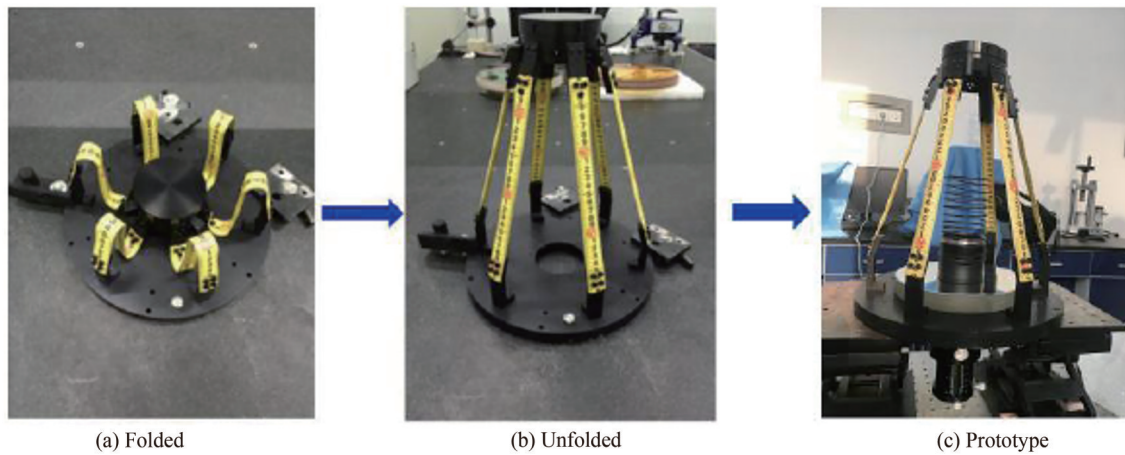


图 18 基于带状弹簧的可展开望远镜样机^[51]
 Fig. 18 Prototype of a deployable telescope based on a ribbon spring^[51]

对非目标星体杂光的抑制能力可达 10^{-10} 。图 20 为遮星伞在轨工作原理图,从远处观察行星时,遮星伞遮挡中央恒星的光线,花瓣结构会构成一个较为平缓的边缘透过行星光线,避免光线的过度弯折(或偏折),遮星伞可以形成黑色锥形“阴影区域”,空间望远镜得以拍摄到被淹没在恒星光芒之中的行星体。为了测试与验证遮星伞杂光抑制能力及像面对比度,普林斯顿大学^[55-57]研究人员在地面搭建了如图 21 所示的测试系统,

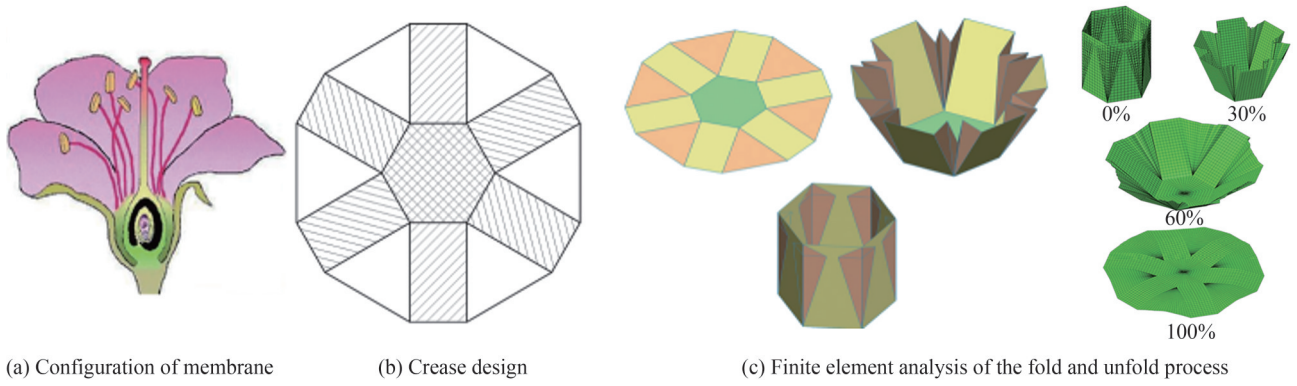


图 19 “观音计划”空间可展开薄膜遮光罩^[52-53]
 Fig. 19 Deployable membrane sunshield of “MEAYIN Project”^[52-53]

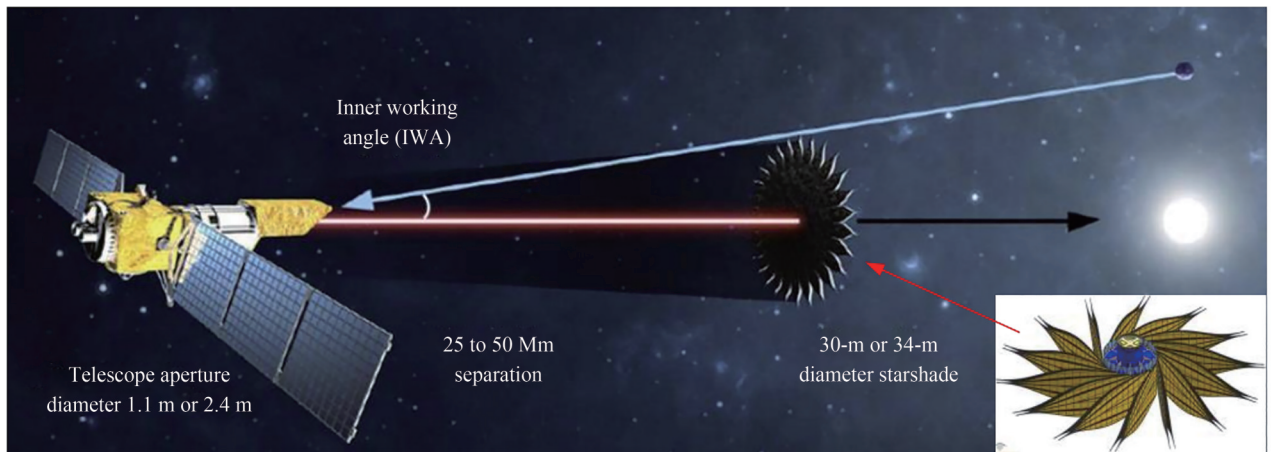


图 20 太阳花状行星遮阳伞在轨示意图^[55-57]
 Fig. 20 Schematic of sunflower-shaped planet starshade instrument on orbit^[55-57]

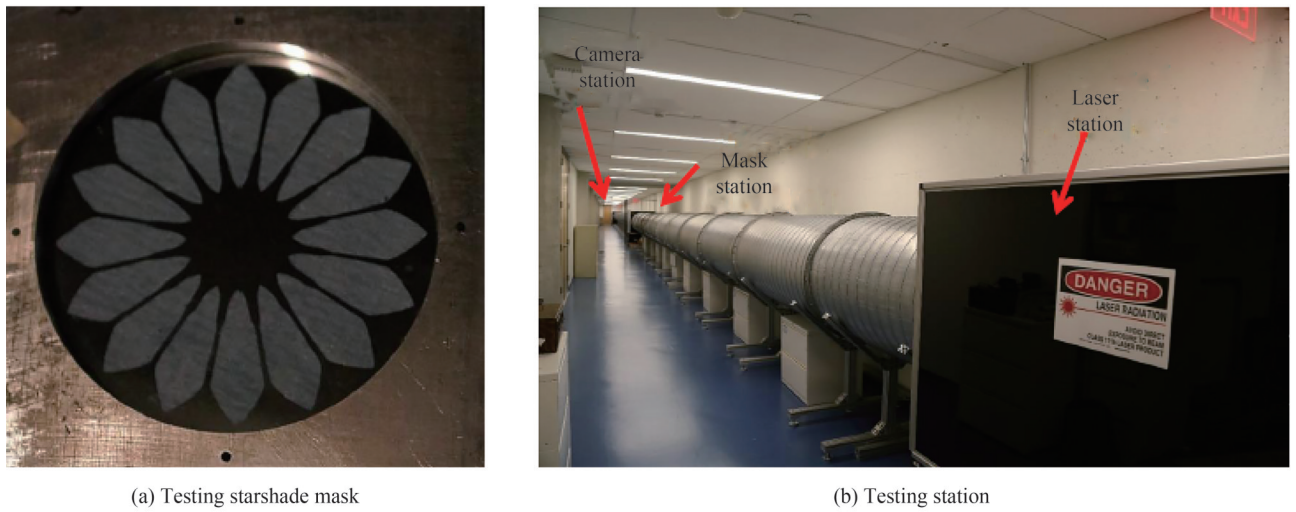
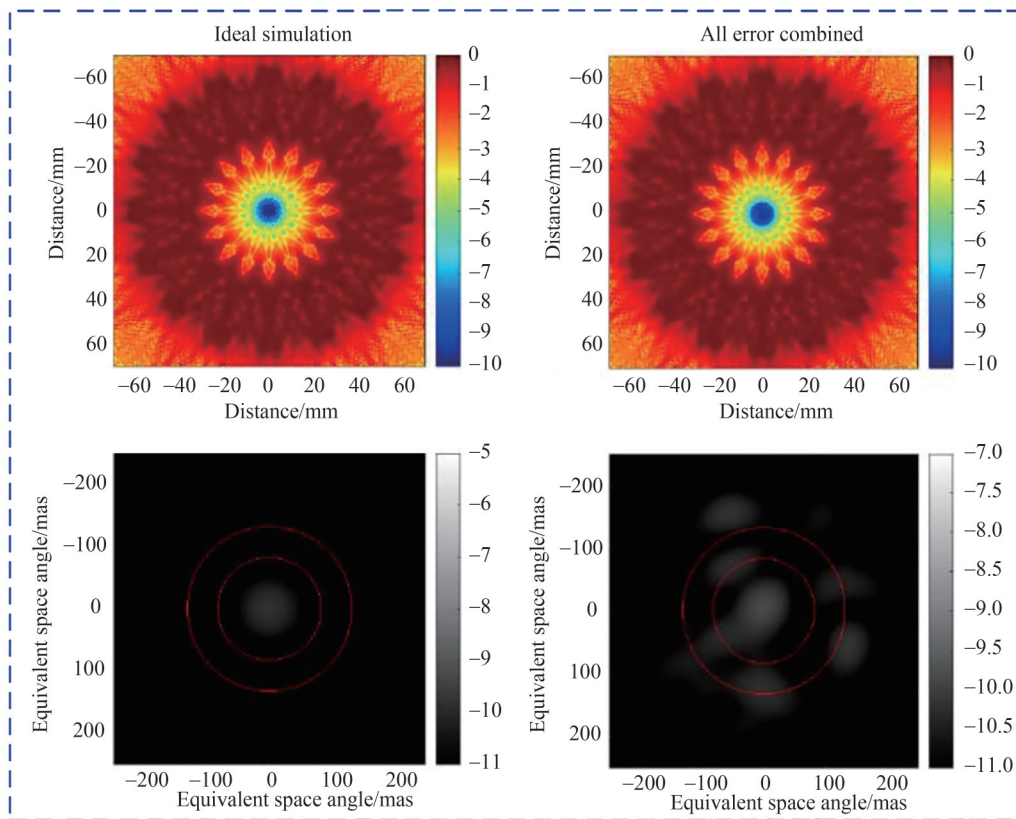
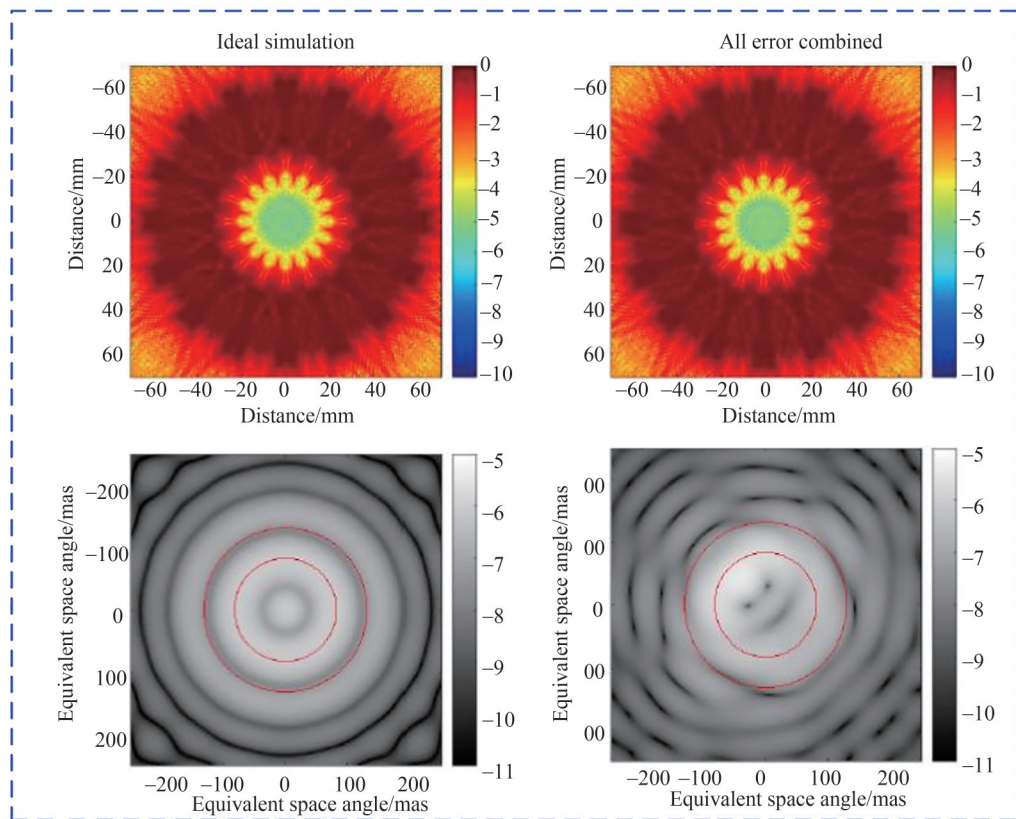


图 21 太阳花状遮星伞地面测试^[54]
 Fig. 21 Ground test of the sunflower-shaped starshade^[54]

像面对比结果如图 22 所示。测试结果表明：在工作波段内，该遮光罩对杂光的抑制能力可达 10^{-9} ，像面对比度可达 10^{-11} 。



(a) Simulation at 638 nm

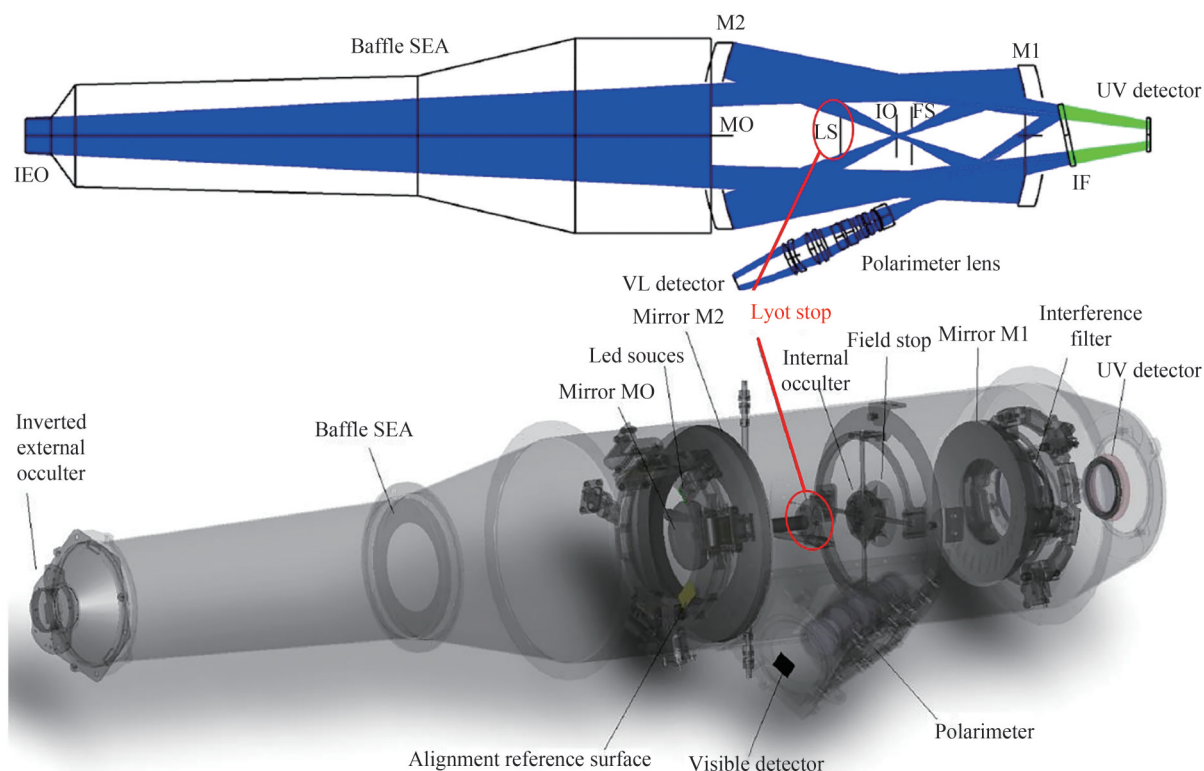


(b) Simulation at 520 nm

图22 太阳花状遮星伞对比度仿真^[55-57]
Fig. 22 Contrast simulation of the sunflower starshade^[55-57]

2.3.3 光阑

当杂光通过遮光罩内部进入成像系统后,可在系统内部合理设置光阑结构对杂光进行抑制,达到有效阻断或衰减杂光的目的。常用的有消杂光光阑、视场光阑、Lyot光阑等^[58]。Lyot光阑可以有效抑制光学系统孔径光阑受到强光照射后引起的衍射杂散光,光学系统中孔径光阑边缘产生的衍射杂散光经后续光学系统后将重新会聚,并在光阑的一次像面处形成一亮环,如图23所示。因此,将Lyot光阑放置在孔径光阑的一次像面位置可以大大降低衍射光斑的能量。整个抑制过程中发生两次衍射衰减,充分抑制了衍射杂散光。与视场光阑一样,当系统尺寸体积受限或者不存在中间像面时,Lyot光阑可能无法添加到系统中。

图23 Lyot光阑在消杂光系统中的应用^[58]Fig. 23 Application of Lyot stop in stray light elimination system^[58]

在实际工程杂散光的抑制中,往往是将多种抑制手段综合使用以达到最佳的抑制效果。图24为美国NASA发射的SABER望远镜^[59],外部前遮光罩和镜筒主遮光罩的应用限制视场外大角度一次杂光,使得杂光在遮光罩内壁经过两次及两次以上反射后才有可能到达主镜。主镜内遮光罩、次镜遮光罩则避免主镜一次散射光直接到达次镜,且避免大部分大视场光直接入射至次镜,加入了光陷阱对外部漏光进行吸收。此外,在光机系统内部设置了视场光阑、Lyot光阑对杂光进行了抑制。

日冕仪是对太阳日冕活动进行监测,对可能影响地球的灾害性天气预测的空间设备^[60-61]。图25(a)为日冕仪光学结构图,系统的杂光源为太阳直射光。在系统前方放置三个齿状遮光盘,主体部分用以遮挡太阳中心部分的直射光,外掩体齿状遮光盘如图25(b)所示,可以使垂直入射到遮光盘边缘光束的衍射光线方向平行于遮光盘平面,有效减少进入到系统中的光能,使杂光消除率提高一个数量级以上。其次针对太阳直射光在外掩体 D_1 和入射孔径 A_1 附近产生的边缘衍射光,可分别在外掩体 D_1 关于物镜组 O_1 的共轭位置 D_2 、入射孔径 A_1 关于物镜组 O_2 的共轭位置 A_3 处设置Lyot光阑进行抑制。距离太阳最近的物镜组 O_1 各表面多次反射形成的杂散光在中继镜组 O_3 的中部被聚焦,能够实现有效的杂光遮拦。

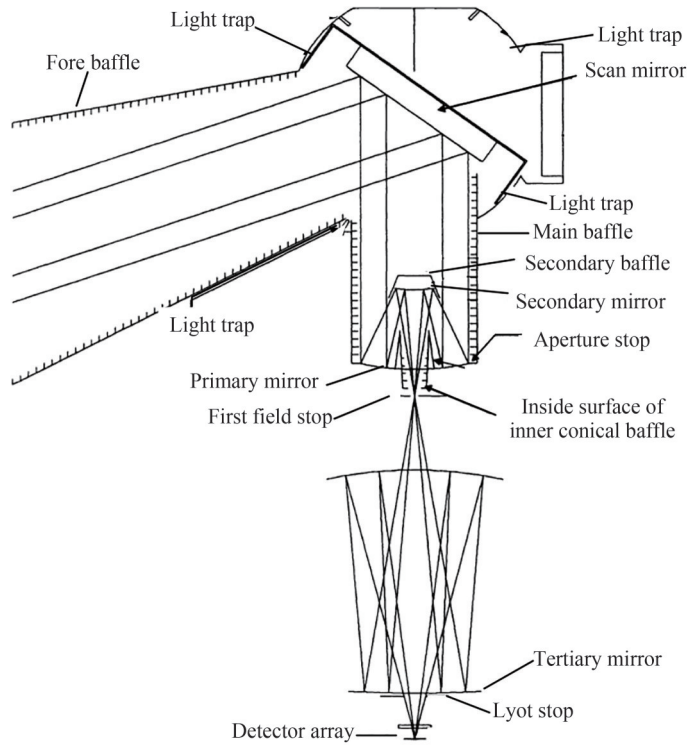


图 24 多种杂光抑制方法在 SABER 望远镜上的应用^[59]
 Fig. 24 Application of various means of suppression for stray light in SABER telescope^[59]

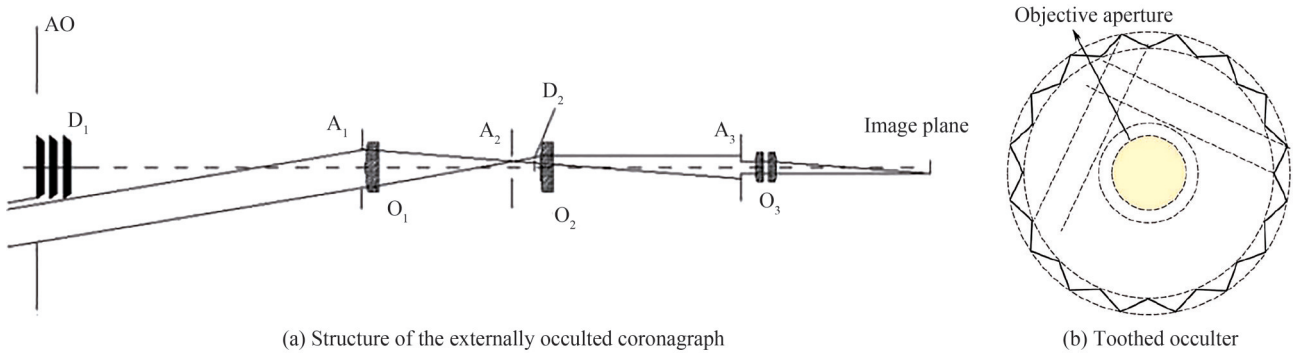


图 25 大视场日冕仪光学系统^[60-61]
 Fig. 25 Large field of view coronagraph optical system^[60-61]

2.3.4 表面属性

杂散光的强弱与表面双向反射分布函数(Bidirectional Reflective Distribution Function, BRDF)直接相关,表面 BRDF 的降低,同样可以实现很好的抑制和杂光消除。因此,需要对处于光路中的机械结构表面、光学表面进行消光处理。消光处理的思路为改变光在不同介质表面的传输路径并进一步降低传播能量。故而在加工后的机械结构通光内表面通过改变其表面微形貌(如结构零件表面喷砂、增大局部表面粗糙度以及微纳结构等处理)、改善表面吸收光线能力(如表面黑化处理、喷涂消光漆、焦平面非工作区粘贴黑色吸光布)等方式降低表面 BRDF。

要降低光学表面的 BRDF,一方面要提高其表面光洁度,减小表面疵病、划痕等引起散射的诱因;另一方面通过膜系设计及镀膜提高透过率或者反射率。对处于光路中的非工作光学表面采用消光处理能进一步减少表面的散射,对于透镜元件需要注意的是,除了关注玻璃条纹度、气泡、均匀度以及内透过率等材料本身属性引起的 BRDF 变化外,在非工作端面涂覆吸光涂料时,涂料的折射率不得小于玻璃材料的折射率,否则在玻璃材料与涂料之间易形成全反射条件,在临界角以外入射的所有光线不能进入涂料介质被吸收,而是直接反射到后续光路进而形成杂散光。

光学表面和机械表面的表面清洁度都会影响到散射强度,表面污染会引起BRDF相应增大,严重时影响探测信号接收,因此,控制表面污染也是杂光抑制的重要内容。目前常采用的表面处理方式有:消光涂层、碳纳米管技术、微纳表面结构、光学镀膜、以及表面粗糙度与表面洁净度等。

2.3.4.1 消光涂层

消光涂层是一种在特定波长范围内强烈吸收光线,以达到消除或降低光线散射现象的油漆或涂料^[62]。消光图层常用来对光学非工作面和机械结构面进行处理,通过降低表面的散射或反射特性直接影响杂散光的传输路径,达到对杂光的抑制。未消光处理的结构表面具有较高的反射率或散射率,导致非目标光线通过多次散射或反射产生杂光。表1为常用的黑漆^[9]。

表1 主要黑化表面处理^[9]
Table 1 Widely used black surface treatments^[9]

Name	Manufacturer	Country	Type	Waveband	Notes
Aeroglaze Z306	Lord Corp.	US	Paint	VIS-LWIR	Diffuse black
Aeroglaze Z302	Lord Corp.	US	Paint	VIS*	Specular black. *Published data available only for VIS.
463-3-8	AkzoNobel Aerospace Coatings	Netherlands	Paint	VIS-LWIR	Diffuse black. Often used for cold shields.
443-3-8	AkzoNobel Aerospace Coatings	Netherlands	Paint	VIS-LWIR	Specular black
Nextel Suede	Mankiewicz	Germany	Paint	VIS-LWIR	Diffuse black
Ball IR Black (BIRB)	Ball Aerospace and Technologies Corp.	US	Etched electroless nickel	VIS-LWIR	Diffuse black
MH21	Alion Science and Technology Corp.	US	Paint	VIS-LWIR	Diffuse black
MH2200	Alion Science and Technology Corp.	US	Paint	VIS-LWIR	Diffuse black
Pioneer Optical Black	Pioneer Metal Finishing	US	Anodize	VIS-SWIR	Diffuse black
Light Absorbing Black-Out Material	Edmund Optics, Inc.	US	Flocking paper	VIS*	Diffuse black. *Published data available only for VIS.
Cerablak	Applied Thin Films, Inc.	US	Fused powder	VIS-LWIR	Diffuse black. Can withstand temperatures up to 1 400 C.
Epner Laser Black	Epner Technology Inc.	UK	Black oxide	VIS-LWIR	Diffuse black. Very low TIS, and very fragile.
Ebonol-C	n Science Corp.	US	Anodize	VIS-LWIR	Diffuse black. Very low TIS, and very fragile.
Deep Space Black	n Science Corp.	US	Anodize	VIS-LWIR	Diffuse black. Very low TIS, and very fragile.
Tiodize	Tiodize Co., Inc.	US	Anodize	VIS-LWIR	Diffuse black, titanium substrate only.
PT-401	Products, Techniques Inc.	US	Paint	VIS-LWIR	Specular black
AK-512		Russia	Paint	VIS-LWIR	Diffuse black
Metal Velvet	Acktar	Israel	Paint	VIS-NIR	Diffuse black
PNC	MAP	France	Paint	VIS-NIR	Diffuse black
SB-3/SB-3A	Shanghai institute of Organic Chemistry	China	Paint	VIS-LWIR	Diffuse black

美国 Aeroglaze®Z306^[63]是一种主要服务于航天器结构件表面的聚氨酯黑漆,其特点是太阳吸收率高、出气率低及耐辐射性能好。Z306黑漆的太阳吸收率 α_s 为 0.95 ± 0.01 ,其法向发射率 $\epsilon_{(0)}$ 为 0.90 ± 0.05 。有机涂层在高真空状态下释放小分子颗粒物,可能会影响探测器的光学系统工作性能,而Z306黑漆的整体质量损失(Total Mass Loss, TML)为1%,其可凝物挥发(Collected Volatile Condensable Materia, CVC)为0.02%。

英国NPL实验室^[62,64]基于镍磷材料研制了一种低反射率超级黑漆,如图26所示,使用硫酸镍和次磷酸钠溶液对待处理样件发黑处理,生成一种以化学方式沉积的镍磷涂层,最后使用硝酸腐蚀处理样件表面,即可生成超黑涂层。经实验测定,该涂层在可见光和紫外波段具有较低反射率,如在633 nm波长处的反射率仅为0.4%,远低于传统黑漆的反射率。

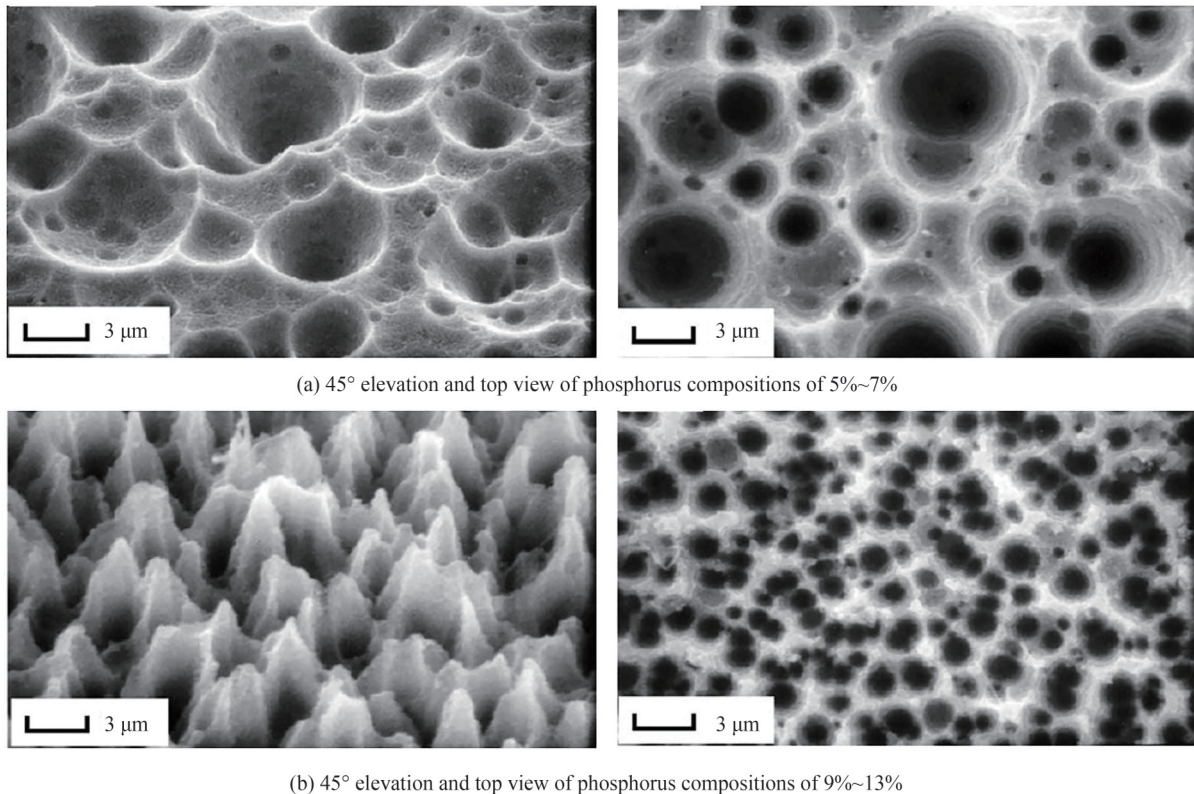


图26 不同含磷量下的镍磷黑漆电镜图像^[62,64]

Fig. 26 SEM images of different phosphorus compositions in nickel-phosphorus black paint^[62,64]

法国MAP公司^[65]研制的哑光黑色涂层MAP® PNC,其主要成分是硅酮树脂,通过添加一些添加剂实现白色和黑色的颜色控制。太阳吸收率 α_s 可达到 0.98 ± 0.02 ,可凝物挥发物(Collected Volatile Condensable Materials, CVC)为0.09%,其恢复后的质量损失(Recovered Mass Loss, RML)为0.56%^[66]。其中RML定义为真空测试后样品的整体质量损失值(Total Mass Loss, TML)与随后放置室温吸收水蒸气恢复后质量损失值(Water Vapor Regained, WVR)的差值。MAP® PNC在-170°C都有很好的热稳定性。此外,该公司还研发了PU1、AQ PU1、PUK、AQ PUK、HT1607等消光黑漆,太阳吸收率 α_s 均保持在0.95~0.96之间。

俄罗斯研制的^[62,67]黑漆主要有AK-512、AK-243、KO818、1-416等,其黏结剂主要成分是有有机硅树脂和丙烯酸树脂,其太阳吸收率 α_s 在0.90~0.95之间。其中,AK-512黑漆以最佳的空间稳定性,服务了多款俄罗斯航天器。

用于我国航天器上的消光涂层多具有高吸收率和低反射率的特点。其中,中科院上海有机化学所研制的SB-3黑漆因具有较高的太阳吸收率而广泛应用于各类光学遥感器上。常用的黑色有机热控涂层还有ERB-2B、SH-96黑漆、Es951黑漆等^[62],相关材料参数及应用情况见表2。此外,中科院上海硅酸盐研究所对铝合金进行镀黑镍处理,吸收率 α_s 能够达到0.92~0.95,结构件处理厚度变化在0.01 mm内。中科院西安

光机所基于实际测量,已建立适用于航空航天的黑漆数据库,包括SB-3/A、Z306、PNC、黑镍、碳纳米管涂层等^[68],以及适用于地面测试实验室的内壁材料数据库,如消光黑布、黑色消光玻璃和黑色亚克力板等。

表2 我国的热控黑漆性能及应用^[62]

Table 2 Performance of black thermal control coating and its appliances in China^[62]

Name	Solar absorptivity	TML/%	CVCM/%	Application
ERB-2B	0.94~0.96	1.63	0.01	Spacecraft, satellites
SB-3	0.96~0.97	2.34	0.04	Spacecraft, satellites
Es951	0.95~0.97	—	—	Ground thermal, optical system, etc.
SH96	0.94~0.96	—	—	Ground thermal, optical system, etc.
SB-3A	0.97~0.98	—	—	Optical system

中科院宁波材料所先进涂层与增材制造研究团队^[69-73]基于5~30 nm 纳米碳球,研制出了超黑吸光涂层HD-CB99A、HD-CB98B以及特种吸光涂层HD-CB97H,采用机器人在线编程辅助热喷涂技术进行超黑涂层喷涂成型,如图27所示,保证了超黑涂层的成分/组织均匀性和整体性能稳定性。所研制的吸光涂层HD-CB99A,如图28所示,在0.2~25 μm 波段吸光率高达99%,使用温度范围为-196~800 $^{\circ}\text{C}$,具有低的可凝挥发物污染。吸光涂层HD-CB98B在0.2~2.5 μm 波段吸光率优于98%,2.5~18 μm 波段辐射率超过0.96,具有优异的辐射散热功能,使用温度范围为-196~250 $^{\circ}\text{C}$ 。特种吸光涂层HD-CB97H在0.2~2.5 μm 的吸光率平均值在97.5%~98.0%之间,2.5~18 μm 的辐射率可达0.96,弥补了涂层HD-CB99A、HD-CB98B无法清洁、刮擦、触摸的缺陷,具有一定的耐磨性能以及可触可摸可洗的特点。

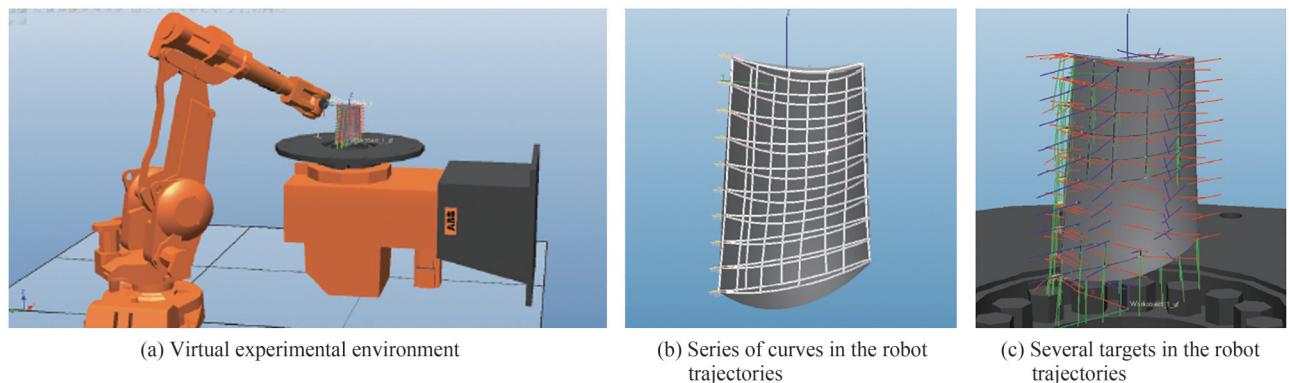


图27 自动机器人辅助热喷涂技术^[71]

Fig. 27 Automated robot-assisted thermal spray technology^[71]

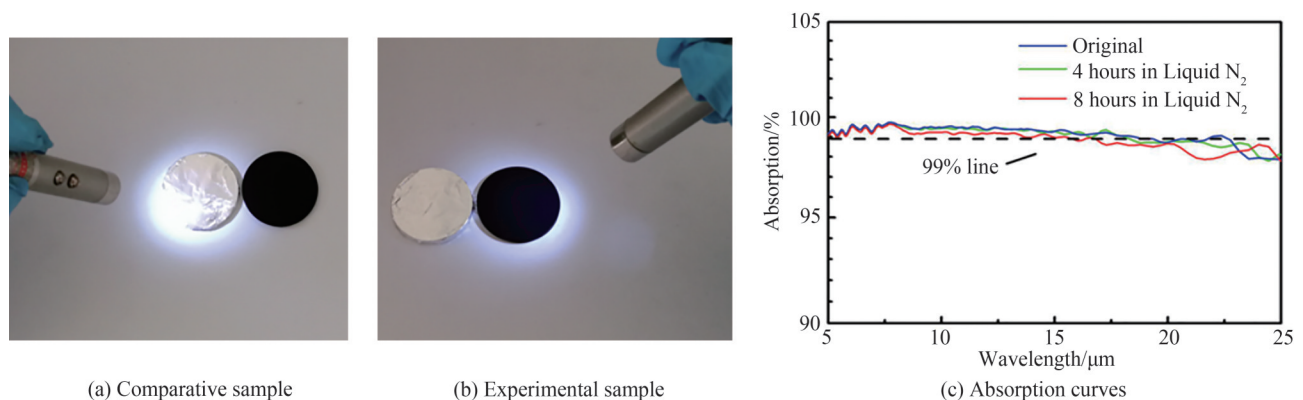


图28 新型超黑涂层HD-CB99A^[72]

Fig. 28 New super black coating HD-CB99A^[72]

2020年北京卫星制造厂有限公司^[74-75]研制了一种适用于空间环境的高吸收率消杂光热控涂层SCB-1,如图29所示,在200~2 500 nm 波长范围内太阳吸收比 α_s 优于0.98。经过了真空-紫外、真空-电子及真空-

质子的连续辐照实验后太阳吸收比降低最大值为0.012,半球发射率 ϵ_h (同温度下的辐射体和黑体的辐射射出度之比)变化量在0.01以内,涂层太阳吸收比与半球发射率变化较小。

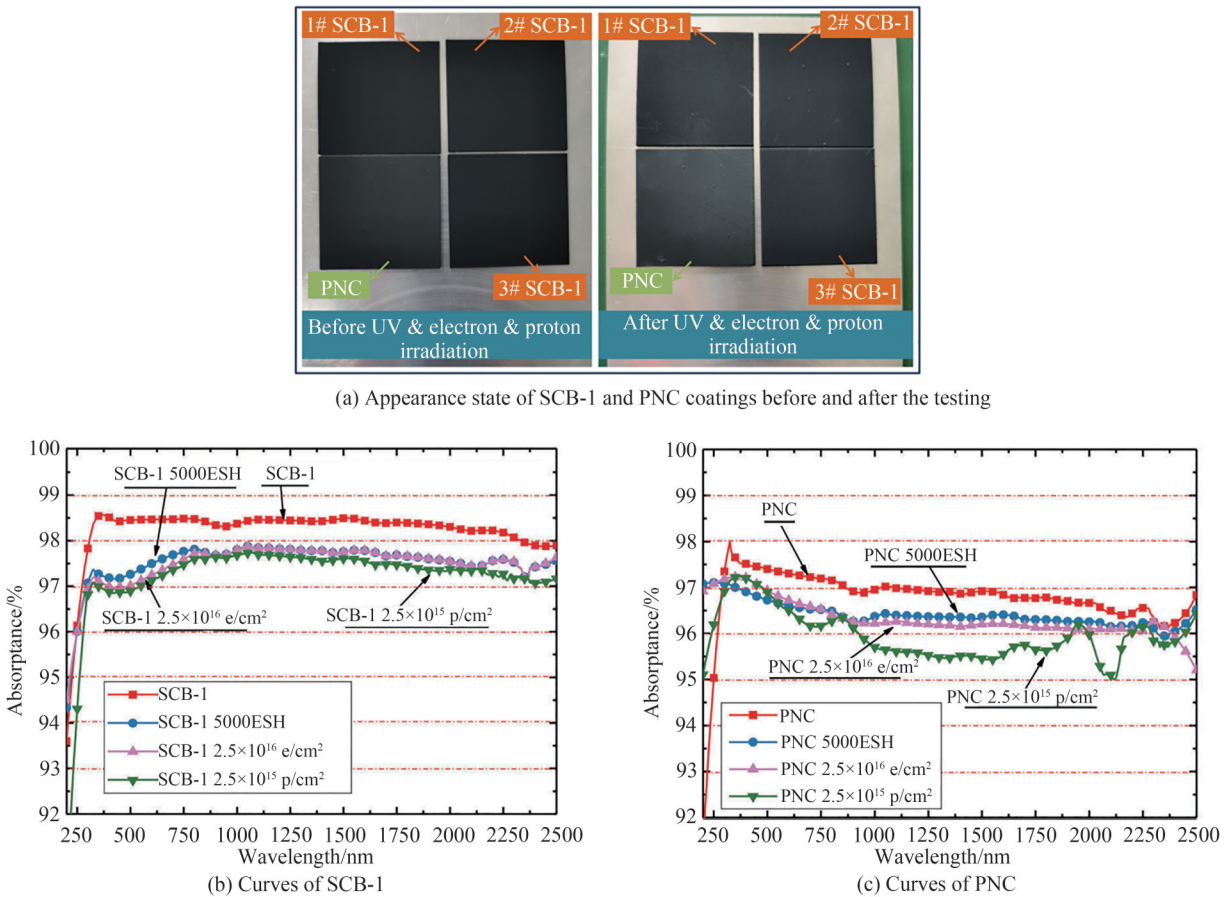


图 29 真空-紫外、真空-电子及真空-质子串联辐照前后 SCB-1 和 PNC 涂层太阳光谱吸收曲线^[74-75]

Fig. 29 Test spectral curve before and after vacuum-UV, vacuum-electron and vacuum-proton irradiation of SCB-1 and PNC^[74-75]

2.3.4.2 碳纳米管技术

碳纳米管^[76-78]作为国际新材料领域的研究热点,凭借其独特的力学、电学、光学、电磁学及超导性能等,引领新型消光材料的发展。理想碳纳米管是无缝、中空的片层石墨烯管体,按照石墨烯的片层数可以分为单壁碳纳米管和多壁碳纳米管。自2007年起,NASA科学家团队^[79]研究了一种适用于空间飞行器的多壁碳纳米管(Multiwalled Carbon Nanotube, MWCNT)涂层,称其“Blacker than black”,该涂层的吸收率在0.9~24 μm的波长范围内为0.99~0.91,且呈单调降低。已公开报道的美国KH-12卫星^[80-81],除了使用锥形充气罩用以折射地面雷达探测电磁波外,还使用了在可见光波段吸收率高达99.965%的碳纳米管材料,因此,除了太阳能电池板和工作镜头外,整个卫星几乎呈绝对黑色,地面观测装置很难探测到该卫星,实现了隐身效果。

英国Surrey Nano Systems公司^[82]基于碳纳米管材料研制的Vantablack也是反射率最低的超黑材料,如图30所示,光线无法直接进入只能穿过其间的缝隙。这种超黑物质导热效率为铜的7倍,坚固程度为钢的10倍,测试633 nm波长可见光的吸收率达到了99.965%。任何被它覆盖的物体在人眼看来都会是一个平坦且无底的空洞。Vantablack S-VIS适用于光谱范围为紫外-太赫兹(UV-THz)的空间设备,Vantablack S-IR适用于光谱范围为5~14 μm的空间设备,Vantablack VB×2适用于光谱范围为UV-THz的地面设备。涂有Vantablack S-VIS的样品在-196℃液氮浸泡后,放置于200℃热板上后,其性能仍然保持不变。2015年12月,该材料首次应用于监测卫星的双星跟踪器上,性能稳定,随后也应用于Antares NG10设备上。

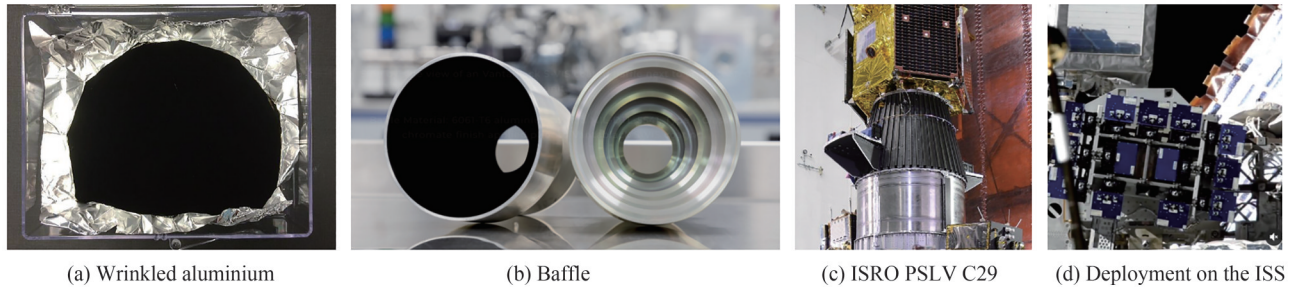


图 30 Vantablack 黑漆的应用^[82]
Fig. 30 Application of Vantablack paint^[82]

意大利 DE NICOLA F 团队^[83]在 2016 年曾以硅为基底材料,沉积单壁碳纳米管(Single Walled Carbon Nanotube, SWCNT)涂层进行吸收率测定实验,通过引入蛾眼效应(梯度折射率),实现了对入射光的高吸收,如图 31 所示。实验结果表明:碳纳米管涂层的厚度可直接影响其抗反射性能。在 45°入射光下,该材料的最高吸收率可达 99.9%,发射率高达 99.3%。

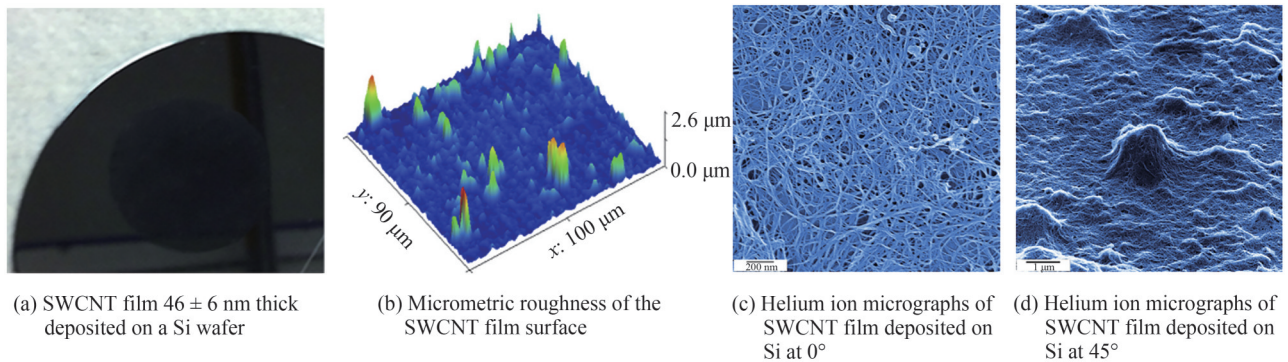


图 31 单壁碳纳米管涂层^[83]
Fig. 31 Single-walled carbon nanotube coatings^[83]

2016 年,北京控制工程研究所的郝云彩、余成武等^[84]仿真分析在杂光抑制角和点源透过率(Point Source Transmittance, PST)指标一致的情况下,如图 32 所示,所设计的碳纳米管遮光罩结构构型较喷涂 PNC 黑漆的遮光罩长度缩短了 30 mm,外口径缩小了 45 mm。此外,该团队开发了以钛合金材料为基底进行碳纳米管涂层生长的新技术,涂层吸光率达到 99% 以上,所制作的碳纳米管遮光罩可等效替代传统飞行产品遮光罩,通过真空原子氧、热真空、力学环境等各项空间环境实验,验证了其具有较好的空间环境适用性。

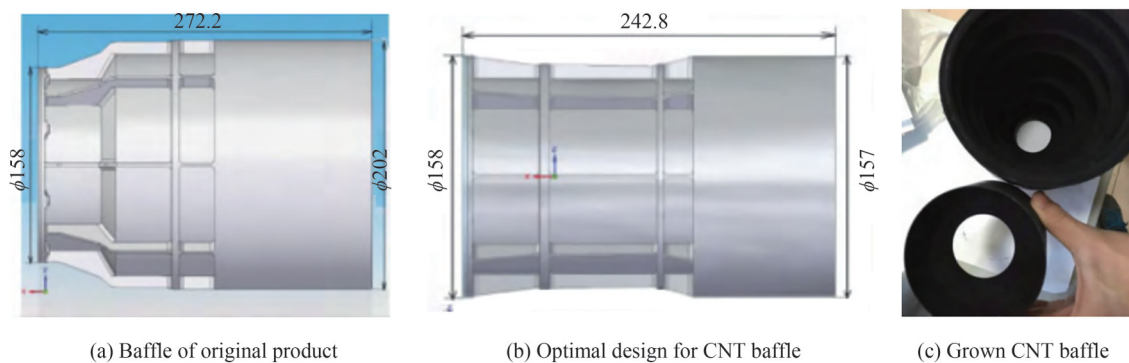


图 32 碳纳米管遮光罩^[84]
Fig. 32 Carbon nanotube (CNT) baffle^[84]

2.3.4.3 微纳表面结构

2020年,中科院西安光机所李明团队^[85-86]通过调整飞秒激光在金属表面的能量密度、扫描间隔和光束偏振态,获得不同特性的表面微纳混合结构如图33所示,可作为光腔捕获光线进入其内部经多次反射最终达到衰减消光的目的,分析结果如图34所示。与其他典型周期性吸光结构相比,该类型的微纳混合结构在250~2300 nm光谱波段具有2%的超低平均反射率,在紫外波段最低反射率可降低至1.5%。高低温试验验证其性能具有较高的稳定性,有效弥补了传统黑漆、电镀、喷砂等方法寿命短、高低温脱落、易污染、不稳定等问题,为杂散光的抑制手段提供新的思路。

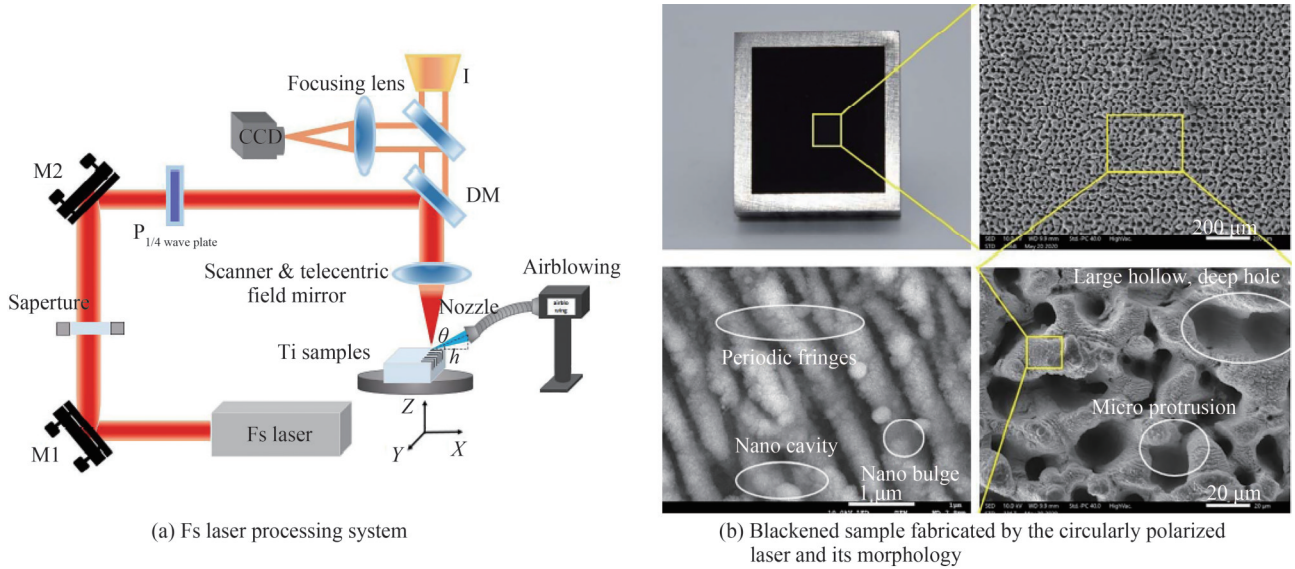


图33 飞秒激光加工设备及其圆偏振激光下的微纳结构^[85-86]
 Fig. 33 Fs laser processing system and morphology of micro/nano structures in circularly polarized laser^[85-86]

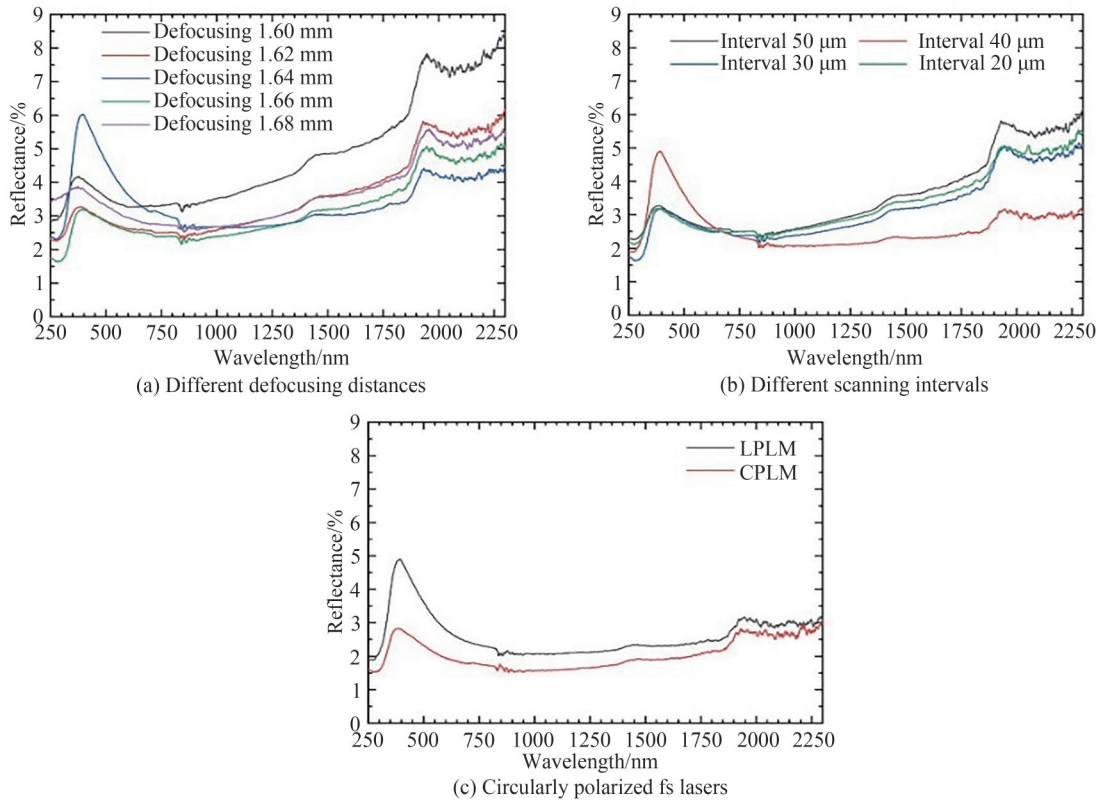
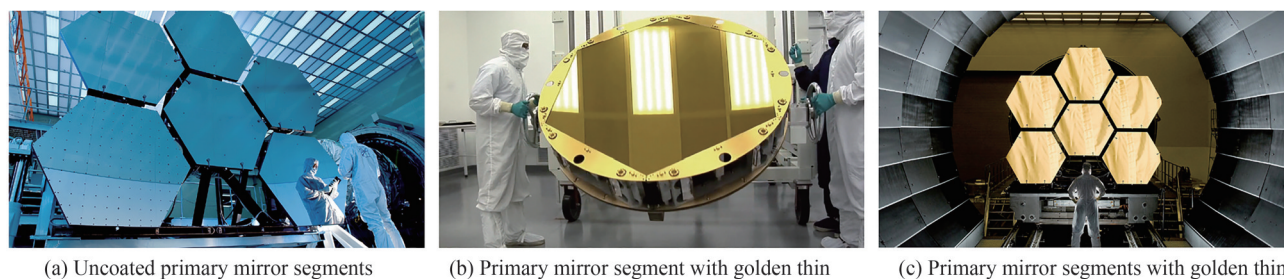


图34 不同实验条件下微纳结构的光谱反射率^[85-86]
 Fig. 34 Reflection spectra of micro/nano structures at different experimental conditions^[85-86]

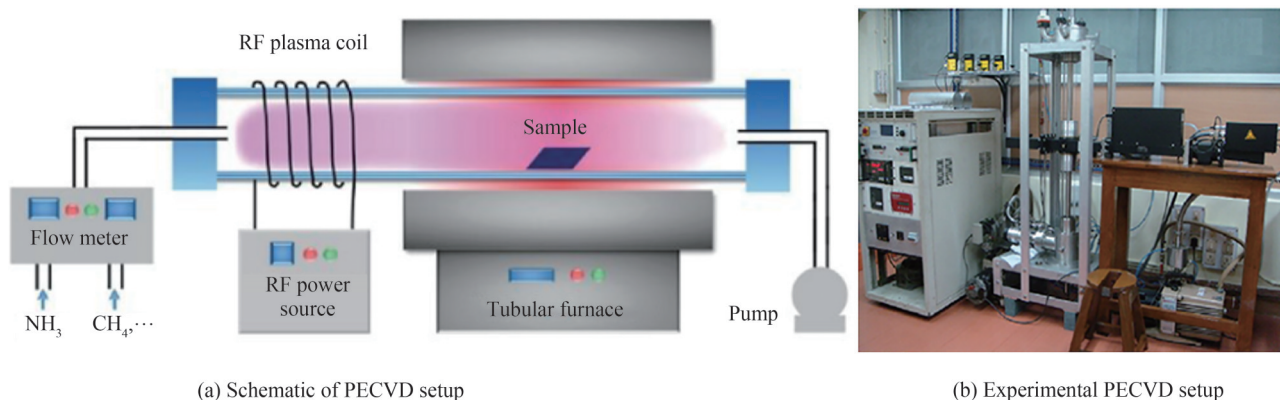
2.3.4.4 光学镀膜

提高透射光学元件表面的透过率(或者反射镜的反射率),不仅能大幅提升系统获得的有效总能量,还能减小杂光,尤其是可减少鬼像发生的概率。如图35所示,在透镜表面镀制高增透膜系或者通过镀膜控制特定工作波段光线透过,抑制其他非工作谱段光线通过;反射镜表面可以通过镀高反射率膜系,如詹姆斯·韦伯(James Webb)望远镜^[87]以极高刚性和轻质特性的铍材料作为主镜衬底,反射面的表面粗糙度小于20 nm,镀上金膜后,有效提高了其反射红外光线的能力。

图35 镀金膜的James Webb太空望远镜^[87]Fig. 35 James Webb Space Telescope coated with golden thin^[87]

光学薄膜中的散射损耗直接影响着薄膜性能^[88],随着表面均方根粗糙度的增大,镜面反射率明显下降。光学薄膜粗糙面的散射,除了要考虑单个界面粗糙度以外,还要考虑这些界面粗糙度之间的互相关特性。西安工业大学潘永强等^[88]通过对K9玻璃基底上TiO₂薄膜的研究表明,当基底粗糙度较小时,随膜层厚度增加,薄膜表面的粗糙度不仅包括基底本身粗糙度复现在薄膜外表面,薄膜生长所带来的固有粗糙度也逐步体现,会逐渐减弱薄膜界面粗糙度的互相关性,其总后向散射仍优于粗糙度较高的基底上沉积的薄膜。因此,降低基底表面粗糙度可直接减小薄膜的散射损耗。

随着镀膜技术的不断进步,等离子体增强化学气相沉积(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)、低温化学气相沉积(Low Temperature Chemical Vapor Deposition, LPCVD)、金属有机化合物化学气相沉积(Metal Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)等新型化学气相沉积镀膜方式^[89-92]出现,与经典的物理气相沉积(Physical Vapor Deposition, PVD)技术相比,所制备的薄膜以较大的折射率变化范围,拓展了膜系设计的空间,可用于低散射渐变折射率光学薄膜的设计与制备,为改善现有光学薄膜器件性能及获取特定功能光学薄膜提供新路径。图36为等离子体增强化学气相沉积实验装置。

图36 等离子体增强化学气相沉积实验装置^[90-91]Fig. 36 Setup of plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD)^[90-91]

具体来说,与电子束热蒸发技术比较,PECVD技术制备的薄膜具有更为致密的薄膜结构、更加灵活的折射率变化范围和更少的表面缺陷(如物理气相沉积技术不可控的制备缺陷,膜料喷溅和麻点等);与离子束热蒸发技术制备的薄膜相比,两者致密度接近,但PECVD薄膜的折射率可调范围更加灵活,更适合制备折射率连续的渐变层。此外,PECVD技术制备的薄膜具有良好的覆型性,适合异形曲面上的制备,非常适

合在微结构表面上制备光学薄膜。

渐变折射率薄膜,又称为非均匀薄膜^[92-94],即沿薄膜厚度方向膜层的折射率呈递增或递减变化,改善了传统多层光学薄膜膜层间的不稳定性和跃变特性,图37为渐变折射率涂层反射率分布图。渐变膜层的层间紧密堆积,因此具有更优良的增透特性和更高的激光损伤阈值(定义为单位面积上的激光能量,单位为J/cm²)。

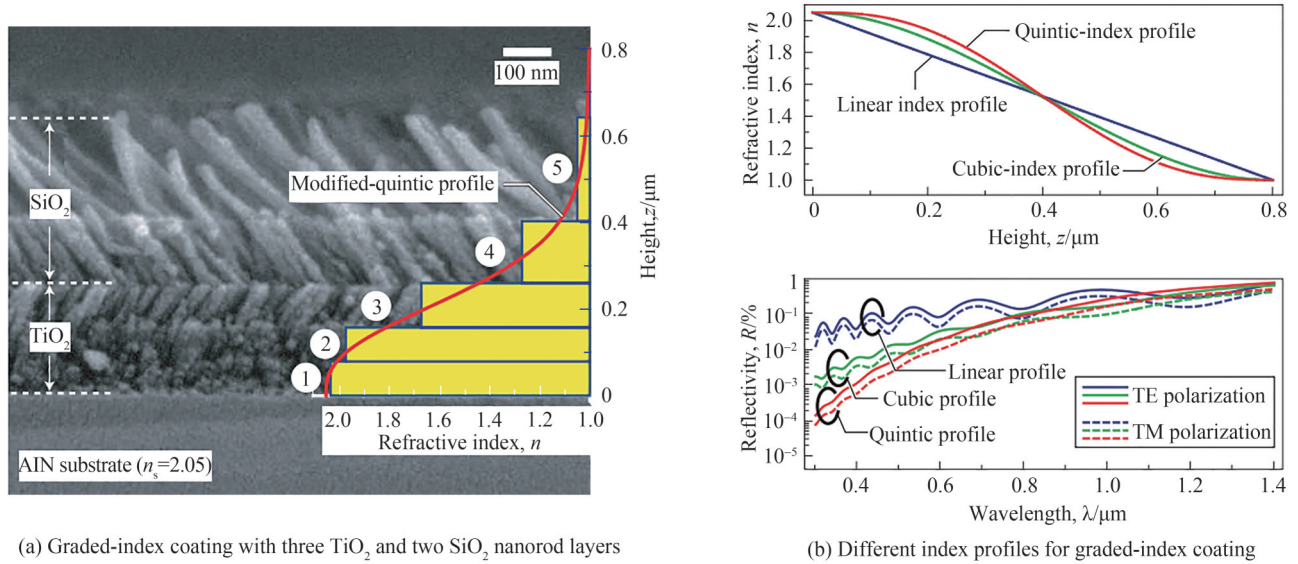


图37 渐变折射率涂层反射率分布^[94]
Fig. 37 Reflectivity distribution of graded-index coating^[94]

PECVD技术在制备减反膜时^[93],可以在膜系结构中引入渐变折射率层,平滑通带的透过率、降低薄膜内部电场强度,从而实现超宽带减反、抗强场损伤等传统薄膜制备技术难以实现的优点;PECVD技术所制备的高损伤阈值高反膜,薄膜表面更加均匀,且制备多层膜时,中间部分存在渐变层,使得界面破损效应变小,从而使损伤阈值大幅提高。此外,PECVD技术制备的薄膜的粗糙度优于热蒸发技术制备薄膜,且接近于离子束溅射技术制备的薄膜。

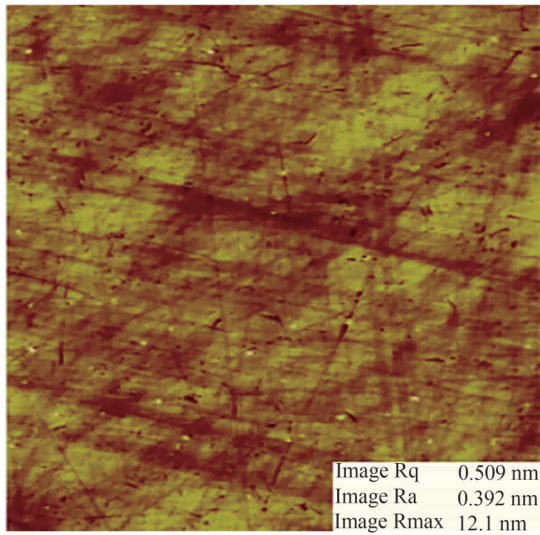
2.3.4.5 表面粗糙度与表面清洁度

图38给出了表面形貌和颗粒污染的分布图。散射是辐射在传播过程中遇到小微粒使传播方向改变并向各个方向散开。按照粒子尺寸与光波波长的关系,引起散射的主要有瑞利散射和Mie散射。瑞利散射是当粒子尺寸小于1/10波长或更小时太阳辐射光谱波长的散射,强度正比于(1/λ⁴);Mie散射是粒子尺寸大于1/10波长到接近太阳辐射光谱波长时所发生的散射,强度正比于(1/λ²),且散射光的前向比后向的散射强度更强,方向性较明显。故而光学表面的粗糙度会直接影响表面的散射特性。通常使用总积分散射(Total Integrated Scatter, TIS)表示散射或透射光总能量与入射光总能量的比值,其与均方根粗糙度σ的关系为^[95-96]

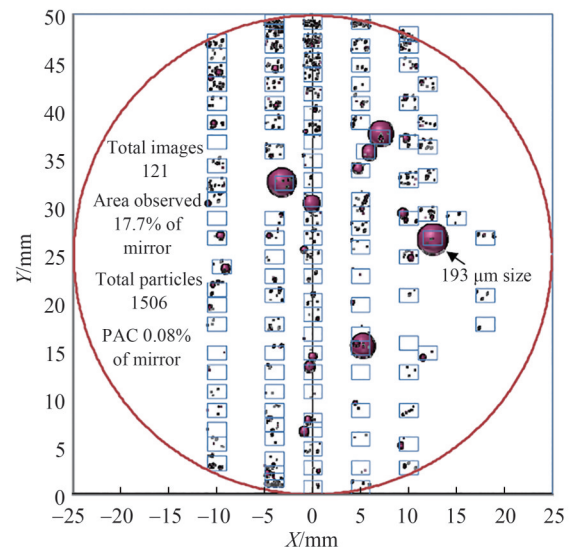
$$TIS = \left(\frac{2\pi\Delta n\sigma\cos\theta_i}{\lambda} \right)^2 \quad (3)$$

式中,Δn是光束入射、散射空间的折射率差,对于镜面而言,通常取Δn=2;λ为入射光波长,θ_i为光束入射角。从式(3)可以看出,在其它条件保持不变的情况下,表面粗糙度与总积分散射成正比,随着表面粗糙度增大,其像面接收到的杂散辐射必然增大,因此在光机元件加工时,要尽量控制表面粗糙度。

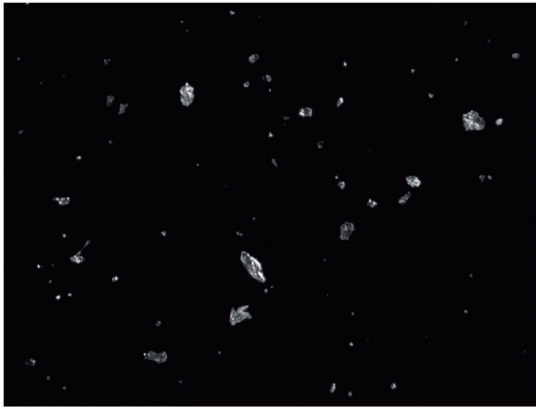
由散射强度与波长的关系可以看出,波长越短,散射强度越强。对于强光强目标散射效应尤其明显。如lyα日冕仪^[97]主反射镜采用超光滑表面(RMS粗糙度优于1 nm)来降低表面粗糙度引起光的散射。另一方面表面灰尘等微粒污染物的存在改变了光与介质表面的散射特性,使其超出了表面粗糙度所造成的影响。大颗粒Mie散射可以通过提高洁净室内空气洁净度实现消除,而瑞利散射可将光学设备放置真空密封腔,通过减少大气中的微粒数量来减弱或建立相应模型计算剔除。目前洁净室等级^[98-100]有国际标准ISO



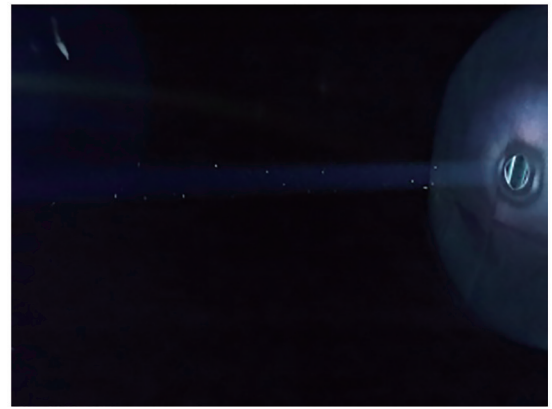
(a) Atomic-force microscope image of the polished fused silica



(b) Imaged particles on a 2" diameter gold mirror



(c) Typical dust particles on black acrylic



(d) MIE scattering in parallel beam

图 38 表面形貌和颗粒污染的影响^[9,102-103]Fig. 38 Influence of the surface topography and particulate contaminants^[9,102-103]

14644-1:2015 和中国标准 GB/T16292-1996。美国环境科学与技术研究所^[101]提出的清洁度标准 IEST-CC1246D 提供了表面清洁度 (Cleanliness Level, CL) 这一单一参数来量化描述表面微粒数量, TRIBBLE A 及 BUCH J 等^[9]研究了表面清洁度与组装环境的洁净室级别、暴露于该环境中的时间和暴露于环境中的空间方向的关系, 结果表明, 在同等条件下, 组装环境洁净水平越高、暴露时间越短、工作表面水平向下放置, 其表面清洁度越好。这些参数与表面清洁度 CL 值的关系为

$$CL = \sqrt{\left(\frac{1}{0.926}\right) \log_{10} \left\{ F_{\text{orient}} \rho t \left[10^{N_{\text{ISOCLASS}}} \cdot \left(\frac{0.1}{5}\right)^{2.08} \right]^{0.773} \right\}} - A \quad (4)$$

式中, F_{orient} 为方向因子, 当工作面水平朝上时取 1, 垂直放置取 0.1, 水平面朝下取 0.01; ρ 为由洁净室每小时换气次数决定的常数; N_{ISOCLASS} 为洁净室的 ISO 14644-1 级别; A 为拟合常数。

2020 年, LINTZ M 等^[104]通过分析引力波 LISA 望远镜光学表面因微流星体冲击产生的碰撞坑与污染物, 建立了一种估算光学表面微流星体损伤引起的杂散光的计算模型。2021 年, 西安工业大学潘永强团队^[105-106]通过在 K9 玻璃表面沉积单层 SiO_2 或 TiO_2 光学薄膜, 如图 39 所示, 实现了对光学元件表面上方半径为 100 nm 粒子污染物球心处电场强度的有效调控, 并根据电场强度最小值确定了所对应的光学薄膜厚度, 不仅降低了光学元件表面污染物球心处的电场强度, 也进一步降低了光学元件表面粒子污染物引起的双向反射分布函数 (BRDF) 以及污染物引起的总散射损耗。计算结果表明, 波长为 632.8 nm 的光垂直入射时, 单

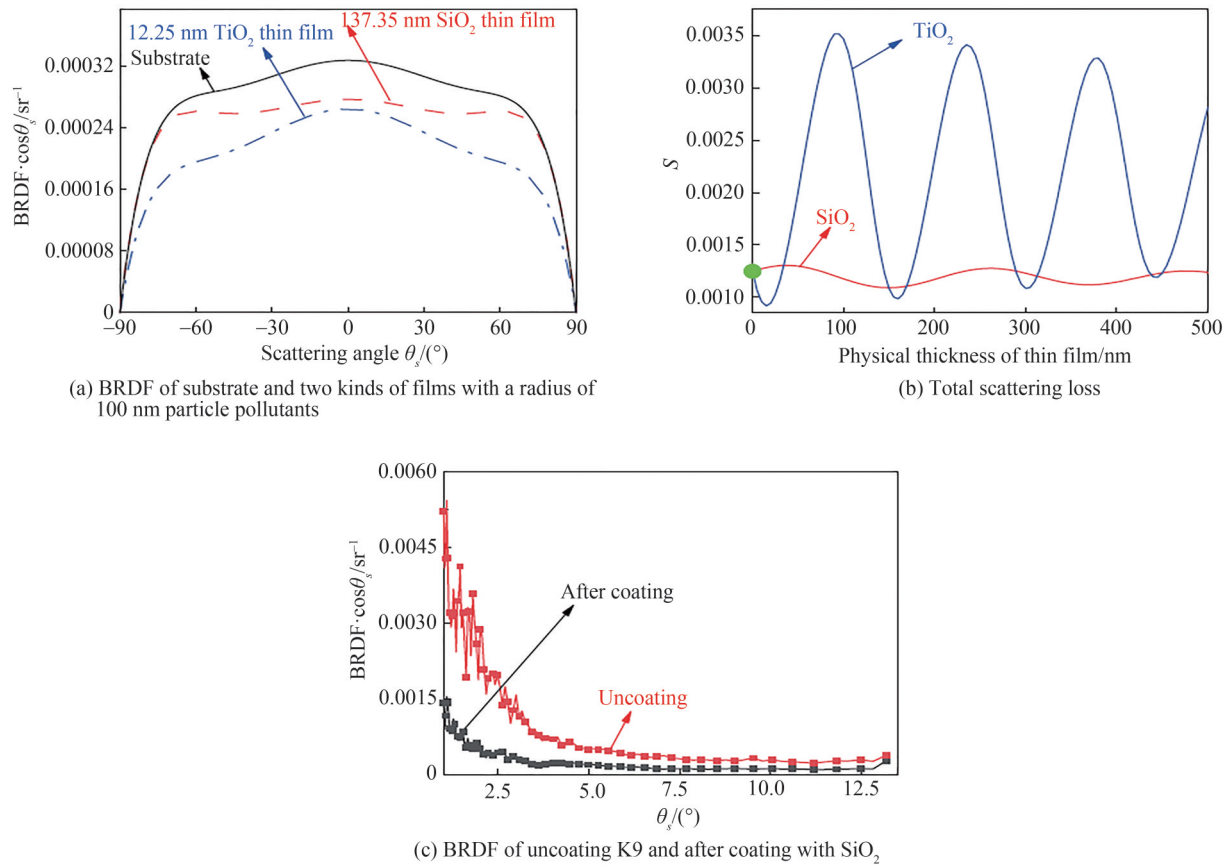


图 39 单层光学薄膜对表面颗粒污染的散射抑制^[105-106]

Fig. 39 Suppression of surface particle pollutant scattering by single-layer film^[105-106]

层 SiO₂ 薄膜和单层 TiO₂ 薄膜可将 K9 玻璃表面的总散射分别降低 12.40% 和 25.04%，通过实验也验证了单层 SiO₂ 薄膜对于表面粒子污染物散射降低的有效性。但该方法的应用需要预估表面粒子污染物的粒径分布，对基底材料、光学薄膜的种类和厚度都有特定要求。

此外，还可以利用一些清除表面污染的方法^[107-111]，如释气处理、二氧化碳喷雪花效应、离子去除法、紫外线辐射清洁以及静电除尘技术等，清洁光学表面以降低其表面散射。二氧化碳喷雪清洁是利用处于高压状态下的液态或气态二氧化碳在减压喷雾过程中形成含有固体二氧化碳雪花晶体(0.3~1 μm)的高速运动气流和污染物间的能量和动量的转移(表面污垢受冷微变形，雪花升华产生体积膨胀，爆开污垢)以及高速气流的清洗作用来清除光路内的污染物，已经在很多航空航天项目中得以应用。图 40 是二氧化碳雪清洁现场，具有如下优点：1) 清洁对象广：可去除油脂(如指纹)、分子污染物及亚微米颗粒污染物；2) 清洗速度快：能完成大面积、大尺寸光学元件清洗；3) 效率高：光学元件表面清洁水平可优于 IEST-CC1246D 标准 250 级；4) 对基底材料基本不限制：清洁材料包括金属、陶瓷、塑料和玻璃表面、半导体晶片、真空元器件、各种镀

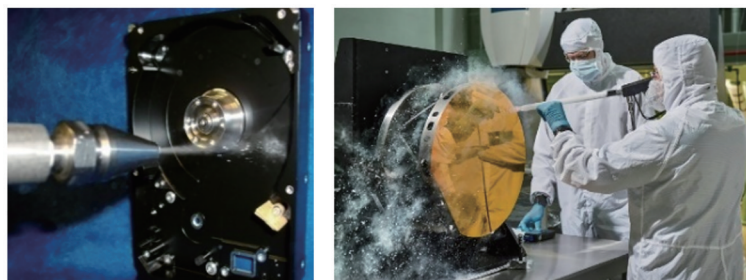


图 40 二氧化碳雪清洁现场^[87]

Fig. 40 CO₂ snow cleaning^[87]

膜(金膜、银膜等)后的光学元件等。

除此以外,还可以利用静电防尘和除尘。当不带静电微粒与另一个带静电物体靠近时,基于静电感应,微粒会感应出与带静电物体相反的电性,互相吸引,从而出现静电吸附现象。王虎等^[112]设计了一种光学系统防尘装置,如图41(a)所示,通过将特定的导电膜镀制在光学系统的第一镜面上,依靠镀膜后镜面与特殊导电压圈的可靠接触,静电经由导电膜传递后由接地导出,最终灰尘因无静电吸附而无法粘附在镜面上,实现防尘目的。该方法尤其适合于月球车、火星车等对光学载荷具有较高防尘需求的任务中。除了消除静电实现除尘外,也可以利用静电场电晕放电,释放离子与自由电子,则灰尘粒子将带有相应电子,经集尘板收集清除。KANAZAWA S等^[113]研究的双极荷电技术,如图41(b)所示,可使带相反电荷的细颗粒在电荷间库仑力的作用下发生静电凝聚,产生更大的颗粒,从而提高了静电除尘(ESP)对细(亚微米)颗粒的收集效率,如图41(c)所示,通过使用双极荷电技术,粒径为 $0.3\sim 1\ \mu\text{m}$ 的颗粒物的分布比例由原来的75%减少到18%,粒径为 $1\sim 5\ \mu\text{m}$ 的颗粒物分布比例由25%增大到82%,微纳量级颗粒污染物的去除效率达到了80%。2016年冯壮波等^[114]曾通过在静电除尘器上加入纤维过滤器,混合除尘,提高了对粉尘微粒的收集效率。

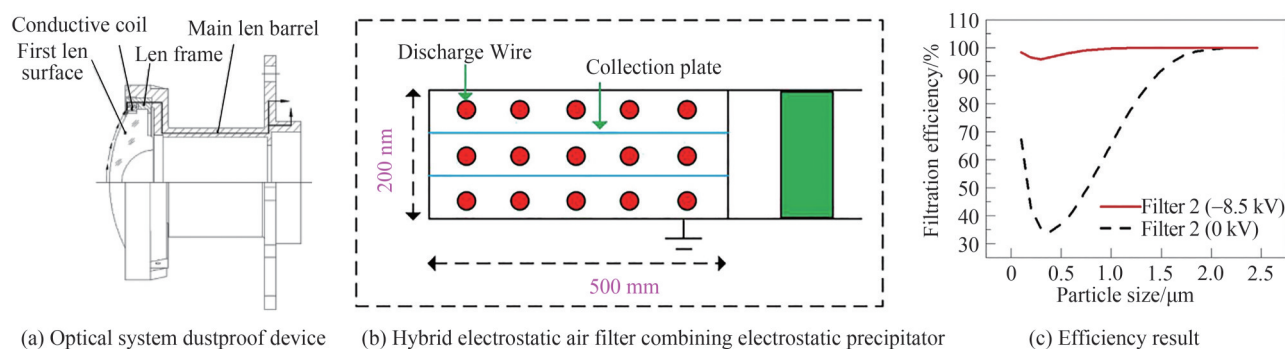


图41 静电除尘技术与应用^[112,114]

Fig. 41 Electrostatic dust removal technology and application^[112,114]

2.4 视场内杂散光抑制方法

视场内杂散光主要是由非成像光束通过仪器内壁及元件折、反射后进入像面产生的,具体受光学元件、结构件表面粗糙度、表面疵病以及表面污染所带来的残余反射、散射以及衍射的影响,以及光学元件、结构件等各折射面的反射光、仪器内壁的反射光,镜片本身的漫反射或者镜筒的反射等。因此,在杂散光的抑制上,要对光学元件的加工、使用、搬运、清洗、保存过程严格控制,保证所需表面质量和表面清洁度,避免因为表面粗糙度、表面疵病(麻点、划痕、破点等)及表面污染对成像造成影响,还要根据光学元件类型使用高反射膜系或高透过率膜系,对光路附近的非工作面使用高吸收率涂层,这与视场外杂散光部分抑制方法一致。

鬼像即二次反射像,是视场内杂散光的另外一种表现形式,为光学系统中任意两个表面的残余反射导致部分非成像光线在光学系统焦面附近汇聚形成的附加像。由于光学系统都镀高反/高透膜,经两次反射后能量更加微弱,故一般只考虑二次反射引起的鬼像影响。对于有 k 个折射面的光学系统,其任意两面间各一次反射造成的鬼像数目为 $k \times (k - 1) / 2$ 。鬼像包括鬼像焦点像和鬼像光瞳像。鬼像焦点像由物面形成,鬼像光瞳像由光瞳形成。由于光瞳是系统全视场能量积分处,所以鬼像光瞳像的影响可能较大。对于高功率激光系统而言,为了防止激光击穿空气,形成气爆,除了要避免成像光路形成的内焦点,还要避免鬼像光路形成的鬼像内焦点。

在鬼像的抑制方面,除了控制表面质量、表面清洁度,使用特定膜系、涂层以外,可以在初始光学设计时对鬼像进行快速初步分析,通过不断调整光学系统构型及内部光学元件参数,尽可能在保证系统成像质量前提下,对鬼像进行消除。另外,减小曝光时间以及图像处理也是常用的鬼像消除方法,图42是图像法消鬼像流程,图43是图像法消除鬼像实例。



图 42 图像法消鬼像流程

Fig. 42 Image method to eliminate ghost image

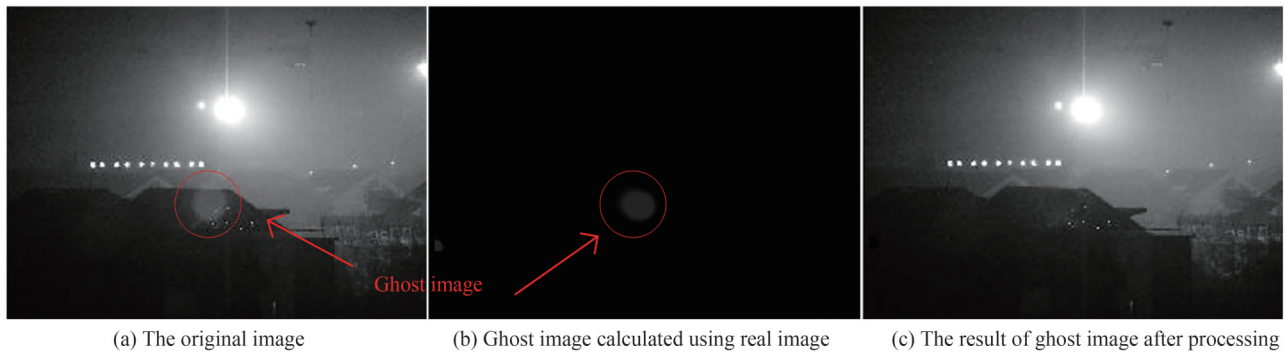


图 43 图像法消鬼像实例^[7]

Fig. 43 An example of image method to eliminate ghost image^[7]

2.5 内部热辐射抑制方法

红外成像系统中,在一定温度下内部元件会产生热辐射,使红外探测器响应从而影响目标信号的探测。在使用遮光罩以及光阑组合进行抑制外部杂散光时,虽然也会减弱外部环境带来的温度变化对内部元件的影响,但是在红外光学系统中,仍然需要独特的内部热辐射抑制方法,包括温度控制法和温阑抑制法,在设计时往往根据实际应用需求,使用多种方法共同抑制。

2.5.1 温度控制法

温度控制法是对光学系统进行内部降温,短波波段逐步成为辐射能量中心,因此长波红外热辐射能量得到降低。温度控制法作为最有效的内部热辐射抑制方法之一,曾被多个红外探测系统所使用。欧洲宇航局于 2009 年发射的空间望远镜 Herschel^[115]如图 44 所示,通过将望远系统浸泡在液氮中,保持恒温 85 K 左右,可以在长波红外甚至 55~671 μm 波段进行有效探测。此外,南极多波段红外相机 (Antarctic Multiband Infrared Camera, AMICA)^[116]也采用了该方法,将整个光学系统、滤光轮和红外探测器放置于特制的 35 K 低温杜瓦瓶内,中波红外阵列相机直接与二级制冷机相连,并与光路进行隔热处理,制冷温度可达 7 K。

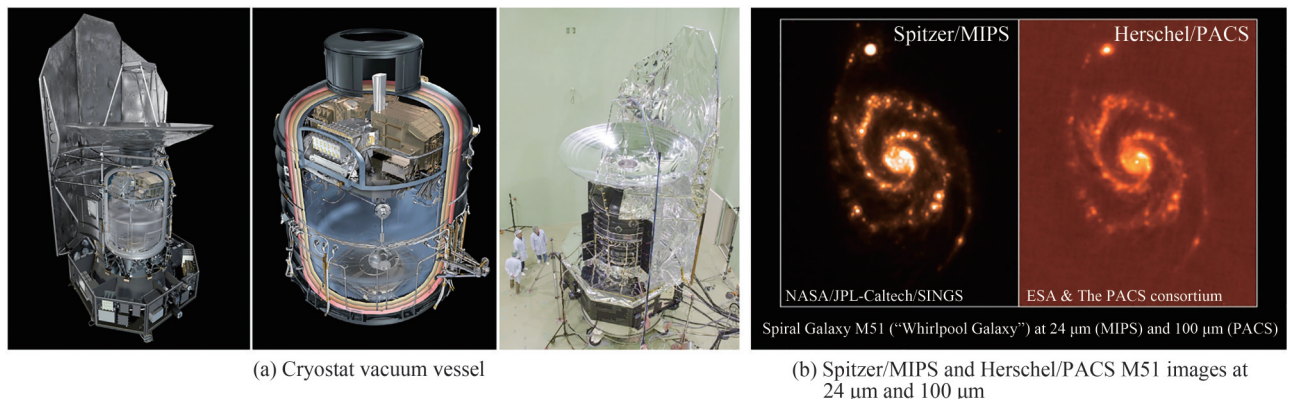


图 44 温度控制法实例^[115]

Fig. 44 An example of temperature control method^[115]

图 45 是中科院云南天文台研制的 1 m 新真空太阳望远镜 (New Vacuum Solar Telescope, NVST)^[117],主要用于太阳观测。太阳照射会让地面温度剧烈升高,不同地物的反射率不同,地面和大气的感热交换引起近地大气温度梯度,严重影响望远镜成像质量。水的比热非常大,且有很高的传导能力,获得的太阳辐射能

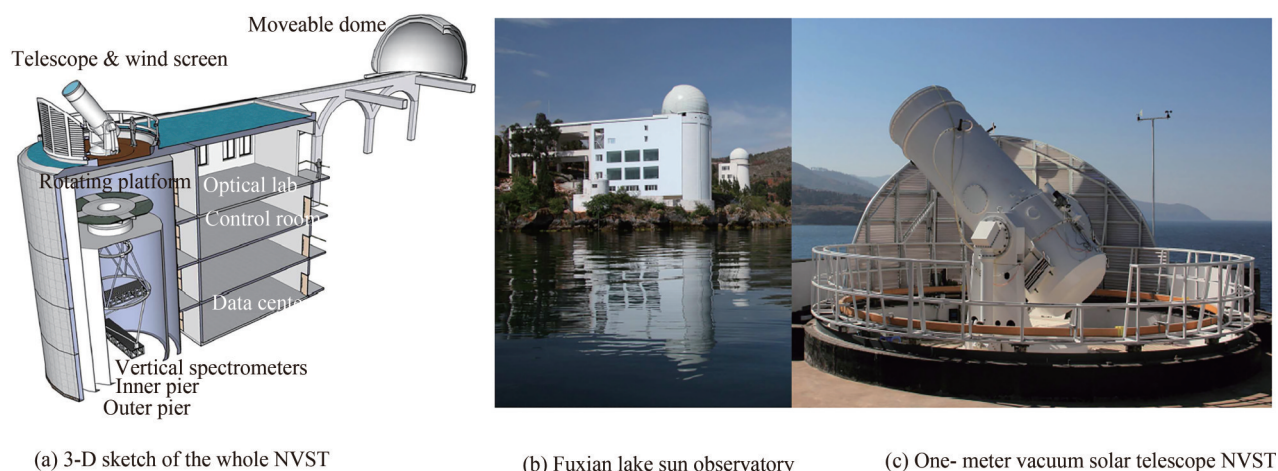


图 45 1 m 新真空太阳望远镜 NVST^[117]
Fig. 45 One-meter vacuum solar telescope NVST^[117]

很快地向下层传导。另外水的蒸发强烈,蒸发过程中消耗了很多热量使水温升不高,也减少了空气的感热交换,使得相同热量照射到水面与照射到地面的情况下水面的升温会慢很多。因此在有大面积水的区域,白天的气流一般都很稳定,望远镜受到的干扰就小。另外抚仙湖观测站为了降低望远镜及建筑物本身吸收太阳热量引起对大气的辐射影响,将观测站附近所有暴露物品都涂成对太阳反射率较高的白色,楼顶平台也最大限度灌满了水,与湖水形成循环,时刻带走太阳照在建筑物上的热量,从而把太阳对大气的热辐射影响降到最小。

此外,黄善杰等^[115]通过对 1 m 口径红外太阳望远镜视场光阑、密封窗口和 CCD 探测器等关键部位进行局部制冷,在保证望远镜系统观测精度的同时有效抑制了系统内部辐射,可以根据应用需求进行温度调整,减小对杜瓦体积、成本、探测器工作温度的限制与约束。

2.5.2 温阑控制法

温阑控制法即采用温阑和冷光阑相匹配的方法抑制红外系统内部杂光。冷光阑可以抑制背景辐射,并且冷光阑通常与前面光学系统出瞳及大小相重合,即冷光阑效率为 100%,此时进入主光路的杂散光将被冷光阑遮拦,从而有效抑制了系统的杂散辐射。成像光束通过温阑反射凹面中心孔,聚焦到像面上。凹面把冷光阑的孔径成像于冷光阑的孔径平面上,即温阑-冷光阑匹配。这种匹配可以显著减少背景噪声,改善像面的均匀性。

2.5.3 杂光综合抑制

在实际应用中,往往会结合多种抑制方法以达到最佳杂光抑制效果。英国宇航技术中心(UK Astronomy Technology Centre, UKATC)所设计的可见光和近红外巡天望远镜(Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy, VISTA)^[22]所搭载的红外相机(VISTA IR Camera, VIRCAM)如图 46 所示,采用 Ritchey-Chretien 结构,由于视场范围较大,取消了传统的冷光阑结构,对挡光环结构及特殊光学元件(成像透镜)进行降温处理,很好地抑制了系统中的内部杂散辐射。挡光环为椭圆反射式结构,表面镀有特殊消杂光膜层,可有效吸收近红外波段辐射并反射中波以上的热辐射。此外,在系统次镜附近添加的环状反射光阑有效抑制了大气辉光传递到系统像面,减弱杂散光对系统的作用。

涂层法作为抑制杂散光的基础,对于内部热辐射同样有效。根据红外系统的工作波段进行涂层选择,如镀金会增加红外镜面的反射率、降低其表面吸收率和红外波段发射率。图 47 是美国在 2010 年研制的长波红外光谱仪 MAKO^[115],采用内部镀金的方法,减弱了系统内部散射。

对于红外光学设备,必须考虑冷反射(Narcissus)。红外探测器比它周围的环境温度低,它的辐射有可能通过光学系统中的某些面反射回来又落在探测器上,从而形成探测器自身的冷像,在像面的中心出现冷反射的黑斑鬼像。

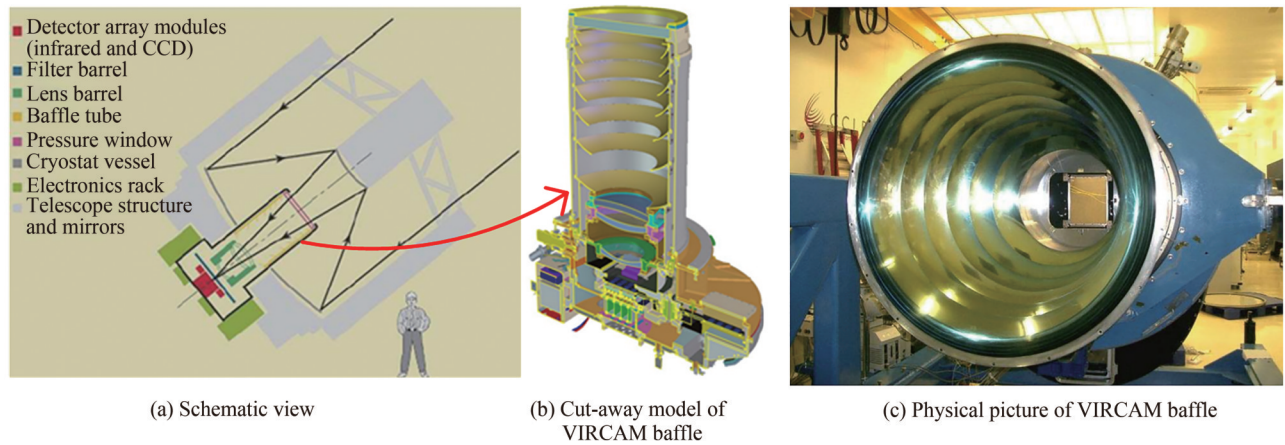


图46 VIRCAM 红外相机综合抑制热辐射^[22]
Fig. 46 Comprehensive thermal suppression in VIRCAM^[22]

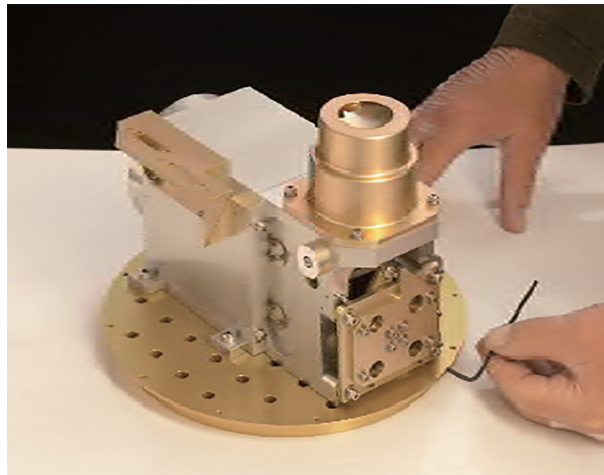


图47 MAKO 光谱仪镀金实物图^[115]
Fig. 47 Gold plating of MAKO spectrometer^[115]

冷反射也有两种抑制方法,一种为结构法,另一种是补偿法,即非均匀性校正法。与结构法消除鬼像类似,结构法抑制冷反射,同样需要先分析出产生严重冷反射的光学表面,调整该表面的曲率半径直至冷反射像无法会聚于像面,如把光学系统前面的平板窗口倾斜放置。鬼像与冷反射的区别在于来源不同,前者来源为强光源,后者来源为冷屏。强光源(或者目标)随光学系统拍摄时,逐渐发生变化,冷屏则保持不变,因此可使用变密度盘法补偿^[7]。此外,变密度盘可校正因渐晕或者镀膜不均匀造成的像面照度不均匀现象。

2.6 其他杂散光抑制方法

2.6.1 滤波法

滤波法分为空域滤波法和带通滤波法。空域滤波法是利用探测器灵敏度相对较强的谱段,规避杂光谱段。带通滤波法是在系统前加一个窄带滤光片,滤除工作谱段外其余杂光。美国 NASA 于 1998 年发射的太阳探测器(Transition Region and Coronal Explorer, TRACE)单载荷卫星^[118-119],采用了带通滤波法抑制杂散光,如图 48 所示,系统前端安装四象限滤光片以阻止非成像波长的辐射进入系统,其中三个扇形滤光片透过 17.1 nm、19.5 nm、28.4 nm 太阳特征谱段波长,一个圆形滤光片是针对 121.6 nm、150 nm 特征波长,一对滤光轮安装在主镜后面,以进一步滤光并在紫外通道中提供波长选择。每个滤光轮位置处各自配备了一个铝薄膜滤光片,以防入口滤光片出现针孔或在其他形式的故障时提供进一步的杂散光的衰减。此外, NASA 在 2010 年发射的太阳动力学观测卫星(Solar Dynamics Observatory, SDO)携带的大气成像装置(Atmospheric Imaging Assembly, AIA)光学望远镜组前方同样采用窗口滤光片^[120],如图 49 所示,能够阻止

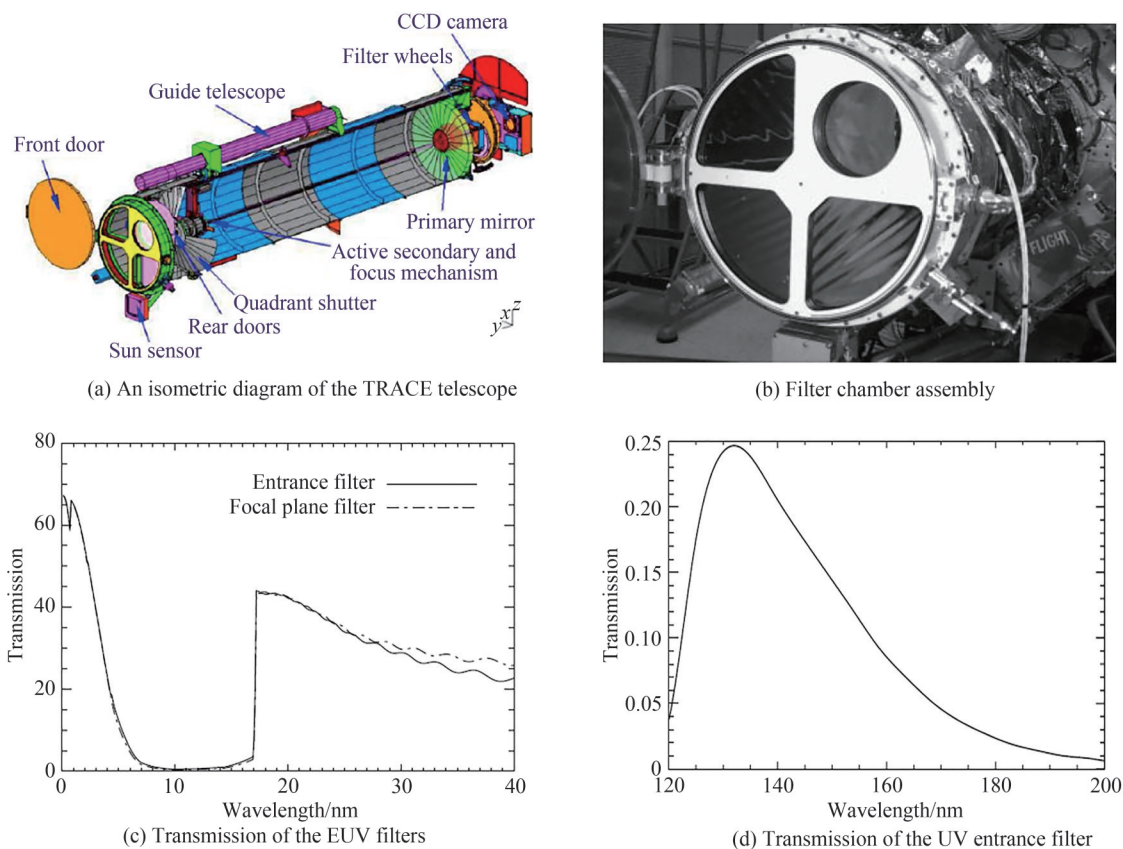


图 48 带通滤波法在 TRACE 望远镜上的应用^[118-119]
 Fig. 48 Application of bandpass filtering to suppress stray light in TRACE^[118-119]

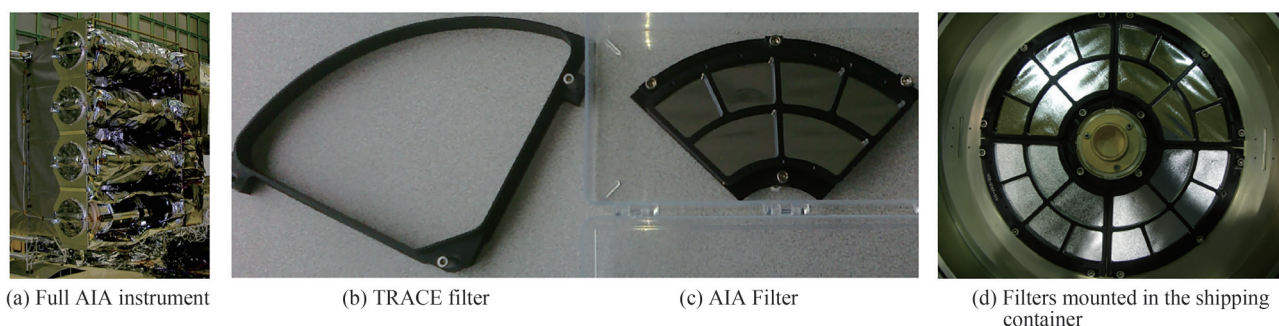


图 49 带通滤波法在 SDO-AIA 望远镜上的应用^[120]
 Fig. 49 Application of bandpass filtering to suppress stray light in SDO-AIA^[120]

来自太阳的绝大部分热辐射进入镜筒内。前端窗口滤波片、反射镜涂层以及像面滤波片的共同作用,可满足对其他谱段杂散光的抑制要求。

2.6.2 相邻帧相减法

相邻帧相减法也称为背景提取法,其原理是控制照明的开和关,同时采集图像,发光二极管(Light-Emitting Diode, LED)(或激光)不开启时采集的图像只有背景光,开启时采集的图像包括目标和背景光,两幅图像相减即可把干扰背景消除掉。2011年,张维安等^[121-122]为解决全向激光探测中太阳光闪烁产生虚假信号,干扰实际探测的问题,按照图像的特征对经过相邻帧相减后的光斑图像进行了判断和识别。该方法不依赖于探测器和图像采集设备,可以在后期处理中完成。图 50 为太阳光虚假信号的识别与排除分析图,经实验验证,该方法对虚假信号具有较好的识别和抑制效果。

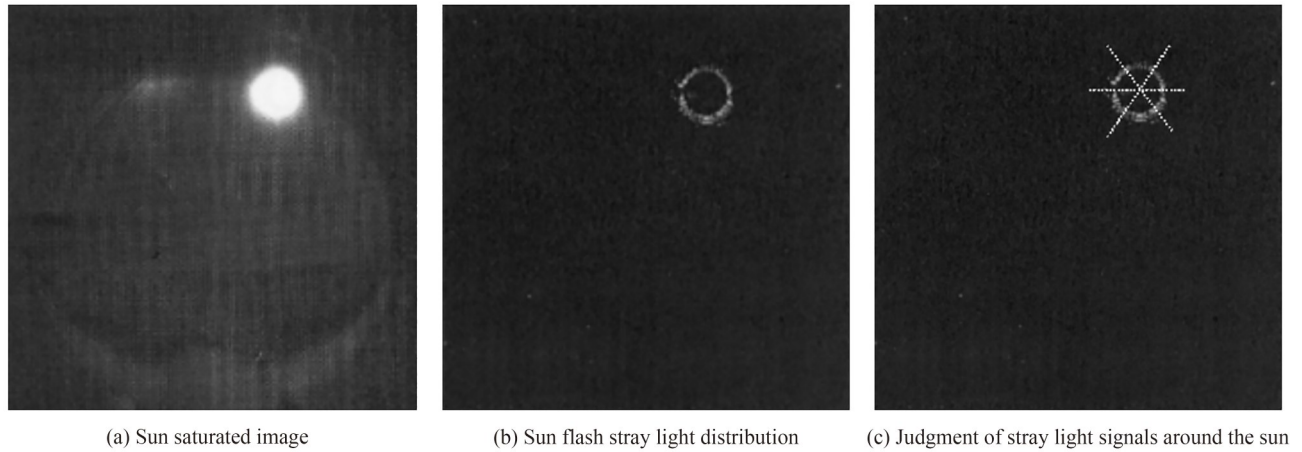


图 50 太阳光虚假信号的识别与排除^[121]
 Fig. 50 Judgment and exclusion of false signal generated by sunlight^[121]

2.6.3 偏振法

传统强度成像只能记录目标的振幅信息,难以记录目标特有的其它维度信息^[123]。偏振图像以像素点灰度值对应不同偏振信息,可以获取强度图像不具备的特有信息,可对强度成像技术进行补充和完善,应用广泛。图 51(a)为常规的强度图像,玻璃表面和水面的反射导致难以观察玻璃后和水下场景,图像模糊,而叶片反射光甚至造成了图像发白,颜色失真。在图 51(b)的偏振图像中,对表面强度炫光进行了消除,图像清晰度更佳。

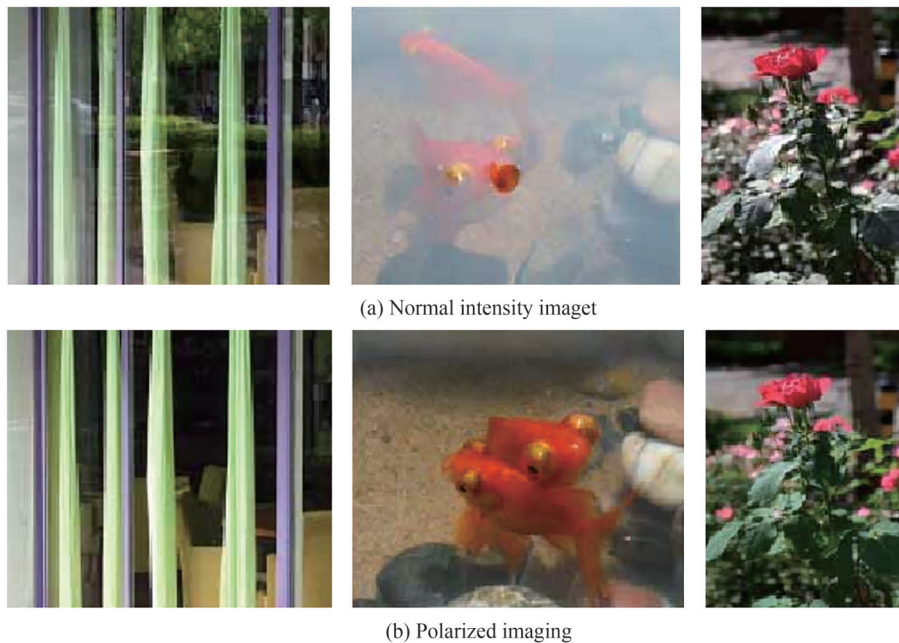


图 51 偏振光学成像消除炫光^[123]
 Fig. 51 Polarized optical imaging eliminates glare^[123]

偏振成像凭借在散射介质中清晰成像的优势,在雾霾成像和不透明水体成像中应用广泛。在 2001 年,哥伦比亚大学的 SCHECHNER Y Y 等^[123]基于对雾霾大气下目标成像研究,提出了以偏振技术为核心的去雾算法模型。通过旋转相机前方的线偏振片,获得偏振方向互为正交的两幅图像,由图像的偏振信息计算空气光强,并在原始拍摄对象中对空气光强进行剔除,在一定程度上,可以对观测目标背景杂光进行衰减和消除。后续还可以通过补偿目标反射光强,达到偏振清晰成像的目的。该理论的提出和应用,奠定了偏振法在背景去噪技术中的重要地位,推动了偏振成像技术的快速发展。图 52 是偏振成像技术在图像去雾中的应用,其中图 52(a)、(b)为偏振方向互为正交的原始拍摄图像,图 52(c)为后期经偏振去雾算法处理后的清晰图像。

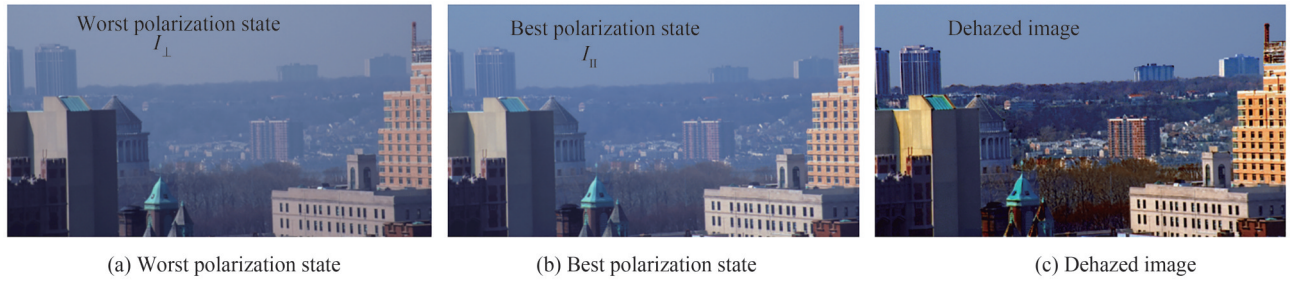


图 52 偏振光学即时去雾效果^[123]
Fig. 52 Instant dehazing of images using polarization^[123]

浑浊水体成像的物理模型,与大气雾霾下的光学成像很相似,均为介质中的颗粒物对成像光线的吸收和散射造成了观测图像的模糊和退化^[124]。但由于浑浊水体对光线的衰减作用更强,导致环境光照度变弱,所以一般需要采用主动成像。以主动光照明作为水下成像的探测方式,水中颗粒物会与光源相互作用,造成较强的后向散射光,直接影响到图像的观测。天津大学胡浩丰课题组^[125]为了抑制后向散射光对图像的干扰,以偏振为基础,采用圆偏振光主动照明,提升了观测图像的清晰度,实验结果如图 53 所示。

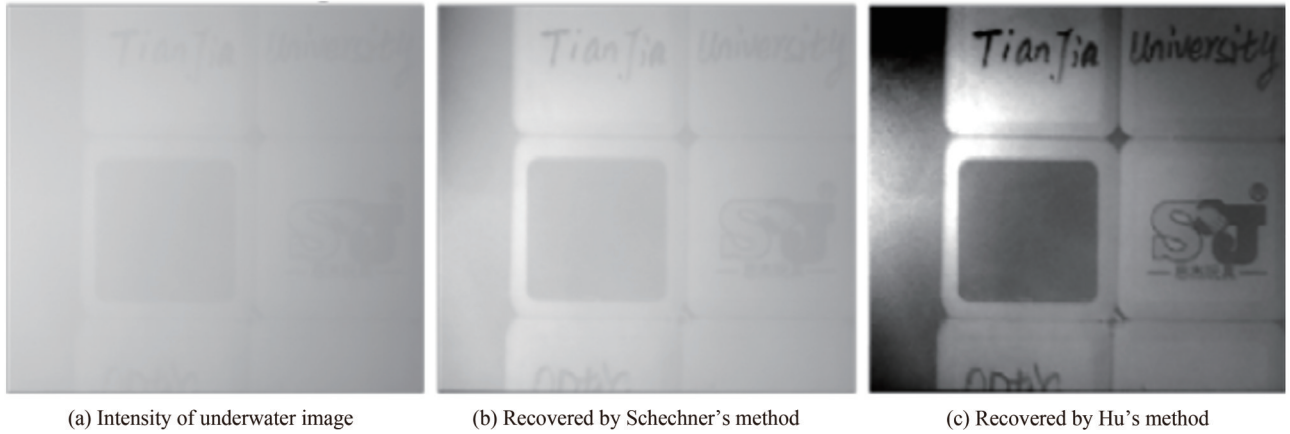


图 53 圆偏振光在浑浊介质偏振成像恢复中的应用^[125]
Fig. 53 Application of circularly polarized light in the restoration of polarized imaging in turbid media^[125]

此外,刘飞等^[124,126]也曾对自然照明下的图像进行了偏振复原研究,充分考虑了水体的吸收和散射效应。该模型不仅解决了后向散射导致的图像对比度降低问题,在一定程度上减弱了水体吸收所引起的图像色彩畸变。图 54 为实验结果分析图。

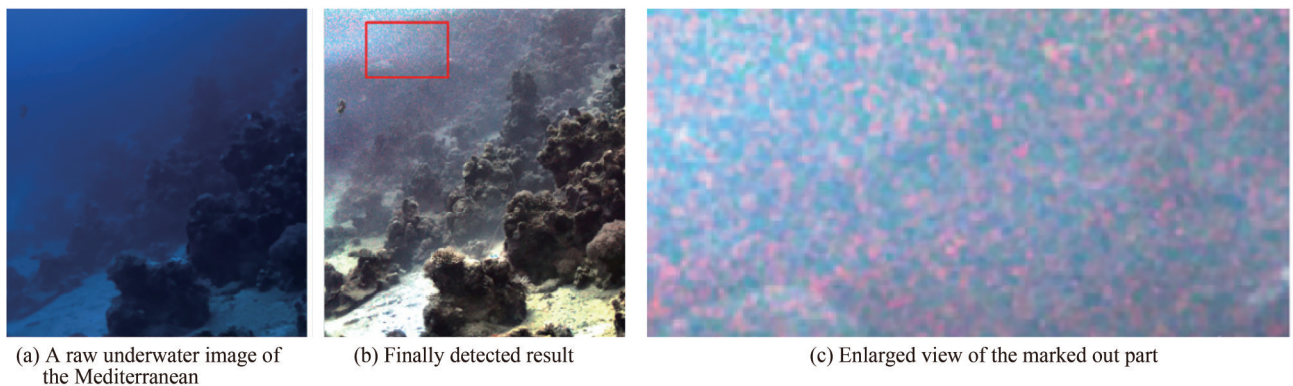


图 54 自然光照下的清晰介质偏振成像^[126]
Fig. 54 Polarization-based imaging for clear underwater vision in natural illumination^[126]

随着对水下成像研究的深入,前向散射对图像的影响同样不可忽略。西安电子科技大学邵晓鹏团队^[124,127]以刃边法为基础,对前向散射造成的图像退化函数进行了合理估计,实验结果较好,如图 55 所示。该模型一般用于低浓度浑浊水体中,提升了图像对比度,图像细节较为清晰,实现了水下“看得清”的目的。

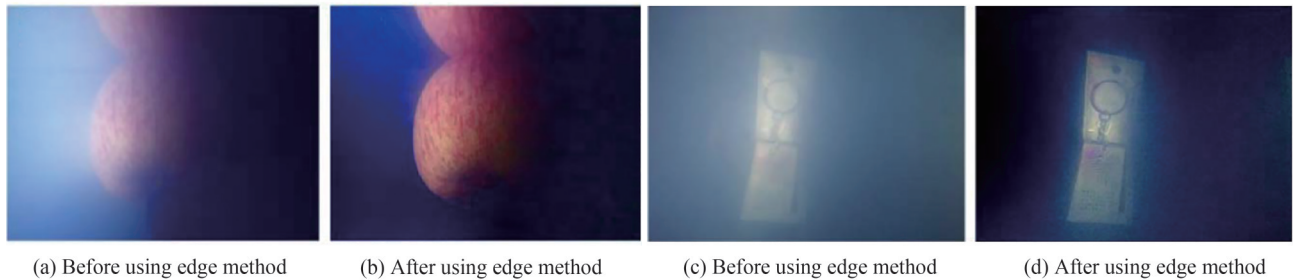


图 55 刃边法使用前后图像对比^[127]

Fig. 55 Image comparison before and after using the edge method^[127]

2.6.4 数值孔径法

当光线从折射率较高的光纤纤芯进入较低折射率光纤包层时,若入射角超过某一临界角(光线远离法线)时,折射光线将会消失不见,所有的入射光线将沿光纤纤芯反射而不会进入光纤包层,如图 56(a)、(b),这是由于入射光线在光纤纤芯和包层的交界面产生全反射。

基于光纤全反射对光线选择的原理,王虎等^[128]提出了针对不同视场设置不同数值孔径的光纤组合,如图 56(c)所示,只允许特定视场成像光线通过,达到对视场外杂散光的抑制作用。为实现宽视场上均匀有效的耦合,可以采用多模光纤弯曲,最终在传统焦平面获得相应图像。由于光导纤维反射时没有光线的损失,因此该方法能够提高探测系统的信噪比,为杂散光的抑制开辟了新方向。

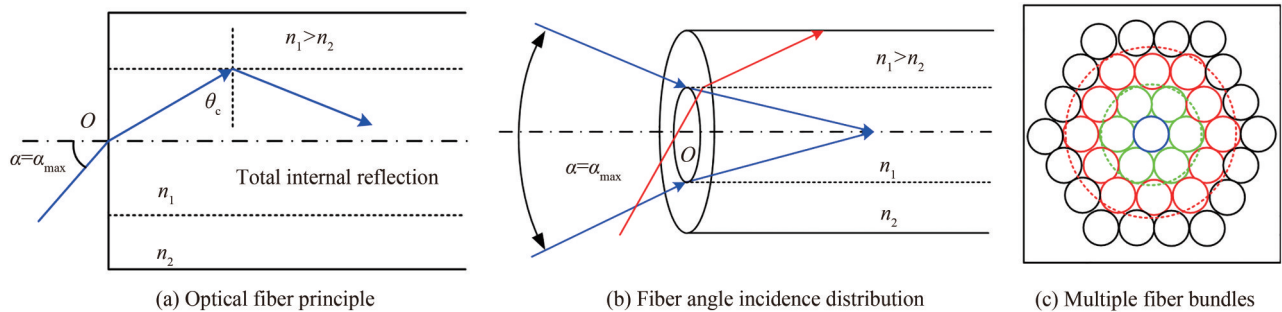


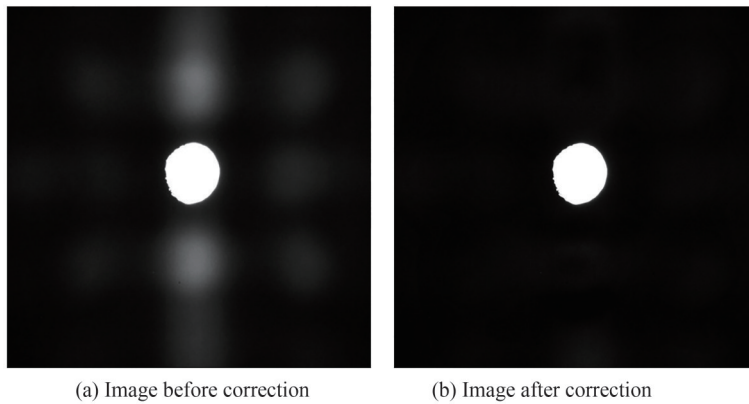
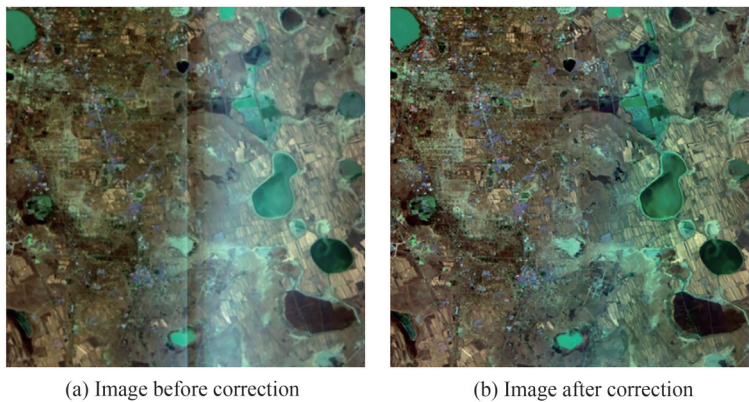
图 56 数值孔径法抑制杂散光

Fig. 56 Numerical aperture method to suppress stray light

2.6.5 图像校正法

光机系统在完成优化设计、加入杂散光抑制措施后,若杂散光的作用仍然明显或需进一步提升探测信噪比,还可以通过后期图像处理校正杂光。杂散光的图像校正主要分为图像复原法和矩阵法^[129]。

图像复原法是以反卷积的方式,将质量较低的缺陷图像进行复原和恢复^[11]。该方法主要依据光学系统的特点和杂散光的成因分析图像退化过程,建立相应的图像降质类型,从而估算系统的点扩散函数,最后采用相应算法对图像复原。IWASAKI A 等^[129]建立了包含特征参量的杂散光分布函数,并利用 Van-Cittert 迭代算法对杂光进行了校正。BITLIS B 等^[130]提出了移变分析参数模型,通过实测随空间变化的不同视场点扩散函数,使用非线性优化计算了模型中的未知参数,如图 57 所示。随空间变化的点扩散函数增大了图像复原的计算量,但是校正后图像饱满,细节清晰,对比度更高。KOVACS G 等^[131]通过在轨测量点扩散函数,运用反卷积的方法对小行星 Vesta 图像进行了校正,如图 58 所示。原育凯等^[129]在光机建模的基础上,获得 FY-2 气象卫星扫描辐射计图像退化模型,采用逆滤波算法实现校正。严明等^[132-134]使用分块自适应算法对杂散光进行处理,前提是要测量杂光在图像上的空间分布,建立特征模型函数。图 59 为采用分块算法的 SJ-9A 遥感图像。

图 57 非线性优化算法在图像上的应用^[130]Fig. 57 Application of nonlinear optimization algorithm in image correction^[130]图 58 反卷积法在小行星 Vesta 图像上的应用^[131]Fig. 58 Application of deconvolution algorithm in image correction of asteroid Vesta^[131]图 59 分块自适应算法在“实践九号”卫星多光谱图像上应用^[132-134]Fig. 59 Application of sub-image adaptive algorithms in multispectral image correction of SJ-9A^[132-134]

矩阵法以仪器在不同像元下的杂散光分布矩阵为基础,通过矩阵运算完成对杂散光的校正。该方法最早由 ZONG Yuqin^[135]提出,如图 60 所示。国外多数的成像仪器都采用该方法来抑制仪器内部杂散光。张军强等^[129]使用单色仪测量了不同波长位置处的杂散光影响矩阵,实现了对杂散光的校正。尚杨等^[129]对成像光谱仪的点扩散函数进行了测量,将光谱仪假设为线性波长不变系统,即单色光形状与波长无关,只在位置进行平移的前提下,构建光谱函数矩阵,确定波长权重影响因子,使用带宽矩阵校正带宽,从而减弱和消除仪器测量中存在的杂散光误差。

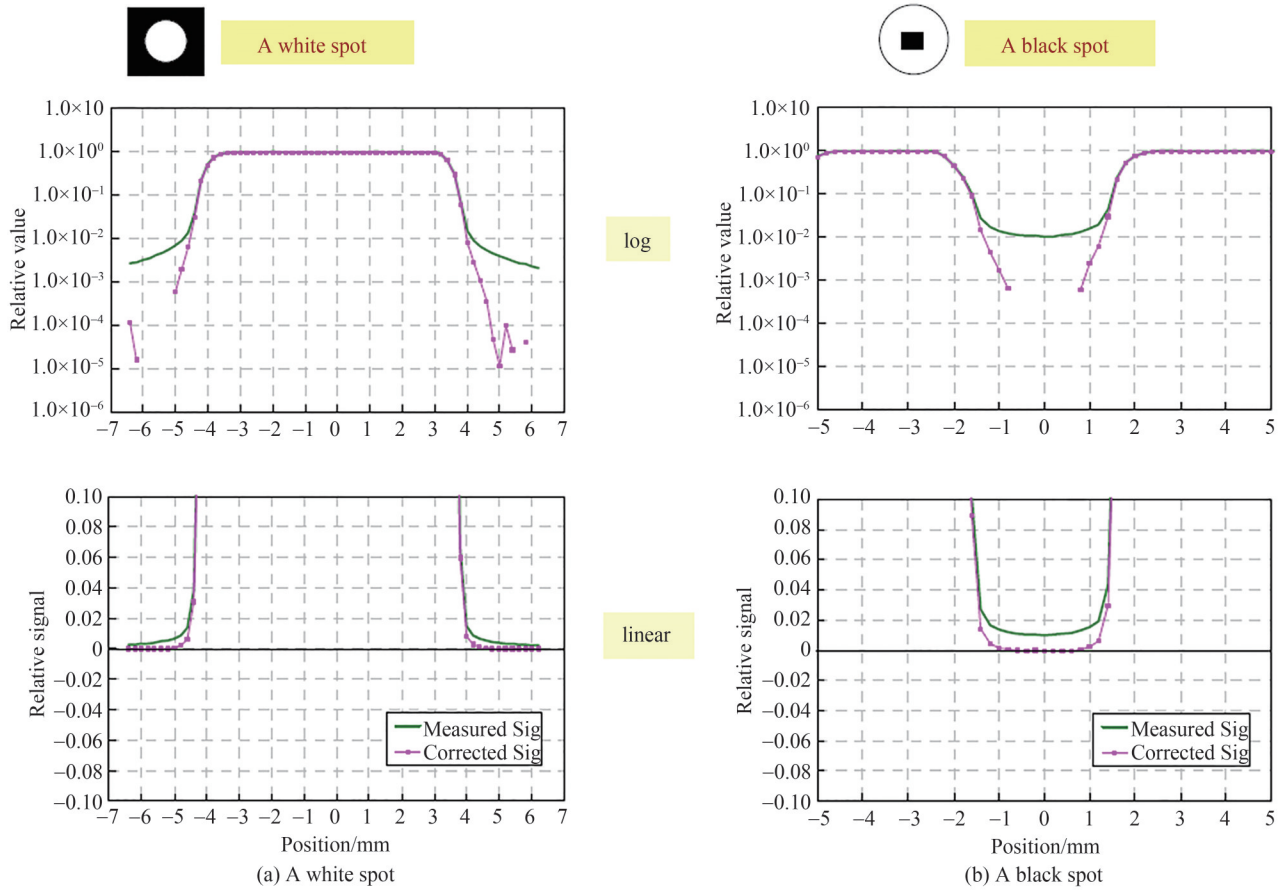


图60 矩阵法对杂散光的校正^[135]
Fig. 60 Correction of stray light by matrix method^[135]

3 抑制模型表面特性测量与建模

杂散光分析的准确性与几何结构模型以及表面散射模型的准确性紧密相关。几何模型的建立可以在软件 SolidWorks、AutoCAD、ProE 的辅助下准确完成;杂散光在光机系统内部进行散射和传播,因此,对相关表面的散射特性研究是杂光仿真中的关键环节。

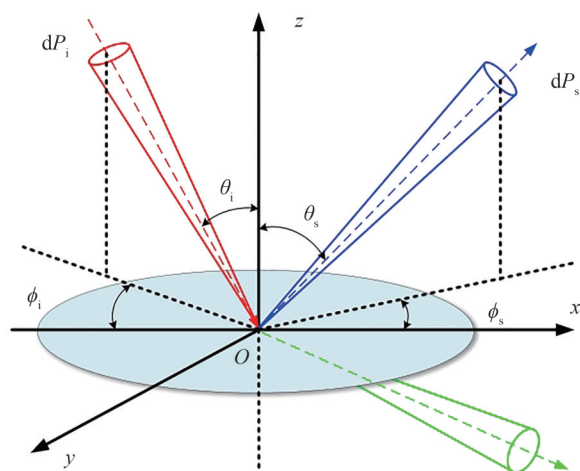
3.1 双向反射分布函数

光学系统一般由不同材料和属性的各种表面构成,不同材料和不同属性的表面,其反射、散射、吸收等特性不同,因此对系统表面特性进行研究,是进行杂散光分析的基础。双向反射分布函数(BRDF)是研究物体表面散射属性的主要工具,由 NICODEMUS F E^[26,136-137]在 1970 年首次提出,使用几何方法表征表面的散射特性,定义为反射(散射)辐亮度与入射辐照度的比值,即

$$BRDF = f(\theta_i, \phi_i; \theta_s, \phi_s) = \frac{dL(\theta_i, \phi_i; \theta_s, \phi_s)}{dE(\theta_i, \phi_i)} \cong \frac{dP_s/d\Omega_s}{P_i \cos\theta_s} \quad (5)$$

式中, θ_i 和 ϕ_i 分别是入射光线在球坐标系中的天顶角和方位角, θ_s 和 ϕ_s 分别是散射光线在球坐标系中的天顶角和方位角, dL 是散射表面微分辐亮度, dE 是微分入射辐照度, dP_s 是散射在立体角 $d\Omega_s$ 内的辐射功率, P_i 是入射辐射功率,如图 61 所示。

BRDF 除了与入射角、散射角有关外,也是入射波长、入射光、散射光偏振态的函数。BRDF 的定义可以扩展到透射元件的双向透射分布函数 BTDF,且 BRDF 和 BTDF 之和构成一般双向散射分布函数 BSDF。

图 61 BSDF、BRDF 和 BTDF 的定义^[26,136-137]Fig. 61 Geometry for the definition of BRDF, BTDF and BSDF^[26,136-137]

3.2 BRDF 设备与测量

实验测量的优点是比较直观准确,可以对一些复杂或未知材料的表面散射情况进行测量,然后在实测数据基础上进行建模与解析计算。鉴于表面散射在杂散光分析中的关键作用,国外对 BRDF 的测量研究起步很早,很多研究机构都竭尽全力来研究自己特有的测量仪器。

1977年,美国 Hughes Aircraft 公司^[138]就已自主研发并制造出了透明材料的 BRDF 散射测量仪。它采用四种波长的激光(0.6328、1.06、3.29、10.6 μm)作为光源,测量了 20 种红外材料前向和后向 $0.5^\circ \sim 70^\circ$ 范围的散射情况。1993年,美国 TMA Technologies Inc^[139-140]为 NASA 研制了高精度真角散射坐标系(True Angle Scatter Coordinate system, TASC)全自动散射仪,放置于万级层流洁净室中使用,以防空气微粒和灰尘污染对测试结果造成影响。其测试光源为高强度氙灯,测试波长为 $0.23 \sim 0.9 \mu\text{m}$,覆盖近紫外到近红外,光源可更换,测量范围覆盖几乎整个半球,曾用于 NASA 对约翰逊航天中心(Johnson Space Center, JSC) Mars-1 的测试。德国 Fraunhofer 研究所^[141-142]设计了一套全自动角度分辨光散射仪(Angle Resolved Light Scatter, ARS),可用于任意电介质、金属或半导体材料,测试动态范围从 $10^{-6} \sim 10^5 \text{ sr}^{-1}$,对均方根粗糙度优于 1 nm 的表面很灵敏。目前,国外已开发多种商用 BRDF 测量设备^[139-144],并提供测试服务,设备参数如表 3、实物装置如图 62 所示。

国内对 BRDF 的测量研究虽然始于 20 世纪末,但是发展迅速。中科院光电所、长春光机所、上海光机所、安徽光机所、西安电子科技大学、哈尔滨工业大学等单位^[145-148]都搭建了 BRDF 测量装置,测量波长范围涵盖紫外到红外,可以测量样片的标量和极化 BRDF,由于只能获得有限条件下的 BRDF,因此有必要结合(半)经验模型,利用有限条件下的实验数据,通过算法优化模型参数,完成样片统计建模。由于大部分装置为实验室搭建,所以未见后续应用与报道。此外,测试数据比较分散,没有形成统一的材料散射数据库,且难以从他方得到特定材料 BRDF 数据。

综合分析国内外 BRDF 测量装置,其主要组成部分如图 63 所示。目前,BRDF 的测量分为绝对测量法和相对测量法^[149-150]。绝对测量法是直接按照 BRDF 的定义,分别测量入射光和反射光对应的电压值,不使用任何参考标准直接将电压值转换,得到的测量结果。但是 BRDF 测量装置一般转动结构较为复杂,系统本身误差和实验产生的随机误差都会对测量结果造成干扰,导致测量结果不准确。相对测量法通常使用标准件(如聚四氟乙烯标准白板等)的测量值来对测量设备进行校正,然后进行目标样品的测量,最后使用标准件测量值修正样品测量值。

虽然目前国内外的 BRDF 测试系统种类繁多,功能强大,但仍存在以下问题:

1) 抗干扰能力弱,测试易受光源和探测器的不稳定性、温度变化等因素影响。

2) 迄今为止,测试装置均为单波长测试或者离散多波长叠加的多光谱测试,尚未见到有连续光谱的测试系统,现有测试装备可能会丢失很多光谱信息。

表3 主要商用BRDF测试设备^[139,143]
 Table 3 The main commercial BRDF measurement devices^[139,143]

Company	Scatterometer type	Performance
Surface Optics Corporation	SOC-200 BDR	Wavelength: 0.30~10.6 μm
		Incident angles: 0°~80°
Light Tec	REFLET 180S	Scattering angles: -85°~+85°
		Azimuth angles: 0°~360°
		Wavelength: 0.40~1.80 μm
		Incident angles: 0°~180°
The Scatter Works Inc	TSW CASI	Scattering angles: -90°~+90°
		Azimuth angles: -90°~+90°
		Angular resolution: 0.01°
		Wavelength: 0.325~10.6 μm
		Incident angles: 0°~85°
TMA Technologies. Inc	TMA TASC	Scattering angles: 0°~360°
		Angular resolution: 0.001°
		Linear resolution: 0.01 mm
		Wavelength: 0.633 μm , 0.850 μm , 1.55 μm , 3.39 μm , 10.6 μm
		Incident angles: 0°~135°
		Azimuth angles: 0°~360°
Fraunhofer Institute	ALBATROSS	Test accuracy: 1%
		Dynamic range: 10 ¹²
		Wavelength: 0.325~10.6 μm
		Incident angles: 0°~85°
		Scattering angles: -90°~90° (ISO5)

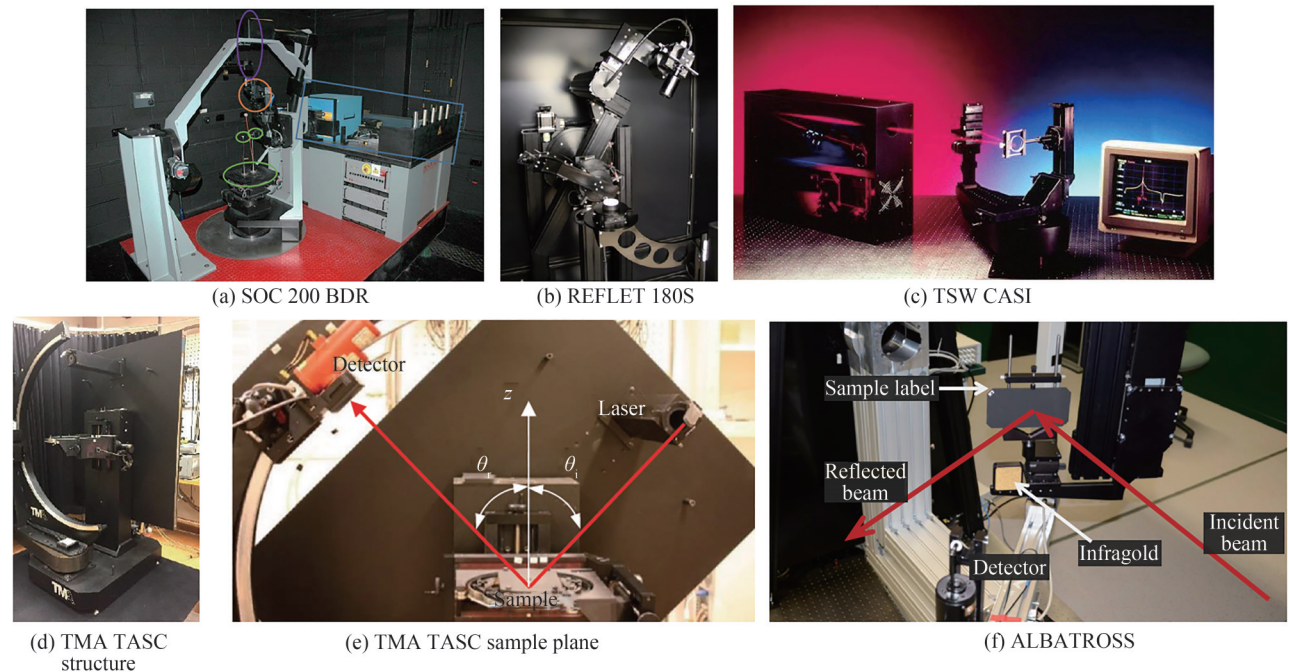


图62 散射仪实物图^[139-140]
 Fig. 62 Picture of the scatterometer^[139-140]

3) 自动化程度低,测试效率较低,测试过程繁琐。入射方向与出射方向组合工况较多,如果提高测试精度,必然带来极大的测试工作量。

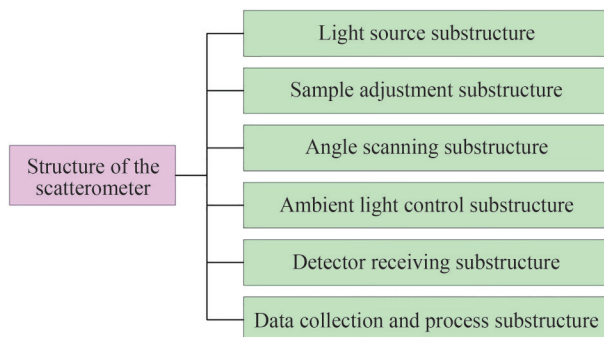


图 63 BRDF 散射仪组成结构
Fig. 63 Structure of the BRDF Scatterometer

4)测试精度问题。在近镜面反射角附近,由于探测器的遮拦,导致该部分数据缺失;大角度测试受环境污染影响较大,导致数据不准确。

因此,未来BRDF的测试会向高精度、多光谱、高效自动化、抗干扰的方向发展,大规模数据库的构建将成为必然。

3.3 BRDF 模型分析

实际测量过程中,光源和探测器的不稳定会影响测量精度,而目标表面的变化对测量也有一定的干扰。此外,BRDF是入射光、反射光方向以及入射波长的强函数。即使获取同一波长下的全部BRDF信息,在精度要求不高时,入射和出射方向也有上万种线性组合,数据量庞大,要耗费很多时间和存储空间。所以实验测量可以作为一种初步获得材料表面信息的手段,不适合后续工程上大规模推广及应用。杂散光相关领域目前多在有限的特征BRDF测量数据上建模计算,用以弥补实验测量不能得到任意入射和观测方向上的不足。

根据基础理论的不同,将散射模型分理论模型^[151]和工程统计模型两类,其中工程统计模型又分为几何光学模型和经验/半经验模型。理论模型以电磁场散射理论为基础,利用边界条件限制,通过解方程获得解析模型^[152-155],如Harvey-Shack散射模型、Rayleigh-Rice矢量微扰模型、Beckmann-Kirchhoff理论模型。HARVEY J E^[156]在进行大量散射实验后发现,散射光强随散射角的变化曲线并不规律和对称。而将散射光强除以散射角余弦,并绘制随散射角正弦与镜面反射方向正弦的差的变化曲线后发现,这些曲线又可以相互重合。基于对大量实验结果的统计分析,得出“在方向余弦空间,散射辐照度是位移不变的”结论。HARVEY J E和SHACK R V后续又推导了表面散射现象的线性系统理论。Harvey-Shack散射模型表达式为

$$\text{BRDF}(|\sin\theta_s - \sin\theta_i|) = b_0 \left[1 + \left(\frac{|\sin\theta_s - \sin\theta_i|}{l} \right)^2 \right]^{s/2} \quad (6)$$

式中,参数 b_0 、 l 及 s 可由实测数据拟合计算获取。该模型经过参数变换,可以转化为杂散光分析软件自带的ABg模型^[9],表达式为

$$\text{BRDF} = \frac{A}{B + |\sin\theta_s - \sin\theta_i|^g} \quad (7)$$

Rayleigh-Rice矢量微扰模型^[157]表达式为

$$\text{BRDF} = \frac{dP/d\Omega_s}{P_i \cos\theta_s} = \left(\frac{16\pi^2}{\lambda^4} \right) \cos\theta_i \cos\theta_s \mathbf{Q} \cdot \text{PSD}(f_x, f_y)_{2-D} \quad (8)$$

式中, \mathbf{Q} 是表面偏振因子,与入射角、散射角、入射光束、散射光束的偏振态有关,功率谱密度函数(Power Spectral Density, PSD)与 x 、 y 方向的频率 f_x 、 f_y 有关。理论模型的坚实理论基础使其在适用范围内一般与实际测量保持一致,但在应用方面存在制约条件:1)散射特性相关参数(如表面相关长度、均方高度、介电常数等)不易获得,并且各参数只有在相关频段范围内有效;2)具有涂层的粗糙表面受到体散射和多重散射影响,求解过程复杂,难以得到简单、实用结论。中科院西安光机所王虎团队基于表面散射理论,推导了光滑

条件下的广义 Harvey-Shack 近似解析式,结合实际应用增加了与散射角相关的经验校正因子。通过逆向散射的方法,从有限表面测量数据中预测其他角度的散射情况。结果表明,经验修正型广义 Harvey-Shack 散射模型能够有效提高散射测验的精度,更符合光学表面的散射实际情况,可以应用在后向散射抑制要求较高的超光滑表面仪器模型上^[158]。

几何光学模型是通过对实际粗糙表面的微观几何结构进行数学统计而推出的理论公式。模型假设表面是由无数微面元组成,每个微面元都遵循菲涅尔反射定律,所以,随机粗糙表面的光散射特性是所有微面元共同光散射的统计结果。几何光学模型通常表示为镜面反射与漫反射两项的线性组合。其中,镜反射项主要受到表面的菲涅尔反射函数、遮蔽函数以及小面元的分布函数影响,漫反射项则一般认为满足朗伯散射定律。由于几何模型基于一系列假设,易受到材质物理参数测量的限制,因此仅适用于具有某种特性表面的反射情况。典型模型如 Torrance-Sparrow 模型^[159-160],可以预测非镜向峰值现象。COOK R L 对 Torrance-Sparrow 模型中面元分布函数进行了修改,得到 Cook-Torrance 模型^[161]。几何光学模型都适用于粗糙表面,即表面均方根(RMS)粗糙度远大于入射波长。

(半)经验统计模型以目标表面的物理特性为基础,结合实验测量结果,利用简单数学函数的组合拟合表面散射特性,具有直观、简单、实用性强的优点。由于该模型不以物理原理为基础,所以模型一般没有实际物理含义,通常不符合互易性、能量守恒等物理特性,典型(半)经验模型有 Lambert 模型、Minnaert 模型、Phong 模型、Ward 模型等^[143]。吴振森等^[162]在 Torrance-Sparrow 模型基础上,提出了五参数半经验模型,将微面元分布函数表示为非高斯函数形式并使用相对菲涅尔函数,可以模拟金属合金或带有涂层的样片,但形式复杂,计算量大。在此基础上,该团队又陆续提出了六参数、七参数模型^[163]。无一例外,这些模型均是在实测数据基础上,基于各类算法如遗传算法、模拟退火算法等完成 BRDF 的建模,建模结果与实际测量数据匹配良好。王虎团队基于实际表面散射情况,建立了适用于颗粒污染的 Mie 散射模型和适用于表面疵病的朗伯散射模型。 N 种不同粒径污染物^[9]所导致的 Mie 散射模型,表达式为

$$\text{BRDF}(\theta_s) = \frac{1}{(2\pi/\lambda)^2 \cos\theta_s} \sum_{i=1}^N f(D_i) \times \left[\frac{R_{I_s}(D_i, \theta_f) + R_{I_p}(D_i, \theta_f) + I_s(D_i, \theta_b) + I_p(D_i, \theta_b)}{2} \right] \quad (9)$$

式中, λ 为入射光线波长; θ_s 为相对于表面法线的散射角; $f(D_i)$ 为第*i*个直径的微粒密度; $I_s(D_i, \theta)$ 和 $I_p(D_i, \theta)$ 分别为直径 D_i 的微粒在S偏振和P偏振强度下关于散射角的函数; R 为表面反射率。

如果散射表面的 BSDF 不随入射角或散射角的变化而变化,则该表面称为朗伯型。朗伯散射体的总积分散射 TIS 与其 BSDF 关系为

$$\text{BSDF} = \text{TIS}/\pi \quad (10)$$

随着神经网络和深度学习的拓展,出现了以机器学习等方法为基础的数据驱动模型^[164-168]。该方法不仅需要大量实测数据进行训练建模,给实验测量带来挑战,数据过大也会造成计算速度过于缓慢,因此,该方法并未在杂散光分析上进行后续应用。

上述提到的模型都有着明显的优缺点,散射模型都有着明确的适用范围,仅针对某一类或某几类目标表面。对于未知及不同表面散射,可以在已有模型的基础上,进行合理选择与改进,获得符合需要的实用模型。目前,适用范围广、模拟精度高的“万能模型”并未出现,这也是众多科研人员的研究目标。

4 杂散光抑制效果仿真

计算机仿真拟合是杂散光分析的重要方法,可以解决高抑制比光学系统杂散光测试费用高昂、实验繁琐的缺陷,能够提高杂散光的分析效率。仿真模拟的结果具有重要参考意义,可指导实际光机系统的研制与生产。此外,随着技术发展,软件仿真分析的功能越来越全面,建立模型的精度也越来越高,现已成为研究杂散辐射的常用方法^[59,169-170]。

4.1 杂散光分析软件发展历程

早在 20 世纪 70 年代初,NASA 及美国军方就开始委托科研机构对杂散光分析软件进行了研究。随后,出现了 Honeywell Avionics Division 研制的 GUERAP III,亚利桑那州立大学大学研制的 Arizona's Paraxial Analysis of Radiation Transfer/Program for the Analysis of Diffracted Energy (APART/PADE) 以及 Hughes

Aircraft Company 研制的 Off-Axis Rejection Design Analysis Software(OARDAS)等代表性的早期杂光仿真软件^[7]。这些软件为美国和欧洲太空计划做出了巨大贡献,如 APART 软件曾对著名的 Hubble 望远镜进行了详细的杂散光分析,在满足杂光抑制要求后,才进行发射。在 20 世纪 80 年代中期,中科院长春光机所开发了初步鬼像计算程序 GHOST-V1.0,航天 508 所编写了星载相机遮光罩杂光分析有限元法专用程序,中科院西安光机所李英才团队曾提出一种简化杂光分析方法的数理模型^[7]。此外,北京理工大学、哈尔滨工业大学等高校^[171]也提出了杂散光的相关计算方法,但均未进行大范围推广。虽然如此,这些工作也为杂散光分析软件的国产化发展奠定了基础。

随着计算机性能的不断提升,计算机可以建立更为复杂、精确的光机系统模型,同时光线追迹的数量、速度、精确度也有了显著提升。表 4 为目前国内外常用的杂散光分析软件^[169]。这些软件都有非连续追迹的功能,可以兼容复杂的 CAD、SolidWorks 结构。ASAP 软件是对 APART 软件的升级和发展,是一套综合杂散光分析软件,具有最好的光线追迹效率。Lambda Research 公司研发的 TracePro,图形界面友好和 3 维图形功能强大。此外,Zemax、CODE V 等知名商业化光学综合设计软件,也有很强的杂散光分析功能。

表 4 各类杂散光分析软件对比^[169]Table 4 Comparison of various stray light analysis softwares^[169]

Software type	Company	Compatibility	Modeling ability	Analysis	Usage
FRED	Photon Engineering	CODE V、Zemax、OSLO	Poor	Moderate	More in abroad
ASAP	Breault Research Organization	CODE V、Zemax、SAYNOPSYSTEM、SOLIDWORKS	Poor	Best	More in abroad
LightTools	Optical Research Associates	CODE V、Zemax	Better	Better	Less
TracePro	Lambda Research Corporation	CODE V、Zemax、OSLO、SOLIDWORKS	Better	Better	More in domestic

4.2 仿真分析的计算方法

从 20 世纪 20 年代到现在,出现了多种杂散光的计算方法,主要有蒙特卡洛法、光线追迹法、区域法、近轴近似法等^[169]。

4.2.1 蒙特卡洛法

蒙特卡洛法是一种以随机变量统计试验为基础,模拟计算工程问题近似解的数值方法。杂散光在光机系统中的产生和传播具有一定的随机性,因此采用概率分布函数进行统计计算,适合采用蒙特卡洛法求解。该方法首先随机引入大量的单独光线,所有光线均通过系统进行追迹,光线与各种表面相交或在内部传播时,根据表面散射特性(BRDF),随机地散射光线,然后再继续追迹每一方向上的光线,直至满足条件,停止追迹。若要获取可靠的统计结果,需要大量的光线进行追迹。此外,使用蒙特卡洛法需要在计算前对光的入射、反射、透射、衍射、散射、吸收等现象建立模型,模型与实际的接近程度直接影响最终追迹结果。因此,该方法也对表面特性的准确模拟提出了较高要求。迄今为止,蒙特卡洛法是计算无规则杂散光唯一成熟的方法,国内外常用杂光软件 ASAP、LightTools、TracePro 及早期的 GUERAP III 都是基于蒙特卡洛法来开发的。

4.2.2 光线追迹法

与蒙特卡洛法不同,光线追迹法通常利用确定的公式计算杂散光。实现前提如下:1)多种光线追迹程序的出现,易于计算加权后光线通过系统的路径。2)随着标量衍射理论的发展,可以用孔径边缘光线来描述衍射现象。漫反射一般是通过临界表面面积的逐级确定来进行计算。在光机系统中,直接被探测器看到的表面称为一级临界表面,其余间接看到的表面为二级或二级以上临界表面。按照逐级计算临界面积、漫射系数和照度,就可以计算由漫反射产生的杂散光。使用点列图来表示经过光学系统后的光线与接收面的交点,点列图上每一点都代表着一份辐射能量。成像与非成像光束所产生的照度可以由单位接收面积加权数目点来确定,在此基础上计算杂光比。一般情况下,参与计算的点数越多,计算精度就越高。

4.2.3 区域法

区域法,也称为有限元法,是计算杂散辐射的确定性方法。该方法在辐射传热的基础上,将光机结构表面以及它们被前面或后面光学元件所成的像分解为众多面元区域。对杂散光贡献量较大面积划分得越细,计算精度则越高。辐射传热适用于计算两个面元区域间的能量传输,然后计算杂散辐射在整个系统中的能量传递。为提高计算效率,需要确定杂散辐射在系统中的传输路径,按路径计算不同离轴角的杂散光大小。早期杂光软件 APART/PADÉ 曾用该方法对多个系统进行杂散光的分析。

4.2.4 近轴近似法

近轴近似法可以计算杂散光的近似解,在光度学范围内对杂散光作定性分析。该方法尽管精度较低,但远没有其他几种方法复杂,可以对系统杂光进行粗略仿真分析指导,对设计和加工仍有一定的实用指导意义。

5 杂散光测试及评估

经过对光机系统杂散光抑制能力的准确仿真分析后,建立杂散光地面测量系统对装配完成后的整机系统进行测量,获得系统实际的杂光量级非常重要,是最终确定和验证系统真实杂散光抑制能力的关键。一般用来评价杂散光大小的指标为杂光系数和点源透过率。这两个指标采用了不同形式描述光学系统像面上的杂散光量级,在定义、测量方法、测试能力及应用范围上各有不同。

一般地,杂光系数通过传统的面源法(黑斑法)来测量系统视场内杂散光水平,点源透过率则通过点源法来测量系统的轴外视场杂散光的抑制能力。

5.1 杂光系数

国际标准 ISO9358:1994(E)^[172]和中国国家标准 GB/T 10988-2009^[1]对杂光系数(Veiling Glare Index, VGI)定义为:在均匀亮度的扩展视场中放置一个黑斑,经被测样品成像后,其中心区域上的光照度与移去黑斑放上白斑后在像面上同一处的光照度之比。VGI以百分比表示,即

$$VGI = \frac{E_B}{E} \times 100\% \quad (11)$$

式中,VGI是杂光系数, E_B 为有黑斑时的像面照度, E 为无黑斑时的像面照度。

图 64(a)为杂光系数典型装置示意图,图 64(b)和(c)为西安光机所研发的杂光系数测试仪^[173]。扩展的 2π 立体角亮视场是由设计布局的若干灯泡照明积分球内壁所构成的。黑斑目标是积分球内壁上的一个吸收腔,可以用与积分球内表面有同样反射特性的白斑置换。被测光学系统放置在和黑斑相对方向的出口处。黑斑像的光照度用光电检测器(附有小孔光阑和散射器)来测量。上述检测信号与用白斑取代黑斑时所测到的检测信号之比即为杂光系数。

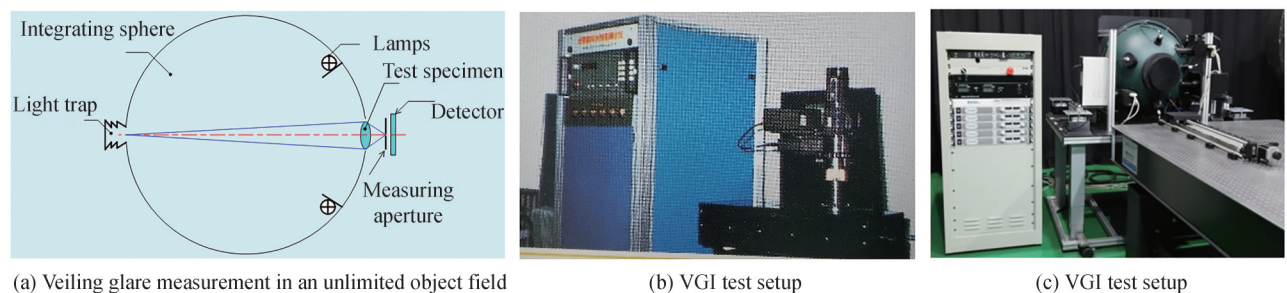


图 64 杂光系数测试系统^[1,173]
Fig. 64 Facility of the veiling glare index^[1,173]

对于物距、口径较小的系统,扩展光源可以选择积分球。对于长焦距或望远系统,可以采用两个半球法、积分球加准直仪法^[1]及西安光机所高万荣等提出的分区扩展源法^[11]来实现。长焦距、大口径系统,虽然也可以用积分球法测量,但是由于所需积分球直径较大,测量装置实现比较困难^[174]。1998年中科院长春光机所马冬梅等^[11]提出箱体扩展光源,实现杂光系数的测量,如图 65(a)所示。其积分腔由前屏箱和 4 个带有

方孔的方箱体组成,测试时可按需要位置摆放箱体,通过适当调整各屏之间距离,即可达到在 2π 立体角范围内获得均匀亮场的要求。这5个箱体内部由多个并排的灯和漫射屏构成。测试时灯照亮漫射屏,获得整个测试场内均匀的亮度。在前屏箱的亮平面上安装一圆形的黑体目标,可在屏前上、下、左、右移动,以实现轴上、轴外视场的测试。该装置占地面积较大($30\text{ m}\times 2.5\text{ m}\times 2.5\text{ m}$)。2006年西安光机所马臻等^[175]提出以计算机全息光学元件为基础的大口径杂光系数测试方法,通过将大口径平行光入射至计算机全息光学元件上,获得空心光束,使用空心光束在待测系统后焦面形成被亮光区围绕的黑斑区域图像,分别测量暗斑区和亮光区的光照度计算出杂光系数。整套系统重量轻、体积小。2013年赵建科等^[176]利用经典黑斑法测量原理,提出了一种全视场杂散光测试方法,其测试精度从原来的1%提高至0.5%,可对 $\Phi 300\text{ mm}$ 以上口径的光学系统杂散光系数进行测量。

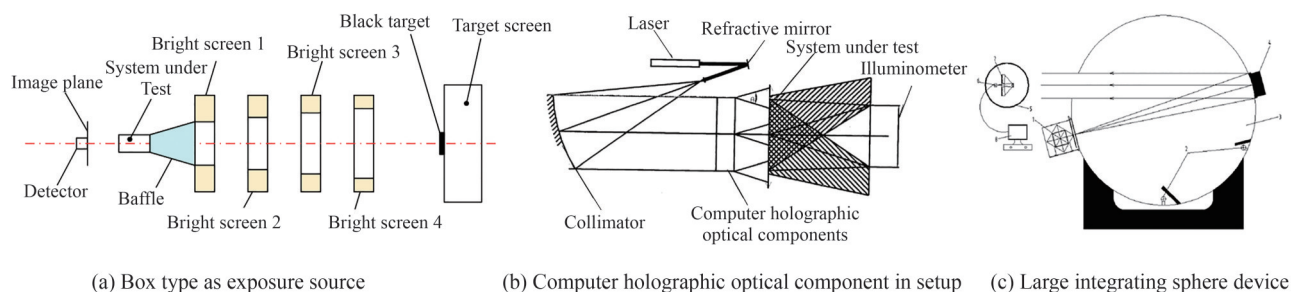


图 65 扩展光源为箱体式的测量系统^[11,175-176]

Fig. 65 The measurement which uses box type as exposure source^[11,175-176]

5.2 点源透过率

随着探测器性能的提升,空间光学系统杂光抑制水平和评价指标也逐步提高。研究人员提出了一个可测量的、可表示光机系统自身对杂光抑制水平的指标一点源透过率(PST)。PST是指视场外离轴角 θ 的点源目标辐射,经光学系统后在像面产生的辐射照度 $E_d(\theta)$ 与入口处辐照度 E_i 的比值^[9]

$$\text{PST}(\theta) = \frac{E_d(\theta)}{E_i} \quad (12)$$

点源透过率PST作为评价光机系统抑制杂光能力的重要指标,代表着系统本身对杂光的衰减能力,与光线的入射角 θ 、系统的工作波段 λ 有关,而与入射光的辐射强度无关^[12]。

点源透过率杂散光测试系统按照系统功能分为四个模块:杂光光源模拟系统、环境保障系统、待测光机系统和探测系统。测试环境杂散光,如空气散射和气溶胶散射等,是影响测试精度的主要因素。根据对环境光污染控制方案的不同,国内外公开报道并且已在工程上应用的高精度点源透过率杂散光测试系统主要分为双柱罐和真空测试腔杂散光测试系统两大类。

5.2.1 高洁净度双柱罐测试系统

第一类是高洁净度双柱罐测试系统。以大尺寸的双柱罐测试腔为基础,内壁采用黑色有机玻璃有效抑制内壁散射。测试腔内部洁净度达到百级水平(ISO5级),降低Mie散射影响,使得空气散射以Rayleigh散射占主导。如美国犹他州立大学的空间动力学实验室建立的Black Hole^[68],该系统最早建于20世纪70年代,其最初测试口径为203 mm,后经改造最终测试口径接近1 000 mm,工作波长覆盖紫外、可见和红外,点源透过率测试阈值 $\leq 10^{-9}$ 量级,该系统曾用于美国绝大部分航天相机的杂散光测试,包括Cassini Narrow Field相机、Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry(SABER)望远镜、Surface Stereo Imager(SSI)相机和Optical Navigation Camera(ONC)相机等设备,系统结构如图66所示。

美国Ball Aerospace & Technologies Corp公司^[177]在2008年也采用了Black Hole的设计方案建成的杂光测试装置,为降低光源散射引起的杂散光,在平行光管与消光腔体之间增加两级挡光屏,其测试口径为450 mm,测试波长为608 nm。根据公开报道^[178],2010年该测试设备对Operation Land Image(OLI)望远镜的杂光水平进行测试,其PST测试阈值达到 10^{-9} ,与Black Hole的测试精度相当。图67为点源透过率装置的三维图和实验室装置图,使用准直系统产生的平行光模拟杂散光的光源。

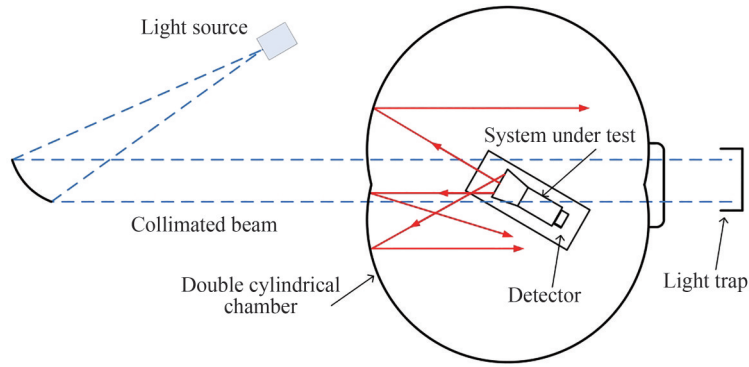
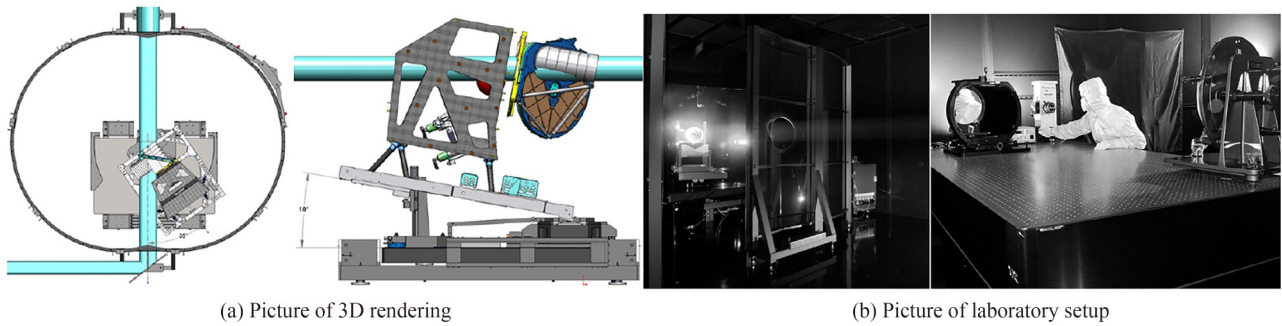


图 66 Utah State University 点源透过率杂光测试系统^[68]

Fig. 66 Point source transmittance stray light test facility of the Utah State University^[68]



(a) Picture of 3D rendering

(b) Picture of laboratory setup

图 67 BATC 公司点源透过率杂光测试装置^[177-178]

Fig. 67 Point source transmittance stray light test facility of the BATC^[177-178]

中科院西安光机所于 2008 年提出了标准星光模拟器杂散光 PST 光学检测系统,并在 2014 年建成了标准星等模拟器和杂散光测试系统,以氙灯作为照明光源,模拟太阳光谱,测试口径为 550 mm, PST 测试阈值达到 10^{-6} 。2015 年西安光机所为上海技物所研制的三波段点源透过率杂光测试系统,如图 68 所示,测试口径达到 1 m,光源采用激光光源,波段覆盖可见光、短波红外、长波红外,可见光波段 PST 测试阈值 $\leq 10^{-8}$ 量级,红外波段达到 10^{-6} 量级,整套系统规模 $30\text{ m} \times 8\text{ m} \times 9\text{ m}$,是国内目前首台规模最大、功能最全、测试精度最高的点源透过率杂光测试系统^[179],已成功应用于我国风云四号、高分等型号项目的杂光测试中。

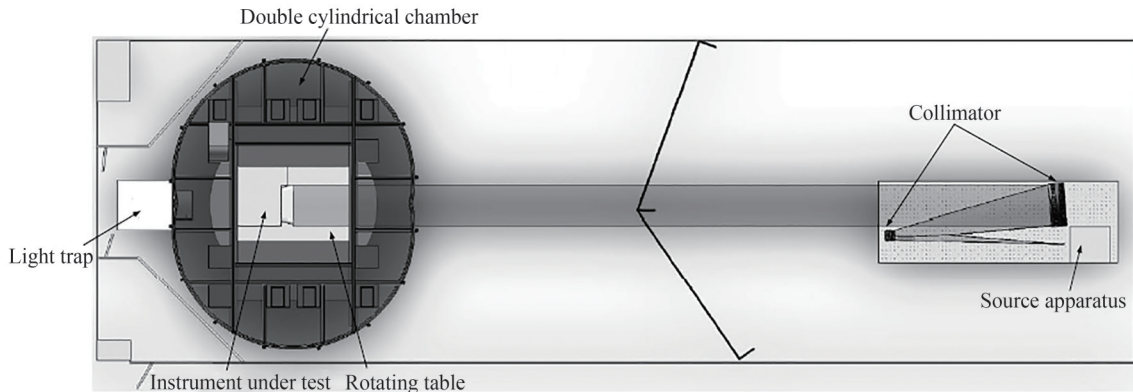


图 68 西安光机所研制的点源透过率杂光测试系统^[179]

Fig. 68 Point source transmittance stray light test station developed by XIOPM^[179]

西安光机所陈钦芳团队经过十多年杂散光抑制技术研究,已建立一体化的杂散光仿真分析与测量研究体系,先后研制完成近十套杂散光测量设备,测试波长范围从单波段扩展至连续光谱, PST 测试精度优于 10^{-9} ,已经对测试系统精度的提高和误差溯源进行了持续性升级与创新^[180-184];

1) 自主设计了一种低散射高吸收黑玻璃^[181], 如图 69(a) 所示, 可用于杂光测试系统图 69(b) 挡光屏及图 69(c) 内部测试腔中, 解决了国外测试腔亚克力板材料带来的占用空间大、不耐磨、易沾灰等问题。该玻璃以黑色浮法玻璃为基底, 表面则使用了电子玻璃, 形状相同且平行设置, 二者外边缘采用胶密封, 间距不超过 0.1 mm, 过渡层的折射率匹配液对空隙进行填充。浮法玻璃虽然具有较高吸收率, 但表面粗糙度较差, 一般高于 4 nm, 且表面疵病(划痕、麻点等)较多。电子玻璃的表面粗糙度低于 2 nm, 在 400~2 500 nm 波段的透过率为 91%~92%, 黑色浮法玻璃表面的划痕、麻点等疵病可以被过渡层的折射率匹配液较好地填充。整个测试腔用玻璃的表面散射在 10^{-5} ~ 10^{-6} 量级, 至少低于亚克力板一个数量级, 散射特性特别好, 不需要依靠增大测试腔体积来减少返回待测光机系统入瞳处的内壁杂光, 有效减小了测试腔体积。

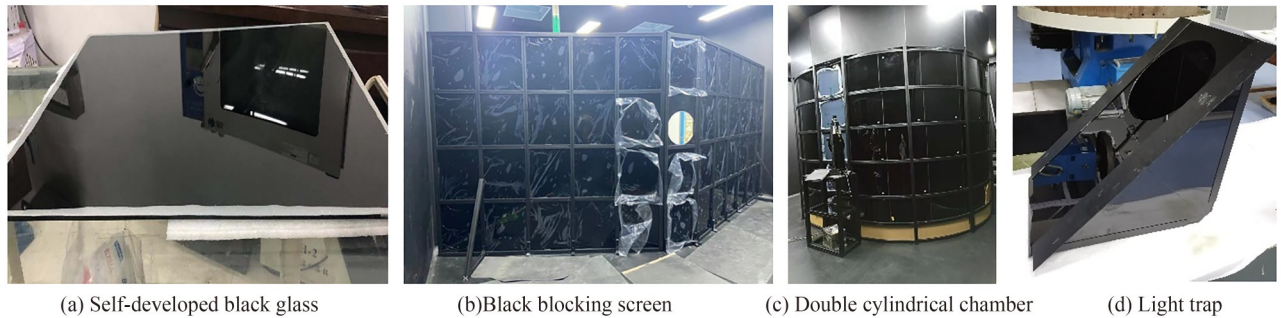


图 69 自主研发的黑玻璃及其在 PST 测试系统中的应用^[180-181]
Fig. 69 Self-developed of black glass and its application in PST test system^[180-181]

2) 自主设计了一款等腰直角三角形高抑制比黑玻璃光陷阱^[180], 如图 69(d) 所示, 解决了常规光陷阱不区分入射光线是否为平行, 难以控制光线散射路径, 无法满足高精度杂光测试需求的问题。当准平行光或平行光到达光陷阱表面时, 经第一面反射, 在可见光波段有 $<10^{-4}$ 的能量返回入射传输空间, 黑色玻璃吸收接近 96% 的光能量, 剩余 4% 左右的能量经黑玻璃表面反射 5 次后, 再返回入射光传输空间, 可使能量衰减到可以忽略的 10^{-7} 量级, 因此该光陷阱的衰减能力优于 10^{-4} , 较传统光陷阱其衰减能力提高至少 2 个量级。

3) 针对光机仪器设备实际装调需求, 提出新的杂光测试平行光管光轴与光机系统光轴对准方法^[182], 如图 70 所示, 平行光管由平面折轴镜和抛物面镜共同组成, 放置于结构框内; 结构框上分别安装了水平线激光器和竖直线激光器, 出射光经待测光机系统的 X 轴、Y 轴基准平面镜依次反射, 水平和竖直激光线与各自反射激光线的公共区域中放置了可透过性接收屏。该方法解决了现有技术中自准直瞄准结构复杂、成本高, 基准镜间接引光轴操作难度大、效率低, 待测系统聚焦判断法存在无法定量判断且只能用于单纯光学系统的技术问题。

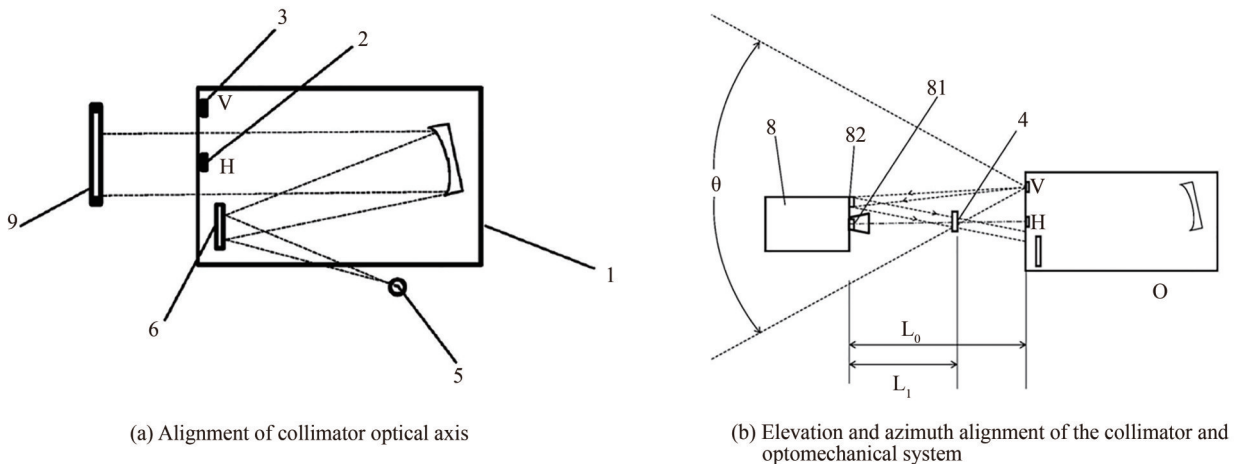


图 70 杂光测试中平行光管光轴与光机系统光轴对准装置^[182]
Fig. 70 Optical axis alignment device of collimator and optomechanical system in stray light test^[182]

4)因系统测试阈值主要受测试腔空气散射和内壁散射的影响,针对地面实验室中存在的大量空气分子及气溶胶粒子限制测试阈值的问题,提出了一种定量计算大气散射对PST测试准确度影响的全波段散射仿真模型^[183],已通过实验室点源透射率杂光测试设备试验验证了模型的准确性,如图71(a)、(b)所示。设计并验证了现有双柱罐内壁散射的测量方案并计算了内壁散射的影响,如图71(c)所示,可在实际杂光测试结果中对内壁散射所占比例进行相应消除计算。此外,还可以对具备高吸收率、低散射率特性的内部材料,如黑色亚克力板、黑色光学玻璃等进行更换,对如椭球柱、圆柱等测试腔形状进行设计,使杂散光能够在测试腔内部完成多次吸收和反射,对内壁散射进行最佳抑制。杂光测试精度的分析研究有助于后续研究中将大气散射、内壁散射的影响从测试结果中剔除,以提高杂散光的测试精度,这对于大视场杂光抑制比要求更高的系统测试具有重要意义。

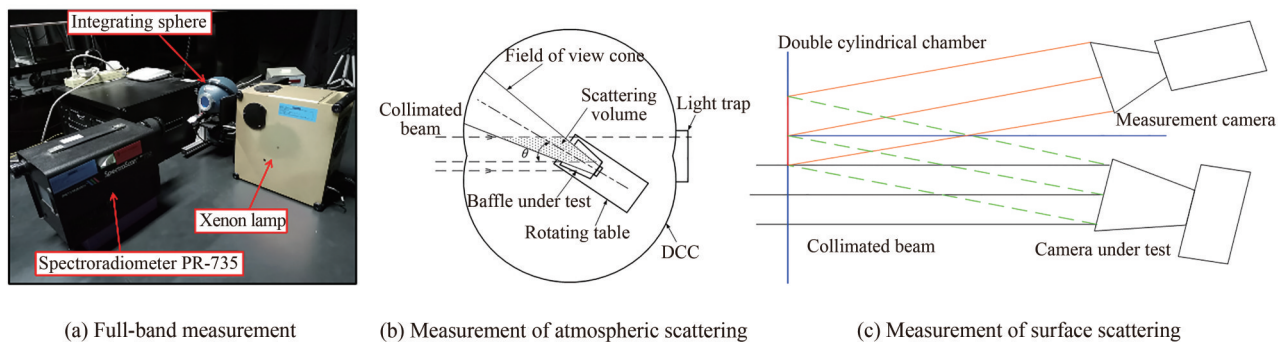


图71 点源透射率杂光测试系统精度分析^[183]
Fig. 71 Accuracy analysis of the point source transmittance test system^[183]

5)为了解决现有杂散光测试提供的信息量太少不足以准确分析及定位系统的杂散光问题,利用因环境污染导致杂光在时间上滞后于信号光的原理,提出了以时间分辨为基础的点源透射率杂散光测试系统^[184],如图72所示。光机系统内杂散光通过不同的杂散光路径,经历的光程不同,因此,在杂散光测试中增加时间维度信息,使其到达系统焦面的辐射能量随时间变化,通过分析计算系统杂光传输时间与散射路径的关系,可以揭示系统内杂散光传输的因果关系,对系统杂光问题的分析和控制具有重要意义,同时从时域角度分析了系统杂光特性,能有效提高系统的测试精度。此研究为深入了解系统杂光特性提供了重要的探索工具,对杂散光测试仪向分析仪的转变起到了积极推动作用。

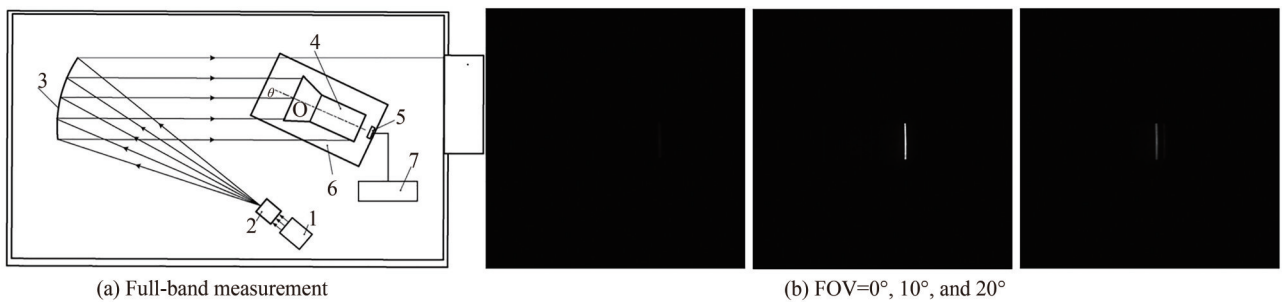
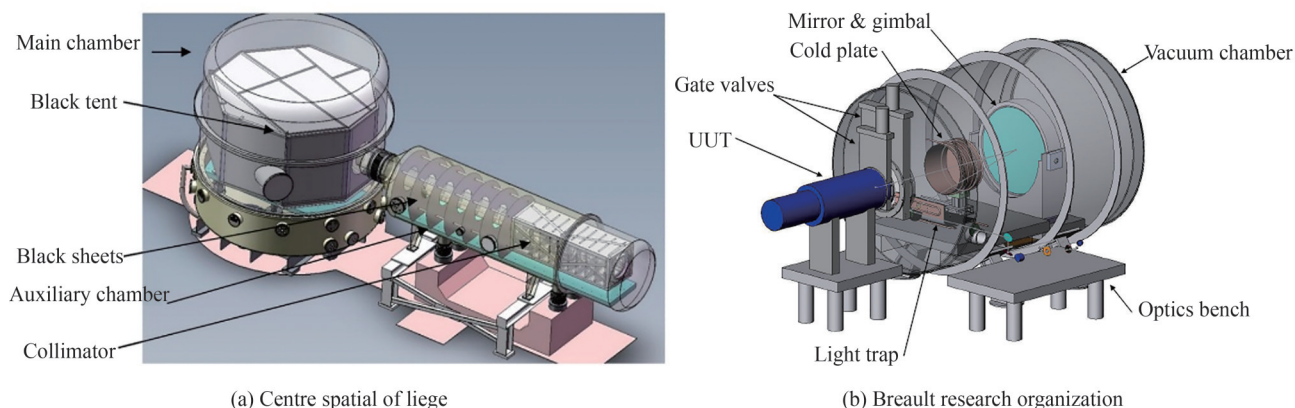


图72 基于时间分辨点源透射率杂散光分析系统原理图及结果分析^[184]
Fig. 72 Structure and result analysis based on time-resolved PST test system^[184]

5.2.2 真空测试腔杂光测试系统

第二类是采用对测试腔抽真空的方式来控制杂散光的影响,如比利时Centre Spatial of Liege^[8,185]和美国Breault Research Organization研究中心^[186]建设的杂光测试系统,如图73所示。对于小尺寸待测系统来说,降低测试腔内气压可减小尘埃微粒的数量,有效抑制微粒的瑞利散射。当待测系统尺寸增大,如果不增大测试腔尺寸,内壁散射带来的影响则不可忽略,同时大尺寸真空罐造价昂贵,而且较难实现。因此测试腔尺寸限制了PST测试阈值,在可见光波段PST测试阈值通常在 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 水平。

图73 真空罐式点源透过率杂光测试系统^[8,185-186]Fig. 73 Point source transmittance test station in the form of vacuum chamber^[8,185-186]

除了以上两类装置以外,美国劳伦斯-利弗莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory)^[174]曾采用单独测试误差,并从实际测试结果中剔除误差的方式进行PST的测试。该方法虽然成本不高,但是易受测试环境影响,很难对实验精度进行控制,且难以进行后续修正。此外,中科院光电所、哈尔滨工业大学^[12,68]都搭建过点源测量系统,但都属于实验装置,入射光束的平行度较低,对于真实空间点源杂光对光机系统的影响模拟并不准确,测量精度较低,也未能进行后续工程化的应用和推广。

5.3 杂光系数与点源透过率的区别与联系

中科院西安光机所的李晖^[187]推导了杂光系数(VGI)与点源透过率(PST)之间的关系,VGI是对PST在 ω_0 至 $\pi/2$ 范围内的积分之和,即

$$VGI = \frac{E_B}{E} = 8F^2 \int_{\omega_0}^{\pi/2} PST(\theta) \sin\theta d\theta \quad (13)$$

式中, ω_0 是光屏上黑斑对光学系统入瞳中心的角半径。所以杂散光系数和点源透过率互相对应,均可以表示光机系统自身对杂散光的抑制。

杂光系数法适用于面源型的背景辐射杂光^[174]。由于扩展光源无法做大,杂光系数法不适合测量大口径的光学系统,多用于测量照相镜头等结构简单、小口径系统。此外,杂光系数法容易引入测量误差,所以测量精度比较低,一般低于 10^{-3} ,难以达到更高精度。但该方法成本低,占用空间小,比较容易实现。

点源透过率法对测量系统的口径没有要求,目前最好的测量系统如Black Hole^[68]、BATC公司点源透过率杂光测试装置^[178]阈值优于 10^{-9} 。虽然高精度点源透过率法对测试系统空间大小和洁净度要求较高,但它是大口径高精度杂散光测量技术发展的必然趋势。

6 总结与展望

对杂光问题的研究已经开展了五十余年,并且随着空间光学载荷探测精度的逐步提高,杂光分析与抑制研究已成为空间光学遥感成像的关键技术之一。因此,在未来的一段时间内,杂光问题仍将作为光机系统性能提升的难点而存在。目前,杂散光问题的研究已经发展成为分支繁多、涉及学科很广的一门综合技术,完整分析体系的建立是杂散光抑制与评估技术面临的首要问题。应用于空间天文探测(如星冕仪、空间引力波探测等)相关的杂散光抑制和评估技术,正不断突破传统技术局限,在杂光来源、杂光抑制及其测试评估技术上都需要进行持续性创新。星冕仪的杂光更关注视场内杂光和衍射杂光,而空间引力波探测杂光主要来自镜面的后向散射。杂光的来源不同,相应的抑制和评估技术也随之改变,如空间引力波杂散光探测要依赖干涉的方法实现高精度后向散射光测量。因此,高效的杂光抑制与高精度的评估技术是空间光学技术发展的必然趋势。

本文以杂散光的分析流程为基础,对已有技术进行整理、分类,进一步补充了杂散光抑制与评估技术的连贯性和完整性,建立了杂散光分析的初步研究体系,包括杂散光抑制方案制订、抑制模型表面特性测量与建模、杂散光抑制效果仿真、杂散光测试及评估四个关键技术模块。

1)杂散光抑制方案制订:在目前遮光罩、遮光板、挡光环和光阑的研究基础上,可根据需求设计形式灵活的杂光抑制机构,未来遮光机构向着小型化、灵活化、可展开、可随动发展,降低尺寸与质量、提高消杂能力是其追求目标,甚至会出现无遮光罩和太阳免疫设计等概念^[188]。冷反射和鬼像的消除更加倾向于设计初期软件分析与后期图像算法处理相结合的解决方法。红外波段内部热辐射仍将是杂散光抑制的一个难题。但随着新工艺和新材料的出现,能够选择性能更好的消光材料,如纳米材料有望将表面反射率降低到1%以下,单次反射就可实现传统多次反射的抑制效果,对系统结构简化和表面改善具有促进作用。数字图像处理技术作为杂光抑制的最后一道防线,在逐步完善和发展过程中,必将发挥重要作用。

2)抑制模型表面特性测量与建模:表面散射模型是进行精确杂散光仿真分析的基础。目前国外已拥有多种商业化BRDF测试设备,如SOC-200 BDR、REFLET 180S、TSW CASI、TMA TASC、ALBATROSS等,对BRDF的测试波段从紫外到红外,几乎涵盖整个空间半球区域,对表面污染清洁研究颇多。各类散射理论和多种散射模型与实测数据相辅相成,已形成较为完备的材料BRDF数据库,且不对外公布和使用。目前我国对表面BRDF的测量和建模多处于实验室阶段,研究分散化严重,没有形成统一的材料散射数据库,且难以从他方得到特定材料的BRDF数据,表面污染问题也未得到重视和研究。应在国外测试设备基础上,开发国产BRDF的测试设备,整合国内材料散射数据,形成完备的BRDF数据库。未来BRDF的测试会向高精度、多光谱、高效自动化、抗干扰的方向发展,谱段会从紫外拓展到微波,随着计算机技术的发展,神经网络和深度学习的引入,大规模数据库的构建将成为必然。

3)杂散光抑制效果仿真:计算机仿真模拟是杂散光分析的重要手段,可以解决高抑制比光学系统杂散光实验过于繁琐、测试费用较高的问题,提高了杂散光的分析效率。国外对杂散光分析软件的研究较早,从早期的GUERAP III、APART/PADE、OARDAS到目前多种商用软件ASAP、TracePro、FRED、LightTools等,提出了多种杂光计算方法。蒙特卡洛法凭借高准确性和计算简洁性,已广泛应用于多种商用软件中,并且随着计算机技术的迅猛发展以及新算法的出现,光线追迹的数量、速度、精确度都将得到巨大提升,分析的功能越来越全面,更能准确模拟杂散光对整机系统的影响,软件的仿真分析方法是杂散光研究的重点。

4)杂散光测试及评估:杂散光的测量是最终确定和验证系统真实杂散光抑制能力的关键。杂散光不同的测量方式形成了两种评估方法,杂光系数法适用于低精度小口径的一般光学系统,点源透过率法则适合大口径、高杂散光抑制比要求的光学系统。国外多家科研机构研制的点源透过率杂光测试设备已在工程上应用多年,服务过多种空间仪器设备。国内虽然起步晚,但是发展较快,中科院西安光机所曾研制出国内首台,也是测试能力最强的点源透过率杂光测试装置,已成功应用在空间设备的杂光测量上,精度较高,目前已实现测试设备的量产化,服务于多家科研院所和高校。

未来杂散光抑制与评估技术将向着系统化、一体化解决空间探测需求方向发展,汇集光学设计、机械设计、辐射传热、表面材料、轨道仿真等多学科交叉领域,贯穿系统设计、加工、检测、装调、集成以及在轨测试的全过程,支撑未来空间遥感远距离、暗弱目标、超大视场、多光谱等众多空间应用需求。我们相信,随着杂散光抑制与评估技术的不断发展和理论的不完善,杂散光抑制与评估体系也将更加丰富、立体、有效,真正成为面向未来的空间光学技术,以支撑空间天文光学观测等前瞻性、战略性的科技研究领域。

参考文献

- [1] China Machinery Industry Federation. GB/T 10988. 2009, Veiling glare of optical systems-methods of measurement[S]. 中国机械工业联合会. GB/T 10988. 2009, 光学系统杂(散)光测量方法[S].
- [2] SHAO X, WU X Q, YU F F, et al. Characterization and monitoring of GOES-16 ABI stray light and comparison with Himawari-8 AHI and GOES-17 ABI[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2021, 15(1): 017503.
- [3] LEE S, CAO C Y. Soumi NPP VIIRS day/night band stray light characterization and correction using calibration view data [J]. Remote Sensing, 2016, 8(2): 138.
- [4] THERNISIEN A F, HOWARD R A, KORENDYKE C, et al. Stray light analysis and testing of the SoloHI and WISPR heliospheric imagers[C]. SPIE, 2018, 10698.
- [5] FROSTIG D, PIOTROWSKI J, CLARK K, et al. Stray light analysis and reduction for IFU spectrograph LLAMAS[C]. SPIE, 2020, 11447: 1446-1454.
- [6] HAMMAR A, CHRISTENSEN O M, PARK W, et al. Stray light suppression of a compact off-axis telescope for a satellite-borne instrument for atmospheric research[C]. SPIE, 2018, 10815: 108150F.
- [7] MEI Chao. The study of stray light analysis and suppressing technology in large pupil multi-spectral zoom optical system

- [D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics), 2014.
梅超. 大口径多光谱变焦光学系统杂散光分析与抑制技术研究[D]. 西安: 中国科学院大学(西安光学精密机械研究所), 2014.
- [8] MAZY E, STOCKMAN Y, M-LHELLIN. Design and modelisation of a straylight facility for space optical instrument [C]. SPIE, 2012, 8550: 855007.
- [9] FEST E C. Stray light analysis and control[M]. Bellingham: SPIE Press, 2013.
- [10] MONTANARO M, GERACE A, LUNSFORD A, et al. Stray light artifacts in imagery from the landsat 8 thermal infrared sensor[J]. Remote Sensing, 2014, 6(11): 10435-10456.
- [11] ZHANG Miaomiao. Research on stray light characteristics and correction of directional polarimetric camera [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.
张苗苗. 多角度偏振成像仪杂散光特性与校正研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
- [12] WANG Zhile, GONG Zhongqiang, ZHANG Wei, et al. Measurement of stray light based on point-source transmittance in space optical system[J]. Optical Technique, 2011, 37(4): 401-405.
王治乐, 龚仲强, 张伟, 等. 基于点源透过率的空间光学系统杂光测量[J]. 光学技术, 2011, 37(4): 401-405.
- [13] TIAN Jianguo. Analysis and suppression of infrared stray light of geosynchronous orbiting telescope [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2021.
田建国. 地球同步轨道望远镜的红外杂散光分析与抑制[D]. 长春: 长春理工大学, 2021.
- [14] WANG Yang. Study on suppression and analysis of stray light in infrared detector assembly [D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics), 2016.
汪洋. 红外探测器组件杂散光分析及抑制研究[D]. 上海: 中国科学院大学(上海技术物理研究所), 2016.
- [15] RODNEY S, STROLGER L G, KELLY P, et al. SN refsdal: photometry and time delay measurements of the first einstein cross supernova[J]. The Astrophysical Journal, 2016, 820(1): 1-18.
- [16] BOND H E, SCHAEFER G H, GILLILAND R L, et al. The sirius system and its astrophysical puzzles: Hubble space telescope and ground-based astrometry[J]. The Astrophysical Journal, 2017, 840(2): 1-17.
- [17] VERLAAN A L, HOGENHUIS H, PIJNENBURG J, et al. LISA telescope assembly optical stability characterization for ESA [C]. SPIE, 2017, 10564: 105640K.
- [18] WEISE D, MARENACI P, WEIMER P, et al. Opto-mechanical architecture of the LISA instrument [C]. SPIE, 2017, 10566: 1056611.
- [19] LIVAS J C, SANKAR S R. Optical telescope system-level design considerations for a space-based gravitational wave mission [C]. SPIE, 2016, 9904: 99041K.
- [20] GONG Y, LUO J, WANG B. Concepts and status of Chinese space gravitational wave detection projects [J]. Nature Astronomy, 2021, 5(9): 881-889.
- [21] RUAN W H, GUO Z K, CAI R G, et al. Taiji program: gravitational-wave sources [J]. International Journal of Modern Physics A, 2020, 35(17): 2050075.
- [22] SUTHERLAND W, EMERSON J, DALTON G, et al. The visible and infrared survey telescope for astronomy (VISTA): design, technical overview, and performance [J]. Astronomy & Astrophysics, 2015, 575: A25.
- [23] ZHONG X, SU Z, ZHANG G, et al. Analysis and reduction of solar stray light in the nighttime imaging camera of Luojia-1 satellite [J]. Sensors, 2019, 19(5): 1130.
- [24] WANG Hu, WU Liquan, XUE Yaoke, et al. A horn tube type baffle: China, ZL201920984111.9 [P]. 2020-06-16.
王虎, 吴俐权, 薛要克, 等. 一种牛角管式遮光罩: 中国, ZL201920984111.9 [P]. 2020-06-16.
- [25] ABBASI V, THORSTEINSON S, BALAM D, et al. The NEOSat experience: 5 years in the life of Canada's space surveillance telescope [C]. Proceedings of the 1st NEO and Debris Detection Conference, 2019, 22: 1-16.
- [26] WANG Zhiqiang. Design of off-axis reflecting collimator with 350mm aperture [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020.
王志强. 350mm口径离轴反射式平行光管的设计 [D]. 长春: 长春理工大学, 2020.
- [27] WU Linglin, MIAO Zhonghua, BAI Hongli, et al. A honeycomb baffle: China, ZL201721023757.8 [P]. 2018-03-16.
吴玲林, 苗中华, 白泓立, 等. 一种蜂窝状遮光罩: 中国, ZL201721023757.8 [P]. 2018-03-16.
- [28] HE Yulin, HE Senyang. A honeycomb anti-glare optical component and classroom lighting fixture: China, ZL202122568784.6 [P]. 2022-03-01.
何育林, 何森洋. 一种蜂窝状防眩光光学构件及教室照明灯具: 中国, ZL202122568784.6 [P]. 2022-03-01.
- [29] CHEN Xue, SUN Chuang, XIA Xinlin. Stray light suppression property of baffle with honeycombed wall [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 230-234.
陈学, 孙创, 夏新林. 具有蜂窝内壁的遮光罩杂散光抑制特性分析 [J]. 光学学报, 2012, 32(5): 230-234.
- [30] YANG Tao, LI Chunlin, MENG Qingliang. Application of reflective ellipsoid grating system in space optical remote sensor [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2016, 37(2): 74-81.

- 杨涛,李春林,孟庆亮.反射式椭球面光栏在空间光学遥感器上的应用[J].航天返回与遥感,2016,37(2):74-81.
- [31] PETERSON G L, JOHNSTON S C, THOMAS J. Specular baffles[C]. SPIE, 1993, 1753: 65-76.
- [32] SCHNEIDER E. Thermal design of retroreflective stray light fore-baffles for spaceborne optical systems[C]. SPIE, 2001, 4198: 82-95.
- [33] LU Qiang. Study on stray light analysis and application technology of the earth synchronous orbit space camera[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics), 2016.
陆强.地球同步轨道空间相机杂散光分析与应用技术的研究[D].上海:中国科学院大学(上海技术物理研究所), 2016.
- [34] SHOLL M, GROCHOCKI F, FLEMING J, et al. Stray light design and analysis of the SNAP telescope[C]. SPIE, 2007, 6675: 66750C.
- [35] LIN S, WANG H, LIU Y, et al. Research on stray light suppression of space debris detection camera[C]. SPIE, 2019, 11341: 113410O.
- [36] LIN Shangmin, WANG Hu, LIU Jie, et al. A telescopic expandable mechanism: China, ZL201610150508.9[P]. 2018-05-29.
林上民,王虎,刘杰,等.一种伸缩式可展开机构:中国,ZL201610150508.9[P]. 2018-05-29.
- [37] LIN S M, WANG H, LIU Y, et al. Athermalization for the supporting structure of space camera primary and secondary mirrors[C]. SPIE, 2019, 11052: 110520U.
- [38] KAWANO H, SATO Y, MITANI K, et al. New light-shielding technique for shortening the baffle length of a star sensor [C]. SPIE, 2002, 4767: 62-69.
- [39] KAWANO H, SHIMOJI H, YOSHIKAWA S, et al. Solar-light shielding using a near-hemispherical lens for a star sensor[J]. Optical Engineering, 2006, 45(12): 124403.
- [40] WARREN P A, SILVER M J, DOBSON JR B J, et al. Experimental characterization of deployable outer barrel assemblies for large space telescopes[C]. SPIE, 2013, 8860: 49-61.
- [41] ARENBERG J W, ADAMSON J, HARPOLE G, et al. Determination of emissivities of key thermo-optical surfaces on the James Webb Space Telescope[C]. SPIE, 2014, 9143: 1113-1122.
- [42] LIGHTSEY P A, WEI Z. James Webb Space Telescope stray light performance status update[C]. SPIE, 2012, 8442: 84423B.
- [43] BOLCAR M R, BALASUBRAMANIAN K, CLAMPIN M, et al. Technology development for the advanced technology large aperture space telescope (ATLAST) as a candidate large UV-optical-infrared (LUVOIR) surveyor[C]. SPIE, 2015, 9602: 86-99.
- [44] TANG H, XIE J, TANG X, et al. On-orbit radiometric performance of GF-7 satellite multispectral imagery[J]. Remote Sensing, 2022, 14(4): 886.
- [45] YAO J, TANG X, LI G, et al. Cloud detection of GF-7 satellite laser footprint image [J]. IET Image Processing, 2021, 15(10): 2127-2134.
- [46] LIU L, XIE J, TANG X, et al. Coarse-to-fine image matching-based footprint camera calibration of the GF-7 satellite [J]. Sensors, 2021, 21(7): 2297.
- [47] ZHOU N, LI C, GAO W, et al. A secondary mirror adjustment system with hexapod structure for optical telescope application[C]. SPIE, 2014, 9280: 92800N.
- [48] ZHONG P, LI C, JING N, et al. Research on lightweight passive deployment mechanism for the secondary mirror in the deployable space telescope[C]. SPIE, 2016, 9685: 968513.
- [49] ZHAO C, LI C, ZHOU N, et al. Self-deployable structure designed for space telescope for microsatellite application[C]. SPIE, 2016, 9685: 96850B.
- [50] DAI H, LI C, LI L, et al. Design of deployment systems for high-resolution deployable telescope based on CubeSat[C]. SPIE, 2021, 12069: 1206918.
- [51] LEI W, LI C, ZHONG P, et al. Realization and testing of a deployable space telescope based on tape springs [C]. SPIE, 2017, 10339: 1033920.
- [52] LIAN Y, HUO Z, CHENG Y. On the dynamics and control of the sun-earth L2 tetrahedral formation [J]. Astrodynamics, 2021, 5(4): 331-346.
- [53] TONG Zhaoyuan, LI Meng, CUI Chengbo, et al. Design and analysis of the configuration of deployable membrane sunshield[J]. Chinese Space Science and Technology, 2021, 41(3): 82-88.
全照远,李萌,崔程博,等.空间可展开薄膜遮光罩设计与分析[J].中国空间科学技术,2021,41(3):82-88.
- [54] WEBB D, HIRSCH B, BACH V, et al. Starshade mechanical architecture & technology effort[C]. Proceedings of the 3rd AIAA Spacecraft Structures Conference, 2016: 2165.
- [55] WEBB D, ARYA M, BRADFORD S, et al. Advances in starshade technology readiness for an exoplanet characterizing science mission in the 2020's[C]. SPIE, 2019, 11117: 111170P.

- [56] WEBB D, HIRSCH B, BRADFORD C, et al. Advances in starshade technology readiness for an exoplanet characterizing science mission in the 2020's[C]. SPIE, 2016, 9912: 99126H.
- [57] KLING D, JEON S K, BANIK J. Novel folding methods for deterministic deployment of common space structures[C]. Proceedings of the 3rd AIAA Spacecraft Structures Conference, 2016: 2168.
- [58] SANDRI P, FINESCHI S, ROMOLI M, et al. Stray-light analyses of the multielement telescope for imaging and spectroscopy coronagraph on Solar Orbiter[J]. Optical Engineering, 2018, 57(1): 015108.
- [59] YAN Peipei. Research on stray radiation suppression of dual band integrative optical system used to low-orbit spaceborne earth[D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics), 2019.
闫佩佩. 低轨对地观测双波段一体化光学系统杂散辐射抑制研究[D]. 西安: 中国科学院大学(西安光学精密机械研究所), 2019.
- [60] SUN Mingzhe, ZHANG Hongxin, LU Zhenwu, et al. Stray light suppression of the large field of view coronagraph optical system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(5): 162-168.
孙明哲, 张红鑫, 卢振武, 等. 大视场日冕仪光学系统杂散光抑制[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(5): 162-168.
- [61] SUN M, ZHANG H, BU H, et al. Computation of the diffracted field of a toothed occulter by the semi-infinite rectangle method[J]. Journal of Optical Society of America A, 2013, 30(10): 2140-2149.
- [62] ZHANG Jianxian, ZOU Yongjun, XU Lei, et al. Matte coating and its application in optical system [J]. Aerospace Materials and Technology, 2014, 44(6): 88-90.
张建贤, 邹永军, 徐蕾, 等. 消光漆在光学系统的国内外应用[J]. 宇航材料工艺, 2014, 44(6): 88-90.
- [63] [EB/OL].[2022-04-18]. <https://www.lord.com/>.
- [64] DURY M R, THEOCHAROUS T, HARRISON N, et al. Common black coatings—reflectance and ageing characteristics in the 0.32 - 14.3 μm wavelength range[J]. Optics Communications, 2007, 270(2): 262-272.
- [65] Le spécialiste de la finition thermique pour satellites et lanceurs : conception, fabrication et application de revêtements de finition thermique à fort héritage technologique[EB/OL].[2022-04-18].www.map-coatings.com.
- [66] ALMEIDA C M, GHICA M E, RAMALHO A L, et al. Silica-based aerogel composites reinforced with different aramid fibres for thermal insulation in Space environments[J]. Journal of Materials Science, 2021, 56(24): 13604-13619.
- [67] TULEUSHEV Y, VOLODIN V, ZHAKANBAEV E, et al. Fabrication of porous tantalum and tungsten black coatings for artificial earth satellites[J]. Technical Physics Letters, 2020, 46(4): 319-322.
- [68] XU Liang. Research on key technologies of stray light measurement for large aperture optical system [D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics), 2019.
徐亮. 大口径光学系统杂散光测试关键技术研究[D]. 西安: 中国科学院大学(西安光学精密机械研究所), 2019.
- [69] LIU Y, HUANG J, FENG X, et al. Thermal-sprayed photocatalytic coatings for biocidal applications: a review [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2021, 30(1): 1-24.
- [70] YANG C, LIU J, REN Q, et al. Development of novel thermal sprayed hydroxyapatite-rare earth (HA-Re) coatings for potential antimicrobial applications in orthopedics[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2021, 30(4): 886-897.
- [71] FANG D, ZHENG Y, ZHANG B, et al. Automatic robot trajectory for thermal-sprayed complex Surfaces [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018, 2018: 1-11.
- [72] 宁波材料所成功研制出吸光率高达99%的超黑吸光涂层[EB/OL].[2022-04-18].http://www.nimte.ac.cn/news/progress/201904/t20190419_5277827.html.
- [73] FU Y, LIU Y, LI H. Efficient coating fabrication of onion-like carbon nanoparticles via aerosol deposition [J]. Particuology, 2020, 53: 58-62.
- [74] ZHANG Jiaqiang, NIU Hu, YANG Youjian, et al. Effect of deep space radiation environments on properties of high absorptivity stray light coatings[J]. Aerospace Materials and Technology, 2021, 51(5): 134-138.
张家强, 牛虎, 杨佑健, 等. 深空辐射环境对高吸收率消杂光涂层的性能影响[J]. 宇航材料工艺, 2021, 51(5): 134-138.
- [75] PING Tuo, ZHOU Ying, YU Chengwu, et al. Effect of simulated space radiation environments on properties of stray light coatings[J]. Surface Technology, 2020, 49(12): 30-37.
平托, 周颖, 余成武, 等. 空间辐照模拟环境对消杂光热控涂层性能的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(12): 30-37.
- [76] SIWAL S S, SAINI A K, RAROTRA S, et al. Recent advancements in transparent carbon nanotube films: chemistry and imminent challenges [J]. Journal of Nanostructure in Chemistry, 2021, 11(1): 93-130.
- [77] ZHANG L, WANG X, XU W, et al. Strong and conductive dry carbon nanotube films by microcombing [J]. Small, 2015, 11(31): 3830-3836.
- [78] KHOLMANOV I N, MAGNUSON C W, PINER R, et al. Optical, electrical, and electromechanical properties of hybrid graphene/carbon nanotube films [J]. Advanced Materials, 2015, 27(19): 3053-3059.
- [79] NASA Technologies[EB/OL].[2022-04-18].<http://www.nasa.gov/topics/technology/features/new-nano.html>.
- [80] RICHELSON J T. Satellite in the shadows[J]. Bulletin of the Atomic Scientists, 2005, 61(3): 26-33.

- [81] XIAO Meizi. "Keyhole" junior debuts[J]. Space Exploration, 2019, (11): 46-49.
小梅子.“锁眼”后辈闪亮登场[J]. 太空探索, 2019, (11): 46-49.
- [82] SPACE & TECHNOLOGY [EB/OL]. [2022-04-18]. <https://www.surreynanosystems.com/applications/space-technology>.
- [83] DE NICOLA F, HINES P, DE CRESCENZI M, et al. Moth-eye effect in hierarchical carbon nanotube anti-reflective coatings[J]. Carbon, 2016, 108: 262-267.
- [84] HAO Yuncai, YU Chengwu, LIANG Shitong, et al. New generation of star tracker baffle-CNT baffle[J]. Aerospace Control and Application, 2016, 42(2): 1-7+31.
郝云彩, 余成武, 梁士通, 等. 新一代星敏感器遮光罩——碳纳米管遮光罩技术研究[J]. 空间控制技术与应用, 2016, 42(2): 1-7+31.
- [85] LI X, LI M, LIU H. Effective strategy to achieve a metal surface with ultralow reflectivity by femtosecond laser fabrication [J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(5): 051401.
- [86] LI X, LI M, LIU H. Enhanced optical absorption surface of titanium fabricated by a femtosecond laser assisted with airflow pressure[J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(9): 091404.
- [87] WEBB space telescope[EB/OL].[2022-04-18].<https://webbtelescope.org/>.
- [88] PAN Yongqiang, WU Zhensen, HANG Lingxia. Optical thin films interfaces roughness cross-correlated properties and light scattering[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(6): 916-920.
潘永强, 吴振森, 杭凌侠. 光学薄膜界面粗糙度互相关特性与光散射[J]. 中国激光, 2008, 35(6): 916-920.
- [89] HANG L, LIU W, XU J, et al. Effects of various substrate materials on microstructural and optical properties of amorphous silicon oxynitride thin films deposited by plasma-enhanced chemical vapor deposition[J]. Thin Solid Films, 2020, 709: 138186.
- [90] YI K, LIU D, CHEN X, et al. Plasma-enhanced chemical vapor deposition of two-dimensional materials for applications[J]. Accounts of Chemical Research, 2021, 54(4): 1011-1022.
- [91] HAMEDANI Y, MACHA P, BUNNING T J, et al. Plasma-enhanced chemical vapor deposition: where we are and the outlook for the future[M]. Amsterdam: William Andrew Press, 2016.
- [92] ZGOU Qibiao, CHEN Jianhua, SONG Yuhua, et al. Design and analysis of variable refractivity optical film[J]. New Technology & New Process, 2020, (5): 47-51.
周启彪, 陈建华, 宋余华, 等. 变折射率光学薄膜设计与分析[J]. 新技术新工艺, 2020, (5): 47-51.
- [93] HANG Liangyi, LIU Weiguo, HANG Lingxia, et al. Research progress in preparation of optical thin films by PECVD[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(13): 45-56.
杭良毅, 刘卫国, 杭凌侠, 等. PECVD技术制备光学薄膜的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 45-56.
- [94] XI J Q, SCHUBERT M F, KIM J K, et al. Optical thin-film materials with low refractive index for broadband elimination of Fresnel reflection[J]. Nature Photonics, 2007, 1(3): 176-179.
- [95] HARVEY J E, CHOI N, SCHROEDER S, et al. Total integrated scatter from surfaces with arbitrary roughness, correlation widths, and incident angles[J]. Optical Engineering, 2012, 51(1): 013402.
- [96] DOYKE L, KHADEMI P, HILZ P, et al. Experimental estimates of the photon background in a potential light-by-light scattering study[J]. New Journal of Physics, 2022, 24: 025003.
- [97] DING J, CAI Z, PROCHASKA J X, et al. Deep Hubble space telescope imaging on the extended Ly α emission of a QSO at $z=2.19$ with a damped Lyman alpha system as a natural coronagraph[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2020, 889(1): L12.
- [98] FEDOTOV A. Getting rid of 95% UCL calculations in ISO 14644-1: 2015 standard: new weaknesses and possible solutions [J]. Clean Air and Containment Review, 2018, 2018(35): 12-15.
- [99] ENSOR D, DIXON A M, BURROWS R. IEST leads development of first ISO 14644 nanotechnology standard [J]. Journal of the IEST, 2016, 59(1): 1-3.
- [100] LIU T, LI X, XU M, et al. Design a pediatric isolation bed and characterization of its purification efficacy in ambient air[J]. Biosafety and Health, 2021, 3(3): 172-178.
- [101] CALABRO K W, ZOLLERS M. Effects of individual particulates in optical systems using a spatially isolated contamination scattering method[C]. SPIE, 2019, 11105: 1110509.
- [102] MA B, SHEN Z, HE P, et al. Evaluation and analysis of polished fused silica subsurface quality by the nanoindenter technique[J]. Applied Optics, 2011, 50(9): 279-285.
- [103] BALASUBRAMANIAN K, SHAKLAN S, GIVEON A. Stellar coronagraph performance impact due to particulate contamination and scatter[C]. SPIE, 2009, 7440: 74400T.
- [104] KHODNEVYCH V, LINTZ M, DINU J N, et al. Stray light estimates due to micrometeoroid damage in space optics, application to the LISA telescope[J]. Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 2020, 6(4): 048005.

- [105] YANG Weirong, PAN Yongqiang, ZHENG Zhiqi. Single-layer film regulation characteristics of particle pollutant scattering from optical surfaces[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(12): 465-471.
杨伟荣, 潘永强, 郑志奇. 光学表面粒子污染物散射的单层薄膜调控特性[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(12): 465-471.
- [106] LIU Jinze, PAN Yongqiang, YANG Chen. Theoretical and experimental study on scattering reduction of single-layer $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ optical films[J]. *Surface technology*, 2019, 48(8): 172-176.
刘金泽, 潘永强, 杨琛. 单层 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 光学薄膜减散射理论与实验探究[J]. *表面技术*, 2019, 48(8): 172-176.
- [107] RANDENIYA L K, DE GROOT G J. Non-thermal plasma treatment of agricultural seeds for stimulation of germination, removal of surface contamination and other benefits: a review[J]. *Plasma Processes and Polymers*, 2015, 12(7): 608-623.
- [108] HEYA A, HARADA T, NIIBE M, et al. Removal of surface contamination by atomic hydrogen annealing [J]. *Journal of Photopolymer Science and Technology*, 2020, 33(4): 419-426.
- [109] ROTH R, COEMERT S, BURKHARDT S, et al. A process towards eliminating cytotoxicity by removal of surface contamination from electrical discharge machined nitinol[J]. *Procedia CIRP*, 2020, 89: 45-51.
- [110] SHERMAN R. Carbon dioxide snow cleaning applications[M]. Amsterdam: William Andrew Press, 2019.
- [111] MASKOVA L, SMOLIK J, VAVROVA P, et al. Carbon dioxide snow cleaning of paper[J]. *Heritage Science*, 2021, 9(1): 1-15.
- [112] WANG Hu, LIU Jie, LIN Shangmin, et al. A dustproof device for an optical system: China, ZL201310489136.9[P]. 2015-12-30.
王虎, 刘杰, 林上民, 等. 一种光学系统防尘装置: 中国, ZL201310489136.9[P]. 2015-12-30.
- [113] ZHAI Meidan, MI Junfeng, MA Wenxin, et al. The development of electrostatic dust removal technology and its influencing factors[J]. *Applied Chemical Industry*, 2021, 50(9): 2572-2577.
翟美丹, 米俊锋, 马文鑫, 等. 静电除尘技术及其影响因素的发展现状[J]. *应用化工*, 2021, 50(9): 2572-2577.
- [114] FENG Z, LONG Z, YU T. Filtration characteristics of fibrous filter following an electrostatic precipitator[J]. *Journal of Electrostatics*, 2016, 83: 52-62.
- [115] PENG Jun. Analysis and measurement of internal stray radiation of thermal infrared imaging spectrometer[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics), 2020.
彭俊. 热红外成像光谱仪内部杂散辐射的分析与测量[D]. 上海: 中国科学院大学(上海技术物理研究所), 2020.
- [116] DOLCI M, VALENTINI A, RAGNI M, et al. AMICA at Dome C: results from the first year of automatic operation tests in Antarctica[C]. SPIE, 2012, 8446: 1406-1419.
- [117] LIU Z, XU J, GU B Z, et al. New vacuum solar telescope and observations with high resolution [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2014, 14(6): 705.
- [118] ALHAMEDI A H, LILLIS R J, POPPE A R, et al. TRACE: telescope for radiation characterization at Europa[C]. *Proceedings of the AGU Fall Meeting Abstract*, 2018.
- [119] KARPENKO M, BHATT S, BEDROSSIAN N, et al. Flight implementation of pseudospectral optimal control for the TRACE space telescope[C]. *Proceedings of the AIAA guidance, navigation, and control conference*. 2011: 6506.
- [120] CHEIMETS P, CALDWELL D C, CHOU C, et al. SDO-AIA telescope design[C]. SPIE, 2009, 7438: 141-152.
- [121] ZHANG Weian, YANG Xiaojie, ZHOU Zhongliang. Study on suppressing false signal generated by sunlight in omnidirectional laser detection[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2011, 26(5): 55-58.
张维安, 杨晓杰, 周中亮. 全向激光探测中抑制太阳光引发虚假信号的研究[J]. *光电技术应用*, 2011, 26(5): 55-58.
- [122] GUO H, CHEN Q, MA N, et al. Test and analysis of background sunlight's influence on laser receiver[C]. SPIE, 2017, 10457: 104570K.
- [123] YANG Liming. Study of target enhancement technique based on polarimetric imaging[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2018.
杨力铭. 基于偏振成像的目标增强技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2018.
- [124] SHAO Xiaopeng, LIU Fei, LI Wei, et al. Latest progress in computational imaging technology and application [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(2): 11-55.
邵晓鹏, 刘飞, 李伟, 等. 计算成像技术及应用最新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(2): 11-55.
- [125] HU H, ZHAO L, LI X, et al. Polarimetric image recovery in turbid media employing circularly polarized light[J]. *Optics Express*, 2018, 26(19): 25047-25059.
- [126] LIU F, WEI Y, HAN P, et al. Polarization-based exploration for clear underwater vision in natural illumination [J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 3629-3641.
- [127] HAN P, LIU F, YANG K, et al. Active underwater descattering and image recovery [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(23): 6631-6638.
- [128] WANG Hu, MA Zehua, SHEN Yang, et al. A large field of view energy detection optical system based on concentric

- spherical mirrors: China, ZL202121649213.9[P]. 2022-02-11.
- 王虎,马泽华,沈阳,等.一种基于同心球镜的大视场能量探测光学系统:中国,ZL202121649213.9[P]. 2022-02-11.
- [129] ZHANG Tengfei. Study on stray light characteristic analysis and correction method of watercolor image spectrometer[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics), 2016.
- 张腾飞.水色成像光谱仪杂散光特性分析及校正方法研究[D].上海:中国科学院大学(上海技术物理研究所),2016.
- [130] BITLIS B, JANSSON P A, ALLEBACH J P. Parametric point spread function modeling and reduction of stray light effects in digital still cameras[C]. SPIE, 2007, 6498: 253-260.
- [131] KOVACS G, SIERKS H, NATHUES A, et al. Stray light calibration of the dawn framing camera[C]. SPIE, 2013, 8889: 239-246.
- [132] XU W, GONG J, WANG M. Development, application, and prospects for Chinese land observation satellites[J]. Geospatial Information Science, 2014, 17(2): 102-109.
- [133] KANG Y, PAN L, SUN M, et al. Destriping high-resolution satellite imagery by improved moment matching[J]. International Journal of Remote Sensing, 2017, 38(22): 6346-6365.
- [134] YAN Ming, WU Fei, WANG Zhiyong. Removal of SJ-9A optical imagery stray light stripe noise[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2014, 35(5): 72-80.
- 严明,伍菲,王智勇.“实践九号”A卫星光学遥感图像杂散光噪声去除[J].航天返回与遥感,2014,35(5):72-80.
- [135] ZONG Y, BROWN S W, MEISTER G, et al. Characterization and correction of stray light in optical instruments[C]. SPIE, 2007, 6744: 422-432.
- [136] BUTLER S D, NAUYOKS S E, MARCINIAK M A. Comparison of microfacet BRDF model elements to diffraction BRDF model elements[C]. SPIE, 2015, 9472: 94720C.
- [137] BUTLER S D, NAUYOKS S E, MARCINIAK M A. Comparison of microfacet BRDF model to modified Beckmann-Kirchhoff BRDF model for rough and smooth surfaces[J]. Optics Express, 2015, 23(22): 29100-29112.
- [138] ZHAO Xiaochen. Technological research of the scattered light measurement of optical element of the surface in solar telescope system[D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Optics and Electronics), 2016.
- 赵晓琛.太阳望远镜光学零件表面散射光测量技术研究[D].成都:中国科学院研究生院(光电技术研究所),2016.
- [139] HALLBERG T, PEARCE D A, RAVEN P, et al. Round robin comparison of BRDF measurements[C]. SPIE, 2019, 11158: 111580I.
- [140] HALLBERG T, POHL A, FAGERSTRÖM J. Simplifying BRDF input data for optical signature modeling[C]. SPIE, 2017, 10206: 102060V.
- [141] ARTS T, TOMUTA D, KIRSCHNER V. Black coatings BSDF database[C]. SPIE, 2021, 11852: 1185261.
- [142] KRONEBERGER M, MEZGER A, VOLATIER J B. Scattering from reflective diffraction gratings: the challenges of measurement and verification[C]. SPIE, 2018, 10692: 106920G.
- [143] GUARNERA D, GUARNERA G C, GHOSH A, et al. BRDF representation and acquisition[J]. Computer Graphics Forum, 2016, 35(2): 625-650.
- [144] ANTHONY N, FROSTEVARG J, SUHONEN H, et al. Laser processing of minerals common on asteroids[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 135(2): 106724.
- [145] LI Chengcheng. Analysis and experimental study of laser scattering characteristics based of kirchhoff approximation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- 李程程.基于基尔霍夫近似法的激光散射特性分析与实验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
- [146] XUE J Y, CAO Y H, WU Z S, et al. Multiple scattering and modeling of laser in fog[J]. Chinese Physics B, 2021, 30(6): 336-344.
- [147] ZHU J, WANG K, LIU H, et al. Modified model of polarized bidirectional reflectance distribution function for metallic surfaces[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 99: 160-166.
- [148] WANG K, ZHU J, LIU H, et al. Expression of the degree of polarization based on the geometrical optics pBRDF model[J]. Journal of Optical Society of America A, 2017, 34(2): 259-263.
- [149] ZHANG W, ZHAO J, LIU L. Experimental study of the effective BRDF of a copper foam sheet[C]. Proceedings of the 7th International Symposium on Radiative Transfer, 2013.
- [150] LIU Y, YU K, LIU Z, et al. Polarized BRDF measurement of steel E235B in the near-infrared region: based on a self-designed instrument with absolute measuring method[J]. Infrared Physics & Technology, 2018, 91: 78-84.
- [151] ZHANG K, HUANG W, ZHANG B, et al. Application of first-order nonparaxial scalar theory to determine surface scattering intensity of multilayer optical coatings[J]. Optics Express, 2018, 26(26): 34592-34608.
- [152] SHEIKH F, KAISER T. A modified Beckmann-Kirchhoff scattering model for slightly rough surfaces at terahertz frequencies[C]. IEEE, 2019: 2079-2080.
- [153] OHLIDAL I, VOHANKA J, CERMAK M, et al. Combination of spectroscopic ellipsometry and spectroscopic reflectometry with including light scattering in the optical characterization of randomly rough silicon surfaces covered by

- native oxide layers[J]. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 2019, 7(4): 045004.
- [154] IGARASHI Y, MITSUNARI T, YAMAZAKI K. Surface roughness measurement using the generalized Harvey-Shack scattering theory and the K-correlation model[C]. *SPIE*, 2021, 11782: 117821S.
- [155] SHEIKH F, GAO Y, KAISER T. A study of diffuse scattering in massive MIMO channels at terahertz frequencies[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 68(2): 997-1008.
- [156] HARVEY J E. *Understanding surface scatter: a linear systems formulation*[M]. Bellingham: SPIE Press, 2019.
- [157] STOVER J C. *Optical scattering: measurement and analysis*[M]. Bellingham: SPIE Press, 2012.
- [158] AKUTSU T, ANDO M, ARAI K, et al. Overview of KAGRA: KAGRA science[J]. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2021, 2021(5): 05A103.
- [159] SHIBAIKIN S D, ALEKSEEV E G. Software library for the lighting fixtures optical characteristics calculation by the computer-aided design system kompas 3D[J]. *Light & Engineering*, 2021, 29(3): 78-85.
- [160] TAN R T. Specularity, specular reflectance [J]. *Computer Vision: A Reference Guide*, 2020: 1-4.
- [161] BITTERLING M, BERN G, SCHOTTL P, et al. Measuring and modelling the BRDF of solar receiver paints[C]. *AIPC*, 2020, 2303(1): 030006.
- [162] LIU Y, DAI J, ZHAO S, et al. Optimization of five-parameter BRDF model based on hybrid GA-PSO algorithm[J]. *Optik*, 2020, 219: 164978.
- [163] BAIL L, WU Z, ZOU X, et al. Seven-parameter statistical model for BRDF in the UV band[J]. *Optics Express*, 2012, 20(11): 12085-12094.
- [164] JIAO Z, DING A, KOKHANOVSKY A, et al. Development of a snow kernel to better model the anisotropic reflectance of pure snow in a kernel-driven BRDF model framework [J]. *Remote sensing of environment*, 2019, 221: 198-209.
- [165] SUN T, JENSEN H W, RAMAMOORTHY R. Connecting measured BRDFs to analytic BRDFs by data-driven diffuse-specular separation [J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2018, 37(6): 1-15.
- [166] LIU Y, DAI J, ZHAO S, et al. A bidirectional reflectance distribution function model of space targets in visible spectrum based on GA-BP network[J]. *Applied Physics B*, 2020, 126(6): 1-9.
- [167] DAHMEN T, TRAMPERT P, BOUGHORBEL F, et al. Digital reality: a model-based approach to supervised learning from synthetic data [J]. *AI Perspectives*, 2019, 1(1): 1-12.
- [168] FURFARO R, LINARES R, REDDY V. Space objects classification via light-curve measurements: deep convolutional neural networks and model-based transfer learning [C]. *Proceedings of the AMOS Technologies Conference*, 2018.
- [169] LIU Dun. *Research on stray light in hybrid diffractive/ refractive imaging optical system*[D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Optics and Electronics), 2018.
刘盾. 折、衍混合成像光学系统杂散光研究[D]. 成都: 中国科学院大学(光电技术研究所), 2018.
- [170] TIAN J G, LI X L, HOU L B, et al. Analysis and suppression of stray radiation in an infrared telescope system in geosynchronous orbit[C]. *SPIE*, 2020, 11548: 115480I.
- [171] SHU Xingxing. *Analysis and suppression of stray light in visible light optical system*[D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Optics and Electronics), 2015.
舒星星. 可见光光学系统杂光分析及抑制[D]. 成都: 中国科学院大学(光电技术研究所), 2015.
- [172] LIU D, WANG L, YANG W, et al. Stray light characteristics of the diffractive telescope system [J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(2): 025105.
- [173] LI Zhaohui. *Stray light testing technology research of long focal length and large aperture optical system*[D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics), 2016.
李朝辉. 长焦距大口径光学系统杂散光测试技术研究[D]. 西安: 中国科学院大学(西安光学精密机械研究所), 2016.
- [174] LI Xiaoping, WANG Gang, HU Tingliang. High-precision stray light measurement system analysis [J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(9): 521-524.
李晓平, 王钢, 胡亭亮. 高精度杂散光测量系统分析[J]. *红外技术*, 2011, 33(9): 521-524.
- [175] MA Zhen, FAN Xuewu, CHEN Rongli, et al. Large aperture stray light coefficient measurement method and system based on computer holographic optical components: China, ZL200610104862.4[P]. 2010-02-03.
马臻, 樊学武, 陈荣利, 等. 基于计算机全息光学元件的大口径杂光系数测试方法及其系统: 中国, ZL200610104862.4 [P]. 2010-02-03.
- [176] XU Liang, ZHAO Jianke, ZHOU Yan, et al. Large aperture stray light test device and test method: China, ZL201310122056.X[P]. 2016-06-08.
徐亮, 赵建科, 周艳, 等. 大口径杂散光测试装置及测试方法: 中国, ZL201310122056.X[P]. 2016-06-08.
- [177] FLEMING J, GROCHOCKI F, FINCH T, et al. New stray light test facility and initial results[C]. *SPIE*, 2008, 7069: 70690O.
- [178] FRANK G, JOHN F. Stray light testing of the OLI telescope[C]. *SPIE*, 2010, 7794: 77940W.

- [179] CHEN Q F, MA Z, LI X, et al. Stray light measurement for point source transmittance of space optical systems[C]. SPIE, 2016, 9684: 726-732.
- [180] CHEN Qinfang, XUE Yaoke, LI Yang, et al. A high rejection ratio optical trap: China, ZL201922350822.3[P]. 2020-09-01.
陈钦芳, 薛要克, 刘阳, 等. 一种高抑制比光陷阱: 中国, ZL201922350822.3[P]. 2020-09-01.
- [181] CHEN Qinfang, XUE Yaoke, MA Zhanpeng, et al. Stray light test system test chamber glass: China, ZL202010600239.8[P]. 2021-10-15.
陈钦芳, 薛要克, 马占鹏, 等. 杂散光测试系统测试腔用玻璃: 中国, ZL202010600239.8[P]. 2021-10-15.
- [182] CHEN Qinfang, XUE Yaoke, MA Zhanpeng, et al. Device and method for aligning the optical axis of the collimator with the optical axis of the optomechanical system in the stray light test: China, ZL202010694073.0 [P]. 2021-07-27.
陈钦芳, 薛要克, 马占鹏, 等. 杂光测试中平行光管光轴与光机系统光轴对准装置及方法: 中国, ZL202010694073.0 [P]. 2021-07-27.
- [183] MA Z P, CHEN Q F, WANG H. Simulation and analysis of atmospheric scattering in stray light testing for point source transmittance[J]. Applied Optics, 2021, 60(2): 232-238.
- [184] CHEN Qinfang, XU Liang, DING Jiaoteng, et al. A time-resolved point source transmittance stray light measurement system: China, ZL201720676422.X [P]. 2018-01-19.
陈钦芳, 许亮, 丁蛟腾, 等. 一种基于时间分辨的点源透过率杂散光测试系统: 中国, ZL201720676422.X [P]. 2018-01-19.
- [185] STOCKMAN Y, ABALLEA L, BAEKE A, et al. Stray light testing of the PROBA V payload[C]. SPIE, 2013, 8889: 228-238.
- [186] PETERSON G L. Stray light test station for measuring point source transmission and thermal background of visible and infrared sensors[C]. SPIE, 2008, 7069: 208-216.
- [187] LI Hui. Study on the stray light analysis method for optical system[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 1996.
李晖. 光学系统杂光分析方法研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 1996.
- [188] HAO Yuncai. Technical progress and application of space optical sensor[J]. Aerospace Control and Application, 2017, 43(4): 9-18.
郝云彩. 空间光学传感器技术进展与应用[J]. 空间控制技术与应用, 2017, 43(4): 9-18.

Development and Prospect of Stray Light Suppression and Evaluation Technology (Invited)

WANG Hu^{1,2,3}, CHEN Qinfang¹, MA Zhanpeng^{1,2}, YAN Haoyu^{1,2}, LIN Shangmin^{1,2},
XUE Yaoke^{1,4,5}

(1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanism, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 CAS Key Laboratory of Space Precision Measurement Technology, Xi'an 710119, China)

(4 Youth Innovation Promotion Association, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100037, China)

(5 Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: With the rapid development of space optical technology and the continuous improvement of the performance of photoelectric detection devices, remote sensing systems with high resolution, multispectral, and low detection threshold are more and more widely used in aviation, aerospace and other fields. And the capabilities and evaluation indicators for the stray light suppression of electric-optic load are gradually becoming stricter. The stray light suppression technology and simulation analysis has become one of the indispensable links. Although the domestic stray light suppression and evaluation technology have developed earlier, a systematic method is still needed to lead the development of this technology to change the current research status of decentralization and fragmentation. Therefore, it is necessary to establish an integrated stray light suppression and evaluation method system, and conduct in-depth research in four key technical modules, including the formulation of stray light suppression scheme, suppression model surface characteristic measurement and modeling, stray light suppression effect simulation, and stray light test and evaluation and so on. Based on the theory of stray light radiation transfer, we give the corresponding

suppression methods according to the stray light inside and outside the field of view, and the internal thermal radiation stray light. But the actual stray light sources are complex and in various forms, often requiring various suppression methods together, such as selecting the configuration of the optical system, setting the baffle and vanes, adding the stops, coating the optical surface, and blackening the surface of the structural parts. In addition, in some specific cases, filtering method, adjacent frame subtraction method, polarization method, numerical aperture method, and image correction method can also be used to suppress stray light. Opto-mechanical systems are generally composed of various surfaces with different materials and properties and they have different characteristics such as reflection, scattering, and absorption. Therefore, studying the surface characteristics of the system is the basis for stray light analysis. The measurement of surface properties can be used as a preliminary method to obtain the surface information of the material. On this basis, modeling calculations can be performed to make up for the deficiency that the experimental measurement cannot obtain any direction of incidence and observation. It can be widely promoted and applied in engineering. Computer simulation is an important means of stray light analysis, which can solve the problems of too cumbersome and high testing costs for stray light experiments in optical systems with high suppression ratios, and improve the efficiency of stray light analysis. The Monte Carlo method has been widely used in a variety of commercial software due to its high accuracy and computational simplicity. With the rapid development of computer technology and the emergence of new algorithms, the number, speed, and accuracy of ray tracing will be improved. It can more accurately simulate the influence of stray light on the whole system. Stray light measurement is the key to the final determination and verification of the system's true stray light suppression capability. The measurement methods of stray light have formed two evaluation methods. The veiling glare index is suitable for general optical systems with low precision and small aperture, and the point source transmittance method is suitable for optical systems with large aperture and high stray light suppression ratio requirements. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanism of the Chinese Academy of Sciences has developed the first domestic point source transmittance stray light test device with the strongest capability of testing. It has been successfully applied to the stray light measurement of space equipped with high accuracy and served many scientific institutes and universities. This paper gives a set of the overall technical route and provides the idea for better promoting the development and application of stray light suppression and evaluation technology.

Key words: Stray light; Ghost image; Suppression technology; Bidirectional reflectance distribution function; Point source transmittance

OCIS Codes: 120.4640; 290.1483; 290.2648