

基于自由曲面的辐射定标光源设计

田杰文^{1,2}, 叶新^{1*}, 方伟¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了减小对卫星上的空间使用, 针对定标特点, 本文提出了一种用于积分球光源准直照明的自由曲面反射镜设计方法。采用该方法, 能够以小口径的积分球实现大面积的方形均匀辐照度分布。首先, 通过点光源模型建立自由曲面离轴反射照明数学模型, 然后, 通过切比雪夫点离散自由曲面, 并求解出满足点光源照明的自由曲面模型, 最后, 分析积分球的光源特性, 通过逐步优化自由曲面能量分布方法完成点光源照明模型到积分球照明模型转变。通过分析可知, 设定照明面积为 140 mm×140 mm 时, 目标面的辐照度非均匀性的不均匀度小于 0.02。满足星载定标轻量化, 短光路, 结构简单的需求。

关键词: 几何光学; 照明设计; 辐射定标; 积分球光源

中图分类号: O436 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2022-0021

Design of a radiometric calibration light source based on a freeform reflector

TIAN Jie-wen^{1,2}, YE Xin^{1*}, FANG Wei¹

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

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

* Corresponding author, E-mail: yexin@ciomp.ac.cn

Abstract: We propose a design method of a free-form reflector for collimating illumination of integrating spherical light sources to reduce the space occupation on a satellite. By using this method, a square irradiance distribution with large area can be achieved through a integrating sphere with small diameter. Firstly, the mathematical model of off-axis reflection lighting of free-form surface is established through the point light source model, then the free-form surface is discretized by Chebyshev points, and the free-form surface model that satisfies the point light source illumination is solved. Finally, the light source characteristics of the integrating sphere are analyzed. The transformation from the point light source illumination model to the integrating sphere illumination model is achieved by the optimization of the free-form surface energy distribu-

收稿日期: 2022-01-27; 修订日期: 2022-02-17

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(No. 2018YFB0504600, No. 2018YFB0504603)

Supported by the National Key R&D Program of China (No. 2018YFB0504600, No. 2018YFB0504603)

tion. The analysis results show that when the illumination area is set as 140 mm×140 mm, the irradiance non-uniformity of the target surface is less than 0.02. This method can meet the requirements of spaceborne calibration for light weight, short light path and simple structure.

Key words: geometric optics; illumination design; radiometric calibration; integrating sphere light sources

1 引言

辐射定标光源是指对空间遥感仪器进行地面或星上定标时,传递辐射计和遥感仪器同时观测的参考光源。辐射计和遥感器的观测视场无法做到完全匹配,因此参考光源的均匀性会在一定程度上影响定标精度^[1-4]。在MODIS的星上定标链路里,将太阳光直接照射漫反射板产生的朗伯光源作为参考光源。但是该方法的缺陷在于其受太阳光照方向的限制较大。此外,在太空环境中,太阳漫反射板自身的衰减很大,长时间使用会造成较大的误差。调查发现,漫反射板的漫反射率在5年时间里的衰减可达20%^[5-7]。CZCS和Landsat 5TM等仪器采用了“灯板”照明的定标方式,它们使用标准卤钨灯作为内置定标光源,其稳定性相对可控,这对于短周期的检测系统有很大优势^[8-9]。随着对光源特性的探究发现通过积分球对卤钨灯进行匀光可以得到一个均匀性更加良好的朗伯光源,因此衍生出了使用“灯+积分球”作为定标光源的定标方式^[10-11]。如我国发射的中巴资源1,2号卫星。但是这种照明方式的结构设计空间比较有限,单纯使用离轴抛物镜对光路进行准直折转时,出射面的辐照度均匀性无法满足定标需求。而且随着空间遥感载荷口径的不断增大,用于匀光的积分球的直径和开口尺寸也要随之加大,以满足定标光源要充满定标仪器视场的需求。然而使用大口径的积分球会带来很多困难,如尺寸加大,重量增加,热设计变得复杂等。此外使用及维护的相关问题也使得大口径积分球不利于实验室定标和在轨定标^[12]。为了通过使用小开口积分球的离轴照明模式,产生面积和均匀度满足要求的光源,本文提出使用自由曲面反射镜对光路进行折转准直,从而在漫反射板上得到大面积的定标光源^[13]。

由于光的几何特性,对光线传播的精确控制成为一个具有挑战性的问题。产生倾斜照明的最常见方法是将反射镜倾斜,这种方法减少了相关物理过程的推导,可以作为一个照明光学系统的理想几何模型。决定倾斜照明系统性能的关键因素为光学元件的表面几何形状。目前国内外在目标平面垂直于光轴的非倾斜几何领域,自由曲面形式的照明光学发展较快,并能进行较高质量的光束控制^[14-15]。但在倾斜离轴照明领域,自由曲面的应用还有待于进一步发展。

本文对基于自由曲面的倾斜反射照明模型进行了推导,并通过对光源进行直接扩展的方法,设计了小开口积分球离轴照明的辐射定标光源。该方法的优点在于定标光源的均匀性高,发散角度小,传递结构简单,体积小,质量轻,空间布局灵活,适合作为空间遥感系统的定标光源。

2 设计原理

2.1 自由曲面倾斜照明模型

具有自由曲面的光学器件在照明和光束整形方面有着广泛的应用^[16]。在自由曲面光学器件的典型应用中,需要调控光学器件的表面来重新定向并重塑光源的辐照度图案,以便在给定的目标面上生成规定的图案,这类问题称为“规定辐照度问题”。当光源或目标的形状以及输入/输出的图案缺乏特殊的对称性(如旋转或矩形)时,必须使用自由形状。随着科技的进步,用于照明的任何形状的自由曲面都具备了加工的可能性。在自由曲面照明系统设计中,核心问题是建立光源和照明区域的映射关系^[17]。本文基于物理原理和严格的数学计算方法,采用将自由曲面反射镜倾斜的方式来构建整个照明系统。如图1所示, β 表示目标面相对垂直情况的偏转角度,可以看出将反射镜倾斜与未将其倾斜的差别主要包括目标面的倾斜和反射镜中心的偏差。

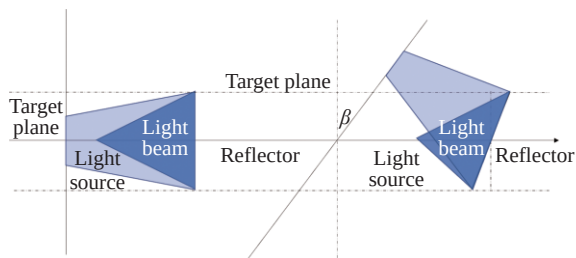


图1 自由曲面反射镜倾斜带来的影响

Fig. 1 The influence caused by the tilt of freeform reflector

2.2 一维模型的建立

建立如图2所示坐标系, 将一条抽象的曲线作为自由曲面的示意图, 其中 O 表示光源位置, P 表示自由曲面反射镜上的任意一点, 在这里用球坐

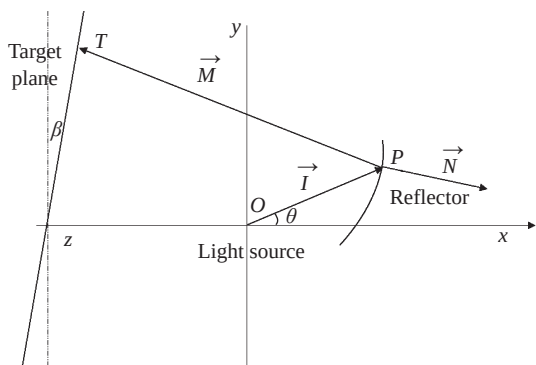


图2 自由曲面二维坐标系

Fig. 2 Two-dimensional coordinate system of a freeform reflector

标系表示 $P(\rho \sin \theta, \rho \cos \theta)$, ρ 表示光源到自由曲面的距离, θ 表示 OP 与 x 轴的夹角, 由此可以得到点 P 处曲线切线的矢量为 $(\rho_\theta \sin \theta + \rho \cos \theta, \rho_\theta \cos \theta - \rho \sin \theta)$, ρ_θ 表示 ρ 在 θ 方向上的导数, 对应的法矢量为 $(\rho \sin \theta - \rho_\theta \cos \theta, \rho_\theta \sin \theta + \rho \cos \theta)$ 。

因此, 点 P 处曲线的单位法矢量可表达为:

$$N = \frac{1}{\sqrt{\rho^2 + \rho_\theta^2}} (\rho \sin \theta - \rho_\theta \cos \theta, \rho_\theta \sin \theta + \rho \cos \theta) \quad (1)$$

设入射光的单位矢量为:

$$I = (\sin \theta, \cos \theta) \quad (2)$$

根据反射定律有:

$$I + M = 2(I \cdot N)N \quad (3)$$

其中 M 表示反射光学的单位矢量。

记 $\Gamma = 2I \cdot N$ 为反射系数, 通过计算能够获得:

$$\Gamma = \frac{2\rho}{\sqrt{\rho^2 + \rho_\theta^2}} \quad (4)$$

根据光学系统的设定, 反射光学的单位矢量为:

$$M = (\Gamma N - I) \quad (5)$$

可以求出

$$M = \begin{cases} \frac{-\sin(\theta)(\rho^2 + \rho_\theta^2) - (\rho_\theta \cos(\theta) - \rho \sin(\theta))(\sqrt{\rho^2 + \rho_\theta^2} + \rho)}{(\rho^2 + \rho_\theta^2)}, \\ \frac{-\cos(\theta)(\rho^2 + \rho_\theta^2) + (\rho_\theta \sin(\theta) + \rho \cos(\theta))(\sqrt{\rho^2 + \rho_\theta^2} + \rho)}{(\rho^2 + \rho_\theta^2)} \end{cases} \quad (6)$$

考虑 T 位于倾斜面上, 所以 T 满足方程

$$At_x + Bt_y + C = 0 \quad (7)$$

其中: $A = \sin(\beta)$, $B = \cos(\beta)$, $C = -BL$, L 表示 O 到 Z 的距离, β 表示倾斜面与坐标面的夹角。

$$\begin{cases} t_x = B \frac{P_x M_y + (L - P_y) M_x}{AM_x + BM_y} \\ t_y = \frac{AP_y M_x - AP_x M_y - CM_y}{AM_x + BM_y} \end{cases} \quad (8)$$

这里 P_x, P_y 表示 P 点坐标。对其进行坐标变换, 将全局坐标变换为局部坐标, 可得:

$$t'_x = \frac{P_x M_y + LM_x - P_y M_x}{AM_x + CM_y}, \quad t'_y = 0 \quad (9)$$

至此, 一维平面内各点的坐标位置关系推导完毕, 即将倾斜照明问题转化成了线对线的问题。上述推导过程的优点是可以很快地得到各点的位置关系, 但是无法实现对光线的进一步调控, 下面将对二维情况进行推导。

2.3 二维模型的推导

自由曲面照明原理的核心就是能量的搬运, 其原理示意图如图3所示。简单理解就是将能量从左边的面搬运到右边的面, 本小结通过对上一小结的扩展推导, 建立了倾斜照明的几何模型, 并建立了如图4所示的坐标系。原理与2.2节一致, 这里不做过多阐述, 直接给出推导结果。

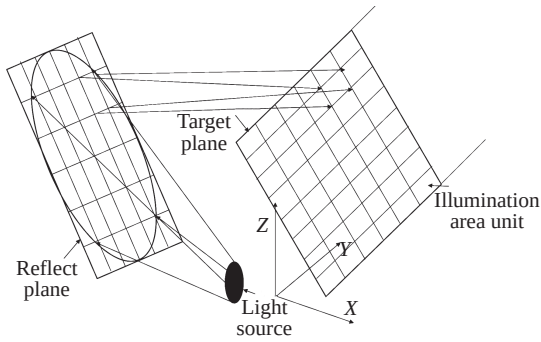


图 3 自由曲面的设计原理

Fig. 3 Design principle of freeform reflector

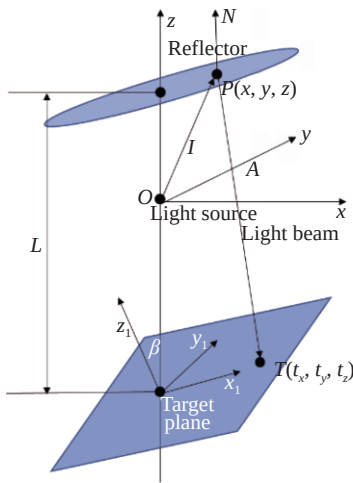


图 4 倾斜照明坐标系

Fig. 4 Coordinate system of tilted illumination

点 $P(P_x, P_y, P_z)$ 用球坐标系可表示为:

$$\begin{cases} P_x = \rho \sin \phi \cos \theta \\ P_y = \rho \sin \phi \sin \theta \\ P_z = \rho \cos \phi \end{cases} \quad (10)$$

假定向量 $\mathbf{P}$ 为点 P 的位置矢量, 向量 $\mathbf{P}_\theta$ 和 $\mathbf{P}_\phi$ 分别为向量 $\mathbf{P}$ 关于 θ 和 ϕ 的一阶偏导数, 显然 $\mathbf{P}_\theta$ 和 $\mathbf{P}_\phi$ 是位于 P 点自由曲面切平面内的相互正交的向量, 且有:

$$\begin{aligned} \mathbf{P} &= \rho \mathbf{I} \\ \mathbf{P}_\theta &= \rho_\theta \mathbf{I} + \rho \mathbf{I}_\theta \\ \mathbf{P}_\phi &= \rho_\phi \mathbf{I} + \rho \mathbf{I}_\phi \end{aligned} \quad (11)$$

其中, 入射光线的单位方向矢量 $\mathbf{I} = (\sin \varphi \cos \theta, \sin \varphi \sin \theta, \cos \varphi)$, 由此可确定曲面在点 P 处的单位法矢量为:

$$\mathbf{N} = \frac{\mathbf{P}_\phi \times \mathbf{P}_\theta}{|\mathbf{P}_\phi \times \mathbf{P}_\theta|} \quad (12)$$

通过进一步计算可得点 P 处的单位法矢量为

$$\mathbf{N} = \frac{1}{\sqrt{\rho_\theta^2 + \sin^2 \phi (\rho^2 + \rho_\phi^2)}} \begin{Bmatrix} \rho_\theta \sin \theta + \cos \theta \sin \phi (\rho \sin \phi - \rho_\phi \cos \phi) \\ -\rho_\theta \cos \theta + \sin \theta \sin \phi (\rho \sin \phi - \rho_\phi \cos \phi) \\ \sin \phi (\rho \cos \phi + \rho_\phi \sin \phi) \end{Bmatrix} \quad (13)$$

反射系数

$$\Gamma = \sqrt{\frac{\rho^2 \sin^2(\phi)}{\rho_\theta^2 + \sin^2(\phi)(\rho^2 + \rho_\phi^2)}} + \frac{\rho \sin(\phi)}{\sqrt{\rho_\theta^2 + \sin^2(\phi)(\rho^2 + \rho_\phi^2)}} \quad (14)$$

反射光线的单位矢量为

$$\mathbf{M} = \frac{1}{R} \begin{Bmatrix} -\cos(\theta) \sin(\phi) \mathbf{R} + (\rho_\theta \sin(\theta) + \cos(\theta) \sin(\phi) (\rho \sin(\phi) - \rho_\phi \cos(\phi))) (\rho \sin(\phi)) \\ -\sin(\theta) \sin(\phi) \mathbf{R} + (\rho_\theta \cos(\theta) + \sin(\theta) \sin(\phi) (-\rho \sin(\phi) + \rho_\phi \cos(\phi))) (-\rho \sin(\phi)) \\ -\cos(\phi) \mathbf{R} + \sin(\phi) (\rho \cos(\phi) + \rho_\phi \sin(\phi)) (\rho \sin(\phi)) \end{Bmatrix} \quad (15)$$

$$\text{其中 } \mathbf{R} = (\rho_\theta^2 + \sin^2(\phi)(\rho^2 + \rho_\phi^2)) \quad (16)$$

此时目标点 T 的全局坐标为

$$\begin{aligned} t_x &= B \frac{P_x M_z + (L - P_z) M_x}{AM_x + BM_z}, \\ t_y &= P_y - M_y \frac{AP_x - BL + BP_z}{AM_x + BM_z}, \\ t_z &= \frac{AP_z M_x - AM_x M_z - CM_z}{AM_x + BM_z} \end{aligned} \quad (17)$$

对其进行坐标转化, 将全局坐标转化为局部坐标可得:

$$\begin{aligned} t'_x &= \frac{P_x M_z + LM_x - P_z M_x}{AM_x + BM_z}, \\ t'_y &= P_y - M_y \frac{AP_x - BL + BP_z}{AM_x + BM_z}, \\ t'_z &= 0 \end{aligned} \quad (18)$$

求解得

$$\begin{cases} t_x = \frac{\sin \phi \{ \cos \theta \sin \phi [(\rho^2 - \rho_\phi^2) t_z \sin \phi + 2\rho^2 \rho_\phi] - 2\rho^2 \rho_\theta \sin \theta \cos \phi \}}{\sin^2 \phi [(\rho^2 - \rho_\phi^2) \cos \phi + 2\rho \rho_\phi \sin \phi] - \rho_\theta^2 \cos \phi} \\ t_y = \frac{\sin \phi \{ \sin \theta \sin \phi [2\rho \rho_\phi (\rho - \cos \phi)] + 2\rho^2 \rho_\theta \cos \theta \cos \phi \}}{\sin^2 \phi [(\rho^2 - \rho_\phi^2) \cos \phi + 2\rho \rho_\phi \sin \phi] - \rho_\theta^2 \cos \phi} \end{cases}, \quad (19)$$

至此二维模型的几何关系推导完毕。将其抽象为

$$\begin{cases} t_x = t_x(\theta, \phi, \rho, \rho_\theta, \rho_\phi) \\ t_y = t_y(\theta, \phi, \rho, \rho_\theta, \rho_\phi) \end{cases}. \quad (20)$$

2.4 能量重新分配

用出射光立体角 Ω 内的总能量作为基准, 不考虑能量损失时, 由能量守恒定律可得:

$$\iint_{\Omega} I(\theta, \phi) d\Omega = \iint_S L(t_x, t_y) dS, \quad (21)$$

其中 S 为预定目标照明的面积, 即出射光立体角内的能量经反射镜反射全部到达目标面的特定区域内。

根据微分公式有:

$$\iint_{\Omega} I(\theta, \phi) \sin \phi d\phi d\theta = \iint_S L(t_x, t_y) dt_x dt_y. \quad (22)$$

使用 Jacobian 矩阵对其进行坐标变换^[18], 得到一个 Monge-Ampère(MA) 椭圆方程,

$$a_1(\rho_{\theta\theta}\rho_{\phi\phi} - \rho_{\theta\phi}^2) + a_2\rho_{\theta\theta} + a_3\rho_{\theta\phi} + a_4\rho_{\phi\phi} + a_{51} + a_{52} = 0, \quad (23)$$

其中:

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{\partial t_x}{\rho_\theta} \frac{\partial t_y}{\rho_\phi} - \frac{\partial t_x}{\rho_\phi} \frac{\partial t_y}{\rho_\theta} \\ a_2 &= \frac{\partial t_x}{\rho_\theta} \frac{\partial t_y}{\phi} - \frac{\partial t_x}{\phi} \frac{\partial t_y}{\rho_\theta} + \rho_\phi \left(\frac{\partial t_x}{\rho_\theta} \frac{\partial t_y}{\rho} - \frac{\partial t_x}{\rho} \frac{\partial t_y}{\rho_\theta} \right) \\ a_3 &= \frac{\partial t_x}{\rho_\phi} \frac{\partial t_y}{\phi} - \frac{\partial t_x}{\phi} \frac{\partial t_y}{\rho_\phi} + \frac{\partial t_x}{\theta} \frac{\partial t_y}{\rho_\theta} - \frac{\partial t_x}{\rho_\theta} \frac{\partial t_y}{\theta} + \\ &\quad \rho_\theta \left(\frac{\partial t_x}{\rho} \frac{\partial t_y}{\rho_\theta} - \frac{\partial t_x}{\rho_\theta} \frac{\partial t_y}{\rho} \right) + \rho_\phi \left(\frac{\partial t_x}{\rho_\phi} \frac{\partial t_y}{\rho} - \frac{\partial t_x}{\rho} \frac{\partial t_y}{\rho_\phi} \right) \\ a_4 &= \frac{\partial t_x}{\theta} \frac{\partial t_y}{\rho_\phi} - \frac{\partial t_x}{\rho_\phi} \frac{\partial t_y}{\theta} + \rho_\theta \left(\frac{\partial t_x}{\rho} \frac{\partial t_y}{\rho_\phi} - \frac{\partial t_x}{\rho_\phi} \frac{\partial t_y}{\rho} \right) \\ a_{51} &= \frac{\partial t_x}{\theta} \frac{\partial t_y}{\phi} - \frac{\partial t_x}{\phi} \frac{\partial t_y}{\theta} \\ a_{52} &= \rho_\theta \left(\frac{\partial t_x}{\rho} \frac{\partial t_y}{\phi} - \frac{\partial t_x}{\phi} \frac{\partial t_y}{\rho} \right) + \rho_\phi \left(\frac{\partial t_x}{\theta} \frac{\partial t_y}{\rho} - \frac{\partial t_x}{\rho} \frac{\partial t_y}{\theta} \right). \end{aligned} \quad (24)$$

最后得到倾斜面照明的自由曲面模型:

$$\begin{cases} a_1(\rho_{\theta\theta}\rho_{\phi\phi} - \rho_{\theta\phi}^2) + a_2\rho_{\theta\theta} + a_3\rho_{\theta\phi} + a_4\rho_{\phi\phi} + \\ a_{51} + a_{52} = 0 \\ t_x = t_x(\theta, \phi, \rho, \rho_\theta, \rho_\phi) \\ t_y = t_y(\theta, \phi, \rho, \rho_\theta, \rho_\phi) \end{cases}. \quad (25)$$

3 离轴反射式照明光学系统设计

首先确定整个系统的结构参数, 由于本文是为了实现对传递辐射计和成像光谱仪的同时比对, 因此经过反射镜后的准直光应垂直照射漫板, 以便传递辐射计和成像光谱仪可以同时以 45° 角观测, 即 $\beta = 45^\circ$, 定标流程如图 5 所示。为了满足相应的尺寸布局, 设定自由曲面反射镜的相关参数如表 1 所示。

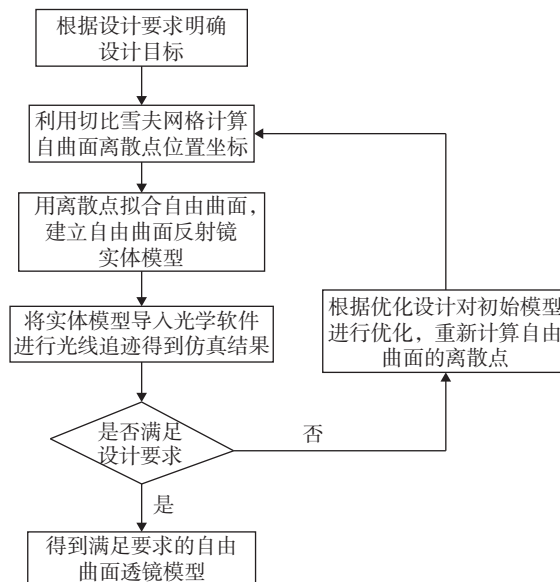


图 5 自由曲面的设计流程图

Fig. 5 Design flow chart of freeform reflector

设 θ 代表光源的发光角度, r 代表光源到自由曲面反射镜的距离, z 代表目标面到光源的距离, $F\#$ 代表系统的 F 数, 这里用反射镜到光源的距离与反射镜的最大口径的比值表示。

由图 1 可以看出, 倾斜照明与垂直照明最大的区别在于, 镜子的外形由圆形变成了椭圆形, 而

表1 自由曲面反射镜的相关参数

Tab. 1 Reference parameters of the freeform reflector

Parameters	value
$\theta/(^\circ)$	15
r/mm	432
z/mm	$900/\sqrt{2}$
F#	1.6

且由于镜子的倾斜造成了椭圆形反射镜的中心不在光轴上。针对这一问题,本文先通过几何关系确定偏心位置,再将整个初始面型通过切比雪夫点的方式进行离散,单位归一化后,以 21×21 采样点为例给出示意图,见图6。

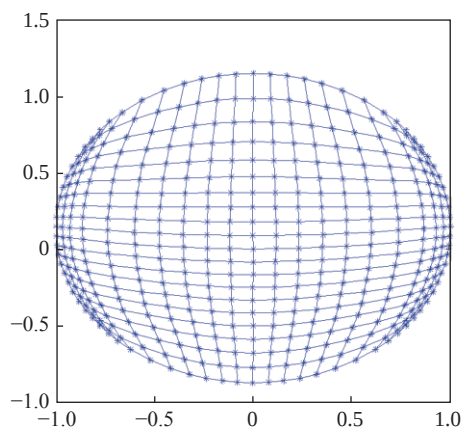


图6 切比雪夫点采样示意图

Fig. 6 Schematic diagram of Chebyshev points sampling

以点光源建立初始模型,根据离散的坐标求解方程(25),通过 Matlab 求解得到仿真图,如图7所示。

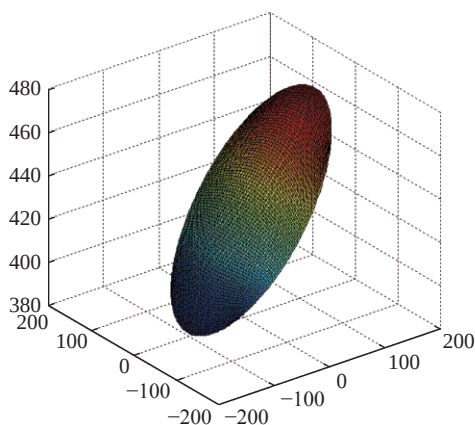


图7 自由曲面反射镜的仿真示意图

Fig. 7 Schematic diagram of simulated freeform reflector

通过 UG 软件将离散点拟合后,导入 lighttools 进行辐照度均匀性分析,光路示意图如图8所示,照度示意图如图9(彩图见期刊电子版)所示。

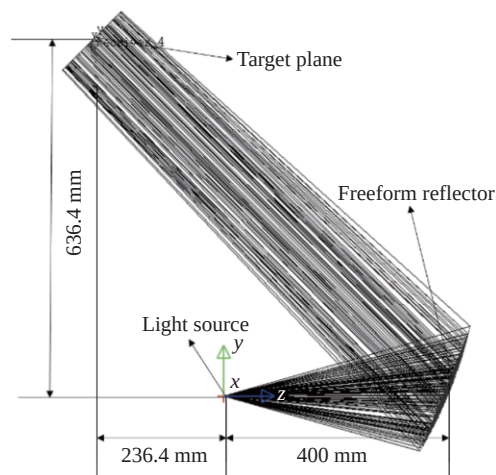


图8 光路示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the optical path

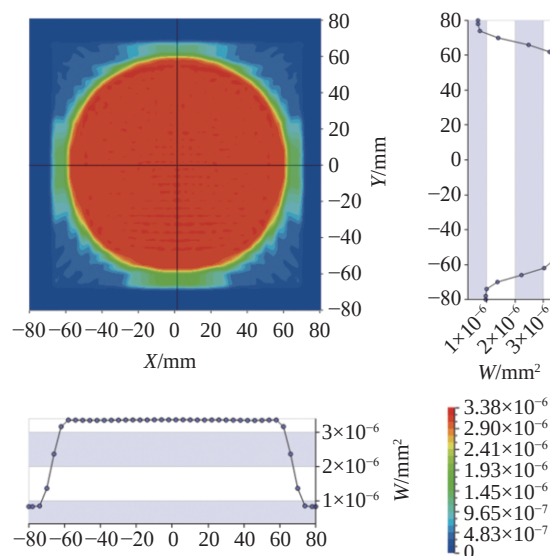


图9 目标面辐照度示意图

Fig. 9 Schematic diagram of irradiance on the target plane

由于圆形边界相对好控制,所以用圆形照明光斑作为初始结构,通过进一步优化得到方形照明示意图,如图10(彩图见期刊电子版)所示。此时,基于点光源的倾斜照明自由曲面构建完成。通过计算可知此时目标面辐照度的均匀性为99.3%。

由图5的流程图可知,该方案中的光源是利用积分球进行匀光,使得光源尺寸有了变化。这里只考虑积分球开口处的光强分布,故可以近似

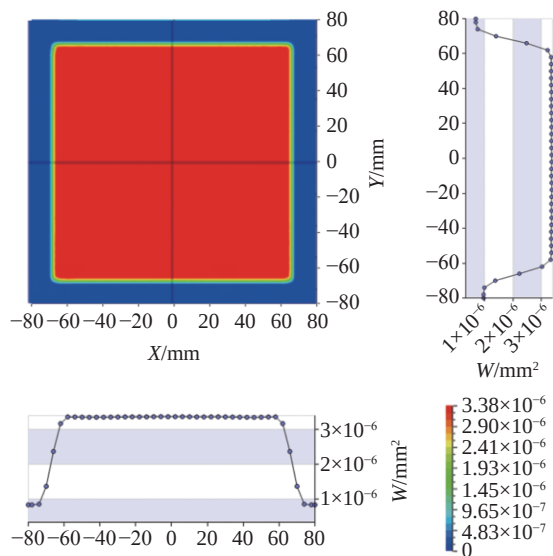


图 10 方形照明示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the square illumination area

看做一个圆形的表面光源, 此时如果继续使用点光源模型, 会造成边界区域呈现大幅度的梯形下降^[19-20], 如图 11(彩图见期刊电子版)所示。经计算此时的均匀性为 95.7%。

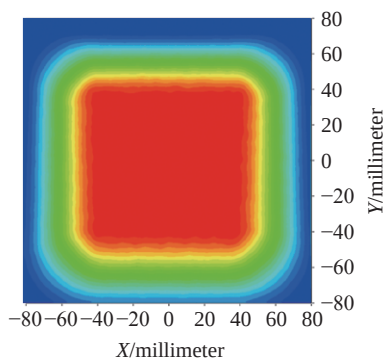


图 11 未优化前辐照度示意图

Fig. 11 Schematic diagram of irradiance before optimization

为了解决这一问题, 通常会使用辐照度反馈的方法来继续优化, 但是该方法的计算相对复杂, 具体方法如下: (1) 利用点光源自由曲面透镜算法构建初始透镜模型, 并将透镜外曲面下半部分的凹面约束为竖直面; (2) 基于实际扩展光源进行光线追迹得到仿真照度分布; (3) 将仿真照度分布与目标照度分布之间的照度偏离量分布累加到预设目标照度分布进行修正, 得到新的目标照度分布; (4) 利用新目标照度分布重建基于点光源的能量映射关系; (5) 利用几何法重构透镜模型, 并将透镜外曲面下半部分的凹面约束为竖直面。重复

(2)至(5)步的迭代反馈优化过程, 直到仿真照度分布满足设计要求。每一步都要把照度的偏离量叠加进去, 而偏离量都是通过仿真追迹出来的, 每一步都会有少量偏差, 并且容易引入迭代误差, 对于该问题, 本文通过直接将光源尺寸放大, 计算模型的初始量, 具体过程如下: (1) 通过点光源建立模型, 得到自由曲面的初始结构; (2) 扩大光源尺寸, 通过接收器获得初始自由曲面上的辐照度, 对点光源模型中的 I 进行优化; (3) 逐渐扩大光源尺寸, 重复步骤(2)的操作, 直到得出满足系统光源尺寸的自由曲面。设计过程如图 12(彩图见期刊电子版)所示。图 12(a) 表示光源是半径为 5 mm 的圆形时, 目标面辐照度示意图, 图 12(b) 表示光源是半径为 11 mm 的圆形时, 目标面辐照度示意图, 此时辐照度均匀性为 98.3%。对比图 11 与图 12, 可以看出设计结果得到了很大的提升。

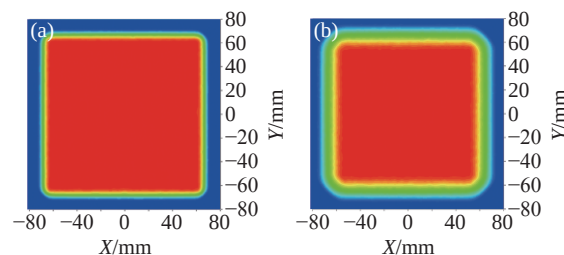


图 12 优化后照明示意图

Fig. 12 Schematic diagram of irradiance after optimization

4 结 论

针对采用大口径积分球作为空间遥感仪器的辐射定标光源所面临的成本高且维护困难的问题, 本文提出了一种使用“积分球+自由曲面反射镜”作为全谱段定标光源结构的方法。使用自由曲面反射镜的优点在于, 使用一片镜子即可实现对小开口积分球发出的朗伯光源进行放大、折转、准直, 使得整个定标光源链路结构简单, 性能良好, 符合在轨空间辐射定标的应用需求。通过改变光源的尺寸大小进行直接求解, 使得求解的面型从点光源模型转变为实际的积分球照明模型。通过光学软件的分析, 可以看出光源经过准直、折转后, 在目标面上得到大小合适、均匀度在 98% 以上的照明光斑, 验证了该方法在全谱段辐射定标光源链路中应用的可行性。

参考文献:

- [1] WANG H R, LI H D, QI J, *et al.*. Total solar irradiance monitor for the FY-3B satellite-space experiments and primary data corrections[J]. *Solar Physics*, 2015, 290(2): 645-655.
- [2] 高峰, 安培浚. 国际空间和对地观测技术发展战略新动向[J]. 遥感技术与应用, 2008, 23(6): 686-696.
GAO F, AN P J. The new trends of development strategy on the international space and earth observation technology[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2008, 23(6): 686-696. (in Chinese)
- [3] 陈凤, 郑小兵. 光谱非匹配对光学遥感器定标精度的影响[J]. 光学精密工程, 2008, 16(3): 415-419.
CHEN F, ZHENG X B. Influence of spectrum not-matching on calibration precision of remote sensor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(3): 415-419. (in Chinese)
- [4] HU SH S, MA SH, YAN W, *et al.*. Measuring internal solitary wave parameters based on VIIRS/DNB data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2019, 40(20): 7805-7816.
- [5] 王玉鹏, 胡秀清, 王红睿, 等. 可在轨溯源的太阳反射波段光学遥感仪器辐射定标基准传递链路[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 1807-1812.
WANG Y P, HU X Q, WANG H R, *et al.*. Standard transfer chain for radiometric calibration of optical sensing instruments with traceability in solar reflective bands[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(7): 1807-1812. (in Chinese)
- [6] PANG W W, ZHENG X B, LI J J, *et al.*. High accuracy calibration technology of remote sensor tracing to cryogenic radiometer[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2014, 9(2): 138-148.
- [7] LI B Y, REN J W, WAN ZH, *et al.*. Research of large aperture integrating sphere used in the radiative calibration for space remote sensor[J]. *Journal of Optoelectronics-Laser*, 2013, 24(3): 464-469.
- [8] 徐达, 岳世新, 张国玉, 等. Offner型凸面光栅宽动态范围辐射定标光源设计[J]. 中国光学, 2020, 13(5): 1085-1093.
XU D, YUE SH X, ZHANG G Y, *et al.*. Design of an Offner convex grating radiation calibration light source with a wide dynamic range[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(5): 1085-1093. (in Chinese)
- [9] HANSSEN L. Integrating-sphere system and method for absolute measurement of transmittance, reflectance, and absorptance of specular samples[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(19): 3196-3204.
- [10] RABL A, GORDON J M. Reflector design for illumination with extended sources: the basic solutions[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(25): 6012-6021.
- [11] 孙景旭, 张汉壮. 一种高亮度积分球定标光源的热设计[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0312002.
SUN J X, ZHANG H ZH. Thermal design for a kind of high-light-level integrating sphere calibration source[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0312002. (in Chinese)
- [12] 顾国超, 王丽, 李洪波, 等. 瞬态热量标定系统的太阳模拟器光学系统设计[J]. 中国光学, 2012, 5(6): 630-638.
GU G CH, WANG L, LIU H B, *et al.*. Optical design of solar simulator used for transient calorimeter calibration system[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(6): 630-638. (in Chinese)
- [13] WU R M, CHANG SH Q, ZHENG ZH R, *et al.*. Formulating the design of two freeform lens surfaces for point-like light sources[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(7): 1619-1622.
- [14] YU B H, TIAN ZH H, SU D Q, *et al.*. Optical design of an ultra-short-focus projection system with low throw ratio based on a freeform surface mirror[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(2): 363-371.
- [15] BÖSEL C, WORKU N G, GROSS H. Ray-mapping approach in double freeform surface design for collimated beam shaping beyond the paraxial approximation[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(13): 3679-3688.
- [16] DESNIJDER K, HANSELAER P, MEURET Y. Ray mapping method for off-axis and non-paraxial freeform illumination lens design[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(4): 771-774.
- [17] 张赢, 丁红昌, 赵长福, 等. 基于多激光传感器装配的自由曲面法线找正方法研究[J]. 中国光学, 2021, 14(2): 344-352.
ZHANG Y, DING H CH, ZHAO CH F, *et al.*. The normal alignment method for freeform surfaces based on multiple laser sensor assembly[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(2): 344-352. (in Chinese)
- [18] SCHRUBEN J S. Formulation of a reflector-design problem for a lighting fixture[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1972, 62(12): 1498-1501.
- [19] 顾国超, 刘洪波, 陈家奇, 等. 基于Supporting-Ellipsoid方法的自由曲面构造[J]. 中国光学, 2014, 7(5): 823-829.

- GU G CH, LIU H B, CHEN J Q, *et al.*. Construction of freeform surface based on Supporting-Ellipsoid method[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(5): 823-829. (in Chinese)
- [20] WESTER R, MÜLLER G, VÖLL A, *et al.*. Designing optical free-form surfaces for extended sources[J]. *Optics Express*, 2014, 22(S2): A552-A560.

作者简介:



田杰文(1990—), 男, 吉林集安人, 2013 年于长春理工大学获得学士学位, 现就读中国科学院大学长春光学精密机械与物理研究所光学工程专业。主要研究方向为定标光源设计。E-mail: 515100720@qq.com



叶 新(1979—), 男, 吉林吉林人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学遥感, 地球辐射测量, 太阳辐射测量, 光谱辐射定标等方向的研究。E-mail: yexin@ciomp.ac.cn



方 伟(1965—), 女, 辽宁朝阳人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学遥感, 太阳辐射测量, 绝对辐射定标等方向的研究。E-mail: fangw@ciomp.ac.cn