

用于太阳直接辐射测量的自由曲面反射镜优化设计方法

杨晓彤¹, 张国玉^{1,2,3*}, 张健^{1,2,3}, 崇伟^{1,4}, 段宗涛¹, 牛政杰¹¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;² 吉林省光电测控仪器工程技术研究中心, 吉林 长春 130022;³ 光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022;⁴ 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

摘要 为解决太阳直接辐射测量过程中跟踪装置导致的全年测量均匀性难以保证的关键问题、实现无需跟踪的太阳直接辐射全季全纬度均匀测量,提出了一种用于太阳直接辐射测量的自由曲面反射镜优化设计方法。分析了全球太阳直接辐射角度变化规律,建立了自由曲面反射镜初始结构模型;构建了时空尺度下辐照度均匀性(RFUS)评价函数,建立了二分进化与无余变长机制,提出了基于进化策略的自由曲面反射镜优化方法;以地球全纬度地区太阳直接辐射均匀测量为目标,迭代优化并仿真分析了染色体细分参量分别为 $3^\circ, 1^\circ, 0.5^\circ, 0.25^\circ$ 的 4 种代表性自由曲面反射镜面型。结果表明:染色体细分参量为 0.25° 时 RFUS 最优,为 92.36%;搭建反射光斑中心位置及 RFUS 验证实验,所提方法得到的光斑中心最大直线距离约为 1.5 mm,RFUS 为 90.34%,该方法可实现全时空太阳直接辐射均匀测量,为后续太阳辐射测量领域新产品和新应用提供理论基础和技术支持。

关键词 光学设计; 太阳直接辐射测量; 自由曲面; 进化策略; 时空均匀性; 非成像光学

中图分类号 TH765; P414.5

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.0922001

Optimization Design Method of Freeform Reflector for Direct Solar Radiation Measurement

Yang Xiaotong¹, Zhang Guoyu^{1,2,3*}, Zhang Jian^{1,2,3}, Chong Wei^{1,4}, Duan Zongtao¹, Niu Zhengjie¹¹ School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;² Jilin Engineering Research Center of Photoelectric Measurement & Control Instruments, Changchun 130022, Jilin, China;³ Key Laboratory of Opto-Electronic Measurement and Optical Information Transmission Technology, Ministry of Education, Changchun 130022, Jilin, China;⁴ Meteorological Observation Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

Abstract This paper proposed an optimization design method of freeform reflectors for direct solar radiation measurement to solve the key problem that year-round measurement uniformity is difficult to guarantee due to the tracking device used in the process of direct solar radiation measurement and to achieve tracking-free full-season and full-latitude uniform measurement of direct solar radiation. The global variation law of the direct solar radiation angle was analyzed, and the initial structure model of a freeform reflector was built. An evaluation function of the radiative flux uniformity at spatiotemporal scales (RFUS) was constructed, a dichotomous evolution mechanism and a variable length mechanism without a remainder were developed, and an optimization method of freeform reflectors based on the evolutionary strategy was proposed. For the purpose of achieving full-latitude uniform measurement of direct solar radiation around the world, four representative freeform reflectors with chromosome subdivision parameters of $3^\circ, 1^\circ, 0.5^\circ$, and 0.25° , respectively, were iteratively optimized and simulated. The results show that the RFUS is the best, 92.36% to be exact, when the chromosome subdivision parameter is 0.25° . Finally,

收稿日期: 2021-09-03; 修回日期: 2021-10-14; 录用日期: 2021-11-17

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20190302124GX)、长春理工大学科技创新基金(XJJLG-2018-02)

通信作者: *zh_guoyu@163.com

tests were set up to verify the position of the reflection spot center and the RFUS. According to the results, the maximum linear distance of the spot center obtained by this method is about 1.5 mm, and RFUS is 90.34%. The proposed method can be used to achieve full-spatiotemporal uniform measurement of direct solar radiation, and it provides a theoretical basis and technical support for new products and applications in the field of solar radiation measurement.

Key words optical design; direct solar radiation measurement; freeform; evolutionary strategy; spatiotemporal uniformity; non-imaging optics

1 引言

太阳辐射是地球最重要的能量来源,其变化深刻影响着地球的气候与环境。太阳辐射主要包含直接辐射和散射辐射两部分^[1],其中直接辐射与太阳自身状态紧密相关,对其光谱辐照度和全辐照度测量有助于长期监测太阳活动变化^[2],反演云量以及大气气溶胶光学特性^[3],对太阳能资源开发、大气环境与污染监测、气候变化检测、极端天气灾害预警,以及保证农业生产等具有重要意义^[4-6]。

目前地面测量太阳直接辐射光谱辐照度的仪器主要分为光谱式和通道式两种^[7-10],均利用太阳跟踪装置实现太阳直接辐射的采集。其中,2016年郑茹等^[11-12]设计了一种基于余弦校正器的光谱型太阳辐射观测仪,利用余弦器外露配合挡光环实现了入射角为 $-80^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 的300~1000 nm范围内的太阳光谱辐照度测量;2019年Gröbner等^[13]采用平场凹面光栅作为色散与会聚元件,实现了350~1000 nm范围内太阳光谱辐照度的室外观测;2020年李建玉等^[14]设计了一种测量多波段激光大气透过率的太阳辐射计,基于太阳宽谱直接辐射测量得到1.064,1.315,1.54 μm 的大气透过率。

现有的太阳直接辐射全辐照度测量方法分为直接测量和间接测量两类^[15]。其中,间接测量法通过太阳总辐射与散射辐射反演得到直接辐射,荷兰Kipp & Zonen公司基于此方法,利用多个硅光电二极管设计了CSD系列日照时数传感器^[16];江苏无线电科学研究所也在此基础上设计了一种采用多分天穹的遮光方案的WUSH-RZ2日照传感器^[17],此类方法存在难以修正的原理性误差。采用直接测量法的典型仪器为德国Logotronic公司的SD系列日照传感器^[18]和锦州阳光气象科技公司的TBS系列直接辐射表^[19],利用二维跟踪机构实现对太阳直接辐射全辐照度的测量时存在结构复杂、运行维护较难的缺陷^[20]。日本EKO公司研制的MS系列日照时数测量系统^[21]无需自动太阳跟踪装置,利用磨砂反射镜^[22]实现了 $-58^{\circ}\sim 58^{\circ}$

地球纬度区间内的日照时数测量;其反射镜经磨砂处理后引起了无规则的漫反射,造成探测光线路径难以控制、能量利用率极低且仪器一致性无法保证等问题。

针对目前太阳直接辐射测量仪器需要跟踪装置才能实现辐照度及辐射光谱全季全纬度测量的难题,本文提出了一种用于太阳直接辐射测量的自由曲面反射镜优化设计方法,建立了自由曲面反射镜的初始结构模型,构建了基于二分进化与无余变长机制的优化策略。最后,以此为基础,迭代优化了一种可应用于地球全纬度空间的自由曲面反射镜,以实现无需跟踪的全时空太阳直接辐射均匀采集,从而为后续太阳直接辐射特性测量提供了新的思路与方法。

2 自由曲面反射镜初始结构构建

2.1 太阳直接辐射测量反射镜工作原理

地球自转和公转导致太阳直射点始终在地球南北回归线之间做往复运动,通过区域化分析全球不同纬度地带太阳视运动轨迹的差异,即可得到太阳直接辐射角度变化规律。太阳在天球上的位置可通过太阳高度角 h_s 和方位角 A_s 共同表示^[23-25],可以描述为

$$\begin{cases} \sin h_s = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos t \\ \sin A_s = \frac{\cos \delta \cdot \sin t}{\cos h_s} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: φ 为所在地纬度,由所在地理位置决定; t 为此时刻太阳时角,由所处时刻决定; δ 为此时刻太阳赤纬,可从天文年历查询得到。

由式(1)可知,太阳直射点在子午方向上绕地轴自西向东旋转,在弧矢方向上在冬至日和夏至日的太阳正午位置间来回移动,两个因素共同导致太阳高度角和方位角的变化。因此,可通过设计使太阳直接辐射测量反射镜的光轴与地轴平行,并使其沿地球周日运动反向旋转,以抵消子午方向上太阳方位角的变化^[26],同时利用自由曲面反射镜面型特性实现对弧矢方向上太阳直接辐射的采集。

2.2 全纬度太阳直接辐射角度范围分析

由太阳直接辐射测量反射镜的工作原理可知, 构建反射镜初始结构时, 全球太阳直接辐射角度的变化规律可由三维空间运动退化为二维平面运动, 建立的模型如图 1 所示。

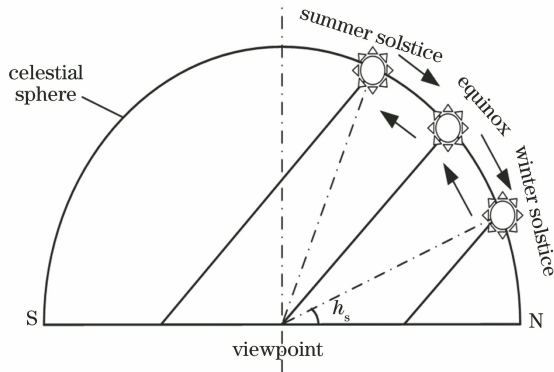


图 1 全球太阳直接辐射角度变化规律二维模型
Fig. 1 Two-dimensional model of global solar direct radiation angle variation

此时式(1)即可表示二维空间中太阳视运动轨迹, 由式(1)求出全球不同纬度地带二分、二至日正午时太阳高度角的变化规律, 如图 2 所示。

根据图 2, 可以得出全纬度太阳直接辐射光线入射角度范围如图 3 所示, 最大入射角度范围为 47° , 南北极圈之外纬度地区太阳直射入射角的范围都小于 47° 。

2.3 太阳直接辐射角度与自由曲面反射镜面型的映射关系

根据全纬度太阳直接辐射光线入射角度范围, 自由曲面反射镜需将不同角度的太阳直射光线反射至接收面所在位置, 因此, 建立太阳直射光线与反射

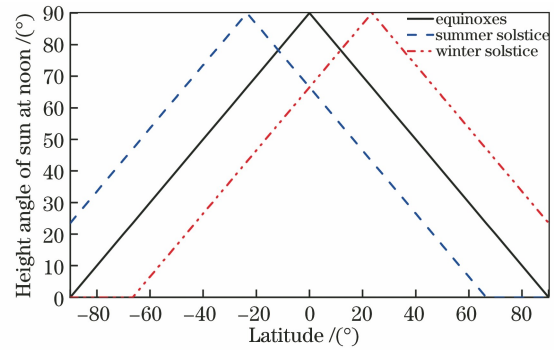


图 2 全球二分、二至日正午高度角的变化规律
Fig. 2 Variation of global noon height angle at equinoxes and solstices

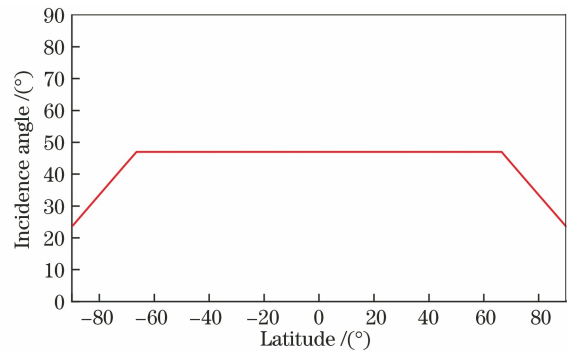


图 3 全纬度太阳直接辐射入射角度范围
Fig. 3 Range of incidence angle of full latitude solar direct radiation

镜面型的映射模型, 使夏至日正午太阳直接辐射光线的入射角度 α_s 、冬至日正午太阳直接辐射光线的入射角度 α_w , 以及与光轴垂直的角度入射的太阳直射光线经对应的反射镜镜面 S_s 、 S_w 、 S_o 的反射后均能会聚到光轴上一点 O'' , 如图 4 所示。图 4 中, $O'O''$ 为反射镜光轴, β_s 为夏至日正午太阳直接辐射

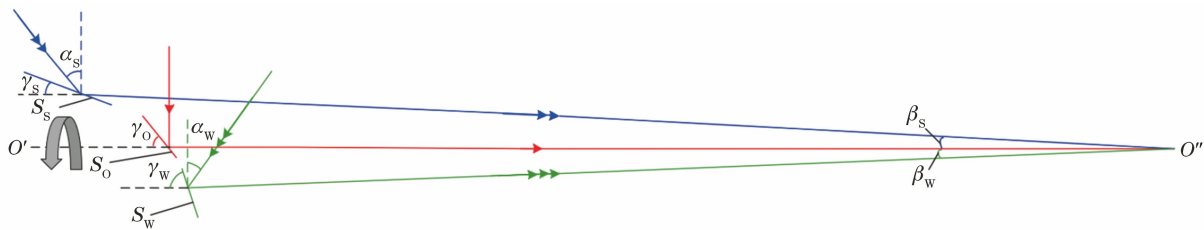


图 4 太阳直射光线与反射镜面型的映射关系
Fig. 4 Mapping relationship between solar direct light and reflector surface

光的接收视场, β_w 为冬至日正午太阳直接辐射光的接收视场, γ_o 为两分日正午直射光线反射至传感器中心所需面型的坡度, γ_s 为夏至日正午直射光线反射至传感器中心所需面型的坡度, γ_w 为冬至日正午直射光线反射至传感器中心面型的坡度, 可以分别描述为

$$\begin{cases} \gamma_o = 90^\circ - 90^\circ/2 = 45^\circ \\ \gamma_s = 45^\circ - (\alpha_s + 3\beta_s)/2 \\ \gamma_w = 45^\circ - (\beta_w - \alpha_w)/2 \end{cases} \quad (2)$$

将太阳直接辐射的最大入射区间 $(-\alpha_s, \alpha_w)$ 内所有光线代入式(3), 可得出反射镜所需包含的面型坡度范围, 据此建立自由曲面反射镜的工作光路与

镜面有限元划分模型,如图 5 所示。

图 5(a)中 O' 为反射镜光斑会聚点, $O'O''$ 为反射镜光轴, D 为反射镜直径, L 为反射镜轴向的最

大工作距离, L_1 为反射镜参与工作部分的长度, L_2 为反射镜轴向的最小工作距离, 它们之间的几何关系可以描述为

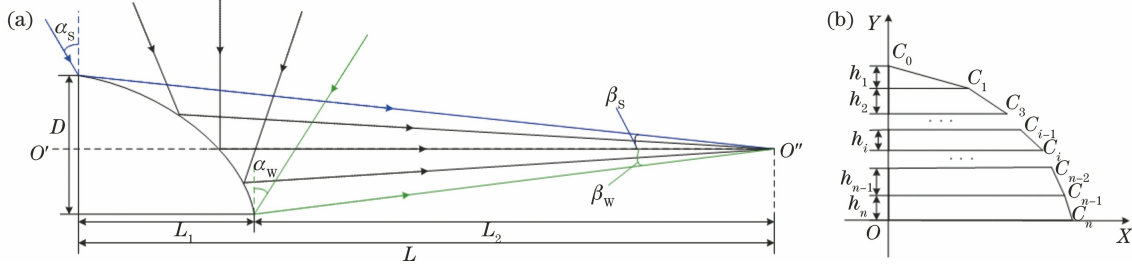


图 5 自由曲面反射镜初始结构模型。(a)工作光路;(b)镜面有限元划分模型

Fig. 5 Initial structure model of freeform surface mirror. (a) Working light path; (b) finite element division model of mirror

$$\begin{cases} L \tan \beta_s + L_2 \tan \beta_w = D \\ L_1 + L_2 = L \end{cases} \quad (3)$$

图 5(b)中 X 轴与反射镜参与工作部分共线, Y 轴与反射镜直径方向共线, 二者的交点 O 为坐标原点, 将反射镜按特定坡度间隔均分, 以划分后 Y 轴方向微元长度 h_i 进行反射镜面型调控, 则第 i 个离散点 C_i 的位置为 (x_i, y_i) 。

反射镜工作光路中, 夏至日、冬至日太阳直接辐射光线对应的反射微元处在整体结构的边缘位置, 会造成辐射采集过程中的能量传递缺失, 面型拟合过程中拟合边缘的龙格现象也会带来边界误差^[27], 因此, 将求取后的坡度区间两端适当拓宽长度 η , 拓宽后坡度区间为 (ρ_s, ρ_w) , 区间长度 $\rho = |\rho_s - \rho_w|$ 。此时将获得的 n 个坡度特征依次赋予划分后的反射单元, 可得各离散点 C_i 的坐标位置方程组为

$$\begin{cases} K_i = \tan \gamma_i \\ x_i - x_{i-1} = K_i (y_i - y_{i-1}) \\ x_i - x_{i-1} = h_i \\ \sum_{i=1}^n h_i = D \end{cases}, \quad (4)$$

式中: γ_i 为第 i 个反射单元的坡度特征; K_i 为坡度特征 γ_i 对应的斜率。构造特征函数 $N_i(x) = \frac{x - x_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}$, 得到自由曲面反射镜初始结构的表达式为

$$U(x) = x_1 N_1(x) + x_2 N_2(x) + \dots + x_n N_n(x). \quad (5)$$

根据式(5)合成后的反射镜镜面上存在连续不可导点, 造成光线连续反射后能量的突变, 因此, 可通过多项式拟合的方法将其变得平滑连续, 从而得到自由曲面反射镜的初始面型。

3 自由曲面反射镜进化策略优化设计方法

3.1 时空尺度下太阳直接辐射测量评价函数

太阳张角以及日冕的存在导致自由曲面反射镜在实际工作中的聚光处为具有一定大小的光斑, 因此建立的反射镜实际工作光路模型如图 6 所示。

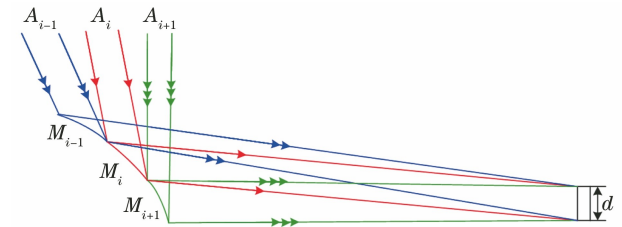


图 6 反射镜的实际工作光路模型

Fig. 6 Optical path model of reflector in actual operation

图 6 中, A_i, A_{i-1} 和 A_{i+1} 分别为某时刻太阳直接辐射光线的入射角度和两侧极限入射角度; M_{i-1}, M_i 和 M_{i+1} 分别为 A_{i-1}, A_i 和 A_{i+1} 所对应的反射镜微元, 会聚光斑直径为 d 。

根据图 5, 设入射角为 $A_j \in (A_{i-1}, A_{i+1})$ 的光线所对应的会聚处辐照度为 E_{A_j} , 此时总辐照度为

$$E_i = \int_{A_{i-1}}^{A_{i+1}} E_{A_j} dA_j. \quad (6)$$

为评价自由曲面反射镜在全季全纬度工作时的太阳直接辐射测量均匀性, 构建时空尺度下辐照度均匀性(RFUS)表达式为

$$S_{RFU} = 1 - \left(\frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \right) \times 100\%, \quad (7)$$

式中: E_{\max} 为全季全纬度测量的最大辐照度; E_{\min} 为全季全纬度测量的最小辐照度。

3.2 基于进化策略的自由曲面优化设计方法

由于初始结构划分的微元数量以及微元长度都会对反射效果产生影响, 因此将 h_i 在 D 中的权重

系数 k_i 定义为染色体编码参数,划分的单元个数 n 定义为染色体编码长度,则每条染色体可表示为 $(k_1, k_2, \dots, k_i, \dots, k_n)$ 。由于遗传算法局部搜索能力较弱^[28-29],故可在基于锦标赛选择策略的遗传操

作基础上增加进化操作和染色体变长操作,建立二分进化与无余变长机制,并以 RFUS 为优化评价函数,实现自由曲面反射镜的迭代优化设计,优化流程如图 7 所示。

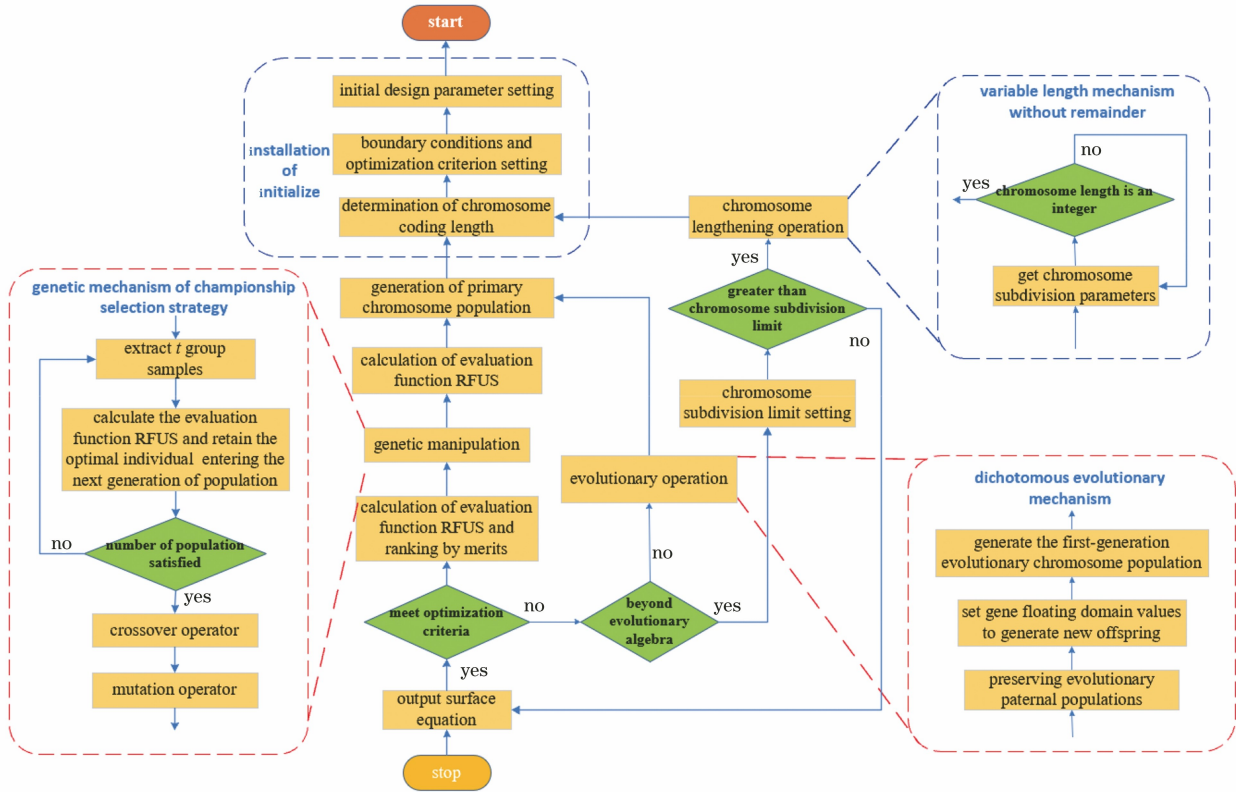


图 7 自由曲面反射镜面型优化流程

Fig. 7 Surface optimization process of free-form reflector

由图 7 可知,优化流程主要分为初始化设置、遗传操作、进化操作,以及染色体变长操作 4 部分。

1) 初始化设置。具体步骤为:a) 初始参量设定,设置反射镜直径为 D ,接收器直径为 d ,夏至、冬至正午太阳直接辐射光线的入射角度为 α_s, α_w ,夏至、冬至正午太阳直接辐射光线的接收视场角为 β_s, β_w ,坡度拓展长度为 η ,以及初代染色体细分参量为 ϵ ,再根据式(2)和式(3)计算初始结构参数 $L_1, L_2, \gamma_s, \gamma_w, \rho_s$ 和 ρ_w ; b) 边界条件及优化判据设置,根据式(4)和式(6)设置边界条件 $\sum_{i=1}^n h_i = D$ 以及 RFUS 的优化判据; c) 染色体编码长度确定,根据 $n = \frac{|\rho_s - \rho_w|}{\epsilon}$ 计算得出编码长度为 n 、生成容量为 m 的初代种群。

2) 遗传操作。得到初代种群后,根据式(6)计算 S_{RFU} 值,进入遗传操作,进而获得新一代种群 S_{RFU} 值用于评价优劣,具体步骤为:a) 选择步骤基于锦标赛选择策略^[30],每次从种群中取出一定数量

个体,然后选择其中最好的一个进入子代种群,重复该操作,直到子代种群规模达到初代种群规模;b) 在子代种群间以概率 P_c 进行交叉;c) 以概率 P_m 进行变异,生成新一代种群;d) 计算新一代种群 S_{RFU} 值并排序,判断种群中最优个体能否触发优化判据。

3) 进化操作。为了保留种群中的优良个体,帮助优化摆脱局部最小的陷阱^[31-32],设计二分进化策略生成新种群,具体步骤为:a) 保留前 50% 个体作为繁衍父本,记为 $G_0(k_1, k_2, \dots, k_i, \dots, k_n)$; b) 设定浮动域值为 Q ,根据 $G_1(k_i) = G_0(k_i) \times (1 + Q)$ 生成新子代;c) 将繁衍父本与新生子代生成初代进化种群;d) 继续进入遗传操作,若超出设定进化代数,则执行染色体变长操作。

4) 染色体变长操作。设置染色体细分极限为 δ ,根据 ϵ 与 δ 之差判断是否执行染色体变长操作,若 ϵ 大于 δ ,则进入无余变长机制,具体步骤为:a) 根据 $\epsilon_0 = \epsilon - \delta$ 求取染色体细分参量;b) 根据 $n_0 = \frac{\rho}{\epsilon_0}$ 计算此时的染色体长度,判断是否为整;c) 若染色体长度

为整,则令 $n = n_0$, 执行细分后的遗传与进化操作。

在整个优化过程中,若出现优良个体触发优化判据,则输出优化后的自由曲面反射镜面型;若完成完整进化后依然未出现匹配结果,则重新生成新的初代种群,执行优化进程,直至出现匹配结果。

4 设计实例

4.1 自由曲面反射镜初始结构

以世界气象组织推荐^[23]的太阳直接辐射 5° 测量视场和全纬度空间最大入射角范围为设计依据,此时, $\beta_s = 2.5^\circ, \beta_w = 2.5^\circ, \alpha_s = 23.5^\circ, \alpha_w = 23.5^\circ, A_{i+1} - A_{i-1} = 5^\circ$, 选取 $D = 10 \text{ mm}, d = 2.4 \text{ mm}, \eta = 2.5^\circ, \epsilon = 5^\circ$ 。根据式(2)~(5),即可得到反射镜初始结构数据,如表 1 所示。

表 1 反射镜初始结构数据

Table 1 Initial structure data of mirror

Parameter	Value
L / mm	119.5
L_1 / mm	10
L_2 / mm	109.5
$\gamma_s / (^\circ)$	33.25
$\gamma_w / (^\circ)$	56.75
$\rho_s / (^\circ)$	30.75
$\rho_w / (^\circ)$	59.25

由式(5)求出各离散点位置后,进行 2~5 次多项式拟合,拟合精度如表 2 所示。

表 2 2~5 次多项式拟合的精度

Table 2 Accuracy of quadratic to quintic polynomial fitting

Polynomial fitting	Quadratic fitting	Cubic fitting	Quartic fitting	Quintic fitting
Residual sum of squares	0.13733	0.00256	0.00005	0.00009
R-squared value	0.99983	1.00000	1.00000	1.00000

由表 2 可知,5 次多项式拟合的残差平方和最小,且可决系数 R 平方和为 1,故选取多项式 $y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5$ 来拟合反射

镜面型曲线,拟合后反射镜初始面型的多项式系数如表 3 所示。

表 3 反射镜初始面型的多项式系数

Table 3 Polynomial coefficients of initial surface shape of mirror

Polynomial coefficient	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
Value	10.00001	-0.57888	0.00680	-0.00571	0.00050	-0.00002

4.2 自由曲面反射镜初始面型仿真

在 Lighttools 中建立反射镜模型并选取入射角度为 $\pm 23.5^\circ, \pm 20^\circ, \pm 17.5^\circ, \pm 15^\circ, \pm 12.5^\circ, \pm 10^\circ, \pm 7.5^\circ, \pm 5^\circ, \pm 2.5^\circ, 0^\circ, -2.5^\circ, -5^\circ, -7.5^\circ, -10^\circ, -12.5^\circ, -15^\circ, -17.5^\circ, -20^\circ, -23.5^\circ$

$\pm 7.5^\circ, \pm 5^\circ, \pm 2.5^\circ$ 以及 0° 的均匀光束进行仿真分析,仿真光路如图 8(a) 所示,会聚面辐照度归一化结果如图 8(b) 所示,此时 S_{RFU} 为 47.6%。

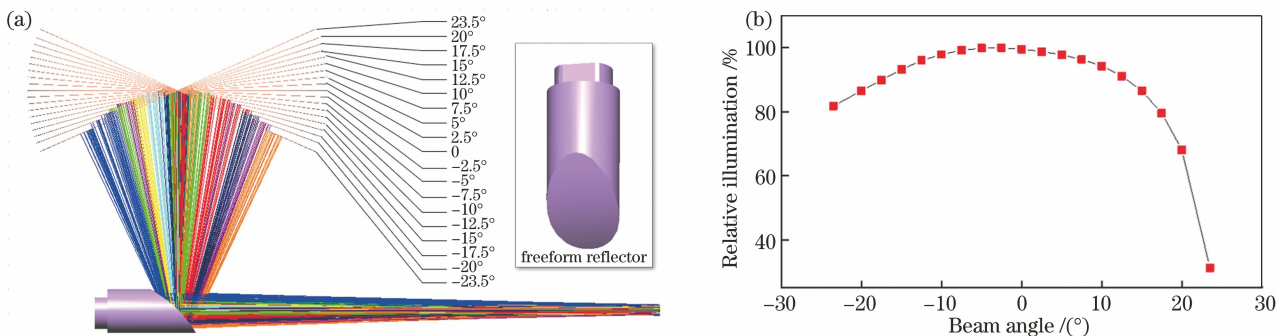


图 8 自由曲面反射镜的初始面型仿真。(a) 仿真光路;(b) 会聚面辐通量归一化结果

Fig. 8 Simulation of initial surface shape of freeform mirror. (a) Simulation optical path; (b) normalized result of irradiance of convergent surface

4.3 自由曲面反射镜面型优化

以 $\rho = 30^\circ$ 为优化初始条件、 $S_{\text{RFU}} \geq 90\%$ 为优化

判据,选取 $N = 200, \delta = 0.25^\circ$, 控制 P_m 为 0.1, P_c 为 0.9。优化过程中所生成的染色体细分参量分别

为 $3^\circ, 1^\circ, 0.5^\circ, 0.25^\circ$ 。4 种代表性面型的会聚面辐照度归一化结果如图 9 所示。其中, ϵ 为 0.25° 时

S_{RFU} 满足优化判据, 达到 92.36%, 对应自由曲面反射镜面型的多项式系数如表 4 所示。

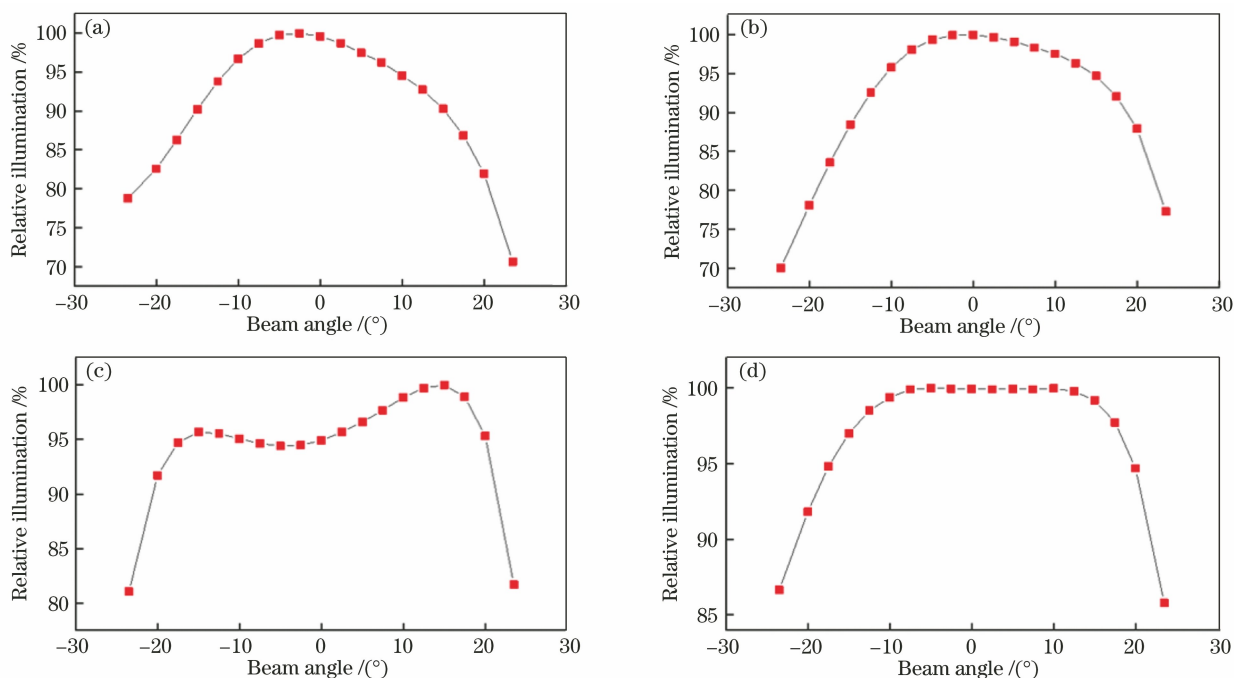


图 9 会聚面辐照度归一化结果。(a) $\epsilon=3^\circ$, $S_{\text{RFU}}=82.79\%$; (b) $\epsilon=1^\circ$, $S_{\text{RFU}}=82.36\%$; (c) $\epsilon=0.5^\circ$, $S_{\text{RFU}}=89.52\%$; (d) $\epsilon=0.25^\circ$, $S_{\text{RFU}}=92.36\%$

Fig. 9 Normalized results of irradiance of convergent surface. (a) $\epsilon=3^\circ$, $S_{\text{RFU}}=82.79\%$; (b) $\epsilon=1^\circ$, $S_{\text{RFU}}=82.36\%$; (c) $\epsilon=0.5^\circ$, $S_{\text{RFU}}=89.52\%$; (d) $\epsilon=0.25^\circ$, $S_{\text{RFU}}=92.36\%$

表 4 $\epsilon=0.25^\circ$ 时自由曲面反射镜面型的多项式系数

Table 4 Polynomial coefficients of freeform surface mirror when $\epsilon=0.25^\circ$

Polynomial coefficient	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
Value	10.00300	-0.60341	-0.00246	-0.00393	0.00034	-0.00002

5 实 验

5.1 反射光斑中心位置验证

利用自由曲面反射镜、半导体激光器, 以及 CCD 图像传感器搭建反射光斑中心位置验证实验, 其中激光器光轴、反射镜光轴, 以及 CCD 像面中心位置位于同一测量平面, 实验现场如图 10 所示。

通过调整激光器和自由曲面反射镜间的角度关系, 获得了入射角度为 $-23.5^\circ, -20.0^\circ, -10.0^\circ, 0^\circ, 10.0^\circ, 20.0^\circ, 23.5^\circ$ 条件下反射光斑在 CCD 上的位置。利用 Canny 边缘检测算法提取光斑边缘^[33], 获取光斑能量中心与 CCD 中心交点, 进而求得测量平面内反射光斑中心像素位置, 如图 11 所示。

根据图 11, 光斑之间最大像素间隔为 436.41 pixel, 由于实验选用 CCD 的分辨率为 $2448 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$, 像元尺寸为 $3.45 \mu\text{m}$, 因此所有角度下的光斑中心最大直线距离约为

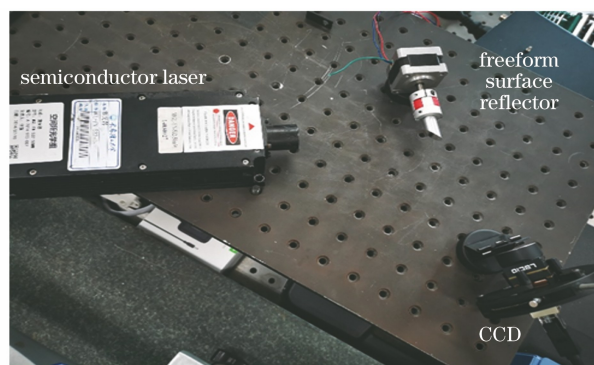


图 10 反射光斑中心位置的验证实验现场

Fig. 10 Verification test site for center position of reflected light spot

1.5 mm, 满足会聚光斑直径小于 2.4 mm 的设计需求。

5.2 RFUS 验证

利用太阳模拟器、辐照计与自由曲面反射镜搭建 RFUS 验证实验, 其中太阳模拟器光轴、反射镜

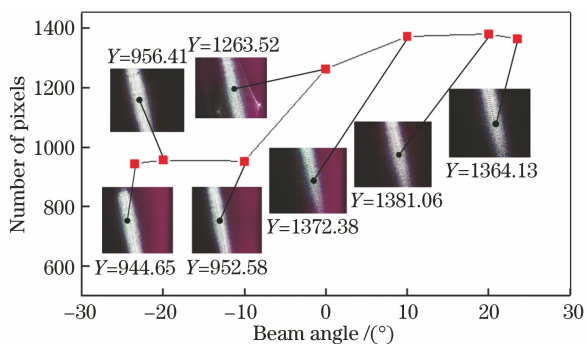


图 11 各入射光角度的反射光斑中心位置

Fig. 11 Center position of reflection spot at each incident light angle

光轴以及辐照计中心位于同一测量平面,实验现场如图 12 所示。

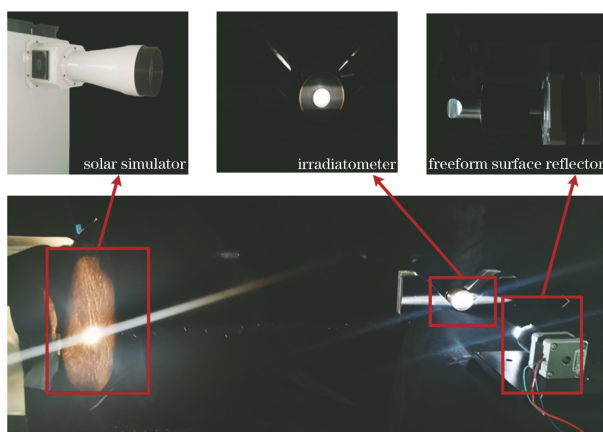


图 12 太阳直接辐射光学系统的测试平台

Fig. 12 Test platform of solar direct radiation optical system

调整太阳模拟器和自由曲面反射镜间的相对位置,使入射光束以 $\pm 23.5^\circ$, $\pm 22^\circ$, $\pm 20^\circ$, $\pm 18^\circ$, $\pm 16^\circ$, $\pm 14^\circ$, $\pm 12^\circ$, $\pm 10^\circ$, $\pm 8^\circ$, $\pm 6^\circ$, $\pm 4^\circ$, $\pm 2^\circ$, 0° 经自由曲面反射镜后入射至辐照计,可得各入射光角度辐照度的归一化结果如图 13 所示,此时 $S_{\text{RFU}} = 90.35\%$,满足 $S_{\text{RFU}} \geq 90\%$ 的优化判据。

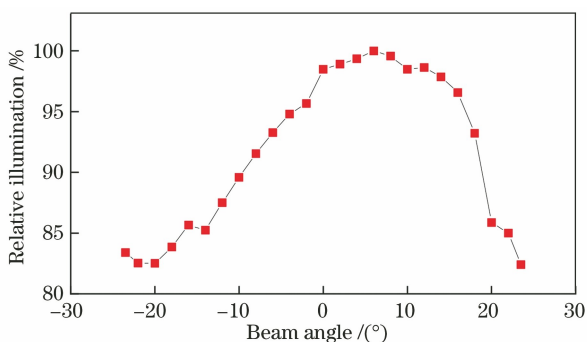


图 13 各入射光角度下辐照度的归一化结果

Fig. 13 Normalized results of irradiance of incident light at various angles

6 结 论

针对太阳直接辐射测量中跟踪装置引起的全季全纬度测量均匀性难以保证的问题,基于全球太阳直接辐射角度变化规律,提出了一种用于太阳直接辐射测量的自由曲面反射镜优化设计方法。以测量视场为 5° 及全纬度空间最大入射角范围为设计前提,通过构建太阳直射光线与自由曲面反射镜的映射关系,确定了自由曲面反射镜的初始结构模型;以 $S_{\text{RFU}} \geq 90\%$ 为优化目标,对自由曲面反射镜面型不断进行优化,将 S_{RFU} 从 82.79% 提升至 92.36% 。以获得的曲面型为核心元件搭建实验平台,对其入射光斑位置和时空测量均匀性进行进一步验证。结果表明,所有角度光斑中心的最大直线间距约为 1.5 mm , S_{RFU} 为 90.34% ,该设计可以实现无需跟踪装置的全年太阳直接辐射均匀测量,并且适用于地球全纬度空间,为后续太阳直接辐射测量提供了一种新方案。在未来的研究中,将会重点研究太阳直接辐射数据与日照数据的转化过程,以为农业生产及建筑交通等领域提供更直观、有效的数据。

参 考 文 献

- [1] 崇伟, 吕文华, 张健, 等. 太阳辐射散射分数 Sigmoid 函数建模与验证分析[J]. 光学学报, 2020, 40(19): 1901001.
Chong W, Lü W H, Zhang J, et al. Modeling and validation analysis of Sigmoid function for solar radiation diffuse fraction [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(19): 1901001.
- [2] Wu A S, Xiong X X, Jin Z H, et al. Sensitivity of intercalibration uncertainty of the CLARREO reflected solar spectrometer features [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(9): 4741-4751.
- [3] 马金玉, 梁宏, 罗勇, 等. 中国近 50 年太阳直接辐射和散射辐射变化趋势特征[J]. 物理学报, 2011, 60(6): 069601.
Ma J Y, Liang H, Luo Y, et al. Variation trend of direct and diffuse radiation in China over recent 50 years [J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(6): 069601.
- [4] Fang Y Y, Zhu Y Y, Huang R L. Research on tower-type solar photothermal power generation technology [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 804(3): 032028.
- [5] 石延英, 郭尔静, 张镇涛, 等. 东北三省水稻生长季农业气候资源及障碍型冷害的时空特征[J]. 应用生

- 态学报, 2020, 31(5): 1625-1635.
- Shi Y Y, Guo E J, Zhang Z T, et al. Spatial-temporal characteristics of agricultural climate resources and sterile-type chilling injury in rice growing season in three provinces of Northeast China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(5): 1625-1635.
- [6] 于瑛, 杨柳, 陈猛, 等. 日散射辐射推算模型在中国的适用性研究 [J]. 太阳能学报, 2018, 39(11): 3005-3013.
- Yu Y, Yang L, Chen M, et al. Applicability of estimation models for diffuse solar radiation in China [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2018, 39(11): 3005-3013.
- [7] Hamill P, Giordano M, Ward C, et al. An AERONET-based aerosol classification using the Mahalanobis distance [J]. Atmospheric Environment, 2016, 140: 213-233.
- [8] Prede. Skyradiometer POM-01 MK-II [EB/OL]. [2021-09-03]. https://www.prede.com/PDF/pdf_taikisokutei/pom01mk2_ja.pdf.
- [9] Uchiyama A, Shiobara M, Kobayashi H, et al. Nocturnal aerosol optical depth measurements with modified sky radiometer POM-02 using the moon as a light source [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2019, 12(12): 6465-6488.
- [10] Prede. Grating sunphotometer PGS-100 [EB/OL]. [2021-09-03]. <https://amt.copernicus.org/articles/12/6465/2019/amt-12-6465-2019.html>.
- [11] 郑茹, 张国玉, 高越, 等. 太阳辐射观测仪余弦误差修正方法 [J]. 光子学报, 2016, 45(1): 0112004.
- Zheng R, Zhang G Y, Gao Y, et al. Cosine error correction of solar radiation observation instrument [J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(1): 0112004.
- [12] 郑茹. 太阳辐射观测仪及其标定技术研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2015.
- Zheng R. Research on solar radiation observation instrument and the calibration technique [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2015.
- [13] Gröbner J, Kouremeti N. The Precision Solar Spectroradiometer (PSR) for direct solar irradiance measurements [J]. Solar Energy, 2019, 185: 199-210.
- [14] 李建玉, 刘庆, 徐文清, 等. 用于多波段激光大气透过率测量的太阳辐射计 [J]. 光学精密工程, 2020, 28(2): 261-270.
- Li J Y, Liu Q, Xu W Q, et al. Solar radiometer for measurement of multi-waveband laser atmospheric transmittance [J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(2): 261-270.
- [15] 杨海行. 新型光电式日照计及其修正方法研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2018.
- Yang H X. Study on new type of photoelectric sunshine recorder and its correction method [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018.
- [16] 钱昊. 直接辐射日照时数的测量方法研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
- Qian H. A study of the measurement method of direct radiation sunshine duration [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2013.
- [17] 路孟. 数字日照计智能化研究 [D]. 成都: 成都信息工程大学, 2018.
- Lu M. Research on intelligence of digital sunshine meter [D]. Chengdu: Chengdu University of Information Science and Technology, 2018.
- [18] 王勃. 光敏晶体管自动日照计技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
- Wang B. Optical transistor automatic sunshine recorder engineering research [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011.
- [19] 杜传耀, 李栋, 张天明, 等. 三种日照观测设备性能比对及影响因子分析 [J]. 气象科技, 2018, 46(1): 29-33.
- Du C Y, Li D, Zhang T M, et al. Comparative performance analysis of three kinds of sunshine observation equipment and their influencing factors [J]. Meteorological Science and Technology, 2018, 46(1): 29-33.
- [20] 黄雄豪. 高精度太阳直射光谱辐照度仪的研制 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.
- Huang X H. Development of high-precision direct solar spectral irradiance monitor [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021.
- [21] 王雨畅, 张国玉, 孙高飞, 等. 日照计的研究概况与发展趋势 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(12): 1-14.
- Wang Y C, Zhang G Y, Sun G F, et al. Research survey and development trend of sunshine recorder [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(12): 1-14.
- [22] Ikeda H, Aoshima T, Miyake Y. Development of a new sunshine-duration meter [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan Ser II, 1986, 64(6): 987-993.
- [23] 王炳忠, 莫月琴, 杨云. 现代气象辐射测量技术 [M]. 北京: 气象出版社, 2008.
- Wang B Z, Mo Y Q, Yang Y. Modern meteorological radiation measurement technology [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2008.

- [24] 晏路明. 全球不同纬度的太阳周日视运动规律解析[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2014, 30(5): 117-124.
Yan L M. Unraveling the sun's diurnal apparent movement at different latitudes on the earth[J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2014, 30(5): 117-124.
- [25] 李浩. 塔式太阳能热发电传热储能系统建模与仿真研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
Li H. Modeling and simulation of heat transfer and energy storage system in solar power tower plant [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [26] 吴咏昆. 极轴式二维日照跟踪系统研究[J]. 机电工程技术, 2013, 42(6): 99-101.
Wu Y K. Research on polar axis type two-dimensional sun tracking system[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2013, 42(6): 99-101.
- [27] 马焯璇, 徐万海, 徐增伟. 基于多项式拟合的细长梁结构振动位移重构方法[J]. 振动与冲击, 2020, 39(11): 152-157, 183.
Ma Y X, Xu W H, Xu Z W. Displacement reconstruction of slender beam based on polynomial fitting method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(11): 152-157, 183.
- [28] 史玮. 基于改进遗传算法的双波段阻抗变换器的自动设计[D]. 扬州: 扬州大学, 2014.
Shi W. Auto designing of dual-band transformer based on improved genetic algorithm[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2014.
- [29] 徐奉刚, 黄玮. 遗传算法在离轴四反光学系统设计中的应用[J]. 光学精密工程, 2017, 25(8): 2076-2082.
Xu F G, Huang W. Application of genetic algorithm in the design of off-axis four-mirror optical system [J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(8): 2076-2082.
- [30] Yang J P, Soh C K. Structural optimization by genetic algorithms with tournament selection [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 1997, 11(3): 195-200.
- [31] 茅言杰, 李思坤, 王向朝, 等. 基于差分进化算法的光刻机匹配方法[J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1222002.
Mao Y J, Li S K, Wang X Z, et al. Lithographic tool-matching method based on differential evolution algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1222002.
- [32] 王宇彤, 李琦. 进化算法优化区域生长的太赫兹全息再现图像分割[J]. 中国激光, 2020, 47(8): 0814003.
Wang Y T, Li Q. Terahertz holographic reconstructed image segmentation based on optimized region growth by evolutionary algorithm[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(8): 0814003.
- [33] 闫河, 赵其峰, 谢敏, 等. 自适应 Canny 算子 PCBA 元器件边缘检测及修复[J]. 光学学报, 2021, 41(5): 0515003.
Yan H, Zhao Q F, Xie M, et al. Edge detection and repair of PCBA components based on adaptive Canny operator[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(5): 0515003.