



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 115292994 B

(45) 授权公告日 2023. 06. 06

(21) 申请号 202210872627.0

G06F 17/16 (2006.01)

(22) 申请日 2022.07.21

G06F 17/12 (2006.01)

G02B 27/00 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 115292994 A

(56) 对比文件

CN 106599504 A, 2017.04.26

WO 2019090958 A1, 2019.05.16

(43) 申请公布日 2022.11.04

(73) 专利权人 西安电子科技大学

地址 710071 陕西省西安市雁塔区太白南路2号

审查员 严荣

(72) 发明人 王东旭 张逸群 段宝岩 李仙丽

樊冠恒 李欣童 杜莹春

(74) 专利代理机构 西安弘理专利事务所 61214

专利代理师 许志蛟

(51) Int. Cl.

G06F 30/23 (2020.01)

G06F 30/20 (2020.01)

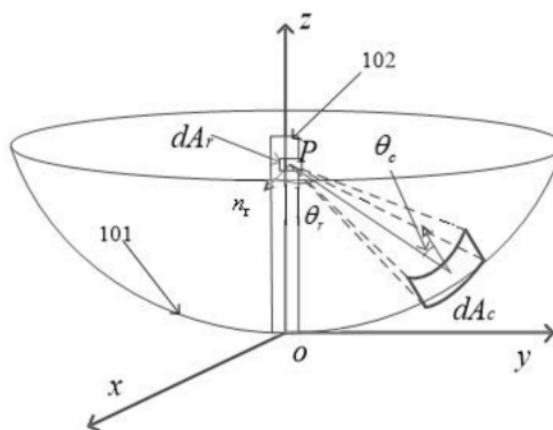
权利要求书2页 说明书5页 附图4页

(54) 发明名称

针对球面光能收集计算的光机耦合方法

(57) 摘要

本发明公开了一种针对球面光能收集计算的光机耦合方法,包括建立球面聚光的光机耦合基础模型、推导聚光模型结构变形的误差参数、在光机耦合基础模型中加入聚光模型结构变形误差参数、使用积分方法计算加入误差的光机耦合模型得到聚光器接收面的光分布结果。采用该方法使得计算得聚光效果直接与结构误差挂钩,使得结果更加准确。



1. 针对球面光能收集计算的光机耦合方法,其特征在于:具体包括如下步骤:

步骤1,建立球面聚光的光机耦合基础模型;

步骤2,将步骤1建立的光机耦合基础模型转换为向量形式;

步骤3,计算光机耦合基础模型中 $F(\phi)$ 反射光线角度函数;

步骤4,计算反射光线角度函数 $F(\phi)$ 中的反射光线 n_{lr} ;

步骤5,计算聚光模型中聚光反射面或聚光接收面结构变形误差 δ ;

步骤6,将步骤5所得的结构变形误差 δ 加入光机耦合基础模型中;

所述步骤6的具体过程为:

在光机耦合模型中加入结构误差参数 δ ,假设聚光反射面及聚光接收面分别存在误差 δ_c 、 δ_r ,然后对整个光机耦合基础模型进行修正,修正后的公式为:

$$q = \iint \frac{F(\phi)(n_{c\delta} \cdot r_\delta)(n_{r\delta} \cdot r_\delta)}{|n_{c\delta}| \cdot |n_{r\delta}| \cdot |r_\delta|^4} dA_c \quad (6);$$

其中, $n_{c\delta} = n_c + \delta_c$, $n_{r\delta} = n_r + \delta_r$, $r_\delta = r + \delta_r - \delta_c$, $n_{li\delta} = n_{li} - \delta_c$;

$$n_{lr\delta} = 2(n_{c\delta}' \cdot n_{li\delta}') \cdot n_{c\delta}' - n_{li\delta}' \quad (7);$$

$$\phi = \arccos\left(\frac{n_{lr\delta} \cdot r_\delta}{|n_{lr\delta}| \cdot |r_\delta|}\right) \quad (8);$$

步骤7,使用积分法计算步骤6所得的光机耦合基础模型中聚光接收面的光分布结果。

2. 根据权利要求1所述的针对球面光能收集计算的光机耦合方法,其特征在于:所述步骤1的具体过程为:

任取聚光反射面和聚光接收面上的两微元面 d_{Ac} 和 d_{Ar} , p 为 d_{Ar} 上一点,则 d_{Ar} 接收的由 d_{Ac} 反射的太阳光能量为:

$$q = \iint \frac{F(\phi) \cos \theta_r \cos \theta_c}{r^2} dA_c \quad (1);$$

式中, $F(\phi)$ 为反射光线角度函数, θ_r 为两微元面的连线与接收面上的微元面 d_{Ar} 的法向量之间的夹角, θ_c 表示两微元面之间的连线与聚光反射面反射面上微元面 d_{Ac} 法向量之间的夹角, r 表示 d_{Ac} 与 p 点之间的距离。

3. 根据权利要求2所述的针对球面光能收集计算的光机耦合方法,其特征在于:所述步骤2的具体过程为:

设聚光反射面上的微元面 d_{Ac} 的法向向量为 n_c ,接收面微元面 d_{Ar} 的法向向量为 n_r , d_{Ac} 与 d_{Ar} 之间指向向量为 r ,则光机耦合基础模型式(1)可转换为:

$$q = \iint \frac{F(\phi)(n_c \cdot r)(n_r \cdot r)}{|n_c| \cdot |n_r| \cdot |r|^4} dA_c \quad (2)。$$

4. 根据权利要求3所述的针对球面光能收集计算的光机耦合方法,其特征在于:所述步骤3的具体过程为:采用如下公式(3)计算反射角度函数 $F(\phi)$:

$$F(\phi) = \begin{cases} G_{bn} / (\pi \sin^2 s) & \phi \leq s \\ 0 & \phi > s \end{cases} \quad (3);$$

其中, G_{bn} 为口径面的入射光强, s 为太阳张角; ϕ 为反射光线和 d_{Ac} 与 d_{Ar} 之间指向向量 r

之间的夹角,具体形式为

$$\phi = \arccos\left(\frac{\mathbf{n}_{1r} \cdot \mathbf{r}}{|\mathbf{n}_{1r}| \cdot |\mathbf{r}|}\right) \quad (4);$$

其中, \mathbf{n}_{1r} 为反射光线。

5. 根据权利要求4所述的针对球面光能收集计算的光机耦合方法,其特征在于:所述步骤4的具体过程为:

球面反射光线 \mathbf{n}_{1r} 由法线 \mathbf{n}_c 和入射光线 \mathbf{n}_{1i} 求得,法线 \mathbf{n}_c 为反射点与球心的连线,入射光线为垂直口径面入射,则求得反射光线 \mathbf{n}_{1r} 为:

$$\mathbf{n}_{1r} = 2(\mathbf{n}_c' \cdot \mathbf{n}_{1i}') \cdot \mathbf{n}_c' - \mathbf{n}_{1i}' \quad (5);$$

其中 \mathbf{n}_c' , \mathbf{n}_{1i}' 为 \mathbf{n}_c , \mathbf{n}_{1i} 的单位向量。

6. 根据权利要求5所述的针对球面光能收集计算的光机耦合方法,其特征在于:所述步骤5的具体过程为:结构变形误差 δ 包括随机误差 δ_1 和系统误差 δ_2 ,则结构变形误差为 $\delta = \delta_1 + \delta_2$ 。

针对球面光能收集计算的光机耦合方法

技术领域

[0001] 本发明属于空间太阳能电站(Space Solar Power Station,SSPS)技术领域,涉及一种针对球面光能收集计算的光机耦合方法。

背景技术

[0002] 空间太阳能电站因其有持续稳定的能量输入、输出而受到大家的关注。随着航天技术的发展,空间太阳能电站的建立逐渐被提上日程,因此需要更详细的理论分析与实验验证。空间太阳能电站进行光能收集转换为电能,再转换为微波发射至地面。其中光能收集包括两种方式,聚光和非聚光。聚光系统设计较为复杂但是有较高的功质比。空间结构由于发射成本的限制要求质量越轻越好,因此多使用轻质的聚光结构,但一般而言越轻质的结构就越容易变形。如近年来曼金斯提出的阿尔法方案为减轻质量使用骨架加薄膜的结构,西安电子科技大学团队提出的OMGEA-SSPS方案也是采用骨架薄膜展开的形式。对于巨大轻质骨架的薄膜类结构,形面精度有限。聚光镜面精度较低会造成光强分布的不均匀。对电池阵系统而言,不均匀的光照强度会导致串联电池的总能量急剧降低。而对于较大的电池阵而言,串联电池必不可少,因此聚光镜面误差大小会严重影响产生的总电量大小。

[0003] 对有误差的聚光系统研究,典型的方法有1981年Paul使用椎体光学法,用概率密度函数描述光学误差,将误差加入至光学分布函数中,然后使用角度接受函数进行光学分析计算。1986年Jeter提出的光照强度积分计算方法奠定了反射面误差分析的基础。1979年光迹追踪法结合蒙特卡洛撒点法被提出后,因其思路简单、对复杂模型的适应性强而被广泛使用,而后有人就用此方法针对有误差的模型进行了分析,但为针对已有确定误差的聚光镜模型计算光照强度,暂未有直接耦合结构的光学分析。引起聚光后光照强度不均匀的主要因素包括光线入射角度误差、聚光镜结构误差及接收面结构误差。入射角度误差主要为定日精度控制引起的误差可直接加入至入射角进行计算。聚光镜结构与接收面结构对聚光效果影响较大,对聚光镜和接收电池的入射角、反射角均有影响,因此在计算公式中直接引入计算较为便捷。

[0004] 近年来学科交叉设计越来越重要,耦合设计优势更加明显。然而现有的光学与结构结合设计过程仍然为独立综合设计,效率和精确度都有待提高,也有些文献使用有限元法等综合分析光热,但也未做到耦合分析。文献中的误差多为直接加至入射光线中,未考虑实际的结构变化。现有地面的结构一般不考虑功质比,质量较大,保型性好,因此只对入射光线误差考虑是比较合理的。但是空间聚光镜运行环境复杂,必须在设计之初就需要充分考虑结构系统对聚光系统的影响,直接给出结构误差对聚光效果的影响将更直观明了。

发明内容

[0005] 本发明的目的是提供一种针对球面光能收集计算的光机耦合方法,该方法在推导球面聚光的积分模型基础上,对其中的积分变量进行了结构误差引入,最终实现光机耦合计算。

[0006] 本发明所采用的技术方案是,针对球面光能收集计算的光机耦合方法,具体包括如下步骤:

[0007] 步骤1,建立球面聚光的光机耦合基础模型;

[0008] 步骤2,将步骤1建立的光机耦合基础模型转换为向量形式;

[0009] 步骤3,计算光机耦合基础模型中 $F(\phi)$ 反射光线角度函数;

[0010] 步骤4,计算反射光线角度函数 $F(\phi)$ 中的反射光线 n_{1r} ;

[0011] 步骤5,计算聚光模型中聚光反射面或聚光接收面结构变形误差 δ ;

[0012] 步骤6,将步骤5所得的结构变形误差 δ 加入光机耦合基础模型中;

[0013] 步骤7,使用积分法计算步骤6所得的光机耦合基础模型中聚光接收面的光分布结果。

[0014] 本发明的特点还在于:

[0015] 步骤1的具体过程为:

[0016] 任取聚光反射面和聚光接收面上的两微元面 d_{Ac} 和 d_{Ar} , p 为 d_{Ar} 上一点,则 d_{Ar} 接收的由 d_{Ac} 反射的太阳光能量为:

$$[0017] \quad q = \iint \frac{F(\phi) \cos \theta_r \cos \theta_c}{r^2} dA_c \quad (1);$$

[0018] 式中, $F(\phi)$ 为反射光线角度函数, θ_r 为两微元面的连线与接收面上的微元面 d_{Ar} 的法向量之间的夹角, θ_c 表示两微元面之间的连线与聚光反射面反射面上微元面 d_{Ac} 法向量之间的夹角, r 表示 d_{Ac} 与 p 点之间的距离。

[0019] 步骤2的具体过程为:

[0020] 设聚光反射面上的微元面 d_{Ac} 的法向量为 n_c ,接收面微元面 d_{Ar} 的法向量为 n_r , d_{Ac} 与 d_{Ar} 之间指向向量为 r ,则光机耦合基础模型式(1)可转换为:

$$[0021] \quad q = \iint \frac{F(\phi)(n_c \cdot r)(n_r \cdot r)}{|n_c| \cdot |n_r| \cdot |r|^4} dA_c \quad (2)。$$

[0022] 步骤3的具体过程为:采用如下公式(3)计算反射角度函数 $F(\phi)$:

$$[0023] \quad F(\phi) = \begin{cases} G_{bn} / (\pi \sin^2 s) & \phi \leq s \\ 0 & \phi > s \end{cases} \quad (3);$$

[0024] 其中, G_{bn} 为口径面的入射光强, s 为太阳张角。 ϕ 为反射光线和 d_{Ac} 与 d_{Ar} 之间指向向量 r 之间的夹角,具体形式为

$$[0025] \quad \phi = \arccos\left(\frac{n_{1r} \cdot r}{|n_{1r}| \cdot |r|}\right) \quad (4);$$

[0026] 其中, n_{1r} 为反射光线。

[0027] 步骤4的具体过程为:

[0028] 球面反射光线 n_{1r} 由法线 n_c 和入射光线 n_{1i} 求得,法线 n_c 为反射点与球心的连线,入射光线为垂直口径面入射,则求得反射光线 n_{1r} 为:

$$[0029] \quad n_{1r} = 2(n_c' \cdot n_{1i}') \cdot n_c' - n_{1i}' \quad (5);$$

[0030] 其中 n_c' , n_{1i}' 为 n_c , n_{1i} 的单位向量。

[0031] 步骤5的具体过程为:结构变形误差 δ 包括随机误差 δ_1 和系统误差 δ_2 ,则结构变形误差为 $\delta = \delta_1 + \delta_2$ 。

[0032] 步骤6的具体过程为:

[0033] 在光机耦合模型中加入结构误差参数 δ ,假设聚光反射面及聚光接收面分别存在误差 δ_c 、 δ_r ,然后对整个光机耦合基础模型进行修正,修正后的公式为:

$$[0034] \quad q = \iint \frac{F(\phi)(\mathbf{n}_{c\delta} \cdot \mathbf{r}_\delta)(\mathbf{n}_{r\delta} \cdot \mathbf{r}_\delta)}{|\mathbf{n}_{c\delta}| \cdot |\mathbf{n}_{r\delta}| \cdot |\mathbf{r}_\delta|^4} dA_c \quad (6);$$

[0035] 其中, $n_{c\delta} = n_c + \delta_c$, $n_{r\delta} = n_r + \delta_r$, $r_\delta = r + \delta_r - \delta_c$, $n_{li\delta} = n_{li} - \delta_c$ 。

$$[0036] \quad n_{lr\delta} = 2(n_{c\delta}' \cdot n_{li\delta}') \cdot n_{c\delta}' - n_{li\delta}' \quad (7);$$

$$[0037] \quad \phi = \arccos\left(\frac{\mathbf{n}_{lr\delta} \cdot \mathbf{r}_\delta}{|\mathbf{n}_{lr\delta}| \cdot |\mathbf{r}_\delta|}\right) \quad (8)。$$

[0038] 本发明的有益效果如下:

[0039] 1. 可实现用积分模型计算球面聚光的光分布,较蒙特卡洛光迹追踪法更准确;

[0040] 2. 用此积分法计算球面聚光更方便快捷,可直接对球面模型及接收面模型进行数值修改计算;

[0041] 3. 可实现综合考虑多种类型误差对聚光性能的影响分析,结合实际的结构变形及误差利用模型进行优化,最终实现高光收集效率、高光分布均匀性连续性的聚光系统设计。

附图说明

[0042] 图1是球面聚光示意图;

[0043] 图2是本发明针对球面光能收集计算的光机耦合方法中球面聚光反射面微元面 d_{Ac} 和接收微元面 d_{Ar} 之间的关系示意;

[0044] 图3是本发明针对球面光能收集计算的光机耦合方法中增加误差后的各矢量示意;

[0045] 图4是本发明针对球面光能收集计算的光机耦合方法中不同积分区域划分份数的计算结果对比;

[0046] 图5是本发明针对球面光能收集计算的光机耦合方法中z轴方向不同取点数的计算结果对比;

[0047] 图6是本发明针对球面光能收集计算的光机耦合方法中光机耦合模型加入随机和系统误差后的光分布计算结果。

[0048] 图中,101-聚光反射面,102-聚光接收面。

具体实施方式

[0049] 下面结合附图和具体实施方式对本发明进行详细说明。

[0050] 本发明针对球面光能收集计算的光机耦合方法,包括建立球面聚光的光机耦合基础模型、推导聚光模型结构变形的误差参数、在光机耦合基础模型中加入聚光模型结构变形误差参数、使用积分方法计算加入误差的光机耦合模型得到聚光器接收面的光分布结果。

[0051] 本发明针对球面光能收集计算的光机耦合方法,具体包括如下步骤:

[0052] 步骤1,建立球面聚光的光机耦合基础模型。

[0053] 如图1、2所示,光机耦合基础模型使用了基于辐射公式的积分公式进行了计算。任取聚光反射面101和聚光接收面102上的两微元面 d_{Ac} 和 d_{Ar} , p 为 d_{Ar} 上一点,则 d_{Ar} 接收的由 d_{Ac} 反射的太阳光能量为:

$$[0054] \quad q = \iint \frac{F(\phi) \cos \theta_r \cos \theta_c}{r^2} dA_c \quad (0 \leq \theta_r, \theta_c \leq \pi) \quad (1);$$

[0055] 式中, $F(\phi)$ 为反射光线角度函数, θ_r 为两微元面的连线与接收面上的微元面 d_{Ar} 的法向量之间的夹角, θ_c 表示两微元面之间的连线与聚光反射面反射面上微元面 d_{Ac} 法向量之间的夹角, r 表示 d_{Ac} 与 p 点之间的距离。

[0056] 步骤2,光机耦合基础模型转换为向量形式,则可方便将结构误差加入至光机耦合基础模型中。设聚光反射面101上的微元面 d_{Ac} 的法向向量为 n_c ,接收面微元面 d_{Ar} 的法向向量为 n_r , d_{Ac} 与 d_{Ar} 之间指向向量为 r ,则光机耦合基础模型式(1)可转换为:

$$[0057] \quad q = \iint \frac{F(\phi)(n_c \cdot r)(n_r \cdot r)}{|n_c| \cdot |n_r| \cdot |r|^4} dA_c \quad (2);$$

[0058] 步骤3,计算光机耦合基础模型中 $F(\phi)$ 反射光线角度函数。反射角度函数使用太阳光张角关系,具体形式如下:

$$[0059] \quad F(\phi) = \begin{cases} G_{bn} / (\pi \sin^2 s) & \phi \leq s \\ 0 & \phi > s \end{cases} \quad (3);$$

[0060] 其中, G_{bn} 为口径面的入射光强, s 为太阳张角。 ϕ 为反射光线和 d_{Ac} 与 d_{Ar} 之间指向向量 r 之间的夹角,具体形式为

$$[0061] \quad \phi = \arccos\left(\frac{n_{lr} \cdot r}{|n_{lr}| \cdot |r|}\right) \quad (4);$$

[0062] 其中, n_{lr} 为反射光线。

[0063] 步骤4,计算反射光线角度函数 $F(\phi)$ 中的反射光线 n_{lr} 。球面的反射光线需通过几何光学反射原理计算。球面反射光线可由法线 n_c 和入射光线 n_{li} 求得,法线 n_c 为反射点与球心的连线,入射光线为垂直口径面入射,则可求得反射光线 n_{lr} 为:

$$[0064] \quad n_{lr} = 2(n_c' \cdot n_{li}') \cdot n_c' - n_{li}' \quad (5);$$

[0065] 其中 n_c' , n_{li}' 为 n_c , n_{li} 的单位向量。

[0066] 步骤5,计算聚光模型中聚光反射面或聚光接收面结构变形误差 δ 。结构变形误差包括随机误差 δ_1 (根据经验值直接给定)和系统误差 δ_2 ,则结构变形误差为 $\delta = \delta_1 + \delta_2$ 。

[0067] 计算聚光模型结构变形参数中的系统误差 δ_2 ,可对受到载荷后的变形分析。聚光反射面及接收面的结构静力学分析方程为:

$$[0068] \quad K\delta_2 = F \quad (6);$$

[0069] 式中, K 为刚度矩阵, δ_2 为有限元节点位移阵列, F 为节点载荷阵列。已知 K 和 F ,即可求得 δ_2 。

[0070] 聚光反射面或接收面的结构动力方程为:

$$[0071] \quad M\ddot{\delta}_2 + C\dot{\delta}_2 + K\delta_2 = F \quad (7);$$

[0072] 式中M为质量矩阵,C为阻尼矩阵, $\dot{\delta}_2$ 、 $\ddot{\delta}_2$ 分别为节点的加速度列阵和速度列阵,F为节点载荷列阵。已知M、C和F,即可求得 δ_2 。

[0073] 步骤6,在光机耦合基础模型中加入结构变形误差参数。前述步骤中已得到反射面或聚光接收面结构变形误差为 δ ,在光机耦合模型中加入结构误差参数,可假设聚光反射面及接收面分别存在误差 δ_c 、 δ_r ,如图3所示,然后对整个光机耦合基础模型进行修正,修正后的公式为:

$$[0074] \quad q = \iint \frac{F(\phi)(n_{c\delta} \cdot r_\delta)(n_{r\delta} \cdot r_\delta)}{|n_{c\delta}| \cdot |n_{r\delta}| \cdot |r_\delta|^4} dA_c \quad (8);$$

[0075] 其中, $n_{c\delta} = n_c + \delta_c$, $n_{r\delta} = n_r + \delta_r$, $r_\delta = r + \delta_r - \delta_c$, $n_{li\delta} = n_{li} - \delta_c$ 。

$$[0076] \quad n_{lr\delta} = 2(n_{c\delta}' \cdot n_{li\delta}') \cdot n_{c\delta}' - n_{li\delta}' \quad (9);$$

$$[0077] \quad \phi = \arccos\left(\frac{n_{lr\delta} \cdot r_\delta}{|n_{lr\delta}| \cdot |r_\delta|}\right) \quad (10);$$

[0078] 步骤7,使用积分方法耦合计算聚光接收面的光分布结果,积分法使用常见的复合辛普森积分方法。

[0079] 实施例1

[0080] 仿真计算选择的参数为光照强度为1000W/m²,聚光模型球面聚光反射面直径为1m,用半球冠聚光,取半球一次反射区,聚光接收圆柱面直径为0.1m,太阳张角为32'。其中太阳盘的能量分布均匀,反射率和吸收率均为理想值,光线垂直入射球口径面。聚光模型中聚光反射面或聚光接收面结构变形误差为零。球反射面和电池阵接收面旋转对称的,所以可以只计算圆柱表面上某条垂直底面直线上的光分布结果。计算结果的图中,横坐标为聚光接收圆柱表面上垂直底面的直线高度,纵坐标为光照强度。

[0081] 图4为计算不同积分区域划分的结果,分别为划分20*20、200*200、500*500、1000*1000和5000*5000份的结果,积分区域划分份数越高计算越准确,但是计算时间越长。图5为计算的聚光接收面直线上取25个点和500个点的计算结果,点数越多,表征的点越多,对光强变化描述越准确。

[0082] 实施例2

[0083] 仿真计算选择的参数为光照强度为1000W/m²,聚光模型球面聚光反射面直径为1m,用半球冠聚光,取半球一次反射区,聚光接收圆柱面直径为0.1m,太阳张角为32'。其中太阳盘的能量分布均匀,反射率和吸收率均为理想值,光线垂直入射球口径面。聚光模型中聚光反射面结构变形随机误差均值为0.1mm,方差为0.1mm,系统误差为聚光反射面整体倾斜1°。球反射面和电池阵接收面旋转对称的,所以只计算圆柱表面上某条垂直底面直线上的光分布结果。计算结果的图中,横坐标为聚光接收圆柱表面上垂直底面的直线高度,纵坐标为光照强度。图6即为光机耦合基础模型加入随机和系统误差后的光分布计算结果。

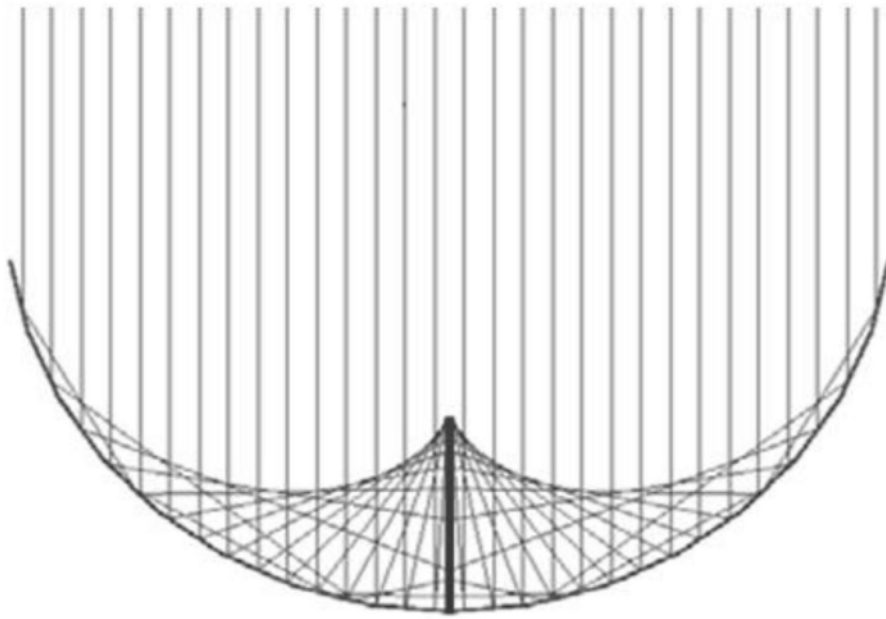


图1

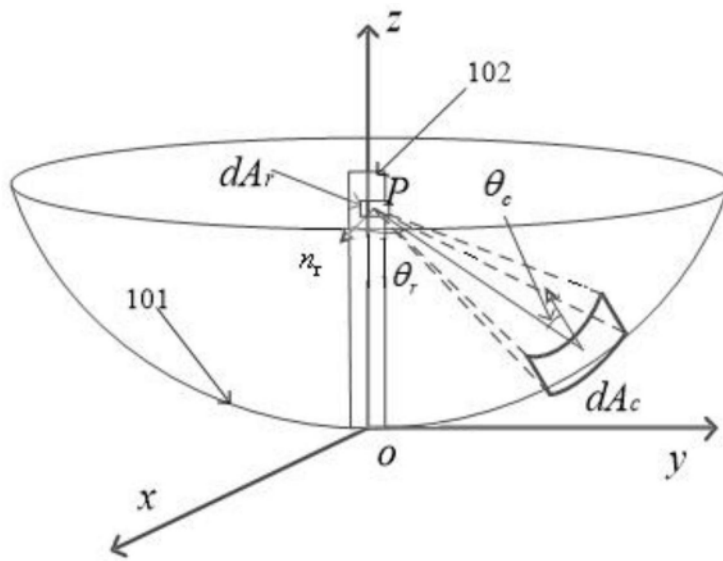


图2

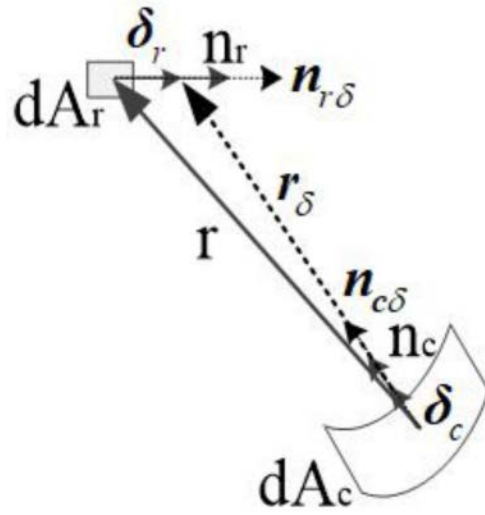


图3

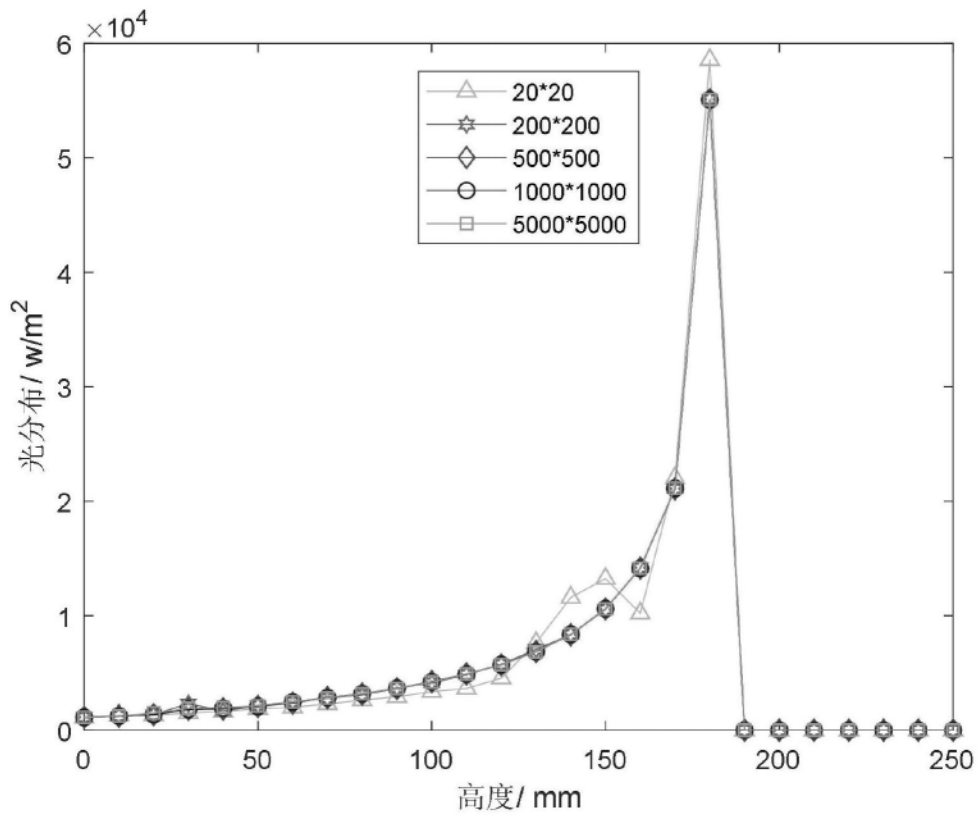


图4

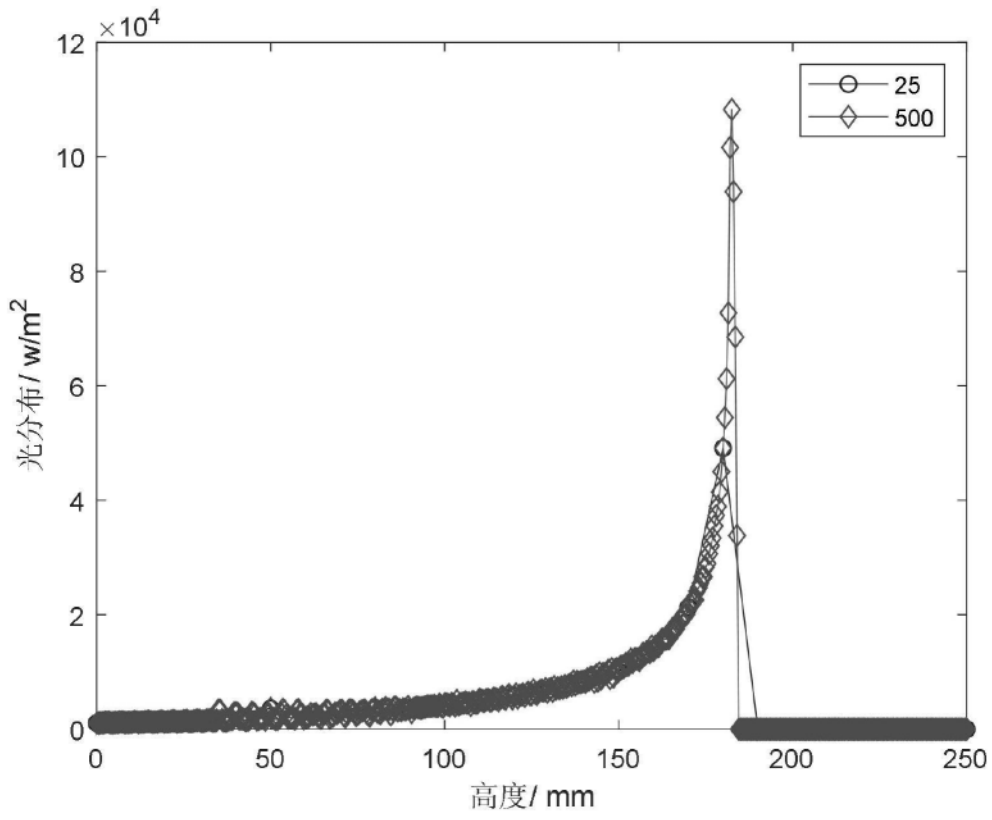


图5

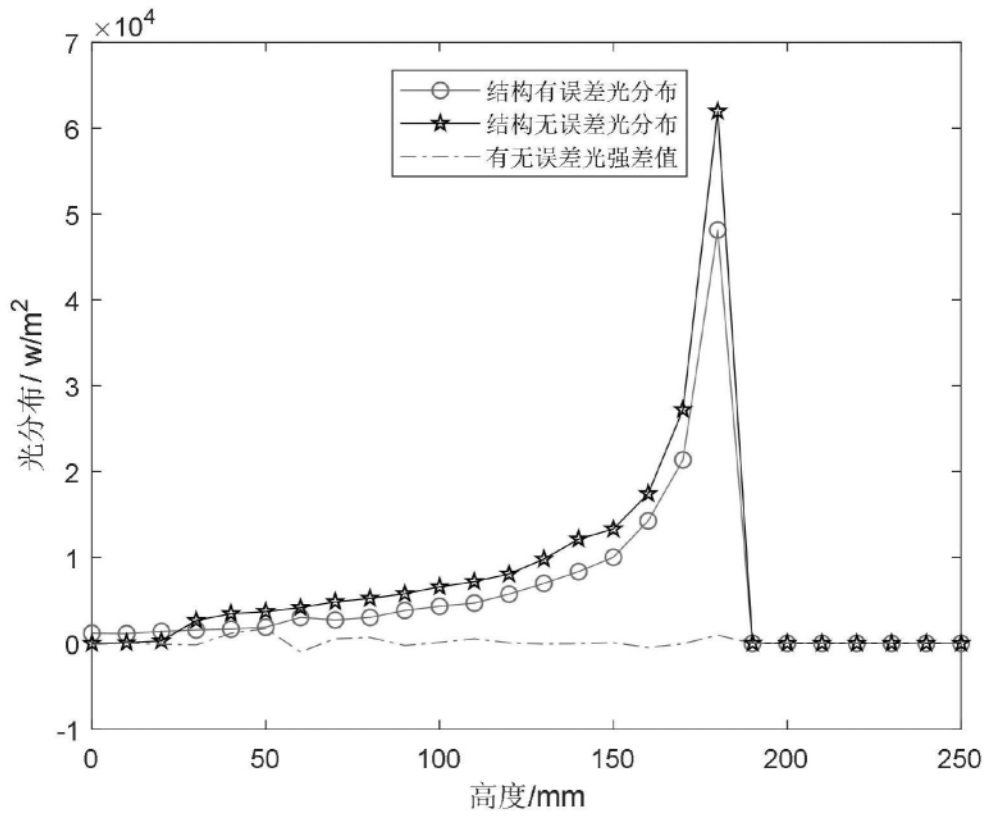


图6