



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111898292 B

(45) 授权公告日 2024.03.15

(21) 申请号 202010640019.8

G06T 17/20 (2006.01)

(22) 申请日 2020.07.06

(56) 对比文件

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 107358652 A, 2017.11.17

申请公布号 CN 111898292 A

US 2019096127 A1, 2019.03.28

WO 2015135087 A1, 2015.09.17

(43) 申请公布日 2020.11.06

李仙丽; 王东旭; 张逸群; 段竹竹. SSPS-

(73) 专利权人 西北大学

OMEGA超大型球形聚光器结构拓扑构型与设计.

地址 710069 陕西省西安市太白北路229号

宇航学报. 2018, (04), 全文.

(72) 发明人 杨阳 刘姣姣 狄青云 裴梦琛

审查员 李锦川

王怡 孟一卓 赵昕玥

(74) 专利代理机构 西安吉顺和知识产权代理有

限公司 61238

专利代理师 吴倩倩

(51) Int. Cl.

G06F 30/23 (2020.01)

G06F 30/17 (2020.01)

权利要求书3页 说明书8页 附图4页

(54) 发明名称

一种用于空间太阳能电站的球形聚光器支撑方法

(57) 摘要

本发明属于太阳能利用技术,具体涉及一种用于空间太阳能电站的球形聚光器支撑方法,其特征是:至少包括如下步骤:(1)建立基准多面体;(2)获取基础子阵;(3)划分基础子阵;(4)获取球面网格形式;(5)确定具体的球面网格和节点坐标;(6)支撑结构构建;(7)建立结构有限元模型;(8)施加约束;(9)施加载荷;(10)求解有限元模型;(11)提取结构基频、形面精度和最大节点位移;(12)构造结构优化模型。它以便降低支撑结构的质量、提高光收集率、提升形面精度,实现光、结构综合性能优化设计。



1. 一种用于空间太阳能电站的球形聚光器支撑方法,其特征是:至少包括如下步骤:

(1) 建立基准多面体

利用正八面体建立基准多面体,正八面体的两个顶点为外接球面的极点,另外四个顶点落在外接球面的赤道上;

(2) 获取基础子阵

将步骤(1)得到的基准多面体映射到外接球面,得到8组相同的球面三角形,选取其中一组作为基础子阵;

(3) 划分基础子阵;

(4) 获取球面网格形式

将步骤(3)得到的基础子阵的节点坐标进行翻转和映射,得到另外7组子阵的节点坐标,合并重复节点并去除极点附近的节点;连接相邻节点,得到球面网格形式;

(5) 确定具体的球面网格和节点坐标;

(6) 支撑结构构建

利用空心碳纤维杆以步骤(5)得到的具体的球面网格为路径,搭建支撑结构;沿球面三角形中线将支撑杆均匀划分为三类,三类支撑结构取不同的内外径;

(7) 建立结构有限元模型

基于步骤(5)得到的节点坐标和步骤(6)的三类支撑结构内外径,利用有限元软件建立结构有限元模型;

(8) 施加约束

针对步骤(7)得到的结构有限元模型,添加自由度约束;

(9) 施加载荷

根据聚光器支撑结构和空间太阳能电站其他结构部件的连接关系,对步骤(7)得到的结构有限元模型施加载荷;

(10) 求解有限元模型

在步骤(7)、(8)和(9)的基础上,对结构有限元模型进行求解,得到结构基频和节点位移;

(11) 提取结构基频、形面精度和最大节点位移

依据步骤(10)得到的节点位移,计算出形面精度并提取最大节点位移,将得到的形面精度、最大节点位移、以及步骤(10)得到的结构基频输出到文本;

(12) 构造结构优化模型;

(13) 求解优化模型

利用粒子群算法求解步骤(12)中的优化模型,得到优化后的三类支撑结构的内外径;

(14) 输出支撑结构设计方案

利用步骤(5)得到的具体的球面网格和节点坐标,以及步骤(13)得到的最优内外径,输出支撑结构设计方案;

所述的步骤(3)具体包括:

(3a) 旋转赤道圆,切割步骤(2)得到的球面三角形的中线,得到点 $N_i$ ;

(3b) 做通过步骤(3a)得到的节点 $N_i$ 的赤纬圆,切割步骤(2)得到的球面三角形,与球面三角形的边交于点 $N_i'$ ;

(3c) 利用赤经圆切割弧 $N_i N_i'$ , 得到基础子阵的节点坐标, 通过下式表示:

$$\begin{bmatrix} x_{i,j} \\ y_{i,j} \\ z_{i,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_0 \cos \varphi_j \sin \theta_i \\ R_0 \sin \varphi_j \\ R_0 \cos \varphi_j \cos \theta_i \end{bmatrix}$$

其中,  $(x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j})$  为节点坐标,  $R_0$  为球形聚光器半径,  $\varphi_j$  和  $\theta_i$  分别为方位角和天顶角, 通过下式计算:

$$\varphi_j = \frac{\pi}{4(m+1)} j, j=1, 2, \dots, m$$

$$\theta_i = \frac{\pi}{2(m+1)} i, i=1, 2, \dots, m$$

其中,  $m$  为步骤 (3a) 切割球面三角形中线的分段数;

(3d) 连接相邻节点, 形成基础子阵网格;

所述的步骤 (5) 具体包括:

(5a) 通过下式计算入射光线的位置、方向向量和携带能量数;

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_0 \\ R_0 \sqrt{R_r} \cos(2\pi R_g) \\ R_0 \sqrt{R_r} \sin(2\pi R_g) \end{bmatrix}$$

$$R_{inc} = (-1, 0, 0)$$

$$e_{j,k} = \frac{I_0 A_r}{N_{inc}}$$

其中,  $(x_0, y_0, z_0)$  为入射光线的位置坐标,  $R_r$  和  $R_g$  分别代表轴向和环向的服从  $[0, 1]$  分布的随机数;  $R_{inc}$  为入射光线的单位方向向量;  $e_{j,k}$  为单个光线携带能量数,  $N_{inc}$  为抽样光线总数,  $I_0$  为太阳常数,  $A_r$  为聚光器口径面积, 通过下式计算:

$$A_r = (\pi + 4 \int_{\pi/6}^0 \sin^2 \varphi d\varphi) R_0^2$$

(5b) 通过下式计算反射光线的方向向量;

$$R_{ref} = R_{inc} - 2(n \cdot R_{inc})n$$

其中,  $R_{ref}$  为反射光线的单位方向向量,  $n$  为聚光器表面外法向量;

(5c) 计算反射光线与接收面的焦点;

(5d) 针对步骤 (3c) 中不同的分段数  $m$ , 通过下式分别计算光收集率;

$$\eta_c = \frac{\sum_{k=1}^{N_j} e_{j,k}}{A_r} \times 100\%, j=1, 2, \dots, M$$

其中,  $\eta_c$  为光收集率,  $N_j$  为入射到第  $j$  个分区的抽样光线总数,  $M$  为统计分区总数;

(5e) 根据光收集率设计要求确定步骤 (3c) 中球面三角形中线的分段数  $m$ , 代入步骤 (3c) 得到具体的球面网格和节点坐标;

所述的步骤 (12) 具体包括:

(12a) 构造如下优化模型,通过优化三类支撑结构的内外径尺寸,来提高形面精度并降低结构质量;

$$\text{Find } (r, R) = (r_0, r_1, \dots, r_2, R_0, R_1, \dots, R_2)^T$$

$$\text{Min } f(r, R) = \omega_1 f_1(r, R) + \omega_2 f_2(r, R)$$

$$\text{S.T. } b_{\min} - b(r, R) \leq 0$$

$$a(r, R) - a_{\max} \leq 0$$

$$e(r, R) - e_{\max} \leq 0$$

$$r_i - R_i < 0, i = 0, 1, 2$$

其中,  $r$ 和 $R$ 分别为支撑结构内径和外径集合,  $f_1(r, R)$ 为归一化结构质量,可基于步骤(12b)计算得到,  $f_2(r, R)$ 为归一化形面精度,可基于步骤(11)计算得到,  $\omega_1$ 和 $\omega_2$ 为权系数;  $b(r, R)$ 和 $b_{\min}$ 分别代表结构基频及其约束,  $a(r, R)$ 和 $a_{\max}$ 分别代表支撑杆对光线的遮挡率及其约束,  $b(r, R)$ 和 $a(r, R)$ 可分别通过步骤(11)和步骤(12c)得到;为了定量地评价拼接单元的结构稳定性,引入等积性指标 $e(r, R)$ ,即单元的最大面积和最小面积之比,  $e_{\max}$ 则代表等积性约束,可通过下式计算:

$$e(r, R) = \frac{\max_{j=1}^{N_e} A_e(j)}{\min_{j=1}^{N_e} A_e(j)}$$

其中,  $A_e(j)$ 为基础子阵中单元的表面积,  $N_e$ 为基础子阵中单元的数目;

(12b) 利用步骤(5)得到的节点坐标和步骤(6)得到的支撑结构内外径,计算出支撑结构的总质量;

(12c) 利用下式计算支撑结构对入射光线的遮挡率;

$$\eta_s = \frac{2 \sum R_{t,i} \sqrt{|y_t - y_s|^2 + |z_t - z_s|^2}}{A_r}$$

其中,  $\eta_s$ 为遮挡率,  $R_{t,i}$ 为支撑结构的外径,  $(y_s, z_s)$ 和 $(y_t, z_t)$ 分别为单个支撑结构在投影面中的起点坐标和终点坐标,聚光器口径面积 $A_r$ 由步骤(5a)计算得到。

2. 根据权利要求1所述的一种用于空间太阳能电站的球形聚光器支撑方法,其特征是:所述的步骤(13)具体包括:

(13a) 设置种群数和进化代数;

(13b) 初始化三类支撑结构内外径;

(13c) 基于步骤(12b)和步骤(11),计算目标函数;

(13d) 更新支撑结构内外径;

(13e) 重复步骤(13c)和步骤(13d),直到达到设置的进化代数;

(13f) 输出最优支撑结构内外径。

## 一种用于空间太阳能电站的球形聚光器支撑方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于太阳能利用技术,具体涉及一种用于空间太阳能电站的球形聚光器支撑方法。

### 背景技术

[0002] 空间太阳能电站是一种直接在太空收集并转换阳光的超大型空间结构,主要包括聚光器、光伏电池阵、微波发射天线等部分。其中,聚光器的尺度可达公里级,无法一体成型,须通过单元模块拼接构建。2016年西安电子科技大学提出了OMEGA (Orb-shaped Membrane Energy Gathering Array) 方案。该方案拟通过按一定的网格路径搭建支撑结构,之后铺设单向薄膜的方式建造半径为1500m的球形聚光器。

[0003] 遥感科学领域对球面网格系统已有多年的研究,主要是研究如何将球面递归剖分为面积、形状近似相等且具有多分辨层次结构的单元。但与一般球面网格构建不同的是,OMEGA方案的球形聚光器承担着光能收集和结构承载的功能,支撑结构的设计需综合考虑光学特性和结构特性,以实现形面精度高、光收集效率高、光收集波动小、系统质量低等设计要求。

### 发明内容

[0004] 本发明的目的在于提供一种用于空间太阳能电站的球形聚光器支撑方法,以便降低支撑结构的质量、提高光收集率、提升形面精度,实现光、结构综合性能优化设计。

[0005] 本发明目的技术方案是这样实现的,一种用于空间太阳能电站的球形聚光器支撑方法,其特征是:至少包括如下步骤:

[0006] (1) 建立基准多面体

[0007] 利用正八面体建立基准多面体,正八面体的两个顶点为外接球面的极点,另外四个顶点落在外接球面的赤道上;

[0008] (2) 获取基础子阵

[0009] 将步骤(1)得到的基准多面体映射到外接球面,得到8组相同的球面三角形,选取其中一组作为基础子阵;

[0010] (3) 划分基础子阵

[0011] (3a) 旋转赤道圆,切割步骤(2)得到的球面三角形的中线,得到点 $N_i$ ;

[0012] (3b) 做通过步骤(3a)得到的节点 $N_i$ 的赤纬圆,切割步骤(2)得到的球面三角形,与球面三角形的边交于点 $N'_i$ ;

[0013] (3c) 利用赤经圆切割弧 $N_i N'_i$ ,得到基础子阵的节点坐标,通过下式表示:

$$[0014] \begin{bmatrix} x_{i,j} \\ y_{i,j} \\ z_{i,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_0 \cos \varphi_j \sin \theta_i \\ R_0 \sin \varphi_j \\ R_0 \cos \varphi_j \cos \theta_i \end{bmatrix}$$

[0015] 其中,  $(x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j})$  为节点坐标,  $R_0$  为球形聚光器半径,  $\varphi_j$  和  $\theta_i$  分别为方位角和天顶角, 通过下式计算:

$$[0016] \quad \varphi_j = \frac{\pi}{4(m+1)} j, j=1, 2, \dots, m$$

$$[0017] \quad \theta_i = \frac{\pi}{2(m+1)} i, i=1, 2, \dots, m$$

[0018] 其中,  $m$  为步骤 (3a) 切割球面三角形中线的分段数;

[0019] (3d) 连接相邻节点, 形成基础子阵网格;

[0020] (4) 获取球面网格形式

[0021] 将步骤 (3) 得到的基础子阵的节点坐标进行翻转和映射, 得到另外 7 组子阵的节点坐标, 合并重复节点并去除极点附近的节点。连接相邻节点, 得到球面网格形式;

[0022] (5) 确定具体的球面网格和节点坐标

[0023] (5a) 通过下式计算入射光线的位置、方向向量和携带能量数;

$$[0024] \quad \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_0 \\ R_0 \sqrt{R_r} \cos(2\pi R_g) \\ R_0 \sqrt{R_r} \sin(2\pi R_g) \end{bmatrix}$$

$$[0025] \quad R_{inc} = (-1, 0, 0)$$

$$[0026] \quad e_{j,k} = \frac{I_0 A_r}{N_{inc}}$$

[0027] 其中,  $(x_0, y_0, z_0)$  为入射光线的位置坐标,  $R_r$  和  $R_g$  分别代表轴向和环向的服从  $[0, 1]$  分布的随机数;  $R_{inc}$  为入射光线的单位方向向量;  $e_{j,k}$  为单个光线携带能量数,  $N_{inc}$  为抽样光线总数,  $I_0$  为太阳常数,  $A_r$  为聚光器口径面积, 通过下式计算:

$$[0028] \quad A_r = (\pi + 4 \int_{\pi/6}^0 \sin^2 \varphi d\varphi) R_0^2$$

[0029] (5b) 通过下式计算反射光线的方向向量;

$$[0030] \quad R_{ref} = R_{inc} - 2(n \cdot R_{inc})n$$

[0031] 其中,  $R_{ref}$  为反射光线的单位方向向量,  $n$  为聚光器表面外法向量;

[0032] (5c) 计算反射光线与接收面的焦点;

[0033] (5d) 针对步骤 (3c) 中不同的分段数  $m$ , 通过下式分别计算光收集率;

$$[0034] \quad \eta_c = \frac{\sum_{k=1}^{N_j} e_{j,k}}{A_r} \times 100\%, j=1, 2, \dots, M$$

[0035] 其中,  $\eta_c$  为光收集率,  $N_j$  为入射到第  $j$  个分区的抽样光线总数,  $M$  为统计分区总数;

[0036] (5e) 根据光收集率设计要求确定步骤 (3c) 中球面三角形中线的分段数  $m$ , 代入步骤 (3c) 得到具体的球面网格和节点坐标;

[0037] (6) 支撑结构构建

[0038] 利用空心碳纤维杆以步骤 (5) 得到的具体的球面网格为路径, 搭建支撑结构。沿球面三角形中线将支撑杆均匀划分为三类, 三类支撑结构取不同的内外径;

[0039] (7) 建立结构有限元模型

[0040] 基于步骤(5)得到的节点坐标和步骤(6)的三类支撑结构内外径,利用有限元软件建立结构有限元模型;

[0041] (8) 施加约束

[0042] 针对步骤(7)得到的结构有限元模型,添加自由度约束;

[0043] (9) 施加载荷

[0044] 根据聚光器支撑结构和空间太阳能电站其他结构部件的连接关系,对步骤(7)得到的结构有限元模型施加载荷;

[0045] (10) 求解有限元模型

[0046] 在步骤(7)、(8)和(9)的基础上,对结构有限元模型进行求解,得到结构基频和节点位移;

[0047] (11) 提取结构基频、形面精度和最大节点位移

[0048] 依据步骤(10)得到的节点位移,计算出形面精度并提取最大节点位移,将得到的形面精度、最大节点位移、以及步骤(10)得到的结构基频输出到文本。

[0049] (12) 构造结构优化模型

[0050] (12a) 构造如下优化模型,通过优化三类支撑结构的内外径尺寸,来提高形面精度并降低结构质量;

[0051] Find  $(r, R) = (r_0, r_1, \dots, r_2, R_0, R_1, \dots, R_2)^T$

[0052] Min  $f(r, R) = \omega_1 f_1(r, R) + \omega_2 f_2(r, R)$

[0053] S.T.  $b_{\min} - b(r, R) \leq 0$

[0054]  $a(r, R) - a_{\max} \leq 0$

[0055]  $e(r, R) - e_{\max} \leq 0$

[0056]  $r_i - R_i < 0, i = 0, 1, 2$

[0057] 其中, $r$ 和 $R$ 分别为支撑结构内径和外径集合, $f_1(r, R)$ 为归一化结构质量,可基于步骤(12b)计算得到, $f_2(r, R)$ 为归一化形面精度,可基于步骤(11)计算得到, $\omega_1$ 和 $\omega_2$ 为权系数; $b(r, R)$ 和 $b_{\min}$ 分别代表结构基频及其约束, $a(r, R)$ 和 $a_{\max}$ 分别代表支撑杆对光线的遮挡率及其约束, $b(r, R)$ 和 $a(r, R)$ 可分别通过步骤(11)和步骤(12c)得到;为了定量地评价拼接单元的结构稳定性,引入等积性指标 $e(r, R)$ ,即单元的最大面积和最小面积之比, $e_{\max}$ 则代表等积性约束,可通过下式计算:

$$[0058] \quad e(\mathbf{r}, \mathbf{R}) = \frac{\max_{j=1}^{N_e} A_e(j)}{\min_{j=1}^{N_e} A_e(j)}$$

[0059] 其中, $A_e(j)$ 为基础子阵中单元的表面积, $N_e$ 为基础子阵中单元的数目;

[0060] (12b) 利用步骤(5)得到的节点坐标和步骤(6)得到的支撑结构内外径,计算出支撑结构的总质量;

[0061] (12c) 利用下式计算支撑结构对入射光线的遮挡率;

$$[0062] \quad \eta_s = \frac{2 \sum R_{t,i} \sqrt{|y_t - y_s|^2 + |z_t - z_s|^2}}{A_r}$$

[0063] 其中,  $\eta_s$  为遮挡率,  $R_{t,i}$  为支撑结构的外径,  $(y_s, z_s)$  和  $(y_t, z_t)$  分别为单个支撑结构在投影面中的起点坐标和终点坐标, 聚光器口径面积  $A_t$  由步骤 (5a) 计算得到;

[0064] (13) 求解优化模型

[0065] 利用粒子群算法求解步骤 (12) 中的优化模型, 得到优化后的三类支撑结构的内外径。

[0066] (13a) 设置种群数和进化代数;

[0067] (13b) 初始化三类支撑结构内外径;

[0068] (13c) 基于步骤 (12b) 和步骤 (11), 计算目标函数;

[0069] (13d) 更新支撑结构内外径;

[0070] (13e) 重复步骤 (13c) 和步骤 (13d), 直到达到设置的进化代数;

[0071] (13f) 输出最优支撑结构内外径;

[0072] (14) 输出支撑结构设计方案

[0073] 利用步骤 (5) 得到的具体的球面网格和节点坐标, 以及步骤 (13) 得到的最优内外径, 输出支撑结构设计方案。

[0074] 本发明的有益之处在于:

[0075] 本发明通过赤道圆、赤纬圆和赤经圆划分基础子阵, 得到球面网格形式, 即支撑结构的构建路径, 进而分类优化支撑结构的内外径。通过该方法降低支撑结构的质量、提高光收集率、提升形面精度, 实现光、结构综合性能优化设计。

[0076] 1、基于正八面体划分球面, 可从原理上降低光收集效率的波动;

[0077] 2、具有对称性的球面网格划分, 可从原理上保证结构稳定性;

[0078] 3、通过调整分段数, 可实现光收集效率的调整, 以满足不同设计要求;

[0079] 4、相比单一尺寸优化, 将支撑结构分为三类后分别优化, 可在降低系统质量的同时, 提升形面精度, 并一定程度提高结构基频和降低光遮挡率。

## 附图说明

[0080] 下面结合附图, 对本发明具体实施方式作进一步的详细说明。

[0081] 图1是本发明流程图;

[0082] 图2A基准多面体;

[0083] 图2B是基础子阵示意图;

[0084] 图3是基础子阵划分过程示意图;

[0085] 其中, 图3a是切割球面三角形中线的分段数示意图; 图3b利用赤经圆切割弧  $N_i N'_i$ , 得到基础子阵的节点坐标示意图; 图3c是连接相邻节点形成基础子阵网格示意图;

[0086] 图4是球形聚光器网格示意图;

[0087] 图5是支撑结构构建过程示意图; 图5a利用空心碳纤维杆得到的具体的球面网格为路径, 搭建支撑结构示意图; 图5b是沿球面三角形中线将支撑杆均匀划分为三类, 三类支撑结构取不同的内外径示意图;

[0088] 图6是支撑结构遮挡示意图。

### 具体实施方式

[0089] 如图1所示,一种用于空间太阳能电站的球形聚光器支撑方法,具体过程如下:

[0090] 步骤1,利用正八面体建立基准多面体(见图2A),正八面体的两个顶点为外接球面的极点,另外四个顶点落在外接球面的赤道上;

[0091] 步骤2,将步骤1得到的基准多面体映射到外接球面,得到8组相同的球面三角形,选取其中一组作为基础子阵如图2B所示;

[0092] 步骤3,划分基础子阵

[0093] (3a) 旋转赤道圆,切割步骤(2)得到的球面三角形的中线,得到点 $N_i$ ;

[0094] (3b) 做通过步骤(3a)得到的节点 $N_i$ 的赤纬圆,切割步骤(2)得到的球面三角形,与球面三角形的边交于点 $N'_i$ ,步骤(3a)和(3b)如图3(a)所示;

[0095] (3c) 如图3(b)所示,利用赤经圆切割弧 $N_i N'_i$ ,得到基础子阵的节点坐标,通过下式表示:

$$[0096] \quad \begin{bmatrix} x_{i,j} \\ y_{i,j} \\ z_{i,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_0 \cos \varphi_j \sin \theta_i \\ R_0 \sin \varphi_j \\ R_0 \cos \varphi_j \cos \theta_i \end{bmatrix}$$

[0097] 其中,  $(x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j})$  为节点坐标,  $R_0$  为球形聚光器半径,  $\varphi_j$  和  $\theta_i$  分别为方位角和天顶角,通过下式计算:

$$[0098] \quad \varphi_j = \frac{\pi}{4(m+1)} j, j=1, 2, \dots, m$$

$$[0099] \quad \theta_i = \frac{\pi}{2(m+1)} i, i=1, 2, \dots, m$$

[0100] 其中,  $m$  为步骤(3a)切割球面三角形中线的分段数;

[0101] (3d) 如图3(c)所示,连接相邻节点,形成基础子阵网格;

[0102] 步骤4,获取球面网格形式

[0103] 如图4所示,将步骤(3)得到的基础子阵的节点坐标进行翻转和映射,得到另外7组子阵的节点坐标,合并重复节点并去除极点附近的节点。连接相邻节点,得到球面网格形式;

[0104] 步骤5,确定具体的球面网格和节点坐标

[0105] (5a) 通过下式计算入射光线的位置、方向向量和携带能量数;

$$[0106] \quad \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_0 \\ R_0 \sqrt{R_r} \cos(2\pi R_g) \\ R_0 \sqrt{R_r} \sin(2\pi R_g) \end{bmatrix}$$

$$[0107] \quad R_{inc} = (-1, 0, 0)$$

$$[0108] \quad e_{j,k} = \frac{I_0 A_r}{N_{inc}}$$

[0109] 其中,  $(x_0, y_0, z_0)$  为入射光线的位置坐标,  $R_r$  和  $R_g$  分别代表轴向和环向的服从  $[0, 1]$  分布的随机数;  $R_{inc}$  为入射光线的单位方向向量;  $e_{j,k}$  为单个光线携带能量数,  $N_{inc}$  为抽样光

线总数,  $I_0$  为太阳常数,  $A_r$  为聚光器口径面积, 通过下式计算:

$$[0110] \quad A_r = (\pi + 4) \int_{\pi/6}^0 \sin^2 \varphi d\varphi R_0^2$$

[0111] (5b) 通过下式计算反射光线的方向向量;

$$[0112] \quad R_{ref} = R_{inc} - 2(n \cdot R_{inc})n$$

[0113] 其中,  $R_{ref}$  为反射光线的单位方向向量,  $n$  为聚光器表面外法向量;

[0114] (5c) 计算反射光线与接收面的交点;

[0115] (5d) 针对步骤 (3c) 中不同的分段数  $m$ , 通过下式分别计算光收集率;

$$[0116] \quad \eta_c = \frac{\sum_{k=1}^{N_j} e_{j,k}}{A_r} \times 100\% , j = 1, 2, \dots, M$$

[0117] 其中,  $\eta_c$  为光收集率,  $N_j$  为入射到第  $j$  个分区的抽样光线总数,  $M$  为统计分区总数;

[0118] (5e) 根据光收集率设计要求确定步骤 (3c) 中球面三角形中线的分段数  $m$ , 代入步骤 (3c) 得到具体的球面网格和节点坐标;

[0119] 步骤6, 支撑结构构建

[0120] 如图5所示, 利用空心碳纤维杆以步骤 (5) 得到的具体的球面网格为路径, 搭建支撑结构 (见图5a)。沿球面三角形中线将支撑杆均匀划分为三类, 三类支撑结构取不同的内外径 (见图5b);

[0121] 步骤7, 建立结构有限元模型

[0122] 基于步骤 (5) 得到的节点坐标和步骤 (6) 的三类支撑结构内外径, 利用有限元软件建立结构有限元模型;

[0123] 步骤8, 施加约束

[0124] 针对步骤 (7) 得到的结构有限元模型, 添加自由度约束;

[0125] 步骤9, 施加载荷

[0126] 根据聚光器支撑结构和空间太阳能电站其他结构部件的连接关系, 对步骤 (7) 得到的结构有限元模型施加载荷;

[0127] 步骤10, 求解有限元模型

[0128] 在步骤 (7)、(8) 和 (9) 的基础上, 对结构有限元模型进行求解, 得到结构基频和节点位移;

[0129] 步骤11, 提取结构基频、形面精度和最大节点位移

[0130] 依据步骤 (10) 得到的节点位移, 计算出形面精度并提取最大节点位移, 将得到的形面精度、最大节点位移、以及步骤 (10) 得到的结构基频输出到文本。

[0131] 步骤12, 构造结构优化模型

[0132] (12a) 构造如下优化模型, 通过优化三类支撑结构的内外径尺寸, 来提高形面精度并降低结构质量;

$$[0133] \quad \text{Find } (r, R) = (r_0, r_1, \dots, r_2, R_0, R_1, \dots, R_2)^T$$

$$[0134] \quad \text{Min } f(r, R) = \omega_1 f_1(r, R) + \omega_2 f_2(r, R)$$

$$[0135] \quad \text{S.T. } b_{\min} - b(r, R) \leq 0$$

$$[0136] \quad a(r, R) - a_{\max} \leq 0$$

[0137]  $e(r, R) - e_{\max} \leq 0$

[0138]  $r_i - R_i < 0, i = 0, 1, 2$

[0139] 其中,  $r$ 和 $R$ 分别为支撑结构内径和外径集合,  $f_1(r, R)$ 为归一化结构质量,可基于步骤(12b)计算得到,  $f_2(r, R)$ 为归一化形面精度,可基于步骤(11)计算得到,  $\omega_1$ 和 $\omega_2$ 为权重系数;  $b(r, R)$ 和 $b_{\min}$ 分别代表结构基频及其约束,  $a(r, R)$ 和 $a_{\max}$ 分别代表支撑杆对光线的遮挡率及其约束,  $b(r, R)$ 和 $a(r, R)$ 可分别通过步骤(11)和步骤(12c)得到;为了定量地评价拼接单元的结构稳定性,引入等积性指标 $e(r, R)$ ,即单元的最大面积和最小面积之比,  $e_{\max}$ 则代表等积性约束,可通过下式计算:

$$[0140] \quad e(\mathbf{r}, \mathbf{R}) = \frac{\max_{j=1}^{N_e} A_e(j)}{\min_{j=1}^{N_e} A_e(j)}$$

[0141] 其中,  $A_e(j)$ 为基础子阵中单元的表面积,  $N_e$ 为基础子阵中单元的数目;

[0142] (12b)利用步骤(5)得到的节点坐标和步骤(6)得到的支撑结构内外径,计算出支撑结构的总质量;

[0143] (12c)支撑结构对入射光线的遮挡如图6所示,利用下式计算支撑结构对入射光线的遮挡率;

$$[0144] \quad \eta_s = \frac{2 \sum R_{t,i} \sqrt{|y_t - y_s|^2 + |z_t - z_s|^2}}{A_r}$$

[0145] 其中,  $\eta_s$ 为遮挡率,  $R_{t,i}$ 为支撑结构的外径,  $(y_s, z_s)$ 和 $(y_t, z_t)$ 分别为单个支撑结构在投影面中的起点坐标和终点坐标,聚光器口径面积 $A_r$ 由步骤(5a)计算得到;

[0146] 步骤13,求解优化模型

[0147] 利用粒子群算法求解步骤(12)中的优化模型,得到优化后的三类支撑结构的内外径。

[0148] (13a)设置种群数和进化代数;

[0149] (13b)初始化三类支撑结构内外径;

[0150] (13c)基于步骤(12b)和步骤(11),计算目标函数;

[0151] (13d)更新支撑结构内外径;

[0152] (13e)重复步骤(13c)和步骤(14e),直到达到设置的进化代数;

[0153] (13f)输出最优支撑结构内外径。

[0154] 本发明的优点可通过以下数值算例进一步说明:

[0155] 1.球形聚光器半径 $R=1500\text{m}$ ,取不同的切割层数,计算光收集率等光学特性参数,结果如表1所示。

[0156] 表1不同切割层数对应的光学特性对比

切割层数	聚光比		归一化收集效率 (%)
	最大值	最小值	
理想球面	9.75	6.76	100
12	6.23	4.75	66.85
15	7.35	5.25	72.28
[0157] 17	7.92	5.75	80.70
20	8.79	6.09	85.41
22	9.23	6.24	87.56
25	9.27	6.56	91.31
27	9.42	6.62	92.02
30	9.61	6.72	94.19

[0158] 由表1可知,当切割层数取30层时,光收集效率可达94.19%。

[0159] 2.取切割层数为30层,种群规模为50,进化代数为160进行优化,采用一类支撑结构优化和本发明提出的三类支撑结构优化的性能参数对比如表2所示。

[0160] 表2分层构建初步优化结果

	方法	目标函数	基频/Hz	质量/t	遮挡率/%	RMS/m	最大变形/m
[0161]	一类	0.02244	0.00558	1214	2.167	0.033	0.152
	三类	0.02039	0.00561	1130	1.549	0.030	0.089
	变化率	-9.12%	0.42%	-6.91%	-28.52%	-9.10%	-41.45%

[0162] 由表2可知,相比单一尺寸,采用三类支撑结构构建可在保证结构基频的前提下,降低系统质量、光遮挡率和最大变形,同时提高了形面精度。

[0163] 本实施方式中没有详细叙述的部分属本行业的公知的常用手段,这里不一一叙述。以上例举仅仅是对本发明的举例说明,并不构成对本发明的保护范围的限制,凡是与本发明相同或相似的设计均属于本发明的保护范围之内。

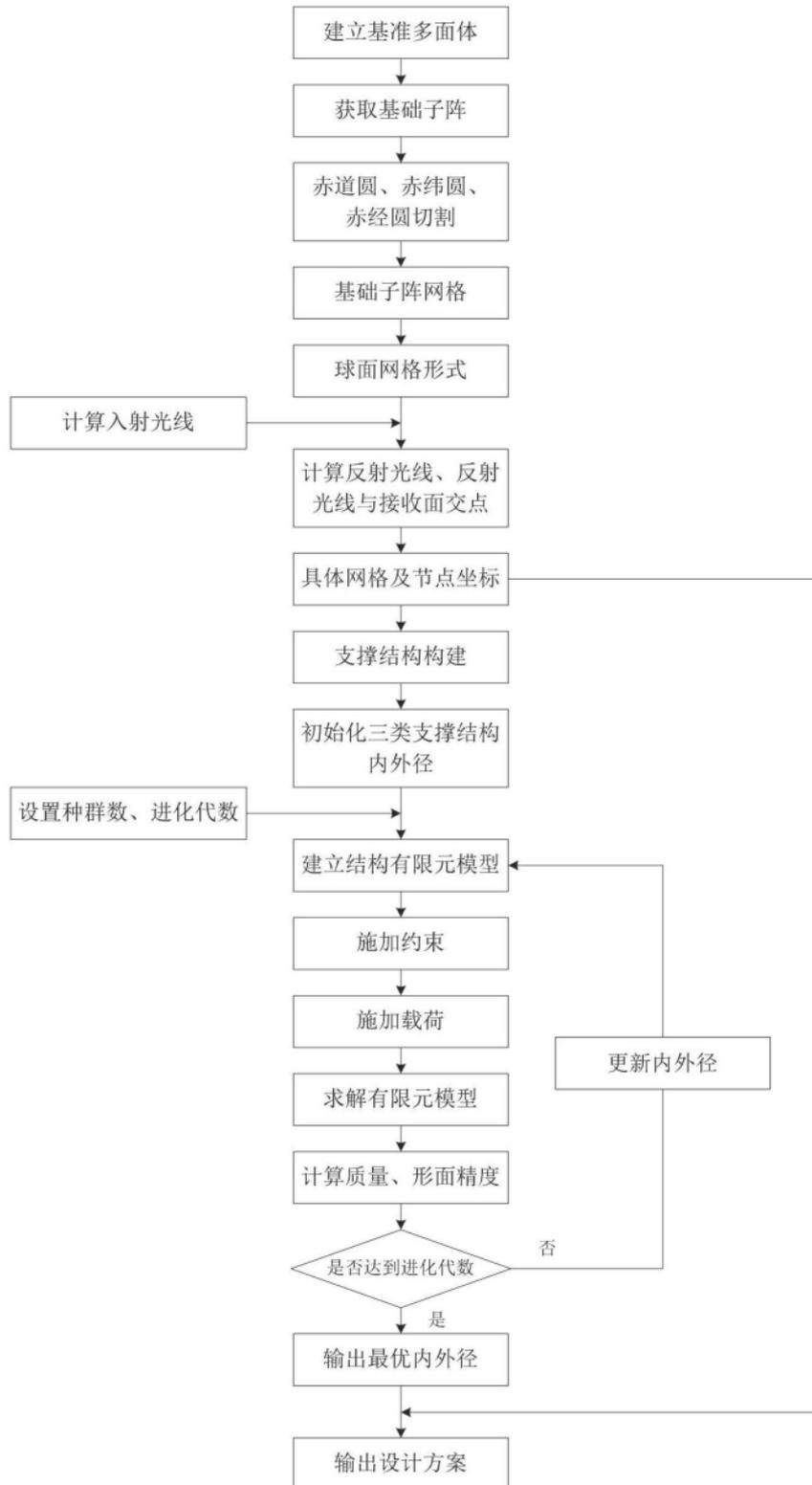


图1

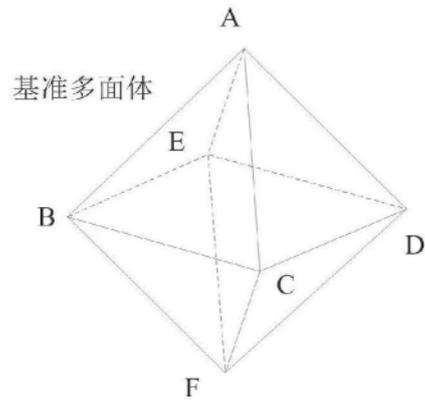


图2A

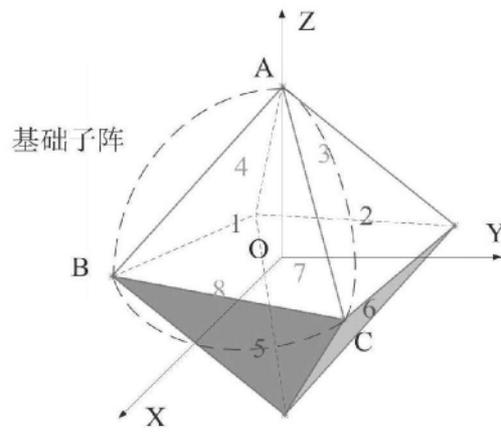


图2B

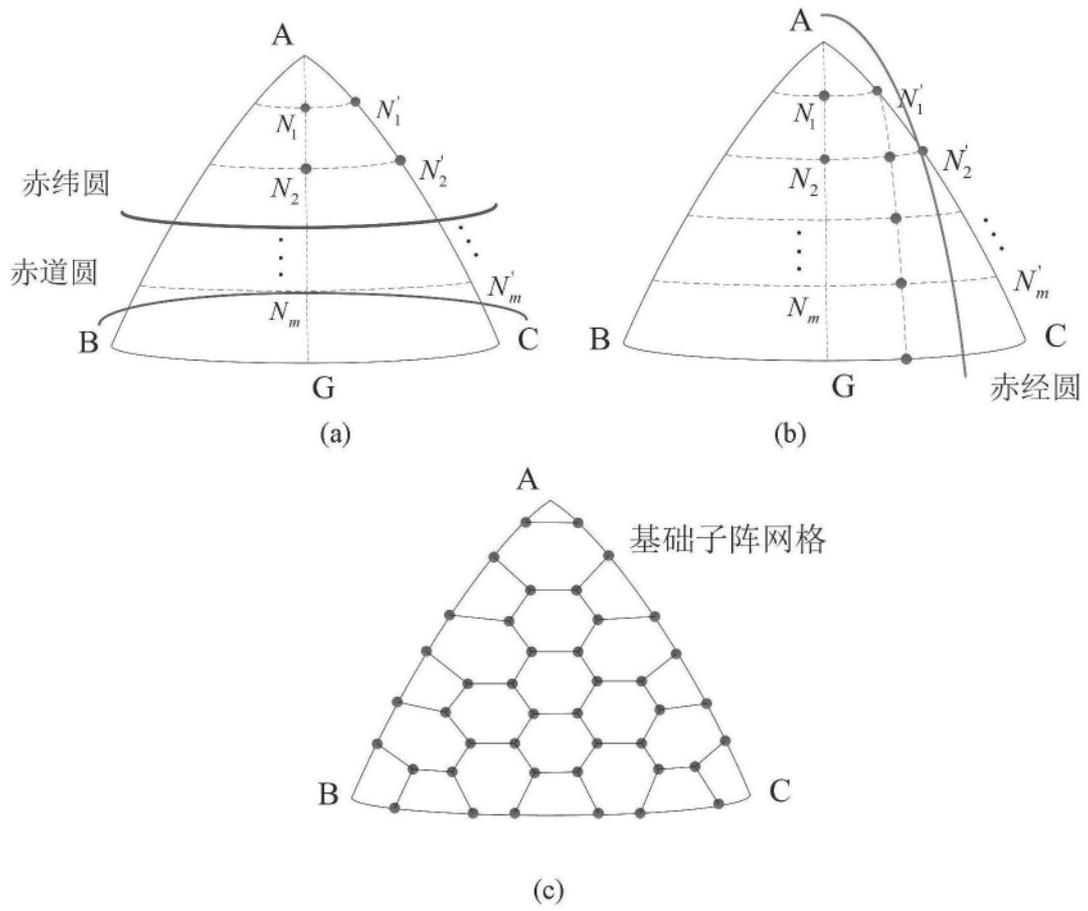


图3

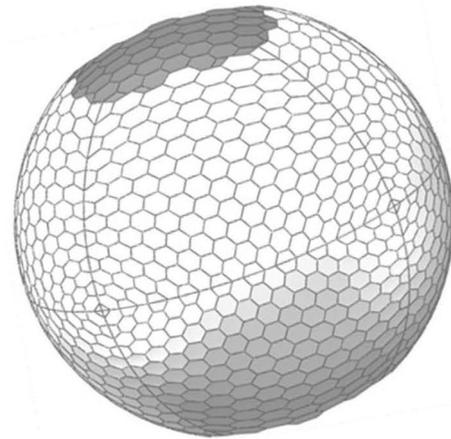


图4

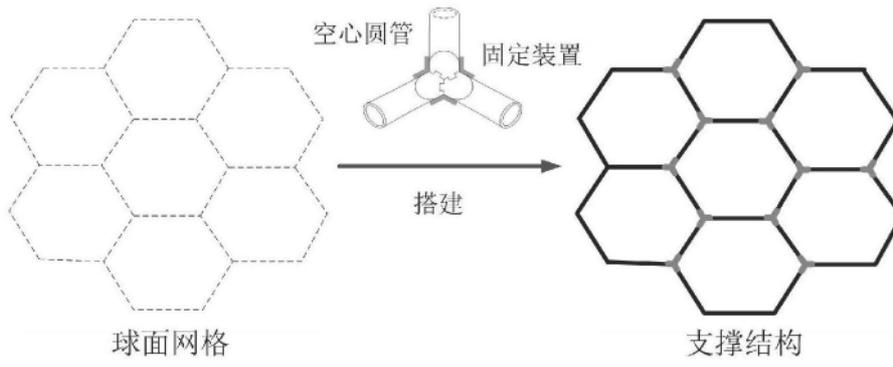


图5a

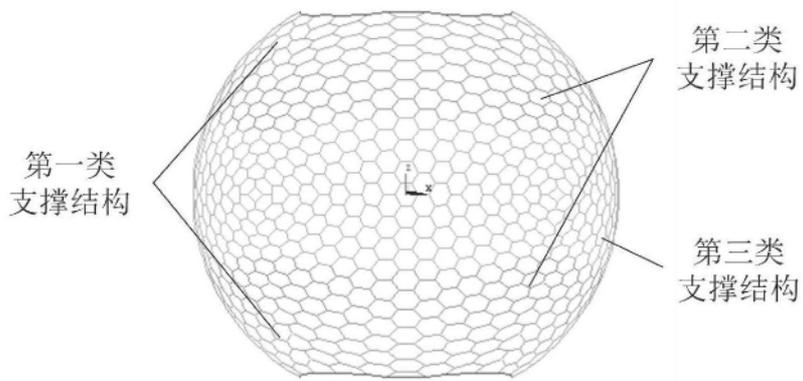


图5b

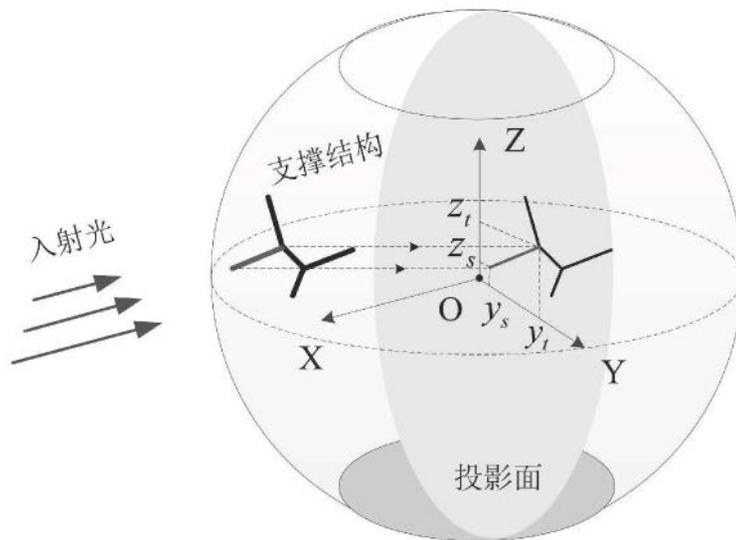


图6