



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106369838 A

(43)申请公布日 2017.02.01

(21)申请号 201610703030.8

(22)申请日 2016.08.22

(71)申请人 西安交通大学

地址 710049 陕西省西安市咸宁路28号

(72)发明人 何雅玲 邱羽 李明佳 吴明

王坤

(74)专利代理机构 西安智大知识产权代理事务

所 61215

代理人 张震国

(51) Int. Cl.

F24J 2/00(2014.01)

F24J 2/10(2006.01)

F24J 2/40(2006.01)

G06F 17/50(2006.01)

权利要求书5页 说明书14页 附图1页

(54)发明名称

一种槽式聚光太阳能集热系统设计方法

(57)摘要

一种槽式聚光太阳能集热系统设计方法,首先,根据当地气象参数、集热系统安装场地几何尺寸和系统使用工况,确定集热系统基本几何结构并建立单个集热回路的参数化几何模型;随后,采用蒙特卡罗光线追迹方法建立回路三维光学计算模型并进行光学计算,获得全年各时刻回路逐时综合光学性能;然后,采用回路集热管一维光热转换计算模型,计算单个集热回路的全年逐时综合产热性能和全年总产热量;随后,根据系统年总产热量的设计要求,初步设计集热系统总回路数目;最后,通过评估初步设计集热系统的全年产热量并进行回路数目优化计算,最终完成集热系统的设计;本方法可迅速有效地进行槽式聚光太阳能集热系统结构与综合光热性能设计。

1. 一种槽式聚光太阳能集热系统设计方法,其特征在于,包括以下步骤:

1) 确定待设计的槽式聚光太阳能集热系统的全年产热量设计要求 $Q_{s,required}$ 、具体地理位置参数和气象参数信息;其中,待设计的槽式聚光太阳能集热系统由多个整体上按南北走向并在东西方向上有偏角的U形布置的集热回路组成,每个回路由若干槽式集热器串联构成,每个集热器主要由槽式反射镜和集热管以及跟踪控制机构组成;

2) 确定待设计的槽式聚光太阳能集热系统的基本几何结构参数,建立集热回路的三维几何模型;

3) 确定槽式聚光太阳能集热器各部件光学参数与热物性参数、传热工质的热物性参数;

4) 确定槽式聚光太阳能集热回路的进口流量初始设置值 m_{in} 和进出口温度设定值;

5) 对槽式聚光太阳能集热回路进行计算单元划分,即以槽式集热回路中由连续的 n 个紧密相连的槽式集热器组成的结构为计算单元, $n \geq 1$,划分后的每个计算单元被视为一个独立的太阳能汇聚与光热转换设备;

6) 对计算单元内太阳能汇聚过程进行计算:针对计算单元三维几何模型建立其光学模型,采用蒙特卡罗光线追迹方法进行光学计算,获得该计算单元在全年中的逐时光学效率、吸热管外表面和玻璃管内实时吸收的热功率;

7) 对计算单元内的光热转换过程进行计算:针对计算单元集热管参数化几何模型建立其一维光热转换计算模型,采用对流传热、导热传热、辐射传热计算方法进行计算,获得该计算单元在全年中的逐时光热转换效率、工质吸热量以及出口温度;

8) 重复步骤6)和步骤7),对槽式聚光太阳能集热回路中串联的所有计算单元的太阳能汇聚与光热转换过程进行逐级求解,直至计算得到回路最后一个计算单元的吸热管的出口参数,将计算得到的回路出口工质温度与回路出口设定温度对比,若二者相差在0.1%以内,则此时的回路质量流量 m_{in} 满足设计要求;反之则调整 m_{in} 的值并再次进行计算,直至回路出口温度满足要求为止;

9) 逐时计算全年中每个时刻的单个回路产热功率并将产热功率与该计算时刻所代表的时间间隔相乘得到该时间间隔内的单个回路产热量,接着通过将各时间间隔内的单个回路产热量相加得到单个回路的全年产热量 $Q_{1,design}$;

10) 根据步骤1)中的集热场全年产热量设计要求 $Q_{s,required}$ 和步骤9)中的单个回路全年产热量计算结果估算待设计集热场所需集热回路数量 $N_{1,design} = Q_{s,required} / Q_{1,design}$;接着,根据步骤2)中的设置确定集热场各分区的集热回路数量;

11) 针对集热场所有分区中的每一个回路采用步骤5)至步骤9)计算各回路全年产热量,并通过将各回路全年产热量相加得到集热系统全年产热量 $Q_{s,design}$;

12) 通过式(1)判断计算结果是否满足设计要求,若得到的集热系统的全年产热量 $Q_{s,design}$ 满足设计要求则结束;若不满足要求,则调整回路数目后返回步骤11)继续计算,直至满足设计要求为止;

$$\begin{cases} \text{满足设计要求, } -Q_{s,design} / N_{1,design} < (Q_{s,design} - Q_{s,required}) < Q_{s,design} / N_{1,design} \\ \text{不满足设计要求, } (Q_{s,design} - Q_{s,required}) > \frac{Q_{s,design}}{N_{1,design}} \text{ 或 } (Q_{s,design} - Q_{s,required}) < -\frac{Q_{s,design}}{N_{1,design}} \end{cases} \quad (1)$$

2. 根据权利要求1所述的槽式聚光太阳能集热系统设计方法,其特征在于:所述步骤1)确定地理位置参数和气象参数包括:

待设计集热场当地纬度、经度和时区数据;待设计集热场当地全年等时间间隔逐时气象数据,所述气象数据包括全年等时间间隔逐时测量得到的太阳直射辐射强度、干球温度、风速、风向和大气压力。

3. 根据权利要求1所述的槽式聚光太阳能集热系统设计方法,其特征在于:所述步骤2)槽式聚光太阳能集热系统的基本几何结构参数包括:单个集热器的反射镜开口长度L和宽度W、玻璃管和吸热管有效长度l、玻璃管内外半径 R_4, R_5 、吸热管内外半径 R_2, R_3 ;集热场分区数目以及每个分区所布置集热回路数目占总回路数的比例;单个集热回路的集热器数目、各集热器在工质流动方向上的间距 d_{line} ;集热器各行之间的间距 d_{row} ;

建立集热回路三维几何模型包括:采用数学表达式建立槽式聚光太阳能集热回路的三维光学系统的三维参数化几何模型,该参数化几何模型的表达式包括计算单元的反射镜柱面方程、玻璃管外壁圆柱面方程、玻璃管内壁圆柱面方程和吸热管外壁圆柱面方程。

4. 根据权利要求1所述的槽式聚光太阳能集热系统设计方法,其特征在于:所述步骤3)中的确定集热器光学参数与热物性参数、传热工质的热物性参数包括:

反射镜、吸热管、玻璃管的材质,反射镜反射率 ρ_m 、洁净度 ρ_{sol1} 、形面误差标准差 σ_m ,玻璃管吸收率 α_g 、透射率 τ_g 、反射率 ρ_g 及折射率 θ_g ,吸热管外壁选择性吸收涂层吸收率 α_3 、发射率 ε_3 ,吸热管导热系数 λ_{23} ,玻璃管导热系数 λ_{45} ,传热工质的导热系数 λ_1 和比热容 c_p 。

5. 根据权利要求1所述的槽式聚光太阳能集热系统设计方法,其特征在于:所述步骤6)计算单元内太阳能汇聚过程计算方法如下:

6-1) 采用式(2)和(3)分别计算集热器跟踪角 β_c 和太阳光在集热器上的入射角 θ ,

$$\beta_c = \tan^{-1} \left(\frac{\cos \alpha \sin(A - A_c)}{\sin(\alpha - \alpha_c) + \sin \alpha_c \cos \alpha (1 - \cos(A - A_c))} \right) \quad (2)$$

$$\theta = \cos^{-1} \sqrt{1 - [\cos(\alpha - \alpha_c) - \cos \alpha_c \cos \alpha (1 - \cos(A - A_c))]^2} \quad (3)$$

式中, α, A 分别为当地真太阳时 t_s 时的太阳高度角和方位角,当 $t_s < 12h$ 时 A 为正值,当 $t_s > 12h$ 时 A 为负值; α_c, A_c 分别为集热场的倾斜角和方位角,其中每个回路整体上按南北方向布置并可在东西方向上有偏角,当回路南侧相对于水平面上翘时 α_c 为正值,反之 α_c 为负值,而当回路南侧偏向东方时 A_c 为正值,反之 A_c 为负值;

6-2) 采用蒙特卡罗光线追迹方法进行太阳辐射在计算单元中的传播过程计算

把入射太阳辐射近似为大量携带相同能量的随机光线;光线在计算单元反射镜上的入射位置由均匀分布的概率模型确定,即采用式(4)计算每束光线在反射镜上的随机位置 P_m ,其中以计算单元反射镜中心为原点,反射镜长度、宽度和中心垂线方向分别为 X, Y, Z 轴建立反射镜坐标系,同时通过非均匀分布的概率模型来计算太阳光非平行夹角的影响,其中随机光线相对于入射光束主光轴的径向偏角 δ_{sol} 和周向偏角 θ_{sol} 分别按式(5)计算;接着考虑太阳光在集热器上的入射角 θ 的影响,即得到反射镜坐标系下太阳光入射方向向量 I_m :

$$P_m = [nL \cdot (\xi_1 - 0.5) \quad nW(\xi_2 - 0.5) \quad f(y)]^T \quad (4)$$

$$\delta_{sol} = \sin^{-1} \left(\sqrt{\xi_3 \sin^2 \delta} \right), \theta_{sol} = 2\pi\xi_4 \quad (5)$$

式中 $f(y)$ 为槽式集热器截面型抛物线型方程; n 为计算单元内的集热器数目; L 和 W 分别为每个集热器反射镜的长度和宽度, m ; δ 为太阳视直径的二分之一,rad;

6-3) 太阳光线与计算单元各部件光学作用过程计算

判断光线是否被相邻槽式集热器挡住;若没被挡住则继续计算光线与槽式集热器反射镜、玻璃管、吸热管的交点,同时,判断光线在各部件处的反射、折射和吸收的光学过程;

6-3-1) 当光线到达反射镜表面时,通过式(6)来判断是否发生反射,若发生发射则通过式(7)来计算光线的反射向量 R_m ;其中,反射镜镜面实际法向量 N_m 考虑了反射镜面误差标准差 σ_m 对反射过程的影响, N_m 相对于理想法向量的径向 δ_R 和周向偏角 θ_R 采用式(8)计算;

$$0 \leq \xi_5 < \rho_m \cdot \rho_{soil}, \text{反射} \quad (6)$$

$$R_m = 2(I_m \cdot N_m)N_m - I_m \quad (7)$$

$$\delta_R = \sin^{-1}\left(\sqrt{\xi_6 \sin^2 \sigma_m}\right), \theta_R = 2\pi\xi_7 \quad (8)$$

式中 ρ_m, ρ_{soil} 分别为反射镜反射率、洁净度;

6-3-2) 当光线到达玻璃管外表面时,通过式(9)来判断光线的光学作用方式,若光线被吸收则统计所吸收的能量并记录其吸收位置;若发生折射则采用光线折射定律计算玻璃中折射向量 Re_o ;采用相同的方法计算光线在玻璃管内表面的折射过程并得到折射后的向量 Re_i ;当光线到达吸热管外表面后,通过式(10)来判断光线光学作用方式,若光线被吸收则统计吸收能量并记录吸收位置;若光线被漫反射则采用兰贝特定律计算吸热管上的漫反射向量 R_c ;

$$0 \leq \xi_8 < \tau_g, \text{折射}; \tau_g \leq \xi_8 < 1 - \rho_g, \text{吸收}; 1 - \rho_g \leq \xi_8 \leq 1, \text{反射} \quad (9)$$

$$0 \leq \xi_8 < \alpha_3, \text{吸收}; \xi_8 \geq \alpha_3, \text{漫反射} \quad (10)$$

式中 τ_g, ρ_g 分别为玻璃管透射率、反射率; α_3 为吸热管外壁选择性吸收涂层吸收率;

6-3-3) 接下来继续计算吸热管外表面漫反射光线与玻璃管内表面的交点,同时采用式(9)判断其光学作用过程并采用步骤6-3-1)~6-3-2)中所述方法继续对光线在计算单元中的传播过程进行计算直至光线被吸收或反射散失掉;根据上述计算最终统计得到理想状态下吸热管上和玻璃管内每个计算时刻所吸收的太阳能功率 $Q_{3,i}, Q_{45,i}$,并获得计算单元在此时刻的理想光学效率值 $\eta_{opt,i}$,其定义为 $Q_{3,i}$ 与该计算时刻槽式反射镜开口面积内所能接收的最大太阳能功率的比值;

6-4) 最后,进一步考虑由于太阳光在反射镜开口平面的入射角所造成的计算单元末端光学损失/收益系数 η_{end} 、由于太阳光在玻璃管上的非垂直透射而造成的玻璃管反射光学损失系数即入射角修正系数 η_{IAM} 、集热器跟踪误差系数 η_{track} 、其他综合误差系数 $\eta_{general}$ 对计算单元光学效率的影响,采用式(11)计算得到计算单元在此时刻的实际光学效率 η_{opt} ;同时采用式(12)计算可得到计算单元吸热管外壁实际吸收太阳能功率 Q_3 、玻璃管实际吸收太阳能功率 Q_{45} ;

$$\eta_{opt} = \eta_{opt,i} \cdot \eta_{end} \cdot \eta_{IAM} \cdot \eta_{track} \cdot \eta_{general} \quad (11)$$

$$Q_3 = Q_{3,i} \cdot \eta_{end} \cdot \eta_{IAM} \cdot \eta_{track} \cdot \eta_{general}, Q_{45} = Q_{45,i} \cdot \eta_{end} \cdot \eta_{IAM} \cdot \eta_{track} \cdot \eta_{general} \quad (12)$$

计算式中,每一个 ξ 均代表一个在(0,1)区间内服从均匀分布的随机数,且所有随机数相互独立;

在计算中,物理量下标中的数字分别代表各结构对应参数,其中1-吸热管内工质、2-吸热

管内壁、3-吸热管外壁、4-玻璃管内壁、5-玻璃管外壁、6-周围空气、7-周围环境,同时,物性参数和相似准则数的下标表示其所采用的结构的定性温度, ε_3 表示吸热管外壁以 T_3 为定性温度的发射率、 λ_{45} 表示玻璃管以其内外壁平均温度 $T_{45} = (T_4 + T_5) / 2$ 为定性温度的导热系数。

6. 根据权利要求1所述的槽式聚光太阳能集热系统设计方法,其特征在于:所述步骤7)的计算单元内的光热转换过程计算方法如下:

7-1) 计算单元的吸热管内单相对流换热功率计算式和进出口能量守恒方程式分别为式(13)和式(14);

$$q_{12} = 2\pi R_2 n l h_{12} (T_2 - T_1), h_{12} = Nu_{12} \lambda_1 / (2R_2), T_1 = (T_{out} + T_{in}) / 2 \quad (13)$$

$$q_{12} = m_{in} (c_{p,out} T_{out} - c_{p,in} T_{in}) \quad (14)$$

式中, m_{in} 为吸热管入口工质质量流量, $kg \cdot m^{-1}$; T_{in}, T_{out} 分别为计算单元吸热管进出口工质温度,K; T_1, T_2 分别为进出口工质平均温度和吸热管内壁平均温度,K; $c_{p,in}, c_{p,out}$ 分别为计算单元吸热管进出口工质比热容, $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$; R_2 为吸热管内径,m;

根据不同的吸热管内流动雷诺数 Re_1 、普朗特数 Pr_1 和计算单元中吸热管的长径比选择不同的吸热管内对流换热关联式;

层流对流换热关联式:

$$Nu_{12} = 4.3636 \quad (15)$$

公式适用范围为 $Re_1 < 2300$;

Dittus-Boelter公式:

$$Nu_{12} = 0.023 Re_1^{0.8} Pr_1^c \quad (16)$$

公式适用范围为,加热流体时 $c = 0.4$,冷却流体时 $c = 0.3$, $Re_1 = 10^4 \sim 1.2 \times 10^5$, $Pr_1 = 0.7 \sim 120$,长径比 $nl / (2R_2) \geq 60$; l 为每根吸热管的长度,m;

Gnielinski公式:

$$Nu_{12} = \frac{(f/8)(Re_1 - 1000)Pr_1}{1 + 12.7\sqrt{f/8}(Pr_1^{2/3} - 1)} \left[1 + \left(\frac{2R_2}{nl} \right)^{2/3} \right] \cdot \left(\frac{Pr_1}{Pr_2} \right)^{0.01} \quad (17)$$

公式适用范围为 $Pr_1/Pr_2 = 0.05 \sim 20$, $Re_1 = 2300 \sim 10^6$, $Pr_1 = 0.6 \sim 10^5$;

Gnielinski公式中的阻力系数采用Filonenko公式计算:

$$f = (1.821 \lg Re_1 - 1.64)^{-2} \quad (18)$$

公式适用范围为 $Re_1 = 2300 \sim 10^6$, $Pr_1 = 0.6 \sim 10^5$;

7-2) 吸热管外壁与内壁之间的导热功率计算

$$q_{23} = 2\pi \lambda_{23} n l (T_3 - T_2) / \ln(R_3/R_2) \quad (19)$$

7-3) 吸热管外壁与玻璃管内壁之间的辐射传热计算

$$q_{34} = 2\pi R_3 n l \sigma (T_3^4 - T_4^4) / \left[\frac{1}{\varepsilon_3} + \frac{R_3}{R_4} \left(\frac{1}{\varepsilon_4} - 1 \right) \right] \quad (20)$$

式中 σ 为黑体辐射常数, $W \cdot (m^2 \cdot K^4)^{-1}$;

7-4) 通过玻璃管内外表面的热流量计算

$$q_4 = \frac{2\pi \lambda_{45} n l}{\ln(R_5/R_4)} (T_4 - T_5) + Q_{45} \left(\frac{R_4^2}{R_5^2 - R_4^2} - \frac{1}{2 \ln(R_5/R_4)} \right) \quad (21)$$

$$q_5 = \frac{2\pi\lambda_{45}nl}{\ln(R_5/R_4)}(T_4 - T_5) + Q_{45} \left(\frac{R_5^2}{R_5^2 - R_4^2} - \frac{1}{2\ln(R_5/R_4)} \right) \quad (22)$$

7-5) 玻璃管外壁与空气之间的对流换热, 以及与周围环境之间的辐射换热计算

$$q_{567} = 2\pi R_5 n h_{56} (T_5 - T_6) + 2\pi R_5 n l \sigma \varepsilon_5 (T_5^4 - T_7^4), h_{56} = Nu_{56} \lambda_{56} / (2R_5) \quad (23)$$

根据不同的瑞利数 Ra_{56} , 雷诺数 Re_{56} 、普朗特数 Pr_{56} 等选择不同的玻璃管外对流换热关联式;

无风自然对流Churchill-Chu公式:

$$Nu_{56} = 0.68 + 0.67 Ra_{56}^{0.25} / \left[1 + (0.492 / Pr_{56})^{9/16} \right]^{4/9} \quad (24)$$

公式适用范围为 $Ra_{56} < 10^9$, $Re_{56} \leq 1$;

Eckert-Drake公式:

$$Nu_{56} = (0.43 + 0.5 Re_{56}^{0.5}) Pr_{56}^{0.38} \left(\frac{Pr_6}{Pr_5} \right)^{0.25} \quad (25)$$

公式适用范围为 $Re_{56} = 1 \sim 10^3$;

Churchill-Bernstein公式:

$$Nu_{56} = 0.3 + \frac{0.62 Re_{56}^{0.5} Pr_{56}^{1/3}}{\left[1 + (0.4 / Pr_{56})^{2/3} \right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re_{56}}{282000} \right)^{5/8} \right]^{0.8} \quad (26)$$

公式适用范围为 $Re_{56} = 10^3 \sim 10^7$, $Pr_{56} > 0.2$ 。

7. 根据权利要求1所述的槽式聚光太阳能集热系统设计方法, 其特征在于: 所述步骤8) 中对槽式聚光太阳能集热回路中串联的所有计算单元的太阳能汇聚与光热转换过程进行逐级求解的方法如下:

8-1) 根据能量守恒定律, 建立步骤7) 中的各热流量之间的平衡方程:

$$q_{23} = q_{12}, q_{34} = Q_3 - q_{23}, q_4 = q_{34}, q_5 = q_{567} \quad (27)$$

8-2) 通过联立方程 (13) ~ (27), 在已知空气温度 T_6 、环境温度 T_7 、计算单元进口工质温度 T_{in} 和流量 m_{in} 的情况下, 求出计算单元出口工质温度 T_{out} 、吸热管内外壁温 T_2, T_3 、玻璃管内外壁温 T_4, T_5 、各热流值 $q_{12}, q_{23}, q_{34}, q_4, q_5, q_{567}$;

8-3) 回路中各计算单元之间的参数传递

在一个集热回路中, 从回路入口到回路出口包含多个计算单元, 对于每个计算单元, 其工质出口参数即为下一个计算单元的入口参数, 最初单元的入口参数等于回路吸热管的入口参数, 最后一个计算单元的出口参数等于整个回路吸热管的出口参数。

8. 根据权利要求1所述的槽式聚光太阳能集热系统设计方法, 其特征在于: 所述步骤12) 中的调整回路数目的方法如式 (28):

$$N'_{1,design} = \begin{cases} N_{1,design} - 1, & (Q_{s,design} - Q_{s,required}) > Q_{s,design} / N_{1,design} \\ N_{1,design} + 1, & (Q_{s,design} - Q_{s,required}) < -Q_{s,design} / N_{1,design} \end{cases} \quad (28)$$

其中调整后的回路数目为 $N'_{1,design}$ 。

一种槽式聚光太阳能集热系统设计方法

技术领域

[0001] 本发明属于聚光型太阳能热利用技术领域,具体涉及一种槽式聚光太阳能集热系统设计方法。

背景技术

[0002] 化石能源的日益枯竭、能源利用带来的环境问题以及社会快速发展对能源需求的增加,都要求全球加快发展可再生能源利用技术。近年来,主要能源大国均出台了一系列法律法规和政策措施,采取行动加快可再生能源的开发和利用。太阳能是储量丰富、清洁并可广泛获取的可再生能源。在太阳能利用技术中,槽式聚光太阳能技术是一种前景广阔的太阳能热利用技术。其中,槽式集热系统的快速、高效、高精度自动设计和评估是一个重要研究课题。

[0003] 聚光太阳能集热系统主要由多个整体上按南北走向并可在东西方向上有一定偏角的U形布置的集热回路组成,每个回路由若干槽式集热器串联构成,每个集热器主要由槽式反射镜和集热管(主要包括外部的玻璃管和内部的金属吸热管)以及相应的跟踪控制机构组成。作为一个复杂的太阳能汇聚与转换系统,槽式集热系统的设计将涉及到复杂的实际地理与气象因素、集热系统中的复杂太阳能汇聚过程、集热管中的光热耦合传热过程,高效方便地设计和准确地评估其性能将十分困难。因此需要研究一种能够迅速有效地进行槽式聚光太阳能集热系统设计和性能评估、提高开发效率、降低开发成本的合理、科学的自动化设计方法。

发明内容

[0004] 本发明的目的在于提供一种能有效完成槽式聚光太阳能集热系统三维参数化几何模型、光学计算模型与传热计算模型设计,迅速有效地进行槽式聚光太阳能集热系统结构与综合光热性能设计,解决系统自动设计问题的槽式聚光太阳能集热系统设计方法。

[0005] 为达到上述目的,本发明所采用的技术方案如下:

[0006] 1) 确定待设计的槽式聚光太阳能集热系统的全年产热量设计要求 $Q_{s,required}$ 、具体地理位置参数和气象参数信息;其中,待设计的槽式聚光太阳能集热系统由多个整体上按南北走向并在东西方向上有偏角的U形布置的集热回路组成,每个回路由若干槽式集热器串联构成,每个集热器主要由槽式反射镜和集热管以及跟踪控制机构组成;

[0007] 2) 确定待设计的槽式聚光太阳能集热系统的基本几何结构参数,建立集热回路的三维几何模型;

[0008] 3) 确定槽式聚光太阳能集热器各部件光学参数与热物性参数、传热工质的热物性参数;

[0009] 4) 确定槽式聚光太阳能集热回路的进口流量初始设置值 m_{in} 和进出口温度设定值;

[0010] 5) 对槽式聚光太阳能集热回路进行计算单元划分,即以槽式集热回路中由连续的 n 个紧密相连的槽式集热器组成的结构为计算单元, $n \geq 1$,划分后的每个计算单元被视为一

个独立的太阳能汇聚与光热转换设备；

[0011] 6) 对计算单元内太阳能汇聚过程进行计算: 针对计算单元三维几何模型建立其光学模型, 采用蒙特卡罗光线追迹方法进行光学计算, 获得该计算单元在全年中的逐时光学效率、吸热管外表面和玻璃管内实时吸收的热功率;

[0012] 7) 对计算单元内的光热转换过程进行计算: 针对计算单元集热管参数化几何模型建立其一维光热转换计算模型, 采用对流传热、导热传热、辐射传热计算方法进行计算, 获得该计算单元在全年中的逐时光热转换效率、工质吸热量以及出口温度;

[0013] 8) 重复步骤6) 和步骤7), 对槽式聚光太阳能集热回路中串联的所有计算单元的太阳能汇聚与光热转换过程进行逐级求解, 直至计算得到回路最后一个计算单元的吸热管的出口参数, 将计算得到的回路出口工质温度与回路出口设定温度对比, 若二者相差在0.1%以内, 则此时的回路质量流量 m_{in} 满足设计要求; 反之则调整 m_{in} 的值并再次进行计算, 直至回路出口温度满足要求为止;

[0014] 9) 逐时计算全年中每个时刻的单个回路产热功率并将产热功率与该计算时刻所代表的时间间隔相乘得到该时间间隔内的单个回路产热量, 接着通过将各时间间隔内的单个回路产热量相加得到单个回路的全年产热量 $Q_{1,design}$;

[0015] 10) 根据步骤1) 中的集热场全年产热量设计要求 $Q_{s,required}$ 和步骤9) 中的单个回路全年产热量计算结果估算待设计集热场所需集热回路数量 $N_{1,design} = Q_{s,required} / Q_{1,design}$; 接着, 根据步骤2) 中的设置确定集热场各分区的集热回路数量;

[0016] 11) 针对集热场所有分区中的每一个回路采用步骤5) 至步骤9) 计算各回路全年产热量, 并通过将各回路全年产热量相加得到集热系统全年产热量 $Q_{s,design}$;

[0017] 12) 通过式(1)判断计算结果是否满足设计要求, 若得到的集热系统的全年产热量 $Q_{s,design}$ 满足设计要求则结束; 若不满足要求, 则调整回路数目后返回步骤11) 继续计算, 直至满足设计要求为止;

$$[0018] \begin{cases} \text{满足设计要求, } -Q_{s,design} / N_{1,design} < (Q_{s,design} - Q_{s,required}) < Q_{s,design} / N_{1,design} \\ \text{不满足设计要求, } (Q_{s,design} - Q_{s,required}) > \frac{Q_{s,design}}{N_{1,design}} \text{ 或 } (Q_{s,design} - Q_{s,required}) < -\frac{Q_{s,design}}{N_{1,design}} \end{cases} \quad (1)$$

[0019] 所述步骤1) 确定地理位置参数和气象参数包括:

[0020] 待设计集热场当地纬度、经度和时区数据; 待设计集热场当地全年等时间间隔逐时气象数据, 所述气象数据包括全年等时间间隔逐时测量得到的太阳直射辐射强度、干球温度、风速、风向和大气压力。

[0021] 所述步骤2) 槽式聚光太阳能集热系统的基本几何结构参数包括: 单个集热器的反射镜开口长度 L 和宽度 W 、玻璃管和吸热管有效长度 l 、玻璃管内外半径 R_4, R_5 、吸热管内外半径 R_2, R_3 ; 集热场分区数目以及每个分区所布置集热回路数目占总回路数的比例; 单个集热回路的集热器数目、各集热器在工质流动方向上的间距 d_{line} ; 集热器各行之间的间距 d_{row} ;

[0022] 建立集热回路三维几何模型包括: 采用数学表达式建立槽式聚光太阳能集热回路的三维光学系统的三维参数化几何模型, 该参数化几何模型的表达式包括计算单元的反射镜柱面方程、玻璃管外壁圆柱面方程、玻璃管内壁圆柱面方程和吸热管外壁圆柱面方程。

[0023] 所述步骤3) 中的确定集热器光学参数与热物性参数、传热工质的热物性参数包

括:

[0024] 反射镜、吸热管、玻璃管的材质,反射镜反射率 ρ_m 、洁净度 ρ_{soil} 、形面误差标准差 σ_m ,玻璃管吸收率 α_g 、透射率 τ_g 、反射率 ρ_g 及折射率 θ_g ,吸热管外壁选择性吸收涂层吸收率 α_3 、发射率 ε_3 ,吸热管导热系数 λ_{23} ,玻璃管导热系数 λ_{45} ,传热工质的导热系数 λ_1 和比热容 c_p 。

[0025] 所述步骤6) 计算单元内太阳能汇聚过程计算方法如下:

[0026] 6-1) 采用式(2)和(3)分别计算集热器跟踪角 β_c 和太阳光在集热器上的入射角 θ ,

$$[0027] \quad \beta_c = \tan^{-1} \left(\frac{\cos \alpha \sin(A - A_c)}{\sin(\alpha - \alpha_c) + \sin \alpha_c \cos \alpha (1 - \cos(A - A_c))} \right) \quad (2)$$

$$[0028] \quad \theta = \cos^{-1} \sqrt{1 - [\cos(\alpha - \alpha_c) - \cos \alpha_c \cos \alpha (1 - \cos(A - A_c))]^2} \quad (3)$$

[0029] 式中, α, A 分别为当地真太阳时 t_s 时的太阳高度角和方位角,当 $t_s < 12h$ 时 A 为正值,当 $t_s > 12h$ 时 A 为负值; α_c, A_c 分别为集热场的倾斜角和方位角,其中每个回路整体上按南北方向布置并可在东西方向上有偏角,当回路南侧相对于水平面上翘时 α_c 为正值,反之 α_c 为负值,而当回路南侧偏向东方时 A_c 为正值,反之 A_c 为负值;

[0030] 6-2) 采用蒙特卡罗光线追迹方法进行太阳辐射在计算单元中的传播过程计算

[0031] 把入射太阳辐射近似为大量携带相同能量的随机光线;光线在计算单元反射镜上的入射位置由均匀分布的概率模型确定,即采用式(4)计算每束光线在反射镜上的随机位置 P_m ,其中以计算单元反射镜中心为原点,反射镜长度、宽度和中心垂线方向分别为 X, Y, Z 轴建立反射镜坐标系,同时通过非均匀分布的概率模型来计算太阳光非平行夹角的影响,其中随机光线相对于入射光束主光轴的径向偏角 δ_{sol} 和周向偏角 θ_{sol} 分别按式(5)计算;接着考虑太阳光在集热器上的入射角 θ 的影响,即得到反射镜坐标系下太阳光入射方向向量 I_m ;

$$[0032] \quad P_m = [nL \cdot (\xi_1 - 0.5) \quad nW (\xi_2 - 0.5) \quad f(y)]^T \quad (4)$$

$$[0033] \quad \delta_{sol} = \sin^{-1} \left(\sqrt{\xi_3 \sin^2 \delta} \right), \theta_{sol} = 2\pi\xi_4 \quad (5)$$

[0034] 式中 $f(y)$ 为槽式集热器截面型抛物线型方程; n 为计算单元内的集热器数目; L 和 W 分别为每个集热器反射镜的长度和宽度, $m; \delta$ 为太阳视直径的二分之一,rad;

[0035] 6-3) 太阳光线与计算单元各部件光学作用过程计算

[0036] 判断光线是否被相邻槽式集热器挡住;若没被挡住则继续计算光线与槽式集热器反射镜、玻璃管、吸热管的交点,同时,判断光线在各部件处的反射、折射和吸收的光学过程;

[0037] 6-3-1) 当光线到达反射镜表面时,通过式(6)来判断是否发生反射,若发生发射则通过式(7)来计算光线的反射向量 R_m ;其中,反射镜镜面实际法向量 N_m 考虑了反射镜形面误差标准差 σ_m 对反射过程的影响, N_m 相对于理想法向量的径向 δ_R 和周向偏角 θ_R 采用式(8)计算;

$$[0038] \quad 0 \leq \xi_5 < \rho_m \cdot \rho_{soil}, \text{反射} \quad (6)$$

$$[0039] \quad R_m = 2(I_m \cdot N_m)N_m - I_m \quad (7)$$

$$[0040] \quad \delta_R = \sin^{-1} \left(\sqrt{\xi_6 \sin^2 \sigma_m} \right), \theta_R = 2\pi\xi_7 \quad (8)$$

[0041] 式中 ρ_m, ρ_{soil} 分别为反射镜反射率、洁净度；

[0042] 6-3-2) 当光线到达玻璃管外表面时,通过式(9)来判断光线的光学作用方式,若光线被吸收则统计所吸收的能量并记录其吸收位置;若发生折射则采用光线折射定律计算玻璃中折射向量 Re_o ;采用相同的方法计算光线在玻璃管内表面的折射过程并得到折射后的向量 Re_i ;当光线到达吸热管外表面后,通过式(10)来判断光线光学作用方式,若光线被吸收则统计吸收能量并记录吸收位置;若光线被漫反射则采用兰贝特定律计算吸热管上的漫反射向量 Rc ;

[0043] $0 \leq \xi_8 < \tau_g$, 折射; $\tau_g \leq \xi_8 < 1 - \rho_g$, 吸收; $1 - \rho_g \leq \xi_8 \leq 1$, 反射 (9)

[0044] $0 \leq \xi_8 < \alpha_3$, 吸收; $\xi_8 \geq \alpha_3$, 漫反射 (10)

[0045] 式中 τ_g, ρ_g 分别为玻璃管透射率、反射率; α_3 为吸热管外壁选择性吸收涂层吸收率;

[0046] 6-3-3) 接下来继续计算吸热管外表面漫反射光线与玻璃管内表面的交点,同时采用式(9)判断其光学作用过程并采用步骤6-3-1)~6-3-2)中所述方法继续对光线在计算单元中的传播过程进行计算直至光线被吸收或反射散失掉;根据上述计算最终统计得到理想状态下吸热管上和玻璃管内每个计算时刻所吸收的太阳能功率 $Q_{3,i}, Q_{45,i}$,并获得计算单元在此时刻的理想光学效率值 $\eta_{opt,i}$,其定义为 $Q_{3,i}$ 与该计算时刻槽式反射镜开口面积内所能接收的最大太阳能功率的比值;

[0047] 6-4) 最后,进一步考虑由于太阳光在反射镜开口平面的入射角所造成的计算单元末端光学损失/收益系数 η_{end} 、由于太阳光在玻璃管上的非垂直透射而造成的玻璃管反射光学损失系数即入射角修正系数 η_{IAM} 、集热器跟踪误差系数 η_{track} 、其他综合误差系数 $\eta_{general}$ 对计算单元光学效率的影响,采用式(11)计算得到计算单元在此时刻的实际光学效率 η_{opt} ;同时采用式(12)计算可得到计算单元吸热管外壁实际吸收太阳能功率 Q_3 、玻璃管实际吸收太阳能功率 Q_{45} ;

[0048] $\eta_{opt} = \eta_{opt,i} \cdot \eta_{end} \cdot \eta_{IAM} \cdot \eta_{track} \cdot \eta_{general}$ (11)

[0049] $Q_3 = Q_{3,i} \cdot \eta_{end} \cdot \eta_{IAM} \cdot \eta_{track} \cdot \eta_{general}, Q_{45} = Q_{45,i} \cdot \eta_{end} \cdot \eta_{IAM} \cdot \eta_{track} \cdot \eta_{general}$ (12)

[0050] 计算式中,每一个 ξ 均代表一个在(0,1)区间内服从均匀分布的随机数,且所有随机数相互独立;

[0051] 在计算中,物理量下标中的数字分别代表各结构对应参数,其中1-吸热管内工质、2-吸热管内壁、3-吸热管外壁、4-玻璃管内壁、5-玻璃管外壁、6-周围空气、7-周围环境,同时,物性参数和相似准则数的下标表示其所采用的结构的定性温度, ε_3 表示吸热管外壁以 T_3 为定性温度的发射率、 λ_{45} 表示玻璃管以其内外壁平均温度 $T_{45} = (T_4 + T_5) / 2$ 为定性温度的导热系数。

[0052] 所述步骤7)的计算单元内的光热转换过程计算方法如下:

[0053] 7-1) 计算单元的吸热管内单相对流换热功率计算式和进出口能量守恒方程式分别为式(13)和式(14);

[0054] $q_{12} = 2\pi R_2 n_1 h_{12} (T_2 - T_1), h_{12} = Nu_{12} \lambda_1 / (2R_2), T_1 = (T_{out} + T_{in}) / 2$ (13)

[0055] $q_{12} = \min(c_{p,out} T_{out} - c_{p,in} T_{in})$ (14)

[0056] 式中, m_{in} 为吸热管入口工质质量流量, $kg \cdot m^{-1}$; T_{in}, T_{out} 分别为计算单元吸热管进出口工质温度,K; T_1, T_2 分别为进出口工质平均温度和吸热管内壁平均温度,K; $c_{p,in}, c_{p,out}$ 分别为计算单元吸热管进出口工质比热容, $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$; R_2 为吸热管内径,m;

[0057] 根据不同的吸热管内流动雷诺数 Re_1 、普朗特数 Pr_1 和计算单元中吸热管的长径比选择不同的吸热管内对流换热关联式;

[0058] 层流对流换热关联式:

[0059] $Nu_{12}=4.3636$ (15)

[0060] 公式适用范围为 $Re_1 < 2300$;

[0061] Dittus-Boelter公式:

[0062] $Nu_{12}=0.023Re_1^{0.8}Pr_1^c$ (16)

[0063] 公式适用范围为,加热流体时 $c=0.4$,冷却流体时 $c=0.3$, $Re_1=10^4\sim 1.2\times 10^5$,
 $Pr_1=0.7\sim 120$,长径比 $n1/(2R_2)\geq 60$;1为每根吸热管的长度,m;

[0064] Gnielinski公式:

[0065]
$$Nu_{12}=\frac{(f/8)(Re_1-1000)Pr_1}{1+12.7\sqrt{f/8}(Pr_1^{2/3}-1)}\left[1+\left(\frac{2R_2}{nl}\right)^{2/3}\right]\cdot\left(\frac{Pr_1}{Pr_2}\right)^{0.01}$$
 (17)

[0066] 公式适用范围为 $Pr_1/Pr_2=0.05\sim 20$, $Re_1=2300\sim 10^6$, $Pr_1=0.6\sim 10^5$;

[0067] Gnielinski公式中的阻力系数采用Filonenko公式计算:

[0068] $f=(1.821\lg Re_1-1.64)^{-2}$ (18)

[0069] 公式适用范围为 $Re_1=2300\sim 10^6$, $Pr_1=0.6\sim 10^5$;

[0070] 7-2) 吸热管外壁与内壁之间的导热功率计算

[0071] $q_{23}=2\pi\lambda_{23}n1(T_3-T_2)/\ln(R_3/R_2)$ (19)

[0072] 7-3) 吸热管外壁与玻璃管内壁之间的辐射传热计算

[0073]
$$q_{34}=2\pi R_3 n1 \sigma (T_3^4 - T_4^4) / \left[\frac{1}{\varepsilon_3} + \frac{R_3}{R_4} \left(\frac{1}{\varepsilon_4} - 1 \right) \right]$$
 (20)

[0074] 式中 σ 为黑体辐射常数, $W\cdot(m^2\cdot K^4)^{-1}$;

[0075] 7-4) 通过玻璃管内外表面的热流量计算

[0076]
$$q_4=\frac{2\pi\lambda_{45}n1}{\ln(R_5/R_4)}(T_4-T_5)+Q_{45}\left(\frac{R_4^2}{R_5^2-R_4^2}-\frac{1}{2\ln(R_5/R_4)}\right)$$
 (21)

[0077]
$$q_5=\frac{2\pi\lambda_{45}n1}{\ln(R_5/R_4)}(T_4-T_5)+Q_{45}\left(\frac{R_5^2}{R_5^2-R_4^2}-\frac{1}{2\ln(R_5/R_4)}\right)$$
 (22)

[0078] 7-5) 玻璃管外壁与空气之间的对流换热,以及与周围环境之间的辐射换热计算

[0079] $q_{567}=2\pi R_5 n1 h_{56}(T_5-T_6)+2\pi R_5 n1 \sigma \varepsilon_5(T_5^4-T_7^4)$, $h_{56}=Nu_{56}\lambda_{56}/(2R_5)$ (23)

[0080] 根据不同的瑞利数 Ra_{56} ,雷诺数 Re_{56} 、普朗特数 Pr_{56} 等选择不同的玻璃管外对流换热关联式;

[0081] 无风自然对流Churchill-Chu公式:

[0082]
$$Nu_{56}=0.68+0.67Ra_{56}^{0.25}/\left[1+(0.492/Pr_{56})^{9/16}\right]^{4/9}$$
 (24)

[0083] 公式适用范围为 $Ra_{56} < 10^9$, $Re_{56} \leq 1$;

[0084] Eckert-Drake公式:

[0085]
$$Nu_{56}=(0.43+0.5Re_{56}^{0.5})Pr_{56}^{0.38}\left(\frac{Pr_6}{Pr_5}\right)^{0.25}$$
 (25)

[0086] 公式适用范围为 $Re_{56}=1\sim 10^3$;

[0087] Churchill-Bernstein公式:

$$[0088] \quad Nu_{56} = 0.3 + \frac{0.62 Re_{56}^{0.5} Pr_{56}^{1/3}}{\left[1 + (0.4 / Pr_{56})^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re_{56}}{282000}\right)^{5/8}\right]^{0.8} \quad (26)$$

[0089] 公式适用范围为 $Re_{56} = 10^3 \sim 10^7$, $Pe_{56} > 0.2$ 。

[0090] 所述步骤8)中对槽式聚光太阳能集热回路中串联的所有计算单元的太阳能汇聚与光热转换过程进行逐级求解的方法如下:

[0091] 8-1)根据能量守恒定律,建立步骤7)中的各热流量之间的平衡方程:

$$[0092] \quad q_{23} = q_{12}, q_{34} = Q_3 - q_{23}, q_4 = q_{34}, q_5 = q_{567} \quad (27)$$

[0093] 8-2)通过联立方程(13)~(27),在已知空气温度 T_6 、环境温度 T_7 、计算单元进口工质温度 T_{in} 和流量 m_{in} 的情况下,求出计算单元出口工质温度 T_{out} 、吸热管内外壁温 T_2, T_3 、玻璃管内外壁温 T_4, T_5 、各热流值 $q_{12}, q_{23}, q_{34}, q_4, q_5, q_{567}$;

[0094] 8-3)回路中各计算单元之间的参数传递

[0095] 在一个集热回路中,从回路入口到回路出口包含多个计算单元,对于每个计算单元,其工质出口参数即为下一个计算单元的入口参数,最初单元的入口参数等于回路吸热管的入口参数,最后一个计算单元的出口参数等于整个回路吸热管的出口参数;

[0096] 所述步骤12)中的调整回路数目的方法如式(28):

$$[0097] \quad N'_{l,design} = \begin{cases} N_{l,design} - 1, & (Q_{s,design} - Q_{s,required}) > Q_{s,design} / N_{l,design} \\ N_{l,design} + 1, & (Q_{s,design} - Q_{s,required}) < -Q_{s,design} / N_{l,design} \end{cases} \quad (28)$$

[0098] 其中调整后的回路数目为 $N'_{l,design}$ 。

[0099] 表1给出了该槽式聚光太阳能集热系统设计方法中所用到参数的列表。其中,物理量下标中的数字分别代表集热器各结构所对应参数,即1-吸热管内工质、2-吸热管内壁、3-吸热管外壁、4-玻璃管内壁、5-玻璃管外壁、6-周围空气、7-周围环境,如 T_3 为吸热管外壁平均温度。同时,物性参数和相似准则数的下标表示其所采用结构的定性温度,如 ϵ_3 表示吸热管外壁以 T_3 为定性温度的发射率、 λ_{45} 表示玻璃管以其内外壁平均温度 $T_{45} = (T_4 + T_5) / 2$ 为定性温度的导热系数。

[0100] 本发明相比传统的设计方法优势在于:

[0101] (1)本发明提供了一种综合了气象学、几何光学、流体力学和传热学等多个学科的槽式聚光太阳能集热系统整体全年综合集热性能评估及自动设计方法。

[0102] (2)本发明设计方法具有极强的通用性,适用于全球任意地点、各种方位的集热场布置方式、各种类型的槽式聚光太阳能集热器。

[0103] (3)本发明设计方法计算精度与计算效率高、智能化与自动化程度高,可使设计人员迅速高效地完成槽式聚光太阳能系统几何模型、光学计算模型和传热计算模型设计,并基于此高效快速地完成系统全年性能的评估与计算,从而实现槽式聚光太阳能系统的自动设计。该方法对于槽式聚光太阳能系统的设计和优化有着重要的指导意义和工程应用价值。

[0104] 表1为槽式聚光太阳能集热系统设计方法参数列表。

附图说明

[0105] 图1为槽式聚光太阳能集热系统结构示意图。

[0106] 图2为槽式集热器结构示意图。

[0107] 附图标记:1、传热工质,2、吸热管内壁,3、吸热管外壁,4、玻璃管内壁,5、玻璃管外壁,8、反射镜,11、槽式集热器,12、U型集热回路,13、热能存储与转换模块,14、集热场分区

具体实施方式

[0108] 本发明的设计方法步骤如下:

[0109] 1) 确定待设计的槽式聚光太阳能集热系统的全年产热量设计要求、具体地理位置参数和气象参数信息;

[0110] 按照设计要求确定集热场全年产热量设计值 $Q_{s,required}$ 。输入待设计集热场当地纬度、经度、时区数据。输入待设计集热场当地全年等时间间隔逐时气象数据;所述气象数据主要包括全年等时间间隔逐时测量得到的太阳直射辐射强度、干球温度、风速、风向、大气压力等。

[0111] 2) 确定待设计的槽式聚光太阳能集热系统(参见图1)的基本几何结构参数,建立回路参数化几何模型;

[0112] 根据槽式集热器的类型确定每个集热器(参见图2)的几何参数,包括反射镜开口长度 L 和宽度 W 、玻璃管和吸热管有效长度 l 、玻璃管内外半径 R_4, R_5 、吸热管内外半径 R_2, R_3 ;根据槽式镜场布置方位及实际场地几何尺寸确定集热场分区数目以及每个分区所布置集热回路数目占总回路数的比例;确定集热回路的几何结构,即确定每个回路的集热器数目、各集热器在工质流动方向上的间距 d_{line} ;最后,根据集热器几何参数和安全运行要求设置集热器各行之间的间距参数 d_{row} ;最终采用数学表达式建立槽式聚光太阳能集热回路光学系统的三维参数化几何模型,该参数化几何模型的表达式主要包括计算单元的反射镜柱面方程、玻璃管外壁圆柱面方程、玻璃管内壁圆柱面方程、吸热管外壁圆柱面方程。在计算中,物理量下标中的数字分别代表各结构对应参数,其中1-吸热管内工质、2-吸热管内壁、3-吸热管外壁、4-玻璃管内壁、5-玻璃管外壁、6-周围空气、7-周围环境。

[0113] 3) 确定槽式聚光太阳能集热器光学参数与热物性参数、传热工质的热物性参数;

[0114] 确定槽式集热器的反射镜、吸热管、玻璃管的材质,反射镜反射率 ρ_m 、洁净度 ρ_{soil} 、形面误差标准差 σ_m ,玻璃管吸收率、透射率、反射率及折射率 $\alpha_g, \tau_g, \rho_g, \theta_g$,吸热管外壁选择性吸收涂层吸收率 α_3 、发射率 ϵ_3 ,吸热管导热系数 λ_{23} ,玻璃管导热系数 λ_{45} ,传热工质的导热系数 λ_1 和比热容 c_p 。其中,物性参数的下标表示其所采用的部件的定性温度,如 ϵ_3 表示吸热管外壁以 T_3 为定性温度的发射率、 λ_{45} 表示玻璃管以其内外壁平均温度 $T_{45} = (T_4 + T_5) / 2$ 为定性温度的导热系数。采用数学表达式建立槽式计算单元的三维光学系统的三维几何结构的参数化模型,该参数化几何模型的表达式主要包括计算单元的反射镜柱面方程、玻璃管外壁圆柱面方程、玻璃管内壁圆柱面方程、吸热管外壁圆柱面方程。

[0115] 4) 确定聚光太阳能集热回路运行参数;

[0116] 根据槽式集热场的实际使用工况及槽式集热器类型、回路长度等,确定集热回路的进口流量初始设置值 m_{in} 、进出口温度设定值。

[0117] 5) 对聚光太阳能集热回路进行计算单元划分;

[0118] 以槽式集热回路为计算对象,以回路中由连续的 n 个紧密相连的槽式集热器组成

的结构为计算单元 ($n \geq 1$), 划分后的每个计算单元可以视为一个独立的太阳能汇聚与光热转换设备。

[0119] 6) 对计算单元内太阳能汇聚过程进行计算;

[0120] 针对计算单元三维几何模型采用蒙特卡罗光线追迹方法建立其三维光学模型, 并进行光学计算, 获得该计算单元的光学效率、吸热管外表面和玻璃管内实时吸收的热功率。计算中, 每一个 ξ 均代表一个在 $(0, 1)$ 区间内服从均匀分布的随机数, 且所有随机数相互独立。

[0121] 6-1) 首先, 采用下式计算集热器跟踪角 β_c 和太阳光在集热器上的入射角 θ :

$$[0122] \quad \beta_c = \tan^{-1} \left(\frac{\cos \alpha \sin(A - A_c)}{\sin(\alpha - \alpha_c) + \sin \alpha_c \cos \alpha (1 - \cos(A - A_c))} \right) \quad (1)$$

$$[0123] \quad \theta = \cos^{-1} \sqrt{1 - [\cos(\alpha - \alpha_c) - \cos \alpha_c \cos \alpha (1 - \cos(A - A_c))]^2} \quad (2)$$

[0124] 式中, α, A 分别为当地真太阳时 t_s 时的太阳高度角和方位角, 当 $t_s < 12$ h 时 A 为正值, 当 $t_s > 12$ h 时 A 为负值; α_c, A_c 分别为集热场的倾斜角和方位角 (参见图1), 其中每个回路整体上按南北方向布置并可在东西方向上有一定偏角, 因此当回路南侧相对于水平面上翘时 α_c 为正值, 反之 α_c 为负值, 而当回路南侧偏向东方时 A_c 为正值, 反之 A_c 为负值。

[0125] 6-2) 接着, 进行太阳辐射在计算单元中的传播过程计算, 把入射太阳辐射近似为大量携带相同能量的随机光线; 光线在计算单元反射镜上的入射位置由均匀分布的概率模型确定, 即采用式 (3) 计算每束光线在反射镜上的随机位置 P_m , 其中以计算单元反射镜中心为原点, 反射镜长度、宽度和中心垂线方向分别为 X, Y, Z 轴建立反射镜坐标系。同时通过非均匀分布的概率模型来计算太阳光非平行夹角的影响, 其中随机光线相对于入射光束主轴的径向偏角 δ_{soi} 和周向偏角 θ_{soi} 也可分别按式 (4) 计算; 接着考虑太阳光在集热器上的入射角 θ 的影响, 即可得到反射镜坐标系下太阳光入射方向向量 I_m 。

$$[0126] \quad P_m = [nL \cdot (\xi_1 - 0.5) \quad nW (\xi_2 - 0.5) \quad f(y)]^T \quad (3)$$

$$[0127] \quad \delta_{soi} = \sin^{-1} \left(\sqrt{\xi_3 \sin^2 \delta} \right), \theta_{soi} = 2\pi\xi_4 \quad (4)$$

[0128] 式中 $f(y)$ 为槽式集热器反射镜 (参见图2) 截面型线方程, 优选为抛物线型; n 为计算单元内的集热器数目; L 和 W 分别为每个集热器反射镜的长度和宽度, $m; \delta$ 为太阳视直径的二分之一, rad;

[0129] 6-3) 然后, 判断光线是否被相邻槽式集热器挡住。若没被挡住则跟踪计算光线与槽式集热器反射镜、玻璃管、吸热管的交点。同时, 判断光线在各部件处的反射、折射和吸收的光学过程;

[0130] 6-3-1) 当光线到达反射镜表面时, 通过式 (5) 来判断是否发生反射, 若发生发射则通过式 (6) 来计算光线的反射向量 R_m 。其中, 反射镜镜面实际法向量 N_m 考虑了反射镜形面误差标准差 σ_m 对反射过程的影响, N_m 相对于理想法向量的径向 δ_R 和周向偏角 θ_R 采用式 (7) 计算。

$$[0131] \quad 0 \leq \xi_5 < \rho_m \cdot \rho_{soi1}, \text{反射} \quad (5)$$

$$[0132] \quad R_m = 2(I_m \cdot N_m) N_m - I_m \quad (6)$$

$$[0133] \quad \delta_R = \sin^{-1} \left(\sqrt{\xi_6 \sin^2 \sigma_m} \right), \theta_R = 2\pi\xi_7 \quad (7)$$

[0134] 6-3-2) 当光线到达玻璃管外表面时, 通过式 (8) 来判断光线的光学作用方式。若光

线被吸收则统计所吸收的能量并记录其吸收位置;若发生折射则采用式(9)计算玻璃中折射向量 Re_o 。采用相同的方法也可以计算光线在玻璃管内表面的折射过程并得到折射后的向量 Re_i 。

$$[0135] \quad 0 \leq \xi_8 < \tau_g, \text{ 折射}; \tau_g \leq \xi_8 < 1 - \rho_g, \text{ 吸收}; 1 - \rho_g \leq \xi_8 \leq 1, \text{ 反射} \quad (8)$$

$$[0136] \quad \mathbf{Re}_o = k_1 \mathbf{I} + k_2 \mathbf{N}, \quad k_1 = 1/n_g, \quad k_2 = k_1 \cos \theta_i - \sqrt{1 - k_1^2 \sin^2 \theta_i} \quad (9)$$

[0137] 式中 θ_i 为光线在空气和玻璃管界面上的入射角, \mathbf{N} 为入射点处的表面法向量。

[0138] 6-3-3) 当光线到达吸热管表面后,通过式(10)来判断光线光学作用方式,若光线被吸收则统计吸收能量并记录吸收位置;若光线被漫反射则采用兰贝特定律计算吸热管上的漫反射向量 R_c 。

$$[0139] \quad 0 \leq \xi_8 < a_3, \text{ 吸收}; \xi_8 \geq a_3, \text{ 漫反射} \quad (10)$$

[0140] 6-3-4) 接下来继续计算吸热管外表面漫反射光线与玻璃管内表面的交点,同时采用式(8)判断其光学作用过程并采用步骤6-3-1)~6-3-3)中所述方法继续对光线在计算单元中的传播过程进行计算直至光线被吸收或反射散失掉。根据上述计算最终可统计得到理想状态下吸热管上和玻璃管内每个计算时刻所吸收的太阳能功率 $Q_{3,i}, Q_{45,i}$,并获得计算单元在此时刻的理想光学效率值 $\eta_{opt,i}$,其定义为 $Q_{3,i}$ 与计算时刻槽式反射镜开口面积内所能接收的最大的太阳能功率的比值;

[0141] 6-4) 最后,进一步考虑由于太阳光在反射镜开口平面的入射角所造成的计算单元末端光学损失/收益系数 η_{end} 、由于太阳光在玻璃管上的非垂直透射而造成的玻璃管反射光学损失系数即入射角修正系数 η_{IAM} 、集热器跟踪误差系数 η_{track} 、其他综合误差系数 $\eta_{general}$ 对计算单元光学效率的影响,采用式(11)计算得到计算单元在此时刻的实际光学效率 η_{opt} ;同时采用式(12)计算可得到计算单元吸热管外壁实际吸收太阳能功率 Q_3 、玻璃管实际吸收太阳能功率 Q_{45} ;

$$[0142] \quad \eta_{opt} = \eta_{opt,i} \cdot \eta_{end} \cdot \eta_{IAM} \cdot \eta_{track} \cdot \eta_{general} \quad (11)$$

$$[0143] \quad Q_3 = Q_{3,i} \cdot \eta_{end} \cdot \eta_{IAM} \cdot \eta_{track} \cdot \eta_{general}, \quad Q_{45} = Q_{45,i} \cdot \eta_{end} \cdot \eta_{IAM} \cdot \eta_{track} \cdot \eta_{general} \quad (12)$$

[0144] 7) 对计算单元内的光热转换过程进行计算;

[0145] 针对计算单元集热管参数化几何模型建立其一维光热转换计算模型,采用对流传热、导热传热、辐射传热计算方法进行计算,获得该计算单元在全年中的逐时光热转换效率、工质吸热量以及出口温度等。

[0146] 7-1) 计算单元的吸热管内单相对流换热功率计算式为式(13)和进出口能量守恒方程式为式(14)。

$$[0147] \quad q_{12} = 2\pi R_2 n_1 h_{12} (T_2 - T_1), \quad h_{12} = Nu_{12} \lambda_1 / (2R_2), \quad T_1 = (T_{out} + T_{in}) / 2 \quad (13)$$

$$[0148] \quad q_{12} = \min(C_{p,out} T_{out} - C_{p,in} T_{in}) \quad (14)$$

[0149] 式中, m_{in} 为吸热管入口工质质量流量, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$; T_{in}, T_{out} 分别为计算单元吸热管进出口工质温度, K ; T_1, T_2 分别为进出口工质平均温度和吸热管内壁平均温度, K ; $C_{p,in}, C_{p,out}$ 分别为计算单元吸热管进出口工质比热容 $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$; R_2 为吸热管内径, m 。

[0150] 根据不同的管内流动雷诺数 Re_1 、普朗特数 Pr_1 和计算单元中吸热管的长径比等选择不同的吸热管内对流换热关联式。

[0151] 层流对流换热关联式:

$$[0152] \quad Nu_{12} = 4.3636 \quad (15)$$

[0153] 公式适用范围为 $Re_1 < 2300$;

[0154] Dittus-Boelter公式:

$$[0155] \quad Nu_{12} = 0.023 Re_1^{0.8} Pr_1^c \quad (16)$$

[0156] 公式适用范围为, 加热流体时 $c = 0.4$, 冷却流体时 $c = 0.3$, $Re_1 = 10^4 \sim 1.2 \times 10^5$, $Pr_1 = 0.7 \sim 120$, 长径比 $nl / (2R_2) \geq 60$; l 为每根吸热管的长度, m ;

[0157] Gnielinski公式:

$$[0158] \quad Nu_{12} = \frac{(f/8)(Re_1 - 1000)Pr_1}{1 + 12.7\sqrt{f/8}(Pr_1^{2/3} - 1)} \left[1 + \left(\frac{2R_2}{nl} \right)^{2/3} \right] \cdot \left(\frac{Pr_1}{Pr_2} \right)^{0.01} \quad (17)$$

[0159] 公式适用范围为 $Pr_1/Pr_2 = 0.05 \sim 20$, $Re_1 = 2300 \sim 10^6$, $Pr_1 = 0.6 \sim 10^5$;

[0160] Gnielinski公式中的阻力系数采用Filonenko公式计算:

$$[0161] \quad f = (1.82 \lg Re_1 - 1.64)^{-2} \quad (18)$$

[0162] 公式适用范围为 $Re_1 = 2300 \sim 10^6$, $Pr_1 = 0.6 \sim 10^5$;

[0163] 7-2) 吸热管外壁与内壁之间的导热功率计算:

$$[0164] \quad q_{23} = 2\pi\lambda_{23}nl(T_3 - T_2) / \ln(R_3/R_2) \quad (19)$$

[0165] 7-3) 吸热管外壁与玻璃管内壁之间的辐射传热计算:

$$[0166] \quad q_{34} = 2\pi R_3 nl \sigma (T_3^4 - T_4^4) / \left[\frac{1}{\varepsilon_3} + \frac{R_3}{R_4} \left(\frac{1}{\varepsilon_4} - 1 \right) \right] \quad (20)$$

[0167] 式中 σ 为黑体辐射常数, $W \cdot (m^2 \cdot K^4)^{-1}$;

[0168] 7-4) 通过玻璃管内外表面的热流量计算:

$$[0169] \quad q_4 = \frac{2\pi\lambda_{45}nl}{\ln(R_5/R_4)}(T_4 - T_5) + Q_{45} \left(\frac{R_4^2}{R_5^2 - R_4^2} - \frac{1}{2\ln(R_5/R_4)} \right) \quad (21)$$

$$[0170] \quad q_5 = \frac{2\pi\lambda_{45}nl}{\ln(R_5/R_4)}(T_4 - T_5) + Q_{45} \left(\frac{R_5^2}{R_5^2 - R_4^2} - \frac{1}{2\ln(R_5/R_4)} \right) \quad (22)$$

[0171] 7-5) 玻璃管外壁与空气之间的对流换热, 以及与周围环境之间的辐射换热计算:

$$[0172] \quad q_{567} = 2\pi R_5 nl h_{56} (T_5 - T_6) + 2\pi R_5 nl \sigma \varepsilon_5 (T_5^4 - T_7^4), \quad h_{56} = Nu_{56} \lambda_{56} / (2R_5) \quad (23)$$

[0173] 根据不同的瑞利数 Ra_{56} , 雷诺数 Re_{56} 、普朗特数 Pr_{56} 等选择不同的玻璃管外对流换热关联式;

[0174] 无风自然对流Churchill-Chu公式:

$$[0175] \quad Nu_{56} = 0.68 + 0.67 Ra_{56}^{0.25} / \left[1 + (0.492 / Pr_{56})^{9/16} \right]^{4/9} \quad (24)$$

[0176] 公式适用范围为 $Ra_{56} < 10^9$, $Re_{56} \leq 1$;

[0177] Eckert-Drake公式:

$$[0178] \quad Nu_{56} = (0.43 + 0.5 Re_{56}^{0.5}) Pr_{56}^{0.38} \left(\frac{Pr_6}{Pr_5} \right)^{0.25} \quad (25)$$

[0179] 公式适用范围为 $Re_{56} = 1 \sim 10^3$;

[0180] Churchill-Bernstein公式:

$$[0181] \quad Nu_{56} = 0.3 + \frac{0.62 Re_{56}^{0.5} Pr_{56}^{1/3}}{\left[1 + (0.4 / Pr_{56})^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re_{56}}{282000}\right)^{5/8}\right]^{0.8} \quad (26)$$

[0182] 公式适用范围为 $Re_{56} = 10^3 \sim 10^7$, $Pe_{56} > 0.2$ 。

[0183] 8) 对槽式聚光太阳能集热回路中串联的所有计算单元的太阳能汇聚与光热转换过程进行逐级求解的方法;

[0184] 重复步骤6)、步骤7), 对回路中串联的所有计算单元的太阳能汇聚与光热转换过程进行逐级求解, 直至计算得到回路最后一个计算单元吸热管的出口参数。将计算得到的回路出口工质温度与回路出口设定温度对比, 若二者相差在0.1%以内, 则此时的回路流量 m_{in} 满足设计要求; 反之则调整 m_{in} 的值并再次进行计算, 直至回路出口温度满足要求为止。其中针对回路的中计算单元的具体求解方法如下:

[0185] 8-1) 根据能量守恒定律, 建立步骤7) 中的各热流量之间的平衡方程:

$$[0186] \quad q_{23} = q_{12}, q_{34} = Q_3 - q_{23}, q_4 = q_{34}, q_5 = q_{567} \quad (27)$$

[0187] 8-2) 通过联立方程 (13) ~ (27), 在已知空气温度 T_6 、环境温度 T_7 、计算单元进口工质温度 T_{in} 和流量 m_{in} 的情况下, 可以求出计算单元出口工质温度 T_{out} 、吸热管内外壁温 T_2, T_3 、玻璃管内外壁温 T_4, T_5 、各热流值 $q_{12}, q_{23}, q_{34}, q_4, q_5, q_{567}$ 。

[0188] 8-3) 回路中各计算单元之间的参数传递

[0189] 在一个集热回路中, 从回路入口到回路出口包含多个计算单元。对于每个计算单元, 其工质出口参数即为下一个计算单元的入口参数。最初的单元的入口参数等于回路吸热管的入口参数, 最后一个计算单元的出口参数等于整个回路吸热管的出口参数。

[0190] 9) 逐时计算全年中每个时刻的单个回路产热功率并将产热功率与该计算时刻所代表的时间间隔相乘, 接着通过将各时间间隔内的单个回路产热量相加得到单个回路的全年产热量 $Q_{l, design}$ 。

[0191] 10) 根据步骤1) 中的集热场全年产热量设计要求和步骤9) 中的单个回路全年产热量计算结果估算待设计集热系统所需回路数量 $N_{l, design} = Q_{s, required} / Q_{l, design}$ 。同时根据步骤2) 中的设置确定集热场各个分区的回路数目。

[0192] 11) 针对所有分区中的每一个回路采用步骤5) 至步骤9) 所述方法计算各回路全年产热量, 并通过将各回路全年产热量相加得到集热系统全年产热量 $Q_{s, design}$ 。

[0193] 12) 通过式 (28) 判断计算结果是否满足设计要求, 若设计得到的集热系统的全年产热量 $Q_{s, design}$ 满足设计要求则结束计算; 若不满足要求, 则将回路数目调整为 $N'_{l, design}$ 后返回步骤11) 继续计算, 直至达到要求为止。

$$[0194] \quad \begin{cases} \text{满足设计要求, } -Q_{s, design} / N_{l, design} \leq (Q_{s, design} - Q_{s, required}) \leq Q_{s, design} / N_{l, design} \\ \text{不满足设计要求, } N'_{l, design} = \begin{cases} N_{l, design} - 1, (Q_{s, design} - Q_{s, required}) > Q_{s, design} / N_{l, design} \\ N_{l, design} + 1, (Q_{s, design} - Q_{s, required}) < -Q_{s, design} / N_{l, design} \end{cases} \end{cases} \quad (28)$$

[0195] 表1槽式聚光太阳能集热系统设计方法参数列表

[0196]	A	太阳方位角, °
	A_c	集热场的方位角, °; 当回路南侧偏向东方时 A_c 为正值, 反之 A_c 为负值
[0197]	c_p	传热工质比热容, $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$
	$c_{p,in}, c_{p,out}$	计算单元吸热管进出口工质比热容, $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$
	d_{line}	各集热器在工质流动方向上的间距, m
	d_{row}	集热器各行之间的间距, m
	$f(y)$	集热器截面型线方程
	L, W	单个集热器的反射镜长度与宽度, m
	l	每个集热器吸热管的有效长度, m
	m_{in}	回路质量流量, $kg \cdot s^{-1}$
	n	计算单元内的集热器数目
	$N_{l,design}, N'_{l,design}$	集热场回路数量计算值、调整后的集热场回路数量
	N_m	镜面实际法向量
	Nu_{12}, h_{12}	吸热管内换热平均努塞尔数、对流换热系数 $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$
	$Nu_{56}, Ra_{56}, Re_{56}, Pr_{56}, h_{56}$	玻璃管外对流换热努塞尔数、瑞利数、雷诺数、普朗特数、对流换热系数 $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$
	P_m	光线与反射镜交点
	$Q_{3,i}$	理想状态下吸热管上每个计算时刻所吸收的太阳能功率, W
	Q_3	实际情况下吸热管上每个计算时刻所吸收的太阳能功率, W
	$Q_{45,i}$	理想状态下玻璃管内每个计算时刻所吸收的太阳能功率, W
	Q_{45}	实际情况下玻璃管内每个计算时刻所吸收的太阳能功率, W
	$Q_{l,design}$	单个回路的全年产热量计算值, J
	$Q_{s,required}$	集热场全年产热量设计要求, J
$Q_{s,design}$	集热场全年产热量计算值, J	
q_{12}	传热工质与吸热管内壁换热功率, W	

[0198]

q_{23}	吸热管外壁与内壁之间的导热功率, W
q_{34}	吸热管外壁与玻璃管内壁之间的辐射传热功率, W
q_4, q_5	通过玻璃管内、外壁的传热功率, W
q_{567}	玻璃管外壁与空气之间的对流换热, 以及与周围环境之间的辐射换热功率, W
Re_1, Pr_1, f	吸热管内雷诺数、普朗特数、阻力系数
R_4, R_5	玻璃管内、外半径, m
R_2, R_3	吸热管内、外半径, m
R_m	镜面光线的反射向量
Re_i, Re_o	玻璃管内、外壁折射向量
R_c	吸热管吸收涂层漫反射向量
t_s	当地真太阳时, h
T_1	计算单元进出口工质平均温度, K
T_2, T_3	吸热管内、外壁平均温度, K
T_4, T_5	玻璃管内、外壁平均温度, K
T_6, T_7	空气温度、环境温度, K
T_{in}, T_{out}	计算单元吸热管进出口工质温度, K
α_3	选择性吸收涂层吸收率
α_g	玻璃管吸收率
α	太阳高度角, °
α_c	集热场的倾斜角, °; 当回路南侧相对于水平面上翘时 α_c 为正值, 反之 α_c 为负值
β_c	集热器跟踪角, °

	δ	太阳视直径的二分之一, rad
	$\delta_{\text{sol}}, \theta_{\text{sol}}$	光线相对于入射光束主光轴的径向偏角和周向偏角, rad
	δ_R, θ_R	镜面实际法向量相对于理想法向量的径向和周向偏角, rad
	ε_3	选择性吸收涂层发射率
	$\varepsilon_4, \varepsilon_5$	玻璃管内、外壁发射率
	$\eta_{\text{opt},i}$	计算单元瞬时理想光学效率, %
	η_{opt}	计算单元瞬时实际光学效率, %
	η_{end}	末端损失/收益系数, %
	η_{LAM}	入射角修正系数, %
	η_{track}	集热器跟踪误差系数, %
	η_{general}	其他综合误差系数, %
[0199]	θ	光线在集热器上的入射角, °
	θ_i	光线在空气和玻璃管界面上的入射角, °
	θ_g	玻璃管折射率
	λ_1	传热工质导热系数, $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$
	λ_{23}	吸热管导热系数, $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$
	λ_{45}	玻璃管导热系数, $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$
	ξ	在(0,1)区间内服从均匀分布的随机数
	ρ_m	反射镜反射率
	ρ_{soil}	反射镜洁净度
	ρ_g	玻璃管反射率
	σ	黑体辐射常数, $\text{W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)^{-1}$
	σ_m	反射镜形面误差标准差, rad
[0200]	τ_g	玻璃管透射率

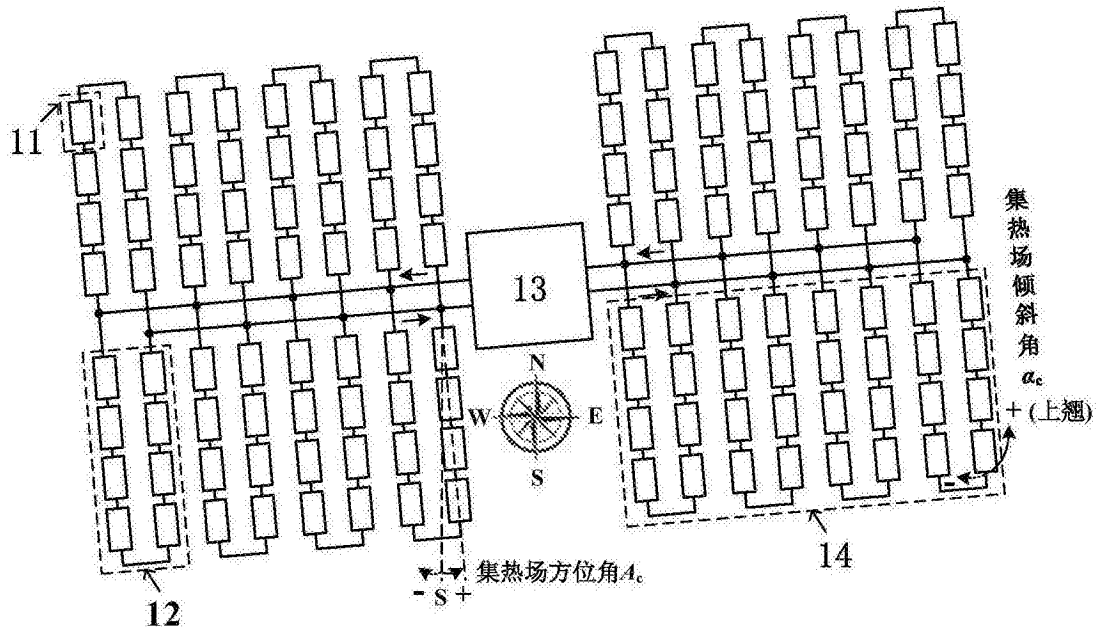


图1

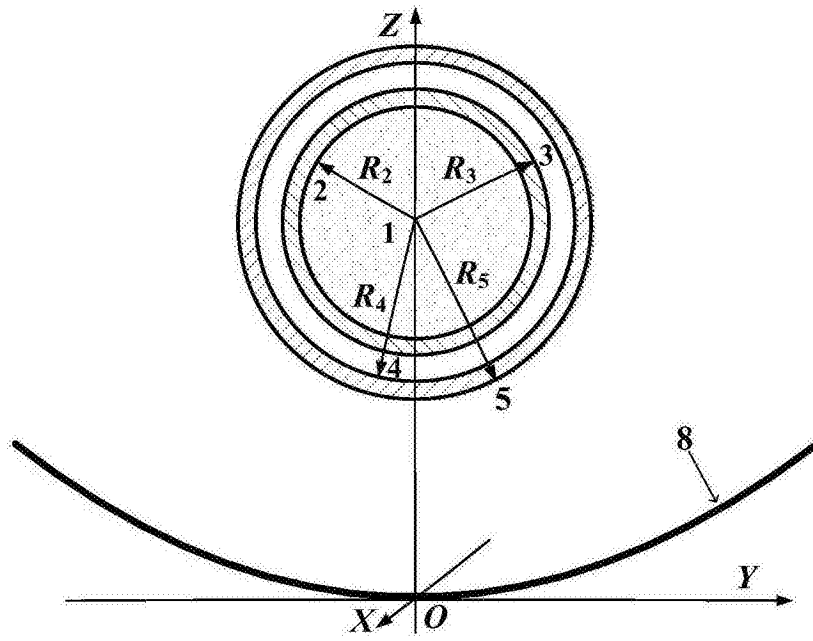


图2