

聚光集热系统统一 MCRT 建模与聚光特性

程泽东, 何雅玲*, 崔福庆

热流科学与工程教育部重点实验室, 西安交通大学能源与动力工程学院, 西安 710049

* 联系人, E-mail: yalinghe@mail.xjtu.edu.cn

2011-12-22 收稿, 2012-06-15 接受

国家自然科学基金(51176155)和国家重点基础研究发展计划(2010CB227102)资助

摘要 针对太阳能热发电站中各种聚光集热系统及其光能聚集与光热转换复杂过程, 提出了一种新的统一建模方法以及与其对应的自编程统一蒙特卡罗光线追迹(MCRT)计算方法. 即根据系统组成特性与光子传播简化计算原则, 将其细分为由不同数量表面组成的各个子系统层次, 采用统一的 4 阶方程与层次/表面编号形式、表面特征与光学参数变量等建立统一的系统几何模型与光学模型, 设计开发具有统一求解交点、统一光学事件判断与计算、统一计算考核等通用模块的统一 MCRT 计算方法与程序. 在此基础上, 将该统一 MCRT 建模方法与程序应用于 3 种典型聚光集热系统, 计算考核结果表明, 该方法与程序具有较好的通用性和较高的准确性, 所获得聚光特性进一步或可有效用于指导各种太阳能聚光集热系统应用选型或设计计算.

关键词

聚光集热系统
统一建模方法
蒙特卡罗光线追迹
光热转换过程
太阳热流分布

能源短缺和化石燃料引起的环境问题已经成为制约全球经济和社会发展的长期、重大瓶颈, 未来将影响到人类的生存状态. 为了解决这一问题, 必须加速可再生能源的开发和利用^[1,2]. 而太阳能发电技术作为一种清洁、安全、可靠、具有广阔应用前景的绿色可再生能源技术, 加速推进其规模化发展已成为国际共识. 在我国, 目前能源形势虽然严峻, 但却具有可供开发的广阔沙漠戈壁资源及丰富太阳能直射辐射资源, 这为我国太阳能热发电的大规模发展提供了极大可能性^[2]. 且随着我国《京都议定书》的签署、《中华人民共和国可再生能源法》及其修正案的出台以及国家能源形势与生态环境的发展, 加快推进太阳能热发电的规模化发展也已达成国内共识. 为此, 国务院 2006 年颁布实施的《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020)》以及国家发改委 2007 年颁布的《可再生能源中长期发展规划》都将太阳能热发电技术列入了未来的发展规划中, 并指出当前发展太阳能发电技术是一项重要的研究任务.

由此可见, 发展太阳能发电技术, 作为国家能

源战略选择之一, 得到了国家的大力推进, 其发展前景必将十分壮丽! 但同时, 我们也要看到我国在太阳能发电技术研发上还有很长的一段路程要走, 许多关键科学和技术问题还需要进一步研究. 其中, 太阳光作为一种辐射传播能量, 其在太阳能聚焦集热系统(如槽式、塔式或碟式等)内的聚光传热过程是一个复杂的光能聚集、转换以及复杂耦合传热的过程^[3]. 深入研究其中的光线传播过程、集热特性以及太阳能热流分布特性是进行太阳能发电系统理论研究的重要依据, 是系统关键热利用部件性能优化与技术创新、提高系统发电效率的必要基础. 同时, 对其研究也是本领域的一个难点问题. 针对这一课题, 国内外先后开发了一些先进的聚光集热系统分析模型和计算软件, 例如 UHC, DELSOL, HFLCAL, MIRVAL, HELIOS, FIAT LUX, CIRCE, SOLTRACE^[4,5]以及 HLFD^[6]等. 但是, 目前为止大多数模型只能针对一种聚光集热系统型式进行建模与计算, 还没有一种模型可以作为基础研究与工业应用的通用标准工具^[4], 且还难以获得整个系统内部太阳能热流分布的

方向属性^[7].

为此,本文即针对太阳能热利用中各种聚光集热系统内光能聚集与光热转换复杂过程,在分析现有研究工作基础上考虑到一般太阳能聚焦集热系统都是具有多阶次、多表面的复杂系统,提出了一种新的统一建模方法以及与其对应的自编程统一蒙特卡罗光线追迹(Monte Carlo Ray-Trace, MCRT)计算方法,并将其应用到了3种典型聚光集热系统,验证了方法的有效性.本研究工作或将促进此研究方向在统一设计方法方面进一步深入开展研究,对于推动太阳能热利用相关技术研发与解决聚焦集热系统设计难题将具有重要的意义.

1 模型及方法

1.1 几何建模

一般太阳能聚焦集热系统(如槽式、塔式或碟式等)都可以认为是由众多4阶及其以下不同阶次表面组合而来的复杂系统,而且根据其组成特性及光子传播简化计算原则,可将其细分为由不同数量表面组成的各个子系统层次.为便于说明,在此先以图1中所示的本文后续应用实例系统进行详细说明.由图1可见,可将槽式聚光集热系统^[8,9]划分为4个子系统层次,每层次分别包含1, 8, 2, 2个表面;将塔式二次聚光集热系统^[10,11]划分为7个子系统层次,每层次分别包含1, 3, 3, 3, 4, 3, 3个表面;而将碟式聚光集热系统^[12]划分为3个子系统层次,每层次分别包含1, 6, 3个表面.并且,每一个表面都可采用如下直角坐标系内统一4阶隐式方程来表达:

$$F_4(x, y, z) = \sum_{n=1}^{35} C_n x^i y^j z^k = 0. \quad (1)$$

上述设计划分过程中,还可以辅助添加非实际表面的“虚拟表面”(例如太阳光入射面)以便于划分出光学特性更为简单的子系统层次来.而所谓“光子传播简化计算原则”是指各子系统层次是由尽可能少的实际表面或虚拟表面分割包围而成,且其中所含介质必为简单的同一均匀介质,以及不同时包含太阳辐射参与性与非参与性两类介质.

然后,针对各子系统层次及其组成表面采用统一编号方法进行编号区分.各层次与表面编号规则为:若系统本身具有 I 个子系统层次且每个子系统层次分别由 $N[i]$ 个表面组成,则子系统层次从2到 $I+1$

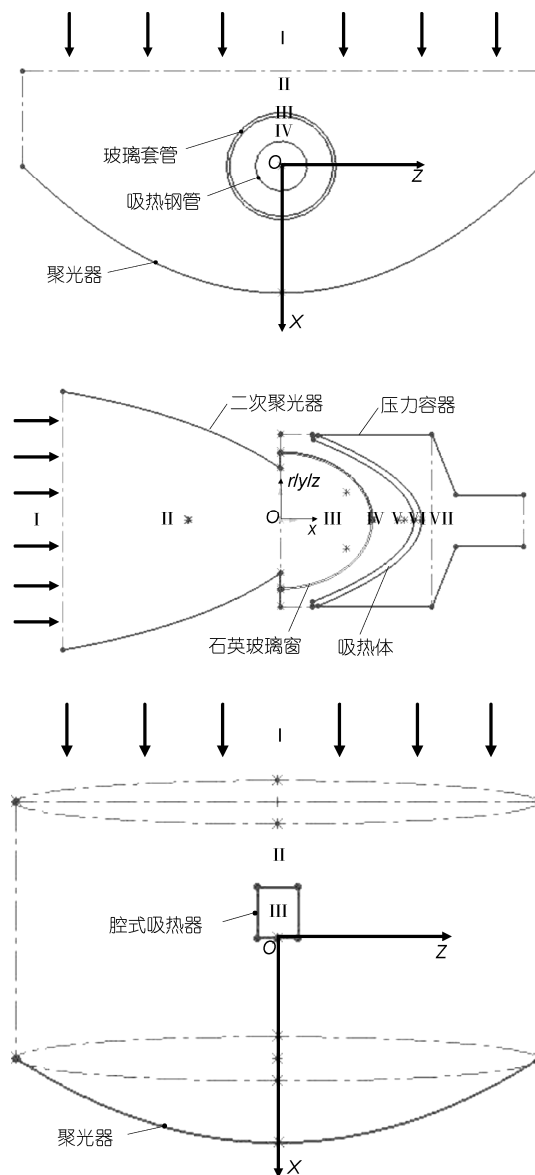


图1 3种典型太阳能聚焦集热系统模型示意图
(a) 槽式; (b) 二次聚光塔式; (c) 碟式

按序编号,而1一般设计为整个太阳能聚焦集热系统之外的所有空间,将其设为一个层次是为了便于判定计算中某条传播光线逃逸出系统及结束其追迹计算.而各子系统层次组成表面编号一般可将光线进入该子系统层次表面标号设计为1,出出处设计为 $N[i]$,其他介于之间的可任意编号.从而,使得系统中的任何一个表面都有一个对应的统一表达形式.但对于跨接两个子系统层次的交界面(包括虚拟表面),则应在其所属的两侧子系统层次中分别设置编号,并建立起二者之间的相对对应关系.

由此,则已初步建立起了聚光集热系统几何模型,但还可以采用一种统一表达形式对每个表面特征分别进行定义以简化计算.例如,可设置统一变量数组来分别设定每个表面的实际阶次和表面形状特征(如平面、凹面和凸面).前者可以大大减少因将低阶次曲面作为高阶次曲面进行定义而带来的额外计算量,后者可以避免繁复计算各子系统层次内由平面/凸面所发射光子在统一求解交点过程中再与自身求解交点.

1.2 光学建模

在上述几何模型基础上,可进一步建立起该系统的光学模型.首先,将系统组成各表面设计定义为“黑体物质表面或完全吸收物质表面”、“一般物质表面”(又分为“非透明质表面”与“一般透明质表面”)及“虚拟透过表面”几种便于统一 MCRT 计算程序中区分的不同类别,具体规则如下:

$$\begin{cases} \alpha = 1 \text{ (黑体物质表面或完全吸收物质表面),} \\ \alpha \neq 1 \begin{cases} \tau \neq 1 \begin{cases} \tau = 0 \text{ (非透明物质表面)} \\ \tau \neq 0 \text{ (一般透明物质表面),} \end{cases} \\ \tau = 1 \text{ (虚拟透过表面)} \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

式中, α 为吸收率, τ 为透射率.

然后,采用一种统一变量数组表达形式描述各子系统层次及其组成表面的光学物性参数.即对每一层次内介质光学特性的描述设计分为非参与性介质与参与性介质分别设定,主要包括统一的折射率 n 或吸收系数 μ_a 、散射系数 μ_s 及各向异性因子 g 表达式.而各层次组成表面光学特性则采用统一的吸收率 α 、反射率 ρ 以及透过率 τ 表达形式,但“虚拟表面”统一设置为透过率 100%.

1.3 统一 MCRT 方法

针对上述统一建模方法所建立几何模型与光学模型,可设计开发与其对应的自编程统一蒙特卡罗光线追迹 MCRT 计算方法与程序,以研究其中的光线传播过程、光热转换与热流分布等特性,如图 2 所示.

由图 2 可见,该统一 MCRT 方法与程序由内外两个循环组成,其中内循环又可同时或分别包含光线在参与性介质与/或非参与性介质子系统层次中随机传播追迹过程.这一设计的最大优点在于,在内循环

中每个光子只依次在各个简化子系统层次内(而非在整个复杂系统中)传播,大大简化和优化了整个计算过程,而该计算过程一直持续到其或逃逸出整个系统、或被吸收、或被判定未存活而终止,使得整个过程也十分清晰明了.接下来,对于具体计算流程,本文将只详细介绍所设计统一 MCRT 方法有关内容,而图 2 中所涉及其他基本计算过程不在此详述,读者可以参考文献[4~7,13~19].

(1) 非参与性介质光线传播过程. 由图 2 可见,初始化的光子进入到所建立几何模型与光学模型后,便开始对其进行追迹计算.首先需要判断该光子到达的是非参与性介质子系统层次还是参与性介质子系统层次内.若到达非参与性介质子系统层次(参见图 2 右侧部分),下一时刻光线会直接到达本子系统层次内某一表面上,则可采用如图 3 所示的统一求解交点通用模块来计算与判定光子所到达表面及其坐标位置.

由图 3 可见,各判断与计算流程已然十分清晰,在此也不再赘述.值得说明的是,每一次可能交点求解过程都是将如下本时刻光线传播直线参数方程式:

$$x_i = x_i^* + \mu_{x_i} \cdot t. \quad (3)$$

与对应表面 4 阶统一方程式(1)联立得到对应统一参数方程式:

$$f_4(t) = \sum_{m=0}^4 D_m t^m = 0, \quad (4)$$

并进一步采用公式法或迭代法求解交点.式中, i 等于 1, 2, 3 分别对应于 x, y, z 方向分量,并且后文中若 i 不作特别说明则表示上述相同意义.而 x_i^* 分别表示光线本时刻发射位置各坐标分量, μ_{x_i} 为本时刻光线传播方向各分量, D_m 为联立统一参数方程各项系数.

在求得与本子系统层次各组成表面所有可能交点以及进行必要检查后,本统一 MCRT 方法与程序将类比计算机真实感图形显示相关原理^[20]再设计一个通用判别式即“在光线传播方向上、距离光线发射点距离最短”两个条件来判别与确定实际交点,即可取所求得最小正参数 t 所对应表面和坐标位置.然后,采用如图 4 所示的统一光学事件判断与计算通用模块来判定和计算在此位置发生何种光学传播过程.

图 4 中所有光学事件判定菱形方框都是基于蒙特卡罗随机统计方法来实现,即光线的反射、折射、

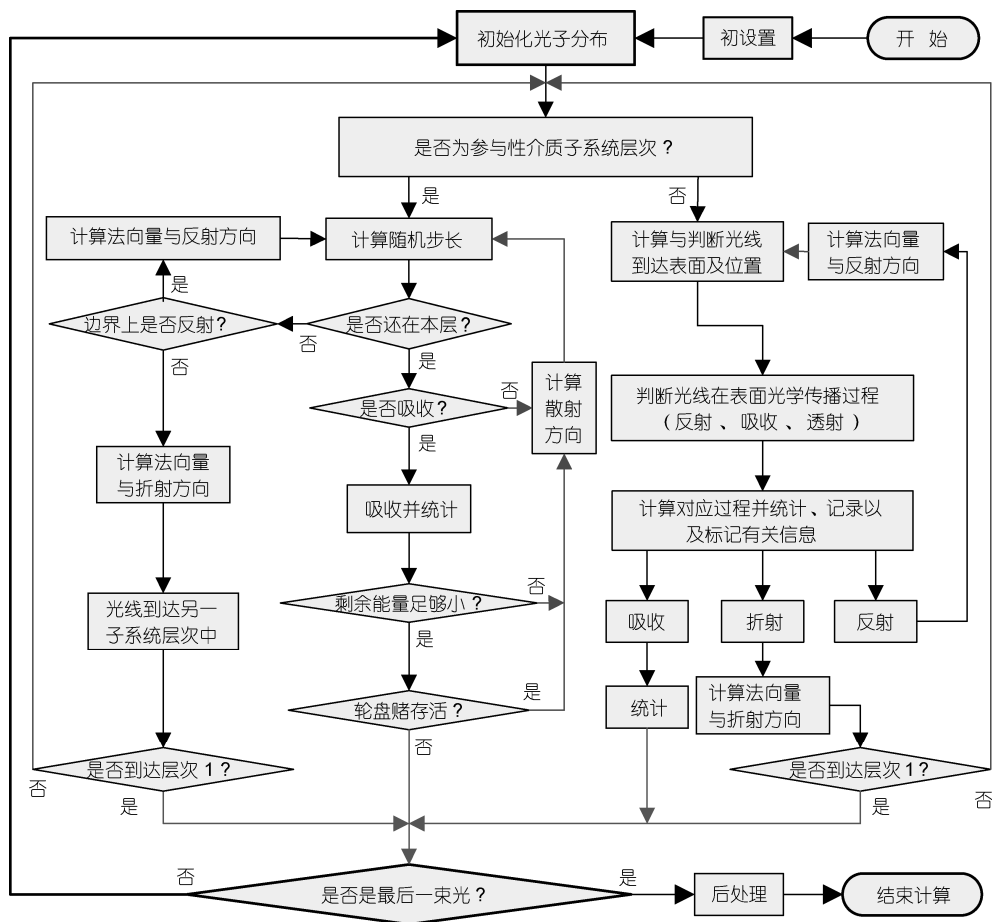


图2 统一蒙特卡罗光线追迹方法与程序总流程图

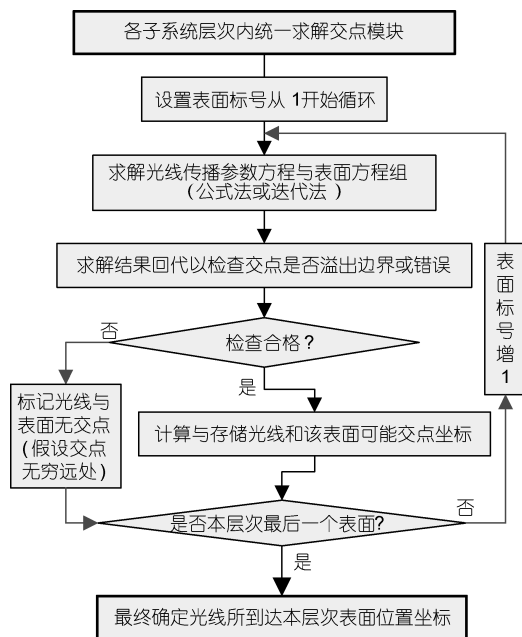


图3 统一求解交点计算模块流程图

吸收等光学过程均是通过蒙特卡罗方法统一比较随机数因子与各表面设置的光学特性统一表达式之间相对关系来判断的。其中，随机数的产生是采用文献[19]中所建议的经典伪随机数发生器，具有高效、可靠、重复周期足够长等优点。而各表面发生光学事件处的法向量和传播方向向量则可基于对应表面统一方程和几何光学定律统一推导而来，均具有通用性。由4阶通式方程所推导表面法向量统一表达式如下：

$$\mu_{n,x_i} = \frac{\partial F_4(x, y, z)}{\partial x_i} \quad (5)$$

由几何光学定律及表面法向量统一表达式，推导反射与折射方向向量通用计算式如下^[21]：

$$\mu_{\text{reflect}, x_i} = \mu_{x_i} + k_0 \mu_{n,x_i}, \quad (6)$$

$$\mu_{\text{refract}, x_i} = k_1 \mu_{x_i} + k_2 \mu_{n,x_i}, \quad (7)$$

式中系数 $k_0 = 2 \times |\Omega|$, $k_1 = n_1 / n_2$, $k_2 = k_1 \times |\Omega| -$

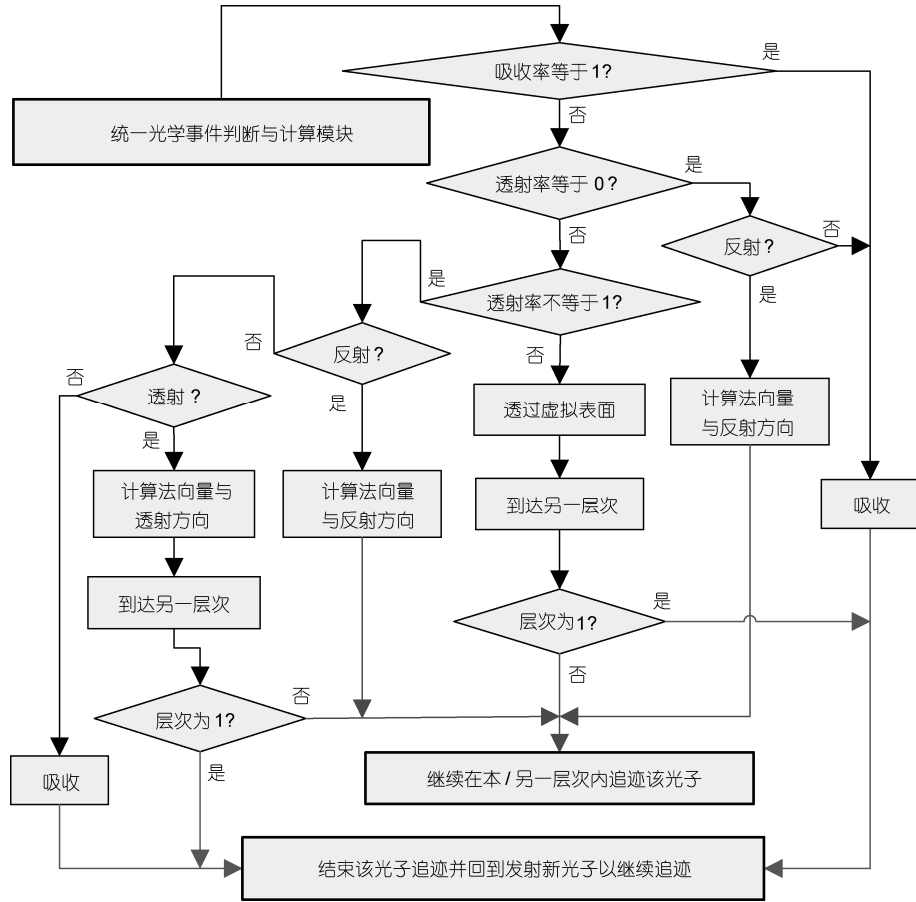


图4 统一光学事件判断及计算流程图

$\sqrt{1.0 - k_1^2 \times (1.0 - |\Omega|^2)}$ ， n_1 与 n_2 分别表示光线在折射表面此侧与彼侧系统层次中的折射率， $\Omega = (\mu_x, \mu_y, \mu_z) \cdot (\mu_{n,x}, \mu_{n,y}, \mu_{n,z})$ 为光线传播方向与表面法向量的点乘积，若 $\Omega > 0$ ，则需将 $-\mu_{n,x_i}$ 取代 μ_{n,x_i} 进行计算。

(2) 参与性介质光线传播过程。若到达参与性介质子系统层次(参见图2左侧部分)，且判断下一时刻光子发生散射，则在本时刻光子所在位置建立主轴方向与本时刻光线传播方向互相重合的局部球坐标系来计算光子散射方向向量，如图5所示。图中实线箭头表示本时刻光线传播方向，而虚线箭头与点划线箭头分别表示散射方向在局部球坐标系(s)与原直角坐标系(c)内方向向量。

在此，本统一 MCRT 方法与程序将类比大气飞行动力学中机体轴系与地轴系之间相互关系原理^[22]，以 x 轴作为主轴为例，且当 $|\mu_x| \neq 1$ 时可推导散射方向向量通用计算式如下：

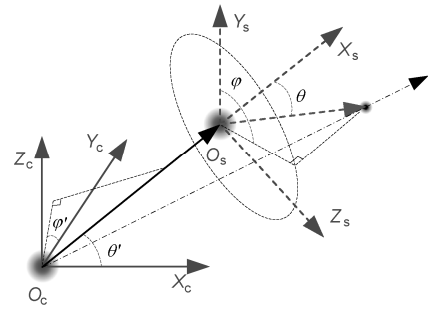


图5 局部球坐标系与直角坐标系示意图

$$\mu_{x_i} = T_{sc} \mu_{s, x_i}$$

$$= \begin{bmatrix} \mu_x - \sqrt{1.0 - \mu_x^2} & 0 \\ \mu_y \frac{\mu_x \mu_y}{\sqrt{1.0 - \mu_x^2}} & \frac{-\mu_z}{\sqrt{1.0 - \mu_x^2}} \\ \mu_z \frac{\mu_x \mu_z}{\sqrt{1.0 - \mu_x^2}} & \frac{\mu_y}{\sqrt{1.0 - \mu_x^2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \cos \varphi \\ \sin \theta \sin \varphi \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中 μ_{s, x_i} 分别表示局部球坐标系中散射方向各分量, θ 与 φ 分别为散射方向在局部球坐标系中偏转角与方位角, T_{sc} 为局部球坐标系到原直角坐标系的转换矩阵.

若 $|\mu_x|=1$ 或者 $|\mu_x|>0.99999$, 则统一采用如下计算式计算散射方向向量:

$$\begin{cases} \mu_x = \mu_x / |\mu_x| \cos \theta, \\ \mu_y = \sin \theta \cos \varphi, \\ \mu_z = \sin \theta \sin \varphi. \end{cases} \quad (9)$$

(3) 统一计算考核通用模块. 该统一 MCRT 方法与程序除了能够追迹系统内光线传播过程外, 还可基于圆柱坐标系来统计计算其中光热转换与热流分布等特性, 但其计算结果的准确性却总是与追迹光子总数和能量统计网格数相关的, 且在这方面暂时还没有一个一致的校验方法. 这是由于不同系统的复杂程度、计算所接受精度以及所关注细节通常不一样, 一般地这两个参数值的选取也就不一样了. 理论上讲, 随着追迹光线总数即模拟抽样光束数量的不断增加其计算结果将无限接近精确解, 而能量统计网格划分微细也可提高统计精度和刻画微小细节, 但同时也需要付出更多计算代价, 涉及到计算效率问题. 为保证其计算准确性和计算效率, 本计算方法与程序也初步给出了一种统一计算考核方法来确定最合适追迹光子总数和最优化能量统计网格数. 即先对比计算不同追迹光子总数(按 10 的幂次方正比例递增变化)下系统内各表面随机计算统计所得光学参数值与对应已知值的平均相对误差 E_n , 以及不同能量统计网格数(即在初始网格数 $92 \times 30 \times 55$ 基础上周向、径向及轴向按相等比率 DN 变化)下周向、径向与轴向某些指定切片平面上能量统计平均相对变化 E_g , 再分别观察 E_n 与 E_g 随追迹光子总数和能量统计网格数增加时的变化趋势, 若前后两次结果对比连续变化已十分微小即可作为最优化值. 与此同时, 发展适用于工程计算的相关考核经验公式及计算效率分析优化还有待进一步研究.

2 应用实例

2.1 槽式聚光集热系统应用

为便于比较验证, 先采用文献[8]中理论分析模型进行对比计算, 如图 1(a)所示. 计算条件如下: 0° 入射角、20 倍几何聚光比、 90° 边缘角、 0.0075 mrad 太阳光光锥角. E_n 与 E_g 随追迹光子总数和能量统计网格数增加时的变化趋势如图 6(a)与(b)所示. 由图可见, 计算中最合适追迹光线总数和最优化能量统计网格数分别设置为 1.0×10^7 和 $DN = 6.5$ (网格数为 $598 \times 195 \times 357$)即可. 在此基础上, 计算得到了与文献相对应的吸热钢管横截面周向上的局部聚光比随圆周角度 φ 的分布情况, 如图 6(c)所示. 图中局部聚光比(local concentration ratio, LCR)定义为局部单元内聚焦太阳能热流密度与直射太阳光辐射热流密度之比. 由图可见, 本文与文献计算结果符合较好, 验证了其正确性.

为获得更接近于实际系统的热流分布特性, 本文进一步针对文献[9]中 LS2 型槽式实验系统进行了计算, 具体参数参见表 1, 计算结果如图 6(d)所示. 由图可见, 吸热钢管表面热流密度 q_w 分布具有很好的对称性, 但在周向上变化非常大、分布十分不均匀, 而在轴向上变化却极其微小.

2.2 塔式聚光集热系统应用

在此, 采用文献[10,11]中带二次聚光器的有压腔体容积式吸热器实验系统做适当假设进行计算, 即假定该系统为完全对称的旋转体结构, 如图 1(b)所示. E_n 与 E_g 随追迹光子总数和能量统计网格数增加时的变化趋势如图 7(a)和(b)所示. 可见, 计算中最合适追迹光线总数和最优化能量统计网格数分别设置为 1.0×10^8 和 $DN = 2.5$ (网格数为 $230 \times 75 \times 137$)即可. 在表 2 所列文献参数条件下, 入口输入总热流量为 540.90 kW , 吸热器所吸收太阳能转换热流量实验与计算结果分别为 372.10 和 419.40 kW , 而本 MCRT

表 1 槽式实验系统主要计算参数

聚光器参数		吸热器参数		光学物性	
聚光器开口(m)	5.000	玻璃管外径(m)	0.115	聚光器反射率	0.930
聚光器焦距(m)	1.840	玻璃管内径(m)	0.110	玻璃管透射率	0.950
聚光器长度(m)	7.800	吸热管外径(m)	0.070	吸热管吸收率	0.960

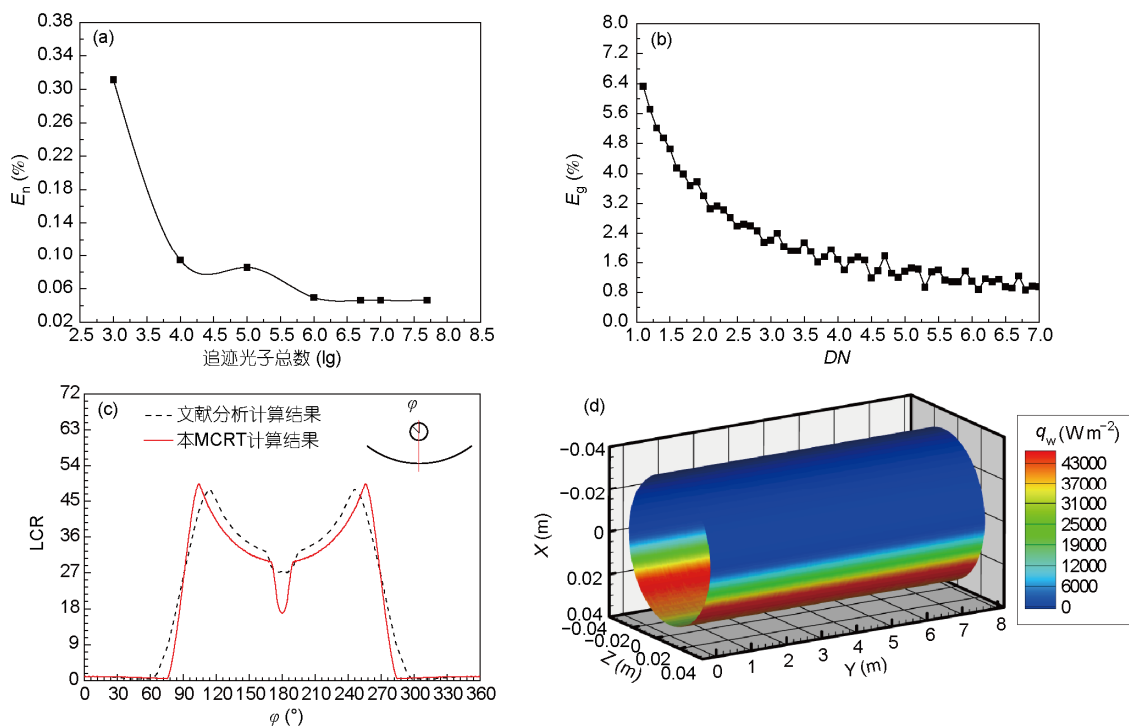


图 6 应用于槽式系统计算结果

(a) 光线数考核; (b) 网格数考核; (c) 对比验证; (d) 管壁热流密度分布

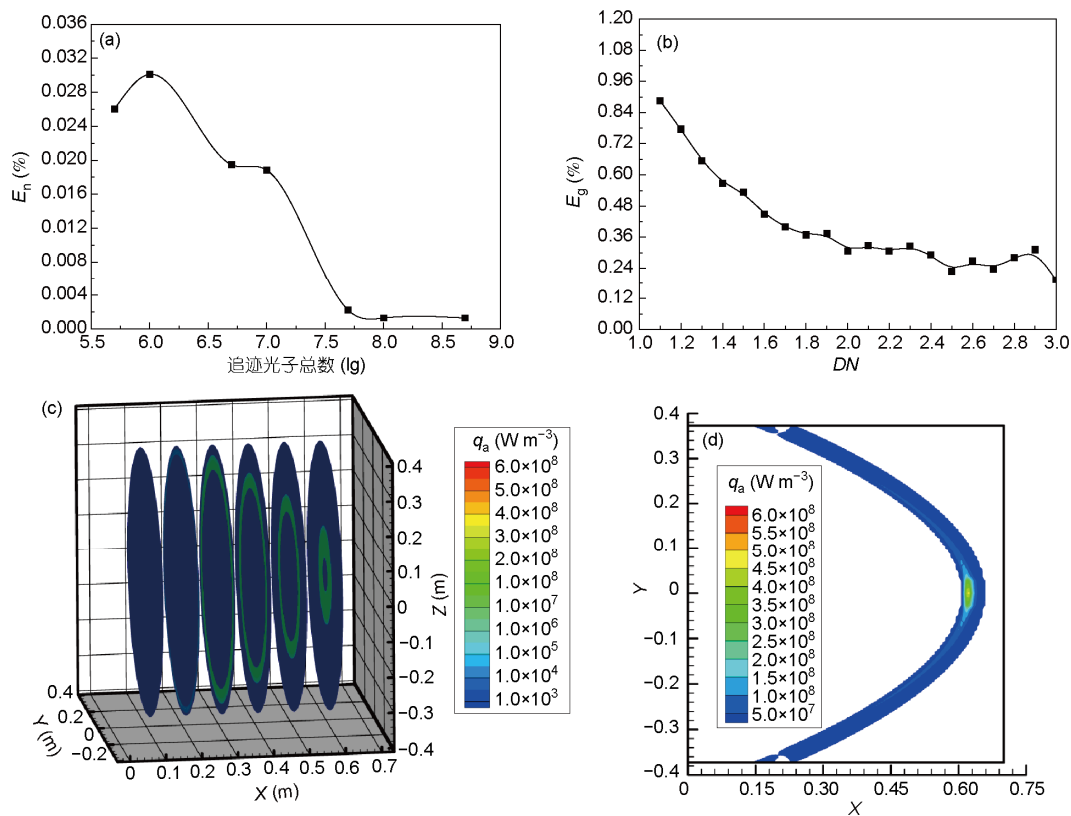


图 7 应用于塔式系统计算结果

(a) 光线数考核; (b) 网格数考核; (c) 吸热器内热流分布; (d) 吸热体内热流分布

表 2 塔式实验系统主要计算参数

几何参数		几何参数		光学物性	
压力腔直径 (m)	0.750	吸热体厚度 (m)	0.035	聚光器反射率	0.930
压力腔长度 (m)	0.760	吸热体焦距 (m)	0.075	玻璃窗透射率	0.950
聚光器开口 (m)	1.200	玻璃窗厚度 (m)	0.008	玻璃窗折射率	1.500
聚光器长度 (m)	1.000	玻璃窗短轴 (m)	0.840	腔体壁反射率	0.900

方法与程序计算结果为 377.54 kW, 相对于文献中实验与计算结果相对误差均不超过 10%, 在工程应用中算符合较好, 验证了其正确性.

在此基础上, 计算得到了整个吸热器和容积式吸热体(参与性介质子系统层次)内太阳能热流密度分布, 如图 7(c)和(d)所示. 由图可知, 吸热器内各横截面上太阳热流密度 q_a 呈环形对称分布, 且在吸收体内的太阳能热流密度远远高于玻璃窗口和压力容器壁面, 达到 5~6 个数量级. 而在吸收体内太阳热流密度沿 Y 方向是完全对称的, 而沿 X 方向呈连续性降低趋势. 这是因为太阳光在容积式吸热体内是沿 X 方向被吸收的, 且在前段较薄层内吸收了大量太阳

光使得热流密度较高, 而越到后段未被前段吸收而通过的光线越少则热流密度越低. 由图还可见在吸热体中部等处热流密度分布极不均匀, 这是由于二次聚光器二次聚光所致.

2.3 碟式聚光集热系统应用

为便于比较验证, 采用文献[12]中理论分析模型进行对比计算, 如图 1(c)所示. 计算条件如下: 1000 mm 焦距、 45° 边缘角以及 0.0075 mrad 太阳光锥角. E_n 与 E_g 随追迹光子总数和能量统计网格数增加时的变化趋势如图 8(a)和(b)所示. 由图可见, 计算中最合适追迹光线总数和最优化能量统计网格数分别设

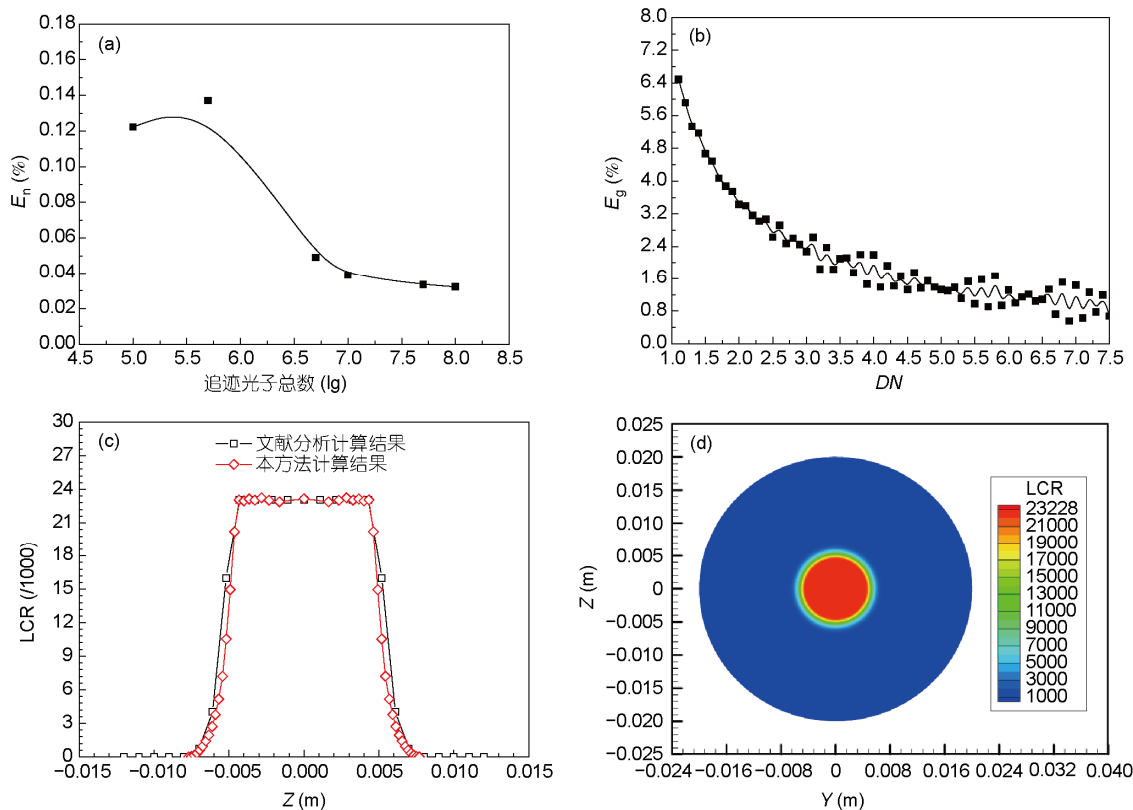


图 8 应用于碟式系统计算结果

(a) 光线数考核; (b) 网格数考核; (c) 对比验证; (d) 焦平面局部聚光比分布

置为 5.0×10^7 和 $DN = 7.0$ (网格数为 $644 \times 210 \times 385$) 即可。在此基础上, 对比了本文与文献局部聚光比 LCR 计算结果, 如图 8(c) 所示, 可见二者符合较好, 验证了其正确性。

图 8(d) 所示为集热器焦平面上局部聚光比分布情况。由图可知, 在焦平面中心位置上出现一个半径约为 8 mm 的圆形能量光斑, 其最大局部聚光比达到 23228。在如此小的面积范围内聚集如此大的太阳能热流密度, 尽管使得碟式系统腔式吸热器能非常有效地捕获太阳能, 但同时也要在极小腔体体积下挑战极其恶劣的疲劳工况, 对材料特性与运行控制等要求会很高。计算结果进一步或可有效用于指导系统应用选型或设计计算。

3 结论

针对太阳能热发电站中各种聚光集热系统具有多阶次、多表面特性及其光能聚集与光热转换复杂过程, 本文提出了一种新的统一建模方法以及与其对应的自编程统一蒙特卡罗光线追迹计算方法。在此基础上, 将该统一建模方法与自编程统一蒙特卡罗光线追迹计算程序应用于槽式、塔式和碟式 3 种典型聚光集热系统, 计算考核结果表明, 该方法具有较好的通用性和较高的准确性, 所获得聚光特性计算结果进一步或可有效用于指导各种太阳能聚光集热系统应用选型或设计计算。

参考文献

- 1 Qu H, Zhao J, Yu X, et al. Prospect of concentrating solar power in China—The sustainable future. *Renew Sust Energ Rev*, 2008, 12: 2505–2514
- 2 Liu L Q, Wang Z X, Zhang H Q, et al. Solar energy development in China—A review. *Renew Sust Energ Rev*, 2010, 14: 301–311
- 3 Kalogirou S A. Solar thermal collectors and applications. *Prog Energy Combust Sci*, 2004, 30: 231–295
- 4 Garcia P, Ferriere A, Benian J J. Codes for solar flux calculation dedicated to central receiver system applications: A comparative review. *Sol Energy*, 2008, 82: 189–197
- 5 Ho C K. Software tools for analysis of concentrated solar power technologies. Technical Report, SAND2008-8053, Sandia National Laboratories, USA, 2008. 1–35
- 6 Yao Z H, Wang Z F, Lu Z W, et al. Modeling and simulation of the pioneer 1 MW solar thermal central receiver system in China. *Renew Energy*, 2009, 34: 2437–2446
- 7 Shuai Y, Xia X L, Tan H P. Radiation performance of dish solar concentrator/cavity receiver systems. *Sol Energy*, 2008, 82: 13–21
- 8 Jeter S M. Calculation of the concentrated flux density distribution in parabolic trough collectors by a semifinite formulation. *Sol Energy*, 1986, 37: 335–345
- 9 Dudley V, Kolb G, Sloan M, et al. SEGS LS2 solar collector—Test results. Technical Report, SANDIA94-1884, Sandia National Laboratories, USA, 1994. 1–32
- 10 Buck R, Abele M, Kunberger J, et al. Receiver for solar-hybrid gas turbine and combined cycle systems. In: *Proceedings of 9th SolarPACES International Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies*, 1999 June 22–26, Font-Romeu, France. *J Phys IV France* 9, 1999. 537–544
- 11 Buck R, Lüpfer E, Téllez F. Receiver for solar-hybrid gas turbine and CC systems (REFOS). In: *Proceedings of 10th SolarPACES International Symposium on Solar Thermal 2000*, Sydney, Australia. 2000. 95–100
- 12 Jeter S M. The distribution of concentrated solar radiation in paraboloidal collectors. *J Sol Energy Eng*, 1986, 108: 219–225
- 13 Prah S A, Keijzer M, Jacques S L, et al. A Monte Carlo model of light propagation in tissue. *Dosim Laser Radiat Med Biol*, 1989, 5: 102–111
- 14 Wang L, Jacques S L, Zheng L. MCMC-Monte Carlo modeling of light transport in multi-layered tissues. *Comput Meth Prog Biol*, 1995, 47: 131–146
- 15 Carter L L, Cashwell E D. Particle-transport simulation with the Monte Carlo method. Technical Report, TID-26607, USERDA Technical Information Center, Oak Ridge, TN, 1975. 1–123
- 16 Hendricks J S, Booth T E. MCNPF' variance reduction overview. *Lect Notes Phys*, 1985, 240: 83–92
- 17 He Y L, Xiao J, Cheng Z D, et al. A MCRT and FVM coupled simulation method for energy conversion process in parabolic trough solar collector. *Renew Energy*, 2010, 36: 976–985
- 18 Tan H P, Shuai Y, Xia X L, et al. Reliability of stray light calculation code by Monte Carlo method. *Opt Eng*, 2005, 44: 023001

- 19 Knuth D E. Seminumerical Algorithms. In: The Art of Computer Programming. 2nd ed. Reading: Addison-Wesley Publishing Company, 1997. 25–113
 - 20 Vince J. Mathematics for Computer Graphics. 3rd ed. London: Springer, 2010
 - 21 Kravtsov Y A. Geometrical Optics in Engineering Physics. Harrow: Alpha Science, 2005
 - 22 Raol J R, Singh J. Flight Mechanics Modeling and Analysis. Boca Raton: CRC Press, 2008
-

Studies on concentrating solar collectors with a new modelling method and unified MCRT code

CHENG ZeDong, HE YaLing & CUI FuQing

Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering of MOE, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

In this paper, a new modelling method and homemade unified code with the Monte Carlo Ray-Trace (MCRT) method for concentrating solar collectors (CSCs) with the involuted solar concentrating and photo-thermal conversion process are presented. According to system characteristics and the principle of simplification for photon propagation, the CSCs are divided into a sequence of subsystems/layers with different numbers of surfaces. Corresponding geometrical models and optical models are built up by unified forms of four order equations, layers/surfaces numbering, variables of geometrical characteristics and optical properties, etc. Based on this, the corresponding unified MCRT code is developed, mainly including the unified solving method on intersection, unified judgment and calculation on optical events, and unified criteria of code checking, etc. Then the proposed method and code are applied to simulate and analyze the involuted solar concentrating and photo-thermal conversion process in three typical CSCs. Numerical checks and results show that the proposed modelling method and code are reliable to simulate various types of CSCs or design new CSCs.

concentrating solar collectors, unified modelling method, Monte Carlo Ray-Trace, photo-thermal conversion process, solar flux distributions

doi: 10.1360/972011-2629