

•绿色建筑与智能建造•

DOI:10.12454/j.jsuese.202400198



本刊网刊

## 建筑幕墙光热聚焦动态分析与可视化方法

欧阳金龙<sup>1</sup>,李越洋<sup>1</sup>,高庆龙<sup>1\*</sup>,丁洪亚<sup>2</sup>

(1. 四川大学 建筑与环境学院, 四川 成都 610065; 2. 中国建筑西南设计研究院有限公司, 四川 成都 610041)

**摘要:**由于凹面建筑幕墙的外形、空间布局及其镜面反射特性,容易出现光热聚焦问题。大量太阳光线反射且高度聚焦,不仅会产生强烈眩光,而且伴光而生的太阳辐射也会恶化建筑周边的热环境,甚至会灼伤聚焦区域内的人、物或引起火灾。在设计阶段快速分析建筑幕墙光热聚焦状况,并及时反馈给建筑师调整幕墙设计,成为控制该类幕墙光热聚焦的关键。目前,国内外已有一些静态计算或模拟分析方法,但在建模、计算结果可视化及对建筑从业者使用友好性等方面存在缺陷,难以有效辅助建筑师优化幕墙设计方案。因此,本文以建筑师常用的 Rhino 绘图软件为建模和数据可视化平台,以修正后 Grasshopper 为模拟计算引擎,开发一种动态模拟计算建筑幕墙光热聚焦的新方法。预先依据镜面反射原理和结合晴天太阳辐射理论,搭建反射光线追踪与太阳光热辐射数值计算模型,并在 Grasshopper 中编制相关“电池”模块,计算数据可快速反馈至 Rhino 几何模型中,以实现计算结果可视化。该方法将帮助建筑师在设计过程中观察建筑幕墙全年逐时动态光热聚焦状况,快速判定幕墙设计方案是否产生光热聚焦、何时发生聚焦、聚焦位置在何处、聚焦强度如何变化、哪些幕墙单元形成聚焦等,有利于建筑师及时调整幕墙设计方案,以避免光热聚焦或降低聚焦强度。

**关键词:**太阳光线;凹面幕墙;太阳辐射;聚焦区域;可视化

**中图分类号:**TU111.19<sup>+2</sup>

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3246(2026)02-0147-08

随着城市化进程的日益推进,中国建筑立面日益多样化,不同类型幕墙被广泛使用。特别是玻璃幕墙几乎已成了高层、超高层建筑的标配外表。然而,中国成为最大的玻璃幕墙使用与生产国家<sup>[1]</sup>的同时,因大面积透明玻璃幕墙而引起的室内过热、能耗过高问题<sup>[2-4]</sup>和因大面积玻璃幕墙的反射光线而导致的城市光污染问题<sup>[5-7]</sup>,也受到了越来越多的关注。

近年来,国外学者相关方面的研究聚焦于大面积幕墙镜面反射的太阳辐射热对周边环境小(微)气候的影响<sup>[8-11]</sup>。尽管这种幕墙的反射热及其影响肉眼不可见,不似眩光易被察觉,但当具有镜面反射特性的幕墙建筑立面形成凹面时,就极易产生光、热聚焦现象,导致建筑周边的局部区域太阳辐射热量高度聚集,可能会灼烧人或物,也存在引起火灾的安全隐患。国外有大量建筑幕墙光热聚焦造成危害的相关报道,比如:英国伦敦 Walkie-Talkie 大楼因光热聚焦致使周

边一车辆后视镜熔化<sup>[12]</sup>;美国拉斯维加斯 Vdara 酒店因外立面凹面反射并汇聚大量太阳光线,形成“死亡射线”<sup>[13]</sup>;洛杉矶迪士尼音乐厅采用大面积抛光弧形金属幕墙,亦存在类似光反射聚焦问题<sup>[14]</sup>。而中国大型城市也建造了多幢有此类幕墙的建筑,如天津日报大厦等<sup>[15]</sup>,但国内文献只是根据国外研究成果,提及了凹面玻璃幕墙热反射的各种潜在危害<sup>[15]</sup>,极少研究其形成原理、评价方法等。

光热聚焦问题实质上是由建筑方位、几何形状、外表皮材料特性和太阳运行轨迹等多因素耦合而产生的。由于在建筑设计阶段,建筑师不仅缺乏光热聚焦的管控意识,而且缺少合适的评价工具,难以简单判定是否会产生光热聚焦问题。此类问题通常在建筑竣工后的运维阶段才被发现,此时已错失最佳干预时机。若采取事后补救措施,不仅改造成本高昂,还可能对建筑外观形象造成不可逆的改变,比如 Walkie-Talkie 幕墙上

收稿日期:2024-03-22 修回日期:2024-06-17 网络出版日期:2024-08-19

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3802704)

作者简介:欧阳金龙(1976—),男,教授,博士。研究方向:城市与建筑物理环境。E-mail:ow761202@scu.edu.cn

\*通信作者:高庆龙,教授, E-mail:gao3066@163.com

不得不安装大量遮阳百叶<sup>[16]</sup>。

由于太阳以电磁波的形式,同时向地球辐射光与热,故理论上基于几何光学的理论或方法,如正向或反向光线追踪法,可用于研究玻璃幕墙眩光与光热聚焦问题。在眩光方面, Ou<sup>[17]</sup>和应申等<sup>[18]</sup>基于太阳、反射表面和观察者之间几何关系的简单计算方法,关注了反射光对行人或驾驶者视觉的影响; Wen等<sup>[19]</sup>利用基于光线追踪方法的 Rhinoceros 软件及其模拟结果,建立了一个快速评估周边建筑反射眩光的预测模型,以快速量化目标建筑在周围反射建筑影响下的总眩光性能; 杨桢<sup>[15]</sup>利用基于光线追踪法的幕墙光环境分析软件 GWLE, 分析了各类外形幕墙的光反射边界。在光热聚集方面, Vollmer等<sup>[20]</sup>采用的 POV 和 ZEMAX 光学模拟软件,模拟分析了 Vadera 酒店的热聚焦情况; Zhu等<sup>[21]</sup>在 Rhinoceros 中建立了 Walkie-Talkie 大楼及其周围环境的三维模型后,使用照明工具 Radiance 模拟了该建筑在不同天气情况下的热聚焦情况; Wong<sup>[22]</sup>开展了玻璃幕墙反射太阳热辐射的光线追踪综合研究; Danks等<sup>[23]</sup>在总结建筑立面反射太阳光的研究文献中,发现部分文献采用了光线追踪法开展研究; 张溪文等<sup>[24]</sup>提出了一种圆柱形幕墙建筑的阳光聚焦安全性分析方法。

对于建筑技术工程师而言,利用以上这些基于光学镜面反射原理的方法或软件,可较为准确地预测或评价幕墙建筑光热聚焦情况;但对于建筑师而言,这些方法或软件的使用却又过于专业且复杂,并不能协助他们模拟计算和分析建筑幕墙光热聚焦问题。究其原因,是这些方法或软件中的建筑光、热理论知识的

专业性强,应用门槛高,对建筑师的技能拓展要求也较高,在实际建筑设计过程中难以推广应用,特别是建模、计算结果可视化等的使用对建筑师不够友好。而且,这些方法或软件只能分析某一特定情况或时刻下的光热聚焦,即静态分析,不利于全面、可视化地观察不同设计方案在全年任一时刻光热聚焦的动态变化场景,难以平衡建筑美学与安全等方面的需求。

因此,有必要开发一种新的模拟计算和快速反馈设计的友好方法。即使建筑师缺乏足够的专业理论知识,也能保证其在建筑设计阶段可以量化分析和预测全年任一时刻、各设计方案是否会产生光热聚焦、何时发生聚焦、聚焦位置在哪里、聚焦强度如何变化等,从而在设计阶段就可优化幕墙设计方案,便于采取合理应对措施,规避光热聚焦或降低其危害。

## 1 建立动态模拟计算方法的思路

众多因素共同耦合产生建筑幕墙光热聚焦现象,借助镜面反射原理及相应的光线追踪法,可理清凹面建筑幕墙光热聚焦的形成原因,并梳理出动态模拟计算、分析幕墙光热聚焦的逻辑流程,如图 1 所示。首先,建立建筑幕墙的三维几何模型;然后,结合其地理位置信息及相应的当地逐时太阳高度角、方位角等,依据基于镜面反射原理的光线追踪法,根据太阳的运行轨迹等,模拟计算出全年任一时刻幕墙对太阳光线的反射及聚焦情况;最后,依据当地的晴天太阳辐射模型<sup>[25]</sup>,预先输入幕墙各单元或其他介质的参数,可量化聚焦强度。

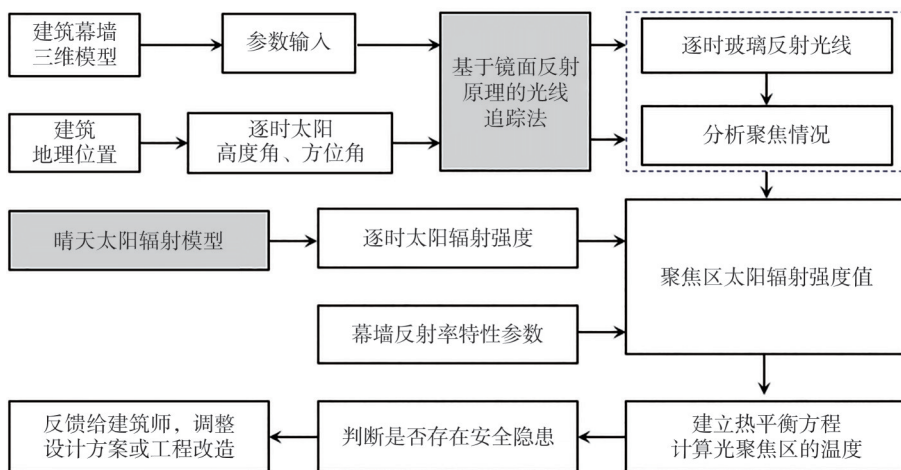


图 1 动态模拟计算与分析幕墙光热聚焦的逻辑流程图

Fig. 1 Logic flowchart of dynamic simulation, calculation and analysis method for photothermal focusing

由图 1 可知,光线追踪法与晴天太阳辐射模型是动态模拟计算建筑幕墙光热聚焦的理论基础,而后者是新方法的核心理论。另外,在建筑模型上实现对计算结果的可视化分析,是新方法的技术难点。由于建筑师设计过程中使用较为广泛的犀牛软件 Rhino,可

同时为三维建模和模拟计算结果的快捷可视化分析提供实现条件,故新的建筑幕墙动态模拟计算方法将以 Rhino 为建模和可视化平台。同时,在 Grasshopper 插件下,使用 VBA 脚本语言将镜面反射原理、晴天太阳辐射模型等编制“电池”模块,实现量化模拟计算幕

墙光热聚焦情况。所以,计算结果数据可以顺畅地重新反馈到Rhino中,进行动态显示和可视化计算结果,便于建筑师观察光热聚焦情况。因而,建筑师可根据计算结果,不断调整、计算、优化设计方案,以规避光热聚焦或控制其影响。综上分析,将以Rhino为建模和可视化平台,以修正后的Grasshopper为计算引擎,建立一种动态模拟计算幕墙光热聚焦的新方法,具体见图2。

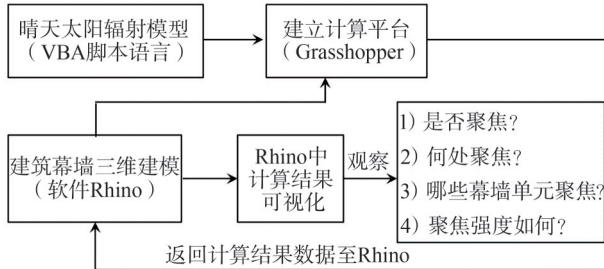


图2 建筑幕墙光热聚焦动态模拟计算方法流程图

Fig. 2 Flowchart of dynamic simulation and calculation method of photothermal focusing of building curtain walls

## 2 晴天太阳辐射计算模型

晴天太阳辐射模型是动态模拟计算建筑幕墙光热聚焦的核心理论基础。该计算模型是基于数学和物理原理的计算方法,用于计算在晴朗天气条件下太阳辐射的大小、分布和变化规律,在气象预测和太阳能利用等领域具有广泛的应用<sup>[25]</sup>。在建筑幕墙光热聚焦的动态模拟计算中,该模型以最不利情况假定全年每天都是晴天,幕墙上将受到大量太阳平行直射光线的照射,忽视漫射光线的影响。

由于幕墙的镜面反射特性,太阳光线将被镜面反射,入(反)射角由各幕墙微单元与太阳的相对位置决定,且会伴随太阳运行导致不同时刻入(反)射角有规律地变化。倘若幕墙外形设计不当,出现凹面形体,反射光线就可能形成聚焦。由此,可判定任一时刻反射光线的平行或聚焦情况、聚焦点或区域位置及面积、形成反射聚焦的幕墙单元位置及面积。

太阳光线中辐射热随不同时刻、不同地理位置而有所变化。而反射光线的聚焦也会形成辐射的高度积聚,其辐射强度不但取决于直射光线的辐射值,也取决于幕墙的反射率。当大量反射光线和直接光线照射到某一介质(如地面),部分辐射热就会被介质吸收,进而提高介质及其周边空气温度,并改变聚焦区域内的热环境,如太阳辐射增强、空气温度升高、湿度降低等<sup>[8-11]</sup>,由此可量化聚焦强度。

由上述分析可知,将融入Grasshopper中的晴天太阳辐射计算模型分成了4步,即太阳动态几何特性计

算、太阳辐射计算、幕墙玻璃反射辐射强度计算、聚焦区域太阳辐射强度与地面温度计算。

### 2.1 太阳动态几何特性计算

根据太阳的运行轨迹、建筑的地理位置及建筑幕墙各不同单元的方位等,基于镜面反射原理的光线追踪法,可计算出太阳直射光线投射到各幕墙单元的入射角,以及反射光线的方向,便于在Rhino中观察来自不同幕墙单元的各反射光线是否平行、相交,并判断最后是否聚焦于某一局部区域或某点。因此,需要确定太阳直射光线照射到幕墙上太阳源射线的几何特性。

首先,根据建筑地理位置的纬度 $\phi$ ,由式(1)和(2)动态计算全年各时刻的太阳高度角 $\beta_s$ 与方位角 $\alpha_s$ 。

$$\sin \beta_s = \cos h \cos \delta \cos \phi + \sin \delta \sin \phi \quad (1)$$

$$\cos \alpha_s = \frac{\sin \delta - \sin \theta \sin \phi}{\cos \theta_s \cos \phi} \quad (2)$$

式(1)、(2)中: $h$ 为太阳时角,可由式(3)计算得出; $\delta$ 为太阳赤纬角,可由式(4)计算得出。

$$h = 15(T - 12) \quad (3)$$

式中, $T$ 为时刻,取值为[1,24]。

$$\delta = 23.45 \sin \frac{360(284 + n)}{365} \quad (4)$$

式中, $n$ 为日期号,1月1日为1,以此类推,12月31日为365(或366)。

由此,根据式(5),可进一步计算出太阳光对建筑幕墙表面的入射角,即太阳光线与幕墙玻璃表面法线的夹角,如式(5)所示。

$$\cos \theta_i = \cos \beta_s \cos(\alpha_s - \alpha_w) \sin \beta_w + \sin \beta_s \sin \beta_w \quad (5)$$

式中: $\alpha_w$ 为玻璃的方位角,朝南取值为 $180^\circ$ ,朝北取值为 $0^\circ$ ; $\beta_w$ 为玻璃的倾角,对于垂直幕墙取 $90^\circ$ ; $\theta_i$ 为入射角, $(^\circ)$ 。

根据太阳平行直射光线在幕墙上的入射角,确定光线反射方向,进而利用Rhino的可视化能够观察到反射光线是否聚焦、何时聚焦、聚焦位置在哪里、哪些幕墙单元引起的聚焦。

### 2.2 太阳辐射计算

建筑幕墙受到太阳光线的照射,相应地也接收到了太阳辐射,其强度包括两部分:太阳直接辐射和散射辐射。为了确定幕墙上接收太阳入射光线的辐射强度,先根据式(6)计算得出晴天状况下某时刻水平(地)面接收到的太阳总辐照度 $I_{gsr}$ <sup>[26]</sup>。因为只考虑镜面反射的强度,故只计算晴天条件下太阳直接辐射值,水平面的太阳直接辐照度可取值总辐射的0.741倍<sup>[25]</sup>,即 $I_{bc} = 0.741 I_{gsr}$ 。

$$I_{gsr} = I_{sc} r (\cos \phi \cos \delta \cos h + \sin \phi \sin \delta) \quad (6)$$

式中: $I_{sc}$ 为太阳常数,取值 $1367 \text{ W/m}^2$ ;  $r$ 为地球大气

层外正入射时的太阳辐射强度与太阳常数之比,无量纲,其体现了日地距离全年变化的影响,可取值为 1,也可由式(7)精确计算得出<sup>[27]</sup>。

$$r = 1 + 0.034 \cos\left(\frac{360n}{365.25}\right) \quad (7)$$

幕墙接收到的太阳辐射照度值  $I_{bcc}$  可由式(8)计算得到。

$$I_{bcc} = I_{bc} \cos \theta_i / \sin \alpha_i \quad (8)$$

式中:  $I_{bc}$  为水平面直接辐射照度,  $W/m^2$ ;  $\alpha_i$  为太阳高度角。

### 2.3 幕墙反射辐射强度计算

照射到幕墙的太阳辐射被分为 3 部分:一部分透射入室内,一部分被玻璃表面反射,剩余部分被玻璃吸收。其中,反射部分的太阳辐射强度受幕墙反射率( $R_{cr}$ )影响,该数据可由分光光度计测试而得。此外,各种幕墙玻璃的反射率还应考虑太阳光线与玻璃表面之间的夹角(即入射角  $\theta_i$ )影响,对玻璃反射率进行修正。以平板玻璃为例,式(9)表达了其反射率与太阳光线入射角之间的关系。由式(9)绘制的图 3 也清晰显示出:随着入射角增大,反射率越大;当入射角高于  $60^\circ$ ,反射率会迅速增大<sup>[28]</sup>。

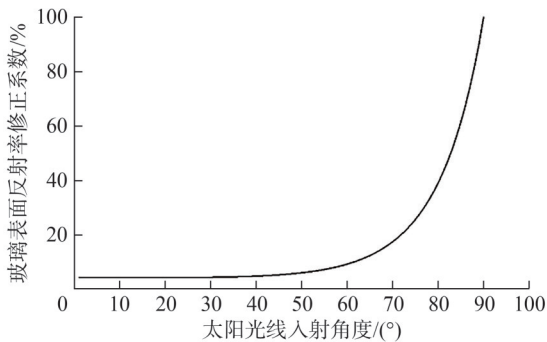


图 3 玻璃反射率修正系数与太阳光线入射角之间的关系  
Fig. 3 Relationship between glass reflectance correction factors and incident angles of sun ray

因而,为了确定反射光线的辐射强度,必须考虑幕墙反射率,由式(10)计算得出经过幕墙反射的太阳辐射强度值  $I_{bcr}$ 。

$$R_{ri} = \frac{1}{2} \left( \frac{\sin\left(\theta_i - \arcsin\left(\frac{\sin \theta_i}{1.52}\right)\right)^2}{\sin\left(\theta_i + \arcsin\left(\frac{\sin \theta_i}{1.52}\right)\right)^2} + \frac{\tan\left(\theta_i - \arcsin\left(\frac{\sin \theta_i}{1.52}\right)\right)^2}{\tan\left(\theta_i + \arcsin\left(\frac{\sin \theta_i}{1.52}\right)\right)^2} \right) \quad (9)$$

$$I_{bcr} = I_{bcc} R_{cr} R_{ri} \quad (10)$$

式(9)、(10)中: $R_{ri}$ 为考虑入射角影响的幕墙反射率的修正系数; $R_{cr}$ 为玻璃的反射率,由分光光度计测试获得。

### 2.4 聚焦区域太阳辐射强度与地面温度计算

当凹面幕墙光热聚焦的强烈太阳辐射投射到周边的任一建筑、人员、设施或物体时,都可能会形成潜在的热危害事故。但在预测聚焦区域太阳辐射强度时,由于无法确定具体的被照体或被照面,故在该方法中以地面作为参考被照面,因为在绝大部分可能形成光热聚焦的案例中,被影响的人员、设施或物体均位于地面上。因此,以聚焦区域内地面接收到的太阳辐射强度与地面温度,量化凹面幕墙光热聚焦对周边环境的热危害程度。聚焦区域地面的太阳辐射强度  $I_{hg}$  由两部分组成:太阳直接照射到地面的太阳辐射强度  $I_{bc}$  和幕墙反射到地面的辐射强度  $I_{bcr}$ 。由此,可得出干燥硬化地面的太阳辐射强度  $I_{hg}$ ,即:

$$I_{hg} = I_{bc} + \sum_{i=1}^m I_{bcr} \sin \alpha_{rc} \quad (11)$$

式中, $m$ 为玻璃幕墙玻璃的个数, $\alpha_{rc}$ 为反射光线与地面之间的夹角。

由于凹面玻璃幕墙建筑的内凹区,多为该建筑广场、主要进出口等,地面一般为硬质干燥地面,如石材地面、混凝土地面等。那么,对于无蒸发散热的此类地面角系数等于 1,可建立热平衡方程<sup>[29]</sup>,即:

$$I_{hg} \rho + \sigma \varepsilon_{sky} T_{sky}^4 = (T_{sur} - T_{db}) \alpha_o - \sigma \varepsilon_{sur} T_{sur}^4 \quad (12)$$

式中: $\rho$ 为地面的太阳辐射吸收率,由地面材质特性确定取值; $\sigma$ 为斯蒂芬常数, $5.669 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ ;  $\alpha_o$ 为表面换热系数,计算时取  $22.7 W/(m^2 \cdot K^4)$ <sup>[29]</sup>;  $T_{sur}$ 为地面温度; $T_{sky}$ 为天空背景温度,可由式(13)计算得出; $\varepsilon_{sky}$ 为天空当量辐射率,可由与露点温度有关的关系式(14)计算得到<sup>[30]</sup>;  $\varepsilon_{sur}$ 为地表当量辐射率,根据地面材质取值; $T_{db}$ 为气温的绝对温度值,为已知量。

$$T_{sky} = T_{dp} \varepsilon_{sky}^{1/4} \quad (13)$$

$$\varepsilon_{sky} = 0.787 + 0.764 \ln\left(\frac{T_{dp}}{273}\right) \quad (14)$$

式(13)、(14)中, $T_{dp}$ 为露点温度的绝对温度值。

故根据式(11)~(14),可计算出光热聚焦区域的地面温度  $T_{sur}$ 。

将式(6)~(14)融入 Grasshopper 中,可以逐步从多方面量化光热聚焦强度,有利于量化研究不同措施对光热聚焦的改善效果,帮助建筑师优化幕墙设计方案。

### 3 动态模拟计算分析方法的应用

图 4 为动态模拟计算分析光热聚焦方法的应用步骤,主要包括以下 4 步,并通过循环迭代进行优化。

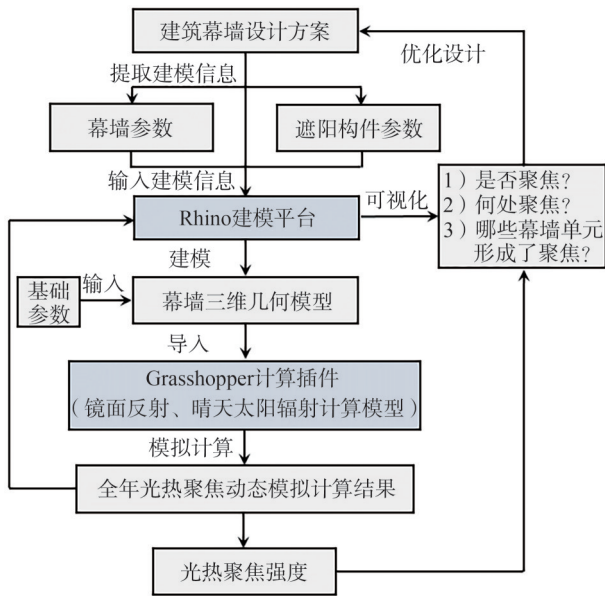


图 4 动态模拟计算分析光热聚焦方法的应用步骤

Fig. 4 Application steps of method to dynamic simulating, calculating and analyzing photothermal focusing

1) 建立幕墙几何模型。需要在 Rhino 软件中建立幕墙的三维几何模型,包括建筑表皮、幕墙各单元,以及可能对光热聚焦产生影响的遮阳构件等。有两种建模途径:一是直接以 Rhino 建筑设计图为三维几何模型;二是根据建筑设计图纸,提取相关的主要建模信息,如幕墙各单元和遮阳构件(如挑檐、遮阳板等)的形状、尺寸、方位、朝向等,在 Rhino 中建立三维几何模型。

2) 输入基础参数。直接在 Rhino 中设定幕墙光热聚焦模拟计算所需的必要参数,主要包括建筑所在位置、所照射地面范围、幕墙各单元和其他介质的性能参数(如反射/吸收率等)及光热聚焦的判定值。合理且准确地输入参数,将决定模拟计算结果的准确性。

3) 模拟计算。根据建筑地理位置的经纬度和时间

表 1 春分日动态模拟计算光热聚焦的量化结果

Tab. 1 Quantitative results of dynamic simulation and calculation of focusing of the Vernal Equinox

时刻	贡献聚焦的玻璃面积/m <sup>2</sup>	聚焦区域的面积/m <sup>2</sup>	聚焦区域的辐射强度/(W·m <sup>-2</sup> )	聚焦区域地面温度/°C
11:00	23	7	2 028	69.7
12:00	10	5	1 636	65.8
13:00	10	8	1 388	63.3
14:00	7	6	1 186	61.0
15:00	84	18	2 692	76.7
16:00	564	208	1 758	67.0
17:00	294	326	802	56.7
18:00	14	62	284	50.8

表 1 中数据仅为春分日的光热聚焦量化结果,实质上经过动态模拟计算后,可以获得任一天、任一时刻的计算数据。图 8 中,案例建筑建成后于 5 月某天 16 时测试地面温度,确实可高达 76.6 °C。Danks 等<sup>[23]</sup>测试过 Walkie-Talkie 大楼幕墙反射区的热辐射强度,最高达

信息,逐时计算晴空太阳辐射强度,并结合太阳轨迹的高度角和方位角,建立太阳光线追踪与辐射计算模块。由于已预先使用 VBA 脚本语言编制了“电池”模块,将镜面反射原理、晴天太阳辐射模型等融入 Rhino 的插件 Grasshopper 中,故只需启动就可以开始模拟计算。

4) 显示计算结果和判定光热聚焦。以平方米为单位细化幕墙成大量微单元,并显示出各微单元中心点的一条反射光线,以观察各反射光线的互相干涉状态;当大量反射光线照射在同一位置产生叠加干涉时,则判定为光热聚焦,并返回到 Rhino 软件界面进行显示,方便建筑师观察可视化计算结果(即全年任一时刻的光热聚焦状况),最后再辅以量化结果,即可判定对幕墙设计方案是否满意。以图 5 中建筑为例,从其全年动态模拟计算结果来看,除了冬季,该建筑通常会在下午发生光热聚焦问题,比如春分日 15 时,根据表 1 中量化结果可知,因光热聚焦导致聚焦区域地面温度高达 76.7 °C 左右。若建筑师不满意并重新调整幕墙设计方案,可继续按照以上步骤开展下一次模拟计算工作,循环迭代优化,直接满足要求。

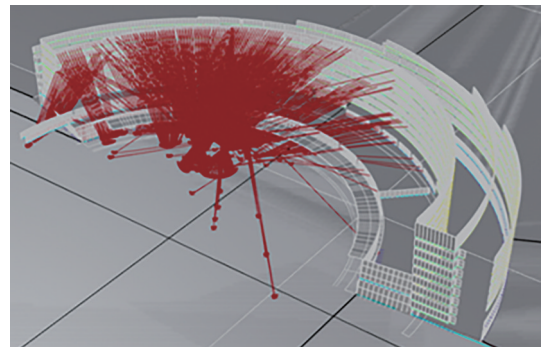


图 5 春分日某建筑幕墙的光热聚焦模拟

Fig. 5 Simulation of photothermal focusing of a building curtain wall in Vernal Equinox

3 600 W/m<sup>2</sup>。但是,这种实地测试方法只能测试出某时某地的光热聚焦地面的温度,不一定能捕获聚焦区域。尽管文献[15,23,31]中提出了一些模拟或计算方法,但只能针对某些特定情况,否则要重新建模或设定参数,无法快捷地获取全年任一时间光热聚焦的数据。

由以上可知:针对建筑幕墙光热聚焦问题,建筑师应用本文所提方法可以快捷地完成建模、参数输入工作;计算结果的可视化方式非常便于观察幕墙设计方案的效果,并针对性地调整优化设计方案;并且该方法预先融入 Grasshopper 中的核心计算模型,无需复杂的建筑光、热环境专业知识,故对建筑师极其友好。

## 4 结 论

本文依据镜面反射原理,结合晴天太阳辐射模型理论,以建筑师常用的 Rhino 软件为建模和可视化平台,以修正后 Grasshopper 为模拟计算引擎,提出了一种建筑幕墙光热聚焦动态分析与可视化方法。由于预先依据镜面反射原理和结合晴天太阳辐射理论,搭建了反射光线追踪与太阳光热辐射数值计算模型,并在 Grasshopper 中编制相关“电池”模块,计算数据可快速反馈至 Rhino 几何模型中,故可实现计算结果可视化。所以,该模型便于建筑师在设计过程中观察幕墙全年逐时的动态光热聚焦状况,快速判定各设计方案是否产生光热聚焦以及各种细节。这将有利于建筑师及时调整幕墙设计方案,以避免光热聚焦或降低聚焦强度。

后续研究中,将利用这种方法,针对光热聚焦产生的一系列危害,开展一些基于模拟计算数据的对策研究,以期帮助建筑师在追求新颖艺术造型的幕墙设计方案的同时,避免出现光热聚焦问题,减小其造成的危害。

### 参考文献:

- [1] Liu Zhihai. China's current situation and development trend of glass curtain wall[J]. Glass, 2023, 50(2): 30–33. [刘志海. 我国玻璃幕墙现状及发展趋势[J]. 玻璃, 2023, 50(2): 30–33.]
- [2] Ji Weidong, Qiao Yaping, Liu Yujiao, et al. Retrofit design of glass curtain wall for office buildings based on thermal environment optimization: Analysis of an office building in Binzhou[J]. Building Energy Efficiency, 2021, 49(6): 125–130. [纪伟东, 乔亚萍, 刘玉蛟, 等. 基于热环境优化的办公建筑玻璃幕墙改造设计研究——以滨州某办公楼为例[J]. 建筑节能(中英文), 2021, 49(6): 125–130.]
- [3] Jia Qingqing. Research on applicability of LOW-E glass in energy saving of high-rise office buildings in hot summer and warm winter area[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021. [贾清清. 夏热冬暖地区 LOW-E 玻璃在高层办公室建筑节能中的适用性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.]
- [4] Yan Yufeng. Study on heat transfer performance mechanism of open-frame glass curtain wall in winter in hot summer and cold winter area[D]. Suzhou: Suzhou Univer-

sity of Science and Technology, 2021. [严羽枫. 夏热冬冷地区明框玻璃幕墙冬季传热性能机理研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2021.]

- [5] Zhang Junli. Glass curtain wall light pollution problem and prevention measures[J]. Build Technology, 2023, 7(2): 50–52. [张军丽. 玻璃幕墙光污染问题与防治措施[J]. 建筑科技, 2023, 7(2): 50–52.]
- [6] Li Xueting, Liu Buyun, Jin Jie. Harm and prevention of light pollution of glass curtain wall[J]. Cleaning World, 2022, 38(3): 92–94. [李雪婷, 刘步云, 金杰. 玻璃幕墙光污染的危害与防治[J]. 清洗世界, 2022, 38(3): 92–94.]
- [7] Mao Hequn, Wang Fan, Xu Guiru, et al. Prevention of light reflection to urban roads off architectural glass curtain walls[J]. Journal of Shanghai Scientific Research Institute of Shipping, 2019, 42(2): 74–78. [毛鹤群, 王帆, 徐桂茹, 等. 建筑玻璃幕墙反射光对城市道路的影响[J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2019, 42(2): 74–78.]
- [8] Wen Jianxiu, Ignatius M, Chen E X, et al. Impacts of a highly reflective stainless-steel façade on a surrounding building: A case study in Singapore[J]. Sustainable Cities and Society, 2023, 90: 104377.
- [9] Salvati A, Kolokotroni M, Kotopouleas A, et al. Impact of reflective materials on urban canyon albedo, outdoor and indoor microclimates[J]. Building and Environment, 2022, 207: 108459.
- [10] Fabbri K, Gaspari J, Bartoletti S, et al. Effect of facade reflectance on outdoor microclimate: An Italian case study[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 54: 101984.
- [11] Mehaoued K, Lartigue B. Influence of a reflective glass façade on surrounding microclimate and building cooling load: Case of an office building in Algiers[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 46: 101443.
- [12] 搜狐网. 国外“辣眼睛”的建筑, 斥 16.8 亿建成, 因将汽车热融又抛 1 亿挡光[EB/OL]. (2023–02–22)[2024–03–22]. [https://travel.sohu.com/a/644511141\\_121493478](https://travel.sohu.com/a/644511141_121493478).
- [13] NBC News. “Death Ray” at Vegas Hotel Pool Heats up Guests[EB/OL]. (2010–09–29)[2024–03–02]. <http://www.nbcnews.com/id/39403349/ns/travel-news/t/death-ray-vegas-hotel-pool-heats-guests/#.VdcnWNVVhBc>.
- [14] Schiler M. Examples of glare remediation techniques[C]. Passive and Low Energy Architecture Conference. Quebec City, 2009: 22–24.
- [15] Yang Zhen. The research on design strategy for preventing and controlling reflecting lights coming from glass curtain wall buildings[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017. [杨贞. 玻璃幕墙建筑反射眩光防控设计策略研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.]
- [16] Meloni M, Zhang Qian, Cai Jianguo, et al. Origami-based adaptive facade for reducing reflected solar radiation in out-

- door urban environments[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2023,97:104740.
- [17] Ou Yinglei. Quantitative study of reflection of sunlight by a glass curtain wall resulting in a visual masking effect[J]. *Applied Optics*, 2014,53(29):6893–6899.
- [18] Ying Shen, Tang Mo, Zhang Xinyue, et al. Sunlight pollution analysis of glass curtain wall in 3D city[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021,46(5):610–619. [应申, 唐茉, 张馨月, 等. 三维城市的玻璃幕墙光污染分析[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2021,46(5):610–619.]
- [19] Wen Jianxiu, Ignatius M, Wong N H. A prediction model for fast evaluation of reflective glare from surrounding buildings[J]. *Solar Energy*, 2022,243:279–299.
- [20] Vollmer M, Möllmann K P. Caustic effects due to sunlight reflections from skyscrapers: Simulations and experiments[J]. *European Journal of Physics*, 2012,33(5):1429.
- [21] Zhu Jiajie, Jahn W, Rein G. Computer simulation of sunlight concentration due to façade shape: Application to the 2013 Death Ray at Fenchurch Street, London[J]. *Journal of Building Performance Simulation*, 2019,12(4):378–387.
- [22] Wong J S J. A comprehensive ray tracing study on the impact of solar reflections from glass curtain walls[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015,188(1):16.
- [23] Danks R, Good J, Sinclair R. Assessing reflected sunlight from building facades: A literature review and proposed criteria[J]. *Building and Environment*, 2016,103:193–202.
- [24] 张溪文, 彭瑞群. 一种圆柱形幕墙建筑的阳光聚焦安全性分析方法: CN102539121B[P]. 2014–12–10.
- [25] Lam J, Li D. Correlation between global solar radiation and its direct and diffuse components[J]. *Building and Environment*, 1996,31(6):527–535.
- [26] Liu B Y H, Jordan R C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation[J]. *Solar Energy*, 1960,4(3):1–19.
- [27] Goswami D Y. *Principles of Solar Engineering*, Third Edition[M]. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2015.
- [28] Ghatak A. *Optics*[M]. 4th ed. New Delhi: McGraw–Hill Education, 2009.
- [29] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. *ASHRAE Handbook: Fundamentals*[R]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2017.
- [30] Walton G N. *Thermal analysis research program reference manual*[R]. Gaithersburg: US Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1983.
- [31] Brzezicki M. The influence of reflected solar glare caused by the glass cladding of a building: Application of caustic curve analysis[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2012,27(5):347–357.

## Dynamic Analysis and Visualization Method for Photo-thermal Focusing of Building Curtain Walls

OUYANG Jinlong<sup>1</sup>, LI Yueyang<sup>1</sup>, GAO Qinglong<sup>1\*</sup>, DING Hongya<sup>2</sup>

(1. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. China Southwest Architecture Design and Research Institute, Chengdu 610041, China)

### Abstract:

**Objective** Due to the concave appearance, spatial layout, and mirror reflection characteristics of building curtain walls, photothermal focusing problems frequently occur. Reflected sunlight and excessive solar radiation highly concentrated by concave curtain walls induce severe glare and deteriorate the thermal environment around concave buildings, and can even cause burns to people or objects in the focused area or trigger fire hazards. Therefore, it is critical for architects to rapidly observe and analyze photothermal focusing so that such problems can be effectively avoided through design adjustments at the design stage. However, existing static calculation and simulation analysis methods exhibit limitations in three-dimensional building model establishment, visualization of calculation results, and user friendliness for the primary decision-makers, architects, and thus fail to effectively support the optimization of design schemes for buildings with concave curtain walls. Therefore, this study aims to develop a new method that enables architects to dynamically simulate and calculate photothermal focusing of curtain walls during the design stage and to rapidly perform analytical evaluations.

**Methods** Based on the principle of mirror reflection and the corresponding ray tracing method, the causes of photothermal focusing induced by concave building curtain walls were identified. The logical framework for dynamic simulation calculation and analysis of photothermal focusing in curtain walls was clarified. Through theoretical derivation, calculation models for Ray Tracing and Sunny Day Solar Radiation were developed, and the corresponding battery modules were prewritten in Grasshopper. Then, a new method was established by adopting Rhino, a drawing software widely used by architects, as the modeling and visualization platform, while the modified Grasshopper served as the simulation and calculation engine. Since the Sunny Day solar radiation model constituted the most important theoretical foundation of the proposed method, this model, along with its four calculation modules, namely the calculation module of dynamic geometric characteristics of the sun, the calculation module of solar radiation, the calculation module of reflected radiation intensity of curtain walls, and the calculation module of solar radiation intensity and ground temperature in the focus area, as well as

the associated formulas, was systematically and logically introduced in detail. Finally, the application of the proposed method in the simulation, calculation, and analysis of photothermal focusing problems in curtain walls was demonstrated step by step, and the results obtained for a case study building using the proposed method were compared to field measurement results reported in previous studies and references.

**Results and Discussions** The newly developed method exhibited several advantages. First, by adopting Rhino as the modeling and visualization platform, the method was highly accessible to architects, as the three-dimensional building models created in Rhino did not require reconstruction and could be directly used for simulation. In addition, simulation results could be promptly transmitted back to Rhino, enabling the visualization of numerical results as graphical outputs, which allowed architects to observe potential scenarios associated with different design schemes and to efficiently analyze photothermal focusing issues. Second, through the calculation module of dynamic geometric characteristics of the sun, the modified Grasshopper was able to trace both direct and reflected rays from curtain walls, enabling the identification of whether photothermal focusing problems would occur, as well as their timing and location, and the specific glass units responsible for their formation. Through the calculation module of solar radiation, the modified Grasshopper calculated the intensity of direct solar radiation at any time throughout the year. Through the calculation module of reflected radiation intensity of curtain walls, the intensity of reflected solar radiation from curtain walls was determined. Through the calculation module of solar radiation intensity and ground temperature in the focus area, the combined intensities of direct and reflected solar radiation on the ground within focus areas or hotspots, as well as the corresponding ground temperature, were calculated. Overall, the proposed method enabled architects to observe the dynamic evolution of photothermal focusing phenomena associated with different curtain wall design schemes over an entire year during the design stage and to rapidly determine which design schemes would induce photothermal focusing, when and where such focusing would occur, how the focusing intensity would evolve, and which curtain wall units would contribute to the focusing effect. Finally, comparisons between the simulation results of the case study building at the Vernal Equinox and field measurement results further demonstrated that the proposed method allowed architects to obtain accurate and comprehensive results efficiently, supporting improved decision-making aimed at avoiding or mitigating photothermal focusing problems induced by buildings with concave curtain walls.

**Conclusions** The newly developed method utilizes Rhino as the modeling and visualization platform and a modified Grasshopper environment as the simulation and calculation engine. This approach enables architects to adjust curtain wall design schemes in a timely manner to avoid photothermal focusing effects or to reduce focusing intensity during the design stage.

**Key words:** sun rays; concave curtain wall; solar radiation; focus area; visualization

**Graphical abstract:**

A New Dynamic Simulation and Calculation Method of Photothermal Focusing of Building Curtain Walls

Fig. 1 Logic flowchart of new developed method

Fig. 3 Application steps of new developed method

Fig. 2 Flowchart of establishment of new developed method

Fig. 4 Focusing Simulation of case building by new developed method

**Tab. 1 Quantitative focusing results of case building by new developed method**

Time	Glass area producing focusing / m <sup>2</sup>	Focus area / m <sup>2</sup>	Solar radiation intensity in focus area / (W·m <sup>-2</sup> )	Ground temperature in focus area / °C
11:00	23	7	2 028	69.7
12:00	10	5	1 636	65.8
13:00	10	8	1 388	63.3
14:00	7	6	1 186	61.0
15:00	84	18	2 692	76.7
16:00	564	208	1 758	67.0
17:00	294	326	802	56.7
18:00	14	62	284	50.8

**Conclusion**  
This new developed method, by taking Rhino as the modeling and visualization platform and taking modified Grasshopper as the simulation and calculation engine, can facilitate architects to adjust the design plans of curtain walls in time to avoid photothermal focusing or reduce the focusing intensity.

(编辑 陈 雪)

引用格式: Ouyang Jinlong, Li Yueyang, Gao Qinglong, et al. Dynamic analysis and visualization method for photo-thermal focusing of building curtain walls [J]. Advanced Engineering Sciences, 2026, 58(2): 147–154. [欧阳金龙, 李越洋, 高庆龙, 等. 建筑幕墙光热聚焦动态分析与可视化方法[J]. 工程科学与技术, 2026, 58(2): 147–154.]