

岛礁密集建筑群长波辐射计算模型

刘大龙, 赵辉辉, 刘加平

(西安建筑科技大学建筑学院, 西安 710055)

摘 要: 中国南海地区常年四季如夏, 温湿度波动小, 辐射热是建筑的主要热源。为了研究南海岛礁上围护结构长波散热强度及建筑围合对长波散热的影响, 建立由直射分量和反射分量组成的长波辐射计算模型。该模型采用视野因子替代传统辐射计算中的角系数, 采用基尔霍夫电流定律计算多个表面的反射辐射。通过多地的实测数据验证该模型的有效性, 为后续建筑长波散热研究奠定基础。

关键词: 城市热环境; 建筑-气候策略; 环境测试; 辐射传热; 数值模型

中图分类号: TU111.19

文献标识码: A

0 引 言

海洋资源开发是 21 世纪全球发展的焦点, 因此作为海洋上战略支点的岛礁将成为海洋开发的前沿^[1]。南海地区是我国海洋开发的重点, 其岛礁陆地面积十分有限, 因此岛礁建设受到严重的用地面积限制, 可谓“寸土寸金”。在我国南海岛礁建设中, 或主动或被动地出现了大量的建筑围合空间, 建筑布局密集, 其不同于我国南方沿海湿热地区开敞、通透的建筑布局。在密集的建筑群中, 短的间距导致建筑发射的长波辐射又作用于相近建筑, 同时加上反射的长波辐射, 建筑长波辐射热效应将显著增加, 这将大大降低建筑夜间长波散热的效果, 不利于建筑的隔热降温。

长波辐射是一种有效的被动式建筑降温措施^[2]。南海岛礁太阳辐射强烈, 建筑厚重, 外围护结构蓄热大。我国南海岛礁气候无显著日变化和年变化, 气温常年处于 26~33 ℃ 之间^[3], 由室内外空气温差而产生的通过围护结构的传热较小。综上所述, 辐射传热是岛礁建筑的主要传热方式。如果能优化建筑的夜间长波散热强度, 就可有效降低围护结构表面温度和空调负荷。岛礁上的围合空间是否会对建筑长波辐射散热产生不利影响? 它会产生多大程度的影响? 针对上述问题, 本文开展围合空间建筑长波辐射强度计算模型研究, 为岛礁长波辐射

规律研究奠定理论基础。

1 围合空间长波辐射计算模型

对于单一建筑的非围合空间, 建筑立面主要接收来自天空、地面和空气的直接长波辐射。而多个建筑相邻组成的围合空间中, 建筑立面接收的长波辐射既包括直接的长波辐射, 还包括相邻建筑表面反射的长波辐射。

2 个平行相对建筑组成的半围合空间中, 在 2 个相对建筑立面中接收到的长波辐射由直接的长波辐射和反射的长波辐射组成, 其关系满足式(1)。

$$q_l = q_{ld} + q_{lr} \quad (1)$$

式中, q_l ——某立面接收到的总长波辐射, W/m^2 ; q_{ld} ——某立面接收到的直接长波辐射, W/m^2 ; q_{lr} ——接收的来自对面建筑反射的长波辐射, W/m^2 。

由 n 个立面组成的建筑围合空间中, 其中 1 个立面接收到的长波辐射满足式(2):

$$q_{li} = \sum_{j=1}^{n-1} q_{ld(j \rightarrow i)} + \sum_{j=1}^{n-1} q_{lr(j \rightarrow i)} = q_{ld,i} + q_{lr,i} \quad (2)$$

式中, $q_{ld(j \rightarrow i)}$ ——某立面 j 发射到立面 i 的直接长波辐射, W/m^2 ; $q_{lr(j \rightarrow i)}$ ——围合空间中其他立面经过立面 j 反射到立面 i 的长波辐射, W/m^2 ; $q_{ld,i}$ ——围合空间中某立面 i 接收到的总直接长波辐射, W/m^2 ; $q_{lr,i}$ ——围合空间中某立面 i 接收到的总反射长波

收稿日期: 2017-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(51578439; 51590913)

通信作者: 刘大龙(1976—), 男, 博士、副教授, 主要从事建筑能耗模拟方面的研究。coffeevc@xauat.edu.cn

辐射, W/m^2 。

1.1 直接长波计算模型

直接长波辐射的计算依据兰贝特定律^[4]: 在 i 、 j 这 2 个面组成的辐射系统中, i 表面接收到来自 j 表面发射的辐射强度满足式(3):

$$q_{\text{ld}(j \rightarrow i)} = \frac{E_{\text{bj}} \varepsilon_j X_{j,i} A_j}{A_i} = E_{\text{bj}} \varepsilon_j X_{i,j} \quad (3)$$

式中, E_{bj} ——面 j 的黑体发射功率, W/m^2 ; ε_j ——面 j 的表面发射率; $X_{i,j}$ 、 $X_{j,i}$ —— i 面到 j 面、 j 面到 i 面的辐射角系数; A_j 、 A_i ——面 A_j 、面 A_i 的计算面积, m^2 。

在上述各变量中, 角系数的计算相对复杂, 特别是针对大尺度、多表面的建筑围合空间。其表面材料差异较大, 且不是均匀温度场, 因为传统角系数计算方法不适用于本研究。针对以上问题, 文献[5]提出天空视野因子 SVF (sky view factor)、地面视野因子 FVF (floor view factor) 和墙面视野因子 WVF (wall view factor) 来估算街谷中人体所受到的长波辐射热量。该方法被较多地应用于城市街谷的热环境研究中^[6-8], 本文采用视野因子来研究建筑围合空间中辐射热计算中的空间几何关系。

图 1 是建筑围合空间中北向建筑南墙 3 个视野因子的示意图。通过天空、建筑立面、地面 3 个平面, 将建筑某一立面所对的半球空间中划分为 3 个子空间。南墙上某一点的 3 个视野因子就是被天空、墙面 (除微元面所在的墙面外) 和地面在半球表面的投影所拦截的辐射量占整个半球上总辐射量的比例。

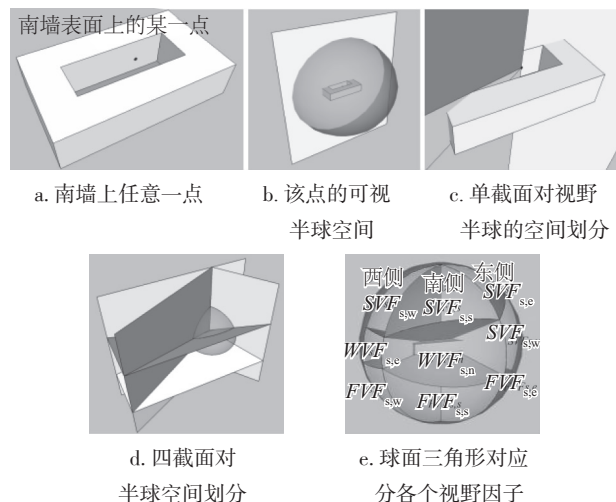


图 1 南墙的 3 个视野因子示意图

Fig. 1 Three view factor on south wall

得到这 3 个视野因子后, 可直接求得墙面上某处接收来自其他表面的发射的直接长波辐射强度, 用公式表示为式(4):

$$q_{\text{ld},s} = \sigma_b (\varepsilon_a T_a^4 \text{SVF}_s + \varepsilon_w T_w^4 \text{WVF}_s + \varepsilon_f T_f^4 \text{FVF}_s) \quad (4)$$

式中, $q_{\text{ld},s}$ ——南墙上某一点接收来自周围环境的直接长波辐射强度, W/m^2 ; ε_a 、 ε_w 、 ε_f ——天空、墙面以及地面的发射率; σ_b ——斯蒂芬-波尔兹曼常数, $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; T_a 、 T_w 、 T_f ——天空、墙面和地面的温度, K ; SVF_s 、 WVF_s 、 FVF_s ——南墙所对的天空视野因子、地面视野因子和墙面视野因子。

由于计算方法相同, 这里仅以 SVF_s 的计算方法为例进行说明。在半球空间里, 南墙上某一点的天空视野因子可表示为:

$$\text{SVF}_s = \frac{W(\theta_{w,\text{sky}} + \theta_{e,\text{sky}} - \pi)}{2\pi \sqrt{W^2 + (H-z)^2}} \quad (5)$$

$$W = \frac{D}{2} \left[\frac{H-z}{\sqrt{(H-z)^2 + (0.5L)^2}} + 1 \right] \quad (6)$$

$$\begin{cases} \theta_{w,\text{sky}} = \arccos \left[\frac{-D(L-x)}{\sqrt{(H-z)^2 + D^2} \sqrt{(H-z)^2 + (L-x)^2}} \right] \\ \theta_{e,\text{sky}} = \arccos \left[\frac{-Dx}{\sqrt{(H-z)^2 + D^2} \sqrt{(H-z)^2 + x^2}} \right] \end{cases} \quad (7)$$

式中, $\theta_{w,\text{sky}}$ ——西侧天空视野边界与北向天空视野边界二面角; $\theta_{e,\text{sky}}$ ——东侧天空视野边界与北向天空视野边界的二面角; H 、 D 、 L ——围合空间长、宽和高, m ; x 、 y 、 z ——南墙某点的三维坐标。

在实际环境当中, 4 个墙面在同一时刻各有不同的温度, 为使计算结果尽可能精确, 将各个墙面的视野因子分开计算。仍以南墙上某点为研究对象, 则东、西、北墙的视野因子可分别表示 $\text{WVF}_{s,e}$ 、 $\text{WVF}_{s,w}$ 和 $\text{WVF}_{s,n}$, 三者之和则是南墙计算点的 WVF_s 值。

南墙上的一点在某一时刻接收到来自周围环境的直接投射辐射为:

$$q_{\text{ld},s} = \varepsilon_a \sigma_b T_a^4 \text{SVF}_s + (\varepsilon_w \sigma_b T_w^4 \text{WVF}_{s,w} + \varepsilon_n \sigma_b T_n^4 \text{WVF}_{s,n} + \varepsilon_e \sigma_b T_e^4 \text{WVF}_{s,e}) + \varepsilon_f \sigma_b T_f^4 \text{FVF}_s \quad (8)$$

1.2 反射长波辐射计算模型

反射长波辐射与入射辐射强度、反射面的位

置、反射率等多要素相关,本研究只计算一次反射的长波辐射强度,即只经过1个表面反射的长波辐射。本文首先以最简单的3面围合1个反射面(如图2所示)为例来分析,之后推导3面围合两面反射,最后得到 n 面围合 $(n-1)$ 面反射情况下反射长波辐射强度计算模型。图2中面2是计算面,接收来自面1的反射辐射。在图2中假设面1是灰表面,面2和面3是黑表面,则3个表面中只有面1可发生反射,它反射来自面2和面3的长波辐射到面2。3个表面均大于绝对零度且差值不过分悬殊(即吸收率 α 等于发射率 ε)。

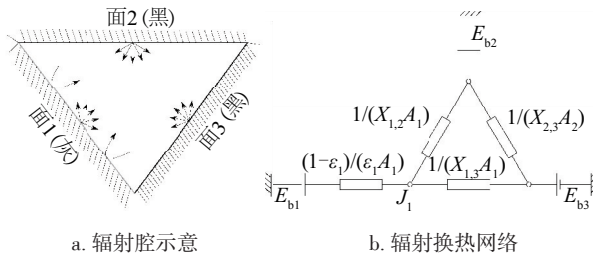


图2 1个灰表面与2个黑表面组成的封闭腔辐射换热网络

Fig. 2 Radiation heat transfer network of enclosure consisted by gray surface and two black surfaces

依据基尔霍夫电流定律使用网络法^[4]建立面2的净辐射换热量表达式为:

$$\Phi_2 = E_{b2}A_2 - E_{b1}\varepsilon_1A_1X_{1,2} - E_{b2}A_2X_{2,1}(1-\varepsilon_1)X_{1,2} - E_{b3}A_3X_{3,1}(1-\varepsilon_1)X_{1,2} - E_{b3}A_3X_{3,2} \quad (9)$$

由于面2是黑表面($\varepsilon_2=1$),其净辐射换热量也可用自身发射的长波辐射强度与该面吸收的长波辐射强度的差来表示,即:

$$\begin{aligned} \Phi_2 &= E_{b2}\varepsilon_2A_2 - (q_{l1,2} + q_{l3,2})\alpha_2A_2 \\ &= E_{b2}A_2 - (q_{l1,2} + q_{l3,2})A_2 \end{aligned} \quad (10)$$

式中, α_2 ——表面2的长波吸收率。

已知面3为黑表面($\varepsilon_3=1$),由式(3)得面2上的直接投射辐射为:

$$q_{l1,2} = E_{b1}\varepsilon_1X_{2,1} + E_{b3}X_{2,3} \quad (11)$$

联立式(9)~式(11),可得面2上接收到由面1反射的单位面积上长波辐射强度为:

$$q_{lr,2} = (E_{b2}X_{1,2} + E_{b3}X_{1,3})(1-\varepsilon_1)X_{2,1} \quad (12)$$

式(12)表示的是面2和面3发射的长波辐射经过面1一次反射后投射到面2的单位面积辐射强度,用“ ρ ”来表示反射率,则根据式(3),式(12)可进一步写为:

$$q_{lr,2} = q_{l1,1}(1-\varepsilon_1)X_{2,1} = q_{l1,1}\rho_1X_{2,1} \quad (13)$$

由式(13)可知,面1反射到面2长波辐射与面1直接发射到面2的长波辐射都遵循兰贝特定律。此外,在一个确定的辐射换热系统内,由于吸收率和角系数通常是定值,因此接收面上的反射辐射强度与反射面上的直接投射辐射强度函数有关。

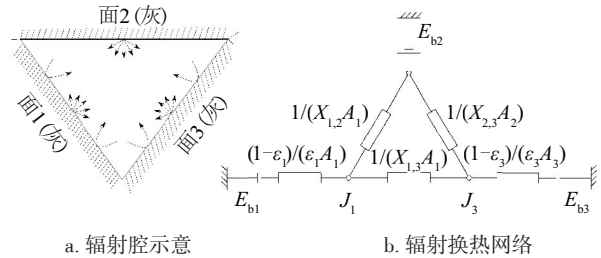


图3 2个灰表面与1个黑表面组成的封闭腔辐射换热网络

Fig. 3 Radiation heat transfer network of enclosure consisted by two gray surfaces and one black surface

上面分析了黑表面与灰表面间的反射辐射规律,同时也是一次反射辐射的规律,如果把黑表面3换成灰表面(如图3),其他条件不变,则面1与面3间进行了无数(n)次的反射,同样用网络求解法,由于篇幅所限,过程不再赘述。分析证明对建筑表面间无数次的反射投射辐射进行估算时,可近似取一次反射量当做有效值,达到2次或2次以上反射辐射量可当做极小值而忽略不计。对于由 n 个灰表面组成的围合空间,且各发射率均接近于1,则 i 表面接收的反射长波辐射为其他各个面上的直接长波辐射经一次反射后到达面 i 的长波辐射量总和,即可用式(14)进行估算:

$$q_{lr,i} \approx \sum_{j=1}^{n-1} q_{l1,j}\rho_jX_{i,j} \quad (14)$$

2 围合空间长波辐射计算模型的验证

为使测试结果相对有效且具有代表性,在2016年8~9月份间进行2次测试。因客观原因,目前很难登陆我国南海岛礁进行实测,课题组选在距离岛礁最近的海南三亚进行围合空间长波辐射强度测试。为对比模型的有效性,还选择在哈尔滨进行同样的测试。两地测试场地平面布局如图4、图5所示。

在2个测试场地中,建筑外表面均为普通涂漆饰面,哈尔滨地面为沥青地面,三亚地面为水泥地面。测试的内容包括各个外墙以及地面的表面温度,各个墙面接收的长波辐射强度以及空气的湿温

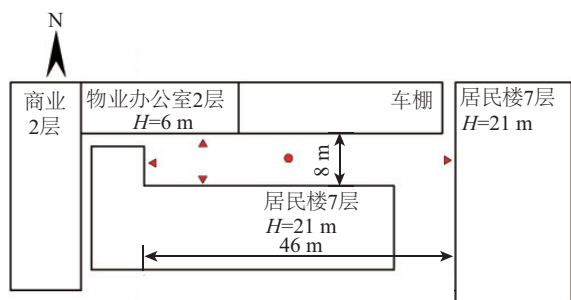


图4 三亚测试场地平面布局图

Fig. 4 Layout of Sanya test site

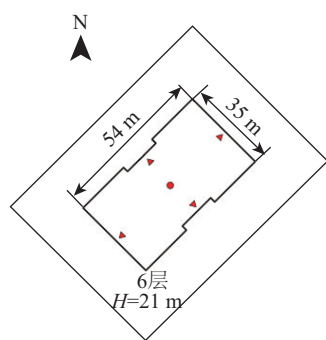


图5 哈尔滨测试场地平面布局图

Fig. 5 Layout of Harbin test site

度,连续测试 48 h,测试所用仪器如表 1 所示。长波辐射测试仪器和表面温度测试仪器的布置位置如图 4 和图 5 中的小三角符号所示;空气温度测试仪器布置于空间中央,如图中圆点所示,同时在各朝向墙面附近各布置一处空气温度测试仪器,同样用三角符号表示。

表 1 测试仪器参数

Table 1 Parameters of test instrument

测试项目	仪器名称	仪器参数
长波辐射强度	QTS-4 长波辐射仪 (手记)	准确度:0.5% 内分辨率: $\pm 1 \mu\text{V}$ 显示周期:10 s
表面温度	CENTER-309 四通道温度 计(自记)	精度: $-200 \sim 1370 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $\pm 0.3\%$ 读数 $+1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 使用环境温度: $-20 \sim 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$
空气 温湿度	175-H2 自计 式温湿度计 (自记)	操作温度: $-20.0 \sim 70.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 精度 ± 3.0 分辨率 $\pm 0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$
空间尺寸	激光测距仪 (手记)	测量范围:40 m 测量精度:1 mm

其中,三亚测试日期为 2016 年 8 月 17 日 22:00~8 月 19 日 22:00,天气由多云转阴再转雨;哈尔滨测试日期为 2016 年 9 月 20 日 17:00~9 月 22 日 17:00,天气晴朗少云。

在获得测试数据后,采用 Matlab 编制长波直接辐射和反射辐射的计算软件。将测试期间得的建筑表面和地面的壁面温度、空气温度(如图 6~图 8 所示)作为式(8)和式(14)的输入参数。发射率的设置参考文献[9~11]的计算方法,各表面发射率均取 0.9,空气发射率哈尔滨取 0.7,三亚取 0.8。计算值与实测值比较结果如图 9、图 10 所示。

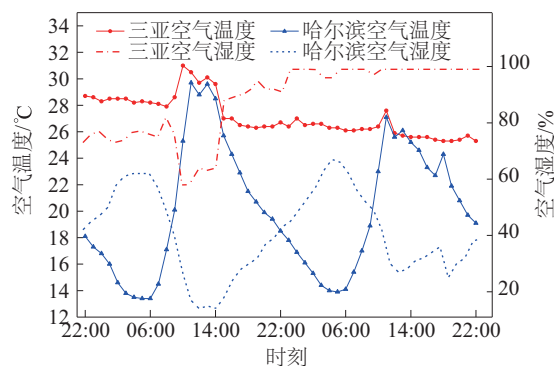


图6 实测空气温湿度曲线

Fig. 6 Data of air temperature and humidity obtained by test

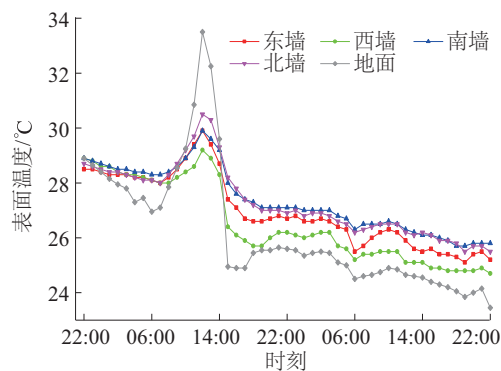


图7 三亚各表面温度测试值

Fig. 7 Surface temperature obtained by test in Sanya

三亚和哈尔滨的理论计算值与实测值的平均误差分别为 2.77%、2.29%,均在工程计算允许误差范围之内,证明该模型可用来估算围合空间建筑外墙表面接收的长波辐射强度。

对比图 9、图 10 发现,三亚的误差大于哈尔滨,两地长波辐射规律有所不同。分析表明,测试期间,三亚天气并非持续晴朗,在测试期内经历了由多云转阴再转雨的过程,导致墙面、地面温度未出

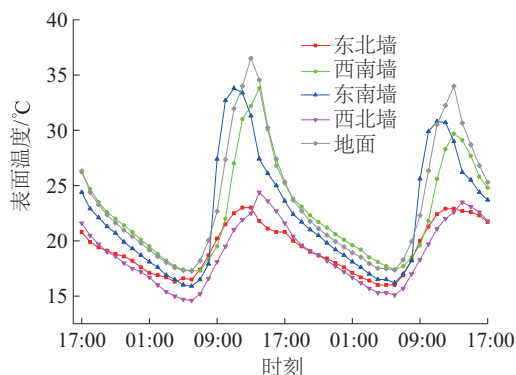


图8 哈尔滨各表面温度测试值

Fig. 8 Surface temperature obtained by test in Harbin

现波峰的状况,反而呈现出缓慢下降的趋势。同时,空气的发射率,即天空对长波辐射作用受到空气相对湿度的影响,不同相对湿度的空气对长波辐射的发射率不同,而两地中计算值误差较大的时刻正是该地区相对湿度较大的时刻,因此在该模型后续研究中,应针对相对湿度来修正不同时刻空气发射率。

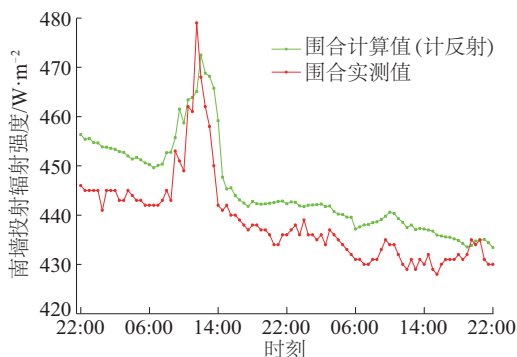


图9 三亚南墙接收长波辐射量的计算值与实测值

Fig. 9 Comparison of calculated and measured values of long wave radiation received on south wall in Sanya

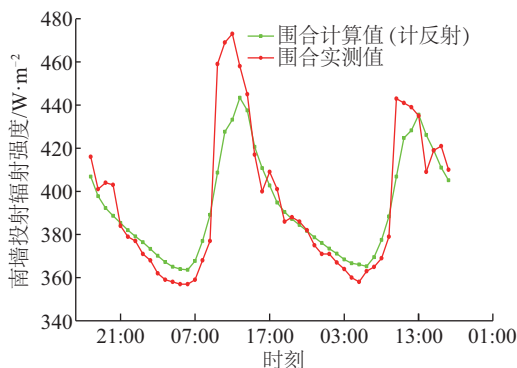


图10 哈尔滨南墙接收长波辐射量计算值与实测值

Fig. 10 Comparison of calculated and measured values of long wave radiation received on south wall in Harbin

3 结 论

针对岛礁密集的建筑围合布局,开展长波辐射计算模型的研究,以期为研究围合空间建筑长波散热技术优化奠定基础。构建以直接分量和反射分量构成的长波辐射计算公式。在直接长波辐射计算中,提出用球面三角学来计算不同围合形式建筑空间内各个表面间的视野因子,以简化空间关系的计算。采用基尔霍夫电流定律计算多个表面的反射辐射,采用网络法推导不同围合面的反射情况。通过三亚、哈尔滨两地的长波辐射强度测试工作,验证模型计算的正确性,证明其可用于估算建筑围合空间长波辐射强度。

[参考文献]

- [1] 周 伟. 推进南海整体性开发的现实思考[J]. 社会主义研究, 2012, (3): 127—131.
- [1] Zhou Wei. Realistic thinking on promoting the overall development of the South China Sea [J]. Socialism Studies, 2012, (3): 127—131
- [2] 刘加平. 建筑物理(第四版)[M]. 北京: 建筑工业出版社, 2009, 105—106.
- [2] Liu Jiaping. Architecture physics (Fourth Edition) [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009, 105—106.
- [3] 柳艳菊, 闫俊岳, 宋艳玲. 近50年南海西沙地区的气候变化特征研究[J]. 地理科学, 2008, 28(6): 804—808.
- [3] Liu Yanju, Yan Junyue, Song Yanling. Features of climate change over the Xisha island over the South China Sea in recent 50 years [J]. Scientia Geographica Sinica, 2008, 28(6): 804—808
- [4] Theodore L B, Adrienne S L, Frank P I et al. Fundamentals of heat transfer and mass trans and mass transfer (7th Edition) [M]. John Wiley & Sons, Inc., 2011, 872—880.
- [5] (以)埃维特·埃雷尔, 戴维·珀尔穆特, (澳)特里·威廉森[著], 叶齐茂, 倪晓辉[译]. 城市小气候——建筑之间的空间设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014, 172—178.
- [5] Evyatar E, David P, Terry W. Urban Microclimate: Designing the spaces between buildings [M]. Ye Qimao, Ni Xiaohui. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014, 172—178.

- [6] Yang Xinyan, Li Yuguo. The impact of building density and building height heterogeneity on average urban albedo and street surface temperature [J]. *Building and Environment*, 2015, 90: 146—156.
- [7] Sun Yuming, Godfried A. Urban heat island effect on energy application studies of office buildings [J]. *Energy and Buildings*, 2014, 77: 171—179.
- [8] Wen Chih Yung, Juan Yu Hsuan, Yang An Shik. Enhancement of city breathability with half open spaces in ideal urban street canyons [J]. *Building and Environment*, 2017, 112(1): 322—336.
- [9] 刘加平. 城市环境物理 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011, 27—28.
- [9] Liu Jiaping. *Urban environment physics* [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011, 27—28.
- [10] 章熙民. 传热学(第五版) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007, 247—252.
- [10] Zhang Ximin. *Heat transfer theory (5th Edition)* [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007, 247—252.
- [11] Smithsonian. *Smithsonian meteorological tables* [S]. Washington: Smithsonian Institution, 1984.

MODEL FOR LONGWAVE IRRADIATION BETWEEN DENSE BUILDINGS IN ISLANDS

Liu Dalong, Zhao Huihui, Liu Jiaping

(*School of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China*)

Abstract: In the South China Sea region, the weather always like summer around year with small temperature and humidity fluctuations so that the thermal radiation is the main source for building heat gains. In order to study the longwave radiation cooling intensity upon surface of the building and how enclosed buildings influence on the South China Sea's islands, the computational model of longwave irradiation consisting of direct component and reflection component was established. The angular factor in traditional calculation of radiation heat transfer was replaced by the view factor such as SVF, WVF and FVF, and Kirchhoff's current law was used to calculate the reflective radiation. The effectivity of the model was verified using the measured data obtained in different areas, which lays the foundation for the subsequent study of longwave radiation cooling.

Keywords: urban thermal environment; buildings-climate control; environmental testing; radiative transfer; numerical models