

风驱雨与湿热耦合作用下的地面目标表面温度计算模型

苏新迪^{1,2}, 韩玉阁^{1,2*}, 任登凤^{1,2}

(1. 南京理工大学 能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094;

2. 南京理工大学 电子设备热控制工信部重点实验室, 江苏 南京 210094)

摘要: 天气环境变幻莫测, 阴雨天气更是不可避免, 研究地面目标表面热特征可以更好地服务于热红外探测与热红外制导, 提高目标定位的准确性。阴雨天气条件下地面目标表面降雨分布受降雨、风力影响; 地面背景受透水材料的水分吸收及蒸发带来的潜热影响, 致使地面目标表面的热特征具有不确定性。文中将空气流动模型、辐射换热模型、风驱雨模型和湿热耦合模型相结合, 在开源平台 Open FOAM 提出了一种集成考虑风驱雨与湿热耦合的地面目标表面温度计算模型, 研究阴雨天气条件下地面目标表面的热特征以及降雨强度和风向对目标表面温度特性的影响。结果表明: 利用该集成计算模型计算目标表面温度的模拟值与热电偶实测值变化趋势高度一致, 数值计算 24 h 各表面的平均绝对误差为 0.95 K; 存在降雨的时刻目标表面的温差较小, 受降雨与风向的影响, 目标的迎风面因降雨捕获率较高, 温度通常低于背风面温度; 降雨强度、风速风向发生改变均会影响目标表面降雨捕获率分布, 从而影响表面温度特征分布。研究表明该方法具有可靠性和较好的精确性, 可为阴雨天气条件下复杂地面目标的热特性分析提供方法支撑。

关键词: 雨; 地面目标; 风向; 降雨强度; 热特征

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230009

0 引言

面对复杂多变的天气条件下提高目标精准定位与识别这一难题, 利用红外探测技术与系统对目标进行精确探测、识别和追踪便凸显得尤为重要。现有对地面目标热特征及红外特征的研究大多都基于晴天条件^[1-2], 鲜有对阴雨天、雾天、雪天、结霜等天气条件下的研究。林群青^[3]考虑雨雾与表面间的吸附、蒸发、凝结、冲刷换热等传热传质过程, 将复杂的传热传质过程简化为目标表面均匀的对流换热系数, 建立了雨雾条件表面的对流换热模型, 评估了装甲车辆热辐射模型的可信度, 研制了装甲车辆红外辐射特性计算集成软件。而在阴雨天气条件下, 由于降雨与风速风向的共同作用, 地面目标表面的降雨分布存在不确定性, 地面背景为土壤或沥青等材料时存在着对空气中的水分及雨水的吸收与储存, 而水分蒸发又会带来

潜热影响, 这些因素势必都会影响地面目标温度分布, 从而影响目标表面热特征。

基于计算流体动力学的数值模型建立阴雨天气地面目标热模型, 可以利用实测数据计算流体域温度、湿度和风速的空间及时间的分布, 通过风驱雨模型计算降雨分布。风驱雨是利用降雨时刻的风速风向计算该时刻地面目标及背景表面降雨捕获率分布^[4], 在降雨发生的情况下, 通常还伴随着风的作用, 风驱雨 (Wind-Driven Rain, WDR) 是雨在下落过程中因受风力驱动影响而形成斜雨的一种自然现象^[5]。目前风驱雨数值模型备受国内外研究人员青睐, 且提出一系列数值模型^[6-7]。黄生洪等人^[8]提出基于欧拉多相流的方法, 将离散的雨相与风相看成共同的连续相, 通过质量守恒方程与动量守恒方程求解得到雨相轨迹, 大大提高计算效率而被广泛使用。袁安^[9]基于 Open FOAM 软件, 利用欧拉多相流模型数值计算了一个立

收稿日期: 2023-01-06; 修订日期: 2023-03-17

作者简介: 苏新迪, 女, 硕士生, 主要从事复杂天气条件下目标红外特性建模方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 韩玉阁, 男, 教授, 博士生导师, 博士, 长期从事传热传质方面、目标红外特性建模方面的研究。

方体建筑物的风驱雨情况。采用目前大多数有关于风驱雨的研究仅仅集中于风驱雨的特征量(如捕获率)大小总结风驱雨的分布规律,没能给出降雨对地面目标热特征分布的影响,这就需要将风驱雨与表面耦合计算进行结合,直观地给出地面目标及背景的温度分布。

近年来相继有学者给出了湿热性耦合模型 (HAM) 分析。Franke 等人^[10]着眼于城市材料与空气温度和湿度之间的湿热关系,给出了简化模型的方法,但完全忽略了蒸发冷却过程。Kubilay 等人^[11]将地面街道考虑为多孔材料,提出了简化多孔材料为均匀潜通量进行简化,给出了三维湿热耦合模型,仅考虑了润湿后街道温度湿度随时间变化。Vujovi S 等人^[12]利用了湿热耦合模型中地面吸水、保水性、反射率对地面温度分布产生的影响。

前人已经对风驱雨模型及湿热耦合模型进行研究与验证,文中将利用两种模型,并综合考虑空气温度、相对湿度、风速风向、太阳辐射、降雨等自然环境因素,提出一种阴雨天气条件下,考虑风驱雨与湿热耦合的地面目标表面温度的计算模型,结合外场试验结果对模型方法进行验证,并计算分析阴雨天气条件下降雨强度、风向对地面目标的热特征的影响。

1 阴雨天气条件下目标热特征分析方法

阴雨天气条件相比晴天天气条件,目标或背景的热边界上增加了由于降雨引起的一系列的传热传质方式。目标表面的热边界不仅包括太阳辐射、天空背景辐射、与空气的对流换热、自身辐射以及与地面的辐射换热,还包括了表面水分的潜热和显热换热;地面背景还包括了由于水分的径流引起的水分和热量的传输。图 1 为简单地面目标与地面背景在阴天及降雨天气条件下的热边界示意图。在阴雨天气条件下,风速风向、太阳辐射、降雨、浮力、空气温度和相对湿度都会影响三维空间内水分和热量的再分配,这就需要充分考虑外流场空气域内各种物理现象之间的相互作用,搭建集成计算模型。

图 2 为文中针对阴雨天气条件下地面目标热特征分析方法,所搭建的集成计算模型示意图。该模型结合了四个子模型: 1) 空气流动模型 (CFD), 该模型

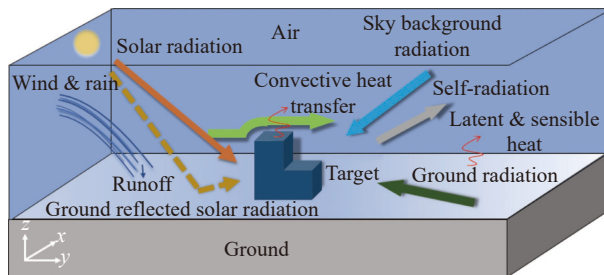


图 1 地面目标热边界示意图

Fig.1 Schematic diagram of ground target thermal boundary

用于求解风速、空气温度和相对湿度以及目标表面温度和地面背景表面的含水量,解决了空气域中的湍流、对流换热、热量和水分输送; 2) 辐射换热模型,该模型根据短波辐射和长波辐射传递方法建模,用于计算地面目标表面与背景表面辐射换热; 3) 风驱雨模型 (WDR), 该模型是利用欧拉多项模型计算降雨分布,给出了特定风速风向下降雨目标及背景的表面降雨捕获率; 4) 湿热耦合模型 (BE-HAM), 该模型耦合用于计算地面目标和背景表面与空气中的热量和水分传输,解决了表面的对流换热、雨水和蒸发引起的显热传递。下文将分别介绍四个子模型,并提出耦合策略。

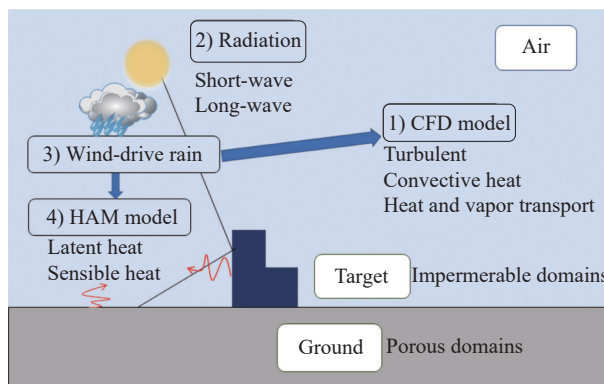


图 2 阴雨天气复杂天候搭建的集成计算模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of integrated calculation model built in overcast and rainy weather and complex weather

1.1 空气流动模型

通过求解稳态三维 RANS 方程,结合湍流的标准 $k-\epsilon$ 模型,计算空气域中湍流气流。除了 RANS 方程,为了计算空气域中的热量与水分的传输还需进一步添加热传输的能量方程和水分传输的方程^[5]。当空气为干空气时,质量、动量能量方程如下:

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_a u) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho_a u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_a u u) = -\nabla p_a - \nabla \cdot \tau + \rho_a g \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho_a h_a)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_a K_a)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_a h_a u) + \nabla \cdot (\rho_a K_a u) = -\nabla \cdot (q) \quad (3)$$

式中： ρ_a 为干空气密度； u 为风速； p_a 为压力； τ 为粘性应力张量； g 为重力加速度； $h_a = c_{p,a}(T - T_{ref})$ 为比焓，其中 $c_{p,a}$ 为比热容， T_{ref} 为参考温度； K_a 为比动能； q 为热流。

密度、压力和温度的理想气体定律为：

$$\rho_a = \frac{p_a}{R_a T} \quad (4)$$

R_a 为干燥空气的比气体常数。公式 (3) 中的热流根据傅里叶定律给出：

$$q = -\lambda_{eff} \nabla T = -\left(\lambda_a + \frac{c_{p,a} \mu_t}{Pr_t}\right) \nabla T \quad (5)$$

式中： λ_a 为干燥空气的层流热导率； Pr_t 为湍流普朗特数； μ_t 为湍流粘度。

考虑空气中的水蒸气，空气被视为干燥空气和水蒸气的稀释混合物（下标 v 这里指气相中的水），气相中的水分传输方程如下：

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_v u) = -\nabla \cdot g_{d,v} \quad (6)$$

式中： ρ_v 为水分密度； $g_{d,v}$ 为扩散质量通量，由菲克定律给出：

$$g_{d,v} = -\rho_a D_{va,eff} \nabla \frac{\rho_v}{\rho_a} \quad (7)$$

式中： $D_{va,eff}$ 为干燥空气和水蒸气之间的有效扩散系数。

空气中的湿度可以根据湿度比 ω 进行定义：

$$\omega = \frac{\rho_v}{\rho_a} = \frac{\rho_v}{R_v T} \frac{R_a T}{p_a} = \frac{R_a}{R_v} \frac{\phi p_{v,sat}}{p_a} \quad (8)$$

式中： ρ_v 为蒸汽分压； R_v 为蒸汽的比气体常数； $\phi = p_v / p_{v,sat}$ 为相对湿度； $p_{v,sat}$ 为饱和蒸汽压。所以湿度的质量守恒方程为：

$$\frac{\partial (\rho_a \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_a \omega u) = \nabla \cdot (\rho_a D_{va,eff} \nabla \omega) \quad (9)$$

1.2 辐射换热模型

总净辐射通量包括短波辐射通量和长波辐射通量。该模型考虑各表面之间及表面与天空之间的辐

射交换。短波辐射通量和长波辐射通量是根据辐射度方法用独立的线性方程组计算得到^[13]，如下所示：

$$q_{LW,k}^{out} = \varepsilon_k \sigma T_k^4 + \rho_k \sum_{j=1}^N F_{k-j} q_{LW,j}^{out} \quad (10)$$

$$q_{SW,k}^{out} = -(1 - \alpha_k) I_{sol} + \partial \alpha_k \sum_{j=1}^N F_{k-j} q_{SW,j}^{out} \quad (11)$$

式中： $q_{LW,k}^{out}$ 表示由于长波而离开表面 k 的能量； $q_{SW,k}^{out}$ 表示由于短波而离开表面 k 的能量； ε_k 表示表面 k 的发射率； σ 表示斯蒂芬-玻耳兹曼常数； T_k 表示表面 k 的温度； ρ_k 表示表面 k 的反射率； α_k 表示表面 k 的短波反照率， F_{k-j} 表示表面 k 与表面 j 之间的角系数； I_{sol} 表示入射到表面 k 的太阳总辐射；由直射分量 I_{dir} 和散射分量 I_{diff} 组成^[13]：

$$\begin{aligned} I_{sol} &= I_{dir} + I_{diff} \\ I_{dir} &= I_{DN} \cos \theta \\ I_{DN} &= A e^{\frac{B}{\sin \beta}} \\ I_{diff} &= C I_{DN} F_{ss} \end{aligned} \quad (12)$$

式中： I_{DN} 是入射到表面 k 的太阳法向辐射； θ 是入射太阳光线与接收表面之间的入射角； β 是太阳高度角； F_{ss} 表示表面与天空之间的角系数； A 、 B 和 C 是常数，取决于一年中的多少天。太阳入射的直射分量 I_{dir} 是通过光线追踪的方法进行计算，考虑了面与面之间的遮挡。

线性方程组 (10) 与 (11) 允许地面目标和天空之间无限次数的反射。天空温度是根据云层覆盖和环境温度计算的。空气被认为是一种非参与介质，即忽略了空气对辐射的吸收、散射和发射。天空温度是根据云量和环境温度 T_a 计算得到：

$$\varepsilon_c = (1 - 0.84c)(0.527 + 0.161e^{[8.45(1-273/T_a)]}) + 0.84c \quad (13)$$

$$T_{sky}^4 = 9.365574 \times 10^{-6} (1 - c) T_a^6 + T_a^4 c \varepsilon_c \quad (14)$$

式中： c 是云量； ε_c 是云的发射率。

1.3 风驱雨模型

利用欧拉多相 (EM) 模型计算风驱雨强度 (WDR 强度) 分布是最常被用来预测降雨分布的方法。在 EM 模型中的雨相和风相被视为一个连续相，基于三维稳定 RANS 方程和封闭湍流模型计算地面目标周围的稳态流场，而大小相似的雨滴将以类似的方式与

风场相互作用,可以根据每个雨滴的大小划分为不同的阶段,进而通过求解其独立的连续方程和动量方程^[14]来获得雨滴轨迹。

$$\frac{\partial \alpha_d}{\partial t} + \frac{\partial \alpha_d \overline{u_{d,j}}}{\partial x_j} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial \alpha_d \overline{u_{d,i}}}{\partial t} + \frac{\partial \alpha_d \overline{u_{d,i}}}{\partial x_j} + \frac{\partial \alpha_d \overline{u'_{d,i} u'_{d,j}}}{\partial x_j} = \alpha_d g_i + \alpha_d \frac{3\mu_a}{\rho_w d^2} \frac{C_d Re_R}{4} (\overline{u_i} - \overline{u_{d,i}}) \quad (16)$$

式中: α_d 是雨相 d 的相分数; d 表示特定粒径的雨滴; $u_{d,j}$ 表示雨相 d 中的雨滴速度分量; u_i 代表风的分量; ρ_w 代表雨滴密度; μ_a 是空气粘度; g_i 是重力加速度; C_d 是阻力系数; Re_R 是相对雷诺数。气流湍流运动导致雨滴的湍流运动,雨滴速度与风速之间存在响应关系^[14]。

$$C_i^2 = \frac{\overline{u'_{d,i} u'_{d,j}}}{\overline{u'_i u'_j}} = \frac{1}{1 + t_p/t_{fl}} \quad (17)$$

式中: C_i 为响应系数; t_p 表示粒子的弛豫时间; t_{fl} 表示拉格朗日流体的时间标度。与拉格朗日流体时间尺度相比,粒子越小弛豫时间越小,也就是越小的雨滴 C_i 的值越接近于 1。

基于计算的雨滴轨迹确定特定粒径雨滴的特定捕获比 η_d , 根据特定捕获比和水平雨滴大小分布计算每个面的捕获率^[14]。

$$\eta_d = \frac{R_{wdr}(d)}{R_h(d)} = \left| \frac{\alpha_d V_n(d)}{\alpha_{d,0} V_i(d)} \right| \quad (18)$$

$$\eta = \frac{R_{wdr}}{R_h} = \sum_{k=1}^N \eta_{dk} f_{Hk} \Delta d \quad (19)$$

式中: η_d 为特定捕获比; $R_{wdr}(d)$ 和 $R_h(d)$ 分别为待测区域表面特定粒径雨相的风驱雨强度和不受干扰处的水平降雨强度; V_n 为待测区域表面的雨相垂直撞击壁面的速度; V_i 为雨滴的竖直末端速度。公式 (19) $f_{Hk} \Delta d$ 为某相雨滴在水平面上占比; R_{wdr} 和 R_h 与 $R_{wdr}(d)$ 和 $R_h(d)$ 代表同样的含义只是它们代表所有粒径雨相考虑水平通量分数后的累加。

1.4 湿热耦合模型

地面背景(草地、砖石、沥青等)多为透水材料,地面目标(钢、铝等)多为不透考虑为不透水材料。在该研究中透水材料考虑为多孔介质,采用了连续

介质建模方法,其中不同的相在材料中的某一点上不单独区分,而是对多孔材料的宏观行为进行建模。假设透水表面可以全部吸收降雨不会产生积水,不透水表面不能吸收任何水分^[15]。透水表面的相比不透水表面增加了液体的渗透,由于多孔材料内吸收了水分热边界方程中增加水分蒸发与冷却所散失的能量。

$$g_{ext} = g_{wdr} + g_{conv} \quad (20)$$

$$q_{ext} = q_{conv} + q_{LW} + q_{SW} + q_{wdr} + q_{vap} \quad (21)$$

公式 (20) 为边界湿通量,式中: g_{ext} 为材料表面的水分通量; g_{wdr} 为材料表面雨水带来的质量通量; g_{conv} 为流入透水表面内部水蒸气交换的水分通量。公式 (21) 为边界热通量,式中: q_{ext} 为材料表面热通量, q_{conv} 为对流换热热量; q_{LW} 和 q_{SW} 分别为表面净长波与短波传热量; q_{wdr} 为雨水引起的显热; q_{vap} 为透水材料孔隙中水分的蒸发与冷却。

雨水质量通量,雨水引起的显热换热量,孔隙中蒸汽的蒸发与冷却引起的潜热和显热换热量为^[16]:

$$g_{wdr} = R_{wdr} \rho_l \quad (22)$$

$$q_{wdr} = c_l T_{wb} g_{wdr} \quad (23)$$

$$q_{vap} = (c_v T_s + L_v) g_{conv} \quad (24)$$

式中: ρ_l 为水的密度; T_{wb} 为湿球温度; c_l 和 c_v 分别为液体和水蒸气的热容; T_s 为材料表面温度; L_v 为汽化潜热。

1.5 求解器设置和耦合策略

使用 Open FOAM@6.0 作为 CFD 求解器,添加三个主要的附加组件: WDR 求解器、辐射模型、湿热耦合模型,图 3 为模型流程图。Open FOAM 是一个开源、隐式、隔离和双精度的有限体积求解器,利用求解器与计算模型一同对地面目标的热特征进行详细分析。

在阴天有降雨的天气条件下调用 WDR 模型,在阴天无降雨的天气条件下不需要调用 WDR 模型。以阴天有降雨的计算过程为例,首先利用 WDR 模型计算降雨捕获率,在 WDR 模型中每输入一个降雨强度 $R_i(\text{mm/h})$ 与风速矢量 $U(\text{m/s})$ 便会输出一组雨滴尺寸下的降雨捕获率。文中将雨滴粒径划分了 17 个雨相,雨滴粒径范围涵盖了 0.3~6 mm,具体的划分方法:

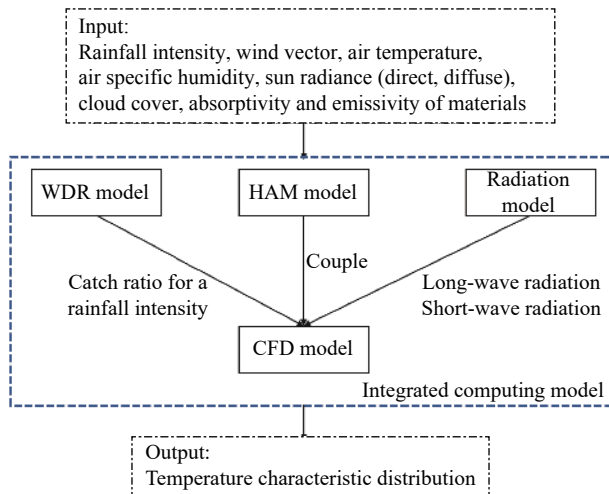


图 3 求解器流程图
Fig.3 Solver flowchart

粒径在 0.3~1 mm, 每 0.1 mm 步长划分一组; 粒径在 1~2 mm, 每 0.2 mm 步长划分一组; 粒径在 2~6 mm, 每 1 mm 步长划分一组, 将降雨事件每 10 min 划分一个步长, 假设 10 min 内的风速风向及降雨强度不发生变化, 风速为 10 min 内的平均风速, 风向为 10 min 开始时刻测量到的风向, 降雨强度为 10 min 内测得的降雨强度, 在 WDR 模型中每隔 10 min 步长输出一个 $(R_h, U_{10\text{min}})$ 计算组合的降雨捕获率。在这一步骤之后, 可以通过对计算出的捕获率值进行线性插值, 获得特定降雨事件的目标及背景表面上的捕获率分布, 其结果用作 CFD 计算中空气域的边界条件。

在 CFD 模型中求解稳定的流场, 并同时调用辐射换热模型与湿热耦合模型, 需要的输入条件为空气温度 (K)、空气比湿度 (kg/kg)、太阳直射辐射强度 (W/m^2)、太阳散射辐射强度 (W/m^2)、风速矢量 (m/s)、云量 (%), 利用压力关联方程的半隐式方法 (SIMPLE) 进行压力-速度耦合。对于控制方程的对流项和粘性项, 都使用了二阶离散格式。利用辐射换热模型加载太阳辐射与热辐射, 固体域与空气域的交界处利用湿热耦合模型计算温度分布, 湿热耦合模型要考虑来自空气域的水分传输、热量传输还要考虑来自固体域的水分传输、热量传输, 利用边界湿通量等式与边界热通量等式共同确定固体域温度分布。当所有缩放残差达到以下值时, 空气子域中的迭代终止: 所有速度分量、湍流项和连续性为 10^{-5} , 热量和水分均为 10^{-4} 。当连续迭代之间绝对值的变化小于含水量

$0.01 \text{ kg}/\text{m}^3$ 和温度 0.01 K 的阈值时, 固体子域中的 Picard 迭代方案终止。最后利用计算出的热通量与湿通量, 进行湿热耦合计算输出地面目标表面的温度分布特性。

2 典型阴雨天气条件下地面目标热特征计算及模型的试验验证

为了验证上述集成模型在典型阴雨天气下的有效性, 设计了 CUBI 模型目标在阴雨天气下的测温试验, 利用热电偶测量不同天气下的目标典型测温点温度变化; 基于目标的形状尺寸、材料、背景等建立 CUBI 目标的计算模型, 通过对比计算温度和实测温度来验证该方法的有效性, 并利用该集成模型研究典型阴雨天气条件下风速风向及降雨对表面温度产生影响。

2.1 CUBI 模型试验

试验采用不可透水材料的标准 CUBI 目标模型为地面目标, 放置于多孔可透水的水泥地砖地面背景之上。图 4(a) 为试验示意图, 图中标准 CUBI 模型高、长、宽分别为 0.6、0.6、0.3 m, 材料为 Q235 钢, 表 1 列出了相关材料的热物性参数。试验地点为南京理工大学能动院天台 (东经 $118^{\circ}85'$, 北纬 $32^{\circ}03'$), 试验地点无遮挡, CUBI 模型附近对风速风向、降雨均无遮挡。试验时间为 2022 年 6 月 28 日, 降雨天气。试验利用 K 型热电偶与 Agilent 34972 A 型号数据采集仪采集目标表面的典型测点温度。试验期间的气象数据采用气象站和太阳辐射观测站采集, 气象站配备了叶轮式风速仪, 最高可测量参考风速 20 m/s 及参考风向, 水平降雨强度由带水平孔的翻斗式雨量计进行测量, 误差精度为 0.1 mm/h。

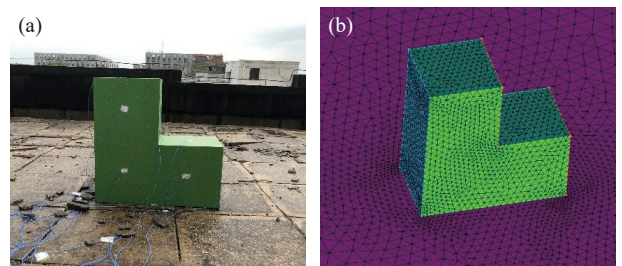


图 4 (a) CUBI 模型试验图; (b) CUBI 物理模型及网格划分
Fig.4 (a) CUBI model test diagram; (b) Physical model and meshing of CUBI

表 1 相关材料的热物性参数

Tab.1 Physical parameters of materials

Materials	Density $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Specific heat $c/\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	Thermal conductivity $\lambda/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	Emissivity ϵ	Albedo β
Q235 steel	7850	540	44	0.72	0.88
Porous concrete	2200	966	1.28	0.92	0.6

2.2 基于阴雨天气计算模型的模拟计算

CUBI 目标计算条件根据试验情况给出, 图 4(b) 为利用 ICFM CFD 软件对模型计算时使用的 CUBI 体模型进行的网格划分的示意图, 利用第 1 章介绍的计算模型求解地面目标及背景的温度场分布。图 5 为 2022 年 6 月 28 日试验期间测得的气象参数数据

示意图, 其中测得的风速为标量数据, 需结合 CUBI 模型的朝向与风向角度, 将风速处理成矢量数据, 进而输入到计算模型, 风速转换公式见表 2。当天 9 点 20 分至 11 点 40 分发生降雨事件, 假设降雨强度每隔 10 min 记录一次, 当天的降雨强度变化如图 5(b) 所示。

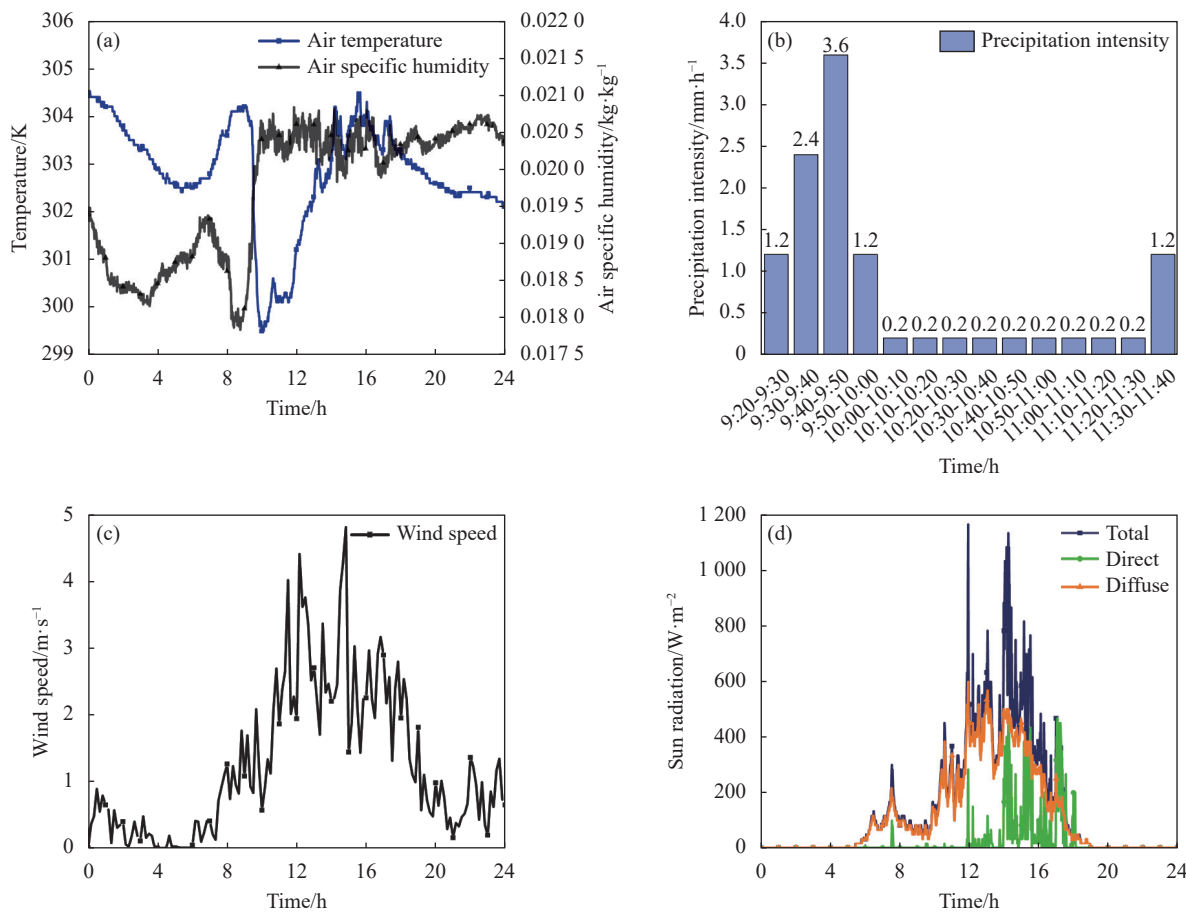


图 5 2022 年 6 月 28 日阴天气象参数。(a) 空气温度、比湿度; (b) 降雨强度; (c) 风速; (d) 太阳辐射

Fig.5 Meteorological parameters on June 28, 2022. (a) Air temperature, air specific humidity; (b) Precipitation intensity; (c) Wind speed; (d) Sun radiance

表 2 风速转换公式

Tab.2 Wind speed conversion formula

Wind direction $\theta/(^\circ)$	Conversion formula
$0 \leq \theta < 90$	$(-U \cos(\theta - 90^\circ), -U \sin(\theta - 90^\circ), 0)$
$90 \leq \theta < 180$	$(-U \cos(\theta - 90^\circ), U \sin(\theta - 90^\circ), 0)$
$180 \leq \theta < 270$	$(U \sin(\theta - 180^\circ), U \cos(\theta - 180^\circ), 0)$
$270 \leq \theta < 360$	$(U \cos(\theta - 270^\circ), -U \sin(\theta - 270^\circ), 0)$

2.3 模型的计算结果及验证分析

为了确定搭建的阴雨天地面目标集成模型计算的真实性与精确性,可以通过对比 CUBI 模型每个方位面上典型点的计算结果与试验测量数据之间的误差,计算平均绝对误差。图 6 为试验中在 CUBI 模型的摆放方位及在 CUBI 模型上选取的典型测温点,同样的模拟计算时设置了相同位置的监测点。

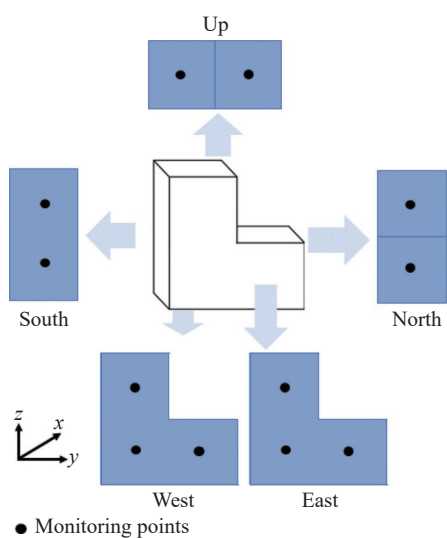


图 6 CUBI 模型监测点设置示意图

Fig.6 Schematic diagram of CUBI model monitoring point setting

试验当天降雨出现在上午 9 点 20 分至 11 点 40 分。降雨阶段需根据风驱雨模型计算降雨强度分布,每 10 min 计算一组地面目标及背景的降雨捕获率分布情况。图 7 为西南风向下降雨时刻地物降雨捕获率分布图与试验拍摄 CUBI 模型降雨分布图,该时刻降雨强度为 1.2 mm/h,风向风速为西南风 1.5 m/s。从图 7(a)可以看出,CUBI 模型顶面的降雨捕获率最高,CUBI 模型的立面中,迎风面降雨捕获率最高,这

与图 7(b)的试验拍摄结果相符,试验拍摄到的 CUBI 模型外部特征也可以观测到模型的东面基本没有降雨捕获。

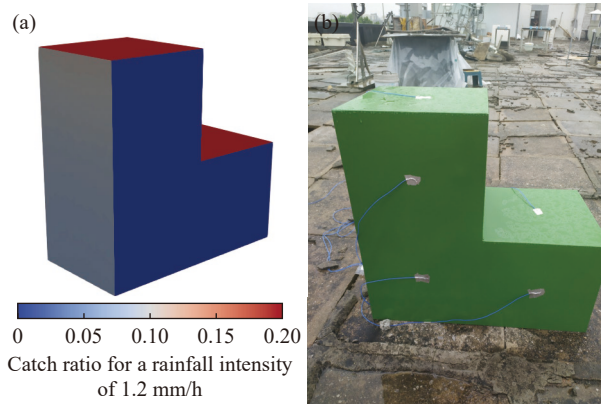


图 7 (a) 降雨强度 1.2 mm/h 的 CUBI 模型降雨捕获率分布图; (b) 试验拍摄 CUBI 模型降雨分布图

Fig.7 (a) The distribution of catch ratio for CUBI model rainfall intensity of 1.2 mm/h; (b) Test photography of CUBI model rainfall distribution map

将上述气象条件与风驱雨模型的计算结果用于 CUBI 模型的典型阴雨天气下表面温度分布的模拟计算,图 8 为 10 点整降雨时刻 CUBI 模型的降雨时温度分布图,图 8(a)为背风面视角下 CUBI 模型温度分布,图 8(b)为迎风面视角下 CUBI 模型温度分布。可以看出,降雨过程中,受降雨影响,CUBI 模型各表面温度相近最大温差小于 2 K。在降雨与西南风的共同作用下,迎风面西面与南面温度相对较低,背风面北面与东面温度相对较高。

图 9(a)~图 9(d)分别为东、南、西、上表面在 6 月 28 日阴雨天气全天的计算与实测监测点温度变化特征和误差图。可以看出,在所选时间内各表面的计

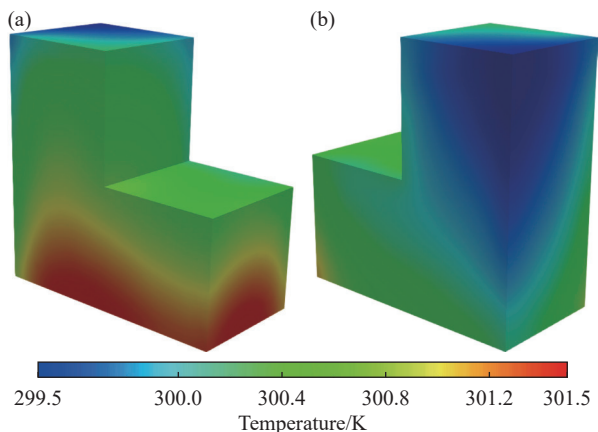


图 8 (a) 背风面视角下 CUBI 模型温度分布; (b) 迎风面视角下 CUBI 模型温度分布

Fig.8 (a) Temperature distribution of CUBI model from leeward view; (b) Temperature distribution of CUBI model from the view of windward side

算温度值与热电偶实测温度值变化趋势趋于一致, 夜间 0 点至 5 点表面温度下降; 9 点至 12 点受降雨

影响各表面均出现温度骤降与全天最低温度; 东面与北面因降雨阶段为背风面后半段降雨强度减小回温最为明显, 表明计算结果具有参考性与可信性。其次当平均绝对误差 MAE 的值越小, 说明模拟值越接近实测值, 模型的计算精度越高, 具体计算公式为:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|}{n} \quad (25)$$

式中: n 为全天的典型测温点实测温度个数; x_i 为模型计算值; y_i 为实测值。

经过计算得出温度点全天的 MAE 值为 0.95 K, 由此证明了计算结果与真实值误差较小。同时说明, 文中提出的阴雨天气条件下地面目标表面温度计算模型的计算结果, 在具有真实性的基础上有较高的精确性。

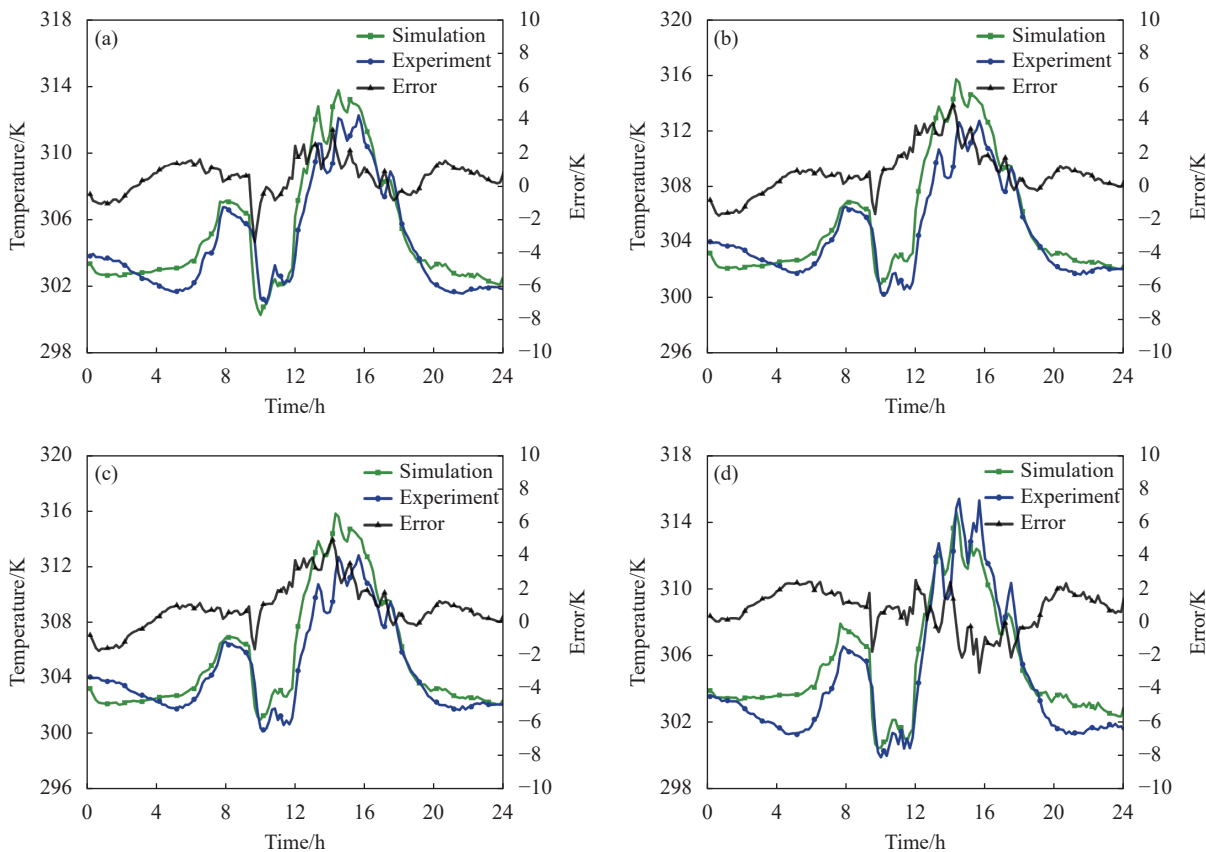


图 9 各表面计算温度与实测温度变化特性及其误差图。(a) 东面温度对比图; (b) 南面温度对比图; (c) 西面温度对比图; (d) 上面温度对比图
Fig.9 Variation characteristics of calculated and measured temperatures on each surface and their errors. (a) Comparison diagram of east temperature; (b) Comparison diagram of south temperature; (c) Comparison diagram of west temperature; (d) Comparison diagram of up temperature

3 典型阴雨天气条件下不同因素对地面目标热特征的影响分析

根据上文提出并验证的阴雨天气条件下,地面目标表面温度集成计算模型,计算研究降雨强度、风速风向对地面目标表面温度分布的影响。空气温度、空气比湿度、太阳辐射均采用试验实测值,分别改变降雨阶段降雨强度大小与降雨阶段风向,计算并对比分析 CUBI 模型表面的热特征分布。

3.1 阴雨天气不同降雨强度对地面目标热特征的影响分析

改变降雨阶段的降雨强度大小至 2 倍、3 倍,重新计算 9 点 20 分至 11 点 40 分内地面目标与背景的降雨捕获率。图 10 为 9 点 20 分西南风向 1.5 m/s,降雨强度分别为 1.2 mm/h、2.4 mm/h 和 3.6 mm/h 地面目标顶面的降雨捕获率分布图像。从图中可以看出,随着降雨强度的增加,地面目标表面的降雨捕获率升高,且由于西南风的影响,CUBI 模型上面的降雨分布趋于东北角。

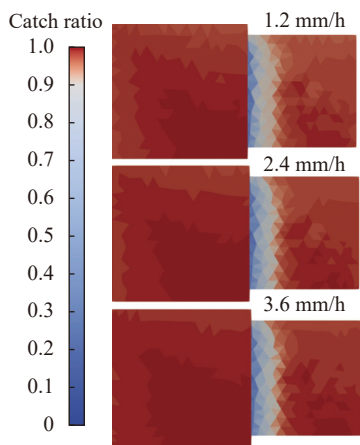


图 10 降雨强度分别为 1.2 mm/h、2.4 mm/h 和 3.6 mm/h CUBI 模型顶面的降雨捕获率分布图

Fig.10 Rainfall capture rate of CUBI model top surface with rainfall intensity of 1.2 mm/h, 2.4 mm/h and 3.6 mm/h respectively

图 11 为 9 点至 12 点降雨阶段 CUBI 模型上面监测点温度对比图,从图中可以看出在不改变其他气象条件的情况下,仅加降雨强度的大小,上表面温度降低的速率越快,温度相对越低。在未改变其他气象条件与环境因素的情况下,增大降雨强度,地面目标表

面由于降雨引起的显热增大了,从而加快了表面温度降低速率,降低了表面温度。

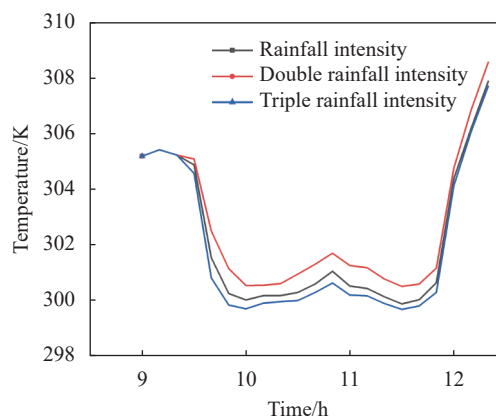


图 11 降雨阶段 CUBI 模型上面监测点温度对比图

Fig.11 Temperature comparison diagram of monitoring points on CUBI model in rainfall stage

3.2 阴天天气不同风速风向对地面目标热特征的影响分析

不改变降雨强度与风速大小,将风向角加 90°后根据表 2 中的风速矢量公式重新处理风速。因风向发生改变,从而影响了风驱雨地物表面的降雨捕获率分布,重新计算 9 点 20 分至 11 点 40 分内地面目标与背景的降雨捕获率。图 12 为 9 点 20 分风速为 1.5 m/s、降雨强度为 1.2 mm/h、风向分别为 231°与 321°目标

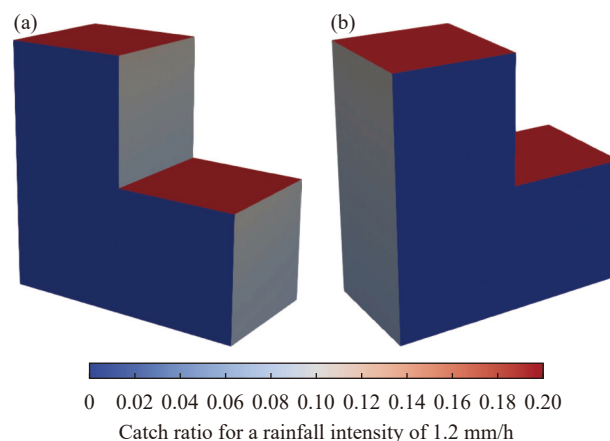


图 12 (a) 西南风向下 CUBI 模型的降雨捕获率分布图; (b) 西北风向下 CUBI 模型的降雨捕获率分布图

Fig.12 (a) Rainfall capture rate distribution of CUBI model in southwest wind direction; (b) Rainfall capture rate distribution of CUBI model in northwest wind direction

表面降雨捕获率分布图,从图中可知由于风向不同,231°时为西南风 CUBI 模型立面中的主要迎风面为西面与南面、321°时主要迎风面为西面和北面,降雨捕获率分布受风速风向的影响,在 CUBI 模型顶面降雨捕获率最高,立面中迎风面降雨捕获率最高,背风面几乎没有降雨分布。

图 13 为改变风向角前后计算得到的 24 h CUBI 模型各面监测点的温度变化特性图,图 12(a)为西南

风向下各表面温度变化,图 12(b)为西北风向下各表面温度变化。可以看出,在西南风向下北面温度整体高于其他面,西北风向下南面温度整体高于其他面。图 13(b) 12 点~18 点中可以明显看出,在西北风的风向下西面温度仍然较高,这是因为该时段受太阳直射的影响,CUBI 模型西面虽然在迎风面对流换热增大,但太阳直射的辐射换热增强。

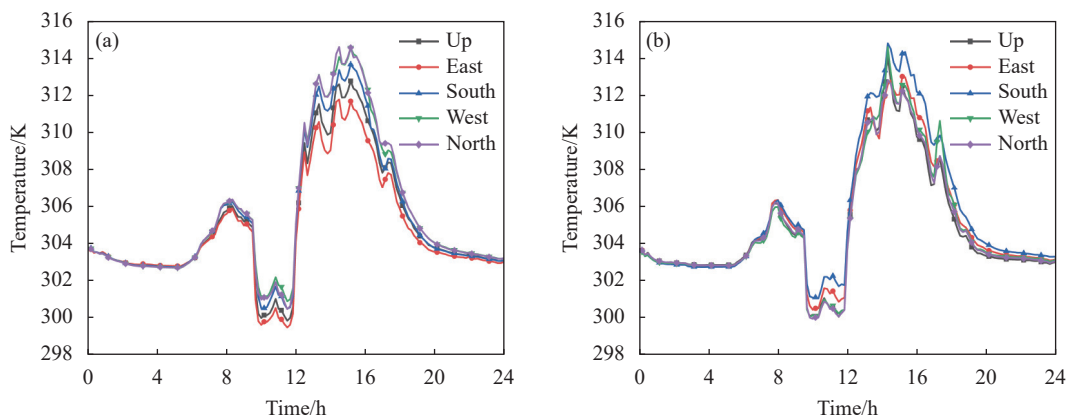


图 13 (a) 西南风为主时 CUBI 模型 24 h 各表面温度特征; (b) 西北风为主时 CUBI 模型 24 h 各表面温度特征

Fig.13 (a) 24 h surface temperature characteristics of CUBI model when southwest wind is dominant; (b) 24 h surface temperature characteristics of CUBI model when northwest wind is dominant

图 14 为北面温度对比图,可以进一步看出风向对地面目标表面温度分布的影响。当风向由西北风转为西南风时,北面温度降低,且在夜间风速较低的时段温差并不明显;在 8 点~20 点由于风速增大对流

换热影响增大,北面因为风向的调整温度降幅明显。

4 结论

文中针对阴雨天气条件,给出了一种考虑风驱雨与湿热耦合的地面目标表面温度的计算模型,该方法采用了一个完全集成的三维数值模型来研究地面目标及背景的温度分布特性,充分考虑了水分、热量传输。该计算模型能够提供速度、温度和湿度的详细空间分布,从而可以研究地面目标在复杂天气条件下的受太阳辐射、空气湿度、风速风向等影响的温度分布特性。主要得到的结论如下:

1) 基于地面目标热特征分析方法,利用阴雨天气下监测的气象数据对 CUBI 模型仿真计算,计算结果和 CUBI 模型试验的实测数据进行对比,证明了文中提出的集成阴雨天气下地面目标表面温度计算模型的可靠性与精确性;

2) 利用该集成计算模型分析了在其他气象条件不变的情况下,不同降雨强度与不同风向对地面目标

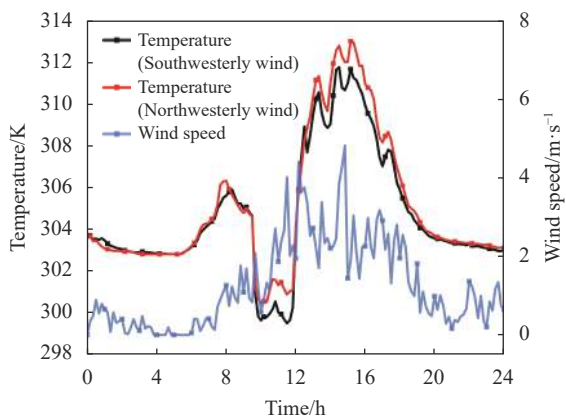


图 14 西南风向、西北风向下 CUBI 模型的北面的温度特性及风速分布图

Fig.14 Temperature characteristics and wind speed distribution in the north of CUBI model in southwest and northwest wind directions

表面温度分布造成的影响。随着降雨强度增强地面目标表面降雨捕获率升高、温度下降。当风向发生改变时迎风面随之发生改变,迎风面的温度通常会低于背风面,但也会受其他气象条件的影响;

由此可见,文中提出的阴雨天气下地面目标表面温度计算模型在还原了真实阴雨天地面目标表面温度变化的同时,还具有较高的精确性,并进一步讨论了降雨强度及风向对 CUBI 模型表面降雨捕获率、温度分布造成的影响,可为地面目标在阴雨天气情况下的热特征分析提供方法支撑。文中讨论阴雨天气条件地面目标表面热特征分布时,讨论的是可透水地面,假设地面对雨水完全吸收,未考虑地面积水这一情况的影响,未来可基于模型对地面多孔模型进行改进,进而应用于任意地面背景下阴雨天气地面目标热特征的研究。另外,文中研究的地面目标较为简单计算量较小,未来可以将风驱雨模型(WDR)提炼成经验公式,简化计算模型应用至大场景的仿真计算。

参考文献:

- [1] Sui Juncheng, Ren Dengfeng, Han Yuge. Inversion and model validation method of missing parameters in infrared modeling of ground targets [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(10): 20220033. (in Chinese)
- [2] Chen Jincheng, Han Yuge. Simplified analysis method of the surface temperature of complex structure camouflage screen with large surface [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(3): 0304002. (in Chinese)
- [3] Lin Qunqing. Research on the effects of droplets and particles on thermal radiative characteristics of vehicles and credibility evaluation method for thermal radiation model[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [4] Soury F, Ge H, Stathopoulos T. Wind-driven rain on buildings: Accuracy of the ISO semi-empirical model [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2021, 212(13): 104606.
- [5] Kubilay A, Derome D, Blocken B, et al. Numerical simulations of wind-driven rain on an array of low-rise cubic buildings and validation by field measurements [J]. *Building and Environment*, 2014, 81: 283-295.
- [6] Chen Chao, Zhang Huibo, Qian Tianda. Semi-empirical model method analysis of wind-driven rain intensity on building walls [J]. *Building Energy Efficiency*, 2021, 49(10): 95-102.
- [7] Blocken B, Carmeliet J. Overview of three state-of-the-art wind-driven rain assessment models and comparison based on model theory [J]. *Building & Environment*, 2010, 45(3): 691-703.
- [8] Huang S H, Li Q S. Numerical simulations of wind-driven rain on building envelopes based on Eulerian multiphase model [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2010, 98(12): 843-857.
- [9] Yuan An. Numerical calculation and analysis of wind driving rain based on euler multiphase flow model [J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2022(5): 70-73. (in Chinese)
- [10] Franke J, Hellsten A, Schlunzen K H, et al. The COST 732 best practice guideline for CFD simulation of flows in the urban environment: a summary [J]. *Int J of Environment and Pollution*, 2011, 44(1-4): 419-427.
- [11] Kubilay A, Derome D, Carmeliet J. Coupled numerical simulations of cooling potential due to evaporation in a street canyon and an urban public square [J]. *Journal of Physics Conference Series*, 2019, 1343: 012016.
- [12] Vujovic Svetlana, Haddad Bechara, Karaky Hamzé, et al. Urban heat island: causes, consequences, and mitigation measures with emphasis on reflective and permeable pavements [J]. *Civil Eng*, 2021, 2(2): 459-484.
- [13] Kubilay A, Derome D, Carmeliet J. Coupling of physical phenomena in urban microclimate: A model integrating air flow, wind-driven rain, radiation and transport in building materials [J]. *Urban Climate*, 2018, 24: 398-418.
- [14] Kubilay A, Derome D, Blocken B, et al. CFD simulation and validation of wind-driven rain on a building facade with an Eulerian multiphase model [J]. *Building & Environment*, 2013, 61(61): 69-81.
- [15] Defraeye T, Blocken B, Carmeliet J. An adjusted temperature wall function for turbulent forced convective heat transfer for bluff bodies in the atmospheric boundary layer [J]. *Building & Environment*, 2011, 46(11): 2130-2141.
- [16] Blocken B J E, Roels S, Carmeliet J E. A combined CFD-HAM approach for wind-driven rain on building facades [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2007, 95(7): 585-607.

Calculation model of surface temperature of ground target under the coupling effect of wind-driven rain and moisture and heat

Su Xindi^{1,2}, Han Yuge^{1,2*}, Ren Dengfeng^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. MIIT Key Laboratory of Thermal Control of Electronic Equipment, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract:

Objective The weather environment is unpredictable, and rainy weather is even more inevitable. Studying the surface thermal characteristics of ground targets can better serve thermal infrared detection and guidance, improving the accuracy of target positioning. Most of the existing research on the thermal and infrared characteristics of ground targets is based on sunny conditions, while few studies have been conducted on the surface temperature characteristics of ground targets under cloudy and rainy conditions. The distribution of rainfall on the surface of ground targets under overcast and rainy weather conditions is affected by rainfall and wind force; The ground background is affected by the latent heat caused by moisture absorption and evaporation of permeable materials, resulting in uncertainty in the thermal characteristics of the ground target surface. Therefore, this paper proposes a calculation model for surface temperature of ground targets that integrates wind-driven rain and moisture heat coupling, and studies the thermal characteristics of surface targets under overcast and rainy weather conditions, as well as the effects of rainfall intensity and wind direction on surface temperature characteristics of targets.

Methods In Open FOAM, an open source platform, combining air flow model, radiation heat transfer model, wind-driven rain model, and moisture heat coupling model, a ground target surface temperature calculation model integrating wind-driven rain and moisture heat coupling is established (Fig.2), and the call and coupling process is given (Fig.3). The reliability and accuracy of the integrated model were verified using CUBI model experiments. The calculated temperature curve was similar to the temperature variation trend of the characteristic points on the surface of the CUBI model in the experiment (Fig.9), and the average absolute error was 0.95 K. The calculation model is used to study the thermal characteristics of the surface of a ground target under overcast and rainy weather conditions, as well as the effects of rainfall intensity and wind direction on the temperature characteristics of the target surface (Fig.11, Fig.13).

Results and Discussions The simulated value of the target surface temperature calculated by the integrated calculation model has a highly consistent trend with the measured value of the thermocouple, and the average absolute error of each surface during the 24-hour numerical calculation is 0.95 K; At the time of the rainfall, the temperature difference on the target surface is small, and due to the impact of rainfall and wind direction, the temperature on the windward side of the target is usually lower than the temperature on the leeward side due to the high rainfall capture rate; Changes in rainfall intensity, wind speed, and direction will affect the distribution of rainfall capture rate on the target surface (Fig.10, Fig.12), thereby affecting the distribution of surface temperature characteristics.

Conclusions In this study, a calculation model of surface temperature of ground targets considering the coupling of wind-driven rain and moisture heat is presented for overcast and rainy weather conditions. This method uses a fully integrated three-dimensional numerical model to study the temperature distribution characteristics of ground targets and backgrounds, fully considering water and heat transfer. The calculation model can provide detailed spatial distributions of velocity, temperature, and humidity, which can be used to study the temperature distribution characteristics of ground targets affected by solar radiation, air humidity, wind speed, and wind direction under complex weather conditions. The model has reliability and good accuracy, and can provide methodological support for the thermal characteristics analysis of complex ground targets under cloudy and rainy weather conditions.

Key words: rain; ground target; wind direction; rainfall intensity; thermal characteristic