

积水条件下城市路网性能恢复决策优化

贾洪飞¹, 庄博¹, 罗清玉¹, 刘玲², 黄秋阳¹

(1. 吉林大学 交通学院, 长春 130022; 2. 长春建筑学院 土木工程学院, 长春 130607)

摘要:为探究积水条件下最优的路网恢复决策方案,考虑了积水深度的动态变化,构建了城市三车道路段元胞自动机仿真模型。通过改进车辆换道与位置更新规则,描述积水条件下的驾驶行为变化,并仿真积水对路段通行能力的影响;分析积水导致车辆在部分路段通行受限时交通流在路网上的分布状态变化,建立以累积路网性能指标最大化为目标的恢复决策优化模型,并采用遗传算法与 Frank-Wolfe 算法相结合的方式求解。选取 Sioux-Falls 网络对模型进行验证,结果表明:求解模型得到的恢复策略对路网性能的恢复效果优于传统基于出度和基于流量的经验恢复策略,提升程度分别为 3.84%、2.02%;路段恢复顺序不仅要考虑路段的受损程度,还要考虑路网的交通需求分布;恢复资源的增加会显著缩短路网的恢复时间,但边际效用逐渐降低。

关键词:交通运输规划与管理;城市道路网络;积水;元胞自动机;决策优化;双层规划模型

中图分类号:U491 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2025)09-2969-09

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240473

Decision optimization of urban road network performance restoration under waterlogged conditions

JIA Hong-fei¹, ZHUANG Bo¹, LUO Qing-yu¹, LIU Ling², HUANG Qiu-yang¹

(1. College of Transportation, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. College of Civil Engineering, Changchun University of Architecture and Civil Engineering, Changchun 130607, China)

Abstract: To explore the optimal road network restoration decision scheme under waterlogged conditions, a urban three-lane road sections cellular automaton simulation model was constructed considering the dynamic change of waterlogged depth. By improving the vehicle lane change and position update rules, the changes of driving behavior under waterlogged conditions were described, and the impact of waterlogged on road sections traffic capacity was simulated. The changes in the distribution of traffic flow on the road network caused by water accumulation leading to restricted passage of vehicles on certain road sections was analyzed, a recovery decision optimization model aiming at maximizing the cumulative road network performance index was established, and the genetic algorithm and Frank-Wolfe algorithm were combined to solve the problem. Sioux-Falls network was selected to verify the model, the results show that the recovery strategy obtained by the provided model has better effect on road network performance restoration than the empirical recovery strategies based on output and flow, and the improvement degree is 3.84% and

收稿日期: 2024-04-30.

基金项目: 吉林省科技发展规划项目(20230203127SF); 国家自然科学基金项目(52302434).

作者简介: 贾洪飞(1969-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 交通网络分析. E-mail: jiahf@jlu.edu.cn

通信作者: 罗清玉(1981-), 女, 教授, 博士. 研究方向: 交通系统规划. E-mail: luqy@jlu.edu.cn

2.02%, respectively. The road section restoration order should not only consider the damage degree of the road section, but also consider the traffic demand distribution of the road network. The increase of recovery resources will significantly reduce the recovery time of the road network, but the marginal utility will gradually decrease.

Key words: transportation planning and management; urban road network; waterlogged; cellular automaton; decision optimization; bi-level programming model

0 引言

近年来,暴雨内涝频繁发生,作为城市生命线的道路,其运输能力与通行效率极易受积水的影响。虽然积水会随着时间的推移逐渐消散,但是较长的恢复时间会导致路网性能退化,甚至有可能造成生命财产损失。同时,由于各路段的地形地势与排水能力有所不同,积水情况也存在差异。因此,分析不同积水条件对城市交通流的影响,探究积水条件下城市路网性能恢复决策,对城市应急指挥和资源分配具有重要的现实意义。

现有相关研究多采用水文模拟与交通仿真相结合的方式。Su等^[1]利用暴雨洪水管理模型(Storm water management model, SWMM)和心理问卷,预估内涝影响下车辆的行驶速度,并仿真分析不同内涝情况对交通状况的影响。Yin等^[2]利用二维水动力模型,模拟了不同强降雨情景对道路的影响及带来的风险。Zhang等^[3]考虑降雨模式构建了城市路网脆弱性评价框架,发现单峰雨型产生的积水对路网影响最大。陈海然^[4]构建了研究区域的内涝模型与交通仿真模型,提出海绵化改造方法以提高路网的整体服务水平。

路网性能恢复决策的研究主要聚焦于路段选择和时序选择。Liao等^[5]提出了预算和时间约束下的韧性优化模型,特别考虑了不同灾前预防策略对灾后恢复策略的影响。Zhao等^[6]构建了双目标双层优化框架以确定最优的交通基础设施灾后重建方案。Wu等^[7]建立了元胞自动机模型,模拟路段部分受损对交通的影响,结合桥梁失效概率确定桥梁修复优先级。Pan等^[8]基于小区容量提出了全新的路网性能指标与韧性指标,以及考虑恢复顺序的恢复策略。

由文献梳理可知,现有关于积水对交通影响的分析,通常基于水文模型模拟积水的生成与消散,由于模型精度限制,无法量化积水在不同车道产生时对整个路段交通流影响的差异性;所在路

网性能恢复决策研究中,多数假定场景为受损路段完全中断,且仅依靠人工分配资源对路网进行恢复,未考虑路网中各路段受损程度的差异。因此,为更好地探究积水条件下城市路网性能的最优恢复决策,本文首先以城市三车道道路为研究对象,建立积水条件下交通流仿真模型,解析不同积水条件下路段受损情况的异质性;其次,提出路网性能恢复决策模型,通过对比不同恢复策略下路网性能的变化,制定更科学、更合理的恢复决策方案,给决策者提供理论依据。

1 积水条件下城市三车道仿真模型

1.1 模型基本假设与参数说明

选取城市三车道路段作为研究对象,采用元胞自动机构建仿真道路环境。当路段出现积水点时,仅当积水宽度和深度达到一定程度时,车辆通行才会在该积水位置受到影响。为了简化模型,本文仅考虑积水对车辆通行产生影响的情况,定义积水在元胞自动机中的表现形式为:当积水占据某元胞时,只需根据该元胞内的积水深度 h_{water} 判断车辆能否通过;若能通过,则计算车辆通过该元胞的速度。上述判断依据与计算方法参考杜磊等^[9]的研究,采用双曲正切函数表达车辆通过积水位置时的速度衰减,如下所示:

$$v_{\text{water}} = \frac{v_0}{2} \tanh\left(\frac{-x+a}{b}\right) + \frac{v_0}{2} \quad (1)$$

式中: v_{water} 为车辆在积水占据元胞时的行驶速度; v_0 为设计车速; x 为积水深度; a 为临界积水深度; b 为弹性衰减系数,其取值越小,速度衰减越快。

将路段划分为3个区域。①积水区域:该区域内车辆能否通行取决于积水深度,若积水在同一车道连续占据 n 个元胞,则积水区域长度 $l_{\text{water}} = n$ 。②感知积水区域:该区域位于积水区域上游,当车辆距离积水 l_a 时,车辆感知到积水存在并减速通过该区域。为保证车辆顺利通过积水位置,定义在感知积水区域内的最大速度 $v_{\text{max}}^a = \min\{v_{\text{water}}, v_{\text{brake}}\}$,

其中 v_{brake} 为最大制动速度。③正常行驶区域:该区域内车辆正常行驶或换道。

在模型仿真过程中,忽略车辆的横向速度,每个时刻车辆均先根据换道条件判断是否换道至相邻车道,再进行位置更新。

其他相关参数定义如下: d_i^m 为车辆 i 与本车道及相邻车道前、后车的距离,其中 $m \in \{0, 1, 2\}$ 分别为本车道、相邻左车道、相邻右

车道, $n \in \{f, b\}$ 分别为前方与后方; v_i 为车辆 i 的当前速度, v_{i+1} 为车辆 i 前车的速度; v_i' 为更新后的车辆速度; v_{max} 为车辆的最大车速; x_i 为车辆 i 的位置; x_{i+1} 为车辆 i 前车的位置; x_{water} 为积水区域的位置; l_{road} 为路段长度; l 为车辆长度。车道1、车道2与车道3分别为路段的内侧车道、中间车道与外侧车道,路段区域划分及参数说明如图1所示。

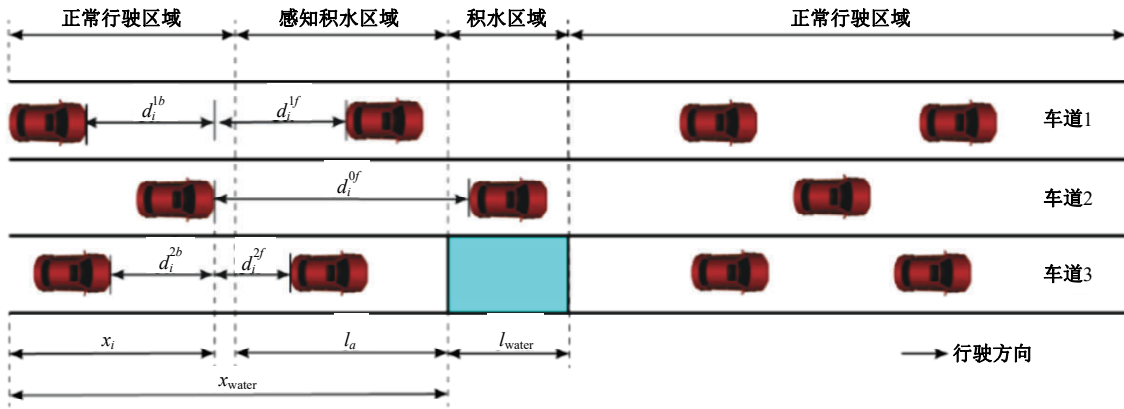


图1 路段区域划分及参数说明

Fig. 1 Road section area division and parameter description

受路拱横坡度的影响,路面积水通常先淹没外侧车道的概率最大。因此,主要讨论积水淹没车道3与积水淹没车道2和3两种情况,分别将这两种情况称为积水占据单车道与积水占据两车道。

1.2 模型换道规则

为了避免车辆换道时与后方车辆发生碰撞,同时保证良好的道路利用效率,车辆在正常行驶区域行驶时,参考STCA-II模型^[10]的换道规则:车道1或车道3的车辆满足换道条件,或车道2仅有一条相邻车道满足换道条件,则直接进行换道;车道2的车辆同时满足向左与向右的换道条件,则优先向左换道。向左换道与向右换道的条件类似,此处仅说明向左换道的条件。向左换道需同时满足式(2)~式(4),其中式(2)表示当前车道无法满足车辆的期望速度;式(3)表示相邻左车道的驾驶条件更好;式(4)表示车辆的换道需要满足安全条件。当换道条件满足时,车辆的换道行为在模型中体现为车辆所在车道的改变。

$$d_i^{of} < \min(v_i + 1, v_{\text{max}}) \quad (2)$$

$$d_i^{lf} > d_i^{of} \quad (3)$$

$$d_i^{lb} - [v_{\text{max}} - \min(v_i + 1, v_{\text{max}})] > 1 \quad (4)$$

当车辆在感知积水区域时,需根据积水条件调整换道条件。当积水未达到临界积水深度时

(即 $h_{\text{water}} < h_{\text{max}}$), 车辆可减速通过积水位置,且车辆会产生换道意愿。假定车辆在感知到积水时的初始换道概率为 P_0 , 与本车道和相邻车道的积水长度差、深度差及速度衰减有关,如下所示:

$$P_0 = \frac{v_{\text{max}} - v_{\text{water}}}{v_{\text{max}}} \cdot \frac{h_{\text{water}} - h_{\text{other}}}{h_{\text{water}}} \cdot \frac{l_{\text{water}} - l_{\text{other}}}{l_{\text{water}}} \quad (5)$$

式中: h_{other} 和 l_{other} 分别为相邻左侧车道的积水深度与积水占据的元胞个数。

不满足换道条件,则车辆继续前行,其换道意愿逐渐减小,此时假设换道概率 P_{change} 随积水距离的减小而线性减小,如下所示:

$$P_{\text{change}} = \begin{cases} P_0, & x_i = x_{\text{water}} - l_a \\ \frac{x_{\text{water}} + l_{\text{water}} - x_i}{l_a + l_{\text{water}}} \cdot P_0, & x_{\text{water}} - l_a < x_i < x_{\text{water}} + l_{\text{water}} \\ 0, & x_i = x_{\text{water}} + l_{\text{water}} \end{cases} \quad (6)$$

若存在换道意愿,则有:

$$\text{rand}(0, 1) < P_{\text{change}} \quad (7)$$

在同时满足式(2)(3)(4)(7)时,车辆将执行换道行为。

当积水达到临界积水深度时(即 $h_{\text{water}} > h_{\text{max}}$), 车辆将无法通过减速驶过积水位置,只能选择换道。假设此时的换道概率随积水距离的减小而线

性增加,如下所示:

$$P_{\text{change}} = \begin{cases} 0, & x_i = x_{\text{water}} - l_a \\ \frac{x_i + l_a - x_{\text{water}}}{l_a}, & x_{\text{water}} - l_a < x_i < x_{\text{water}} \\ 1, & x_i = x_{\text{water}} \end{cases} \quad (8)$$

此种情况下,当同时满足式(4)(车辆在感知积水区域满足安全条件)、式(7)(存在换道意愿)及式(9)(与相邻左车道的前车距离 >0)时,车辆将执行换道行为。

$$d_i^f > 0 \quad (9)$$

若积水所在车道的车辆始终未找到合适的安全距离进行换道,当行驶到积水位置附近时,不会在积水前一直排队,而会执行强制换道行为。车辆强制换道示意图如图2所示。

当积水仅占据单车道时,定义R_lead与M_lead分别为距离积水位置最近的车道3与车道2的头车(见图2(a)),同时定义二元变量lanechangeflag。若该变量为1,则允许换道;若该变量为0,则不允许换道。当R_lead的车头到达积水前一个元胞位置时(见图2(b)),lanechangeflag=1,车辆将执行强制换道行为(见图2(c))。强制换道的要求相对宽松,车辆仅需满足式(9)(与相邻左车道前车距离 >0)和式(10)(与相邻左车道后车距离 ≥ 1)。当强制换道结束后,需重新定义R_lead,并将lanechangeflag赋值为0;直到M_lead车头驶出感知积水区域,再将lanechangeflag赋值为1,并重新定义M_lead(见图2(d))。通过这种方式,实现拉链合流。

$$d_i^{lb} \geq 1 \quad (10)$$

当积水占据两车道且超过临界积水深度时,车道2上的车辆向车道1强制换道的过程与上述强制换道过程类似;而车辆从车道3向车道1换道需要进行2次,为了避免该类车辆在临近积水区域时换道加剧感知积水区域的拥堵,设置该类车辆在积水位置前 $5l$ 提前强制换道至车道2。当车辆满足换道条件时,车辆的换道行为在模型中体现为车辆所在车道的改变。

1.3 模型位置更新规则

由于NaSch模型具有良好的拓展性,且能模拟真实的交通现象,因此在正常行驶区域采用NaSch规则^[11]进行位置更新,而在感知积水区域与积水区域,则需对NaSch规则中的加速与减速规则进行改进。

加速规则:当 $h_{\text{water}} < h_{\text{max}}$ 时,车辆在感知积水

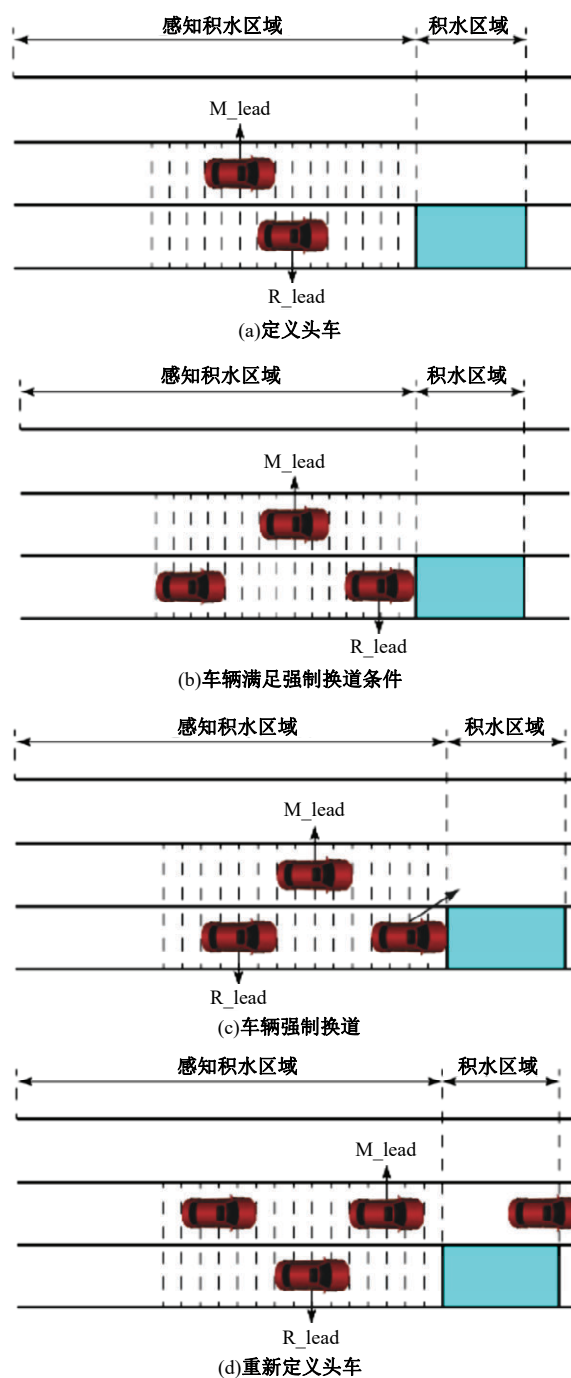


图2 车辆强制换道示意图

Fig. 2 Schematic diagram of vehicle forced lane change
区域与积水区域的最大速度分别为 v_{max}^a 和 v_{water} ,对应的加速规则分别如式(11)(12)所示;当 $h_{\text{water}} \geq h_{\text{max}}$ 时,强制换道后的车辆以本车道下游第1辆车的速度作为新速度进行更新,其加速规则如式(13)所示。

$$v_i' = \min \{v_i + 1, v_{\text{max}}^a\} \quad (11)$$

$$v_i' = \min \{v_i + 1, v_{\text{water}}\} \quad (12)$$

$$v_i' = v_{i+1} \quad (13)$$

减速规则:当 $h_{\text{water}} \geq h_{\text{max}}$ 时,车辆的减速过程

需要考虑车辆与积水的距离,对应的减速规则如式(14)、式(15)所示。同时,对于M_lead当,lan-exchange-flag=1时,还需为R_lead车辆的强制换道留出一定空间,其减速规则如式(16)所示。

$$v'_i = \min \{v_i, d_i, x_{\text{water}} - x_i\} \quad (14)$$

$$d_i = x_{i+1} - x_i - l \quad (15)$$

$$v'_i = \min \{v_i, d_i, x_{\text{water}} - x_i - l - 1\} \quad (16)$$

2 积水条件下路网性能恢复决策模型

2.1 路网性能指标

积水条件下路网性能的变化过程如图3所示。图3中, t_0 、 t_1 、 t_s 、 t_n 分别为积水开始时刻、积水深度增加至临界积水深度时刻、积水消散至临界积水深度时刻、积水完全消散时刻。在 t_0 时刻之前,路网上未出现积水,路网性能保持在稳定状态 Q_0 ;在 t_0 时刻,路网上多条路段出现积水点,随着积水深度的增加,路网的性能逐渐降低;在 t_1 时刻,积水深度达到临界积水深度,路网性能降到最低值 Q_1 ;在 $t_1 \sim t_s$ 时间段,积水开始消散,但是积水深度仍大于临界积水深度,路网性能保持在稳定状态 Q_1 ;从 t_s 时刻开始,积水深度小于临界积水深度且逐渐减小,路网性能逐渐恢复并于 t_n 时刻恢复到初始状态 Q_0 。

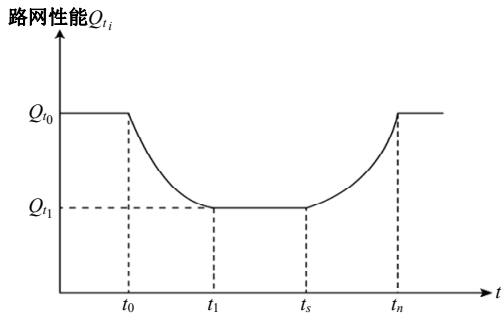


图3 积水条件下路网性能的变化曲线

Fig. 3 Road network performance change curve

参考Nagurney等^[12]提出的网络效率指标,本文提出了路网在 t_i 时刻的路网性能指标 Q_{t_i} ,如下所示:

$$Q_{t_i} = \frac{E_{t_i}}{E_{t_0}} = \frac{\sum_{w \in W} \frac{q_w}{\psi_{w,t_i}}}{\sum_{w \in W} \frac{q_w}{\psi_{w,t_0}}} \quad (17)$$

式中: q_w 为OD对 w 间的交通需求; ψ_w 为OD对 w 间的阻抗,通常将OD对路径上各路段的出行时

间求和作为OD对间的阻抗; W 为OD对数。

为了更好地对比一段时间内自然恢复与人工恢复带来的路网性能变化差异,进一步提出累积路网性能评价指标 R_{t_i} ,如下所示:

$$R_{t_i} = \frac{\int_{t_1}^{t_i} Q_{t_i} dt}{(t_i - t_1) Q_{t_0}}, \quad t_1 \leq t_i \leq t_e \quad (18)$$

2.2 路网性能恢复决策模型

模型假设:①当路段积水达到临界积水深度时,才考虑人工恢复策略;②当路段 a 上出现积水后,若不采取人工恢复,则路段通行能力将随积水的自然消散出现动态变化;若采取人工恢复,则路段通行能力在恢复后达到最初水平且保持不变;③当采取人工恢复措施时,恢复时长与路段受积水影响的车道数成正比;④在路段受积水扰动影响的阶段,路网间的交通需求保持不变。

建立双层规划模型求解恢复决策方案。上层模型的目标是累积路网性能最大化,决策变量为 x_{e,t_i} ,用于确定路段 e 是否采取人工恢复及对应的恢复时刻,即给出路段的恢复时序方案;下层模型是一个带时间序列的用户均衡配流模型,通过不同时刻用户的出行路径选择,得到各时刻的路网性能。上层模型将 x_{e,t_i} 输入下层模型,以便下层模型计算各时刻的路网性能 Q_{t_i} ;下层模型将各时刻的路网性能指标值反馈至上层模型,以便上层模型计算累积路网性能指标值。

上层模型为:

$$\max R_{t_n} \quad (19)$$

$$x_{e,t_i} = \{0, 1\}, \quad \forall e \in E^*, t_i \in T \quad (20)$$

$$\tau_e = m v_e \quad (21)$$

$$\sum_{i=1}^{\max} x_{e,t_i} = \{0, 1\}, \quad \forall e \in E^* \quad (22)$$

$$t_i x_{e,t_i} + \tau_e < t_e, \quad \forall e \in E^*, t_i \in T \quad (23)$$

$$\eta_{t_i} = \sum_{e \in E^*} \sum_{j=1}^i \|t_i \geq x_{e,t_j} t_j\| \|t_i \leq x_{e,t_j} (t_j + \tau_e)\| \leq \eta_{\max} \quad (24)$$

式中: E^* 为受损路段的集合; x_{e,t_i} 为0或1的变量,只有在 t_i 时刻选择对路段 e 开始人工恢复时, $x_{e,t_i}=1$,其余时刻均为0; $T=\{t_1, t_2, \dots, t_s, \dots, t_n\}$ 为时间序列,其中 t_1 为路段积水达到临界积水深度的时刻, t_n 为受损车道数最多的路段自然恢复到原本通行能力的时刻; τ_e 为路段 e 人工恢复持续的时间; m 为路段 e 的受损车道数; v_e 为人工恢复单车

道积水花费的时间; t_e 为路段 e 自然恢复到原本通行能力的时刻; $\eta_{\max}$ 为恢复资源的数目,即最多可同时进行人工恢复的路段数目。

式(19)为上层模型的目标函数,含义为累积路网性能最大化;式(20)表示 x_{e,t_i} 为二元变量;式(21)表示路段 e 的恢复时间与路段受损车道数成正比;式(22)表示路段 e 仅可采取一次人工恢复或不采取人工恢复;式(23)表示路段 e 的人工恢复结束时刻需早于其自然恢复结束时刻;式(24)表示任意时刻同时进行人工恢复的路段数目不能超过恢复资源的数目,其中 $\|\cdot\|$ 为判断函数,若“ $\cdot$ ”为真,则 $\|\cdot\|=1$,若“ $\cdot$ ”为假,则 $\|\cdot\|=0$ 。

下层模型为:

$$\min C_{t_i} = \sum_{e \in E} \int_0^{f_{e,t_i}} Z_{e,t_i}(f) df, t_i \in T \quad (25)$$

$$\sum_{p \in P_{w,t_i}} f_{w,p,t_i} = q_w, \quad \forall w \in W \quad (26)$$

$$f_{e,t_i} = \sum_{w \in W} \sum_{p \in P_{w,t_i}} f_{w,p,t_i} \delta_{e,p,w,t_i}, \quad \forall e \in E \quad (27)$$

$$f_{w,p,t_i} \geq 0, \quad \forall p \in P_{w,t_i}, \quad \forall w \in W \quad (28)$$

$$c_{e,t_i} = c_{e,t_0}, e \in (E - E^*) \quad (29)$$

$$u_{e,t_i} = \left\| \sum_{j=1}^i x_{e,t_j} = 1 \right\|, \quad \forall e \in E^* \quad (30)$$

$$s_{e,t_i} = \left\| t_i > \sum_{j=1}^i x_{e,t_j} (t_j + \tau_e) \right\| u_{e,t_i}, \quad \forall e \in E^* \quad (31)$$

$$c_{e,t_i} = \begin{cases} c_{e,t_0} \theta_{t_i}, & \text{若 } s_{e,t_i} = 0, \forall e \in E^* \\ c_{e,t_0}, & \text{若 } s_{e,t_i} = 1, \forall e \in E^* \end{cases} \quad (32)$$

$$Z_{e,t_i} = z_e \left[1 + \partial \left(\frac{f_{e,t_i}}{c_{e,t_i}} \right)^\beta \right] \quad (33)$$

式中: W 为OD对 w 的集合; P_{w,t_i} 为 t 时刻OD对 w 之间所有路径 p 的集合; q_w 为OD对 w 之间的交通需求; f_{w,p,t_i} 为 t 时刻OD对 w 在路径 p 上的流量; δ_{e,p,w,t_i} 为二元变量,若 t 时刻OD对 w 的路径 p 经过路段 e ,则 $\delta_{e,p,w,t_i}=1$,否则 $\delta_{e,p,w,t_i}=0$; f_{e,t_i} 为 t 时刻路段 e 的流量; Z_{e,t_i} 为 t 时刻路段 e 的行程时间阻抗; c_{e,t_i} 为 t 时刻路段 e 的通行能力; u_{e,t_i} 为二元变量,若 t 时刻路段 e 进行人工恢复,则 $u_{e,t_i}=1$,否则 $u_{e,t_i}=0$; s_{e,t_i} 为二元变量,若 t 时刻对路段 e 的人工恢复已经结束,则 $s_{e,t_i}=1$,否则 $s_{e,t_i}=0$; θ_{t_i} 为积水影响系数; z_e 为路段的初始阻抗; ∂, β 为待标定参数。

式(25)为下层模型的目标函数,旨在使 t 时刻路网总出行时间最短;式(26)为路网均衡约

束;式(27)用于计算路网交通量;式(28)为非负约束;式(29)表示未受积水影响的路段,其通行能力保持不变;式(30)~式(32)表示对于所有受积水影响的路段,若对路段 e 采取的人工恢复已经结束,则路段 e 将恢复到最初的通行能力,否则,路段 e 的通行能力始终受到积水的影响;式(33)为阻抗函数,用于计算在 t 时刻路段 e 的通行能力。

2.3 求解算法

上层模型本质上属于并行机调度问题,采用遗传算法求解;通过构建向量组染色体表征各受损路段是否恢复以及恢复时序,并完成初始种群生成、染色体解码、遗传算子设计和适应度函数构建^[13]。下层的用户均衡分配模型则采取Frank-Wolfe算法求解。双层规划模型求解算法流程如图4所示。

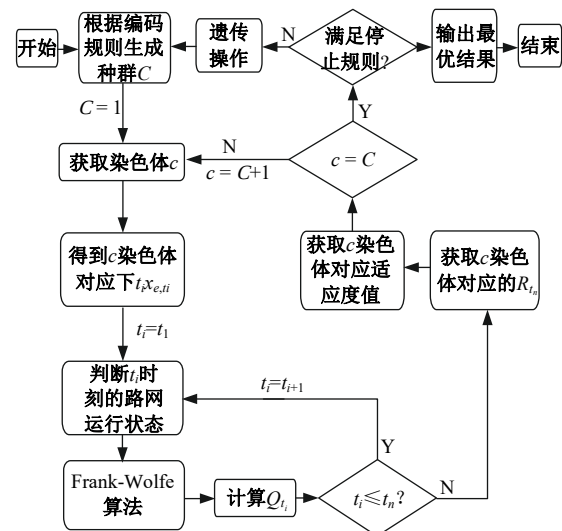


图4 双层规划模型求解算法流程

Fig. 4 Two-layer programming model solving algorithm flow

3 算例分析

3.1 研究区域选取

选取经典的Sioux-Falls路网进行算例分析,该路网包括24个节点、38条路段、552个OD点对,如图5所示,其中圆圈代表节点,圆圈内的数字为节点编号;红色带箭头的线段为单向三车道路段,蓝色带箭头的线段为单向两车道路段,黑色带箭头的线段为单向单车道路段,线段旁的数字为路段同一方向车道组的编号。

3.2 模型及算法参数设置

在积水条件下城市三车道仿真模型中,定义

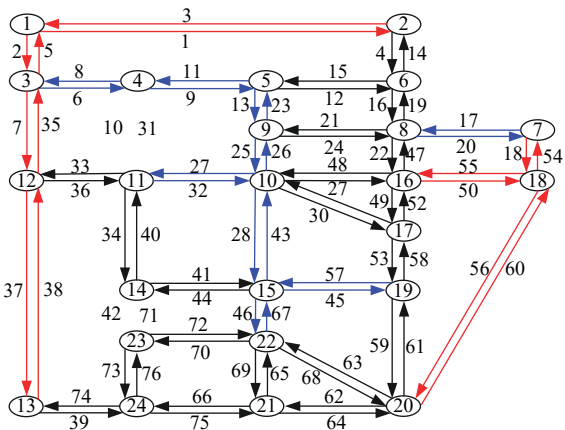


图5 Sioux-Falls路网结构

Fig. 5 Sioux-Falls road network structure

单个元胞长度为1 m,宽度为车道宽度,且一辆小汽车占据4个元胞。考虑到城市道路车辆平均行驶速度通常为40~60 km/h,而强降雨后路面湿滑,大多数车辆的行驶速度会减小,因此设定车辆的最大速度 $v_{\max}=9$ 元胞(即32.4 km/h), $l_a=100$ 元胞。通常车辆的制动速度可达3~4 m/s,故设定 $v_{\text{brake}}=4$ 元胞。设置路段总长度为1 000 m,仿真时长为2 000 s。从第900 s加载积水,持续时间为400 s。设定积水距离起点为600 m,即 $x_{\text{water}}=600$ m,积水连续占据的元胞数 $l_{\text{water}}=5$ 元胞。为简化模型,假设积水占据的各元胞状态一致,最大积水深度为20 cm,且积水深度随时间的推移以二次函数的形式从0升至最大积水深度再将至0。

在积水条件下路网性能恢复决策模型中,假设有8个积水点,分别出现在车道组3、13、17、18、19、32、37、60,各车道组的车道数与受积水影响的车道数如表1所示。设定人工恢复单车道积水花费的时间 $v_e=3$,恢复资源数目 $\eta_{\max}=2$,BPR函数中 $\theta=0.15$ 、 $\beta=4$,仿真步长为20 s。在遗传算法中,初始种群数量设为200,迭代次数为150,交叉概率为0.8,位变异概率为0.05,交叉变异概率为0.05;在Frank-Wolfe算法中,误差收敛值为0.01。迭代曲线如图6所示。

表 1 各车道组的车道数与受积水影响的车道数

Table 1 Number of lanes in lane group and number of lanes affected by waterlogging

参数	车道组编号							
	3	13	17	18	19	32	37	60
车道数	3	2	2	3	1	2	3	3
受积水影响车道数	2	1	1	1	1	2	3	3

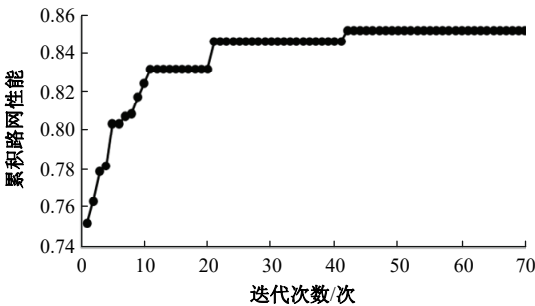


图 6 迭代曲线图

Fig. 6 Iterative graph

3.3 积水条件下路网恢复决策分析

选取三车道路段积水占据单车道、三车道路段积水占据两车道、两车道路段积水占据单车道与路段所有车道被积水占据共4种研究场景。应用积水条件下城市三车道仿真模型,以第800 s为分析起始时刻,取步长为20 s,可得积水影响系数 θ_i 的变化情况,如图7所示。

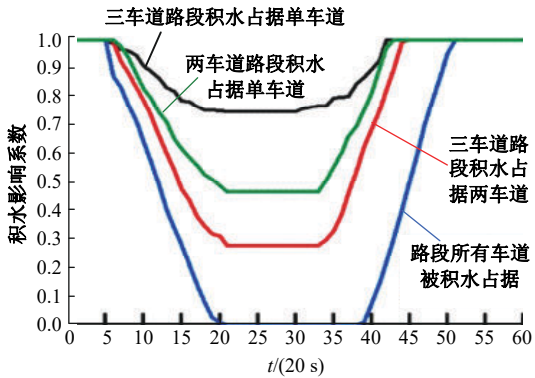


图 7 不同积水条件下积水影响系数的变化

Fig. 7 Change of water logged influence coefficient unber different water logged condition

由图7可知,随着积水深度的增加,路段通行能力降低。虽然积水占据的车道数不同,但影响曲线的变化趋势一致,各路段在第6 s时通行能力开始下降,并于同一时刻达到最小值,最大受损程度分别为25%、72%、53%与100%。各路段恢复到最初通行能力的时间不同,这是因为随着受损车道数的增加,积水位置前的排队车辆数增多。

本文模型得到的恢复策略被称为目标恢复策略,采用甘特图展示目标恢复策略的恢复顺序,如图8所示。当恢复资源数目为2时,在路段19、32、60、37恢复之后,后续路段的优先恢复顺序为13、18、17,而剩余路段按受损程度排序为3、13、17、18。这说明目标恢复策略不能仅以路段的受损程度为依据,还需结合交通需求分布及路径选择。

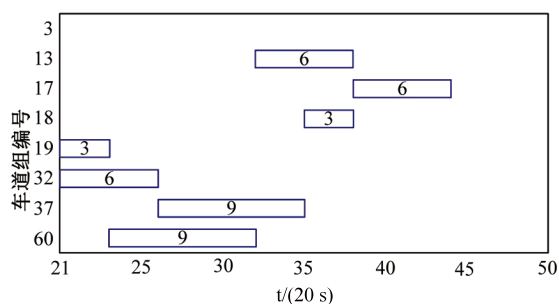


图 8 目标恢复策略受损路段恢复顺序

Fig. 8 Target recovery strategy for recovery sequence of damaged sections

选取无恢复策略、基于路段出度的偏好恢复策略、基于路段流量的偏好恢复策略与目标恢复策略进行对比,分析不同恢复策略下各时刻路网性能指标(见图9)及累积路网性能指标(见图10)的变化。可以发现,目标恢复策略优于其他2种偏好恢复策略,提升程度分别为3.84%、2.02%;同时,目标恢复策略的恢复效果并非在每个时刻都最优(基于路段流量的偏好恢复策略在第30~35 s的效果优于目标恢复策略),但在整个恢复过程中,能最大限度减少路网性能的损失。

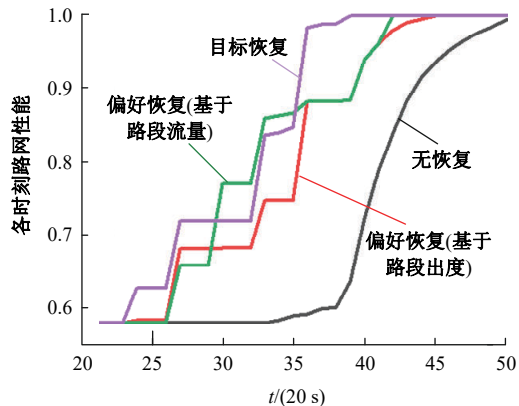


图 9 各时刻路网性能变化曲线

Fig. 9 Road network performance change curves at different

进一步对恢复资源这一参数进行敏感性分析,图11和图12分别为不同恢复资源下各时刻路网性能与累积路网性能变化趋势。

如图11所示,随着恢复资源的增加,无恢复资源、单恢复资源、两恢复资源、三恢复资源条件下,路网接近恢复到初始性能(即路网性能指标超过0.99)的时刻分别为第50、43、39、33 s。这说明增加恢复资源能够显著缩短路网性能恢复时间。如图12所示,随着恢复资源的增加,累积路网性能提高,每增加一个恢复资源,累积路网性能分别

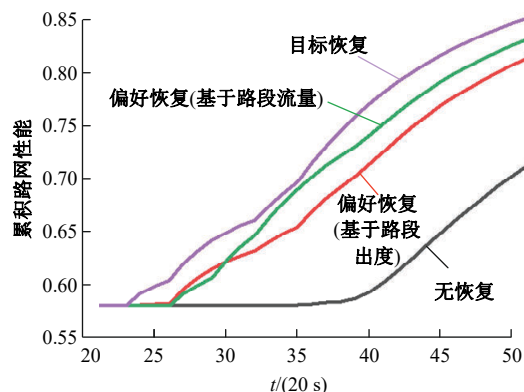


图 10 累积路网性能变化曲线

Fig. 10 Cumulative road network performance change curves

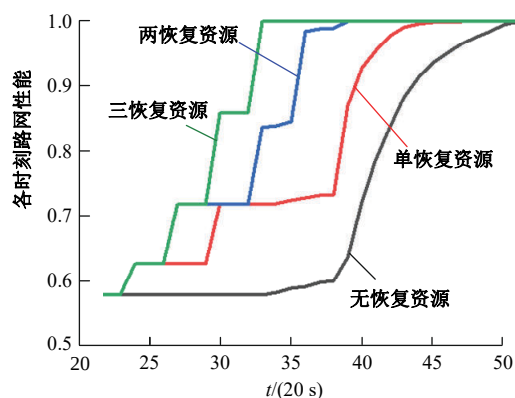


图 11 不同恢复资源下各时刻路网性能变化曲线

Fig. 11 Road network performance under change curves at different moments different recovery resources

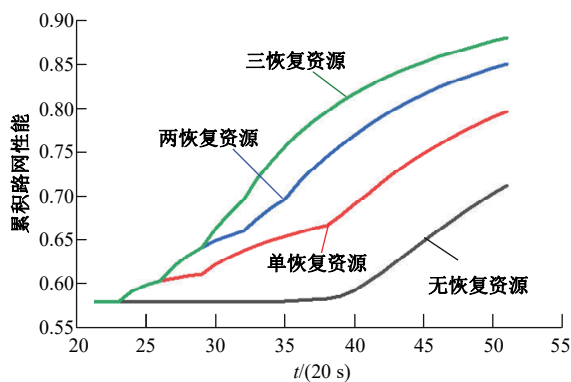


图 12 不同恢复资源下累积路网性能变化曲线

Fig. 12 Cumulative road network performance change curves under different recovery resources

增加0.085、0.054、0.030,且增加值随着恢复资源的增加而减小。这说明,增加恢复资源可以有效减少路网性能损失,提升路网性能,但边际效益会逐渐降低。因此,需根据期望的路网恢复程度

及恢复资源成本合理安排恢复资源,持续增加恢复资源会导致资源浪费。

4 结 论

(1)在单位时间内,三车道路段积水占据单车道、三车道路段积水占据两车道、两车道路段积水占据单车道与路段所有车道被积水占据4种研究场景下,路段的最大受损程度分别为25%、72%、53%与100%。

(2)路网性能恢复决策模型的结果表明:路段恢复顺序不仅要考虑路段的受损程度,还要考虑路网的交通需求分布;目标恢复策略的路网性能恢复效果优于基于路段出度、基于路段流量的偏好恢复策略;恢复资源的增加会显著缩短路网的恢复时间,但边际效用逐渐降低。

参考文献:

- [1] Su B, Huang H, Li Y. Integrated simulation method for waterlogging and traffic congestion under urban rainstorms[J]. *Natural Hazards*, 2016, 81(1): 23-40.
- [2] Yin J, Yu D, Yin Z, et al. Evaluating the impact and risk of pluvial flash flood on intra-urban road network: A case study in the city center of Shanghai, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 537: 138-145.
- [3] Zhang M L, Xu M H, Wang Z L, et al. Assessment of the vulnerability of road networks to urban waterlogging based on a coupled hydrodynamic model[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 603: No. 127105.
- [4] 陈海然. 海绵化改造对城市内涝及交通的影响研究——以东莞市中心片区为例[D]. 广州: 华南理工大学土木与交通学院, 2020.
Chen Hai-ran. Research on the impact of urban waterlogging and traffic under the concept of sponge city—a case study in downtown district of Dongguan [D]. Guangzhou: School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, 2020.
- [5] Liao T Y, Hu T Y, Ko Y N. A resilience optimization model for transportation networks under disasters [J]. *Natural Hazards*, 2018, 93(1): 469-489.
- [6] Zhao T, Zhang Y. Transportation infrastructure restoration optimization considering mobility and accessibility in resilience measures[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 117: No. 102700.
- [7] Wu Y, Xu Z, Liang C, et al. Post-earthquake traffic simulation considering road traversability[J]. *Sustainability*, 2022, 14(18): No. 11145.
- [8] Pan X, Dang Y, Wang H, et al. Resilience model and recovery strategy of transportation network based on travel OD-grid analysis[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2022, 223: No. 108483.
- [9] 杜磊, 杨晓宽. 不同道路积水情况对交通影响及造成损失的研究[C]//科技创新绿色交通——第十一次全国城市道路交通学术会议论文集. 北京:中国土木工程学会, 2011: 389-393.
- [10] 王永明, 周磊山, 吕永波. 基于元胞自动机交通流模型的车辆换道规则[J]. *中国公路学报*, 2008(1): 89-93.
Wang Yong-ming, Zhou Lei-shan, Lv Yong-bo. Lane changing rules based on cellular automaton traffic flow model[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2008(1): 89-93.
- [11] Nagel K, Schreckenberg M. A cellular automaton model for freeway traffic[J]. *Journal de Physique I*, 1992, 2(12): 2221-2229.
- [12] Nagurney A, Qiang Q. A network efficiency measure with application to critical infrastructure networks[J]. *Journal of Global Optimization*, 2008, 40(1-3): 261-275.
- [13] 尹文君, 刘民, 吴澄. 带工艺约束并行机调度问题的一种新的遗传算法[J]. *电子学报*, 2001(11): 1482-1485.
Yin Wen-jun, Liu Min, Wu Cheng. A new genetic algorithm for parallel machine scheduling with process constraint[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2001(11): 1482-1485.