

智能网联环境下的城市路网容量可靠性分析*

郝 威^{1▲} 肖 蕾¹ 张兆磊¹ 郑 楠²

(1. 长沙理工大学交通运输工程学院 长沙 410114;

2. 澳大利亚蒙纳士大学土木工程学院 澳大利亚克莱顿 3168)

摘 要: 网联自动驾驶车辆(CAVs)与人工驾驶车辆(HDV)混行的交通发展模式会促进城市路网容量发生变化,为解析混合交通流对城市路网容量可靠性的影响,构建了智能网联环境下城市路网容量可靠性双层规划模型。为表征 CAVs 信息获取与自动驾驶的能力,假定 CAVs 遵循系统最优原则选择路径,而 HDVs 则根据自身经验选择路径,基于二者路径选择的差异建立描述混合交通分配的下层模型,刻画智能网联环境下的混合交通流分配特性。并且,为了快速求解大型路网交通分配,将下层混合交通分配模型转换为非线性互补下问题进行求解。考虑到实际路网的随机性,以及路网道路通行能力并非固定值,运用具有多种相关性的均匀随机分布理论,建立了描述城市路网容量可靠性的上层模型。通过蒙特卡洛仿真分析不同 CAVs 渗透率下的路网容量可靠性,并进一步解析各路段对路网容量可靠性的敏感度。结果表明:当需求水平 $d > 0.5$ 时,路网容量可靠性开始降低;当 $d > 0.7$ 且 CAVs 渗透率 $\lambda = 0$ 时,可靠性小于 0.4;当 $d > 0.7$ 而 $\lambda = 1$ 时,可靠性接近 1,说明 CAVs 可增强路网容量可靠性。研究还发现,当需求水平处于 0.7~1 区间时,渗透率的变化对路网容量可靠性有显著的影响,但随着需求的增大,路网处于超负荷状态,渗透率对路网容量可靠性影响较小。此外,CAVs 渗透率从 0 增加至 1 的过程中,路网中存在“道路容量悖论”现象的道路从 19 条下降至 3 条,且当 $\lambda = 1$ 时路网中仅有 1 条道路出现了显著的“道路容量悖论”现象,拥堵严重。表明 CAVs 渗透率的增大可以显著改善路网中的“道路容量悖论”现象,减少路网容量可靠性的波动,提高路网运行稳定性。

关键词: 交通工程;城市路网容量;双层规划模型;无人驾驶;混合交通均衡;容量可靠性

中图分类号: U491.122

文献标识码: A

doi:10.3963/j.jssn.1674-4861.2022.05.005

A Reliability Analysis of the Capacity of Urban Road Network Under a Mixed Human-driven and Connected Traffic Environment

HAO Wei^{1▲} XIAO Lei¹ ZHANG Zhaolei¹ ZHENG Nan²

(1.. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Department of Civil Engineering, Monash University, Clayton 3168, Australia)

Abstract: The emerging of mixed traffic involving both connected autonomous vehicles (CAVs) and human-driven vehicles (HDVs) may change the capacity of urban road networks. A bi-level programming model is proposed to analyze the impacts of mixed traffic flow on the reliability of the capacity of urban road network in an intelligent network environment. Assuming that CAVs follow the path selected based on the system optimization principle and the drivers of the HDVs select their paths according to their own experience, a lower model is developed for the assignment of traffic flow based on the differences in the path selection between the two types of vehicles. Furthermore, the modeling of the assignment of mixed traffic at the lower level is transformed into a nonlinear complementarity

收稿日期: 2022-05-12

* 国家自然科学基金项目(52172339)、国家自然科学基金青年基金项目(52002036)、湖南省科技厅重点研发计划项目(2020SK2098)、湖南省科技创新团队项目(2020RC4048)、湖南省教育厅重点项目(19A014)资助

▲ 第一作者(通信作者)简介:郝 威(1983—),博士,教授。研究方向:交通系统协同优化、混合交通流理论等。

E-mail: haowei@csust.edu.cn

problem to reduce runtime. Considering the randomness of road capacity in a network, an upper model is set up for modeling the reliability of capacity by using a uniform random distribution with multiple correlations. A Monte Carlo simulation is used to analyze the reliability of road network capacity under different market penetration rate (MPR) of CAVs. A sensitivity analysis is then carried out for studying the reliability of road capacity under such a scenario. Numerical results show that, when the level of the demand $d > 0.5$, the reliability of road network capacity decreases. When level of the demand $d > 0.7$ and the market penetration rate of CAVs $\lambda = 0$, the reliability is less than 0.4. However, when $d > 0.7$ and $\lambda = 1$, the reliability is found close to 1, indicating that CAVs can enhance the reliability of road network capacity. It is also found that when the level of the demand is between 0.7 and 1, the MPR of CAVs significantly affects the reliability of road network capacity. When the road network is overloaded, the MPR has a very minor impact on the reliability of road network capacity with the increase of traffic demand. In addition, when λ increases from 0 to 1, the number of roads showing “capacity paradox” in the road network decreases from 19 to 3. When $\lambda = 1$, only one road in the entire network show the issue. Study results show that the increase of MPR can not only reduce the possibility of “road capacity paradox”, but also improve the stability of the road network.

Keywords: traffic engineering; network capacity; bi-level programming model; unmanned vehicle; traffic equilibrium; capacity reliability

0 引言

城市道路网络是保障社会经济发展的重要生命线,其可靠运行能力受到多种不确定性因素的影响,可从连通可靠性、行程时间可靠性、容量可靠性3个方面来分析各种情况下的应变能力。其中,容量可靠性是交通管理者和路网规划者最为关注的1个指标,描述了路网在各种不确定性因素影响下满足一定交通需求的能力。通过对路网容量可靠性进行研究和分析,能够定量地评价城市道路网络的整体运行质量和抵御风险的能力,确定路网中的薄弱和瓶颈环节,为道路规划设计和运营提供决策依据,在有限的资源下充分地发挥路网的潜在能力。Chen等^[1-2]首次从系统管理者角度出发,建立了计算容量可靠性的双层规划模型,并采用基于灵敏度分析和蒙特卡洛技术求解。已有研究主要分析了天气状况和交通事故因素对路网容量可靠性的影响,如Lam等^[3]针对雨水天气下供需不确定性对路网的可靠性进行了研究。除了针对常规天气下的日常交通拥堵外,冷军强等^[4-5]研究了冰雪等特殊天气条件下城市路网容量可靠性,采用路段行程时间可靠性及容量为约束条件进行研究,定义了冰雪条件下的路网容量可靠性的概念。陈玲娟等^[6]将交通事故作为1个影响路网性能的不确定因素,改进了事故影响下的动态流量加载模型,采用Logit选择原则描述出发时刻的路径选择概率,建立了事故影响下的拟动态模型,对交通事故发生下的路网容量可靠性进行了深入探讨。为了进一步分析不确定性因素对路网性能的影响,方雅君等^[7]以随机用户均衡模型作为底层

模型,构建了基于路段服务水平约束的路网容量可靠性双层规划研究模型,并通过灵敏度分析的方法求解该双层规划模型。Wang等^[8]从路网储备容量的角度,考虑了驾驶员在路径决策中的不确定性因素,构建了基于随机用户均衡的储备容量双层规划模型,并利用遗传算法求解路网的储备容量。Jiang等^[9]则从路网脆弱性的角度,考虑了不确定性因素发生的可能性和对路段容量的影响程度,提出了1种基于概率的路网脆弱性评估方法。

以自动驾驶、车联网为代表的智能网联技术,将对城市道路网络的稳定运行能力产生深远影响。当前,网联自动驾驶车辆(connected and automated vehicles, CAVs)已逐步进入实际道路环境中,美国Tesla公司推出Autopilot“完全自动驾驶功能”系统并将其安装在CAVs上,至今已经完成了超过385.838 km的行驶里程^[10]。国内的百度、高德、滴滴等公司在长沙、上海、广州等多个城市的开放道路下开展了无人驾驶出租车实际运营。针对这种趋势,国内外学者对智能网联环境下的交通运行状况展开了一系列研究,主要集中于研究智能网联环境下的交通均衡及路网容量分析。其中,Wang等^[11]考虑到无人驾驶车辆获取道路交通信息的能力更强,提出了1种基于定量的多类流量分配模型,假设人工驾驶车辆(human driven vehicles, HDVs)的路径选择遵循交叉巢式Logit(cross-nested Logit, CNL)模型,CAVs的路径选择遵循用户均衡(user equilibrium, UE)原则。与传统的HDVs相比,CAVs行驶途中无需专职驾驶员,车内乘员可进行其他活动,通勤者的出行时间价值较低,倾向于选择时间相对较长但更加舒适平稳

的行驶路径;此外,由于CAVs能自主决策行驶路径,具有车联网实时通信能力,可接受交通管理者的全局交通调度,CAVs选择使路网整体出行成本最优的系统最优(system optimal, SO)路径选择方式具有合理性和可行性。因此,黄中祥等^[12-13]从有人驾驶/无人驾驶车辆在路径选择的自私性差异角度出发,假设无人驾驶车辆以系统出行成本最优(SO原则)为目标,而有人驾驶车辆以个体出行成本最优为目标(UE原则),并采用连续平均算法对混合交通均衡问题进行数值求解。Bagloee等^[14-17]则研究了有人驾驶/无人驾驶的长期演化规律,建立1个基于非线性互补问题(nonlinear complementarity problem, NCP)的SO-UE混合交通均衡模型,考虑了不对称延迟、弹性需求、道路容量限制等多方面约束条件。以无人驾驶混合交通均衡模型为基础,黄中祥等还进一步对OD结构影响下的路网最大通行能力开展了一系列研究。

路网容量可靠性作为交通系统中的1个重要概率测度参数,能有效地评价城市交通网络在复杂条件下的稳定运行能力,特别是由于外界因素的干扰使得交通需求和道路的供应条件发生变化时,更能体现这一概率指标的适用性^[18-19]。随着无人驾驶车辆的不断发展,针对无人驾驶车辆的混入对路网容量可靠性影响的相关研究,是未来城市交通对无人驾驶车辆管理以及相关政策法规制定的重点参考依据。而且,现有研究在计算路网容量可靠性时,大多假设路段容量是独立分布的随机变量^[20],但实际交通环境中各路段的容量分布具有一定的相关性。如在气候条件等大范围影响因素的作用下,各路段之间将具有一定的弱相关性。而交通事故、道路施工等小范围因素使得相邻路段具有较强的相关性。

针对上述问题,笔者建立了面向智能网联环境的路网容量可靠性双层规划模型。下层模型是SO-UE混合交通流网络均衡模型,因CAVs相较于HDVs拥有更强的信息交互能力,更易接受系统管理,假设CAVs遵循SO的路径选择原则,HDVs遵循UE的路径选择原则,将其转化为非线性互补问题后通过GAMS软件编程求解,为解析CAVs市场渗透率(market penetration rate, MPR)变化下的交通流演化规律及其对路网可靠性的影响提供研判基础;上层模型充分考虑路段之间容量波动的相关性,假设其服从均匀分布,各路段的容量分布具有弱相关性,相邻路段具有强相关性,利用蒙特卡洛仿真分析不同CAVs渗透率下的路网容量可靠性,并对路网容量

可靠性进行敏感度分析。

1 智能网联环境下混合交通网络均衡模型

1.1 基本假设与符号定义

1.1.1 基本假设

智能网联环境下混合交通网络道路上主要存在2类车辆:CAVs和HDVs。CAVs在交通分配环节遵循系统最优原则(SO),而HDVs遵循用户均衡原则(UE)。用 $G(N, A)$ 表示1个路网,其中 N 与 A 分别代表节点集和道路集。

1.1.2 符号定义

表1 混合交通网络均衡模型符号定义

Tab. 1 Symbol definition of the hybrid traffic network equilibrium model

符号	意义	符号	意义
A	道路集合	N	节点集合
X	混合交通流	D	目的地集合
c_{ij}	道路 ij 的随机道路容量, veh/h	λ	CAV 渗透率
x_a	HDV 在道路 a 上的交通流量, veh/h	\bar{x}_a	CAV 在道路 a 上的交通流量, veh/h
q_i^k	HDV i 到 k 的出行需求, veh/h	\bar{q}_i^k	CAV i 到 k 的出行需求, veh/h
p	HDV 的路径	\bar{p}	CAV 的路径
$f_{p,i}^k$	从 i 到 k 路径 p 上的 HDV 的流量, veh/h	$\bar{f}_{p,i}^k$	从 i 到 k 路径 p 上的 CAV 的流量, veh/h
P_i^k	HDV 从 i 到 k 的所有路径集合	\bar{P}_i^k	CAV 从 i 到 k 的所有路径集合
$\delta_{a,p,i}^k$	关于 HDV 的道路路径发生因子(如果道路 a 属于路径 p , 从 i 到 k 对 HDV 可用, 则值为 1, 否则为 0)	$\bar{\delta}_{a,p,i}^k$	关于 CAV 的道路路径发生因子(如果道路 a 属于路径 p , 从 i 到 k 对 CAV 可用, 则值为 1, 否则为 0)
$t_{ij}(X)$	道路 ij 上关于 HDV 阻抗函数	$\bar{t}_{ij}(X)$	道路 ij 上关于 CAV 阻抗函数
α_{ij}	BPR 函数中的路滞系数, 可看作道路自由流行驶时间	β_{ij}	BPR 函数中的路滞系数
\bar{q}_i^k	从 i 到 k 的总出行需求, veh/h	ζ	CAV 编队行驶折算系数

注:在全文中,所有术语都是非负的,除非另有说明。

1.2 基本交通网络均衡模型

由于CAVs具有信息交互的功能,能接收路网的全局信息,故假定CAVs遵循系统最优原则,以系统效益最大为目标选取自身行驶路径,而HDVs则由驾驶人操作,驾驶人会以优先考虑自身的效益,寻找使自身效益最大化的路径,依然遵循用户最优原则^[21-22]。2类车辆在混合交通流中遵循不同的路径选择原则,在相互影响下达到网络均衡。

1.2.1 用户均衡交通分配(UE-TAP)

在用户均衡交通分配模型(UE-TAP)模式下, HDVs出行者基于“自私”的路径选择原则, 选取通行时间最短的路径^[21-22]。HDVs和CAVs混合交通流中遵循不同的路径选择原则, 在相互影响下达到均衡后, 任意1个OD对的HDVs所使用的路径均具有最小且相等的通行时间, 其他未被使用的路径的通行时间则大于最小通行时间。基于Beckmann的构建方式, 将上述UE-TAP模式表述为1个非线性最优化问题。

$$\min z(x) = \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a(x_a + \zeta \bar{x}_a) dx \quad (1)$$

$$\text{s.t. } \sum_p f_{p,i}^k = q_i^k \quad i \in N, k \in D \quad (2)$$

$$f_{p,i}^k \geq 0 \quad p \in P_i^k, i \in N, k \in D \quad (3)$$

$$x_a = \sum_i \sum_k \sum_p f_{p,i}^k \delta_{a,p,i}^k$$

$$a \in A, p \in P_i^k, i \in N, k \in D \quad (4)$$

式(1)中的Beckmann目标函数能确保HDVs出行者选取最短的通行路径, 式(2)~(4)则描述了HDVs出行者的路径和流量分配约束。

1.2.2 系统最优交通分配(SO-TAP)

由于CAVs具有信息交互的功能, 能接收路网的全局信息, 故假定CAVs遵循系统最优的路径选择原则。在系统最优交通分配(SO-TAP)模式下, CAVs出行者选取使系统总出行时间最小的路径。CAVs与HDVs使用的是相同的道路网络, 其主要差异是UE-TAP中构建的是Beckmann目标函数, 而SO-TAP的目标函数是系统总出行时间。为了统一求解UE和SO混合的交通分配问题, 将Beckmann目标函数中的延迟函数 $\bar{t}_a(x_a + \bar{x}_a)$ 替换为边际延迟函数: $t_a(x_a + \bar{x}_a) + x_a \cdot \partial t_a(x_a + \bar{x}_a) / \partial \bar{x}_a$, 得到如下非线性最优化问题。

$$\min z(\bar{x}) = \sum_{a \in A} \int_0^{\bar{x}_a} \bar{t}_a(x_a + \zeta \bar{x}_a) dx \quad (5)$$

$$\text{s.t. } \sum_{\bar{p}} \bar{f}_{\bar{p},i}^k = \bar{q}_i^k \quad i \in N, k \in D \quad (6)$$

$$\bar{f}_{\bar{p},i}^k \geq 0 \quad \bar{p} \in \bar{P}_i^k, i \in N, k \in D \quad (7)$$

$$\bar{x}_a = \sum_i \sum_k \sum_{\bar{p}} \bar{f}_{\bar{p},i}^k \bar{\delta}_{a,\bar{p},i}^k$$

$$a \in A, \bar{p} \in \bar{P}_i^k, i \in N, k \in D \quad (8)$$

式(5)是Beckmann目标函数, 式(6)~(8)是HDVs车流的路径和流量分配约束。

1.3 非线性互补下混合交通均衡模型

基本交通均衡模型不适用于大型复杂网络, 且求解不便, 但将其转化为非线性互补问题, 利用

GAMS软件非线性规划模块求解, 可使混合交通均衡模型适用于大型复杂网络, 降低求解难度。非线性互补问题(NCP)是找到满足方程和不等式系统的矢量, 也就是 $x \geq 0, F(x) \geq 0, x \cdot F(x) = 0$ 。其中: $F(x)$ 是1个给定的矢量函数, x 是1个矢量变量, 符号“ \cdot ”是逐元素相乘的哈达玛积。上述公式也可用更紧凑的表示: $0 \leq x \perp F(x) \geq 0$ 。符号“ \perp ”表示 x 在 $F(x)$ 上的投影。

1.3.1 需求划分

在CAVs混入HDVs的混行交通流中, 确定2类交通流的需求是最先也是最重要的任务, 设 λ 为CAVs在混合交通流中的渗透率, 其范围为 $0 \leq \lambda \leq 1$ 。因此2类车辆的某一OD对间的交通需求为

$$q_i^k = (1 - \lambda) \bar{q}_i^k \quad (9)$$

$$\bar{q}_i^k = \lambda \bar{q}_i^k \quad (10)$$

$$\hat{q}_i^k = q_i^k + \bar{q}_i^k \quad (11)$$

1.3.2 最短路径搜索

$t_a(X)$ 为道路 a 的阻抗函数。通过建立以下互补条件实现均衡状态。

$$\begin{cases} t_j^k + t_{ij}(X) - t_i^k \geq 0 \\ x_{ij}^k \geq 0 \\ x_{ij}^k (t_j^k + t_{ij}(X) - t_i^k) = 0 \end{cases} \quad (i, j) \in A, k \in D \quad (12)$$

当 $t_j^k + t_{ij}(X) - t_i^k = 0$, 那么道路 (i, j) 是从 i 到 k 的最短路径, 道路上流量大于0, 即 $x_{ij}^k \geq 0$; 否则, $x_{ij}^k (t_j^k + t_{ij}(X) - t_i^k) \geq 0$, 表示此道路上没有通向 k 点车流, 即 $x_{ij}^k = 0$ 。式(12)可以用更为简洁的方式表示, 见式(13)。

$$0 \leq x_{ij}^k \perp \{t_j^k + t_{ij}(X) - t_i^k\} \geq 0 \quad (i, j) \in A, k \in D \quad (13)$$

式(13)为关于UE相关流量的约束, 需要注意的是最短路径搜索中最关键的是模型的延迟函数, 对于上述公式道路的行驶时间不仅取决于相应道路的交通流量, 而是交通流量网络的向量的函数。此外, 可以用边际延迟函数(即 $\bar{t}_{ij}(X) + \bar{x}_{ij} \times \partial \bar{t}_{ij}(x) / \partial \bar{x}_{ij}$)替换延迟函数, 以确保SO流量, 与SO相关流量约束见式(14)。

$$0 \leq \bar{x}_{ij}^k \perp \left\{ \bar{t}_j^k + \bar{t}_{ij}(X) + \bar{x}_{ij} \times \frac{\partial \bar{t}_{ij}(x)}{\partial \bar{x}_{ij}} - \bar{t}_i^k \right\} \geq 0 \quad (i, j) \in A, k \in D \quad (14)$$

采用BPR函数作为HDVs交通流阻抗函数, 见式(15)。

$$t_{ij}(X) = \alpha_{ij} + \beta_{ij} \cdot \left((x_{ij} + \zeta \bar{x}_{ij}) / c_{ij} \right)^4 \quad (i, j) \in A \quad (15)$$

式中: α_{ij} , β_{ij} 为参数, 要通过实地测量数据校准(α_{ij} 可以解释为自由流动行驶时间)

CAVs 的边际阻抗函数计算见式(16)。

$$\begin{aligned} \bar{t}_{ij}(X) = & \alpha_{ij} + \beta_{ij} \cdot \left((x_{ij} + \zeta \bar{x}_{ij}) / c_{ij} \right)^4 + \\ & 4\beta_{ij} \zeta \bar{x}_{ij} / c_{ij}^4 \cdot (x_{ij} + \zeta \bar{x}_{ij})^3 \quad (i, j) \in A \end{aligned} \quad (16)$$

1.3.3 路径流量约束

路径流量守恒约束见式(17)。

$$0 \leq t_i^k \perp \left\{ \sum_{j(i,j) \in A} x_{ij}^k - \sum_{j(j,i) \in A} x_{ji}^k - q_i^k \right\} \geq 0 \quad i \in N, k \in D \quad (17)$$

上述为关于 UE 相关流量的约束, SO 相关流量约束见式(18)。

$$0 \leq \bar{t}_i^k \perp \left\{ \sum_{j(i,j) \in A} \bar{x}_{ij}^k - \sum_{j(j,i) \in A} \bar{x}_{ji}^k - \bar{q}_i^k \right\} \geq 0 \quad i \in N, k \in D \quad (18)$$

1.3.4 道路流量约束

由于(15)中的延迟函数取决于道路的流量, 方程系统还必须具有从路径流量 x_{ij}^k 得出道路流量 x_{ij} 的约束条件, 见式(19)。

$$0 \leq x_{ij} \perp \left\{ x_{ij} - \sum_k x_{ij}^k \right\} \geq 0 \quad (i, j) \in A \quad (19)$$

上述为关于 UE 相关流量的约束, 与 SO 相关流量约束条件见式(20)。

$$0 \leq \bar{x}_{ij} \perp \left\{ \bar{x}_{ij} - \sum_k \bar{x}_{ij}^k \right\} \geq 0 \quad (i, j) \in A \quad (20)$$

考虑 HDVs 与 CAVs 驾驶行为的差异, 构建了混合交通分配模型, 其中 CAVs 遵循系统最优的路径选择原则, 而 HDVs 遵循用户最优的原则。为了求解所提模型, 将模型转换为 1 个非线性互补下的混合交通网络均衡模型, 利用 GAMS 直接对模型求解, 求解方便且高效, 克服了传统网络均衡模型求解大型路网十分困难的问题。

2 路网容量可靠性分析

2.1 容量可靠性定义

容量可靠性是度量道路网络在随机因素影响下保持一定通行能力的指标。本文采用基于统计的容量可靠性定义方法, 即路网满足特定交通需求的概率(特定交通需求是指在路网中, 某一时段路网需要承担的“确定”的交通出行量), 见式(21)。

$$R(d) = P[\hat{x}_a \leq c_a, \forall a \in A] \quad (21)$$

式中: d 为归一化的交通需求水平, 是实际交通需求与理想道路容量下能满足的最大交通需求之比; $\hat{x}_a = x_a + \bar{x}_a$ 为道路 a 上的合计流量, veh/h; c_a 为道路 a 的随机道路容量, veh/h。

2.2 道路容量分布

受到各种不确定因素的影响, 道路的通行能力会发生波动。即道路实际容量 c_a 可以视为 1 个随机变量, 在容量上限 c_a^H 和下限 c_a^D 之间波动。现有研究一般假设不同路段的容量是相互独立的随机变量。然而在实际交通环境之中, 2 条道路的容量取值是相互影响的。例如, 在同一城市交通网络之中, 城西区域强降雨, 那么城西区域多条道路的通行能力一定程度上是相互影响的, 与城西区域道路相邻的城东区域道路的容量也会受城西范围内强降雨影响。而受到交通事故、道路维修等因素的影响, 相邻道路的容量分布会具有更高的相关性。因此, 本文用多元随机变量表征路网的道路容量, 并假定相邻道路容量的随机分布具有强相关性, 非相邻道路具有弱相关性: 对于路网中任意 2 条道路 $a_i, a_j \in A$, 若二者相邻, 则其容量随机变量的相关系数设为 $\sigma_{ij} = 0.5$; 若不相邻, 其相关系数 $\sigma_{ij} = 0.1$ 。并构建相互独立、弱相关(路网内全局道路相关系数为 $\sigma_{ij} = 0.1$)另外 2 种情况, 数值的取值仅是为了区分 3 种情况, 本文研究为定性分析, 而非定量分析, 取值仅需满足 3 种假设的差异性即可。

2.3 容量可靠性计算

采用蒙特卡洛仿真技术来计算的容量可靠性, 具体步骤如下。

步骤 1。初始化。设定最大抽样次数 N_{\max} , 令抽样计数 $n = 1$ 。

步骤 2。抽样。假设各路段容量服从多元随机分布, 根据相关性假设确定各随机变量之间的相关系数。采用变换抽样法产生道路容量的第 n 次采样 $C_n = [c_1^n, c_2^n, \dots, c_{|A|}^n]$ 。

步骤 3。定义功能函数。当抽样确定路网容量向量 C_n 后, 利用 GAMS 软件求解智能网联环境下混合交通均衡网络模型, 获得路网内各道路的实际流量 \hat{x}_a , 则路网容量可靠性功能函数见式(22)。

$$M_n(C_n) = \begin{cases} 1, & \forall \hat{x}_a < c_a^n \\ 0, & \exists \hat{x}_a \geq c_a^n \end{cases} \quad a \in A \quad (22)$$

步骤 4。判定是否达到最大抽样次数。若 $n < N_{\max}$, 则令 $n = n + 1$, 重复操作步骤 2, 否则转入步骤 5。

步骤5。计算路网容量可靠性估计值。基于统计方法,容量可靠性估计值见式(23)。

$$\tilde{R} = 1/N_{\max} \cdot \sum_{n=1}^{N_{\max}} M_n(C_n) \quad (23)$$

2.4 敏感度分析

为了确定影响路网容量可靠性的关键道路,对各道路容量参数进行敏感度分析:假设道路 a 的实际容量 c_a 增加至 $c_a + \Delta c$,分析其对路网容量可靠性的影响。由于 $\partial R / \partial c_a$ 的解析式无法推导获得,文中采用数值方式计算其估计值,见式(24)。

$$\frac{\partial \tilde{R}}{\partial c_a} = 1/(N_{\max} \Delta C) \cdot \left\{ \sum_{n=1}^{N_{\max}} M_n\left(C_n + \frac{\Delta C}{2}\right) - \sum_{n=N_{\max}+1}^{2N_{\max}} M_n\left(C_n - \frac{\Delta C}{2}\right) \right\} \quad (24)$$

3 案例研究

3.1 交通网络参数设置

选用经典的 Sioux-Falls 交通网络进行案例应用,该路网包含 24 个节点、76 个有向路段,2 个节点间道路均为双向道路。道路基础信息见图 1,其中路段的注释为 $(\alpha_{ij}, c_{ij}^{\text{theo}})$, α_{ij} 表示路段 ij 的自由流时间, min; c_{ij}^{theo} 表示路段 ij 的理论容量上限, veh/h。路网的 OD 矩阵需求见表 2, ζ 取 0.5。基于变换抽样的蒙特卡洛方法产生多元随机变量,对概率分布的类型有所限制,一般为正态分布、均匀分布、极大值分布、极小值分布、Gamma 分布等。其中只有均匀分布能设置确定的上下限范围。鉴于以上原因,本文采取均匀分布作为各路段容量的边缘概率分布,容量的波动范围限制为 c_{ij}^{theo} 至 $0.5 c_{ij}^{\text{theo}}$ 。本文主要考虑道路部分失效的情况,因此容量下限设置为理论上限的一半。容量下限值需要根据道路实际情况进行校正,其具体校正方法不在本文讨论的范围。

3.2 结果及分析

1) 容量可靠性。为了便于比较,定义需求水平 d 为实际交通需求与理想道路容量下能满足的最大交通需求之比。 $d < 1$, 则表明交通需求小于道路最大服务量,路网能够承担路网要完成的交通需求任务; $d = 1$, 则表明交通需求刚好等于最大服务量; $d > 1$, 则表明交通需求大于道路最大的服务量。

基于所提模型、求解算法和 Sioux-Falls 网络,运用蒙特卡洛技术进行仿真测试,研究不同需求水平和 CAVs 渗透率(λ) 对路网容量可靠性的影响,其中 CAVs 渗透率为 $\{0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1\}$, 设置随机抽样次数 $N_{\max} = 5\,000$, 通过反复仿真测试可得

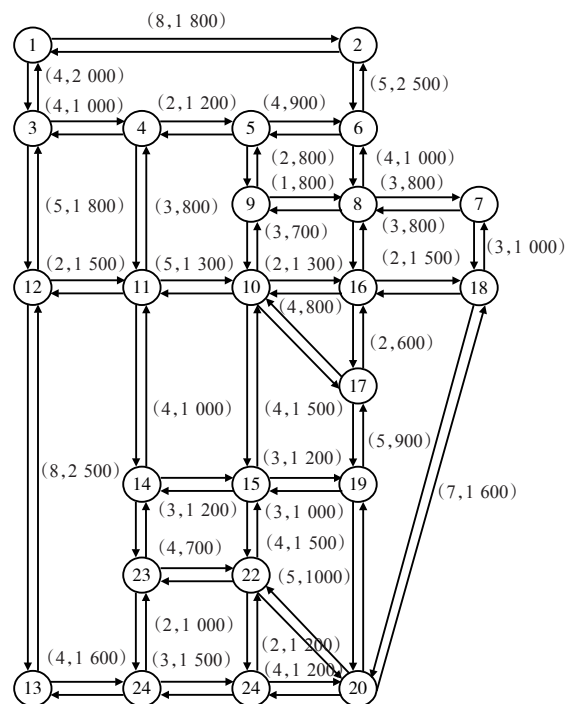


图1 Sioux-Falls网络

Fig. 1 Sioux-Falls network

表2 Sioux-Falls OD需求矩阵

Tab. 2 Sioux-Falls OD demand matrix

单位: veh/h

OD	1	2	10	13	20
1	0	700	300	500	200
2	700	0	200	400	400
10	300	200	0	600	800
13	500	400	600	0	500
20	200	400	800	500	0

到需求水平-CAVs渗透率-路网容量可靠性之间的关系,见图2。

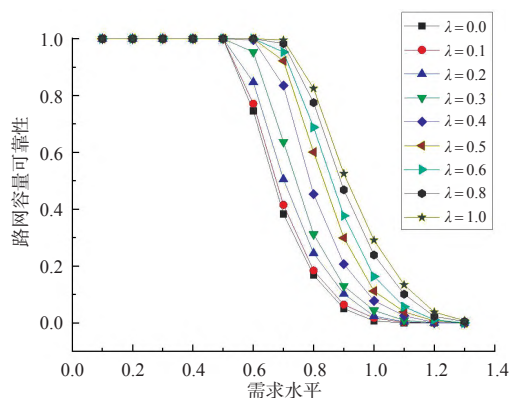


图2 不同CAV渗透率下路网容量可靠性

Fig. 2 Road network capacity reliability with different MPRs

考虑到CAVs现实发展状况,对渗透率较低状态 $\lambda = 0$ 到 $\lambda = 0.5$ 范围以 0.1 为增幅,当 $\lambda > 0.5$ 时以 0.2 为增幅进行实验分析。

路网容量可靠性的变化可以划分为 3 个明显阶

段,见图2。

第1阶段 $0.1 \leq d \leq 0.5$ 。因设置随机道路容量服从均匀分布的下限为 $1/2c^{\text{theo}}$,故路网内任何道路的随机道路容量均满足交通需求,CAVs渗透率不论为何值,路网容量可靠性为1,路网内任何道路都不会拥堵。

第2阶段 $0.5 < d \leq 1$ 。此阶段由于路网容量存在随机性,可能出现最大服务量不满足交通需求的概率,路网的可靠性随着需求水平的增加逐渐变小,可靠性递减而小于1,路网内有拥堵现象的道路逐渐变多。但CAVs渗透率的提高有助于提高路网容量的可靠性。例如, $d=0.7$, $\lambda=0$, 路网容量可靠性为0.39; $d=0.7$, $\lambda=0.2$, 路网容量可靠性为0.45; $d=0.7$, $\lambda=0.4$, 路网容量可靠性为0.84,相较于渗透率为0,可靠性提高了115%。

第3阶段 $d > 1$ 。此阶段交通需求大于路网的服务量,路网可靠性下降较快,但是随着CAVs渗透率升高,路网容量可靠性略有提高,说明CAVs较高时能有效优化交通路网的性能,提高路网容量的可靠性。 $d > 1.3$ 时,路网容量可靠性等于0,说明路网已经进入全面拥挤阶段,路网内所有道路都存在拥堵,路网处于瘫痪状态。

此外,固定需求水平下,路网容量可靠性跟随渗透率变化情况可见图2。

当需求水平 $0.6 \leq d \leq 1.2$ 范围内,可明显看出,在同一需求水平下,渗透率越高其路网容量可靠性越高,如当 $d=0.6$ 时, $\lambda=0$, $\lambda=0.1$, $\lambda=0.2$ 的可靠性逐渐升高,当 $\lambda=0.3$ 时,路网容量可靠性已高达1。说明CAVs的混入能有效提高路网容量可靠性,提高路网的稳定性。

2) 路段相关性。现有研究大多假设路段容量是独立分布的随机变量,而实际情况下路段容量之间具有一定的相关性。为了分析路段相关性对路网容量可靠性的影响,考虑3种相关性假设:①独立分布假设,路网内所有路段的随机道路容量相互独立,互不相关;②弱相关假设,路网内所有路段的相关系数 $\sigma=0.1$;③强相关假设,相邻路段相关系数 $\sigma=0.5$,非相邻路段相关系数 $\sigma=0.1$ 。同时,为了分析相关性假设影响的普适性,除了均匀分布之外,还以Gumbel型极大值分布作为对比。图3中呈现了CAVs渗透率为0.5时,不同相关性假设下的路网容量可靠性比较结果。实验结果表明:在低需求水平条件下,相关性假设对路网容量可靠性的影响较小;当需求水平大于0.6时,相关性假设会对路网容量可

靠性分析的结果有显著的影响,强相关性假设下的容量可靠性高于弱相关性假设和独立假设。同时注意到,由于Gumbel分布不便于指定明确的容量下限,当需求水平为0.5时,图3(a)中所示的Gumbel分布下路网容量可靠性略低于1,而图3(b)所示的均匀分布的路网容量可靠性等于1。

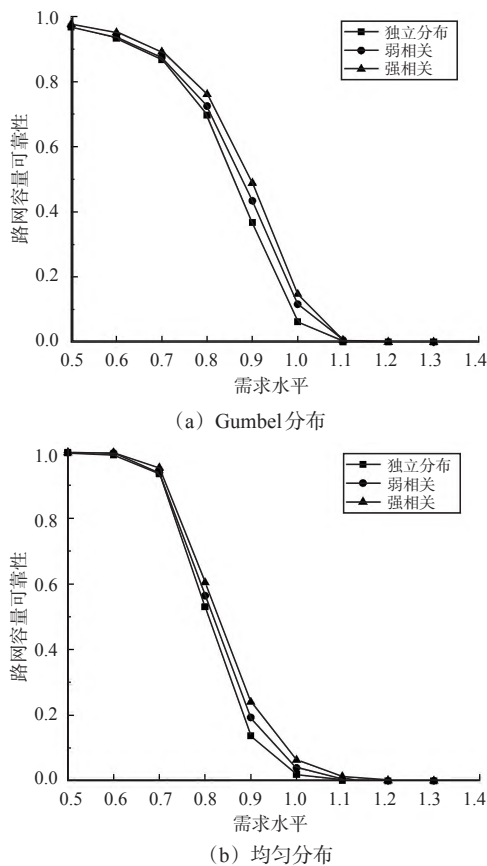


图3 不同相关性假设下的路网容量可靠性
Fig. 3 The reliability of road network capacity under the different correlation assumption

3) 敏感度。图4呈现了路网容量可靠性敏感度分析的图形化结果。为了分析不同CAVs渗透率下道路容量波动对路网整体性能的影响,以路网容量可靠性为0.5作为比较基准,此时路网有一半的概率不会出现拥堵。当CAVs渗透率 $\lambda=0$ 时,由图4(a)可见:路网中有19条道路的敏感度为负,表明纯HDVs交通流容易出现“道路容量悖论”现象:即增加某1条道路的容量反而会降低路网整体的容量可靠性。例如,图4(a)中节点3~12所示道路增加1个单位的容量使路网容量可靠性整体降低了0.01。敏感度分析结果反映纯HDVs交通流的路网状态较不稳定,道路容量波动容易降低路网容量可靠性,从而导致拥堵。随着CAVs渗透率的提高,路网中的“道路容量悖论”现象得到了显著的改善。由图4(f)可见:当 $\lambda=1$ 时路网中仅有1条道路出现了显著的“道路

容量悖论”现象(即敏感度 <-0.01),大部分道路容量的波动不会对整体路网产生负面影响,造成严重拥堵概率较小。敏感度分析的结果表明,CAVs的混入可改变路网内各道路对路网容量可靠性敏感程度,且高CAVs渗透率下的路网中能造成拥堵的“关键道路”少,CAVs的发展与落地有助于整个路网系统的稳定。

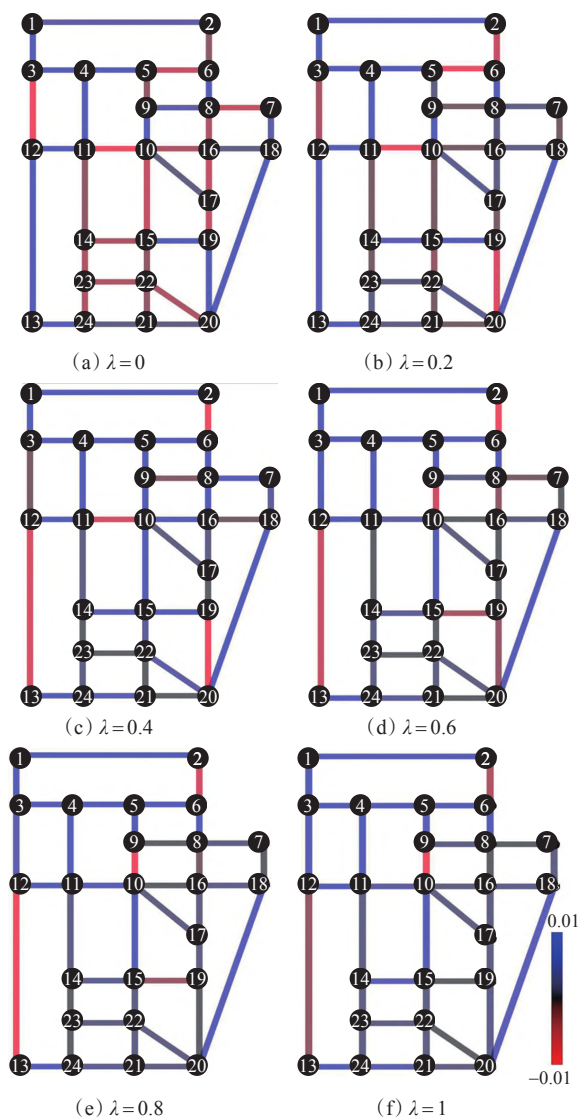


图4 路网容量可靠性敏感度分析

Fig. 4 The sensitivity analysis of road network reliability

4 结束语

1) 为表征CAVs信息获取与自动驾驶的能力,假定CAVs遵循SO路径选择原则,且混合交通流中HDVs遵循UE路径选择原则,考虑到需求划分、路径搜索、路径流量与道路流量约束,构建了智能网联环境下的混合交通均衡模型。并以此为下层模型构建了基于混合交通流网络均衡模型的路网容量可靠性评价方法。应用蒙特卡洛方法求解,得到了CAVs

渗透率演化下($\lambda=0.0, \lambda=0.2, \lambda=0.4, \lambda=0.6, \lambda=0.8, \lambda=1.0$)的路网容量可靠性变化过程。

2) 分析比较了不同的道路容量相关性假设对路网容量可靠性结果的差异,考虑了相邻道路容量分布的强相关性以及非相邻道路容量分布的弱相关性,弥补了以往研究中只假设道路容量独立分布的不足之处。

3) 案例分析表明,当需求水平 $d>0.5$ 时,路网容量可靠性开始降低;当 $d>0.7$ 时且CAVs渗透率 $\lambda=0$ 时,可靠性小于0.4,而渗透率等于1时,可靠性接近1,说明CAVs可增强路网容量可靠性。随着CAVs混入比例增高,路网容量可靠性降低拐点逐渐右移,但当需求水平较低或较大(小于0.5或大于1.3),CAVs对路网容量可靠性的影响较小。此外,敏感度分析的结果表明,CAVs的混入显著改善了路网中“道路容量悖论”现象,渗透率从0增加至1的过程中,路网中存在“道路容量悖论”现象的道路从19条下降至3条,且当 $\lambda=1$ 时路网中仅有1条道路出现了显著的“道路容量悖论”现象,拥堵现象严重。CAVs可编队行驶相关特性使道路能够承担更多的交通出行,降低了路网内道路出现拥堵的可能性,减少了使路网稳定性变差的“关键道路”数量,CAVs的发展与落地有助于整个路网系统的稳定,增强了路网运行的稳定性。

下一步研究将考虑双向道路不对称延迟,以及弹性需求等因素对下层混合交通均衡模型的影响,进一步增加混合交通均衡的约束条件,使智能网联环境下路网容量可靠性模型更贴合实际交通状况。

参考文献

References

- [1] CHEN A, YANG H, LO H K, et al. A capacity related reliability for transportation networks[J]. Journal of Advanced Transportation, 1999, 33(2): 183-200.
- [2] CHEN A, YANG H, LO H K, et al. Capacity reliability of a road network: An assessment methodology and numerical results[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2002, 36(3): 225-252.
- [3] LAM W H K, SHAO H, SUMALEE A. Modeling impacts of adverse weather conditions on a road network with uncertainties in demand and supply[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2008, 42(10): 890-910.
- [4] LENG J Q, ZHANG Y P, ZHANG Q, et al. Integrated reliability of travel time and capacity of urban road network under

- ice and snowfall conditions[J]. Journal of Central South University of Technology, 2010, 17(2):419-424.
- [5] 冷军强,张亚平,韩丽飞,等. 冰雪条件下城市路网容量可靠性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(4):592-596.
- LENG J Q, ZHANG Y P, HAN L F, et al. Reliability of urban road network capacity under ice and snow conditions[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(4):592-596. (in Chinese)
- [6] 陈玲娟,王殿海,刘玲丽. 交通事件影响下路网逐日出行动态可靠性[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17(5):97-103.
- CHEN L J, WANG D H, LIU L L. Dynamic reliability of day-by-day travel of road network under the influence of traffic incidents[J]. Traffic and Transportation System Engineering and Information, 2017, 17(5):97-103. (in Chinese)
- [7] 方雅君,郑长江,马庚华,等. 基于路段服务水平约束的路网容量可靠性分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2019, 43(3):502-504+510.
- FANG Y J, ZHENG C J, MA G H, et al. Reliability analysis of road network capacity based on road service level constraints[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering), 2019, 43(3):502-504+510. (in Chinese)
- [8] WANG J, DENG W, ZHAO J B. Road network reserve capacity with stochastic user equilibrium[J]. Transport, 2015, 30(1):103-116.
- [9] JIANG Y, WANG Y, SZETO W Y, et al. Probabilistic assessment of transport network vulnerability with equilibrium flows[J]. International Journal of Sustainable Transportation, 2021, 15(7):512-523.
- [10] 宗长富,代昌华,张东. 智能汽车的人机共驾技术研究现状和发展趋势[J]. 中国公路学报, 2021, 34(6):214-237.
- ZONG C F, DAI C H, ZHANG D. Research status and development trend of human-machine co-driving technology for intelligent vehicles [J]. Journal of China Highway and Transportation, 2021, 34(6):214-237. (in Chinese)
- [11] WANG J, PEETA S, HE X Z. Multiclass traffic assignment model for mixed traffic flow of human-driven vehicles and connected and autonomous vehicles[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2019(126):139-168.
- [12] 黄中祥,覃定明,况爱武. 考虑 CAV 影响的道路网络容量模型[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2018, 15(4):45-51.
- HUANG Z X, QIND D M, KAUNG A W. Road network capacity model considering the influence of CAV[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 15(4):45-51. (in Chinese)
- [13] 黄中祥,唐志强,覃定明,等. 无人驾驶环境下考虑 OD 结构的路网容量模型[J]. 中国公路学报, 2019, 32(12):98-105.
- HUANG Z X, TANG Z Q, QIN D M, et al. Road network capacity model considering OD structure in driverless environment[J]. Chinese Journal of Highways, 2019, 32(12):98-105. (in Chinese)
- [14] BAGLOEE S A, SARVI M. Heuristic approach to capacitated traffic assignment problem for large-scale transport networks[J]. Transportation Research Record, 2015, 2498(1):1-11.
- [15] BAGLOEE S A, SARVI M, PATRIKSSON M. A hybrid branch and bound and benders decomposition algorithm for the network design problem[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2017, 32(4):319-343.
- [16] BAGLOEE S A, TAVANA M, ASADI M, et al. Autonomous vehicles: Challenges, opportunities, and future implications for transportation policies[J]. Journal of Modern Transportation, 2016(24):284-303.
- [17] BAGLOEE S A, SARVI M, PATRIKSSON M, et al. A mixed user-equilibrium and system-optimal traffic flow for connected vehicles stated as a complementarity problem: Mixed user-equilibrium and system-optimal traffic flow[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2017, 32(2):562-580.
- [18] 甘明,王丰,林志翔. 军事物流路网可靠性的 Monte Carlo 评估方法[J]. 军事交通学院学报, 2019, 21(3):58-63.
- GAN M, WANG F, LIN Z X. Monte Carlo evaluation method of military logistics network reliability [J]. Journal of Military Transportation College, 2019, 21(3):58-63. (in Chinese)
- [19] 刘秋杰. 城市路网可靠性及其模型研究[D]. 成都:西南交通大学, 2011.
- LIU Q J. Research on urban road network reliability and its model[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [20] HONG K L, LUO X W, SIU B W Y. Degradable transport network; Travel time budget of travelers with heterogeneous risk aversion[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2006, 40(9):792-806.
- [21] 孙超,王欣,童蔚苹,等. 用户均衡与系统最优原则下交通分配模型的建立与分析[J]. 中国科技论文, 2013, 8(11):1073-1077.
- SUN C, WANG X, TONG W P, et al. Establishment and analysis of traffic allocation model under the principle of user equilibrium and system optimization[J]. Chinese Journal of Science and Technology, 2013, 8(11):1073-1077. (in Chinese)
- [22] 王灿,汤宇卿. 博弈论视角下的交通分配系统最优与用户均衡的探讨[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2014, 38(4):850-854.
- WANG C, TANG Y Q. Research on optimal and user equilibrium of traffic distribution system from the perspective of game theory[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering), 2014, 38(4):850-854. (in Chinese)