

基于随机森林的智能网联汽车开放 测试道路评级算法

王 东¹, 李宇暄², 吴 欢², 宗 芳²

(1. 交通运输部科学研究院, 北京 100029; 2. 吉林大学 交通学院, 长春 130022)

摘 要: 为研究开放测试道路对智能网联汽车行驶安全性测试的有效性, 本文提出了基于随机森林的智能网联汽车开放测试道路评级算法。从道路复杂性、安全保障性、场景多样性、设施全面性和场景典型性五方面构建了智能网联汽车开放测试道路评级指标体系, 建立智能网联汽车开放测试道路评级的随机森林模型, 应用国内外已建开放测试道路数据进行模型标定, 并以长春市智能网联汽车开放测试道路为案例, 验证算法可行性。结果表明: 应用本文所提出的智能网联汽车开放测试道路评级算法可准确进行道路评级, 为智能网联汽车开放测试道路的选择、规划和建设提供模型支持。

关键词: 交通运输规划与管理; 智能网联汽车; 开放测试; 道路分级; 随机森林

中图分类号: U491.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)09-2998-09

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20250544

Rating algorithm for open test road of intelligent connected vehicle based on random forest

WANG Dong¹, LI Yu-xuan², WU Huan², ZONG Fang²

(1. China Academy of Transportation Science, Beijing 100029, China; 2. Transportation College, Jilin University, Changchun 130022, China.)

Abstract: To investigate the effectiveness of open roads in the ICV driving safety test, a rating algorithm for open road in ICV test according to the theory of random forest was proposed. A rating index system for open testing roads of intelligent connected vehicles was constructed from five aspects: road complexity, safety assurance, scene diversity, facility comprehensiveness, and scene typicality. Then a random forest model for the rating of open road is built and calibrated with the data of the existing open roads in ICV test. The rating algorithm is then applied in rating of open roads in Changchun City, the results of which demonstrates the feasibility and effectiveness of the model. The results indicate that the proposed intelligent connected vehicle (ICV) open test road rating algorithm can accurately perform road rating, providing model support for the selection, planning, and construction of open test roads for ICV.

Key words: transportation planning and management; intelligent connected vehicle (ICV); open test; road rating; random forest

收稿日期: 2025-06-22.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61873109).

作者简介: 王东(1979-), 男, 副研究员, 硕士. 研究方向: 交通运输. E-mail: wdong010@163.com

0 引言

随着无人驾驶和无线通信技术的迅速发展,传统交通系统正逐渐向自主式交通系统转型,作为自主式交通系统重要组成部分的智能网联汽车也在不断更新与迭代^[1-3]。然而,智能网联汽车的发展离不开对其在测试道路行驶的安全性及行驶能力进行测试和评估。智能网联测试道路主要分为封闭场地测试和开放道路测试,其中开放道路测试是检验智能网联车辆在实际交通环境下行驶安全性及运行能力的重要环节。因此,针对智能网联汽车开放测试道路安全性测试评价的研究变得尤为重要。

目前,以美、日、欧等为代表的发达国家和地区正在大力发展智能网联汽车测试技术,并出台相关的测试道路评价指标以促进智能网联汽车技术的研发。例如,美国的SAE J3161标准提出3个测试道路等级,分别为:Level 1路侧标志数字化(如电子限速牌),Level 2支持SPAT(信号灯相位时序)广播,Level 3路侧参与车辆轨迹规划(如匝道合流辅助)。欧洲道路运输研究咨询委员会(European road transport research advisory council, ERTRAC)根据是否具有静态道路标识的数字化地图、事故、天气与微观交通情况等因素提出智能网联道路分级标准,将测试道路按照数字化与协同感知程度由高到低分为A、B、C、D、E 5个等级^[4]。欧洲的ITS-G5标准提出基础V2I(如限速提醒)、协作式感知(如施工区域预警)和全自动化协同(如优先通行权分配)3个等级。

国内各省市近年大力推进智能网联汽车开放道路测试进程。北京、上海、重庆各地先后发布了智能网联汽车开放道路测试实施细则或者管理办法,指导路测工作,并开放了部分道路进行测试^[5,6]。针对某一拟建设为智能网联汽车开放测试道路的路段,需根据其道路环境、交通设施、测试场景等情况分析其能够满足哪一等级智能网联汽车的测试要求。北京市交通委员会从道路类型、交通设施以及交通密度等方面首次提出了系统的测试道路评价指标体系,明确了初步的交通管理设施要求^[7]。并且针对北京高级别自动驾驶示范区的开放道路,提出3个设施能力建设等级,包括1.0阶段(覆盖5G+V2X),支持信号灯信息推送;2.0阶段(雷视一体机全域覆盖,实现弱势交通参与者预警);3.0阶段(引入“智慧城市专

网”,支持车路云一体化控制)。上海奉贤测试区要求路侧单元(Road side unit, RSU)支持DSRC/C-V2X双模通信,且延迟在100 ms以内。我国也正在推动《智能网联汽车车路协同系统系列标准》的制定进程。

虽然国内外在智能网联汽车道路等级评估方面的科技进展主要来源于上述工程实践方面,但在理论研究方面也有一定收获。例如,宗晨宏等^[8]基于层次分析法建立了智能网联汽车测试场评价层级模型,提出了一种智能网联汽车测试场可靠性评价的方法。李晓庆等^[9]综合考虑道路基础设施、道路交通运行和道路社会环境三大因素,构建了面向智能网联汽车开放测试道路的交通综合复杂度评价指标体系。黄丽^[10]从安全性、智能性和舒适性等方面建立了多层次自动驾驶评价指标体系,并利用模糊综合评价法对自动驾驶测试结果进行评价。滕金润^[11]综合考虑人、车、路、环境和“云端”5类因素,建立了基于层次熵权-物元可拓道路交通安全评价模型,以评价测试道路的安全性。

除了以上关于测试道路设施和等级的评价研究之外,现有关于智能网联汽车测试方面的研究更多是有关测试规程和方法。例如,Avery^[12]提出了车辆检测与测试系统的完整性方法,Daniel^[13]运用VBOX3i进行了不同路面条件下车辆制动距离的分析研究,马亚芳等^[14]提出了智能网联汽车需要测试的项目。

由以上研究可知,针对智能网联汽车开放测试道路的评价标准尚未统一,现有测试标准更强调道路设施提供的通信和协同能力,对于标准化场景评价的侧重程度有所欠缺。此外,对于众多指标组成的指标体系,客观确定评价指标的权重非常重要。而现有根据工程经验或专家打分等主观确定权重的方法并不能满足客观评价的要求,亟须采取数据驱动的量化权重计算算法。因此,为了避免仅凭主观经验进行测试道路选址和评级而导致的评价方法可转移性差、测试结论缺乏有效性和准确性等问题,需要针对智能网联汽车开放测试道路的量化评价指标和评价算法展开深入研究,确定科学且具有普适性的量化评级方法。

本文提出智能网联汽车开放测试道路评级指标体系,建立智能网联汽车开放测试道路评级的随机森林模型,为智能网联汽车开放测试道路的选择、规划和建设提供模型支持,从而促进智能网

联汽车测试理论的发展和测试技术水平的提升,有利于新型基础设施建设进程的推进。

1 随机森林理论概述

为避免开放测试道路传统定性评级方法打分过程主观性过强等缺陷,本文采用机器学习方法,通过建立分类器进行开放测试道路评级。由于目前国内外已建设的成熟智能网联汽车开放测试道路有限,可供模型标定的样本量较少,如基于多项 Logit (Multinomial logit, MNL) 模型等普通模型建立分类器则模型标定困难,因此,采用随机森林算法(Random forest),其能应用小样本准确地完成分类任务,有效避免数据量小而产生的误差,在多维小样本数据分类领域有着广泛应用。

随机森林是一种基于分类树(Classification tree)的组合分类算法^[15],利用随机重采样技术和节点随机分裂技术构建多棵决策树。在给定自变量 X 下,每个决策树分类器通过投票决定最优的分类结果。该算法通过分析具有复杂相互作用的众多分类特征($X_1, X_2, \dots, X_n$),得到各自变量对因变量 Y 的重要性度量,常作为高维数据的特征选择工具,对部分数据缺失的分类任务仍保持较高的鲁棒性。它通过对大量分类树的投票提高了模型的分类准确程度,因其具有数据抗噪声能力强、稳定性高、学习训练速度快等优点,被广泛应用于各种分类、预测、特征选择以及异常点检测问题中^[16-19]。随机森林算法采用分类与回归树(Classification and regression tree, CART),用基尼指数选择最优分类特征,数据集的纯度用基尼值表示为:

$$\text{Cini}(C) = \sum_{k=1}^{|K|} p_k(1 - p_k) \quad (1)$$

式中: p_k 为当前样本集合 C 中第 k 类样本所占的比例; K 为分类任务中的类别总数。

从式(1)可知,数据集纯度与基尼值的大小成反比,特征的基尼指数为:

$$\text{Cini_index}(C, a) = \sum_{v=1}^v \frac{|C^v|}{|C|} \text{Cini}(C^v) \quad (2)$$

式中: a 为离散特征,其有 v 个可能取值。假定离散属性 a 有 v 个可能取值 $\{a^1, a^2, a^3, \dots, a^v\}$,若使用 a 对样本 C 进行划分,则会产生 v 个分支节点,其中第 v 个分支节点包含了 C 中所有在属性 a 上取值为 a^v 的样本,记为 C^v 。信息增益就是通过度量不同分支节点所包含的样本数不同,给分支节点赋予权重 $|C^v|/|C|$,即样本数越多的分支节点影

响越大。因此,在特征集合中,选择基尼指数最小的特征作为最优分类特征进行节点分裂。

随机森林的边缘函数为:

$$\text{mg}(x, y) = \frac{1}{Z} \sum_{z=1}^Z I(h_z(x) = y) - \max_{j \neq y} \frac{1}{Z} \sum_{z=1}^Z I(h_z(x) = j) \quad (3)$$

式中: Z 为随机森林中树的总数量; $h_z(x)$ 为第 z 棵决策树对输入 x 的预测结果; $I(\cdot)$ 为指示函数,当内部条件成立时值为 1,否则为 0; y 为样本的真实标签; j 为所有非真实标签的类别($j \neq y$); $\max_{j \neq y}$ 为模型预测错误时得票最高的错误类别得票率。

随机森林的泛化误差上界为:

$$PE^* \leq \rho(1 - s^2)/s^2 \quad (4)$$

式中: ρ 为相关系数的均值; s 为分类器的强度, $s = E_{x,y} \text{mr}(x, y)$ 。

随机森林中每棵决策树的分类准确度以及树与树之间的相关程度共同决定了随机森林的泛化误差上界,即不同树之间的相关程度增大,每棵树的分类准确度越高,从而随机森林泛化误差上界越大。此外,每棵分类树在每个节点处随机选择特征进行分裂构造分支,有利于最大限度降低各棵分类树之间的相关性,提高了随机森林的分类准确程度和可靠性。

2 开放测试道路评级的随机森林模型

2.1 随机森林构建

根据国内外智能网联道路评级现有标准和智能网联汽车道路测试建设要求^[4-9, 20-24],将智能网联汽车开放测试道路等级分为 $R_1 \sim R_5$ 五个等级: R_1 代表无智能化/初步具备智能化基础设施的道路; R_2 代表具备部分智能网联化基础设施的道路; R_3 代表基于交通基础设施的有条件实现自动驾驶和网联化的道路; R_4 代表基于交通基础设施可实现高度自动驾驶的道路; R_5 代表基于交通基础设施可实现完全自动化驾驶的道路。这 5 个等级的道路分别对应可供 $L_1 \sim L_5$ 等级的智能网联汽车道路测试使用。从测试道路复杂性、测试场景多样性、相关设施全面性、交通安全的保障性和交通场景的典型性五方面提出智能网联汽车开放测试道路评级所需的内容,共计 59 个评价指标,如表 1 所示。

表 1 智能网联汽车开放测试道路评级自变量汇总表
Table 1 Summary of independent variables for road rating of intelligent connected vehicle open test

评价方面	评价内容	具体指标	评价方面	评价内容	具体指标
测试道路 复杂性	路网形态	X_1 方格式	道路交通管理设施		X_{31} 限速标志
		X_2 放射式			X_{32} 停车让行标志标线
		X_3 环形放射式			X_{33} 车道线
		X_4 自由式			X_{34} 人行横道线
	道路等级	X_5 快速路			X_{35} 中央隔离带
		X_6 主干路			X_{36} 机非分离设施
		X_7 次干路			X_{37} 可变车道
		X_8 支路			X_{38} 减速带
	车道数	X_9 含有单向双车道道路	相关设施 全面性	道路交通设施	X_{39} 公交专用道
		X_{10} 含有单向三车道道路			X_{40} 路边式公交站
X_{11} 含有单向四车道及以上道路		X_{41} 港湾式公交站			
X_{12} 道路变窄		X_{42} 路侧停车设施			
交叉口类型	X_{13} 十字交叉口	路侧设施智能化水平		X_{43} 左弯待转区	
	X_{14} 丁字交叉口			X_{44} 照明设施	
	X_{15} 异形交叉口			X_{45} R_1 (基础信息化)	
				X_{16} 环形交叉口	X_{46} R_2 (部分协同)
X_{47} R_3 (有条件协同)					
	X_{48} R_4 (高度协同)				
测试场景 多样性	路段类型	X_{17} 直路	交通安全 保障性	交通事故率/(起·年 ⁻¹)	X_{49} 简易交通事故率 ≤ 50
		X_{18} 坡路			X_{50} 一般交通事故率 ≤ 10
		X_{19} 弯路			X_{51} 重大交通事故率 ≤ 1
	交叉口 组织方式	X_{20} 机动车信号灯交叉口	居住密度		X_{52} 中低居住密度
		X_{21} 方向指示信号灯交叉口			X_{53} 中高居住密度
		X_{22} 无信号灯交叉口			
	障碍物	X_{23} 路墩、井盖、车阻石等	路段饱和度 (高峰时段)		X_{54} 路段饱和度 ≤ 0.6
		X_{24} 学校区域			X_{55} $0.6 < \text{路段饱和度} \leq 0.75$
	X_{25} 隧道				X_{56} $0.75 < \text{路段饱和度} \leq 0.9$
	特殊场景		X_{26} 桥下道路	路段饱和度 (全时段)	
		X_{27} 林荫路	X_{58} 部分路段饱和度 > 1		
		X_{28} 互通式立交	交通场景 典型性		
		X_{29} 转弯盲区			
		X_{30} 无中央隔离带			

路侧设施的智能化、协同化程度是进行智能网联汽车测试道路评估的重要指标。根据《智能网联汽车道路测试与示范应用管理规范》,对应前述智能网联汽车开放测试道路的 5 个等级,路侧设施及所提供功能如下:

(1) R_1 (基础信息化):具有基础交通感知(如流量检测)和静态信息发布(可变情报板)设施;具备单向信息推送功能,而无实时交互能力。

(2) R_2 (部分协同):具有动态感知(雷视融合)和局部 V2I 通信(红绿灯状态推送)设施;支持车-路单向数据共享(如信号灯配时)。

(3) R_3 (有条件协同):具有高精度感知(厘米

级定位)、边缘计算(事件实时处理)设备,且 5G/V2X 全覆盖;具备车-路双向交互能力(如交叉口碰撞预警)。

(4) R_4 (高度协同):具有全域数字化(高精地图、全息感知)、AI 决策(云端-边缘协同)设施;支持车辆编队、优先通行等复杂场景。

(5) R_5 (完全协同):实现全要素智能(自组织网络、自适应调控);具有车-路-云一体化能力,支持完全无人驾驶。

此外,《北京市自动驾驶车辆测试路段道路要求(试行)》中定义居住密度是依据道路周边的居民区、住宅小区情况设定^[7]。共计 3 种情况,分别

为:①低居住密度,即道路周边无或少量封闭住宅小区;②中居住密度,即道路周边有部分非连续封闭住宅小区;③高居住密度,即道路处在大型居民区内或周边有连续开放式住宅小区。

部分路段饱和度指的是某一条道路部分路段高峰时段的路段饱和度值,通常为某一条道路全时段路段饱和度的最大值。

本文采用如下步骤构建随机森林:

(1)从原始训练数据集中应用 bootstrap 重采样方法有放回地随机抽取样本生成 Q 个子样本集,构建 Q 棵分类树。原始数据集中每次未被抽到的样本则组成了袋外数据(Out of bag, OOB), Q 次抽样对应总计 Q 个袋外数据,用于评估分类误差。

(2)设因变量 Y 有 N 个特征,则在每一棵树的每个节点处随机抽 m 个特征($m \leq N$),通过计算每个特征蕴含的信息量,在 m 个特征中选择基尼指数最小的一个特征作为最优划分特征进行节点分裂。

(3)根据基尼指数最小的特征将节点分裂成 2 个分支,再从剩下的特征中寻找分类效果最好

的特征,不断构造分支,使分类树最大限度地生长,不做任何剪裁,直到该棵分类树使用了全部特征自变量。

(4)用生成的 Q 棵分类树组成随机森林,用随机森林对新的给定数据进行分类,通过每一棵分类树投票,得到最优分类结果。根据效用最大化理论^[25],最终确定智能网联汽车开放测试道路等级。需要说明的是,虽然 59 个特征自变量存在共线性关系,但利用随机森林算法可以在降低各分类树相似程度的同时兼顾分类结果的准确性^[15]。同时在数据部分缺失的情况下,随机森林算法仍有较高的稳定性与精准度,适用于本文所研究的原始训练数据集中部分测试路段自变量数据难以获取的情况^[15]。

2.2 随机森林分类器生成训练

本文将国内多个城市确定评级的开放测试道路共计 107 组数据中的 64 组(约占总样本的 60%)作为随机森林分类器训练数据集,将剩余 43 组数据(约占总样本的 40%)作为模型验证数据集,用于误差及精确度分析。部分智能网联汽车测试路段信息如表 2 所示。

表 2 部分国内城市智能网联汽车测试路段相关情况

Table 2 Relevant conditions of test roads in some domestic cities

城市	测试开放道路总里程/km	分布区域	测试开放道路环境	交通概况
北京	2 238.43	大兴、海淀、房山、顺义、亦庄等 7 个区	以双向四车道为主	交通流量较小
上海	2 008	嘉定、临港、奉贤和金桥、浦东新区等区域	测试道路几何线形较好	交通流量小
深圳	144.69	福田、南山、盐田、宝安等 9 个区	测试道路以非交通性主、次干路为主	交通流量较小 交通状况良好
武汉	3 378.73	遍布武汉市 12 个行政区	测试场景多样,路况全面	交通流量小
杭州	115	余杭区、临平区、富阳区	测试场景多样,路况全面	交通流量小 交通状况良好
广州	1 980	南沙、黄埔、花都等 6 个行政区	测试场景丰富	社会车辆较少

将国内各城市智能网联汽车开放测试道路相关数据输入,训练生成随机森林分类器,利用 R 语言执行下述代码:

```
install.packages("randomForest")
library(randomForest)
road<-read.csv("d:/data/road.Csv",header=TRUE)
```

```
RF1<-randomForest(road[,c('R1','R2','R3','R4','R5')],road[,c('rank')],importance=TRUE,ntree=500)
```

其中,road[,c('R1','R2','R3','R4',

'R5')]表示道路的量度,是一个由国内各城市测试道路信息构成的矩阵;road[,c('rank')]表示测试道路对应的等级,是由每个测试场道路等级组成的一个向量。应用时,将待评级的道路特征参数对应的 59 个指标作为给定的 X_n 输入,即可得到该随机森林对该道路等级的投票结果,其过程如图 1 所示。

2.3 精度分析

为了得到稳定的识别结果,利用不同的样本量训练模型,分析样本量大小对精度的影响,其结果如图 2 所示。结果表明:当路测道路数达到 20

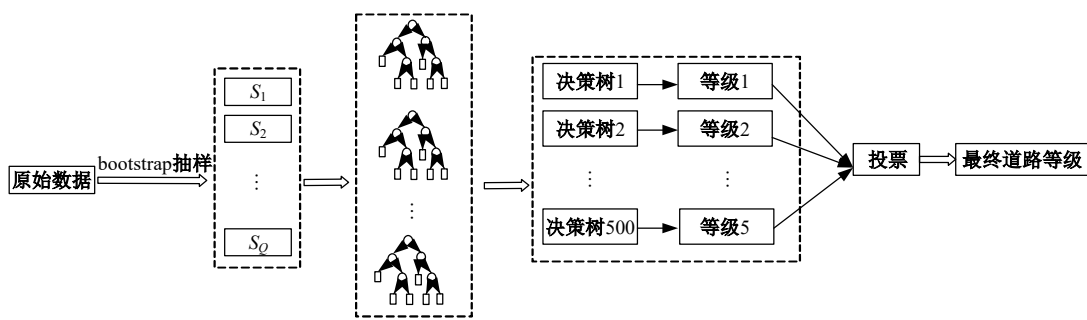


图 1 随机森林过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of random forest

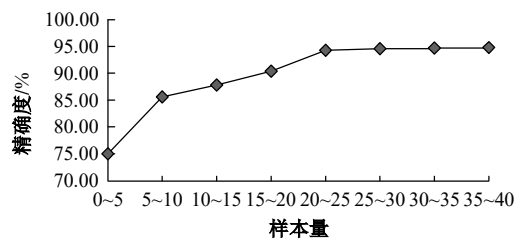


图 2 样本量影响分析

Fig. 2 Influence of sample size

以上时,模型结果开始趋于稳定。

在相同的训练条件下,引入Logit模型方法,对两种方法的识别结果进行对比分析,其结果如表 3 所示。

表 3 不同算法的识别精度

Table 3 Recognition accuracy of different algorithm

路测等级	随机森林算法	Logit 算法
R ₁	98.84	84.34
R ₂	89.00	76.42
R ₃	90.94	64.55
R ₄	88.57	66.78
R ₅	87.15	47.00

根据 Logit 模型,将某一开放测试道路区域 β 被评为第 i 等级的效用函数定义为:

$$U_{i\beta} = V_{i\beta} + \epsilon_{i\beta} \tag{5}$$

式中: $V_{i\beta}$ 为可观测到的影响道路评级的因素效用; $\epsilon_{i\beta}$ 为不可观测到的影响因素的效用变动项。

判定某一开放测试道路区域 β 为第 i 等级的概率 $P_{i\beta}$ 为:

$$P_{i\beta} = \text{Prob}(U_{i\beta} > U_{j\beta}, i \neq j, j \in J_n) \tag{6}$$

定义 $U_{\beta}^* = \max(V_{j\beta} + \epsilon_{j\beta})$, 则有 $U_{\beta}^* = V_{j\beta}^* + \epsilon_{j\beta}^*$ 。定义 $\epsilon_{j\beta}^*$ 服从二重指数分布,则判定道路 β 为等级 i 的概率 $P_{i\beta}$ 可以表示为:

$$P_{i\beta} = \text{Prob}(V_{i\beta} + \epsilon_{i\beta} > V_{j\beta}^* + \epsilon_{j\beta}^*, i \neq j, j \in J_n) =$$

$$\text{Prob} \{ (V_{i\beta} + \epsilon_{i\beta}) - (V_{j\beta}^* + \epsilon_{j\beta}^*) \geq 0 \} = \frac{e^{v_i}}{\sum_{j=1}^5 e^{v_j}} \tag{7}$$

由表 3 可知,对于单个道路路测等级识别准确率和平均识别准确率,随机森林算法明显优于 Logit 方法。此结果表明:基于众多决策树投票机制的随机森林算法在智能网联汽车开放测试道路评级中优于传统 Logit 方法,是可行的。此外,国内现有符合 R₅ 等级路测要求的道路样本量较少,受到样本量的限制,Logit 在 R₅ 等级的分类精确度只有 47%。而由于随机森林样本需求量少,分类效果并不受样本量小的影响,所以表现出较高的预测精度。

3 案例分析

以长春市智能网联汽车开放测试道路(一期)为案例,采用本文所提出的智能网联汽车开放测试道路评级算法确定其道路等级。

该开放测试道路以净月核心封闭测试区为核心,包含 6 个路段,全程共 8 km。路网、用地和道路设施等主要信息如图 3 所示。

测试道路类型包括直路、弯路、坡路、林荫路、立交桥等,其车道类型涵盖双向两车道、双向四车道、双向六车道以及带有隔离设施的双向六车道;测试场景丰富,路况复杂,多条道路交汇,涵盖十字路口、丁字形交叉口、Y 形交叉口、异形交叉口、环岛等交叉口类型,具体如表 4 所示。

交通设施包含交通标志和标线、信号灯、交通摄像头、安防摄像头等。经实地交通调查,测试道路交通标志比较齐全,但在学校等重点区域缺少限速等标志,且部分路段交通标线模糊。另外,测试区域涵盖多个交叉口,且各交叉口交通设施情况相对复杂。根据调查得到各交叉口交通设施的具体设置情况如图 3 和表 4 所示。



图3 长春市测试道路范围及信号灯布设示意图

Fig. 3 Sketch map of changchun test road scope and signal lamp layout

表 4 长春市测试道路设施表

Table 4 Facilities of test road in Changchun				
序号	地点	信号灯	交通摄像头	交叉口类型
1	绿柳路	布设	布设	十字路口
2	青桐路	未布设	未布设	丁字路口
3	蓝桉路	聚业大街	布设	丁字路口
4	紫杉路	未布设	未布设	丁字路口
5	银杏路	布设	布设	异形路口
6	金桔路	未布设	未布设	Y形路口
7	福业广场	未布设	未布设	环岛
8	郁金香街	未布设	未布设	丁字路口
9	樱花街	布设	布设	十字路口
10	福祉大路	擎天树街	布设	十字路口
11	槐荫路	未布设	布设	十字路口
12	新城大街	未布设	未布设	—
13	紫杉路	欧李街	未布设	十字路口
14	夏荷路	欧李街	未布设	丁字路口
15	枫叶路	欧李街	未布设	丁字路口
16	百合街	欧李街	未布设	十字路口
17	百合街	红梅街	未布设	十字路口
18	长春大学旅游学院	未布设	未布设	环岛
19	长春市实验中学	未布设	未布设	—
20	长春市机械工业学校	未布设	未布设	—

将该道路相关数据对应的 59 个指标作为给定的 X_n 输入已接受训练的智能网联汽车开放测试道路评级随机森林中,执行分类,得到该道路各

等级概率分别为 R_1 : 9.5%、 R_2 : 25.2%、 R_3 : 34.4%、 R_4 : 18.2%、 R_5 : 12.7%。结果表明:该道路为 R_3 的概率最大。这是因为高等级的道路可供同等级或更低等级的智能网联汽车测试使用,所以随机森林判定的最终结果为该道路可供 R_3 及以下等级的智能网联汽车测试使用。

《长春市智能网联汽车开放测试道路(一期)可行性评估报告》结合开放测试道路区域的基础条件,对道路状况、交通流量及交通事故、周边用地、交通设施、路侧设施智能化水平、测试要求、交通安全、行车效率等因素进行分析,得出结论“测试道路能够满足 L_3 及以下智能网联汽车开放式路测的相关要求”^[26]。这与随机森林判定结果一致,证明了本算法的可行性。

4 结束语

本文针对智能网联汽车开放道路测试评级存在的传统打分方式主观性强、过程烦琐、缺乏统一的定量计算方法等不足,提出了一种基于随机森林的评级算法。在充分考虑不同等级智能网联汽车测试需要的基础上,从测试道路的复杂性、测试场景的多样性、相关设施的全面性、交通安全的满足性以及交通影响的最小化五方面列出影响测试道路评级的特征变量,利用国内多个较为成熟的

开放测试道路数据训练生成随机森林。通过对长春市智能网联汽车开放测试道路的案例分析,验证了方法的可行性。本文提出的特征变量体系和评级随机森林模型对于待建或拟评估的开放测试道路评级具有理论指导意义,有利于提升智能网联汽车测试评估技术水平。本文所提出的智能网联汽车开放测试道路的评价方法体系和计算方法聚焦标准化场景,不但包括传统的道路设施、交通设施方面的指标,而且涵盖智能网联通信和协同能力。此外,评价指标的权重确定采取了客观定量计算方法,解决了以往研究依赖主观工程经验或专家打分的问题。相比于传统的层次分析、专家咨询等方法,基于随机森林的智能网联汽车道路评级算法能够科学、准确地评估开放测试道路的等级。

参考文献:

- [1] 杨涛, 马玉琴, 刘梦, 等. 智能网联环境下信号交叉口车辆轨迹重构模型[J]. 西南交通大学学报, 2024, 59(5): 1148-1157.
Yang Tao, Ma Yu-qin, Liu Meng, et al. Vehicle trajectory reconstruction model of signalized intersection in connected automated environments[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2024, 59(5): 1148-1157.
- [2] 蒋阳升, 刘梦, 王思琛, 等. 基于跟驰特性的智能网联车混合交通流轨迹重构[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(6): 1135-1142.
Jiang Yang-sheng, Liu Meng, Wang Si-chen, et al. Trajectory reconstruction for traffic flow mixed with connected automated vehicles based on car-following characteristics[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 56(6): 1135-1142.
- [3] 李骁驰, 赵祥模, 徐志刚, 等. 面向智能网联交通系统的模块化柔性试验场[J]. 中国公路学报, 2019, 32(6): 137-146.
Li Xiao-chi, Zhao Xiang-mo, Xu Zhi-gang, et al. Modular flexible test bed for intelligent and connected transportation system[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(6): 137-146.
- [4] Connected automated driving roadmap [R]. Brussels: European Road Transport Research Advisory Council, 2019.
- [5] 和福建, 石娟, 秦孔建. 国内外智能网联汽车公共道路测试现状和发展趋势研究[J]. 中国汽车, 2018(12): 28-33.
He Fu-jian, Shi Juan, Qin Kong-jian. Research on the current situation and future development of domestic and foreign intelligent and connected vehicle public road testing[J]. China Auto, 2018(12): 28-33.
- [6] 于胜波, 陈桂华, 李乔, 等. 国内外智能网联汽车道路测试对比研究[J]. 汽车文摘, 2020(2): 29-36.
Yu Sheng-bo, Chen Gui-hua, Li Qiao, et al. Comparative research on intelligent and connected vehicle road tests at home and abroad[J]. Automotive Digest, 2020(2): 29-36.
- [7] 北京自动驾驶车辆测试路段道路要求(试行)[R]. 北京: 北京市交通委员会, 2018.
- [8] 宗晨宏, 马健霄, 陆涛. 封闭式智能网联汽车测试场可靠性评价方法[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学, 2023(4): 105-114.
Zong Chen-hong, Ma Jian-xiao, Lu Tao. Reliability evaluation method of closed test fields for intelligent connected vehicles[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2023(4): 105-114.
- [9] 李晓庆, 刘奇, 李炳林, 等. 智能网联汽车测试开放道路选线及分级研究[J]. 交通工程, 2019(5): 74-78.
Li Xiao-qing, Liu Qi, Li Bing-lin, et al. Research on selection and classification of intelligent connected vehicle public testing roads[J]. Journal of Transportation Engineering, 2019(5): 74-78.
- [10] 黄丽. 部分自动驾驶汽车场地测试与评价研究[D]. 重庆: 重庆大学车辆工程学院, 2018.
Huang Li. Study on the field test and evaluation methods of partial automated vehicles[D]. Chongqing: College of Vehicle Engineering, Chongqing University, 2018.
- [11] 滕金润. 智能网联汽车开放测试道路交通安全评价研究[D]. 成都: 西华大学交通学院, 2022.
Teng Jin-run. Research on traffic safety evaluation of open test roads for intelligent connected vehicles[D]. Chengdu: College of Transportation, Xihua University, 2022.
- [12] Avery D J. System and method for testing the integrity of a vehicle testing/ diagnostic system[P]. United States Patent: 20110185115, 2011-07-28.
- [13] Daniel L. Research of the stopping distance for different road conditions[J]. Transport Problems, 2011, 6(4): 119-126.
- [14] 马亚芳, 王文杰, 顾可, 等. 智能网联汽车自动驾驶功能测试分析[J]. 时代汽车, 2021 (23): 38-40, 46.
Ma Ya-fang, Wang Wen-jie, Gu Ke, et al. Test and analysis of autonomous driving function of intelligent

- and connected vehicles[J]. *Auto Time*, 2021 (23): 38-40, 46.
- [15] Breiman L. Random forests[J]. *Netherlands: Machine Learning*, 2001, 45(1): 5-32.
- [16] Strobl C, Boulesteix A L, Kneib T, et al. Conditional variable importance for random forests[J]. *England: BMC Bioinformatics*, 2008, 9(1): 1-11.
- [17] Reif D M, Motsinger A A, McKinney B A, et al. Feature selection using a random forests classifier for the integrated analysis of multiple data types[C]//*Proceedings of the 2006 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Bioinformatics and Computational Biology*, Toronto, Canada, 2006: 171-178.
- [18] Mohammed K, Sounak C, Mihail P. Predicting disease risks from highly imbalanced data using random forest[J]. *England: BMC Medical Informatics and Decision Making*, 2011, 11(7): 51-58.
- [19] Verikas A, Gelzinis A, Bacauskiene M. Mining data with random forests: a survey and results of new tests[J]. *England: Pattern Recognition*, 2011, 44(2): 330-349.
- [20] 智能网联道路系统分级定义与解读报告(征求意见稿)[R]. 北京: 中国公路学会自动驾驶工作委员会, 2019.
- [21] 北京市自动驾驶车辆道路测试能力评估内容与方法(试行)[R]. 北京: 北京市经济和信息化委员会, 2019.
- [22] 北京自动驾驶车辆测试路段道路要求(试行)[R]. 北京: 北京市交通委员会, 2019.
- [23] 蔡越, 潘怡宏. 智能网联汽车开放测试道路建设研究[J]. *城市道桥与防洪*, 2021(1): 24-28, 48. Cai Yue, Pan Yi-hong. Study on open test road construction of intelligent connected vehicle[J]. *Urban Roads Bridges & Flood Control*, 2021(1): 24-28, 48.
- [24] 蔡勇, 李秀文. 智能网联汽车测试评价体系研究[J]. *中国汽车*, 2018(10): 27-33. Cai Yong, Li Xiu-wen. Research on test and assessment system of intelligent & connected vehicle (ICV) [J]. *China Auto*, 2018(10): 27-33.
- [25] 张立建. 人们追求效用最大化的全新解读[J]. *广州大学学报: 社会科学版*, 2018, 17(4): 50-56. Zhang Li-jian. A new interpretation of people's pursuit of utility maximization[J]. *Journal of Guangzhou University (Social Science Edition)*, 2018, 17(4): 50-56.
- [26] 长春市智能网联汽车开放测试道路(一期)可行性评估报告[R]. 长春: 长春市启明信息技术股份有限公司, 2018.