

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2023.02.021

基于文献计量分析的交通量预测研究综述

裴玉龙, 何庆龄, 侯琳, 蔡小溪
(东北林业大学 交通学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要: 为了解交通量预测的研究现状和发展趋势, 基于VOSviewer文献计量工具, 以Web of Science核心合集和CNKI核心数据库近29 a (1993—2021年) 有关交通量预测研究的文献为研究数据源, 从发文年代、国家及地区、期刊来源和技术主题聚类分析了交通量预测领域研究态势。以“Traffic volume forecast”和“交通量预测”为检索主题, 检索了范围内592篇有效文献, 共涵盖6 438个关键词。基于科学知识图谱对交通量预测领域文献进行了梳理分析。结果表明: 交通量预测研究近29 a发文态势呈上升趋势, 我国文献发表数量位居首位; *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 不仅是文献发表数量最多的期刊, 同时也是被引次数最多的期刊, 《公路交通科技》是国内期刊中文献被引次数最多的期刊; 交通量预测领域的研究主要是从公路交通需求发展预测、交通量预测方法模型、交通事件与实时监测等角度切入, 重点围绕公路交通量预测、项目建设可行性研究、短时交通量预测方法模型构建与精度提升、交通事件监测和交通时空分布特征等主题开展研究; 国外近年关于公路交通量与建设投资关系的研究、非典型条件下的交通量预测和有关雨雪等不利天气下的交通量预测研究文献发表数量呈显著上升趋势; 国内在对四阶段法的改进、公路交通建设项目可行性研究和公路旅游交通量预测方面的研究相对丰富, 但主要是从经济、人口和旅游产业等宏观角度出发, 有必要进一步增加季节变化、个人出行特征和出行偏好等对公路旅游交通量预测的影响研究。

关键词: 交通工程; 可视化分析; 文献计量分析; 公路交通量预测; 短时交通量预测

中图分类号: U491.1⁺13

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2023) 02-0171-11

Review of Studies on Traffic Volume Prediction Based on Bibliometric Analysis

PEI Yu-long, HE Qing-ling, HOU Lin, CAI Xiao-xi

(School of Traffic and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang 150040, China)

Abstract: In order to understand the current study status and development trend of traffic volume forecast, based on the VOSviewer bibliometric tool, taking the Web of Science core collection and the literatures related to traffic volume prediction studies in recent 29 years (1993—2021) in CNKI core database as the data sources, the study trends in the field of traffic volume forecasting are analyzed in terms of article age, country and region, journal source and technical topics. Taking the “traffic volume forecast and” “traffic volume forecasting” as the search topics, 592 valid literatures covering 6 438 keywords are searched. Based on the scientific knowledge mapping, the literatures in the field of traffic volume prediction are sorted out and analyzed. The result shows that (1) Traffic forecasting studies have been on the rise in the past 29 years, and the number of publications in China is the highest. (2) *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* is not only the journal with the largest number of literatures, but also the journal with the largest number of citations, and Journal of Highway and Transportation Research and Development is the most cited journal among domestic journals. (3) The studies in the field of traffic volume forecasting are mainly conducted from the perspectives of highway traffic demand development prediction, traffic volume prediction method model, traffic events and real-time monitoring, focusing on the topics of highway traffic volume

收稿日期: 2021-05-31

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2572022AW62); 国家重点研发计划项目 (2018YFB1600902)

作者简介: 裴玉龙 (1961-), 男, 黑龙江桦川人, 博士, 教授. (yulongp@263.net)

prediction, project construction feasibility study, short-time traffic volume prediction method modelling and accuracy improvement, traffic event monitoring and traffic spatial and temporal distribution characteristics.

(4) The number of foreign study literatures on the relationship between highway traffic volume and construction investment, traffic volume prediction under atypical conditions and the studies on traffic volume prediction under adverse weather conditions such as rain and snows shown a significant increase in recent years. (5) Domestic studies on the improvement of the four-stage method, feasibility study of road traffic construction projects and road tourism traffic volume prediction are relatively abundant, but mainly from the macro perspective of economy, population and tourism industry, it is necessary to further increase the studies on the influence of seasonal changes, individual travel characteristics and travel preferences on road tourism traffic volume prediction.

Key words: traffic engineering; visual analysis; bibliometric analysis; highway traffic volume forecast; short-term traffic volume forecast

0 引言

交通量预测作为公路可行性研究阶段分析确定公路技术等级、建设规模、路线方案比选和安排建设时序,以及进行拟建项目国民经济评价和财务评价的基础和主要依据,并为城市道路网交通运行状态提供实时预测和研判,可及时发现路网中存在的问题,采取实时有效的交通控制和诱导,提高城市道路交通运行效率。现有交通量预测的研究综述多为针对特定主题的理论方法分析,如以时间序列^[1]、神经网络^[2]、支持向量机^[3]、深度学习^[4]等为切入点的交通量预测,缺乏通过文献计量学的角度,从宏观角度对国内外交通量预测研究的可视化对比分析。

自1969年阿伦·普理查德正式提出“文献计量学”这一术语以来,随着计算机技术的普及,文献计量学朝着科学化、信息化、网络化的方向发展,在探索学科发展现状、研究前沿、研究热点、系统论述等方面得到了广泛应用。文献计量学是以文献主题词、关键词、词频、作者、国家或地区、期刊来源等信息等为计量对象,应用数理统计的方法定量分析文献内部的知识单元和相关信息,通过计算机软件对定量分析结果进行挖掘归类,并对结果进行绘图,给出可视化的分析^[5]。

本研究采用文献计量方法,通过回顾最近29 a(1993—2021年)在交通量预测研究领域发表的592篇文献,探析在交通量预测研究历史进程中哪些国家/地区的研究成果占主要地位;该研究领域的核心期刊包括哪些;国际刊物研究进展和国内刊物研究进展的现状与异同。通过探析上述问题,可厘清交通量预测研究领域的发展脉络,明确国内外研究中

重点关注的主题及研究进展,通过国内外期刊发表的研究成果及方法的对比分析,发现当前我国相关研究的不足之处,并为当前和今后一个时期内的研究提供参考。

1 数据来源与方法原理

1.1 数据来源

以Web of Science核心合集和CNKI核心数据库文献为研究数据源,分析交通量预测研究现状与发展趋势。以“Traffic volume forecast”和“交通量预测”为检索主题,检索年限为1993至2021年4月,通过过滤文献的标题、摘要和关键词,剔除有关大气环境、航空交通流、IP网络流量、港口货物吞吐量预测、电信数据流量、通信机电技术行业等与研究内容不一致的文献,共检索得到592篇有效文献,将所有文献的“全纪录及参考文献”以文本文档格式导出,用以进行文献计量分析。

1.2 方法原理

文章应用VOSviewer文献计量工具,结合软件特性,对交通量预测检索文献进行了分析。VOSviewer是由荷兰学者^[5]开发,该软件基于相似度可视化技术对检索文献知识单元进行可视化分析,通过共现矩阵布局生成知识图谱,可有效进行文献期刊来源统计与主题挖掘等,其核心原理主要包括构建相似矩阵和VOS布局方法。

(1) 构建相似矩阵

构建相似矩阵是指通过将共现矩阵进行归一化,即对共现矩阵中元素(即本研究检索文献的关键词)出现的总数或出现次数的差异性进行校正,以便从共现矩阵得到相似矩阵^[5]。VOSviewer运用关联强度对共现数据中的元素两两之间相似度进行测量,即:

$$S_{ij} = \frac{C_{ij}}{w_i w_j}, \quad (1)$$

式中, S_{ij} 为元素 i 和元素 j 之间的相似度; C_{ij} 为元素 i 和元素 j 共现的次数; w_i , w_j 分别为元素 i 和元素 j 的总出现次数。

(2) VOS 布局方法

VOS 布局方法是用任意 1 对元素 i 和元素 j 的空间距离来反映元素之间的相似度 S_{ij} , 确定元素在二维空间的位置, 元素间距与相似度呈正相关。VOS 布局方法的核心思想是最小化所有元素对之间欧氏距离的平方加权和, 即:

$$V(x_1, \dots, x_n) = \sum_{i < j} S_{ij} \| \bar{x}_i - \bar{x}_j \|^2, \quad (2)$$

式中, n 为需要进行布局的元素个数; 向量 $\bar{x}_i = (x_{i1}, x_{i2})$ 二维空间中元素 i 的位置; $\| \cdot \|$ 为欧几里得范数。

目标函数的最小化在式 (3) 的约束条件下进行:

$$\frac{2}{n(n-1)} \sum_{i < j} \| \bar{x}_i - \bar{x}_j \|^2 = 1. \quad (3)$$

2 文献统计分析

2.1 文献年度分布

某研究领域文献发表数量的变化情况是衡量该研究领域发展趋势的重要指标, 同时体现该领域知识研究范围的变化。检索范围内有关交通量预测的研究论文最早出现于 1993 年, 孙保原等^[6]结合我国的交通量调查现状, 提出了具有采样少、精度高、预测准确的灰色系统交通量预测方法, 弥补了统计预测方法的局限性。截至 2021 年 4 月, 交通量预测领域共计发表相关学术文献 592 篇, 历年文献发表数量趋势见图 1。

由图 1 可知, 对交通量预测的研究近年来愈发受到重视且研究成果颇丰。2003 年以前交通量预测研究以国内为主, 主要集中于以四阶段法为理论基础的公路交通量预测和灰色预测模型的研究。2003 年以后国内外交通量预测研究进入快速发展时期, 研究内容主要以时间序列、神经网络为主, 同时结合灰色理论和模糊逻辑等理论, 构建交通量组合预测模型。2012 年以后, 国内外交通量预测研究继续呈增长趋势, 其研究内容相对更加多元, 包括: 支持向量回归、机器学习等以大数据为背景的智能交通的快速发展, 通过挖掘交通时空分布特征, 考虑交通事件、占道施工、不利天气等非典型条件下的交通预测模型成为研究热点。

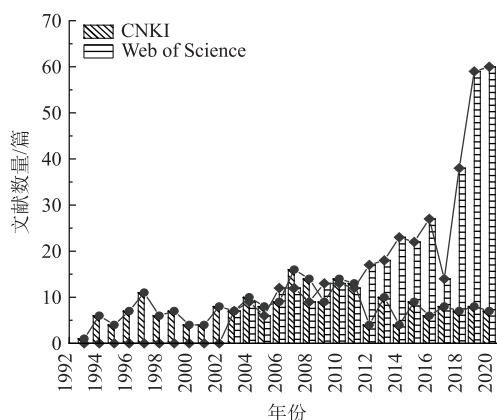


图1 交通量预测领域文献历年发表数量变化

Fig. 1 Changes in number of literatures in field of traffic volume prediction over years

2.2 国家及地区分布

本研究检索范围内的文献共涉及 56 个国家/地区, 图 2 展示了其中 24 个有 3 篇以上相关成果的国家/地区在时间维度上的分布。由图 2 可知, 检索范围内交通量预测领域的研究早期以我国、美国及法国等地为主, 随后在韩国、加拿大及德国快速发展。

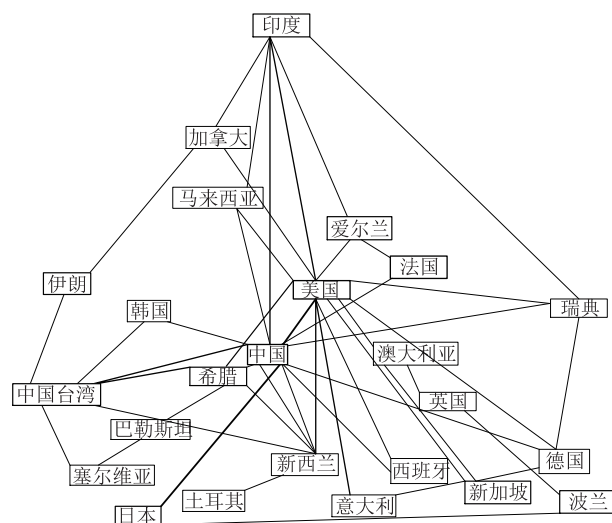


图2 文献国家及地区分析

Fig. 2 Analysis of countries and regions of literatures

如表 1 所示, 近 29 a 来, 交通量预测研究领域检索范围内文献数量排在前 10 名的国家/地区文献总量为 585 篇, 占成果总数的 98.8%。值得注意的是, 我国文献总量 344 篇, 位居首位, 占成果总数的 58.1%; 篇均被引 16.9 次, 仅为排名第 1 的 1/6。前 10 位国家/地区篇均被引的 1/2, 我国在该领域的文献数量虽多, 但篇均被引次数较低, 表明我国科研工作者虽很关注该领域的研究, 但研究内容需要进一步与国际接轨, 加强国际影响力。

表 1 前 10 位交通量预测文献发表数量国家/地区
Tab.1 Top 10 countries/regions in terms of published literatures on traffic volume prediction

序号	国家/地区	文献数量/ 篇	百分 比/%	被引 次数	篇均被引 次数
1	中国	344	58.1	5 824	16.9
2	美国	129	21.8	3 268	25.3
3	加拿大	17	2.9	249	14.6
4	韩国	17	2.9	198	11.6
5	西班牙	17	2.9	414	24.4
6	希腊	16	2.7	1 652	103.3
7	澳大利亚	14	2.4	294	21.0
8	德国	13	2.2	258	19.8
9	英国	10	1.7	619	61.9
10	意大利	8	1.4	474	59.3

2.3 期刊来源分析

检索范围内的 592 篇文献在 200 多种不同的期刊上发表,表 2 和表 3 分别展示了交通量预测研究领域 CNKI 核心数据库和 Web of Science 核心合集发表文献数量的前 5 位来源期刊。发表在这 10 种期刊上的文献占有所有期刊发表文献的 35.3%。其中,公路期刊发表文献数量最多,Transportation Research Part C: Emerging Technologies 作为交通运输领域新兴技术研究的国际权威期刊,文献被引次数最多。值得注意的是,《公路交通科技》、IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Journal of Transportation Engineering 等期刊发表文献数量不多,但被引次数及篇均被引次数均排名靠前,正是因为这些期刊的出现,提高了交通量预测领域的研究水平。

表 2 1993—2020 年 CNKI 核心数据库交通量预测文献发表数量 TOP5 期刊

Tab.2 Top 5 journals on traffic volume prediction published in CNKI core database from 1993 to 2020

序号	期刊名称	文献数量	被引次数	篇均被引次数	文章占比/%
1	公路	49	438	8.9	22.2
2	公路交通科技	21	666	31.7	9.5
3	中国公路学报	16	408	16.8	7.2
4	中外公路	9	151	25.5	4.1
5	交通运输系统工程与信息	8	103	12.9	3.6

由表 2 可知,在 CNKI 核心数据库中,《公路》文献发表数量最多,占该领域文献数量的 22.2%,篇均被引次数最低;《公路交通科技》文献数量排名第 2,但是被引次数及篇均被引次数均为第 1;排名前 5 位的期刊文献总量占 CNKI 核心数据库的 46.6%,是国内交通量预测研究领域的核心及权威期刊。

表 3 1993—2020 年 Web of Science 核心合集交通量预测文献发表数量 TOP5 期刊

Tab.3 Top 5 journals published Web of Science core collection on traffic volume prediction from 1993 to 2020

序号	期刊名称	文献数量	被引次数	篇均被引次数	文章占比/%
1	Transportation Research Record	35	424	12.1	9.4
2	Transportation Research Part C Emerging Technologies	27	1 667	61.7	7.3
3	IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems	20	1 048	52.4	5.4
4	IEEE Access	14	70	5.0	3.8
5	Journal of Transportation Engineering	10	749	74.9	2.7

由表 3 可知,在 Web of Science 核心合集中,Transportation Research Record 的文献发表数量最多,占该领域文献数量的 9.4%;Transportation Research Part C Emerging Technologies 的文献被引次数最高,文献数量和篇均被引次数均为第 2;排名前 5 位的期刊文献总量占该核心合集的 28.6%,是国外交通量预测研究领域的核心及权威期刊。

3 技术主题分析

技术主题分析是指通过从不同出版物的标题、摘要、作者提供的关键字和索引关键字中提取关键词或关键术语,并对共同出现的次数进行关联强度的统计,进行关键词共现网络分析。本节针对检索范围内文献以关键词出现次数为 12 及以上为标准进行筛选,在全部 6 438 个关键词中共获得 208 个符合条件的关键词,关键词共聚类为 4 类,每类的关键词在研究课题上具有相似性,节点大小表示关键词的频次。结果表明,交通量预测研究主要以公路交通量和短时交通量预测为主,核心主题包括公路网规划、高速公路、四阶段法、重力模型、转移交通量、诱增交通量、时间序列、支持向量机、神经网络、深度学习、时空特征等。在本节分析中将 592 篇文献中通讯单位为我国科研机构的文献归纳为国内研究,其余的归纳为国外研究。

3.1 国外技术主题分析

集群 1: 公路交通发展需求预测与项目建设。该集群的主要关键词包括:交通模型、区域位置、人口分布、需求影响、评估投资。

实际交通网络运输系统条件与性能、交通模式、运输成本和经济影响之间的总体关系作为交通工程项目建设发展投资的依据,可实现交通需求与经济

等影响因素之间的纵向一体化动态发展预测。Vlahogianni等^[7]根据交通流的结构和时间演化识别交通流模式,并对交通流演化进行聚类,认为交通模式传播具有确定性结构和非线性演化等统计特征。Anderson等^[8]认为经过适当验证和应用的交通规划模型比常用的外推交通趋势模型具有更准确的预测性能。Caceres等^[9]将道路属性和周边城市社会经济特征作为解释变量,运用聚类和回归建模技术,提出了估算城市道路日交通量和小时交通量的方法,提高了在交通数据缺失情况下,交通规划的合理性。Lee等^[10]采用倒S曲线模型预测占道施工期间的日交通量,解决了传统静态交通规划方法单点时间单一均衡交通量的局限性。提高需求随时间变化的认识是评价运输政策和预测未来投资需求的关键。Gomez等^[11]认为国内生产总值是公路重型车辆需求随时间演变的重要解释变量。Næss等^[12]认为道路交通预测存在大都市区交通量低估,边远地区交通量高估的地理偏差。Veeraragavan等^[13]将HDM-4策略应用于低交通量预测管理,降低了地理偏差对交通量需求预测与评估投资选择的影响。

集群2:交通拥堵与交通预测模型精度。该集群的主要关键词包括:交通管理、交通拥堵、相关系数及权重、统计特征、模型精度。

随着城镇化进程的加快,智能交通的快速发展为提升城市交通管理水平,缓解交通拥堵提供了新的技术思路。智能交通系统管理对短期交通量预测要求的不断提高,导致大量预测算法的发展。现有研究采用平滑处理或非线性模型解释短期交通量数据快速而剧烈的波动及频繁地转向拥堵的特点,降低了预测精度。Vlahogianni等^[14]根据交通状况识别交通量统计特征并实施可变预测策略,降低了数据波动和边界条件转移的影响。Ermagun等^[15]考虑交通运输网络的拓扑结构,通过道路之间的正负相关关系,提取道路网络空间相关结构,提高了短期交通预测模型的精度。

集群3:交通量预测模型与方法。该集群的主要关键词包括:历史数据、时间序列、高速公路、智能交通、短时交通量预测、神经网络、机器学习、混合模型、预测精度、交通时空模式。

Prozzi等^[16]通过分析交通量的时间和季节性变化,构建的季节时间序列模型具有更高精度。Wagner-Muns等^[17]结合时间序列特征函数和主成分分析,构建的在线交通量预测模型,可充分利用数据的连续性,相较于传统季节时间序列模型预测结

果具有更高精度。Yoon等^[18]提出的K近邻(KNN)非参数回归模型,在预测精度和无时延响应的时间状态演化方向性构造上优于季节时间序列模型,可有效解决交通量预测的时间演化非线性和非平稳问题,具有捕捉城市交通流复杂行为的优势。Habtemichael等^[19]通过改进的KNN算法识别交通模式,构建的非参数数据驱动短时交通量预测方法,具有简单准确和鲁棒性等特点,可与实时交通控制相结合,实现交通系统动态管理。

神经网络和模糊模型具有在混沌系统非线性建模的能力,相较于传统预测方法,可提高预测结果的准确性和鲁棒性。Raza等^[20]考虑交通系统的动态性和随机性,结合系统数学模型,提出了适用高峰和非高峰时段的遗传优化的人工神经网络(GA-ANN)和局部加权回归多元交通量预测模型。基于模糊规则的在线自适应Kalman滤波器和ANN的非线性组合预测模型^[21],基于模糊规则和LSTM的混合方法^[22],以及基于聚合策略的移动平均、指数平滑、ARIMA和神经网络的数据聚合模型^[23]的预测结果表明,组合模型有助于提高传统单因子交通量预测模型的精度。

Abdi等^[24]以动态交通分配为背景,从情感概念和多智能体系统观点出发,提出了面向对象的非参数方法,可有效预测交通量的动态变化趋势。相较于ANN模型、局部加权回归、传统支持向量回归(SVR)和在线学习SVR等模型^[25],在线学习加权SVR模型,通过考虑交通流数据之间时间差的相对重要性,提高了交通量预测性能。交通系统的复杂性、多维性和非线性导致时间聚集水平对交通流时空结构的识别和最佳模型规格的选择至关重要。Pavlyuk等^[26]提出了通过验证不同时间聚集级别来扩展交通量预测方法。Avila等^[27]通过分析交通数据时空模式层次结构,提出的无参数交通量预测方法可识别预测交通时空模式。针对现有机器学习不能直接收集交通数据时空存在的非线性复杂关系,Vijayalakshmi等^[28]考虑交通数据的动态性和混沌性,利用卷积神经网络(CNN)和LSTM网络提取交通数据的时空特征,提出了基于CNN-LSTM多步预测模型,有助于识别近期的交通细节。Sarvepalli等^[29]利用大数据的时空分布,为动态交通分配模型建立了与时间相关的出行表。

集群4:交通事件与实时监控。

针对现有交通量预测研究主要集中在正常和非事故条件下。Tahmasbi等^[30]提出运用Hull-White模

型,模拟交通运行状况,预测交通量和检测交通事故。OL-SVR模型具有监督统计学习性能,可有效预测交通事故、占道施工区和节假日等非典型条件下的交通量,为解决偶发性交通拥堵提供了理论依据^[31]。不利的天气条件可能对交通量的统计特征产生重大影响,从而影响其可预测性。Burow等^[32]认为交通量对降雪最敏感的时段是工作日中午和周末下午,对夜间降雪最不敏感。为改善不良天气条件下的交通管理,Dunne等^[33]将降雨数据作为交通量预测的外生变量,利用小波变换的平稳形式,提出了考虑降雨影响的小波神经网络交通量预测算法,可准确预测恶劣天气期间交通量,有助于交通规划、风险分析和道路安全。

3.2 国内技术主题分析

集群1:四阶段法与可行性研究。该集群的主要关键词包括:交通规划、四阶段法、交通量调查、弹性系数、高速公路改扩建、可行性研究。

交通需求是人进行经济社会或其他活动的派生需求,交通需求及交通行为受到交通服务水平的影响。针对四阶段法中不包含反映交通服务水平的变量,难以准确预测转移、诱增交通量及对经济内容和角度考虑的不完整性。丁志坤等^[34]在原有方法的基础上融入经济-交通组合模型,提高了未来年平均日交通量的精确合理性。陈海华等^[35]提出了多维线性回归OD交通量预测模型,解决了传统OD交通量预测方法工作量繁重且精度不高的问题。赵跃峰等^[36]考虑改扩建高速公路与项目影响区域路段及其之间的相互影响,为转移交通量预测提供了新思路。李双宝等^[37]提出了基于重力模型和二元Logit模型的拟建公路项目承担机场集疏交通量的预测方法,提高了公路工程可行性研究中机场集疏交通量的预测精度,为综合交通网背景下交通枢纽、客运场站港口等公路工程可行性研究提供了新方法。

集群2:公路交通量预测与灰色模型。该集群的主要关键词包括公路建设项目、重力模型、诱增交通量、转移交通量、旅游公路。

公路建设项目社会效益具有宏观性、间接性、滞后性、长期性和有限性等特点,徐学明等^[38]认为公路建设项目诱增交通量的主要成因是潜在交通需求得到释放。王晖等^[39]认为诱增交通量的发生主要取决于当地的社会状况和路网结构。程俊龙等^[40]探究了地区诱增型经济增长与交通的内生关系,提出了考虑诱增经济需求影响的改进重力模型,弥补了原有模型对诱增经济产生的额外出行考虑不

足的局限性。

随着现代旅游业的发展,公路旅游交通作为公路交通运输业的重要组成部分,对公路交通量的影响巨大。针对现有研究缺乏有效的公路旅游交通量预测方法,王颀等^[41]提出以区域社会经济、旅游人数和旅游产业发展趋势为基础,在分析基年旅游交通量分布的基础上,估算未来年各路段的交通出行量。张文斌等^[42]结合景区的等级、历年旅客接待人数和景点周边城市规模等因素,考虑旅客出行特性,提出了基于非集计模型的公路旅游交通量预测模型。Wu等^[43]考虑旅游目的地吸引力、旅行时间和往返交通费用等因素,构建了旅游概率模型,为预测游客数量提供了新方法,弥补了现有方法过于依赖游客历史数据的局限性。

集群3:交通量预测方法与模型,该集群的主要关键词包括:灰色模型、时间序列、神经网络、组合预测模型。

灰色理论可对连续平稳变化的数据进行有效预测,基于熵的灰色关联分析方法,可用于分析历史交通流与当前时段交通流的相关性。陈淑燕等^[44]提出了基于改进GM(1,1)模型的交叉口交通量预测的方法。为克服灰色预测方法的不足,蒋丽忠等^[45]提出了灰色马尔可夫链桥梁荷载随机过程交通量预测模型,该模型可兼顾趋势值和波动性对预测结果的作用,同时克服单因素模型的局限性。

小波神经网络(WNN)模型结合了离散小波变换和神经网络的优点,具有很强的非线性逼近能力,已广泛应用于预测和函数逼近。非参数动态时滞递归WNN模型,通过考虑交通流的自相似、奇异和分形特性,可同时预测日交通量和周交通量。基于不同母小波的WNN^[46],相较于神经网络和径向基函数神经网络模型,提高了预测精度。交通量数据的分布具有随时间演化的特征,概念漂移环境下的增量回归方法^[47],将交通量预测回归问题转化为二元分类问题,相较于现有增量回归和集成回归,提高了预测方法的准确性和稳定性。具有周期性的季节ARIMA模型^[48],可有效解决预测模型按月度预测误差较大的问题。针对现有交通量预测研究中时间序列数据出现波动或突变时导致交通量预测效率低下的问题,KNN-NPR动态多区间模型^[49]提高了区间交通量预测性能,是面向交通系统具有很大发展空间的方法。Wang等^[50]对欧氏距离进行了重构,提出了非对称损失的KNN预测算法,弥补了现有研究中欧氏距离和非对称损失预测的局限性,为非对称

损失下的交通量预测提供了一种有效的方法。KNN方法与神经网络^[51]及局部回归神经网络^[52]等组合模型的应用,拓展了KNN方法在短期交通量预测中的适用性,提高了在大样本数据训练下的预测精度和稳定性。

集群4:智能交通与交通时空特征。该集群的主要关键词包括智能交通、支持向量机、主成分分析、深度学习、时空特征、技术标准。

智能交通关键技术之一的短时交通量预测具有周期性、非线性、不确定性和复杂性的问题,季节性ARIMA和支持向量机的组合预测模型^[53],可有效解决交通量预测周期性问题。基于历史短期交通量数据的PSO-SVR模型,可有效解决数据中存在噪声导致预测精度下降的问题^[54],基于时变滤波的经验模态分解和LSSVM的混合方法,可有效捕捉原始数据中的非线性和非平稳性特征,提高交通量预测精度^[55]。现有交通量预测模型大都未考虑施工和天气条件对交通量的影响,Hou等^[56]针对占道施工区交通流特性,构建了随机森林模型,可有效预测长短期施工区交通量。Wang等^[57]结合双向LSTM、复杂的注意机制和天气条件等外部特征,构建了交通量动态预测模型。综合在线降水校正模型^[58],通过考虑平均降水量与交通量之间的线性关系,提高了降水条件下交通量的预测精度。

现有交通模型主要集中在单点交通数据的时间分布上,未能充分利用交通数据的时空特性。Wang等^[59]通过克里格方法,探析了路面状况、交通速度、人口密度和土地价值等因素之间的时空交互特征。CNN深度学习框架模型^[60]通过时空特征选择算法确定最优的输入数据,将交通数据时空交互特征转化为二维矩阵,弥补了现有交通量预测模型不能充分利用交通数据时空特性的缺陷。Zhao等^[61]将图卷积网络(GCN)和门控递归单元相结合,提出的时态图卷积网络模型,可有效获取城市道路网交通数据时空相关性。通过考虑交通数据时空特性,构建的图马尔可夫网络和谱图马尔可夫网络模型,具有在边缘计算和在线预测情况下处理缺失值的能力,弥补了现有数据插补方法需要长期历史交通量数据的局限性^[62]。结合层次协调的梯度提升方法,为学习交通大数据集中的时空相关性,提供了一种高度灵活和自动化的方法,可有效预测较长范围内复杂道路网络中的交通量^[63]。基于完全集成经验模式分解和XGBoost的车道级混合模型^[64],相较于神经网络和其他基于XGBoost的模型,能有效拟合不同类

型路段交通流的复杂波动性,提高了模型的预测精度和稳定性。

3.3 技术主题进展分析

技术主题进展分析是指将检索范围内交通量预测文献按照时间先后顺序进行梳理,明确各时间段国内外学者在交通量预测研究领域的主要研究方向和研究重点与热点。在公路交通需求预测与工程项目可行性研究方向,Veeraragavan等^[13]提出将HDM-4策略应用于低交通量道路需求预测与评估投资选择。Anderson等^[8]提出将经过适当验证和应用的的城市交通规划模型应用于交通量预测。Vlahogianni等^[7]研究了交通模式传播的确定性结构和非线性演化特征。Caceres等^[9]结合聚类 and 回归建模技术,提出了估算城市道路日交通量和小时交通量的方法。Lee等^[10]提出了采用倒S曲线模型预测占道施工期间的日交通量。丁志坤等^[34]在四阶段方法的基础上,构建了基于经济-交通组合的交通量预测模型。陈海华等^[35]提出了多维线性回归OD交通量预测模型。赵跃峰等^[36]提出了考虑公路项目影响的转移交通量预测方法。李双宝等^[37]提出了拟建公路项目承担机场集疏交通量的预测方法。王晖等^[39]研究了诱增交通量与社会状况和路网结构的关系。程俊龙等^[40]提出了考虑诱增经济的改进重力模型。Wu等^[43]构建了旅游公路交通量概率预测模型。王颀等^[41]提出了估算未来年路段旅游交通出行量的方法。张文斌等^[42]采用非集计模型,构建了公路旅游交通量预测模型。

灰色模型研究方向。孙保原等^[6]提出了灰色系统交通量预测方法,陈淑燕等^[44]提出了改进GM(1,1)模型。蒋丽忠等^[45]提出了灰色马尔可夫链桥梁荷载随机过程交通量预测模型。

时间序列研究方向。Prozzi等^[16]构建了季节时间序列交通量预测模型。童明荣等^[48]提出了具有周期性的季节ARIMA模型。Wagner-Muns等^[17]结合时间序列的基本函数特征,构建了在线交通量预测模型,Xiao等^[47]提出了概念漂移环境下的增量回归方法。

神经网络研究方向。Raza等^[20]提出了GA-ANN和局部加权回归多元交通量预测模型。Stathopoulos等^[21]提出了基于模糊规则的在线自适应Kalman滤波器和ANN的非线性组合预测模型。Alecsandru等^[22]提出了基于模糊规则和LSTM的混合方法。Xie等^[46]提出了基于不同母小波的WNN模型。

机器学习研究方向。Pavlyuk等^[26]提出了通过验

证不同时间聚集级别来扩展交通量预测的方法。Chang 等^[49]提出了 KNN-NPR 动态多区间模型。Abdi^[24]等提出了面向对象的交通量动态变化趋势非参数方法。Jeong 等^[25]提出了在线学习 SVR 模型。Vijayalakshmi 等^[28]考虑交通数据的动态性和混沌性,提出了基于 CNN-LSTM 多步预测模型。Sarvepalli 等^[29]利用大数据的时空分布,为动态交通分配模型建立了与时间相关的出行表。Hu 等^[54]提出了基于历史短期交通量数据相似性的历史动量 PSO-SVR。Wang 等^[50]提出了非对称损失的 KNN 预测算法。Liu 等^[51]提出了 KNN 方法与神经网络组合预测模型。Qu 等^[52]提出了 KNN 方法与局部回归神经网络组合预测模型。Zhang 等^[53]提出了季节性 ARIMA 和 SVM 的组合预测模型。Wang 等^[55]提出了基于时变滤波的经验模态分解和 LSSVM 的混合方法。

交通事件条件下的交通量预测研究方向。Tahmasbi 等^[30]提出了运用 Hull-White 模型,构建随机微分方程预测交通量和检测交通事故。Castro-Neto 等^[31]提出了适用于交通事故、占道施工区和节假日等非典型条件下交通量预测的在线 SVR 模型。Burrow 等^[32]认为交通量对降雪最敏感的时段是工作日中午和周末下午,对夜间降雪最不敏感。Dunne 等^[33]提出了考虑降雨影响的 WNN 交通量预测算法。Hou 等^[56]提出了用于施工区交通量预测的随机森林模型。Wang 等^[57]考虑天气条件,构建了交通量动态预测模型。Qiu 等^[58]提出了综合在线降水校正模型。

考虑时空特征分布的交通量预测研究方向。Wang 等^[59]通过克里格方法,探析了路面状况、交通速度、人口密度和出行生成率等数据集之间的时空交互特征。Zhang 等^[60]提出了 CNN 深度学习框架模型。Zhao 等^[61]提出了时态图卷积网络 (T-GCN) 模型。Cui 等^[62]通过考虑交通数据时空特性,提出了具有在边缘计算和在线预测的情况下处理缺失值能力的图马尔可夫网络和谱图马尔可夫网络。Lu 等^[64]提出了基于完全集成经验模式分解和 XGBoost 的车道级混合模型。

4 结论

本研究利用文献计量和结构化网络分析方法对比梳理了 Web of Science 核心合集和 CNKI 核心数据库中交通量预测研究领域近 29 年的研究成果,主要得出以下结论:

(1) 交通量预测研究领域的文献发表数量呈逐年上升趋势,文献发表数量排名前 10 的国家依次

为:中国、美国、加拿大、韩国、西班牙、希腊、澳大利亚、德国、英国、意大利。值得注意的是,我国文献发表数量和被引次数最多,但篇均被引次数排名第 8,表明我国科研工作者虽很关注该领域的研究,但研究内容需要进一步与国际接轨,加强国际影响力。该领域文献被引最多的国内外期刊分别是《公路交通科技》和 *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*。

(2) 通过技术主题聚类分析发现,交通量预测领域主要研究方向有公路交通量预测、项目建设可行性研究、短时交通量预测、交通事件与实时检测和交通时空分布特征。国内科研工作者对公路交通量预测与项目投资之间的研究相对较多,短时交通量预测以灰色模型、时间序列、神经网络、支持向量机等组合模型的研究为主。通过探析交通时空分布特征,建立交通量时空动态变化关系,提高现有交通量预测组合模型的准确性和鲁棒性是目前研究的热点。

(3) 国内公路交通量预测研究主要通过引入供需理论和经济计量学等,结合大数据统计分析特征,以改进四阶段法为主,缺少符合国内实际发展趋势的预测方法。公路交通量预测后续研究应结合《国家综合立体交通网规划纲要》需要,提高综合交通网发展背景下交通枢纽、客运场站、机场港口等周边公路建设项目交通量预测精度,考虑旅游发展与新兴经济等对诱增和转移交通量的影响,加强公路交通量与建设投资之间的研究,为公路交通建设发展投资提供交通量依据。

(4) 现有交通量预测研究主要集中在正常和非事故条件下,未来研究应加强针对交通事故、占道施工区和节假日等非正常和事故条件下的交通量预测研究,为解决偶发性交通拥堵等提供交通量依据,同时应加强有关雨雪等不利天气下的交通量预测研究。

参考文献:

References:

- [1] 张益,陈淑燕,王伟. 短时交通量时间序列智能复合预测方法概述 [J]. 公路交通科技, 2006, 23 (8): 139-142.
ZHANG Yi, CHEN Shu-yan, WANG Wei. Survey of Traffic Volume Time Series Intelligent Compound Forecasting Methods [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23

- (8): 139–142.
- [2] DO L N N, TAHERIFAR N, VU H L. Survey of Neural Network-based Models for Short-term Traffic State Prediction [J]. WIREs Data Mining and Knowledge Discovery, 2019, 9 (1): e1285.
- [3] 林浩, 李雷孝, 王慧. 支持向量机在智能交通系统中的研究应用综述 [J]. 计算机科学与探索, 2020, 14 (6): 901–917.
- LIN Hao, LI Lei-xiao, WANG Hui. Survey on Research and Application of Support Vector Machines in Intelligent Transportation System [J]. Journal of Frontiers of Computer Science & Technology, 2020, 14 (6): 901–917.
- [4] ERMAGUN A, LEVINSON D. Spatiotemporal Traffic Forecasting: Review and Proposed Directions [J]. Transport Reviews, 2018, 38 (6): 786–814.
- [5] BAMEL U K, PANDEY R, GUPTA A. Safety Climate: Systematic Literature Network Analysis of 38 Years (1980–2018) of Research [J]. Accident Analysis and Prevention, 2019, 135: 105387.
- [6] 孙保原, 魏连雨. 道路交通量灰色预测方法 [J]. 中国公路学报, 1993, 6 (2): 84–89.
- SONG Bao-yuan, WEI Lian-yu. The Grey Prediction Method of Road Traffic Volume [J]. China Journal of Highway and Transport, 1993, 6 (2): 84–89.
- [7] VLAHOIANNI E I, KARLAFTIS M G, GOLIAS J C. Temporal Evolution of Short-term Urban Traffic Flow: A Nonlinear Dynamics Approach [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2008, 23 (7): 536–548.
- [8] ANDERSON M D, GHOLSTON S E, AKKINAPALLY V K. Feasibility of Using Urban Planning Models to Support Intermediate Traffic Forecasts [J]. Journal of Urban Planning and Development, 2004, 130 (3): 159–162.
- [9] CACERES N, ROMERO L M, MORALES F J, et al. Estimating Traffic Volumes on Intercity Road Locations Using Roadway Attributes, Socioeconomic Features and Other Work-related Activity Characteristics [J]. Transportation, 2018, 45: 1449–1473.
- [10] LEE K Y, TING K L. The Construction of a Route-diversion Traffic Flow Prediction Model and Potential Applications [J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2011, 34 (5): 671–681.
- [11] GOMEZ J, VASSALLO J M. Evolution over Time of Heavy Vehicle Volume in Toll Roads: A Dynamic Panel Data to Identify Key Explanatory Variables in Spain [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2015, 74: 282–297.
- [12] NÆSS P, FLYVBJERG B, BUHL S. Do Road Planners Produce More ‘Honest Numbers’ Than Rail Planners? An Analysis of Accuracy in Road-traffic Forecasts in Cities Versus Peripheral Regions [J]. Transport Reviews, 2006, 26 (5): 537–555.
- [13] VEERARAGAVAN A, REDDY K B R. Application of Highway Development and Management Tool for Low-volume Roads [J]. Transportation Research Record, 2003, 1819: 24–29.
- [14] VLAHOIANNI E I, KARLAFTIS M G, GOLIAS J C. Statistical Methods for Detecting Nonlinearity and Non-stationarity in Univariate Short-term Time-series of Traffic Volume [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2006, 14 (5): 351–367.
- [15] ERMAGUN A, CHATTERJEE S, LEVINSON D. Using Temporal Detrending to Observe the Spatial Correlation of Traffic [J]. PloS one, 2017, 12 (5): e0176853.
- [16] PROZZI J A, HONG F. Seasonal Time Series Models to Support Traffic Input Data for Mechanistic-empirical Design Guide [J]. Transportation research record, 2006, 1947: 175–184.
- [17] WAGNER-MUNS I M, GUARDIOLA I G, SAMARANAYKE V A, et al. A Functional Data Analysis Approach to Traffic Volume Forecasting [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19 (3): 878–888.
- [18] YOON B, CHANG H. Potentialities of Data-driven Nonparametric Regression in Urban Signalized Traffic Flow Forecasting [J]. Journal of Transportation Engineering, 2014, 140 (7): 04014027.
- [19] HABTEMICHAEL F G, CETIN M. Short-term Traffic Flow Rate Forecasting Based on Identifying Similar Traffic Patterns [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 66: 61–78.
- [20] RAZA A, ZHONG M. Lane-based Short-term Urban Traffic Parameters Forecasting Using Multivariate Artificial Neural Network and Locally Weighted Regression Models: A Genetic Approach [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2019, 46 (5): 371–380.
- [21] STATHOPOULOS A, DIMITRIOU L, TSEKERIS T. Fuzzy Modeling Approach for Combined Forecasting of Urban Traffic Flow [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2008, 23 (7): 521–535.
- [22] ALECSANDRU C, ISHAK S. Hybrid Model-based and Memory-based Traffic Prediction System [J]. Transportation Research Record, 2004, 1879: 59–70.
- [23] TAN M C, WONG S C, XU J M, et al. An Aggregation Approach to Short-term Traffic Flow Prediction [J]. IEEE

- Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2009, 10 (1): 60-69.
- [24] ABDI J, MOSHIRI B, ABDULHAI B, et al. Short-term Traffic Flow Forecasting: Parametric and Nonparametric Approaches via Emotional Temporal Difference Learning [J]. Neural Computing and Applications, 2013, 23 (1): 141-159.
- [25] JEONG Y S, BYON Y J, CASTRO-NETO M M, et al. Supervised Weighting-online Learning Algorithm for Short-term Traffic Flow Prediction [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14 (4): 1700-1707.
- [26] PAVLYUK D. Temporal Aggregation Effects in Spatiotemporal Traffic Modelling [J]. Sensors, 2020, 20 (23): 6931.
- [27] AVILA A M, MEZIĆ I. Data-driven Analysis and Forecasting of Highway Traffic Dynamics [J]. Nature Communications, 2020, 11 (1): 1-16.
- [28] VIJAYALAKSHMI B, RAMAR K, JHANJHI N Z, et al. An Attention-based Deep Learning Model for Traffic Flow Prediction Using Spatiotemporal Features Towards Sustainable Smart City [J]. International Journal of Communication Systems, 2021, 34 (3): e4609.
- [29] SARVEPALLI A, DAVIS B. Multiple Uses of Big Data for Model Validation and Express Lanes Traffic Forecasts [J]. Transportation Research Record, 2020, 2674: 87-100.
- [30] TAHMASBI R, HASHEMI S M. Modeling and Forecasting the Urban Volume Using Stochastic Differential Equations [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15 (1): 250-259.
- [31] CASTRO-NETO M, JEONG Y S, JEONG M K, et al. Online-SVR for Short-term Traffic Flow Prediction under Typical and Atypical Traffic Conditions [J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36 (3): 6164-6173.
- [32] BUROW D, ATKINSON C. An Examination of Traffic Volume during Snow Events in Northeast Ohio [J]. Natural Hazards, 2019, 99: 1179-1189.
- [33] DUNNE S, GHOSH B. Weather Adaptive Traffic Prediction Using Neurowavelet Models [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14 (1): 370-379.
- [34] 丁志坤, 朱梦炼, 宋义勇. 基于改进“四阶段法”的高速公路交通量预测研究 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2017, 36 (5): 86-90.
- DING Zhi-kun, ZHU Meng-lian, SONG Yi-yong. Traffic Forecast of Highway Based on Improved “Four-stage Method” [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2017, 36 (5): 86-90.
- [35] 陈海华, 谭国贤, 黄子敬, 等. 基于出口流水数据的高速公路节假日 OD 交通量分布预测 [J]. 广西大学学报 (自然科学版), 2020, 45 (1): 239-247.
- CHEN Hai-hua, TAN Guo-xian, HUANG Zi-jing, et al. Daily OD Volume Distribution Prediction for Expressway Network under the Background of Big Data [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2020, 45 (1): 239-247.
- [36] 赵跃峰, 张生瑞, 王若亚. 高速公路改扩建施工期转移交通量预测 [J]. 公路交通科技, 2013, 30 (10): 129-133.
- ZHAO Yue-feng, ZHANG Sheng-rui, WANG Ruo-ya. Forecast of Transfer Traffic Volume during Freeway Reconstruction and Expansion [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30 (10): 129-133.
- [37] 李双宝, 邱万军. 公路沿线机场集疏交通量预测方法研究 [J]. 公路, 2020, 65 (2): 177-182.
- LI Shuang-bao, QIU Wan-jun. Study on Forecast Method of Airport Traffic Volume along Highway [J]. Highway, 2020, 65 (2): 177-182.
- [38] 徐学明, 王仕杰, 陈艳艳, 等. 基于 MD 模型公路建设项目诱增交通量方法研究 [J]. 公路, 2019, 64 (5): 200-203.
- XU Xue-ming, WANG Shi-jie, CHEN Yan-yan, et al. Study of Induced Traffic Prediction in Highway Project Based on MD Model [J]. Highway, 2019, 64 (5): 200-203.
- [39] 王晖, 申少君. 诱增交通量的变化规律和预测模型 [J]. 公路交通科技, 2003, 20 (3): 147-150.
- WANG Hui, SHEN Shao-jun. Induced Traffic and Forecast Model [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2003, 20 (3): 147-150.
- [40] 程俊龙, 李娟. 基于改进型重力模型的诱增交通量预测研究 [J]. 公路, 2019, 64 (1): 171-175.
- CHENG Jun-long, LI Juan. Research on the Forecast of Induced Traffic Volume Based on Improved Gravity Model [J]. Highway, 2019, 64 (1): 171-175.
- [41] 王颀, 王卫峰, 杜厚俊. 基于四阶段法的旅游交通量预测 [J]. 公路, 2011, 56 (1): 167-170.
- WANG Wei, WANG Wei-feng, DU Hou-jun. Forecast of Tourism Traffic Volume Based on Four Stages Forecast [J]. Highway, 2011, 56 (1): 167-170.
- [42] 张文斌, 王博, 陈先义. 旅游公路交通量预测模型研究 [J]. 公路工程, 2013, 38 (2): 87-90.
- ZHANG Wen-bin, WANG Bo, CHEN Xian-yi. Study on the Traffic Forecast Model of Tourist Highway [J].

- Highway Engineering, 2013, 38 (2): 87-90.
- [43] WU B, WU J, SHI X, et al. Visiting Probability Model: A New Method for Tourist Volume Forecasting [J]. Asia Pacific Journal of Tourism Research, 2019, 24 (12): 1155-1168.
- [44] 陈淑燕, 陈家胜. 一种改进的灰色模型在交通量预测中的应用 [J]. 公路交通科技, 2004, 21 (2): 80-83.
CHEN Shu-yan, CHEN Jia-sheng. Application of a Novel Grey Model to Traffic Flow Prediction [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21 (2): 80-83.
- [45] 蒋丽忠, 李春丹, 唐斌, 等. 基于灰色马尔可夫链的桥梁荷载随机过程交通量预测 [J]. 公路交通科技, 2010, 27 (7): 128-132.
JIANG Li-zhong, LI chun-dan, TANG Bin, et al. Prediction of Traffic Volume in Bridge Random Load Process Based on Grey Markov Chain [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27 (7): 128-132.
- [46] XIE Y, ZHANG Y. A Wavelet Network Model for Short-term Traffic Volume Forecasting [J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2006, 10 (3): 141-150.
- [47] XIAO J, XIAO Z, WANG D, et al. Short-term Traffic Volume Prediction by Ensemble Learning in Concept Drifting Environments [J]. Knowledge-Based Systems, 2019, 164: 213-225.
- [48] 童明荣, 薛恒新, 林琳. 基于季节 ARIMA 模型的公路交通量预测 [J]. 公路交通科技, 2008, 25 (1): 124-128.
TONG Ming-rong, XUE Heng-xin, LIU Lin. Highway Traffic Volume Forecasting Based on Seasonal ARIMA Model [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25 (1): 124-128.
- [49] CHANG H, LEE Y, YOON B, et al. Dynamic Near-term Traffic Flow Prediction: System-oriented Approach Based on Past Experiences [J]. IET Intelligent Transport Systems, 2012, 6 (3): 292-305.
- [50] WANG Z, JI S, YU B. Short-term Traffic Volume Forecasting with Asymmetric Loss Based on Enhanced KNN Method [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019, 722: 1-11.
- [51] LIU Z, GUO J, CAO J, et al. A Hybrid Short-term Traffic Flow Forecasting Method Based on Neural Networks Combined with K-nearest Neighbor [J]. Promet-Traffic & Transportation, 2018, 30 (4): 445-456.
- [52] QU W, LI J, YANG L, et al. Short-term Intersection Traffic Flow Forecasting [J]. Sustainability, 2020, 12 (19): 8158.
- [53] ZHANG N, ZHANG Y, LU H. Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average and Support Vector Machine Models: Prediction of Short-term Traffic Flow on Freeways [J]. Transportation Research Record, 2011, 2215: 85-92.
- [54] HU W, YAN L, LIU K, et al. A Short-term Traffic Flow Forecasting Method Based on the Hybrid PSO-SVR [J]. Neural Processing Letters, 2016, 43 (1): 155-172.
- [55] WANG Y, ZHAO L, LI S, et al. Short Term Traffic Flow Prediction of Urban Road Using Time Varying Filtering Based Empirical Mode Decomposition [J]. Applied Sciences, 2020, 10 (6): 2038.
- [56] HOU Y, EDARA P, SUN C. Traffic Flow Forecasting for Urban Work Zones [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 16 (4): 1761-1770.
- [57] WANG J, ZHU W, SUN Y, et al. An Effective Dynamic Spatiotemporal Framework with External Features Information for Traffic Prediction [J]. Applied Intelligence, 2021, 51: 3159-3173.
- [58] QIU H, LI R, LIU H. Integrated Model for Traffic Flow Forecasting under Rainy Conditions [J]. Journal of Advanced Transportation, 2016, 50 (8): 1754-1769.
- [59] WANG X, KOCKELMAN K M. Forecasting Network Data: Spatial Interpolation of Traffic Counts from Texas Data [J]. Transportation Research Record, 2009, 2105: 100-108.
- [60] ZHANG W, YU Y, QI Y, et al. Short-term Traffic Flow Prediction Based on Spatio-temporal Analysis and CNN Deep Learning [J]. Transportmetrica A: Transport Science, 2019, 15 (2): 1688-1711.
- [61] ZHAO L, SONG Y, ZHANG C, et al. T-GCN: A Temporal Graph Convolutional Network for Traffic Prediction [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 21 (9): 3848-3858.
- [62] CUI Z, LIN L, PU Z, et al. Graph Markov Network for Traffic Forecasting with Missing Data [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 117: 102671.
- [63] LI Z, ZHENG Z, WASHINGTON S. Short-term Traffic Flow Forecasting: A Component-wise Gradient Boosting Approach with Hierarchical Reconciliation [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 21 (12): 5060-5072.
- [64] LU W, RUI Y, YI Z, et al. A Hybrid Model for Lane-level Traffic Flow Forecasting Based on Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition and Extreme Gradient Boosting [J]. IEEE Access, 2020, 8: 42042-42054.