

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022051723051997

文章编号:1674-599X(2023)05-0122-17

引用格式:赵娜,王旭东,雷聪聪.国内外智能交通系统研究热点及演化趋势分析[J].交通科学与工程,2023,39(5):122-138.

Citation: ZHAO Na, WANG Xudong, LEI Congcong. Analysis of research hotspots and evolutionary trends of intelligent transportation systems at home and abroad[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(5): 122-138.

## 国内外智能交通系统研究热点及演化趋势分析

赵娜<sup>1</sup>, 王旭东<sup>1,2</sup>, 雷聪聪<sup>1</sup>

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114;

2.中国铁建投资集团有限公司, 广东 珠海 519000)

**摘 要:**为更直观地了解与分析国内外智能交通系统领域研究发展的现状,基于中国知网与Web of Science数据库,选用CiteSpace科学计量软件,绘制关键词共现与时区演化等知识图谱,系统梳理国内外智能交通系统领域的研究热点与演化趋势。研究表明:近年来,在中国,该领域研究呈“东密西疏”的分布特点;美国、欧洲、韩国、新加坡等地对该领域的研究较多。无论研究者来自何方,该领域研究均呈现出将传统交通系统与新兴技术相融的趋势。而中国的学者则更多侧重于通过政策引领科技发展,而中国以外的国家和地区的研究者则相对更注重通过基础研究助力行业发展。交通大数据是目前研究的重点之一,中国学者的研究更侧重于整体的交通规划与建设。未来,中国应继续强化基础技术研发,推进车、路、云协同一体化建设,注重混合交通流等问题,推进中国智能交通系统的深入发展。

**关键词:**智能交通系统;热点解析;演化趋势;知识图谱;科学计量

中图分类号:U491.2

文献标志码:A

## Analysis of research hotspots and evolutionary trends of intelligent transportation systems at home and abroad

ZHAO Na<sup>1</sup>, WANG Xudong<sup>1,2</sup>, LEI Congcong<sup>1</sup>

(1.School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology,

Changsha 410014, China;

2.China Railway Construction Investment Group Co., Ltd., Zhuhai 519000, China)

**Abstract:** In order to understand the current situation of research development in the field of intelligent transportation systems at home and abroad, CiteSpace scientometric software is used to draw the knowledge map of keyword co-occurrence and time zone evolution based on China Knowledge Network and Web of Science database, and systematically sort out the research hotspots and evolution trends in the field of intelligent transportation systems at home and abroad. The results show that: First, in recent years, most of the foreign research has been conducted in the United States, Europe, Korea, and Singapore, while the domestic research shows the distribution characteristics of "dense in the east and sparse in the west". Secondly, both domestic and foreign research shows the trend of

收稿日期:2022-05-17

基金项目:湖南省教育厅科学研究项目“跨界融合视角下智慧城轨高质量建设管理实现路径”(20C0041);长沙自然科学基金项目“政府-公众二元介入下新城轨道交通融合创新发展模式、路径及策略研究”(kq2014115)

作者简介:赵娜(1988—),女,长沙理工大学硕士生导师。Email:zhaona@csust.edu.cn

emerging technology integration and innovation, while foreign research focuses on basic research to help industry development and domestic research shows the characteristics of policy leadership. Thirdly, big data in transportation is the focus of R&D at home and abroad, while domestic research is more focused on overall transportation planning and economic construction. In the future, domestic research should continue to strengthen basic technology research and development, promote the integration of vehicle-road-cloud synergy construction, and focus on the research of mixed traffic flow and other issues, so as to promote the development of China's intelligent transportation system.

**Key words:** intelligent transportation systems; hotspot analysis; evolutionary trends; knowledge graph; scientometrics

近年来,中国的城镇化、机动化进程不断加快,城市的交通需求量不断增长,民众出行需求日益提高,交通问题也日益凸显。由于交通基础设施的修建速度与交通需求量的增长速度之间存在差异,城市交通始终面临着超负荷运转、安全事故频发、排放污染严重等问题。但究其本质,交通需求与供给分配之间不平衡的矛盾才是造成这些现象的根本原因。目前,智能交通系统(intelligent traffic system, ITS)作为信息技术、通信技术、控制技术与人工智能等先进技术在交通领域的综合应用系统,对于解决交通供需矛盾以及缓解这些交通问题有着不可忽视的作用<sup>[1]</sup>。在国际上,欧洲、美国、日本等发达国家争相布局ITS相关产业,利用自身技术优势,抢占市场先机与行业优势地位。而与其他国家和地区相比,中国在ITS领域的研究仍有较大差距,其前沿技术多低水平重复、政府顶层设计作用有限、行业产业规模小等问题较为突出<sup>[2]</sup>。因此,为实现交通强国战略、促进中国ITS领域高效发展,中国亟须打造多方共赢的交通运输信息化治理体系<sup>[3]</sup>。

1994年,国际学界初步界定了ITS的内涵,迄今为止,ITS已经发展成为一种集多技术于一体的综合交通系统,这些技术包括车辆控制系统、交通监控系统、旅行信息系统等,并且随着科技的发展,各类高新技术在不断改进其领域内的各个子系统功能,ITS也逐渐成为众多学者的热门研究方向。NARANJO等<sup>[4]</sup>提出了利用人工智能技术改进车辆控制系统。NGUYEN等<sup>[5]</sup>建立了一种基于遥测传输协议的实时交通拥堵监测系统。PETERSEN等<sup>[6]</sup>研发了公交出行时间预测系统。智能交通系

统技术应用呈现出多元发展的趋势。在交通信息服务方面,赵祥模等<sup>[7]</sup>提出了交通信息服务系统,该系统通过网络云平台及智能化设施发布实时交通信息。在提升既有交通设施效率方面,严海等<sup>[8]</sup>针对公交车不能按时到站的问题,通过建立数值仿真模型,提出了实时的公交车速度控制方法。代壮等<sup>[9]</sup>建立了半自动驾驶公交车辆调度优化模型,该模型有效地降低了公交车辆运行成本,缩短了乘客候车时间。而在节能减排方面,低碳、高效、大容量的绿色交通系统以及清洁能源运载工具的推广,极大地提升了城市的宜居质量。

综上所述,本研究拟系统分析ITS最新研究热点,探究其在近些年来的发展。本研究选用科学计量方法,对国内外ITS方面的研究绘制可视化图谱,深入解读其研究发展现状,总结归纳ITS的发展趋势,为中国交通强国战略建设任务的开展与ITS相关学术问题的深入研究提供借鉴。

## 1 研究说明

### 1.1 研究数据与工具

本研究的数据来源于中国期刊的中国国家知识基础设施(China national knowledge infrastructure, CNKI)全文数据库和Web of Science核心期刊数据库(下文简称为WOS)。在CNKI中,以“智能交通系统”为检索词,分别选取中文核心、中文社会科学引文索引(chinese social science citation index, CSSCI)、中国科学引文数据库(chinese science citation database, CSCD)进行高级检索,检索时间设为2012~2020年,剔除与主题无关的期刊后,将搜

索到的553篇文献作为本研究的基础数据之一。然后,在WOS中,搜索英文主题“intelligent transportation system”“intelligent transport system”,将文献类型设为“article”,检索时间也设为2012~2020年,对相关研究领域进行筛选,去除与主题不符的文献,最终得到2 505篇文献。通过对这些文献进行统计,得到了国内外智能交通系统发文总量年度分布,如图1所示。

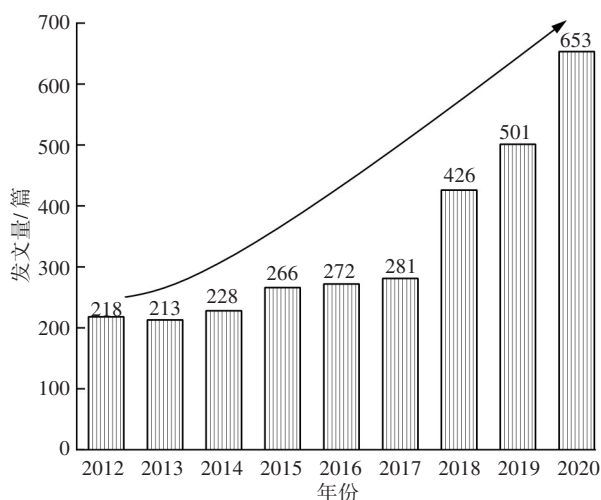


图1 2012~2020年国内外智能交通系统发文总量年度分布

Fig. 1 Statistics on the literature of intelligent transportation systems at home and abroad from 2012 to 2020

从图1可以发现,在2012~2020年期间,智能交通系统领域的发文量总体呈上升趋势。其中,2012~2017年属于平稳发展阶段,而2017~2020年属于爆发式增长阶段,特别是2018年,该领域的发文量比2017年的增长了51.6%,表明ITS受到国内外众多学者的广泛关注。本研究所使用工具为可视化软件CiteSpace,该软件通过共引理论和寻径算法,对特定学科或领域的科学文献进行分析,能对其进行可视化处理,表征该学科或者领域的演化趋势,探究其内部发展规律。CiteSpace科学计量软件使用基于时序的可视化方法,能分析特定某一主题随时间的变化趋势。若将其与聚类算法配合使用,可以探究随时间推移凸现的主题类别,其在国内外的各个学科领域都得到了十分广泛的应用<sup>[10]</sup>。

## 1.2 研究整体特征

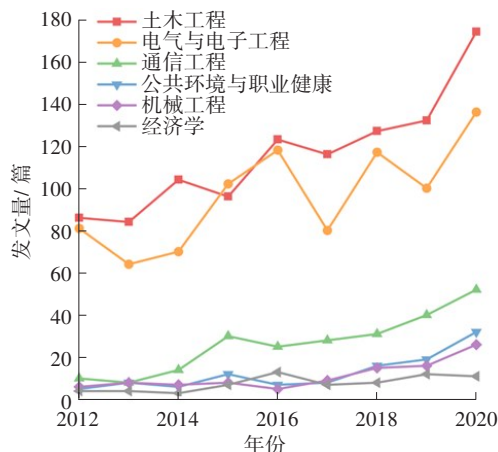
### 1.2.1 中国以外的国家和地区的研究特征分析

根据在2012~2020年期间的搜索数据,利用

CiteSpace绘制中国以外的国家和地区在该领域发文的可视化图谱,结果如图2(a)所示;绘制中国以外的国家和地区的ITS涉及的学科领域发展图谱,结果如图2(b)所示。



(a) ITS研究发文的国家(地区)分布特征;



(b) 中国以外的国家和地区的ITS研究涉及学科分布特征

图2 中国以外的国家和地区的ITS研究特征

Fig. 2 Distribution of foreign ITS research characteristics

#### 1) ITS研究发文国家(地区)分布。

从图2(a)中可以看出不同国家(地区)在ITS领域内的发文量。图谱中的节点半径越大,来自该国家(地区)的发文量就越多;节点半径越小,来自该国家(地区)的发文量就越少。节点间的连线表示国家(地区)间合作程度,线条越粗,则两个国家(地区)间的合作越多;反之,若线条越细,则两个国家(地区)间的合作就越少。

从图2(a)中可以发现,ITS领域内的发文量排名靠前的国家(地区)有美国、英国、澳大利亚、韩国、加拿大、法国、新加坡等,表明这些国家(地区)在研发ITS方面具有强劲的科技实力。从国家层面看,美国、欧洲、韩国等作为最早进行ITS研发与创

新的国家(地区),它们在ITS研究领域占据了重要位置;从国家(地区)间的合作网络来看,国家(地区)间合作联系紧密,这也从侧面体现了这些国家(地区)对ITS研究的重视程度。

## 2) 中国以外国家和地区ITS涉及学科分布。

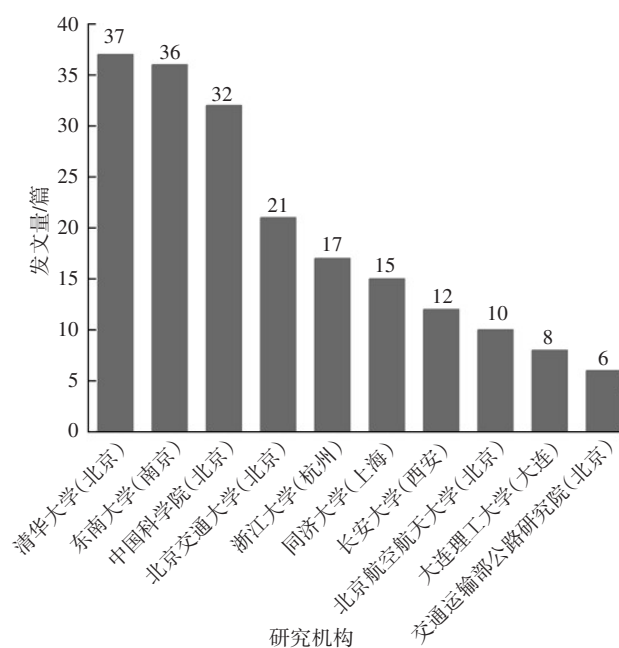
从图2(b)中可以发现,从对WOS的数据分析来看,在ITS的大类下,除交通工程领域外,涉及较多的学科领域有土木工程(978篇文献)、电气与电子工程(850篇文献)、通信工程(235篇文献)、公共环境与职业健康(90篇文献)、机械工程(77篇文献)、经济学(68篇文献)等。土木工程、电气与电子工程仍是ITS的主要合作学科领域,表明先进的交通基础设施、电子传感、控制技术是ITS的重要组成部分。通信工程、公共环境与职业健康、机械工程等领域的发文量均大致呈稳步增长的趋势,据此也可判断ITS与通信技术、机械工程、安全健康等学科的融合发展逐渐成了中国以外国家和地区ITS研究的热门方向。

### 1.2.2 中国研究特征分析

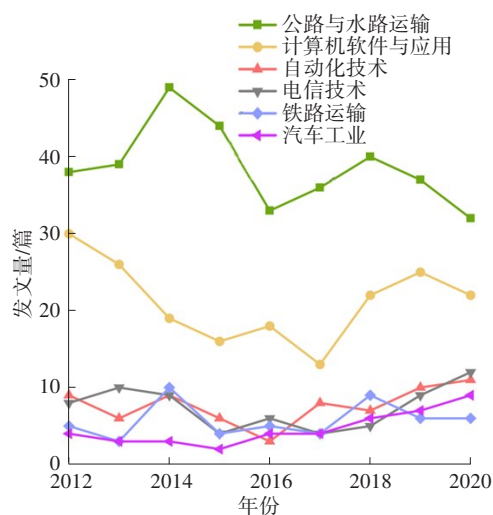
根据在2012~2020年期间的搜索数据,利用CiteSpace绘制中国研究机构发文量排名柱状图,结果如图3(a)所示;根据搜索的CNKI筛选数据,绘制中国的ITS涉及的学科领域发展图谱,结果如图3(b)所示。

## 1) 中国ITS研究发文机构分布。

从图3(a)中可以发现,中国在2012~2020年间与ITS主题相关的总发文量为194篇。中国的清华大学的ITS发文量居首位,共计37篇;其次为东南大学和中国科学院,分别为36篇和32篇。排名前三位的机构发文量占中国2012~2020年ITS主题相关总发文量的54.12%,发文篇数大于等于10篇以上机构占总发文机构的92.78%。从这些数据来看,中国在ITS领域的研究多集中于具有雄厚实力的理工类高等院校及科研院所。从这些研究机构所属的行政区域来看,中国对ITS展开研究的机构多分布在北京市、南京市、杭州市、大连市等经济发达的东部地区,中西部地区仅有西安市的长安大学一所。这表明中国ITS研究多集中于人口稠密、经济与科技研究水平均较高的东部地区;而在人口稀疏、经济与科技水平相对靠后的中西部地区,ITS方面的研究开展得较少。



(a) 国内ITS研究发文机构分布



(b) 中国研究ITS涉及学科分布

图3 中国研究特征分布

Fig. 3 Distribution of research characteristics in China

## 2) 中国ITS涉及学科分布。

从图3(b)中可以发现,中国ITS领域的研究涉及较多的学科有公路与水路运输(349篇文献)、计算机软件应用(191篇文献)、自动化技术(67篇文献)、电信技术(49篇文献)、铁路运输(46篇文献)、汽车工业(40篇文献)等。公路与水路运输、计算机软件与应用仍是ITS研究的主要涉及领域,表明这些学科在中国ITS研究中占据主导地位。其次,自动化技术、电信技术、汽车工业等学科领域的ITS发文量均大致呈稳步增长趋势。据此可以预测



中国 ITS 与这些领域的联系将会继续加强,并逐步成为新的研究热点。

## 2 国内外 ITS 研究热点与演化

### 2.1 中国以外国家和地区 ITS 研究热点与趋势

#### 2.1.1 高被引文献分析

高被引文献是某一研究领域最具代表性的文章,对其进行分析有助于发掘该学科领域的热点与前沿问题<sup>[11]</sup>。因此,本研究对 WOS 高被引文献进行了统计分析,得到 2012~2020 年中国以外国家和地区的高被引文献,并依据引用次数,对其进行了排名,结果见表 1。

自 20 世纪 80 年代以来,短期交通流预测一直是 ITS 研究与应用的重要组成部分,VLAHOIANNI 等<sup>[12]</sup>就对在短期交通流预测方面存在的问题做了总结和归纳,并提出了其中 10 个未来研究的重点方向。LIPPI 等<sup>[13]</sup>对以往的短期交通流预测方法进行

了系统的对比和分析。近年来,车辆自动驾驶、自动巡航逐渐成为 ITS 研究的重点,MILANÉS 等<sup>[14-15]</sup>基于实际实验数据,开发了自适应巡航控制(adaptive cruise control, ACC)和合作巡航控制(cooperative adaptive cruise control, CACC)系统模型。DI 等<sup>[16]</sup>针对车队排列问题,提出了新的分布式控制协议。PETIT 等<sup>[17]</sup>就自动驾驶潜在的隐私安全、网络攻击等问题进行了深入研究,并提出对应策略。交叉口协同控制是 ITS 研发的关键环节,LEE 等<sup>[18]</sup>设计了在车辆完全自动化的情况下的交叉口控制算法(cooperative control algorithm for vehicle at intersection, CCAVI)。在 ITS 扩展研究方面,MENOUAR 等<sup>[19]</sup>提出了将无人机应用在智能交通系统的方法,该方法可提高智能交通系统的灵活性。MOREIRA-MATIAS 等<sup>[20]</sup>认为 ITS 也可以应用在高效率的出租车调度、需求预测、省时寻路等方面。综上所述,提升 ITS 在交通流精准预测方面能力、车辆自动驾驶及交叉口协同控制、ITS 扩展研发等是近些年来中国以外国家和地区 ITS 研究的热点方向。

表 1 中国以外国家和地区 ITS 领域高被引论文

Table 1 Highly cited papers in ITS field from countries and regions outside of China

排名	作者	年份	标题	研究重点	被引频次
1	ELENI I. VLAHOIANNI 等 <sup>[12]</sup>	2014	Short-term traffic forecasting: where we are and where we're going	短期交通流(short-term traffic, STT); 预测模型(prediction models, PM); 响应式算法(responsive algorithms, RA)	523
2	VICENTE MILANÉS 等 <sup>[14]</sup>	2013	Cooperative adaptive cruise control in real traffic situations	协同自适应巡航控制(cooperative adaptive cruise control, CACC); 智能驾驶(intelligent driving, ID); 协同车辆(cooperative vehicles, CV)	450
3	JOYOUNG LEE 等 <sup>[18]</sup>	2012	Development and evaluation of a cooperative vehicle intersection control algorithm under the connected vehicles environment	合作车辆交叉控制系统(cooperative vehicle intersection control system, CVICS); 交通控制(traffic control, TC)	366
4	HAMID MENOUAR 等 <sup>[19]</sup>	2017	UAV-Enabled intelligent transportation systems for the smart city: applications and challenges	无人机在 ITS 中的应用及挑战(applications and challenges of uavs in its)	313
5	LUIS MOREIRA-MATIAS 等 <sup>[20]</sup>	2013	Predicting taxi - passenger demand using streaming data	数据流(data streams, DS); GPS 数据(global positioning system data, GPSD); 出租车-乘客需求(taxi - passenger demand, TPD)	280
6	JONATHAN PETIT 等 <sup>[17]</sup>	2014	Potential cyberattacks on automated vehicles	协作自动驾驶汽车(cooperative automated vehicle, CAV); 网络攻击(cyberattacks);安全(security)	279
7	VICENTE MILANÉS 等 <sup>[15]</sup>	2014	Modeling cooperative and autonomous adaptive cruise control dynamic responses using experimental data	协同自适应巡航控制(cooperative adaptive cruise control, CACC); 汽车跟踪模型(car-following models, CFM);车辆编队(vehicle platooning, VP)	279

表1 (续)

排名	作者	年份	标题	研究重点	被引频次
8	MARCO LIPPI等 <sup>[13]</sup>	2013	Short-Term traffic flow forecasting: an experimental comparison of time-series analysis and supervised learning	支持向量回归模型(support vector regression models,SVRM); 交通流预测(traffic forecasting,TF)	275
9	LEI等 <sup>[21]</sup>	2017	Blockchain-Based dynamic key management for heterogeneous intelligent transportation systems	区块链(blockchain); 动态密钥管理(dynamic key management,DKM); 车载通信系统(vehicular communication systems , VCSS)	229
10	DI等 <sup>[16]</sup>	2015	Distributed consensus strategy for platooning of vehicles in the presence of time-varying heterogeneous communication delays	基于Agent控制(agent-based control,ABC); 复杂网络系统控制(control of complex network systems,CCNS)	222

2.1.2 关键词分析

研究热点是指某领域在一定的时期内,研究关注度较大的科学主题<sup>[22-23]</sup>。本研究借助 CiteSpace 软件,绘制文献关键词共现图谱来展示关键词之间的内在联系,以此反映中国以外国家和地区在智能交通系统领域的热点与动态前沿,结果如图4所示。在图4中,图谱中每个年轮代表一个关键词,年轮半径的大小代表以该词作为关键词的文献数量的多少,年轮半径越大,关键词出现的词频越高,其与文章主题相关性也越强;反之,年轮半径越小,关键词出现的词频越低,其与文章主题相关性也越弱。词汇的中心性指的是该词汇在全部关键词中的中心程度,如果某关键词的中心性大于等于0.1,则该词汇为科研网络中的关键节点,且其中介作用较强;反之,如果某关键词的中心性小于0.1,则该词汇不是科研网络中的关键节点,其中介作用也相对较弱。这些年轮最外圈宽度代表中心性,最外圈年轮越宽,关键词

的中心性越大;最外圈年轮越窄,关键词的中心性越小。年轮间的连线粗细代表两个关键词共线关系的强弱。

从图4中可以发现,WOS数据库智能交通系统中的关键词均较为集中,且关键词四周分布较为均匀,表明其所研究领域主题较为集中,没有局限于单一研究方向,各领域间联系较为紧密。

通过对 ITS 的高频关键词进行统计,得到最常用的前20位高频关键词,结果见表2。

表2 中国以外国家和地区的智能交通系统最常见的前20个关键词

Table 2 The top 20 most commonly used keywords in ITS field in countries and regions outside of China

排名	高频关键词	中心性	频次	排名	高频关键词	中心性	频次
1	ITS (智能交通系统)	0.27	211	11	optimization (最优化)	0.03	51
2	model (模型)	0.00	152	12	safety (安全性)	0.14	48
3	system (系统)	0.01	143	13	behavior (行为)	0.15	42
4	algorithm (算法)	0.02	77	14	time (时间)	0.08	40
5	network (网络)	0.01	66	15	road traffic (道路交通)	0.08	39
6	neural network (神经网络)	0.08	60	16	tracking (轨迹追踪)	0.08	39
7	design (设计)	0.05	58	17	prediction (预测)	0.02	39
8	flow (流)	0.00	56	18	traffic engineering computation (交通工程计算)	0.10	36

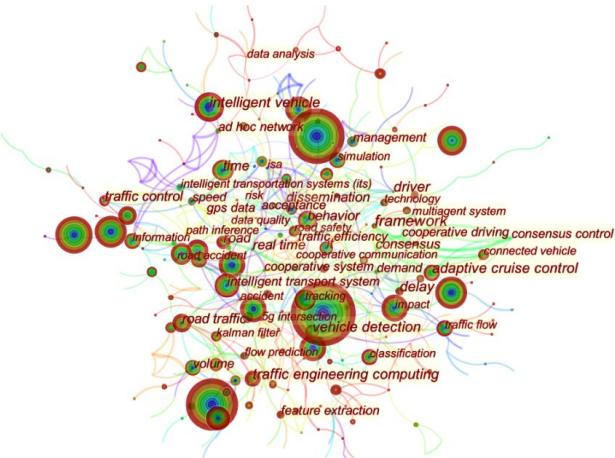


图4 WOS数据库智能交通系统关键词共现网络

Fig. 4 WOS database intelligent transportation system keyword co-exist network

表2(续)

排名	高频关键词	中心性	频次	排名	高频关键词	中心性	频次
9	impact (影响)	0.07	54	19	adaptive cruise control (自适应巡航 控制)	0.15	35
10	intelligent vehicle (智能交通工 具)	0.14	52	20	communication (交流)	0.04	29

由表2可知,外文文献中ITS的研究领域主要聚焦于交通出行安全,如 adaptive cruise control(自适应巡航控制)、behavior(行为)、security(安全)等关键词的搜索频率较高<sup>[24-25]</sup>。据相关数据,中国以外国家和地区的交通事故发生率与致死率均远低于中国的交通事故发生率与致死率,这与中国以外国家和地区的学者注重交通出行安全方面的研究密不可分<sup>[26-27]</sup>。

由表2还可知,外文文献对于 model(模型)、algorithm(算法)、neural network(神经网络)、optimize(优化)、communication(交流)等关键词的关注较为密切,表明提升ITS计算性能的基础学科是中国以

外国家和地区的交通领域的热点议题<sup>[28-29]</sup>。而在实际应用方面,除 adaptive cruise control(自适应巡航控制)、behavior(行为)、security(安全)外,较多研究聚焦于 traffic(交通)、intelligent vehicle(智能交通设备)、prediction(预测)、tracking(轨迹追踪)等方面<sup>[30-31]</sup>。traffic(交通)和 prediction(预测)等关键词主要出现在车辆流及异质流预测中,这两者是目前智能交通系统领域研究的热点。intelligent vehicle(智能交通工具),又称 self-driving vehicle(自动驾驶交通工具)主要涵盖环境感知、定位及地图构建、路径规划决策、运动控制等方面的内容,它们均是ITS领域的重要研究课题<sup>[32-33]</sup>。tracking(轨迹追踪)这一关键词主要出现在自动驾驶车队、伴随车辆、车辆监测等方面的研究中,多用于交通控制与诱导、稽查布控、应急抢险救灾等工作,这些研究具有较高的社会意义。

### 2.1.3 研究趋势演变

收集中国以外国家和地区的智能交通系统关键词,对其进行时区划分,结果如图5所示。对关键词的时区划分进行分析与研判,并结合 CiteSpace 关键词突现度,可将研究区间划分为两个阶段:

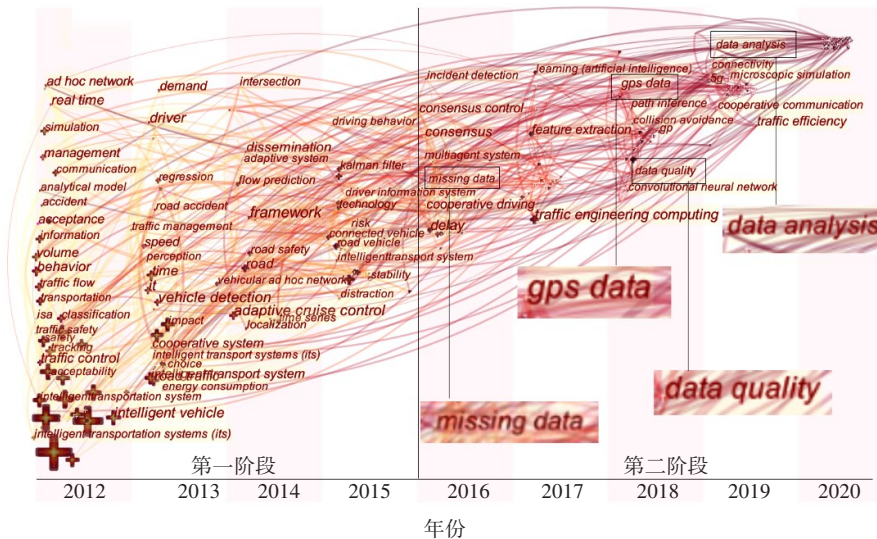


图5 国外智能交通系统时区演化阶段

Fig. 5 Time zone evolution of foreign intelligent transportation systems

第一阶段(2012~2015年):此阶段涉及的关键词数量最多,主要有 ITS、traffic prediction(交通预测)、intelligent vehicle(智能交通工具)、energy consumption(能源消耗)、advanced driving assistance system(先进驾驶辅助系统)、traffic control(交通控制)、traffic safety(交通安全)、framework(框架)、traffic engineering(交通工程)等。此阶段研究主题多为ITS奠基性理论与技术,后续研究基本都是以

该阶段的研究工作为基础,在其之上进行深入的研究与应用。

第二阶段(2016~2020年):该阶段的重点研究方向有 feature extraction(特征提取)、deep learning(深度学习)、data analysis(数据分析)、consensus control(一致性控制)、traffic engineering calculations(交通工程计算)、人工智能(artificial intelligence, AI)等。WUTHISHUWONG等<sup>[34]</sup>采用多智能体概念



对交通网络进行了建模。TANG等<sup>[35]</sup>基于机器学习的车载网络,开发了高度动态的智能系统。值得注意的是,在此阶段,数据作为重要的战略资源,开始引起学界的广泛关注,从数据缺失到数据分析,数据的价值愈发显著。CHEN等<sup>[36]</sup>运用交通大数据,挖掘其外部价值,给交通系统提供了更便利、更可靠的服务。NKENYEREYE等<sup>[37]</sup>提出了专门用于安全车辆云计算的交通数据传播和分析协议。将人工智能

(artificial intelligence, AI)、云计算、物联网、大数据等新一代信息技术综合起来,解决交通领域的科学研究问题在这一阶段逐渐成为主流的研究趋势与热点。

2.2 中国ITS研究热点与趋势

2.2.1 高被引文献分析

本研究对2012~2020年的CNKI筛查数据进行了统计与分析,得到了这些年来中国高被引文献表,见表3。

表3 中国ITS领域高被引文献

Table 3 Highly cited pagers in ITS field in China

排名	作者	年份	标题	研究重点	被引频次
1	陆化普等 <sup>[38]</sup>	2014	大数据及其在城市智能交通系统中的应用综述	交通大数据基本概念; 交通大数据“6V”特征; 大数据衍生问题	303
2	赵祥模等 <sup>[7]</sup>	2014	泛在交通信息服务系统的概念、架构与关键技术	交通信息服务; 泛在网络; 体系架构与关键技术	96
3	于荣等 <sup>[39]</sup>	2013	基于支持向量机的城市道路交通状态模式识别研究	支持向量机; 城市道路交通状态识别及分类	82
4	赵鹏军等 <sup>[40]</sup>	2014	大数据方法对于缓解城市交通拥堵的作用的理论分析	大数据方法; 最优均衡理论; 缓解交通拥堵; 一体化交通监测与管理	78
5	张存保等 <sup>[41]</sup>	2013	车路协同下道路交叉口信号控制优化方法	车路协同; 道路交叉口信号控制优化方法; 基于时间窗的滚动预测	72
6	冉斌等 <sup>[42]</sup>	2018	智能网联交通技术发展现状及趋势	智能网联交通系统的技术体系架构	70
7	李颖宏等 <sup>[43]</sup>	2013	基于组合预测模型的短时交通流预测	短时交通流预测; 组合预测模型; 历史交通流数据; 数据挖掘	63
8	杨帆等 <sup>[44]</sup>	2012	车路协同系统下多智能体微观交通流模型	车路协同; 多智能体; 单车道微观交通流模型; 决策机制	54
9	张存保等 <sup>[45]</sup>	2012	基于车路协同的单点信号控制优化方法和模型	车路协同; 预测时间窗; 单点信号控制优化; 交通仿真	52
10	张纪升等 <sup>[46]</sup>	2018	智慧高速公路架构与发展路径设计	我国智慧高速公路架构与发展路径; “端—管—云”技术架构	51

由表3可知,在ITS顶层设计方面,陆化普等<sup>[38]</sup>认为数据是ITS研究设计的基础,交通大数据将会引领ITS的深度变革。冉斌等<sup>[42]</sup>则认为ITS的发展

应该从“聪明的系统”起步,逐渐发展到“聪明的车和路”的高级阶段。赵祥模<sup>[7]</sup>则提出了泛在交通信息融合系统,该系统将先进的泛在网络、协同感知、



大数据、云计算等技术与ITS结合起来,得到了较好的效果。在交通流预测方面,于荣等<sup>[39]</sup>以顺畅流、平稳流、拥挤流、堵塞流为标签,对道路交通状态进行分类,提高了交通流的预测精度。杨帆等<sup>[44]</sup>建立了在车路协同下多智能体的微观交通流模型;李颖宏等<sup>[43]</sup>利用数据挖掘技术,分析了历史交通数据的时空特性,结合多种组合预测方式,实现了短时交通流预测。在道路交叉口交通控制方面,张存保等<sup>[45]</sup>改进了道路交叉口信号控制流程,建立车路协同环境下的交叉口仿真模型。在交通大数据方面,赵鹏军<sup>[40]</sup>采用大数据方法,采用ITS技术,提高了交通流的预

测精度,提升了公交运行实时监控水平,缓解城市交通拥堵。在ITS子系统方面,张纪升等<sup>[46-47]</sup>针对智慧高速公路,提出了“端-管-云”思路的技术架构。综上所述,提高交通流预测精准度、构建科学完善的ITS子系统是这一阶段中国ITS研究的主要趋势。

### 2.2.2 研究关键词解析

将筛查得到的CNKI数据导入CiteSpace科学计量软件进行分析,得到中国智能交通系统关键词的共现网络,结果如图6所示,并据此建立高频关键词表,结果见表4。



图6 CNKI数据库智能交通系统关键词共现网络

Fig. 6 CNKI database intelligent transportation system keyword co-exist network

表4 中国智能交通系统最常见的前20的关键词

Table 4 The top 20 most commonly used keywords in ITS field in China

排名	高频关键词	中心性	频次	排名	高频关键词	中心性	频次
1	智能交通系统	0.53	340	11	地图匹配	0.17	7
2	城市轨道交通	0.14	29	12	交通安全	0.03	6
3	交通工程	0.10	18	13	交通流预测	0.02	6
4	物联网	0.06	12	14	人工智能	0.38	6
5	车联网	0.34	11	15	车路协同	0.35	5
6	大数据	0.04	9	16	交通控制	0.03	5
7	交通仿真	0.19	9	17	自动驾驶	0.06	5
8	卷积神经网络	0.00	8	18	公共交通	0.04	5
9	深度学习	0.38	7	19	云计算	0.29	5
10	车辆检测	0.06	7	20	卡尔曼滤波	0.00	4

在图6中,节点外圈环的厚度越大,节点的重要性越高。节点间连线的颜色深浅代表节点首次建立连接的时间,颜色越深,节点间发生连接时间越晚;反之,颜色越浅,节点间发生连接的时间越早。

从表4中可以看出,中心性排名前五的关键词为智能交通系统、深度学习、人工智能、车路协同、车联网。从图6中可看出,这些关键词之间的连线颜色多为深色,表明中国智能交通系统研究与新兴技术开发间联系时间较晚。图6中与云计算相关的节点(如云控系统、云控交通信号管控、云控基础平台等)之间的连线为深色,表明这些均是中国智能交通系统的热点研究方向。大数据及云控制技术的发展与创新,为其他各领域的研发与创新带来新的机遇。在实际应用层面,车辆检测、地图匹配、车路协同、交通控制、公共交通等均为中国的研究热点。其中,车辆检测主题主要涉及交通流监测<sup>[48-49]</sup>、

车辆行为检测<sup>[50]</sup>等方面;地图匹配及车路协同主题则代表ITS领域的关键定位技术<sup>[51]</sup>及短程通信技术研发方面,精准的卫星定位技术及高效的短程数据通信可为ITS提供更加精确的道路交通定位及导航信息服务;交通控制、公共交通主题涵盖了交通信号控制、智能公交协调优化<sup>[52-54]</sup>等方面。

### 2.2.3 研究演化分析

绘制中国智能交通系统时区图谱,如图7所示,并结合CiteSpace科学计量软件中的关键词突现度及中国智能交通政策内容,将所研究区间划分为3个阶段。

第一阶段(2012~2013年):这阶段的代表关键词有ITS、交通仿真、交通流量预测、城市轨道交通、物联网、云计算、车路协同等。在区域协同方面,马庆禄等<sup>[55-56]</sup>结合交通物联网、云计算技术,提出了区域交通联动控制云策略模型。龙琼等<sup>[57-59]</sup>基于Q学习理论,对城区干线交通控制进行系统优化。在车路协同方面,邓国红等<sup>[60-63]</sup>对微观交通流、巡航控制等模型进行了设计和优化,大幅提升了交通运行的机动性、稳定性。纵观近年来的研究进展,受通信技术发展所限,这两方面始终不能较好地同时满足低时延、高可靠的要求,故发展较为缓慢。

第二阶段(2014~2017年):这阶段的代表关键词为无线传感网络、交通控制、地图匹配、车联网等。在此阶段,中国政府颁布了《“十三五”现代综合交通运输体系发展规划》,该规划强调了建设智

能交通的重要性。地图匹配是智能交通系统的难点。周成等<sup>[64]</sup>认为如何在复杂城市环境中提高地图匹配精确性及处理海量数据的能力是该领域研究重点。王明月等<sup>[65-67]</sup>指出实时而准确的短时交通流量预测是解决复杂城市交通问题的关键。车联网技术是融合汽车、信息、交通等领域专业知识的重要技术,也是未来ITS发展的关键。此外,交通信号控制作为诱导车辆合理通行的重要节点,对城市智能交通的合理规划起着重要引领作用。

第三阶段(2018~2020年):这阶段的代表关键词有深度学习、自动驾驶、智能网联汽车、信息物理系统、云控系统、云控基础平台等。2019年9月,中共中央、国务院印发了《交通强国建设纲要》,提出要推动大数据、人工智能、区块链、超级计算等前沿技术与交通行业深度融合发展。很多学者也在不断尝试新技术与交通行业的结合应用。谭台哲等<sup>[68-69]</sup>利用卷积神经网络与深度学习进行交通标志的识别与检测。在云控制技术方面,先进、完善的云控制系统对于解决交通数据处理与存储难题、合理规划调度交通资源并具有显著优势。李克强等<sup>[70-72]</sup>提出了智能网联汽车云控系统,该系统可显著降低车辆运行成本,减少交通事故,提升道路通畅性。

综上所述,不难发现,中国智能交通系统的发展与国家政策紧密相关,具有较强的政策引导效应,且基于人工智能等各类信息技术与交通领域的融合发展亦是中国ITS研究的重点与趋势。

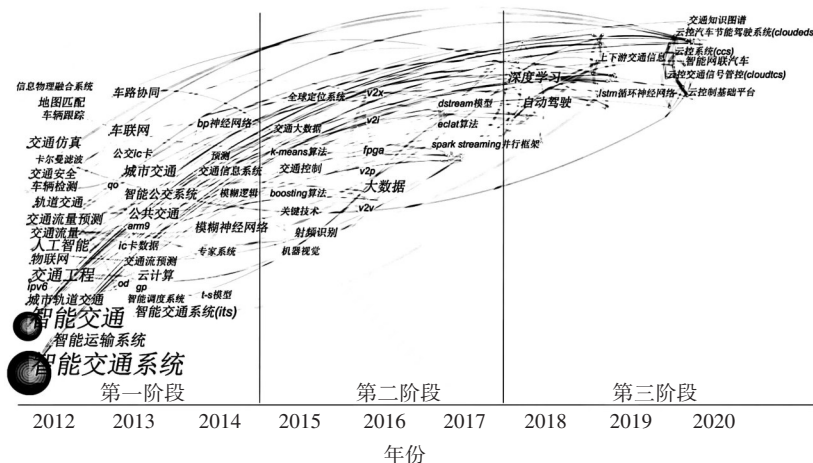


图7 国内智能交通系统时区划分

Fig. 7 Time zone division of the domestic intelligent transportation system

### 3 结论与展望

#### 3.1 研究结论

通过对国内外 ITS 基础知识及热点前沿研究进行统计分析,得出结论:

近年来,国内外研究学者在智能交通系统领域研究热度持续升温。中国以外国家和地区的研究国家(地区)中,美国、欧洲、韩国、新加坡等国家(地区)的发文量较多,这些均是 ITS 研究的传统强国(地区),国家(地区)间的联系也较为紧密。在中国的研究机构中,交通理工类的高等院校是研究的主要力量,且其地域上也呈东部密集,西部稀疏的特点。从涉及学科方面看,国内外的 ITS 研究均越来越表现出与多学科、多领域融合的趋势,且 ITS 与通信、电子信息、汽车机械等学科和领域的联系日益紧密。

从 ITS 高被引文献来看,国内外研究均注重交通流预测、车路协同、ITS 系统扩展研发等方面。从研究热点来看,国内外研究均呈 ITS 与前沿技术交叉融合的特征。从发展趋势来看,国内外研究存在一定的差异,中国以外国家和地区多以基础研究为主,注重通过技术发展破解交通系统研发难题;而中国的研究则呈现政策引领发展的特征,其研究更多聚焦于区域协同、交通控制、云控系统等方面。

此外,交通大数据是国内外研究者普遍关注的重点,大数据研究的发展对于 ITS 的理论与应用影响深远。与中国以外国家和地区的研究相对比,中国的研究更侧重于公共交通、电子停车不收费系统(electronic toll collection,ETC)等交通整体性规划对于提升区域乃至全国经济发展的应用等,且其对于 ITS 的顶层架构理念及其系统技术应用也在逐步深入。

#### 3.2 研究展望

综合国内外 ITS 发展趋势,未来中国 ITS 研发与应用可着重考虑以下几个方面:

##### 1) ITS 基础核心技术。

从全球化趋势来看,各国对于 ITS 技术的研发投入与深度都将达到一个全新的水平,其发展演变将在现有基础上不断提升,都致力于实现研发新突破,掌握核心技术,实现技术输出。对于中国来说,

首先是研发更具中国特色的 ITS 技术,不断提升 ITS 智能化水平,如多流向车辆检测算法、区域协同控制算法等;其次是智能交通模拟仿真技术,其对于打破技术封锁、丰富道路交通智能化应用、提升道路运行管理水平至关重要;最后是在大数据背景下,重点关注交通数据获取、处理、存储等,如何在云端及边缘端实现数据高效、准确提取,降低计算处理维度,解决海量数据存储难题,是未来研究的重要着力点。

##### 2) 车路云协同一体化。

通过终端网联车辆、路端智能设备、云端处理中心,结合 5G 等先进通信技术,实现车路云信息共享,进而解决传统交通信息的传输阻滞、视觉盲区、交通拥堵等难题。目前,中国在单车智能技术路线上与美国相比,仍有较大差距,而采用车路云协同一体化路线则有利于中国在科技领域上弯道超车,实现技术引领。并且对于大规模区域协同控制而言,车路云协同的优势更加明显,尤其是对于大量车辆实时协作控制、保证车辆协作通信所需信息与数据的实时性与可靠性等方面的作用更加显著。所以,基于先进通信技术的车路云协同一体化是未来重要研究方向之一。

##### 3) 混合交通流下 ITS 研发。

传统交通流多为非智能化的车辆组成的单一交通流,而随着自动驾驶技术的突破,有人与无人驾驶车辆组成的混合交通流将在未来很长时间内占据主导地位。基于此,混合交通模式下的 ITS 研究也应随之增多。如基于混合交通流的车辆协同控制优化,降低交通事故发生率与燃料消耗,提升道路交通安全性与流畅性;针对混合交通流车辆轨迹数据获取,构建道路交通全样本数据模型,进行交通状态预测评估;人机共驾模式下,有人与无人驾驶车辆事故权责分配法律问题研究等。因此,如何在混合交通流下探索 ITS 新突破将成为未来研究的重要议题。

#### 参考文献(References):

- [1] HUANG W, WEI Y, GUO J H, et al. Next-generation innovation and development of intelligent transportation system in China [J]. Science China Information Sciences, 2017, 60 (11): 110201. DOI: 10.1007/



- s11432-017-9182-x.
- [2] 王笑京, 张纪升, 宋向辉, 等. 国际智能交通系统研发热点[J]. 科技导报, 2019, 37(6): 36-43.  
WANG Xiaojing, ZHANG Jisheng, SONG Xianghui, et al. Research and development focus of international intelligent transport system [J]. Science & Technology Review, 2019, 37(6): 36-43.
  - [3] 卢锐, 曹文娟. 迈向全面联网业务协同智能应用:《交通运输信息化“十三五”发展规划》解读[N]. 中国交通报, 2016-05-09(2).  
LU Yue, Cao Wenjuan, Towards comprehensive networking, business collaboration and intelligent applications: interpretation of the 13th five-year plan for the development of transport informatization [N]. China Communications News, 2016-05-09(2)
  - [4] NARANJO J E, JIMÉNEZ F, GÓMEZ O, et al. Low level control layer definition for autonomous vehicles based on fuzzy logic [J]. Intelligent Automation & Soft Computing, 2012, 18 (4) : 333-348. DOI: 10.1080/10798587.2012.10643247.
  - [5] NGUYEN D B, DOW C R, HWANG S F. An efficient traffic congestion monitoring system on Internet of vehicles [J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2018, 2018: 1-17. DOI: 10.1155/2018/9136813.
  - [6] PETERSEN N C, RODRIGUES F, PEREIRA F C. Multi-output bus travel time prediction with convolutional LSTM neural network[J]. Expert Systems with Applications, 2019, 120: 426-435. DOI: 10.1016/j.eswa.2018.11.028.
  - [7] 赵祥模, 惠飞, 史昕, 等. 泛在交通信息服务系统的概念、架构与关键技术[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14 (4) : 105-115. DOI: 10.3969/j. issn. 1671-1637.2014.04.013.  
ZHAO Xiangmo, HUI Fei, SHI Xin, et al. Concept, architecture and challenging technologies of ubiquitous traffic information service system [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(4): 105-115. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1637.2014.04.013.
  - [8] 严海, 刘润坤. 基于实时信息的公交运行速度控制策略与算法研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18 (4) : 61-68. DOI: 10.16097/j. cnki. 1009-6744.2018.04.010.
  - YAN Hai, LIU Runkun. Bus speed control strategy and algorithm based on real-time information [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2018, 18 (4) : 61-68. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2018.04.010.
  - [9] 代壮, 陈汐, 马晓磊. 半自动驾驶公交车辆编组与调度优化[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(12) : 2284-2292. DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2019.0627.  
DAI Zhuang, CHEN Xi, MA Xiaolei. Semi-autonomous driving bus platooning and scheduling optimization [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46 (12) : 2284-2292. DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2019.0627.
  - [10] CHEN C M, DUBIN R, KIM M C. Emerging trends and new developments in regenerative medicine: a scientometric update (2000 - 2014) [J]. Expert Opinion on Biological Therapy, 2014, 14(9) : 1295-1317. DOI: 10.1517/14712598.2014.920813.
  - [11] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace知识图谱的方法论功能[J]. 科学学研究, 2015, 33(2) : 242-253. DOI: 10.16192/j.cnki.1003-2053.2015.02.009.  
CHEN Yue, CHEN Chaomei, LIU Zeyuan, et al. The methodology function of CiteSpace mapping knowledge domains [J]. Studies in Science of Science, 2015, 33(2) : 242-253. DOI: 10.16192/j.cnki.1003-2053.2015.02.009.
  - [12] VLAHOIANNI E I, KARLAFTIS M G, GOLIAS J C. Short-term traffic forecasting: where we are and where we're going [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014, 43: 3-19. DOI: 10.1016/j.trc.2014.01.005.
  - [13] LIPPI M, BERTINI M, FRASCONI P. Short-term traffic flow forecasting: an experimental comparison of time-series analysis and supervised learning [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14 (2) : 871-882. DOI: 10.1109/TITS.2013.2247040.
  - [14] MILANÉS V, SHLADOVER S E, SPRING J, et al. Cooperative adaptive cruise control in real traffic situations [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(1) : 296-305. DOI: 10.1109/TITS.2013.2278494.
  - [15] MILANÉS V, SHLADOVER S E. Modeling cooperative and autonomous adaptive cruise control dynamic

- responses using experimental data [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2014, 48: 285-300. DOI: 10.1016/j.trc.2014.09.001.
- [16] DI BERNARDO M, SALVI A, SANTINI S. Distributed consensus strategy for platooning of vehicles in the presence of time-varying heterogeneous communication delays [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 16(1): 102-112. DOI: 10.1109/TITS.2014.2328439.
- [17] PETIT J, SHLADOVER S E. Potential cyberattacks on automated vehicles [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 16(2): 546-556. DOI: 10.1109/TITS.2014.2342271.
- [18] LEE J, PARK B. Development and evaluation of a cooperative vehicle intersection control algorithm under the connected vehicles environment [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2012, 13(1): 81-90. DOI: 10.1109/TITS.2011.2178836.
- [19] MENOUAR H, GUVENC I, AKKAYA K, et al. UAV-enabled intelligent transportation systems for the smart city: applications and challenges [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(3): 22-28. DOI: 10.1109/MCOM.2017.1600238CM.
- [20] MOREIRA-MATIAS L, GAMA J, FERREIRA M, et al. Predicting taxi: passenger demand using streaming data [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2013, 14(3): 1393-1402. DOI: 10.1109/TITS.2013.2262376.
- [21] LEI A, CRUICKSHANK H, CAO Y, et al. Blockchain-based dynamic key management for heterogeneous intelligent transportation systems [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2017, 4(6): 1832-1843. DOI: 10.1109/JIOT.2017.2740569.
- [22] 彭飞, 富宁宁, 胡伟, 等. 国内外海洋资源研究知识图谱解析及启示 [J]. *资源科学*, 2020, 42(11): 2047-2061. DOI: 10.18402/resci.2020.11.01.
- PENG Fei, FU Ningning, HU Wei, et al. Analysis and enlightenment of knowledge map of marine resources research at home and abroad [J]. *Resources Science*, 2020, 42(11): 2047-2061. DOI: 10.18402/resci.2020. 11. 01.
- [23] 黎雪微. 基于知识图谱的在线学习资源个性化推荐研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2020. DOI: 10.27379/d.cnki.gwhdu.2020.001976.
- LI Xuewei. Research on personalized recommendation of online learning resources based on knowledge graph [D]. Wuhan: Wuhan University, 2020.
- [24] LIN C Y, ZHOU X Y, GONG B W. Trusted measurement and evaluation for intelligent transportation system products: a case study for traffic signal controller [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2019, 11(3): 168781401982959. DOI: 10.1177/1687814019829597.
- [25] COCÎRLEA D, DOBRE C, HÎRȚAN L A, et al. Blockchain in intelligent transportation systems [J]. *Electronics*, 2020, 9(10): 1682. DOI: 10.3390/electronics9101682.
- [26] CHANDRA SHIT R. Crowd intelligence for sustainable futuristic intelligent transportation system: a review [J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2020, 14(6): 480-494. DOI: 10.1049/iet-its.2019.0321.
- [27] YANG C, ZHA M J, WANG W D, et al. Efficient energy management strategy for hybrid electric vehicles/plug-in hybrid electric vehicles: review and recent advances under intelligent transportation system [J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2020, 14(7): 702-711. DOI: 10.1049/iet-its.2019.0606.
- [28] WANG C, LI X, ZHOU X H, et al. Soft computing in big data intelligent transportation systems [J]. *Applied Soft Computing*, 2016, 38: 1099-1108. DOI: 10.1016/j.asoc.2015.06.006.
- [29] LI M W, LI L. Intelligent transportation system in China: the optimal evaluation period of transportation's application performance [J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2020, 38(6): 6979-6990. DOI: 10.3233/jifs-179776.
- [30] XUE S, XIONG L, YANG S F, et al. A self-adaptive multi-view framework for multi-source information service in cloud ITS [J]. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2016, 7(2): 205-220. DOI: 10.1007/s12652-015-0316-5.
- [31] FERREIRA D L, NUNES B A A, OBRACZKA K. Scale-free properties of human mobility and applications to intelligent transportation systems [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, 19(11): 3736-3748. DOI: 10.1109/TITS.2018.2866970.
- [32] PUNZO V, MARZANO V, SIMONELLI F. Guest

- editorial special issue on models and technologies for intelligent transportation systems[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(11): 3538-3539. DOI: 10.1109/TITS.2018.2875806.
- [33] ZHU F H, LV Y S, CHEN Y Y, et al. Parallel transportation systems: toward IoT-enabled smart urban traffic control and management[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(10): 4063-4071. DOI: 10.1109/TITS.2019.2934991.
- [34] WUTHISHUWONG C, TRAECHTLER A. Distributed control system architecture for balancing and stabilizing traffic in the network of multiple autonomous intersections using feedback consensus and route assignment method[J]. Complex & Intelligent Systems, 2020, 6(1): 165-187. DOI: 10.1007/s40747-019-00125-3.
- [35] TANG Y, ZHANG C Z, GU R S, et al. Vehicle detection and recognition for intelligent traffic surveillance system [J]. Multimedia Tools and Applications, 2017, 76(4): 5817-5832. DOI: 10.1007/s11042-015-2520-x.
- [36] CHEN W, GUO F Z, WANG F Y. A survey of traffic data visualization [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(6): 2970-2984. DOI: 10.1109/TITS.2015.2436897.
- [37] NKENYEREYE L, PARK Y, RHEE K H. Secure vehicle traffic data dissemination and analysis protocol in vehicular cloud computing [J]. The Journal of Supercomputing, 2018, 74(3): 1024-1044. DOI: 10.1007/s11227-016-1773-0.
- [38] 陆化普, 孙智源, 屈闻聪. 大数据及其在城市智能交通系统中的应用综述[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(5): 45-52. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2015.05.007.
- LU Huapu, SUN Zhiyuan, QU Wencong. Big data and its applications in urban intelligent transportation system [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15(5): 45-52. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2015.05.007.
- [39] 于荣, 王国祥, 郑继媛, 等. 基于支持向量机的城市道路交通状态模式识别研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2013, 13(1): 130-136. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2013.01.024.
- YU Rong, WANG Guoxiang, ZHENG Jiyuan, et al. Urban Road traffic condition pattern recognition based on support vector machine [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2013, 13(1): 130-136. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2013.01.024.
- [40] 赵鹏军, 李铠. 大数据方法对于缓解城市交通拥堵的作用的理论分析[J]. 现代城市研究, 2014, 29(10): 25-30. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6000.2014.10.006.
- ZHAO Pengjun, LI Kai. A theoretical analysis for the applications of big-data methods for traffic congestion relief[J]. Modern Urban Research, 2014, 29(10): 25-30. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6000.2014.10.006.
- [41] 张存保, 冉斌, 梅朝辉, 等. 车路协同下道路交叉口信号控制优化方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2013, 13(3): 40-45. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2013.03.019.
- ZHANG Cunbao, RAN Bin, MEI Zhaohui, et al. An optimization method of traffic signal control based on cooperative vehicle infrastructure system [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2013, 13(3): 40-45. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2013.03.019.
- [42] 冉斌, 谭华春, 张健, 等. 智能网联交通技术发展现状及趋势[J]. 汽车安全与节能学报, 2018, 9(2): 119-130. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8484.2018.02.001.
- RAN Bin, TAN Huachun, ZHANG Jian, et al. Development status and trend of connected automated vehicle highway system [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2018, 9(2): 119-130. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8484.2018.02.001.
- [43] 李颖宏, 刘乐敏, 王玉全. 基于组合预测模型的短时交通流预测[J]. 交通运输系统工程与信息, 2013, 13(2): 34-41. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2013.02.017.
- LI Yinghong, LIU Lemin, WANG Yuquan. Short-term traffic flow prediction based on combination of predictive models [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2013, 13(2): 34-41. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2013.02.017.
- [44] 杨帆, 云美萍, 杨晓光. 车路协同系统下多智能体微观交通流模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(8): 1189-1196. DOI: 10.3969/j.issn.0253-374x.2012.0



- 8.012.
- YANG Fan, YUN Meiping, YANG Xiaoguang. Microscopic traffic flow model based on multi-agent in CVIS circumstance [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40 (8): 1189-1196. DOI: 10.3969/j.issn.0253-374x.2012.08.012.
- [45] 张存保, 陈超, 严新平. 基于车路协同的单点信号控制优化方法和模型[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34 (10): 74-79. DOI: 10.3963/j.issn.1671-4431.2012.10.016.
- ZHANG Cunbao, CHEN Chao, YAN Xinping. Traffic signal control method for single intersection based on cooperated vehicle infrastructure system [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(10): 74-79. DOI: 10.3963/j.issn.1671-4431.2012.10.016.
- [46] 张纪升, 李斌, 王笑京, 等. 智慧高速公路架构与发展路径设计[J]. 公路交通科技, 2018, 35(1): 88-94. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2018.01.012.
- ZHANG Jisheng, LI Bin, WANG Xiaojing, et al. Design of architecture and development roadmap of smart expressway [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35 (1): 88-94. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2018.01.012.
- [47] 岑晏青, 宋向辉, 王东柱, 等. 智慧高速公路技术体系构建[J]. 公路交通科技, 2020, 37(7): 111-121. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2020.07.015.
- CEN Yanqing, SONG Xianghui, WANG Dongzhu, et al. Establishment of technology system of smart expressway [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37 (7): 111-121. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2020.07.015.
- [48] 戈权民. 车流波动理论在监测点路网划分中的应用分析[J]. 交通科学与工程, 2017, 33(2): 92-96. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2017.02.015.
- GE Quanmin. Application and analysis of traffic flow fluctuation theory in the road network division of monitoring points [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2017, 33 (2): 92-96. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2017.02.015.
- [49] 安树科, 徐良杰, 陈国俊, 等. 基于车路协同技术的信号交叉口改进车辆跟驰模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50 (1): 169-174. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2020.01.022.
- AN Shuke, XU Liangjie, CHEN Guojun, et al. Improved car-following model at signalized intersection based on vehicle-infrastructure cooperation technology [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2020, 50 (1): 169-174. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2020.01.022.
- [50] 尹宏鹏, 李艳霞, 周佳怡, 等. 智能视频分析的车辆异常行为检测方法[J]. 重庆大学学报, 2016, 39(3): 75-83. DOI: 10.11835/j.issn.1000-582X.2016.03.010.
- YIN Hongpeng, LI Yanxia, ZHOU Jiayi, et al. A vehicle abnormal behavior detection method based on intelligent video analysis [J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2016, 39(3): 75-83. DOI: 10.11835/j.issn.1000-582X.2016.03.010.
- [51] 王坚, 刘纪平, 韩厚增, 等. 应急救援无缝定位关键技术研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45 (8): 1126-1136. DOI: 10.13203/j.whugis20200066.
- WANG Jian, LIU Jiping, HAN Houzeng, et al. Key technologies of seamless location in emergency rescue [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(8): 1126-1136. DOI: 10.13203/j.whugis20200066.
- [52] 宋现敏, 张明业, 姜景玲. 考虑区间重叠的多运营商公交调度优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20 (5): 142-147. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2020.05.021.
- SONG Xianmin, ZHANG Mingye, JIANG Jingling. Bus dispatching optimization of multi-operators considering overlapping interval [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2020, 20 (5): 142-147. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2020.05.021.
- [53] ZHANG WEIHUA, LI JUN, DING HENG. Arterial traffic signal coordination model considering buses and social vehicles [J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2020, 36(2): 206-212.
- [54] 雷永巍, 林培群, 姚凯斌. 互联网定制公交的网络调度模型及其求解算法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17 (1): 157-163. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2017.01.023.
- LEI Yongwei, LIN Peiqun, YAO Kaibin. The network scheduling model and its solution algorithm of Internet customized shuttle bus [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology,

- 2017, 17 (1): 157-163. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2017.01.023.
- [55] 马庆禄, 斯海林, 郭建伟. 物联网环境下城市交通区域联动的云控制策略[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(9): 2711-2714. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3695.2013.09.038.
- MA Qinglu, SI Hailin, GUO Jianwei. Cloud computing strategy of coordinated control in urban region traffic things networking [J]. Application Research of Computers, 2013, 30(9): 2711-2714. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3695.2013.09.038.
- [56] 夏元清, 闫策, 王笑京, 等. 智能交通信息物理融合云控制系统[J]. 自动化学报, 2019, 45(1): 132-142. DOI: 10.16383/j.aas.c180370.
- XIA Yuanqing, YAN Ce, WANG Xiaojing, et al. Intelligent transportation cyber-physical cloud control systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(1): 132-142. DOI: 10.16383/j.aas.c180370.
- [57] 龙琼, 张谨帆, 周昭明, 等. 基于Q学习的城区干线区域交通控制优化[J]. 铁道科学与工程学报, 2014, 11(4): 141-145. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.2014.04.023.
- LONG Qiong, ZHANG Jinfan, ZHOU Zhaoming, et al. Traffic control optimization of artery in urban area based on the Q-algorithm [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2014, 11(4): 141-145. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.2014.04.023.
- [58] 韩印, 邢冰, 姚佼, 等. 混合交通流条件下区域交通信号控制优化模型[J]. 交通运输工程学报, 2015, 15(1): 119-126. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1637.2015.01.016.
- HAN Yin, XING Bing, YAO Jiao, et al. Optimal model of regional traffic signal control under mixed traffic flow condition [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015, 15(1): 119-126. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1637.2015.01.016.
- [59] 魏赞, 邵清. 基于Q-学习和粒子群算法的区域交通控制模型[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(10): 2108-2111. DOI: 10.16182/j.cnki.joss.2011.10.024.
- WEI Yun, SHAO Qing. Area traffic control model based on Q-learning and PSO [J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(10): 2108-2111. DOI: 10.16182/j.cnki.joss.2011.10.024.
- [60] 邓国红, 张熏, 宋红松, 等. 协同自适应巡航控制系统跟车算法设计[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2019, 33(12): 32-37. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8425(z).2019.12.005.
- DENG Guohong, ZHANG Xun, SONG Hongsong, et al. Design of car-following algorithms for cooperative adaptive cruise control system [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2019, 33(12): 32-37. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8425(z).2019.12.005.
- [61] 叶心, 魏劲鹏, 杨杰星, 等. 智能车队跟车纵向控制算法设计及仿真验证[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2019, 33(11): 16-23. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8425(z).2019.11.003.
- YE Xin, WEI Jinpeng, YANG Jiexing, et al. Design of longitudinal control algorithms for intelligent fleet tracking and simulation verification [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2019, 33(11): 16-23. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8425(z).2019.11.003.
- [62] 吕伟, 霍非舟. 道路瓶颈前车辆强制变道汇流过程模拟研究[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(9): 1799-1807. DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-0117.
- LYU Wei, HUO Feizhou. Simulation on vehicles mandatory lane changing and merging process in case of road bottleneck [J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(9): 1799-1807. DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-0117.
- [63] 黄玲, 郭亨聪, 张荣辉, 等. 人机混驾环境下基于LSTM的无人驾驶车辆换道行为模型[J]. 中国公路学报, 2020, 33(7): 156-166. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.07.016.
- HUANG Ling, GUO Hengcong, ZHANG Ronghui, et al. LSTM-based lane-changing behavior model for unmanned vehicle under environment of heterogeneous human-driven and autonomous vehicles [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(7): 156-166. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.07.016.
- [64] 周成, 袁家政, 刘宏哲, 等. 智能交通领域中地图匹配算法研究[J]. 计算机科学, 2015, 42(10): 1-6. DOI: 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.10.001.
- ZHOU Cheng, YUAN Jiazheng, LIU Hongzhe, et al. Survey of map-matching algorithm for intelligent transport system [J]. Computer Science, 2015, 42(10): 1-6. DOI: 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.10.001.
- [65] 王明月, 王晶, 齐瑞云, 等. 基于改进GMDH算法的路

- 口短时交通流量预测[J]. 计算机应用, 2015, 35(增刊 1): 101-103, 134.
- WANG Mingyue, WANG Jing, QI Ruiyun, et al. Short-term traffic flow forecasting on grossroads based on improved group method of data handing[J]. Journal of Computer Applications, 2015, 35(sup1): 101-103, 134
- [66] 王俊杰, 李德敏, 张光林, 等. 基于 TLSC 的短时交通流预测与拥塞预警算法[J]. 计算机仿真, 2019, 36(3): 171-174, 267. DOI: 10.3969/j. issn. 1006-9348.2019.03.034.
- WANG Junjie, LI Demin, ZHANG Guanglin, et al. Short-term traffic flow prediction and congestion warning algorithm based on traffic light switch control [J]. Computer Simulation, 2019, 36(3): 171-174, 267. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9348.2019.03.034.
- [67] 徐秀妮. 基于 V2X 的城市智能交通信号灯控制方法[J]. 西安工程大学学报, 2020, 34(3): 48-54. DOI: 10.13338/j.issn.1674-649x.2020.03.008.
- XU Xiuni. Research on intelligent traffic signal control method of urban road based on V2X[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2020, 34(3): 48-54. DOI: 10.13338/j.issn.1674-649x.2020.03.008.
- [68] 谭台哲, 卢剑彪, 温捷文, 等. 应用卷积神经网络与 RPN 的交通标志识别[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(21): 251-256, 264. DOI: 10.3778/j. issn. 1002-8331.1707-0355.
- TAN Taizhe, LU Jianbiao, WEN Jiewen, et al. Traffic signs recognition applying with convolutional neural network and RPN [J]. Computer Engineering and Applications, 2018, 54(21): 251-256, 264. DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.1707-0355.
- [69] 赵泽通, 李宇海, 赵红东, 等. 多比例车辆目标的分类识别[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(7): 134-137, 141. DOI: 10.13873/J.1000-9787(2020)07-0134-04.
- ZHAO Zetong, LI Yuhai, ZHAO Hongdong, et al. Classification and identification of multi-proportion vehicle targets [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(7): 134-137, 141. DOI: 10.13873/J.1000-9787(2020)07-0134-04.
- [70] 李志强, 李家文, 常雪阳, 等. 智能网联汽车云控系统原理及其典型应用[J]. 汽车安全与节能学报, 2020, 11(3): 261-275.
- LI Keqiang, LI Jiawen, CHANG Xueyang, et al. Principles and typical applications of cloud control system for intelligent and connected vehicles[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2020, 11(3): 261-275.
- [71] 李志强, 常雪阳, 李家文, 等. 智能网联汽车云控系统及其实现[J]. 汽车工程, 2020, 42(12): 1595-1605. DOI: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2020.12.001.
- LI Keqiang, CHANG Xueyang, LI Jiawen, et al. Cloud control system for intelligent and connected vehicles and its application [J]. Automotive Engineering, 2020, 42(12): 1595-1605. DOI: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2020.12.001.
- [72] 李力, 王飞跃. 地面交通控制的百年回顾和未来展望[J]. 自动化学报, 2018, 44(4): 577-583. DOI: 10.16383/j.aas.2018.c170616.
- LI Li, WANG Feiyue. Ground traffic control in the past century and its future perspective [J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(4): 577-583. DOI: 10.16383/j.aas.2018.c170616.
- (责任编辑:李脉;校对:罗容;英文编辑:刘至真)