引文格式:黄龙,章炜,乐鹏,等.智能网联汽车高精地图安全监管分析与技术研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(10):2122-2134.DOI:10.13203/j.whugis20250068

Citation: HUANG Long, ZHANG Wei, YUE Peng, et al. Safety Supervision Analysis and Technology Research of Intelligent Connected Vehicle High-Definition Map[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(10): 2122-2134. DOI:10.13203/j.whugis20250068

智能网联汽车高精地图安全监管分析与技术研究

黄 龙[1,2] 章 炜[3] 乐 鹏[1] 刘晓雪[1] 王 勇[4] 刘永轩[5]
赵 帅[6] 吴佳桐[2]

1 武汉大学遥感信息工程学院,湖北 武汉,430079
2 自然资源部地图技术审查中心,北京,100830
3 自然资源部地理信息管理司,北京,100812
4 中国测绘科学研究院,北京,100830
5 北京市测绘设计研究院,北京,100045
6 中国汽车技术研究中心有限公司,天津,300300

摘 要:自动驾驶为方便出行、减少污染、改善交通提供了有效的解决方案。高精地图在支撑自动驾驶过程中具有位置定位、路径规划、辅助决策、增强感知等作用,尤其是在L3级以上高级别自动驾驶阶段,高精地图可大大减少对车机算力的要求,助力在高算力硬件"卡脖子"的环境下实现较好的自动驾驶效果。然而,自动驾驶对高精地图的迫切需求与实际应用中的安全风险之间的矛盾日益凸显。聚焦智能网联汽车高精地图的安全监管,旨在为高精地图的安全应用提供有效的解决思路。首先,介绍了国内外高精地图安全监管现状;其次,从数据采集、生产加工、发布应用等环节分析了高精地图应用的安全风险,并提出了高精地图安全监管框架;然后,进一步梳理了框架所涉及的高精地图脱密脱敏处理、安全审查和时空数据溯源等关键技术;最后,以高精地图安全监管北京试点为案例,介绍了其应用现状及探索经验,并展望了高精地图安全监管的发展趋势。

关键词:高精地图;安全监管;地理信息安全;时空数据;人工智能

中图分类号:P208 **文献标识码**:A **收稿日期**:2025-03-05

DOI:10.13203/j.whugis20250068 **文章编号**:1671-8860(2025)10-2122-13

Safety Supervision Analysis and Technology Research of Intelligent Connected Vehicle High-Definition Map

HUANG Long[1,2] *ZHANG Wei*[3] *YUE Peng*[1] *LIU Xiaoxue*[1] *WANG Yong*[4]
LIU Yongxuan[5] *ZHAO Shuai*[6] *WU Jiatong*[2]

1 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China
2 Map Supervision Centre, Ministry of Natural Resources, Beijing 100830, China
3 Division of Geographic Information Management, Ministry of Natural Resources, Beijing 100812, China
4 Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830, China
5 Beijing Institute of Surveying and Mapping, Beijing 100045, China
6 China Automotive Technology and Research Center Co. Ltd, Tianjin 300300, China

Abstract: **Objectives**: Automated driving provides an effective solution to facilitate travel, reduce pollution and improve transportation. High-definition maps have the role of location positioning, path planning, assisted decision-making, enhanced perception, etc. In supporting the process of automated driving, especial-

基金项目:国家杰出青年科学基金(42425108);国家重点研发计划(2024YFB2505800);自然资源部地理信息安全防控与综合监管项目(121135000000180001)。

第一作者:黄龙,高级工程师,博士生,主要研究方向为地理信息数据安全治理。long.huang@whu.edu.cn

通信作者:乐鹏,博士,教授。pyue@whu.edu.cn

ly in the stage of high-level automated driving above L3 level, high-definition maps can greatly reduce the requirements for the arithmetic power of the vehicles, and help solve the problem of realizing better automated driving under the environment of the high arithmetic power hardware "necklace". However, the contradiction between the urgent demand for high-definition maps for automated driving and the safety risks in practical applications is becoming more and more prominent. **Methods:** Based on the urgent demand for high-definition maps for automated driving and the safety risks in applications, we focus on safety supervivion of high-definition map for intelligent connected vehicle and aim to provide effective solution ideas for the safe application. First, the current situation of high-definition map safety supervision at home and abroad is introduced. Based on the systematic analysis of the safety risks throughout the whole lifecycle of high-definition map, from data collection, production, processing, release and application, a high-definition map safety supervision framework is proposed. Then, the geographic information decryption and desensitization, map safety scrutiny, spatial-temporal data provenance and other key technologies involved in the framework are further sorted out. **Results:** Taking the high-definition map safety supervision pilot in Beijing as a case study, we introduce the current status of its application and exploration experience. After a series of exploration, Beijing has established an advanced mechanism for dynamic supervision of the safety of high-definition maps for intelligent connected vehicles by pre-registration, mid-monitoring, and post-tracing. A platform for the safety supervision of maps is also set up, which comprehensively utilizes geographic information, big data, 5G, artificial intelligence and other technology. **Conclusions:** High-definition maps, as important basic resources and data elements, are an important link in the automated driving industry and the spatial-temporal information industry chain. To better secure high-definition maps, on the one hand, the government should empower policy propaganda and also solidify the supervision, on the other hand, enterprises and institutions engaged in surveying and mapping activities should also strengthen safety awareness and protection.

Key words: high-definition map; safety supervision; geographic information safety; spatial-temporal data; artificial intelligence

高精地图作为自动驾驶技术的核心支撑,发挥着至关重要的作用。尽管近年来无图大模型的兴起为自动驾驶提供了新的技术路径,但由于车载计算硬件的高算力发展仍面临诸多挑战,高精地图凭借其数据的高精度、高维度、高丰富度和高鲜度特性,在辅助车辆定位、增强环境感知以及实现精准路径规划和决策等方面依然不可或缺[1-2]。尤其是在道路标线磨损、交通设施遮挡、大雪雾霾天气等场景下,高精地图相较纯视觉[3]、无图大模型[4]等方案具有明显优势。

然而,技术的飞速发展往往伴随着政策和监管的不足。一方面,若高精地图产品的质量与可靠性良莠不齐,如精度、一致性、完整性等方面,可能造成公共交通安全问题。在现实场景中,高精地图的质量缺陷已在一定程度上受到消费市场的限制。另一方面,在高精地图的生产过程中,涉及的数据处理手段复杂多样,数据在各个处理方之间的流转也各具特性。这种复杂性显著增加了敏感时空信息暴露的风险,包括数据泄露、篡改或不当使用等行为。若对高精地图生产过程不加以严格的监督与管控,可能对国家安全和社会稳定造成严重威胁。

面对这一危机,行业整体亟需加强高精地图产品及其采集、生产加工、应用过程的安全监管。为此,近年来相关部门对高精地图的安全应用问题的关注逐渐加深,同时行业各方已呈现维护高精地图数据安全的积极趋势,发展了一系列有针对性的安全监管技术,包括地理围栏、数字水印、数据加密等,旨在最大限度地减少数据在全流程、全生命周期的安全风险。此外,区块链等新兴技术的应用也提升了数据的透明度和可追溯性。然而,目前学术与产业界尚缺少针对高精地图安全审查技术的深入研究,缺乏对这些关键技术的系统分析、总结和未来展望,这使得行业在制定有效的安全监管策略时面临挑战。

在此背景下,本文将探讨高精地图安全应用全流程的安全风险,侧重于地图生产流程中涉及国家地理信息的数据安全性监管,提出覆盖数据采集、数据生产加工、数据发布应用环节的安全隐患,为监管框架的设计与实施提供参考,并以

监管对象为主线,提出包含监管主体、内容流程、技术手段和法规政策的高精地图安全监管框架,从数据全生命周期的视角梳理分析监管框架所涉及的高精地图脱密脱敏处理、安全审查和时空数据溯源等关键技术难点,以高精地图安全监管北京试点为案例,介绍其应用现状及探索经验,以期为构建智能网联汽车高精地图安全监管体系提供参考。

1 高精地图监管现状

1.1 国内现状

近年来,中国在智能网联汽车领域出台了一系列重要政策文件,积极推动产业的发展与规范。2020年国家发展和改革委员会、工业和信息化部、自然资源部等多部门联合发布的《智能汽车创新发展战略》中提出:到2025年,中国标准智能汽车的技术创新、产业生态、基础设施、法规标准、产品监管和网络安全体系基本形成[5]。2021年国务院下发了《关于开展营商环境创新试点工作的意见》,鼓励北京、上海、重庆等6个试点城市在确保安全的前提下试行高精度地图面向智能网联汽车使用[6]。2022—2024年自然资源部先后发布了《关于促进智能网联汽车发展维护测绘地理信息安全的通知》[7]、《关于加强智能网联汽车有关测绘地理信息安全管理的通知》[8]以及《智能网联汽车时空数据传感系统安全基本要求》《智能网联汽车时空数据安全处理基本要求》两项强制性国家标准征求意见稿,旨在落实总体国家安全观,促进智能网联汽车发展,维护测绘地理信息安全。

国内多个城市相应发布了高精地图监管的地方规定,上海于2022年发布了《上海市智能网联汽车高精度地图管理试点规定》[9],提出管理部门通过督查检查的方式及时获取测试与应用企业登记的高精地图材料,掌握应用情况,加强过程监督和现场检查,发现问题及时督查整改。北京于2023年发布了《北京市智能网联汽车高精度地图试点工作指导意见》,提出强化安全监管,建立安全动态监管机制,建设安全监管平台,对从事高精地图生产的单位开展现场检查,维护地理信息数据安全[10]。杭州于2023年发布了《杭州市智能网联汽车高精度地图管理规定》,通过智能网联车辆数据应用安全监测平台获取地图相关数据与应用情况,加强过程监督和实地现场检查,发现问题及时督查整改[11]。广州于2024年发布了《广州市智能网联汽车基础地图应用试点管理规定(试行)的通知》[12],通过深化商用密码应用,支持基于身份认证、脱密脱敏、加密及权限控制等安全监管技术研究与测试,强化监管。

上述智能网联汽车产业政策制定与车路云协同试点应用的监管实践,尚缺乏学术界系统性理论方法研究与基础机理支撑。针对时空数据治理中面临的数据泄露风险、网络攻击威胁及数据滥用隐患等核心挑战,文献[13]创新性地构建了涵盖监管主体、监管对象与监管环境的三元互动监管框架,为实现智能网联汽车时空数据的安全采集处理与合规应用提供了理论范式。本文基于上述理论框架,将进一步阐释面向智能网联汽车高精地图的安全监管实施路径,重点剖析全生命周期的关键技术体系,为完善智能网联汽车数据治理理论架构提供技术层面的学理支撑。

1.2 国外现状

国外对智能汽车及高精地图数据主要通过法律条例进行规范和管理。其中,美国最早在2017年《自动驾驶法案》中首次明确了自动驾驶汽车的生产、测试和发布管理要求[14]。欧盟主要通过《通用数据保护条例》《车联网个人数据保护指南》等实现对智能汽车数据的监督与管理[15]。德国2022年通过了《自动驾驶法》,初步建立了自动驾驶应用监管法律制度体系[16]。日本2023年修订通过了《道路交通法》,实现特定条件下完全自动化驾驶的“Level 4”运行许可制度,确保数据安全[17]。英国2024年发布了《自动驾驶汽车法》,实现对自动驾驶车辆在道路和其他公共场所的使用规定,确保安全性与可靠性[18]。

除法律条款外,国外多个数据管理机构提出了数据监管相关模型。国际标准化组织(international organization for standardization, ISO)于2015年发布首个数据治理国际标准,并于2024年修改重新发布——ISO/IEC 38500:2024《组织的信息技术治理》[19]标准,在通用数据领域提出了关于信息技术治理的广泛指导方针和实施框架。国际数据管理协会、国际数据治理研究所、国际信息系统审计和控制协会等权威机构均从不同角度给出了数据治理的框架,涵盖数据组织架构、数据存储和操作、数据安全、文件和内容管理、元数据和数据质量等多个方面,形成了不同的指导指南。但是,目前国外针对智能网联汽车时空数据或高精地图的数据监管模型仍为空白。

2　高精地图应用安全风险

自动驾驶技术扮演着时空数据采集者与使用者的双重角色。智能网联汽车通过在运行、服务和测试过程中对车辆和周边道路的空间坐标、影像、点云及其属性信息进行测绘与加工,完成高精地图的生产与更新。在当前时空数据巨大采集需求背景下,具备长时间、大范围、叠加式采集能力的量产智能网联汽车成为获取现实世界海量坐标信息以及道路周边实时图像的重要渠道,相关的信息不仅可用于提取、分析中国境内重要目标和敏感区域地理信息,也可以实时构建大范围高精度的矢量和三维地图[20]。因此,高精地图应用在各个环节均存在诸多风险,如图 1 所示。

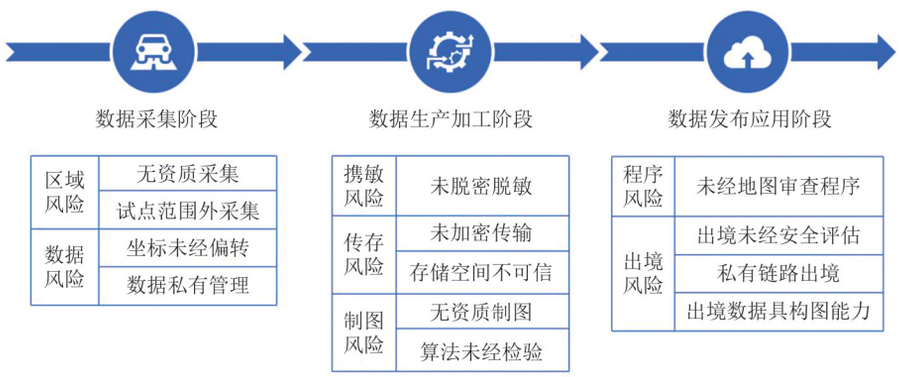


图 1　高精地图应用安全风险

Fig. 1　Safety Risks of High-Definition Map Applications

具体表现如下:

1)数据采集阶段,两大重要风险分别为区域风险和数据风险。区域风险主要指采集主体具有的采集资质区域以及进行采集行为的区域,出现国外无资质企业诱导中国公民、企事业单位开展非法测绘,以及数据采集范围超出政府允许的高精地图试点范围区域的情况。数据风险则主要包含轨迹坐标未经规定偏转、采集数据私有不规范管理等。

2)数据生产加工阶段,主要包含数据携带敏感信息的风险、数据在传输和存储过程中泄露的风险,以及制图过程的风险。数据携带敏感信息的风险指未及时按照相关规定对采集数据进行脱密处理。传存风险包括采集的原始时空数据未经过国家认定的地理信息保密技术处理,数据在车云、路云、车路、车车之间传输时未进行商用保密保护与安全传输,使用不可信的存储空间或存储介质混乱交叉,致使数据被窃取、篡改和攻击。此外,在制图过程中,存在企事业单位进行无资质制图情况,以及生产加工算法未经合规检验,放任涉密涉军区域识别复原算法发展。

3)数据发布应用阶段,均需要经过政府机构的地图审查程序,尤其是数据出境前。没有履行地图审核程序、传输至非法平台、数据出境时未依法履行安全评估等审批程序均造成风险,或通过其他私有风险链路出境,导致的数据泄露及产权纠纷,进而影响国家信息安全及企业合法权益[21]。

3　高精地图安全监管框架

高精地图主要来源于各端侧对道路及周边设施空间坐标、影像、点云及其属性信息的采集与加工,属于法定的测绘活动,其安全监管框架是确保地图数据准确性、完整性和安全性的重要保障。高精地图安全监管框架包括 4 个核心部分:监管主体与职责确保各方有效协作,监管内容与流程规范数据处理环节的安全标准,监管技术与手段提升数据安全监测和防护能力,而监管法规与政策为监管提供法律依据和政策指导,如图 2 所示。

1)监管的主体与职责。从事高精地图数据的收集、存储、传输和处理者是测绘活动的主体,从业的车企、服务商以及智能驾驶软件提供商等应遵守相关规定并依法承担相应责任,也应接受自然资源部的监督与管理。

2)监管的内容与流程。资质的管理:内资企业应取得相应的测绘资质,外业企业必须与有资质的内资企业合作开展测绘活动;地图制作与数据的管理:采集的数据需进行地图保密技术处理,传输时需要进行商用密码保护;地图发布管理:地图对外发布时应依法依规履行地图审查程序,数据出境时也应依法履行审批程序[22]。

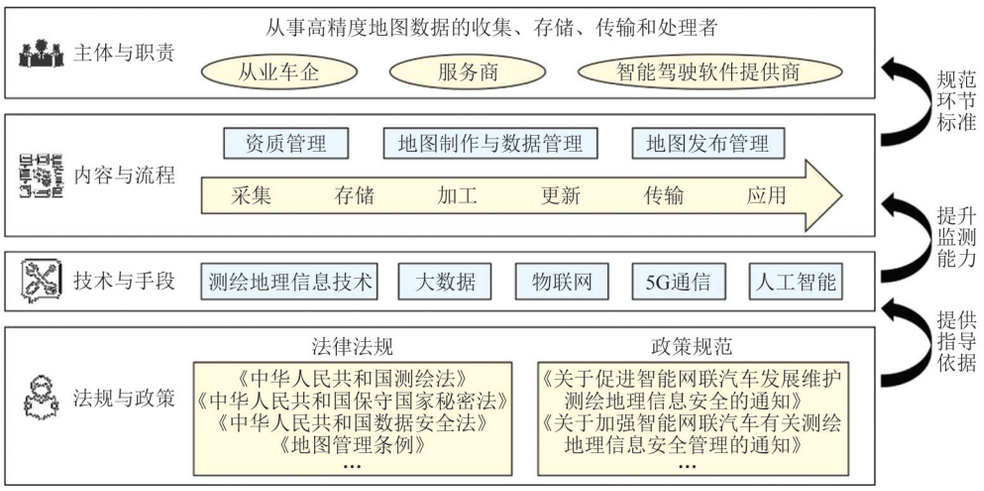


图2 高精地图安全监管框架

Fig. 2 Safety Supervision Framework of High-Definition Map

3)监管的技术与手段。综合测绘地理信息、大数据、物联网、5G通信、人工智能等技术手段,实现对地图数据从采集、存储、加工、更新、传输与应用的全流程闭环管理。

4)监管的法规与政策。法律法规主要有《中华人民共和国测绘法》《中华人民共和国保守国家秘密法》《中华人民共和国数据安全法》《地图管理条例》,政策规范主要有《关于促进智能网联汽车发展维护测绘地理信息安全的通知》《公开地图内容表示规范》[23]、《关于加强智能网联汽车有关测绘地理信息安全管理的通知》等。

4 高精地图安全监管关键技术

高精地图安全监管关键技术在数据全流程中的位置与作用如图3所示,主要包括三大专属高精地图领域的监管技术,即脱密脱敏处理、安全审查、时空数据溯源,及其他通用基础监管技术。

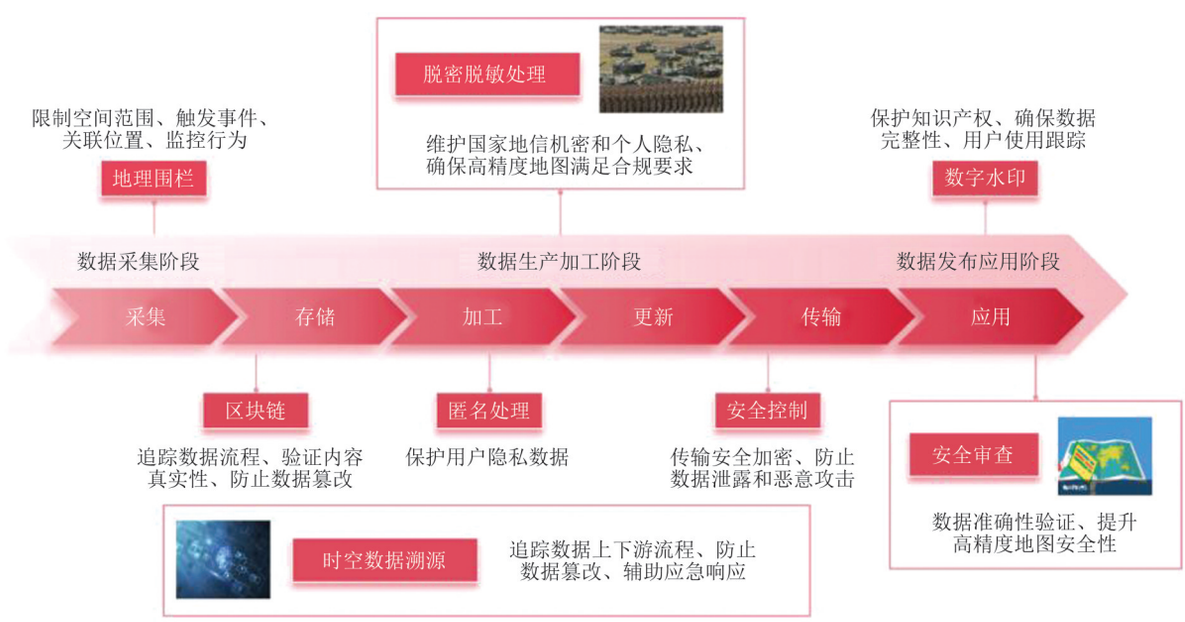


图3 高精地图安全监管关键技术

Fig. 3 Key Technologies for Safety Supervision of High-Definition Map

高精地图脱密脱敏处理主要应用于数据生产加工阶段,是维护国家地信机密和个人隐私、确保高精地图满足合规要求的关键。

高精地图安全审查主要应用于数据发布应用前,确保数据的安全合规,验证数据准确性,并提升高精地图的安全性与可靠性。

时空数据溯源应贯穿数据全生命周期,指追溯获得时空数据产品的历史衍生信息[24],用于追

溯高精地图数据上下游、防止数据篡改和辅助应急响应。

通用基础高精地图监管技术包括地理围栏、数字水印、安全控制、区块链和匿名化处理技术等。地理围栏技术对应数据采集阶段的安全风险,用于监控采集行为。区块链技术主要应用于数据存储阶段,可验证内容真实性及防止数据篡改。安全控制技术主要对传输数据进行安全加密,防止数据泄露和恶意攻击。数字水印技术主要应用于数据应用阶段,负责保护高精地图的知识产权,确保数据的完整性。匿名化处理技术主要应用于数据加工阶段,起到对用户的敏感数据(如用户轨迹、设备标识等)进行保护的作用。

4.1　高精地图脱密脱敏处理

高精地图精确表达了道路及其构成物的地理坐标、尺寸及特征信息,精度可达亚米级,关乎到国家安全[25]。地理信息脱密脱敏技术一方面可以确保国家地理信息数据安全,使得高精地图安全可用;另一方面也可促进高精地图作为时空数据要素的流通性,提升地理信息数据的共享能力。

地理信息脱密一般是指对涉及国家秘密的地理信息要素从空间位置和属性信息上进行处理,以确保信息在公开发布或使用时不泄露国家秘密;地理信息脱敏一般是指对信息中敏感内容进行删除、替换或虚化等处理,以保护国家敏感信息不被泄露[26]。

就空间位置处理而言,高精地图的脱密脱敏通常通过对要素坐标进行非线性变化的方式使其与真实坐标不一致,几何精度发生变化,并保证变化的不可逆性。目前国内被国家认可的加密坐标系统为GCJ-02坐标系统,该加密坐标系统具有非线性、不可逆、相对位置关系不变、对长度计算的影响可忽略等众多优势。智能网联汽车坐标加密的方式一般为将坐标偏转组件集成到车端,在轨迹数据上传至云端前自动完成偏转。

就属性信息处理而言,属性信息通过增加干扰信息、删除关键信息、修改关键信息和替换关键信息等方式保护重要或敏感信息。具体如删除军事设施、国家战略资源、国防设施、政府机关、水库水坝、电视广播等重要要素或者图层,对重要桥梁的限高、限宽、净空、载重量和坡度,重要隧道的高度和宽度信息进行删除、分级分档表达等模糊处理。

这一技术在地理信息安全监管领域的应用是重点,但目前仍存在一些难点。首先,算法的精确性与逆向推导风险是关键,在高精地图生产过程中主要进行脱密脱敏处理的是轨迹和图像数据,既需要保证处理后数据的精确性,又需要避免处理后的数据被逆向推导还原出原始的敏感信息。其次,如何保证处理后数据的完整性同样是一个重要问题,在脱密脱敏过程中,对于重要信息的删除和非重要信息的保护需要找到平衡点,以确保数据的真实性和完整性。综合而言,脱密脱敏处理通常需要较高的技术水平,意味着较高的研发成本投入。

4.2　高精地图安全审查

智能网联汽车高精地图安全审查技术是指针对高精地图数据在公开应用之前进行的安全审查,制图单位需要提交高精地图数据及其重要说明文件,由所属地方监管部门及下属审查单位负责执行。其主要作用是确保高精地图数据的安全性、合规性及与说明文档的一致性,避免因地图数据泄露、错误或敏感信息暴露而引发的安全风险,保障智能网联汽车的正常运行和国家信息安全。

具体而言,如图4所示,高精地图安全审查数据主要包括道路级和车道级路网、服务管理设施、路测设施和动态信息等多种类型;审查内容重点关注界线数据、涉军内容及涉敏内容等,审查中依托审图专家知识库对禁采区域地理围栏和提交的地图区域进行比对与分析。流程上,审查按照区域范围合法判别、轨迹偏转合规检查、特征图标目标检测、数据项合规检查、内容属性合法检测、数字水印设计6个环节规律进行,形成一套闭环的安全审查机制。《高级辅助驾驶地图审查要求》国家标准规定了L2和L3级驾驶自动化系统公开使用的高级辅助驾驶地图审查内容和要求,具体要求如表1所示。

安全审查是高精地图进入市场流通前设立的最后一道关卡,在确保其安全性起到核心作用。尽管该技术在保障数据安全性方面取得了显著成效,但仍面临着一些难点和注意事项。例如,对于敏感数据的识别和分类标准需要进一步明确;对于数据项和内容属性的合规要求需进一步细化,对于高精地图高程等数据项的审查要求需进一步创新;在处理大规模地图数据时,需提升效率与精度的平衡能力。此外,还需加强对动态更新地图数据的实时性审查能力,避免因数据

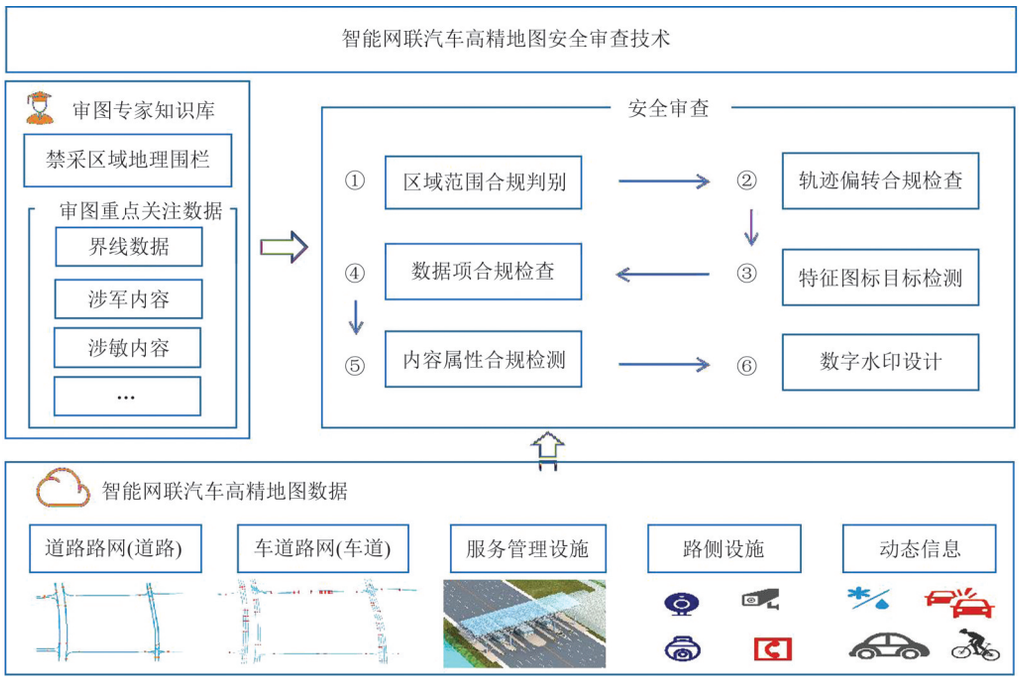


图4 智能网联汽车高精地图安全审查技术

Fig. 4 Safety Scrutiny Technology of Intelligent Connected Vehicle High-Definition Map

滞后或审查漏洞导致的潜在安全隐患。因此,未来需要在技术优化、政策完善和多方协作方面持续推进。

4.3 时空数据溯源

时空数据溯源是指通过追踪时空数据的生成、流转、加工全链条元数据,构建数据生命周期的可信验证体系,以实现高精地图数据流向的可审计性与可控性[27-28]。该技术能够识别非法数据篡改、越权访问等风险行为,满足国家安全监管对数据"可知、可管、可追溯"的核心要求。

基于时空数据溯源的安全监管技术体系通常包含三大核心模块:溯源信息的明确、溯源模型的构建,以及溯源数据仓库的建立。首先,基于智能网联汽车时空数据相关法律法规、国家表现与行业规范中的合规要求与监管内容,明确时空数据全生命周期各个环节中的溯源信息种类及其含义,主要包含数据本身、元信息及其对应的合规性信息;其次,构建车-云协同的时空数据溯源模型,为溯源信息定义统一的表达结构,从而将车端与云端生成的原始数据转换为有序统一的结构化表达,并以固定的载体形式在不同终端间存储、传输,如溯源日志文件;最终,建立全链路溯源数据仓库,并在此基础上设计时空数据溯源的应用,服务于平台中时空数据合规相关信息的监管,如上下游信息查询、合规指标嵌入、异常信息标记等,支持从原始轨迹回溯到地图产品的可信度验证,为高精地图安全监管提供贯穿全流程的风险防控支点。

溯源技术同样存在诸多难点。首先,目前自动驾驶时空数据领域缺乏统一的溯源标准,各厂商传感器设备的元数据格式、精度、溯源粒度不统一,跨平台数据核验困难,进一步导致溯源信息断层或误差。其次,自动驾驶场景中每秒产生和处理PB级时空数据,对分布式存储和计算架构均提出极高要求,实时溯源需具备高效索引和查询机制,传统数据库难以满足低延迟需求。此外,还存在时空数据频繁变更情况,若高精地图达到分钟级更新频率,版本回滚时可能因数据依赖关系(如某路段修改影响周边拓扑)引发溯源逻辑混乱。

4.4 通用基础监管技术

通用基础监管技术是指可适配不同行业、适用多类数据的安全监管技术,主要包括地理围栏、区块链、密码技术、数字水印和匿名化处理技术等。地理围栏是一种基于位置服务的地理信息技术,其通常使用经纬度坐标系来定义地理围栏的边界,当设备的位置信息(如GPS、北斗)进入、离开或者区域内进行活动时,系统就会触发预设的动作或通知[29-30]。各地行业管理部门通常根据划定的智能网联汽车高精地图试点区域设置对应的地理围栏。现阶段地理围栏技术在安全监管实际应用中,面临在车辆位置精度和传输实时性的双重不确定性下,如何有效避免定位误差引起监管失效的挑战。

表 1　高级辅助驾驶地图审查要求

Table 1　Examination Requirements of Advanced Assistant Driving Map

类别	要素	审查要求
境界	国界、省界	应符合 GB/T 35764 的规定。
地物实体	道路实体	1)路侧和道路上方设施以点状符号(单点)表达地物存在; 2) 不采用点云、实景影像等实测成果表达道路及其相关属性信息。
地物属性	道路坡度	1) 不表达真实坡度值。 2) 可使用分档处理后的等级值表达坡度值,且符合下列规则: (1) 坡度角度值分档处理,且分档细度不优于0.1°; (2) 其他方式表达,其转化为坡度角度值后的分档细度不优于0.1°。
	道路曲率	1) 不表达真实曲率值。 2) 可使用分档处理后的等级值表达曲率值,且符合下列规则: (1) 曲率值分档处理,且分档细度不优于$1\times10^{-5}\,m^{-1}$; (2) 其他方式表达,其转化为曲率值后的分档细度不优于$1\times10^{-5}\,m^{-1}$。
地名及兴趣点	地名及兴趣点	1)不包含不得表示的地物实体的名称; 2)符合GB/T 35764的要求。
其他	完成空间位置保密处理。 经空间位置保密处理后的平面位置精度应不优于 10 m(不含)。 国家有关法规要求。	

注:地物实体不得包含以下内容:

1) 军队指挥机关、指挥工程、作战工程,军用机场、港口、码头,营区、训练场、试验场,军用洞库、仓库,军用信息基础设施,军用侦察、导航、观测台站,军用测量、导航、助航标志,军用公路、铁路专用线,军用输电线路,军用输油、输水、输气管道,边防、海防管控设施等直接用于军事目的的各种军事设施;

2) 武器弹药、爆炸物品、剧毒物品、麻醉药品、精神药品、危险化学品、铀矿床和放射性物品的集中存放地,核材料战略储备库、核武器生产地点及储备品种和数量,高放射性废物的存放地,核电站;

3) 国家安全等要害部门;

4) 石油、天然气等重要管线;

5) 军民合用机场、港口、码头的重要设施;

6) 卫星导航定位基准站;

7) 国家禁止公开的其他内容。

地物属性不应包含下列内容:

1) 桥梁的限高、限宽、净空、载重量和坡度;

2) 隧道的高度和宽度;

3) 公路的路面铺设材料;

4) 路侧和道路上方设施的相对高度;

5) 高程。

区块链技术是利用加密链式区块结构来验证与存储数据、利用分布式节点共识算法来生成和更新数据、利用自动化脚本代码来编程和操作数据的一种全新的去中心化基础架构与分布式计算范式。其不可篡改、安全可信、可溯源的技术特征,被广泛应用于金融机构、政府部门、科技企业[31-32]。区块链技术在地理信息数据安全监管应用中虽然有诸多优势,但也需要克服性能等方面的难点。

密码技术是指能够实现密码算法的加密、解密和安全认证等功能的技术,中国国产商用密码算法主要有SM系列及祖冲之序列,该技术是保障工业互联网安全的核心技术和基础支撑[33]。在车路云一体化应用场景中,密码技术作为车辆与云端、路侧设施及其他车辆信息交互的信任保障,在身份认证、数据传输加密、隐私保护等环节中具有不可替代的作用。通过采用商用密码安全控制技术,可构建安全的数据传输通道,实现车端、路侧端与云平台之间的安全传输,也可采用密码机服务,实现对地理信息时空数据的加密解密和签名验签。

数字水印技术是一种信息隐藏技术,该技术可通过在原始数据中嵌入秘密信息使得版权标志不可见或不可听,从而达到既不损害原作品的质量,又达到保护版权的目的,其具有透明性、鲁棒性、安全性与标识性[34-35]。数字水印技术通常主要应用于高精地图发布与应用环节,在高精地图中嵌入包含版权信息、数据特征、用户标识的数字水印,可确保特征在传输和使用过程中不被篡改或损坏,并防止未经授权的访问和使用,追踪非法行为。

匿名化处理技术是指对用户的敏感数据(如用户轨迹、设备标识等)进行去除或变更处理,以确保个人身份不能从数据中被识别出来。中国的“匿名化”强调两个关键要素:一是无法识别,二是不能复原。在高精地图安全监管领域,该技术是保障数据合规流通的核心工具,通过去除位置坐标、字符遮挡、替换等方式,平衡数据开放共享与隐私保护需求。然而,该技术同样面临挑战:一是高精度与匿名化的矛盾,过度处理可能减少地图可用信息;二是关联攻击风险,攻击者可结合多源数据破解匿名化逻辑。

5 监管实现:以北京市试点实践为例

2019年,工业和信息化部、自然资源部和北京市政府签署合作协议,开展全国首个车联网(智能网联汽车)和自动驾驶地图应用试点。2020年,北京市在亦庄建设全球首个网联云控高级别自动驾驶示范区,统筹“车、路、云、网、图”五大建设要素,创新建设智能网联汽车“中国方案”。2022—2024年,北京市先后加入了国家智能网联汽车高精地图试点、车路云一体化应用试点城市,在确保安全的前提下积极推进、试行高精地图面向智能网联汽车的使用。

北京市当前正在探索建立智能网联汽车高精地图安全动态监管机制,建立了智能网联汽车地图安全监管平台,综合利用地理信息、大数据、5G、人工智能等技术手段,通过事前注册、事中监控、事后追溯的方式,实现安全监管[36]。

事前注册:对于从事高精地图活动的企事业单位需要在监管平台进行基本信息的登记与注册(如网联车、路侧单元、地图平台的唯一标识、IP地址、测绘资质证书等)。之后针对不同的端侧安装地图保密技术插件与安全监管插件,实现对地理信息时空数据的保密技术处理与安全传输。

事中监管:事中指高精地图数据从采集到生产加工再到发布应用的全阶段,重点监管内容关注采集阶段的区域和轨迹的合规性监管、生产加工阶段的脱敏脱密和安全控制监管,以及发布应用阶段的安全审查程序及数据追踪。通过对不同阶段各端测绘行为活动日志进行收集、存储、分析与处理,如地理围栏识别、活动轨迹感知预测、脱密脱敏判断、数据流入流出方向、数据项及数据内容合规性审查、数字水印识别、数据上链等方式,保障高精地图应用端的安全合规。

事后追溯:通过对测绘活动合规性检查与监管,对违规行为生成告警信息并线上通知,再结合线下督查与整改,最终实现数据全流程闭环安全监管,实现高精地图的可管、可控、可追、可防的智能化管理。

截至2024年3月底,北京市自动驾驶示范区综合安全运营平台在定期检查中发现并修复7 000多个安全漏洞,处置了5 500多件安全风险事件,处置率95%以上。同时,在国家重大会议活动期间提供7×24 h“重保”服务,保障无安全事件发生,保障网络安全稳定。2022年北京车网获得数据安全能力成熟度认证;2023年获得数据管理能力成熟度认证。示范区数据安全治理能力获得权威专业认可,为全国其他智能网联汽车测

试示范区提供借鉴参考,为行业贡献北京经验[37]。

6 展　望

智能网联汽车作为新质生产力的重要体现和典型应用,为行业发展注入新的动力。在这一进程中,高精地图作为重要的基础资源与数据要素,是自动驾驶产业与时空信息产业链上的重要一环,具有带动相关产业的潜力。在高精地图相关技术迅速发展的同时,其生产和应用过程中涉及的地理信息数据安全也必须被重视并确保,以保障国家和个人的利益。一方面,政府应加强法规政策宣传,提高从业人员的合规意识和维护国家主权、安全和利益的自觉性,同时采取技管结合的方式加强监管,研究高精地图数据分级分类标准,建立数据分级指标库与安全等级模型实现数据的分类分级管理。另一方面,从事测绘活动的企事业单位也应加强地理信息数据安全意识与安全防护,规范高精地图内容表达,依法依规履行地图审核程序,坚持自主可控、安全合规的生产应用技术路线,守住安全底线,共同维护国家地理信息安全。

人工智能、大数据、云计算、5G等新一代信息技术的飞速发展使得计算更高效,硬件水平的提升使得算力资源更丰富,未来智能网联汽车高精地图安全监管将朝着以下方面发展:

1)随着算力水平的持续提升,车端的实时监管成为可能。通过在车端使用具有更高算力的硬件,车端系统能够更有效地处理大量传感器数据和相关的安全信息,同时也能支持运行更复杂的监管算法,实现对车辆采集数据安全的实时监测和分析。此外,算力提升有助于改善数据传输效率,加快监管信息上传到云端或监管中心的速度,实现更快的实时监管响应。在这种模式下,高精地图监管将覆盖车端、路端、云端等地图使用端,监管实现全覆盖、实时化、无死角。

2)人工智能等技术的升级将进一步优化算法,突破现有计算瓶颈,助力监管实现智能化、标准化、便捷化。大模型的引入将为高精地图监管带来革命性变化,例如,结合大模型的语义解析能力,可开发动态敏感区域识别算法,更高效识别政府建筑、军事设施等敏感位置;同时,利用大模型生成自然语言描述,记录地图数据全生命周期的溯源信息,并拓展语言交互查询,提高监管效率。在智能网联汽车领域,这种升级不仅能增强自动驾驶模型的应用水平,同样为高精地图的安全监管提供了巨大的潜力。未来,更智能化的算法将进一步提高监管水平,确保数据的安全性和隐私保护,为智能网联汽车的发展提供重要保障。

7 结　语

本文介绍了国内外高精地图安全监管现状,探讨了高精地图应用全流程的安全风险,建立了智能网联汽车高精地图安全监管框架,梳理分析了框架所涉及的高精地图脱密脱敏处理、安全审查和时空数据溯源等关键技术难点;以高精地图安全监管北京试点为案例,介绍了其应用现状及探索经验,并对高精地图安全监管的发展趋势进行了展望。

值得注意的是,尽管本文综合考虑了安全监管体系涉及的诸多关键技术,随着人工智能大模型等技术的飞速发展和产业变革,在监管实施过程中仍需考虑新技术引发的成本与政策因素。该研究为智能网联汽车高精地图安全监管提供技术支撑及实践参考,希望在后续的研究中能够给行业提供更多切实可行的选项。

参　考　文　献

[1] 刘经南,詹骄,郭迟,等. 智能高精地图数据逻辑结构与关键技术[J]. 测绘学报,2019,48(8):939-953.
LIU Jingnan,ZHAN Jiao,GUO Chi,et al. Data Logic Structure and Key Technologies on Intelligent High-Precision Map[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*,2019,48(8):939-953.

[2] 詹骄,郭迟,雷婷婷,等. 自动驾驶地图的数据标准比较研究[J]. 中国图象图形学报,2021,26(1):36-48.
ZHAN Jiao, GUO Chi, LEI Tingting, et al. Comparative Study on Data Standards of Autonomous Driving map[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2021,26(1):36-48.

[3] XU H Z,GAO Y,YU F,et al. End-to-End Learning of Driving Models from Large-Scale Video Datasets[C]// IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition,New York,USA,2017.

[4] CHEN L,SINAVSKI O,HÜNERMANN J,et al. Driving with LLMs: Fusing Object-Level Vector Modality for Explainable Autonomous driving[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation ,New York,USA,2024.

[5] 田野.11部门联合发布《智能汽车创新发展战略》[J].智能网联汽车,2020(2):6-7.
TIAN Ye. 11 Departments Jointly Released the Strategy for the Innovative Development of Intelligent Vehicles[J]. *Intelligent Connected Vehicles*, 2020(2):6-7.

[6] 周詹.促进营商环境迈向更高水平激发市场活力和社会创造力:国务院日前印发《关于开展营商环境创新试点工作的意见》[J].中国科技产业,2022(2):21.
ZHOU Zhan. Promoting the Business Environment to a Higher Level to Stimulate Market Vitality and Social Creativity: The State Council Has Recently Issued the Opinions on Carrying Out Pilot Work on Business Environment Innovation[J]. *China Science and Technology Industry*,2022(2):21.

[7] 自然资源部.自然资源部关于促进智能网联汽车发展维护测绘地理信息安全的通知[EB/OL].(2022-08-25)[2025-04-15]. https://gk.mnr.gov.cn/zc/zxgfxwj/202208/t20220830_2757960.htm.
Ministry of Natural Resources. Notice of the Ministry of Natural Resources on Promoting the Development of Intelligent Connected Vehicles and Maintaining the Security of Surveying, Mapping and Geographic Information[EB/OL].(2022-08-25)[2025-04-15]. https://gk.mnr.gov.cn/zc/zxgfxwj/20220830/t20220830_2757960.htm.

[8] 自然资源部.自然资源部关于加强智能网联汽车有关测绘地理信息安全管理的通知[EB/OL].(2024-07-26)[2025-04-15]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202407/content_6965227.htm.
Ministry of Natural Resources. Notice of the Ministry of Natural Resources on Strengthening the Security Management of Surveying, Mapping and Geographical Information Related to Intelligent Connected Vehicles[EB/OL]. (2024-07-26)[2025-04-15]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202407/content_6965227.htm.

[9] 上海市规划和自然资源局.关于印发《上海市智能网联汽车高精度地图管理试点规定》的通知[EB/OL](2022-11-28)[2025-04-15]. https://www.shanghai.gov.cn/gwk/search/content/8449243cefb24f94bd3b95efec65f3ef.
Shanghai Urban Planning and Natural Resources Bureau. Notice on the Issuance of the Pilot Provisions on the Management of High-Precision Maps for Intelligent Networked Vehicles in Shanghai Municipality[EB/OL](2022-11-28)[2025-04-15]. https://www.shanghai.gov.cn/gwk/search/content/8449243cefb24f94bd3b95efec65f3ef.

[10] 北京市规划和自然资源委员会北京市经济和信息化局关于印发《北京市智能网联汽车高精度地图试点工作指导意见》的通知[J].北京市人民政府公报,2023(43):8-14.
Beijing Municipal Commission of Planning and Natural Resources Beijing Municipal Bureau of Economy and Informatization on the Issuance of the "Beijing Municipal Intelligent Networked Vehicle High-Definition Map Pilot Work Guidance"[J]. *Beijing Municipal People's Government Bulletin*, 2023(43): 8-14.

[11] 杭州市规划和自然资源局关于印发杭州市智能网联汽车高精度地图管理规定的通知[J].杭州市人民政府公报,2023(11):12-13.
Circular of Hangzhou Planning and Natural Resources Bureau on the Issuance of Provisions on the Management of High-Definition Maps for Intelligent Networked Vehicles in Hangzhou[J]. *Bulletin of Hangzhou Municipal People's Government*, 2023(11): 12-13.

[12] 广州市规划和自然资源局.广州市智能网联汽车基础地图应用试点管理规定(试行)的通知[EB/OL].(2024-10-01)[2025-04-15]. https://www.gz.gov.cn/gfxwj/sbmgfxwj/gzsghhzrzyj/content/post_9832352.html.
Guangzhou Urban Planning and Natural Resources Bureau. Notice of the Guangzhou Municipal Bureau of Planning and Natural Resources on the Issuance of the Administrative Provisions on the Pilot Application of Intelligent Networked Vehicle Base Maps in Guangzhou (for Trial Implementation)[EB/OL]. (2024-10-01)[2025-04-15]. https://www.gz.gov.cn/gfxwj/sbmgfxwj/gzsghhzrzyj/content/post_9832352.html.

[13] 乐鹏,刘晓雪,刘瑞祥,等.智能网联汽车时空数据监管建模与实施方法研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,DOI:10.13203/J.whugis20240353.
YUE Peng, LIU Xiaoxue, LIU Ruixiang, et al. Modelling and Development Approaches for Spatial-Temporal Data Governance in Intelligent Connected Vehicles[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, DOI: 10.13203/J.whugis20240353.

[14] 刘力源,荣亚鹏,李硕,等.美国加州自动驾驶汽车路测数据分析[J].公路与汽运,2021(5):40-44.
LIU Liyuan, RONG Yapeng, LI Shuo, et al. Analysis of Self-driving Car Road Test data in California[J]. *Highway and Vehicle Transportation*, 2021(5):40-44.

[15] 何玉颜.欧盟《通用数据保护条例》解读及其对中国

个人数据保护的启示[J]. 图书情报导刊,2018,3(11):67-72.
HE Yuyan. Interpretation of *the EU General Data Protection Regulation* and Its Inspiration for Personal Data Protection in China[J]. *Library and Intelligence Guide*,2018,3(11):67-72.

[16] 朱吕茂. 自动驾驶汽车立法的域外启示:以德国《自动驾驶法》体系为例[J]. 中阿科技论坛,2021(12):174-177.
ZHU Lümao. Extraterritorial Revelation of Self-driving Car Legislation: Taking the System of German Autonomous Driving Law as an Example[J]. *Sino-Arab Science and Technology Forum* ,2021(12):174-177.

[17] TONG Shenghua. Analysis of the Development of Japanese Autonomous Driving Industry and Regulatory control[C]//The 17th China Standardization Forum. Shenzhen Institute of Standard Technology, Fuzhou,China,2020.
童生华. 日本自动驾驶产业发展及监管规制分析[C]//第十七届中国标准化论坛,中国福州,2020.

[18] 赵天舒. 英国正式为自动驾驶汽车立法[N]. 北京商报,2024-05-22(008).
ZHAO Tianshu. UK Formally Legislates for Self-Driving Cars[N]. Beijing Business News, 2024-05-22(008).

[19] ISO/IEC JTC 1/SC 40. Information Technology Governance of IT for the Organization: ISO/IEC 38500:2024[S]. Geneva: ISO,2024.

[20] 李必军,郭圆,周剑,等. 智能驾驶高精地图发展与展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2024,49(4):491-505.
LI Bijun, GUO Yuan, ZHOU Jian, et al. Development and Prospects of High Definition Map for Intelligent Vehicle[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(4): 491-505.

[21] 吴佳桐,黄龙,王勇,等. 智能汽车基础地图安全防控相关问题浅析[J]. 测绘通报,2023(9):155-159.
WU Jiatong, HUANG Long, WANG Yong, et al. Analysis on Safety Monitoring and Controlling of Intelligent Vehicle Basic Map[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2023(9): 155-159.

[22] 杜清运,况路路,任福,等. 自动驾驶高精度地图特征分析及发展展望[J]. 地球信息科学学报,2024,26(1):15-24.
DU Qingyun, KUANG Lulu, REN Fu, et al. Feature Analysis and Development Prospect of High Definition Maps for Autonomous Driving[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2024, 26(1): 15-24.

[23] 自然资源部. 自然资源部关于印发《公开地图内容表示规范》的通知[EB/OL]. (2023-02-06)[2025-04-15]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2023/content_5752310.htm.
Ministry of Natural Resources. Notice of the Ministry of Natural Resources on the issuance of the Specification for the Representation of the Contents of Public Maps [EB/OL]. (2023-02-06) [2025-04-15]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2023/content_5752310.htm.

[24] 乐鹏,郭霞,张晨晓,等. 空间数据溯源的概念、模型与服务[J]. 地理与地理信息科学,2015,31(6):1-7.
YUE Peng, GUO Xia, ZHANG Chenxiao, et. al. Geospatial Data Provenane: Concept, Model and Services[J]. *Geography and Geo-Information Science*,2015,31(6):1-7.

[25] 刘经南,吴杭彬,郭迟,等. 高精度道路导航地图的进展与思考[J]. 中国工程科学,2018,20(2):99-105.
LIU Jingnan, WU Hangbin, GUO Chi, et al. Progress and Consideration of High Precision Road Navigation Map[J]. *Strategic Study of CAE*, 2018, 20(2):99-105.

[26] 郭磊. 地理信息系统敏感数据脱密技术研究[D]. 北京:北方工业大学,2019.
GUO Lei. Research on Decryption Technology for Sensitive Data of Geographic Information System [D]. Beijing: North China University of Technology,2019.

[27] JIANG L C, YUE P, KUHN W, et al. Advancing Interoperability of Geospatial Data Provenance on the Web: Gap Analysis and Strategies[J]. *Computers and Geosciences*,2018(1): 117.

[28] ZHANG M, JIANG L, ZHAO J, et al. Coupling OGC WPS and W3C PROV for Provenance Aware Geoprocessing Workflows[J]. *Computers & Geosciences*, 2020,138: 104419.

[29] 惠英,解英堃. 共享单车电子围栏应用现状及发展前景[J]. 交通与运输,2022,38(2):89-94.
HUI Ying, XIE Yingkun. Application Status and Development Prospect of Electronic Fence for Shared Bicycle [J]. *Traffic and Transportation*, 2022,38(2):89-94.

[30] 杨松涛,马春光,周长利,等. 一种地理围栏服务中的LBS隐私保护方法[J]. 山东大学学报(理学版),2014,49(9):69-73.
YANG Songtao, MA Chunguang, ZHOU Changli, et al. An LBS Privacy Protection Method in Geofencing Service[J]. *Journal of Shandong University*

(*Science Edition*),2014,49(9):69-73.

[31] 袁勇,王飞跃.区块链技术发展现状与展望[J].自动化学报,2016,42(4):481-494.
YUAN Yong, WANG Feiyue. Blockchain: The State of the Art and Future Trend[J]*s. Acta Automatica Sinica*, 2016, 42(4): 481-494.

[32] 于戈,聂铁铮,李晓华,等.区块链系统中的分布式数据管理技术:挑战与展望[J].计算机学报,2021,44(1):28-54.
YU Ge,NIE Tiezheng,LI Xiaohua,et al. Distributed Data Management Techniques in Blockchain Systems-Challenges and Prospects[J]. *Journal of Computing*,2021,44(1):28-54.

[33] 姚键.国产商用密码算法研究及性能分析[J].计算机应用与软件,2019,36(6):327-333.
YAO Jian. Research and Performance Analysis of Domestic Commercial Cryptographic Algorithms [J]. *Computer Application and Software*, 2019, 36(6):327-333.

[34] 尹浩,林闯,邱锋,等.数字水印技术综述[J].计算机研究与发展,2005(7):1093-1099.
YIN Hao, LIN Chuang, QIU Feng, et al. An Overview of Digital Watermarking Technology[J]. *Computer Research and Development*, 2005(7): 1093-1099.

[35] 聂耿.数字地图水印技术[D].西安:西安电子科技大学,2012.
NIE Geng. Digital Map Watermarking Technology [D]. Xi'an: Xidian University,2012.

[36] 刘永轩,董明,杨伯钢,等.高精度地图众源更新安全监管研究与路径探析[J].北京测绘,2024,38(2):189-194.
LIU Yongxuan, DONG Ming, YANG Bogang, et al. Research and Path Analysis on the Safety Supervision of Updating the Crowd Source of High-Definition Maps [J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2024,38(2):189-194.

[37] 北京经济技术开发区.发布《北京市高级别自动驾驶示范区数据安全治理白皮书》自动驾驶数据安全治理有了亦庄样本[EB/OL].(2024-04-19)[2025-01-06]. https://open. beijing. gov. cn/html//yizhuang/gzdt/2024/4/1714370704536. html.
Beijing Economic-Technological Development Area. Releasing the *White Paper on Data Security Governance in Beijing's High-Level Autonomous Driving Demonstration Zone* Autonomous Driving Data Security Governance Has a Yizhuang Sample [EB/OL]. (2024-04-19) [2025-01-06]. https://open. beijing. gov. cn/html//yizhuang/gzdt/2024/4/1714370704536. html.

(上接第2110页)

HE Jianhua, QIN Rongnuo, DING Su, et al. Reconstruction of Rural Settlement Based on the Characteristics of Livability and Population Flow Network [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(3): 402-409.

[39] FANG C L, YU D L. Urban Agglomeration: An Evolving Concept of an Emerging Phenomenon[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 162: 126-136.

[40] 袁华锡,刘耀彬,胡森林,等.产业集聚加剧了环境污染吗?基于外商直接投资视角[J].长江流域资源与环境,2019,28(4):794-804.
YUAN Huaxi, LIU Yaobin, HU Senlin, et al. Does Industrial Agglomeration Aggravate Environmental Pollution: From a Perspective of Foreign Direct Investment[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(4): 794-804.

[41] 张华,冯烽.绿色高铁:高铁开通能降低雾霾污染吗?[J].经济学报,2019,6(3):114-147.
ZHANG Hua, FENG Feng. Green High-Speed Railway: Does High-Speed Railway Reduce Haze Pollution?[J]. *China Journal of Economics*, 2019, 6(3): 114-147.

[42] HOU W, ZHAI L, WALZ U. Identification of Spatial Conservation and Restoration Priorities for Ecological Networks Planning in a Highly Urbanized Region: A Case Study in Beijing-Tianjin-Hebei, China [J]. *Ecological Engineering*, 2023, 187: 106859.

[43] 宋艳华,焦利民,刘稼丰,等.城市扩张程度的影响因素分析:以武汉市为例[J].武汉大学学报(信息科学版),2021,46(3):417-426.
SONG Yanhua, JIAO Limin, LIU Jiafeng, et al. Analysis of the Factors Affecting the Degree of Urban Expansion: Taking Wuhan City as an Example [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(3): 417-426.