

数字技术赋能城市交通拥堵的治理机制与路径

黄小花

云南民族大学政治与公共管理学院, 云南 昆明

收稿日期: 2026年6月5日; 录用日期: 2026年9月7日; 发布日期: 2026年9月15日

摘要

传统城市中交通拥堵的根源应从复杂适应系统所涉时空异质性供需来理解。文中采用技术及制度并重思路, 把信息、制度、行为、结构当作四维分析要素, 集中考察算法公平问题的实质。所提数字技术对拥堵的缓解机制有四类: 反馈更完善、路权重新配置、决策较合理、治理较网络化, 而算法调度正好是关键手段; 但单靠效率逻辑的算法本身又会带来空间失衡或群体不公这类风险。应对方法是使制度与算法作实质性结合, 根据实际需要确定差异性治理形式。

关键词

数字技术赋能, 城市交通拥堵, 算法公平, 智慧治理, 制度融合

Governance Mechanisms and Paths of Digital Technology Empowering Urban Traffic Congestion

Xiaohua Huang

School of Politics and Public Administration, Yunnan Minzu University, Kunming Yunnan

Received: June 5, 2026; accepted: September 7, 2026; published: September 15, 2026

Abstract

The deep-seated cause of urban traffic congestion lies in the spatiotemporal heterogeneous mismatch of supply and demand in complex adaptive systems. Based on the perspective of technology-institution coordination, this paper constructs a four-dimensional analytical framework of information, rules, behavior and structure, focusing on the core contradiction of algorithmic fairness. The study finds that digital technology alleviates congestion through four paths: feedback enhancement, road right redistribution, decision environment optimization and governance networking,

among which algorithm scheduling is the core carrier. However, efficiency-oriented algorithm operation endogenously produces fairness risks. The solution lies in promoting the in-depth adaptation of algorithm and institution through whole-chain ethical regulation, and adopting differentiated governance solutions according to local conditions.

Keywords

Digital Technology Empowerment, Urban Traffic Congestion, Algorithmic Fairness, Smart Governance, Institutional Integration

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

交通拥堵应被看作“城市病”的基本表征，其根源是交通系统在时空上供需不匹配。截至 2025 年末，我国城镇化率达 67.8% [1]，拥堵造成的年经济损失达数千亿元，交通碳排放约占全国十分之一[2]。按“当斯定律¹”来说，单纯扩建道路效果有局限。借助大数据、人工智能这类数字资源，对拥堵可以提前预测、及时调控，算法调度是当代智慧交通治理的关键所在。2025 年七部委发布《关于“人工智能 + 交通运输”的实施意见》[3]，把智能算法的运用纳入规范轨道、与公平效率并提，正好可作本文依据。

现有研究存在三方面缺口：只注意技术效率而未将技术同制度一并考虑，对算法制度适配分析太弱[3]；对算法正面功能写得较多，对其公平性作微观考察不够[4]；提出优化方案多属宏观设想，全链条或分项适配仍缺落实。鉴于上述情况，本文把算法公平当作重点来分析，用文献归纳及多案例对照的方式展开论述，把杭州定为详细考察对象，深圳、新加坡作为辅助案例，又就 22 名有关当事人(政府工作人员 3 人、技术人员 4 人、平台相关人 5 人、市民 10 人)做半结构化访谈，从多角度求证。

2. 核心概念与理论基础

2.1. 核心概念界定

文中提到的数字技术是有关大数据、人工智能、物联网、5G-A 以及云计算或数字孪生的各类形式，“技术赋能”以能力、结构、价值作三层内核划分。此处对三者加以定义说明：

1) 制度融合

将数字技术系统同正式制度、非正式限制及治理方式作深度结合、同步发展的状态加以说明，按四维思路操作化地展开分析，以算法制度适配度为核心来论述：数据制度适配度(有关数据权利、共享及流程的基本匹配，是前提性内容)；算法制度适配度(对算法做问责、审计、伦理控制并考虑其用途，是主要手段)；主体制度适配度(权责多元、结构网络化的对应关系，是主体保障)；价值制度适配度(诸项价值 - 效率、公平、安全 - 的协调及优化，是价值取向)。所提评估分基础适配、良好适配、深度融合三等。

2) 算法公平

将交通调度所涉的资源分配理解为对各区域及各类人群都应中立、普惠的问题，其操作标准是四维的：空间上公平(所投资源不专为某地或某类车流而设)；群体上公平(老年人、残障者或低收入人等数字

¹当斯定律，又称交通出行诱增定律：新建、拓宽道路带来的通行能力提升，会刺激新增驾车需求与短途出行转化，长期拥堵程度会重回原有水平，单纯依靠修路扩供给无法根治城市拥堵。

弱勢者要被顾及)；程序上公平(有关逻辑清楚、社会有知情权和发言权)；结果上公平(治理拥堵应使出行获益普遍，不扩大差距)。所提评估分基本合格、良好、优秀三级。

3) 系统韧性

将系统在发生技术问题或受到网络攻击、有意外事件影响之后仍能运行、迅速复原的情形视为韧性，按此思路分出技术、人力及社会三类，即算法公平治理的基本保障。

2.2. 理论基础

第一，有关复杂适应系统的理论。按此理论看，城市交通是多种异质性出行者共同作用的复杂适应系统，所遇的拥堵正是个体理性累积而成的非最优系统状态。对算法调度来说，加快信息反馈、降低调节时滞是基本的效率贡献，但只从效率角度使用算法未必能避免异质性主体的样本偏差，不能保证公平，由此产生的问题属于算法公平具有内生性的理论来源。

第二，应采用协同治理的观点。按此思路看，解决城市交通拥堵要依靠政府各部分及社会、市场诸项力量的配合，不能只由一主体完成治理任务。对算法公平来说，技术上做单项改进是不够的，必须让各类主体一起讨论制度、加以约束或评价，把制度和科技都纳入治理的协作之中。

第三，应以“技术－制度协同演化”观点来思考问题。文中所提的理论不主张技术由制度单独支配或制度对技术作单方面限制，而是把二者都看作动态、互惠、同步演化的因素。有关算法的更新会促使交通管理用到新制度，而制度上对公平的要求又反过来规定算法可行的范围及其价值。对算法公平做三重分析(即来源、方法及逻辑)后可以得出结论：要消除算法不公平现象不能只靠改良某一算法，而要着力使算法同制度形成真正意义上的结合或统一。

2.3. 理论对话与边际贡献

数字治理研究过去就一直有“技术决定论”和“制度决定论”两类观点，两者都未很好处理技术及制度的配合关系，在智慧交通上相应地有“重技术效率、轻制度公平”的偏向[3]倾向。对于算法治理的公平性已有较多论述，不过所涉政务或司法案例居多，有关智慧交通的场景化思考尚待发展[4][5]。本文将三类理论结合，提出以“基础－核心－保障－价值”为线索的制度融合思路，其边际贡献是两点：第一，把技术－制度协同纳入考虑，对算法公平做生成性解释和逻辑梳理，从而对技术决定论与制度决定论作出统一回应；第二，依杭州实例来设计事前、事中、事后三段式算法规制，给出城市间差异化的可行方案。

3. 数字技术赋能城市交通拥堵治理的作用机制

所论章节以信息、规则、行为、结构四个层面来分析赋能机制，在四者中把规则上(即算法)的调度当作治堵效率的关键所在，其他三者是其数据或制度基础。

3.1. 信息层：全息感知提供算法数据基础

按传统思路进行的交通管理多用线圈或地面巡检，所获信息是零散的、不及时的，反馈慢。现在数字技术以车载 GPS 或视频、地磁、基站诸类终端为媒介建立整体性监测体系，把流量、时段及气候诸项因素带入深度学习模型来分析交通状况，使系统对事件的反应由以分钟计变为以秒计，从而把事后处理转为事前判断。杭州已把全市 85.5 万个视频点纳入物联感知平台，警情响应平均耗时由 5 分钟减到 90 秒，由此获得各区域、各时刻的准确数据支撑，有利于算法作出精细调度。

3.2. 规则层：算法调度释放核心治堵效能

算法能根据实际的车流动态来调节通行方式，将车流引向总体最优状态。传统用固定时间配比的方

法处理流量时，对潮汐式或突发性交通没有很好准备。现在的自适应信号控制借助多智能体深度强化学习，把区域内总的延误作为指标求解配时问题，使路口信号从“车看灯”转变为“灯看车”，所涉试点区车辆平均速度提高 20%~30%，有关交通的投诉基本减少 20%以上[6]。杭州城市大脑 3.0 把 AI 类信号调控放在中心位置，对主城区 1300 多个路口作统一管理，高峰时段主要延误率降低 18%，PM2.5、PM10 排放都较以前有较大降幅，空气质量上升约 7.78% [7] [8]。

3.3. 行为层：需求诱导拓展算法作用场景

交通拥堵本身即由大量出行者在信息有限状态下分别作个体最优的局部安排所造成，最后变成系统非最优现象。以导航或 MaaS (Mobility as a Service, 出行即服务)平台为媒介的算法可从需求角度来塑造出行选择，利用信息提示及方案设计使个人判断接近整体最优的解决思路。赫尔辛基 Whim 的案例证明：MaaS 用两年后私家车使用比例一般下降约 29% [9]。所提方法属于助推类思路，不对出行意愿做生硬改变，而是借优化环境达成治理目的，但算法促成的转变是否广泛、是否公平，在很大程度上依赖于人们运用数字的习惯，不宜过分乐观。

3.4. 结构层：跨域协同筑牢算法制度保障

有关城市交通的大脑要将诸部门数据集中利用，按全域思路统筹安排，以消除信息“孤岛”，促成“用数据说话、用数据决策、用数据管理、用数据创新”类的治理方法[10]；对一体化平台来说，流程必须随之更新，跨部门协作由“部门跑腿”变为“数据跑路”，制度上亦利于算法、利于公平监管[11]。

所列的表 1 是有关三地基本案例的归纳，其中深圳及新加坡作横向对照分析。

Table 1. Comparison of typical urban smart transportation governance models

表 1. 典型城市智慧交通治理模式比较

维度	杭州(城市大脑 3.0)	深圳(智慧交通云平台 2.0)	新加坡(Smart Mobility 2030)
核心驱动	政企合作(阿里云) + 运营专班	政府主导 + 企业技术参与	政府统筹(LTA)
技术侧重	云计算 + AI 信号调控	车路协同 + 边缘计算	拥堵动态定价 + 数据共享沙盒
制度创新	数据归集共享条例	智能网联汽车管理试点	拥堵定价法 + 数据共享沙盒
主要成效	拥堵指数下降 15%、高峰延误下降 18%	车速提升 20%~30%，拥堵指数降 3%	高峰车速保持 25 km/h 以上
可复制性	适用于数据基础好的大城市	适用于产业配套强的城市	需较强财政能力支撑
核心困境	跨部门数据标准不统一，政企数据价值分配待完善	车路协同成本高，商业模式不清晰	公众对动态定价接受度待提升

从比较的角度看，数字治理的成效不只是由技术所决定的，制度也起很大作用。按信息、规则、行为、结构来分层考察四项机制，应以算法调度为效能中心，但此时的高效率与公平之间已有基本矛盾要解。

4. 算法公平视角下智慧交通治理的结构性困境

所用的是制度融合的四维思路及算法公平的四维标准，将基础限制、主要矛盾、延伸风险一并纳入分析范围。

4.1. 基础约束：数据共享壁垒制约算法公平底色

数据孤岛是有关算法公平治理的基本困境。交通行业目前面临“数据富集与信息贫乏”悖论：所用

感知手段越来越多,实际可作交叉利用的数据比例仍小,70%以上城市没有完全打破部门间数据壁垒[12]。造成这种现象的原因有三:权属安排不一致,交管及交通单位各自开发系统,所用技术未必对应;激励机制不协调,企业把数据看作资源,政府部门“共享无收益、封闭无风险”;技术上又缺乏统一标准,厂商私有格式产生沉没成本。三者彼此促成恶性循环。就杭州而言,跨部门核心数据要走3层审批流程,主要道路流量信息平均晚于现实24~72小时;平台只公布总体统计结果,老城区或低收入区的详细出行记录少有公开来源,这类样本偏差早有发生可能。

4.2. 核心矛盾:算法运行的多维度公平性偏差

1) 空间公平偏差:效率优先下的资源倾斜

所用算法是按全区域通勤效率最大来设计的,低收入区居民少用导航、有关数据少,因而不能指望样本完整地反映实际情形,路径规划多绕开此类区。这种偏差不是由人工刻意造成,而是训练数据有偏、优化目标过于集中两方面同时促成的结果。杭州的主干道或核心商业点一般比旧社区支路更受重视,高峰时段资源多向车流大的地方集中,空间公平性在算法下未得保障。

2) 群体公平偏差:数字鸿沟下的弱势排斥

2025年我国老年人口超3.1亿[13],所涉人群大体上不擅长运用智能手机,同属出行信息弱势群体(含残障者、低收入者)。目前交通系统多利用移动端的数字反馈来运作,对这类人实际的出行需要尚不能作完整统计。若仅以通行效率为标准来配置路网资源,算法所允许的路权可能因效率逻辑而受损害,数字鸿沟即成路权差距。就受访者所见而言,老旧社区附近有关公交智能化、信号改善的进展远不及主干道,有老人因不会查实时车次而被迫多等公交车。

3) 程序公平缺失:伦理隐忧与信任危机

有关交通的位置信息是高度个人可识别的,若用大量数据加以交叉考察就可能突破隐私保护边界;深度学习所依赖的黑箱又使配时、引导这类公共决定失去透明性,容易造成信任方面的困难[14]。算法黑箱会进一步遮蔽公平偏差:当决策标准不为人知时,判断是否公正、改正偏差都较难完成[15]。

4) 安全风险与自动化悖论

高集成的系统本身有较大的安全缺陷:若对信号控制机或云服务器发动攻击,红绿灯可失灵、假交通数据可出现,由此造成的麻烦比一般道路瘫痪要重;所用的大语言模型又可能造成幻觉或解释困难。文中把这种情形称为自动化悖论——高度自动化的安排虽能减少人所犯的错误,却因设计原因放大了整体系统的脆弱性。

4.3. 衍生风险:经济与韧性短板放大公平困境

1) 经济可持续性不足加剧治理短板

智慧交通类项目大体上“重建设、轻运维”:建设阶段由专项资金支撑,但长久运行所涉费用没有按常规列入财政计划,结果系统老化、数据更新不及时。要使算法不断改进、判断标准公平成立,必须有持续的资金安排,缺少资金就难有进展,公共服务的普惠性亦无从落实。资金困难和数据壁垒是互相促成的恶性组合:数据壁垒本身会妨碍应用价值、降低投资意愿;资金不足又造成群众不满,运维资源减少,最后掉入“投资不足-效益欠佳-投资收缩”所述的低水平发展循环。

2) 系统韧性不足放大公平冲击

把系统自动判断当作唯一依靠容易使管理能力趋于退化。若发生广泛停电或网络瘫痪一类的极端状况,高度自动化手段未必能有效应对,此时没有经常练习的人员又难作应急补充,弱势群体的出行保障最先受到冲击。此处所言即韧性悖论:对一般情况中自动化的过分倚重,本身有损系统应变力及复原的

可能性。根据杭州调查所得信息,监控类工作是常态、实操性任务限于月度演练,有关岗位的独立应急知识已较薄弱。自动化悖论着眼技术体系内部的不足,韧性悖论讨论人与技术的相互影响,二者都说明治理算法要讲公平的必要性。

5. 算法公平导向下智慧交通治理的优化路径

按制度融合四个维度来思考,结合算法公平所涉四标准,在基本支撑、核心规范、价值指引、底线要求诸项上给出路径,把治理由单纯技术嵌入引向制度性深度结合。实际操作要分层次展开:对超大城市宜先试行算法治理法律方案及数据沙盒思路;省域中心城市的重心应是数据中台和有关算法的评估办法;一般地级市要着重发展数字基础、部署轻量级 SaaS (Software as a Service, 软件即服务)应用,依托省市一体化算力池落地。

5.1. 夯实基础: 构建数据共享的制度基础设施

有关数据权属及激励、标准的三重困难应由三方面同时解决:第一是理清权属关系,利用地方立法将财政性资金所获的交通数据划为公共数据产品,在完成隐私处理之后按法统一接入城市大数据系统;对企业数据用“用数据换服务”方法加以引导,允许北上广深就交通数据做试验性试点。第二是统合技术标准,从城市角度出发对交通数据中台作元数据及质量设计,把异构数据整合起来;省会类城市应着力构建本地化中台,一般地级市可以借助省级或区域平台来办事。第三是完善激励制度,把数据分层、分项管理同授权使用结合起来,高价值(脱敏)数据可借交易所渠道流通,由此促成数据价值的持续实现。

5.2. 核心规制: 建立全链条算法治理伦理规制框架

对算法的治理不能只以效率为着眼点,而应把公平列入各阶段所要处理的问题(事前、事中、事后)。

1) 事前准入: 强制开展算法偏见测试

有关路权及出行资源分配的高风险算法应按三个环节作强制性测试:数据是否具代表性(即所用训练集不遗漏各阶层或各社区);结果是否公平(方案不能有明显阶层偏颇现象);特殊人群是否受影响(老年人或低收入者出行不被损害)。可以考虑采用欧盟《人工智能法案》中所提的差异化监管方法,把重要交通算法列入前置审批范围[16]。

2) 事中运行: 推进透明化与公众参与

要对所用的算法作公开说明,按易懂的方式解释有关信号、路径的基本逻辑,使公众知悉其内容;同时让诉求有表达机会,把出行中遇到的不公列入投诉范围,用意见来辅助算法的改进。

3) 事后监督: 落实算法审计与问责机制

要以常态方式运用第三方审计手段,按期分析有关算法的公平性、安全及合规情况;把“技术团队-监管部门-政府主管方”纳入分级问责范围,对所涉事故做责任追究。对重要信息基础设施落实等级保护要求,定期加以攻防测试。

5.3. 价值校准: 弥合数字鸿沟推进包容性治理

把线上线下双轨制当作刚性的服务原则来落实:对电子站牌作推广但不取代传统站牌或语音提示;对扫码乘车作鼓励却不排除交通卡的使用、刷卡通行,在医院及枢纽处仍设人工扬招的便利点。有关适老化、无障碍的改善要成为常规管理内容,出行类平台须按此要求配置大字界面或语音方式。从长期机制着眼,将交通公平列入智慧交通考察范围,以公交替代比例、低收入区出行时间、老年人实际出行感受作为包容性指标,利用考核手段防止单纯追求效率的偏颇。

5.4. 底线保障：打造人机协同的系统韧性架构

从管理决策的角度说，要以人为核心来考虑问题，将机器用于分析数据、做预测或推演，最后由一线管理者结合安全、效率及公平作出判断，在必要场合(如强制管制、突发事态)中保有人工主导。就技术架构而言，应采用模块式、低耦合设计，用“平台上移、应用下沉”方法建立可扩展的基础平台，各类应用依统一标准做接口连接，彼此不强求一致、可分别改进；省会城市的改造以省级平台为起点，一般地级市多用已成熟产品。对应急状况的准备要早作安排，设立系统降级运行机制，使主要功能在故障下仍能简易运转或转人工处理，极端情形有预案应对；每6个月举行多单位联合演练，防止技术依赖造成应急失效。

6. 结语

算法公平属于智慧交通治理从“有效”到“善治”的基本命题。所涉主要结论有：第一，把制度融合当作四维分析的出发点，把算法制度适配度定为核心维度，依空间、群体、程序、结果四个角度设计公平分级标准，对数据起点至价值落点的因果关系作较完整的梳理与说明。第二，对算法公平困境作系统解构，按基本限制、中心矛盾及衍生风险来分析数据壁垒、多维偏差、经济与韧性不足诸项传导现象，将“技术与制度不匹配”视为深层成因，同时区别自动化悖论与韧性悖论——前者限于技术系统的固有缺陷，后者是技术与人力能力随时间变化的张力。第三，给出全链条算法规制思路，从事前偏见检测、过程透明到事后审计完成制度闭环，又将数据共享、治理包容、人机协同韧性纳入支撑性措施的考虑范围。就实践而言，文中指明“数据壁垒-算法偏差-投入不足”有负反馈隐患，提出由“技术内生性”转向“制度内生性”的改进方向与分类推进原则。目前研究受限于单一城市(且多为大中型)的观察视角，将来可借助多城对比、微观实证方式考察制度情境的调节作用。

参考文献

- [1] United Nations, Department of Economic and Social Affairs (2025) World Urbanization Prospects: The 2025 Revision. UN.
- [2] 中华人民共和国 2025 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. https://www.stats.gov.cn/zwfck/sjfb/202602/t20260228_1962662.html, 2026-08-12.
- [3] 交通运输部 国家发展改革委 工业和信息化部 国家数据局 国家铁路局 中国民用航空局 国家邮政局关于“人工智能 + 交通运输”的实施意见[EB/OL]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/kjs/202509/t20250925_4177256.html, 2026-08-12.
- [4] 王婧怡. 数字时代算法技术异化的伦理困境与治理路径[J]. 自然辩证法研究, 2023, 39(10): 128-131.
- [5] 周文财, 李千, 李永琪, 等. 智能优化算法在交通信号控制中的应用研究综述[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2026, 40(2): 53-60.
- [6] 古淤华. 基于多智能体深度强化学习的城市交通信号协同控制方法与应用仿真[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.
- [7] 郭继文, 冯国强, 房超, 等. 城市拥挤效应破解的数字化方案——以杭州“城市大脑”治堵为例[J]. 世界经济, 2025, 48(11): 160-195.
- [8] 郁建兴, 樊靓. 数字技术赋能社会治理及其限度——以杭州城市大脑为分析对象[J]. 经济社会体制比较, 2022(1): 117-126.
- [9] 王晓霞, 张明霞, 李佳雯, 等. 出行即服务系统理论与实践: 回顾与展望[J]. 生态学报, 2024, 44(7): 2859-2872.
- [10] 陈其航, 胡浩辰, 何天劭. 杭州: 打造超大城市交通治理新样本[J]. 道路交通管理, 2026(4): 20-21.
- [11] 齐若星. 基于 SFIC 模型的新型智慧城市建设中协同治理机制研究——以杭州“城市大脑”为例[J]. 住宅与房地产, 2024(2): 18-20.
- [12] 中国信息通信研究院. 数据要素发展报告(2025 年)[EB/OL].

- https://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/ztbg/202511/t20251128_704834.htm, 2026-08-12.
- [13] 中国互联网络信息中心. 第 55 次中国互联网络发展状况统计报告[EB/OL].
<https://www3.cnnic.cn/n4/2025/0117/c88-11229.html>, 2026-08-12.
- [14] 贾开, 薛澜. 人工智能伦理问题与安全风险治理的全球比较与中国实践[J]. 公共管理评论, 2021, 3(1): 122-134.
- [15] 陈云. 杭州“城市大脑”的治理模式创新与实践启示[J]. 国家治理, 2021(17): 16-21.
- [16] 刘芷莼. 数字赋能交通治理的理论逻辑与价值理性[J]. 交通企业管理, 2026, 41(4): 83-85.