

澳门数字化交通优化路径

肖伊宏 吴静思 吴绵 李溢 朱启源 李振祖

(珠海科技学院, 广东 珠海 519090)

摘要: 在高密度建成环境、旅游型城市功能与岛际通勤流叠加背景下, 澳门交通系统呈现道路空间稀缺、客流波动显著、桥梁通道敏感、治理主体多元等典型特征。本文在吸收智慧城市、智慧出行与数字治理研究成果的基础上, 构建“实时数据—算法中枢—岛际协同—应用场景”四维分析框架, 系统检视澳门行政区域内数字化交通的现实基础、结构性瓶颈与可行优化路径, 研究范围为澳门半岛与氹仔(含路氹片区)之间的交通组织优化。研究认为, 澳门已具备实时交通信息服务、公交到站信息发布、停车信息联通及智慧城市政策牵引等基础, 但仍存在数据接口分散、跨部门共享不足、信号控制自适应能力有限、公交调度的事件响应不足、跨桥通道与节点联动不够、绿色出行激励机制偏弱等问题。据此, 文章提出: 建设全域交通数据治理体系, 推动信号控制与公交调度算法升级, 构建面向游客—居民—通勤者的MaaS (Mobility as a Service) 服务架构, 强化本岛与氹仔之间的桥梁走廊、旅游热点和综合换乘节点的数字联动, 并以绿色交通、韧性治理和人才培养形成制度闭环; 在此基础上, 进一步提出将澳门本土数字治理经验有序外溢至横琴交通协同场景, 作为本文的延伸性创新。本文旨在为澳门在“小空间、高流量、强旅游”条件下推进本土化数字交通治理提供具有管理学价值的政策工具与实施次序。

关键词: 澳门; 数字化交通; 本岛—氹仔协同; 智慧出行; 交通治理

Optimization Pathways for Digital Transportation in Macao

XIAO Yihong, WU Jingsi, WU Mian, LI Yi, ZHU Qiyuan, LI Zhenzu

Abstract: Against the backdrop of a high-density built environment, a tourism-oriented urban economy, and intensive inter-island commuting flows, Macao's transport system is characterized by scarce road space, highly volatile demand, bridge-corridor sensitivity, and a multi-actor governance structure. Drawing on research in smart cities, smart mobility, and digital governance, this paper develops a four-dimensional analytical framework consisting of data infrastructure, algorithmic coordination, inter-island integration, and service scenarios, and examines the institutional foundations, structural bottlenecks, and optimization pathways of digital transportation strictly within Macao's own administrative territory, with a specific focus on the

【作者简介】肖伊宏, 女, 本科生, 珠海科技学院; 吴静思, 女, 本科生, 珠海科技学院; 吴绵, 女, 本科生, 珠海科技学院; 李溢, 女, 本科生, 珠海科技学院; 朱启源, 男, 本科生, 珠海科技学院; 李振祖, 男, 硕士研究生, 助教, 珠海科技学院。

Macao Peninsula and Taipa (including the Cotai area). The study finds that Macao has already established a preliminary foundation through real-time traffic information services, bus arrival information systems, parking information connectivity, and smart-city policy support. However, persistent constraints remain, including fragmented data interfaces, weak interdepartmental sharing, limited adaptive signal control, insufficient event-responsive bus dispatching, inadequate digital coordination across bridge corridors and key nodes, and weak incentives for green mobility. Accordingly, the paper proposes to build an integrated transport data governance architecture, upgrade signal control and bus scheduling algorithms, develop a Mobility-as-a-Service framework for residents, visitors, and commuters, strengthen digital coordination among the Macao Peninsula, Taipa, bridge corridors, and major interchange nodes, and institutionalize green, resilient, and talent-based governance. As an innovative extension, the paper also argues that the mature digital governance experience formed within Macao may later be transferred to Hengqin in order to improve the efficiency of the wider Macao-Hengqin transport interface. The article aims to provide a directly applicable and management-oriented policy framework for the local optimization of transportation in Macao.

Keywords: Macao; digital transportation; Macao Peninsula-Taipa coordination; smart mobility; transport governance

一、问题提出与研究意义

澳门的交通治理具有典型的“超高密度—强旅游—小尺度—双核心联动”复合特征：一方面，澳门半岛行政、商业、历史街区与旅游接待功能高度集中，道路断面有限、交叉口密度高，任何新增需求都容易在高峰时段转化为拥堵、排队与换乘摩擦；另一方面，氹仔及路氹片区承载机场、大学、会展、综合度假休闲设施与新型旅游消费场景，形成与澳门半岛之间频密而具有显著时段差异的客流往返。由此可见，澳门交通问题并非单纯的“车多路少”，更不是一般意义上的区域联通问题，而是本土范围内“有限路网承压、跨桥通道敏感、客流峰值突增、节点转换复杂”共同叠加而形成的治理难题^[1-3]。

从治理工具演化看，数字化交通并不是将传统交通简单“上线”，而是以数据采集、算法决策、平台协同和场景服务为中心，对交通治理流程进行再组织。澳门已在实时交通发布、公交信息服务、停车信息整合、交通应用程序建设等方面具备一定基础^[2,4]，但与真正意义上的智慧出行体系相比，现有数字化仍偏重“信息展示”，在预测、联动、分流、协同、评价等更深层治理环节仍有较大提升空间。尤其对于本岛与氹仔之间的桥梁走廊、旅

游热点与综合换乘节点而言，单纯提供静态信息尚不足以支撑高频、短周期、强波动的出行组织，需要进一步形成以实时感知、情景预判和策略联动为核心的数字治理能力。

在澳门持续推进智慧城市建设、完善城市治理体系并持续优化民生服务的政策背景下^[5-7]，研究“澳门数字化交通优化路径”具有三重意义：其一，为澳门半岛与氹仔之间的日常交通组织提供更精细、更可执行的治理工具，以提升有限道路资源的配置效率；其二，为旅游型城市处理节假日、大型演出、赛事及会展活动所引发的瞬时客流波动提供韧性化方案；其三，在严格立足本土治理的前提下，为后续将成熟的数字交通经验有序拓展至横琴协同场景提供可复制的制度样本与方法论基础。换言之，本文的研究逻辑首先是做深澳门本地，再讨论经验外溢，而非将研究对象预设为跨境交通本身。

二、文献综述与分析框架

（一）文献综述

现有研究大体可分为三条路径。第一类聚焦智慧城市与智慧交通的技术架构，强调以物联网、传感器、云计算与人工智能提升交通感知与调度能力；第二类强调公共管理与平台治理，关注多部门共享、标准协同与公共服务一体化；第三类聚焦绿色交通与韧性治理，主张将低碳转型、极端天气适应和应急响应纳入交通系统优化的统一框架^[9-11]。这些研究共同表明，数字化交通的核心价值并不在于技术叠加本身，而在于通过制度安排把分散的技术能力组织成可持续的公共治理能力。

与本文最相关的研究启示主要有两点。其一，Li等在智能算法评价研究中指出，算法工具的有效性并不取决于“是否使用人工智能”本身，而取决于评价指标体系、场景适配程度与决策闭环是否完整^[6]。这意味着澳门数字化交通不应停留于技术采购或系统堆叠，而应将算法评价嵌入到出行效率、公平性、碳排约束、游客体验和监管可解释性之中。其二，Huang等从城市化、气候变化与能源转型的联动角度说明，城市基础设施优化不能只追求即时效率，还需要兼顾气候韧性、能源结构与长期可持续性^[9]。因此，澳门数字化交通路径必须把绿色出行和韧性治理纳入核心目标，而非事后补充。对于澳门而言，这一启示尤其重要：由于城市尺度较小、空间调整成本较高，一旦交通数字化偏离公共价值导向，负面效应会在有限空间内被迅速放大。

另一方面，围绕澳门本地交通的研究已揭示出其高密度道路网络、公交依赖度较高、重大活动对交通波动影响显著等特点^[17-19]。但既有成果更多从交通工程或单项系统功能切入，对“数据治理—跨部门协同—岛际组织—场景服务”这一完整治理链条的管理学分析仍显不足。尤其在澳门半岛与氹仔之间，桥梁通道、接驳节点、旅游片区、学校片区与居住

片区的出行节律并不一致，若缺乏整合性的治理框架，局部优化极易被系统性瓶颈所抵消。本文正是针对这一缺口展开，并试图在保留工程逻辑的同时强化治理逻辑与制度逻辑。

（二）分析框架：数据底座—算法中枢—岛际协同—应用场景

结合澳门城市特征与数字治理逻辑，本文构建“四维分析框架”。第一，基础数据，强调多源数据的统一接入、清洗、标注、共享与授权，是实现精确识别与联动治理的前提；第二，算法中枢，强调信号控制、公交调度、需求预测、事件预警等模型的动态优化，是把数据转化为治理能力的关键；第三，岛际协同，强调澳门半岛、三座跨海大桥、氹仔及路氹片区之间的交通组织衔接，以及交通、旅游、治安、气象、公共工程等部门之间的流程对接；第四，应用场景，强调面向居民、游客、通勤者与大型活动时段的差异化服务设计。该框架既突出技术维度，也强调治理对象在空间上的精细分层。

该框架的核心不在于简单增加技术投入，而在于形成“感知—判断—执行—反馈—再优化”的闭环：如果数据不可共享，则算法难以精准；如果算法无法嵌入部门流程，则数字平台只能停留在展示层；如果岛际协同缺乏统一调度，则本岛拥堵可能沿桥梁迅速传导至氹仔，反之亦然；如果场景服务没有用户分层，则技术优化无法转换为实际体验提升。由此，澳门数字化交通的关键任务不是孤立优化某一个应用，而是在有限行政空间内重构交通治理的组织逻辑，使“跨桥通行、节点换乘、热点疏导、活动保障”被纳入同一套治理闭环之中。

三、澳门数字化交通的现实基础与主要瓶颈

（一）现实基础：初步数字化能力已经形成

从政策基础看，澳门较早将智慧城市纳入治理议程，并通过与数字技术平台合作推进云计算、大数据等基础能力建设^[6]。在政府层面，交通事务局已形成实时交通状态、巴士信息查询、停车信息发布等线上服务入口^[2]，为交通信息公开与公众查询奠定了基础。与此同时，澳门大学智慧城市物联网国家重点实验室持续围绕人工智能、物联网与城市韧性等方向开展研究，为本地交通数字化提供了技术外溢与人才支撑^[7,21]。这些条件表明，澳门在制度、平台与科研层面已具备推动本土交通数字化深化的基础性条件。

从应用基础看，公交到站信息、线路查询、部分停车信息联通以及面向游客的综合性出行应用，已使澳门由传统经验型出行逐步过渡到“信息辅助型”出行^[4]。尤其在旅游出行占比较高的城市中，信息可达性本身就是公共服务质量的重要组成部分。现有平台虽未完全实现 MaaS，但已为“一站式出行信息整合”提供了原型。进一步看，澳门半岛以高密度

街区微循环见长，氹仔与路氹片区则更依赖主干道与综合枢纽调度，这种空间差异恰恰说明数字化系统必须具备分区识别与差异响应能力，而非沿用单一的均质化管理逻辑。

从数据基础看，已有研究基于澳门公交实时数据开展了路线到达时间预测、事件期客流比较、数据集建构等工作，说明澳门已经具备进一步推进交通数据分析和精细化调度的客观条件^[18-20]。换言之，澳门数字化交通并非“从零起步”，而是处于从信息发布阶段迈向智能协同阶段的关键过渡期。更重要的是，这一过渡期并非抽象意义上的技术升级，而是要求将桥梁走廊、旅游热点、学校片区和高频换乘节点纳入同一套可计算、可比较、可评估的数据模型。

（二）主要瓶颈：从“有数据”到“能治理”仍有断点

第一，数据资源仍呈碎片化。当前澳门交通相关数据分散于交通事务、公交运营、停车管理、旅游活动、道路施工、气象预警等多个系统，数据格式、更新频率、调用权限和责任主体不一致，导致跨系统联动困难。结果是“各自可见、整体不明”：单个系统能解释局部状态，却难以形成对澳门半岛与氹仔整体交通态势的实时判断。特别是在桥梁通道与热点节点上，若数据粒度、更新节奏和事件标签无法统一，管理者往往难以及时识别拥堵是源于本地道路瓶颈、活动流量突增还是跨区传导效应。

第二，算法应用更多停留在局部功能层面，尚未充分转化为统筹调度能力。已有实时查询、线路展示、到站提示等功能提高了公众的信息获取效率，但在高峰拥堵预测、节庆活动分流、施工绕行引导、公交与步行换乘协同、跨桥通道组织等方面，面向治理目标的预测性算法和自适应机制仍显不足^[17,18]。当澳门半岛旧城区局部拥堵与氹仔大型活动客流同时出现时，如果缺乏一体化预测与联动控制，系统容易出现“局部看似合理、整体却效率下降”的管理悖论。

第三，澳门半岛与氹仔之间的岛际协同仍不够顺畅。虽然三座跨海大桥构成基本联通骨架，但在桥头匝道、主干道衔接点、旅游热点周边和大型综合体外部道路等关键节点上，仍存在诱导信息不充分、分流策略不稳定、跨区调度节奏不一致等问题。其结果是，原本属于局部片区的拥堵容易通过桥梁通道快速放大，并在两端区域形成连锁反应，使交通治理呈现明显的“耦合性风险”。

第四，大型活动与旅游旺季带来的偶发性冲击尚未有效解决。澳门具有明显的事件驱动型客流波动特征，节假日、会展活动、演唱会及澳门格兰披治大赛车等大型活动会显著改变交通模式^[19]。如果没有以历史数据为基础的预判模型、临时运力投放机制与多主体联

动脚本，系统往往只能在拥堵发生后被动处置。对于本岛与氹仔这种功能分区较为鲜明的城市结构而言，活动影响往往并不局限于单一点位，而会沿桥梁、干道和接驳节点外溢。

第五，绿色导向和用户导向仍待强化。数字化交通若只服务于“通行速度最大化”，可能忽视步行环境、公交优先、低碳激励、老龄友好、学童友好、游客友好等公共价值。澳门作为旅游型城市和高密度城市，更需要在效率与公平、速度与体验、通行与减排之间建立平衡。特别是在历史街区、旅游步行区与综合娱乐片区之间，若缺乏精细化的慢行引导与公交替代方案，数字化反而可能强化对小汽车和临时接驳的依赖。

表 1 澳门数字化交通主要问题、成因与优化方向矩阵

问题维度	直接表现	核心成因	对应优化方向
数据治理	多源数据分散、接口不统一	部门分割与标准缺失	建设统一数据中台与分级授权机制
算法调度	拥堵预测与事件响应不足	算法嵌入治理流程不深	升级自适应信号与需求响应调度
岛际协同	桥梁走廊与关键节点联动不足	跨区调度节奏不一致、诱导不足	强化本岛—氹仔联调与桥梁数字管控
公众服务	信息可见但决策建议弱	平台偏展示、缺少场景编排	建设面向多群体的 MaaS 服务
绿色转型	公共交通与绿色出行激励不足	评价体系单一	纳入碳效、韧性与公平指标

资料来源：作者根据文献与政策资料整理^[2,9,16]。

四、澳门数字化交通的优化路径

（一）建设全域交通数据底座，重构数据治理规则

数字化交通首先是数据治理问题，而非单纯的设备问题。澳门应以“统一采集标准、统一时空编码、统一接口规范、统一授权规则”为原则，推动交通事务局牵头建立覆盖公交、出租、停车、道路施工、桥梁通行状态、旅游热点、气象预警与重大活动信息的全域交通数据底座。其重点不在于消除所有部门边界，而在于通过数据目录、共享清单、接口协议和责任台账，使不同系统能够在不改变既有行政分工的前提下实现协同调用。对于澳门半岛与氹仔之间的交通优化而言，数据底座的价值尤其体现在“跨区可比”和“跨节点可联动”两个方面，即管理者能够在同一界面内识别桥梁压力、热点集聚程度和接驳失衡位置。

具体而言，可分三步推进：第一步，完成基础数据资产盘点，明确“谁生产数据、谁负责质量、谁拥有调用权、谁承担更新责任”；第二步，建立面向管理部门、运营主体和公众的分级授权机制，既保障公共服务开放，也控制敏感数据的安全边界；第三步，建设可持续的数据质量评估制度，将更新及时性、完整性、一致性和可追溯性纳入常态考核。对于桥梁、枢纽和活动场馆周边等高敏感区域，还应进一步提高数据更新时间频率，并建立异常波动的自动报警规则，使数据体系不仅“存得住”，更能“用得起、调得动”。

在制度层面，澳门还应将数据共享由“临时协作”转为“规则协作”。建议以行政规章、跨部门备忘录或技术规范形式明确共享范围、接口标准和异常处置流程，减少因人而异、因事而异的协同成本。这一转变将显著降低不同部门和运营单位之间的摩擦成本，提高数字治理的稳定性。进一步而言，可围绕桥梁走廊、旅游旺区、学校片区和大型活动片区建立主题化数据专题库，使后续算法训练、政策评估与事件复盘都建立在统一数据口径之上。

（二）升级算法中枢，形成需求响应型信号控制与公交调度体系

澳门道路资源高度有限，任何通行效率提升都必须建立在精细调度之上。因此，优化重点应从“静态配时”和“经验派班”转向“需求响应型控制”。在路口层面，可逐步引入基于实时流量、路段占有率、行人过街需求和周边活动热度的自适应信号控制机制；在走廊层面，可对主要拥堵走廊及通往三座跨海大桥的关键通道建立分时段、分事件的协同配时方案；在节点层面，则应强化桥头匝道、旅游热点、轻轨接驳点、学校周边与大型场馆周边的联动控制。对澳门而言，算法升级不是追求抽象的“更智能”，而是让有限的道路资源在不同时间、不同区域和不同场景中实现更精确的弹性配置。

在公共交通方面，应推动公交调度从“固定班次主导”向“基础班次+弹性加密”演进。依托历史客流与实时定位数据，可建立工作日、周末、节假日、会展活动期及大型赛事期等多场景预测模型，对高峰线路提前加密班次，对高拥堵路段设置临时疏运预案，并在必要时与出租、步行、轻轨接驳形成组合式供给。对于澳门半岛与氹仔之间的高频往返线路，还可探索“桥梁走廊优先保障—节点动态疏导—末端接驳补位”的三级调度逻辑，以降低旅程中的等待成本与换乘不确定性。

更重要的是，算法必须接受治理评价。应将平均旅行时间、公交准点率、桥梁通行稳定性、热点节点疏散效率、游客换乘清晰度、碳排约束、老龄友好性与系统可解释性共同纳入模型评估，而不是仅以“车速提升”作为唯一标准^[9,16]。这有助于避免算法优化在技术

上有效、在公共价值上失衡。对于涉及大规模配时调整和优先级分配的模型，尤其应建立“试点—校验—复盘—扩展”的审慎迭代机制。

（三）以本岛—氹仔一体化为主轴，完善桥梁走廊与关键节点的数字联动

澳门数字化交通的独特性，在于其治理重点并不在空间扩张，而在于如何在有限行政空间内提升澳门半岛与氹仔之间的运行协同。居民通勤、游客往返、机场接驳、会展出行、学校通学和休闲消费，共同构成了本岛与氹仔之间高频而多类型的流动网络。基于此，建议将“三座跨海大桥—桥头匝道—综合枢纽—旅游热点”视为同一条连续治理链，率先推动三类机制建设：一是桥梁客流预判机制，通过整合历史流量、实时车速、活动排期和天气信息形成联合预警；二是临时事件联处机制，对极端天气、道路施工、事故拥堵和大型活动形成同步通报与替代路线诱导；三是跨区策略联动机制，使澳门半岛与氹仔两端在分流、限停、公交加密和诱导发布上保持节奏一致。

从管理学角度看，岛际协同的难点不只是技术联通，而是治理节奏与责任边界的协调。为此，可探索建立面向桥梁走廊和关键节点的交通联席机制，形成“日常数据共享+重点时段联调+重大活动联合指挥”的分层治理结构。通过制度化协同，可以把原本被动、临时、碎片化的处置，转化为常态化、可预测、可复盘的协同治理。特别是在旅游旺季和活动集中期，应建立统一的预警分级和触发阈值，确保部门间行动在时间上同步、在标准上相容。

在服务侧，应加强面向居民、游客与通勤者的连续性引导。理想状态下，用户从澳门半岛出发前往氹仔，或由氹仔前往澳门半岛，其出行信息都应尽可能保持连贯，包括桥梁通行状态、换乘建议、步行路线、停车余位与公交接续提示。只有当这一岛际出行链条被完整视为“一个旅程”，澳门数字化交通才真正完成从点状服务向链式治理的升级。

（四）构建面向居民、游客与活动场景的 MaaS 服务体系

澳门出行结构的复杂性，决定了数字交通平台不能只提供“信息目录”，而应朝向 MaaS（Mobility as a Service）方向发展，即把多种交通方式、路径方案、时间成本、拥堵风险和换乘建议整合为可执行的出行服务。对于居民，平台应突出通勤稳定性、公交换乘效率和停车成本提示；对于游客，应强化景点间步行—公交—轻轨联动、热门片区拥挤预警、多语言指引和支付友好；对于大型活动场景，则应提供专门的临时路线推荐、分流指令和疏散时间提示。若能进一步叠加用户画像、时间偏好和出行目的的识别，平台服务将从“统一输出信息”升级为“分层供给建议”。

与一般城市不同，澳门的旅游密度高、街区尺度小、步行行为占比较大，因此 MaaS 不能简单复制大城市的“轨道主导”模式，而应形成“步行优先、公交主支撑、轻轨节点化、出租与停车精细化管理”的组合逻辑。平台服务要从“告诉用户有什么”进阶到“告诉用户此刻怎样走更优”，这将显著提升用户对公共交通和慢行系统的使用意愿。对于澳门半岛狭窄街区与氹仔综合旅游片区，还应分别设置差异化界面和推荐逻辑，避免因空间结构差异而导致同一平台出现“建议失真”。

同时，应把无障碍与包容性设计嵌入 MaaS。面向老年人、视障人士、外地游客和语言能力有限者，平台界面、语音播报、路口提示、到站提醒和换乘说明都应强化可达性。数字交通的成熟标志，不是功能越多越好，而是不同人群都能低门槛地获得可执行信息。为增强平台黏性，还可建立用户反馈与偏好学习机制，使投诉、搜索行为和路线放弃行为反过来成为优化服务界面的依据。

（五）以绿色交通和韧性治理塑造长期竞争力

数字化交通不能只面向“更快通行”，还应服务于“更可持续通行”。在澳门这样的高密度旅游城市中，如果缺乏绿色导向，数字化极易沦为单纯提升机动车通行效率的工具，进而挤压步行、公交和低碳出行空间。结合可持续城市与能源转型研究^[9,11,12]，澳门应将绿色交通指标纳入数字化交通绩效框架，包括公共交通分担率、步行友好度、单位客运周转能耗、停车周转效率、游客低碳引导率等。只有将效率目标与碳效目标同时纳入评价，数字交通改革才不会陷入“速度提升而外部成本上升”的单向度逻辑。

在实施路径上，一方面可通过数字平台强化“低碳优先推荐”，即在路径规划中优先展示步行、公交、轻轨等组合方案；另一方面可通过停车诱导、差异化收费提示、热点区域拥堵预警等方式抑制不必要的小汽车出行。对于新能源公共交通、慢行微循环和夜间旅游交通组织，数字平台也可发挥资源调度与行为引导的双重作用。更进一步，可在重点景区、学校片区和活动场馆周边探索数字化的“微循环优先”机制，以小尺度、高频率的接驳组织减轻主路网压力。

此外，澳门还应把韧性治理纳入交通数字化的制度目标。极端天气、重大活动、施工叠加等情境下，交通系统更需要具备快速预警、替代方案生成和多主体联动能力。数字平台只有在非常态情境下仍能保持可用、可信和可指挥，才称得上真正意义上的智慧交通体系。为此，应围绕台风、暴雨、突发事件、活动散场等典型场景建立标准化应急脚本，并把脚本执行效果纳入事后复盘机制。

（六）完善制度、人才与评估机制，形成可持续实施闭环

任何数字化交通改革都不是一次性工程，而是持续迭代的治理过程。为避免“重建设、轻运营，重平台、轻制度”的常见问题，澳门应同步完善制度、人才与评估三项保障机制。首先，在制度上建立统一的项目立项、数据共享、隐私保护、算法审查和绩效复盘规则，使数字交通建设具有明确的责任链和问责链；其次，在人才上推动交通治理、数据科学、公共管理、城市规划与城市服务运营的复合型培养，增强政府与运营主体的持续运营能力；再次，在评估上建立以用户体验和公共价值为导向的动态评价体系，而非仅以系统上线率或设备部署量衡量成效。

特别是在算法治理层面，应设置审慎而可操作的“评估—试点—扩围”机制：对涉及大规模信号调控、动态收费、路线推荐和事件分流的模型，先在重点片区小范围试点，经过公开评估后再逐步扩展，避免技术快速推进带来的治理风险。与此同时，要建立公众反馈通道，使平台使用者的抱怨、建议和行为数据成为模型迭代的重要输入。只有当算法的调整过程具备可解释性、可申诉性与可复核性，数字治理才具备稳健的社会接受度。

从更长周期看，澳门数字化交通的成功并不取决于单一技术领先，而取决于是否建立了制度化学习能力。也就是说，系统能否在每一次节假日、每一次大型活动、每一次极端天气和每一次桥梁高峰后完成复盘，并把经验沉淀为新的规则与模型。这种“以事件促学习、以学习促优化”的治理机制，才是澳门形成长期竞争力的关键。对于城市尺度有限、需求结构复杂的澳门而言，持续学习能力本身就是最重要的治理基础设施之一。

（七）以经验外溢推动澳门—横琴协同增效，形成区域创新增量

在严格限定研究对象为澳门行政区域内部交通优化的前提下，本文仍有必要指出：澳门本岛与氹仔之间数字化治理一旦形成成熟范式，其经验并不应被封闭地停留于本地，而应作为一种“经验证明有效的方法资产”服务于更大范围的区域协同。具体而言，澳门在桥梁走廊精细调度、旅游热点拥堵预警、活动场景运力重配、MaaS多场景服务整合等方面形成的规则、指标和算法逻辑，可在后续阶段为横琴交通治理提供可对接的经验模板。这里的“拓展”并不是简单复制技术系统，而是围绕接口兼容、数据口径衔接、事件分级机制与服务连续性设计，推动两地在实践层面实现更高质量的互联互通。

这一延伸性安排构成本文的重要创新点：不同于直接以跨境交通作为起点的研究路径，本文坚持“先做深本土、再外溢经验”的递进逻辑。其理论意义在于，只有当澳门内部交通秩序通过数字化手段实现稳定、可评估、可复制的优化之后，澳门与横琴之间的协同才具备坚实的治理基础；其实践意义在于，横琴可以借鉴澳门在高密度、小尺度、旅游驱

动条件下所形成的精细治理方法，从而减少重复试错成本，提高区域交通协同的启动效率与实施精度。由此，澳门本土优化与横琴协同并非彼此替代，而是“以内促外、以内带外”的递进关系。

五、结论

本文在借鉴智慧城市、绿色转型与数字治理研究成果的基础上，围绕澳门高密度、旅游型与双核心联动的城市特征，构建了“基础数据—算法中枢—岛际协同—应用场景”的分析框架，并在此基础上系统提出澳门数字化交通的优化路径。研究表明，澳门已经具备一定的数字交通基础，但当前矛盾已从“有没有数字工具”转向“数字工具能否真正嵌入本土治理流程、桥梁走廊组织与用户场景”。因此，澳门交通数字化的核心并不在于泛化的技术扩张，而在于围绕澳门半岛与氹仔之间的高频流动关系，建立更精细、更可持续且更具公共价值导向的治理机制。

因此，澳门数字化交通的优化重点应当从六个方面同步推进：一是以统一标准和分级授权夯实数据底座；二是以自适应信号和需求响应调度强化算法中枢；三是以本岛—氹仔一体化为主轴提升桥梁走廊与关键节点联动；四是以 MaaS 提升居民、游客与活动场景的服务整合；五是以绿色导向、韧性治理和复合型人才构建长期实施保障；六是在本土系统趋于成熟之后，将澳门本岛与氹仔的数字治理经验作为“可转移的方法资产”，有序拓展至横琴交通协同场景，以提升澳门与横琴之间更大范围的出行效率。需要强调的是，横琴协同在本文中并非研究对象的前置设定，而是建立在澳门本土优化完成后的经验外溢与制度创新，这也正构成本文区别于一般区域交通研究的创新点。

就实践价值而言，澳门的经验对于其他高密度旅游城市亦具有参考意义：在空间约束无法快速改变的情况下，交通优化的重点不再是单纯扩大道路供给，而是通过数据治理、算法协同与制度学习提高既有空间的配置效率。进一步看，当澳门半岛与氹仔在本地治理层面形成较为成熟的数字化范式之后，其在桥梁走廊管控、热点节点诱导、活动时段疏运和服务平台整合方面积累的经验，亦可为横琴提供接口兼容、调度逻辑和治理评估上的参考，从而推动澳门与横琴之间形成更高效、更具连续性的交通协同。由此，澳门数字化交通优化的本质，是以本土精细治理为基础，逐步走向区域协同增效。同时，这一路径也说明，交通数字化并非孤立的基础设施升级，而是城市治理精细化、旅游服务品质化与公共政策协同化的综合体现。

【参考文献】

- [1] 澳门特别行政区政府新闻局. 2025 澳门年鉴: 交通[EB/OL].
- [2] 澳门特别行政区交通事务局. 交通事务局官方网站及实时交通资讯服务[EB/OL].
- [3] 澳门特别行政区政府旅游局. Local Transportation / 本地交通指南[EB/OL].
- [4] 交通事务局 DSAT. 澳门出行(Macao Smart Go)应用服务说明[EB/OL].
- [5] 澳门特别行政区政府. 澳门特别行政区第二个五年发展规划(2021-2025)[R].
- [6] 澳门特别行政区政府新闻局. 与阿里巴巴签署智慧城市战略合作框架协议[EB/OL], 2017.
- [7] 澳门特别行政区政府新闻局. 澳门大学举办澳门国际智慧城市技术大会相关报道[EB/OL], 2023-2025.
- [8] 澳门特别行政区政府新闻局. 2023 财政年度施政报告中有关改善交通管理与智慧城市建设内容 [R/OL], 2022.
- [9] Huang Q R, Li Z Z, Wu J, et al. Urbanization, climate change, and energy transition in China: A time-series assessment toward climate-resilient and sustainable cities[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2026, 143: 104356.
- [10] Giffinger R, Fertner C, Kramar H, et al. Smart cities: Ranking of European medium-sized cities[R]. Vienna: Centre of Regional Science, Vienna University of Technology, 2007.
- [11] Papa E, Lauwers D. Smart mobility: Opportunity or threat to innovate places and cities?[C]//Proceedings of the 20th International Conference on Urban Planning and Regional Development in the Information Society. Ghent, 2015.
- [12] Shaheen S, Cohen A. Shared mobility policies for the city of the future[J]. *Transport Policy*, 2019, 74: 103-110.
- [13] World Bank. Digital Development Overview: Data-driven public service delivery[R/OL].
- [14] OECD. Shaping the transition to smart and sustainable mobility[R]. Paris: OECD Publishing.
- [15] UN-Habitat. World Cities Report: Cities and Digitalization[R].
- [16] Li Z, Yu Y, Wang S. Practical evaluation of intelligent algorithms in ESG management of manufacturing enterprises[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 19394. DOI:10.1038/S41598-024-70376-9.
- [17] Zhu J. Smart Economic City: Current Status and Optimisation of Macau's Transport and Environment[C]//ICEMED 2023. Paris: Atlantis Press, 2023: 425-431.
- [18] Lam C T, Ng B, Leong S H. Prediction of bus arrival time using real time online bus locations[C]//2019 IEEE 19th International Conference on Communication Technology. Xi'an: IEEE, 2019: 473-478.
- [19] Kim S K, Wang J. A dataset on public bus transportation during normal and Grand Prix seasons in the Macao area[J]. *Scientific Data*, 2025, 12: 1306. DOI:10.1038/s41597-025-05660-y.
- [20] Leong S H, Lam C T, Ng B K. Bus arrival time prediction for short distance bus stops with real-time online information[C]//2021 IEEE 21st International Conference on Communication Technology. Tianjin: IEEE, 2021: 387-392.
- [21] 澳门大学智慧城市物联网国家重点实验室. 智慧城市技术研究与应用资料[EB/OL].
- [22] 中华人民共和国国务院. 粤港澳大湾区发展规划纲要[R].