文章编号：1003-1421(2026)11-0038-09
引用格式：白丽. 四网融合条件下综合交通枢纽大数据技术研究及应用[J]. 铁道运输与经济，2026，48(11)：38-46.
BAI Li. Research and Application of Big Data Technology in Integrated Rail Transit Hubs under Four-Network Integration[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(11)：38-46.

四网融合条件下综合交通枢纽大数据技术研究及应用

白 丽

(中国铁道科学研究院集团有限公司 电子计算技术研究所，北京 100081)

摘 要：随着“十四五”综合交通规划实施，干线铁路、城际铁路、市域(郊)铁路与城市轨道交通四网融合发展成为构建高效出行网络重点，综合交通枢纽作为四网交汇关键节点，承担跨制式客流转换、多模式交通协同及要素集聚辐射职能，其发展水平直接决定四网融合效能与区域一体化深度。但四网融合实践中，多网协同难、数据共享不畅、服务精准度不足等问题依然突出，多主体运营的复杂性、服务需求的多样性对传统技术模式形成显著挑战。围绕四网融合枢纽的大数据应用需求，系统梳理多网协同场景下的用户对象特征、城市管理诉求、枢纽运营痛点及乘客出行需求，基于多方安全计算、联邦学习等前沿技术，探索大数据技术在枢纽架构设计、运营效率优化、乘客换乘体验提升及应急响应效能增强等场景中的协同应用路径，为四网融合背景下“智慧枢纽”的构建提供理论支撑与技术参考。

关键词：四网融合；综合交通枢纽；多运营主体；多方计算；联邦学习
中图分类号：U293 **文献标识码**：A **DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250926003

Research and Application of Big Data Technology in Integrated Rail Transit Hubs under Four-Network Integration

BAI Li

(Institute of Computing Technologies, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

Abstract: With the implementation of the 14th Five-Year Plan for comprehensive transportation, the integrated development of trunk railways, intercity railways, suburban railways, and urban rail transit has become a key priority in building an efficient transportation network. As critical nodes where the four networks converge, integrated transportation hubs perform functions such as cross-system passenger transfers, multimodal transport coordination, and the aggregation and distribution of resources. Their level of development directly determines the efficiency of four-network integration and the depth of regional integration. However, persistent challenges remain in practice, including difficulties in multi-network coordination, inadequate data sharing, and insufficiently precise services. The complexity of multi-party operations and the diversity of service demands pose significant challenges to traditional technological models. To address the big data application requirements of four-network integrated hubs, this study systematically analyzed the characteristics of user groups,

收稿日期：2025-09-26 **修订日期**：2026-05-20
基金项目：中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题(K2024S007)；中国铁道科学研究院集团有限公司科研项目(2025YJ063)

urban management needs, operational challenges, and passenger travel demands in multi-network coordination scenarios. By leveraging cutting-edge technologies such as secure multi-party computation and federated learning, the study explored collaborative application pathways for big data technologies across various scenarios, including hub architecture design, operational efficiency optimization, passenger transfer experience enhancement, and emergency response capability improvement. This research provides theoretical support and technical guidance for the development of smart hubs in the context of four-network integration.

Keywords: Four-Network Integration; Integrated Rail Transit Hubs; Multiple Operating Entities; Multi-Party Computation; Federated Learning

0　引言

综合交通枢纽是集成干线铁路、城际铁路、市域(郊)铁路、城市轨道交通及公交、社会车辆等多交通方式于一体的核心综合服务节点[1]，呈现多主体运营、管理机制各异的特征，其多运营主体间的协作效率直接决定四网融合的互联互通深度，以及区域一体化与城市群协同发展效能[2]。“十四五”期间，以粤港澳、长三角、京津冀、成渝为代表的综合交通枢纽已在物理空间一体化、运营管理协同化、服务集成化方面取得初步成效[3-4]。大数据技术在枢纽场景中的应用逐步深化，尤其在客流监测与运力疏导、跨制式票务结算等关键环节形成了典型实践案例：北京南站在春运期间，运用大数据技术预测高峰时段客流，动态调整安检通道数量，有效缩短了旅客平均排队时间；上海虹桥枢纽融合视频感知与手机信令数据，依托高速铁路客流精细化预警模型，在节假日常态化大客流时段延时加开地铁、公交线路等，实现大客流高效疏散，显著提升了监测响应效能与调度精度[5-6]；广州交通一卡通“羊城通”App覆盖地铁、城际铁路、公交等多种交通方式，通过大数据清分系统实现不同制式车票的费用结算，为乘客提供了更便捷的出行支付体验。

但实践表明，四网融合的挑战已从基础网络联通转向多网深层协同，具体表现为：多网间缺乏智能化协同机制，数据互通阻滞制约协同效能；同时，多主体运营的复杂性与服务需求的多样性，进一步加剧了传统技术模式的适配难度[7]。目前枢纽大数据建设采用各主体独立部署的运行模式，应用多集中于单点优化，由此导致多方面短板：数据融合深度不足，造成跨网络、跨场景的客流特征全局维度缺失，难以有效支撑深度分析[8-9]；运营主体间因跨域数据共享机制缺失、数据标准与接口协议不兼容，导致运力配置与实时需求动态适配不足、应急协同响应滞后；旅客信息服务分散于多个渠道或显示终端，查询流程繁琐，“一票到底”、安检互认等难以规模化推广，无缝换乘与节点性服务体验难以显著改善。

综上分析，基于不同用户对象的差异化需求，探索引入多方安全计算与联邦学习等前沿技术，通过构建综合交通枢纽大数据技术架构，实现“数据不出域、价值可流通”的多主体数据协同，在技术层面突破跨域隐私计算瓶颈，为综合交通枢纽实现多网融合与数字化深度协同提供可行路径。

1　枢纽大数据需求分析

在四网融合背景下的综合交通枢纽中，运营主体、城市管理部门与旅客是三大核心用户，大数据是连接和支撑三者的关键。旅客作为核心服务对象，注重“便捷、安全、个性化”的出行体验，依赖运营主体提供的多方式交通衔接服务，其选择偏好直接驱动各运营主体动态调配资源。运营主体以“衔接精准、集疏高效、运行安全”为目标，依托旅客到发数据，精准开展跨网运力衔接、换乘流线优化及多方应急联动[10]，缩短旅客进出站时间，提升整体运营效率。城市管理部门作为监管方，以“全局、协同、韧性”为治理目标，通过大交通数据平台实时监测枢纽运行，推动枢纽与智慧交通、智慧城市深度融合，支撑交通态势研判、应急资源调配及城市规划的前瞻性优化。

1.1　运营主体需求

各运营主体之间实现高效跨网协同、顺畅客流转换及快速应急联动，需高度依赖跨域客流、车次等数据，开展联合分析，优化运输组织与接驳资源，强化态势感知能力，保障通行效率、提升事件处置效能。

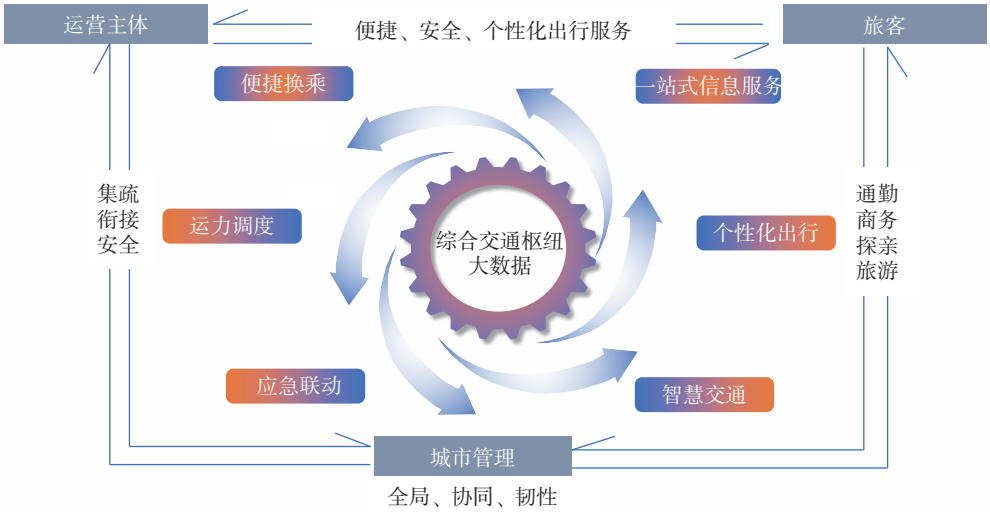


图1　综合交通枢纽大数据需求分析

Fig.1　Analysis of big data requirements for integrated rail transit hubs

（1）跨网运力协同。不同轨道交通的时刻表要实现精准对接，需依据各自的运营特点以及旅客出行规律，制定相互匹配的时刻表。例如，在高速铁路列车集中到达的时段，地铁和市域(郊)铁路应适当增加列车班次、缩短发车间隔，以此确保旅客能够及时疏散。

（2）抵站客流顺畅转换。为实现抵站客流顺畅转换，各方需全面掌握枢纽各区域进出口及设施节点的实时客流，构建跨管辖区域的完整“蓄水池”模型与换乘流线，提前预判易堵点，从全局最优视角优化换乘、安检通道，围栏设置及电扶梯非对称运行等策略，提升旅客集散效率[11-12]。

（3）应急联动。列车晚点、设备故障、极端天气等突发事件易造成枢纽客流积压混乱，需融合多方信息和数据，建立“事件–关联方”映射关系库，完善告警分级推送，同步应急资源数据，构建信息发布联动机制，制定典型场景协作流程，提升协同联动效能。

1.2　城市管理需求

城市管理部门聚焦提升综合交通治理与城市空间优化能力，推动枢纽融入智慧交通与城市体系，实现从物理连接到智慧服务的升级，支撑多模式交通协同调度、节假日及城市大型活动高承载保障。

（1）多模式交通协同调度。为防范枢纽运行异常向城市路网扩散，需融合多源交通数据，实时监测全路网拥堵态势，动态调整公交、地铁、网约车等接驳运力；综合分析枢纽周边道路与停车资源，优化交通组织，实现拥堵节点的精准疏解，保障城市交通网络的整体韧性[13]。

（2）节假日及城市大型活动保障。应对节假日与大型活动期间的多流叠加压力，需基于城市全局视角，统筹轨道与地面交通网络，结合枢纽客流流向、活动周边区域空间特征及往返程交通组织需求，分析来向与返程客流的时空分布特征，制定覆盖全路网与枢纽的协同疏运保障方案，提升城市在高峰场景下的高承载能力。

1.3　旅客需求

旅客出行对多源信息需求核心在于通过一站式、全链条的融合信息支持，实现跨方式出行的精准决策、无缝衔接与个性化服务，从而获得便捷、高效、舒适的出行体验。

（1）综合交通信息需求。旅客需借助融合多源交通数据的信息服务，在出行前与行程中实时掌握运行动态、进站口排队、延误及路况，获取并比选接驳与路径方案，辅助旅客高效规划行程和调整路线。

（2）便捷换乘需求。旅客抵达枢纽后，需获取清晰的站内导乘指引，并能实时查看地铁、出租车、网约车等接驳点位的综合排队状态、预计等待时间及实时距离信息，为离场接驳决策提供即时参考，提高换乘效率。

2　综合交通枢纽大数据架构

2.1　多方安全计算

多方安全计算是通过一系列基于密码学的隐私保护计算范式，允许各参与方将加密后的数据或中间计算结果进行交互，在不泄露各自原始数据的前提下，协同完成对数据的计算和分析，实现参与方“原始数据不出域、计算过程全密态、结果价值可共享”，在政务、金融、医疗、电力、互联网等行业已成熟落地[14-15]。

数字底座正成为驱动四网融合枢纽建设的核心支撑，如重庆东站、苏州北站等枢纽已规划建设独立的云架构大数据平台，通常为枢纽方运营或委托运营。其主要功能聚焦于枢纽及周边的综合交通指挥协同与应急联动，为枢纽的智慧化运营提供核心服务。

综合交通枢纽主要涉及中国国家铁路集团有限公司(以下简称“国铁集团”)、城市轨道交通及枢纽开发管理等企业，各主体均设有严格的数据安全要求，导致数据开放度低。面对多主体协同中的数据孤岛与隐私顾虑，引入多方安全计算是实现数据互联互通的关键技术路径。通过在枢纽大数据平台上构建隐私计算框架，在不转移原始数据的前提下，驱动跨域数据的“可用不可见”式联合计算，同时充分运用本地算力，安全高效地完成跨域数据的联合分析与联邦学习。

2.2　大数据应用架构

基于综合交通枢纽独立的大数据平台，通过嵌入隐私计算能力，构建兼具本地安全性与跨域协同性的新型数据协同范式，以多方安全计算为互联桥梁，实现“物理分散、逻辑统一”的跨域大数据计算架构，综合交通枢纽大数据应用架构如图2所示。

（1）算力基础层。基于异构芯片如FPGA，ASIC等可针对加解密、数据转换等算法实现低延高效计算，加速密态复杂分析与模型训练；可信执行环境(TEE)以硬件隔离防数据代码被恶意访问、泄露或篡改，为高安全应用提供加密、身份认证环境，支持授权开发者编写专属可信应用[16-17]，适配特定场景。

（2）数据平台层。枢纽通用的大数据平台能力，集成近线、即时、实时分布式计算及深度学习算法组件，为序列预测、图像分析、时空特征提取、模型训练与推理等典型任务，提供适配不同规模与延迟需求的计算能力。

（3）多方计算引擎。结合大数据平台部署多方计算框架。构建隐私计算总线，将多方计算域定义、异构数据标准化处理、加密协议配置、跨域任务协同流程等多方共识协议进行封装，集成随机性

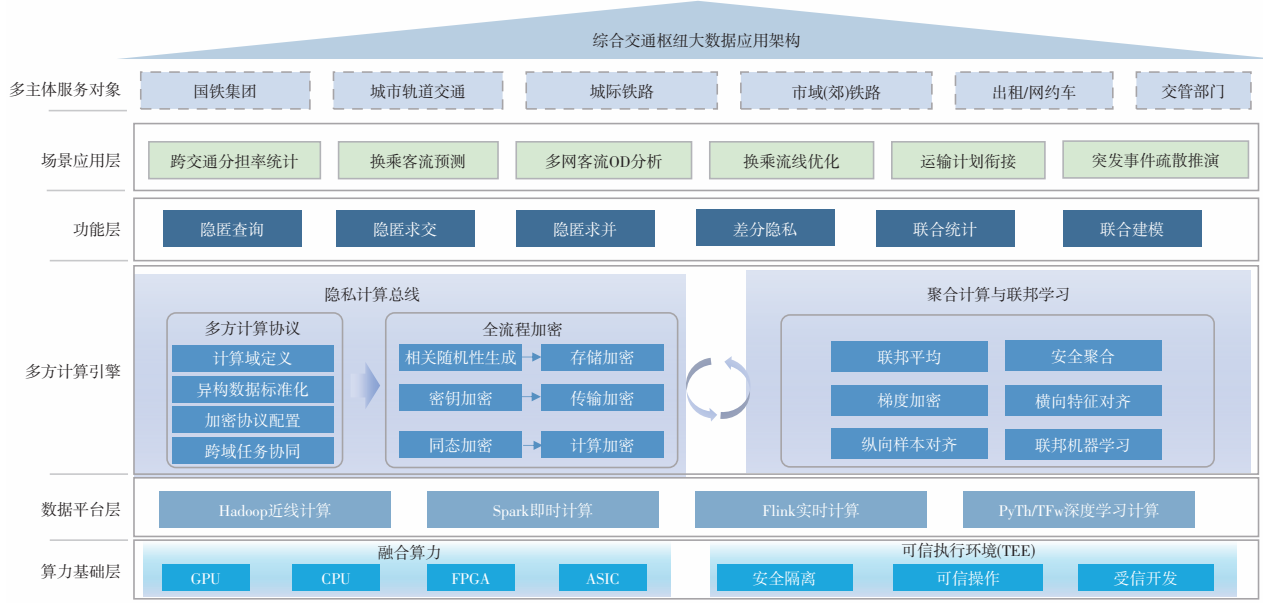


图2　综合交通枢纽大数据应用架构

Fig.2　Big data application architecture for integrated rail transit hubs

生成、加密密钥、同态加密等技术，对参与计算的数据在存储、传输、计算全周期实施加密，支撑多方数据在安全合规前提下实现聚合计算、联邦分析及联合学习。

（4）功能层。基于多方计算引擎，参与方可通过隐匿集合操作、差分隐私、联合统计、联合建模等隐私计算服务，在保障原始数据不泄露的前提下，实现跨主体的数据协作，形成综合交通枢纽跨域融合的数据能力。

（5）场景应用层。通过调用功能层服务，适配跨交通分担率统计、换乘客流预测、多网客流OD分析、换乘流线优化、运输计划衔接和突发事件疏散推演等多方协作场景业务需求，支撑综合交通枢纽精细运营、智能决策和高效协同，此外，经授权可向交管、应急等部门提供隐私查询服务。

2.3　多主体数据协作方式

明确共识是实现枢纽多运营主体数据互联互通的基础，需围绕交互数据的全生命周期，针对多方隐私计算的加密技术、协作流程及协议规范构建跨主体共识机制，并结合具体业务场景商定部署模式、规划网络带宽及算力资源配置。

2.3.1　多方计算部署模式

多方计算主要有中心模式和直连模式。中心模式适用于三方及以上参与的并集计算及联邦学习同态加密场景，需将密文数据汇聚至中心节点完成全量数据聚合计算，常用于多主体及数据规模庞大的大型枢纽，由枢纽部署的中心承担大部分计算。轨道交通综合交通枢纽多方计算部署模式如图3所示。若仅有两方参与，可选择直连模式，不设中心节点，适用于小型枢纽或既有线资源受限的场景。但数据规模和计算范围受限，仅适用于简单交集业务，后期可升级为中心化模式。

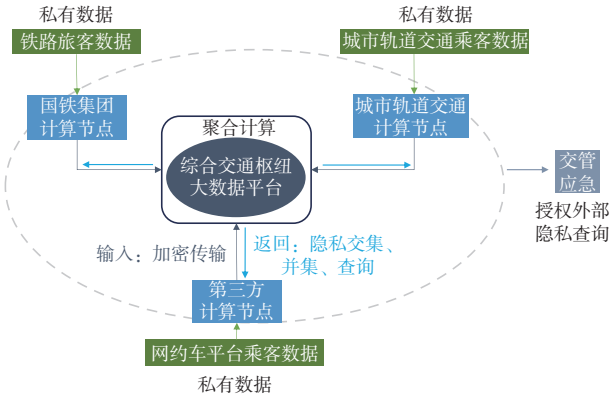


图3　综合交通枢纽多方计算部署模式

Fig.3　Multi-party computation deployment model for integrated rail transit hubs

2.3.2　多方计算协作协议

围绕交互数据全生命周期，通过协议共识、标识统一、加密保护、计算过程共识及结果发布等关键环节，实现多方客流数据的安全、准确求并，兼顾隐私保护与业务需求。

（1）协议共识。参与方达成共识协议，明确元数据与指标范围、数据规模，确定各指标对象采用私有交集、私有并集或联邦计算等方式，并结合数据量评估明确同态计算资源需求及中心化或分布式部署模式。

（2）全局维度标识与生成规则约定。参与方统一全局标识生成规则以保障数据语义一致，跨平台旅客身份通过对手机号脱敏、时空联合编码等进行哈希处理强化隐私保护。

（3）加密机制共识。传输层统一采用加密协议标准保障数据全生命周期隐私，交互中间数据按场景防护，交集计算依托不经意传输扩展协议配合对称加密且仅参与方持钥，如铁路与地铁换乘用户隐私求交，并集计算对多项式系数同态加密后再用接收方公钥加密传输，确保仅授权方可解密。

（4）计算过程共识。计算场景明确后，锁定并集、交集、同态加密、联邦学习及隐私查询四类模式，结合资源开销匹配对应加密协议，并预先约定双向、星形或完全直连等数据流向拓扑与计算指标。

（5）最终结果发布与完整性验证。确定计算结果采用差分隐私噪声添加与数据合成等去标识化形式，实现数学可证的隐私保护，适配高精度聚合结果合规发布或合成集保留统计特征，兼顾隐私合规与结果可用性。

2.3.3　多方算力规划

多方计算本质上是通过对明文数据引入复杂的加密与隐私保护机制，以计算复杂度的大幅提升来换取更高的安全性，其网络带宽与计算资源需求远高于非密计算。因此需依据业务进行切分，在不同需求间做好业务平衡，需重点围绕网络带宽与算力资源2方面进行量化评估与方案制定。

（1）网络带宽估算。以KKRT16(不经意传输扩

展隐私集合求交)协议为例，为提升安全性，需对单条原始数据执行多项式变换扩展，数据量随之线性放大。相关参数约定如下：原始数据条数为n，扩展倍数d=10，扩展后的单方数据总条数$N_{ext}=n\times d$；引入冗余系数δ=1.3，以涵盖加密、封装及校验等额外开销；设定期望传输时长T_{trans}=2 s，峰值系数η=1.8。基于上述参数，N_{ext}取值及单方平均带宽与峰值带宽的计算逻辑如式(1)—(2)所示。

$$B_{avg}=\frac{N_{ext}\times 64\times\delta}{T_{trans}\times 10^{6}} \tag{1}$$

$$B_{max}=B_{avg}\times\eta \tag{2}$$

式中：B_{avg}为单方一次计算的平均带宽，Mbps；B_{max}为峰值带宽，Mbps；64为协议底层单条交互信息长度，bit；10^6为Mbps、bit换算系数。

单方单次计算网络带宽估算示例如表1所示，单方单次传输10万条数据可满足秒级低延迟业务；传输100万条原始数据时，平均带宽需求≤400 Mbps，三方场景需3倍带宽，普通千兆网可支撑数秒延迟；处理1 000万条数据时，平均带宽需4～8 Gbps，需万兆链路或多千兆聚合QoS保障，否则需接受数十秒至分钟级延迟；百万级规模的全量交、并集及同态计算适用于非实时场景，例如预测次日国铁购票乘客使用网约车或地铁接驳的概率。任务编排时需统筹实时与离线计算资源，通过分批次处理、本地轻度汇总等方式减少数据传输量；针对乘客交集等典型场景，宜利用天窗时间执行计算任务，以降低对实时业务的资源争用。

（2）算力资源估算。算力资源的合理评估需统筹考虑内存与CPU两大关键性能资源，并依据参与方数量与计算模式的差异，如三方并行或串行计算，综合纳入加密膨胀、并行损耗及交互冗余等多重约束条件。

其中内存估算中参数约定如下，M_{inst}为每实例占用内存，单条数据大小为考虑原始数据加密膨胀的经验值，γ为三方内存系数，反映内存使用在加密后的额外开销，$2\times N_{ext}$为三方模式下中心方A需与B，C各做一次两方串行计算的原始数量，内存计算参考逻辑如下。

$$M_{total}=M_{inst}\times 2\times N_{ext}\times\gamma \tag{3}$$

CPU估算中α为并行损耗系数，涵盖线程调度、协议状态维护、缓存命中率损失等引入的额外开销；β为三方复杂度系数，反映加密计算耗时的额外开销；T_{comp}为期望计算时长。CPU核数简易推算逻辑为计算量除以单方计算时长，单方计算公式如下。

$$T_{sum}=\alpha\times k\times 2\times N_{ext}\times\beta \tag{4}$$

$$\text{建议CPU核数}=\frac{T_{comp}}{T_{sum}}\times\text{基准核数} \tag{5}$$

式中：T_{sum}为单方单次同态计算时长。

算力资源估算示例如表2所示，以两方求交集为基准，β=1，γ=1，量化了不同模式的算力需求：三方串行受依赖延迟影响，系数较高，β=5，γ=4；星形三方同态加密则因密文体积与元数据开销，呈现中高CPU、极高内存特征，β=3，γ=8。在资源配置层面，通常中心方资源约为单方4倍，两方与三

表1　单方单次计算网络带宽估算示例

Tab.1　Example of network bandwidth estimation for single-party one-time computation

集合规模/万条	扩展倍数	单方大小/万条	单方数据量/Mbit	单方有效数据量/Mbit	平均带宽/Mbps	峰值带宽/Mbps
10	10	100	64	83.2	41.6	74.9
100	10	1 000	640	832	416	748.8
1 000	10	10 000	6 400	8 320	4 160	7 488

表2　算力资源估算示例

Tab.2　Example of computing resource estimation

计算场景	数据规模/万条	单条膨胀系数/字节	运算方式	单方内存占用/GB	单方CPU耗时/s	建议硬件配置	三方复杂度系数	三方内存系数
两方求交集	100 (原始数据)	1 024	哈希运算	1	10~30	各方8核CPU，16GB内存	1	1
三方串行计算	50 (原始数据)	2 028	序列化 代数运算	2~4	120~300	各方16核CPU，32 GB内存	5	4
星形三方同态加密并行计算	100 (加密后数据)	5 102	密文运算	4~8	60~180	中心方32核CPU，64 GB内存； 其余方16核CPU，32 GB内存	3	8

方并集算力需求呈2倍关系。针对客流统计等百万级数据且低延迟场景，可采用无中心三方模式；针对大型枢纽等复杂联邦学习场景，因同态加密高膨胀及运算复杂，建议采用星形架构设立独立中心方部署，并与并集计算错时运行。

上述估算针对客流统计场景，拓展业务场景时需综合任务频次、复杂度及数据规模叠加测算。海量复杂场景建议CPU与GPU混合部署以提升算力；带宽与算力规划受算法、协议及数据膨胀显著影响，需全面权衡。实际落地应参考官方经验值，结合单任务实测校准，平衡业务需求、规模、成本与时效。

3　枢纽大数据典型应用场景

大型综合交通枢纽通常由铁路、城市轨道交通与枢纽方三大主体构成。铁路到发客流是地铁编计划、调运力的关键依据，枢纽方关注网约车、出租车及社会车辆等接驳资源的周转效率与组织秩序，精准识别与研判客流态势是三方高效协同的共同诉求。全域客流动态与换乘客流预测是普遍关注场景，多方计算的典型实现如下。

3.1　枢纽全域客流分担率统计

从枢纽角度计算本地总客流和3种交通方式的分担率，数据包括铁路出站人数、地铁进出站人数、出租车/网约车上下客人数，枢纽管理方最终获得总客流、铁路出站占比、地铁进站占比、地铁出站占比、出租车上客占比、出租车下客占比。

枢纽全域客流分担率计算过程与数据流向如图4所示，各参与方首先在本地按5 min固定时间片统计枢纽内的各类别客流数，包括铁路闸机出站人数、地铁进站/出站人数、出租车上客/下客人数，并记录对应的时间片与位置信息；随后使用同态加密将各统计值加密后上传，通过安全多方计算在密文状态下完成总客流的安全聚合及各方式占比的近似计算；最终仅由枢纽管理方对结果解密，并在需要时可选择性加入差分隐私扰动后对外公开，从而在保障数据隐私的前提下，实现枢纽本地细分客流分担率的统计，用于观察高峰时段客流流向和流速。

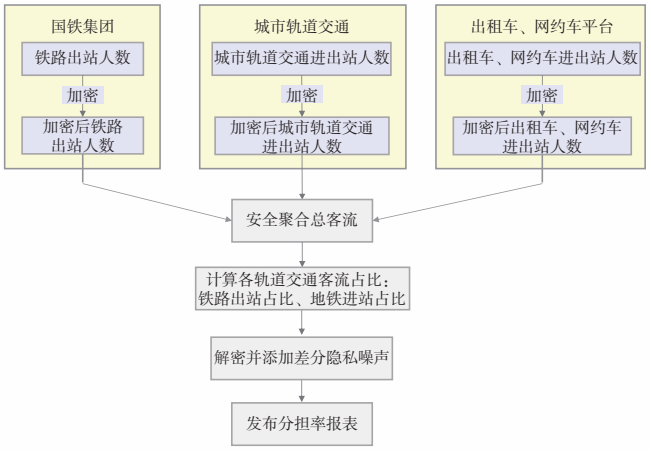


图4　枢纽全域客流分担率计算过程与数据流向

Fig.4　Calculation process and data flow of hub-wide passenger flow split ratio

3.2　个体换乘概率预测

传统地铁客流预测局限于自身历史数据，难以精准预估枢纽换乘客流，且缺乏铁路出站人数等关键特征。隐私交集计算可在保障数据安全的前提下融合多方全样本数据，基于个体换乘概率建模，显著提升预测精准性，兼顾实时性与全面性。基于个体换乘概率的客流预测计算过程如图5所示，由城市轨道交通与国铁集团两方计算节点通过隐私集合交集加密技术匹配潜在换乘旅客，在不交换原始数据的前提下，依托乘客历史出行特征训练换乘偏好模型；预测时支持双模式切换：实时场景采用“平均概率×人数”快速估算，应急或调度场景则融合天气、晚点等动态特征进行二次训练与个体概率重算，既保障了乘客隐私与数据安全，又兼顾了实时响应速度与预测精度。

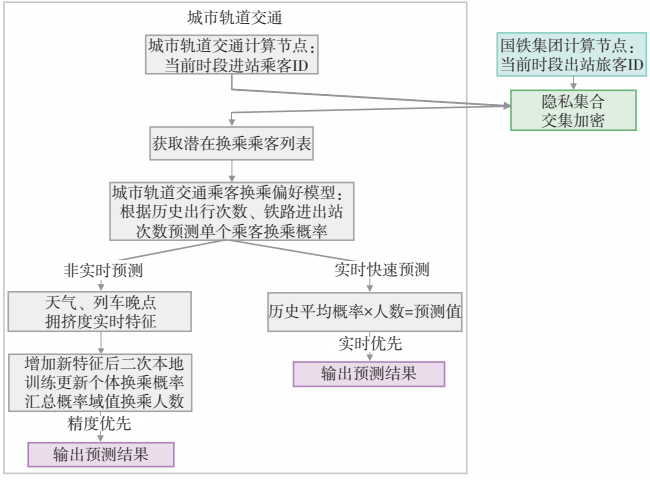


图5　基于个体换乘概率的客流预测计算过程

Fig.5　Calculation process of passenger flow prediction based on individual transfer probability

3.3　联邦学习客流预测

联邦学习不仅能洞察个体行为，更能进一步在保护特征隐私的前提下，融合铁路、地铁及网约车多方异构时序特征，基于联合隐藏状态深度建模，在提升宏观预测精准性的同时，基于同一算法框架确保了跨主体计算口径的一致性。联邦学习客流预测如图6所示，在纵向联邦学习中，各方特征不同，但在时间片或乘客维度上样本空间有交集，铁路掌握“出站人数、车次、晚点”，地铁拥有“进站人数、客流密度”，网约车和出租车具备“上下客人数”；预测时，各方先按统一时间片对齐特征，本地长短记忆网络(LSTM)提取时序隐藏状态并加密上传；中心方在密文状态下聚合生成联合隐藏状态，经标签方解密后预测换乘与接驳客流。训练过程通过多轮安全梯度聚合更新模型参数，最终输出未来时段预测结果。

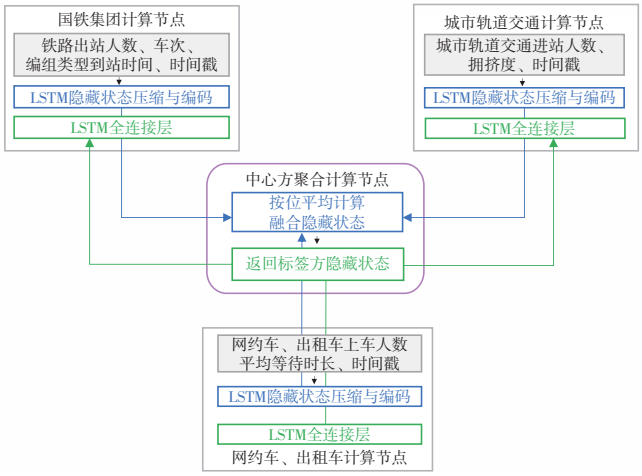


图6　联邦学习客流预测

Fig.6　Passenger flow prediction based on federated learning

4　结束语

四网融合枢纽多运营主体跨域数据流通是实现枢纽深度运营融合的关键。基于多方安全计算与联邦学习技术构建的安全可信数据协同大数据架构，能在不泄露原始数据的情况下，充分利用本地算力实现跨域数据的分布式建模与联合分析，从技术上达成全链路隐私保护，为四网融合深化提供了可操作的技术验证。研究通过结合项目数据开展针对客流的交集和联邦学习场景验证测试，已初步证实其可行有效，但在工程化实现、管理工具、交互界面等方面还有待优化，对于非开源硬件加速方案还需进一步研究。

参考文献：

[1] 陈　旭．面向四网融合的大型铁路枢纽规划重点问题探讨[J]. 铁道运输与经济，2024，46(4)：68-74.
CHEN Xu. Discussion on Key Issues of Large-Scale Railway Hub Planning for Four Networks Integration[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(4)：68-74.

[2] 刘　涛．都市圈轨道交通互联互通发展实践的思考[J]. 交通与运输，2021，37(S1)：112-116.
LIU Tao. Practice and Consideration on the Development of Rail Transit Interconnection in Metropolitan Areas[J]. Traffic & Transportation，2021，37(S1)：112-116.

[3] 冉　杰．粤港澳大湾区轨道交通票务清分系统互联互通及一体化方案探索[J]. 铁道经济研究，2024 (4)：55-64.
RAN Jie. Interoperability and Integration of Railway Ticket Clearing System of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Railway Economics Research，2024 (4)：55-64.

[4] 豆甜甜，梁嘉文，汪健雄，等．京津冀地区城际铁路与城市轨道交通票务互联互通方案研究[J]. 现代城市轨道交通，2024 (2)：99-105.

[5] 陆海亭，付保明，金立艳，等．沪苏城市轨道交通票务互联互通研究[J]. 现代城市轨道交通，2024 (5)：117-122.
LU Haiting，FU Baoming，JIN Liyan，et al. Research on the Interoperability of Ticketing between Urban Rail Transits in Shanghai and Suzhou[J]. Modern Urban Transit，2024 (5)：117-122.

[6] 余　攀，宋唯维，陈友文．“四网融合”条件下市域(郊)铁路互联互通模式及技术要求探讨[J]. 综合运输，2022，44(6)：44-48.
YU Pan，SONG Weiwei，CHEN Youwen. Modes and Technical Requirements of Suburban Railway Interconnection under the Urban-Regional Rails Network Convergence[J]. China Transportation Review，2022，44(6)：44-48.

[7] 王晓蕾，王洪业．铁路客运大数据智能化应用[J]. 铁路计算机应用，2024，33(8)：83-86.
WANG Xiaolei，WANG Hongye. Intelligent Application of Big Data in Railway Passenger Transportation[J]. Railway Computer Application，2024，33(8)：83-86.

[8] 戴　平，冯敬然，黄乃斌．铁路客站综合交通枢纽信息系

统建设方案研究[J]. 铁道经济研究，2022(S1)：210-213.
DAI Ping，FENG Jingran，HUANG Naibin. Research on Scheme of Railway Station of Integrated Transportation Hub Information System[J]. Railway Economics Research，2022(S1)：210-213.

[9] 陈金霖，唐　堂，李晓伟，等. 基于仿真的市域(郊)铁路与高铁综合枢纽客流换乘衔接优化研究[J]. 现代城市轨道交通，2024(6)：103-109.
CHEN Jinlin，TANG Tang，LI Xiaowei，et al. Research on Optimization of Passenger Flow Transfer and Connection between Urban Region(Suburban) Railway and High Speed Railway Integrated Hubs Based on Simulation[J]. Modern Urban Transit，2024(6)：103-109.

[10] 肖　瑶，谭宇燕. 基于旅客多维异质性的高速铁路客流分配方法研究[J]. 铁道运输与经济，2025，47(7)：74-85.
XIAO Yao，TAN Yuyan. Passenger Flow Assignment Method of High Speed Railway Based on Passengers' Multidimensional Heterogeneity[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(7)：74-85.

[11] 陈　旭. 高铁车站最高聚集人数的综合计算法研究[J]. 铁道运输与经济，2025，47(7)：159-168.
CHEN Xu. Comprehensive Calculation Method for Maximum Number of People Gathered at High Speed Railway Stations[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(7)：159-168.

[12] 杨小林，张　晋，庄金翠，等. 基于图像分析的客运站客流分析及异常报警系统的设计与实现[J]. 铁路计算机应用，2025，34(2)：17-22.
YANG Xiaolin，ZHANG Jin，ZHUANG Jincui，et al. Passenger Flow Analysis and Abnormal Alarm System for Passenger Stationbased on Image Analysis[J]. Railway Computer Application，2025，34(2)：17-22.

[13] 陈　琨，王国赛，李　艺，等. 多方计算在个人征信领域中的应用[J]. 征信，2021，39(5)：21-27.
CHEN Kun，WANG Guosai，LI Yi，et al. On the Application of Multi-Party Computation in the Field of Personal Credit Reporting[J]. Credit Reference，2021，39(5)：21-27.

[14] 郭庆来，田年丰，孙宏斌. 支撑能源互联网协同优化的隐私计算关键技术[J]. 电力系统自动化，2023，47(8)：2-14.
GUO Qinglai，TIAN Nianfeng，SUN Hongbin. Key Technologies of Privacy Computation Supporting Collaborative Optimization of Energy Internet[J]. Automation of Electric Power Systems，2023，47(8)：2-14.

[15] 徐思哲，宋子贤，王亚军，等. 基于用户画像的高铁急送市场需求特征与发展策略研究[J]. 铁路物流，2026，44(3)：13-20.
XU Sizhe，SONG Zixian，WANG Yajun，et al. Research on Market Demand Characteristics and Development Strategies of Instant Delivery by High Speed Railways Based on User Profiles[J]. Railway Logistics，2026，44(3)：13-20.

[16] 李瑞辰，尚麟宇，刘逸明，等. 技术站列车进路占用时段智能预测方法研究[J]. 铁路物流，2025，43(9)：46-51.
LI Ruichen，SHANG Linyu，LIU Yiming，et al. Intelligent Prediction Method for Train Route Occupation Period in Technical Stations[J]. Railway Logistics，2025，43(9)：46-51.

[17] 徐亚琼，苗　凡，王智为. 铁路客运数据安全流通关键技术研究[J]. 铁路计算机应用，2025，34(8)：12-17.
XU Yaqiong，MIAO Fan，WANG Zhiwei. Key Technologies for Secure Circulation of Railway Passenger Transport Data[J]. Railway Computer Application，2025，34(8)：12-17.

(责任编辑　刘宁馨)