DOI:10.20033/j.1003-7241.(2025)10-0148-06

城市轨道交通自动化机械设备控制与路径规划

林　静[1]，郑徽醒[1]，管伟新[2]
（1.温州市铁路与轨道交通投资集团有限公司运营分公司，浙江 温州 325000；
2.浙江众合科技股份有限公司，浙江 杭州 310051）

摘　要：为实现城市轨道交通自动化，通过定义所有城市轨道交通路段集合，考虑边际成本偏好与理性行为调整规则，调整前后路径的流量变化值。为解决交通自动化机械设备线路容载越限程度问题，利用模糊均值聚类算法对机械设备的预估故障严重程度进行排序，不断优化隶属度函数，计算隶属度值以对样本数据进行分类。发现 2023 年的城市轨道交通耦合度 C 值达到 0.991，协调指数 T 值为 0.516，城市轨道交通流量最大值为 9.8，路段通行时间更长高达 96.12 min。轨道交通自动化技术具有良好协调性特征，提高机械设备控制水平，从而推动中国城市轨道交通行业的发展。用模糊均值聚类技术能够使城市轨道交通信息化得到提升，为大众在选择出行方式时增加一个选项。

关键词：城市轨道交通；自动化机械设备；边际成本偏好；容载越限程度；模糊均值聚类
中图分类号：TP273　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1003-7241(2025)10-0148-06

Mechanical equipment control and path planning for urban rail transit automation

LIN Jing[1], ZHENG Jingxing[1], GUAN Weixin[2]
(1. Wenzhou Mass Transit Railway Investment Group Co., Ltd., Operation Branch, Wenzhou 325000, China;
2. UNITTEC Co., Ltd., Hangzhou 310051, China)

Abstract: In this paper, in order to realize urban rail transit automation, the flow change value of the path before and after adjustment is adjusted by defining the set of all urban rail transit sections and considering the marginal cost preference and rational behavior adjustment rule. In order to solve the problem of line capacity overrun degree of transportation automation mechanical equipment, the fuzzy mean clustering algorithm is used to rank the predicted failure severity of mechanical equipment, the affiliation function is continuously optimized, and the affiliation value is calculated in order to classify the sample data. It is found that the coupling degree C value of urban rail transportation in 2023 reaches 0.991, the coordination index T value is 0.516, the maximum value of urban rail traffic flow is 9.8, and the longer passage time of the section is up to 96.12 minutes. The rail transit automation technology has good coordination characteristics and improves the control level of mechanical equipment, thus promoting the development of China's urban rail transit industry. The use of fuzzy mean clustering technology can improve the informatization of urban rail transit and add an option for the public to choose their mode of transportation.

Keywords: urban rail transit; automatic machinery and equipment; marginal cost preference; capacity overrun degree; fuzzy mean clustering

0　引言

随着城市轨道交通自动化设备控制种类逐渐变化，中国的轨道交通工程自动化智能技术水平在逐渐提升，分析自动化技术的优势，并对城市轨道交通自动化控制系统进行改进并加以创新[1]。机械设备中要对轨道交通自动化系统进行优化，保证机械设备各项安全指标能够符合城市轨道机械控制管理的具体要求[2-3]。提高交通自动化机械设备的综合管理控制水平，对轨道交通机械运行中产生的故障进行全面检测，提升自动化机械设备综合控制管理效率，不断提升城市轨道交通自动化机械设备的安全控制管理能力[4]。

通过对机械设备进行全面的分析和管理，提高安全设备的综合控制和管理水平。刘春霞等[5]表明当前城市轨道交通智能运维方法，通过人工操作无法实现各个运维操作环节的有序衔接，提出应用自动化技术的城市轨道交通智能运维方法。沈里洋[6]指出越来越多的创新技术应用到交通领域之中，城市轨道交通也作为当前城市基础建设过程中最重要的部分之一，适当地采用自动化技术也能够进一步加快当前现代城市的建设进程。赖军等[7]在保证城市轨道交通运营情况正常的前提下，做好机械设备控制工作，达到路径规划有序并且有计划执行。熊龙鹏[8]结合相应的交通运行设备实施针对性的监管，促进城市轨道运行得到全方位的发展。徐英哲[9]研究城市轨道交通是城市交通网的重要组成部分，以实现对轨道交通牵引供电系统的有效监督和管控，维护城市轨道交通的安全稳定运行。常博[10]研究中城市轨道交通对路径规划有着提前预

*基金项目：浙江省交通科技项目(202222)
收稿日期：2024-02-19

知功能，并且安全高效满足人们出行需求，所以大众选择城市轨道交通方式逐渐增多。黄浩勇[11]指出城市轨道交通的自动化运行已经为城市当下交通运行的主力军，通过从机械设备控制情况研究，全方位分析城市轨道交通故障原因。以上文献中，机械设计自动化设备安全控制并未按照国家相关标准积极开展工作，无法通过模式优化达到自动化系统设计安全控制的目标。

本文以自动化机械设备控制为基础，设计一种城市轨道交通自动化模型。通过采集和利用大量设备状态监测数据，基于模糊均值聚类算法和工作流引擎，全面监控关键设备健康状态。考虑路径叠加的边际成本，采用模糊均值聚类算法对轨道交通路网中的车站进行聚类分析，通过目标函数计算各类的欧氏距离总和，判断设备的工作是否偏离正常的工作参数。分别对交通自动化设备控制和路径规划进行分析，表明城市轨道交通可以通过服务质量提高大众满意度，有助于城市轨道交通系统的扩展和优化，满足城市发展需求支持绿色出行，促进城市可持续发展。

1 交通自动化机械设备控制与路径设计

1.1 城市轨道交通自动化模型构建

本文着眼于城轨设备综合运维管理，基于故障预测与健康管理理念，提出城轨设备智能运维系统的总体架构和功能框架，探讨亟需深入研究的关键技术[12-13]。通过收集城市轨道交通的相关数据，对收集的数据进行清洗、格式化和归一化。根据实际需求，明确模型要解决的问题，选择模糊均值聚类算法调整模型参数，以获得更好的性能。图 1 为城市轨道交通自动化模型，通过多方位协作达到高效高质量的轨道交通运行，以利于制定综合维修计划和实现多专业作业协同。实现列车间的安全距离自动控制，通过对设备的实时监控，及时发现潜在隐患降低故障率。提供实时客流信息方便乘客规划出行路线，提高列车准点率提升乘客出行体验。

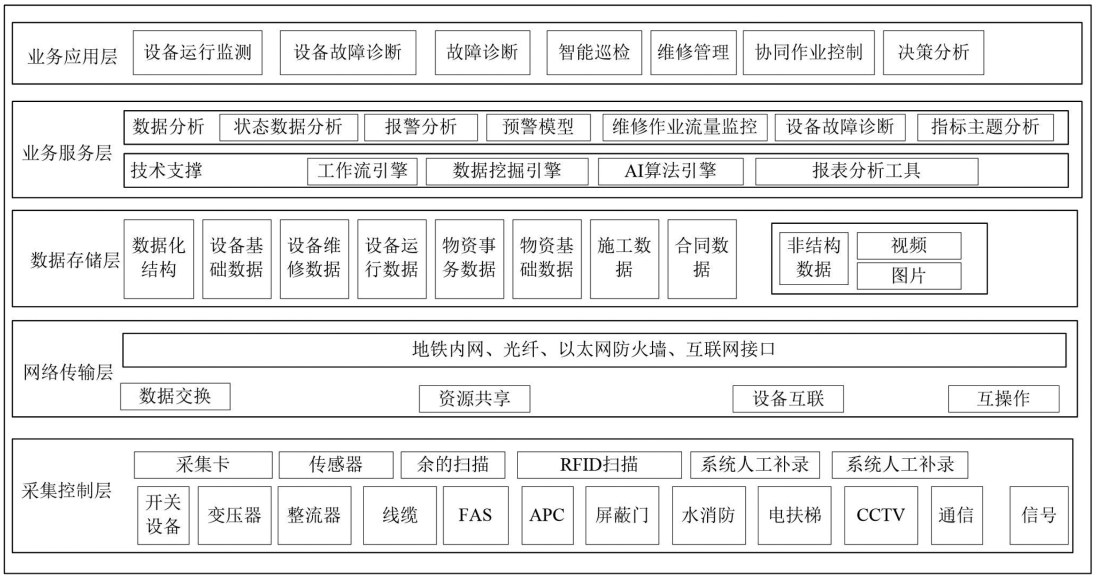


图 1 城市轨道交通自动化模型

城市轨道交通实现设备运行状态数据自动采集以及系统与底层设备间信息交换，网络传输层为设备智能运维管理系统运行提供高速可靠的传输通道，利用泛在感知定位、标识技术，实现数据交换资源共享和设备互联。数据存储层汇聚多源异构数据，提供关系型数据库与分布式文件系统混合数据存储，实现设备基础数据结构化数据的集中存储管理。通过实现城市轨道交通自动化机械设备控制协同协作，侧方面提升机械设备效率情况，以模糊均值聚类算法为基础来助力轨道交通路径规划情况。城市轨道交通自动化机械设备控制与路径规划的意义在于提高运输效率、降低运营成本、确保安全性和提升乘客体验。自动化设备控制可以实现精确的列车运行调度，优化资源分配提高载客量。路径规划则有助于优化列车行驶路线，减少拥堵降低能耗，从而提高整体运营效益。同时，这一切都有助于中国城市交通事业的可持续发展。

1.2 城市轨道交通设备状态模式

1.2.1 交通网络信号表达

对于城市的完整轨道交通系统，设立一个包含各个区域的路段的集合，并考虑到边际成本的偏好。边际成本描述的准确度表达为：

$$\Omega = \{f \mid \sum_{p \in K^w} f_p^w = q_w, f_r^w \geqslant 0, r \in K^w, w \in W\} \quad (1)$$

式中，a 代表某一路段的指示，w 则是指所有的交通自动化设备的总和，q_w 描述路段之间的交通需求，K^w 表示路段之间有效路径的总和，f_r^w 描述路段之间的交通流量，而向量 f 则是路径流状态模式。

通过调整前后路径的流量变化值对当前旅行时间进行研究，计算边际成本对路径流量的影响，边际成本偏好的影响为

$$\dot{f}_r^{wt} = \sum_{p \in K^w} (f_p^{wt} \cdot \rho_{\rho r}^{wt} - f_r^{wt} \cdot \rho_{rp}^{wt}) \tag{2}$$

$$\rho_{rp}^{wt} = \kappa_{rp}^{wt} \cdot [C_r^{wt} - C_p^{wt}]_+ = \frac{s_0^w}{s_1^w \cdot NetMC_{pp}^{wt} + 1} \cdot [C_r^{wt} - C_p^{wat}] \tag{3}$$

式中，f_r^{wt} 为城市轨道交通模型路径的交通流量，$\dot{f}_r^{wt}$ 为对于 f_r^{wt} 时间的导数，ρ_{rp}^{wt} 为流量调整比例，C_r^{wt} 为交通旅行时长，κ_{rp}^{wt} 为网络状态。s_0^w 与 s_1^w 都是非负常数，$NetMC_{rp}^{wt}$ 为反应强度表达式中的参数，在反应强度表达式中被用来表示城市轨道交通路径的边际成本，并且需要考虑到城市轨道交通路径重叠的影响。

如果在定义域 Ω 上，路径旅行时间不为负值，而且具有一个连续的界限，那么式(4)中考虑的边际成本计算方法为

$$NetMC_{rp}^{wt} = \frac{\partial(C_p^{wt} - C_{rp}^{wt})}{\partial f_p^{wt}} \forall r, p \in K^w, \ w \in W, t \geqslant 0 \tag{4}$$

式中，C_{rp}^{wt} 为在 t 时刻不同城市轨道交通系统的性能，并且比较了新的边际成本计算模型和传统模型之间的重要区别。排除了不同的线路之间的相互作用，最终得到了一个更准确的线路状态信息。路径状态情况表示为

$$v_a^t = \sum_w \sum_i f_r^{wt} \delta_{ar}^w \quad \forall a, t \tag{5}$$

式中，v_a^t 为 t 时刻的交通流量与路段路径之间存在关联，δ_{ar}^w 表明路段 a 与路径 r 之间存在着一定的相互依存关系。实用信号周期为满足交叉口各相位车流在一定实用限值下稳定运行的信号周期时长，实用信号周期计算方式为

$$C_u = t_L + \frac{q_1 C_u}{s_1 x_u} + \frac{q_2 C_u}{s_2 x_u} + \cdots + \frac{q_n C_u}{s_n x_u} \tag{6}$$

式中，$\tilde{n}$ 表示信号相位数，C_u 表示实用周期时长，t_L 为总损失时间，q_i 为相位 i 关键车流流率，S_i 表示相位关键车流饱和流率。

实用信号周期长度与饱和度实用限值有关，其值越大信号周期长度越短，当饱和度实用限值为 1 时，即可得到最小信号周期公式，为

$$C_{\min} = \frac{t_L}{1 - \sum_{i=1}^{n} y_i} = \frac{t_L}{1 - Y} \tag{7}$$

式中，y_i 表示相位的交通流量比，Y 表示各相位交通流量比之和。

基于定数理论提出平均延误时间计算，延误时间由固定延误和随机延误组成，其计算方法为

$$d_i = d_i^f + d_i^r = \frac{C(1 - \lambda_i)}{2(1 - \lambda_i \eta_i)} + \frac{\eta_i^2}{2q_i(1 - \eta_i)} - 0.65 \sqrt[3]{C/q_i} \eta^{5\lambda_i + 2} \tag{8}$$

式中，q_i 为车流的流率，λ_i 为城市轨道交通信号比，η_i 为相位饱和度，d_i 为车流平均延误时间，C 为信号周期时长。

1.2.2 获取设备裕度目标

安全性是机械设备正常运行的关键因素，因此，根据机械设备发生故障时所产生的负荷，确定一个裕度目标函数，以便更好地控制和管理设备的安全性，即

$$\min f_y = \min \frac{Q_{fh}}{\Delta Q_{\min}} \tag{9}$$

式中，$\min f_y$ 为通过调整目标函数获得加精细值，Q_{fh} 为机械设备的电气负荷容量，设备供电路径最小裕度值若为非正数值，以此对目标函数实施惩罚确定最优解。

电压水平对于保证机械设备的电气传输质量和安全至关重要，必须确保机械设备的电压处于一个较高的水平，同时还要设定一个相应的阈值来限制，过程可以用下面的方式来表达为

$$\min f_{dy} = \min \frac{1}{U_{dx} - U_{sx}} \tag{10}$$

式中，U_{sx}、U_{dx} 分别为最高最低电压阈值，$\min f_{dy}$ 为建立的电压目标函数。用来检测和惩罚超过这个阈值的机械设备，从而降低竞争力。根据线路的客流量需求，保证供电系统的稳定性和冗余性，以满足列车停放和维护的需求。

根据城市轨道交通分析，将机械设备的故障情况按照严重程度来划分。其中发电机的输入功率与输出功率之间的关系为

$$\varphi_i = \frac{z_{h_i}}{\sum_{i=1}^{m} z_{h_i}} \Delta \max P_{yg} \tag{11}$$

式中，φ_i 为获取机械设备发电机节点出力的比例系数，h_i 为发电机节点，m 为总数量，z_{h_i} 为预防控制指标向量，$\Delta \max P_{yg}$ 为机械设备的最大有功出力，获取设备最佳有功出力极限。

随着城市轨道交通的发展，采用先进的技术手段来提高机械设备的电气安全性，定期调整模拟控制参数，及其阶跃响应时间，有效地保障系统的稳定性和可靠性。

$$T(s) = (K/G + 1) \cdot \lambda^{-s} \tag{12}$$

式中，$T(s)$ 为控制器的传递函数，K 代表机械设备的电气动力学特性，λ 则是一个反映了延迟的响应速率，G 为设备脉冲数量。

城市轨道机械设备控制通过采集图像对路径进行研究，将模糊均值聚类融合到机械设备控制中。利用机械设备中电气动力学理论知识，减少设备控制的人工掌控时长，增加人工智能的控制程度，从而提高交通自动化机械设备掌控度。图 2 为针对模糊均值聚类算法的城市轨道交通框架，结合电力比例系数保障交通自动化机械设备的稳定性，进而实现城市轨道交通模型系统的校验。

在进行城市轨道交通位置控制时，用调电机通过压力值到达预定值。设定压力值开始进行自动化设备监测压力。通过调整参数，使城市轨道交通模型能够遵循预先设定的时间规律，参数的设置也必须符合这一时间函数。此外，还要按照规定的顺序对设备进行操作，在每一个步骤中都采取不同的措施来实现最佳效果。监控模块不仅负责控制轨道交通的自动化设备，还能实时监测它们的运行

情况。收集各种数据,包括工作状态和时长,并将这些信息进行处理,以确定设备是否超出正常工作范围,从而确保整个城市轨道系统的安全。将数据集中的每个点分配到一个或多个聚类中,根据模糊集理论隶属度表示数据点属于该聚类的程度。针对城市轨道交通框架,模糊均值聚类算法可以用于分析城市轨道交通线路的乘客流量,将繁忙线路与非繁忙线路进行区分。分析城市轨道交通网络的可达性,将区域划分成不同的聚类,评估交通设施布局的合理性,为城市交通规划提供参考。

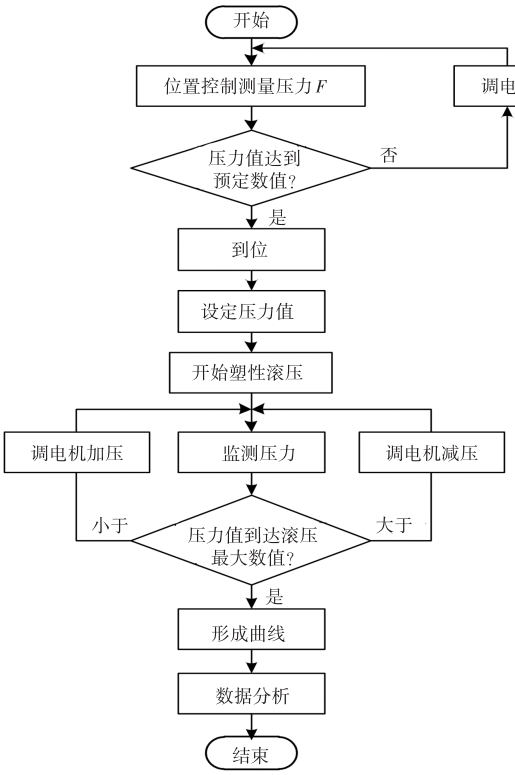


图 2　城市轨道交通计算框架

1.2.3　模糊均值聚类算法轨道交通优化

采用模糊均值聚类算法对轨道交通路网中的车辆进行聚类分析,通过不断优化隶属度函数,计算隶属度值以对样本数据进行分类。模糊均值聚类算法的目标函数可以表示为

$$J_m = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{c} u_{ij}^{m} \| x_i - c_j \|, \quad 1 \leqslant m < \infty \tag{13}$$

式中,m 代表一个聚类的簇,N 则是指第 i 个样本,而 c 则是指该聚类的中心,c_j 代表第 j 类的聚类中心,而且还可以通过 u_{ij} 欧几里得范数来衡量样本与其中心之间的相关性。

根据启发信息计算从城市轨道交通起点到终点距离,判断路径状态:

$$P_{ij}^{k}(t) = \begin{cases} \dfrac{[\tau_{ij}(t)]^{\alpha}[\eta_{ij}(t)]^{\beta}}{\sum_{st}[\tau_{is}(t)]^{\alpha}[\eta_{is}(t)]^{\beta}}, & j \in \text{adjcent}_k \\ 0, & \text{else} \end{cases} \tag{14}$$

式中,$adjcent_k$ 表示机械设备可选择的下一结点的结点集合,$P_{ij}^{k}(t)$ 表示结点 i 与结点 j 路径的信息素浓度,信息素的重要性取决于之间距离,而启发函数则由 α 和 β 来决定。

在硬件设备的支持下,通过确定交通自动化机械设备控制逻辑以及控制程序编写等步骤,对各个独立的个体进行数据的分析,机械设备群集可以量化表示为

$$\begin{cases} x_j = x_i + d_{ij} \cdot \cos(\varphi + \theta_i) \\ y_j = y_i + d_{ij} \cdot \sin(\varphi + \theta_i) \end{cases} \tag{15}$$

式中,x_i 和 y_i 代表自动化机械设备姿态角度,θ_i 为自动化设备路径间隔距离,d_{ij} 表示拉格朗日乘子和输入转矩。

适宜体现城市轨道交通自动化在决策过程中选择概率,设每个决策者都是根据随机选择规则来决定策略,在实际执行策略后如果该策略产生的收益超过决策者的满意值,决策的被选择概率的更新过程可以分为两个阶段,策略的收益传递给他的反馈为:

$$S_a^{\tau} = \frac{u_a - A_i}{\sup | u(k) - A_i |} \tag{16}$$

式中,u_a 是决策者选择策略得到的收益值,A_i 是决策者在进行此决策前内心的满意值,$u(k)$ 表示决策合集中其他可选策略的收益值,每条决策的收益值和决策者满意值差值的最大值。

考虑到学习效应对乘客在轨道交通网络中路径选择行为的影响,通过实际出行行为确定个体的感知出行费用,在实际出行结束后乘客对本次出行做出评价,评价标准为感知出行费用与期望出行费用的大小。

2　城市轨道交通自动化分析

2.1　机械设备耦合调度评价分析

为分析城市轨道交通模型耦合调度情况,使用模糊均值聚类算法对数据进行耦合协调计算,获得自动化机械设备控制与路径的耦合度,耦合协调度计算结果见表 1。

表 1　耦合协调度计算结果

时间	耦合度 C 值	协调指数 T 值	耦合协调度 D 值	协调级别
2018	0.956	0.002	0.036	2
2019	0.997	0.125	0.357	5
2020	0.999	0.203	0.448	5
2021	0.958	0.414	0.629	8
2022	0.972	0.489	0.681	8
2023	0.991	0.516	0.725	9

2018 年~2019 年期间,城市轨道交通自动化模型协调发展度总体上表现出上升趋势,2020 年~2021 年协调发展度增长明显增值达 0.201。2021 年的协调指数 T 值为 0.414,耦合协调度 D 值提升到 0.629,协调等级为 8 级。随着年份的上涨,2023 年的耦合度 C 值达到 0.991,协调指数 T 值为 0.516,对比往年已有很大提高,而耦合协调度和协调等级达到峰值,分别为 0.725 和最高级 9 级。交通自动化是机械设备主要的发展方向,在机械设计领域城市轨道交通自动化机械的应用让生产效率得到提升,为自动化机械提供适当的支持,让自动化机械保持

安全稳定的工作状态，提升城市轨道交通自动化机械设计水平。

为探讨基于传统边际成本定义的路径调整模型与对于网络交通流演化的不同影响，图 3 为轨道交通路径下交通流演化轨迹，对于当前城市轨道交通规模灵敏度分析。依据是模糊均值聚类、MCP 算法和初始交通流模式，数值分析边际成本偏好强度对于城市轨道交通演化过程与结果影响，可使路径调整模型的流量演化轨迹长度更短，丰富现有逐日交通选择行为理论基础。

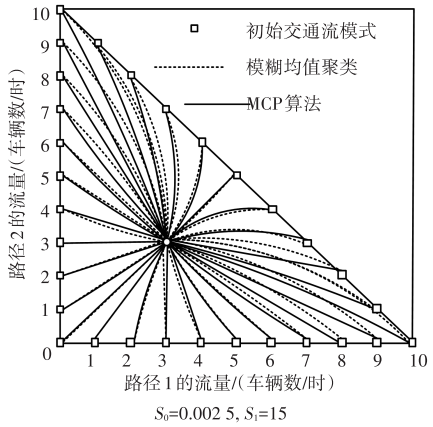


图 3　交通流演化轨迹

基于不同边际成本定义的流量演化轨迹仍存在比较明显的差异，城市轨道交通流量最大值为 9.8，比 MCP 算法高出 52%。对比初始交通流模式，路径在第 3 流量时，模糊均值聚类和 MCP 算法达到同一值，随着路径的增加模糊均值聚类算法的交通流量高出 49%左右。运用城市轨道交通岗路径的选择情况，确保设备在生产中能够稳定运转，从而可为城市轨道路径规划提供有力保障。

2.2　交通流预测情况研究

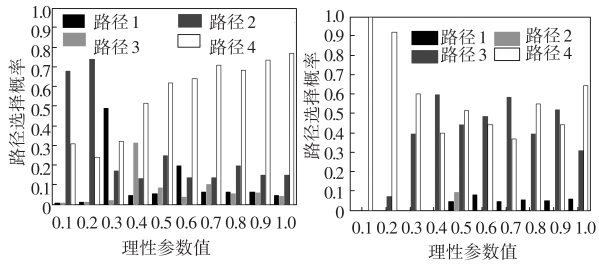
进行模糊均值算法与 MCP 算法的对比实验，保证多层级路网能随动态路网权重矩阵的执行效率，进行不同路网权重矩阵对路径规划影响的对比实验。利用城市轨道的路网权重类型，包括路段距离、路段当前的通行时间、路段的预计通行时间。不同权重下路径规划结果对比见表 2，对城市轨道交通机械设备的全面安全性进行研究。

利用模糊均值聚类算法路径效率确实高于 MCP 算法的，基于模糊聚类算法计算出的路径实际耗时更短，当前路段通行时间更长，高达 96.12 min。在多层级路网上执行原始的路段距离远到 956 m 时，城市轨道路段预计通行时间长达 139 min。从路网的权重邻接矩阵类型来看，采用预估的道路通行时间，相较于 MCP 算法权重，模糊均值聚类能更精准地规划出最优路径。机械设备信息控制管理为机械设备的全面优化创造良好的条件，这为未来城市轨道交通自动化奠定了良好基础。

表 2　不同权重下路径规划结果对比

类型	路段距离/km		当前路段行驶时间/min		道路通行时间/min	
	模糊均值算法	MCP 算法	模糊均值算法	MCP 算法	模糊均值算法	MCP 算法
A	178	140	83.94	57.15	193	135
B	136	131	96.12	41.77	126	105
C	123	109	65.87	32.90	131	112
D	956	712	79.44	36.08	139	124
E	761	608	58.36	29.41	107	96

为分析在调整理性参数后对机械设备控制情况，根据路径选择概率转化，对路径的选择概率控制设置参数。图 4 为路径选择概率与理性程度关系，模糊均值算法机械设备控制和 MCP 算法机械设备控制对路径进行选择，理性参数值制定为 10 个值，对路径选择概率进行研究。



(a) 模糊均值算法　　(b) MCP 算法

图 4　路径选择概率与理性程度

图 4(a)为模糊均值算法机械设备控制与路径选择关系，在理性参数值 0.1 时，对其中一条路径有很高的选择概率，路径 3 的选择概率高达 0.68，路径 4 的选择概率为 0.3。在理性参数值大于 0.3 时，路径 3 的选择概率出现小幅度的波动低至 0.1 左右，但是整体相比理性参数值为 0.2 时呈下降趋势，路径 4 的选择概率随着理性参数的增大而增大，最大值为 0.79，说明首次选择路径的选择概率在经验选择的作用下后期的占比依然较高。

图 4(b)为 MCP 算法机械设备控制与路径选择关系，在理性参数值大于 0.4 时，对路径 4 的选择概率超过 0.5，并且随着理性参数的增大而进一步增大，并且在理性参数值为 0.3 时路径 3 与路径 4 的选择概率处于此消彼长的状态。在理性程度处于较高水平时，对路径的选择会出现一定程度的不稳定性，这是由于过高的学习能力导致最佳路径的选择期望也同时增大，可以达到降低路网流量震荡

并缓解客流压力的效果。通过研究城市轨道交通路径选择规律,分析在轨道交通网络中应对出行环境的不确定性因素,产生的机械设备控制过程并确定对路径的选择概率。

3 结束语

本文以模糊均值聚类算法为基础,确定城市轨道交通自动化机械设备控制逻辑,对各个独立的个体进行数据分析。计算城市轨道交通出行者在路径调整时对于路径时长差的反应强度,并对城市轨道交通设备的差异进行研究。考虑到学习效应对乘客在轨道交通网络中路径选择行为的影响,通过实际出行行为确定个体的感知出行费用,计算出决策收益指数和满意值最大值。城市轨道交通耦合协调度和协调等级达到峰值,分别为 0.725 和最高级 9 级,城市轨道路段预计通行时间长达 139 分钟,模糊均值聚类的流量演化轨迹的直线性高出其他 52%,城市轨道路径选择概率随着理性参数增大到最大值 0.79。运用模糊均值聚类技术能够使城市轨道交通信息化得到提升,为大众在选择出行方式时增加一个选项。

参考文献

[1] 李德宏, 柴娟. 城市轨道交通全自动运行线路自动化场段库线设计方案[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(11): 76-78.

[2] 陈逸, 刘燕. 城市轨道交通既有车辆段自动化改造方案研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(9): 199-202, 222.

[3] 陈鑫鑫. 城市轨道交通行车综合自动化系统信息安全防护方案[J]. 自动化博览, 2022, 39(1): 26-30.

[4] 范建华. 城市轨道交通自动化节能控制系统的研究[J]. 山西电子技术, 2022 (5): 74-76.

[5] 刘春霞,姚成勇,李泽军. PLC 技术在城市轨道交通自动化控制系统中的应用[J]. 中国高新科技, 2023 (7): 109-110, 117.

[6] 沈里洋. 基于自动化技术的城市轨道交通智能运维研究[J]. 自动化应用, 2022 (11): 87-89,93.

[7] 赖军,周心亮. 冗余光纤环网在城市轨道交通电力监控系统中的应用[J]. 自动化技术与应用, 2013, 32(6): 123-126.

[8] 熊龙鹏. 云计算在城市轨道交通自动化系统中的应用研究[J]. 今日自动化, 2021 (9): 104-106.

[9] 徐英哲. 城市轨道交通列车运行控制系统集成技术分析[J]. 中国设备工程, 2022 (19): 227-229.

[10] 常博. 基于通信列车控制的计算机城市轨道交通联锁子系统功能测试研究[J]. 自动化技术与应用, 2020, 39(3): 166-169.

[11] 黄浩勇,柴娟. 城市轨道交通全自动运行的列车控制模式自动升级方案研究[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(11): 97-99,103.

[12] 王春娟. 基于 Hadoop 的列车管理系统设计[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(3): 165-167, 174.

[13] 何倩. 城市轨道交通全自动运行功能需求探讨[J]. 城市轨道交通, 2023 (2): 50-53.

作者简介:林 静(1990—),女,硕士,高级工程师,研究方向:轨道交通通信信号。

(上接第 97 页)

明,2021 年和 2022 年,九高路路面有 9 处监测点的沉降速度超过 20 mm/y,但每年的形变状况存在差异。无人机的飞行高度与测量误差呈非线性关系。通过对路面沉降病害的现场测试,得到的地面沉降与水准观测值之间的误差为 4.38%。本文所建立的方法可在较大范围内实现路面沉陷的快速检测,减少人工野外作业,且检测效率较高,准确度满足监测要求。在无人机搭载激光雷达监测过程中,有许多因素都会对监测效果有很大的影响,后续可以从点云数据获取的角度出发,深入研究无人机搭载激光雷达数据处理精度的影响因素。

参考文献

[1] 张士诚, 魏娜, 杨金凯, 等. 基于无人机遥感影像的边坡位移变形监测技术[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(6): 13-16.

[2] XUE Y, JING Z, KANG S, et al. Combining UAV and landsat data to assess glacier changes on the central tibetan plateau[J]. Journal of Glaciology, 2021, 265(67): 862-874.

[3] 李思杰. 遥感测绘图像特征智能识别技术[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(3): 76-79.

[4] 李淑贞, 徐大伟, 范凯凯, 等. 基于无人机与卫星遥感的草原地上生物量反演研究[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(1): 272-278.

[5] 李建新, 陈厚权, 范文龙. 基于改进 YOLOv5 的遥感图像目标检测研究[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(9): 102-108.

[6] QI J, CHEN H, CHEN F. Extraction of landslide features in UAV remote sensing images based on machine vision and image enhancement technology[J]. Neural computing & applications, 2022, 34(15): 12283-12297.

[7] 芦建刚, 崔博涛, 黄琪, 等. 复杂地形下无人机自动巡航轨迹规划研究[J]. 微型电脑应用, 2023, 39(6): 69-73.

[8] 盛蔚, 卢东辉. 基于云的无人机远程技术支持系统设计与实现[J]. 计算机工程与设计, 2020, 41(6): 1787-1795.

[9] HUI H Y. GPR Monitoring of artificial debonded pavement structures throughout its life cycle during accelerated pavement testing[J]. Remote Sensing, 2021, 139(7): 309-328.

[10] 方磊, 郭斌, 郑永军, 等. 沥青路面施工智能监控技术研究[J]. 中国测试, 2023, 49(2): 15-21.

[11] 薛薇, 张锋, 凡静, 等. 基于边缘检测及 RBF 神经网络的遥感图像帧特征动态识别技术[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(7): 163-168.

[12] WANG X Y, LIU L L, SONG M P. Remote sensing image and multi-type image joint encryption based on NCCS[J]. Nonlinear dynamics, 2023, 111(15): 14537-1563.

作者简介:王赵明(1984—),男,博士,副研究员,研究方向:环境遥感。