

基于免疫神经网络的综合交通枢纽布局优化方法

——以洛阳市城市轨道交通 1 号线为例

钟佩伶, 高 波

(华设设计集团股份有限公司, 南京 210000)

摘要: 为了提高综合交通枢纽布局的科学性, 促进区域经济的建设与交通产业的良性发展, 基于免疫神经网络算法, 研究设计了一种综合交通枢纽布局优化方法。提取综合交通枢纽布局优化的关键因素, 设置约束条件, 应用 BP 神经网络算法, 建立综合交通枢纽布局优化模型, 引入免疫克隆算法, 求得综合交通枢纽布局优化模型的最优解算结果。检测结果显示, 对于随机的 10 组综合交通枢纽规划的历史数据, 该方法得到优化结果的执行时间均值为 0.56 s, 具有实时性与高效性; 布局优化结果误差绝对值的均值为 0.043, 最大误差的绝对值为 0.074, 均控制在实际工程所需误差±0.1 的范围之内, 具有精确性与可行性。

关键词: 免疫神经网络算法; 综合交通枢纽; 布局优化

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)02-0268-05

伴随着社会经济的发展, 交通运输种类与交通运输流量不断增加, 促进了交通运输产业的飞速发展。综合交通枢纽由多种交通运输方式及其相关基础设施共同构成, 其交通运输方式主要包括公路、铁路、水路、航空、管道、地铁等^[1]。这些运输方式支撑着区域经济、产业结构以及人口等方面的协调发展, 对区域的可持续建设具有重大意义。从交通运输方式的多样性可以看出, 一个地区的综合交通枢纽是一个具有多种模式、多种层次的交叉网络结构, 其布局的合理程度与区域未来的发展息息相关^[2]。同时, 通过综合交通枢纽的不断完善与优化, 能够解决区域范围内人流、物流的集散与中转等问题, 提升区域范围内整体的交通可达性, 从时间维度上有效减小区域群体的距离, 加强群体之间的交流与联系, 从长远角度上提升区域空间的集聚效应, 推动区域空间结构的演化速度^[3]。因此, 如何研究出一种可靠、科学的综合交通枢纽布局方法与技术, 成为交通布局产业及其相关部门重点关注的课题。

温永杰和由婷婷^[4]针对综合客运交通枢纽的布局进行规划, 以客源交通枢纽为例, 研究枢纽内外

交通一体化, 设计交通设施布局, 分析各种交通方式换乘与衔接、站区主要交通动线组织等方面, 提出客运综合交通枢纽布局优化对策。段妍等^[5]以嵊州新昌站为例, 针对综合交通枢纽交通接驳设施规模展开研究, 研究高铁站站前广场所含各类接驳设施的交通功能, 预测各类交通接驳方式的需求量, 对交通接驳设施布设标准和规模展开布局规划, 并进行优化调整。但以上两种方法易受到地理位置的影响, 不适合范围使用。

免疫神经网络算法, 是指通过量子搜索策略与免疫克隆, 使原始数据种群与克隆子群实现信息扩张, 增大搜索空间, 提升整体与局部的信息分析能力, 在组合优化问题中, 具有显著的应用效果。基于以上背景, 本文研究了一种基于免疫神经网络的综合交通枢纽布局优化方法, 希望通过有效提高综合交通枢纽布局的科学性与合理性, 提升综合交通枢纽运营的高效性与稳定性, 推动区域未来经济的可持续建设与发展, 保证交通产业结构的经济、社会、环境等多方面的综合效益。

1 提取综合交通枢纽布局优化的关键因素

洛阳市轨道交通 1 号线位于河南省洛阳市, 项

收稿日期: 2023-10-13

基金项目: 河南省发展和改革委员会文件-洛阳市城市轨道交通 1 号线工程设计 LYGD-SJ-03 标段(土建单项设计)豫发改设计[2017]1093 号

作者简介: 钟佩伶(1983—), 女, 广西岑溪人, 高级工程师, 研究方向为轨道交通建筑、交通枢纽以及地下空间开发; 高波(1977—)男, 湖北襄阳人, 高级工程师, 硕士, 研究方向为桥梁。

目投资估算约为 170.58 亿元,1 号线工程自谷水西至文化街站,线路长约 23 km,设站 19 座,串联涧西区、西工区、老城区、瀍河回族区,规划建设期为 2016—2020 年。洛阳市城市轨道交通第一期建设

规划(2016—2020 年)示意图如图 1 所示。

以经济建设为主要布局优化目标,分析洛阳市城市轨道交通 1 号线区域交通枢纽布局,提取综合交通枢纽布局优化的关键因素,如表 1 所示。



图 1 洛阳市城市轨道交通第一期建设规划(2016—2020 年)示意图

表 1 综合交通枢纽布局优化的关键因素

序号	关键因素	具体因素
1	形态结构	区域个数;区域空间分布
2	产业结构	区域第二产业产值
3	人口结构	区域人口数量;人口空间分布;人口密度
4	交通枢纽定位	以区域经济发展为主
5	枢纽整体规划	高铁;出租车;轨道交通;公交车;小汽车;长途大巴;飞机
6	空间规划条件	公路网长度及空间分布;铁路网长度及空间分布;区位线
7	客流量与客流组织	交通分担比;车行人行流线;枢纽节点客流量
8	空间布局条件	枢纽区域个数;枢纽区域空间分布;枢纽区域通道运输需求量;枢纽区域通道运输能力

表 1 所示的每一个综合交通枢纽布局优化的关键因素,均对区域整体的交通布局有着引导、决定性作用,为综合交通枢纽布局的优化,奠定了数据基础^[6]。

2 基于免疫神经网络的优化策略

2.1 设置约束条件

为了得到综合交通枢纽布局的优化策略,需要综合分析规划需求,设置满足规划需求的约束条

件^[7]。设综合交通枢纽布局优化的关键因素为 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 。

综合考虑区域人流、物流运输需求量,建立第一组约束条件,表示为

$$\alpha_{ji} = \frac{\chi \frac{\phi_i \phi_j}{D_{ji}}}{\sum_{i=1}^n \chi \frac{\phi_i \phi_j}{D_{ji}}} ij = \kappa_{ji} \quad (1)$$

式中: α_{ji} 为子区域 j 对子区域 i 的吸引力值; χ 为

相关系数; ϕ_i 、 ϕ_j 分别为子区域的人口数量和子区域的人口密度; κ_{ji} 为子区域 j 到达子区域 i 的运输量; D_{ji} 为子区域 j 到达子区域 i 的距离。为保证区域对综合交通枢纽布局方案的总投资建设金额不超过投资预算金额,建立了下述约束条件,表示为

$$\sum_{b=1}^n \delta_b \leq \beta_b \quad (2)$$

式中: δ_b 为子区域 b 的枢纽布局优化所需的总建设金额; β_b 为子区域的枢纽布局优化的预算金额。在区域的综合交通枢纽布局优化过程中,必须确保子区域数量大于 0,且小于划分子区域总数量,该约束条件表示为

$$0 < S' \leq S \quad (3)$$

式中: S' 为某部分子区域数量; S 为子区域划分总数量。建立约束条件,本文仅列举三组约束条件,其他约束条件均通过综合交通枢纽布局优化的关键因素协同分析来提出,为后续的布局优化工作,提供理论依据。

2.2 建立综合交通枢纽布局的 BPF 神经网络模型

根据综合交通枢纽布局优化的关键因素与约束条件,结合反向传播神经网络(back propagation neural network, BPNN)算法,建立三层径向基函数的综合交通枢纽布局优化模型^[8]。在模型的输入端,输入不同的关键因素,经过隐含层节点与约束条件的综合分析,最终输出综合交通枢纽布局优化结果。选择高斯核函数作为模型隐含模块的作用机制,可以得到综合交通枢纽布局优化模型在隐含模块的目标函数,表达式为

$$z_s = \text{EXP} \left[-\frac{(\zeta A - \omega_s)(\zeta A - \omega_s)^T}{2\mu^2 \mu_s} \right], s = 1, 2, \dots, \eta \quad (4)$$

式中: z_s 为第 s 组隐含节点的输出结果,对应的数值范围在 0 至 1 之间; ζ 为约束条件; A 为综合交通枢纽布局优化的关键因素,即模型的输入值; η 为隐含模块的总节点数量; ω_s 为高斯核函数的中心数值; μ_s 为模型的标准向量; μ_s 为第 s 组模型的标准向量。经过上述隐含模块的分析处理,得到综合交通枢纽布局优化模型的目标函数,表达式为

$$f_r = \sum_{s=1}^{\eta} g_s z_s = g_r z, r = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

式中: f_r 为综合交通枢纽布局优化模型的输出结果; g_s 为隐含模块节点对应的权值。输入不同的信息数据,经过模型进行训练,比较训练结果与期望

结果,调节隐含模块权值,继续训练。检查训练结果的误差值是否满足实际工程需求,最终得到模型的解算结果。

2.3 基于免疫克隆算法的模型最优解算策略

在上述综合交通枢纽布局的 BP 神经网络模型进行初始化运行后,整体的结构不再发生变化,只能通过隐藏节点权值的变化,迭代计算结果。这种运算模式具有复杂性与模糊性,在实际的应用中会增加时间、经济成本^[9]。为了提高综合交通枢纽布局 BP 神经网络模型的运算效率与精确度,引入免疫克隆算法,避免模型的运算陷入局部最佳,提升算法整体与局部的信息分析能力。结合上述分析,选择免疫克隆算法,来求得综合交通枢纽布局模型的最优阶段结果,得到最终的综合交通枢纽布局的优化方案。将上述综合交通枢纽布局优化的 BP 神经网络模型的权值输入到免疫克隆算法中,进行初始化操作,将权值初始化为抗体的量子位状态 $|U\rangle$,表达式为

$$|U\rangle = e|0\rangle + h|1\rangle \quad (6)$$

式中: e 、 h 分别为量子位状态出现概率的两组复数,且 $e^2 + h^2 = 1$ 。根据量子位状态可以得出具有 r 组量子位的抗体,表达式为

$$x_r^c = \begin{bmatrix} e_1^c & e_2^c & \dots & e_r^c \\ h_1^c & h_2^c & \dots & h_r^c \end{bmatrix} \quad (7)$$

将式(7)抗体构建成集合的形式,得到 BP 神经网络权值优化的最优解空间,表示为 $X(c) = \{x_1^c, x_2^c, \dots, x_r^c\}$ 。引用实数编码理论,对抗体集合进行编码,编码规则为

$$g_n = 0.5[\text{rangmax}(1 + e_1^c) + \text{rangmin}(1 + e_1^c)] \quad (8)$$

通过式(8)的编码处理,使抗体的长度与权值数量一致。对集合中的每一个经过编码处理的抗体进行克隆,得到具有高亲和度值的记忆细胞,存储到抗体集合中。经过克隆得到的抗体集合表示为 $\tilde{X}(c) = \{X(c), \varphi(c)\}$ 。其中, $\varphi(c)$ 为在克隆处理过程中产生的抗体子集,该集合的克隆规模表达式为

$$k_r = \left[\rho_r \cdot q(x_r) / \sum_{s=1}^n q(x_s) \right] \quad (9)$$

式中: k_r 为集合中第 r 组抗体对应的克隆规模; ρ_r 为与克隆规模相关的常数向量; $q(*)$ 为集合中第 r 组抗体对应的适应度值;“ \cdot ”表示向上取整函数值。应用量子旋转门定理,对抗体集合进行全局的交叉

与更新,该过程的计算公式为

$$\partial(y) = \begin{bmatrix} \cos y & -\sin y \\ \sin y & \cos y \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: y 为旋转角度。通过克隆规模的循环计算,刺激神经网络的连接权值,检查抗体的适合度是否符合条件,实现自适应的特征匹配,得到最终的综合交通枢纽布局优化方案。

完成规划后,2016年12月,洛阳轨道交通1号线试验段安居路站(现史家湾站)开工建设,截至2021年3月,洛阳轨道交通1号线线路全长为22.97 km,高架线长度为0.9 km、过渡段长度为0.5 km、地下线长度为21.57 km。线路西起谷水站,终点接入杨湾站,沿途主要经过焦济洛城际铁路涧西站、河南科技大学、牡丹广场、周王城广场、市隋唐洛阳城国家遗址公园、市人民医院、青年宫广场、洛阳市长途客运东站等主要客流集散点。共设置19座车站,其中高架站1座、地下站18座,平均站间距为1.30 km,均为地下两层站;与规划线网中的2号线、3号线、4号线各有一座换乘站。线路西端设杨湾车辆段,车辆段出入线线路长度约为3.18 km;东端设瀍东停车场,停车场出入线线路长度约为2.03 km。全线设主变电所2座(分别与规划3、4号线共享),控制中心1座(为线网中4条线共用)。于2021年3月28日,洛阳轨道交通1号线正式开通运营。

3 测试与分析

3.1 试验准备

为了检测本文设计的基于免疫神经网络的综合交通布局优化方法的可行性与应用效果,设计了仿真模拟对比试验。基于Windows系统,在Visual Studio 2010开发环境下,应用C++语言,搭建试验的测试平台。将某城市的历史综合交通枢纽规划数据,存储到测试平台的数据库中,作为测试样本。在平台的Matlab程序中,分别导入本文设计的基于免疫神经网络的综合交通枢纽布局优化方法(试验组)、传统方法(对照组1),以及基于粒子群算法的综合交通枢纽布局优化方法(对照组2),作为测试方法。

3.2 检测结果与分析

在上述试验准备的基础上,随机选取10组综合交通枢纽规划的历史数据,分别输入到三种方法的模型中,仿真运行,记录不同方法得到最优解算结果的执行时间,进行对比分析,结果如表2所示。

表2 不同方法得到结果的执行时间对比

序号	数据组	执行时间/s		
		试验组	对照组1	对照组2
1	第一组	0.54	2.39	1.59
2	第二组	0.56	3.17	2.31
3	第三组	0.49	2.65	2.67
4	第四组	0.62	3.29	1.87
5	第五组	0.58	2.74	1.49
6	第六组	0.57	2.68	2.67
7	第七组	0.62	3.62	1.99
8	第八组	0.47	2.47	2.63
9	第九组	0.59	2.56	1.58
10	第十组	0.51	3.29	1.97
11	平均值	0.56	2.89	2.08

由表2可知,对于随机的10组综合交通枢纽规划的历史数据,试验组方法得到的优化结果的执行时间均低于对照组1、对照组2,试验组方法的执行时间均值为0.56 s,分别比对照组1、对照组2低2.33 s、1.52 s。表明试验组方法可以更快地分析处理数据,从而得到综合交通枢纽布局优化方案,具有实时性与高效性。

在本文方法更加高效的基础上,进行模型性能的测试。与上述试验条件一致,随机选取10组综合交通枢纽规划的历史数据,记录三种方法的仿真运行结果,与真实布局优化数据进行对比,计算误差的绝对值,结果如图2所示。

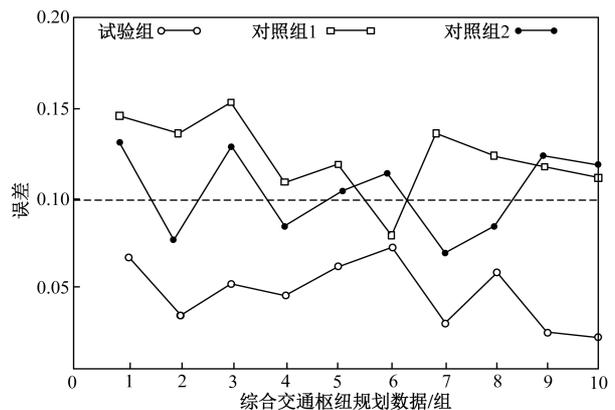


图2 不同方法布局优化结果的误差绝对值对比

由图2可知,对于随机的10组综合交通枢纽规划的历史数据,试验组方法布局优化结果的误差绝对值均低于对照组1、对照组2。试验组方法布局优化结果的误差绝对值的均值为0.043,最大误差绝对值为0.074,均控制在实际工程所需的误差 ± 0.1 范围之内,具有精确性与可行性。

免疫克隆算法的应用,有效减少或删除综合交通枢纽布局神经网络模型中的冗余隐藏节点,精简

且优化了模型的网络权值,提高了综合交通枢纽布局优化结果的精确度与科学性。同时,还可以进行数据目标的识别与特征分类,降低了神经网络模型的计算复杂程度,提升了算法的收敛效果与得出优化策略的运行时间,为城市交通规划相关部门,提供了可靠、高效的参考技术与方案。

4 结束语

交通是区域经济发展建设的核心基础部分,与区域整体的经济布局、基础建设布局以及产业结构布局息息相关。通过对区域综合交通枢纽的优化布局,可以改善区域整体的运输网络,降低交通运输成本,提升运输效率,推动区域群空间集聚效应的推进与演化速度,保证相关产业结构的经济效益。

参考文献

- [1] 龙元. 基于 VISSIM 的交通枢纽仿真[J]. 山西建筑, 2023, 49(3): 51-54.
- [2] 程智源, 曾雪松, 李海. 铁路综合交通枢纽智慧系统探讨[J]. 铁路计算机应用, 2022, 31(12): 36-41.
- [3] 谭占进, 白诚. BIM 技术在综合交通枢纽工程机电安装深化设计与施工中的应用[J]. 现代城市轨道交通, 2022 (S2): 145-149.
- [4] 温永杰, 由婷婷. 某市综合客运交通枢纽交通规划设计研究[J]. 城市道桥与防洪, 2023(9): 48-52.
- [5] 段妍, 吴沛峰, 陈彦美, 等. 综合交通枢纽交通接驳设施规模研究[J]. 城市道桥与防洪, 2022(11): 214-217.
- [6] 基于云计算技术的客运交通枢纽智慧管理系统[J]. 自动化博览, 2022, 39(12): 38-40.
- [7] 王壮, 李兆平, 谢桂馨, 等. 高铁车站配套匝道桥与地下交通枢纽结构并行建造方案研究[J]. 市政技术, 2022, 40(11): 10-17.
- [8] 覃睿, 孔誉婷, 李艳华. 综合交通枢纽集群空间分级布局模型研究[J]. 综合运输, 2022, 44(10): 65-70.
- [9] 周航, 刘扬帆. 综合交通枢纽对城市空间结构体系演变中的作用研究——以南阳市为例[J]. 科技风, 2022 (18): 150-153.

Optimization Method of Comprehensive Transportation Hub Layout Based on Immune Neural Network: Taking Luoyang Urban Rail Transit Line 1 as an Example

ZHONG Peiling, GAO Bo

(China Design Group Co., Ltd, Nanjing 210000, China)

Abstract: In order to improve the scientificity of the comprehensive transportation hub layout and promote the construction of regional economy and the benign development of the transportation industry, an optimization method of the comprehensive transportation hub layout was studied and designed based on the immune neural network algorithm. The key factors of the comprehensive transportation hub layout optimization was extracted, constraints were set, BP neural network algorithm was applied, the comprehensive transportation hub layout optimization model was established, and immune clone algorithm was introduced to obtain the optimal solution results of the comprehensive transportation hub layout optimization model. The test results show that the average execution time of the optimization results obtained by this method is 0.56s for 10 random groups of historical data of comprehensive transportation hub planning, which is real-time and efficient. The mean value of the absolute value of the error of the layout optimization results is 0.043, and the absolute value of the maximum error is 0.074, both of which are controlled within the range of ± 0.1 required by the actual project, which is accurate and feasible.

Keywords: immune neural network algorithm; comprehensive transportation hub; layout optimization