

基于BP神经网络的城市轨道交通线网合理规模研究

张依婧¹, 张毅¹, 汪涛¹, 谢乐龙²

(1.上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海市 200240; 2.中国建筑上海设计研究院有限公司, 上海市 200062)

摘要: 当下我国城市轨道交通正处于兴旺发展的关键时期, 然而我国尚未形成完善的城市轨道交通线网合理规模计算模型和理论, 因此有必要深入探究城市轨道交通线网合理规模的计算方法。首先, 从国家政策与交通战略、城市经济社会发展水平、城市规模与形态、交通需求与供给等方面, 剖析城市轨道交通线网规模的影响因素, 提取城镇常住人口、建成区面积、GDP、全网日均客运量、城市轨道交通占公共交通分担率和线网负荷强度6个量化指标。其次, 利用我国21座城市的历年城市轨道交通线网规模影响指标数据, 构建基于BP神经网络算法的城市轨道交通线网合理规模计算模型。最后, 以上海市、深圳市、重庆市、长沙市和南宁市为例, 应用该模型对五市2035年的线网合理规模进行预测, 以期为我国城市轨道交通线网规划提供科学的依据, 促进我国城市交通可持续发展。

关键词: 城市轨道交通; 线网规模; 影响指标; BP神经网络模型

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)03-0230-06

0 引言

发展城市轨道交通是解决大城市病, 建设绿色城市 and 智能城市的有效途径^[1]。截至2021年底, 中国内地累计有50座城市开通城市轨道交通, 运营线路总长度达到9192.62 km, 25座城市线网规模达到100 km以上; 2021年我国新增城市轨道交通运营线路长度1222.92 km, 占全球新增运营线路长度的35.6%^[2]。由此可见, 我国城市轨道交通发展迅猛, 建设规模空前, 已成为大城市交通的发展方向。

确定线网合理规模是城市轨道交通规划建设过程中一项至关重要的前期工作。线网规模从宏观上调控城市轨道交通线网规划, 合理的线网规模应当将城市轨道交通的线网供给水平维持在与实际需求和发展情况相当的合理范围内, 从而取得最佳经济效益, 避免供给水平不足限制城市发展或供给水平过高造成资源浪费^[3]。因此, 在城市轨道交通线网规划中根据城市交通发展模式、经济社会发展水平、城市规模、交通需求等因素确定城市轨道交通线网合理规模意义重大。

目前, 我国在城市轨道交通线网规划时主要采用交通需求法、线网服务水平法和建设能力分析法来匡算线网规模^[4]。国外研究主要从分析线网规模

影响因素、分析线网结构特性、构建多约束条件模型等角度来匡算线网规模^[5-8]。近年来, 一些学者在探索线网规模影响因素的基础上, 提出运用多元回归分析、神经网络模型、熵权法等方法综合多方面影响因素, 更为全面地确定线网合理规模。2009年, 孟迎春^[9]采用多元回归分析分别对国外13座城市和历年北京市、上海市的城市轨道交通建设相关数据进行训练, 拟合得到我国城市轨道交通线网规模确定模型。2016年, 陈坚等^[10]综合考虑交通需求法、回归分析法和线网服务水平法3种常用计算方法, 基于熵权法构建了城市轨道交通线网合理规模综合计算模型。2021年, 靳旭刚等^[11]建立了由人口规模、建设用地规模、GDP、第三产业值、人均客运量构成的影响因素指标体系, 以广州市为例, 基于熵权优化的BP神经网络模型和交通需求法, 构建了城市轨道交通线网合理规模预测方法。

现有研究在确定线网合理规模时主要考虑城市规模、城市经济发展水平、客运量等影响指标, 本文通过分析城市轨道线网规模影响因素, 在现有研究的基础上增加城市轨道交通占公共交通分担率、线网负荷强度等影响指标。采用基于数据学习的反向传播(Back Propagation, BP)神经网络算法, 对我国21座城市的大量历年城市轨道交通线网规模及其影响指标数据进行训练, 构建线网规模与其影响指标之间的关系模型, 用于分析城市轨道交通线网合理规模, 为我国城市轨道交通线网规划提供科学的依据。

收稿日期: 2022-11-08

作者简介: 张依婧(1997—), 女, 硕士在读, 研究方向为交通规划与管理。

1 指标分析

1.1 城市轨道交通线网规模影响因素

1.1.1 国家政策与交通战略

国家政策与交通发展战略决定了城市公共交通的发展方向与建设规模。近年来,我国出台了多项政策保障公共交通优先发展。2021年11月,《综合运输服务“十四五”发展规划》发布,明确提出:到2025年,超大城市和特大城市确立轨道交通在城市公共交通系统中的主体地位,公共交通机动化出行分担率不低于50%;大城市确立大、中运量公共交通在城市公共交通系统中的骨干地位,公共交通机动化出行分担率不低于40%^[12]。

1.1.2 城市经济社会发展水平

城市轨道交通的建设、运营和维护需要大量资金支撑。我国对申报建设城市轨道交通的城市经济实力有着硬性要求。城市经济社会发展水平决定了对于城市轨道交通的投资力度和居民出行成本水平。因此,确定城市轨道交通线网规模需要充分考虑城市经济发展水平。这里选取GDP来表征城市经济社会发展水平。

1.1.3 城市经规模与城市形态

城市人口规模直接决定了居民出行总量,进而影响城市轨道交通需求。城市用地规模直接影响居民出行距离特征,进而影响城市轨道交通覆盖范围。因此,城市规模对确定城市轨道交通线网规模有重要意义。

城市形态决定了城市交通需求的分布特征。城市轨道交通线网形态需与交通需求分布特征相适应,继而会形成不同的线网规模。由于城市形态较难量化,这里仅选取城镇常住人口和建成区面积来表征城市规模。

1.1.4 交通需求与供给

交通需求的大小和分布特性对于确定城市轨道交通线网规模具有决定性意义。交通供给指交通基础设施和服务的提供。构建合理线网规模的主要任务就是实现“供需平衡”。这里选取全网日均客运量和城市轨道交通占公共交通分担率(城市轨道交通客运总量占公共交通客运总量的出行比率)来表征交通需求,选取线网长度和线网负荷强度来表征交通供给。

1.2 影响指标选取

基于以上影响因素的分析,选取城镇常住人口、

建成区面积、GDP、全网日均客运量、城市轨道交通占公共交通分担率和线网负荷强度作为城市轨道交通线网规模的影响指标。

通过查阅《城市轨道交通年度统计和分析报告》、《中国城市建设统计年鉴》、《中国第三产业统计年鉴》、各城市统计年鉴等资料,获取我国上海市、北京市、重庆市、天津市、广州市、深圳市等21座城市的历年城市轨道交通线网长度及各影响指标实际数据共220条。鉴于篇幅有限,表1仅展示各市2021年的统计数据。受疫情影响,各市2020年的全网日均客流量和线网负荷强度大幅下降,具有一定特殊性,不符合我国正常情况下的发展规律。因此,在后续研究过程中剔除2020年的数据。

基于历年数据,利用SPSS统计分析软件中的相关性分析功能,分析线网长度及影响指标之间的相关性,结果见表2。城市轨道交通线网长度与GDP、全网日均客运量、城市轨道交通占公共交通分担率3个影响指标间的皮尔逊相关性系数 r 大于0.8,与城镇常住人口和建成区面积的皮尔逊相关性系数 r 大于0.7,显著性检验指标 p 值均为0,表明变量间具有显著的相关性;与线网负荷强度的皮尔逊相关性系数 r 为0.352,显著性检验指标 p 值为0,表明线网规模与线网负荷强度之间相关性一般。通过相关性分析,证明本研究指标选取合理。

2 模型构建与应用

城市轨道交通线网规模受到多方面因素的影响,相互之间呈现非线性映射关系,部分影响因素之间又具有多重共线性,所以较难用传统的数学模型去刻画。而BP神经网络是一种监督式学习算法,具有优越的非线性映射能力、柔性网络结构和容错能力,可以灵活学习各种类型的特征变量关系,适用于复杂的非线性关系建模^[13-14]。因此,本研究采用BP神经网络算法建模。

2.1 BP神经网络模型

BP神经网络结构包含输入层、隐含层和输出层,学习过程包含信息的前向传播和误差的反向传播,如图1所示。在前向传播中,信息由输入层经隐含层逐层计算传向输出层。如果网络输出值未达到期望,则将模型输出值与目标输出值之间的误差通过网络逐层反向传播,采用梯度下降法调整各层的权值和阈值,使网络输出值不断贴近目标输出值,即均方误差达到最小值^[15]。

表1 我国21座城市的城市轨道交通线网长度及影响指标数据(2021年)

城市	线网长度 ^① / km	城镇常住人口/ 万人	建成区面积 ^② / km ²	GDP/ 亿元	全网日均客运量/ 万人次	线网负荷强度/ (万人次·d ⁻¹ ·km ⁻¹)	城市轨道交通占公 共交通分担率/%
上海	880.2	2 220.9	1 238.0	43 214.9	1 007.2	1.3	66.0
北京	740.9	1 915.0	1 469.0	40 269.6	832.9	1.2	55.0
重庆	384.9	2 351.5	1 566.0	27 894.0	300.6	0.8	28.7
天津	271.9	1 165.0	1 151.0	15 695.1	135.2	0.5	38.3
广州	531.6	1 626.4	1 351.0	28 232.0	770.8	1.5	60.6
深圳	431.0	1 769.2	960.5	30 664.9	599.4	1.4	60.6
武汉	484.4	1 154.2	885.1	17 717.0	300.2	0.6	46.1
沈阳	216.7	774.8	567.0	7 249.7	107.3	0.5	29.1
西安	252.6	1 046.3	700.7	10 688.3	280.3	1.1	47.7
昆明	139.4	684.4	482.8	7 222.5	60.8	0.4	27.6
杭州	342.0	1 020.3	666.2	18 109.4	260.1	0.8	54.8
长沙	161.6	851.5	409.5	13 270.7	161.1	1.0	45.8
南宁	128.2	616.4	326.7	5 120.9	87.5	0.7	50.0
合肥	153.6	795.4	502.5	11 412.8	85.7	0.6	34.4
成都	557.8	1 684.3	977.1	19 917.0	490.6	1.0	50.0
郑州	205.9	1 007.9	640.8	12 691.0	117.7	0.7	40.0
宁波	160.8	748.3	377.9	14 594.9	82.8	0.5	41.7
厦门	98.4	475.7	401.9	7 033.9	50.9	0.5	19.7
南昌	128.5	506.3	366.0	6 650.5	88.2	0.7	44.0
福州	58.4	614.7	305.3	11 324.5	32.5	0.6	19.4
石家庄	74.3	796.5	311.8	6 490.3	25.2	0.3	28.4

注:1.线网长度为城市轨道交通运营线路总长度,包含地铁、轻轨、单轨、磁浮、有轨电车等制式,不含市域铁路。

2.部分城市2021年的建成区面积数据尚未发布,采用2020年的建成区面积数据代替。

表2 线网长度及影响指标间的相关性

指标	参数	Y	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅
x ₁	r	0.747					
	p	0.000					
x ₂	r	0.726	0.831				
	p	0.000	0.000				
x ₃	r	0.916	0.734	0.720			
	p	0.000	0.000	0.000			
x ₄	r	0.933	0.732	0.731	0.848		
	p	0.000	0.000	0.000	0.000		
x ₅	r	0.352	0.453	0.434	0.292	0.557	
	p	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
x ₆	r	0.844	0.506	0.535	0.794	0.812	0.428
	p	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

注:x₁代表城镇常住人口,x₂代表建成区面积,x₃代表GDP,x₄代表全网日均客运量,x₅代表线网负荷强度,x₆代表城市轨道交通占公共交通分担率,Y代表线网长度。

图1中隐含层输出值 H_j 和输出层输出值 O_k 的计算如公式(1)和公式(2)所示,模型均方误差 E 的计算如公式(3)所示。

$$H_j = f \left(\sum_{i=1}^n \omega_{ij} x_i - \alpha_j \right) \quad j = 1, 2, \dots, l \quad (1)$$

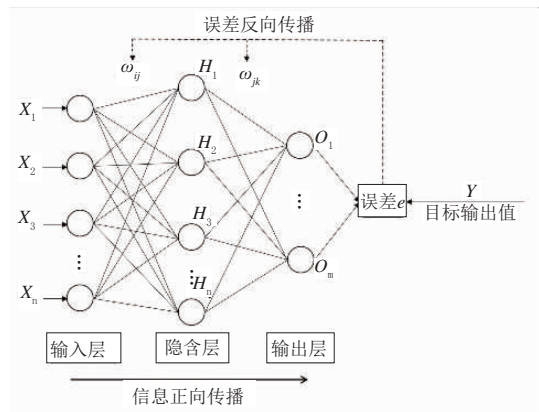


图1 BP神经网络结构

式中: f 为激励函数; ω_{ij} 为输入层和隐含层神经元之间的连接权值; x_i 为输入层输入值; α_j 为隐含层阈值。

$$O_k = f \left(\sum_{j=1}^l H_j \omega_{jk} - \beta_k \right) \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

式中: ω_{jk} 为隐含层和输出层神经元之间的连接权值; H_j 为隐含层输出值; β_k 为输出层阈值。

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m (Y_k - O_k)^2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m e_k^2 \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

式中: Y_k 为目标输出值;记 $e_k = Y_k - O_k$ 。

BP神经网络的建模流程如图2所示。

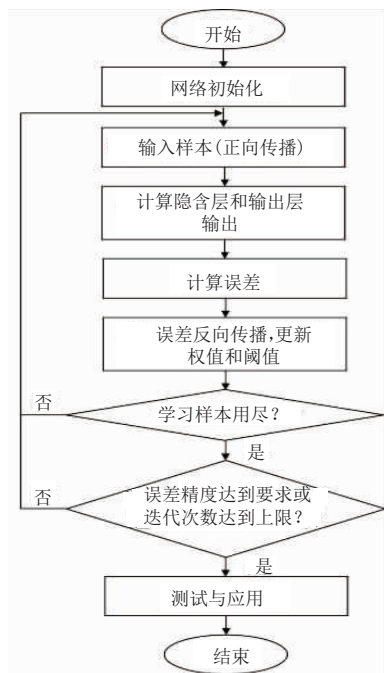


图2 BP神经网络建模流程

2.2 模型构建

基于 MATLAB 软件,采用我国 21 座城市的历年(剔除 2020 年)城市轨道交通线网长度及各影响指标数据作为样本(共 199 条数据),根据 2.1 中的流程构建 BP 神经网络模型。

(1)数据预处理

为了消除指标之间的量纲影响,将所有原始数据进行归一化处理,转换到 $[-1,1]$ 范围内,保证程序运行时的收敛速度。归一化完成后,将打乱后的数据按 7:1.5:1.5 的比例划分为训练集、验证集和测试集,以保证模型的泛化能力。

(2)神经网络结构设计

BP 神经网络结构由网络层数、各层神经元数、神经元之间的连接等组成。根据 Kolmogorov 定理,一个 3 层的 BP 神经网络结构就可以完成任意的 n 维到 m 维的映射。因此,本研究选用单隐含层的 BP 神经网络结构。输入神经元和输出神经元个数由求解问题本身决定。本次研究选取的城市轨道交通线网规模影响指标(自变量)为:城镇常住人口(x_1)、建成区面积(x_2)、GDP(x_3)、全网日均客运量(x_4)、线网负荷强度(x_5)和城市轨道交通占公共交通分担率(x_6),即 6 个输入神经元。城市轨道交通线网长度(O)为因变量,即 1 个输出神经元。

神经网络的拟合性能和隐含层神经元数目有很大关系^[16]。为寻找最优隐含层神经元个数,先由经验

公式(4)^[17]计算得到最优隐含层节点数区间。然后,用试凑法对隐含层神经元个数取^[3,13]的不同模型进行多次模拟训练。当隐含层神经元个数为 12 个时,模型均方误差最小。因此,确定隐含层神经元个数为 12 个。

$$l = \sqrt{n+m} + a \quad a \in [1, 10] \quad (4)$$

式中: l 为隐含层节点数; n 为输入层节点数; m 为输出层节点数; a 为常数。

由此构建了 6-12-1 的 BP 神经网络结构,即输入层选取 6 个节点,隐含层选取 12 个节点,输出层选取 1 个节点。

(3)神经网络参数设置和算法选择

模型学习率设为 0.01,迭代次数设为 1 000 次。训练算法使用莱文贝格-马夸特(Levenberg-Marquardt)算法^[18],激活函数使用 Sigmoid 函数。

最后,基于以上参数进行神经网络训练。

2.3 模型评估

经过 16 次迭代训练,验证集均方误差达到最小值 0.000 7,精度满足要求,完成建模。如图 3 所示,模型训练集、验证集和测试集的回归 R 值分别为 0.999 1、0.998 8 和 0.996 7,全集回归 R 值为 0.998 5,拟合程度很好。证明网络训练效果优秀,可以刻画线网规模与其影响指标之间的关系,用于城市轨道交通线网合理规模研究。

2.4 模型应用

利用上一节构建的模型,预测 2035 年我国上海市、深圳市、重庆市、长沙市和南宁市的城市轨道交通线网合理规模。将 2035 年的影响因素指标数据作为模型输入值,通过模型预测得到与规划年城市发展模式、交通需求、城市规模、经济发展水平等方面相匹配的线网规模,即线网合理规模。

根据各市国土空间总体规划,2035 年重庆市、深圳市和南宁市的城镇常住人口(x_1)分别为 2 800 万人、1 900 万人和 805 万人;2035 年上海市和长沙市的常住人口分别为 2 500 万人和 1 550 万人,根据常住人口和城镇化率,预测得到城镇常住人口(x_1)分别为 2 300 万人和 1 400 万人。基于五市各指标的历史数据,采用指数平滑模型预测 2035 年五市的建成区面积(x_2)、GDP(x_3)和全网日均客运量(x_4),结果如表 3 所示。线网负荷强度(x_5)参考城市轨道交通发展较成熟的城市,并结合各市历年发展规律,上海市取 1.4,深圳市取 1.5,重庆市取 0.8,长沙市取 1.0,南宁市取 0.9。根据五市城市轨道交通发展现状及目标,

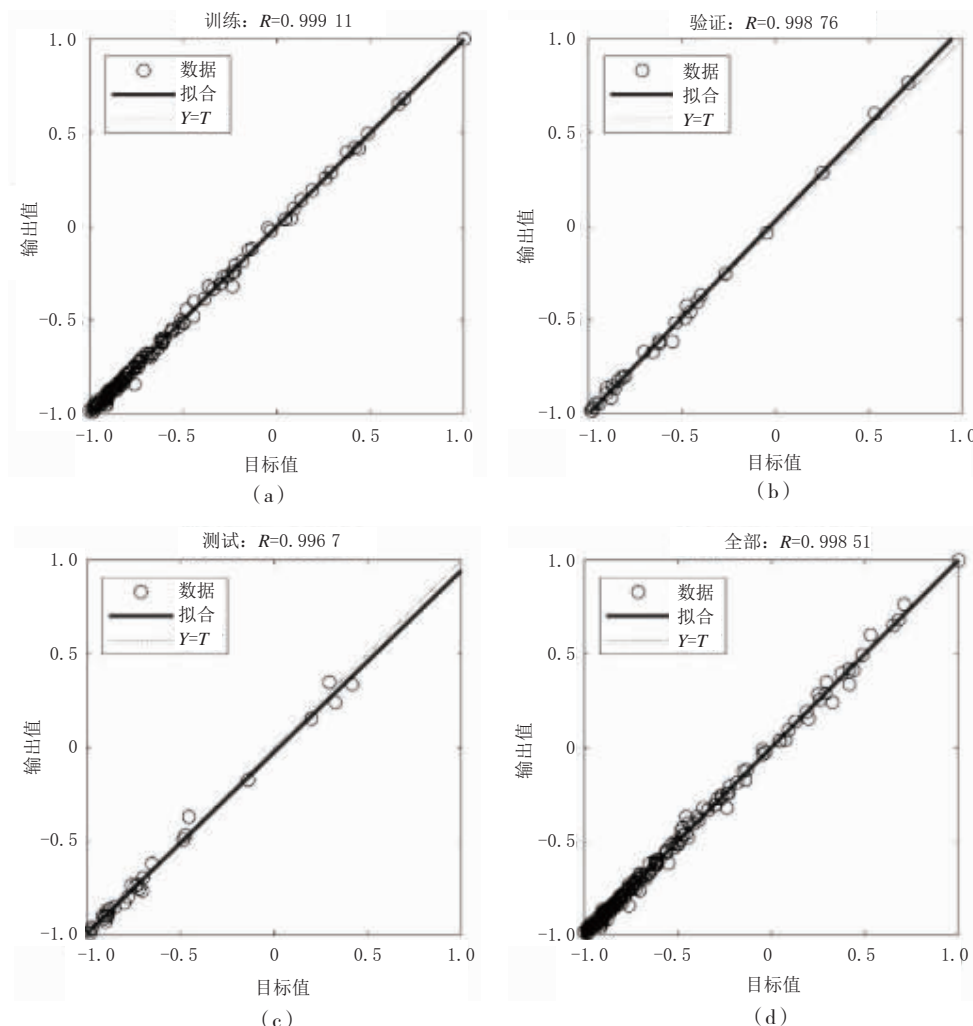


图3 模型拟合程度

上海市和深圳市的城市轨道交通占公共交通分担率(x_6)将保持小幅增长趋势,预计2035年达到70%和68%;重庆市致力于打造“轨道上的主城都市区”,城市轨道交通占公共交通分担率(x_6)将大幅提升,预计2035年达到58%;长沙市和南宁市以构建城市轨道交通为骨干的绿色交通体系为目标,城市轨道交通占公共交通分担率(x_6)将稳步提升,预计2035年达到60%。综上所述,五市2035年的城市轨道交通线网规模影响因素指标数据预测值(即模型输入值)如表3所示。

表3 模型输入值

城市	BP神经网络法 预测值	交通需求法 预测值	规划值
上海市	1 052	1 150	1 043
深圳市	885	861	839
重庆市中心城区	1 197	1 634	1 252
长沙市	739	702	852
南宁市中心城区	427	432	429

将以上规划年的影响指标数据输入模型,预测得到2035年上海市、深圳市、重庆市、长沙市和南

市的城市轨道交通线网合理规模预测值(O)分别为1 052 km、885 km、1 197 km、739 km和427 km。

由常用计算方法交通需求法(公式5)计算得到2035年五市的城市轨道交通线网合理规模预测值分别为1 150 km、861 km、1 634 km、702 km和432 km。

$$L = \frac{\alpha \beta Q}{q_d} \# \quad (5)$$

式中: L 为交通需求分析法匡算的线网规模,km; Q 为远景年的城市居民出行需求总量,万人次; α 为远景年的公共交通出行需求占比; β 为远景年的城市轨道交通占公共交通分担率; q_d 为城市轨道交通的线网负荷强度,万人次/(km·d)。

根据各市的城市轨道交通规划,2035年五市的城市轨道交通线网规划长度分别为1 043 km、839 km、1 252 km、852 km和429 km。

如表4所示,相比交通需求法,BP神经网络模型法的预测结果与规划值更加贴近,BP神经网络模型法预测值与规划值之间的平均误差率为4.89%。

各市2035年的城市轨道交通线网规划尚未完

表 4 五市线网合理规模预测值与规划值对比 单位:km

城市	BP 神经网络法 预测值	交通需求法 预测值	规划值
上海市	1 052	1 150	1 043
深圳市	885	861	839
重庆市中心城区	1 197	1 634	1 252
长沙市	739	702	852
南宁市中心城区	427	432	429

全成熟,预测结果可为五市城市轨道交通线网规划提供参考。上海市、重庆市、南宁市的模型预测值与规划值之间的误差率在 5%以内,说明三市的规划线网规模较为合理。深圳市的模型预测值和交通需求法预测值均大于规划值,模型预测值比规划值大 5.5%,建议深圳市适当增加线网规模,以适应 2035 年的深圳市的发展情况。长沙市的模型预测值和交通需求法预测值均小于规划值,模型预测值比规划值小 13.3%,说明长沙市的规划线网规模存在一定超前,宜进行调整。

需要说明的是,由于预测年份距今较远,城市发展存在不确定性,影响因素指标数据的预测值可能存在偏差,并且模型泛化能力有限,会导致预测结果本身有一定偏差。除了用于预测未来的城市轨道交通线网合理规模,本模型还能用于评估现状线网规模的合理性;以及分析某一指标改变对于线网规模的影响,如提升城市轨道交通占公共交通分担率、人口增长或 GDP 增长对线网长度的影响程度和敏感性程度。

3 结 语

对线网规模进行匡算是城市轨道交通规划中不可或缺的重要内容。一个合理的城市轨道交通线网不应盲目地扩大规模,而是要以适当超前的建设规模满足中长期的交通需求,推进公交优先发展,并用相对少的投入获取最优经济效益,避免运营资源浪费和地方政府过高的财政补贴,促进城市轨道交通可持续发展。

本文相对全面地分析了城市轨道交通线网规模的影响因素,基于 BP 神经网络算法提出了一种与城市各方面发展情况和需求相适应的城市轨道交通线网合理规模计算模型。经验证,模型具有较高的可靠性,可以为相关部门提供规划、设计和决策依据。本文应用该模型预测我国五座城市 2035 年的线网合理规模,预测值与实际规划值之间的平均误差率为

4.89%,表明规划存在进一步优化调整空间,预测结果可以为相关部门提供规划、设计和决策依据。

由于线网规模的影响因素复杂多样,部分因素较难量化,本文选取了 6 个易量化的指标,今后的研究可以进一步优化影响指标;本文选取我国 21 座城市的历年数据作为训练样本,今后的研究可以进一步增加样本数量,对不同类型城市的线网规模,以及城市中心区域和外围区域的线网规模进行分类研究。

参考文献:

[1] 中国城市轨道交通协会.中国城市轨道交通智慧城轨发展纲要[J].城市轨道交通,2020(4):8-23.

[2] 韩宝明,李亚为,鲁放,等.2021 年世界城市轨道交通运营统计与分析综述[J].都市快轨交通,2022,35(1):5-11.

[3] 姚帆.城市群城际铁路线网合理规模与布局规划研究[D].西安:长安大学,2021.

[4] 毛保华.城市轨道交通规划与设计[M].北京:人民交通出版社,2020.

[5] Bollinger C R, Ihlanfeldt K R. The Impact of Rapid Rail Transit on Economic Development: The Case of Atlanta's MARTA[J].Journal of Urban Economics, 1997, 42(2):179-204.

[6] Derrible S,Kennedy C.Network Analysis of World Subway Systems Using Updated Graph Theory [J].Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board,2009,2112(1):17-25.

[7] Canca D,De-Los-Santos A,Laporte G,et al.A general rapid network design, line planning and fleet investment integrated model[J].Annals of Operations Research, 2016,246(1):127-144.

[8] Li Z C,Lam W,Wong S C,et al.Design of a rail transit line for profit maximization in a linear transportation corridor[J].Procedia-Social and Behavioral Sciences,2011,17:82-112.

[9] 孟迎春.我国城市轨道交通规模研究[D].北京:北京交通大学,2009.

[10] 陈坚,李武,赵翰林,等.城市轨道交通合理规模综合计算模型研究[J].铁道运输与经济,2016,38(2):71-75.

[11] 靳旭刚,陈德玖,黄丽,等.基于 BPNN-TD 算法的城市轨道交通线网规模预测方法[J].都市快轨交通,2021,34(3):58-64.

[12] 交通运输部关于印发《综合运输服务“十四五”发展规划》的通知[EB/OL].[2022-11-08]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-11/18/content_5651656.htm.

[13] 方晨晨,周继彪,董升,等.基于 BP 神经网络的地铁车厢拥挤度预测方法[J].交通信息与安全,2018,36(6):47-53.

[14] 陈昱君,孙樊荣,沐瑶,等.离港航班延误时间预测方法[J].科学技术与工程,2022,22(15):6354-6361

[15] 潘文婵,刘尚东.BP 神经网络的优化研究与应用[J].计算机技术与发展,2019,29(5):74-76,101.

[16] BAHADIR E.Prediction of prospective mathematics teachers' academic success in entering graduate education by usingback-propagation neural network [J].Journal of Educationand Training Studies, 2016,4(5):113-122.

[17] 刘天舒.BP 神经网络的改进研究及应用[D].哈尔滨:东北农业大学,2011.

[18] 陈明忠.BP 神经网络训练算法的分析与比较[J].科技广场,2010(3):24-27.