改进蚁群算法下城市地铁-公交耦合网络布局效率优化

陈星星[1]，靳 婷[2]

（1.长江大学 城市建设学院，湖北 荆州 434000；2.海南大学 计算机科学与技术学院，海口 570228）

摘 要：城市地铁-公交网络站点交叉重叠、线路复杂，高峰时段的客流潮汐现象下，布局不合理的交通网络难以资源互补，导致线路换乘乘客出行耗时延长、交通碳排放量增大。为此，提出改进蚁群算法下城市地铁-公交耦合网络布局效率优化方法。该方法通过耦合站点对和耦合距离完成城市地铁-公交耦合网络中交叉重叠线路、站点的复杂拓扑结构连接，实现地铁-公交交通资源互补；基于拓扑结构，设计换乘乘客出行耗时和交通碳排放量减少的换乘站点布局目标函数，以及碳排放效益最大化的约束条件，以解决换乘乘客出行耗时延长、交通碳排放量增大问题；改进传统蚁群算法的信息素挥发系数的自适应设置方法，快速求解满足目标函数与约束条件的地铁-公交耦合网络换乘站点位置、线路走向的布局方案。研究结果显示：该方法可以将复杂的城市地铁-公交耦合换乘网络用耦合站点对和耦合线路关联起来，完成耦合建模。本文方法改进蚁群算法后，算法对布局优化方案的求解时长最大值低于1 s，明显小于优化前。城市地铁-公交耦合网络布局优化后，换乘乘客的换乘步行距离变化值为-16 m，步行时间缩短-5.46%。换乘乘客的出行总时间减少1.18 h。城市地铁-公交耦合网络换乘效率提升，碳排放效益显著，且求解布局优化方案时更加高效。

关键词：改进蚁群算法；城市地铁-公交；耦合网络；布局效率优化；信息素挥发系数；碳排放效益

中图分类号：TP391 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5497(2026)02-0480-08

DOI：10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20241201

Optimization of efficiency of urban subway bus coupling network layout under improved ant colony algorithm

CHEN Xing-xing[1], JIN Ting[2]

(1. *School of Urban Construction, Yangtze University, Jingzhou* 434000, *China*; 2. *School of Computer Science and Technology, Hainan University, Haikou* 570228, *China*)

Abstract: The intersection and overlap of urban subway and bus network stations, the complexity of routes, and the tidal phenomenon of passenger flow during peak hours make it difficult for the transportation network with unreasonable layout to complement resources, resulting in longer travel time and increased carbon emissions for passengers transferring between routes. To this end, an improved ant colony algorithm is proposed to optimize the efficiency of urban subway bus coupling network layout. This method completes the complex topology connection of overlapping lines and stations in the urban subway

收稿日期：2024-11-07.

基金项目：国家土建结构预制装配化工程技术研究中心开放课题项目(2023CPCCE-K02).

作者简介：陈星星(1982-)，男，教授.研究方向：低碳城市交通规划.E-mail：Chenxingxing1106@163.com

bus coupling network by coupling station pairs and coupling distances, achieving complementary subway bus transportation resources; based on topological structure, design the objective function of transfer station layout to reduce the travel time and transportation carbon emissions of transfer passengers, as well as the constraint conditions to maximize carbon emission benefits, in order to solve the problems of prolonged travel time and increased transportation carbon emissions of transfer passengers; improve the adaptive setting method of pheromone volatilization coefficient for traditional ant colony algorithm, and quickly solve the layout scheme of subway bus coupling network transfer station location and route direction that meets the objective function and constraint conditions. The research results show that this method can associate complex urban subway bus coupling transfer networks with coupling station pairs and coupling lines to complete coupling modeling. After improving the ant colony algorithm, the maximum solution time for layout optimization schemes in this article is less than 1 second, which is significantly lower than before optimization. After optimizing the layout of the urban subway bus coupling network, the change in walking distance for transfer passengers is -16 m, and the walking time is reduced by -5.46%. The total travel time of transfer passengers decreased by 1.18 hours. The coupling network between urban subway and public transportation has improved transfer efficiency, significant carbon emission benefits, and is more efficient in solving layout optimization solutions.

Key words: improved ant colony algorithm; urban subway bus; coupling network; layout efficiency optimization; volatile coefficient of pheromones; carbon emission benefits

0　引　言

在推动低碳城市交通系统优化的进程中，地铁与公交作为关键构成元素，通过二者的有效整合能够实现资源互补，构建一个更为健全的耦合式交通网络体系，以满足居民多元化的出行需求，并同步降低碳排放量，助力城市交通向可持续发展方向迈进[1,2]。然而耦合式交通网络体系线路复杂，如何通过交通网络布局优化实现交通资源互补，提升乘客出行效率成为亟待解决的问题。

刘志勇等[3]构建地铁拓扑网络和公交拓扑网络，并根据换乘走行距离设置耦合规则，采用“薄弱环节优先”的层间关联性提升策略，构建地铁-公交复合网络，合理设置站点间距和发车频率，完成网络布局优化。然而，该研究未同时考虑换乘和到站非换乘乘客的出行时间不同，导致换乘步行距离规划不当，进而影响客流流动效率，反而会增加换乘所需时间，削弱交通布局优化的预期成效。Hosseini等[4]提出了基于贪婪随机自适应搜索的交通网络布局方法。主要从节省交通成本角度，利用贪婪策略，寻优设置交通建设成本、运营成本最小化的交通网络布局方案。但由于贪婪策略的特性，该方法容易陷入局部最优解，即算法可能在某个阶段选择一个在当前状态下最优的选项，但这个选项并不一定是全局最优的。这可能导致算法最终得到的交通网络布局并不是最优的，而是次优的或甚至较差的布局方案。李欣等[5]为优化城市轨道交通与常规公交线网的耦合应用状态，构建方格路网模型，考虑乘客能够选择多种交通出行方式，设计多层、混合式整数优化模型。但该方法在调整发车时距、线间距和站间距时并未考虑换乘乘客的步行距离和时间，导致规划后，两个站点之间的换乘乘客步行距离较长，降低了整体出行效率。孙会君等[6]深入研究地铁与公交接驳的约束条件，构建混合整数规划模型，旨在减少乘客等待时间并提升公交满载率。该模型使用改进的遗传算法求解，但参数设定依赖经验或假设，可能导致模型陷入局部最优，优化结果不够理想。

为解决城市地铁-公交耦合网络换乘效率、布局效率优化问题，提出改进蚁群算法下城市地铁-公交耦合网络布局效率优化方法。

1　城市地铁-公交耦合网络基础拓扑结构连接

城市地铁-公交网络站点交叉重叠、线路复杂，为实现低碳交通资源互补，建立地铁-公交交通网络耦合模型，利用耦合站点对将复杂的地铁网络、公交网络的站点、线路等要素以基础拓扑结构形式相互联结[7,8]。

以图论拓扑形式设计低碳城市中的城市地铁-公交网络中站点(地铁站点、交通站点)为节点,线路(地铁线路、交通线路)为边,地铁网络为:

$$F_{\mathrm{d}}=(n_{\mathrm{d}},b_{\mathrm{d}}) \tag{1}$$

式中:n_{d}为地铁站点集合;b_{d}为地铁线路集合。

公交网络为:

$$F_{g}=(n_{g},b_{g}) \tag{2}$$

式中:n_{g}为公交站点集合;b_{g}为公交线路集合。

为了提升交通出行效率,保证换乘乘客在不同交通方式之间的无缝转换,设置换乘乘客出行在两个或多个站点之间的换乘衔接耦合站点对和耦合距离L,实现城市地铁-公交耦合网络基本拓扑结构连接:

(1)设置耦合距离L。

(2)计算地铁网络$F_{\mathrm{d}}=(n_{\mathrm{d}},b_{\mathrm{d}})$的任意站点坐标$n_{\mathrm{d}}^{i}$和公交网络$F_{\mathrm{g}}=(n_{\mathrm{g}},b_{\mathrm{g}})$中的任意站点坐标$n_{\mathrm{g}}^{j}$的图距离:

$$\Omega(n_{\mathrm{d}}^{i},n_{\mathrm{g}}^{j})=\sum_{j=1}^{F_{\mathrm{g}}}\sum_{i=1}^{F_{\mathrm{d}}}\sqrt{(n_{\mathrm{d}}^{i\,2}-n_{\mathrm{g}}^{j\,2})} \tag{3}$$

(3)如果$\Omega(n_{\mathrm{d}}^{i},n_{\mathrm{g}}^{j})$数值小于$L$,那么便把$n_{\mathrm{d}}^{i}$、$n_{\mathrm{g}}^{j}$设成耦合站点对。

(4)多次执行步骤(3),当全部地铁站点与公交站点地理距离均被计算后停止。

(5)回到步骤(2),将全部地铁站点都执行步骤(2)与步骤(4)。

使用上述方法,便可识别全部耦合站点对,根据耦合站点把地铁-公交网路连接起来。如果耦合距离中有多个公交站点,便将此类站点一一连接[9,10],最终构建图1所示的城市地铁-公交耦合网络基础拓扑结构。

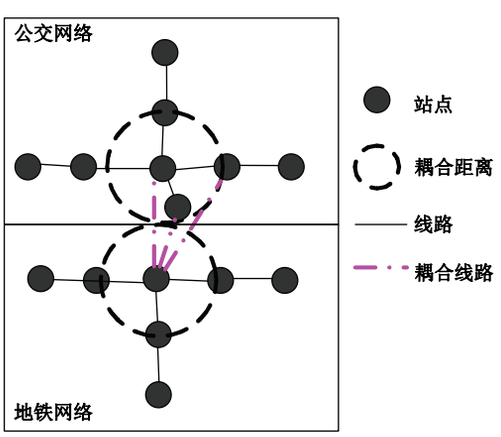

图1 城市地铁-公交耦合网络基础拓扑结构

Fig. 1 Basic topology of urban subway-bus coupling network

2 基于拓扑结构的布局效率优化

低碳城市交通优化(包括地铁、公交等)并非以营利为主要目的[11,12],而是承载着一定的社会责任和公益属性。这意味着在规划和运营公共交通时,需要更多地考虑乘客的出行便利性和效率[13]。考虑到调整城市地铁-公交耦合网络基础拓扑结构中某个站点位置对通过性乘客(即不在该站点下车或换乘的乘客)来说,其出行时间并无变化[14,15]。因此,在构建目标函数时,没有将这类乘客的出行时间纳入考虑范围。考虑高峰时段的客流潮汐现象,本文建立的效率优化目标函数主要聚焦于优化换乘乘客(即需在该站点转乘其他交通工具的旅客)及到站非换乘乘客(即在该站点下车且无须转乘的旅客)的出行耗时。这两类乘客的流量构成了客流潮汐,因此,通过优化城市地铁-公交耦合网络基础线路布局缩短这两类乘客的出行时间即可在客流潮汐状态下解决线路换乘乘客出行耗时延长问题。整个交通系统的流畅性和效率得到提升,也间接有助于减少所有乘客的碳排放,从而实现低碳城市交通优化的综合目标。

2.1 效率优化目标函数

地铁-公交耦合网络布局效率优化主要是调整优化拓扑结构中的站点位置,但考虑到高峰时段客流潮汐集中容易在换乘路上发生拥堵,而站点位置调整时,换乘乘客在换乘时的步行距离对整体换乘时间具有巨大影响,因此,在目标函数中加入步行时间参数,缩短站点位置调整后换乘乘客的等待时间、到站非换乘乘客的整体出行时长:

$$\begin{aligned}\min(T)&=T_{\mathrm{e}}+T_{\mathrm{a}}+\Delta T_{\mathrm{e}}+\Delta T_{\mathrm{a}}+C_{\max}=\\&[T_{\mathrm{ve}}+T_{\mathrm{ne}}+T_{\mathrm{ue}}]+[T_{\mathrm{va}}+T_{\mathrm{na}}]+C_{\max}+\\&\left[\sum_{n'=1}^{n-1}p_{n',n}^{\mathrm{e}}\cdot\left(\frac{\Delta Z}{s_{\mathrm{B}}}+\frac{\Delta Z^{\mathrm{e}}}{s_{\mathrm{w}}}\right)\right]+\left[\sum_{n'=1}^{n-1}p_{n',n}^{\mathrm{a}}\cdot\frac{|\Delta Z|}{s_{\mathrm{B}}}\right]+C_{\max}\end{aligned} \tag{4}$$

式中:将上节地铁-公交耦合网络拓扑结构中耦合站点对的地铁站点n_{d}^{i}和公交站点n_{g}^{j}简化为n、n'编号;T_{e}、T_{a}为地铁-公交耦合网络中,换乘乘客与到站非换乘乘客的总出行时间;ΔT_{e}、ΔT_{a}为换乘乘客在站点换乘、到站非换乘乘客在站点到站下车时,由于站点位置调整带来的出行时间变化值;T_{ve}、T_{ne}、T_{ue}为换乘乘客的候车、在车、换乘步行耗时;T_{va}、T_{na}为到站非换乘乘客的候车、在车

耗时；$p^{e}_{n',n}$、$p^{a}_{n',n}$为在站点n'乘车至可与地铁换乘站点n下车换乘的乘客数量、在站点n'乘车至可与地铁换乘站点n下车到其目的地的乘客数量；ΔZ、ΔZ^{e}为优化后站点相对原站点调整距离、换乘乘客的换乘步行距离变化值；s_B、s_w分别为常规公交运行速度、换乘乘客步行速度；C_{max}为碳排放效益最大化。

2.2　约束条件

为保证地铁-公交耦合网络的正常交通运行，需要为上述优化目标函数设定约束条件：低碳城市交通的地铁-公交耦合网络中，因站点位置布局优化时，对此站点附近站点距离存在影响，所以不能仅为缩短换乘距离而调整站点位置。为此，需要保障站点距离最小值，大于公交最小停车距离Z_{min}，且不能大于乘客可接受的最大站间距Z_{max}。则：

$$Z_{min} \leqslant \Delta Z \leqslant Z_{max} \tag{5}$$

城市地铁-交通耦合网络布局优化，能够改变以往乘客易选择出租车等交通模式，而降低低碳城市的交通碳排放量，为此，在城市地铁-交通耦合网络布局优化时，在保证减少换乘乘客的换乘等待时间和到站非换乘乘客出行总时间的基础上，需保证实现碳排放效益最大化C_{max}。碳排放效益约束条件是：

$$C_{max} = q^{g}_{co_2} y \frac{f_a \partial_g}{C^{g}_{e}} + q^{\pi}_{co_2} y \frac{f_a \partial_v}{C^{g}_{v}} + q^{\pi}_{co_2} y \frac{f_a \partial_g}{C^{g}_{z}} - C_j - C_k \tag{6}$$

式中：$q^{g}_{co_2}$、$q^{\pi}_{co_2}$为公交、轻型车碳排放因子；f_a、∂_g为某站吸引乘客量、某站乘客原出行方式中公交车的出行比例；∂_v、y表示某站乘客原出行方式中小汽车的出行比例、某站乘客出行距离均值；C^{g}_{e}、C^{g}_{v}、C^{g}_{z}为公交车单车客载量、小汽车的单车客载量、出租车单车客载量；C_j、C_k为地铁-交通耦合网络建设碳排、地铁-交通耦合网络运营碳排。

联立以上目标函数和约束条件公式(4)～(6)即可获得城市地铁-公交耦合网络布局效率优化模型，模型输出的站点布局方案代称为Z。

2.3　基于改进蚁群算法的站点布局方案最优求解

由于城市地铁-公交网络站点交叉重叠、线路复杂，城市地铁-公交耦合网络布局效率优化模型属于多参数动态求解，因此，通过蚁群算法来搜索出行耗时和交通碳排放量最优的站点调整方案的多个最优参数。但蚁群算法求解容易陷入局部最优解，延长得出最优解的时间，间接降低了布局方案的出行效率。而高峰时段客流潮汐背景下的布局具有实时性要求，因此，本文通过挥发系数自适应调节方法对蚁群算法进行改进，提升求解过程的收敛速度，提升布局效率。

状态转移和信息素更新机制对蚁群算法的寻优效果存在直接影响，状态转换规则中，设置蚂蚁o运行时的信息素强度为每条站点线路调整后的出行时间变化值，设置换乘步行距离变化值为代价因子，在换乘可行站点集合中，分析选择新交通或地铁站点的调整概率，即目前站点n'至下一站点n的转移概率：

$$\theta_t(Z) = \begin{cases} \dfrac{Z\left|\beta(n',n)\right|^{\phi}\left|\delta(n',n)\right|^{\varphi}}{\sum\limits_{n\in I_t(n)}\left|\beta(n',n)\right|^{\phi}\left|\delta(n',n)\right|^{\varphi}}, n\in I_t(n) \\ 0, \text{其他} \end{cases} \tag{7}$$

式中：$I_t(n)$为布局站点n附近可换乘站点集合；$\beta(n',n)$、$\delta(n',n)$分别为信息素强度(出行时间变化值)与换乘步行距离变化值代价因子；ϕ、φ为$\beta(n',n)$、$\delta(n',n)$的重要系数。

信息素更新机制规定只有最优蚂蚁个体(站点调整方案)才可进入后续全局优化阶段，x只蚂蚁在完成城市地铁-交通耦合网络路径搜索后，需增加最优路径的信息素浓度，便能够提高寻优收敛效率。交通布局方案的全局寻优结果：

$$\beta(n',n) = (1-\lambda)\beta(n',n)\theta_t(Z) + \lambda\left[\Delta\beta(n',n) + \lambda\Delta\beta(n',n)\right] \tag{8}$$

式中：$\Delta\beta(n',n)$为$\beta(n',n)$的增加量；λ为信息素挥发系数。

传统蚁群算法的上述参数设定依赖经验或假设寻优结果，容易出现局部最优解，且求解过程收敛速度较慢，降低了布局方案的出行效率。为提高算法在地铁-公交耦合网络布局方案中的搜索效率与全局优化能力，本文引入挥发系数自适应调节方法，以此改进蚁群算法。

当城市地铁-交通耦合网络覆盖区域较大时，大量没有被遍历搜索的站点信息素会变成0，以此会影响算法的全局寻优效果，而λ数值较大时，会导致历史遍历的站点路径被优选的概率较大，其数值较小时，又会导致算法的收敛速度下降。为此，需要设置最小挥发系数λ_{min}，解决上述问题。

则迭代过程中挥发系数的自适应设置方法是:

$$\lambda(k+1)=\begin{cases}\tau\lambda(k),\lambda(k+1)\geqslant\lambda_{\min}\\ \lambda_{\min},\lambda(k+1)<\lambda_{\min}\end{cases}\tag{9}$$

式中:τ为挥发约束系数,其数值大于0且小于1。

则基于改进蚁群算法的地铁-公交耦合网络布局方案求解设计步骤是:

(1)输入地铁-公交网络的基本参数,包括站点位置、线路走向。生成一组蚂蚁,每只蚂蚁代表一个可能的网络布局方案,并初始化它们的位置和信息素强度。设定初始的信息素挥发系数λ。

(2)根据当前的信息素强度和启发式信息(如距离、换乘次数等),每只蚂蚁依次选择下一个访问的站点或线路,构建自己的城市地铁-交通耦合网络布局方案。

(3)根据蚂蚁构建的网络布局方案,计算式(4)的目标函数值,更新路径上的$\beta(n',n)$。表现较好的方案(即目标函数值较小的方案),将在其路径上留下更多的信息素。利用式(9)自适应地调节信息素挥发系数。在算法初期,较大的挥发系数可以鼓励蚂蚁探索新的布局空间;在算法后期,较小的挥发系数则有助于蚂蚁在已发现的优秀布局方案附近进行精细搜索。将自适应调整的信息素挥发系数代回到式(7)中,迭代全局搜索最优布局方案。

(4)分析迭代次数是否为最大值,迭代次数为最大值时,停止迭代求解,在所有蚂蚁构建的网络布局方案中,选择目标函数值最小的方案作为最优解,输出最优解的城市地铁-交通耦合网络布局方案,包括站点位置、线路走向等信息。如果不满足终止条件,则回到步骤(2)。由此完成城市地铁-公交耦合网络布局效率优化。

3 实验分析

为测试本文方法在城市地铁-公交耦合网络布局问题中的使用效果,选取某地区复合交通网络作为实验对象,采集该网络的所有交通站点信息,。基于Intel Core i7-11700K处理器、DDR4 3 200 MHz内存、三星980 Pro 1 TB NVMe SSD、NVIDIA GeForce RTX 3060显卡的硬件主机环境,运行Windows 10系统。利用Oracle Database 19c数据库管理系统存储和管理地铁-公交耦合网络中的大量数据,包括站点信息(坐标、名称、换乘关系等)、线路信息(途经站点、运营时间、发车间隔等)、客流量数据等。将数据输入地理信息系统ArcGIS Pro 2.8中,处理地理空间数据,如地铁站点、公交站点的地理位置信息。该地区地铁1号线和存在换乘关系的4条公交线路的换乘乘客数目如表1所示。

换乘节点1属于地铁-公交换乘节点,在该节点的地铁车站300 m半径区域内,线路1存在2个可布局优化站点(公交站点1与公交站点2),则以换乘时间最短为参考,分析站点位置关系,如图2所示。

图2中,区间长度Z_1、Z_2、Z_3分别是255、60、205,Z_3距离是路段与地铁口入口距离、乘客在出入口到站台的步行等效距离值之和。

表1 到站换乘与到站非换乘数量详情

Table 1 details of arrival transfer and arrival non transfer quantity

公交站点	到站换乘人数/人	到站非换乘人数/人
1	46	25
2	58	19
3	46	7
4	43	16
5	25	3
6	0	0
7	4	0

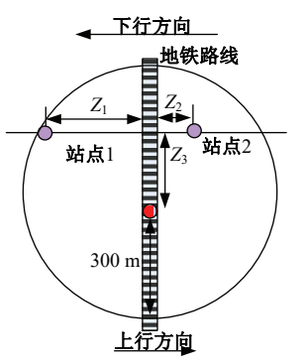

图2 站点位置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of station location

3.1 耦合网络基本拓扑结构连接结果

基于站点位置关系,利用Matlab R2021b运行第2节的基础拓扑结构连接建模研究内容,对城市地铁-公交换乘耦合网络进行连接,连接结果如图3所示,可知,本文方法可以将复杂的城市地铁-公交耦合换乘网络用耦合站点对和耦合线路关联起来,完成耦合建模,有效实现低碳交通资源互补。

3.2 蚁群算法求解速度改进效果

本文方法利用改进蚁群算法寻优求解布局优

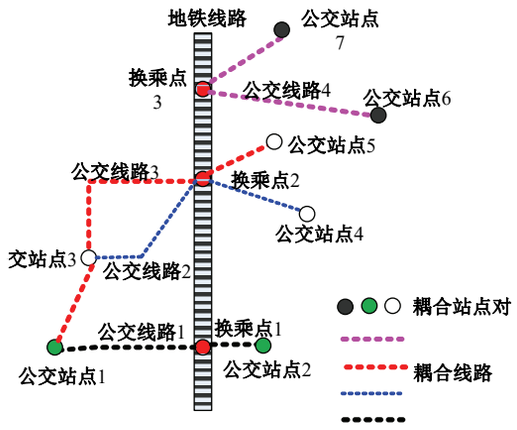

图 3　城市地铁-公交耦合换乘网络连接示意图

Fig. 3　Schematic diagram of urban subway-bus coupling transfer network connection

化方案。设置算法参数如下：蚂蚁数量为 500；信息素重要程度因为 3；启发函数重要程度因子为 6；信息素挥发系数为 0.29；最大迭代次数为 1000；信息素初始值为 0.01。

图 4 是本文方法改进蚁群算法前后，在不同种群数量（地铁-公交耦合网络站点布局优化方案数量）下，算法对地铁-公交耦合网络布局优化方案的求解时长。

如图 4 所示，在不同种群数量下，本文方法改进蚁群算法前后，算法对布局优化方案的求解时长差异明显，本文方法改进蚁群算法后，算法对布局优化方案的求解时长最大值低于 1 s，明显小于优化前。原因是本文方法引入了挥发系数的自适应调节方法，改进蚁群算法，通过自适应地调节挥发系数，算法能根据当前的搜索状态动态地调整信息素的更新策略，避免早熟收敛和搜索停滞的问题，从而显著缩短求解时长。

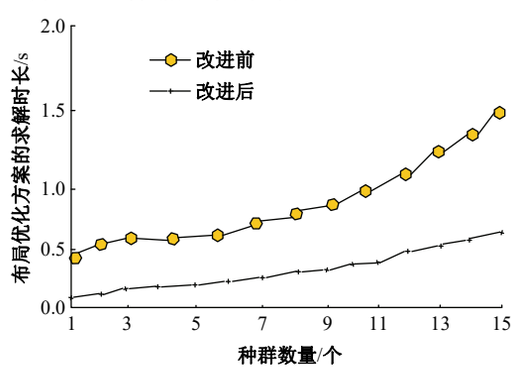

图 4　蚁群算法改进前后的求解时长变化

Fig. 4　Solving time duration change before and after ant colony algorithm improvement

3.3　城市地铁-公交耦合网络布局优化结果

选择图 3 耦合网络中的站点 1 作为布局优化站点，使用改进的蚁群算法寻优获得布局优化方案，调节此站点位置，优化布局结果如图 5 所示。

由图 5 可知，城市地铁-公交耦合网络布局优化方案是站点 1 位置向右缩短 16 m，站点 1 和站点 2 距离缩短，也就意味着缩短了站点换乘的步行距离。

3.4　布局方案的效率优化效果

以出行时间为布局方案的效率指标，测试图 4 所示布局方案下，站点优化距离和换乘步行变化详情如表 2 所示，交通运营时间变化如表 3 所示。

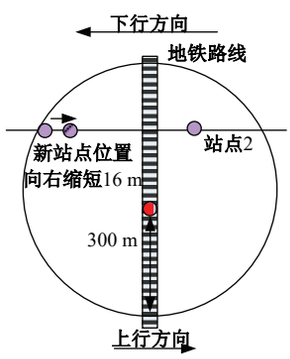

图 5　城市地铁-公交耦合网络布局结果

Fig. 5　Layout results of urban subway bus coupling network

表 2　站点优化距离和换乘步行变化详情

Table 2　Details of station optimization distance and transfer pedestrian changes

指　标	上行	下行
区间距离/m	326	716
换乘步行距离/m	276	276
优化后站点相对原站点调整距离/m	−16	16
换乘步行距离变化值/m	−16	−16
优化后区间距离/m	311	731
优化后换乘步行距离变化值/m	251	261
换乘步行时间/h	221	221
换乘步行时间变化率/%	−5.46	−5.46

表 3　交通运营时间变化

Table 3　Changes in transportation operation time

指　标	换乘乘客	到站非换乘乘客	总计
候车耗时/h	43.14	29.26	72.4
在车耗时/h	48.49	53.18	101.67
换乘耗时/h	21.09	—	21.09
出行总时间/h	112.72	82.44	195.16
优化后时间变化量/h	−1.18	0.06	−1.12

结合表2与表3可知,使用本文方法设计的地铁-公交耦合网络中的换乘站点后,优化后站点相对原站点调整距离为16 m,这表明在设计地铁-公交耦合网络时,对换乘站点的位置进行微调,以提高换乘效率。换乘乘客的换乘步行距离变化值为-16 m,则乘客换乘步长距离得到有效缩短;换乘乘客的换乘步行时间缩短-5.46%。步行时间的减少可直接提升换乘效率,减少乘客的等待和行走时间。从换乘乘客、到站非换乘乘客角度分析,换乘乘客的出行总时间、到站非换乘乘客出行总时间分别减少1.18 h、增多0.06 h,但增加幅度较小,且可能是由于换乘站点优化导致的局部交通调整所致。但总体是缩短-1.12 h。综上所述,使用本文方法设计的地铁-公交耦合网络中换乘站点后,换乘效率得到显著提升。同时,从乘客出行时间的角度来看,换乘乘客的出行总时间显著减少,尽管到站非换乘乘客的出行时间有所增加,但总体出行时间仍然呈现缩短趋势。这表明优化后的换乘站点设计,对提升地铁-公交耦合网络的整体运营效率具有积极意义。

3.5 布局方案的碳排优化效果

图6是本文方法设计的城市地铁-公交耦合网络、文献[3]设计的交通网络、文献[4]设计的交通网络的碳排放量,在某日早高峰与午高峰的出行工况中对比情况。

如图6所示,在某日早高峰与午高峰的出行工况中,本文方法设计的城市地铁-公交耦合网络碳排放量最低,效益最大,在早高峰时段(7:00~8:00)、午高峰时段(11:00~12:00)出现碳排峰值,其他时段排放量减少,总体低于1.5 kg/h。但和文献[3]设计的交通网络、文献[4]设计的交通网络的碳排放量相比,本文方法设计的交通网络具有更小的碳排放量,则碳排放效益更显著,满足低碳城市交通优化发展标准,由此可知,地铁-公交耦合网络不仅能提高乘客出行的便捷性和效率,也能显著降低低碳城市交通系统的总体碳排放水平。

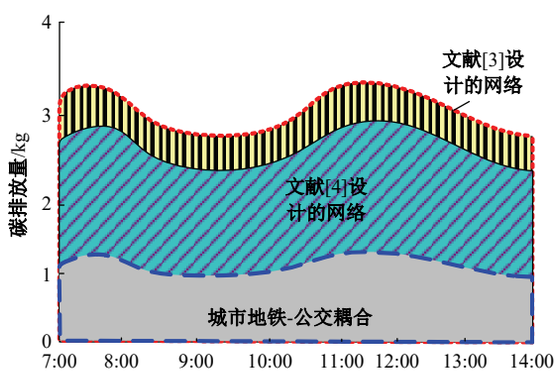

图6 不同交通网络的碳排放量对比

Fig. 6 Comparison of carbon emissions of different transportation networks

4 结束语

本文方法在构建城市地铁-公交耦合网络后,从低碳城市交通优化角度,以换乘乘客的换乘等待时间和到站非换乘乘客出行总时间最小化,且碳排效益最大化的地铁-公交耦合网络布局为优化目标,并改进蚁群算法,快速求解满足目标条件的地铁-公交耦合网络布局优化方案。实验证实:本文方法对于实际应用中的布局优化问题具有重要的指导意义,能够为实现快速地铁-公交耦合网络布局优化方案求解提供有力的支持。

参考文献:

[1] 孙珊. 综合交通枢纽与城市发展协调关系研究[J]. 铁道运输与经济, 2023, 45(5): 60-66.
Sun Shan. Research on coordination between comprehensive transportation hubs and urban development [J]. Railway Transport and Economy, 2023, 45(5): 60-66.

[2] 郑乐, 高良鹏, 陈学武. 基于多源数据的地铁公交换乘量影响因素与空间异质性分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(2): 128-138.
Zheng Le, Gao Liang-peng, Chen Xue-wu. Investigating influencing factors on metro-bus transfer demand incorporating spatial heterogeneity based on multi-source data[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(2): 128-138.

[3] 刘志勇, 李文帅, 李思奇, 等. 基于层间关联性的复合公共交通网络布局优化策略[J]. 北京交通大学学报, 2024, 48(3): 83-91.
Liu Zhi-yong, Li Wen-shuai, Li Si-qi, et al. Composite public transport network layout optimization strategy based on interlayer correlation[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2024, 48 (3): 83-91.

[4] Hosseini A, Wadbro E. A hybrid greedy randomized heuristic for designing uncertain transport network layout[J]. Expert Systems with Application,

2022,190(3): 1-10.

[5] 李欣, 戴章, 李怀悦, 等. 基于连续近似模型的轨道交通与常规公交耦合优化设计[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(2): 206-213.
Li Xin, Dai Zhang, Li Huai-yue, et al. Joint optimization of urban rail transit and local bus transit:continuous approximation approach[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(2): 206-213.

[6] 孙会君, 冯宗旭, 郑汉坤. 考虑地铁运营中断下多站协同的接驳公交优化研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(2): 111-120.
Sun Hui-jun, Feng Zong-xu, Zheng Han-kun. Optimization of bus bridging considering multi-station coordination under metro disruption[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(2): 111-120.

[7] 朱敏清, 张姝婷, 崔洪军, 等. 公交引导发展模式下天津市社区型地铁站点与服务设施布局协调性研究[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(1): 44-48.
Zhu Min-qing, Zhang Shu-ting, Cui Hong-jun, et al. Coordination of community metro station and public service facility layout under TOD guidance in tianjin[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(1): 44-48.

[8] 程国柱, 张宇洁, 冯天军. 严寒城市地铁-公交复合网络承载力计算方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(9): 101-110.
Cheng Guo-zhu, Zhang Yu-jie, Feng Tian-jun. Carrying capacity calculation method of subway-bus composite network in severe cold city[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(9): 101-110.

[9] 陈燕申. 国内外城市轨道交通分类规则与方法研究[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(9): 57-61.
Chen Yan-shen. Classification rules and methods of urban rail transit in china and abroad[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(9): 57-61.

[10] 杨亚璟, 吴钊, 宾涛. 轨道交通单线接运电动公交调度优化模型[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2024, 43(4): 52-59.
Yang Ya-zao, Wu Zhao, Bin Tao. Scheduling optimization model of single line rail transit electric feeder bus [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2024, 43(4): 52-59.

[11] 陈伟, 李宗平. 基于系统动力学的轨道交通客流拥堵传播研究[J]. 计算机仿真, 2022, 39(12): 160-164.
Chen Wei, Li Zong-ping. Research on congestion propagation of rail transit passenger flow based on system dynamics[J]. Computer Simulation, 2022, 39(12): 160-164.

[12] 严敏祖, 董冠鹏, 卢宾宾. 基于刷卡数据的公交-地铁换乘模式研究[J]. 地球信息科学学报, 2024, 26(6):1351-1362.
Yan Min-zu, Dong Guan-peng, Lu Bing-bing. Bus-subway interchange mode research with IC card data[J]. Journal of Geo-information Science, 2024, 26(6): 1351-1362.

[13] 王璞, 肖健和, 李明伦, 等. 地铁乘客站点的选择行为分析及预测[J]. 电子科技大学学报, 2022, 51(4): 623-629.
Wang Pu, Xiao Jian-he, Li Ming-lun, et al. Analyzing and predicting station choice behavior of subway passengers[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2022, 51(4): 623-629.

[14] 李特, 杨圣文, 韩清颖, 等. 区域综合客运复合网络构建及特征分析[J]. 公路交通科技, 2022, 39(5): 182-190.
Li Te, Yang Sheng-wen, Han Qing-ying, et al. Construction and characteristics analysis on regional comprehensive passenger transport composite network [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(5): 182-190.

[15] 田飞. 轨道交通复合型快线线站位研究——以厦门地铁 9 号线为例[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(4): 23-29.
Tian Fei. Multi-function express rail transit line positioning plan:a case study of Xiamen line 9[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2023, 36(4): 23-29.