

禁忌搜索与 SIC 模型结合在公交 冗余站点优化中的应用*

杨娜娜^{1,2}, 张青年¹, 黄健锋¹

(1. 中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510275;

2. 广东省国土资源测绘院, 广东 广州 510500)

摘要: 站点数量是影响公交系统可达性和效率的重要因素之一, 增设站点可提高公交可达性, 但降低系统效率, 延长出行时间; 适量减少冗余站点, 则能有效改善公交的服务质量。空间相互作用覆盖 (Spatial Interaction Coverage, SIC) 模型在满足区位需求量及站点吸引力相互作用强度之和最大化的前提下, 通过识别冗余站点, 提高公交系统效率。本文将 SIC 模型应用于东莞市公交冗余站点的优化中, 引入站点覆盖面积比值作为吸引力的指标之一, 并针对退火算法求解模型的不足, 采用禁忌搜索算法进行最优求解。实验表明, SIC 模型适用于国内公交冗余站点的优化研究, 且与退火算法相比, 所提出的算法对于处理复杂的空间优化问题具有更大的优越性。

关键词: 空间相互作用; GIS; 禁忌搜索算法; 退火算法; 可达性; 选址

中图分类号: U491 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2015) 04-0150-08

Improving Bus Stop Redundancy Using Tabu Search Algorithm and SIC Model

YANG Nana^{1,2}, ZHANG Qingnian¹, HUANG Jianfeng¹

(1. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Surveying and Mapping Institute, Lands and Resource Department of Guangdong
Province, Guangzhou 510500, China)

Abstract: The number of bus stops is a key factor for transit accessibility and system efficiency. Adding more stops along a route will increase coverage of potential riders, but slow down travel speeds, and then decrease system efficiency. The purpose of this study is to identify redundant stops and improve the quality of public transit services. We successfully integrate the tabu search algorithm (TS) and a GIS spatial optimization model called spatial interaction coverage (SIC) model to address this problem. This method can easily identify redundant stops without reducing the interaction between the demand areas and the transit facilities. In addition, a stop coverage ratio index (SCRI) is introduced as one of the indicators to access the attraction of the transit facilities. The proposed method has been tested in a bus route of Dongguan, China. The comparison experiment indicates that TS has better performance than SA especially in the computing time for bus stop selection. We believe that this method can be used as a planning tool to help traffic planners to improve public transit efficiency.

Key words: spatial interaction; GIS; tabu search algorithm; simulated annealing algorithm; accessibility; site selection

* 收稿日期: 2014-08-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40971210)

作者简介: 杨娜娜 (1989 年生), 女; 研究方向: 城市 GIS 与空间信息服务; 通讯作者: 张青年; E-mail: zhanggiszsu@163.com

公共交通是交通规划和城区管理的重要组成部分^[1]，与其它交通出行方式相比，其优势是效能高、耗能小^[2]。因此，大力发展公共交通对解决城市交通拥堵和环境污染等问题意义重大，同时有助于解决低收入人群出行难的问题，进一步促进社会公平。公共交通规划可以从宏观和微观层面分析其可达性以及交通效率，前者利用公交网络评价指标，如平均站距、公交线密度等来指导公交线路的优化^[3]；后者则关注单一线路中各个站点的设置^[4-6]。公交线路的站点疏密程度对交通效率有明显影响。对于站点数量较少的线路，停靠站点少，乘客的出行时间缩短，但其站点覆盖范围小，导致公交可达性较低。由此可见，适量布设或减少冗余站点，才能有效兼顾可达性和交通效率的平衡。本文主要探讨微观层面下公交站点的优化配置，利用空间相互作用覆盖（Spatial Interaction Coverage, SIC）模型^[7]识别出冗余站点，在最大化区位需求力及站点吸引力相互作用强度之和的前提下，提升公交的服务质量。

公交站点优化配置的关键是如何选取站点的位置及数量，使其服务达到最优，属选址研究的范畴。选址研究的典型问题有 p -中值问题和最大覆盖选址问题^[8]，将其应用于公交线路的优化中，难点是如何体现供应点与需求点之间的关系^[9-10]。 p -中值问题探究选定 p 个供应点的位置，使总的成本最小^[11]，其缺点是所有需求点都只能由最近的供应点提供服务，没有考虑供应点自身的吸引力和它们之间的竞争关系。最大覆盖选址问题则要求设施点在一定距离范围内覆盖更多的需求量，所有需求量也只分配到距离它最近的供应点，并假设从需求点到供应点的人数按一定线性方式递减^[12]。与传统选址模型不同的是，SIC 模型综合考虑了区位需求量和供应点（公交站点）吸引力的相互关系、站点间的竞争性以及空间作用随距离衰减规律，因此，更适合应用于公交冗余站点的优化配置中。

本文以广东省东莞市 29 路公交线为例，运用 SIC 模型与 GIS 空间数据处理技术对其开展优化研究。模型按照街区划分需求单元，以建筑物密度为权重计算各单元的人口密度，用以表征需求量；利用站点连通性、最近人行横道距离以及站点覆盖面积比值 3 个指标综合评价站点的吸引力。针对退火算法求解 SIC 模型时存在收敛速度慢、对初始值和参数敏感等不足，尝试利用禁忌搜索算法对模型进行最优求解。

1 基于禁忌搜索算法的空间相互作用覆盖模型

1.1 空间相互作用覆盖模型

SIC 模型最初被应用于美国 Mecklenburg 县的公交线路优化案例中，是一种结合空间相互作用、距离衰减规律和覆盖问题特点的最优化模型。其原理是将公交站点作为供应点，周边人口密度作为需求量，以最大化两者间相互作用强度之和为目标，通过选取必要数量的供应点，移除冗余站点，以达到优化公交可达性及交通效率的目的。模型充分考虑了公交站点对周边人群的吸引力，同时避免了需求点只由单个或最近的设施点提供服务，即站点之间允许存在竞争性。模型的目标函数如公式（1）和（2）所示^[7]：

$$\text{Maximize } Z = \sum_{i \in I} \sum_{j \in N_i} S_{ij} \quad (1)$$

$$S_{ij} = \left[\frac{a_i w_j^\alpha d_{ij}^{-\beta}}{\sum_{k \in N_i} w_k^\alpha d_{ik}^{-\beta} X_k} \right] X_j \quad \forall i \in I, \forall j \in J,$$

$$X_j \in (0, 1), \sum X_j = p \quad (2)$$

目标函数（1）表示最大化所有需求点与公交站点（供应点）的相互作用强度之和， I 和 J 分别是需求点和公交站点集合。决策变量 S_{ij} 表示需求点 i 与公交站点 j 的相互作用强度。其中， a_i 为需求点 i 的区位需求量，通常用人口密度来表示； w_j 表征站点 j 的吸引力，可用连通性等指标予以评价，将在后面详细讨论，其影响因子为 α 。由式（2）可知，当需求量或站点吸引力为 0 时， $S_{ij} = 0$ 。 d_{ij} 表示作用点之间的欧氏距离或网络距离， β 为距离衰减因子，即随着作用点之间的距离增大，其相互作用强度也随之降低。模型从所有公交站点中选取 p 个作为优化后的站点序列， X_j 为二值变量，用于判断站点是否被选择，当某个站点 j 被选择时， $X_j = 1$ ，否则为 0。SIC 模型只考虑一定距离范围内需求点与公交点的相互作用，对于每个需求点 i ， N_i 为其 R 距离范围内的站点集合，因此，只有 N_i 中的站点存在竞争性。由式（2）的分母可知，当存在多个站点服务于同一需求点时，需求量将依照一定的权重关系予以分配。

1.2 公交站点吸引力评价指标

SIC 模型较一般选址模型的优势在于考虑了公交站点对需求点的吸引力，如何定量描述站点的吸引力，是模型能否得到应用的关键。文献 [7] 将站点连通性和最近人行横道距离分别作为评价站点

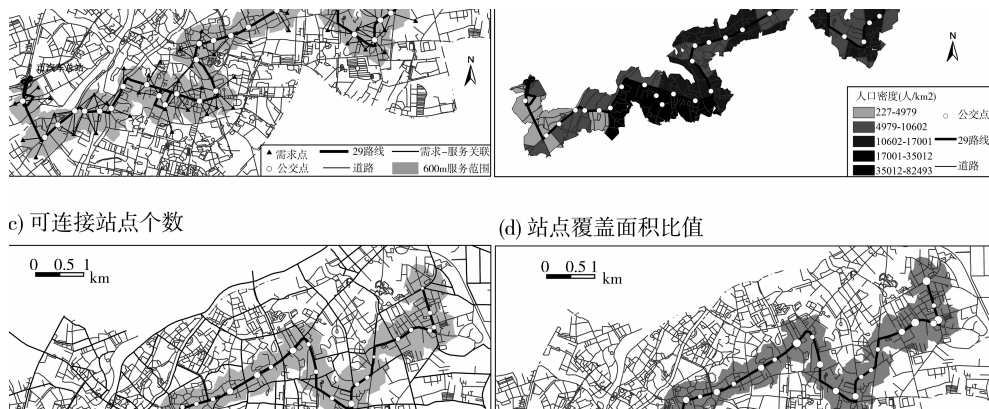


图 1 公交站点理想覆盖范围和实际覆盖范围

Fig. 1 Ideal (circular) and actual (convex hull) bus stop access coverage

吸引力的依据。本文综合利用站点连通性、最近人行横道距离, 以及站点覆盖面积比值等指标来计算站点吸引力。

1.2.1 站点连通性 站点连通性是指从某个公交站点出发^[7], 在 k ($k \geq 0$) 次换乘中, 可到达的其它站点总个数。一般而言, 在公交线路的交汇站点处, 其连通性往往较高。经过标准化处理, 站点 j 的连通性按公式 (3) 计算:

$$\text{Connectivity}_j^k = \frac{\sum_{e \in E, e \neq j} C^k(j, e)}{\text{Max}(\sum_{e \in E, e \neq j} C^k(j, e))} \quad j \in J, J \in E \quad (3)$$

式中, E 为该区域内所有公交站点的集合, 函数 $C^k(j, e)$ 用于判断站点 j 在 k 次换乘中是否可以到达站点 e , 如能到达, 值为 1, 否则为 0。由公式 (3) 的计算结果可知, 站点连通性值在 (0, 1) 范围内。

1.2.2 最近人行横道距离 公交站点距人行横道的距离是公交规划的重要指标, 如果公交站点离人行横道较远, 将使乘客不得不走更远的距离穿越道路, 这也导致行人乱穿马路的现象频发, 增加交通事故发生的概率。因此, 考虑到乘客的安全以及交通的顺畅度, 站点一般设置在离人行横道 20 ~ 50 m 范围内为宜。可见, 离人行横道距离的远近, 是站点吸引力的重要评价指标, 其计算过程如公式 (4) 所示:

$$\text{Crosswalk}_j = \frac{\text{Max}(\sum_{j \in J} D(j)) - D(j) + L}{\text{Max}(\sum_{j \in J} D(j))} \quad (4)$$

式中, $D(j)$ 表示站点 j 与最近人行横道的距离。为避免计算结果为 0 的情况出现, 公式中引入常量 L , 表示站点与最近人行横道的标准最低距离。由

式 (4) 可知, 当 $D(j)$ 越小, Crosswalk_j 越大, 站点的吸引力就越大。

1.2.3 站点覆盖面积比值 有学者在评价公交线路覆盖率时采用站点指定半径缓冲区的面积来计算, 但其仅仅表示站点的理想可达覆盖范围 (Ideal Stop Access Coverage, ISAC), 对于实际可达覆盖范围 (Actual Stop Access Coverage, ASAC), 其形状、大小往往受道路网络的限制, 且覆盖面积一般小于理想的覆盖范围。图 1 说明了 ISAC 和 ASAC 之间的差异。

为了统一分析各个站点覆盖范围的差异, Osman 等^[13] 利用 ASAC 与 ISAC 之间的比值, 即站点覆盖面积比值 (Stop Coverage Ratio Index, SCRI), 评价公交站点的可达性, 其计算过程如公式 (5) 所示:

$$\text{SCRI}_j^R = \frac{\text{ASAC}_j}{\text{ISAC}_j} = \frac{\text{Area}(\text{ConvexHull}^R(j))}{\pi \times R^2} \quad j \in J \quad (5)$$

在式 (5) 中, 函数 $\text{ConvexHull}^R(j)$ 表示从站点 j 沿四周出发, 在距离为 R 的范围内可以到达的所有最远端点围成的“凸包”几何, $\text{Area}()$ 是求解多边形面积的函数。由于 SCRI 计算了各站点的实际覆盖率, 在一定程度上反映了公交站点可达性的差异, 本文将其作为站点吸引力的评价指标之一。

1.2.4 公交站点吸引力计算 文献 [7] 分别使用站点连通性和最近人行横道距离计算站点的吸引力, 其实验结果对单指标评价的规划实践有一定的意义, 然而对于复杂事物的评价其片面性也是显而易见的。因此, 本文选取了比较具有代表性的上述三个指标对站点吸引力进行多指标综合评价, 通过赋予它们各自的权重值, 最终加权求和得到站点吸

引力,如公式(6)所示。权重的分配一般采取专家打分的方法或者依照具体线路的站点规划需要进行赋值。由式(6)可知,当某个权重值设置为1时,即为单指标评价问题。

$$w_j = w_c \times \text{Connectivity}_j^k + w_n \times \text{Crosswalk}_j + w_s \times \text{SCRI}_j^R, \quad w_c + w_n + w_s = 1 \quad (6)$$

1.3 基于禁忌搜索算法解决组合优化问题

由于目标函数中存在 α 和 β 两个影响因子,当两者不同时等于1时,目标函数是非线性的,求解时需从数量庞大的站点组合中选择最佳的组合。不少学者应用启发式优化算法解决该类问题,常用的有模拟退火算法(Simulated Annealing, SA)^[8],禁忌搜索算法(Tabu Search)^[14],遗传算法(Genetic Algorithm, GA)^[15]以及蚁群算法(Ant Colony Optimization, ACO)^[16]等。文献[7]最先使用SA算法求解SIC模型,算法首先随机选取 P 个站点作为候选组合,其余的为非候选组合,通过邻域置换的方式,将候选组合中的一个站点与非候选组合中的某个站点进行交换,从而产生新的候选组合,通过比较交换前后两组组合所对应的目标函数值大小,选取函数值较大的组合作为下次邻域置换的对象。SA算法在搜索目标解过程中具备概率突跳性,可有效避免陷入局部极值并最终得到全局最优解。然而,其性能受初始值、最大温度以及各温度下的迭代次数的影响,并对参数值较为敏感。因此,SA算法收敛速度慢、执行时间较长,且不一定能找到全局最优解。针对SA算法的不足,本文采用禁忌搜索算法对SIC模型进行求解。

禁忌搜索算法是一种全局性邻域搜索算法,在很多领域尤其是组合优化方面应用广泛。其主要思想是采用一个禁忌表来记录已到达过的局部最优点,在下次搜索中避免重复搜索这些点,从而跳出局部最优点,获得全局最优解^[17]。该算法遵循“藐视准则”,即在优化过程中若获得比当前最优解更优的解时,可清空禁忌表的信息,继而激励对优良状态的局部搜索。与模拟退火算法不同的是,禁忌搜索算法不需要其它优化参数,只要设计合理的邻域结构、禁忌表长度以及禁忌对象即可。依照文献[7]的邻域置换方式,利用结构 $\text{Tuple} \langle a, b \rangle$ 表示禁忌对象,在每一次交换过程中, a 记录从候选组合排除的站点序号,而 b 则记录添加进候选集合的站点序号,利用该结构,即可将禁忌搜索算法应用于求解SIC模型。整个禁忌搜索算法的流程如下:

步骤1 产生初始站点组合 InitialSolution 和初始解 InitialFitness, 分别赋予当前组合 CurrentSolu-

tion 和当前解 CurrentFitness, 用于邻域置换; 初始化禁忌队列 TabuQueue ($\text{Queue} \langle \text{Tuple} \langle a, b \rangle \rangle$);

步骤2 若当前迭代次数小于最大迭代次数, 清空候选邻域组合 NextSolution 及最小化候选邻域解 NextFitness, 并将候选禁忌对象 NextTabu 置空, 转向步骤3; 否则, 转向步骤7;

步骤3 若当前邻域搜索次数小于最大邻域搜索次数, 产生邻域组合 NeighborSolution 与邻域解 NeighborFitness, 获得置换前后的 Move, 判断该 Move 是否已经在 TabuQueue 中, 如果不在, 转向步骤4; 否则重复执行步骤3; 若迭代次数已达到最大邻域搜索次数, 则转向步骤5;

步骤4 比较 NeighborFitness 与 NextFitness, 若 NeighborFitness 较大, 将 NeighborSolution 和 NeighborFitness 分别赋予 NextSolution 和 NextFitness, 并把对应的 Move 作为候选禁忌对象 NextTabu, 转向步骤3; 否则, 直接返回步骤3;

步骤5 比较当前最优解 BestFitness 与 NextFitness 的大小, 若 NextFitness 较大, 即满足“藐视准则”, 可将禁忌队列 TabuQueue 清空, 并将 NextSolution 和 NextFitness 作为当前最优组合 BestSolution 与最优解 BestFitness, 转向步骤6; 否则, 直接转向步骤6;

步骤6 将 NextTabu 加入 TabuQueue 中, 将 NextSolution 和 NextFitness 作为下一次用于邻域置换的 CurrentSolution 和 CurrentFitness, 转向步骤2;

步骤7 输出当前最优组合 BestSolution 与最优解 BestFitness, 结束优化运算流程。

2 数据来源及处理

2.1 研究区公交线路情况

东莞市公交线网布局不尽合理, 站点距离目的地过远, 候车时间长, 换乘不便, 线路多绕弯, 偏僻路段公交难等, 是东莞公交所面临的问题。本文研究的29路公交线全长约19.5 km, 起始于万江街道的市汽车总站, 途径南城、莞城以及东城街道, 终点设置在莞城科技园南, 共35个汽车站点, 单程时间约为1 h 40 min。从图2(a)可以看到, 该线路公交站点过多, 部分站点间距过近, 可能存在冗余站点。

2.2 利用GIS获取空间数据

实验使用的人口普查数据来源于2012年东莞市统计年鉴, 以镇区为统计单位; 在百度地图中, 利用 Javascript 抓取网页响应的 JSON 数据, 结合 Python 语言对其进行格式转换, 最终得到该区域的

公交点线数据; 道路网数据可以通过矢量化获得。所有矢量数据都经过一定的投影变换和空间校正处理。利用 ArcGIS 平台的 Network Analyst Tools 和 Analysis Tools 等工具箱, 能方便地计算模型的各种参数。

2.2.1 需求量的计算 需求量用人口密度表示, 可从人口普查数据中得到各镇区的人口密度, 但微观层面的站点优化问题并不适宜采用大尺度的指标^[18]。文献 [6] 在研究临界簇模型应用于公交线路网可达性评价时, 认为人口密度与建筑物密度存在宏观关联性, 利用建筑物密度作为人口空间配分的权重。虽然该方法存在一定的偏差, 但不失为一种现实的人口密度估计方法^[6]。因此, 本文首先对研究区域按照街道划分^[19], 用其中心点表示各个需求单元, 然后分别计算各个单元内的建筑物密度和人口总数, 最后依比例得到各个单元的人口密度, 即需求量。图 2(a) 表示了需求点的空间分布, 用直线关联距离其 600 m 范围内的公交站点; 图 2(b) 是关于人口密度的空间分布情况, 在公交线的起始站和终点站附近, 其人口密度相对小, 在南城与莞城的交界区处其人口密度最大。

2.2.2 吸引力指标的计算 利用公式 (3) - (5) 可以得到站点吸引力的各项指标值。其中, 站点连通性没有考虑换乘的情况, 即公式 (3) 中 $k = 0$, 可通过统计站点个数求得。对于最近人行横道和站点覆盖面积比值的计算, 需要先对道路网建立网络数据集, 然后分别使用 Network Analyst Tools 的“最近设施点分析”和“服务区分析”功能计算指标值。在计算站点覆盖面积比值的过程中, 参考《城市道路设计规范》^[20] 中 300 m 半径和 500 m 半径应分别覆盖城市用地 50% 和 90% 以上的要求, 将站点覆盖距离 R 设置为 600 m, 以包含该站点服务区内的全部城市用地。原因是本文采用的站点覆盖范围为该站点的整个服务区的凸包, 该凸包的外接圆显然略大于半径为 500 m、覆盖 90% 城市用地的圆形区域。

图 2(c) 表示站点连通性 (可连接站点个数) 的分级情况, 可见, 起始站点与交汇站点的连通性都比较大。图 2(d) 是各个站点覆盖面积比值的分级图, 其值往往与周边道路网密度相关, 因此, 可以更真实地反映出站点的可达范围。

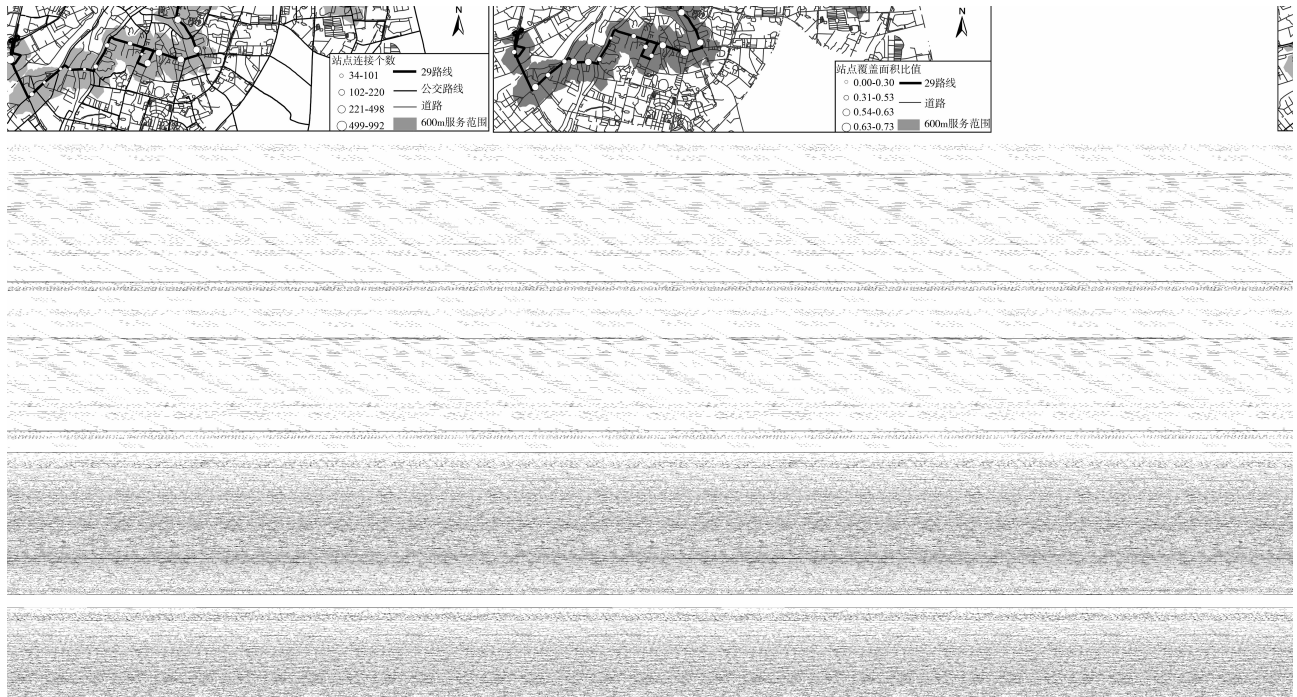


图 2 利用 GIS 获取 SIC 模型所需的空间数据

Fig. 2 Obtain spatial data for SIC model using GIS

3 模型运行结果及比较

本文程序用 C# 实现, 在 I5 2.6 GHz 处理器上运行。用文献 [7] 的模拟退火算法与本文提出的

算法进行对比, 按公式 (1) 和 (2) 中定义的目标函数做对比实验, 同时考虑站点吸引力和需求量对选址的影响。SIC 模型参数设置如下: 站点吸引力因子 α 为 2, 其中, 指标权重分配采用两种方

案, 第一种方案中 w_c, w_n, w_s 分别为 1、0、0, 即仅考虑站点连通性的单指标评价方案; 第二种方案中参考专家意见, w_c, w_n, w_s 分别为 0.15、0.15、0.7, 即优先考虑站点覆盖面积比值的多指标评价方案; 距离衰减因子 β 为 1, d_{ij} 为作用点之间的欧氏距离。在模拟退火算法中, 初始温度为 2 000, 冷却系数是 0.98, 每个温度级别下分别迭代 500 次。而在禁忌搜索算法中, 邻域置换次数为 30 次, 禁忌表长度为 18。实验时, 从 35 个站点中依次选择 29、27、25、23、21、19、17 个站点计算模型最优解, 当选择 17 个站点时, 其组合个数为 $C_{17}^{35} = 4.5 \times 10^9$ 。要想一一比较它们的优劣, 是十分困难的。因而使用启发式优化算法显得十分必要。实验结果对比见表 1-3。

从表 1 看出, 在选取不同站点数的情况下, 禁

忌搜索算法所得到的目标函数值都不低于模拟退火算法。从函数值的分布可以看出, 当选择 21 个以上站点时, 对应的最大相互作用之和均为 7.77×10^5 , 即选取更多站点也无法提高系统的相互作用强度之和, 因此, 本文认为选取 21~25 个站点比较适宜; 表 2 比较了 SA 和 TS 在算法时间上的优劣, TS 算法用时低于 SA 算法的 23%, 在多指标评价中其差异更明显, 仅为 6.5%, 说明 TS 在此组合优化问题中效率更高; 两种算法均使用了相同的邻域置换方式, 但由于 TS 算法利用禁忌表避免重复搜索一些禁忌置换, 更容易跳出局部最优, 只需较少次数的置换就能找到优质解, 表 3 的对比结果也说明了该情况, TS 算法的置换次数为 SA 算法的不足 20%。

表 1 模拟退火算法与禁忌搜索算法目标函数值对比

Table 1 Comparison of the improvement of objective function values between the SA and TS in bus-stop selection

方案	目标站点数	29	27	25	23	21	19	17
单个指标	SA/ 10^5	7.77	7.77	7.77	7.74	7.64	7.59	7.33
	TS/ 10^5	7.77	7.77	7.77	7.77	7.77	7.74	7.62
	(TS/SA)/%	100.00	100.00	100.00	100.36	101.71	102.00	103.98
多个指标	SA/ 10^5	7.77	7.77	7.77	7.77	7.70	7.56	7.39
	TS/ 10^5	7.77	7.77	7.77	7.77	7.77	7.74	7.62
	(TS/SA)/%	100.00	100.00	100.00	100.00	100.84	102.39	103.18

表 2 模拟退火算法与禁忌搜索算法时间对比

Table 2 Comparison of computing time between the SA and TS

方案	目标站点数	29	27	25	23	21	19	17
单个指标	SA/s	0.48	14	5.5	13.1	6.62	0.9	2.66
	TS/s	0.11	0.057	0.64	0.13	0.2	0.04	0.09
	(TS/SA)/%	22.71	0.41	11.60	0.99	3.07	4.67	3.31
多个指标	SA/s	24.4	9.25	8.11	8.06	19.95	8.67	1.98
	TS/s	0.27	0.04	0.02	0.11	0.36	0.09	0.13
	(TS/SA)/%	1.12	0.41	0.27	1.41	1.83	1.01	6.46

表 3 模拟退火算法与禁忌搜索算法邻域置换次数对比

Table 3 Comparison of neighbor movements between the SA and TS

方案	目标站点数	29	27	25	23	21	19	17
单个指标	SA/ 10^5 次	2.41	79.99	34.72	88.16	47.53	6.98	21.9
	TS/ 10^5 次	0.45	0.015	3.79	0.71	1.23	0.22	0.67
	(TS/SA)/%	18.43	0.18	10.91	0.80	2.58	3.08	3.05
多个指标	SA/ 10^5 次	135.83	53.55	50.38	54.37	144.33	63.36	16.48
	TS/ 10^5 次	1.48	0.21	0.11	0.77	2.53	0.69	0.89
	(TS/SA)/%	1.09	0.39	0.22	1.42	1.75	1.09	5.39

图 3 是 SA 算法和 TS 算法在选取 23 个站点数时, 对应的函数值收敛曲线图。其中, 图 3 (a) 为单指标评价的计算结果, 图 3 (b) 则为考虑多指标评价时的计算结果。可见 TS 算法能在短时间内搜索得到全局最优解, 其收敛速度较快。相比于 TS 算法, SA 算法收敛速度较慢, 容易陷入局部最优解, 其概率突跳性在求解过程中作用不明显。因此, TS 算法在性能和算法时间上均优于 SA 算法, 更适合用于求解 SIC 模型。

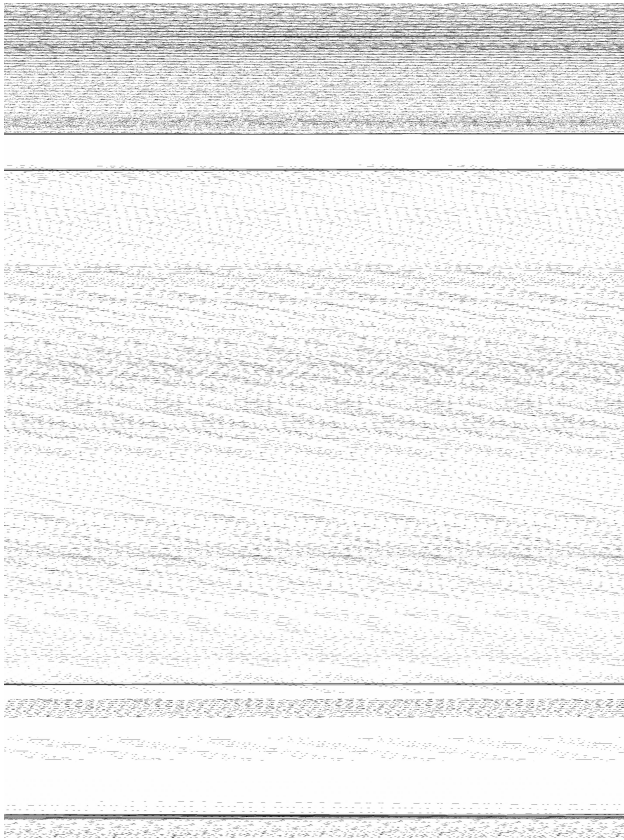


图 3 SA 与 TS 目标函数值收敛曲线图 (23 个目标)

Fig. 3 Convergence rates of the SA and the TS of twenty three targets

为了更好地体现 SIC-TS 模型识别公交冗余站点的效果, 将两种权重分配方案对应的站点选取结果显示在地图上, 以便直观地分析其有效性。图 4 (a) 是单指标评价 (最大化站点连通性) 后的选取结果; 而图 4 (b) 则为多指标评价 (优先考虑站点覆盖面积比值) 的选取结果。

由图 4 (a) 可见, 连通性较大的站点大多数被选择, 对于起始站点 (市汽车总站), 其连通性是所有站点中最大的, 周围的需求点均由它提供服务; 在南城和莞城的交界处, 即人口密度最大的区域, 虽然站点间距比较小, 但几乎全部被选择了,

说明了该区域受区位需求力的影响较大; 在公交线路的中段, 模型识别出的冗余站点较多, 被选择的站点其连通性较高或周边人口密度较大, 由于该路段相对平直, 经优化后的公交线必能有效减少单程所需时间; 而在线路的末段, 站点的连通性相差不大, 能否被选择视乎站点在竞争中谁的优势更为明显。

由图 4 (b) 可见, 在优先考虑站点覆盖面积比值的情况下, 可以避免线路中出现连续多个站点被选择的情况, 覆盖面积比值较大的站点基本上被选择。在线路的多个拐点处, 被选择的站点较多, 这可能与指标的计算方法有关。对比分析图 4 (a) 和图 4 (b), 两者仅在局部位置有所不同, 对于 SIC 模型而言, 区位需求量仍然占主要地位, 而站点吸引力起着指导性的作用。

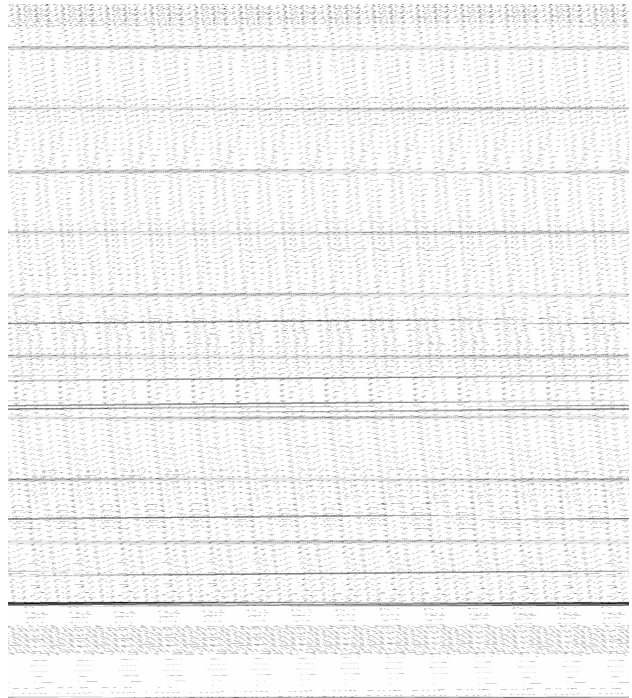


图 4 不同吸引力指标权重下的站点选取结果

Fig. 4 Final Result in bus stop selection of route 29 with different evaluations of attraction

4 结 论

本文提出了将禁忌搜索算法与 GIS 结合来解决公交冗余站点优化问题的新方法, 该方法基于空间相互作用覆盖 (SIC) 模型。与一般的选址模型不同, SIC 模型同时考虑了供应点的吸引力、供应点之间的竞争性以及空间作用随距离衰减的特点, 能更有效体现公交站点与区位需求量之间的联系。由

于禁忌搜索算法采用了有效的禁忌搜索策略,且基本不受初始参数的影响,在求解 SIC 模型时,其所需的邻域置换次数比退火算法减少了 80% 以上,计算效率得到了较大的提高。实验以东莞市 29 路公交线的优化为例,运用站点连通性、最近人行横道距离以及站点覆盖面积比值来综合评价站点的吸引力,通过赋予它们不同的权重,可以为公交规划决策者提供不同规划目的优化方案。本文研究着眼于单一线路的站点优化问题,本线路的站点选择对其他线路的影响可以在一定程度上通过“站点连通性”指标而得以体现,但这种分析模式不适用于整个公交线路网的整体优化。此外,在评价公交站点吸引力时,如何更合理地选取评价指标并分配权重,仍然有待下一步的研究。

参考文献:

- [1] HUANG Z, LIU X. A Hierarchical Approach to Optimizing Bus Stop Distribution in Large and Fast Developing Cities[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2014, 3(2):554 - 564.
- [2] 田春春. 常规公交停靠站优化设置研究[D]. 长沙:中南大学,2009.
- [3] 王运静,李强. 北京市地面公共交通线路网现状评价[J]. 交通运输系统工程与信息,2007,7(5):135 - 141.
- [4] 张小丽,陈峻,王伟,等. 基于公交可达性的公交站距优化方法[J]. 东南大学学报:自然科学版,2009,39(2):384 - 388.
- [5] 董洁霜,刘彦延,刘巍巍. 模糊层次分析法在公交站点选址中的应用[J]. 交通与运输,2013,28(H12):35 - 39.
- [6] 陈翔,李强,王运静,等. 临界簇模型及其在地面公交线网可达性评价中的应用[J]. 地理学报,2009,64(6):693 - 700.
- [7] DELMELLE E M, LI S, MURRAY A T. Identifying bus stop redundancy: a gis-based spatial optimization approach[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2012, 36(5): 445 - 455.
- [8] MURRAY A T, CHURCH R L. Applying simulated annealing to location-planning models[J]. Journal of Heuristics, 1996, 2(1): 31 - 53.
- [9] 马林兵,曹小曙. 基于 GIS 的城市公共绿地景观可达性评价方法[J]. 中山大学学报:自然科学版,2007,45(6):111 - 115.
- [10] 宋正娜,陈雯,张桂香,等. 公共服务设施空间可达性及其度量方法[J]. 地理科学进展,2010(10):1217 - 1224.
- [11] 何晋强,黎夏,刘小平,等. 蚁群智能及其在大区域基础设施选址中的应用[J]. 遥感学报,2009(2):246 - 256.
- [12] CROMLEY R G, LIN J, MERWIN D A. Evaluating representation and scale error in the maximal covering location problem using GIS and intelligent areal interpolation[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2012, 26(3): 495 - 517.
- [13] OSMAN A O. Using GIS for measuring transit stop accessibility considering actual pedestrian road network[J]. Journal of Public Transportation, 2010, 13(4):23 - 40.
- [14] BETTINGER P, SESSIONS J, BOSTON K. Using tabu search to schedule timber harvests subject to spatial wildlife goals for big game[J]. Ecological Modelling, 1997, 94(2): 111 - 123.
- [15] 黎夏,叶嘉安. 遗传算法和 GIS 结合进行空间优化决策[J]. 地理学报,2004,59(5):745 - 753.
- [16] 倪捷,刘志强. 基于蚂蚁算法的公交网络优化方法研究[J]. 交通与计算机,2007,25(1):36 - 39.
- [17] 刘毅,熊盛武. TSP 问题的禁忌模拟退火求解[J]. 计算机工程与应用,2009,45(31):43 - 45.
- [18] BIBA S, CURTIN K M, MANCA G. A new method for determining the population with walking access to transit[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(3): 347 - 364.
- [19] 杨必胜,栾学晨. 城市道路网几何结构模式的自动识别方法[J]. 中国图象图形学报,2009,14(7):1251 - 1255.
- [20] GB50220 - 1995. 城市道路交通规划设计规范[S]. 北京:中国标准出版社,1995.