Modeling and Simulation 建模与仿真, 2024, 13(6), 5902-5910
Published Online November 2024 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/mos
https://doi.org/10.12677/mos.2024.136538

Hans汉斯

基于游客满意度的县域旅游公交网络优化设计

吴国录，董洁霜

上海理工大学管理学院，上海

收稿日期：2024年10月13日；录用日期：2024年11月6日；发布日期：2024年11月13日

摘　要

近年来，旅游业发展迅速。县域常因为其具有优美的自然风景成为旅游的目的地，旅游公交作为服务县域旅游的重要组成，本文从游客旅游体验出发，提出了一种多目标优化的旅游公交网络设计模型。模型综合考虑游客平均时间成本和旅游体验指数，以游客满意度最大化为优化目标，利用贪婪算法生成初始解，并通过遗传算法对初始解迭代改进计算最大游客满意度的公交线路方案。通过数值案例验证模型在旅游公交的设计中的合理性。结果表明，算法可以有效的求解县域旅游公交网络设计模型；游客平均时间成本对游客满意度的影响度会导致旅游公交线路设计要素产生变化。

关键词

旅游公交，公交网络设计，遗传算法，多目标优化

Optimization Design of County Tourism Bus Network Based on Tourist Satisfaction

Guolu Wu, Jieshuang Dong

School of Managenment, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Oct. 13th, 2024; accepted: Nov. 6th, 2024; published: Nov. 13th, 2024

Abstract

In recent years, tourism is developing rapidly. The county often becomes a tourist destination because of its beautiful natural scenery, and for tourist buses as an important component of the service county tourism, this paper proposes a multi-objective optimization tourist bus network design model from the tourists' travel experience. The model comprehensively considers the average time cost of tourists and the tourism experience index, takes the maximization of tourist satisfaction as the optimization objective, generates the initial solution by using the greedy algorithm, and iteratively improves the initial solution by genetic algorithm to calculate the bus route scheme with the maximum

文章引用: 吴国录, 董洁霜. 基于游客满意度的县域旅游公交网络优化设计[J]. 建模与仿真, 2024, 13(6): 5902-5910.
DOI: 10.12677/mos.2024.136538

tourist satisfaction. The rationality of the model in the design of tourist buses is verified through numerical cases. The results show that the algorithm can effectively solve the county tourism bus network design model; the degree of influence of the average time cost of tourists on tourists' satisfaction will lead to changes in the design elements of tourism bus routes.

Keywords

Tourism Bus, Bus Network Design, Genetic Algorithm, Multi-Objective Optimization

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

随着经济的发展和社会的进步，越来越多的人选择在假期或周末等闲暇时间旅游。世界旅游组织(UNWTO)的数据显示，国际旅游人数从 20 世纪末的数亿人次增长到如今的十几亿人次，国内旅游市场也呈现出爆发式增长态势，根据文旅部数据显示，旅游规模和旅游消费水平不断扩大，2023 年国内出游人次达 48.91 亿。这一系列数据表明，旅游业正成为全球经济增长的重要动力之一。县域往往因为其自然景观优美成为人们休闲旅游的目的地。县域旅游存在旅游淡旺季中客流量差异巨大，道路资源在高峰期较为紧张的问题。旅游公共交通具有高效、环保、经济的特点，可以有效缓解旅游高峰期的拥堵问题，成为县域旅游的重要组成部分。如何合理的设计旅游公交网络是学者需要研究的课题。

旅游公交网络设计问题属于城市公交网络设计问题，在研究旅游公交网络设计时，可以借鉴常规城市公交网络设计的理论模型和方法。谭倩从乘客利益、公交企业利益和公交可持续发展三个方面，建立公交网络设计的双层规划模型[1]。柳伍生考虑路段行程时间的不确定性，建立乘客总出行时间最短和公交公司利益最大的多目标优化模型[2]。孙洋以接运公交服务乘客量最大化、接运乘客平均成本最小化、运营成本最小化为目标，设计遗传－变邻域搜索算法解决接运公交的多目标优化模型[3]。

城市公交网络优化一般以用户时间最短、企业利润最大或运营费用最小为目标，旅游作为一种弹性需求，游客对旅游活动的满意度受到旅游交通服务质量的影响[4]，因此旅游公交往往从用户收益考虑。李妍峰在考虑旅游公司运营成本和游客的出行时间的前提下，引入服务水平作为游客满意度，建立旅游公共交通网络设计的整数规划问题[5]。丁子航考虑游客收益和景点饱和度因素，建立景区交通组织优化模型[6]。Sumalee Ngeoywijit 同时考虑医疗和旅游作为公交服务，从公交总距离和总行驶时间两个方面构建智能公交系统[7]。

县域旅游公交网络设计问题属于非确定性多项式难题(NP-hard)，需要借助遗传算法、模拟退火法、蚁群算法等启发式算法进行求解。张辉[8]将乘客总乘车时间和换乘次数结合建立城市公交网络设计模型，采用蜂群算法求解，并证明其在大规模公交网络设计上的适用性。刘好德、杨晓光通过结合模拟退火法替代传统轮盘赌改进遗传算法，建立用户出行时间和未满足需求两者费用最小的优化模型[9]。俞礼军将发车频率作为基本决策变量，以乘客时间成本与运营企业成本之和最小为目标，改进模拟退火法求解整数非线性规划的公交线路设计模型[10]。裴玉龙以乘客出行时间最小化、公交企业运营收益和接驳公交服务率最大化为目标函数，建立双层规划模型，并采用改进的 NSGA-II算法求解多目标问题[11]。

本文考虑县域旅游交通的需求特点，引入了旅游体验指数的概念，表示游客游玩景区带来的体验的高低的指标。将游客的平均乘车时间和旅游体验指数相结合建立多目标优化问题，并将其转化为求解游

客满意度最大化问题，利用贪婪算法来构造初始解，并采用遗传算法求解问题。

2. 问题描述和模型建立

2.1. 问题描述

县域旅游公交网络主要是为了服务县域各个景区和主要交通枢纽之间的游客需求，好的旅游体验可以为县域旅游带来好的口碑并吸引更多的游客，促进县域旅游业的发展，因此，如何设计县域旅游公交网络给游客带来更高的满意度是发展县域旅游业的一个重要问题。游客出行的时间成本和旅游体验是提升游客满意度最主要的目标，本文旨在设计县域旅游公交线路时减少游客的出行成本的同时提高旅游体验指数。

旅游公交网络可以通过有向图$G=(K,L)$表示，其中 K 表示节点，由交通枢纽和站点(景区)组成，L 表示连接节点的路线。在该交通网络中，有 N 条公交线路，每条公交线路有 I 个节点，I_n 表示第 n 条公交线路经过的站点的集合。

2.2. 模型假设

1. 不同类型游客在不同景点中的 OD 需求已知，游客在乘车过程中都能在需求终点站下车。
2. 各点之间的车辆运行时间已知。
3. 旅游公交发车频率已知。
4. 县域内旅游景区的等级和网络评分已知。

2.3. 数学模型

针对游客在交通枢纽和景区处不同的出行需求，设计县域旅游公交线路优化模型。模型主要从游客角度出发，目标函数是旅游公交游客的平均时间成本最小化以及游客的旅游体验指数最大化。模型如下所示：

$$\min C_P = q^{-1}\sum_{n}^{n\in N}\sum_{m}^{m\in M}\sum_{i,j}^{i,j\in I_n} Q_m\left(t_{ij}^m q_{ij}^{nm}\right) \tag{1}$$

$$\max S_p = q^{-1}\sum_{i}^{i\in I_i}\sum_{n}^{n\in N} AS_i^n q_{ij}^n \tag{2}$$

$$t_{ij}^m = t_1^m + t_2^m \tag{3}$$

$$q_{ij}^{nm} = q_{ij}^n p_{ij}^m \tag{4}$$

约束条件为：

$$\sum_{i}^{i\in I_n} y_i^n \geq 2,\ \forall n \in N \tag{5}$$

$$\sum_{i,j}^{i,j\in I_n} y_{ij}^n \leq 1,\ \forall n \in N \tag{6}$$

$$\sum_{i}^{i\in I_n} T_n^i \leq T_{\max},\ \forall n \in N \tag{7}$$

式(1)、(2)为目标函数。目标函数(1)表示旅游公交出行的乘客平均总时间成本 C_p 最小，其中 Q_m 表示第 m 类乘客的时间价值；t_{ij}^m 表示第 m 类乘客的总出行时间；q_{ij}^{nm} 表示在第 n 条线路中起终点分别为(i,j)的第 m 类乘客的客流需求量；q 表示公交出行中服务的总乘客数。目标函数(2)表示公交线路满足乘客的旅游

体验指数 S_P 最大，其中 S_i^n 表示第 n 条线路在站点 i (旅游景区)的景区网络评分。参数 A 表示景区等级对体验指数的影响，若站点是核心景区 A 取值为 2；若为一般景区 A 取值为 1。式(3)表示第 m 类乘客公交出行花费总时间的计算公式，由乘客的站点等待时间 t_1^m 以及乘坐旅游公交的车辆运营时间 t_2^m 加和确定。式(4)表示公交服务的人数的计算，其中 q_{ij}^n 表示第 n 条线路中，起终点分别为 (i,j) 的乘客的数量， q_{ij}^n 表示第 n 条线路起终点分别为 (i,j) 的乘客总人数， p_{ij}^m 表示起终点分别为 (i,j) 的第 m 类乘客的比例。

约束条件(5)表示一条线路中至少包含两个站点(首末站)， y_i^n 为决策变量，若站点 i 在线路 n 上为 1，否则为 0；约束条件(6)确保一个点在一条线路中只出现一次。 y_{ij}^n 为决策变量，若线路 n 中，如果存在相同站点使 $i=j$ ，那么 $y_{ij}^n=1$，否则为 $y_{ij}^n=0$；约束条件(7)表示线路设计不超过最大行驶时间 $T_{\max}$ 。

3. 模型求解

3.1. 多目标求解方法

多目标优化问题，其多个目标之间往往存在冲突，无法使多目标同时达到最优值。旅游公交线路的设计中不仅要考虑乘客的出行时间成本，同时要考虑乘客的旅游体验。县域旅游资源的分布往往是零散的，特别是自然生态类的景区，通常都是在远离城市的郊区的各个方向，在旅游公交线路布设时，无法同时考虑为游客提供更高旅游体验指数和更少的出行时间成本。因此本文将综合考虑游客的时间成本和旅游体验指数，将多目标优化问题转化为单目标优化问题，求解游客满意度 Z 最大化。目标函数 Z 表示为式(8)，式中 ∂ ，β 表示用户平均时间成本和景观体验指数对游客满意度的影响度。

$$\max Z = \partial S_P + \beta C_P \tag{8}$$

3.2. 遗传算法求解

本文采用贪婪算法和遗传算法结合的方法进行模型的求解，利用贪婪算法求解出初始解，随后通过遗传算法对初始解的迭代优化来得到最终的线路方案。遗传算法(Genetic Algorithm, GA)是模拟达尔文生物进化论的自然选择和遗传学机理的生物进化过程的计算模型，是一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法。

3.2.1. 遗传算法求解步骤

遗传算法的具体求解步骤如下：

Step1：采用贪婪算法生成初始解。

Step2：编译初始解成为可进行交叉变异操作的染色体集。

Step3：交叉、变异产生子代个体，将父代和子代种群结合。

Step4：计算父代与子代结合后种群的适应度，并采用轮盘赌方式选择新一代种群。

Step5：判断是否满足迭代次数，满足则输出种群并解码，若不满足返回 Step2。

3.2.2. 初始解的确定

采用贪婪算法确定初始解，初始解的选择应优先满足公交运行的时间成本最小或体验价值最大的线路来提升遗传算法的求解速度。下面为初始解的寻找过程：

Step1：假设该网络所需设计 n 条旅游公交路线，旅游公交路线集合为 I，令 $t=0$。

Step2：寻找 OD 矩阵中需求量的最大值 q_{ij} ，点 i 和点 j 为新线路的两个顶点，寻找这两个顶点之间满足约束的最少时间成本路径以及最大体验指数路径，这些最小成本和最大体验指数路径上的点就是属于这条线路上的站点，将这两条线路储存在线路集 I 中。

Step3：更新 OD 矩阵，减去所有已设计线路所对应的 OD 需求。

Step4：$t = t + 1$，若 $t \geq n$ 进入 Step5，否者返回 Step2。

Step5：将这些线路集 t 进行组合，随机选取其中 n 条线路作为初始解。

3.2.3. 染色体的解编码设计和交叉变异算子

1) 染色体的编码和解码

对于一种公交运行方案，例如[(1-2-3) (1-3-7) (1-6)]，表示共有 3 条旅游公交路线，数字表示公交网络的站点，用数字−1 将每条线路隔开，并重组为一条可直接交叉变异的染色体，染色体的表示如图 1 所示。染色体的解码只需要将−1 与−1 之间的序列取出就是公交运行线路的方案。

Figure 1. Representation of the solution
图 1. 解的表示

2) 交叉和变异算子

交叉算子是两个父代染色体间交换站点集，探索不同路径组合的方式如图 2 所示，两个父代相互交换其中的几个相邻站点，包括用于分割的基因−1，可探究增减方案线路数带来的效益变化。

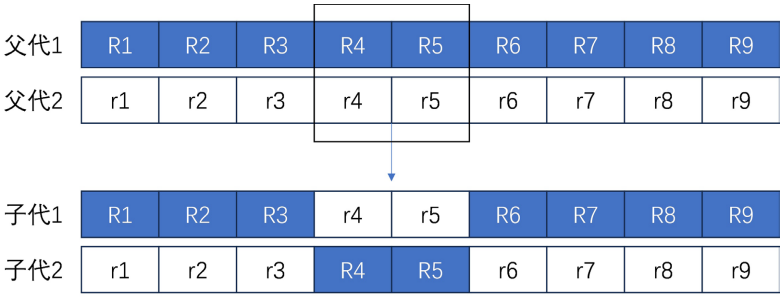

Figure 2. Chromosome crossover operations
图 2. 染色体交叉操作

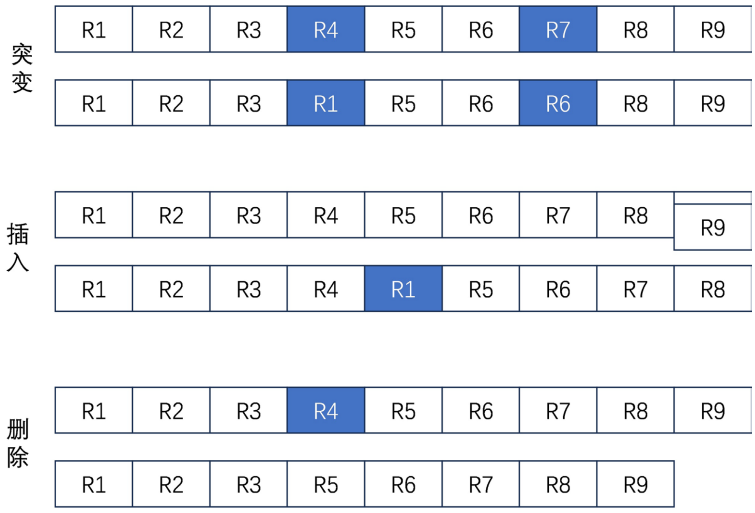

Figure 3. Chromosome mutation operations
图 3. 染色体变异操作

变异算子是为了扩大搜索空间，设置三类变异算子：突变、插入及删除。突变算子是某一线路的某一站点发生变化，发生突变的父代染色体与子线路均随机选择。插入变异算子是将旅游公交网络中的某一线路任意站点插入到染色体中，插入子线路以及父代染色体均随机；删除变异算子是将某一染色体中的某一站点删除，染色体与子线路均随机确定；变异操作如下图 3 所示。

4. 数值算例分析

为某县域设计旅游公交线路，该县域存在一个交通枢纽和 9 个旅游景区，下图 4 为该县域交通枢纽和景点的网络拓扑图。图中带数字的圆圈表示公交候选站点，数字表示站点的序号，其中站点序号 5 表示交通枢纽，其他为景点站点。站点与站点之间的连接线表示公交的运行线路，数字为公交在两个站点之间的运行时间(min)。

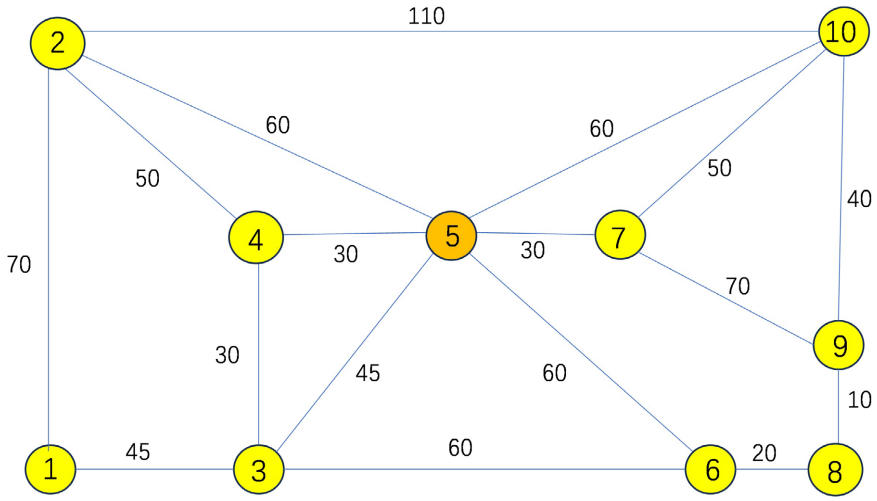

Figure 4. Distribution of sites in a county
图 4. 某县域站点分布图

旅游公交 OD 需求矩阵已知，如表 1 所示。

Table 1. Demand matrix for tourist bus stops (in persons/30 min)
表 1. 旅游公交站点需求矩阵(单位：人/30 min)

站点编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	3	4	4	15	4	4	3	5	4
2	3	0	4	4	14	4	4	4	3	3
3	4	4	0	5	8	7	4	4	4	5
4	4	4	5	0	13	4	5	4	4	5
5	15	14	8	13	0	5	10	12	13	15
6	4	4	7	4	5	0	4	8	3	4
7	4	4	4	5	10	4	0	4	6	7
8	3	4	4	4	12	8	4	0	9	5
9	5	5	4	4	13	3	6	9	0	8
10	4	3	5	5	15	4	7	5	8	0

景区评分和规模如表 2 所示，其中规模为 A 类表示为规模较大的核心景区，规模为 B 类的表示为规模较小的一般风景区。

Table 2. A county scenic area rating and scenic area network scorecard
表 2. 某县域景区等级及景区网络评分表

站点编号	景区等级	景区网络评分(0~5)
1	B	4.5
2	A	5.0
3	B	4.0
4	A	4.5
5	-	-
6	B	4.4
7	B	4.4
8	A	4.3
9	B	4.6
10	B	4.1

由于在旅游出行中，不同年龄的游客存在时间价值的异质性，将游客依据年龄分为青年型(18~35 岁)，中年型(35~55 岁)和老年型(55 岁以上)，三类游客的时间价值分别为 40 元/h、48 元/h 和 20 元/h，同时不同年龄游客选择旅游目的地的倾向也不同，青年人受网络口碑、目的地景区知名度而选择旅游目的地具有正向影响，而老年人则相反[12]。假定不同类型游客对旅游景点的需求比例依照景点规模分为三种，OD 需求点都为核心景区的三种类型游客人数比例为：0.3、0.5 和 0.2；OD 需求点其中一个为核心景区的三种类型游客人数比例为：0.4、0.2 和 0.3；OD 需求点都不为核心景区的三种类型游客人数比例为：0.3、0.3 和 0.4。参数∂，β 分别取 1 和−0.002。

用 python 编程软件编程，利用遗传算法结合模型中的目标函数与约束条件计算，将种群规模设置为 80，最大迭代次数为 400，交叉概率为 0.8，变异概率为 0.05，计算出旅游公交线网的最佳线路与组合，如图 5 所示。

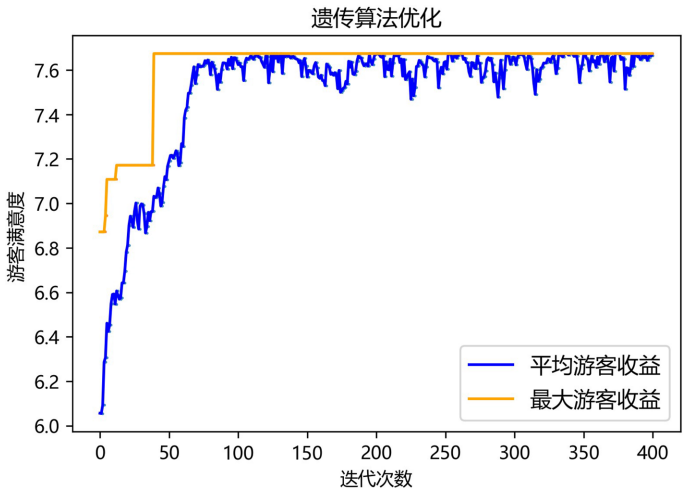

Figure 5. Genetic algorithm calculation result
图 5. 遗传算法计算结果

可以得到当前旅游公交最优解的组合线路方案，如下表 3：

Table 3. Maximum visitor satisfaction program for tourist transit in a county
表 3. 某县旅游公交游客满意度最大方案

最优运行方案	
旅游公交线路	5-4-3-1 5-7-10 5-6-8-9 5-4-2
游客平均时间成本(元)	2266
旅游体验指数	11.76
游客满意度	7.64

利用遗传算法求解得到的最优公交线路分别为以下四条：[5, 4, 3, 1]，[5, 7, 10]，[5, 6, 8, 9]，[5, 4, 2]。可以看出，利用贪婪算法和遗传算法求解有较快的收敛速度，求出的公交方案覆盖大部分站点，同时满足了游客的较低时间成本和较高的旅游体验指数，可以满足旅游公交需求特点。

参数 β 表示游客平均时间成本对游客满意度的影响，保证 ∂ 值不变，当 β 取值不同时，计算得到的路线方案有所差别，下表 4 是不同 β 取值下，游客平均时间价值和游客体验指数的最优分配结果。可以看出当 β 取值变小时，线路方案的游客平均时间成本和游客平均体验指数都增大，原因可能是当时间成本对线路方案满意度的影响度变小时，旅游公交线路倾向于花费更多时间成本来获取更多景观体验；当 β 取值变大时，时间成本对游客满意度的影响度变大，旅游公交倾向于更少时间成本和景观体验的线路。

Table 4. Results of tourist bus route program under different values
表 4. 不同取值下旅游公交线路方案结果

β 值	旅游公交线路方案	游客平均时间成本(元)	旅游体验指数
−0.001	[5, 4, 3, 1], [7, 5], [5, 6, 8, 9], [6, 5, 4, 2]	2344	11.86
−0.002	[5, 4, 3, 1], [5, 7, 10], [5, 6, 8, 9], [5, 4, 2]	2266	11.76
−0.004	[5, 4, 3], [5, 7, 10], [5, 6, 8, 9], [5, 4, 2]	2054	11.69

5. 结语

本文考虑县域旅游游客出行的需求特点，从游客角度出发，考虑了游客平均时间成本和旅游体验指数两方面因素，建立了县域旅游公交网络设计模型并设计一套贪婪算法和遗传算法共同求解模型的方法。本文的主要结论有：

1) 提出了旅游体验指数的计算方法，该指标考虑景区的网络评分和等级规模，和游客平均时间成本一起用于计算游客满意度具有可靠性。

2) 设计一套贪婪算法和遗传算法共同求解模型的方法，该算法具有较快的求解速度，利用算法验证了模型和算法的有效性。

3) 建立的模型可以通过改变游客出行时间和旅游体验指数的影响度，得到该情境下的最优线路方案，为县域旅游公交设计的决策者提供针对性的设计方案。

参考文献

[1] 谭倩, 常柱刚. 基于多目标遗传算法的低碳公交网络优化[J]. 长沙大学学报, 2018, 32(5): 32-36.

[2] 柳伍生, 李远东, 谭倩. 行程时间不确定的城市公交网络设计模型与算法[J]. 系统工程, 2018, 36(5): 72-78.

[3] 孙杨, 孙小年, 李葆青, 等. 接运公交网络设计的多目标优化模型及遗传变邻域搜索求解算法[J]. 北京工业大学学报, 2014, 40(4): 535-541.

[4] 汪丽, 曹小曙. 历史文化景区旅游交通满意度研究——以西安三大景区为例[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2015, 45(4): 665-669.

[5] 李妍峰, 高雍, 徐国勋. 考虑服务水平的旅游公共交通网络设计问题研究[J]. 工业工程与管理, 2020, 25(5): 94-102.

[6] 丁子航, 董洁霜. 基于游客收益的极高峰期间景区游线优化[J]. 建模与仿真, 2024, 13(4): 4904-4911.

[7] Ngeoywijit, S., Kruasom, T., Ugsornwongand, K., Pitakaso, R., Sirirak, W., Nanthasamroeng, N., *et al*. (2022) Open Innovations for Tourism Logistics Design: A Case Study of a Smart Bus Route Design for the Medical Tourist in the City of Greater Mekong Subregion. *Journal of Open Innovation*, **8**, Article 173. https://doi.org/10.3390/joitmc8040173

[8] 张辉, 赵鹏. 基于改进蜂群算法的城市公交网络设计[J]. 北京交通大学学报, 2015, 39(4): 118-124.

[9] 刘好德, 杨晓光. 基于改进遗传算法的公交线网优化设计研究[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(8): 10-14.

[10] 俞礼军, 梁明苹. 基于整数非线性规划的城市常规公交线网优化设计[J]. 中国公路学报, 2016, 29(2): 108-115, 135.

[11] 裴玉龙, 姜封帅, 王婉佼, 等. 基于改进 NSGA-II的轨道交通接驳公交线路优化[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2024, 43(6): 54-63.

[12] 汪淼. 大理州国内游客旅游停留时长的影响因素研究[D]: [硕士学位论文]. 大理: 大理大学, 2023.