【交通物流 / Transportation Logistics】

旅游城镇路网多目标优化模型及算法设计

奚宽响¹, 查伟雄^{1,2}, 李 剑^{1,2}, 严利鑫¹

1) 华东交通大学交通运输与物流学院, 江西南昌 330013; 2) 华东交通大学交通运输与经济研究所, 江西南昌 330013

摘 要: 为缓解旅游城镇的交通拥堵问题, 提出将宏观交通仿真软件与启发式算法相融合进行路网优化设计. 基于旅游城镇的交通流特点, 将旅游城镇路网优化问题抽象为多目标优化模型进行研究. 以路网中各条路段饱和度系统最优及投资成本最低为目标, 建立多目标优化模型, 寻求交通拥堵治理与道路资源投入博弈中的最优平衡点. 运用 TransCAD 仿真软件, 采用用户均衡模型对初始路网进行流量分配, 基于遗传算法进行模型算法设计, 编写 Matlab 算法程序求解模型. 通过多次算法实验并对比分析实验结果, 确定目标函数的最佳权重. 算例分析结果表明, 路网中所有路段饱和度的总和由 16.70 下降至 11.12, 平均值由 0.93 下降至 0.62, 且各优化后的路段饱和度稳定在 0.5~0.8 的合理范围内, 路网整体饱和度明显降低且更加均衡, 投资成本合理. 研究结果对新型旅游城镇的路网规划具有一定指导意义.

关键词: 公路运输; 多目标优化模型; 交通仿真; 遗传算法; 旅游城镇; 路网优化

中图分类号: U491.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.3724/SP.J.1249.2020.02130

Multi-objective optimization model and algorithm design of road network in tourist town

XI Kuanxiang¹, ZHA Weixiong^{1,2}, LI Jian^{1,2}, and YAN Lixin¹

1) School of Transportation and Logistics, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, Jiangxi Province, P. R. China

2) Institute of Transportation and Economics, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, Jiangxi Province, P. R. China

Abstract: To alleviate traffic congestion in tourist towns, we propose a method to optimize the road network design by combining the macro-traffic simulation software with the heuristic algorithm. Based on the characteristics of traffic flow in tourist towns, the problem of optimal design of tourism urban road network is transformed into a multi-objective optimization model. To seek the optimal balance point between traffic congestion management and road resource investment, a multi-objective optimization model is established to optimize the saturation system of each road section and minimize the investment cost. We use TransCAD simulation software and the user equilibrium model to distribute the traffic flow of the initial road network, then, design the model algorithm based on genetic algorithm, and at last, design Matlab algorithm program to solve the model. The optimal weight of the objective function is determined by multiple algorithm experiments and comparative analysis of the experimental results. The results of the numerical example show that the total saturation value of all sections in the road network decreases from 16.70 to 11.12, and the average saturation value of all sections in the road network decreases from 0.93 to 0.62. The

Received: 2018-12-04; **Accepted:** 2019-03-28

Foundation: National Natural Science Foundation of China (51805169); Graduate Student Innovation Special Foundation of Jiangxi Province (YZ2018-S251)

Corresponding author: Professor ZHA Weixiong. E-mail: 1033723954@qq.com

Citation: XI Kuanxiang, ZHA Weixiong, LI Jian, et al. Multi-objective optimization model and algorithm design of road network in tourist town [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2020, 37(2): 130-135. (in Chinese)

<http://journal.szu.edu.cn>

saturation of optimized sections is stable in a reasonable range from 0.5 to 0.8. The overall road network saturation is significantly reduced and becomes more balanced, moreover, the cost of investment is more reasonable. Therefore, results of the study have certain guiding significance for the road network planning of new tourist towns.

Key words: highway transportation; multi-objective optimization model; traffic simulation; genetic algorithm; tourism town; road network optimization

近年来,随着旅游热的兴起以及自驾游人数的增长,旅游城镇交通量增势迅猛,交通资源和交通需求之间的矛盾日益突出,旅游城镇交通拥堵已成为一个亟待解决的问题.目前对交通拥堵问题的研究主要集中在普通城市的交通拥堵管理政策和道路网络优化等方面.陈兆盟等^[1]提出为缓解交通拥堵,允许私家车以收费模式驶入公交专用车道,建立基于拥挤收费的交通信号控制模型;史峰等^[2]建立了交通微循环网络设计双层优化模型以缓解城市交通拥堵问题;张振东等^[3]研究路票交易约束下的出行人通勤路径选择特性,基于可交易电子路票的运行机理,根据出行者效用最大化原理,构建通勤出行路径选择模型;KAROONSOONTAWONG等^[4]建立基于通行能力的一般双层规划城市网络优化模型;张孜等^[5]提出整数线性规划和双层规划模型,通过可变车道最大限度地提高路网的通行能力;秦进等^[6]考虑网络结构、交通需求、出行选择及出行成本等因素,对既有定量化交通网络效率评价方法进行比较;王正武等^[7]进行级联失效影响源重要度辨识和排序方法研究,为道路交通网络级联失效行为的管理与控制提供参考.

交通拥堵问题的研究在交通拥堵管理策略和道路网络优化及城市交通路网评价等方面已取得丰富成果,却鲜有针对旅游城镇交通拥堵问题的研究,旅游客流的持续增长使旅游城镇交通拥堵问题逐渐凸显.本研究基于旅游城镇的交通流特点及交通资源现状,从如何设计旅游城镇路网优化方案,使路网的各条路段饱和度适中且均衡、以及投资成本最低方面,探讨旅游城镇交通拥堵治理问题.

1 旅游城镇路网多目标优化模型

1.1 问题描述

旅游城镇道路交通资源的主要服务对象为外来旅游交通量,其出行目的单一,起讫点(origin-destination, OD)固定,出行路径具有很强的规律性.旅游城镇路网优化问题实际是基于旅游城镇路网现状,结合旅游城镇交通流特点,寻求最佳的路网优

化方案,使旅游城镇的交通需求与交通供给达到平衡状态.

在旅游城镇路网优化问题中,设旅游城镇路网为 $G = (E, A)$, 其中, E 为网络节点的集合; A 为网络节点间路段 a_i 的集合. q_i 为第 i 条路段的交通量,将旅游城镇入口处定义为交通流起点,旅游城镇景点定义为交通流终点,路段集合 A 就构成了 OD 之间的路网; x_i 为决策变量,表示路网中第 i 条路段新增车道数;若路网中共有 N 条路段且所有路段新增车道数的最大值均为 M ,则路网共有 $(M+1)^N$ 种路网优化方案.旅游城镇路网优化问题即在投资成本最低、饱和度最适中且均衡的双目标条件下,求解所有路网优化方案中的最佳方案.

1.2 模型建立

旅游城镇路网优化要考虑旅游城镇的发展目标、交通流特点及道路优化条件等因素.在一定投入费用范围内实现路网交通拥堵治理与投入费用的最优平衡关系,为路网优化决策提供参考^[8].

饱和度是反映道路交通状况的重要指标,也是评判道路服务水平的重要基准^[9].根据文献[10],饱和度小于 0.5 会造成道路资源浪费;饱和度大于 0.8 会造成路网交通拥堵.基于此,设置惩罚系数 δ_i 对不同范围的饱和度 s_i 给予不同惩罚, δ_i 设定见表 1.为尽可能保证 s_i 在 0.5 ~ 0.8 的合理范围, δ_i 应满足 $\delta_5 = \delta_1 > \delta_4 = \delta_2 > \delta_3$.

表 1 不同范围饱和度下的惩罚系数设定

Table 1 Penalty parameters setting
in different saturation range

s_i	$s_i \leq 0.5$	$0.5 < s_i \leq 0.6$	$0.6 < s_i \leq 0.7$	$0.7 < s_i \leq 0.8$	$s_i > 0.8$
δ_i	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4	δ_5

投资成本最低目标是从路网系统优化的角度,确定各路段的优化方案,从而使路网整体效益最优.本研究以各路段扩建车道所需的建设费用总和作为投资成本,构建目标函数

$$\min Z_1 = \sum_{i=1}^N l_i x_i \sigma \quad (1)$$

其中, $\min Z_1$ 为投资成本最小值; N 为路网中路段总数; l_i 为第 i 条路段的有效长度; x_i 为第 i 条路段新增车道数; σ 为每车道单位长度建设所需的费用 (单位: 1 个货币单位)。

饱和度系统最优目标是在路网整体饱和度均衡的前提下, 确定最佳路网优化方案, 降低路网整体饱和度, 实现路网通畅的目标。为使路网整体饱和度趋于均衡, 本研究以惩罚后的各路段饱和度总和最小为目标构建目标函数

$$\min Z_2 = \sum_{i=1}^N \frac{q_i \delta_i}{\beta_i c_i^l \mu \sum_{n=1}^{K_n} K_n} \quad (2)$$

其中, $\min Z_2$ 为惩罚后的路网整体饱和度最小值; q_i 为第 i 条路段的交通量; c_i^l 为第 i 条路段第 l 条车道的通行能力; μ 为交叉口折减系数; β_i 为机动车道的道路分类系数, 高速公路及快速路取 $\beta_i = 0.80$, 1 级公路与主干道取 $\beta_i = 0.85$, 次干道 (2 级以下道路) 取 $\beta_i = 0.90$, 支路取 $\beta_i = 0.95^{[11]}$; 自中心线起第 n 条车道的折减系数为 K_n , $K_1 = 1.00$, $K_2 = 0.85$, $K_3 = 0.70$ 及 $K_4 = 0.55^{[10]}$; b_i 为第 i 条路段原有的车道数。

为投资成本最低和饱和度系统最优目标设定不同权重, 可将该多目标优化问题转化为单目标非线性优化问题。建立模型为

$$\min Z = \lambda_1 \min Z_1 + \lambda_2 \min Z_2 \quad (3)$$

s. t.

$$\begin{cases} \lambda_1 + \lambda_2 = 1 \\ 0 \leq Z_1 \leq Z_{1\max} \\ Z_{2\min} \leq Z_2 \leq Z_{2\max} \\ l_i \geq 0 \\ x_i \in \{0, 1, 2, \dots, M\} \\ \sigma \geq 0 \\ i = 1, 2, 3, \dots, N \end{cases} \quad (4)$$

其中, λ_1 和 λ_2 分别为投资成本最低目标和饱和度系统最优目标的权重; Z_1 为投资成本; Z_2 为路网整体饱和度; 约束条件 $0 \leq Z_1 \leq Z_{1\max}$ 保证投资成本不应超出规划部门的投资预算, $Z_{1\max}$ 为投资预算值; 约束条件 $Z_{2\min} \leq Z_2 \leq Z_{2\max}$ 保证路网整体饱和度在合理范围内, $Z_{2\min}$ 和 $Z_{2\max}$ 分别为路网整体饱和度下

界和上界值。

本模型从 $(M+1)^N$ 种路网优化方案中筛选满足投资成本最低目标与饱和度系统最优目标的最佳方案。引入饱和度惩罚系数 $\delta_i^{[12]}$, 将饱和度惩罚转化为货币支出, 将 δ_i 作为经济惩罚, 进而统一饱和度系统最优和建设费用最低两个目标的量纲。通过多次实验不断调整 δ_i 的值, 使两目标的优化结果处于同一数量级, 以消除两目标由于数值大小差异对优化结果产生的影响。

2 基于遗传算法的模型算法设计及目标函数权重分析

2.1 基于遗传算法的模型算法设计

上述优化模型为非线性优化模型, 采用遗传算法求解, 算法步骤如下:

步骤 1 初始化。设定遗传算法的交叉概率为 p_c 、变异概率为 p_m 、变异比率为 p'_m 、种群规模为 p_{size} 、最大进化代数数为 $G_{\max}$ 、决策变量个数为 n^{ver} 、第 1 代种群数量为 n^{pop} 、联赛规模为 T_{size} 、最佳个体为 $n^{\text{pop}(1)}$ 。

步骤 2 模型的决策变量为整数, 故采用实数编码, 利用随机函数与取整函数生成初始种群, 随机生成 p_{size} 个 $|n^{\text{ver}}|$ 维向量。

步骤 3 将式 (3) 作为适应度函数, 对产生的种群计算个体适应度值。

步骤 4 根据计算得到的个体适应度值对所有个体按升序排列, 选择出前 n^{pop} 个作为新种群 (第 1 代为 n^{pop} 个, 其他代为 $(n^{\text{pop}} + n^{\text{pop}} p_c + n^{\text{pop}} p_m p'_m)$ 个)。

步骤 5 将前 n^{pop} 个个体复制 1 次得到 $2n^{\text{pop}}$ 个新个体, 采用联赛选择方法从群体中任意选择一定数目的个体, 将适应度最高的个体保存到下一代。反复执行这一过程, 直至保存到下一代的个体数达到 n^{pop} 为止, 联赛规模 $T_{\text{size}} = 3$, 按交叉概率对随机配对个体进行交叉操作, 交叉 $n^{\text{pop}} p_c$ 次得到 $n^{\text{pop}} p_c$ 个新个体。

步骤 6 将选择出的前 n^{pop} 个个体按变异比率 p'_m 进行变异操作, 即随机挑选 1 个或多个基因座并对其基因值以 p_m 做变动, 得到 $n^{\text{pop}} p_m p'_m$ 个新个体。因此, 经选择、交叉及变异共得 $(n^{\text{pop}} + n^{\text{pop}} p_c + n^{\text{pop}} p_m p'_m)$ 个新个体。

步骤 7 判断是否达到迭代总数, 若否, 则转

向步骤3; 否则, 计算个体适应度值, 对所有个体按升序排列选择操作, 输出最佳个体 $n^{\text{pop}(1)}$.

2.2 目标函数权重分析

λ_1 和 λ_2 的取值不同将直接影响路网优化方案的选取. 本研究选取不同权重取值进行算法实验, 通过分析实验结果, 筛选出最佳目标函数权重取值, 筛选步骤如下:

步骤1 按照 $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ 等比例将 λ_1 及 λ_2 分为 K 组值.

步骤2 基于 TransCAD 平台, 利用用户均衡模型将路网 OD 交通量分配到初始路网中, 产生各路段初始交通量.

步骤3 将路网具体数据与步骤2结果带入路网优化模型, 利用 Matlab 软件按照上述遗传算法步骤实验 K 次, 计算出 λ_1 和 λ_2 在不同取值下的最优解, 得出不同的路网优化方案.

步骤4 比较分析不同路网优化方案下, 投资成本及路网中各路段饱和度的变化, 筛选出路网中各路段饱和度适中且均衡、投资成本合理的最佳方案, 确定 λ_1 和 λ_2 的取值.

3 算例

图1为中国某新型旅游城镇的路网 $G = (E, A)$, 路网道路等级为主干道($\beta_i = 0.85$); 该路网共有4个OD对; 17个节点, 包括4个虚拟节点(节点1、2、3及4); 22条路段, 包括4条虚拟路段

图1 某新型旅游城镇现状路网示意图
Fig. 1 The current road network of a new tourist town

(1—5、2—6、17—3 及 15—4); 路段6—8 及 8—12 长度为 14.1 km, 路段 9—16 长度为 22.4 km, 其余路段长度为 10.0 km; 目前各路段的车道数 $b_i = 2$; 路段每车道单位长度建设费用 $\sigma = 1$ 个货币单位; 路网各交叉口间距较大, 故交叉口折算系数 $\mu = 1$; 车速限制为 60 km/h, 第1条车道的道路通行能力 $c_i^1 = 1\,800$ 辆/h; 原有路网每条路段上最多可增加车道数 $M = 2$, 故 $x_i \in \{0, 1, 2\}$, 路网实际总路段数 $N = 18$, 因此, 共有 3^{18} 种路网优化方案. 本算例路网 OD 交通量如表2 (算例忽略旅游城镇内部交通小区之间产生的交通量).

表2 某新型旅游城镇 OD 交通量
Table 2 OD traffic of a new tourist town $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$

进口处	景点1	景点2
1	3 000	4 000
2	2 500	4 500

基于以上算例的路网具体数据, 通过用户均衡模型对初始路网进行流量分配, 在 TransCAD 平台得出分配结果如图2.

图2 某新型旅游城镇各路段流量分配示意图
(单位: $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$)

Fig. 2 Flow assignment of each road section in a new tourist town (unit: $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$)

本研究参考文献[12], 通过多次算法实验不断调整惩罚系数的取值, 得出不同优化方案, 分析对比最佳方案确定惩罚系数的取值为 $\delta_1 = 10$ 、 $\delta_2 = 1$ 、 $\delta_3 = 0.5$ 、 $\delta_4 = 1$ 及 $\delta_5 = 10$ (单位: 1 个货币单位).

算法实验过程中, 在约束条件 $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ 下, 通过不断在 $[0, 1]$ 内缩小相邻两组权重的均分间隔, 发现当均分间隔为 0.1 后, 实验结果的种类将不再增加, 此时, $[0, 1]$ 被划分为 11 组值, 因此,

选取 $K = 11$. 算法实验结果表明, 当目标函数权重设定为 $\lambda_1 = 0.2$ 、 $\lambda_2 = 0.8$ 或 $\lambda_1 = 0.1$ 、 $\lambda_2 = 0.9$ 时, 算例结果最合理, 本例取 $\lambda_1 = 0.2$ 、 $\lambda_2 = 0.8$.

在遗传算法参数方面, 设定 $G_{\max} = 100$ 、 $p_{\text{size}} = 100$ 、 $p_c = 0.7$ 、 $p_m = 0.1$ 、 $p'_m = 0.3$ 及 $n^{\text{ver}} = 18$.

图 3 为遗传算法迭代收敛图. 可见, 当程序运行到第 8 代时, 目标函数值开始逐渐收敛于最优解, 当程序运行到第 16 代时, 达到适应度函数的理论最小值 51.899 3, 此时 x_i 的取值即为最优解, 得到路网最佳优化方案如表 3. 对原有路网按上述方案优化后, 可得路网中各路段饱和度的变化情况. 路网各路段现状饱和度与优化后饱和度如图 4.

图 3 遗传算法迭代结果

Fig. 3 Results of genetic algorithm

表 3 各路段新增车道数

Table 3 The number of new lanes in each road section

路段	5—7	5—9	6—7	6—8	7—8
新增车道数	1	2	0	2	1
路段	7—10	8—11	8—12	9—10	9—16
新增车道数	1	1	2	0	1
路段	10—11	10—13	11—14	12—15	13—14
新增车道数	0	1	1	2	1
路段	14—15	14—17	16—17		
新增车道数	2	0	1		

由图 4 计算可知, 路网中所有路段饱和度的总和由 16.70 下降至 11.12, 路网中所有路段饱和度

图 4 路网优化前后饱和度对比分析

Fig. 4 Comparison of saturation between before and after optimization of road network

的平均值由 0.93 下降至 0.62, 说明整体路网的交通状况得到极大改善; 路网中所有路段饱和度之间的标准差由 0.31 下降至 0.14, 说明路网中各路段的饱和度更为均衡. 由图 4 可见, 所有扩建车道的路段饱和度均介于 0.5 ~ 0.8 的饱和度合理范围内, 说明模型的优化方法并未因投资成本过高、路段扩建车道过多而造成道路资源浪费, 也没有因为投资成本过低使路段扩建车道数量不足而造成交通拥挤现象.

结 语

本研究针对旅游城镇交通流特性建立路网多目标优化模型, 并综合考虑路网通畅程度和投资成本, 结果可为旅游城镇的路网优化决策提供参考; 在模型求解过程中, 借助 TransCAD 平台, 采用用户均衡模型进行交通量分配, 使模型具有较强的工程实用性; 通过多次算法实验分析确定目标函数的最佳权重, 使路网通畅程度与投资成本达到最优平衡. 最后, 通过算例验证了模型的有效性. 本模型尚未考虑路网优化后各路段交通量的变化, 路网饱和度惩罚系数的设定方法也有待改善, 这将是接下来的研究重点.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51805169); 江西省研究生创新专项基金资助项目 (YZ2018-S251)

作者简介: 奚宽响 (1993—), 华东交通大学硕士研究生. 研究方向: 交通系统优化. E-mail: 476499730@qq.com

引 文: 奚宽响, 查伟雄, 李 剑, 等. 旅游城镇路网多目标优化模型及算法设计[J]. 深圳大学学报理工版, 2020, 37(2): 130-135.

参考文献 / References:

- [1] 陈兆盟, 吴文祥, 刘小明, 等. 车道拥挤收费与信号控制组合优化模型研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17(5): 29-35.
CHEN Zhaomeng, WU Wenxiang, LIU Xiaoming, et al. The combinatorial optimization model research of congestion pricing and signal control [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2017, 17(5): 29-35. (in Chinese)
- [2] 史峰, 王英姿, 陈群. 城市交通微循环网络设计优化模型[J]. 同济大学学报自然科学版, 2011, 39(12): 1795-1799.
SHI Feng, WANG Yingzi, CHEN Qun. Optimization model for traffic microcirculation network design [J]. Journal of Tongji University Natural Science, 2011, 39(12): 1795-1799. (in Chinese)
- [3] 孙振东, 张生瑞, 李运, 等. 路票交易下的私家车通勤路径选择[J]. 深圳大学学报理工版, 2018, 35(2): 213-220.
SUN Zhendong, ZHANG Shengrui, LI Yun, et al. The choice of commuter path of private cars under ticket trade constraints [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2018, 35(2): 213-220. (in Chinese)
- [4] KAROONSOONTAWONG A, WALLER S T. Integrated network capacity expansion and traffic signal optimization problem: robust bi-level dynamic formulation [J]. Networks and Spatial Economics, 2010, 10(4): 525-550.
- [5] 张孜, 宋奇文, 林思. 动态可变车道在路网通行能力优化中的应用[J]. 公路交通科技, 2015, 32(9): 109-114.
ZHANG Zi, SONG Qiwen, LIN Si. Application of dynamic reversible lane in road network capacity optimization [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(9): 109-114. (in Chinese)
- [6] 秦进, 贺钰昕. 量化交通网络效率评价方法比较[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(2): 111-119.
QIN Jin, HE Yuxin. Evaluation methods comparison of quantitative transportation network efficiency [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(2): 111-119. (in Chinese)
- [7] 王正武, 陈小兰, 李常乐. 道路交通网络级联失效影响源辨识[J]. 中国公路学报, 2015, 28(10): 98-104.
WANG Zhengwu, CHEN Xiaolan, LI Changle. Identifying influence sources of cascading failure for road traffic network [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(10): 98-104. (in Chinese)
- [8] 诸云, 王建宇, 高宁波, 等. 基于拥堵辨识的城市路网优化模型[J]. 东南大学学报自然科学版, 2017, 47(3): 607-612.
ZHU Yun, WANG Jianyu, GAO Ningbo, et al. Urban traffic congestion optimization model based on bi-level programming [J]. Journal of Southeast University Natural Science Edition, 2017, 47(3): 607-612. (in Chinese)
- [9] 杜进有, 杨远祥, 李宗平. 城市道路网饱和度模型及其应用[J]. 公路交通科技, 2006, 23(3): 131-134.
DU Jinyou, YANG Yuanxiang, LI Zongping. Saturation model and its application of urban road network [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(3): 131-134. (in Chinese)
- [10] 徐家钰, 程家驹. 道路工程[M]. 上海: 同济大学出版社, 1995.
XU Jiayu, CHENG Jiaju. Road engineering [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1995. (in Chinese)
- [11] 沈颖, 朱翀, 徐英俊. 道路饱和度计算方法研究[J]. 交通标准化, 2007(1): 125-129.
CHEN Ying, ZHU Chong, XU Yingjun. Research on calculation method for road saturation [J]. Transportation Standardization, 2007(1): 125-129. (in Chinese)
- [12] CADARSO L, MARIN A. Robust rolling stock in rapid transit networks [J]. Computers & Operations Research, 2011, 38(8): 1131-1142.

【中文责编: 方圆; 英文责编: 淡紫】