

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2024.06.019

常规公交运营脆弱性评价及发车优化研究

胡立伟*, 武加宝, 赵雪亭, 杨志莹, 余先林

(昆明理工大学 交通工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 针对常规公交在城市公共交通中的分担率逐年下降状况, 综合考量乘客的出行感知和公交运营成本, 为量化常规公交运营线路的脆弱性并提高服务质量, 提出了常规公交运营脆弱性评价方法及其基于脆弱性评价的公交发车间隔优化。首先, 采用文献萃取法从人为活动、运营组织管理、环境状态和车辆状态4个方面萃取得到15个脆弱因子, 基于概念格加权群组改进的结构解释模型对初始评分结果进行统计筛选得到脆弱因子间的影响程度关系, 通过对脆弱因子的暴露性、敏感性和适应性3个特征进行等级划分, 以取交集的方法得到车内拥挤度和候车时长2个关键脆弱因子。其次, 从不同客流时段的乘客感知与心理变化特征角度出发, 对车内拥挤度的等级划分和候车时长正态分布曲线进行分析, 确定拥挤度的临界划分和以85%乘客的候车容忍时间作为容忍阈值。进一步, 基于关键脆弱因子及其容忍阈值构建高峰、次高峰和平峰时段以发车间隔时间为变量的运营公司成本和乘客成本函数模型, 并采用遗传算法进行求解。最后, 结合昆明市23路公交线路进行算例分析。结果表明: 优化后的运营线路高峰时段的暴露度、敏感度和适应度分别降低39.10%, 26.75%, 35.74%, 脆弱度降低了33.88%, 优化效果最好, 次高峰居中, 平峰较差。总体分析来看, 评价模型和优化方法具有较好的实用性, 提升了乘客出行感知服务水平并降低了运营成本。

关键词: 智能交通; 脆弱性评价; 改进ISM; 常规公交运营; 发车间隔优化; 遗传算法

中图分类号: U491.17

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2024) 06-0173-09

Study on Vulnerability Evaluation of Conventional Bus Operation and Departure Optimization

HU Li-wei*, WU Jia-bao, ZHAO Xue-ting, YANG Zhi-ying, YU Xian-lin

(Faculty of Transportation Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China)

Abstract: Aiming at the fact that the share rate of conventional public transport in urban public transport has been declining year by year, and comprehensively considering the travel perception of passengers and the cost of bus operation, in order to quantify the vulnerability of conventional bus operation routes and improve service quality, a vulnerability evaluation method for conventional bus operation and the bus departure interval optimization based on vulnerability assessment are proposed. First, 15 vulnerability factors are extracted from 4 aspects, including human activities, operational organization management, environmental status and vehicle status by using the literature extraction method. The relationship among the influence degrees of the factors is classified by the 3 characteristics of exposure, sensitivity and adaptability of the vulnerable factors, and the 2 key vulnerable factors, in-vehicle congestion degree and waiting time are obtained by using the intersection method. Secondly, from the perspective of passenger perception and psychological change characteristics in different passenger flow periods, the classification of in-vehicle congestion and the normal distribution curve of waiting time are analyzed to determine the critical division of

收稿日期: 2022-06-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61863019, 42277476)

作者简介 (* 通讯作者): 胡立伟 (1978-), 男, 山东潍坊人, 博士, 教授. (liweihukm@kust.edu.cn)

congestion and the waiting tolerance time of 85% of passengers as the tolerance threshold. Further, based on the key vulnerability factors and their tolerance thresholds, the operating company cost and passenger cost function models with departure time as a variable during peak, sub-peak and peak periods are constructed, and the genetic algorithm is used to solve the problem. Finally, combined with the case analysis of bus line No. 23 in Kunming, the result shows that the exposure, sensitivity and fitness of the optimized operation line during peak hours reduce by 39.10%, 26.75% and 35.74% respectively, and the vulnerability reduces by 33.88%, the optimization effect is the best, the second peak is in the middle, and the flat peak is poor. Due to the overall analysis, the evaluation model and optimization method have good practicability, the passenger travel perception service level is improved, and the operating cost is reduced.

Key words: ITS; vulnerability assessment; improved ISM; conventional bus operation; departure interval optimization; genetic algorithm

0 引言

常规公交是城市公共交通的重要组成部分,但由于轨道交通逐渐成为城市公共交通的骨架,常规公交的载客量逐渐下降,公交企业损失逐年上升。因此,合理选择常规公交运营评价指标进行脆弱性评价,并对其关键脆弱因子进行分析优化以提高常规公交的运营服务质量是促进交通结构平衡和高效利用资源的重要方法^[1]。

常规公交运营脆弱性评估是近几年国内外学者研究的重点,其中,在模拟攻击脆弱性评估研究方面,主要采用场景模拟攻击^[2]、路径服务中断模拟^[3]、模拟删除节点和连接方式^[4]、节点攻击与随机攻击^[5]等手段对网络脆弱性进行定量化评估。此外,常规公交系统网络的连通度、网络效率等性能指标也多用于识别网络中的关键脆弱节点及路段^[6-7]。

公交运营服务能力是评价系统脆弱性的重要考量指标之一,也是近年来研究的一大热点。Liu等^[8]提出了从关键服务的共同功能角度分析公共交通系统的脆弱性,引入一种用于脆弱性分析的多层网络模型,考虑公交系统与地铁系统的互补关系并提出了公共交通系统的功能指标,对脆弱性评估方法进行了研究。Han等^[9]根据转移距离,比较一般群体和弱势群体的预期转移时间和实际转移时间,对交通弱势群体的出行过程脆弱性进行了研究。路庆昌等^[10]在考虑公交接驳场景下的前提下,以出行损失时间为指标构建脆弱性评估模型,通过对比不同的公交接驳效率研究得到了网络中的关键点。Jia等^[11]基于开源数据构建了公交中转网络模型,使用巨型分量分析了网络脆弱性程度。

综上所述,以上研究多采用模拟攻击、网络性能指标等对公交运营系统进行脆弱性评估,没有根据运

营实际将定性评价与定量结合分析验证分析系统的脆弱性,只是得到网络中的脆弱关键节点以及节点失效的严重程度或整体的脆弱程度。鉴于此,本研究基于常规公交运营系统脆弱性的暴露性、敏感性与适应性3个特征属性,采用结构解释模型定性评价和利用脆弱度计算方法定量评价相结合的方法,对公交线路脆弱度进行了研究,并构建了基于关键脆弱因子的发车间隔时间优化模型,通过优化公交发车间隔实现了降低公交运营系统脆弱性的目的,研究结果对提升常规公交运营质量和降低运营成本提供了理论依据。

1 常规公交运营脆弱性评价模型

1.1 常规公交运营脆弱性

常规公交运营系统脆弱性是指因脆弱因子(指标)失效而导致乘客放弃常规公交并选择其他交通方式的系统扰动变化程度。引发系统脆弱性的事件包括人为活动、运营组织、车辆状态和自然环境等,例如因调度安排导致乘客候车时间过长,因道路状况或其他因素导致车辆运行速度过低增加乘客的行程时间,以及受到不可抗拒因素影响,如新冠疫情和雷雨天气等恶劣天气等。以上事件的发生影响乘客的出行选择行为,是导致客流量由常规公交转移到其他方式的重要原因。因此,本研究基于脆弱性理论,以乘客感知为视角,从脆弱因子的暴露性、敏感性和适应性等脆弱属性分析系统脆弱原因。暴露性指脆弱因子引发事件的概率,敏感性指人为所感知的服务水平的程度,适应性指运营系统在受到扰动后的恢复原有服务水平的能力。因此,脆弱因子脆弱性高是指其暴露性高、敏感性强和适应性差。

1.2 基于改进的ISM脆弱因子脆弱性分析

(1) 概念格加权计算权重系数

在脆弱因子的选取和体系构建上,采用文献萃

取法提取 n 个脆弱因子,构成脆弱因子集。由于专家群决策方法不能够全面综合考虑个体的认知水平、个人经验等异质性,因此,采用概念格群决策方法进行群组加权,改变直接使用群组平均值的方法。概念格群决策方法是一种新型的知识表示模型,能将概念格理论和加权群决策综合运用于评价决策当中,可以有效弥补传统方法中无法融合专家意见的缺陷^[12],提高计算结果的准确性和判定结果的准确度。相同评价结果为一类,共聚为 l 类。采用式(1)计算相同分值权重系数,计算每个分值的权重系数并得到初始影响矩阵。

$$\lambda_i = \frac{\sum_{i=1}^l \frac{\chi_i^2}{\sum_{i=1}^l \chi_i^2} \times P_i}{\sum_{i=1}^l \chi_i^2} \times P_i, \quad (1)$$

式中, λ 为专家权重系数; χ 为相同分值的人数; P 为评价分数; l 为聚类数。

(2) 分析模型

根据可达矩阵进行暴露性、敏感性和适应性的脆弱因子的依赖性和自发性划分。自发性表示各行对应脆弱因子对所有其他脆弱因子的影响程度,依赖性表示各列对应脆弱因子受到其他脆弱因子的影响程度,脆弱因子的自发度和依赖度计算为:

$$D_i = \sum_{j=1}^n t_{ij}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (2)$$

$$C_i = \sum_{j=i}^n t_{ji}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (3)$$

式中, D_i 为自发度; C_i 为依赖度; t 为矩阵元素。

为了科学准确地把握常规公交运营系统脆弱因子脆弱性程度的大小,对脆弱性的严重程度进行定量化分析,应该综合考虑脆弱因子的暴露性、敏感性和适应性3个方面。因此,采用脆弱因子的自发度和依赖度将其定量化,得到脆弱因子的暴露性、敏感性和适应性的权重系数计算为:

$$\gamma_\theta = \frac{D_\theta - C_\theta}{\sum_{\theta=1}^3 (D_\theta - C_\theta)}, \quad (4)$$

式中, γ 为脆弱因子属性值; $\theta=1, 2, 3$ 分别为暴露度、敏感度和适应度。因此,脆弱度量化值可通过暴露度、敏感度和适应度得到:

$$V = v_n \sum_{\theta=1}^3 \omega_\theta \gamma_\theta, \quad (5)$$

式中, V 为脆弱因子的脆弱度; $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 分别为脆弱因子的暴露度、敏感度、适应度的权重系数^[13],权重系数分别取值0.33,0.33,0.34,即认

为暴露度、敏感度、适应度对脆弱因子的脆弱度影响几乎相同。

1.3 常规公交运营脆弱性评价

为全面充分和准确高效地识别出常规公交运营脆弱因子,采用文献萃取方法,整合归纳得到15个脆弱因子^[14-17],如表1所示。

表1 常规公交运营脆弱因子

Tab. 1 Vulnerability factors of conventional bus operations

脆弱因子	编码	脆弱因子	编码
乘客个人素质	F1	车辆运行速度	F9
驾驶员服务态度	F2	乘车票价	F10
行驶平稳性	F3	首末发车时间	F11
站点播报	F4	车内拥挤度	F12
车内卫生环境	F5	候车时间	F13
公交线路网密度	F6	到站准点率	F14
线网覆盖率	F7	换乘距离	F15
站点覆盖率	F8	—	—

为将理论前沿与现实需求相结合,邀请10名专家进行打分,其中拥有教授职称的专家5人,包含交通运输规划、交通管理、智能交通和社会学研究方向。昆明某公交集团专家顾问5人,从事城市客运行业皆超过20 a,有着丰富的工作经验,对运营服务有着深刻的理解,通过对脆弱因子的暴露性程度、敏感性程度和适应性程度进行评价打分。脆弱因子集中的因子设置为可忽略、较小、中等、较大和严重共5个等级,表示被调查个体对脆弱因子的关注敏感程度。对脆弱因子的暴露性程度、敏感性程度和适应性程度进行评价打分,采用5分度制,即打分区间为0~4分,分别为可忽略、较小、中等、较大和严重共5个等级。以脆弱因子 F_1 对脆弱因子 F_2 的影响程度为概念格加权计算为例,打分结果为:3人认为有较小影响,7人认为可忽略。因此,将打分结果聚为2类,计算得到式(6),得到 F_1 对 F_2 的影响程度为0.16,重复以上步骤,得到初始影响矩阵所有元素值,如表2所示。经迭代计算,得到可达矩阵如表3所示。

$$\frac{3^2}{3^2 + 7^2} \times 1 + \frac{7^2}{3^2 + 7^2} \times 0 = 0.16. \quad (6)$$

根据表3中脆弱因子的驱动力和依赖度,可根据网格划分为4类:独立因子、依赖因子、联动因子和自发因子。独立因子和依赖因子的自发度都较小,其自发能力弱,表示脆弱因子的脆弱性呈隐性,对常规公交运营系统的影响程度小。而联动因子和自发因子的自发度较大,其自发能力强,表示

表 2 初始影响矩阵
Tab. 2 Initial impact matrix

脆弱因子	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8	F_9	F_{10}	F_{11}	F_{12}	F_{13}	F_{14}	F_{15}
F_1	0.00	0.16	0.90	1.49	0.13	3.01	3.56	3.17	0.00	0.99	1.76	0.00	0.42	0.80	0.97
F_2	3.12	0.00	1.37	1.27	3.29	3.03	2.96	2.89	1.63	1.31	1.39	1.10	0.90	1.01	1.12
F_3	1.69	2.83	0.00	2.96	2.71	1.38	1.69	1.03	0.00	3.40	0.13	0.78	0.71	1.31	1.50
F_4	3.09	1.77	1.06	0.00	0.49	3.34	3.28	3.28	0.00	0.00	0.00	0.41	0.10	0.07	1.06
F_5	0.00	0.07	0.62	0.70	0.00	2.96	3.09	3.16	0.49	1.08	0.09	1.11	1.20	1.47	1.34
F_6	1.00	0.83	0.59	1.41	1.06	0.00	0.39	0.62	0.36	1.07	0.70	0.86	1.08	0.82	1.28
F_7	1.06	0.84	0.56	1.25	1.02	0.34	0.00	0.55	0.23	1.19	0.77	0.70	1.16	0.86	1.18
F_8	1.03	0.92	0.59	1.20	1.08	0.25	0.48	0.00	0.34	1.19	0.66	0.77	1.17	0.83	1.22
F_9	0.08	0.06	0.11	0.16	1.05	2.93	3.25	3.19	0.00	0.99	0.00	0.06	0.00	1.50	2.03
F_{10}	0.71	1.40	0.55	1.08	2.31	1.03	0.91	0.80	0.00	0.00	1.94	1.28	1.41	1.98	2.73
F_{11}	1.40	1.61	1.41	0.53	0.21	1.23	0.55	0.44	1.18	1.29	0.00	1.94	1.10	1.18	1.50
F_{12}	0.91	2.91	2.71	1.07	3.47	3.49	2.54	3.56	0.65	3.49	3.40	0.00	3.30	3.14	3.47
F_{13}	3.12	3.28	3.51	2.45	2.35	2.72	2.65	2.65	0.20	1.50	2.29	1.07	0.00	2.89	3.05
F_{14}	1.95	2.75	1.38	0.98	3.24	3.10	3.18	3.34	1.01	1.93	1.11	0.99	2.73	0.00	1.10
F_{15}	1.23	1.19	0.25	0.07	0.15	0.04	0.11	0.13	0.00	0.67	0.58	1.12	1.27	1.23	0.00

表 3 可达矩阵
Tab. 3 Reachability matrix

脆弱因子	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8	F_9	F_{10}	F_{11}	F_{12}	F_{13}	F_{14}	F_{15}	自发度
F_1	1 [*]	0	0	0	0	1 [#]	1 [#]	1 [#]	0	0	0	0	0	0	0	4
F_2	1 [#]	1 [*]	0	0	1 [#]	1 ⁰	1 ⁰	1 ⁰	0	0	0	0	0	0	0	6
F_3	1 ⁰	1 [#]	1 [*]	1 [#]	1 ⁰	1 ⁰	1 ⁰	1 ⁰	0	1 [#]	0	0	0	0	1 ⁰	10
F_4	1 [#]	0	0	1 [*]	0	1 ⁰	1 ⁰	1 ⁰	0	0	0	0	0	0	0	5
F_5	0	0	0	0	1 [*]	1 [#]	1 [#]	1 [#]	0	0	0	0	0	0	0	4
F_6	0	0	0	0	0	1 [*]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
F_7	0	0	0	0	0	0	1 [*]	0	0	0	0	0	0	0	0	1
F_8	0	0	0	0	0	0	0	1 [*]	0	0	0	0	0	0	0	1
F_9	0	0	0	0	0	0	1 [#]	1 [#]	1 [*]	0	0	0	0	0	0	3
F_{10}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1 [*]	0	0	0	0	1 ⁰	2
F_{11}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1 [*]	0	0	0	0	1
F_{12}	1 ⁰	1 ⁰	1 ⁰	1 ⁰	1 ⁰	1 ⁰	1 ⁰	1 ⁰	0	1 ⁰	1 [#]	1 [*]	1 [#]	1 [#]	1 ⁰	14
F_{13}	1 ⁰	1 ⁰	1 [#]	1 ⁰	1 ⁰	1 ⁰	1 ⁰	1 ⁰	0	1 ⁰	0	0	1 [*]	1 ⁰	1 ⁰	12
F_{14}	1 ⁰	1 ⁰	1 [#]	1 ⁰	1 ⁰	1 ⁰	1 ⁰	1 ⁰	0	1 ⁰	0	0	1 ⁰	1 [*]	1 ⁰	12
F_{15}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1 [*]	1
依赖度	7	5	4	5	6	9	10	10	1	5	2	1	3	3	6	—

注：1[#]为骨架矩阵中的元素；1^{*}为单位矩阵中的元素；1⁰为不同脆弱因子的影响关系。

脆弱因子的脆弱性呈显性，对常规公交运营系统的影响程度大，但联动因子的依赖度同样很高，具有较强的依附性。综合分析来看，自发因子的脆弱程度较高，对常规公交运营系统的影响程度较大。

绘制脆弱因子的自发度-依赖度坐标图如图 1 所示，图中所划分的 I，II，III，IV 等级分别为独立、依赖、联动、自发层级脆弱因子。

通过 ISM 方法将脆弱因子划分为 4 个层级，为

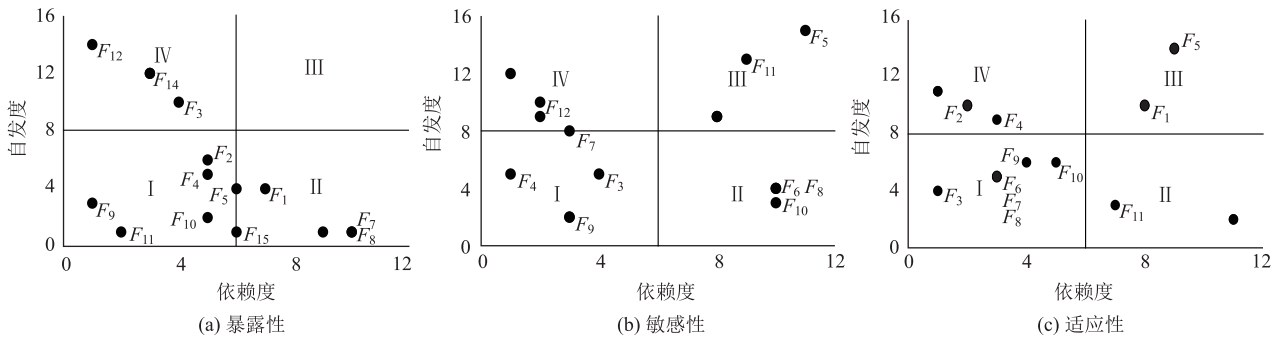


图1 常规公交运营系统脆弱因子自发性-依赖度坐标图

Fig. 1 Spontaneity-dependency coordinate diagrams of vulnerability factors in conventional bus operation system

获得脆弱因子集中脆弱程度较大的脆弱因子,采用各层级脆弱因子的交集作为“最优集”。自发因子集(第IV层级)相较于另外3个层级的脆弱程度较高,因此,取第IV层级的交集为关键脆弱因子,即暴露性_{IV}∩敏感性_{IV}∩适应性_{IV}的结果为 F_{12} 和 F_{13} ,得到车内拥挤度和等候时长为常规公交运营系统中的关键脆弱因子。

2 关键脆弱因子分析

为明晰客流随时间变化的波动变化趋势,将采集的站点客流数据绘制成折线图,结合波谷时段及相邻时段的客流特征,通过不断地测试,采用运营线路客流总数的10%和5%将运营时段将客流特征时段划分为高峰、次高峰和平峰时段,如图2所示。

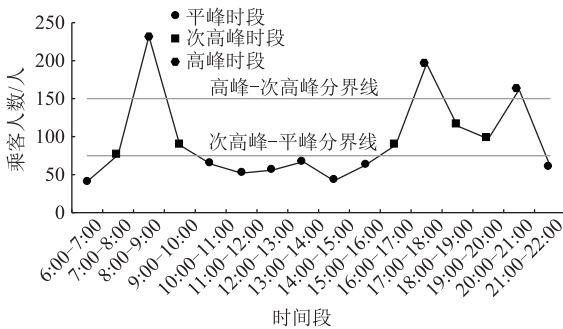


图2 常规公交线路平均日客流情况

Fig. 2 Average daily passenger flow of conventional bus lines

为获取乘客对拥挤度和候车时间的真实感知情况,在高峰、次高峰和平峰时段采用随车调查方式共发放调查问卷1 103份,回收问卷1 058份,剔除无效样本后,获得有效问卷1 005份,有效率为95%。

2.1 拥挤度

为量化拥挤度指标,通过断面乘客数与载客量

的比值计算得到拥挤度,即:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n P_N}{nQ}, \quad (7)$$

式中, R 为拥挤度; n 为调查的常规公交运营线路数量; Q 为常规公交车辆载客量; P_N 为断面乘客数。

表4 样本构成特征

Tab. 4 Sample composition features

指标	类别	比例/%
性别	男	52.6
	女	47.4
年龄/岁	<30	39.7
	30~39	37.8
	40~49	10.3
	50~59	9.7
	≥60	2.5
学历	高中以下	16.2
	大专	33.7
	本科以上	50.1
职业	企业员工	38.2
	公务员	6.4
	个体工商户	10.8
	事业单位	22.1
	其他	22.5

为了确定乘客对车内拥挤程度的主观感知与实际情况的对应关系,对常规公交乘客展开RP调查。根据调查时段车内实际拥挤程度,对乘客开展拥挤度感知与出行选择调查,调查结果如图3和图4所示。

由图3可将乘客自身实际感知程度与拥挤度测算结果进行描述,如表5所示。由图4可知,高峰时段多数乘客可接受4级拥挤度即拥挤度为1.0,次高峰

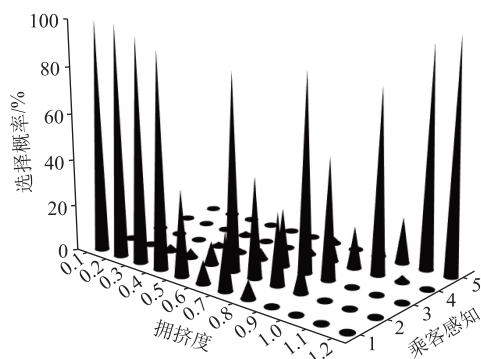


图3 拥挤度等级划分

Fig. 3 Congestion grading

时段多数乘客可接受3级拥挤度即拥挤度为0.8, 平峰时段多数乘客可接受2级拥挤度即拥挤度为0.6。

2.2 候车时间

通过对乘客调查数据的分析, 发现不同时段乘客对候车时间的敏感度不同, 根据调查数据结果的拟合正态分布曲线, 将85%乘客候车容忍值视为候车容忍阈值, 如图5所示。因此, 得到平峰时段乘客候车时间容忍阈值为15 min, 次高峰时段为12 min, 高峰时段为10 min。

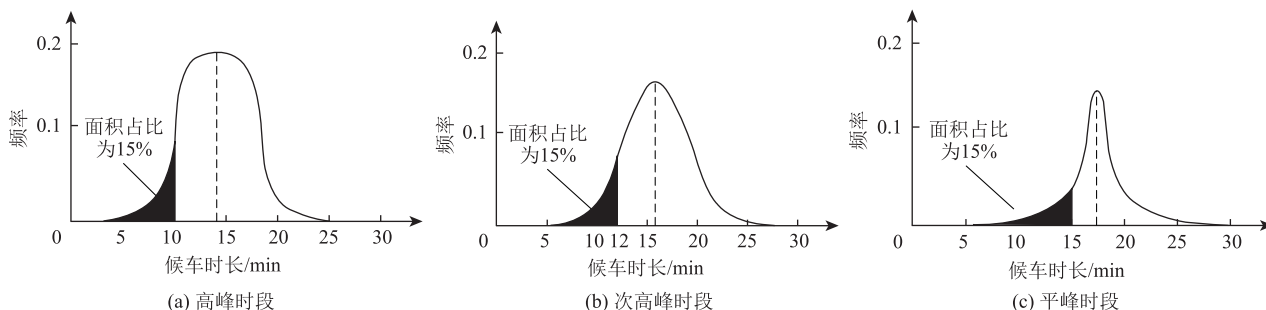


图5 乘客的候车时间容忍度分布

Fig. 5 Distribution of passengers' tolerance for waiting time

3 基于脆弱性评价发车优化

3.1 模型构建

为方便模型建立, 提出以下假设条件: (1) 全程票价一致; (2) 不考虑因交通事故造成的线路瘫痪等极端情况; (3) 乘客遵循就近乘车原则。

根据拥挤度和候车时间2个关键脆弱因子, 对常规公交发车时间间隔进行优化^[18]。为权衡公交乘客与运营企业的利益, 建立以发车间隔时间为变量的运营企业成本模型和乘客成本模型, 其成本函数为:

$$f_i = C\alpha_1 \sum_{K=1}^{K_i} \frac{T_i}{\Delta t_i} + D \left(\alpha_2 \sum_{K=1}^{K_i} \sum_{n=1}^{N-1} R \frac{L_{N, N+1}}{V_i} P_N + \sum_{K=1}^{K_i} \sum_{n=1}^{N-1} \alpha_3 \frac{\Delta t_i}{2} P_N \right), \quad (8)$$

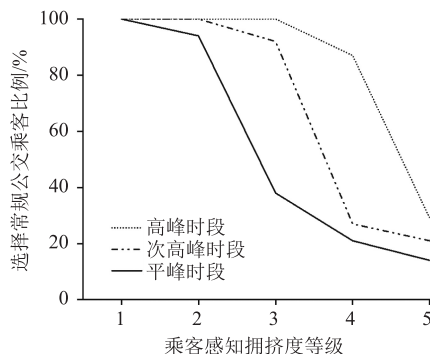


图4 不同拥挤度等级下乘客选择常规公交比例

Fig. 4 Proportion of passengers choosing regular bus at different congestion levels

表5 乘客感知拥挤度分级

Tab. 5 Passenger perceived crowding rating

乘客感知拥挤度等级	乘客感知	临界值
1	完全不拥挤, 有空余座位	0.4
2	不拥挤, 无空余座位, 无身体接触	0.6
3	不太拥挤, 有身体接触	0.8
4	比较拥挤, 身体接触明显	1.0
5	极为拥挤, 挤压感明显	1.2

式中, f 为时段运营成本函数; C 和 D 分别为企业运营成本加权系数和乘客成本加权系数; K 为时间段个数; T 为时段的运营时间长度; Δt 为发车间隔; $L_{N, N+1}$ 为站点与站点间线路长度; V 为车辆平均运行速度; α_1 为每班次车辆运营成本; α_2 为乘客的拥挤度成本; α_3 为乘客单位时间候车成本; $i=1, 2, 3$ 分别为高峰时段、次高峰时段和平峰时段。因此, 得到全天时段的总成本函数为:

$$F = \min \sum_{i=1}^3 \lambda f_i, \quad (9)$$

式中, F 为全天总成本; λ 为时段加权系数。

从乘客选择常规公交的拥挤度阈值和候车时间阈值以及合理保障企业运营利益的角度出发, 将拥挤度和候车时间在高峰、次高峰和平峰时段应进行

限定。同时,每班次公交车需要保持一定标准的载客人数和发车间隔时间限制,因此,得到模型约束条件为:

$$\text{s. t. } \begin{cases} R \leq r_i \\ \frac{\Delta t_i}{2} \leq t_i \\ 50\% \leq \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{Q \frac{T_i}{\Delta t_i}} \leq 120\% \\ 5 \leq \Delta t_i \leq 30 \end{cases}, \quad (10)$$

式中, r 为乘客所能接受的拥挤度, $r_1 = 1.0$, $r_2 = 0.8$, $r_3 = 0.6$; t 为乘客所能接受的候车时长, $t_1 = 10 \text{ min}$, $t_2 = 12 \text{ min}$, $t_3 = 15 \text{ min}$; Q 为车辆载客量。

3.2 模型求解

本研究所提出的基于关键脆弱因子发车时间间隔优化模型属于线性整数规划,求解该类问题通常采用计算速度快、求解精度高的算法。遗传算法经过不断地完善发展,在求解公交调度优化方面应用越来越广泛。因此,本研究采用遗传算法进行求解^[19-20],算法流程如图6所示。

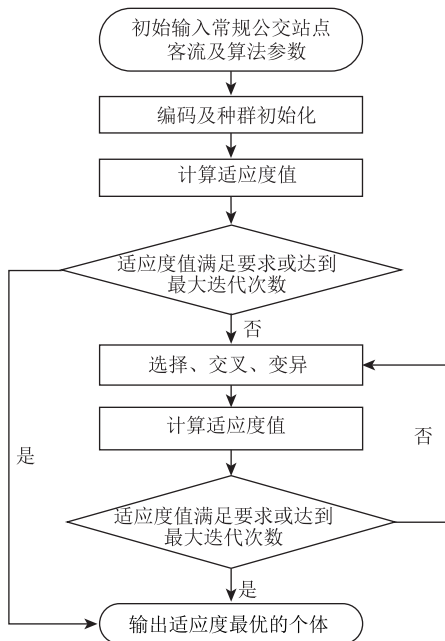


图6 遗传算法求解流程

Fig. 6 Flowchart of genetic algorithm solving

4 算例分析

选取昆明市23路常规公交为研究对象,线路长度为14.2 km,发车间隔为15 min,高峰、次高峰和平峰

时段的平均运行速度分别为21.4, 26.8, 32.7 km/h。

以基于候车时间和车内拥挤度建立的公交车发车间隔时间优化模型为依据,使用遗传算法进行求解过程中,为确定合适的参数进行了大量的试验,最终的参数设置为:初始种群规模为20,交叉概率为0.9,变异概率为0.01,最大迭代次数为200次。企业运营成本加权系数和乘客成本加权系数分别为0.4和0.6。根据2021年昆明市平均工资水平及企业调研数据分析, α_1 取307元/(辆·h), α_2 取17元/(人·h), α_3 取6元/(人·h)。遗传算法迭代过程如图7所示。

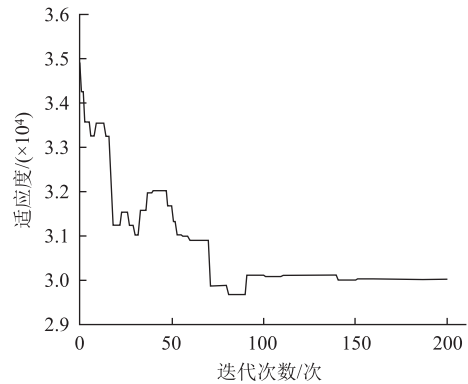


图7 遗传算法迭代过程

Fig. 7 Genetic algorithm iterative process

适应度函数在进化代数达到150时,目标函数呈现收敛状态,目标函数得到最优解,总成本达到最低。优化后得到的高峰时段、次高峰时段和平峰时段的发车间隔分别为6, 10, 22 min。平峰、次高峰和高峰时段的拥挤度降低53.77%, 22.74%, -1.22%。候车时间减少47.82%, 18.33%, -2.76%。

以高峰时段的拥挤度和候车时间为基准,计算得到各脆弱因子的暴露度值、敏感度值和适应度值以及脆弱度值。将通过遗传算法求解,得到优化后的常规公交运营线路脆弱性3个特征变化如表6所示。

表6 运营线路脆弱性特征优化前后对比(单位:%)

Tab. 6 Comparison before and after optimization of vulnerability characteristics of operating lines (unit: %)

时段	优化对比	暴露度	敏感度	适应度
高峰	优化前	76.55	52.73	70.72
	优化后	37.45	25.98	34.98
次高峰	优化前	35.98	24.78	33.24
	优化后	28.53	19.71	26.49
平峰	优化前	22.20	15.29	20.51
	优化后	26.45	18.36	24.73

根据式(4)和式(5)计算得到高峰、次高峰和平峰时段的运营线路脆弱度分别降低 33.88%, 降低 6.43%, 增加 3.85%。对于高峰时段的优化效果较为明显, 次高峰次之, 而平峰时段由于乘客人数较少同时需要考虑公交企业运营成本, 所以, 运营线路的脆弱度不减反增。

5 结论

本研究以常规公交运营线路为研究对象, 构建了脆弱性评价模型并提出基于评价结果的优化方法, 通过实例分析发现, 优化效果较好, 有助于提升服务质量和运营线路网络的韧性。得到结论如下:

(1) 通过脆弱性的暴露性、敏感性和适应性 3 个特征定性评价脆弱因子, 并采用改进 ISM 定量地将脆弱因子的脆弱 3 特征属性由低到高划分为独立、依赖、联动和自发 4 个等级。

(2) 对调查数据的统计分析与测试, 得到不同时段乘客选择常规公交时的容忍阈值, 为提升优化公交运营服务水平及降低运营系统脆弱度奠定基础。

(3) 通过建立基于脆弱性评价的公交发车间隔优化模型, 经遗传算法求解得到运营线路高峰、次高峰和平峰时段的发车间隔时间分别为 6, 10, 22 min; 在此发车间隔下, 高峰时段运营线路的脆弱度降低了 33.88%, 次高峰时段降低了 6.43%, 平峰时段增加了 3.85%。

(4) 研究结果对节约公交运营成本具有较好的应用价值, 同时对提升城市公交响应需求能力的提升具有重要意义, 但由于侧重大多数乘客的出行体验, 对平峰时段的乘客出行产生影响, 下一步将对如何兼顾各时段乘客出行的互补方法展开研究。

参考文献:

References:

- [1] 吕彪, 管心怡, 高自强. 地铁网络服务韧性评估与最优恢复策略 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21 (5): 198-205, 221.
LÜ Biao, GUAN Xin-yi, GAO Zi-qiang, et al. Evaluation and Optimal Recovery Strategy of Metro Network Service Resilience [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21 (5): 198-205, 221.
- [2] CAO N, CAO H. Exploring the Robustness of Urban Bus Network: A Case from Southern China [J]. Chinese Journal of Physics, 2020, 65: 389-397.

- [3] ZHANG L, WEN H Y, LU J, et al. Vulnerability Assessment and Visualization of Large-scale Bus Transit Network under Route Service Disruption [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2020, 88: 102570.
- [4] ABDELATY H, MOHAMED M, EZZELDIN M, et al. Quantifying and Classifying the Robustness of Bus Transit Networks [J]. Transportmetrica A Transport Science, 2020, 16 (3): 1176-1216.
- [5] 赖强, 张宏昊, 王徐盱. 基于复杂网络理论的城市公交网络鲁棒性分析与优化 [J]. 计算机工程与应用, 2022, 58 (10): 249-254.
LAI Qiang, ZHANG Hong-hao, WANG Xu-yu. Robustness Analysis and Optimization of Urban Public Transport Network Based on Complex Network Theory [J]. Computer Engineering and Applications, 2022, 58 (10): 249-254.
- [6] 宋英华, 李玉枝, 霍非舟, 等. 城区内涝条件下城市公交-地铁双层交通网络的脆弱性分析 [J]. 安全与环境工程, 2021, 28 (2): 114-120.
SONG Ying-hua, LI Yu-zhi, HUO Fei-zhou, et al. Vulnerability of Two-layer Traffic Network of Bus and Subway under Waterlogging Condition Based on Complex Network Theory [J]. Safety and Environmental Engineering, 2021, 28 (2): 114-120.
- [7] 李彦瑾, 罗霞. 基于路网压缩的城市路网脆弱路段识别 [J]. 公路交通科技, 2019, 36 (5): 104-112.
LI Yan-jin, LUO Xia. Identification of Urban Road Vulnerability Based on Road Network Compression [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36 (5): 104-112.
- [8] LIU H, XIN Z A, MIN O, et al. Vulnerability Analysis of Public Transit Systems from the Perspective of Urban Residential Communities [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2019, 189: 143-156.
- [9] HAN Y H, KU J S, KIM Y C, et al. Analyzing the Accessibility of Subway Stations for Transport-vulnerable Population Segments in Seoul: Case of Bus-to-subway Transfer [J]. Case Studies on Transport Policy, 2022, 10 (1): 166-174.
- [10] 路庆昌, 崔欣, 徐标, 等. 公交接驳场景下轨道交通网络脆弱性研究 [J]. 中国安全科学学报, 2021, 31 (8): 141-146.
LU Qing-chang, CUI Xin, XU Biao, et al. Vulnerability Research of Rail Transit Network Under Bus Connection Scenarios [J]. China Safety Science Journal, 2021, 31 (8): 141-146.
- [11] JIA T, LIU W X, LIU X T. A Cross-city Exploratory

- Analysis of the Robustness of Bus Transit Networks Using Open-source Data [J]. *Physical A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2021, 580: 126133.
- [12] 赵平, 邓如玉, 李志飞, 等. 基于改进 DEMATEL 的输电线路跨越施工安全影响因素研究 [J]. *安全与环境学报*, 2022, 22 (1): 36-43.
- ZHAO Ping, DENG Ru-yu, LI Zhi-fei, et al. Safety Influencing Factors of Transmission Line Crossover Construction: Based on Improved [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2022, 22 (1): 36-43.
- [13] LI X M, WANG Y, SONG Y. Unraveling Land System Vulnerability to Rapid Urbanization: An Indicator-based Vulnerability Assessment for Wuhan, China [J]. *Environmental Research*, 2022, 211: 112981.
- [14] 毛保华, 王敏, 何天健, 等. 城市公共交通服务水平研究回顾和展望 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2022, 22 (1): 2-13.
- MAO Bao-hua, WANG Min, HE Tian-jian, et al. A Review and Prospect of Urban Public Transit Level-of-Service Research [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2022, 22 (1): 2-13.
- [15] 刘玲. 成都市城市常规公交服务公众满意度影响因素研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- LIU Ling. Public Satisfaction of Chengdu Regular Bus Services Influencing Factors [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [16] 高文凯. 交通拥堵视角下的武汉市主城区公交供给服务水平评价与公平性研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2019.
- GAO Wen-kai. A Study on Evaluation and Fairness of Public Transport Supply Service Level in Wuhan City from the Perspective of Traffic Congestion [D]. Wuhan: Wuhan University, 2019.
- [17] 吕慎, 田锋, 莫一魁. 基于乘客感知的接运公交服务质量评估 [J]. *公路交通科技*, 2019, 36 (8): 152-158.
- LÜ Shen, TIAN Feng, MO Yi-kui. Evaluating Service Quality of Feeder Buses Based on Passenger Perception [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2019, 36 (8): 152-158.
- [18] 薛运强, 郭军, 钟蒙, 等. 基于不确定理论的常规公交车辆调度优化 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2021, 21 (6): 115-122, 130.
- XUE Yun-qiang, GUO Jun, ZHONG Meng, et al. Optimization of Regular Bus Scheduling Based on Uncertainty Theory [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2021, 21 (6): 115-122, 130.
- [19] 陆百川, 何相蟻, 刁素素, 等. 城市外围非高峰时段多线路柔性公交协调调度研究 [J]. *公路交通科技*, 2020, 37 (5): 131-139, 158.
- LU Bai-chuan, HE Xiang-yi, DIAO Su-su, et al. Study on Coordinated Scheduling of Multi-route Flexible Buses in Urban Periphery in Off-peak Period [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2020, 37 (5): 131-139, 158.
- [20] 姚恩建, 刘彤, 郇宁, 等. 常规公交线路发车间隔及车型配置优化 [J]. *北京交通大学学报*, 2020, 44 (4): 86-93.
- YAO En-jian, LIU Tong, XUN Ning, et al. Study on Optimization of Departure Interval and Vehicle Type Configuration of Regular Bus Lines [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2020, 44 (4): 86-93.