

文章编号: 1005-0523(2020)05-0053-07

# 考虑尾气污染的公交跳站策略研究

金梦宇, 何胜学, 张思潮

(上海理工大学管理学院, 上海 200093)

**摘要:** 为了提高公交运行效率的同时考虑到公交尾气对环境的影响, 文章提出一种新的跳站调度策略。新策略通过减少停靠站点数量来提高公交系统的运行效率。以单条公交线路的运行行为研究对象, 对需要停靠的具体站点进行决策, 以乘客旅行时间, 公交运行时间以及站点的排放量与原始方案的占比加权和最小为优化目标的模型。在已知公交 OD 到达率数据条件下, 利用遗传算法对优化模型进行求解, 得出最优跳站方案。最终结果显示, 新的跳站方案可以减少乘客旅行时间 3.09%, 车辆的运行时间 0.92%, 站点处的尾气排放 4.4%。

**关键词:** 公交跳站; 尾气排放; 遗传算法

**中图分类号:** U491

**文献标志码:** A

**本文引用格式:** 金梦宇, 何胜学, 张思潮. 考虑尾气污染的公交跳站策略研究[J]. 华东交通大学学报, 2020, 37(5): 53-59.

**Citation format:** JIN M Y, HE S X, ZHANG S C. Study on bus stop-skip strategy considering bus emission[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2020, 37(5): 53-59.

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.05.008

跳站运行策略, 可以减少公交车辆的停靠, 缩短人们的旅行时间, 提高公交车的行驶速度, 减少环境污染<sup>[1]</sup>, 是一种有效的提高公交车辆运行效率的手段。Fu<sup>[2]</sup>建立了以运营成本和乘客费用最小为目标的非线性整数规划模型, 并且为了满足被滞留的乘客的乘车需求, 要求若某一公交车发生跳站时, 下一趟车必须服务完整的线路。郑思瑶<sup>[3]</sup>考虑在车-车通信的条件下, 建立了跳站实时调度模型, 对乘客的出行延误时间和公交公司的停靠运营成本进行优化。Cao<sup>[4]</sup>提出了一种结合车辆调度的公交优化时刻表确定方法。该方法分析了基于实时乘客需求的跳停策略的可行性, 可以减少乘客的总旅行时间和使用的车辆的数量。Gkiotsalitis<sup>[5]</sup>提出了一种考虑了旅行时间的不确定性的跳站策略。韩笑宓<sup>[6]</sup>首先根据已有 OD 数据确定大站快车的停靠方案, 然后使用基于排放因子的计算方法处理由于行驶里程的不同带来的排放量差异, 最后以乘客时间成本与公交公司运营成本最小化为主要目标, 减少公交排放量为次要目标建立公交调度模型。根据 Yu<sup>[7]</sup>等人的研究, 50%的公交车运行的排放都产生在交叉口处与站点处, 公交车的独特性就在于有固定的站点需要停靠, 而在停靠的过程中不仅车辆加减速会产生排放, 等候乘客上下车时怠速状态的公交车辆也会引起排放增加。本文根据已知的乘客 OD 到达率矩阵数据下, 将综合考虑乘客利益、公交运行效率以及车辆尾气排放这 3 个因素, 规划公交停靠方案。

## 1 公交跳站运行模型

建立跳站模型所需的相关参变量。 $N$  为公交的行程次数;  $O$  为公交线路的站点数;  $A$  为到达每一站的时间;  $D$  为离开每一站的时间;  $T_a$  为第一辆车的发车时间;  $T_b$  为平均发车间隔;  $K$  为公交车在站点的停留时间;  $H$  为车头时距;  $W$  为站点等待总人数;  $L$  为由于上一辆车跳站而被滞留的人数;  $M$  为被滞留的总人数;  $U$  为上车的总人数;  $V$  为下车的总人数;  $r_1$  为乘客平均上车时间;  $r_2$  为乘客平均下车时间;  $\delta$  为公交车的平均加速时间, 减

收稿日期: 2020-04-11

基金项目: 国家自然科学基金(71801153); 国家自然科学基金(71871144); 上海市自然科学基金项目(18ZR1426200)

作者简介: 金梦宇(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为交通运输规划与管理。E-mail: jmy\_709@163.com。

通信作者: 何胜学(1976—), 男, 副教授, 研究方向为交通网络建模。E-mail: lovellhe@126.com。

速时间; $a_1$ 为减速进站时的加速度; $a_2$ 为加速离站时的加速度; $v_0$ 为公交在路段上的行驶速度; $t_c$ 为行驶一站点的时间; $E^*$ 为公交怠速时的排放率; $E_1, E_2, E_3$ 为公交进站减速,加速,怠速时的排放量; $E_4$ 为匀速行驶时的排放率; $E^1$ 为进站过程的总排放量; $E^2$ 为跳过站点的排放量; $X$ 为决策变量,1代表停靠,0代表跳过; $\alpha, \beta, \gamma$ 为权重。

### 1.1 公交站点停靠模型

与Liu<sup>[8]</sup>所建立的公交站点停靠模型相似,本文对车辆在站点处的停靠情况以及上下客过程进行了详细描述。在上述描述基础之上,本文加入了发车间隔要素,并进一步考虑了在减少停靠站条件下的尾气污染的减少情况。

模型假设:①乘客遵循前门上车,后门下车原则;②由于跳站而被限制上车的乘客,不会离开,会在站台继续等待乘坐下一班次的车辆。

若 $o$ 站为首站,车辆的到达时间取决于该车队的发车时间及发车间隔;若不是,则与其在上一站点的停靠情况有关,即

$$A_{n,o} = \begin{cases} T_a + (n-1) \times T_b, & o=1 \\ D_{n,o-1} + t_{n,o} + \delta \times X_{n,o} + \delta \times X_{n,o-1}, & o \neq 1 \end{cases} \quad (1)$$

车辆 $n$ 在 $o$ 站的出发时间,等于其在该站的到达时间与停留时间之和,即

$$D_{n,o} = A_{n,o} + K_{n,o} \quad (2)$$

车辆 $n$ 在 $o$ 站的停留时间,等于乘客在该站上下车的最大时间,即

$$K_{n,o} = \max\{r_1 \times U_{n,o}, r_2 \times V_{n,o}\} \quad (3)$$

车辆 $n$ 在 $o$ 站的上车总人数为

$$U_{n,o} = X_{n,o} \sum_{d=o+1}^o W_{n,od} X_{n,d} \quad (4)$$

车辆 $n$ 在 $o$ 站上车目的地为具体 $d$ 站的人数为

$$U_{n,od} = X_{n,od} W_{n,od} X_{n,d} \quad (5)$$

车辆 $n$ 在 $o$ 站的下车总人数,取决于在 $d$ 站与 $o$ 站之间的乘坐的人数( $d < o$ ),即

$$V_{n,o} = X_{n,o} \sum_{d=1}^{o-1} W_{n,od} X_{n,d} \quad (6)$$

在 $o$ 站等待车辆 $n$ 的总人数,等于被车辆 $n-1$ 限制上车的从 $o$ 站要到 $d$ 站的人数,加上车辆 $n-1$ 离开后的到达 $o$ 站的人数,即

$$W_{n,od} = L_{n-1,od} \lambda_{o,d} \times H_{n,o} \quad (7)$$

在 $o$ 站,车辆 $n$ 与车辆 $n-1$ 的车头时距为

$$H_{n,o} = A_{n,o} - A_{n-1,o} \quad (8)$$

为了让车辆之间不会出现超车现象,要保证车头时距不能为负,即

$$H_{n,o} > 0 \quad (9)$$

车辆 $n$ 在 $o$ 站被限制上车的目的地去往 $d$ 站的人数,等于原本期望上车的等待总人数减去由于某站不停靠而导致不能上车的人数,即

$$L_{n,od} = W_{n,od} - W_{n,od} X_{n,o} X_{n,d} \quad (10)$$

在第 $o$ 站被车辆 $n$ 限制上车的总人数,等于所有被限制去往目的地 $d$ 站的人数的加和,即

$$M_{n,o} = \sum_{d=o+1}^o L_{n,od} \quad (11)$$

保证不能跳过起始站和终点站,即

$$X_{n,1} = X_{n,o} = 1 \quad (12)$$

决策变量取值0或1,即

$$X_{n,\phi} \in \{0, 1\} \quad (13)$$

乘客在站点处的等待总时间,等于期望上车的乘客的等待时间加上被由于被限制上车而要等待下一辆车的乘客的额外等待时间。本文规定,每位乘客在站点的平均等待时间为 1/2 的车头时距。则期望上车的乘客的等待时间,等于该站上车的总人数减去被上一辆车限制上车的人数,乘以 1/2 的车头时距。被上一辆车限制上车的乘客的等待时间等于 1/2 的上辆车的车头时距加上这辆车的车头时距。则乘客在站点处的等待总时间为

$$Z_1 = \sum_{n=2}^N \sum_{o=1}^o \left[ (U_{n,o} - M_{n-1,o}) \times \frac{H_{n,o}}{2} + M_{n-1,o} \times (H_{n-1,o} + \frac{H_{n,o}}{2}) \right] \quad (14)$$

乘客的在车时间,等于其在车内所经历的从  $o$  站上车后直到到达目的地  $d$  站之间的行程时间,停留时间,加减速时间之和,即

$$Z_2 = \sum_{n=2}^N \sum_{o=1}^o \sum_{d=o+1}^o \left[ U_{n,od} \sum_{z=d+1}^d (t_{od} + (K_{n,z} + 2\delta) X_{n,o}) \right] \quad (15)$$

车辆的运行时间,等于其在各个 OD 间的行程时间,停留时间,加减速时间之和,即

$$Z_3 = \sum_{n=2}^N \sum_{o=1}^o \sum_{d=o+1}^o (t_{od} + (K_{n,o} + 2\delta) X_{n,o}) \quad (16)$$

### 1.2 站点尾气排放模型

模型假设:① 车辆在路段上以一给定速度  $v_0$  匀速行驶;② 在进入站点时,以减速度  $a_1$  做匀减速运动,直至速度为 0。在离开站点时,以加速度  $a_2$  做匀加速运动,直至速度恢复为  $v_0$ 。

本文选取 Panis<sup>[9]</sup>等人所建立的速度加速度排放模型作为基础参考模型,此处只考虑污染物  $CO_2$ ,相关回归系数如表 1 所示。

$$E(t) = \max\{E^0, f_1 + f_2 v(t) + f_3 v(t)^2 + f_4 a(t) + f_5 a(t)^2 + f_6 v(t)a(t)\} \quad (17)$$

表 1 公交车各类污染物排放回归系数  
Tab.1 Regression coefficients of various pollutants from buses

回归系数	$E^0$	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_6$
$CO_2$	0	0.904	1.13	-0.042 7	2.81	3.45	1.22

#### 1.2.1 匀减速运动

减速时间  $\delta$  可分为是由第 1 s 至第  $i$  s,则其分别对应了一组速度  $v_1^1$  至  $v_i^1$ ,即

$$v_i = v + a_1 t_i \quad (18)$$

减速时,每一秒的排放量可计算为

$$E(i) = \max\{E^0, f_1 + f_2 v_i^1 + f_3 (v_i^1)^2 + f_4 a_1 + f_5 (a_1)^2 + f_6 v_i^1 a_1\} \quad (19)$$

总排放量为逐秒排放量之和为

$$E_1 = \sum_{i=1}^{\delta} E(i) \quad (20)$$

#### 1.2.2 匀加速运动

加速时间  $\delta$  可分为是由第 1 s 至第  $j$  s,则其分别对应了一组速度  $v_1^2$  至  $v_j^2$ ,即

$$v_j = v + a_2 t_j \quad (21)$$

加速时,每一秒的排放量可计算为

$$E(j) = \max\{E^0, f_1 + f_2 v_j^2 + f_3 (v_j^2)^2 + f_4 a_2 + f_5 (a_2)^2 + f_6 v_j^2 a_2\} \quad (22)$$

总排放量为逐秒排放量之和为

$$E_2 = \sum_{j=1}^{\delta} E(j) \quad (23)$$

1.2.3 怠速运动

怠速时的排放率为  $E^*$ , 怠速运动的时间即是公交停留在站台的时间, 则怠速时的排放总量为怠速的排放率乘以在站点的停留时间, 即

$$E_3 = E^* \times K_{n,o} \tag{24}$$

进站过程的总排放量为

$$E^1 = E_1 + E_2 + E_3 \tag{25}$$

1.2.4 匀速行驶过站台

如果一次旅行在一个站点进行跳站策略, 直接行驶过站台, 驶过的时间为  $t_c$ 。

匀速行驶时, 对应的排放率为

$$E_4 = f_1 + f_2 v_0 + f_3 (v_0)^2 \tag{26}$$

则行驶过一个站点的排放量为排放率乘以行驶过站台的时间

$$E^2 = E_4 \times t_c \tag{27}$$

由于给出了各路段的行程时间, 并假设了公交在路段上的行驶速度, 公交在路段上的排放量不会由于是否跳站而发生改变, 所以本文只考虑其在站点处排放量的改变。站点处的尾气排放量为

$$Z_4 = \sum_{n=2}^N \sum_{o=1}^O [E^1 X_{n,o} + E^2 (1 - X_{n,o})] \tag{28}$$

1.3 目标函数

$$\min f(X) = \alpha \times \left| \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1^* + Z_2^*} \right| + \beta \times \left| \frac{Z_3}{Z_3^*} \right| + \gamma \times \left| \frac{Z_4}{Z_4^*} \right| \tag{29}$$

其中:  $Z_1^*, Z_2^*, Z_3^*, Z_4^*$  分别为没有采用跳站时的, 乘客站点等候时间, 乘客在车旅行时间以及车辆运行时间, 站点尾气排放量;  $Z_1 + Z_2$  为乘客的总旅行时间。目标函数为优化后的各要素占优化前各要素的比值, 并赋予权重相乘;  $\alpha + \beta + \gamma = 1$ 。

2 算法设计

决策车辆停靠问题是一个 NP-hard 问题, 该问题包含了  $N$  辆车  $O$  个站点, 即所产生的跳站方案有  $2^{N \times O}$  个, 规模较大, 经典的算法难以求解, 故选用启发式算法遗传算法进行求解。在该问题中, 决策变量为站点是否停靠, 0 表示该站跳过, 1 表示该站停靠。在遗传算法中, 可直接用二进制编码来表示车辆的站点停靠方案。

1) 设遗传参数, 群体规模为 50, 循环次数为 150, 交叉概率为 0.7, 变异概率为 0.07。

2) 使用 01 编码生成初始跳站策略。每一个染色体代表一组跳站方案, 里面包含  $N \times O$  个基因, 每个基因代表每个站点的停靠情况。编码时必须满足第一, 第三辆车全停, 第二辆车只在 2 至  $O-1$  站进行跳站。编码图如图 1 所示。

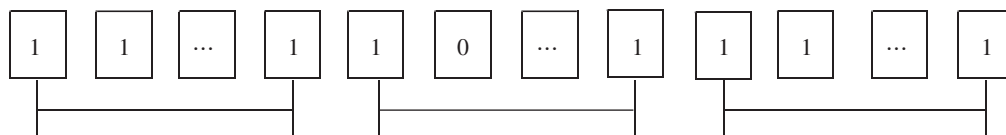


图 1 编码示意图  
Fig.1 Coding diagram

3) 设计适应值函数, 求得  $f(X)$  为最小值, 故将适应值函数去为倒数形式进行求解。并且为了确保车辆不会超车这一约束, 即在出现车头时距为负时, 赋予一极大值, 进行筛选。适应值函数为

$$F(X) = \frac{1}{f(X)} \tag{30}$$

- 4) 选择:利用轮盘赌选择,适应度越大的个体被选择的概率就越高
- 5) 交叉:采用随机单点交叉法
- 6) 变异运算:首先,为了满足原始约束,对变异区间进行标定。若变异点属于变异区间,可进行变异操作,否则不可变异。
- 7) 满足迭代次数。

### 3 案例分析

假设某条公交线路有 19 个车站,列车的平均行驶速度为 9.7 m/s,加速时间为 10 s,减速时间为 10 s,行驶过一个站台的时间为 10 s,发车间隔为 10 min。权重  $\alpha=0.4, \beta=0.3, \gamma=0.3$ 。相邻站点之间的行程时间如表 2 所示,OD 之间的出行率如表 3 所示。

表 2 相邻站点之间的行程时间  
Tab.2 Travel time between adjacent stations

	min								
站点	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
行程时间	2	1.5	0.5	1.5	0.5	1.5	2.5	2.0	5.5
站点	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19
行程时间	1.5	1.5	3.0	3.0	5.5	3.0	3.0	3.0	3.0

表 3 OD 对之间的出行率  
Tab.3 Travel rate between OD pairs

	min																		
站点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	0	0.17	0.05	0.03	0.05	0.10	0.12	0.22	0.07	0.07	0.02	0.07	0.10	0.05	0.03	0.07	0.02	0.03	0.25
2		0	0.12	0.05	0.10	0.20	0.25	0.35	0.17	0.12	0.02	0.15	0.18	0.10	0.08	0.15	0.02	0.08	0.23
3			0	0.08	0.15	0.23	0.30	0.18	0.25	0.20	0.03	0.23	0.28	0.17	0.12	0.23	0.02	0.10	0.22
4				0	0.03	0.07	0.08	0.13	0.05	0.03	0.00	0.05	0.07	0.03	0.03	0.05	0.00	0.02	0.18
5					0	0.13	0.17	0.25	0.10	0.07	0.02	0.10	0.13	0.07	0.03	0.08	0.10	0.03	0.12
6						0	0.15	0.23	0.10	0.07	0.02	0.10	0.12	0.07	0.05	0.08	0.11	0.03	0.22
7							0	0.23	0.10	0.07	0.03	0.08	0.12	0.07	0.15	0.08	0.00	0.03	0.22
8								0	0.17	0.12	0.12	0.17	0.20	0.12	0.08	0.15	0.02	0.08	0.25
9									0	0.10	0.04	0.13	0.15	0.08	0.07	0.12	0.13	0.05	0.23
10										0	0.02	0.07	0.08	0.03	0.03	0.05	0.00	0.02	0.20
11											0	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.10	0.02	1.00
12												0	0.38	0.22	0.15	0.28	0.12	0.12	0.25
13													0	0.15	0.12	0.02	0.02	0.10	0.17
14														0	0.13	0.27	0.02	0.12	0.18
15															0	0.17	0.02	0.07	0.28
16																0	0.02	0.08	0.13
17																	0	0.03	0.07
18																		0	0.17
19																			0

由于要满足被上一辆车所限制上车的的所有乘客都要被下一辆车全部带走,所以本文研究连续的3辆车,且第1,3辆车为全程车,第2辆车为跳站车。将文本建立的模型通过遗传算法进行求解,得到最优停靠方案,适应度迭代图如图2所示。通过迭代图可以发现,大约在迭代到50次左右就已经收敛,说明了模型的有效性。

### 3.1 结果分析

对优化后的各要素值进行分析,发现总的运行效率提升了2.83%。其中,乘客站点等候时间增加了5.58%,但是乘客的在车时间减少了5.1%,总的乘客旅行时间减少了3.09%,车辆的运行时间减少了0.92%,站点出的排放减少了4.4%,具体数据如表4所示。由于本文所设计的到达率较低,故系统中的到达人数较少,且仅研究3辆车,即最后的优化结果较小。

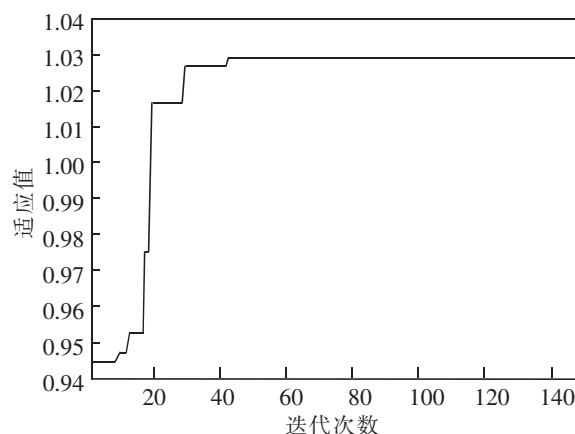


图2 适应度曲线图  
Fig.2 Fitness curve

表4 优化效果对比

Tab.4 Comparison of optimization effects

优化效果	乘客站点等候 时间/min	乘客在车 时间/min	乘客总运行 时间/min	车辆运行 时间/min	站点的尾气 排放总量/g	目标函数值
全部停靠	1 940	8 414.16	10 354.16	112.36	8 356.02	1
跳站调度	2 048.31	7 985.45	10 033.76	111.33	7 988.76	0.97
优化结果	-108.31	428.71	320.40	1.03	367.26	0.93
优化情况	-5.58%	5.1%	3.09%	0.92%	4.4%	2.83%

### 3.2 权重的影响分析

权重的赋予,代表着考虑各要素系统中的重要性占比。针对不同的权重,对跳站方案行优化,结果如表5所示。

表5 不同权重的优化情况

Tab.5 Optimization of different weights

权重	跳过站点情况	$Z_1$	$Z_2$	$Z_1+Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$f(x)$
0.4 0.3 0.3	11, 15, 17	-5.58%	5.1%	3.09%	0.92%	4.40%	2.83%
0.3 0.3 0.4	11, 15, 17, 18	-11.14%	4.62%	1.67%	0.85%	5.59%	2.99%
0.3 0.4 0.3	11, 17, 18	-5.04%	4.88%	3.02%	0.93%	4.40%	2.60%

根据3组不同的权重,所得出的最优方案均跳过11,17站点,由于11,17站点的到达率较低,基本会被跳过。通过结果可知,权重的变化对整体系统影响不大。其中,若将排放量的改变赋予较大权重,可能会出现对乘客等待时间的负面影响较大的情况。

## 4 总结

本文分析了公交车行驶进出站点的过程,联系已有的微观排放模型对其停靠过程中的尾气排放情况

进行量化。以车辆是否停靠为决策变量,考虑到乘客感受以及尾气排放等多重因素。根据已有的 OD 数据,利用遗传算法对模型进行求解。结果表明,该方法可以减少乘客旅行时间 3.09%,车辆的运行时间 0.92%,站点处的尾气排放 4.4%,能够一定程度上提高公交车辆的运行效率。

#### 参考文献:

- [1] 魏昌海. 考虑公交车尾气排放的常规公交大站快车组合调度研究[D]. 北京:北京交通大学,2016.
- [2] FU L P, LIU Q, PAUL C. Real-time optimization model for dynamic scheduling of transit operations[J]. *Transportation Research Record*, 2003, 1857(1): 48-54.
- [3] 郑思瑶. 车车通信条件下的公交实时调度方法研究[D]. 北京:北京交通大学,2016.
- [4] CAO Z C, AVISHAI C. Autonomous shuttle bus service timetabling and vehicle scheduling using skip-stop tactic[J]. *Transportation Research Part C*, 2019, 102(MAY): 370-395.
- [5] KONSTANTINOS G. Robust stop-skipping at the tactical planning stage with evolutionary optimization[J]. *Transportation Research Record*, 2019, 2673(3): 611-623.
- [6] 韩笑宓. 考虑公交车尾气排放的常规公交组合调度优化研究[D]. 北京:北京交通大学,2019.
- [7] YU Q, LI T Z. Evaluation of bus emissions generated near bus stops[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 85: 195-203.
- [8] LIU Z Y, YAN Y D, QU X O, et al. Bus stop-skipping scheme with random travel time[J]. *Transportation Research Part C*, 2013, 35(9): 46-56.
- [9] INT P L, BROEKX S, LIU R H. Modelling instantaneous traffic emission and the influence of traffic speed limits[J]. *The Science of the total environment*, 2006, 371(1-3): 270-285.

## Study on Bus Stop-Skip Strategy Considering Bus Emission

Jin Mengyu, He Shengxue, Zhang Sichao

(School of Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** In order to improve the efficiency of bus operation and reduce the impact of bus emission on the environment, this paper proposes a new skip station scheduling strategy. The new strategy improves the efficiency of public transportation system by reducing the number of stops. This paper takes the operation of a single bus line as the research object, and makes decisions on the specific stops to be stopped. The optimization objective is the weighted sum of the proportion of the passenger travel time, bus operation time and bus emission to the original scheme. Given the OD arrival rate data of public transport, the genetic algorithm is used to solve the optimization model, and the optimal station skipping scheme is obtained. The final results show that the new scheme can reduce the travel time of passengers by 3.09%, the running time of vehicles by 0.92%, and the exhaust emission at the station by 4.4%.

**Key words:** bus stop-skip; bus emission; GA