

# 自动驾驶环境下考虑区间重叠的公交调度优化

周建康 李辉\* 高媛媛 曹凯乐 翟亚龙

河南工业大学土木工程学院 河南 郑州 450001

**【摘要】**：针对多线路公交在重叠区间内因车辆无序聚集引发的串车、拥堵及效率低下问题，本文综合考虑自动驾驶环境下车辆精准协同的潜力，以最小化乘客出行时间与公交运营成本为目标，构建了考虑区间重叠的公交调度优化模型。基于遗传算法对模型进行求解，并以郑州市 B27、B201 与 45 路公交线路的重叠区间为案例进行验证。结果表明，与现状固定间隔调度方案相比，优化方案可使乘客总出行时间降低 3.2%，公交系统总运营成本降低 3.7%。

**【关键词】**：自动驾驶环境；重叠区间；公交调度；遗传算法；MATLAB

DOI:10.12417/3083-5526.25.04.025

## 引言

随着我国城市化进程加速，公共交通已成为缓解交通压力的关键。然而，传统公交调度模式在应对多线路区间重叠时往往失效，易引发车辆集中到站、运行效率降低等问题，影响乘客出行并推高运营成本。自动驾驶技术的成熟为精准协同调度提供了新的可能。早期研究已明确指出区间重叠是多线路公交网络中的普遍现象，并系统性地揭示了其负面影响。这些问题主要包括由车辆无序聚集引发的串车现象<sup>[1,2]</sup>、站点周边拥堵<sup>[3]</sup>、以及由此导致的乘客等待时间延长<sup>[1,4]</sup>、车辆运营效率降低与能耗增加<sup>[5,6]</sup>。为量化这一问题，学者们提出了基于客流数据的分析方法，如利用智能卡数据识别高需求的重叠 OD 对<sup>[7]</sup>，或定义重叠指数来评估线路运营效率<sup>[7,8]</sup>。这些研究奠定了将重叠问题从定性描述转向定量分析的基础。

在传统人工驾驶环境下，大量研究聚焦于通过静态时刻表优化与动态控制策略来缓解重叠冲突。静态调度主要通过调整发车间隔<sup>[9]</sup>、发车频率<sup>[10]</sup>或时刻表<sup>[11]</sup>进行协同设计，以在规划层面避免车辆在重叠区间同时到达。优化目标多集中于最小化乘客总出行时间<sup>[4,9,10]</sup>或兼顾公交公司运营成本<sup>[6,8]</sup>，形成了单目标<sup>[9]</sup>与多目标<sup>[6,8]</sup>优化模型。求解算法以遗传算法（GA）<sup>[9,12]</sup>、粒子群算法（PSO）<sup>[8]</sup>等启发式方法为主。动态调度则针对运行中的扰动，采用驻站控制、速度诱导、跳站调度等实时策略<sup>[1,2]</sup>，以恢复车头时距均匀性，避免串车。部分研究进一步将调度与站点泊位设置<sup>[3]</sup>、信号优先<sup>[13]</sup>进行联合优化，体现了从单一控制向多系统协同的演进。

随着问题研究的深入，模型考虑因素日趋复杂。一是引入多车型调度（大、小型车组合），以更精细地匹配重叠区间波动的客流需求，从而在降低拥挤成本的同时提高运力利用率<sup>[5,6,14]</sup>。二是考虑多运营商竞争博弈，构建以政府（乘客利益）

和运营商（自身利润）为主体的双层规划模型，揭示了利益主体不同目标下的协同复杂性<sup>[4,10]</sup>。三是在调度模式上，探索全程车与跨站车的混合调度，通过服务差异化进一步优化资源配置<sup>[12,15-17]</sup>。

最近研究开始关注自动驾驶与车路协同技术带来的范式变革。自动驾驶公交车精准、可控的特性，为实现高动态的协同调度提供了前所未有的技术条件。相关研究已尝试构建融合时刻表优化、速度引导和信号优先的集成控制模型<sup>[13]</sup>，旨在利用专用车道和通信技术，使车辆以合理间隔通过重叠区间，从根本上避免串车。这标志着研究方向从被动缓解转向了基于新技术的主动预防与全局协同。在此背景下，本文聚焦自动驾驶环境，以优化重叠区间公交调度为核心，构建兼顾乘客出行时间与运营成本的双目标优化模型，以期智慧公交系统的高效协同运营提供理论支撑。

## 1 模型构建

### 1.1 参数定义

假设研究区域中共有  $Y$  ( $y=1,2,3\dots Y$ ) 条公交线路，每条公交线路共有  $I_y$  辆公交车。重叠区间前有  $R_y$  个站点，重叠区间有  $O$  个站点，每条公交线路  $y$  有  $S_y$  个站点，区间重叠影响下的公交调度模型具体参数定义如表 1 所示。

表 1 模型参数

参数	定义
$D_a$	离开站点 $S_y$ 的加速距离
$D_d$	到达站点 $S_{y+1}$ 的减速距离
$T_a$	加速出站时间
$T_d$	减速进站时间
$T_t$	在站点 $S_y$ 的停靠时间

作者简介：周建康（2005-），男，本科生，主要研究方向：智能交通规划与管理。

通信作者：李辉（1989-），女，博士，讲师，主要研究方向：智能交通规划与管理。

基金项目：河南工业大学本科生科研训练项目（KYXL2025032）；2022 年度河南省重点研发与推广项目（科技攻关）（222102240052）

参数	定义
$t_0$	公交开门时间
$t_c$	公交关门时间
$t_s$	乘客上车时间
$t_x$	乘客下车时间
$T_{S_y}^{S_{y+1}}$	站内行程时间
$T_{S_y, S_{y+1}}^u$	车内出行时间
$c_t$	车内出行时间成本
$\mu_1$	单位车内出行成本
$P_{i, S_y}$	线路 <i>i</i> 站点 $S_y$ 滞留人数
$\lambda_{S_y}$	站点 $S_y$ 乘客到达率
$H_{i-1}^i$	第 <i>i-1</i> 和第 <i>i</i> 辆公交车车头时距
$R_{i, S_y}$	第 <i>i</i> 辆车在站点 $S_y$ 剩余容量
$T_1$	第一类乘客候车时间
$\mu_2$	单位站点候车成本
$c_0$	公交公司运营成本
$c_f$	短期运营成本
$\mu_3$	单位运营成本
$L_1$	线路长度
$T_k$	时段长度
$\Delta t$	发车间隔
$\gamma_1$	系数
$\gamma_2$	系数
$m_{S_y}$	第一类乘客比例

## 1.2 乘客出行时间

依据乘客出行范围对乘客进行分类。第一类乘客为仅位于单条公交线路的运营范围内，上下车站点均处于线路的重叠区间内，即便其他公交线路在同一路段内并行运营，亦不会对他们的出行方式构成任何干扰或影响。第二类乘客为出行起点和终点均位于多条公交线路均可抵达的范围内。依据乘客分类，分别计算出行成本。

### 1.2.1 乘客车内出行时间成本

车内行程时间为乘客上车后从进站到目的站点的总时间。从站点 $S_y$ 到站点 $S_{y+1}$ 的乘客车内出行时间包括：

- (1) 公交车离开站点 $S_y$ 的加速时间
- (2) 公交车到达站点 $S_{y+1}$ 的减速时间
- (3) 公交车从站点 $S_y$ 到站点 $S_{y+1}$ 的站间行程时间

(4) 公交车在站点 $S_y$ 的停靠时间

公交车离开站点 $S_y$ 的加速时间：

$$T_a = \frac{2D_a}{v/3.6} \cdot 60 \quad (1)$$

公交车到达站点 $S_{y+1}$ 的减速时间：

$$T_d = \frac{2D_d}{v/3.6} \cdot 60 \quad (2)$$

公交车在站点 $S_y$ 的停靠时间：

$$T_t = t_0 + t_c + \max(t_s, t_x) \quad (3)$$

公交车在站点 $S_y$ 和站点 $S_{y+1}$ 的站内行程时间：

$$T_{S_y}^{S_{y+1}} = \frac{D_{S_y}^{S_{y+1}} - D_a - D_d}{v/3.6} \cdot 60 \quad (4)$$

因此，车内出行时间为：

$$T_{S_y, S_{y+1}}^u = T_a + T_d + T_t + T_{S_y}^{S_{y+1}} \quad (5)$$

车内出行时间成本为：

$$c_t = \mu_1 \sum_{S_y} T_{S_y, S_{y+1}}^u \quad (6)$$

### 1.2.2 乘客站点候车成本

(1) 第一类乘客

由于第一类乘客只有一种选择，无需关注其他线路可能带来的任何影响，由于公交车容量有限，每次到达的公交车不一定能够容纳所有的乘客，因此需分情况讨论。若候车人数小于车辆剩余容量，则没有乘客滞留。若候车人数大于车辆的剩余容量，则还会有乘客进行二次候车，假设候车次数最大不超过两次。

$$P_{i, S_y} = \lambda_{S_y} \cdot H_{i-1}^i - R_{i, S_y} \quad (R_{i, S_y} \leq \lambda_{S_y} \cdot H_{i-1}^i) \quad (7)$$

$$P_{i, S_y} = 0 \quad (R_{i, S_y} > \lambda_{S_y} \cdot H_{i-1}^i) \quad (8)$$

由此可得，第一类乘客的候车时间为：

$$T_1 = \sum_{y=1}^Y \sum_{i=1}^i \sum_{s=1}^s \left[ \min(\lambda_{S_y} \cdot H_{i-1}^i, R_{i, S_y}) \cdot \frac{H_{i-1}^i}{2} \cdot m_{S_y} + P_{i, S_y} \cdot H_{i-1}^i \cdot m_{S_y} \right] \quad (9)$$

(2) 第二类乘客

第二类乘客处于重叠区间内，因此候车时有多种路线选择，计算时需要将离站时刻按照顺序排列，排列后的离站时刻表示为 $T_{y, i, s}$ ，其中， $i = P_i + 1, P_i + 2, \dots, P_i + O$ ， $Y = 1, 2, \dots, X$ ，

$X = \sum_{i=1}^l I_i$ 。可得到车头时距的表达式为

$H_{y,i,s} = T_{y,i,s} - T_{y,i,(s-1)_0}$ ，表示第*i*辆车在站点*s*处的车头

时距， $T_{y,i,s}$ 、 $T_{y,i,(s-1)_0}$ 分别表示离站时刻。得到车头时距

后，类似于第一类乘客候车时间可得：

$$T_2 = \sum_{y=1}^y \sum_{i=q+1}^{o+E} \sum_{X=1}^X \left[ \min(\lambda_{s_y} \cdot H_{y,i,s}, R_{i,s_y}) \right] \cdot \frac{H_{y,i,s}}{2} \cdot (1-m_{s_y}) + P_{i,s_y} H_{y,i,s} \cdot (1-m_{s_y}) \quad (10)$$

因此，总乘客站点候车时间成本为  $c_w = \mu_2(T_1 + T_2)$ 。

### 1.3 公交公司运营成本

公交公司运营过程中会产生各类成本，根据时间投入维度，将其分为短期成本和长期成本。短期成本包括维持公交车日常运营必需的各项费用，驾驶员和管理人员工资是短期成本的基础。公交车在运行过程中需要进行定期维护和保养，以确保车辆的正常运行和安全性。短期成本记为  $c_f$ 。

长期成本指公交车运行期间，需持续输出的运行成本，根据公交线路的长度以及发车频率高低的变化而不同。公交公司运营总成本<sup>[18]</sup>：

$$c_0 = c_f + \mu_3 L_1 \sum_{K=1}^K \frac{T_K}{\Delta t} \quad (11)$$

### 1.4 约束条件

(1) 时间间隔

自动驾驶环境下，通过控制车辆行驶速度，保持相邻两车间隔既不超过最大间隔，也不小于最小间隔<sup>[6]</sup>。

$$A_{\min} \leq \Delta t \leq A_{\max} \quad (12)$$

其中： $A_{\min}$ 、 $A_{\max}$ 表示相邻两车的最短间隔和最长间隔。

(2) 行程时间

自动驾驶环境下，车辆速度受到智能控制，因此公交车在相邻两个站点运行时行程时间满足：

$$H_{i-1}^i \leq 30 \quad (13)$$

模型以乘客出行时间成本以及公交公司运营成本最小为目标函数，同时考虑到两者的互相影响，公交车调度优化模型表示如下：

$$\min z = \gamma_1(c_t + c_w) + \gamma_2 c_0$$

$$s.t. \begin{cases} A_{\min} \leq \Delta t \leq A_{\max} \\ H_{i-1}^i \leq 30 \end{cases} \quad (14)$$

### 1.5 模型求解

区间重叠下的公交调度问题因多参数、多变量以及复杂的约束条件非常困难。因此，寻求一种适宜的算法以解决问题变得至关重要。本文借鉴已有研究<sup>[19-20]</sup>，选取遗传算法求解优化问题。

本文主要使用浮点数编码方式。以郑州市 B27 路公交车为例，研究的晚高峰时段（17:00-18:30）。如长度为 *n* 的编码串：(0,4,8,90)，0 表示首次发车时间即 17:00，4 表示第二趟发车时间距首次发车时间间隔为 4 分钟，即 17:04 发第二趟车，90 表示距首发 90 分钟发车。

## 2 案例分析

### 2.1 公交线路数据调查

本文选取郑州市重叠区间处于客流量较大的主干道上的公交线路为例进行交通调查，如 B27 路、B201 路、45 路公交车。B27 路共有 23 个站点，途径枫香街、莲花街等客流量大的主干道，全长 11.5 公里，途径格力工业园、郑州轻工业大学、长椿路站、商业区等人流量集中区域。B201 路共 21 个站点，途径多条交通要道，包括长椿路、莲花街等繁华路段，全长 20.4 公里。45 路共有 31 个站点，途径长椿路、莲花街、科学大道等多条重要街道，总里程 20.6 公里。公交线路分布如图 1 所示，从长椿路站至雪松路站，为三条公交线路的重叠区间，长度为 1.6km。

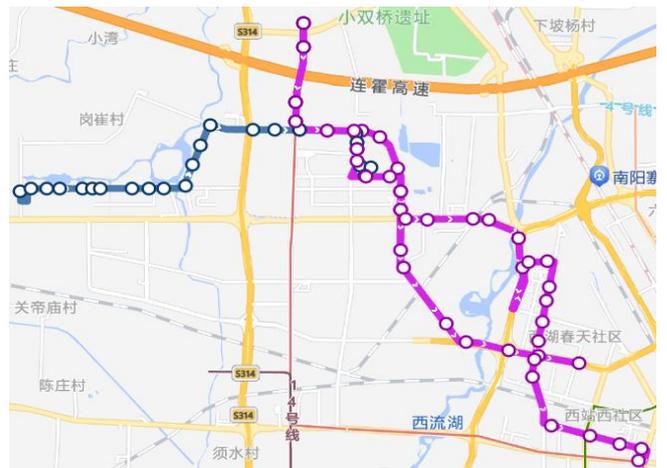


图 1 公交线路分布

### 2.2 乘客数据调查

本文采用跟车调查，具体操作步骤如下：两个调查员为一组，其中一名调查员负责统计上车乘客数量及时间，并详细记录每辆公交车的到站、离站时间和公交车在相邻两个站点之间的行驶时间。另一名调查员负责统计下车人数及时间、车辆的

开门和关门时间和公交车的站间行程时间。以 B27 路公交车为例，晚高峰时段（17:30-18:30）运行的数据如表 2 所示。

表 2 B27 路公交车

站点编号	上车人数	下车人数
1	5	0
2	3	0
3	4	3
4	3	4
5	2	0
6	6	2
7	3	2
8	2	1
9	1	6
10	2	5
11	4	3
12	2	6
13	2	4
14	1	5
15	0	0
16	4	1
17	3	2
18	6	0
19	5	2
20	1	4
21	2	3
22	0	5
23	0	3

注：（1）公交车发车间隔为 10min，（2）公交车座位个数为 20。

2.3 参数标定

采用跟车调查方法得到各站点上车率和下车率。站内等候时调查重叠区间 3 个站点的两种乘客比例。数据调查时段为晚高峰 17:30-18:30。调查结果如下：

（1）站点的上、下车率等于该站点的上、下车人数与该公交车的发车间隔之比，如表 3 所示。

（2）第一类乘客比例为该站点第一类乘客的人数与该站点候车总人数的比值，如表 4 所示。

表 3 B201 路乘客上、下车率

站点编号	上车率	下车率
1	0.6	0
2	0.4	0
3	0.2	0.4
4	0.8	0.2
5	0.6	0.4
6	1.0	0.2
7	1.2	0.4
8	0.2	1.0
9	0.4	0.8
10	0.2	0.6
11	1.0	0.8
12	0.2	1.0
13	0.4	0
14	0.6	0.2
15	0.8	0.4
16	0.2	0
17	0	0.8
18	0.4	0.2
19	0.4	1.0
20	0	0.4
21	0	0.8

表 4 第一类乘客比例

站点名称	长椿路站	河南工业大学站	雪松路站
第一类乘客比例	2%	0.3%	1.5%

利用 MATLAB 进行求解优化前需根据数据调查结果对模型各个参数进行标定，具体如表 5 所示：

表 5 参数标定

参数	$t_0$ /min	$t_c$ /min	$D_a$	$D_d$	$T_a$
参数取值	1/25	1/25	20	15	1/9
参数	$T_d$	$\mu_3$	$A_{min}$ /min	$A_{max}$ /min	$T_t$ /min
参数取值	1/9	3.2	4	11	2/5
参数	$I_l$	$\mu_1$ 元/h	$\mu_2$ 元/h	$v$ km/h	
参数取值	14	5.0	5.0	22	

## 2.4 优化求解

利用 MATLAB 对模型进行求解,发现当迭代次数达到 200 时,目标函数得到明显优化,乘客出行时间对比如图 2 所示,公交公司运营成本对比如图 3 所示:

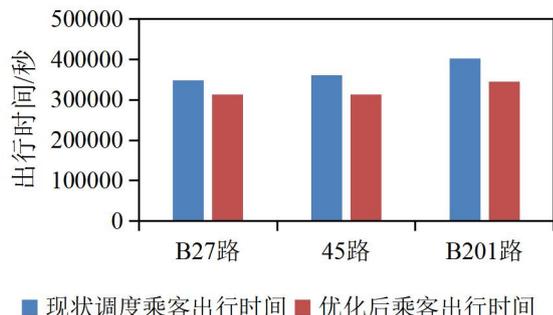


图 2 乘客出行时间

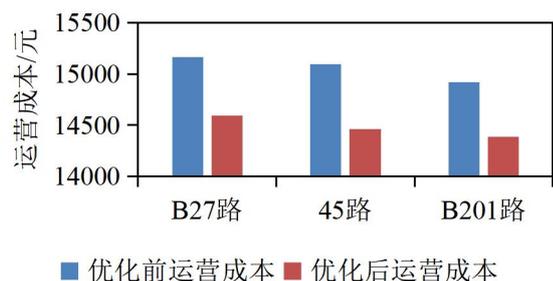


图 3 公交运营成本

## 参考文献:

- [1] 赵琥. 运行区间重叠公交线路协同调度研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [2] 熊昕宇. 区间重叠影响下的城市公交线路动态调度策略[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [3] 胡宝雨, 刘文磊, 程国柱. 区间重叠下多线公交车辆调度和泊位设置联合优化[J/OL]. 交通运输系统工程与信息, 1-17 [2025-12-17].
- [4] 宋现敏, 张明业, 姜景玲. 考虑区间重叠的多运营商公交调度优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(5): 142-147.
- [5] SHANG H, LI Y, WANG W, et al. Multi-depot vehicle scheduling with multiple vehicle types on overlapped bus routes[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 228: 120352.
- [6] 汤茹茹. 区间重叠影响下的多车型组合调度方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [7] SEO J, CHO S, KIM D, et al. Analysis of overlapping origin-destination pairs between bus stations to enhance the efficiency of bus operations[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2020, 14(6): 545-553.
- [8] 贾嘉璐. 多线路运行区间重叠下的公交调度优化研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2024.
- [9] 郭艺璇. 基于区间重叠影响下的公交调度优化[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
- [10] 张明业. 考虑运营商的重叠区间公交线路发车频率优化[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [11] 李明达. 基于公交到站时间的公交重叠区间时刻表协同优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [12] 姜楠. 高频公交线路运行区间重叠下的静态调度方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [13] YANG C, JIN S, YAO W, et al. Collaborative optimization of intersection signals and speed guidance for buses run on overlapping route segments under connected environment[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2024, 39(21): 3289-3316.

由图可知,优化后的方案在乘客总出行时间上降低了 3.2%,在公交公司总成本上降低了 3.7%。即对车辆发车间隔的优化可有效减少出行时间和运营成本,使重叠区内多条公交线路的运行效率得到提高。

## 3 结论

本文在自动驾驶环境下,以最小化乘客出行时间与公交运营成本为目标,构建了考虑区间重叠的公交调度优化模型。基于遗传算法对模型进行求解,并通过案例分析验证了模型的有效性。结果表明,本文提出的模型可有效降低乘客出行时间与公交运营成本,且相较于传统固定间隔调度方案,优化方案在重叠区间的协同效果更为显著。本文主要针对发车间隔的静态协同调度进行优化,未来研究可进一步考虑与车辆实时速度引导、动态路径调整及交叉口信号优先等多系统协同优化。

- [14] BIE Y, TANG R, WANG L. Bus scheduling of overlapping routes with multi-vehicle types based on passenger OD data[J]. IEEE Access, 2020, 8: 1406-1415.
- [15] ZHANG M, YANG M, LEI D, et al. Bus scheduling of overlapping routes based on the combination of all-stop and stop-skipping services[J]. Transportation Research Record, 2023, 2677(1): 49-59.
- [16] 姜梅. 城市公交走廊线路协调优化调度研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [17] 周雪. 考虑运行区间共线的多线路公交协调调度优化研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2021.
- [18] 刘双, 魏明, 孙博, 等. 不确定性区域公交车调度问题的双层规划模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2013, 13(04): 106-113.
- [19] 胡宝雨, 张禹衡. 基于电池-车辆匹配的寒区城市电动公交调度优化[J/OL]. 华南理工大学学报(自然科学版), 1-13 [2025-12-17].
- [20] 钟彧, 刘莉. 基于多目标优化与遗传算法的公交调度模型研究[J]. 长江信息通信, 2025, 38(10): 91-94.