

# 考虑换乘策略的需求响应公交多车协同控制优化研究

饶明华\*, 李慧珠

重庆公交集团, 重庆  
Email: \*68057868@qq.com

收稿日期: 2021年6月8日; 录用日期: 2021年7月21日; 发布日期: 2021年7月28日

## 摘要

长期以来, 大部分公交公司需要依靠政府提供财政补贴维持运营, 为提高运营收益, 提升公共交通出行方式的吸引力, 公交公司纷纷改革运营方式。需求响应公交DRT (Demand Responsive Transport)经营模式近几年成为公共交通运营的改革方向, 经过实际应用后发现, 需求响应公交在低出行需求区域取得良好的效果, 但在城市中心区域的效果并不理想。为使需求响应公交在城市中心区域发挥优势, 本文建立换乘多车协同服务的DRT整体化服务网络, 以系统总时间最小和发车数量最少为目标函数, 构建混合整数规划模型并使用MATLAB求解。最后, 通过案例验证, 本文构建的系统能够使出行总时间明显减少, 同时发车数量较采取换乘策略之前也有减少, 从而得出结论: 在多车协同控制下, 采取换乘策略的需求响应公交能够满足市中心等繁华地区的出行需求, 并且能够降低系统总成本。

## 关键词

换乘策略, 需求响应公交DRT, 协同控制, 成本

# A Multi-Bus Cooperative Control Approach in Demand Responsive Transit (DRT) Considering Transfer Strategy

Minghua Rao\*, Huizhu Li

Chongqing Public Transport Group, Chongqing  
Email: \*68057868@qq.com

Received: Jun. 8<sup>th</sup>, 2021; accepted: Jul. 21<sup>st</sup>, 2021; published: Jul. 28<sup>th</sup>, 2021

\*通讯作者。

## Abstract

For a long time, most public transport companies need to rely on the government to provide financial subsidies to maintain operation. In order to improve the operation income and enhance the attractiveness of public transport travel mode, public transport companies have reformed the operation mode. In recent years, demand responsive transport (DRT) has become the reform direction of public transport operation. After practical application, it is found that DRT has achieved good results in low travel demand areas, but the effect in urban central areas is not ideal. In order to give full play to the advantages of demand responsive public transportation in the central area of the city, this paper establishes the DRT integrated service network of multi vehicle cooperative service, takes the minimum total system time and the minimum number of departures as the objective function, constructs the mixed integer programming model and uses MATLAB to solve the problem. Finally, through the case verification, the system constructed in this paper can significantly reduce the total travel time, and the number of departure vehicles is also reduced compared with that before taking the transfer strategy, so as to draw a conclusion: under the multi vehicle collaborative control, taking the transfer strategy to respond to the demand of public transport can meet the travel demand of downtown and other prosperous areas, and can reduce the total cost of the system.

## Keywords

Transfer Strategy, Demand Response Bus DRT, Collaborative Control, Cost

Copyright © 2021 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

近年来,随着我国城镇化加速发展,城市机动化水平不断增长,居民私有汽车数量也不断攀升,公共交通方式在乘客个性化出行的需求下吸引力明显不足。交通拥堵问题频频出现,严重影响城市运行效率;尾气污染物排放量激增,城市环境质量日益下降,降低了人民生活幸福感。传统公交曾在城市客运中占据绝对优势地位,但如今乘客出行需求越来越复杂,用户期望越来越高,对需求响应公交的研究和使用成为必然趋势。

Daganzo [1]提出灵活公交服务系统,将固定线路公交和需求响应公交系统进行对比,得出结论:需求响应公交适合在乘客出行密度较小的区域运营。Quadrioglio 等人[2]在解决单车接驳客运系统的调度问题时使用了一种新的启发式算法,建立对模型的仿真系统,最终求解出适用于单车接驳的客运调度系统。

Frei 等人[3]对居民出行意向进行调查,同时比对不同公共交通出行方式的优缺点,最终建立模型对不同公共交通方式的潜在客流进行分析。Kashani 等人[4]通过大量实例数据对比在不同需求密度区域内需求响应型灵活公交和传统固定线路公交的运行状态,结果显示在低需求密度的地区灵活公交明显具有更高的服务效率和准时率,且能够减少乘客的等待时间成本。Bilge 等人[5]进行了大量仿真测试,考虑需求响应公交乘客满意程度和运营成本之间的制约关系,结果证明动态分配车辆位置和采用多线路服务模式并行的运营方式将带来比静态分配车辆更高的收益。王俊培[6]分析了定制公交开设所需要的条件,建立

优化模型, 最终选择出对定制公交的开设影响最大的条件。潘述亮等人[7]提出一种灵活接驳的公交系统, 建立了双层整数规划模型。通过设计考虑重力模型智能型算法求解接驳公交系统内车辆的调度安排。刘毅[8]将定制公交与常规公共交通方式进行对比, 得出结论: 定制公交在其出行的舒适度、安全性、便捷度等方面都具有很大的优势和前景十分可观的发展空间, 并从乘客体验度、运营企业收益和综合效益三方面, 构建出与我国国情相符的城市定制公交评价体系。

本文在现有研究成果的基础上, 考虑了乘客从当前位置到站点位置的分配问题, 同时在本文构建的多车协同控制系统中乘客可以换乘, 弥补了现有研究的不足之处。通过研究公交换乘策略对线网优化的影响、多车协同控制的实现路径、需求响应公交的线网设计、站点优化等问题建立数学模型并求解, 最终验证考虑换乘策略的需求响应公交多车协同控制优化系统能够满足城市中心乘客的出行需求。

## 2. 模型构建

### 2.1. 问题描述

由于本文的研究对象为需求响应公交, 不同于传统的公交“定时”“定线”的特征, 需求响应公交的线路根据服务区域内乘客需求确定。本文通过构建混合整数规划模型, 完成动态的需求响应公交线网规划, 在尽可能满足乘客出行需求的前提下, 实现系统总成本最大化。在具体的实现过程中, 以车辆路径优化问题为基础, 乘客出行前进入预约系统, 提前向需求响应公交运营中心提出申请, 运营中心统计同一预约时间的乘客, 选择乘客周转量较大的车站作为换乘站点, 并调度车辆在指定时间为指定乘客服务。本文研究的核心内容为如何在需求响应公交系统中加入换乘策略, 以及论证加入换乘策略前后对系统总成本的影响。

### 2.2. 变量设置

变量设置如表 1。

**Table 1.** List of Variables  
**表 1.** 变量明细表

集合	
$P$	乘客集合
$B$	公交车辆集合
$L$	站点集合
$O$	乘客出行起点集合
$S$	乘客出行终点集合
参数	
$p$	乘客参数
$b$	车辆参数
$i, j, k, h, s$	站点参数, 其中, $s$ 代表终点站, $h$ 代表换乘站
$o$	起始站点参数
变量	
$e^p$	乘客偏好服务时间下限
$l^p$	乘客偏好服务时间上限
$c$	车辆容量
$T_{\max}$	车辆最大行驶时间

Continued

$L_{\min}$	车辆最小运行长度
$t_{ij}$	从 $i$ 到 $j$ 的行驶时间
$d_{oi}$	从起始站点 $o$ 到中间站 $i$ 的距离
$W_s$	步行速度
$V$	车辆固定成本
决策变量	
$x_{ij}^{pb}$	如果乘客 $p$ 乘坐公交车 $b$ 从 $i$ 站到 $j$ 站, 则 $x_{ij}^{pb} = 1$
$z_h^{pbb'}$	如果乘客 $p$ 在 $h$ 站从 $b$ 车换乘至 $b'$ 车, 则 $z_h^{pbb'} = 1$
$m_{ij}^b$	车辆 $b$ 从 $i$ 站行驶至 $j$ 站
$A_i^p$	乘客 $p$ 到达 $i$ 站的时间
$T_i^p$	乘客 $p$ 离开 $i$ 站的时间
$A_i^b$	车辆 $b$ 到达 $i$ 站的时间
$T_i^b$	车辆 $b$ 离开 $i$ 站的时间
$y_i^{pb}$	如果乘客 $p$ 在 $i$ 站乘坐了 $b$ 车, 则 $y_i^{pb} = 1$

### 2.3. 模型构建

考虑换乘策略的需求响应公交多车协同控制优化模型以系统成本最小化为目标函数:

公式(1)表示模型的目标函数, 即最小化系统成本。系统成本由四方面构成, 分别为车辆行驶时间、车辆在站点的等待时间、乘客步行时间和乘客在换乘站点的等待时间。

$$\min \sum_b \sum_i \sum_j t_{ij} m_{ij}^b + \sum_b \sum_i (T_i^b - A_i^b) + \sum_o \sum_p \sum_i \frac{d_{oi} y_i^{pb}}{W_s} + \sum_p \sum_h (T_h^p - A_h^p) z_h^{pbb'} \quad (1)$$

公式(2)表示利用最小的发车数量满足服务区域的需求。

$$\min \sum_j \sum_s \sum_b m_{js}^b \quad (2)$$

公式(3)保证每一名乘客一定会被分配至一个站点。乘客只有被分配至站点才能被纳入需求响应公交的服务范围中。

$$\sum_i \sum_b y_i^{pb} = 1 \quad \forall p \in P \quad (3)$$

公式(4)保证每一名乘客都能被服务。

$$\sum_j \sum_b x_{ij}^{pb} = 1 \quad \forall p \in P, i \in L \quad (4)$$

公式(5)保证车辆在线网中能够正常运行, 不会出现中断或停滞的情况。公交车行驶到一个站点, 如果当前站点不是终点站, 那么车辆一定继续行驶。

$$\sum_{i,i \neq k} \sum_b x_{ik}^{pb} \leq \sum_{j,j \neq k} \sum_b x_{kj}^{pb} \quad \forall p \in P, k \in L \quad (5)$$

公式(6)保证在车辆的一次行驶过程中不会出现重复路线, 在需求响应公交运行一次时, 公交车不重复经过同一路线, 在该路线上的剩余乘客由下一辆经过该路线的公交车服务。

$$\sum_j m_{ij}^b \leq 1 \quad \forall b \in B, i \in L \quad (6)$$

公式(7)保证公交车内乘客数量不超过公交车的容量。

$$\sum_p \sum_j x_{ij}^{pb} \leq c \cdot m_{ij}^b \quad \forall b \in B, i \in L \cup S \tag{7}$$

公式(8)保证每班车辆的行驶时间不超过车辆规定最大行驶时间。

$$\sum_i \sum_j t_{ij} m_{ij}^b \leq T_{\max} \quad \forall b \in B \tag{8}$$

公式(9)保证每班车辆的行驶长度不小于车辆规定最小行驶距离。

$$\sum_i \sum_j t_{ij} m_{ij}^b \geq L_{\min} \quad \forall b \in B \tag{9}$$

公式(10)、(11)保证车辆的到达和离开时间在乘客的偏好时间窗内。

$$A_i^b \geq e^p y_i^{pb} \quad \forall p \in P, i \in L, b \in B \tag{10}$$

$$T_i^b \leq l^p y_i^{pb} \quad \forall p \in P, i \in L, b \in B \tag{11}$$

公式(12)、(13)保证了每条路线上车辆时间表的可行性。

$$A_j^b \geq T_i^b + t_{ij} - M \left( 1 - \sum_b x_{ij}^{pb} \right) \quad \forall p \in P, i, j \in L \tag{12}$$

$$A_j^b \leq T_i^b + t_{ij} + M \left( 1 - \sum_b x_{ij}^{pb} \right) \quad \forall p \in P, i, j \in L \tag{13}$$

公式(14)保证了换乘车辆在时间上一定在原车辆之后到达。该约束保证乘客能够顺利搭乘接续车辆,保证了乘客换乘的可行性。

$$A_h^b \leq A_h^{b'} + M \cdot (1 - z_h^{pbb'}) \quad \forall p \in P, b, b' \in B, h \in L \tag{14}$$

公式(15)保证了如果乘客  $p$  在  $h$  站换乘, 那么  $z_h^{pbb'} = 1$ 。

$$\sum_{j, j \neq h} x_{jh}^{pb} + \sum_{k, h \neq k} x_{hk}^{p'b'} \geq 2z_h^{pbb'} \quad \forall p \in P, b, b' \in B, h \in L \tag{15}$$

### 3. 案例分析

本文设计的模型适用于解决乘客从出行起点到出行终点的较为稳定的单向客流问题。由于在本文建立的需求响应公交系统中, 车辆的起点终点均根据乘客需求确定, 因此在本算例中没有选取某一辆公交车跟踪分析, 而是选择分析局部范围内的站点间的情况, 设置了 5 名乘客, 6 个站点, 其中包括需求响应公交的发车点 1 和最后的乘客出行终点  $D_1$ 、 $D_2$ , 见图 1。

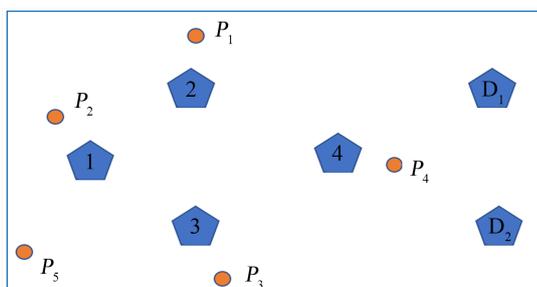


Figure 1. Schematic diagram of stations and passengers  
图 1. 站点、乘客示意图

在本算例中, 公交车在六个站点间行驶, 设定车辆在站点间的行驶时间见表 2。

**Table 2.** Vehicle timetable between stations (min)  
**表 2.** 车辆在站点间行驶时间表(min)

$D \backslash O$	1	2	3	4	$D_1$	$D_2$
1	—	5	3	7	12	14
2	5	—	6	4	9	15
3	3	6	—	6	16	10
4	7	4	6	—	7	8
$D_1$	12	9	16	7	—	7
$D_2$	14	15	10	8	7	—

根据乘客当前位置与步行速度, 计算出乘客步行时间, 计算结果见表 3。

**Table 3.** Passengers' walking distance and time  
**表 3.** 乘客步行距离及时间

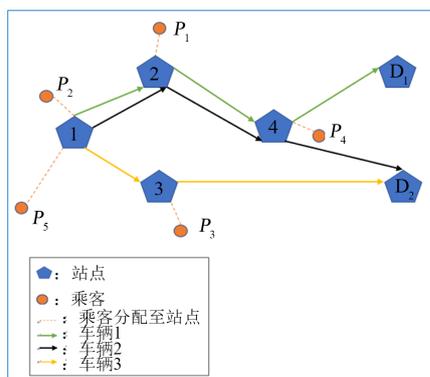
$P$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
$d_{oi}$ (m)	113	105	129	186	197
$T$ (min)	1.6	1.5	1.8	2.6	2.7

为满足乘客出行时间偏好并提高公交服务质量, 系统分配车辆前将统计每名乘客在站点等待时间的最大限度, 统计结果如表 4。

**Table 4.** Passenger waiting time window at the station  
**表 4.** 乘客在站点等待时间窗

乘客	乘车时间偏好
$P_1$	7:10~7:13
$P_2$	6:59~7:09
$P_3$	7:00~7:15
$P_4$	7:05~7:20
$P_5$	6:55~7:08

为满足乘客出行需要, 在不考虑换乘策略的情况下需要三辆公交车同时服务, 乘客分配和车辆运行情况如图 2。



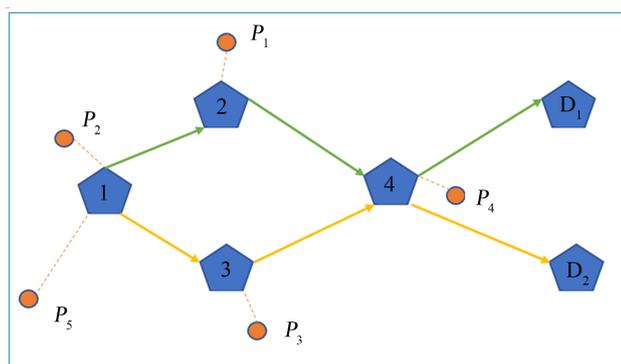
**Figure 2.** Schematic diagram of vehicles, stations, and passengers  
**图 2.** 车辆、站点、乘客示意图

三辆公交车的行车时间安排见表 5。

**Table 5.** Vehicle departure timetable before transfer  
**表 5.** 换乘前车辆发车时间表

$B \backslash S$	1	2	3	4	$D_1$	$D_2$
$B_1$	7:00~7:05	7:10~7:15	—	7:19~7:24	7:31	—
$B_2$	7:00~7:05	—	7:08~7:13	—	—	7:23
$B_3$	7:00~7:05	7:10~7:15	—	7:19~7:24	—	7:32

采取换乘策略后, 对于乘客而言, 乘客  $P_4$  可以在系统内选择换乘, 对于车队来说, 发车数可以减少一辆, 此时的系统分配结果如图 3。



**Figure 3.** Schematic diagram of vehicles, stations, and passengers after the transfer is added  
**图 3.** 加入换乘后的车辆、站点、乘客示意图

采取换乘策略后, 为满足系统乘客需求, 车队行车时间安排见表 6。

**Table 6.** Vehicle departure timetable after transfer  
**表 6.** 换乘后车辆发车时间表

$B \backslash S$	1	2	3	4	$D_1$	$D_2$
$B_1$	7:00~7:05	7:10~7:15	—	7:19~7:24	7:31	—
$B_2$	7:00~7:05	—	7:08~7:13	7:19~7:24	—	7:32

根据上述数据可以计算出采取换乘策略前后目标函数的变化。采取换乘策略前, 目标函数值为 96.2 分钟, 采取换乘策略后, 目标函数值为 78.2 分钟, 系统总时间成本减少了 18 分钟。

#### 4. 结论与展望

本文基于带时间窗的车辆路径优化问题建立混合整数规划模型, 以最小化系统总时间和最小化发车数量为目标函数, 同时对车辆路线长度、车辆运行时间、乘客等待时间窗, 乘客换乘条件等因素建立约束条件, 利用 MATLAB 计算换乘前后的系统总时间和发车数, 证明了加入换乘策略后的需求响应公交系统能够提高公交公司的运营收益, 能够满足乘客的出行需求, 能够发挥需求响应公交系统的运营优势, 能够以主要交通方式服务于城市中心区域。

本文通过设计贴近公交实际运营现状的小型案例, 证明所提出优化方案的优化效果和可行性。基于有无换乘策略的需求响应公交系统对比, 可以发现在考虑乘客协同换乘的需求后, 系统总体运营时间能够减少 18 分钟, 对于公交公司运营与乘客出行体验来说均具有重要意义。本文在模型设计过程中, 充分考虑乘客换乘时间需求与路线需求, 以及实际公交运营过程中的各类限制条件, 在面向更大的城市路网和更多的公交线路时, 具备能够产生更多系统效益的潜能。

## 参考文献

- [1] Daganzo, C.F. (1984) Checkpoint Dial-a-Ride Systems. *Transportation Research Part B: Methodological*, **18**, 315-327. [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(84\)90014-6](https://doi.org/10.1016/0191-2615(84)90014-6)
- [2] Quadrifoglio, L., Dessouky, M.M. and Palmer, K. (2006) An Insertion Heuristic for Scheduling Mobility Allowance Shuttle Transit (MAST) Services. *Journal of Scheduling*, **10**, 25-40. <https://doi.org/10.1007/s10951-006-0324-6>
- [3] Frei, C., Hyland, M. and Mahmassani, H.S. (2016) Flexing Service Schedules: Assessing the Potential for Demand-Adaptive Hybrid Transit via a Stated Preference Approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **76**, 71-89. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.12.017>
- [4] Kashani, Z.N., Ronald, N. and Winter, S. (2016) Comparing Demand Responsive and Conventional Public Transport in a Low Demand Context. 2016 *IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communication Workshops (PerCom Workshops)*, Sydney, 14-18 March 2016, 1-6. <https://doi.org/10.1109/PERCOMW.2016.7457089>
- [5] Atasoy, B., Ikeda, T., Song, X. and Ben-Akiva, M.E. (2015) The Concept and Impact Analysis of a Flexible Mobility on Demand System. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **56**, 373-392. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.04.009>
- [6] 王俊培. 大城市定制公交服务体系研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2015.
- [7] 潘述亮, 俞洁, 邹难, 舒波. 含特殊需求的灵活接驳公交服务区域与路径选择[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2014, 35(11): 1650-1654.
- [8] 刘毅. 城市定制公交线路规划及发展评价研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.