DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.20221215001 文章编号:1672-9331(2024)05-0156-09
引用格式:周和平,高英楠,郜敏,等.考虑残疾乘客优先的多车场定制公交路径优化[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2024,21(5):156-164.
Citation: ZHOU Heping, GAO Yingnan, GAO Min, et al. Optimization of customized bus routes with multiple parking lots considering priority of disabled passengers [J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2024, 21(5): 156-164.

考虑残疾乘客优先的多车场定制公交路径优化

周和平,高英楠,郜敏,林辉,刘佳丽
(长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114)

摘　要:【目的】探究考虑残疾乘客优先的多车场定制公交路径优化问题,为定制公交路径决策提供理论依据。**【方法】**构建以车辆行驶时间成本、车辆固定派遣成本、残疾乘客等待时间成本之和最小为目标,包含多起终点、多停车场、多车型、多乘客类型、残疾乘客上下车优先等诸多要素的定制公交路径优化模型。改进Benders分解算法,并采用多平面割约束策略及引入松弛变量的方式提高算法求解效率,最后通过案例对模型和算法进行分析和验证。**【结果】**与未考虑残疾乘客优先相比,在考虑残疾乘客优先的情况下,残疾乘客的等车时间和乘车时间分别减少了30.6%和1.3%;与传统分支定界算法相比,改进的Benders分解算法在获得满意解的同时,运算时间缩短了20.6%。**【结论】**本文提出的模型有效减少了残疾乘客等车时间和乘车时间,改进的Benders分解算法同样有效。本研究对解决残疾人出行问题具有重要的现实意义。

关键词:车辆调度;路径优化;多起终点;Benders分解算法;残疾乘客优先
中图分类号:U492.2+2　　**文献标志码:**A

Optimization of customized bus routes with multiple parking lots considering priority of disabled passengers

ZHOU Heping, GAO Yingnan, GAO Min, LIN Hui, LIU Jiali
(School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: [**Purposes**] This paper aims to explore the optimization of customized bus routes with multiple parking lots considering the priority of disabled passengers and provide a theoretical basis for the decision-making of customized bus routes. [**Methods**] A customized bus route optimization model was built with the goal of minimizing the sum of vehicle travel time cost, fixed vehicle dispatching cost, and waiting time cost for disabled passengers, involving elements such as multiple origins and destinations, multiple parking lots, multiple vehicle types, multiple passenger types, and priority for disabled passengers to get on and off the bus. The Benders decomposition algorithm was improved. The multi-plane cut constraint strategy was adopted, and the slack variables were introduced to speed up the algorithm solving efficiency. Finally, the model and algorithm were analyzed through a case. [**Findings**] Compared with the case without considering the priority of disabled passengers, the waiting time and travel time of disabled

收稿日期:2022-12-15;**修回日期:** 2023-02-03; **接受日期:** 2023-02-08
基金项目:国家自然科学基金项目(51178061);湖南省科技计划项目(2019JJ40311)
通信作者:周和平(1971—)(ORCID:0000-0002-5056-1370),男,教授,主要从事交通运输规划与管理等方面的研究。E-mail:154180776@qq.com

passengers after considering their priority are reduced by 30.6% and 1.3% respectively. Compared with the traditional branch-and-bound algorithm, the improved Benders decomposition algorithm can obtain satisfactory solutions while reducing the calculation time by 20.6%. [**Conclusions**] The model proposed in this paper effectively reduces the waiting time and travel time of disabled passengers, and the improved Benders decomposition algorithm is effective. The results are of important practical significance in solving the travel problem of the disabled.

Key words: vehicle dispatching; route optimization; multiple origins and destinations; Benders decomposition algorithm; priority of disabled passengers

Foundation items: Project (51178061) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2019JJ40311) supported by Hunan Province Science and Technology Plan

Corresponding author: ZHOU Heping (1971—) (ORCID: 0000-0002-5056-1370), male, professor, research interest: transportation planning and management. E-mail: 154180776@qq.com

0 引言

中国拥有数量庞大的残疾人口。近年来,随着社会经济的快速发展以及人们生活水平的不断提高,残疾人对于公共交通出行的意愿与日俱增,并且残疾人对等车时间和乘车时间具有更高的要求。然而,目前的常规公交系统很难满足残疾人特殊出行需求,从而造成了残疾人出行难的社会现象。定制公交的应用是解决残疾人出行问题的重要举措,定制公交最早于20世纪70年代在美国、欧洲、新加坡等地开通[1]。与常规公交相比,定制公交能够提供更为快捷、灵活、舒适的新型公共交通服务[2],能够更好地适应残疾人的出行需求。为解决残疾人出行难的问题,以及减少残疾乘客等车时间和乘车时间,研究残疾乘客优先的定制公交路径优化问题尤为重要。

本文提出的考虑残疾人优先的多车场定制公交路径优化问题是叫车接送问题(dial-a-ride problem, DARP)的扩展,目前对该方向的研究较少。CHANE-HAÏ等[3]提出了一种考虑往返的叫车接送问题,并建立了考虑多目标的路径优化模型。LUO等[4]为满足病患的出行需求,提出了以最小行驶距离为目标的定制公交路径优化模型,同时提出了两阶段分支定界切割算法并进行求解。以上研究均是从单车场角度出发,为了降低企业成本,国内外学者围绕多车场协同优化展开研究。陈可嘉等[5]、DETTI等[6]针对叫车接送问题,建立了一种以总行程时间最小为目标的开放式多车场路径优化模型。凌海峰等[7]为实现多车场协调优化,提出了一种带软时间窗的多车场开放式车辆调度模型。此外,一些学者将更多的现实因素引入叫车接送问题,OUASAID等[8]将驾驶员的偏好引入叫车接送问题,并建立了以行驶距离最短和考虑驾驶员偏好的惩罚成本最小为目标的路径优化模型。ASLAKSEN等[9]提出了叫车接送问题与具有固定班次的轮渡相结合的多式联运问题,并设计了一个请求分配程序。GUO等[10]、ABEDI等[11]分别将疾病传播风险与温室气体排放因素引入叫车接送问题,并建立了相关的路径优化模型。然而,交通拥堵、自然天气状况等因素可能会造成路网参数变化,使得路网具有时变性。HU等[12]针对叫车接送问题,提出了一种考虑车速变化的多目标路径优化模型。DO等[13]、LIANG等[14]为解决合乘乘车问题,分别构建了考虑速度窗口和动态行程时间的时间依赖路径优化模型,并通过案例验证了模型的有效性。在求解算法研究方面,BONGIOVANNI等[15]设计了改进的分支定界算法,用于求解与电动车充电桩选址相结合的叫车接送问题。然而,随着问题规模的增加,精确算法的求解时间呈指数增加。为了降低大规模问题的求解时间,MASMOUDI等[16]、MALHEIROS等[17]通过设计混合算法求解具有多车型、多需求类型的叫车接送问题。TELLEZ等[18]、MASMOUDI等[19]通过设计改进的邻域搜索算法求解多车型路径优化问题。HO等[20]针对多车型叫车接送问题,设计了改进的禁忌搜索算法,并提出一种时间窗口调整策略来加快收敛速度。综上所述,现有文献大

多基于多起点至单终点的场景,针对单一类型乘客建立以成本最低、时间最短为目标的路径优化模型。少数文献虽然对乘客类型加以区分,但是仍然采用相同的服务时间参数及等车、乘车策略。这可能是因为忽略了不同类型的乘客在相同服务下满意程度不同的情况。

鉴于此,本研究考虑了残疾乘客与普通乘客同时存在,且残疾乘客对服务质量要求更严格的情况,并通过引入优先权重,提出了一种可以缩短残疾乘客等车时间的计算方法,以及能够降低残疾乘客乘车时间的车辆绕行约束,同时针对多类型乘客采用不同的服务时间参数。本研究建立了在多起终点场景下,以车辆行驶时间成本、车辆固定派遣成本、残疾乘客等待时间成本之和最小为目标的定制公交路径优化模型,并利用改进的Benders分解算法对模型进行求解,同时通过案例验证模型和算法的有效性,为具有残疾人出行需求的定制公交路径决策提供依据。

1 问题描述与数学模型

1.1 问题描述及假设

在某区域内存在多个车场和多个上下车节点,预约服务的乘客类型分为两种,即普通乘客和残疾乘客。各节点的乘客由多个车场的多种车型服务,且严格要求在时间窗内被服务。车辆从车场出发,服务完上车节点乘客后可视情况前往下一上车节点或将乘客送往其目的地,服务结束后返回所属车场。每种车型具有不同的座位类型(普通座位和轮椅位置)及数量,乘客只能坐在对应的座位上。在传统的多车场异质用户叫车接送问题中,节点的服务时间固定,服务策略单一。而在本研究中,车辆在节点的服务时间由乘客类型及其数量确定。本文采用的残疾乘客优先策略是依据上车节点的残疾乘客数量来分配优先权重的。具体而言,上车节点的残疾乘客数量越多,优先权重则越大。在不违背约束的情况下,尽可能使残疾乘客更快被接送。

本文模型假设如下:1)车场具有足够数量的车辆,能够为所有节点的乘客提供服务;2)每个上下车节点仅被同一辆车服务一次,但是车辆可以多次经过各个节点;3)每个出行需求对应一对上下车节点[5],若某一需求对应的上车节点或下车节点与其他需求的节点相同,则将其视为不同的节点;4)残疾乘客都视为需要坐轮椅的乘客;5)各上车节点的乘客数量已定且不超过单辆车的核载人数;6)各个节点间的车辆行驶时间已知且保持不变。

1.2 参数说明

将道路网络抽象为有向图$G=(V,E)$。其中,V表示节点集合,由出发车场集合S_0、上车节点集合I、下车节点集合J及返回车场集合S_0'组成,即$V=S_0\cup I\cup J\cup S_0'$;$E$表示节点间弧的集合,$E=\{i,j\}\ (i,j\in V, i\neq j)$。模型参数及含义如表1所示。

表1 模型参数及含义

Table 1 Parameters and meanings of model

参数	含义
$b(i)$	上车节点i的乘客所对应的下车节点
$f(i)$	下车节点i的乘客所对应的上车节点
K	所有车场的车辆集合
$S(k)$	车辆k所属的车场
t_{ij}	从节点i到节点j的行驶时间
R	乘客类型集合,$R=\{0,1\}$,其中0和1分别表示普通乘客和残疾乘客
$t^{(r)}$	乘客类型为r的单个乘客上下车服务时间
$[e_i,u_i]$	e_i、u_i分别表示节点i的服务时间窗下界与上界
t_{ik}	车辆k在节点i的开始服务时间
$q_i^{(r)}$	在节点i类型为r的乘客需求数量
$Q_k^{(r)}$	车辆k对类型为r的乘客核载限制
$h_{ik}^{(r)}$	车辆k离开节点i后,类型为r的乘客剩余数量
γ	每辆车的固定派遣成本系数
θ	车辆的绕行系数
p_i	上车节点i的优先权重
$[0,T]$	车场的服务周期
x_{ijk}	$x_{ijk}=\begin{cases}1, \text{车辆}k\text{由}i\text{向}j\text{驶}\\0, \text{否则}\end{cases}$
M	一个极大数

1.3 数学模型

$$\min \sum_{i\in V}\sum_{j\in V}\sum_{k\in K}x_{ijk}t_{ij}+\sum_{s\in S_0}\sum_{j\in I}\sum_{k\in K}x_{sjk}\gamma+\sum_{i\in I}\sum_{k\in K}p_i(t_{ik}-e_i) \tag{1}$$

s.t.

$$\sum_{j\in V}\sum_{k\in K}x_{ijk}=1,\ \forall i\in I\cup J \tag{2}$$

$$\sum_{i \in V} x_{ijk} - \sum_{i \in V} x_{jik} = 0, \forall j \in I \cup J, k \in K \tag{3}$$

$$\sum_{i \in I} x_{S(k)ik} = \sum_{j \in J} x_{jS(k)+gk} = 1, \forall k \in K \tag{4}$$

$$x_{ijk} = 0, \forall i \in S_0', j \in V, k \in K \tag{5}$$

$$x_{isk} = 0, \forall i \in I, s \in S_0 \cup S_0', k \in K \tag{6}$$

$$\sum_{i \in S_0} \sum_{j \in V} x_{ijk} = 1, \forall k \in K \tag{7}$$

$$n_{ik} - n_{jk} + (|V| + 1)x_{ijk} \leqslant |V|, \forall i, j \in V, \forall k \in K \tag{8}$$

$$\sum_{j \in V} x_{jik} - \sum_{j \in V} x_{jb(i)k} = 0, \forall i \in I, k \in K \tag{9}$$

$$n_{b(i)k} - n_{ik} \geqslant 0, \forall i \in I, k \in K \tag{10}$$

$$h_{ik}^{(r)} \leqslant Q_k^{(r)}, \forall i \in V, k \in K, r \in R \tag{11}$$

$$h_{jk}^{(r)} \geqslant h_{ik}^{(r)} + q_j^{(r)} - M(1 - x_{ijk}), \forall i \in V \backslash S_0', j \in I, k \in K, r \in R \tag{12}$$

$$h_{jk}^{(r)} \geqslant h_{ik}^{(r)} - q_{f(j)}^{(r)} - M(1 - x_{ijk}), \forall i \in I \cup J, j \in J, k \in K, r \in R \tag{13}$$

$$e_i \leqslant t_{ik} \leqslant u_i, \forall i \in V, k \in K \tag{14}$$

$$t_{jk} \geqslant t_{ik} + t_{ij} + \sum_{r \in R} q_i^{(r)} t^{(r)} - M(1 - x_{ijk}), \forall i \in I \cup S_0, j \in I \cup J, k \in K \tag{15}$$

$$t_{jk} \geqslant t_{ik} + t_{ij} + \sum_{r \in R} q_{f(i)}^{(r)} t^{(r)} - M(1 - x_{ijk}), \forall i \in J, j \in V \backslash S_0, k \in K \tag{16}$$

$$t_{b(i)k} - t_{ik} \leqslant (1 + \frac{\theta}{\theta + q_i^{(1)}}) t_{ib(i)}, \forall i \in I, k \in K \tag{17}$$

$$x_{ijk} = \{0, 1\}, \forall i \in V, j \in V, k \in K \tag{18}$$

目标函数(1)表示车辆行驶时间成本、车辆固定派遣成本以及考虑残疾乘客优先的等车时间成本之和最小，其中s表示某一车场。本文定义某一上车节点的残疾乘客数量越多优先权重越大，通过$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} p_i (t_{ik} - e_i)$使该节点的乘客等车时间缩短，从而实现残疾乘客上车优先。约束(2)表示任意上下车节点的乘客仅被服务一次。约束(3)表示上下车节点流量守恒，车辆在上下车节点服务后离开。约束(4)~(7)表示车辆从车场出发必须返回该车场，其中g表示车场的数量，$S(k) + gk$即车辆k对应的返回车场。约束(8)限制子回路的产生，其中n_{ik}、n_{jk}均为辅助变量，$|V|$表示路网中所有节点的数量。约束(9)、(10)保证同一辆车服务某一节点的乘客需求，并且先经过上车节点再到达其对应的下车节点，其中$n_{b(i)k}$为辅助变量。约束(11)~(13)表示车辆的容量限制。约束(14)~(16)表示时间约束。约束(17)表示定制公交绕行约束，即乘客乘坐定制公交到达下车节点的时间不能超过其直达行驶时间的$1 + \theta / (\theta + q_i^{(1)})$倍。上车节点残疾乘客越多，其绕行系数越小，从而实现残疾乘客下车优先。约束(18)限定决策变量的取值范围。

2　算法设计

本文改进了Benders分解算法并进行求解，通过将原问题模型中的变量x_{ijk}与连续变量t_{ik}和$h_{ik}^{(r)}$分离，得到一个关于车辆路径约束的主问题模型和一个具有资源约束的子问题模型，并且在迭代过程中，通过求解子问题模型的对偶模型向主问题模型中添加割平面约束。将主问题模型的最优目标值设为下界B_L，随着约束的不断添加，B_L逐渐上升。$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} x_{ijk} t_{ij} + \sum_{s \in S_0} \sum_{j \in I} \sum_{k \in K} x_{sjk} \gamma + Z_{\text{sub-dual}}$($Z_{\text{sub-dual}}$为对偶子问题模型的目标函数值)作为上界$B_U$，且随着迭代不断下降。随着计算的迭代更新，当$(B_U - B_L)/B_U \leqslant G_{AP}$($G_{AP}$为给定的相对差值)或者到达最大迭代次数时计算结束。Benders分解算法流程如图1所示。

为了提高该算法的求解速度，本文采用江雨星等[21]的改进思路，在求解主问题模型时同时保留一组最优解和多个次优解，并将这些解分别代入子问题模型，再通过求解子问题的对偶问题生成多个割平面约束。为了解决由子问题对偶模型的极方向构成的可行割平面约束收敛效率低的缺点，在子问题模型中加入松弛变量$w_{ik}^{(r)}$、z_{ik}、c_{ik}和y_{ik}，并在其目标中引入惩罚项，确保子问题和对偶问题总具有最优解，以加快收敛速度，如式(19)所示。其中，引入目标的惩罚项为$M \sum_{i \in V} \sum_{k \in K} \sum_{r \in R} w_{ik}^{(r)} + M \sum_{i \in V} \sum_{k \in K} z_{ik} + M \sum_{i \in V} \sum_{k \in K} c_{ik} + M \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} y_{ik}$。

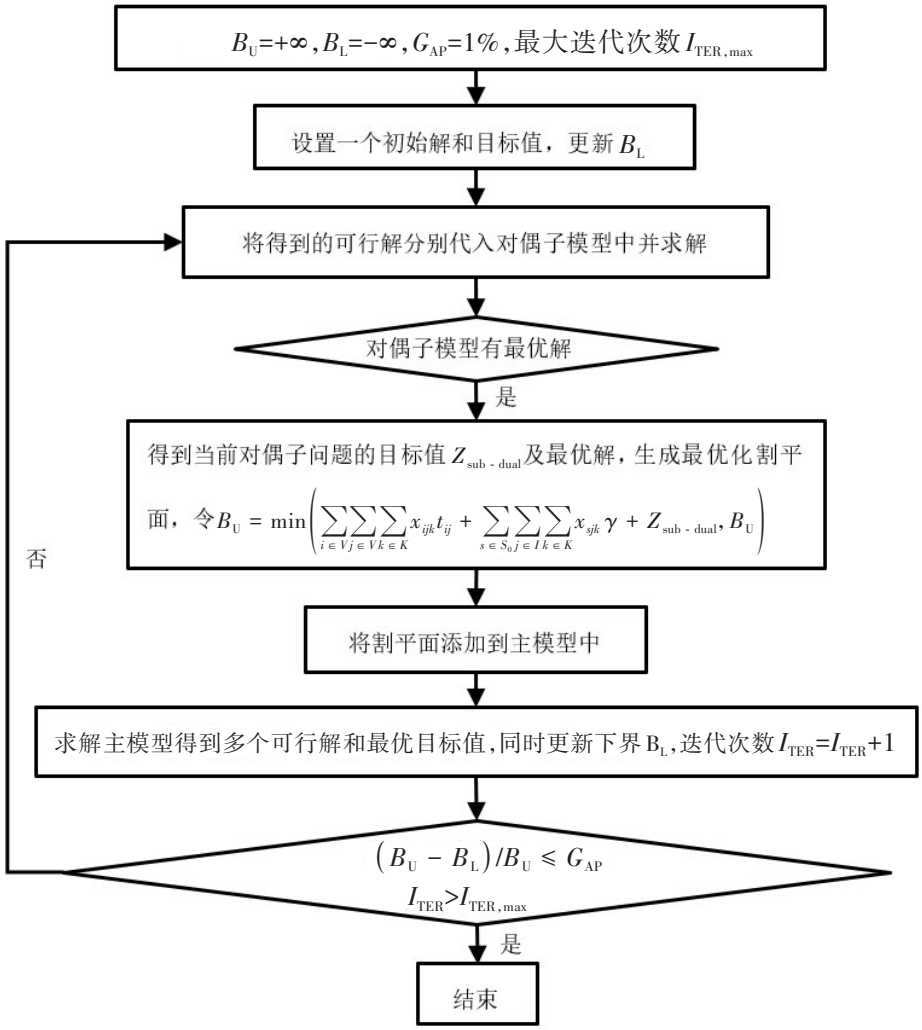

图1 Benders分解算法流程图

Fig. 1 Flow for Benders decomposition algorithm

2.1 子问题模型

$$\min\sum_{i\in I}\sum_{k\in K}p_i(t_{ik}-e_i)+M\sum_{i\in V}\sum_{k\in K}\sum_{r\in R}w_{ik}^{(r)}+M\sum_{i\in V}\sum_{k\in K}z_{ik}+M\sum_{i\in V}\sum_{k\in K}c_{ik}+M\sum_{i\in I}\sum_{k\in K}y_{ik} \tag{19}$$

s.t.

$$h_{ik}^{(r)}\leqslant Q_k^{(r)}+w_{ik}^{(r)},\forall i\in V,k\in K,r\in R \tag{20}$$

$$e_i-z_{ik}\leqslant t_{ik}\leqslant u_i+c_{ik},\forall i\in V,k\in K \tag{21}$$

$$t_{b(i)k}-t_{ik}\leqslant\left(1+\frac{\theta}{\theta+q_i^{(1)}}\right)t_{ib(i)}+y_{ik},\forall i\in I,k\in K \tag{22}$$

此外,约束条件还包括式(12)、式(13)、式(15)和式(16)。

2.2 主问题模型

若子问题模型的对偶模型可行且有界,则构造最优化割平面约束,如式(24)所示。其中,$\bar{\alpha}_{ik}^{(r)}$、$\bar{\psi}_{ijk}^{(r)}$、$\bar{\beta}_{ik}$、$\bar{\varphi}_{ijk}^{(r)}$、$\bar{\omega}_{ik}$、$\bar{\eta}_{ijk}$、$\bar{s}_{ijk}$、$\bar{\zeta}_{ik}$、$\bar{\tau}_{ik}$表示子问题对偶模型的最优解,$Z$为连续的辅助变量。主问题模型如下:

$$\min\sum_{i\in V}\sum_{j\in V}\sum_{k\in K}x_{ijk}t_{ij}+\sum_{s\in S_0}\sum_{j\in I}\sum_{k\in K}x_{sjk}\gamma+Z \tag{23}$$

s.t.

$$\begin{aligned}&\sum_{i\in I\cup S_0}\sum_{j\in I\cup J}\sum_{k\in K}\left[t_{ij}+\sum_{r\in R}q_i^{(r)}t^{(r)}-M(1-x_{ijk})\right]\bar{\eta}_{ijk}+\\&\sum_{i\in J}\sum_{j\in I\cup J}\sum_{k\in K}\left[t_{ij}+\sum_{r\in R}q_{f(i)}^{(r)}t^{(r)}-M(1-x_{ijk})\right]\bar{s}_{ijk}+\\&\sum_{i\in I}\sum_{k\in K}\left[\left(1+\frac{\theta}{\theta+q_i^{(1)}}\right)t_{ib(i)}\right]\bar{\beta}_{ik}+\sum_{i\in V}\sum_{k\in K}u_i\bar{\omega}_{ik}+\\&\sum_{i\in I}\sum_{k\in K}\left(\sum_{r\in R}q_i^{(r)}t^{(r)}+t_{ib(i)}\right)\bar{\zeta}_{ik}+\sum_{i\in V}\sum_{k\in K}e_i\bar{\tau}_{ik}+\\&\sum_{i\in I\cup J}\sum_{j\in J}\sum_{k\in K}\sum_{r\in R}\left[-q_{f(j)}^{(r)}-M(1-x_{ijk})\right]\bar{\varphi}_{ijk}^{(r)}+\\&\sum_{i\in VS_0'}\sum_{j\in I}\sum_{k\in K}\sum_{r\in R}\left[q_j^{(r)}-M(1-x_{ijk})\right]\bar{\psi}_{ijk}^{(r)}+\\&\sum_{i\in V}\sum_{k\in K}\sum_{r\in R}Q_k^{(r)}\bar{\alpha}_{ik}^{(r)}\leqslant Z\end{aligned} \tag{24}$$

此外,约束条件还包括式(2)~式(10)。

3　案例分析

本文以某城市主要道路构成的抽象路网为案例路网，如图2所示。路网共有24个节点，其中包括两个定制公交停车场（编号为1、2），11个上车节点（编号为3~13）和11个下车节点（编号为14~24）。定制公交运行成本构成包括时间、距离、费用等多个因素，本文取时间成本。车辆固定派遣成本系数为100 min/台，车辆绕行系数为2，车辆信息如表2所示。普通乘客和残疾乘客的平均上下车服务时间分别为0.5、2.0 min，乘客订单信息如表3所示。停车场开放时长为0~240 min。

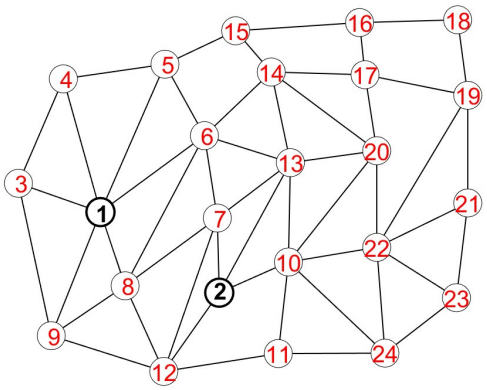

图2　案例路网图

Fig. 2　Case of road network

表2　车辆信息表

Table 2　Information sheet of vehicles

车辆编号	普通乘客容量/人	残疾乘客容量/人	所属停车场
1	10	4	1
2	12	2	1
3	10	4	2
4	12	2	2

表3　乘客订单信息表

Table 3　Information sheet of passenger orders

上车节点	下车节点	普通乘客人数	残疾乘客人数	期望时间窗/min	优先权重
3	14	1	1	30~45	2
4	15	3	0	30~50	1
5	16	2	1	55~70	2
6	17	3	0	55~75	1
7	18	1	0	35~55	1
8	19	4	1	35~50	2
9	20	2	0	75~95	1
10	21	3	2	75~90	4
11	22	2	1	80~100	2
12	23	3	0	90~110	1
13	24	1	1	90~105	2

本文采用Python语言，依托PyCharm平台编程求解路径优化问题。进行试验的计算机参数：CPU为AMD Ryzen 7 5800H @ 3.20 GHz的16 G内存的个人计算机。Benders分解算法的主问题模型与子问题模型均通过Gurobi进行求解。为了验证本文改进的Benders分解算法的有效性，在相同试验数据下，与传统分支定界算法进行比较，结果见表4。由表4可知，改进的Benders分解算法与传统分支定界算法均满足所有乘客的订单需求，优化方案分别如图3和图4所示。通过改进的Benders分解算法求得的总成本比分支定界算法求得的总成本增大了约0.9%，而运算时间缩短了20.6%，并且在车辆数相同的条件下，两种算法具有相同的平均上座率。这说明本文改进的Benders分解算法在求解精度方面较分支定界算法虽然略有不足，但是相差不大，而在求解速度方面较分支定界算法有很大的优势，更适用于考虑残疾乘客优先的多车场定制公交路径优化问题。

表4　不同算法的优化方案对比

Table 4　Comparison of optimization schemes obtained by different algorithms

比较指标	改进的Benders分解算法	分支定界算法
优化方案	车辆1：1—3—4—5—15—16—14—1 车辆2：1—9—12—23—20—1 车辆3：2—7—10—11—22—21—18—2 车辆4：2—8—6—13—17—19—24—2	车辆1：1—8—7—10—11—22—21—18—19—1 车辆2：1—3—4—5—15—16—14—1 车辆3：2—9—12—23—20—2 车辆4：2—6—13—17—24—2
总时间成本/min	1 023	1 014
平均上座率/%	57	57
运算时间/s	1 060	1 335

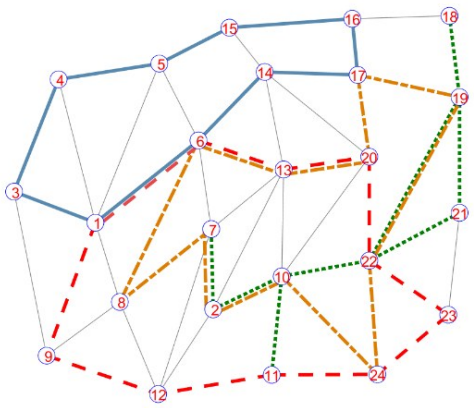

图3 改进的Benders算法优化方案

Fig. 3 Optimization schemes of improved Benders decomposition algorithm

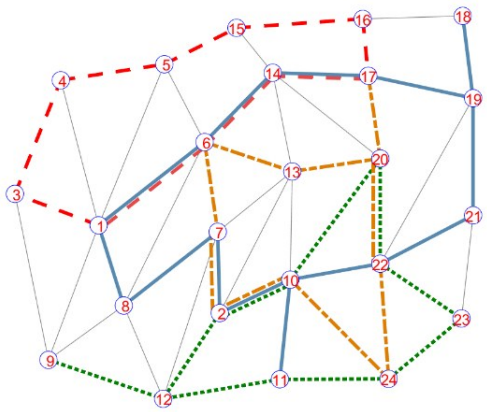

图4 分支定界算法优化方案

Fig. 4 Optimization scheme of branch-and-bound algorithm

由于本文提出的考虑残疾乘客优先的多车场定制公交路径优化问题是一个新问题,所以为了进一步验证本文模型的有效性,将对本文模型的优化方案与未考虑残疾乘客优先的模型优化方案进行对比,结果见表5。在不考虑残疾乘客优先的多车场路径优化问题中,各需求节点绕行系数λ相等(本文令$\lambda = 2$)。该模型如下:

$$\min \sum_{i \in V}\sum_{j \in V}\sum_{k \in K} x_{ijk} t_{ij} + \sum_{s \in S_0}\sum_{j \in I}\sum_{k \in K} x_{ijk}\gamma + \sum_{i \in I}\sum_{k \in K}(t_{ik} - e_i) \tag{25}$$

s.t.

$$t_{b(i)k} - t_{ik} \leqslant (1 + \lambda) t_{ib(i)} \quad ,\forall i \in I, k \in K \tag{26}$$

此外,约束条件还包括式(2)~式(16)及式(18)。

在相同试验数据下,考虑残疾乘客优先的路径优化模型与未考虑残疾乘客优先的路径优化模型具有不同的优化方案。两种模型的优化方案分别如图5、图6所示。由图5、图6可知,当未考虑残疾乘客优先时,车辆会尽可能服务靠近其所属车场节点的乘客,并且选择能减少车辆行驶时间的路径,以降低成本;考虑残疾乘客优先的方案与之相比,对降低残疾乘客等车时间更加关注,当具有与不具有残疾乘客的节点时间窗相近时,车辆可能会优先服务具有残疾乘客的节点,即使这有可能增加行驶时间成本。由表5可知,在对具有相近时间窗的节点7和节点8的处理上,在未考虑残疾乘客优先的方案中,车场2的车辆优先服务节点7的乘客,而在考虑残疾乘客优先的方案中,需要车场1的车辆优先选择具有残疾乘客的节点8。此外,考虑残疾乘客优先模型较未考虑残疾乘客优先模型,残疾乘客平均等车时间减小了30.6%,普

表5 不同模型的优化方案对比

Table 5 Comparison of optimization schemes obtained by different models

比较指标	考虑残疾乘客优先模型	未考虑残疾乘客优先模型
优化方案	车辆1:1—8—7—10—11—22—21—18—19—1 车辆2:1—3—4—5—15—16—14—1 车辆3:2—9—12—23—20—2 车辆4:2—6—13—17—24—2	车辆1:1—4—5—15—16—1 车辆2:1—3—6—13—14—17—24—1 车辆3:2—10—11—21—22—2 车辆4:2—7—8—9—12—23—19—18—20—2
残疾乘客平均等车时间/min	2.50	3.60
普通乘客平均等车时间/min	6.52	3.70
残疾乘客平均乘车时间/min	67.50	68.40
普通乘客平均乘车时间/min	62.90	71.20
总时间成本/min	1 014.00	947.00

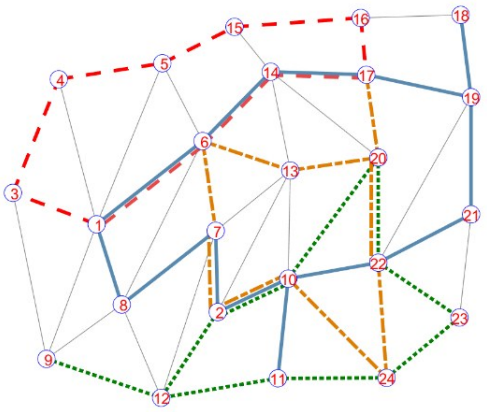

图5　考虑残疾乘客优先的优化方案

Fig. 5　Scheme considering priority of disabled passengers

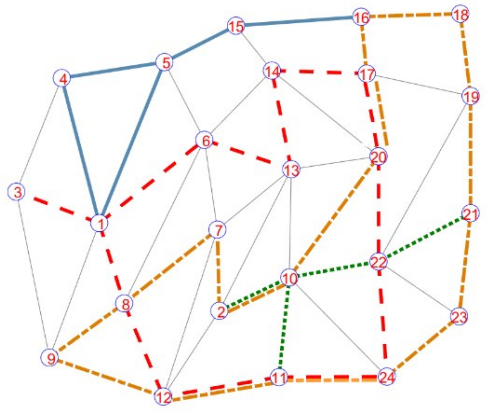

图6　未考虑残疾乘客优先的优化方案

Fig. 6　Scheme without priority of disabled passengers

通乘客的平均等车时间在满足时间窗的要求下增加了76.2%，残疾乘客和普通乘客的平均乘车时间分别减小了1.3%和11.7%。这说明在满足乘客需求的同时，本文模型虽然增加了普通乘客的平均等车时间，但是可以大幅减少残疾乘客的平均等车时间，符合本文的设想，同时减少了残疾乘客的平均乘车时间，有效提升了残疾乘客的出行质量。

4　讨论

在实际路网中，节点间的行程时间会根据道路拥挤程度、自然天气变化等情况发生改变，使得路网节点的行程时间具有不确定性，这与本文假设的静态行程时间不符。另外，本文研究的对象为静态需求，未考虑服务过程中新出现的乘客需求，因此本文的研究结果更适于为服务预约需求的定制公交路径决策提供参考。为了增强研究结果的普适性，未来研究应在本文的基础上进一步引入实时乘客需求及考虑路网行程时间不确定性。此外，探索具有更高求解精度和求解速度的算法也至关重要。

5　结论

1）本文针对所提出的考虑残疾乘客优先的多车场定制公交路径优化问题，构建了路网情景下残疾乘客上下车优先的路径优化模型，同时为不同类型的乘客设置了不同的服务时间，且考虑了乘客的座位需求与车型是否兼容，使模型更贴近现实生活中乘客的出行需求。

2）通过与未考虑残疾乘客优先的多车场路径优化模型进行对比，本文提出的模型能够大幅缩减残疾乘客的等车时间，并且可以缩减残疾乘客和普通乘客的乘车时间，能够更好地满足残疾乘客的出行需求，提升定制公交的服务水平。

3）改进的Benders分解算法能够有效解决本文提出的问题，且采用多平面割约束策略及在子问题中引入松弛变量的方法有利于加快上下界的收敛。与传统的分支定界算法相比，本文改进的Benders分解算法能够得到满意解的同时，还具有更快的求解速度。

［参考文献］

［1］　徐康明，李佳玲，冯浚，等．定制公交服务初探［J］．城市交通，2013，11（5）：24-27. DOI：10.3969/j.issn.1672-5328.2013.05.008.
XU Kangming，LI Jialing，FENG Jun，et al. Discussion on subscription bus services［J］. Urban Transport of China，2013，11（5）：24-27. DOI：10.3969/j.issn.1672-5328.2013.05.008.

［2］　LIU T，CEDER A A. Analysis of a new public-transport-service concept：customized bus in China［J］. Transport Policy，2015，39：63-76. DOI：10.1016/j.tranpol.2015.02.004.

［3］　CHANE-HAÏ T，VERCRAENE S，MONTEIRO T. Sharing a ride time constraint in a multi-trip dial-a-ride problem. An application to the non-urgent patient transportati-on problem［C］// Proceedings of the MOSIM 2020-13th International Conference on Modeling，Optimization and Simulation. Agadir：New advances and challenges for sustainable and smart

industries,2020.

[4] LUO Z X, LIU M Y, LIM A. A two-phase branch-and-price-and-cut for a dial-a-ride problem in patient transportation[J]. Transportation Science, 2019, 53(1): 113-130. DOI: 10.1287/trsc.2017.0772.

[5] 陈可嘉,方云飞,骆佳艺.灵活多车场多类型的叫车接送问题的规划模型[J].交通信息与安全,2021,39(3): 103-110. DOI: 10.3963/j. jssn. 1674-4861.2021.03.013.
CHEN Kejia, FANG Yunfei, LUO Jiayi. A programming model for the flexible multi-depot heterogeneous dial-a-ride problems [J] Traffic Information and Security, 2021, 39(3): 103-110. DOI: 10.3963/j.jssn.1674-4861.2021.03.013.

[6] DETTI P, PAPALINI F, DE LARA G Z M. A multi-depot dial-a-ride problem with heterogeneous vehicles and compatibility constraints in healthcare[J]. Omega, 2017, 70: 1-14. DOI: 10.1016/j.omega.2016.08.008.

[7] 凌海峰,谷俊辉.带软时间窗的多车场开放式车辆调度[J].计算机工程与应用,2017,53(14):232-239. DOI:10.3778/j.issn.1002-8331.1601-0408.
LING Haifeng, GU Junhui. Study on multi-depot open vehicle routing problem with soft time windows [J] Computer Engineering and Application, 2017,53(14): 232-239.DOI:10.3778/j.issn.1002-8331.1601-0408.

[8] OUASAID S, SADDOUNE M. A dial-a-ride problem with driver preferences[C]// Proceedings of the 2021 7th International Conference on Optimization and Applications (ICOA). Wolfenbüttel: IEEE, 2021: 1-6. DOI: 10.1109/ICOA51614.2021.9442667.

[9] ASLAKSEN I E, SVANBERG E, FAGERHOLT K, et al. A combined dial-a-ride and fixed schedule ferry service for coastal cities[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2021, 153: 306-325. DOI: 10.1016/j.tra.2021.09.004.

[10] GUO S C, DAYARIAN I, LI J, et al. A branch-cut-and-price algorithm for a dial-a-ride problem with minimum disease-transmission risk[EB/OL].(2022-05-11)[2022-12-13]. http://arxiv.org/abs/2205.05324.

[11] ABEDI M, CHIONG R, ATHAUDA R, et al. A regional multi-objective tabu search algorithm for a green heterogeneous dial-a-ride problem [C]// Proceedings of the 2019 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC). Wellington, New Zealand: IEEE, 2019: 2082-2089. DOI: 10.1109/CEC.2019.8790003.

[12] HU T Y, ZHENG G C, LIAO T Y. Multi-objective model for dial-a-ride problems with vehicle speed considerations [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2019, 2673(11): 161-171. DOI: 10.1177/0361198119848417.

[13] DO P T, NGHIEM N V D, NGUYEN N Q, et al. A time-dependent model with speed windows for share-a-ride problems: a case study for Tokyo transportation [J]. Data & Knowledge Engineering, 2018, 114: 67-85. DOI: 10.1016/j.datak.2017.06.002.

[14] LIANG X, DE ALMEIDA CORREIA G H, AN K, et al. Automated taxis' dial-a-ride problem with ride-sharing considering congestion-based dynamic travel times [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 112: 260-281. DOI: 10.1016/j.trc.2020.01.024.

[15] BONGIOVANNI C, KASPI M, GEROLIMINIS N. The electric autonomous dial-a-ride problem [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2019, 122: 436-456. DOI: 10.1016/j.trb.2019.03.004.

[16] MASMOUDI M A, BRAEKERS K, MASMOUDI M, et al. A hybrid genetic algorithm for the heterogeneous dial-a-ride problem [J]. Computers & Operations Research, 2017, 81: 1-13. DOI: 10.1016/j. cor. 2016.12.008.

[17] MALHEIROS I, RAMALHO R, PASSETI B, et al. A hybrid algorithm for the multi-depot heterogeneous dial-a-ride problem[J]. Computers & Operations Research, 2021, 129: 105196. DOI: 10.1016/j.cor.2020.105196.

[18] TELLEZ O, VERCRAENE S, LEHUÉDÉ F, et al. The fleet size and mix dial-a-ride problem with reconfigurable vehicle capacity [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 91: 99-123. DOI: 10.1016/j.trc.2018.03.020.

[19] MASMOUDI M A, HOSNY M, DEMIR E, et al. Hybrid adaptive large neighborhood search algorithm for the mixed fleet heterogeneous dial-a-ride problem [J]. Journal of Heuristics, 2020, 26(1): 83-118. DOI: 10.1007/s10732-019-09424-x.

[20] HO S, NAGAVARAPU S C, PANDI R R, et al. An improved tabu search heuristic for static dial-a-ride problem[EB/OL].(2018-01-25)[2022-12-13]. http://arxiv.org/abs/1801.09547.

[21] 江雨星,牛惠民.需求响应的集装箱班列时刻表优化及Benders分解算法[J].交通运输系统工程与信息, 2020, 20(5): 191-198. DOI: 10.16097/j. cnki. 1009-6744.2020.05.028.
JIANG Yuxing, NIU Huimin. Optimization of demand-response container train timetables and benders decomposition [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2020, 20(5): 191-198. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2020.05.028.

(责任编辑:刘平;校对:毛娜)