

文章编号: 1674-599X(2020)03-0088-06

时变路网下机场接驳车辆-用户共享路径优化

欧阳瑞祥, 周和平, 刘静波, 郭权

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要: 采用时空集聚网络表征动态交通路网, 运用离散时间阻抗值构建时变路网。基于机场接驳预排班, 考虑原有预定用户需求、航班时间、车辆绕行时间及资源限制等约束, 建立了时变路网的共享式机场接驳车辆-用户选择模型。根据约束规划和分枝定界算法, 设计了其求解算法, 对实时新增用户需求进行快速判断, 实现机场接驳运输系统中有限资源的共享, 提高了接驳效率。计算结果表明: 该模型和算法能处理机场接驳需求响应系统中实时新增用户需求的动态车辆路径优化, 具有合理性与有效性。

关键词: 时变路网; 共享式; 机场接驳; 实时用户需求; 车辆-用户选择模型

中图分类号: U491

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.03.014

Airport feeder vehicle-user shared path optimization under time-varying network

OUYANG Rui-xiang, ZHOU He-ping, LIU Jing-bo, GUO Quan

(1.School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: A shared airport feeder vehicle-user selected model for time-varying network is established in this paper, which the space-time aggregation network is used to characterize the dynamic traffic road network and the time-varying network is constructed by the discrete time impedance. Based on the per-scheduling of airport feeder, the shared airport feeder vehicle-user selection model is established considering the constraints, such as the original scheduled user demand, flight time, vehicle detour time and resource limitation. According to the constrained programme and the branch-and-bound algorithm, a solution algorithm is proposed to quickly judge the demands of new users in real time, to realize the sharing of limited resources in the airport shuttle transportation system and to improve the feeder efficiency. The results show that the model and algorithm are rational and effective for solving the real-time new user demand in the airport feeder demand response system.

Key words: time-varying network; share-based; airport feeder; real-time user demand; vehicle-user selected model

民航运输是人们出行不可或缺的方式。目前, 机场接驳运输智能化水平较低, 而研究机场接驳车辆-用户选择方法有助于构建智慧化民航接驳运输系统。国内外学者对需求响应式接驳进行了深入研究。靳文舟^[1]等人通过 K-means 算法, 响应公交临

时停靠点规划的需求。并基于精英选择遗传算法, 选择公交线路规划方案。申婵^[2]等人基于可靠性时空网络, 建立了定制公交线路优化模型, 并采用禁忌搜索算法进行求解。Zheng^[3-4]等人研究了可变线路与可变站点的公交模式选择, 且提出了一种动态

收稿日期: 2020-05-10

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2019JJ40311)

作者简介: 欧阳瑞祥(1995-), 男, 长沙理工大学硕士生。

离站时间窗的策略。Sun^[5-6]等人考虑了乘客满意度和轨道站点同步换乘的需求响应,建立了接驳公交调度模型。Li^[7]等人研究了集成站点选址的需求响应,建立了接驳公交调度模型。

机场接驳车辆-用户选择过程,实质上是考虑新增用户需求的动态车辆路径问题(Dynamic Vehicle Routing Problem, 简称为 DVRP), 国内外对 DVRP 进行了许多的研究。Abdallah^[8]等人对新增客户需求,构建了带容量约束的 DVRP 模型,按时间段将动态需求的车辆路径问题转化成静态车辆路径问题,并采用遗传算法进行求解。Chen^[9]等人考虑新增客户需求对车辆容量和时间窗的影响,建立了容量和时间窗约束的 DVRP 模型,采用生成初始路径和按时间段定期更新路径的两阶段策略。Ulmer^[10]等人将随机顾客请求的多周期车辆路径问题视为马尔可夫决策,以接受服务请求数最大化作为优化目标,提出了一种基于近似动态规划的预期动态策略。祁航^[11]等人基于交通网络的动态性及乘客需求的定制性与动态性,建立了高铁站定制性灵活线路接驳巴士路径优化模型,并采用改进的蚁群算法求解。智路平^[12]等人先对路段行程时间进行分状态的随机动态预测,然后建立以行程时间可靠性为关键控制变量的三阶段单车辆路径选择模型。作者在时变路网下,对新增用户需求进行实时响应,拟建立共享式机场接驳车辆-用户选择模型,根据约束规划和分枝定界算法,设计了算法并进行求解。以期实现机场接驳运输系统中有限资源的共享,提高接驳效率。

1 问题描述及符号注明

设预排班方案 $Y=(U,H)$, 接驳车辆在 t_p 时刻,从车场 p 出发,接 n 个预定用户需求点 w , 去机场 e 。其中: U 为接驳车辆路径集,接驳车辆在预排班方案 Y 中接驳路径 $u \in U$; H 为用户出发时刻集, w 用户的出发时刻 $t_w \in H$ 。

在预排班方案 Y 和时变路网 $RN=(V,E,M,C)$ 的基础上,对已出发接驳车辆和实时新增用户需求 w^* 进行匹配,判断接驳车辆能否满足 w^* , 并生成接驳车辆-用户实时共享方案 $Y^*=(U,H^*)$, 如图 1 所示。其中,新增用户需求 w^* 是在接驳车辆出发以后,随机出现的; V 是道路节点集,路网中任意节点 $i \in$

V ; E 是道路路段集, $(i,j) \in E$; 时间间隔集 $M=\{0,1,2,\dots,m\}$, 任意 m 表示间隔长度为 Δm 的时间间隔 $[t,t+\Delta m]$ (如: 将 10:20-11:20, 按每 10 分钟, 间隔离散, $t=0$ 对应 10:20-10:30); C 为路段时间阻抗集, 路网中任意路段时间阻抗 $C_{ij}^m \in C$, 表示在 m 间隔内, 路段 (i,j) 的时间阻抗值; U^* 是共享路径集, 接驳车辆在实时共享方案; Y^* 中的共享路径 $u^* \in U^*$; H^* 为 Y^* 中用户出发时刻集。

从图 1 可以看出, 当 4 节点随机产生实时新增用户需求 w^* 时, 接驳车辆已行驶到 $(p,1)$ 路段上。在保证原有预定用户准时到达机场 e 的情况下, 需要快速地判断此接驳车辆能否满足 w^* 需求, 并送其到达机场。既找到一条考虑原有用户航班时间以及接驳车辆空余资源等约束, 且能满足 w^* 需求的共享路径 u^* 。

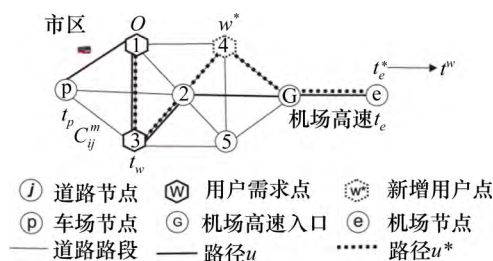


图1 时变路网图

Fig. 1 Time-varying network diagram

其中, t_o 为路径 u^* 中共享起点 O 的出发时刻; Δt 为乘客登机缓冲时间; q_w 为用户需求点 w 的随行人数; Q 为车辆容量; Q_u 为路径 u 的总人数; ϵ 为车辆绕行系数; T_w^* 为用户需求点 w 在 t_w 时刻自行出发到机场的最小旅行时间; L_{\max} 为最大停靠次数; T_{\max} 为乘客最大候机时间阈值; N_0 为已过节点集, 接驳车辆在新增用户需求出现前已过的节点 $i \in N_0$; N 为未过节点集, $N=V-N_0$; W : 用户需求点集, $w \in W_0$; t_p 为车辆从 p 出发的时刻; C_{ij}^m 为在 m 间隔内路段 (i,j) 的时间阻抗; t_w 为 w 用户的出发时刻; t_o 为车辆在预排方案中到达机场的时刻; O 为共享路径的起点; t_e^* 为车辆在共享方案中到达机场的时刻; W^* 为实时新增用户需求; t_w 为 w 用户的航班时间。

2 模型建立

为响应机场接驳过程中实时出现的新增用户

需求,建立时变路网下共享式机场接驳车辆-用户选择模型,并使用该模型对机场接驳车辆路径进行优化。

2.1 假设条件

为方便建立模型和求解,假设:①每个预约用户的出发位置和航班时刻表等信息,可在终端获得。②所有用户的登机缓冲时间相同。③乘客上车时间忽略不计,即接驳车辆到达 w 节点的时间就是乘客的出发时间。④若接驳车辆在 t 时刻位于路段 $(i,j) \in u$ 之间,即 $t_i < t \leq t_j$,则规定 j 节点为重新规划的共享起点 O 。⑤假设系统一次只能判断一个用户需求点,是否可以共享,且判断时间忽略不计;⑥所有路段任意间隔内的时变阻抗已获得,在 m 间隔内,路段阻抗是相同的。

2.2 目标函数与决策变量

为了快速响应机场接驳过程中实时出现的新增用户需求,以接驳车辆总运行时间最小为目标函数,考虑在满足约束条件的情况下,对机场接驳车辆路径进行优化,生成实时共享路径方案。其目标函数公式为:

$$\min z = \sum_N \sum_M C_{ij}^m x_{ij}^m. \quad (1)$$

模型以接驳车辆路径为决策变量,其公式为:

$$x_{ij}^m = \begin{cases} 1, & \text{车辆在} m \text{时段内从} i \text{到} j; \\ 0, & \text{其他。} \end{cases} \quad (2)$$

2.3 约束条件

1) 流量守恒约束

起终点约束:接驳车辆运营从起点出发,到终点机场结束,需满足节点进、出次数约束。

$$\sum_{j \in N} \sum_{m \in M} x_{ij}^m = 1, i = 0. \quad (3)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{m \in M} x_{ji}^m = 1, i = e. \quad (4)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{m \in M} y_{ij}^{mw} = 1, i = w (\forall w \in W). \quad (5)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{m \in M} y_{ji}^{mw} = 1, i = e (\forall w \in W). \quad (6)$$

其中, $i=0$ 表示变量 x 的起点; $i=e$ 表示变量 x, y 的终点; $i=w$ 表示 y 的起点。

中间节点约束:车辆到达中间节点,提供接驳服务后,又离开中间节点,需满足节点进出守恒。

$$\sum_{i, j \in N} \sum_{m \in M} x_{ij}^m = \sum_{i, j \in N} \sum_{m \in M} x_{ji}^m, i \neq 0, e. \quad (7)$$

$$\sum_{i, j \in N} \sum_{m \in M} y_{ij}^m = \sum_{i, j \in N} \sum_{m \in M} y_{ji}^m, i \neq w, e. \quad (8)$$

必经节点约束:系统中未上车的原有预定用户需求必须被满足。

$$\sum_{i \in N} \sum_{m \in M} x_{ij}^m = 1, j = w (\forall w \in W \cap N). \quad (9)$$

2) 车辆绕行约束

为使乘客有较好的服务体验感,乘客接受服务的时间,不能超过其自行出发最小旅行时间的 $(1+\varepsilon)$ 倍,本研究 $\varepsilon=1.4$ 。 w 乘客接受服务的时间为 T_w 。

$$T_w = \sum_{i, j \in V} \sum_{m \in M} C_{ij}^m y_{ij}^{mw}. \quad (10)$$

$$T_w \leq (1 + \varepsilon) T_w^* (\forall w \in W). \quad (11)$$

3) 容量限制约束

在提供接驳服务的过程中,车内的乘客数不能超过车辆的容量。

$$\sum_{w \in W \cap N_0} q_w + \sum_{w \in W \cap N} q_w \leq Q. \quad (12)$$

4) 航班信息约束

空余时间约束:已出发车辆还有空余时间共享给新增用户。

$$t^w - t_e - \Delta t > 0 (\forall w \in W \text{ 且 } w \neq w^*). \quad (13)$$

用户航班约束:不能让 w 的候机时间过长, T_{\max} 是已经在车上用户最大候机时间的 μ 倍,本研究中 $\mu=1.5$ 。

$$0 \leq t^w - t_e^* - \Delta t \leq T_{\max} (\forall w \in W). \quad (14)$$

5) 最大停靠次数约束

为保证接驳服务的质量,接驳车辆在途中停靠的次数不宜过多,本研究最大停靠次数 $L_{\max}=10$ 。

$$L \leq L_{\max}. \quad (15)$$

6) 无回路约束

不允许在一次接驳路径中,到达一个地点 2 次。

$$\sum_{i \in V} \sum_{m \in M} x_{ij}^m \leq 1, \forall j \in V. \quad (16)$$

3 算法设计

根据约束规划和分枝定界算法设计,相应求解

算法,对新增用户需求进行实时共享判断。通过将分枝定界算法中的分枝策略,运用到计算过程中,

从而达到减少存储空间和加快求解速度的目的。其算法流程图如图2所示。

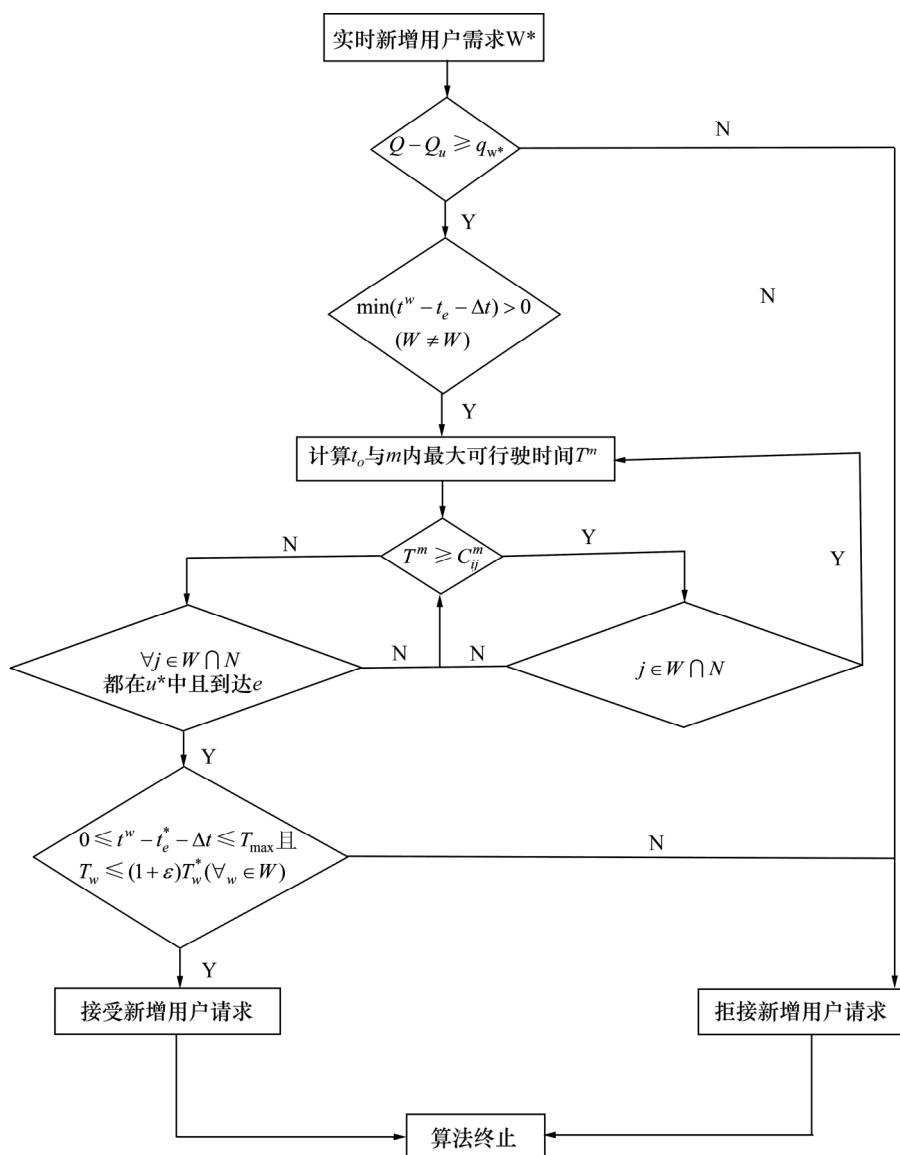


图2 算法流程

Fig. 2 Algorithm flow diagram

4 算例分析

设有13个提前预约用户,向机场接驳需求响应系统发送请求,提前预约用户需求信息见表1;设置2组实时预约用户组,每组4个实时预约用户,多组实时预约用户需求信息见表2。机场接驳车辆采用10座车,从办理登机牌到登机的缓冲时间最少45 min,即 $\Delta t=45$ min。时变路网中所有路段的阻抗值是由10:20~12:30以10 min为间隔,13个随机离散值组成的。13个提前预约用户预排班方案 Y 见表3,在 Y

中,只有路径 u_2 ,可对表2中的实时预约用户进行共享,因此,对 u_2 进行重点分析。实时预约用户为1组时,路径 u_2 的实时共享方案图如图3所示。

多组实时预约用户共享对比见表4,预约用户2组通过机场接驳需求响应系统,拒绝6,10节点的预约请求,得到 u_2 共享路径为 $p \rightarrow 2 \rightarrow 7 \rightarrow 15 \rightarrow 18 \rightarrow 13 \rightarrow 14 \rightarrow G \rightarrow e$ 。

由表4可知,通过对1,2组实时预约用户共享进行比较,车辆的满载率均从70%增加到100%,机场接驳系统对用户请求响应率均增加15.3%,候机时间利用率分别提高了66.7%和58.9%。表明:

该共享模型可靠,增加了车辆满载率,减少了运营成本,提高了接驳效率和用户满意度。该模型和算法能处理机场接驳需求响应系统中实时新增用户需求的动态车辆路径优化,具有良好的适用性。

表 1 提前预约用户需求信息表

Table 1 Demand information of advance booking user			
用户需求点	随行人数	航班时间	预约时间
1	1	12:30	2020.3.28 9:23
2	2	12:30	2020.3.28 9:50
3	3	12:30	2020.3.28 11:34
4	2	12:30	2020.3.28 13:07
5	4	12:30	2020.3.28 14:18
7	1	12:35	2020.3.28 15:49
9	1	12:30	2020.3.28 18:20
12	3	12:30	2020.3.28 19:48
14	1	12:30	2020.3.28 22:57
15	2	12:30	2020.3.28 23:02
16	2	12:30	2020.3.29 00:33
17	2	12:30	2020.3.29 5:58
18	2	12:45	2020.3.29 8:33

表 2 多组实时预约用户需求信息表

Table 2 Demand information of Multi-group real-time booking user				
组别	需求点	随行人数	航班时间	预约时间
1	8	2	12:45	2020.3.29 10:25
1	13	1	12:30	2020.3.29 10:32
1	20	2	14:15	2020.3.29 10:39
1	19	2	12:30	2020.3.29 10:54
2	6	3	12:30	2020.3.29 10:27
2	13	2	12:45	2020.3.29 10:38
2	14	1	13:15	2020.3.29 10:45
2	10	2	12:30	2020.3.29 10:59

表 3 预排班机场接驳方案

Table 3 Pre-scheduling of airport feeder						
路径编号	最优预排班路线	满载率/%	车辆出发时刻	运行时间/min	等待时间/min	备注
u_1	$p \rightarrow 1 \rightarrow 5 \rightarrow 16 \rightarrow 17 \rightarrow 20 \rightarrow G \rightarrow e$	90	10:27	78	0.0	不可共享
u_2	$p \rightarrow 2 \rightarrow 7 \rightarrow 15 \rightarrow 18 \rightarrow G \rightarrow e$	70	10:23	65.2	16.8	可共享
u_3	$p \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 9 \rightarrow 12 \rightarrow 14 \rightarrow G \rightarrow e$	100	10:28	74.9	2.1	不可共享

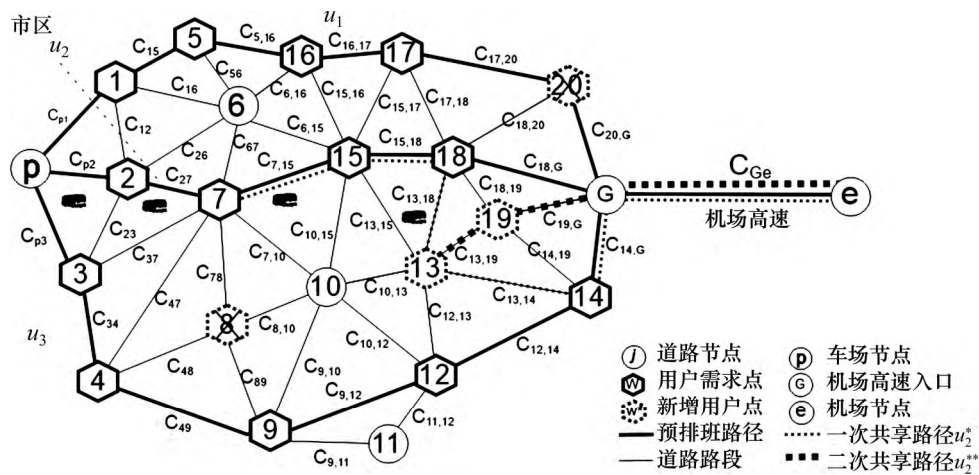


图 3 实时共享方案

Fig. 3 Real-time shared diagram

表 4 多组实时预约用户共享对比表

Table 4 Multi-group real-time booking user sharing comparison						
组别	u_2 共享路径	满载率/%	请求响应率/%	运行时间	候机时间利用率/%	拒绝请求点
1	$p \rightarrow 2 \rightarrow 7 \rightarrow 15 \rightarrow 18 \rightarrow 13 \rightarrow 19 \rightarrow G \rightarrow e$	100	15.3	76.4	提高了 66.7	8,20
2	$p \rightarrow 2 \rightarrow 7 \rightarrow 15 \rightarrow 18 \rightarrow 13 \rightarrow 14 \rightarrow G \rightarrow e$	100	15.3	75.1	提高了 58.9	6,10

5 结论

根据机场接驳响应系统,建立了共享式机场接

驳车辆-用户选择模型,对实时新增用户需求进行响应,并设计相应的算例进行分析。得到的结论为:

- 1) 在机场接驳预排班的基础上,建立了时变路

网下共享式机场接驳车辆-用户选择模型,及时快速的响应了实时新增用户需求,实现了有限资源的共享,提高了接驳效率和用户满意度。

2) 根据约束规划和分枝定界算法,设计了模型求解方法,对车辆路径进行了优化,满足了新增用户需求的实时共享。以期构建智慧化民航接驳运输系统提供参考。

参考文献(References):

- [1] 靳文舟,郭献超,龚隽.基于精英选择遗传算法的需求响应公交规划[J].公路工程,2020,45(2):44-49.(JIN Wen-zhou, GUO Xian-chao, GONG Jun. Based on elitist selection genetic algorithm for demand responsive transit planning[J]. Highway Engineering, 2020, 45(2): 44-49. (in Chinese))
- [2] 申婵,崔洪军.基于可靠性最短路实时定制公交线路优化研究[J].交通运输系统工程与信息,2019,19(6):99-104.(SHEN Chan, CUI Hong-jun. Optimization of real-time customized shuttle bus lines based on reliability shortest path[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2019, 19(6): 99-104. (in Chinese))
- [3] Zheng Y, Li W, Qiu F, et al. A methodology for choosing between route deviation and point deviation policies for flexible transit services[J]. Journal of Advanced Transportation, 2018, 49(3): 496-509.
- [4] Zheng Y, Li W, Qiu F. A slack arrival strategy to promote flex-route transit services[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 92: 442-455.
- [5] Sun B, Wei M, Yang C F, et al. Personalised and coordinated demand-responsive feeder transit service design: a genetic algorithms approach[J]. Future Internet, 2018, 10(7): 60-77.
- [6] Sun B, Wei M, Zhu S L. Optimal design of demand-responsive feeder transit services with passengers' multiple time windows and satisfaction[J]. Future Internet, 2018, 10(3): 30-46.
- [7] Li X, Wei M, Hu J, et al. An agent-based model for dispatching real-time demand-responsive feeder bus [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018(1): 1-11.
- [8] Abdallah A M F M, Essam D L, Sarker R A. On solving periodic re-optimization dynamic vehicle routing problems[J]. Applied Soft Computing, 2017, 55(6): 1-12.
- [9] Chen S F, Chen R, Wang G G, et al. An adaptive large neighborhood search heuristic for dynamic vehicle routing problems[J]. Computers & Electrical Engineering, 2018, 67(4): 596-607.
- [10] Ulmer M W, Soeffker N, Mattfeld D C. Value function approximation for dynamic multi-period vehicle routing [J]. European Journal of Operational Research, 2018, 269(3): 883-899.
- [11] 祁航,周和平,苏贞旅.高铁站定制性灵活线路接驳巴士路径优化[J].交通科学与工程,2018,34(4):71-76.(QI Hang, ZHOU He-ping, SU Zhen-lv. Route optimization of customized flexible line feeder bus for the high-speed rail station[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2018, 34(4): 71-76. (in Chinese))
- [12] 智路平,周溪召.基于动态行程时间可靠性的单车辆路径选择算法研究[J].公路交通科技,2018,35(9):71-77,84.(ZHI Lu-ping, ZHOU Xi-zhao. Study on single vehicle routing algorithm based on dynamic travel time reliability [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(9): 71-77, 84. (in Chinese))