

基于交织的立体综合车场 公交调度优化模型研究

陈建凯,肖亮,覃鹏*,何佳利,刘谦,杨雨千
(深圳市城市交通规划设计研究中心有限公司,广东深圳518021)

摘要: 公交调度是公交立体综合车场(简称立体车场)运营中的关键问题.不同于以往公交调度问题,立体车场公交调度需要同时安排各车的场内停车位置、发车时间与行驶路径.基于立体车场公交“早出晚进”特征对立体车场调度问题与调度模式进行研究,进一步分析立体车场公交车辆的交织条件;基于整数规划构建以立体车场公交车辆交织次数为目标的公交调度优化模型,求解立体车场公交调度方案.研究表明:立体车场公交调度存在同层集发和异层分发两种调度模式,且异层分发模式优于同层集发模式;此外,车辆交织条件是空间与时间同时发生重叠.通过案例验证了研究结论的正确性及调度优化模型的可行性.

关键词: 城市交通;调度模型;立体车场;整数规划;调度模式;同层集发;异层分发

Bus Scheduling Optimization Model of Function-integrated Depot with Weaving

CHEN Jian-kai, XIAO Liang, QIN Peng, HE Jia-li, LIU Qian, YANG Yu-qian

(Shenzhen Urban Transport Planning Center Ltd, Shenzhen 518021, Guangdong, China)

Abstract: Bus scheduling plays a key role on the operation of the stereoscopic and function-integrated depot (SFID or stereoscopic bus depot, SBD). Being different from previous bus scheduling, bus scheduling for SBD needs to determine the parking location, departure time, and driving path. This study focuses on the SBD bus scheduling considering the attributes of buses like departure in the morning and return at night. The condition of vehicle interweaving is also considered in the analysis. An optimization model is developed to solve the bus scheduling scheme based on the integer programming, and the weaving times between buses are set as the objectives of the model. The results indicate that there are two modes of bus scheduling for the SBD: the mode that dispatches buses at the same floor, and the mode that dispatches buses at different floors. The different-floor dispatching mode performs better than the same-floor dispatching mode. The interweaving condition is the double-overlapping of route space and out time. The case study was also conducted to verify the accuracy of the results and the feasibility of the proposed method.

Keywords: urban traffic; scheduling model; stereoscopic bus depot; integer programming; scheduling mode; same-floor dispatching; different-floor dispatching

0 引言

发展立体车场是落实公交优先的具体举措,也是当前存量发展与集约发展背景下应对传统公交场站占地过多这一关键问题的现实需要.公交调度是立体车场运营中的关键问题,既有关于公

交调度的研究主要是在成本、服务水平等约束下公交发车时间表、车型组合、线路路径及站点等方面的动、静态调度优化问题^[1-3].文献[1]以电动公交车的电池续航约束构建线性规划模型研究电动公交车路线调度方案及充电方案,文献[2]以车辆运

收稿日期:2019-10-14

修回日期:2020-04-07

录用日期:2020-04-22

作者简介:陈建凯(1973-),男,广东河源人,高级工程师.

*通信作者:qinpeng@sutpc.com

行时间和乘客时间成本最小为目标,构建多需求下多目标的灵活公交路径优化模型,并采用启发式算法求解路径.有文献对机械式立体车库的车辆出库时间长、调度能耗高等问题进行研究,但主要以小汽车为调度对象^[4].鲜有研究立体车场公交调度问题.

为应对立体车场因调度方法不合理,调度低效问题,基于立体车场在实际调度中车辆显著存在“早发车、晚收车”(即早出晚进)的特征,分析立体车场公交调度模式及交织条件,并基于整数规划理论构建立体车场公交调度优化模型.

1 立体综合车场调度问题与模式

1.1 立体车场公交调度问题

立体车场存在多楼层、多坡道及多通道,各公交线路间的车辆易因发车时间、停车位置和行驶路径等要素统筹不合理而发生交织,导致车辆排队拥堵和时间损失,降低调度效率.与以往公交调度问题有所区别,本文公交调度是指统筹安排立体车场内各车的停车位置、行驶路径与发车时间表的决策,减少车辆交织以提高调度效率.由于晚间回场车辆相对分散而交织少,早间则发车集中而交织明显,故主要研究早间立体车场的公交车调度问题.

1.2 立体车场公交调度模式

立体车场公交调度可分为两种基本调度模式:

(1) 同层集发调度模式.将属于不同公交线路,出场时间接近的车辆停放在同一楼层,早间调度各线路车辆集中发车.该模式下,出场时间接近的车辆其行驶路径重叠,交织较多.

(2) 异层分发调度模式.将属于不同公交线路而出场时间接近的车辆停放在不同楼层,早间调度各线路车辆分散发车.该模式下,出场时间接近的车辆其行驶路径重叠的可能性低,可有效减少车辆交织,优于同层集发模式.

2 基于交织的调度优化模型构建

2.1 基本术语定义

(1) 流线路径:车辆从车场内停车位行驶至出入口的流线轨迹.不同停车位对应不同的流线路

径,同一楼层或分区各停车位对应流线路径的公共交集部分为基本流线路径.流线路径长度为行程长度.

(2) 发车时间:车辆驶出停车位的时刻.

(3) 出场时间:车辆离开车场出口的时刻.

(4) 出场时差:任意前后相邻两辆车的出场时间之差.

(5) 内行程时间:车辆在车场内部的总行程时间.

(6) 路径重叠判别矩阵:以任意两辆车的流线路径是否发生重叠的判定值为元素值的0-1矩阵.发生重叠,元素值为1;否则,为0.

(7) 空间时间:由行程长度与车场内限制行驶速度计算所得时间.

(8) 损失时间:车辆因交织产生的损失时间,为内行程时间与空间时间之差.

(9) 交织时差阈值:任意两辆车是否发生交织的临界出场时差,以车场内车辆最小车头时距代替.

(10) 车辆序号:将各辆车按线路、出场时间排列后对应的序号.例如,有3条公交线路,各线路分别有3,5,2辆车参与调度,则第1条线路3辆车的序号为1/2/3,第2条线路5辆车的序号累记为4/5/6/7/8,第3条线路2辆车的序号为9/10.

(11) 停车位序号:将车场所有停车位按楼层、分区排列后,各停车位对应的序号.

出场时间根据公交线路时刻表,结合公交首末站与立体车场间的行程时间(称为外行程时间)反向推算,是车辆准时到达首末站的约束.停车位空间集有楼层、分区等多个维度,车辆序号和停车位序号则可将车辆与停车空间集的多维匹配问题转化为一维空间里车辆的停车位序号分配问题.

2.2 交织模型构建思路

2.2.1 车辆交织条件

车辆间出场时差小于交织时差阈值(时间维)与流线路径存在重叠(空间维)是调度车辆交织的根本原因.故交织发生需两个条件:一是车辆出场时差小于交织时差阈值,二是车辆流线路径存在重叠.出场时差由各车出场时间决定,为客观条件;流线路径是否重叠取决于各车辆分配的停车位序号,故立体车场公交调度优化,即优化车辆停车位序号的分配,降低车辆时一空同时重叠的可

能性以减少交织。

2.2.2 模型假设与约束条件

模型假设如下：

- (1) 同一线路的车辆之间不发生交织；
- (2) 每次各车因交织的损失时间相同；
- (3) 同一停车区各车的基本流线路径相同。

调度优化模型旨在减少车辆交织数,提升车场调度效率,故以车辆交织次数最少为目标.模型也可称为基于交织最少的车辆调度优化模型,需满足如下约束：

- (1) 任意两辆车之间的交织次数为0或1；
- (2) 任意一辆车可能发生的交织次数存在合理上限值；
- (3) 所有参与研究的调度车辆均有且独自占有一个停车位。

2.3 交织模型构建

2.3.1 变量定义

B ——序号集合,由研究时段所有参与调度的车辆按车辆序号从小到大排列所构成的一维数组,数组中元素序号与元素值相同；

m, n, b —— m, n 分别为 B 中第 m, n 个元素值,代表第 m, n 辆车, b 为 B 的最大元素值, $m, n, b \in B$ ；

$W(m, n)$ ——判定第 m 辆车与第 n 辆车是否发生交织的二值函数,发生交织为1,否则为0；

$B_p(m)$ ——第 m 辆车被分配得到的停车位序号,为决策变量；

$t(m)$ ——第 m 辆车的空间时间；

$t_c(m)$ ——第 m 辆车的损失时间；

$t_d(m)$ ——第 m 辆车的发车时间；

$t_p(m)$ ——第 m 辆车的内行程时间；

$t_s(m)$ ——第 m 辆车的出场时间；

$h_{t, \min}$ ——车辆间的最小车头时距；

$D_s(m, n)$ ——第 m 辆车与第 n 辆车的出场时差；

D ——停车位序号集合,按停车位序号将流线路径的行程长度进行排列所构成的一维数组,数组的元素 $d(m)$ 表示车辆 m 分配所得停车位对应的行程长度；

v ——车场内的限制行驶速度；

d_p ——流线路径的通道长度,与所经过的通

道数量有关；

d_r ——流线路径的坡道长度,与所经过的坡道数量有关；

d_f ——流线在首层的行驶长度,与车场规模、车场首层及出入口布局有关；

M ——路径重叠判别矩阵,元素 $r(m, n)$ 表示对第 m 辆车与第 n 辆车流线路径是否存在重叠的判定值；

W_{et} ——任一辆车的最大交织次数；

w_t ——任一车辆单次交织的损失时间；

C_c ——参与调度的车辆的总交织次数。

2.3.2 模型构建

整数规划模型常被应用于公交调度研究,以优化求解公交调度线路的车型组合、发车时刻表、路径与发车数等^[3-5],故基于纯整数规划模型构建立体车场公交调度优化模型.模型求解方案包括车辆车位序号和发车时间,将模型拆分为空间与时间两部分。

(1) 空间部分调度模型。

目标函数为

$$C_c = \min \left[\sum_{m=1}^b \sum_{n=1}^b W(m, n) \right] \quad (1)$$

约束条件为

$$W(m, n) = 1 \text{ or } 0, \forall m, n \in B \quad (2)$$

$$\sum_{m=1}^b W(m, n) \leq W_{et} \quad (3)$$

$$B_p(m) \neq B_p(n), \forall m, n \in B \quad m \neq n \quad (4)$$

(2) 时间部分调度模型。

$W(m, n)$ 由路径重叠矩阵和出场时差决定.路径重叠矩阵 M 根据停车位序号确定,为模型的输入数据;出场时差 $D_s(m, n)$ 为模型优化过程中的迭代计算数据,即

$$D_s(m, n) = \text{abs}[t_s(m) - t_s(n)] \quad (5)$$

采用伪代码对 $W(m, n)$ 进行分析：

```
W(m, n) = {If  $D_s(m, n) < h_{t, \min}$  ###对条件1验证
###{then if  $r(m, n)$  ###对条件2验证###{then 1;
else 0}; else 0}
```

$t_p(m)$ 由流线路径决定,即

$$t_p(m) = t(m) + t_c(m) \quad (6)$$

$$t(m) = d(m)/v \quad (7)$$

$$d(m) = d_p(m) + d_r(m) + d_l(m) \quad (8)$$

$$t_c(m) = w_l \cdot \sum_{n=1}^b W(m,n) \quad (9)$$

由式(1)~式(9)得到各车的停车位序号,则各车流线路径也确定.停车场各车的发车时间基于模型的出场时间约束求解,即

$$t_d(m) = t_p(m) + t_s(m) \quad (10)$$

综上,得到公交调度优化方案.

3 验证分析

3.1 车场基本流线

以某立体综合车场为例,应用所构建模型求解公交调度方案,分析车场基本组织流线,各楼层之间流线路径不同,如图1和图2所示.

3.2 基础数据设定

模型求解基本数据如表1所示,基本参数如表2所示.

3.3 调度方案求解

使用Lingo软件求解案例调度方案,计算同层集发模式和异层分发模式下调度方案,对比不同方案交织次数.异层分发模式下各车的停车位序号及发车时间如表3和表4所示,车辆总交织次数为8车·次.

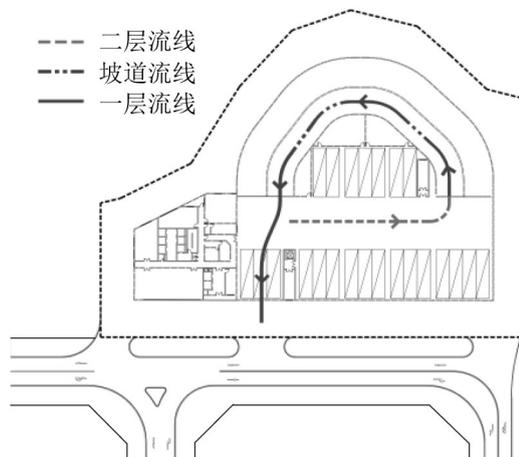


图1 车场二层出场流线组织示意图

Fig. 1 Dispatching route of the second floor of FID

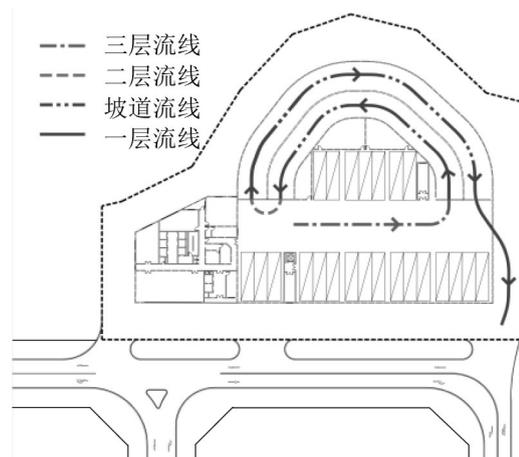


图2 车场三层出场流线组织示意图

Fig. 2 Dispatching route of the third floor of FID

表1 基本数据

Table 1 Basic data of bus of FID

调度线路名称	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
调度车辆数	6	8	5	8	4	5	6	7	5	6	
1车	06:20:20	06:21:30	06:20:50	06:21:10	06:20:00	06:22:40	06:22:10	06:21:50	06:22:20	06:20:10	
2车	06:25:20	06:25:30	06:25:50	06:26:10	06:27:00	06:27:40	06:27:10	06:25:50	06:27:20	06:26:10	
3车	06:30:20	06:29:30	06:30:50	06:31:10	06:38:00	06:32:40	06:32:10	06:29:50	06:33:30	06:32:10	
每辆车	4车	06:35:20	06:33:30	06:35:50	06:36:10	06:48:00	06:38:20	06:37:10	06:33:50	06:39:30	06:38:10
出场时间	5车	06:42:10	06:37:30	06:40:50	06:41:10	06:45:20	06:43:10	06:37:50	06:45:30	06:44:10	
6车	06:50:10	06:42:50		06:45:20			06:50:10	06:42:50		06:50:10	
7车		06:47:50		06:49:20				06:47:50			
8车		06:52:50		06:53:20							

表2 模型基本参数

Table 2 Parameter value of model

参数名称	参数代号	参数值	单位
交织时差阈值 ^①	$h_{t,\min}$	5	s
单次交织损失时间	c_l	3	s
内部限制行驶速度	ν	5	km/h

注:^①取车场公交车辆最小车头时距.

同层集发调度模式下,车场每层停车泊位容量为20,共10条公交线路,故每层平均停放各条线路的2辆车,计算得到车辆总交织次数为20车·次.

与同层集发模式相比,异层分发模式通过分散车辆停车位置,减少车辆流线路径发生重叠的

概率,降低车辆交织条件同时发生的可能性,从而减少车辆交织.故异层分发模式总体优于同层集

发模式,证明本文研究论点的正确性及调度优化模型的可行性.

表 3 异层分发调度模式下车场车辆停车位序号分布

Table 3 Parking space number of bus under mode of dispatching in different floors

调度线路名称	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 车	1	21	41	61	81	101	115	34	56	15
2 车	2	22	42	62	82	102	116	35	57	16
3 车	3	23	43	63	83	103	117	36	58	17
4 车	4	24	44	64	84	104	118	37	59	18
5 车	5	25	45	65		105	119	38	60	19
6 车	6	26		66			120	39		20
7 车		27		67				40		
8 车		28		68						

表 4 异层分发调度模式下车场车辆发车时间

Table 4 Bus-parking time of bus under mode of dispatching in different floors

调度线路名称	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 车	06:18:50	06:19:3	06:17:25	06:16:48	06:14:40	06:16:22	06:15:47	06:19:20	06:18:47	06:18:35
2 车	06:23:48	06:23:0	06:22:22	06:21:45	06:21:37	06:21:20	06:20:44	06:23:17	06:23:44	06:24:32
3 车	06:28:45	06:26:57	06:27:20	06:26:42	06:32:34	06:26:17	06:25:41	06:27:14	06:29:51	06:30:29
4 车	06:33:42	06:30:54	06:32:17	06:31:39	06:42:31	06:31:54	06:30:38	06:31:11	06:35:48	06:36:26
5 车	06:40:29	06:34:51	06:37:14	06:36:36		06:38:48	06:36:35	06:35:8	06:41:45	06:42:23
6 车	06:48:23	06:40:5		06:40:40			06:43:32	06:40:3		06:48:17
7 车		06:45:3		06:44:40				06:45:0		
8 车		06:50:3		06:48:38						

4 结 论

本文针对立体车场公交调度问题进行研究,指出立体车场调度的核心问题是统筹安排车辆的停车位置、流线路径与发车时间;基于立体车场调度模式分析,提出异层分发调度模式优于同层集发调度模式;总结车场内车辆发生交织的两个必要条件是车辆流线路径存在重叠与出场时差小于交织时差阈值;案例验证表明,异层分发模式优于同层集发模式,同时验证了本文构建模型的可行性.

国内外关于立体车场公交调度的研究仍处于萌芽阶段,本文研究结论可为未来立体车场公交调度研究提供参考,为立体车场公交调度实践提供方法指引与理论支撑.

参考文献:

- [1] JANOVEC M, KOHÁNI M. Exact approach to the electric bus fleet scheduling[J]. Transportation Research Procedia, 2019(40): 1380-1387.
- [2] 孙继洋, 黄建玲, 陈艳艳, 等. 面向多目标站的灵活型公交路径优化调度模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(6): 105-111. [SUN J Y, HUANG J Y, CHEN Y Y, et al. Flexible bus route optimization scheduling model for multi-target stations[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information, 2019, 19(6): 105-111.]
- [3] 张思林, 袁振洲, 曹志超. 考虑容量限制的多公交车型运行计划优化模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17(1): 150-156, 170. [ZHANG S L, YUAN Z Z, CAO Z C. Optimization model of bus operation plan based on hybrid bus sizes with constraints on vehicle capacity[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2017, 17(1): 150-156, 170.]

开始时间会经常性变动,证实了该交通方式在使用上的灵活性.

对共享单车骑行时间分布规律研究,可促进该系统与城市公共交通系统的衔接和配合,更加高效地解决城市“最后一公里问题”,吸引更多出行者采用“自行车+公交”的交通方式,促进城市交通系统的可持续发展.

参考文献:

- [1] FISHMAN E, WASHINGTON S, HAWORTH N. Bike share's impact on car use: Evidence from the United States, Great Britain, and Australia[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2014(31): 13-20.
- [2] MARTIN E W, SHAHEEN S A. Evaluating public transit modal shift dynamics in response to bikesharing: a tale of two US cities[J]. *Journal of Transport Geography*, 2014(41): 315-324.
- [3] 季彦婕, 谢晓乐, 马新卫, 等. 共享单车影响下小汽车出行方式转移机理研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2019, 19(3): 188-194. [JI Y J, XIE X L, MA X W, et al. Exploring psychology factors influencing the transfer willingness from car to dockless bike-sharing [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2019, 19(3): 188-194.]
- [4] 袁朋伟, 董晓庆, 翟怀远, 等. 基于 Nested Logit 模型的共享单车选择行为研究 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2018, 18(5): 191-196. [YUAN P W, DONG X Q, ZHAI H Y, et al. Choice behavior of bike-sharing based on Nested Logit model[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2018, 18(5): 191-196]
- [5] SUSILO Y O, AXHAUSEN K W. Repetitions in individual daily activity-travel-location patterns: A study using the Herfindahl-Hirschman Index[J]. *Transportation*, 2014, 41 (5): 995-1011.
-
- 上接第 173 页
- [4] 陈桂兰, 奚宝华, 杨兰英. 改进混合粒子群算法的立体车库存取调度[J]. *计算机工程与应用*, 2019, 55(19): 263-270. [CHEN G L, XI B H, YANG L Y. Improved hybrid particle swarm optimization for scheduling optimization of stereo garage[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2019, 55(19): 263-270.]
- [5] WIHARTIKO F D, BUONO A, SILALAH B P. Integer programming model for optimizing bus timetable using genetic algorithm[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, 166(1): 1-9 .