

文章编号:1671-1637(2013)03-0079-07

# 基于同步多样性的公交时刻优化方法

柏海舰<sup>1</sup>,董瑞娟<sup>1</sup>,张敏<sup>2</sup>,陈一锴<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学 交通运输工程学院,安徽 合肥 230009; 2. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

**摘要:**分析了现有公交调度方法中大间隔发车、局部收敛与时间不协调等问题,以最大同时到站次数和最大同时到站车辆数量为优化目标,以末车定时、站点允许排队长度、服务质量、线路服务时间跨度为约束条件,建立了公交时刻优化方法,设计了基于网络选点规则和网络同步规则的求解算法。计算结果表明:当公交网络中存在2条线路与2个站点且发车时间在30 min内时,应用提出的方法,在2个站点共产生3次同步,线路1的发车时刻分别为第5、15、20、30 min,线路2的发车时刻分别为第0、10、30 min;与现有方法相比,同步次数减少1次,发车时刻完全分布于规定时间内,消除了剩余时间,获得了非均匀化的发车间隔,体现了同步的多样性。

**关键词:**交通规划;公交调度;公交时刻;同步最大化;多样性;双目标函数

**中图分类号:**U492.22 **文献标志码:**A

## Optimization method of bus time based on synchronization diversity

BAI Hai-jian<sup>1</sup>, DONG Rui-juan<sup>1</sup>, ZHANG Min<sup>2</sup>, CHEN Yi-kai<sup>1</sup>

(1. School of Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China;

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** The problems of existing bus scheduling method such as big interval departure, local convergence and time incoordination were analyzed. The maximum number and maximum bus number arrived at station at the same time were taken as optimization objectives, the fixed departure time of last bus, the allowable queue length of station, service quality and the time span of route service were taken as constraint conditions, an optimization method of bus time was built, and the solution algorithm based on network reconnaissance rule and network synchronization rule were designed. Calculation result indicates that when there are two routes and two stations, and departure time is less than 30 min, three synchronizations appear at two stations by using the proposed method. The departure times of route 1 are at 5, 15, 20, 30 min and the departure times of route 2 are at 0, 10, 30 min respectively. Compared with the existing method, the number of synchronization times decreases by one, all departure times completely distribute in given time, surplus time is eliminated, inhomogeneous departure intervals are gotten, and synchronization diversity is reflected. 9 tabs, 6 figs, 17 refs.

**Key words:** traffic planning; bus scheduling; bus time; maximum synchronization; diversity; double-objective function

**Author resume:** BAI Hai-jian(1980-), male, lecturer, PhD, +86-551-2919161, baihaijian0000@163.com.

收稿日期:2012-12-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51178158);安徽省教育厅自然科学基金项目(KJ2012A220);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2011JC048)

作者简介:柏海舰(1980-),男,安徽青阳人,合肥工业大学讲师,工学博士,从事道路交规研究。

## 0 引 言

公交站点是线路的节点、线网的节点,也是公交时刻表中车次到发时刻的参照位置,因此,公交站点也成为多线路区域协调的关键位置。公交车辆在站点换乘协调的优化方法有很多,Rapp 等利用 4 阶段图形化交互工具使公交线网中的换乘延误达到最小,在运营费用的限制下,通过调整起始发车时刻,可以获得系统最优的时刻表,计算结果表明与现有的手工生成的时刻表相比,在不增加运营成本的情况下,优化时刻表降低了约 20% 的总换乘延误<sup>[1]</sup>;Kyte 等提出了一个基于主干线与客流集散中心的公交线网,通过确定整点发车间隔,以便于协调公交车辆在公交枢纽站点的协同次数<sup>[2]</sup>;Abkowitz 等研究了交会于同一站点的 2 条线路的案例,结果表明同步换乘与没有调度的换乘相比,在 4 种条件下都能够提供更高的服务水平<sup>[3]</sup>;Klemt 等以最小网络换乘等车时间为目标函数,建立了整数规划问题,通过建立线路图的规则,应用图形化和人机交互方式求解模型<sup>[4]</sup>;Voss 分析了协同调度的 2 个案例,并将其转化为规划问题,第 1 个案例类似于 Klemt 等提出的模型,即二次安排问题的松弛类型,第 2 个案例为第 1 个案例的修正,即公交系统中不同的线路有部分重复路径,并设计了禁忌搜索算法改进初始可行解<sup>[5]</sup>;Lee 等引入了 2 个模型优化轨道交通和公交线路之间换乘乘客的等待时间,第 1 个模型假定列车固定时刻到达,而公交车按概率函数到达,第 2 个模型假设列车和公交车均按概率函数到达,并采用换乘费用函数表示延迟时间、发车间隔、换乘客流量、乘客的时间价值、公交车运营费用及公交车到达的随机性,结果表明当到达时间的偏差标准超出一定水平时,线路之间的协调调度的综合收益将降低<sup>[6]</sup>;Desilets 等在 Klemt 等研究的基础上提出了广义费用最小化的优化目标,基于连续同步换乘的定义,并通过启发式算法来改进初始随机解<sup>[7]</sup>;Nelson 等在美国公交系统中应用了两车辆同时到站的优化模型,提出了几种不同换乘策略如简单的时间同步换乘和脉冲式客流条件下的同步换乘,并进一步研究了各种换乘条件下的控制方法<sup>[8]</sup>;Adamski 等在基于车辆随机运行的假设条件下,建立了单一换乘点的静态模型,以最小乘客负效用(等待时间函数)为目标函数计算最优时刻偏移量,并由此决定控制变量,如控制点的协同次数<sup>[9-10]</sup>;Maxwell 分析了干线与支线换乘的同步策略,同一地点

的换乘策略,固定间隔的同步换乘策略<sup>[11]</sup>;Becker 等提出了用于设计和实现基于多中心同步换乘网络结构的原则,为了改善网络结构的协同性,采用一些其他的调整措施,如在终点站连接线路与将支线连接到换乘中心等<sup>[12]</sup>;Ceder 等以两两同步到站最大化为目标建立了公交时刻的单层整数优化模型,并设计了有效的启发式求解算法应用在两线路同步和多线路同步的实例计算中<sup>[13-16]</sup>,但仍然只考虑了单时段内同步优化方法;石琴等在 Ceder 等研究的基础上,提出了基于车辆同时到站最大化的区域优化方法,并将 Ceder 提出的多线路两两协调扩展到多线路同时协调,扩大了区域协调的范围<sup>[17]</sup>,但研究是以单时段为研究对象,容易导致大间隔发车,同时到站次数最多和同时到站的不同车站数最小的双目标函数的自身也存在缺陷,算法容易陷入局部最优。

本文考虑到已有同步到站最大化目标函数的缺陷、公交时刻编制的时段差异性、公交站点车辆排队与车内拥挤等问题,提出了基于同步多样性的公交时刻优化方法。以同时到站次数最多和同时到站车辆数量最多为双目标函数,以末车定时、站点允许排队长度、服务质量与线路服务时间跨度为约束条件,设计了网络选点规则与网络同步规则下的启发式算法求解模型。

## 1 同步到站最大化双目标函数

### 1.1 同时到站次数最大化

根据线路数量的多少,可能存在不同线路的 2 辆车、3 辆车以及多辆车同时到站的情况。可将多辆车同时到站拆分为多个 2 辆车同时到站,同时到站次数最大化的目标函数为

$$\max A = \sum_{k=1}^{m_n-1} \sum_{l=1}^{R_k} \sum_{i=1}^{F_{kl}} \sum_{q=k+1}^{m_n} \sum_{p=1}^{R_q} \sum_{j=1}^{F_{qp}} \sum_{n=1}^N Z_{kliqpn} \quad (1)$$

$$Z_{kliqpn} = \max \left\{ 1 - |X_{ki} + T_{kln} - (X_{qj} + T_{qpn})|, 0 \right\}$$

式中: $A$  为同步到站次数总和; $Z_{kliqpn}$  为 0-1 决策变量,当第  $k$  条线路  $l$  时段的第  $i$  个车次与第  $q$  条线路  $p$  时段的第  $j$  个车次同时到达站点  $n$  时, $Z_{kliqpn}$  取 1,否则取 0; $F_{kl}$ 、 $F_{qp}$  分别为第  $k$ 、 $q$  条线路  $l$ 、 $p$  时段内的发车次数; $R_k$ 、 $R_q$  分别为第  $k$ 、 $q$  条线路的时段划分数量; $T_{kln}$ 、 $T_{qpn}$  分别为第  $k$ 、 $q$  条线路  $l$ 、 $p$  时段内从始发站点到站点  $n$  的平均行驶时间; $X_{ki}$ 、 $X_{qj}$  分别为第  $k$ 、 $q$  条线路  $l$ 、 $p$  时段内第  $i$ 、 $j$  个车次的发车时刻; $N$  为网络上的站点数量; $m_n$  为停靠站点  $n$  的

线路数量。

### 1.2 同时到站车辆数量最大化

同时到站车辆数量最大化即在同一站点,在不超过站点停靠能力的前提下,多辆车同时到达,而非仅仅两两车辆同时到达,可表述为网络上的任意站点同时到站车辆数量最大化与不同到达时刻数量最小化的等价转换关系,车辆轨迹见图 1~4。

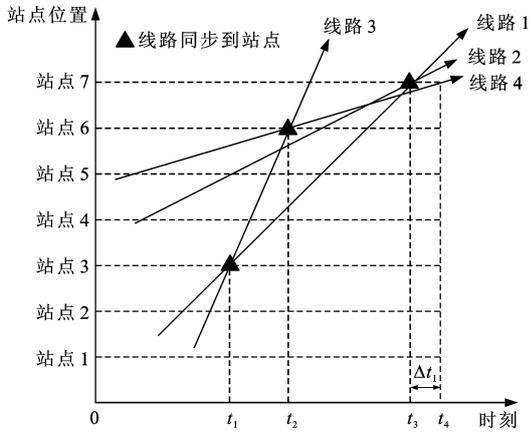


图 1 不同站点车辆同步前轨迹

Fig. 1 Bus trajectories at different stations before synchronization

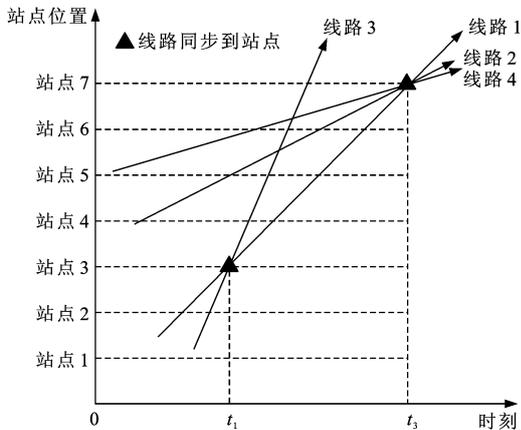


图 2 不同站点车辆同步后轨迹

Fig. 2 Bus trajectories at different stations after synchronization

图 1、2 分别为不同站点车辆同步前后时空轨迹,  $t_1 \sim t_3$  为同步时刻,  $t_4$  为线路 4 到达站点 7 的时刻。图 1 中线路 4 的车辆原本停靠站点 7,但并不与线路 1、2 的车辆同时到站,而是与线路 3 的车辆同步到达站点 6。线路 1~4 在站点 3、6、7 产生 3 个同步时刻  $t_1 \sim t_3$ ,总同步到站次数为 3,同时到站车辆数量最大为 2。考虑同时到站车辆数量最大化,将线路 4 的发车时刻前移  $\Delta t_1$ ,使得线路 4 在站点 7 与线路 1、2 同步,总同步到站次数为 4,同时到站车辆数量最大为 3,同步时刻减少为 2 个,分别为  $t_1$ 、 $t_3$ 。可见,在不同站点通过调整同步时刻,增加同时到站的车辆数量,将带来同时到站时刻数量的减少。

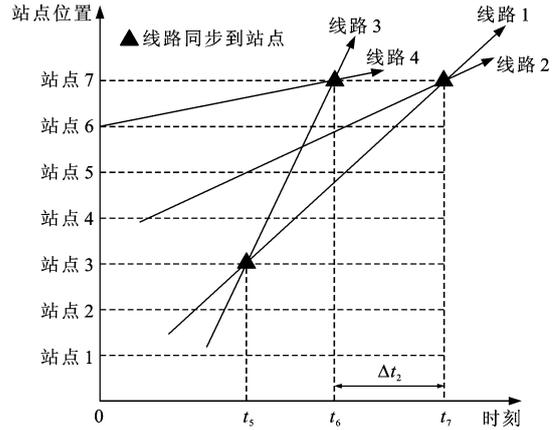


图 3 相同站点车辆同步前轨迹

Fig. 3 Bus trajectories at same stations before synchronization

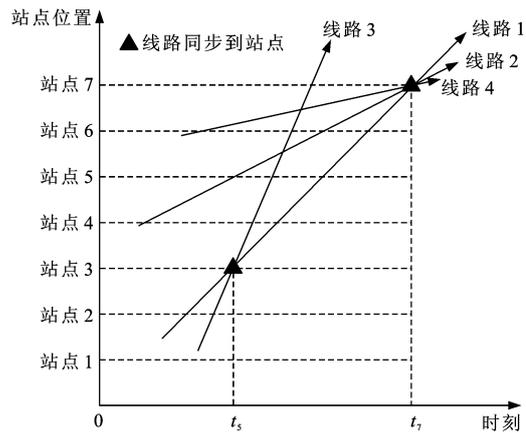


图 4 相同站点车辆同步后轨迹

Fig. 4 Bus trajectories at same stations after synchronization

图 3 中两两同步的 4 条线路分别在 2 个时刻到达站点 7,将线路 4 发车时刻后移  $\Delta t_2$  时间后的车辆时空轨迹图见图 4,前移后,3 条线路在站点 7 同时到站,获得 4 次同步和 2 个不同的同步时刻。在同一站点通过调整同步策略,增加同步到站车辆数量的同时减少了同时到站时刻的数量。综合上述 2 种情况,可将同步到站车辆数量最大化转化为不同到站时刻的数量最小化,则有

$$\min B = \sum_{k=1}^{m_n-1} \sum_{l=1}^{R_k} \sum_{i=1}^{F_{kl}} \sum_{q=k+1}^{m_n} \sum_{p=1}^{R_q} \sum_{j=1}^{F_{qp}} \sum_{n=1}^N U_{klijpn} + \sum_{n=1}^N F_{m_n} \quad (2)$$

$$U_{klijpn} = \min \{ |X_{kli} + T_{kln} - (X_{qpj} + T_{qpn})|, 1 \}$$

式中: $B$  为同步到站时刻数量的总和; $U_{klijpn}$  为 0-1 决策变量,当第  $k$  条线路  $l$  时段的第  $i$  个车次与第  $q$  条线路  $p$  时段的第  $j$  个车次到达站点  $n$  的时刻相等时, $U_{klijpn}$  取 0,否则取 1; $F_{m_n}$  为经过站点  $n$  的第  $m_n$  条线路的总车次。

线路编号按照总发车次数从小到大顺序编号为 1、2、...、 $m_n$ ，便于让发车次数少的线路在同步过程中最大化与其他线路同步到站的机会。第  $m_n$  条线路是最后一条线路，前  $m_n - 1$  条线路的所有车次中，如果某车次的到站时间与线路  $m_n$  的某车次到站时间一致，则该车次的  $U_{klijpn}$  取 0，而第  $m_n$  条线路同步车次的  $U_{klijpn}$  取 1，相当于保存了唯一的同步发车时刻，因此，第  $m_n$  条线路所有发车车次的到站时刻都是唯一的。

## 2 模型约束条件

### 2.1 末车定时

在编制车辆时刻时，考虑客流的时段变化虽然满足了客流的需求，但也增加了时刻编制优化的复杂性。在传统时刻编制方法中，一个时段内发车间隔通常为固定值，虽然通过渐变发车间隔的方法将时段剩余时间进行分解可保证相邻两辆车的发车间隔满足要求，但该方法只能用于单线调度。在多线路非均匀发车间隔的时刻编制过程中，容易产生大间隔发车问题。末车定时安排在每个时段的最后 1 个车次在时段结束时刻发车，而时段内的其他车次则以同步到站为目标优化发车时刻。

末车定时的发车方式实际上以牺牲了少量站点同步可能性为代价，来保证时段发车的协调。在不增加额外发车次数的情况下，避免在时段末出现剩余时间

$$X_{krF_{kr}} = t_{kr} \tag{3}$$

式中： $X_{krF_{kr}}$  为第  $k$  条线路  $r$  时段内第  $F_{kr}$  个车次(时段最后车次)的发车时刻； $t_{kr}$  为第  $k$  条线路  $r$  时段的结束时刻。

### 2.2 站点允许排队长度

公交站点的通行能力对公交车辆的运行效率有重要的影响。车辆同步到站最大化的目标潜在作用使得同时到站车辆数量有可能超过站点的停靠能力，尤其在线路较多的站点。控制同时到站的车辆数量，减少车辆排队进站的问题。由以上分析有

$$D_{nklqi} = \sum_{p=1}^{R_q} \sum_{j=1}^{F_{qp}} \max \left\{ 1 - | X_{kli} + T_{kln} - (X_{qpj} + T_{qpj}) |, 0 \right\} \tag{4}$$

$$Y_{nkli} = \sum_{q=k+1}^{m_n} D_{nklqi} + 1 \tag{5}$$

$$Y_{nkli} \leq C_n \tag{6}$$

式中： $D_{nklqi}$  为 0-1 决策变量，当第  $k$  条线路  $l$  时段的

第  $i$  个车次与线路  $q$  的全服务时段的任何一个车次同时到达站点  $n$  时， $D_{nklqi}$  取 1，否则取 0； $Y_{nkli}$  为与第  $k$  条线路  $l$  时段的第  $i$  个车次同时到站的所有车辆数量； $C_n$  为站点  $n$  的泊位数量或站点允许排队车辆数量。

### 2.3 服务质量

车内服务质量包括拥挤程度、噪音以及运营管理问题如配车数限制、企业规定等都会约束发车间隔的范围，因此，非均匀发车间隔的优化也必须保证发车间隔在一定范围内变化

$$I_{kr} \leq H_{kr} \leq O_{kr} \tag{7}$$

$$H_{kr} = \begin{cases} X_{kri} - X_{kr(i-1)} & r \text{ 时段内的相邻车次的发车间隔} \\ X_{kr1} - X_{k(r-1)F_{kr}} & r \text{ 时段首车次与 } r-1 \text{ 时段末车次的发车间隔} \end{cases}$$

式中： $H_{kr}$  为第  $k$  条线路  $r$  时段任意连续两辆车的发车间隔； $I_{kr}$ 、 $O_{kr}$  分别为第  $k$  条线路  $r$  时段允许的最小、最大发车间隔。

### 2.4 线路服务时间跨度

为了避免乘客过久地等待首班车，首班车发车时刻与服务跨度开始时刻的差值应尽可能小，但最大不能超过该时段允许的最小发车间隔

$$X_{k11} \leq I_{k1} \tag{8}$$

式中： $X_{k11}$  为第  $k$  条线路第 1 个时段的第 1 个车次的发车时刻； $I_{k1}$  为第  $k$  条线路第 1 时段的允许的最小发车间隔。

## 3 算法设计

在式(1)中，每 2 条线路的车辆同时到达同一个站点，只产生 1 个同步变量；而式(2)只影响同步站点和同步时刻的选择策略，不产生额外的变量，因此，模型可转变为混合整数的线性规划问题。本文设计了一套启发式算法，算法流程见图 5，通过双重规则建立网络同步搜索路径，简化算法的同时获取近似全局最优解。

网络选点规则为确定站点同步的先后顺序，网络同步规则为确定选定站点内线路的同步时刻。首先根据时段发车间隔、发车车次、首末车辆发车时刻的要求，建立所有车次发车时刻的可能范围；然后通过选点规则和同步规则的搜索，确定同步站点、同步车辆数量、同步时刻、同步线路以及同步车次；再以确定的同步车次为基准，在发车间隔的要求下，更新并缩小所有未定车次发车时刻的可能范围。通过两重规则的反复循环，最终确定线路所有车次的发车

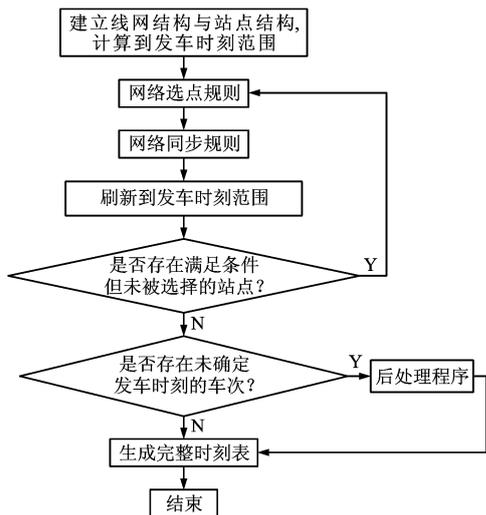


图 5 算法流程

Fig. 5 Algorithm flow

时刻。后处理程序的对象是经过两重规则仍未确定发车时刻的车次,一般较少,可采用传统的处理方法进行处理。

### 3.1 到发车时刻范围的计算方法

基于上文的 4 个约束条件,可计算所有车次的发车时刻范围,计算方法如下。

Step 1:以服务跨度的起终点时刻作为时间范围的上下极限边界,最后车次的发车时刻安排在时段结束的时刻。

Step 2:根据约束条件 4 确定服务跨度内第 1 时段的第 1 个车次的发车时刻范围。

Step 3:分别以各个时段最后车次的发车时刻为起点,根据发车间隔的变化范围(约束条件 3)反推各个时段其他车次的发车时刻范围。

Step 4:以首车发车时刻为起点,根据发车间隔的变化范围,顺推第 1 时段内其他车次的发车时刻。

Step 5:根据 Steps 3、4 的结果确定第 1 时段各车次的发车时刻范围,根据 Step 3 的结果确定其他时段的车时刻范围。

Step 6:根据站点间行程时间计算车辆到达选定站点的到站时刻范围。

### 3.2 网络选点规则

以最大化同步机会为原则建立网络选点规则,确定同步站点的先后顺序。

Step 1:将网络上所有站点按照站点允许的排队长度进行分类,第 1 次选择时,选择站点泊位数量最多或允许排队长度最长的站点作为备选对象。

Step 2:在 Step 1 选定的备选对象中,选择包含待定车次线路最多的站点作为同步站点。

Step 3:若 Step 2 确定的不是唯一站点,则选择停靠线路待定车次数量差值最小的站点作为同步站点。

Step 4:若由 Step 3 的结果仍不能确定唯一站点,则在 Step 3 的结果中,选择站点总客流量最大的站点作为同步站点。

Step 5:若由 Step 4 的结果仍不能确定唯一站点,则表明备选站点同步重要度差别很小,可在 Step 4 的结果中任意选择一个站点,选择前提为对网络优化无显著影响。

### 3.3 网络同步规则

在选定同步站点后即可在站点内部搜索同步车次,基本步骤如下。

Step 1:选择车次的顺序。线路编号是由线路总发车次数的大小确定,线路按编号从小到大与从左到右排列,线路车次按从早到晚、从上到下的顺序排列,选择车次的顺序为先由上至下,后由左至右。

Step 2:确定同步车次。在网络同步规则中,每次同步搜索的车辆数量都与网络选点规则 Step 1 确定的允许排队长度相同。若搜索到的同步车次大于允许的排队长度,则以允许排队长度为同步车辆数量,优先选择线路编号较小的线路作为同步车次。

Step 3:确定同步时刻。若 2 个车次发生同步,2 个车次的发车时刻范围存在交集,因此,取交集的下限值作为同步时刻。该取法可以最大化待定车次的发车时刻范围,进而增大待定车次的同步可能性。当搜索到一次同步,则以同步时刻为基准更新本时段内的所有待定车次的发车时刻范围。

Step 4:每次同步搜索结束后,该站点所有线路只存在小于允许排队长度的同步车次,因此,修改该站点的允许排队长度(减 1),返回网络选点规则。

## 4 计算结果分析

为了便于比较,选择文献[14]的同类模型的实例网络(图 6)进行时刻优化,文献[14]中的方法为现有的常规公交调度方法。图 6 中包含 2 条线路和

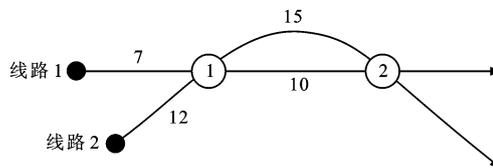


图 6 公交网络结构

Fig. 6 Bus network structure

2个站点,线路1、2都经过站点1、2,单向运行,弧(线)段上的数字为站间行程时间(单位为min),发车时刻限定在0~30min内,所有车次均按分钟整点发车,线路参数与站点参数分别为见表1、2。求解模型的计算步骤如下。

表1 线路参数

Tab. 1 Line parameters

线路编号	服务起点时刻/min	服务终点时刻/min	发车间隔下限/min	发车间隔上限/min	发车次数
1	0	30	5	15	4
2	0	30	8	20	3

表2 站点参数

Tab. 2 Station parameters

站点编号	泊位数量	停靠线路数量	总经过车次	最大发车次数	最小发车次数	总客流量/人次
1	2	2	7	4	3	250
2	2	2	7	4	3	200

Step 1:选择优先同步站点。2个站点车位数量为2veh,即最大允许排队长度为2veh。当Steps 1、2、3都无法确定站点时,则根据Step 4选择站点1作为第1个同步点。

Step 2:计算所有线路在站点1发车与到达站点1的时刻范围,结果见表3。

表3 站点1的时刻范围

Tab. 3 Time ranges of station 1 min

线路1			线路2		
车次	发车时刻	到站时刻	车次	发车时刻	到站时刻
1	0~5	7~12	1	0~8	12~20
2	5~20	12~27	2	10~22	22~34
3	15~25	22~32	3	30	42
4	30	37			

Step 3:选择同步车次。首先选择线路1的第1个车次,在线路2中搜寻同步车次得到线路2的第1个车次为同步车次,到站时刻的交集为第12min,由此反推线路1、2的发车时刻分别为第5、0min。

Step 4:更新到站点1的2条线路到发车时刻范围,结果见表4。

表4 第1次更新后站点1的时刻范围

Tab. 4 Time ranges of station 1 after 1st rectification min

线路1			线路2		
车次	发车时刻	到站时刻	车次	发车时刻	到站时刻
1	5	12	1	0	12
2	10~20	17~27	2	10~20	22~32
3	15~25	22~32	3	30	42
4	30	37			

Step 5:继续选择线路1的第2个车次,搜寻同步车次得到线路2的第2个车次,2个同步车次到站时刻的交集范围为第22~27min,取最小值(第22min)作为同步时刻。重复Step 4,第2次更新站点1的到发车时刻范围,结果见表5。

表5 第2次更新后站点1的时刻范围

Tab. 5 Time ranges of station 1 after 2nd rectification min

线路1			线路2		
车次	发车时刻	到站时刻	车次	发车时刻	到站时刻
1	5	12	1	0	12
2	15	22	2	10	22
3	20~25	27~32	3	30	42
4	30	37			

Step 6:选择线路1的第3个车次搜寻同步车次,未搜索到同步车次;线路1的第4个车次也未搜索到同步车次,站点1的同步搜索完毕。

Step 7:由于存在未被选择的站点,因此,计算站点2所有线路发车和到达的时刻范围,结果见表6。

表6 站点2的时刻范围

Tab. 6 Time ranges of station 2 min

线路1			线路2		
车次	发车时刻	到站时刻	车次	发车时刻	到站时刻
1	5	22	1	0	27
2	15	32	2	10	37
3	20~25	37~42	3	30	57
4	30	47			

Step 8:选择同步车次。由于线路1的第3个车次未确定发车时刻,在线路2中搜索其同步车次为第2个车次,2个车次到站时刻范围交集为第37min,因此,确定线路1第3个车次的发车时刻为第20min,更新站点2的到发时刻范围结果,见表7。

表7 更新后站点2的时刻范围

Tab. 7 Time ranges of station 2 after rectification min

线路1			线路2		
车次	发车时刻	到站时刻	车次	发车时刻	到站时刻
1	5	22	1	0	27
2	15	32	2	10	37
3	20	37	3	30	57
4	30	47			

利用本文方法计算线路1、2的同步到站次数,结果见表8,现有方法的相关计算结果见表9。利用本文方法,在站点1、2进行了3次同步,得到线路1的发车时刻分别在第5、15、20、30min,线路2的发车时刻分别在第0、10、30min。利用现有方法<sup>[14]</sup>,

表 8 本文方法计算结果

Tab. 8 Calculation result of proposed method

线路 1 发车时刻/min	线路 2 发车时刻/min	在站点 1 的同步时刻/min	在站点 2 的同步时刻/min	总同步次数
5	0	12		3
15	10	22		
20	30		37	
30				

表 9 现有方法计算结果

Tab. 9 Calculation result of existing method

线路 1 发车时刻/min	线路 2 发车时刻/min	在站点 1 的同步时刻/min	在站点 2 的同步时刻/min	总同步次数
5	0	12		4
13	8	20		
21	16	28		
26			43	

在站点 1、2 进行了 4 次同步,得到线路的发车时刻分别为第 5、13、21、26 min,线路 2 的发车时刻分别为第 0、8、16 min。本文方法虽然比现有方法少了 1 次同步,但使得发车时刻完全分布于时段内,且获得了非均匀化的发车间隔,是同步的多样性表征。在现有方法中,线路 1、2 在时段末分别产生了 4、14 min 的剩余时间,在多时段条件下剩余时间容易在时段过渡期间的产生大间隔发车问题,且以 8 min 为发车间隔,迫使所有线路和同步时刻优先在一个站点同步,网络同步过于集中。

## 5 结 语

本文建立了基于同步多样性的公交时刻优化方法,在公交网络上实现了多站点、多线路、多时段、多目标的同步到站协调,不仅完善了同步到站最大化的思想内涵,也通过约束条件的补充和求解算法的改进,进一步弥补了同类方法在大间隔发车、站点拥堵、易局部最优等问题上的不足。本文方法中,公交车辆站间行驶时间为给定常数,与实际车辆运行规律有一定的差异,影响车辆到达时刻范围的计算,因此,有必要在进一步研究中引入行程时间的变化特征。

### 参 考 文 献 :

#### References :

[ 1 ] RAPP M H, GEHNER C D. Transfer optimization in an interactive graphic system for transit planning[J]. Transportation Research Record, 1976(619): 27-33.  
 [ 2 ] KYTE M, STANLEY K, GLEASON E. Planning, implementing, and evaluating a timed-transfer system in Portland, Oregon[J]. Transportation Research Record, 1982(877):

23-29.  
 [ 3 ] ABKOWITZ M, JOSEF R, TOZZI J, et al. Operational feasibility of timed transfer in transit systems[J]. Journal of Transportation Engineering, 1987, 113(2): 168-177.  
 [ 4 ] KLEMT W D, STEMME W. Schedule synchronization for public transit networks[J]. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, 1988(308): 327-335.  
 [ 5 ] VOSS S. Network design formulations in schedule synchronization[J]. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, 1992(386): 137-152.  
 [ 6 ] LEE K, SCHONFELD P. Optimal slack time for timed transfers at a transit terminal[J]. Journal of Advanced Transportation, 1991, 25(3): 281-308.  
 [ 7 ] DESILETS A, ROUSSEAU J M. SYNCHRO: a computer-assisted tool for the synchronization of transfers in public transit networks[J]. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, 1992(386): 153-166.  
 [ 8 ] NELSON M, BRAND D, MANDEL M. Use and consequences of timed-transfers on US transit properties[J]. Transportation Research Record, 1981(798): 50-55.  
 [ 9 ] ADAMSKI A. Transfer optimization in public transport[J]. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, 1995(430): 23-38.  
 [10] ADAMSKI A, CHMIEL W. Optimal service synchronization in public transport[C]//IEEE. Proceedings of the 45th Annual Conference of the ORSNE. Wellington: IEEE, 2010: 140-149.  
 [11] MAXWELL R R. Intercity rail fixed-interval, timed-transfer, multihub system; applicability of the "integraler taktfahrplan" strategy to North America[J]. Transportation Research Record, 1999(1691): 1-11.  
 [12] BECKER A J, SPIELBERG F. Implementation of a timed transfer network at Norfolk, Virginia[J]. Transportation Research Record, 1999(1666): 3-13.  
 [13] CEDER A. Bus timetables with even passenger loads as opposed to even headways [J]. Transportation Research Record, 2001(1760): 3-9.  
 [14] CEDER A, GOLANY B, TAL O. Creating bus timetables with maximal synchronization[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2001, 35(10): 913-928.  
 [15] CEDER A, STERN H I. Deficit function bus scheduling with deadheading trip insertions for fleet size reduction[J]. Transportation Science, 1981, 15(4): 338-363.  
 [16] CEDER A, TAL O. Designing synchronization into bus timetables[J]. Transportation Research Record, 2001(1760): 28-33.  
 [17] 石 琴,覃运梅,黄志鹏. 公交区域调度的最大同步换乘模型[J]. 中国公路学报, 2007, 20(6): 90-94.  
 SHI Qin, QIN Yun-mei, HUANG Zhi-peng. Maximal synchronous transfer model of bus regional dispatching[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(6): 90-94. (in Chinese)