

# 基于发车时刻表的单线公交组合调度模型

王 洋 沈记全

(河南理工大学计算机科学与技术学院 焦作 454003)

**摘 要** 针对目前全程车和大站快车的单线公交组合调度模型中对乘客的分类及滞站乘客乘车处理方法的不足,分3个步骤对模型进行了补充:首先,系统地探讨了乘客的构成及转化关系,并基于滞站乘客等车数、滞站原因及目的站距离提出一种处理滞站乘客乘车的方法,并以此方法计算滞站乘客等车的时间成本;其次,通过发车车型、模式和间隔的变量组合构建发车时刻表,进而以此表的信息为基础推算运营时刻表的各项变量,从而计算出公交服务各项指标及乘客和车辆的相关成本;最后,根据问题特征,应用最大最小蚁群系统算法求解模型。结合实例,对比分析了给定配车数和限定时间段内4种调度策略的发车时刻表最优解及相应最优解的公交服务指标和相关成本。实验结果表明,采用间隔不定的组合调度策略能够使车辆均衡分配站点客流,最大限度地降低乘客的时间成本及车辆耗燃成本。

**关键词** 组合调度,大站快车,蚁群算法,发车时刻表,发车间隔

**中图分类号** TP301.6,U121 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.10.049

## Single Line Transit Mixed Scheduling Model Based on Vehicle Departure Timetable

WANG Yang SHEN Ji-quan

(College of Computer Science and Technology, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

**Abstract** Aiming at the shortage of the classification of passengers and handling method of stranded passengers in the single line transit mixed model with express bus, this paper supplemented the model by three steps. Firstly, the composition and transformation of the passengers were systematically discussed, meanwhile, a method based on the bus quantity of stranded passenger waiting for, stranded reason and the distance of destination station was put forward to deal with the stranded passenger distribution, and the time cost of the stranded passengers was calculated by this method. Secondly, the departure timetable was established with the combination of three variables-vehicle type, departure mode and headway, and then the variables of operating timetable were calculated based on this departure timetable information, and next the bus services indicators, passenger and vehicle related costs were also calculated. Finally, according to the characteristics of the problem, the max-min ant colony system algorithm was used to solve the model. With a given number of vehicles and a period of time, a comparative experiment was taken to analyze the optimal timetable solution of four scheduling strategies and its corresponding optimal solution's bus service levels and total system cost. The experimental results demonstrate that the proposed model balances the passenger flow, and minimizes the cost of passenger time and vehicle fuel consumption.

**Keywords** Combination scheduling, Express bus, Ant colony algorithm, Departure timetable, Departure interval

## 1 引言

全程车、区间车和大站快车两两组合或全组合的调度策略是当前常规公交单线组合调度研究领域的主要内容,其主要目的是缓解传统单一调度策略对站点客流分配不均的现象<sup>[1-2]</sup>。

国内外许多专家学者对公交组合调度进行了研究, Ceder<sup>[3]</sup>在公交全程车运营的基础上,对采取组合调度的运营模式进行了初步的探索; Aichong<sup>[4]</sup>对公交车辆跳站运营进行了研究; Mekkaoui<sup>[5]</sup>以公交车辆发车时刻表为优化对象和实现

手段,对发车频率进行了研究;杨兆升<sup>[6]</sup>基于公交站点客流集散量,对大站快车停靠站进行了研究;魏明<sup>[1]</sup>在限定配车数的情况下,考虑滞站乘客等现实约束因素,提出了一种全程车和大站快车公交组合调度模型;明洁<sup>[2]</sup>考虑了公交车辆串车运行的问题,建立了发车间隔不定的多种形式的组合调度模型。

分析上述内容可得:1)公交组合调度研究一般兼顾乘客和公交公司的利益,结合一定条件建立基于发车频率或间隔的模型。2)基于发车频率的模型研究较多,主要研究思路有两种。一种是采用某种方法先确定区间车或大站快车的停靠站点,再根据客流需求分别计算各种车辆模式的发车频率;另

到稿日期:2016-09-21 返修日期:2016-12-23 本文受河南省基础与前沿研究项目(152300410212)资助。

王 洋(1988-),男,硕士生,主要研究方向为智能信息处理;沈记全(1969-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为智能交通、智能网络与网格、智能信息系统、计算机控制技术、企业应用系统集成, E-mail: sjq@hpu.edu.cn(通信作者)。

一种是将它们的停靠站点作为变量,探讨不同停靠站点和它们的发车频率在时空上分配客流的效果<sup>[1]</sup>。基于发车间隔的模型研究较少,主要思路是将发车间隔作为变量,通过不同发车模式和间隔的变量组合,探讨它们在时空上分配站点客流的效果。3)根据线路客流在时空分布的具体特征选择相应的组合调度策略。在线路站点客流平峰时段主要采用区间车和全程车组合调度,以最小化公交运营成本;在线路站点客流高峰时段主要采用大站快车和全程车的组合调度策略,以提高公交整体服务水平。4)已有文献仅仅计算了滞站人数或者简单用滞站人数乘以相应的滞站时间来得到其等车时间,未有学者对组合调度滞站乘客的分类及其乘车处理做深入研究。

本文针对目前全程车和大站快车的组合调度模型中对乘客的分类和对滞站乘客乘车处理的不足,系统地讨论了乘客的构成及转化关系,提出了一种根据滞站乘客等车数、滞站原因和目的站距离依优先级大小来处理滞站乘客乘车的方法;并以此方法计算本文模型中滞站乘客的等车时间成本,分析了车辆消耗燃料所提供的动力构成,以乘客时间成本和车辆耗燃成本构成的系统总成本最优为目标建立一种发车间隔不定的全程车和大站快车组合调度模型。为了计算系统总成本和公交服务的相关指标,首先以发车车型、模式和间隔的变量来组合构建组合调度发车时刻表,然后以此发车时刻表信息为基础推算运营时刻表中的各项变量,最后以运营时刻表信息为基础计算公交服务的各项指标及乘客和车辆的相关成本。根据问题特征,应用最大最小蚁群系统算法对模型进行求解。结合实例的线路客流特征,分析了4种调度策略的发车间隔分布规律,从公交服务和系统相关成本两方面的评价指标对比分析了这4种调度策略的调度效果,进而对本文模型的有效性进行了验证。

## 2 相关概念

### 2.1 公交车辆运行模式

公交车辆的运行模式有两种:跨线变站点运行模式和定线定站点运行模式<sup>[7]</sup>。而定线定站点运行模式又分3种:全程车、区间车和大站快车<sup>[2]</sup>。全程车指车辆沿线每站都停靠的运行模式,是目前常规公交最基本也最常用的运行模式;区间车指沿线停靠部分连续站点的运行模式;大站快车指只停

靠乘客集散量较大的站点的运行模式。

### 2.2 组合调度车辆发车时刻表

由于公交企业车型增多以及组合调度运营模式的出现,单一的发车时刻表已不适用于组合调度发车时刻表的编制,因此本文以发车车型、模式和间隔的变量组合作为车辆节点和发车时刻表的基本元素,从而更好地记录单一或组合调度的发车方案,并反映发车属性。

### 2.3 线路运营时刻表

公交线路运营时刻表的信息以发车时刻表的信息为推算始点,然后不断以前站的信息来推算本站的某些信息,它是公交公司调整调度策略、提升服务的重要数据来源。参考文献<sup>[1]</sup>,本文的运营时刻表需要统计每辆车到达每个站点的14个变量,依次为:车辆到站时间、新到站乘客矩阵、不靠站固定滞站乘客矩阵、靠站固定滞站乘客矩阵、待上车乘客矩阵、允许上车人数、上车乘客矩阵、因车满滞站乘客矩阵、上车乘客人数、下车乘客人数、停站时间、离站时间、路段客流量、满载率。上述矩阵变量都是 $1 \times n$ (线路单向站点数)阶的矩阵,为了统一变量类型,将单个变量处理成 $1 \times 1$ 阶的矩阵。上述涉及到的几个矩阵均指某个时刻车辆经过某站时,根据来车模式和车辆是否停靠站而产生的记录了相应原因的乘客欲往各目的站的相应人数的矩阵。

### 2.4 发车时刻表和运营时刻表的变量关系

本文假设所有车辆从首站发车,设定车辆在首站的到站时间为车辆的发车时刻,而车辆的发车时刻与客流产生的初始时刻和各车发车间隔有关;除首站外,车辆到站时间与前站离站时间、路段距离和行驶速度有关。车辆在某站的离站时间与车辆到站时间和停站时间有关,而车辆的停站时间与上车乘客人数和人均上车时间有关。某车经过某站时,从客流产生初始时刻到此车经过此站时刻的时间内,此站台客源由3部分构成:相邻前后车到站时间间隔内新到站乘客、通过前各车已上车乘客、前各车滞站乘客。站台等车乘客由滞站乘客和新到站乘客构成,他们根据来车发车模式、车辆是否停靠此站变为新的根据不同滞站原因产生的滞站乘客和待上车乘客,而待上车乘客根据来车在此站允许上车的人数变为上车乘客和因车满滞站乘客,该过程依据车辆到站时刻循环更新。发车时刻表和运营时刻表的变量关系如图1所示。

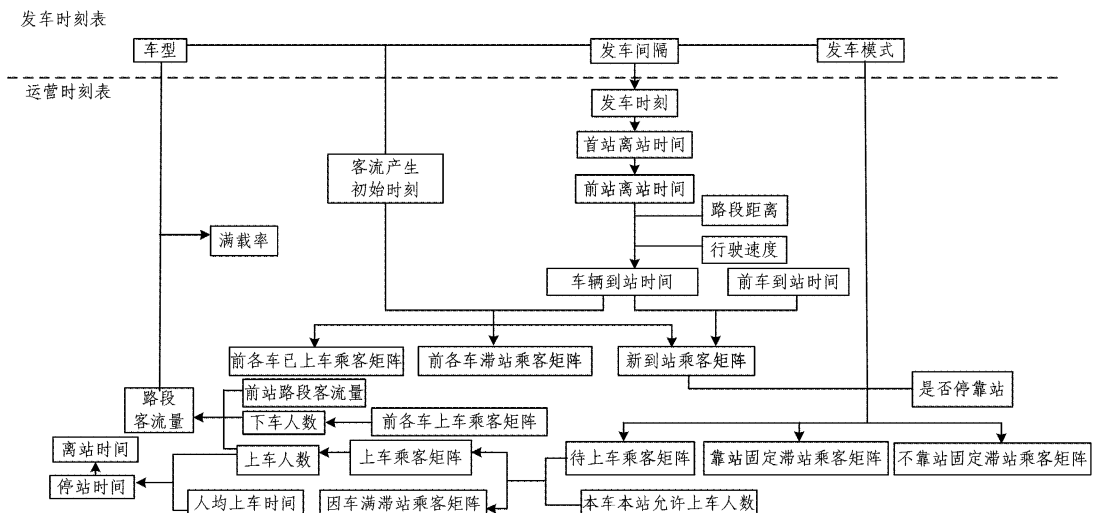


图1 发车时刻表和运营时刻表的变量关系图

2.5 三步优先级处理滞站乘客乘车的方法

本文根据车辆到站时允许上车的人数,先处理前各车滞站乘客,后处理由新到站乘客转化而来的待上车乘客,且假设研究时段内第一辆车在每站与前时段最后一辆车的到站时间间隔为第一辆车的发车时间间隔,且第一辆车在每站的前各车滞站乘客数为零。对于上车乘客,从待上车乘客矩阵中随机选取相应人数构成上车乘客矩阵,余下的构成因车满滞站乘客矩阵;对于滞站乘客乘车,基于滞站乘客等车数、滞站原因和目的站距离分 3 步依优先级大小进行。当车辆靠站时,处理滞站乘客乘车的具体步骤如下:

第 1 步 标记滞站乘客等车数。运营时刻表中某车在某站的 3 种滞站乘客是当时新到站乘客根据相应原因转化而来的,因此站台上滞站的乘客为运营时刻表中前各车 3 种滞站乘客矩阵的总和。某车到某站时,以此车为计数起点并标号,向前判断前车的 3 种滞站乘客矩阵是否全为零,若否,则标号累加后继续向前循环判断和标号;若是,则结束计数标号过程。标号即为相关车辆滞站乘客的等车数,等车数越大,处理优先级越高。对于同一站点,滞留乘客的等车数是不同的。

第 2 步 按照不靠站固定滞站乘客、靠站固定滞站乘客和因车满滞站乘客的滞站原因优先级由小到大的顺序处理同一等车数的滞站乘客相应矩阵。

第 3 步 根据靠站车辆的允许上车人数和滞站乘客的目的站距离减少第二步中相关矩阵的相应人数直至为零。该步骤的优先级由站点序号确定,目的站距离越远,站点序号越大,优先级越高。

处理滞站乘客乘车的原则是按照等车数优先级大小依次处理,在同一等车数优先级中根据滞站原因优先级大小依次处理,在同一滞站原因优先级中根据目的站序号做最终处理。

3 单线公交组合调度模型

3.1 基本假设

- (1)一种车型的车辆对应一种车辆容量规格;
- (2)所有车辆都从首站开始发车;
- (3)研究时段内,相对于每个站台的客源,乘客到站服从均匀分布;
- (4)乘客始终选择乘坐常规公交出行且乘车不受个人偏好的影响,即乘客始终选择未满载且能够到达目的站的车辆,无论该车辆采用何种发车模式;
- (5)所有车辆在水平路面且无风的状态下匀速行驶;
- (6)车辆到达站台之后,将怠速时到达站台的乘客计算到下一辆车中;
- (7)已获得研究时段的公交 OD 信息。

3.2 符号、参数定义与参数关系的说明

3.2.1 组合调度车辆发车时刻表

定义  $H_i(C, A, \Delta T)$  为第  $i(i=1, 2, 3 \dots)$  辆车的节点,车辆节点元素  $C, A$  和  $\Delta T$  分别表示车型、发车模式和发车间隔,车辆节点作为发车时刻表的基本元素,则发车时刻表为  $H_s = \{H_i(C, A, \Delta T) | 1 \leq i \leq o\}$ 。其中,  $o$  为不同车型的配车总数;  $C = \{c_i' | 1 \leq i' \leq k\}$ ,  $k$  为车型数;  $A = \{a_i'' | 1 \leq i'' \leq 2\}$ ,  $a_1$  为全程车,  $a_2$  为大站快车;  $\Delta T = [s, e] \in Z$ ,  $s, e$  分别为发车间隔的

最小和最大值。第  $i$  辆车的发车时刻  $T_i = T_0 + \sum_{i'=1}^i H_{i'}(\Delta T)$ ,  $T_0$  为产生客流的初始时刻。不同车辆节点组合得到不同的发车时刻表。

3.2.2 线路运营时刻表

定义符号  $J_{i,j}^x(y)$  为线路运营时刻表中第  $i(1 \leq i \leq o)$  辆车在第  $j(1 \leq j \leq n)$  站第  $x(1 \leq x \leq 14)$  个矩阵第  $y(1 \leq y \leq n)$  列的值。考虑到大站快车超车的情况,以发车序列作为一个整体,内部依据某个站“先到站先计算”和对于所有站“一站一算”的原则,参照 2.4 节,计算各变量的关系如下:

$$J_{i,j}^1(1) = \begin{cases} T_i, & j=1 \\ J_{i,j-1}^{12}(1) + d_{j-1,j}/v, & j \geq 2 \end{cases} \quad (1)$$

$$J_{i,j}^2(y) = \begin{cases} \lambda_{i,j}(J_{i,j}^1(1)) - \lambda_{i,j}(J_{i,j}^1(1) - T_i), & i=1 \\ \lambda_{i,j}(J_{i,j}^1(1)) - \lambda_{i-1,j}(J_{i-1,j}^1(1)), & i \geq 2 \end{cases} \quad (2)$$

$$J_{i,j}^3(y) = \begin{cases} J_{i,j}^2(y), & i=1 \\ J_{i,j}^2(y) + \sum_{i'=1}^{i-1} \sum_{x=3}^{4+8} J_{i',j}^x(y), & i \geq 2 \end{cases} \quad (3)$$

$$J_{i,j}^4(y) = J_{i,j}^2(y) I'_{ij} \quad (4)$$

$$J_{i,j}^5(y) = J_{i,j}^2(y) I_{ij} \quad (5)$$

$$J_{i,j}^6(1) = \begin{cases} H_i(C), & j=1 \\ H_i(C) - J_{i,j-1}^{13}(1) + J_{i,j}^{10}(1), & j \geq 2 \end{cases} \quad (6)$$

$$J_{i,j}^7(y) = \begin{cases} J_{i,j}^5(y), & \sum_{y=1}^n J_{i,j}^5(y) - J_{i,j}^6(1) \leq 0 \\ J_{i,j}^7(y'), & \sum_{y=1}^n J_{i,j}^5(y) - J_{i,j}^6(1) > 0, \sum_{y'=j+1}^n J_{i,j}^7(y') = J_{i,j}^6(1) \end{cases} \quad (7)$$

$$J_{i,j}^8(y) = J_{i,j}^5(y) - J_{i,j}^7(y) \quad (8)$$

$$J_{i,j}^9(1) = \sum_{y=1}^n J_{i,j}^7(y) \quad (9)$$

$$J_{i,j}^{10}(1) = \sum_{j'=1}^{j-1} J_{i,j'}^7(j) \quad (10)$$

$$J_{i,j}^{11}(1) = J_{i,j}^9(1) \sigma \quad (11)$$

$$J_{i,j}^{12}(1) = J_{i,j}^1(1) + J_{i,j}^{11}(1) \quad (12)$$

$$J_{i,j}^{13}(1) = \begin{cases} J_{i,j}^9(1), & j=1 \\ J_{i,j-1}^{13}(1) + J_{i,j}^9(1) - J_{i,j}^{10}(1), & j \geq 2 \end{cases} \quad (13)$$

$$J_{i,j}^{14}(1) = J_{i,j}^{13}(1) / H_i(C) \quad (14)$$

其中,  $v$  为车辆平均速度;  $d_{j-1,j}$  为  $j-1$  站到  $j$  站的距离;  $H_i(C)$  为第  $i$  辆车的车型;  $\lambda_{i,j}(t)$  表示第  $i$  辆车在  $t$  时刻到达  $j$  站时,  $j$  站客流从初始时刻到  $t$  时刻产生的欲往各目的站的相应人数矩阵;  $I_{ij}$  为第  $i$  辆车与  $j$  站的停靠关系,值为 0 或 1, 0 和 1 分别表示不停车和停车;  $I'_{ij}$  表示对矩阵元素取反, 0 取 1, 1 取 0;  $\sigma$  表示人均上车时间。式(3)表示不靠站固定滞站乘客,若车辆停靠此站,则此矩阵全为零;若不停靠此站,则当车辆为研究时段内第一辆车时,与新到站乘客矩阵相同,除第一辆车外,为新到站乘客矩阵和前车各种滞站乘客矩阵总和;式(7)表示上车乘客矩阵,当待上车乘客人数小于某车在某站允许上车的人数时,上车乘客矩阵和待上车乘客矩阵相同,否则,根据某车在某站允许上车的人数从待上车乘客矩阵中随机选取相应人数;式(13)表示路段客流量,即第  $i$  辆车在  $j$  与  $j+1$  站间运行时车厢内的乘客人数,当车辆在首站时即为上

车人数,除首站外,为前站路段客流量加上本站上车人数再减去本站下车人数。

### 3.3 数学模型的建立

本文模型参考文献[1-2],综合考虑新到站乘客等车时间成本  $f_1$ ,滞站乘客等车时间成本  $f_2$ 、已上车乘客在车时间成本  $f_3$  和公交公司运营耗燃成本  $f_4$ ,以它们的系统总成本  $f$  最小为目标,建立发车间隔不定的全程车和大站快车组合调度模型,如式(15)所示。

$$\min f = \min f_1 + f_2 + f_3 + f_4 \tag{15}$$

#### 3.3.1 乘客乘公交的出行时间成本

乘客乘公交的出行时间成本主要包括  $f_1, f_2$  和  $f_3$ ,其计算方法分别如式(16)一式(18)所示。

$$f_1 = \mu \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{1}{2} (J_{i,j}^1(1) - J_{i-1,j}^1(1)) J_{i,j}^2(1) \tag{16}$$

$$f_2 = \mu' \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{d=1}^d S_{i,j}^d (J_{i,j}^1(1) - J_{i-d+1,j}^1(1)) \tag{17}$$

$$f_3 = \mu'' \sum_{i=1}^n \sum_{j=2}^n \sum_{j'=1}^{j-1} J_{i,j'}^1(j) (J_{i,j}^1(1) - J_{i,j'}^2(1)) \tag{18}$$

式(16)中,根据假设(3),新到站乘客的等车时间为相邻两车到站时间间隔的一半<sup>[8]</sup>,因此新到站乘客人数乘以平均等车时间即为新到站乘客的等车时间成本;由于滞站乘客都是由新到站乘客转化而来的,因此滞站乘客作为新到站乘客身份时的等车时间已经计算过,故滞站乘客的等车时间指使乘客成为滞站乘客身份的那辆车的到站时间和滞站乘客上车的那辆车的到站时间之差。式(17)中, $d$ 表示等车数, $i-d+1$ 表示第*i*辆车到站时,使滞站乘客的等车数为*d*的相对于此站相应车辆的到站顺序标号; $S_{i,j}^d$ 表示第*i*辆车在第*j*站时,根据第2.5节中处理滞站乘客的方法,处理等车数为*d*的滞站乘客乘车的人数。式(18)中,通过第*i*辆车从某站上车到*j*站下车的乘客人数为 $J_{i,j'}^1(j)$ ,乘以从上车到下车的时间 $J_{i,j}^1(1) - J_{i,j'}^2(1)$ ,即为乘客在车时间。上述各式中,参数 $\mu, \mu'$ 和 $\mu''$ 分别表示相对应时间阶段的乘客单位时间成本,在不同的时间阶段的取值不同。

#### 3.3.2 公交车辆运营耗燃成本

结合本文研究的组合调度车辆的运行模式特点,主要研究公交车辆的运营耗燃成本,如式(19)所示。

$$f_4 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n-1} p_g (Q_{i,j}^0 J_{i,j}^1(1) / 10^3 + Q_{i,j+1}^1 d_{j,j+1} / 10^5) \tag{19}$$

其中, $p_g$ 为单位质量的燃料价格(元/kg); $Q_{i,j}^0$ 为第*i*辆车在*j*站怠速候客时发动机单位时间消耗燃料的质量(g/s); $Q_{i,j+1}^1$ 为第*i*辆车在*j*站与*j+1*站间运行的车辆百公里耗油量(kg/100km),它是评价车辆燃料消耗经济性的指标之一,根据假设(5),其计算公式<sup>[9]</sup>如式(20)所示。

$$\begin{aligned} Q_{i,j+1}^1 &= \frac{g_e}{v\eta_t} (P_f + P_w) \times 0.1 \\ &= \frac{g_e}{v\eta_t} \left( \frac{m_0 + J_{i,j}^3(1)\omega_p}{3600} g f_r v + \frac{C_d S v^2 v}{21.15 \times 3600} \right) \times 0.1 \end{aligned} \tag{20}$$

其中, $g_e$ 为比燃耗(g/kwh),指发动机每发出1kw的有效功率时1h内所消耗的燃料质量; $v$ 为车辆行驶速度(km/h); $\eta_t$ 为传动系统机械效率; $p_f$ 为克服滚动阻力所消耗的功率(kw); $p_w$ 为克服空气阻力所消耗的功率(kw); $m_0$ 为车辆质量(kg); $\omega_p$ 为乘客平均质量(kg); $g$ 为重力加速度(m/s<sup>2</sup>); $f_r$

为轮胎滚动阻力系数; $C_d$ 为空气阻力系数; $S$ 为车辆行驶时的投影面积(m<sup>2</sup>); $v_r$ 为相对于风速的车辆行驶速度(m/s)。

### 3.4 约束条件

$$\sum_{i=1}^n H_i(T) \leq T_e - T_s \tag{21}$$

$$\sum_{k=1}^k N(\sum_{i=1}^n H_i(c_k')) = \sum_{k=1}^k N(c_k') \tag{22}$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n J_{i,j}^1(1) / (o \times n) \leq r \tag{23}$$

式(21)表示所有车辆的发车间隔总和不超过研究时间;式(22)表示发车时刻表中各种车型的辆车数等于相应车型的配车数, $N$ 为求相应车型个数的函数;式(23)表示线路平均满载率小于某一值。

## 4 求解算法

### 4.1 最大最小蚁群系统算法

蚁群优化算法最初用于解决 TSP(旅行商)问题,凭借算法的全局搜索、并行计算等优点成功应用于车辆货物装载问题<sup>[10]</sup>、车辆路径问题<sup>[11]</sup>等 NP-Hard 特征的组合优化问题中,为这些难题提供了有效的解决手段。最大最小蚁群系统算法(MMAS)由 Stutzle<sup>[12]</sup>提出,是对基本蚁群优化算法的一种改进。

根据 3.2.1 节组合调度发车时刻表的生成逻辑,任意车辆*i*在发车时有 $2k(e-s+1)$ 种选法,则给定*o*辆车的节点组合有 $(2k(e-s+1))^o$ 种选法,寻优问题变量维数较高、约束条件较复杂,解空间范围十分庞大,属于 NP-Hard 特征的问题,运用传统的寻优算法时效率过低。因此,本文以发车车型、模式和间隔的变量组合作为节点,应用 MMAS 算法,将算法生成的满足约束条件的路径上的节点先后顺序作为发车时刻表信息;然后以发车时刻表信息为基础推算线路运营时刻表信息;最后以运营时刻表的信息为基础,计算公交相关服务指标和系统总成本,并保存每次迭代总成本最小的路径,用于信息素更新。

### 4.2 路径状态转移规则及参数定义

参照 3.2.1 节公交组合调度车辆发车时刻表生成的逻辑,蚂蚁选择下一跳节点的方式由一维变为二维,任意蚂蚁在第*i*辆车的逻辑发车集合中的*h*节点上,根据第*i+1*辆车的逻辑发车集合中可达节点上的信息素浓度、启发信息在*t*时刻由节点(*i, h*)转移到节点(*i+1, h'*)的规则如下:

$$\begin{aligned} (i+1, h') &= \begin{cases} \max_{h' \in allowed} \{ [\tau_{(i,h)}^{(i+1,h')}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{(i,h)}^{(i+1,h')}(t)]^\beta \}, & q \leq q_0 \\ P_{(i,h)}^{(i+1,h')}(t), & q > q_0 \end{cases} \\ p_{(i,h)}^{(i+1,h')}(t) &= \frac{[\tau_{(i,h)}^{(i+1,h')}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{(i,h)}^{(i+1,h')}(t)]^\beta}{\sum_{k' \in allowed} [\tau_{(i,h)}^{(i+1,k')}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{(i,h)}^{(i+1,k')}(t)]^\beta} \end{aligned} \tag{24}$$

式(24)表示任意蚂蚁根据 $q_0$ 与*q*的大小关系选择下一跳节点的方式:即任意蚂蚁根据下一跳节点集合中各个节点的信息素浓度的大小或者根据下一跳节点集合中各个节点与此集合中所有可达节点的信息素浓度总和的比值(概率)进行的。其中*q*为[0,1]区间均匀分布的随机数, $q_0$ 的大小决定了利用先验知识与探索新路径之间的相对重要性<sup>[13]</sup>;allowed表示允许蚂蚁选择第*i+1*辆车的节点的集合; $\tau_{(i,h)}^{(i+1,h')}(t)$ 为*t*时刻在路径(*i, h*)→(*i+1, h'*)上的信息素浓度; $\alpha$ 为信息素浓

度相对重要性因子;  $\eta_{(i,h)}^{(i+1,h')}(t)$  为  $t$  时刻路径  $(i,h) \rightarrow (i+1,h')$  上的启发信息,结合本文实际问题,定义其为第  $i+1$  辆车集合中  $h'$  节点的发车间隔减去车辆平均发车间隔(发车间隔集合元素之和除以配车数)的绝对值的倒数,若此值为无穷大,则取为 1;  $\beta$  为启发信息相对重要性因子;  $\rho_{(i,h)}^{(i+1,h')}(t)$  为蚂蚁选择下一跳节点的概率。

4.3 信息素浓度更新规则

由 4.2 节可知蚂蚁选择下一跳节点主要依赖路径上的信息素的浓度大小,因此路径信息素更新规则直接影响算法的收敛速度和解的质量,最大最小蚁群算法是将信息素浓度限制在  $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ , 以防止寻优过程过分依赖信息素导致算法收敛到一条局部最优解上。为了充分利用迭代最优解和至今最优解在算法不同运行阶段中所处的作用,根据文献[13]的思想,设信息素更新规则如式(25)所示:

$$\tau_{(i,h)}^{(i+1,h')}(t) = (1-\rho)\tau_{(i,h)}^{(i+1,h')}(t) + f(\omega)(\Delta\tau_{(i,h)}^{(i+1,h')})^b + (1-f(\omega))(\Delta\tau_{(i,h)}^{(i+1,h')})^\phi$$

$$(\Delta\tau_{(i,h)}^{(i+1,h')})^\phi = \begin{cases} Q/C_\phi, & (i,h) \rightarrow (i+1,h') \in R_\phi \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$(\Delta\tau_{(i,h)}^{(i+1,h')})^b = \begin{cases} Q/C_b, & (i,h) \rightarrow (i+1,h') \in R_b \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$f(\omega) = \begin{cases} \min(0.5 + \omega^a, 1), & \omega \leq 0 \\ \max(0, 0.5 - \omega^b), & \omega > 0 \end{cases}$$

其中,  $\rho$  ( $0 \leq \rho \leq 1$ ) 为信息素的蒸发率;  $(\Delta\tau_{(i,h)}^{(i+1,h')})^b$ ,  $(\Delta\tau_{(i,h)}^{(i+1,h')})^\phi$  分别为与迭代和至今最优相比,路径  $(i,h) \rightarrow (i+1,h')$  上的信息素浓度增量;  $Q$  为根据具体问题确定的常数;  $C_b, C_\phi$  分别表示迭代和至今最优路径系统总成本;  $R_b, R_\phi$  分别为迭代和至今最优路径集合;  $\omega = C_b/C_\phi - 1$ , 当  $\omega < 0$  时,说明算法在本次迭代中找到了更好的解,应该快速增大  $(\Delta\tau_{(i,h)}^{(i+1,h')})^b$  所占的比重; 当  $\omega > 0$  时,说明本次迭代效果较差,应该快速减少  $(\Delta\tau_{(i,h)}^{(i+1,h')})^b$  所占的比重; 当  $\omega = 0$  时,  $(\Delta\tau_{(i,h)}^{(i+1,h')})^b$  和  $(\Delta\tau_{(i,h)}^{(i+1,h')})^\phi$  的比重各占一半。  $a, b$  为相应情况下控制迭代最优解在式(25)所占比重的参数,可根据实际情况取值。算法流程如图 2 所示。

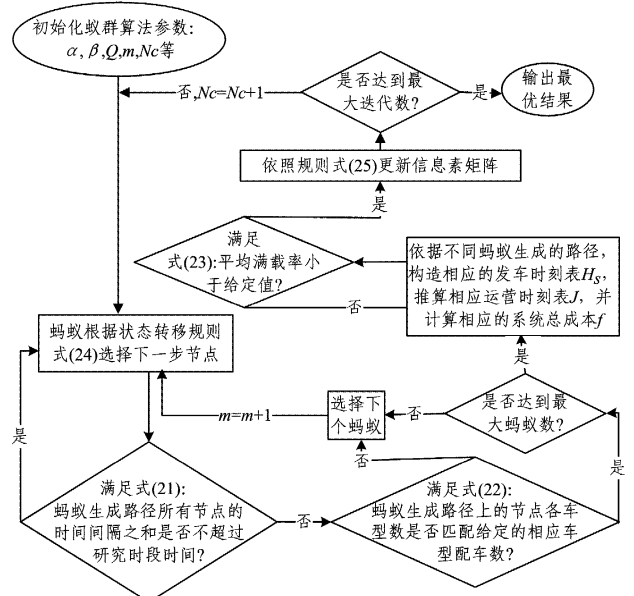


图 2 算法流程图

5 算例

5.1 客流数据来源

焦作市 21 路上行有 26 个站点,通过车载 GPS 和车辆前门安装的客流视频调查设备(误差率在 5%以内)采集并汇总某天早高峰时段 7:00—8:00 内从上行首站发出的 12 辆公交车在各站点总的上、下车客流基本信息,如表 1 所列。根据文献[14]反推公交站点 OD 矩阵的方法推算出公交站点 OD 矩阵,如图 3 所示。

表 1 公交客流基本信息

站点	上车人数	下车人数	路段客流量	站间距离/km
1	131	0	131	0.80
2	108	19	220	1.23
3	98	9	309	0.64
4	40	25	324	0.67
5	83	46	361	1.09
6	69	94	336	1.27
7	90	79	347	0.45
8	83	95	335	0.70
9	35	34	336	0.60
10	67	34	369	0.26
11	55	31	393	0.49
12	24	21	396	0.32
13	21	20	397	0.45
14	5	24	378	0.72
15	4	4	378	0.50
16	16	55	339	0.68
17	17	43	303	0.60
18	15	35	283	0.34
19	29	96	216	0.58
20	8	26	198	0.43
21	11	89	120	0.20
22	11	26	105	0.34
23	2	16	91	0.39
24	3	40	54	0.28
25	0	34	20	0.59
26	0	20	0	0.30

站点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1	-	19	5	9	14	22	15	13	3	3	2	1	1	1	0	3	3	2	5	1	4	1	1	1	1	1
2	-	-	4	8	14	21	14	13	3	3	2	1	1	2	0	3	2	2	5	2	3	1	1	1	1	1
3	-	-	-	8	12	20	13	12	3	3	1	1	1	0	3	2	2	5	1	4	3	0	1	0	0	0
4	-	-	-	-	6	9	7	4	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	2	0	1	0	0	1	1	0
5	-	-	-	-	-	22	14	13	3	2	1	1	1	1	3	3	2	5	2	2	1	1	1	1	1	1
6	-	-	-	-	-	-	16	15	4	3	3	1	1	2	0	3	3	2	5	1	4	1	1	2	1	1
7	-	-	-	-	-	-	-	25	7	6	4	3	3	0	6	4	3	9	2	7	2	1	3	1	1	1
8	-	-	-	-	-	-	-	-	10	8	5	4	3	3	1	7	6	4	12	3	9	2	1	3	1	1
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	3	1	1	2	0	3	3	2	5	2	3	1	1	2	1	1
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	4	3	3	1	7	5	4	12	3	9	2	1	3	3	1
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	3	3	0	7	5	4	10	2	8	2	1	3	3	1
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	4	1	2	4	1	4	1	1	1	1	1	1
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0	3	2	2	4	1	4	1	0	1	1	1
14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0
16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	4	1	3	1	0	1	1	1	0
17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	2	0	2	0	0	1	1	0
18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	1	4	1	1	1	1	1
19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	12	3	2	4	3	2
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	1	0	1	1	1
21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	1	4	3	1
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	4	3	2
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	0
24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	1
25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0

图 3 公交站点 OD 矩阵图

5.2 相关参数设置

根据 2015 年焦作市人均收入情况、乘客平均候车时间、乘客人均乘车费用和乘客平均在车时间确定新到乘客候车、滞站乘客候车和在车乘客的时间成本参数  $\mu' = \mu'' = 0.12$  元/分,

$\mu''=0.09$  元/分;通过到公交公司调研和参考文献[15]得,本文所涉及的车辆全部为:燃气车,耗燃成本相关参数为: $m_0=11200\text{kg}$ , $w_p=60\text{kg}$ , $f_r=0.018$ , $g=9.8\text{m/s}^2$ , $C_d=0.6$ , $S=4\text{m}^2$ , $Q_{i,j}=0.15\text{g/s}$ , $g_e=210\text{g/kwh}$ , $p_g=5.5$  元/kg, $v=25\text{km/h}$ , $v_r=7\text{m/s}$ , $\eta_r=90\%$ ;发车时刻表相关参数  $c_1=50$  人, $c_2=60$  人, $\Delta T=[1,10]$ ;约束条件参数  $o=12$  辆, $N(c_1)=7$  辆, $N(c_2)=5$  辆, $T_s=7:00$ , $T_e=8:00$ , $r=50\%$ ;算法相关主要参数  $\alpha=3$ , $\beta=2$ , $\tau_{\min}=0.4$ , $\tau_{\max}=2$ , $\rho=0.02$ , $a=2$ , $b=3$ 。根据站点客流集散量均衡法[6]和实际情况确定大站快车的停靠站点为 1-2-6-7-8-10-13-16-19-21-24-26。

### 5.3 结果分析

分析文献[1-2]中的调度模型,调度策略主要分为 4 种:单一调度与固定间隔策略、单一调度与不定间隔策略、组合调度与固定间隔策略、组合调度与不定间隔策略。基于本文假设,利用 MATLAB 编写相应策略和求解问题的最大最小蚁群系统算法,计算以上 4 种调度策略发车时刻表的最优解(解元素包括:车辆模式(1 为全程车,2 为大站快车)、车辆容量(1 为 50 人,2 为 60 人)、发车间隔(min))和相应运营情况,如表 2 和表 3 所列。

表 2 4 种调度策略的最优解

车辆编号	调度策略			
	1	2	3	4
1	1,1,5	1,1,7	2,1,7	1,2,3
2	1,2,5	1,2,3	1,1,1	2,1,2
3	1,1,5	1,2,7	2,1,6	1,1,5
4	1,1,5	1,1,7	1,2,2	2,1,1
5	1,2,5	1,2,6	2,2,5	1,2,5
6	1,1,5	1,1,5	1,1,3	2,2,3
7	1,2,5	1,2,5	2,2,4	1,1,5
8	1,2,5	1,2,4	1,2,4	2,1,7
9	1,2,5	1,1,4	2,1,3	2,2,1
10	1,1,5	1,1,5	1,1,5	1,1,3
11	1,1,5	1,1,6	2,2,2	2,2,6
12	1,1,5	1,1,3	1,1,6	1,1,6

表 3 4 种调度策略最优解的运营情况

指标	调度策略			
	1	2	3	4
乘客总等车时间/min	2855	2972	2607	2595
乘客总滞站时间/min	358	207	584	632
乘客总在车时间/min	9545	10442	6904	6664
时段内最终滞站总人数	0	0	35	62
车辆满载率超过 60%的次数	51	39	28	29
车辆平均满载率/%	44	47	29	28
乘客总时间成本/元	1371	1425	1080	1073
车辆总耗燃成本/元	138	139	96	98
系统总成本/元	1509	1564	1176	1171

分析表 2、表 3 的数据可得:

(1)由于在给定配车数和限定研究时段的情况下,若间隔过小,则每辆车在站点时的乘车人数少,满载率不高,最终导致这一时段内站点滞留的乘客人数增多,乘客总时间成本增大;若间隔过大,则乘客等车时间成本和耗燃成本大大增加。因此,各车与前车的发车时间间隔集中在 5~8min 之间,乘客总等车时间与总滞留时间呈负相关,与总在车时间呈正相关。

(2)单一调度策略的最优固定发车间隔为 5min,组合调度策略的最优固定发车间隔分别为 8min 和 7min。其他两种

调度策略的发车间隔基本上是由高降低,再升高,这是由于所选线路的上行是处于城市新区到旧区的衔接线路,又由于所选客流数据时段是早高峰,用车性质主要为通勤,线路客流需求量大且时间集中,客流整体特点是偏左型,客流主要由线路前端涌向线路中间,因此发车间隔呈“U”字型。

(3)由于大站快车的运行特点导致站点存在固定滞站的乘客,进而达到站点分流的效果,因此组合调度在研究时段最终滞站总人数相对较多,这部分人未参与时段内客流分配过程。大站快车的组合调度通过缩短大客流站点间的乘客等车和在车时间,及适当增大站点间滞站乘客的等车时间来最终实现降低乘客时间成本和车辆运营成本的目标。

(4)一方面研究时段内组合调度策略的车辆满载率超过 60%的次数比单一调度策略最大降低 20 次左右,平均满载率要低于单一调度策略 15%左右;另一方面组合调度策略的乘客总滞站时间大于单一调度 2 倍多,而总等车时间和总在车时间均小于单一调度策略,最终导致组合调度策略的乘客的时间成本低于单一调度形式 400 元左右。此外,由于组合调度策略均衡分配站点客流,导致路段车辆总质量降低,从而降低了路段百公里耗燃成本,最终组合调度策略的耗燃成本低于单一调度策略 40 元左右。

(5)变间隔的组合调度策略牺牲了部分乘客的利益,使其在一定时间段内均衡分配站点客流,使线路的服务水平与其他 3 种调度策略相比有所提升,系统总成本最低。

**结束语** 本文首先介绍了常规公交车辆的运行模式、组合调度发车时刻表及运营时刻表的各变量及其关系,然后基于假设:乘客“他比我先到站,他先乘车”的高素质及“我的目的站近,可以多等几辆车”的心理,提出一种基于滞站乘客等车数、滞站原因和目的站距离的处理滞站乘客乘车的方法。在通过某种手段获取了公交站点客流 OD 信息的情况下,本文以发车车型、模式和间隔的变量组合作为车辆节点和发车时刻表的基本元素,应用最大最小蚁群系统算法寻找公交服务和系统总成本综合评价指标最优的车辆节点组合,建立了一种基于优化发车时刻表的发车间隔不定的大站快车和全程车组合调度模型。结合实例对比分析了 4 种调度策略的公交服务和成本指标,验证了本文模型的有效性。实验结果表明,采用间隔不定的组合调度策略将站台滞站乘客人数控制在一定范围内,不仅可以缩短乘客的总出行时间,还可以降低车辆运营相关成本,充分发挥公共交通出行优势。但影响公交组合调度的原因包括乘客、公交公司及环境等多种内外因素的共同作用,它们相互之间的作用关系需要进一步的探索。

### 参考文献

[1] WEI M, CHEN X W, SUN B. Multi-objective Single Line Transit Mixed Scheduling Model Considering Express Bus Service [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15(2): 169-181. (in Chinese)  
魏明, 陈学武, 孙博. 配合大站快车的单线公交组合调度模型 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(2): 169-181.

[2] MING J, ZHANG G J, LIU Y D. Combinatorial Optimization Model of Multi-model Transit Scheduling [J]. Computer Science,

- 2015,42(9):263-267. (in Chinese)  
 明洁,张贵军,刘玉栋.多模式公交组合调度优化模型[J].计算机科学,2015,42(9):263-267.
- [3] CEDER A. Designing Transit Short-Turn Trips with the Elimination of Imbalanced Loads [M]. Computer-Aided Transit Scheduling,1988;321-326.
- [4] AICHONG S,MARK H. The Real-Time Stop-skipping Problem [J]. Journal of Intelligent Transportation Systems,2005,9(2):91-109.
- [5] MEKKAOUI O,DE PALMA A,Lindsey R,et al. Optional bus timetables and trip timing preferences[C]// The 8th International Conference on Computer aided Scheduling of Public Transport. 2000;356-364.
- [6] 杨兆升.城市智能公共交通系统理论与方法[M].北京:中国铁道出版社,2004.
- [7] WU L R. Real-time Tour Planning for Flexible Route Bus Considering Passengers' Waiting Behavior[D]. Dalian: Dalian University of Technology,2014. (in Chinese)  
 吴丽荣.考虑乘客等待行为的柔性路径公交车实时调度方法[D].大连:大连理工大学,2014.
- [8] NIU X Q,CHEN Q,WANG W. Optimal model of urban bus frequency determination[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2003,3(4):68-72. (in Chinese)  
 牛学勤,陈茜,王伟.城市公交线路调度发车频率优化模型[J].交通运输工程学报,2003,3(4):68-72.
- [9] 余志生.汽车理论[M].北京:机械工业出版社,2009.
- [10] TIAN R,SUN L F. Multi-unloading Packing Problem Model Research Based on MMAS[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science Edition),2016,35(2):156-162. (in Chinese)  
 田冉,孙林夫.基于最大最小蚁群算法的多卸载车载装箱模型研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2016,35(2):156-162.
- [11] GE B,HAN J H. Dynamic Adaptive Ant Colony Optimization Algorithm for Min-Max Vehicle Routing Problem[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence,2015,28(10):930-938. (in Chinese)  
 葛斌,韩江洪.最小最大车辆路径问题的动态自适应蚁群优化算法[J].模式识别与人工智能,2015,28(10):930-938.
- [12] STUTZLE T,HOOS H H. MAX-MIN Ant system[J]. Future Generation Computer Systems,2000,16(9):889-914.
- [13] YAO Y. Research for the Improvement of Max-Min Ant Colony Algorithm[J]. Mathematics in Practice and Theory,2014,44(15):242-247. (in Chinese)  
 姚艳.一种最大最小蚂蚁系统的改进算法[J].数学的实践与认识,2014,44(15):242-247.
- [14] DOU H L,LIU H D,YANG X G. OD matrix estimation method of public transportation flow based on passenger boarding and alighting[J]. Computer and Communication,2007,25(2):79-83. (in Chinese)  
 窦慧丽,刘好德,杨晓光.基于站点上下客人数的公交客流 OD 反推方法研究[J].交通与计算机,2007,25(2):79-83.
- [15] WANG W Q. Research on Gas-Saving technology for City CNG buses[D]. Xi'an:Chang'an University,2012. (in Chinese)  
 王文强.城市 CNG 公交车辆节气技术的研究[D].西安:长安大学,2012.
- 
- (上接第 248 页)
- [2] REIJERS H A,MENDLING J,DIJKMAN R M. On the Usefulness of Subprocesses in Business Process Models[J]. Information Systems(IS),2012,37(5):443-459.
- [3] ZHOU S B. Research and application of optimal cluster number determination method in clustering analysis[D]. Wuxi:JiangNan University,2011. (in Chinese)  
 周世兵.聚类分析中的最佳聚类数确定方法研究及应用[D].无锡:江南大学,2011.
- [4] CHEN L F. Research on Clustering Methods for High Dimensional Data and Their Applications[D]. Xiamen: Xiamen University,2008. (in Chinese)  
 陈黎飞.高维数据的聚类方法研究与应用[D].厦门:厦门大学,2008.
- [5] WANG N,SUN S W. Constraint-based Activity Clustering in Business Process Model Abstraction [J] Computer Science,2017,44(1):259-263,294. (in Chinese)  
 王楠,孙善武.业务流程模型抽象中基于约束的行为聚类方法研究[J].计算机科学,2017,44(1):259-263,294.
- [6] WANG N,SUN S W,OUYANG D T. Business Process Modeling Abstraction Based on Semi-Supervised Clustering Analysis [C]//Business & Information Systems Engineering. 2016.
- [7] SMIRNOV S. Business Process Model Abstraction., Germany: University of Potsdam[OL]. [http://opus.kobv.de/ubp/volltexte/2012/6025/pdf/smirnov\\_diss.pdf](http://opus.kobv.de/ubp/volltexte/2012/6025/pdf/smirnov_diss.pdf).
- [8] POLYVYANY A,VANHATOLO J,VOLZER H. Simplified Computation and Generalization of the Refined Process Structure Tree [C] // Proceedings of the WS-FM 2010. Springer,2011:25-41.
- [9] FREY B J,DUECK D. Response to Comment on Clustering by Passing Messages Between Data Points[J]. Science,2008,319(5864):726.
- [10] YANG S L,LI Y S,HU X X,et al. Optimization Study on k Value of K-means Algorithm K-means[J]. System Engineering Theory and Practice System EngTheorPrac,2006,26(2):97-101. (in Chinese)  
 杨善林,李永森,胡笑旋,等. K-means 算法中的 k 值优化问题研究[J].系统工程理论与实践,2006,26(2):97-101.
- [11] FREY B J,DUECK D. Clustering by passing messages between data points[J]. Science,2007,315(5814):972-976.
- [12] SUN S W,WANG N,OUYANG D T. Business Process Model Abstraction Based on Cluster Analysis [J]. Computer Science,2016,5(5):193-197. (in Chinese)  
 孙善武,王楠,欧阳丹彤.基于聚类分析的业务流程模型抽象[J].计算机科学,2016,5(5):193-197.
- [13] SMIRNOV S,WEIDLICH M,MENDLING J. Business Process Model Abstraction Based on Behavioral Profiles[M]//Service-Oriented Computing. Springer Berlin Heidelberg,2010:1-16.
- [14] SMIRNOV S,WEIDLICH M,MENDLING J. Business Process Model Abstraction Based on Synthesis from Well-Structured Behavioral Profiles[J]. International Journal of Cooperative Information Systems,2012,21(1):55-83.