

# 基于服务可靠性的公交到站时刻表编排与评价\*

李军, 邓育新, 黄柳红

(中山大学智能工程学院/广东省智能交通系统重点实验室, 广东 广州 510006)

**摘要:** 建立了利用公交历史数据进行公交到站时刻表编排的优化模型, 以提升乘客按时刻表出行的搭乘成功率, 减少等待时间, 改善出行体验。首先, 提出了服务可靠性的概念来表示乘客根据时刻表候车能成功搭乘的概率, 并基于此引入了历史百分位到站时刻作为参考时刻; 然后综合考虑等待时间、运行时间等约束条件, 以最大化服务可靠性构建了到站时刻表编排模型, 并利用乘客搭乘成功率、平均等待时间等指标来对模型进行评估。最后, 选取广州市某公交线路进行了实例验证, 并与传统方法进行了对比分析。结果表明, 模型编排的到站时刻表能明显提高乘客的搭乘率, 减少乘客平均等待时间。

**关键词:** 交通工程; 公交时刻表; 服务可靠性; 乘客等待时间

**中图分类号:** U491.1<sup>+</sup>7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2020)05-0086-09

## Arrangement and evaluation of bus arrival timetable based on service reliability

LI Jun, DENG Yuxin, HUANG Liuhong

(School of Intelligent Systems Engineering, Sun Yat-sen University//Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Transportation System, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** An optimization model of bus arrival timetable utilizing historical data is proposed to increase the riding success ratio, reduce the waiting time, and improve the level of service of buses. The concept of service reliability is introduced to indicate the probability that the riders successfully take the bus according to the timetable, and the historical percentile arrival time is proposed as the control points; then the model to maximize service reliability with the constraints conditions of rider waiting time and bus running time is proposed, and the riding success ratio and waiting time are employed to evaluate the performance of the proposed method. A case study of a bus route in Guangzhou is presented, and the results show that the proposed model can produce a timetable with higher riding success ratio and less waiting time, comparing with traditional method.

**Key words:** traffic engineering; bus timetable; service reliability; rider waiting time

公交是城市交通的重要组成部分, 是人们出行的重要交通方式之一<sup>[1-2]</sup>。公交到站时刻表是人们规划出行时间的重要参考, 它是指公交车到达公交线路各个站点的时刻表, 一般张贴在公交站牌上, 显示每班次公交到达该站的时间。乘客

可通过时刻表大致了解公交到站时间和运营状况, 以方便安排出行时间。公布公交到站时刻表, 从而使公交企业与乘客之间形成基本约定, 使乘客的出行可计划并可靠, 可以提高公交运营效率, 改善乘客出行体验, 从而提高公交的吸引力和分

\* 收稿日期: 2019-06-06

基金项目: 广东省重点领域研发计划 (2019B090913001)

作者简介: 李军 (1968年生), 男; 研究方向: 交通运输规划与管理; E-mail: stsljun@mail.sysu.edu.cn

担率。虽然现有的电子站牌和手机软件也能提供公交到站信息,但两者都有一定的局限性。前者成本较高,难以在所有公交站点设置。后者覆盖范围不够全面,特别是对老人和学生等特殊群体不友好。而公交到站时刻表设置简单,容易在各城市推广。有研究者通过问卷调查分析了乘客对于时刻表信息服务需求,研究发现有92%的乘客认为有必要公布时刻表,在有动态到站信息提供时仍有74%的乘客认为到站时刻表作用不可替代,应两者配合发布<sup>[3]</sup>。在国外如英国、日本和德国等发达国家,公交信息服务发展较为完善,不仅提供了公交中途站点的到站时刻表,而且保证了较高的准点率。国内大部分城市只在站牌上提供首末班车信息,缺少中途站点的到站时刻信息。乘客到站和公交到站都具有一定的随机性,当乘客未能搭上相应班次公交车时,乘客需要长时间等待下一班次公交车或选择其它交通方式出行,尤其是发车间隔稀疏的公交线路。因此,编排到站时刻表对于改善乘客出行体验,提高公交运营效率具有实际意义。

多年来,大多数研究都集中在公交到站时间的动态预测,并提出了大量预测算法,例如卡尔曼滤波<sup>[4-5]</sup>、支持向量机<sup>[6-7]</sup>、神经网络<sup>[8-12]</sup>等。然而,这些方法需要结合公交位置等实时信息进行到站时间预测,到站时间是实时变化的,不适用于静态到站时刻表的编排。在公交时刻表方面,研究对象多为发车时刻表<sup>[13-18]</sup>,关于中途站点时刻表的研究取得的成果并没有很多。陈玥祺等<sup>[19]</sup>通过到站时刻信息统计得出行程时间分布规律,引入置信区间覆盖率研究发布公交站点时刻表的可行性。吉婉欣等<sup>[20]</sup>提出了基于行程时间和基于到站间隔两种时刻表计算模型,分别适用于站间行程时间波动较小和较大的公交线路。传统方法是根据发车时刻表和站间平均行程时间得到公交到站时刻均值,当乘客到站均匀分布时,乘客搭乘概率较低。公交到站时刻表的服务对象是乘客,而现有研究一般是从公交运营的角度进行时刻表编排,编排角度较不合理,且未考虑乘客候车心理等因素。

本文从乘客的角度出发,构建了一个基于服务可靠性的公交到站时刻表编排模型,建立了搭乘率和平均等待时间两个模型评价指标,并分析了模型的实际应用效果。研究结果可为乘客出行规划提供参考,为城市规划和公交运营提供辅助

决策。

## 1 公交到站时刻表

对于静态的到站时刻表,乘客希望参考时刻表进行候车时,能在短时间内成功搭乘相应班次的公交,因此需要保证时刻表的服务可靠性。服务可靠性是指乘客根据某班次时刻表在某个站点进行候车时,能成功搭上该班次公交的概率,即计算公式如下:

$$R_i = P\{t_i \geq x_i\} = \frac{d_s}{d_s + d_f} \quad (1)$$

式中: $R_i$ 为该班次到站时刻表在站点*i*的服务可靠性; $t_i$ 为该班次的实际到站时刻; $x_i$ 为时刻表上的到站时刻; $d_s$ 为实际到站时刻晚于时刻表的天数; $d_f$ 为实际到站时刻早于时刻表的天数。

为了保证时刻表的服务可靠性,本文借鉴交通工程设计小时交通量(第30位最大小时交通量)的定义方法,采用历史百分位到站时刻作为参考时刻。历史百分位到站 $\alpha$ 分位值是指将公交到达某一站点的历史到站时刻数据从大到小排列,向上累积频率 $\geq \alpha$ 的最大到站时刻数据为第 $\alpha$ 分位到站时刻,即到站时刻 $\alpha$ 分位值,记为 $t_i^\alpha$ 。如表1为28天某公交线路某班次到达某站点的历史到站时刻数据,当 $\alpha=90\%$ 时,则参考时刻为6:54。若将此时刻作为该班次在该站点的设计到站时刻,则乘客在该站点搭上该班次公交的概率约为90%,则时刻表的服务可靠性为90%。

另外,到站时刻表的编排还与乘客候车心理和公交运营管理两方面密切相关。从统计学的角度来说,选择一个历史较早到站时刻作为设计时刻,即 $\alpha$ 取值越大,可保证公交在设计时刻后到达的概率越高,则乘客根据设计时刻进行候车时搭乘概率越高,即时刻表的服务可靠性越高。当公交到站时刻样本较为离散时,则会出现时刻表编排过早的问题,虽然乘客搭乘概率提高,但不可避免地会延长乘客等待时间。为了保证服务可靠性与等待时间的平衡,需要规定乘客最大等待时间。在公交运营管理方面,由于实际道路交通状况难以准确预测,公交公司对公交到达各站点的时刻没有硬性要求,但为了保证公交运行周转率,公交公司会规定各线路的最大单程运行时间。公交到站时刻表设置最大单程运行时间能反映交通状态,同时也能对公交公司运营服务起到一定的监督作用。另外,部分站点间距较短,行程时间

可能小于 1 min, 而到站时刻表的时间精确至分钟, 为符合实际还要设置站点间到站时刻的约束。

表 1 某班次公交线路到达某站点的历史到站时刻

Table 1 The historical arrival time of a shift bus line at a stop							
序号	1	2	3	4	5	6	7
时刻	7: 01	7: 00	7: 00	6: 59	6: 59	6: 58	6: 58
序号	8	9	10	11	12	13	14
时刻	6: 58	6: 58	6: 58	6: 58	6: 57	6: 57	6: 57
序号	15	16	17	18	19	20	21
时刻	6: 57	6: 57	6: 57	6: 56	6: 56	6: 56	6: 55
序号	22	23	24	25	26	27	28
时刻	6: 54	6: 54	6: 54	6: 54	6: 54	6: 53	6: 52

## 2 基于服务可靠性的时刻表编排模型

### 2.1 模型建立

在参考时刻表规划出行时间时, 乘客希望公交在设计时刻准点到达或在一定时间内晚点到达, 从而能搭上该班次公交。若公交提前到达, 乘客需要等待下一班次公交, 会大大增加乘客等待时间或者改选其它交通方式出行, 尤其是郊区线路。因此时刻表的服务可靠性与公交到站时刻直接相关, 也是乘客候车过程中最为关注的指标。基于对问题的分析, 可知到站时刻表编排的首要目标是保证时刻表可靠性高, 因此以最大化时刻表的服务可靠性为目标, 建立到站时刻表编排模型, 目标函数如下:

$$\text{Min} \sum_{i=2}^{n-1} (x_i - t_i^\alpha)^2 \quad (2)$$

式中:  $x_i$  为站点  $i$  设计到站时刻;  $t_i^\alpha$  为公交到达站点  $i$  的历史到站时刻  $\alpha$  分位值。模型的目标函数越小, 说明站点设计时刻越接近预定的历史百分位到站时刻, 从而在尽可能多的站点处, 公交有接近预定百分比的可能性在该时刻后到达, 乘客有接近预定百分比的可能性成功搭上公交车, 时刻表的服务可靠性也越大。另外, 首站的到站时刻(即发车时刻)一般是保持不变的, 末站不存在上车乘客, 因此首末站不在到站时刻表的编排范围内。

其次是保证合理的乘客等待时间, 以及符合公交公司运营策略和站点到站时刻的约束。约束条件如下:

$$t_i^0 - x_i \leq W, i = 2, \dots, n - 1 \quad (3)$$

$$x_{n-1} - x_2 \leq T \quad (4)$$

$$x_{i+1} - x_i \geq 1, i = 1, 2, \dots, n - 1 \quad (5)$$

式中:  $t_i^0$  为公交到达站点  $i$  的历史到站时刻 0 分位值, 即历史最晚到站时刻;  $W$  为乘客最大等待时间;  $x_n$  为站点  $n$  (末站) 的设计到站时刻;  $x_1$  为首站的发车时刻;  $T$  为最大单程运行时间;  $x_i$  为站点  $i$  的设计到站时刻。

### 2.2 模型求解和相关参数

上述的模型是一个非线性规划模型, 可采用广义简约梯度法 (Generalized Reduced Gradient, GRG) 进行求解, GRG 法是目前求解一般非线性优化问题最有效的算法之一。为了使乘客在站点的搭乘概率尽可能高, 需要不断调整目标函数中的  $\alpha$  值。调整过程为: 首先所有站点的初始  $\alpha$  取相同值, 对时刻表进行求解; 计算时刻表在各站点的服务可靠性, 若站点  $i$  的服务可靠性大于等于预设定的百分位 (即  $\alpha$ ), 则令该站点  $\alpha_i = \alpha_i + 5\%$ , 其它站点的  $\alpha$  不变,  $\alpha$  最大取值为 100%, 重新求解直到前后两次结果相同。

初始  $\alpha$  表示初始的服务可靠性, 其取值可通过简单抽样和问卷调查所获得的统计数据来确定, 常取 85% 或 90%。 $W$  表示乘客可接受的最大等待时间, 可通过问卷调查或分析公交运行数据来确定。 $T$  表示最大单程运行时间, 一般通过首站发车时刻及末站到站时刻计算单程运行时间, 取样本 95% 位运行时间作为计划最大单程运行时间。

### 2.3 评价指标

建立时刻表的评价指标, 评价模型编排得到的到站时刻表的实际应用效果。考虑到公交到站时刻表的服务对象为乘客, 运营方为公交公司, 建立了搭乘率和平均等待时间两个评价指标。一般来说, 乘客在使用到站时刻表时主要关注两个问题, 一是参考时刻表候车能否搭上相应班次公交, 二是按照时刻表候车需要等待多长时间才能搭上公交。搭乘率是参照时刻表候车时成功搭乘的乘客比例, 能衡量时刻表的合理性, 同时它也能反映公交的运营效率。另一方面, 在保证乘客参考时刻表能搭上公交的同时, 还需考虑乘客的等待时间, 等待时间过长也会影响时刻表的使用率, 降低乘客满意度, 因此乘客等待时间也是衡量时刻表合理性和评价公交服务水平的重要指标。

**2.3.1 搭乘率** 搭乘率是描述在公交站点, 根据时刻表候车能成功搭乘该班次公交车的乘客比例,

计算公式如下:

$$BR_i = \frac{p_i^s}{p_i^s + p_i^f} \quad (6)$$

式中:  $BR_i$  为公交到达  $i$  站点成功搭乘该班公交车的乘客比例;  $p_i^s$  是在站点  $i$  搭上该班公交的乘客数量;  $p_i^f$  为在站点  $i$  未搭上该班公交的乘客数量。

**2.3.2 平均等待时间** 平均等待时间指乘客到站与公交到站的平均时间差, 是反映公交服务水平的重要指标之一。若乘客成功搭乘相应班次的车, 等待时间为两者的到站时间差, 否则为乘客到站与下一班次到站的时间差, 计算公式如下:

$$\bar{w}_i = \frac{\sum_{j=1}^J (t_i - a_j)}{J} \quad (7)$$

式中:  $\bar{w}_i$  是在站点  $i$  搭乘该班次的乘客搭上公交时的平均等待时间;  $a_j$  为乘客  $j$  到达站点  $i$  的时刻; 当第  $j$  个乘客能搭上公交时,  $t_i$  为该班次公交车到达站点  $i$  的实际到站时刻, 否则为下一班次的到站时刻;  $J$  为在站点  $i$  搭乘该班次的乘客数量。

### 3 算例分析

#### 3.1 基础数据

本文选取广州番 11 路从高铁庆盛总站开往新市桥汽车站方向作为研究线路 (图 1), 该线路共包含 31 个站点, 线路总长约为 22 km, 站点间距介于 300 ~ 2 000 m 之间。本文提取该线路 2012 年 9 月

1 日到 10 月 31 日某个班次的到站数据, 将数据量化成以分钟为单位。将 9 月的 20 个工作日和 9 个非工作日作为编排模型的历史数据, 10 月的 16 个工作日和 12 个非工作日作为评价模型编排结果的实际运行数据, 其中 10 月 4 日、24 日和 31 日数据缺失。

#### 3.2 编排时刻表

根据 9 月到站时刻数据, 确定该班次的发车时刻为 6: 50, 该班次的发车时刻介于平峰与早高峰之间。在本文时刻表编排模型中, 初始  $\alpha=90\%$ ,  $W=7 \text{ min}$ ,  $T=55 \text{ min}$ , 并用传统方法和本文方法对工作日和非工作日进行编排, 传统的时刻表一般是公交公司由发车时刻表和站间平均运行时间计算得到的, 结果如表 2 所示。

#### 3.3 评价时刻表

在每个站点随机生成 100 位乘客的 10 月到站时刻数据, 计算站点每天的搭乘率和乘客等待时间, 并重复随机试验 100 次, 取平均值对时刻表效果进行评价。考虑到不同站点的评价效果不同, 将站点分为近站点 (前 15 个站点) 和远站点 (后 14 个站点)。

##### 3.3.1 搭乘率

(1) 站点间的搭乘率对比 对比分析乘客随机到站、传统时刻表到站和本文时刻表到站三种到站情形对乘客搭乘率的影响, 结果如表 3 所示。当乘客根据本文时刻表到站候车时, 站点搭乘率



图 1 广州番 11 路公交车线路图  
Fig. 1 Bus route map of Guangzhou Pan-11 line

表2 该班次到站时刻表  
Table 2 Arrival timetable of the shift bus

站点	传统方法	本文方法	
		工作日	非工作日
石牌村	6: 53	6: 52	6: 52
东涌名苑	6: 54	6: 53	6: 55
三沙村口	6: 56	6: 54	6: 56
昌利工业城	6: 57	6: 55	6: 57
励业路口	6: 58	6: 56	6: 58
东涌医院	6: 59	6: 58	6: 59
东涌镇政府	7: 02	7: 00	7: 00
东涌吉祥路	7: 03	7: 01	7: 03
东涌东丫村	7: 05	7: 02	7: 04
东涌村	7: 06	7: 04	7: 05
安顺村	7: 07	7: 05	7: 07
大稳村	7: 09	7: 06	7: 08
石基村	7: 11	7: 08	7: 11
大利高	7: 12	7: 09	7: 12
墩涌	7: 13	7: 10	7: 13
太石工业区	7: 15	7: 11	7: 14
大同村	7: 18	7: 15	7: 17
草河村	7: 22	7: 19	7: 20
好又多	7: 25	7: 21	7: 23
番禺广场	7: 28	7: 26	7: 27
东秀园	7: 31	7: 29	7: 29
邮电大厦	7: 32	7: 31	7: 30
沙墟村	7: 34	7: 34	7: 34
交通大厦	7: 35	7: 35	7: 35
星海公园	7: 36	7: 37	7: 36
市桥汽车站西门	7: 39	7: 39	7: 39
百越广场东门	7: 41	7: 42	7: 41
丹山桥	7: 44	7: 45	7: 45
丹山村	7: 45	7: 46	7: 46

为 44% ~ 99%，工作日平均值为 80.1%，非工作日为 83.0%。与前两种情形相比，线路站点的整体搭乘率分别提高了 61.3% 和 13.1%。结果表明，在设置到站时刻表后，乘客能有依据地规划出行时间，搭乘率有明显提高，同时这也会提高时刻表的使用率，改变人们的出行行为，提高公交的吸引力。传统时刻表是根据平均行程时间所得的，

包含了一定的行程时间规律，搭乘率（70%左右）相较于随机到站有所提高。而本文模型设置了初始的服务可靠性以及最大等待时间，在把握公交到站时刻规律的同时兼顾了乘客的使用需求，较传统方法进一步提高了搭乘率。

图 2 为各公交站点 10 月份的日平均搭乘率。乘客随机到站时，各站点的日平均搭乘率差异不大，而传统时刻表和本文时刻表均表现出线路前段搭乘率较高，而在太石工业区和好又多站点后出现比较明显的下降。乘客根据本文时刻表到站时，好又多站前的站点搭乘率都高于 85.0%，之后的站点搭乘率有明显下降，但仍高于 50.0%。主要原因是这一部分路段的站点间距处于 800 m 至 2 000 m 之间（图 1），站点间距相对较长，站间行程时间不稳定，到站时刻波动性较大。除了受站点间距影响外，近站点产生的到站时刻不稳定性会传播至远站点，一定程度影响了远站点的搭乘率，因此本文时刻表中近站点的搭乘率达到 90%，而远站点为 70% 左右。

尽管本文时刻表会受公交线路特征如路线长短、路线走向等的影响，但总体上看，搭乘率仍然比传统方法以及随机到站的高。为了配合时刻表，可将番禺广场等站点作为时刻表运行的关键站点，通过设置公交专用道或站点停留的方式提高公交在这些关键站点到站时刻的稳定性。

(2) 站点搭乘率的时间特征分析 选取分别处于线路前段、中段和后段的石牌村、大利高和丹山村站点进行搭乘率的时间特征分析，如图 3 所示。在石牌村站，随机到站时日搭乘率为 28.3% ~ 78.9%，传统时刻表为 30.3% ~ 100.0%，本文时刻表均高于 50.0%。10 月 10 日至 16 日的搭乘率较低，主要是因为处于国庆放假后的工作日，发车时刻较以往提早了 1~2 min，导致公交早于时刻表到达和离开，部分乘客错过该班次公交，导致搭乘率较低。在大利高站，三种到站情形的日搭乘率与石牌村站大致相同，而丹山村站的日搭乘率的时间波动性较大。对比分析发现，本文时刻表在前中段的石牌桥及大利高站的搭乘率较为稳定，大部分时间均高于其他两种情形。而在丹山村站的搭乘率在时间上波动较大，与其它两种情形一致，该站的到站时间不仅与当天的道路状况，还与前面所有站点的到站时间相关，所以到站时间相较于前中段的站点更不稳定。

表3 搭乘率评价结果  
Table 3 Evaluation results of boarding rate

日平均 搭乘率/%	随机到站		传统时刻表		本文时刻表	
	工作日	非工 作日	工作日	非工 作日	工作日	非工 作日
最小值	38.5	41.8	53.9	56.6	44.2	48.4
最大值	60.2	62.9	80.3	95.5	98.1	98.6
平均值	47.8	53.8	66.9	78.5	80.1	83.0
近站点	46.8	57.2	74.6	90.1	91.6	93.1
远站点	48.9	50.2	58.6	66.2	67.8	77.2

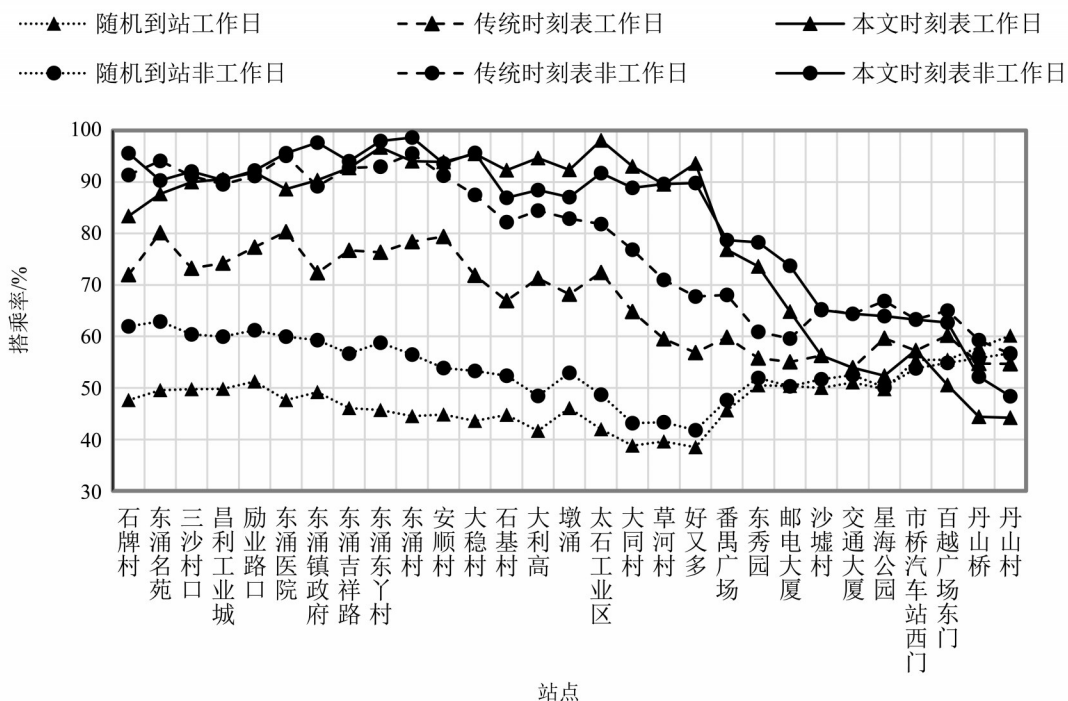


图2 不同到站情形的站点搭乘率

Fig. 2 Boarding rate of different arrival situations

### 3.3.2 平均等待时间

(1) 站点间的平均等待时间对比 如表4所示, 当乘客根据本文时刻表候车时, 站点平均等待时间2.7~5.0 min, 工作日平均等待时间为4.0 min, 非工作日为4.1 min。与随机到站相比, 工作日和非工作日分别减少1.7 min和1.6 min, 与传统时刻表相比略有减少。设置时刻表后, 乘客能根据时刻表选择合适的出行时间, 减少了其在站点的等待时间, 改善了乘客的出行体验。本文时刻表是优先满足乘客使用时刻表能成功搭乘这一目标的, 其次设定了最大等待时间的约束, 因此与比传统时刻表相比提高了搭乘率的同时, 也相应减少了部分乘客的等待时间。

如图4所示, 与随机到站相比, 设置时刻表后

的乘客等待时间减少了1.5~2 min, 基本能控制在5 min以内, 主要是因为乘客依据时刻表出行时, 搭乘率明显提升, 大多数情况都能成功搭乘, 偶尔需要等待下一班车。另外, 三种情形下的平均等待时间均随着站点距离首站越远而不断增加。一方面是近站点的公交到站时间延误会影响后续站点到站时间的搭乘率, 因此也增加了后续站点的乘客平均等待时间。另一方面为了保证较高的服务可靠性, 时刻表中部分站点编排的到站时间较早, 不可避免地增加了乘客在这些站点的等待时间。

对比工作日和非工作日的情形发现, 各站点工作日的平均等待时间的差异相对较大, 且在太石工业区至好又多后的平均等待时间高于非工作

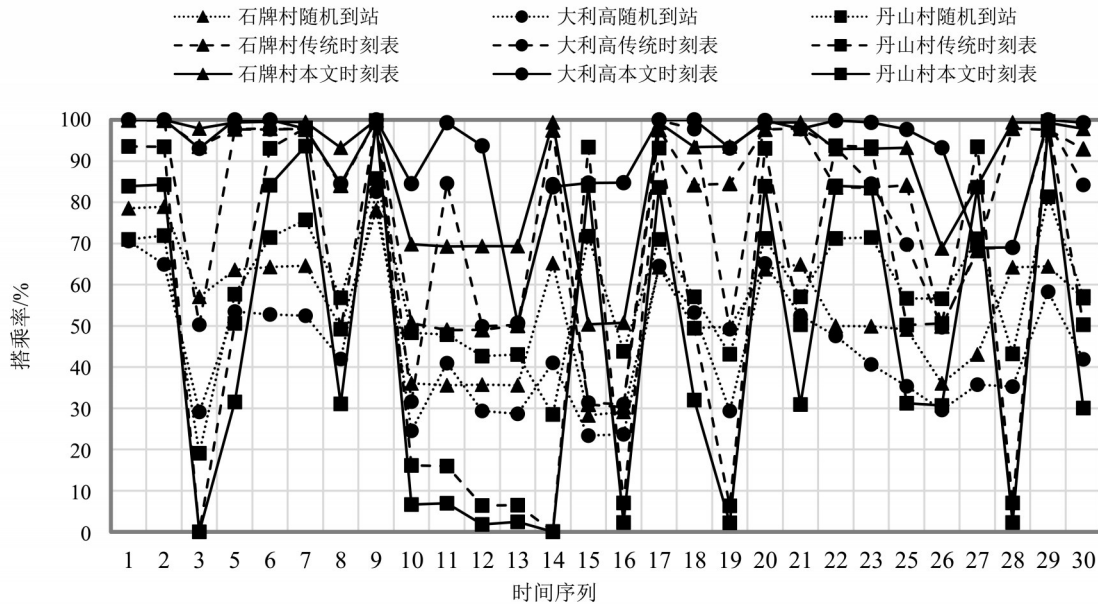


图3 站点搭乘率的时间分布

Fig. 3 Temporal distribution of boarding rate

日, 进一步说明这部分路段在工作日的交通状况相对较差, 从而影响了后面站点的等待时间。

(2) 站点平均等待时间的时间特征 在石牌村站, 乘客随机到站的平均等待时间约为 5 min, 传统时刻表和本文时刻表除个别时间外基本在 4 min 内, 且本文时刻表的等待时间大部分时间都小于传统时刻表。在大利高站, 本文时刻表在 10 月 9

日、17 日和 29 日出现了明显的高峰, 一方面是因为发车时间延迟了 2~4 min, 中间产生了到站延误; 另一方面时刻表为了保证较高的服务可靠性编排较早, 但整体效果仍比另两种情形好。在丹山村站, 随机到站的平均等待时间为 6 min 左右, 本文时刻表和传统时刻表差异不大, 大部分时间在 5 min 以内。

表4 平均等待时间评价结果

Table 4 Evaluation results of average waiting time

平均等待时间/min	随机到站		传统时刻表		本文时刻表	
	工作日	非工作日	工作日	非工作日	工作日	非工作日
最小值	5.1	5.1	3.7	3.9	2.7	3.5
最大值	6.6	6.6	5.0	4.6	5.0	4.9
平均值	5.7	5.7	4.3	4.3	4.0	4.1
近站点	5.4	5.5	4.0	4.2	3.4	4.0
远站点	6.0	6.0	4.7	4.3	4.6	4.3

### 4 结 语

本文从乘客的角度出发, 提出了用服务可靠性表示乘客根据时刻表候车成功搭乘的概率, 并结合考虑乘客候车心理和公交运营实际的约束, 构建了基于服务可靠性的公交时刻表编排模型以及搭乘率和平均等待时间两个评价指标, 并将模型应用于实际算例中。算例结果表明, 与传统方法和乘客随机到站相比, 搭乘率明显提高, 平均

等待时间也有所减少。因此, 验证了本文时刻表编排模型的可行性。文中的模型从乘客需求出发, 符合时刻表的服务理念, 同时满足等待时间约束及公交运营策略, 具有较高的实践价值。另外, 模型编排的结果也能为城市规划和公交运营提供辅助决策。

后续工作是基于公交线路特点, 进一步优化模型约束及参数选择, 以提高模型的普适性, 以

及研究时刻表发布后对人们出行行为的可能影响。

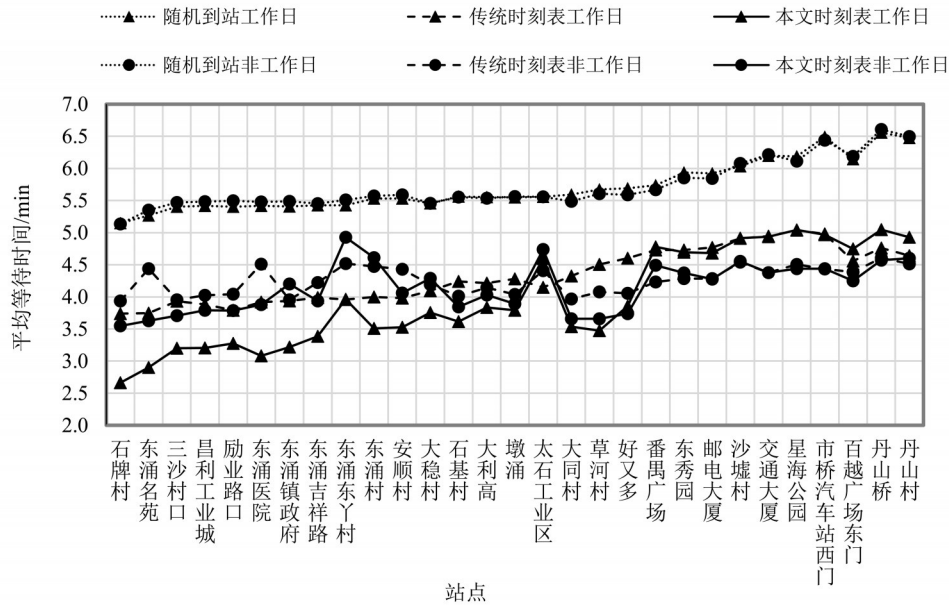


图4 不同到站情形的平均等待时间

Fig. 4 Average waiting time of different arrival situations

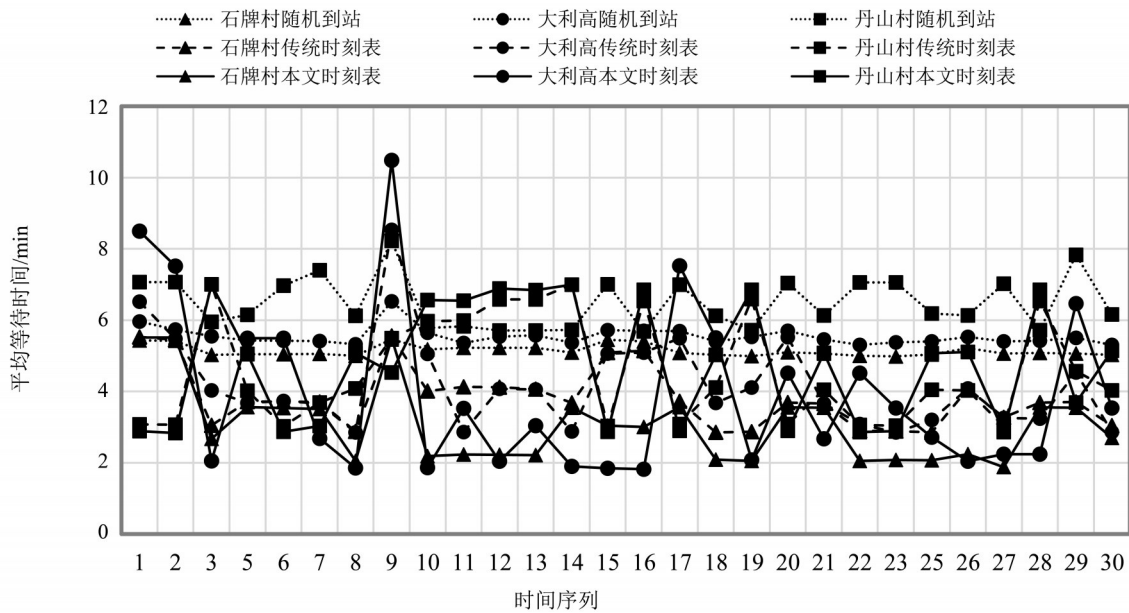


图5 站点平均等待时间的时间分布

Fig. 5 Temporal distribution of average waiting time

参考文献:

[1] 温惠英, 吴璐帆, 梅家骏. 基于改进 AHP 法的广佛城际公交满意度模糊综合评价[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2018, 57(5): 64-71.  
 WEN H Y, WU L F, MEI J J. Fuzzy comprehensive evaluation of Guangzhou-Foshan public transit satisfac-

tion of inter-city based on improved AHP method [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2018, 57(5): 64-71.  
 [2] 杨娜娜, 张青年, 黄健锋. 禁忌搜索与 SIC 模型结合在公交冗余站点优化中的应用[J]. 中山大学学报(自

- 然科学版), 2015, 54(4): 150-157.
- YANG N N, ZHANG Q N, HUANG J F. Improving bus stop redundancy using tabu search algorithm and SIC model [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2015, 54(4): 150-157.
- [3] 缪芳, 杨晓光, 滕靖. 上海市公布公交时刻表实施推进方案研究[J]. *交通与港航*, 2015, 2(6): 34-40.
- MIAO F, YANG X G, TENG J. Research on advancing plan for implementation of the public transport timetable in Shanghai[J]. *Public Utilities*, 2015, 2(6): 34-40.
- [4] CHEN M, LIU X B, XIA J X, et al. A dynamic bus-arrival time prediction model based on APC data[J]. *Computer-Aided Civil Infrastructure Engineering*, 2010, 19(5): 364-376.
- [5] VANAJAKSHI L, SUBRAMANIAN S C, SIVANANDAN R. Travel time prediction under heterogeneous traffic conditions using global positioning system data from buses [J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2009, 3(1): 1-9.
- [6] YU B, YANG Z Z, YAO B Z. Bus arrival time prediction using support vector machines[J]. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2007, 10(4): 151-158.
- [7] YU B, YANG Z Z, CHEN K, et al. Hybrid model for prediction of bus arrival times at next station[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2010, 44(3): 193-204.
- [8] JEONG R, RILETT R. Bus arrival time prediction using artificial neural network model [C]// *International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, 2004: 988-993.
- [9] PETERSEN N C, RODRIGUES F, PEREIRA F C. Multi-output bus travel time prediction with convolutional LSTM neural network[J]. *Expert Systems with Applications*, 2019: 426-435.
- [10] WANG L, ZUO Z Y, FU J H. Bus arrival time prediction using RBF neural networks adjusted by online data [J]. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 2014: 67-75.
- [11] YIN T T, ZHONG G, ZHANG J, et al. A prediction model of bus arrival time at stops with multi-routes[J]. *Transportation Research Procedia*, 2017, 25: 4623-4636.
- [12] YU B, LAM W H K, TAM M L. Bus arrival time prediction at bus stop with multiple routes[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2011, 19(6): 1157-1170.
- [13] 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.
- [14] CHU J C. Mixed-integer programming model and branch-and-price-and-cut algorithm for urban bus network design and timetabling [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2018, 108: 188-216.
- [15] SHANG H Y, HUANG H J, WU W X. Bus timetabling considering passenger satisfaction: An empirical study in Beijing[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019: 1155-1166.
- [16] SUN D, XU Y, PENG Z R. Timetable optimization for single bus line based on hybrid vehicle size model[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2015, 2(3): 179-186.
- [17] WU Y H, YANG H, TANG J F, et al. Multi-objective re-synchronizing of bus timetable: model, complexity and solution [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2016, 67: 149-168.
- [18] 刘环宇. 基于可靠性的公交时刻表优化设计研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- LIU H Y. Study on bus timetable optimization based on reliability [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.
- [19] 陈玥祺, 朱昊. 上海市 925 路到站时刻表化运行可行性探讨[J]. *交通与运输*, 2013(1): 58-61.
- CHEN Y Q, ZHU H. Research into the feasibility of Shanghai route 925 arrival schedule operation[J]. *Traffic & Transportation*, 2013(1): 58-61.
- [20] 吉婉欣, 杨东媛, 段征宇, 等. 基于公交准时化的时刻表制定方法研究[J]. *城市公共交通*, 2010(10): 32-36.
- JI W X, YANG D Y, DUAN Z Y, et al. Calculation method of timetable based on punctual transit [J]. *Urban Public Transport*, 2010(10): 32-36.

(责任编辑 王海蓉)