

平行公交系统中的计算实验问题研究

李润梅¹ 刘建忠¹ 朱凤华²

摘 要 研究了在平行公交系统中如何进行计算实验的问题. 平行公交系统中的计算实验主要通过以下三步完成: 1) 基于简化的数学模型的求解确定初始的公交车发车间隔; 2) 在一个较小范围内不断调整公交车发车间隔, 在平行公交系统中运行观察其运行效果, 形成不同的发车间隔方案; 3) 建立方案评价体系, 对得到的发车间隔方案进行评估, 确定最优发车方案. 在本文的计算实验实例中, 共进行了 6 次计算实验, 得到了一个最优的发车方案, 并基于结果数据说明了论文所提方法的其合理性.

关键词 智能交通, 平行公共交通系统, 代理, 计算实验

引用格式 李润梅, 刘建忠, 朱凤华. 平行公交系统中的计算实验问题研究. 自动化学报, 2013, 39(7): 1011–1017

DOI 10.3724/SP.J.1004.2013.01011

On Computational Experiment in Parallel Public Transportation System

LI Run-Mei¹ LIU Jian-Zhong¹ ZHU Feng-Hua²

Abstract The problem of how to carry out the computational experiments in the parallel public transportation system is studied. The computational experiments is done by the following three steps: 1) Determining the initial departure time of the buses by a method model; 2) Adjusting the initial departure time in a small interval to get some experiment plans in parallel public transportation system; 3) Assessing the plans by a simple evaluation algorithm to get the suitable departure time. The computing resulting shows the validness of the method proposed by paper.

Key words Intelligent transportation, parallel public transportation system, agent, computational experiment

Citation Li Run-Mei, Liu Jian-Zhong, Zhu Feng-Hua. On computational experiment in parallel public transportation system. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(7): 1011–1017

随着国民经济的快速发展, 我国城市化进程加快, 城市居民增加, 与之相应的是城市居民的出行需求也急剧增加, 这就给公共交通系统运行模式提出了新的要求.

研究者们已经在公共交通发车调度方面开展了大量工作, 并取得了众多的理论成果, 但实际系统中的应用却相当有限. 其主要原因在于城市交通系统复杂性已经远远超出数学模型描述能力, 调度方案优化和评价工作很难在事前开展实验, 传统的交通仿真方法因受建模算法或仿真对象的限制还存在

诸多局限, 往往会造成实验结果距现实的交通现象较远, 目前还只能作为模型与方法验证的一种辅助手段, 应用范围很有限.

着眼于城市交通系统的复杂性特点, 利用复杂系统的研究成果解决交通管理中的建模、实验、优化与评价问题正成为未来的重要发展方向, 其中, 基于 ACP 方法的平行交通系统理论将传统交通仿真推向了更高的层次和更广的视野, 已经成为当前的研究热点. 平行交通系统的核心是 ACP 方法, 即人工系统 (Artificial systems)、计算实验 (Computational experiments) 和平行执行 (Parallel execution) 三个部分, 具体可以描述为综合考虑工程、社会、人为和环境等各方面因素, 采用理论建模、经验建模和数据建模有机结合的方法, 建立与实际系统“等价”的人工系统, 解决实际系统难以进行传统建模的难题; 在人工系统上通过计算实验或“试验”来认识实际系统各要素间正常和非正常状态下的演化规律和相互作用关系, 通过二者的相互连接, 对二者之间的行为进行对比和分析, 研究对各自未来状况的“借鉴”和“预估”, 相应地调节各自的控制与管理方式. 平行交通系统理论在全球范围内得到了众多研究者的关注, 在理论研究和应用开发两个方面都开始走向成熟, IEEE 智能交通系统学会早在 2004 年就成立了人工交通系统专业委员会, 并从 2006 年

收稿日期 2012-03-07 录用日期 2012-10-22
Manuscript received March 7, 2012; accepted October 22, 2012
国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2011AA110404), 国家自然科学基金 (60904057), 中央高校基本科研业务费专项资金 (2011JBM213) 资助

Supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2011AA110404), National Natural Science Foundation of China (60904057), and Fundamental Research Funds for the Central Universities (2011JBM213)

本文责任编辑 刘德荣

Recommended by Associate Editor LIU De-Rong

1. 北京交通大学电子信息工程学院智能系统与再生能源研究中心 北京 100044 2. 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室 北京 100190

1. School of Electronic and Information Engineering of Beijing Jiaotong University, Beijing 100044 2. State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

开始组织每年一度的人工交通系统与仿真国际研讨会,原型系统已在实际交通管理中完成整体部署,取得显著效果^[1-3].

就公共交通发车调度来说,平行交通系统为从整体上描述公共交通运行场景提供了基本思路,并为开展调度方案实验提供了可行方法.平行公交系统为研究公交车辆的运行提供了一个新的平台,在这个平台上可以综合考虑公交运行中的交通参与者、交通环境、交通系统外部因素之间的相互作用,对公交运行过程中的各个方面进行大量的计算实验,通过计算实验来认识实际公交系统各要素正常和非正常状态下的规律和相互作用,通过对比各种实验方案,对实际公交系统的未来状况进行预测和评估,利用平行系统找到实际系统问题或规划的最优方案,并对其进行优化控制和管理.本文重点关注平行公交系统建立之后的计算实验问题.

1 计算实验

1.1 计算实验的作用

复杂社会系统和一般复杂系统之所以复杂的原因在于无法进行还原性分析与实验分析.无法进行还原分析是复杂系统和复杂性面临的本质性困难,而无法进行试验或实验分析是其面临着的手段性困难或工具性困难.公共交通系统是一个具有随机性、动态性、模糊性和自适应性的开放的复杂巨系统,包括人、车、路以及交通环境等,并受到整体社会发展中方方面面因素的影响.公共交通系统领域的研究也面临着上述的存在于复杂系统中的困难^[4].

“计算实验”这一概念的提出为解决以上问题提供了一种全新的、有效的方法.同人工生命和人工社会研究方法一样,除传统的仿真方法外,计算实验中的被试系统的计算模拟,将主要基于代理方法和相应的面向对象的编程技术,产生人工对象,通过人工对象的相互交往,自下而上的“主动”产生被试系统的各种行为.同时,由于主动性和综合型的模拟方式,在“计算试验”过程中必然会全面综合地考虑各种不同因素对被试系统行为的影响,所以必须进行整体系统行为的模拟.这与计算仿真仅可以模拟系统行为的一部分的能力完全不同.

需要指出的是,计算实验方法要成为研究复杂系统的有力工具,就必须建立起一套行之有效的基于涌现的观察和解释方法.近来提出的涌现计算(Emergent computation)及其应用,为此提供了很好的案例.本文致力于建立基于平行公交系统平台上的计算实验方案,着眼于对结果的评估和解释.

1.2 计算实验的执行模式

计算实验的执行是在实际系统的平行系统建立之后,它连接着实际系统与平行系统.计算实验的执

行模式可以被描述如下:

1) 首先,利用各种传感器实时采集实际系统中的有关数据,在平行系统中产生实际问题的解决方案.将所得方案以及在一个较小区间内对方案进行修正所得到的某些方案在平行系统中进行实验,得到效果最好的方案.

2) 将 1) 中所得效果最优方案应用于实际系统,观测其运行效果,同时对其运行效果以某一标准进行评估.这一标准根据关注重点的不同可以是某一个特别重要的指标,也可以是几个指标的加权和.

3) 在评估之后,根据评估结果以及目前实际系统的数据来决定是否更新现行方案.

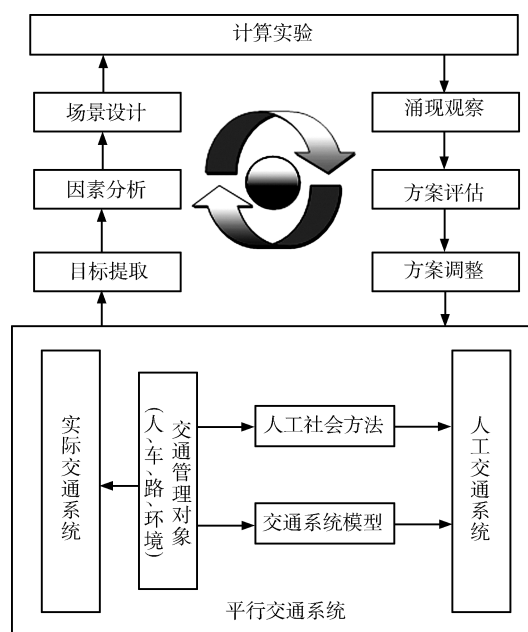


图1 计算实验的执行模式

Fig. 1 Execution mode of computational experiments

1.3 如何进行计算实验

数学建模方法是几乎所有科学研究的通用方法,公共交通系统领域的研究也是如此.其过程不外乎是通过对现实情况的合理假设,将对结果影响不大的因素合理丢弃,建立起数学模型,求解出实际问题的最优解或次优解^[5-7].

正如所见,数学建模方法无法准确、全面地描述公共交通系统运行过程中的各因素,同时这种方法只孤立关注待解决的问题,没有考虑公共交通系统中其余因素对这一问题的影响,所以利用数学建模方法所得到的公共交通系统的管理方案或某一问题的解决方案必然与实际问题的最优解有一定差距.

但与此同时,也应该看到数学建模方法中的假设在很大程度上都是合理的,并且它只对某些对结果影响不大的因素进行了丢弃,所以利用这一方法得到的结果必然在实际问题的最优解的某一区间之

内,可以在较大程度上反映最优解的某些特性,这也是为什么数学建模方法得到广泛应用的原因所在。

在进行计算实验的时候,是对实际问题所有的可行解都进行实验还是只对可行解的中的某些解进行实验是一个棘手的问题. 本文的研究中只对可行解集合中的一个比较靠近最优解的较小的子集合进行实验. 这个集合的确定就需要依靠数学建模方法. 如前所述,数学建模方法得到的问题的解决方案在很大程度上已经逼近实际问题的最优解,所以在数学建模方法得到的方案的某一区间对可行解进行实验,根据实验结果就可以得到实际问题的最优(次优)解,区间大小以及计算实验的次数可通过具体问题的精度要求、计算机性能等因素确定。

2 公交车辆发车间隔的计算实验

公交车辆的发车间隔是公共交通系统中的核心问题,直接决定着公共系统的服务质量以及公交运营公司的收益. 发车间隔时间过长容易导致乘客候车时间过长,违背公共交通的初衷,而发车时间过短则容易导致车辆的载客率偏低,无法满足公交运营公司的期望收益. 选取合适的发车间隔,在满足乘客的出行需求的前提下,尽可能提高公交公司的收益具有极大的社会与经济意义。

本文以某条线路公交车辆的发车间隔的确定来说明平行公交系统中计算实验的过程. 此公交线路为一个平行系统中某一个路网中的一条线路,运营时间为 5:00~23:00. 该路网如图 2 所示,其中的小点代表不同的生活场所,乘客人数由系统“自下而上”“涌现”产生。

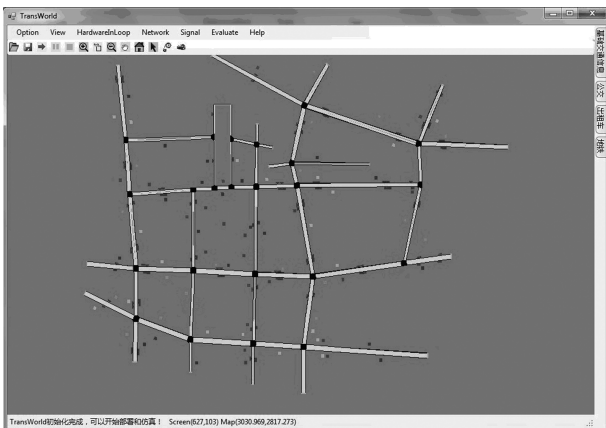


图 2 研究线路所在的路网

Fig. 2 The road net of researched line

2.1 利用数学模型确定初始发车间隔

确定公交车辆发车间隔的数学模型大多是优化模型,目标函数一般为乘客等待时间以及公交运营公司的利益,约束一般为公交运行中的一些实际约束,如载客率的约束、乘客候车时间的约束等。

考虑到多个方面的约束问题,本文采用 Yang 等在文献 [8] 中提出的数学模型来进行公交车辆发车间隔初始方案的确定. 该方案综合权衡了乘客与公交车运营公司两个方面的利益,较为适合描述这一问题. 其模型如下:

$$\max Z = \frac{1}{m} \left[w_1 \sum_{k=1}^m \delta(CW_k) + w_2 \sum_{k=1}^m \mu(P_k) \right]$$

$$\text{s.t. } M_{\min} \leq \frac{H_k^*}{T_k} \leq M_{\max} \\ \frac{H_k^*}{\Delta t_k} \leq C_v$$

$$CW_k = \sum_{i=1}^n \left(\bar{\omega} \Delta t_k \cdot \lambda_{ik}^{(u)} \cdot \frac{\Delta t_k}{2} \right)$$

$$P_k = R_k - C_k = \rho U_k - C F_k$$

$$\delta(x) = \begin{cases} 0, & x \geq a_{\max} \\ \frac{x - a_{\min}}{a_{\max} - a_{\min}}, & a_{\min} \leq x \leq a_{\max} \\ 1, & 0 \leq x \leq a_{\min} \end{cases}$$

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & 0 \leq x \leq b_{\min} \\ \frac{x - b_{\min}}{b_{\max} - b_{\min}}, & b_{\min} \leq x \leq b_{\max} \\ 1, & x \geq b_{\max} \end{cases}$$

其中, $\delta(x)$ 和 $\mu(x)$ 是隶属函数; w_1 、 w_2 是公交公司利益和乘客等车费用的权值,其值随乘客人数的不同而发生变化,在乘车高峰期乘客等车费用的权值要大些,在非高峰期公交公司利益权值要大些,但 $w_1 + w_2 = 1$; k 为公交运行时间内的不同时段,在求解过程中,把该线路的运营时间按每小时为一个时间段分为 18 个时间段, $T_k = 1, k = 1, 2, \dots, 18$; i 为某条公交线路上的总站点数, $i = 1, 2, \dots, 13$; $\bar{\omega}$ 为单位时间内乘客候车产生的社会成本; Δt_k 为公交运行时间内第 k 个时段内公交车辆发车间隔 (min); $\lambda_{ik}^{(u)}$ 乘客在第 k 个时间段内到达第 i 个站点的流率 (1/min); U_k 为在第 k 个时段内上车的乘客总人数,并假设各个站点在每 k 个时段乘客到达率相同; R_k 为第 k 个时段内公交公司的总收益; C_k 为第 k 个时段内公交公司的总的运营成本; F_k 为第 k 个时段内公交公司的总发车数; ρ 为单程票价; C_v 为公交车辆核定载客人数; H_k^* 为第 k 个时段中最大的乘客流; $M_{\min}$ 、 $M_{\max}$ 分别代表公交车最小及最大的载客率. 在求解此模型时,假设在某一时段到达公交站点的乘客在这一时段全部上车。

在求解过程中,模型中各主要参数取值如下所示:

$$w_1 = [0.9, 0.5, 0.1, 0.3, 0.4, 0.6, 0.6, 0.7, 0.7, 0.7, 0.6, 0.4, 0.2, 0.4, 0.4, 0.6, 0.7, 0.9];$$

$$w_2 = [0.1, 0.5, 0.9, 0.7, 0.6, 0.4, 0.4, 0.3, 0.3, 0.3, 0.4, 0.6, 0.8, 0.6, 0.6, 0.4, 0.3, 0.1];$$

$\bar{\omega} = 0.385$ 元/分钟;
 $U_k = [30, 700, 833, 785, 142, 103, 70, 42, 133, 211, 261, 654, 889, 557, 312, 282, 325, 133]$;
 $\rho = 1$ 元/次;
 $M_{\min} = 50\%$;
 $M_{\max} = 200\%$;
 $C_v = 30$.
以各时段发车间隔为变量, 用 Matlab 软件中的遗传算法命令 ga 求解得:
 $\Delta t_k = [15, 4, 3, 4, 12, 8, 12, 15, 12, 8, 4, 5, 4, 5, 7, 10, 9, 11]$.

2.2 时间间隔调整幅度的确定

初始方案确定后, 如何进行方案调整以寻找可能最优方案是计算实验的核心. 基于对所使用模型有效性的认可, 初始方案在实际条件下, 可以认为是一个较优的方案, 而计算实验的本质是围绕这个较优的方案进行方案微调, 以得到可能更优的改进结果. 因此, 重点讨论如何确定方案调整规则, 即发车间隔的调整间隔就成为研究的核心问题. 考虑到发车间隔直接受站点候车乘客人数的影响, 本文以乘客平均到达率为调整时段的确定指标.
定义 k 时段乘客的平均到达率为平均每分钟到达各站点的乘客人数, 记为 Ω_k :

$$\Omega_k = \frac{U_k}{60}, \quad k = 1, 2, \cdots, 18$$

根据第 2.1 节中 U_k 的取值, 可以计算得:
 $\Omega_k = [0.04, 0.90, 1.07, 1.01, 0.18, 0.13, 0.09, 0.05, 0.17, 0.27, 0.33, 0.84, 1.14, 0.71, 0.40, 0.36, 0.42, 0.17]$
显然, 在 1 分钟的调整幅度内, 在最大发车间隔下, 到站乘客数的最小变化量为 0.6, 在最小发车间隔下, 到站乘客数的最大变化量为 3.42, 在调整范围内, 有乘客人员的变化, 而变化量又不是非常大, 因此, 在以下的计算实验中, 时间间隔的调整幅度确定为 1 分钟.

2.3 计算实验

将初始公交发车间隔应用于此线路, 统计各时段乘客的平均候车时间和公交公司每时段发车数, 然后, 在此基础上分别将时间间隔加一分钟, 减一分钟再统计两次, 结果如表 1 所示.
其他方案, 首先将发车间隔中小于等于 5 的间隔加一分钟, 大于 5 的减一分钟进行实验, 然后将所有时间间隔减一分钟基础上将其中大于 5 分钟的间隔再减一分钟进行实验, 另外一种是将所有时间间隔加一分钟基础上将其中小于 5 分钟的间隔再加一分钟进行实验, 结果如表 2 所示.

表 1 实验结果
Table 1 Experiments results

时段	发车间隔	候车时间 (s)	发车数
5:00 ~ 6:00	15/14/16	102.3/90.1/100.5	5/5/4
6:00 ~ 7:00	4/3/5	74.69/62/74.86	15/21/15
7:00 ~ 8:00	3/2/4	24.95/19.54/31.3	20/30/15
8:00 ~ 9:00	4/3/5	33.33/26.57/33.31	15/20/12
9:00 ~ 10:00	12/11/13	40.04/21.55/32.73	5/5/4
10:00 ~ 11:00	8/7/9	72.85/42.67/42.01	7/9/8
11:00 ~ 12:00	12/11/13	52.4/40.58/60.71	5/6/6
12:00 ~ 13:00	15/14/16	23.33/20.62/27.21	4/5/4
13:00 ~ 14:00	12/11/13	63.14/76.05/83.44	5/6/6
14:00 ~ 15:00	8/7/9	105.31/86.84/96.28	8/9/8
15:00 ~ 16:00	4/3/5	89.2/64.87/114.96	15/21/13
16:00 ~ 17:00	5/4/6	41.59/34.99/49.54	12/15/10
17:00 ~ 18:00	4/3/5	48.64/31.89/37.39	15/20/12
18:00 ~ 19:00	5/4/6	42.67/20.89/42.99	12/15/10
19:00 ~ 20:00	7/6/8	86.78/46.29/77.22	8/10/7
20:00 ~ 21:00	10/9/11	346.89/240.01/333.4	6/6/6
21:00 ~ 22:00	9/8/10	560.05/445.74/570.75	7/9/8
22:00 ~ 23:00	11/10/12	430.13/111.06/44.94	5/7/5

表 2 实验结果
Table 2 Experiments results

时段	发车间隔	候车时间 (s)	发车数
5:00 ~ 6:00	14/13/16	110.30/95.44/103	5/5/4
6:00 ~ 7:00	5/3/6	100.68/70.88/86.16	13/21/13
7:00 ~ 8:00	4/2/5	38.96/14.58/58.54	15/30/12
8:00 ~ 9:00	5/3/6	43.98/34.61/47.38	12/20/10
9:00 ~ 10:00	11/10/13	32.12/27.74/41.07	5/6/4
10:00 ~ 11:00	7/6/9	26.33/40.83/47.01	10/10/7
11:00 ~ 12:00	11/10/13	39.87/34.28/57.66	6/6/5
12:00 ~ 13:00	14/13/16	33.07/31.41/32.21	5/4/4
13:00 ~ 14:00	11/10/13	87.96/54.51/74.16	6/7/5
14:00 ~ 15:00	7/6/9	102.28/85.04/89.98	9/10/7
15:00 ~ 16:00	5/3/6	72.13/63.62/90.23	13/20/11
16:00 ~ 17:00	6/4/6	35.86/33.95/49.05	11/15/10
17:00 ~ 18:00	5/3/6	51.87/36.64/29.61	12/20/10
18:00 ~ 19:00	6/4/6	41.56/18.15/43.24	10/15/10
19:00 ~ 20:00	6/5/8	82.71/64.64/79.46	10/12/7
20:00 ~ 21:00	9/8/11	299.65/221.37/259.82	6/7/6
21:00 ~ 22:00	8/7/10	491.88/500.29/524.65	8/9/7
22:00 ~ 23:00	10/9/12	153.49/245.49/42.29	7/7/5

2.4 计算实验结果分析

实验中公交车辆核定载客人数为 30 人/辆, 计算各试验方案下一天中乘客平均候车时间, 公交公

司的平均载客率以及公交车总的发车数. 定义一天中乘客平均候车时间为

$$t_w = \frac{\sum_{k=1}^{18} t_{kw}}{18} \quad (1)$$

一天中公交车辆平均载客率为

$$Q = \frac{\sum_{k=1}^{18} U_k}{\sum_{k=1}^{18} N_k \times 30} \quad (2)$$

一天中公交车总的发车次数为

$$N = \sum_1^{18} N_k \quad (3)$$

其中, t_{kw} 为各时段乘客平均候车时间, N_k 为各时段公交车辆发车数.

根据式 (3), 对各实验结果进行计算, 结果如图 3 ~ 5 所示.

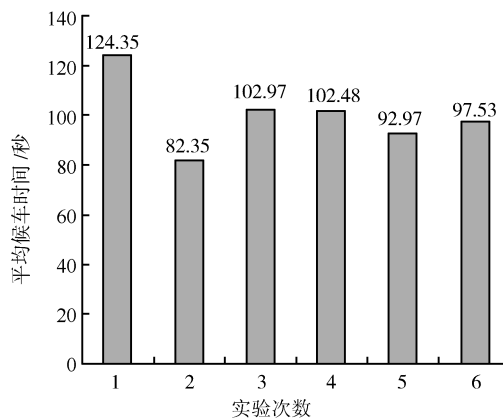


图 3 一天中乘客平均候车时间

Fig. 3 Average waiting time of a passenger one day

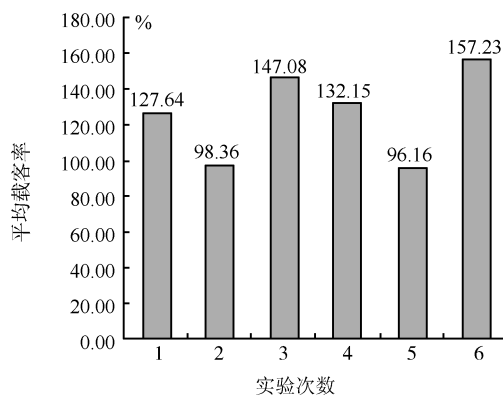


图 4 一天中车辆平均载客率

Fig. 4. Average load factor of a bus one day

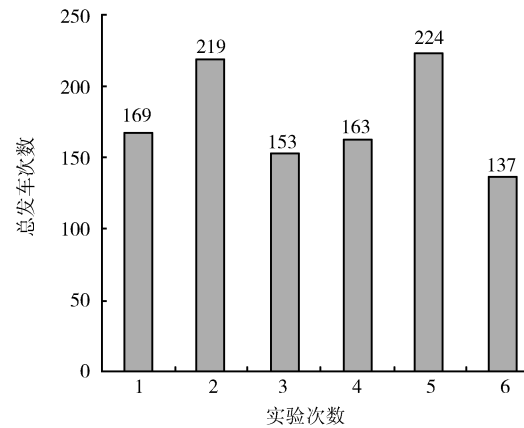


图 5 一天中车辆总发车次数

Fig. 5 Total departure times of buses one day

2.5 计算实验结果评估

为了对具有多指标的实验结果有一个直观、感性的认识, 从而判定实验结果的优劣, 必须对实验结果的各指标值进行融合. 常用的融合方法有加权平均法、贝叶斯估计、卡尔曼滤波、模糊数学算法以及神经网络等方法^[9-15].

为简单起见, 本文采用加权平均法对实验结果进行评估. 因为乘客的候车时间和公交车辆的平均载客率是一对相互矛盾的指标, 所以先对乘客平均候车时间进行处理, 然后, 进行加权计算, 以使得这两个指标均为指标值越大, 所产生的社会效益也越大.

$$p = \frac{w_p(300 - t_w)}{60} + w_c Q \quad (4)$$

其中, w_p 为决策时乘客的权重, w_c 为决策时公交公司的权重, t_w 、 Q 的含义分别为上文提到的一天中的平均候车时间以及平均载客率, p 为综合指标值, 300 为乘客可忍受的最长的候车时间, 单位: 秒, 60 为时间单位转换系数.

由于公交系统属于公益事业, 目的在于减轻城市交通压力, 所以在对发车时间间隔问题进行决策时, 应更倾向于乘客的利益. 根据综合调查法, 乘客的候车时间和公交车辆的载客率的权重分别取为 0.7、0.3. 实验结果的评估结果如图 6 所示.

由图 6 可以看出, 综合考虑平均候车时间和平均载客率, 该线路各时段的发车时间间隔应该选取试验 2 所采用的方案, 即:

$$\Delta t_k = [14, 3, 2, 3, 11, 7, 11, 14, 11, 7, 3, 4, 3, 4, 76, 19, 8, 10]$$

虽然方案 2 的综合评价最优, 而初始方案的评价值小于所有调整后方案, 但从其他指标来看, 如平均载客率, 方案 2 是比较低的, 总发车次数也是比较高的. 因此, 实验方案的评估方式是确定优化方案的标准或条件, 因此, 科学合理的制定方案的评估体系非常重要.

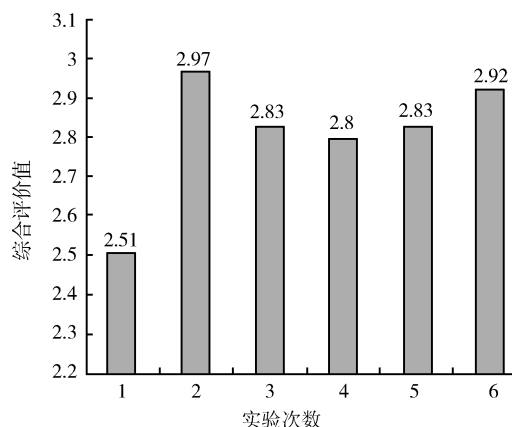


图6 实验结果的评估结果

Fig.6 Assessment results of computing experiments results

此外,还可以从其他的方面来进行评估,如乘客对于所乘公交车的满意度情况.此时,考虑的因素有以下几点:平均候车时间 t_w 、乘车时的拥挤情况 M (与载客率 Q 很相关)、车辆的速度 V .

未来也可以评估一下公交车系统引起的交通堵塞问题,这个问题涉及的主要因素有:公交车的发车次数 N 、车辆的速度 V 、乘客的候车时间 t_w 等.

3 结语

平行公交系统中的计算实验是整个 ACP 方法体系中比较重要的一环,通过计算实验可以认识实际公交系统各要素正常和非正常状态下的规律和相互作用,通过对比对各种实验方案,对实际公交系统的未来状况进行预测和评估,根据用户关注的重点的不同,找到实际系统中问题或规划的最优方案,并对其进行优化控制和管理计算实验.本文针对平行公交系统中的一条公交线路的运行建立了平行公交系统中的计算实验框架,进行公交车发车时间间隔的计算实验,确定了计算实验的执行模式,得到了该线路的最优发车间隔时间方案.

然而,本文也存在如下不足:

1) 初始方案的确定具有较大随意性.初始方案直接影响着后续实验方案的产生,它决定了将要寻找的最优解所在的范围,初始方案是否准确将直接影响到计算实验的成败,关系到是否能找到实际问题的最优(次优)解.因此,初始方案应该从多方面进行考虑综合而得.

2) 实验方案的理论支持及实验次数较少.在一个实际问题进行计算实验时,首先应基于较为严密的理论指导确定实验方式,并利用高性能计算机计算速度快的优点,在以初始方案为中心的一个较大可行解范围内进行大量计算实验,以免遗漏实际问题的最优解,本文初步探索了计算实验的执行模式,但对实验的理论依据研究尚不深入.

3) 对实验结果的分析 and 评估不足.在对结果进行评估时,本文为简单起见,选用加权平均法进行评估.下一步的研究将探索多维评估理论和方法,综合考虑多种因素对方案进行评估,以确定可能的最优方案.

4) 实验方案不完善,如时段的划分、模型参数的设定、方案选择规则等都较为简单,实验数据较少.下一步的工作将在平行公交系统平台进一步完善的情况下,更加深入的进行上述问题的探讨和研究.

References

- 1 Wang Fei-Yue. Parallel system methods for management and control of complex systems. *Control and Decision*, 2004, **19**(5): 485–489, 514
(王飞跃. 平行系统方法与复杂系统的管理和控制. 控制与决策, 2004, **19**(5): 485–489, 514)
- 2 Wang F Y. Computational experiments for behavior analysis and decision evaluation of complex systems. *Journal of System Simulation*, 2004, **16**(5): 893–897
- 3 Wang F Y. Parallel control and management for intelligent transportation systems: concepts, architectures, and applications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2010, **11**(3): 630–638
- 4 Tang Shu-Ming, Wang Fei-Yue, Liu Xiao-Ming, Jia Xing-Wu, Liu Xue-Jun, Li Jian-Xin. A preliminary investigation on artificial transportation systems. *Journal of System Simulation*, 2005, **17**(3): 704–709
(汤淑明, 王飞跃, 刘小明, 贾兴无, 刘学军, 李建新. 人工交通系统的研究初探. 系统仿真学报, 2005, **17**(3): 704–709)
- 5 Han Yin. Research on optimization of intelligent public transport headway based on genetic algorithm. *Computer Engineering and Applications*, 2008, **44**(33): 243–245
(韩印. 基于遗传算法的智能公交发车频率优化研究. 计算机工程与应用, 2008, **44**(33): 243–245)
- 6 Tong Gang. Application study of genetic algorithm on bus scheduling. *Computer Engineering*, 2005, **31**(13): 29–31
(童刚. 遗传算法在公交调度中的应用研究. 计算机工程, 2005, **31**(13): 29–31)
- 7 Zhang Fei-Zhou, Yan Lei, Fan Yue-Zu, Sun Xian-Fang. Research on dispatching methods of public traffic vehicles in intelligent transport system. *China Journal of Highway and Transport*, 2003, **16**(2): 82–85
(张飞舟, 晏磊, 范跃祖, 孙先仿. 智能交通系统中的公交车辆调度方法研究. 中国公路学报, 2003, **16**(2): 82–85)
- 8 Yang Z W, Zhao S C, Zhao Q. Research on bus scheduling based on artificial immune algorithm. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*. Dalian, China: IEEE, 2008. 1–4

- 9 Zhang Yi, Luo Yuan, Zheng Tai-Xiong. Mobile robot technology and it's applications. *Information Fusion*. Beijing: Electronic Industry Press, 2007 290–310
(张毅, 罗元, 郑太雄. 移动机器人技术及其应用. 北京: 电子工业出版社, 2007)
- 10 Su Zhao-Pin, Jiang Jian-Guo, Xia Na, Zhang Guo-Fu. An evaluation method for agent coalition based on D-S evidence theory. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2007, **20**(5): 624–629
(苏兆品, 蒋建国, 夏娜, 张国富. 一种基于 D-S 证据理论的 Agent 联盟评价方法. 模式识别与人工智能, 2007, **20**(5): 624–629)
- 11 Chen S M, Lee L W. Fuzzy multiple attributes group decision-making based on the ranking values and the arithmetic operations of interval type-2 fuzzy sets. *Expert Systems with Applications*, 2010, **37**(1): 824–833
- 12 Liu N, Zhang J H, Wu X. Asset analysis of risk assessment for IEC 61850-based power control systems, Part II: Application in substation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, **26**(2): 876–881
- 13 Pishvae M S, Torabi S A, Razmi J. Credibility-based fuzzy mathematical programming model for green logistics design under uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, 2012, **62**(2): 624–632
- 14 Tansel iC, Yurdakul M. Development of a quick credibility scoring decision support system using fuzzy TOPSIS. *Expert Systems with Application*, 2010, **37**(1): 567–574
- 15 Chen S M, Yang M W, Lee L W. A new method for fuzzy multiple attributes group decision making based on ranking interval type-2 fuzzy sets. In: *Proceedings of the 2011 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*. Guilin, China: IEEE, 2011. 142–147



李润梅 北京交通大学副教授. 2005 年于中国科学院自动化研究所获得工学博士学位. 主要研究方向为动态交通规划, 人工交通系统. 本文通信作者.

E-mail: rmli@bjtu.edu.cn

(**LI Run-Mei** Associate professor at Beijing Jiaotong University. She received her Ph.D. degree from the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences in 2005. Her research interest covers artificial transportation systems and dynamic traffic assignment. Corresponding author of this paper.)



刘建忠 北京交通大学电子信息工程学院硕士研究生. 主要研究方向为智能交通系统. E-mail: 09126323@bjtu.edu.cn

(**LIU Jian-Zhong** Master Student at the School of Electronic and Information Engineering of Beijing Jiaotong University. His research interest covers intelligent transportation systems.)



朱凤华 中国科学院自动化研究所助理研究员. 2008 年于中国科学院自动化研究所获得工学博士学位. 主要研究方向为人工交通系统, 平行交通管理系统. E-mail: zhu@bjtu.edu.cn

(**ZHU Feng-Hua** Assistant professor at the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. He received his Ph.D. degree in control theory and control engineering from the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences in 2008. His research interest covers artificial transportation systems and parallel transportation management systems.)