

文章编号: 1002-0268 (2005) 10-0132-04

公共交通系统营运可靠性研究

赵 航, 宋 瑞

(北京交通大学交通运输学院, 北京 100044)

摘要: 优先发展公共交通是大城市解决交通拥堵, 实现城市交通可持续发展的一项重要措施, 然而, 公交营运水平的低下制约着公交的发展。本文借鉴可靠性理论对公共交通营运可靠性进行定义, 并对公交营运时间和乘客服务可靠性分别进行了描述, 据此建立起公交系统营运可靠性模型, 然后采用随机模拟技术 (即 Monte Carlo 模拟) 进行求解, 通过算例说明模型的可行性, 最后通过分析可靠性模型得出大型活动期间改善公交营运的途径。

关键词: 交通工程; 营运可靠性; Monte Carlo 模拟; 公共交通; 出行时间

中图分类号: U491.1⁺12

文献标识码: A

Study on Reliability of Transit Operation

ZHAO Hang, SONG Rui

(School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: It is very important measure to develop public transportation for resolving traffic jam and carrying out sustainable urban traffic development, but the development of public transportation is restricted by service level of the transit operation. This paper describes the reliability of transit operation with the reliability theory. And the reliability of travel time and customer services is defined in the paper. According to the definitions, the modal of the reliability of transit operation can be established, and it can be computed by Monte Carlo simulation. The feasibility of the modal was testified by the example. The way of improving service was proposed by analyzing the modal of the reliability for big event.

Key words: Traffic engineering; Operational reliability; Monte Carlo simulation; Public transportation; Travel time

0 引言

城市交通中交通流和道路容量间的矛盾与日俱增, 特别是在高峰时段, 问题表现得更为突出, 而像北京这样的大城市还要承担主办许多大型活动的任务, 例如奥运会, 在大型活动的当天就会诱发更大的交通出行, 车速低下、车辆阻塞很可能成为制约大型活动成功举办的一大障碍。解决这一突出问题的一个最有效的方法就是优先发展公共交通。为了不影响市民的正常生活出行以及参加大型活动的出行, 这意味着公交应替代小汽车、自行车等私人交通出行方式,

成为市民在大型活动举办期间出行的主要选择。显然, 就会将大量原本采用其他交通方式的交通出行量以及大型活动诱增的交通出行量分担到公共交通上, 这就对公交企业提出了新的问题——这样巨大的交通出行量以公交企业现有的营运条件或改进后的条件是否能成功的完成任务, 由于存在许多不确定因素, 则应考虑完成任务的概率有多大, 以及在该营运条件下公交企业营运对于出行需求变化和走行时间变化的应变能力。而对于需要出行的乘客来说, 考虑的是公交企业是否能按时完成运送乘客到达目的地的任务。这就需要引入可靠性理论来对问题进行研究。

收稿日期: 2004-07-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (70371014)

作者简介: 赵航 (1981-), 男, 贵州贵阳人, 研究生, 主要研究方向为交通运输规划与管理. (wazua@sina.com)

对于可靠性理论在交通领域的应用, 国内外专家、学者的研究取得了一些成果: 文献 [1] 对城市道路网进行可靠性定义, 建立基于出行时长的路网可靠性模型, 并对模型进行仿真计算; 文献 [2] 进一步对公交网络可靠性建立双层规划模型, 上层模型使整个网络系统可靠达到最优, 下层满足用户平衡模型; 文献 [3] 研究了公共交通运输服务时刻表的可靠性和准时性的计算方法, 讨论了这些计算方法的前提和特性以及相互关系, 并得到可以用于预测的基于时刻表延误的可靠性计算方法; 文献 [4] 研究了公共交通运输链的可靠性, 通过对公共交通运输的出发时间和到达时间的可靠性分析来研究失去交通运输联结性所带来的运输时刻表的延误; 文献 [5] 研究了基于效用理论的出行时间可靠性评价及该评价对出行方式选择的影响, 并给出了可靠性评价的计算方法。综上所述, 国内研究交通网络可靠性的文献较多, 而研究公交营运可靠性的较少, 国外对公交时刻表的可靠性进行了一定的研究, 考虑了周期性的延误对营运可靠性造成的影响, 但是这些对可靠性的研究比较复杂, 而更快甚至不是很精确的可靠性计算方法常常在实际中得到应用。本文主要从公交企业角度出发, 不仅考虑公交走行时间由于延误带来的可靠性变化, 还要考虑出行需求变化带来的可靠性变化, 据此建立简单的营运可靠性模型, 通过快速简便的随机模拟技术进行求解, 从而可以了解在一定条件下公共交通的应变能力。

本文结构安排为: 引言部分介绍研究背景, 提出问题并进行文献综述; 第 1 部分给出可靠性定义; 第 2 部分给出可靠性的算法; 第 3 部分是算例分析; 第 4 部分为结论。

1 公交系统营运可靠性的定义

广义来讲, 公共交通系统营运服务的可靠性可定义为: 在一定的营运条件下, 在规定的时间内, 完成规定任务的能力。这里规定的时间是指大型活动开始之前到达活动举办的场所, 体现的是公交营运的时间可靠性; 而规定的任务则是将每位乘客按时送到目的地, 体现的是公交营运乘客服务可靠性; 同时可以定义公交系统发生故障为乘客不能在规定的时间内到达目的地。

为了从可靠性角度出发研究公交系统营运各路段时间和各车站乘客之间的逻辑关系, 可绘制单一线路的公交系统营运的可靠性框图, 如图 1。



图 1 公交系统营运的可靠性框图

公交营运系统类似于一个串联系统, 由 $n + 1$ 个车站和 n 条路段 (车站之间的线路) 组成的系统, 其中由于城市公交营运受到一定速度的限制, 在前面某一路段发生延迟, 很难在后面的路段将延迟的时间追赶回来, 因此, 如果因为延迟不能按时完成任务就会出现前面定义的公交系统营运故障; 同时, 如果公交服务不能将每个积聚在各车站的乘客运送到目的地, 可认为发生了营运故障。由以上分析可以知道, 公交系统营运的可靠性与各路段的时间可靠性和各车站乘客服务的可靠性有关。

1.1 公交营运时间可靠性的计算

根据文献 [6] 对工程可靠性的定义, 对公交有 $n + 1$ 个车站, n 条路段, 每个路段上的时间可靠性为 $R_i = P\{T_i \leq t_i\}$ ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), 这里 T_i 为到达第 i 个车站的时刻, t_i 为规定到达第 i 个车站的时刻。所以公交营运系统的时间可靠性为

$$R_T(t) = P\{T_n \leq t_n | \dots | T_i \leq t_i | \dots | T_2 \leq t_2 | T_1 \leq t_1\} \quad (1)$$

而且有

$$T_i = S_k + \sum_{j=1}^i T'_j \quad (2)$$

其中, S_k 为第 k 辆公交车发车时刻, $k = 1, 2, \dots$; T'_i 为第 $i-1$ 站到第 i 站的走行时间, 是随机变量且相互独立。将 (2) 式代入 (1) 式有

$$R_T^k(t) = P\{T_n^k \leq t_n | \dots | T_i^k \leq t_i | \dots | T_2^k \leq t_2 | T_1^k \leq t_1\} = P\{S_k + \sum_{i=1}^n T'_i \leq t_n | \dots | S_k + T'_1 \leq t_1\} = P\left\{\sum_{i=1}^n T'_i \leq t_n - S_k | \dots | T'_1 \leq t_1 - S_k\right\} \quad (3)$$

其中, T_i^k 表示第 k 辆车到达第 i 个车站的时刻; $R_T^k(t)$ 是第 k 辆车在路段上行驶的时间可靠性。

1.2 公交系统乘客服务可靠性

乘客的服务主要是在车站上完成, 公交服务的任务是将乘客运送到目的地。可以得到乘客在各站的 OD 出行需求矩阵, 这里的 OD 矩阵中的各点的 OD 量是随机变量, 为了计算方便, 定义 OD 矩阵为在一定时间段 $[T_1, T_2]$ 内产生的乘客出行量。因此, 可以定义对乘客服务的可靠性为

$$R_c = P\left\{\max_i \left[\sum_j \left(\sum_{m=1}^n x_{jm} - \sum_{m=1}^i x_{mi} \right) \right] \leq \frac{T_2 - T_1}{h} Q_k \right\} \quad (4)$$

这里, R_c 为乘客服务可靠性; x_{ij} 、 x_{mi} 分别为第 i 、 m 站

到达第 j, i 站的随机乘客数; h 为在 $[T_1, T_2]$ 时段内的发车间隔; Q_k 为公交车辆 k 的固定运载能力, 其中, $k = 1, 2, \dots$; 而 $\max_i \left[\sum_{j=1+1}^n x_{ij} - \sum_{m=1}^i x_{mi} \right]$ 则是各站断面需求公交车服务的最大乘客数; 若在该时段内公交车的总运量 $(T_2 - T_1) Q_k / h$, 满足各站断面上需求公交车服务的最大乘客数, 即可以使在该时段内的每位乘客得到服务。

1.3 公交系统营运的可靠性模型

公交系统营运的任务主要是在一定的时间内, 将乘客运送目的地。可以由定义知包括了时间可靠性和对乘客服务的可靠性, 而且对于公交车的营运来说路段上的走行时间和乘客的需求量可以看作是独立的。则有公交系统营运的可靠性模型为

$$R_o = R_c \cdot R_T(t) = R_c \cdot \prod_k R_T^k(t) \quad (5)$$

其中, R_o 表示公交系统营运可靠性。

而在某一发车时刻发车的第 k 辆公交车的营运可靠性为

$$R_o^k = R_c \cdot R_T^k(t) \quad (6)$$

2 算法

对于式(3)的计算可以采用解析法计算, 若式(3)中 T'_i 服从某一已知分布, 这里可以假设服从正态分布, 则有 $T'_1 \sim N(\mu_1, \sigma_1^2), T'_2 \sim N(\mu_2, \sigma_2^2)$; 则

$$R_T^k(t) = P\{T_2 \leq t_2 | T_1 \leq t_1\} = \frac{P\{T_1 \leq t_1, T_2 \leq t_2\}}{P\{T_1 \leq t_1\}} = \frac{P\{T'_1 \leq t - S_k, T'_1 + T'_2 \leq t_2 - S_k\}}{P\{T'_1 \leq t_1 - S_k\}} = \frac{P\left\{T'_1 \leq t_1 - S_k, T'_1 + T'_2 \leq t_2 - S_k\right\}}{P\left\{\frac{T'_1 - \mu_1}{\sigma_1} \leq \frac{(t_1 - S_k) - \mu_1}{\sigma_1}\right\}} = \frac{P\{T'_1 \leq t_1 - S_k, T'_1 + T'_2 \leq t_2 - S_k\}}{\Phi\left\{\frac{(t_1 - S_k) - \mu_1}{\sigma_1}\right\}} \quad (7)$$

这里, $\Phi\{\cdot\}$ 表示标准正态分布下的概率取值, 可以通过查表得到。

从上面的计算可以看到采用解析法计算, 难度很大, 如果路段较多时, 则计算将无法进行, 所以解析法不是求解可靠性的有效方法。

式(3)和式(4)还可以采用随机模拟技术(即 Monte Carlo 模拟)进行求解; 通过模拟反映系统本质的数学模型, 运用计算机对过程或系统运行进行模仿, 从而定量地获得系统的性状指标, 为决策服务。虽然模拟是一种很不精确的技术, 其提供的仅仅是一

个统计估计而不是一个精确解, 有时耗时较多, 费用较高, 但对那些无法用解析方法处理的模型, 模拟则可获得问题的合意解。随机模拟是一种实现随机(或确定)系统抽样实验的技术, 其基础是从给定的概率分布中抽取随机变量^[7]。限于篇幅, 具体的模拟方法参见文献[7]。

3 算例分析

假设某公交线路由 5 个站点、4 条路线组成, 某大型活动举办地靠近第 4 个站点, 车辆为标准车型, 每辆最大载客量为 90 人, 且该大型活动的开始时间为下午 14:30, 这里研究公交营运可靠性主要是研究在活动开始前的一段时间内公交营运的可靠性, 对于发车的起点站主要考虑的是在活动开始前, 一般情况下按时到达活动举办地点的最后一班车的发车时刻, 以后的发车时刻则不作为这里的研究范围; 活动开始前的最后一班车从起点到终点的平均走行时间为: $18 + 15 + 14 + 13 = 60$ (min), 则这里的最后一班车发车的时刻要在 13:30 以前; 各路段的走行时间服从正态分布。各分布具体情况如表 1, 时段 12:00~14:30 内产生的乘客数的 OD 矩阵见表 2。

表 1 公交车在各站间的走行时间分布 min

时段	起点站~1站	1~2站	2~3站	3~4站
12:00~14:30	$N(18, 25)$	$N(15, 16)$	$N(14, 49)$	$N(13, 36)$

表 2 时段 12:00~14:30 内产生的乘客数的 OD 矩阵人

0	D			
	1	2	3	4
1	-	$N(500, 100^2)$	$N(430, 100^2)$	$N(400, 100^2)$
2		-	$N(500, 100^2)$	$N(550, 100^2)$
3			-	$N(800, 100^2)$
4				-

同时, 由路段上的一般走行时间可以得到, 在 13:48, 14:03, 14:17, 14:30 以前分别到达第 1、2、3、4 站, 都可以认为该辆公交车在活动开始之前有到达第 4 站的可能; 通过 Visual C++ 程序语言在 Windows 操作系统下进行计算机编程模拟, 可以计算在该时段内不同的发车频率的可靠性, 结果如图 1 所示。

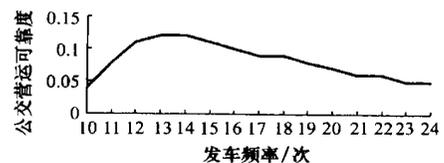


图 1 不同发车频率的公交营运可靠性

计算在不同的发车频率下公交系统对乘客的服务

可靠性, 如图 2 所示。

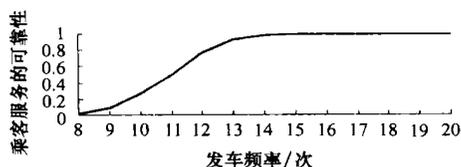


图 2 公交系统对乘客的服务可靠性

通过改变乘客需求的 OD 概率分布, 还可以检验在该营运条件下公交系统的可靠性, 以及对乘客服务的可靠性, 从而了解该系统的应变能力, 限于篇幅这里不作进一步比较。

由图 1 和图 2 可知, 发车频率为 14 时, 公交系统对乘客的服务可靠性接近 1, 且公交系统营运的可靠性最大, 这里还可以通过计算得到各发车时刻发出的公交车的时间可靠性, 如图 3 所示。

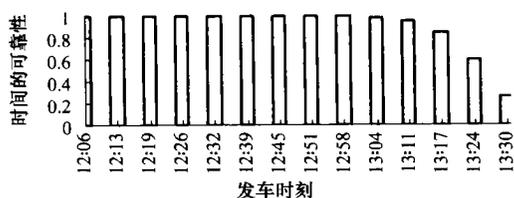


图 3 各发车时刻发出的公交车的时间可靠性

由图 3 可看出, 当乘客在时刻 13 11、13 17、13 : 24、13 30 之间上车, 要在大型活动开始之前到达目的地的可靠性在下降, 说明乘客要想及早赶到目的地, 越提前, 可靠性就越大。

还可以进一步计算在该时段内发车频率为 14 时各发车时刻公交车的营运可靠性, 如图 4 所示。

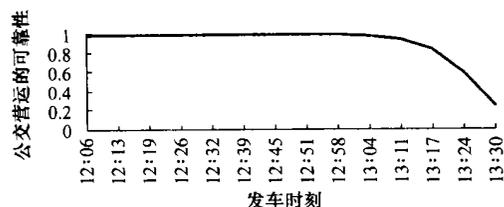


图 4 各发车时刻的公交车的营运可靠性

由图 4 可以看到, 在该营运条件下, 12 00~ 13: 30 时段内发车频率为 13 和 14 时, 对乘客的服务可靠性接近 1, 但是公交系统的营运可靠性却不到 0.15, 整体可靠性不高的原因, 可以从图 3 和图 4 了解到, 主要是在接近时刻 13 30 出发的车辆在规定的时间内赶到目的地的可能性不大, 而这几辆车同样承担着运送乘客到达活动现场的任务。因此, 如何解决临近大型活动开始之前的一段时间内公交车能否按时到达活动地点, 是决定公交系统营运是否可靠的关键。

对于如何提高临近大型活动开始之前的一段时间

内公交车营运可靠性, 由可靠性模型的参数可得到解决途径:

(1) 对大型活动参与者发布出行信息, 使参与者尽量在可靠性较大的时段内出行, 同时, 公交企业需要在该时段内重新调整发车间隔以满足乘客需求。

(2) 在大型活动开始之前的一段时间内采取公交优先策略, 设立公交车专用车道, 改善交叉口信号控制使公交车优先通过。

(3) 鼓励活动参与者尽量采用轨道交通方式到达活动地点, 以减少在路段上的延误。

4 结论

公共交通承担着大部分大型活动参与者的运输任务, 这对于公交企业的服务能力是一个很大的考验, 这就要求公交企业的服务能力要按照一定的可靠性进行规划, 体现为公交企业应具有一定的应变能力, 因为在做大型活动的交通需求预测时也仅仅是对需求的一个初步估计, 准确的数据是很难预测, 这就要求公交企业在承担大型活动的任务前要进行一定的服务可靠性分析, 以保证公交企业的服务具有一定的应变能力。

从算例中可以得到, 要提高公交系统的可靠性, 在一定程度上, 是要保证在大型活动开始之前的一段时间内所发出的公交车能按时到达各站, 因为在时间紧迫的运输任务中, 对如何缩短延误的要求更高, 更加体现了公交企业服务的可靠性, 因此在时间紧迫的条件下, 如何缩短公交延误, 是改善公交系统营运的关键。

参考文献:

- [1] 侯立文, 蒋馥. 城市道路网的可靠性仿真 [J]. 系统仿真学报, 2002, 5: 664- 668.
- [2] 毛林繁. 城市公交网络可靠性的双层规划模型 [J]. 中国公路学报, 2002, 7: 88- 91.
- [3] Malachy Carey. Ex ante heuristic measures of schedule reliability [J]. Transportation Research Part B, 1999, 33(4): 73- 494.
- [4] P Rietveld, FR Bruinsma, DJ van Vuuren. Coping with unreliability in public transport chains: A case study for Netherlands [J]. Transportation Research Part A, 2001 (35): 539- 559
- [5] John Bates, John Polak, Peter Jones, Andrew Cook. The valuation of reliability for personal travel [J]. Transportation Research Part E, 2001, 37: 191- 229.
- [6] 王少萍. 工程可靠性 [M]. 北京航空航天大学出版社, 2000.
- [7] 刘宝碇, 赵瑞清. 随机规划与模糊规划 [M]. 清华大学出版社, 1998.