

基于时空路径的城市公交时间可靠性研究

胡继华^{1,2}, 程智锋^{1,2}, 詹承志^{1,2}, 陈 熹^{1,2}

(1. 中山大学工学院智能交通研究中心, 广东 广州 510275; 2. 广东省智能交通系统重点实验室, 广东 广州 510275)

摘要: 时间可靠性是公交重要的时空特性之一, 提高公交时间可靠性有助于提高公共交通吸引力。基于时间地理学, 从时空过程的角度对公交时间可靠性进行了研究。利用公交时空路径, 提出一种城市公交时间可靠性的评价方法, 该方法包括单程准时度、单程准时稳定度、站点准时度、站点准时稳定度4个指标。然后利用广州公交GPS数据对各指标进行计算。结果表明, 公交时间可靠性随着线路长度增大和站点数增加而降低, 随着用地类型的不同而变化, 其中商业用地内的时间可靠性最大, 并且时段不同, 可靠性也有较大差异, 其中早高峰的时间可靠性最低, 从而验证了所提出评价方法的有效性。

关键词: 时间地理学; 时空路径; 公交; 时间可靠性

中图分类号: X491

文献标识码: A

文章编号: 1000-0690(2012)06-0673-07

提高公交网络的可靠性, 可以提升公交运力和效率, 通过更短的出行时间和更少浮动变化来吸引出行人群往公交靠拢, 从而提高市民的公交出行效率。公交网络作为一个复杂网络, 可靠性是衡量网络建设水平的一个重要指标, 是保障网络稳定运营的基础。随着智能交通(ITS)的发展, 公交网络可靠性成为评估交通网络性能的一个重要方面, 也逐渐成为公交网络研究的新热点。

在公交可靠性研究上, 目前国内外许多学者提出了可靠性的指标和研究方法。由于对于可靠性理解和划分角度不同, 可靠性度量有不同的指标和模型。从公交路网结构角度上, 主要是从点、线、面3层关系, 自微观到宏观分析公交网络所提供服务的可靠性^[1]。这种指标体系认为, 公交路网中的微观元素如公交车站的可靠性直接影响到了中观层次(线路)甚至宏观层次(路网)的可靠性, 可靠性存在着传递关系。另外一种观点认为, 公交系统可靠性是与乘客行为相互作用的, 乘客的出行随机性与公交到站的不可靠性相互影响。在乘客与公交系统关系上, 主要有根据乘客获得信息准确程度进行的客流分配模型^[2], 车辆运行时间可靠性和乘客候车时间可靠性计算模型^[3,4]等。此

外, 学者们还对时段因素影响下公交可靠性变化^[5], 出行者行为方式不足和出行时间可靠性对动态路径选择的影响^[6]等做了相关的研究。

在时空路径研究上, 主要为时间地理学在时空中个体行为分析中的研究与应用。一方面, 时空路径作为分析工具应用在时态地理信息系统(TGIS)中, 表现和分析个体在时空中的行为、关系^[7-9], 并由此扩展时间地理学概念到混合的物理—虚拟空间。同时, 个体行为的时空查询借助时空路径得以实现^[10]。另一方面, 从时间地理学的角度出发对居民日常活动的时空关系进行分析, 结合TGIS, 研究了居民日常生活具有时空强关联性^[11]。

从以上研究可以看出, 时间地理学和公交可靠性的研究成果颇丰, 但是从时间地理学的角度对公交可靠性的研究甚少。本文从时间地理学最基本的概念时空路径出发, 根据公交车时空路径的特征提出单程准时度、单程准时稳定度、站点准时度、站点准时稳定度4个指标来衡量公交线路和站点两个层次的可靠性。通过广州市公交GPS数据进行实例计算, 并分析线路长度、土地利用类型、时段、线路站点数4个因素对公交时间可靠性的影响。

收稿日期: 2011-11-30 **修订日期:** 2012-01-26

基金项目: 国家863计划项目(2011AA110306); 广东省2011年度安全生产专项资金项目(2011-118)资助。

作者简介: 胡继华(1971-), 男, 河南淮滨人, 博士, 讲师, 从事GIS及其在交通中的应用研究。E-mail: hujihua@mail.sysu.edu.cn

1 城市公交时间可靠性

可靠性是指系统在规定的条件下和规定的时间内达到系统规定的功能的概率^[12]。公交网络可靠性可定义为: 在一定的营运条件下和时间内, 公交系统完成规定任务的能力。时间可靠性是从时间的角度出发评价公交系统运行的稳定情况, 包括了候车时间可靠性, 换乘可靠性, 行程时间可靠性等。目前受关注比较大的是行程时间可靠性, 是指在给定的时间内, 一次出行到达终点的概率^[13]。本文所指的公交时间可靠性是指, 公交系统按照时间计划稳定运行的能力。公交车辆时空过程蕴含了丰富的运行特征信息, 可以为公交时间可靠性提供数据基础。

1.1 公交时空过程

经典时间地理学框架的两个基本概念: 时空路径和时空棱锥, 在时空棱锥的约束下, 可以用时空路径来描述移动物体的时空过程。时空过程是指实体的演变序列, 在城市交通运输网络中, 公交车是一个时空过程对象 (Spatio-temporal Process Objects, STOP), 其时空过程就是在路网中随时间变化的空间位置移动。由于公交车运行有周期性, 所以公交车的时空路径是一条螺旋上升的多段线。公交车的时空路径能够体现很丰富的公交车时空信息, 如公交运行周期、行驶线路等。从 Z 轴上向下俯视, 则是一条规整的曲线, 与道路线重合得到的则是该辆公交车的行驶线路。从个体的角度来说, 通过时空路径可以从空间、时间维度观察到单个公交车在时空中的运行规律, 比如到站的时间、停靠位置等; 从多个对象的角度来说, 多条时空路径可以反映多辆公交车之间的时空关系, 比如是否同时到站, 同时路过某个路段等。

1.2 时间可靠性指标

假设一辆公交车只走一条固定的线路, 那么其时空路径在地图上的投影是公交车的行驶轨迹, 公交车的时空路径是一条半螺旋上升的三维曲线。在出发前或者到达终点站的时候有比较长的靠站等待时间, 因此会出现一条直线, 表示原地不动, 直线的时间距离即为等待时间。图 1 为广州市大学城一辆公交车一次运行的时空路径。

根据公交车辆时空路径特性提出以下 4 个公交时间可靠性指标:

1) 单程准时度 (One-way punctuality index,



图 1 公交车时空路径示例

Fig. 1 Example of space-time path of bus

OWPI)。定义单程准时度为公车时空路径从 O 点到 D 点间的平均时间距离与设计的标准单程时间的相对误差与 1 的差值。设公车时空路径从 O 点到 D 点的平均时间距离为 $dist_{ow}$, 设计的标准单程时间为 $stdt_{ow}$, 则

$$stdt_{ow} = t_2 - t_1 \quad (1)$$

相对误差为:
$$\delta_{ow} = \frac{|dist_{ow} - stdt_{ow}|}{stdt_{ow}} \quad (2)$$

则单程准时度:
$$OWPI = 1 - \delta_{ow} \quad (3)$$

单程准时度是用来衡量公交车单程行驶过程的准时程度, 描述了一条公交线路一个方向上从出发点到终点行驶时间与设计的标准单程时间的偏差程度, 且 $OWPI \leq 1$, 越是接近 1 就表明该方向的准时程度越高。如果 $OWPI < 0$, 则表明时间距离偏差达到一倍以上, 已经处于非常不准时的状态, 线路行驶非常不稳定。由于考虑了车辆行驶的方向, 因此, 一辆公交车的时空路径可以做两个方向上的计算。相关定义如图 2 所示。

2) 单程准时稳定度 (Stability of one-way punctuality index, SOWPI)。单程准时稳定度是用来描述线路在一个方向上的准时度的变化程度, SOW-

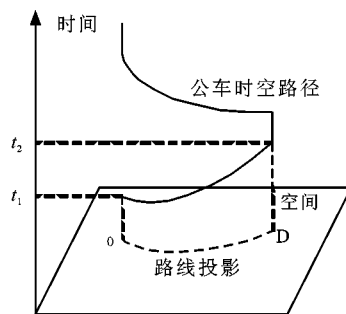


图 2 公交车时空路径

Fig. 2 Space-time path of bus

PI 越小则表明准时的变化程度越小。单程准时稳定度属于路网级别宏观层次的衡量指标。公式如(4)所示:

$$SOWPI = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (OWPI_j - \overline{OWPI})^2}{m}} \quad (4)$$

其中 \overline{OWPI} 为单程准时度的平均值。

3) 站点准时度 (Station punctuality index, SPI)。定义: 两条公交车时空路径在站点位置的时间距离的平均值与设计的标准车头时距的相对误差与1的差值。设两条公交车的时空路径在指定站点位置的平均时间距离为 $dist_h$, 指定线路的标准车头时距为 $stdt_h$, 则相对误差:

$$\delta_h = \frac{|dist_h - stdt_h|}{stdt_h} \quad (5)$$

则站点准时度: $SPI = 1 - \delta_h$ (6)

站点准时度描述了站点上某一班次的公交车发车间隔的准时程度, 且 $SPI \leq 1$ 。SPI 越接近1, 公交车越能够按照指定的发车间隔通过, 时间可靠性越高。从本质上来剖析, 两条公交车时空路径在站点位置的时间距离是实际的车头时距, 站点准时度反映的就是实际车头时距与设计车头时距的关系。SPI 就越靠近1, 实际车头时距与设计车头时距差别越小。相关定义如图3所示。

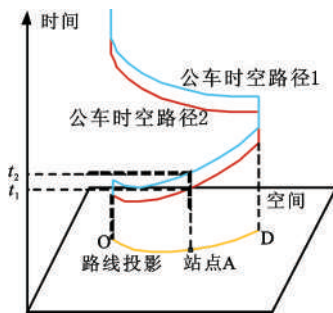


图3 两辆公交的时空路径

Fig. 3 Space-time paths of two buses

站点准时度可以从微观、中观和宏观3个尺度来衡量公交的可靠性。首先从定义上来看, 站点准时度是站点层次, 从微观角度来描述公交车运行的准时程度。站点准时度能够最直接地反映乘客所直观感受到的公交车的时间可靠性, 是从乘客角度出发的可靠性衡量指标。同时, 站点准时度可扩展到中观和宏观层次来反映公交的可靠

性, 比如, 以线路站点的站点准时度平均值作为线路级别的站点准时度衡量指标, 是中观尺度上的衡量标准; 如果以整个路网的平均值作为衡量指标, 则可以反映整个路网的站点准时度的情况。

4) 站点准时稳定度 (Stability of station punctuality index, SSPI)。其定义如公式(7)所示:

$$SSPI = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (SPI_j - \overline{SPI})^2}{m}} \quad (7)$$

其中 \overline{SPI} 是站点准时度的平均值。站点准时稳定度是用来衡量在站点层次上, 站点准时度的变化程度, SSPI 的值越小, 站点的准时度变化程度越小。SSPI 也可以扩展到线路和路网层次。

1.3 实例计算

选取广州市公交6条BRT (Bus Rapid Transit) 专用线路, 146辆公交车共605 780条GPS记录作为实例计算的数据。对公交GPS数据进行作消除噪声等预处理之后, 建立公交车的时空路径。将公交时空路径与该线路所经过公交站点的实际位置进行匹配, 在时间轴上可以找到公交车到站的具体时刻。因而, 从时空路径中可以直接提取公交的时空信息进行上述可靠性指标的计算。计算时段分为平峰期, 早高峰和晚高峰3个时段, 根据交通流的一般理论, 早高峰为7:00至9:00, 晚高峰为16:00至18:00, 其余时段为平峰期。从线路层次对单程准时度和单程准时稳定度进行统计(表1)。

2 影响因素分析

公交车辆运行在公交网络中, 其可靠性受到系统内部和外部两大方面的因素影响。其中, 公交网络自身的设计、结构等属于系统内部因素, 如线路长度、站点数、走向等; 外部因素则包括土地利用类型、社会车辆干扰、天气等。本文采用的统计数据均来自BRT线路, 排除了道路等级对公交可靠性的影响, 对线路长度、土地利用类型、时段和线路站点数4个影响因素进行分析。

2.1 线路长度

在一条公交线路的同一方向上, 上游公交站点的时间可靠性比下游的要高。上游的扰动会以波动的形式影响到下游的站点, 不可靠性存在着积累效应。B22路(广州科学城总站方向)站点准时度与站点准时稳定度为例。以由图4和图5可

表1 各线路各时段准时度与稳定度
Table 1 OWPI and SOWPI of each line and period

线路名	早高峰准时度	早高峰稳定度	晚高峰准时度	晚高峰稳定度	平峰准时度	平峰稳定度
B12方向1	0.894	0.941	0.869	0.894	0.749	0.526
B12方向2	0.847	0.847	0.884	0.922	0.815	0.756
B22方向1	0.929	0.934	0.931	0.968	0.850	0.834
B22方向2	0.876	0.855	0.949	0.969	0.892	0.894
B2方向1	0.893	0.924	0.827	0.768	0.867	0.818
B2方向2	0.850	0.865	0.864	0.905	0.841	0.820
B4A方向1	0.085	0.905	0.066	0.416	0.665	0.886
B7方向1	0.874	0.894	0.954	0.96	0.904	0.903
B7方向2	0.919	0.907	0.911	0.919	0.919	0.923
B7快方向1	0.921	0.949	0.921	0.903	0.886	0.877
B7快方向2	0.879	0.932	0.929	0.856	0.911	0.924

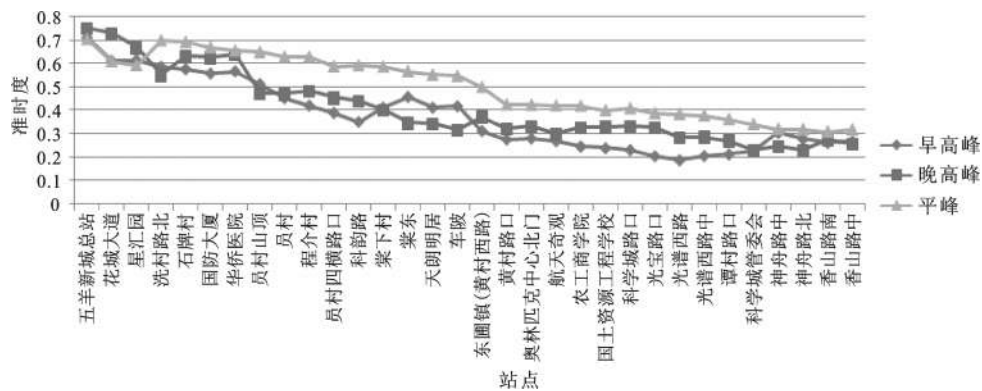


图4 B22路广州科学城总站方向站点准时度

Fig. 4 SPI of B22 from Wuyang New Town to Guangzhou Science City

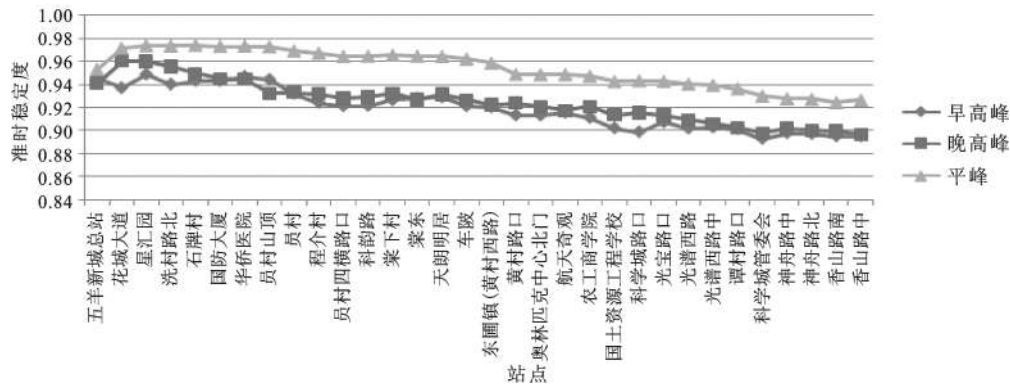


图5 B22路广州科学城总站方向站点准时稳定度

Fig. 5 SSPI of B22 from Wuyang New Town to Guangzhou Science City

以看到,公交车站准时度与站点准时稳定度随着线路长度增大总体呈下降趋势,由此可知时间可靠性与公交车线路的长度有关。对于B22路,早高峰时段科韵路—车陂段的站点准时度有一个小高峰,原因有两点:①在早高峰时段会增加B22

路从五羊新城总站—天朗明居的短线,相当于算短了总长度,提高了下游车站的可靠性;② 站点准时度在BRT站点路段会变得较为平缓,小高峰的形成路段也正好在BRT站点集中路段,因此公交车站准时度有所提高。

综上,时间可靠性随线路长度增加而降低,公交线路不宜设置过长。对同样长度的线路而言,BRT 站点准时度会比普通站点准时度高。因此在设计公交线路的时候,应控制长度,长线路应尽量设置为BRT线路。

2.2 土地利用类型

本文将所研究线路所经过区域划分为3种类型:商业用地、居住用地和混合型用地。商业用地主要指中心商业区的用地,主要是提高以工作、商业为主的业务方便的用地,出入人群主要为上班族和商务人士。居住用地则指居住小区、居住街坊、居住组团和单位生活区等各种类型的用地,主要满足基本居住、生活的需求。混合型用地则介于商业用地和居住用地之间,具有二者混合的特

征,比如大学等教育机构的用地,既含有提供工作环境的用途,也含有提供居住的功能。

从表2可以看到,无论是早高峰、晚高峰和平峰期,商业用地的准时度均为最高,混合型用地次之,居住用地的准时度最差。这是由于商业性用地区域的出行频率较其他用地类型的频率要大,且该部分人群有着更严格的时空约束,要求得到的公交服务水平也相应提高。同时此类区域公交有着较高的发车密度和站点分布密度,公交车辆在站间运行过程产生的延误较少,因而得到较高的可靠性。而居住用地的稳定度却是3种用地类型中数值最高的,表明居住用地区域内的公交站点普遍存在着公交车辆到站不准时的现象。

表2 不同用地类型可靠性相关指标

Table 2 Indexes of different land use types

用地类型	早高峰准时度	早高峰稳定度	晚高峰准时度	晚高峰稳定度	平峰准时度	平峰稳定度
商业用地	0.47	0.915	0.533	0.928	0.49	0.936
居住用地	0.417	0.92	0.445	0.926	0.447	0.938
混合型用地	0.448	0.92	0.472	0.923	0.456	0.937

2.3 时段

对上述6条线路共322个站点进行统计分析。早高峰的站点准时度范围为-0.42至0.736,平均值为0.27,准时度大于0.5的占25%,准时稳定度范围为0.31至0.96;晚高峰的站点准时度范围为0.086至0.773,平均为0.45,准时稳定度范围为0.79至0.96;平峰时段的站点准时度范围为0.024至0.539,平均为0.305,准时稳定度范围为0.826至0.999,表现出了较高的稳定性。准时度和稳定度的频率统计图如图6和图7所示。由这些数据可以看到,晚高峰的准时度为最大,平峰期次之,早高峰的准时度最差,而平峰期的稳定度最大,晚高峰次之,早高峰最低。因此公交车辆在早高峰时段表现出来的可靠性最差。这是由于早高峰的出行人群在同一时段内相对集中,而经过一天的运营,到晚高峰时公车的运行已趋于稳定,所以表现出更高的可靠性。

2.4 线路站点数

从2.1中的分析可以得到,随着线路的增长,公交站点的的时间可靠性减小。对于线路来说同样存在相关的现象,当线路的站点设置过多,过多的停靠次数会影响线路的可靠性。由图8可以看

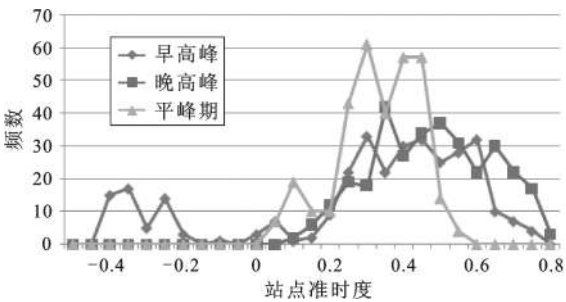


图6 站点准时度频数分布图

Fig.6 Frequency distribution of SPI

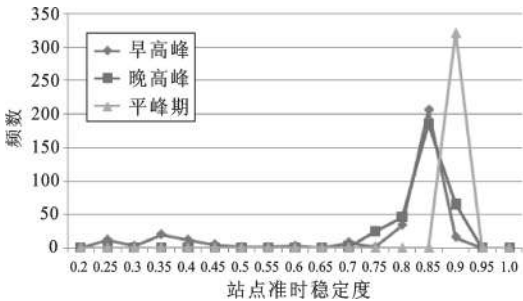


图7 站点准时稳定度频数分布图

Fig.7 Frequency distribution of SSPI

到,一条线路上的公交站点数目小于30的时候,单程准时度稳定在一定的范围内,当单程的站点

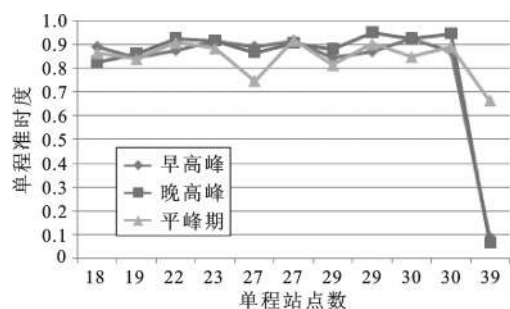


图8 单程准时度与站点数关系

Fig. 8 Relationship between station number and OWPI

数超过30个,单程准时度急剧下降。因此,在公交线路规划时应尽量避免单程站点数大于30。

3 结 语

研究公交时间可靠性对提高公交服务水平,满足日趋增大的公共交通需求具有重要意义。时间地理学中的时空路径为分析公交时间可靠性提供了有利的工具。本文主要做了以下2方面的工作:基于时间地理学的基本概念,依据时空路径从站点和线路两个层次提出了单程准时度、单程准时稳定度、站点准时度、站点准时稳定度等城市公交时间可靠性指标,并利用广州公交GPS数据进行了实例计算;分析了公交时间可靠性与线路长度、土地利用类型、时段和线路站点数的相关性,结果表明,公交时间可靠性随着线路长度增大和站点数增加而降低,且商业用地的时间可靠性最大,早高峰的时间可靠性最低,验证了本文提出的评价方法的有效性。

由于数据精度和选取数据量的问题,本文所计算指标仍存在一定误差。下一步工作将会从更大范围的数据着手,同时将会提出公交网络层次的时间可靠性指标。

参考文献:

- [1] Chen X M, Yu L, Zhang Y S, et al. Analyzing urban bus service reliability at the stop, route, and network level [J]. *Transportation Research Part A*, 2009, **43**: 722-734.
- [2] Larsen O, Sunde O. Waiting time and the role and value of information in scheduled transport [J]. *Research in Transportation Economics*, 2008, **23**: 41-52.
- [3] 戴 帅,朱 晨,陈艳艳. 城市公交系统的时间可靠性研究 [J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2008, **32**(5): 869-871.
- [4] 戴 帅,陈艳艳,魏中华. 复杂公交网络的系统可靠性分析 [J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2007, **31**(3): 412-414.
- [5] Mazloumi E, Asce S M, Currie G, et al. Using GPS data to gain insight into public transport travel time variability [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2010, **136**(7): 623-231.
- [6] Liu H X, Recker W, Chen A. Uncovering the contribution of travel time reliability to dynamic route choice using real-time loop data [J]. *Transportation Research Part A*, 2004, **38**: 435-453.
- [7] Shaw S L, Yu H B. A GIS-based time-geographic approach of studying individual activities and interactions in a hybrid physical-virtual space [J]. *Journal of Transport Geography*, 2009, **17**: 141-149.
- [8] Chen J, Shaw S L, Yu B, et al. Exploratory data analysis of activity diary data: a space-time GIS approach [J]. *Journal of Transport Geography*, 2011, **19**: 394-404.
- [9] Shaw S L. What about "Time" in Transportation Geography [J]. *Journal of Transport Geography*, 2006, **14**: 237-240.
- [10] 赵 莹,柴彦威,陈 洁,等. 时空行为数据的GIS分析方法 [J]. *地理与地理信息科学*, 2009, **25**(5): 1-5.
- [11] 周素红,邓丽芳. 基于T-GIS的广州市居民日常活动时空关系 [J]. *地理学报*, 2010, **65**(12): 1454-1463.
- [12] Amiria. The design of service systems with queuing time cost, workload capacities and backup service [J]. *European journal of Operational Research*, 1998, **104**: 201-217.
- [13] Yasunori Iida. Basic concepts and future directions of road network reliability analysis [J]. *Journal of Advanced Transportation*, 1999, **33**(2): 125-134.

Time Reliability of Urban Public Transportation Using Space-time Path

HU Ji-hua^{1,2}, CHENG Zhi-feng^{1,2}, ZHAN Cheng-zhi^{1,2}, CHEN Xi^{1,2}

(1. *Research Center of Intelligent Transportation System, School of Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China*; 2. *Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Transportation System, Guangzhou, Guangdong 510275, China*)

Abstract: The time reliability is an important indicator of bus services quality evaluation. The improvement of time reliability has much potential to attract more commuters to public transit and to reduce the congestion through modal shift from cars. The time reliability is one of the space-time characteristics of urban public transportation. At present, there is not much researches on bus service reliability from the time geography perspective. To aim at filling the gap, this article proposes an evaluation approach of time reliability for the urban public transportation in space-time process based on time geography. In this approach, four indexes, one-way punctuality index (OWPI), stability of one-way punctuality index (SOWPI), station punctuality index (SPI), stability of station punctuality index (SSPI), are included. The space-time path, which is a basic concept of time geography, is also used to describe the four indexes as a powerful tool. OWPI and SOWPI are the moderate level indexes to investigate the time reliability of bus line, while SPI and SSPI are the micro indexes for bus stations. In addition, SPI and SSPI are time reliability indexes from the perspective of passengers, and they can also be extended to micro and macro levels. Using GIS and GPS data, space-time paths of buses are formed to calculate the indexes, and 6 bus lines of Guangzhou BRT are given as examples. Moreover, the route length, land use types, period of day and number of stations are considered as influencing factors of time reliability. The relationships between these factors and time reliability are investigated respectively. As to the analysis results, in the same direction of a bus line, the time reliability of bus stations in the upper line is higher than that in downstream. The unreliability accumulation effect can be seen along the bus route. With respect to land use types, a higher reliability in commercial land is indicated, which can be interpreted as that commercial lands, which need better bus service since the commuters in such area, have more time constraints than others. With respect to period of day, the statistical results indicate the lowest reliability is in the morning rush hours since all commuters flock to the transit system at the same time. Meanwhile, a bus line with more bus stations shows lower time reliability as higher stop frequency reduces the arrival accuracy. Recommendations for improving time reliability are proposed in the analysis. Recommendations for improving time reliability are proposed in the analysis, which includes rational number (no more than 30) if station of a bus line, and reasonable length of that, and providing better bus services in residential land plus in the morning rush hours.

Key words: time geography; space-time path; Bus; time reliability