

北京地铁乘客旅行时间分布规律与可靠性研究

张翰良, 张琦, 马坤

(北京交通大学交通运输学院, 北京 100044)

摘要: 伴随着我国城市轨道交通的飞速发展, 乘客对旅行时间的变化更加敏感, 为了更好的满足乘客的需求, 提升城市轨道交通在交通系统中的竞争力, 我们需要更好的掌握城市轨道交通乘客旅行时间的分布规律以及旅行时间的可靠性。

基于北京地铁自动售检票系统(AFC)所提供的数据。首先, 对乘客旅行时间的分布规律进行研究, 并利用 K-S 单样本检验予以验证, 得到东直门至北京站的乘客旅行时间服从 Gamma 分布、对数正态分布。其次, 在掌握了旅行时间分布规律的基础上, 通过计划旅行时间(PT)、计划旅行时间指数(PTI)、可靠性缓冲时间(RBT)、可靠性缓冲时间指数(RBTI)、额外的可靠性缓冲时间(ERBT)五项指标, 分别就客流规模、运输距离、换乘次数、运营故障四个方面对旅行时间的可靠性及影响方式进行了研究。

关键词: 交通运输规划与管理; 北京地铁; 旅行时间; 分布规律; 旅行时间可靠性

中图分类号: U121 文献标志码: A

Study of Beijing Rail Transit Passenger Travel Time Distribution and Reliability

ZHANG Hanliang, ZHANG Qi, MA Kun

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

Abstract: With the rapid development of China's urban rail transit, passengers are more sensitive to the change of travel time. In order to better meet the requirements of the passengers and improve the competitiveness of urban rail transit in the traffic system, we need to master the distribution of the travel time of the passengers in the urban rail transit and the reliability of the travel time.

Using the data provided by the automatic fare collection system(AFC) of Beijing metro. First of all, the distribution of the passengers' travel time is studied, and the K-S single sample test is used to verify the passengers' travel time in Dongzhimen to Beijing Railway Station to obey the Gamma distribution and lognormal distribution. Secondly, based on the distribution of travel time, through the following five indicators: plan travel time (PT), plans travel time index (PTI), reliability buffer time (RBT), reliability buffer time index (RBTI) and the extra reliability buffer time (ERBT), The influence of the passenger flow scale, transport distance, transfer number and operation fault on the reliability of the travel time were studied.

Key words: transportation planning and management; Beijing metro; travel time; distribution model; travel time reliability

0 引言

城市轨道交通不仅能大大提高城市交通供给水平, 缓解交通压力, 还有效地优化了空间结构、提升了土地集约化利用率。随着我国社会与经济的持续发展, 越来越多的城市需要并已经着手发展城市轨道交通。同时, 乘客对旅行时间的变化更加敏感, 为了更好的满足乘客的需求, 提升城市轨道交通在交通系统中的竞争力, 需要更好的掌握城市轨道交通乘客旅行

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(20120009120019)

作者简介: 张翰良(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 交通运输规划与管理

通信联系人: 张琦(1982-), 女, 副教授, 研究方向: 交通运输规划与管理、城市轨道交通网络化运营组织. E-mail: qzhang6@bjtu.edu.cn

时间的分布规律以及旅行时间的可靠性。

45 目前,国内关于旅行时间分布规律及其可靠性的研究较少,且主要集中于道路交通方向。唐小勇、王炜、程琳^[1]借助于 Greenshilds 速度密度模型和交通流三要素关系模型,考虑交通流波动、道路条件、出行者心理期望三个因素,得到一个新的路段旅行时间可靠度估计模型。黄建梅、吴建平、奇格奇^[2]利用南京市 RFID 数据,应用数理统计方法对路段旅行时间的分布趋势做了量化研究,推断其分布趋势,为针对交通流变化导致的旅行时间估计提供理论及数据支持。城市轨道交通方面,张永红^[3]研究了城市轨道交通追踪列车组区间旅行可靠性、缓冲时间设置优化、列车运行计划可靠性等问题。高圣国、吴忠^[4]研究了乘客旅行时间分布与路径选择的关系,提出了动态计算客流分布的方法。Sun, Yanshuo, Xu R^[5]通过分析旅行时间概率密度分布 (PDF)、旅行时间累积密度分布 (CDF), 研究了出行路径选择和旅行时间可靠性之间的关系,并以北京市为例,进行了验证。

55 国外城市轨道交通发展时间长,涉及旅行时间可靠性的研究则相对较多。Uniman D L, Attanucci J P, Mishalani R G 等人^[6]从缓冲时间的角度对地铁旅行时间可靠性进行了研究,并提出了车站及线路 RBT、REBT 的计算方法,以伦敦地铁运营中断实际数据为例研究了其对旅行时间可靠性的影响。ZhenliangMa, Luis Ferreira, Mahmoud Mesbah^[7]证明了传统的缓冲时间对旅行时间的评估存在缺陷,并引入了 PTI、RBTI 等新的指标用于研究旅行时间可靠性,同时,对地铁旅行时间的分布规律进行了研究。

60 本文综合国内外研究现状,基于北京地铁 AFC 数据,对北京地铁乘客旅行时间分布规律及可靠性进行了研究。首先,结合 K-S 检验,对北京地铁乘客旅行时间分布规律进行了研究;而后,通过 PT、PTI、RBT、RBTI、ERBT 五项指标,分别就客流规模、运输距离、换乘情况、运营故障等四个方面对旅行时间可靠性及影响方式进行了研究。

1 地铁旅行时间分布与可靠性评估方法

1.1 地铁旅行时间分布分析

65 根据 ZhenliangMa、Luis Ferreira 和 Mahmoud Mesbah^[7]等人的既有研究,某一 OD 对地铁的旅行时间概率密度分布 (PDF) 形式如图 1 所示。旅行时间的分布主要可以分为以下三个阶段:

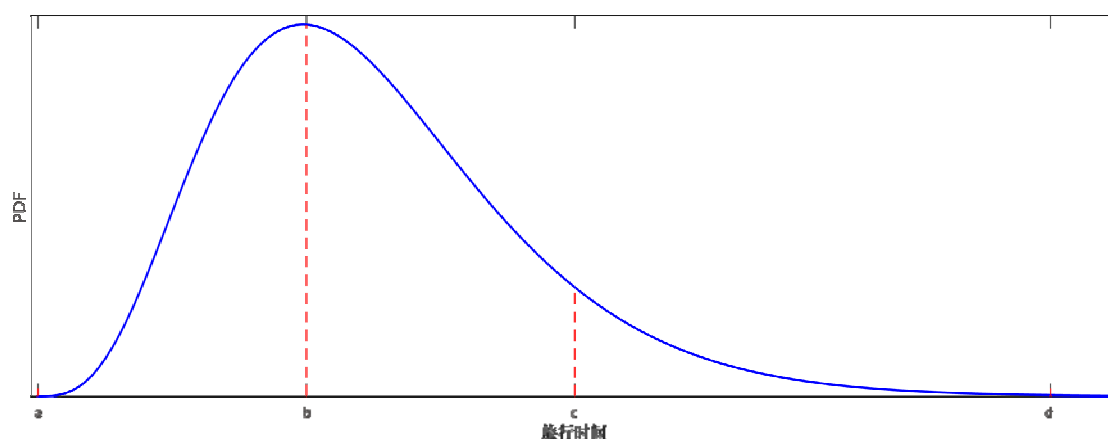


图1 地铁旅行时间概率密度分布

Fig. 1 Probability density distribution of travel time

70 (1) 第一阶段: 旅行时间分布区间为 $a \sim b$, 此阶段内, 随之旅行时间的增加, 对应的概率逐渐增大, 直至旅行时间为 b 时, 概率达到最大值;

(2) 第二阶段：旅行时间分布区间为 $b \sim c$ ，此阶段内，随之旅行时间的增加，对应的概率逐渐减小，此阶段旅行时间的概率密度分布与第一阶段关于 $x=b$ 基本呈对称分布；

75 (3) 第三阶段：旅行时间分布为 $c \sim d$ ，此阶段内，随之旅行时间的增加，对应的概率仍然逐渐减小，但所对应的概率相对都为一个较低的值。

根据以上旅行时间概率密度分布特点，参考基本的概率密度分布模型，对于地铁旅行时间，可选择正态分布、Gamma 分布、Weibull 分布、对数正态分布四种分布模型进行验证，采用 Kolmogorov-Smirnov 单样本检验（简称 K-S 检验）分析旅行时间分布情况。

80 1.2 地铁旅行时间可靠性评估

从概念上讲，旅行时间可靠性可以定义为实际旅行时间和预期旅行时间之间的匹配程度。合理的评估旅行时间的可靠性，对于乘客合理安排出行，提升城市轨道交通整体的服务水平能够起到一定的作用。

85 由于旅行时间可靠性的异质性，目前对于它的描述没有一个特定的指标，相比较其他指标而言，缓冲时间对于描述旅行时间可靠性的效果较为突出。“缓冲时间”表示缓冲行程所需的时间，表示乘客在一个给定的概率下能够准时到达目的地所需要的附加时间。

1.2.1 计划旅行时间

计划旅行时间（PT）是指乘客在一次出行中，出行决策所计划需要的旅行时间，一般用第 95 百分位旅行时间表示^[7]，具体计算公式如下：

$$90 \quad PT = TT_{95} \quad (1)$$

式中：PT 表示计划旅行时间；

TT_{95} 表示第 95 百分位旅行时间。

计划旅行时间指数（PTI），是以百分率表示的计划旅行时间与平均旅行时间的比值，可用于比较评价不同 OD 对的计划旅行时间，具体计算公式如下：

$$95 \quad PTI = \frac{TT_{95}}{TT_{avg}} \times 100\% \quad (2)$$

式中：PTI 表示计划旅行时间指数；

TT_{95} 表示第 95 百分位旅行时间；

TT_{avg} 表示所有出行乘客的平均旅行时间；

1.2.2 可靠性缓冲时间

100 可靠性缓冲时间（RBT）是指“松弛”或“缓冲区”的时间，即在一次出行中，乘客必须预留一定的缓冲时间，从而才能确保准时的到达目的地。在数学上定义为，第 M 百分位旅行时间与第 N 百分位旅行时间之间的差值，通常情况下^[6]，设定 M 为 95，N 为 50，则可靠性缓冲时间的计算公式为：

$$RBT = TT_M - TT_N \quad (3)$$

105 式中： RBT 表示可靠性缓冲时间；

TT_M 表示第 M 百分位旅行时间；

TT_N 表示第 N 百分位旅行时间；

M 取值为 95， N 取值为 50。

110 可靠性缓冲时间指数（ $RBTI$ ），是以百分率表示的可靠性缓冲时间与第 50 百分位旅行时间的比值，可用于比较评价不同 OD 对的可靠性缓冲时间，具体计算公式如下^[7]：

$$RBTI = \frac{TT_M - TT_N}{TT_N} \times 100\% \quad (4)$$

式中： $RBTI$ 表示可靠性缓冲时间指数；

TT_M 表示第 M 百分位旅行时间；

TT_N 表示第 N 百分位旅行时间；

115 M 取值为 95， N 取值为 50。

1.2.3 额外的可靠性缓冲时间

RBT 可以衡量任何给定样本的旅行时间的可靠性，并用它来分析可靠性水平及其影响因素。利用 RBT 分析旅行时间的可靠性需要考虑不同场景：“一般场景”和“特殊场景”。前者代表通常条件下系统的状态，并受到车站、列车和乘客固有特征的影响，如车站类型、
120 列车发车间隔、列车停站时间以及乘客走行时间等。后者代表在特殊情况下系统的状态，如大客流、事故导致运营中断等。在此场景下，旅行时间可靠性降低，可靠性缓冲时间增长。因此，额外的可靠性缓冲时间（ $ERBT$ ）表示为了保证乘客准时到达目的地，除了在通常情况下所需的缓冲时间外，还需要的额外的缓冲时间，计算公式如下^[6]：

$$ERBT = RBT_{Overall} - RBT_{Typical} \quad (5)$$

125 式中： $ERBT$ 表示额外的可靠性缓冲时间；

$RBT_{Overall}$ 表示特殊场景下的可靠性缓冲时间；

$RBT_{Typical}$ 表示一般场景下的可靠性缓冲时间。

2 北京地铁案例分析

130 以北京地铁为例，为研究北京地铁乘客旅行时间分布，以及客流规模、运输距离、换乘次数和运营故障对旅行时间可靠性的影响，选取北京地铁 AFC 数据，主要包括乘客始发、终到车站及刷卡进出站的时间等信息，进而基于乘客个体精确旅行时间进行统计研究。

2.1 地铁 AFC 数据处理

原始的地铁 AFC 数据，会有部分因为个人行为导致旅行时间极端过长的数据，例如丢失公交一卡通等意外情况、在地铁中等人等个人情况、在地铁乞讨或发生争执等不正常情况。这部分异常的数据在数据分析的过程中，会对结果的合理性造成一定的影响，因此需要对数据进行预处理，剔除这些坏值。

Sun, Yanshuo 等在充分研究了北京地铁 AFC 数据信息后得出结论^[5]：多个随机选择的 OD 对，其旅行时间累积密度分布曲线表明，累积密度在达到 98%或 99%时，会突然增大到 100%。因此，本文的数据选取过程大致如下：首先，从数据库中导出研究所需日期 OD 对所有乘客数据；而后，根据进出站刷卡时间计算其旅行时间并进行排序；最后，选取前 98%的数据，并将后 2%的数据作为坏值剔除。

2.2 北京地铁旅行时间分布规律

根据 2.1 中对地铁旅行时间分布模型及检验方法的分析，选取 2015 年 1 月 7 日和 2015 年 2 月 14 日东直门站至北京站的旅行时间概率密度分布数据，分别用正态分布、Gamma 分布、Weibull 分布、对数正态分布四种分布模型对其旅行时间分布进行检验，结果如表 1 所示。

表1 东直门至北京站的旅行时间分布模型检验结果

Tab. 1 Test results of travel time distribution in Dongzhimen to Beijing Railway Station

分布模型	平日				春运			
	h	p	ks	cv	h	p	ks	cv
正态分布	1	0.0076	0.501	0.4093	1	0.0077	0.5002	0.4093
Gamma 分布	0	0.9049	0.1661	0.4093	0	0.8242	0.1849	0.4093
Weibull 分布	1	0	0.9628	0.4093	1	0.0000	0.9681	0.4093
对数正态分布	0	0.9278	0.1594	0.4093	0	0.9096	0.1648	0.4093

根据上表检验参数 h、p、ks、cv 的取值可知，平日和春运情况下，东直门至北京站的旅行时间都不服从正态分布、Weibull 分布，同时，都服从 Gamma 分布、对数正态分布。

其中，平日情况下，东直门至北京站的旅行时间的分布有 0.9049 的概率服从 Gamma 分布，有 0.9278 的概率服从对数正态分布；春运情况下，东直门至北京站的旅行时间的分布有 0.8242 的概率服从 Gamma 分布，有 0.9096 的概率服从对数正态分布。

2.3 地铁旅行时间可靠性评估

2.3.1 客流规模对旅行时间可靠性的影响分析

对于客流规模因素，选取季节性客流高峰时期与平峰时期进行对照研究。客流数据显示：2015 年 2 月 14 日（春节前），以地铁北京站为终到站的地铁客流量为 80461 人，2015 年 1 月 7 日（平日）其客流量为 30741 人，可见春运期间，以铁路客运站为终到站的客流规模明显增长。因此，选取以铁路客运站为终到站的 OD 进行分析。同时，为充分反应客流规模对旅行时间可靠性的影响，选取同类型、无换乘的 OD 对进行研究，以排除其他因素对结果的影响。该种情况下，乘客的旅行时间主要由进站走行时间、候车时间、在车时间和出站走行时间构成，所以，客流规模对乘客的旅行时间构成较大的影响。下面选取数据量较大的西直门站至北京站 OD 对研究客流规模对旅行时间可靠性的影响。

根据所选取的 2015 年 1 月 7 日（平日）和 2015 年 2 月 14 日（春运）西直门站至北京

165 站的客流数据，可得其旅行时间概率密度分布、累积密度分布如图 2 所示：

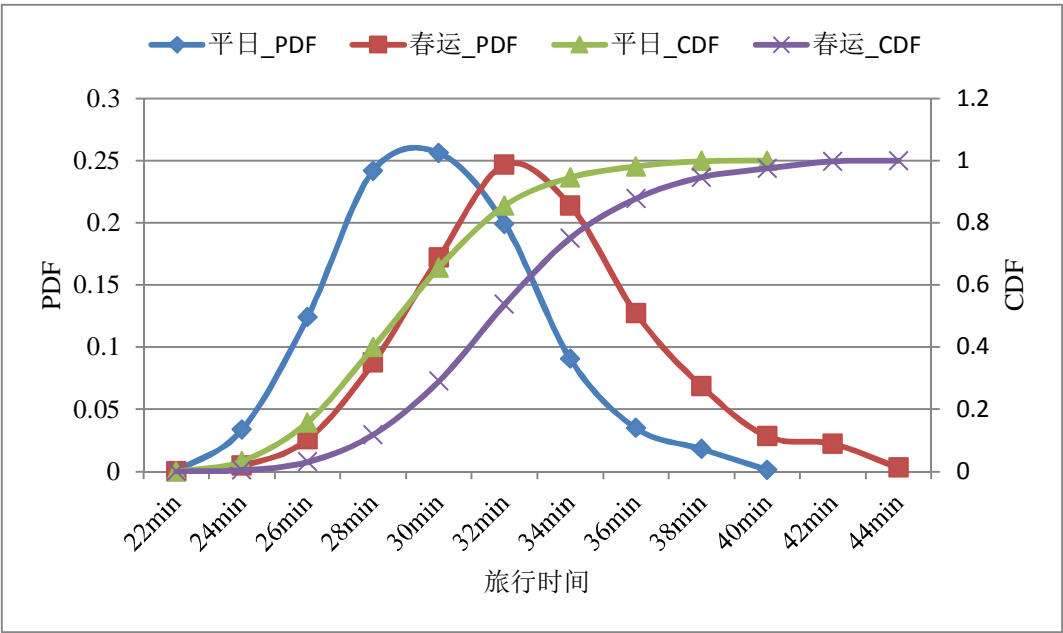


图2 西直门站至北京站旅行时间概率密度分布、累积密度分布

Fig. 2 Probability density and cumulative density distribution of travel time in Xizhimen station to Beijing Railway Station

170 表2 客流规模对旅行时间可靠性的影响分析

Tab. 2 Analysis of the impact of the scale of passenger flow on the reliability of travel time

指标	PT	PTI	RBT	RBTI	ERBT
平日	0:34:03	118.54%	0:05:40	19.96%	-
春运	0:38:05	120.17%	0:06:43	21.41%	0:01:03
差值	0:04:02	1.63%	0:01:03	1.45%	-

结合图 2 西直门站至北京站春运及平日的旅行时间概率密度分布、累积密度分布，以及表 2 中 PT、PTI、RBT、RBTI、ERBT 五个指标的计算结果，可得如下结论：

- 175
1. 客流规模增长促使旅行时间增长。由图 2 可知，春运期间旅行时间概率密度分布曲线、累积密度分布曲线较平日向右侧移动，分布范围扩大；参考表 2 的计算结果，春运较平日 PT 值增大 0:04:02、PTI 值增大 1.63%；
 2. 客流规模增长促使旅行时间可靠性降低。如上表 2 所示，春运较平日 RBT 值增大 0:01:03、RBTI 值增大 1.45%，即受到春运期间客流规模增长的影响，产生了额外的可靠性缓冲时间（ERBT），使得乘客的旅行时间可靠性降低。

180 **2.3.2 运输距离对旅行时间可靠性的影响分析**

为研究运距对旅行时间可靠性的影响，选取东直门站至北京站数据，与 3.3.1 中西直门至北京站数据进行对比，分析运距对旅行时间可靠性的影响。

根据所选取的 2015 年 1 月 7 日（平日）东直门站至北京站的客流数据，可得其旅行时间概率密度分布、累积密度分布如下图 3 所示：

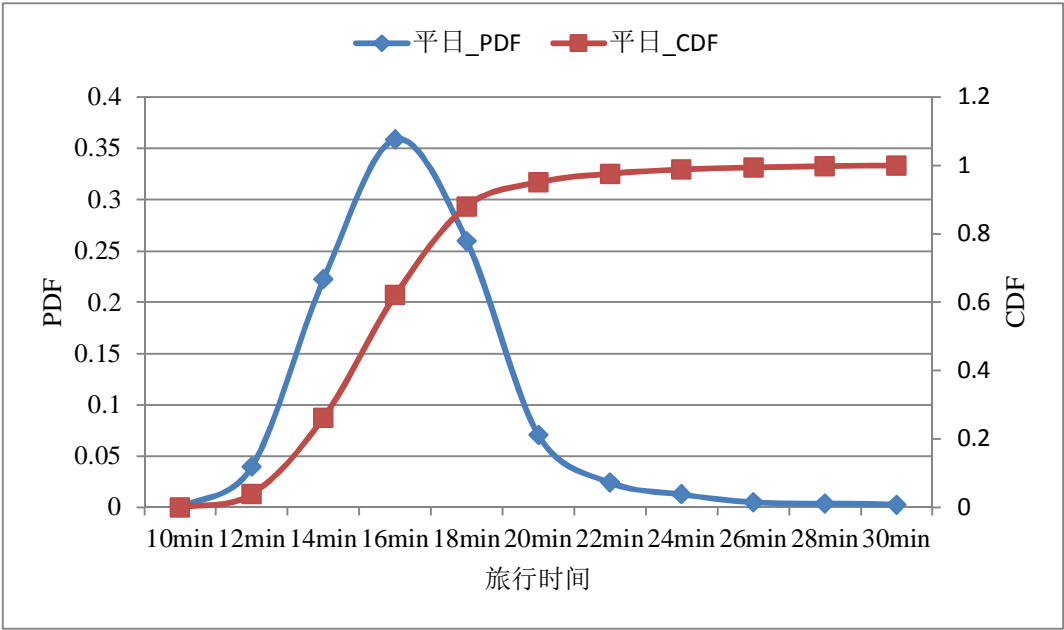


图3 东直门站至北京站旅行时间概率密度分布、累积密度分布

Fig. 3 Probability density and cumulative density distribution of travel time in Dongzhimen station to Beijing Railway Station

表3 运输距离对旅行时间可靠性的影响分析

OD 对	PT	PTI	RBT	RBTI
西直门站-北京站	0:34:03	118.54%	0:05:40	19.96%
东直门站-北京站	0:19:27	127.01%	0:04:20	28.67%
差值	0:14:36	-8.47%	0:01:20	-8.71%

结合表 3 西直门站至北京站和东直门站至北京站两个 OD 对 PT、PTI、RBT、RBTI 四个指标的计算结果，可得如下结论：

- 运距增长促使旅行时间增长，但计划旅行时间指数与运距无明显关系。由表 3 可知，由于西直门站-北京站运输距离较长，其 PT 值增大 0:14:36；但是，PTI 值则西直门站-北京站反而小与东直门站-北京站；
- 运距增长促使旅行时间可靠性降低。如上表 3 所示，春运较平日 RBT 值增大 0:01:20，即随着运距的增长，乘客的旅行时间可靠性降低。

2.3.3 换乘次数对旅行时间可靠性的影响分析

当乘客的一次出行始发车站在不同的轨道交通线路上时，乘客需要换乘，此时，乘客的旅行时间主要由进站走行时间、候车时间、换乘时间、在车时间和出站走行时间构成，此时，由于乘客换乘行为的复杂性，换乘走行时间对乘客的旅行时间也构成产生较大的影响。本节分别选取不同换乘次数的 OD 对研究换乘次数对旅行时间可靠性的影响。

(1) 四惠东站至北京站

根据所选取的 2015 年 1 月 7 日（平日）四惠东站至北京站的客流数据，可得其旅行时间概率密度分布、累积密度分布如下图 4 所示：

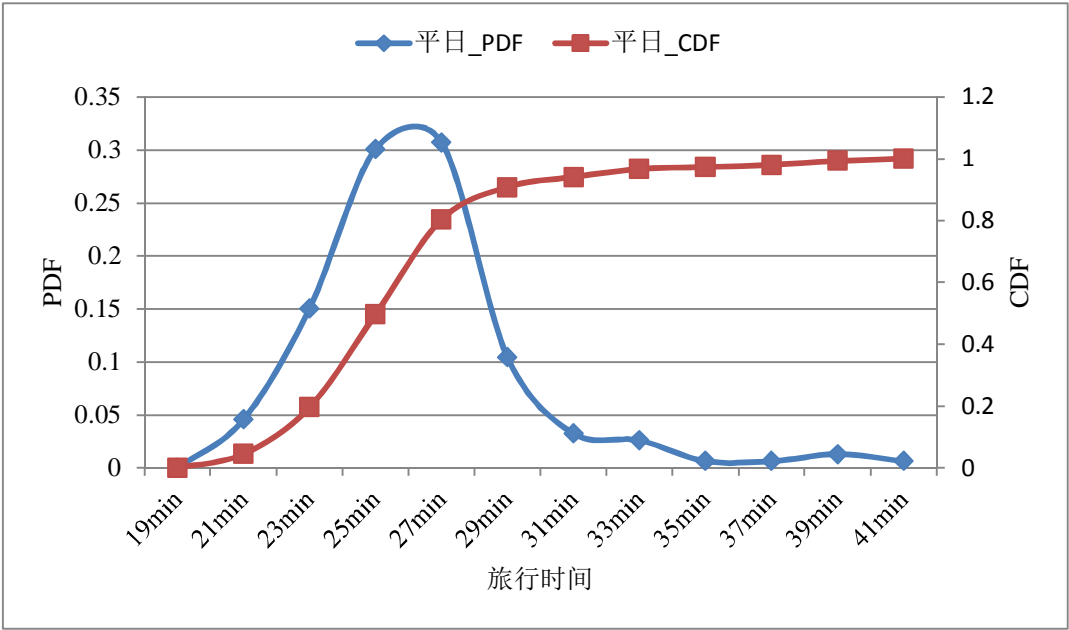


图4 四惠东站至北京站旅行时间概率密度分布、累积密度分布

Fig. 4 Probability density and cumulative density distribution of travel time in Sihuidong station to Beijing Railway Station

210 (2) 苹果园站至北京站

根据所选取的 2015 年 1 月 7 日（平日）苹果园站至北京站的客流数据，可得其旅行时间概率密度分布、累积密度分布如下图 5 所示：

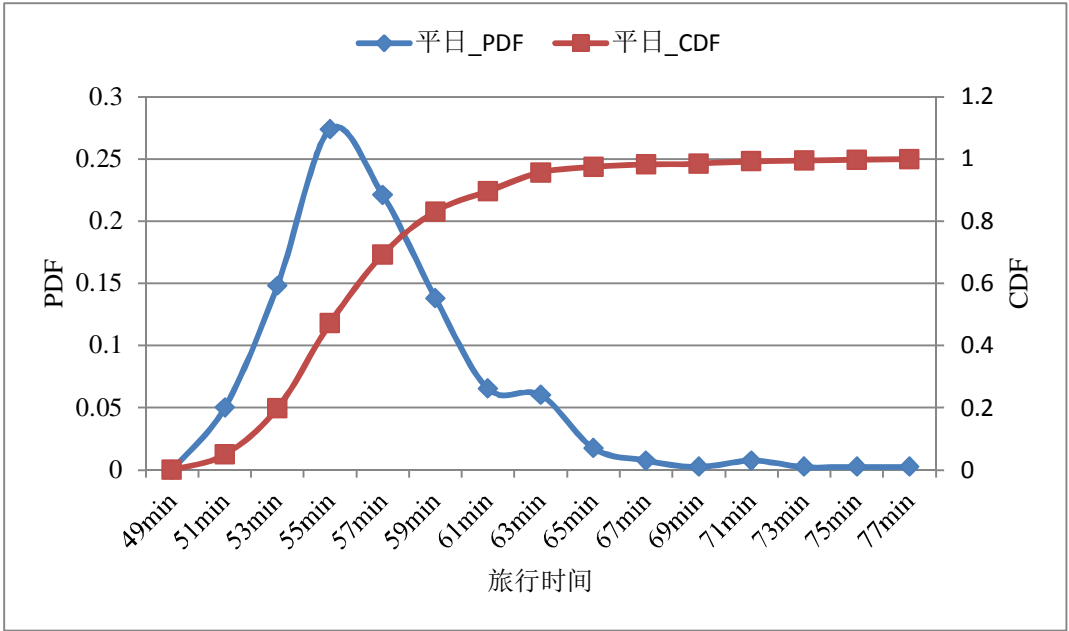
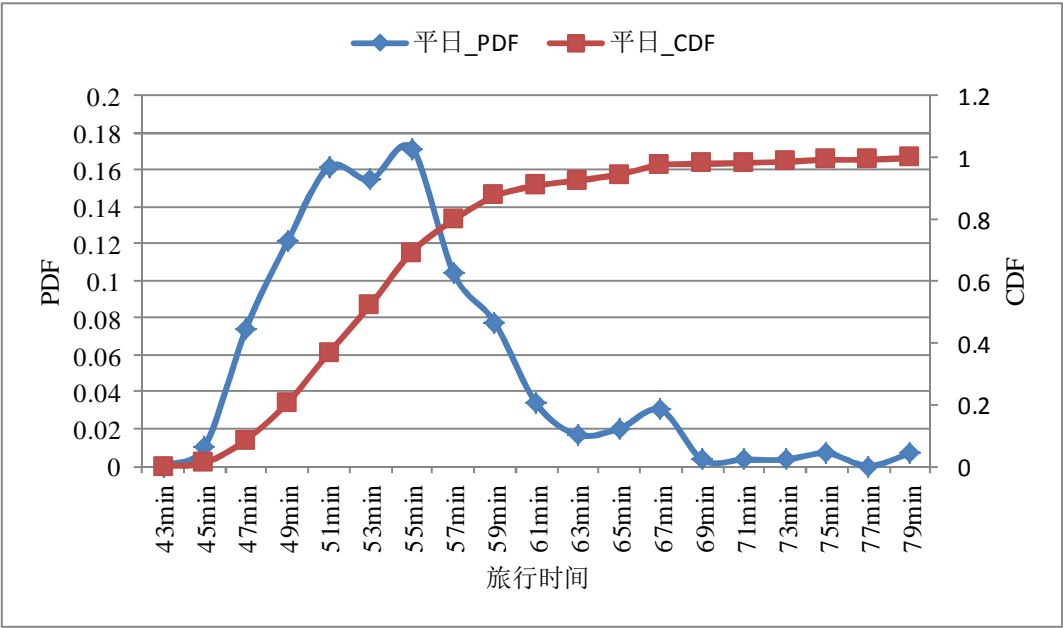


图5 苹果园站至北京站旅行时间概率密度分布、累积密度分布

215 Fig. 5 Probability density and cumulative density distribution of travel time in Pingguoyuan station to Beijing Railway Station

(3) 西二旗站至北京西站

根据所选取的 2015 年 1 月 7 日（平日）西二旗站至北京西站的客流数据，可得其旅行时间概率密度分布、累积密度分布如下图 6 所示：



220

图6 西二旗站至北京西站旅行时间概率密度分布、累积密度分布

Fig. 6 Probability density and cumulative density distribution of travel time in Xi'erqi station to Beijing West Railway Station

(4) 生命科学园站至北京西站

225

根据所选取的 2015 年 1 月 7 日（平日）生命科学园站至北京西站的客流数据，可得其旅行时间概率密度分布、累积密度分布如下图 7 所示：

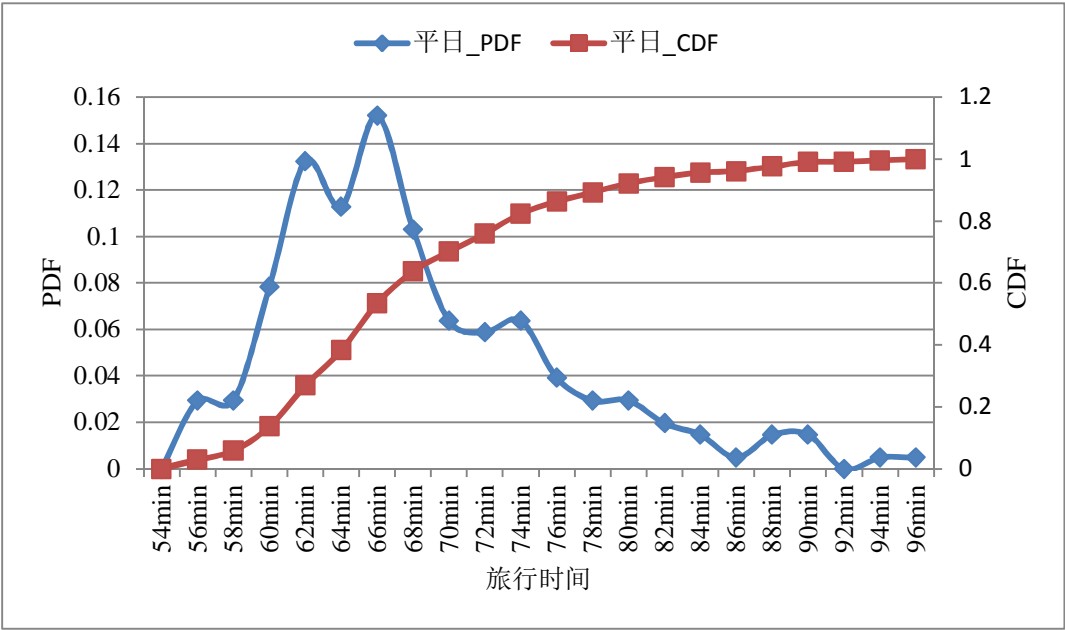


图7 生命科学园站至北京西站旅行时间概率密度分布、累积密度分布

Fig. 7 Probability density and cumulative density distribution of travel time in Life Science Park station to Beijing West Railway Station

以上图 4~图 7 对 1 次换乘和多次换乘及以上的 OD 对进行了分析，结合前文对无换乘 OD 对的分析，可得下表：

表4 换乘次数对缓冲时间的影响

Tab. 4 Analysis of the impact of the transfer times on the reliability of travel time

换乘次数	OD 对	PT	PTI	RBT	RBTI
无换乘	西直门站-北京站	0:34:03	118.54%	0:05:40	19.96%
	东直门站-北京站	0:19:27	127.01%	0:04:20	28.67%
1 次换乘	四惠东站-北京站	0:31:08	123.95%	0:06:08	24.53%
	苹果园站-北京站	1:02:17	111.87%	0:07:12	13.07%
多次换乘	西二旗站-北京西站	1:05:16	122.07%	0:12:31	23.73%
	生命科学园站-北京西站	1:22:57	123.05%	0:17:32	26.80%

结合表 4 中所示 6 个 OD 对 PT、PTI、RBT、RBTI 四个指标的计算结果，可得如下结论：

1. 计划旅行时间指数与换乘次数无明显关系。随着换乘次数的变化，PTI 值变化无明显规律，与换乘次数无关。
2. 换乘次数增加促使旅行时间可靠性降低。随着换乘次数的增加，RBT 值呈上升趋势，旅行时间可靠性降低。
3. 可靠性旅行时间指数与换乘次数无明显关系。随着换乘次数的增加，RBTI 呈现波动变化，无明显规律。

2.3.4 运营故障对旅行时间可靠性的影响分析

通过查询北京地铁公开的地铁突发故障信息，再基于已有的北京地铁 AFC 数据，对故

障小时和正常小时的旅行时间进行对比分析。

2015 年 2 月 12 日（周四）18:06 地铁 5 号线列车（开往宋家庄方向）在天通苑北站因车载信号故障，改为降级模式行车，列车间隔加大，影响部分列车晚点。取 18:00-19:00 天通苑北到北京站的数据，与 2015 年 2 月 11 日（周三）同时间段的数据进行对比分析。图 8 描述了旅行时间的概率密度分布和累积密度分布。

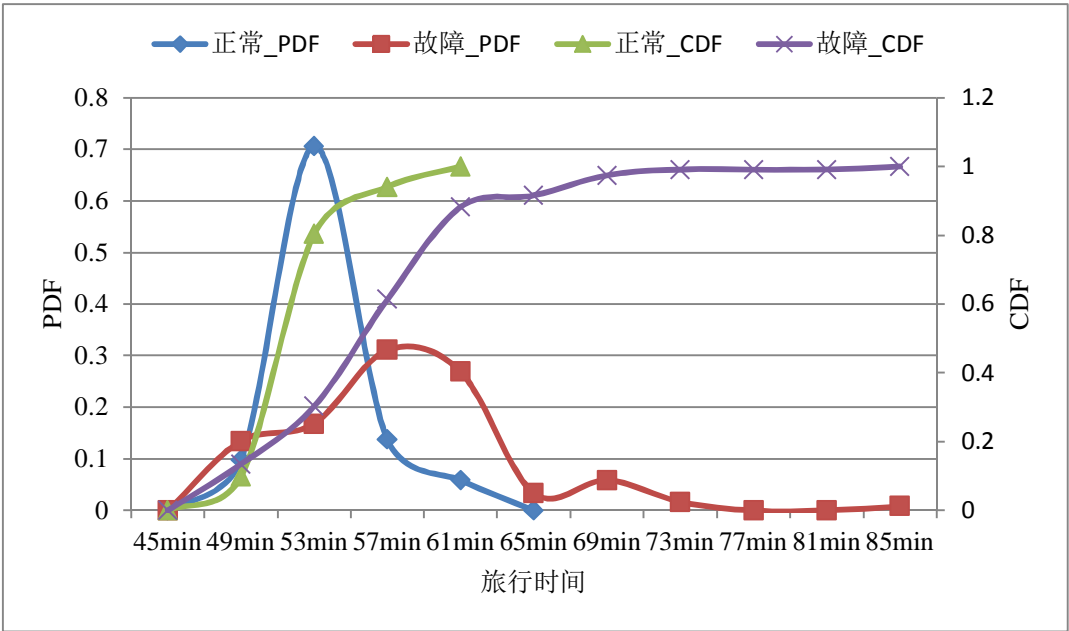


图8 天通苑北至北京站旅行时间概率密度分布、累积密度分布

Fig. 8 Probability density and cumulative density distribution of travel time in Tiantongyuan North station to Beijing Railway Station

表5 运营故障对缓冲时间的影响

Tab. 4 Analysis of the impact of operational failure on buffer time

	PT	PTI	RBT	RBTI	ERBT
正常	0:56:04	108.80%	0:04:41	9.11%	
故障	1:07:14	120.83%	0:12:01	21.76%	0:07:20
差值	0:11:10	12.03%	0:07:20	12.65%	

结合图 8 天通苑北至北京站旅行时间概率密度分布、累积密度分布，以及表 5 中 PT、PTI、RBT、RBTI、ERBT 五个指标的计算结果，可得如下结论：

- 运营故障促使旅行时间增长。由图 8 可知，故障期间旅行时间概率密度分布曲线、累积密度分布曲线较正常情况向右侧移动，分布范围扩大；参考表 5 的计算结果，故障较正常情况 PT 值增大 0:11:10、PTI 值增大 12.03%；
- 运营故障促使旅行时间可靠性降低。如上表 5 所示，故障较正常情况 RBT 值增大 0:07:20、RBTI 值增大 12.65%，即受故障的影响，会产生额外的可靠性缓冲时间(ERBT)，使得乘客的旅行时间可靠性降低。

3 结论

本文基于 AFC 系统所提供的数据，对地铁旅行时间的分布模型、地铁旅行时间可靠性

进行分析,并进一步探讨地铁旅行时间可靠性的影响因素。以北京市地铁 AFC 数据为例,利用 K-S 检验验证了北京市地铁(东直门站至北京站)旅行时间服从 Gamma 分布、对数正态分布;以北京市三大火车站为 D 点,根据客流并考虑 OD 对类型,选取不同的 O 点,分析客流规模、运距、换乘次数、运营故障等因素对旅行时间可靠性的影响。

270 同时,本文在分析地铁旅行时间的可靠性中,对于 OD 对的选择仍存在一定的不足,后续将开展进一步研究。

[参考文献] (References)

- [1] 唐小勇,王炜,程琳. 交通网络旅行时间可靠度估计[J]. 土木工程学报, 2007, 40(6):84-88.
- 275 [2] 黄建梅,吴建平,奇格奇. 基于 RFID 数据的路段旅行时间分布趋势研究[J]. 数字技术与应用, 2013:101-101.
- [3] 张永红. 城市轨道交通列车运行图缓冲时间优化方法研究[D]. 中南大学, 2013.
- [4] 高圣国,吴忠. 基于旅行时间分布的客流清分模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2011, 11(6):124-130.
- [5] Sun, Yanshuo, Xu R. Rail Transit Travel Time Reliability and Estimation of Passenger Route Choice Behavior: Analysis Using Automatic Fare Collection Data[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2012, 7(2275):58-67.
- 280 [6] Uniman D L, Attanucci J P, Mishalani R G, et al. Service Reliability Measurement Using Automated Fare Card Data Application to the London Underground[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2010, 13(2143):92-99.
- [7] ZhenliangMa, Luis Ferreira, Mahmoud Mesbah. Measuring service reliability using automatic vehicle location data[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014(1):159-171.
- 285 [8] 王静,刘剑锋,马毅林,等. 北京市轨道交通车站客流时空分布特征[J]. 城市交通, 2013:18-27.
- [9] 谢中华. MATLAB 统计分析与应用: 40 个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社. 2010.