

# 城市轨道交通列车运行延误及其调整方法

乔珂 赵鹏

(北京交通大学交通运输学院 北京 100044)

**摘要** 阐述城市轨道交通列车运行延误的概念、分类及其特点,总结单线情况下、共线运营条件下以及网络化条件下列车运行延误传播的规律,分析客流对于网络化列车运行延误的重要影响。从运营角度和乘客角度两方面,对列车运行延误调整的优化模型和方法进行分析和比较。最后,提出网络化运营条件下地铁列车运行延误及其调整方法的研究展望。

**关键词** 城市轨道交通;列车运行延误;列车运行调整

**中图分类号** U231 **文献标志码** A

**文章编号** 1672-6073(2013)01-0041-05

在大力发展城市轨道交通的同时,其运营可靠性越来越引起高度重视。近年来,我国城市轨道交通的线路数量和运营里程逐年增长,北京、上海、广州等城市开通了多条线路,形成了轨道交通网络。随着轨道交通网络规模的扩大,轨道交通运营条件越来越复杂。在日常运营中,受到客流变化、设备故障、突发事件等因素影响,使列车运行发生延误。延误具有传播性,网络化又使延误传播的范围扩大,所以延误会造成线网运营秩序紊乱、服务质量降低、运营可靠性下降<sup>[1]</sup>。如何合理地进行调度指挥,减少列车运行延误,保持服务的准时、安全,提高运营可靠性,成为需要解决的重要问题。研究网络化条件下列车运行延误的传播规律,分析客流与列车运行延误的相互影响,提出抑制列车运行延误的措施,可以为城市轨道交通调度调整提供依据,保障轨道交通的服务质量。

收稿日期: 2011-10-19 修回日期: 2011-11-21

作者简介: 乔珂,男,博士研究生,主要研究城市轨道交通运营管理,09114218@bjtu.edu.cn

赵鹏,男,教授,博士生导师

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2011YJS037)

## 1 列车运行延误及其传播规律分析

### 1.1 列车运行延误的定义、分类和特点

城市轨道交通列车运行组织类似于铁路系统,列车按照计划运行图从车站出发和到达车站,在运营过程中不可避免地会受到一些随机因素的干扰。徐瑞华等<sup>[2]</sup>将列车运行延误定义为“在执行列车运行图过程中受到各种因素影响,造成列车进入区间(车站)或在区间(车站)运行过程中偏离(滞后)计划运行轨迹的综合表现形式”。列车运行延误可分为初始延误和连带延误,连带延误是指在前行列车发生初始延误后,引起后行列车或其自身的后效延误现象。

列车运行延误属于突发性事件,延误的发生是随机的,表现为突发性、紧急性、高度的不确定性和影响的群体性。如果初始延误发生后,不能采取有效措施消除延误,就会形成连带延误,连带延误造成的危害更大,因此研究的重点是连带延误。延误具有时间和空间双重传播特性<sup>[3]</sup>,随延误发生时间和地点的不同,延误造成的影响也不同。由于城市轨道交通站间距短,发车频率高,车站线路布置简单,列车运行延误很容易传播。江志彬等<sup>[4]</sup>将城市轨道交通列车运行延误传播的特点概括为“直接性、快速性、双向性、向前传播性”。其中,向前传播性是城市轨道交通特有的、区别于铁路系统的特点。上述特点是单线情况下的列车运行延误传播特点,网络化运营条件给列车运行延误带来了新的影响,对网络化条件下新特点的研究还有待深入。

在网络化运营条件下也存在列车衔接延误,马兴峰<sup>[3]</sup>认为,该延误是由于列车在换乘车站等待其他列车的到达以方便乘客换乘,或列车在终点站开始新的运行服务而产生的。衔接延误本质上也是受到其他列车的影响而产生的,因此此类延误实际上是一种连带

延误。国外的文献<sup>[5]</sup>认为,在现代城市公共交通运输中,乘客出行往往需要多次换乘才能到达目的地,换乘失败会造成乘客额外的等待时间。因此,列车衔接延误是轨道交通网络化运营条件下需要关注的重点。

### 1.2 列车运行延误的影响因素

分析列车运行延误传播的规律,首先应理清其影响因素,对列车运行延误产生的原因有深入了解。

列车运行延误产生的原因多种多样,其中初始延误的产生具有随机性,根据北京地铁运营经验,列车运行延误的影响因素主要为客流因素、设施设备因素、环境气候因素等。马兴峰<sup>[3]</sup>以上海市轨道交通事故统计数据为基础,分析后发现,71%的初始延误是由于车辆和通信信号故障造成的。江志彬等<sup>[4]</sup>将连带延误的原因归纳为以下8类:列车自身因素、缓冲时间、车底周转、乘务组织、辅助线数量及其布置形式、运营调度、乘客换乘、客流变化。

李为为<sup>[1]</sup>认为,轨道交通乘客流状况对列车运行稳定性有着重要的关联。在网络化运营条件下,客流需求迅速增长,尤其是在高峰时段,需求与供给水平不匹配,高峰时段的满载率很高,使得车辆等运营设施设备面临超强度的负荷,设备的可靠性得不到有效的保障,而且往往容易在大型的换乘枢纽出现客流的积聚。延误发生后,通过相衔接的线路或线路间的交换客流,网络上某条线路的延误影响会迅速扩展到整个网络。朱自刚等<sup>[6]</sup>分析了客流与列车运行延误的相互影响关系。列车运行延误将导致乘客在车站集聚,车站站台乘客密度增加,乘客上下车时间发生改变,从而影响到了列车停站时间,造成列车出发晚点。William H. K. Lam<sup>[7-8]</sup>以香港轻轨为例,得出了列车停站时间与乘客上下车人数的线性回归公式。Nigel G. Harris<sup>[9]</sup>以伦敦地铁为例,研究了高峰客流情况下乘客的上下车速率。车站规模越大,其乘客到达率越大,相同时间内到达的乘客总量相对比较多,在延误条件下易发生大客流现象。距离源车站越近的后续车站,其延误时间较长,受到延误影响的乘客较多,易出现乘客过度拥挤现象。张知青等<sup>[10]</sup>运用上海市轨道交通3号线的实际数据,通过仿真实验,得出受列车运行延误影响的车站数和乘客数与初始延误时间长短呈线性关系。

可以看出,在网络化运营条件下,列车运行延误受乘客的影响会更加明显。周艳芳等<sup>[11]</sup>研究了网络化条件下客流高峰传播的规律,说明了列车运行延误与客流高峰传播的相互制约关系。网络化条件下,由于

聚集效应,客流增大必然对各网络内部和网络间衔接协调造成很大的影响,特别是当遇到突发事件面对大规模客流紧急疏导时,对列车运行秩序会造成什么样的影响?因此,研究列车运行延误传播规律应当与客流规律相结合。国外的研究多重视从旅客角度考虑,而国内成果较少从这方面考虑,相关理论较薄弱。

### 1.3 列车运行延误的传播规律

列车初始延误发生后,如果运行图缓冲时间不足以抵消延误时间,就可能造成延误传播。当一趟列车的晚点影响到其他列车时,就会形成列车在线网的延误传播,列车运行延误传播规律是进行列车运行调度调整的基础。延误传播使列车正常运行秩序破坏,导致车站乘客聚集,线网客流分布发生变化。网络化条件下,相邻线路间延误的传播主要通过换乘站的客流换乘以及乘客选择路径的变化。延误传播规律不仅仅是列车间的相互影响,同时表现为客流变化,需要将延误传播规律与客流规律一体化研究,调度调整应根据客流变化情况采取各类措施。如果延误发生后不及时采取有效措施,延误的影响过程很容易形成“滚雪球”效应<sup>[4]</sup>,使整个轨道交通网络陷入“车越跑越慢,人越聚越多,影响范围越来越广”的恶性循环。既有的研究多考虑列车间的相互影响,客流变化规律的研究还较少。

徐瑞华等<sup>[2]</sup>认为由于列车运行延误的发生具有随机性,其传播又受到列车运行图规定时刻的控制,运行延误的发生及其传播具有“随机有控”或“有控随机”的特点,定量分析和研究难度大。对单线情况和共线运营条件下的列车运行延误传播规律的研究成果较多,研究方法主要有2种:一种是采用数学方法进行理论分析,另一种是采用系统仿真方法进行仿真实验。

在数学方法理论分析方面,马兴峰<sup>[3]</sup>对单一线路建立了延误传播的递推模型和排队模型,得出了延误与时刻表中冗余时间的函数关系,同时对连通型轨道交通网络共线运营情况,分析了在接轨站处的干扰概率和干扰时间,推导了直接延误、连带延误和衔接延误的计算公式。李为为<sup>[1]</sup>对单线情况建立了自身延误及连带延误的递推模型,并通过公式推导分析了乘客、追踪间隔时间对列车运行延误的影响。

系统仿真方法可以更直观地分析哪些因素会对列车运行延误传播产生影响。江志彬<sup>[12]</sup>、徐瑞华<sup>[13]</sup>、徐鸣等<sup>[14]</sup>建立了列车运行延误的仿真系统,以上海市一条轨道交通线路为例,仿真结果表明,列车运行延误及其传播主要与能力利用率、缓冲时间、备车数量以及辅

助线数量这些因素有关。谢超<sup>[15]</sup>构建了轨道交通通过能力的延误仿真系统,对上海市轨道交通3号线和4号线共线运营的仿真结果表明:共线区段的初始延误造成的影响比发生在非共线区段的初始延误造成的影响大,发生在高峰时段的延误影响比发生在非高峰时段的延误影响大。通过仿真实验可以发现轨道交通运营网络中容易造成延误传播的关键节点、线路和延误容易发生的时间,从而采取针对性的预防措施。

轨道交通运营网络形成后,延误传播规律复杂化,延误不仅会在所在线路传播,还会通过换乘站的作用向相邻线路传播。陈菁菁<sup>[16]</sup>运用复杂系统理论,建立了城市轨道交通延误网络传播的SIR(susceptible infective removed)模型。首先抽象出地铁网络的拓扑结构,然后按照一定的传播规则分析了列车运行延误的传播规律,模型中的主要参数是延误传播速率和延误恢复速率,通过模型可以看出:1)对多点初始延误和单点初始延误的对比分析表明,网络对于延误的传播扩散具有一定的控制能力,能够有效防止延误过大范围的影响,多点延误并没有使得延误在网络中的传播范围更广、影响更大;2)换乘站在网络延误传播中的重要作用,网络中换乘站数量越多,延误在网络中扩散的态势就越难以控制。对于列车衔接延误,张铭<sup>[17]</sup>建立了换乘站衔接方案的微观模型,分析了区间运行延误、列车停站延误、列车运行间隔时间的延误对列车衔接延误的影响。一旦因延误导致衔接被破坏,根据原有时刻严格推算的主衔接线路上该方向的其他换乘节点的衔接都将受到影响。目前国内对于网络化运行延误传播规律的研究成果较少,上述研究成果也未系统化,网络化列车运行延误传播规律的研究还处于起步阶段。

## 2 列车运行延误调整措施

列车运行延误发生后,需及时调整列车运行计划,不仅要控制延误的传播,还要为乘客提供延误发生后的优化出行方案。列车运行延误调整就是列车调度问题(train dispatching),这是日常运营中最基本的问题之一,是列车运行组织中的关键环节,是一个实时性很强的优化问题。在有效的优化模型和算法基础上,结合完善的调度指挥系统,可以提高轨道交通服务水平和列车的运行效率。

城市轨道交通列车采用列车自动控制(atuomatic train control, ATC)系统,短时间的列车运行延误可以通过ATC系统自动调整,长时间的列车运行延误则需要人工和计算机结合。

在人工调整策略方面,可以采取的措施有始发站提前或停止发车、增加/压缩列车停站时间、组织列车跳站停车、扣车、停运列车、加开备车、设置列车运行等级等<sup>[18]</sup>。

在列车自动调整方面,肖鹏<sup>[19]</sup>、李晓艳<sup>[20]</sup>、李家平<sup>[21]</sup>、路飞<sup>[22]</sup>分别基于专家系统、Petri网、多智能体理论给出了调整算法,对这些成果进行分析后,发现调整的目标函数和约束条件基本类似。调整的目标函数主要从运营角度考虑,以尽快消除延误、恢复正常秩序为目的,主要考察指标有:列车晚点时间最短、晚点列车数目最少、列车旅行时间间隔偏差最小、调整至正常计划所需时间尽量短及实施运行调整的范围要小。约束条件主要是满足列车停站时间约束、最小追踪间隔约束及发车时间约束。但李为为<sup>[1]</sup>认为城市轨道交通的调整目标应该是维持列车高密度行车,保证一个比较稳定的发车间隔,考虑车辆周转来及时疏散人群,城轨交通恢复时刻表意义不大。

国内既有的研究对乘客因素考虑较少。在网络化条件下,列车衔接延误对乘客造成的影响很大,当延误产生后,在整个轨道交通网络中会产生被延误客流。国外把该调整问题称为“延误管理问题(delay management problem)”。该问题主要是考虑列车衔接延误,即发生延误后,接续列车是否应该等待延误列车,从而使衔接换乘成功。Geraldine Heilporn<sup>[5]</sup>以全体乘客的延误时间最小化为目标,建立了延误管理问题的混合整数线性规划模型。Michael Schachtebeck<sup>[23]</sup>也做了类似的研究,主要不同点在于考虑了能力约束。Natalla Kilewer<sup>[24]</sup>认为优化模型没有考虑到延误管理实时性的特点,模型求解结果仅能提供参考,可能与实际情况不吻合。他提出了简单规则下的调整方法,如:延误发生后,在容许时间范围内衔接列车等待延误列车;一旦延误发生,衔接列车不等待延误列车;延误发生后,衔接列车始终等待延误列车。针对不同延误情况可采用一种简单的调整方法或几种简单的调整方法相结合,通过仿真实验发现,在线网中初始延误发生频率较高的情况下,采用简单调整方法的效果要好于优化模型计算的结果。

在网络化运营条件下,大规模延误后,调整措施也涉及与城市其他公共交通方式的衔接协调,需要强化与其他交通方式的衔接。目前,虽然单线情况下已经有比较系统的列车运行延误调整方法,但在一体化城市公共交通体系下,不同线路间、不同交通方式间的系统协调还有待深入。



### 3 研究展望

随着轨道交通网络化速度的加快,网络化运营管理的需求越来越迫切,网络化条件下列车运行延误的影响正在扩大。通过对既有研究成果的总结,结合轨道交通网络化运营的新特点,以下内容有待于进一步研究探讨。

1) 网络化列车运行延误传播规律研究。单线情况下列车运行延误传播规律在既有研究中已经较为成熟,网络化条件下由于列车运行延误在不同线路之间进行传播,需要了解列车运行延误传播的新特点,了解延误在线路间是如何具体影响的,系统地归纳线路间的传播规律,分析列车运行延误在线网中的传播速度和范围,同时可以根据网络的不同形式,对线路、节点在列车运行延误中所起的作用进行分类、排序,分析网络中容易造成列车运行延误的薄弱环节。

2) 列车运行延误传播规律与客流规律的一体化研究。列车运行延误会造成某一车站乘客人数的激增,形成客流高峰,尤其是网络化条件下,换乘站的客流量大,一旦发生延误,由于乘客出行路径选择的多样性使客流产生波动。分析客流与列车延误之间的相互影响关系,对列车运行延误进行分类,深入研究不同类型的列车运行延误对于线网客流分布的影响。

3) 网络化列车运行延误调整模型与算法研究。目前,在国内的研究中优化目标主要考虑了运营方面的影响,对乘客关注较少。应当建立同时考虑旅客延误时间最少和列车运行计划干扰最少两个角度的优化模型,建立城市轨道交通以人为本的优化理念。列车运行延误调整还应考虑与其他交通方式的合理衔接。

### 4 结语

首先归纳了列车运行延误的基本概念及其分类,总结了列车运行延误传播的影响因素,分析了乘客对于列车运行延误传播的重要作用。就单线条件、共线运营及网络化条件三种情况下的列车运行延误传播规律以及列车运行延误调整方法进行了比较和分析,重点说明了列车延误管理问题。最后对网络化运营条件下列车运行延误及其调整方法研究进行了展望。从现有成果看,网络化列车运行延误研究还处于起步阶段,现有的研究多为定性分析,定量研究少,需要更多方面的研究加以充实。而列车运行延误调整作为一个实时性很强的优化问题,需要建立起以人为本的优化理念,以保障城市轨道交通的服务质量。

### 参考文献

- [1] 李为为. 城市轨道交通调度指挥智能集成系统研究[D]. 北京:北京交通大学,2006.
- [2] 徐瑞华,江志彬,邵伟中,等. 城市轨道交通列车运行延误及其传播特点的仿真研究[J]. 铁道学报,2006,28(2):7-10.
- [3] 马兴峰. 城市轨道交通系统运营可靠性研究[D]. 上海:同济大学,2007.
- [4] 江志彬,苗秋云. 城轨交通列车运行延误影响及其减缓措施[J]. 现代城市轨道交通,2009(5):59-62.
- [5] Heilporn G, Giovanni L D. Optimization models for the single delay management problem in public transportation [J]. European Journal of Operational Research, 2008 (189): 762-774.
- [6] 朱自刚,张知青,徐瑞华. 列车运行延误条件下的城市轨道交通客流研究[J]. 城市轨道交通研究,2006,9(12):81-84.
- [7] Lam W H K, Cheung C Y. A study of crowding effects at the Hong Kong light rail transit stations [J]. Transportation Research Part A, 1999(33):401-415.
- [8] Lam W H K, Cheung C Y. A study of train dwelling time at the Hong Kong mass transit railway system [J]. Journal of advanced Transportation, 1998,32(3):285-296.
- [9] Harris N G. Train boarding and alighting rates at high passenger loads [J]. Journal of Advanced Transportation, 2005,40(3):249-263.
- [10] 张知青,吴强,徐瑞华. 城市轨道交通系统故障时的客流动态分布仿真研究[J]. 城市轨道交通研究,2006,9(4):52-55.
- [11] 周艳芳,周磊山,乐逸祥. 城市轨道交通客流高峰传播影响研究[J]. 综合运输,2010(6):67-70.
- [12] 江志彬. 基于列车运行图的城市轨道交通运营可靠性研究[D]. 上海:同济大学,2007.
- [13] 徐瑞华,徐浩,宋健. 城市交通列车共线运营的通过能力和延误[J]. 同济大学学报:自然科学版,2005,33(3):301-304.
- [14] 徐鸣,江志彬,徐瑞华. 轨道交通列车运行延误仿真系统研究[J]. 城市轨道交通研究,2004,7(6):35-37.
- [15] 谢超. 城市轨道交通网络运输能力研究[D]. 上海:同济大学,2004.
- [16] 陈菁菁. 城市轨道交通网络运营可靠性研究[D]. 上海:同济大学,2007.
- [17] 张铭. 城市轨道交通网络运营计划协调优化研究[D]. 上海:同济大学,2008.

[18] 张国宝. 城市轨道交通运输组织[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2000.

[19] 肖鹏. 城市轨道交通列车自动调整模型算法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.

[20] 李晓艳. 基于Petri网模型的城市轨道交通列车运行调整方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.

[21] 李家平. 基于MAS的城市轨道交通列车运行调整方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.

[22] 路飞. 移动闭塞条件下地铁列车的运行优化[D]. 济南: 山东大学, 2007.

[23] Schachtebeck M, Scobel A. To wait or not to wait - and who goes first? delay management with priority decisions[J]. transportation science, 2010, 44(3): 307 - 321.

[24] Killewer N, Suhl L. A note on the online nature of the railway delay management problem[J]. Networks, 2011, 57(1): 28 - 37.

(编辑: 曹雪明)

Train Delay and Adjusting Strategies for Urban Rail Transit

Qiao Ke Zhao Peng

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

**Abstract:** This paper describes concepts, classification and characteristics of train delay of urban rail transit system, summarizes train delay propagation law under the single line case, joint operation case and network operation case, and analyzes the important impact of passenger flow on the network train delay. From an operational point of view and a passengers' point of view, it analyzes and compares optimization models and adjusting strategies for train delay. In the end, this paper proposes research prospects for metro train delay and adjusting strategies under network operation.

**Key words:** urban rail transit; train delay; train operation adjusting

(上接第 36 页)

由表 4 可以看出,  $V_2 > V_1$ , 所以利用价值工程原理进行优选, 深圳市地铁 9 号线 DC1 500 V 接触网采用接触轨最优。

6 结语

我国城市轨道交通目前正经历一个高速发展时期, 接触网系统作为唯一的向电动车组提供电能且没有备用的供电设施, 在整个轨道交通牵引供电系统中占有重要地位。笔者提出的城市轨道交通接触网评价体系可应用于接触网的选型, 但是对评价指标权重的确定还值得进一步研究与深化。

参考文献

[1] 胡懿洲, 杨啸勇. 建立城市轨道交通接触网评价体系的探讨[C]//科技、工程与经济社会协调发展——中国科协第五届青年学术年会论文集科学决策. 北京, 2004.

[2] 马沂文, 白秀梅. 城市轨道交通供电接触网类型的比较[J]. 城市轨道交通研究, 2003(1): 20 - 24.

[3] 贾颖绚. 城市轨道交通直流牵引网供电制式技术研讨会纪实[J]. 都市快轨交通, 2010, 23(1): 1 - 4.

[4] 龚文涛. 钢铝复合接触轨在广州地铁 4 号线的应用[J]. 都市快轨交通, 2007, 20(3): 82 - 85.

[5] 程强. 广州地铁 4 号线牵引网形式的选择[J]. 城市轨道交通研究, 2006(7): 14 - 18.

[6] 陈进杰, 陈峰, 梁青槐, 等. 城市轨道交通全寿命周期成本

分析[J]. 交通运输工程学报, 2010(1): 82 - 87.

[7] 孙峻, 丁烈云, 曹立新. 建设工程全寿命周期质量管理体系研究[J]. 建筑经济, 2007(12): 28 - 30.

[8] 计琳. 应用价值工程比选道桥工程设计的可行性方案[J]. 城市道路与防洪, 2008(8): 141 - 143.

(编辑: 郭洁)

Research on Catenary Evaluation System of Urban Rail Transit

Hu Jiang<sup>1</sup> Zhang Zhongan<sup>1</sup> Wu Linke<sup>1</sup>  
Zhou Geqian<sup>2</sup>

(1. Shenzhen Metro Line 3 Investment Co., Ltd., Shenzhen 518000;

2. School of Civil Engineering & Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

**Abstract:** Catenary is an indispensable part of urban rail transit system. Different forms of catenary will exert influence differently on the operation of urban rail transit. The paper explores the establishment of catenary evaluation index system of urban rail traffic based on the principles of catenary selection. Focusing on the aspects of technology and economy of catenary, authors comprehensively evaluated the availability, reliability, service life, safety, environmental adaptability and maintainability of catenary in order to promote the healthy development of China's urban rail transit.

**Key words:** urban rail transit; catenary; evaluation system; index