

基于运行图的轨道交通网络动态可达性研究

罗 钦^{1,2}, 徐瑞华¹, 江志彬¹, 陈菁菁³

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 威立雅交通巴黎地铁中国有限公司, 北京 100004; 3. 上海申通轨道交通研究咨询有限公司, 上海 201103)

摘要: 网络各站之间的可达性特别是首末班车可达性衔接方案的生成和发布, 对提升城市轨道交通智能化管理水平具有重要意义. *OD*(起讫点)之间动态可达性, 主要依赖于城市轨道交通物理网络和列车运行网络, 需综合考虑列车运行图的刚性控制和乘客换乘走行的柔性影响. 根据弹性换乘时间, 定义完全可达、条件可达和不可达三个层次, 构建网络动态可达性的衔接模型, 并提出推算流程. 以实际城轨线网为例, 确定了某 *OD* 对之间的可达时间域, 表明该方法的推算结果可作为乘客出行向导的依据.

关键词: 列车运行图; 城市轨道交通; 首末班车; 动态可达性

中图分类号: U 298.6

文献标识码: A

Dynamic Accessibility of Urban Mass Transit Network Based on Train Diagram

LUO Qin^{1,2}, XU Ruihua¹, JIANG Zhibin¹, CHEN Jingjing³

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Veolia Transport RATP China Co. Ltd., Beijing 100004, China; 3. Shanghai Shentong Rail Transit Research & Consultancy Co. Ltd., Shanghai 201103, China)

Abstract: Accessibility coordination scheme of urban rail transit network especially for the first and last trains plays a significant role in promoting the intelligent management of UMT system. The dynamic accessibility between *ODs* mainly depends on the physical network as well as train operational network, which effected by determinate control of train diagram and uncertainty of transfer time. The paper sets up a coordination model of first and last trains' dynamic accessibility of UMT network, which consists of absolute accessibility, conditional accessibility and inaccessibility levels in terms of elastic transfer time, then gives the calculation

procedure. It indicates the results of accessible time domain of first and last trains can be used for passengers' trip guide.

Key words: train diagram; urban mass transit; the first and last trains; dynamic accessibility

城市轨道交通形成网络以后, 不同线路车站之间能够通过一次或多次换乘可达, 而且具有路径选择的多样性; 特别是在“一票换乘”条件下, 乘客只需一次购票即可完成在不同线路车站之间的出行. 但由于各线的运营时间不同, 网络上各站之间的可达关系在一天中是动态变化的. 文献[1]综合考虑节点的交通需求、节点层次以及驾驶员路径选择行为, 建立了公路网络可达性模型; 文献[2]从换乘时间优化角度, 提出多种运输方式衔接的算法; 文献[3]从多线换乘接续的可达性和合理性两方面, 构造多向列车换乘衔接模型, 根据早晚客流特点, 建立首末班列车发车时间域的计算方法. 而对于城市轨道交通网络, 可达性问题及列车首末班车的衔接, 研究尚少. 笔者基于线路、车站所组成的物理网络和列车运行网络, 综合考虑列车运行图的“刚性”控制和乘客换乘行走的“柔性”影响, 确定网络各站之间的动态可达性, 从而实现乘客出行的智能化向导. 由于网络的动态可达性主要与各线首末班车时间有关, 考虑到首班车的衔接与否只产生乘客的等待时间, 而末班车的衔接合理与否可能造成乘客出行无法到达目的地, 因此, 笔者主要研究末班车条件下的城市轨道交通网络可达性, 即网络各站间的末班车衔接问题.

1 网络可达性的影响因素

1.1 物理网络

收稿日期: 2008-10-30

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划资助项目(2007AA11Z236)

作者简介: 罗 钦(1982—), 男, 博士生, 主要研究方向为轨道交通运营管理. E-mail: luoqin82@126.com

徐瑞华(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为交通与运输系统管理、运输系统仿真. E-mail: rhxu@tongji.edu.cn

城市轨道交通的线路、车站及其连通性构成其物理网络.随着换乘节点的增多,环线、共线等不同线路类型的出现,乘客在两站之间的出行通常有多条路径可以选择.不同的路径由于途经车站(主要是换乘站)不一样,在同一时间点上, OD (起讫点)之间不同路径的可达性可能不一致.

1.2 运行网络

列车运行图是运行网络的直观描述.基于列车运行图的列车运行时间、交路形式、线路各站首末班车时间等,都是影响 OD 之间可达性的重要因素.在单线运营条件下,乘客出行只需要考虑起点站往终点站方向的列车首末班车时间;而在网络化运营条件下,乘客由于出行的路径要跨越一个或多个换乘站,换乘站的首末班车是衔接的关键.另外,首末班车时间需结合交路形式加以考虑.在单一交路模式下,各车站的首末班车时刻与一条列车运行线唯一关联;而在多交路时,各站的首末班车时刻与多条运行线有关,应当根据具体路径的途经车站匹配相应的列车运行线.考虑到当前轨道交通运营管理的实际,只讨论首末班车为大交路的情形.

1.3 换乘时间

在衔接匹配网络首末班车时间时,对于两站之间有换乘的路径,除了起点站的首末班车时间和换乘站往换乘线路方向的首末班车时间外,换乘时间也是需要考虑的因素.对于不同的出行人群,换乘过程中的走行速度存在差异.因此,为了更好地体现首末班车衔接的合理性、可靠度,引入换乘弹性时间,满足正常条件下完成换乘所需不同时间范围的要求.

2 基于时间窗约束的网络动态可达性衔接模型及算法

2.1 网络可达性分析

OD 之间的可达性需通过 OD 之间路径的可达性来反映.对于 OD 之间无须换乘的路径来说,末班车在起点站开往目的站之前, OD 在该路径上具有可达性;对于 OD 之间需要换乘的路径来说,可达需满足两个条件,一是进站乘车时间应该在该站开往换乘站方向的末班车之前,二是满足路径上全部换乘站换乘方向的末班车时间要求.这需要根据列车运行时间、途经站主要是换乘站的末班车时间及换乘行走时间推算,这些时间因素构成网络首末班车动

态可达性衔接的约束条件.

由于受列车运行图的“刚性”控制,列车运行时间及各站首末班车时间较为确定;而换乘时间因人而异,考虑其柔性影响,需定义各个换乘站不同换乘方向的换乘时间域.换乘时间域的上界值较大,保证行走速度较慢的人能从车头或车尾在这个时间范围内完成换乘;下界值较小,是完成该方向换乘所需的最少时间.根据换乘站换乘时间域,将末班车的可达性定义为以下三个层次:

(1) 完全可达 OD 之间至少有一条路径可达,并且该路径途经的每个换乘站的预留换乘时间,不小于相应换乘站换乘时间域的上界.在这种条件下,乘客可以从起点站按该路径到达目的地站,并且在换乘站有较充裕的换乘时间.

(2) 条件可达 OD 之间有至少一条路径可达,并且最晚的可达路径中,需换乘末班车的换乘车站所预留的换乘时间,在该换乘站换乘时间域的上、下界范围之内.在这种条件下,乘客可以从起点站经该路径的换乘站到达目的地站,但是,在换乘站的换乘时间较为紧张.

(3) 不可达 OD 之间无路径可达.在这种条件下,乘客无法通过任何一条路径从起点站到达目的地站.

在一天的运营当中,随着时间的推移,存在换乘需求的 OD 对之间的出行,将由完全可达变为条件可达,最后变成不可达.

2.2 末班车衔接的建模

基于列车运行图的末班车衔接方案的推算模型,实际上是具有时间窗约束的优化计算模型.假设 OD 之间的可行路径^[4]都可能被乘客选择,末班车衔接时间应根据 OD 之间全部可行路径的末班车衔接时间来确定,从而将末班车衔接问题转化为 OD 之间路径的末班车衔接问题.末班车时间最晚的路径作为 OD 的末班车有效路径,该路径的末班车时间定义为 OD 的末班车时间.

假设 OD 之间的可行路径集为 $R = \{R_1, R_2\}$, 路径 R_1 不经过换乘,其途经的车站依次为 $(O, A_1, A_2, A_3, \dots, D)$; 路径 R_2 经过一站换乘,其途经的车站依次为 $(O, B_1, B_2, \dots, B_n, C_1, C_2, \dots, D)$. 对路径 R_1 , O 站往 A_1 方向的末班车时间为 T_{O-A_1} ; 对路径 R_2 , O 站往 B_1 方向的末班车时间为 T_{O-B_1} , 换乘站 C_1 往 C_2 站方向的末班车时间为 $T_{C_1-C_2}$, O 站至 B_n 站的行车时间为 W_{O-B_n} (包括 O 站至 B_n 站间的区间运行时间和停站时间), 在换乘站 C_1 由 B 线换乘

至 C 线的换乘时间域为 $[P, Q]$.

那么,对于当前时间 T ,满足末班车衔接要求可以表示如下:

(1) 完全可达

$$T \leq \max(T_{O-A_1}, \min(T_{O-B_1}, T_{C_1-C_2} - Q - W_{O-B_n}))$$

对于路径 R_1 , T_{O-A_1} 为该路径的末班车时间;而对于 R_2 ,取起点站 O 的末班车时间 T_{O-B_1} 和换乘站 C_1 的末班车时间 $T_{C_1-C_2}$,考虑弹性换乘时间上界反推至起点站 O 的有效进站时间 $T_{C_1-C_2} - Q - W_{O-B_n}$ 二者中较早者,为该路径的末班车时间.在当前时间早于两条路径末班车时间的较晚的时间点之前,即保证至少一条路径可通.这种情况为 OD 完全可达.

(2) 不可达

$$T \geq \max(T_{O-A_1}, \min(T_{O-B_1}, T_{C_1-C_2} - P - W_{O-B_n}))$$

对于 R_1 , O 的末班车时间 T_{O-A_1} 为该路径的末班车时间;对于 R_2 ,取 O 的末班车时间 T_{O-B_1} 和 C_1 的末班车时间 $T_{C_1-C_2}$,考虑弹性换乘时间下界反推至 O 的有效进站时间 $T_{C_1-C_2} - P - W_{O-B_n}$ 中较早者为该路径的末班车时间.在当前时间晚于两条路径末班车时间中较晚的时间点之后,即无任何一条路径可通.这种情况视为 OD 不可达.

(3) 条件可达

$$\max(T_{O-A_1}, \min(T_{O-B_1}, T_{C_1-C_2} - Q - W_{O-B_n})) <$$

$$T < \max(T_{O-A_1}, \min(T_{O-B_1}, T_{C_1-C_2} - P - W_{O-B_n}))$$

在 OD 之间介于完全可达和不可达的时间段内,即认为是条件可达,即乘客需在较紧张的时间内完成换乘.

2.3 推算流程

基于时间窗约束的网络首末班车衔接方案的确定,是以网络上各 OD 之间的可行路径为基础,以基于列车运行图的区间运行时间、停站时间、各站首末班车时间等时间因素为依据,综合考虑乘客在换乘站的弹性换乘时间域来推算的.下面以网络末班车衔接方案生成为例,描述算法的实现流程.

步骤一,建立城轨交通网络的拓扑结构,导入列车运行图信息.

步骤二, OD 之间路径搜索:根据轨道交通物理网络,搜索 OD 之间可能存在的物理通路.

步骤三, OD 之间各路径的可达性确定:基于列车运行图的各站末班车信息,根据各条路径起点站到路径上其他各站所需时间(包括列车运行时间和换乘时间),推算起点站可以乘车的最晚有效时间,使之能满足路径上各站(主要是换乘站)的末班车时间要求,起点站的最晚有效时间定义为该路径的末

班车时间.其中,应结合换乘时间域来推算完全可达、条件可达和不可达的三种情形.

步骤四, OD 之间末班车衔接方案的确定:根据 OD 之间全部可通路径所确定的末班车时间,取最晚一条可达路径的末班车时间为该 OD 的末班车时间.

3 算例

以上海城市轨道交通局部线网为例(网络拓扑结构如图 1 所示),确定莘庄站与龙漕路站之间的动态可达性.其中,上海南站、上海体育馆和虹桥路站为换乘车站,弹性换乘时间域见表 1,区段的列车运行时间见表 2,相关车站的末班车时间见表 3.

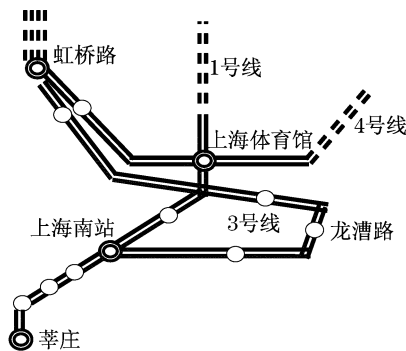


图 1 线网结构示意图

Fig.1 Network structure diagram

表 1 换乘时间域

Tab.1 Transfer time domain

换乘站	换乘方向	换乘时间域/min
上海南站	1 号线至 3 号线	[3,8]
上海体育馆	1 号线至 4 号线	[2,6]
虹桥路	4 号线至 3 号线	[1,4]

表 2 区段运行时间

Tab.2 Running time of related sections

线路	区段	运行时间/min
1 号线	莘庄——上海南站	11
1 号线	上海南站——上海体育馆	5
3 号线	上海南站——龙漕路	5
3 号线	虹桥路——龙漕路	7
4 号线	上海体育馆——虹桥路	5

表 3 车站末班车时间

Tab.3 Last train departure time of related stations

线路	车站	方向	末班车时刻
1 号线	莘庄	上海体育馆	22:32
3 号线	上海南站	石龙路	22:00
4 号线	上海体育馆	虹桥路	23:14
3 号线	虹桥路	石龙路	22:52

考虑 *OD* 之间有两条可行路径,其中,路径 1 经上海南站换乘至 3 号线龙漕路站,途经 6 站,需一次换乘;路径 2 在上海体育馆换乘 4 号线,至虹桥路站后换乘 3 号线到龙漕路站,途经 11 站,需两次换乘.根据上述的时间约束条件,经末班车衔接模型计算得出结果为:

对路径 1,在 21:41 之前为完全可达,21:41~21:46 为条件可达,21:46 之后不可达.
对路径 2,22:21 之前为完全可达,22:21~22:28 为条件可达,22:28 之后不可达.
由此推算出 *OD* 之间的动态可达性结果,如表 4 所示.

表 4 莘庄站至龙漕路站之间的末班车动态可达性分析结果
Tab.4 Dynamic accessibility results between Xinzhuang station and Longcao Rd station

时间段	OD 之间可达性			可达路径	
~21:41	■完全可达	□条件可达	□不可达	■路径 1	■路径 2
21:41~21:46	■完全可达	□条件可达	□不可达	■路径 1	■路径 2
21:46~22:21	■完全可达	□条件可达	□不可达	□路径 1	■路径 2
22:21~22:28	□完全可达	■条件可达	□不可达	□路径 1	■路径 2
22:28~	□完全可达	□条件可达	■不可达	□路径 1	□路径 2

注:“■”表示该状态存在,该路径可行;“□”表示该状态不存在,该路径不可行.

4 结语

为了提高网络化运营条件下城市轨道交通客运服务水平和质量,应实现各线列车尤其是首末班车在换乘站的合理衔接,并将其作为网络运营计划编制的依据^[5].而对于各线确定的列车运行,研究网络动态可达性方案的生成和发布具有十分重要的现实意义.本文基于列车运行图的“刚性”时间约束条件,考虑换乘时间的柔性影响,提出了网络动态可达性的衔接模型及推算流程,并通过实际的例子进行了验算.

参考文献:

[1] 盖春英,裴玉龙.公路网络可达性研究[J].公路交通科技,2006,6(23):104.

GAI Chunying, PEI Yulong. Study on accessibility of highway network[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 6(23): 104.
[2] CHING Jungting, Paul Schonfeld, Asce F. Schedule coordination in a multiple hub transit network[J]. Journal of Urban Planning and Development, 2005, 131(2): 112.
[3] 徐瑞华,张铭,江志彬.基于线网运营协调的城市轨道交通首末班列车发车时间域研究[J].铁道学报,2008,30(2):7.
XU Ruihua, ZHANG Ming, JIANG Zhibin. Study on departure time domain of the first and last trains of urban mass transit network based on operation coordination[J]. Journal of the China Railway Society, 2008, 30(2): 7.
[4] Luo Q, Zhang L J, Xu R H. Fare distribution method based on travel choice for urban rail transit[C]// International Conference on Transportation Engineering 2007. Chengdu: ASCE, 2007: 3482 - 3487.
[5] 张铭,徐瑞华.城市轨道交通网络运营组织协调性研究[J].城市轨道交通研究,2007,11:44.
ZHANG Ming, XU Ruihua. Study on coordination relations in network operation of urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2007, 11: 44.