

Review of Urban Rail Transit Capacity Research

Yanfang Zhou, Leishan Zhou, Yixiang Yue

Traffic and Transportation School of Beijing Jiaotong University, Beijing, China

Email: yanfangzhou421@163.com, lszhou@263.com

Abstract: Capacity research of the urban rail transit is the basis of train operation organization and capacity planning and utilization. This paper summarized capacity research achievement of urban rail transit, by classifying and comparing the calculation method of transit line capacity and station collection and distribution capacity, analyzing measures used to promotion line capacity, we pointed out problem remained in urban rail transit capacity research. As the end of this paper, the promising study area of transit line capacity has been summarized.

Keywords: line capacity; capacity computing; rail transit; train operation organization

城市轨道交通能力计算研究综述

周艳芳, 周磊山, 乐逸祥

北京交通大学交通运输学院, 北京, 中国, 100044

Email: yanfangzhou421@163.com, lszhou@263.com

【摘要】城市轨道交通能力研究是轨道交通列车运行组织与能力规划利用的基础。本文主要对城市轨道交通的车站能力计算及线路通过能力计算研究现状进行了总结、分类与比较, 并对提高通过能力的各项措施进行了分析, 指明了轨道交通线路通过能力研究仍然存在的问题, 提出了轨道交通能力进一步的研究方向。

【关键词】线路通过能力; 能力计算; 轨道交通; 列车运行组织

1 引言

随着我国城市轨道交通网络化进程的加速, 路网规模的扩大和结构的升级对网络化环境下的资源共享、集中指挥、智能化管理等提出了更高的要求。要实现全网范围的“资源共享, 综合利用”, 必须准确计算路网输送能力、评估既有线网运输能力极限, 为能力利用和配置提供明确的边界和约束条件, 为解决路网能力瓶颈的识别与消解问题, 从而实现路网整体优势出发的“点、线、网”的动态能力配置, 解决由于运能紧张及利用不合理致使的运输效率不高的问题。

城市轨道交通的能力研究可以从三个层次两个方面进行。三个层次分别是指轨道交通车站的集散能力、线路的输送能力及路网的承载能力, 即点、线、面三个层次。两个方面是指静态能力和动态能力。静态能力即理论最大能力, 在不考虑随机因素和系统的动态变化时各个层次的最大能力, 而动态能力是指在一定

的随机扰动、一定的运力资源配置现状下, 与路网内客流变化趋势相一致的使用能力。点、线能力的研究是路网系统能力研究的基础, 但路网系统运输能力不仅仅是组成路网各点线子系统运输能力的简单加总, 孤立地研究“点”或“线”系统的运输能力具有很大片面性, 所以从系统的观点讲“轨道交通运输能力”应该是轨道交通路网系统的运输能力, 而不是其各子系统的运输能力。当前的城市轨道交通能力研究主要侧重于点、线能力, 对路网能力的研究甚少。

2 城市轨道交通车站能力研究现状

城市轨道交通点能力的研究包括车站集散能力及换乘站的换乘能力。城市轨道交通车站集散能力是指行车组织方法、既有设施设备数量和职工配备已定情况下, 所研究车站在单位时间内所能吐纳的最大客流量。而换乘能力是指一定时间内车站换乘通道所能通过的最大客流量。

(1) 车站集散能力

基金支持: 北京市自然科学基金资助项目(9082012)

影响车站集散能力的主要因素包括站台、通道、楼梯、自动扶梯和自动售检票设备。目前对车站集散能力的研究比较少,计算方法主要采用解析计算法和仿真算法。

解析算法是在车站结构分析基础上,组成乘客集散流线的的所有设施设备能力单独计算,并以木桶原理,取所有设施设备能力中最小值为车站集散能力。文献 22、23 都属于解析算法。解析法是一种静态的理想状态车站集散能力计算方法,没有考虑乘客行为对设施设备通过能力的影响。

随着计算机仿真技术的发展,乘客群体行为与车站通道、设施设备互动的建模使得应用仿真技术计算车站集散能力变成可能。对行人交通流的研究建模手段大致上分三种:宏观建模仿真,即把行人视为连续流动介质,因为现代行人运动研究是从交通流的研究中分化出来,因而也就自然的继承了流体研究中已经完善和成熟的方法;微观建模仿真,从每个行人的行为入手,建立符合行人行为的模型,这类方法是目前最成熟也是最热门的方法,其中最为著名的是 Helbing 的“社会力”模型^[23]和 VictorBlue 的元胞自动机模型^[24];再一种是介观建模仿真,它介于微观和宏观之间,最著名的是格子气模型,日本学者 Masakuni Muramatsu 和 Takashi Nagatani^[25-27]在此领域研究较多。

仿真计算结果的准确性依赖于模型的参数、仿真的粗细粒度以及不同的仿真要求。

(2) 车站换乘能力

城市轨道交通换乘系统是一个以管理为中枢、人为核心、换乘设施为基础、车为条件组成的总体性的、以实现乘客在不同的轨道交通线路之间转换为目的综合系统。换乘能力是指一定时间内车站所有换乘通道通过的最大客流量。换乘能力包括两方面的内容,一方面是换乘需求能力,另一方面是供给能力。换乘需求能力由一定时间内该站到达的所有列车的换乘客流量大小决定,而供给能力受换乘通道和车站换乘客流组织措施的影响。当前对换乘能力计算的研究较少,文献 22 采用解析方法对车站的换乘能力进行了计算。进一步的研究应在考虑车流组织与客流组织协调的基础上,以车站通道乘客群体行为分析为依据,对车站的换乘能力进行仿真计算,以更好的发现影响车站换乘能力的薄弱环节,提高车站的换乘效率。

3 城市轨道交通线路通过能力研究现状

轨道交通线路通过能力是指一定车辆类型、信号设备及行车组织条件下,单位时间内线路通过的最大列车数。确定线路通过能力是计算轨道交通线路运输能力的基础,既能为运营部门提供既有线路通过能力相关信息,也是未来轨道线路路网投资建设的参考依据。合理的通过能力计算方法有助于运营部门确定

合理的列车运输组织方案,制定正确的路网规划与改造策略。出行是联结城市居民生活的重要纽带,也是日常生活重要的一部分。随着城市的扩张及经济的发展而来的,则是大量的出行造成的交通拥堵,快速、经济且大容量的轨道交通毫无疑问成为了大城市交通问题的出路。而线路通过能力的有限性成为了制约其解决城市出行问题的瓶颈。线路通过能力不能储存,无法调拨,如何规划及利用有限的通过能力使得城市轨道交通系统运营成本最低、社会边际收益最大的是研究轨道交通通过能力的最终目标。

通过能力是列车数量、运行图稳定性、列车最高平均速度以及列车运行的异质性之间的平衡^[1-2]。影响线路通过能力的因素众多^[3],包括:一、线路基础设施因素如信联闭系统,轨道几何特性、单线或双线、速度限制等;二、交通特性如既有线或新线,列车同质性,运行图种类,交通高峰因素以及运行优先规则等;三、运行特性如轨道的连续性,列车停站时间,最大旅行时间,天窗,服务质量,运行图的可靠性等。因此,轨道交通线路通过能力的计算是在力求对所有影响因素全面分析的基础上,采用瓶颈分析技术将列车实际运行或仿真运行得到的相关数据引入到以排队论为基础的解析模型。随着各种智能计算方法方法的引入,计算机仿真逐渐的将经典的计算线路通过能力分析法和图解法进行了融合,以分析法为基础得到初始时刻表,再以智能优化算法得到理想的时刻表,最后通过仿真确定实际的时刻表,这也是未来轨道交通线路通过能力计算的发展趋势。

轨道交通通过能力的研究内容众多。主要有线路通过能力的计算,车站折返能力计算,通过能力规划及利用,通过能力仿真研究以及提高通过能力的措施研究等等。在各项研究中,通过能力的计算是其它各项研究的基础,也是通过能力研究的重点所在,总结线路通过能力研究的各项成果有助于整体把握线路通过能力的研究趋势。

轨道交通线路通过能力计算的目的是为了确定线路设施是否能使潜在的线路运输能力满足预定的运输需求。计算方法的偏差,可能引起通过能力计算结果的偏大或偏小,从而影响运营部门对由线路通过能力决定的轨道交通输送能力是否适应近、远期客运需求的判断,并影响轨道交通路网建设的规模、标准及时机的确定,避免投资浪费。因此,要求轨道交通线路通过能力计算方法能科学地反映客观实际,计算结果应具有相当的准确度,并在此基础上,力求直观、简便和实用。

轨道交通线路通过能力计算的研究成果众多。文献 4 指出了线路通过能力的控制点为车站,详细分析车站各项作业过程,计算了线路通过能力及折返能力,

探讨了提高线路能力的措施。文献 5 给出了计算线路通过能力及折返能力的最小时间间隔法,并对公式中的参数确定及公式应用进行了分析;文献 6 引入了缓冲时间的概念,对地铁区间通过能力的质量因素计算方法进行了探讨;移动闭塞的应用使得轨道交通线路通过能力得到了大幅提升,文献 7-10 以移动闭塞下地铁追踪间隔分析为基础,计算了移动闭塞下地铁线路的通过能力。由于轨道交通列车的循环运行特性,折返作业时间是制约线路通过能力的重要。文献 11、12 研究了轨道交通线路折返能力的计算及加强,文献 13 则对采用不同交路模式下折返能力的计算进行了研究,重点对采用特殊交路时的中间站折返能力与线路通过能力损失问题进行了定量分析,提出了在采用特殊交路时可供采取的扩能措施。文献 14 以上海轨道交通实际运营案例为背景研究了共线运营时线路通过能力的计算方法,文献 15 分析了多种交路对城轨交通过能力和车底运用的影响,建立了多种交路条件下城轨交通过能力和车底数量的数学模型。文献 16 以概率论和排队论为基础,给出了城市轨道交通高峰期线路通过能力的动态不确定型计算方法。

轨道交通多采用平行运行图,平行运行图能力的计算是以运行图周期为基础的。首先必须确定一昼夜可用于列车运行的时间内,一个区间可以铺画多少个运行图周期,然后再乘以该类型运行图周期内所包含的列车对数或列车数,再乘以该区间通过能力的有效度系数。传统的轨道交通线路通过能力计算方法主要有以下几种:

(1) 解析法

解析法包括利用率法和平均最小列车间隔时间法。城市轨道交通列车编组模式单一,运行图同质性高,因此,计算线路通过能力时多采用平均最小列车间隔时间法。列车间隔时间是指从运行列车组前行列车占用区间时间始点至邻接后行列车占用区间时间始点止的时间且运行过程相互不受干扰的最小时间间隔。最小列车间隔时间是保证车站能完成必要的接发列车作业和确保列车在区间内安全运行的时间。在具体铺画列车运行图时,由于受列车种类不同、列车在运行图上相互位置的安排和区间通过能力利用率等因素的影响,列车运行途中实际安排的列车发车间隔时间或到、发间隔时间往往大于最小列车间隔时间。定义列车运行图规定的列车间隔时间与最小列车间隔时间之差为列车运行图缓冲时间。在不考虑列车折返时,最小列车间隔时间 $=\max\{\text{区间追踪间隔, 车站追踪间隔}\}$,当列车采用立折的模式运行时,最小列车间隔时间 $=\max\{\text{区间追踪间隔, 车站追踪间隔, 折返时间}\}$ 。

平均最小列车间隔时间算法属于动态的不确定型的计算方法,以排队论为理论基础。它是在分析研

究各区段当前实际列车运行状态的基础上,依据它的列车进入晚点概率、晚点列车平均进入晚点时间和列车种类比平均最小列车间隔时间的取值,按照给定的反映列车运行工作质量水平要求的列车后效晚点时间允许总值等条件,计算线路通过能力的方法。通过能力的计算结果与给定的列车运行工作质量要求水平密切相关,它随列车运行工作质量要求水平的变化而变化,是一项可按高层决策者意愿而改变的不确定值。在这一计算方法中,引入了列车运行图缓冲时间的概念。很显然,带有必要缓冲时间的运行图是具有一定调整余地、有一定应变能力的柔性运行图,是在实际工作中实施的运行图。

(2) 图解法

在运行图上所能最大限度铺画的列车总数即为该区段的非平行运行图的通过能力。应用图解法计算线路通过能力主要有两种方式:一种是饱和法,另一种是压缩法,即 wakob's razor^[17]。饱和法^[3]以数学规划方法为基础,通过线性规划、混合整数规划,并引入各种智能算法进行求解,在给定初始条件的运行图上,通过调度最大的列车数即铺画最多运行线得到线路通过能力。韦克伯剃刀法以排队论为理论基础,对各部分线路基础设施进行分离,在铺画运行线时列车按最小列车追踪时间为间隔以一定的排队规则到达拟定的基础设施(初始化时假定进入该基础设施的列车存量无限),因此,由韦克伯法得到的是每部分独立的基础设施的最大通过能力,因此,韦克伯法也属于瓶颈分析法的一种。饱和法韦克伯剃刀法的主要缺点是很难确定初始化后列车的到达间隔和追踪间隔变更数据^[18],并且韦克伯法不处理现实中的随机波动导致的各种问题,使用的总等待时间为抽象总体,现实意义不强^[17]。饱和法是在已有的时刻表上尽量地添加运行线,因此,选择合适的列车成为了影响通过能力大小的关键因素。

UIC406 法是当前比较推崇的能力计算及评价方法,运用韦克伯剃刀规则,给出的是运行图的期望能力。UIC 法基于运行计划而非确定性的运行图,因此能通过修改系统各项参数对计算结果进行审查,对线路能力利用进行评价。

图解法比较精确,但因其作业量大,费时费力,而且只反映结果不反映过程,难以分析影响因素,一般只用于通过利用程度接近饱和时或个别特殊情况的图解验算。

(3) 计算机仿真

计算机模拟法是由计算机模拟人工铺图,严格按照铺图标尺,通过紧密铺画列车运行线,进而确定高速铁路区段或全线通过能力的方法。计算机模拟确定

区段或全线通过能力都是在某种特定条件下进行的，都是根据某种原则，在固定某些种类列车数量的前提下，通过计算机模拟人工铺画满表运行图，确定其它种类列车的数量。由于满足铺图标尺约束条件下的可行方案数量巨大，因此方案的必选和优化算法相当复杂。计算机仿真法将理论计算与仿真技术结合，如下图所示，计算机仿真法分析轨道交通线路通过能力包括 3 个基本要素：轨道交通系统、模型及计算机，而连接 3 个基本要素的则是 3 个基本活动：建立数学模型，建立仿真模型及进行仿真试验。

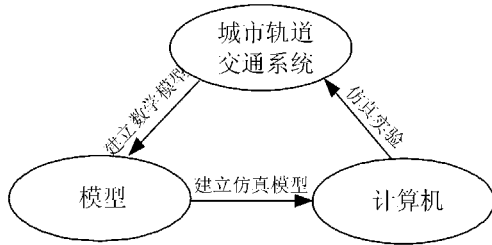


Figure 1 basic elements and activity of transit line capacity simulation

图1 计算机仿真轨道交通系统线路通过能力的基本要素及基本活动

由图可知，计算机仿真法分析轨道交通线路通过能力的基础是基于系统分析的数学建模，仿真模型是将模型与计算机连接的桥梁，仿真试验作为仿真的最终展示，体现了仿真的目的及意义。近年来随着信息并行处理技术、可视化技术、分布处理技术、多媒体技术以及虚拟现实技术的发展，使得建立人-机-环境一体化的分布的多维信息交互的仿真模型和仿真环境成为可能，形成了一些新的仿真方法：面向对象的仿真方法、分布式交互仿真方法、人机和谐仿真方法^[21]。

智能算法与仿真技术的融合使得应用仿真求解线路通过能力成为了当前的研究热点。文献 3 总结了仿真模型的主要研究成果，如将动态规划与分值定界法在仿真环境中进行整合，仿真与启发式算法结合评价影响线路能力的众多因素的相互关系以及 SCAN 模型等。图论以及离散事件动态系统理论在列车运行过程分析理论中的应用也使得基于事件等的仿真技术得以发展起来。仿真技术的发展与优化模型及算法的融合使得大量的仿真软件得以开发，其中，DEMIURGE、RailSys, OpenTrack, CMS, Railcap, CAPRES 等都是极具代表性线路通过能力计算及评价的仿真软件。

仿真计算的准确性不仅依赖于所采用的模型、参数，计算方法及精度，也同仿真环境息息相关。线路拓扑结构、列车性能、信号系统及运行约束等基础数据的精确录入需要耗费大量的人力。但由于仿真系统的特性，在基础工作完成后，通过修改仿真模型的各项参数以及仿真条件可快速得到仿真结果，通过与实

际运行统计数据和分析比较，计算机仿真方法能更快有效的计算及分析线路通过能力。因此，计算机仿真方法必然成为研究热点。

总的来说，基于排队论或其他随机分析模型的解析法建立的数学模型不能精确估计线路冲突、驾驶员、调度员反应时间不一等情况下由于加速或减速致使的列车晚点，而仿真模型则不能反映影响列车晚点传播的各项因素之间的关系。解析法是图解法和仿真法的基础及开端，由解析法得到的线路能力一般可以成为理论通过能力，图解法得到的则是理想的线路通过能力，而经由仿真试验可以得到线路有效通过能力。解析法适用范围广，而图解法及仿真法则必须与其应用环境相适应。因此，当前的研究趋势是将解析法、图解法及仿真法进行整合。

4 提高轨道交通线路通过能力的措施分析

提高轨道交通线路通过能力的研究是以线路通过能力计算为基础的，在轨道交通线路通过能力的计算中，分析影响线路通过能力的各项因素的相互关系，可以得到制约通过能力的关键点，为设施设备的更新、改扩建等提供决策方案。提高轨道交通通过能力可以从以下 3 个途径得到：一、设施设备更新。包括线路等基础设施的改、扩建，动车的更新、信联闭设施的更新。二、优化列车运行组织。主要措施有增加行车密度，缩短列车追踪间隔，提高列车运行速度，加强车站客流组织工作，减少列车运行折返时间等。三、设施设备更新与列车运行组织优化相结合。

线路基础设施设备的更新对通过能力的影响可以通过积聚模型进行比较分析。文献 19 提出了应用积聚模型对线路基础设施的更新后理论通过能力进行计算，通过对不同的方案下线路通过能力的比较与核对，可以方便的选取投资小而受益最大的方案作为决策方案。文献 10 给出了信号系统更新后线路通过能力的变化数据，可以看出，尽管采用移动闭塞后线路的追踪间隔大幅度缩短，折返时间却没有改变。即在折返运行的列车线路上，仅仅缩短列车追踪间隔无法提高线路的理论通过能力，但是追踪间隔的缩短使得区间运行缓冲时间增加，因此列车运行图的稳定性能得到加强。

优化列车运行组织主要针对共线运营以及各种交路混合等情况，文献 14、15 分别对两种情况下的线路通过能力计算及应用进行了研究。此外，文献 20 应用线性离散时间网络模型对存在速差的列车混合运行时的通过能力计算及影响进行了研究。轨道交通的列车运行组织模式相对简单，但列车的循环运行使得折返成为了制约线路通过能力的瓶颈，如何减少列车折返时间，使得列车追踪间隔与折返时间相协调是提高线路通过能力的关键。

列车在轨道交通系统的运行是一个复杂巨系统。系统的各个组成部分都有其特定的能力限制，因此，如何协调利用系统各部分的能力，优化系统性能是提高线路通过能力的研究方向。

5 城市轨道交通能力研究趋势

文献 3 给出了通过能力相关的 4 个概念：理论通过能力、实际通过能力，利用通过能力以及有效通过能力。其中，理论通过能力是线路通过能力的上限。实际的运营过程中，考虑各种随机干扰因素以及列车运营成本等，运行图编制时很少按照最大通过能力铺画列车运行线。因此，如何选择合适的通过能力利用铁路轨道交通通过能力的一个重要研究方向。需求通过能力计算不仅是线路规划的决策依据之一，也是线路投入运营后列车开行频率的决策依据。但是，运营阶段的需求通过能力尚需考虑运营成本的因素，降低运营成本且最大限度的提高乘客服务水平是轨道交通通过能力未来研究的另一个重要内容。此外，车站的客流集散能力从一定程度上影响了线路的需求能力，研究车站客流组织对通过能力的影响是全面研究轨道交通通过能力的基础。轨道交通线路的建设使得各线路不再分离独立，形成路网后各线路的通过能力相互影响，因此，必须对轨道交通路网通过能力进行研究。具体而言，轨道交通通过能力的研究趋势有以下几点：

(1) 通过能力利用率研究

能力利用率过高时，运行图的稳定性下降，抗干扰能力降低；能力利用率过低时，乘客的等待时间增加，服务质量下降。合理的能力利用率须全面考虑客流需求、运营成本以及运行图鲁棒性以及一定的通过能力储备。选取合适的通过能力利用率亟需从理论及实验等方面进行系统的研究。比较可行的方法是以运行计划兑现率、扰动性能指标以及经济效益指标等的定性定量分析为依据对通过能力进行评价，根据评价结果确定通过能力利用率。

(2) 考虑一定乘客服务水平的需求通过能力研究

生活水平的提高使得乘客对出行质量的要求越来越高。与道路服务水平相似，一定的服务水平下路段的通过能力是不一样的。在一定的客流量下，一定的服务水平对应着一定的需求通过能力。但是需求通过能力可以无限，线路通过能力却是有限值。因此，考虑一定乘客服务水平的需求通过能力研究包括两方面，一方面要确定给定的服务水平下由线路客流总量决定的需求通过能力，另一方面，则是对确定的客流总量下系统所能提供的通过能力对应的乘客服务水平。

(3) 车站客流组织对通过能力的影响分析

车站客流组织工作是针对乘客从进站、买票、检票、候车、换乘直至出站在内的所有活动的约束规范，分流、引导等措施是枢纽站常用的措施。车站客流组织工作的好坏一方面影响了列车停站时间，另一方面车站集散能力大小对需求的通过能力形成了一定的影响。换乘客流的组织依赖于换乘线路之间列车到达时刻的有序衔接，这一点在非高峰运营时段尤其明显。车站客流组织对通过能力的影响是动态变化的，全面系统的研究尚需依赖于实际运营数据的统计分析结果。

(4) 轨道交通路网通过能力研究

路网系统通过能力不仅仅是组成路网各点线子系统通过能力的简单相加，孤立地研究点或线的通过能力局限性较大，会有片面性。如何提供合理分析评价方法，还有待从概念、理论体系到计算方法方面进行系统的研究与深化。

(5) 路网通过能力仿真及评估

路网通过能力的仿真及评估是在路网通过能力计算研究的基础上，结合仿真技术，把路网作为一个整体进行仿真研究。仿真模型，求解策略以及仿真策略等是路网通过能力仿真及评估的重点研究对象。

References (参考文献)

- [1] Landex, A., Kaas, A. H., Schittenhelm, B. & Schneider-Tilli, J. Evaluation of railway capacity., Proceedings of the Annual Transport Conference at Aalborg University, Denmark, 2006.
- [2] M. Lüthi, A. Nash, U. Weidmann, F. Laube, and R. Wüst. Increasing railway capacity and reliability through integrated real-time rescheduling. In Proceedings of the 11th World Conference on Transport Research, Berkeley, 2007.
- [3] M. Abril, F. Barber, L. Ingolotti, M. A. Salido a, P. Tormos, A. Lova. An assessment of railway capacity. Transportation Research Part E 44 (2008) 774-806.
- [4] Liu XiaQing. Subway track capacity [J], metro and light rail, 1995.2.
刘夏菁. 地铁线路的通过能力[J]. 地铁与轻轨-1995年2期.
- [5] Zhang Guobao. research on Subway capacity calculation method [J], 1995. journal of Shanghai railway institute, 1995.1.
张国宝. 地下铁道通过能力计算方法的探讨[J]. 上海铁道学院学报-1995年1期.
- [6] Feng chunxia. Research on Calculate method of subway carrying capacity of the block section journal of Shanghai railway institute, 1995.12.4, vol.16
冯春霞. 地铁线路区间通过能力的计算方法探讨[J]. 上海铁道学院学报-1995年12月, 第16卷第4期.
- [7] JinJuan, YangMei, Wang changlin. Research on carrying capacity for subway track based on principle of movable block [J] RAILWAY COMPUTER APPLICATION, 2008.6, vol.17.
金娟, 杨梅, 王长林. 基于移动闭塞原理的地铁列车线路通过能力的研究[J]. 铁路计算机应用, 2008年第17卷第6期.
- [8] Zheng Xiaolong, Ma lin, Tang tao, Ning bing. Analysis of Train Headway in Urban Rail Transport System [J]. COMPUTER AND COMMUNICATIONS. 2005.3, vol.23.
郑晓龙, 马琳, 唐涛, 宁兵. 城市轨道交通系统中列车间隔的有关分析[J]. 交通与计算机, 2005年第3期第23卷.

- [9] Luo li yun,Wu wenqi.Analysis on the Safety Time Interval of Train with Movable Block System in Urban Rail Transit[J], China Railway Science, 2005.1.1, vol.26.
罗丽云, 吴汶麒. 城市轨道交通移动闭塞列车安全间隔时间分析[J]. 中国铁道科学, 2005年1月第26卷第1期.
- [10] Lu Fei. Operation Optimization of the Subway Train Under Moving Block System [D]. Shandong university, 2007. 4.
路飞. 移动闭塞条件下地铁列车的运行优化[D]. 山东大学, 2007年4月.
- [11] Zhang Guobao,Yu Tao. A Study on the Turn back Capacity of Trains on Urban Rail Transit.[J].urban rapid rail transit, 2006.8.4, vol.19.
张国宝, 于涛. 关于城轨列车折返能力计算与加强的研究[J]. 都市轨道交通, 第19卷第4期 2006年8月.
- [12] LiuTao. Rsearch on Turn around capacity calculation and effect factors analysis of urban rail transit. Rail signaling & communication, 2008, 12, 12, vol.44.
刘涛. 城市轨道交通折返能力的估算及影响因素[J]. 铁道通信信号, 2008年12月, 第44卷, 第12期.
- [13] Zhang Guobao, Liu mingshu, Xu ruihua.Analysis on Carrying Capacity for URT Train Turn-back at Wayside Station[J], 2005.6.
张国宝, 刘明珠, 徐瑞华. 城市轨道交通列车在中间站折返时的通过能力适应性分析[J]. 城市轨道交通研究, 2005年6期.
- [14] Xu Ruihua, Xuhao, SongJian. Capacity and train running delay under condition of operation plan of urban transit system network[J] Journal of Tongji University, 2005.3.3, vol.33.
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年3月第33卷第3期.
- [15] Xu ruihua, Chenqingqing, Du shiming. Study on Carrying Capacity and Use of Rolling Stockwith Multi2routing in Urban Rail Transit[J], Journal of the China Railway Society, 2005.8.4, vol.27.
徐瑞华, 陈菁菁, 杜世敏. 城轨交通多种列车交路模式下的通过能力和车底运用研究[J].铁道学报, 2005年8月第27卷第4期.
- [16] Wang haidan, Li yinghong.Research on urban rail transit line capacityduring rush hours [J]. Shanghai Railway Science & Technology, 2005.3.
王海丹, 李映红. 高峰期城市轨道交通线路通过能力的研究[J]. 上海铁道科技, 2005年第3期.
- [17] A. F. de Kort, B. Heidergott, H. Ayhan.A probabilistic (max, +) approach for determining railway infrastructure capacity. European Journal of Operational Research 148 (2003) 644–661.
- [18] Dan Max Burkolter. Capacity of Railways in Station Areas using Petri Nets. PHD thesis, Swiss Federal Institute Of Technology Zurich 2005.
- [19] Jan C. Fransooa, J. Will M. Bertrand. An aggregate capacity estimation model for the evaluation of railroad passing constructions. Transportation Research Part A 34 (2000) 35-49.
- [20] Steven Harrod.Capacity factors of a mixed speed railway network. Transportation Research Part E 45 (2009) 830-841.
- [21] Zhen xiaolong. Train carrying capacity theory analysis and computer simulation of urban rail transit [D], Beijing Jiaotong university, 2006.3.
郑晓龙. 城市轨道交通中列车通过能力的理论分析及计算机仿真[D]. 北京交通大学, 2006年3月.
- [22] ZhangYiMei, Study on Urban Rail Transit System Carrying Capacity Based on Network[D]Beijing Jiaotong university, 2009.6.
张一梅. 基于路网的城市轨道交通系统运输能力研究[D]北京交通大学, 2009年6月.
- [23] Dirk Helbing, Peter Molnar. Social force model for pedestrian dynamics [J]. Physical Review E, 1995, 5 1(5), 4 282-4285.
- [24] Blue V J, Adler J L. Emergent fundamental pedestrian flows from cellular automata micro-simulation[J].Transportation Research Record, 1998, 1644: 29-36.
- [25] Masakuni Muramatsu, Takashi Nagatani. Jamming transition in two- dimensional pedestrian traffic[J]. Physica A, 2000, 275: 281-291.
- [26] [Masakuni Muramatsu, Takashi Nagatani. Jamming transition in pedestrian counter flow [J]. Physica A, 1999, 267: 4 87-498.
- [27] Masakuni Muramatsu, Takashi Nagatani. Jamming transition of pedestrian traffic at a crossing with open boundaries [J]. Physica A, 2000, 2 86:377-390.