

列车晚点情况下的地铁运营调整自组织机制研究

赵 源^{1,2,3}

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海; 2. 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 201804, 上海; 3. 上海申通地铁集团有限公司运营管理中心, 201100, 上海 // 高级工程师)

摘 要 在细致梳理他组织模式下的列车运行调整规则与策略基础上, 引入智能体概念, 借鉴“沙丁鱼群”运动效应, 将邻近两列车间的运行时间距离划分为排斥间隔、协同间隔和吸引间隔, 继而建立列车间的协同运动关系。运用仿真技术实现了晚点情况下的列车运行调整自组织算例, 论证了自组织调整机制的有效性和应用性。

关键词 城市轨道交通; 列车晚点; 运营调整; 运行间隔; 自组织机制

中图分类号 U29-39

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.04.004

Self-Organization Mechanism of Metro Operation Adjustment in Case of Train Delay

ZHAO Yuan

Abstract The train operation adjustment rules and strategies under other organizational modes are sorted in detail, and the concept of smart agent is introduced. Referring to the movement effect of "sardine herd", the running time interval between adjacent two trains is divided into three thresholds, i.e., exclusion interval, cooperative interval and attraction interval, and the cooperative movement relationship between trains is established. Self-organization operation adjustment algorithm in case of train delay is realized with simulation, which demonstrates the effectiveness and applicability of the self-organization adjustment mechanism.

Key words urban rail transit; train delay; operation adjustment; train following interval; self-organization mechanism

First-Author's address Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education in Tongji University, 201804, Shanghai, China

在高密度行车条件下, 城市轨道交通系统一旦出现列车因故晚点, 很容易引发连带晚点, 继而出现列车晚点传播, 打乱列车运行秩序, 甚至波及网络中其他线路。因此, 及时针对晚点情况做出有效的调度应急处置与运营调整决策尤为重要。

在传统的运营调度指挥体系中, 针对列车运行晚点情况, 主要采取人工介入调整模式来应对, 以调度员为决策者和指挥者^[1]。受限于调度员的工作经验及调度能力, 加之受日益复杂的网络运营环境和不确定的外界因素干扰, 列车运营调整方案及效果也存在很大的不确定性。因此, 研究建立列车晚点情况下的自动化、智能化运营调整机制与方法具有重要意义^[2]。

既有的列车运行调整模式属于他组织过程, 其系统组织力来自系统外部的调度指令。与他组织相对应, 系统自组织是指在没有外部指令条件下, 系统内部各子系统之间能自行按照某种规则形成一定结构或功能的现象。自组织理论主要研究系统如何从混沌无序的初态向稳定有序的终态的演化过程和规律^[3]。本文探索性地将系统自组织原理引入城市轨道交通行车组织与运营调整中, 针对列车因故晚点、线路系统运行秩序被打乱后的状态, 建立系统内列车个体间协同作用机理, 通过构建列车运行调整的自组织规则, 实现列车运行秩序的自动恢复。

1 晚点情况下的地铁列车运行调整

1.1 列车运行晚点的产生与传播

列车在线路上运行时, 由于受到自身或外界因素的干扰, 其运行时时刻会偏离计划运行图, 产生自身晚点^[4-5]。例如, 车站客流量过大造成的停站时间延长会导致列车出站晚点, 司机驾驶不当或设备设施发生故障造成的区间运行时间延长会导致区间晚点等。由于绝大多数地铁线路无越行条件, 故同方向前后列车运行状态相互影响。若前行列车发生晚点, 且未能短时间恢复正点运行, 则后行列车达到最小追踪间隔时会被迫偏离计划运行图, 形成晚点传播, 导致相关列车产生连带晚点^[4-5]。

前行列车自身晚点程度、列车运行控制系统预留冗余时间及列车追踪间隔时间等均会对晚点传播产生不同的影响,因此,必须根据实际情况对列车做出相适应的调整策略。

1.2 晚点情况下的列车运行调度调整目标

根据乘客出行需求的时空分布规律,地铁运营方制定了列车运行图。在正常情况下,行车调度员应严格按照运行图组织行车,兑现运行图规定的服务水平。当列车发生晚点时,区段开行间隔出现偏差,服务水平下降,对此,行车调度员要及时进行调整,尽快恢复运行图规定的开行间隔时间及间隔均衡性,以尽快恢复正常的服务水平。

1.3 晚点情况下列车运行调度人工调整手段

当列车轻微晚点时,列车运行控制系统借助预先设置的运行图冗余时间,通过逐列列车在逐个车站的微小冗余调整来恢复线路列车的正常运营。当线路突发事件导致列车运行延误较大或发生中断时,列车运行控制系统无法仅通过冗余调整来修正列车运行时间,极易造成列车晚点传播,继而导致列车运行间隔偏差及运行秩序混乱。可见,由行车调度员来人工选择和制定恰当的列车运行调整方案是关键。

针对列车运行晚点或中断情况,行车调度员通过全局观察,以恢复运行间隔时间及间隔均衡性为目标,对列车运行进行调整。调整方式主要包括扣车、载客跳停、调整始发站发点、改变列车运行等级(调整区间运行时分)、调整停站时间、运休列车(收车)、加开列车、列车替开、变更交路、改变折返方式及单线双向运行等^[7-8]。其中,加开列车、列车替开、变更交路、改变折返方式及单线双向运行等措施在列车组织方式实施过程中改变了在线列车的前后运动顺序关系,并受到线路条件及备用列车等复杂因素影响。因此,本文以地铁常见的运营晚点场景(因列车故障救援、线路短时设备发生故障及异物侵限等引发的、可通过应急消除且未发生线路中断的场景)为对象,在不改变在线列车运动顺序及关系的条件下,研究相适应的列车运行调整自组织机制。

2 基于群体协同的列车运行调整自组织机制

2.1 列车运行调整机制转变

根据列车自动监控(ATIS)系统自动控制的程

度,列车运行调度模式分为自动调整模式、人工调整模式、人工调度模式和全人工模式。在人工调整模式下,地铁行车调度员作为自始至终的参与者,结合实践经验与专业知识做出调度决策。调度决策依赖于调度员的人工指令,ATS系统作为决策的操作端、执行端和输出端。如果把1条线路的列车运行看作1个动态的组织系统,每辆列车是构成这个系统的元素,那么在晚点情况下的列车运行调整模式属于他组织过程,其系统组织力来自系统外部的调度指令。

他组织模式下的列车运行调整灵活,但对调度员业务要求高。随着新线的迅速增加,服务客流量快速增长,线路设施设备装备多样化,越来越多的调度员很难快速适应复杂的线路运营环境,无法准确做出应急处置决策。因此,引入智能体概念与思想:将地铁运行系统中的每列列车视作1个智能个体,通过建立列车智能体的运动思想及相互之间的交互规则,在列车运动受干扰、运动秩序紊乱的情况下,使各列列车智能体能够自发组织起来,不需要外界特定干预,通过相互协同作用,实现列车运行系统由无序向有序的自组织演变。

2.2 列车运行调整的自组织机制

与人工介入的他组织模式不同,智能体间自组织的组织力来自系统内部元素间的协同。因此,实现列车运行调整自组织过程的关键是建立系统各元素(即各列车智能体)之间的交互、协同运动关系。为建立该协同关系,本文以某列车故障场景为例,将“列车晚点发生→列车运行调整→列车运行恢复”过程中列车之间的追踪运行关系简化如图1所示。

如图1所示,受列车意外故障影响,列车之间的运行时间距离(运行间隔)被打乱,列车晚点情况发生;在列车故障被清除后的一段时间里,通过运行调整,重新恢复了列车运行秩序及运行间隔,从而恢复了运行图规定的服务水平。可见,列车运行自组织机制的关键是建立基于时间距离的列车间交互、协同运动关系。为此,借鉴“沙丁鱼群”运动原理对列车间的运动交互及协同过程进行描述和自组织分析。

研究表明,尽管整个沙丁鱼群具有高度相关性,但每个个体仅与最邻近的另一个体产生交互作用。鱼群通过相邻鱼之间的吸引力和排斥力保持行动统一。基于鱼对相对距离的感受,每2条鱼

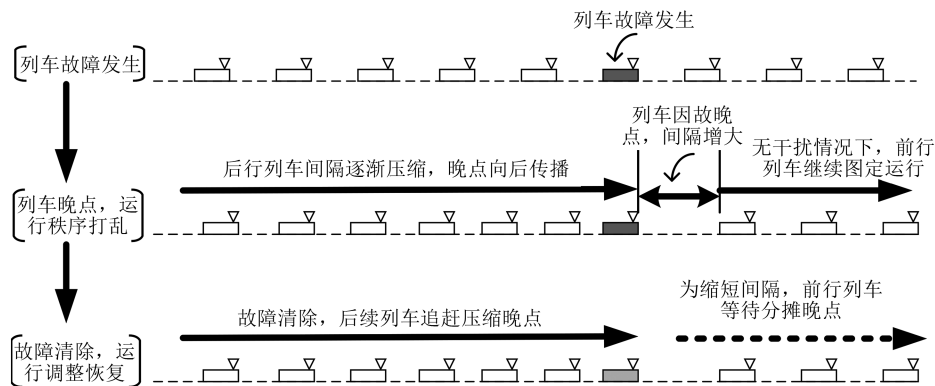


图 1 列车故障场景下的行车组织关系

之间的运动距离可划分为 3 个层级,即如图 2 所示的 3 个区域:①排斥区域,其他个体对此个体有排斥作用,此个体也希望远离排斥区域内的其他个体;②协同区域,其他个体对此个体总保持协同运动或保持一致运动的趋势;③吸引区域,其他个体对此个体有吸引作用,此个体也希望向其他个体靠近^[9]。当超出吸引区域时,其他个体对此个体不产生影响。

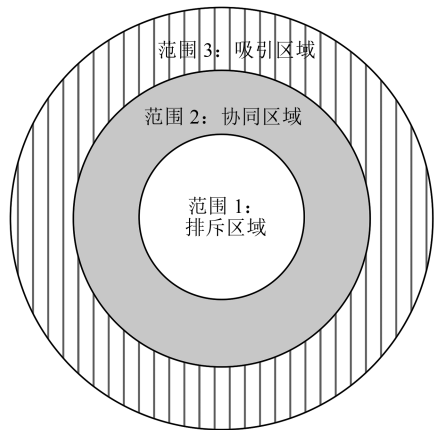


图 2 沙丁鱼群运动关系的区域划分

参考沙丁鱼对邻近个体间运动距离的感受,对线路上相邻列车的运行间隔进行描述。列车在线路上运行,故列车间的位置关系为一维运行间隔。相邻列车运动关系的距离划分如图 3 所示。①协同间隔:列车间隔在运行图冗余时间范围内为可接受范围,列车运行控制系统采取按图调整模式来协调列车运行。②排斥间隔:如当前列车与邻近列车运行间隔因故缩短至冗余时间允许范围以内,则邻近列车对该列车有排斥作用,要拉大运行间隔。③吸引间隔:如当前列车与邻近列车的运行间隔因故延长至冗余时间允许范围以外,则邻近列车对该列车

有吸引作用,要缩短运行间隔。此外,如当前列车与邻近列车运行间隔超出吸引作用范围,则在线列车无法通过相互协同满足乘客运输需求,列车运行控制系统可考虑自动加开列车,使列车间隔在可作用范围内。综上所述,建立列车运行调整的自组织机理为:在突发事件发生后,各列车智能体基于对邻近列车运行间隔的感知来自主调整与邻近列车的运行间隔,从而完成运动交互与协同,实现运行有序性与间隔均衡性。

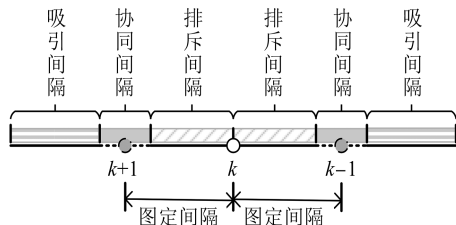


图 3 相邻列车运动关系的距离划分

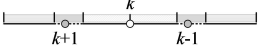
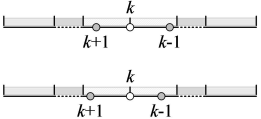
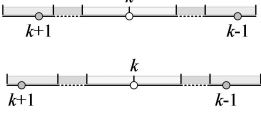
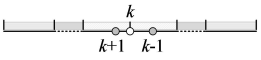
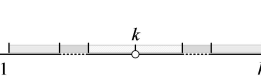
2.3 列车运行调整的自组织协同模型

地铁线路上的列车运行行为为前后排队追踪的运动组织形式。将线路中运行的列车比作有序向前运动的“列车群”,当其中某列列车因故晚点或运行中断后,线路上原本有序运行的“列车群”就好像“沙丁鱼群”被攻击一样,各列车个体按照所建立的“列车群”交互与协同关系,由各列车智能体根据其与前、后邻近列车间的交互关系,自主选择运行调整策略,从而建立起列车运行调整的自组织协同模型(见表 1)。

表 1 中:当相邻列车间隔大于图定间隔冗余范围时,相邻列车间表现出引力,且该引力在实际间隔小于指定间隔值时随距离的增大而增大,并在实际间隔等于指定间隔值时达到极值;当相邻列车间隔小于图定间隔时,相邻列车间表现出斥力,且该斥力在实际间隔大于指定间隔值前随距离减小而

增大,并在实际间隔等于指定间隔值时达到极值。前后邻近列车 $k-1$ 、 $k+1$ 对列车 k 的作用力分别用 $F(k,k-1)$ 、 $F(k,k+1)$ 表示。若作用力指向列车 k , 则作用力大于 0, 为斥力, 说明邻近列车对列车 k 具有排斥作用; 若作用力远离列车 k 时, 则作用力小于 0, 为引力, 说明邻近列车对列车 k 具有吸引作用。

表 1 列车运行调整的自组织协同规则模型

情景	与前、后邻近列车间隔	与邻近列车的作用关系	自组织调整策略
情景 1		与邻近列车的允许间隔在运行图允许的冗余时间内, 邻近列车对其不产生额外作用力。 $F(k,k-1) \approx F(k,k+1) \approx 0$	冗余调整, 列车基于图定偏差调整运行速度与停站时间
情景 2		与邻近列车的运行间隔被压缩, 邻近列车对其产生排斥作用, 一方斥力大于另一方。 $F(k,k+1) > F(k,k-1) > 0$ 或 $F(k,k-1) > F(k,k+1) > 0$	根据列车协同关系, 列车自动改变运行等级或调整停站时间 ①后方斥力大, 列车区间加速或缩短停站时间, 甚至载客跳停 ②前方斥力大, 列车区间减速或车站扣车
情景 3		与邻近列车的运行间隔被拉大, 邻近列车对其产生吸引作用, 一方引力大于另一方。 $F(k,k+1) < F(k,k-1) < 0$ 或 $F(k,k-1) < F(k,k+1) < 0$	根据列车协同关系, 列车自动改变运行等级或调整停站时间 ①前方引力大, 列车区间加速或缩短停站时间(含始发站早开), 甚至载客跳停 ②后方引力大, 列车区间减速或车站扣车
情景 4		与邻近列车的运行间隔被严重压缩, 甚至接近列车间以安全追踪间隔, 邻近列车对其产生很大的排斥作用力。 $F(k,k+1) > F(k,k-1) \gg 0$	①作用力向后传递, 扣发列车(含始发站晚开) ②列车选择回库或进存车线停运, 即运休列车
情景 5		与邻近列车的运行间隔被拉大, 晚点严重, 由引力所产生的协同运动已无法满足调整需求。 $F(k,k+1) \ll F(k,k-1) \ll 0$	加开列车, 通过作用力向前传递, 均衡并缩短列车运行间隔, 满足运能需求

3 列车运行调整的自组织优化算例

基于上海轨道交通 8 号线(以下简为“8 号线”)列车运行仿真平台^[10], 进一步优化对线路基础设施设备、车辆运用及列车运行的管理和仿真模拟。在列车运行的仿真中, 可在任意时刻、任意地点设置列车故障场景。为对列车运行自组织调整模型进行有效性验证, 在 8 号线列车运行仿真系统中嵌入了所构建的列车间交互作用与协同运动规则。

3.1 仿真场景

设计列车区间故障场景: 列车运行图 9:00 之前发车间隔为 3 min 20 s, 9:00 之后发车间隔为 5 min; 假定某列车于 9:00 在曲阳路站→虹口足球场站区间发生了故障紧急迫停; 经组织实施应急处置后故障清除, 但该列车在虹口足球场站进站晚点 10 min。由于本案例仅用于验证列车运行自组织调整过程, 故将列车故障迫停区间→驾驶员应急处置完成排故的过程简化处理, 仿真界面仅显示列车迫停区间 10 min。

3.2 自组织调整过程

列车因故晚点后, 列车运行控制系统依据表 1 中的列车交互与协同运动作用及自主运行调整规则, 通过不断更新列车与相邻列车的交互关系和运动状态来完成列车运行的自组织调整, 并实时输出调整的列车运行图, 如图 4 所示。

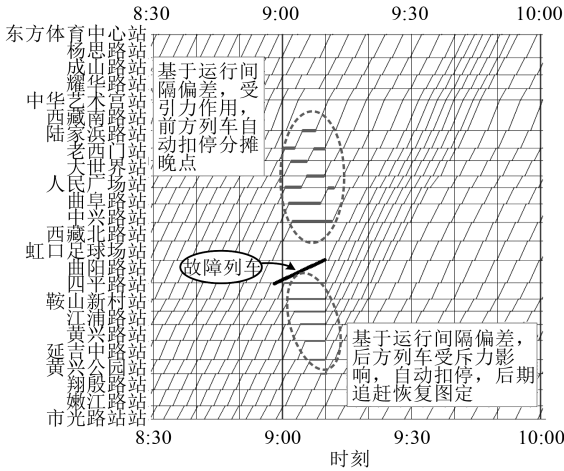


图 4 故障场景下列车运行调整自组织过程模拟

根据实际行车组织情况, 高峰时段线路上运行的列车均采用最大速度标尺(无法压缩运行时间), 无热备车, 且客流高峰期不允许列车载客通过车站。在列车交互关系中, 假定列车间隔 1 个站间距时斥力最大(逼停后车), 间隔为图定运行间隔 2 倍时引力最大(扣停前车), 且在下一停站兑现(不在区间停车)。

1) 前方列车运行的自组织调整过程为: 故障车迫停拉大了其与前方列车的运行间隔, 使得前方列车与前后相邻列车之间的运行间隔进入吸引间隔区间, 且其后方列车间隔大于其前方列车间隔, 故

有后方引力>前方引力,进而使列车运行控制系统自动延长了列车停站时间。由于列车之间存在群体效应,前方列车间的引力向前传递,使得前方多列列车依次受“向后的”引力作用而自动扣停,由此分摊晚点,确保前方车站的列车服务间隔均匀。

2) 后方列车运行的自组织调整过程:故障车迫停压缩了与后方列车的运行间隔,使得后方列车与前后列车之间的运行间隔进入排斥间隔区间,且前方间隔小于后方间隔,故有前方斥力>后方斥力,使列车自动扣停后方车站。同样,由于列车间的群体效应,后方列车间的斥力向后传递,使得后方多列列车依次受“向后的”斥力作用自动扣停,由此确保列车运行安全且列车服务有序。

需要说明的是,为确保列车上旅客服务的安全性,在列车运行控制系统实施列车运行自组织调整过程中,主要采取延长列车停站时间(即扣停)的自动调整策略。

4 结语

在日益复杂而严峻的地铁运营组织形势下,因突发事件导致的运营延误或运营安全事件时有发生。为确保能够快速、系统、有效应对偶发的列车运行晚点影响,在系统梳理和分析列车运营调整策略和规则的基础上,引入智能体概念和自组织理论,借鉴“沙丁鱼群”运动现象描述基于3个间隔阈值的邻近列车间的作用关系。将列车与前后邻近列车间的运行间隔关系转化为个体之间的吸引与排斥关系,实现对列车间运动交互关系的描述,从而建立线路运行系统中各列车的自组织协同模型。

(上接第12页)

安装的设备采取二次防护措施,以防止因设备紧固不足导致其脱落至轨道而影响行车安全。

4 结语

全自动运行系统实现了监控轨道、监控乘客上下车、监控列车和应急处理等的自动化。列车是全自动运行系统关键的子系统。相对传统列车,全自动运行列车的可靠性、可用性、可维护性及智能化等方面要求更高。本文探讨了全自动运行列车的功能需求、RAMS需求及列车设计需求,以期为全自动运行列车的设计及全自动无人驾驶系统的发展提供参考。

地铁列车运行条件复杂、系统不确定因素众多,本文基于所建立的上海轨道交通8号线列车运行仿真平台,建立假定的列车故障场景模型,并实现了前、后方向列车运行自组织调整的过程模拟与运行结果自动化输出,由此论证了基于群体协同的列车运行调整自组织机制与规则模型的有效性和应用性。由于线路未发生长时间运行中断,行车调整过程中不改变在线列车运动顺序及关系,因此,所建立的列车运动交互、协同的自组织机制还需进一步优化。

参考文献

- [1] 刘莉.城市轨道交通列车运行调整的粒子群算法实现[D].成都:西南交通大学,2013.
- [2] 胡亚峰.列车运行自动调整研究回顾与展望[J].铁路通信信号工程技术,2011(6):54.
- [3] 魏道江,康承业,李慧民.自组织与他组织的关系及其对管理学的启示[J].系统科学学报,2014(2):45.
- [4] 杨肇夏,董中英.列车晚点传播模拟系统[J].铁道学报,1995(2):17.
- [5] 吴洋.晚点情况下地铁列车实时运行调整及速度控制模式研究[D].成都:西南交通大学,2004.
- [6] 曹继茹.城市轨道交通列车运行调整算法研究[D].成都:西南交通大学,2015.
- [7] 张星臣.城市轨道交通运营管理[M].北京:高等教育出版社,2017.
- [8] 上海申通地铁集团有限公司轨道交通培训中心.城市轨道交通运营调度[M].北京:中国铁道出版社,2017.
- [9] 高佳丰,赵之,陈浩.基于三维空间关于海豚围捕沙丁鱼群的运动规律[J].计算机科学与应用,2019(2):299.
- [10] 朱琳,吴强,刘志钢,等.城市轨道交通运营列车故障影响仿真分析系统[J].都市快轨交通,2017(2):113.

(收稿日期:2020-09-28)

参考文献

- [1] 张海涛,梁汝军.地铁列车全自动无人驾驶系统方案[J].城市轨道交通,2015(2):33.
- [2] 公吉鹏.全自动运行系统中信号系统新增配置和功能[J].铁路通信信号,2019(3):76.
- [3] 李猛,张艳兵,徐成永,等.全自动运行系统地铁车辆关键技术[J].都市快轨交通,2018(1):123.
- [4] 郭涛.全自动驾驶地铁车辆安全性需求分析[J].交通安全与环保,2016(11):118.
- [5] 翟国锐,刘宏伟,师秀霞.下一代地铁车辆全自动无人驾驶信号系统关键技术[J].都市快轨交通,2017(3):78.

(收稿日期:2020-08-31)