

基于乘客等待时间的城市轨道交通列车运行调整模型

乔珂,赵鹏,禹丹丹

(北京交通大学 交通运输学院,北京 100044)

摘要:研究突发事件导致列车晚点情况下城市轨道交通列车运行调整问题.从乘客角度出发,提出了“首站控制”和“多站协调控制”两类列车运行调整策略.考虑列车能力约束和列车区间运行时间、追踪间隔时间等运行条件约束,以受突发事件影响的全部乘客等待时间最小为优化目标,建立了基于两类调整策略的列车运行调整模型,采用 Lingo 软件进行求解.以某简化线路为算例,与不采取控制策略相比,两类策略下乘客等待时间均节省约 9%,结果表明了模型的有效性,能够为轨道交通列车运行调整提供辅助支持.

关键词:城市交通;列车运行调整策略;整数规划模型;列车晚点;乘客等待时间

中图分类号:U293.1

文献标志码:A

Train regulation model of urban rail transit based on passenger waiting time

QIAO Ke, ZHAO Peng, YU Dandan

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

Abstract: The delay regulation problem due to emergencies was studied for urban rail train. With the waiting time of passengers considered, two train regulation strategies which included “first station control” and “multi-station corresponding control” were proposed. Then with the train capacity and some other train operation conditions such as train running time and train headway constrained, a regulation model based on the two strategies was established with minimum total waiting time of passengers affected by emergencies as the objective, which was solved efficiently with Lingo. The train regulation case for a simplified operation scheme showed that passenger waiting time can almost be reduced by 9% under these two strategies that we put forward, compared with no control strategy. The results indicated that the proposed model was effective and capable of providing decision support for urban rail train regulation.

Key words: urban traffic; train regulation strategy; integer programming model; train delay; passenger waiting time

作为复杂巨系统,城市轨道交通系统具有内在的不稳定性^[1],列车运行过程中容易受到各类突发

事件的影响,产生列车运行晚点、运营秩序紊乱、服务水平下降等现象.因此,列车运行调整是城市轨道

收稿日期:2014-09-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51478036);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20120009110016);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014YJS066)

作者简介:乔珂(1988—),男,山西孝义人,博士生.研究方向为城市轨道交通运营管理. email:09114218@bjtu.edu.cn.

通讯作者:赵鹏(1967—),男,内蒙古通辽人,教授,博士,博士生导师. email:pzhao@bjtu.edu.cn.

交通调度指挥的主要内容之一.合理的列车运行调整策略可为轨道交通列车运行的实时调整提供辅助支持,对提高城市轨道交通系统运营可靠性、保障正常运营秩序具有重要意义.

目前关于列车运行调整的研究以列车自动运行调整为主,如文献[2-5]分别采用基于多智能体、Petri网和预测控制等的仿真方法进行列车运行调整,调整的目标是使列车实际运行图与计划运行图的偏差最小,尽快恢复按图行车.这些研究主要是从企业运营角度考虑问题,已不能满足人性化的服务需求,列车运行调整不仅要保证正常的运营秩序,更应当注重保障乘客服务水平,要从乘客视角考虑列车运行调整问题,但相关研究成果还较少.文献[6]和文献[7]以乘客的乘车时间、等待时间和拥挤程度不满意程度最小为列车运行调整的目标,但模型中未全面考虑列车能力约束,而且拥挤程度不满意程度难以准确衡量.文献[8]和文献[9]针对波士顿地铁特定线路,建立了以系统全部乘客等待时间最小为目标的列车运行调整模型,但模型结构较为复杂,实用性有限.

本文作者针对一条线路列车运行调整问题,从乘客角度出发,以系统中受突发事件影响的全部乘客等待时间最小为目标,综合考虑列车输送能力和列车运行条件约束,建立了列车运行调整的整数规划模型,并以某城市轨道交通线路为实例进行了分析计算.

1 基于乘客等待时间的运行调整模型

1.1 列车运行调整策略

列车运行调整的主要目的是保障运行效率和服务水平.而乘客等待时间是衡量服务水平的重要指标之一,在乘客随机到达情况下,一条线路乘客的平均等待时间可以表示为^[10]

$$E(W) = \frac{1}{2}E(I) \left[1 + \frac{V_{ar}(I)}{E(I)^2} \right] \quad (1)$$

式中: $E(W)$ 为乘客平均等待时间; $E(I)$ 为列车行车间隔的期望值; $V_{ar}(I)$ 为列车行车间隔的方差.

通常情况下,列车按照计划运行图正常运行,行车间隔固定, $E(W)$ 是一个确定量.当突发事件发生时,会使某次列车运行晚点(以下称该列车为“故障列车”),由于城市轨道交通列车晚点的向前传播特性,突发事件同时影响故障列车的后续列车及前行列车,造成列车群之间行车间隔的不规则, $V_{ar}(I)$ 的值会急剧增大,显著增加乘客的平均等待时间.因此,为减小乘客等待时间,列车运行调整不仅需要调

整故障列车及其后续列车,还需要对前行列车进行调整.

本文定义列车运行调整范围为突发事件影响集合,包括影响列车集合和车站集合.受突发事件影响的前行列车和后续列车之和构成影响列车集合;车站集合根据列车集合确定,突发事件发生时各次列车均在线路中相应的位置,列车集合中的第一列车和最后一列车各自将要到达的第一个车站之间的所有车站构成影响车站集合.

对故障列车及后续列车的调整属于被动调整,主要受列车追踪间隔时间等运行条件约束.对前行列车调整属于主动调整,通过主动增加前行列车的区间运行时间或在各车站的停站时间,延迟前行列车在各车站的出发时刻,缩小前行列车与故障列车的行车间隔,保持列车行车间隔的均衡性,这是国外轨道交通经常采用的方法.由于城市轨道交通列车区间运行时间调整范围较小,本文假设列车区间运行时间是固定的,因此,仅考虑停站时间的增加,按照前行列车主动控制位置的不同^[8],有以下两种调整策略:

1)首站控制策略:在影响车站集合内,仅控制列车将要到达的第一个车站,各次列车在控制车站除正常停站时间外,可额外增加停站时间,列车控制时间即为该额外增加停站时间,列车在其余车站正常停车.

2)多站协调控制策略:在影响车站集合内,控制车站的位置和数量不固定,根据控制需要协调控制各次列车在多个车站的额外停站时间.

1.2 模型假设条件及相关符号定义

1.2.1 假设条件

1)按照突发事件持续时间的不同,可将其影响分为“小范围晚点”、“中等范围晚点”和“大范围晚点”^[2].大范围晚点情况下,需要采取临时小交路等调整策略,本文研究假设突发事件持续时间较短,只考虑“小范围晚点”和“中等范围晚点”.

2)突发事件的位置确定后,根据历史经验可以判断突发事件的大致持续时间,即假设突发事件的位置和持续时间是已知的.

3)突发事件发生时,可得到各次列车在线路上的具体位置及列车从前一车站的出发时刻,从而推算各次列车即将到达的车站.

4)可以根据短时客流OD数据估计得到研究时段内各个车站乘客的到达速率和下车比例.

1.2.2 符号定义

设城市轨道交通线路共有车站 m 座,将车站的

站台按上下行分开,并从始发站起依次顺序编号,车站集合表示为 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_i, S_{i+1}, \dots, S_{2m}\}$. 线路上共有列车 n 列,按照始发站发车顺序顺次编号,列车集合表示为 $T = \{T_1, T_2, \dots, T_j, T_{j+1}, \dots, T_n\}$. I_{\min} 为列车的最小追踪间隔时间, $R_{i,i+1}$ 为列车在区间 $[S_i, S_{i+1}]$ 的运行时分, C_{\max} 为列车最大载客能力; a_i^j 和 d_i^j 分别为列车 j 在车站 i 的到达和出发时刻, w_i^j 为列车 j 在车站 i 的停站时间; l_i^j 为列车 j 在车站 i 的滞留乘客人数, q_i^j 为列车 j 在车站 i 的乘客需求人数, b_i^j 和 e_i^j 分别为列车 j 在车站 i 的上车人数和下车人数, p_i^j 为列车 j 从车站 i 出发后的列车载客人数; δ_i 为车站 i 的乘客进站速率,单位(人/min); θ_i 为车站 i 的乘客下车比例; j_0 为故障列车; i_0 为故障车站,是突发事件发生后故障列车将要到达的第一个车站; t_{delay} 为突发事件的持续时间; i_{tf} 表示突发事件发生后各次列车将要到达的第一个车站; $F = M \cup N$ 为突发事件影响集合, $M \subset S$, $N \subset T$, M 为影响车站集合, N 为影响列车集合.

1.3 列车运行调整模型构建和求解

基于上述假设和分析,以突发事件影响集合中乘客等待时间最小为目标,根据2.1节所述两类控制策略,分别构建不同控制策略下的列车运行调整模型.

当采用多站协调控制策略时,其模型表示如下

$$\min Z = \sum_i^M \sum_j^N \int_0^{d_i^j - d_i^{j-1}} \delta_i (d_i^j - d_i^{j-1} - t) dt + U_0 \sum_i^M \sum_j^N [l_i^j (d_i^{j+1} - d_i^j)] \quad (2)$$

s. t.

$$b_i^j \leq q_i^j - p_{i-1}^j (1 - \theta_i) \quad \forall i, j \in (M, N) \quad (3)$$

$$b_i^j \leq C_{\max} - p_{i-1}^j (1 - \theta_i) \quad \forall i, j \in (M, N) \quad (4)$$

$$q_i^j = \delta_i (d_i^j - d_i^{j-1}) + l_{i-1}^{j-1} + (1 - \theta_i) p_{i-1}^j \quad \forall i, j \in (M, N) \quad (5)$$

$$p_i^j = p_{i-1}^j (1 - \theta_i) + b_i^j \quad \forall i, j \in (M, N) \quad (6)$$

$$l_i^j = q_i^j - C_{\max} \quad \forall i, j \in (M, N) \quad (7)$$

$$d_i^j \geq d_{i+1}^{j-1} + I_{\min} - R_{i,i+1} \quad \forall i, j \in (M, N) \quad (8)$$

$$d_i^j \geq d_{i-1}^j + R_{i-1,i} + w_i^j, \quad \forall i, j \in (M, N) \quad (9)$$

$$w_i^j = \lambda_0 + \lambda_1 \cdot b_i^j + \lambda_2 \cdot e_i^j \quad \forall i, j \in (M, N) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} d_i^j &\geq d_{i-1}^j + R_{i-1,i} + w_i^j + t_{\text{delay}} \\ \forall i, j &\in (M, N), \forall i = i_0, \forall j = j_0 \quad (11) \\ d_i^j, l_i^j, p_i^j, b_i^j, e_i^j &\geq 0 \text{ 且为整数} \\ \forall i, j & \end{aligned} \quad (12)$$

目标函数式(2)中第一项表示正常乘客等待时间,其中 t 表示时间变量,第二项表示滞留乘客等待时间,其中 U_0 为滞留乘客等待时间放大系数. 约束条件中,式(3)和式(4)限制列车在车站的上车人数,列车载客人数应不超过列车的最大载客能力;式(5)计算列车在车站的乘客需求人数,表示为 $[d_i^{j-1}, d_i^j]$ 时间范围内到达车站 i 的乘客人数、列车 $j-1$ 在车站 i 的滞留乘客人数以及列车 j 在车站 i 的通过乘客人数三者之和;式(6)计算列车载客人数,式(7)计算滞留乘客人数;式(8)为列车追踪间隔时间约束,式(9)为列车区间运行时间和停站时间约束;式(10)计算列车在车站的正常停站时间,根据文献[11],可采用与上下车人数相关的线性公式表示,其中 λ_0 、 λ_1 和 λ_2 为列车停站时间参数;式(11)为突发事件持续时间约束,限制故障列车在故障车站的最早发车时间.

当采用首站控制策略时,约束条件(9)发生变化,目标函数和其余约束条件与多站协调控制时相同,列车只在将要到达的第一个车站进行停站时间控制,表示为

$$\begin{aligned} d_i^j &\geq d_{i-1}^j + R_{i-1,i} + w_i^j \\ \forall i, j &\in (M, N), \forall i = i_{\text{tf}} \quad (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d_i^j &= d_{i-1}^j + R_{i-1,i} + w_i^j \\ \forall i, j &\in (M, N), \forall i \neq i_{\text{tf}} \quad (14) \end{aligned}$$

上述模型为二次整数规划模型,决策变量为突发事件影响集合中各次列车在各车站的出发时刻. 模型的目标函数为二次凸函数,约束条件都是线性函数,因此模型为凸规划问题,存在唯一解^[12]. 相关求解方法已经相当成熟,这里不进行赘述,本文选用Lingo软件进行求解. 为方便Lingo求解,以列车出发时刻矩阵 D 表示解的结构,如下式所示

$$D = \begin{bmatrix} d_1^1 & d_2^1 & \cdots & d_i^1 & \cdots & d_m^1 \\ d_1^2 & d_2^2 & \cdots & d_i^2 & \cdots & d_m^2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ d_1^j & d_2^j & \cdots & d_i^j & \cdots & d_m^j \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ d_1^n & d_2^n & \cdots & d_i^n & \cdots & d_m^n \end{bmatrix} \quad (15)$$

行表示列车,列表示车站,用从某整点时刻到出发时刻所经过的秒数来表示出发时刻.

模型求解时,已知突发事件位置和持续时间,其过程如下:

Step 1 判断突发事件影响的前行列车和后续列车的数量,可使用 $k = t_{\text{delay}}/\Delta I$ 近似计算^[4], ΔI 表示追踪间隔时间冗余.

Step 2 根据前行列车和后续列车数量确定突发事件影响集合大小.以列车出发时刻矩阵为基础,采用突发事件影响关联矩阵表示不同调整策略下的影响集合,从而确定决策变量范围.不同调整策略的关联矩阵大小可根据突发事件影响集合确定,但不同关联矩阵的结构略有差异.

多站协调控制策略下关联矩阵结构如矩阵 ζ 所示,当 $\zeta_i^j = 0$ 表示列车 j 已通过车站 i ,此时 d_i^j 不在影响集合中,不是决策变量.当 $\zeta_i^j = 1$ 表示列车 j 还未通过车站 i , d_i^j 在影响集合中,是决策变量且在车站 i 可能对列车 j 进行停站时间控制.

$$\zeta = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

首站控制策略下的关联矩阵结构如矩阵 ξ 所示,当 $\xi_i^j = 0$ 和 $\xi_i^j = 1$ 时,意义同上,当 $\xi_i^j = 2$ 时,表示 d_i^j 在影响集合中,是决策变量,但不控制列车 j 在车站 i 的停站时间.

$$\xi = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 2 & 2 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 2 & 2 & 2 & 0 \\ 1 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 0 \end{bmatrix}$$

当不采取控制策略时,前行列车不进行停站时间控制,关联矩阵结构如矩阵 ψ 所示.

$$\psi = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 2 & 2 & 2 & 0 \\ 0 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 0 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 0 \end{bmatrix}$$

Step 3 根据影响集合关联矩阵,分别得到两类策略下的目标函数和约束条件.

Step 4 调用 Lingo 软件进行求解,计算得到不同调整策略下列车在各车站的出发时刻.

2 算例分析

2.1 基础数据

以某城市轨道交通简化线路为例,线路按上下行将站台分开,共有车站 32 座, S_1 到 S_{16} 为上行方向, S_{17} 到 S_{32} 为下行方向.列车最大载客能力为 1 400 人,计划列车追踪间隔时间为 5 min,最小列车追踪间隔时间为 3 min.以短时客流 OD 数据为基础,得到乘客在各个车站进站速率 δ_i 以及下车比例 θ_i ,相关基础数据如表 1 所示.线路区间运行时间如表 2 所示.

列车正常停站时间根据文献[11]中停站时间系数计算,当不采取控制策略时,正常停站时间均不超过 30 s,因此将正常停站时间统一设定为 30 s.滞留乘客等待时间放大系数为 1.5.

假设故障列车为 T_7 ,故障车站为 S_7 ,突发事件持续时间为 10 min.突发事件发生时,得到各次列车在前一车站的出发时刻(换算为从整点时刻到出发时刻所经过的秒数),用来反映各次列车的位置,如表 3 所示(表中仅列出了上行方向各次列车位置),列车按发车次序顺序编号.根据突发事件持续时间确定突发事件影响列车集合为 T_2 到 T_{11} ,后续列车为 T_8 到 T_{11} ,前行列车为 T_2 到 T_6 ,则影响车站集合为 S_3 到 S_{13} .

表 1 乘客基础数据表

Tab.1 Basic data of the passengers

| 参数值 | 车站编号 | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | S_1 | S_2 | S_3 | S_4 | S_5 | S_6 | S_7 | S_8 | S_9 | S_{10} | S_{11} | S_{12} | S_{13} | S_{14} | S_{15} | S_{16} |
| 乘客进站速率 $\delta_i/(人/min)$ | 124 | 62 | 63 | 99 | 32 | 93 | 33 | 33 | 25 | 21 | 8 | 6 | 7 | 4 | 2 | 0 |
| 乘客下车比例 θ_i | 0 | 0.01 | 0.03 | 0.06 | 0.13 | 0.19 | 0.24 | 0.29 | 0.25 | 0.23 | 0.08 | 0.27 | 0.13 | 0.13 | 0.30 | 1.00 |

| 参数值 | 车站编号 | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | S_{17} | S_{18} | S_{19} | S_{20} | S_{21} | S_{22} | S_{23} | S_{24} | S_{25} | S_{26} | S_{27} | S_{28} | S_{29} | S_{30} | S_{31} | S_{32} |
| 乘客进站速率 $\delta_i/(人/min)$ | 86 | 32 | 27 | 23 | 40 | 18 | 53 | 74 | 99 | 87 | 67 | 38 | 15 | 4 | 2 | 0 |
| 乘客下车比例 θ_i | 0 | 0.02 | 0.02 | 0.05 | 0.04 | 0.04 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.10 | 0.27 | 0.11 | 0.31 | 0.27 | 0.37 | 1.00 |

表 2 区间运行时间表

Tab.2 Train running time in the section

| 区间信息 | | 区间编号 | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 起点 | | S_1 | S_2 | S_3 | S_4 | S_5 | S_6 | S_7 | S_8 | S_9 | S_{10} | S_{11} | S_{12} | S_{13} | S_{14} | S_{15} |
| 终点 | | S_2 | S_3 | S_4 | S_5 | S_6 | S_7 | S_8 | S_9 | S_{10} | S_{11} | S_{12} | S_{13} | S_{14} | S_{15} | S_{16} |
| 区间运行时间 $R_{i,i+1}/s$ | | 255 | 105 | 165 | 330 | 180 | 300 | 135 | 180 | 330 | 165 | 420 | 150 | 105 | 90 | 135 |

| 区间信息 | | 区间编号 | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
| 起点 | | S_{17} | S_{18} | S_{19} | S_{20} | S_{21} | S_{22} | S_{23} | S_{24} | S_{25} | S_{26} | S_{27} | S_{28} | S_{29} | S_{30} | S_{31} |
| 终点 | | S_{18} | S_{19} | S_{20} | S_{21} | S_{22} | S_{23} | S_{24} | S_{25} | S_{26} | S_{27} | S_{28} | S_{29} | S_{30} | S_{31} | S_{32} |
| 区间运行时间 $R_{i,i+1}/s$ | | 150 | 105 | 105 | 165 | 390 | 150 | 360 | 150 | 180 | 285 | 210 | 285 | 165 | 120 | 285 |

表3 突发事件发生时各次列车位置

Tab.3 Train location when emergencies happened

| 参数值 | 列车编号 | | | | | | | | | | |
|--------------------|----------|----------|----------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|
| | T_1 | T_2 | T_3 | T_4 | T_5 | T_6 | T_7 | T_8 | T_9 | T_{10} | T_{11} |
| 经过的前一车站 | S_{15} | S_{12} | S_{11} | S_{10} | S_9 | S_8 | S_6 | S_5 | S_4 | S_3 | S_2 |
| 列车在前一车站的 出发时刻/s | 270 | 285 | 165 | 300 | 270 | 225 | 225 | 345 | 315 | 315 | 360 |

2.2 计算结果

根据基础数据,采用 Lingo 软件分别对两种调整策略进行求解,可得到各次列车在各站的出发时刻,进一步计算得到列车与前一列车在各车站的行车间隔,如表 4 和表 5 所示.

可以看到突发事件发生前各次列车与前一列车的行车间隔均为计划行车间隔 5 min, 突发事件发生后, 进行列车运行调整, 行车间隔发生改变。两种策略下后续列车均为被动调整, 主要受追踪间隔时间约束, 调整后各次列车的行车间隔均为最小追踪间隔时间 3 min。故障列车与前一列车的行车间隔随着列车运行从 15 min 不断减小, 在车站 S_{13} 达到最小, 如表中加粗数字所示。前行列车通过停站时间

控制,列车与前一列车的行车间隔增大,大于计划行车间隔时间 5 min. 与首站控制策略相比,多站协调控制策略下,影响集合列车群之间的行车间隔更加均匀。

在影响集合范围内,与不采取控制策略时的乘客等待时间进行比较(当不采取控制策略时,仅对后续列车通过追踪间隔时间冗余进行调整,前行列车不进行停站时间控制),得到两种策略下乘客节省等待时间,计算结果如表 6 所示.可以看出,两种控制策略下乘客等待时间均有很大程度节省(约 9%),说明两类策略调整均有很好的效果.虽然多站协调控制策略效果略好,但在实际调整中首站控制策略更容易实施.

表 4 首站控制策略下列车与前一列车的行车间隔

Tab. 4 Train Headway under "First Station Control"

[illegible]

表 5 多站协调控制策略下列车与前一列车的行车间隔
Tab.5 Train Headway under “Multi-station Coordination Control”

| 列车与前一列车的行车间隔/min | 车站编号 | | | | | | | | | | |
|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | S ₃ | S ₄ | S ₅ | S ₆ | S ₇ | S ₈ | S ₉ | S ₁₀ | S ₁₁ | S ₁₂ | S ₁₃ |
| T ₂ | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 6.7 |
| T ₃ | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 6.7 | 6.7 |
| T ₄ | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 7.2 | 6.7 | 6.7 |
| T ₅ | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 8.3 | 7.2 | 6.7 | 6.7 |
| T ₆ | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 10.0 | 8.3 | 7.2 | 6.7 | 6.7 |
| T ₇ | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 15.0 | 15.0 | 10.0 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 6.7 |
| T ₈ | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 13.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 |
| T ₉ | 5.0 | 5.0 | 11.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 |
| T ₁₀ | 5.0 | 9.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 |
| T ₁₁ | 7.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 |

表 6 不同调整策略效果比较
Tab.6 Comparison of different regulation strategies

| 乘客等待时间计算结果 | 控制策略 | | |
|--------------|--------|--------|--------|
| | 不控制 | 多站协调控制 | 首站控制 |
| 乘客全部等待时间/min | 56 942 | 54 674 | 54 769 |
| 与正常情况相比 | | | |
| 乘客增加等待时间/min | 24 160 | 21 892 | 21 987 |
| 乘客节省等待时间 | | | |
| 百分比/% | — | 9.3 | 9.0 |

突发事件影响集合中前行列车数量的确定与调度人员经验有关,基于此,本文也计算了不同的影响集合中前行列车数量对调整效果的影响,结果如图 1 所示.可以看到:无论是首站控制策略还是多站协调控制策略,前行列车数量越多,乘客节省等待时间也越多,但前行列车数量超过 3 列以后,乘客节省等待时间的增长率已经很小,调整效果已不明显.因此,为满足调度调整实时性的要求,实际调度调整中前行列车数量不需要太多.

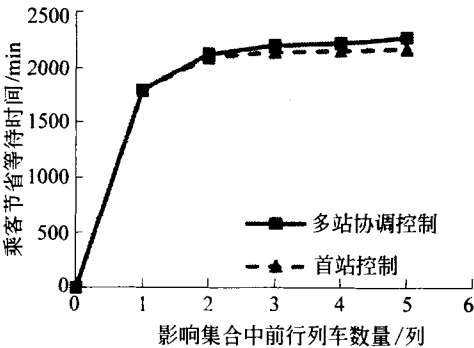


图 1 前行列车数量对调整效果影响

Fig.1 Impact of different train number ahead of the blockage on regulation result

上述模型结构清楚,易于求解(求解时间均小于 1 s),能够很好满足调度调整实时性的要求,可为调度人员提供辅助决策支持.

3 结语

基于乘客等待时间对单一线路城市轨道交通列车运行调整问题进行了研究,考虑列车能力约束和列车运行约束,建立了以受突发事件影响乘客等待时间最小为目标的整数规划模型.列车调整对象不仅包括故障列车及其后续列车,而且包括前行列车.按照前行列车调整位置的不同,提出了多站协调控制与首站控制两类调整策略,分析了两种策略下列车运行调整的效果,算例结果表明:与通常不采取控制策略相比,多站协调控制和首站控制的效果基本一致,乘客等待时间均节省了 9% 左右.本文提出的模型可为调度调整提供辅助支持,由于模型假设乘客到达速率和下车比例是固定的,与实际客流情况略有差别,因此考虑乘客到达速率和下车比例动态变化的列车运行调整是下一步的研究重点.

参考文献 (References):

[1] Paquel C. Metro traffic regulation and quality of passenger service: performance analysis of the operational control center at RATP[D]. Delft: Delft University of Technology, 2011.

[2] 路飞,宋沐民,田国会. 基于多智能体的地铁列车运行调整方法[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(1): 123 - 125.

LU Fei, SONG Mumin, TIAN Guohui. Method for subway operation adjustment based on multi-agent[J]. China Railway Science, 2007, 28(1): 123 - 125. (in Chinese)

[3] 徐航. 城市轨道交通列车运行实时调整算法的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.

XU Hang. Study on real-time train operation adjustment algorithm in urban rail transit[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013. (in Chinese)

[4] 徐蓓. 基于预测控制的城市轨道交通列车运行调整研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010. (下转第 39 页)

- tally Trainable Probabilistic Generative Model[J]. IEEE Transactions on Audio Speech and Language Processing, 2008, 16(2): 435–447.
- [8] Kim Y S, Yum B J. Recommender System Based on Click Stream Data Using Association Rule Mining[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(10): 13320–13327.
- [9] Jung S Y, Hong J H, Kim T S. A Statistical Model for User Preference[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2005, 17(6): 834–843.
- [10] Zhao B, Sen P, Getoor L. Entity and Relationship Labeling in Affiliation Networks[C]. ICML Workshop on Statistical Network Analysis. Pennsylvania, USA, 2006.
- [11] Wang C, Han J, Jia Y, et al. Mining Advisor-advisee Relationships from Research Publication networks[C]//Proceedings of the 16th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, Washington D C, USA, 2010: 203–212.
- [12] Eagle N, Pentland A S, Lazer D. Inferring friendship network structure by using mobile phone data[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2009, 106(36): 15274–15278.
- [13] Zhuang H, Tang J, Tang W, et al. Actively Learning to Infer Social Ties[J]. Data Mining and Knowledge Discovery, 2012, 25(2): 270–297.
- [14] Tang J, Lou T, Kleinberg J. Inferring Social Ties across Heterogenous Networks[C]//Proceedings of the Fifth ACM International Conference on Web Search and Data Mining. Seattle, USA, 2012: 743–752.
- [15] Lin Y, Wan H, Jiang R, et al. Inferring the Travel Purposes of Passenger Groups for Better Understanding of Passengers[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014(99): 1–9.



(上接第 32 页)

- XU Qian. The urban rail transit train regulation research based on predictive control[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
- [5] 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.
- LI Xiaoyan. Research on petri net-based method for urban rail transit train regulation[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009. (in Chinese)
- [6] Murata S, Goodman C J. Optimally regulating disturbed metro traffic with passenger inconvenience in mind[C]//International Conference on Developments in Mass Transit Systems, 1998(4): 86–91.
- [7] Goodman C J, Murata S. Metro traffic regulation from the passenger perspective[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2001, 215(2): 137–147.
- [8] O'Dell S W. Optimal Control strategies for a rail transit line[D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 1997.
- [9] Shen S. Integrated real time disruption recovery strategies: a model for rail transit systems[D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [10] Ceder A. Public transit planning and operation: theory, modeling and practice[M]. Amsterdam: Elsevier, Butterworth-Heinemann, 2007.
- [11] Lam W H K, Cheung C Y, Poon Y F. A study of train dwelling time at the Hong Kong mass transit railway system[J]. Journal of Advanced Transportation, 1998, 32(3): 285–295.
- [12] 刘灿齐. 现代交通规划学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- LIU Canqi. Advanced traffic planning[M]. Beijing: China Communications Press, 2001. (in Chinese)