

动态随机客流下城轨列车运行调整策略

许 红,陈 楠

(北京交通大学 城市交通复杂系统理论与技术教育部重点实验室,北京 100044)

摘 要:针对城市轨道交通中随机到达客流对列车运行造成的延误问题,将动态变化且服从泊松分布的客流到达率拟合为随机分布变量,结合随机规划理论,构建了以列车发车时间偏差及到站列车间隔偏差为最小化目标的期望模型,应用最优化方法中的 K-T 条件对所建模型进行求解,得出调整相关偏差的控制策略,通过实例仿真模拟列车运行在受到随机客流及外界干扰的影响下产生的延误,比较采取调整策略前后列车在各站的离站时间偏差及其优化水平,结果表明:所设计的列车运行调整策略能够有效减小列车延误约 25%,使得在动态客流下的城市轨道交通列车运行更能“按图行车”。

关键词:城市交通;动态随机客流;城市轨道交通列车;最优化方法;K-T 条件

中图分类号:U121 **文献标志码:**A

Operation adjustment of urban rail transit trains under dynamic stochastic passengers

XU Hong, CHEN Nan

(MOE Key Laboratory for Urban Transportation Complex Systems Theory and Technology,
Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: This paper aims at reducing the train delay in urban rail transit, which is caused by disturbance from the random passenger arrivals. The dynamic changeable arrival rate of passengers is set as a random variable which follows a Poisson distribution. Applying stochastic programming theory, this paper proposes an expectation model for train operation which tries to minimize the deviations of the departure time of trains and the deviations of the time intervals between successive arriving trains. The control strategy for adjusting the deviations is obtained by solving the model with the Kuhn-Tucker condition from optimal method. In the base of the real survey data, the simulation chapter obtains the delay of trains by simulating trains operate under the influence of random passenger arrivals and external factors. The paper also compares the deviations of departure time and the levels of optimization before and after using the adjustment strategy. In this way, the paper verifies that the designed strategy can effectively reduce the train delay by 25%, enabling the urban rail transit trains to operate more steadily according to the timetable.

Keywords: urban traffic; dynamic stochastic passengers; urban rail transit trains; optimization method; Kuhn-Tucker condition

收稿日期:2016-10-12

基金项目:北京市自然科学基金(9144031);中央高校基本科研业务费专项资金(T16JB0050)

Foundation item: Beijing Municipal Natural Science Foundation(9144031); Fundamental Research Funds for the Central Universities (T16JB0050)

第一作者:许红(1967—),女,辽宁大连人,副教授,博士.研究方向为城市轨道交通规划设计与运营管理.email:hxu@bjtu.edu.cn.

引用格式:许红,陈楠.动态随机客流下城轨列车运行调整策略[J].北京交通大学学报,2017,41(6):55—60.
XU Hong, CHEN Nan. Operation adjustment of urban rail transit trains under dynamic stochastic passengers[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2017, 41(6): 55—60. (in Chinese)

http://jdx.bjtu.edu.cn

近年来,我国城市轨道交通的换乘站点及客流需求不断增长,运营条件更加复杂,列车运行组织受到客流变化、突发事件干扰等因素的影响更加频繁。由于城市轨道交通系统具有列车运行间隔时间小、站间距离短、车站线路布置相对简单等特点,一旦发生初始延误,其传播的影响范围大,造成的能力损失严重。因此,从客流角度解决列车延误问题是保障城市轨道交通服务质量的必要手段。

在解决城市轨道交通的列车运行问题方面,有诸多学者进行了大量研究。文献[1]通过仿真分析不同备车条件下的列车运行延误,总结出延误传播主要与能力利用率、缓冲时间、备车数量及辅助线数量等因素有关,并未考虑到客流因素的影响。文献[2]探究了列车运行过程中受到各类扰动的影响下列车之间的晚点传播问题,应用总结得出的传播规律对列车运行图中冗余时间的时空分布进行了评价,但研究未考虑乘客服务水平的影响。文献[3-4]应用不同列车运行调整策略的组合优化,降低了列车运行延误对客流的影响,维持正常运营秩序的同时也保障了乘客服务水平,但未考虑客流到达率对列车运行调整策略的影响。此外,既有研究对列车运行过程中干扰因素的约束条件考虑较少,而研究考虑约束条件下的列车组织最优化问题可以为城市轨道交通的运营管理提供更加准确的针对性建议。

乘客到站乘车是随机过程,并在时间序列上呈现动态变化的随机分布^[5],而轨道交通列车在停站过程中会等候乘客上车,可能出现实际停站时分超出既定停站时分的情况,从而造成列车运行的延误,使得列车运行图偏离计划时刻表,因而针对这一延误进行列车运行调整是必要的。

本文作者提出了一种基于动态随机客流及运行约束条件下的城市轨道交通列车优化调整策略,考虑了客流波动条件对列车运行系统的影响,建立城市轨道交通列车运输组织的离散时间状态基础模型,以减少列车运行延误时间及乘客等待时间为优化目标,提出以客流到达率为随机分布变量的性能指标期望值函数,应用最优化方法中的 K-T 条件进行求解,并得到了基于反馈信息的列车运行调整策略,以期提高城市轨道交通的运营效率。

1 列车运行模型建立与求解

1.1 基础模型

假设一条正常运营的城市轨道交通列车运行线路上有列车集合: $\{1, 2, 3, \dots, i\}$; 站点集合: $\{1, 2, 3, \dots, k, k+1\}$, k 为车站编号; t_k^i 为第 i 列车

从第 k 站的出发时刻; r_k^i 为第 i 列车从第 k 站到第 $k+1$ 站的运行时分; s_k^i 为第 i 列车在第 k 站的停站时分,则满足关系式

$$t_{k+1}^i = t_k^i + r_k^i + s_k^i \quad (1)$$

运行时分

$$r_k^i = R_k^i + u_k^i \quad (2)$$

式中: R_k^i 为时刻表上列车在第 k 站和 $k+1$ 站间的运行时间; u_k^i 为延误松弛时间。停站时分 s_k^i 主要考虑了乘客随机到达对列车停站时间造成的影响及外界干扰影响因素。将 s_k^i 定义为

$$s_k^i = a_k^i (t_k^i - s_k^i - t_{k+1}^{i-1}) + D + w_k^i \quad (3)$$

式中: a_k^i 为客流到达率; w_k^i 为干扰延误时间; D 表示车门开闭所花费的必要时间。图 1 表示列车在车站之间的运行状态。

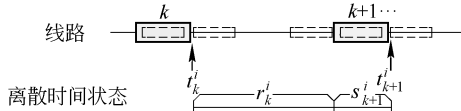


图 1 第 i 列车运行离散状态示意图

Fig.1 Operation discrete state of the i th train diagram

1.2 相关参数

1) 客流到达率 a_k^i . 基础模型中客流到达率参数考虑为随机到达的动态变化客流对旅客乘降过程的影响,客流浮动的不稳定性直接干预了列车的停站时间长短,从而进一步加重或修复列车运行延误^[6].同时,各个车站的客流情况不尽相同,为了减小连带延误在车站之间的传播影响,应用适当的数学模型拟合时间序列来描述某一线路上各个车站的客流到达规律是必要的。模型中选择满足城市轨道交通客流特征及符合动态随机性质的泊松分布作为拟合目标,且以某一时间粒度的泊松分布线性回归系数作为该时段的 a_k^i 期望值。该建模方式能够依据客流的动态变化情况,对列车的运行方案做出更加微观的调整,规避了传统方法中依据全线全日客流高峰小时系数、最大断面客流量来设计列车运行图的缺陷。

2) 延误松弛时间 u_k^i . 列车运行延误会直接导致城市轨道交通运营服务质量下降、系统能力利用率降低、运行成本增高,甚至会影响到系统安全性^[7]。如:在产生较短延误时间时,列车自动控制系统会利用停站与区间运行缓冲时间,通过在区间内加速运行、缩短停站时间等方法来调整列车的运行状态,从而恢复“按图行车”。在运行偏离运行图、调整运行状态的过程中,就会产生实际运行情况与计划运行图的偏差,本文主要考虑的列车在区间运行中所产生的此类偏差,并定义为延误松弛时间 u_k^i 。

其中:该参数负值表示运行速度较快,比计划运行时间更短.正值表示运行速度较慢,比计划运行时间更长,取 0 s 表示与计划运行时间相同.

3) 干扰延误时间 w_k^i . 城市轨道交通列车的停站时间构成包括开门时间、旅客乘降时间、缓冲时间、关门时间、离站作业时间,如图 2 所示.

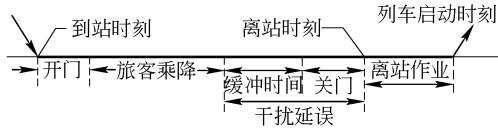


图 2 列车停站时间构成示意图

Fig.2 Constitute of train dwell time diagram

在停站时间内的各个时间段内都有可能发生突发事件,导致停站时间延长.在实际运营中,发生突发事件频率最高的时段是关门时间,会有乘客因为挤入过饱和的到站列车,导致车门无法正常关闭,列车此时则会延长停站时间以确保车门的关闭,假设此类情况为干扰延误时间 w_k^i .

1.3 性能指标

由于在所设计的模型中,将客流到达率 a_k^i 考虑为根据时段动态变化的随机分布变量,则此过程将该参数考虑为一项期望值.相应地,将所建立模型的性能指标定为一个期望值模型.

为了整合停站时间表达式,对客流到达率的影响系数进行线性回归^[8-9],定义

$$c_k^i = \frac{a_k^i}{1 + a_k^i}, b_k^i = \frac{1}{1 + a_k^i}, v_k^i = b_k^i w_k^i \quad (4)$$

则式(3)可以改写为

$$s_k^i = c_k^i x_k^i - t_k^{i-1} + b_k^i D + v_k^i \quad (5)$$

定义列车在计划运行图下的运行状态($u_k^i = 0, v_k^i = 0$)为

$$T_{k+1}^i = T_k^i + R_k + c_{k+1}^i (T_{k+1}^i - T_{k+1}^{i-1}) + b_{k+1}^i \quad (6)$$

设 x_k^i 为实际出发时间 t_k^i 与计划出发时间 T_k^i 的偏差,即 $x_k^i = t_k^i - T_k^i$. 可以得出

$$(1 - c_{k+1}^i) x_{k+1}^i + c_{k+1}^i x_{k+1}^{i-1} = x_k^i + u_k^i + w_k^i \quad (7)$$

令 $j = i + k$, 可将 x_k^i 向量化^[10]得到

$$\mathbf{X}_j = \{x_k^i \mid i + k = j\} \quad (8)$$

依照 x_k^i 的生成规律,得到如下等式

$$\mathbf{X}_{j+1} = \mathbf{A} \mathbf{X}_j + \mathbf{B} \mathbf{U}_j + \mathbf{B} \mathbf{V}_j \quad (9)$$

式中: \mathbf{A}, \mathbf{B} 为系统参数矩阵

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{-c_1}{1-c_1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \frac{-c_k}{1-c_k} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{-c_1}{1-c_1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \frac{1}{1-c_k} \end{bmatrix};$$

状态变量 $\mathbf{X}_j = (x_1^{j-1}, \dots, x_k^{j-k})^T$; 控制变量 $\mathbf{U}_j = (u_0^j, \dots, u_{k-1}^{j-k+1})^T$; 扰动输入 $\mathbf{V}_j = (v_0^j, \dots, v_{k-1}^{j-k+1})^T$.

综合上述参数,本文提出了以相邻列车发车时间偏差、连续到站列车的间隔偏差及列车运行调整控制条件 \mathbf{M}_j 为优化目标的性能指标函数

$$\mathbf{J} = p \mathbf{X}_{j+1}^T \mathbf{X}_{j+1} +$$

$$q (\mathbf{X}_{j+1} - \mathbf{X}_j)^T (\mathbf{X}_{j+1} - \mathbf{X}_j) + \mathbf{M}_j^T \mathbf{M}_j \quad (10)$$

式中:第 1 项为相邻列车发车时间偏差;第 2 项为连续到站列车的间隔偏差;第 3 项为控制条件幅度大小,对计划时刻表为 0;系数 p, q 为比重系数,分别为 0.2 和 0.8.

1.4 模型求解

为了得到上述性能指标最优值,将所建模型转换为不等式约束问题,并用拉格朗日乘子法求解.

最优化函数和约束条件如下

$$\begin{aligned} f(x_j, \mu_j) &= p (\mathbf{A} x_j + \mathbf{B} \mu_j)^T (\mathbf{A} x_j + \mathbf{B} \mu_j) + \\ q (\mathbf{A} x_j + \mathbf{B} \mu_j - x_j)^T (\mathbf{A} x_j + \mathbf{B} \mu_j - x_j) &+ \mu_j^T \mu_j \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{cases} g_1(\mu_j) = \mu_j - \underline{\mu} \geq 0 \\ g_2(\mu_j) = \bar{\mu} - \mu_j \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: μ_j 表示 \mathbf{M}_j 的求导; $\underline{\mu}, \bar{\mu}$ 分别表示 μ_j 的最小值和最大值.由于 p, q 大于 0,则目标函数的二阶导数大于 0,因此可以看出最优化函数的解为凸函数,约束函数均为凹函数,此不等式约束优化问题为凸规划.根据上述求导结果可得 K-T 条件表达式为

$$\begin{cases} 2p(\mathbf{A} x_j + \mathbf{B} \mu_j) \cdot \mathbf{B} + \\ 2q(\mathbf{A} x_j + \mathbf{B} \mu_j - x_j) \cdot \mathbf{B} + \\ 2\mu_j - y_1 + y_2 = 0 \\ y_1(\mu_j - \underline{\mu}) = 0 \\ y_2(\bar{\mu} - \mu_j) = 0 \\ y_1, y_2 \geq 0 \end{cases} \quad (13)$$

求解该方程组,分为以下 4 种情况讨论:1) $y_1 \neq 0$ 且 $y_2 \neq 0$,方程组无解.2) $y_1 \neq 0$ 且 $y_2 = 0$,可求得:

$$\begin{cases} (2p\mathbf{A}\mathbf{B} + 2q\mathbf{A}\mathbf{B} - 2q\mathbf{B})x_j + \\ (2p\mathbf{B}^2 + 2q\mathbf{B}^2 + 2)\mu_j = y_1 \\ \mu_j = \underline{\mu} \end{cases} \quad (14)$$

由于当 $\frac{(q\mathbf{B} - p\mathbf{A}\mathbf{B} - q\mathbf{A}\mathbf{B})}{p\mathbf{B}^2 + q\mathbf{B}^2 + 1} x_j \leq \mu_j$ 时,根据式

(14) 可得 $y_1 \geq 0$, 所以此时, $\mu_j = \underline{\mu}$ 为 K-T 点.

3) $y_1 = 0$ 且 $y_2 \neq 0$, 可求得:

$$\begin{cases} -(2ABp + 2ABq - 2Bq)x_j - \\ (2pB^2 + 2qB^2 + 2)\mu_j = y_2 \\ \mu_j = \underline{\mu} \end{cases} \quad (15)$$

由于当 $\frac{(Bq - ABp - ABq)}{pB^2 + qB^2 + 1}x_j \geq \mu_j$ 时, 根据式

(15) 可得 $y_2 \geq 0$, 所以此时 $\mu_j = \underline{\mu}$ 为 K-T 点.

$$\begin{cases} \mu_j = \underline{\mu} \\ \mu_j = \frac{(Bq - ABp - ABq)}{pB^2 + qB^2 + 1}x_j \\ \mu_j = \underline{\mu} \end{cases} \quad \begin{cases} \frac{(Bq - ABp - ABq)}{pB^2 + qB^2 + 1}x_j \leq \underline{\mu} \\ \underline{\mu} \leq \frac{(Bq - ABp - ABq)}{pB^2 + qB^2 + 1}x_j \leq \bar{\mu} \\ \frac{(Bq - ABp - ABq)}{pB^2 + qB^2 + 1}x_j \geq \bar{\mu} \end{cases} \quad (18)$$

1.5 控制策略

根据上述所建模型, 提出以下列车运行控制策略: 1) 依据各个车站各个时段的客流到达情况来确定列车在车站的停站时间约束值及列车在站间区间运行时的偏差约束值. 2) 列车在车站的实际停站时间约束值应符合客流乘降量的需求, 满足乘客完成上下车过程的同时, 避免出现冗余停站时间及因满载率过饱和而出现列车无法按时发车离站的情况. 3) 列车在站间区间的实际运行时分与计划运行时分尽可能一致, 允许小于计划运行时分, 如大于计划时分, 则不超过一定的约束值.

2 实例仿真

2.1 基本信息

选择北京地铁亦庄线作为研究案例, 全线共包

4) $y_1 = y_2 = 0$ 时

$$\begin{aligned} (2ABp + 2ABq - 2Bq)x_j + \\ (2pB^2 + 2qB^2 + 2)\mu_j = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

求解得 K-T 点:

$$\mu_j = \frac{(Bq - ABp - ABq)}{pB^2 + qB^2 + 1}x_j \quad (17)$$

综上, 可得方程组分段最优解如下

$$\begin{cases} \frac{(Bq - ABp - ABq)}{pB^2 + qB^2 + 1}x_j \leq \underline{\mu} \\ \underline{\mu} \leq \frac{(Bq - ABp - ABq)}{pB^2 + qB^2 + 1}x_j \leq \bar{\mu} \\ \frac{(Bq - ABp - ABq)}{pB^2 + qB^2 + 1}x_j \geq \bar{\mu} \end{cases}$$

含 13 个站点. 选取 2015 年 4 月的客流数据作为仿真输入, 以 5 min 为间隔划分早高峰小时(6:00~7:00)各个车站的到达客流, 应用数理统计工具 SPSS 对依时段分布的客流数据代入泊松模型, 验证了所研究的站台客流到达是随时间序列动态变化的泊松过程. 拟合的线性回归系数区间为 $[0.015, 0.096]$, 在此区间内获取随机因子作为各个车站客流到达率 a_k^i 的期望值, 则客流分布见图 3.

假设首车在首站的离站时间偏差为 0 s, 列车连续追踪间隔为 360 s, 计划停站时分为 30 s, 根据调研结果, 初步将区间运行延误松弛时间 u_k^i 控制在 15 s 以内, 干扰延误时间 w_k^i 控制在 5 s 以内, 相邻列车发车时间偏差与连续到站列车的间隔偏差之比为 5 : 1. 以上相关参数为基本假设, 应用 Matlab 仿真比对实行调整策略前后列车延误的变化情况.

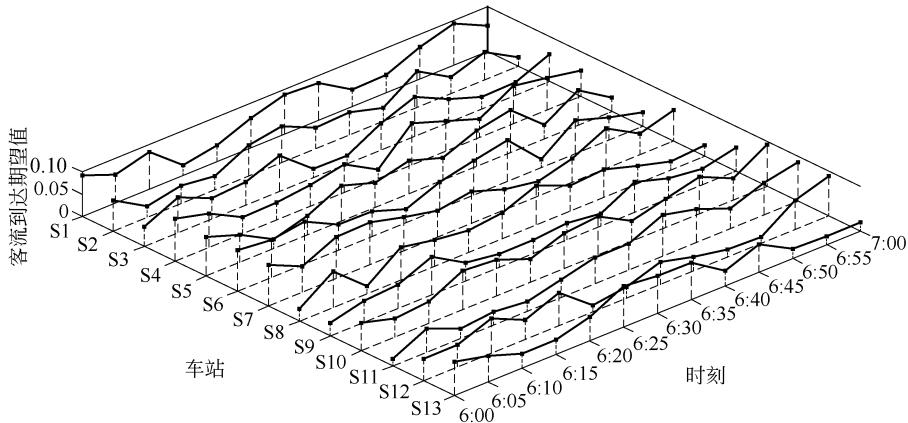


图 3 客流时空分布

Fig.3 Passengers space-time distribution

2.2 仿真结果

根据所建模型可求得调整前、后的列车在各站离站时间偏差, 进一步求得调整幅度的大小, 见图 4.

可得, 调整后的离站时间偏差较调整前减少了约 70%, 并明显地控制了偏差在各站之间的连带传播, 验证了所设计的优化模型有效地减小列车的延

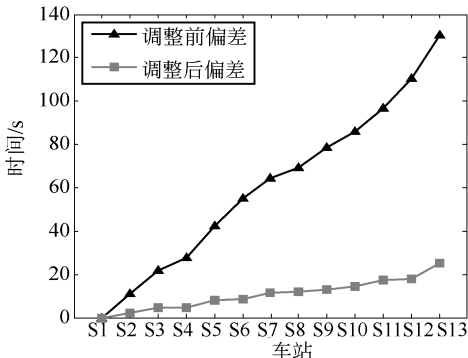


图 4 调整前后各站离站时间偏差对比

Fig.4 Comparison between depart time deviation at each station before and after adjustment
误.进一步结合线路资料及仿真数据,分别绘制计划

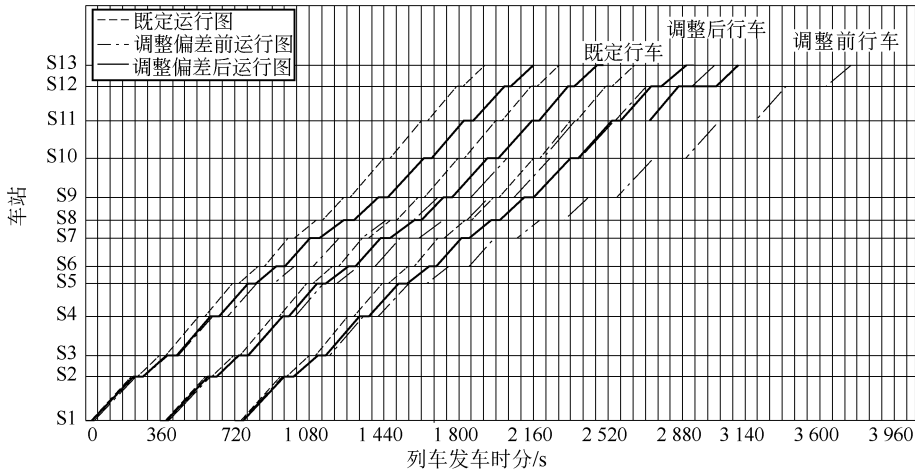


图 5 列车运行图比对

Fig.5 Comparison of train schedule

表 1 相关参数修正前后调整结果

Tab.1 Comparison between deviation before and after correlation indexes adjustment

车站	偏差时间调整幅度对比/%				偏差时间调整对比/s			
	客流系数取值区间		比重系数之比		延误松弛时间		干扰延误时间	
	[0.015,0.097]	[0.15,0.96]	5 : 1	1 : 5	[0,15]	[-5,10]	[0,5]	[0,2]
S1	0	0	0	0	0	0	0	0
S2	79.06	11.69	79.06	25.58	10.94	10.94	10.94	8.75
S3	79.46	16.16	79.46	25.76	21.70	26.06	21.70	14.97
S4	82.96	56.23	82.96	27.32	27.70	28.07	27.70	17.60
S5	80.87	32.29	80.87	26.38	42.38	42.77	42.38	29.46
S6	84.44	72.51	84.44	27.99	55.31	48.58	55.31	42.17
S7	81.94	44.53	81.94	26.86	64.49	46.90	64.49	50.67
S8	82.64	52.57	82.64	27.17	69.28	48.87	69.28	54.89
S9	83.58	63.10	83.58	27.60	78.49	56.46	78.49	62.65
S10	83.47	61.91	83.47	27.55	86.03	71.57	86.03	66.61
S11	81.94	44.62	81.94	26.86	96.80	87.90	96.80	76.38
S12	84.00	67.72	84.00	27.79	110.29	90.96	110.29	85.30
S13	80.84	31.93	80.84	26.37	130.59	112.08	130.59	100.70

1)将客流到达率的线性回归系数 c_k^i 的数量级增加一级,由基本假设中的约束区间[0.015,0.096]增至[0.15,0.96],模拟当上车客流对停站时间影响非常大时调整策略的效果.可由修正前后的调整幅

列车运行图、调整偏差前、偏差后列车运行图,如图 5 所示.

由图 5 可知,调整偏差后的列车运行图相比与调整前更加贴近计划列车运行图,证明了所采用的调整策略使得在动态随机客流下的城市轨道交通列车运行更能“按图行车”,在对列车运行时分及停站时分合理地约束下,假设干扰因素得以控制的同时,仍体现了良好的优化效果.

2.3 参数修正

为了进一步研究对各项参数采取控制约束或是修正后调整策略的效果,此次仿真还对相关参数的约束区间进行修正并运行仿真,得到了相应的调整结果,如表 1 所示.

度看出,在大客流情况下调整策略的优化水平均低于正常客流,且随车站的变化调整幅度波动较大.

2)修正相邻列车发车时间偏差与连续到站列车的间隔偏差比重系数 p 、 q 值,由基本假设中 $p =$

5、 $q=1$ 修正为 $p=1$ 、 $q=5$ 。由表 1 可以看出,修正后调整幅度处于 25%左右的优化水平,远低于原假设中的调整效果,说明在实际运营中应当重点考虑相邻列车发车时间偏差。

3) 将列车在区间内的延误松弛时间 u_k^i 由基本假设中的约束区间 $[0, 15]$ 修正为 $[-5, 10]$, 允许列车通过上限为 5 s 的加速来减少区间运行时分,并将列车在区间运行延误约束在 10 s 以内,即假设列车在区间运行过程中具有一定自动调节延误的能力。由表 1 可以看出,修正运行缓冲时间 u_k^i 约束区间后,列车在各站的离站时间偏差有了明显的减少,偏差调整效果随着偏差的增大而更加显著,体现出列车自动调节能力的重要作用。

4) 将干扰延误时间 w_k^i 由基本假设中的约束区间 $[0, 5]$ 修正为 $[0, 2]$, 假设弱化列车在停站期间受其他干扰的影响程度。由表 1 可以看出,修正其他干扰造成的停站时间延长 w_k^i 的约束区间后,当偏差值较小时,偏差调整效果不明显;当偏差值较大时,有显著的偏差调整优化效果。

3 结 论

1) 考虑将随机分布的城市轨道交通客流量变化体现在模型搭建及求解的过程中,建立城市轨道交通列车流控制组织优化模型,应用最优化方法的 K-T 条件对所建模型进行求解,提出了对列车运行偏差时间、列车停站时间进行约束的调整控制策略。

2) 通过实例仿真表明所提方法可以有效减小列车总延误时间 80%左右,从而提高了城市轨道交通列车的运营效率和服务水平。

下一步的研究工作将由单线运行向网络化轨道交通运行进行延伸,尤其是对换乘车站交汇线路的列车运行调整进行深入研究。

参考文献 (References):

- [1] 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.
XU Ruihua, JIANG Zhibin, SHAO Weizhong, et al. Simulation study on train delay and propagation characteristics of urban mass transit systems[J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28(2): 7—10. (in Chinese)
- [2] 孟令云, GOVERDE R M P. 基于实际数据分析的列车晚点传播过程构建方法与实例[J].北京交通大学学报, 2012, 36(6): 15—20.
MENG L Y, GOVERDE R M P. A method for constructing train delay propagation process by mining train

- record data[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2012, 36(6): 15—20. (in Chinese)
- [3] 乔珂,赵鹏,禹丹丹.基于乘客等待时间的城市轨道交通列车运行调整模型[J].北京交通大学学报, 2014, 38(6): 27—32.
QIAO K, ZHAO P, YU D D. Train regulation model of urban rail transit based on passenger waiting time[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2014, 38(6): 27—32. (in Chinese)
- [4] 江志彬,李婷婷.基于客流影响的城市轨道交通列车运行调整策略[J].城市轨道交通研究, 2014, 1(1): 39—42.
JIANG Z B, LI T T. URT train regulation strategy based on passenger flow influence[J]. Urban Mass Transit, 2014, 1(1): 39—42. (in Chinese)
- [5] 丁小兵,徐行方.基于时段分布的市郊轨道交通车站滞留客流分布算法[J].交通运输系统工程与信息, 2016, 16(1): 116—122.
DING X B, XU X F. Algorithms of station passenger flow forecast of suburban rail transit based on distribution time[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2016, 16(1): 116—122. (in Chinese)
- [6] 柏赞,陈垚,陈玥,等.考虑列车总晚点和到发均衡性的地铁列车运行调整方法研究[J].交通运输系统工程与信息, 2014, 14(3): 104—110.
BAI Y, CHEN Y, CHEN Y, et al. Rescheduling of metro train timetable for delay reduction and equilibrium of trains' arrival and departure[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2014, 14(3): 104—110. (in Chinese)
- [7] 滕靖,何传勇,刘向龙.城市轨道交通突发事件下联动运输仿真评价方法[J].交通信息与安全, 2016, 2(2): 108—116.
TENG J, HE C Y, LIU X L. A simulation-based evaluation method of coordinated-scheduling program of urban rail transit systems under emergency response [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2016, 2(2): 108—116. (in Chinese)
- [8] CAMPION G, BREUSEGEM V V, PINSON P, et al. Traffic regulation of an underground railway transportation system by state feedback[J]. Optimal Control Applications & Methods, 1985, 6: 385—402.
- [9] BREUSEGEM V V, CAMPION G, BASTIN G. Traffic modelling and state feedback control for metro lines [C]//IEEE Trans Autom Contr, 1991, 36: 770—784.
- [10] FERNA'NDEZ A, DE CUADRA F, GARCIA A. A SIRO: an optimal regulation system in an integrated control centre for metro lines [C]//Proceedings of COMRAIL'96, 1996, 2: 299—308.