

优化设置运行图弹性时间的新策略

杨金花¹, 杨东援¹, Thomas Siefer²

(1. 同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804; 2. 汉诺威大学 轨道交通工程仿真研究所, 汉诺威 30419)

摘要: 提出一种优化弹性时间布置的新策略——弯曲列车运行线(curved train path, CTP), 将附加时间分段设置, 从而降低了延误水平, 提高了能力利用率, 使运行图质量三要素达到了新的平衡. 以乘客经济效益最大为目标, 建立了该策略实际应用中的运行图方案比选原则. 最后以德国某市域线为例, 基于CTP策略, 运用Railsys[®]软件对不同运行图方案进行仿真分析, 得出不同附加时间比例下的最优运行图方案.

关键词: 列车运行图; 附加时间; 弹性时间; 延误; 仿真
中图分类号: U 292.4⁺1 **文献标识码:** A

New Strategy to Optimize Flexible Time Arrangement in Railway Timetable

YANG Jinhua¹, YANG Dongyuan¹, Thomas Siefer²

(1. College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Institute of Transport, Railway Construction and Operation, Hanover University, Hanover 30419, Germany)

Abstract: Curved train path (CTP), a new strategy to optimize reserve time arrangement is developed, and allowance is set by sections. As a result, delay level decreases, the capacity utility is improved and the three parameters of timetable quality are balanced. With the aim to maximize the passenger economic benefit, the principle to choose timetable variants under this strategy is determined. Different timetable variants based on CTP strategy are simulated and analyzed with Railsys[®] software by taking a German local passenger line for example. Average delay along the train path at different allowance percentages is evaluated, and the optimal timetable variant is determined.

Key words: railway timetable; allowance; flexible time; delay; simulation

运行图中设置的弹性时间分附加时间(allowance)和缓冲时间(buffer time). 附加时间分为区间附加时间和停站附加时间, 其作用是避免日常运营中各种干扰而造成列车到站延误, 称为吸收初始延误. 缓冲时间分为列车间缓冲时间、越行缓冲时间和换乘缓冲时间^[1], 其作用是当前列车发生延误时, 避免后续列车受到干扰传播的影响, 称为吸收连带延误. 附加时间和缓冲时间均提高了运营过程中调度调整的弹性, 为保证运行图质量, 弹性时间的设置是必须的. 另一方面, 附加时间延长了列车旅行时间, 缓冲时间增大了列车间隔, 减少了可铺画的运行线数量, 对运行图质量造成负面影响. 因此优化弹性时间的布置, 达到运行图质量要素即准时性、旅行时间和铺图能力的平衡统一, 是运行图铺画过程中一项重要任务.

江志彬^[2]利用整数规划模型对城市轨道交通运行线的附加时间进行了研究, 以总延误最小为目标, 得出了附加时间值的3种分布情况; Kaminsky^[3]利用“缓冲列车”的概念建立了附加时间和缓冲时间的关系, 成为弹性时间优化设置的基础策略, 为专家所认同; Rudolph^[4]在Kaminsky优化缓冲时间布置的基础上, 通过把均匀布置在运行线中的区间附加时间全部转变为停站附加时间, 减小了列车出发延误, 提高了换乘站的服务质量.

1 弯曲列车运行线策略

1.1 弹性时间内部关系

尽管附加时间和缓冲时间设置的位置和作用不同, 但两者间存在以下关系^[3]:

$$S_n = V_{s_n}^* - \sum_{i=1}^n Z_{F_{i-1,i}} - \sum_{i=1}^n Z_{H_i} + \sum_{i=1}^n t_{Z_i} \quad (1)$$

收稿日期: 2009-01-12

作者简介: 杨金花(1981—), 女, 博士生, 主要研究方向为交通运输规划与管理. E-mail: lily.yong2006@gmail.com
杨东援(1953—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为交通运输规划及交通信息工程.
E-mail: yangdyk@yahoo.com.cn

式中: S_n 为区间 n 处前后两列车之间的必要缓冲时间; $V_{s_n}^*$ 为由延误概率统计确定的列车最小发车间隔(包括必要越行、换乘缓冲时间); $Z_{F_{i-1,i}}$ 为区间 $(i-1, i)$ 上, 包含在运行线中的区间附加时间; Z_{H_i} 为列车在 i 站的停站附加时间; t_{Z_i} 为列车停站时的额外延误, 由统计得到.

当发车间隔 $V_{s_n}^*$ 确定时, 假设停站附加时间和停站时发生的额外延误 $\sum_{i=1}^n Z_{H_i} + \sum_{i=1}^n t_{Z_i}$ 不变, 那么从第1个区间开始的区间附加时间总和 $\sum_{i=1}^n Z_{F_{i-1,i}}$ 与限制区间的缓冲时间 S_n 存在反比关系. 图1为4个车站(o, a, b, d)6个闭塞分区(1,2)~(6,7)时运行图中前后两列车的弹性时间设置情况, 图中, Z 为附加时间; t 为额外延误时间; V 为最小发车间隔; S 为缓冲时间. 列车1和列车2的限制分区为(4,5), $\sum_{i=1}^5 Z_{F_{i-1,i}}$ 和 S_5 存在着反比关系. 这同时也说明, 前列车列车的初始延误与后续列车的连带延误之间存在反比关系. 因此, 优化其中之一或者同时优化2个参数的设置将导致延误发生复杂的变化.

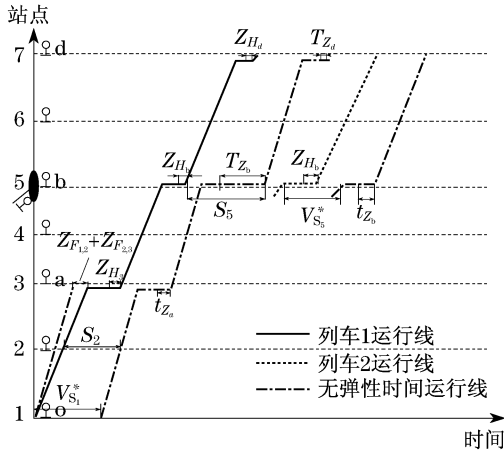


图1 运行图铺画过程中的弹性时间设置^[5]

Fig.1 Flexible time arrangement in timetable planning

1.2 弯曲列车运行线策略

弯曲列车运行线(curved train path, CTP), 以调整 $\sum_{i=1}^n Z_{F_{i-1,i}}$ 和 S_n 间的关系是本文的主要策略. 图2为弯曲列车运行线策略, 图中设于限制分区末的“变坡点” p 把运行线分为2部分: 从开始分区至 p 点, 列车以较小的附加时间、较高的速度运行, 称为“上坡”部分; 从 p 点至终点站, 列车以较大的附加时间、较低的速度运行, 称为“下坡”部分. 图中, b_{12} (阴影部分) 为列车1和列车2间的缓冲时间; Δt 为CTP策略

下列车1和列车2间缓冲时间的增加量. 为比较策略的效果, 这里假设CTP策略与直线运行线中预留相同的附加时间, 即列车在终点站到站时刻相同.

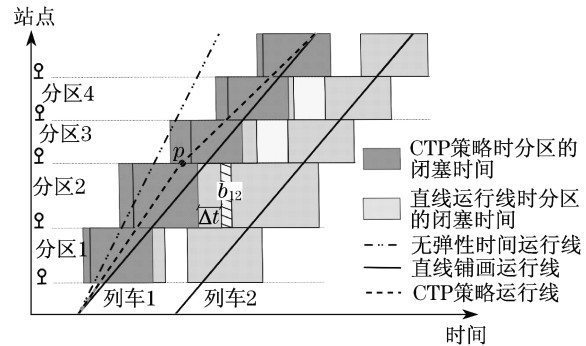


图2 弯曲列车运行线策略

Fig.2 Curved train path strategy

1.3 弯曲列车运行线策略的优点

(1) 由于CTP策略为前列列车的缓冲时间积累了较多的空间, 使后列车运行中受到的连带延误减小, 见图3, 图中 d_1 为若干扰发生在闭塞分区2时, 而导致列车1在进入该分区时发生的初始延误值 ($d_1 > b_{12}$), d_2 为由于列车1和列车2的闭塞时间在分区2发生冲突而导致列车2发生的连带延误值. 但如果列车1运行线采用CTP策略铺画, 两列车的闭塞时间在分区2时无冲突, 所以列车2未受到列车1延误的干扰.

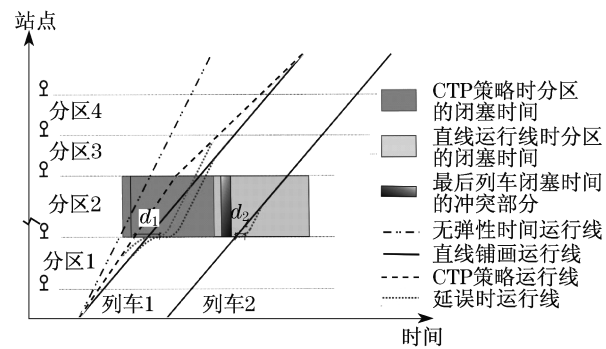


图3 不同策略下的连带延误

Fig.3 Secondary delay of different train paths

(2) 较之直线运行线, CTP策略在列车运行中节省出更多的缓冲空间, 这有利于消除初始延误. 图4中 d_1, d_2 分别为若干扰发生在分区3时而导致列车1此时的初始延误值和列车2最初进入区间3所发生的连带延误值, d_3 为列车2进入区间4时的连带延误值, d_4 为列车1在终点站时发生的初始延误值 ($d_4 < d_1$). 直线运行线情况下, 将不仅导致列车2在分区3和4发生连带延误, 受到不规则延误传播

影响^[6],列车1在终点站发生初始延误也产生初始延误值 d_4 .但如果列车1运行线采用CTP策略铺画,可以避免列车2受到延误传播的影响,因为在之后的两分区内两列车的闭塞时间不发生冲突,而且列车1可准时到达终点站,因为列车1在途中分区5时赶上了规划运行线.

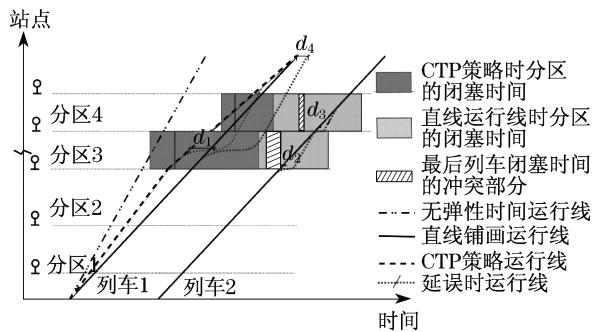


图4 不同策略下的初始延误和连带延误
Fig.4 Primary delay and secondary delay of different train paths

(3) 列车间隔被压缩,进一步发掘了潜在的运行图能力(图5).对于同类型列车,限制分区多数位于首末分区之间,此时,弯曲列车运行线可以压缩列车的发车间隔.

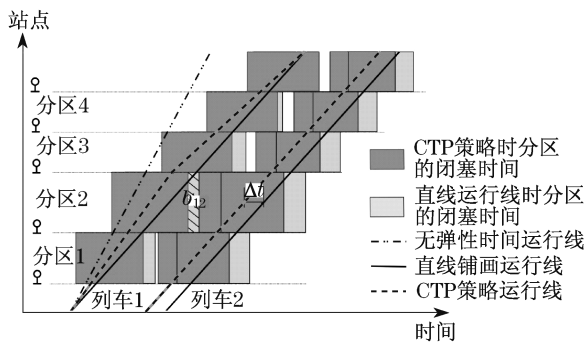


图5 列车间隔压缩过程
Fig.5 Headway shortening process

列车1运行线按CTP策略铺画时,在限制分区2时缓冲时间增加了 Δt (图1).如果列车间的缓冲时间保持Kaminsky建议的标准,即保持 b_{12} 不变,那么列车2运行线的铺画位置就被提升了 Δt (图5),从而使发车间隔变小、运行线密度变大.

1.4 弯曲列车运行线策略的适用性

由以上分析可知,CTP策略适用于列车技术速度相差不大的线路.此时限制分区多位于首末分区之间,弯曲其中一条列车运行线或者几条运行线(相同速度列车连发时),均有1.3节中分析的效果,提高了运行图质量.

2 仿真测试

2.1 仿真条件

①选择研究线路为德国某市域线局部TBF站至THG站,全长13 km,共8个车站;②研究时段为6:00~8:00;③3种类型列车运行,其中1列长距离货物列车,6列城际旅客列车和1列单机,共8条列车运行线;④列车按次序运行,无越行;⑤仿真工具为德国IVE公司研发的轨道交通运营仿真软件 Railsys[®].

2.2 仿真过程

①从实际运行图中推算出按Kaminsky方法计算的最优运行图作为基本运行图;②弯曲列车运行线作为运行图方案1;③在运行图变量1的基础上压缩列车间隔,保证限制分区缓冲时间等于基本运行图中缓冲时间,作为运行图方案2;④设置相同的干扰水平参数,分别对各运行图仿真200 d,输出、评价延误情况.

2.3 结果分析对比

和实际运行图相比,基本运行图压缩了57 min 33 s,占实际运行图中列车时间跨度的61.09%;和基本运行图相比,运行图变量2继续压缩了1 min 30 s,占基本运行图中列车时间跨度的4.10%.图6、图7显示了基本运行图、运行图方案1、运行图方案2下各站平均延误及额外延误情况.

3 实例分析与方案选取

3.1 乘客经济效益最大原则

以直线运行线为基本运行图,CTP策略下的不同运行图为各运行图方案.相同干扰水平下,仿真基本运行图和各运行图方案输出各站的平均延误值.运行图方案下,各站受延误影响乘客人数(途经各站乘客与各站换乘乘客)与该站延误减小量的乘积为该站的乘客经济效益.若运行图方案下该站延误较基本运行图时小,则该站的乘客经济效益为正;反之,若运行图方案下该站延误较基本运行图时大,则该值为负.列车途经各站经济效益加和为该运行图方案总经济效益,经济效益最大的方案为最优方案.由于CTP策略直接影响本列车的延误和后列车的延误情况,所以这里分别计算两列车的经济效益,然后加和作为运行图方案的总经济效益.

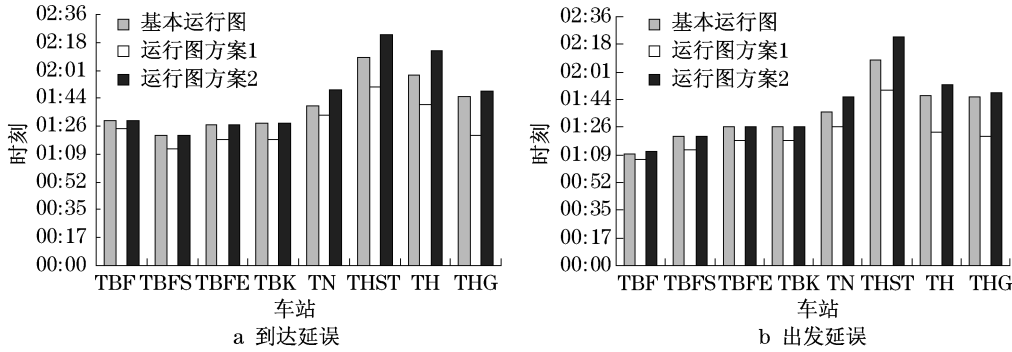


图6 各运行图的车站平均延误

Fig.6 Average delay of each timetable

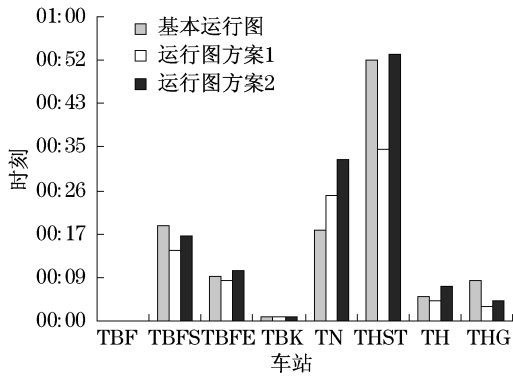


图7 各运行图的车站额外延误

Fig.7 Additional arrival delay of each timetable

图6~7表明:只采用CTP策略的运行图方案1可以大幅度减少延误;采用CTP策略并压缩运行线间隔的运行图方案2提高了能力利用率,但较之基本运行图,延误水平未发生明显变化(局部稍有增加)。这也再次说明了运行图质量三要素存在动态平衡关系^[7]。

令 $d_{i,s}$ 为基本运行图下列车在 i 站的延误时间, s ; d_{i,c_j} 为方案运行图 c_j 下列车在 i 站的延误时间, s ; n_i 为 i 站受延误影响乘客数, 人; $n_{(i-1),b}$ 为区间 $(i-1, i)$ 列车上乘客人数, 人; $n_{i,in}$ 为在 i 站换乘进入列车的乘客人数, 人; $n_{i,out}$ 为 i 站换乘离开列车的乘客人数, 人; $n_{1,b}$ 为首站时列车上乘客人数, 人; $w_{i,j}$ 为运行图方案 c_j 在 i 站的经济效益, 人 · s; $W_{i,j}$ 为沿列车径路方向运行图方案各站经济效益之和; G_{c_j} 为运行图方案 c_j 下, 前后两列车总经济效益之和; $y(c_j)$ 为最优运行图方案。

$$\Delta d_{i,c_j} = d_{i,s} - d_{i,c_j} \quad (2)$$

$$n_i = n_{(i-1),b} + n_{i,in} \quad (3)$$

$$n_{(i-1),b} = n_{1,b} + \sum_{x=1}^{i-1} (n_{x,in} - n_{x,out}) \quad (4)$$

由式(2)~(4)得

$$w_{i,j} = (d_{i,s} - d_{i,c_j}) \left[n_{1,b} + n_{i,in} + \sum_{x=1}^{i-1} (n_{x,in} - n_{x,out}) \right] \quad (5)$$

$$W_{i,j} = \sum_{i=1}^m (d_{i,s} - d_{i,c_j}) \left[n_{1,b} + n_{i,in} + \sum_{x=1}^{i-1} (n_{x,in} - n_{x,out}) \right] = \sum_{i=1}^m (d_{i,s} - d_{i,c_j}) (n_{1,b} + n_{i,in}) + \sum_{i=1}^m \sum_{x=1}^{i-1} (d_{i,s} - d_{i,c_j}) (n_{x,in} - n_{x,out}) \quad (6)$$

$$G_{c_j} = \sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^m (d_{i,s} - d_{i,c_j}) (n_{1,b} + n_{i,in}) + \sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^m \sum_{x=1}^{i-1} (d_{i,s} - d_{i,c_j}) (n_{x,in} - n_{x,out}) \quad (7)$$

$$y(c_j) = \max\{G_{c_j}\} \quad (8)$$

3.2 运行图方案

选取研究线路同第2节,为德国某市域线局部,范围为从TBF站至THG站。设直线运行线策略为基本运行图。设CTP策略下,“变坡点” p 的位置依次位于TBK, TN, THST, TH站,分别对应运行图方案1~4(见图8),其中列车停站未画出。

3.3 仿真结果处理与方案评价

仿真中干扰的类型分布见表1,干扰发生位置见图8。预留附加时间分别为5%,10%,15%时,对各运行图方案进行仿真,得出列车1和列车2沿运行线的延误情况见图9。

表1 仿真中干扰参数设置

Tab.1 Perturbation parameters in simulation

干扰种类类型	发生延误列车比例/%	平均延误时间/min	最大延误时间/min
停站干扰	20	2	10
运行过程中干扰	70	4	15

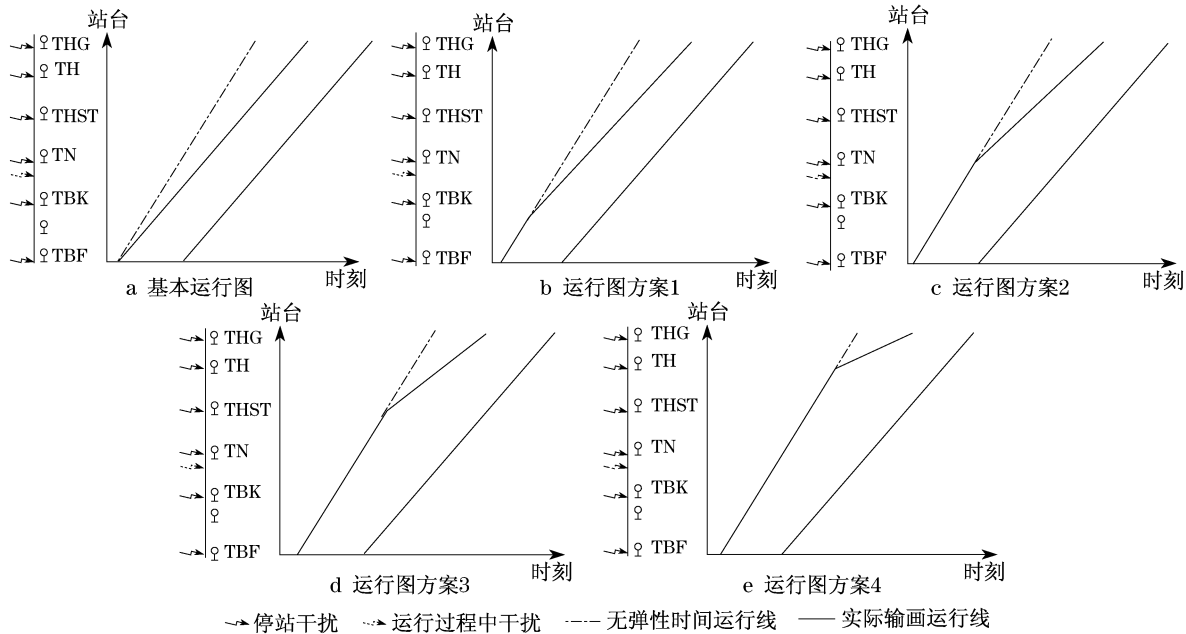


图8 各运行图方案的设置

Fig.8 Timetable variants

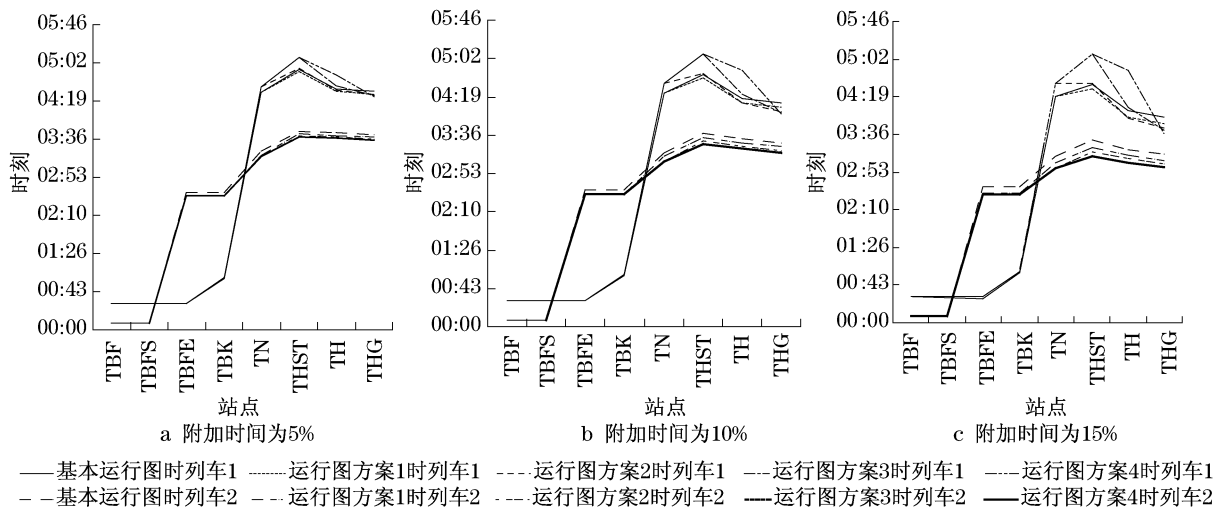


图9 相同附加时间比例下各运行图方案中两列车的延误

Fig.9 Two trains' delay under different timetable variants with same allowance percentage

由仿真结果可知:①针对列车终点站延误,采用CTP策略的各运行图方案均优于基本运行图,其中运行图方案4减小延误幅度最大,方案1最小;②针对途中延误,CTP策略对第2列列车的乘客经济效益全部为正,第1列列车的乘客经济效益不确定。

假设列车1上 $n_{1,b} = 500$ 人,列车2上 $n_{1,b} = 200$ 人,各站换乘乘客人数如表2,依据乘客经济效益最优原则,编程求出各预留时间比例下,各运行图方案的乘客经济效益值,结果见表3,其中经济效益最大值对应的运行图为各附加时间比例下的最优运行图方案。

表2 各站换乘乘客数据

Tab.2 Number of interchange passengers 人

换乘	TBF	TBF S	TBFE	TBK	TN	THST	TH	TH G
进入	0,0	15,5	25,10	5,15	15,5	25,15	35,15	100,60
出去	0,0	45,15	55,20	45,25	45,20	55,35	75,30	125,60

注:逗号前为列车1对应数据,逗号后为列车2对应数据。

由表3可知:①减小列车终点站延误值最大的运行图方案不一定是最优方案;②最优运行图方案与乘客数、附加时间比例、干扰水平、干扰分布等因素有关。

(下转第544页)