

# 多股道城市轨道交通车站站前折返能力分析

江志彬, 饶 娅

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

**摘要:** 折返能力是制约线路能力的关键因素之一,以 4 线站前折返站为研究对象,通过综合考虑车站折返模式、列车停站时间、列车进出车站的均衡性等影响因素,基于 N-Track 理论模型,建立以总折返过程耗费时间最小为目标的整数规划模型,得到不同股道使用方案与不同折返模式条件下的最大折返能力和股道运用方案,最后以上海轨道交通 16 号线滴水湖站为实例进行分析,验证评估折返能力与折返股道的使用方式、列车停站时间和列车进出车站的均衡程度的关系。

**关键词:** 城市轨道交通; 站前折返; 折返能力; 停站时间; 均衡性

**中图分类号:** U231+.92

**文献标志码:** A

## Turnback Capacity Assessment at Rail Transit Stub-end Terminal with Multi-tracks

JIANG Zhibin, RAO Ya

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Turnback capacity becomes a major concern for the line capacity of rail transit. By taking a rail transit stub-end terminal with four-tail tracks as background, a mixed integer programming optimization model is formed based on N-track integrated model, to estimate the turnback capacity and the track occupation strategies with the objective of minimizing occupation times of trains. Operations and design parameters such as tail track allocation strategies, train layover time, homogeneity of trains are also considered in this model. We illustrate our model with computational experiments drawn from the real rail transit Line 16 in Shanghai and reach the results which show the track occupation strategy, maximum layover time and homogeneity impact on turnback capacity.

**Key words:** rail transit; terminal with crossovers located in advance of station; turnback capacity; layover time; homogeneity of trains

随着我国城市轨道交通网络客流的快速增长,越来越多的线路面临着能力不足的局面,而折返能力是制约线路能力的关键因素之一<sup>[1]</sup>。折返能力与车站站型、折返方式、折返模式、停站时间和列车到发均衡性等因素有关<sup>[2]</sup>。

既有成果中针对折返能力的分析方法主要有四类:数学解析法、图解法、仿真法和数学建模法。解析法是通过列车折返作业的过程与列车在折返站的作业(进路)干扰等影响因素的分析,确定满足最小折返出发间隔时间的条件,建立数学关系式<sup>[3]</sup>,但该方法仅仅适应于固定折返模式条件下的计算;图解法是将采用图解的方式分析列车的折返过程,其优点是直观简单,但对于寻求最优解的制约较大<sup>[4]</sup>;计算机仿真方法是将车站的基础设施进行仿真建模,通过模拟列车运行过程来得到折返能力,但该方法对于不同类型的站型需要单独设计模型,工作量较大<sup>[5-8]</sup>;数学建模方法是将折返站的能力分析抽象成整数规划模型,通过设定求解目标和约束目标来寻求最优解条件下各项时间参数,其最大的优点除了可以得到折返站在不同折返模式下的最大折返能力,还能得到最大能力条件下的详细折返作业过程和各个过程的详细占用时间,适合给定站型条件下的不同运营方案的能力分析。

由于站前折返与站后折返的流程差异较大,在数学建模时需要将两者分别考虑。即有文献中,JIANG 等<sup>[2]</sup>在 TORNQUIST 和 PERSSON<sup>[9]</sup>的理论基础上,研究了站后双折返站的最大能力计算模型。针对站前折返,即有成果主要集中在站前双折返线条件下的固定折返或混合交替折返模式条件下的能力分析<sup>[4,10-13]</sup>,但针对多股道(如 4 线)车站混合折返条件下的折返站的能力研究成果非常少。

因此,本文以站前 4 线折返站为研究对象,通过综合考虑车站折返模式、列车停站时间、列车进出车

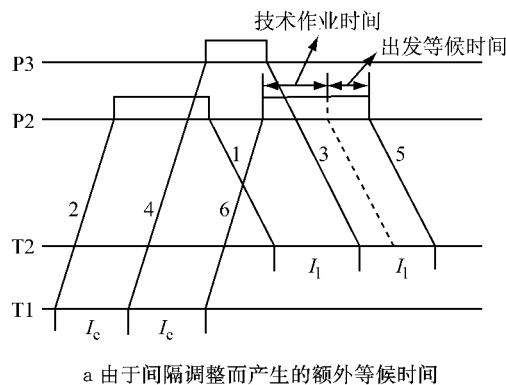
站的均衡性等影响因素,基于 N-Track 理论模型,建立以总折返过程耗费时间最小为目标的整数规划模型,求解不同股道使用方案与不同折返模式条件下的最大折返能力和股道运用方案,最后以上海轨道交通 16 号线滴水湖站为实例进行分析,以评估折返能力与折返股道的使用方式、列车停站时间和列车进出车站的均衡程度的关系。

### 1 站前折返能力的影响因素分析

站前折返能力由车站配线、折返方式与折返模式、停站时间、列车到发间隔的均衡性等因素决定。

#### 1.1 折返模式

对于 4 折返线站前折返站型下的列车折返主要有固定折返线折返、双线交替折返和多线混合折返 3 种模式。固定折返线折返模式下,列车折返过程选择某一固定折返线(如图 1 中的 P1、P2、P3 或 P4),该折返模式下,列车折返过程较为单一,能力计算也很简单;双线交替折返模式下,列车折返过程中,可以采用 4 线中的任何两条线进行循环交替使用(如 P2 与 P3 组合,P3 与 P4 组合等),该折返模式下的列车折返过程需要满足寻求最佳组合的作业模式才能做到最大能力;多线混合折返模式下,列车折返过程中可以采用任意股道,且使用的规律可以不固定,该模式条件下的折返组合非常复杂且不同组合条件下大能力计算方式不尽相同,因此也最为复杂。



a 由于间隔调整而产生的额外等候时间

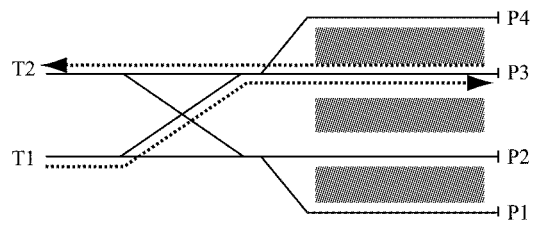


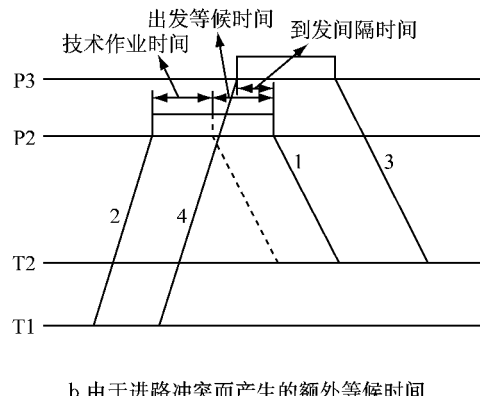
图 1 4 线站前折返站的单股道折返示意图

Fig.1 Turnback operation of crossover located in advance of station with four tail tracks

#### 1.2 停站时间

折返站的列车停站时间由两类时间组成:最小技术作业时间和出发等候时间。最小技术作业时间包括旅客上、下车时间和开关门(包括屏蔽门)等技术作业时间,与上、下车人数、车内拥挤程度、站台拥挤程度、司机操作的熟练程度以及列车设备性能等因素相关。

出发等候时间为扣除最小技术作业时间以外的额外等待时间。出发等候时间是因为列车间隔调整或由于疏解进路冲突产生的。图 2a 为由于间隔调整而产生的额外等候时间,图中  $I_c$  为列车 5 为保证与列车 3 的出发间隔与列车 1、3 间隔的一致性(均为  $I_1$ ),在股道 P2 延长了停站时间;图 2b 为由于列车进路冲突而产生的额外等候时间,图中列车 1 的出发与列车 4 的到达存在进路冲突,列车 1 需要在列车 4 停在股道 P1 并满足一个到发间隔后(包括接车进路解锁和发车进路开放的时间)才能出发。



b 由于进路冲突而产生的额外等候时间

图 2 出发等候时间的影响(单位:s)

Fig.2 Influence of departure waiting time(Unit: s)

#### 1.3 列车到发的均衡性

小间隔、高密度是城市轨道交通运营的特点,实际运营中往往会将列车到发的均衡性作为考虑衡量服务水平的关键因素。在多折返线混合使用时,折返能力会受列车到发均衡性的影响。以图 1 中双折返线交替使用为例,在不均衡到发条件下(如图 3a),由

于列车 4 需要等列车 3 离开后才能接进站,间隔时间较长,而列车 6 与列车 4 先后进站,间隔时间较短,同理列车 3 与列车 1 是先后出站,而列车 5 需要等列车 6 进站后才能出站,因此列车 3 和列车 5 的发车间隔要大于列车 1 与列车 3 的发车间隔,在交替折返过程中,上下行列列车两两成组形成周期。而列

车均衡到发条件下(如图 3b),由于列车到发都需要保证等间隔,因此列车的接与发的间隔由最大的接或发的列车组决定(图中的列车 2 与列车 4),因此该

条件下的折返能力不会大于不均衡到发条件下的能力. 同理,在多折返线交替使用时,到发的均衡性对于能力的影响会比较大.

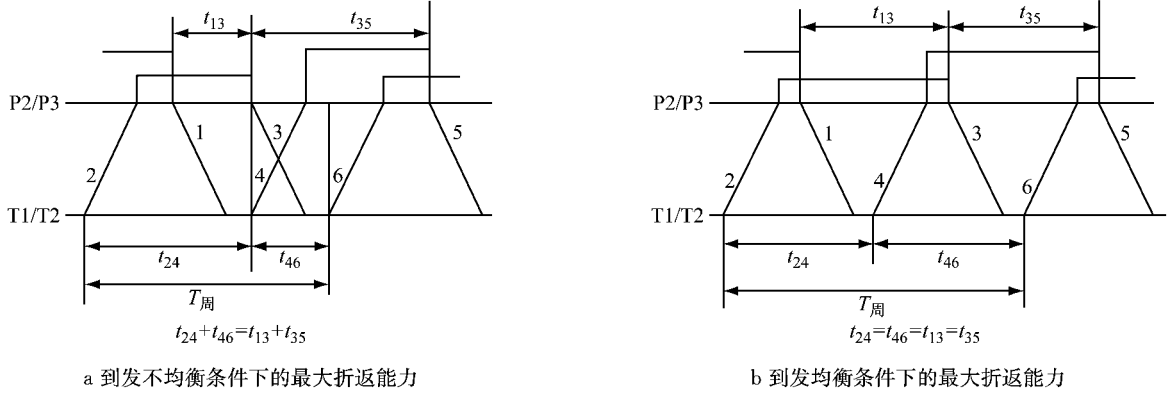


图 3 到发均衡性对折返能力的影响(单位:s)

Fig. 3 Influence of turn-back capacity under the homogeneity of arrival or departure interval(Unit: s)

## 2 折返能力计算的整数规划模型

### 2.1 站前折返过程分析

列车在车站的折返过程实质上是列车占用车站各设施设备的时间分布过程,基于 TORNQUIST 和 PERSSON 提出的 N-Track 模型<sup>[9]</sup>,将车站分为若干个区段,各个区段由若干条轨道(Track)组成,以 4 线站前折返站为例(图 4),可以将车站分为 4 个区段,其中区段 1 有 2 条轨道(A 和 B),区段 2 有 3 条轨道(C、E 和 D),区段 3 有 2 条轨道(F 和 G),区段 4 有 4 条轨道(H、I、J 和 K).

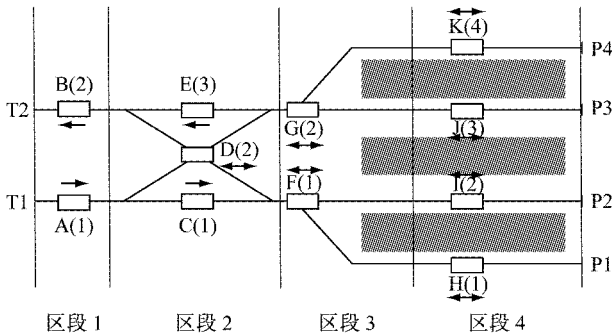


图 4 岛式站台四折返线站前折返示意图

Fig. 4 Turn-back operation with crossover located in advance of four tail tracks station

在图 4 中,将列车占用轨道的过程称为一个事件(Event),每个事件包括 3 个属性:开始占用时间、结束占用时间和列车运行方向(进、出或双方向). 因此,列车的折返过程可以分解为 3 步:①车底的折返过程依次占用 8 个区段(顺序为 1—2—3—4—4—

3—2—1),由 8 个事件组成;②在每一个区段选择必须且只能选择某条轨道;③分配占用选择轨道的起始与结束时间.

受列车运行规则(如右侧行车)和道岔布局(决定列车运行方向)的影响,列车选择的轨道编号以及不同轨道的列车运行方向需要在模型中明确限定,图 4 中股道选择和方向占用可以转化为图 5 所示的拓扑结构.

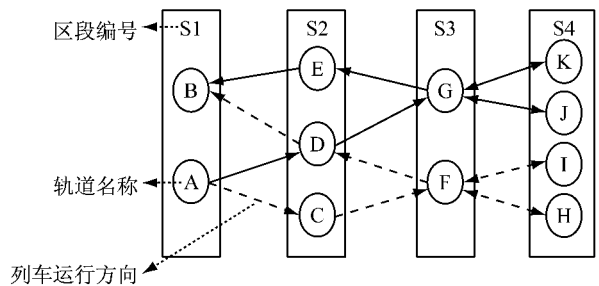


图 5 轨道选择和方向占用的拓扑结构

Fig. 5 Topology diagram of events track occupation and direction of trains

以列车使用固定折返线 P3 为例,列车在车站的折返过程可以用图 6 的事件占用图来表示. 同时,为了保证列车运行过程中的安全,需要对轨道的占用设定以下规则:

- (1)同一轨道只能允许一列车占用;
- (2)对于连续的同方向列车占用同一轨道,需要错开同方向占用时间间隔;
- (3)对于连续的对向列车占用同一轨道,需要错开对向占用时间间隔.

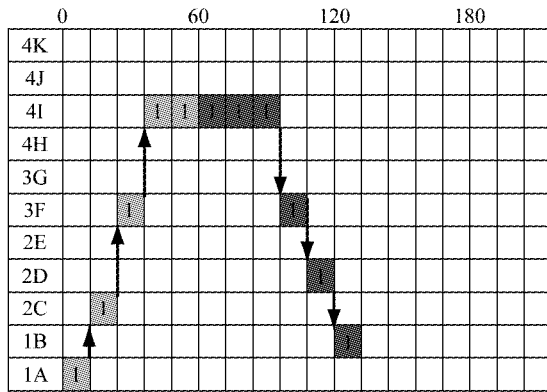


图 6 区段轨道列车区段运行占用顺序示意图  
Fig.6 Topology diagram of track occupancy

2.2 模型建立

基于上述的分析, 站前折返能力的计算问题实际可以用混合整数规划(MIP)模型来表示, 下面为模型的参数、约束与目标函数的定义. 参数和决策变量的时间单位都以秒为单位.

2.2.1 参数定义

表 1、表 2 和表 3 分别给出了模型的集合、参数和决策变量的定义.

表 1 集合定义  
Tab.1 Sets

集合	定义
$U$	列车编号;
$S$	区段编号;
$S_T$	区间轨道区段编号, 图 4 中 $S_T=4$
$S_P$	拥有站台轨道的区段编号, 图 4 中 $S_P=4$
$S_D$	拥有单开道岔的区段编号, 图 4 中 $S_D=3$
$S_C$	拥有平交交叉渡线的区段编号, 图 4 中 $S_C=3$
$S_W$	列车拥有多余等待时间或停留的区段编号
$K$	事件(Event, 列车占用轨道的过程)发生次序编号 $K = [ (i, j, in/out), i \in U, j \in S ]$ 表示列车 $i$ 在区段 $j$ 的运行方向. 依照图 6, 列车 1 的 $K$ 事件集合即为: $K = [ (1, 1, in), (1, 2, in), (1, 3, in), (1, 4, in), (1, 4, out), (1, 3, out), (1, 2, out), (1, 1, out) ]$
$K_{in,i,j}$	列车 $i$ 在区段 $j$ 为进站方向的事件发生次序的集合, $K_{in,i,j} \in K, i \in U, j \in S$
$K_{out,i,j}$	列车 $i$ 在区段 $j$ 为出站方向的事件发生次序的集合, $K_{out,i,j} \in K, i \in U, j \in S$
$K_{S,j}$	在区段 $j$ 发生的事件次序的集合
$P_j$	区段 $j$ 的轨道集合
$f_i$	在 $K$ 中每列车第一个事件序列号的有序集合
$l_i$	在 $K$ 中每列车最后一个事件序列号的有序集合

2.2.2 目标函数

折返能力是指单位时间内能折返的最大列车对数, 但是当列车数量足够大时, 最大折返能力意味着所有列车完成折返过程的总占用时间最小, 且折返模式的规律可达到稳定的周期, 因此为衡量折返能力, 可以用最后事件的结束时刻和第一事件的开始

表 2 参数定义

Tab.2 Parameters

参数	定义
$n_{TU}$	初始列车数
$n$	每一列车事件发生数目
$f_e$	$K$ 中的第一个事件序列号, 如图 6, 即为 $f_e=1$
$l_e$	$K$ 中的最后一个事件序列号如图 6, 即为 $l_e=nm_{TU}$
$d_{in,j,t}$	区段 $j$ 的轨道 $t$ 在进站方向上的最小占用时间
$d_{out,j,t}$	区段 $j$ 的轨道 $t$ 在出站方向上的最小占用时间
$h_{M,j,t}$	列车在区段 $j$ 的轨道 $t$ 上对向运行时的最小间隔时间
$h_{F,j,t}$	列车在区段 $j$ 的轨道 $t$ 上同向运行时的最小间隔时间
$t_b$	第一事件的开始时间
$\pi_{begin,k}$	事件 $k$ 的计划开始时间
$\pi_{end,k}$	事件 $k$ 的计划结束时间
$o_k$	事件 $k$ 的列车运行方向
$M$	足够大的常数, 本文设定为 86 400
$\theta_{k,t}$	$\theta_{k,t} = \begin{cases} 1 & \text{事件 } k \text{ 占用轨道 } t \\ 0 & \text{事件 } k \text{ 不占用轨道 } t \end{cases} k \in K_{S,j}, t \in P_j, j \in S_T$
$b_{k,j}$	$b_{k,j} = \begin{cases} 1 & \text{事件 } k \text{ 在区段 } j \text{ 的方向为进站} \\ 0 & \text{事件 } k \text{ 在区段 } j \text{ 的方向为出站} \end{cases} k \in K_{S,j}, j \in S$
$N_{fix}$	固定折返轨道编号

表 3 决策变量定义

Tab.3 Decision variables

决策变量	定义
$x_{begin,k}$	事件 $k$ 的开始时刻
$x_{end,k}$	事件 $k$ 的结束时刻
$q_{k,t}$	$q_{k,t} = \begin{cases} 1 & \text{事件 } k \text{ 占用轨道 } t \\ 0 & \text{事件 } k \text{ 不占用轨道 } t \end{cases} k \in K_{S,j}, t \in P_j, j \in S$
$r_{k\hat{k}}$	$r_{k\hat{k}} = \begin{cases} 1 & \text{事件 } k \text{ 发生在事件 } \hat{k} \text{ 之前} \\ 0 & \text{事件 } k \text{ 发生在事件 } \hat{k} \text{ 之后} \end{cases} k, \hat{k} \in K_{S,j}, j \in S, k < \hat{k}$

时刻的时间间隔表示, 即

$$\text{Min}(x_{end,l_e} - x_{begin,f_e}) \quad (1)$$

2.2.3 约束条件

约束一: 时间约束

(1) 第一事件的开始事件与计算的开始时间相一致, 有

$$x_{begin,f_e} = t_b \quad (2)$$

(2) 后一事件的开始时刻与前一事件的结束时刻必须保持一致, 有

$$x_{begin,k+1} = x_{end,k}, k \notin K_{out,ij}, i \in U, j \in S \quad (3)$$

(3) 车底按时间顺序进入车站进行折返作业, 有

$$x_{begin,f_{i+1}} \geq x_{begin,f_i}, i \in U, i < n_{TU} \quad (4)$$

(4) 为保证先进先出, 后一事件的结束时间必须大于前一事件的结束时间, 有

$$x_{end,l_{i+1}} \geq x_{end,l_i}, i \in U, i < n_{TU} \quad (5)$$

(5) 在列车可以停留的区段上, 列车的占用时间不小于该区段的最小占用时间, 有

$$x_{end,k} \geq x_{begin,k} + b_{k,j}d_{in,j,t} + (1 - b_{k,j})d_{out,j,t}, k \in K, j \in S_W, t \in P_j \quad (6)$$

(6) 在不许等待或停留的区段内, 事件的占用时

间即为最小占用时间,有

$$x_{\text{end},k} = x_{\text{begin},k} + b_{k,j}d_{\text{in},j,t} + (1 - b_{k,j})d_{\text{out},j,t},$$

$$k \in K, j \notin S_W, t \in P_j \quad (7)$$

约束二:轨道占用约束

(1)保证列车在每一区段必须并且只能占用一条轨道,有

$$\sum_{t \in P_j} q_{k,t} = 1, \quad k \in K_{S,j}, j \in S \quad (8)$$

(2)进站列车必须从区段 1 的轨道 A 进入,有

$$q_{k,1} = 1, \quad k \in K_{\text{in},i,j}, i \in U, j \in S_T \quad (9)$$

(3)出站列车必须从区段 1 轨道 B 离开,有

$$q_{k,2} = 1, \quad k \in K_{\text{out},i,j}, i \in U, j \in S_T \quad (10)$$

(4)同一车底接续的列车占用的折返线必须保持一致,有

$$q_{k,t} = q_{k-1,t}$$

$$k \in (K_{\text{in},i,j} \cup K_{\text{out},i,j}), t \in P_j, i \in U, j \in S_P \quad (11)$$

(5)如果列车选择轨道 D 进站,随后必须选择 H,如果选择轨道 C 进站,随后必须选择 G,即

$$q_{k,t} = q_{k+1,t}$$

$$k \in K_{\text{in},i,j}, i \in U, j \in S_C, k < m_{TU} \quad (12)$$

(6)如图 4 所示,对于折返列车,若选择股道 A,那么随后必须选择股道 C 或者 D,若选择股道 C,则随后必须选择股道 F,若选择股道 D,则随后必须选择股道 G,若选择股道 H 或 I 为折返股道,那么随后必须选择轨道 F 进入道岔区间,若选择股道 J 或 K 为折返股道,那么随后必须选择轨道 G 进入道岔区间;对于选择 F 股道出站的列车,随后必须选择轨道 D,对于选择 G 股道出站的列车,随后必须选择轨道 E;对于选择轨道 D 或 E 的列车,随后必须选择轨道 B 出站,如

$$q_{k,g} = q_{k-1,1}$$

$$k \in K_{\text{in},i,j}, i \in U, j \in S_C, k < m_{TU} \quad (13)$$

$$g = 1, 2$$

$$q_{k,1} = q_{k-1,1}$$

$$k \in K_{\text{in},i,j}, i \in U, j \in S_D, k < m_{TU} \quad (14)$$

$$q_{k,2} = q_{k-1,2}$$

$$k \in K_{\text{in},i,j}, i \in U, j \in S_D, k < m_{TU} \quad (15)$$

$$q_{k,x} = q_{k+1,1}$$

$$k \in K_{\text{out},i,j}, i \in U, j \in S_P, k < m_{TU} \quad (16)$$

$$x = 1, 2$$

$$q_{k,y} = q_{k+1,2}$$

$$k \in K_{\text{out},i,j}, i \in U, j \in S_P, k < m_{TU} \quad (17)$$

$$x = 3, 4$$

$$q_{k,z} = q_{k+1,z+1}$$

$$k \in K_{\text{out},i,j}, i \in U, j \in S_D, k < m_{TU} \quad (18)$$

$$z = 1, 2$$

$$q_{k,m} = q_{k+1,2}$$

$$k \in K_{\text{out},i,j}, i \in U, j \in S_C, k < m_{TU} \quad (19)$$

$$m = 2, 3$$

(7)如果两列车同时占用某一轨道,则需要判断是同向占用还是对向占用,然后选择对应的安全间隔时间来疏解,以保证安全,即

$$x_{\text{begin},\hat{k}} - x_{\text{end},k} \geq h_{F,j,t}r_{\hat{k}} - M(1 - r_{\hat{k}})$$

$$k, \hat{k} \in K_{S,j}, j \in S, k < \hat{k} - 1$$

$$o_k = o_k, q_{k,t} + q_{\hat{k},t} = 2, t \in P_j \quad (20)$$

$$x_{\text{begin},\hat{k}} - x_{\text{end},k} \geq h_{M,j,t}r_{\hat{k}} - M(1 - r_{\hat{k}})$$

$$k, \hat{k} \in K_{S,j}, j \in S, k < \hat{k} - 1$$

$$o_k \neq o_k, q_{k,t} + q_{\hat{k},t} = 2, t \in P_j \quad (21)$$

$$x_{\text{begin},k} - x_{\text{end},\hat{k}} \geq h_{M,j,t}(1 - r_{\hat{k}}) - Mr_{\hat{k}}$$

$$k, \hat{k} \in K_{S,j}, j \in S, k < \hat{k} - 1$$

$$o_k \neq o_k, q_{k,t} + q_{\hat{k},t} = 2, t \in P_j \quad (22)$$

$$x_{\text{begin},k} - x_{\text{end},\hat{k}} \geq h_{F,j,t}(1 - r_{\hat{k}}) - Mr_{\hat{k}}$$

$$k, \hat{k} \in K_{S,j}, j \in S, k < \hat{k} - 1$$

$$o_k = o_k, q_{k,t} + q_{\hat{k},t} = 2, t \in P_j \quad (23)$$

约束三:可选约束

(1)4 列车为一组循环折返

为保证列车循环时间上遵循的规律性,即第 1 列车折返过程中的每一事件的开始或结束时间与第 5 列车折返过程中的每一事件的开始或结束时间的间隔相等,

$$x_{\text{begin},k+5n} - x_{\text{begin},k+n} = x_{\text{begin},k+4n} - x_{\text{begin},k}$$

$$k \in K, k \leq n(n_{TU} - 5) \quad (24)$$

$$x_{\text{end},k+5n} - x_{\text{end},k+n} = x_{\text{end},k+4n} - x_{\text{end},k}$$

$$k \in K, k \leq n(n_{TU} - 5) \quad (25)$$

为规定列车循环的运行流程的规律性,即保证第 1 列车折返过程中每一事件选择的走行轨道与第 5 列车折返过程中每一事件选择的走行轨道保持一致,则

$$q_{k+4n,t} = q_{k,t}$$

$$k \in K, k \leq n(n_{TU} - 4),$$

$$t \in P_j, j \in S \quad (26)$$

为保证每组循环经历时间的均衡性,即保证第 1 列车折返过程中每一事件发生的时间长短与第 5 列车折返过程中每一事件发生的时间长短相等,则

$$x_{\text{end},k+4n} - x_{\text{begin},k+4n} = x_{\text{end},k} - x_{\text{begin},k}$$

$$k \in K, k \leq n(n_{TU} - 4) \quad (27)$$

(2) 均衡性约束

为保证到发时刻的均衡性, 即进站列车的到达时间间隔相等、出站列车的出发时间间隔相等, 便应有以下约束, 则

$$x_{\text{begin}, f_{i+2}} - x_{\text{begin}, f_{i+1}} = x_{\text{begin}, f_{i+1}} - x_{\text{begin}, f_i} \quad i \in U, i < n_{\text{TU}} - 1 \quad (28)$$

$$x_{\text{end}, f_{i+2}} - x_{\text{end}, f_{i+1}} = x_{\text{end}, f_{i+1}} - x_{\text{end}, f_i} \quad i \in U, i < n_{\text{TU}} - 1 \quad (29)$$

2.2.4 折返方案

(1) 固定站台轨道进行折返

$$q_{k,t} = 1 \quad t \in N_{\text{fix}}, k \in K_{S,j}, j \in S_P \quad (30)$$

(2) 固定 2 股道进行双线折返

若选用 H+I 股道进行折返, 如

$$q_{k,1} + q_{k,2} = 1 \quad k \in K_{S,j}, j \in S_P \quad (31)$$

若选用 I+J 股道进行折返, 如

$$q_{k,2} + q_{k,3} = 1 \quad k \in K_{S,j}, j \in S_P \quad (32)$$

若选用 J+K 股道进行折返, 如

$$q_{k,3} + q_{k,4} = 1 \quad k \in K_{S,j}, j \in S_P \quad (33)$$

2.3 模型求解

由于该模型为整数规划模型, 可以通过一些成熟的整数规划模型的求解工具进行求解. ILOG CPLEX 可以提供灵活、高性能的优化器, 解决混合整数规划问题, 能够处理有数百万个约束和变量的问题, 本文基于 Visual Studio 开发环境, 开发了一个求解工具 CTTC (calculation tool for turnback capacity), 该工具通过组件库调用 ILOG CPLEX 交互式优化器来实现.

3 案例分析

本文选用上海轨道交通 16 号线滴水湖站作为研究案例. 上海轨道交通 16 号线, 北起龙阳路站, 南至滴水湖站, 全长 58.96 km, 共设车站 13 座. 滴水湖站为 16 号线的一个终点折返站, 为四线站前折返站型. 该站配线图如图 7 示, 列车占用各区段的以及同时占用的间隔时间定义如表 2. 其他参数:  $n_{\text{TU}}=8, n=6, f_e=1, l_e=48, t_b=0$ .

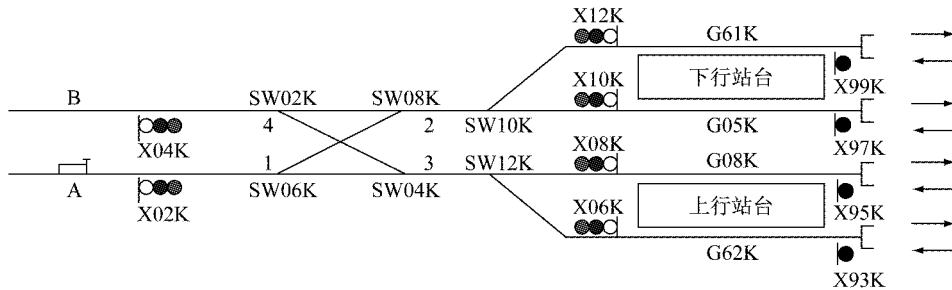


图 7 上海轨道交通 16 号线滴水湖站车站配线图

Fig. 7 Rack map of Dishuihu Station of Line 16 in Shanghai

表 4 时间参数(单位:s)

Tab.4 Time parameters(Unit: s)

轨道编号	进站占用时间 $d_{\text{in},j,t}$	出站占用时间 $d_{\text{out},j,t}$	对向占用间隔时间 $h_{M,j,t}$	同向占用间隔时间 $h_{F,j,t}$
A	3	—	—	30
B	—	3	—	30
C	10	—	—	30
D	12	12	60	30
E	—	10	—	30
F	3	3	60	30
G	3	3	60	30

3.1 方案设计

固定折返线模式下, 列车折返过程单一, 折返能力很容易计算出来. 本次研究重点分析到发均衡及不均衡条件下的多条折返线混合使用条件下的最大折返能力, 共设计了 4 个方案, 见表 5.

表 5 折返方案设计

Tab.5 Calculation scheme

方案	折返股道	可选折返股道数	间隔均衡性	可选约束	停站时间/s
1	I+J	2	均衡	式(28)、(29)、(32)	10, 20,
2	I+J	2	不均衡	式(32)	30, ……,
3	H+I+J+K	4	均衡	式(24)~(29)	600
4	H+I+J+K	4	不均衡	式(24)~(27)	

3.2 结果分析

根据以上方案, 可得出如图 8 所示的不同混合折返模式下(对应方案 1、2、3、4)的能力结果.

3.2.1 不同折返模式下的能力分析

从图 8 中可看出, 在相同停站时间条件下, 不同折返模式下的折返间隔时间有较大差异:

(1) 到发均衡性对折返能力的影响较大. 在双线折返模式下, 当停站时间小于 140 s 时, 均衡条件下

的能力小于不均衡条件下的能力,而大于 140s 时,两种条件下的能力相同. 在四线折返模式下,有相同的规律,但临界值为 370 s.

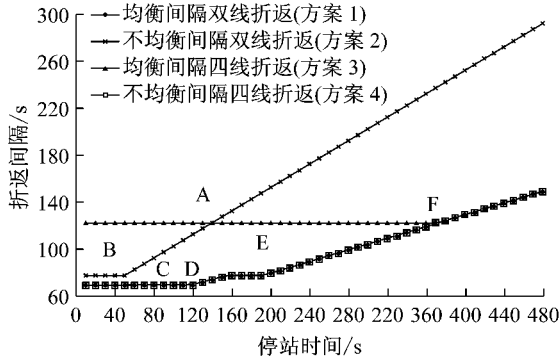


图 8 不同折返模式与不同停站时间条件下的折返间隔统计

Fig. 8 Statistics of turn-back interval under different turn-back modes and different stopping time

(2) 四线折返模式下的能力不会小于双线交替折返模式下的能力,均衡条件下,当停站时间小于 140 s 时,能力相同,而大于 140 s 时,四线折返模式的能力要大于双线折返模式的能力. 不均衡条件下,四线折返模式下的能力会一直大于双线折返模式下的能力.

### 3.2.2 不同停站时间下的能力分析

从图 8 中可看出,停站时间是决定折返能力的关键因素之一,停站时间越短,折返能力越大. 但在停站时间不超过某一数值时(如方案 1 对应图 8 中的 A 转折点,停站时间为 140 s;方案 2 对应图 8 中的 B 转折点,停站时间为 51 s),不论停站时间如何变化,最大折返能力始终保持一致(方案 1 为 122 s,方案 2 为 78 s),形成该条件的主要原因是由于先到达折返股道的列车必须要等后续进站列车接到另一折返线后才能出发,因此会产生额外的出发等候时间,如图 9 所示.

### 3.2.3 不同均衡条件下的能力分析

列车到发的均衡性对能力的影响较大,在停站时间小于 140 s 条件下,列车到发均衡条件下的能力都会小于不均衡条件下的能力. 但在超过 140 s 时,两个方案的能力一致,即都在满足最大能力的同时,也满足了均衡性的要求.

因此,在实际的运营过程中,双折返线混合使用条件下,在较短的停站时间条件下,可以通过不均衡接发列车来提高折返能力.

而对于方案 3、4,在不均衡间隔条下,在 C、D 及 E 点处,由于存在轨道 F 与 G 处的对向冲突,导致折

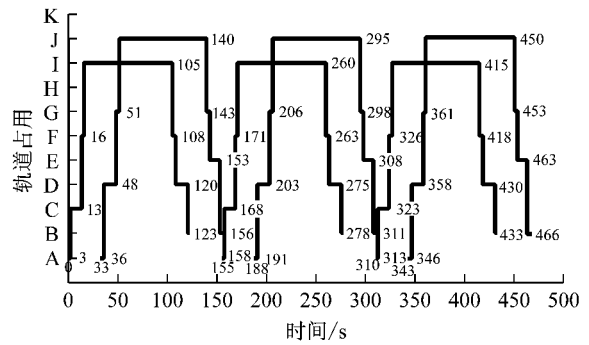


图 9 不均衡间隔条件下的折返过程占用图(对应图 8 的 B 点)(单位:s)

Fig. 9 Track occupation under the disproportion of arrival or departure interval (corresponding to Fig. 8-B) (Unit: s)

返时间增加,从而增加折返间隔时间. 在 C 点处,其限制因素是在进站列车和出站列车在轨道 F 和 G 的对向冲突中,使得在停站时间小于 64 s ( $153 - 51 - 19 - 19 = 64$  s) 时,存在最小折返时间. 因此,当停站时间小于 64 s 时,折返间隔保持不变,且折返模式即轨道选择方案相同. 当停站时间大于 64 s 时,其间隔时间则会增加. 在 D 点处,其限制因素是在进站列车和出站列车在轨道 F 和 G 的对向冲突中,使得在停站时间小于 64s ( $191 - 18 - 25 - 25 = 123$  s) 时,存在最小折返时间. 因此,当停站时间小于 123 s 时,折返间隔保持不变,且折返模式即轨道选择方案等效或相同. 当停站时间大于 123 s 时,其间隔时间则会增加. 在 E 点处,其限制因素是在进站列车和出站列车在轨道 F 和 G 的对向冲突中,使得在停站时间小于 194 s ( $450 - 206 - 25 - 25 = 194$  s) 时,存在最小折返时间. 因此,当停站时间小于 194 s 时,折返间隔保持不变,且折返模式即轨道选择方案等效或相同. 当停站时间大于 194 s 时,其间隔时间则会增加. 在均衡间隔条件下,在 F 点处(如图 10),其限制因素为保证折返间隔时间的均衡,使得在轨道 F 处存在对向间隔,影响折返的均衡性,因此在停站时间小于 372 s ( $682 - 260 - 25 - 25 = 372$  s) 时,存在最小折返时间. 因此,当停站时间小于 372 s 时,折返间隔保持不变,且折返模式即轨道选择方案等效或相同. 当停站时间大于 372 s 时,其间隔时间则会均衡增加.

### 3.2.4 不同折返模式的适应性分析

由图 8 和上述分析,从线路的实际运营需求出发,可以得出:

- (1) 在折返能力不紧张时,尽量采用单轨道折返或双线交替折返的模式;
- (2) 在能力较为紧张的情况下,从车站组织作业

过程的简化和车站客运组织的便利性出发,不均衡间隔条件下的双线折返模式最为适用;

(3)在能力利用最为紧张时,且停站时间较长时,4 线混合折返(尤其是不均衡)的折返模式更为适用。

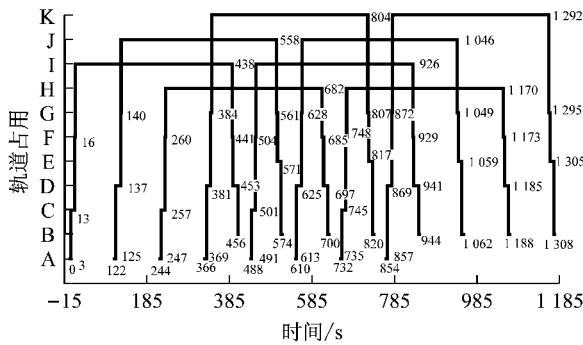


图 10 均衡间隔、先到先发条件下的折返过程占用图(对应图 8-F 点)(单位:s)

Fig. 10 Track occupation under the same arrival or departure interval and the rule of first in first out (Fig. 8-F) (Unit: s)

## 4 结语

折返是限制城市轨道交通线路能力的关键因素之一,为了提高线路的折返能力、增加运营调整的灵活性,越来越多的城市设计了多线的站前折返站。本文基于 N-Track 模型,建立了不同折返模式的折返能力和停站时间以及均衡约束条件下的折返能力计算模型,并最终以上海滴水湖站为例进行了精细分析,成果对于轨道交通的车站设计、运营过程的方案分析与模式选择等都有重要参考意义。但本文仍然有待进一步深化,如在在更多折返线(如大于 4 线)车站的适用性、考虑延误影响的能力分析等。

### 参考文献:

[ 1 ] 刘循. 城市轨道交通折返能力的匹配性设计研究[J]. 现代城市轨道交通, 2012(5):64.  
LIU Xun. Study on design of matching turn-back ability in urban rail transit[J]. Modern Urban Transit, 2012(5):64.

[ 2 ] JIANG Z, TAN Y, WANG F, *et al.* Turnback capacity assessment and delay management at a rail transit terminal with two-tail tracks [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015(2015):1.

[ 3 ] KFH Group. Transit capacity and quality of service manual;

TCRP Report 165 [R]. Washington D C: Transportation Research Board, 2013.

[ 4 ] 王志海. 轨道交通终点站折返能力及改进研究[J]. 城市轨道交通研究, 2012,15(4):86.  
WANG Zhihai. Analysis and improvement of the turn-back capacity at rail transit terminal[J]. Urban Mass Transit, 2012,15(4):86.

[ 5 ] 徐瑞华, 石俊刚. 基于元胞自动机的列车站前折返仿真模型[J]. 系统仿真技术, 2011,7(4): 273.  
XU Ruihua, SHI Jungang. Cellular automaton model for simulating station-front turning-back[J]. System Simulation Technology, 2011,7(4): 273.

[ 6 ] Gill D C. Assessment of mass transit turn-back capacity using dynamic simulation models[C]// International Conference on Computers in Railways. Boloano: Wessex Institute of Technology Press, 2000;1077-1086.

[ 7 ] 张增勇, 毛保华, 蒋玉琨, 等. 基于牵引计算的城市轨道交通站后折返站能力计算方法[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(2):450.  
ZHANG Zengyong, MAO Baohua, JIANG Yukun, *et al.* Calculation method for station-end turn-back capacity of urban rail transit based on train traction[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2013,33(2):450.

[ 8 ] 马琳, 陈德旺. 基于单车仿真和作图解析的城轨折返能力分析[J]. 系统仿真技术, 2011, 7(4):288.  
MA Lin, CHENG Dewang. A method on turn-back capability analysis of urban rail transit using computer simulation and mapping analysis[J]. System Simulation Technology, 2011, 7(4):288.

[ 9 ] TÖRNQUIST J, PERSSON J A. N-tracked railway traffic re-scheduling during disturbances[J]. Transportation Research Part B—Methodological, 2007,41(3):342.

[ 10 ] 王俊锋, 孙旺, 邵洪民. 城市轨道交通车站站前折返间隔分析[J]. 城市轨道交通研究, 2013,16(4):69.  
WANG Junfeng, SUN Wang, GAO Hongmin. Analysis of pre-station turn-back headway in urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2013,16(4):69.

[ 11 ] 马能艺. 一种常用折返站型的折返能力改进方案[J]. 城市轨道交通研究, 2013,16(2):99.  
MA Nengyi. Improvement scheme of the turn-back capacity at conventional turn-back station[J]. Urban Mass Transit, 2013, 16(2):99.

[ 12 ] 苗沁, 周天星. 城市轨道交通折返站折返能力分析[J]. 城市轨道交通研究, 2010,13(11):57.  
MIAO Qin, ZHOU Tianxing. Analysis of turning-back capacity at urban rail transit station[J]. Urban Mass Transit, 2010,13(11):57.

[ 13 ] 徐小亮, 柴慧君, 薛强. 地铁列车站前折返效率影响因素分析[J]. 城市轨道交通研究, 2014,17(10):119.  
XU Xiaoliang, CHAI Huijun, XUE Qiang. Analysis of factors influencing the front turnback efficiency of metro train[J]. Urban Mass Transit, 2014,17(10):119.