

# 多交路共线运行的城市轨道交通车辆运用优化

江志彬<sup>1</sup>, 徐瑞华<sup>1</sup>, 吴强<sup>2</sup>, 周明<sup>2</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 上海轨道交通运营管理中心, 上海 200070)

**摘要:** 基于共线交路的四种基本形式, 建立了车底独立与套跑运用条件下的多目标非线性混合整数规划优化模型, 开发了一个车底运用优化工具, 并通过实例验证了该模型的实用性与有效性. 结果表明: 车底运用数量与共线段行车间隔、不同交路列车的开行比例、共线段及非共线段运行时分、折返站的折返时间标准及车底的运用方式(独立或套跑运用)等因素关系密切. 最后给出了该模型在城市轨道交通列车运行图编制系统中的实际应用效果.

**关键词:** 城市轨道交通; 列车运行图; 共线交路; 车底独立运用; 车底套跑运用; 运行图编制系统

**中图分类号:** U231<sup>+</sup>.92

**文献标志码:** A

## Optimal Model for Using of Transit Unit Based on Shared-path Rail Transit Route

JIANG Zhibin<sup>1</sup>, XU Ruihua<sup>1</sup>, WU Qiang<sup>2</sup>, ZHOU Ming<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Metro Operation Management Center, Shanghai 200070, China)

**Abstract:** Based on four forms of shared-path route, a multi-objective non-linear mixed integer programming (MIP) optimization model of calculating the number of transit unit (TU) with separate or shared using mode is presented. A calculation software tool based on this model is developed and a case is proposed to testify the availability and validity of the model. The results show that the number of TU affected by five key factors such as headway of shared-path sections, number of trains in different routes, running time of routes, layover time in terminals and the using mode (separate or shared) of TU. The practical application of the model to urban rail transit train plan maker (TPM) and its prospects are introduced finally.

**Key words:** urban rail transit; rail transit timetable; shared-path route; separate using of transit unit; shared using of transit unit; train plan maker (TPM) system

多种交路共线运行是指一条线路(包括非连通型与连通型线路)上开行两种或两种以上交路形式的列车(为叙述方便,下文简称为共线交路),共线交路至少存在两种交路占用相同区段(称共线段,其他区段称非共线段)<sup>[1]</sup>.随着我国城市轨道交通网络里程的不断扩展和客流的不断增加,越来越多的城市轨道交通线路开行了共线交路的行车组织模式.共线交路形式不仅会由于线路的连通性结构特征而必然产生,而且也会由于客流的空间分布差异特征而形成<sup>[1]</sup>.这样的复杂交路形式增加了城市轨道交通列车运行图编制的难度,因为列车运行图的编制是一项需要考虑路网结构、客流特征、乘客服务、车辆运用、运营调整等多因素优化的复杂工作<sup>[1-2]</sup>.城市轨道交通线路上开行的列车是由一定数量的车辆连挂成列、带动力并且有唯一识别号的车组,本文将这样的车辆组成简称为车底.受城市轨道交通折返站的布局特征、折返模式、信号制式等条件的影响,车底运用是列车运行图编制过程中需要重点考虑的关键因素,车底数量的确定是运行图编制的重要基础之一.在单一交路列车运行图的编制过程中,车底运用需要考虑行车间隔、车底数量、周转时间之间的相互影响和制约,文献[2]提出了单一交路条件下的车底数量的计算方法,并给出了车底数量与行车间隔、周转时间的关系.

对于共线交路,目前较多的研究成果体现在交路设计<sup>[3-4]</sup>、能力分析<sup>[5]</sup>、运行调整过程中的小交路折返<sup>[6]</sup>等方面,但还没有针对共线交路车底运用优化的研究成果.在共线交路的运行条件下,车底运用与共线段行车间隔、不同交路列车的开行比例、共线段及非共线段运行时分、折返站的折返时间标准以及车底的运用方式(独立或套跑运用)等因素关系密切.在满足客流需求的条件下,如何快速有效地得到共线交路开行方式下的最少车底数量和最佳车底周

收稿日期: 2013-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(51008229, 71071112); 中央高校基本科研业务费专项资金(20123228)

第一作者: 江志彬(1980—),男,副教授,工学博士,主要研究方向为轨道交通组织优化和运输系统仿真. E-mail: jzb@tongji.edu.cn

通讯作者: 徐瑞华(1963—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为运输组织现代化. E-mail: rhxu@tongji.edu.cn

转方案是编图人员面临的需要迫切解决的现实问题,而目前编图人员普遍采用的方法是公式估算或模拟编制运行图<sup>[1]</sup>.前一种方法无法准确得到需要的车底数量,而后一种方法是一种试凑法,虽然能得到准确的车底数量,但是不一定能保证车底的运用数量最少和运用方式最优.本文将首先分析影响共线交路车底数量计算的关键因素,基于四种常见的共线交路形式,建立车底独立及套跑运用条件下的车底运用多目标非线性混合整数规划优化模型,最后以实例验证该模型的有效性,并给出该模型的应用现状和应用前景.

## 1 共线交路车底运用的关键因素分析

共线交路的产生有两种原因,一种是由于连通型的线路结构(如 Y 型线)产生的,另一种是由于客流特征等原因产生的(如不同区段的断面客流差异大,开行大小交路有利于节省运营成本).四种常见的共线交路形式如图 1 所示,图中 A, B, C, D, E, F 为折返站或接轨站.

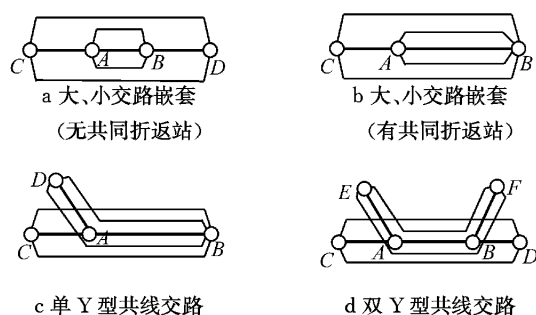


图 1 共线交路的四种常见形式

Fig.1 Four normal forms of shared-path route

共线交路运用条件下,各交路列车在共线段存在着相互制约与影响,因此各交路的周转时间存在一定的约束关系,这种约束关系与车底的运用方式、各交路的运行时间、列车在折返站的最小折返时间、各交路列车的开行比例、共线段区段的行车间隔等因素有关.

### (1) 车底运用方式

如果各交路之间没有共同折返站(见图 1a, d),则各交路的车底周转过程相互独立,称之为车底独立运用.但各交路若存在共同的折返站(见图 1b, c),则车底周转有两种方式:套跑运用和独立运用<sup>[1]</sup>.满足车底套跑运用的基本前提条件之一是两交路的列车具备共享的相关技术条件(如线路、供电、信号等),另外一个关键前提是两交路采用相同折返站折返.

### (2) 不同交路的运行时分

运行时分(包括在中间站的停站时分)决定了不同交路的周转时间,同时不同交路运行时分差决定了车底运用过程中各交路列车从折返站折返回来时再次进入共线段的相对位置与时刻,也决定了不同交路在各折返站的实际折返时间.

### (3) 不同交路的开行比例

不同交路在共线段的开行比例会影响各交路的周转时间,也会影响车底的运用数量.为了使不同交路列车的行车间隔尽量均衡且平均间隔时间保证一定的服务水平,因此常见的开行比例有 1:1, 2:1 和 1:2 三种情况,并且不同交路列车之间在共线段均衡交错开行,如图 2 所示.

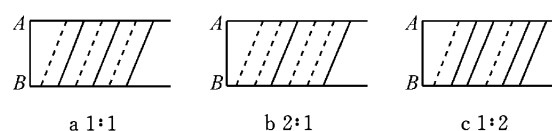


图 2 共线段不同交路列车的开行比例及开行形式

Fig.2 Proportion of different route trains and running schemes in shared section

### (4) 共线段区段的行车间隔

共线段的行车间隔决定了各交路的平均间隔,也会影响车底的周转时间.在共线交路运用条件下,共线段的列车运行应尽量保持均衡.

车底运用方式不同,共线交路的车底数量计算原理也不同,下面分别对车底独立运用和套跑运用两种方式进行讨论.

## 2 车底独立运用条件下的优化模型

图 1 中四种交路形式中,车底均可以采用独立运用的方式.以图 1d 的形式为例,该形式为双 Y 型共线交路,交路 CD 在 C 站与 D 站之间循环开行,交路 EF 在 E 站与 F 站之间循环开行,两交路在 AB 区段共线运行,如图 3 所示.

在交路 1(图 1d 交路 CD)与交路 2(图 1d 交路 EF)的开行比例为 1:1 的条件下,总的车底运用数量

$$n_{\text{tu}} = \frac{T_{R1}}{I_R} + \frac{T_{R2}}{I_R} = \frac{T_{R1} + T_{R2}}{I_R} \quad (1)$$

式中:  $I_R$  为交路 1 与交路 2 的平均行车间隔,  $T_{R1}$  和  $T_{R2}$  分别为交路 1 与交路 2 的周期时间.如果交路 1 与交路 2 的开行比例为 2:1,则可以将交路 1 的两列车虚拟为一列车,如图 4 所示.设  $I_S$  为共线段行车间隔,此时交路 1 虚拟列车的平均行车间隔  $I_R = 3I_S$ ,交路 2 列车的平均行车间隔也为  $3I_S$ ,因此虚拟

后的计算方法与1:1条件下的计算方法相同.同理,在开行比例为1:2的条件下,可以将两列交路2的列

车虚拟成一列车.通过这种方法也可以类推至 $n:1$ 或 $1:n$ 的条件下.因此,车底数量的计算方法如下:

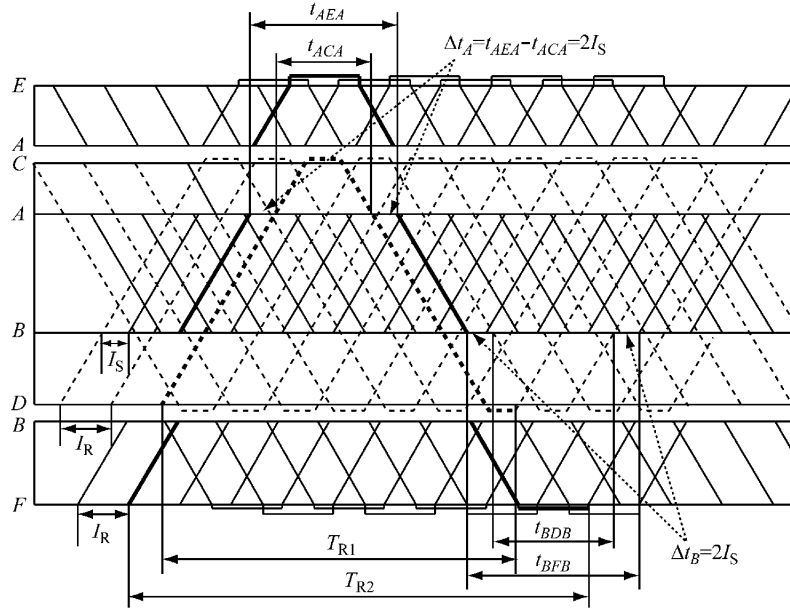


图3 双Y型共线交路且车底独立运用条件下运行图

Fig.3 Time-space diagram of two separate shared-path Y type route

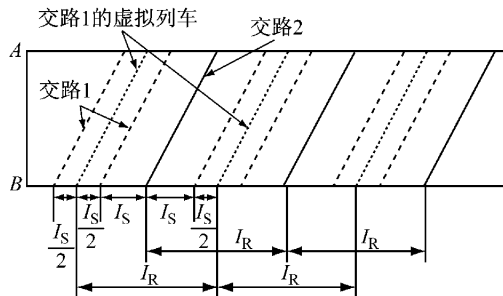


图4 两交路开行比例为2:1条件下列车虚拟方法

Fig.4 Virtual train for proportion of 2:1 in two routes

#### (1) 目标函数

在给定共线段行车间隔以及开行比例条件下,使得总的车底数量达到最小值.

$$M = \min n_{tu} \quad (2)$$

$$I_R = (n_{R1} + n_{R2}) I_S \quad (3)$$

$$n_{tu} = \frac{T_{R1} n_{R1} + T_{R2} n_{R2}}{I_R} \quad (4)$$

式中: $n_{R1}:n_{R2}$ 为交路1与交路2列车的开行比例.

#### (2) 约束条件

**约束1** 交路1的周期为交路1列车虚拟平均行车间隔 $I_R$ 的整数倍.

$$T_{R1} = r_{u,CD} + t_{r,C} + r_{d,CD} + t_{r,D} \quad (5)$$

$$T_{R1} = K_{R1} I_R, K_{R1} \text{ 为非零正整数} \quad (6)$$

**约束2** 交路2的周期为交路2列车虚拟平均行车间隔 $I_R$ 的整数倍.

$$T_{R2} = r_{u,EF} + t_{r,E} + r_{d,EF} + t_{r,F} \quad (7)$$

$$T_{R2} = K_{R2} I_R, K_{R2} \text{ 为非零正整数} \quad (8)$$

**约束3** 在车站A, $t_{AEA}$ 和 $t_{ACA}$ 的时间差需要满足 $I_S$ 的整数倍.在车站B, $t_{BFB}$ 和 $t_{BDB}$ 的时间差需要满足 $I_S$ 的整数倍.

$$\Delta t_A = |t_{AEA} - t_{ACA}| = |(r_{u,EA} + t_{r,E} + r_{d,EA}) - (r_{u,CA} + t_{r,C} + r_{d,CA})| \quad (9)$$

$$\Delta t_A = K_A I_S, K_A \text{ 为正整数} \quad (10)$$

$$\Delta t_B = |t_{BFB} - t_{BDB}| = |(r_{u,BF} + t_{r,F} + r_{d,BF}) - (r_{u,BD} + t_{r,D} + r_{d,BD})| \quad (11)$$

$$\Delta t_B = K_B I_S, K_B \text{ 为正整数} \quad (12)$$

在图3所示的运行图中, $K_A = K_B = 2$ .

**约束4** 列车在各折返站的折返时间需要满足最小值与最大值的要求.

$$t_{\max,i} \geq t_{r,i} \geq t_{\min,i}, i = \{C, D, E, F\} \quad (13)$$

式中: $t_{r,i}$ ,  $t_{\max,i}$ ,  $t_{\min,i}$ 分别为车站 $i$ 的实际、最大和最小折返时间; $r_u$ 和 $r_d$ 分别为区段的上行与下行运行时分(含中间站的停站时分); $t_{AC(E)A}$ 为交路1(2)列车从离开A站时起,至从折返站C(E)折返回来后再次进入共线段时止(含A站的上下行停站时分)的总运行时分; $t_{BD(F)B}$ 为交路1(2)列车从离开B站时起,至从折返站D(F)折返回来后再次进入共线段时止(含B站的上下行停站时分)的总运行时分.

如果折返时间没有最大值约束,则 $t_{\max}$ 的值可以取一个较大的值(如24h),但在固定折返线的站

前折返模式时,  $t_{\max}$  即为列车在车站的最长折返停留时间. 该模型中的所有常量与变量均为整数, 其中  $M, t_{r,i}, K_{R1}, K_{R2}, K_A, K_B$  均为决策变量. 在  $n_u$  达到最小值时,  $\sum t_{r,i}$  的值是固定的, 但各  $t_{r,i}$  的取值组合会有很多. 因此, 在满足最小车底数量的条件下, 如果想使某一个(或几个)车站的折返时间尽量短, 则可以加上一个折返时间优化目标函数, 如下所示:

$$M_1 = \min \sum (t_{r,i} \lambda_i), i = \{C, D, E, F\} \quad (14)$$

式中:  $\lambda_i$  为各折返站实际折返时间对应的权重系数.  $\lambda_i$  越大, 表明要求该站的折返时间越短,  $\lambda_i$  的建议取值范围为 1~100. 如果将车底数量最少和某些站折返时间最短作为一个综合目标, 则该问题就变成了多目标决策问题. 本文采用多目标决策中的线性加权法和法, 此时多目标决策函数为

$$M_2 = \min [n_u \lambda_u + \sum (t_{r,i} \lambda_i)], i = \{C, D, E, F\} \quad (15)$$

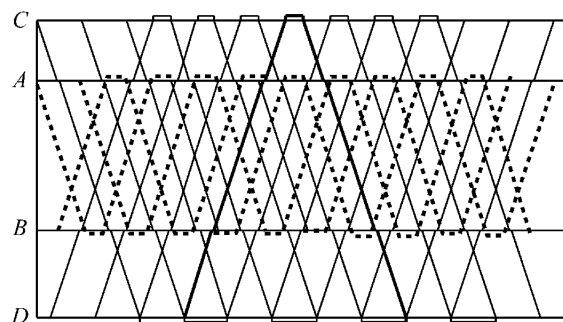
式中:  $\lambda_u$  为车底数量的权重系数. 车底数量(单位为列)与折返时间(单位为 s)为不同量纲, 但车底数量最小是首要决策目标, 因此可以将  $\lambda_u$  的值取足够大, 大至无论各站的折返时间取多长, 都不会影响车底数量达到最小的要求, 即  $\lambda_u$  不小于所有折返站最大折返时间乘以对应的权重系数之和, 即  $\lambda_u \geq 3\,600 \times 24 \times 6 \times 100 = 51\,840\,000$ .

其他三种交路形式为双 Y 型交路形式的特殊形式, 计算方法类似. 图 1a 的形式相当于图 3 中 EA 和 BF 的区间时分分为零(见图 5a), 图 1b 的形式相当于图 3 中 EA, BF, BD 的区间时分分为零(见图 5b), 图 1c 的形式相当于图 3 中 BF, BD 的区间时分分为零.

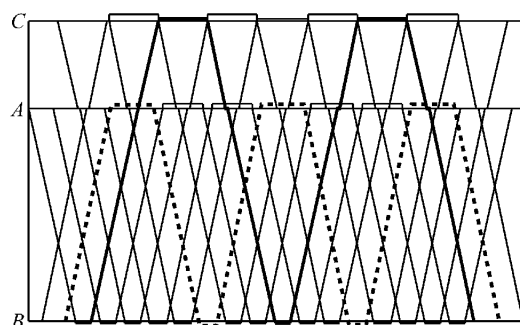
### 3 车底套跑运用条件下的优化模型

图 1b, c 的两交路列车具备车底套跑运用的条件, 计算原理也相同. 以图 1b 为例, 车底套跑运用后, 车底的周转过程不再是某一个交路独立循环运行, 而是在两个交路之间进行循环, 但循环的过程依然呈现周期性特点. 以图 6 为例, 在交路开行比例为 1:1 的条件下, 车底 1 以 B—A—B—C—B 为周期进行循环, 且每隔  $2I_s$  重复一次循环过程, 大周期为  $12I_s$ , 由一个小交路周期和一个大交路周期组成, 由图解法可以得到总的车底数量为 6. 在交路开行比例为 2:1 的条件下(见图 7), 车底 1 以 B—A—B—A—B—C—B 为周期进行循环, 且每隔  $3I_s$  重复一次循环过程, 大周期为  $18I_s$ , 即由两个小交路周期和一个

大交路周期组成, 由图解法可以得到总的车底数量为 6.



a 两交路嵌套且车底独立运用



b 开行比例为 1:1 且车底独立运用

图 5 车底独立运用条件下的运行图

Fig. 5 Time-space diagram of separate using of train units

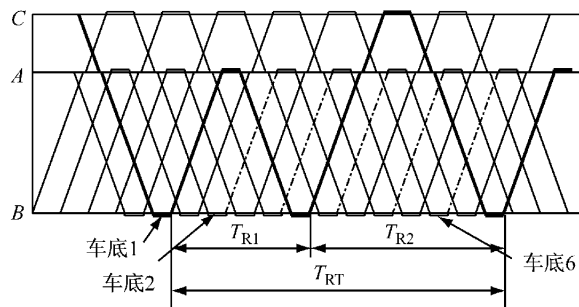


图 6 开行比例为 1:1 且车底套跑条件下的运行图

Fig. 6 Time-space diagram of shared using of transit units and proportion of 1:1 in two routes

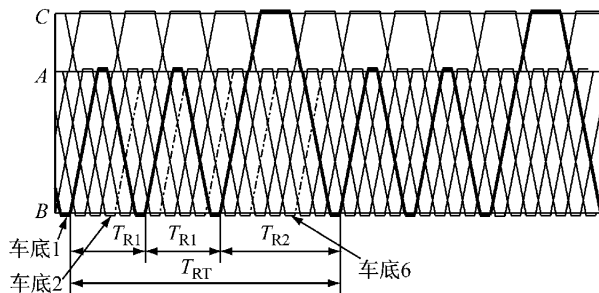


图 7 开行比例为 2:1 且车底套跑条件下的运行图

Fig. 7 Time-space diagram of shared using of transit units and proportion of 2:1 in two routes

因此,车底套跑运用条件下,车底数量  $n'_{tu}$  的计算方法如下:

(1) 目标函数

$$M_3 = \min n'_{tu} \quad (16)$$

$$I_R = (n_{R1} + n_{R2}) I_S \quad (17)$$

$$n'_{tu} = \frac{T_{R1} n_{R1} + T_{R2} n_{R2}}{I_R} \quad (18)$$

(2) 约束条件

**约束 1** 交路 1 的周期为共线段列车行车间隔  $I_S$  的整数倍。

$$T_{R1} = r_{u,AB} + t_{r,A} + r_{d,AB} + t_{r,B} \quad (19)$$

$$T_{R1} = K_{R1} I_S, K_{R1} \text{ 为正整数} \quad (20)$$

**约束 2** 交路 2 的周期为共线段列车行车间隔  $I_S$  的整数倍。

$$T_{R2} = r_{u,AB} + r_{u,CA} + t_{r,C} + r_{d,CA} + r_{d,AB} + t_{r,B} \quad (21)$$

$$T_{R2} = K_{R2} I_S, K_{R2} \text{ 为正整数} \quad (22)$$

**约束 3** 大周期时间 ( $T_{RT}$ ) 为各交路平均行车间隔  $I_R$  的整数倍。

$$T_{RT} = T_{R1} n_{R1} + T_{R2} n_{R2} \quad (23)$$

$$T_{RT} = K' I_R, K' \text{ 为非零正整数} \quad (24)$$

**约束 4** 在车站 A,  $t_{ACA}$  与  $t_{r,A}$  的时间差需要满足  $I_S$  的整数倍。

$$\Delta t_A = r_{u,CA} + t_{r,C} + r_{d,CA} - t_{r,A} \quad (25)$$

$$\Delta t_A = K_A I_S, K_A \text{ 为正整数} \quad (26)$$

**约束 5** 列车在各折返站的折返时间需要满足最小值与最大值的要求。

$$t_{\max,i} \geq t_{r,i} \geq t_{\min,i}, i = \{A, B, C\} \quad (27)$$

同理,如果将车底数量最少和某些站折返时间最短作为一个综合目标,则目标函数为

$$M_4 = \min [n'_{tu} \lambda_{tu} + \sum (t_{r,i} \lambda_i)], i = \{A, B, C\} \quad (28)$$

式(28)中  $\lambda_{tu}$  和  $\lambda_i$  的取值方法以及参考值与式(15)相同。

这里需要说明的是,当  $T_{R1}$  为  $(n_{R1} + n_{R2}) I_S$  的整数倍时,表示交路 1 的列车与交路 2 的列车不会在 B 站形成连接,即相当于交路 1 与交路 2 的车底独立运用,这种条件下的车底数量以及各站的折返时间与车底独立运用时的计算结果完全相同。

## 4 模型求解及案例分析

### 4.1 模型求解

上述模型均为多目标非线性混合整数规划模型,因此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 提供了灵活、高性能的优化器,可解决混合整数规划问题,它能够处理有数百万个约束和变量的问题。本文基于 Visual Studio 2012 开发环境,开发了一个共线交路车底运用优化模型的求解工具 TUCAL,该工具通过组件库调用 ILOG CPLEX 交互式优化器 (ILOG.CPLEX.dll) 来实现。由于该模型的决策变量最多为 12 个,且变量的取值范围有限,因此求解速度非常快 ( $< 2$  s)。

### 4.2 实例参数输入

某城市轨道交通线路共线交路方式如图 1b 所示,三个折返站的最小折返时间为 4 min,最大折返时间为 60 min。由于车底数量最少是首要目标,并同时考虑列车在 B 站和 A 站的折返时间也尽量短,因此目标函数中权重参数设置为:  $\lambda_{tu} = 100\ 000\ 000$ ,  $\lambda_B = 100$ ,  $\lambda_A = 10$ ,  $\lambda_C = 1$ 。为了分析车底独立运用及套跑运用条件下的车底数量与交路开行比例、共线段及非共线运行时间、共线段行车间隔的关系,在本案例中共设置四个计算方案,如表 1 所示。

表 1 车底独立及套跑运用条件下的计算方案

Tab.1 Computation schemes of separate or shared using of train units

| 方案编号 | $r_{u,AB}$ 和 $r_{d,AB}$ / min | $r_{u,CA}$ 和 $r_{d,CA}$ / min | $n_{R1} : n_{R2}$ | $I_S$            |
|------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------|------------------|
| 1    | 11                            | 5                             | 1:1               | 2~15 min 间隔 15 s |
| 2    | 11                            | 5                             | 1:2               | 2~15 min 间隔 15 s |
| 3    | 11                            | 10~60 min 间隔 1 min            | 1:1               | 6 min            |
| 4    | 10~60 min 间隔 1 min            | 5                             | 1:1               | 6 min            |

### 4.3 实例结果分析

#### 4.3.1 不同交路开行比例和共线段行车间隔 $I_S$ 条件下的车底数量分析

表 2 给出了交路开行比例为 1:1,不同车底运用方案和  $I_S$  条件下部分车底数量计算结果(对应表 1 的方案 1)。图 8 给出了交路开行比例为 1:1 和 1:2 时,不

同车底运用方案和  $I_S$  条件下的车底数量计算结果(对应表 1 的方案 2)。从表 2 和图 8 中可以看出:

(1) 相同  $I_S$  条件下,车底套跑运用时的车底数量不会超过独立运用时的车底数量。数值差与交路开行比例有关,开行比例为 1:1 时的最大数值差为 1,1:2 时的最大数值差为 2。图 5b 和 6 分别为开行比

例1:1,  $I_s = 6.0$  min, 车底独立与套跑运用条件下的运行图. 从图中可以看出, 车底独立运用时的车底数量为7, C, A, B站对应的折返时间为12.0, 10.0, 4.0 min(对应表2中的编号17); 而车底套跑运用时的车底数量为6, C, A, B站对应的折返时间为6.0, 4.0, 4.0 min(对应表2中的编号18).

(2) 对于大部分  $I_s$ , 车底独立运用或套跑运用的车底数量一致, 但列车在各车站的折返时间不同. 如  $I_s = 2.0$  min时, 车底独立运用时, 列车在C站与

A站的折返时间分别为4.0, 6.0 min, 而在车底套跑运用时, 列车在C站与A站的折返时间分别为6.0, 4.0 min.

(3) 对于满足  $T_{R1}$  为  $(n_{R1} + n_{R2}) I_s$  的整数倍的  $I_s$ , 车底独立运用与套跑运用时的车底数量和各站折返时间完全一致(如表2中的  $I_s$  为2.5, 3.0, 4.0, 5.0, 5.5 min对应的方案), 这表明在这些行车间隔条件下, 车底无需进行套跑, 同时车底数量也能达到最小值.

表2 开行比例为1:1不同  $I_s$  和车底运用方案条件下的车底数量计算结果  
Tab.2 Computation results of different using modes of train units and  $I_s$

| 编号 | 是否套跑 | $I_s$ /min | $T_{R1}$ /min | $T_{R2}$ /min | $t_{r,C}$ /min | $t_{r,A}$ /min | $t_{r,B}$ /min | $K_{R1}$ | $K_{R2}$ | $\Delta t_A$ /min | $K_A$ | $n_{tu}$ /列 | 结果是否套跑 |
|----|------|------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------|----------|-------------------|-------|-------------|--------|
| 1  | 否    | 2.0        | 32.0          | 40.0          | 4.0            | 6.0            | 4.0            | 8        | 10       | 8                 | 4     | 18          | 否      |
| 2  | 是    | 2.0        | 30.0          | 42.0          | 6.0            | 4.0            | 4.0            | 18       | 18       | 9                 | 6     | 18          | 是      |
| 3  | 否    | 2.5        | 30.0          | 40.0          | 4.0            | 4.0            | 4.0            | 6        | 8        | 10                | 4     | 14          | 否      |
| 4  | 是    | 2.5        | 30.0          | 40.0          | 4.0            | 4.0            | 4.0            | 14       | 14       | 10                | 4     | 14          | 否      |
| 5  | 否    | 3.0        | 30.0          | 42.0          | 6.0            | 4.0            | 4.0            | 5        | 7        | 12                | 4     | 12          | 否      |
| 6  | 是    | 3.0        | 30.0          | 42.0          | 6.0            | 4.0            | 4.0            | 12       | 12       | 12                | 4     | 12          | 否      |
| 7  | 否    | 3.5        | 35.0          | 42.0          | 6.0            | 9.0            | 4.0            | 5        | 6        | 7                 | 2     | 11          | 否      |
| 8  | 是    | 3.5        | 31.5          | 45.5          | 9.5            | 5.5            | 4.0            | 11       | 11       | 14                | 4     | 11          | 是      |
| 9  | 否    | 4.0        | 32.0          | 40.0          | 4.0            | 6.0            | 4.0            | 4        | 5        | 8                 | 2     | 9           | 否      |
| 10 | 是    | 4.0        | 32.0          | 40.0          | 4.0            | 6.0            | 4.0            | 9        | 9        | 8                 | 2     | 9           | 否      |
| 11 | 否    | 4.5        | 36.0          | 45.0          | 9.0            | 10.0           | 4.0            | 4        | 5        | 9                 | 2     | 9           | 否      |
| 12 | 是    | 4.5        | 31.5          | 40.5          | 4.5            | 5.5            | 4.0            | 8        | 8        | 9                 | 2     | 8           | 是      |
| 13 | 否    | 5.0        | 30.0          | 40.0          | 4.0            | 4.0            | 4.0            | 3        | 4        | 10                | 2     | 7           | 否      |
| 14 | 是    | 5.0        | 30.0          | 40.0          | 4.0            | 4.0            | 4.0            | 7        | 7        | 10                | 2     | 7           | 否      |
| 15 | 否    | 5.5        | 33.0          | 44.0          | 8.0            | 7.0            | 4.0            | 3        | 4        | 11                | 2     | 7           | 否      |
| 16 | 是    | 5.5        | 33.0          | 44.0          | 8.0            | 7.0            | 4.0            | 7        | 7        | 11                | 2     | 7           | 否      |
| 17 | 否    | 6.0        | 36.0          | 48.0          | 12.0           | 10.0           | 4.0            | 3        | 4        | 12                | 2     | 7           | 否      |
| 18 | 是    | 6.0        | 30.0          | 42.0          | 6.0            | 4.0            | 4.0            | 6        | 6        | 12                | 2     | 6           | 是      |

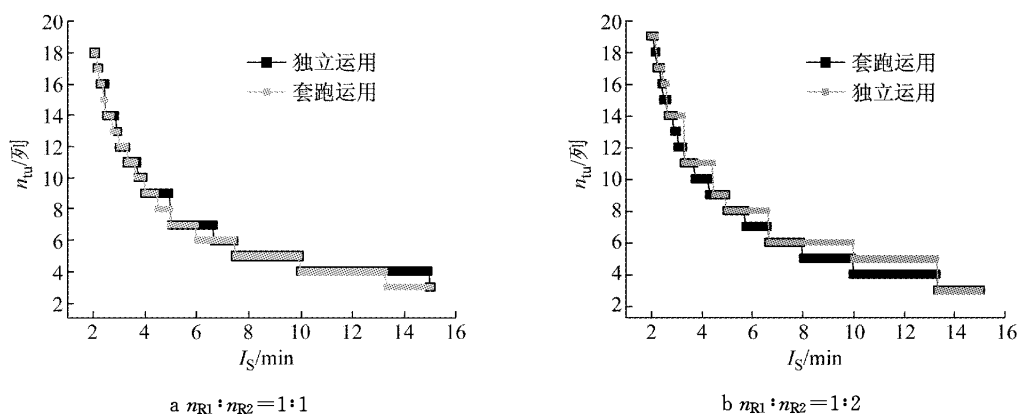


图8 不同交路开行比例以及不同  $I_s$  和车底运用方案条件下的车底数量

Fig.8 Numbers of transit units in different using modes,  $I_s$  and proportions of two routes

#### 4.3.2 不同 $I_s$ 条件下的折返站折返时间分析

不同  $I_s$  条件下, 车底数量达到最小时的折返站折返时间变化规律有所不同. 由于B站的折返时间决策权重给得比较大, 因此无论何种方案条件下, B站的折返时间均取最小值4 min, C站与A站的折返

时间随  $I_s$  的变化而发生变化. 以两交路开行比例1:1为例, 图9给出了不同车底运用方式条件下的A站与C站折返时间随  $I_s$  的变化规律(对应表1的方案1). 从图中可以看出, C站与A站的折返时间随  $I_s$  呈分段变化(为分段函数, 在同一分段内, 呈线性递

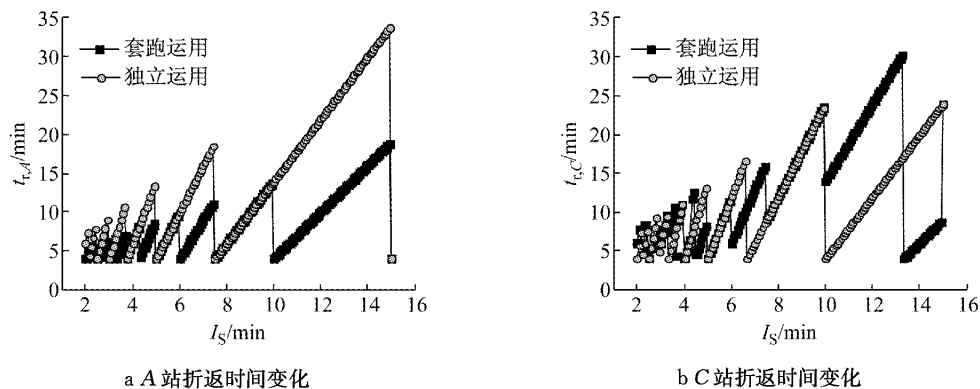


图9 开行比例为1:1条件下车底独立运用及套跑运用条件下的A站和C站折返时间

Fig.9 Turnback time of Station C and Station A in different transit unit using modes and proportion of 1:1 in two routes

增),随着  $I_s$  的增加,分段时间跨度增加,但增长的斜率变小,且C站与A站的时间分段长度与拐点均不相同。

#### 4.3.3 运行时间对车底数量的影响

图10给出了  $I_s$  为6 min,不同车底运用方式条件下,车底数量与非共线段CA以及共线段AB的运行时分的变化规律(对应表1的方案3和4)。从图中可以看出,车底数量与运行时分呈周期阶梯递增,车

底数量变化都以每6分钟( $=I_s$ )周期进行变化。在CA段运行时分增加的条件下,车底独立与套跑运用时,车底增长趋势均为每隔6分钟后增加一列车底,但独立运用时,车底会提前3 min开始增加。在AB段运行时分增加的条件下,车底独立运用时,车底增长趋势为每隔5分钟连续两次增加一列车底,而车底套跑运用时,车底增长趋势为每隔3分钟增加一列车底(相当于3 min的周期变化)。

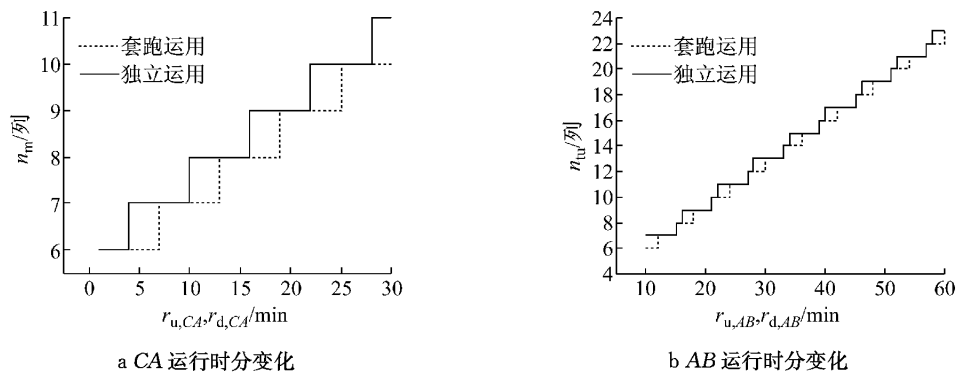


图10 开行比例为1:1且CA和AB的运行时分变化及不同车底运用方式条件下的车底数量变化

Fig.10 Number of transit unit in different transit unit using modes with running time of CA and AB, proportion of 1:1 in two routes

## 5 结语

共线交路的车底数量计算较单一交路来说要复杂得多,与共线段行车间隔、不同交路列车的开行比例、共线段及非共线段运行时分、折返站的折返时间标准以及车底的运用方式(独立或套跑运用)有关。本文系统地对不同共线形式和车底运用方式条件下的共线交路车底数量优化模型进行了分析,文中所考虑的共线交路形式基本涵盖了我国目前大部分城市轨道交通系统的实际运营现状。

本文的模型已经成功通过开发的TUCAL工具来实现,该工具已经整合在城市轨道交通列车运行图计算机编制系统(Rail TPM V5.0)中,并且在上海1,2,6,7,8,9号线大、小交路,10与11号线“Y”型交路的列车运行图编制过程中得到了成功应用,通过该工具可以设计出适应不同车底运用方式以及线路折返条件下的最佳共线交路的开行方式。另外,该工具也可以运用到线路的前期规划设计以及运营评估过程中,协助工程师完成交路方案设计、车底数量估算以及折返站能力的适应性分析等工作。

(下转第1431页)