

文章编号:1001-8360(2013)04-0009-07

城市轨道交通网络周期运行图编制研究

汪 波^{1,2}, 韩宝明¹, 战明辉², 牛 丰³

(1. 北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044;

2. 北京市轨道交通指挥中心, 北京 100101; 3. 铁道部 办公厅, 北京 100844)

摘 要:将铺画城市轨道交通列车运行线的问题看作周期事件安排问题,分析周期约束特性、周期约束图等因素,考虑列车运行与停站时间、列车运行到发安全、列车折返和线间换乘衔接等周期约束,以减少平峰时段轨道交通路网乘客换乘的总等待时间为目标,建立城市轨道交通网络列车运行图编制模型;提出选择合适约束图生成树的方法,结合城市轨道交通运行特征和周期约束特性,对网络模型的基本圈约束进行细化分析,研究简化模型的方法;以北京城市轨道交通局部网络为实例,编制网络列车周期运行图。分析表明,模型及其优化算法可行,对城市轨道交通运行图编制工作有较强的实用性。

关键词:周期势差模型;约束图;轨道交通;网络;列车运行图

中图分类号:U292.41 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1001-8360.2013.04.002

Study on Formulation of Periodic Train Diagram of Urban Rail Transit Network

WANG Bo^{1,2}, HAN Bao-ming¹, ZHAN Ming-hui², NIU Feng³

(1. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Beijing Metro Network Control Center, Beijing 100101, China; 3. General Office of MOR, Beijing 100844, China)

Abstract: Formulation of train diagrams was considered as a periodic event scheduling problem (PESP). Characteristics of periodic constraints, the periodic constraints graph and the periodic tension model were analyzed. Periodic constraints such as the train running time and stopping time, safety of train arriving and leaving, train turning back and transfer between lines were studied. The urban rail transit network train diagram formulation model was set up with shortening of the total transfer waiting time during off-peak periods as the target. The method of choosing the appropriate constraint graph spanning tree was proposed. In combination with the features of operation of urban rail transit and periodic constraints, the basic-circle constraints of the network model were analyzed in detail, and the method of simplifying the model was discussed in order to reduce the scale and difficulty of solving the model. Finally, as an example, the network periodic train diagram of the partial network covering Beijing Metro was worked out. The diagram shows that the model and optimized algorithm are feasible and practical in urban rail transit train diagram formulation.

Key words: periodic tension model; constraints graph; rail transit; network; train diagram

随着计算机技术与列车运行图编制理论的发展,我国在铁路和城市轨道交通(以下简称轨道交通)领域运用计算机辅助编制运行图的理论研究与实践取得很多成果,实现了计算机编制双线列车运行图^[1]、网状线

路列车运行图^[2]、轨道交通单线列车运行图^[3]以及共线交路列车运行图^[4]。以上列车运行图编制的相关研究与运用均基于列车非周期运行的模式,运行图编制过程相对较复杂,网络求解规模有限。

欧美、日本等发达国家的铁路和轨道交通广泛采用列车周期化运行的模式^[5-10],使用周期运行图组织行车。我国北京、上海和广州等大城市已初步形成覆

收稿日期:2012-03-12;修回日期:2012-11-29
基金项目:国家科技支撑计划(2011BAG01B01)
作者简介:汪 波(1978—),男,湖南衡阳人,高级工程师,博士。
E-mail: bowang@bjtu.edu.cn

盖城区的轨道交通网络,由于列车开行种类单一、运行频率高,非常适合采用周期化的运行模式。当轨道交通线连接成网后,周期化运行有利于优化不同线路间换乘和能力的合理配合,将极大地提升轨道交通网络的运输服务水平,更加充分发挥出轨道交通的优势。本文结合列车周期运行图的特点,运用图论及周期势差模型理论,在单线列车运行图编制约束的基础上,考虑缩减乘客在换乘站的换乘等待时间,开展轨道交通网络列车周期运行图的编制理论研究,并应用于北京轨道交通网络列车运行图的编制工作。

1 周期约束与周期势差模型

1.1 周期约束

对列车周期运行图的研究主要有 3 类模型:同步单个旅行模型、二次不完全分配问题模型以及周期事件安排问题(Periodic Event Scheduling Problem,简称 PESP)模型。PESP 模型对问题的适用性以及求解的规模都强于前两类模型^[11]。

对于以周期时间 T 循环发生的两个事件 i, j , 给定时间窗 $[l_{ij}, u_{ij}]$, 它们发生时刻 v_i, v_j 之间的关系可写成

$$l_{ij} \leq v_j - v_i + Tp_{ij} \leq u_{ij} \quad v_i, v_j, T, p_{ij} \in \mathbf{Z} \quad (1)$$

式中: v_i, v_j 为决策变量; T 为事件循环的周期时间; p_{ij} 为整数变量; l_{ij}, u_{ij} 为时间窗的下、上限。简便起见,将式(1)记为

$$v_j - v_i \in [l_{ij}, u_{ij}]_T \quad (2)$$

式(1)和式(2)称为周期时间窗约束,简称周期约束。

Serafini 和 Ukovich^[12] 结合此前人们对周期事件的相关研究,提出“周期事件安排问题”,用以解决将一些事件在 1 个周期时间(Periodic Time)内做出合理安排这一类重要的问题。

在周期运行图中,列车在各站的到发事件是在时间段 T 内周期循环发生的。设乘客 m 在换乘车站 s 的下车、上车时刻分别为 $v_a^{m,s}$ 和 $v_d^{m,s}$, 为了保证必要的换乘走行时间和乘降时间 t_1 , 以及避免候车时间超过上限值 t_2 , $v_a^{m,s}, v_d^{m,s}$ 的周期约束关系可以表示为

$$v_d^{m,s} - v_a^{m,s} \in [t_1, t_1 + t_2]_T \quad (3)$$

这样的周期约束构成研究周期运行图编制的基础。

1.2 周期约束特性

(1) 多重周期约束简化

PESP 模型允许事件之间具有多重周期约束,各约束会出现重叠或离散的情况,如图 1 所示。

设 $l_{ij}^1, l_{ij}^2, u_{ij}^1, u_{ij}^2$ 分别为 2 个周期事件的时间窗下、

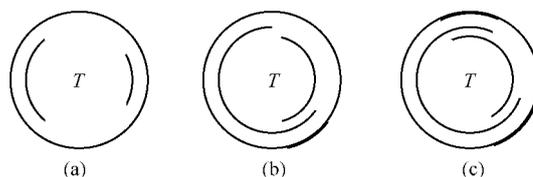


图 1 多重 PESP 周期约束情况

上限,图 1 中的多重周期约束可以表示为式(4)~式(6)。

$$[l_{ij}^1, u_{ij}^1]_T \cap [l_{ij}^2, u_{ij}^2]_T = \emptyset \quad (4)$$

$$[l_{ij}^1, u_{ij}^1]_T \cap [l_{ij}^2, u_{ij}^2]_T \neq \emptyset, [l_{ij}^1, u_{ij}^1]_T \cup [l_{ij}^2, u_{ij}^2]_T < T \quad (5)$$

$$[l_{ij}^1, u_{ij}^1]_T \cap [l_{ij}^2, u_{ij}^2]_T \neq \emptyset, [l_{ij}^1, u_{ij}^1]_T \cup [l_{ij}^2, u_{ij}^2]_T = T \quad (6)$$

出现第 1 种情况时,模型无解,这是判断 PESP 模型有无可行解最简单的方法;后两种情况下,模型的解为多重周期约束的重合部分。

(2) 相邻两个周期约束的合并

设 π_i, π_k, π_j 为决策变量, $l_{a_1}, l_{a_2}, u_{a_1}, u_{a_2}$ 为时间窗的下、上限,当周期约束 $a_1 = \pi_k - \pi_i \in [l_{a_1}, u_{a_1}]_T$ 与周期约束 $a_2 = \pi_j - \pi_k \in [l_{a_2}, u_{a_2}]_T$ 相邻时,会有如图 2 所示的 3 种情况,经过化简,均可合并为 1 个周期约束 a 。

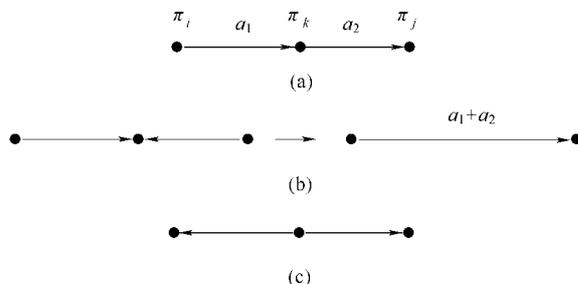


图 2 相邻两个 PESP 约束合并

相邻周期约束 a_1 和 a_2 合并后,可表示为

$$(a) \quad a = a_1 + a_2 = (i, j), a \in [l_{a_1} + l_{a_2}, u_{a_1} + u_{a_2}]_T \quad (7)$$

$$(b) \quad a = a_1 + a_2 = (i, j), a \in [l_{a_1} - u_{a_2}, u_{a_1} - l_{a_2}]_T \quad (8)$$

$$(c) \quad a = a_1 + a_2 = (i, j), a \in [l_{a_2} - u_{a_1}, u_{a_2} - l_{a_1}]_T \quad (9)$$

1.3 周期势差模型

为了方便表示 1.1 节中周期运行图各周期约束之间的关系,可用有向图 $G=(V, A)$ 表示周期约束结构,如图 3(a) 所示。其中 $V=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 表示周期事件(如列车在车站的到发时刻)的集合, $A=\{1, 2, \dots, m\}$ 表示周期约束 $(v_j - v_i \in [l_{ij}, u_{ij}]_T)$ 的集合^[13]。

设图 3(b) 为图 3(a) 的 1 个可行解,每个顶点值为 1 个势 v_i , 则每条弧 (i, j) 对应着 1 个势差 $x_{ij} = v_j - v_i$,

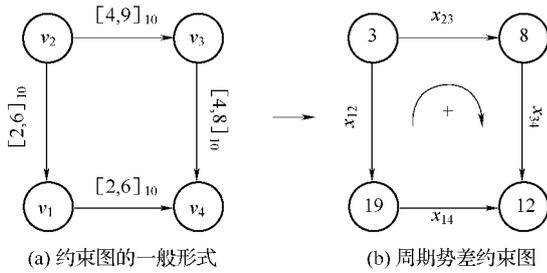


图 3 周期为 10 的周期约束图

即 $x_{ij} \in [l_{ij}, u_{ij}]_T$ 。只要约束图 G 关于 1 个生成树 H 的所有基本圈 c 都满足 $\sum_{(i,j) \in c^+} x_{ij} - \sum_{(i,j) \in c^-} x_{ij} = Tq^c$ (其中, q^c 为整数, c^+ 、 c^- 分别为指定的基本圈正、负方向), x_{ij} 就是 1 个可行周期势差^[7,14]。可以建立以下周期势差模型求解 PESP。

在约束图 G 找到一可行矢量 $x \in \mathbf{Z}^{|A|}$ 及其对应的整数矢量 q , 有

$$q \in \mathbf{Z}^{|C|} \tag{10}$$

s.t.

$$F^T x = Tq \tag{11}$$

$$x \in [l, u]_T \tag{12}$$

F 为约束图 G 的基本圈矩阵; $|A|$ 为 G 中边的个数; C 为 F 对应的基本圈组; $|C|$ 为所有基本圈个数; x 为周期势差矢量; l, u 为 x 的时间窗上、下限矢量; q 为整数矢量。约束式(11)表示约束图 G 关于 1 个生成树 H 的所有基本圈 c 都满足 $\sum_{(i,j) \in c^+} x_{ij} - \sum_{(i,j) \in c^-} x_{ij} = Tq^c$; 约束式(12)表示周期势差约束。

2 网络列车周期运行图模型

根据上节的描述, 周期运行图中待确定的列车到发时刻是周期势差模型中的各种“事件”, 到发时刻的逻辑关系是周期约束, 周期约束图描述运行图的“时间节点(事件)-逻辑关系(周期约束)”, 同时构成周期运行图模型。

网络运行图模型约束图的网络结构如图 4 所示, 约束图中画出两条线路运行图情况。约束图网络主要由列车运行时间约束、停站约束、列车到发安全间隔约束、列车折返约束、线间换乘约束等周期约束组成, 当路网各线的运行线满足模型所有周期约束条件时, 就是模型的可行解。

为了提高服务水平, 编制网络列车运行图时, 应该考虑尽量减少乘客在换乘站的换乘等待时间。轨道交通网络中, 两线换乘的车站有 8 个换乘方向, 三线换乘最多有 24 个换乘方向, 在模型中如果考虑所有换乘站的所有换乘方向的换乘等待时间, 显然会增加模型的

求解难度, 最后的结果也不利于线间主要衔接方向的优化。实际运用中, 可仅考虑优化主要换乘站的主要换乘方向(换乘量较大方向)的总换乘等待时间。

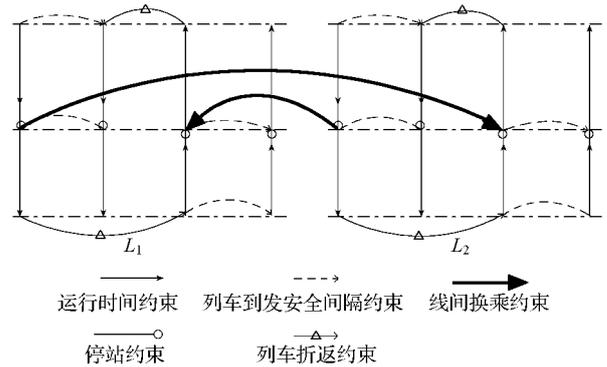


图 4 网络周期运行图约束图

2.1 网络列车运行图周期约束

轨道交通开行方案是编制列车运行图的基础, 确定了轨道交通网络中各线各时段(单位时间)开行的列车种类、数量以及停站方案。设路网线路集合为 $L = \{L_1, L_2, \dots, L_i\}$, 线路 L_i 中车站集合为 $S = \{1, 2, \dots, N^{L_i}\}$, 在周期时间 T 内开行列车集合为 $M = \{1, 2, \dots, R^{L_i}\}$ 。

(1) 列车区间运行时间周期约束

列车在区间运行的时间由区间纯运行时间与起、停车附加时分组成, 设列车 m 在区间 $[s, s+1]$ 的纯运行时间为 $r_m^{s,s+1}$, 起、停附加时分分别记为 t_q 和 t_t , 列车区间运行时间周期约束 $x_m^{s,s+1}$ 可表示为

$$x_m^{s,s+1} \in [r_m^{s,s+1} + t_q + t_t, r_m^{s,s+1} + t_q + t_t]_T \quad \forall m \in M, \forall s \in S \tag{13}$$

(2) 停站时间周期约束

设列车 m 在车站 s 的停车时间范围为 $[l_m^s, u_m^s]$, 停站周期约束 x_m^s 可表示为

$$x_m^s \in [l_m^s, u_m^s]_T \quad \forall m \in M, \forall s \in S \tag{14}$$

(3) 列车到发安全间隔周期约束

轨道交通列车以闭塞分区间隔运行, 两列车间设有安全间隔。设 h 为列车追踪间隔时间, 列车到发安全间隔周期约束 $x_{m,m'}^s$ 可表示为

$$x_{m,m'}^s \in [h, T-h]_T \quad \forall m, m' \in M, \forall s \in S \tag{15}$$

(4) 列车折返周期约束

设列车 m 在车站 s 进行折返作业的时间标准是 $[l_m^{s,z}, u_m^{s,z}]$, 列车折返周期约束 x_m^s 可表示为

$$x_m^s \in [l_m^{s,z}, u_m^{s,z}]_T \quad \forall m \in M, \forall s \in S \tag{16}$$

(5) 网络线间列车换乘周期约束

轨道交通成网后, 乘客换乘是否方便是用来评估运行图的重要标准, 乘客换乘周期约束图如图 5 所示。设 L_i 线列车 m 在车站 s 换乘到 L_j 线列车 m' 平

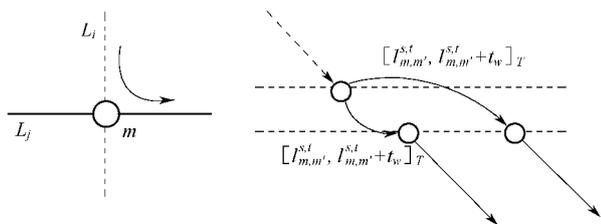


图 5 乘客换乘周期约束图

均步行时间为 $l_{m,m'}^{s,t}$, 给定最大站台等待时间标准 t_w , 换乘周期约束 $x_{m,m'}^s$ 可表示为

$$x_{m,m'}^s \in [l_{m,m'}^{s,t}, l_{m,m'}^{s,t} + t_w]_T \quad m, m' \in M, s \in S \quad (17)$$

2.2 模型有解的充要条件

令 PESP 模型约束图 $G=(V, A)$ 的生成树为 H , 给定每个基本圈的正方向, 那么每 1 个基本圈 c 都对应着 1 个唯一矢量 $c \in \{-1, 1\}^e$, e 为基本圈 c 中边的个数。

$$c_a = \begin{cases} 1 & \text{边 } a=(i, j) \in A \text{ 与指定正方向相同} \\ -1 & \text{边 } a=(i, j) \in A \text{ 与指定正方向相反} \end{cases}$$

另外定义

$$\begin{cases} \gamma_a^+ = \max(c_a, 0) \\ \gamma_a^- = \min(c_a, 0) \end{cases}$$

对于周期势差模型, 当且仅当约束图 $G=(V, A)$ 生成树 H 的任意基本圈 c 满足

$$\frac{1}{T} [\mathbf{u}^T \gamma^- + \mathbf{l}^T \gamma^+] \leq q \leq \frac{1}{T} [\mathbf{u}^T \gamma^+ + \mathbf{l}^T \gamma^-] \quad (18)$$

时, 模型有可行解^[14-15]。

此特性不但成为判断 PESP 是否有解的重要方法, 而且提供 1 个割平面方程, 缩小变量 q^c 的搜索域, 有利于求解含有大规模变量和周期约束的运行图编制问题。

2.3 网络列车运行图模型

综合以上分析, 网络列车运行图编制模型表示如下

$$\min f = \sum_{m,m'} \sum_s x_{m,m'}^s \quad (19)$$

s t

$$\mathbf{F}^T \mathbf{x} = T\mathbf{q} \quad \mathbf{x} \in \mathbf{G} \quad (20)$$

$$\mathbf{x} \in [\mathbf{l}, \mathbf{u}]_T \quad \mathbf{x} \in \mathbf{G} \quad (21)$$

$$\frac{1}{T} [\mathbf{u}^T \gamma^-] + \mathbf{l}^T \gamma^+ \leq q \leq \frac{1}{T} [\mathbf{u}^T \gamma^+ + \mathbf{l}^T \gamma^-] \quad (22)$$

$$\mathbf{x} \in \mathbf{Z}^{|\mathbf{A}|} \quad \mathbf{q} \in \mathbf{Z}^{|\mathbf{C}|} \quad (23)$$

$$c \in \mathbf{C}; m, m' \in M; s \in S$$

周期约束统一表示为式(21)的矢量形式。

上述模型中, 目标函数 f 表示减少乘客的总换乘等待时间; 约束式(20)表示运行图约束图 G 关于 1 个生成树 H 的所有基本圈 c 都满足 $\sum_{(i,j) \in c^+} x_{ij} - \sum_{(i,j) \in c^-} x_{ij}$

$= Tq^c$; 约束式(21)表示 2.1 节中所有的运行图周期约束; 约束式(22)表示模型有解的充要条件; 约束式(23)表示各变量的整数约束。

3 模型求解方法分析

3.1 约束图生成树的选择

约束图基本圈组中每个基本圈的等式与不等式约束构成式(19)的所有约束条件。

约束图的基本圈组并不是唯一的, 所以选择合适的生成树对于求解模型是很关键的。观察图 4 可以发现, 周期运行图约束图由在车站的各时间约束和区间运行时间约束两部分组成。选择各线各方向任意 1 条运行线以及该运行线与各发车点之间的弧为生成树, 可以保证每添加 1 条连枝与生成树就构成 1 个三角形或四边形的基本圈。

3.2 到发安全间隔约束基本圈及 q^c 的取值

图 4 中到发安全间隔周期约束与生成树构成三角形基本圈, 如图 6 所示。

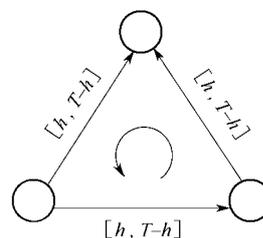


图 6 到发安全间隔约束基本圈

由不等式(18)可得

$$\lceil (3h - T) / T \rceil \leq q \leq \lfloor (2T - h) / T \rfloor$$

3.3 列车运行约束基本圈及 q^c 的取值

图 4 中列车运行约束、停站约束与生成树构成四边形基本圈, 如图 7(a) 所示。

根据 1.2 节周期约束特性, 可以将列车运行约束、停站约束合并为 1 条周期约束, 于是四边形基本圈图 7(a) 可以简化为四边形基本圈图 7(b)。四边形基本圈中出现相对弧势差为固定值且方向相同时, 可以将固定势差舍去。因此四边形基本圈图 7(b) 可以进一步简化为图 7(c)。

由不等式(18)可得

$$\lceil (2h + l_m^s - u_m^s - T) / T \rceil \leq q \leq \lfloor (T - 2h - l_m^s + u_m^s) / T \rfloor$$

3.4 列车折返约束基本圈及 q^c 的取值

令列车 m_1, m_2 到达折返车站的时间分别为 a_1, a_2 , 列车 m_3, m_4 由车站折返发出的时间分别为 d_1, d_2 。列车折返约束基本圈可以表示为图 8(a)。

由约束图可得

$$d_1 - a_2 = d_2 - a_1 \in [l_m^{s,z} + h, u_m^{s,z} + T - h]_T$$

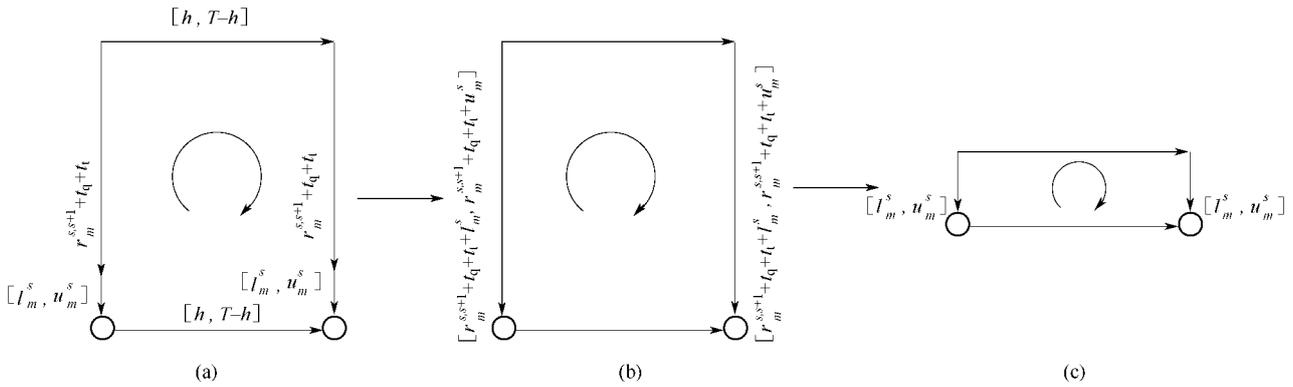


图 7 列车运行约束基本圈

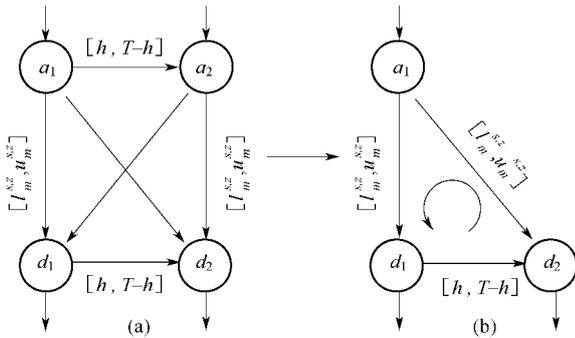


图 8 列车折返约束基本圈

此时

$$[l_m^{s,z}, u_m^{s,z}] \cap [l_m^{s,z} + h, u_m^{s,z} + T - h]$$

不是离散的, 当 $u_m^{s,z} - l_m^{s,z} \geq 2h$ 时, $[l_m^{s,z} + h, u_m^{s,z} + T - h]$ 包含整个周期时间轴, 因此条件

$$[l_m^{s,z}, u_m^{s,z}]_T \subset d_1 - a_2 = d_2 - a_1$$

始终成立。

根据 1.2 节周期约束特性, 列车折返约束基本圈

图 8(a) 可以化简为图 8(b), 即当

$$d_2 - d_1 \in [h, T - h]_T \quad d_1 - a_1 \in [l_m^{s,z}, u_m^{s,z}]_T$$

满足时, 三角形基本圈图 8(b) 始终成立。

由不等式(18)可得

$$[(h + l_m^{s,z} - u_m^{s,z}) / T] \leq q^c \leq [(T - h - l_m^{s,z} + u_m^{s,z}) / T]$$

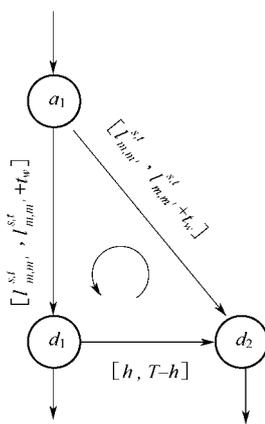


图 9 列车换乘约束基本圈

3.5 列车换乘约束基本圈及 q^c 的取值

为了提高线间衔接的质量, 考虑一列车与多列列车间的衔接。令列车 m_1 到达换乘车站的时间为 a_1 , 接续列车 m_2, m_3 由该站车站发出的时间分别为 d_1, d_2 。由上节分析可知, 当 $t_w \geq 2h$ 时, 列车换乘约束基本圈如图 9 所示。

由不等式(18)可得

$$[(h - t_w) / T] \leq q^c \leq [(T - h + t_w) / T]$$

4 轨道交通网络列车运行图编制算例

以下运用周期势差模型和网络约束图理论, 建立轨道交通网络列车运行图模型, 编制由北京轨道交通城区 1 号线、2 号线和 5 号线所构成路网 (如图 10 所示) 条件下的网络列车运行图。本文仅考虑 1 号线进城方向列车与 2 号线环线列车的换乘衔接, 箭头方向为本算例考虑优化的换乘衔接方向, 各方向的优先级一致。

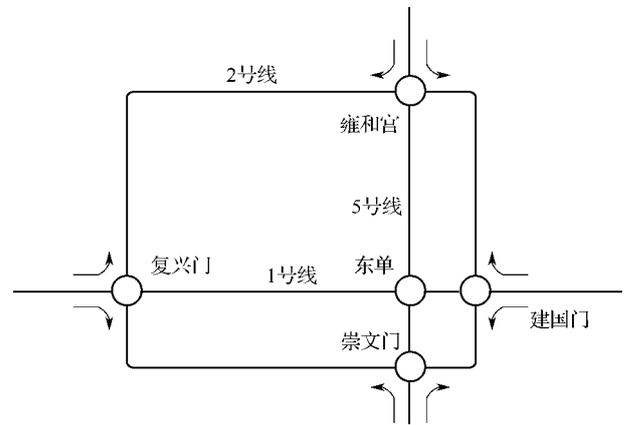


图 10 北京市轨道交通网络(局部)

4.1 网络列车运行图时间要素

本文假设 1 号线、2 号线和 5 号线所有列车的区间运行时间, 起停附加时分以及通过车站站停时间为固定值, 复兴门、雍和宫、东单、建国门和崇文门等换乘站站停时间为可调整的弹性时间。部分时间要素见表 1。

T 的选取主要考虑运行图的方便性以及模型的求

解规模,考虑到北京轨道交通开行比较密集,本文 T 取 20 min。

表 1 网络列车运行图时间要素 s

时间要素	1 号线	2 号线	5 号线
周期时间段 T	1 200	1 200	1 200
最小发车间隔 h	125	120	170
换乘站站停时间下限	50	45	50
换乘站站停时间上限	90	90	90
折返时间下限	120(苹果园)	—	150(天通苑北)
	120(四惠东)	—	150(宋家庄)
折返时间上限	380(苹果园)	—	500(天通苑北)
	380(四惠东)	—	500(宋家庄)

4.2 换乘站换乘衔接时间标准

图 10 中各换乘站各项衔接时间标准见表 2。

表 2 换乘衔接时间标准(含走行时间) s

车站	衔接方向	衔接时间下限	衔接时间上限
复兴门	1 上行换 2 上行	60	360
	1 上行换 2 下行	60	360
雍和宫	5 下行换 2 上行	120	420
	5 下行换 2 下行	120	420
建国门	1 下行换 2 上行	90	360
	1 下行换 2 下行	90	360
崇文门	5 上行换 2 上行	240	540
	5 上行换 2 下行	240	540

4.3 网络列车运行图模型基本圈化简及 q^c 的取值

根据 3.3 节的结论,由于轨道交通列车的区间运行时分固定,所以所有列车运行约束基本圈都可以得到化简。

根据 3.4 节的结论,列车折返约束基本圈可以化简为三角形基本圈。

将表 1 和表 2 的参数代入第 3 节基本圈的分析可得:到发安全间隔约束基本圈中 $q^c \in \{0, 1\}$, 列车运行约束基本圈中 $q^c = 0$, 列车折返约束基本圈中 $q^c \in \{0, 1\}$, 列车换乘约束基本圈中 $q^c \in \{0, 1\}$ 。实际上,上述基本圈中,只要指定的正方向不变,北京市轨道交通列车运行时间标准发生变化时,三角形(四边形)基本圈 q^c 的取值都不会变,可缩减模型求解搜索范围。

4.4 网络列车运行图模型运算结果与分析

本模型算例在 windows XP 操作系统下,配置为 2.0G 双核 CPU 和 2G 内存的 PC 机上运行,运算 980 s 后得到最优解,路网总换乘等待时间为 3 275 s (含换乘走行时间)。

受篇幅限制,本文仅画出轨道交通 1 号线、2 号线和 5 号线下行方向换乘站间的列车运行图,如图 11~图 13 所示。由于列车在周期时间段内是按规律重复运行的,可以将区段内所有列车运行线画在 1 个周期时段的运行图内。考虑到列车在区间的运行时间以及在非换乘车站的站停时间为固定值,为清楚表示出模

型运算的结果,本文将经过这些非换乘车站的运行线用直线代替。

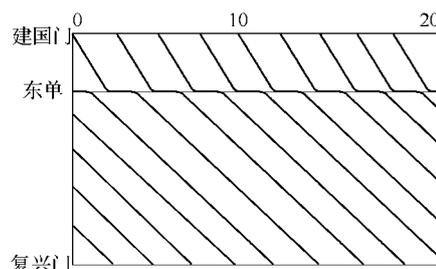


图 11 1 号线下行列车周期运行图

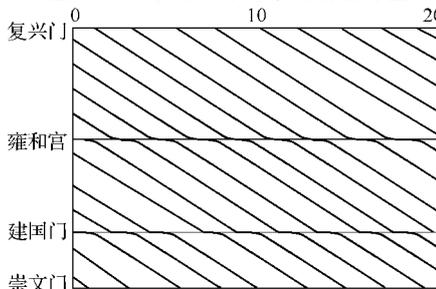


图 12 2 号线下行列车周期运行图

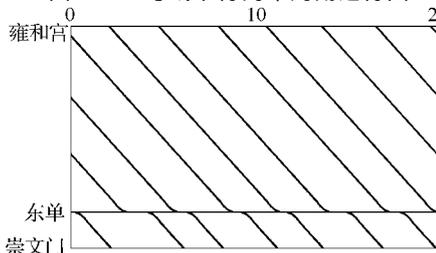


图 13 5 号线下行列车周期运行图

计算中,尽可能多地考虑线间的换乘约束,在高峰向平峰过渡及平峰时段,均匀地抽掉部分运行线,可以避免候车时间明显增加。算例结果中,各线平峰时段运行图在建国门、雍和宫两换乘车站的换乘衔接效果如图 14、图 15 所示。

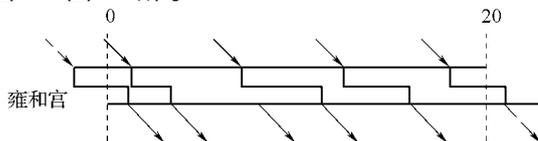


图 14 平峰时段雍和宫站列车衔接效果 (5 号线下行换 2 号线下行)

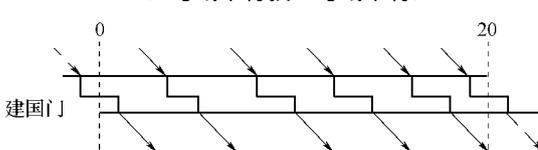


图 15 平峰时段建国门站列车衔接效果 (1 号线下行换 2 号线下行)

雍和宫站 5 号线下行换乘 2 号线下行方向列车,平均花费 3 min 10 s,其中换乘走行时间为 2 min,乘客平均候车时间为 1 min 10 s;建国门站 1 号线下行换

乘2号线下行方向列车,平均花费1 min 55 s,其中换乘走行时间为1 min 30 s,乘客平均候车时间为25 s。列车在换乘站的站停时间都在40 s以上,因此乘客站台实际等待时间要比计算候车时间短,如图15中1号线换乘乘客步行至2号线建国门车站站台时,下行方向列车已经到达车站。

5 结束语

本文将编制轨道交通列车运行图看做周期事件安排问题(PESP),将循环发生的事件通过约束图联系并表示出来。周期势差模型将PESP模型进一步深化发展,降低了求解实际问题的难度。模型中同时考虑了列车区间运行时间、停站时间、到发安全间隔、列车折返等周期约束,通过在路网换乘站考虑旅客换乘周期约束,将轨道交通网络各线关联起来。

列车在周期时间段内是按规律重复运行的,将区段内所有列车运行线画在1个周期时段的运行图内,可简洁地表示出全天运行图运行线特征。将周期运行图复制到轨道交通全天运营时段内,可以得到初始全天列车运行图。在高峰阶段,列车按照满表运行线运行;在非高峰阶段,列车可按照抽取部分运行线的运行图运行;在早出车和晚收车阶段,由于列车间隔较大,列车间影响较小,可以结合列车进出段的约束条件,对部分列车运行线再进行细微调整。

网络列车周期运行图模型的约束图较为复杂,求解有较大困难。从模型约束图入手,找到合适的生成树,研究不同类型约束图基本圈的规律,同时对模型进行预先简化处理,可以减少模型约束和变量数量,在很大程度上降低模型的求解难度。

对北京市轨道交通局部网络列车运行图进行的求解计算表明,网络列车周期运行图模型及其优化算法是可行的,模型可以扩展到更大规模路网结构条件下进行网络列车周期运行图的求解,为编制实际网络运行图提供决策支持。

参考文献:

- [1] 彭其渊,杨明伦. 计算机编制双线实用货物列车运行图的整数规划模型及求解算法[M]. 北京:中国铁道出版社,1994.
- [2] 彭其渊,朱松年,王培. 网络列车运行图的数学模型及算法研究[J]. 铁道学报,2001,23(1):1-8.
PENG Qi-yuan, ZHU Song-nian, WANG Pei Study on a General Optimization Model and Its Solution for Railway Network Diagram[J]. Journal of the China Railway Society,2001,23(1):1-8.
- [3] 许红,马建军,龙建成,等. 城市轨道交通列车运行图编制的数学模型及方法[J]. 北京交通大学学报,2006,30(3):10-14.

XU Hong, MA Jian-jun, LONG Jian-cheng, et al Study on Model and Method of Train Working Diagram of Urban Rail Transit[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2006,30(3):10-14.

- [4] 江志彬,徐瑞华,吴强,等. 计算机编制城市轨道交通共线交路列车运行图[J]. 同济大学学报:自然科学版,2010,38(5):692-696.
JIANG Zhi-bin, XU Rui-hua, WU Qiang, et al Shared-path Routing Timetable Computer Designing in Rail Transit System[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010,38(5):692-696.
- [5] 須田 寛. 東海道新幹線[M]. 東京:大正出版株式会社,1989.
- [6] ODJJK M A. Railway Timetable Generation[D]. Delft: Delft University of Technology,1997.
- [7] Christian Liebchen, Rolf H Mohring. A Case Study in Periodic Timetabling[J]. Electronic Notes in Theoretical Computer Science,2002,66(6):1-14.
- [8] 汪波,杨浩,牛丰,等. 周期运行图编制的模型与算法研究[J]. 铁道学报,2007,29(5):1-6.
WANG Bo, YANG Hao, NIU Feng, et al Study on Model and Algorithm of Periodic Train Diagram Generation [J]. Journal of the China Railway Society,2007,29(5):1-6.
- [9] 汪波,韩宝明,牛丰,等. 城市轨道交通网络运力优化配置研究[J]. 铁道学报,2011,33(12):9-14.
WANG Bo, HAN Bao-ming, NIU Feng, et al Study on Optimization of Transport Capacity Planning in Beijing Metro Network[J]. Journal of the China Railway Society,2011,33(12):9-14.
- [10] 汪波,杨浩,张志华. 基于周期运行图的京津列车开行方案研究[J]. 铁道学报,2007,29(2):8-13.
WANG Bo, YANG Hao, ZHANG Zhi-hua. The Research on the Train Operation Plan of the Beijing-Tianjin Intercity Railway Based on Periodic Train Diagrams[J]. Journal of the China Railway Society,2007,29(2):8-13.
- [11] Christian Liebchen. Periodic Timetable Optimization in Public Transport[M]. Berlin: Winter-Industries GmbH, 2006.
- [12] Serafini P, Ukovich W. A Mathematical Model for Periodic Scheduling Problems[J]. SIAM J. Discrete Math, 1989, 2(4):550-581.
- [13] 王朝瑞. 图论[M]. 北京:北京理工大学出版社,2001.
- [14] SERAFINI P, UKOVICH W. A Mathematical Model for the Fixed-time Traffic Control Problem [J]. European Journal of Operation Research,1989,42(2):152-165.
- [15] ODJJK M A. A Constraint Generation Algorithm for the Construction of Periodic Railway Timetable[J]. Transportation Research part B,1996,30(6):455-466.

(责任编辑 刘 钢)