

考虑维修天窗和到发线数量的复线铁路 列车运行图优化

兰泽康,何世伟,黎浩东,殷玮川,毕明凯

(北京交通大学 交通运输学院,北京 100044)

摘 要:研究了维修天窗与复线铁路列车运行图一体化编制问题,考虑到发线数量、维修限速等约束条件,建立了混合整数规划模型.针对约束的特点对约束进行分类,并运用行生成方法对到发线数量等约束进行分解,运用两阶段法处理较为复杂的维修限速约束,结合商业软件 GUROBI 求解模型.设计算例进行验证,比较分析了模型约束的不同分解方法.结果显示分解到发线数量约束可以提高求解效率 25%~45%,而列车追踪间隔间距约束是否宜采取分解与求解规模有关.

关键词:铁路运输;列车运行图;行生成;维修天窗;GUROBI

中图分类号:U292.41 **文献标志码:**A

Optimization for double-track railway train timetabling considering the maintenance skylight and the number of arrival-departure tracks

LAN Zekang, HE Shiwei, LI Haodong, YIN Weichuan, BI Mingkai

(School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: This paper investigates the joint optimization on the maintenance skylight and double-track railway train timetabling. A Mixed Integer Linear Program (MILP) model is established considering the number of arrival-departure tracks, the speed restriction for maintenance. The constraints are classified according to their characteristics, and some kinds of constraints, e.g. the number of arrival-departure tracks constraints are decomposed using row generation, then the model is solved by commercial software GUROBI. The model and algorithm is tested on a calculation example, in which different decomposition methods are compared, and a two-stage approach is applied to deal with the complex maintenance restriction constraints. The results show that decomposing the number of arrival-departure track constrains can improve the solving efficiency by 25%~45%, and whether it's beneficial to decompose the headway constrains depen-

收稿日期:2017-07-13
基金项目:国家自然科学基金(U1434207, U1734204);中国铁路总公司科技研究开发计划项目(2017X004-E)
Foundation items: Natural Science Foundation of China(U1434207, U1734204); China Railway Corporation Science and Technology Research Plan Project(2017X004-E)
第一作者:兰泽康(1993—),男,福建宁德人,博士生,研究方向为交通运输规划与管理与运输组织现代化.email: zeklan@bjtu.edu.cn.
通信作者:何世伟(1969—),男,重庆市人,教授,博士,博士生导师.email: shwhe@bjtu.edu.cn.
引用格式:兰泽康,何世伟,黎浩东,等.考虑维修天窗和到发线数量的复线铁路列车运行图优化[J].北京交通大学学报,2018,42(3):30—36.
LAN Zekang, HE Shiwei, LI Haodong, et al. Optimization for double-track railway train timetabling considering the maintenance skylight and the number of arrival-departure tracks[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2018, 42(3): 30—36. (in Chinese)

ding on the solving scale.

Keywords: railway transportation; train timetabling; row generation; maintenance skylight; GU-ROBI

在铁路运输生产工作中,列车运行图编制工作主要是确定列车途经各站的到发时刻,同时保证列车对资源的占用不存在冲突,确保列车行车安全.研究方法大多通过建立混合整数规划模型,采用启发式方法^[1-2]、分支定界^[3]或拉格朗日松弛^[4]等方法求解.实际中编制运行图时,为日常维修作业预留固定的时间,称为运行图日常维修天窗(简称天窗)时间.天窗占用行车资源,限制铁路线路的通过能力,可能导致旅客列车在中间站停留时间过长,从而降低列车旅行速度等,已有文献涉及天窗取点与列车运行图编制一体化问题,如文献[5]将维修作业看作是“虚拟列车”,将维修类约束转化成列车类约束.文献[6]中进一步提出了维修限速问题.较多研究集中于突发事件下应急维修的列车运行调整问题;文献[7]研究了高速铁路区间固定维修时间窗的实时调整问题;文献[8]研究了维修作业持续时间不确定条件下如何调整运行图使得列车总期望晚点时间最小.

已有很多文献将到发线数量约束和其他约束一同优化,导致模型求解效率较低,或者采用启发式方法求解,降低了求解质量.文献[9]建立了含到发线数量约束的数学模型,并用 CPLEX 直接求解;文献[10]采用交换列车到发顺序疏解到发线冲突的启发式方法;文献[7]设计了分干扰结束前和结束后的两阶段法,本质上是滚动求解.

本文作者将列车运行图优化与天窗时间安排相结合,考虑了到发线数量和维修限速等约束,建立了混合整数规划模型,运用行生成的思想,延时生成某些约束条件,解决了受到发线数量约束影响模型求解困难的问题,同时结合问题特点设计两阶段法处理维修限速约束,加快了模型求解.

1 问题描述

维修作业对于保障列车安全运行具有重要作用,在作业期间相应区间实行封锁,列车不可通过.天窗时间由区间封锁时间、施工辅助时间和天窗影响时间组成,区间封锁时间即维修作业开始至结束,停止列车运行的时间^[11],本文仅考虑区间封锁时间.以复线自动闭塞线路为研究对象,天窗开设方式为单 V 形天窗,它是指分别在上下行两条线路上,逐个区间顺序开设区间矩形天窗,假设上下行运行系统相互独立,则只需选择一个线路方向进行研究.

在维修作业结束之后,将产生临时性慢行,对通过维修区间的前几列车有限速要求.如图 1 所示,有 3 列车和 5 个车站,列车 1 在维修作业开始之前通过维修区间,可按正常速度通过,列车 2 和列车 3 分别为车站 3 和车站 5 之间两项维修作业结束之后通过相应维修区间的第 1 列车和第 2 列车,则需要在相应区间限速行驶,比如列车 2 限速 80 km/h,列车 3 限速 100 km/h.

每一列车具有固定的始发时间窗,优化目标是使得所有列车的总旅行时间最小和取消开行的列车数量尽可能的少.维修作业的开始时间并不是固定的,可以在合理的时间范围内选择,且有最小的持续时间要求.

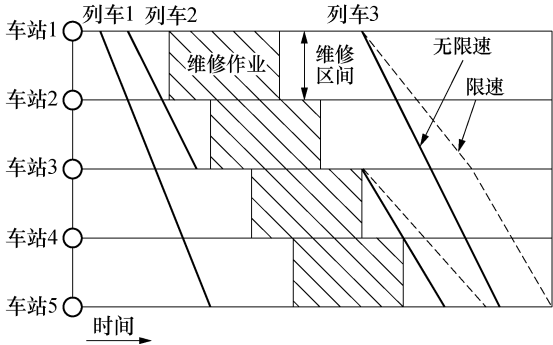


图 1 维修作业对列车限速的示意图

Fig.1 Sketch map of train speed restriction for maintenance

2 列车运行图优化模型建立

2.1 基本符号定义

设研究区段内下行方向所有列车集合为 T , $i, j \in T$; 车站集合为 S , 车站 $s \in S$, 其中最后一个车站为 S^l , 列车 i 始发站为 s_i^s , 终点站为 s_i^d ; 列车 i 最早可能始发时间为 D_i^s , 最晚可能始发时间为 D_i^l ; 车站 s 下一相邻车站为 S' ; 列车 i 在车站 s 的最小停站时间为 W_s^i ; 列车 i 在两相邻车站 s 和 s' 之间的最小运行时间为 $R_{ss'}^i$; 列车 i 在车站 s 的起动和停车附加时分分别为 T_{is}^d 和 T_{is}^a ; 列车 i 和 j 在车站 s 的不同时发车间隔和到达间隔分别为 D_s^{ij} 和 A_s^{ij} , 占用同一条到发线的到发间隔为 H_s^{ij} ; 车站 s 到发线集合为 K_s , $k \in K_s$; 维修作业集合为 U , $u \in U$; M 为足够大的正整数.

由于列车在车站的作业种类存在差异,本文以

列车在车站的作业类型对列车进行划分.在车站 s 有发车和到达作业的列车集合分别为 TD_s 和 TA_s , 同时有发车和到达作业的列车集合为 TP_s , TD_s 和 TA_s 均包含 TP_s . 定义符号 $\{i, j\} < TP_s$ 表示 TP_s 中的一对列车 i 和 j , 且 j 在 TP_s 中的索引大于 i , $\{i, j\} < TD_s$ 和 $\{i, j\} < TA_s$ 同理.

列车 i 到达和离开车站 s 的时间为 a_s^i 和 d_s^i , 均取为正整数; 二元变量 x_s^i 表示列车 i 在车站 s 是否停站的标识, 若停站取值为 1, 否则取值为 0; 二元变量 v_s^{ij} (o_s^{ij}) 表示列车 i 和 j 离开(到达)车站 s 的前后顺序, 若 j 在 i 之前离开(到达)车站 s , 则取值为 1, 否则取值为 0; 二元变量 q_{sk}^i 表示列车 i 是否占用车站 s 到发线 k 的标识, 若占用则取值为 1, 否则取值为 0.

2.2 约束条件和目标函数

1) 列车始发时间窗约束.

$$d_{s_0}^i \geq (y_i - 1)M + M_1, \quad \forall i \quad (1)$$

$$d_{s_0}^i - D_i^e \geq 0, \quad \forall i \quad (2)$$

$$d_{s_0}^i - D_i^l \leq y_i M, \quad \forall i \quad (3)$$

式中: y_i 为列车 i 是否取消开行的二元变量, 若取消则取值为 1, 否为 0; M_1 是一个大于总规划时长的正整数. 式(1)表示当列车取消开行时, 将列车始发时间设置到总规划时长以外; 式(2)表示列车始发时间在最早可能始发时间之后; 式(3)表示当列车未取消开行时始发时间在最晚可能始发时间之前. 若不考虑取消开行, 列车始发时间被固定在较小的时间范围内, 当维修作业的持续时间较长时, 可能出现无解的情况.

2) 最小停站时间约束.

$$d_s^i - a_s^i \geq W_s^i \quad \forall s, i \in TP_s \quad (4)$$

最小停站时间是指当列车到达车站后, 完成相应作业以后, 才能离开. 没有停站作业要求的列车, 最小停站时间为 0.

3) 区间最小运行时间约束.

$$a_{s'}^{i'} - d_s^i \geq R_{is'}^{i'} + x_s^i T_{is}^d + x_{s'}^{i'} T_{is'}^a \quad \forall s, i \in TD_s, s' \neq s^1 \quad (5)$$

式(5)为区间最小运行时间约束, 本文考虑了起动附加时分 DT_s^i 和停车附加时分 AT_s^i , 它们仅当列车 i 在相应车站停车时才有效.

4) 停站标识约束.

$$x_s^i \leq d_s^i - a_s^i \quad \forall s, i \in TP_s \quad (6)$$

$$d_s^i - a_s^i \leq x_s^i M \quad \forall s, i \in TP_s \quad (7)$$

式(6)表示当列车 i 在车站 s 的离开时间等于到达时间时, 即 $d_s^i = a_s^i$ 时, $x_s^i = 0$; 式(7)为当列车 i 在车站 s 的离开时间大于到达时间, 即 $d_s^i > a_s^i$ 时,

$x_s^i = 1$. 需指出, 因 a_s^i 和 d_s^i 均取为正整数, 故 $d_s^i > a_s^i$ 时, 停站时间最小为 1, 使得式(6)同时成立.

5) 不同时发车间隔约束.

$$d_s^i - d_s^j \geq (v_s^{ij} - 1)M + D_s^{ij}, \quad \forall s, \{i, j\} < TD_s \quad (8)$$

$$d_s^j - d_s^i \geq (v_s^{ji} - 1)M + D_s^{ij}, \quad \forall s, \{i, j\} < TD_s \quad (9)$$

$$v_s^{ij} + v_s^{ji} = 1 \quad \forall s, \{i, j\} < TD_s \quad (10)$$

为保障列车安全行车的要求, 列车发车时间需满足一定的发车间隔. 一对列车 i 和 j 在车站 s 发车, 式(8)约束列车 j 在 i 之前发车时的时间间隔, 即 $v_s^{ij} = 1$ 时, $d_s^i - d_s^j \geq D_s^{ij}$; 式(9)约束列车 i 在 j 之前发车时的时间间隔, 即 $v_s^{ji} = 1$ 时, $d_s^j - d_s^i \geq D_s^{ij}$; 式(10)表示 v_s^{ij} 和 v_s^{ji} 有且仅有一个取值为 1, 另一个取值为 0.

6) 不同时到达间隔约束.

$$a_s^i - a_s^j \geq (o_s^{ij} - 1)M + A_s^{ij}, \quad \forall s, \{i, j\} < TA_s \quad (11)$$

$$a_s^j - a_s^i \geq (o_s^{ji} - 1)M + A_s^{ij}, \quad \forall s, \{i, j\} < TA_s \quad (12)$$

$$o_s^{ij} + o_s^{ji} = 1, \quad \forall s, \{i, j\} < TA_s \quad (13)$$

与式(8)~式(10)分析同理, 此处不再赘述.

7) 区间内不发生越行的约束.

$$o_{s'}^{ij} = v_s^{ij}, \quad \forall s, \{i, j\} < TD_s, s' \neq s^1 \quad (14)$$

$$o_{s'}^{ji} = v_s^{ji}, \quad \forall s, \{i, j\} < TD_s, s' \neq s^1 \quad (15)$$

同向列车不可在区间内发生越行, 即列车 i 和 j 从同一车站出发, 若 i 在 j 之前出发, 则相应的 i 在 j 之前到达下一个车站.

8) 到发线数量约束.

$$\sum_{k \in K_s} q_{sk}^i = 1 \quad \forall s, i \in TP_s \quad (16)$$

$$a_s^i - d_s^j \geq (3 - o_s^{ij} - q_{sk}^i - q_{sk}^j)M + H_s^{ij} \quad \forall s, \{i, j\} < TP_s, k \in K_s \quad (17)$$

$$a_s^j - d_s^i \geq (3 - o_s^{ji} - q_{sk}^i - q_{sk}^j)M + H_s^{ij} \quad \forall s, \{i, j\} < TP_s, k \in K_s \quad (18)$$

式(16)表示每列车在途经的车站需要占用一条到发线, 不考虑在始发站和终到站占用到发线. 一对列车 i 和 j 到达车站 s , 若选择的是相同到发线, 只能是分先后次序占用; 式(17)表示 j 在 i 之前到达时, 需要等待 j 离开车站后, 间隔 H_s^{ij} 时长后 i 方可到达车站, 即 $q_{sk}^i = q_{sk}^j = 1$, 且 $o_s^{ij} = 1$ 时, 有 $a_s^i \geq d_s^j + H_s^{ij}$; 式(18)则约束 i 在 j 之前到达的情形. 本文没有考虑占用不同到发线时列车之间的到发间隔.

9) 维修作业开始时间和结束时间约束.

$$MOT_u^e \leq mot_u^{\text{start}} \leq MOT_u^l, \quad \forall u \quad (19)$$

$$mot_u^{\text{end}} = mot_u^{\text{start}} + MOT_u^{\text{d}}, \quad \forall u \quad (20)$$

式中: MOT_u^{e} , MOT_u^{l} 和 MOT_u^{d} 分别为维修作业 u 的最早开始时间, 最晚开始时间和最小持续时间; mot_u^{start} 和 mot_u^{end} 分别表示维修作业 u 实际的开始时间和结束时间。式(19)是维修作业开始时间的约束; 式(20)是维修作业最小持续时间的约束, 此处直接将维修作业的持续时间取为最小持续时间。

10) 维修作业与列车冲突疏解约束。

$$d_{s_u}^i + (1 - z_{iu})M \geq mot_u^{\text{end}} \quad \forall u, i \in TD_{s_u} \quad (21)$$

$$a_{s'}^i - z_{iu}M \leq mot_u^{\text{start}} \quad \forall u, i \in TA_{s'}; s' = F_{s_u} \quad (22)$$

式中: s_u 为维修作业 u 所在区间对应于下行方向的第一个车站; z_{iu} 为列车 i 是否在维修作业 u 结束之后进入维修区间的二元变量, 是则取值为 1, 否则为 0。式(21)表示当列车在维修作业 u 结束之后离开车站 s_u 时, 其离开时间应大于维修作业结束时间; 式(22)表示当列车在维修作业 u 还未开始时离开车站 s_u , 则到达下一车站 s' 的时间应在维修作业开始时间之前。

11) 在维修作业结束后, 进入维修区间的列车次序与时间先后关系。

$$d_{s_u}^i - d_{s_u}^j \geq -(2 + \sum_{m=1}^n z_{iu}^m - z_{ju}^n - z_{iu})M, \quad \forall u, \{i, j\} < TD_{s_u}, 1 \leq n \leq N_u \quad (23)$$

$$d_{s_u}^j - d_{s_u}^i \geq -(2 + \sum_{m=1}^n z_{ju}^m - z_{iu}^n - z_{ju})M, \quad \forall u, \{i, j\} < TD_{s_u}, 1 \leq n \leq N_u \quad (24)$$

$$z_{iu}^n \leq z_{iu} \quad \forall u, i \in TD_{s_u}, 1 \leq n \leq N_u \quad (25)$$

$$\sum_{i \in TD_{s_u}} z_{iu} - (n - 1) \leq M \sum_{i \in TD_{s_u}} z_{iu}^n, \quad \forall u, 1 \leq n \leq N_u \quad (26)$$

式中: 在维修作业 u 结束之后, 前 N_u 列车通过维修区间需要限速, $N_u \geq 1$ 。 z_{iu}^n 表示列车 i 是否是在维修作业 u 结束之后进入相应维修区间的第 n 列车, 是则取值 1, 否则取 0, $1 \leq n \leq N_u$ 。

式(23)表示若列车 i 和 j 均在维修作业 u 结束之后离开车站 s_u , 而列车 j 是其中的第 n ($n \leq N_u$) 列车, 且列车 i 不是其中的第 m ($m \leq n$) 列车时, 列车 i 的离开时间应在 j 之后, 式(24)同理; 式(25)表示 $z_{iu} = 0$ 时, $z_{iu}^n = 0$; 式(26)表示当维修作业 u 结束之后离开车站 s_u 的数量大于等于 n 时, 则存在列车 i 使得 $z_{iu} = 1$ 。需要指出本文令 $N_u \geq 1$, 即假设了在维修作业 u 结束之后, 至少通过相应维修区间的第一列车需要限速。

12) 在维修作业结束之后, 进入维修区间的列车限速约束。

$$a_{s'}^i - d_{s_u}^i \geq R_u^n + x_{s_u}^i T_{is_u}^{\text{d}} + x_{s'}^i T_{is'}^{\text{a}} + (z_{iu}^n - 1)M$$

$$\forall u, i \in TD_{s_u}, s' = E_{s_u}, 1 \leq n \leq N_u \quad (27)$$

$$z_{iu}^m + z_{iu}^n \leq 1 \quad \forall u, i \in TD_{s_u}, 1 \leq m < n \leq N_u \quad (28)$$

式中: R_u^n 表示在维修作业 u 结束之后通过维修区间第 n 列车的最小区间纯运行时分。

式(27)为若 $z_{iu}^n = 1$ 时, 列车 i 在维修区间的最小运行时间约束; 式(28)为列车 i 不能使得 $z_{iu}^m = 1$ 和 $z_{iu}^n = 1$ ($m < n$) 同时成立。

13) 目标函数。

$$\min \sum_{i \in T} [(a_{s_i}^i - d_{s_i}^i) + \lambda_i y_i] \quad (29)$$

式中: λ_i 为取消列车 i 的惩罚系数。

模型目标是最小化所有列车的总旅行时间和取消列车的数量, 为平衡两个目标, 引入系数 λ_i 将两者加权求和。在模型求解之后, 扣除已取消列车的总旅行时间, 可得到未取消列车的总旅行时间。

3 基于行生成的模型分解方法

行生成方法通过松弛原模型中的复杂约束, 得到一个主问题, 当求解主问题后构造相应的子问题检测是否存在不满足的松弛约束, 若存在再添加相应约束, 从而减少约束的数量, 最终可求得最优解。

3.1 约束分类及分解方法

1) 列车基本运行约束。

该类约束由列车区间最小运行时间和最小停站时间等组成, 是列车在不考虑与其他资源冲突的条件下, 完成自身运行过程需满足的约束。它们属于较为简单的约束, 可以直接保留在主问题中。

2) 列车追踪间隔约束。

该类约束限制两列车之间的到发时间间隔, 约束数量受列车数量影响较大。由于设置了列车始发时间窗的关系, 始发时间间隔较大的两列车发生冲突可能性较小, 可在判断列车之间存在冲突以后再添加相应约束。例如若检测到列车 i 和 j 在车站 s 的不同时发车约束不满足, 则添加式(8)~式(10)中对应列车 i, j 在车站 s 不同时发车约束即可。不同时到达约束和区间内不发生越行约束同理。

3) 到发线数量约束。

到发线数量约束制约了模型的求解效率, 可采用行生成方法分解。到发线数量约束添加方式有所不同, 需要构造额外的约束。在检测到发线数量是否

满足时,主问题已经求解且得到列车在各站的到发时刻.以车站 s 为例,假设 $TP_s = \{A, B, C, D, E\}$, $A \sim E$ 均表示列车.可绘制出如图 2 所示的列车在车站停留时间段,片段的左端点为列车到达车站的时间,右端点为列车离开车站的时间,右上角邻接图表示两个片段是否在时间上交叉,若交叉则用线段连接.

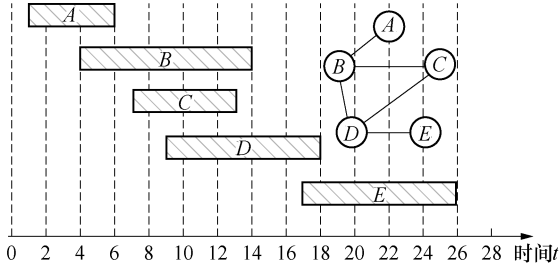


图 2 列车在车站 s 的停留时间段

Fig.2 Time snippets for train dwelling in station s

当有列车到达车站并需要停留时,此时车站到发线数量可能不足,而列车离开车站时,释放占用的到发线,故只需检测每一列车到达车站时,车站内停留的列车数量是否超过到发线数量即可.例如在 $t = 9$ 时刻,列车 B, C, D 同时在车站内停靠,故至少需要 3 条到发线.若车站只有 2 条到发线,则 B, C, D 中至少有两列车先后占用了同一条到发线,需满足以下约束

$$\sum_{i \in N} q_{sk}^i \geq 2 \quad (30)$$

$$a_s^i - d_s^j \geq -(3 - o_s^{ij} - q_{sk}^i - q_{sk}^j)M + H_s^{ij}, \quad \forall \{i, j\} < N, k \in K_s \quad (31)$$

$$a_s^j - d_s^i \geq -(3 - o_s^{ji} - q_{sk}^i - q_{sk}^j)M + H_s^{ij}, \quad \forall \{i, j\} < N, k \in K_s \quad (32)$$

式中: $N = \{B, C, D\}$, k 取为 K_s 中一条特定到发线即可,表示集合 N 中至少有两列车占用了同一到发线 \bar{k} ,再通过式(31)和式(32)疏解占用同一条到发线的列车到达车站的时间.最终到发线冲突检测的子问题需返回约束式(30)~式(32)添加至主问题中.

4) 维修作业约束.

由文献[5]可知,维修作业占用行车资源的性质和列车相似.由此,将式(19)和式(20)保留在主问题中,而式(21)和式(22)分解方式类似于列车追踪间隔约束,通过求解主问题初步得到各项维修作业的开始时间和结束时间,继而判断是否存在列车与维修作业之间的冲突,添加式(21)和式(22)中不满足的约束条件至主问题中.

维修限速约束众多且较为复杂,主要是由于难

以确定在维修作业结束之后通过维修区间的列车次序.若能够确定哪些列车需要限速,则只需调整相应列车在维修区间的运行时间即可,本文据此设计两阶段法寻求次优解.第 1 阶段暂不考虑维修限速约束,求解得到各列车的到发时刻以及维修作业的起止时间;第 2 阶段固定所得到时刻表的列车到发顺序、列车和维修作业的前后顺序,松弛列车的到发时刻和维修作业的起止时间,并调整需要限速列车在维修区间的最小运行时间,重新求解并输出结果.

3.2 算法流程

基于前面的分析,以分解列车追踪间隔约束、到发线数量约束和维修作业约束为例,给出算法流程如下:

1) 令 R 为所有的列车基本运行约束, P 为维修作业开始和结束时间约束,暂不考虑列车追踪间隔约束、到发线数量约束、列车与维修作业之间冲突疏解约束和维修限速约束,设置 $X = \emptyset$, $S = \emptyset$.

2) 求解主问题 $M(R, X, S, P)$, 如果不可行,则输出原问题不可行,终止程序.否则输出列车在各站的到发时刻及各项维修作业的起止时间,转下一步.

3) 检查主问题得到解是否满足列车追踪间隔约束和列车与维修作业之间的冲突疏解约束.如果不满足,将疏解所有存在冲突的约束加入 X 中,转步骤 2).如果均满足相应约束,转下一步.

4) 检查主问题得到解是否满足到发线数量约束.一旦检测到某个车站某一时刻不满足,将相应约束添加至 S , 转步骤 2).如果不存在到发线占用冲突,转下一步.

5) 固定列车之间的到发顺序、列车和维修作业的前后顺序,判断哪些列车需要限速并加上限速约束式(27),重新求解主问题 $M(R, X, S, P)$, 输出结果,终止程序.

4 算例分析

以某复线铁路下行方向为例,全线共 23 个车站,运行列车 73 列.列车最小发车间隔、到达间隔和到发间隔均取为 3 min,起停附加时分分别为 2 min 和 3 min,车站到发线数量均设置为 2 条,沿线路方向从第 1 个区间开始共设置 10 项维修作业,第 1 项维修作业的开始时间范围为 7:00~7:30,第 2 项为 7:30~8:00,依此类推,最小持续时间均为 120 min.维修作业结束之后经过维修区间的第 1 列车限速值为 80 km/h,第 2 列车为 100 km/h,其余列车不考虑限速.本文将所有列车始发时间窗设置为可提前

30 min 和延迟 180 min,可以保证在不取消列车的前提下,使得原问题有可行解.

4.1 算法性能

为了更好地体现算法性能,暂不考虑列车限速约束,设计了 3 个不同规模大小的测试场景,分别用 4 种方法求解.1) GUROBI: 用求解器 GUROBI 6.5.0 求解原模型;2) RG_S: 运用行生成方法分解到发线数量约束;3) RG_XS: 运用行生成方法同时分解列车追踪间隔约束和到发线数量约束;4) RG_XSP: 运用行生成方法同时分解列车追踪间隔约束、到发线数量约束和列车与维修作业冲突疏解约束.测试的计算机参数为 Intel Pentium CPU B960 2.2 GHz,6GB 内存,在 Visual Studio 2013 平台上调用 GUROBI 的 LazyConstraintCallback 类实现行生成算法.求解结果如表 1 所示.

在第 1 种场景中, RG_XS 和 RG_XSP 无法在 1 h 内获得最优解,说明当列车和车站数量较多时,列车之间的冲突也相应较多,通过子问题反馈回列车追踪间隔约束,相对较为耗时,而分解列车与维修作业冲突疏解约束对求解效率影响不大.在第 3 种较小求解规模的场景中则体现出 RG_XS 和 RG_XSP 的优势.3 个场景测试都表明了 RG_S 可以加快模型的求解,与 GUROBI 比较求解时间分别减少 42.7%,29.2%和 28.3%.

表 1 4 种算法的求解时间比较

Tab.1 Solving time for the four methods

场景	(列车数, 车站数)	GUROBI/s	RG_S/s	RG_XS/s	RG_XSP/s
1	(73,23)	2 680	1533	—	—
2	(37,23)	219	155	79	75
3	(27,11)	67	48	14	14

注:表中“—”表示在 1 h 内没有求得最优解.

为说明到发线数量对模型求解的影响,运用 RG_S 方法分别求解设置到发线数量为 2 条和 3 条两种情形,结果如表 2 所示.

表 2 不同到发线数量的求解结果

Tab.2 Solutions for different number of station tracks

场景	到发线 2 条		到发线 3 条		Obj/min
	RG_S		RG_S	GUROBI	
	T/s	Obj/min	T/s	T/s	
1	1 533	12 740	1 436	2 343	12 740
2	153	6 461	101	196	6 461
3	48	3 237	22	42	3 237

其中 T 为求解时间,Obj 为目标函数值.到发线数量越少,越容易造成到发线能力不足,从而造成求解时间增加,但在 3 个场景中总旅行时间均没有变化.到发线数量为 3 条时,对比 GUROBI 的求解结

果, RG_S 在 3 种场景中提高求解效率分别为 38.7%,48.5%和 47.6%.

4.2 维修限速分析

根据之前算法测试, RG_S 对问题规模的适应性更好,故求解方法采用 RG_S,选取测试场景为第 2 种.分为两种方法比较,第 1 种是直接将限速约束保留在主问题中求解,记为 RG_S1,第 2 种是采用两阶段法,记为 RG_S2,求解结果如表 3 所示.表 3 中维修作业分别取前述 10 项维修作业当中的前几项,Gap 表示 GUROBI 当前搜索到的最好可行解与下界值间隔.可以看出随着维修作业数量的增多, RG_S1 求解越来越困难,而 RG_S2 几乎不受影响,且能够获得满意解.

表 3 RG_S1 和 RG_S2 的求解结果

Tab.3 Solutions for RG_S1 and RG_S2

维修作业数量	RG_S1			RG_S2	
	T/s	Obj/min	Gap/%	T/s	Obj/min
1	47	3 179	0	11	3 184
2	94	3 232	0.24	10	3 240
3	375	3 280	0.32	10	3 348
4	435	3 471	4.36	11	3 373
5	×	×	×	29	3 450

注:“×”表示 1 h 内没有求得可行解.

5 结论

1)构建了考虑到发线数量 and 维修作业约束的复线铁路列车运行图优化的 MILP 模型,可以更好地协调天窗安排和列车运行图编制.分析了不同类型约束行生成的分解方法,并比较不同分解方法的求解效率.

2)算例对比验证了当求解规模较大时,采取逐步添加列车追踪间隔约束的方式,模型求解将会更耗时.今后可进一步研究在模型一开始求解时,将列车追踪间隔约束初始化为冲突可能性的较大约束,从而减少迭代的时间.将到发线数量约束逐步添加,在 3 个测试场景中求解时间分别减少 25%~45%,可运用于实时性要求较高的列车运行调整问题.

3)考虑维修限速约束后,模型求解效率受维修作业数量影响较大,在第 3 种测试场景中,当维修作业数量增加到 5 项时,无法在 1 h 内获得可行解.通过设计两阶段法,可以在 30 s 内获得满意解.

参考文献(References):

[1] 彭其渊,杨明伦,聂勋煌.单线区段实用货物列车运行图的优化模型及算法[J].铁道学报,1995,17(3):15—20.

PENG Qiyuan, YANG Minglun, NIE Xunhuang. Optimization model and its algorithm for making wagon diagram on single-track lines[J]. Journal of the China Railway Society, 1995, 17(3): 15–20. (in Chinese)

[2] 赵强, 严余松. 单线铁路列车运行调整计算机辅助决策系统研究[J]. 铁道学报, 2000, 22(4): 1–7.

ZHAO Qiang, YAN Yusong. Research on computer aided decision system of adjusting train diagram on single-track railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2000, 22(4): 1–7. (in Chinese)

[3] ZHOU X S, ZHONG M. Bicriteria train scheduling for high-speed passenger railroad planning applications[J]. European Journal of Operational Research, 2005, 167(3): 752–771.

[4] MENG L Y, ZHOU X S. Simultaneous train rerouting and rescheduling on an N-track network: a model reformulation with network-based cumulative flow variables [J]. Transportation Research Part B Methodological, 2014, 67(3): 208–234.

[5] LUAN X J, MIAO J R, MENG L Y, et al. Integrated optimization on train scheduling and preventive maintenance time slots planning[J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies, 2017, 80:329–359.

[6] INFORMS R. Problem description and released data set for problem solving competition[EB/OL]. (2016-06-08) [2017-02-01]. <http://www.informs.org/Community/RAS/ProblemSolving-Competition/2016-RAS-Problem-Solving-Competition>.

[7] ZHAN S G, KROON L G, VEELENTURF L P, et al. Real-time high-speed train rescheduling in case of a complete blockage [J]. Transportation Research Part B Methodological, 2015, 78(1): 182–201.

[8] MENG L Y, ZHOU X S. Robust single-track train dispatching model under a dynamic and stochastic environment: a scenario-based rolling horizon solution approach [J]. Transportation Research Part B Methodological, 2011, 45(7): 1080–1102.

[9] TÖRNQUIST J, PERSSON J A. N-tracked railway traffic re-scheduling during disturbances[J]. Transportation Research Part B Methodological, 2007, 41(3): 342–362.

[10] 史峰, 魏堂建, 周文梁, 等. 考虑动车组周转和到发线运用的高速铁路列车运行图优化方法[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(2): 107–114.

SHI Feng, WEI Tangjian, ZHOU Wenliang, et al. Optimization method for train diagram of high-speed railway considering the turnover of multiple units and the utilization of arrival-departure tracks[J]. China Railway Science, 2012, 33(2): 107–114. (in Chinese)

[11] MANNINO C, LAMORGESE L, PIACENTINI M. Optimal train dispatching by Benders'-like reformulation[J]. Transportation Science, 2015, 50(3): 910–925.

[12] LAMORGESE L, MANNINO C. An exact decomposition approach for the real-time train dispatching problem[J]. Operations Research, 2015, 63(1): 48–64.

[13] 杨浩. 铁路运输组织学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2013:361–363.

YANG Hao. Organization of railway transportation [M]. Beijing: China Railway Press, 2013: 361–363. (in Chinese)



(上接第 29 页)

[3] 刘维林. 基于动态蚁群算法的集装箱国际多式联运路径优化研究[J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 2012(3):57–62.

LIU W L. Route optimization of international multimodal container transportation based on dynamic ant colony algorithm[J]. Journal of Beijing Jiaotong University(Social Sciences Edition), 2012(3):57–62. (in Chinese)

[4] SUN Y, LANG M. Bi-objective optimization for multimodal transportation routing planning problem based on Pareto optimality[J]. Journal of Industrial Engineering and Management, 2015, 8(3): 1195–1217.

[5] 张建勇, 郭耀煌. 一种多式联运网络的最优分配模式研究[J]. 铁道学报, 2002, 24(4):114–116.

ZHANG J Y, GUO Y H. A Multimode transportation network assignment model [J]. Journal of the China Railway Society, 2002, 24(4):114–116. (in Chinese)

[6] WINEBRAKE J J, CORBETT J J, FALZARANO A, et al. Assessing energy, environmental, and economic tradeoffs in intermodal freight transportation.[J]. Air & Waste, 2008, 58(8):1004–1013.

[7] LIU B, IWAMURA K. Chance constrained programming with fuzzy parameters[J]. Fuzzy Sets & Systems, 1998, 94(2):227–237.

[8] 刘艳芳. 考虑模糊需求的多式联运路径优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.

LIU Yanfang. Study on the multimodal routing optimization with fuzzy customer demands [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016. (in Chinese)