

铁路编组站列车解编顺序优化

呼志刚¹,黎浩东²,何世伟²

(1.中国铁路太原局集团有限公司,太原 030013;2. 北京交通大学 交通运输学院,北京 100044)

摘 要:优化到达列车的解体顺序和出发列车的编组顺序是编组站作业计划的核心内容之一.基于车流接续与分配方案,构建综合考虑解体顺序和编组顺序的优化模型,包括单溜放驼峰、峰尾一台调机情形,多台解编调机情形的解编顺序优化模型.所构建模型还可进一步扩展至考虑列车技术检查顺序的优化.最后设计案例验证模型的正确性,通过对不同数量解体调机、编组调机情形的列车解编顺序优化的测算可知:受车流量的影响,双推双溜的作业效率不一定比双推单溜高;解编作业相互影响,两者的作业能力也应相互协调,只增加解体作业能力或者只增加编组作业能力对整个系统作业效率的影响较小.

关键词:铁路运输;编组站;解体顺序;编组顺序

中图分类号:U292.31 **文献标志码:**A

Optimization of hump and assemble sequence
of trains in railway marshalling yard

HU Zhigang¹, LI Haodong², HE Shiwei²

(1.Taiyuan Railway Bureau Group Co., Ltd., Taiyuan 030013,China;

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

Abstract:Daily operation of marshalling yard mainly focuses on optimizing the hump sequence of arrival trains and assemble sequence of departure trains. Based on the wagon-flow allocation plan, this paper presents two sequencing models of hump and assemble, such as the sequencing model with one hump engine and one-yard engine, as well as a general model with multi-engines, which can be improved to take the optimization of technical inspection sequence of trains into consideration. At last, numerical examples are proposed to verify those models. The calculation results of different numbers of shunting engines show that the efficiency of parallel hump process does not always better than single hump process and the hump sequence and assemble sequence are inter-acted, and the capacities of two parts should be coordinated with each other. The efforts on the efficiency of the whole dispatching system appears insignificant, if only the capacity of the hump side or assemble side is increased.

Keywords:railway transportation; marshaling yard;hump sequence; assemble sequence

收稿日期:2016-09-20;修回日期:2017-06-25
基金项目:国家自然科学基金(71701014);北京市自然科学基金(9164032,J160001)
Foundation items:National Natural Science Foundation of China (71701014);Beijing Natural Science Foundation(9164032,J160001)
第一作者:呼志刚(1972—),男,山西屯留人,博士生.研究方向为运筹管理,铁路运营管理优化.email:hzg720623@163.com.
通信作者:黎浩东(1983—),男,湖南邵阳人,副教授,博士.email:lihd@bjtu.edu.cn.

引用格式:呼志刚,黎浩东,何世伟.铁路编组站列车解编顺序优化[J].北京交通大学学报,2017,41(6):61—68.
HU Zhigang, LI Haodong, HE Shiwei.Optimization of hump and assemble sequence of trains in railway marshalling yard[J].
Journal of Beijing University,2017,41(6):61—68.(in Chinese)

列车解编顺序是编组站阶段计划的核心内容之一,它规定了到达列车解体及出发列车编组的开始时刻和结束时刻.为保证出发列车满轴正点发车,必须将车流推算、调机运用和到发线运用三者综合协调,因此部分研究将其中的车流推算和调机运用^[1-3],或者将三者进行综合优化^[4].然而,在计算这些综合优化模型时,主要的求解思路是将其分为几个子问题^[5],采用如“配流—解编顺序—股道运用—配流…”的求解思路^[1],这凸显了单独研究各子问题的重要性.针对列车解体或编组顺序的优化问题,Shi^[6],Yagar 等^[7]提出了列车解体顺序的仿真模型;Kraft^[8]构建了列车解体顺序优化模型,研究了列车解体顺序和编组场股道运用的组合优化问题.王世东等^[9-13]采用不同方法对编组站列车解编顺序进行了探讨.

已有研究大多是将解体顺序和编组顺序分开考虑,如分别构建两者的优化模型^[6].在阶段计划编制时,对解编顺序的考虑也基本都是先以列车出发顺序为编组顺序,计算到达列车最早、最晚解体时刻,进而确定列车解体顺序;其后,根据解体方案计算出出发列车最早、最晚编组时刻,进而确定编组方案.这种处理方式会压缩解空间,有可能错过更优的解编方案;与此同时,在阶段计划编制过程中,将两者分开考虑会增加解编方案反复迭代的次数及其与配流方案协调的难度,影响阶段计划编制的效率.

在车流接续方案(到达车组和出发列车的对应关系)已定的基础上,本文作者将列车解体顺序和编组顺序优化组合至一个优化模型,这种方法可提高列车解编方案的编制质量,为阶段计划的编制提供新的计算思路;更为重要的是通过该组合模型,可很容易地发现编组站的作业能力瓶颈.首先构建单溜放驼峰、峰尾一台调机情形下的列车解编顺序优化模型(Hump and Assemble Sequencing Optimization, HASO);并将其扩展至多台调机的任意情形;所构建的模型还可进一步地将列车技术检查顺序优化纳入其中.最后设计案例,对模型进行验证.对于不同站型的编组站,该模型只需根据其作业组织过程与方式,修订解编作业时间参数即可适应.

1 列车解编顺序优化模型构建

1.1 单溜放驼峰、峰尾一台编组调机情形

在配流方案给定的条件下,各到达车组与出发列车的对应关系已知,解编顺序优化的目标就是尽可能确保车流接续方案的执行,即最大化计划周期内接续和分配的车流量.编组站解编作业遵循如下

特征:①任一列车(到达列车或者出发列车)都只能被一台调机服务;②任意一台调机同时只能服务一列列车,必须完成前一列车的解体/编组作业,才能解体/编组下一列车.

假定计划阶段内有 n 列到达列车, $i = 1, 2, \dots, n$, 列车 i 的到达时刻为 a_i , 列检时间、解体时间分别设为 t_i 和 h_i . 为方便模型的构建,增加两列虚拟到达列车 $i = 0$ 和 $i = n + 1$, 其到达时刻设为阶段初始时刻,列检和解体时间都设为 0. 与此同时,假定阶段内有 m 列出发列车, $j = 1, 2, \dots, m$, 其出发时刻、列检时间和编组时间分别为 d_j 、 b_j 和 v_j . 相似的,增加两列虚拟出发列车 $j = 0$ 和 $j = m + 1$, 虚拟列车的出发时刻设为阶段末时刻,列检时间和编组时间都为 0. 设 U 为到达车组集合($u \in U$), U_i 为到达列车 i 的车组集合, 则有 $U = \bigcup_{i=1, \dots, n} U_i$. 根据配流方案可知每列出发列车 j 的车组集合, 设为 U^j , 则有 $U = \bigcup_{j=1, \dots, m} U^j$. 车组在被编组之前必须解体至编组场内,在解体和编组之间需要一定的冗余时间 T .

编组站列车解编方案优化需作如下决策:

- 1) 解体顺序 p_{ik} , 当到达列车 k 紧随到达列车 i 解体时取值为 1, 否则取值为 0;
- 2) 编组顺序 q_{jl} , 当出发列车 l 紧随出发列车 j 进行编组作业时取值为 1, 否则取值为 0;
- 3) x_u 表示车组是否根据配流方案在当前阶段分配出去, 是则取值为 1, 否则取值为 0;
- 4) 到达列车 i 的解体开始时刻 r_i , 以及出发列车 j 的编组开始时刻 s_j .

从车站调度员角度,需要及时将车组解体和编组,车组如不能在本阶段完成接续,则需要等待至下一周期,延误时间甚至可能超过 24 h. 设 Δ_u 为不能完成接续时车组 u 的延误时间,每个车组 u 包含的车辆数计为 δ_u , 则优化目标可设为总延误时间最小化, 表示为 $\sum_{u \in U} \delta_u \cdot \Delta_u \cdot (1 - x_u)$, 其中 $\sum_{u \in U} \delta_u \cdot \Delta_u$ 为常量. 综上分析,构建单溜放驼峰、峰尾一台调机的编组站解编顺序优化模型(HASO-1)如下.

HASO-1: $\max z = \sum_{u \in U} \delta_u \cdot \Delta_u \cdot x_u$ (1)

s.t. $r_k - (r_i + h_i) \geq M \cdot (p_{ik} - 1),$
 $i, k = 1, \dots, n, i \neq k$ (2)

$r_i - t_i - a_i \geq 0 \quad i = 1, \dots, n$ (3)

$s_j - r_i - h_i - T \geq M \cdot (x_u - 1),$
 $i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m; u \in U_i \cap U^j$ (4)

$s_l - (s_j + b_j) \geq M \cdot (q_{jl} - 1),$
 $j, l = 1, \dots, m, j \neq l$ (5)

$$d_j - s_j - b_j - v_j \geq 0 \quad j=1, \dots, m \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^{n+1} p_{ik} = 1 \quad i=0, 1, \dots, n \quad (7)$$

$$\sum_{i=0}^n p_{ik} = 1 \quad k=1, \dots, n+1 \quad (8)$$

$$\sum_{l=1}^{m+1} q_{jl} = 1 \quad j=0, 1, \dots, m \quad (9)$$

$$\sum_{j=0}^m q_{jl} = 1 \quad l=1, \dots, m+1 \quad (10)$$

$$x_u, p_{ik}, q_{jl} \in \{0, 1\}; r_i, s_j \geq 0 \quad (11)$$

目标函数式(1)表示最大化出发车组总的延误时间;式(2)表示相邻两到达列车 k 和 i 的解体时间约束;式(3)表示到达列车 i 必须在列检后才能进行解体作业;式(4)为车组接续与分配的时间约束,即车组在编组之前必须被解体至编组场中;式(5)表示相邻两出发列车 l 和 j 的编组时间约束;式(6)为出发时刻约束;式(7)和式(8)为唯一性约束,即对于任一到达列车,只能有一列列车在其之前、之后解体;相似的,式(9)和式(10)表示对于任一出发列车,只能有一列列车在其之前、之后编组。

1.2 多台调机情形

在大部分编组站内,特别是路网型编组站,有多台调机进行解体 and 编组作业,此时需要对 1.1 节所构建的模型进行修改.考虑解编作业的特点,只需增加约束式(12)和(13),并将约束式(7)~式(10)修改为式(14)和式(15),便可得到多台调机情形的列车解编顺序优化模型(HASO-2)。

HASO-2: 式(1)

$$\text{s.t.} \quad \sum_{k=1}^{n+1} p_{0k} = \sum_{i=0}^n p_{i,n+1} = \epsilon \quad (12)$$

$$\sum_{l=1}^{m+1} q_{0l} = \sum_{j=0}^m q_{j,m+1} = \phi \quad (13)$$

$$\sum_{k=1}^{n+1} p_{ik} = \sum_{k=0}^n p_{ki} = 1, i=1, \dots, n \quad (14)$$

$$\sum_{l=1}^{m+1} q_{jl} = \sum_{l=0}^m q_{lj} = 1, j=1, \dots, m \quad (15)$$

式(2)~式(6);式(11)

式中, ϵ 和 ϕ 分别为解体调机和编组调机的数量.式(2)、式(12)和式(14)表示被同一解体调机进行解体作业的到达列车的解体顺序;相似的,式(5)、式(13)和式(15)表示被同一编组调机进行编组作业的出发列车的编组顺序。

当 ϵ 和 ϕ 都为 1 时,则等同于 HASO-1.部分编组站虽然配备了多台解体调机,但如只进行单溜放作业,只需修订其解体时间标准,则可视为一台解体调机($\epsilon=1$).而对于多台编组调机的编组站,如调

机数量少于牵出线数量,将参数 ϕ 设定为调机数量;反之,将 ϕ 设定为牵出线数量,HASO-2 便可适用于这些情形。

1.3 考虑列检顺序的扩展模型

目前关于铁路编组站调度计划编制的研究,都是假定列检组数量足够多,能满足“随到随检”.在实际作业过程中,列检顺序和列车解编顺序是紧密相关的,列检组的数量也不一定能满足“随到随检”,特别是随着人工成本的快速增加,优化列检顺序的重要性也将逐渐凸显。

设 τ 和 φ 分别为到达场和出发场列检组数量;定义变量 o_{ik} 为到达列车的技检顺序,当到达列车 i 和 k 由同一列检组进行车检货检,且列车 k 紧随列车 i 进行技检作业时, $o_{ik}=1$,否则 $o_{ik}=0$;变量 w_{jl} 为出发列车的技检顺序,当出发列车 j 和 l 由同一列检组进行车检货检,且列车 l 紧随列车 k 进行技检作业时, $w_{jl}=1$,否则 $w_{jl}=0$; θ_i 为到达列车 i 的技检开始时刻; ϑ_j 为出发列车 j 的技检开始时刻.可构建考虑列检顺序的扩展模型(HASO-3)如下。

HASO-3: 式(1)

$$\text{s.t.} \quad r_i - \theta_i - t_i \geq 0 \quad i=1, \dots, n \quad (16)$$

$$\theta_i - a_i \geq 0 \quad i=1, \dots, n \quad (17)$$

$$\theta_k \geq \theta_i + t_i - M \cdot (1 - o_{ik}), \quad i, k=1, \dots, n, i \neq k \quad (18)$$

$$d_j - \vartheta_j - v_j \geq 0 \quad j=1, \dots, m \quad (19)$$

$$\vartheta_j - s_j - b_j \geq 0 \quad j=1, \dots, m \quad (20)$$

$$\vartheta_l \geq \vartheta_j + v_j - M \cdot (1 - w_{jl}), \quad j, l=1, \dots, n, j \neq l \quad (21)$$

$$\sum_{e=1}^{n+1} o_{0e} = \sum_{i=0}^n o_{i,n+1} = \tau \quad (22)$$

$$\sum_{l=1}^{m+1} w_{0l} = \sum_{j=0}^m w_{j,m+1} = \varphi \quad (23)$$

$$\sum_{k=1}^{n+1} o_{ik} = \sum_{k=0}^n o_{ki} = 1, \quad i=1, \dots, n \quad (24)$$

$$\sum_{l=1}^{m+1} w_{jl} = \sum_{l=0}^m w_{lj} = 1, \quad j=1, \dots, m \quad (25)$$

式(2), 式(4), 式(5)

式(12)~式(15)

$$x_u, o_{ie}, p_{ik}, q_{jl}, w_{jl} \in \{0, 1\}; r_i, s_j, \theta_i, \vartheta_j \geq 0 \quad (26)$$

式(16)表示列车解体必须在列车技检结束之后;式(17)确保列车 i 只能在到达之后才能进行技检作业;式(18)约束到达列车技检顺序;式(19)表示

出发列车 j 需在技术检查之后才能出发;式(20)表示出发列车技检必须在列车编组完成之后;式(21)约束出发列车技检顺序,式(18)、式(22)和式(24)表示被同一列检组服务的到达列车的技检顺序;相似的,式(21)、式(23)和式(25)表示被同一列检组服务的出发列车的技检顺序.

假定计划周期为 24 h,设计不同数量到达和出发列车、车组,以及不同数量列检组、调机的情形,采用 IBM ILOG Cplex Optimization Studio 软件对所构建的 HASO-3 模型进行测试.假定列车技检时间为 60 min,解体时间为 2.45 辆/min,平均编组时间设为 30 min,测试结果如表 1 所示.

表 1 不同情形下的 ILOG 求解效率分析
Tab.1 Computational performance of ILOG

到达列车 数量	出发列车 数量	车组数	列检组数量		解体调机 数量	编组调机 数量	目标函数 值/min	计算时间/s
			到达场	出发场				
23	21	366	1	1	1	1	35 064	11.22
			1	1	2	2	35 064	9.75
			2	2	1	1	35 160	1.64
			2	2	2	2	35 160	0.25
28	28	444	1	1	2	2	om	om
			2	2	1	1	38 352	7.08
			2	2	2	2	38 352	3.99
			3	3	1	1	38 352	4.17
35	35	554	3	3	2	2	38 352	2.84
			2	2	1	1	om	om
			2	2	2	2	43 488	20.90
			3	3	1	1	43 488	25.63
40	40	628	3	3	2	2	43 488	12.50
			3	3	3	3	43 488	10.20
			2	2	2	2	om	om
			3	3	2	2	46 344	30.30
40	40	628	3	3	3	3	46 344	36.43
			4	4	3	3	46 344	21.23
			4	4	4	4	46 344	20.26

注:om 表示 Cplex 因内存不足而不能获得最优解.

2 算例分析

以阶段作业计划为例设计算例对模型进行验证,已知基本信息有:列车到发计划(如表 2 所示),到达列车和出发列车各 12 辆(其中 A0 表示站存车组).假设到达列车和出发列车的技检时间均为 40 min,而列车解体时间和编组时间均为 25 min.根据阶段配流方案,得到车组的接续与分配关系如表 3 所示.设 $\Delta_u=24$ min,根据调机数量的差异,设置不同情形对模型进行验证.在上述到发列车数量及车组数量条件下,求解变量、约束数量规模不大,可利用 Cplex 进行求解.

情形 1:一台解体调机和一台编组调机.

对于大部分情形,都能在较短的时间内获取解编顺序、列检顺序的最优解.而对于部分不能获取最优解的情形,主要原因在于列检组数量和调机数量无法完成给定数量到发列车的列检作业和解编作业.如只考虑列车解编顺序(HASO-1 或 HASO-2),由于变量规模的减小,其求解时间将更短.考虑阶段到发列车的数量,Cplex 能够满足列车解编作业计划编制对时效性的要求.与此同时,列车解编顺序、技检顺序均为稀疏矩阵,存在大量的不可行决策值,利用到达列车和出发列车之间的车流接续关系,可剔除部分不可行决策值,也可有效提高求解效率.

该情形下得到的解编顺序如表 4 所示,此时目标函数为 10 080 min,完成接续的车辆数为 420 辆.受解编能力的影响,有 5 列到达列车不能及时解体,4 列出发列车不能及时编组.

情形 2:一台解体调机和两台编组调机.

该情形下的解编顺序如表 5 所示,目标函数值为 11 232 min,完成接续的车辆数为 468 辆(有多台调机时,在顺序一列中用 E 表示编组调机,如 E1-1 一栏表示出发列车 B1 利用调车机车 E1 编组,编组顺序为 1).相比于情形 1,由于编组能力的提升,完成接续的车辆数增加了 48 辆.而受解体能力的影响,仍有 2 列到达列车不能及时解体,虽然 A10、A12 完成了解体作业,但其作业时间已晚于所有出发列

车的编组开始时刻车组并不能完成接续和分配.这也是解编列车数量有增加(相对于情形 1),而目标函数值增幅较小的原因.

情形 3:两台解体调机和一台编组调机.

如两台解体调机能同时进行解体作业(双溜放形式),可得解编顺序如表 6 所示(有多台调机时,在顺序一列中用 e 表示解体调机),目标函数值为 11 808 min,完成接续的车辆数为 492 辆.受编组能力的影响,4 列出发列车不能及时完成编组作业而晚点.

相比于情形 1,由于解体能力的提升,完成接续的车辆数增加了 72 辆;相比于情形 2,完成接续的

车辆数增加了 24 辆,可知在该算例中,增加解体能力比增加编组能力的效果更加明显.其原因在于解体能力的增加,可将车流及时解体至编组场内,有利于车流的接续;而受编组能力的限制,取消部分出发列车的编组,在一定程度上可延长车流接续的时间,这也有利于车流的接续.

如采用单溜放作业形式,可视为一台解体调机,但调机解体作业时间会得到压缩(一台调机解体列车时,另一机车完成列车的推峰作业).设此时列车解体作业时间为 15 min,计算可得目标函数值为 12 624 min,完成接续的车辆数为 526,比双溜放作业形式增加了 34 辆,其原因分析见情形 4.

表 2 列车到发计划
Tab.2 Arrival and departure schedule

到达计划				出发计划			
到达列车	到达时刻	到达列车	到达时刻	出发列车	出发时刻	出发列车	出发时刻
A1	9:00	A7	10:25	B1	11:20	B7	12:50
A2	9:10	A8	10:30	B2	11:30	B8	13:00
A3	9:30	A9	10:44	B3	11:55	B9	13:15
A4	9:42	A10	10:50	B4	12:03	B10	13:20
A5	9:50	A11	11:00	B5	12:10	B11	13:30
A6	9:58	A12	11:15	B6	12:35	B12	13:58

表 3 车组的接续与分配关系
Tab.3 Railcar connection between inbound trains and outbound trains

编号	组号	到达列车	出发列车	编号	组号	到达列车	出发列车	编号	组号	到达列车	出发列车
1	1	A0	B3	21	6	A4	B5	41	5	A8	B5
2	3	A0	B4	22	4	A4	B4	42	2	A8	B9
3	4	A0	B1	23	7	A4	B8	43	7	A8	B8
4	1	A1	B3	24	1	A5	B6	44	1	A9	B11
5	2	A1	B3	25	2	A5	B6	45	2	A9	B9
6	7	A1	B8	26	7	A5	B8	46	4	A9	B10
7	5	A1	B5	27	3	A6	B7	47	2	A9	B9
8	1	A1	B3	28	5	A6	B5	48	3	A10	B7
9	3	A2	B1	29	4	A6	B4	49	6	A10	B12
10	4	A2	B1	30	3	A6	B7	50	7	A10	B8
11	5	A2	B5	31	5	A6	B12	51	4	A10	B10
12	3	A2	B1	32	6	A6	B5	52	1	A11	B11
13	6	A2	B5	33	3	A7	B7	53	6	A11	B12
14	1	A3	B2	34	5	A7	B12	54	2	A11	B9
15	2	A3	B2	35	7	A7	B8	55	5	A11	B12
16	4	A3	B10	36	4	A7	B7	56	1	A11	B11
17	2	A3	B2	37	3	A7	B7	57	6	A12	B12
18	3	A4	B4	38	7	A7	B8	58	4	A12	B10
19	4	A4	B4	39	2	A8	B9	59	5	A12	B12
20	5	A4	B5	40	7	A8	B8	60	4	A12	B10

情形 4:两台解体调机和两台编组调机.

如采用单溜放作业,可视为一台解体调机(列车解体作业时间设为 15 min),计算可得列车解编方案如表 7 所示,目标函数值为 19 728 min,完成接续的车辆数为 822 辆.而假设两台解体调机可同时进

行解体作业(双溜放作业),作业时间都为 25 min,可得表 8 所示的解编顺序.此时,目标函数为 17 088 min,完成接续的车辆数为 712 辆.虽然能够进行双溜放作业,但本案例中,由于列车数量有限,以及解编作业时间的设置,导致驼峰能力并不能充分利用,

表 4 解体顺序和编组顺序(情形 1)

Tab.4 Hump sequence and assemble sequence (Scenario 1)

解体顺序				编组顺序			
顺序	到达列车	开始时刻	结束时刻	顺序	出发列车	开始时刻	结束时刻
1	A2	9:50	10:15	1	B6	9:50	10:15
2	A1	10:15	10:40	2	B1	10:15	10:40
—	A3	—	—	—	B2	—	—
—	A4	—	—	3	B3	10:40	11:05
—	A5	—	—	—	B4	—	—
3	A6	10:40	11:05	4	B5	11:05	11:30
—	A7	—	—	—	B7	—	—
4	A8	11:10	11:35	5	B8	11:35	12:00
5	A9	11:35	12:00	6	B9	12:00	12:25
6	A11	12:00	12:25	—	B10	—	—
7	A10	12:20	12:50	7	B11	12:25	12:50
—	A12	—	—	8	B12	12:53	13:18

表 5 解体顺序和编组顺序(情形 2)

Tab.5 Hump sequence and assemble sequence (Scenario 2)

解体顺序				编组顺序			
顺序	到达列车	开始时刻	结束时刻	顺序	出发列车	开始时刻	结束时刻
1	A2	9:50	10:15	E1-1	B1	10:15	10:40
2	A1	10:15	10:40	E1-2	B3	10:40	11:05
—	A3	—	—	E1-3	B5	11:05	11:30
—	A4	—	—	E1-4	B8	11:50	12:15
3	A5	10:40	11:05	E1-5	B10	12:15	12:40
4	A7	11:05	11:30	E2-1	B2	10:20	10:45
5	A9	11:30	11:55	E2-2	B4	10:45	11:10
6	A11	11:55	12:20	E2-3	B6	11:10	11:35
7	A6	12:20	12:45	E2-4	B7	11:35	12:00
8	A8	12:45	13:10	E2-5	B9	12:00	12:25
9	A10	13:10	13:35	E2-6	B11	12:25	12:50
10	A12	13:35	14:00	E2-7	B12	12:53	13:18

表 6 解体顺序和编组顺序(情形 3)

Tab.6 Hump sequence and assemble sequence (Scenario 3)

解体顺序				编组顺序			
顺序	到达列车	开始时刻	结束时刻	顺序	出发列车	开始时刻	结束时刻
e1-1	A1	9:40	10:05	1	B5	9:50	10:15
e1-2	A3	10:10	10:35	2	B1	10:14	10:40
e1-3	A5	10:35	11:00	—	B2	—	—
e1-4	A4	11:00	11:25	3	B3	10:40	11:05
e1-5	A10	11:30	11:55	—	B4	—	—
e1-6	A9	12:00	12:25	4	B6	11:05	11:30
e1-7	A12	12:28	12:53	5	B7	11:30	11:55
e2-1	A2	9:50	10:15	6	B8	11:55	12:20
e2-2	A6	10:38	11:03	—	B9	—	—
e2-3	A7	11:05	11:30	—	B10	—	—
e2-4	A8	11:30	11:55	7	B11	12:25	12:50
e2-5	A11	12:00	12:25	8	B12	12:53	13:18

调机的空闲时间相对单溜放形式有所增加;与此同时,由于所设计算例车流接续时间较短,更长的解体时间对车流接续的影响更大.因此,在本案例中,采用双溜放作业形式时,完成接续的车辆数比单溜放作业形式减小了 110 辆.如若再考虑双溜放条件下解体列车作业时的相互影响(如道岔组的占用),其作业效率将进一步缩减,这也是当前大部分编组站都采用双推单溜作业形式的原因之一.

表 7 单溜放条件下解体顺序和编组顺序(情形 4)

Tab.7 Hump sequence and assemble sequence under single hump process (Scenario 4)

解体顺序				编组顺序			
顺序	到达列车	开始时刻	结束时刻	顺序	出发列车	开始时刻	结束时刻
1	A1	9:40	9:55	E1-1	B1	10:15	10:40
2	A2	9:55	10:10	E1-2	B3	10:40	11:05
3	A3	10:10	10:25	E1-3	B5	11:05	11:30
4	A4	10:25	10:40	E1-4	B6	11:30	11:55
5	A6	10:40	10:55	E1-5	B9	12:00	12:25
6	A5	10:55	11:10	E1-6	B11	12:25	12:50
7	A7	11:10	11:25	E1-7	B12	12:53	13:18
8	A8	11:25	11:40	E2-1	B2	10:25	10:50
9	A9	11:40	11:55	E2-2	B4	10:58	11:23
10	A12	11:55	12:10	E2-3	B7	11:25	11:50
11	A11	12:10	12:25	E2-4	B8	11:50	12:15
12	A10	12:25	12:40	E2-5	B10	12:15	12:40

编组站列车解体作业和编组作业是相互关联、相互影响的,在作业能力设计及扩张时应综合协调两者之间的关联关系.单独提升解体作业能力或者编组能力,对编组站作业效率的提升幅度较小.如相对于情形 1,增加一台编组调机(情形 2)时,完成接续的车辆数增加 48,增幅为 11.43%;增加一台解体调机(情形 3,单溜放形式)时,完成接续的车辆数增

加 106,增幅为 25.24%;如同时增加一台解体调机和编组调机,完成接续的车辆数可增加 402,增幅为 95.71%.通过将解体作业和编组作业进行综合考虑,对比完成解体的到达列车数量和完成编组作业的出发列车数量,可直观地了解解编作业系统的能力瓶颈所在.

表 8 双溜放条件下解体顺序和编组顺序(情形 4)

Tab.8 Hump sequence and assemble sequence under parallel hump process (Scenario 4)

解体顺序				编组顺序			
顺序	到达列车	开始时刻	结束时刻	顺序	出发列车	开始时刻	结束时刻
e1-1	A1	9:40	10:10	E1-1	B1	10:15	10:40
e1-2	A3	10:10	10:35	E1-2	B3	10:40	11:05
e1-3	A6	10:38	11:03	E1-3	B5	11:05	11:30
e1-4	A7	11:05	11:30	E1-4	B7	11:35	12:00
e1-5	A9	11:30	11:55	E1-5	B9	12:00	12:25
e1-6	A11	11:55	12:20	E1-6	B11	12:25	12:50
e1-7	A12	12:20	12:45	E1-7	B12	12:53	13:18
e2-1	A2	9:50	10:15	E2-1	B2	10:25	10:50
e2-2	A4	10:22	10:47	E2-2	B4	10:58	11:23
e2-3	A5	10:47	11:12	E2-3	B6	11:25	11:50
e2-4	A8	11:12	11:37	E2-4	B8	11:50	12:15
e2-5	A10	11:37	12:02	E2-5	B10	12:15	12:40

列检组的数量也会直接关系到列车解编顺序和车流的接续,通过测算不同列检组的数量可知,如采用情形 4(解体调机和编组调机各两台,且采用双溜放作业形式),本案例中,到达场和出发场各至少配置 3 组列检人员,才能满足列车的“随到随检”.如表 9 所示,通过与情形 4 中目标值的比较可知,当列检组少于 3 时,都会导致更多的列车不能及时解编.当到达和出发列检组数都为 3 时,可得到列检顺序如表 10 所示(其中 g 和 G 分别表示到达与出发列检组).可知,将列检顺序纳入优化模型进行综合优化,有利于车站确定合理的列检组数量.

表 9 列检组数对目标函数值的影响

Tab.9 Relationship between inspection group number and objective function value

到达列检组	出发列检组	目标函数值/min	百分差/%
2	2	14 208	16.85
3	2	14 928	12.64
2	3	14 400	15.73
3	3	17 088	—
3	4	17 088	—
4	3	17 088	—
4	4	17 088	—

表 10 中,出发列车 B2 因作业时间的关系不能完成编组和列检作业,但该方案下的目标函数值仍为

17 088 min,与表 8 所示解编顺序下目标函数值相同.虽然 B2 不能完成编组作业,但由于减少了一列列车的作业,延缓了部分出发列车的作业时间,车流接续时间也相应延长.此时,表 8 方案中部分不能完成接

续的车组,在如表 9 所示的方案中完成了接续.这也反映出所构建模型在单目标条件下的不足:不能充分平衡出发列车数量和出发车辆数的关系,需要将车流推算(配流)和列车解编方案进行综合协调.

表 10 到达列车和出发列车的列检顺序
Tab.10 Inspection sequences of inbound trains and outbound trains

列检顺序	到达列车	开始时刻	结束时刻	列检顺序	出发列车	开始时刻	结束时刻
g1-1	A1	9:00	9:40	G1-1	B1	10:40	11:20
g2-1	A2	9:10	9:50	—	B2	—	—
g3-1	A3	9:30	10:10	G2-1	B3	10:30	11:10
g1-2	A4	9:42	10:22	G2-2	B4	11:12	11:52
g3-2	A5	10:10	10:50	G3-1	B5	11:30	12:10
g2-2	A6	9:58	10:38	G1-2	B6	11:55	12:35
g1-3	A7	10:30	11:10	G2-3	B7	12:00	12:40
g2-3	A8	10:38	11:18	G3-2	B8	12:10	12:50
g3-3	A9	10:55	11:35	G1-3	B9	12:35	13:15
g1-4	A10	11:10	11:50	G2-4	B10	12:40	13:20
g2-4	A11	11:20	12:00	G3-3	B11	12:50	13:30
g3-4	A12	11:35	12:15	G1-4	B12	13:18	13:58

3 结 论

1)基于车流接续关系,将编组站列车解体顺序和编组顺序进行组合优化,构建了单溜放驼峰、峰尾一台编组调机,以及任意解编调机数量的列车解编顺序优化模型.模型还可进一步扩展至考虑列检顺序,形成编组站作业顺序优化的综合模型.

2)通过算例的设计验证模型的有效性,对不同情形下的列车解编方案测算可知,将列车解体顺序和编组顺序进行组合,有利于解编方案和车流接续与推算的协调,也有利于发掘编组站解编作业系统的能力瓶颈;进一步考虑列检顺序,可辅助车站合理确定列检组的数量.

本文所构建模型没有考虑车站股道能力,特别是编组场股道的作业能力,这是影响配流方案的重要因素.此外,还需深入研究模型的计算方法,使其满足编组站阶段计划编制对时效性的要求.

参考文献(References):

[1] 彭其渊,赵军,韩雪松. 技术站广义配流问题模型与算法[J]. 中国铁道科学,2010,31(2):108—114.
PENG Qiyuan, ZHAO Jun, HAN Xuesong. Model and algorithm for the generalized wagon-flow allocation problem of railway technical station[J]. China Railway Science, 2010, 31(2):108—114.(in Chinese)

[2] 黎浩东,何世伟,景云,等. 考虑不同满轴约束的编组站阶段计划配流优化[J]. 铁道学报,2012,34(7):10—17.
LI Haodong, HE Shiwei, JING Yun, et al. Wagon-flow

allocation of stage plan for marshaling station by considering different size limitation of departure trains[J]. Journal of the China railway Society, 2012, 34(7):10—17.(in Chinese)

[3] 马亮,郭进,陈光伟. 铁路编组站动态配流分层模型[J]. 中国铁道科学,2015,36(2):87—95.
MA Liang, GUO Jin, CHEN Guangwei. Hierarchical model of dynamic traffic assignment at railway marshaling station[J]. China Railway Science, 2015, 36(2):87—95.(in Chinese)

[4] SHI Tie, ZHOU Xuesong. A mixed integer programming model for optimizing multi-level operations process in railroad yards[J]. Transportation Research Part B, 2015, 80:19—39.

[5] 王世东,郑力,张智海,等.编组站阶段计划自动编制的数学模型及算法[J].中国铁道科学,2008,29(2):120—125.
WANG Shidong, ZHENG Li, ZHANG Zhihai, et al. Mathematical model and algorithm for automatically programming the stage plan of marshaling station[J]. China Railway Science, 2008, 29(2):120—125.(in Chinese)

[6] SHI Q. On the railway hump yard sequencing problem [D]. Ontario:University of Waterloo,1981.

[7] YAGAR S, SACCOMANNO F F, SHI Q. An efficient sequencing model for humping in a rail yard[J]. Transportation Research Part A, 1983, 17 (4):251—262.

[8] KRAFT E R. A hump sequence algorithm for real time management of train connection reliability[J]. Journal of the Transportation Research Forum, 2000, 39(4), 95—115.

(下转第 75 页)