

城际铁路动车组运用计划模型

曲思源^{1,2}, 徐行方¹

(1. 同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804; 2. 上海铁路局 调度所, 上海 200071)

摘要: 在分析动车组运用模型的基础上, 对有关基本概念进行了界定和解析. 结合城际铁路动车组运用特征, 将动车组运用计划编制问题转化为交路段生成和基于交路段生成两个问题分步求解, 并使用紧凑指派算法和矩阵相结合以及基于运用时间均衡交路段互换的方法, 建立城际铁路动车组运用计划周期模型. 以既有繁忙干线沪宁线 2009 年 4 月列车运行图为例加以验证, 得到了符合城际铁路动车组具体运用的满意结果. 该模型和算法的采用将为动车组运用计划的编制起到很好的借鉴作用.

关键词: 城际铁路; 动车组; 运用计划; 交路段; 交路

中图分类号: U 282.91

文献标识码: A

Scheduling Model of Multiple Units on Intercity Railway

QU Siyuan^{1,2}, XU Xingfang¹

(1. College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Dispatch's Office, Shanghai Railway Bureau, Shanghai 200071, China)

Abstract: By analyzing the mathematics scheduling modal of Multiple Units (MU), the paper parses concerned basic concepts dealing with the scheduling of MU. According to the character of scheduling of MU on Intercity Railway (IR), the scheduling problem is divided into two sub-problems: sub-routings-making and routing-building based on the sub-routings. According to an algorithm combined with compact assign and matrix, and operational time strategy designed to optimize the routings in terms of balances, the paper constitutes a modal of the periodic scheduling of MU on IR, and gives an example of Hu-Ning main-line on the foundation of latest train graph in April of 2009 to explain the new method. Results indicate the method adapts to the actual situation of IR. The use of the model and algorithm provides a good reference for scheduling MU.

Key words: intercity railway (IR); multiple units (MU); scheduling; sub-routings; routings

城际铁路是指为满足经济发达、人口稠密的城市群内各城市间或城市与卫星城之间旅客出行需要的快速铁路. 文献[1]将城际列车定义为在城市密集地区城市间开行的密度较大、速度较快、运距较短、运行有规律的一类旅客列车, 并将城际列车发展划分为既有线和客运专线两个阶段. 文献[2]介绍了动车组运用计划、交路段和交路等常用概念的含义、种类和条件以及评价标准; 文献[3]将紧凑指派算法运用到动车组运用计划编制模拟过程中; 文献[4]在紧凑指派算法的基础上通过多起点搜索和交路段互换方法, 利用计算机求解动车组计划; 文献[5]在研究机车周转问题时提出了具体的指派算法步骤, 符合铁路运输实际.

本文在已有研究成果的基础上, 结合城际铁路动车组运用特征, 将动车组运用计划编制问题转化为交路段生成和基于交路段生成两个问题分步求解, 并使用紧凑指派算法和矩阵相结合以及基于运用时间均衡交路段互换的方法, 建立城际铁路动车组运用计划周期模型, 以既有繁忙干线沪宁线 2009 年 4 月列车运行图为例加以验证, 得到满意结果, 该模型和算法的采用将为动车组运用计划的编制起到很好的借鉴作用.

1 动车组运用的基本概念

动车组运用的有关概念至今尚无定论. 本文结合我国动车组繁忙干线两年来的运营实践, 对有关概念进行解析和界定.

1.1 运用模式和运用内容

从运用模式分析, 动车组运用计划分为固定区段和不固定区段两种模式. 其中, 不固定模式指运行区段不固定, 此时动车组利用率较高, 可充分发挥动车组快速灵活的特点, 是编制计划时优先考虑的运

用模式.但因该模式需折返作业、接续时间紧凑,当出现较大运行干扰时,动车组运用受到的影响较大.比较而言,固定区段运用模式组织简单,有利于动车组管理,因此该模式仍然可行.

从运用内容分析,可将运行线、接续环节形成每套动车组每天的运用计划称为动车组交路段.再按照满足检修要求的接续规则,将几个可用交路段连接起来,形成每套动车组一个运用检修周期内的运用计划,称为动车组运用交路.

显见,固定和不固定模式均会产生交路段,由交路段构成动车组运用交路.城际铁路动车组运用计划需要两种模式相结合,在不固定模式的基础上补充固定模式,以便充分发挥两种模式的优点.两种运用模式如图1所示.

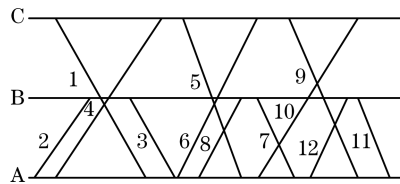


图1 固定和不固定模式运用示意图

Fig.1 Fixed and unfixed modes

图1中,不固定模式的交路由两个交路段组成,表示某一动车组第一天从A站始发按交路段1(4—5—10)运行后在C站停留;第二天从C站始发按交路段2(1—6—9)运行后在A站所在的运用所进行一级检修.固定模式的交路仅由一个交路段3(2—3—8—7—12—11)组成,第一天从A站始发按交路段运行后回到A站所在的运用所停留,第二天继续按此交路段循环后在A站所在的运用所进行一级检修.另外,两种运用模式中也可采取长短交路套跑如交路段4(4—5—12—11)的形式.

1.2 接续时间和运用时间

动车组接续时间和运用时间是衡量动车组运用效率的两个重要概念.接续时间是指在一个交路段内,从动车组担当某次列车运行至某终到站时起,至动车组再次担当其他车次由该站始发时止的在站作业停留时间.当列车到站后反向出发时接续时间可称为折返作业时间.动车组的运用时间是指在担当某交路过程中在途旅行时间(包括停站时间)和接续时间的总和.运用时间不包括在运用所的停留时间.

1.3 检修有关规则

文献[6]规定我国动车组采用计划性的预防检修方式,检修分为5个等级,1,2级为运用检修,在动

车组运用所或基地进行;3—5级为在基地进行的定期检修.其中,运用检修可利用动车组运用间隔时间,通过人工目视检查和车载安全诊断系统对动车组技术状态进行检查与检测,以便及时消除各类设备故障.因此,编制动车组运用计划时可仅考虑1,2级检修作业,而动车组定期检修时可采取启用备用动车组的方式进行.

1.4 城际动车组运用特征

(1) 城际列车的运距一般在300~500 km,采取行车密度较大的公交化运营方式,其运营时间一般在5:00~23:00.客流以短途城际客流为主,出行高峰时间一般在8:00~11:00和17:00~20:00.

(2) 在始发或终到站一般设有动车组基地或运用所,编组相同的动车组可以在不同运行区段间套跑.主要大站每日早高峰时间内需要始发一定数量的动车组列车,因而在未设运用所或基地的大站需要停放一定数量的过夜动车车底.

(3) 当动车组运用时间达到修程范围时(可适当增减上下浮动),按照检修要求返回运用所或基地进行检修,完成一个周期.

2 模型构建

若将列车运行图中的车站中心线看作沿着时间轴的有向线段,那么列车运行图就是有向连通图.在该连通图中,给定列车开行方案和动车组使用组数,假设 k 动车组担当 l_i 运行线终到某站,并担当 l_j 运行线的接续时间为 t_{ij}^k ,存在

$$\sum t_y^k = \sum t_l^k + \sum t_{ij}^k \quad (1)$$

式中: t_y^k 为动车组 k 的运用时间; t_l^k 为动车组 k 的旅行时间; t_{ij}^k 为动车组 k 的接续时间.

引入0—1变量, $x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{动车组担当}(l_i, l_j) \text{任务} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$

设 t_j^d, t_i^a 分别表示在同一车站 j 出发时间和 i 到达时间,有

$$t_{ij}^k = \begin{cases} t_j^d - t_i^a & t_j^d - t_i^a \geq t_{ij} \\ t_j^d - t_i^a + 1440 & t_j^d - t_i^a < t_{ij} \end{cases} \quad (2)$$

模型建立如下:

$$\min \sum t_{ij}^k \quad (3)$$

$$\min \sqrt{\sum_k (t_y^k - \bar{t}_y)^2} \quad (4)$$

式中: \bar{t}_y 表示平均运用时间.

$$\text{s. t.} \quad \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad (6)$$

$$t_{ij} \geq t_z \quad (7)$$

$$y_{ij}^k = 1, \text{当 } s_r - \alpha \leq \sum s_j \leq s_r + \alpha, r = 1, 2 \quad (8)$$

目标函数式(3), (4)为动车组接续时间最短和运用时间均衡. 限制条件中, 式(5), (6)表示每条列车运行线都有动车组担当, 并且每组动车组仅担当一次. 式(7)中, t_z 为最小接续时间标准. 式(8)中, y_{ij}^k 为动车组 k 的检修决策变量; $\sum s_j$ 为动车组 k 在某交路内的运用时间; s_r 为1或2级检修($r = 1, 2$)修程运用时间标准; α 为修程标准的上下浮动时间.

3 模型求解

3.1 基本思路

求解动车组交路是典型的 NP-hard (nondeterministic polynomial-hard) 问题, 直接求解比较困难, 根据动车组交路图中存在很多组始发站和终到站都相同的交路段, 可以将动车组交路问题简化为分步处理, 即交路段求解和交路段生成交路两个阶段. 根据紧凑指派算法, 按照动车组列车运行线在各站接续时间最少为目标函数, 将有方向的列车运行线配对组合, 求得动车组交路段, 并由此确定固定运用模式和不固定模式, 有时还要根据运营实际情况对交路段作必要调整; 以动车组运用时间均衡为目标函数, 将交路段组合形成完整的不固定模式动车组交路.

3.2 利用紧凑排列算法求解交路段

紧凑排列算法要求每个交路段内列车接续时间尽量短. 按照分层聚类原则, 将同一车站始发和终到的列车划分为一个集体单元; 将该集合划分为终到车站和车站始发两个子集合; 按照在每一个层次的车站最早到优先安排出发的原则, 进行列车运行线的匹配, 即按照到达车站时刻顺序, 依次指派最早出发的动车组列车运行线, 以提高动车组利用率, 可通过 Lingo 软件结合矩阵进行求解.

3.3 交路段互换的动车组交路求解

对于不固定运用模式, 在求出动车组交路段集合后, 依据动车组运用时间均衡等条件, 结合1, 2级检修修程标准时间, 采取交路段互换的方式分组配对, 由此得到每组动车组的交路, 不断迭代, 直到满

足一定的均衡条件或终止条件为止, 得到满意解.

4 实例分析

2009年4月列车运行图实施后, 沪宁线配备12套(组)CRH2型动车组(均为16辆的重联编组)担当沪宁间运行任务, 动车运用所和基地所在站为上海站. 有关技术参数如下: 1级检修作业修程为4 000 km或48 h, 检修时间2 h; 2级检修运行3万 km或30 d, 检修时间6 h; 1, 2级检修有效作业时间为19:00~次日7:00计12 h, 检修能力满足目前动车组套数需要; 要求每日6:00~9:00间南京、上海两站分别对开5列动车组列车, 且 $t_z \geq 19 \text{ min}$, $s_r = 30 \text{ h}$, $\alpha = 2 \text{ h}$. 各站动车组列车始发、终到时刻表见表1.

4.1 列车运行线匹配方案

参考文献[5], 对紧凑指派算法描述步骤作适当修订: 将某站到、发列车按接续时间先后顺序排列, 必须满足动车组接续最小时间. 建立的系数矩阵具有明显的规律性.

第一步: 排序.

将动车组始发、终到站将到达列车时刻由小到大排序, 构成向量 $\mathbf{D} = (d_1, d_2, \dots, d_m)^T$, 出发列车时刻由小到大排序, 构成向量 $\mathbf{F} = (f_1, f_2, \dots, f_n)$. 因讨论成对运行情况, 故 $m = n$.

第二步: 构造接续时间矩阵表.

表的左表头和上表头分别填记 d_i ($i = 1, 2, \dots, m$) 和 f_j ($j = 1, 2, \dots, n$), 令表中元素

$$t_{ij} = f_j - d_i - t_z \geq 0 \quad (9)$$

若 $t_{ij} \geq 0$, 标记实际数值, 表示第 i 号到达列车可接续开行第 j 号出发列车; 若 $t_{ij} < 0$, 标记“—”, 表示接续时间不够.

第三步: 求最佳动车组交路方案.

在动车组接续时间中, 与主对角线平行的斜线(含主对角线本身)有多条, 每一条代表一个动车组交路方案. 将每一条斜线都看成是主对角线向右移动而形成的, 每移动一步就在表的右侧添加一列. 当某条斜线穿越的符号没有“—”号时, 且主对角线向右移动的步数最少时, 该斜线代表的方案即为最佳方案.

第四步: 动车组总接续时间计算方案.

$$\sum t_{ij} = \sum_{j=1}^n f_j - \sum_{i=1}^m d_i + 1440\beta \quad (10)$$

式中: β 为主对角线向右移动的步数. 下面以上海站到达和出发9列动车组为例, 具体说明紧凑指派问题的算法, 如表2所示.

表 1 各站动车组始发、终到时刻表

Tab.1 Departure and arrival timetable of MU at terminal stations

发站	车次	始发时刻	终到时刻	发站	车次	始发时刻	终到时刻
上海	D5452	05:40	7:00 常州	南京	D5401	06:20	08:36
上海	D5460	05:45	06:27 苏州	南京	D5403	06:26	08:47
上海	D5456	05:55	07:03 无锡	南京	D5405	07:40	09:56
上海	D5402	06:20	08:46	南京	D5407	07:45	10:01
上海	D5506	06:35	07:35 无锡	南京	D5409	07:50	10:11
上海	D5404	06:55	09:11	南京	D5411	09:30	11:46
上海	D5406	07:50	10:15	南京	D5413	09:35	11:51
上海	D5408	08:50	11:06	南京	D5415	10:40	13:10
上海	D5410	08:55	11:11	南京	D5417	11:26	13:32
上海	D5412	09:09	11:35	南京	D5419	11:31	13:47
上海	D5414	09:39	11:40	南京	D5421	12:00	14:00
上海	D5508	09:44	10:44 无锡	南京	D5423	12:05	14:11
上海	D5416	10:22	12:33	南京	D5425	12:52	15:08
上海	D5418	10:27	12:38	南京	D5427	13:02	15:13
上海	D5420	10:32	12:43	南京	D5429	13:07	15:23
上海	D5422	12:05	14:21	南京	D5431	14:40	17:01
上海	D5424	12:10	14:26	南京	D5433	14:45	17:06
上海	D5510	13:34	02:35 无锡	南京	D5435	16:24	18:34
上海	D5426	13:48	16:04	南京	D5437	16:29	18:39
上海	D5428	13:53	16:09	南京	D5439	16:39	18:44
上海	D5430	14:13	16:19	南京	D5441	16:44	18:49
上海	D5432	14:18	16:24	南京	D5443	17:23	19:33
上海	D5434	14:30	16:53	南京	D5445	18:09	20:30
上海	D5436	15:32	17:48	南京	D5447	18:58	21:09
上海	D5438	15:37	17:53	南京	D5449	19:03	21:23
上海	D5440	15:42	18:08	苏州	D5459	06:47	07:29
上海	D5442	17:27	19:43	苏州	D5503	21:16	22:01
上海	D5444	17:32	19:53	无锡	D5455	07:27	08:29
上海	D5446	18:52	21:03	无锡	D5457	20:17	21:18
上海	D5448	18:57	21:08	无锡	D5505	07:57	08:58
上海	D5502	18:05	06:45 无锡	无锡	D5507	11:56	12:57
上海	D5458	19:02	07:55 无锡	无锡	D5509	16:25	17:33
上海	D5454	19:07	08:23 常州	无锡	D5501	19:10	19:54
上海	D5450	19:51	22:17	常州	D5451	07:26	08:42
上海	D5504	20:16	08:56 苏州	常州	D5453	21:13	22:35

注:上海站始发车次除注明到站外,其余终到站均为南京站;其他站始发车次终到站均为上海站.

表 2 上海站部分终到和始发动车组列车时刻表

Tab.2 Part of departure and arrival timetable of MU at Shanghai station

到达车次	时刻	出发车次	时刻
D5459	07:29	D5406	07:50
D5455	08:29	D5408	08:50
D5401	08:36	D5410	08:55
D5451	08:42	D5412	09:09
D5403	08:47	D5414	09:39
D5505	08:58	D5508	09:44
D5405	09:56	D5416	10:22
D5407	10:01	D5418	10:27
D5409	10:11	D5420	10:32

相应求得指派矩阵,如表 3 所示,主对角线就是指派动车组列车交路的连线,可以看出部分主对角线某 n 列对应的 $n + 1$ 行也有数字对应,而且数字要比 n 行对应数字要小,表示该出动车组有多列

到达列车交路提供,可按照动车组列车先到先出发的原则,利用 Lingo(8.0 以上版本)软件和人工调整相结合的方法进行计算和优化.本例中 $\beta = 0$.

表 3 上海站部分终到和始发动车组指派矩阵表

Tab.3 Assigned matrix of departure and arrival timetable of MU at Shanghai station min

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	21	81	86	100	130	135	173	178	183
2	—	21	26	40	70	75	113	118	123
3	—	—	19	33	63	68	106	111	116
4	—	—	—	27	57	62	100	105	110
5	—	—	—	22	52	57	95	100	105
6	—	—	—	—	42	47	85	90	95
7	—	—	—	—	—	—	26	31	36
8	—	—	—	—	—	—	21	26	31
9	—	—	—	—	—	—	—	16	21

注:“—”表示接续时间不够.

4.2 交路段生成方案

通过指派算法计算,得出每站连接各站列车交路连线,整合可得到动车组交路段如下:

上海站始发动车组交路段(括号内均为运用时间,下同):

(1) D5452/5451/5412/5421/5432/5441/5454/5453(13 h 50 min).

(2) D5460/5459/5406/5415/5426/5435/5446(16 h 33 min).

(3) D5456/5455/5408/5417/5428/5437/5448(15 h 11 min).

(4) D5402/5411/5422/5431/5442(13 h 3 min).

(5) D5404/5413/5424/5433/5444(13 h 20 min).

(6) D5506/5505/5508/5507/5510/5509/5502/5501/5504/5503(14 h 26 min).

南京站始发动车组交路段:

(7) D5401/5410/5419/5430/5439/5458/5457(14 h 48 min).

(8) D5403/5414/5423/5434/5443/5450(13 h 48 min).

(9) D5405/5416/5425/5436/5445(12 h 50 min).

(10) D5407/5418/5427/5438/5447(13 h 24 min).

(11) D5409/5420/5429/5440/5449(12 h 43 min).

首先检查交路段的可行性.交路段(1),(6)的始发和终到站均为上海站,考虑到(6)仅涉及上海站与中间站的交路方案,故可安排为固定模式组织日常运行,也可根据客流情况适当开行临客.而南京站始发交路段(8)终到站仍为该站,与运用所在上海站的条件不符,第二天的交路段应回到上海站进行一级检修.显见,交路段(1)和(8)需要重新组合,方法是将(1)中D5421后的部分和(8)中D5423后的部分互换.最终交路段(1)调整为不固定模式:D5452/5451/5414/5423/5434/5443/5450(16 h 37 min);交路段(8)变更为:D5403/5412/5421/5432/5441/5454/5453(15 h 59 min).

4.3 交路生成方案

按照运用时间均衡的原则交叉配对,可得到不固定运用模式满意方案,即:

(1) D5452/5451/5414/5423/5434/5443/5450/5409/5420/5429/5440/5449(29 h 20 min).

(2) D5460/5459/5406/5415/5426/5435/5446/5405/5416/5425/5436/5445(29 h 23 min).

(3) D5456/5455/5408/5417/5428/5437/5448/

D5407/5418/5427/5438/5447(28 h 45 min).

(4) D5402/5411/5422/5431/5442/5403/5412/5421/5432/5441/5454/5453(29 h 02 min).

(5) D5404/5413/5424/5433/5444/5401/5410/5419/5430/5439/5458/5457(28 h 08 min).

该方案在2009年4月运行图实施后得到实际运用.2009年7月,通过将交路(4)和(5)中D5454/5453和D5458/5457互换,使得两个交路的运用时间进一步得到均衡优化.

5 结语

实际运营中,沪宁线存在两种车型,在具体编制动车组运用计划时没有考虑,而且,存在着多基地多车种动车组套跑的现实要求.另外,客运专线的动车组运用数量更大,列车密度更高,有待进一步深入研究提高动车组运用效率的优化方案.

参考文献:

- [1] 徐行方,忻铁朕,项宝余.城际列车概念及其开行条件[J].同济大学学报:自然科学版,2003,31(4):432.
XU Xingfang, XIN Tiezhen, XIANG Baoyu. Conception of intercity train and its operating conditions[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2003, 31(4): 432.
- [2] 赵鹏,富井规雄.动车组运用计划及其编制算法[J].铁道学报,2003,25(3):1.
ZHAO Peng, NORI Tomii. Trains-set scheduling and an algorithm [J]. Journal of the China Railway Society, 2003, 25(3): 1.
- [3] 聂磊,赵鹏,杨浩,等.高速动车组运用的研究[J].铁道学报,2001,23(3):1.
NIE Lei, ZHAO Peng, YANG Hao, et al. Study on motor trainset operation in high speed railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2001, 23(3): 1.
- [4] 张杰,陈滔,施福根.客运专线动车组运用计划的计算机编制[J].西南交通大学学报,2006,41(5):635.
ZHANG Jie, CHEN Tao, SHI Fugen. Computer scheduling of motor train-sets for high speed passenger railways[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2006, 41(5): 635.
- [5] 王慈光.系统工程导论讲义[M].成都:西南交通大学出版社,2002.
WANG Ciguang. System engineer teaching materials [R]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2002.
- [6] 中华人民共和国铁道部.铁路动车组运用维修规程(暂行)[M].北京:中国铁道出版社,2007.
Ministry of Railways of the People's Republic of China. The operation and maintenance procedures of railway train-set (Interim)[M]. Beijing: China Railway Press, 2007.