

动车组多专业检修调度优化模型 与算法研究

王忠凯, 贾志凯, 王辉, 李燕, 李莉, 张莉艳

(中国铁道科学研究院集团有限公司 电子计算技术研究所)

摘要: 近年来我国高速铁路建设取得了显著的成就, 高速铁路营业里程在 2018 年底已达 2.9 万公里, 动车组保有量逾 3000 标准组。随着动车组的检修量日益增加, 动车所的检修压力越来越大。动车所检修工作由多个专业团队协同完成, 其检修任务调度计划具有重要的实际意义。本文针对动车所检修任务调度计划优化编制问题, 以满足动车组的开行计划、检修计划和调车计划为约束条件, 同时考虑多个专业检修团队的资源约束, 以减少无效调度时间为优化目标, 构建整数规划数学模型。鉴于模型的复杂性, 本文设计了基于最大最小蚁群系统的快速求解策略, 为动车所的检修生成组织提供决策支持。

关键词: 运输组织; 动车组检修调度问题; 蚁群优化算法

中图分类号: U292.8 U266.2: U268.2

Research on Optimization Model and Algorithm of EMU Multi-Professional Teams Maintenance Task Scheduling

Wang Zhongkai, Jia Zhikai, Wang Hui, Li Yan, Li Li, Zhang Liyan

(Institute of Computing Technologies, China Academy of Railway Sciences Group Co., Ltd)

Abstract: In recent years, China's high-speed railway construction has made remarkable achievements. The operating mileage of high-speed railway has reached 29000 kilometers by the end of 2018, and the number of EMUs has exceeded 3000 standard units. With the increasing number of EMU maintenance, the maintenance pressure of EMU depot is increasing. The maintenance work of EMU is completed by many professional teams, and the scheduling of maintenance tasks is of great practical significance. In this paper, aiming at the problem of scheduling optimization of maintenance tasks for EMUs, the constraints were to meet the operation plan, maintenance plan and shunting plan of EMUs, and the resource constraints of multiple professional maintenance teams was considered. The objective was to reduce invalid scheduling time, and to build an integer programming mathematical model. In view of the complexity of the model, this paper designed a fast solution strategy based on the maximum and minimum ant colony system, which provided decision support for the maintenance generation organization of EMU.

Key words: Transportation Organization; EMU Maintenance Scheduling Problem; Ant Colony Optimization Algorithm.

0 引言

近年来我国高速铁路建设取得了显著的成就, 截止 2018 年底, 高速铁路营业里程已达 2.9 万公里, 动车组保有量逾 3000 标准组。随着动车组的检修量日益增加, 动车所的检修压力越来越大。动车所检修工作由多个专业团队协同完成, 其检修任务调度计划是指导动车所检修运转的重要依据, 直接关系到动车组检修工作能否顺畅进行。如何科学合理的制定该计划对于动车所来说具有重要作用。

基金项目: 中国铁路总公司科技研究开发计划 (P2018J016) 系列化复兴号动车组技术深化研究, 中国铁道科学研究院集团有限公司科研基金 (2018YJ104) 智能动车段成套解决方案及典型示范应用研究

作者简介: 王忠凯 (1982-), 男, 副研究员, 主要研究方向: 智能交通系统. E-mail: winter-light@163.com

围绕动车组的检修过程组织问题，大量学者取得诸多有意义的成果。文献[1, 2]考虑动车组运用和检修联合约束条件，设计了运用计划和检修计划的优化模型，并给出了求解算法，达到了提高动车组利用率的目标。文献[3]在考虑在当日开行计划、次日开行计划、检修计划的约束下，在动车所站场布局给定的条件下，优化动车组在站场内调车过程方案，提高动车所的检修吞吐量。文献[4]应用理论研究成果，研发动车所运输组织的辅助编制系统，应将系统应用到全路动车所。上述文献针对动车组的开行计划、检修计划、调车计划取得了一定成果，但是上述研究没有考虑动车组检修过程中检修人员的调度问题，实践中，动车组的检修需要多个专业检修团队协同作业，人员的因素在调度过程中具有重要的影响。鉴于动车组调度问题普遍具有的非线性、多目标、复杂度高等特点，实践中往往难以求得精确解。文献[5, 6]给出了蚁群算法在求解动车组调度问题中的基本框架，为多专业动车组检修调度问题的求解打下基础。本文围绕动车所多专业检修过程协同调度问题，展开优化模型和求解算法的研究。

1 问题描述

1.1 动车组的一个运用检修周期

动车组的一个运用检修周期包括担当当日开行交路，上线运行后，夜班回到配属或异地动车所，如果动车组的一、二级检修到期，则安排进检修库进行一、二级检修；如果一、二级检修未到期，则一般安排洗车、内保洁、吸污等整备作业，待次日上线运行；如果安排次日日班进行二级检修作业，则动车组次日不担当交路，由其他动车组代替检修动车组上线。上述流程见图 1。

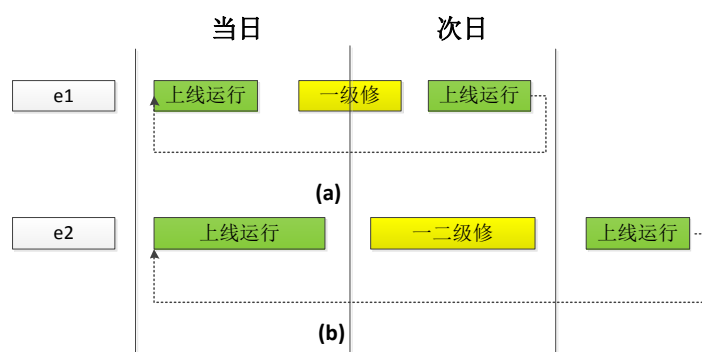


图 1 动车组运用检修周期图

上述过程中，当日开行情况在当日开行计划中定义，该计划规定了当前计划日各列动车组当地具体交路的情况，当日开行计划中定义的动车组回所时间是每列动车组调度过程的起点，动车组一旦上线，往往无法调整，只能根据列车运行图按计划运行，因此该计划作为问题优化中的硬约束；检修情况在检修计划中定义，该计划规定了当日夜班和次日日班各列动车组的具体检修情况，根据动车组运用检修规程，动车组在动车所内检修一般按照作业包形式展开，常见的检修作业包定义如表 1 所示；动车组的次日上线情况在次日开行计划中定义，该计划规定了次日各列动车组的担当交路情况。

表 1 动车组检修规程

| 类别 | 作业包名称 | 检修周期 | 检修耗时 |
|-----|----------|------------|------|
| 二级修 | 3 万公里检修包 | 30 天/3 万公里 | 5(h) |
| | 6 万公里检修包 | 60 天/6 万公里 | 5(h) |
| | 9 万公里检修包 | 90 天/9 万公里 | 8(h) |

| | | | |
|-----|-----------|-------------|-------|
| 一级修 | 空心轴探伤 | 9 万公里 | 12(h) |
| | 齿轮箱注油 | 30 万公里 | 8(h) |
| | 牵引电机注油 | 15 万公里 | 8(h) |
| | 车轮镟修 | 25 万公里 | 12(h) |
| | 吸污作业 | 2 天/4000 公里 | 1(h) |
| | 有电作业+无电作业 | 2 天/4000 公里 | 3(h) |
| | 内保洁 | 2 天/4000 公里 | 1(h) |
| | 洗车 | 2 天/4000 公里 | 1(h) |

动车组在一次运用检修周期内，外完成检修任务，保证次日开行计划，在动车所内的调车过程在调车计划中规定，该计划中详细定义了动车组在具体时间点进入检修库进行一、二级检修的情况，以及在具体时间点进入洗车股道进行洗车的情况。该计划是多专业检修团队任务调度的基本依据。表 2 示意了典型的调车计划。

75

表 2 调车方案

| 线区 | 股道 | 动车组及停留时间 |
|--------|----|---|
| 洗车线区 | g1 | 动车组 E1(20:00-21:00); |
| | | 动车组 E2(21:30-22:30); |
| | | 动车组 E3(23:00-24:00) ; |
| | | 动车组 E4(次日 03:30-次日 04:30) |
| 吸污作业线区 | c1 | 动车组 E1(21:30-22: 30); |
| | | 动车组 E2(23:00-24:00); |
| | c2 | 动车组 E3(次日 00: 30-次日 01:30) ; 动车组 E4(次日 02:00-次日 03:00) |
| 检修作业线区 | r1 | 动车组 E1(23:00-次日 02: 00, 一级修+内保洁); |
| | | 动车组 E2(次日 02:30-次日 05:30, 一级修+内保洁); |
| | r2 | 动车组 E3(19: 30-22:30, 一级修+内保洁) ; |
| | | 动车组 E4(次日 00:00-次日 03:00, 一级修+内保洁) |
| 轮对镟轮线区 | a1 | 动车组 E5(次日 08: 30-次日 20:30) |

1.2 多专业检修团队的检修约束

动车组的检修专业化程度高，通常由多个专业检修团队协同完成。动车所针对不同的作业包工作要求，设置相应的专业检修团队，根据专业团队的工作性质，有的团队可以并行完成检修，有的团队需要穿行完成检修。表 3 说明了专业分工情况。

80

表 3 检修专业团队情况

| 作业包 | 专业团队 | 备注 |
|-------------|---------|-----------|
| 有电作业 | 有电检作业修员 | 有电与无电不可并行 |
| 无电作业 | 无电作业检修员 | |
| 内保洁 | 保洁工 | 保洁不可与有电并行 |
| 二级修电器类作业包检修 | 电器作业班组 | |
| 二级修机械类作业包检修 | 机械作业班组 | |

1.3 多专业检修团队协同调度的优化目标

随着动车检修量的日益增加，合理调度动车所检修班组的工作安排显得尤为重要。通过制定优化的工作方案，可以理顺动车所的检修过程，均衡检修员工作量。

85

分析可见，动车组的检修时间离散分布在时间轴上，同时检修员的工作之间具有串并

行、互斥约束，如果计划安排不好，极易出现部分检修员的无故等待，亦或部分检修员的超负荷工作。因此编制动车组检修调度计划的目标为减少调度碎片时间，避免检修班组的无故等待。

1.4 约束松弛条件

90 当检修工作量过大时，可能导致检修工作无法完成，由于完成检修是保证动车组安全的基本要求，因此，一旦出现检修工作量过大，问题无解时，首先考虑调整次日开行计划，以满足检修工作。

2 优化模型

2.1 集合

95 E : 动车组集合，具体动车组用变量 $e (e=0, \dots, N_E)$ 描述。
 M_e : 动车组 e 的检修任务集合，具体的检修任务用变量 $m (m=0, \dots, N_M)$ 描述。
 S : 专业检修团队集合，具体的检修团队用变量 $s, d (s, d=0, \dots, N_S)$ 描述。

2.2 变量

T_e^E : 动车组 e 担当完当日开行，回所时间。
 100 t_{em} : 动车组 e 在进行检修任务 m_e 时的最小检修时间。
 T_e^B : 动车组 e 的次日开行时间。
 θ_{mes} : 如果专业检修团队 s 可以完成检修任务 m_e , θ_{mes} 为 1, 否则为 0.
 H_{sd} : 如果专业检修团队 s 与专业检修团队可以同时作业时, H_{sd} 为 1, 否则为 0.

2.3 决策变量

105 x_{ems} : 如果安排专业检修团队 s 承担动车组 e 的检修任务股道 m_e , x_{ems} 为 1, 反之为 0。
 t_{es}^B : 专业检修团队 s 承担动车组 e 的检修任务股道 m_e 的开始时间。
 t_{es}^E : 专业检修团队 s 承担动车组 e 的检修任务股道 m_e 的结束时间。

2.4 优化模型

建立问题的优化模型为:

110 Min

$$C = \sum_{e \in E} \sum_{j \in M_e} \sum_{s \in S} x_{ems} (t_{es}^e - t_{es}^B) \quad (1)$$

s. t.

$$\sum_{s \in S} x_{ems} = 1 \quad \forall e \in E, m \in M_e \quad (2)$$

$$x_{ems} = 1, t_{ems}^B + t_{em} \leq t_{ems}^E \quad \forall e \in E, m \in M_e \quad (3)$$

115 $t_{ems}^B \geq T_e^E \quad \forall e \in E, s \in S, m \in M_e \quad (4)$

$$t_{ems}^E \leq T_e^B \quad \forall e \in E, s \in S, m \in M_e \quad (5)$$

$$x_{ems} \leq \theta_{mes} \quad \forall e \in E, s \in S, m \in M_e \quad (6)$$

$$H_{sd} = 0, x_{ems} = 1, x_{emd} = 1, t_{ems}^E \leq t_{emd}^B \text{ or } t_{ems}^B \geq t_{emd}^E \quad \forall e \in E, s, d \in S, m \in M_e \quad (7)$$

$$x_{ejg} = 0,1 \tag{8}$$

120 模型的目标函数是最小化专业检修团队空闲等待时间 (1)，式 (2) 说明了检修条件，式 (3-5) 满足动车组的检修任务最小时间条件，式 (6, 7) 满足专业团队检修条件约束。

注意，当检修任务过多时，上述模型可能无解，此时，根据松弛约束条件，将次日开行计划做出适当调整，得到下述模型。

Min

$$125 \quad C = \sum_{e \in E} \sum_{j \in M_e} \sum_{s \in S} x_{ems} (t_{es}^e - t_{es}^B) + L \sum_{e \in E} \sum_{j \in M_e} \sum_{s \in S} (t_{ems}^E - T_e^B) \tag{9}$$

s. t.

$$\sum_{s \in S} x_{ems} = 1 \quad \forall e \in E, m \in M_e \tag{10}$$

$$x_{ems} = 1, t_{ems}^B + t_{em} \leq t_{ems}^E \quad \forall e \in E, m \in M_e \tag{11}$$

$$t_{ems}^B \geq T_e^E \quad \forall e \in E, s \in S, m \in M_e \tag{12}$$

$$130 \quad x_{ems} \leq \theta_{mes} \quad \forall e \in E, s \in S, m \in M_e \tag{13}$$

$$H_{sd} = 0, x_{ems} = 1, x_{emd} = 1, t_{ems}^E \leq t_{emd}^B \text{ or } t_{ems}^B \geq t_{emd}^E \quad \forall e \in E, s, d \in S, m \in M_e \tag{14}$$

$$x_{ejg} = 0,1 \tag{15}$$

3 求解算法

针对上述模型，本文的求解策略为：

135 1) 预处理

根据检修任务集合 Me 和专业检修团队集合 S 构建分配候选拓扑图，图中节点包含检修团队和任务之间的可能组合，节点之间的弧代表节点选择的先后关系。

2) 应用最大最小蚁群系统求解调度方案

140 鉴于蚁群系统在求解类似问题的优势，本文采用蚁群系统在上述图上迭代构造最优的调度路径，该路径满足检修任务覆盖约束。以相应动车组的回所时间为路径的起点，求取每个节点的开始和结束时间值，即得到了最终的调度方案。

3.1 候选调度拓扑图构造算法

算法 1： 候选任务拓扑图构造算法

- 1、输入集合 Me, G
- 145 2、遍历集合 E 中的每列动车组 e
- 3、 遍历集合 m 中的每项检修任务 Me
- 4、 取全部可以完成 m 作业的专业团队集合 S_m
- 5、 遍历集合 S_m 中的每个专业团队 s
- 6、 生成节点 $d=(s, t_{em}, d')$ ，其中 t_{em} 为最小检修时间
- 150 7、 设置指针 d' 指向前次检修任务生成的检修节点，如果 s 存在并行 i 安修任务，则根据专业检修团队之间的串行关系，修正 t_{em} ，使得互斥的专业团队在检修时间上无法并行。
- 8、 将节点 d 添加到拓扑图

3.2 蚁群系统求解算法

155 设计算法的具体策略如下。

1、初始化启发信息

定义根据动车组的回所时间定义拓扑图中节点的启发信息为：

$$\eta_i(t) = \frac{1}{t_e^s} \quad (10)$$

其中 η 为相对较大的值，从而保证先进入运用所的动车组先得到调度。

160 2、定义班组占用信息

用 $\omega_i(t)$ 描述检修班组的动态任务占用情况，如果班组 g 对应的某节点被任务占用，则降低该班组后续被选中的机会，从而均衡安排检修班组的工作量。

$$\omega_i(t) = \omega_i(t) - (t_{egje} - t_{egjs}) \quad (14)$$

3、状态转移规则

165 第 k 只蚂蚁从节点 v_i 转移到节点 v_j 的选择方式为：

$$p_{ijk}(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_j(t)]^\beta [\omega_j(t)]^\gamma}{\sum_{s \in Allow_k} ([\tau_{is}(t)]^\alpha [\eta_s(t)]^\beta [\omega_s(t)]^\gamma)} & v_j \in Allow_k \\ 0 & else \end{cases} \quad (15)$$

4、求解算法

算法 2：检修班组任务分配方案求解算法。

1、初始化算法参数

170 2、输入拓扑图

3、遍历迭代变量 n

4、遍历全部蚂蚁 a

4-1、随机选择一个初始节点 d

4-2、获取节点 d 的后续节点集合 S_d

175 4-3、将其他动车组的开始节点附加到集合 S_d 上

4-4、根据状态转移规则在节点集合 S_d 中选择下一跳

4-5、设置其它节点属性

4-6、将选中的节点附加到调度序列中

4-7、如果完成了全部必须调度节点的遍历，结束蚂蚁 a 的求解，否则转 4-2

180 5、根据目标函数评价蚂蚁 a 的解

6、调整信息素

7、进行新的迭代

8、输出最优调度序列

4 结语

185 在我国高铁网络逐步建成的背景下，动车组配属量与日俱增，动车所的检修压力日益增加。本文在考虑多个专业检修团队之间关系的基础上，给出了动车组检修任务调度优化模型

和求解算法。在任务量较大时,提出调整次日开行的策略,以保证动车组的检修时间。通过紧凑调度策略,有效减少无效调度时间,合理安排协调了各个专业检修团对之间的检修任务,最终提高动车所的检修能力,满足日益增加的动车组检修量。

190

[参考文献] (References)

- [1] 史峰,周文梁,郁宇卫. 客运专线动车组运用计划优化模型与算法 [J]. 铁道学报, 2011, 33 (1) : 8-12.
- [2] 王忠凯,史天运,张惟皎. 等. 动车组运用计划和检修计划一体化编制模型及算法[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(3): 102-107.
- 195 [3] 王忠凯,史天运,张惟皎. 等. 动车运用所调车作业计划优化模型与算法[J]. 铁道学报, 2013, 35(8): 1-9.
- [4] 王忠凯,史天运,张惟皎. 等. 动车组运用检修计划智能编制平台的研究[J]. 铁路计算机应用, 2013, 22(1) : 17-21.
- 200 [5] 佟璐,聂磊,赵鹏. 蚁群算法在动车组运用问题中的应用 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2009, 9 (6) : 161-167.
- [6] 郑金子,苗建瑞,张君平. 蚁群算法在铁路乘务运用计划编制中的应用研究[J]. 铁路计算机应用, 2010, 19(10): 36-40.