

高级检修错峰条件下的动车组运用计划 优化模型与算法

王忠凯

(中国铁道科学研究院电子计算技术研究所, 北京 100081)

摘要: 分析动车组高级检修相关业务及其与日常运用之间的相互关系, 研究考虑高级检修错峰的动车组运用计划优化策略。以高级检修到期情况、一二级检修规程和满足列车运行图为约束条件, 以实现高级检修错峰为优化目标, 构建动车组运用计划的优化模型。设计基于粒子群优化的问题求解算法, 通过调整动车组的运用计划, 实现高级检修错峰的目标, 可以为动车所的生产组织提供决策支持。

关键词: 铁路运输; 动车组运用方案优化; 高级检修错峰; 粒子群优化

中图分类号: U292.8; U266.2; U268.2 文献标识码: A 文章编号: 1674-2850(2017)08-0897-08

Optimal model and algorithm for operation plan electric multiple units under stagger of overhaul peak

WANG Zhongkai

(Institute of Computing Technology, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: This paper analyzed the relationship between the overhaul repair and the daily operation of electric multiple units, discussed the optimization strategy of operation plan combined with overhaul conditions. An integer optimal model was built to stagger the overhaul peak of electric multiple units, with the situation of overhaul, repair regulation of level one and two, and train diagram as the constraints. Particle swarm optimization was applied to find better solutions. As a result, adjusting operation schemes contributes to avoiding stagger of overhaul peak and provides a decision support for the production of electric multiple units.

Key words: railway transport; operation plan optimization of electric multiple units; stagger of overhaul peak; particle swarm optimization

0 引言

截至2016年, 动车组的运营数量已超过1800组, 随着投入运营动车组累计行驶里程的增加, 达到高级检修周期的动车组数量将逐渐增多, 而动车组的高级检修周期以及检修作业时间均较长, 对于动车组的运用方案有较大影响。

围绕动车组的运用计划优化问题, 国内外学者进行了大量研究。文献[1]是中国铁路总公司制定的动车组运用规程。文献[2]~[3]分析动车组运用方式、动车组管理模式、动车组维修体制与维修方式、列车运行图等因素对动车组运用检修计划问题的影响, 在列车运行图已知的条件下, 建立动车组运用计划优化模型, 采用精确求解或智能求解的方法, 取得了问题的优化方案。文献[4]~[6]同时考虑运用和检修约束, 设计了运用计划和检修计划的一体化优化模型和求解算法, 并研发了动车组运用检修计划的计算机

基金项目: 铁道部科技研究开发计划基金(2015J006-B)

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

辅助编制平台。文献[7]~[8]针对动车组的日常运用计划和检修计划优化问题进一步展开研究,考虑构建动态的运用交路网络,以提高动车组利用率为优化目标,采用智能算法进行求解。上述文献在理论研究和实际系统开发方面取得了诸多成果,但是随着业务的发展,高级检修与日常运用计划的关系日益紧密,亟需引入更有针对性的动车组运用计划优化理论和方法。

1 问题分析

1.1 动车组检修等级

我国将动车组的检修分为五级修程:

1) 一级检修

更换、调整和补充消耗部件,检查各部分的状态和性能,对受电弓、转向架、走行装置、制动装置、电气设备、车内设备等的状态、作用及性能进行检查。

2) 二级检修

进行动车组性能试验和安全性检测,包括对受电弓、高压回路、主回路、辅助回路、控制回路、制动装置、转向架、走行装置、车体等状态进行检修,重点检查轮对踏面和车轴。

3) 三级检修

对转向架及其主要零部件进行分解检修,包括对转向架、牵引电动机、传动装置、走行装置、弹簧装置、制动装置等主要部件解体后进行全面仔细检修。

4) 四级检修

对各主系统进行分解检修,包括对受电弓、高压回路、主回路、辅助回路、控制回路、自动门、制动装置、转向架、牵引电动机、传动装置、走行装置、弹簧装置、制动装置等主要部件解体后进行全面仔细检修,必要时进行车体的涂漆。

5) 五级检修

对全车进行分解检修,较大范围地更新零部件,并进行车体的涂漆。

一级检修与二级检修为日常运用检修,由动车运用所实施,三级检修、四级检修与五级检修属于高级检修,由动车基地或主机厂实施。

1.2 高级检修规则

动车组的三至五级高级检修具有各自的检修周期,由于各车型的检修周期具有倍乘关系,同时高级检修修程可以覆盖低级检修修程,在实际运用中呈现出修程叠加的现象,如图1所示。



图1 动车组的高级检修实例

Fig. 1 Overhaul example of electric multiple units

动车组高级检修的检修耗时根据修程不同也不尽相同,表1列出了常见车型的高级检修周期及检修耗时。

1.3 高级检修与日常运用的关系

1) 简化 3 个级别的高级检修

相对动车组的日常运用和检修而言, 高级检修的周期很长, 在日常运用过程中, 仅需以上一次高级检修的发生时间和里程为基础, 考虑下一次高级检修的到期时间即可, 因此在运用阶段, 可将 3 个级别的高级检修抽象成 1 个级别的高级检修, 进而简化问题。

2) 日常运用对高级检修的影响

由于动车组所担当的交路之间存在日均里程的差距, 表 2 为某动车所的部分交路情况, 动车组在累计担当交路一段时间后, 一般在几个月后就会对高级检修的入场时间产生影响。

3) 高级检修集中到期

如果不提前对动车组的运用情况进行规划, 可能在数月后出现多列动车组同时到达高级检修周期的现象, 由于高级检修的检修耗时一般较长, 一旦发生高级检修集中到期, 意味着动车所在长时间内无车可用, 无法有序开展运用工作。

1.4 考虑高级检修的运用计划约束条件

将考虑高级检修的运用计划约束条件总结如下。

1) 一二级检修约束条件

所有动车组均必须满足检修周期的限制, 不能超过任意检修包的最大检修里程周期和时间周期限制的 1.1 倍。

对于动车所来说, 其检修资源并不是无限的, 在给定时间段内, 只能完成一定数量的动车组检修任务。

动车组各项检修作业包的最近一次检修记录定义了检修时的里程和时间数据, 是未来检修计划计算的初始值。

2) 满足列车运行图约束

为列车运行图中的全部交路安排车型、定员和头向匹配的动车组。如果交路要求重联机组担当, 则为该交路安排两列同车型动车组。

动车组在担当交路时需要满足交路之间的时空接续条件。

每个计划日因二级检修扣修的动车组不能超过上限。

3) 高级检修因素

上一次高级检修的动车组走行里程和时间是计算高级检修到期的起点。仅取未来最近一次即将到期的高级修级别为计算目标, 其周期取下一次预计到期的高级检修和上一次检修时的差值, 如图 2 所示。

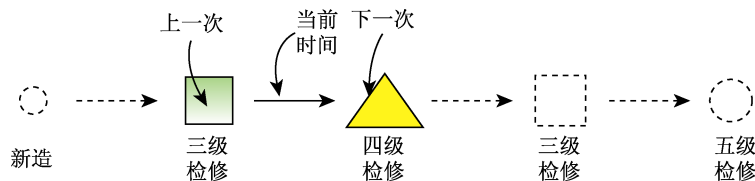


图 2 高级检修约束

Fig. 2 Overhaul constraints

表 1 动车组高级检修周期及耗时

Tab. 1 Overhaul cycle and time-consuming of electric multiple units

车型	里程周期/km	修程	耗时/d
CRH2A	60 万	三级检修	15
CRH2A	120 万	四级检修	30
CRH3C	120 万	三级检修	15

表 2 动车组所担当的交路信息

Tab. 2 Operation routing information of electric multiple units

交路	走行里程/km	所需车型	持续天数/d
W_1	3 276	CRH3C	2
W_2	3 836	CRH3C	2
W_3	1 132	CRH3C	1
W_4	3 276	CRH3C	2
W_5	1 636	CRH3C	1
W_6	1 132	CRH2E	1
W_7	3 332	CRH2E	2
W_8	2 604	CRH2E	2

检修规程要求如果动车组距上一次高级检修后累计的里程或时间到达高级检修周期的 1.1 倍, 则动车组必须转入高级检修。

1.5 计划编制目标

动车组的运用计划需要在长时间累计后才会对高级检修到期情况产生影响, 但是在日常运用阶段没有必要编制长期计划, 目前一般动车所的实践中, 常安排动车组连续担当同一固定交路而简化动车所调度组织。因此这里采取以下策略:

1) 按照目前动车所的实践, 编制短周期的运用计划。

2) 假设动车组选择某条交路后, 则在交路上连续运用, 直到发生一二级检修到期才下线检修, 由其他动车组顶替下线动车组。

动车组高级检修集中到期对动车所的运输组织干扰较大, 因此本文的优化目标为对未来动车所配属动车组的高级检修进行错峰, 亦即均衡未来动车组高级检修的到期时间。

2 优化模型

2.1 集合

E : 动车组集合, 具体动车组用变量 e ($e=0, \dots, N_E$) 描述。

D : 计划日集合, 具体的计划日用变量 d ($d=0, \dots, N_D$) 描述。

Q : 未来月份集合, 具体的月份用变量 q ($q=0, \dots, N_Q$) 描述。

P : 一二级检修作业包集合, 具体的作业包用变量 p ($p=0, \dots, N_P$) 描述。

R : 交路集合, 具体的交路用变量 r ($r=0, \dots, N_R$) 描述。

2.2 变量

$\lambda(d)$: 计划日所在的月份。

$\rho(q, \lambda(d))$: 如果 $\lambda(d)$ 与 q 相等, 则 $\rho(q, \lambda(d))=1$, 否则 $\rho(q, \lambda(d))=0$ 。

m_r : 交路 r 的日均走行里程。

t_{edp} : 动车组 e 的检修作业包 p 在计划日 d 的动态累计运行时间。

m_{edp} : 动车组 e 的检修作业包 p 在计划日 d 的动态累计走行里程。

t_{ep}^0 : 动车组 e 的检修作业包 p 的最近一次检修时间。

m_{ep}^0 : 动车组 e 的检修作业包 p 的最近一次检修里程。

C_p^T : 作业包 p 的时间周期。

C_p^M : 作业包 p 的里程周期。

M_e : 动车组 e 最近一次高级检修后的剩余运行里程。

M_R : 动车所每日最大的检修数量。

M_O : 动车组每日最大的下线车组数量。

θ_{er} : 当动车组 e 的车型与交路 r 一致时, $\theta_{er}=1$, 否则 $\theta_{er}=0$ 。

w_r : 交路 r 要求的车组数量。

2.3 决策变量

x_{edr} : 如果动车组 e 在计划日 d 的交路 r 上线运行, $x_{edr}=1$, 否则 $x_{edr}=0$ 。

y_{edp} : 如果安排动车组 e 的检修作业包 p 在计划日 d 检修, $y_{edp}=1$, 否则 $y_{edp}=0$.

2.4 优化模型

$$\min z = \sum_{q \in Q} \left(\sum_{e \in E} \rho(q, \lambda(\frac{M_e}{\varepsilon_e})) - \eta \right)^2, \quad (1)$$

$$\varepsilon_e = \sum_{r \in R} \sum_{d \in D} x_{edr} m_r / N_D, \quad (2)$$

$$\eta = \sum_{q \in Q} \sum_{e \in E} \rho(q, \lambda(\frac{M_e}{\varepsilon_e})) / N_Q, \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{e \in E} \sum_{r \in R} (1 - x_{edr}) \leq M_O, \quad \forall d \in D, \quad (4)$$

$$\sum_{e \in E} \sum_{p \in P} y_{edp} \leq M_R, \quad \forall d \in D, \quad (5)$$

$$\sum_{r \in R} x_{edr} \leq 1, \quad \forall e \in E, d \in D, \quad (6)$$

$$\sum_{e \in E} x_{edr} = w_r, \quad \forall r \in R, d \in D, \quad (7)$$

$$x_{edr} \leq \theta_{er}, \quad \forall e \in E, r \in R, d \in D, \quad (8)$$

$$M_e > 0, \quad \forall e \in E, \quad (9)$$

$$\sum_{d=i}^j \sum_{r \in R} x_{edr} t_{ed} \leq 1.1 C_p^T (1 + \sum_{d=i}^j y_{edp}), \quad \forall e \in E, p \in P, i, j \in D, i < j, \quad (10)$$

$$\sum_{d=i}^j \sum_{r \in R} x_{edr} m_{ed} \leq 1.1 C_p^M (1 + \sum_{d=i}^j y_{edp}), \quad \forall e \in E, p \in P, i, j \in D, i < j, \quad (11)$$

$$t_{ep}^0 + \sum_{d=1}^j \sum_{r \in R} x_{edr} t_{ed} \leq 1.1 C_p^T (1 + \sum_{d=1}^j y_{edp}), \quad \forall e \in E, p \in P, j \in D, \quad (12)$$

$$m_{ep}^0 + \sum_{d=1}^j \sum_{r \in R} x_{edr} m_{ed} \leq 1.1 C_p^M (1 + \sum_{d=1}^j y_{edp}), \quad \forall e \in E, p \in P, j \in D. \quad (13)$$

模型的目标函数是最小检修成本式 (1) ~ 式 (3), 其中式 (2) 描述动车组在计算日范围内的平均日均里程, 式 (3) 描述每个月的平均高级检修到期车组数, 式 (4) 和式 (5) 描述了动车所扣修数量条件和检修能力条件, 式 (6) ~ 式 (8) 描述列车运行图约束, 式 (9) ~ 式 (13) 描述检修不能超期约束。

3 求解算法

鉴于粒子群算法在求解类似问题的优势^[9-10], 本文采用粒子群优化运用方案。每个粒子 q 都有一个 J 维的位置矢量 $\mathbf{X}_q = (x_{q1}, x_{q2}, \dots, x_{qJ})$ 。每个粒子的位置矢量代表一个动车组的运用计划。在迭代优化计算过程中, 对每个粒子的目标函数进行评价。每个粒子具有一个飞行速度矢量 $\mathbf{V}_q = (v_{q1}, v_{q2}, \dots, v_{qJ})$, 通过粒子的速度变量实现粒子代表的解的优化更新, 每个粒子都有一个历史最优位置 $\mathbf{P}_q = (p_{q1}, p_{q2}, \dots, p_{qJ})$, 具体表示在迭代计算过程中到当前迭代次数为止该粒子所搜索到的最优动车组运用计划, 整个粒子群具有一个全局历史最优位置 $\mathbf{P}_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gJ})$, 也就是全局的动车组运用计划优化方案。

粒子速度依然采用粒子群算法中的基本迭代更新公式进行计算更新, 如式 (14) 所示。

$$v_{qj}^{(t+1)} = \omega_q^{(t)} v_{qj}^{(t)} + c_1 r_1 (p_{qj}^{(t)} - x_{qj}^{(t)}) + c_2 r_2 (p_{gj}^{(t)} - x_{qj}^{(t)}), \quad (14)$$

其中, t 为迭代次数; r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 之间的随机数; c_1 和 c_2 为学习因子; 粒子速度满足区间 $[-v_{\max}, v_{\max}]$; $\omega_q^{(t)}$ 为惯性权重, 采用前文提到的随迭代次数线性变换的函数进行更新, 如式 (15) 所示。

$$\omega_q^{(t)} = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{t_{\max}} \times t, \quad (15)$$

其中, ω_{\max} 和 ω_{\min} 分别为最大和最小惯性权重; t_{\max} 为最大迭代次数。采用改进的二进制离散粒子群优化算法进行求解, 借助一个常用的模糊函数和随机的方法对粒子在各维度上代表的解的取值进行具体更新, 如式 (16) 所示。

$$x_{qj}^{(t+1)} = \begin{cases} 1, & \rho < \text{Sigmoid}(v_{qj}^{(t+1)}), \\ 0, & \text{其他}, \end{cases} \quad (16)$$

其中, ρ 为 $[0, 1]$ 之间的随机数, 每次迭代中随机产生; Sigmoid 函数是一种模糊函数,

$$\text{Sigmoid}(v_{qj}^{(t)}) = \frac{1}{1 + \exp(-v_{qj}^{(t)})}. \quad (17)$$

4 算例

取 15 列动车组进行算法仿真, 动车组及其最近一次高级检修情况如表 3 所示。

表 3 动车组检修信息表

Tab. 3 Overhaul information of electric multiple units

动车组	上次高级修时间	上次修程	车型	按交路平均计算条件下的下次高级修到期时间
e_1	2016-01-03	三级检修	CRH3C	2018-01-22
e_2	2015-11-02	三级检修	CRH3C	2017-11-21
e_3	2015-12-17	四级检修	CRH3C	2018-01-05
e_4	2016-01-17	三级检修	CRH3C	2018-02-05
e_5	2016-01-13	四级检修	CRH3C	2018-02-01
e_6	2016-02-07	三级检修	CRH3C	2018-02-26
e_7	2016-02-13	三级检修	CRH3C	2018-03-04
e_8	2016-02-01	四级检修	CRH3C	2018-02-20
e_9	2015-10-15	三级检修	CRH3C	2017-10-29
e_{10}	2015-10-04	五级检修	CRH2E	2017-01-06
e_{11}	2015-09-18	三级检修	CRH2E	2016-12-21
e_{12}	2015-08-02	三级检修	CRH2E	2016-11-04
e_{13}	2015-09-07	三级检修	CRH2E	2016-12-10
e_{14}	2015-10-17	三级检修	CRH2E	2017-01-19
e_{15}	2015-09-20	三级检修	CRH2E	2016-12-23

采用上述动车组担当表 2 中的交路时, 在不考虑高级检修的条件下, e_1, e_2, \dots, e_9 动车组担当 5 条 CRH3C 交路, 保留一组动车组替换专项修动车组上线运行。同理, e_{10}, \dots, e_{15} 动车组担当 CRH2E 交路。在考虑高级检修的条件下, 如表 3 所示, 存在多列车组在相同时间段集中到期, 导致动车所无车可用。

通过本文算法求解时, 将 e_1 动车组基本固定在 W_3 交路上, 使其高级检修到期时间延后, 将 e_4 动车

组和 e_6 动车组基本固定在 W_2 交路上, 使其高级检修到期时间提前, 从而消解 CRH3C 动车组的集中到期问题。同理, 将 e_{10} 动车组和 e_{13} 动车组基本固定在交路 W_7 上, 提前高级检修到期时间, 将 e_{15} 基本固定在交路 W_6 上, 使其高级检修到期时间延后。进而计算 6 个计划日的运用检修计划, 如表 4 所示。

表 4 运用检修计划计算结果
Tab. 4 Calculation results of overhaul plan

动车组	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6
e_1	W_3	W_3	W_3	W_3	镟轮	镟轮
e_2	W_4 第二日	W_5	W_5	备用	W_5	W_5
e_3	W_1 第一日	W_1 第二日	W_1 第一日	W_1 第二日	W_1 第一日	W_1 第二日
e_4	W_2 第一日	W_2 第二日	W_2 第一日	W_2 第二日	W_2 第一日	W_2 第二日
e_5	W_1 第二日	W_1 第一日	W_1 第二日	W_1 第一日	W_1 第二日	W_1 第一日
e_6	专项检修	W_2 第一日	W_2 第二日	W_2 第一日	W_2 第二日	W_2 第一日
e_7	W_4 第一日	W_4 第二日	W_4 第一日	W_4 第二日	W_4 第一日	W_4 第二日
e_8	W_5	W_4 第一日	W_4 第二日	W_4 第一日	W_4 第二日	W_4 第一日
e_9	备用	专项检修	专项检修	W_5	W_3	W_3
e_{10}	W_7 第一日	W_7 第二日	W_7 第一日	W_7 第二日	W_7 第一日	W_7 第二日
e_{11}	W_8 第二日	备用	备用	W_6	备用	备用
e_{12}	备用	W_8 第一日	W_8 第二日	W_8 第一日	W_8 第二日	W_8 第一日
e_{13}	W_7 第二日	W_7 第一日	W_7 第二日	W_7 第一日	W_7 第二日	W_7 第一日
e_{14}	W_8 第一日	W_8 第二日	W_8 第一日	W_8 第二日	W_8 第一日	W_8 第二日
e_{15}	W_6	W_6	W_6	专项检修	W_6	W_6

5 结论

随着达到高级检修周期的动车组数量的逐年上涨, 高级检修与日常运用计划协同优化的需求日益增加。这里以高级检修规则、一二级检修规程和运行图为约束条件, 以错开高级检修到期时间为优化目标建立优化模型, 从有利于高级检修均衡入场的角度调整动车组运用计划方案, 并设计了基于粒子群优化方法的问题求解算法。仿真实验证明了算法的有效性, 后续会逐步将研究成果应用到动车所调度计算机编制系统中。

[参考文献] (References)

- [1] 中华人民共和国铁道部. 铁路动车组运用维修规程[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.
China Railway Corporation. Railway CRH-EMU operational and repair regulation[S]. Beijing: China Railway Press, 2007. (in Chinese)
- [2] 赵鹏. 高速铁路动车组和乘务员运用的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 1998.
ZHAO P. Study on EMU train-set and staff operation in high speed railway[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 1998. (in Chinese)
- [3] 张才春. 成网条件下客运专线动力组运用的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
ZHANG C C. Study on the train units operation problems of passenger dedicated rail network[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
- [4] 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): 102-108.

- WANG Z K, SHI T Y, ZHANG W J, et al. Model and algorithm for integrative scheduling of EMU utilization plan and maintenance plan[J]. *China Railway Science*, 2012, 33(3): 102-108. (in Chinese)
- [5] 王忠凯, 史天运, 张惟皎, 等. 动车组开行计划优化模型及求解算法的研究[C]//中国智能交通年会优秀论文集, 2014: 260-269.
- WANG Z K, SHI T Y, ZHANG W J, et al. Research on optimized model and algorithm for EMUs utilization plan[C]//Proceedings of China Intelligent Transportation Conference, 2014: 260-269. (in Chinese)
- [6] 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.
- WANG Z K, SHI T Y, ZHANG W J, et al. Research on intelligent scheduling platform of utilization and maintenance plan of EMUs[J]. *Railway Computer Application*, 2013, 22(1): 17-21. (in Chinese)
- [7] 郭海燕. 客运专线动车组运用计划编制算法的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- GUO H Y. Research on algorithm of passenger dedicated line EMU utilization plan[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [8] 李建, 林柏梁, 耿令乾, 等. 基于交路接续的动车组运用计划优化模型与算法[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2015, 15(5): 172-177.
- LI J, LIN B L, GENG L Q, et al. Optimization model and algorithm for EMU trainset utilization scheduling based on routes connection[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2015, 15(5): 172-177. (in Chinese)
- [9] ZAHIRI S H, SEYEDIN S A. Using multi-objective particle swarm optimization for designing novel classifiers[M]//Swarm Intelligence for Multi-objective Problems in Data Mining. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2009: 65-92.
- [10] KÖPPEN M, YOSHIDA K. Many-objective particle swarm optimization by gradual leader selection[M]//Adaptive and Natural Computing Algorithms. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2007: 323-331.