

文章编号:1671-1637(2013)04-0102-06

动车组年度高级检修量预测方法

李 燕,张惟皎,贾志凯

(中国铁道科学研究院 电子计算技术研究所,北京 100081)

摘 要:为准确、高效地预测任意时间段内的所有动车组高级检修量,提出了一种动车组年度高级检修量预测方法。以上线动车组的既有运行规律的相关数据为初始值,计算后续高级检修具体日期和统计时间段内的高级检修量,得到上线动车组的高级检修总量。针对尚未投入使用的动车组,从宏观角度建立各个修程年度高级检修量概率计算方法,使用积分统计方法得到统计时间段内未上线动车组的高级检修总量。将2013年实际检修计划和2015年预测计划的总高级检修量进行归一化处理,进行了相关比较与误差计算。计算结果表明:当基准动车组为670组,上线日均走行公里在1 000~3 000 km,计算周期为180 d时,2015年归一化数据与2013年归一化数据的相对误差为-2.86%,三、四级检修的相对误差分别为-0.23%、9.24%,误差在有效范围之内,方法有效。

关键词:铁路运输;动车组;信息系统;高级检修;预测方法

中图分类号:U269

文献标志码:A

Forecast method of annual senior overhaul amount for EMU

LI Yan, ZHANG Wei-jiao, JIA Zhi-kai

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

Abstract: To forecast the senior overhaul amounts of all EMUs in arbitrary time period accurately and efficiently, a forecast method of annual senior overhaul amount for EMU was put out. The relative data of existing running rule of EMU on line was taken as initial value, the concrete dates of subsequent senior overhaul and the senior overhaul amounts during the statistical period were calculated, and the total senior overhaul amounts of all EMUs on line were obtained. For the EMUs which were not put into use, the probability calculation method of annual senior overhaul amounts for different overhaul levels were built from macro perspective, and the total overhaul amounts of all EMUs which were not put into use during the statistical period were obtained by using integral statistical method. The total senior overhaul amounts of actual overhaul plan in 2013 and predictive overhaul plan in 2015 were calculated through normalization processing, and correlative comparison and error calculation were carried out. Calculation result shows that when the standard amount of EMU is 670, the day-average mileage on line is from 1 000 km to 3 000 km, and calculation period is 180 d, the relative error of unitary data in 2015 and 2013 is -2.86%, and the relative errors of three-level and four-level overhauls are -0.23% and 9.24% respectively, the errors are within the effective range, and the proposed method is effective. 1 tab, 4 figs, 17 refs.

收稿日期:2013-01-18

基金项目:铁道部科技研究开发计划项目(2011J002)

作者简介:李 燕(1980-),女,河北香河人,中国铁道科学研究院助理研究员,工学博士,从事铁路信息化研究。

Key words: railway transportation; EMU; information system; senior overhaul; forecast method

Author resume: LI Yan(1980-), female, assistant researcher, PhD, +86-10-51893296, yan531@263.net.

0 引言

自中国铁路第6次大提速以来,以动车组为主的大量新设备与自动研发车型投入使用,将铁路运输装备水平的安全性、高效性、舒适性提高到了一个新水平^[1]。为了保障动车组运行的稳定性、安全性,减少备用车,提高检备率,定期保养、维护、检修是必不可少的手段。动车组高级检修采用整体检修模式,既不能将动车组所含车辆分批进行检修,也不允许将所含车辆与其他动力或非动力车辆组合担当运行任务^[2-3]。考虑到高级检修的周期为30~60 d,随着动车组上线车组数量的日益增加,对高级检修能力的要求也越来越高。如何根据当前动车组运行规律与检修能力之间的制约关系,对今后的检修需求和检修能力的变化进行估算,对于合理安排动车组的运行、维修计划,制定检修单位中、长期建设方案,保证动车组合理、稳定运转具有举足轻重的现实意义^[4-5]。

从既有铁路机车车辆的检修保养经验中可以看出,机车检修周期的预测应符合机车部件的实际损耗状况,除考虑走行公里与运行时间因素外,更应当将机车的动态因素考虑在内。张建成将机车运行过程中的公里量、负荷量和时间量相结合来确定机车检修周期的科学性和合理性^[6];赵中喜通过分析电力机车与内燃机车的差异,提出以牵引电动机电流为参考的电力机车当量公里数学模型^[7];王锐锋等采用人工神经网络方法对参数样本进行学习,得到了更合理、直观的机车检修周期预测结果^[8];齐金平等提出了一种用遗传算法构建二元决策树的机车当量公里系数算法,并利用分类预测结果确定不同工况下的机车当量公里数学模型^[9];Huang等基于Posbist可靠性理论,将协同系统中的错误形式化为Posbist故障树的结构方程,并在Posbist故障树最小分割的基础上构建了基于Posbist理论的故障树分析模型^[10];齐金平等在检修预测的当量公里模型基础上建立了机车检修周期模糊故障树模型,通过模糊树模型分析机车运行过程中的静态、动态因素^[11]。

考虑动车组一体化检修的客观要求,在编制一体化检修计划研究领域,Bae等以动车组现有运行条件、检修特性为组成部分构建了检修代价函数,使用AMSAA模型进行可靠性分析,评估单一动车组

的故障率与平均故障时间等,并通过二者的结合确定动车组各组成部分的最优检修周期,进而安排检修计划^[12];张才春等以动车组接续时间与地点、定检里程、检修点分级检修能力为约束条件,以所需动车组数量最少和总检修时间最小为目标函数,建立了优化模型,并用改进的蚁群算法求解模型^[13];史峰等提出在不固定动车组运行区段的前提下,以列车形成的环形排列为动车组交路,以日常检修和一级检修的时间间隔和里程间隔为约束条件,以列车接续费用最少为优化目标,建立了动车组运行计划和检修计划的一体化优化模型,并通过引入惩罚函数和三交换邻域结构,设计了求解模型的模拟退火算法^[14];王莹等以检修能力和路径数量为约束条件,以动车组检修前的累计运行里程最大化为目标函数,建立了优化模型并采用分枝定价法求解模型^[15],但是该模型将运行计划和检修计划割裂优化,使计划编制过程复杂,调整繁琐;王忠凯等以降低检修成本为目标函数,建立并求解了动车组运行计划和检修计划的一体化整数规划模型^[16];陈彦以检修任务关系、检修工时要求和检修工序能力限制为约束条件,以检修所需时间最短为优化目标,建立了动车组高级检修检修计划编制模型,结果表明该模型可大幅提高现场检修计划编制质量和效率^[17]。

尽管动车组高级检修量的预测对于铁路行业的发展具有前瞻性的重要意义,但由于中国高速铁路的发展还处于起步阶段,预测领域的相关研究并不多见。本文首次提出了动车组年度高级检修量预测的2种算法,推算法和走行公里倍除法,干次高级检修的具体日期。在实际的检修预测应用中,通过详细分析2种算法各自的适用范围和优缺点,首次将2种算法结合,开发了动车组管理信息系统中的高级检修预测模块,为铁路部门编制高级检修计划,预测未来任意时间段的高级检修量提供可靠依据。

1 年度高级检修计划

1.1 年度高级检修计划编制流程分析

各铁路局根据动车组的检修规程规定和走行公里情况,编制年度三、四、五级检修建议计划,并上报建议计划。上级铁路部门根据信息系统自动预排出的年计划,结合施修单位检修能力和运输需要,进行再次

协调,最终完成全路高级检修年度计划的编制,并进行发布。高级检修年度计划编制业务流程见图 1。

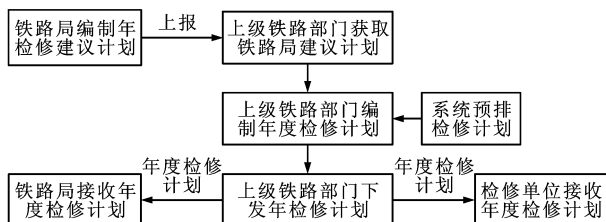


图 1 年度计划流程

Fig. 1 Annual plan flow

1.2 年度计划侧重点

图 1 中系统预排检修计划是指依照动车组检修规程要求,以动车组走行数据为依据,设计一定的计算规则,通过计算机自动测算出动车组高级检修的相关信息,作为相关人员编制计划的参考依据。

以年度为单位的检修计划并不过多关注具体需要检修车组的详细信息是否准确,而是更关注这些检修车组信息在时间周期内所形成的统计规律,如下年度或未来某个年度总检修车组数、标准列数,各车型检修量,即各车型分别有多少车组需要进行三、四、五级检修等。这些统计规律数据对于合理安排动车组运行、检修具有指导性意义,对检修单位检修能力的建设提供参考性意见。

2 高级检修预测算法

动车组高级检修量的预测目的并不是精确得到动车组高级检修的准确时间,而是得到可能发生的检修量的统计规律,根据计算原理的不同,预测算法可以分为推算法和走行公里倍除法 2 种。

2.1 推算法

推算法就是以单一动车组的既有运行规律的相关数据为初始值,依次计算出动车组的下次乃至多次高级检修具体日期,然后根据需要统计落在特定时间段内的动车组高级检修量,作为该特定时间段内的高级检修预测量,推算过程见图 2。

推算法可形式化为

$$Q_1 = \text{arv}(t_{i,j} \in t_0) \quad (1)$$

$$t_{1,j} = t_c + \frac{L_{l,j} - L_{c,j} + L_{0,j}}{\bar{m}_j} \quad (2)$$

$$t_{i,j} = t_{i-1,j} + d_{l,j} + \frac{L_{l,j}}{\bar{m}_j} \quad (3)$$

式中: Q_1 为时间段 t_0 内根据推算法得到的全路高级检修量; $\text{arv}(\cdot)$ 为取个数操作; $t_{i,j}$ 为动车组 j 从现在开始的第 i 次高级检修日期; $t_{1,j}$ 为动车组 j 的

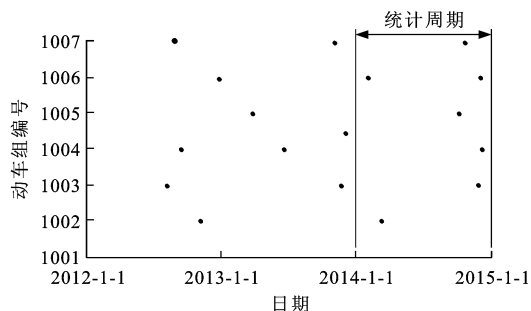


图 2 推算过程

Fig. 2 Calculating process

下次高级检修日期; t_c 为系统当前日期; $L_{l,j}$ 为动车组 j 检修级别 l 的修程公里; $L_{c,j}$ 为动车组 j 当前的走行公里; $L_{0,j}$ 为动车组 j 上次高级检修修竣时的走行公里; \bar{m}_j 为动车组 j 的日均走行公里; $d_{l,j}$ 为动车组 j 检修级别 l (三、四、五级检修) 的修时。

推算算法的有效性主要基于以下 4 个方面的假设前提:动车组保持预测之前一定周期内的运行和检修规律不变;不同动车组的运行、检修过程相对独立,相互之间不存在依赖关系;忽略一、二级检修修时;动车组在进行高级检修时,严格按照计划修时的安排,不缩短或延长检修天数。

2.2 走行公里倍除法

走行公里倍除法是通过提供某车型的日均走行信息,从宏观统计角度计算该车型每车组一年内可能产生的各级检修量,沿车组总量和车型对检修数量求和,最后以时间长度为系数,得到一定时间段内可能产生的高级检修总量。该方法可形式化为

$$Q_2 = \sum_{l=3}^5 \sum_{x=1}^T V_x Q_{l,x} Q_3 \quad (4)$$

$$Q_3 = t_0 / t_Y \quad (5)$$

$$Q_{5,x} = \frac{L_x}{L_{5,x}} \quad (6)$$

$$Q_{4,x} = \frac{L_x}{L_{4,x}} - Q_{5,x} \quad (7)$$

$$Q_{3,x} = \frac{L_x}{L_{3,x}} - Q_{5,x} - Q_{4,x} \quad (8)$$

$$L_x = \bar{m}_x \bar{d}_x \quad (9)$$

式中: Q_2 为时间段 t_0 内根据走行公里倍除法得到的全路高级检修总量; Q_3 为时间权重系数,即为需要统计的时间段长度 t_0 与该年总天数 t_Y 的比值; x 为车型种类; V_x 为 x 型动车组的总数量; $Q_{l,x}$ 为检修级别 l 的 x 型动车组每年可能发生高级检修的数量; L_x 为 x 型动车组每年可可行的公里; $L_{l,x}$ 为检修级别 l 的 x 型动车组检修周期公里; \bar{d}_x 为 x 型动车

组年平均开行天数; \bar{m}_x 为 x 型动车组日均走行公里。

基于高级检修程高优先级的规律,在计算低级检修的检修量时需要减去可能发生的较高级检修程的检修量。走行公里倍除法的有效性主要基于以下3个方面的假设:所有同一型号的动车组同时上线,且初始走行公里均为0,日均走行公里相同;统计时间段内的某种车型的总投放列数已知;尚未投入使用的车型与现有某种车型运行和检修规律相同。

2.3 关键参数分析

2.3.1 车组日均走行公里

在推算法中,动车组 j 的日均走行公里 \bar{m}_j 是关键参数。尽管在走行公里倍除法中,没有直接使用这一参数,但日均走行公里 \bar{m}_x 是通过 \bar{m}_j 统计平均所得,因此, \bar{m}_j 对于高级检修预测至关重要。日均走行公里有2种计算方式,分别为

$$\bar{m}_{j,N} = L_s/d_N \quad (10)$$

$$\bar{m}_{j,R} = L_s/d_R \quad (11)$$

式中: L_s 为周期 s 内动车组总走行公里; d_N 为周期 s 内包含的自然天数; d_R 为周期内动车组的运行天数,即车组状态为“运行”的总天数; $\bar{m}_{j,N}$ 为动车组 j 自然日均走行公里; $\bar{m}_{j,R}$ 为动车组 j 上线日均走行公里。

研究表明,周期 d_N 越长,所得日均值越稳定,预测结果也越稳定。当 d_N 为180 d时,预测结果与实际吻合度较高。

在实际应用中,某铁路局同种车型的动车组交替运行,如果以某路局某车型的日均走行数据作为该车型动车组的日均走行参数,有助于提高日均走行参数的适用性。

2.3.2 年平均开行天数

年平均开行天数对于走行公里倍除法十分重要。式(9)中,年平均开行天数 \bar{d}_x 决定着这一年度该车型每动车组全年可能发生的走行公里总数,直接影响当年的高级检修总量。某种车型的年平均开行天数计算有2种方法:第1种为该车型所有车组在某一年上线天数之和与该车型车组总数之比;第2种为

$$\bar{d}_x = t_Y - \sum_{l=3}^5 p_l d_l \quad (12)$$

式中: d_l 为检修级别 l 的修时; p_l 为系数,为该车型某年度检修级别 l 的数量与该车型总车组数之比。

方法2中,各车型不一定每年都有各个修程的高级检修,高级检修的集中程度又分高低年,只用某一年的数据并不能体现普遍规律,因此,2种计算方

式相比,第1种更具普遍意义。

2.4 算法适用性比较

推算法能够根据既有动车组一段时间内的走行信息较准确地计算出其日均走行公里,并且每个车组都有明确的上次高级检修竣日期或上线运行起始日期,此种方法能够递归推算动车组未来的多次精确检修时间,适用于已经上线运行的动车组。

走行公里倍除法以车型为单位,在总车组数已知的情况下,粗尺度地估算每一年的高级检修量。由于没有考虑已上线车组上线时间长短和走行公里的差异,因此,得到的结果没有推算法准确。但对于尚未投入使用的车型,在已知计划生产总量的条件下,能够预测出任意时间的高级检修量,适合于尚未投入运营车组或车型的高级检修量预测。

3 计算结果分析

在实际应用中,已经上线的动车组会陆续不断地产生高级检修,同时,未上线车组也会在运行了一段时间后发生可能的高级检修,因此,需要将2种计算方法相结合,以得到较为全面、准确的预测数据,作为检修单位中、长期检修能力建设的参考依据。

3.1 2015年检修总量预测

自2004年6月中国铁路第6次大提速起,截止至2012年6月,上级铁路部门统一配属CRH1、CRH2、CRH3、CRH5、CRH380共5个大车型12个小车型约670组动车组。这些动车组每日担当近2000个车次的运营任务。根据各个车型不同的高级检修周期规定,每半年至1年进行一次高级检修,且每一轮次的高级检修修程规律为三级修、四级修、三级修、五级修,包括北京、上海、武汉、广州4大动车检修基地在内的8家单位承担动车组高级检修任务。通过估算动车组可能发生的年高级检修量,可以对年度检修任务进行均衡分配,高效合理地利用现有检修能力,对未来较远时间段的高级检修量估算,更可标识检修能力的发展趋势,为检修能力的建设规划提供数据支持。

当前动车组总配属为670组,计算周期为180 d,上线日均走行取值范围为1000~3000 km,自然日均走行取值范围在700~2500 km。既有车组已发生过三级修的为420组,四级修的为130组,五级修的为50组,用上述2种算法来预测2015年可能发生的高级检修总量。

对于已上线动车组,本文采用推算法,得到2015年可能发生的高级检修量,见图3、4,图4中车

型 1~12 分别代表 CRH1A、CRH1B、CRH1E、CRH2A、CRH2B、CRH2C、CRH2E、CRH380A、CRH380AL、CRH380BL、CRH3C 和 CRH5A 车型。从图 3 可以看出,无论上线日均走行公里还是自然日均走行公里,各修程检修量和总的检修量具有相同的变化趋势。从图 4 可以看出,除 CRH1A 和 CRH1E 两个车型外,在不同日均走行取值下,不同车型检修量的也具有相同的变化规律。CRH1A 和 CRH1E 两个车型由于上线时间较早,检修状况不但受到修程公里的制约,同时受到修程时间年限的制约,即动车组即使不上线运行,停放一定时间后也需要进行相应高级检修。日均走行公里取值的差异对不同车型、不同修程的高级检修预测规律基本没有影响,充分说明了预测方法的稳定性和可靠性。

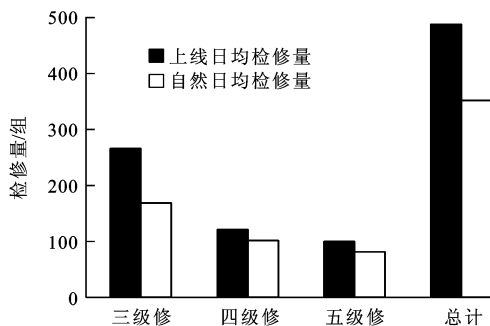


图 3 不同修程下的检修量

Fig. 3 Overhaul amounts under different overhaul levels

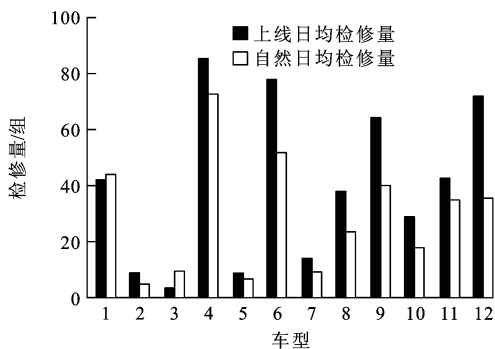


图 4 不同车型检修量

Fig. 4 Overhaul amounts for different vehicles

对于未上线车型,采用走行公里倍除法进行计算。假设即将上线的短编组动车组车型为 CRH380E (30 组)、CRH380F(20 组)车型,参照 CRH380A 型车的走行规律,长编组车型 CRH380EL (50 组)、CRH380FL(120 组)参照 CRH380AL 的走行规律,则 2015 年可能发生的高级检修量分为 2 种情况。

(1)采用 180 d 自然日均走行计算时,这 4 种车型在 2015 年会产生三级修 45 组、四级修 22 组、五

级修 22 组,共 89 组。

(2)采用 180 d 上线日均走行计算时,会产生三级修 71 组、四级修 35 组、五级修 35 组,共 141 组。将已上线和未上线车型预测数量相加进行相关处理,即为 2015 年可能发生的高级检修总量。

3.2 2015 年预测检修总量与 2013 年实际检修计划的归一化数据误差对比

2012 年底发布的 2013 年度实际高级检修计划中,动车组总配属为 800 组,计划总检修 563 组,其中三级修 317 组,四级修 156 组,五级修 90 组,该计划是参照上线日均走行公里进行计算的。考虑动车组配属总数不同会给预测对比带来影响,在对比过程中,将 2013 年实际检修计划和 2015 年预测计划的总检修组数进行数量归一化,得到两者上线日均预测的计划误差,结果见表 1。

表 1 误差比较

Tab. 1 Comparison of errors

| 分类 | 总检修组数 | 三级修组数 | 四级修组数 | 五级修组数 |
|----------------|-------|-------|-------|--------|
| 2013 年实际检修计划/组 | 563 | 317 | 156 | 90 |
| 2015 年预测计划/组 | 487 | 267 | 120 | 100 |
| 按总车组比例校正后误差/% | -2.86 | -0.23 | 9.24 | -24.37 |

从表 1 可以看出,总检修组数和三、四级检修误差均在 $\pm 10\%$ 以内,三级修的预测值几乎与实际计划值完全相同,但五级修的预测值与实际计划相差甚远。可能的原因有 2 点:五级修修程为三级修修程的 4 倍,在动车组上线运行的最初 2~3 年内,除个别车型外,几乎不会发生五级检修,因此,在大批动车组同时投产使用时,五级修检修量预测偏差较大;五级修修程最长,在运用中须经历两次三级修和一次四级修才能达到修程,其间动态影响检修周期的因素较另两修程更多、更复杂,预测难度更高,需有更完备的预测模型和方法。

4 结 语

目前,基于推算法和走行公里倍除法相结合的预测方法已在部、局级系统动车组管理信息系统的高级检修模块中成功应用,为编制高级检修计划,安排动车组高级检修工作提供了可靠依据,并大幅度地减少了人工计算带来的工作量和可能的误差,有效提高了工作效率。同时,方法的应用为动车组短期检修计划的预测、中长期轮廓计划的制定以及检

修基地产能规模的建设提供了有力的数据支持。

未来的研究主要集中在3个方面:如何利用统计分析的方法获得更准确的参数值;在预测方法中考虑运用检修的修时延误问题,使算法结果更精确;配合动车组整车检修与配件检修相结合的精细化管理模式,以运营压力、检修能力、检修效率的平衡点为优化目标,引入机器学习方法,进一步对预测模型进行智能化和标准化。

参考文献:

References:

- [1] 刘刚,王华胜,文礼. 高速列车修程修制技术[J]. 中国铁路, 2010(12): 62-66.
LIU Gang, WANG Hua-sheng, WEN Li. High-speed train repair process and system technologies[J]. Chinese Railways, 2010(12): 62-66. (in Chinese)
- [2] 刘丽影,刘继刚,刘继. 我国高速动车组检修制度[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2001, 29(8): 121-124.
LIU Li-ying, LIU Ji-gang, LIU Ji. Study on maintenance system of electric multiple unit[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2001, 29(8): 121-124. (in Chinese)
- [3] 韩增力. 关于动车组检修性能的探讨[J]. 铁道机车车辆, 2011, 31(3): 90-92.
HAN Zeng-li. Analysis of EMU maintenance performance[J]. Railway Locomotive and Car, 2011, 31(3): 90-92. (in Chinese)
- [4] 吴庄胜,赵清,王伯铭. 高速列车运用检修及动车段的设计研究[J]. 西南交通大学学报, 2006, 32(3): 277-282.
WU Zhuang-sheng, ZHAO Qing, WANG Bo-ming. Operation and maintenance of high speed trains[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2006, 32(3): 277-282. (in Chinese)
- [5] 匡双芹. 动车组检修基地与动车检修分析[J]. 产业与科技论坛, 2011, 10(2): 90-91.
KUANG Shuang-qin. Maintenance bases and maintenance analysis of EMU[J]. Industrial and Science Tribune, 2011, 10(2): 90-91. (in Chinese)
- [6] 张建成. 用机车当量公里概念确定机车检修周期[J]. 铁道机车车辆工人, 2005(6): 10-12.
ZHANG Jian-cheng. Deciding the maintenance cycle of locomotive by equivalent kilometers[J]. Railway Locomotive and Rolling Stock Workers, 2005(6): 10-12. (in Chinese)
- [7] 赵中喜. 电力机车当量公里数学模型研究[J]. 铁道机车车辆, 2005, 25(增): 46-47.
ZHAO Zhong-xi. Study of mathematical model on electric locomotive equivalent kilometers[J]. Railway Locomotive and Car, 2005, 25(S): 46-47. (in Chinese)
- [8] 王锐锋,罗扬,阎军,等. 基于人工神经网络的机车当量模型的研究[J]. 内燃机车, 2008(3): 11-14.
WANG Rui-feng, LUO Yang, YAN Jun, et al. Study of locomotive equivalent model based on artificial neural network[J]. Diesel Locomotives, 2008(3): 11-14. (in Chinese)
- [9] 齐金平,宋薇,李宏亮,等. 基于遗传算法的二元决策树方法在机车当量公里数学模型中的应用研究[J]. 内燃机车, 2010(2): 13-15, 19.
QI Jin-ping, SONG Wei, LI Hong-liang, et al. Application of genetic algorithm-based binary decision tree method to mathematical model for equivalent locomotive running kilometers[J]. Diesel Locomotives, 2010(2): 13-15, 19. (in Chinese)
- [10] HUANG Hong-zhong, TONG Xin, ZUO Ming-jian. Posbist fault tree analysis of coherent systems[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2004, 84(2): 141-148.
- [11] 齐金平,史亚娟,杨团名. 基于模糊故障树的铁路机车检修周期预测研究[J]. 兰州交通大学学报, 2010, 29(3): 62-66.
QI Jin-ping, SHI Ya-juan, YANG Tuan-ming. Study of forecast for railway locomotive overhaul cycle on fuzzy fault tree[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2010, 29(3): 62-66. (in Chinese)
- [12] BAE C, KOO T, SON Y, et al. A study on reliability centered maintenance planning of a standard electric motor unit subsystem using computational techniques[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009, 23(4): 1157-1168.
- [13] 张才春,陈建华,花伟. 基于不同检修能力的动车组运用计划研究[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(5): 130-133.
ZHANG Cai-chun, CHEN Jian-hua, HUA Wei. Research on the EMU operation plan based on different maintenance capacity[J]. China Railway Science, 2010, 31(5): 130-133. (in Chinese)
- [14] 史峰,周文梁,郁宇卫,等. 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): 8-13.
SHI Feng, ZHOU Wen-liang, YU Yu-wei, et al. Optimized model and algorithm of motor train-sets scheduling for dedicated passenger lines[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(1): 8-13. (in Chinese)
- [15] 王莹,刘军,苗建瑞. 基于列生成算法的动车组检修计划优化[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(2): 115-120.
WANG Ying, LIU Jun, MIAO Jian-rui. Column generation algorithms based optimization method for maintenance scheduling of multiple unit[J]. China Railway Science, 2010, 31(2): 115-120. (in Chinese)
- [16] 王忠凯,史天运,张惟皎,等. 动车组运用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 Zhong-kai, SHI Tian-yun, ZHANG Wei-jiao, et al. Model and algorithm for the integrative scheduling of EMU utilization plan and maintenance plan[J]. China Railway Science, 2012, 33(3): 102-108. (in Chinese)
- [17] 陈彦. 动车组高级修检修计划编制模型与算法[J]. 铁路计算机应用, 2013, 22(1): 22-24.
CHEN Yan. Model and algorithm for making overhaul plan of EMUs[J]. Railway Computer Application, 2013, 22(1): 22-24. (in Chinese)