

文章编号:1005-0523(2019)03-0055-09

大机捣固养修作业计划多目标决策模型

许玉德^{1,2},赵梓含^{1,2},乔雨^{1,2},沈坚锋³,邱俊兴⁴

(1.同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804;2.上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室,上海 201804;3.中交投资有限公司,北京 100029;4.深圳市城市交通规划设计研究中心,广东 深圳 518021)

摘要:提出一种以轨道几何状态和养护维修作业成本为子目标函数的大机捣固养护维修作业计划多目标决策模型,其中轨道几何状态最优子目标函数依据轨道高低不平顺恶化模型及恢复模型建立,养护维修作业成本最优子目标函数包括计划性养护费用、固定费用、事后养护费用、舒适性损失费用。采用改进的NSGA-II算法对模型进行求解,并编写了相应的MATLAB程序,选取一沪昆上行线区段对模型及算法进行了验证分析。结果表明:所提出的大机捣固养护维修作业计划多目标决策模型能够提供多个养护维修维护计划方案,且对于初始高低不平顺较大且轨道结构状态恶化较快的区段优先安排养护维修作业;对于初始高低不平顺较小且轨道结构状态恶化较慢的区段,将其维修安排在年度计划的后期,或者不予安排维修作业。

关键词:有砟轨道;大机捣固;高低不平顺;多目标模型

中图分类号:U216.4

文献标志码:A

随着我国高速铁路运营年限的不断增长,轨道几何状态也随之不断恶化,在有砟轨道线路中,线路状态和大机捣固作业直接相关^[1],大机捣固是轨道养护维修作业的重要手段之一。

徐伟昌通过建立TQI_{rw}预测模型和维修时机决策模型,提出了“线路维修服务水平”的概念^[2];陈立利用轨道质量指数建立状态修基准指标,科学安排大机捣固作业计划^[3];Miwa等通过研究轨道不平顺与火车脱轨概率之间的关系,以保障运营安全,指导捣固作业时机^[4];周宇^[5]基于整数型轨道状态最优综合维修计划模型,建立了基于遗传算法的模型设计,但上述研究均未考虑成本问题。Higgins将由养护维修作业导致的列车运行延误转化为成本费用考虑到计划决策模型中^[6],但没有考虑到由基本养护维修活动产生的费用,且国内外养护维修作业方式存在显著差异,有必要针对国内的捣固养护维修作业方式提出合理的养护维修成本构成。

为制定科学、合理的大机捣固养护维修作业计划,综合考虑轨道结构几何状态和捣固养修作业成本,建立大机捣固养护维修作业计划多目标决策模型,采用改进的NSGA-II算法对模型进行求解,并选取一沪昆上行线区段进行验证分析。

1 轨道几何状态最优子目标函数

1.1 轨道几何不平顺恶化模型

轨道系统具有复杂性,几何不平顺预测模型往往采用随机性恶化模型,Quiroga L M, Schniede E提出一种基于200 m区段的指数型预测模型^[7-8],在此基础上,本文针对轨道高低不平顺,提出如下模型:

$$\sigma_i(T) = \sigma_0 \cdot e^{k_i T} + \varepsilon(t) \quad (1)$$

收稿日期:2018-12-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51678445)

作者简介:许玉德(1965—),男,教授,博士,博士生导师,主要研究方向为轨道管理、轨道养护维修技术。

式中: σ_0 为计划区段*i*在时间*T*=0的轨道高低不平顺在200 m区段的标准差,mm; $\sigma_i(T)$ 为计划区段*i*在时间*T*的轨道高低不平顺在200 m区段的标准差,mm; k_{it} 为区段*i*上服从对数正态分布的待定随机变量参数,与养护维修作业次数有关,对于同一单元区段,养护维修作业前后不同; t 为2次捣固相隔时间; $\varepsilon(t)$ 为服从正态分布的随机噪声,mm。

1.2 轨道几何不平顺恢复模型

大型养路机械作业可以在一定程度上恢复线路状态,但无法完全恢复,轨道几何不平顺始终存在着残留,在一个养护维修周期内,残留率定义为作业后与作业前不平顺值之比。

大型养路机械作业计划区段定义为 $u_j = \{1, 2, 3, \dots, U_j^{\max}\}$,单元区段*u*在养护维修开始时间 t_0 前的轨道高低不平顺为 $\sigma_u(t_0)$,当线路稳定且养路机械固定时,假设每个单元区段的残留率 g_u 是一个常数,则经过养护维修作业后,该区段高低不平顺值为

$$\sigma_u(t_0 + \Delta t) = g_u \cdot \sigma_u(t_0) \quad (2)$$

式中: $\sigma_u(t_0)$ 为单元区段*u*在养护维修作业前 t_0 时刻的轨道高低不平顺,mm; $\sigma_u(t_0 + \Delta t)$ 为经过养护,单元区段*u*的轨道高低不平顺,mm; g_u 为作业后,单元区段*u*的轨道高低不平顺残留率,%; Δt 为从养护作业开始到线路稳定,下一个恶化阶段开始之前的时间。

1.3 轨道几何状态最优目标函数

以10 d(1旬)为一个预测步长,年度养护计划安排中一年分36旬,旬集合 $J = \{1, 2, 3, \dots, 36\}$,基于所建立的模型,可以根据年末的轨道几何状态,求出一年中任意时间的高低不平顺标准差,而养护维修作业的时机,对计划区段的年末状态具有决定性作用。

若全年不进行任何养护作业,由式(1)可得,计划区段*u*在年末即第36旬时的轨道高低不平顺值为

$$\sigma_u^{36} = \sigma_u^0 \cdot e^{36k_u^n T} + \varepsilon_n^{36} \quad (3)$$

式中: σ_u^i 为计划区段*u*在第*i*旬时的高低不平顺标准差,mm, $i=1, 2, 3, \dots, 36$; σ_u^0 为计划区段*u*在年初时的高低不平顺标准差,mm; k_u^n 为计划区段*u*在第*n*次恶化阶段时的参数; ε_n^i 为第*n*次恶化阶段第*i*旬时的随机噪声,mm, $i=1, 2, 3, \dots, 36$ 。

若在第1旬进行养护维修作业,则作业后该区段轨道高低不平顺值为

$$\sigma_u^1 = g_u^1 \cdot (\sigma_u^0 \cdot e^{k_u^n T} + \varepsilon_n^1) \quad (4)$$

式中: g_u^1 为计划区段*u*上在第1旬进行养护维修作业后的几何不平顺标准差残留率,%, $j=1, 2, 3, \dots, 36$ 。

随后,轨道结构状态继续恶化,在第2旬结束后该区段高低不平顺值为

$$\sigma_u^2 = g_u^1 \cdot (\sigma_u^0 \cdot e^{k_u^n T} + \varepsilon_n^1) e^{k_u^{n+1} T} + \varepsilon_{n+1}^1 = g_u^1 \cdot \sigma_u^0 \cdot e^{(k_u^n + k_u^{n+1})T} + g_u^1 \cdot \varepsilon_n^1 \cdot e^{k_u^{n+1} T} + \varepsilon_{n+1}^1 \quad (5)$$

在第3旬结束后该区段轨道高低不平顺值为

$$\sigma_u^3 = g_u^1 \cdot (\sigma_u^0 \cdot e^{k_u^n T} + \varepsilon_n^1) e^{k_u^{n+1} 2T} + \varepsilon_{n+1}^2 = g_u^1 \cdot \sigma_u^0 \cdot e^{(k_u^n + 2k_u^{n+1})T} + g_u^1 \cdot \varepsilon_n^1 \cdot e^{2k_u^{n+1} T} + \varepsilon_{n+1}^2 \quad (6)$$

所以在第1旬进行养护维修作业时,该区段年末轨道高低不平顺值为

$$\sigma_u^{36} = [g_u^1 \cdot \sigma_u^0 \cdot e^{(k_u^n + 35k_u^{n+1})T} + g_u^1 \cdot \varepsilon_n^1 \cdot e^{35k_u^{n+1} T} + \varepsilon_{n+1}^{35}] \cdot W_u^1 \quad (7)$$

式中: W_u^j 为整数(0-1)型决策变量, $W_u^j = \begin{cases} 0, & \text{在第}j\text{旬不对区段}u\text{进行计划性养护} \\ 1, & \text{在第}j\text{旬对区段}u\text{进行计划性养护} \end{cases} \quad j=1, 2, 3, \dots, 36$ 。

若在第2旬进行养护维修作业,则该区段年末轨道高低不平顺值为

$$\sigma_u^{36} = [g_u^2 \cdot \sigma_u^0 \cdot e^{(2k_u^n + 34k_u^{n+1})T} + g_u^2 \cdot \varepsilon_n^2 \cdot e^{34k_u^{n+1}T} + \varepsilon_{n+1}^{34}] \cdot W_u^2 \quad (8)$$

式中: g_u^2 为计划区段 u 上在第2句进行养护维修作业后的几何不平顺标准差残留率,%。

同理,若计划区段 u 在第 j 句进行养护维修,该区段年末轨道高低不平顺值为

$$\sigma_u^{36} = \{g_u^j \cdot \sigma_u^0 \cdot e^{[k_u^n + (36-j)k_u^{n+1}]T} + g_u^j \cdot \varepsilon_n^j \cdot e^{(36-j)k_u^{n+1}T} + \varepsilon_{n+1}^{36-j}\} \cdot W_u^j + (\sigma_u^0 \cdot e^{36k_u^n T} + \varepsilon_n^{36}) \cdot (1 - W_u^j) \quad (9)$$

式中: g_u^3 为计划区段 u 上在第3句进行养护维修作业后的几何不平顺标准差残留率,%, $j=1,2,3,\dots,36$ 。

计划区段 u 全年的轨道状态为

$$\bar{S}_u = \frac{1}{36} \{36 \cdot (\sigma_u^0 \cdot e^{36k_u^n T} + \varepsilon_n^{36}) + \sum_{j=1}^{36} [g_u^j \cdot \sigma_u^0 \cdot e^{[k_u^n + (36-j)k_u^{n+1}]T} + g_u^j \cdot \varepsilon_n^j \cdot e^{(36-j)k_u^{n+1}T} + \varepsilon_{n+1}^{36-j} - \sigma_u^0 \cdot e^{36k_u^n T} + \varepsilon_n^{36}]\} W_u^j \quad (10)$$

所有计划区段的轨道状态 \bar{S} 可表示为

$$\bar{S} = \frac{\sum \bar{S}_u}{U_{\max}} \quad (11)$$

从式(10)、式(11)可以看到,对于确定的养护计划区段, \bar{S} 中 $U_{\max}, \sigma_u^0 \cdot e^{36k_u^n T}$ 均为定值,而其中的随机噪声也存在正负互消的情况;因此,也可不在目标函数中予以考虑,所以轨道状态最优目标函数就是保证所有计划区段的轨道状态 \bar{S} 在年末取到最小值,得到

$$\text{Min}O_1 = \sum_{u \in U} \sum_{j \in J} (g_u^j \cdot \sigma_u^0 \cdot e^{[k_u^n + (36-j)k_u^{n+1}]T} + g_u^j \cdot \varepsilon_n^j \cdot e^{(36-j)k_u^{n+1}T}) \cdot W_u^j \quad (12)$$

2 养护维修作业成本最小子目标函数

我国铁路养护维修作业秉承“周期修”和“状态修”的理念,养护维修活动分类见表1所示。

表1 高速铁路线路养修活动
Tab.1 High-speed railway maintenance activities

| 内容 | 对应规范内容 | 对应成本项 |
|------|--------|------------------------------|
| 周期检查 | 动态检测 | 轨检车费用、设备购置费、信息维护费、探伤车费用、人员费用 |
| | 静态检测 | 人员费用 |
| 大机维修 | 周期检修 | 大机维修费用 |
| | 经常保养 | 大机维修费用 |
| 临时补修 | 临时补修 | 治理费用 |

可以看出,线路维修活动主要包括三大部分:周期检查、大机维修和临时补修。结合本文所需的成本费用最小目标函数,除大机计划性养护费用以外,动静态检测中所产生的费用都认为是养护维修的固定生产费用;任一区段的高低不平顺超过事后养护限度前,都会对该区段进行维修作业;因此,临时补修作业在模型中不予考虑,而是将其以超限概率成本计算成事后养护费用;另外,为了体现轨道状态优劣对乘客舒适度的影响,将高低不平顺标准差可能导致的乘坐不舒适性计算为成本费用作为惩罚加入模型之中。

因此,所建立的成本费用最小目标函数中,主要包括计划性养护费用、固定费用、舒适性损失费用和事后养护费用四部分。

- 1) 计划性养护费用 C_i 指采用大型养路机械进行计划性养护维修时所产生的费用,本文取 $C_i=1$ 万元/km。
- 2) 固定费用 C_d 指无论是否进行养护维修作业都会产生的费用,包括检测费、人员费、探伤费等。参考文献[9],本文取 $C_d=8$ 万元/km。

3) 事后养护成本用 C_b 指每一次事后养护平均成本 L_b 和某旬恶化量 σ_t 超过事后养护限度 σ_b 的概率 P_b 乘积来表示, 如式(13)和图 1 所示。经试算, L_b 取 0.01 万元/km。

$$C_b = L_b \cdot P_b = L_b \cdot \int_{\sigma_b}^{\infty} f_n^j(\sigma_t) \cdot d\sigma_t \quad (13)$$

式中: $f_n^j(\sigma_t)$ 为不同高低不平顺标准差对应的概率分布函数; σ_{crit} 为安全限度; σ_{cft} 为舒适度标准。

4) 舒适性损失费用 C_{cft} 是由于轨道结构状态不佳导致乘坐不舒适而产生的费用。用单位时间的舒适度损失成本 L_{cft} 和舒适度不良的时间期望 E_{bad} 的乘积来表示, 为了不与事后养护费用重复计算, 只计算恶化量超过舒适度管理值且小于事后养护限度的概率, 如式(14)和图 2 所示。经试算, L_{cft} 取 0.5 万元/km。

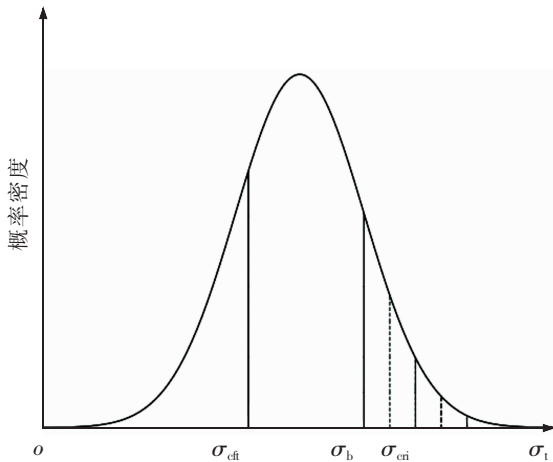


图 1 恶化量超过事后养护限度的概率

Fig.1 The schematic diagram of post maintenance costs

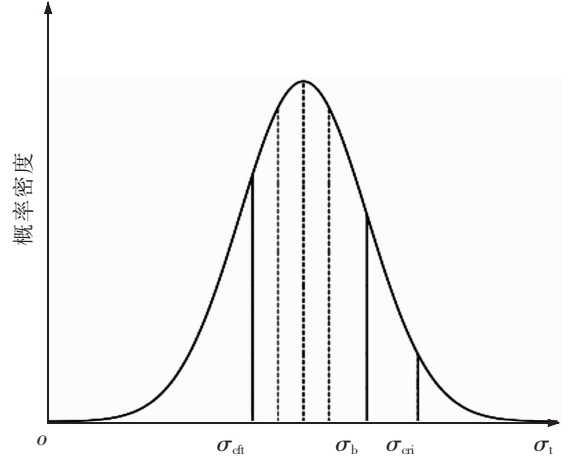


图 2 恶化量超过舒适度且小于事后养护限度的概率

Fig.2 The schematic diagram of comfort loss costs

$$C_{\text{cft}} = L_{\text{cft}} \cdot E_{\text{bad}} = L_{\text{cft}} \cdot T \cdot P_{\text{cft}}(\sigma_{\text{cft}} \leq \sigma_t \leq \sigma_b) = L_{\text{cft}} \cdot \int_0^T \int_{\sigma_{\text{cft}}}^{\sigma_b} f_n^j(\sigma_t) \cdot d\sigma_t \cdot dt \quad (14)$$

在利用帕累托最优前沿曲线进行 2 个目标函数的优化时, 要求子目标函数之间相互制约。而由式(13)、式(14)可知, 事后养护费用、舒适性损失费用均随着轨道高低不平顺标准差降低而减少, 但计划性养护费用随作业次数的增加而线性增长。所以, 当这 3 个单项成本费用加入成本费用目标函数时, 无法和轨道状态最优目标函数形成此消彼长的矛盾关系, 只能成为一个单目标最优化问题。

为了得到帕累托最优前沿曲线, 将舒适性损失费用、事后养护费用理解成为保持良好的轨道状态而产生的负的惩罚性费用。

综上所述, 可得成本费用最小目标函数:

$$\text{Min}O_2 = \sum_{u \in U} \sum_{j \in J} (C_t \cdot W_u^j + C_d - C_{\text{cft}} - C_b) \quad (15)$$

3 轨道状态—成本费用双目标优化模型

综合上述推导所得的轨道几何状态最优和养护维修作业成本最小两个子目标函数, 建立大机捣固养护维修作业计划多目标模型如下

$$\text{Min}O = \begin{cases} O_1 = \sum_{u \in U} \sum_{j \in J} (g_u^j \cdot \sigma_u^0 \cdot e^{[j k_u^n + (36-j) k_u^{n+1}] T} + g_u^j \cdot \varepsilon_u^j \cdot e^{(36-j) k_u^{n+1} T}) \cdot W_u^j \\ O_2 = \sum_{u \in U} \sum_{j \in J} (C_t \cdot W_u^j + C_d - C_{\text{cft}} - C_b) \end{cases} \quad (16)$$

约束条件:

1) 养路机械总量约束。所建立模型仅适用于一套大型养路机械在计划区段上作业的情况:

$$W_u^j \leq 1 \quad (17)$$

2) 定点定时养护约束。在特定情况下,需要在规定时间内对规定区段进行养护维修:

$$W_u^j = 1 \quad (18)$$

式中: $u_1, j_1 \in \{\text{被指定的某个工区和配置时间}\}$ 。

3) 计划区段上限个数约束。大型养路机械不能够每个天窗都作业,在固定时间内,其作业量是有上限的:

$$\sum_u W_u^j \leq A_j \quad j \in J \quad (19)$$

式中: A_j 为第 j 旬时可养护的作业区段上限数。

4) 同一计划区段养护次数约束。大型养路机械对线路的预防性养护维修作业的效果一般都较为明显,所以计划性养护维修的最大次数暂定为 1 年 1 次:

$$\sum_j W_u^j \leq 1 \quad (20)$$

5) 恶化状态上限约束。若计划区段高低不平顺值即将超过事后养护限度,则需在此之前进行养护维修作业:

$$\sum_{j=1}^{J-1} W_u^j = 1 \quad (21)$$

式中: U_2 : {年度计划期中,预测几何不平顺达到上限值计划区段}, $u \in U_2$; $J_c^u \in \{\text{计划区段 } u \text{ 最迟需进行养护的旬}\}, j \in J$ 。

6) 养护成本总量约束。为了确定列车运行安全这个第一要务,大型养路机械的专项维修资金拨付是较为充裕的,所以在保证高低不平顺值不超过事后养护限度的前提下,规定养护维修成本不超过预设限值即可:

$$\sum_{u \in U} \sum_{j \in J} C_{uj} \leq C_{\max} \quad (22)$$

4 求解算法

根据上述模型,本文采用 MATLAB 对改进的 NSGA-II 算法进行编译^[10]。该算法实现流程如图 3 所示。

5 算例

5.1 算例设计

选取沪昆上行线 K230+600~ K240+600 区段编制养护维修年度计划。

初始参数中, $U_j^{\max} = 10$, $T = 10$, $\sigma_z(n) = 0.01$, $C_1 = 1$, $C_d = 8$, $L_{\text{eff}} = 0.01$, $L_b = 0.5$, $C_{\max} = 70$, $A_j = 3$, $U_2 = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 10\}$, $J_c^u \in \{17, 22, 18, 22, 24, 35, 29\}$, $gen = 200$, $pop = 700$, $P_{1c} = 0.7$, $P_{2c} = 0.2$, $P_{1m} = 0.1$, $P_{2m} = 0.01$, 本算例中不指定区段 U_1 以及相对应的 J_1 的数值,初始高低不平顺标准差 σ_u^0 见表 2。

因为该区段在年度计划中存在养护维修作业,每个区段都要两个对应不同恶化阶段的参数 k ,根据样本数据统计分析,结果见表 3。

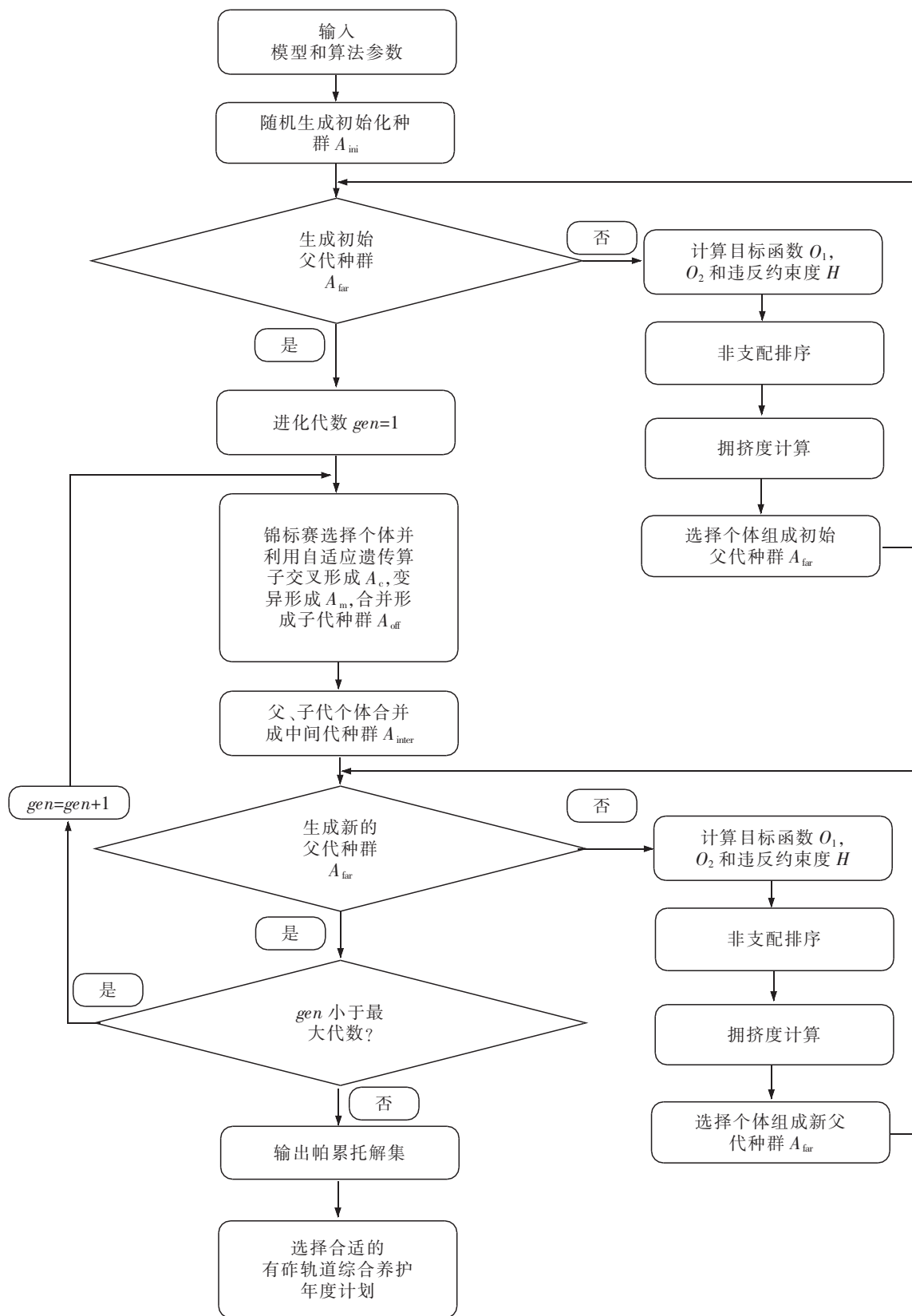


图3 有砟轨道综合养护年度计划的实现流程图

Fig.3 Flow chart of improved NSGA-II algorithm

表 2 沪昆上行线 K230+600~ K240+600 区段高低不平顺初始标准差

Tab.2 Initial standard deviation of vertical irregularity of K230+600~K240+600 in Shanghai-Kunming upline

| 计划区段序号 | 起点里程 | 终点里程 | 高低不平顺标准差/mm |
|--------|----------|----------|-------------|
| 1 | K230+600 | K231+600 | 0.881 |
| 2 | K231+600 | K232+600 | 0.767 |
| 3 | K232+600 | K233+600 | 0.788 |
| 4 | K233+600 | K234+600 | 0.791 |
| 5 | K234+600 | K235+600 | 0.763 |
| 6 | K235+600 | K236+600 | 0.646 |
| 7 | K236+600 | K237+600 | 0.675 |
| 8 | K237+600 | K238+600 | 0.631 |
| 9 | K238+600 | K239+600 | 0.645 |
| 10 | K239+600 | K240+600 | 0.745 |

根据样本数据分析,本文残留率采用如下公式进行计算:

$$\sigma_u(t_0+\Delta t)=0.147 \cdot \sigma_{i0}^3-0.847 \cdot \sigma_{i0}^2+1.485 \cdot \sigma_{i0} \quad (23)$$

$$g_u=\frac{\sigma_u(t_0)}{\sigma_u(t_0+\Delta t)} \quad (24)$$

$f_{ij}(\sigma_i)$ 采用三参数 Burr 分布:

$$k=10.975e^{-2\alpha} \quad (25)$$

$$\alpha=13.323e^{-0.667 \cdot \sigma_i} \quad (26)$$

$$\beta=0.229e^{0.966 \cdot \sigma_i} \quad (27)$$

式中: k 为形状参数; α 为不等式参数; β 为尺度参数。

5.2 结果分析

分析沪昆上行线 K230+600~ K240+600 综合养护年度计划的帕累托最优前沿,可以得到 43 种养护维修计划方案。在进化过程中,各代适应度均值如图 4、图 5 所示。

可以看出,初期高低不平顺标准差适应度由 1.065 mm 降至 0.929 mm,养护成本适应度由 41.89 万元升至 63.9 万元,在进化到 80 代以后,高低不平顺标准差适应度平均值稳定在 0.92 mm 左右,养护成本适应度平均稳定在 64 万元左右。

选取帕累托最优前沿的 2 个端点及 2 个中间点,所对应的 4 种养护维修计划见表 4。

表 3 沪昆上行线 K230+600~ K240+600 区段模型参数 k_n 和 k_{n+1} 取值表

Tab.3 k_n and k_{n+1} of K230+600~K240+600 in Shanghai-Kunming upline

| 区段序号 | k_n | k_{n+1} |
|------|----------|-----------|
| 1 | 0.003 09 | 0.003 19 |
| 2 | 0.003 05 | 0.003 31 |
| 3 | 0.003 14 | 0.003 27 |
| 4 | 0.002 98 | 0.003 07 |
| 5 | 0.002 91 | 0.002 97 |
| 6 | 0.002 41 | 0.002 53 |
| 7 | 0.002 12 | 0.002 37 |
| 8 | 0.001 88 | 0.002 13 |
| 9 | 0.001 85 | 0.002 41 |
| 10 | 0.002 49 | 0.002 68 |

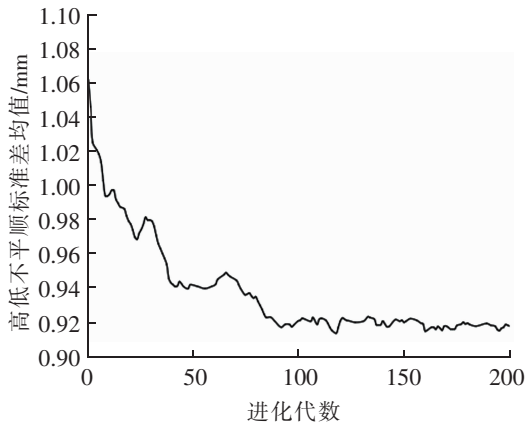


图4 各代种群高低不平顺标准差变化

Fig.4 Mean value for standard deviation fitness of each generation

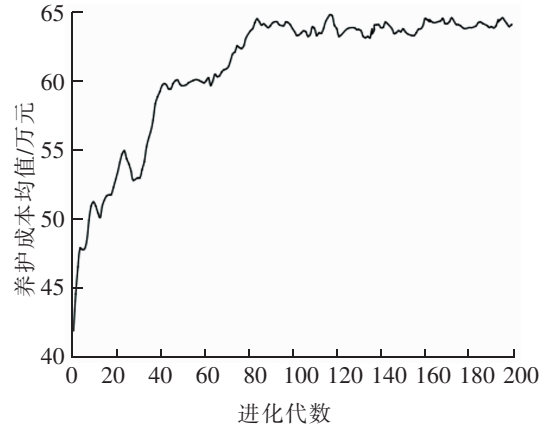


图5 各代种群养护成本变化

Fig.5 Maintenance cost of each generation

表4 4种维修计划

Tab.4 Four maintenance proposals

| 维修计划 序号 | 各区段维修时间/旬 | | | | | | | | | |
|------------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| | 区段 1 | 区段 2 | 区段 3 | 区段 4 | 区段 5 | 区段 6 | 区段 7 | 区段 8 | 区段 9 | 区段 10 |
| 1 | 14 | 21 | 16 | 17 | 24 | 29 | 25 | 27 | 31 | 24 |
| 2 | 14 | 22 | 16 | 17 | 24 | 29 | 25 | 27 | - | 24 |
| 3 | 14 | 22 | 16 | 17 | 24 | 27 | 30 | - | - | 24 |
| 4 | 14 | 22 | 16 | 17 | 24 | 29 | - | - | - | 24 |

可以看出:

- 1) 4种养护维修计划中,计划区段 1,3,4,5,10 这 5 个区段的作业时间相同;
- 2) 计划 1 中区段 2 和计划 3 中区段 6 的作业时间与其余 3 个计划前后只相差 1 旬;
- 3) 区段 7,8,9 的作业时间在 4 个不同计划安排中差距较大,直接影响各计划高低不平顺标准差和养护成本;

4) 对于初始高低不平顺较大且参数 k_n 和 k_{n+1} 较大,即轨道结构状态差恶化较快的区段 1,3,4,在 4 种计划中都优先安排养护维修作业,而对于初始高低不平顺较小且轨道结构状态恶化较慢的区段,则都安排在年度计划的后期,或不予安排养护维修作业。

6 结论

- 1) 基于建立的轨道几何不平顺恶化模型和恢复模型,精确推导了轨道几何状态最优子目标函数;
- 2) 综合考虑计划性养护费用、固定费用、舒适性损失费用和事后养护费用 4 个部分,建立了养护维修作业成本最小的子目标函数;
- 3) 以轨道几何状态最优和捣固作业成本最小为 2 个子目标,建立了大机捣固养护维修作业计划多目标决策模型;
- 4) 采用改进的 NSGA-II 算法求解模型,通过一次计算得到较完整的帕累托最优前沿,可提供多种养护维修计划方案;
- 5) 在有砟轨道年度养护维修计划编制中,对于初始高低不平顺较大且轨道结构状态恶化较快的计划

区段优先安排养护维修作业,而对于初始高低不平顺较小且轨道结构状态恶化较慢的计划区段,则安排在年度计划的后期,或者不予安排养护维修作业。

参考文献:

- [1] 许玉德,刘一鸣,沈坚锋. 轨道不平顺预测随机模型的 SVM-MC 求解方法[J]. 华东交通大学学报,2018,35(3):1-7.
- [2] 徐伟昌. 大型养路机械捣固作业维修决策模型研究[J]. 铁道科学与工程学报,2016(1):152-157.
- [3] 陈立. 制定状态修基准指标指导大型养路机械捣固作业的探讨[J]. 铁道建筑,2015,2(2):118-121.
- [4] MIWA M, MIZUNO M. Modeling an optimal track maintenance schedule in consideration of train derailment risk[J]. Quarterly Report of Rtri,2014,55(1):51-59.
- [5] 周宇,许玉德. 基于遗传算法的轨道状态最优综合维修计划模型改进[J]. 华东交通大学学报,2005,22(1):15-20.
- [6] HIGGINS A. Scheduling of railway track maintenance activities and crews[J]. Journal of the Operational Research Society,1998(10):1026-1033.
- [7] QUIROGA L M, SCHNIEDER E. Heuristic forecasting of geometry deterioration of high speed railway tracks[C]//Computer Aided Systems Theory-Eurocast-International Conferenq, DBLP,2011:609-616.
- [8] QUIROGA L M, SCHNIEDER E. Monte carlo simulation of railway track geometry deterioration and restoration[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part O-Journal of Risk and Reliability,2012,226(3):274-282.
- [9] 马迪. 我国高速铁路无砟轨道经济性研究[D]. 成都:西南交通大学,2009.
- [10] 刁训娣. 基于多目标遗传算法的项目调度及其仿真研究[D]. 上海:上海交通大学,2010.

Multi-Objective Decision Model for Tamping Maintenance Plan of Ballast Track

Xu Yude^{1,2}, Zhao Zihan^{1,2}, Qiao Yu^{1,2}, Shen Jianfeng³, Qiu Junxing⁴

(1.Key Laboratory for Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;
2. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Shanghai 201804, China; 3. CCCC Investment Co., Ltd., Beijing 100029, China; 4. Shenzhen Urban Transport Planning Center, Shenzhen 518021, China)

Abstract: This paper proposes a multi-objective decision model for tamping maintenance plan of ballast track with track geometry state and maintenance costs as sub-objective functions. The optimal sub-objective function of track geometry state was established based on the deterioration model and the recovery model of track vertical irregularities. The minimum sub-objective function of maintenance costs includes planned maintenance costs, fixed maintenance costs, post maintenance costs and comfort loss costs. The improved NSGA-II algorithm was used to solve the model and a corresponding MATLAB program was developed for this purpose. A section of Shanghai-Kunming up line was selected to verify the model and algorithm. Results showed that the proposed multi-objective decision model for tamping maintenance plan of ballast track can provide a number of different maintenance plans, and priority maintenance was given to the section with large initial vertical irregularity and fast deterioration of the standard deviation of vertical irregularity, the maintenance was arranged in the later period of the annual plan, or no maintenance was arranged for the section with small initial vertical irregularity and low deterioration of the standard deviation of vertical irregularity.

Key words: ballast track; tamping operation; geometric irregularity; vertical irregularity; multi-objective model