

文章编号: 1005—0523(2005)01—0015—06

基于遗传算法的轨道状态最优综合维修计划模型改进

周 宇, 许玉德

(同济大学 城市轨道交通与铁道工程系, 上海 200331)

摘要: 铁路高速化、重载化的条件下, 为了使轨道平顺状态处于良好的情况之内, 采用大型养路机械进行作业和制订最优养护维修计划是十分重要的. 本文在 0—1 整数型轨道状态最优综合维修计划模型的基础上, 建立了基于遗传算法的模型设计, 提出了解决这种大规模优化问题的途径, 从算法角度上解决了轨道不平顺状态计算机辅助决策系统的关键问题.

关 键 词: 高低不平顺; 综合维修计划; 遗传算法; 遗传算子

中图分类号: U2

文献标识码: A

1 前 言

铁路运输在客运高速化、货运重载化的条件下, 越来越高的列车运行速度和密度使得线路养护维修的作业量不断增加, 而可供养护维修作业的时间却越来越少. 解决这个问题的有效手段是利用大型养路机械进行作业, 并采用计算机智能决策系统来合理安排养护维修计划.

以往的线路综合维修计划基本是依靠轨道状态变化情况和养护维修历史, 辅助以现场经验来决定, 文献^[2]以预防性养护策略为指导, 以养护维修时间和地点为决策变量, 以年度轨道高低不平顺平均值最小为目标函数, 考虑资源配置等一系列约束条件的情况下, 建立了基于大型养护机械(multiple tie tamper, MIT)的 0—1 整数型轨道状态最优综合维修计划模型.

为进一步实现该模型的数值解析和计算机智能决策, 本文分析了这种 0—1 整数型轨道状态最优综合维修计划模型, 采用一种求解大型调度优化问题非常有效的遗传算法来设计模型结构, 从算法的角度完善该模型, 解决了轨道状态最优综合维修计

划模型的实现方案和计算机辅助决策系统的关键问题.

2 轨道状态最优综合维修计划模型^[2]

2.1 线路维修单位

根据养护机械的作业范围和线路维修管理的需要, 将计划维修的线路划分为如图 1 所示的维修管理单位^[2], 其中划分单位的定义如下:

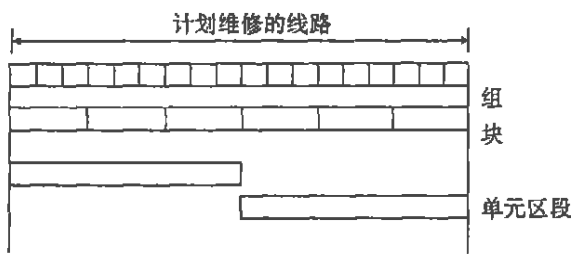


图 1 线路划分的管理单位

1) 组(lot): 轨道不平顺管理单位, 用于预测轨道高低不平顺和计算标准偏差的长度单位.

2) 块(block): 综合维修作业单位, 连续 N 个组的集合.

收稿日期: 2003—11—25

基金项目: 广深线轨道不平顺状态恶化模型的研究(2002G041)

作者简介: 周宇(1973—), 男, 山西太原人, 同济大学博士生.

中国知网 <https://www.cnki.net>

3) 单元区段(unit):综合维修计划单位,是M个块的集合(不一定连续).

2.2 模型参数定义

1) 集合定义

①月集合 $M=\{1,2,3,\dots,11,12\}$;旬集合 $K=\{1,2,3\}$;

②养路工区 $D=\{1,2,\dots,D^{\max}\}$;

③单元区段 $=\{1,2,3,\dots,U_i^{\max}\}$ (第i工区);

2) 变量

① Z_{md} 整数(0-1)型 $m\in M, d\in D$

当 $Z_{md}=1$ 时,在第m个月,养护机械配置到d工区;

$Z_{md}=0$ 时,在第m个月,养护机械不配置到d工区

② W_{mkj} 整数(0-1)型 $m\in M, k\in K, j\in U_i$

当 $W_{mkj}=1$ 时,在第m个月k旬,对单元区段j进行综合维修

$W_{mkj}=0$ 时,在第m个月k旬,不对单元区段j进行综合维修

3) 约束条件

① 养护机械总量约束.1个工区或几个工区只拥有1台养护机械,同一时间内只有一个单元区段使用该机械作业.

② 养护机械特殊约束.有些特殊情况如进行更换钢轨等作业区段,必须使用养护机械.

③ 单元区段上限个数约束.各旬可进行养护的单元上限数,根据各旬可养护的时间设定.

④ 时间约束.夏季高温和冬季低温时期,停止作业.

⑤ 养护次数限制.对任意一个单元区段养护的最大次数是一年一次.

⑥ 养护机械可移动范围的约束.考虑养护基地位置,各旬养护机械有个可移动范围.

⑦ 恶化状态上限约束.超过恶化上限值的单元区段马上进行养护.

⑧ 铺设护轨的区间约束.铺设护轨的区间准备时间较长,该准备时间段内不安排养护作业.

2.3 模型定义

模型采用如下评价准则:养护机械综合维修的单元区段在全线作业的区间内,年度高低不平顺平均值最小.轨道状态最优综合维修计划模型归纳为下列整数型优化问题^[2]:

中国知网 <https://www.cnki.net>
$$\max \sum_{j=1}^{m-1} \sum_{x=1}^{v-1} \sum_{i=1}^m \Delta S_i W_{xij} + \sum_{j=1}^{m-1} \sum_{k=1}^3 \sum_{i=1}^m \Delta S_i W_{mkj} \quad (1)$$

其中, ΔS_j :单元区段j的轨道不平顺养护改善量;

s.t. $G(W_{mkj})=G$ (养护机械养护指定时间,养护范围,轨道不平顺上限值等)

从上述轨道状态最优综合维修计划模型及其约束条件可以看出,该模型以养护机械作业的时间和地点为决策变量、以轨道不平顺平均值最小,即养护改善量最大为目标函数,属于0-1整数型调度优化问题.由于模型决策变量参数多,用传统的优化算法搜索最优解花费的时间长,效率低,故寻求采用新的优化算法来求解该模型的最优解.

3 基于遗传算法的模型设计

3.1 遗传算法概述

遗传算法(Genetic Algorithm, GA)是模拟生物在自然环境中“优胜劣汰”、“适者生存”的遗传和进化过程而形成的一种高度并行、全局优化、自适应的概率搜索算法.它将问题的求解表示成生物“染色体”的适者生存的过程,解的结构作为遗传的基因段,通过染色体种群的进化,包括复制、交叉、变异等,最终收敛到“最适应环境”的个体,从而得到问题的最优解或满意解^{[7],[8]}.

根据遗传算法的这些特点,结合轨道状态最优综合维修计划模型的情况,以模型方程作为目标函数和适应度函数,以养护时间和地点为遗传算法的“染色体”,通过选择、交叉、变异等遗传操作,在解空间实现对最优解的有向、自适应搜索.

3.2 基于遗传算法的模型设计

1) 遗传算法结构问题

采用遗传算法求解最优大型养护机械的作业安排,应选择合适的算法结构,关于结构的问题如下:

① 如何使问题空间的解集合所有解都能用遗传算法空间的染色体来描述,即编码问题;

② 如何使遗传算法空间的染色体能与问题空间解集合中所有解一一对应,即解码问题;

③ 如何使前一代的性质能有效地遗传到下一代,即编码、选择、交叉、变异问题;

④ 如何控制遗传算法的收敛方向,即遗传算子的方式和遗传概率的选择;

⑤ 如何使遗传算法具有记忆功能,避免近亲繁殖,即新个体的生成问题.

2) 线路维修单位定义

线路采用组、块的划分方式距离都比较短,会造成线路划分区段数目众多,增加了求解的时间;而养护机械是以天为单位进行作业的,单元区段是养护机械一天内能作业的距离,所以以单元区段作为维修单位,可以明确表示养护机械的作业情况.

3) 养护时间变量定义

上述模型中,对时间的定义划分成两部分,即月集合 M 和旬集合 K . 实际仅用旬做时间单位就可以表达清楚养护机械的时间安排,所以本模型以旬作为养护基本时间单位,简化月、旬这类对求解目标关联不大的内容.

因此,采用“旬”作为养护机械作业的单一时间,即用 1 年 36 旬来确定养护机械的作业时间,这时 $K=\{1,2,3,\dots,34,35,36\}$. 如确定 $k=15$ 时将进行养护作业,即是在 5 月下旬进行养护作业.

4) 地点变量定义

原有模型的决策变量是 Z_{md} 和 W_{mkj} , 前者决定养护机械作业地点, 后者决定养护机械作业时间. 决策变量的数目多少决定了模型求解的难易程度, 根据上述时间变量的定义, 在此设计变量 W_{jk} 来代替上述决策变量达到简化的目的, W_{jk} 也是 0-1 整数型变量, $W_{jk}=1$ 表示在第 k 旬时, 养护机械在 j 单元区段进行作业, 表示在第 k 旬时, 养护机械不在 j 单元区段进行作业. 这样设定也便于遗传算法编码操作.

综合上述设计, 轨道状态最优综合维修计划模型转换为:

$$\begin{aligned} &\max . 3 \sum_j \sum_m \sum_{x=1}^{m-1} \sum_{v=1}^3 \Delta S_r^j W_{xvj} + \sum_j \sum_m \sum_{k y=1}^k \Delta S_r^j W_{mkj} \\ &= \sum_j [\Delta S_r^j (36 W_{j1} + 35 W_{j2} + 34 W_{j3} \cdots 3 W_{j34} + 2 W_{j35} + \\ &W_{j36})] = \sum_j \sum_{k=1}^K (37-k) \Delta S_r^j W_{jk} \end{aligned} \tag{2}$$

其中, j : 第 j 个单元区段, $j \in J$ (计划维修的线路上的所有单元区段);
 k : 作业时间, $k \in K=\{1,2,3,\dots,34,35,36\}$;
 ΔS_r^j : 单元区段 j 的养护改善量.

这样, 经过上述养护机械时间变量和地点变量的分析, 设计遗传算法的个体“染色体”为矩阵编码的格式, 矩阵的行表示时间(一年), 列表示线路单元区段, 矩阵元素 W_{jk} 即表示第 k 旬, 第 j 单元区段的作业情况.

5) 模型改进

考虑到约束条件④的时间约束问题, 夏季和冬季不安排养护机械作业, 即

$$\sum_{j \in J_1(k)} \sum_{R_j} W_{jk} = 0 \tag{3}$$

其中: $J_1=\{\text{可进行养护但有时时间限制的单元区段}\};$
 $R_j=\{\text{集合内, 单元区段 } j \text{ 不能进行养护的时间}\}.$

时间约束一般为夏季 7~8 月, 冬季 11~1 月, 日本规定为从 7 月份中旬到 9 月中旬全线不进行养护维修, 2 月只进行接头养护, 表 1 是日本养护机械年度时间安排的情况, 横线表示该旬该段线路使用养护机械作业.

表 1 日本的年度时间安排情况^{[5][6]}

配置基地	月 4	5			6			7		7-3	9			10			11		11-3
	旬 1~3	1	2	3	1	2	3	1	2	~ 8-3	1	2	3	1	2	3	1	2	~ 3-3
I							—									—			—
II	养护机械维护	—					—				—			—					
III						—		—			—						—		
IV			—											—					
V				—					—										
VI													—						

参照上表来看, 养护机械在夏季、冬季和设备维修的时候, 停止对线路的作业, 即编码矩阵这些时间内的元素为 0. 根据表格内容, 确定 4 月 1~3 旬为养护机械维修时间; 7 月下旬~8 月下旬为夏季炎热时间; 11 月下旬~3 月下旬为冬季时间.

除去上述时间段后, 养护作业可以进行的时间

是 5 (第 13、14、15 旬, 其他如此类推)、6、7 月上中旬、9、10、11 月上中旬, 共 16 个时间段. 这样的处理使得编码矩阵的列缩短为 16 列.

同时, 综合维修计划模型(2)改进为:

$$\sum_{j x=13}^{20} (37-k) \Delta S_r^j W_{jx} + \sum_{j y=25}^{32} (37-k) \Delta S_r^j W_{jy} \tag{4}$$

3.3 基于遗传算法的模型参数设计

1) 编码—解码

遗传算法的编码形式主要有二进制编码、实数编码等. 本模型决策变量定义为 0—1 整数型变量 W_{jk} , 为同时表示养护机械作业的时间和地点, 这里采用矩阵编码的形式. 矩阵的行表示时间, 从 1~

16, 列表示作业单元区段, 从线路起始定义为单元区段 1, 一个工区包括若干单元区段. 矩阵编码的“染色体”个体如图 2 所示.

从图中矩阵可以看出, 元素 $W_{jk}=1$ 表示在第 k 旬时, 养护机械在 j 单元区段进行作业, $W_{jk}=0$ 表示在第 k 旬时, 养护机械不在 j 单元区段进行作业.

时间(旬) 单元区段		13	14	.....	20	25	.....	32
工 区 1	1	1	0	.....	0	0	.....	0
	2	0	1	.....	0	0	.....	1
工 区 2	3	0	0	.....	0	0	.....	0
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
工 区 ⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
工 区 N-1	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	N	0	0	.....	1	0	.....	0
工 区 m	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	N	0	0	.....	0	0	.....	1

图 2 矩阵编码结构

如 $W_{214}=1$ 表示第 2 单元区段在第 14 旬(5 月中旬)要进行大型机械养护作业; $W_{325}=0$ 表示第 3 单元区段在第 25 旬(9 月上旬)不需安排大型机械养护作业.

根据这种矩阵编码格式建立的个体, 整个矩阵作为遗传算法个体, 比二进制编码和实数编码更便于进行遗传操作, 提高运算效率; 其单个元素形象地反映养护机械作业时间和地点, 可以直接代入目标函数求解适应度. 这样可以解决算法结构问题①、②和③的一部分.

2) 评价函数

将目标函数公式(4)作为个体 i 的适应度评价函数, 则进化到第 N 代时, 个体 i 的评价函数:

$$F_N(W_i) = \sum_{j=1}^{20} \sum_{x=13}^{37} (37-k) \Delta S_r^j W_{jx} + \sum_{j=1}^{32} \sum_{y=25}^{37} (37-k) \Delta S_r^j W_{jy}$$

(5)

适应度概率: $f_i = F_N(W_i) / \sum_i F_N(W_i)$

(6)

其中, $i \in I$ {第 N 个种群中的所有个体};
其他符号含义同上.

3) 其他约束条件

遗传算法中常用处理约束的方法有拒绝方法、修补方法和罚方法. 拒绝方法抛弃进化过程中的所有不可行解, 是处理问题最简单也是效率最低的方

法; 修补方法包括获得不可行解和修补过程产生可行解两部分, 修复算法依赖于所求解的问题; 罚方法通过对不可行解施加某种惩罚来将约束问题变为无约束问题, 在每代中维持一定数量的不可行解, 从而使搜索从可行区域和不可行区域两个方向搜索.

本问题的约束函数分成两部分: 预处理部分和施加罚函数部分. 预处理是在遗传进化之前, 将部分约束函数应用到生成的初始种群中, 去除不合约束的个体, 直到种群个体都满足要求再进行遗传操作, 这部分约束如约束条件①、②、③、⑤、⑧. 其余约束条件⑥、⑦作为罚函数添加到目标函数中.

3) 遗传算子

① 选择算子

对种群进行遗传操作的选择算子采用轮盘赌选择^[7], 轮盘赌选择是根据“优胜劣汰”的原则, 按个体适应度占种群所有个体适应度的比例来选择较优的个体.

② 交叉和变异算子

按一定概率进行个体间“基因片段”的交叉和变异, 分别设定两个按交叉概率和变异概率随机生成的长度为 16 的二进制串作为控制交叉和变异的

掩码,这里用单点交叉和单点变异的情况来说明.

如按交叉概率随机生成的长度为16的二进制串{0010000000000000},1的位置是第3位,则两个个体矩阵从第3列开始的后面部分进行单点交叉操

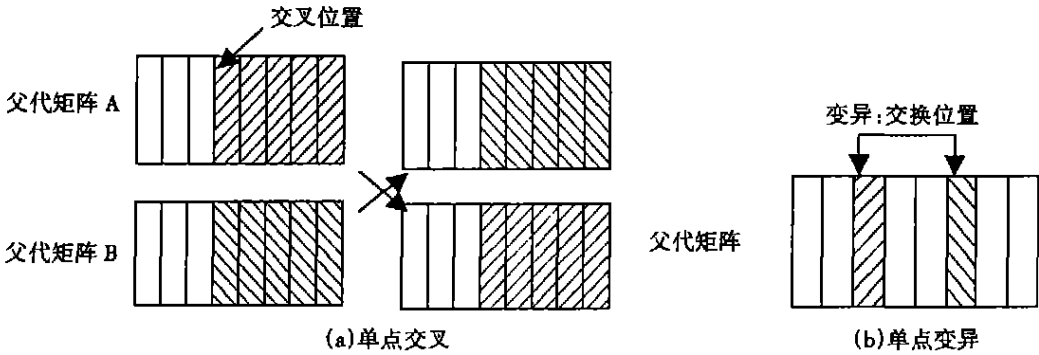


图3 交叉、变异图

为避免种群过早收敛,解决结构问题④、⑤,这里设计一个生成新个体的操作,在遗传到一定代数的时候,再生成一定数量的新个体添加到既有种群中代替适应度低的个体.这样的操作可以实现种群全局搜索,避免过早收敛到个别优秀局部最优解.

4) 算法终止条件

算法的终止条件有两种设定方法:一是设置遗传终止进化代数 T ,通常 T 取 $100\sim1000$ 代,既保证“染色体”种群有足够的进化,又不至于计算时间过长;二是设置一个足够小的数值 ϵ ,当第 N 代个体的最大适应度与第 $N-1$ 代个体的最大适应度之差小于该数值时,计算终止,即

$$\max\{F_N(W)\}-\max\{F_{N-1}(W)\}\leq\epsilon \tag{7}$$

这里两种方法都采用,保证遗传到一定程度算法的终止.

5) 遗传算法流程

根据上述分析得到的基于遗传算法的模型数值解析实现步骤如图4所示.

4 结 论

本研究对轨道状态最优综合维修计划模型进行了基于遗传算法的模型和参数设计,为该模型的数值解析提供了一套可行的优化算法,得到结论如下:

- 1) 通过分析,得到基于遗传算法的模型目标函数公式(4)和适应度函数公式(5);
- 2) 建立了 0-1 整数型矩阵编码格式,对养护

作;按变异概率随机生成的二进制串{0000010000010000},1的位置是第6位和第12位,则1个个体矩阵的第6列和第12列进行交换,发生变异操作.单点交叉和单点变异操作如图3所示.

- 机械作业的时间、地点安排更直观和清晰,同时便于遗传交叉、变异操作;
- 3) 将约束函数分为预处理部分和施加罚函数部分,将原有的约束问题变为无约束问题;
 - 4) 提出交叉掩码和变异掩码来实现矩阵个体的交叉变异操作;
 - 5) 采取一定时间向种群内添加新个体,避免过早收敛问题.

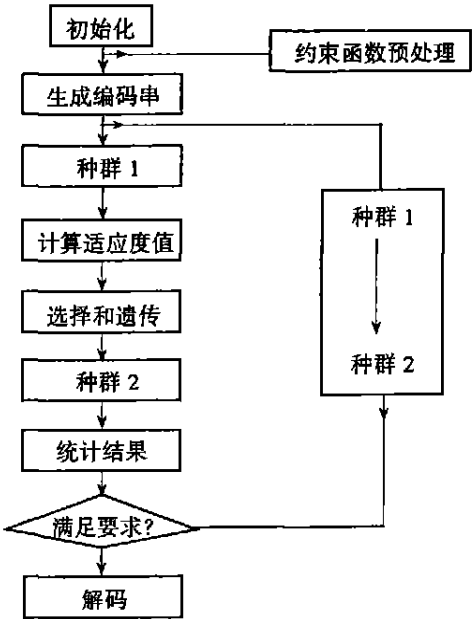


图4 遗传算法的寻优流程

随着线路长度的增加,轨道状态最优综合维修计划模型的结构会逐渐增大,遗传算法适于解决大规模调度优化问题,通过对模型分析,建立基于遗

传算法的模型结构和参数,为实现该模型的数值解析提供了一种有效的解决方法.

参考文献:

- [1] 佐藤吉彦,徐涌,等译.新轨道力学[M].北京:中国铁道出版社,2001.
- [2] 许玉德,曾学贵,建立整数型轨道状态最优综合维修计划模型[J],铁道学报,2003.6;85—88.
- [3] 三和雅史、内田雅夫,遗传的アルゴリズムによるマルチ运用计划法[J].铁道总研报告,1998(3);11—12.
- [4] 三和雅史、石川达也、大山达雄,轨道状态推移予測モデルの构筑と最適轨道保守计画作成のための全整数型

数理计画モデル分析[C].土木学会论文集,2001(7);51—65.

- [5] 三和雅史、河西智司,轨道保守へのオペレーションズリサーチ(OR)技术の适用(上),新线路,2003.12,p23—25.
- [6] 三和雅史、河西智司,轨道保守へのオペレーションズリサーチ(OR)技术の适用(下),新线路,2004.1,p51—53.
- [7] 王小平,曹立明.遗传算法:理论、应用与软件实现[M].西安:西安交通大学出版社,2002.
- [8] 玄光男,程润伟.遗传算法与工程优化[M].北京:清华大学出版社,2004.

Designing of Optimization Track Synthetical Maintenance Plan Model Based on Genetic Algorithms

ZHOU Yu, XU Yu-de

(Department of Urban Track and Railway Engineering, Tongji University, Shanghai 200331, China)

Abstract: In order to realize efficient maintenance in track irregularity to adapt to the request of railway high-speed and heavy-load, it is important to use large-scale maintenance machines and build optimization track synthetical maintenance plan model. In this paper, based on 0—1 integral optimization track synthetical maintenance plan model, genetic algorithms-based model design and solution method were analyzed. The key problems of computer aided by decision-making system of track irregularity were solved from arithmetic aspect.

Key words: longitudinal irregularity; comprehensive maintenance plan; genetic algorithms; genetic operator