

## 基于改进粒子群算法的地铁隧道维护策略优化\*

顾亦宁<sup>1</sup> 艾青<sup>1</sup> 袁勇<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 200240, 上海; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 200092, 上海)

**摘要** [目的] 维护策略是影响地铁隧道全寿命期服役性能和成本的关键因素, 因此需研究更适宜的维护策略优化算法。[方法] 建立了基于 Gamma 过程的隧道服役性能退化模型, 并对检查计划和维修行为进行了参数化假设; 针对维护策略优化数学模型中的随机性问题, 提出了一种改进粒子群算法, 并与网格枚举法对比验证了该算法的有效性; 分析了不同预防性维修阈值和初始检查时间间隔对维护成本的影响。[结果及结论] 改进粒子群算法可提升地铁隧道维护策略优化的计算效率; 与初始检查时间间隔相比, 地铁隧道全寿命周期维护成本对预防性维修阈值更加敏感。

**关键词** 地铁隧道; 维护策略; 粒子群算法; 优化算法

**中图分类号** U457

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.01.008

## Optimization of Metro Tunnel Maintenance Strategy Based on Improved Particle Swarm Algorithm

GU Yining<sup>1</sup>, AI Qing<sup>1</sup>, YUAN Yong<sup>2</sup>

(1. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, 200240, Shanghai, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, 200092, Shanghai, China)

**Abstract** [Objective] Maintenance strategy is the key factor influencing the lifetime service performance and maintenance cost of metro tunnel. Therefore, it is essential to develop more suitable optimization algorithms for maintenance strategies. [Method] A tunnel service performance degradation model is established based on Gamma process, and parametric assumptions are made for inspection schedule and maintenance activities. The improved particle swarm optimization (PSO) algorithm is proposed to solve the stochastic problem in maintenance strategy optimization mathematical model, and its effectiveness is verified through a comparison with gridded enumeration algorithm. The impact of different preventive maintenance thresholds and initial inspection time intervals on maintenance costs is analyzed. [Result & Conclusion] The improved PSO algorithm enhances the computational efficiency of

optimizing metro tunnel maintenance strategies. Compared to the initial inspection time interval, the lifetime maintenance cost of metro tunnel is more sensitive to preventive maintenance threshold.

**Key words** metro tunnel; maintenance strategy; particle swarm algorithm; optimization

地铁隧道由于自身建设历史、地理位置和结构型式各异, 其维护工作具体细节可能不同, 但总体上可归纳为检查、服役性能评估和维修等几项主要任务。以上海轨道交通为例, 隧道维护采用定期检查模式, 以服役性能评估结论为依据, 从结构安全角度判断是否需要预防性维修。上海轨道交通隧道维护工作实践取得了良好效果, 近年来未发生过较大的结构安全问题。然而, 由于我国大部分城市的地铁运行时间尚短、服役状态尚好, 定期检查模式和经验性预防性维修存在的问题还未暴露。由发达国家的经验可知, 基础设施在服役后期将发生大规模退化, 维护资源短缺问题难以避免, 管理部门将面临严峻的工作量和资金预算压力。因此, 为了提升地铁隧道维护的科学性, 有必要进行维护策略优化, 在保障地铁隧道高水平服役运行的前提下降低全寿命期维护成本。

本文采用隧道结构状态导向维护方法<sup>[1]</sup>中的非周期性检查模式和控制-极限维修规则, 探究通过对检查维修方案中的变量取值进行组合, 达到对地铁隧道维护过程和全寿命期维护成本进行优化管控的目的。

## 1 地铁隧道维护策略优化模型

### 1.1 地铁隧道服役性能退化过程

地铁隧道服役性能退化过程可用 Gamma 过程表示<sup>[1-2]</sup>。Gamma 过程是单调递增的随机过程模型, 非常适合描述以累积损伤为特征的地铁隧道退

\* 上海市科委“科技创新行动计划”社会发展科技攻关项目(21DZ1203504)

化过程,其概率密度函数  $g_{X(t)}(x)$  为:

$$g_{X(t)}(x) = Ga(x | \alpha t, \beta) = \frac{x^{\alpha t - 1} \beta^{\alpha t}}{\Gamma(\alpha t)} \exp(-\beta x) \quad (1)$$

式中:

$X(t)$ —— $t$  时刻的地铁隧道服役性能退化指标;

$\alpha$ ——Gamma 过程的形状参数;

$\beta$ ——Gamma 过程的尺度参数;

$Ga(x | \alpha t, \beta)$ ——形状参数为  $\alpha t$ , 尺度参数为  $\beta$  的 Gamma 分布;

$\Gamma(x)$ ——Gamma 函数。

地铁隧道服役性能退化并不严格遵循上述稳态增长的 Gamma 过程,由于不同的退化机制,可能会出现加速或减速的现象<sup>[3]</sup>。因此,使用时间转换方法建立非稳态 Gamma 过程,即在稳态 Gamma 过程中使时刻  $t$  与  $t + \Delta t$  之间的增量  $\Delta t$  满足式(2)一式(4):

$$X(0) = 0 \quad (2)$$

$$X(t + \Delta t) - X(t) \sim Ga(v(t + \Delta t) - v(t), \beta), \quad \Delta t > 0 \quad (3)$$

$$v(t) = ct^q \quad (4)$$

式中:

$v(t)$ ——时间转换方程;

$c$ ——时间转换方程中的拟合常数;

$q$ ——时间转换方程中的拟合幂指数。

## 1.2 检查计划函数

一般认为,随着地铁隧道服役性能退化程度上升,需要减小检查时间间隔。因此,结合以往非周期性检查研究结论<sup>[3,4]</sup>,采用的检查计划函数为递减凸函数,即:

$$T_{\text{insp}}(X(t)) = \begin{cases} \frac{(X(t) - b)^2}{b^2} (a - 1) + 1, & 0 \leq X(t) \leq b \\ 1, & X(t) > b \end{cases} \quad (5)$$

式中:

$T_{\text{insp}}(X(t))$ ——检查时间间隔;

$a$ ——初始检查时间间隔;

$b$ ——地铁隧道服役性能退化临界指标,表示地铁隧道已接近失效,超过该指标后需每年进行一次检查。

## 1.3 维修措施效果

令  $A(t)$  表示地铁隧道维修措施效果,  $X'(t)$  表示执行维修措施后地铁隧道的服役性能退化指标。

由于地铁隧道维修措施大多数为隐蔽措施,其效果不确定性较强,因此,假设  $A(t)$  为随着隧道退化指标上升而下降的随机数,则:

$$A(t) = \begin{cases} 0, & X(t) < s \\ \frac{2 - X(t)}{f} R, & s \leq X(t) < f \\ -X(t), & X(t) \geq f \end{cases} \quad (6)$$

式中:

$s$ ——预防性维修阈值,当  $X(t)$  大于该数值时进行预防性维修;

$f$ ——失效阈值,当  $X(t)$  大于该数值时进行重建;

$R$ ——预防性维修效果的基础值,服从下限值  $l$  至上限值  $u$  之间的均匀分布,即  $R \sim U(l, u)$ 。

## 1.4 全寿命期维护成本

地铁隧道全寿命期维护成本等于所有检查、预防性维修和重建的总成本。由于隧道的退化过程和维护措施效果都存在随机性,因此可通过  $N$  次蒙特卡洛模拟求全寿命期维护成本的期望值  $E(C_{\text{life}})$ , 其计算公式如下:

$$E(C_{\text{life}}) = C_{\text{insp}} E(Q_{\text{insp}}) + C_{\text{pr}} E(Q_{\text{pr}}) + C_{\text{f}} E(Q_{\text{f}}) \quad (7)$$

式中:

$C_{\text{insp}}, C_{\text{pr}}, C_{\text{f}}$ ——地铁隧道单次检查成本、单次预防性维修成本和重建成本;

$Q_{\text{insp}}, Q_{\text{pr}}, Q_{\text{f}}$ ——检查次数、维修次数和重建次数;

$E(\cdot)$ ——数学期望操作符。

## 1.5 参数取值和决策变量

1) 退化过程。以地铁隧道中常见的管片锈蚀引起隧道收敛变形增大为典型退化机制,可认为地铁隧道服役性能退化过程服从加速退化模式<sup>[3]</sup>。Gamma 过程的参数取值为:  $c = 0.006$ ,  $q = 2$ ,  $\beta = 0.5$ 。

2) 检查计划函数。为方便执行检查计划,  $T_{\text{insp}}(X(t))$ 、 $a$  应为整数。在初始状态,隧道服役性能未产生退化,此时  $T_{\text{insp}}(0) = a$ , 即最长检查时间间隔为  $a$ 。在工程实践中,地铁隧道检查时间间隔不宜过长,假设  $a$  的取值范围为[1 年, 20 年]。当  $X(t)$  接近  $b$  时,  $T_{\text{insp}}(X(t)) \approx 1$  年,需要每年对地铁隧道进行检查以降低失效风险。一般认为  $b \leq f$ 。根据相关试验结果,地铁隧道收敛变形在大于 140 mm (即  $X(t) > 140$  mm) 后会快速增长,因此可以取

$f = 140 \text{ mm}^{[5]}$ 。为提供一定安全储备,  $b$  略小于  $f$ , 可以取  $b = 130 \text{ mm}$ 。

3) 维修措施效果。假设维修措施效果的基础值服从  $-30$  至  $-20$  的均匀分布, 即  $R \sim U(-30, -20)$ 。 $s$  的工程单位为  $\text{mm}$ , 取整数值。

4) 维护成本。假设不同维护措施的成本取值为:  $C_{\text{insp}} = 0.01$  万元,  $C_{\text{pr}} = 500$  万元,  $C_{\text{f}} = 500\,000$  万元。需要说明的是, 维护措施成本因受不同地区经济水平和技术发展变化影响会存在一定差异, 本案例主要关注各类成本之间的比值关系。

5) 决策变量。本优化问题的决策变量包括  $a$  和  $s$ 。

为了反映地铁隧道真实退化过程和维修措施效果, 本模型引入了大量不确定性, 因此其优化问题难以通过规划模型或网络模型等方法求解, 为避免参数组合叠加蒙特卡洛模拟带来的大量计算需求, 需要提出高效的优化求解算法。

## 2 维护策略优化的改进粒子群算法

### 2.1 模型的随机性分析

首先, 在  $s$  和  $a$  取值不同的情况下进行几次试验, 大致探索参数  $s$  和  $a$  对目标函数  $E(C_{\text{life}})$  的影响及模型的收敛规律。结果表明, 当  $s$  取值较小 ( $s < 100 \text{ mm}$ ) 时, 大量的预防性维修会导致  $E(C_{\text{life}})$  很高。此时, 当模拟次数  $N$  较大 ( $N \geq 1 \times 10^6$  次) 时, 计算结果稳定, 但是计算非常耗时; 而减小  $N$  ( $N \approx 2 \times 10^4$  次), 计算时长可以接受, 但是计算结果不稳定。当  $s$  取值较大 (约  $s > 125 \text{ mm}$ ) 时, 在  $E(C_{\text{life}})$  中预防性维修占比较低, 重建成本占比很高。因此, 当蒙特卡洛模拟次数  $N$  较小时, 可能会造成  $E(C_{\text{life}})$  出现异常高值或异常低值的现象, 这种偶然出现的异常低值称为伪最优解。

粒子群算法是一种较高效的启发式优化算法, 可用于求解带有随机性的优化问题<sup>[6]</sup>。在传统粒子群算法中, 若  $N$  设为较大的值, 所得结果相对可靠, 但计算效率很低; 若  $N$  设为较小的值, 一旦伪最优解在某次迭代中出现, 则全局最优解容易陷于这个异常解中, 从而给出错误的解。为保证计算效率和结果可靠性, 本文提出了一种改进粒子群算法来求解上述优化问题。

### 2.2 改进粒子群算法

基于传统粒子群算法, 首先采用较小的模拟次

数  $N_s = 2 \times 10^4$  次在每次迭代中粗略但快速地求解。若在此过程中出现了新的个体最优解, 则在较大的模拟次数  $N_m = 2 \times 10^5$  次下对该个体最优解再进行 3 次计算, 以判断该个体最优解是否为伪最优解。本研究提出的改进粒子群算法的伪代码如图 1 所示。

---

**Data:** 全局最优  $gbest$ ; 最小个体最优  $pbest$ ; 次小个体最优  $pbest_2$

```

1  While  $i < i_{\text{max}}$  do //  $i_{\text{max}}$  为最大迭代次数
2      if  $pbest < gbest$  do
3          在  $N_i$  下计算  $pbest$  处  $E(C_{\text{life}})$  三次, 比较其与  $pbest$  的误差
4          if error  $< 0.15$  do
5              if  $\text{mean}(E(C_{\text{life}})) < gbest$  do
6                   $pbest \leftarrow \text{mean}(E(C_{\text{life}}))$ 
7                   $gbest \leftarrow pbest$ 
8              end if
9          else do 寻找次小个体最优  $pbest_2$ 
10             在  $N_i$  下计算  $pbest_2$  处  $E(C_{\text{life}2})$  三次, 并取均值
11             if  $\text{mean}(E(C_{\text{life}2})) < gbest$  do
12                  $pbest_2 \leftarrow \text{mean}(E(C_{\text{life}2}))$ 
13                  $gbest \leftarrow pbest_2$ 
14             end if
15          end if
16      end if
17       $i = i + 1$ 
18  end while

```

---

图 1 改进粒子群算法截图

Fig. 1 Screenshot of improved particle swarm algorithm

若  $N_s$  下求得的解与  $N_m$  下求得的解相比误差小于 15%, 则认为该个体最优解是真实解。若此个体最优解小于当前的全局最优解, 则更新全局最优解为 3 次  $N_m$  下求得的解的均值。

若  $N_s$  下求得的解与  $N_m$  下求得的解相比误差大于 15%, 则认为该个体最优解是伪最优解, 将其更正为 3 次  $N_m$  下求得的解的均值。

在伪最优解出现的情形中, 为保证全局最优解仍能得到更新, 算法将寻找次小个体最优解并将其与全局最优解进行比较。在  $N_m$  下对次小个体最优解进行 3 次计算并取均值。若该个体最优解小于全局最优解, 则更新全局最优解为该个体最优解。

改进粒子群算法的参数设置为: 粒子数为 20 个, 最大迭代次数为 50 次, 个体和全局学习率均为 2, 惯性权重随着迭代次数线性下降, 最大和最小惯性权重分别为 0.8 和 0.4, 以保证算法在早期拥有较强的全局搜索能力, 而在后期拥有较强的局部搜索能力使算法收敛。

2.3 求解过程分析

根据 2.1 节的分析结果,将  $s$  的搜索范围划定为  $[100\text{ mm}, 125\text{ mm}]$ ,  $a$  的搜索范围划定为  $[1\text{ 年}, 20\text{ 年}]$ 。采用改进粒子群算法在 50 次迭代后得到最优成本期望值  $E(C_{\text{life}}) = 215.24$  万元,对应的  $s = 122\text{ mm}$ ,  $a = 11\text{ 年}$ 。 $E(C_{\text{life}})$  随着迭代次数的下降过程如图 2 所示。由图 2 可见  $E(C_{\text{life}})$  最终收敛至稳定值,即所提出的改进粒子群算法适用于求解本优化问题。

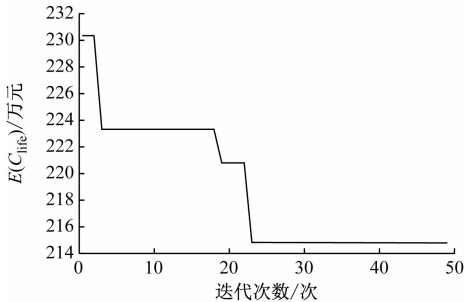


图 2 目标函数迭代收敛过程

Fig. 2 Iterative convergence process of the objective function

3 算法验证与分析

3.1 改进粒子群算法验证

为验证改进粒子群算法的准确性,将其计算的最优解与网格枚举法计算结果进行对比。构建参数组合,  $s$  分别取值为 101、104、107、110、113、116、119、122 和 125 mm,  $a$  分别取值为 1、5、9、13、17 和 20 年,在  $N = 1 \times 10^6$  的条件下共进行 54 次蒙特卡洛试验。 $E(C_{\text{life}})$  较小的 3 个值分别为 226.97、227.40 和 231.04 万元,对应的  $s$  均为 122 mm,  $a$  分别为 9、20、5 年,与 2.3 节中的改进粒子群算法结果十分接近。

根据网格枚举法计算结果,绘制  $s$  和  $a$  组合下  $E(C_{\text{life}})$  的等值线图,如图 3 所示。由图 3 可见,  $E(C_{\text{life}})$  对  $a$  不敏感,对  $s$  更敏感。另外,改进粒子群算法解(图中圆点)恰好落在等值线图的中心。

进一步研究不同  $s$  和  $a$  对  $E(C_{\text{life}})$  的影响,在最优解附近进行多次 ( $N = 1 \times 10^6$  次)的蒙特卡洛试验,进一步分析参数敏感性和最优解准确值。

图 4 为当  $a$  固定取最优值 ( $a = 11\text{ 年}$ ) 时不同预防性维修阈值  $s$  下的  $E(C_{\text{life}})$ ,以及由改进粒子群算法得到的最优解。

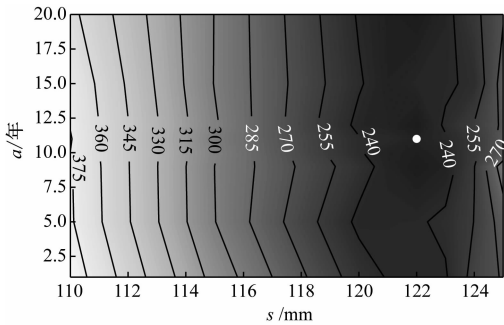


图 3 不同  $s$  和  $a$  取值下的  $E(C_{\text{life}})$  等值线图

Fig. 3 Contour map of  $E(C_{\text{life}})$  under different values of  $s$  and  $a$

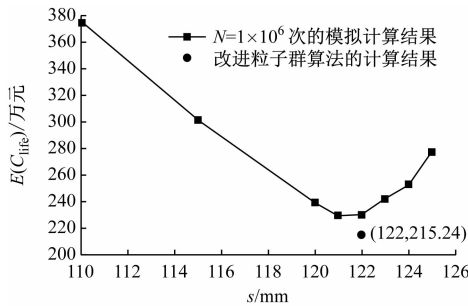


图 4  $a$  取最优值时不同  $s$  下的  $E(C_{\text{life}})$

Fig. 4  $E(C_{\text{life}})$  under different values of  $s$  when taking the optimal  $a$

当  $s$  小于 121 mm 时,  $E(C_{\text{life}})$  随着  $s$  的增大而减小;当  $s$  大于 122 mm 时,  $E(C_{\text{life}})$  随着  $s$  的增大而增大。产生该现象的原因是,当  $s$  过大时,地铁隧道的失效概率增加,而  $C_f$  很高,这将会极大地增加  $E(C_{\text{life}})$ 。

在  $N = 1 \times 10^6$  次的试验结果中,  $E(C_{\text{life}})$  次小值出现在  $s = 122\text{ mm}$  和  $a = 11\text{ 年}$  组合,与改进粒子群算法的结果一致。 $E(C_{\text{life}})$  次小值为 230.59 万元,与  $E(C_{\text{life}})$  最小值仅相差 0.32%,与改进粒子群算法结果相差 6.67%。

图 5 为当  $s$  固定取最优值 ( $s = 122\text{ mm}$ ) 时不同  $a$  下的  $E(C_{\text{life}})$ ,以及由改进粒子群算法得到的最优解。

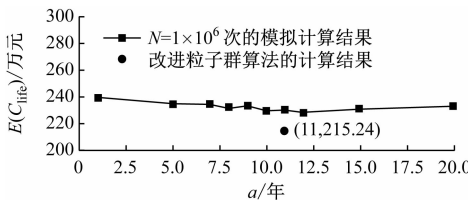


图 5  $s$  取最优值时不同  $a$  下的  $E(C_{\text{life}})$

Fig. 5  $E(C_{\text{life}})$  under different values of  $a$  when taking the optimal  $s$



图 5 结果与图 3 结果基本一致,  $E(C_{\text{life}})$  对  $a$  的变化较不敏感。在  $N = 1 \times 10^6$  次的试验结果中,  $E(C_{\text{life}})$  较小的 3 个值分别为 228.68、229.75 和 230.89 万元, 分别对应  $a$  为 12、10 和 11 年。三者之间非常相近, 相互之间仅相差 0.47% 和 0.96%。改进粒子群算法结果与第三小的解都位于  $a = 11$  年处, 二者  $E(C_{\text{life}})$  之间相差 6.78%。

结合图 3—图 5 计算结果进行比较分析: 由于本优化问题假设大多数参数取值均为整数, 因此该优化问题可能存在多解的情况; 考虑到改进粒子群算法的最优  $E(C_{\text{life}})$  更低以及等值线图指示的最优解所在区域, 可认为改进粒子群算法可以较高效、准确地求解本优化问题。

### 3.2 改进粒子群算法的评价与讨论

1) 计算成本。本文所提出的改进粒子群算法在每次迭代中需要对 20 个粒子分别进行  $2 \times 10^4$  次计算, 并且对 2 个粒子分别进行至多  $3 \times 2 \times 10^5$  次计算, 在 50 次迭代中, 总共最多进行  $8 \times 10^7$  次计算。网格化枚举可以保证得到最优解, 但是需要巨大的计算成本。虽然已将决策变量约定为整数, 已极大地降低了计算代价, 但  $s$  和  $a$  分别有 26 和 20 种取值, 共有 520 种组合, 对于每种组合需要进行  $1 \times 10^6$  次计算以保证结果收敛, 总共需要进行  $5.2 \times 10^8$  次计算, 是改进粒子群算法的 6.5 倍。可见, 在计算成本上, 改进粒子群算法具有明显优势。

2) 求解精度。对于所提出的随机优化问题, 改进粒子群算法虽然难以保证给出严格的最优解, 但是可以给出与最优解非常接近的满意解, 对于本问题, 其求解精度已满足工程需求。此外, 适当增加改进粒子群算法的蒙特卡洛模拟次数, 预期可以得到更为准确的最优解。

3) 适用情景。改进粒子群算法更适用于决策变量多、组合复杂的优化问题。对于一些不太复杂的优化情景, 可以设计层次化、精细程度不同的网格枚举方法, 从而降低枚举法的总成本, 在这种情形下枚举法可能更为高效、可靠。

## 4 结语

本文提出了一种对地铁隧道维护策略进行优化的改进粒子群算法, 分析了不同决策变量对全寿命期维护成本的影响, 并对改进粒子群算法的应用

效果进行了评估。主要结论如下:

1) 本文所提出的改进粒子群算法极大地提升了随机优化问题的计算效率, 可以得到与最优解非常接近的满意解。对于本问题其求解精度满足工程需求。相比于网格枚举法, 所提出的改进粒子群算法更适用于决策变量多、组合复杂的优化问题。

2) 通过维护策略优化可以降低地铁隧道全寿命期维护成本。在决策变量中, 预防性维修阈值比初始检查时间间隔更为敏感。因此, 建议在工程实践中合理设定预防性维修阈值, 在保证安全的前提下尽可能减少维修次数, 降低地铁隧道的全寿命期维护成本。

## 参考文献

- [1] 袁勇, 艾青. 隧道结构状态导向维护方法[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.  
YUAN Yong, AI Qing. State-oriented maintenance method of tunnel structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020.
- [2] 艾青, 袁勇. 隧道结构状态导向维护方法及维护策略对比研究[J]. 中国市政工程, 2018(5): 38.  
AI Qing, YUAN Yong. Comparative study on state-oriented maintenance method & maintenance strategy of tunnel structure[J]. China Municipal Engineering, 2018(5): 38.
- [3] AI Q, YUAN Y, SHEN S, et al. Investigation on inspection scheduling for the maintenance of tunnel with different degradation modes [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 106: 103589.
- [4] AI Q, YUAN Y, MAHADEVAN S, et al. Maintenance strategies optimisation of metro tunnels in soft soil[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2017, 13(8): 1093.
- [5] AI Q, YUAN Y. State-oriented maintenance strategy for deteriorating segmental lining of tunnel[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2018, 24(6): 469.
- [6] LI Y, SHI Y, ZHANG Z, et al. Condition-based maintenance for performance degradation under nonperiodic unreliable inspections [J]. IEEE Transactions on Artificial Intelligence, 2023, 4(4): 709.

· 收稿日期: 2023-07-20 修回日期: 2023-09-25 出版日期: 2024-01-10  
Received: 2023-07-20 Revised: 2023-09-25 Published: 2024-01-10  
· 第一作者: 顾亦宁, 硕士研究生, guyining@sjtu.edu.cn  
通信作者: 艾青, 副教授, ai.qing@sjtu.edu.cn  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license