



基于役龄回退模型的露天矿卡车周期预防性维护策略

李雯静 邱莉 林志勇 姚国 谢展扬

引用本文：

李雯静, 邱莉, 林志勇, 等. 基于役龄回退模型的露天矿卡车周期预防性维护策略[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(4): 209–214.
LI Wenjing, QIU Li, LIN Zhiyong. Periodic preventive maintenance strategy of open-pit mine truck based on age-reduction model[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(4): 209–214.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2021-1236>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于深度卷积特征的露天矿卡车装载状况识别技术研究

Study on recognition technology of truck loading condition in open-pitmine based on deep convolutional features
煤炭科学技术. 2021, 49(10): 167–176 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e08f5f3b-8582-470a-a82f-3b8ecb636a36>

基于MCMC算法的露天矿典型设备故障预测方法研究

Research on fault prediction method of typical equipment in open-pit mine based on MCMC Algorithm
煤炭科学技术. 2019(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/ff1c6fef-36a2-45d4-87e2-91639528f7f7>

基于综合赋权云模型的露天矿岩体可爆性分级识别

Classification and identification of rock blastability in open-pit mine based on comprehensive weighted cloud model
煤炭科学技术. 2019(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/bc5a74c0-aa17-4284-9a5c-b64f1ffbb51a>

近水平煤层露天矿中间搭桥高度研究

Study on height of pit-middle bridge in open-pit mine with flat seam deposit
煤炭科学技术. 2021, 49(8): 45–52 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/ce53f11c-c2d3-4626-b52b-f5e12f7028ce>

基于BIM的智慧露天矿协同工作平台架构与关键技术

Collaborative work platform architecture and key technologies of intelligent open pit mine based on BIM
煤炭科学技术. 2019(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/2da5ea86-0ec3-4403-afbc-89430f8671b3>

基于强度折减法的露天矿压煤区复合边坡稳定性研究

Study on stability of composite slope in unexploited coal area of open-pit mine based on Strength Reduction Method
煤炭科学技术. 2019(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e445c77d-6767-4cf8-829f-4af643f77e66>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

李雯静,邱莉,林志勇,等.基于役龄回退模型的露天矿卡车周期预防性维护策略[J].煤炭科学技术,2023,51(4): 209–214.
LI Wenjing, QIU Li, LIN Zhiyong, et al. Periodic preventive maintenance strategy of open-pit mine truck based on age-reduction model[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(4): 209–214.

基于役龄回退模型的露天矿卡车周期预防性维护策略

李雯静¹,邱莉¹,林志勇²,姚园¹,谢展扬¹

(1. 武汉科技大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430081; 2. 武汉大学 遥感信息工程学院, 湖北 武汉 430079)

摘要:针对露天矿生产运输中卡车维护成本较高的问题,对卡车采用周期预防性维护和小修相结合的维护方式,考虑露天矿卡车周期预防维护后故障率的变化规律,基于役龄回退模型研究了露天矿卡车周期预防维护策略。针对露天矿卡车故障率函数服从威布尔分布特点,引入役龄回退因子反映露天矿卡车在每次周期预防维护后的故障率变化,建立露天矿卡车每次周期预防维护后的故障率函数。基于露天矿卡车的故障率函数,建立包括露天矿卡车周期预防维护成本和小修成本的预防维护总成本模型,为求取露天矿卡车最优的周期预防维护策略设计了求解算法。研究结果表明:当露天矿卡车运行时间确定时,预防维护成本随着预防维护次数增加先减小后增大,随着预防维护周期变长先变小再变大;随着露天矿卡车运行时间的变长,最优预防维护次数呈增长趋势;露天矿卡车采用最优的周期预防维护策略比常用的维修策略的所需成本更小且随着露天矿卡车运行时间的变长差值变大。基于役龄回退模型构建露天矿卡车每次周期预防维护后的故障率函数,研究卡车在不同运行时间的最优周期预防维护策略,可为矿山设备预防维护管理提供有效的解决方案。

关键词:露天矿卡车;周期预防维护;役龄回退因子;卡车维护

中图分类号:TD407 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2023)04-0209-06

Periodic preventive maintenance strategy of open-pit mine truck based on age-reduction model

LI Wenjing¹, QIU Li¹, LIN Zhiyong², YAO Nan¹, XIE Zhanyang¹

(1. School of Resource and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 2. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: In view of high maintenance cost of trucks in the production and transportation of open-pit mine, a combination of periodic preventive maintenance and minor repairs was adopted for truck. Considering the change rule of failure rate after periodic preventive maintenance of open-pit mine truck, based on age-reduction model, periodical preventive maintenance strategy of open-pit mine truck was studied. According to the characteristics of the weibull distribution of open-pit mine truck failure rate function, introducing age-reduction factor to reflect change in the failure rate of open-pit mine truck after each cycle of periodic preventive maintenance, established the failure rate function of open-pit mine truck after each cycle of periodic preventive maintenance. Based on the failure rate function of open-pit mine truck, total preventive maintenance cost model including periodic preventive maintenance costs and minor repair costs of open-pit mine truck was established, and solution algorithm was designed to obtain optimal periodic preventive maintenance strategy for open-pit mine truck. The results show that: when operating time of open-pit mine truck was determined, preventive maintenance cost first decreases and then increases with the increase in the number of preventive maintenance, and first becomes smaller and then larger as the preventive maintenance cycle becomes longer; As the operating time increases, the number of optimal preventive maintenance increase slower; The optimized periodic preventive maintenance strategy for open-pit trucks requires less cost than the common maintenance strategy, and the difference becomes larger as the operating time becomes longer. Constructing failure rate function of open-pit mine truck based on the age-

reduction model, and to study the periodic preventive maintenance strategies of trucks with different operating hours, which can provide effective solutions for preventive maintenance and management of mining equipment.

Key words: open-pit mine truck; periodic preventive maintenance; age-reduction factor; truck maintenance

0 引言

在过去几十年,露天采矿通过引进超大型机械和高度自动化的设备不断实现现代化。卡车运输是露天采矿业中最传统、最经典的运输方式,与所有类型的机械类似,露天矿卡车也需要根据维护计划进行仔细维护,但其维护成本有时占露天矿运输成本的30%~50%^[1]。预防维护措施可以延长露天矿卡车的寿命降低故障率,并有利于减少露天矿卡车在运输中的能源消耗和温室气体排放^[2]。研究露天矿卡车预防维护策略对于实现可持续和经济的露天矿生产起着关键作用。

许多研究人员对矿用设备的维护问题做了研究,胡明振等^[3]根据矿用电动轮汽车维修成本数据,建立电动轮的日常维修成本数学模型与实际大修周期数学模型,以此确定电动轮汽车维修周期;王广慧等^[4]通过引入故障率和等效役龄建立了矿用变压器的检修策略优化模型,并利用布谷鸟搜索算法求解了该模型;张旭辉等^[5]结合数字孪生技术设计了的矿用设备维修指导系统,提高了矿用设备的故障维修指导效率。徐畅等^[6]在矿用设备出现故障前实现智能报警,及时提供相应的设备预知维护方案;于嘉成等^[7]采用松耦合方式集成矿山设备的生命周期数据,基于状态设备监测数据判别算法预判设备是否需要检修;刘威等^[8]采用MCMC算法预测露天矿典型设备的故障类别和发生时间,揭示了设备故障发生规律。针对卡车维护方面的研究,OZDEMIR B等^[9]分析了操作员对卡车可靠性的影响,并证明操作员得到好的培训是延长卡车寿命的有效手段;OZDEMIR B等^[10]通过收集露天矿卡车历史可靠性数据计算其虚拟年龄,依据该信息安排设备的维护计划;PERALTA S等^[11]收集露天矿卡车的历史故障数据建立其可靠性模型,通过给定4个不同维修周期时间研究证明最短的维修周期在可靠性方面效果最好,但代价是维修频率最高及维修成本最高;刘设^[12]根据设备的t时刻和历史的性能特征参数预测设备运行性能状态,根据设备实际情况调整维修计划。ANGELES E等^[13]首先通过收集露天矿卡车的历史故障数据建立其可靠性模型,然后根据所需的可靠性水平确定最佳检查间隔,最后考虑每次维修后设

备的虚拟寿命制定预防性维修计划。另外许多作者在露天矿卡车调度研究中考虑卡车维护成本的不确定^[14-16]。

以上研究对矿山设备管理具有一定的指导意义,但很少考虑露天矿卡车预防维护后故障率的变化规律,也未对卡车不同运行时间的预防维护策略进行研究。针对此问题,笔者引入役龄回退因子构造每次预防维护后的故障率函数,从矿山企业设备管理角度出发,建立露天矿卡车预防维护总成本模型,设计了求解算法。最后,针对露天矿卡车不同运行时间进行了实验,研究了最优维护次数随卡车运行时间的变化规律。

1 基于役龄回退模型构建露天矿卡车故障率函数

设备维护主要有事后维修和预防维护两类。定期预防维护因其有利于生产计划的制订和执行是目前运用较多的预防维护方式^[17]。事后维修最常用的是小修,它不改变露天矿卡车的故障率。对露天矿卡车执行预防性维护,使卡车介于“恢复如新”和“恢复如旧”之间,它改变卡车的故障率。为了便于矿山企业对卡车进行管理,采用周期预防维护和故障发生后小修相结合的方式对卡车进行维护。

设备故障是维护的前提,分析设备故障特征,可以为管理层提供针对性的维护决策^[18]。常用的故障函数有威布尔分布、正态分布和指数分布^[19]。威布尔分布是故障率函数的一种重要形式,可分为早期失效期、偶然失效期和损耗失效期3个阶段,它适用于机械电气设备累计失效产品的故障分布模拟^[20]。露天矿生产运输所需的卡车是一种机械设备,由于其在露天矿生产中的使用负荷、磨损磨耗、自然侵蚀等因素的影响,其役龄和故障率会不断增加。文献[11]和[13]通过收集并分析露天矿卡车历史故障数据,证明了露天矿卡车的故障率函数服从威布尔分布且处于损耗型失效阶段。根据威布尔分布,露天矿卡车故障率函数可表示为

$$h(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1}$$

其中, $h(t)$ 、 η 、 β 分别为故障率函数、尺度参数和形状参数; t 为露天矿卡车运行时间。其中,当

$0 < \beta < 1$ 时, 故障率随时间单调递减; 当 $\beta = 1$ 时, 故障率为常数; 当 $\beta > 1$ 时, 故障率随时间单调递增, 呈现出损耗型失效的特点, 此时进行预防维护才有意义。

针对露天矿卡车每次预防维护前后故障率会产生变化的特点, 引入役龄回退因子 α 来反映露天矿卡车在每次周期预防维护后的故障率变化, 为后续更准确地评估露天矿卡车故障率变化规律奠定基础。在对露天矿卡车执行预防维护周期为 T 的周期预防维护时, 其故障率会退到周期预防维护前 $(1-\alpha)T$ 时刻, 露天矿卡车役龄回退量为 αT , 此时露天矿卡车实际役龄 T_s 表达为

$$T_s = T - \alpha T = (1 - \alpha)T$$

对露天矿卡车执行周期预防维护策略, 其故障率变化规律呈递推模式, 变化规律如下:

$$\begin{aligned} h_0(t) &= h(t) \\ h_1(t) &= h[t + (1 - \alpha)T] \\ h_2(t) &= h_1[t + (1 - \alpha)T] \\ h_3(t) &= h_0[t + (1 - \alpha)2T] \\ &\vdots \\ h_i(t) &= h[t + (1 - \alpha)iT] \quad (i = 1, 2, \dots, N) \end{aligned}$$

其中, $h_0(t)$ 为未进行预防性维护的故障率函数; $h_i(t)$ 为进行第一次预防性维护后的故障率函数; $h_i(t)$ 为进行第 i 次预防性维护后的效率函数; T 为待优化的预防维护周期; N 为待优化的周期预防维护次数。

由此, 可得卡车在进行第 i 次预防维护后故障率函数 $h_i(t)$ 为

$$h_i(t) = h[t + (1 - \alpha)iT] = \frac{\beta}{\eta} \left[\frac{t + (1 - \alpha)iT}{\eta} \right]^{\beta-1}$$

2 露天矿卡车周期预防维护成本模型及求解算法

结合第1节基于役龄回退模型构造的露天矿卡车每次维护后的故障率函数, 构造露天矿卡车周期预防维护成本模型, 设计该模型的求解算法, 求取露天矿卡车最优的周期预防维护维护策略。

2.1 预防维护总成本

对露天矿卡车进行预防维护的目的是保证其在露天矿生产运行中安全可靠。建立露天矿卡车周期预防维护成本模型是为了寻求既能保证露天矿卡车安全可靠运行又具有经济性的最优维护方案。合理执行露天矿卡车的预防维护周期 T , 从而使得在卡车运行时间 L 内的预防维护总成本的值最小, 是矿山企业管理者关心的问题。

露天矿卡车的预防维护总成本由周期预防维护成本和发生故障后的小修成本组成, 用 $C(T)$ 表示, 是关于 T 待优化的目标函数, 如式(1):

$$C(T) = C_1 N + C_2 M \quad (1)$$

其中, C_1 为每次对卡车执行定周期预防维护费用; C_2 为卡车运行中每次发生故障采用小修的费用。由露天矿卡车执行第 i 次预防维护后故障率函数 $h_i(t)$ 可得其在进行第 i 次预防维修后故障次数 M_i 和运行时间 L 内故障总次数 M 分别为

$$M_i = \int_0^T h_i(t) dt = \left[\frac{(1 + (1 - \alpha)i)T}{\eta} \right]^\beta - \left[\frac{(1 - \alpha)iT}{\eta} \right]^\beta$$

$$M = \sum_{i=0}^N M_i = \sum_{i=0}^N \left\{ \left[\frac{(1 + (1 - \alpha)i)T}{\eta} \right]^\beta - \left[\frac{(1 - \alpha)iT}{\eta} \right]^\beta \right\}$$

2.2 最优周期预防维护策略

为了获得露天矿卡车在运行时间 L 内的最优预防维护总成本 $C(T)$ 、最优预防维护次数 N^* 和最优预防维护周期 T^* , 需求解露天矿卡车预防维护总成本以获取最优周期预防维护策略。

当 N 给定时, 可以得到 T 取值范围为 $[L/N(N+1), L/N]$, 露天矿卡车预防维护总成本 $C(T)$ 关于 T 的一阶导数 $C'(T)$ 为

$$\begin{aligned} C'(T) = C_2 \sum_{i=0}^N & \left\{ \left[\beta \frac{(1 + (1 - \alpha)i)}{\eta} \right] \left[\frac{(1 + (1 - \alpha)i)T}{\eta} \right]^{\beta-1} - \right. \\ & \left. \left[\beta \frac{(1 - \alpha)i}{\eta} \right] \left[\frac{(1 - \alpha)iT}{\eta} \right]^{\beta-1} \right\} \end{aligned}$$

由文献[11]和[13]证明了露天矿卡车的故障率函数符合威布尔分布且处于损耗型失效阶段可知 $\beta > 1$, 役龄回退因子 $0 < \alpha < 1$, 则 $C'(T) > 0$, 即露天矿卡车预防维护总成本 $C(T)$ 是关于预防维护周期 T 的增函数。因此, 当 N 给定时, 预防维护总成本 $C(T)$ 的最小值在 $T = L/(N+1)$ 处取得。

基于此给出具体的算法步骤。

Step1: 令 $N=1$ 。

Step2: 令 $i=0$, 计算露天矿卡车第 i 次预防维修后故障次数 M_i 。

Step3: $i=i+1$ 。若 $i \leq N$, 则执行第2步; 否则, 执行第4步。

Step4: 计算露天矿卡车运行时间 L 内发生故障的次数 M 与 $T_{\min} = L/(N+1)$, 并计算 $C^*(T_{\min})$ 。

Step5: $N=N+1$ 。若 $N \leq \bar{N}$ (其中 \bar{N} 可以取任意大的整数, 本文取100), 则执行第2步; 否则, 执行第

6步。

Step6: 搜索当在 $1 \leq N \leq \bar{N}$ 范围取值时, $C^*(T_{\min})$ 的最小值, 即为预防维护总成本的最优值 $C^*(T)$ 。

基于上述算法, 可获得露天矿卡车运行时间 L 内的最优预防维护周期 T^* 和最优预防维护次数 N^* 。

3 露天矿卡车算例分析

3.1 模型参数

参考文献[11]根据露天矿卡车历史故障数据, 利用最大似然估计法分析其故障率函数服从参数 η 、 β 分别为660.94、1.49的威布尔分布。最大似然估计法求解威布尔参数 η 、 β 过程如下:

由威布尔分布可得露天矿卡车概率密度函数为

$$f(t|\alpha, \beta) = \frac{\beta t^{\beta-1}}{\eta^\beta} e^{-(t/\eta)^\beta}$$

根据露天矿卡车发生 n 次故障的时间 $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_n$, 可得第 n 次故障的概率密度函数为 $f(t_1, t_2, \dots, t_n | \eta, \beta) = \prod_{k=1}^n f(t_k | \eta, \beta) = \tau^{-n} e^{-n\phi(\eta, \beta)}$ 。

则似然函数为

$$\phi(\eta, \beta) = \left[\frac{\theta(\beta)}{\eta} \right]^\beta + \beta \ln \frac{\eta}{\tau} - \ln \beta$$

式中, $\tau = \left(\prod_{k=1}^n t_k \right)^{1/n}$, $\theta(\beta) = \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n t_k^\beta \right)^{1/\beta}$ 。

根据最大似然估计法, 先对似然函数分别关于 η 、 β 求偏导, 然后进行代数变换可得:

$$\begin{cases} \eta = \theta(\beta) \\ Z(\beta) = \frac{1}{\beta_1} - \frac{1}{\beta} - r(\beta) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $r(\beta) = \ln t_n - \frac{\sum_{k=1}^n (\ln t_k) t_k^\beta}{\sum_{k=1}^n t_k^\beta}$, $\frac{1}{\beta_1} = \ln \frac{t_n}{\tau}$ 。

求解式(2)可得:

$$\beta^* = \beta_1 \frac{1 - \frac{1}{2}\beta_1 r(\beta_1)}{1 - \beta_1 r(\beta_1)}$$

将 β^* 代入式(2)可得:

$$\eta^* = \theta(\beta^*)$$

役龄回退因子 α 参考文献[21]取0.95, 本文基于此研究露天矿卡车最优周期预防性维护策略。

3.2 试验

基于3.1节模型参数进行试验, 当露天矿卡车运

行时间 L 固定时, 求取最优预防维护策略; 然后探究露天矿卡车预防维护总成本最优值 $C^*(T)$ 、最优预防维护周期 T^* 和最优预防维护次数 N^* 随露天矿卡车运行时间的变化; 最后做了露天矿卡车最优周期预防维护策略与计划性检修策略的成本对比试验。

假定露天矿卡车周期预防维护的成本 C_1 为500元, 小修成本 C_2 为300元, 露天矿卡车运行时间 L 为40 000 h, 根据2.2算法可得总成本最优值 $C^*(T)$ 为5.42万元, 对应最优预防维护周期 T^* 和最优预防维护次数 N^* 分别为1 904.76 h、20次。为了探究卡车运行时间 L 为40 000 h时维护次数 N 、维护周期 T_{\min} 与维护成本 $C^*(T_{\min})$ 三者的关系, 绘制其三维图如图1所示。由图1可知, 当 L 确定时, $C^*(T_{\min})$ 的值随着 N 的增加先减小后增大, $C^*(T_{\min})$ 的值随着 T_{\min} 的变长先变小再变大。

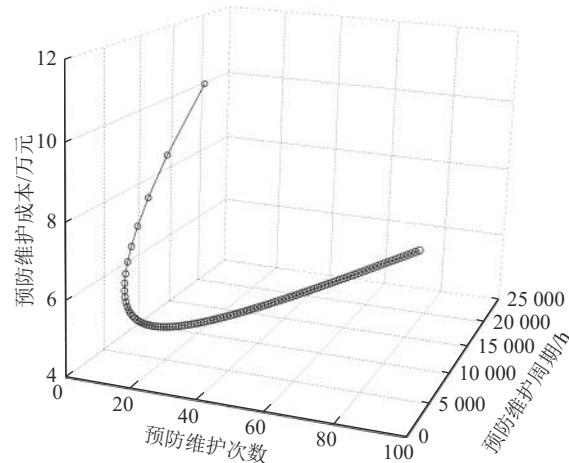


图1 维护次数、维护周期与维护成本关系

Fig.1 Three-dimensional relationship of maintenance cost, maintenance frequency and maintenance cycle

为便于矿山设备管理针对不同情况做出最合适露天矿卡车的维护计划, 计算卡车运行时间 L 从5 000~100 000 h的预防维护总成本最优值 $C^*(T)$ 、最优维护周期 T^* 和最优维护次数 N^* , 计算结果见表1。为探究最优预防维护次数 N^* 随露天矿卡车运行时间的变化, 根据表1绘制最佳预防维护次数 N^* 时间序列图, 如图2所示。由图2可知, 随着露天矿卡车运行时间的变长, 最优预防维护次数 N^* 呈现增长趋势。

目前露天矿卡车多采用每运行1 000 h进行一次计划性检修策略, 根据式(1)计算此策略下卡车运行时间 L 从5 000~100 000 h的总成本 $\tilde{C}(T)$, 见表1。并绘制当露天矿卡车运行时间 L 不同时, 其与本文周期预防维护策略最优成本对比图, 如图3所

表 1 运行时间不同时对应的最优周期预防维护策略
Table 1 Optimal periodic preventive maintenance strategy corresponding to different operating time

L/h	$C^*(T)/万元$	T^*/h	$N^*/次$	$\tilde{C}(T)/万元$
5 000	0.48	1 666.67	2	0.51
10 000	1.06	1 666.67	5	1.14
15 000	1.70	1 666.67	8	1.82
20 000	2.37	1 818.18	10	2.54
25 000	3.08	1 785.71	13	3.31
30 000	3.83	1 875.00	15	4.12
35 000	4.61	1 944.44	17	4.96
40 000	5.42	1 904.76	20	5.84
45 000	6.26	1 956.52	22	6.75
50 000	7.13	2 000.00	24	7.69
55 000	8.03	2 037.04	26	8.66
60 000	8.95	2 000.00	29	9.66
65 000	9.90	2 031.25	31	10.69
70 000	10.87	2 058.82	33	11.74
75 000	11.86	2 083.33	35	12.82
80 000	12.88	2 105.26	37	13.92
85 000	13.92	2 125.00	39	15.04
90 000	14.98	2 142.86	41	16.19
95 000	16.06	2 159.09	43	17.36
100 000	17.16	2 173.91	45	18.55

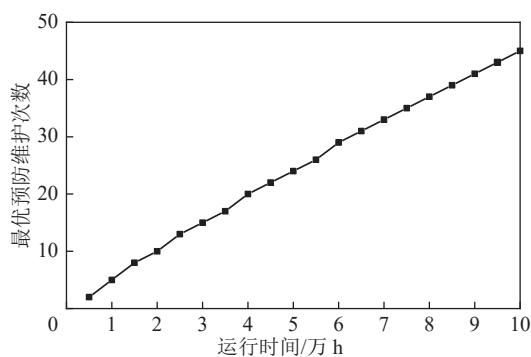


图 2 最优预防维护次数随运行时间变化示意

Fig.2 Schematic of best preventive maintenance times with operating time

示。由图 3 可知, 与本文周期预防维护策略最优成本相比, 采用每运行 1 000 h 进行一次计划性检修策略所需成本更多, 且随着露天矿卡车运行时间的增长差值越来越大, 说明对露天矿卡车进行预防维护优化可以节约成本, 研究露天矿卡车预防维护策略优化有利于露天矿可持续和经济发展。

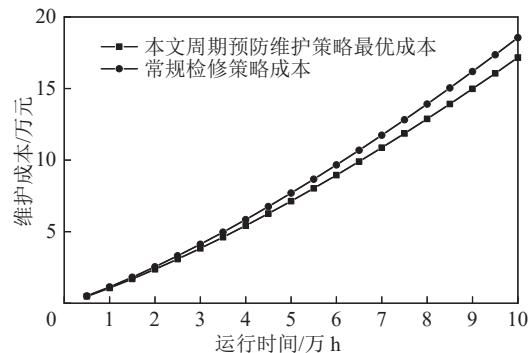


图 3 成本对比

Fig.3 Cost comparison

4 结 论

1) 从露天矿卡车故障率的角度研究露天矿卡车周期预防维护策略, 首先引入役龄回退因子构造露天矿卡车每次周期预防维护后的故障率函数, 然后建立包括露天矿卡车小修成本和周期预防维护成本的预防维护总成本模型, 最后设计了求解该模型的算法。

2) 试验中当露天矿卡车运行时间为 40 000 h 时, 对应的最优预防维护总成本、最优预防维护周期、最优预防维护次数分别为 5.42 万元、1 904.76 h、20 次, 分析三者关系可知预防维护成本随着预防维护次数增加先减小后增大, 随着预防维护周期变长先变小再变大。

3) 计算露天矿卡车运行时间从 5 000~100 000 h 的最优周期预防维护策略, 通过分析最优维护次数随露天矿卡车运行时长变化关系可知, 随着露天矿卡车运行时间的增长, 最优预防维护次数呈现增长趋势。

4) 通过成本对比, 露天矿采取最优周期预防维护策略比常用的维修策略的所需成本更少且随着露天矿卡车运行时间的变长差值变大, 说明对露天矿采取最优周期预防维护策略更利于露天矿可持续性生产。

参考文献(References):

- [1] MORAD A M, POURGOL-MOHAMMAD M, SATTARVAND J. Application of reliability-centered maintenance for productivity improvement of open pit mining equipment: case study of sungun copper mine[J]. *Journal of Central South University*, 2014, 21(6): 2372–2382.
- [2] 张振芳. 露天煤矿碳排放量核算及碳减排途径研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.
ZHANG Zhenfang. Study on carbon emissions accounting and carbon emission reduction approach of surface coal mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013.

- [3] 胡明振, 郭年琴. 矿用电动轮汽车运行效率及维修成本数学模型[J]. 煤炭学报, 2009, 34(11): 1574–1578.
HU Mingzhen, GUO Nianqin. The mathematical model of operation efficiency and maintenance cost of mine dump truck[J]. Journal of China and Society, 2009, 34(11): 1574–1578.
- [4] 王广慧, 董新伟, 邓 薇, 等. 矿用变压器检修策略研究[J]. 中国矿业, 2020, 29(S2): 383–389.
WANG Guanghui, DONG Xinwei, DENG Wei, et al. Research on maintenance strategy of mining transformer[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(S2): 383–389.
- [5] 张旭辉, 张雨萌, 王 岩, 等. 融合数字孪生与混合现实技术的机电设备辅助维修方法[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(8): 2187–2195.
ZHANG Xuhui, ZHANG Yumeng, WANG Yan, et al. Auxiliary maintenance method for electromechanical equipment integrating digital twin and mixed reality technology[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(8): 2187–2195.
- [6] 徐 畅, 王道元, 李敬兆, 等. 矿用设备智能安全监测与预知维护系统[J]. 工矿自动化, 2021, 47(3): 79–82, 88.
XU Chang, WANG Daoyuan, LI Jingzhao, et al. Intelligent safety monitoring and predictive maintenance system for mining equipment[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(3): 79–82, 88.
- [7] 于嘉成, 王 刚, 刘卫东, 等. 矿山设备全生命周期信息集成与工况判别算法研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(4): 38–43.
YU Jiacheng, WANG Gang, LIU Weidong, et al. Life-cycle information integration and working condition discriminational algorithm of mine equipment[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(4): 38–43.
- [8] 刘 威, 郭直清, 黄 敏, 等. 基于MCMC算法的露天矿典型设备故障预测方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(10): 51–57.
LIU Wei, GUO Zhiquing, BAI Runcui, et al. Research on fault prediction method of typical equipment in open-pit mine based on MCMC Algorithm[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(10): 51–57.
- [9] OZDEMIR B, KUMRAL M. Analysing human effect on the reliability of mining equipment[J]. International Journal of Heavy Vehicle Systems, 2019, 26(6): 872–887.
- [10] OZDEMIR B, KUMRAL M. Appraising production targets through agent-based Petri net simulation of material handling systems in open pit mines[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2018, 87: 138–154.
- [11] PERALTA S, SASMITO A P, KUMRAL M. Reliability effect on energy consumption and greenhouse gas emissions of mining hauling fleet towards sustainable mining[J]. Journal of Sustainable Mining, 2016, 15(3): 85–94.
- [12] 刘 设. 基于随机过程的露天矿生产系统调度方法研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
LIU She. Research on dispatching method of open-pit mine production system based on random process[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2019.
- [13] ANGELES E, KUMRAL M. Optimal Inspection and Preventive Maintenance Scheduling of Mining Equipment[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2020, 20(4): 1408–1416.
- [14] PATARAWAN C, HEIKKI S, HEIKKI K. Age-based maintenance for a fleet of haul trucks[J]. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2018, 24(4): 511–528.
- [15] TOPAL E, RAMAZAN S. Mining truck scheduling with stochastic maintenance cost[J]. Journal of Coal Science and Engineering (China), 2012, 18(3): 313–319.
- [16] YU H, SOLVANG W D, SUN X. A decision-support model for operational planning of surface coal mining considering equipment failure[C]// International Symposium on Small-scale Intelligent Manufacturing Systems. IEEE: 2017: 89–94.
- [17] 彭苑茹, 刘勤明, 吕文元, 等. 基于故障状态演化的租赁设备定期多维护策略研究[J]. 工业工程, 2018, 21(5): 57–63.
PENG Yuanru, LIU Qinming, LYU Wenyuan, et al. A research on periodic multi-maintenance strategy of leased equipment based on failure state evolution[J]. Industrial Engineering Journal, 2018, 21(5): 57–63.
- [18] 龙翔宇, 刘葛辉, 陈绍宽, 等. 基于延迟时间的地铁车辆多级维修计划优化模型[J]. 铁道学报, 2021, 43(2): 30–36.
LONG Xiangyu, LIU Gehui, CHEN Shaokuan, et al. Optimum multi-level maintenance scheduling model for metro vehicles with delay time theory[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(2): 30–36.
- [19] 马 威. 基于健康指数的配电设备状态评估研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
MA Wei. Research on state evaluation of power distribution equipment based on health index[D]. Xian: Xi'an University of Technology, 2021.
- [20] 金 琳. 基于虚拟年龄的租赁设备多阶段预防性维护策略研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
JIN Lin. Study on multi-period preventive maintenance policy for leased equipment based on virtual age method[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [21] 周志恒, 贺德强, 陈彦君, 等. 基于GA-BP神经网络的列车关键部件预防性维修优化模型及应用[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(6): 1382–1391.
ZHOU Zhiheng, HE Deqiang, CHEN Yanjun, et al. Optimization model and application of preventive maintenance of key components of train based on GA-BP neural network[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(6): 1382–1391.