

Residual Life Assessment of Concrete Pump Truck Boom System Based on Weibull Distribution

Tao Rong, Bangliang Meng

School of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan
Email: rotam@foxmail.com

Received: Nov. 14th, 2018; accepted: Nov. 30th, 2018; published: Dec. 7th, 2018

Abstract

Residual life assessment of used parts of construction machinery is the premise and basis for its remanufacturing. Due to the complicated working environment of construction machinery, the traditional life prediction method is too cumbersome and complicated. In this paper, the concrete pump truck boom system is taken as an example. Based on the system component failure data and historical service condition data, the Weibull distribution and ECC system information are combined to evaluate the remaining life of the boom system. Improve the accuracy of the results by comparing them with the results of traditional mechanical analysis life assessments. The reliability of the actual service life and remaining life of the boom is analyzed, and the actual component reliability threshold is combined to provide a quantitative analysis basis for the remanufacturing project. It also provides a simpler method for the remanufactured residual life assessment.

Keywords

Residual Life Assessment, Weibull Distribution, Boom System, Remanufacturing

基于威布尔分布的混凝土泵车臂架系统的剩余寿命评估

荣 涛, 蒙帮梁

湖南科技大学机电工程学院, 湖南 湘潭
Email: rotam@foxmail.com

收稿日期: 2018年11月14日; 录用日期: 2018年11月30日; 发布日期: 2018年12月7日

摘要

对工程机械的废旧零部件进行剩余寿命评估是对其再制造的前提与基础。由于工程机械的作业环境较为复杂, 传统的寿命预测方法存在过于繁琐与复杂的问题。本文以混凝土泵车臂架系统为例, 以系统零部件失效数据和历史服役工况数据为基础, 联合威布尔分布和ECC系统信息来评估臂架系统的剩余寿命。通过与传统的力学分析寿命评估的结果对比, 提高结果准确度。并分析了臂架实际使用寿命与剩余寿命的可靠性, 结合实际的零部件可靠性阈值, 为再制造工程提供定量分析依据, 也为再制造的剩余寿命评估提供了一种更为简单的方法。

关键词

剩余寿命评估, 威布尔分布, 臂架系统, 再制造

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

混凝土泵车是基础建设不可或缺的建设机械, 但因其工作环境的恶劣, 其主要的零部件损耗过快, 如泵车主要作业的臂架系统, 因此需要对于退役的混凝土泵车的零部件采取有效的再制造措施。而再制造产品零部件寿命评估与预测是实施再制造、保证再制造产品可靠质量的前提。如果废旧零部件不进行寿命预测, 那么装配使用后无法保证再制造产品的质量, 造成巨大的资源浪费。徐滨士院士提出, 寿命评估是判断废旧零部件是否具有再制造性的基础[1]。因此再制造性评估前必须对零件进行剩余寿命预测。

目前, 机械系统的剩余寿命评估主要有两类[2]。一类是通过建立有限元模型, 通过名义应力法、疲劳累积损伤等, 评估机械系统的剩余寿命。国外研究中 Kazunori、Shinohara 等提出了一种耦合电动力学分析方法来预测功率元件的疲劳性能, 基于有限元分析, 提出了一种计算疲劳寿命的新方法, 基于网络精度来影响疲劳寿命预测, 较为精确的对于零件的疲劳寿命进行预测[3]; 国内宋守许以曲轴为研究对象, 建立了有限元分析模型, 通过雨流计数分析法得到零部件的最大名义载荷, 确定载荷谱后, 分析零部件的明显的裂纹来预测其剩余寿命[4]。另一类是基于机械系统的失效数据, 联合其失效概率分布确定其平均寿命, 通过已服役时间实现剩余寿命评估。潘权通过建立结构臂的可靠性参数模型, 提出了一种基于结构臂平均剩余寿命的可再制造性评估方案, 并对其做出综合性评估[5]; 徐微等通过分析不同的参数估计方法, 初步探讨了分布函数取值的不同对于预测结果的影响, 并通过零部件的失效数据完成可靠性预测[6]。本文基于威布尔分布函数, 选取泵车 ECC 系统中臂架的服役信息, 确定了臂架系统的平均寿命, 通过不断扩大数据样本提高结果的准确度, 并与力学实验结果进行对比, 确定分析结果的精确度, 最后确定臂架已服役的寿命及剩余寿命的可靠度, 为混凝土泵车再制造研究提供一定的理论依据。

2. 臂架系统剩余寿命评估模型

本文以 37 米臂架混凝土泵车臂架系统为例, 其结构如图 1 所示, 其主要的失效数据来源于混凝土泵车的 ECC 系统, 其中主要以泵车的工况信息和泵车臂架系统的故障和维护信息为主。

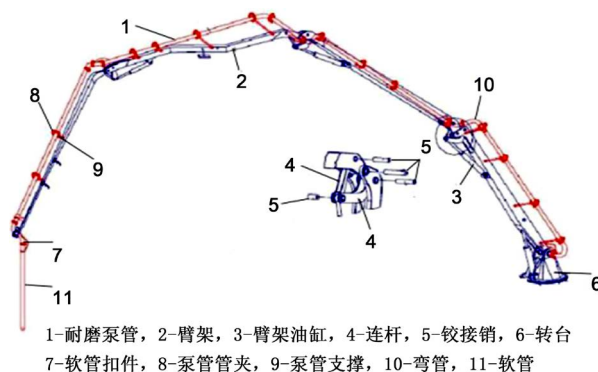


Figure 1. 37 M concrete pump truck boom system structure
图 1. 37 米混凝土泵车臂架系统结构图

ECC (企业控制中心 Enterprise Control Center)系统是混凝土泵车的一个定位、传感、远程传送、记录混凝土泵车运行状态及维护信息的系统。而混凝土泵车在服役过程中的运行状态和维护信息是产品面向再制造设再制造零部件寿命预测和再制造产品质量的保证。

因为 ECC 系统整个臂架系统的服役历史都比较清楚。根据臂架系统的剩余寿命评估模型如式 1 所示:

$$M_r = M_t - M_0 \quad (1)$$

式中, M_r 代表关键零部件的剩余寿命, M_t 代表关键零部件的平均寿命, M_0 代表关键零部件的实际使用寿命, 可以依据 ECC 系统的查询泵车的服役时间, 即为实际使用寿命。

依式(1)可以看出, 当得到臂架系统的平均寿命后, 再通过 ECC 系统查询泵车的服役时间, 即可以得到臂架系统的剩余寿命。

3. 基于威布尔分布的平均寿命评估

在工程机械失效概率密度函数中, 有几种常见的分布函数: 指数分布、正态分布、对数正态分布、威布尔分布等, 其中威布尔分布作为可靠性及寿命的计算中其失效数据的散点图拟合结果近似一条直线, 其拟合程度更高[7]。且根据文献[8] [9]可知, 工程机械的零部件的失效行为大多满足威布尔分布, 因此本文使用威布尔失效分布函数描述零部件的失效行为。

在某一应力水平下, 零件的疲劳寿命服从二参数威布尔分布的概率密度函数, 其概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k\right], 0 \leq x \leq \infty, \lambda > 0, k > 0 \quad (2)$$

威布尔分布的失效分布函数为:

$$F(t) = 1 - \exp\left[1 - \left(\frac{t}{\lambda}\right)^k\right] \quad (3)$$

式中, λ 为尺度参数, 称为特征寿命, 是零部件寿命的一种均值; k 为形状参数, 指的是零部件的失效形式。

工程机械中大部分的失效模式是符合浴盆曲线的描述, 如图 2 所示, 当 $0 < k < 1$ 时, 表明了机械零部件处于早期失效期, 失效率递减并趋近于平稳; 当 $k = 1$ 时, 表明零部件处于稳定阶段, 失效率大致趋于稳定; 当 $k > 1$ 时, 表明是耗损失效期。

威布尔失效分布函数是指时间从 0 到 t 出现的失效概率, 它是由威布尔分布概率分布密度函数在时间段 $[0, t]$ 做积分得到的。

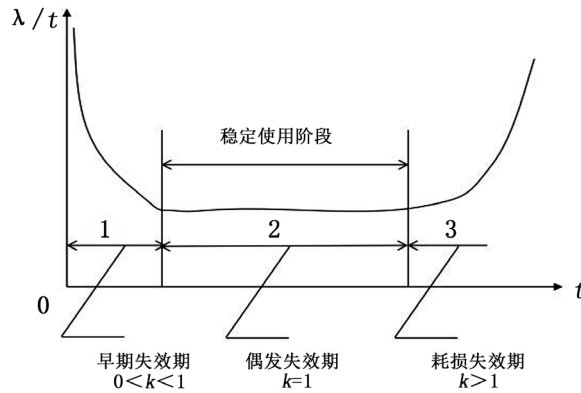


Figure 2. The relationship between the parameter k of the Weibull model and the failure rate
图 2. 威布尔模型参数 k 与失效率之间的关系

机械产品的平均寿命表示产品失效前的平均服役时间, 当臂架系统失效概率符合威布尔失效分布函数的描述时, 其平均寿命由失效分布函数的期望值表示, 即

$$M_t = \lambda \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \quad (4)$$

其中 Γ 为 Gamma 函数。

针对臂架系统已服役时间, ECC 系统实施监控模块中对于泵车的工作时间及泵送时间都可以查询。因此, 臂架系统的已服役寿命, 即混凝土泵车服役的总泵送时间, 可得式(5):

$$M_0 = T \quad (5)$$

因此可以得到臂架系统的剩余寿命评估模型如式(6)所示:

$$M_r = M_t - M_0 = \lambda \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) - T \quad (6)$$

可以看出, 为了得到臂架系统的剩余寿命, 需要确定威布尔分布函数的参数, 及 ECC 系统中臂架系统的已服役时间, 从而确定数据样本中臂架系统的平均寿命、剩余寿命及其可靠性。

威布尔分布的参数估计应用比较简单且常用的最小二乘法, 其具有计算量小、计算简单直观以及能有效实现数据的线性处理的特点。对于式(3)将其左右变形化为线性回归方程 $Y = AX + B$ 。

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-F(t)} \right) \right] = k (\ln t - \ln \lambda) \quad (7)$$

$$x = \ln t, y = \ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-F(t)} \right) \right], A = k, B = -k \ln \lambda$$

对于线性回归方程, 回归系数 A 和 B 的最小二乘估计解为:

$$\begin{cases} \hat{A} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2} \\ \hat{B} = \bar{y} - \hat{A} \bar{x} \end{cases} \quad (8)$$

式中, \bar{x} 和 \bar{y} 分别是 x 、 y 的平均值。通过 ECC 系统中选取的臂架服役数据得到 t 与 $F(t)$ 后, y 与 x 的线性关系, 估算 A 与 B , 从而求得参数 k 与 λ 。

其中失效密度函数 $F(t)$ 经过臂架系统失效时间增序排列后, 采用常用的中位秩来计算, 经验分布函数在数据分析中有重要的地位, 是最小二乘法中参数估计的关键, 也是确定寿命模型的一种基准, 经验分布函数的精度直接影响寿命模型的精度[10]。中位秩次公式为:

$$F = \frac{i-0.5}{K} \quad (9)$$

分别得到 t 与 $F(t)$ 之后, 将其带入式 7 和 8 中, 可以得到 λ 和 k 两参数, 通过参数确定威布尔分布的失效分布函数的期望值, 即机械系统失效的平均寿命。

4. 实例结果对比验证

本文从 ECC 系统中随机选取了拥有不同工况、不同作业环境、不同服役时间的混凝土泵车臂架系统的服役信息, 失效时间表示在臂架系统发生失效时已经服役的时间, 见表 1。

Table 1. Concrete pump truck boom system failure data sheet

表 1. 混凝土泵车臂架失效时间表

序号	失效时间/h	序号	失效时间/h
1	8233	11	10,052
2	8361	12	10,158
3	8380	13	10,213
4	8865	14	10,392
5	9017	15	10,692
6	9486	16	11,001
7	9513	17	11,920
8	9551	18	12,454
9	9709	19	13,055
10	9820	20	13,161

通过二参数威布尔分布拟合上述数据, 拟合结果如图 3 所示:

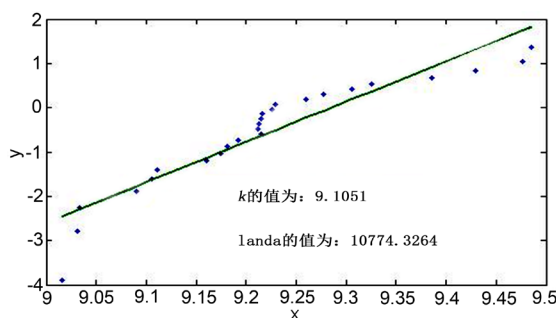


Figure 3. Least squares fit of approximate median rank
图 3. 近似中位秩的最小二乘拟合图

由图 3 可知, 同时可以得到威布尔分布函数的两个参数, 如式(9)所示:

$$\lambda = 10774.3264, k = 9.1051 \quad (10)$$

计算得到威布尔分布形状参数 $k = 9.1053 > 1$, 则说明臂架系统处于“浴盆曲线”三个寿命阶段的损耗失效期, 符合实际情况。将两参数带入式(4)中, 可以得到威布尔失效分布函数的期望值, 即本文数据样本中混凝土泵车臂架系统的的平均寿命。

$$M_t = \lambda \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) = 10774.3264 \Gamma\left(1 + \frac{1}{9.1053}\right) = 10208$$

将数据样本的容量扩大, 以检测结果的可靠性, 重新在 ECC 系统中选取 80 台不同工况、不同作业环境、不同服役时间的混凝土泵车臂架系统的服役信息, 确定威布尔分布函数的两个参数及该数据样本中臂架系统的平均寿命。

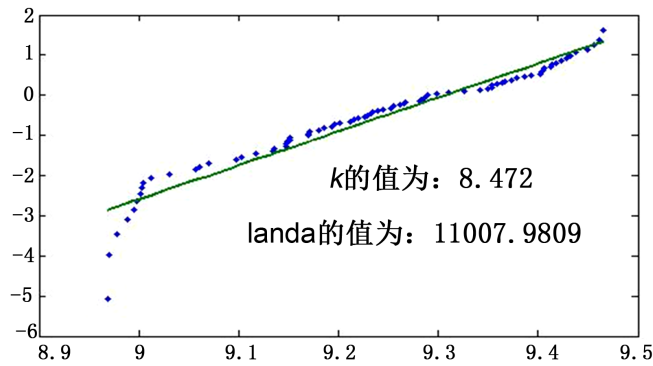


Figure 4. 80-bracket data sample least squares fit map
图 4. 80 个臂架数据样本最小二乘拟合图

由图 4 可知, 当臂架的数据样本扩大至 80 个时, 其拟合程度更高, 得到的威布尔分布的两个参数分别为: $k = 8.472$, $\lambda = 11,007.9809$, 得到的臂架系统平均寿命为 $M_t(80) = 10,395$ h。

继续将臂架的数据样本扩大至 200 个时, 由图 5 得到威布尔分布的两个参数分别为: $k = 8.4123$, $\lambda = 11,075.6471$, 得到的臂架系统平均寿命为 $M_t(200) = 10,456$ h。

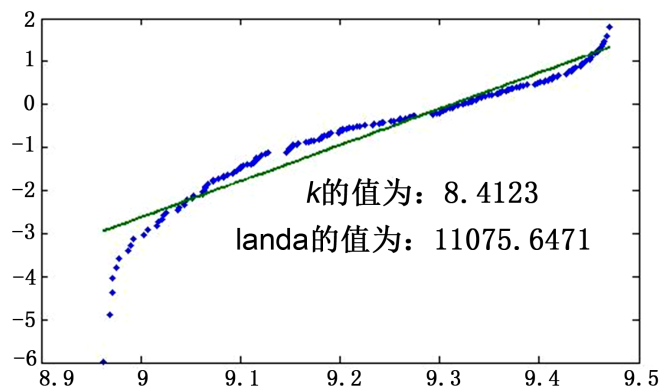


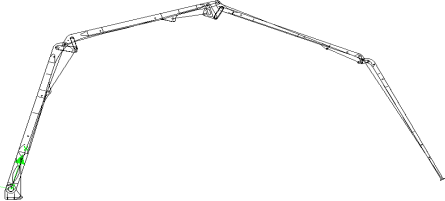
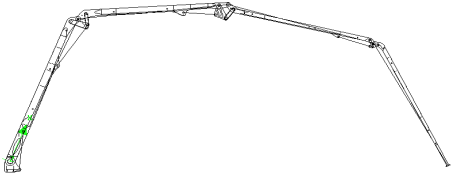
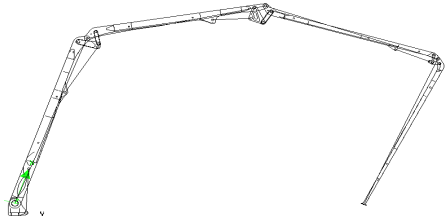
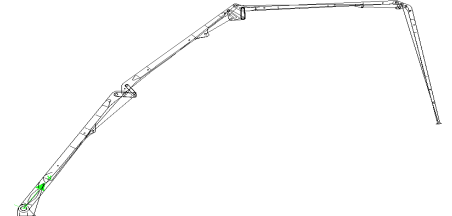
Figure 5. 200-bracket data sample least squares fit map
图 5. 200 个臂架数据样本最小二乘拟合图

扩大臂架数据样本得到的结果, 通过与传统的有限元建模的力学分析评估臂架系统剩余寿命的方法进行结果的对比, 以确定扩大数据样本得到的结果的准确性。

在文献[11]中, 翁建鑫以 37 米混凝土泵车臂架系统为研究对象, 基于混凝土泵车实际作业时臂架系统的典型工况进行臂架系统末端载荷时间历程研究, 通过试验模拟、有限元分析, 得到多工况臂架系统疲劳寿命, 根据剩余寿命预测相关理论, 建立臂架系统剩余疲劳寿命预测模型。

几种不同的典型工况的臂架疲劳寿命如表 2 所示, 最后总共确定四种典型工况的疲劳寿命, 分别确定了 $M1 = 10336.8$ 、 $M2 = 12964.8$ 、 $M3 = 8409.6$ 和 $M4 = 9110.4$, 见表 2。

Table 2. 4 Typical working conditions of the boom
表 2. 臂架 4 种典型工况

工况 1 地基 40%排量 各臂架夹角: 73°、125°、135°、140°	工况 2 地基 20%排量 各臂架夹角: 67°、119°、157°、131°
	
工况 3 地基 25%排量 各臂架夹角: 70°、122°、147°、83°	工况 4 二楼楼板 80%排量 各臂架夹角: 58°、167°、133°、97°
	

最后通过专家打分法确定各个工况的权重, 通过每一位专家对于各个工况的臂架系统打分, 通过求得平均值, 确定每个工况下臂架系统疲劳寿命的权重, 得到臂架系统的疲劳总寿命。

$$M_t = 0.261 \times 10336.8 + 0.360 \times 12964.8 + 0.162 \times 8409.6 + 0.216 \times 9110.4 = 10687.2$$

基于威布尔分布的寿命评估结果与有限元分析结果进行对比, 可以看出以威布尔分布为基础的臂架系统平均寿命评估的结果, 与其分析的数据样本的大小有关, 当数据样本足够大时, 其分析的结果与以名义应力法和 nCode DesignLife 的臂架疲劳寿命仿真得到的结果越相似, 就越能确定威布尔参数和寿命评估结果的准确性。

因此在运用威布尔分布函数及 ECC 系统信息来评估臂架系统的剩余寿命, 需要有适当的数据样本来扩大结果的准确性, 由此保证评估模型能够较为准确的描述臂架系统的剩余寿命评估。由结果表明样本的扩大提高了最终结果与传统力学分析的结果相比的准确性。

在再制造中, 具有剩余寿命的机械废旧零部件可以直接进行再制造, 还需要通过分析其寿命周期内的可靠性, 从策略层面上判断其是否可进行再制造。使用可靠度来评估臂架系统的剩余寿命的可靠性, 二参数威布尔分布的可靠度函数为:

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\lambda} \right)^k \right] \quad (11)$$

根据臂架系统的可靠度, 设定一个阈值, 确定臂架系统的再制造的可靠性阈值的方法。当臂架实际使用寿命与剩余寿命的可靠度都大于阈值时, 则臂架能够进行再利用处理; 当臂架实际使用寿命可靠度大于阈值, 剩余寿命可靠度小于阈值, 则需进行再制造处理; 当臂架的实际使用寿命与剩余寿命的可靠度都小于阈值, 则需要再循环处理。

以 20 个数据样本的第 9 号臂架为例, 其服役时间 $t = 9606$, 设定企业的可靠度阈值 $R^* = 0.7$, 则臂架的剩余寿命为 $M_r = 10021 - 9606 = 415$ (h)。

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{9606}{10774.3264} \right)^{9.1035} \right] = 0.7308$$

当臂架处于剩余寿命点, 即服役时间 $t = 10,208$ h 时, 其可靠度 $R = 0.5425$ 。因此第 9 号臂架的实际使用寿命的可靠度大于企业要求设定的阈值, 但其剩余寿命的可靠度小于阈值, 因此该臂架需要进行再制造。

5. 总结

工程机械零部件的剩余寿命评估对于再制造的决策具有重要作用, 且因为零部件因为工况等原因具有很大的不确定性, 导致对于工程机械零部件的寿命评估的方法较为繁琐与复杂。针对该问题, 本文以混凝土泵车臂架系统为例, 使用了基于零部件失效数据与服役信息的剩余寿命评估方法, 并通过扩大大数据样本, 提高结果与传统有限元力学分析结果的准确性; 还分析了臂架系统的基于寿命的可靠度, 为臂架系统的再制造方案决策提供了依据。由于 ECC 系统对于臂架系统服役信息的提取较为简洁, 因此也为再制造的剩余寿命评估提供了一种更为简单的方法。

基金项目

湖南省高等学校科学研究重点项目: 基于数据挖掘的工程机械关键零部件剩余寿命预测与评估(14A046)。

参考文献

- [1] 董丽虹, 徐滨士, 董世云, 等. 金属磁记忆技术用于再制造毛坯寿命评估初探[J]. 中国表面工程, 2010, 23(2): 106-111.
- [2] Kara, S., Mazhar, M.I. and Kaebernick, H. (2004) Lifetime Prediction of Components for Reuse: An Overview. *International Journal of Environmental Technology and Management*, 4, 323-348. <https://doi.org/10.1504/IJETM.2004.005720>
- [3] Kazunori, S. and Yu, Q. (2011) Fatigue Life Evaluation Accuracy of Power Devices Using Finite Element Method. *International Journal of Fatigue*, 33, 1221-1234. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2011.03.009>
- [4] 宋守许, 张敬东, 刘志峰. 基于裂纹萌生期限的典型零件剩余寿命预测[J]. 中国机械工程, 2011, 22(20): 2490-2494.
- [5] 潘权, 谢文, 贺尚红. 基于可靠性建模的混凝土泵车结构臂可再制造性评估[J]. 机械设计与研究, 2015(3): 109-113.
- [6] 徐微, 胡伟明, 孙鹏. 基于两参数威布尔分布的设备可靠性预测研究[J]. 中国工程机械学报, 2013, 11(2): 112-116.
- [7] 胡建军, 徐洪斌, 祖世华, 等. 服从正态分布随机载荷作用下齿轮弯曲疲劳试验研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(12): 1572-1575.
- [8] Shu, L.H. and Flower, W.C. (1998) Reliability Modeling in Design for Remanufacture. *ASME Journal of Mechanical Design*, 120, 620-627. <https://doi.org/10.1115/1.2829324>
- [9] Jiang, Z.H., Shu, L.H. and Benhabib, B. (2000) Reliability Analysis of Non-Constant-Size Part Population in Design for Remanufacture. *ASME Journal of Mechanical Design*, 122, 172-178. <https://doi.org/10.1115/1.533558>
- [10] 方华元, 胡昌华, 黄莹, 等. 提高可靠性数据分析精度的一种有效方法[J]. 电光与控制, 2006(1): 78-80.
- [11] 翁建鑫. 基于多工况分析的混凝土泵车臂架剩余疲劳寿命研究[D]: [硕士学位论文]. 湘潭: 湖南科技大学, 2014.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2167-6631，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：met@hanspub.org