doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.037

谷物联合收获机清选装置疲劳寿命分析

王乐刚[1,2]　张晓辉[1]　冷　峻[1]　赵光军[1]　焦中元[1]　秦永峰[1]
(1.雷沃重工股份有限公司,潍坊 261206;2.山东省主要农作物机械化生产装备协同创新中心,青岛 266109)

摘要:以等强度设计思想为指导,以提高联合收获机清选装置疲劳寿命、延长使用功效为目标,运用刚柔耦合动力学分析、疲劳寿命分析、装配尺寸公差分析等方法,通过建立清选筛动力学模型,对影响联合收获机清选系统疲劳寿命的因素进行研究,获得影响清选装置主要零部件疲劳寿命的关键因素。提出一种清选系统疲劳寿命分析方法和优化设计方法,并通过试验验证了该分析方法的准确性,仿真与试验应力偏差在 20% 以内。

关键词:谷物联合收获机;清选装置;橡胶轴承;疲劳寿命
中图分类号:S225.31　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2018)S0-0282-06

Fatigue Life Analysis of Grain Combine Harvester Cleaning Device

WANG Legang[1,2]　ZHANG Xiaohui[1]　LENG Jun[1]　ZHAO Guangjun[1]　JIAO Zhongyuan[1]　QIN Yongfeng[1]
(1. *Lovol Heavy Industry Co., Ltd.*, *Weifang* 261206, *China*
2. *Shandong Province Major Crop Mechanization Production Equipment Collaborative Innovation Center*, *Qingdao* 266109, *China*)

Abstract: Guided by equal strength design ideas, the objective was to improve the fatigue life and prolong the use efficiency of the combine harvester cleaning device by using rigid-flexible coupling dynamics analysis, fatigue life analysis and assembly dimensional tolerance analysis. Through the establishment of the clearing sieve dynamics model, the key factors affecting the fatigue life of the main components of the cleaning device were obtained. The systematic improvement was carried out to improve the fatigue life of the combine harvester cleaning system. A fatigue life analysis method and optimization design method for the cleaning system were proposed. The accuracy of the analysis method was verified by experiments.

Key words: grain combine harvester; cleaning device; rubber bearing; fatigue life

0　引言

近年来,国内外学者对联合收获机清选装置的工作性能参数进行了研究[1-4]。以往相关研究中对清选装置的工作性能研究较多[5-16],对农机清选装置的结构件疲劳寿命分析研究较少。随着谷物联合收获机喂入量的提高,清选装置的负荷也不断增大,在对清选装置的性能提出更高要求的同时,对其系统结构的使用寿命和性能稳定性要求则更为突出。为了能得到稳定的清选性能,研究筛箱惯性力及筛箱疲劳寿命分析[17-23]方法十分必要。

影响收获机清选性能的主要因素是清选装置驱动系统的橡胶轴承失效,导致清选装置运动参数发生变化,同时引发清选筛箱等相关零部件故障。本文以等强度设计思想为指导,采用刚柔耦合动力学分析、疲劳寿命分析、装配尺寸公差分析等方法,对影响联合收获机清选系统疲劳寿命的因素加以研究,以解决联合收获机清选装置使用寿命和性能稳定性问题。

1　清选装置机构组成

清选装置如图 1 所示,主要由清选筛箱及筛箱驱动机构组成。

清选装置驱动机构是由曲柄、曲柄推杆、驱动摇臂、上筛支撑臂和下筛支撑臂构成的两组四杆机构。曲柄从筛箱两侧通过曲柄推杆推动上下筛摇臂,分别驱动上下筛两组四杆机构,使上下筛产生往复交错摆动。

收稿日期:2018-07-15　修回日期:2018-09-10
基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0702000)
作者简介:王乐刚(1965—),男,应用研究员,主要从事谷物收获机械技术研究,E-mail:sdwlg1965@126.com

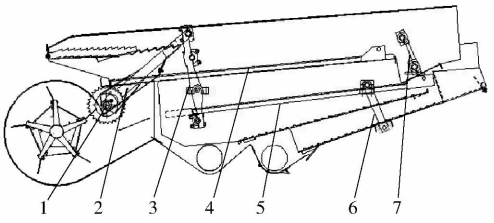

图 1　清选装置机构组成

Fig. 1　Cleaning sieve mechanism

1. 曲柄　2. 曲柄推杆　3. 驱动摇臂　4. 上筛　5. 下筛　6. 下筛支撑臂　7. 上筛支撑臂

筛箱由连接轴通过橡胶轴承与驱动机构联接，筛箱摆动时由橡胶轴承承受运动产生的冲击，橡胶轴承装配后，外径与轴瓦、内径与筛箱连接轴保持相对静止，不能产生相对滑动，筛箱运动时，橡胶轴承内外层间产生扭转，且承受径向冲击载荷，从而使筛箱获得稳定的运动参数，橡胶轴承具有传递动力和减震两大作用。

当橡胶轴承使用一段时间后，最薄弱环节的橡胶轴承首先会出现老化、磨损、橡胶鳞片化分层、内径变大等现象，使筛箱的两个四杆机构运动参数发生变化，导致清选机构工作效能发生变化，并快速引起其它环节的橡胶轴承与零部件快速失效。因此提高橡胶轴承的寿命、实现各联接点等寿命设计，是提高清选装置寿命的核心。橡胶轴承磨损如图 2 所示。

图 2　橡胶轴承磨损图

Fig. 2　Rubber bearing wear diagram

2　清选装置刚柔耦合仿真分析

2.1　橡胶轴承参数测定

首先通过检测橡胶轴承物理特性，获得刚柔耦合的初始输入条件，如图 3 所示。

选定邵氏硬度 65HD 的橡胶轴承进行测定，检测径向力与径向弹性变形量，轴向力与轴向弹性变形量，扭矩与扭转弹性变形量，并分别进行线性拟合（如图 4、5 所示），获得橡胶轴承的径向刚度、轴向刚度和扭转刚度分别为 1 880.2 N/mm、503.71 N/mm 和 4 570 N·mm/(°)。

2.2　刚柔耦合动力学仿真

将清选装置有限元 FEM 模型导入 ADAMS 软件中进行刚柔耦合仿真，依据最大作业工况，将上筛配重按 80 N 计算，橡胶轴承采用 BUSHING 单元模拟，径向刚度、轴向刚度和扭转刚度按测定参数输入，模拟清选装置的运行工况，如图 6 所示。

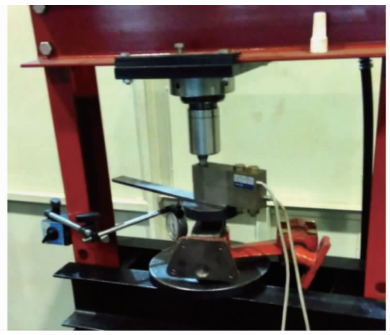

图 3　橡胶轴承参数测定

Fig. 3　Rubber bearing parameter determination

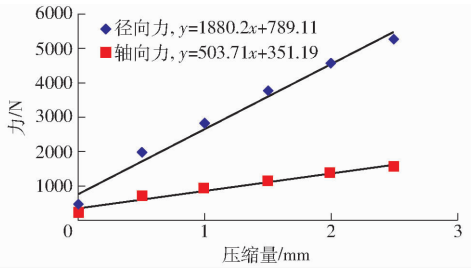

图 4　橡胶轴承力与压缩量拟合曲线

Fig. 4　Fitting curves of rubber bearing force and compression

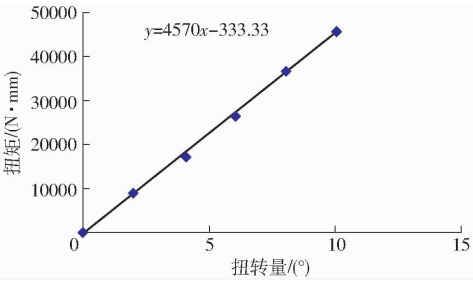

图 5　橡胶轴承扭矩与扭转量拟合曲线

Fig. 5　Fitting curves of rubber bearing torque and torsion

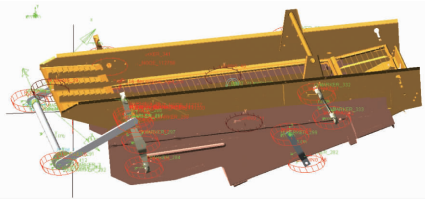

图 6　清选筛仿真模型

Fig. 6　Simulation model of cleaning sieve

3　清选装置惯性力分析

3.1　橡胶轴承径向刚度的影响

为了方便分析，将清选装置橡胶轴承编号，如图 7 所示。

因为橡胶轴承要保持足够的硬度（一般不低于邵氏硬度 65HD），对检测的径向刚度 1 880.2 N/mm 的橡胶轴承与径向刚度 2 400 N/mm 分别计算，并对比分析，如图 8 所示。

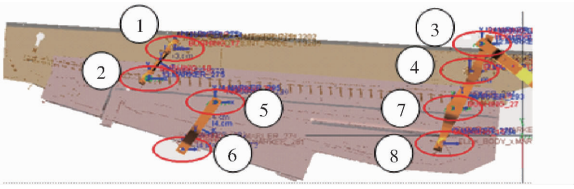

图 7 橡胶轴承编号示意图

Fig. 7 Sketch of rubber bearing numbering

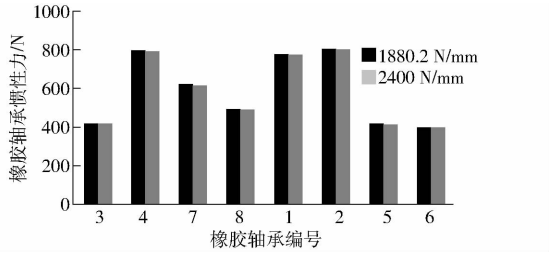

图 8 橡胶轴承径向刚度对惯性力的影响

Fig. 8 Influence of rubber bearing radial stiffness

分析结果表明邵氏硬度大于 65 HD 的橡胶轴承径向刚度变化对清选装置惯性力的影响较小,不会引起惯性力的明显增加。

3.2 橡胶轴承轴向刚度的影响

对检测的轴向刚度 503.71 N/mm 的橡胶轴承与轴向刚度 1 006 N/mm 分别计算对比,如图 9 所示。

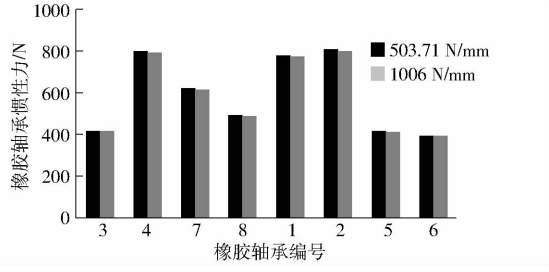

图 9 橡胶轴承轴向刚度对惯性力的影响

Fig. 9 Influence of rubber bearing axial stiffness

分析结果表明邵氏硬度大于 65 HD 的橡胶轴承其轴向刚度的变化对清选装置惯性力的影响较小,不会引起惯性力的明显变化。

3.3 橡胶轴承扭转刚度的影响

通过试验观测,清选装置中的橡胶轴承的工作形式主要以扭转变形为主,通过弹性扭转变形吸收惯性力与冲击,并释放回程初始运动的弹性势能,当橡胶轴承失效时其扭转刚度会迅速下降,并逼近零值。基于上述因素,对旋转刚度 4 570 N·mm/(°)的橡胶轴承与失效状态(旋转刚度接近 0 N·mm/(°))进行计算对比,如图 10 所示。

分析结果表明当清选装置橡胶轴承扭转刚度逼近零值时,各橡胶轴承支撑点的惯性力明显增大,驱动端惯性力增大尤其明显,最大变化量可达 260% 以上,说明橡胶轴承扭转刚度是影响惯性力的核心因素。

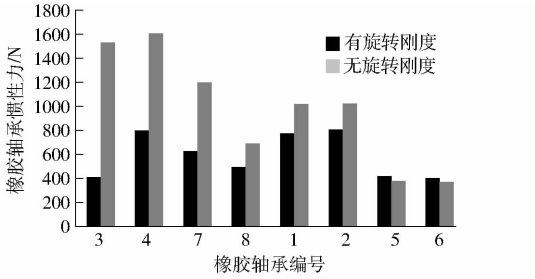

图 10 橡胶轴承扭转刚度对惯性力的影响

Fig. 10 Influence of rubber bearing rotating stiffness

3.4 清选装置橡胶轴承装配误差的影响

依据清选装置工作原理,驱动机构装配时橡胶轴承的初始扭矩应为零,但由于装配位置偏差的影响,橡胶轴承装配后均存在一定的初始扭矩。

以清选装置理论中位安装与在运动极限位置进行安装的形式进行计算对比,如图 11 所示。

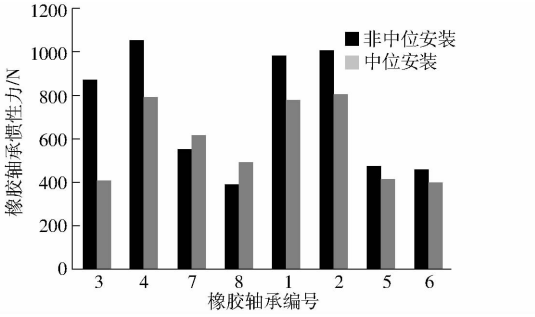

图 11 橡胶轴承偏离中位安装对惯性力的影响

Fig. 11 Influence of median installation

分析表明当清选装置偏离初始中位装配时,各点橡胶轴承工作时惯性力均有较明显的增大,最大增幅可达 105% 以上,说明橡胶轴承非中位安装时会明显增大清选装置的惯性力,对轴承的工作产生不利因素。

3.5 清选筛零部件结构偏差的影响

依据清选装置工作原理,筛箱驱动机构左右的四连杆机构为对称布置,筛箱结构尺寸偏差、驱动机构零组件结构尺寸偏差以及与机架的位置尺寸偏差对四连杆机构装配后的对称性有较大影响。

通过尺寸公差分析,尺寸链综合极限偏差如图 12 和图 7 所示:

(1)上筛左右对称支撑轴点 2,竖直方向位置偏差为 ±1 mm,允许超差率为 4.74%;水平方向位置偏差为 ±1.25 mm,允许超差率为 4.54%。

(2)驱动摇臂左右安装支点 7,竖直方向位置偏差为 ±0.75 mm,允许超差率为 4.22%;水平方向位置偏差为 ±1.25 mm,允许超差率为 2.6%。

(3)筛箱驱动摇臂上筛左右安装支点 4,竖直方向位置偏差为 ±1.2 mm,允许超差率为 2.86%;水平方向位置偏差为 ±2 mm,允许超差率为 1.16%。

(4)上筛左右后支点 1,竖直方向位置偏差为 ±0.8 mm;水平方向位置偏差为 ±1 mm,允许超差率为 2.16%。

筛箱驱动机构左右侧相对应的四连杆分析在极限位置偏差状态与理论位置状态,橡胶轴承旋转刚度有效状态下偏差对惯性力的影响对比如图 13 所示。橡胶轴承旋转刚度失效状态下偏差对惯性力的影响对比如图 14 所示。

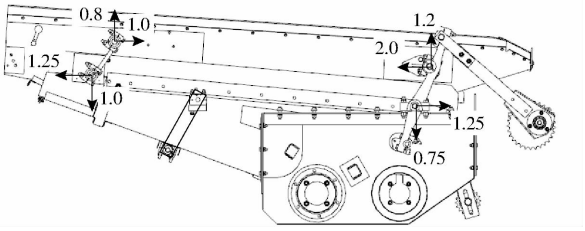

图 12　位置极限偏差

Fig. 12　Position limit deviation

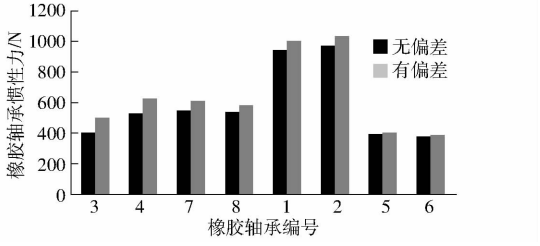

图 13　橡胶轴承旋转刚度有效状态下偏差对惯性力的影响

Fig. 13　Influence of rubber bearing limit deviation

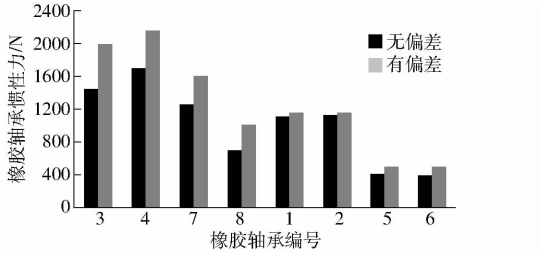

图 14　橡胶轴承旋转刚度失效状态下偏差对惯性力的影响

Fig. 14　Influence of rubber bearing limit failure

计算结果表明,清选装置的结构偏差,对清选机构各橡胶轴承的装配支点的惯性力增加幅度影响较小,但当橡胶轴承旋转刚度失效时,工作时的惯性力明显增加,最大增幅在 50% 以上,说明橡胶轴承装配时不仅对制造偏差有一定的补偿作用,其扭转刚度对消减惯性力和冲击负荷有明显的作用。

4　疲劳寿命的影响因素分析

基于对清选筛惯性力的影响因素分析,从中选出对惯性力影响较大的因素,即橡胶轴承扭转刚度和清选驱动机构制造和安装偏差,研究其对清选筛疲劳寿命的影响。通过调整优化橡胶轴承扭转刚度、工作应变量以及清选装置关键点制造及装配精度,运用 ADAMS、NCODE 分别进行动应力分析和疲劳寿命分析。计算流程如图 15 所示,对筛箱体柔性化处理得到刚柔耦合分析所需的 mnf 文件,并导入 ADAMS 中进行刚柔耦合仿真,获得疲劳分析所需要的 dac 文件,最后导入 NCODE 进行筛箱疲劳寿命分析。

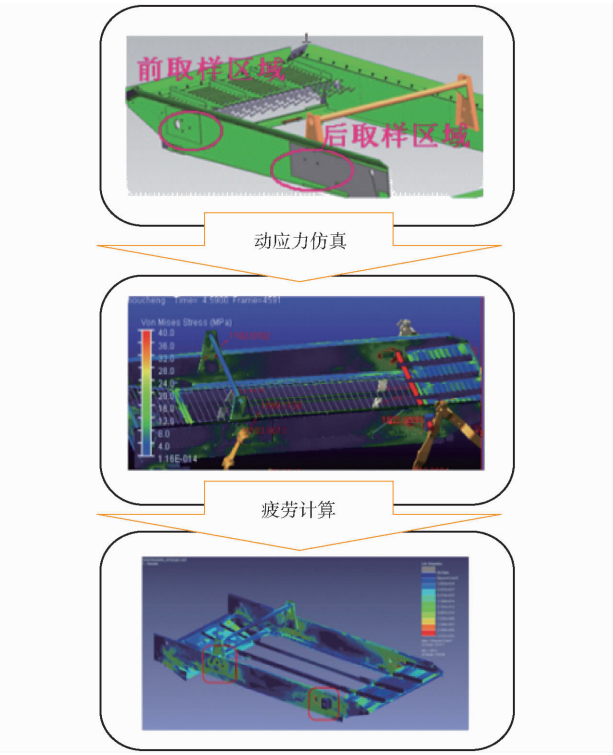

图 15　疲劳寿命分析流程

Fig. 15　Fatigue life analysis process

通过多组数据的组合优化计算对比,得到优化方案(合理选取橡胶轴承的径向刚度、轴向刚度、扭转刚度并考虑偏差及中位安装),对筛箱疲劳寿命进行计算对比,结果如表 1 所示,编号支点 1 和编号支点 4 的位置如图 7 所示,计算结果的雷达图分析见图 16 所示。

表 1　筛箱疲劳寿命计算结果

Tab. 1　Screen box fatigue life　　h

方案	支点 1 无偏差	支点 4 无偏差	支点 1 极限位置	支点 4 极限位置
原始方案	2.44×10^{12}	9.78×10^{5}	6.68×10^{9}	7.58×10^{2}
优化方案	3.26×10^{10}	7.46×10^{10}	1.50×10^{10}	1.67×10^{10}

分析结果表明:清选装置原始状态下,筛箱前端和后端的疲劳寿命是不均衡的;优化后的状态,筛箱前端和后端的理论疲劳寿命较为均衡,基本达到等寿命。

5　试验验证

基于以上的分析、计算,将试验测点布置于清选筛前端左、右侧壁和后端左、右侧壁共 4 个点检测动应力,如图 17 所示,并在筛面中心设置冲击加速度测点,如图 18 所示。

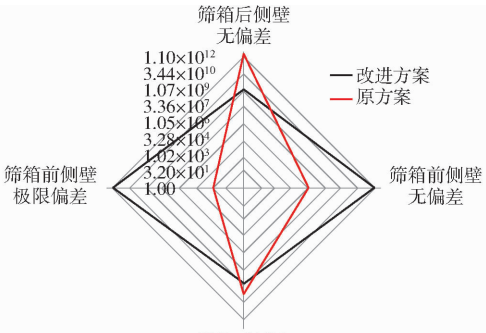

图 16 筛箱疲劳寿命影响因素雷达图

Fig. 16 Radar chart of screen box fatigue life factors

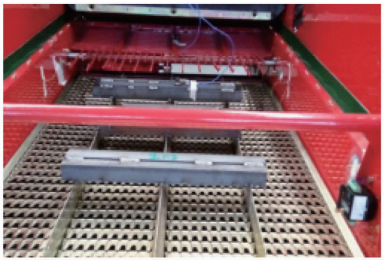

图 17 动应力测试点

Fig. 17 Dynamic stress test points

图 18 冲击加速度测试点

Fig. 18 Acceleration test point

筛箱加速度仿真与试验结果对比如图 19,筛箱测点应力与仿真对比如图 20 ~ 23 所示。

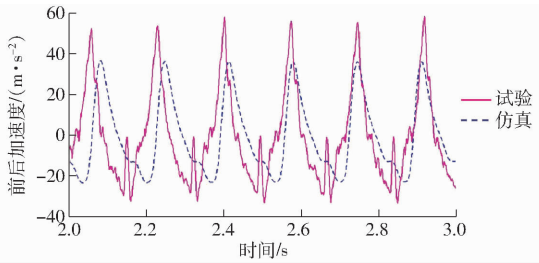

图 19 筛箱前后方向加速度仿真与试验曲线

Fig. 19 Simulated and tested curves of screen box front and rear direction acceleration

通过试验检测结果表明,清选装置中上筛箱的仿真冲击加速度、左前侧壁动应力、右前侧壁动应力、左后侧壁动应力、右后侧壁动应力均与试验值吻合较好,偏差在 20% 以内,说明该分析方法是较为正确的,其计算模型及结果较为准确。

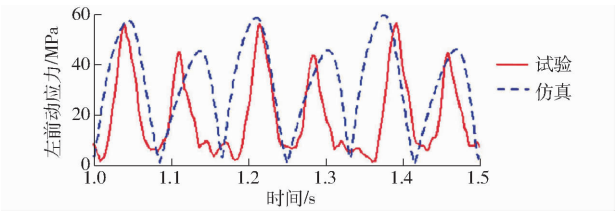

图 20 筛箱左前侧壁动应力仿真与试验曲线

Fig. 20 Simulated and tested curves of screen box front left wall dynamic stress

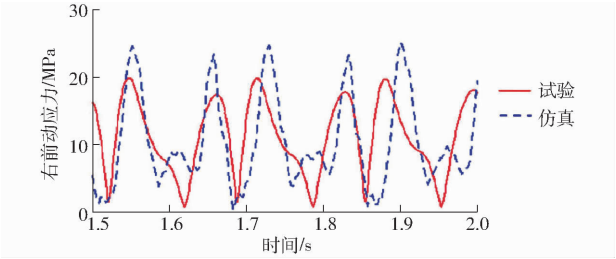

图 21 筛箱右前侧壁动应力仿真与试验曲线

Fig. 21 Simulated and tested curves of screen box front right wall dynamic stress

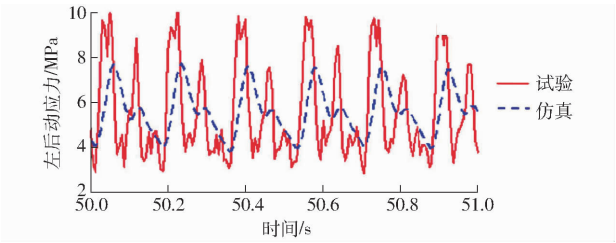

图 22 筛箱左后侧壁动应力仿真与试验曲线

Fig. 22 Simulated and tested curves of screen box rear left wall dynamic stress

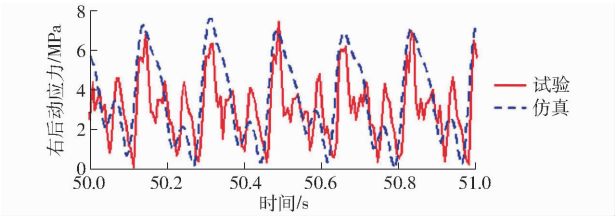

图 23 筛箱右后侧壁动应力仿真与试验曲线

Fig. 23 Simulated and tested curves of screen box rear right wall dynamic stress

6 结论

(1)运用动力学仿真分析,找出了影响清选装置疲劳寿命的核心因素,即橡胶轴承的径向刚度、轴向刚度、扭转刚度以及清选装置综合几何偏差等,确定了清选装置惯性力及疲劳寿命分析的流程,提出了有效的清选装置疲劳寿命分析方法,实现了清选装置前、后侧壁疲劳强度的等寿命设计。

(2)基于清选装置惯性力的影响因素分析,确定了橡胶轴承的扭转刚度及应变量等影响疲劳寿命的参数。清选装置综合偏差等几何参数,提高扭转疲劳寿命,通过试验验证,优化后筛箱疲劳寿命得到大幅提高,并与理论分析结果吻合度较高。

参 考 文 献

1 成芳,王俊. 风筛式清选装置筛上流场的试验研究[J]. 农业工程学报,1999,15(1):55 - 58.
CHENG Fang, WANG Jun. Test study on the flow field above surface of the air and screen cleaning mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 1999, 15(1): 55 - 58. (in Chinese)

2 林恒善,李耀明. 风力因素对风筛式清选效果影响的试验研究[J]. 中国农机化,2005(1):62 - 64.
LIN Hengshan, LI Yaoming. The effects of wind force factors upon air-and-screen cleaning results[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2005(1): 62 - 64. (in Chinese)

3 李建平,赵匀. 物料在振动筛面上抛起的计算机模拟和实验研究[J]. 农业工程学报,1997,13(4):46 - 48.
LI Jianping, ZHAO Yun. Experiment and computer simulation of tossing motion of agricultural materials on oscillating sieve[J]. Transactions of the CSAE, 1997, 13(4): 46 - 48. (in Chinese)

4 赵建平,尹文庆,黄爱勇. 联合收割机清粮筛的运动仿真与优化[J]. 计算机仿真,2007,24(11):185 - 188.
ZHAO Jianping, YIN Wenqing, HUANG Aiyong. Movement simulation and optimization of grain cleaning sieve of combine harvester[J]. Computer Simulation, 2007, 24(11): 185 - 188. (in Chinese)

5 王成芝,葛永久. 轴流滚筒的实验研究[J]. 农业机械学报,1982,13(1):56 - 72.
WANG Chengzhi, GE Yongjiu. A research on axial-flow threshing cylinder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1982, 13(1): 56 - 72. (in Chinese)

6 成芳,杨健明,蔺公振. 小型联合收割机风筛式清选装置试验研究[J]. 农业机械学报,1996,27(4):60 - 63.
CHENG Fang, YANG Jianming, LIN Gongzhen. Test study on the air-and-screen cleaning mechanism of small tractor-mounted grain combine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1996, 27(4): 60 - 63. (in Chinese)

7 李骅,张美娜,尹文庆,等. 基于 CFD 的风筛式清选装置气流场优化[J]. 农业机械学报,2013,44(增刊 2):12 - 16.
LI Hua, ZHANG Meina, YIN Wenqing, et al. Optimization of airflow field on air-and-screen cleaning device based on CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 2): 12 - 16. (in Chinese)

8 李洪昌,李耀明,唐忠,等. 风筛式清选装置振动筛上物料运动 CFD - DEM 数值模拟[J]. 农业机械学报,2012,43(2):79 - 84.
LI Hongchang, LI Yaoming, TANG Zhong, et al. Numerical simulation of material motion on vibrating screen of air-and-screen cleaning device based on CFD - DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 79 - 84. (in Chinese)

9 唐忠,李耀明,李洪昌,等. 联合收获机风筛式清选装置清选室内涡流试验[J]. 农业机械学报,2010,41(12):62 - 66.
TANG Zhong, LI Yaoming, LI Hongchang, et al. Analysis on the eddy current of the air-and-screen cleaning device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 62 - 66. (in Chinese)

10 李耀明,赵湛,陈进,等. 风筛式清选装置上物料的非线性运动规律[J]. 农业工程学报,2007,23(11):142 - 147.
LI Yaoming, ZHAO Zhan, CHEN Jin, et al. Nonlinear motion law of material on air-and-screen cleaning mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(11): 142 - 147. (in Chinese)

11 成芳,王俊. 风筛式清选装置主要参数的试验研究[J]. 农业工程学报,1998,14(4):217 - 221.
CHENG Fang, WANG Jun. Test study on main parameters of air and screen cleaning mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 1998, 14(4): 217 - 221. (in Chinese)

12 吴守一. 农业机械学:下册[M]. 2 版. 北京:机械工业出版社,1987:139 - 146.

13 陈德俊,龚永坚,黄东明,等. 履带式全喂入稻麦联合收获机新型工作装置研究设计[J]. 农业机械学报,2007,38(8):82 - 85.
CHEN Dejun, GONG Yongjian, HUANG Dongming, et al. Development on some apparatus of Chinese model caterpillar rice-wheat combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(8): 82 - 85. (in Chinese)

14 董国华,杨益. 筛面气流的分布状态对清选谷粒混合物的影响[J]. 农业机械学报,1982,13(3):16 - 27.
DONG Guohua, YANG Yi. The influence of airstream distribution along a sieve on the separation of grain mixture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1982, 13(3): 16 - 27. (in Chinese)

15 ZHEN Sen, CHENG Kai, WANG Jixin, et al. Failure analysis of frame crack on a wide-body mining dump truck[J]. Engineering Failure Analysis, 2015, 48: 153 - 165.

16 MI Chengji, GU Zhengqi, YANG Qingquan, et al. Frame fatigue life assessment of a mining dump truck based on finite element method and multibody dynamic analysis[J]. Engineering Failure Analysis, 2012, 23(4): 18 - 26.

17 GU Zhengqi, MI Chengji, WANG Yutao, et al. A-type frame fatigue life estimation of a mining dump truck based on modal stress recovery method[J]. Engineering Failure Analysis, 2012, 26(26): 89 - 99.

18 郝庆升. 非公路宽体矿用自卸车车架强度分析与试验研究[D]. 长春:吉林大学,2015.
HAO Qingsheng. Study on strength analysis and test for off-way wide-body mining dump truck frame[D]. Changchun: Jilin University, 2015. (in Chinese)

19 杨海平. 某越野车车架结构有限元分析及试验研究[D]. 南京:南京理工大学,2011.
YANG Haiping. Finite element analysis and experimental study of a off-road vehicle frame structure[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)

20 李强. 某重型载货车车架有限元静态及其试验研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2009.
LI Qiang. Finite element static analysis and experimental study of a heavy duty truck frame[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009. (in Chinese)

21 郑森. 非公路宽体矿用自卸车车架结构失效分析及疲劳寿命预测[D]. 长春:吉林大学,2015.
ZHENG Sen. Failure analysis and fatigue life prediction of frame structure of non highway wide body dump truck[D]. Changchun: Jilin University, 2015. (in Chinese)

22 陈传尧. 疲劳与断裂[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2002.

23 霍鹏飞. 直线振动筛的疲劳寿命分析[D]. 太原:太原理工大学,2010.
HUO Pengfei. Fatigue life analysis of linear vibrating screen[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010. (in Chinese)