

Optimization Technique Used on Endurance Improving about the Arm of Excavator

Xing Du, Hao Feng, Xingye Lv

Guangxi Liugong Machinery Co., Ltd., Liuzhou Guangxi
Email: duxing@liugong.com

Received: Feb. 27th, 2018; accepted: Mar. 12th, 2018; published: Mar. 19th, 2018

Abstract

To improve the endurance of the arm about one type excavator, this paper used the OptiStruct software to do optimization on the arm. In conceptual design phase, the topological optimization is used to define the total material layout. Based on the result, the original model is designed. And then the size optimization is used on the model. The new structure is design based on the result. It did FEA on the new structure and compared it with the old structure. The stress of the new structure on which positions we focused is 20% lower and the mass is 15 kilograms lower. At last, the verification test is done. It indicated that the design life of the new structure is one time higher than the old structure.

Keywords

Topological Optimization, Size Optimization, Verification Test, Arm Structure, Excavator

运用优化技术对挖掘机斗杆进行耐久性提升

杜 杏, 冯 豪, 吕兴业

广西柳工机械股份有限公司, 广西 柳州
Email: duxing@liugong.com

收稿日期: 2018年2月27日; 录用日期: 2018年3月12日; 发布日期: 2018年3月19日

摘 要

为实现对某型液压挖掘机斗杆结构的耐久性提升, 本文运用优化软件OptiStruct对斗杆结构进行优化设计。首先在概念设计阶段应用拓扑优化技术给出材料布局方案, 根据结果提示设计初始斗杆几何结构, 然后将斗杆结构各板厚作为设计目标进行尺寸优化设计, 最后重构几何, 对新斗杆进行有限元分析, 并

与原结构进行对比,发现新设计斗杆结构关注部位应力均降低20%以上,且质量也降低了15 kg,并通过了验证试验,将斗杆设计寿命提升了一倍。

关键词

拓扑优化, 尺寸优化, 验证试验, 斗杆结构, 挖掘机

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

斗杆是挖掘机工作装置的主要结构件之一[1],由于斗杆与铲斗直接相连,面对的工况比较恶劣,在交变载荷作用下,斗杆极易发生疲劳失效。面对竞争日益激烈的市场形势,斗杆耐久性提升是必然的需求;同时工程机械节能与环保的呼声也日趋热烈,斗杆需要在保证结构耐久性前提下实现轻量化。因而必须在轻量化与耐久性提升之间找到平衡。

工程机械行业结构件面临的耐久性提升的压力很大,多数采取的手段是局部改进,导致重量不断增加,这些均与节能环保相违背。有些会采取局部挖孔、减小非主要承载部件的尺寸、板厚加强薄弱部位的措施进行结构优化。这些基于经验和类比的方法会导致整体强度不均匀[2]。

文献[2]中施朝坤,冯豪等将截面和板厚尺寸作为参数,通过各参数的灵敏度分析,得出主要影响参数的最优组合。但该方法只是轻量化并没有提升斗杆的耐久性。

拓扑优化方法可以从整体的材料布局来优化结构件的材料分布,所以运用越来越广泛。如李光,胡凯等采用有限元拓扑优化方法,对大型正、反铲挖掘机整体式斗杆进行了拓扑优化[3][4],但其运用局限在铸件等一体化结构件上[5]。

针对目前结构优化局部修改、无法协调轻量化与耐久性、优化方法运用局限于一体式结构件等不足情况,本研究结合运用拓扑优化与尺寸优化方法,成功的在斗杆这类箱型板焊结构件上进行结构优化,对斗杆进行耐久性提升的同时保证质量小幅降低,将斗杆设计寿命提升1倍,并通过了验证试验。

2. 结构优化设计方法

拓扑优化是以材料分布为优化对象,可以在均匀分布材料的设计空间中找到最佳的材料分布方案。拓扑优化先将最大设计空间建造出来,然后给定一定的负载情况、约束条件和性能指标,然后在给定的区域内对材料分布进行优化。

结构件优化设计问题在数学上可表达为以等式或不等式函数描述的约束条件和以多变量函数描述的优化设计目标。见公式1所示

$$\begin{aligned} \min f(x), x \in R^n \\ \text{s.t. } h_v(x) = 0, v = 1, 2, \dots, p \\ g_u(x) \leq 0, u = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $f(x)$ -目标函数;

x -设计变量, $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T, x \in R^n$;

$h_v(x)$ -等式约束函数

$g_u(x)$ -等式约束函数

结构件优化中可能会要求多个设计指标最优，也就是多个目标函数。比如质量最小、应力最小、位移最小、应变能最小等。

结构件优化设计是将优化技术与有限元分析技术结合起来，设计满足给定的各种要求最佳结构尺寸、形状等的设计手段。设计手段是计算机及优化计算软件。本文运用 OptiStruct 软件来对斗杆结构进行优化设计。

为满足激烈的市场竞争，挖掘机结构件耐久性提升提上日程，但不能牺牲结构件的质量目标。所以必须从整体结构件优化着手，而不是局部改进。本文以某型挖掘机斗杆开发为例，基于变密度法建立了拓扑优化的数学模型，运用 OptiStruct 软件，结合拓扑优化及尺寸优化技术对斗杆进行耐久性提升设计。

3. 斗杆优化设计

3.1. 概念设计建模

建立概念设计模型，需要将结构不干涉的最大外轮廓设定为设计空间，见图 1 所示。

根据计算机性能以及实际情况划分网格(本文中划分 10 mm)，创建材料和属性并赋给组件，加载多工况载荷见图 1 所示。

通过观察分析结果，确定有限元分析结论无误的情况下，对现有设计空间进行结构优化。

3.2. 拓扑优化分析

优化三要素[6]分别如下：设计变量为非铰接孔周围的空间考虑到实际工程需要，增加了对称约束以及最小尺寸约束[7]。根据实际需求将应力，质量和应变能分别作为约束条件和设计目标。

拓扑优化结果如图 2 所示，根据结果提示，确定了斗杆的大致材料分布趋势，然后结合动臂和斗杆油缸铰接孔处支座安装状况等重构几何模型如下图 3 所示。

3.3. 尺寸优化分析

根据拓扑优化结果提示，建立了尺寸优化的有限元模型见图 3 所示。对不同的板材分别创建材料、

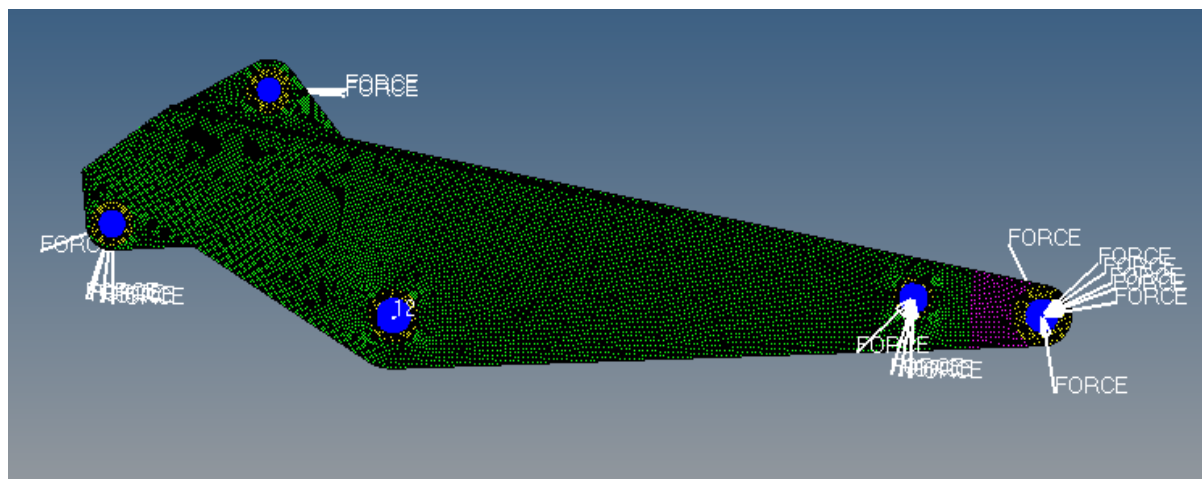


Figure 1. Topological optimization model

图 1. 优化模型



Figure 2. Topological optimization of arm
图 2. 斗杆整体拓扑优化

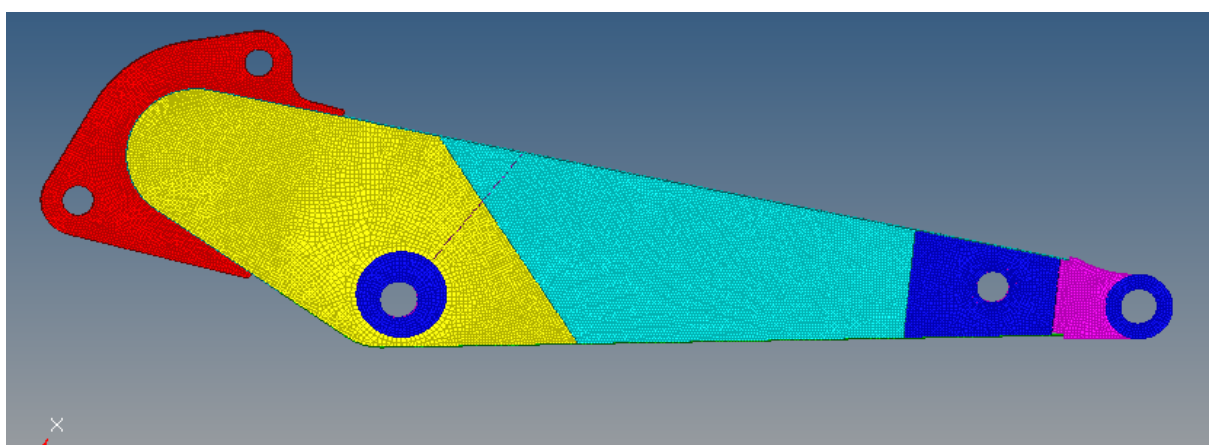


Figure 3. Size optimization model
图 3. 尺寸优化模型

属性，加载荷边界条件、载荷工况、查看静力计算结果是否合理。

分别将每块焊接板的厚度作为设计变量，设定初始值及最大值、最小值。最后一个切换成 `ddval`，见图 4 所示。其中离散变量是工程需要，需要提前定义离散的设计变量。重复以上操作，直至建立好所有板厚参数。

然后将所有设计变量与属性的关联。根据优化的需求将应力，位移，质量及应变能作为约束条件及设计目标。

3.4. 新结构有限元分析

根据拓扑优化以及尺寸优化结果，并结合现有失效情况及设计经验来设计斗杆几何。然后进行有限元分析，对比新、旧结构的应力水平。

该斗杆满足质量目标(降低 15 kg)，经过与现有斗杆结构对比分析可知，多处关注位置应力降幅在 20% 以上，见图 5 及表 1 所示。

4. 试验验证

4.1. 试验方案

本研究针对的优化部件是动臂和斗杆，在此只列出斗杆的相关信息。在动臂、斗杆关注部位贴应变

片, 采集动臂、斗杆油缸大、小腔压力, 各油缸位移。贴片位置如下图 6 所示:

包含测试工况介绍、贴片位置等介绍

1) 标定有限元模型(静态测试);

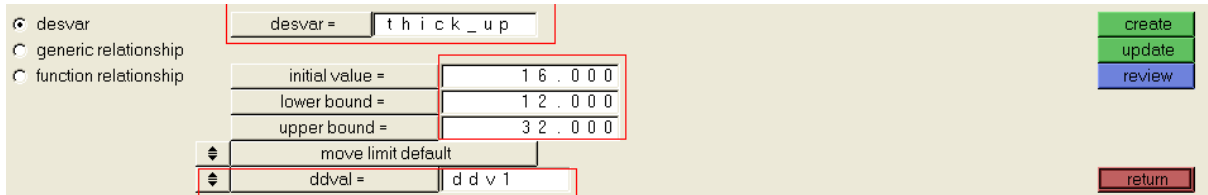


Figure 4. Design variable

图 4. 设计变量

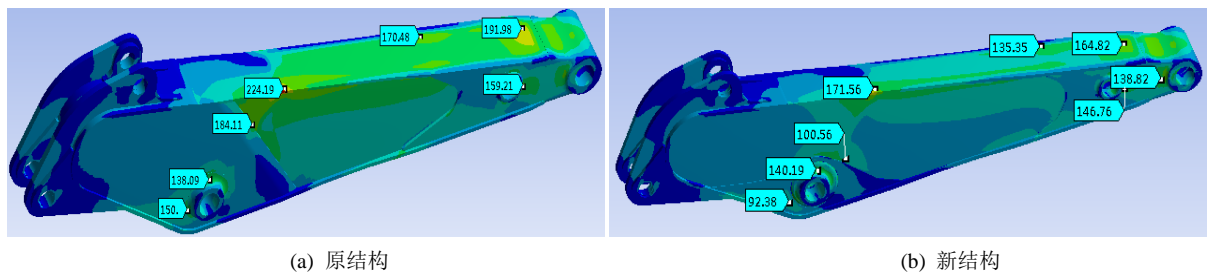


Figure 5. Comparing the stress result of new and old

图 5. 新旧结构应力结果对比

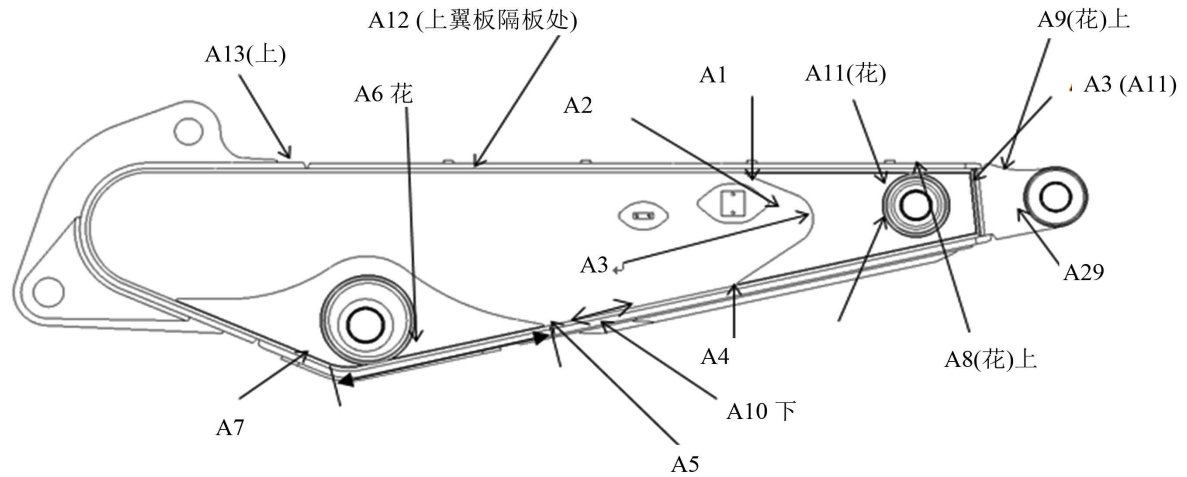


Figure 6. Strain gauge position

图 6. 斗杆贴片位置

Table 1. Comparing the stress of new and old

表 1. 新旧结构应力对比

| 位置 position | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|
| 原结构应力 old (MPa) | 192 | 170 | 159 | 224 | 184 | 150 |
| 新结构应力 new (MPa) | 165 | 135 | 139 | 172 | 100 | 92 |
| 应力降幅(%) | 14.1 | 20.6 | 12.6 | 23.2 | 45.7 | 38.7 |

2) 动态测试工况，客户实际使用工况，采石场装车、甩料等工况。

4.2. 验证试验

4.2.1. 对标有限元模型(静态对标测试)

对工作装置参数化建模，调整姿态与挖掘机最大挖掘力姿态对应见图 7 所示，将实测应力与有限元计算应力结果对比，显示结果表明，有限元模型正确见图 8 所示。

4.2.2. 客户采石场测试(动态测试对比)

完成有限元对比分析后，还需要设计试验来验证优化改进的有效性。进行实际客户采石场装车、甩料等工况测试，见图 9 所示。

4.3. 验证结果(数据处理)

对测试数据进行判态判稳分析后，确定测试数据有效。由于篇幅限制，本文只截取装车工况中的 26 斗来进行数据对比说明。

选取装车工况中的 26 斗数据进行改进前后应力对比分析见图 10 所示，结果对比图见图 11 所示。

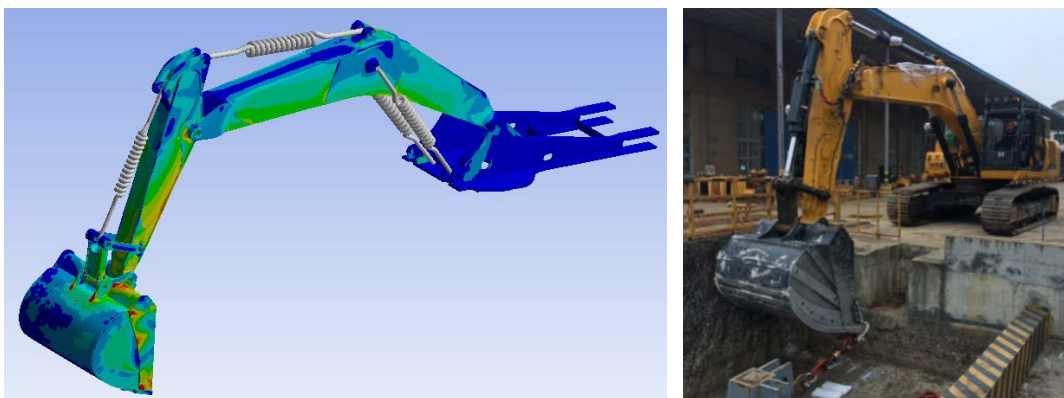


Figure 7. Calibration test
图 7. 对标试验

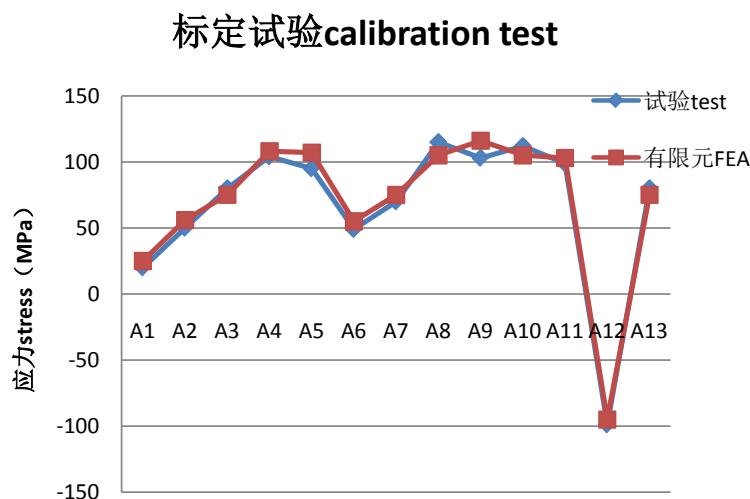


Figure 8. Comparing the test and FEA result
图 8. 斗杆应变测试与有限元计算结果对比图



Figure 9. Verification test of Customer at quarry
图 9. 客户采石场验证试验

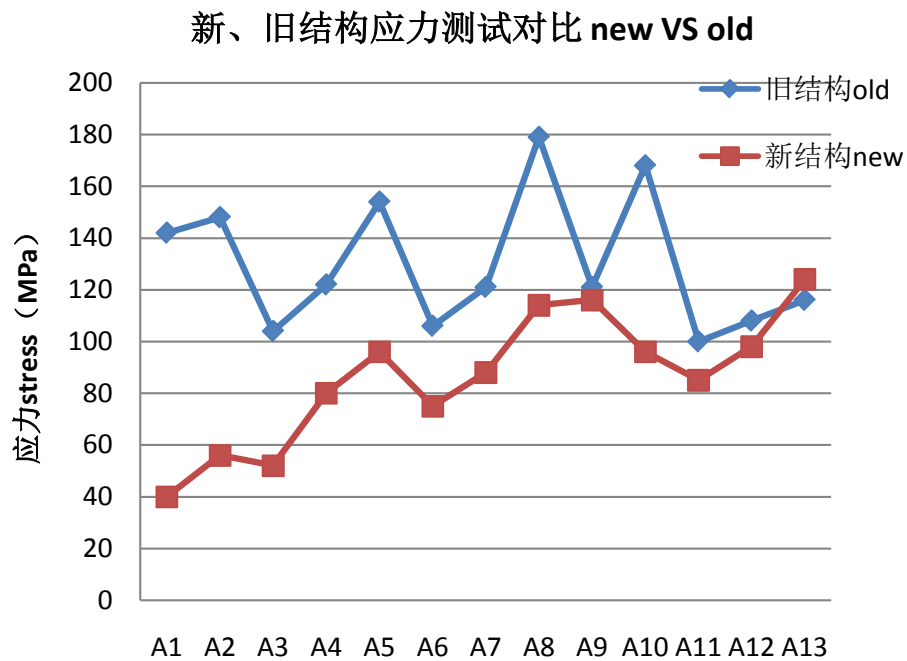


Figure 10. Comparing the stress of old and new structure in test
图 10. 新旧结构试验数据对比

从试验结果可以看出，绝大多数贴片位置应力降幅较大(平均降幅在 20%以上)，平均设计寿命提升 1 倍。说明斗杆优化方案有效，目前斗杆已经批量生产，现已投入市场，至今没有反馈，需要继续跟踪。

5. 结论

本文运用拓扑优化技术及尺寸优化技术对斗杆结构进行了优化设计，保证质量小幅降低的情况下，将原结构的关注部位应力降低 20%以上，且减小了斗杆加工工艺难度，并通过了验证试验。说明优化技

新、旧结构设计寿命new VS old

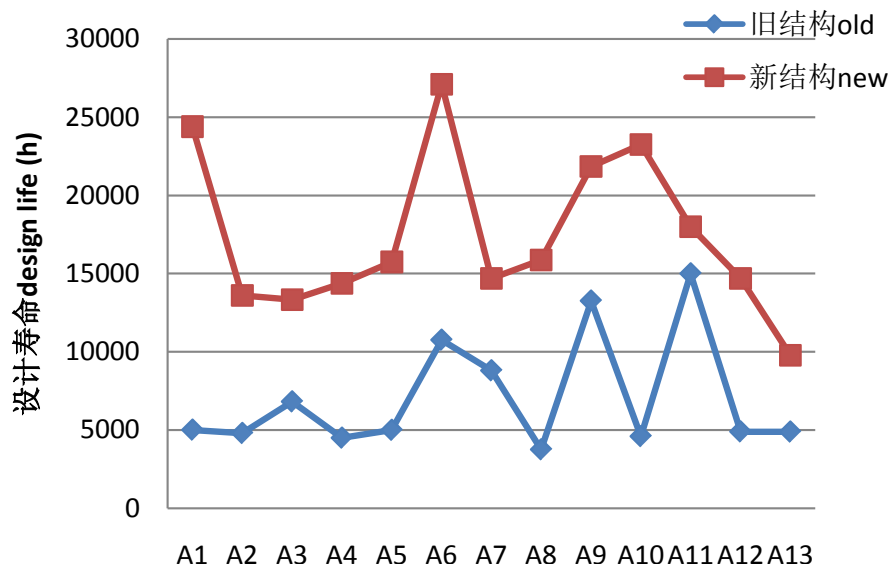


Figure 11. Comparing the design life of old and new structure

图 11. 新旧结构设计寿命对比

术从概念设计阶段到详细设计阶段均能指导设计，能改变以往反复修改的设计模式，缩短设计周期，提升设计质量。

本文运用优化技术提升了结构件的耐久性，但若先对整个工作装置机构进行优化[8]，然后在此基础上进行结构优化会更显成效。希望本文的优化方法能对其他结构件的优化起到参考意义。

参考文献

- [1] 史青录. 液压挖掘机[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [2] 施朝坤, 冯豪, 包刚强. 基于参数化方法的挖掘机动臂轻量化设计[J]. 工程机械, 2013, 44(12): 44-50.
- [3] 宁晓斌, 刘亚冉, 李颖, 李光, 李佳林. 基于拓扑优化方法的大型液压挖掘机斗杆新型结构[J]. 中国机械工程, 2017, 28(16): 1936-1942.
- [4] 李光, 胡凯, 李佳林, 谭磊, 宁晓斌. WYD260 矿用液压挖掘机工作装置强度分析与轻量化设计[J]. 矿山机械, 2017, 45(7): 7-11.
- [5] 吴盛彬, 刘孝保. 液压挖掘机动臂内部筋板的拓扑优化设计[J]. 新技术新工艺, 2014(8): 43-45.
- [6] 张胜兰, 郑冬黎, 郝琪. 基于 HyperWorks 的结构优化设计技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [7] 洪清泉, 赵康, 张攀. OptiStruct & HyperStudy 理论基础与工程应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [8] 周全, 李光, 吕晓林, 等. 基于多学科仿真的大型正铲液压挖掘机工作装置动态强度研究[J]. 机电工程, 2015, 32(3): 333-337.

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：2332-6980，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：iae@hanspub.org