

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.10.002

大豆收获机车架的轻量化设计

李 怡¹, 徐中明¹, 张黎骅², 杜 杰¹, 蒋运策¹

(1. 重庆大学 汽车工程学院, 重庆 400044; 2. 四川农业大学机电学院, 四川 雅安 625014)

摘要:以某大豆收获机的车架为对象,利用三维建模软件 Solidworks 进行了参数化建模,导入有限元前处理软件 Hypermesh 对车架进行有限元网格划分和模态仿真分析,对车架样件进行模态试验分析,验证了仿真模型和结果的正确性。对车架不同工况下进行了强度校核计算;以车架固有频率和动载荷系数为 2.5 时材料的最大许用应力为约束,以车架质量最小为目标,进行了轻量化优化设计,优化后底盘车架减质量 16%。

关键词:收获机;模态试验;车架;有限元分析;轻量化

中图分类号:TH122

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2019)10-014-08

Light weight design of chassis frame for a soybean harvester

LI Yi¹, XU Zhongming¹, ZHANG Lihua², DU Jie¹, JIANG Yunce¹

(1. School of Automotive Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Sichuan Agricultural University,

Ya'an 625014, Sichuan, P. R. China)

Abstract: In this paper, the chassis frame of a soybean harvester is taken as an object. Using three-dimensional modeling software Solidworks for the parametric modeling and finite element before the import processing software Hypermesh for the finite element meshing and modal simulation analysis of the chassis frame the modal test of frame samples is conducted to verify the validity of the simulation results. The strength of the chassis under different working conditions is checked and calculated. With the maximum allowable stress of the material taken as constraint when the natural frequency and dynamic load coefficient of the chassis are 2.5, and with the minimum weight of the frame taken as the target, the lightweight optimization design is carried out and the mass of the chassis after optimization is reduced by 16%.

Keywords: harvester; modal test; chassis rack; finite element analysis; lightweight design

中国南方丘陵地区农村,田间作业环境差,在雨季收获机陷在地里无法行走和操作并增加油耗^[1-3],对收获机车架进行轻量化设计可以降低制造和使用成本,并提高收获机的使用性能^[4-5]。车架作为安装基础,承受来自发动机、脱粒清选装置、粮仓以及收获机割台这 4 个主要部分以及在行驶途中所产生的力与力矩^[6-7]。其结构刚度和强度是影响使用寿命与安全的主要因素^[8-9]。对车架进行优化时,要先保证其强度。

收稿日期:2019-05-10

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2017YFD030170402);农业部产业体系资助项目(CARS-02)。

Supported by National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technoloty of China (2017YFD030170402); Ministry of Agricultural Industry System Project (CARS-02).

作者简介:李怡(1997—),女,重庆大学硕士研究生,主要从事结构轻量化设计研究,(E-mail)20183202043t@cqu.edu.cn。

通讯作者:徐中明,男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事车辆系统动力学与控制研究,(E-mail)xuzm@cqu.edu.cn。

近年来,已有学者利用有限元软件对收获机进行模态分析及优化设计,如马丽娜等^[10]建立了玉米收获机前后轮距的准静态横向稳定性数学建模,仿真分析与模态试验得出关键影响因素;黄琼春等^[11]对小型甘蔗收获机机架进行有限元建模,对板件厚度进行尺寸优化;杨方飞等^[12]对喷雾机结构进行了有限元求解,得到应力分布;姚艳春等^[13]研究了玉米收获机车架静态加载下不同焊点模型所造成的车架应力分布情况。上述文献多为对收获机的静力学研究,没有考虑收获机受到的动载荷影响。

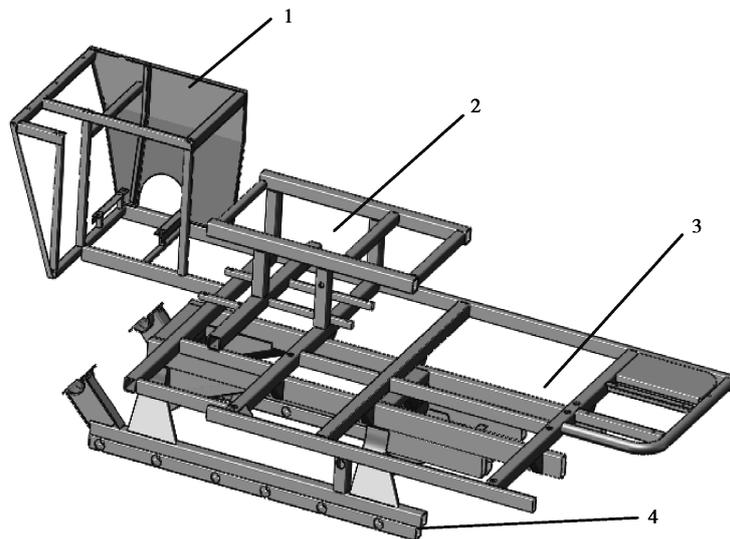
笔者以某大豆收获机车架为对象,建立有限元模型,通过样件模态试验验证仿真模型,对底盘车架施加不同工况动静载荷条件下的应力及杆件薄弱区进行分析,以车架杆件的厚度为设计变量,振动固有频率以及许用应力为约束条件,以车架质量最小为目标函数,对车架进行轻量化优化设计。

1 有限元模型的建立与分析

1.1 车架的有限元模型

大豆收获机的车架为上中下 3 层框架结构,上层机架包括驾驶室和发动机室,中层为连接脱粒清选装置和粮仓等的主承载机架,下层为连接履带和割台的底盘结构。选择参数建模,以缩短设计周期^[14],用三维建模软件 SolidWorks 搭建底盘车架的几何模型并利用有限元前处理软件 Hypermesh 进行网格划分和模态分析,模型进行了一定的简化,删除了导条安装座板、轮轴安装套及吊耳等小附件。

将底盘车架的三维模型导入 Hypermesh 后,车架所有结构钢的网格采用 Pshell 壳单元形式,为保证网格的精准性,提高网格划分的质量,选择网格类型为 mixed,网格大小为 5 mm,结构钢之间的焊点则采用 Pbeam 进行模拟。整个底盘车架采用的材料是 Q345 结构钢,弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3,密度为 7 850 kg/m³,屈服强度为 345 MPa。最终得到网格划分后的有限元模型如图 1 所示,整个模型节点的个数为 304 035,单元数为 303 367。



1.驾驶室;2.发动机室;3.机架;4.底座

图 1 底盘车架的有限元模型

Fig. 1 Parametric model of chassis frame

1.2 车架有限元分析结果

收获机行驶速度低,工作频率也比较低,结构的动态特性受到低频振动的影响最大,低频振动是决定车架结构强度的失效及稳定性的重要因素^[15-17],收获机主要用于田间作业,结合田地地表不平,行驶速度慢,发动机、割台振动等实际情况,选取车架前 4 阶的模态振型和频率进行分析。将划分网格后底盘车架的有限元模型进行仿真分析,求解所得的前 4 阶固有频率,1,2 阶均为驾驶室局部模态,频率分别为 24.29,26.18 Hz,3 阶为车架弯曲模态,频率为 39.20 Hz,远离发动机激励和地面激励等激励频率。

2 车架的模态试验与分析

2.1 模态试验

模态试验采用 B & K 数据采集前端、力锤、6 个 B & K 4524 B 三向加速度传感器及 B & K PULSE Reflex 模态分析软件。联合收获车架在模态试验中所建立的模型结构用 94 个节点对其轮廓进行定义,如图 2 所示。

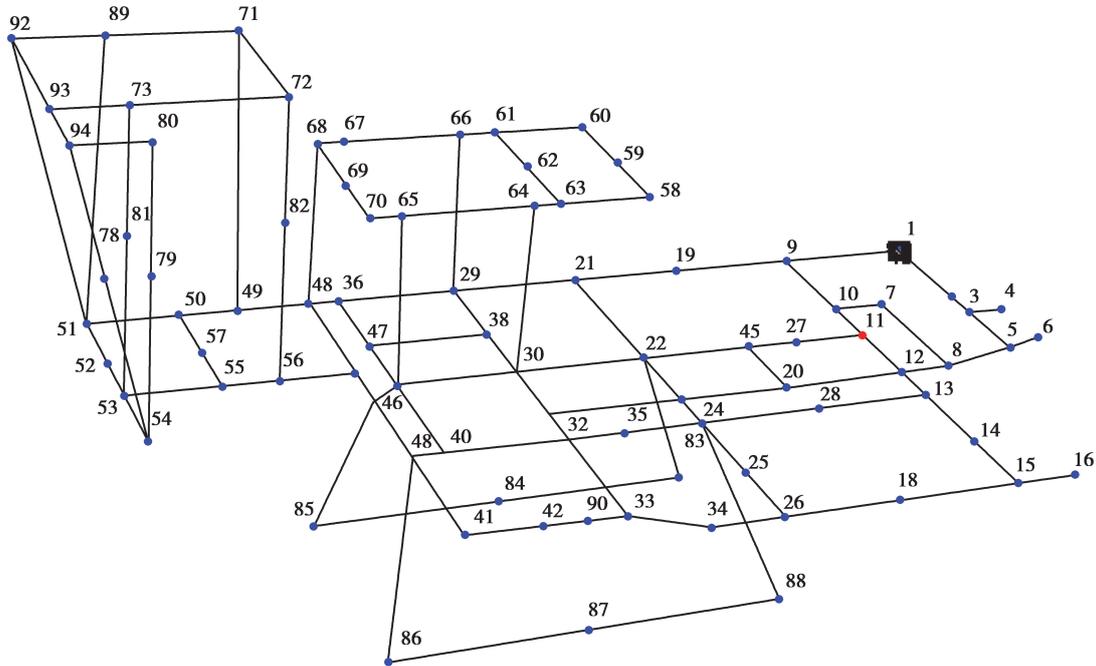


图 2 底盘车架模态试验的模型结构图

Fig. 2 Model structure of chassis frame in the modal test

试验时将大豆收获机车架水平放置于充气内胎上,处于自由振动状态,用力锤依次敲击测试点,每点敲击 3 次,采集振动信息,导入到 B&K PULSE Reflex 模态分析软件,进行参数识别,可得到底盘车架的模态试验的固有频率及振型图。

2.2 试验模态与计算模态对比分析

试验模态固有频率与计算仿真模态对比分析如表 1 所示,可以看出模态试验频率值与有限元分析结果较为接近,说明建立的大豆收获机底盘车架的有限元模型是准确的。

表 1 试验模态与仿真模态对比分析

Table 1 Comparative analysis of test and simulation modes

阶次	模态试验/Hz	仿真实验/Hz	差值/%	振型描述
1	24.46	24.29	0.66	1 阶弯曲
2	26.96	26.18	2.88	1 阶弯曲
3	42.06	39.20	6.78	1 阶扭转
4	51.21	45.16	11.82	1 阶弯曲、扭转
5	61.23	56.32	8.02	2 阶弯曲、扭转
6	64.84	63.77	1.66	2 阶弯曲、扭转

3 车架强度校核

3.1 载荷及约束的处理

车架的载荷:该大豆收获机车架作为主承载部位,承受自重、割台、驾驶室、发动机、脱离清选装置、粮仓等静载荷以及行驶过程中由速度变化、路面不平等因素所产生的动载荷。外部静载荷则以质量点的形式向车架施加均布载荷。外部静载荷大小如表 2 所示。

表 2 收获机各部分质量

Table 2 Quality of harvester components y

收获机部件	驾驶室	脱离清选装置	输送装置	发动机	粮仓(空载)	粮仓(满载)
质量/kg	300	500	150	400	80	350

大豆收获机不同于一般公路车辆,长期在田间地里,工作环境复杂,路面起伏波动剧烈,整体负重大(如行驶速度骤变所引起的冲击载荷以及如刮风、下雨等自然环境引起的偶然载荷等)。因此单对车架进行静强度校核是不够的,还需要验证底盘车架在动载荷下的强度是否满足屈服应力^[18-20],且动载荷的加载方式与静载荷相同,而取值则是以静载荷为基础乘上一定的动载系数 n 。在影响大豆收获机行驶环境的多重因素相互作用下,难以用数学分析方法准确得出动载系数的大小,参考文献[21]取 $n=2.5$ 。

车架的约束:大豆收获机在田间作业,为尽可能模拟大豆收获机真实的约束情况,对车架前轮部位施加 X, Y, Z 3 个方向的全约束,其后轮部位对 X, Y 约束,而 Z 向自由。其约束与加载情况如图 3 所示。

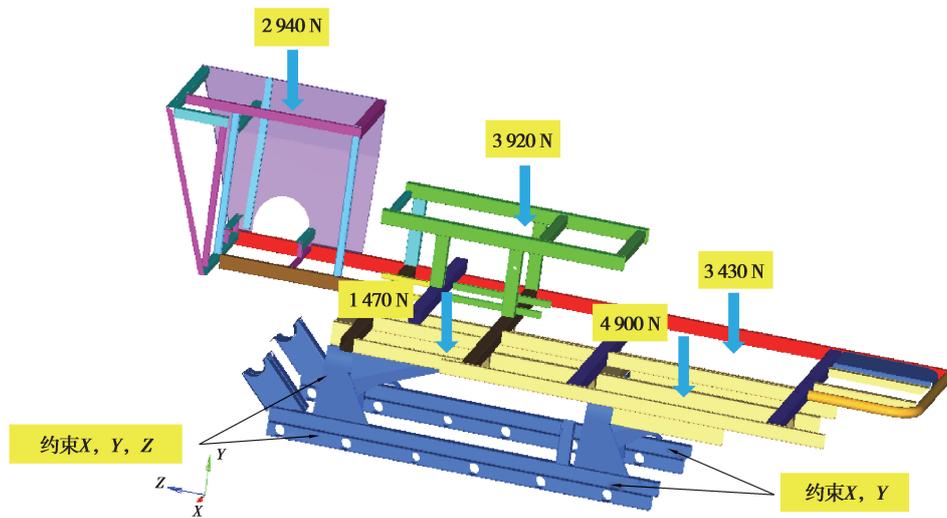


图 3 车架载荷分布及约束图

Fig. 3 Diagram of frame load distribution and constraint

3.2 动静载荷的应力分析

根据 3.1 载荷大小与加载方式及约束条件,有限元求解所得底盘车架在静载荷下应力云图及最大静应力处的局部图,如图 4,5 所示。静载荷:最大应力 $\sigma_{\max 1}=123.2$ MPa;动载荷:最大应力 $\sigma_{\max 2}=308.0$ MPa;未超过结构钢 Q345 的极限应力。

当动载系数 $n=2.5$ 时,材料的许用应力为

$$[\sigma] = \frac{\sigma_s}{n} = 138 \text{ MPa}, \quad (1)$$

则得 $\sigma_{\max 1} < [\sigma]$, 证明该大豆收获机车架的设计强度足够,还能进行进一步的轻量化设计。

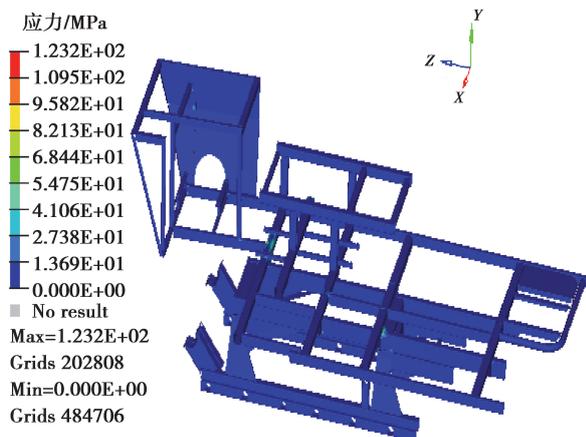


图 4 车架静载荷等效应力图

Fig. 4 Equivalent stress diagram of chassis frame static load

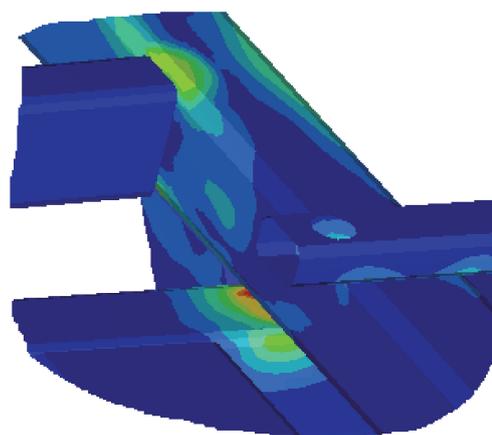


图 5 最大静应力局部图

Fig. 5 Local map of maximum static stress local map

4 车架的轻量化设计

4.1 车架优化方程的建立

在不改变现有车架的结构、材料的基础上,为减轻车架整体的质量,选择优化设计的方案为目前成熟的尺寸优化^[22],从而根据优化设计的理论确定优化变量,即目标函数、设计变量、约束条件。

因此,底盘车架的优化数学模型为

$$f(X) = f(x_1, x_2, \dots, x_n); \quad (2)$$

$$g_j(x) \leq 0, j = 1, 2, \dots, m; \quad (3)$$

$$x_i^a \leq x_i \leq x_i^b, i = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

其中, $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为设计变量, x_i 为底盘车架的结构尺寸, $f(X)$ 为目标函数, $g_j(x)$ 为约束函数, 上角标 a 为尺寸下限, 上角标 b 为尺寸上限^[23]。

4.2 设计变量

设计变量作为一种在设计过程中可调整修改从而提高系统性能的参数^[24],在不改变底盘车架结构的前提下,选择的设计变量为对车架部分梁的截面厚度。根据优化设计数学模型的收敛性以及梁截面厚度的实际情况^[25],选取 5 个设计变量,如表 3 所示。

表 3 设计变量取值范围
Table 3 Design variable range

部件名称	初始尺寸/mm	下限尺寸/mm	上限尺寸/mm
底盘	4.0	2.5	5.5
驾驶室纵梁	3.0	2.5	3.5
发动机室	4.0	2.5	5.5
机架纵梁	3.0	2.5	3.5
机架横梁	4.0	2.5	5.0

4.3 约束条件

约束条件作为对设计的限制,影响设计变量及其他性能的选择^[18]。为了优化出符合实际的车架,需要选择约束条件的合理取值范围,本文的约束条件如下:

1) 强度约束条件。车架的材料 Q345 钢,满足动载荷条件的最大应力不超过许用应力 $[\sigma] = 138.0$ MPa。

2) 频率约束条件。约束车架前 2 阶的频率波动上下不超过 1 Hz, 即: $24 \text{ Hz} \leq f_1 \leq 25 \text{ Hz}$, $26 \text{ Hz} \leq f_2 \leq 27 \text{ Hz}$ 。其中 f_1, f_2 为车架的 1, 2 阶固有频率。

4.4 目标函数

选取的优化目标为车架质量最小。

4.5 优化结果与分析

在 Hypermesh 中设置完以上各项参数后, 求解出车架初步尺寸优化结果。根据结构钢壁厚工程规格对优化后尺寸进行小调整, 如表 4 所示。

表 4 优化前后尺寸对比

Table 4 Size comparison before and after optimization

部件名称	优化前厚度/mm	优化后厚度/mm	减少量/mm
底盘	4.0	3.0	1.0
驾驶室纵梁	3.0	3.2	-0.2
发动机室	4.0	3.0	1.0
机架纵梁	3.0	2.7	0.3
机架横梁	4.0	3.0	1.0

对优化后的车架重新进行模态分析和静载荷与动载荷情况下的强度计算, 表 5 为优化前后模态频率对比, 固有频率变化不大, 满足所设约束条件。静载荷最大应力为 137.5 MPa, 动载荷的最大应力为 343.8 MPa, 满足材料 Q345 结构钢的许用应力和屈服应力; 优化后车架的质量由 185.2 kg 减少到 155.5 kg, 减质量 16%, 实现了轻量化。

表 5 优化前后底盘车架的模态频率对比

Table 5 Comparison of modal frequency before and after optimization

模态阶数	1	2	3	4	5	6
优化前(优化后)/Hz	24.2(25.36)	26.18(26.74)	39.20(38.27)	45.16(43.99)	56.32(56.83)	63.77(64.57)

5 结 论

1) 建立了大豆收获机盘车架有限元模型, 模态试验分析结果与有限元计算仿真结果接近, 验证了有限元模型的准确性。

2) 对大豆收获机车架进行了强度校核和轻量化优化, 车架质量减少了 16%, 实现了车架轻量化, 轻量化设计方案企业已采纳实施。

参考文献:

- [1] 潘远香. 小型半喂入水稻联合收割机割台系统设计研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2016.
PAN Yuanxiang. Design and Research on Header System of Small Half-Feed Rice Combine Harvester[D]. Guiyang: Guizhou University, 2016. (in Chinese)
- [2] 李永兵, 李亚庭, 楼铭, 等. 轿车车身轻量化及其对连接技术的挑战[J]. 机械工程学报, 2012, 48(18): 44-54.
LI Yongbing, LI Yating, LOU Ming, et al. Lightweighting of car body and its challenges to joining technologies[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(18): 44-54. (in Chinese)
- [3] 高志朋, 徐立章, 李耀明, 等. 履带式稻麦联合收获机田间收获工况下振动测试与分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33

- (20): 48-55.
- GAO Zhipeng, XU Lizhang, LI Yaoming, et al. Vibration measure and analysis of crawler-type rice and wheat combine harvester in field harvesting condition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(20): 48-55. (in Chinese)
- [4] Sakundarini N, Taha Z, Abdul-Rashid S H, et al. Optimal multi-material selection for lightweight design of automotive body assembly incorporating recyclability[J]. Materials & Design, 2013, 50: 846-857.
- [5] 王刚, 关卓怀, 沐森林, 等. 油菜联合收获机种子籽粒脱粒装置结构及运行参数优化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 52-57.
- WANG Gang, GUAN Zhuohuai, MU Senlin, et al. Optimization of operating parameter and structure for seed thresher device for rape combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(24): 52-57. (in Chinese)
- [6] 姚艳春, 杜岳峰, 朱忠祥, 等. 基于模态的玉米收获机车架振动特性分析与优化[J]. 农业工程学报, 2015, 31(19): 46-53.
- YAO Yanchun, DU Yuefeng, ZHU Zhongxiang, et al. Vibration characteristics analysis and optimization of corn combine harvester frame using modal analysis method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(19): 46-53. (in Chinese)
- [7] Ebrahimi R, Esfahanian M, Ziaei-Rad S. Vibration modeling and modification of cutting platform in a harvest combine by means of operational modal analysis (OMA) [J]. Measurement Journal of the International Measurement Confederation, 2013, 46(10):3959-3967.
- [8] 李福强, 刘守荣, 毛恩荣, 等. 基于功率密度的玉米收获机车架疲劳分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 34-40.
- LI Fuqiang, LIU Shourong, MAO Enrong, et al. Fatigue analysis of corn harvester frame based on power density[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(10): 34-40. (in Chinese)
- [9] 陈志, 周林, 赵博, 等. 玉米收获机底盘车架疲劳寿命研究[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 19-25.
- CHEN Zhi, ZHOU Lin, ZHAO Bo, et al. Study on fatigue life of frame for corn combine chassis machine [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(20): 19-25. (in Chinese)
- [10] 马丽娜, 杜岳峰, 宋正河, 等. 玉米收获机准静态横向稳定性数学建模与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 89-95.
- MA Lina, DU Yuefeng, Song Zhenghe, et al. Mathematical modeling and experiment of corn harvester quasi-static lateral stability[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 89-95. (in Chinese)
- [11] 黄琼春, 李尚平, 李冰, 等. 小型甘蔗收获机台架结构分析与轻量化设计[J]. 农机化研究, 2018, 40(6): 29-32.
- HUANG Qiongchun, LI Shangping, LI Bing, et al. Structure analysis and lightweight design of the small sugarcane harvester stand[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(6): 29-32. (in Chinese)
- [12] 杨方飞, 韩小进, 段垚奇, 等. 高地隙喷杆喷雾机底盘可靠性试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 73-77,72.
- YANG Fangfei, HAN Xiaojin, DUAN Yaoqi, et al. Reliability experiment on high clearance boom sprayer chassis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 73-77,72. (in Chinese)
- [13] 姚艳春, 宋正河, 杜岳峰, 等. 玉米收获机车架应力及模态数值模拟焊点模型优选[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 50-58.
- YAO Yanchun, SONG Zhenghe, DU Yuefeng, et al. Optimum seeking of spot weld model on numerical simulation of stress and modal analysis for corn combine harvester frame[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(24): 50-58. (in Chinese)
- [14] Li Y M, Zhu L H, Tang Z, et al. Finite element modal analysis and experiment of the compression device of the all-in-one machine of combine harvester and baler[C]//Proceedings of the 2016 International Forum on Mechanical, Control and Automation (IFMCA 2016), December 30-31, 2016. Shenzhen, China. Paris, France: Atlantis Press, 2017.
- [15] 李耀明, 李有为, 徐立章, 等. 联合收获机割台机架结构参数优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(18): 30-37.
- LI Yaoming, LI Youwei, XU Lizhang, et al. Structural parameter optimization of combine harvester cutting bench[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(18): 30-37. (in Chinese)

- [16] 姚艳春, 宋正河, 杜岳峰, 等. 玉米收获机割台振动特性及其主要影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(13): 40-49.
YAO Yanchun, SONG Zhenghe, DU Yuefeng, et al. Analysis of vibration characteristics and its major influenced factors of header for corn combine harvesting machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(13): 40-49. (in Chinese)
- [17] 李耀明, 孙朋朋, 庞靖, 等. 联合收获机底盘机架有限元模态分析与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 38-46, 301.
LI Yaoming, SUN Pengpeng, PANG Jing, et al. Finite element mode analysis and experiment of combine harvester chassis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(3): 38-46, 301. (in Chinese)
- [18] Hu D F, Du Y P. Strength analysis of corn combine harvester chassis[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 644/645/646/647/648/649/650:489-492.
- [19] 陈志, 周林, 赵博, 等. 玉米收获机底盘车架疲劳寿命研究[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 19-25.
CHEN Zhi, ZHOU Lin, ZHAO Bo, et al. Study on fatigue life of frame for corn combine chassis machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(20): 19-25. (in Chinese)
- [20] 蒋亚军, 廖宜涛, 秦川, 等. 4SY-2.9 型油菜割晒机机架振动分析及改进[J]. 农业工程学报, 2017, 33(9): 53-60.
JIANG Yajun, LIAO Yitao, QIN Chuan, et al. Vibration analysis and improvement for frame of 4SY-2.9 typed rape windrower[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(9): 53-60. (in Chinese)
- [21] 王想到. 玉米联合收割机总体分析及底盘结构优化[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2014.
WANG Xiangdao. Corn harvester's comprehensive analysis and the chassis' structural optimization[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [22] 袁守利, 许烁. 3WPZ-500 自走式喷杆喷雾机机架的轻量化设计[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(7): 1359-1363.
YUAN Shouli, XU Shuo. Lightweight design of frame for 3WPZ-500 self-propelled boom sprayer[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2017, 56(7): 1359-1363. (in Chinese)
- [23] 季轩, 黄世明, 施诗, 等. 腐熟剂喷施机械机架部分轻量化设计[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(19): 4829-4833.
JI Xuan, HUANG Shiming, SHI Shi, et al. Lightweight design of frame for decomposition agent spraying machine[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2015, 54(19): 4829-4833. (in Chinese)
- [24] 张娜娜, 赵匀, 刘宏新. 高速水稻插秧机车架的轻量化设计[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 55-59.
ZHANG Nana, ZHAO Yun, LIU Hongxin. Light design of frame for self-propelled chassis rice transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(3): 55-59. (in Chinese)
- [25] 徐中明, 陶能发, 赖诗洋, 等. 基于折衷规划法的转向节多目标拓扑优化设计[J]. 重庆大学学报, 2017, 40(12): 1-7.
XU Zhongming, TAO Nengfa, LAI Shiyang, et al. Multi-objective topology optimization for vehicle steering knuckle based on the compromise programming method[J]. Journal of Chongqing University, 2017, 40(12): 1-7. (in Chinese)

(编辑 张 苹)