

基于激光扫描的螺旋输送机焊接质量在线检测

高瑞遥 王丽丽 牛康 周利明 赵博 苑严伟

(中国农业机械化科学研究院土壤植物机器系统技术国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 联合收获机螺旋输送机因缺乏快速有效的在线检测手段导致其加工质量差, 易出现物料堵塞、叶片开焊、叶片与外壳过度磨损等故障。为此, 研究基于激光测距传感器的螺旋输送机焊接质量在线快速检测方法, 设计联合收获机螺旋输送机焊接质量在线检测系统, 通过结构关系和传感器布局, 将主轴径向跳动量、螺旋叶片的径向跳动量以及螺距等关键参数的检测转换为对与之相应的距离信息检测, 实现了多参数的连续、同步测量。试验表明, 与传统人工测量方法需要根据经验选取多个测量位置、进行多次测量、单次测量耗时 15 ~ 20 min 相比, 系统可实现关键参数连续、同步测量, 单次测量时间缩短至 1 min。主轴径向跳动量检测的最大相对偏差为 3.661%, 螺旋叶片径向跳动量检测的最大相对偏差为 2.030%, 螺距的测量标准差为 2.07 mm, 满足检测需求。系统通过对检测数据的分析处理, 实现加工误差的精准定位和 3D 可视化展示, 并根据公差要求对螺旋输送机进行合格性检查评价, 对超限变形进行报警。

关键词: 联合收获机; 螺旋输送机; 激光测距; 焊接质量; 在线检测

中图分类号: S225 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S1-0292-06

Online Detection of Welding Quality for Screw Conveyor of Combine Harvester Based on Laser Scanning

GAO Ruiyao WANG Lili NIU Kang ZHOU Liming ZHAO Bo YUAN Yanwei

(The State Key Laboratory of Soil-Plant-Machine System Technology,
Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The lack of rapid and effective on-line detection means for combine screw conveyor leads to poor machining quality, which leads to material blockage, blade open welding, excessive wear between blade and shell. In order to solve the problem, an on-line rapid detection method based on laser ranging sensor was proposed, a multi-parameter synchronous online detection system for combine screw conveyor was developed, and a detection test bench was designed. Through the structural relationship and sensor layout, the detection of the radial runout of the spindle, the radial runout of the spiral blade and the pitch of the screw were transformed into the detection of the corresponding distance information, which realized the continuous and synchronous measurement of multi-parameters. The experiment showed that compared with the traditional manual measurement method, which needed to select multiple measurement positions according to experience and took 15 ~ 20 minutes for a single measurement, the system can realize continuous and synchronous measurement of key parameters, and the single measurement time was 1 minute. The maximum relative error of spindle radial runout was 3.661%, the relative error of spiral blade radial runout was 2.030%, and the standard deviation of pitch measurement was 2.07 mm, which met the detection requirements. Through the analysis and processing of the test data, the system realized the accurate positioning of machining error and 3D visualization display. According to the tolerance requirements, the screw conveyor was inspected and evaluated for compliance, and the over limit deformation was alarmed.

Key words: combine harvester; screw conveyor; laser ranging; welding quality; online detection

收稿日期: 2020-08-01 修回日期: 2020-09-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700205)

作者简介: 高瑞遥(1996—), 女, 硕士生, 主要从事自动检测与控制技术研究, E-mail: gaoruiyao96@163.com

通信作者: 苑严伟(1980—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事精准农业与农机测控技术研究, E-mail: yyw215@163.com

0 引言

随着国内农业装备设计水平的提升,加工制造水平日渐成为制约国产农机品质提高的主要因素,快速有效的质量检测手段是提高制造水平的基础^[1-4]。但是,目前国内农业装备核心部件的在线检测手段存在落后或缺失的问题^[5-7]。虽然在航空航天、汽车制造、工程机械等其他高端装备领域已有一些相对成熟的质量检测方法及设备投入应用^[8-9],但考虑到农业装备特点和投入产出率,这些检测方法和装备不能直接应用^[10-11]。因此,结合农机生产制造的特点,开发快速、有效、经济的质量检测系统对农机品质的提升有重要意义。

螺旋输送机由主轴、螺旋叶片和外壳组成,其运动可靠性高,制造成本低,常用作联合收获机的传输装置^[12-13]。螺旋输送机顺畅稳定地传输物料是联合收获机可靠工作的必要基础^[14-15]。螺旋叶片多采用人工焊接,容易出现螺距不均匀、主轴和螺旋叶片径向跳动大等问题^[16-18],导致使用过程中时常发生物料堵塞、螺旋叶片开焊、螺旋叶片与外壳过度磨损等故障^[19-23]。

主轴径向跳动量、螺旋叶片径向跳动量、螺距是评价螺旋输送机焊接质量的重要指标。目前这些参数的检查仍采用传统的人工测量方法,测量人员凭借经验选取多个测量点,使用卡尺测量螺距,使用千分表测量主轴的端面跳动,使用止通规和千分表测量螺旋叶片与外壳的间隙。单次测量时间一般在 15~20 min,并由于测点数量有限,检测精度低,无法满足螺旋叶片连续测量的需求^[24-25]。

本文研究一种联合收获机螺旋输送机主轴径向跳动量、螺旋叶片径向跳动量以及螺距误差的快速检测方法,设计基于激光扫描的螺旋输送机焊接质量在线检测系统,以实现多参数的同步测量。

1 螺旋输送机焊接质量在线检测系统设计

1.1 系统平台搭建

系统平台由试验台、检测装置、控制显示装置组成。如图 1 所示,滑轨固定在螺旋输送器的侧方,并与其主轴轴线保持平行。螺旋叶片与导向顶针接触,以保证在其推动下滑台可沿滑轨移动。检测装置安装在滑台上,主要包括仿形装置和传感器。仿形装置 1 和 2 分别与主轴和螺旋叶片相切,激光测距传感器 1 和 2 向仿形装置 1 和 2 发射信号,获得径向距离信息。拉绳位移传感器主体固定在试验台的右侧,拉绳端在固定滑台上,以便记录滑台位移。控制装置主要由工控机、驱动电机组成。工控

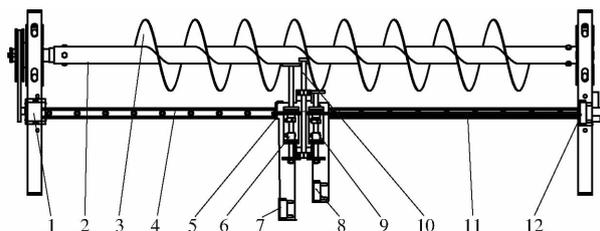


图 1 系统平台示意图

Fig. 1 Schematic of test bench

1. 电机 2. 螺旋输送机主轴 3. 螺旋叶片 4. 滑轨 5. 拉绳固定端 6. 仿形装置 1 7. 激光测距传感器 1 8. 激光测距传感器 2 9. 仿形装置 2 10. 导向顶针 11. 拉绳 12. 拉绳位移传感器

机与运动控制卡通信,控制伺服电机驱动螺旋输送机转动。工控机采集激光测距传感器得到的距离信息,进行数据处理和分析计算,得出螺旋输送机主轴径向跳动量、叶片径向跳动量以及螺距误差,并进行合格性评价,对超过误差允许的变形进行报警,提醒操作人员校正。

1.2 系统软件设计

在 LabVIEW 2015 环境下,依据检测系统流程(图 2),设计在线检测系统软件。

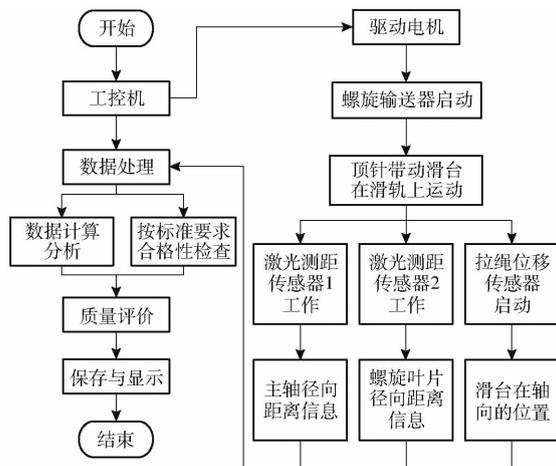


图 2 检测系统流程图

Fig. 2 Flow chart of diagnosis system

软件界面设计如图 3 所示,主要包含参数设置、数据采集、处理计算、异常提示、曲线图形显示以及结果显示和保存等模块。

系统可以对采集的数据进行数据处理和分析运算,得出被测件的关键参数,并依据标准 JB/T 7679—2008 中规定的公差要求进行合格性检查评价,当出现超限变形时,超限报警指示灯亮起,提醒使用者对被测件进行复检和再加工。

2 检测系统工作原理

系统根据螺旋输送机与试验台的结构特点,合理分布传感器,将关键参数的测量转换为距离信息的测量。

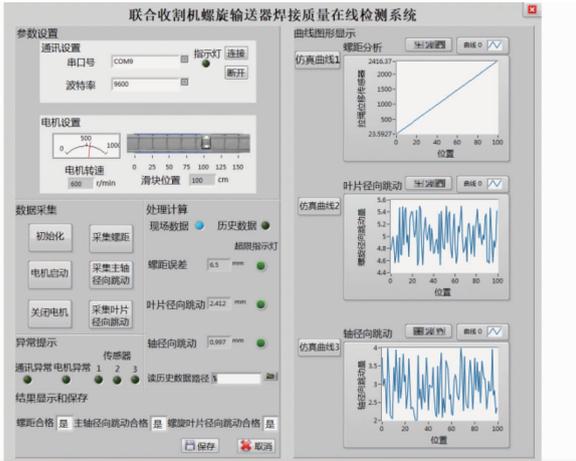


图3 系统界面设计

Fig. 3 Design of interface for system

当螺旋输送机匀速转动时,螺旋叶片推动导向顶针,使得滑台可以在滑轨上沿轴向跟随螺旋输送机同步运动,此过程与物料传输过程相似。同时,仿形装置1、2分别将主轴外轮廓信息、螺旋叶片外轮廓信息转换为对应的径向距离信息,并分别由激光测距传感器1、2采集。滑台的位置由拉绳位移传感器负责记录。

2.1 径向跳动测量方法

工控机采集从激光传感器1和2获得的距离信息,并从中还原出主轴和螺旋叶片的外轮廓信息,计算对应的径向跳动量。

主轴径向跳动的具体计算方法:激光传感器1与螺旋输送机主轴中心线的距离为 L_1 。仿形装置1的长度为 d_1 。激光测距传感器1在第 i 个采样点采集的数据为 A_i ($i=1, 2, \dots, n$; $n=t_1f$, t_1 为试验时间, f 为采样频率),则主轴偏移量为

$$M_{1i} = L_1 - d_1 - A_i - \frac{D_1}{2} \quad (1)$$

式中 D_1 ——主轴直径设计值,mm

主轴径向全跳动量为

$$e_1 = M_{1\max} - M_{1\min} \quad (2)$$

主轴径向跳动变异系数为

$$C_{v1} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_{1i} - \bar{M}_{1i})^2} \times 100\% \quad (3)$$

式中 \bar{M}_{1i} —— M_{1i} 均值

变异系数 C_{v1} 越小,说明主轴偏移量的离散程度越小,其整体的端面跳动量越小。

同理,螺旋叶片径向跳动量的计算方法为:激光测距传感器2到主轴中心线的距离为 L_2 。仿形装置2的长为 d_2 。激光测距传感器2在第 i 个采样点采集的数据为 B_i ($i=1, 2, \dots, n$),则螺旋叶片偏移量为

$$M_{2i} = L_2 - d_2 - B_i - \frac{D_1 + D_2}{2} \quad (4)$$

式中 D_2 ——螺旋叶片直径设计值,mm

螺旋叶片径向全跳动量为

$$e_2 = M_{2\max} - M_{2\min} \quad (5)$$

螺旋叶片径向跳动变异系数为

$$C_{v2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_{2i} - \bar{M}_{2i})^2} \times 100\% \quad (6)$$

式中 \bar{M}_{2i} —— M_{2i} 均值

变异系数 C_{v2} 越小,说明螺旋叶片偏移量的离散程度越小,其整体的端面跳动就越小。

2.2 螺距测量方法

理想情况下,螺旋输送机螺旋叶片的螺距均匀一致,螺旋输送机轴每旋转一周,其所传输的物料在螺旋叶片的推动下沿着轴的方向移动一个螺距。

已知伺服电机驱动螺旋输送机以转速 N_0 匀速转动。螺距计算式为

$$P_j = S(i) - S\left(i - \frac{60}{N_0}f\right) \quad \left(i \geq \frac{60}{N_0}f + 1\right) \quad (7)$$

式中 P_j ——第 j 个计算的螺距,mm

$S(i)$ ——在第 i 个采样点时滑台的位置,mm

3 试验与分析

试验台实物如图4所示。被测量的螺旋输送器的参数设计值:螺距为145 mm,主轴直径为48 mm,螺旋叶片直径为200 mm。



图4 试验台实物图

Fig. 4 Physical picture of test bench

3.1 试验过程与数据

仿形装置1(图1)被一对轴承座独立支撑,调节其与导向顶针的相对位置,可控制其与主轴接触的位置,保证其在试验过程中不与焊缝相接触,避免焊缝对主轴径向跳动量测量的影响。

启动系统,控制电机使螺旋输送机开始匀速转动,导向顶针推着滑台跟随螺旋输送机沿轴向运动,3个传感器同时工作,实现了主轴径向跳动量、螺旋叶片径向跳动量、螺距这3个关键参数的连续、同步测量。

激光测距传感器 1 采集主轴径向的距离信息, 根据式(1)、(2)可计算主轴径向跳动量。并与人工千分表测量的主轴径向跳动量相比较, 结果如表 1 所示。

表 1 螺旋输送机主轴径向跳动量

Tab.1 Radial runout of main shaft of screw conveyor

参数	系统测量值/	千分表测量	绝对误差/	相对误差/
	mm	值/mm	mm	%
数值	0.934	0.955	-0.021	2.198

激光测距传感器 2 采集螺旋叶片径向的距离信息, 根据式(4)、(5)可计算螺旋叶片径向跳动量。并与人工测量的叶片径向跳动量相比较, 结果如表 2 所示。

表 2 螺旋输送机螺旋叶片径向跳动量

Tab.2 Radial runout of spiral blade

参数	系统测量	人工测量	绝对误差/	相对误差/
	值/mm	值/mm	mm	%
数值	2.334	2.395	-0.061	2.546

拉绳位移传感器记录滑台的位移。系统测量和人工测量结果如表 3 所示。

表 3 螺旋输送机螺距测量值

Tab.3 Measured value of screw pitch

测量位置	人工测量值/mm	螺旋输送机转动周数	螺距/mm
1	146.0	1	145.76
2	143.0	2	143.52
3	146.5	3	147.09
4	149.0	4	148.75
5	142.5	5	143.04
6	145.0	6	144.01
7	144.0	7	144.52
标准差	2.25		2.07

注:人工测量时,在被测量螺旋输送机上选取 7 段螺距进行测量。

对同一螺旋输送机,在相同的转速和采样频率下进行 10 次测量,每次测量时间为 1 min,每次测量有 2 组数据,每组有 600 个数据,通过计算得出径向跳动量如表 4 所示。

3.2 试验结果分析

根据式(1)可知,除 A_i 外其余均为常量,故可通过分析 A_i 的变化来分析主轴偏移量的波动。激光测距传感器 1 测量值如图 5 所示。

根据系统设计,激光测距传感器 1 采集数据的理论标准值为 247 mm。如图 5 所示,测量数据时散落在 247 mm 附近,最大值为 247.468 mm,最小值为 246.521 mm,偏差不得超过 ± 0.5 mm。根据式(3)计算出主轴偏移量变异系数为 0.092 9%,符合标准

JB/T 7679—2008 中规定的公差要求。

同理,根据式(4)可知,螺旋叶片偏移量波动可通过 B_i 进行分析,激光测距传感器 2 测量值如图 6 所示。

表 4 径向跳动重复性试验结果

Tab.4 Radial runout repeatability experiment

试验 编号	主轴		叶片	
	跳动量/	相对偏差/	跳动量/	相对偏差/
	mm	%	mm	%
1	0.991	3.661	2.324	1.692
2	0.972	1.674	2.373	0.381
3	0.979	2.406	2.371	0.296
4	0.959	0.314	2.366	0.085
5	0.954	0.209	2.335	1.227
6	0.947	0.941	2.412	2.030
7	0.938	1.883	2.351	0.550
8	0.943	1.360	2.381	0.719
9	0.946	1.046	2.391	1.142
10	0.932	2.510	2.334	1.269
平均值	0.956		2.364	

注:相对偏差为单次测定值和平均值的差值占平均值的百分比。

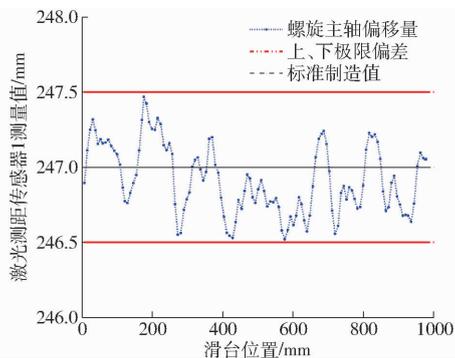


图 5 激光测距传感器 1 测量数据

Fig.5 Data of laser ranging sensor 1

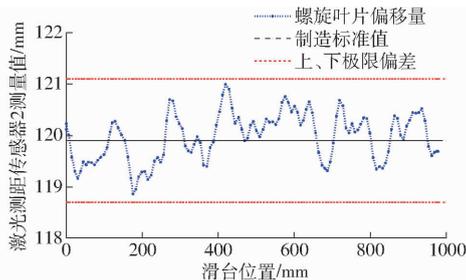


图 6 激光测距传感器 2 测量数据

Fig.6 Data of laser ranging sensor 2

激光测距传感器 2 的理论标准值为 120 mm, 图 6 中的数据散落在 120 mm 附近,其最大值为 120.993 mm,最小值为 118.862 mm,偏差不得超过 ± 1.2 mm,根据式(6)计算得出螺旋叶片偏移量变异系数为 0.385%。符合标准 JB/T 7679—2008 所规定的公差要求。

为直观展示螺旋叶片的径向跳动,在螺旋输送机三维模型的基础上得到螺旋叶片的外轮廓的散点

分布情况,如图7所示。

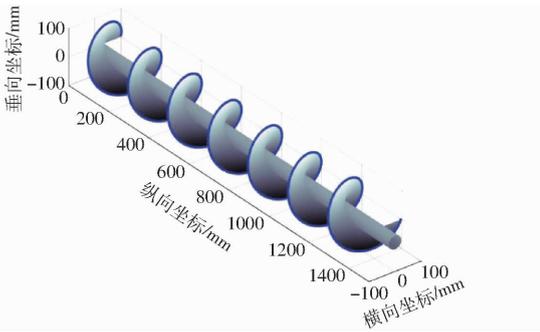


图7 螺旋叶片外轮廓散点分布图

Fig.7 Scatter plot of data of helical blade

如图7所示,螺旋叶片外轮廓的散点均为蓝色,表示径向跳动的误差全部在允许范围内。若径向跳动超出误差允许范围,则小于最小允许范围的部分用黄色表示,大于最大允许范围用红色表示(图8),方便系统使用者进行复检修正。

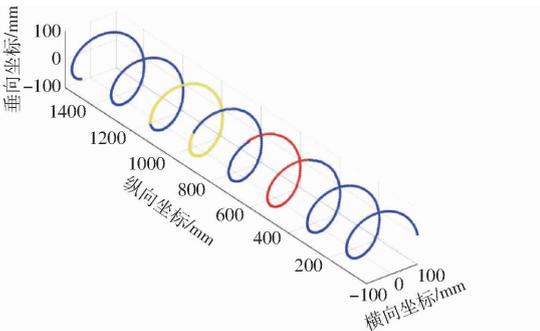


图8 超限示意图

Fig.8 Overlimit diagram

表4为10次径向跳动重复性试验的数据,设10次试验所得的主轴径向跳动量和螺旋叶片径向跳动量分别为 e_{1k} 和 e_{2k} ($k=1,2,\dots,10$)。

则主轴径向跳动量重复性试验标准差为

$$\sigma_{e1} = \sqrt{\frac{1}{10} \sum_{k=1}^{10} (e_{1k} - \bar{e}_1)^2} \quad (8)$$

式中 \bar{e}_1 ——10次试验主轴径向跳动量平均值,mm

螺旋叶片径向跳动量重复性试验标准差为

$$\sigma_{e2} = \sqrt{\frac{1}{10} \sum_{k=1}^{10} (e_{2k} - \bar{e}_2)^2} \quad (9)$$

式中 \bar{e}_2 ——10次试验螺旋叶片径向跳动量平均值,mm

由表4可知,主轴径向跳动量的最大相对偏差为3.661%,其标准差 σ_{e1} 为0.018mm,螺旋叶片跳

动量的最大相对偏差为2.030%,其标准差为 σ_{e2} 为0.026mm。重复性试验结果表明,系统比较稳定,满足检测要求。

理想情况下,螺距均匀一致,所以当螺旋输送机匀速转动时,滑块在滑轨的位置应该是线性增加。

以拉绳位移传感器的采样点序号为横坐标,采样点序号对应的拉绳位移传感器测量值为纵坐标,测量数据如图9所示。

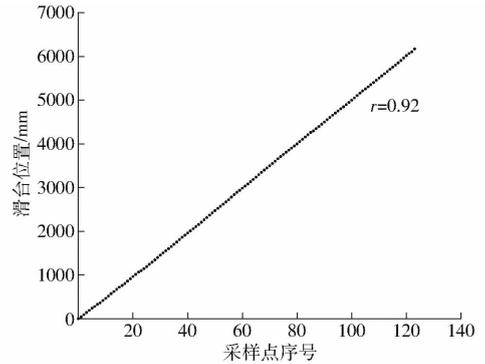


图9 拉绳位移传感器测量数据

Fig.9 Data of cable displacement sensor

由图9可知,滑台位置与采样点序号的相关系数为0.92,说明被测的螺旋输送器的螺距比较均匀。结合表3中的数据,系统测量的标准差小于人工测量的标准差,表明系统相对稳定且符合JB/T 7679—2008所规定的公差要求。

4 结论

(1)设计了基于激光扫描的螺旋输送机焊接质量在线检测系统。通过搭建检测试验台,实现了主轴径向跳动量、螺旋叶片径向跳动量以及螺距等关键参数的在线检测。通过对数据进行符合性检查和可视化,实现了变形定位和超限报警。

(2)对检测系统进行了试验验证,试验结果表明,系统对螺距测量准确稳定,对主轴和螺旋叶片的径向跳动量最大相对偏差分别为3.661%、2.030%,均在合理范围内,满足检测精度需求。

(3)实现了螺旋输送机关键参数的连续、同步测量。一方面摆脱了传统人工测量方法因测量位置不同和读数误差对测量结果造成的影响;另一方面检测时间从传统方法的15~20min缩短至1min,检测效率提高15倍以上。

参 考 文 献

- [1] 邹媛媛,赵明扬.激光拼焊焊缝质量自动检测技术研究及应用现状[J].焊接技术,2014,43(9):63-66.
ZOU Yuanyuan, ZHAO Mingyang. Research and current application situation on quality inspection of laser welding of tailored blanks [J]. Welding Technology, 2014,43(9):63-66. (in Chinese)
- [2] WANG Y F, CAO Y L, CHEN X L. Development of electrical runout online measurement system based on eddy current technique and laser triangulation[J]. Sensors & Transducers, 2013, 154(7): 158-164.

- [3] ZHAO Jianlong, SANG Yong, DUAN Fuhai, et al. Improvement of measurement resolution of a mechanical touch-trigger probe method for static radial runout measurements based on digital image correlation [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 105(7-8):3127-3136.
- [4] 张亚伟,王冬,陈度,等. 大型收获机械发动机孔组位置度误差在线检测方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(增刊):71-78. ZHANG Yawei, WANG Dong, CHEN Du, et al. Online method for large-scale harvester engine punch combination position accuracy measurement [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(Supp.):71-78. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s012&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.012. (in Chinese)
- [5] LI Y M, SUN P. A study on noise test and control of combine harvester[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 971-973:324-328.
- [6] SUN D, CHEN D, WANG S, et al. Development on electrical system performance test stand for combine harvester[J]. *FAC Proceedings Volumes*, 2018, 51(17):363-367.
- [7] 王卓,车东,白晓平,等. 玉米联合收获机清选损失监测装置设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(12):100-108. WANG Zhuo, CHE Dong, BAI Xiaoping, et al. Improvement and experiment of cleaning loss rate monitoring device for corn combine harvester[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(12):100-108. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181212&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.012. (in Chinese)
- [8] 宋起,单东日. 大型轴类工件径向圆跳动非接触检测方法的研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2015(8):74-78. SONG Qi, SHAN Dongri. Research on non-contact measurement method of the radial circular run-out error of the large-size axes [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2015(8):74-78. (in Chinese)
- [9] 袁小江. 曲轴主轴同轴度与径向圆跳动的转换测量[J]. *机械设计与研究*, 2010, 26(5):98-100. YUAN Xiaojiang. Research on the crankshaft concentricity and radial run out measurement conversion [J]. *Machine Design and Research*, 2010, 26(5):98-100. (in Chinese)
- [10] 陈虹,朱颖. 高速旋转主轴径向跳动非接触测量[J]. *机电工程技术*, 2013, 42(1):72-75. CHEN Hong, ZHU Ying. High-speed rotating spindle non-contact measurement radial directio runout value of research[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2013, 42(1):72-75. (in Chinese)
- [11] 王伟,于洋,陈淑萍,等. 一种基于激光测量轴类工件跳动量的算法[J]. *工程与试验*, 2014, 54(2):72-75. WANG Wei, YU Yang, CHEN Shuping, et al. Algorithm for measuring runout of axial workspace based on laser [J]. *Engineering & Test*, 2014, 54(2):72-75. (in Chinese)
- [12] 张捷美. 螺旋输送机技术综述[J]. *科技展望*, 2016, 26(14):168.
- [13] 王继伟,于文娟,姜元志,等. 螺旋输送器的类型及输送机理分析[J]. *粮油加工*, 2010(7):158-160.
- [14] 殷蓉,车晨曦. 螺旋输送机构件和特点分析[J]. *南方农机*, 2017, 48(7):38, 40.
- [15] 乌兰图雅,王春光. 螺旋输送装置的研究现状及未来发展[J]. *农机化研究*, 2014, 36(11):244-248.
- [16] 商兴国,王杰. 螺旋输送机叶片磨损情况分析研究[J]. *煤矿机械*, 2011, 32(4):79-80. SHANG Xingguo, WANG Jie. Research on wear of screw conveyeri screw vane [J]. *Coal Mine Machinery*, 2011, 32(4):79-80. (in Chinese)
- [17] 张森林,张玉香,陈耀春. 螺旋叶片成形新工艺及原理[J]. *矿业装备*, 2014(12):113.
- [18] 邹剑平,苏焕欧,曾庆丰. 定量螺旋输送机分析与改进[J]. *机电信息*, 2013(12):99-100.
- [19] 王东霞. 输送小麦卧式螺旋输送机主要参数的选择和确定[J]. *电子测试*, 2013(21):57-59. WANG Dongxia. Selection and identification of the main parameters of horizontal-type spiral conveyer [J]. *Electronic Test*, 2013(21):57-59. (in Chinese)
- [20] 贾朝斌. 螺旋输送机参数设计及其优化方法研究[D]. 太原:太原理工大学, 2015. JIA Zhaobin. Research the designation of parameters and optimization method for screw conveyer [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [21] 刘海军,孙井坤,郑先哲. 螺旋输送机参数设计系统的开发[J]. *包装工程*, 2012(11):15-17. LIU Haijun, SUN Jingkun, ZHENG Xianzhe. Development of parameter design of screw conveyer [J]. *Packaging Engineering*, 2012(11):15-17. (in Chinese)
- [22] 向冬枝,徐余伟. 螺旋输送机设计参数的选择和确定[J]. *水泥技术*, 2010(1):29-33. XIANG Dongzhi, XU Yuwei. Design parameter selection of spiral conveyer [J]. *Cement Technology*, 2010(1):29-33. (in Chinese)
- [23] 李晓华,牛红宾. 螺旋输送机三维 CAD 参数化设计系统的研制[J]. *煤矿机械*, 2014, 35(1):209-211. LI Xiaohua, NIU Hongbin. Research of 3D CAD parametric design system of screw conveyer [J]. *Coal Mine Machinery*, 2014, 35(1):209-211. (in Chinese)
- [24] 张翠哲. 螺旋输送机螺旋叶片的耐磨堆焊[J]. *中外企业家*, 2015(12):190.
- [25] PEZO L, JOVANOVI A, PEZO M, et al. Modified screw conveyor-mixers-discrete element modeling approach[J]. *Advanced Powder Technology*, 2015, 26(5):1391-1399.