

花生联合收获机秧蔓夹持输送系统载荷谱编制

翟新婷 陈明东

(青岛农业大学机电工程学院, 青岛 266109)

摘要: 花生联合收获机夹持输送系统存在经常堵塞问题,对其液压系统的工作载荷进行研究极为关键。为得到反映花生秧蔓夹持输送系统的典型作业载荷谱,根据多次田间试验结果,选取花生秧蔓夹持输送系统液压马达输出轴转速为 310、360、410 r/min 时的工况,进行系统液压马达田间作业载荷测试试验。针对大量的测试数据,采用转折点提取方式将载荷数据压缩至原来的 1/50 左右;随后利用雨流计数将时域内的载荷转换为雨流域内的均值、幅值载荷;再根据极大似然参数估计法分别对均值、幅值载荷数据进行统计分析。基于拟合检验结果分析得到,当花生秧蔓夹持输送系统液压马达输出轴转速为 410 r/min 时,系统压力载荷均值和幅值分别满足分布均值为 7.28、标准差为 0.81 的正态分布以及阈值为 0.32、尺度参数为 0.30、形状参数为 0.90 的三参数威布尔分布要求,可作为系统载荷谱编制的典型田间作业工况。由于室内架架试验以及花生秧蔓夹持输送系统机械零部件测试及产品结构优化设计的需要,将系统液压马达的压力信号转换为扭矩信号。根据均值、幅值的独立性,建立典型作业工况载荷的联合概率密度函数,采用载荷外推法得到液压马达输出轴扭矩的二维载荷谱,同时,结合实际试验加载的需求,进行二维载荷谱的降维操作,根据变均值法得到一维扭矩程序谱。

关键词: 花生联合收获机; 夹持输送系统; 液压马达; 载荷谱; 雨流计数; 参数估计

中图分类号: S225.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S1-0261-06

Load Spectrum Compiling of Peanut Combine Harvester's Seedling Clamping and Conveying System

ZHAI Xinting CHEN Mingdong

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

Abstract: The blockage problem often occurs in the clamping and conveying system of the peanut combine harvester, and it is extremely critical to do research on the working load of its hydraulic system. The working loads of the hydraulic motor of the driving system of the clamping and transportation of peanut seedlings were measured to obtain the typical load spectrum. According to the motor analysis of a large amount of test pressure data, three rational speeds of the output shaft, respectively, 310 r/min, 360 r/min and 410 r/min were chosen. For a large number of the test data, the turning point extraction method was used to compress the load data to about 1/50 of the original. Then the load in the time domain can be transformed into range and mean load in the rainflow domain through the rainflow counting method. And the maximum likelihood parameter estimation method was employed during the statistical analysis. The rotational speed of motor of 410 r/min was determined as the typical working condition of the system according to the fitting test result. Because the mean and range load of the system pressure met the requirements of a normal distribution with a mean of 7.28, a standard deviation of 0.81, and a three-parameter Weibull distribution with a threshold of 0.32, a scale parameter of 0.30, and a shape parameter of 0.90. Due to the requirements of indoor bench test, mechanical parts testing of peanut seedling spreading conveyor system and the structure optimization design, the pressure signal of the system hydraulic motor was converted into torque signal. Then, the joint probability density function of the mean and range load was established based on the independence of mean and range. And on this basis, the two dimensional torque spectrum of the hydraulic motor output shaft was obtained by the load

收稿日期: 2020-08-02 修回日期: 2020-09-10

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2017MEE058)

作者简介: 翟新婷(1989—),女,讲师,博士,主要从事智能农业装备研究,E-mail: zxt00900@sina.com

通信作者: 陈明东(1978—),男,副教授,博士,主要从事智能农业装备研究,E-mail: mingdong3202@126.com

extrapolation method. Finally, combined with the actual test loading requirements, dimensionality reduction operation was performed on the two-dimensional load spectrum. And the one-dimensional program spectrum was transformed from the two-dimensional according to the variable mean method for the convenience of actual load test. The application of statistical analysis method of compiling of one-dimensional program would realize the reproduction of field operation load and provide a reliable data foundation for the bench test for indoor mechanical parts of peanut combine harvester.

Key words: peanut combine harvester; clamping and conveying system; hydraulic motor; load spectrum; rainflow counting; parameter estimation

0 引言

花生是我国主要油料和经济作物之一,在油料生产和贸易中仅次于大豆,位于第二位^[1]。随着我国花生种植面积的逐年增加,花生收获机械市场需求量日益增大。

国外花生收获机械的研制起步较早,受作物品种和地域限制,国外花生的种植方式多为一年一作和大地块作业为主,多采用两段式收获法,主要有四行自走式花生联合收获机、六行牵引式花生联合收获机以及牵引式联合收获机^[5]。国内的花生收获机械研制起步较晚,且以直立型花生品种的收获为主。胡志超等^[7]设计了半喂入自走式花生联合收获机,果实损失率为2.3%。尚书旗等^[8]设计了一种全新的挖拔组合装置,并利用甩捋式工作原理提高了鲜湿花生的摘净率。王东伟等^[9]设计了一种螺旋圆弧面板式摘果机构,使摘果率提升至99.25%。刘洋成等^[10]设计的弹齿式捡拾装置,使果实的破碎率降低到了1.3%。杨然兵等^[11]设计的花生联合收获机复收装置,将平均漏果率降为0.12%。上述研究主要集中于花生联合收获机整机及关键部件的结构设计,机械传动部件较多、结构复杂,当产品运行出现故障时,维修存在困难,且机械运行速度单一,各工作部件传动比恒定。然而每株花生秧在田间的长势不同,花生联合收获机工作过程中,夹持输送系统经常出现堵塞现象,导致整机无法工作,严重影响工作效率。与机械传动相比,液压传动技术能够实现负载反馈、速度和方向控制,能够对花生秧蔓夹持输送系统负载反馈进行控制。由于田间载荷具有随机性的特点,很难实现花生秧蔓夹持输送系统的有效控制,因此获取能够反映实际田间工况的作业载荷,展开室内田间试验载荷的复现,将有助于该系统功能结构的优化设计^[12]。

针对花生联合收获机夹持输送系统存在经常堵塞问题,本文基于液压调速阀-液压马达秧蔓夹持输送系统,结合统计分析理论,对花生秧蔓夹持输送系统的载荷特性进行分析,确定其田间作业液压马达输出轴的典型转速工况,并编制马达输出轴扭矩一

维程序谱,从而在室内完成田间真实作业载荷的复现,为后续花生联合收获机室内机械零部件台架试验提供加载依据^[13-15]。

1 田间载荷测试

试验选取夏花生(白沙1016)为试验对象,基于液压调速阀-液压马达秧蔓夹持输送系统,开展不同花生秧蔓夹持输送速度工况下系统的田间作业载荷特性分析,试验机前进速度为2.6 km/h,每垄试验长度为125 m。图1为花生联合收获机与试验现场图。



图1 花生联合收获机与试验现场图

Fig.1 Peanut combine harvester and test site diagram

采用液压马达驱动花生秧蔓夹持链条机构,其马达输出轴转速变化将决定单位时间内进入夹持链条的花生秧蔓量,即花生联合收获机前进速度一定的情况下,液压马达驱动夹持链条速度越快,单位时间内进入夹持链条的秧蔓量越少。反之,液压马达驱动夹持链条速度越慢,单位时间内进入夹持链条的秧蔓量越大。本文认为花生联合收获机直线行走的作业过程满足平稳性假设,采用额定压力为16 MPa的液压马达,其出口连接液压油箱,压力近似为零。马达入口与液压调速阀相连,两者之间安装压力传感器进行系统工作压力数据采集,在马达输出轴端部安装转速传感器,其过程中采用西门子37-200系列控制器实时采集系统工作压力、流量以及转速等数据,并通过调节液压调速阀阀口开度调节流量,从而实现花生秧蔓夹持输送链条的速度调节。图2为测试马达及测试系统实物图。

2 基于统计分析的典型工况确定

为更好地分析花生秧蔓夹持输送系统田间作业时的载荷特性,对不同秧蔓夹持输送速度工况进行

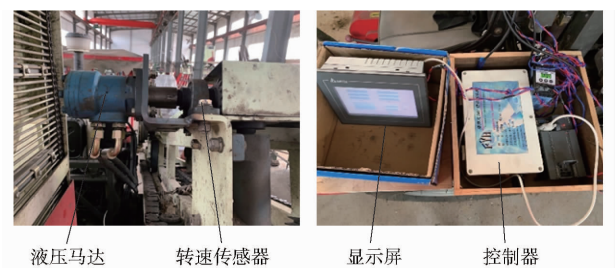


图2 测试马达及测试系统实物图

了田间试验。通过大量试验,确定3种代表性的马达输出轴转速分别为310、360、410 r/min,这3种转速工况对应的试验表现为:严重卡秧、略卡秧以及不卡秧。针对各种工况下测得的压力数据,在样本量

充足的前提下,任选一组进行分析。

在相同田间工作长度下,3种转速测得的原始载荷数据分别为65 530、51 335、47 945个,经过转折点提取后^[16],减少至950、944、998个数据点,在保留原始载荷峰谷点的基础上,数据量压缩至原来的1/50左右,大大缩减了后续载荷统计分析时间。用雨流计数法^[17]统计马达工作压力峰值提取后的载荷时间历程,将时域载荷数据转换为雨流域内的均值、幅值载荷数据,得到如图3所示的3个载荷均值、幅值频次关系,能够明显看出随着转速的增加,载荷矩阵的波峰中心向均值变小的方向移动。

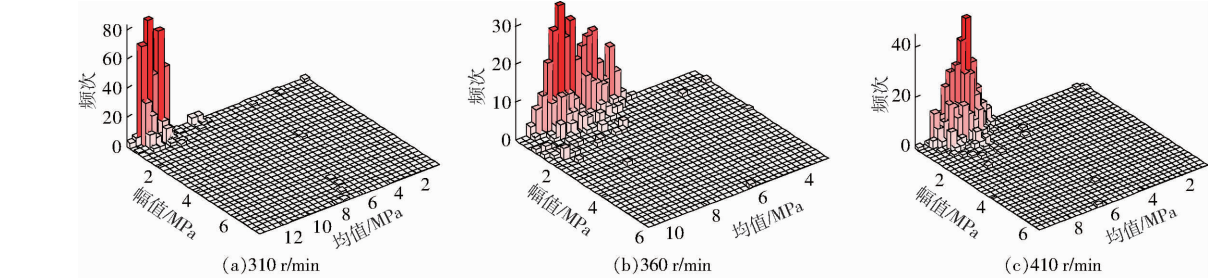


图3 不同马达输出轴转速下的雨流矩阵分布直方图

Fig.3 Histograms of rainflow matrix distribution at different rotational speeds of motor output shaft

均值、幅值的载荷分布特点分析也是判断载荷特性的方式之一^[18]。结合图3的雨流计数结果,基于统计学分布规律,采用正态分布和三参数威布尔分布来拟合3种作业工况下均值频次和幅值频次关系^[19]。用随机变量 s_m 、 s_a 分别表示载荷均值、幅值, $f(s_m)$ $f(s_a)$ 分别为载荷均值、幅值的概率密度,则

$$f(s_m) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(s_m-\mu)^2}{2\sigma^2}} \tag{1}$$

$$f(s_a) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{s_a-u}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{s_a-u}{\alpha}\right)^{\beta}} \tag{2}$$

式中 μ ——分布均值 σ ——标准差
 β ——威布尔分布的形状参数
 α ——威布尔分布的尺度参数
 u ——威布尔分布的位置参数,即阈值,根据最小载荷值确定

根据极大似然估计法^[20]得到表1的参数值。

表1 均值、幅值参数估计值

Tab.1 Parameter estimation of mean and range load					
转速/ (r·min ⁻¹)	s_m		s_a		
	μ	σ	u	α	β
310	11.65	1.48	0.37	0.22	0.78
360	8.08	1.03	0.31	0.27	0.83
410	7.28	0.81	0.32	0.30	0.90

基于参数估计结果,用正态分布对均值函数进行拟合,用三参数威布尔分布对幅值进行拟合,得到载荷数据的分布函数拟合直方图及其对应的概率检验(Probability – probability, P – P)图^[21],见图4、5,图4中直方图左侧为P – P图。由于在各数值处可通过拟合曲线与直方图之间的贴合程度来判断拟合效果,但整体数据的拟合效果可通过P – P图来协助判断,在该检验图中虚线为检验线,通过判断各检验观测数据在检验线附近的分布情况来判断拟合效果。

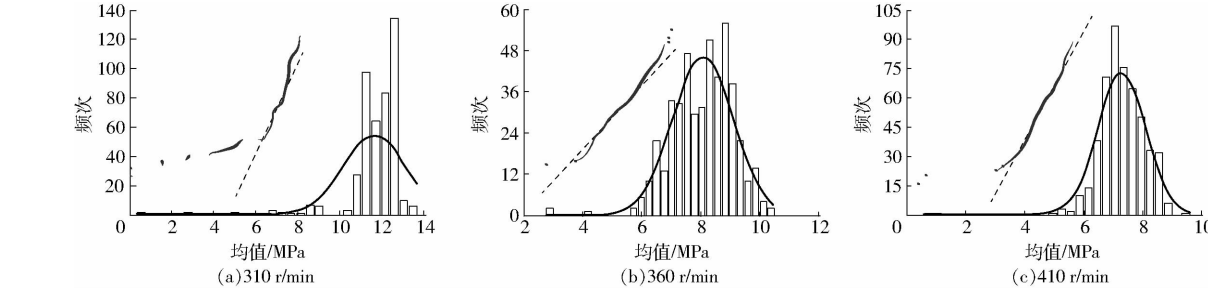


图4 载荷均值正态分布拟合直方图及其P – P图

Fig.4 Normal distribution fitting histograms and P – P plot of mean load

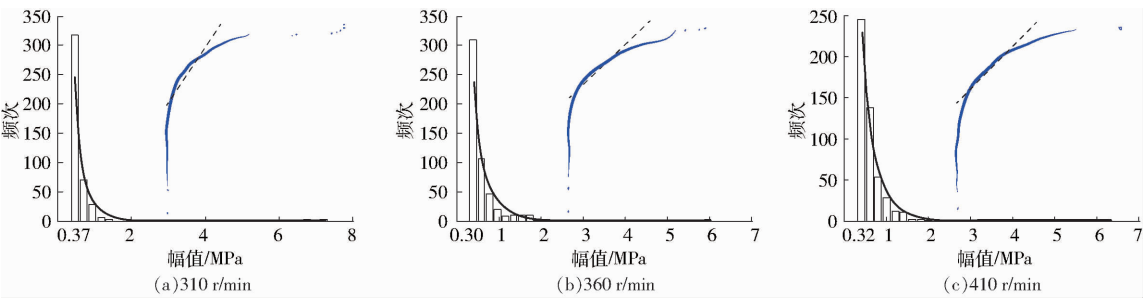


图5 载荷幅值三参数威布尔分布拟合直方图及其P-P图

Fig.5 Three-parameter Weibull distribution fitting histograms and P-P plot of range load

图4a中,载荷均值的波峰在11.5 MPa附近,整体分布主要集中在11~13 MPa之间,而此范围外的载荷频次骤减,对应的拟合曲线在任一数值的直方图处未出现贴合现象。图4b中,其载荷均值的波峰减小为8 MPa,且曲线尾部在11.5 MPa处不为0,直方图分布与拟合的正态分布曲线很接近,但中间有明显凹坑。图4c中,载荷均值的波峰继续减小,曲线尾部在11.5 MPa处趋近于0,且该曲线与直方图在各数值处拟合较好。同时根据对应的P-P图来判断各曲线的整体拟合效果,当转速为310 r/min时,有较多的数据分布远离检验线;当转速为360 r/min时,观测数据在检验线附近波动;当转速为410 r/min时,对应的观测数据分布更贴近检验线。同理观察图5,各载荷幅值直方图差别不大,从贴合程度来看,3种载荷对应的直方图与其拟合三参数威布尔曲线在各数值处均能较好的拟合。再对比P-P图,在检验线的两端均出现观测数据远离的现象,但在中间段,图5c则完全重合。

结合田间试验结果以及上述均值、幅值的分布直方图数据,可为该次试验的代表性工况进行指标量化,严重卡秧工况其载荷均值分布在11.5 MPa附近;略卡秧工况,其载荷均值分布在8 MPa附近,且存在少量载荷大于11.5 MPa;而不卡秧的工况,均值小于8 MPa,且无大于11.5 MPa的载荷。结合载荷统计学规律并综合上述载荷特性分析结果,当夹持链的运转速度为410 r/min时,其载荷分布状况更符合统计学分布规律,即其均值服从正态分布,幅值满足三参数威布尔分布的要求。因此,选取马达输出轴的转速为410 r/min,即不卡秧工况作为该试验收获机液压系统的典型工况,以开展后续的载荷谱编制工作,保证秧蔓夹持输送系统的顺利工作,同时满足田间试验效果的最终要求。

3 马达轴扭矩载荷谱编制

在田间试验测试过程中,测得的是液压马达进出口压力信号,而室内台架试验时,通常以输入液压马达扭矩信号来开展花生秧蔓夹持输送系统机械零

部件测试及产品结构优化设计。因此,将压力载荷转换为扭矩载荷为

T = PV\eta / (2\pi) \tag{3}

式中 T——扭矩,N·m
P——液压马达进出口压力差,MPa
V——排量,mL/r,本试验为定量马达,取50 mL/r
 η ——液压马达工作效率,取0.9

3.1 均幅值载荷独立性检验

为了获得均值、幅值载荷的外推极值和外推频次,需要先根据Fisher定理对载荷的均值、幅值的独立性进行检验。若均值、幅值相互独立,则近似服从自由度为(r-1)(l-1)的卡方分布^[22]。

\chi^2 = k \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^l \frac{\left(m_{ij} - \frac{m_i m_j}{k}\right)^2}{m_i m_j} \tag{4}

式中 k——各作业段样本长度
r、l——幅值、均值划分的等级数,构成l×r阶矩阵,即雨流矩阵
m_i——幅值在第i级的频次
m_j——均值在第j级的频次
m_{ij}——载荷循环落在第i级幅值、第j级均值的频次

本文将扭矩载荷的均值、幅值划分为32级,近似得到 χ^2 分布0.05的上分位点数据为1 034。因此根据式(4)计算得到 χ^2 小于1 034,可以认为在置信度水平为0.95时,该扭矩载荷的均值、幅值相互独立。因此,相互独立的条件下,均值、幅值载荷的联合分布函数即为二者各自分布函数的乘积。

3.2 均值、幅值联合概率密度函数

采用正态分布和三参数威布尔分布来拟合均值频次和幅值频次关系得到,均值载荷中 σ 为9.15、 μ 为77.68,幅值载荷中, β 为0.741 8、 α 为2.096 4、 u 为4.82。由于二者相互独立,则均值、幅值的联合概率密度函数表达式为

f(s_a, s_m) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{s_a - u}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{s_a - u}{\alpha}\right)^\beta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(s_m - \mu)^2}{2\sigma^2}} \tag{5}

3.3 二维载荷谱外推

由于实际载荷测试只采集垄长 125 m 的数据，很难反映全寿命周期中可能出现的载荷历程，基于统计学相关知识，认为 10^6 次循环能够覆盖最严重的情况在内的全部载荷，因此将载荷累积频次进行扩展^[23]。

$$N'_i/N_i = 10^6/N$$

(6)

式中 N ——载荷总循环频次
 N_i ——测试的载荷频次
 N'_i ——扩展后的载荷频次

随后计算均值、幅值载荷的极值，即求均值、幅值的最大值。根据载荷概率密度函数以及极值发生

概率 Q ($1/10^6$)，计算得到均值、幅值的极值为

$$Q = \int_{s_{me}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(s_m-\mu)^2}{2\sigma^2}} ds_m$$

(7)

$$Q = \int_{s_{ae}}^{\infty} \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{s_a-u}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{s_a-u}{\alpha}\right)^{\beta}} ds_a$$

(8)

式中 s_{me} 、 s_{ae} ——概率为 Q 时，均值、幅值对应的极大值

根据均值、幅值的极大值，用等间隔法对均值进行划分，不等间隔法对幅值进行划分^[24]，各分为 8 级。再根据均值、幅值的联合概率密度函数，可得到对应均值、幅值载荷的循环频次，形成二维载荷谱，见表 2。

表 2 二维载荷谱

Tab.2 Two-dimensional load spectrum

均值/(N·m)	幅值/(N·m)							
	77.05	67.42	57.79	48.16	38.53	28.89	19.26	9.63
121.17	0	0	0	0	0	3	32	189
109.79	0	0	1	4	21	150	1 635	9 729
98.40	0	2	9	44	258	1 846	20 123	119 721
87.02	1	6	27	136	791	5 653	61 618	366 596
75.63	1	4	21	106	619	4 425	48 236	286 979
64.25	0	1	4	21	123	880	9 590	57 058
52.86	0	0	0	1	6	43	468	2 782
41.48	0	0	0	0	0	0	5	32

3.4 一维程序谱

二维载荷谱是关于均值、幅值载荷及其作业频次的谱，是最接近真实作业情况的载荷谱，但是在实际台架试验中，由于其均值、幅值的变动使得加载过程繁琐，为简化操作，通常对其进行降维操作，即采用一维程序谱。因此，根据变均值法^[25]，即分段将均值固定，幅值变动的方式，对 3.3 节得到的二维载荷谱进行转换，使其转换为均值固定的一维 8 级程

序谱。具体操作公式为

$$T_i = \frac{\sum_{j=1}^8 T_j n_{ij}}{\sum_{j=1}^8 n_{ij}}$$

(9)

式中 T_i ——第 i 级幅值所对应的平均值
 T_j ——第 j 级均值
 n_{ij} ——第 i 级幅值、第 j 级均值对应的频次
得到的一维 8 级程序谱见表 3。

表 3 一维 8 级程序谱

Tab.3 One-dimensional program loading spectrum of eight levels

	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级	6 级	7 级	8 级
均值/(N·m)	81.33	83.51	83.71	83.41	83.37	83.38	83.37	83.37
幅值/(N·m)	77.05	67.42	57.79	48.16	38.53	28.89	19.26	9.63
频次	2	13	62	312	1 818	13 000	141 707	843 086

4 结论

(1)采用田间试验与测试数据分析结合的方式，提出了以田间作业表现为严重卡秧、略卡秧及不卡秧作为花生秧蔓夹持输送系统的代表性工况，并确定对应的马达输出轴转速为 310、360、410 r/min。

(2)基于 3 种代表性工况下载荷数据，提取其

数据转折点，实现了载荷数据压缩，使数据缩至原数据量的 1/50 左右。同时采用雨流计数法对压缩后的载荷统计分析，并对比数据拟合直方图以及 P-P 图。结果表明，当马达输出轴转速为 410 r/min 时，对应的系统工作载荷符合均值为 7.28、标准差为 0.81 的正态分布以及阈值为 0.32、尺度参数为 0.30、形状参数为 0.90 的三参数威布尔分布要求，并且以该不卡秧工况作为该夹持输送系统作业的典

型工况。

(3)应用统计分析理论,基于均值、幅值独立性,建立均值、幅值的联合概率密度函数,得到 10^6

次载荷循环作用下的二维外推载荷谱,最后采用变均值法编制典型工况下的一维扭矩程序谱,实现室内田间作业载荷的复现。

参 考 文 献

[1] BUTTS C L, VALENTINE H E. Building on our past to engineer the future[J]. Peanut Science, 2019,46:82 – 90.

[2] 陈中玉,高连兴,CHEN Charles,等. 中美花生收获机械化技术现状与发展分析[J]. 农业机械学报,2017,48(4):1 – 21.

CHEN Zhongyu, GAO Lianxing, CHEN Charles, et al. Analysis on technology status and development of peanut harvest mechanization of China and the United States[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(4): 1 – 21. (in Chinese)

[3] CHAPIN J W, THOMAS J S. Peanut money-maker production guide 2015[R]. South Carolina: National Peanut Board, 2015.

[4] FLETCHER S M, CHEN C, ZHANG P, et al. Competitiveness of peanuts: United States versus China[R]. Georgia: University of Georgia, 2009.

[5] RALPH H. John Deere peanut combines[J]. Machinery Feature, 1997(2):1 – 6.

[6] 尚书旗,刘曙光,王方艳,等. 花生生产机械的研究现状与进展分析[J]. 农业机械学报,2005,36(3):143 – 147.

SHANG Shuqi, LIU Shuguang, WANG Fangyan, et al. Current situation and development of peanut production machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005,36(3):143 – 147. (in Chinese)

[7] 胡志超,彭宝良,尹文庆,等. 4LH2 型半喂入自走式花生联合收获机的研制[J]. 农业工程学报,2008,24(3):148 – 153.

HU Zhichao, PENG Baoliang, YIN Wenqing, et al. Design of 4LH2 type half-feed and self-propelled peanut combine[J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(3):148 – 153. (in Chinese)

[8] 尚书旗,李国莹,杨然兵,等. 4HQL – 2 型全喂入花生联合收获机的研制[J]. 农业工程学报,2009,25(6):125 – 130.

SHANG Shuqi, LI Guoying, YANG Ranbing, et al. Development of 4HQL – 2 type whole-feed peanut combine[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(6):125 – 130. (in Chinese)

[9] 王东伟,尚书旗,韩坤. 4HJL – 2 型花生联合收获机摘果机构的设计与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(14):15 – 25.

WANG Dongwei, SHANG Shuqi, HAN Kun. Design and test of picking mechanism in 4HJL – 2 peanut combines[J]. Transactions of the CSAE, 2013,29(14):15 – 25. (in Chinese)

[10] 刘洋成,何珂,王骞,等. 4HJZ – 4A 花生捡拾摘果机设计与试验[J]. 农机化研究,2019,41(5):121 – 126, 132.

LIU Yangcheng, HE Ke, WANG Qian, et al. Design and experiment of 4HJZ – 4A peanut collecting and picking machines[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019,41(5):121 – 126, 132. (in Chinese)

[11] 杨然兵,范玉滨,尚书旗,等. 4HBL – 2 型花生联合收获机复收装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(9):115 – 120, 107.

YANG Ranbing, FAN Yubin, SHANG Shuqi, et al. Design and experiment of twice-receiving device on 4HBL – 2 peanut combine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(9):115 – 120, 107. (in Chinese)

[12] BAE H R, ANDO H, NAM S, et al. Fatigue design load identification using engineering data analytics[J]. Journal of Mechanical Design, 2015, 137(1): 1 – 12.

[13] 孟庆瑞,田兆锋,张书明,等. 混合模式下的农业机械载荷谱数据管理系统[J]. 农业机械学报,2009,40(11):189 – 192.

MENG Qingrui, TIAN Zhao Feng, ZHANG Shuming, et al. Realization of load spectrum data management system for typical agricultural machinery based on hybrid model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(11):189 – 192. (in Chinese)

[14] 于佳伟,郑松林,赵礼辉,等. 整车室内道路模拟试验用载荷谱的编制方法研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(14): 93 – 99.

YU Jiawei, ZHENG Songlin, ZHAO Lihui, et al. Research on spectrum development methodology for vehicle indoor road simulation test[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(14): 93 – 99. (in Chinese)

[15] 马甜. 深松铲工作载荷测试及载荷谱编制研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2019.

MA Tian. Study on the test and generation about load spectrum of deep loosening shovel[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019. (in Chinese)

[16] WANG J, ZHAI X, LIU C, et al. Determination of the threshold for extreme load extrapolation based on multi-criteria decision-making technology[J]. Strojniški Vestnik-Journal of Mechanical Engineering, 2017, 63(3): 201 – 211.

[17] 何佳龙. 数控车床切削力谱的编制及其在功能部件可靠性试验中的应用[D]. 长春:吉林大学, 2017.

HE Jialong. Compilation of cutting force spectrum of CNC lathe and its application in reliability test[D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)

[18] 闫祥海,周志立,贾方. 拖拉机动输出轴动态转矩载荷谱编制与验证[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19): 74 – 81.

YAN Xianghai, ZHOU Zhili, JIA Fang. Compilation and verification of dynamic torque load spectrum of tractor power take-off[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(19): 74 – 81. (in Chinese)

[19] 张英爽,王国强,王继新,等. 工程车辆传动系载荷谱编制方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 179 – 183.

ZHANG Yingshuang, WANG Guoqiang, WANG Jixin, et al. Compilation method of power train load spectrum of engineering vehicle[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 179 – 183. (in Chinese)

- [10] OCZAK M, VIAZZI S, ISMAYILOVA G, et al. Classification of aggressive behaviour in pigs by activity index and multilayer feed forward neural network[J]. *Biosystems Engineering*, 2014, 119: 89–97.
- [11] VIAZZI S, ISMAYILOVA G, OCZAK M, et al. Image feature extraction for classification of aggressive interactions among pigs[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2014, 104: 57–62.
- [12] YANG A, HUANG H, ZHENG B, et al. An automatic recognition framework for sow daily behaviours based on motion and image analyses[J]. *Biosystems Engineering*, 2020, 192: 56–71.
- [13] REICHSTEIN M, CAMPS-VALLS G, STEVENS B, et al. Deep learning and process understanding for data-driven earth system science[J]. *Nature*, 2019, 566(7743): 195–204.
- [14] HE K, GKIOXARI G, DOLLÁR P, et al. Mask R-CNN[J]. *arXiv*, 2018: 1703.06870v3.
- [15] FEICHTENHOFER C, PINZ A, ZISSERMAN A. Convolutional two-stream network fusion for video action recognition[C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016: 1933–1941.
- [16] BHATTACHARJEE P, DAS S. Two-stream convolutional network with multi-level feature fusion for categorization of human action from videos[C]//Pattern Recognition and Machine Intelligence, 2017: 549–556.
- [17] WANG X H, GAO L L, WANG P, et al. Two-stream 3-D convNet fusion for action recognition in videos with arbitrary size and length[J]. *IEEE*, 2018, 20(3): 634–644.
- [18] ZHU Y, LAN Z, NEWSAM S, et al. Hidden two-stream convolutional networks for action recognition[J]. *arXiv preprint arXiv*, 2017: 1704.00389v4.
- [19] LOU Z, HURNIK J F. Peripartum sows in three farrowing crates: posture patterns and behavioural activities[J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 1998, 58(1): 77–86.
- [20] VALROS A, RUNDGREN M, SPINKA M, et al. Metabolic state of the sow, nursing behaviour and milk production[J]. *Livestock Production Science*, 2003, 79(2–3): 155–167.
- [21] CHIDGEY K L, MOREL P C H, STAFFORD K J, et al. Sow and piglet behavioral associations in farrowing pens with temporary crating and in farrowing crates[J]. *Journal of Veterinary Behavior-Clinical Applications and Research*, 2017, 20: 91–101.
- [22] GIRDHAR R, GKIOXARI G, TORRESANI L, et al. Detect-and-track: efficient pose estimation in videos[C]//IEEE, 2018: 350–359.
- [23] HE K, ZHANG X, REN S, et al. Deep residual learning for image recognition[C]//IEEE, 2016: 770–778.
- [24] SIMONYAN K, ZISSERMAN A. Two-stream convolutional networks for action recognition in videos[J]. *arXiv preprint arXiv*, 2014: 1406.2199v2.
- [25] LUCAS B, KANADE T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision[C]//DARPA Image Understanding Workshop, 1981, 121: 130.
- [26] ANDRILUKA M, PISHCHULIN L, GEHLER P, et al. 2D human pose estimation: new benchmark and state of the art analysis[C]//2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2014: 3686–3693.
- [27] YANG Y, RAMANAN D. Articulated human detection with flexible mixtures of parts[J]. *IEEE*, 2013, 35(12): 2878–2890.

(上接第 266 页)

- [20] SHIN J Y, HEO J H, JEONG C, et al. Meta-heuristic maximum likelihood parameter estimation of the mixture normal distribution for hydro-meteorological variables[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2014, 28(2): 347–358.
- [21] 杨子涵, 宋正河, 尹宜勇, 等. 基于 POT 模型的大功率拖拉机传动轴载荷时域外推方法[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(15): 40–47.
- YANG Zihan, SONG Zhenghe, YIN Yiyong, et al. Time domain extrapolation method for load of drive shaft of high-power tractor based on POT model[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(15): 40–47. (in Chinese)
- [22] 成凯, 张盾. 推土机车架纵梁程序加载载荷谱的编制[J]. *农业工程学报*, 1997, 13(4): 40–45.
- CHENG Kai, ZHANG Dun. The program of load spectrum applying on lengthwise beam of dozer frame[J]. *Transactions of the CSAE*, 1997, 13(4): 40–45. (in Chinese)
- [23] 翟新婷, 张晓晨, 江柱锦, 等. 基于混合分布的轮式装载机半轴载荷谱编制[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(8): 78–84.
- ZHAI Xinting, ZHANG Xiaochen, JIANG Zhujin, et al. Load spectrum compiling for wheel loader semi-axle based on mixed distribution[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(8): 78–84. (in Chinese)
- [24] WANG Jixin, CHEN Hongbin, LI Yan, et al. A review of the extrapolation method in load spectrum compiling[J]. *Strojniški Vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 62(1): 60–75.
- [25] 高云凯, 徐成民, 方剑光. 车身台架疲劳试验程序载荷谱研究[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(4): 92–98.
- GAO Yunkai, XU Chengmin, FANG Jianguang. Study on the programed load spectrum of the body fatigue bench test[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(4): 92–98. (in Chinese)