doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.10.015

# 基于动态称量原理的泛函式播种施肥量检测方法

丁永前[1,2]　刘　卓[3]　陈　冲[3]　刘海龙[3]　罗　俊[3]　余洪锋[3]

(1.南京农业大学人工智能学院,南京 210031;2.现代作物生产省部共建协同创新中心,南京 210095;
3.南京农业大学工学院,南京 210031)

**摘要**:针对动态检测播种施肥量的测量系统易受振动干扰影响且难消除的问题,本文采用高压氮气弹簧的支撑力和 S 型传感器的拉力组合成称量式播量检测装置,利用压力和拉力之间存在力向相反、幅值呈比例的互补特性,提出了一种泛函式播量检测方法,该方法构建了以目标播量函数为变量的泛函,通过求取泛函极值确定目标播量函数。利用外槽轮式小麦播种施肥机平台,在不同目标播量(225、300、375 kg/hm$^2$)和不同车速(3、5 km/h,3~7 km/h 变速)下开展了 18 组室外车载式小麦播种交叉试验,并应用泛函式播量检测方法获取累积播量和动态播量信息。累积播量的绝对相对偏差的最大值、平均值和标准差分别为 5.61%、2.26% 和 1.58%;动态播量的检测数据在作业面积较小时(少于 0.020 hm$^2$时)存在较大波动,随着作业面积的增加呈明显收敛趋势,动态播量稳定阶段(作业面积大于 0.033 hm$^2$),所有测试最大绝相对偏差为 9.61%,单次测试中,最大平均值为 4.73%,最大标准差为 1.97%。试验结果表明,泛函式播量检测方法能有效获取动态播量和累积播量信息,为播种施肥机的播量检测提供了一种测量方法。

**关键词**:精准农业;播量检测;泛函式;动态称量

**中图分类号**:S24　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2021)10-0146-09　　**OSID**:

# Functional Detection Method of Application Rate Based on Principle of Dynamic Weighing

DING Yongqian[1,2]　LIU Zhuo[3]　CHEN Chong[3]　LIU Hailong[3]　LUO Jun[3]　YU Hongfeng[3]

(1. *College of Artificial Intelligence*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 210031, *China*
2. *Collaborative Innovation Center for Modern Crop Production Co-sponsored by Province and Ministry*, *Nanjing* 210095, *China*
3. *College of Engineering*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 210031, *China*)

**Abstract**: Dynamic weighing method is an ideal method for dynamic detection of application rate of fertilization and seeding, because the application is not limited by the measurement object and can directly obtain dynamic information. But it is difficult to be applied in practice because of its easily being interfered by environmental vibration. An application rate measuring device, where the supporting force from high-pressure nitrogen springs and the pulling force from S-type weighting sensors was combined for detection, was adopted in this research. A functional application rate detection method was proposed based on the complementary characteristics of the measuring device with opposite direction and proportional amplitude between the pressure and tension. In this method, a function with application rate function as a variable was constructed, and the target application rate function was finally determined by calculating the extreme value of the function. Eighteen groups of experiments, with a wheat seed-fertilizer drill machine on a slight potholes cement road, were carried out at different target application rates (225 kg/hm$^2$, 300 kg/hm$^2$ and 375 kg/hm$^2$) and at different vehicle speeds (3 km/h, 5 km/h and 3 ~ 7 km/h). And the dynamic and cumulative application rate were measured with the functional detection method. The maximum, average and standard deviation of the absolute relative error of cumulative application rate were 5.61%, 2.26% and 1.58%, respectively. After exceeding 0.033 hm$^2$ of operation area, the maximum absolute relative deviation of the dynamic application rate was 9.61% in all tests, and the maximum average absolute relative deviation and maximum standard deviation were 4.73% and

收稿日期:2021-06-08　修回日期:2021-07-07

**基金项目**:国家重点研发计划项目(2016YFD070030403)和江苏省信息农业重点实验室项目(KLIAKF1901)

**作者简介**:丁永前(1975—),男,副教授,博士,主要从事智能农业装备、智能检测与控制研究,E-mail:yongqiand@njau.edu.cn

1.97% in one test. The experimental results showed that the functional detection method can effectively obtain the dynamic and cumulative information of application rate, but the construction method of the function needed further research.

**Key words**: precision agriculture; application rate detection; functional detection method; dynamic weighing

## 0　引言

随着现代农业的快速发展,农业自动化、智慧化和信息化发展步伐不断加快,精准农业逐渐替代传统农业,并成为实现农业可持续发展的重要方式[1-3]。在自然资源日益减少和生态环境不断恶化的背景下,发展精准农业已成为国际社会的共识,以达到最小资源投入和最大农业收益,确保粮食安全和实现农业可持续发展[4-7]。播种和施肥是精准农业中已经获得重要应用的两个作业环节,但由于种子和肥料入土后难以直观评价,实现作业质量的有效检测一直是该作业环节有待解决的问题,而获取准确的动态播量和累积播量信息是实现播种施肥作业质量评价的有效途径。

播种施肥播量检测方法主要有直接法和间接法,直接法应用范围广,不受测量对象的限制;间接法测量精度往往与被测对象特性有关,局限性较大。以光电法[8-9]和电容电荷法[10-11]等间接法为基本原理构建的播量检测方法需要反复标定;图像法[12-13]对环境和机器性能要求较高,设备昂贵,数据量大,一般限于实验室内使用;而转速法[14]和多普勒效应法[15-16]等检测方法依赖物料流量的标定,检测精度有待进一步提高。

动态称量法[17-18]作为直接检测方法,相比于其它方法,对测量对象具有更好的适应性,已在精准农业的播种、施肥和收获环节中获得重要应用,具有广阔的潜在应用前景,但其在大田环境下的稳定性和动态测量精度始终是有待解决的课题。PIETRZAK 等[19]和 MELLER 等[20]提出了一种基于时变低通滤波的方法来消除系统受振动产生的低频分量的干扰;LIU 等[21]设计了四阶响应的 IIR 型的巴特沃斯滤波器来消除旋耕机的振动干扰,这些硬件滤波都存在滤波精度低,易被环境影响的问题;XIE 等[22]和 FENG 等[23]提出使用小波变换的方法来消除动态称量信号的噪声干扰,但对小波阈值的合适选择较为困难,容易造成信号失真;BOSCHETTI 等[24]建立称量传感器的力学模型和环境振动补偿模型来获取称量值;此外,LI 等[25]采用 BP 神经网络建立了皮带秤自动称量误差补偿模型,但检测精度有待进一步提高。

本文以自主研发的以高压氮气弹簧为支撑力的称量式播量检测装置为基础(该装置利用氮气弹簧的压力和 S 型传感器的拉力组合实现播量的检测),利用氮气弹簧压力和 S 型传感器拉力之间存在力向相反、幅值呈比例的互补特性,提出一种泛函式播量检测方法,以期为动态称量测量方法提供一种新的方式。

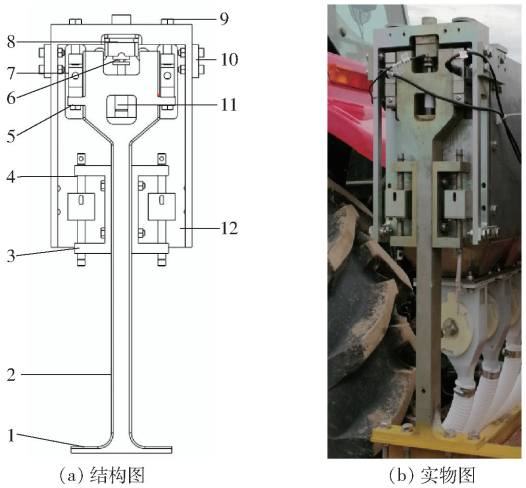
## 1　材料与方法

从播量检测装置的结构和基本原理出发,分析播量检测装置的测量特性,提出一种基于压拉互补特性的信号滤波和播量信息检测方法。

### 1.1　测量装置

一般的动态称量系统将称量传感器作为总承重元件,承担机构和物料的总质量,而当称量传感器精度等级一定时,其分辨力与量程成正比,为了支撑机构的质量,需要选用大量程的称量传感器,从而增大传感器的分辨力,这对测量精度不利。本文设计的称量式播量检测装置由氮气弹簧支撑总质量,使称量传感器只测量物料的变化量,因此,可以选用较小量程的传感器,从而提高其测量精度。

如图 1 所示,该称量式播量检测装置主要由提供支撑力的高压氮气弹簧、S 型拉力式称量传感器、




(a) 结构图　　(b) 实物图

图 1　称量式播量检测装置

Fig. 1　Application-rate measuring device

1. Y 形支架固定孔　2. Y 形支架　3. 导引轴固定板　4. 导引轴　5. 拉力传感器下紧固螺栓　6. 压力传感器　7. 拉力传感器　8. 带有止推轴承的限位装置　9. 拉力传感器上紧固螺栓　10. 挂接板　11. 高压氮气弹簧　12. 悬挂式侧板

膜盒压力传感器和 Y 形固定支架组成。高压氮气弹簧支撑起重物后,其富裕弹力通过上紧固螺栓传递到 S 型拉力传感器上,固定螺栓同时起到限制高压氮气弹簧回弹的作用。

该装置属于直接式测量装置,经团队多年的设计改进,该称量式播量检测装置已经具有稳定的力学结构和合理的加载方式,在实际应用中可以有效避免侧向力和竖直方向摩擦力的影响(摩擦力和侧向力会严重影响测量结果),为播量检测信息的获取提供良好的技术保障。

### 1.2 测量原理及特性

该称量式播量检测装置核心器件为高压氮气弹簧、S 型拉力传感器和膜盒压力传感器,其主要工作原理如图 2 所示。

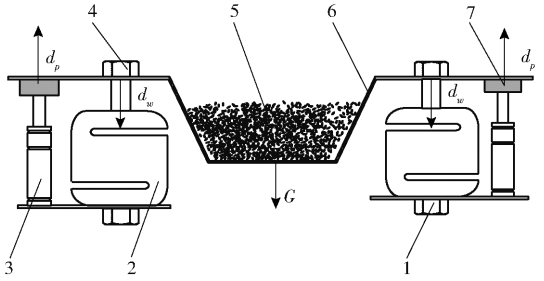



图 2 称量式播量检测装置测量原理图

Fig. 2 Principle diagram of application-rate measuring device based on dynamic weighting technology

1. S 型拉力传感器下紧固螺栓 2. 称量传感器 3. 氮气弹簧 4. S 型拉力传感器上紧固螺栓 5. 物料 6. 箱体 7. 压力传感器

由于压力传感器检测到的是氮气弹簧内部的气体压力和其内部摩擦力(氮气弹簧内部的活塞环与活塞之间的摩擦)的合力,内摩擦力在外部作用力(主要为箱体和物料重力、振动干扰引起的惯性力)激励下具有非线性特征,这导致两类传感器响应信号与外部作用力之间呈现非线性特征。分析压、拉力传感器的受力关系可得

$$d_p(t) = d_s(t) - f_{\text{in}}(t) + N_p(t) \tag{1}$$

$$d_w(t) = d_s(t) - f_{\text{in}}(t) - f_{\text{out}}(t) - G(t) + N_w(t) \tag{2}$$

$$d_c(t) = d_p(t) - d_w(t) = G(t) + N_p(t) - N_w(t) \tag{3}$$

式中 $d_s(t)$——氮气弹簧的内压力

$d_p(t)$——压力传感器检测到的氮气弹簧压力

$d_w(t)$——S 型拉力传感器检测到的拉力

$G(t)$——箱体和当前物料的重量

$d_c(t)$——压力测量值与拉力测量值之差

$f_{\text{in}}(t)$——氮气弹簧的内摩擦力

$f_{\text{out}}(t)$——机构运动件间的摩擦力

$N_p(t)$、$N_w(t)$——压、拉力传感器受振动产生的随机干扰信号

机构间的摩擦力 $f_{\text{out}}(t)$ 通过机械装置的优化调整可以被有效消除。当物料减少时,$d_w(t)$ 将增大,$d_p(t)$ 和 $G(t)$ 将减小。当无外界振动干扰影响时,压、拉力传感器测量值差值 $d_c(t)$ 的变化量 $\Delta d_c(t)$ 即为物料的变化量,且不受氮气弹簧内摩擦力的影响,理论上包含了实际动态播量信息。即有

$$\Delta G(t) = \Delta d_c(t) = \Delta d_p(t) - \Delta d_w(t) \tag{4}$$

式中 $\Delta G(t)$、$\Delta d_p(t)$、$\Delta d_w(t)$——$G(t)$、$d_p(t)$、$d_w(t)$ 变化量

由于,$\Delta G(t)\,\Delta d_p(t) > 0$,$d_c(t)\,\Delta d_w(t) < 0$,式(4)等同于

$$|\Delta G(t)| = |\Delta d_p(t)| + |\Delta d_w(t)| \tag{5}$$

当箱体内物料减少时,播量检测装置的氮气弹簧在内部压力的作用下有向上运动的趋势,从而使 S 型拉力传感器受拉状态加剧,其在受拉方向的应变增加,而氮气弹簧与拉力传感器在受力方向的应变量在量值上相等,即有

$$\begin{cases} |\Delta d_p(t)| = K_{ps}\delta \\ |\Delta d_w(t)| = K_{ws}\delta \end{cases} \tag{6}$$

$$|\Delta d_p(t)| / |\Delta d_w(t)| = K_{ps}/K_{ws} \tag{7}$$

式中 $\delta$——氮气弹簧在压力方向上的绝对长度变化量

$K_{ps}$——氮气弹簧在受压方向上的等效弹性系数

$K_{ws}$——S 型拉力传感器在受拉方向上的等效弹性系数

在有效工作范围内,$K_{ps}$ 和 $K_{ws}$ 保持定值。由此可知,在实际工作过程中,压、拉力两类传感器检测到的力变化量存在力向相反、幅值呈比例的特征;当外界存在振动干扰时,两类传感器的干扰信号也呈现力向相反、幅值呈比例的特征,而振动干扰在两类传感器信号相减后整体振动幅值将叠加增强,该叠加后的振动信号用 $d_{\text{err}}(t)$ 表示,同时引入一个分配系数 $K_w$,并令 $K_w$ 表示为

$$K_w = \frac{K_{ws}}{K_{ws} + K_{ps}} \tag{8}$$

则式(3)可表示为

$$d_c(t) = G(t) + d_{\text{err}}(t) \tag{9}$$

同时

$$N_w(t) = -K_w d_{\text{err}}(t) \tag{10}$$

$$N_p(t) = (1 - K_w) d_{\text{err}}(t) \tag{11}$$

### 1.3 基于分配系数 $K_w$ 的信号滤波方法

在变量施肥或常规施肥的实际实施过程中,在设定的作业单元内目标播量保持恒定,在系统的控制作用下,作业面积和累积播量之间具有理论上的

线性关系，线性关系不受作业速度影响，因此，若将自变量取为作业面积，则信号处理具有更大的便利性，而自变量的改变不影响已建立公式中各物理量之间的运算关系。据此，式(9)可改写为

$$d_{\mathrm{err}}(S)=d_c(S)-G(S) \tag{12}$$

式中　$S$——当前累积作业面积

$G(S)$实际上是播量方程，可表示为 $G(S)=a_1S+a_0$ 的直线方程形式，因为作业过程中 $G(S)$一直减小，所以$|a_1|$即为单位面积播量，$|a_1S|$即为作业面积为 $S$ 时的累积播量。由于干扰信号的存在，真实的 $G(S)$无法获取，当测量过程中干扰信息具有白噪声特征时，$G(S)$ 可由 $d_c(S)$ 和 $S$ 的拟合直线方程 $d_{\mathrm{fit}}(S)$等效表达，式(12)亦可表示为

$$d_{\mathrm{err}}(S)=d_c(S)-d_{\mathrm{fit}}(S) \tag{13}$$

由此可得

$$d_{w_\mathrm{fil}}(S)=d_w(S)+K_wd_{\mathrm{err}}(S) \tag{14}$$

$$d_{p_\mathrm{fil}}(S)=d_p(S)-(1-K_w)d_{\mathrm{err}}(S) \tag{15}$$

式中　$d_{w_\mathrm{fil}}(S)$——拉力传感信号滤除振动干扰后的信号

$d_{p_\mathrm{fil}}(S)$——压力传感信号滤除振动干扰后的信号

通过对式(13)～(15)分析可知，将噪声信号 $d_{\mathrm{err}}(S)$按分配系数 $K_w$ 叠加到压、拉力信号上，可滤除传感信号中的振动，而测量系统的 $K_w$ 可以通过试验方式求取，当 $K_w$ 取到最佳值时，滤波值平方和应达到最小，即可由评价指标 $E$ 求取，计算式为

$$E=\min_{K_w=x}\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(d_w(S_i)+K_wd_{\mathrm{err}}(S_i))^2}$$

或　$$E=\min_{K_w=x}\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}[d_p(S_i)-(1-K_w)d_{\mathrm{err}}(S_i)]^2} \tag{16}$$

由于 $K_w$ 在(0,1)之间取值，具体求解时，可以通过使 $K_w$ 以足够小的步长在(0,1)之间随机取值，获取一系列对应的 $E$ 值，以最小 $E$ 对应的 $K_w$ 值作为其最优值。

### 1.4　泛函式播量检测方法

#### 1.4.1　检测方法理论分析

根据以上对滤波方法的说明，获取拟合直线方程 $d_{\mathrm{fit}}(S)$是实现压、拉力信号滤波的关键，而该方程 $d_{\mathrm{fit}}(S)$的实际物理意义即为箱体内物料质量变化与作业面积之间的关系方程，在目标播量恒定时：其斜率的绝对值为实际单位面积播量，其幅值变化量即为作业面积内的累积播量，其实时值即为箱体内物料的总质量和称量传感器的初始加载量之和，因此可将 $d_{\mathrm{fit}}(S)$定义为系统的播量方程。

进一步分析滤波特性方程式(14)、(15)，可得

$$d_{w_\mathrm{fil}}(S)=(1-K_w)d_w(S)+K_wd_p(S)-K_wd_{\mathrm{fit}}(S) \tag{17}$$

$$d_{p_\mathrm{fil}}(S)=(1-K_w)d_w(S)+K_wd_p(S)+(1-K_w)d_{\mathrm{fit}}(S) \tag{18}$$

式(17)、(18)存在一个共同因子$(1-K_w)d_w(S)+K_wd_p(S)$，其实质是压、拉力传感信号关于 $K_w$ 的加权平均，可实时计算获取，同时也表明，拉、压力信号的滤波可以看成是两者加权信号和播量方程之间的线性组合。

若令 $d_{\mathrm{weig}}(S)=(1-K_w)d_w(S)+K_wd_p(S)$，$d_{w-\mathrm{weig}}(S)=d_w(S)-d_{\mathrm{weig}}(S)$，$d_{p-\mathrm{weig}}(S)=d_p(S)-d_{\mathrm{weig}}(S)$，则可得

$$d_{w-\mathrm{weig}}(S)=-K_wd_c(S)=-K_w(d_{\mathrm{fit}}(S)+d_{\mathrm{err}}(S)) \tag{19}$$

$$d_{p-\mathrm{weig}}(S)=(1-K_w)d_c(S)=(1-K_w)(d_{\mathrm{fit}}(S)+d_{\mathrm{err}}(S)) \tag{20}$$

将式(19)两边同时乘上$(1-K_w)/K_w$，可得

$$\frac{1-K_w}{K_w}d_{w-\mathrm{weig}}(S)=-(1-K_w)(d_{\mathrm{fit}}(S)+d_{\mathrm{err}}(S)) \tag{21}$$

在式(21)两侧同时加上 $2(1-K_w)y(S)$，其中，$y(S)$是与 $d_{\mathrm{fit}}(S)$具有相同截距的直线，$d_{\mathrm{fit}}(S)$的截距实际上是开始测量时箱体和物料的总重量，可以通过读取检测装置的初始值确定。

并令 $d_{w-\mathrm{flip}}(S)=\frac{1-K_w}{K_w}d_{w-\mathrm{weig}}(S)+2(1-K_w)y(S)$，则可得

$$d_{w-\mathrm{flip}}(S)=-(1-K_w)(d_{\mathrm{fit}}(S)+d_{\mathrm{err}}(S))+2(1-K_w)y(S) \tag{22}$$

对比式(20)和式(22)可以发现，$d_{w-\mathrm{flip}}(S)$和 $d_{p-\mathrm{weig}}(S)$关于 $2(1-K_w)y(S)$对称，当 $y(S)$取为 $d_{\mathrm{fit}}(S)$时，式(22)可改写为

$$d_{w-\mathrm{flip}}(S)=(1-K_w)(d_{\mathrm{fit}}(S)-d_{\mathrm{err}}(S)) \tag{23}$$

对照式(20)和式(23)可知，此时 $d_{w-\mathrm{flip}}(S)$和 $d_{p-\mathrm{weig}}(S)$具有相同的拟合直线方程$(1-K_w)d_{\mathrm{fit}}(S)$，但叠加了反向的振动干扰信号$(1-K_w)d_{\mathrm{err}}(S)$，鉴于此特性，理论上在 $d_{w-\mathrm{flip}}(S)$和 $d_{p-\mathrm{weig}}(S)$各截取任意 3 点以上数据，其组合数据的拟合方程结果都是一样的，若能根据 $d_{w-\mathrm{flip}}(S)$和 $d_{p-\mathrm{weig}}(S)$数据，找到一种衡量 $y(S)$和 $d_{\mathrm{fit}}(S)$之间接近程度的判据，则理论上存在通过少量观测数据确定出实际播量方程的方法。

#### 1.4.2　泛函式播量检测方法的构建

在实际测量过程中，测量的目标是根据传感器的测量数据尽可能快地确定出播量方程 $d_{\mathrm{fit}}(S)$，而通过直线拟合的方式获取播量方程 $d_{\mathrm{fit}}(S)$不符合

快速性。由 1.4.1 节的理论分析可知,当 $y(S)$ 取为 $d_{\mathrm{fit}}(S)$ 时,$d_{w-\mathrm{flip}}(S)$ 和 $d_{p-\mathrm{weig}}(S)$ 具有相同的拟合直线方程,因此,$d_{w-\mathrm{flip}}(S)$ 和 $d_{p-\mathrm{weig}}(S)$ 之间的距离将达到最小,为了能有效克服振动干扰带来的影响,此处的距离是指广义的距离,可以是某种形式的范数,对于不同的应用场景,可以构建不同形式的"距离"范数来表征 $d_{w-\mathrm{flip}}(S)$ 和 $d_{p-\mathrm{weig}}(S)$ 之间的距离,这个距离理论上可以通过构建基于目标播量函数的泛函 $J(y(S))$ 以及泛函的极值条件来实现,即可表示为

$$\begin{cases} J(y(S)) = \| d_{w-\mathrm{flip}}(S) - d_{p-\mathrm{weig}}(S) \| \\ \min\{J(y(S))\} = \lim\limits_{y(S)\to d_{\mathrm{fit}}(S)} J(y(S)) \end{cases} \quad (S \in [S_0, S_1]) \tag{24}$$

式中 $[S_0, S_1]$——需要求解播量信息的作业面积范围

式(24)是本文基于播量检测装置压、拉互补特性提出的泛函式播量检测方法的基本思路,其目标是构建合适目标泛函及确定泛函取得极值的条件。

## 2 试验与结果分析

### 2.1 试验条件

针对江苏省盐城市临海农场的农艺需求设计了如图 3 所示宽幅 4 m 的播种机,箱体分成左右两部分,同时,为了增加机构的稳定性,在箱体中间增加了基于氮气弹簧的支撑点。其种箱可承载 160 kg 左右的种子,箱体及附件等质量约 150 kg。



图 3 试验测试现场

Fig. 3 Scene photo of experimental tests

播量检测装置中的拉、压型称量传感器分别采用蚌埠通力称量传感系统有限公司生产的 CGQ-YS 型和 CGQ-PM 型传感器,主要工作参数如表 1 所示。这两类传感器均为压电式称量传感器,具有体积小、刚性强和频带宽等优点,被广泛应用于动态称量领域。

在南京农业大学(浦口校区)与江苏省农机鉴定站联合测试中心的试验场地开展了系列小麦播种试验测试。应用华测 NX300 型自动驾驶系统获取拖拉机的行驶速度(理论测速精度为0.01 km/h),

表 1 称量传感器的主要工作参数

Tab. 1 Main working parameters of load cells

| 参数 | 传感器型号 | |
|---|---|---|
| | CGQ-YS 型 | CGQ-PM 型 |
| 量程/kg | 0~50 | 0~100 |
| 尺寸/(mm×mm×mm) | 70×64×20 | Φ25×18 |
| 精度/% | 0.1 | 0.1 |
| 灵敏度/(mV·V$^{-1}$) | 2.0±0.1 | 2.0±0.1 |
| 工作温度/℃ | -20~80 | -20~80 |

将搭载播量检测装置的外槽轮式播种机安装在旋耕机作业平台上,作业平台整体由一台 73.5 kW 的拖拉机悬挂牵引,测试时拖拉机以一定速度行驶在有少量坑洼的水泥路面上(路面有坑洼将对测量系统引入冲击干扰,导致测量数据的突变),旋耕机旋耕刀具正常旋转,播种口下方放置收集容器,用电子秤(测量精度为 ±5 g)测量收集容器回收的小麦质量,作为测试结束时累积播量的参考值。

### 2.2 试验方案设计

如表 2 所示,采用多因素多水平组合方式开展测试,小麦的目标播量设为 225、300、375 kg/hm$^2$ 共 3 个水平;作业速度分 3、5 km/h 和 3~7 km/h 变速共 3 个水平。实际测试过程中,每个水平的目标播量和每个水平的作业速度开展双因素组合试验,每种组合试验重复 2 次。由于收集容器容积有限,播量越大,不间断作业时间越短,实际每次测试中,225、300、375 kg/hm$^2$ 目标播量对应的测试面积分别约为 0.170、0.133、0.100 hm$^2$。

表 2 双因素三水平试验因素水平

Tab. 2 Two-factor and three-level experimental scheme

| 水平 | 因素 | |
|---|---|---|
| | 目标播量/(kg·hm$^{-2}$) | 作业速度/(km·h$^{-1}$) |
| 1 | 225 | 3 |
| 2 | 300 | 5 |
| 3 | 375 | 变速(3~7) |

### 2.3 分配系数 $K_w$ 的确定及滤波效果

按照表 2 的试验方案开展试验测试,共采集了 18 组动态测试数据。按照式(16)的评价指标确定每组测试数据对应的分配系数,如图 4 所示。18 组测试数据求得的分配系数均值为 0.42,标准差为 0.011,分配系数在不同速度和不同目标播量下具有较高的一致性,这表明本文设计的播量检测装置的测量特性在动态测试过程中具有较高的稳定性。根据测试结果,确定播量检测系统的分配系数 $K_w$ 为 0.42。

为具体说明信号特征和信号滤波效果,本文选取如图 5 所示一组测试数据作为示例(目标播量和

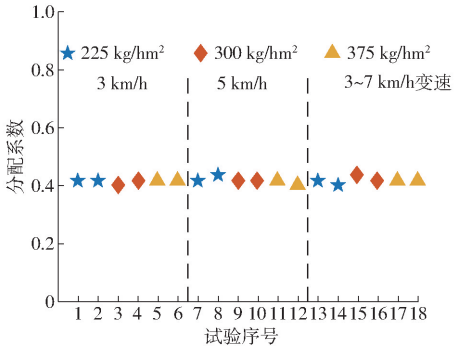



图 4　分配系数测试结果

Fig. 4　Test results of distribution coefficient

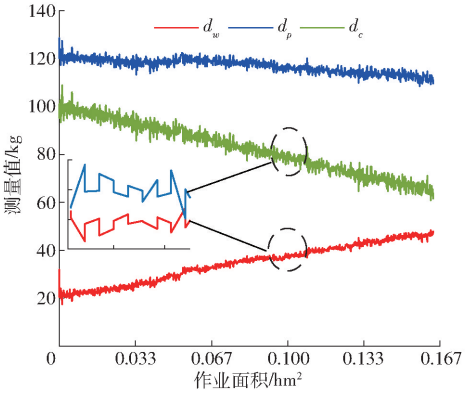



图 5　压、拉力传感器原始测量信号

Fig. 5　Original measurement signal from pressure and pull sensors

作业速度分别为 225 kg/hm² 和 3 km/h)，为了充分表达和对比信号细节，图中将压力信号向下平移 180 kg。图 5 为压、拉力传感器检测到的原始信号，以及两信号的差值信号 $d_c(S)$，同时将两小段压、拉力信号放大平移后展示在小窗中，从小窗中可以清楚地发现压力信号 $d_p(S)$ 和拉力信号 $d_w(S)$ 两者幅值呈比例、力向相反的特性；而压力信号 $d_p(S)$ 和拉力信号 $d_w(S)$ 由于氮气弹簧内摩擦的影响呈现出非线性特性，但两者之差 $d_c(S)$ 总体表现出良好的线性关系。图 6 是根据式(13)～(15)获得的压、拉力信号的滤波结果数据，以及两者之差获得的播量直线方程数据 $d_{\text{fit}}(S)$ 和两者的加权数据 $d_{\text{weig}}(S)$。从图 6 可以看出，滤除振动信号后的压、拉力信号依然存在氮气弹簧内摩擦力带来的非线性影响，但两者之差信号可以完全消除内摩擦的影响，获得准确的播量方程数据。

## 2.4　泛函式播量算法设计

泛函式播量算法实现的关键是确定关于目标播量函数的泛函表达，由于振动干扰存在，$d_{w-\text{flip}}(S)$ 和 $d_{p-\text{weig}}(S)$ 信号虽关于 $(1-K_w)d_{\text{fit}}(S)$ 对称，但波形相互交织难以区分，尝试采用以下方式构建两者之间的距离泛函：将 $d_{w-\text{flip}}(S)$ 和 $d_{p-\text{weig}}(S)$ 组合作为新的信号 $x(S)$，$x(S)\in\{d_{w-\text{flip}}(S)\cup d_{p-\text{weig}}(S)\}$，

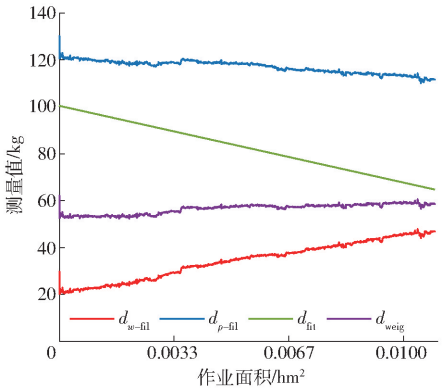



图 6　压、拉力传感信号滤波效果

Fig. 6　Filtering effect of measurement signal from pressure and pull sensors

把大于 $(1-K_w)y(S)$ 的信号作为组合信号的上边界 $x_{\text{up}}(S)$，小于 $(1-K_w)y(S)$ 的信号作为组合信号下边界 $x_{\text{down}}(S)$，将上下边界之差求和作为 $d_{w-\text{flip}}(S)$ 和 $d_{p-\text{weig}}(S)$ 信号之间的距离泛函值，即

$$\begin{cases} J(y(S)) = x_{\text{up}}(S) - x_{\text{down}}(S) \\ \min\{J(y(S))\} = \lim\limits_{y(S)\to d_{\text{fit}}(S)} J(y(S)) \end{cases} \quad (S\in[S_0,S_1]) \tag{25}$$

其中 $x_{\text{up}}(S)=\{x(S)\,|\,x(S)>(1-K_w)y(S)\}$

$x_{\text{down}}(S)=\{x(S)\,|\,x(S)<(1-K_w)y(S)\}$

在实际应用中，$y(S)$ 可表示为 $y(S)=a_1S+a_0$ 的形式，$a_0$ 是根据初始条件可确定的已知量，$a_1$ 是需要确定的参数。本文采用的是外槽轮式播种机，播量控制基于外槽轮排种器流量-转速的关系，在设定的作业单元内，目标播量保持不变，实际播量方程 $d_{\text{fit}}(S)$ 的参数短时间内不会发生大的变化，$a_1$ 可以试探性地在目标控制量附近搜索（$-a_1$ 即为实际单位面积播量）。

图 7 是将 $y(S)$ 参数 $(a_1,a_0)$ 分别选取为 (−142.95 kgm/hm², 280.50 kg)、(−217.95 kg/hm², 280.50 kg) 和 (−292.95 kg/hm², 280.50 kg) 时获得的组合信号 $x(S)$ 及其上边界和下边界图，其中参数组合 (−217.95 kg/hm², 280.50 kg) 是根据实际累积播量推算出的理想播量方程参数。由图 7 可以看出，当 $y(S)$ 选取的播量方程偏离理想播量方程时（播量方程的斜率偏大或偏小），组合信号上下边界之间的距离总体均呈现大于理想播量方程时的距离，且在作业面积增大时，这种距离差异越显著。

## 2.5　播量检测结果与分析

在实际作业过程中，动态称量系统的测量目标是快速获取作业单元内的真实播量信息（累积播量和动态播量）。正如前文所述，本文采用的是外槽轮式播种机，播量控制基于外槽轮排种器流量-转速的标定关系，在设定的作业单元内，由于目标控制播

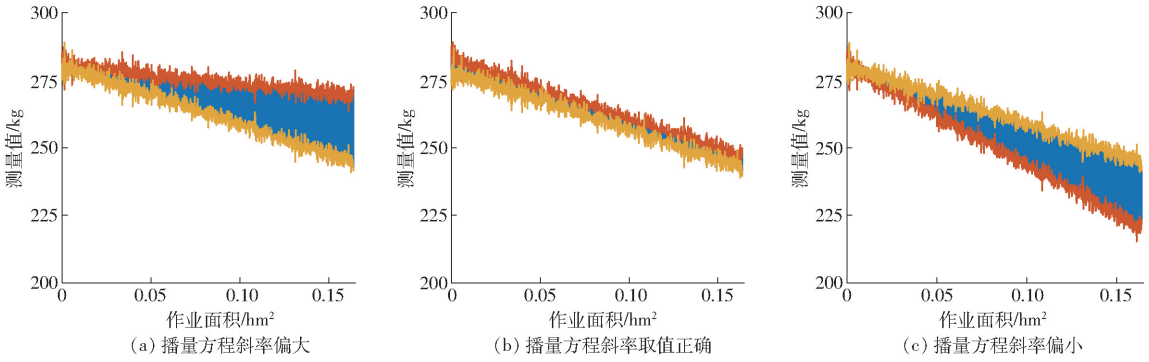



图 7 不同播量方程下组合信号的上下边界特征

Fig. 7 Upper and lower boundary characteristics of combined signals under different equations of application rate

量保持不变,实际动态播量和作业单元内的平均播量(累积播量与作业面积之比)差异不大,因此本文的动态播量是指测试过程中当前累积作业面积下的平均播量,累积播量为当前累积面积与当前动态播量的乘积。而将电子秤称量收集容器中的物料总质量作为累积播量参考值,累积播量参考值除以测量系统记录的作业面积作为动态播量的参考值,采用绝对相对偏差 $D_W$ 作为评价指标,绝对相对偏差定义为

$$D_W = \frac{|W_m - W_r|}{W_r} \times 100\% \tag{26}$$

式中 $W_m$——测量值 $W_r$——参考值

### 2.5.1 测试结果

由示例数据计算所得的动态播量如图 8a 所示,累积播量如图 8b 所示,系统记录的作业面积为 0.164 $hm^2$,参考累积播量为 35.04 kg。在图 8a 中,动态播量在作业面积较小时,测量值有较大的波动,但是随着作业面积的增加,动态播量渐趋稳定。在所有的测试数据中,作业面积小于 0.020 $hm^2$,动态播量存在较大的随机波动;作业面积在 0.020 ~ 0.034 $hm^2$之间时,大幅度的随机波动明显减少,呈现收敛趋势;而在作业面积大于 0.033 $hm^2$以后,动态播量数据呈现出明显的收敛特性,并快速趋于稳定。为了真实有效地反映动态播量信息,本文提取累积作业面积大于 0.033 $hm^2$后的动态播量数据计算绝对相对偏差。虽然,动态播量数据在作业面积较小时存在较大波动,但由于总量较小,累积播量并没有明显波动,在整个测量过程中呈现较好的线性特性,示例数据对应的累积播量测量值为 35.68 kg,绝对相对偏差为 1.83%,累积作业面积达到 0.033 $hm^2$后动态播量绝对相对偏差最大值、平均值和标准差分别为 3.11%、1.43% 和 0.87%。

图 9a 为各次测试中参考累积播量和测量累积播量的对比数据,18 次测试中,所有累积播量的绝对相对偏差最大值、平均值和标准差分别为

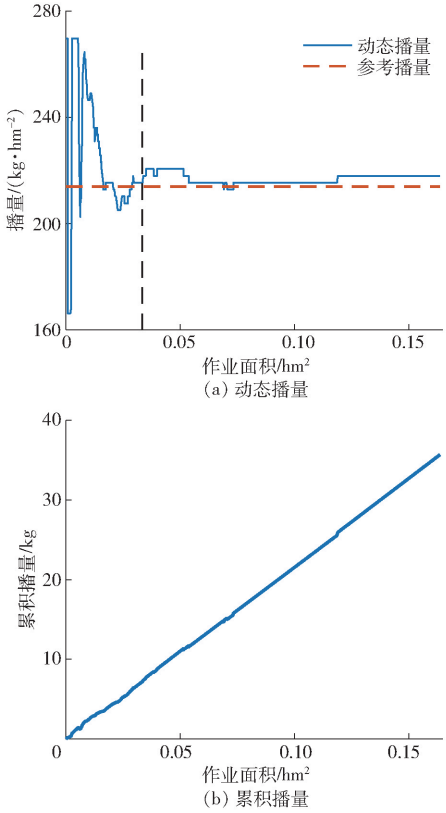



图 8 播量信息示例图

Fig. 8 Example of measured information of application rate

5.61%、2.26% 和 1.58%。图 9b 为各次测试中动态播量(累积作业面积大于 0.033 $hm^2$)绝对相对偏差平均值及标准差,在所有 18 次测试过程中,动态播量绝对相对偏差的最大值为 9.61%,单次测试中最大平均值和最大标准差分别为 4.73% 和 1.97%。

### 2.5.2 测试结果分析

从测试结果来看,播量检测装置测试结果的稳定性和正确性随作业面积的增加而显著改善,当作业面积达到 0.033 $hm^2$以上时,动态播量测试结果稳定可靠,由于累积播量是动态播量与作业面积的乘积,其测试效果与动态播量测试结果直接正相关。动态播量测试结果在测试面积较小时存在较大波动,其主要影响因素有:

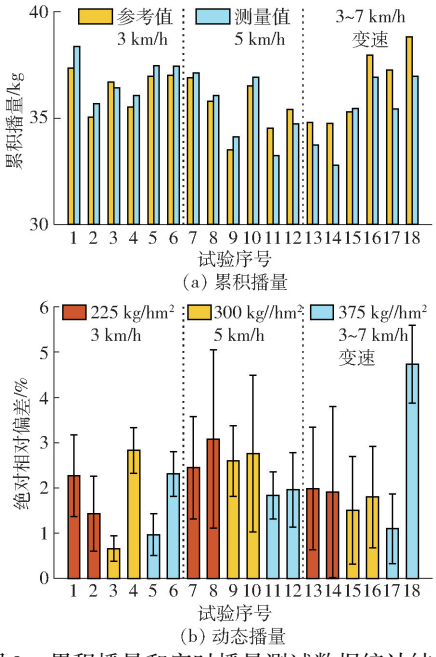



图 9　累积播量和实时播量测试数据统计结果

Fig. 9　Statistical results of cumulative and dynamic application rate

(1)作业面积精度和更新率不够

监控系统控制信息的更新率为 2 Hz,由于作业面积是以速度信息为基础计算更新的,同时系统记录数据以 1/15 公顷为单位保存,只保留小数点后 2 位有效数字,这将导致记录的面积数据存在连续多个数据重复的情况,行驶速度越慢,重复率越高(理论上 3 km/h 行驶速度至少存在 4 个连续重复数据的情况),同时,由于存在导航系统速度更新率不稳定、差分精度不理想、测量数据滞后于实际运动等现象,导致实际记录信号中数据的重复率高于理论重复率;同时,由于存在数据重复和测速精度不高等原因,致使小面积下的存储数据存在较大阶段性跳跃现象。这些情况可能使数据的整体趋势严重偏离真实情况,导致难以有效提取动态播量信息。

(2)悬挂式测试平台干扰信息对测量结果的影响

由于测试过程是在略有坑洼的水泥路面进行,因此,搭载播种施肥机的旋耕平台须经拖拉机三点悬挂系统抬离地面,当拖拉机驶过坑洼路面时,悬挂平台在产生冲击干扰的同时,引起的机体整体晃动将引入缓变干扰信息,这会使系统的响应信号整体变化趋势偏离真实变化情况,这种影响在累积面积较小时会变得比较明显。而在实际田间作业时,由于旋耕平台整体由地面支撑,这种机体晃动性的缓变干扰并不明显,更多的是整体呈白噪声特性的相对高频振动干扰,对测量结果的影响相对较小。

(3)组合信号数据之间的交叉重叠

在作业面积较小时,振动干扰的幅值相对较大,组合信号 $d_{w-\mathrm{flip}}(S)$ 和 $d_{p-\mathrm{weig}}(S)$ 信号之间存在大量的交叉重叠,在不同 $y(S)$ 下构建的组合信号,其上下边界之间的距离差异不明显,所构建的距离泛函难以有效表达 $d_{w-\mathrm{flip}}(S)$ 和 $d_{p-\mathrm{weig}}(S)$ 之间的距离。

事实上,本文的主要目标是基于测量系统压、拉力信号的互补特征,提出一种泛函式播量信息检测的新方案,而如何构建一个有效的泛函尚有待进一步研究。

## 3　结论

(1)自主研发的播量检测装置存在压、拉互补特性,压、拉力检测信号可以组合成一组相互对称的测量信号,并以此为基础构建以播量方程为变量的泛函,可以将播量的测量问题转换为泛函极值的求取问题。

(2)通过泛函极值的求取可以实现播量信息的测量,试验中累积播量绝对相对偏差的最大值、平均值和标准差分别为 5.61%、2.26% 和 1.58%;当作业面积小于 0.020 $\mathrm{hm}^2$ 时,动态播量测量值存在较大波动,但随着作业面积的增加呈明显收敛趋势,当作业面积大于 0.033 $\mathrm{hm}^2$ 时,动态播量的最大绝对相对偏差为 9.61%,单次测试中,最大平均值和最大标准差分别为 4.73% 和 1.97%。

## 参　考　文　献

[1]　赵春江. 智慧农业发展现状及战略目标研究[J]. 智慧农业, 2019, 1(1): 1-7.
ZHAO Chunjiang. State-of-the-art and recommended developmental strategic objectives of smart agriculture[J]. Smart Agriculture, 2019, 1(1): 1-7. (in Chinese)

[2]　葛文杰,赵春江. 农业物联网研究与应用现状及发展对策研究[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 222-230.
GE Wenjie, ZHAO Chunjiang. State-of-the-art and developing strategies of agricultural internet of things[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 222-230. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20140735&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.07.035. (in Chinese)

[3]　KING A. Technology: the future of agriculture[J]. Nature, 2017, 544: S21-S24.

[4]　KAMILARIS A, KARTAKOULLIS A, PRENAFETA-BOLDU F X. A review on the practice of big data analysis in agriculture[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 143: 23-37.

[5]　RETTORE D A Z A, DA S E, PESSOA A L C. Security challenges to smart agriculture: current state, key issues, and future directions[J]. Array, 2020, 8: 100048.

[6] SONG C, ZHOU Z, ZANG Y, et al. Variable-rate control system for UAV-based granular fertilizer spreader[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 180: 105832.
[7] 刘彩玲,魏丹,都鑫,等. 宽苗带勾型窝眼轮式小麦精量排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 75-84.
LIU Cailing, WEI Dan, DU Xin, et al. Design and test of wide seedling strip wheat precision hook-hole type seed-metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 75-84. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190108&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.008. (in Chinese)
[8] 丁幼春,王雪玲,廖庆喜. 基于时变窗口的油菜精量排种器漏播实时检测方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 11-21.
DING Youchun, WANG Xueling, LIAO Qingxi. Method of real-time loss sowing detection for rapeseed precision metering device based on time changed window[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(24): 11-21. (in Chinese)
[9] BESHARATI B, NAVID H, KARIMI H, et al. Development of an infrared seed-sensing system to estimate flow rates based on physical properties of seeds[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 874-881.
[10] 陈建国,李彦明,覃程锦,等. 小麦播种量电容法检测系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 51-58.
CHEN Jianguo, LI Yanming, QIN Chengjin, et al. Design and test of capacitive detection system for wheat seeding quantity[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 51-58. (in Chinese)
[11] 周利明,马明,苑严伟,等. 基于电容法的施肥量检测系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 44-51.
ZHOU Liming, MA Ming, YUAN Yanwei, et al. Design and test of fertilizer mass monitoring system based on capacitance method[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(24): 44-51. (in Chinese)
[12] 温翔宇,贾洪雷,张胜伟,等. 基于 EDEM-Fluent 耦合的颗粒肥料悬浮速度测定试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 69-77.
WEN Xiangyu, JIA Honglei, ZHANG Shengwei, et al. Test of suspension velocity of granular fertilizer based on EDEM-Fluent coupling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 69-77. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20200308&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.03.008. (in Chinese)
[13] DEVIN L M, AJAY S, DANIEL F, et al. Development of high-speed camera hardware and software package to evaluate real-time electric seed meter accuracy of a variable rate planter[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 142: 314-325.
[14] 马旭,马成林,桑国旗,等. 变量施肥机具的设计[J]. 农业机械学报, 2005, 36(1): 50-53.
MA Xu, MA Chenglin, SANG Guoqi, et al. Design of variable rate fertilizer applicator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(1): 50-53. (in Chinese)
[15] 杨立伟,黄家运,张季琴,等. 基于微波多普勒法的施肥质量流量检测系统研究[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1): 210-217.
YANG Liwei, HUANG Jiayun, ZHANG Jiqin, et al. Mass flow measurement system of granular fertilizer based on microwave doppler method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.1): 210-217. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2020s124&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S1.024. (in Chinese)
[16] 冯宁宁,刘刚,张彦娥,等. 基于 EMD 的奶牛动态称量算法[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 305-312.
FENG Ningning, LIU Gang, ZHANG Yan'e, et al. Dynamic weighing algorithm of dairy cow based on EMD[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 305-312. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2019s047&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.047. (in Chinese)
[17] MAWJOUD S A, BASHI I Y D. Flow-rate measurements of solid particulates and liquids using doppler effect[J]. IETE Journal of Research, 2015, 28(11): 597-601.
[18] GONZÁLEZ-MONTELLANO C, BAGUENA E M, RAMÍREZ-GÓMEZ Á, et al. Discrete element analysis for the assessment of the accuracy of load cell-based dynamic weighing systems in grape harvesters under different ground conditions[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 100: 13-23.
[19] PIETRZAK P, MELLER M, NIEDŹWIECKI M. Dynamic mass measurement in checkweighers using a discrete time-variant low-pass filter[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, 48(1-2): 67-76.
[20] MELLER M, NIEDŹWIECKI M, PIETRZAK P. Adaptive filtering approach to dynamic weighing: a checkweigher case study[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2014, 47(3): 5927-5932.
[21] LIU Haitao, DING Yongqian, YU Hongfeng, et al. Signal processing method and performance tests on weighting-sensor-based measuring system of output quantity for a seeding and fertilizing applicator[J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(17): 536-540.
[22] XIE Chao, HUANG Jie, WEI Chengjia, et al. An evolving wavelet-based de-noising method for the weigh-in-motion system[C]// International Conference on Advances in Natural Computation, 2006, 4221: 923-926.
[23] FENG Ningning, KANG Xi, HAN Haoyuan, et al. Research on a dynamic algorithm for cow weighing based on an SVM and empirical wavelet transform[J]. Sensors (Basel), 2020, 20(18): 5363.
[24] BOSCHETTI G, CARACCIOLO R, RICHIEDEI D, et al. Model-based dynamic compensation of load cell response in weighing machines affected by environmental vibrations[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 34(1-2): 116-130.
[25] LI Bingying, LI Yongxin, WANG Haitao, et al. Compensation of automatic weighing error of belt weigher based on BP neural network[J]. Measurement, 2018, 129: 625-632.