doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S1.019

基于电容法的齿盘式棉花穴播器播种量传感器设计与试验

周利明[1,2] 季雨希[1,2] 牛 康[1,2] 韩璧蔓[1,2] 白圣贺[1,2] 刘阳春[1,2]
(1. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司，北京 100083；2. 农业装备技术全国重点实验室，北京 100083)

摘要：针对新疆地区广泛应用的齿盘式穴播器无导种管结构，常规光电传感器无法安装的问题，研究一种基于微弱电容信号获取与分析的播种传感器。通过对穴播器内取种过程分析，确定检测位置及极板外尺寸。以提高信号显著性和检测精度为目标，以可靠性为边界约束条件，建立三因素三水平响应面试验对电极结构参数寻优，并对传感器敏感单元屏蔽处理，集中场能。经改进后传感器敏感单元厚度0.64 mm，基础电容平均值13.94 pF，电容变化量为0.16 pF，有效提升信号显著性和检测精度。设计了以电容转换芯片AD7745为核心的电容信号采集模块。上位机通过对采集信号自适应阈值正交小波变换滤波，基于二阶导数寻峰获取种子实时播量。试验结果表明：在采样周期11 ms、穴播器转速20~30 r/min条件下，传感器具有较高的检测精度，实际播量和测量播量之间相对误差为-2.604%~1.836%，均小于5%。本文所设计的播种传感器为解决穴播器式播种装备播种检测问题提供了一种有效途径，对提高精量播种技术具有重要意义。

关键词：棉花；齿盘式穴播器；播种量；传感器；电容法；滤波寻峰算法
中图分类号：S126 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-1298(2024)S1-0177-09

Design and Experiment of Seeding Quantity Sensor for Cotton Hill-drop Planters Based on Capacitive Method

ZHOU Liming[1,2] JI Yuxi[1,2] NIU Kang[1,2] HAN Biman[1,2] BAI Shenghe[1,2] LIU Yangchun[1,2]
(1. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing* 100083, *China*
2. *State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: To address the installation challenges of conventional photoelectric sensors in hill-drop planters widely used in Xinjiang, which lack seed guiding tubes, a seeding sensor was explored based on weak capacitive signal acquisition and analysis. By analyzing the seed extraction process within the seeder, the optimal detection position and external dimensions of the electrode plates were established. The primary objectives were to enhance signal significance and detection accuracy while ensuring reliability as a critical boundary constraint. To optimize the electrode structure parameters, a response surface methodology was employed, utilizing three factors at three levels. Additionally, the sensitive unit of the sensor was shielded to concentrate the electric field. Following enhancement, the thickness of the sensor's sensitive unit was determined to be 0.64 mm, and a capacitance variation of 0.16 pF, effectively enhancing signal significance and detection accuracy. A capacitive signal acquisition module, centered around the AD7745 capacitive conversion chip, was designed. The upper computer processed the collected signals using adaptive threshold orthogonal wavelet transform filtering and employed the second derivative peak detection to obtain real-time seed sowing rates. Experimental results indicated that with a sampling period of 11 ms and a seeder rotation speed of 20~25 r/min, the sensor achieved high detection accuracy, with relative errors between the actual and measured sowing rates ranged from −2.604% to 1.836%, which were all less than 5%. The designed seeding sensor provided an effective solution to the sowing detection challenges associated with disc-type seeding equipment and played a significant role in advancing precision sowing technology.

Key words: cotton; hill-drop planter; seeding quantity; sensors; capacitance method; filtered peak detection algorithm

收稿日期：2024-08-21 修回日期：2024-09-18
基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFD2002400)和兵团财政科技计划项目(2023AB014)
作者简介：周利明(1982—)，男，研究员，博士生导师，主要从事精准农业测控技术研究，E-mail：haibo1129@163.com
通信作者：刘阳春(1982—)，女，研究员，博士，主要从事农用传感器研究，E-mail：lyc327@163.com

0 引言

新疆棉花播种作业采用地膜覆盖种植模式,铺膜播种机一次性完成铺膜和播种作业[1-2]。摒弃导种管下种的传统播种方式,由机械齿盘式穴播器在机器前进过程中鸭嘴掘地成穴直接投种。而目前的播种质量监测方式均体现在导种管处安装传感器监控管内种子(流),对于不含导种管结构的穴播器播种质量监测存在较大局限性。因此,研发适用于机械齿盘式穴播器的播种质量检测系统对推进棉花生产过程向精准高效机械化、精量智能化发展有着重要意义。

目前播种质量检测手段中以光电检测技术[3-5]发展最为成熟,其简单、动态响应速度快的特点广受青睐,但光电法仍无法突破穴播器无导种管机械结构的限制。近些年来,电容法因其极板设计灵活性强、成本低、抗尘性能高的优点进入大众视野。电容法最早被普遍应用于谷物含水率的测量,根据水与干燥谷物相对介电常数不同这一特性,通过监测电容的变化确定含水率[6-7]。在播种质量检测方面,周利明等[8-9]首先提出利用改进的差分结构电容器捕获种子质量流量信号,构建AD7746微电容检测电路实现弱信号高精度测量。侯加林等[10]根据电容随极板间介质体积变化这一特性设计圆柱形电容器将蒜种形态差异转换为电容差异,实现蒜种麟芽方向判定。共面型电容极板在木材含水率[11]、冰雪覆盖率[12]等单侧有限空间内的非接触式测量为播种监测提供了新思路:将传统对置式极板转换为共面电极后利用电场边缘效应感知检测场内介质变化[13]。利用电容极板灵活多变的结构特点,可有效突破检测空间对传感器安装尺寸的限制。

本文针对新疆广泛应用的机械齿盘式穴播器,基于微电容信号检测的方式,设计一种共面叉指电极结构的播种传感器,利用滤波寻峰算法捕获种子脉冲,对寻到的种子信号进行标注,从而计算实时播量。

1 检测原理及整体方案设计

1.1 检测对象及安装位置

如图1所示,穴播器内部固定的隔种圈将穴播器内空间分为前后2个腔,取种盘携带种子到达隔种圈空缺口时,因缺少隔种圈支撑落入另一侧分种腔。取种盘与隔种圈之间有3~4 mm间隙,隔种圈厚度1.5 mm,传感器厚度约0.64 mm,隔种圈空缺口边缘处开槽0.5 mm,嵌入传感器,在种子落入分种腔前检测窝穴取种状态。

1.2 播种传感器检测原理

播种传感器基于变介电常数电容检测的原理实现,棉种通过检测电场时改变空间介电常数从而引起输出电容信号变化。传感器敏感单元采用共面叉指电极排列方式,利用共面电极间的电场边缘效应形成棉种检测电场。传感器敏感单元结构如图2所示,共面的激励电极和感应电极交错排列组成N对叉指电极。其中l为叉指电极长度,$2a$为相邻电极齿距,d为叉指电极宽度,λ为空间波长。

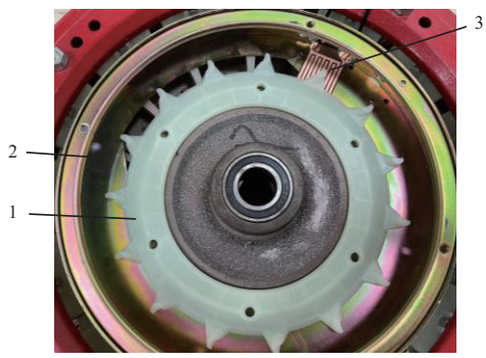


图1 播种传感器安装位置

Fig. 1 Installation position of sowing sensor

1. 取种盘. 2. 隔种圈. 3. 传感器

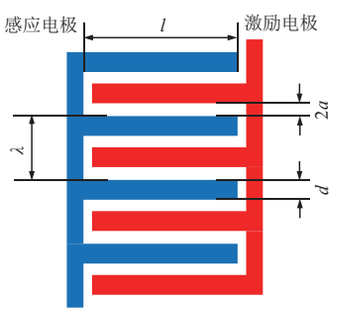


图2 叉指电极结构示意图

Fig. 2 Schematic of interdigital electrode structure

向传感器激励电极施加电压时,在叉指电极表面形成高度为h的非均匀检测电场,场内电场线内密外疏、方向由正极指向负极,如图3所示。

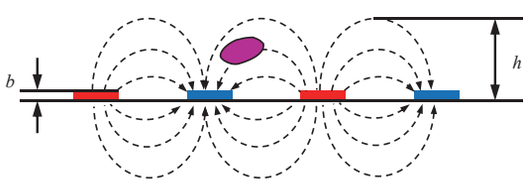


图3 播种传感器检测原理

Fig. 3 Principle of sensor detection

传感器一对叉指电极基础电容C_0可等效为相邻电极相对壁形成的平行板电容C_1与边缘场电容C_2的叠加。其中C_1计算式为

$$C_1 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 lb}{2a} \tag{1}$$

式中 ε_0——真空介电常数,取8.854×10^{-12} F/m

ε_1——叉指电极间隙填充介质相对介电常数

b——电极厚度,mm

C_2电容贡献值的计算较为复杂,需要施加施瓦兹-克里斯托费尔保角映射变换[14](Schwarz-Christoffel mapping),将z平面内共面叉指电极结构映射到w平面内平行板电极结构,然后依据椭圆函数的模进行第一类椭圆积分计算,从而确定映射后叉指电极边缘电场的电

容C_2。以相邻两电极中心作为零点建立z平面内空间坐标，将z平面内区域边界上的点映射至w平面内顶点的SC变换公式为

$$w = A\left|\int \prod_{j=1}^{4} \mathrm{Re}\left(\left[-i\sinh\left(\frac{\pi}{2}\left(z - z_j\right)\right)\right]^{-\frac{1}{2}}\right)\right| \mathrm{d}z + C \quad (2)$$

式中　A——伸缩系数

确定变换各点值

$$z_j = (j-1)\frac{m}{n-1} \quad (3)$$

式中　j——映射点个数

m——各点映射模量

对于矩形域变换，通过第一类椭圆积分函数表示，并以相邻两点边长比值消掉伸缩系数，减小未知量求解，有

$$w = \int \left(1-\xi^2\right)^{-\frac{1}{2}}\left(1-k^2\xi^2\right)^{-\frac{1}{2}}\mathrm{d}\xi \quad (4)$$

式中　ξ——椭圆积分变量

k——椭圆积分的模

对于叉指电极对数大于2的极板，取$k=\cos\frac{\pi d}{2(d+2a)}$，$k'=\sqrt{1-k^2}$。得到$w$平面内平行板电容的极板间距为$2K(k)$，极板宽度为$K(k')$，则有边缘电容

$$C_2 = l\varepsilon_0\frac{\varepsilon_2+\varepsilon_3}{2}\frac{K(k)}{K(k')} \quad (5)$$

式中　ε_2——棉种相对介电常数

ε_3——基底相对介电常数

对于N对叉指电极，总电容$C=(2N-1)C_0$，整理后得到传感器基础电容C

$$C = \frac{\varepsilon_1 lb}{2a}\frac{(2N-1)\varepsilon_0 l}{2}\left[\frac{\varepsilon_1 b}{a} + \left(\varepsilon_2+\varepsilon_3\right)\frac{K(k)}{K\left(\sqrt{1-k^2}\right)}\right] \quad (6)$$

式中，电极常数κ满足

$$\kappa = \frac{2K\left(\sqrt{1-k^2}\right)}{K(k)} \quad (7)$$

播种传感器的总电容与极板电极长度l、极板对数N、相邻电极齿距$2a$、电极宽度d、电极厚度b等参数呈非线性相关。当棉种经过极板上方信号检测区时，引起电容变化，变化量为

$$\Delta C = C_{\mathrm{meas}} - C \quad (8)$$

式中　C_{meas}——电容检测值

1.3　检测系统总体方案设计

检测系统总体设计如图4所示，硬件结构包括叉指电极敏感单元、电容信号采集模块和上位机。其中信号采集模块包括微小电容检测电路、基于STM32F103C8T6主控芯片的微控制器处理单元、电路通信单元和检测电路供电模块。取种盘携棉种通过叉指电极敏感单元时产生微弱电容信号，信号采集模块基于电荷平衡原理将待测物理量转换为数字信号输出[14]，通过USART发送至上位机。上位机完成信号滤波寻峰算法处理后反馈取种盘存种状态，从而为棉种播种质量提供判断依据。

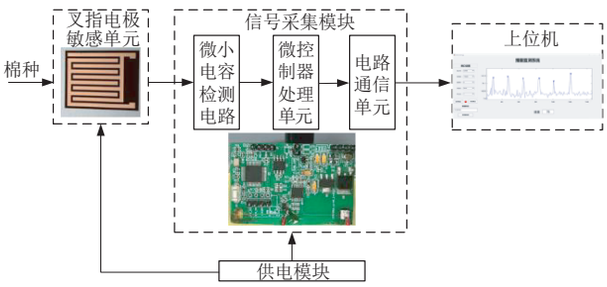


图4　检测系统总体方案框图

Fig. 4　Block diagram of detection system

2　传感器结构设计

2.1　基于响应曲面法的叉指电极参数优化

叉指电极的各项参数对传感器性能有极大影响[15]，从工程应用角度出发，取传感器信号显著性最大、检测精度最高作为传感器性能提升评价指标。控制变量对叉指电极结构参数分别实验，分析相关参数与检测电容的相应关系与变化趋势，利用Box-Behnken响应面优化方法对结构设计寻优。

传感器信号显著性取决于基础电容C，基础电容越大，信号反馈越强，有利于提升信噪比[16]。而传感器检测精度可由棉种通过引起的电容变化量ΔC决定，变化量越大，信号区分性能越强，检测精度越高。

机械式棉花穴播器的工作转速为20~30 r/min，取种盘1圈14穴，半径110 mm，棉种尺寸近乎椭球形（长轴1.2 cm，短轴0.5 cm）。为保证采样不失真，极板长度L需满足

$$qv_{\max}t_{\mathrm{response}} \leqslant L < D \quad (9)$$

式中　q——安全系数，取3

t_{response}——最大采样周期，ms

$v_{\max}$——待测棉种最大线速度，m/s

D——取种盘相邻窝穴之间弧长，取50 mm

当穴播器转速为30 r/min时，$v_{\max}=0.35$ m/s，$t_{\mathrm{response}}=33$ ms，有极板长度$L=35$ mm。考虑隔种圈内安装尺寸限制，取敏感单元极板尺寸为35 mm×40 mm。由式（6）得，基础电容C与极板对数N正相关，但过多的极板对数会超出极板尺寸限制并增加漏电阻，不利于微弱信号的检测。取极板对数N=4，基底材料为FR4（环氧玻璃布层压板），相对介电常数$\varepsilon_3=4.2$，电极材料为铜箔，测试棉种为新陆早78号棉花种子（千粒质量84.40 g，含水率4.45%）。通过LCR测试仪分别测量极板空载时电容、棉种以工作速度通过时的电容变化。建立三因素三水平正交试验探究电极宽度d、相邻电极齿距$2a$、电极厚度b对基础电容C和电容变化量ΔC的影响，分别以X_1、X_2、X_3作为电极宽度、相邻电极齿距、电极厚度试验因素

编码值，Y_1、Y_2为基础电容和电容变化量观测指标响应值，确定各试验因素编码如表1所示。

表1 试验因素编码

Tab. 1 Experimental factors and codes

编码	因素		
	电极宽度 d/mm	相邻电极齿距 $2a$/mm	电极厚度 b/mm
−1	2	1.0	0.035
0	3	1.5	0.065
1	4	2.0	0.100

先验试验中已确定取种盘空转时引起电容变化(0.002 pF)远小于棉种变化引起的pF量级，因此可忽略取种盘对电容变化的影响。每组别下测量10次取均值计算观测指标。试验方案与结果如表2所示，X_1、X_2、X_3为编码值。

采用2次多项式拟合得到各目标函数响应关系式为

$$Y_1 = 11.07 + 0.976X_1 - 0.647X_2 + 0.146X_3 + 0.021X_1X_2 - 0.538X_1^2 + 0.16X_2^2 \quad (10)$$

$$Y_2 = 0.034\,1 + 0.010\,4X_1 - 0.003\,4X_2 + 0.008\,6X_3 - 0.001\,8X_1X_2 + 0.005\,1X_1X_3 + 0.002\,3X_2X_3 - 0.000\,2X_1^2 + 0.003\,5X_2^2 \quad (11)$$

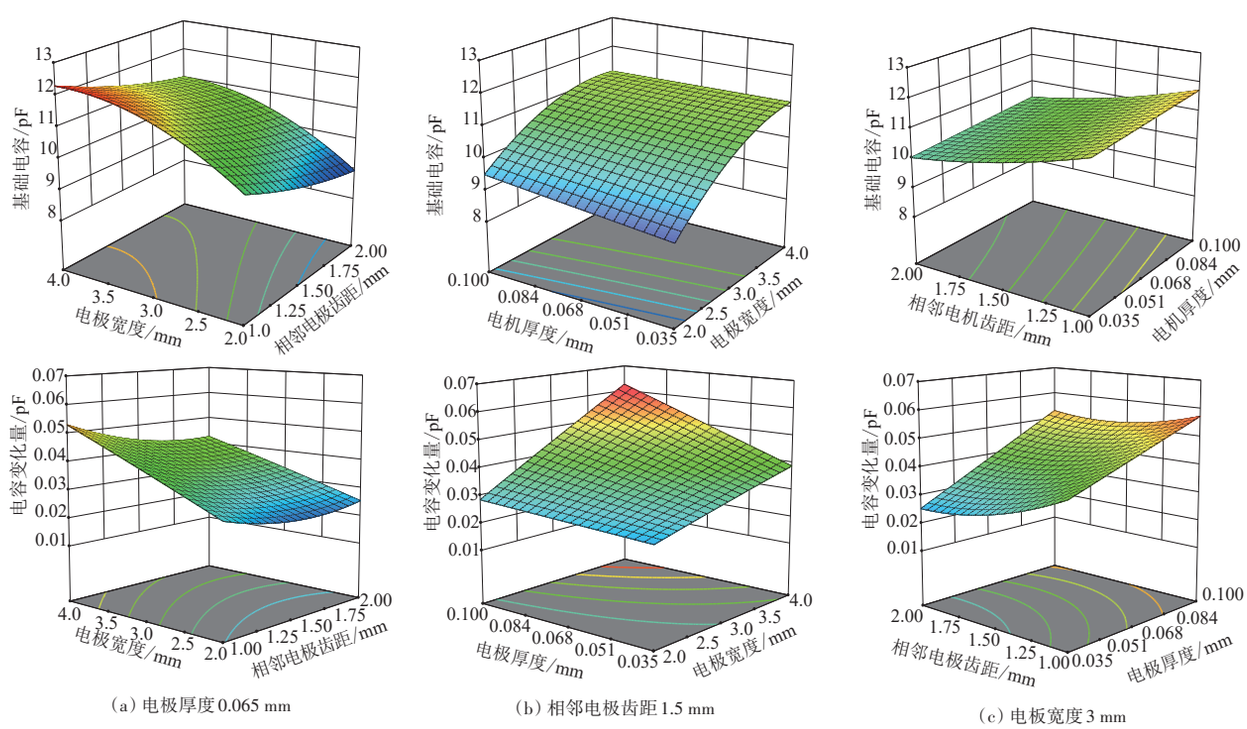
模型P_1<0.01，决定系数R_1^2=0.994 0，变异系数为1.46%(<10%)，模型P_2<0.05，决定系数R_2^2=0.981 9，变异系数为8.95%(<10%)。表明两组模型多元回归方程显著，拟合度好，信号有效反映各参数与观测指标的关系。

表2 试验结果

Tab. 2 Test results

序号	因素			Y_1/pF	Y_2/pF
	X_1	X_2	X_3		
1	1	1	0	10.993 1	0.042 7
2	−1	0	−1	9.240 1	0.018 5
3	−1	−1	0	10.410 1	0.027 1
4	−1	1	0	8.927 0	0.026 6
5	1	−1	0	12.392 0	0.050 5
6	0	−1	1	11.904 3	0.047 4
7	0	1	1	10.737 1	0.042 5
8	1	0	1	11.520 1	0.059 5
9	−1	0	1	9.944 8	0.028 1
10	1	0	−1	11.421 7	0.029 5
11	0	−1	−1	11.702 7	0.037 6
12	0	1	−1	10.572 9	0.023 0

图5为各因素相互作用对信号显著性(基础电容)和检测精度(电容变化量)的影响。信号显著性随着电极宽度的增加呈非线性增强，但在电极宽度d>3.5 mm时，正向增强作用明显减弱，趋于平缓。而相邻电极齿距的增加对信号显著性起削弱作用，且在电极宽度较小时(d<2.5 mm)削弱程度更剧烈。增加电极厚度对提升信号显著性及精度均具有正向作用，当电极厚度d满足0.068 mm<d<0.1 mm时，电极宽度对信号显著性的正向激励作用减弱，但可显著提升检测精度。



(a) 电极厚度0.065 mm (b) 相邻电极齿距1.5 mm (c) 电极宽度3 mm

图5 各因素对观测指标影响的响应曲面

Fig. 5 Response surface of each factor on observed indicators

总的来看，增加电极宽度和电极厚度，减小相邻电极齿距有利于提升信号显著性和检测精度，且改变电极宽度对增强信号的效果更明显，但过度提升电极宽度往往会降低传感器可靠性，因此需对参数进行边界约束[17]。以电极常数作为传感器可靠性指标，根据以往传感器结构设计经验，以提升传感器检测可靠性作为优化

目标时，要求电极常数κ尽可能小[18]。由式(7)得，电极常数κ与叉指电极比例$\frac{d}{d+2a}$之间关系如图6所示。

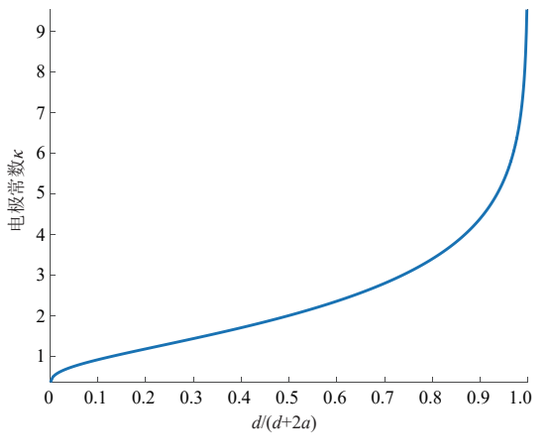


图6　叉指电极比例与电极常数关系曲线

Fig. 6　Relationship between interdigitated electrode ratio and electrode constant

当$\frac{d}{d+2a}$>0.75(κ_{max} = 3.02)时，κ近似爆发式指数增长，信号显著性增强的损耗为可靠性急剧降低。工程应用时取κ_{TH} = 0.75κ_{max}，当κ < 0.75κ_{TH}时往往不利于区分检测信号[19]。计算得到$\frac{d}{d+2a}$ = 0.65，确定最优电极参数为电极宽度d=3.7 mm，相邻电极齿距2a=1 mm，电极厚度b=0.1 mm。按照最优电极参数组合重复3次试验，得到基础电容平均值为12.522 6 pF(相对标准偏差为0.51%)，电容变化量ΔC为0.060 3 pF(相对标准偏差为0.27%)。

2.2　敏感单元屏蔽处理

共面型叉指电容形成的空间电场为上下2层内密外疏非均匀场，实际应用中进行非电量测量时应对极板进行屏蔽处理，防止外界潜在电磁干扰[20-21]。同时，屏蔽层可以集中场能，增强信号显著性和精度，即提升传感器对棉种的检测能力，如图7所示。

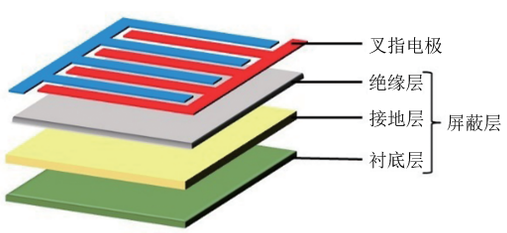


图7　敏感单元屏蔽结构示意图

Fig. 7　Schematic of shielding structure for sensitive unit

极板均采用无胶材料，其中叉指电极正面裸铜采用OSP抗氧化处理；绝缘层为绝缘非金属材料树脂，约0.5 mm；接地层为整版铜不蚀刻，约0.035 mm，防止敏感单元上表面电场泄漏；衬底层为聚酰亚胺Pi绝缘材料，约0.035 mm，具备良好的热导性并有效隔离电流。通过屏蔽处理后，可使叉指电极场能分布集中在极板上表面，如图8所示。

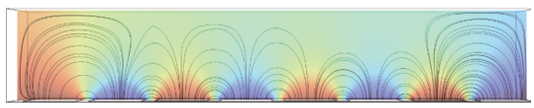


图8　屏蔽处理后叉指电极场能分布示意图

Fig. 8　Electric field distribution of shielded interdigitated electrodes

经屏蔽处理改进后的极板厚度为0.64 mm，基础电容C为13.94 pF，相对提升变化量为0.16 pF，如图9所示。信号显著性及测量信号精度提升效果显著。

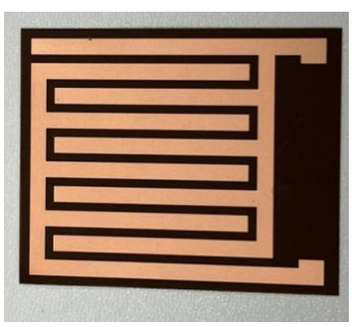


图9　屏蔽处理的传感器敏感单元

Fig. 9　Shielded sensor sensing unit

2.3　信号采集单元设计

信号采集模块总体设计包括微小电容检测电路、微控制器处理单元、电路通信单元和供电单元，如图10所示。微小电容检测电路与微控制器处理单元通过I^2C协议通讯。

微小电容检测单元基于ADI电容数字转换芯片AD7745搭建外围电路，敏感单元叉指电极接入CAP端输入，测量电容值在pF量级。芯片满量程变化范围为±4 pF，可支持共模电容至17 pF，采样率为10~90 Hz可调，可工作在单端或差分模式[22]。在测量叉指电极电容前，设置芯片为单端输入工作方式，搭建AD8515扩容电路增大检测量程范围并对AD7745进行共模电容补偿。

实际动态测量范围C_{ref}满足

$$C_{ref} = 4.096F \tag{12}$$

式中　F——扩容电路增益因子

$$F = \frac{V_{EXC(A-B)}}{V_{EXCS}} = \frac{R_1 + R_3}{|R_1 - R_3|} \tag{13}$$

式中　$V_{EXC(A-B)}$——AD7746激励电压，V

V_{EXCS}——AD8515衰减激励电压，V

取R_1 = 43 kΩ，R_3 = 75 kΩ，计算得到扩展后的动态测量范围C_{ref} = 15.104 pF。进行共模电容补偿时，共模电容补偿量C_{DAC+}满足

$$C_{DAC+} = 3.2C_{ref} \tag{14}$$

此时有检测电容表达式

$$C_{meas} = \frac{d_{DATA} - 0x800000}{0x800000} C_{ref} + C_{DAC+} \tag{15}$$

式中d_{DATA}为寄存器Cap Data H\M\L读取的24位转换结果。在嵌入式系统中编写测量电容软件采集叉指电极测量值C_{meas}，如图11所示。

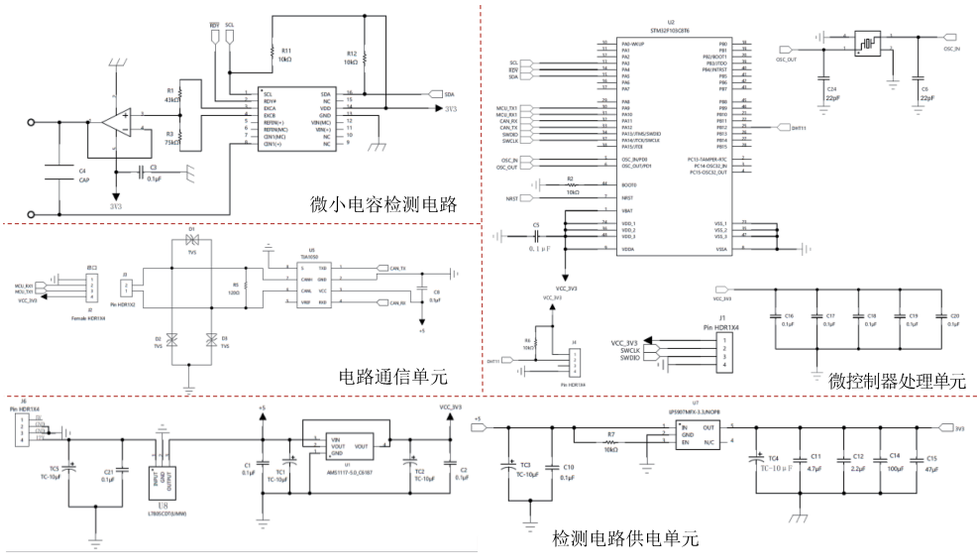


图10 信号采集模块电路

Fig. 10 Signal acquisition module circuit

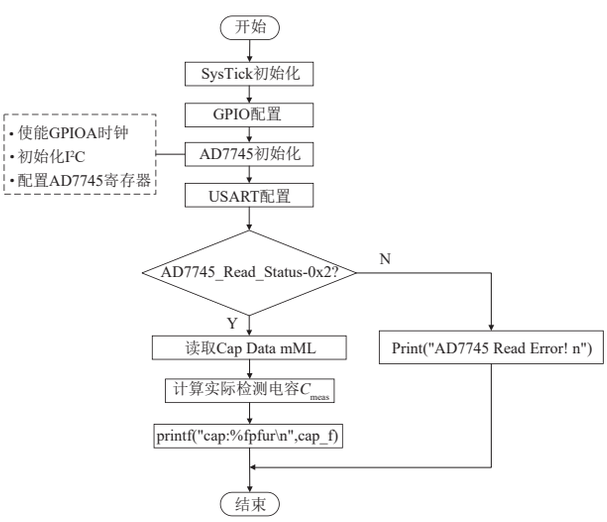


图11 电容测量软件流程图

Fig. 11 Flowchart of capacitance measurement software

3 上位机设计

3.1 种子信号滤波-寻峰算法设计

棉种到达检测区域时出现电容脉冲,传感器采集的原始电容信号中存在大量电气毛刺噪声需要剔除(图12),且棉花种子引起的电容变化不一,无法用固定阈值筛选。对于统计特性变化无规律的信号,采用自适应阈值正交小波变换滤波去噪,过滤电气毛刺噪声[23-24],并基于二阶导数对滤波重构信号寻峰,辨认种子信号峰。

设定含噪信号为$f(t)=x(t)+n(t)$,其中$x(t)$表示有效信号,$n(t)$表示噪声信号。对信号采用正交小波变换,其过程描述为

$$\begin{cases} u = W(f) \\ \tilde{u} = D(u,t_{\mathrm{th}}) \\ \hat{x} = W^{-1}(\tilde{u}) \end{cases} \tag{16}$$

式中,$W()$和$W^{-1}()$分别表示正交小波分解及重构运算。

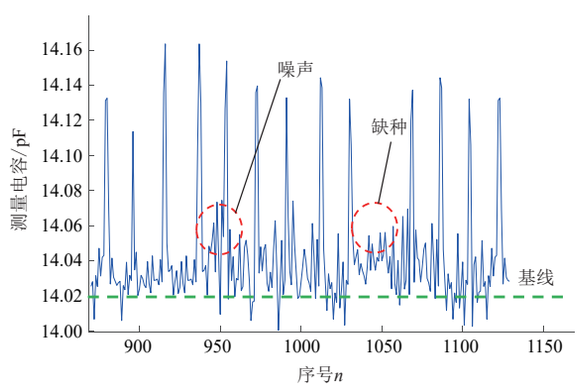


图12 原始信号

Fig. 12 Original signal

分解小波基为sym3,消失矩为3,分解层数为4,有效减少信号重构过程中的相位失真。$D()$为去噪函数,$\tilde{u}$为经过滤波去噪的小波系数,t_{th}为小波系数阈值且满足$t_{\mathrm{th}}=\sigma\sqrt{2\lg S}/\lg(\zeta+1)$,其中$\zeta$为分解尺度,$\sigma^2$为噪声方差,$S$为信号长度,$\tilde{u}$满足自适应阈值函数

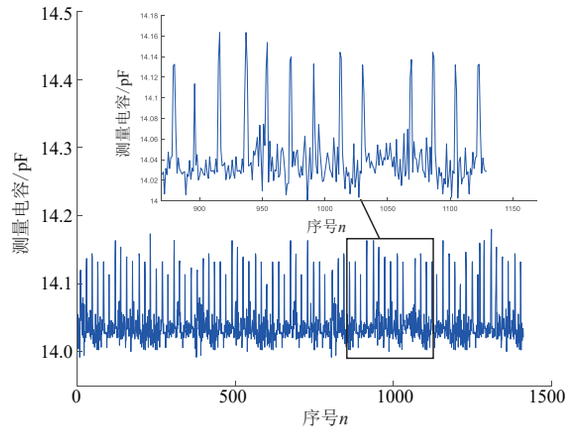
$$\tilde{u} = \begin{cases} x - 0.5\mathrm{sgn}(x)\dfrac{t_{\mathrm{th}}^{m_{\mathrm{p}}}}{|x|^{m_{\mathrm{p}}-1}} & (|x|>t_{\mathrm{th}}) \\ 0.5\mathrm{sgn}(x)\dfrac{|x|^{m_{\mathrm{p}}+1}}{t_{\mathrm{th}}^{m_{\mathrm{p}}}} & (|x|\leqslant t_{\mathrm{th}}) \end{cases} \tag{17}$$

式中,可调参数m_{p}通过各分解尺度下的低频小波能量$E_{a\zeta}$及高频率小波能量$E_{n\zeta}$定义,即

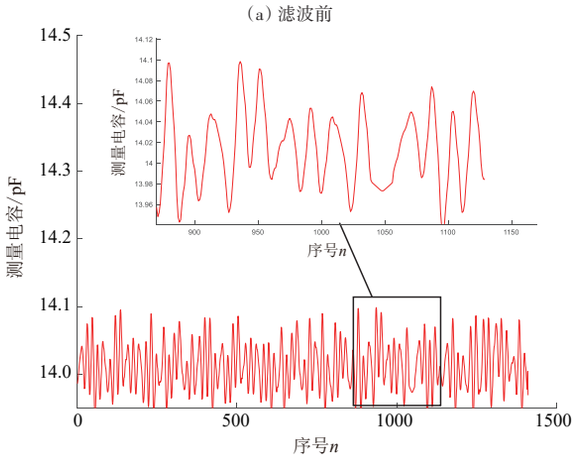
$$m_{\zeta} = 1 + 10\frac{E_{n\zeta}}{E_{a\zeta}} \tag{18}$$

在对小波系数自适应滤波去噪后重构信号得到图13b,信号处理前后对比如图13所示。

对信号滤波去噪后基于二阶导数筛选种子峰,根据0.675倍二阶导数标准偏差确定二阶导数阈值[25]。当二阶导数小于负阈值时判定此处为种子峰,在原始信号中标注,如图14所示。



(a) 滤波前



(b) 滤波后

图 13　自适应阈值正交小波变换信号

Fig. 13　Adaptive thresholding orthogonal wavelet transform signal

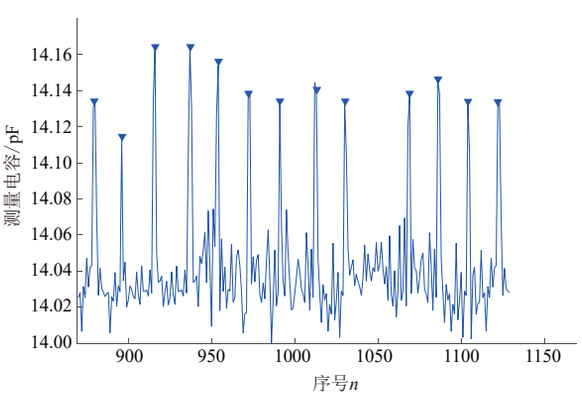


图 14　电容脉冲信号寻峰

Fig. 14　Capacitive pulse signal peak detection

3.2　GUI设计

在上位机 Matlab 中搭建 GUI，串口实时采集电容信号，滤波寻峰后实时反馈当前播量，并将寻峰结果可视化，如图 15 所示。

4　试验与结果分析

4.1　试验台架

试验台架包括双仓转盘式棉花竖直圆盘穴播器、步进电机控制器、播种传感器，如图 16 所示。步进电机控制穴播排种器转速，播种传感器通过串口将采集电容信号上传至上位机处理。

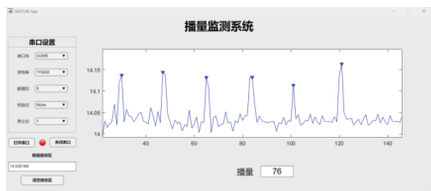


图 15　上位机界面

Fig. 15　Upper computer interface

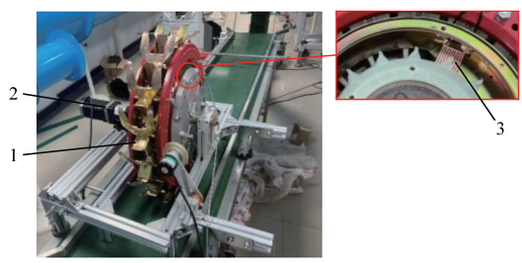


图 16　试验台架

Fig. 16　Test bench

1. 双仓转盘式棉花竖直圆盘穴播器　2. 步进电机控制器　3. 播种传感器

4.2　传感器量程及频率范围

对于这类非标传感器，目前仍缺少具体标准文件对播种传感器的性能指标测试作出明确规范，根据传感器农机应用场景选取量程、频率范围作为传感器性能指标。

传感器量程 U 由 AD7745 数字电容芯片外围电路参数决定，扩容后得到量程 U = 15.104 pF，而传感器的频率范围由寄存器配置决定，5 Hz ≤ f ≤ 45 Hz，传感器量程及频率范围均满足农机播种作业实际测量需求。

4.3　不同转速下的播量实时检测试验

调整步进电机控制器带动穴播器分别以工作转速 20、25、30 r/min 转动 20 周（约 280 目种子），设置采样周期为 11 ms。在相同试验条件下每个转速下重复 6 组试验，在每组试验中分别统计传感器记录播量与人工记录播量，得到不同转速下播量实时检测情况如表 3 所示。

表 3　播量实时检测结果

Tab. 3　Real-time detection results of broadcast volume

转速/(r•min^{-1})	棉花种子数		相对误差/%
	实际值	测量值	
20	268	270	0.746
	277	274	−1.082
	285	286	0.351
	278	280	0.719
	283	280	−1.061
	280	281	0.357
25	277	279	0.722
	289	285	−1.384
	281	277	−1.422
	273	278	1.836
	288	293	1.736
	278	274	−1.440
30	286	280	−2.094
	289	293	1.386
	268	261	−2.604
	278	283	1.799
	283	289	1.403
	285	278	−2.456

由表3可以发现，当穴播器转速在20 r/min时，棉花种子实际播量和理论播量之间相对误差较小，介于-1.082%~0.746%之间。而随转速增加，实际值与测量值之间相对误差增大，最高偏离-2.604%，这是由于随着转速增加，机械振动加剧，信号中电气干扰噪声水平增加，可能会掩盖信号真实特征，从而引入重构误差。

5 结论

（1）基于电容法设计了适用于机械齿盘式穴播器的播种传感器。以信号显著性和检测精度为优化目标建立三因素三水平响应曲面试验，以可靠性为边界约束条件确定传感器电极结构参数。并对传感器敏感单元采用内部屏蔽处理，集中场能，进一步提升信号显著性及检测精度。

（2）针对传感器采集原始信号中的电气毛刺噪声提出滤波-寻峰算法，基于自适应阈值正交小波变换对传感器采集信号滤波，滤波信号经平滑处理后通过二阶导数阈值寻峰，在搭建的上位机界面中实时反馈播量信息。

（3）搭建穴播器试验台架，在不同转速下测量传感器播量实时检测性能，试验表明，穴播器转速在20~30 r/min时，实际播量和测量播量之间相对误差介于-2.604%~1.836%之间，均小于5%，传感器具有较高的检测精度。

参 考 文 献

[1] 沈丽. 棉花精量播种技术现状及应用[J]. 农业技术与装备，2022，4(4)：84－86.
SHEN Li. Present Situation and application of cotton precision sowing technology[J]. Agricultural Technology and Equipment，2022，4(4)：84－86.(in Chinese)

[2] 廖庆喜，雷小龙，廖宜涛，等. 油菜精量播种技术研究进展[J]. 农业机械学报，2017，48(9)：1－16.
LIAO Qingxi，LEI Xiaolong，LIAO Yitao，et al. Research progress of precision seeding for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2017，48(9)：1－16.(in Chinese)

[3] 丁幼春，陈礼源，董万静，等. 油菜宽幅播种作业监测系统设计与试验[J]. 农业工程学报，2021，42(6)：43－51.
DING Youchun，CHEN Liyuan，DONG Wanjing，et al. Design and test of monitoring system for rapeseed sowing quality[J]. Transactions of the CSAE，2021，42 (6)：43－51.(in Chinese)

[4] JACEK MAJCHER，MARCIN KAFARSKI，et al. Prototype of a sensor for measuring moisture of a single rapeseed (*Brassica napus* L.) using microwave reflectometry[J]. Measurement，2023，214：112－128.

[5] 张甜，蒋乐，李兆东，等. 光纤计数式油菜精量排种器种子流检测系统研究[J]. 农业机械学报，2023，54(1)：64－74.
ZHANG Tian，JIANG Le，LI ZhaoDong，et al. Seed flow detection system of optical fiber counting rapeseed precision metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(1)：64－74.(in Chinese)

[6] 陈进，王月红，练毅，等. 高频电容式联合收获机谷物含水量在线监测装置研制[J]. 农业工程学报，2018，34(10)：36－45.
CHEN Jin，WANG Yuehong，LIAN Yi，et al. Development of on - line monitoring device of grain moisture content in combine harvester with high frequency capacitance[J]. Transactions of the CSAE，2018，34(10)：36－45.(in Chinese)

[7] 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. Design and test of capacitive detection system for wheat seeding quantity[J]. Transactions of the CSAE，2018，34(18)：51－58.(in Chinese)

[8] 周利明，李树君，张小超，等. 基于电容法的棉管籽棉质量流量检测[J]. 农业机械学报，2014，45(6)：47－52.
ZHOU Liming，LI Shujun，ZHANG Xiaochao，et al. Detection of seedcotton mass flow based on capacitance approach[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2014，45(6)：47－52.(in Chinese)

[9] 周利明，王书茂，张小超，等. 基于电容信号的玉米播种机排种性能监测系统[J]. 农业工程学报，2012，28(13)：16－21.
ZHOU Liming，WANG Shumao，ZHANG Xiaochao，et al. Seed monitoring system for corn planter based on capacitance signal[J]. Transactions of the CSAE，2012，28(13)：16－21.(in Chinese)

[10] 侯加林，方立志，李玉华，等. 基于电容检测技术的蒜种鳞芽扶正装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2023，54(4)：63－72.
HOU Jialin，FANG Lizhi，LI Yuhua，et al. Design and tset of garlic clove orientation device based on capacitive detection technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(4)：63－72.(in Chinese)

[11] 孔令宇. 基于叉指型电容传感器的木材含水率检测系统研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2016.
KONG Lingyu. Research on wood moisture measurement system based on interdigitated single planar capacitance sensor[D]. Harbin：Haibin Engineering University，2016.(in Chinese)

[12] 朱永灿，熊浩男，田毅，等. 基于叉指电容效应的光伏组件覆冰雪监测技术[J]. 高电压技术，2022，48(1)：20－28.
ZHU Yongcan，XIONG Haonan，TIAN Yi，et al. Monitoring technology of ice - snow - covered photovoltaic modules based on interdigital capacitance[J]. High Voltage Engineering，2022，48(1)：20－28.(in Chinese)

[13] 胡钧铭，戴强，刘军，等. MEMS电容型器件边缘效应研究[J]. 电子测量与仪器学报，2023，37(2)：76－82.
HU Junming，DAI Qiang，LIU Jun，et al. Research on fringing effect of MEMS capacitive devices[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation，2023，37(2)：76－82.(in Chinese)

[14] WANG J，JIN Z，LI Z，et al. Realization of planar and surface conformal mappings through stress - free growth of hyperelastic plates：analytical formulas and numerical calculations[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids，2024，190(2)：27－43.

[15] 胥善治，王鹏，董永贵，等. 平面叉指电极溶液阻抗的低频三角波测量[J]. 仪器仪表学报，2016，37(2)：387－394.

XU Shanzhi, WANG Peng, DONG Yonggui, et al. Measurement of planar - interdigitated electrolyte impedance by triangular waveform voltage at low frequencies[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(2): 387 - 394.(in Chinese)

[16] GAO Qiyuea, SHAO Zhitaoa, SUN Simina, et al. Boosting photoresponse of self - powered photoelectrochemical photodetectors via planar interdigital electrodes[J]. Advanced Optical Materials, 2024,12(13): 651 - 662.

[17] YOGESH H, SHRUTI S, SOMNATH L, et al. Unraveling the properties of interdigital electrode - based γ - In2Se3 photodetectors for optimal performance[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(17): 80 - 92.

[18] 郑培亮，李倩，王淑香，等. 基于叉指电容阵列模块的宽量程微纳力源装置[J]. 计量科学与技术，2021(2)：49 - 53.
ZHENG Peiliang, LI Qian, WANG Shuxiang, et al. Wide range micro - nano force source device based on interdigital capacitor array module[J]. Metrology Science and Technology, 2021(2): 49 - 53. (in Chinese)

[19] WELLS B, BAKER E, FARWELL A, et al. An adjustable parallel - plate capacitor instrument - test of the theoretical capacitance formula[J]. American Journal of Physics, 2016, 84(9): 723 - 726.

[20] 刘剑，李永刚，黄猛，等. 小型机载光电平台电磁屏蔽设计[J]. 红外与激光工程，2016，45(9)：236 - 241.
LIU Jian, LI Yonggang, HUANG Meng, et al. Design of electromagnetic shielding for minitype airborne electric - optical platform[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(9): 236 - 241.(in Chinese)

[21] 雷虎成，夏善红，彭春荣，等. 一种压电驱动互屏蔽电极 MEMS 电场传感器[J]. 微纳电子与智能制造，2020，2(4)：52 - 58.
LEI Hucheng, XIA Shanhong, PENG Chunrong, et al. Piezoelectric driven MEMS electric field sensor with mutual shielding electrodes [J]. Micro/nano Electronics and Intelligent Manufacturing, 2020, 2(4): 52 - 58. (in Chinese)

[22] 郭强，谢康，姜海明，等. 电容数字转换器 AD7745 的工作原理和应用[J]. 现代电子技术，2008 (14)：170 - 172.
GUO Qiang, XIE Kang, JIANG Haiming, et al. Principle and application of capacitance to digital converter AD7745 [J]. Modern Electronics Technique, 2008(14): 170 - 172.(in Chinese)

[23] 刘佳昱，黄亦翔，李炳初，等. 基于双正交小波变换 QRS 波检测方法研究与改进[J]. 机电一体化，2014，20(5)：21 - 25.
LIU Jiayu, HUANG Yixiang, LI Bingchu, et al. QRS Wave detection method and improvement based on biorthogonal wavelet transform [J]. Mechatronics, 2014, 20(5): 21 - 25. (in Chinese)

[24] 薛忠新，呼少平，张艳军，等. 皮带机故障诊断中基于自适应小波阈值去噪法的应用[J]. 机械设计与研究，2023，39(4)：213 - 216.
XUE Zhongxin, HU Shaoping, ZHANG Yanjun, et al. Application of adaptive wavelet threshold denoising method in fault diagnosis of belt conveyor[J]. Machine Design & Research, 2023, 39(4): 213 - 216.(in Chinese)

[25] 何伟健，程良伦，邓广水. 吸收峰混叠的太赫兹光谱区间组合特征提取算法[J]. 光谱学与光谱分析，2020，40(2)：403 - 409.
HE Weijian, CHENG Lianglun, DENG Guangshui. Terahertz spectral interval combination feature extraction algorithm in the case of aliasing absorption peak[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(2): 403 - 409.(in Chinese)

(上接第124页)

[20] 李中复，唐维铁，熊文才. 行走机械 LUDV 控制及负载平衡补偿[J]. 机床与液压，2013，41(4)：102 - 104.
LI Zhongfu, TANG Weitie, XIONG Wencai. LUDV control for mobile machine and load balance compensating[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2013, 41(4): 102 - 104. (in Chinese)

[21] LUO Y, CHEN W, CHI B. Modeling and simulation analysis of pre-valve compensation of flow-saturated resistant system [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 735(1): 012071.

[22] WANG H, FENG Z. A Review of flow saturation resistant techniques in multi-actuators load sensing hydraulic system [J]. Journal of Engineering Mechanics and Machinery, 2023, 8(3): 42 - 51.

[23] 张国泰. 负载口独立控制阀及系统的研究[D]. 秦皇岛：燕山大学，2020.
ZHANG Guotai. Study on independent metering control valve and system[D]. Oinhuangdao: Yanshan University, 2020. (in Chinese)

[24] 贾铭新，陈雪峰，刘博. 液压传动与控制[M]. 4 版. 北京：电子工业出版社，2017.

[25] 陶柳，徐化文，方婷. 阀后补偿负载敏感液压系统优化设计及 AMESim 仿真研究[J]. 机床与液压，2021，49(16)：150 - 153.
TAO Liu, XU Huawen, FANG Ting. Optimal design and AMESim simulation of the after-valve compensation load sensitive hydraulic system[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(16): 150 - 153. (in Chinese)