

玉米种子活力逐粒无损检测与分级装置研究

王亚丽^{1,2} 彭彦昆^{1,2} 赵鑫龙^{1,2} 沈柳杨^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 国家农产品加工技术装备研发分中心, 北京 100083)

摘要: 基于近红外反射光谱分析技术, 设计了玉米种子活力逐粒无损检测与分级装置, 该装置主要由单粒化装置、输送管道、近红外光谱采集系统、控制系统和分级装置等组成。种子单粒化装置由一个带孔的倾斜转盘和一个固定托盘组成。输送管道与固定托盘出种口连接, 其末端为光谱采集单元。种子由单粒化装置分离后, 经输送管道落至光谱采集区进行光谱分析及活力判断, 之后由分级装置对判别完成的种子进行分级。带孔圆盘用于将种子单粒化, 其工作效率是提高种子检测及分级速率的关键。经分析得出, 决定单粒化装置单粒化效率的因素分别为转盘倾斜角、转盘速度和孔高度。为提高检测速率, 对单粒化装置进行了参数分析及优化试验。试验结果表明, 当转盘倾斜角为 31° 、转速为 0.5 r/s 、孔高度为 2.2 mm 时, 种子单粒化效率最优, 单通道可达 7 粒/s 。为建立玉米种子活力预测模型, 基于该装置分别采集了100粒正常有活力玉米种子和100粒人工老化无活力玉米种子在 $980\sim 1700\text{ nm}$ 波长范围的光谱数据, 对种子原始光谱进行不同方法的预处理, 并利用PLS-DA建立种子活力的定性判别模型。几种不同处理方式下的建模对比结果表明, SG-smooth预处理下的建模效果最优, 其中校正集的判别准确率为 98.7% , 预测集的判别准确率为 96% 。选取100粒种子对该装置预测模型的稳定性和准确性进行了验证试验, 种子活力预测的总准确率为 97% 。所设计的玉米种子活力逐粒无损检测分级装置单粒化效率较高, 光谱数据采集稳定, 对玉米种子活力进行实时无损检测及分级具有可行性。

关键词: 玉米种子; 近红外光谱; 活力; 无损检测; 分级

中图分类号: S237

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)02-0350-07

OSID:



Design and Experiment of Non-destructive Testing and Grading Device for Corn Seed Vigor

WANG Yali^{1,2} PENG Yankun^{1,2} ZHAO Xinlong^{1,2} SHEN Liuyang^{1,2}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. National R&D Center for Agro-processing Equipment, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on near-infrared reflectance spectroscopy technology, a non-destructive testing and grading device for corn seed vigor was developed, including single granulation device, conveying pipeline, near-infrared spectroscopy acquisition system, control system and grading device, etc. The seed granulation device consisted of an inclined turntable with holes and a fixed tray. The conveying pipe was connected with the fixed tray, and the end of it was a spectrum collecting unit. The seeds were separated by a single granulation device and then dropped into a spectral collection area through a delivery pipe for spectral analysis and viability determination, and then the classified seeds were classified by a classification device. The perforated disc was used for separating seeds, their working efficiency was key for seed detection and grading efficiency. According to analysis, there were three factors that determined the single granulation efficiency of the single granulation device: the tilt angle of the turntable, and the turntable speed and height of the hole. In order to improve the single granulation efficiency of corn seeds and improve the detection rate, the parameters analysis and optimization experiments were carried out on the single granulation device. The results showed that when the tilt angle of the turntable was 31° , the rotation speed was 0.5 r/s , and the height of the hole was 2.2 mm , the

收稿日期: 2019-07-03 修回日期: 2019-07-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0701205)

作者简介: 王亚丽(1991—),女,博士生,主要从事农畜产品无损检测技术与装备研究,E-mail: wyli_cau@163.com

通信作者: 彭彦昆(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事农畜产品无损检测技术与装备研究,E-mail: ypeng@cau.edu.cn

seed single granulation efficiency was optimal, and the single channel can reach 7 grains/s. In order to establish a corn seed vigor detection model, based on the device, spectral data of 100 normal viable corn seeds and 100 artificially aged non-viable corn seeds in the wavelength range of 980 ~ 1 700 nm were collected, and the qualitative discriminant model of seed vigor were established by utilizing the PLS - DA in different methods. When the number of principal factors was 5, the modeling comparison results under SG - smooth preprocessing was optimal. In the calibration concentration, there were one discriminant error of viable seeds and one discriminant error of non-viable seeds, and the discriminant accuracy rate was 98.7%. All the viable seeds in the predicted concentration were correctly discriminated, and the non-viable seeds had two judgment errors, the total discriminant accuracy was 96%. The stability and accuracy of the device were tested by selecting 100 seeds. The total accuracy of seed vigor prediction was 97%. The results indicated that the self-designed corn seed vigor particle-free non-destructive testing grading device had higher single granulation efficiency and stable spectrum acquisition. It was feasible to perform real-time non-destructive detection and grading of corn seeds.

Key words: corn seed; near-infrared spectroscopy; vigor; non-destructive detecting; grade

0 引言

随着现代农业机械技术的发展,尤其是精量播种机械的应用,对种子的品质提出了越来越高的要求^[1-3]。种子活力是国际种子检验协会提出的一个综合概念,种子活力是决定种子在发芽和出苗期间的活性水平和种子特性的综合表现,是检测种子品质的重要指标^[4]。常规种子品质检测方法主要有标准发芽试验、四唑试验(TZ)和电导率试验,这些方法所需时间较长、基于化学品、破坏种子,不符合现代农业生产对种子活力检测快速、无损的要求^[5]。

近红外(NIR)反射光谱技术是一种无损检测技术,通常用于预测种子的品质属性^[2]。国内外基于近红外光谱的相关研究较多,建立了对种子活力、品种的鉴别模型^[6-8],但这些研究大多是在静态条件下进行采集分析^[9]。国外开发出基于近红外的小麦种子单粒品质无损检测装置^[10],但效率较低,且成本相对较高。国内关于种子单粒活力无损检测装置的研究较少。

本研究基于近红外反射光谱分析技术,设计种子活力逐粒无损检测及分级装置。以白甜糯玉米种子为研究对象,对检测装置进行稳定性和精准性测定,建立种子活力的定性判别模型,为玉米种子品质逐粒实时检测分级提供技术支撑。

1 无损检测装置设计

1.1 结构与工作原理

设计的玉米种子活力检测与分级装置总体结构如图1所示,由单粒化装置、种子输送管道、检测装置、分选装置和控制单元组成。工作状态下,玉米种子由单粒化装置分离,经输送管道到达检测区,然后

对其进行光谱采集与检测,并根据检测结果对种子进行分级,将有活力和无活力的玉米种子分别吹送至相应的分种箱,完成玉米种子的无损检测及分级。

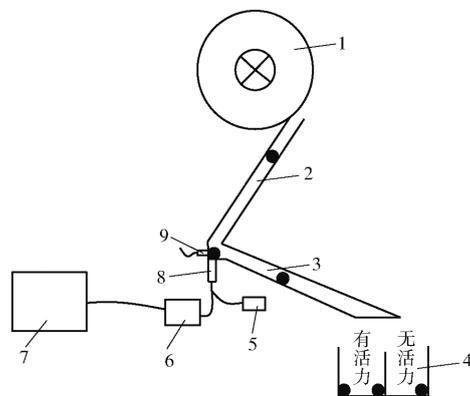


图1 种子活力检测与分级装置示意图

Fig.1 Schematic of seed vigor detection and classification device

1. 单粒化装置 2. 输送管道 3. 分选管道 4. 分种箱 5. 光源
6. 近红外光谱仪 7. 计算机 8. 光纤探头 9. 气吹单元

本装置的关键部件为单粒化装置,其效率是完成种子检测及分级速率的关键。种子单粒化装置如图2所示,由一个转盘和一个固定托盘组成,固定托盘上设有出种口,转盘上分布着分粒孔;供种区位于装置下侧位置;转盘与水平面呈一定倾角,倾斜角度大于种子与转盘材料的最大静摩擦角,以使未进入孔内的种子以自重自行落回供种区^[11];种子转盘顺时针转动,出种口位于种子由低位侧转过3/4处的中侧位置,给未进入孔内的种子充足的时间落回供种区,并使进入孔内的种子在出口处顺利落下。转盘上的分粒孔由中心向外分布在5个同心圆上,分别对应5个输送管道,从出种口落下的种子分别落入相应的管道,在管道末端进行检测及分级。

1.2 影响因素分析

单粒化装置的效率是影响整个种子活力逐粒检

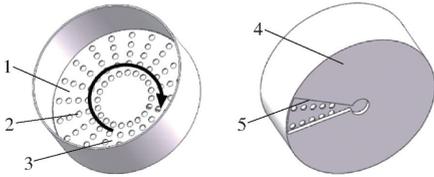


图2 单粒化装置结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of single granulation device

1. 转盘 2. 分粒孔 3. 供种区 4. 固定托盘 5. 出种口

测装置工作效率的关键。为得到较高的单粒化效率,对影响单粒化效率的因素进行分析。

根据种子的形状、尺寸等因素设计适当的孔型,以使每孔充入数量相等的种子^[12],本文所设计的分粒孔形状应与种子形状相同或相近,尺寸应比种子对应最大尺寸大10%^[13],以使每个孔中能且只能容纳一粒种子。本文所选白甜糯玉米种子,种子形状、尺寸由长 L 、宽 W 、高 H 来描述,如图3所示。选择100粒尺寸较均衡种子,分别测量其长、宽、高,得出其平均尺寸分别为8.56、8.03、4.21 mm。从所测尺寸可看出,长和宽基本一致,为加工方便和防止卡种,设计转盘上孔型形状为圆形,尺寸设为10 mm,以保证种子顺利进入孔中且避免进入2粒及以上的种子。圆盘厚度与孔型高度有关,应保证种子进入孔内后不会掉落,且防止堆积多余的种子,因此孔型高度应在保证大于种子的高度重心(约2.1 mm)的条件下尽量小,孔型高度还与转盘倾斜角度有关。

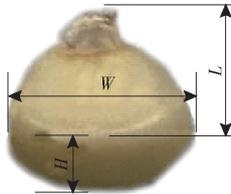


图3 种子三维尺寸示意图

Fig. 3 Sketch of 3D size of seeds

转盘倾斜角也是影响单粒化效果的一个重要因素,倾斜角的范围应大于种子与转盘材料的最大静摩擦角,保证未进入孔内的种子落回供种区,进入孔内的种子顺利转至出口处。倾斜角太小,会导致未进入孔内的种子无法在到达出口前落回供种区,并与进入孔内的种子一起从出种口落下,影响单粒化效果。倾斜角太大,会导致已经进入到孔内的种子状态不稳定,在到达出口之前就落回供种区,影响单粒化效率。经测定,种子与转盘材料的最大静摩擦角为 24.5° ,即倾斜角应大于 24.5° 。

另一个影响单粒化效率的因素为转盘转速。转速会影响进入孔内种子个数,也会影响单粒化效率。转速过小,效率太低。转速过大,会导致进入孔内的种子状态不稳定,出现充入又滑出的现象,影响单粒

化效率,且受光谱检测速率(光谱积分时间约80 ms)和分级速率限制,单粒化效率应小于10粒/s,即转盘转速要小于0.5 r/s。

1.3 试验及结果分析

基于影响因素分析,以试验目的和要求为依据选择试验因素的参数范围,因素编码见表1。根据种子活力逐粒检测要求,试验指标为单粒化效率 Y_1 (一个孔内进入1粒种子的效率)、多粒率 Y_2 (一个型孔内进入2粒及以上种子的概率)。采用 Design-Expert 8.0.6 软件,选择 Box - Behkcn 设计原理,设置5个中心试验点^[14],设计了三因素三水平试验方案,如表2所示。本文所设计的单粒化装置为5通道,试验指标以单个通道为单位进行统计。

表1 因素编码

Tab. 1 Coding of factor

编码	因素		
	孔高度 A/mm	倾斜角 $B/(\text{^\circ})$	转盘转速 $C/(\text{r}\cdot\text{s}^{-1})$
-1	2.2	28	0.3
0	2.7	31	0.4
1	3.2	34	0.5

利用 Design-Expert 8.0.6 软件建立的响应面试验方案和试验结果见表2。

表2 响应面试验设计及数据处理

Tab. 2 Response surface experiment design and results

试验号	因素			单粒化效率 $Y_1/(\text{粒}\cdot\text{s}^{-1})$	多粒率 $Y_2/\%$
	A/mm	$B/(\text{^\circ})$	$C/(\text{r}\cdot\text{s}^{-1})$		
1	2.7	31	0.4	6.2	0.8
2	3.2	34	0.4	7.0	1.4
3	2.2	31	0.5	7.0	0.4
4	2.7	31	0.4	6.4	0.9
5	2.7	31	0.4	6.2	0.8
6	3.2	31	0.5	8.5	1.8
7	2.2	34	0.4	5.6	0.2
8	2.7	34	0.5	6.1	0
9	2.7	31	0.4	6.7	1.0
10	2.2	28	0.4	6.6	0.8
11	2.7	28	0.3	5.4	1.4
12	2.7	31	0.4	6.1	0.6
13	2.7	28	0.5	7.4	0.8
14	3.2	31	0.3	5.5	2.0
15	3.2	28	0.4	7.4	2.0
16	2.7	34	0.3	5.1	1.0
17	2.2	31	0.3	4.9	0.8

对试验数据进行多元回归拟合分析,得到单粒化效率、多粒率的方差分析如表3所示。由表3可以看出,孔高度、转盘倾斜角、转盘转速3个试验因素对单粒化效率、多粒率2个试验指标均影响显著,其中:各因素对单粒化效率影响的主次顺序依次为

转盘转速、孔高度和倾斜角;各因素对多粒率影响的主次顺序依次为孔高度、倾斜角和转盘转速。单粒化效率、多粒率的二次回归模型均高度显著($P < 0.01$),失拟项均不显著($P > 0.1$);单粒化效率和多粒率模型的决定系数分别为 $R^2 = 0.9434$ 和 $R^2 = 0.9591$,可得出回归方程模型与实测数据拟合度好。依据系数间不存在线性相关性,对试验结果进行回归拟合,得出单粒化效率 Y_1 、多粒率 Y_2 真实值的响应方程为^[15]

$$Y_1 = 6.174678 - 12.519A + 0.437778B + 43.60833C + 0.1AB + 4.5AC - 0.83333BC + 1.61A^2 - 0.00806B^2 - 24.75C^2 \quad (1)$$

$$Y_2 = 1.198956 - 7.034A + 0.61889B - 0.31667C + AC - 0.33333BC + 1.46A^2 - 0.00944B^2 + 6.5C^2 \quad (2)$$

表3 试验结果方差分析

Tab.3 Analysis of variance of experiment result

方差来源	自由度	单粒化效率 Y_1			多粒率 Y_2		
		均方误差	F	P	均方误差	F	P
模型	9	1.46	12.97	0.0014	0.57	18.22	0.0005
A	1	2.31	20.6	0.0027	3.13	100.34	<0.0001
B	1	1.13	10.03	0.0158	0.72	23.12	0.0019
C	1	8.2	73.09	<0.0001	0.6	19.4	0.0031
AB	1	0.09	0.80	0.4002	0	0	1
AC	1	0.2	1.80	0.2211	0.01	0.32	0.5886
BC	1	0.25	2.23	0.1792	0.04	1.28	0.2944
A^2	1	0.68	6.08	0.0431	0.56	18.01	0.0038
B^2	1	0.022	0.20	0.6704	0.03	0.98	0.3559
C^2	1	0.26	2.30	0.1733	0.018	0.57	0.4744
残差	7	0.11			0.031		
失拟	3	0.19	3.26	0.1417	0.043	1.97	0.2607
误差	4	0.057			0.022		

根据不同限制条件可得到最优效果组合。多于1粒的种子进入检测区域会影响检测效果,因此本设计的目的是得到较高的单粒化效率。因此本文设定限制条件为:在多粒率低于0.5%的条件下,尽量得到较高的单粒化效率。从以上17组试验得出,在第3组试验条件下即分粒孔高度为2.2 mm、转盘倾斜角为31°、转盘转速为0.5 r/s时,多粒率为0.4%,单通道单粒化效率可达7粒/s,效率最好,符合限定条件。

1.4 单粒化效果验证试验

为验证单粒化效果,根据所选最优组合参数进行验证试验,做3次重复试验取平均值。验证试验结果如表4所示,对所选参数进行3次试验后的平均单粒化效率为7粒/s,多粒率为0.46%,符合限定条件且效果稳定,满足试验要求。图4为试验时的

表4 单粒化效果验证试验

Tab.4 Verification test of single granulation effect

试验号	单粒化效率 $Y_1/(粒 \cdot s^{-1})$	多粒率 $Y_2/\%$
1	6.9	0.39
2	7.0	0.60
3	7.1	0.40
平均值	7.0	0.46



图4 试验单粒化效果

Fig.4 Single granulation effect chart of test

单粒化效果。因此本文将第3组试验参数确定为最终试验参数进行后续试验。

1.5 光谱采集单元

光谱采集单元主要包括:光谱仪、化学光纤和光源。其中,光谱仪为AVS-DESKTOP-USB2-EXT-12V型(爱万提斯公司),扫描范围是980~1700 nm,分辨率为4 nm;化学光纤为R200-7-VIS-NIR型,为Y型分叉光纤,光纤直径为200 μm;光源为HL-2000型。

2 种子活力预测模型

为验证所设计种子活力逐粒无损检测装置的可行性和稳定性,利用此装置进行种子活力的检测试验。

2.1 试验材料

从种子培育基地购买白甜糯玉米种子,并对购回未经任何处理的种子进行发芽试验,得到初始发芽率可达98%以上,且胚芽和根系茁壮健康,可认定为有活力的种子。人工挑选无裂纹、无虫害、外表饱满的种子200粒,分为2组,一组用于获得人工老化种子组,另一部分作为正常种子组^[6]。将100粒正常种子在42℃、(98±2)%的湿度条件下处理8 d,之后在25℃正常状态下放置2 d作为人工老化种子样本^[16-17]。另外100粒种子不做处理,作为正常有活力种子样品组。

2.2 试验方法

2.2.1 种子光谱信息采集

本文选择在一个管道内进行种子光谱采集试验。采集前打开光谱仪及光源,预热30 min使设备达到稳定工作状态^[18],然后设置装置的检测参数,

包括积分时间、像素平滑窗口宽度、平均次数等。先采集校正参考并保存,采集前先将装置探头放置在标准校正白板上采集白参考,再放置在标准黑板上采集黑参考。之后将种子放置在单粒率装置内,按照所优化参数,使种子沿管道逐粒落下,对每个样本进行光谱采集并编号。图5为管道内采集种子光谱的实物图,为方便观察,右侧图为将分级管道取下后的内部结构图。

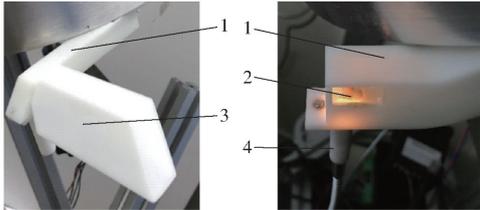


图5 样品光谱采集仪实物图

Fig. 5 Physical diagram of sample spectrum acquisition

1. 输送管道 2. 采集区域 3. 分选管道 4. 光纤探头

2.2.2 种子发芽验证试验

为验证人工老化种子组的活力,对采集完光谱的人工老化种子进行标准发芽试验:按编号顺序将种子放于发芽皿上,放置在25℃恒温箱中进行发芽试验。在为期7d的萌发过程中,每天检查所有种子的发芽情况。长度大于5mm的种子认为是有活力的,否则认定为无活力^[19]。试验发现,经过人工加速老化处理的种子发芽率很低,为8%,虽然这些种子可以发芽,但持续试验发现其后期霉变现象严重,不能够继续生长为茁壮的幼苗,因此将它们视为无活力的种子。由此对2组种子进行分离,设定正常种子为有活力种子,人工老化种子为无活力种子。

2.2.3 数据分析方法

本文选取偏最小二乘法判别分析(Partial least squares discriminant analysis, PLS-DA)方法来进行种子活力的判别分析^[20-21]。因为PLS-DA是基于线性的回归模型,需要设置一个阈值来进行种子活力的分类判别。本试验将正常有活力种子的类别变量设为1,人工老化无活力种子的类别变量设为2,阈值设置为1.5,即当阈值小于1.5时判定为有活力种子,大于等于1.5时判定为无活力种子。

2.3 建模结果与分析

2.3.1 玉米种子光谱特征

图6为200粒玉米种子样本的原始光谱图,从图中可以看出,正常有活力种子和人工老化无活力种子的光谱曲线的总趋势和特征峰基本相同。在1200nm附近和1400~1500nm处有2个明显的吸收峰,其中1200nm为C—H基的第二倍频吸收波长,代表碳水化物的特征吸收峰;1400~1500nm为O—H基和N—H基的第一倍频吸收波长,分别

代表水和蛋白质的特征吸收峰^[22-24]。

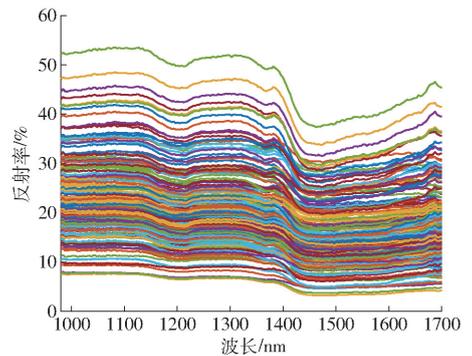


图6 玉米种子样本原始光谱曲线

Fig. 6 Original spectral curves of corn seed samples

图7为100粒正常有活力种子和100粒人工老化无活力种子的平均光谱图。从图中可以得出,人工老化无活力种子与有活力种子的反射光谱强度有差异,人工老化无活力种子的平均反射率小于正常种子的平均反射率。玉米种子经过高温高湿老化处理后,种子内的蛋白质性质发生了变性,蛋白质分子内部的结构发生了破坏。天然蛋白质与变性蛋白质的结构差异导致种子反射光谱强度的差异^[23]。

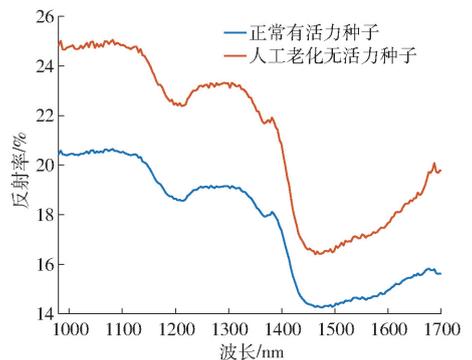


图7 平均原始近红外光谱曲线

Fig. 7 Average raw NIR spectra curves

2.3.2 PLS-DA 判别模型

本装置检测种子的活性是基于反射光谱,反射率计算公式^[25]为

$$R = \frac{I_s - I_b}{I_w - I_b} \times 100\% \quad (3)$$

式中 R ——种子样本的光谱反射率

I_s ——样本的反射光谱强度

I_b ——黑参考的反射光谱强度

I_w ——白参考的反射光谱强度

建立PLS-DA模型首先是选择主因子数,本文采用留一交叉验证法来确定PLS-DA模型的主因子数,选择RMSECV较小,判别正确率较高,而主因子数尽量小的参数。将样品集按3:1的比例划分为校正集(75粒)和预测集(25粒)^[26],对样品进行建模判别。选择SG卷积平滑(Savitzky-Golay smooth, SG-smooth)、标准正态变换(Standard

normal variable transformation, SNV) 以及这 2 种预处理方式相结合的方法对原始光谱进行处理, 比较所建模型的判别结果, 如表 5 所示。从表中可看出, 在主因子数为 5 时, 几种不同处理方式下的建模结果差异不大, 其中 SG - smooth 预处理下的建模效果最优, 校正集中有活力种子和无活力种子均有 1 粒判别错误, 判别准确率达 98.7%; 预测集中有活力种子全部判别正确, 无活力种子有 2 粒判定错误, 总判别准确率为 96%。

表 5 不同预处理模式下偏最小二乘判别分析的玉米种子活力判别结果

Tab. 5 Corn seed vigor detection results of PLS - DA models with different pretreatments

预处理方法	因子数	校正集			预测集		
		有活力/粒	无活力/粒	总准确率/%	有活力/粒	无活力/粒	总准确率/%
无	5	74	73	98.0	25	23	96
SG - smooth	5	74	74	98.7	25	23	96
SNV	5	72	73	96.7	22	24	92
SG - SNV	5	72	74	97.3	22	23	90

由此可得, 基于本装置进行种子的活力判别模型性能比较稳定, 利用本装置进行种子活力的逐粒无损检测是可行的。

3 验证试验

选取 50 粒正常有活力种子和 50 粒人工老化无活力种子对装置进行外部验证, 以检验种子活力预测模型的稳定性和准确性。预热待光源稳定后, 按所优化参数使种子逐粒从单粒化装置落下并采集光谱数据。之后为检验预测模型预测结果, 根据模型对所采集种子光谱数据进行阈值计算并与实际值作比较, 分析装置的检测性能。预测结果如图 8 所示, 50 粒人工老化无活力种子有 3 粒种子的预测值在 1.5 以下, 判断错误; 而 50 粒正常有活力种子的预测值都在 1.5 以下, 全部预测正确。计算得出, 活力预测模型的预测总准确率为 97%。

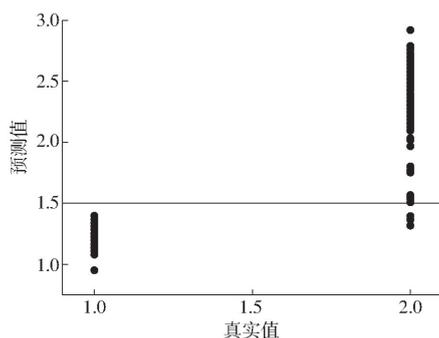


图 8 种子活力预测模型预测效果

Fig. 8 Prediction results of seed vigor model

4 结论

(1) 设计了玉米种子活力逐粒无损检测及分级装置, 该装置包括种子单粒化装置、输送管道、光谱采集单元、分级装置等, 可综合完成种子的单粒化分离、输送、光谱采集、判别分级任务, 其中单粒化装置单通道的单粒化效率可达 7 粒/s。

(2) 基于所设计的种子活力逐粒无损检测及分级装置, 采集了正常有活力玉米种子和人工老化无活力玉米种子在 980 ~ 1 700 nm 波长范围内的近红外反射光谱。分析了光谱特性, 采用 SG 卷积平滑、标准正态变换和 2 种方式结合的预处理方式对原始光谱进行预处理, 利用 PLS - DA 法建立了玉米种子活力的判别模型。不同预处理方法建模结果表明, 采用 SG 卷积平滑预处理后的建模效果最佳, 其判别模型的校正集判别准确率为 98.7%, 预测集的判别准确率为 96%。

(3) 对种子活力逐粒无损检测及分级装置预测模型的稳定性和准确性进行验证。结果表明, 种子活力的预测总准确率为 97%。

(4) 本文所设计种子活力逐粒无损检测及分级装置将近红外无损检测技术和种子逐粒分离装置相结合, 单粒化效率高, 建模精度和稳定性良好, 可以实现玉米种子活力逐粒无损检测及分级, 为种子活力的实时无损检测、分级提供了思路及技术基础。

参 考 文 献

- [1] 彭彦昆, 赵芳, 白京, 等. 基于图谱特征的番茄种子活力检测与分级[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 327 - 333. PENG Yankun, ZHAO Fang, BAI Jing, et al. Detection and classification of tomato seed vitality based on image processing[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 327 - 333. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180242&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.042. (in Chinese)
- [2] 孙群, 王庆, 薛卫青, 等. 无损检测技术在种子质量检验上的应用研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(3): 1 - 6. SUN Qun, WANG Qing, XUE Weiqing, et al. Advances in nondestructive detection of seed quality[J]. Journal of China Agricultural University, 2012, 17(3): 1 - 6. (in Chinese)
- [3] 陈兵旗, 孙旭东, 韩旭, 等. 基于机器视觉的水稻种子精选技术[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 168 - 173. CHEN Bingqi, SUN Xudong, HAN Xu, et al. Rice seeds selection based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 168 - 173. (in Chinese)
- [4] 李振, 廖同庆, 冯青春, 等. 基于图像处理技术的黄瓜种子活力指数检测系统设计[J]. 种子, 2015, 34(6): 111 - 115.

- LI Zhen, LIAO Tongqing, FENG Qingchun, et al. A system design on cucumber seed vigor index detection based on image processing[J]. *Seed*, 2015, 34(6): 111–115. (in Chinese)
- [5] KANDPAL L M, LOHUMI S, KIM M S, et al. Near-infrared hyperspectral imaging system coupled with multivariate methods to predict viability and vigor in muskmelon seeds[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 229: 534–544.
- [6] 彭彦昆,赵芳,李龙,等. 利用近红外光谱与PCA-SVM识别热损伤番茄种子[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(5): 159–165. PENG Yankun, ZHAO Fang, LI Long, et al. Discrimination of heat-damaged tomato seeds based on near infrared spectroscopy and PCA-SVM method[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(5): 159–165. (in Chinese)
- [7] 陈建,陈晓,李伟,等. 基于近红外光谱技术和人工神经网络的玉米品种鉴别方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28(8): 1806–1809. CHEN Jian, CHEN Xiao, LI Wei, et al. Study on discrimination of corn seed based on near-infrared spectra and artificial neural network model[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(8): 1806–1809. (in Chinese)
- [8] ESTEVE A L, ELLIS D D, DUVICK S, et al. Feasibility of near infrared spectroscopy for analyzing corn kernel damage and viability of soybean and corn kernels[J]. *Journal of Cereal Science*, 2012, 55(2): 160–165.
- [9] FOX G, MANLEY M. Applications of single kernel conventional and hyperspectral imaging near infrared spectroscopy in cereals[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2014, 94(2): 174–179.
- [10] ARMSTRONG P R. Development and evaluation of a near-infrared instrument for single-seed compositional measurement of wheat kernels[J]. *Cereal Chemistry*, 2014, 91(1): 23–28.
- [11] 刘彩玲,王亚丽,都鑫,等. 摩擦充种型孔带式水稻精量排种器充种性能分析与验证[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(4): 29–36. LIU Cailing, WANG Yali, DU Xin, et al. Filling performance analysis and verification of cell-belt rice precision seed-metering based on friction and repeated filling principle[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(4): 29–36. (in Chinese)
- [12] 李宝筏. *农业机械学*[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018: 10, 473.
- [13] 罗锡文,刘涛,蒋恩臣,等. 水稻精量穴直播排种轮的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(3): 108–112. LUO Xiwen, LIU Tao, JIANG Enchen, et al. Design and experiment of hill sowing wheel of precision rice direct-seeder[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(3): 108–112. (in Chinese)
- [14] 汪建红. Box-Behnken 试验设计优化内部沸腾法提取荸荠皮多糖工艺[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(10): 115–119. WANG Jianhong. Optimization of extraction technology of polysaccharide in eleocharis tuberosa peel by inner ebullition with Box-Behnken experimental design[J]. *Food Research and Development*, 2019, 40(10): 115–119. (in Chinese)
- [15] 刘彩玲,王超,宋建农,等. 振动供种型孔轮式非圆种子精密排种器设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(5): 108–115. LIU Cailing, WANG Chao, SONG Jiannong, et al. Design and seed-filling test of cell-type precision seed-metering device with vibration technology[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(5): 108–115. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180512&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.012. (in Chinese)
- [16] LEE H, JEON Y, LEE Y, et al. Large-scale screening of intact tomato seeds for viability using near infrared reflectance spectroscopy (NIRS)[J]. *Sustainability*, 2017, 9(4): 618.
- [17] KHIDRAPURE G, VASUDEVAN S N, DODDAGOUDAR S R, et al. Prediction of storability of organically produced paddy seeds through natural and accelerated ageing techniques[J]. *Journal of Applied and Natural Science*, 2016, 8(3): 1638–1642.
- [18] 彭彦昆,马莹,李龙. 苹果内部品质分级机械手设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(1): 307–312. PENG Yankun, MA Ying, LI Long. Design and experiment of apple internal quality sorting manipulator[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(1): 307–312. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190134&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.034. (in Chinese)
- [19] QIU G, LÜ E, LU H, et al. Single-Kernel FT-NIR spectroscopy for detecting supersweet corn (*Zea mays* L. *Saccharata* Sturt) seed viability with multivariate data analysis[J]. *Sensors*, 2018, 18(4):1010.
- [20] LOHUMI S, MO C, KANG J, et al. Nondestructive evaluation for the viability of watermelon (*Citrullus lanatus*) seeds using Fourier transform near infrared spectroscopy[J]. *Journal of Biosystems Engineering*, 2013, 38(4): 312–317.
- [21] 黄敏,朱晓,朱启兵,等. 基于高光谱图像的玉米种子特征提取与识别[J]. *光子学报*, 2012, 41(7): 868–873. HUANG Min, ZHU Xiao, ZHU Qibing, et al. Morphological characteristics of maize seed extraction and identification based on the hyperspectral image[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(7): 868–873. (in Chinese)
- [22] AMBROSE A, KANDPAL L M, KIM M S, et al. High speed measurement of corn seed viability using hyperspectral imaging[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 75: 173–179.
- [23] WANG D, RAM M S, DOWELL F E. Classification of damaged soybean seeds using near-infrared spectroscopy[J]. *Transactions of the ASAE*, 2002, 45(6): 1943–1948.
- [24] 曹崇文. 玉米干燥中应力裂纹的生成、扩展、检测和预防分析[J]. *干燥技术与设备*, 2009, 7(4): 153–158. CAO Chongwen. Formation expansion analysis of detection and prevention of corn stress cracks during drying[J]. *Drying Technology & Equipment*, 2009, 7(4): 153–158. (in Chinese)
- [25] 赵杰文等. *现代食品检测技术*[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2008: 357.
- [26] 刘伟,赵众,袁洪福,等. 光谱多元分析校正集和验证集样本分布优选方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(4): 947–951. LIU Wei, ZHAO Zhong, YUAN Hongfu, et al. An optimal selection method of samples of calibration set and validation set for spectral multivariate analysis[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(4): 947–951. (in Chinese)