

基于近红外光电效应的联合收获机谷物厚度测量方法

赵 湛¹ 雷朝鹏¹ 李洪昌^{1,2} 刘金凯¹

(1. 江苏大学农业工程研究院, 镇江 212013; 2. 常州机电职业技术学院车辆工程学院, 常州 213164)

摘要: 谷物在刮板升运器中的堆积状态是影响光电式流量测量精度的重要因素。为了提高联合收获机容积式谷物流量传感器的测量精度,开展了基于近红外光电效应的谷物厚度测量方法及其传感器的研究。通过激光发射器生成 850 ~ 980 nm 的近红外光,采用硅光电池接收透射谷物的红外光线,根据光强的变化获取谷物的厚度。设计了以 T 型反馈网络为核心的 I/V 转换处理电路,根据试验测量的输出电压与谷物厚度的变化关系,拟合建立了 Gaussian 函数方程,分析了激光发射器功率、红外线波长对不同品种水稻厚度测量性能的影响。结果表明:当红外线波长为 940 nm 时,回归方程的拟合精度最高,水稻厚度测量误差小于 0.5 mm;随着激光发射器功率的增加,水稻厚度测量量程随之增大,当功率为 500 mW 时,谷物厚度的有效测量距离约为 50 mm;红外线的穿透能力随着波长的增加而增强,随着籽粒含水率的降低而减弱。提出的谷物厚度测量方法可以提高容积式谷物流量测量精度。

关键词: 联合收获机; 流量传感器; 谷物厚度; 近红外光电效应; 标定试验

中图分类号: S237 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)09-0381-06

Grain Thickness Sensor for Combine Harvester Grain Flow Measurement Based on Near-infrared Spectroscopy

ZHAO Zhan¹ LEI Chaopeng¹ LI Hongchang^{1,2} LIU Jinkai¹

(1. Institute of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. College of Vehicle Engineering, Changzhou Vocational Institute of Mechatronic Technology, Changzhou 213164, China)

Abstract: The distribution of grain in the flight elevator is an important factor affecting the grain mass flow measurement error of photoelectric sensors. To improve the grain mass flow measurement accuracy of combine harvester, a grain thickness measurement method based on infrared photoelectric effect was proposed. The sensor was mainly composed of laser emitter, silicon photocell and signal processing circuit. The near-infrared light with wavelength of 850 ~ 980 nm was generated by using the laser emitter, and the light intensity passed through the grain was received by using the silicon photocell. Then, the grain thickness can be acquired according to the variation of received light intensity. An I/V conversion circuit based on T-type feedback network was designed. The Gaussian regression equation was established to describe the relationship between the output voltage and the grain thickness. The effects of laser emitter power, infrared wavelength and rice variety on the sensor measurement performance were analyzed. The results showed that the optimal regression accuracy was received with the infrared wavelength of 940 nm, and the measurement error of grain thickness was less than 0.5 mm. The measurement range was increased with the increase of laser emitter power. The effective measurement range of about 50 mm could be achieved when the power was 500 mW. The transmission capacity of infrared ray to grain was increased with the increase of wavelength and decreased with the decrease of grain moisture content. The proposed measurement method and sensor of grain thickness can be used to measure the time interval which grain blocked the light path during the lifting process, and also can be used to analyze the grain distribution in the flight elevator. The research result provided important reference for improving the grain flow measurement accuracy.

Key words: combine harvester; grain flow sensor; grain thickness; near-infrared photoelectric effect; calibration tests

收稿日期: 2019-03-08 修回日期: 2019-04-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51775246)、江苏省博士后基金项目(1401052C)和江苏省高校优势学科建设工程项目(PADP)

作者简介: 赵湛(1978—),男,研究员,博士生导师,主要从事农业机械监测与控制技术研究,E-mail: zhaozhan@ujs.edu.cn

0 引言

精准农业是根据土壤环境和作物生长状况的空间差异信息,以平衡地力、提高产量为目标,通过制定科学的管理决策、实施生产过程的定位、定量精细调控投入,以提高农业生产力、合理施用化肥、减少环境污染,实现可持续发展。获取作物的产量信息,建立小区产量分布图是精准农业技术体系中的重要环节^[1-4]。

在谷物联合收获机上安装测产系统是获取产量信息的有效途径,其核心是谷物流量传感器^[5-8]。现有谷物流量传感器主要根据容积式和冲量式工作原理^[9-12]。文献^[13-16]分析了冲量式传感器的测量误差来源,指出收获机振动、机器姿态、田间坡度等因素对测量精度影响显著。文献^[17-18]分析了谷物测产系统倾斜特性,提出根据收获机的倾斜、俯仰角度进行测量误差和零点漂移的修正方法,可以降低测量误差。国内许多学者提出双板冲量式谷物流量传感器,通过差分运算减小振动对测量精度的影响^[19-20],但由于每台机器特性的差异性,难以建立准确统一的修正模型。刮板式升运器广泛采用容积式测产装置^[11,21],它是通过光电传感器测量谷物在升运过程中的阻断光路时间,产生脉冲信号,脉冲的时间宽度与谷物的堆积高度成正比,然后根据刮板尺寸和升运速度计算得到谷物的体积。

本文以水稻籽粒为对象,根据籽粒的红外光谱特性开展籽粒厚度的测量方法研究,设计相应的信号处理电路,分析红外线波长、功率、籽粒形态和含水率等因素对测量性能的影响。

1 测量原理

1.1 测量误差分析

光电容积式谷物流量测量原理如图1所示,谷物在刮板升运器中可以分为两部分:在高度 h_1 范围内,籽粒充满升运器内腔,通常呈现长方体形态;受到内摩擦作用力的影响,上层高度 h_2 范围内的籽粒为自由堆积状态。受到收获机姿态、谷物流量、刮板结构和作业参数等因素的影响, h_2 范围内的籽粒分布状态存在随机性,即测量的脉冲宽度有一定的波动和不确定性,这是造成容积式谷物流量测量误差的最主要因素。籽粒堆积表面的曲率是决定体积的主要参数,受到内摩擦力的影响,谷物在刮板内 h_2 范围的堆积表面通常为连续曲面,通过测量顶部区域谷物厚度的变化,可以获取表面整体变化的差异,其关键技术就是检测谷物堆积厚度,即根据谷物厚度的变化速率获取堆积表面的曲率变化规律。

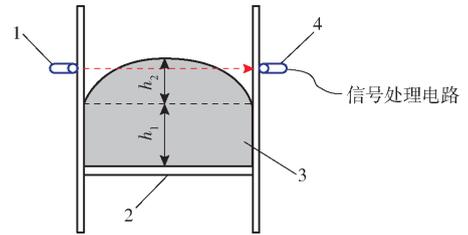


图1 光电容积式谷物流量测量原理图

Fig.1 Measurement method of grain mass using photoelectric sensor

1. 激光发射器 2. 刮板 3. 谷物 4. 硅光电池

1.2 谷物厚度测量原理

根据 Lambert - Beer 定律,当光在介质中传播时,普遍存在吸收、折射和散射现象,透过介质的光强 I 将随传播距离作指数衰减,即

$$I = I_0 e^{-\alpha L} \quad (1)$$

式中 I_0 ——介质表面上的辐射光强,W

L ——光在介质中传播的距离,m

α ——光强衰减系数

本文以激光为光源。籽粒的含水率是影响光线衰减特性的重要因素,由于水分对波长1440~2500 nm 范围的近红外光吸收敏感^[22-23],为了减小籽粒含水率变化对测量结果的影响,试验选择近红外光波长 λ 的范围为850~980 nm,功率 P 的范围为100~500 mW。选择LXD66RM型硅光电池为接收器,根据透过谷物的红外线光强测量谷物的厚度。硅片尺寸为6 mm×6 mm,波长范围300~1100 nm,特征波长为940 nm时的灵敏度为0.57 A/W,响应时间为12 μ s。

均匀介质的光强衰减系数 α 通常是光波长的函数,根据光谱特性进行籽粒的物理特性测量已有成功应用^[24-26]。水稻、小麦等谷物籽粒为散体颗粒,在升运器中自由堆积时,籽粒间存在空隙。水稻籽粒的结构和成分复杂,外层为颖壳,内层为糙米,主要成分包括淀粉和水。光线在不同介质中传播时的衰减系数也不相同,通常籽粒的衰减系数远大于空气的衰减系数,籽粒自然堆积时的空隙率则会受到籽粒尺寸和形态等因素的影响,很难推导准确的光强衰减理论模型,但可以通过试验测量谷物厚度与接收光强的变化关系,建立相应的数学函数。

2 信号处理电路

硅光电池在光照作用下会产生微弱电流信号,将其作为电流信号监测具有较好的线性关系和带宽性能。为了减小由放大器的输入电流和硅光电池漏电流产生的直流偏置,试验设计了T型I/V转换电路。它由电阻R1、R2和R3构成反馈电阻,可以消

除寄生振荡、提高频率响应的稳定性,增大输出信号的信噪比,电容 C1 可以减小由于相移产生的自激振荡。当硅光电池输出电流为 I_p 时, I/V 转换输出电压 V_p 为

$$V_p = \left(R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R_3} \right) I_p \quad (2)$$

式中 R_1, R_2, R_3 ——电阻 R1、R2、R3 的阻值

I/V 转换电压 V_p 输入至调节电路,通过电阻 R4 和 R8 分别调节输出电压 V_{out} 的零点和增益,从而将硅光电池接收的光强线性转换为电压信号 V_{out} , 电路结构如图 2 所示。

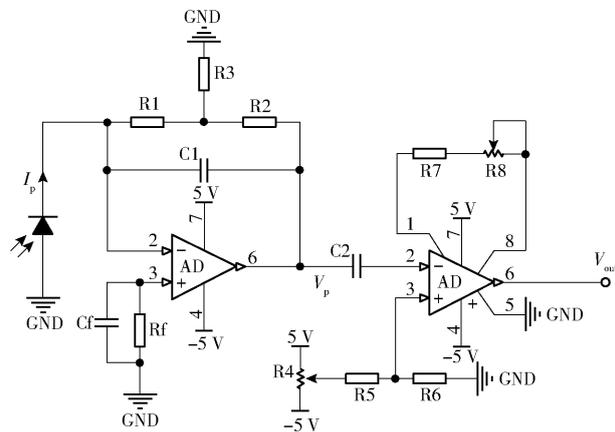


图 2 信号处理电路

Fig.2 Signal process circuit

3 谷物厚度测量试验

3.1 试验台架结构

为了进行谷物厚度测量性能试验,设计了标定试验台架,结构如图 3 所示。在滑台模组的滑块上安装移动支架,在转动手轮丝杠的驱动下,移动支架沿着导向光轴作直线运动,定支架固定安装于滑台模组的底座。在移动支架上安装红外激光发射器,定支架上安装硅光电池,并保证红外激光发射器和硅光电池在同一轴线上。激光发射器发射的红外光透过籽粒射入硅光电池,硅光电池产生的电流信号输入信号处理电路,通过万用表读取测量结果 V_{out} 。



图 3 标定试验台架结构

Fig.3 Structure of calibration test-rig

1. 信号处理器
2. 水稻
3. 硅光电池
4. 转动手轮
5. 激光发射器

3.2 标定试验建模

以南粳 52 水稻籽粒为对象,测量得到含水率为 18.9%,三轴尺寸为 7.07 mm × 3.08 mm × 2.40 mm,选择红外激光发射器的功率为 200 mW、波长为 940 nm。当两个支架之间的距离小于 4 mm 时,籽粒难以均匀放入支架之间的区域,因此标定试验从 6 mm 开始进行。

试验过程中,人工将籽粒填满定支架与移动支架之间区域,通过调节移动支架的位置改变谷物的厚度,调节精度为 0.1 mm。由于籽粒填满了定支架与移动支架之间的区域,故将两个支架之间的距离视为红外线穿过的籽粒厚度 x ,每组参数下的试验重复进行 3 次,测量获得的 x 与输出电压 V_{out} 的变化关系如图 4 所示。

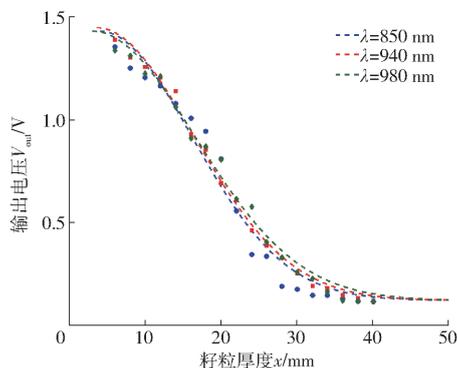


图 4 谷物籽粒厚度与输出电压的变化关系

Fig.4 Relationship between grain seed thickness and output voltage

由于籽粒的复合结构和存在空隙,红外光线是在非连续介质中传播,鉴于光线的指数衰减特性,根据试验测量结果,本文采用 Gaussian 函数建立 x 与 V_{out} 的变化关系

$$V_{out} = ae^{-(x-b)^2/c^2} + d \quad (x \geq b) \quad (3)$$

函数中的系数 a 代表输出电压的变化幅值,主要取决于硅光电池接受的光强和波长; b 为输出电压的峰值所对应的籽粒厚度; c 为红外线的衰减特性,且 c 越小,衰减速率越快,穿透能力越弱; d 是由信号处理电路产生的偏置直流电压,试验测量 $d = 0.12 \text{ V}$ 。采用最小二乘法拟合得到,方程的决定系数 $R^2 > 0.996$,对应的籽粒厚度 x 的测量误差小于 0.5 mm。在 $x < b$ 范围内,红外线传播的介质为空气,光衰减系数较小,输出电压近似恒定,即

$$V_{out} = a + d \quad (x < b) \quad (4)$$

3.3 影响因素分析

3.3.1 红外波长

为了分析波长对谷物穿透性能的影响,分别采用 850、940、980 nm 的红外光源进行标定试验,结果如图 4 所示。不同波长下,均可采用 Gaussian

函数建立 x 与 V_{out} 的变化关系,拟合结果如表 1 所示。波长 $\lambda = 940$ nm 所对应的拟合方程系数 a 值略大,这主要受到硅光电池特征波长的影响,相同光强时,红外线波长与硅光电池的特征波长越接近,硅光电池产生的光电流越大,输出电压 V_{out} 也

越大;红外线的穿透能力会随着波长的增加而增强,拟合得到的 c 也随之增大;当波长为 940 nm 时,方程的拟合精度最高,相对误差小于 6.5%,因此,优选波长为 940 nm 的红外激光发射器作为谷物厚度测量光源。

表 1 水稻籽粒厚度测量拟合结果

Tab. 1 Fitting results of rice seed thickness measurements

品种	含水率/ %	三轴尺寸/ (mm × mm × mm)	激光源		拟合系数			决定系数 R^2
			波长 λ /nm	功率 P /mW	a/V	b/mm	c/mm	
南粳 52	18.9	7.07 × 3.08 × 2.40	850	200	1.308	4.409	17.18	0.988 9
				100	1.272	1.310	17.79	0.991 7
			940	200	1.326	3.564	18.05	0.995 9
				300	1.354	4.897	18.47	0.993 7
				500	1.643	5.422	19.57	0.990 7
0	7.05 × 2.99 × 2.12	980	200	1.309	3.005	19.21	0.988 9	
		940	300	1.324	3.619	17.58	0.985 3	
南粳 9018	18.8	7.06 × 3.10 × 2.38	940	300	1.359	4.811	18.59	0.993 2
南粳 5055	18.9	7.07 × 3.08 × 2.41	940	300	1.337	4.820	18.61	0.991 0
镇稻 20	19.0	7.19 × 3.17 × 2.79	940	300	1.378	5.645	17.92	0.993 5

3.3.2 激光发射器功率

选择波长 λ 为 940 nm、功率 P 为 100、200、300、500 mW 的激光发射器,测量获得的 x 与 V_{out} 的变化关系如图 5 所示。由于硅光电池产生的光电流随着接收光强的增大而线性增加,从表 1 可以看出,随着激光发射器功率的增加,Gaussian 方程的拟合系数 a 近似呈现线性增长关系;增大红外线的能量密度,其穿透能力也随之增强,方程拟合系数 c 也近似呈现线性增长关系,当功率为 500 mW 时,谷物厚度的有效测量距离约为 50 mm。

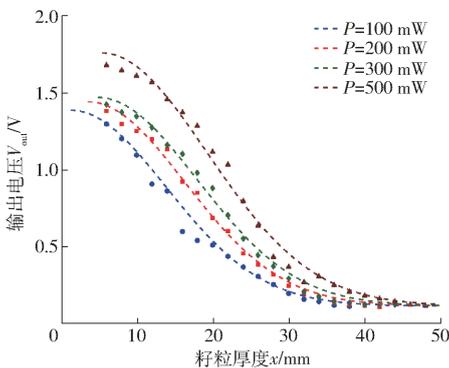


图 5 发射功率对红外线穿透能力的影响

Fig. 5 Effect of emission power on infrared transmission capacity

3.3.3 谷物含水率

水稻籽粒的主要成分是淀粉和水,随着籽粒含水率的不同,光传播介质的特性也会发生改变,从而影响穿透性能。试验将含水率为 18.9% 的南粳 52 水稻籽粒进行加热干燥处理,然后进行标定性能试验,结果如图 6 所示。测量统计得到水稻籽粒干燥

后的三轴尺寸为 7.05 mm × 2.99 mm × 2.12 mm,体积缩小了约 14.5%,空隙率随之降低,淀粉的光吸收系数通常大于水的光吸收系数,综合造成红外线穿透能力随着籽粒含水率的减小而降低;由于选用了相同的激光发射器(波长 λ 为 940 nm、功率 P 为 300 mW),方程的拟合系数 a 基本保持恒定,即输出电压 V_{out} 的峰值基本相等。

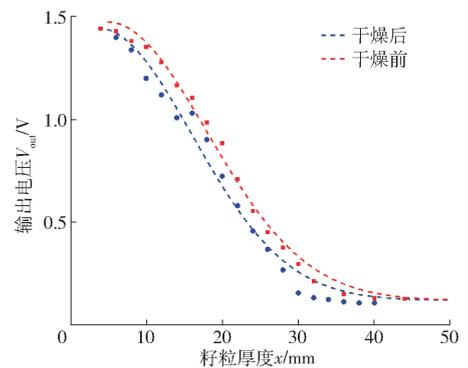


图 6 籽粒含水率对红外线穿透能力的影响

Fig. 6 Effect of seeds moisture content on infrared transmission capacity

3.3.4 谷物品种

选择了 4 个不同品种的水稻籽粒进行标定性能试验,以分析品种的差异性对红外线穿透性能的影响,激光发射器的波长 λ 为 940 nm、功率 P 为 300 mW,拟合结果如表 1 所示。可以看出,籽粒形态是决定空隙率和光传播介质特性的主要因素,南粳 52、南粳 5055 和南粳 9018 的籽粒形态、含水率相似,方程拟合系数 a 、 b 和 c 也比较接近。镇稻 20 的三轴尺寸相对较大,籽粒间的空

隙率也较大,拟合系数 c 较小,即红外线的衰减速率相对较低。

4 结论

(1)通过激光发射器产生近红外光,根据硅光电池接收穿过谷物籽粒后的光强变化,可以实现籽粒厚度的测量;设计了以 T 型反馈网络为核心的 I/V 转换处理电路,从而将硅光电池接收的光强信号线性转换为电压信号;根据试验测量结果,采用

Gaussian 函数拟合建立籽粒厚度与输出电压的变化关系。

(2)当红外线波长和硅光电池的特征波长为 940 nm 时,Gaussian 函数拟合的拟合精度最高,籽粒厚度测量相对误差小于 6.5%;随着激光发射器功率的增加,水稻厚度测量量程随之增大,当功率为 500 mW 时,谷物厚度的有效测量厚度约为 50 mm;红外线的穿透能力随着波长的增加而增强,随着籽粒含水率的降低而减弱。

参 考 文 献

- [1] 罗锡文, 臧英, 周志艳, 等. 精细农业中农情信息采集技术的研究进展[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 167-173. LUO Xiwen, ZANG Ying, ZHOU Zhiyan, et al. Research progress in farming information acquisition technique for precision agriculture[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(1): 167-173. (in Chinese)
- [2] 苑严伟, 张小超, 张银桥, 等. 农田粮食产量分布信息数字化研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 133-137. YUAN Yanwei, ZHANG Xiaochao, ZHANG Yinqiao, et al. Digitization of grain yield and distribution information in farmland[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(9): 133-137. (in Chinese)
- [3] 王凤花, 张淑娟. 精细农业田间信息采集关键技术的研究进展[J]. 农业机械学报, 2008, 39(5): 112-121. WANG Fenghua, ZHANG Shujuan. Research progress of the framing information collections key technologies on precision agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(5): 112-121. (in Chinese)
- [4] NASH E, FREGER F, SCHWARZ J, et al. Development of a model of data-flows for precision agriculture based on a collaborative research project[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 66(1): 25-37.
- [5] REINKE R, DANKOWICZ H, PHELAN J, et al. A dynamic grain flow model for a mass flow yield sensor on a combine[J]. Precision Agriculture, 2011, 12(5): 732-749.
- [6] 李新成, 孙茂真, 李民赞, 等. 谷物联合收获机自动测产系统产量模型[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 91-96. LI Xincheng, SUN Maozhen, LI Minzan, et al. Modeling algorithm for yield monitor system of grain combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 91-96. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150714&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.014. (in Chinese)
- [7] 李长占, 祁广云, 黄操军. 基于称重法的收割机谷物测产方法的研究[J]. 农机化研究, 2014, 36(3): 42-45. LI Changzhan, QI Guangyun, HUANG Caojun. Research on the measuring method of the harvester grain yield based on weighing[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(3): 42-45. (in Chinese)
- [8] 熊迎军, 周俊, 韦玮, 等. 嵌入式谷物流量传感器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(5): 39-46. XIONG Yingjun, ZHOU Jun, WEI Wei, et al. Design and experiment of grain mass flow sensor based on embedded system[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(5): 39-46. (in Chinese)
- [9] 魏新华, 张进敏, 但志敏, 等. 冲量式谷物流量传感器测产信号处理方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 222-228. WEI Xinhua, ZHANG Jinmin, DAN Zhimin, et al. Signal processing method of impact-based grain flow sensor for predicted yield[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(15): 222-228. (in Chinese)
- [10] CHUNG S O, CHOI M C, LEE K H, et al. Sensing technologies for grain crop yield monitoring systems; a review[J]. Journal of Biosystems Engineering, 2016, 41(4): 408-417.
- [11] 马朝兴, 李耀明, 徐立章. 联合收割机谷物流量传感器的现状与分析[J]. 农机化研究, 2008, 30(7): 74-76. MA Chaoping, LI Yaoming, XU Lizhang. Present status and analysis of grain flow sensor of combine harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008, 30(7): 74-76. (in Chinese)
- [12] 李新成, 李民赞, 郑立华, 等. 谷物联合收获机测产系统采样频率优化与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(增刊): 74-78. LI Xincheng, LI Minzan, ZHENG Lihua, et al. Test and optimization of sampling frequency for yield monitor system of grain combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(Supp.): 74-78. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2015S013&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.013. (in Chinese)
- [13] ARSLAN S, COLVIN T S. Grain yield mapping: yield sensing, yield reconstruction, and errors[J]. Precision Agriculture, 2002, 3(2): 135-154.
- [14] ARSLAN S, COLVIN T S. Laboratory test stand for combine grain yield monitors[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1998, 14(4): 369-371.

- [15] BURKS T F, SHEARER S A, FULTON J P, et al. Effects of time-varying inflow rates on combine yield monitor accuracy[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2004, 20(3): 269 – 275.
- [16] MAERTENS K, REYNS P, De BAERDEMAEKER J. Double adaptive notch filter for mechanical grain flow sensors[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 266(3): 645 – 654.
- [17] FULTON J P, SOBOLIC C J, SHEARER S A, et al. Grain yield monitor flow sensor accuracy for simulated varying field slopes[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2009, 25(1): 15 – 21.
- [18] LOGHAVI M, EHSANI R, REEDER R. Development of a portable grain mass flow sensor test rig[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2008, 61(2): 160 – 168.
- [19] 陈树人, 杨洪博, 李耀明, 等. 双板差分冲量式谷物流量传感器性能试验[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(8): 171 – 174.
CHEN Shuren, YANG Hongbo, LI Yaoming, et al. Experiment of dual-plates differential impact-based grain flow sensor[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(8): 171 – 174. (in Chinese)
- [20] 胡均万, 罗锡文, 阮欢, 等. 双板差分冲量式谷物流量传感器设计[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(4): 69 – 72.
HU Junwan, LUO Xiwen, RUAN Huan, et al. Design of dual-plate differential impact-based yield sensor[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(4): 69 – 72. (in Chinese)
- [21] 付兴兰, 张兆国, 安晓飞, 等. 光电漫反射式联合收割机谷物产量计量系统研发与性能试验[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(3): 24 – 30.
FU Xinglan, ZHANG Zhaoguo, AN Xiaofei, et al. Development and performance experiment on grain yield monitoring system of combine harvester based on photoelectric diffuse reflectance[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(3): 24 – 30. (in Chinese)
- [22] 白路军. 近红外水分检测仪研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
BAI Lujun. Research on near infrared moisture detector[D]. Shenyang: Northeastern University, 2013. (in Chinese)
- [23] 王转卫, 迟茜, 郭文川, 等. 基于近红外光谱技术的发育后期苹果内部品质检测[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(5): 348 – 354.
WANG Zhuanwei, CHI Qian, GUO Wenchuan, et al. Quality detection of apples during late developmental period based on near-infrared spectral technology[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(5): 348 – 354. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180541&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.041. (in Chinese)
- [24] KUSNIEREK K, KORSAETH A. Simultaneous identification of spring wheat nitrogen and water status using visible and near infrared spectra and powered partial least squares regression[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, 117: 200 – 213.
- [25] LONG D, ENGEL R E, SIEMENS M C. Measuring grain protein concentration with in-line near infrared reflectance spectroscopy[J]. *Agronomy Journal*, 2008, 100(2): 247 – 252.
- [26] 林颢, 王卓, 陈全胜, 等. 基于色敏传感器结合光谱技术的大米储藏期鉴别[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(6): 359 – 364.
LIN Hao, WANG Zhuo, CHEN Quansheng, et al. Identification of rice with different storage time based on color-sensitive sensor array combined with visible-near-infrared spectroscopy[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(6): 359 – 364. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190642&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.042. (in Chinese)