

# 谷物联合收割机在线产量监测综述

## ——测产传感方法、产量图重建和动力学模型

金诚谦<sup>1,2</sup> 蔡泽宇<sup>1</sup> 倪有亮<sup>1</sup> 刘政<sup>1</sup>

(1. 农业农村部 南京农业机械化研究所, 南京 210014;

2. 山东理工大学 农业工程与食品科学学院, 山东 淄博 255049)

**摘要** 为深入了解测产方法、产量图重建和动力学模型的研究内容及关键技术,对测产方法、产量图重建、谷物流的动力学模型以及产量测量中的误差等研究成果进行梳理。重点概述了测产方法的分类,介绍了不同测产方法的原理、产量图重建涉及到的关键技术和动力学模型上取得的成果;对测产方法的试验结果和优缺点进行比较;分析了测产方法、产量图重建、水分传感器、切割宽度传感器和GPS定位装置等研究的误差来源。结果表明:1)对不同的测产装置进行合理的安装、校准和操作,就能使测产结果达到足够的精度,建议对不同的测产方式加强误差分析并提高试验准确度。2)产量图重建过程中的部分误差通过校准可以减小甚至消除,但基于小面积地块的产量图构建及误差研究还有待加强。3)一阶动力学模型无法确定谷物混合对产量监测的影响,建议在基于非线性组合算法和反褶积算法的动力学模型上加强研究。

**关键词** 精细农业; 产量监测; 产量图; 产量重建; 谷物动力学模型; 误差分析

**中图分类号** S24 **文章编号** 1007-4333(2020)07-0137-16 **文献标志码** A

## Research review on online grain yield monitoring for combine harvester: Yield sensing, yield mapping and dynamic model

JING Chengqian<sup>1,2</sup>, CAI Zeyu<sup>1</sup>, NI Youliang<sup>1</sup>, LIU Zheng<sup>1</sup>

(1. Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China;

2. School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

**Abstract** In order to deeply understand the research contents and key technologies of yield sensing, yield mapping and dynamic model, the research results of yield sensing, yield mapping, dynamic model of grain flow and errors in yield sensing were sorted out. This review mainly summarized the classification of yield measurement methods. The principles of different yield sensing, the key technologies involved in yield mapping and the results obtained from the dynamic model were introduced. The test results and the advantages and disadvantages of the yield sensing were compared. The error sources of yield sensing, yield mapping, moisture sensors, cutting width sensors and GPS positioning device were analyzed. The results show that: 1) Reasonable installation, calibration and operation of production measuring devices in different ways can make the production measurement results achieve enough accuracy. It is suggested to strengthen error analysis of different production measuring methods and improve test accuracy. 2) Some errors in the yield mapping can be reduced or even eliminated by calibration, but the production plot construction and error research based on small plots need to be strengthened. 3) The first-order dynamic model cannot determine the impact of grain mixing on yield monitoring. Therefore, research on the dynamic model based on nonlinear combination algorithm and deconvolution algorithm should be strengthened.

**Keywords** precision agriculture; yield monitor; yield map; yield reconstruction; grain flow model; error analysis

收稿日期: 2019-11-19

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2017YFD0700305, 2016YFD0702003); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(S201902)

第一作者: 金诚谦, 研究员, 博士生导师, 主要从事农业机械及其智能化研究, E-mail: 412114402@qq.com

蔡泽宇, 助理工程师, 硕士研究生, 主要从事图像处理、仪器仪表自动化研究, E-mail: 1543271553@qq.com

精细农业(Precision agriculture, PA)的核心是对环境变量的掌握和管理<sup>[1]</sup>,即通过利用卫星定位系统(GPS)、地理信息系统(GIS)、遥感技术(RS)等信息技术,获取农田小区作物产量和影响作物生产的环境因素在空间和时间上的差异信息<sup>[2]</sup>。所有信息都是基于传感器通过对外界物理刺激如热、光、磁、运动、压力和声音作出的反应来获得<sup>[3]</sup>,其中基于智能农机的谷物产量测量是精细农业中重要的信息之一<sup>[4]</sup>,它直接反映了农田的播种效果、水肥利用、病虫害等管理信息对谷物产量的影响。

精细农业不只是使用了新技术,更是一场信息革命<sup>[5]</sup>,其中智能化农机是实施精细农业的基础,世界上一些发达国家相继投入了大量的人力和物力进行研究和开发<sup>[6]</sup>。目前成熟的产量监测产品有:美国 Case IH 公司研制的 Advanced farming system 系统,英国 Massey Ferguson 公司研制的 Fieldstar 系统,John Deere 公司研制的 Green star 系统,Ag Leader 公司研制的 PF advantage 产品,Micro-Trak 公司研制的 Grain-Trak 产品,CLAAS 公司研制的 Lexion 产品等。

20 世纪 80—90 年代,欧美各国对谷物产量监测进行了大量研究并取得了丰硕的成果,尤其在基础研究与应用领域,如测产方式、测产装置、产量图重建中的关键技术、测产传感器和产量图的误差分析、产量图的分析与应用<sup>[7-9]</sup>。同时,为了详细描述输入和输出谷物的质量流的关系,国外研究人员提出了许多动力学模型用来修正产量图中的时间延迟和谷物的损失产量。我国对产量监测的研究由于起步较晚,研究主要集中在测产传感器及装置的研究上,使用的测产方式比较单一,对产量图重建、动力学模型和误差分析研究较少。

本研究拟对国内外测产方法、产量图重建和动力学模型的研究现状及进展进行梳理和总结,阐述不同测产方法的原理并进行分类和比较,介绍产量图重建的原理及关键技术和联合收割机的一阶动力学模型并对不同测产方法和产量图重建中的误差进行描述和分析。

## 1 测产方法

产量监测是走向精细农业的重要一步,定义为“在空间和时间上对作物收获量的测量和地图形式下这些测量的表示”<sup>[10]</sup>,反映了农田作物产量的空间变异性,众多的研究利用不同的测产传感原理为

不同作物开发了测产装置。但测产传感技术目前还落后于其他的农业扶持技术<sup>[11]</sup>,传感器的可用性被认为是阻碍精细农业更广泛实施的关键因素<sup>[12]</sup>。因此,测产传感原理的研究一直是研究热点,对我国大田农业的发展至关重要。

从收割流程看,联合收割机在头部切割作物,并将它们运至脱粒机构,然后脱粒谷物通过分离筛落入水平搅龙,再由刮板式或螺旋式升运器将谷物输送到谷仓。当谷仓装满时,谷物通过一个螺旋输送机排出到外部的货车上。谷物流动(输送)的路线很长,测产传感器可以安放在流动中的任一环节。参考国外已有研究<sup>[13-14]</sup>对测产方法的概述,将测产方法归纳为称重式、测体积、冲击式和其他(图 1)。

称重式、冲击式和其他的测产方式大都利用物理原理直接和谷物质量建立关系,理论上避免了容重比的影响,因此将这几种方法归类于质量流。其次,笔者认为在测产方法中使用 2 种或 2 种以上测产原理进行联合测产的归类于组合式。因此测产方法被分为:质量流量、体积流量和组合式。参考文献<sup>[16]</sup>和<sup>[17]</sup>对谷物流传感方法的分类和描述,本研究对测产方法、传感器类型、安装位置及误差分类进行整理见表 1<sup>[15,17-33]</sup>。

### 1.1 测产原理介绍

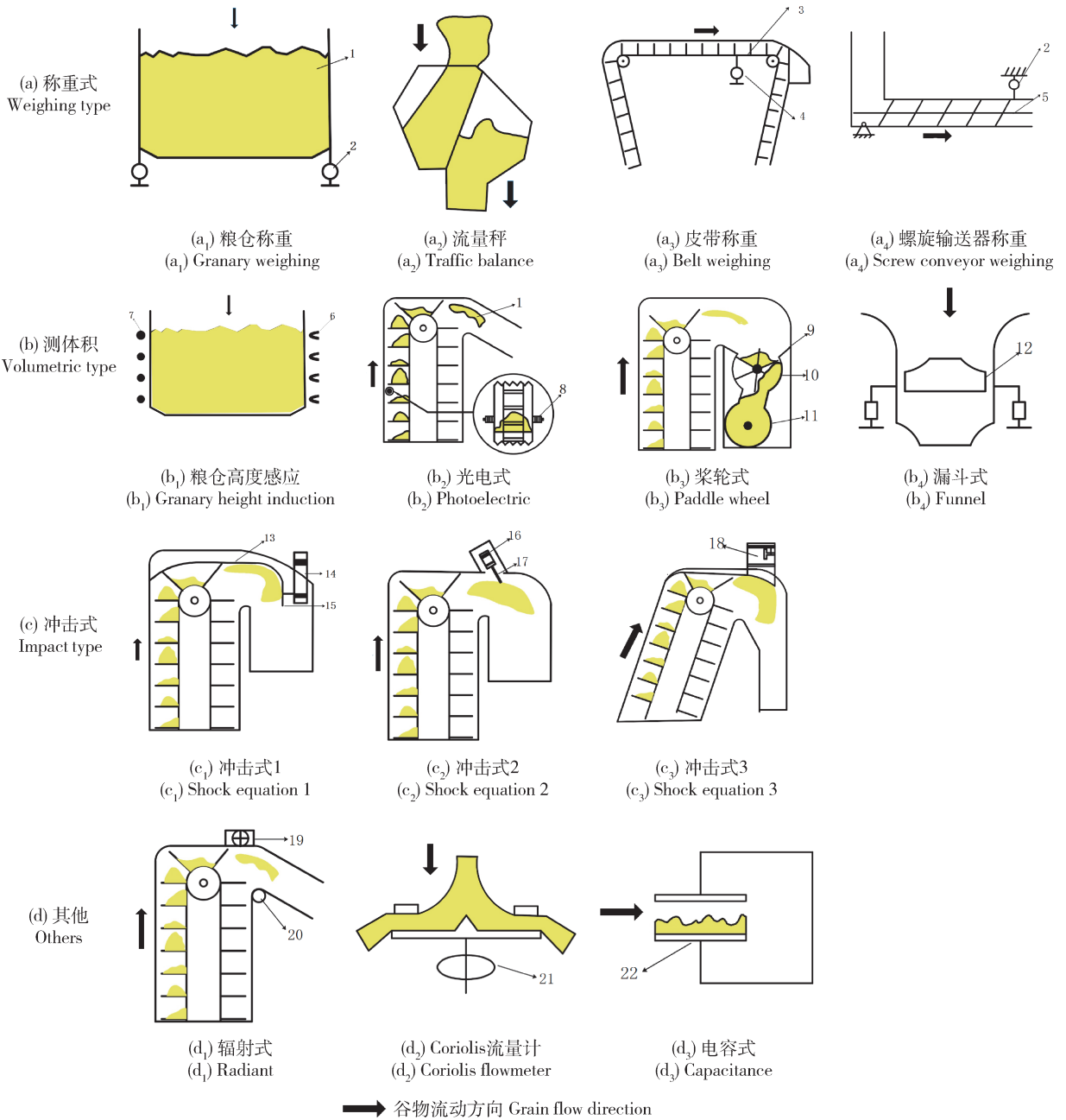
#### 1.1.1 质量流量

质量流量传感器主要安装在升运器的前端、升运器的出口或谷仓的下方,多采用称重式、辐射式或力冲击式。称重式传感器主要安装在粮仓底部<sup>[19,34]</sup>、搅龙底部(TSI Montana 公司产品)或者升运器水平传输带上<sup>[18]</sup>。粮仓底部称重或升运器上称重两者测产误差均小于 5%<sup>[17-18]</sup>。搅龙底部称重较粮仓底部称重具有装置位置靠前,谷物质量损失较小因而时间延迟小的优点。

冲击式测产方法是目前应用最广泛,产品最成熟和研究最多的方法,其原理公式如下:

$$M = \sum_{i=1}^n Q_i(t) \cdot \Delta t = \sum_{i=1}^n \frac{I_i(t)}{v_i(t)} \Delta t \quad (1)$$

式中: $M$ 为谷物总质量; $Q_i$ 为 $t$ 时刻谷物流质量; $I_i$ 为谷物撞击冲击板的冲量; $v_i$ 为撞击时刻谷物的瞬时速度。无论室内或田间试验,不同含水率、地面速度和谷物重量下的产量与传感器输出具有较高的相关系数( $R^2 > 0.94$ )<sup>[22]</sup>。试验表明,弧形板冲击式传感器的测产平均误差为 2%<sup>[35]</sup>,且误差与收获面积大小成反比,400 m<sup>2</sup>地块的误差约为 5%,而 6 hm<sup>2</sup>



1. 谷物; 2. 称重传感器; 3. 皮带; 4. 压力传感器; 5. 旋转轴; 6. 光电接收器; 7. 光电发射器; 8. 光阵列; 9. 高度传感器; 10. 桨轮; 11. 螺旋输送机; 12. 漏斗; 13. 导向板; 14. 力传感器; 15. 导流板; 16. 力传感器; 17. 测量杆; 18. 弹簧式电位计; 19. 辐射接收器; 20. 辐射源; 21. Coriolis 流量计; 22. 电容极板

1. The grain; 2. Weighing sensor; 3. The belt; 4. Pressure sensor; 5. Rotation axis; 6. Photoelectric receiver; 7. Photoelectric transmitter; 8. Optical array; 9. Height sensor; 10. The paddle wheel; 11. Screw conveyor; 12. The funnel; 13. Guide board; 14. Force sensor; 15. Guide plate; 16. Force sensor; 17. Measuring rod; 18. Spring potentiometer; 19. Radiation receiver; 20. Source of radiation; 21. Coriolis flowmeter; 22. Capacitor plate

图 1 不同谷物测产方法分类图

Fig. 1 Classification chart of different grain production methods

地块的误差约为 1.6%<sup>[36]</sup>。此外,误差还与左/右斜率和前/后倾角相关<sup>[37]</sup>。为提高测产精度,周俊等<sup>[38]</sup>通过对联合收割机的振动噪声进行滤波,以减

少误差。还有研究采用双板分别测有谷物冲击和没有谷物冲击的振动数据,利用回归差分方法消除干扰噪声<sup>[39-40]</sup>。

表1 联合收割机测产方法分类

Table 1 Classification table of combine harvester production measurement method

测产类型 Yield type	传感器类型 Sensor type	安装位置 Installation position	作物类型 Crop type	误差 Error	参考文献 Reference
质量流量 Mass flow	称重式负载传感器	搅龙下方	小麦、玉米	实验室误差 $\leq 5\%$	[17]
		升运器称重	谷物	误差 $\leq 5\%$	[18]
		谷仓下面(底盘上)	水稻	$9.5\% \leq \text{误差} \leq 23.1\%$	[19]
	张力传感器	升运器传动链上	玉米	$10\% \leq \text{误差} \leq 20\%$	[20]
	扭矩传感器	升运器转轴上	谷物	误差 $\leq 5\%$	[21]
	冲击式负载传感器	升运器前端	玉米, 小麦, 大麦	误差 $\leq 4.06\%$	[15]
		升运器末端(弧段上)	玉米	$R^2 = 0.89$	[22]
	压电薄膜传感器	升运器末端	玉米	$0.90 \leq R^2 \leq 0.97$	[23]
		脱粒转子外端	水稻	误差 $\leq 12\%$	[24]
	伽马射线或 X 射线传感器	升运器顶部	玉米、小麦、大麦	误差 $\leq 4.07\%$	[15]
玉米			实验室 $R^2 = 0.99$	[25]	
超声波传感器	料斗(谷仓)上方	玉米、燕麦	误差 $\geq 10\%$	[26]	
电容式传感器	升运器的出口后方	谷物	无	[27]	
体积流量 Volume flow	浆轮式	升运器的出口后方	玉米、小麦、大麦	误差 $\leq 4\%$	[28]
			玉米、小麦、大麦	误差 $\leq 3.43\%$	[15]
	光学式	升运器的中间部位	玉米	误差 $\leq 3\%$	[29]
			玉米、小麦	误差 $\leq 9\%$	[30]
	图像式传感器	螺旋输送机中间部位	玉米	$R^2 \geq 0.97$	[31]
组合式 Combination type	光学传感器和称重传感器	光学式: 粮仓入口	水稻、大麦	误差 = $10\%$	[32]
		称重式: 粮仓底部			
	光学传感器、激光传感器、微波传感器和超声波传感器	脱粒滚筒和筛箱之间	水稻、大豆、大麦	$0.72 \leq R^2 \leq 0.96$	[33]

注: 未做说明的误差或  $R^2$  为田间试验所得。

Notes: The unstated error or  $R^2$  is obtained from field trials.

辐射式测产传感器分 2 种, 伽马射线和 X 射线。原理都利用谷物输送时通过一个有放射性的区域, 建立辐射吸收度与谷物流单位面积质量的关系, 公式为:

$$S_v = S_{v_0} \cdot e^{-\mu M} \quad (2)$$

式中:  $S_{v_0}$  为没有谷物吸收能量时的辐照强度;  $S_v$  为谷物吸收能量后, 探测器测得的辐照强度;  $\mu$  为谷物单位质量的吸收系数;  $M$  为谷物在辐射场单位面积上的物质质量。通过精确地测量衰减系数得到谷物的质量流<sup>[15]</sup>, 其中衰减系数不受谷物的种类和含水率变化的影响<sup>[41]</sup>, 但在测量较大谷物流量时, 对射

线能量要求较高<sup>[25]</sup>。

其他质量流传感器还包括张力式传感器、扭矩式传感器、薄膜式传感器、超声波式传感器和电容式传感器。张力式传感器采用薄膜电位器与悬臂式负载传感器相结合的方法, 与传统的质量流测产方式相比, 其准确性较低<sup>[20]</sup>。扭矩传感器安装在升运器的传动系中, 将测量到的扭矩转化为质量流量<sup>[21]</sup>, 其误差小于  $5\%$ <sup>[42]</sup>。薄膜式传感器原理类似于冲击式传感器, 但其使用了柔性增强织物的橡胶而非刚性板材<sup>[23]</sup>, 已有研究在脱粒滚筒的转子末端安装压电 PVDF(聚偏氟乙烯)薄膜, 来测谷物损失量<sup>[24]</sup>。

超声波式传感器利用脉冲透过作物后撞击金属板的回波信号强度来建立谷物流量方程<sup>[26]</sup>,该方法受振动和地形变化影响较大<sup>[43]</sup>。电容式传感器利用了谷物流量与介电常数之间的关系,但介电常数还与谷物的含水率和谷物的品种有关,因此该方法必须对每个品种谷物进行单独的校准,而且校准曲线是非线性的,取决于谷物的含水率<sup>[27]</sup>,因此该方法误差较大。

### 1.1.2 体积流量

体积流量传感器测产的方法主要包括桨轮式和非接触的光学式。桨轮式传感器利用谷粒从升运器中出来,积累到一个固定的桨轮上,当谷物的高度达到电容式接近传感器时,传感器启动继电器以转动桨轮,然后排出固定体积的谷物获得产量<sup>[44]</sup>。

光学式传感器是使用较多的体积流量传感器,主要利用的传感器包括光电二极管、激光传感器或结构光传感器。目前,升运器处的体积流量测量大都采用了点激光测垂直平面高度<sup>[29-30]</sup>或者线激光测截面高度<sup>[45-46]</sup>的方法,尚未看到面激光或结构光在大田测产上的应用。光学式传感器具有校准方便、安装快捷的特点,其误差相对较小,小于5%<sup>[29,47]</sup>。近几年随着半导体材料(CMOS)的成本降低和广泛应用,有研究在螺旋输送器的中间部位安装图像式测产装置,利用高速摄像机测量谷物流经螺旋输送机时的速度<sup>[31]</sup>,通过对截面积分得到谷物的体积流量。

### 1.1.3 组合式

韩国和日本的研究人员提出多传感器组合式的测量方法,利用不同传感器的工作原理对误差进行修正,达到更高精度的目的。已有研究结合光学阵列传感器、微波传感器、激光传感器和超声波阵列模块,以大米、大豆和大麦作为研究对象对传感器进行了比较和优化<sup>[33]</sup>。日本研究人员考虑到日本收割机的宽幅较窄,谷物通过升运器输送具有间歇性非连续变化的特点,设计了光学传感器和负载传感器联合对产量进行监测,提高了测产的准确度<sup>[32]</sup>。

### 1.1.4 其他类型的测产传感器

虽然大多数谷物流量检测方法都是通过质量流或体积流的方法实现,也还存在一些专用传感器用来测产,包括计数传感器测产和遥感测产。

计数传感器主要有3种:机械式<sup>[48-49]</sup>、光电式<sup>[50]</sup>和图像式<sup>[51-52]</sup>。机械式和光电式主要用于玉米产量的测量,该方法计数误差可以小于3%。图

像计数法被用于玉米群体检测和小麦群体检测,在小麦群体检测中采集小麦群体图像对麦穗和籽粒进行计数并进行产量预测,试验表明0.25 m<sup>2</sup>面积内的小麦麦穗数量、总籽粒数及产量预测的平均精度为93.83%、93.43%、93.49%<sup>[52]</sup>。

机载遥感和星载遥感原理都是在很高的地方通过图像或者光谱进行产量监测或预测。图像测产需要对采集图片的RGB色彩进行分析<sup>[53-55]</sup>,建立其与产量的关系模型。光谱方法则分为多光谱和高光谱测量,多光谱利用近红外反射光谱和可见光吸收(VIS)光谱进行产量预测<sup>[56]</sup>;高光谱较多光谱具有更高的精度和更多的波段,通过获得的遥感数据反演叶面指数,然后利用作物模型预测产量和生物量<sup>[57]</sup>。星载遥感较机载遥感具有独一无二的优势,其可以在全球范围内使用遥感预测作物产量,在作物未收割前对产量进行预测,为农民提供了在价格有利的情况下出售谷物的能力。但遥感测产方法受天气影响较大,对数据处理和模型算法的要求很高。

## 1.2 测产误差分析

1)不校准引起的误差。校准是针对某一特定区域的预期流量进行的准备工作,并且只在此预期范围内提供最佳的精度水平。为了保持准确性,需要根据产量水平进行多次校准,直接使用未经校准的产量监测数据是不可靠的<sup>[58]</sup>。Doerge提出“任何影响谷物的流动或与冲击感应板有相互作用的因素都会影响测产的结果”<sup>[59]</sup>,因此获得良好精度的重要因素是将正确范围内的谷物流量纳入冲击式测产传感器的校准中<sup>[60]</sup>。已有研究表明,校准评估应该每天进行4、5次,否则就会出现较大的系统误差,使整体数据产生偏离<sup>[61]</sup>;校准的次数越多,传感器的值越精确。如果在一批试验中只使用1次校准,误差高达9.5%;但如果在每次运行前重新校准数据,则误差降低到6.6%<sup>[9]</sup>。

2)传感器的响应误差。已有研究在室内对质量流量为2~6 kg/s的冲击式测产传感器的响应进行分析,通过试验台实时调节流量来模拟联合收割机的谷物流动,结论表明产量监测装置显示谷物流量变化误差为4.5%<sup>[60]</sup>。

3)谷物水分和密度变化带来的误差。通常同一天同一块土地上不同时间谷物的水分变化很大,如玉米含水率的变化幅度可以超过10%<sup>[10]</sup>。在一些气候环境下水分变化更大,如在英国温带海洋性气候下,谷物含水率的变化范围为12%~30%<sup>[62]</sup>。因

此在使用体积流量测产传感器时,当模型将体积流量转换为质量流量时必需考虑作物密度变化带来的影响,否则会将含水率变化的误差引入到质量流量测量中<sup>[63]</sup>。由水分引起的质量变化对冲击式流量传感器也有较大的影响,谷粒含水率较高时其表面的游离水会改变其物理特性<sup>[59]</sup>,因而对冲击力产生影响,当含水率较低时,实际通过联合收割机的质量流量更大<sup>[62]</sup>。

4) 谷物流分布不均带来的误差。试验表明在利用体积流量传感器测产时,颗粒流动的剖面受工作场地斜率变化以及颗粒性质的影响<sup>[30]</sup>,伴随着振动和现场地形的变化,谷粒的位移随斜率增加而增加,从而增大了谷物质量流量的误差<sup>[43]</sup>。

5) 谷物流速变化带来的误差。实验室环境下对冲击式测产传感器分别在恒定流量、阶跃输入流量和瞬态流动条件下的误差进行研究,结果表明恒定流量下平均误差仅为2.1%,而流量在阶跃变化和瞬态情况下,误差分别为3.2%和4.3%<sup>[60]</sup>。

### 1.3 不同测产方法的比较与分析

桨轮式和辐射式2种方式的测产精度几乎相同,与实际产量的误差都小于10%。桨轮式传感器在潮湿环境下收获作物,其测量容积的机械装置可能会出现故障。而辐射式流量传感器受制于各国不同的特殊法律(防辐射预防措施)要求,由于可能存在的放射性污染,导致部分国家已经将这种装置排除在外<sup>[28]</sup>。

冲击式和桨轮式2种方式均与非连续的产量显示了极高的相关性( $R^2 > 0.99$ ),但由于测产方式的离散性,二者在计算瞬时产量中都有着显著的误差<sup>[48]</sup>。冲击式和扭矩式传感器<sup>[64]</sup>在实验室中进行了比较试验,结果表明扭矩传感器对流量变化的敏感性是冲击式传感器的10倍;然而,这2种测量装置都无法精确地测量流量低于3 kg/s的流量,当流量小于3 kg/s时,冲击式传感器的标准误差为±60%,扭矩传感器的标准误差为±18%,当流量大于3 kg/s时,冲击式传感器的标准误差为±15%,而扭矩传感器的标准误差为±5%。因此扭矩式传感器是一种可替代冲击式传感器、更精确的谷物流量测量方法,且对较小流速的变化更加敏感。冲击式和薄膜式传感器测量原理是一样的,但薄膜式传感器使用的柔性薄膜式材料可以减少谷物流通的阻碍,减轻谷物与刚体的碰撞;但薄膜的受力区域会产生很大磨损,寿命较短<sup>[23]</sup>。冲击式和称重式传感器

的测产误差差别不大,且都与产量之间都有明显的相关性( $R^2 = 0.99$ ),平均误差为2.11%<sup>[65]</sup>。

有研究<sup>[15]</sup>比较了4种商用体积流和质量流谷物流量测量系统,包括:桨轮式(Class yield-o-meter)、光学式(RDS ceres)、辐射式(Massey ferguson flowcontrol)和力冲击式(Ag-Leader yield monitor)。试验表明桨轮式的误差为6.40%~8.48%,大部分的误差是由谷物质量密度的变化引起的。光学式传感器误差范围为6.85%~7.02%,主要受谷物水分变化的影响。辐射式传感器误差为7.15%~9.15%,而冲击式传感器误差为5.67%~10.11%。还有研究对7种商业的测产传感器在同一环境下进行台架试验,期间主要考虑了不同喂入量、横向和纵向倾斜的影响,试验表明7种测产传感装置的测产误差之间不存在明显的差异<sup>[66]</sup>。

通过以上研究数据可以看出,不同的产量监测方式受试验环境影响,都具有较大的不稳定性,但大部分测产方式之间的误差差别不是很大,研究认为通过测产装置的合理安装、校准和操作,可以使测产达到足够的准确度<sup>[67]</sup>,理想的测产系统应满足以下4种条件:1)易于安装与校准;2)具有足够的准确度和稳定性;3)传感器的损坏不妨碍正常工作,降低机械故障率;4)使用的测产方式与作物类型无关,且便于安装在不同类型和型号的收割机上。

## 2 产量图重建原理介绍与分析

20世纪80、90年代,国外研究人员就已经讨论了特定点<sup>[68]</sup>的农业产量图发展的前景和其具有的功能<sup>[69-71]</sup>。产量图提供了作物对土壤和作物管理方法做出反应的反馈信息,并帮助农民确定资源投入的最佳利用率<sup>[72]</sup>。作物产量图还被用于反应各种作物和土壤的状态<sup>[73]</sup>。这些研究促进了建立基于作物和土壤属性的农田管理系统的发展。目前为止,国外对各种谷物、饲料、根和其他作物的产量监测和产量图算法进行了大量研究<sup>[74-75]</sup>。

产量图是产量监测的可视化与延伸,研究内容包括产量重建的关键技术、产量图的误差研究、产量图的分析与应用等<sup>[9-10]</sup>。本研究着重对产量图的原理、关键技术及产量图的误差进行梳理介绍。

### 2.1 产量图重建原理及关键技术

产量图中的谷物产量定义为单位面积上的谷物质量,公式为:

$$y_G = \frac{m_G}{A} \quad (3)$$

式中:  $y_G$  为谷物产量;  $m_G$  为谷物经含水率处理后的标准化质量;  $A$  为实际收获面积, 其与实际割幅、行程速度相关。

在获得产量的基础上, 产量图还需要融合地理位置信息(GPS 坐标)<sup>[16]</sup>, 其一般由 4 部分组成: 谷物质量测量部分、面积测量部分、定位部分和数据处理部分(图 2)。产量监测系统中的传感器包括测产

传感器、水分传感器、地面速度传感器、切割宽度传感器、升运器速度传感器, 以及差分全球定位系统(DGPS)接收机等, 数据处理系统将感应到的谷物流量、作业面积、联合收割机的运动信息与位置函数联系起来生成产量图。为了减小测产的误差, 部分联合收割机的产量监测系统还配备了一些辅助传感器, 包括使用姿态传感器修正数据减少倾斜带来的误差, 在联合收割机的拨禾轮处安装开关传感器, 以启动或终止数据采集。

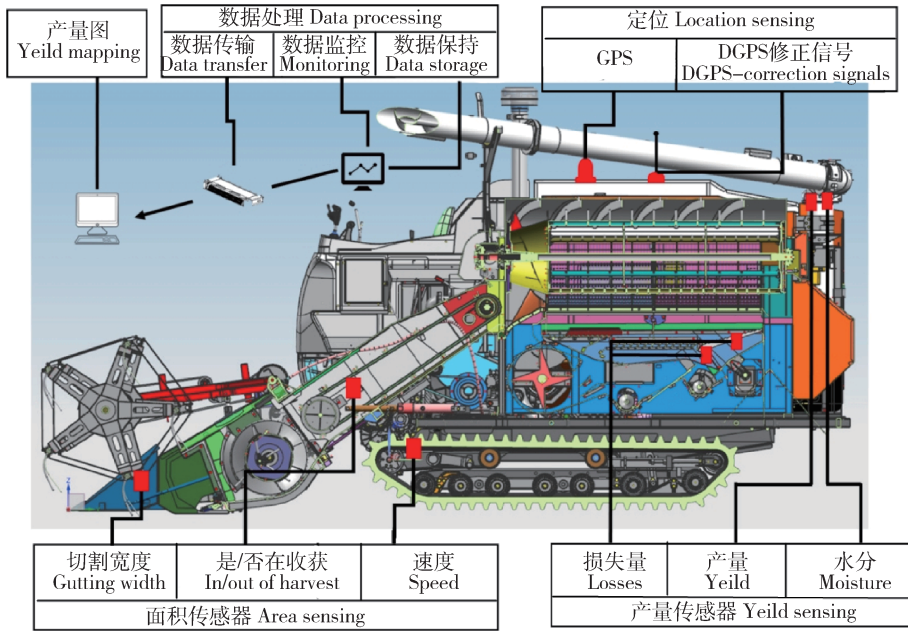


图 2 产量监测系统组成图<sup>[76]</sup>

Fig. 2 Production monitoring system composition diagram<sup>[76]</sup>

1) 谷物质量测定。谷物质量测定主要利用了测产传感器、水分传感器、倾角和升运器转速传感器。其中谷物的含水率无损测量是关键技术之一, 含水率测量的方法很多包括电容、微波、声学 and 近红外光谱(NIR)等方法。电容法测水分由于装置结构简单, 成本低而被广泛研究和应用, 含水率的平均误差不超过 3%, 最大误差为 10%~16%<sup>[77-78]</sup>, 修正后误差最小达到 0.24%<sup>[79]</sup>, 国内利用电容法测水分也做了大量研究<sup>[80-82]</sup>, 精度水平与国外相当。微波法测水分也是研究较多的领域之一, 其误差小于 1% ( $R^2 \geq 0.95$ )<sup>[83-85]</sup>。本研究着重介绍近红外光谱法, 近红外光谱在农业和食品工业中有着广泛的应用领域<sup>[86-89]</sup>。在近红外区和短波红外区, 光谱与含水率的相关系数都很高<sup>[90-91]</sup>。光谱法可以在联合收割机等近端传感模式下与其他农业作业环节同时进行工

作, 也可以在卫星等远程模式下进行工作, 因此应用前景十分广泛。已有研究<sup>[92]</sup>在升运器上测试了商用近红外光谱仪测定小麦籽粒水分和蛋白质含量的能力, 室内试验表明采用适当的低通滤波技术和最优的模型, 对蛋白质和水分的交叉验证误差分别为 0.57% 和 0.31%。

通过谷物流量传感器和水分传感器测得的参数, 利用式(4)计算得到谷物质量:

$$Y_G(t) = m_G(t) \frac{[1 - U_G(t)]}{[v(t)(w_C(t))]} \quad (4)$$

式中:  $Y_G(t)$  为谷物产量;  $m_G(t)$  为质量流量;  $v(t)$  为地面速度;  $w_C(t)$  为切割宽度;  $U_G(t)$  为谷物含水率。

2) 实际面积测量。包括地面速度和切割宽度测量。其中联合收割机的地面速度可以选用地面速度传感器进行测量; 也可以利用 DGPS 单元来测量,

根据定位系统定时记录定位信息然后计算得到联合收割机在给定时间内行驶的距离,通过平均速度公式计算出联合收割机的前进速度。切割宽度的测量多选用机械、光电或超声波传感器,其中光电式传感器误差小于3%,超声波传感器的最大误差小于5%<sup>[93-95]</sup>。

3)定位。目前,全球定位系统已经成为主流的定位方法,DGPS在引入基站对位置坐标和距离进行修正后精度可达到1 m以下,DGPS接收器被联合收割机广泛使用来确定坐标位置。斯坦福大学O'Connor<sup>[96]</sup>较早将RTK-DGPS应用于拖拉机导航定位、跟踪,利用方向偏差及变化率、转向角度及变化率、跟踪误差等5个变量建立了拖拉机运动学方程,在Deere 7800型拖拉机进行导航控制实验,平均偏差为-0.22 cm。国内,罗锡文等<sup>[97]</sup>在东方红X-804拖拉机中基于PID算法使用DGPS设计自动导航系统,其在前进速度0.8 m/s下,最大误差小于0.15 m,平均误差小于0.03 m。

4)数据处理。将产量数据和位置数据结合在一起,利用地图软件生成产量图。处理的数据采用彩色编码输出并可视化,在产量图中显示为点、块或等值线。在产量图重建中,由于过滤数据会产生空洞或者数据存在突变等原因,数据处理模型尤为重要常用到的是插值技术。插值是从周围数据中估计一个给定点的值的值的过程,它依赖于空间自相关的存在<sup>[98]</sup>,而产量数据在空间上是相关的<sup>[99-100]</sup>,因此可利用插值技术进行数据处理,其中克里金(Kriging)算法<sup>[101-102]</sup>和逆距离加权(IDW)算法<sup>[103-104]</sup>是建立连续的产量图的常用算法。

## 2.2 产量图重建误差分析

实现精确的产量图重建是十分困难的,尤其是在大范围内谷物流量变化始终保持高精度的测量<sup>[104]</sup>。在产量图重建过程中传递的主要误差有:未知的作物切割宽度、籽粒滞后时间、GPS的数据波动、谷物与杂物未知的组成成分、谷粒的损失。除上述误差来源,产量图还存在平滑算法、收割面积大小、收割机充填方式以及结束方式等因素引起的误差<sup>[106-112]</sup>。对产量图主要的误差分析如下:

1)切割宽度的测量误差。收割谷物时,联合收割机的切割宽度在实时变化,很难利用微调来保持割台边缘与作物边缘一致<sup>[73]</sup>。切割宽度的测量误差和地面速度的误差反映为收割面积的误差,降低了产量测量的精度<sup>[35]</sup>。已有研究认为在小麦收获

过程中利用超声波测距传感器进行测量得到切割宽度精度小于2 cm<sup>[73]</sup>。还有研究表明,速度测量中最大误差为2.5%而切割宽度误差为5%,地面速度和切割宽度误差使总产量监测误差从5%提高到7.5%<sup>[35]</sup>,推算得到切割宽度测量误差约占总误差的22%。因此研究人员建议产量图重建中用的切割宽度可以设置为95%的刀具实际宽度,以减少误差<sup>[9]</sup>。

2)变化的地面速度带来的误差。当联合收割机的地面速度突然变化时,将在计算中引入了一个小的测量面积,而收获的谷物在联合收割机中具有延迟作用,这会使计算出的瞬时产量出现较大误差,地面速度的变化还会影响滞后作物的再分配<sup>[10]</sup>。通过研究冲击式的产量传感器在恒定和变化的地面速度下的响应,发现当联合收割机速度恒定为8 km/h时,载荷的平均误差为3%,当速度为8~11 km/h时,误差增加到5.2%<sup>[113]</sup>。地面速度的变化使测量误差几乎翻了一番,通过保持恒定的地面速度,则可以减小这一误差。

3)填充时间及时间延时带来的误差。已有研究<sup>[9]</sup>分析了联合收割机中时间延迟随操作条件变化的特点,对填充时间和时间延迟(滞后时间)进行了区别。填充时间是指谷物进入空载收割机时谷物到达产量传感器的时间,而滞后时间是指谷物在正常运转过程中进入负载收割机时到达测产传感器的时间。目前的产量图系统中通常忽略了填充时间只考虑了时间延迟。当联合收割机开始运转和停止运转时,分别处于空载和负载状态下的动力学是不同的,因此在产量图中引入了误差。对于空载联合收割机,谷物填充时间需要10~40 s<sup>[114]</sup>,这种误差会导致高产量的地块被划为低产量的地块。如果在产量图重建中没有对填充时间进行补偿修正,则应排除前40 s内的收获数据。在另一项研究中,研究人员建议从产量图中删除联合收割机开始运动后的20 m的部分,以排除错误的的数据<sup>[115]</sup>。

4)地块大小和平滑处理带来的误差。由于联合收割机的启动、停止以及速度的突然变化在动力学中引入了误差,因此很难确定产量监测装置对小面积测产的精度。地块面积越小带来的误差就越大,而目前为止瞬时产量监测准确度没有得到广泛的研究<sup>[12]</sup>。已有研究认为,采用超过4~6 s的平均数据通常将误差保持在4%以下,当采用10 s的平均数据几乎消除了所有可能降低精度的误差<sup>[113]</sup>。如果



联合收割机以 8 km/h 的速度前进,在满足误差 4% 以下的情况(不考虑延时误差),4~6 s 时间内对应的地块长度应在 9~25 m,如何准确测量更小面积地块的瞬时产量还有待研究。

产量图重建并可视化,就需要对每个产量数据点进行分类和着色。一片区域中的产量与产量之间在空间上不是独立而是相关的,因此不能单独处理每个产量数据点,而需要通过一种平滑的方式获得总体的产量分布<sup>[9]</sup>。产量图重建研究中,许多研究对稀疏的产量数据建议使用克里金算法(Kriging)来丰富、预测作物产量的数据集,但是在平滑和丰富数据集的过程中势必会引入新的误差,如何使模型达到最优化还需要更多的研究。

5)定位误差。随着全球定位系统(GPS)的发展,定位误差在不断的减少。使用 DGPS 技术,位置数据的精度可达±1 m,但其在定位过程中,最大的误差来源于差分信号的丢失,因此在使用位置数据前需要判断并排除错误的位置信息。总体来说,DGPS 引入的误差可以认为是微不足道的<sup>[9]</sup>,误差主要分为 2 种:影响少量数据点的误差(第一类误差)和影响整个数据集的误差(第二类误差)。第二类误差的本质是定位位置的偏移,是可以通过其他方式的定位数据或者往年的定位数据校准修正的。第一类位置的误差,则可以利用程序通过联合收割机的预期轨迹进行纠正。

可视化产量图作为人机交互的界面,它的数据准确度格外重要。国外已经在产量图重建系统和误差研究上进行了大量试验,反观国内研究相对较少,尤其在产量图的可视化及大数据分布算法的研究上有待加强。

### 3 谷物流体力学模型研究介绍

鉴于谷物流体力学对产量图的精度有着重要的影响,通过分析联合收割机的谷物流动状态并建立精确的谷物流体力学模型至关重要<sup>[116]</sup>。要很好地了解谷物在联合收割机中流动和作用的方式十分困难,且收割机的每一环节都有自己的影响,这取决于收割机的结构、几何尺寸和作物特性。通过动力学模型的研究,将不同的机构组合起来并观察它们对谷物流动的影响<sup>[117]</sup>,在产量图中动力学模型可以用来修正时间延时误差,还可以通过模型得到谷物的损失来校准实际产量,提高产量图的精度。通过文献梳理发现,目前大部分研究还集中在使用一个

简单的时间延迟模型或一阶模型作为联合收割机的谷物流体力学模型<sup>[63,115]</sup>,还没有研究出一种有效地处理非线性组合动力学的产量重建算法。

一阶模型最早由 Searcy 等<sup>[44]</sup>提出,由于浆轮式测产传感器测量谷物的体积时,谷物流信号间隔并不均匀,需要通过数据处理才能在相同的时间间隔下获得产量数据,研究中利用算术平均法对过滤后的流量数据进行平滑处理。在产量重建过程中,对从联合收割机的头部到产量传感器的流动假设了一个总的模型来模拟真实系统。结论表明,利用一阶传输延迟的组合传递函数可以生成谷物产量图,时域中流量表示为:

$$f(t) = r(t) (1 - e^{-\frac{t-t_p-t_0}{\tau}}) \quad (5)$$

式中: $f(t)$ 为输出粮仓的谷物流量; $r(t)$ 为收割机头部输入的谷物流量; $t_p$ 为输送延迟时间; $t_0$ 为阶跃输入时间; $\tau$ 为滞后时间。

Birrell 等<sup>[63]</sup>在此基础上提出,谷物流测量实际上是一种离散数据采样操作,考虑将时域下的一阶模型在 Laplace 域中转换为  $z$  域进行分析。基于 ATE 变换方法,在 Laplace 传递函数中加入零阶变换,并将其转化为  $z$  变换, $z$  变换后的离散形式表达式为:

$$r(i - t_p)/(T - 1) = \left[ \frac{1}{1 - e^{-T/\tau}} \right] [f(i) - e^{-T/\tau} f(i - 1)] \quad (6)$$

式中: $f(i)$ 为任意时刻  $t$  测得的作物流量; $r(i)$ 为采样周期  $T$  上计算的作物流量; $\tau$ 为一阶系统的时间常数; $i=1,2,\dots$ 。

此外,有研究<sup>[73]</sup>通过在联合收割机上连续测量小麦产量,简化后的收获系统见图 3。

根据系统的输入变量  $YI(t)$ 、 $SP(t)$  和  $AWI(t)$ ,可以联立方程得到收获谷物的流量  $FR_{out}(t)$  为:

$$FR_{out}(t) = YI((x, y)(t))(AWI(t))(SP(t)) \quad (7)$$

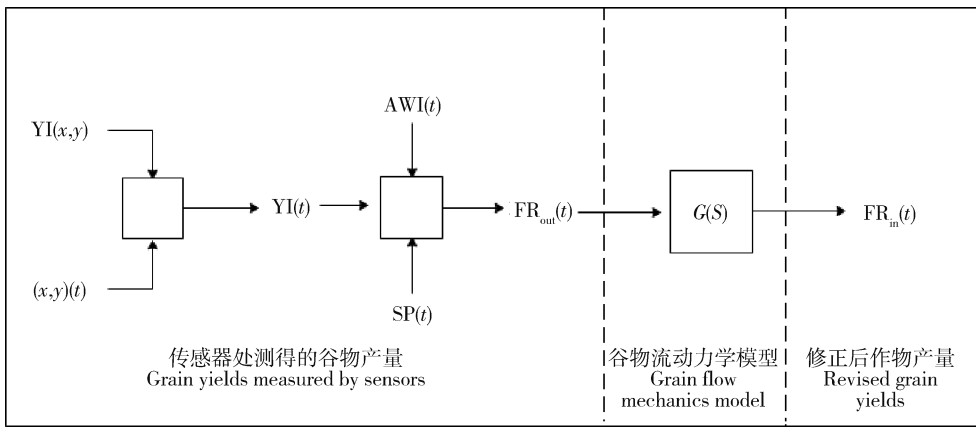
传感器测得的谷物流量  $FR_{out}(t)$  为作物的实际产量  $FR_{in}(t)$  经过系统的动态输送后的值,则  $FR_{in}(t)$  与  $FR_{out}(t)$  存在:

$$L[FR_{in}(t)] = G(s)L[FR_{out}(t)] \quad (8)$$

式中: $L$  为 Laplace 算子; $G(s)$  为表示系统动力学的传递函数。在获得  $FR_{in}(t)$  和  $FR_{out}(t)$  后,谷物运动过程的损失  $FR_{loss}(t)$  为:

$$FR_{loss}(t) = FR_{in}(t) - FR_{out}(t) \quad (9)$$

式中, $FR_{loss}(t)$  是指联合收割机本身造成的所有损



YI(x,y)为(x,y)处测得的瞬时产量;(x,y)(t)为收割机的行走轨迹坐标;YI(t)为t时刻测得的产量;AWI(t)为t时刻收割机的切割宽度;SP(t)为t时刻收割机的地面速度;G(s)为谷物流动力学模型函数;FR<sub>out</sub>(t)为t时刻传感器测得的产量;FR<sub>in</sub>(t)为模型修正后的产量。

YI(x,y) is the instantaneous yield measured at the position of the harvester; (x,y)(t) is the moving track coordinate of the harvester; YI(t) is the yield of the harvester measured at time t; AWI(t) is the cutting width of the harvester at time t; SP(t) is the ground speed of the harvester at time t; G(s) is the function of grain flow mechanics model; FR<sub>out</sub>(t) is the output measured by the time t sensor; FR<sub>in</sub>(t) is the output after model modification.

图3 收获系统模型流程图

Fig. 3 Diagram of harvesting system

失,但不包括收获前因鸟类、昆虫、天气等造成的损失。谷物损失可进一步细分为“收割损失”(头部掉落或漏掉的谷物)、“处理损失”(内部运动中造成的谷粒损失)和“泄漏损失”(除了收集损失和处理损失以外的任何损失)。为了更好的得到谷物的损失模型,可以在联合收割机上安装“产量损失率测量传感器”来跟踪谷物的损失<sup>[118]</sup>。

Maertens等<sup>[92]</sup>在研究中考虑了回流的影响,原先假设回流为零,低阶线性传递函数G(s)在系统中起着很好的作用。考虑到回流(ε)不为零的情况时,传递模型见图4。模型中的环节没有采用卷积来处理,而是将每个环节独立设置一个简单的延时子模型。

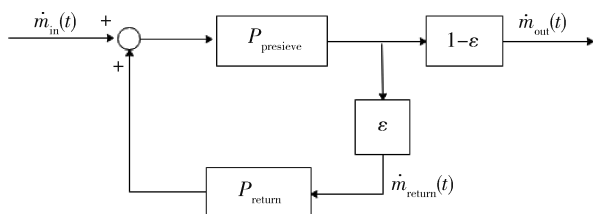


图4 考虑回流的系统模型<sup>[92]</sup>

Fig. 4 A system model that considers reflux

该模型由以下2个方程描述<sup>[117]</sup>:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{out}(t) &= (1 - \epsilon) \cdot (\dot{m}_{in}(t - P_{presieve}) + \\ &\dot{m}_{return}(t - P_{presieve} - P_{return})) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\dot{m}_{return} = \left( \frac{\epsilon}{1 - \epsilon} \right) \cdot \dot{m}_{out}(t) \quad (11)$$

式中: $\dot{m}_{out}(t)$ 为t时刻传感器处的流量; $\dot{m}_{return}$ 为返回升运器的流量; $P_{presieve}$ 为输入流量与返回流量混合后的输送延迟; $P_{return}$ 为从筛子返回到回流和进料流混合的输送延迟;当该系统为一个线性系统时,ε为常数。

谷物流动状态还受到作物条件的影响,因而组合模型不尽相同<sup>[119]</sup>。目前的流量模型可以修正谷物的延迟时间来匹配谷物流量数据和位置数据,但是都无法确定谷物混合对产量监测的影响<sup>[114]</sup>。

#### 4 结束语

本研究对产量监测的相关文献进行了梳理,总结如下:

1) 谷物测产方式包括质量流量式、体积流量式和组合式,其中质量流量式直接将物理量与谷物质量联系在一起,属于直接测量;而体积流量式属于间接测量,其在将谷物体积转化为质量时还将引入谷物密度的误差和测量体积中的空气间隙的误差;因此,利用质量流量传感器进行测产更可取。但质量流量传感器也存在着弊端,例如冲击式传感器需要经常性的清洁,以清除工作期间在传感器上积累水分、灰尘和杂草汁液。不同原理的传感器关系到装

置结构的复杂程度、成本价格、安全性能和安装方式,我们在选择合适的一种或多种传感器进行测产时,需要考虑传感器失效的临界点和工作的地理环境等因素。

2) 产量监测的精度主要取决于流量传感器的校准、传感器的响应性能、谷物流量的波动、流量剖面的均匀性、谷物的水分和密度变化。对误差差别不大的不同类型传感器,可以通过合理的安装、校准和操作,使测得的产量达到足够高的精度。

3) 产量监测系统由谷物质量测量部分、作业面积测量部分、定位部分和数据处理部分组成。涉及的传感器包括:测产传感器、水分传感器、地面速度传感器、切割宽度传感器、升运器转速传感器,以及差分全球定位系统(DGPS)接收机等。

4) 产量图重建建立在测产的基础上,是产量监测的可视化和延伸,既反应了这一轮各个环节处理的结果,也为下一轮的各个环节提供依据。产量图重建的误差主要来源于:切割宽度的测量误差,变化的地面速度的误差,填充时间和时间延时带来的误差,GPS数据波动误差,地块大小和平滑处理带来的误差。产量图重建的研究不仅在于硬件性能的提高,还包括数据处理及产量图重建模型的建立。

5) 目前联合收割机的动力学模型集中在一阶模型的研究上,包括简单的传送模型和时间延时模型,对产量图的误差修正有着重要的作用。

在智能农机和产量监测的发展中,还有许多问题有待解决,建议:

1) 在高精度的测产传感器研究上,可以考虑联合冲击式传感器使用组合式的传感器以继续减小误差,或采用安装、校准方便的扭矩式和光电式传感器。

2) 针对我国地块面积小、传感器性价比要高等特点,建议加强对小面积地块的产量图重建、产量图平滑算法、国产联合收割机的延时时间和地面变速等误差的研究。

3) 目前的谷物流动力学模型无法确定谷物混合对产量监测的影响,现有模型都未引入填充时间对产量进行校正,加强不同环节下的非线性组合算法和反褶积算法的产量动力学模型的研究。

## 参考文献 References

[1] Blackmore S. Precision farming: An introduction[J]. *Outlook*

*on Agriculture*, 1994, 23(4): 275-280

[2] 汪懋华. “精细农业”发展与工程技术创新[J]. *农业工程学报*, 1999, 15(1): 1-8

Wang M H. Development and engineering technology innovation of “Precision Agriculture”[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1999, 15(1): 1-8 (in Chinese)

[3] Pierce F J, Nowak P. Aspects of precision agriculture[J]. *Advances in Agronomy*, 1999, 67: 1-85

[4] 汪懋华. 关于精细农业试验示范与发展研究的思考[C]//中国农业机械学会成立40周年庆典暨2003年学术年会论文集. 北京:中国农业机械学会, 2003: 27-32

Wang M H. Reflections on experimental demonstration and development research of fine agriculture[C]. In: *Proceedings of the 40th Anniversary Celebration of China Agricultural Machinery Association and 2003 Academic Annual Meeting*, Beijing: China Agricultural Machinery Association, 2003: 27-32 (in Chinese)

[5] Robert P C. Precision agriculture: An information revolution in agriculture [J]. *Agriculture Outlook Forum*, 1999: 1-5

[6] 介战, 刘红俊, 侯风云. 中国精准农业联合收割机研究现状与前景展望[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(2): 179-182

Jie Z, Liu H J, Hou F Y. Research advances and prospects of combine harvester on precision agriculture in China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(2): 179-182 (in Chinese)

[7] Blackmore B S, Marshall C J. Yield mapping: errors and algorithms[C]. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Precision Agriculture*. Bloomington: ASA-CSSA-SSSA, 1996: 403-416

[8] Pierce F J, Anderson N W, Colvin T S, Schueller J K, Humburg D S, McLaughlin N B. Yield mapping[C]. In: *Site-Specific Management for Agricultural Systems*, Madison: ASA-CSSA-SSSA, 1997: 211-243

[9] Blackmore B S. Remedial correction of yield map data[J]. *Precision Agriculture*, 1999, 1(1): 53-66

[10] Pierce F J. Yield mapping [J]. *Resource Magazine*, 1997, 4(2): 9-10

[11] Pierce F J, Sadler E J, Sudduth K A, Hummel J W, Birrell S J. Sensors for site-specific management[C]. In: *The State of Site-specific Management for Agriculture*, Madison: ASA-CSSA-SSSA, 1997: 183-210

[12] Stafford J V. Essential technology for precision agriculture [C]. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Precision Agriculture*, Bloomington: ASA-CSSA-SSSA,

- 1996; 595-604
- [13] Kützbach H D, Schneider H. Scientific challenges of grain harvesting[C]. In: *ASAE Paper No 97-1080*, St Joseph: ASAE, 1997
- [14] Hindryckx K, Missotten B. Krachten en snelheden van de graanstroom bij een impulsdebietmeter [J]. *Eindwerk KU Leuven*, 1994; 15-20
- [15] Kormann G, Demmel M, Auernhammer H. Testing stand for yield measurement systems in combine harvesters [C]. In: *American Society of Agricultural Engineers Annual Meeting*. Orlando: ASAE, 1998
- [16] Morgan M T, Ess D. *The Precision-Farming: Guide for Agriculturists*[M]. 1st ed. Moline: Deere & Company, 1997
- [17] Wagner L E, Schrock M D. Grain flow measurement with a pivoted auger[J]. *Transactions of the ASAE*, 1987, 30(6): 1583-1586
- [18] Schrock M D, Kuhlman D K, Hinnen R T, Oard D L, Pringle J L. Sensing grain yield with a triangular elevator[C]. In: *Proceedings of 2nd International Congress on Site-specific Management for Agricultural Systems*, Madison: ASA-CSSA-SSSA, 1995; 638-650
- [19] Iida M, Kaho T, Lee C K, Umeda M, Suguri M. Measurement of grain yields in Japanese paddy field[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1999, 48(3): 293-300
- [20] Veal M W, Shearer S A, Fulton J P. Development and performance assessment of a grain combine feeder house-based mass flow sensing device[J]. *Transactions of the ASABE*, 2010, 53(2): 339-348
- [21] Chaplin J, Hemming N, Hetchler B. Comparison of impact plate and torque-based grain mass flow sensors [J]. *Transactions of the ASAE*, 2004, 47(4): 1337-1345
- [22] Perez-Munoz F, Colvin T S. Continuous grain yield monitoring[J]. *Transactions of the ASAE*, 1996, 39(3): 775-783
- [23] Schrock M D, Oard D L, Taylor R K, Eisele E L, Zhang N, Suhardito, Pringle J L. A diaphragm impact sensor for measuring combine grain flow[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 1999, 15(6): 639-642
- [24] Zhao Z, Li Y M, Chen J, Xu J J. Grain separation loss monitoring system in combine harvester[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2011, 76(2): 183-188
- [25] Arslan S, Inanc F, Gray J N, Colvin T S. Grain flow measurements with X-ray techniques [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2000, 26(1): 65-80
- [26] Wild K, Ruhland S, Haedicke S. Performance of pulse radar systems for crop yield monitoring[C]. In: *American Society of Agricultural Engineers Annual Meeting*. Las Vegas: ASAE, 2003
- [27] Stafford J V, Ambler B, Smith M P. Sensing and mapping grain yield variation[C]. In: *Automated Agriculture for the 21st Century*, Chicago: ASAE, 1991; 356-365
- [28] Auernhammer H, Demmel M, Muhr T, Rottmeier J, Wild K. Yield measurements on combine harvesters[C]. In: *American Society of Agricultural Engineers Meeting, New Orleans*: ASAE, 1993; 10
- [29] Pfeiffer D W, Hummel J W, Miller N R. Real-time corn yield sensor[C]. In: *American Society of Agricultural Engineers Meeting*, New Orleans: ASAE, 1993; 25
- [30] Strubbe G, Missotten B, De Baerdemaeker J. Performance evaluation of a three-dimensional optical volume flow meter [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 1996, 12(4): 403-409
- [31] Jason N S, Matthew J D, Robert P M, Aaron J B, Zach A P. Design and development of a particle flow yield monitor for combine harvesters[C]. In: *2018 ASABE Annual International Meeting*, St Joseph: ASABE, 2018
- [32] Chosa T, Shibata Y, Kobayashi K, Daikoku M, Omine M, Toriyama K, Araki K, Hosokawa H. Yield monitoring system for a head-feeding combine[J]. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 2006, 40(1): 37-43
- [33] Choi M C. Development of a grain yield monitoring system for 55 kW full-type multi-purpose combines [D]. Chungnam: Chungnam National University, Department of Biosystems Machinery Engineering, 2016
- [34] Colvin T S, Karlen D L, Tischer N. Yield variability within fields in central Iowa[C]. In: *Automated Agriculture for the 21st Century*, Chicago: ASAE, 1991; 366-372
- [35] Shoji K, Kawamura T. A mini grain-yield sensor and *in-situ* non-linear calibration impact-by-impact sensing to compensate for it's own drift and to preserve non-linearity for enhanced accuracy[C]. In: *American Society of Agricultural Engineers, Kentucky*: ASAE, 2011
- [36] Missotten B, Strubbe G, Baerdemaeker J D. Accuracy of grain and straw yield mapping [C]. In: *Proceedings of 3rd International Conference on Precision Agriculture*. Minneapolis: ASA-CSSA-SSSA, 1996; 713-722
- [37] Fulton J P, Sobolik C J, Shearer S A, Higgins S F, Burks T F. Grain yield monitor flow sensor accuracy for simulated varying field slopes[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2009, 25(1): 15-21

- [38] 周俊, 周国祥, 苗玉彬, 刘成良. 悬臂梁冲量式谷物质量流量传感器阻尼设计[J]. 农业机械学报, 2005, 36(11): 121-123, 127  
Zhou J, Zhou G X, Miao Y B, Liu C L. Damping design of impact-based grain yield sensor [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2005, 36(11): 121-123, 127 (in Chinese)
- [39] 胡均万, 罗锡文, 阮欢, 陈树人, 李耀明. 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 J W, Luo X W, Ruan H, Chen S R, Li Y M. Design of a dual-plate differential impact-based yield sensor [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(4): 69-72 (in Chinese)
- [40] 李新成, 李民赞, 王锡九, 郑立华, 张漫, 孙茂真, 孙红. 谷物联合收割机远程测产系统开发及降噪试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(2): 1-8  
Li X C, Li M Z, Wang X J, Zhen L H, Zhang M, Sun M Z, Sun H. Development and denoising test of grain combine with remote yield monitoring system [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(2): 1-8 (in Chinese)
- [41] Ruwe D M, Murphy G, Bockhop C W. Gamma-ray attenuation coefficients of grains and forages[J]. *Transactions of the ASAE*, 1996, 9(3): 0312-0313
- [42] Zandonadi R S, Stombaugh T S, Shearer S A, Queiroz D M, Sama M P. Laboratory performance of a mass flow sensor for dry edible bean harvesters [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2009, 26(1): 11-20
- [43] Klemme K A, Schumacher J A, Froehlich D P. Results and advantages of a spatially variable technology for crop yield[C]. In: *SAE Technical Paper Series*, Warrendale: SAE International, 1992
- [44] Searcy S W, Schueller J K, Bae Y H, Borgelt S C, Stout B A. Mapping of spatially variable yield during grain combining[J]. *Transactions of the ASAE*, 1989, 32(3): 0826-0829
- [45] 姜鑫, 尹文庆, 浦浩, 胡飞, 陈彩蓉, 李旭辉. 基于结构光三维视觉的螺旋输送机谷粒体积的测量方法[J]. 南京农业大学学报, 2019, 42(2): 373-381  
Jiang X, Yin W Q, Pu H, Hu F, Chen C R, Li X H. Measurement method of grain volume on screw conveyor based on structured light of 3D vision [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2019, 42(2): 373-381 (in Chinese)
- [46] 杨刚, 雷军波, 刘成良, 陶建峰. 基于线结构光源和机器视觉的高精度谷物测产系统研制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(8): 21-28  
Yang G, Lei J B, Liu C L, Tao J F. Development of yield monitoring system with high-precision based on linear structured light source and machine vision [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(8): 21-28 (in Chinese)
- [47] 付兴兰, 安晓飞, 张兆国, 李晨源, 李立伟, 于佳杨. 基于单质点法的联合收割机谷物卸粮质量理论建模与分析[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(11): 208-211  
Fu X L, An X F, Zhang Z G, Li C Y, Li L W, Yu J Y. Theoretical modeling and analysis of grain unloading mass measurement of combine-harvester based on single particle method [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(11): 208-211 (in Chinese)
- [48] Birrell S J, Sudduth K A. Corn population sensor for precision farming [C]. In: *ASAE Paper No. 951334*. St Joseph: ASAE, 1995
- [49] Sudduth K A, Birrell S J, Krumpelman M J. Field evaluation of a corn population sensor [C]. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture*, Bloomington: ASA-CSSA-SSSA, 2000
- [50] Hummel J W, Lobdell B M, Sudduth K A, Birrell S J. Sensing corn population-another variable in the yield equation [C]. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Precision Agriculture*, Bloomington: ASA-CSSA-SSSA, 2002
- [51] Shrestha D S, Steward B L. Automatic corn plant population measurement using machine vision [J]. *Transactions of the ASAE*, 2003, 46(2): 559-565
- [52] 李毅念, 杜世伟, 姚敏, 易应武, 杨建峰, 丁启朔, 何瑞银. 基于小麦群体图像的田间麦穗计数及产量预测方法[J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 185-194  
Li Y N, Du S W, Yao M, Yi Y W, Yang J F, Ding Q S, He R Y. Method for wheatear counting and yield predicting based on image of wheatear population in field [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(21): 185-194 (in Chinese)
- [53] Domsch H, Heisig M, Witzke K. Estimation of yield zones using aerial images and yield data from a few tracks of a combine harvester [J]. *Precision Agriculture*, 2008, 9(5): 321-337
- [54] Stark R, Gitelson A, Grits U, Rundquist D, Kaufman Y. New technique for remote estimation of vegetation fraction: Principles, algorithms and validation [J]. *Aspects of Applied Biology*, 2000, 60: 241-246
- [55] Diker K, Buchleiter G W, Farahani H J, Heerman D F, Brodahl M K. Frequency analysis of yield for delineating

- management zones [C]. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Precision Agriculture and Other Precision Resources Management*. Minneapolis: ASA-CSSA-SSSA, 2002
- [56] Stroppiana D, Migliazzi M, Chiarabini V, Crema A, Musanti M, Franchino C, Villa P. Rice yield estimation using multispectral data from UAV: A preliminary experiment in northern Italy[C]. In: *2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. Milan: IEEE, 2015: 4664-4667
- [57] Jégo G, Pattey E, Liu J G. Using leaf area index retrieved from optical imagery, In the STICS crop model for predicting yield and biomass of field crops[J]. *Field Crops Research*, 2012, 131: 63-74
- [58] Ambuel J R. Knowledge and decision support for variable rate application of materials in precision agriculture[D]. Ames: Iowa State University Doctor of Philosophy, 1995
- [59] Doerge T A. Weigh wagon vs. yield monitor comparison[EB/OL]. 1996. <http://www.pioneer.com/usa/technology/i970801.htm>
- [60] Arslan S, Colvin T S. Laboratory performance of a yield monitor[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 1999, 15(3): 189-195
- [61] Robert P C, Rust R H, Larson W E, Larscheid G, Blackmore B S. Interactions between farm managers and information systems with respect to yield mapping[C]. In: *Proceedings of 3rd International Conference on Precision Agriculture*, Minneapolis: ASA-CSSA-SSSA-ASAE, 1996: 1153-1163
- [62] Sanaei A, Yule I J. Yield measurement reliability on combine harvesters[C]. In: *ASAE Paper No. 96-1020*. St Joseph: ASAE, 1996
- [63] Birrell S J, Sudduth K A, Borgelt S C. Comparison of yield sensors and techniques for crop yield mapping[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 1996, 14(2-3): 215-233
- [64] Chaplin J, Hemming N, Hetchler B. Comparison of an impact plate and torque-based yield sensor[C]. In: *ASABE Paper No. 03-1034*. St Joseph: ASABE, 2003
- [65] Arslan S, Colvin T S. Laboratory test stand for combine grain yield monitors [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 1998, 14(4): 369-371
- [66] Demmel M. Site-specific recording of yields[C]. In: *Precision in Crop Farming Site-Specific Concepts and Sensing Methods Applications and Results*. Dordrecht: Springer Science and Business Media, 2013: 313-329
- [67] Arslan S, Colvin T. Grain yield mapping: Yield sensing, yield reconstruction, and errors[J]. *Precision Agriculture*, 2002, 3(2): 135-154
- [68] Schueller J K. In-field site-specific crop production[C]. In: *Automated Agriculture for the 21st Century*. Chicago: ASAE, 1991: 291-292
- [69] Bae Y H, Searcy S W, Schueller J K, Stout B A. Determination of spatially variable yield maps[C]. In: *ASAE Paper No. 87-1533*. St Joseph: ASAE, 1987
- [70] Borgelt S C, Sudduth K A. Grain flow monitoring for in-field yield mapping[C]. In: *ASAE Paper No. 92-1022*. St Joseph: ASAE, 1992
- [71] Searcy S W, Schueller J K, Bae Y H, Borgelt S C, Stout B A. Mapping of spatially variable yield during grain combining[J]. *Transactions of the ASAE*, 1989, 32(3): 826-829
- [72] Dingemans M J. The practical implementation of precision farming for European agriculture [C]. In: *First European Conference on Precision Agriculture*. Coventry: Warwick, 1997: 727-733
- [73] Vansichen R, De B J. Continuous wheat yield measurements on a combine[C]. In: *Automated Agriculture for the 21st Century*. Chicago: ASAE, 1991: 346-355
- [74] Singh M, Verma A, Sharma A. Precision in grain yield monitoring technologies: A review [J]. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa, and Latin America*, 2012, 43: 50-59
- [75] Reyns P, Missotten B, Ramon H, De Baerdemaeker J. A review of combine sensors for precision farming[J]. *Precision Agriculture*, 2002, 3: 169-182
- [76] Chung S O, Choi M C, Lee K H, Kim Y J, Hong S J, Li M Z. Sensing technologies for grain crop yield monitoring systems: A review[J]. *Journal of Biosystems Engineering*, 2016, 41(4): 408-417
- [77] Reitz P, Kutzbach H D. Investigations on a particular yield mapping system for combine harvesters[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 1996, 14: 137-150
- [78] Berbert P A, Stenning B C. On-line moisture content measurement of wheat [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1996, 65(4): 287-296
- [79] Lawrence K C, Funk D B, Windham W R. Parallel-plate moisture sensor for yellow-dent field corn[J]. *Transactions of the ASAE*, 1999, 42(5): 1353-1358
- [80] 林国栋. 粮食水分在线检测控制系统的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2003
- Lin G D. Online moisture test system for grain[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2003 (in Chinese)

- [81] 滕召胜, 宁乐炜, 张海霞, 杨清海, 张洪川. 粮食干燥机水分在线检测系统研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 130-133  
Teng Z S, Ning L W, Zhang H X, Yang Q H, Zhang H C. On-line measurement system of grain dryer for monitoring moisture content[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(5): 130-133 (in Chinese)
- [82] 李泽峰, 金诚谦, 刘政, 杨腾祥, 陈满, 蔡泽宇. 谷物联合收获机水分在线检测装置设计与标定[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(6): 145-151  
Li Z F, Jin C Q, Liu Z, Yang T X, Chen M, Cai Z Y. Design and calibration of on-line moisture detection device for grain combine harvester [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2019, 40(6): 145-151 (in Chinese)
- [83] Kocsis L, Schelemm U, Richter H, Mellmann J, Farkas I. On-line microwave measurement of the moisture content of wheat [C]. In: *Proceedings of the 17th World Congress*, Laxenburg: International Federation of Automatic Control, 2008: 631-635
- [84] Nelson S O, Trabelsi S, Lewis M A. Microwave sensing of moisture content and bulk density in flowing grain and seed [J]. *Transactions of the ASABE*, 2016, 59(2): 429-433
- [85] Lotfi M, Darvishi H. In-line measurement of the moisture content of wheat by acoustic method[J]. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 2015, 8(2): 163-167
- [86] Puchwein G, Eibelhuber A. Outlier detection in routine analysis of agricultural grain products by near-infrared spectrometry[J]. *Analytica Chimica Acta*, 1989, 223: 95-103
- [87] Sorvaniemi J, Kinnunen A, Tsados A, Mälkki Y. Using partial least squares regression and multiplicative scatter correction for FT-NIR data evaluation of wheat flours[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 1993, 26(3): 251-258
- [88] Delwiche S R. Protein content of single kernels of wheat by near-infrared reflectance spectroscopy[J]. *Journal of Cereal Science*, 1998, 27(3): 241-254.
- [89] Ferrio J P, Villegas D, Zarco J, Aparicio N, Araus J L, Royo C. Assessment of durum wheat yield using visible and near-infrared reflectance spectra of canopies [J]. *Field Crops Research*, 2005, 94(2-3): 126-148
- [90] Penuelas J, Filella I, Biel C, Serrano L, Save R. The reflectance at the 950-970 nm region as an indicator of plant water status[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(10): 1887-1905
- [91] Yang C M, Su M R. Analysis of spectral characteristics of rice canopy under water deficiency [C]. In: *Proceedings of the Asian Conference on Remote Sensing*. Taipei: Session Agriculture and Soil, 2000
- [92] Maertens K, Reyns P, De B J. On-line measurement of grain quality with NIR technology[J]. *Transactions of the ASAE*, 2004, 47(4): 1135-1140
- [93] Stafford J V, Ambler B, Bolam H C. Cut width sensors to improve the accuracy of yield mapping systems [C]. In: *Proceeding of the 1st European Conference on Precision Agriculture*. Oxford: BIOS Scientific Publishers Ltd, 1997: 623-627
- [94] Missotten B. Measurement systems for the mapping and the evaluation of crop production performance[J]. *Dissertationes de Agricultura (Belgium)*, 1998, 302
- [95] Han S, Schneider S M, Rawlins S L, Evans R G. A bitmap method for determining effective combine cut width in yield mapping[J]. *Transactions of the ASAE*, 1997, 40(2): 485-490
- [96] O'Connor M. Carrier-phase differential GPS for automatic control of land vehicles[D]. Stanford: Stanford University, 1997
- [97] 罗锡文, 张智刚, 赵祚喜, 陈斌, 胡炼, 吴晓鹏. 东方红 X-804 拖拉机的 DGPS 自动导航控制系统[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 139-145  
Luo X W, Zhang Z G, Zhao Z X, Chen B, Hu L, Wu X P. Design of DGPS navigation control system for Dongfanghong X-804 tractor [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(11): 139-145 (in Chinese)
- [98] Robinson T P, Metternicht G. Comparing the performance of techniques to improve the quality of yield maps [J]. *Agricultural Systems*, 2005, 85(1): 19-41
- [99] Rands M. The development of an expert filter to improve the quality of yield mapping data [D]. Cranfield: Cranfield University, 1995
- [100] Thylén L, Murphy D P L. The control of errors in momentary yield data from combine harvesters[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1996, 64(4): 271-278
- [101] Whelan B M, McBratney A B, Minasny B. VESPER-spatial prediction software for precision agriculture [C]. In: *Proceedings of the 3rd European Conference on Precision Agriculture*. Montpellier: ASA-CSSA-SSSA, 2001: 139-144
- [102] Heuvelink G, Webster R. Modelling soil variation: Past, present and future[J]. *Geoderma*, 2001, 100(3-4): 269-301
- [103] Webster R, Oliver M A. *Geostatistics for Environmental*

- Scientists[M]. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2007
- [104] Burrough P A, McDonnell R A. Optimal interpolation using geostatistics[C]. In: *Principles of Geographic Information Systems*. Oxford: Oxford University, 1998: 132-161
- [105] Thylen L, Jurschik P, Murphy D P L. Improving the quality of yield data[C]. In: *First European Conference on Precision Agriculture*. Coventry: Warwick, 1997: 743-750
- [106] Taylor R K, Kastens D L, Kastens T L. Creating yield maps from yield monitor data using multi-purpose grid mapping (MPGM) [C]. In: *Proceedings of the Fifth International Conference on Precision Agriculture and Other Precision Resources Management*, Bloomington/Minneapolis: CAB Direct, 2000
- [107] Thylen L, Algerbo P A, Giebel A. An expert filter removing erroneous yield data [C]. In: *Proceedings of the Fifth International Conference on Precision Agriculture and Other Precision Resources Management*, Bloomington/Minneapolis: CAB Direct, 2000
- [108] Beck A D, Searcy S W, Roades J P. Yield data filtering techniques for improved map accuracy [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2001, 17(4): 423-431
- [109] Noack P O, Muhr T, Demmel M. Long term studies on determination and elimination of errors occurring during the process of georeferenced yield data collection on combine harvesters[C]. In: *Proceedings of the Third European Conference on Precision Agriculture*. Montpellier: ASA-CSSA-SSSA, 2001: 833-837
- [110] Steinmayr T. Error analysis and error correction with site-specific yield sensing in combines for the development of a standardized algorithm for yield recording: In German[D]. TU München; Echnical University of Munich, 2002
- [111] Sudduth K A, Drummond S T, Myers D B. Yield editor 2.0: software for automated removal of yield map errors[C]. In: *ASABE Paper No. 12-1338243*. St Joseph: ASABE, 2012
- [112] Moore M R. An investigation into the accuracy of yield maps and their subsequent use in crop management[D]. Cranfield: Cranfield University, 1998
- [113] Arslan S, Colvin T. An evaluation of the response of yield monitors and combines to varying yields [J]. *Precision Agriculture*, 2002, 3(2): 107-122
- [114] Whelan B M, McBratney A B. Sorghum grain flow convolution within a conventional combine harvester[C]. In: *First European Conference on Precision Agriculture*. Coventry: Warwick, 1997: 759-766
- [115] Stott B L, Borgelt S C, Sudduth K A. 1993. Yield determination using an instrumented claas combine[C]. In: *ASAE Paper No. 93-1507*. St Joseph: ASAE, 1993
- [116] Srivastava A K, Goering C G, Rohrbach R P. Engineering principles of agricultural machines[C]. In: *ASAE Textbook No. 6*. St Joseph: ASAE, 1995
- [117] Maertens K, De B J, Ramon H, De K R. An analytical grain flow model for a combine harvester. part I: Design of the model[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2001, 79(1): 55-63
- [118] Maertens K, Missotten B, De B J. On-line tracking of separation processes in combine harvesters [C]. In: *Proceedings of the International Conference on Crop Harvesting and Processing*. Kentucky: ASAE, 2003: 48-51
- [119] Lark R M, Stafford J V, Bolam H C. Limitations on the spatial resolution of yield mapping for combinable crops[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1997, 66: 183-193

责任编辑: 刘迎春