

生物质传感器的有限元分析与测试

李海洲 于劲松*

(上海理工大学 医疗器械与食品学院,上海 200093)

摘要 针对生物质传感器的电容式检测单元设计前期结构如何选型的问题,利用有限元方法对基本交指型、极化交指型、半交指型和固态电极传感器设计4种检测单元结构进行模拟和对比。结果显示:虽然极化交指型传感器设计产生的电容响应值只有基本交指型设计的7%,但电容变化率(0.99%)却是基本交指型设计的100倍。半交指型和固态电极型是对极化交指型的优化设计,当秸秆-传感器间距为1.5 cm时,半交指型和固态型的电容变化率分别为1.32%和1.26%,两者差异不大;相对于半交指型固态电极型的结构更为简单,因而选择固态电极型设计制作传感器的物理原型。实际田间测试结果表明,该物理原型可以有效地鉴定秸秆的存在。

关键词 生物质; 电容式; 玉米秸秆; 精准农业; 传感器

中图分类号 S 134

文章编号 1007-4333(2011)03-0150-06

文献标志码 A

Finite element analysis and test of biomass sensor

LI Hai-zhou, YU Jin-song*

(Institute of Food Safety, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract Aiming at the problem of detection element design of biomass sensor, a number of capacitive sensor patterns were simulated using the Finite Element method, and then the patterns were fabricated and tested in the laboratory. Finally, a non-intrusive, capacitive, single-sided biomass proximity sensor was developed. The result showed that while the polarized inter-digital pattern produced only 7% of the base capacitance of the basic interdigital pattern, the percentage change in capacitance (0.99%) was more than 100 times that of the basic interdigital pattern. Semi-interdigital pattern and solid electrode pattern is the optimization of polarized inter-digital pattern, and the capacitance change was 1.32% and 1.26% for the semi-interdigital and the solid patterns respectively while the sensor-stalk distance is 1.5 cm. It is likely that the very small difference in the modeled performance of these two patterns. Based on these results, the simple solid electrode pattern was selected for further investigation.

Key words biomass; capacitive; corn stalk; precision agriculture; sensor

生物质传感器主要应用于精准农业生产中^[1],使用该传感器确定的数量数据可以得到更好的精确到点的作物密度图^[2-5],生产者可以利用作物密度图做出更好的田间管理决策,从而提高生产效率。玉米秸秆传感器主要有侵入式(机械)和非侵入式(电磁式)2种。在产量变化范围比较大的条件下,机械式设计容易低估植株数量^[6],平均低估水平为4.4%。已有研究认为,电容设计灵敏度低、感应距

离不足等限制了低水分含量的玉米秸秆的检测准确性^[7-8]。相比而言,非侵入式的生物辨识技术比较有效,因为侵入式设计中机械部件的动态响应时间可能会限制运行速度。非侵入式的方法可以减少动态响应时间,并收集更多的信息,用于从背景噪音辨识出所需的生物量信息^[9-10]。此外,非侵入式传感器通常需要较少的维护,不易受到机械污垢的影响,并有较长的寿命^[11-12]。基于已有研究的成功经验,以

收稿日期:2010-10-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31000780);上海高校优秀青年教师专项基金(slg08030);上海市教委科研创新项目(09YZ222)

第一作者:李海洲,讲师,主要从事传感器技术研究,E-mail:haizhouli@gmail.com

通讯作者:于劲松,讲师,主要从事传感器技术研究,E-mail:yujinsong84@163.com

及电容式近距离传感器在其他领域的普遍应用,笔者选择电容式设计作为本研究的重点,通过有限元分析和实证,以期为实际的传感器物理原型制作提供理论指导,通过不断地模拟和验证找到最佳的设计方案,并在此基础上进行初步的试验研究。

1 方法

1.1 检测系统设计

本研究中,玉米秸秆是生物质近距离传感器的测试对象。周围空气与玉米秸秆之间水分含量的差异是辨识秸秆的重要参数。电容式传感器能够根据水分含量变化引起的介电常数的变化而产生一个电容变化的响应。文氏振荡器^[13]可以将频率变化转变为电容变化。对于文氏振荡器,理论上频率 f 与电容 C 的关系为:

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \quad (1)$$

式中 R 为电阻。采用基于频率电压转换的锁相环(PLL)技术产生电压信号,并由数据采集系统(DAQ)进行记录。

1.2 实验室静态试验装置结构设计

使用超高分子量聚乙烯制作测试用的静态实验装置(图1)评估检测单元的性能。该装置由试验样本(玉米秸秆)、电容器极板和聚乙烯板3部分组成。试验样本(玉米秸秆)挂在2个聚乙烯支架上,传感器对秸秆距离的调整通过移动支撑电容器电极的垂

直板进行,每次移动5 mm。测试时使用了2个电极(平板设计)。如果没有良好的保持水分含量的条件,随着时间的推移,玉米秸秆样本的水分含量会发生变化,所以选择橡胶杆代替玉米秸秆,模拟玉米秸秆的介电常数 ϵ 。这可以为下一步解决测试样本的变化多样性问题提供一个稳定的对照,并可以把误差降低到最低程度。

1.3 检测单元对比设计

基于电容变化来检测水分含量的非侵入式传感技术具有成本低、维护简便的优点。因为双面设计需要使2个电极板严格排成直线,并且两极板之间需要较长的电线相连,这将会降低其性能,增加安装的复杂性,还会提高成本,所以在本研究中选择了单面设计。为了开发电容式近距离检测单元,研究中考察了包括交指型设计在内的几个单面设计。交指型电极传感器是一种足趾或手指状的平板电极,其作用是建立起电容与能穿透待检测的材料样本的电场之间的联系。该类型的传感器广泛应用于无损检测(NDT)、微机电系统(MEMS)设计^[14]、电信、化学传感以及生物技术^[15]。交指型电极传感器具有以下一些特性:单通道、便于进行信号强度控制、成像能力强,而且在相同结构中具有多重物理效应。

通过改变指间距离可以调整传感器的灵敏度、感应距离和边缘电容,但实际中没有现成的理论公式可以用来计算基于指间距离的确切信号强度^[16]。大多数都是经验公式,或仅仅给出了一个近似结果。因此,本研究中采用有限元模拟(FEM)方法模拟和计算生物数量对传感器类型的影响。相关文献数据显示,相比分析型解决方案,有限元模拟方法的错误率低0.18%^[17-18]。

在制作交指型电极传感器和其衍生类型传感器的实物之前,分别用有限元模拟的方法进行设计、模拟、建模和验证,然后在实验室使用印刷电路板(PCB)刻制机(ProtoMat 92s/II, LPKF激光电子股份有限公司和, Garbsen, 德国)制作了相对应的实物原型。本研究采用商业有限元模拟软件包(Multiphysics 3.1, COMSOL, Inc., Burlington, Mass.)进行有限元模拟。模拟中设置的假设和边界条件如下:

1)所有模型中环境介电常数 ϵ 设为1($\epsilon_{\text{干燥空气}} = 1.0005$)。在制品周围的空气中含有水蒸汽,这会

图1 生物质传感器的实验室静态试验装置图

Fig. 1 Static test apparatus for pattern evaluation

增加其介电常数,但为了便于比较,试验中选择一个不变的介电常数参考值。

2)将空间边界设定为绝缘边界,使得该空间成为一个独立的系统。由于电脑的限制,三维和二维检测单元模型分别放进 $20\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 和 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的空间内。这个有限的空间会抑制电场,可能会影响到模拟的准确性。

3)检测单元是用铜制作的,电极电位设定为 10 V 或直接接地。在建立物理原型前对能量密度、电容和电场电动势进行了分析。

1.4 田间预试验设计

测试试验中使用了 Case-IH 2344 收割机以及附属的 Case-IH 1063 型 6 行玉米割台。传感器安装在最右边的收割行。在传感器的数据输出端连接了一个 12 位的数据采集单元(DAQ)(美国国家仪器,USB-6008),该采集单元由位于收割机驾驶室的便携式计算机控制。试验中使用多芯屏蔽线(长约 4 m)给传感器系统供电,并将传感器的数据输出口与数据采集系统连接起来。数据采集系统与便携式计算机之间用 USB 线连接。数据采集卡的采样频率设定为 10^4 次/s,电压输入范围为 $\pm 5\text{ V}$ 。试验中用 LabVIEW 对电压随时间变化的数据进行采集和记录。

2 结果与分析

2.1 检测单元对比分析

首先,为检测单元制作了相应的单面 PCB 板,大小约为 $7\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 。然后将该原型与一个文氏电桥振荡器相连,振荡器的输出频率使用频率计(3131A, Agilent Technologies, Inc., Santa Clara, Cal.)进行测量;使用橡皮棒($\epsilon = 8$)测试电容的变化。在所有的实验室测试中,有 2 种检测单元使用了文氏电桥。由于所有的检测单元都是单面设计,所以检测单元只含有 1 个平板。试验中,对传感器-样本间距和沿检测单元长度方向各个位置进行了控制。试验在室温($24\text{ }^\circ\text{C}$)、相对湿度为 $40\% \sim 60\%$ 的条件下进行。

一般来说,模型性能的比较是在能量密度整合的基础上进行的,能量密度与电容成比例。检测单元性能对比试验主要是考察包括检测单元在内的振荡器电路的输出频率之间的区别(具体解释见 2.1.1)。

2.1.1 交指型电极传感器有限元模拟和物理原型设计

由于交指型电极传感器在商业中的普遍应用,所以首先选择了一个基本交指型电极传感器进行研究。试验中尝试了对交指型电极传感器输出的电容信号进行直接测试,但效果不理想,主要是由于相比测试设备的分辨率,该模型输出电容的变化太小,根本无法得到真实的信号。通过进一步的试验研究发现,如果将检测单元整合到振荡器电路中,就能够得到可靠的测试数据。测试时使用橡胶秆($\epsilon = 8$)代替玉米秸秆,传感器-样本间距为 0.5 和 2.5 cm 。当传感器-样本间距为 0.5 cm 时,振荡器频率为 273 kHz ,相对于空气的频率(290 kHz),发生了显著的变化(5.9%);而当间距为 2.5 cm 时,由于受到噪声的干扰,频率变化很难识别。试验中还发现,当测试样本从传感器表面移开之后,传感器的灵敏度和信噪比(SNR)会急剧下降。这表明,交指型电极传感器产生的边缘电容主要集中在传感器的表面附近;同时表明,当测试样本放置于测试单元周围时,电容会发生相对较大的(包括绝对值和百分比)变化。相反的,当测试样本从检测单元移开时,绝对变化和相对变化下降。传感器-试样间距较小时,交指型设计的灵敏度高;一旦距离增加,灵敏度会急剧下降。这说明,从传感器表面发出的电场强度不够强,传感器的感应距离还比较有限。总之,这种基本的交指型电极传感器还不能满足本研究的要求,需要进行其他类型传感器的开发。

2.1.2 基本交指型与极化交指型电极传感器有限元模拟对比

为了开发灵敏度较高的传感器,研究中考察了玉米秸秆对不同类型传感器电场的影响。试验时,玉米秸秆放置在距每个传感器模型 1.5 cm 处,考察有秸秆存在($\epsilon_{\text{秸秆}} = 5$)和没有秸秆存在($\epsilon_{\text{秸秆}} = \epsilon_{\text{空气}} \approx 1$)情况下电场能量密度的整合情况。电场能量密度的不同可以转变为一定比例的电容变化,将电容变化作为比较不同类型传感器的参考基准。

图 2(a)示出玉米秸秆对基本交指型电极传感器电场的影响。在正极和地极之间存在着高强度的电场,但是没能从模型的表面向周围发射出去,这也验证了对基本交指型模型的最初的测试试验。距离模型表面较远的的秸秆几乎对模型表面周围的高密

度电场没有任何的影响。这一结果为基本交指型模型的改进提供了第 1 个改进方向,包括将所有的正极移向一端,而所有的地极移向另一端,从而得到了极化交指型电极传感器的模型(图 2(b))。基本交指型和极化交指型电极传感器的对比结果见表 1。基本交指型设计的电容变化很小($\Delta C < 0.009\%$),

不可能对秸秆作出准确的检测。虽然极化交指型设计产生的电容响应值只有基本交指型设计的 7%,但在电容变化率上(0.99%)却是基本交指型设计的 100 倍。从电容变化率角度考虑极化交指型设计更适合于秸秆检测,因而选择该模型做进一步研究。

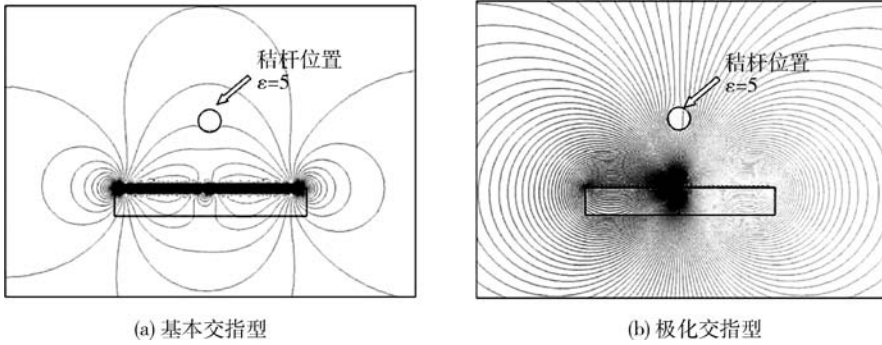


图 2 1 个秸秆存在时基本交指型和极化交指型电场线分布图

Fig. 2 Basic and polarized inter digital pattern model electrical potential lines with a stalk

表 1 有无秸秆存在时基本交指型和极化交指型传感器能量密度和电容的变化

Table 1 Changes in integrated energy density and capacitance for two interdigital patterns with and without stalk

参数	基本交指型		极化交指型	
	有秸秆	无秸秆	有秸秆	无秸秆
能量密度/(10^{-9} J/m)	18.092 8	18.092 6	1.269 5	1.257 1
电容变化率/%	0.009		0.990	

在极化交指型电极传感器模型的研究过程中,对有 无秸秆存在 2 种条件,设计了 5 个不同的传感器-秸秆间距:0.5、1.0、1.5、2.0 和 2.5 cm,计算得到模型电场能量密度、电容变化率的和传感器间距三者的整合情况。由于电容变化与电场密度变化是成比例的,当秸秆从模型表面移走之后,电容变化率下降(图 3)。

到玉米秸秆的正常出峰;此外,连续的高频信号会发生重叠,要区分两者会变得非常困难。

研究表明,当传感器-秸秆间距为 2 cm 时,极化交指型设计确实可以在振荡器中产生可测量的频率变化(3~300 kHz)。如前所述,相同条件下基本交指型不能产生这样的变化,然而,试验中发现,当玉米秸秆从极化交指型模型中通过时,出现了 2 个频率峰值:一个位于正极中点,另一个在接地电极的中点。这些峰的出现会为后期的检测带来困难,因为传感器对这些峰的反应相对比较慢,从而影响

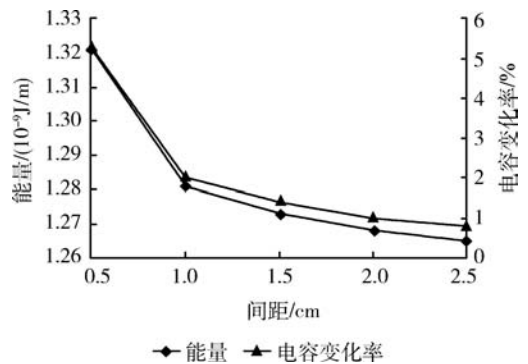


图 3 极化交指型电场能量和电容变化率与传感器-秸秆间距的关系

Fig. 3 Relationship between integrated field energy density and sensor-stalk distance for polarized interdigital pattern

2.1.3 半交指型与固态电极型传感器有限元模拟对比

为了消除2个信号峰,对极化交指型模型进行修改。将所有电极中的正极变为接地电极,即为半交指型模型。正极做成很窄的单线电极(宽2.5 mm),正负电极间距20 mm。采用有限元方法对该设计进行模拟,并在实验室中制作了相应的实物原型。在这种设计的实验室测试中,只产生了1个信号峰。当交指电极间距为20 mm,总接地电极宽度为45 mm,传感器-秸秆间距为1.5 cm时,在单线电极位置处的电容变化约为0.8%。

为了简化检测模型的结构,设计了固态电极模型。该模型中,将半交指型电极传感器设计中的接地电极整合到一个单面电极上。对该固态电极传感器进行了有限元模拟,并与半交指型设计进行对比。秸秆放在传感器的正极,秸秆-传感器间距为1.5 cm,半交指型和固态电极型传感器的电容变化率分别为1.32%和1.26%。此外,这2种模型的电场也很相似(图4)。在实验室测试中,使用振荡器无法检测出半交指型和固态电极型传感器之间的差异。本研究选择这种固态电极做进一步研究。

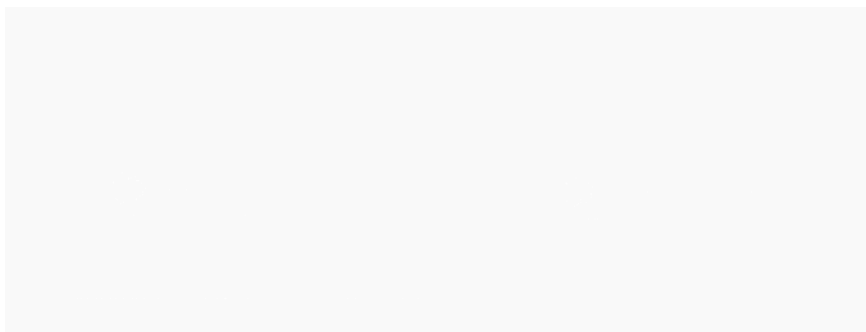
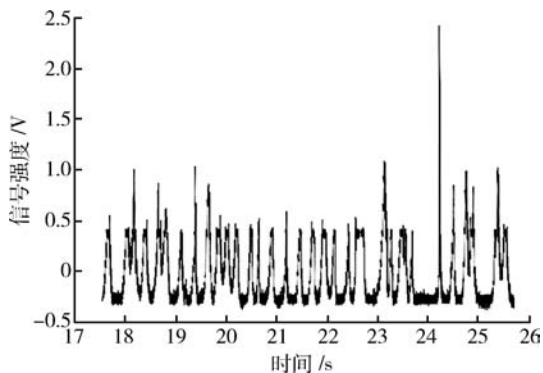


图4 1个秸秆存在时半交指型和固态电极型传感器的电场线分布

Fig. 4 Semi-interdigital sensor pattern electrical potential lines with a stalk

2.2 田间预试验结果

田间试验的目标是,验证通过有限元模拟和实证得到的传感器物理原型鉴定秸秆存在的有效性,同时收集具有代表性收割工况的数据。预试验结果表明,秸秆水分含量和传感器-秸秆间距是影响传感器性能的关键因素。收获前对每个样本中每个秸秆的位置进行记录,茎的直径用卡钳测量。试验结果表明该传感器可以有效鉴定秸秆的存在(图5)。



每个数据峰表示检测到了1个玉米秸秆。

图5 田间预试验传感器的典型输出信号

Fig. 5 A typical sensor output signal in the pre-trial

3 结论

本研究优化了单面电容式玉米秸秆检测传感器。优化后的传感器能够有效识别收获状态下的玉米秸秆。在电容式传感器的模式设计过程中,有限元分析方法为实际的传感器物理原型制作提供理论指导。对基本交指型、极化交指型、半交指型和固态电极型传感器进行模拟和对比,结果显示:虽然极化交指型电极传感器产生的电容响应值只有基本交指型设计的7%,但在电容变化率上(0.99%)却是基本交指型设计的100倍。半交指型和固态电极型是对极化交指型电极传感器的优化设计,当秸秆-传感器间距为1.5 cm时,半交指型和固态型的电容变化分别为1.32%和1.26%,这2种传感器设计的模拟性能差异非常小。实际田间试验结果表明,该电容式生物质传感器能够有效地鉴定玉米秸秆的存在。

参 考 文 献

[1] Seungdo Kim, Bruce E Dale. Global potential bioethanol

- production from wasted crops and crop residues[J]. Biomass and Bioenergy, 2004, 26(4): 361-375
- [2] Lyandres V, Briskin S. On an approach to moving-average filtering[J]. Signal Processing, 1993, 34(2): 163-178
- [3] 张小超, 胡小安, 张爱国, 等. 基于称重法的联合收获机测产方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 125-129
- [4] Wang Donghai, Sun Xiuzhi. Low-density particleboard from wheat straw and corn pith[J]. Industrial Crops and Products, 2002, 15(1): 43-50
- [5] 杨柳, 杨明皓, 刘嫣红. 利用边缘电场的电容式谷物水分传感器的研究[J]. 中国农业大学学报, 2007, 12(2): 58-61
- [6] 张小超, 胡小安, 张银桥, 等. 联合收获机粮食产量分布信息获取技术[J]. 农业机械学报, 2004, 9(40): 173-176
- [7] Ichigea K, Otsukab N, Ishiic R. An automatic design procedure of IIR digital filters from an analog low-pass filter[J]. Signal Processing, 1997, 57(3): 223-231
- [8] Webb N E. Real-time system for determining corn plant population in-situ at harvest time [D]. Knoxville, Tenn: University of Tennessee, Department of Biosystems Engineering, 2001
- [9] 吕立新, 汪伟, 卜天然. 基于无线传感器网络的精准农业环境监测系统设计[J]. 计算机系统应用, 2009, 8(12): 5-9
- [10] Mamishev V A K, Dundara-Rajan F, Yang Y, et al. Interdigital sensors and transducers[J]. Proc IEEE Trans Ind Electronics, 2004, 92(5): 808-845
- [11] Shrestha D S, Steward B L. Automatic corn plant population measurement using machine vision[J]. Trans ASAE, 2003, 46(2): 559-565
- [12] 金衡模, 高焕文, 王晓燕. 农业机械自动化的现状与推进模式[J]. 中国农业大学学报, 2000, 5(2): 44-49
- [13] Moody H. Unpublished corn population sensor development laboratory report [D]. Knoxville, Tenn: University of Tennessee, Department of Biosystems Engineering, 2002
- [14] 杨绍辉, 王一鸣, 冯磊. 土壤水分空间分布快速测试仪器的开发[J]. 中国农业大学学报, 2005, 10(2): 23-25
- [15] 匡丹, 袁国良. 基于 ZigBee 技术的精准农业中监控网络[J]. 信息技术, 2010, 8: 143-145
- [16] Moon Yang-Sae, Kim Jinho. Efficient moving average transform-based subsequence matching algorithms in time-series databases [J]. Information Sciences, 2007, 177(23): 5415-5431
- [17] Chen Z, Luo R C. Design and implementation of capacitive proximity sensor using microelectromechanical systems technology[J]. IEEE Trans Ind Electronics, 1998, 45(6): 886-894
- [18] 高艳, 孙宇瑞, 马道坤, 等. FDS 土壤水分传感器的两步标定法[J]. 中国农业大学学报, 2006, 11(2): 78-81

(责任编辑: 刘迎春)

• 科研简讯 •

我校郭顺堂教授研发的产品——谷之爱婴幼儿小米粉上市

由我校食品学院郭顺堂教授带领的蛋白质加工利用研究室研发的谷之爱婴幼儿小米粉全面上市。

小米粉也称粟米, 含有多种维生素、蛋白质、脂肪、糖类及钙、磷、铁等人体所必需的营养物质。小米原产我国, 是我国北方尤其是干旱地区的重要作物, 占我国粮食作物播种面积 5% 左右, 占北方粮食作物播种面积的 10%~15%, 是我国北方人民非常喜爱的重要粮食作物。自古以来, 我国北方地区就有食用小米的习俗, 在母乳不足或者婴幼儿断奶期, 常以小米粥或小米糊作为辅食来喂养婴幼儿。

山西省沁县是优质沁州黄小米主产区, 多年来该地区出产的优质小米仅以原粮方式销售, 产品附加值较低; 且小米食用方式不符合现代人方便快捷的需求, 限制了消费市场。为此, 山西省将沁州黄小米营养粉项目列入“两区”建设重点项目。2007 年, 山西省沁州黄小米(集团)有限公司与我校合作, 历经 3 年研发, 最终开发出成熟的技术, 并获得 2 项国家专利。

该产品首次采用液态加工法将小米加工成婴幼儿辅助食品, 完成了实验室工艺小试、中试, 并建立了生产线, 为小米方便化和高附加值化的开发提供了现代化深加工生产技术。技术针对小米原料营养特点和加工物性缺陷, 结合现代婴儿食品消费市场需求, 通过调整成分和糊化黏度控制, 集成先进的液态食品和粉体食品加工技术, 以小米、大豆为基料, 开发出小米米粉和米乳粉 2 种不同形态的婴幼儿辅助食品, 不仅蛋白质含量增加, 同时实现了必需氨基酸平衡互补, 提升了营养价值。

(摘自中国农大校园网)