

# 研究报告

项目名称：收购现场高水分稻谷品质检测新方法  
研究方向：质量安全  
负责人：金银哲  
联系方式：15692166719  
立项单位：上海海洋大学  
执行日期：2023.06-2023.11

填表日期：2023.11.09

## 目录

摘要: .....	1
1. 研究背景.....	5
2. 研究依据.....	6
3. 方案实施情况 .....	7
4. 开展调研情况 .....	8
5. 经费使用情况 .....	14
6. 研究内容.....	15
6.1 技术路线 .....	15
6.2 机器学习模型 .....	16
7. 研究工作的主要内容和结果 .....	18
7.1 主要研究内容 .....	18
7.2 主要研究结果 .....	19
7.2.1 含水率和频率对稻谷电学参数变化规律的影响 .....	19
7.2.2 基于电学参数的稻谷含水率、出糙率和出米率预测模型 .....	22
8. 研究性论文成果汇总 .....	27
8.1 不同含水率稻谷电学物理量变化规律研究.....	27
8.2 基于电学参数的稻谷含水率和出糙率预测模型.....	42
9. 实用新型专利成果汇总.....	62
9.1 一种实验用清洁智能砻谷机.....	62
9.2 一种针对长粒稻谷的砻谷机进料调节防堵塞装置.....	69

上海市粮食和物资储备局科技创新研究项目成果未经允许不得翻印

## 摘要:

稻谷具有巨大的经济价值和营养价值,是人类饮食中不可或缺的一部分,可以提供大量的碳水化合物、能量和蛋白质。稻谷是我国的主要粮食作物之一,随着人口增长和经济发展,稻谷产量的稳定增长成为我国农业发展的重要目标之一。在面对如此大规模的稻谷产量时,稻谷收购现场仍面临诸多问题和一系列挑战,包括收购能力不足、收购时间窗口短、运输和储存条件不足等。这些问题导致稻谷滞销、贮存不当和损耗等情况的发生,对农民的经济利益和粮食安全构成威胁。尤其对于高水分稻谷,如果不能及时充分干燥,容易发生霉烂变质等问题,因此,对高水分稻谷品质的快速高效检测显得尤为重要。

本项目拟以高水分稻谷为研究对象,以稻谷含水率、出糙率和出米率为稻谷的品质指标。使用烘箱制备不同含水率稻谷样品,借助 LCR 阻抗测试仪测定不同含水率稻谷的电学参数,然后使用砻谷机和精米机分别获得同一含水率稻谷的出糙率和出米率。首先,将获取的稻谷电学参数、含水率、出糙率建立数据集,并采用非线性回归模型和机器学习模型进行数据的训练,从而确定最佳的数学模型对稻谷含水率和出糙率进行准确预测。其次,使用回归模型将出糙率和出米率之间的关系进行拟合,力求通过稻谷出糙率对稻谷出米率进行预测。最后,基于电学参数能够预测稻谷的出糙率的关系,借助出糙率与出米率之间的数学关系间接获得电学参数和出米率之间的关系,即可实现稻谷的出米率的快速检测。另外,在研究的过程中发现目前的砻谷机存在的两个问题:一是处理过程中容易产生粉尘,二是进料口易于堵塞。本项目基于发现的问题对砻谷机进行了改造并设计两个实用新型专利。

利用 LCR 阻抗测试仪、HIOKI-9140 四端子测试夹具、带盖的正方体模具,测定了低频率下(1 MHz-8 MHz)不同含水率稻谷的 13 个电学参数(阻抗的相位角、损耗系数、等效并联电阻、阻抗、电抗、导电率、导纳、电纳、电导、电容、介电常数、介电损耗和 Q 因数)的变化,稻谷的电学参数在不同频率下表现出不同的行为,并且这些参数与稻谷的含水率之间存在一定的相关性。结果表明,随着测试信号频率从 1 MHz 增加到 8 MHz,稻谷的电学参数发生了变化。其中,阻抗的相位角和损耗系数在频率增加时先增大后减小,等效并联电阻和阻抗在频率增加时降低,电抗、导电率、导纳、电纳和电导在频率增加时增大,介

电常数和电容在频率增加时也增大，而介电损耗在频率增加时增加。由含水率与电学参数的二元回归模型的相关性分析结果可知，在 1 MHz 和 6 MHz 下，稻谷的电容与含水率之间具有很高的相关性 ( $R^2=0.998$  和  $0.994$ )，而在 8 MHz 下，稻谷的损耗系数与含水率之间也具有很高的相关性 ( $R^2=0.992$ )。由电学物理参数与含水率之间的相关性研究结果可以得出，利用这些电学物理参数来检测高水分稻谷的含水率是可行的。通过探究不同频率下稻谷的电学特性与含水率之间的关系，为开发电学测量方法来检测稻谷含水率提供了有力的依据。

基于稻谷的电学参数与其含水率和稻谷的含水率与出糙率的密切相关性，本研究在测试信号频率 1MHz 下测定了稻谷含水率为 9%-24% 的 6 个电学参数(介电常数、介电损耗、损耗系数、导电率、电导和电容)，并使用磨谷机对稻谷进行脱壳处理，进而构建反映电学参数、含水率和出糙率之间关系的数学模型。使用决定系数和 RMSE 对建立的模型进行相关性和准确性评估，从而找出最佳的数学模型用于预测稻谷的含水率和出糙率。结果表明，在含水率和电学参数的拟合模型中，6 个电学参数都随着含水率的增加而提高。含水率与 6 个电学参数的决定系数从大到小分别为：电容>介电常数>导电率>介电损耗>电导>损耗系数。其中，含水率与介电常数、导电率和电容的拟合模型决定系数都超过 0.96。为了获取电学参数和含水率两个指标与出糙率之间的关系，分别建立了单自变量模型(含水率-出糙率模型和电学参数-出糙率模型)、双自变量模型(电学参数和含水率-出糙率模型)两种数学关系模型。在含水率和出糙率拟合模型中，模型的决定系数为 0.944，RMSE 为 3.05%。稻谷的出糙率随着含水率先增加后减小，在含水率为 13.34% 时，出糙率达到最大值为 69.31%。在分析电学参数和出糙率的拟合模型时，可以发现 6 个电学参数与出糙率的拟合决定系数从大到小分别为：导电率>介电常数>电容>电导>损耗系数>介电损耗。其中，可以发现导电率与出糙率的拟合效果最佳，决定系数为 0.929。然而，将电学参数和含水率作为输入量建立双自变量模型用于预测出糙率，发现当电学参数为介电常数、导电率和电容时模型的决定系数均等于 0.980。电学参数(介电常数和电容)与含水率的模型在拟合稻谷出糙率时获得了最佳的拟合效果和最小的 RMSE。

为了提高模型的精确度和准确度，本研究使用 100 组稻谷电学参数数据，每个数据具有 48 个电学参数输入。将所有的数据中 80% 划分为训练集，用于训练

机器学习模型，20%用于验证模型的准确性。训练使用了四种机器学习模型，分别为多层感知机（MLP）、决策树（XGBoost）、支持向量机（SVM）和随机森林（Random Forest）。从各项评价指标看来，在预测稻谷含水率和出糙率方面，多层感知机（MLP）模型优于决策树（XGBoost）、支持向量机（SVM）和随机森林（Random Forest）模型，其中预测稻谷含水率的最佳预测模型多层感知机（MLP）模型的  $R^2=0.934$ ， $RMSE=1.66\%$ ，预测稻谷出糙率的最佳预测模型多层感知机（MLP）模型的  $R^2=0.741$ ， $RMSE=7.92\%$ 。

基于市场实际需求和稻谷收购现场的实际情况，《稻谷》标准进行了新的修订。修订内容将出米率作为稻谷定等指标，该指标更能反映稻谷的利用率。利用回归模型将出糙率与出米率进行二次拟合，其结果为： $y = 9.33 + 1.76x - 0.01x^2$ ，其中模型的  $R^2=0.869$ ， $RMSE=2.96\%$ 。当出糙率在 20% - 60% 时，随着出糙率的增加，出米率的增加速度在不断减缓；当出糙率在 60% - 70% 时，稻谷的出米率趋于稳定。基于前面研究建立的稻谷电学参数预测含水率和出糙率的回归分析模型和机器学习模型，借助出糙率与出米率之间的数学关系可间接获得电学参数和出米率之间的关系，这样即可以实现稻谷的出米率的快速检测。总之，这项研究揭示了稻谷的电学参数与含水率、出糙率和出米率之间的关系，开发一种可以快速检测稻谷含水率、出糙率和出米率的方法将有巨大的应用市场。

为解决在使用实验型砻谷机遇到的困难和问题，本研究撰写了两篇实用新型专利，分别是《一种实验用清洁智能砻谷机》和《一种针对长粒稻谷的砻谷机进料调节防堵塞装置》，其中，一种实验用清洁智能砻谷机的机箱上端连接处设置有进料口，所述进料口的一端连接有转轴，所述转轴的一端连接有装料盒，所述装料盒的底部内侧有称重装置，所述机箱的内部顶端设置有固定支架，所述固定支架的一端设置有辊轴，所述辊轴的一端设置有固定挡板，所述机箱的内部中间设置有有水平固定板，所述水平固定板的最左侧设置有糙米出料口，所述糙米出料口的一端设置有谷壳出料口，所述谷壳出料口的一端设置有降风速谷壳装料盒，所述降风速谷壳装料盒的顶部设置有水平固定板，所述水平固定板的一端设置有上阻风板，所述上阻风板的一端设置有固定滑板，所述固定滑板一端设置有粉末滤板，所述粉末滤板上侧设置有下阻风板，所述粉末滤板下部设置有粉末收集盒，所述粉末收集盒左侧设置有糙米装料盒，所述糙米装料盒的一侧设置有固定滑板，

所述固定滑板的底端设置有称重装置，所述机箱的外侧表面设置有显示屏，所述显示屏的右侧设置有显示屏。通过装料盒、称重装置、显示屏、显示屏、降风速谷壳装料盒和粉末收集盒，达到减轻工作程序，降低实验人员的实验工作量，减少脱壳过程中的粉末污染的目的。另外，一种针对长粒稻谷的砻谷机进料调节防堵塞装置包括进料斗，所述进料斗的下端固定安装有下列口，所述下料口的外部设置了电机，所述电机右侧开设插孔，并直接连接传动轮，传动轮上安装振动装置，振动装置上平铺筛网，所述筛网的下端设置了相互对立的第二导向板和第一导向板，使得从筛网上漏下的稻谷均匀洒落在自动传送带上，所述自动传送带由两组底座固定于砻谷机底部和顶部。流经自动传送带的稻谷通过导料斗，所述导料斗与砻谷机脱壳装置直接连接，流经导料斗的稻谷进入脱壳装置进行脱壳处理。本实用新型可以通过设置的电机、传动轮、振动棒和筛网之间的配合作用，根据稻谷的外形进行筛选、分级，使得长粒稻谷顺利进入砻谷机进行脱壳处理；通过对第二导向板和第一导向板两者之间结构的设计，该设计起到导料的作用，避免堵塞现象的发生。通过第二、第一导向板的稻谷均匀流到自动传送带上后，匀速流进导料斗，进而通过脱壳装置进行脱壳处理。

## 1. 研究背景

稻谷作为我国的主要粮食作物之一，在保障国家粮食安全和农民生计方面具有重要意义。随着人口增长和经济发展，稻谷产量的稳定增长成为我国农业发展的重要目标之一。根据国家统计局发布数据显示，2022 年全年粮食实现增产丰收。全国粮食总产量达 13731 亿斤，比上年增加 74 亿斤，增长 0.5%，粮食产量连续 8 年稳定在 1.3 万亿斤以上。统计数据显示，2022 年全国粮食播种面积 17.75 亿亩，比上年增加 1051.9 万亩，增长 0.6%；全国粮食作物单产 386.8 公斤/亩，每亩产量比上年减少 0.2 公斤，下降 0.1%。2022 年，全国夏粮和早稻产量分别为 2948.1 亿斤和 562.5 亿斤，比上年增加 28.9 亿斤和 2.1 亿斤。在面对如此大规模的稻谷产量时，稻谷收购现场仍面临诸多问题和一系列挑战，包括收购能力不足、收购时间窗口短、运输和储存条件不足等。这些问题导致稻谷滞销、贮存不当和损耗等情况的发生，对农民的经济利益和粮食安全构成威胁。尤其对于高水分稻谷，如果不能及时充分干燥，容易发生霉烂变质等问题。根据《中国农业产业发展报告 2023》显示，到 2035 年，若我国粮食收获、储藏、加工和消费环节损失率分别减少 1 至 3 个百分点，实现三大主粮损失率减少 40%，可降低三大主粮损失约 1100 亿斤，相当于粮食减损再造一个千亿斤增产行动。收获环节可通过“低损优良品种+高质量农机+熟练农机手+适时收获”减损 159 亿斤，储藏环节可通过“及时干燥+先进储粮器具+科学储粮方法+降低储粮成本”减损 446 亿斤，加工环节可通过“推动全谷物加工+适度加工”减损 260 亿斤，消费环节可通过“培养消费者减损观念+实施餐饮环节减损奖惩措施”减损 213 亿斤，实现粮食损失降低 1078 亿斤。据联合国粮农组织统计，每年全球粮食从生产到零售全环节损失约占世界粮食产量的 14%。这个损失降低 1 个百分点，就相当于增产 2700 多万吨粮食，够 7000 万人吃一年。根据中国商报网报道，农户粮食产后损失和浪费情况较为严重，储备、消费和收获环节的总损失率为 11.39%，其中，三种主粮作物（水稻、玉米和小麦）的收获平均损失率为 4.09%，其中水稻损失占 3.55%、小麦损失占 4.41%、玉米损失占 2.58%。农业农村部副部长马有祥曾表示，如果我国粮食减损一个百分点，就相当于减少损失 650 万吨，按 400 公斤/年/人粮食计算，可养活约 1600 万人。这也意味着促进粮食生产、收购和加工的减损增效是保障粮食安全的重要途径，是实现粮食加工等高质量发展的有效措施，是为了

实现更好的经济效益：（一）增加稻谷产量：稻谷在干燥过程中含水率的控制对产量具有重要影响。通过精确监测和控制稻谷含水率，可以降低稻谷发霉、变质和损失的风险，从而提高稻谷的可用产量。（二）降低粮食损失：合理控制稻谷含水率可以有效减少粮食损失。过高的含水率可能导致稻谷霉变和变质，过低的含水率则可能导致重量损失和品质下降。通过精确的稻谷水分检测和控制，可以最大限度地减少粮食损失，提高经济效益。（三）提高质量和市场竞争力：稻谷的品质是影响市场竞争力的重要因素。通过精确控制稻谷含水率，可以确保稻谷的品质符合标准要求，提高市场认可度和竞争力。（四）提高农民收入和农业发展：稻谷是我国的主要口粮之一，稻谷生产直接关系到农民收入和农业发展。通过提高稻谷产量、降低粮食损失和提高品质，可以帮助农民增加收入，促进农业可持续发展。

稻谷的品质评价主要涉及含水率、出糙率和出米率等指标。含水率过高促使稻谷中微生物生命活动旺盛，导致稻谷发热霉变，会影响水稻种植的经济收益。水分含量的变化也会影响稻谷的出糙率和出米率。目前，比较常用的电阻法主要是利用不同含水量粮食的电阻或电导不同对含水量进行测定，该方法使用的设备具有结构简单、成本低和响应速度快等优点，但是国标中（GB/T 19878-2005）显示电阻法测定稻谷的水分含量范围为 9-20%，超过 20% 水分含量的稻谷含水率的检测不适用。因此，开发一种利用电学参数检测高水分（含水率 > 20%）稻谷品质的新方法显得尤为重要。

## 2. 研究依据

检测高水分稻谷品质的方法符合国家方向性、农业生产需求和技术理论支撑三大依据，具体如下：

（1）政策方向性。2023 年，国家粮食和物资储备局召开全国粮食和物资储备工作会议，提出要守住管好“天下粮仓”，立足职能推进全方位夯实粮食安全根基的关键举措。要完善储备体系，加快形成同大国地位相符合的国家储备实力。要全力做好保供稳价，服务经济发展和社会稳定大局。牢牢守住农民“种粮卖得出”底线。要不断完善体制机制，推进粮食和物资储备治理现代化。要做好应急保障，强化日常管理，坚守安全发展底线。上海市粮食和物资储备局召开 2023



年工作会议指出，明确“一条主线，五个抓手”。以全面贯彻落实党的二十大精神为主线，推进全面从严治党向纵深发展；以提升“大国储备”管理水平为抓手，筑牢战略和应急物资安全管理根基；以增强“大国粮仓”监管能力为抓手，筑牢粮食安全根基；以增强储备综合实力为抓手，提高以国家储备的确定性应对外部环境不确定性的能力；以素质能力提升 2.0 工程为抓手，打造高素质专业化人才队伍；以推动转型发展为抓手，完善公司市场化创新机制。

(2) 农业生产需求。稻谷是全球重要的粮食作物之一，中国是稻谷生产大国，开发快速检测稻谷品质的方法有助于提高收购稻谷质量，从而提高稻谷的商业价值。

(3) 技术理论支撑。稻谷的介电参数是指在电场作用下，稻谷对电磁波的响应和传导特性。这些参数包括介电常数、介电损耗因子和电导率等。高水分稻谷的品质特征，如米粒的完整性、含水量、口感和熟化程度等，可以反映在稻谷的介电参数上。稻谷在高水分条件下，由于水分含量的增加，其介电常数和介电损耗因子等介电参数会发生变化。这是因为水分分子对电磁波有吸收和散射作用，导致稻谷的介电特性发生改变。同时，高水分稻谷的品质也会受到影响，例如稻谷的软化程度会增加，米粒易碎、易变形等。通过测量稻谷在高水分条件下的介电参数，并建立介电参数与品质之间的关联模型，可以实现对高水分稻谷品质的快速检测。这种方法具有非侵入性、快速、无需样品破坏等优点，适用于稻谷的在线检测和品质控制。

### 3. 方案实施情况

在过去的 5 个月里，项目组成员针对既定研究目标和内容，通过 3 个阶段的交叉、协作研究和同步开展研究，按照项目方要求依次完成了项目任务书、项目调研、实验设计、数据分析、数据总结、中期汇报、成果总结等任务，从 2023 年 6 月 1 日至 2023 年 11 月 10 日的工作开展详细情况如图 1 所示。首先，在 2023 年 6 月 1 日到 2023 年 8 月 1 日，项目组成员制定了详细的实验方案，并购买了实验样品及实验检测设备；随后，项目组成员测定了不同含水率的高水分稻谷主要品质指标（含水率、出糙率和出米率），进而初步探究了高水分稻谷电学参数随品质指标的变化规律。其次，在 2023 年 8 月 1 日到 2023 年 10 月 1 日，项目

组成员基于第一阶段的实验数据，详细探究了不同水分条件下，稻谷出糙率与电学参数的变化规律，并揭示了稻谷出糙率与电学参数变化机理。通过多次实验获取了不同品质稻谷电学参数的数据集；进而为建立可快速分析稻谷品质指标的最佳数学模型做准备。最后，在2023年10月1日到2023年11月10日，基于前面两个阶段研究所获取的数据，探究了高水分稻谷出糙率与出米率的关系，并利用多层感知机（MLP）、决策树（XGBoost）、支持向量机（SVM）和随机森林（Random Forest）四种机器学习模型对高水分稻谷的品质进行预测。与此同时，根据三个阶段的研究，项目组成员撰写两篇学术论文（《不同含水率稻谷电学物理量变化规律研究》和《基于电学参数的稻谷含水率和出糙率预测模型》），分别投稿至《食品工业》和《食品工业科技》期刊。同时，项目组成员根据实验过程中遇到的问题，针对砻谷机的清洁、智能化和进料口堵塞问题，撰写两篇实用新型专利（《一种实验用清洁智能砻谷机》和《一种针对长粒稻谷的砻谷机进料调节防堵塞装置》）。

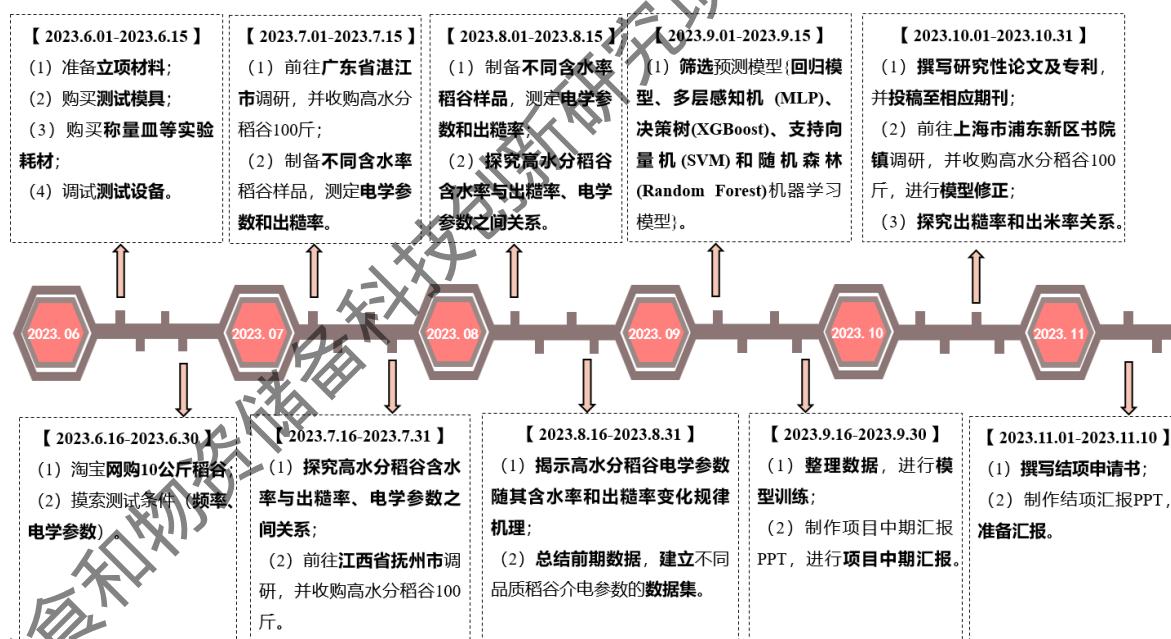


图1 本项目工作开展详细情况图。

#### 4. 开展调研情况

项目组成员根据项目开展时间及稻谷成熟季节，结合国家统计局及地方统计局统计的数据，前往广东省湛江市、江西省抚州市和上饶市、上海市浦东新区书院镇调研，向当地农民了解稻谷种植情况和产量，现场调研情况如图2所示。从

国家统计局获取的我国粮食种植面积及产量的数据统计如图 3 所示，从 2012 年到 2022 年，我国粮食种植面积稳定在 1.15 亿公顷左右，而粮食产量从 2012 年的 5.88 亿吨增加到 2022 年的 6.87 亿吨，增加了 0.99 亿吨。对比图 4 所示的 2016 年到 2022 年中国粮食进出口数据可知，近些年的粮食进口数量远远大于出口数量。因此，我们更要把握好大方向，懂得粮食安全则是战略问题，要守住管好“天下粮仓”、要完善储备体系、要全力做好保供稳价、要不断完善体制机制、要做好应急保障。

项目组成员在 2023 年 7 月上旬到广东省湛江市进行考察调研，近十年以来广东省稻谷的种植面积及产量如图 5 所示，2012 年全年粮食播种面积 3810.27 万亩，其中稻谷播种面积为 2924.07 万亩，占比 76.7%，2013 年全年粮食播种面积 3761.43 万亩，其中稻谷播种面积为 3139.25，占比 83%，2014 年全年粮食播种面积 3760.52 万亩，其中稻谷播种面积为 3117.22，占比 82.9%，2015 年全年粮食播种面积 3758.76 万亩，其中稻谷播种面积为 2830.95，占比 75.3%，2016 年全年粮食播种面积 3764 万亩，其中稻谷播种面积为 2832.9，占比 75.26%，2017 年全年粮食播种面积 3750.08 万亩，其中稻谷播种面积为 2831.94，占比 75.5%，2018 年全年粮食播种面积 3226.56 万亩，其中稻谷播种面积为 2681.09，占比 83.1%，2019 年全年粮食播种面积 3240.97 万亩，其中稻谷播种面积为 2690.51，占比 83.01%，2020 年全年粮食播种面积 3307.03 万亩，其中稻谷播种面积为 2751.65，占比 83.2%，2021 年全年粮食播种面积 3319.55 万亩，其中稻谷播种面积为 2741.13，占比 82.6%，2022 年全年粮食播种面积 3345.43 万亩，其中稻谷播种面积为 2753.84，占比 82.3%。由此可以得出，近些年广东省稻谷的种植面积还是比较稳定的，且占总粮食的比例较大，占比在 80% 左右。从广东省稻谷的总产量可以看出，近十年稻谷的平均产量在 1090 万吨左右。湛江市作为广东省重要的稻米产区之一，其稻谷产量在过去几年中一直保持着相对稳定的水平，湛江市稻谷种植面积约为 130.2 万亩左右，总产量达到约 77.5 万吨。通常，湛江市的稻谷主要种植在徐闻、廉江等县市，这些地区由于其气候和水资源条件，种植季节和水稻品种的选择都在一定程度上影响了稻谷的产量。项目组成员依据项目实验需要和现场调研情况，在广东省湛江市廉江市和寮镇采购刚收获得高水分稻谷 100 斤。在 2023 年 7 月下旬和 10 月上旬分别到江西省抚州市和上饶市进行考察调研，根据江西省统计局数据，总结了江西省 2017 年到 2022 年的粮食种植面

积及产量，特别是稻谷的种植面积及产量，具体如图 6 所示。2017 年，全年粮食种植面积 11222 万公顷，比上年减少 81 万公顷。其中，稻谷种植面积 3018 万公顷，减少 0.2 万公顷。全年粮食产量 61791 万吨，比上年增加 166 万吨，增产 0.3%。其中，早稻产量 3174 万吨，减产 3.2%。全年谷物产量 56455 万吨，比上年减产 0.1%。其中，稻谷产量 20856 万吨，增产 0.7%。2018 年，全年粮食种植面积 11704 万公顷，比上年减少 95 万公顷。其中，稻谷种植面积 3019 万公顷，减少 56 万公顷。全年粮食产量 65789 万吨，比上年减少 371 万吨，减产 0.6%。其中，早稻产量 2859 万吨，减产 4.3%。全年谷物产量 61019 万吨，比上年减产 0.8%。其中，稻谷产量 21213 万吨，减产 0.3%。2019 年，全年粮食种植面积 11606 万公顷，比上年减少 97 万公顷。其中，稻谷种植面积 2969 万公顷，减少 50 万公顷。全年粮食产量 66384 万吨，比上年增加 594 万吨，增产 0.9%。其中，早稻产量 2627 万吨，减产 8.1%，全年谷物产量 61368 万吨，比上年增产 0.6%。其中，稻谷产量 20961 万吨，减产 1.2%。2020 年，全年粮食种植面积 11677 万公顷，比上年增加 70 万公顷。其中，稻谷种植面积 3008 万公顷，增加 38 万公顷。全年粮食产量 66949 万吨，比上年增加 565 万吨，增产 0.9%。其中，早稻产量 2729 万吨，增产 3.9%。全年谷物产量 61674 万吨，比上年增产 0.5%。其中，稻谷产量 21186 万吨，增产 1.1%。2021 年，全年粮食种植面积 11763 万公顷，比上年增加 86 万公顷。其中，稻谷种植面积 2992 万公顷，减少 15 万公顷。全年粮食产量 68285 万吨，比上年增加 1336 万吨，增产 2.0%。其中，早稻产量 2802 万吨，增产 2.7%；全年谷物产量 63276 万吨，比上年增产 2.6%。其中，稻谷产量 21284 万吨，增产 0.5%。2022 年，全年粮食种植面积 11833 万公顷，比上年增加 70 万公顷。其中，稻谷种植面积 2945 万公顷，减少 47 万公顷。全年粮食产量 68653 万吨，比上年增加 368 万吨，增产 0.5%。其中早稻产量 2812 万吨，增产 0.4%。全年谷物产量 63324 万吨，比上年增产 0.1%。其中，稻谷产量 20849 万吨，减产 2.0%。根据对早稻的抽样调查结果推算，经国家统计局核定，2023 年全省早稻总产量 684.5 万吨，较上年增产 7.3 万吨，增长 1.1%；早稻总产居全国第二位，仅次于湖南。江西省抚州市金溪县浒湾镇苦竹村是优质早稻种植基地，项目组成员依据项目实验需要和现场调研情况，在江西省抚州市采购刚收获的高水分稻谷 100 斤，在江西省上饶市采购刚收获的高水分稻谷 100 斤。作为

国际大都市的上海市，如图 7 所示，从 2012 年到 2022 年，上海市粮食种植面积呈现先减小后增大的趋势，产量呈现相似的变化趋势，整体呈现向好趋势发展。图 8 显示的是从 2015 年到 2020 年全国及上海人均粮食情况，从图中可知，上海市人均粮食需求量逐渐增加。项目组成员依据项目实验需要和现场调研情况，在十月下旬前往上海市浦东新区书院镇收割高水分稻谷 100 斤。

与此同时，项目组成员通过百度、中国知网、google 学术、ScienceDirect 和 Web of Science 等平台搜寻文献资料，归纳目前关于稻谷的研究现状，并通过国家统计局和地方统计局查询各地稻谷种植面积、品种、产量等信息。



图 2 现场调研情况。

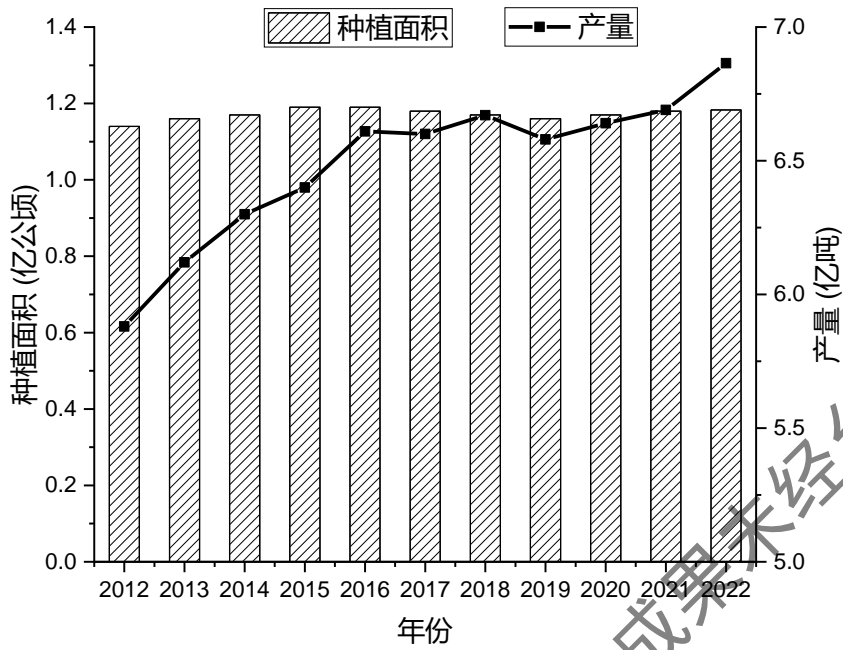


图 3 2012-2022 年中国粮食种植面积及产量。

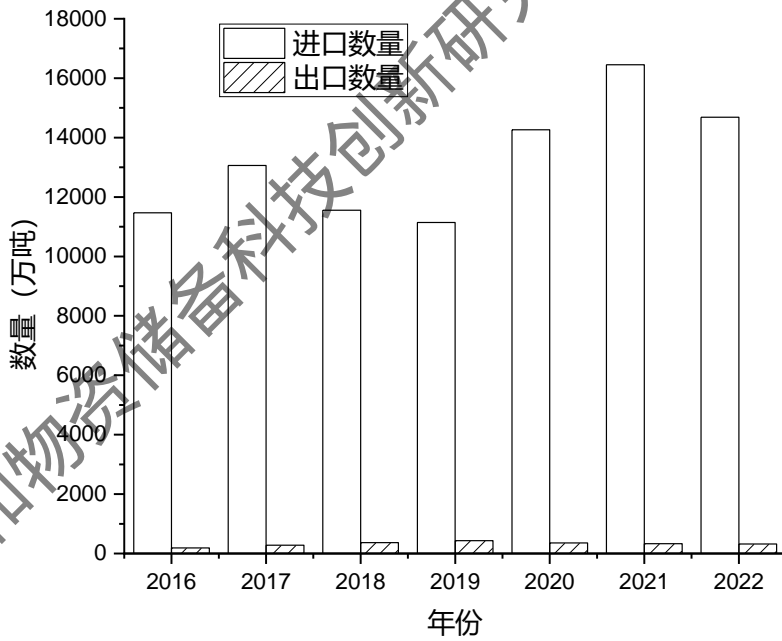


图 4 2016-2022 年中国粮食进出口数量统计图。

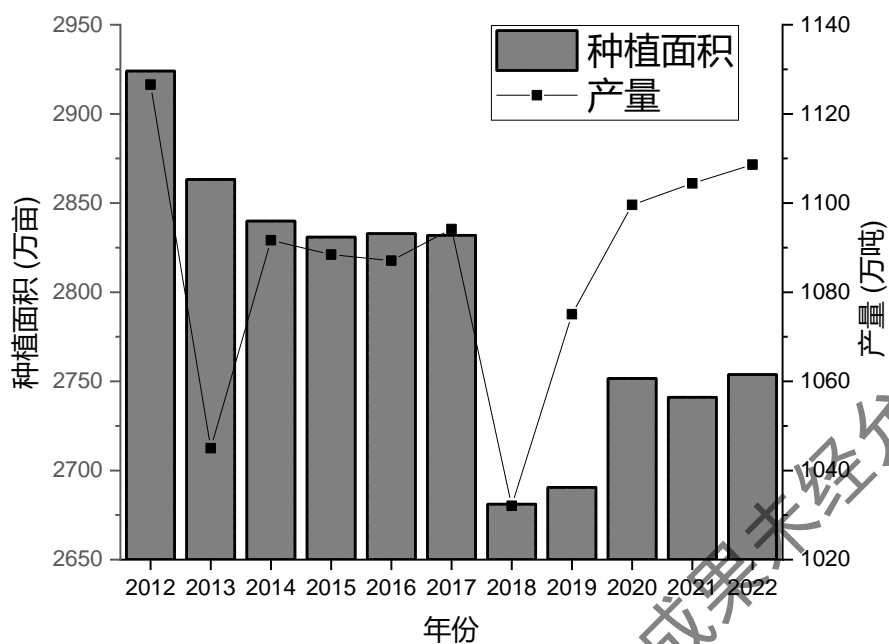


图 5 2012-2022 年广东省稻谷种植面积及产量。

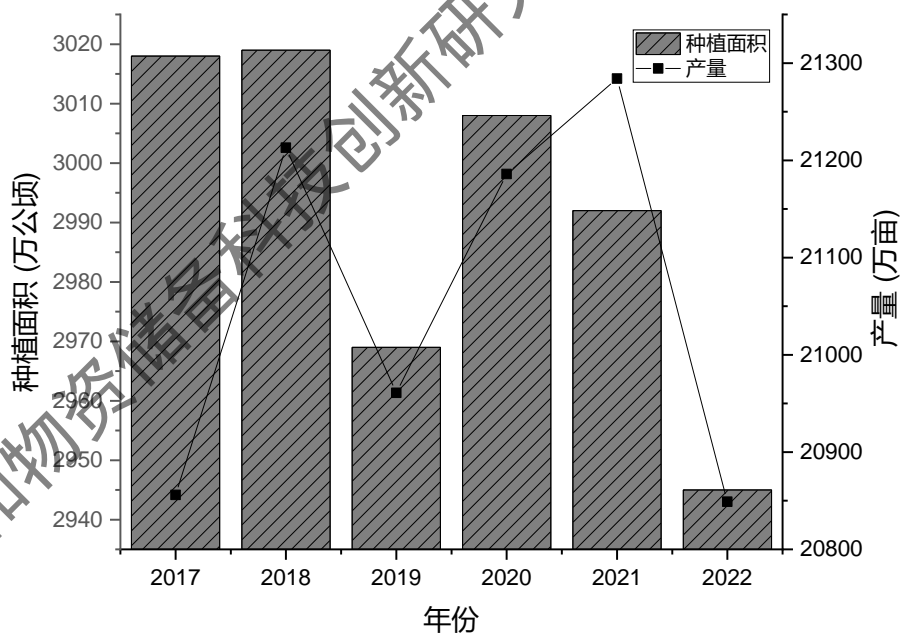


图 6 2017-2022 年江西省稻谷种植面积及产量。

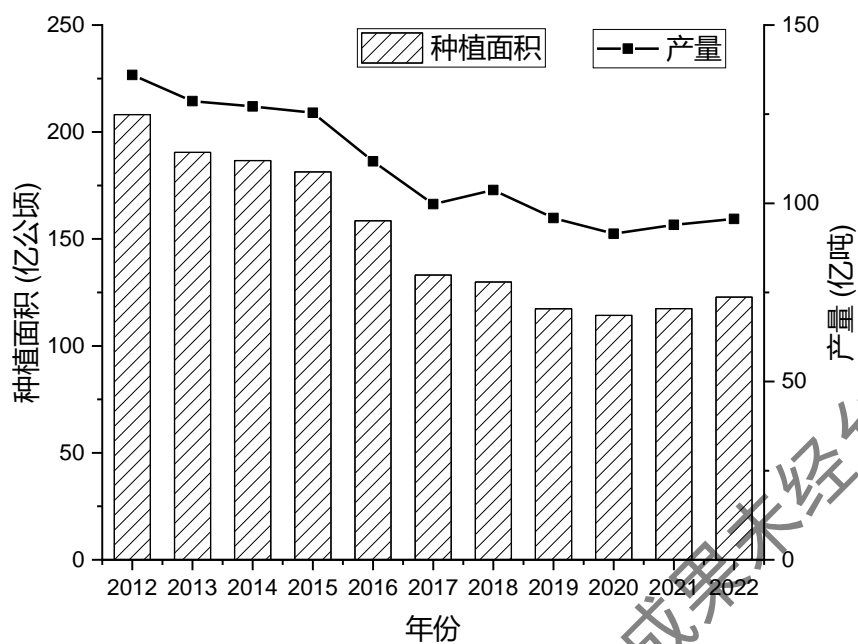


图 7 2012-2022 年上海粮食种植面积及产量统计情况。

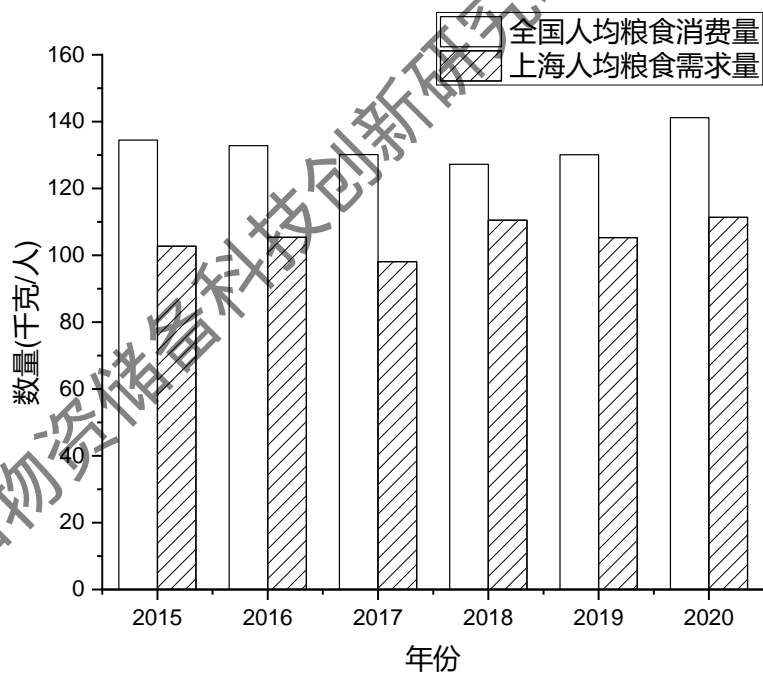


图 8 2015-2020 年全国及上海人均粮食情况。

## 5. 经费使用情况

在整个研究过程中，主要包括研究开发费、差旅费项目管理费、测试/化验/



加工费和科研奖励费，其中，购买稻谷原材料、干燥皿、称量瓶、模具、钛片、磨谷机、精米机、实验用电、打印材料等共计 9.4 万元；现场调研和收购原料（广东省湛江市、江西省抚州市、江西省上饶市和上海市浦东新区书院镇）所用差旅费 1.5 万元；项目管理费 1.6 万元；测试/化验/加工费 1.0 万元。发表研究成果（2 篇中文论文，2 篇实用新型专利）共计 2.5 万元；参与本项目的研究人员、雇佣农户的劳务费，共计 4.0 万元；总共合计 20.0 万元。

## 6. 研究内容

### 6.1 技术路线

本项目拟以高水分稻谷为研究对象，以稻谷含水率、出糙率和出米率为稻谷品质指标，利用 LCR 阻抗测试仪测定低频下稻谷的电学参数。如图 9 所示，具体测定方法是，在测量前，打开测量系统并在稳定的环境下保持至少 1 h。设置所需要测定的电学参数（电导率、介电常数、电容和电阻等参数），使得 LCR 阻抗测试仪通过两个钛片与自制模具连接，随后进行测定。探究高水分稻谷（含水率 > 20%）含水量与电学参数之间的相关关系。通过测定多个频率下不同含水量稻谷的电学参数，找到预测高水分稻谷含水量的最佳测试频率和电学参数，进而建立高水分稻谷含水率随最佳电学参数变化规律的数据集。并通过介电理论阐明稻谷含水率、出糙率和出米率与其电学参数的理论关系，分析电学参数与高水分稻谷品质的相关性。最后，基于前期建立的高水分稻谷电学参数和品质指标的数据集，采用回归分析模型、多层感知机（MLP）、决策树（XGBoost）、支持向量机（SVM）和随机森林（Random Forest）模型建立预测稻谷品质的数学模型，进而得出适合在收购现场使用的高水分稻谷品质快速检测的新方法，具体的技术路线如图 10 所示。研究成果将为高水分稻谷的物理特性内容和基于电学参数的高水分稻谷品质检测新方法的开发提供重要理论依据。

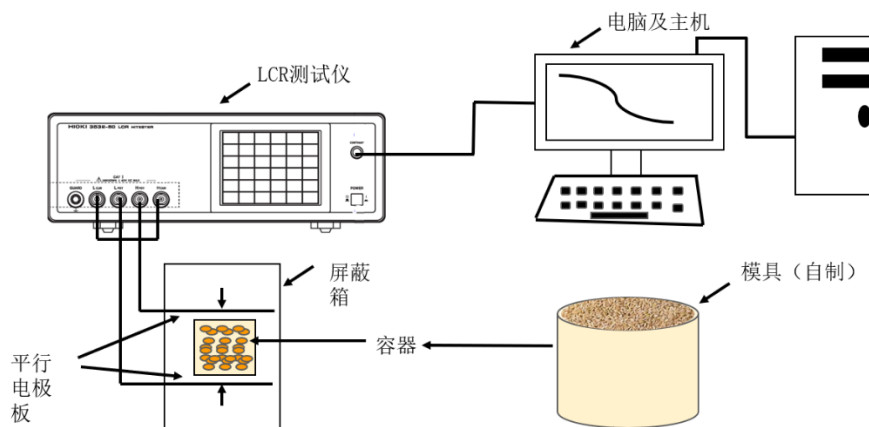


图 9 电学参数测定仪器示意图。

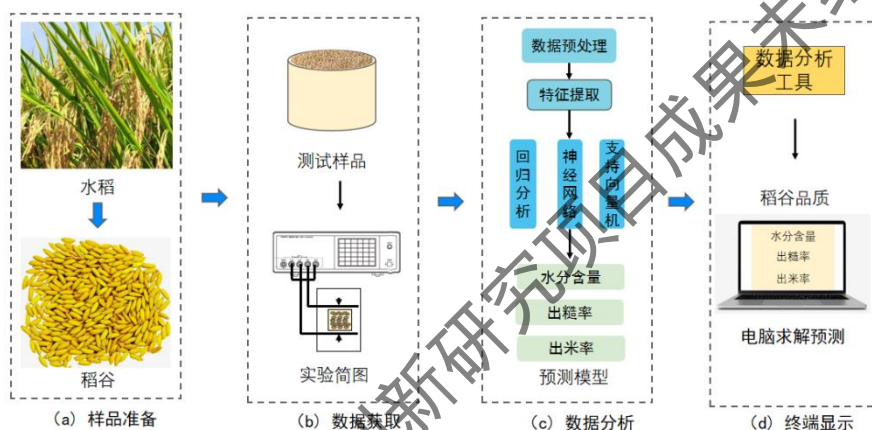


图 10 本项目技术路线图。

## 6.2 机器学习模型

为了提高模型数据的有效性，本研究通过回归模型分析从 13 个电学参数中筛选出 6 个电学参数（阻抗的相位角、电容、电导、导电率、损耗系数和介电常数）用于建立稻谷电学参数与含水率和出糙率之间的数学关系。为提取不同含水率稻谷样本电学参数之间的特征，本研究使用主成分分析（PCA）模型实现非线性动态特征提取，再分别使用多层感知机（MLP）、决策树（XGBoost）、支持向量机（SVM）和随机森林（Random Forest）实现稻谷含水率和出糙率的预测。四个算法在预测稻谷品质的过程中都需要输入特征、模型构建和输出结构三个步骤，具体如图 11 所示。

多层感知机（MLP）的预测过程：1、输入特征：将提取的电学参数（阻抗的相位角、电容、电导、导电率、损耗系数和介电常数）作为输入特征。2、模

型构建：构建一个多层的神经网络，其中每个神经元与一个电学参数相对应。通过多次迭代训练神经网络，使其学习电学参数与含水率和出糙率之间的复杂非线性关系。3、输出：输出层的神经元对应于含水率和出糙率，模型通过调整权重和偏差来最小化预测输出与实际值之间的误差。

决策树（XGBoost）的预测过程：1、输入特征：同样使用电学参数作为输入特征。2、模型构建：构建一系列的决策树，每个树都根据电学参数进行分裂，最终形成一个集成模型。XGBoost 通过梯度提升的方式逐步改进每棵树的性能。3、输出：集成模型的输出是所有树的加权平均值，最终得到对含水率和出糙率的预测。

支持向量机（SVM）的预测过程：1、输入特征：将电学参数作为 SVM 的输入特征。2、模型构建：SVM 试图找到一个超平面，以最大化不同类别之间的间隔。通过引入核函数，SVM 可以处理非线性关系。训练过程中，SVM 找到将电学参数映射到高维空间的方法，使得数据在新空间中更容易分离。3、输出：SVM 的输出是对含水率和出糙率的分类结果，可以进一步转化为概率或实数值。

随机森林（Random Forest）的预测过程：1、输入特征：同样使用电学参数作为输入。2、模型构建：随机森林由多个决策树组成，每个树都是基于不同的数据子集和特征子集构建的。通过投票或平均，随机森林综合了所有决策树的预测结果。3、输出：随机森林的输出是对含水率和出糙率的综合预测。

四个算法在进行预测的时候都具有不同的优势和特点，多层感知机（MLP）对于大规模数据集和复杂的模式识别任务效果较好，它可以自适应地学习数据的特征表示。决策树（XGBoost）在集成学习中表现出色，对于特征工程的需求相对较低，它能够处理非线性关系和缺失数据。支持向量机（SVM）适用于高维空间和复杂的数据结构，对于小样本数据表现较好，并且在处理非线性问题时引入核函数可以提高性能。随机森林（Random Forest）具有较高的准确性，对于大规模数据集和高维特征数据表现出色，对于缺失数据的处理较为鲁棒。通过选择四个算法可以找出预测效果最佳的算法以更好的预测稻谷品质。

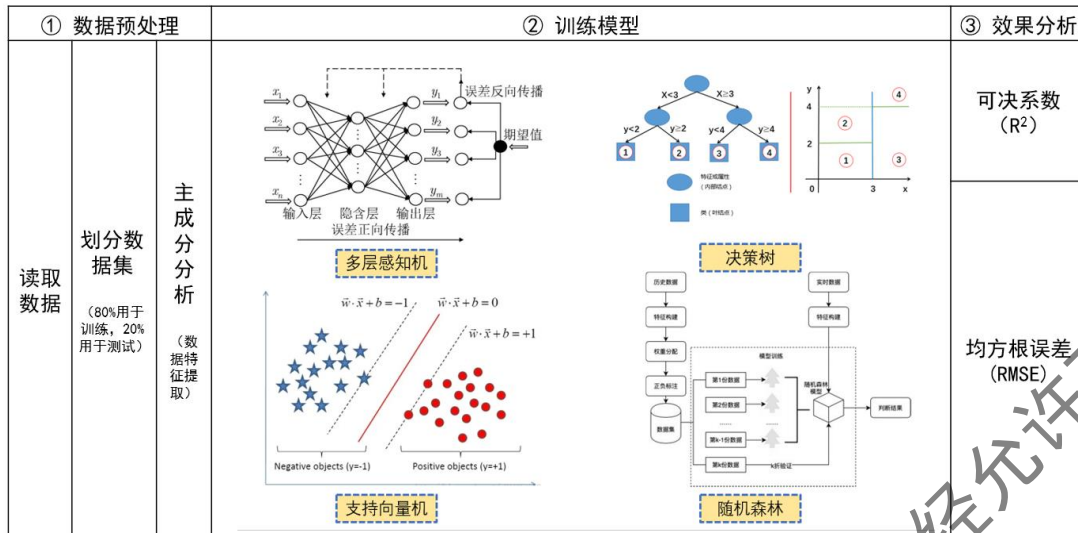


图 11 四种机器学习模型。

## 7. 研究工作的主要内容和结果

### 7.1 主要研究内容

利用 LCR 阻抗测试仪、HIOKI-9140 四端子测试夹具、带盖的正方体模具，测定了低频率下（1 MHz-8 MHz）不同含水率稻谷的 13 个电学参数（阻抗的相位角、损耗系数、等效并联电阻、阻抗、电抗、导电率、导纳、电纳、电导、电容、介电常数、介电损耗和 Q 因数）的变化，这 13 个电学参数相互联系，具体如图 12 所示。通过分析高水分稻谷在不同频率下的电参数与其含水率之间的关系，确定测定高水稻谷含水率的最佳测试频率及最佳电学参数。

基于上述实验，利用 LCR 阻抗测试仪获取稻谷的 6 个最佳电学参数(介电常数、介电损耗、损耗系数、导电率、电导和电容)。将获取的数据用于研究电学参数、含水率和出糙率、出米率之间的相互关系，利用多层感知机、决策树、支持向量机、随机森林和回归模型等算法建立能够快速准确检测稻谷含水率、出糙率和出米率的数学模型，以实现收购现场稻谷含水率、出糙率和出米率的快速检测，为稻谷的分级收购、运输、储藏和加工提供实验数据和理论依据。

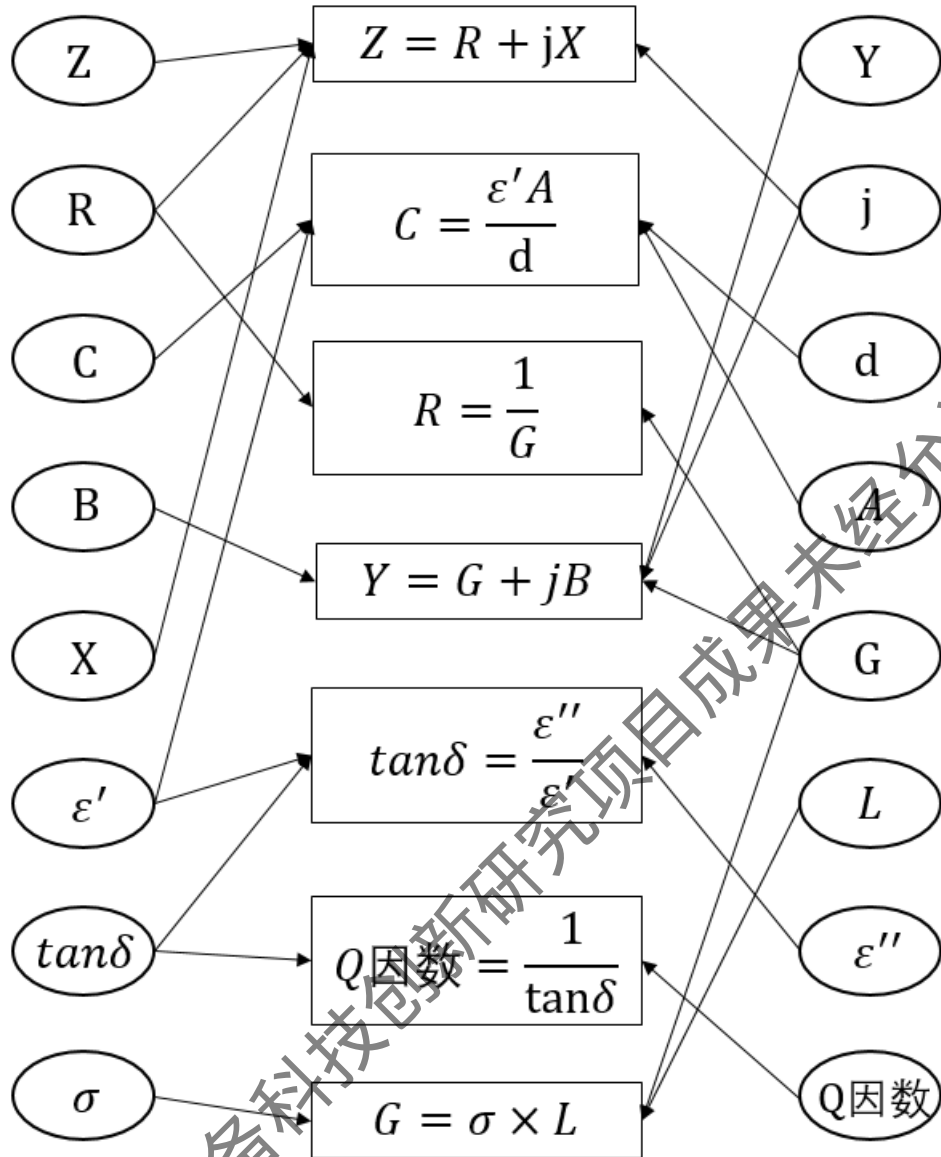


图12 本研究所涉及电学参数之间的相互关系图。

其中： $Z$  代表阻抗， $R$  代表等效并联电阻， $C$  代表电容； $B$  代表电纳； $X$  代表电抗； $\epsilon'$  代表介电常数； $\tan\delta$  代表损耗系数， $\sigma$  代表导电率， $Y$  代表导纳， $G$  代表电导， $\epsilon''$  代表介电损耗， $d$  代表电容器间距， $A$  代表电容器横截面积， $L$  代表一定横截面积上的导体长度；注意： $G$  在数值上等于  $R$  的倒数，阻抗的相位角( $\theta$ )代表电路中电流和电压之间的相位角。

## 7.2 主要研究结果

### 7.2.1 含水率和频率对稻谷电学参数变化规律的影响

#### 7.2.1.1 稻谷的阻抗的相位角和损耗系数

阻抗的相位角是指电路中电流和电压之间的相位角，损耗系数（也称为衰减系数）是一个用来描述信号或电能在传输或传输过程中的能量损耗的参数，损耗系数和阻抗的相位角之间存在正切关系。如图 13 所示，在 1 MHz-8 MHz 频率范围内，随着频率的增加，不同含水率稻谷阻抗的相位角和损耗系数均呈现先增加后减小的趋势。在 1 MHz-6 MHz 范围内，随着频率的增加，不同含水率稻谷的阻抗的相位角和损耗系数逐渐增大，在 6 MHz-8 MHz 范围内，随着频率的增加，不同含水率稻谷的阻抗的相位角和损耗系数逐渐减小。两个参数出现的第一个起伏波峰的频率均是 6 MHz，不同含水率稻谷的阻抗的相位角和损耗系数随频率的变化趋势趋于一致。在 1 MHz-8 MHz 频率范围内，稻谷含水率从 23.14% 减小到 17.11% 的过程中，阻抗的相位角和损耗系数呈现逐渐降低的趋势，而稻谷含水率从 13.14% 减小到 7.28% 的过程中，阻抗的相位角和损耗系数均出现交联现象，可能是因为在频率较低时，低水分稻谷的阻抗的相位角和损耗系数的测定受到外界环境的影响较大，导致测定数据不稳定。

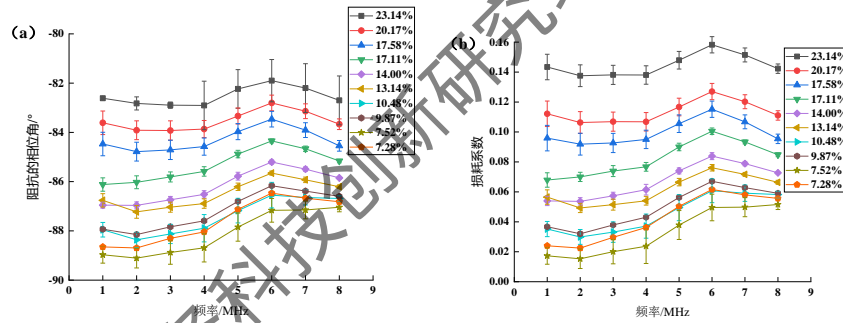


图 13 不同含水率稻谷的阻抗的相位角和损耗系数随频率变化。其中 (a) 表示阻抗的相位角，(b) 表示损耗系数。

### 7.2.1.2 稻谷的电容和介电常数

生物材料的偶极效应、电子极化、原子极化和 Maxwell-Wager 效应是介电特性的影响机制。介电特性是物质的固有属性，影响介电常数的因素有很多，比如频率、温度、样品的水分含量及其营养成分等。

电容的大小与介质的介电常数、电容器之间的交叉截面积以及电容器之间的距离有关，其中介电常数反映了物质储存电磁能的能力。如图 14(a)、(b)所示，电容与介电常数呈现相同的变化规律。以 6 MHz 为拐点，在 1 MHz-6 MHz 频率范围内，不同含水率稻谷的介电常数和电容随着频率的增加而降低，介电常数的

变化可能是因为稻谷在外加交流电场的的作用下，其表面会发生极化现象，随着频率的增大，偶极极化滞后于交变电场的变化，当频率增大到一定程度时，偶极子的取向极化停止，导致介电常数随着频率的增大而减小。但在 6 MHz-8 MHz 频率范围内，不同含水率稻谷的介电常数和电容随着频率的增加而增大，此现象还有待探究。在特定频率下，随着稻谷含水率的增大，其介电常数增大，其原因是稻谷细胞中水分形态及含量不同，在低水分含量稻谷中的水主要是强结合水（介电常数为 3.2），稻谷细胞内部离子运动迟缓，导致低水分稻谷介电常数较小。随着含水率增大，稻谷细胞代谢增强，内部离子运动增强，其中自由水的含量相对增多，水分子是典型偶极子，能结合更多电磁能，导致高水分稻谷介电常数比较大。

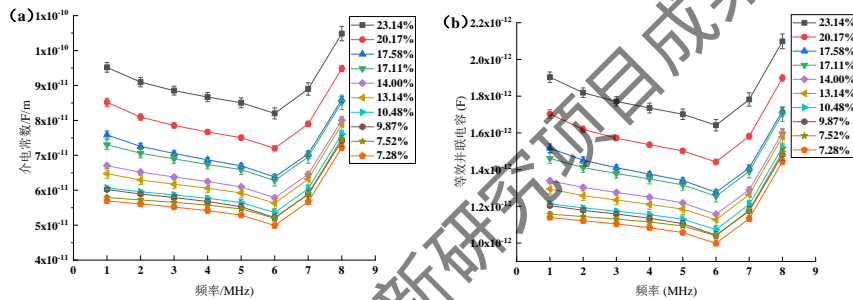


图 14 不同含水率稻谷的介电常数和电容随频率变化。其中 (a) 表示介电常数，(b) 表示电容。

### 7.2.1.3 回归模型建立

为了在实际检测过程中，保证测试结果的准确性及可重复性，根据上述分析结果可知，不同含水率稻谷的阻抗的相位角、损耗系数、介电常数和电容随频率变化规律稳定，且均以 6 MHz 为拐点频率。因此，选取下列频率下的电学参数做回归模型分析。其中，频率为：1 MHz、6 MHz 和 8 MHz；电学参数为：阻抗的相位角、损耗系数、介电常数和电容；利用二元回归模型分析，建立 1 MHz、6 MHz 和 8 MHz 下阻抗的相位角、损耗系数、介电常数和电容与稻谷含水率之间的关系模型，如表 1 所示。其中，1 MHz 和 6 MHz 下模型的决定系数 ( $R^2$ ) 大小排序均为：电容 > 介电常数 > 损耗系数 > 阻抗的相位角；8 MHz 下模型的决定系数 ( $R^2$ ) 大小排序为：损耗系数 > 介电常数 > 电容 > 阻抗的相位角；说明在 1 MHz 和 6 MHz 下稻谷的电容与含水率具有很好的相关性，在 8 MHz 下稻谷的

损耗系数与含水率具有很好的相关性。

表 1 特定频率下，稻谷含水率与电参数的相关性分析

频率	电参数	回归模型	R <sup>2</sup>
1 MHz	阻抗的相位角(°)	$y=0.008x^2+0.149x-90.360$	0.957
	电容(F)	$y=2.256\times 10^{-12}x^2-2.069\times 10^{-14}x+1.18\times 10^{-12}$	0.998
	损耗系数	$y=2.593\times 10^{-4}x^2-2.098\times 10^{-4}x+0.009$	0.968
	介电常数(F/m)	$y=1.129\times 10^{-13}x^2-1.038\times 10^{-12}x+5.905\times 10^{-11}$	0.997
	阻抗的相位角(°)	$y=0.008x^2+0.092x-88.004$	0.961
6 MHz	电容(F)	$y=2.225\times 10^{-15}x^2-2.906\times 10^{-14}x+1.117\times 10^{-12}$	0.994
	损耗系数	$y=2.580\times 10^{-4}x^2-0.001x+0.052$	0.976
	介电常数(F/m)	$y=1.106\times 10^{-13}x^2-1.438\times 10^{-12}x+5.575\times 10^{-11}$	0.993
	阻抗的相位角(°)	$y=0.012x^2+0.094x-86.931$	0.985
8 MHz	电容(F)	$y=2.348\times 10^{-15}x^2-3.223\times 10^{-14}x+1.583\times 10^{-12}$	0.990
	损耗系数	$y=3.280\times 10^{-4}x^2-0.005x+0.070$	0.992
	介电常数(F/m)	$y=1.168\times 10^{-13}x^2-1.595\times 10^{-12}x+7.906\times 10^{-11}$	0.991

注：x 为稻谷含水率（%），y 为各个电参数数值。

## 7.2.2 基于电学参数的稻谷含水率、出糙率和出米率预测模型

根据上述实验，选定测试频率为 1 MHz，测试电参数为介电常数和电容。

### 7.2.2.1 稻谷含水率与出糙率之间的关系

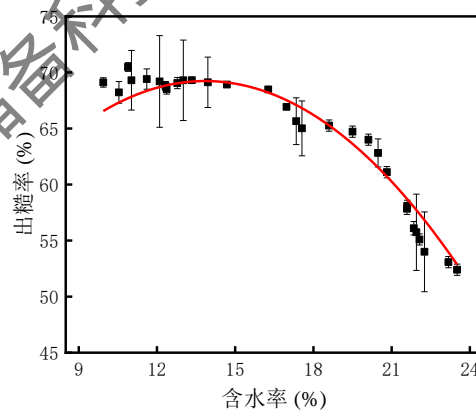


图 15 稻谷含水率与出糙率之间的关系。

出糙率是反映稻谷加工品质的重要指标，可用于评价稻谷的生长条件、成熟程度和出米情况。出糙率高的稻谷在进行加工时出米率高，食用品质更好。图 15 表示了含水率与出糙率之间的关系。通过拟合获得含水率与出糙率之间的数学模型为  $f(x)=35.62+4.86x-0.18x^2$ ，可以看到稻谷含水率与出糙率拟合的决定系



数为 0.944, RMSE 为 3.05%, 说明了模型的准确性较高。随着含水率的增加, 稻谷的出糙率发生了显著的变化。当含水率低于 13.34% 时, 含水率越低, 稻谷的出糙率越小。水分低时, 会导致米粒变得很脆, 在机械脱壳的过程中米粒容易受到外力的作用断裂而降低出糙率。含水率在 13.34% 时, 稻谷的出糙率达到最大值为 69.31%。当含水率从 13.34% 提高到接近 24% 时, 稻谷的出糙率在不断降低。水分的增加会降低稻谷颗粒的流动性, 降低稻谷的硬度。在使用砻谷机对稻谷进行脱壳处理时, 稻谷更容易产生机械损伤。由此可知, 在实际的工业加工环境下, 应控制稻谷的水分在合理的范围内, 以减少过高的水分导致脱壳过程中造成的损耗。

### 7.2.2.2 稻谷电学参数与出糙率之间的关系

为了获得电学参数与出糙率之间的数学关系, 本研究分别建立了介电常数、电容与出糙率之间的拟合模型。图 16 表示了稻谷电学参数与出糙率之间的关系。其中介电常数与出糙率的拟合决定系数为 0.808, 电容与出糙率的拟合决定系数为 0.805, 与上述含水率与出糙率之间的拟合决定系数 0.944 相比, 电学参数与出糙率的拟合效果并不理想。这可能是由于出糙率受到的影响因素较多, 单一的电学特性并不能完全准确的分析出糙率的变化趋势。

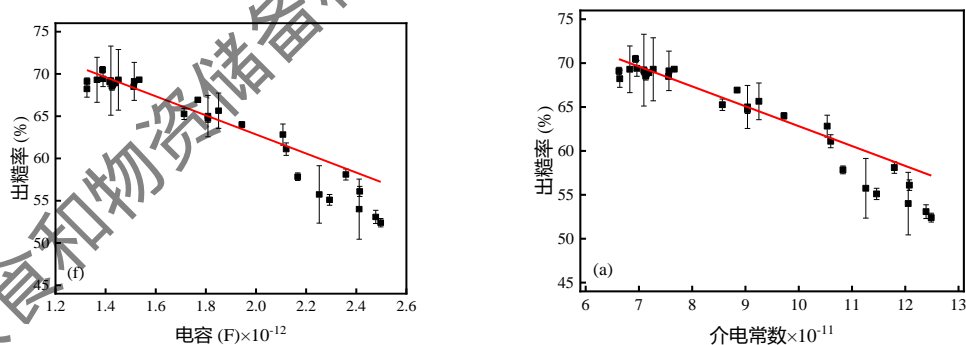


图 16 稻谷电学参数与出糙率之间的关系。

表 2 稻谷电学参数与出糙率的拟合模型分析

自变量	因变量	模型参数			拟合效果	
$x$	$f(x)$	$a$	$b$	$c$	$R^2$	RMSE (%)
介电常数	出糙率	85.45	$-2.26 \times 10^{11}$	-40.36	0.808	5.05
电容		85.41	$-1.13 \times 10^{13}$	-40.21	0.805	5.08

### 7.2.2.3 稻谷电学参数、含水率与出糙率之间的关系

为了能够更好的预测稻谷的出糙率，本研究分别使用电学参数（介电常数和电容）和含水率作为输入，建立双自变量数学模型用于预测出糙率。由表 3 可以看到，介电常数和电容分别与含水率作为自变量的模型决定系数都等于 0.980。相较于表 2 中单参数（电学参数：介电常数或者电容）预测稻谷出糙率模型的决定系数和 RMSE，双参数（电学参数和含水率）模型的拟合效果提升很多，且误差降低很多，说明电学参数和含水率两个变量更能全面的预测出糙率的变化情况。

表 3 稻谷电学参数、含水率和出糙率的拟合模型分析

自变量		因变量	模型参数					拟合效果	
$x$	$y$	$f(x, y)$	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_5$	$R^2$	RMSE (%)
介电常数	含水率	出糙率	41.00	$3.02 \times 10^{11}$	2.67	$1.72 \times 10^{21}$	$-3.97 \times 10^{10}$	0.980	0.90
电容	含水率		40.97	$1.53 \times 10^{13}$	2.65	$4.19 \times 10^{24}$	$-1.97 \times 10^{12}$	0.980	0.90

### 7.2.2.4 机器学习算法预测含水率和出糙率的效果

为了测试机器学习算法的拟合效果，本研究使用 100 组稻谷电学参数数据（频率为 1 MHz-8 MHz；电学参数为阻抗的相位角、电容、电导、导电率、损耗系数和介电常数），每个数据具有 48 个电学参数输入。将所有的数据中 80% 划分为训练集，用于训练机器学习模型，20% 用于验证模型的准确性。训练使用了四种机器学习模型，分别为多层感知机（MLP）、决策树（XGBoost），支持向量机（SVM）和随机森林（Random Forest）。

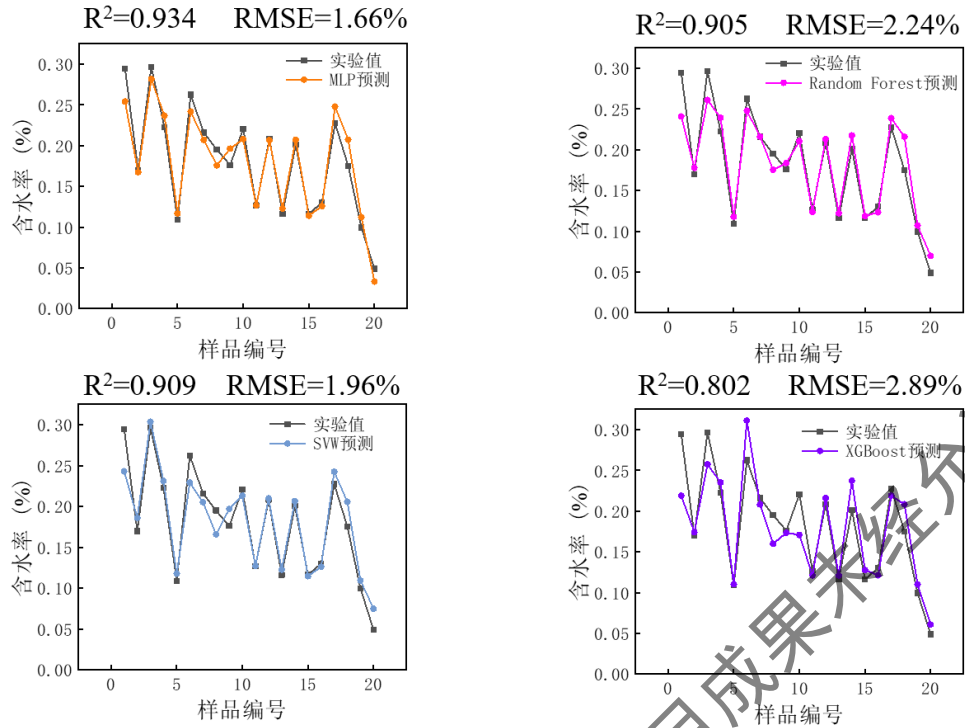


图 17 机器学习算法对含水率的预测模型。

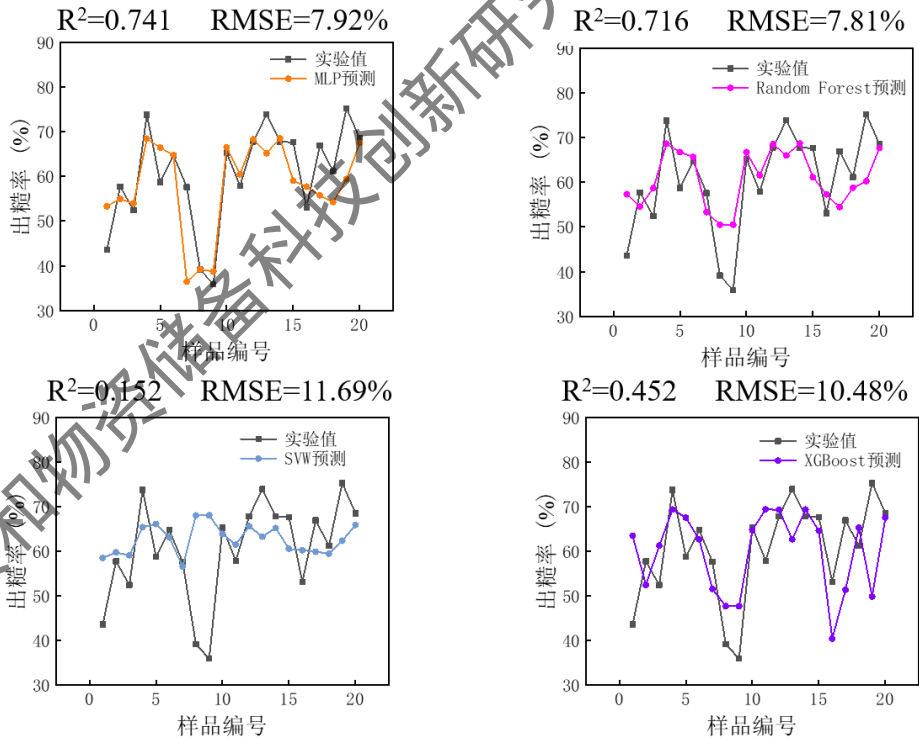


图 18 机器学习算法对出糙率的预测模型。

图 17 是四种机器学习拟合含水率所获得的数据。从各项评价指标看来，多

层感知机 (MLP) 模型优于决策树 (XGBoost)、支持向量机 (SVM) 和随机森林 (Random Forest) 模型, 其中最佳预测模型多层感知机 (MLP) 的  $R^2=0.934$ ,  $RMSE=1.66\%$ , 此外, 图 18 是四种机器学习拟合出糙率所获得的数据。同样是多层感知机 (MLP) 模型最佳, 其  $R^2=0.741$ ,  $RMSE=7.92\%$ 。

### 7.2.2.5 稻谷出糙率与出米率之间关系

图 19 是稻谷的出糙率与出米率之间的拟合关系曲线。将出糙率与出米率进行二次回归拟合, 其结果为:  $y = 9.33 + 1.76x - 0.01x^2$ , 其中模型的  $R^2=0.869$ ,  $RMSE=2.96\%$ 。根据拟合曲线的变化趋势可以发现, 当出糙率在 20% - 60% 时, 随着出糙率的增加, 出米率的增加速度在不断减缓; 当出糙率在 60% - 70% 时, 稻谷的出米率趋于稳定。目前, 基于市场实际需求和稻谷收购现场的实际情况, 《稻谷》标准进行了新的修订。修订内容将出米率作为稻谷定等指标, 该指标更能反映稻谷的利用率。本研究前部分通过非线性回归模型和机器学习模型建立了稻谷电学参数、含水率和出糙率之间的关系, 发现通过含水率和电学参数 (介电常数和电容) 预测出糙率获得最好的拟合效果, 拟合的决定系数均为 0.980。那么, 基于电学参数将能够预测稻谷的出糙率关系, 然后借助出糙率与出米率之间的数学关系间接获得电学参数和出米率之间的关系, 这样即可以实现稻谷的出米率的快速检测。

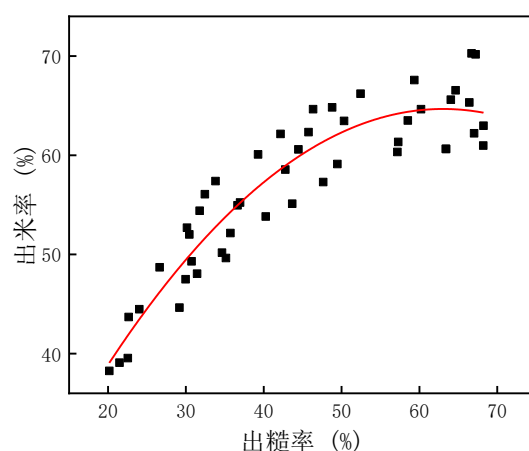


图 19 稻谷出糙率与出米率之间的拟合关系。

## 8. 研究性论文成果汇总

### 8.1 不同含水率稻谷电学物理量变化规律研究

#### 不同含水率稻谷电学物理量变化规律研究

**摘要** 为探究高水分稻谷含水率与其电学物理量之间的关系,探索电学物理量在高水分稻谷含水率快速检测方面的可行性,以高水分稻谷(含水率 23.14%)为研究对象,利用 LCR 阻抗测试仪测定信号频率(1 MHz-8 MHz)下不同含水率稻谷的 13 个电学物理量。结果表明,阻抗的相位角、损耗系数、介电常数和电容与稻谷含水率具有良好的相关性。在 1 MHz-8 MHz 频率范围内,稻谷的阻抗的相位角和损耗系数均随着频率的增加呈先增大后减小的趋势,介电常数和电容均随着频率的增加而增大。在 1 MHz 频率下稻谷的电容与其含水率具有更好的相关性( $R^2=0.998$ )。通过对不同含水率稻谷的电学物理量进行研究,为开发一种利用电学物理量预测稻谷含水率的快速检测技术提供理论基础。

**关键词** 高水分稻谷; 含水率; 频率; 电学物理量; 回归模型分析

#### **Study on the Change Law of Electrical Physical Quantity of Rice with Different Moisture Content**

**Abstract:** In order to explore the relationship between moisture content of high moisture rice and electrical physical quantity, the feasibility of electrical physical quantity in rapid detection of moisture content of high moisture rice was explored. The high moisture rice (23.14% moisture content) was taken as the research object. The LCR impedance tester was used to measure 13 electrical physical quantities of rice with different moisture content at signal frequency (1 MHz-8 MHz). The results showed that the phase Angle, loss coefficient, dielectric constant and equivalent parallel capacitance of impedance had good correlation with the water content of rice. In the frequency range of 1 MHz to 8 MHz, the phase Angle and loss coefficient of the impedance of rice increased first and then decreased with the increase of frequency, and the dielectric constant and equivalent parallel capacitance increased

with the increase of frequency. At the frequency of 1 MHz, the equivalent parallel capacitance of rice had a better correlation with its water content ( $R^2=0.998$ ). By studying the electrical physical quantity of rice with different moisture content, it provides a theoretical basis for developing a rapid detection technology using electrical physical quantity to predict the moisture content of rice.

**Keywords:** High moisture rice; Moisture content; Frequency; Electrical physical quantity; Regression model analysis

粮食问题关乎一个国家的生存和发展,其中稻谷是我国的主要粮食作物之一,产量占全国和世界粮食总产量的 50%和 35%,居世界第一位<sup>[1]</sup>。稻谷的品质受生长环境和自身条件影响。比如,种植方式、时间、土壤、气候、自身含水率及储存环境等因素影响<sup>[2]</sup>。中国南部的水稻产量比较大,但南方的阴雨天气、梅雨季节多,新收购的水稻含水率高达 30%<sup>[3]</sup>。而稻谷进仓储存的含水率在 14%以下<sup>[4]</sup>,因此,含水率是衡量稻谷品质的一个重要因素。由于新收购的稻谷代谢快、呼吸旺盛,其温度和水分含量较高,稻谷易于发霉<sup>[5]</sup>,这会直接影响稻谷的脱壳、加工成品等环节,每一道生产工艺都有对稻谷含水率有一定要求,不符合要求的稻谷会影响稻谷品质,会造成稻谷损失,并增加动力能耗<sup>[6]</sup>。含水率过低会影响稻谷食用品质,口感不好。含水率过高,稻谷易于发霉,容易滋生微生物,造成产量损失。适度的含水率有助于延长储存时间,提高稻谷品质,尽可能多的保留其营养成分<sup>[7]</sup>。高利伟等人研究发现,收割的新鲜稻谷在收购、运输、储藏和检测过程中的总损失量大,造成严重的经济损失<sup>[8]</sup>。

稻谷水分检测方法主要分为有损检测法和无损检测法,无损检测法主要通过检测与物料含水率有关的电学物理量,建立含水率和电学物理量的相关性,进而确定稻谷含水率<sup>[9]</sup>。目前,常用的粮食水分快速检测技术主要包括电容法、介电特性法、电阻法、红外法、微波法、核磁共振法、中子法、容重法和摩擦阻力法等<sup>[10-12]</sup>。国标中(GB/T 19878-2005)显示电阻法测定稻谷的水分含量范围为 9-20%,超过 20%水分含量的稻谷含水率的检测不适用。俞世钢等人基于电阻抗对稻谷含水率进行测定,结果显示,在一定的测试条件下,介电常数随稻谷水分含量的增加而增大,且呈指数相关( $R^2=0.9334$ )<sup>[13]</sup>。Nelson 等人利用燕麦、

水稻和大豆的电阻获取的数学模型，建立了对谷物和大豆的无损湿度检测<sup>[14-15]</sup>。韩志恒等人在研究异位发酵床稻谷壳含水率与介电特性的关系中发现，稻壳的含水率与介电特性有良好的相关性<sup>[16]</sup>。前人研究的多是不同含水率稻谷的单个电学物理量变化规律，且对稻谷含水率检测范围窄，对于高水分含量稻谷在不同测试信号频率下的多个电学物理量的变化规律的研究较少。因此，本研究利用 LCR 阻抗测试仪、HIOKI-9140 四端子测试夹具、带盖的正方体模具，测定了低频率下（1 MHz-8 MHz）不同含水率稻谷的 13 个电学物理量（阻抗的相位角、损耗系数、等效并联电阻、阻抗、电抗、导电率、导纳、电纳、电导、电容、介电常数、介电损耗和 Q 因数）的变化，通过分析高水分稻谷在不同频率下的电参数与其含水率之间的关系，确定测定高水分稻谷含水率的最佳测试频率及最佳电学物理量。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与设备

#### 1.1.1 材料

带壳稻谷，含水率为 23.14%，2023 年 7 月 13 日购买于广东省湛江市，采用密实袋密封置于 4 °C 冰箱中保存。

#### 1.1.2 仪器设备

LCR 阻抗测试仪(日本日置电机株式会社);BS224S 分析天平(德国 Sartorius 公司);DHG-9245 鼓风干燥箱(上海惠泰仪器制造有限公司)。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 稻谷含水率测定

稻谷含水率的测定采用直接干燥法（GB/T 14489.1-2008）。具体操作步骤如下：取 10 组 ( $m_1$  质量为  $20 \pm 0.5$  g) 含水率为 23.14% 的稻谷分别置于称量皿中，编号为 1-10 号，其中 1 号样品作为对照组，其余 9 组样品置于鼓风干燥箱内，当温度达到 105 °C 时开始计时，每隔 40 s，从鼓风干燥箱中取出一组样品，并置于玻璃干燥皿中，冷却至室温后，利用分析天平对稻谷称重，记为  $m_2$ ，稻谷含

水率计算如公式 (1):

$$\text{稻谷含水率}(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

### 1.2.2 稻谷介电特性测定

本实验主要测定频率为 1 MHz、2 MHz、3 MHz、4 MHz、5 MHz、6 MHz、7 MHz、8 MHz 下不同含水率稻谷的电学参数, 采用带盖的正方体模具、HIOKI-9140 四端子测试夹具、LCR 阻抗测试仪和 DHG-9245 鼓风干燥箱进行测定, 测定装置如图 1 所示。首先, 将 LCR 阻抗测试仪开机预热 1 h。其次, 将带盖的正方体模具(尺寸(长×宽×高)为 2×2×2 cm)放置于与之配套的样品测试盒中, 利用钛片和 HIOKI-9140 四端子测试夹具与 LCR 阻抗测试仪相连接。最后, 取 4.5 ± 0.2 g 不同含水率的稻谷置于正方体测试模具内, 并盖好盖子, 每次测量要保持稻谷容积密度变化不大。通过 LCR 阻抗测试仪测定的电学物理量直接导入计算机, 重复读取 3 次数据, 取其平均值作图。

电介质理论:

$$\varepsilon'_r = \frac{C_s}{C_{s_0}} \quad (2)$$

其中,  $\varepsilon'_r$  - 电介质的相对介电常数;

$C_s$  - 充满介质的平板电容器的电容 (单位: F);

$C_{s_0}$  - 充满空气的平板电容器的电容 (单位: F)。

电导率的计算公式为:

$$\sigma = \frac{L}{Z \times A} \quad (3)$$

其中,  $\sigma$  - 电导率 (单位: s/m);

$L$  - 两极板间的距离 (单位: m);

$Z$  - 阻抗 (单位:  $\Omega$ );

$A$  - 极板面积 (单位:  $m^2$ );

阻抗是包含了电容、电感和电阻, 表示电路对电流的总体“阻碍”程度的量:

$$Z = R + jX \quad (4)$$

其中,  $R$  是纯电阻的阻值, 是阻抗的实部,  $X$  是电容和电感的电抗, 是阻抗的虚部。



电导率与介质的相对介电损耗是有一定相关性：

$$\sigma = \omega \varepsilon_0 \varepsilon'' \quad (5)$$

其中， $\omega$ -角频率；

$\omega = 2\pi f$ （单位： $\text{rad s}^{-1}$ ，其中  $f$  是频率）；

$\varepsilon_0$ -真空中的介电常数 ( $8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ )；

根据上述公式，可推导出：

$$\varepsilon'' = \frac{\sigma}{\omega \times \varepsilon_0} = \frac{\sigma}{2 \times \pi \times f \times \varepsilon_0} \quad (6)$$

其中，

$\varepsilon''$ -电介质的介电损耗；

$\sigma$ -导电率（单位： $\text{S/m}$ ）；

$f$ -频率（单位： $\text{Hz}$ ）；

$\varepsilon_0$ -真空介电常数 ( $8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ )；

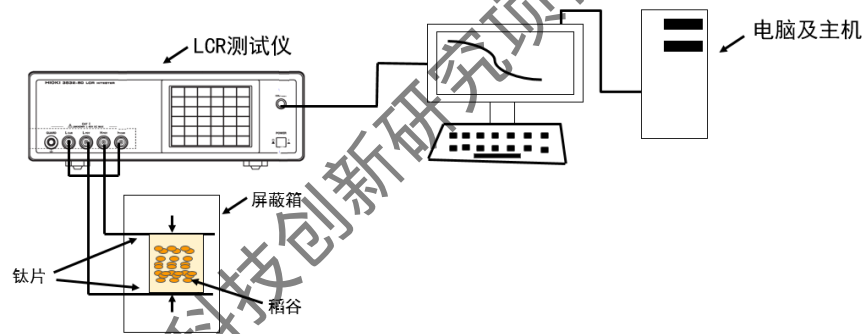


图 1 电学参数测定装置图。

### 1.3 统计分析

所有的实验数据采用平均值  $\pm$  标准差 ( $n \geq 3$ )，实验结果采用Excel 2016 (Microsoft, Washington, USA) 整理、Origin 9.0 (OriginLab, Massachusetts, USA) 作图。

## 2 结果分析

### 2.1 含水率和频率对稻谷电学物理量变化规律的影响

#### 2.1.1 稻谷的电抗和阻抗

电抗包括电感和电容两种，它们都是电路中对电流流动的阻碍程度。电感的

电抗与电感值、角频率和时间常数有关，而电容的电抗则与电容值、角频率和时间常数有关。阻抗是电阻、电抗或两者的组合，用复数表示。它描述了电路中的阻碍程度和相位差。当电抗小于零时，其被称为容性电抗。该实验中，不同含水率稻谷的电抗均小于零。如图 2 所示，在 1 MHz-8 MHz 频率范围内，随着频率的增加，不同含水率稻谷的电抗数值均呈现逐渐增大，强度逐渐降低。而不同含水率稻谷的阻抗均呈现逐渐减小的趋势。这是因为低频稻谷细胞壁容性电抗较大，随着频率增加，细胞膜的容性电抗降低，进而导致阻抗降低，阻碍电流通过的能力减弱，导电性增强<sup>[17]</sup>。其中，在频率从 1 MHz 增加到 2 MHz 时，不同含水率稻谷的电抗和阻抗变化曲线陡峭，阻抗值减少最多，电抗值增加最多。随后，随着频率的增加，两种电参数的变化趋势均变得平缓，可能是因为稻谷的电抗和阻抗在高频下的响应强度比较低。随着含水率的增加，1 MHz 下的电抗减小最显著 ( $p < 0.05$ )，从含水率为 23.14% 的  $-90277.7 \Omega$  减小到含水率为 7.28% 的  $-139523.5 \Omega$ ，而在 1 MHz 下的阻抗增加最显著 ( $p < 0.05$ )，从含水率为 23.14% 的  $92060.5 \Omega$  增加到含水率为 7.28% 的  $139628 \Omega$ 。由此可以得出，电抗和阻抗这两个参数的在 1 MHz 对稻谷含水率变化的响应速度更明显，预示着该频率下的电抗和阻抗可用于对稻谷含水率的预测。

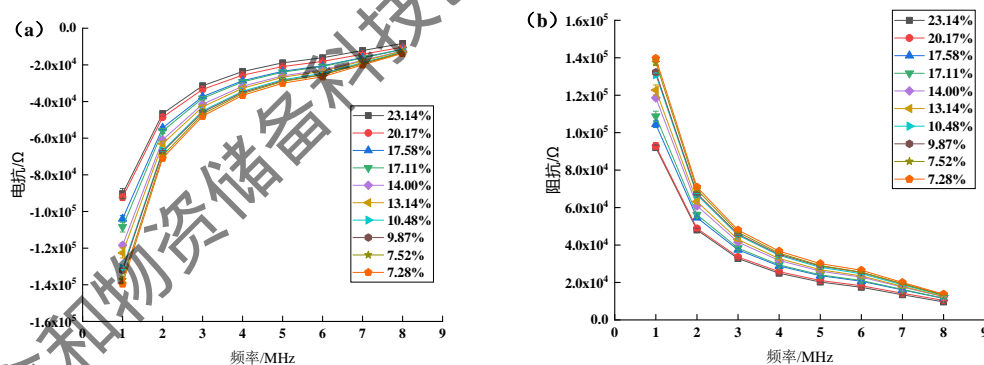


图 2 不同含水率稻谷的电抗和阻抗随频率变化。其中 (a) 表示电抗，(b) 表示阻抗。

### 2.1.2 稻谷的导电率、导纳、电纳和电导

导电率是指物质传递电流能力强弱的一种量度。导纳是电路中的导电性能和阻碍程度的综合表现，在电路分析中，导纳是一个重要的参量，可以方便地计算

电路的响应和频率特性。电纳是电导的倒数，也是电路中的阻抗。它描述了电路中的阻碍程度和相位差，并与电容和电感值相关。电导是电路中的导电性能，它与电阻的倒数成正比，可以用来计算电流所经过的物质体积内的导电程度。导纳、电纳和电导是反映导电性的参数，与导电率相对应<sup>[18]</sup>。由图 3 可知，在 1 MHz-8 MHz 的频率范围内，随着频率的增加，不同含水率稻谷的导电率、导纳、电纳和电导均逐渐增大，说明随着频率的增加，稻谷的导电性增强，该结果与不同含水率稻谷的电抗和阻抗分析结果一致。在 1 MHz-6 MHz 范围内的四个电参数（导电率、导纳、电纳和电导）的升高速率较小，在 6 MHz-8 MHz 频率范围内的升高速率大，但是不同含水率稻谷的导电率、导纳、电纳和电导的增大趋势基本一致。在同一频率下，随着含水率的增大，稻谷的导电率、导纳、电纳和电导逐渐增大。其中，含水率在 7.28%-14% 的稻谷的导电率、导纳和电纳的变化幅度不大，相对高含水率稻谷（14%-23.14%）的变化幅度较明显。而电导在稻谷含水率 10.48%-23.14% 区间内的变化幅度明显，由此得出，相较于其他三个电参数，电导对稻谷含水率变化的响应范围更广，其有可能成为区别不同含水率稻谷的电参数指标。

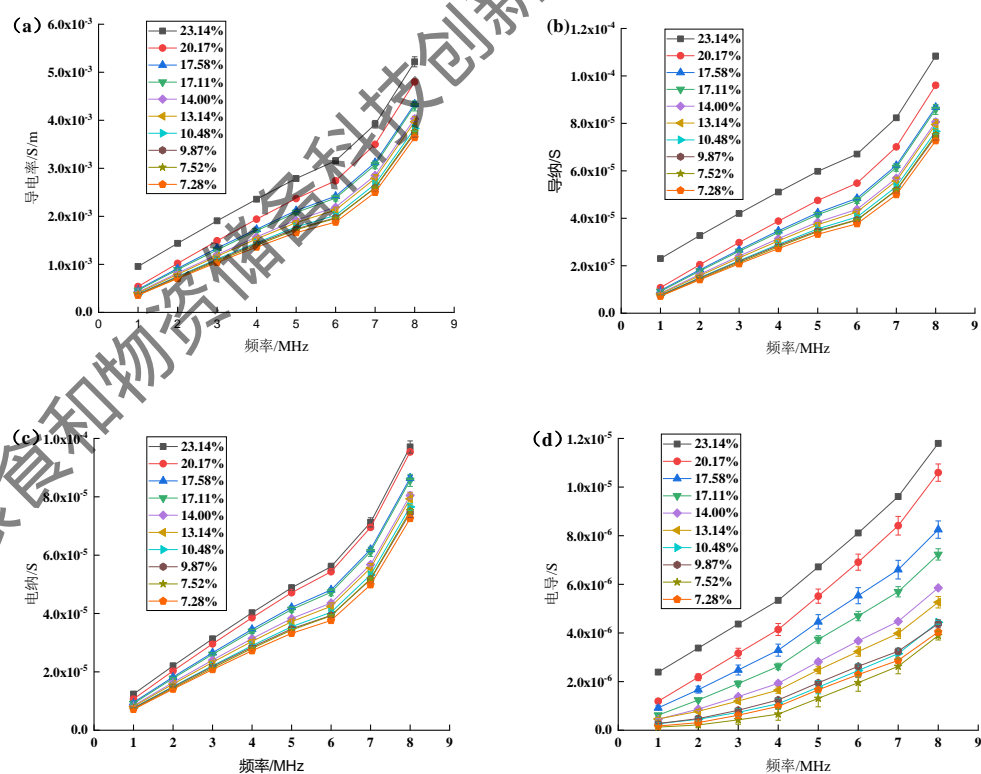


图 3 不同含水率稻谷的导电率、导纳、电纳和电导随频率变化。其中 (a) 表示导电率，(b) 表示导纳，(c) 表示电纳，(d) 表示电导。

### 2.1.3 稻谷的阻抗的相位角和损耗系数

阻抗的相位角是指电路中电流和电压之间的相位角，损耗系数（也称为衰减系数）是一个用来描述信号或电能传输过程中的能量损耗的参数，损耗系数和阻抗的相位角之间存在正切关系。如图 4 所示，在 1 MHz-8 MHz 频率范围内，随着频率的增加，不同含水率稻谷阻抗的相位角和损耗系数均呈现先增加后减小的趋势。在 1 MHz-6 MHz 范围内，随着频率的增加，不同含水率稻谷的阻抗的相位角和损耗系数逐渐增大，在 6 MHz-8 MHz 范围内，随着频率的增加，不同含水率稻谷的阻抗的相位角和损耗系数逐渐减小。两个参数出现的第一个上伏波峰的频率均是 6 MHz，不同含水率稻谷的阻抗的相位角和损耗系数随频率的变化趋势趋于一致。在 1 MHz-8 MHz 频率范围内，稻谷含水率从 23.14% 减小到 17.11% 的过程中，阻抗的相位角和损耗系数呈现逐渐降低的趋势，而稻谷含水率从 13.14% 减小到 7.28% 的过程中，阻抗的相位角和损耗系数均出现交联现象，可能是因为在频率较低时，低水分稻谷的阻抗的相位角和损耗系数的测定受到外界环境的影响较大，导致测定数据不稳定。

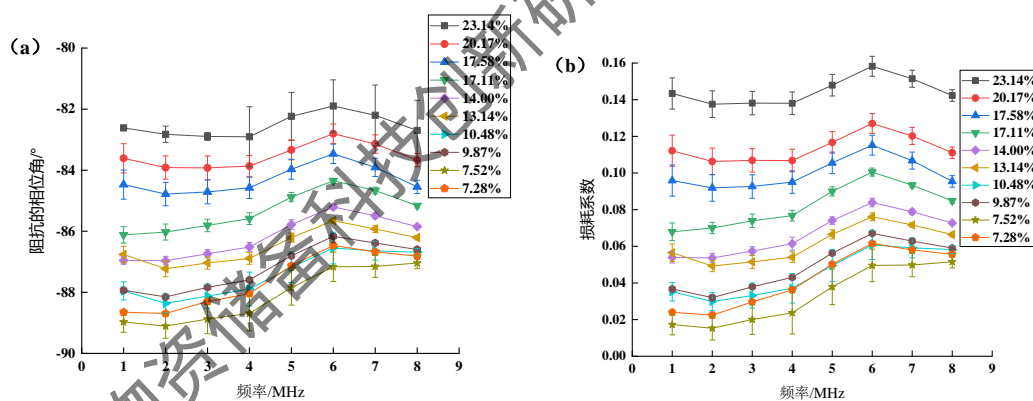


图 4 不同含水率稻谷的阻抗的相位角和损耗系数随频率变化。其中 (a) 表示阻抗的相位角，(b) 表示损耗系数。

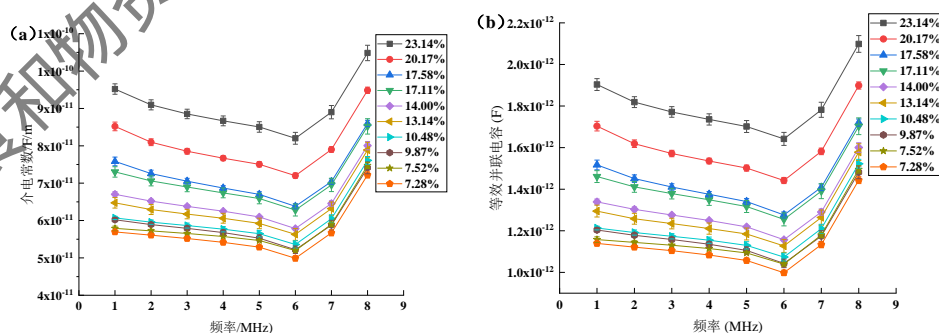
### 2.1.4 稻谷的电容、介电常数和介电损耗

生物材料的偶极效应、电子极化、原子极化和 Maxwell-Wager 效应是介电特性的影响机制<sup>[19]</sup>。介电特性是物质的固有属性<sup>[20]</sup>，影响介电常数的因素有很多，比如频率、温度、样品的水分含量及其营养成分等<sup>[21-25]</sup>。

电容的大小与介质的介电常数、电容器之间的交叉截面积以及电容器之间的

距离有关，其中介电常数反映了物质储存电磁能的能力。如图 5(a)、(b)所示，电容与介电常数呈现相同的变化规律。以 6 MHz 为拐点，在 1 MHz-6 MHz 频率范围内，不同含水率稻谷的介电常数和电容随着频率的增加而降低，介电常数的变化可能是因为稻谷在外加交流电场的的作用下，其表面会发生极化现象，随着频率的增大，偶极极化滞后于交变电场的变化，当频率增大到一定程度时，偶极子的取向极化停止，导致介电常数随着频率的增大而减小<sup>[26]</sup>。但在 6 MHz-8 MHz 频率范围内，不同含水率稻谷的介电常数和电容随着频率的增加而增大，此现象还有待探究。在特定频率下，随着稻谷含水率的增大，其介电常数增大，其原因是稻谷细胞中水分形态及含量不同，在低水分含量稻谷中的水主要是强结合水（介电常数为 3.2），稻谷细胞内部离子运动迟缓，导致低水分稻谷介电常数较小。随着含水率增大，稻谷细胞代谢增强，内部离子运动增强，其中自由水的含量相对增多，水分子是典型偶极子，能结合更多电磁能，导致高水分稻谷介电常数比较大<sup>[27-28]</sup>。

介电损耗反映了将电磁能转化为热能的能力，其主要受偶极子和离子损耗两个因素影响。如图 5(a)所示，随着频率的增加，不同含水率稻谷的介电损耗呈现先减小后增大的变化趋势，呈现出介电松弛现象。比如，含水率为 7.28% 的稻谷的极化松弛时的特征频率在 2 MHz 附近，随着稻谷水分含量的增加，极化松弛时的特征频率逐渐增大，当含水率达到 23.14% 时，其极化松弛时的特征频率在 4 MHz 附近<sup>[29]</sup>。在特定频率下，随着稻谷含水率的增大，其介电损耗逐渐增大，该结果与损耗系数结果相对应。



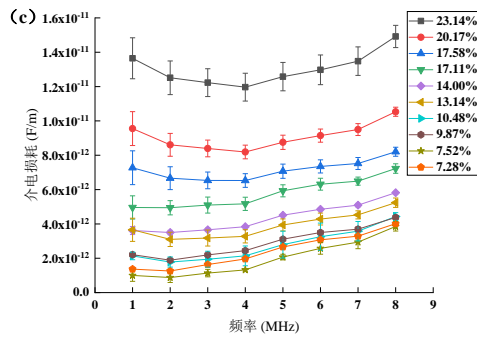


图 5 不同含水率稻谷的介电常数、电容和介电损耗随频率变化。其中 (a) 表示介电常数, (b) 表示电容, (c) 表示介电损耗。

### 2.1.5 等效并联电阻和 Q 因数

如图 6(a)所示,不同含水率稻谷的等效并联电阻随着频率的增加呈现下降速率先大后小的趋势。其中,在 1 MHz-5 MHz 频率范围内,随着稻谷水分含量的降低,高水分含量稻谷的等效并联电阻的降低速率逐渐减小。在 6 MHz-8 MHz 频率范围内,不同含水率稻谷的下降速率几乎为零,且多条等效并联电阻图像重叠。说明低频下的等效并联电阻有望成为预测稻谷水分含量的电参数。

Q 因数是衡量电抗纯度的指标, Q 因数越大,说明电抗的绝对值越大。如图 6(b)所示,在 1 MHz-8 MHz 频率范围内,随着水分含量的增加, Q 因数逐渐增大,电抗的绝对值也逐渐增大,进一步说明 Q 因数可以用来衡量电抗值。另外,以 2 MHz 为拐点频率,含水率为 13.14%-23.14% 的各稻谷组的 Q 因数随着频率的增加呈现先上升后下降的趋势。含水率为 7.28%-10.48% 的各稻谷组的 Q 因数随着频率的增加呈现降低的趋势,且降低速率缓慢,这与同频率段的电抗的变化规律一致。另外,在特定频率下 (1 MHz-4 MHz),含水率为 13.14%-23.14% 的各稻谷组的 Q 因数差异明显。因此,利用在该频率范围内测定的稻谷的 Q 因数预测高水分稻谷的水分含量成为可能。

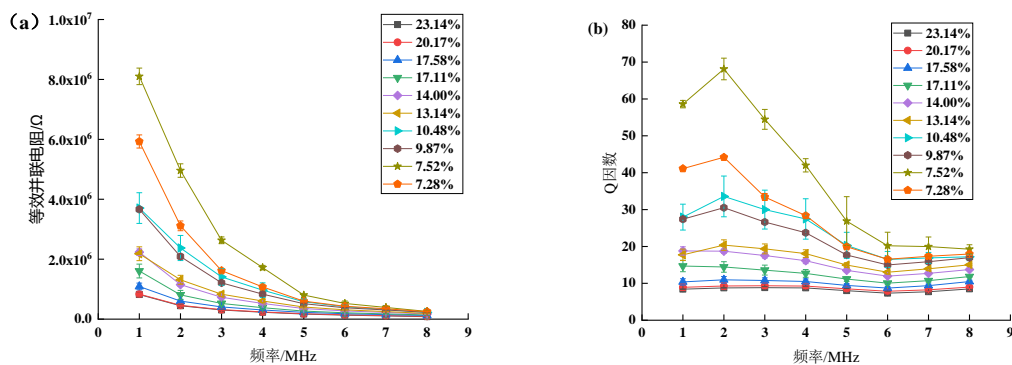


图 6 不同含水率稻谷的等效并联电阻和 Q 因数随频率变化。  
其中 (a) 表示等效并联电阻, (b) 表示 Q 因数。

## 2.2 回归模型建立

为了在实际检测过程中, 保证测试结果的准确性及可重复性, 根据上述分析结果可知, 在整个频率范围内, 相较于其他 9 个电学物理量, 不同含水率稻谷的阻抗的相位角、损耗系数、介电常数和电容随频率变化规律稳定, 且均以 6 MHz 为拐点频率。因此, 选取下列频率下的电学物理量参数做回归模型分析。其中, 频率为: 1 MHz、6 MHz 和 8 MHz; 电学物理量参数为: 阻抗的相位角、损耗系数、介电常数和电容; 利用二元回归模型分析, 建立 1 MHz、6 MHz 和 8 MHz 下阻抗的相位角、损耗系数、介电常数和电容与稻谷含水率之间的关系模型, 如表 1 所示。其中, 1 MHz 和 6 MHz 下模型的决定系数 ( $R^2$ ) 大小排序均为: 电容 > 介电常数 > 损耗系数 > 阻抗的相位角; 8 MHz 下模型的决定系数 ( $R^2$ ) 大小排序为: 损耗系数 > 介电常数 > 电容 > 阻抗的相位角; 说明在 1 MHz 和 6 MHz 下稻谷的电容与含水率具有很好的相关性, 在 8 MHz 下稻谷的损耗系数与含水率具有很好的相关性。

表 1 特定频率下, 稻谷含水率与电参数的相关性分析

频率	电参数	回归模型	$R^2$
1 MHz	阻抗的相位角( $^{\circ}$ )	$y=0.008x^2+0.149x-90.360$	0.957
	电容(F)	$y=2.256\times 10^{-12}x^2-2.069\times 10^{-14}x+1.18\times 10^{-12}$	0.998
	损耗系数	$y=2.593\times 10^{-4}x^2-2.098\times 10^{-4}x+0.009$	0.968
	介电常数(F/m)	$y=1.129\times 10^{-13}x^2-1.038\times 10^{-12}x+5.905\times 10^{-11}$	0.997

6 MHz	阻抗的相位角(°)	$y=0.008x^2+0.092x-88.004$	0.961
	电容(F)	$y=2.225\times 10^{-15}x^2-2.906\times 10^{-14}x+1.117\times 10^{-12}$	0.994
	损耗系数	$y=2.580\times 10^{-4}x^2-0.001x+0.052$	0.976
	介电常数(F/m)	$y=1.106\times 10^{-13}x^2-1.438\times 10^{-12}x+5.575\times 10^{-11}$	0.993
8 MHz	阻抗的相位角(°)	$y=0.012x^2+0.094x-86.931$	0.985
	电容(F)	$y=2.348\times 10^{-15}x^2-3.223\times 10^{-14}x+1.583\times 10^{-12}$	0.990
	损耗系数	$y=3.280\times 10^{-4}x^2-0.005x+0.070$	0.992
	介电常数(F/m)	$y=1.168\times 10^{-13}x^2-1.595\times 10^{-12}x+7.906\times 10^{-11}$	0.991

注:  $x$  为稻谷含水率 (%),  $y$  为各个电参数数值。

### 3 结论

这项研究结果表明, 稻谷的电学物理参数在不同频率下表现出不同的行为, 并且这些参数与稻谷的含水率之间存在一定的相关性。首先, 频率对电学物理参数的影响表明, 随着测试信号频率从 1 MHz 到 8 MHz 的增加, 稻谷的电学物理参数发生了变化。阻抗的相位角和损耗系数在频率增加时先增大后减小, 等效并联电阻和阻抗在频率增加时降低, 电抗、导电率、导纳、电纳和电导在频率增加时增大, 介电常数和电容在频率增加时也增大, 而介电损耗在频率增加时增加。其次, 由含水率与电学物理参数的二元回归模型的相关性分析结果可知, 在 1 MHz 和 6 MHz 下, 稻谷的电容与含水率之间具有很高的相关性 ( $R^2=0.998$  和 0.994), 而在 8 MHz 下, 稻谷的损耗系数与含水率之间也具有很高的相关性 ( $R^2=0.992$ )。最后, 由电学物理参数与含水率之间的相关性研究结果可以得出, 利用这些电学物理参数来检测高水分稻谷的含水率是可行的。总之, 这项研究揭示了不同频率下稻谷的电学特性与含水率之间的关系, 为开发电学测量方法来检测稻谷含水率提供了有力的依据。

### 4 参考文献

[1]王成龙, 王俊卿, 余波等. 臭氧协同紫外处理对偏高水分粳稻储藏品质的影响[J]. 食品工业, 2022, 43(05): 133-136.



[2]邵小龙, 徐文, 时小转等. 不同收储条件对粳稻南粳 5055 储藏品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(05): 130-136+143.

[3]蒋伟鑫, 陈银基, 陈霞等. 高水分稻谷品质劣变与防控技术研究进展[J]. 粮食与饲料工业, 2014(06): 11-14+17.

[4]白士刚, 赵宏伟, 贾富国. 糙米吸湿裂纹的断裂力学机制[J]. 食品工业, 2020, 41(09): 273-275.

[5]吕都, 周帅, 陈中爱等. 稻谷水分近红外光谱预测模型特征波长筛选[J]. 食品工业, 2022, 43(07): 320-324.

[6]Vera Zambrano M, Dutta B, Mercer D G, et al. Assessment of moisture content measurement methods of dried food products in small-scale operations in developing countries: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 88(47): 484-496.

[7]钱长钱. 基于介电特性稻谷含水率无损检测研究[D]. 沈阳农业大学, 2020.

[8]高利伟, 许世卫, 李哲敏等. 中国主要粮食作物产后损失特征及减损潜力研究[J]. 农业工程学报, 2016, 32(23): 1-11.

[9]管清林, 庄荣荣. 粮食水分检测技术及发展趋势[J]. 农民致富之友, 2014, 1(11): 54.

[10]刘志壮, 吕贵勇. 基于电容法的稻谷含水率检测[J]. 农业机械学报, 2013, 44(07): 179-182.

[11]王丹阳, 王洁, 张本华等. 基于介电特性的稻谷干燥含水率检测模型构建与验证[J]. 沈阳农业大学学报, 2022, 53(06): 752-758.

[12]韩孝强. 粮食水分快速检测方法的研究[J]. 农村实用科技信息, 2013, 1(05): 52.

[13]俞世钢, 黄仕华. 基于电阻抗特性稻谷含水率测定研究[J]. 山西农业科学, 2010, 38(12): 19-22.

[14] Nelson S O. Mathematical model for the dielectric constant of rice[J]. Transaction of the ASAE, 1992, 35(5): 1533-1536.

[15]朱哲燕, 鲍一丹. 大豆含水率电特性的试验研究[J]. 浙江大学学报(农业

与生命科学版), 2005, 1(02): 105-109.

[16] 韩志恒, 陶志影, 曾育宁等. 基于介电特性的异位发酵床稻谷壳含水率的检测[J]. 河南农业科学, 2021, 50(05): 173-180.

[17] 郭文川, 朱新华, 郭康权. 采后苹果介电特性与生理特性的关系及其应用[J]. 农业工程学报, 2005, 21(7): 136-139.

[18] 李芳, 蔡骋, 马惠玲等. 基于生物阻抗特性分析的苹果霉心病无损检测[J]. 食品科学, 2013, 34(18): 197-202.

[19] 向萍, 邱伟强, 金英善等. 微波加热下 10 种不同氨基酸溶液介电特性[J]. 上海海洋大学学报, 2022, 31(02): 547-585.

[20] 郭文川, 朱新华. 国外农产品及食品介电特性测量技术及应用[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 308-312.

[21] 向萍. 微波加热下南极磷虾酶解液与葡萄糖美拉德反应液的介电特性研究[D]. 上海海洋大学, 2021.

[22] LING Bo, GUO Wenchuan, HOU Lixia, et al. Dielectric properties of pistachio kernels as influenced by frequency, temperature, moisture and salt content[J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(2): 420-430.

[23] GUO Wenchuan, WANG Shaojin, Gopal Tiwari, et al. Temperature and moisture dependent dielectric properties of legume flour associated with dielectric heating[J]. LWT-Food Science and Technology, 2010, 43(2): 193-201.

[24] 朱新华, 郭文川. 影响食品射频-微波介电特性的因素及影响机理分析[J]. 食品科学, 2010, 31(17): 410-414.

[25] 郭文川, 陈克克. 桃 10~4500 MHz 间的介电特性与内部品质关系分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(03): 134-138.

[26] 钱长钱. 基于介电特性稻谷含水率无损检测研究[D]. 沈阳农业大学, 2020.

[27] 郭文川, 王东阳, 孔繁荣等. 基于介电特性的豆浆固形物含量检测[J]. 农业机械学报, 2016, 47(07): 239-245.

[28] Al-Holy M, Wang Y, Tang J, et al. Dielectric properties of salmon (*Oncorhynchus keta*) and sturgeon (*Acipenser transmontanus*) caviar at radio frequency (RF) and microwave (MW) pasteurization frequencies[J]. Journal of Food

Engineering, 2005, 70: 564-570.

[29]刘熠, 郭文川. 频率、温度和掺水率对洋槐蜂蜜介电特性的影响[C]//中国农业工程学会. 纪念中国农业工程学会成立 30 周年暨中国农业工程学会 2009 年学术年会 (CSAE 2009) 论文集.[出版者不详],2009:1452-1455.

上海市粮食和物资储备科技创新研究项目成果未经允许不得翻印

## 8.2 基于电学参数的稻谷含水率和出糙率预测模型

### 基于电学参数的稻谷含水率和出糙率预测模型

**摘要:** 收购现场稻谷出糙率和含水率的快速检测有助于稻谷的快速收购和分级管理, 从而减少在运输、储藏和加工过程中的损耗。本研究使用 LCR 阻抗测试仪在 1MHz 频率下测试含水率为 9.94%-23.51% 的稻谷的 6 个电学参数(介电常数、介电损耗、损耗系数、导电率、电导和电容)。然后, 用砻谷机对稻谷进行脱壳处理以获得稻谷出糙率。将稻谷的含水率、电学参数和出糙率数据用数学模型进行拟合以建立三者之间的联系。结果表明, 在含水率与出糙率的拟合模型中, 6 个电学参数都随着含水率的增加而增加。其中, 含水率与电学参数(介电常数和电容)的拟合效果最好。在含水率与出糙率的拟合模型中, 稻谷的出糙率随着含水率的增加呈现先增后减的趋势。在含水率为 13.34% 时, 出糙率达到最大值为 69.31%。导电率与出糙率的拟合模型的决定系数为 0.929, RMSE 为 3.08%。为了提高模型的拟合性能, 以电学参数(介电常数和电容)和含水率作为输入变量预测稻谷出糙率的模型获得了最佳的决定系数和最小的 RMSE。在使用机器学习模型时, 发现多层感知机 (MLP) 在预测稻谷含水率和出糙率的效果都更好, 可用于快速检测稻谷的品质。这种便捷、高效的方法为稻谷品质无损检测提供了一定的理论参考。

**关键词:** 稻谷, 出糙率, 含水率, 电学参数, 数学模型

### Prediction model for paddy moisture content and husked rice yield based on electrical parameters

**Abstract:** The rapid on-site testing of husked rice yield and moisture content contributes to the swift acquisition and grading management of paddy, thereby reducing losses during transportation, storage, and processing. In this study, an LCR meter was used to test six electrical parameters (dielectric constant, dielectric loss, dielectric loss tangent, conductivity, electrical conductivity, and capacitance) of paddy samples with moisture content ranging from 9.94% to 23.51% at a frequency of 1

MHz. Subsequently, a rice huller was used to dehusk the paddy samples to determine the husked rice yield. Mathematical models were employed to fit the data of paddy moisture content, electrical parameters, and husked rice yield to establish their relationships. The results indicate that, in the fitting models established for moisture content and electrical parameters, all six electrical parameters increased with rising moisture content. Among these parameters, moisture content exhibited the best fit with electrical parameters (dielectric constant and capacitance). In the model relating moisture content to husked rice yield, husked rice yield initially increased and then declined as moisture content increased, reaching its maximum of 69.31% at a moisture content of 13.34%. The fitted model for the relationship between electrical conductivity and husked rice yield had a determination coefficient of 0.929 and an RMSE of 3.08%. To enhance the fitting performance of model, a model predicting rice husked yield based on electrical parameters (dielectric constant and capacitance) and moisture content as input variables achieved the best determination coefficient and the smallest RMSE. When using the machine learning model, it is found that the multi-layer perceptron (MLP) is more effective in predicting the moisture content and husked rice yield, and can be used to quickly detect the quality of rice. This convenient and efficient approach provides valuable theoretical insights for non-destructive quality assessment of paddy.

**Key words:** paddy; husked rice yield; moisture content; electrical parameters; mathematical model

稻谷是世界三大粮食作物之一，种植面积占世界粮食作物总面积的 25%<sup>[1-2]</sup>。预计到 2030 年，全球稻米产量将增加 58 吨，达到 5.67 亿吨<sup>[3]</sup>。中国是一个水稻种植大国，水稻总产量连续 11 年稳定在 2 亿吨以上<sup>[4]</sup>。面对巨大的稻谷产量，稻谷的收购存在收购周期短、运输距离长的难题，而且采收地区气候和稻谷成熟度的差异会显著影响稻谷的含水率。在微生物的作用下，水分越高的稻谷在运输、储藏过程中更容易发生霉变导致经济损失<sup>[5-6]</sup>。在稻谷收购现场，收购人员会根据稻谷的含水率和出糙率来评估稻谷的品质并进行定价。稻谷的出糙率也会受到含水率的影响<sup>[7]</sup>。因此，在收购现场准确测定稻谷的含水率至关重要。然而，传

统稻谷含水率检测的方法主要有烘箱法、甲苯蒸馏法、卡尔费休法、减压干燥法<sup>[8]</sup>。这些方法普遍存在测试时间长、操作繁琐、需要破坏稻谷的缺点，因此不宜在收购现场使用<sup>[9]</sup>。此外，出糙率的检测一般需要对稻谷进行脱壳处理，在挑拣糙米的过程中需要花费大量的时间，而且容易因为主观因素导致误差<sup>[10]</sup>。

为了实现粮食含水率的快速检测，国内外专家基于粮食的物理特性、化学特性和光学特性开发了一些无损检测的方法，包括电阻法<sup>[11-12]</sup>、微波法<sup>[13-14]</sup>，电容法<sup>[15-16]</sup>，红外法<sup>[17-18]</sup>和核磁共振法<sup>[19]</sup>。其中红外法不易检测物质内部的水分；微波法的检测设备重量大，造价高；而核磁共振法的使用成本高<sup>[9,14,20]</sup>。因此，这三种方法并没有被广泛使用。目前，使用较多是通过电学特性(电容、介电特性等)来间接预测粮食的含水率<sup>[21]</sup>。郭文川等<sup>[22]</sup>使用 LCR 测量仪测定了含水率为 12%-21% 燕麦的介电特性，通过数学模型建立了含水率与介电特性之间的联系，并通过验证实验证实了含水率预测模型的可行性。刘志壮等<sup>[15]</sup>使用平行电容传感器将电容转化为含水率值，并建立回归模型准确预测了稻谷含水率。俞世钢等<sup>[23]</sup>通过稻谷的电阻抗特性建立的预测含水率模型相关系数达到 0.9334。这些研究证明了使用谷物的电学参数可以实现水分的快速检测，但目前使用电学参数来预测稻谷出糙率的研究还没有。

因此，本研究拟使用 LCR 测量仪获取稻谷的 6 个电学参数(介电常数、介电损耗、损耗系数、导电率、电导和电容)。将获取的数据用于研究电学参数、含水率和出糙率之间的相互关系，建立能够快速准确检测稻谷含水率和出糙率的数学模型，以实现收购现场稻谷含水率和出糙率的快速检测，为稻谷的分级收购、运输、储藏和加工提供实验数据和理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与仪器

新鲜稻谷 购自广东湛江(2023 年 7 月)。

DHG-9245A 型鼓风干燥箱 上海慧泰仪器制造有限公司；FA2204 型电子天平 上海良平仪器仪表有限公司；IM 3536 型 LCR 测量仪 日本日置电机株式会社；JLG-2018 型砻谷机 济宁市翰业机械设备有限公司。

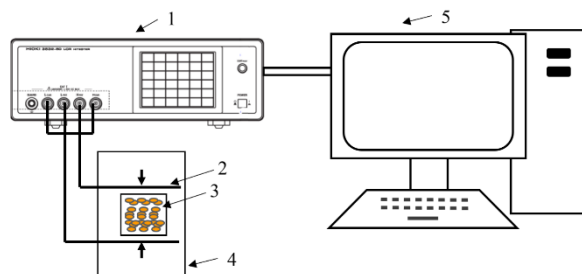
## 1.2 实验方法

### 1.2.1 稻谷样品的制备

在制备样品前，先去除稻谷中的虫子、杂物、护颖上的稻须。将处理好的稻谷混合均匀后分成质量相同的 31 份，每份质量为  $150\pm 0.5$  g。每一份新鲜稻谷使用透明密封袋密封，做好标记为 0-50 号。根据文献<sup>[24]</sup>测定初始样品(0 号)的含水率为 24.6%。使用同样的干燥方法分别处理剩余 30 份(1-50 号)稻谷获得含水率为 10%-31%的稻谷样品。

### 1.2.2 电学参数的测定

本研究使用的实验设备简图如图 1。装稻谷的模具为定制的，极板长度、宽度和极板间距都为 20 mm。LCR 测量仪测试电学参数的方法参考了文献<sup>[25]</sup>。使用 LCR 测量仪来获得不同含水率稻谷 1-8MHz 八个频率点的介电常数、介电损耗、损耗系数、导电率、电导和电容。每个电学参数具有八个频率数据点，测试一次即可获得一个数据集，每个数据集有 48 个电学参数。每个水分梯度测定两次电学参数，共获得 100 个数据集。这些电学参数常用于食品品质的检测<sup>[21-23]</sup>。所获得的电学参数数据集都用于 1.2.4 部分机器学习模型的训练。依据文献<sup>[23]</sup>选取 1MHz 作为 1.2.4 部分回归模型拟合用的频率，该频率下获得的电学参数更加稳定便于提高回归模型拟合的精度。为了减少误差，在进行回归模型前对数据进行了筛选，选取其中 30 个数据用于回归拟合。机器学习模型则采用全部数据，因为机器学习模型可以在训练的过程中自动筛选有效信息。



1.LCR测量仪 2.平行电极板 3.稻谷 4.屏蔽箱 5.电脑  
1.LCR meter 2. Parallel electrode plate 3.Rice 4. Shielding box 5. Computer

图 1 稻谷 LCR 测试的实验简图  
Fig.1 Schematic of LCR testing for paddy

### 1.2.3 稻谷出糙率的测定

出糙率的测试方法按照文献<sup>[26]</sup>。在开始剥壳之前，先打开砻谷机，根据稻谷的粒形调节砻谷机的辊轴距离和风速。使用少量测试稻谷进行脱壳处理，直到碎米数量最少，且糙米和谷壳的分离效果最佳时进行正式实验。正式测试的操作流程见图 2。如果经过一次脱壳后有少量稻谷未剥壳成功，则进行二次处理。为了确保实验结果的准确性，同一含水率的稻谷进行三次脱壳处理。

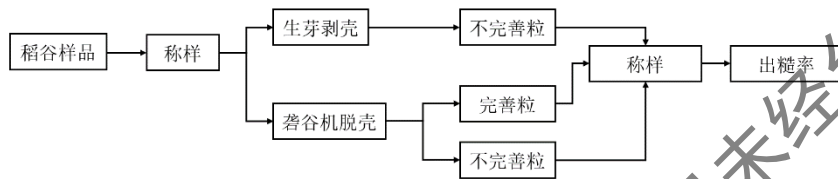


图 2 出糙率测试流程图

Fig.2 Flowchart for husked rice yield testing

根据以下公式即获得不同含水率稻谷的出糙率：

$$\text{HRY}(\%) = \frac{(m_1 + m_2) - (m_1 + m_3)/2}{m} \times 100$$

式中：HRY 表示稻谷的出糙率，%； $m_1$  表示生芽粒糙米的质量，g； $m_2$  表示砻谷机脱壳糙米质量，g； $m_3$  表示人工挑选的不完善粒糙米质量，g； $m$  表示净稻谷质量，g。

### 1.2.4 拟合模型的建立

本研究建立了两个回归模型和四个机器学习模型用于分析含水率、电学参数和出糙率三个指标之间的关系。

#### 1.2.4.1 模型一

该模型分别用于分析含水率(自变量)与电学参数(因变量)、含水率(自变量)与出糙率(因变量)之间的关系。由以下公式计算出因变量：

$$f(x) = a + b \cdot x + c \cdot x^2$$

式中： $x$  表示模型输入的自变量； $f(x)$  表示模型的因变量； $a$ ， $b$  和  $c$  表示模型中的参数。

#### 1.2.4.2 模型二



为了提高模型的拟合效果,本研究使用电学参数和含水率两个指标作为输入变量用于预测稻谷的出糙率。由以下公式计算出因变量:

$$f(x, y) = p_1 + p_2 \cdot x + p_3 \cdot y + p_4 \cdot x^2 + p_5 \cdot x \cdot y$$

式中:  $x$  表示电学参数;  $y$  表示含水率;  $f(x, y)$  表示模型的因变量;  $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$ 、 $p_4$  和  $p_5$  表示模型中的参数。

### 1.2.4.3 多层感知机模型 (MLP)

构建一个多层的神经网络,其中每个神经元与一个电学参数相对应。通过多次迭代训练神经网络,使其学习电学参数与含水率和出糙率之间的复杂非线性关系。3、输出:输出层的神经元对应于含水率和出糙率,模型通过调整权重和偏差来最小化预测输出与实际值之间的误差(图3)。

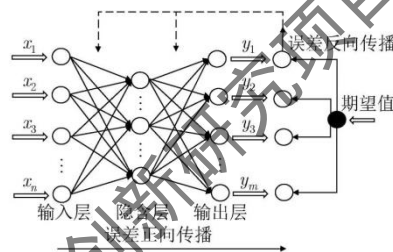


图3 多层感知机模型 (MLP) 的逻辑图

Fig.3 Logic Diagram of Multi-layer Perceptron Model (MLP)

### 1.2.4.4 决策树 (XGBoost)

该模型的预测过程: 1、输入特征: 同样使用电学参数作为输入特征。2、模型构建: 构建一系列的决策树, 每个树都根据电学参数进行分裂, 最终形成一个集成模型。XGBoost 通过梯度提升的方式逐步改进每棵树的性能。3、输出: 集成模型的输出是所有树的加权平均值, 最终得到对含水率和出糙率的预测(图4)。

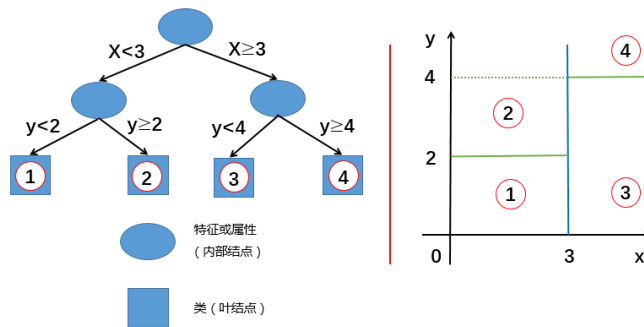


图 4 决策树 (XGBoost) 的逻辑图  
Fig.4 Logical diagram of decision tree (XGBoost)

### 1.2.4.5 支持向量机 (SVM)

该模型的预测过程：1、输入特征：将电学参数作为 SVM 的输入特征。2、模型构建：SVM 试图找到一个超平面，以最大化不同类别之间的间隔。通过引入核函数，SVM 可以处理非线性关系。训练过程中，SVM 找到将电学参数映射到高维空间的方法，使得数据在新空间中更容易分离。3、输出：SVM 的输出是对含水率和出糙率的分类结果，可以进一步转化为概率或实数值（图 5）。

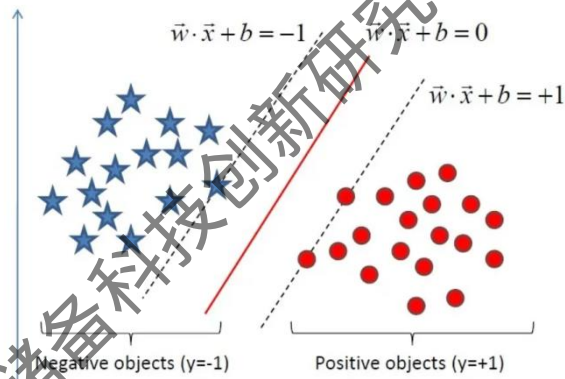


图 5 支持向量机 (SVM) 的逻辑图  
Fig.5 Logic Diagram of support Vector Machine (SVM)

### 1.2.4.6 随机森林 (Random Forest)

该模型的预测过程：1、输入特征：同样使用电学参数作为输入。2、模型构建：随机森林由多个决策树组成，每个树都是基于不同的数据子集和特征子集构建的。通过投票或平均，随机森林综合了所有决策树的预测结果。3、输出：随机森林的输出是对含水率和出糙率的综合预测（图 6）。

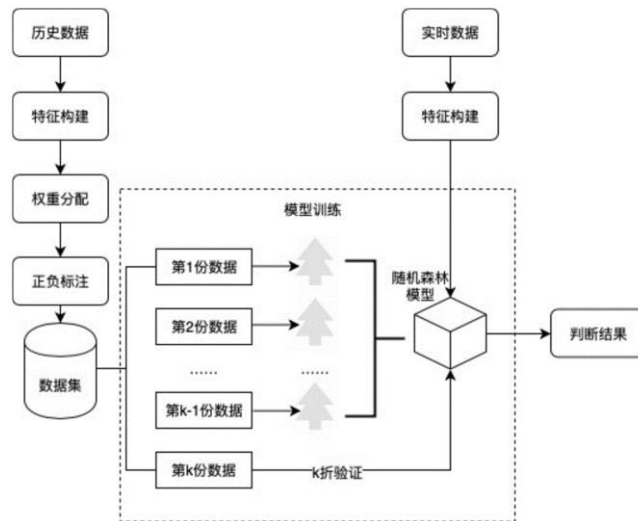


图 6 随机森林 (Random Forest) 的逻辑图  
Fig.6 Logical Graph of Random Forest (Random Forest)

### 1.2.7 模型的评估方法

使用 Origin 2018 软件对稻谷的含水率、电学参数和出糙率数据进行拟合分析并绘制图形。使用 Matlab R2021a 软件分析自变量(含水率和电学参数)与因变量(出糙率)之间的拟合效果。分别使用决定系数(R<sup>2</sup>)和均方根误差(root mean squared error, RMSE)来衡量模型的拟合效果和精确程度, R<sup>2</sup> 越接近 1, 且 RMSE 越小说明模型效果越好<sup>[27]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 稻谷含水率与电学参数之间的关系

稻谷含水率与电学参数的拟合模型参数及相关性如表 1 所示。含水率与 6 个电学参数的决定系数从大到小分别为: 电容(0.967)>介电常数(0.967)>导电率(0.962)>介电损耗(0.897)>电导(0.895)>损耗系数(0.855)。其中, 含水率分别与电容、介电常数和导电率拟合获得的决定系数最高, 都超过 0.96。这说明稻谷的含水率与这三个电学指标具有显著的相关性, 获得的三个模型均可以用于分析稻谷含水率的变化关系。

表 1 稻谷含水率与电学参数的拟合模型分析

Table 1 Analysis of fitting models for paddy moisture content and electrical parameters

自变量	因变量	模型参数			拟合效果	
x	f(x)	a	b	c	R2	RMSE
含水率	介电常数	$9.81 \times 10^{-11}$	$-6.09 \times 10^{-12}$	$3.10 \times 10^{-13}$	0.967	$3.64 \times 10^{-12}$
	介电损耗	$2.10 \times 10^{-11}$	$-3.03 \times 10^{-12}$	$1.58 \times 10^{-13}$	0.897	$3.50 \times 10^{-12}$
	损耗系数	0.02	$2.36 \times 10^{-3}$	$4.00 \times 10^{-4}$	0.855	$2.89 \times 10^{-2}$
	导电率	$6.46 \times 10^{-4}$	$-4.31 \times 10^{-5}$	$2.17 \times 10^{-6}$	0.962	$2.69 \times 10^{-5}$
	电导	$2.62 \times 10^{-6}$	$-3.79 \times 10^{-7}$	$1.99 \times 10^{-8}$	0.895	$4.44 \times 10^{-7}$
	电容	$1.96 \times 10^{-12}$	$-1.21 \times 10^{-13}$	$6.22 \times 10^{-15}$	0.967	$7.20 \times 10^{-14}$

图 7 稻谷含水率与电学参数的拟合关系

Fig.7 Relationship between paddy moisture content and electrical parameters fitting

由图 7 可以看到,6 个电学参数都随着含水率的增加呈现出不断升高的趋势。介电常数反映了食品组分对电磁辐射吸收的能力<sup>[28]</sup>。随着含水率的增加,稻谷吸收微波的能力变得更强。在高含水率时,稻谷的介电常数增加显著,表明高水分稻谷对于电磁波具有显著的影响。在对燕麦、苹果和颗粒饲料的介电特性的研究中也发现了类似的规律<sup>[22,25,29]</sup>。介电损耗表示稻谷极性组分对电磁波的损耗能力<sup>[30]</sup>。含水率的增加提高了稻谷中极性成分的数量,从而增加了稻谷的介电损

耗。损耗系数反映了物料对外部作用的能量吸收程度的指标，可以用介电常数和介电损耗的比值来表示<sup>[28]</sup>。因此，这一指标和介电常数和介电损耗具有类似的变化趋势。电容也常用于检测食品的品质，刘志壮等<sup>[15]</sup>发现稻谷的含水率为8%-23%时，电容与含水率成正相关。电导和导电率两个指标单位不同，都可作为物质对于电流的输送能力的指标。水作为溶剂，可以促进稻谷中可溶性物质的溶解。当稻谷中含水率提高后，会增加稻谷中离子的浓度。此外，新鲜高含水率稻谷的代谢速度更快，使得稻谷内部离子的运动性更高。在进行 LCR 测试的时候电流通过稻谷时遇到的阻碍也会更小。因此，含水率越高的稻谷也将获得更高的电导和导电率。以上结果说明了电学参数和稻谷水分之间具有较好的相关性，借助电学特性可以有效的预测稻谷含水率。

## 2.2 稻谷含水率与出糙率之间的关系

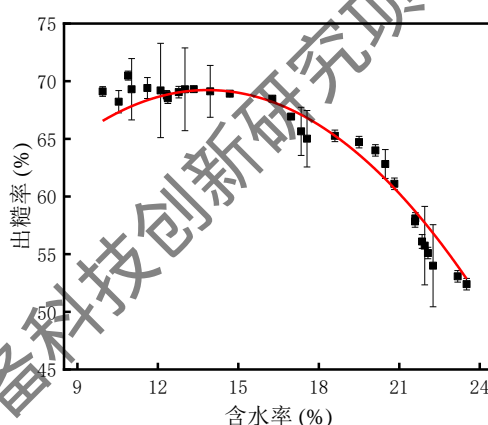


图 8 稻谷含水率与出糙率之间的关系

Fig.8 Relationship between paddy moisture content and husked rice yield

出糙率是反映稻谷加工品质的重要指标，可用于评价稻谷的生长条件、成熟程度和出米情况<sup>[31]</sup>。出糙率高的稻谷在进行加工时出米率高，食用品质更好。

图 8 表示了含水率与出糙率之间的关系。通过拟合获得含水率与出糙率之间的数学模型为  $f(x)=35.62+4.86x-0.18x^2$ ，可以看到稻谷含水率与出糙率拟合的决定系数为 0.944，RMSE 为 3.05%，说明了模型的准确性较高。由图 8 可以看到，随着含水率的增加，稻谷的出糙率发生了显著的变化。当含水率低于 13.34%时，含水率越低，稻谷的出糙率越小。水分低时，会导致米粒变得很脆，在机械脱壳

的过程中米粒容易受到外力的作用断裂而降低出糙率。含水率在 13.34% 时，稻谷的出糙率达到最大值为 69.31%。当含水率从 13.34% 提高到接近 24% 时，稻谷的出糙率在不断降低。水分的增加会降低稻谷颗粒的流动性，降低稻谷的硬度。在使用砻谷机对稻谷进行脱壳处理时，稻谷更容易产生机械损伤。古汶玉等<sup>[7]</sup>也发现过高的水分会导致稻谷的出糙率降低。由此可知，在实际的工业加工环境下，应控制稻谷的水分在合理的范围内，以减少过高的水分导致脱壳过程中造成的损耗。

### 2.3 稻谷电学参数与出糙率之间的关系

表 2 稻谷电学参数与出糙率的拟合模型分析

Table 2 Analysis of fitting models for paddy electrical parameters and husked rice yield

自变量 x	因变量 f(x)	模型参数			拟合效果	
		a	b	c	R2	RMSE (%)
介电常数	出糙率	85.45	$-2.26 \times 10^{11}$	-40.36	0.808	5.05
介电损耗		71.43	$-3.38 \times 10^{11}$	-10.83	0.645	6.86
损耗系数		63.59	92.72	-402.35	0.708	6.22
导电率		51.24	$8.63 \times 10^4$	$-1.04 \times 10^8$	0.929	3.08
电导		68.00	$2.03 \times 10^6$	$-1.16 \times 10^{12}$	0.826	4.81
电容		85.41	$-1.13 \times 10^{13}$	-40.21	0.805	5.08

图 9 稻谷电学参数与出糙率之间的关系

Fig.9 Relationship between paddy electrical parameters and husked rice yield

为了获得电学参数与出糙率之间的数学关系,本研究分别建立了 6 个电学参数(介电常数、介电损耗、损耗系数、导电率、电导和电容)与出糙率之间的拟合模型。由表 2 可知,6 个电学参数和出糙率的拟合决定系数从高到低分别为:导电率(0.929)>介电常数(0.808)>电容(0.805)>电导(0.826)>损耗系数(0.708)>介电损耗(0.645)。导电率与出糙率的拟合效果较好,决定系数大于 0.9,其他 5 个电学参数与出糙率的拟合模型相关系数都低于 0.9。由图 9 拟合曲线也可看到,稻谷的出糙率随着 6 个电学参数增加而不断减少。这可能是因为电学参数增加反映了稻谷的含水率也在不断增加,从而导致稻谷的出糙率持续降低(图 3)。在图 9 中,损耗系数、导电率和电导三者与出糙率的拟合呈现先平稳后不断降低的趋势。而介电常数、介电损耗和电容三者与出糙率的拟合曲线接近线性拟合,呈现不断降低的趋势。与 2.2 部分含水率与出糙率之间的拟合决定系数 0.944 相比,电学参数与出糙率的拟合效果并不理想。这可能是由于出糙率受到的影响因素较多,单一的电学特性并不能完全准确的分析出糙率的变化趋势。

## 2.4 稻谷电学参数、含水率与出糙率之间的关系

为了能够更好的预测稻谷的出糙率,本研究分别使用 6 个电学参数和含水率作为输入,建立双自变量数学模型用于预测出糙率。由表 3 可以看到,6 个电学参数(介电常数、介电损耗、损耗系数、导电率、电导和电容)分别与含水率作为自变量的模型决定系数都大于 0.97。相较于表 2 中单参数(电学参数)预测稻谷出糙率模型的决定系数和 RMSE,双参数(电学参数和含水率)模型的拟合效果提升很多,且误差降低很多,说明电学参数和含水率两个变量更能全面的预测出糙率的变化情况。尤其,电学参数(介电常数和电容)与含水率作为自变量建立的模型取得了最好的拟合效果,决定系数为 0.980, RMSE 为 0.90。这也证明了使用电学参数和含水率作为自变量的双参数模型可以更好的预测稻谷的出糙率。

表 3 稻谷电学参数、含水率和出糙率的拟合模型分析

Table 3 Analysis of fitting models for paddy electrical parameters, moisture content, and husked rice yield

自变量		因变量	模型参数					拟合效果	
$x$	$y$	$f(x, y)$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$R^2$	RMSE (%)
介电常数	含水率		41.00	$3.02 \times 10^{11}$	2.67	$1.72 \times 10^{21}$	$-3.97 \times 10^{10}$	0.980	0.90
介电损耗	含水率		61.88	$1.19 \times 10^{12}$	0.54	$1.33 \times 10^{22}$	$-9.85 \times 10^{10}$	0.977	0.96
损耗系数	含水率	出糙率	53.64	123.60	1.45	333.90	-14.62	0.973	1.06
导电率	含水率		41.73	$4.42 \times 10^4$	2.66	$4.79 \times 10^7$	-6283.00	0.980	0.91
电导	含水率		61.93	$9.47 \times 10^6$	0.54	$8.32 \times 10^{11}$	$-7.79 \times 10^5$	0.978	0.96
电容	含水率		40.97	$1.53 \times 10^{13}$	2.65	$4.19 \times 10^{24}$	$-1.97 \times 10^{12}$	0.980	0.90

## 2.5 机器学习算法对稻谷含水率的拟合效果

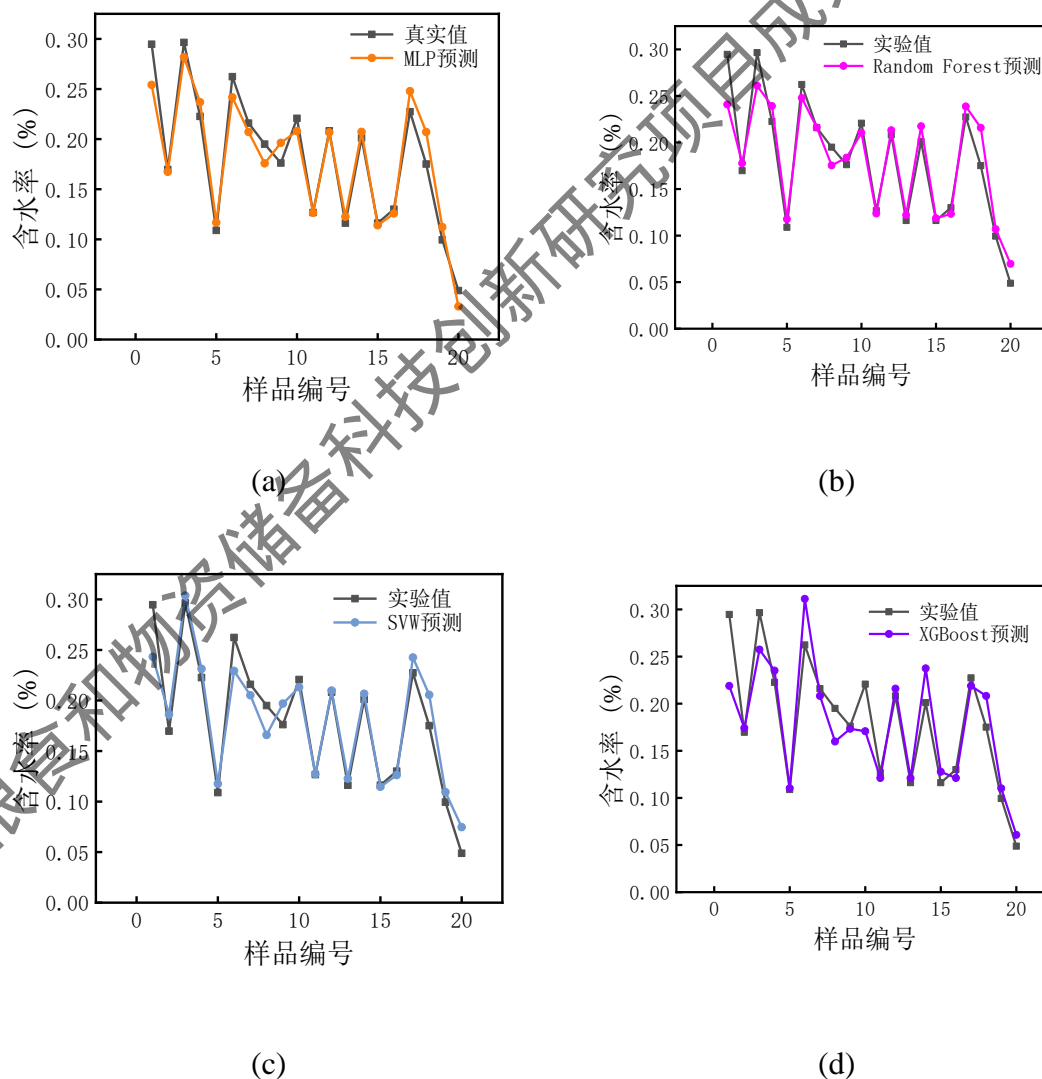


图 10 机器学习预测含水率的模型效果。(a)表示多层感知机模型，(b)表示决策树模型，(c)表示支持向量机模型，(d)表示随机森林模型。



Fig.10 The effect of machine learning model for predicting moisture content. (a) represents multilayer perceptron model, (b) represents decision tree model, (c) represents support vector machine model, and (d) represents random forest model.

为了测试机器学习算法的拟合效果，本研究使用 100 组稻谷电学参数数据（频率为 1 MHz-8 MHz；电学参数为阻抗的相位角、电容、电导、导电率、损耗系数和介电常数），每个数据具有 48 个电学参数输入。将所有的数据中 80% 划分为训练集，用于训练机器学习模型，20% 用于验证模型的准确性。图 10 是四种机器学习拟合含水率所获得的数据。四种机器学习模型拟合效果分别为多层感知机（ $R^2=0.934$ ， $RMSE=1.66\%$ ）、决策树（ $R^2=0.905$ ， $RMSE=2.24\%$ ），支持向量机（ $R^2=0.909$ ， $RMSE=1.96\%$ ）和随机森林（ $R^2=0.802$ ， $RMSE=2.89\%$ ）。从各项评价指标看来，多层感知机（MLP）模型优于决策树（XGBoost）、支持向量机（SVM）和随机森林（Random Forest）模型，其中最佳预测模型多层感知机（MLP），说明该模型可以用于更好的预测含水率。

## 2.6 机器学习算法对稻谷出糙率对的拟合效果

图 11 是四种机器学习拟合出糙率所获得的数据。四种机器学习模型拟合效果分别为多层感知机（ $R^2=0.741$ ， $RMSE=7.92\%$ ）、决策树（ $R^2=0.716$ ， $RMSE=7.81\%$ ），支持向量机（ $R^2=0.152$ ， $RMSE=11.69\%$ ）和随机森林（ $R^2=0.452$ ， $RMSE=10.48\%$ ）。从各项评价指标看来，多层感知机（MLP）模型优于决策树（XGBoost）、支持向量机（SVM）和随机森林（Random Forest）模型，其中最佳预测模型多层感知机（MLP），说明该模型可以用于更好的预测稻谷的出糙率。

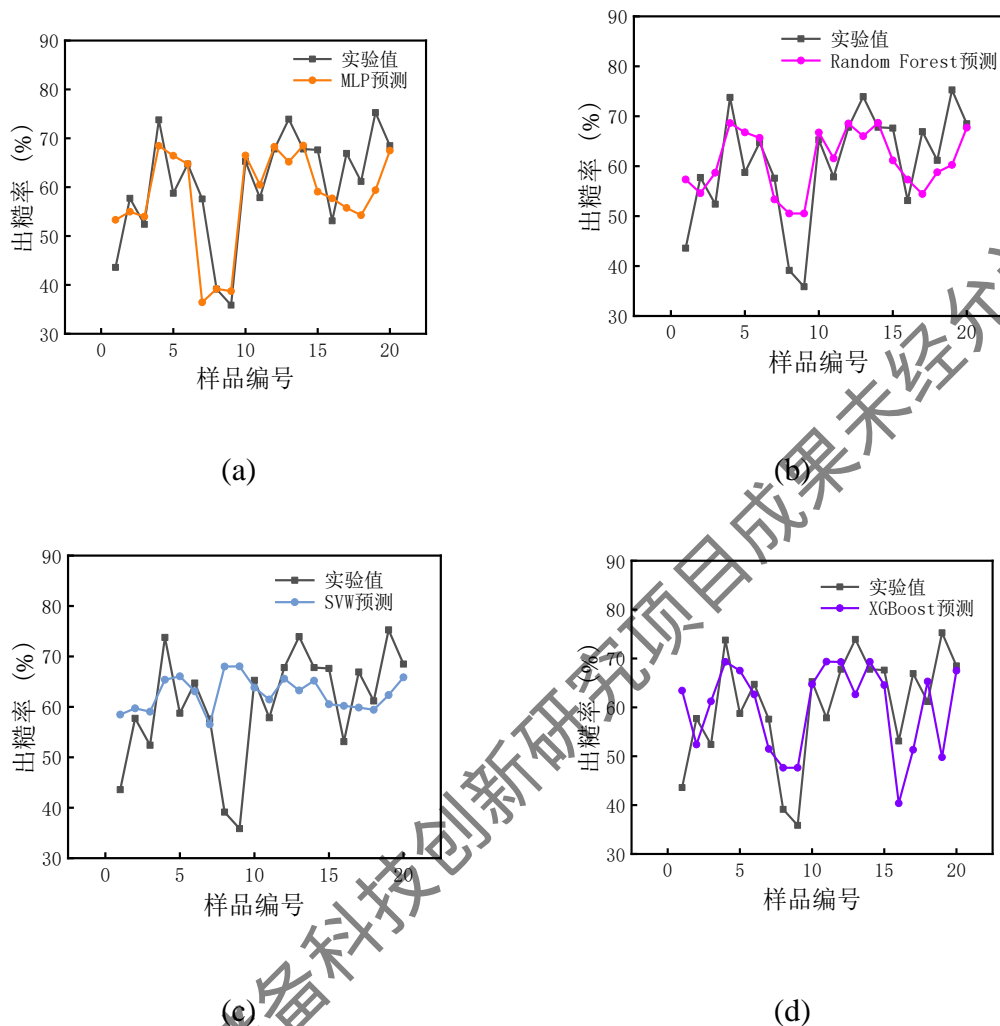


图 11 机器学习预测出糙率的模型效果。(a)表示多层感知机模型，(b)表示决策树模型，(c)表示支持向量机模型，(d)表示随机森林模型。

Fig.11 The model effect of machine learning to predict husked rice yield. (a) represents multilayer perceptron model, (b) represents decision tree model, (c) represents support vector machine model, and (d) represents random forest model.

### 3 结论

本研究基于 LCR 测量仪，在 1MHz 频率下测试了含水率为 9.94%-23.51% 稻谷的 6 个电学参数(介电常数、介电损耗、损耗系数、导电率、电导和电容)，并使用砻谷机对稻谷进行脱壳处理，进而构建反映电学参数、含水率和出糙率之间

关系的数学模型。使用决定系数和 RMSE 对建立的模型进行相关性和准确性评估,从而找出最佳的数学模型用于预测稻谷的含水率和出糙率。结果表明,在含水率和电学参数的拟合模型中,6个电学参数都随着含水率的增加而提高。含水率与6个电学参数的决定系数从大到小分别为:电容>介电常数>导电率>介电损耗>电导>损耗系数。其中,含水率与介电常数、导电率和电容的拟合模型决定系数都超过0.96。为了获取电学参数和含水率两个指标与出糙率之间的关系,分别建立了单自变量模型(含水率-出糙率模型和电学参数-出糙率模型)、双自变量模型(电学参数和含水率-出糙率模型)两种数学关系模型。在含水率和出糙率拟合模型中,模型的决定系数为0.944, RMSE为3.05%。稻谷的出糙率随着含水率先增后减,在含水率为13.34%时,出糙率达到最大值为69.31%。在分析电学参数和出糙率的拟合模型时,可以发现6个电学参数与出糙率的拟合决定系数从大到小分别为:导电率>介电常数>电容>电导>损耗系数>介电损耗。其中,可以发现导电率与出糙率的拟合效果最佳,决定系数为0.929。为了提高模型的精确度,将电学参数和含水率作为输入建立双自变量模型用于预测出糙率,发现当电学参数为介电常数、导电率和电容时模型的决定系数均等于0.980。电学参数(介电常数和电容)与含水率的模型在拟合稻谷出糙率时获得了最佳的拟合效果和最小的RMSE。在使用机器学习模型时,发现多层感知机(MLP)在预测稻谷含水率和出糙率的效果都更好,可用于快速检测稻谷的品质。基于本研究的内容和市场需求,开发一种可以快速检测稻谷含水率和出糙率的方法将有巨大的应用市场。

#### 4 参考文献:

[1]徐广超,谢天.中外大米质量标准对比分析及发展建议[J].粮油食品科技,2019,27(06):35-39. [XU G C, XIE T. Comparative analysis of rice quality standards at home and abroad and development suggestions[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2019, 27(06): 35-39.]

[2]ZHAO W X, CHOU J M, LI J N, et al. Impacts of extreme climate events on future rice yields in global major rice-producing regions[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022, 19(08): 4437.

[3]Mohidem N A, Hashim N, Shamsudin, R, et al. Rice for Food Security:

Revisiting Its Production, Diversity, Rice Milling Process and Nutrient Content[J].Agriculture-Basel. 2022, 12(06): 741.

[4]徐春春, 纪龙, 陈中督, 等. 2021 年我国水稻产业形势分析及 2022 年展望[J]. 中国稻米, 2022, 28(02): 16-19. [XU C C, JI L, CHEN Z D, et al. Analysis of China's Rice Industry in 2021 and the Outlook for 2022[J]. China Rice, 2022, 28(02): 16-19.]

[5]TIAN T, ZHANG B, CHEN S B, et al. Characterization of differences between microwave and traditional thermal sterilization to prevent fungal spoilage during storage of high-moisture paddy rice[J]. Cereal Chemistry. 2020, 98(01): 154-163.

[6]WANG R L, LIU L L, GUO Y P, et al. Effects of deterioration and mildewing on the quality of wheat seeds with different moisture contents during storage[J]. RSC Advances. 2020, 98(01): 154-163.

[7]古汶玉, 黄玉, 谢宇霞, 等. 稻谷水分对出糙率和整精米率的影响[J]. 粮食科技与经济, 2020, 45(04): 80-81.

[8]宋琦. 基于电阻抗谱分析的稻谷水分传感器设计[D]. 江苏: 江苏大学, 2018. [SONG Q. Design of grain moisture sensor based on electrical impedance spectroscopy[D]. Jiangsu: Jiangsu University, 2018.]

[9]赵晶, 黄操军, 李博识. 谷物含水率检测方法综述[J]. 农业科技与信息, 2018, (16): 46-49.

[10]吕荣文, 包鸟兰, 秦晓亮. 稻谷出糙率和出米率关系探讨[J]. 粮食储藏, 2022, 51(01): 53-56.

[11]李长友. 稻谷干燥含水率在线检测装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(03): 56-59. [LI C Y. Design and experiment of on-line moisture content metering device for paddy drying process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(03): 56-59.]

[12]张胜全. 电阻式粮食水分含量的测定方法[J]. 粮油加工与食品机械, 2005(02): 66-67+69.

[13]TRABELSI S, NELSON S. Microwave moisture sensor for grain and seed[J]. Biological Engineering, 2008, 1(02): 195-202.

[14] 张伟, 杨刚, 雷军波, 等. 基于微波反射法的谷物含水率在线检测装置研制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(23): 21-28. [ZHANG W, YAGN G, LEI J B, et al. Development of on-line detection device for grain moisture content using microwave reflection method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(23): 21-28.]

[15] 刘志壮, 吕贵勇. 基于电容法的稻谷含水率检测[J]. 农业机械学报, 2013, 44(07): 179-182. [LIU Z Z, LV Y G. Moisture content detection of paddy rice based on capacitance approach[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(07): 179-182.]

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

[17] CHEN N N, CHEN M Q, Fu B A, et al. Far-infrared irradiation drying behavior of typical biomass briquettes[J]. Energy, 2017, 121: 726-738.

[18] 吕都, 唐健波, 姜太玲, 等. 基于近红外光谱技术快速检测稻谷水分含量[J]. 食品与机械, 2022, 38(02): 51-56+63. [LU D, TANG J B, JIANG T L, et al. Research on rapid prediction model of rice moisture content based on near infrared spectroscopy[J]. Food & Machinery, 2022, 38(02): 51-56+63.]

[19] 金志强, 张锦胜, 钱菲, 等. 利用核磁共振技术研究谷物在储藏过程中的变化[J]. 食品科学, 2008, 29(09): 66-69. [JIN Z Q, ZHANG S J, QIAN F. Study on changes of grains during storage by NMR[J]. Food Science, 2008, 29(09): 66-69.]

[20] Zhang G, Wang Y, Wang W, et al. Rapid online determination of feed concentration in nitroguanidine spray drying process by near infrared spectroscopy[J]. Infrared Physics and Technology, 2020, 109: 103432.

[21] 王丹阳, 王洁, 张本华, 等. 基于介电特性的稻谷干燥含水率检测模型构建与验证[J]. 沈阳农业大学学报, 2022, 53(06): 752-758. [WANG D Y, WANG J, ZHANG B H, et al. Construction and verification of detection model of moisture content for paddy rice drying based on dielectric properties[J]. Journal of Shenyang

Agricultural University, 2022, 53(06): 752-758.]

[22]郭文川, 王婧, 朱新华. 基于介电特性的燕麦含水率预测[J]. 农业工程学报, 2012, 28(24): 272-279. [GUO W C, WANG J, ZHU X H, et al. Moisture content prediction of oat seeds based on dielectric property[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(24): 272-279.]

[23]俞世钢, 黄仕华. 基于电阻抗特性稻谷含水率测定研究[J]. 山西农业科学, 2010, 38(12): 19-22. [YU S G, HUANG S H. Study on the grain moisture rate testing based on impedance characteristics[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2010, 38(12): 19-22.]

[24]国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.3—2016 食品安全国家标准 食品中水分的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

[25]黄铝文, 田旭, 任烈弘, 等. 基于电学参数的苹果可溶性固形物含量预测[J]. 农业工程学报, 2023, 39(02): 252-259. [HUANG L W, TIAN X, REN L H, et al. Prediction of the soluble solid contents for apple fruit using electrical parameters[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(02): 252-259.]

[26]国家质量监督检验检疫总局. GB/T 5495—2008 粮油检验 稻谷出糙率检验[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

[27]CHANG H, WU Q, TIAN H, et al. Non-destructive identification of internal water core in apples based on online Vis/NIR spectroscopy[J]. Transaction of the ASABE. 2020, 63(06): 1711-1721.

[28]XU Y Y, XIANG P, QIU W Q, et al. Dielectric properties of the Maillard reaction solution formed between enzymatic hydrolysate of Antarctic krill and glucose under microwave heating[J]. LWT, 2022, 161: 113355.

[29]牛智有, 刘芳宏, 刘鸣, 等. 平行极板电容传感器介电式颗粒饲料水分检测仪设计与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(18): 36-43. [NIU Z Y, LIU F H, LIU M, et al. Design of dielectric pellet feed moisture detector based on parallel plate capacitance sensor[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(18): 36-43.]

[30]张保艳, 于海洋, 程裕东, 等. 温度、频率和水分含量对罗非鱼介电特性的影响[J]. 水产学报, 2012, 36(11): 1785-1792. [ZHANG B Y, YU H Y, CHENG Y D, et al. Effects of temperature, frequency, and moisture content on the dielectric properties of tilapia[J]. Journal of fisheries of china, 2012, 36(11): 1785-1792.]

[31]袁军. 稻谷出糙率检验的研究[J]. 粮食问题研究, 2022, (06): 38-40.

上海市粮食和物资储备科技创新研究项目成果未经允许不得翻印

## 9.实用新型专利成果汇总

### 9.1 一种实验用清洁智能砻谷机

#### 摘要:

本实用新型公开了一种实验用清洁智能砻谷机,所述机箱的上端连接处设置有进料口,所述进料口的一端连接有转轴,所述转轴的一端连接有装料盒,所述装料盒的底部内侧有称重装置,所述机箱的内部顶端设置有固定支架,所述固定支架的一端设置有辊轴,所述辊轴的一端设置有固定挡板,所述机箱的内部中间设置有水平固定板,所述水平固定板的最左侧设置有糙米出料口,所述糙米出料口的一端设置有谷壳出料口,所述谷壳出料口的一端设置有降风速谷壳装料盒,所述降风速谷壳装料盒的顶部设置有水平固定板,所述水平固定板的一端设置有上阻风板,所述上阻风板的一端设置有固定滑板,所述固定滑板一端设置有粉末滤板,所述粉末滤板上侧设置有下阻风板,所述粉末滤板下部设置有粉末收集盒,所述粉末收集盒左侧设置有糙米装料盒,所述糙米装料盒的一侧设置有固定滑板,所述固定滑板的底端设置有称重装置,所述机箱的外侧表面设置有显示屏,所述显示屏的右侧设置有显示屏。通过装料盒、称重装置、显示屏、显示屏、降风速谷壳装料盒和粉末收集盒,达到减轻工作程序,减少脱壳过程中的粉末污染的目的。

#### 权利要求书:

1.一种实验用清洁智能砻谷机,包括机箱(5),其特征在于:所述机箱(5)的上端连接处设置有(4),所述进料口(4)的一端连接有转轴(3),所述转轴(3)的一端连接有装料盒(1),所述装料盒(1)的底部内侧有称重装置(2),所述机箱(5)的内部顶端设置有固定支架(18),所述固定支架(18)的一端设置有辊轴(19),所述辊轴(19)的一端设置有固定挡板(20),所述机箱(5)的内部中间设置有水平固定板(25),所述水平固定板(25)的最左侧设置有糙米出料口(24),所述糙米出料口(24)的一端设置有谷壳出料口(23),所述谷壳出料口(23)的一端设置有降风速谷壳装料盒(9),所述降风速谷壳装料盒(9)的顶部设置有水平固定板(25),所述水平固定板(25)的一端



设置有上阻风板(15)，所述上阻风板(15)的一端设置有固定滑板(16)，所述固定滑板(16)一端设置有粉末滤板(14)，所述粉末滤板(14)上侧设置有下列阻风板(13)，所述粉末滤板(14)下部设置有粉末收集盒(10)，所述粉末收集盒(10)左侧设置有糙米装料盒(8)，所述糙米装料盒(8)的一侧设置有固定滑板(12)，所述固定滑板(12)的底端设置有称重装置(11)，所述机箱(5)的外侧表面设置有显示屏(6)，所述显示屏(6)的右侧设置有显示屏(7)。

2.根据权利要求1所述的一种实验用清洁智能砻谷机，其特征在于：所述称重装置(2)的通过转轴(3)与进料口(4)活动连接，所述装料盒(1)位于称重装置(2)的底部便于称重，获得的数据在显示屏(6)中显示。

3.根据权利要求1所述的一种实验用清洁智能砻谷机，其特征在于：所述糙米装料盒(8)的内部镂空，使用固定滑板(12)滑动进料，内部呈现先大后下的特征，所述糙米装料盒(8)的底部设置有称重装置(11)便于称重，获得的数据在显示屏(7)显示。

4.根据权利要求1所述的一种实验用清洁智能砻谷机，其特征在于：所述水平固定板(25)底部设置有上阻风板(15)降低风速，防止粉尘吹出腔体，粉末滤板(14)上侧连接有固定滑板(16)便于吹飞的谷壳滑落，所述粉末滤板(14)上端连接有下列阻风板(13)用于降低风速，所述粉末滤板(14)内部有小孔便于收集固体粉末。

说明书：

### 一种实验用的清洁智能砻谷机

技术领域：

[0001] 本实用新型属于下料装置技术和电子技术领域，具体涉及一种实验用清洁智能砻谷机。

背景技术：

[0002] 砻谷机是将稻谷脱去颖壳，制成糙米的粮食加工机械，主要由进料口装

置、机头装置、谷壳分离室、齿轮变速箱、机架等组成。

[0003] 现有的砻谷机在使用时容易将固体粉末吹出机器谷壳分离室外，容易导致环境污染，而且不便于打扫。而且在计算出糙率时还需要手动的进行称重，需要将样品不断的移动，增加了工作量。为此，我们提出了一种清洁的智能砻谷机。

### 实用新型内容：

[0004] 本实用新型的目的在于提供一种清洁智能的砻谷机，以解决上述背景技术中提出砻谷机产生的固体粉末容易污染实验室和称重过程中的繁琐操作。

[0005] 为实现上述目的，本实用新型提供如下技术方案：一种清洁智能的砻谷机，包括所述(5)的上端连接处设置有进料口(4)，所述进料口(4)的一端连接有转轴(3)，所述转轴(3)的一端连接有装料盒(1)，所述装料盒(1)的底部内侧有称重装置(2)，所述机箱(5)的内部顶端设置有固定支架(18)，所述固定支架(18)的一端设置有辊轴(19)，所述辊轴(19)的一端设置有固定挡板(20)，所述机箱(5)的内部中间设置有水平固定板(25)，所述水平固定板(25)的最左侧设置有糙米出料口(24)，所述糙米出料口(24)的一端设置有谷壳出料口(23)，所述谷壳出料口(23)的一端设置有降风速谷壳装料盒(9)，所述降风速谷壳装料盒(9)的顶部设置有水平固定板(25)，所述水平固定板(25)的一端设置有上阻风板(15)，所述上阻风板(15)的一端设置有固定滑板(16)，所述固定滑板(16)一端设置有粉末滤板(14)，所述粉末滤板(14)上侧设置有下阻风板(13)，所述粉末滤板(14)下部设置有粉末收集盒(10)，所述粉末收集盒(10)左侧设置有糙米装料盒(8)，所述糙米装料盒(8)的一侧设置有固定滑板(12)，所述固定滑板(12)的底端设置有称重装置(11)，所述机箱(5)的外侧表面设置有显示屏(6)，所述显示屏(6)的右侧设置有显示屏(7)。

[0006] 优选的，所述转轴(3)位于称重装置(2)和进料口(4)的连接处，且转轴(3)能够与所述称重装置(2)一起转动，所述装料盒(1)固定于称重装置(2)的底部，获得的数据位于所述机箱(5)外侧的显示屏(6)处显示。

[0007] 优选的，所述糙米装料盒(8)的内部镂空，使用固定滑板(12)滑动进料，内部呈现先大后下的特征，所述糙米装料盒(8)的底部设置有称重装置(11)便于称重，获得的数据在显示屏(7)显示。

[0008] 优选的，所述水平固定板(25)底部设置有上阻风板(15)降低风速，防止粉尘吹出腔体，粉末滤板(14)上侧连接有固定滑板(16)便于吹飞的谷壳滑落，所述粉末滤板(14)上端连接有下阻风板(13)用于降低风速，所述粉末滤板(14)内部有小孔便于收集固体粉末。

[0009] 与现有技术相比，本实用新型的有益效果是：

[0010] 1、此种清洁智能的砻谷机，通过设置装料盒(1)、称重装置(2)、转轴(3)、显示屏(6)、显示屏(7)和称重装置(11)，在使用砻谷机时，实验人员直接将稻谷放置在称重装置(2)内，然后通过显示屏(6)读取放置在称重装置(2)内稻谷的重量，读数结束后通过转轴(3)转动称重装置(2)将稻谷倾倒入进料口(4)内的入口，稻谷进入机器后，经过辊轴(19)处理后会脱壳处理。其中，糙米受到重力的作用会掉进糙米出料口(24)，经过固定滑板(12)滑落到称重装置(11)上，待糙米脱壳结束，显示屏(7)中会显示出米的重量。这样在进行实验用砻谷机脱壳前和脱壳后就不需要拿着样品走来走去进行称重，从而大大降低了实验人员的实验工作量，而且还能通过屏幕上的数据直接看出稻谷加工效果。

[0011] 2、此种实验用清洁智能砻谷机，通过设置降风速谷壳装料盒(9)和粉末收集盒(10)，将稻谷倾倒入进料口(4)内的入口，稻谷进入机器后，经过辊轴(19)处理后会脱壳处理。在扇叶(21)和电动机(17)的作用下，稻谷壳会随着风进入谷壳出料口(23)内。在风的作用下，大量的谷壳和米糠会被吹进降风速谷壳装料盒(9)内，在固定滑板(16)、上阻风板(15)、下阻风板(13)、上阻风板(15)的阻挡下，风的速度降低。此时产生的部分粉末固体会掉落在粉末滤板(14)上，部分风也会进入粉末滤板(14)被进一步减弱。在降风速谷壳装料盒(9)和粉末收集盒(10)容量达标后即可取出去除内部的谷壳和米糠。这些装置可以有效地阻止风将固体粉末和谷壳吹出砻谷机，造成实验室的污染。

#### 附图说明：

[0012] 图 1 为本实用新型的整体结构示意图；

[0013] 图 2 为本实用新型实验用砻谷机的剖视图；

[0014] 图 3 为本实用新型除尘称重底座的局部结构示意图；

[0015] 图 4 为本实用新型除尘称重底座的剖视图。

[0016] 图中：1、装料盒；2、称重装置；3、转轴；4、进料口；5、机箱；6、显示屏；7、显示屏；8、糙米装料盒；9、降风速谷壳装料盒；10、粉末收集盒；11、称重装置；12、固定滑板；13、下阻风板；14、粉末滤板；15、上阻风板；16、固定滑板；17、电动机；18、固定支架；19、辊轴；20、固定挡板；21、扇叶；22、固定底座；23、谷壳出料口；24、糙米出料口；25、水平固定板。

### 具体实施方式：

[0017] 下面将结合本实用新型实施例中的附图，对本实用新型实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述，显然，所描述的实施例仅是本实用新型一部分实施例，而不是全部的实施例。基于本实用新型中的实施例，本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例，都属于本实用新型保护的范围。

[0018] 请参阅图 1-图 4，本实用新型提供一种清洁智能磨谷机方案：所述(5)的上端连接处设置有进料口(4)，所述进料口(4)的一端连接有转轴(3)，所述转轴(3)的一端连接有装料盒(1)，所述装料盒(1)的底部内侧有称重装置(2)，所述机箱(5)的内部顶端设置有固定支架(18)，所述固定支架(18)的一端设置有辊轴(19)，所述辊轴(19)的一端设置有固定挡板(20)，所述机箱(5)的内部中间设置有水平固定板(25)，所述水平固定板(25)的最左侧设置有糙米出料口(24)，所述糙米出料口(24)的一端设置有谷壳出料口(23)，所述谷壳出料口(23)的一端设置有降风速谷壳装料盒(9)，所述降风速谷壳装料盒(9)的顶部设置有水平固定板(25)，所述水平固定板(25)的一端设置有上阻风板(15)，所述上阻风板(15)的一端设置有固定滑板(16)，所述固定滑板(16)一端设置有粉末滤板(14)，所述粉末滤板(14)上侧设置有下阻风板(13)，所述粉末滤板(14)下部设置有粉末收集盒(10)，所述粉末收集盒(10)左侧设置有糙米装料盒(8)，所述糙米装料盒(8)的一侧设置有固定滑板(12)，所述固定滑板(12)的底端设置有称重装置(11)，所述机箱(5)的外侧表面设置有显示屏(6)，所述显示屏(6)的右侧设置有显示屏(7)。

[0019] 优选的，所述转轴(3)位于称重装置(2)和进料口(4)的连接处，且转轴(3)能够与所述称重装置(2)一起转动，所述装料盒(1)固定于称重装置(2)的底部，获得的数据位于所述机箱(5)外侧的显示屏(6)处显示。

[0020] 优选的，所述糙米装料盒(8)的内部镂空，使用固定滑板(12)滑动进料，内部呈现先大后下的特征，所述糙米装料盒(8)的底部设置有称重装置(11)便于称重，获得的数据在显示屏(7)显示。

[0021] 优选的，所述水平固定板(25)底部设置有上阻风板(15)降低风速，防止粉尘吹出腔体，粉末滤板(14)上侧连接有固定滑板(16)便于吹飞的谷壳滑落，所述粉末滤板(14)上端连接有下阻风板(13)用于降低风速，所述粉末滤板(14)内部有小孔便于收集固体粉末。

[0022] 工作原理：首先，本说明书中提及的装料盒(1)、称重装置(11)、显示屏(6)、显示屏(7)和(17)可通过市场购买和私人定制获得，通过设置装料盒(1)、称重装置(2)、转轴(3)、显示屏(6)、显示屏(7)和称重装置(11)，在使用砬谷机时，实验人员直接将稻谷放置在称重装置(2)内，然后通过显示屏(6)读取放置在称重装置(2)内稻谷的重量，读数结束后通过转轴(3)转动称重装置(2)将稻谷倾倒入进料口(4)内的入口，稻谷进入机器后，经过辊轴(19)处理后会被脱壳处理。其中，糙米受到重力的作用会掉进糙米出料口(24)，经过固定滑板(12)滑落到称重装置(11)上，待糙米脱壳结束，显示屏(7)中会显示出米的重量。这样在进行实验用砬谷机脱壳前和脱壳后就不需要拿着样品走来走去进行称重，从而大大降低了实验人员的实验工作量，而且还能通过屏幕上的数据直接看出稻谷加工效果。通过设置降风速谷壳装料盒(9)和粉末收集盒(10)，将稻谷倾倒入进料口(4)内的入口，稻谷进入机器后，经过辊轴(19)处理后会被脱壳处理。在扇叶(21)和电动机(17)的作用下，稻谷壳会随着风进入谷壳出料口(23)内。在风的作用下，大量的谷壳和米糠会被吹进降风速谷壳装料盒(9)内，在固定滑板(16)、上阻风板(15)、下阻风板(13)、上阻风板(15)的阻挡下，风的速度降低。此时产生的部分粉末固体会掉落在粉末滤板(14)上，部分风也会进入粉末滤板(14)被进一步减弱。在降风速谷壳装料盒(9)和粉末收集盒(10)容量达标后即可取出去除内部的谷壳和米糠。这些装置可以有效地阻止风将固体粉末和谷壳吹出砬谷机，造成实验室的污染。

[0023] 尽管已经示出和描述了本实用新型的实施例，对于本领域的普通技术人员而言，可以理解在不脱离本实用新型的原理和精神的情况下可以对这些实施例进行多种变化、修改、替换和变型，本实用新型的范围由所附权利要求及其等同物限定。

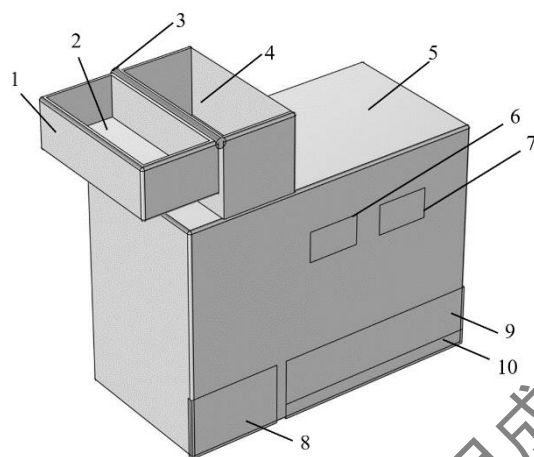


图1 本实用新型的整体结构示意图。

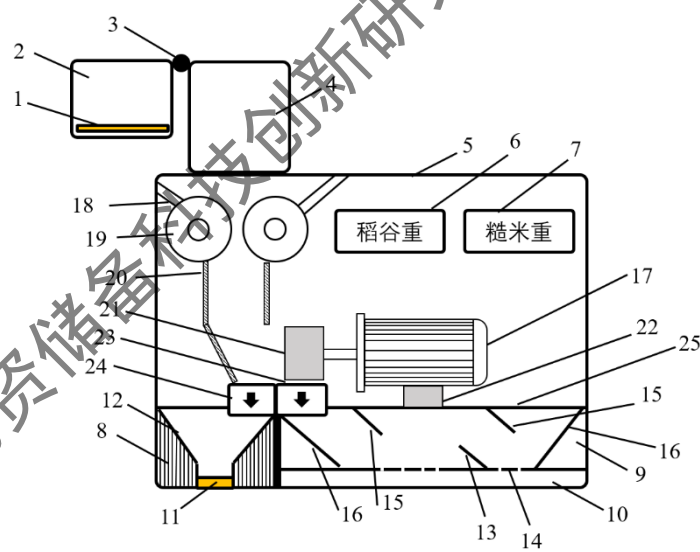


图2 本实用新型实验用砻谷机的剖视图。

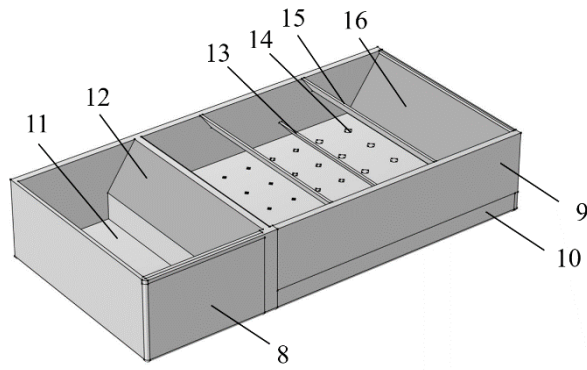


图3 本实用新型除尘称重底座的局部结构示意图。

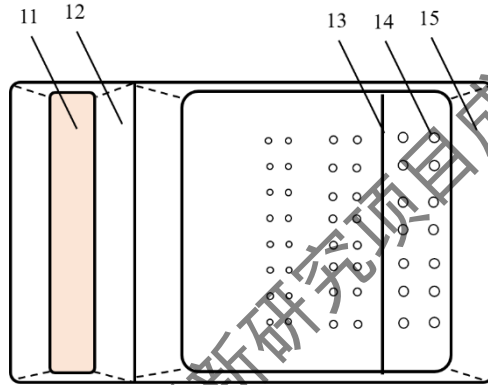


图4 本实用新型除尘称重底座的剖视图。

## 9.2 一种针对长粒稻谷的砻谷机进料调节防堵塞装置

### 摘要：

本实用新型涉及一种针对长粒稻谷的砻谷机进料调节防堵塞装置，包括进料斗，所述进料斗的下端固定安装有下列口，所述下列口的外部设置了电机，所述电机右侧开设插孔，并直接连接传动轮，传动轮上安装振动装置，振动装置上平铺筛网，所述筛网的下端设置了相互对立的第一导向板和第二导向板，使得从筛网上漏下的稻谷均匀洒落在自动传送带上，所述自动传送带由两组底座固定于砻谷机底部和顶部。流经自动传送带的稻谷通过导料斗，所述导料斗与砻谷机脱壳装置直接连接，流经导料斗的稻谷进入脱壳装置进行脱壳处理。本实用新型可以通过设置的电机、传动轮、振动棒和筛网之间的配合作用，根据稻谷的外形进行筛选、分级，使得长粒稻谷顺利进入砻谷机进行脱壳处理；通过对第一导向板和第二导

向板两者之间结构的设计，该设计起到导料的作用，避免堵塞现象的发生。通过第一、第二导向板的稻谷均匀流到自动传送带上后，匀速流进导料斗，进而通过脱壳装置进行脱壳处理。

## 权利要求：

1. 一种针对长粒稻谷的砻谷机进料调节防堵塞装置，包括进料斗（1），所述进料斗（1）的下端固定安装有下列口（2），其特征在于，所述下料口（2）的外部设置了电机（3），所述电机（3）右侧开设插孔，并直接连接传动轮（4），所述传动轮（4）上安装振动装置（5），所述振动装置（5）上平铺筛网（6），所述筛网（6）的下端设置了相互对立的第—导向板（7）和第—导向板（8），所述第—导向板（7）和第—导向板（8）的下端设置有自动传送带（9），所述自动传送带（9）由两组底座（15）固定于砻谷机底部和顶部。流经自动传送带（9）的稻谷通过导料斗（17）进入脱壳装置（18）进行脱壳处理。

2. 根据权利要求 1 所述的装置，其特征在于：所述筛网（6）呈薄圆柱型结构，所述筛网（6）的表面设置了以振动装置（5）为中心线的对称分布的呈长粒稻谷形状的若干个网洞，这样的设置可以对样品进行筛选，长粒稻谷可以通过筛网进行后续脱壳工艺，其他形状稻谷不能通过，进而达到分级效果。

3. 根据权利要求 1 所述的装置，其特征在于：所述第—导向板（7）末端和第—导向板（8）末端在筛网（6）的中心线上，且第—导向板（7）的长度是第—导向板（8）的三分之二，这样的设置可以将流过下料口的长粒稻谷先落在第—导向板上，第—导向板起到缓冲作用，随后滑落在第—导向板上，通过第—和第—导向板后的稻谷可以均匀的洒落在自动传送带上。

4. 根据权利要求 1 所述的装置，其特征在于：所述挡板（12）呈长方体型结构，挡板（12）设置有两组，两组挡板（12）关于自动传送带（9）对称分布，这样的设置可以防止洒落在自动传送带的稻谷落在传送带以外，造成损失。

5. 根据权利要求 1 所述的装置，其特征在于：所述轴承（11）中央设有导向孔，连杆（10）滑动连接在轴承（11）的导向孔内。

6. 根据权利要求 5 所述的装置，其特征在于：所述连杆（10）与两组固定板（13）连接，两组固定板（13）通过两个缓冲垫（14）与底座（15）连接固定。



说明书：

## 一种针对长粒稻谷的砻谷机进料调节防堵塞装置

技术领域：

[0001] 本实用新型涉及砻谷机的进料装置技术领域，特别涉及一种针对长粒稻谷的砻谷机进料调节防堵塞装置。

背景技术：

[0002] 砻谷机可以将稻谷脱去外壳，得到糙米。砻谷机主要由进料装置、电机装置、谷壳分离装置、变速箱和外壳机架等构成。

[0003] 传统的砻谷机在进料口处并未设计有对不同形状稻谷进行筛选、分级的装置，也并未设计很好的防堵塞装置，导致无法很好的控制进料口的进料量，会导致产生堵塞现象，进而影响砻谷机的脱壳效率，影响砻谷机的使用时长，基于此，我们提出了一种针对长粒稻谷的砻谷机进料调节防堵塞装置。

实用新型内容：

[0004] 本实用新型专利所设计的进料装置解决了现有技术中传统的砻谷机没有设置筛选机构和调节机构，用于有效控制稻谷进料速率、防止堵塞，提高生产效率。本发明的目的是提供一种创新性的自动传送带系统，以便更可靠地将稻谷引导进砻谷机，减少堵塞问题。

[0005] 一种针对长粒稻谷的砻谷机进料调节防堵塞装置，包括进料斗，所述进料斗的下端固定安装有下列口，所述下料口的外部设置了电机，所述电机右侧开设插孔，并直接连接传动轮，传动轮上安装振动装置，振动装置上平铺筛网，所述筛网的下端设置了相互对立的第一导向板和第二导向板，使得从筛网上漏下的稻谷均匀洒落在自动传送带上，所述自动传送带由两组底座固定于砻谷机底部和顶部。流经自动传送带的稻谷通过导料斗，所述导料斗与砻谷机脱壳装置直接连接，流经导料斗的稻谷进入脱壳装置进行脱壳处理。本实用新型可以通过设置的

电机、传动轮、振动棒和筛网之间的配合作用，根据稻谷的外形进行筛选、分级，使得长粒稻谷顺利进入砻谷机进行脱壳处理；通过对第一导向板和第二导向板两者之间结构的设计，该设计起到导料的作用，避免堵塞现象的发生。通过第一、第二导向板的稻谷均匀流到自动传送带上后，匀速流进导料斗，进而通过脱壳装置进行脱壳处理。

[0006] 在上述技术方案的基础上，本实用新型还做了如下改进。

[0007] 进一步，所述筛网呈薄圆柱型结构，筛网的表面设置了以振动装置为中心线的对称分布的呈长粒稻谷形状的网洞。

[0008] 进一步，所述第一导向板的长度是第二导向板的三分之二。

[0009] 进一步，所述挡板呈长方体型结构，挡板设置有两组，两组挡板关于自动传送带对称分布。

[0010] 进一步，所述轴承中央设有导向孔，连杆滑动穿过轴承的中心的导向孔与轴承连接在一起。

[0011] 进一步，所述连杆与两组固定板连接，两组固定板通过两个缓冲垫与底座连接固定。

[0012] 本实用新型的优势在于：

[0013] 1、通过设置的进料斗、下料口、电机、传动轮、振动棒和筛网之间的配合作用，可以对稻谷进行筛选、分级，利于稻谷的加工；

[0014] 2、通过对第一导向板和第二导向板两者之间结构的设计，该设计起到导料的作用，可以避免稻谷直接落在自动传送带的某一处，避免堵塞现象的发生。

[0015] 3、通过设置的自动传送带、固定板、轴承、连杆、缓冲垫和底座之间的配合作用，由于稻谷自身重力的作用和自动传送带的转动作用，使得稻谷可以均匀散落在自动传送带上，从而稻谷可以均匀进入导料斗，进行脱壳处理，进而避免导料斗处发生堵塞。

## 附图说明：

[0016] 图1为本实用新型结构示意图；

[0017] 图2为本实用新型结构电机、传动轮、振动棒和筛网配合的局部示意图；

[0018] 图3为图1中A处结构放大示意图。

[0019] 图中：1、进料斗；2、下料口；3、电机；4、传动轮；5、振动棒；6、筛网；7、第一导向板；8、第二导向板；9、自动传送带；10、连杆；11、轴承；12、挡板；13、固定板；14、缓冲垫；15、底座；16、拉杆；17、导料斗；18、脱壳装置。

### 具体实施方式：

[0020] 该处所描述的具体实施方式的具体实施例是针对本实用新型一部分的实施例，并非全部实施例。本研究领域技术人员可以依托本实用新型的原理，在本实施例基础上进行改造、变换等操作，这也在本实用新型技术方案的保护范围内。

[0021] 本实用新型提供了一种针对长粒稻谷的砻谷机进料调节防堵塞装置，包括进料斗1，所述进料斗1的下端固定安装有下料口2，其特征在于，所述下料口2的外部设置了电机3，所述电机3右侧开设插孔，并直接连接传动轮4，传动轮4上安装振动装置5，振动装置5上平铺筛网6，所述筛网6的下端设置了相互对立的第一导向板7和第二导向板8，第一导向板7和第二导向板8的下端设置有自动传送带9，自动传送带9由两组底座15固定于砻谷机底部和顶部。流经自动传送带9的稻谷通过导料斗17进入脱壳装置18进行脱壳处理。本实用新型可以通过设置的电机3、传动轮4、振动装置5和筛网6之间的配合作用，根据稻谷的外形进行筛选、分级，使得长粒稻谷顺利进入砻谷机进行脱壳处理；通过对第一导向板7和第二导向板8两者之间结构的设计，该设计起到导料的作用，避免堵塞现象的发生。通过第一、第二导向板的稻谷均匀流到自动传送带9上后，匀速流进导料斗，进而通过脱壳装置18进行脱壳处理。

[0022] 具体的，所述筛网6呈薄圆柱型结构，筛网6的表面设置了以振动装置5为中心线的对称分布的呈长粒稻谷形状的网络，通过设置的筛网6可以使长粒稻谷通过网络进行下料处理。

[0023] 具体的，所述第一导向板7末端和第二导向板8末端在筛网6的中心线上，且第一导向板7的长度是第二导向板8的三分之二，第一导向板7的作用是使得从筛网6漏下的稻谷导向第二导向板8上，第二导向板8起到导流作用，使得漏下的稻谷掉落的方向与自动传送带9的方向相反，进而使得稻谷可以均匀散

落在自动传送带 9 上。

[0024] 具体的，所述挡板 12 呈长方体型结构，挡板 12 设置有两组，两组挡板 12 关于自动传送带 9 对称分布，挡板 12 的作用是防止稻谷在运输过程中从自动传送带 9 两侧掉落造成损失。

[0025] 具体的，所述轴承 11 中央设有导向孔，连杆 10 滑动连接在轴承 11 的导向孔内，通过导向孔将设置的轴承 11 和连杆 10 固定在一起，从而使得自动传送带 9 进行旋转处理。

[0026] 具体的，所述连杆 10 与两组固定板 13 连接，两组固定板 13 通过两个缓冲垫 14 与底座 15 连接固定，两个缓冲垫 14 起到缓冲作用，防止从第二导向板 8 掉落的稻谷从自动传送带 9 上面弹起来，并跨越挡板 12 掉落造成损失。

[0027] 工作原理：

[0028] 本实用新型提供了一种针对长粒稻谷的砻谷机进料调节防堵塞装置，使用时，把整个装置安装在砻谷机的进料口处，然后电机 3 通过外接电源连通，然后通过电机 3 带动传动轮旋转，进而通过传动轮控制振动棒 5 的振动，振动棒 5 带动筛网 6 的振动速度，筛网 6 的下端设置了第一导向板 7 和第二导向板 8；自动传送带 9 侧面设置有挡板 12，挡板 12 两端固定在连杆 10 上，连杆 10 通过导向孔设置在轴承 11 上，轴承 11 通过固定板 13 和缓冲垫 14 固定于底座 15 上；自动传送带 9 另一端通过拉杆 16 固定于另一个底座 15 上；掉落在自动传送带 9 上的稻谷通过导料斗 17 进入脱壳装置 18 中进行脱壳处理；通过控制稻谷从导料斗 17 进入脱壳装置 18 中的速度，以达到防止脱壳装置 18 堵塞的目的，利于砻谷机的加工，保证脱壳稻谷的品质。

[0029] 以上所述只是针对本实用新型的比较适合的实施案例，并非对本实用新型作任何形式上的限制；本研究领域技术人员可以在不偏离本实用新型的原理的情况下，在该实施案例基础上进行的改进、变换等操作，仍然在本实用新型技术方案的保护范围内。

该处所描述的具体实施方式的具体实施例是针对本实用新型一部分的实施例，并非全部实施例。本研究领域技术人员可以在不偏离本实用新型的原理的情况下，在该实施案例基础上进行的改进、变换等操作，仍然在本实用新型技术方案的保护范围内。下面内容结合附图对本实用新型做进一步说明。

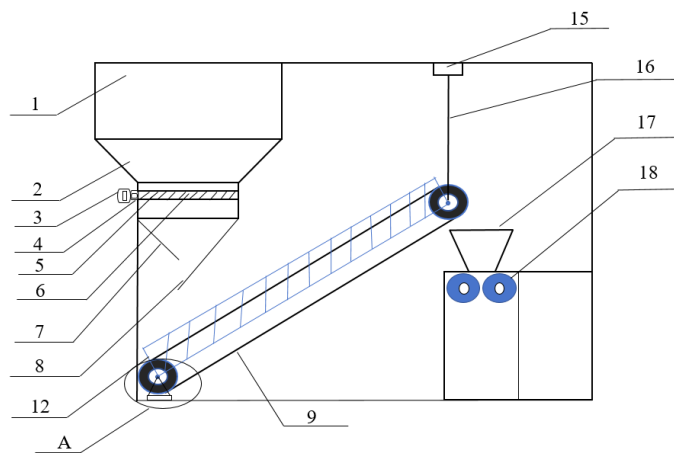


图1 本实用新型结构示意图。

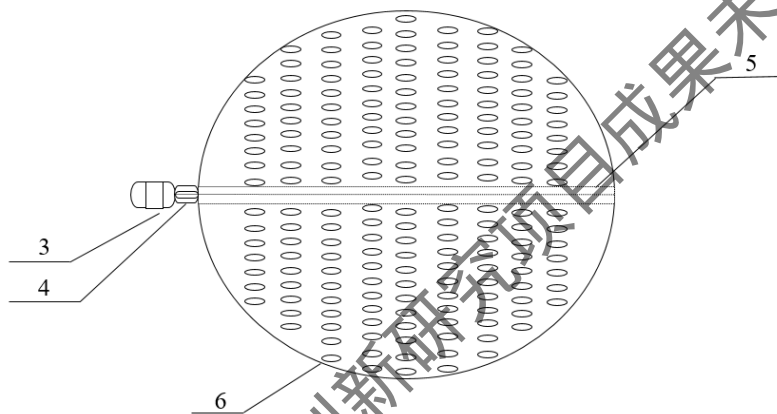


图2 本实用新型结构电机、传动轮、振动棒和筛网配合的局部示意图。

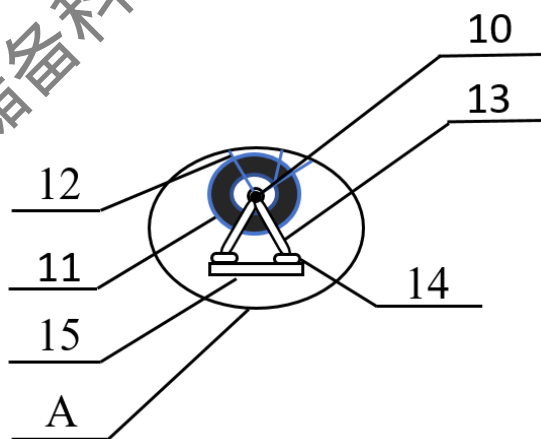


图3 A处结构放大示意图。