

淡水鱼圈养模式气送式投饲系统设计与试验

孔宪锐^{1,2} 张卿¹ 李洪波¹ 牛智有^{1,2} 黄凰^{1,2} 刘梅英^{1,2} 刘静^{1,2}

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部智慧养殖技术重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 由于传统淡水鱼池塘养殖存在废物过量堆积、水体污染严重等问题,以及中国对水产品需求的增加,工厂化循环水养殖、集装箱、圈养模式等高质量、高产量、集约化的新型淡水鱼养殖模式逐渐得到应用。针对新型淡水鱼养殖模式存在投饲劳动强度大、自动化程度低等问题,设计了一款气送式自动投饲系统,实现了定向、定时和定量投饲功能。设计了特定的四通装置和三通装置以保证饲料的定向输送;基于计算流体力学和离散单元法(Computational fluid dynamics - Discrete element method, CFD - DEM)耦合技术,初步确定了满足投饲要求的投饲速度并由此确定了风机型号;开发了以 Arduino Mega 2560 单片机为核心处理器的投饲控制系统,通过时钟模块实时获取当前时间信息,通过称量传感器实时获取料仓内物料质量信息,通过蓝牙传输预计投饲区域、投饲时间和投饲质量,从而实现定向定时定量投饲;最后试制样机并进行了性能试验,两种工况下投饲的实际投饲距离与仿真结果误差分别为 5.74% 和 9.54%,定向、定时和定量投饲可以准确实现,控制系统响应时间小于 1 s,定量投饲最大误差为 5.37%。研究结果表明,自动投饲系统结构可靠、控制系统精度较高,满足自动投饲要求。

关键词: 淡水鱼; 圈养模式; 气送式投饲系统; 定时定量; 定向送料; CFD - DEM

中图分类号: S969.31

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)08-0152-09

OSID:



Design and Experiment of Pneumatic Feeding System for Freshwater Fish in Juanyang Mode

KONG Xianrui^{1,2} ZHANG Qing¹ LI Hongbo¹ NIU Zhiyou^{1,2} HUANG Huang^{1,2} LIU Meiying^{1,2} LIU Jing^{1,2}

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Smart Farming for Agricultural Animals, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: Due to the problem of excessive waste accumulation and serious water pollution in traditional feeding mode, high-quality, high-yield and intensive feeding modes for freshwater fish were applied to meet the demand for water products in China, such as industrial aquaculture, containerized aquaculture and pond Juanyang mode. A pneumatic and automatic feeding system was designed, aiming at the problems of high intensity of labour and low degree of automation. The functions of directional, timing and quantitative feeding were realized, combined with Bluetooth control. The main content was summarized as follows: the specific four-way and three-way units were designed to ensure the directional delivery of feed. Based on Computational fluid dynamics - Discrete element method (CFD - DEM) coupling technology, the feeding speed was initially determined, and the fan was selected according to the feeding speed. The feeding system was developed with Arduino Mega 2560 processor; the time and weight information in this system were obtained by clock module and weighting sensor; the data of expected feeding time, feeding weight and feeding area was transmitted through Bluetooth module. Finally, the prototype was performed and tested. For two working conditoinis, the error of average feeding distance between experiment and simulation were 5.74% and 9.54%. The directional, timing and quantitative feeding could be achieved accurately, with response time less than 1 s. The maximum error of quantified feeding was 5.37%. The results showed that the automatic feeding system can meet the real feeding requirements with reliable structure and high-accuracy control system. This research can provide a solution for the feeding problem of freshwater fish farming.

Key words: freshwater fish; feeding mode; pneumatic feeding system; timing and quantitative; directional delivery; CFD - DEM

收稿日期: 2023-12-05 修回日期: 2024-01-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(32072765)和湖北省农机装备补短板核心技术应用攻关项目(HBSNYT202217)

作者简介: 孔宪锐(1998—),男,博士生,主要从事颗粒饲料生产加工技术与装备研究, E-mail: kxr@webmail.hzau.edu.cn

通信作者: 刘静(1981—),女,副教授,博士,主要从事农产品加工技术与装备研究, E-mail: meliujing@mail.hzau.edu.cn

0 引言

我国是水产养殖大国,占世界水产养殖总产量的 60% 以上^[1]。目前,在我国水产养殖业中,池塘养殖产量达到了全国总产量 50%。然而,池塘养殖普遍存在水环境恶化、病害频发、养殖效率不高、产品质量安全隐患多等问题^[2-3]。为解决池塘养殖模式的不足,工厂化循环水养殖^[4-6]、“跑道”^[7]、集装箱^[8-9]、圈养^[10]等淡水鱼新型养殖模式应运而生。新型养殖模式大多由许多独立的养殖区域构成,可以高效地解决水体内部污染物清理等问题。

新型养殖模式环境友好、理念先进、技术水平高,有利于促进水产养殖业的工业化深度转型,该模式的广泛应用对饲料投喂技术提出了更高的要求。一方面,投饲过多容易导致饲料浪费,污染水体;另一方面,投饲过少则会影响鱼体生长速度,降低养殖效益^[11]。目前主要采取的投喂方式仍为人工投喂。人工投喂行为广泛存在于我国水产养殖行业,其存在饲料投喂量不可控、投饲时间不可控、投喂面积不均匀以及劳动强度大等缺点^[12];传统的投饲装置虽可以代替人工抛撒饲料这一动作,但是在饲料填充、机械运转等方面仍需人工干预,人力资源投入情况并未得到明显改善,而且存在定时不够准确、系统稳定性较差和投饲效率低等问题^[13]。此外,大面积和工厂集约化鱼类养殖对投饲装置提出了更高的要求^[14]。因此,亟需研究一款投饲装备,对控制系统进行深入研究,实现定向定时定量自动投喂的功能。

近年来已有学者对水产养殖投饲装置进行了研究。孙月平等^[15]设计了一种空气螺旋桨风力驱动船载自动投饵系统,采用抛料盘实现饲料的均匀投放,并对抛撒过程进行了试验和仿真。张丰登等^[16]以 QC-TR-15 型投饲机为研究对象,采用响应曲面设计方法研究了风机风速、投饲量、间隔时间和料筒装料量对投料精准性的影响,结果表明,4 种因素的影响程度依次降低。针对池塘散养模式,邵恺悱^[17]设计了一款气力式自动投饲装置,以 Arduino Mega 2560 为控制核心,实现了饲料的定时定量投喂。随着计算机技术的发展,相关研究人员基于仿真模拟技术,如 CFD-DEM (Computational fluid dynamics-Discrete element method) 耦合技术^[18-20]、CFX 仿真技术^[21]等,针对投饲装置饵料抛撒均匀性、饲料破碎率和送料精度等问题开展了研究,并根据仿真结果获得了不同因素的影响。

已有的投饲系统大多数适用场景仍为池塘散养,投喂方式主要集中于抛撒式或圆盘式投喂,部分样机实现了定时定量投喂等功能,但不能很好地满

足多个养殖区域下精准投喂的需求。因此,针对新型淡水鱼圈养模式定时定量定向的投饲需求,设计一种气送式自动投饲系统,设计特定的四通装置和三通装置以满足定向投饲需求;采用 CFD-DEM 方法,获取不同养殖区域的优选投饲速度;通过控制系统实现定向、定时和定量投饲的功能;最后,试制样机并进行性能试验。

1 气送式自动投饲系统结构及参数设计

1.1 投饲系统整体结构

基于淡水鱼圈养模式,设计了气送式自动投饲系统,其整体结构如图 1 所示,主要包括机架、称量传感器、储料仓、叶轮卸料器、风机、四通装置、三通装置和管道等零部件。储料仓位于整体结构的上方,下接叶轮卸料器;叶轮卸料器下方与输料装置连接;输料装置前端为风机,后端分别为四通装置和三通装置,各部分通过管道连接。装置整体放置于机架上,储料仓与机架连接处放置有称量传感器。

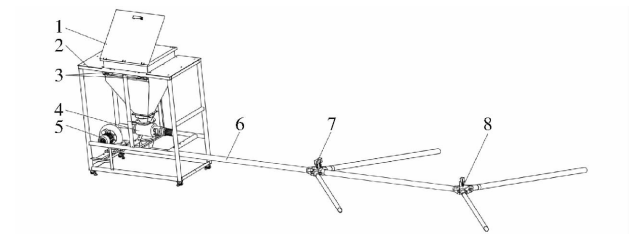


图 1 气送式自动投饲系统结构示意图

Fig. 1 Schematic of pneumatic automatic feeding system

- 1. 储料仓 2. 机架 3. 称量传感器 4. 叶轮卸料器 5. 风机
- 6. PVC 管道 7. 四通装置 8. 三通装置

该系统的工作流程为:投饲系统工作前需要输入投饲信息,即投饲方向、投饲时间和投饲质量。投饲信息设置完成后,检查料仓内饲料质量,若物料量正常,则投饲系统进入工作状态。当实时时钟与设定投饲时间一致时,电机响应,通过旋转四通装置或三通装置内部挡板控制投饲方向。风机开启,叶轮卸料器运转开始运转下料,饲料通过管道被输送至目标养殖区域内。当称量传感器检测值与设定值一致,叶轮卸料器停止下料,风机停止,挡板回归初始状态。当到达下一次投饲时间,投饲系统重复上述过程。

1.2 关键零部件设计

1.2.1 下料装置

为了实现均匀下料功能,本文对叶轮卸料器进行设计。叶轮轴和叶轮直径分别设计为 50 mm 和 100 mm。为了提高投饲效率,设计叶轮长度为 150 mm。此外,叶片数量过少会导致漏气现象产生,叶片过多则会导致饲料流动性下降。综合考虑密封性及颗粒流动性,本文选取 8 个叶片。叶轮有效容

积计算式为

$$V_c = [\pi(R_c^2 - r_c^2) - (R_c - r_c)m\delta]L_c \quad (1)$$

式中 V_c ——叶轮有效容积,mm³

R_c ——叶轮半径,mm

r_c ——叶轮轴半径,mm

m ——叶片数量

δ ——叶片厚度,mm

L_c ——叶轮长度,mm

经计算可得叶轮的有效容积为 0.7 L。为了保证称量传感器的称量精度,本研究将叶轮转速设定为 15 r/min,选取 GK-60 型齿轮减速电机进行驱动。则投饲系统投饲效率计算式为^[22]

$$G_c = 60n\rho_s V_c \varphi \quad (2)$$

式中 G_c ——投饲系统的理论投饲效率,kg/h

n ——叶轮转速,r/min

ρ_s ——饲料密度,kg/m³

φ ——填充系数,取 0.7

1.2.2 定向输料装置

设计了图 2 所示的特定四通装置和三通装置,以满足投饲装置定向投饲的需求。

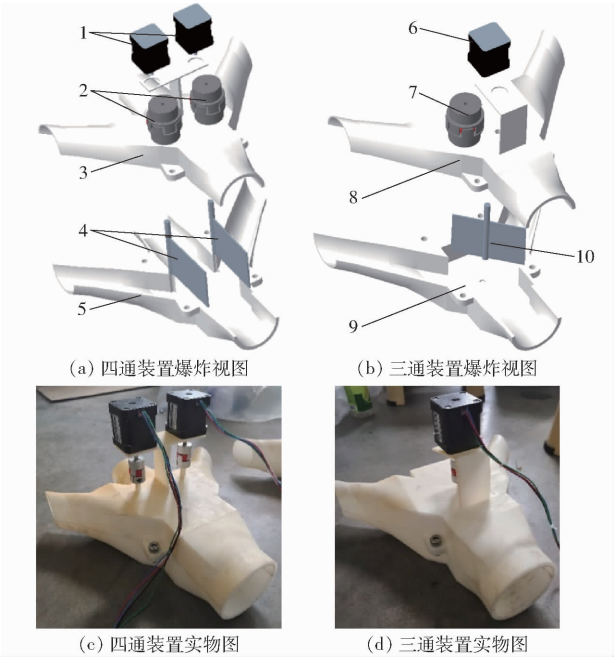


图 2 定向输料装置

Fig. 2 Directional feeding units

1、6. 电机 2、7. 联轴器 3、8. 上壳体 4、10. 挡板 5、9. 下壳体

四通装置和三通装置爆炸视图如图 2a、2b 所示,主要包括壳体、电机、联轴器和挡板等零部件。四通装置内部挡板运转角度为 45°,三通装置内部挡板运转角度为 90°。联轴器选用 GFC 梅花联轴器,电机选用 42BYG4812A 型步进电机。四通装置和三通装置实物图如图 2c、2d 所示,上下壳体及挡

板均采用 3D 打印方式获得,材质为白色树脂。

定向投饲工作过程如图 3 所示(以 4 个养殖区域为例,下同),当投饲系统工作时,由控制系统发出信号并驱使电机带动挡板旋转一定的角度。当选择投饲方案 1 时,四通装置内一侧挡板旋转 45°,三通装置内挡板为初始状态;当选择投饲方案 2 时,四通装置内另一挡板旋转 45°,三通装置内挡板为初始状态;当选择投饲方案 3 时,四通装置和三通装置内挡板均为初始状态;当选择投饲方案 4 时,三通装置内挡板旋转 90°,四通装置内挡板为初始状态。旋转后的挡板对颗粒流产生不同的导向作用,从而产生不同的流动方向。

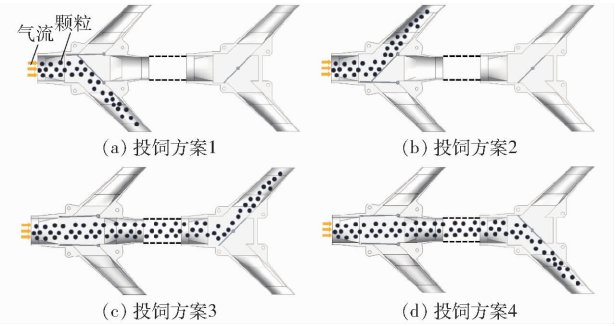


图 3 定向投饲方式示意图

Fig. 3 Schematics of directional feeding schemes

1.2.3 称量传感器

为了获取储料仓内物料存储情况,考虑储料仓和饲料的总质量,选取 4 个量程为 40 kg 的 QL601 型称量传感器进行质量测量。传感器采用并联方式连接,对称布置于机架两侧。其安装位置如图 4 所示。

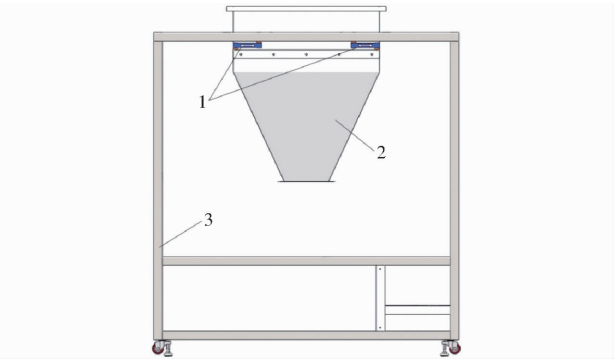


图 4 称量传感器安装示意图

Fig. 4 Schematic of weighting sensor

1. 称量传感器 2. 储料仓 3. 机架

1.3 投饲速度确定

采用 CFD-DEM 方法,对饲料在管道中的气力输送过程进行仿真分析,最终获取合适的投饲速度。由于采用 BPM(Bonded particle model)构建的饲料模型颗粒数量多、颗粒直径小,本文采用多球模型构建饲料颗粒,其基本参数根据文献[23]

设定,如表 1 所示。PVC 材料参数参照文献[24]进行设定。

表 1 多球模型基本参数

Tab.1 Basic parameters of multi-sphere model

参数	数值
密度/(kg·m ⁻³)	736.54
颗粒饲料剪切模量/Pa	3.67×10 ⁷
泊松比	0.35
颗粒饲料间碰撞恢复系数	0.54
颗粒饲料间静摩擦因数	0.23
颗粒饲料间滚动摩擦因数	0.10
饲料-PVC 间碰撞恢复系数	0.57
饲料-PVC 间静摩擦因数	0.20
饲料-PVC 间滚动摩擦因数	0.11

在进行 CFD-DEM 耦合计算之前,省略储料仓、风机等对仿真影响较小的零部件。经过简化,获得如图 5 所示的仿真模型。将图 3 中投饲方案 1 和投饲方案 2 示为工况 1,投饲方案 3 和投饲方案 4 示为工况 2。



图 5 EDEM 仿真模型

Fig.5 EDEM simulation model

在 Fluent 中,以工况 1 为例,建立管道内部流场模型,由于挡板处的尖角会导致网格质量降低甚至导致报错,因此,本文采用弯曲半径为 50 mm 的 45°弧形弯管进行优化。对整体进行结构体网格划分,圆管截面采用“O”型网格进行划分,如图 6 所示。网格尺寸为 6 mm。

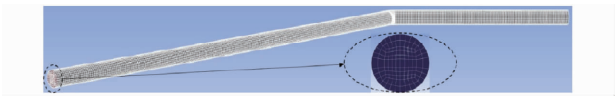


图 6 流体域结构体网格划分示意图

Fig.6 Schematic of structure mesh in fluid domain

在仿真模型准备完毕后,先在颗粒入口处设置颗粒工厂,产生一定数量的颗粒,以模拟储料仓的填料过程;待颗粒生成完毕且静止后,设定叶轮卸料器转速为 15 r/min;接着,通过耦合接口使 EDEM 软件与 Fluent 软件耦合,采用欧拉-拉格朗日方法进行气固耦合计算,选择 Realizable *k*-epsilon 湍流模型,其余基本参数设置见表 2^[20];最后,通过不断调整管道入口速度,观察饲料投饲状态,从而获取合适的投饲速度。

本研究以 4 个养殖区域为研究对象,分别对工况 1、工况 2 两种气力输送工况进行分析,其中,工况 1 输送直管道长度为 700 mm,斜管道长度为

表 2 CFD-DEM 耦合基本参数

Tab.2 Basic parameters of CFD-DEM coupling

参数	数值
EDEM 时间步长/s	1×10 ⁻⁶
Fluent 时间步长/s	1×10 ⁻⁴
湍流强度/%	4
水力直径/mm	60
粗糙高度/mm	0.001 5
粗糙常数	0.5

1 600 mm;工况 2 输送直管道长度为 5 700 mm,斜管道长度为 1 600 mm。为了防止堵塞,管道直径的选取应大于 3 倍颗粒直径,本文选择为 60 mm^[25]。投饲速度的选择需要保证颗粒顺利输送,即管道内无堵塞现象。因此,最优速度应高于无堵塞现象的最小投饲速度。为了表征颗粒堆积程度,通过 CAXA 软件提取截面内颗粒面积,如图 7 所示,定义堆积百分比 *R* 表征管道填充程度(以 3.5 s 时颗粒堆积状态为例),计算式为

$$R=\frac{A_2}{A_1+A_2}\times 100\% \tag{3}$$

式中 *A*₁——管道内部未填充部分面积,mm²

*A*₂——管道内部颗粒填充部分面积,mm²

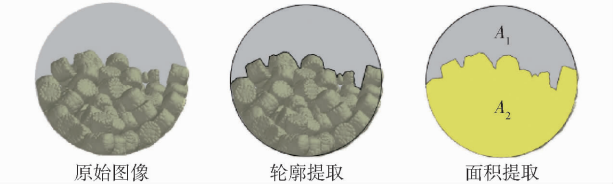


图 7 颗粒堆积程度提取

Fig.7 Extraction of particle packing degree

当管道入口速度分别为 12、14、16、18、20 m/s 时,堆积百分比分别为 62.30%、18.07%、16.42%、0 和 0。当管道入口速度小于 18 m/s 时,饲料堆积产生,且速度越小,颗粒饲料堆积越严重。因此,为了保证投饲过程的顺利进行,投饲系统最小投饲速度选择为 18 m/s。

除了饲料堆积会影响投饲过程的正常运行,管道出口处的饲料状态也是值得关注的问题,饲料抛撒范围太近或太远均会导致饲料利用率下降。在实际投饲过程中,理想的投饲距离为养殖区域中心,即投饲距离为 2 000 mm。通过仿真试验获取颗粒饲料投饲范围,即最小投饲距离和最大投饲距离的平均值,试验结果如表 3 所示。从表中可以看出,在工况 1 下进行气力输送时,投饲速度优选区间为 26~28 m/s;在工况 2 下进行气力输送时,投饲速度优选区间为 34~36 m/s。根据仿真结果,针对 4 个养殖区域,选择 CZR-LY80 型中压鼓风机作为投饲系统动力源。

表 3 气力输送仿真结果

Tab.3 Simulation results of pneumatic conveying

工况	风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	平均投饲距离/mm
1	18	793.79
	20	1 279.18
	22	1 398.34
	24	1 511.81
	26	1 896.96
	28	2 011.49
2	26	1 247.03
	28	1 654.36
	30	1 731.98
	32	1 815.63
	34	1 923.87
	36	2 034.44

2 控制系统设计

2.1 系统硬件电路设计

采用 Arduino Mega 2560 单片机作为核心处理器,其中,DM422 为步进电机驱动器,信号驱动端 PLS 与 Arduino 单片机的 PWM 端口连接,正反转控制端 DIR 和供电端口分别与 Arduino 单片机的 I/O 口相连。为使 QL601 型称量传感器的输出信号可以被 Arduino 单片机识别采集,选用 HX711 模数转换模块对其信号进行转换,其中,SCK 端口和 DT 端口分别与 Arduino 单片机的 I/O 口相连。采用 DS1302 时钟模块进行计时,其 CLK、DAT 和 RST 端口分别与 Arduino 单片机的 I/O 口相连,采用 LCD1602 模块实时显示时间信息,其 SDA 和 SCL 端口与 Arduino 单片机的通讯串口相连。采用 HC - 06 蓝牙模块作为通信模块,实现 Arduino 单片机与操作人员手机 APP 之间的通信,其 TX 和 RX 端口分别与 Arduino 单片机的 RX 和 TX 串口连接。控制系统主要硬件连接图如图 8a、8b 所示,硬件电路集成实物图和电控箱实物图如图 8c、8d 所示。

2.2 系统软件设计

基于 C/C + + 语言开发系统软件,包括主程序任务和 3 个子程序任务,其中主程序任务实现整个投饲系统的初始化,子程序任务分别实现定向、定时和定量投饲等功能。系统软件工作流程图如图 9 所示。

系统工作时从主程序开始运行,首先进行蓝牙模块、步进电机、显示屏、时钟模块、称量传感器和继电器等的初始化设置,并且获取当前质量。初始化完成后,时钟模块获取当前时间,并将当前时间打印在 LCD 显示屏上,操作人员使用手机发送数据,Arduino Mega 2560 单片机通过蓝牙模块接收数据。

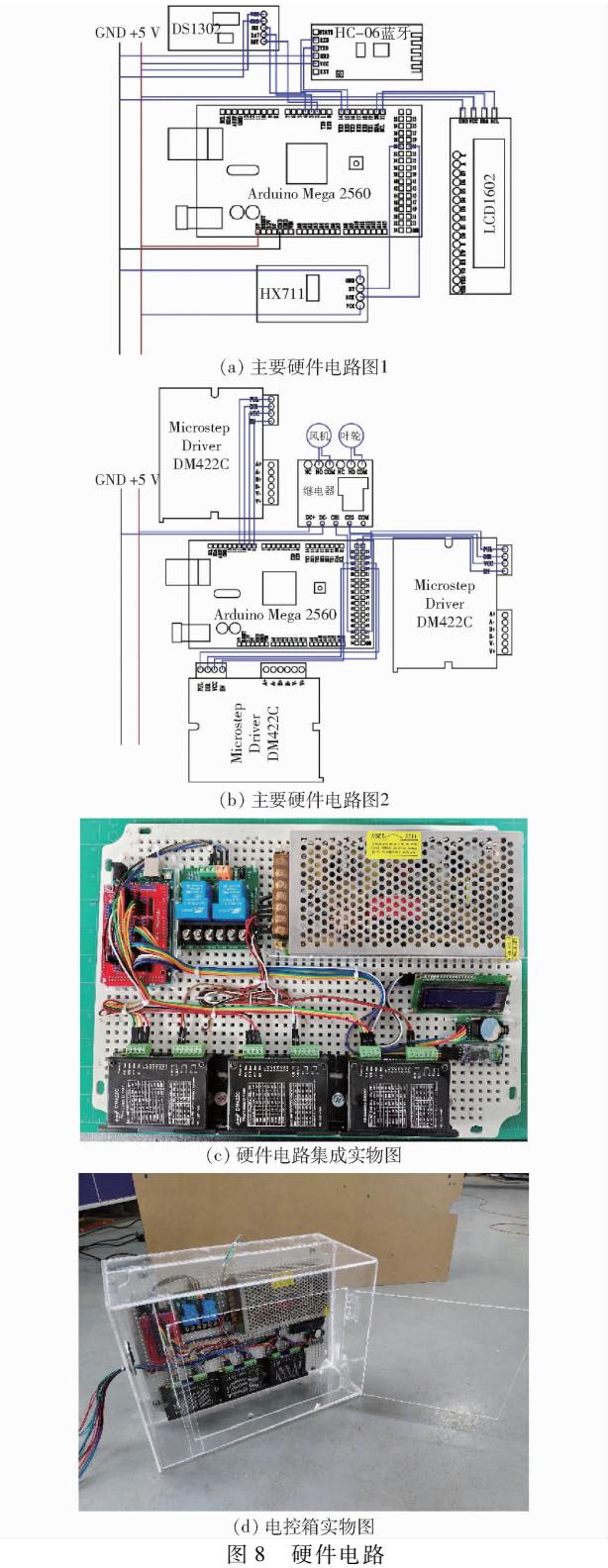


Fig. 8 Hardware circuits

数据信息包含投饲方向、投饲时间和投饲质量。当到达预定投饲时间后,Arduino Mega 2560 单片机控制称量传感器获取初始料仓质量;同时控制步进电机进行旋转,选定投饲方向的送料通道打开;对两个继电器输入高电位信号,控制风机开启,5 s 后叶轮工作,进行送料,称量传感器实时获取投饲质量;当实际投饲质量达到预设投饲质量后,对两个继电器

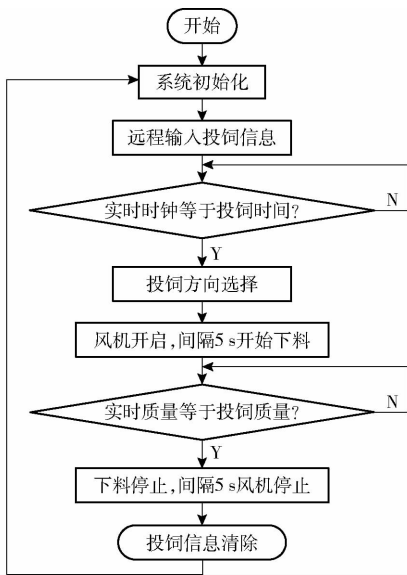


图 9 控制系统工作流程图

Fig. 9 Flowchart of control system

分别输入低电位信号, 叶轮下料器关闭, 停止下料, 间隔 5 s 后风机停止; 步进电机回归初始状态, 关闭投饲通道; 系统清除投饲方向、投饲时间、投饲质量等数据缓存, 准备下一次投饲开启。

2.2.1 定向定时定量投饲

采用手机端输入投饲信息, Arduino Mega 2560 单片机读取手机端传来的投饲信息后, 运用条件语句判断接收信息与电机编号是否相同。如果相同, 则调用电机运行程序, 相应编号的电机进行旋转; 如果不相同, 则继续比较, 电机无响应。通过循环语句控制步进电机的步数使电机旋转固定的角度, 从而带动四通装置和三通装置中挡板旋转固定的角度。

分别将预计投饲时间和实际时间赋值于两个全局变量并实时更新, 将两个全局变量进行字符串比较。如果相同, 则判定开始投饲, 系统响应; 如果不相同, 则继续比较, 系统无响应。

类似地, 分别将预计投饲质量和实际投饲质量赋值于两个全局变量并实时更新, 将两个全局变量进行字符串比较。如果相同, 则判定投饲完成, 系统停止响应; 如果不相同, 则继续投饲。

2.2.2 投饲系统扩展

当各养殖区域投饲需求一致时, 即不需要指定养殖区域投饲, 可在程序中设置默认值, 系统按照程序设置遍历执行。

为了方便对投饲装置进行扩展, 本文将电机控制程序进行函数封装, 其中, 四通装置的运行包含 2 种控制程序, 三通装置的运行包含 1 种控制程序。当养殖区域增加时, 四通装置的数量会增加, 通过四通装置控制子函数和养殖区域编号来实现定向投喂, 其具体实现方式如图 10 所示。

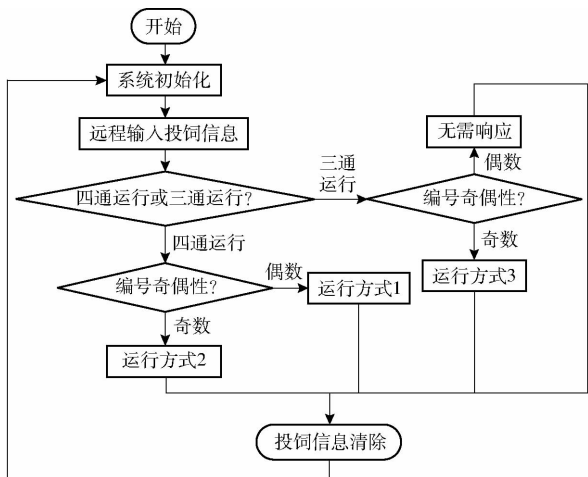


图 10 扩展后定向投饲流程图

Fig. 10 Flowchart of directional feeding after extension

3 投饲系统性能试验

完成气送式自动投饲系统的机械结构和控制系统设计后, 试制样机如图 11 所示。为验证投饲系统是否满足设计要求, 在华中农业大学机电工程训练中心对装置开展性能试验。



图 11 自动投饲系统实物图

Fig. 11 Diagram of automatic feeding system

3.1 试验样品

采用恒胜鲈鱼用膨化饲料进行投饲试验, 其密度为 736.54 kg/m^3 。随机选取 100 个颗粒, 采用数显式游标卡尺进行尺寸测量, 其直径范围为 $8.18 \sim 9.90 \text{ mm}$, 平均值为 9.08 mm , 其长度范围为 $7.46 \sim 8.58 \text{ mm}$, 平均值为 7.89 mm 。采用电子分析天平 (精度 0.0001 g) 测量其质量, 获得单颗粒平均质量为 0.3243 g 。通过 HN101-2A 型鼓风干燥箱测量饲料平均含水率为 8.17% 。

3.2 性能试验

3.2.1 称量传感器标定

将称量电路连接完毕, 采用 500 g 标准砝码对称量传感器进行标定。根据串口监测器显示读数, 通过程序调整称量传感器灵敏度, 使其示数恒定在 500 g 左右。分别将砝码放置不同位置进行 5 次测试, 串口监测器显示测量值分别为 500 、 501 、 502 、 499 、 500 g 。结果表明, 标定后的传感器可以准确测量出物体质量。

3.2.2 控制功能验证

定向定时定量控制为本投饲系统的核心功能,因此,对投饲系统定向定时定量功能进行实地试验验证。投饲系统定向定时定量功能验证于 2023 年 6 月 10 日在华中农业大学工程实训技术中心完成。试验前,将 20 kg 袋装鲈鱼用膨化饲料倒入投饲机储料仓中。通过手机端输入投饲信息,格式为“投饲方向_投饲时间_投饲质量”。投饲方向在 4 个投饲区域中随机选取,分别以 1 000、2 000、3 000 g 为投饲质量,进行投饲试验。每组试验重复 5 次,预设投饲区域、实际投饲区域、预设投饲时间、实际投饲时间、预设投饲质量和实际投饲质量均列于表 4,并根据数值计算了 5 次实际投饲质量平均值与标准差。

表 4 定向定时定量验证试验

Tab.4 Validation of timing, quantitative and directional tests						
预设质量/g	试验次序	设定区域编号	实际区域编号	预设时刻	实际时刻	实际质量/g
1 000	1	2	2	15:00:00	15:00:01	1 048.3
	2	1	1	15:02:00	15:02:01	975.3
	3	3	3	15:04:00	15:04:01	1 040.7
	4	4	4	15:06:00	15:06:01	968.3
	5	1	1	15:08:00	15:08:01	978.5
2 000	1	1	1	15:20:00	15:20:01	1 915.1
	2	3	3	15:23:00	15:23:01	2 107.4
	3	3	3	15:26:00	15:26:01	1 937.1
	4	4	4	15:29:00	15:29:01	2 010.4
	5	4	4	15:32:00	15:32:01	1 993.4
3 000	1	2	2	15:40:00	15:40:01	3 029.7
	2	2	2	15:44:00	15:44:01	2 976.7
	3	3	3	15:48:00	15:48:01	3 083.0
	4	4	4	15:52:00	15:52:01	2 920.9
	5	1	1	15:56:00	15:56:01	3 046.7

从表 4 可以看出,投饲系统定向定时定量功能可以较好地实现。所有试验中,电机响应迅速。实际投饲时间与预设投饲时间差距为 1 s,即当到达预设投饲时间时,投饲系统于 1 s 内开始工作。因此,投饲系统具有较小的响应时间,满足定时投饲的需求。当预设投饲质量为 1 000 g 时,实际投饲质量与设定值的最大误差为 4.83%,平均值为 $(1\,002.2 \pm 34.8)$ g;当预设投饲质量为 2 000 g 时,实际投饲质量与设定值的最大误差为 5.37%,平均值为 $(1\,992.7 \pm 67.2)$ g;当预设投饲质量为 3 000 g 时,实际投饲质量与设定值的最大误差为 2.77%,平均值为 $(3\,011.4 \pm 56.8)$ g。因此,投饲系统具有较高的质量检测精度,满足定量投饲需求。

3.2.3 投饲速度验证

试验前,采用 L 型毕托管和 KXYL-600B 型风

压风速仪测定不同调节频率下风机的出口速度,测量结果如图 12 所示。拟合结果表明,变压器频率 x 与风机出口风速 y 满足线性关系,关系式为

$$y = 1.07x - 0.57 \quad (R^2 = 0.9983) \quad (4)$$

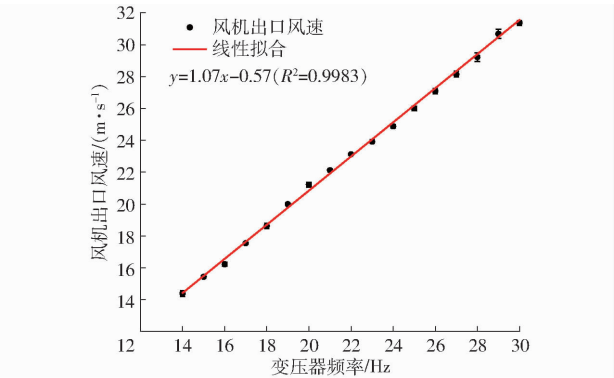


图 12 风机风速与变压器频率关系曲线

Fig.12 Relationship between fan speed and transformer frequency

在样机上进行投饲试验,投饲速度以前文仿真所得优选速度区间为起始值,直至平均投饲距离达到 2 000 mm,每组试验重复 3 次。投饲结束后,采用卷尺测量最近投饲距离和最远投饲距离,并计算出平均投饲距离,如表 5 所示。

表 5 气力输送试验结果

Tab.5 Test results of pneumatic conveying		
工况	风速/(m·s ⁻¹)	平均投饲距离/mm
1	24	1 398.33
	26	1 630.83
	28	1 896.67
	30	2 035.67
	34	1 646.67
2	36	1 840.33
	38	1 932.43
	40	2 043.67

从表 5 可以看出,工况 1 气力输送实际投饲最优输送速度区间为 28 ~ 30 m/s,工况 2 气力输送实际投饲最优输送速度区间为 38 ~ 40 m/s。与表 3 进行比较可得,当风机速度为 28 m/s 时,近距离气力输送仿真和实际试验平均投饲距离误差为 5.74%,当风机风速为 36 m/s 时,远距离气力输送仿真和实际试验平均投饲距离误差为 9.54%。实际试验结果与仿真结果有一定差别,这可能是由于仿真试验中未考虑气流损失,因此在实际输送试验中需要更高的气流速度使颗粒投饲到固定距离,且随着输送距离的增加,管道内气流损失增加。

4 结论

(1)设计了特定的四通装置和三通装置,其结构包括壳体、电机、联轴器和挡板等零部件。通过控

制系统控制挡板旋转一定角度,从而对饲料颗粒产生不同的导向作用,以满足投饲系统定向投饲的需求。

(2) 基于 CFD - DEM 耦合技术,模拟了饲料颗粒在管道中的输送过程,确定了防止管道堵塞的最小投饲速度为 18 m/s,初步确定了两种工况下输送投饲速度区间分别为 26 ~ 28 m/s 和 34 ~ 36 m/s。

(3) 对气送式投饲系统控制单元硬件和软件进行了设计。确定了以 Arduino Mega 2560 为控制核

心的硬件电路,并基于 C/C++ 语言实现了定向定时定量等功能。

(4) 完成了投饲装置性能试验,分别对称量传感器测量精度、定向定时定量控制和投饲范围进行试验测量,结果表明,传感器测量精度高,投饲系统整体响应时间小于 1 s,定量投饲最大误差为 5.37%,两种工况下输送的投饲速度区间分别为 28 ~ 30 m/s 和 38 ~ 40 m/s,平均投饲距离误差分别为 5.74% 和 9.54%。

参 考 文 献

[1] 杨宁生,袁永明,孙英泽. 物联网技术在我国水产养殖上的应用发展对策[J]. 中国工程科学,2016,18(3):57-61.
YANG Ningsheng, YUAN Yongming, SUN Yingze. Development strategy for application of the internet of things in China's aquaculture industry[J]. Strategic Study of CAE, 2016, 18(3): 57-61. (in Chinese)

[2] 苗淑彦,王际英,张利民,等. 水产动物残饵及粪便对养殖水环境的影响[J]. 饲料研究,2009(2):64-67.

[3] 黄世明,陈献稿,石建高,等. 水产养殖尾水处理技术现状及其开发与应用[J]. 渔业信息与战略,2016,31(4):278-285.
HUANG Shiming, CHEN Xiangao, SHI Jiangao, et al. Review on status of wastewater treatment technologies and their development and application in aquaculture[J]. Fishery Information & Strategy, 2016, 31(4): 278-285. (in Chinese)

[4] 薛正锐,姜辉,陈庆生. 工厂化循环水养鱼工程技术与开发[J]. 海洋水产研究,2006(4):77-81.
XUE Zhengrui, JIANG Hui, CHEN Qingsheng. Research and development of the engineering technique of circulating water system in industrial fish farming[J]. Marine Fisheries Research, 2006(4): 77-81. (in Chinese)

[5] 徐皓,张建华,丁建乐,等. 国内外渔业装备与工程技术研究进展综述[J]. 渔业现代化,2010,37(2):1-8.
XU Hao, ZHANG Jianhua, DING Jianle, et al. The review of the research progress of fishery equipment and engineering technology at home and abroad[J]. Fishery Modernization, 2010, 37(2): 1-8. (in Chinese)

[6] 朱建新,刘慧,程海华,等. 工厂化循环水养殖技术研究与产业化发展[J]. 中国水产,2022(10):41-49.

[7] BROWN T W, CHAPPELL J A, BOYD C E. A commercial-scale, in-pond raceway system for Ictalurid catfish production[J]. Aquacultural Engineering, 2011, 44(3): 72-79.

[8] 刘波. 集装箱循环水养殖技术[J]. 黑龙江水产,2019(2):33-35.

[9] 王磊,贾松鹏,舒锐,等. 陆基推水集装箱式水产养殖模式解析及发展展望[J]. 中国水产,2020(11):51-53.

[10] 何绪刚,侯杰. 池塘圈养模式研究进展[J]. 华中农业大学学报,2021,40(3):21-29.
HE Xugang, HOU Jie. Research progress on pond Juanyang mode[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(3): 21-29. (in Chinese)

[11] 徐立鸿,黄薪,刘世晶. 基于改进 LRCN 的鱼群摄食强度分类模型[J]. 农业机械学报,2022,53(10):236-241.
XU Lihong, HUANG Xin, LIU Shijing. Recognition of fish feeding intensity based on improved LRCN[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 236-241. (in Chinese)

[12] 孙月平,陈祖旭,赵德安,等. 池塘河蟹养殖精准投饵系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(5):291-301.
SUN Yueping, CHEN Zuxu, ZHAO Dean, et al. Design and experiment of precise feeding system for pond crab culture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 291-301. (in Chinese)

[13] 吴强泽,袁永明. 渔用投饲机产品现状及发展趋势[J]. 江苏农业科学,2015,43(10):458-461.

[14] 朱明,张镇府,黄凰,等. 鱼类养殖智能投喂方法研究进展[J]. 农业工程学报,2022,38(7):38-47.
ZHU Ming, ZHANG Zhenfu, HUANG Huang, et al. Research progress on intelligent feeding methods in fish farming[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(7): 38-47. (in Chinese)

[15] 孙月平,赵德安,洪剑青,等. 河蟹养殖船载自动均匀投饵系统设计与效果试验[J]. 农业工程学报,2015,31(11):31-39.
SUN Yueping, ZHAO Dean, HONG Jianqing, et al. Design of automatic and uniform feeding system carried by workboat and effect test for raising river crab[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(11): 31-39. (in Chinese)

[16] 张丰登,朱松明,张佩琦,等. 投射式投饲机投饲精准性试验[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2018,44(6):755-764.
ZHANG Fengdeng, ZHU Songming, ZHANG Peiqi, et al. Feeding precision experiment of projective feeding machine[J]. Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.), 2018, 44(6): 755-764. (in Chinese)

[17] 邵恺悌. 气送式自动投饲装置的设计与试验[D]. 武汉:华中农业大学,2021.
SHAO Kaiyi. Design and experiment of pneumatically-powered automatic feeding device[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021. (in Chinese)

[18] 赵思琪,丁为民,赵三琴,等. 基于 EDEM - Fluent 的气动式鱼塘投饲机性能优化[J]. 农业机械学报,2019,50(9):

- 130 – 139.
- ZHAO Siqi, DING Weimin, ZHAO Sanqin, et al. Performance analysis and optimization of pneumatic fishpond feeder based on EDEM – Fluent coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 130 – 139. (in Chinese)
- [19] 汪帅帅. 基于 EDEM – Fluent 耦合仿真的气力式投饵机设计与试验[D]. 武汉:华中农业大学,2022.
- WANG Shuaishuai. Design and experiment of pneumatic bait casting machine based on EDEM – Fluent coupling simulation [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [20] KONG X, LIU J, YANG T, et al. Numerical simulation of feed pellet breakage in pneumatic conveying[J]. Biosystems Engineering, 2022, 218: 31 – 42.
- [21] 张丽珍,杨朦朦,胡庆松,等. 精准投饲机送料精度仿真与分析[J]. 上海海洋大学学报,2018,27(5):703 – 709.
- ZHANG Lizhen, YANG Mengmeng, HU Qingsong, et al. Simulation and analysis of feeding accuracy of precision feeding machine[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2018, 27(5): 703 – 709. (in Chinese)
- [22] 吴建章,李东森. 通风除尘与气力输送[M]. 北京:中国轻工业出版社,2009.
- [23] 牛智有,江善晨,孔宪锐,等. 膨化颗粒饲料碰撞破碎特性分析与离散元模拟仿真[J]. 农业机械学报,2023,54(8): 371 – 380.
- NIU Zhiyou, JIANG Shanchen, KONG Xianrui, et al. Impact breakage characteristics and discrete element simulation of extruded pellet feed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 371 – 380. (in Chinese)
- [24] 温翔宇,袁洪方,王刚,等. 颗粒肥料离散元仿真摩擦因数标定方法研究[J]. 农业机械学报,2020,51(2):115 – 122,142.
- WEN Xiangyu, YUAN Hongfang, WANG Gang, et al. Calibration method of friction coefficient of granular fertilizer by discrete element simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 115 – 122, 142. (in Chinese)
- [25] ZHOU J, LIU Y, DU C, et al. Effect of the particle shape and swirling intensity on the breakage of lump coal particle in pneumatic conveying[J]. Powder Technology, 2017, 317: 438 – 448.

(上接第 151 页)

- [30] 魏思林. 基于耦合仿生机理立式香蕉秸秆粉碎还田机的优化设计[D]. 海口:海南大学,2019.
- WEI Silin. Optimal design of vertical banana straw crushing and returning machine based on coupling bionic mechanism[D]. Haikou: Hainan University,2019. (in Chinese)
- [31] 辛青青. 基于 Fluent – EDEM 的马铃薯秧粉碎抛送装置仿真与试验[D]. 泰安:山东农业大学,2020.
- XIN Qingqing. Simulation and text of potato seedling crushing and throwing device based on Fluent – EDEM [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University,2020. (in Chinese)
- [32] 王立军,刘天华,冯鑫,等. 农业和食品领域中颗粒碰撞恢复系数的研究进展[J]. 农业工程学报,2021,37(20):313 – 322.
- WANG Lijun, LIU Tianhua, FENG Xin, et al. Research progress of the restitution coefficients of collision of particles in agricultural and food fields[J]. Transactions of the CSAE,2021,37(20):313 – 322. (in Chinese)
- [33] 王自强,李粤,张喜瑞,等. 沟齿式香蕉假茎粉碎还田机设计与试验[J]. 农机化研究,2018,40(12):55 – 59.
- WANG Ziqiang, LI Yue, ZHANG Xirui, et al. Design and experiment on banana stalks disintegrator with double shafts[J]. Agricultural Mechanization Research,2018,40(12):55 – 59. (in Chinese)
- [34] FRAZZETTA T H. Feeding mechanisms in sharks and other elasmobranchs[J]. Advances in Comparative and Environmental Physiology, 1994, 18:31 – 57.
- [35] GUO J, KARKEE M, YANG Z, et al. Discrete element modeling and physical experiment research on the biomechanical properties of banana bunch stalk for postharvest machine development[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 188:106308.
- [36] JIA H, LI C, ZHANG Z, et al. Design of bionic saw blade for corn stalk cutting[J]. Journal of Bionics Engineering, 2013, 10(4):497 – 505.
- [37] 刘鹏,何进,李艳洁,等. 异速对辊式玉米秸秆粉碎还田装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(14):69 – 79.
- LIU Peng, HE Jin, LI Yanjie, et al. Design and experiment of double rollers maize stalk chopping device with different rotation speeds[J]. Transactions of the CSAE,2020,36(14):69 – 79. (in Chinese)
- [38] 张姬,于泳涛,杨启勇,等. 高留茬玉米秸秆复式割台粉碎还田装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊):42 – 49.
- ZHANG Ji, YU Yongtao, YANG Qiyong, et al. Design and experiment of smashed straw unit for high stubble maize double header[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 42 – 49. (in Chinese)
- [39] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 保护性耕作机械 第6部分:秸秆粉碎还田机:GB/T 24675.6—2021[S]. 北京:中国标准出版社,2021.