

自走式养殖粪水注射施肥机设计与试验

袁兴茂^{1,2} 吴海岩¹ 李霄鹤¹ 焦海涛¹ 胡 栋^{2,3} 张俊杰¹

(1. 河北省农业机械化研究所有限公司, 石家庄 050051; 2. 农田环境修复河北省工程研究中心, 石家庄 050051;

3. 河北省农林科学院农业资源环境研究所, 石家庄 050051)

摘要: 针对目前养殖场养殖粪水产量大、配套耕地面积小且分散, 小型粪水注射施肥机缺乏及利用率低问题, 设计了主要由底盘、罐体、吸排肥系统及开沟施肥注射器等部件组成、容量为 6 m³ 的自走式养殖粪水注射施肥机。阐述了施肥机整机结构及工作原理, 对施肥机罐体结构、吸排肥管路系统、控制监控系统、粪水均分器及取力器等关键部件进行了设计与计算, 对核心部件粪水均分器进行了流场模拟分析与优化改进, 确定了粪水均分器结构形式及各分管出口开口角度。按照设计要求对施肥机进行了试制, 并以猪场养殖粪水为原料进行了田间试验, 结果表明: 该机可实现粪水多通道多方位自动吸排、循环流动、注射断流及防堵监测报警等功能, 施肥机行进速度为 4 km/h 时, 注射深度为 92.8 mm, 注射深度稳定系数为 94.6%, 各行施肥量一致性变异系数为 5.3%, 各项指标与设计值相符, 且满足农艺要求。

关键词: 养殖粪水; 施肥机; 注射; 自走式

中图分类号: X713; S224.21 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)S2-0084-07

Design and Experiment of Self-propelled Fecal Water Injection Fertilizer Applicator

YUAN Xingmao^{1,2} WU Haiyan¹ LI Xiaohe¹ JIAO Haitao¹ HU Dong^{2,3} ZHANG Junjie¹

(1. Hebei Agricultural Mechanization Research Institute Co., Ltd., Shijiazhuang 050051, China

2. Farmland Environmental Restoration of Hebei Engineering Research Center, Shijiazhuang 050051, China

3. Institute of Agro-resources and Environment, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: In order to overcome the shortcomings of farms, such as high fecal water yield, small and scattered supporting arable land area, lack of small fecal water injection fertilization machine, low utilization rate of fecal water, a kind of equipment of self-propelled fecal water injection fertilizer applicator was developed. The capacity of the machine was 6 m³, mainly composed of chassis, fertilizer tank, suction and discharge system and trenching fertilization syringe and other components. The complete machine structure and operational principle of the equipment were introduced. The research focused on the key components of the fertilizer applicator, such as tank structure, suction and discharge pipe system, control and monitoring system, fecal water divider and power extractor, which were designed and calculated. When the machine worked, it can realize the functions of fecal water multi-channel and multi-directional automatic suction and discharge, constant speed cruise, liquid circulating flow in the tank, furrow fertilization, injection cut-off and anti-blocking monitoring and alarm. According to the design requirements, the fertilizer applicator was trial produced, and the field experiment was carried out with pig farm manure as raw material. Experiment and test results showed that when the speed of the fertilizer applicator was 4 km/h, the injection depth was 92.8 mm, the stability coefficient of injection depth was 94.6%, and the consistency variation coefficient of fertilizer application was 5.3%. All indexes were consistent with the design value and met the agronomic requirements. The research result provided reference for the research and development of small self-propelled fecal water injection fertilization equipment.

Key words: fecal water; fertilizer applicator; injection; self-propelled

收稿日期: 2022-06-15 修回日期: 2022-08-10

基金项目: 河北省农林科学院科技创新专项(2022KJCXZX-NJS-3)、河北省现代农业产业技术体系生猪创新团队建设项目(HBCT2018110206)和河北省重点研发计划项目(21327305D)

作者简介: 袁兴茂(1985—),男,副研究员,主要从事农业废弃物资源化利用技术与装备研究,E-mail: hsyuanxingmao@163.com

通信作者: 张俊杰(1986—),女,工程师,主要从事农业生产机械自动化及装备研究,E-mail: 564810768@qq.com

0 引言

近年来,随着产业结构的调整和畜禽养殖业的不断发展,畜禽养殖集约化与规模化得到快速发展,畜禽养殖成为农业发展、农田增收重要支柱产业的同时,也导致了畜禽粪污排放密度的增加^[1],第二次全国污染源普查公报显示,2017 年畜禽养殖业水污染物化学需氧量 1 000.53 万 t^[2],牛、猪和家禽年粪污产生量约为 34.9 亿 t^[3],综合利用率不足 60%,绝大多数规模化养殖场缺乏必要的配套措施和设备,产生的粪污对养殖环境的空气、土壤、水质等造成了严重污染,已成为我国环境污染的主要来源^[4-9]。

解决养殖污染问题的根本措施是将畜禽粪污进行资源化利用,采取种养结合和农牧结合方式,使畜禽粪污转化为有机肥回归农田^[10-11],其中肥料化是最主要最经济的利用方式^[12]。将养殖废水转化为液态肥施用到田间,起到改善土壤、增加土壤肥力、提高作物产量的作用,同时解决了粪污的污染问题,从而被广泛应用^[13-19]。国外对于液体肥施用机械研究较早,技术比较成熟,但其价格昂贵、机型庞大,在国内应用并不广泛^[20-22]。我国液体肥料使用较晚,主要从国外进口,国产机型种类较少,且多为牵引式,自走式液体施肥机械设计 & 作业参数优化等关键技术的研究比较匮乏,同时相应配套设施还很不完善,相比于固体粪,液体肥料还田难度高,施用主要依靠人工、半机械完成,面临着劳动强度大、肥料浪费严重、作业效率与自动化程度低以及缺少罐内循环技术造成粪水沉淀堵塞管道等问题^[23-25]。

针对上述问题,并结合我国种养结合循环农业基本现状,本文设计一种自走式养殖粪水开沟注射施肥机,完成粪水自动吸排、均匀分配、精量注射等作业,以期为国内液体肥还田施用技术提供配套装备及相关机型设计提供参考。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

自走式养殖粪水注射施肥机主要由驾驶室、底盘、动力行走系统、罐体、吸污泵、流量计、电动注液控制阀、管路系统、均分器、悬架连接装置、液压升降器、开沟施肥注射器、取力器、爬行梯、防护栏、定速巡航系统、智能控制系统等组成,整机结构如图 1 所示。

养殖粪水注射施肥机采用四轮驱动工程汽车底盘,底盘上安装椭圆式结构的贮肥罐体,罐体末端设有粪水均分器,在粪水均分器下方与施肥机尾部设

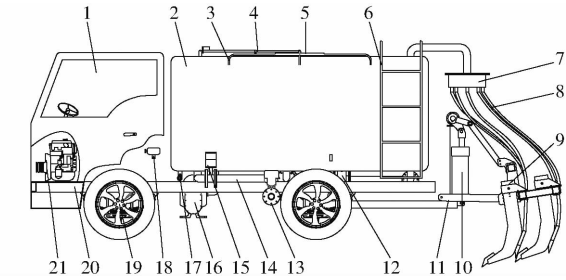


图 1 自走式养殖粪水注射施肥机结构示意图
Fig.1 Schematic of self-propelled fecal water injection fertilizer applicator

1. 驾驶室 2. 贮肥罐体 3. 防护栏 4. 电动推门 5. 直注孔/维修孔 6. 爬行梯 7. 均分器 8. 输液软管 9. 开沟施肥注射器 10. 液压升降器 11. 悬挂装置 12. 流量计 13. 左/右吸污口 14. 管路系统 15. 电动注液控制阀 16. 吸污泵 17. 残渣排出口 18. 取力器 19. 行走系统 20. 底盘 21. 发动机

有粪水开沟施肥注射器,均分器与开沟注射器通过输料软管相连。开沟施肥注射器采用深松式施肥犁头,通过悬挂拉杆、液压升降器与悬挂装置连接,悬挂装置与施肥机后桥固定连接,管路系统设置在贮肥罐体与施肥机底盘之间,管路上设有吸污泵、电动注液控制阀、压力表、流量计等,吸污泵位于贮肥罐体右前端,吸污泵动力从发动机获得,经取力器、传动轴传递。流量智能调控系统设置在驾驶室內的仪表盘旁侧,智控系统电源为施肥机蓄电池(24VDC),同时驾驶室内设有液位监视仪器,供驾驶员实时监测贮肥罐内液位情况。养殖粪水注射施肥机主要设计参数如表 1 所示。

表 1 养殖粪水注射施肥机主要设计参数
Tab.1 Design parameters of fecal water injection fertilizer applicator

参数	数值
罐体容积/m ³	6
施肥行数	6
施肥行距/mm	150 ~ 600
注射深度/mm	80 ~ 150
注射深度稳定系数/%	≥90
各行施肥量一致性变异系数/%	≤10
工作速度/(km·h ⁻¹)	3.5 ~ 5.0

1.2 工作原理

养殖粪水注射施肥机作业主要有粪水抽取和田间开沟注射施肥两个环节。粪水抽取时,吸污泵为动力源,以施肥机蓄电池为智能控制系统电源,将施肥机静置于养殖场的集水沉淀池旁,将带有过滤网的软管置于沉淀池内,软管另一端与施肥机粪水进口(左右均可)连接,开启流量智能调控系统中的吸肥开关,电动注液控制阀通电打开,同时发动机通过取力器将动力传递至吸污泵,水泵转动将粪水输送

至罐体内,若养殖场集水池配备吸污泵,也可通过吸污泵将粪水直接从罐体直注孔注入罐体。田间开沟注射施肥时,通过液压升降器调整好开沟施肥注射器入土深度,开启流量智能调控系统中的注射开关,将罐体内的粪水由水泵、连接注射管路的电动注液控制阀开启后通过粪水均分装置均匀、定量地注射至各个开沟施肥器内,由粪水开沟注射装置开沟后注入田间,同时驾驶员可以根据地形状况开启定速循环系统,使施肥机保持定速行驶。

2 关键部件设计

2.1 罐体结构

参考国外研制的粪污撒施机类型,结合我国现状,根据我国农用车辆底盘通用机型状况,将施肥机底盘宽度设计为 2 m,罐体容积设计为 6 m³。为避免注射机在工作过程由于启动、制动、爬坡及危险情况躲闪时,液体涌动对罐体产生冲击造成罐车重心偏移的现象,在罐体内部设有竖向防晃板。根据文献[26]的研究,防晃板面积 50% 与防晃板面积 60% 的防波效果类似,及《液化气体运输车》标准中装载普通液体或液化气体的罐车,最大体积充装率不应超过 92% 的规定,本设计防晃板面积为罐体横截面的 50%,充装率为 90%,罐体与防晃板结构如图 2 所示。罐体采用 6 mm 厚不锈钢,长 2.8 m,宽 1.78 m,高 1.5 m,罐体内部设有两块开有贯气孔、厚度为 10 mm 的不锈钢防晃板,防晃板上部通过螺栓与罐体内壁连接板连接,防晃板下部与罐体底部形成检修孔,便于检修与液体流动。

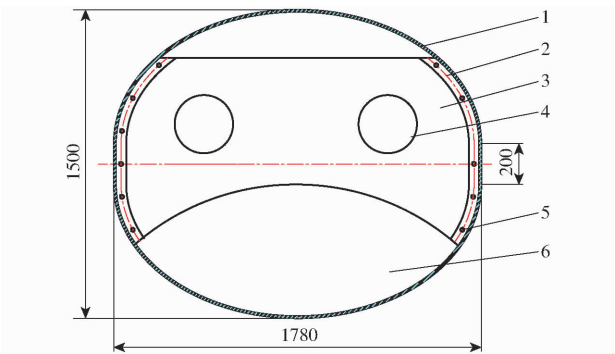


图 2 罐体结构图

Fig. 2 Tank structure diagram

1. 罐体 2. 连接板 3. 防晃板 4. 贯气孔 5. 连接螺栓 6. 检修孔

2.2 系统管路设计

管路系统主要由吸污泵、过滤器、左吸污管路、右吸污管路、循环管路、粪水注射管路、排污管路、电动注液控制阀、流量计、压力表等组成,安装在罐体与底盘之间。管路系统布局如图 3 所示。

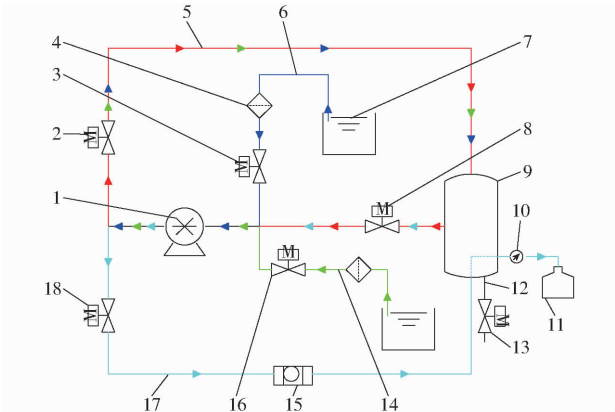


图 3 吸排管路布局图

Fig. 3 Schematic of suction drainage pipes

1. 吸污泵 2. 电动注液控制阀 4 3. 电动注液控制阀 1 4. 过滤器 5. 循环管路 6. 左吸污管路 7. 集水池 8. 电动注液控制阀 3 9. 贮肥罐体 10. 压力表 11. 粪水均分器 12. 排污管路 13. 电动注液控制阀 6 14. 右吸污管路 15. 流量计 16. 电动注液控制阀 2 17. 粪水注射管路 18. 电动注液控制阀 5

为便于施肥机粪水抽取,设计了左/右吸污管路,粪水抽取时可根据集水池位置选择启用靠近施肥机的吸污管路,如启用左吸污管路系统时,电动注液控制阀 1 与 4 打开,其他控制阀关闭,粪水经吸污泵通过过滤器与左吸污管路(蓝色箭头路线)进入罐体,启用右吸污管路系统时,电动注液控制阀 2 与 4 打开,其他控制阀关闭,粪水经过滤器、吸污泵与右吸污管路(绿色箭头路线)进入罐体。施肥机在田间进行注射施肥时,电动注液控制阀 3 与 5 打开,其他控制阀关闭,粪水由罐体经吸污泵与流量计通过粪水注射管路(青色箭头路线)将粪水输送至粪水均分器,均分器通过输液软管将粪水输送至开沟注射器,施肥机进行田间注射施肥作业。考虑到施肥机运输与长时间停止时,粪水中杂质易沉淀,增设粪水混合循环路线,循环路线开启时,电动注液控制阀 3 与 4 打开,其他控制阀关闭,粪水由罐体通过吸污泵经粪水混合循环管路(红色箭头路线)进入罐体,实现罐体内粪水循环流动。施肥机闲置或贮存时,罐内残余粪水可以通过排污管路进行排放,此时电动注液控制阀 6 打开,其他控制阀关闭。

2.3 污水泵选取与取力器设计

根据施肥机高度、集水池深度及施肥工作要求,选取 ZY-3A 型吸污泵,流量为 80 m³/h,扬程 60 m,吸程高度 10 m,输入轴转速 800 ~ 1 000 r/min,经测试污水泵转速在 955 r/min 时处于最佳运行状态。污水泵动力源由发动机前端输出轴提供,输出轴转速为 985 r/min,为满足水泵额定转速,需设计一款传动比在发动机与水泵转速之比范围内的取力器,考虑到水泵安装位置与发动机距离较远,将取力器输入端与发动机输出端采用带传动,取力器输出端

与水泵输入端采用万向轴传动。

发动机与水泵转速之比在 0.98 ~ 1.23 之间,最佳传动比为 1.03,将发动机输出端与取力器输入端设计为基准直径 200 mm 的带轮,取力器内部采用齿轮传动,输入端与输出端分别采用齿数为 31 与 32 的圆柱齿轮。因此,取力器传动比为 1.03,经取力器取力变速后,水泵转速为 954.22 r/min,接近水泵最佳转速。

2.4 粪水均分器

2.4.1 均分器设计与模拟分析

均分器作用是将总管中的粪水均匀稳定地分配到各个分管中,主要由壳体、总管和分管等组成,壳体内径为 430 mm,主管内径为 100 mm,分管内径为 40 mm,分管数设计为 6 个,与开沟注射施肥器配套,外形结构如图 4 所示。均分器设计完成后,利

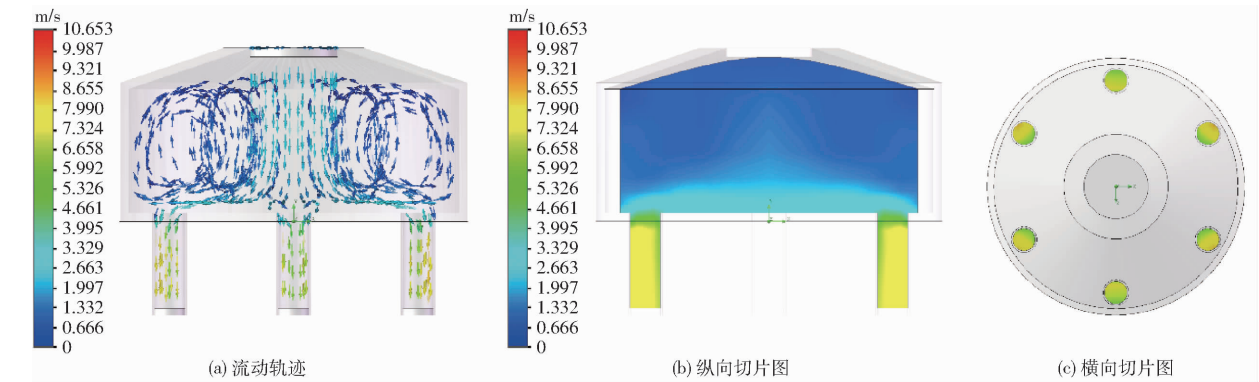


图 5 流体模拟仿真
Fig. 5 Fluid simulation of fecal water equalizer

由图 5a 可以看出,液体在流入分管时由于管径变小,形成压差,流速较快,同时在均分器内部产生大量旋流,流态紊乱,稳定性较差;由图 5b、5c 可以看出,各分管内液体流速及流量分布呈对称性分布,相邻两管液体流速及流量分布相反。

2.4.2 均分器改进与模拟分析

为了保证液体在均分器内稳定性及各分管液体均匀性,对均分器进行了改进,设计了旋流防止器与环形漏斗分管接头,其中旋流防止器叶片数设计为 6 个且环形均布,底部增设缓冲溢流区;均分器底部各分管出口由圆孔改为环形长孔,开孔角度为 40°,宽度为 125 mm,漏斗接头锥体高度 100 mm,呈环形分布,结构图如图 6 所示。模拟结果如图 7 所示。

由图 7a 可以看出,液体经旋流防止器叶片一次分配后沿均分器内壁流入各分管漏斗接头进行二次分配,经漏斗变径形成二次压差,在分管出口达到最大值,在防止器底层有较小旋流,流态有序且稳定;由图 7b、7c 可以看出,各分管内液体流速及流量分布一致,满足设计要求。

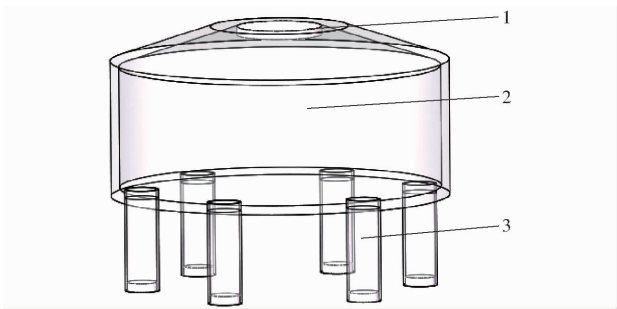


图 4 粪水均分器
Fig. 4 Structure diagram of fecal water equalizer
1. 总管入口 2. 壳体 3. 分管

用流体分析软件对其粪水分配均匀性进行了模拟分析,液体设为水,边界条件设置为总管入口环境压力 0.2 MPa,各分管出口压力为大气压,模拟结果如图 5 所示。

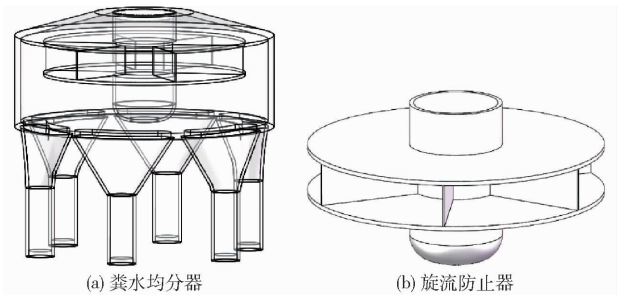


图 6 改进后粪水均分器
Fig. 6 Structure diagrams of improved fecal water equalizer

2.5 智能控制系统

该控制系统为智能粪水注射装备的核心,由其实现沉淀池内的粪水抽取与田间注射工作。该控制系统由电源、继电器、开关、时间继电器、注液控制阀、液位传感器、液位报警器、防堵传感器、断流传感器、异常报警器等组成。控制系统工作原理图如图 8 所示。

由集水沉淀池向贮肥罐内抽取粪水时,控制电源与工作电路总开关接通,吸肥与注射双向开关旋至吸肥挡,通过左右吸肥开关选择左或右吸肥,如左

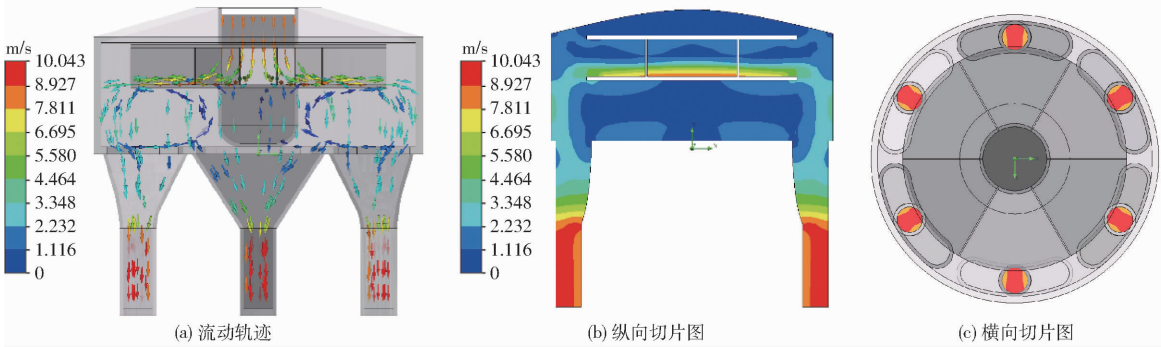


图7 改进后流体模拟仿真

Fig.7 Fluid simulation of improved fecal water equalizer

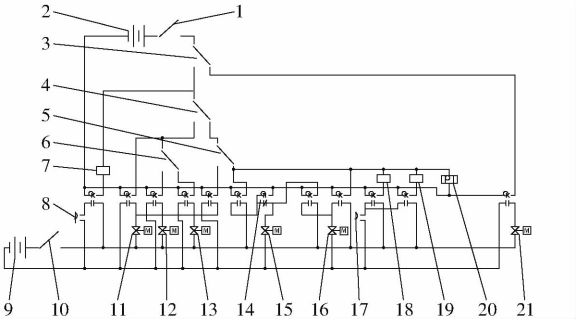


图8 控制系统工作原理

Fig.8 Working principle diagram of control system

1. 控制电源总开关 2. 控制电源 3. 吸排控制双向开关 4. 吸肥与注射双向开关 5. 循环注射双向开关 6. 左右吸肥开关
7. 液位传感器 8. 液位报警器 9. 工作电源 10. 工作电路总开关 11. 电动注液控制阀 4 12. 电动注液控制阀 1 13. 电动注液控制阀 2 14. 时间继电器 15. 电动注液控制阀 5 16. 电动注液控制阀 3
17. 注射异常报警器 18. 防堵传感器 19. 断流传感器 20. 流量计 21. 电动注液控制阀 6

吸肥接通时,电动注液控制阀 1 与 4 通电打开,实现左吸肥;右吸肥接通时,电动注液控制阀 2 与 4 通电打开,实现右吸肥。施肥机在田间进行施肥注射作业时,吸肥与注射双向开关、循环注射双向开关旋至注射挡,电动注液控制阀 3 与 5 通电打开,实现粪水注射,通过时间继电器设定电动注液控制阀 5 通电时长来调节阀 5 转动角度,以便控制施肥流量;当罐内粪水需要实现循环流动时,将循环注射双向开关旋至循环挡,电动注液控制阀 3 与 4 通电打开,实现罐内粪水循环流动。罐内残余粪水需排放时,将吸排控制双向开关旋至排污挡,电动注液控制阀 6 通电打开,进行排污。

为便于及时监测罐内粪水液位情况,防止粪水吸取时液位过高造成粪水溢流与进行注射作业时液位过低造成注射排空现象,增设液位传感器与报警系统,当液位高于或低于液位设定值时,液位传感器向报警器发送信号,报警器接收信号并报警提示。同时为避免施肥机在注射施肥时出现施肥管堵塞与断流的现象,增设管路防堵与断流传感器,当某行管

路出现堵塞或断流时,防堵与断流传感器向报警器发送信号,报警器接收信号并报警,提示驾驶员停机检查。

3 田间性能试验

按照本设计方案对养殖粪水注射施肥机进行了试制,机具如图 9 所示,并进行了田间试验。试验以注射深度、注射深度变异系数、注射深度稳定性系数、各行注射量变异系数作为主要指标,综合评价自走式养殖粪水注射施肥机工作性能及注射施肥效果。



图9 机具实物图

Fig.9 Physical diagram of implement

3.1 试验条件

田间试验于 2022 年 4 月 8 日在河北省辛集市某种猪场试验基地进行。地块规整,长度为 150 m,宽度为 60 m,土壤质地壤土,土壤含水率 15% ~ 22% (0 ~ 10 cm 土层),土壤硬度 0.75 ~ 0.98 MPa,环境温度 15.5 ~ 27.8℃,施肥原料为猪场产生的粪水经 90 d 沉淀无害化后的液体。

3.2 试验设备及方法

试验设备为钢卷尺、钢板尺、电子秒表、电子天平、大容量筒,钢卷尺用于测量工作区域尺寸,钢板尺用于测量注射深度,电子秒表用于校准施肥机田间作业时的工作速度,大容量筒与电子天平用于测量施肥量。设定试验地块中间 100 m 为工作平稳区,试验区宽度作为测量区域,在工作平稳区施肥机行进速度设定为 4 km/h。注射深度测量采用 5 点

取样法,测量点选取四边形对角线均分点,在平稳工作区取 5 个测试区测量并记录;各行施肥量测量采用定点间断测量法,施肥机在工作区域任意地点定点间断注射,电动注液注射控制阀开启角度为 45°,注射时间为 30 s,间隔时间为 1 min,重复 5 次。

3.3 试验结果与分析

自走式养殖粪水注射施肥机注射深度试验数据如表 2 所示。

表 2 注射深度试验数据
Tab.2 Injection depth test data mm

测试区	测试点序号				
	1	2	3	4	5
A	90	85	98	80	87
B	98	90	108	89	95
C	87	101	99	93	105
D	84	81	93	80	85
E	101	98	91	108	93

稳定性系数 U 计算式为

$$U = 1 - V$$

式中 V ——注射深度变异系数, %

U ——注射深度稳定性系数, %

由表 2 中数据计算得出注射深度平均值 a 为 92.8 mm,注射深度变异系数 V 为 5.4%,注射深度稳定性系数 U 为 94.6%,满足设计要求。

自走式养殖粪水注射施肥机各行注射量测试数据如表 3 所示。

由表 3 中各行排肥量试验数据计算得出施肥排量平均值为 15.5 kg,即 0.52 kg/s,各行排肥量变异系数 c 为 5.3%,满足设计要求。在该试验条件下,施肥机工作效率约 0.3 hm²/h,每公顷施肥量约

37.5 t。

表 3 注射排肥量试验数据
Tab.3 Experimental data of fertilizer displacement
by injection kg

试验 组号	测试行序号					
	1	2	3	4	5	6
A	15.6	16.2	15.2	14.5	16.4	15.5
B	15.4	15.8	16.7	15.1	17.5	16.4
C	14.2	13.9	13.6	14.6	13.8	14.2
D	14.9	13.5	15.5	16.4	14.8	16.7
E	15.8	17.8	16.7	14.9	17.3	15.6

4 结论

(1)针对目前国内缺乏小型粪水注射施肥机,结合我国种养结合循环农业现状及养殖场配套耕地面积基本情况,设计了主要由底盘、罐体、吸排肥系统、控制监测系统和开沟施肥注射器、粪水均分器等部件组成的自走式养殖粪水注射施肥机。施肥机容量为 6 m³,配套 6 行开沟施肥注射器,可满足行距 150 ~ 600 mm、注射深度 80 ~ 150 mm 的注射施肥要求。

(2)对施肥机罐体结构、吸排肥管路系统、控制监控系统、粪水均分器及取力器等关键部件进行了设计与计算,施肥机可实现粪水自动吸排、循环流动、注射器断流及防堵监测报警等功能。

(3)田间试验结果表明,在施肥机行进速度为 4 km/h 时,施肥注射深度为 92.8 mm,注射深度稳定系数为 94.6%,施肥量为 0.52 kg/s,各行施肥量一致性变异系数为 5.3%,各项指标与设计值相符,且满足农艺要求。

参 考 文 献

[1] 袁兴茂,李霄鹤,吴海岩,等. 规模化猪场固粪好氧快速发酵工艺与设备研究[J]. 农业机械学报,2021,52(9):355-360. YUAN Xingmao, LI Xiaohe, WU Haiyan, et al. Design and experiment of rapid compost process and equipment by using solid manure on scale pig farm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9):355-360. (in Chinese)

[2] 中华人民共和国环境保护部,中华人民共和国国家统计局,中华人民共和国农业农村部. 第二次全国污染源普查公报[J]. 环境保护,2020,48(18):8-10.

[3] 范龙杰. FY80 粪污撒施机的设计与研究[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院,2019. FAN Longjie. Design and research on FY80 slurry spreader[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2019. (in Chinese)

[4] 吴浩玮,孙小淇,梁博文,等. 我国畜禽粪便污染现状及处理与资源化利用分析[J]. 农业环境科学学报,2020,39(6):1168-1176. WU Haowei, SUN Xiaoqi, LIANG Bowen, et al. Analysis of livestock and poultry manure pollution in China and its treatment and resource utilization[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(6):1168-1176. (in Chinese)

[5] 武淑霞,刘宏斌,黄宏坤,等. 我国畜禽养殖粪污产生量及其资源化分析[J]. 中国工程科学,2018,20(5):103-111. WU Shuxia, LIU Hongbin, HUANG Hongkun, et al. Analysis on the amount and utilization of manure in livestock and poultry breeding in China[J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(5):103-111. (in Chinese)

[6] 李文哲,徐名汉,李晶宇. 畜禽养殖废弃物资源化利用技术发展分析[J]. 农业机械学报,2013,44(5):135-142. LI Wenzhe, XU Minghan, LI Jingyu. Prospect of resource utilization of animal faeces wastes[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5):135-142. (in Chinese)

[7] 袁兴茂,范国昌,陈林,等. 畜禽粪便高温快速发酵装备设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(增刊):413-418.

- YUAN Xingmao, FAN Guochang, CHEN Lin, et al. Design and experiment of high temperature and rapid fermentation equipment for livestock and poultry excrement[J]. Transactions of the Chinese Society for Ageicultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 413 – 418. (in Chinese)
- [8] 张安琪, 黄光群, 张绍英, 等. 好氧堆肥反应器试验系统设计与性能试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 156 – 161. ZHANG Anqi, HUANG Guangqun, ZHANG Shaoying, et al. Design and test on an experimental aerobic composting reactor system[J]. Transactions of the Chinese Society for Ageicultural Machinery, 2014, 45(7): 156 – 161. (in Chinese)
- [9] 孙晓曦, 崔儒秀, 马双双, 等. 智能型规模化膜覆盖好氧堆肥系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 356 – 362. SUN Xiaoxi, CUI Ruxiu, MA Shuangshuang, et al. Design and test on large-scale semi-membrane-covered compost system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 356 – 362. (in Chinese)
- [10] 杨延强, 负莹莹, 陈兆英, 等. 牵引式液态肥喷洒机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 159 – 167. YANG Yanqiang, YUN Yingying, CHEN Zhaoying, et al. Design and experiment of trailed liquid fertilizer sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 159 – 167. (in Chinese)
- [11] 王德福, 黄会男, 张洪建, 等. 生猪养殖设施工程技术研究现状与发展分析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 1 – 14. WANG Defu, HUANG Huinan, ZHANG Hongjian, et al. Analysis of research status and development on engineering technology of swine farming facilities[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 1 – 14. (in Chinese)
- [12] 刘晨阳, 马广旭, 刘春, 等. 畜禽粪便资源化利用研究综述与对策建议[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2022(2): 13 – 17, 25. LIU Chenyang, MA Guangxu, LIU Chun, et al. Review and countermeasures on resource utilization of livestock and poultry manure—based on the two-dimensional perspective of supply and demand[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2022(2): 13 – 17, 25. (in Chinese)
- [13] 王金武, 周文琪, 白海超, 等. 液肥深施肥差动式双向供肥分配装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 105 – 110. WANG Jinwu, ZHOU Wenqi, BAI Haichao, et al. Design and experiment of differential-type bidirectional distribution device for fertilizer supply for deep-fertilizer liquid fertilizer application[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 105 – 111. (in Chinese)
- [14] KIM M K, KWON S I, CHUN H C, et al. Impacts of pig manure-based liquid fertilizer agricultural application on the water quality of agricultural catchment[J]. Journal of Environmental Protection, 2013, 4(2): 195 – 200.
- [15] 周文琪, 肖红, 刘子铭, 等. SYJ-3 深施型斜置式液肥穴施肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 78 – 86. ZHOU Wenqi, XIAO Hong, LIU Ziming, et al. Design and test of SYJ-3 deep application-type inclined liquid fertilizer hole applicator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 78 – 86. (in Chinese)
- [16] 郎春玲, 王金武, 王金峰, 等. 深施型液态肥变量施肥控制系统[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 43 – 47, 62. LANG Chunling, WANG Jinwu, WANG Jinfeng, et al. Variable fertilizer control system for deep-fertilization liquid fertilizer applicator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 43 – 47, 62. (in Chinese)
- [17] 周文琪, 孙小博, 刘子铭, 等. 液肥穴施肥机扎穴针体与土壤互作仿真分析及试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 87 – 94. ZHOU Wenqi, SUN Xiaobo, LIU Ziming, et al. Simulation analysis and test of interaction between pricking hole needle body of liquid fertilizer hole applicator and soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 87 – 94. (in Chinese)
- [18] OTTO R, FRANCO H C J, FARONI C E, et al. The role of nitrogen fertilizers in sugarcane root biomass under field conditions[J]. Agricultural Sciences, 2014, 5(14): 1527 – 1538.
- [19] 郑健, 殷李高, 朱传远, 等. 施用沼液对设施番茄生长与土壤生态环境的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 278 – 288. ZHENG Jian, YIN Ligao, ZHU Chuanyuan, et al. Effects of digestate on tomato growth and soil ecological environment in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 278 – 288. (in Chinese)
- [20] 李文哲, 袁虎, 刘宏新, 等. 沼液沼渣暗灌施肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 75 – 80. LI Wenzhe, YUAN Hu, LIU Hongxin, et al. Biogas slurry fertilizer applicator for dark irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 75 – 80. (in Chinese)
- [21] 孙冬霞, 李明军, 吴爱兵, 等. 有机肥及其配套机械化技术的研究进展[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(2): 72 – 80. SUN Dongxing, LI Mingjun, WU Aibing, et al. Research progress of organic fertilizer and its supporting mechanization technology[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(2): 72 – 80. (in Chinese)
- [22] 许斌星, 马彪, 陈永生, 等. 我国设施蔬菜有机肥撒施装备研究现状及发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(6): 40 – 44. XU Binxing, MA Biao, CHEN Yongsheng, et al. Status and development trend of organic fertilizer broadcast application equipments in greenhouse vegetables in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(6): 40 – 44. (in Chinese)
- [23] 张克强, 杜连柱, 杜会英, 等. 国内外畜禽养殖粪肥还田利用研究进展[J]. 农业环境科学化学报, 2021, 40(11): 2472 – 2481. ZHANG Keqiang, DU Lianzhu, DU Huiying, et al. Application of livestock and poultry waste to agricultural land: a review[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(11): 2472 – 2481. (in Chinese)
- [24] 张鲁云, 何义川, 杨怀君, 等. 国内外液体肥料施肥机械发展概况及需求分析[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(15): 12 – 15. ZHANG Luyun, HE Yichuan, YANG Huaijun, et al. Development and demand analysis of liquid fertilizer machines at home and abroad[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2020, 59(15): 12 – 15. (in Chinese)
- [25] 张鲁云, 何义川, 杨怀君, 等. 液体施肥机械发展现状与现代农业关系分析[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(4): 34 – 40. ZHANG Luyun, HE Yichuan, YANG Huaijun, et al. Analysis of the relationship between the development of liquid fertilizer machinery and modern agriculture[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(4): 34 – 40. (in Chinese)
- [26] 李鑫. 重型半挂式液罐车罐内液体晃动与防晃板设置研究[D]. 南宁: 广西大学, 2017. LI Xin. Research on liquid sloshing of the heavy liquid-filled tractor-semitrailer and the baffles[D]. Nanning: Guangxi University, 2017. (in Chinese)