

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.01.017

牵引式液态肥喷洒机设计与试验

杨延强^{1,2} 负莹莹³ 陈兆英^{1,2} 范国强^{1,2} 董和银^{4,5} 王玉亮^{1,2}

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省农业装备智能化工程实验室, 泰安 271018;
3. 浙江大学海洋学院, 舟山 316021; 4. 泰安意美特机械有限公司, 新泰 271215;
5. 泰安市畜牧智能装备产业技术研究院, 新泰 271215)

摘要: 针对目前国内缺乏专业的液态肥喷洒机,设计了主要由罐体、吸料系统、排料系统和喷洒器等部件组成的牵引式液态肥喷洒机,建立了喷洒作业理论模型,并对真空泵排量、罐体结构、喷嘴喷射速度等关键参数进行了设计与计算。采用仿真软件对喷洒器散射挡板形状、散射挡板朝向、喷嘴形状和喷嘴喷射速度等关键因素进行了仿真分析,结果表明,为达到较好的喷洒效果,应采用扇形散射挡板、圆锥形喷嘴和13 m/s左右的喷射速度,散射挡板与水平面呈正夹角。以喷洒幅宽、均匀性变异系数、平均厚度为喷洒性能指标,采用正交试验对喷洒作业进行了优化仿真,得出对喷洒幅宽影响显著的因素是散射挡板长轴长度,对地面水平平均厚度影响显著的因素是散射挡板倾斜角,各个因素对于喷洒均匀变异系数的影响不显著。结合设计目标,当行进速度5 km/h时,优先选取散射挡板与水平夹角35°、散射挡板长轴长度32 cm、喷射速度13 m/s和喷嘴高度1 m,可得试验喷洒幅宽为11 m,地面水平平均厚度为1.65 mm,喷洒均匀性变异系数 C_v 为34.86%,仿真分析与试验结果基本一致,验证了设计的准确性和可靠性,达到了设计目标,满足使用要求。

关键词: 液态肥喷洒机; 牵引式; 计算流体动力学

中图分类号: S817.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)01-0159-09 **OSID:** 

Design and Experiment of Trailed Liquid Fertilizer Sprayer

YANG Yanqiang^{1,2} YUN Yingying³ CHEN Zhaoying^{1,2} FAN Guoqiang^{1,2} DONG Heyin^{4,5} WANG Yuliang^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China
2. Shandong Provincial Intelligent Engineering Laboratory of Agricultural Equipment, Taian 271018, China
3. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China
4. Taian Yimeite Machinery Co., Ltd., Xintai 271215, China
5. Taian Animal Husbandry Intelligent Equipment Industry Technology Research Institute, Xintai 271215, China)

Abstract: There are few studies on the design and optimization of liquid fertilizer sprayer, a trailed liquid fertilizer sprayer was designed, which mainly composed of tank, suction system and discharge system. The theoretical model of spraying operation was established, and the key parameters such as vacuum pump displacement, tank structure and nozzle outlet flow rate were designed and calculated. The key factors such as the shape of scattering baffle, orientation of scattering baffle, shape of nozzle and flow velocity of nozzle outlet were simulated and analyzed. The analysis showed that the ideal spraying effect can be achieved by selecting fan-shaped scattering baffle, positive angle between scattering baffle and horizontal plane, circular nozzle and outlet velocity of about 13 m/s. Taking the radiation width, uniformity variation coefficient and average thickness of spraying as the spraying performance indexes, the spraying operation was optimized and simulated by orthogonal experiment. It was concluded that the significant factor affecting the spraying width was the longitudinal axis length of the scattering baffle, and the significant factor affecting the horizontal average thickness of the ground was the inclination angle of the scattering baffle, each factor had little effect on the coefficient of variation of spraying uniformity.

收稿日期: 2021-10-02 修回日期: 2021-11-10
基金项目: 山东省自然科学基金面上项目(ZR2018MEE026)、财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-27)和山东省农业重大应用技术创新项目(SD2019NJ008)
作者简介: 杨延强(1980—),男,讲师,博士,主要从事畜牧机械和智能农机装备研究,E-mail: yanqiang227@163.com
通信作者: 范国强(1975—),男,副教授,主要从事液压传动、畜牧机械和智能农机装备研究,E-mail: fgq1217@163.com

Combined with the design goal, when the traveling speed was 5 km/h, the included angle between the scattering baffle and the horizontal was 35°, the longitudinal axis length of the scattering baffle was 32 cm, the outlet flow rate was 13 m/s and the nozzle height was 1 m. The test spraying width was 11 m, the average ground thickness was 1.65 mm, and the spraying uniformity variation coefficient C_v was 34.86%. The simulation analysis was basically consistent with the test results, which verified the accuracy and reliability of the design. The design goal was achieved, the application requirements were met, and some data support was provided for the spraying research of liquid fertilizer.

Key words: liquid fertilizer sprayer; trailed; computational fluid dynamics

0 引言

随着我国人民对肉、蛋和奶消费需求的增加,我国畜牧业正向规模化、现代化、集约化和标准化的养殖方式转变^[1]。2017 年,我国牛、猪和家禽年产粪污量为 34.9 亿 t^[2]。我国绝大多数规模化养殖场缺乏必要的污染防治设备和措施,产生的粪污基本上未得到及时处理,大量未经处理的粪污对地下水、土壤和大气环境造成较大危害,成为重要水源、江河和湖泊富营养化的主要原因,同时也对畜牧业本身和人类健康造成巨大威胁^[3-8]。中国是世界化肥生产与施用大国,化肥的盲目过量施用,致使农作物产量品质降低、土壤板结退化和水体严重污染,因此引发了系列农产品安全、环境污染与资源浪费等亟需解决的社会性问题^[9]。

解决养殖污染问题根本有效的措施是采取种养结合和农牧结合,使畜禽粪污变成有机肥回归农田,发展以循环和生态为主的环保型畜牧业^[10-11]。将液态尿和沼化液以液态肥的形式洒施到田地中,不仅解决了粪污的污染问题,还有利于改善土壤,增加土壤肥力,为植物生长提供营养^[12]。施用液态有机肥面临的难题是施用量大、劳动强度大和作业环境恶劣,无法采用人工进行大面积作业。欧美等发达国家已经实现了液态肥的喷洒、表面施、浅施和深施作业的机械化和自动化,公开文献报道比较少,掌握着核心技术的公司主要有德国福林格、法国 Jeantil 和比利时 Joskin 等。

近年来,我国厩液和沼液洒施技术推广取得了较大的进步,相关研究逐渐起步^[2,13]。土壤施入方式氮肥保护好,气味和污染较小,但系统复杂,价格昂贵,适合大型农场。地面喷洒方式氮保护较差,气味较大,但结构简单,性价比较高,适合中小型农场,是当前我国首选的作业方式。但国内对喷洒器设计及作业参数优化等关键技术的研究比较匮乏,提高喷洒性能成为国产液态肥喷洒机亟待解决的问题。针对以上问题,本文对 20 m³ 牵引式液态肥喷洒机进行设计和试验,以解决国内液态肥喷洒研究匮乏现状,为国内相关机型设计提供理论支持。

1 结构与工作原理

1.1 整机结构

牵引式液态肥喷洒机主要由牵引架、真空泵、真空泵换向液压缸、液气分离器、防溢阀、泄压阀、吸料控制闸阀、吸料软管、罐体、喷洒液压缸、喷洒控制闸阀、喷洒器、车桥、轮胎、车架和支腿等部件组成,20 m³ 牵引式液态肥喷洒机整机结构如图 1 所示。为减少连接,对罐体进行加固,将车架焊接在罐体底部。车架通过铰接销轴与牵引架铰接在一起,通过牵引架悬挂在拖拉机后部。悬架与轮胎承载罐体、粪污和车架的全部重量,为减小接地压力,降低对土壤的压实力,采用 2 个单点悬架,4 个 600/55-26.5 宽轮胎增大接触面积^[14]。

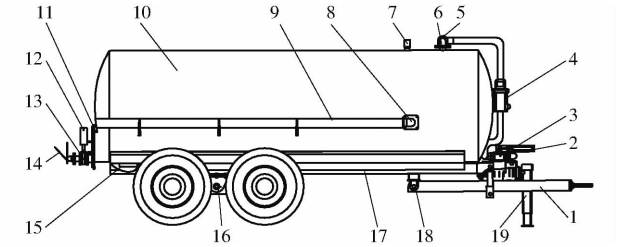


图 1 20 m³ 牵引式液态肥喷洒机结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of 20 m³ trailed liquid fertilizer sprayer

- 1. 牵引架 2. 真空泵换向液压缸 3. 真空泵 4. 液气分离器
- 5. 接头 6. 防溢阀 7. 泄压阀 8. 吸料控制闸阀 9. 吸料软管
- 10. 罐体 11. 粪污排出口 12. 喷洒液压缸 13. 喷洒控制闸阀
- 14. 喷洒器 15. 残渣排出口 16. 单点悬架及轮胎 17. 车架
- 18. 铰接销轴 19. 支腿

液态肥喷洒机由拖拉机牵引作业,吸取和洒施动力由拖拉机后动力输出轴通过万向联轴器带动真空泵提供,真空泵换向液压缸和喷洒液压缸由拖拉机齿轮泵提供液压动力。将液态肥吸入罐体,开动拖拉机牵引洒施机到农田进行作业。整机设计参数如表 1 所示。

1.2 罐体

参考国外液态肥洒施机械设备,参照作业要求和国家相关标准,将厩液罐直径设置为 2 m,厩液罐容积定为 20 m³,罐体结构如图 2 所示。为防止喷洒机启动或爬坡时液体流动引起的冲击和质心偏移,

表 1 设计参数

Tab.1 Design parameters of machine

参数	数值
罐体长×直径/(m×m)	7.25×2
罐体容积/m ³	20
洒施行数	1
喷洒平均厚度/mm	1.5~5.0
喷洒幅宽/m	≥8
喷洒均匀性变异系数/%	≤40
工作速度/(km·h ⁻¹)	3~6

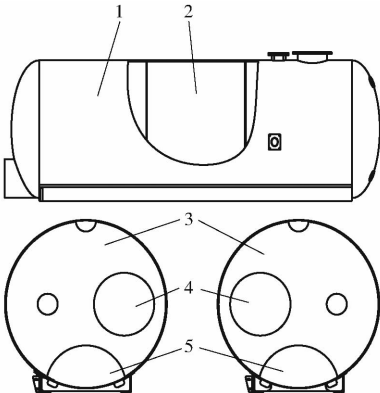


图 2 罐体结构图

Fig.2 Tank structure

1. 后防波板 2. 前防波板 3. 贯气孔 4. 检修孔 5. 残渣倾泻孔

在罐体内部的前端和后端焊接防波板。根据李鑫^[15]研究结果,防波板面积设为横截面积的 50% 与 60% 所达到的防冲击效果相仿,本设计防波板面积为横截面积的 50%。在防波板上部开设贯气孔,便于不同部位液体的流动。为方便检修,在防波板中部开设检修孔,前后防波板的检修孔对称布置。在防波板底部开设残渣倾泻孔,便于罐体内液体的流动和残渣的倾泻。

1.3 吸料和排料系统

真空泵、真空泵换向液压缸、液气分离器、吸料控制闸阀、吸料软管、罐体、喷洒液压缸、喷洒控制闸阀和喷洒器等部件组成吸料和排料系统。采用双万向联轴器将拖拉机输出动力轴与真空泵输入轴连接,驱动真空泵工作。通过真空泵换向液压缸控制真空泵换向杆改变真空泵转向,实现吸气或排气。

填充肥料时将吸料软管一端浸入粪池,关闭尾部喷洒控制闸阀,打开吸料控制闸阀,真空泵排气,罐体内压力降低,实现吸料。吸料结束后,关闭吸料控制闸阀。当田间作业时,开启喷洒控制闸阀,真空泵吸气,罐体内压力升高,液态肥从尾部喷出,在喷洒器的作用下实现扇形喷洒。

1.4 喷洒器

喷洒器主要由喷嘴、挡板、散射挡板组成(图 3)。为减小阻力并达到一定流速,采用锥形收口喷嘴。

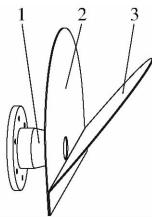


图 3 喷洒器结构图

Fig.3 Nozzle device structure

1. 锥形收口喷嘴 2. 竖直挡板 3. 散射挡板

2 关键部件设计

2.1 真空泵计算与选取

根据工作要求,真空泵抽气速率是决定真空泵性能的关键因素^[16-17]。取真空泵使罐体内达到既定真空度所需时间 t 为 1.5 min,罐体容积 V 为 20 000 L,初始压力 p_1 为标准大气压。如图 4 所示在负压吸取粪污时,设真空泵工作压力为 p_2 ,抽液最大高度 $h_{\max}$ 为 6.5 m,粪污密度 ρ 为 $1.05 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,重力加速度 g 为 9.8 m/s^2 。

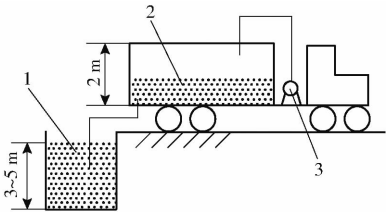


图 4 真空吸污示意图

Fig.4 Schematic diagram of vacuum suction manure

1. 粪池 2. 真空罐 3. 真空泵

由伯努利方程得

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho g} = h_{\max} \tag{1}$$

计算得 $p_2 = 34 \text{ kPa}$,则真空泵抽气速率 S 为^[18]

$$S = \frac{V}{t} \ln \frac{p_1}{p_2} \tag{2}$$

计算得真空泵抽气速率 S 为 14 517 L/min,选取意大利 MORO 公司 PM110AP 型风冷叶片式真空泵,性能参数如表 2 所示。

表 2 PM110AP 型风冷叶片式真空泵性能参数

Tab.2 Parameters of PM110AP vacuum pump

参数	数值
流量/(L·min ⁻¹)	16 400
连续真空度/%	80
极限真空度/%	95
最大工作压力/kPa	300
工作转速/(r·min ⁻¹)	1 100
最大真空功率/kW	19
连续作业时间/min	≤20

2.2 罐体设计

我国车辆标准规定半挂牵引车宽度限制 2.5 m, 参考国外相关设备, 结合我国农村道路现状, 选取罐体直径为 2 m。选用如图 5 所示的 THB 碟形封头, 封头直径 D_0 为 2 m, 封头大径 R_0 为 2 m。

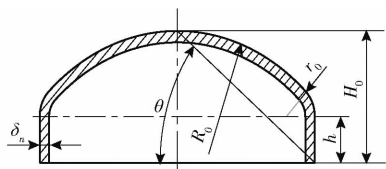


图 5 THB 碟形封头示意图

Fig. 5 Schematic of THB dish-shaped head

根据压力容器标准^[19], 封头厚度应不小于封头内径的 0.3%, 设计封头厚度 δ_n 为 10 mm, 封头过渡段转角内半径 $r_0 = 200$ mm, 封头总高度 H_0 为 485 mm, 封头直边高度 h 为 100 mm。则封头伸角为

$$\theta = \arccos \frac{\frac{D_0}{2} - r_0}{D_0 - r_0} = 1.1102 \text{ rad} \quad (3)$$

则封头容积为^[20]

$$V_F = C_1 (D_0 - 2\delta_n)^2 (r_0 - \delta_n) + C_2 (D_0 - 2\delta_n) (r_0 - \delta_n)^2 + C_3 (r_0 - \delta_n)^3 + C_4 (R_0 - \delta_n)^3 + \frac{(D_0 - 2\delta_n)^2}{4} h = 0.34 \text{ m}^3 \quad (4)$$

$$\text{其中 } C_1 = \frac{\sin \theta}{4} = 0.224$$

$$C_2 = \frac{\sin \theta \cos \theta + \theta}{2} - \sin \theta = -0.1416$$

$$C_3 = 2 \sin \theta - \frac{\sin^3 \theta}{3} - \sin \theta \cos \theta - \theta = 0.0436$$

$$C_4 = \frac{(2 + \sin \theta)(1 - \sin \theta)^2}{3} = 0.0107$$

由总容积求得罐体中段长度为

$$l = 4 \times \frac{20 - 2V_F}{\pi (D_0 - 2\delta_n)^2} = 6.278 \text{ m} \quad (5)$$

计算罐体总长为 7 248 mm, 圆整为 7 250 mm。

2.3 喷洒器设计

在洒施装置高度一定的情况下, 洒施过程中, 液态肥在压力和重力双重作用下排出, 液态肥排出流量 Q 与压力差 Δp 、出口面积 A 有关, 计算公式为

$$Q = \mu A \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho} + 2gh_0} \quad (6)$$

式中 μ ——孔口流量系数, 0.8^[21]

h_0 ——液面高度, m

文献[22-23]研究表明, 洒施量维持在 25 t/hm² 左右可以降低本地轮作系统的氮素损失, 提高营养利用率, 减少洒施过量造成的土地富营养化等问题。随着农作物和洒施季节的不同, 液态有机肥洒施量

控制在 25 ~ 45 t/hm², 喷洒平均厚度为 2.4 ~ 4.3 mm。取拖拉机牵引速度为 3 km/h, 洒施宽度 8 m, 则喷洒效率为 16 ~ 28.7 L/s。真空泵最大工作压力为 300 kPa, 取直径为 d 的圆形出口, 计算得 $d = 43$ mm。为进一步提高流速, 扩大喷洒幅宽, 取 $d = 40$ mm。

液态肥流出喷嘴的流速由罐体压力控制, 罐体压力恒定, 即可保持液态肥喷出流速恒定。在喷嘴截面面积不变时, 流体流量与流速呈正比例关系, 即

$$Q = Av \quad (7)$$

式中 v ——流体速度, m/s

当喷嘴入口压力为 0.2 MPa, 环境压力为 0.1 MPa, 真空泵连续作业时间小于等于 20 min, 将 20 m³ 液态肥撒施完成, 由式(6)、(7)可计算得流出喷嘴速度为 13.2 m/s。

3 喷洒仿真

3.1 仿真模型建立

VOF 模型是一种求解气液两相流动和自由表面流动的算法。该方法通过引入流体体积组分 α 函数及其控制方程来表示混合流体的密度并跟踪自由面的位置。液态肥密度以及黏度与液态水极为接近, 为简化计算过程, 将液态肥等效为液态水模型。采用计算流体动力学分析软件 STAR-CCM+ 对液态肥经喷嘴的运动建立外流场进行数值模拟。本文研究的物理模型如图 6 所示, 计算域由内流场和外流场组成, 内流场为液态肥在管道以及喷嘴内部的流域, 外流场为液态肥从喷嘴离开后的流域。按 1:1 比例在 SolidWorks 中完成该模型的建立, 并以 .igs 的格式导入仿真软件。各区域几何参数如表 3 所示。

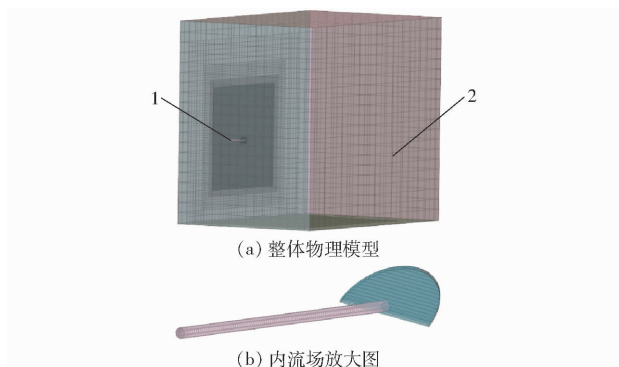


图 6 物理模型

Fig. 6 Physical model

1. 内流场 2. 外流场

3.2 仿真试验设计

影响喷洒效果的关键因素为喷嘴形状、散射挡板形状、喷射速度、散射挡板倾斜角等, 以喷洒幅宽、

表 3 仿真模型区域几何参数

Tab.3 Geometric parameters of simulation model area

参数	数值
管道长度/m	1
喷嘴直径/mm	40
外流场尺寸(长×宽×高)/(m×m×m)	15×10×13
喷嘴距地面高度/m	1.5

均匀性变异系数(C_v)、平均厚度为喷洒性能指标。使用 Matlab 编写程序,对水体积分数分布云图进行

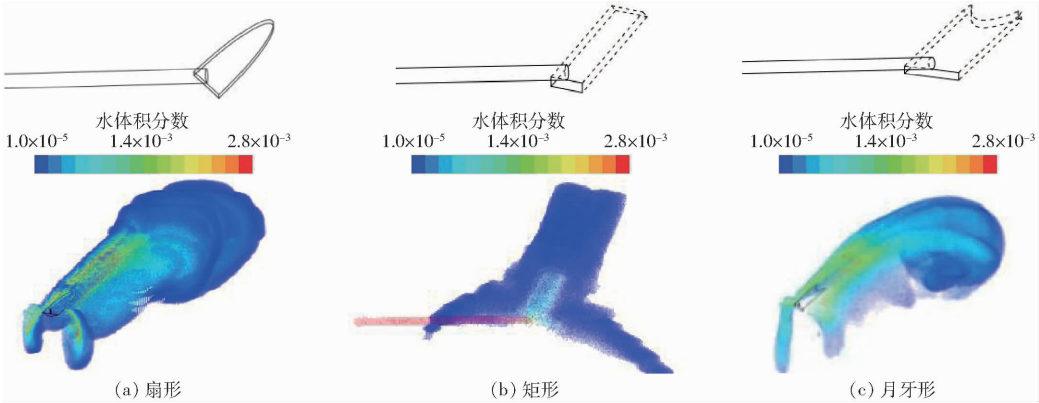


图 7 不同散射挡板形状水体积分数分布

Fig. 7 Volume distributions of water with different scattering baffle shapes

图 8 所示。散射挡板形状对喷洒性能的影响如表 4 所示。

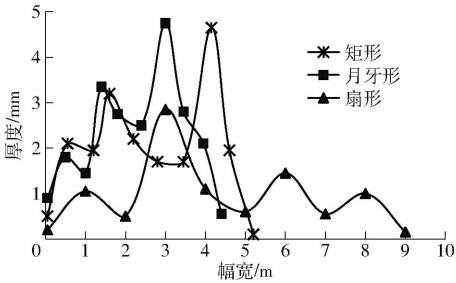


图 8 散射挡板形状对地面水横向厚度分布的影响

Fig. 8 Effect of scattering baffle shape on transverse thickness distribution of surface water

表 4 散射挡板形状对喷洒性能的影响

Tab.4 Effect of scattering baffle shape on spraying performance

挡板形状	$C_v/\%$	平均厚度/mm	喷洒幅宽/m
扇形	43.23	1.783	8.907
矩形	21.40	3.255	5.140
月牙形	36.89	3.479	6.084

由图 8 和表 4 可知,扇形散射挡板喷洒的均匀性变异系数略高,但喷洒幅宽远大于矩形与月牙形,散布效果较好。因此为提高喷洒幅宽和散布效果,选择扇形散射挡板。

3.2.2 散射挡板朝向

仿真条件为:圆锥形喷嘴、喷嘴喷射速度 13 m/s、

量化处理和数据统计。在规定的参数下作业,测量每个测量区的水体积。

3.2.1 散射挡板形状选取

仿真条件为:圆形喷嘴、喷嘴出口速度 13 m/s、喷嘴高度 1.5 m、散射挡板倾斜角 45°、车速 5 km/h。散射挡板形状及初始水的体积分数分布云图如图 7 所示。由图 7 可知,扇形散射挡板的散布效果较好,矩形散射挡板的散布效果最差。

散射挡板形状对地面水横向厚度分布的影响如

散射挡板倾斜角 45°、喷嘴高度 1.5 m、车速 5 km/h。液态肥喷洒机的散射挡板朝向有两种类型:散射挡板与水平面所成夹角为正夹角;散射挡板与水平面所成夹角为负夹角。对两种朝向的散射挡板进行仿真,得到地面上水的体积分数分布如图 9 所示,正夹角散布效果较好。

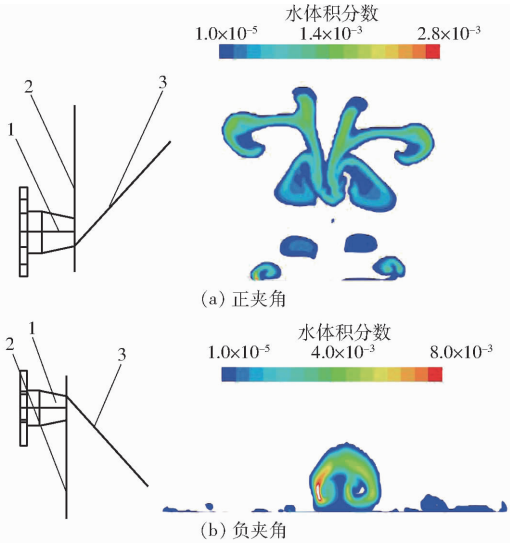


图 9 不同散射挡板朝向时地面水体积分数分布

Fig. 9 Volume distributions of water with different scattering baffle direction

1. 圆锥形喷嘴 2. 竖直挡板 3. 散射挡板

散射挡板朝向对喷洒性能的影响如表 5 所示。散射挡板呈正夹角喷洒机构的喷洒幅宽远大于散射

表 5 散射挡板朝向对喷洒性能的影响

Tab.5 Effect of scattering baffle direction on spraying performance

挡板朝向	$C_V/\%$	平均厚度/mm	喷洒幅宽/m
正夹角	43.23	1.783	8.907
负夹角	34.12	2.981	0.560

挡板呈负夹角的喷洒机构,散布效果较好。为提高喷洒幅宽和散布效果,选取散射挡板呈正夹角的喷洒机构。

3.2.3 喷嘴形状选取

吴泽兵等^[24]对不同形状喷嘴的空化性能进行

了数值模拟,阐述了喷嘴形状对撒施效果的影响。丁素明等^[25]对扇形喷嘴不同喷雾方式下的空间沉积情况进行了研究。杜哲等^[26]选取 WJ-7010、WJ-8010 型喷嘴喷雾对茶果的降温效果进行了研究。本文选取几个具有代表性的喷嘴形状:圆锥形、十字形、扁平形。为保证仿真效果真实有效,无论喷嘴为何种形状,其截面面积都保持相等。仿真条件为:喷嘴出口速度 13 m/s、散射挡板形状为扇形、半径为 40 cm、喷嘴高度为 1.5 m、散射挡板倾斜角为 45°。图 10 为不同喷嘴形状的地面水体积分数分布云图。

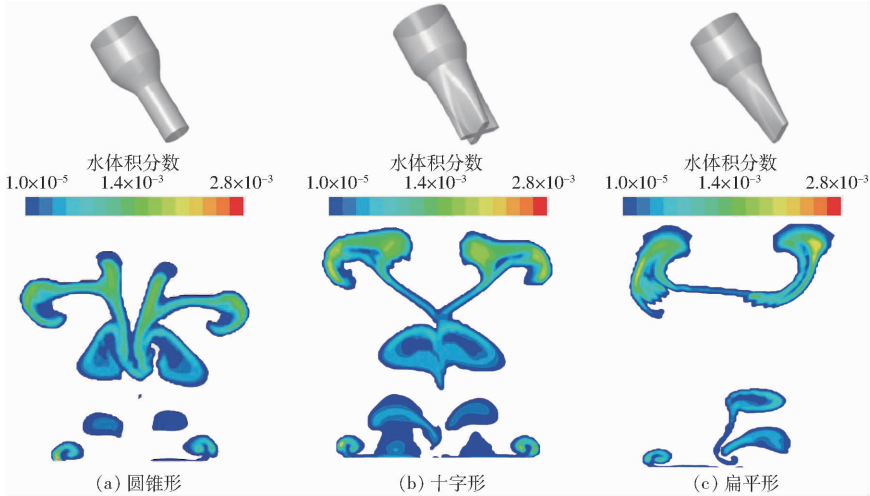


图 10 不同喷嘴形状的水体积分数分布

Fig.10 Volume distributions of water with different nozzle shapes

喷嘴形状对地面水横向厚度分布影响如图 11 所示。由图 10、11 可知,圆锥形喷嘴散布效果好。

3.2.4 喷射速度选取

仿真条件为:喷嘴形状圆锥形、散射挡板形状扇形、喷嘴高度 1.5 m、散射挡板倾斜角 45°。喷嘴出口速度分别选取 9、13、17 m/s 进行仿真设计,其仿真分布云图如图 12 所示。

喷射速度对地面水横向厚度分布的影响如图 13 所示。由图 12、13 可知,随着出口喷射速度的增加,喷洒幅宽先增加后减小,散布效果先变优后变差。

喷射速度对喷洒效果的影响如表 7 所示。喷洒幅宽与喷射速度的关系大致呈倒 U 形关系,因此出口喷射速度应选取 13 m/s 左右为宜。

3.3 喷洒正交试验仿真分析

正交试验设计选用散射挡板长轴长度、喷嘴出口速度、喷嘴高度、散射挡板倾斜角 4 个因素,每个因素采用 3 个水平,如表 8 所示。以洒施幅宽、平均厚度、均匀性变异系数 C_V 3 个性能指标来综合判定不同因素对洒施效果的影响。采用 $L_9(3^4)$ 正交试验法,正交试验结果如表 9 所示。得到 9 组试验的幅宽、均匀性变异系数和平均厚度后进行极差分析,结果如表 10 所示。

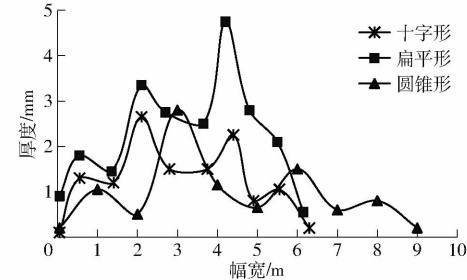


图 11 喷嘴形状对地面水横向厚度分布的影响

Fig.11 Effect of nozzle shape on transverse thickness distribution of surface water

3 种喷嘴形状对喷洒效果的影响如表 6 所示。从喷洒幅宽效果来看,圆锥形喷嘴优于其他形状喷嘴,因此选用圆锥形喷嘴。

表 6 喷嘴形状对喷洒性能的影响

Tab.6 Effect of nozzle shape on spraying performance

喷嘴形状	$C_V/\%$	平均厚度/mm	喷洒幅宽/m
圆锥形	43.23	1.783	8.907
十字形	31.47	2.479	6.304
扁平形	36.89	2.938	6.084

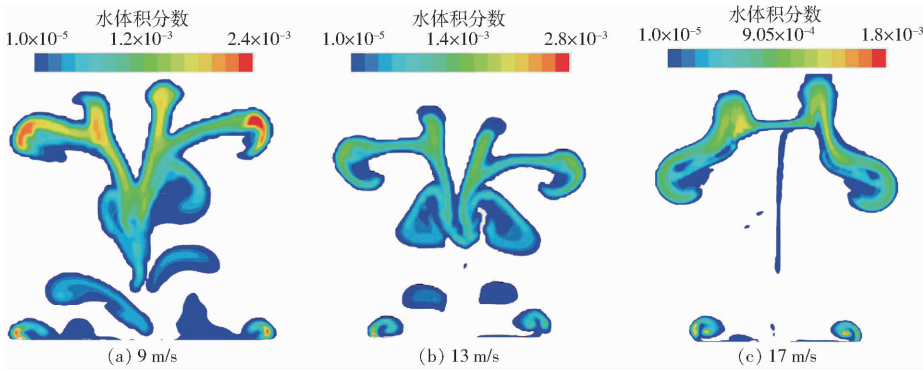


图 12 不同喷射速度时的水体积分数分布

Fig. 12 Water volume distributions at different outlet velocities

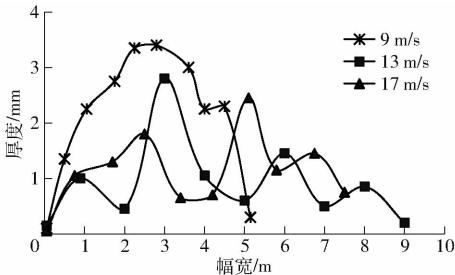


图 13 喷射速度对地面水横向厚度分布的影响

Fig. 13 Effect of outlet velocity on transverse thickness distribution of surface water

表 7 喷射速度对喷洒性能的影响

Tab.7 Effect of outlet velocity on spraying performance

出口速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$C_V/\%$	平均厚度/ mm	喷洒幅宽/ m
9	23.6	3.308	5.112
13	43.2	1.783	8.907
17	31.1	1.846	7.496

表 8 正交试验因素水平

Tab.8 Factors and levels of orthogonal test

水平	因素			
	散射挡板倾 斜角 $A/(\circ)$	挡板长轴 长度 B/cm	喷射速度 $C/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	喷嘴高度 D/m
1	55	48	15	3
2	45	40	13	2
3	35	32	11	1

表 10 极差分析

Tab.10 Range analysis

指标	喷洒幅宽				均匀性变异系数				平均厚度			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
K_1	9.872	8.538	9.278	10.48	0.422	0.389	0.351	0.412	1.548	1.227	1.074	1.125
K_2	9.844	9.718	9.911	9.298	0.540	0.445	0.487	0.438	0.421	0.980	1.069	1.098
K_3	9.033	10.493	9.560	8.971	0.328	0.456	0.452	0.440	0.549	0.310	0.375	0.295
R	0.839	1.955	0.633	1.509	0.212	0.067	0.136	0.028	1.127	0.917	0.699	0.830

出和提高地面水的平均厚度。结合设计目标,选取行进速度 5 km/h、散射挡板与水平夹角 35°、挡板长

表 9 正交试验结果

Tab.9 Orthogonal experiment results

序号	因素				评价指标		
	散射挡板 倾斜角	挡板 长轴长	喷射 速度 $C/$	喷嘴 高度	喷洒 幅宽/ m	$C_V/$ %	平均 厚度/ mm
	$A/(\circ)$	度 B/cm	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	D/m			
1	55	48	15	3	9.420	28.3	4.956
2	55	40	13	2	10.050	50.2	4.677
3	55	32	11	1	10.147	47.9	2.510
4	45	48	13	1	8.515	56.6	2.006
5	45	40	11	3	10.853	55.8	2.883
6	45	32	15	2	10.164	49.5	2.886
7	35	48	11	2	7.680	31.7	1.769
8	35	40	15	1	8.250	27.4	2.120
9	35	32	13	3	11.168	39.2	1.965

由表 10 可知,4 个因素对喷洒幅宽影响由大到小为 B 、 D 、 A 、 C ,最佳组合为 $A_1B_3C_2D_1$ 。4 个因素对地面水平均厚度的影响由大到小为 A 、 B 、 D 、 C ,最佳组合为 $A_2B_3C_3D_3$ 。4 个因素对喷洒均匀性变异系数的影响不太显著,影响由大到小为 A 、 C 、 B 、 D ,最佳组合为 $A_3B_1C_1D_1$ 。

喷洒幅宽与地面水平均厚度是两个相反的指标,幅宽越大,地面水平均厚度越小。仿真分析表明,提高喷嘴高度有利于扩大喷幅,降低地面水的厚度。但在实际作业中,为了提高整机的稳定性,罐体重心不能太高,喷嘴离地高度小有利于液态肥的排

轴长度 32 cm、喷射速度 13 m/s 和喷嘴高度 1 m 进行试验。

4 试验

在泰安意美特机械有限公司厂内进行试验,在平整干净的混凝土地面上(长50 m,宽26 m)使用水作为试验材料,选取仿真分析得到的最优参数进行试验,现场无风,样机性能试验如图14所示。



图14 样机性能试验

Fig. 14 Performance test of prototype

采用400 mm×300 mm×150 mm(长×宽×高)的长方形接水盘测量喷洒到地面水厚度。将8个接水盘垂直于喷洒机行走方向,沿着喷洒中心向一侧等间距直线摆放,间隔0.8 m。试验取3次测量数据的平均值进行分析,主要测试指标:喷洒幅宽、地面堆积水平均厚度、喷洒均匀性变异系数和机具作业稳定性。

仿真与试验对比如图15所示。由图15可知,仿真效果与试验效果曲线基本拟合,仿真具有准确性和可靠性。试验测试的喷洒幅宽为11 m,地面水平均厚度为1.65 mm,抛洒均匀性变异系数 C_V 为34.86%,均达到了设计目标,满足使用要求。

5 结论

(1)设计了主要由牵引架、罐体、吸料系统、排料系统、喷洒器、车架和车桥等部件组成的牵引式液态肥喷洒机,建立了喷洒作业的理论模型,并对真空

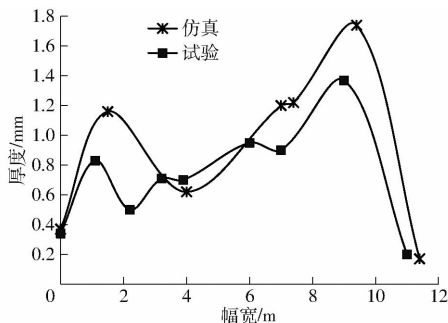


图15 仿真与试验对比

Fig. 15 Comparison between simulated and experiment results

泵排量选择、罐体结构、喷嘴喷射速度等关键参数进行了设计与计算。

(2)采用仿真软件对散射挡板形状、散射挡板朝向、喷嘴形状和喷嘴喷射速度等关键因素进行了分析,以喷洒幅宽、均匀性变异系数、平均厚度为喷洒性能指标。分析表明,为达到较好的喷洒效果,应选择扇形散射挡板、散射挡板与水平面呈正夹角、圆锥形喷嘴和13 m/s左右的喷射速度。

(3)采用正交试验对喷洒作业进行了优化仿真分析,分析表明对喷洒幅宽影响由大到小为散射挡板长轴长度、长轴喷嘴高度、散射挡板倾斜角、喷嘴喷射速度,对地面水平均厚度影响由大到小为散射挡板倾斜角、散射挡板长轴长度、喷嘴高度、喷嘴出口速度,4个因素对于喷洒均匀性变异系数的影响不太显著。在实际作业中为提高整机稳定性,采取较小的喷嘴离地高度有利于液态肥排出和提高地面水的平均厚度。结合设计目标,当行进速度5 km/h时,优先选取散射挡板与水平夹角35°、散射挡板长轴长度32 cm、喷射速度13 m/s和喷嘴高度1 m进行试验。仿真分析与试验结果基本一致,抛撒幅宽为11 m,地面水平均厚度为1.65 mm,抛洒均匀性变异系数 C_V 为34.86%,达到了设计目标,满足使用要求。

参考文献

- [1] 徐鹏翔,孙敏捷,李季. 规模化肉牛场粪污收集与堆肥处理工艺设计[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊2): 213-217.
XU Pengxiang, SUN Minjie, LI Ji. Feces collection and composting technological design on scaled beef cattle farms[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(Sup. 2): 213-217. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] 关正军,李文哲,杨柏松,等. 牛粪螺旋压榨固液分离工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 276-279.
GUAN Zhengjun, LI Wenzhe, YANG Baisong, et al. Optimization on parameters of solid-liquid separation process of dairy manure by screw press[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(12): 276-279. (in Chinese)
- [4] 徐武文,刘金亮,徐亚娣,等. 奶牛养殖对生态环境的污染现状及其防治[J]. 畜牧与饲料科学, 2012, 33(5-6): 88-89.
XU Wuwen, LIU Jinliang, XU Yadi, et al. Pollution situation of dairy cattle feeding on ecological environment and its control[J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2012, 33(5-6): 88-89. (in Chinese)
- [5] 许斌星,吴爱兵,马标,等. 肉牛养殖场粪污资源化处理设备研究现状与分析[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(11): 85-89.

- XU Binxing, WU Aibing, MA Biao, et al. Research status and analysis of manure pollution resource processing equipment in beef cattle farm[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(11): 85–89. (in Chinese)
- [6] 栾冬梅, 李士平, 马君, 等. 规模化奶牛场育成牛和泌乳牛生产排污系数的测算[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 185–189.
- LUAN Dongmei, LI Shiping, MA Jun, et al. Calculation of pollutants producing and discharging coefficients of heifers and lactating dairy cows in large-scale dairy farms[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(16): 185–189. (in Chinese)
- [7] 吴爱兵, 朱德文, 陈永生, 等. 螺杆式有机肥施肥机的研制与试验[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(6): 174–176.
- WU Aibing, ZHU Dewen, CHEN Yongsheng, et al. Design and test of organic manure fertilizer machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(6): 174–176. (in Chinese)
- [8] 赵汝东, 董桓诚, 黄华, 等. 我国畜禽粪污肥料化利用研究现状[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(5): 151–156.
- ZHAO Rudong, DONG Huancheng, HUANG Hua, et al. Research status of fertilizer utilization of livestock and poultry in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(5): 151–156. (in Chinese)
- [9] 刘钦普. 中国化肥施用强度及环境安全阈值时空变化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 214–221.
- LIU Qipu. Spatio-temporal changes of fertilization intensity and environmental safety threshold in China[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(6): 214–221. (in Chinese)
- [10] 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 Dongxia, 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)
- [11] 马标, 付菁菁, 许斌星, 等. 有机肥撒施技术及装备研究[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(8): 1–6.
- MA Biao, FU Jingjing, XU Binxing, et al. Research on manure spreader technology and equipment[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(8): 1–6. (in Chinese)
- [12] 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.
- [13] 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)
- [14] 刘宁, 李新举, 郭斌, 等. 机械压实过程中复垦土壤紧实度影响因素的模拟分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 183–190.
- LIU Ning, LI Xinju, GUO Bin, et al. Simulation analysis on influencing factors of reclamation soil compaction in mechanical compaction process[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(1): 183–190. (in Chinese)
- [15] 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)
- [16] 齐立娟. 几种真空泵工作原理及选型方案探讨[J]. 石油化工设备, 2020, 49(4): 71–75.
- QI Lijuan. Discussion on working principles and selection schemes for several kinds of vacuum pump[J]. Petro-chemical Equipment, 2020, 49(4): 71–75. (in Chinese)
- [17] 赵远江. 新型多功能疏通车真空吸污系统设计与分析[D]. 厦门: 厦门理工学院, 2018.
- ZHAO Yuanjiang. Design and analysis of vacuum suction system for new multi-function dredging vehicle[D]. Xiamen: Xiamen University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [18] 盛金良, 汪骏, 朱金龙, 等. 联合疏通车真空吸污过程分析及其 Matlab 仿真[J]. 工程机械, 2015, 46(2): 28–33, 7.
- SHENG Jinliang, WANG Jun, ZHU Jinlong, et al. Analysis and Matlab simulation of vacuum suction for combined sewage suction truck[J]. Construction Machinery and Equipment, 2015, 46(2): 28–33, 7. (in Chinese)
- [19] 中国特种设备检测研究院. 压力容器 第3部分: 设计: GB 150.3—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [20] 合肥通用机械研究院. 压力容器封头: GB/T 25198—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [21] QIU T, WANG K, LEI Y, et al. Investigation on effects of upstream flow on submerged jet flow from short cylindrical orifice in common-rail injector[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 127(Pt. C): 16–20.
- [22] 甄珍, 博文静, 吴光磊, 等. 有机肥对土壤地力和作物产量的影响及应用示例[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2012, 4(1): 19–25.
- ZHEN Zhen, BO Wenjing, WU Guanglei, et al. Important effect of the organic fertilizer on soil fertility and yield of crop: a case study in Zhende Organic Farm, Henan, China[J]. Journal of Engineering Studies, 2012, 4(1): 19–25. (in Chinese)
- [23] 吴德胜. 畜禽粪污资源化利用设施装备推广应用[R]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2019.
- [24] 吴泽兵, 王勇勇, 张帅, 等. 不同形状喷嘴的空化性能数值模拟研究[J]. 流体机械, 2020, 48(4): 36–41.
- WU Zebing, WANG Yongyong, ZHANG Shuai, et al. Numerical simulation of cavitation performance of nozzles of different shapes[J]. Fluid Machinery, 2020, 48(4): 36–41. (in Chinese)
- [25] 丁素明, 薛新宇, 董祥, 等. 喷雾参数对雾滴沉积性能影响研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊2): 308–315.
- DING Suming, XUE Xinyu, DONG Xiang, et al. Effects of spraying parameters on droplet deposition performance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 308–315. (in Chinese)
- [26] 杜哲, 胡永光, 仇树成, 等. 喷雾降温风机风筒优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 118–125, 151.
- DU Zhe, HU Yongguang, QIU Shucheng, et al. Optimization design and experiment of air duct on spray cooling fan[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 118–125, 151. (in Chinese)