doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.11.026

棉田变量施肥整地联合作业机设计与试验

韩长杰[1,2]　刘　钊[1]　毛罕平[1]　马　旭[1]　王　速[3]

(1.新疆农业大学机电工程学院,乌鲁木齐 830052;2.新疆智能农机装备工程技术研究中心,乌鲁木齐 830052;
3.石河子市光大农机有限公司,石河子 832000)

摘要:针对新疆缺少棉田施肥整地联合机械和施肥量控制精度不高等问题,设计了一种变量施肥整地联合作业机,可一次性完成耙地、变量施肥、平土、碎土和镇压等作业。对排肥装置、双圆盘开沟机构、缺口耙片组、碎土与镇压组件等关键部件进行设计,通过静力学分析得到影响其工作性能的关键因素,并确定关键部件结构参数;基于北斗自动导航驾驶系统获取行驶速度,并以 STM32F405 为核心处理器实现了变量施肥控制。以各行排肥量一致性、不同行驶速度下施肥量控制精度以及施肥深度合格率作为施肥性能评价指标,以耙深稳定性、地表平整度标准差、碎土率作为整地性能评价指标,开展了田间试验。试验结果表明,当排肥轴转速为 10~60 r/min 时,各行排肥量一致性变异系数不大于 4.27%;当车速为 4、7、10 km/h 时,排肥量控制精度不小于 96.70%、95.35% 和 94.14%;施肥深度合格率为 87.04%;耙深稳定性变异系数不大于 5.34%;地表平整度标准差不大于 4.69 mm;碎土率为 96.16%。各项指标均达到施肥机械和整地机械标准要求。

关键词:变量施肥;整地;联合作业机;棉田

中图分类号:S222.4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2024)11-0250-12　　**OSID**:

Design and Experiment of Variable Rate Fertilization Combined Soil Preparation Machine

HAN Changjie[1,2]　LIU Zhao[1]　MAO Hanping[1]　MA Xu[1]　WANG Su[3]

(1. *Mechanical and Electronic Engineering Institute*, *Xinjiang Agricultural University*, *Urumqi* 830052, *China*
2. *Xinjiang Intelligent Agricultural Machinery Equipment Engineering Technology Research Center*, *Urumqi* 830052, *China*
3. *Guangda Agricultural Machinery Co.*, *Ltd.*, *Shihezi* 832000, *China*)

Abstract: In view of the lack of cotton field fertilization combined soil preparation machinery and the low control precision of fertilizer application in Xinjiang, a variable fertilization combined soil preparation machine was designed, which could complete the operations of harrowing, variable fertilization, soil leveling, soil crushing and suppression at one time. The key components such as fertilizer discharge device, double disc trenching mechanism, notch rake group, soil crushing and pressing components were designed. The key factors affecting its working performance were obtained through static analysis, and the structural parameters of key components were determined. Based on the Beidou automatic navigation driving system, the driving speed was obtained, and the variable fertilization control was realized with STM32F405 as the core processor. The field experiment was carried out with the consistency of fertilizer amount in each row, the control accuracy of fertilizer amount at different driving speeds and the qualified rate of fertilization depth as the evaluation indexes of fertilization performance, and the stability of rake depth, standard deviation of surface flatness and rate of broken soil as the evaluation indexes of soil preparation performance. The test results showed that when the rotation speed of the fertilizer shaft was 10~60 r/min, the maximum coefficient of variation of the consistency of each row of fertilizer was 4.27%. When the driving speed was 4 km/h, 7 km/h and 10 km/h, the minimum control precision of fertilizer discharge was 96.70%, 95.35% and 94.14%, respectively. The qualified rate of fertilization depth was 87.04%. The maximum coefficient of variation of rake depth stability was 5.34%. The

收稿日期:2024-05-15　修回日期:2024-08-03

基金项目:新疆农机研发制造推广应用一体化项目(YTHSD2022-21)、新疆维吾尔自治区天山创新团队项目(2021D14010)和新疆蔬菜产业技术体系项目(XJARS-07)

作者简介:韩长杰(1980—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械设计与智能农业装备研究,E-mail:hcj_627@163.com

maximum standard deviation of surface roughness was 4.69 mm. The broken soil rate was 96.16%. All indexes met the requirements of fertilization machinery and soil preparation machinery standards.
Key words: variable fertilization; land preparation; combined machine; cotton fields

0　引言

新疆是我国棉花的主要产区[1]，2023 年新疆地区棉花播种面积及产量均居全国首列[2]。施肥是提高棉花产量的重要手段，但新疆地区棉花种植单位面积化肥用量偏高，盲目施肥、化肥利用效率低等问题仍较为突出[3-4]。而市场上具有施肥功能的联合作业机械肥量控制精度不高[5-6]，不能达到棉花播前施肥整地需求。

国外变量施肥机械较为成熟并得到了推广[7-8]，向自动化、大型化方向发展。美国 Case 公司研发的 Flexi-Coil 系列变量施肥播种机[9]，可针对不同类型肥料和种子进行调节。德国 AMAZONE 公司研制的 ZA-M 系列变量撒肥机[10]，利用服务终端通讯设备和多种作业传感器生成处方图，实现对撒肥盘转速及幅宽控制。荷兰 Ploeger 公司研制的 Ploeger AT 5104 型整地施肥机[11]，可同时实现圆盘式整地与液态施肥作业。国内研究起步相对较晚，主要以多功能联合施肥作业和变量施肥为研究方向。文献[12-13]设计深松、深施肥和镇压联合作业机型，实现一次进地便可完成多道工序。文献[14-17]设计的播种与施肥联合作业机型能满足免耕播种施肥的农艺需求。文献[18-20]设计的变量施肥机基于 GPS 导航系统和施肥处方图改变执行机构的转速，以达到变量施肥的目的。刘成良等[21]设计了基于全球定位系统的智能变量播种、施肥、旋耕复合机，根据导入的施肥处方信息实现排肥器开度和转速双调节，提高了施肥量变化范围和精度。

国内外学者从排肥控制、系统监测控制、多功能联合等方面进行深入研究，并取得一定的进步，但国外研制的诸多机型并不适用于我国新疆地区棉花种植模式。在国内基于施肥处方图实现变量施肥虽已实现，但该技术应用在新疆地区的施肥机械上较为困难，尽管我国研制出多种类型的施肥联合整地机械，但缺少在大田高效率完成施肥整地作业的施肥与圆盘式整地联合作业机型，本文设计一种具有变量施肥功能的联合整地机，将排肥装置与圆盘耙片整地机械联合，可一次性完成耙地、变量施肥、平土、碎土和镇压等作业。通过田间试验，以验证变量施肥控制系统性能及施肥联合整地机合理性。

1　总体设计

1.1　整机结构

整机结构如图 1 所示，主要由北斗自动导航驾驶系统、变量施肥控制系统、排肥装置、整机机架、碎土与镇压组件、平土板、独立缺口耙片、双圆盘开沟机构、分流板、车载显控终端等组成，整地机主要技术参数如表 1 所示。各个整地部件根据整地作业工序依次排布在整机机架下方，排肥装置固定在整机机架前上方，双圆盘开沟机构置于两排耙片组之间，变量施肥控制系统与北斗自动导航驾驶系统以车载显控终端为载体，固定于拖拉机驾驶室。

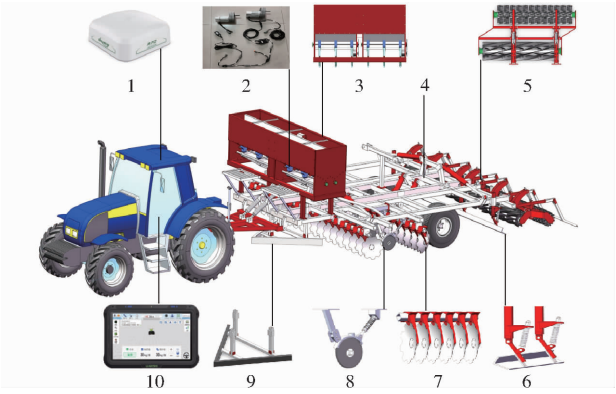


图 1　整机结构示意图

Fig. 1　Structural diagram of whole machine

1. 北斗自动导航驾驶系统　2. 变量施肥控制系统　3. 排肥装置　4. 整机机架　5. 碎土与镇压组件　6. 平土板　7. 独立缺口耙片　8. 双圆盘开沟机构　9. 分流板　10. 车载显控终端

表 1　变量施肥联合整地机主要技术参数

Tab. 1　Main technical parameters of variable rate fertilization combined soil preparation machine

参数	数值
整机尺寸/(mm × mm × mm)	8 600 × 4 800 × 2 500
整机质量/kg	4 350
作业幅宽/m	4.56
施肥行距/mm	760
肥箱容量/kg	1 200
排肥量/(kg·hm^{-2})	150 ~ 375
作业速度/(km·h^{-1})	≤10.5
施肥深度/mm	80 ~ 120

1.2　工作原理

拖拉机根据北斗自动导航驾驶系统的路径规划牵引整机前进，整机机架下方的各部件在牵引力和重力作用下滑移和滚动，完成分流、耙地、开沟施肥、平土、碎土及镇压等作业。而变量施肥控制系统内施肥控制器接收车载显控终端发送的车速信息和控

制系统相关参数,经施肥控制器解码分析和计算,向排肥电机发送转速指令,控制排肥装置排肥器转速,达到变量施肥的目的。排出的肥料经导肥盒和排肥管输送至双圆盘开沟机构,最终落入土壤指定深度范围内。田间掉头时,高度传感器能捕捉整机高度变化,实现拖拉机后悬挂对施肥工作的启停控制。

2 关键部件设计

2.1 双圆盘开沟机构设计

双圆盘开沟机构主要由圆盘、圆盘毂、弹性挡圈、支撑轴、滚珠轴承、毡封、限位螺母、短支撑座、压缩弹簧、限位杆、肥料挡板、长支撑座、连接板、圆盘护盖和支撑架等组成,如图 2 所示。

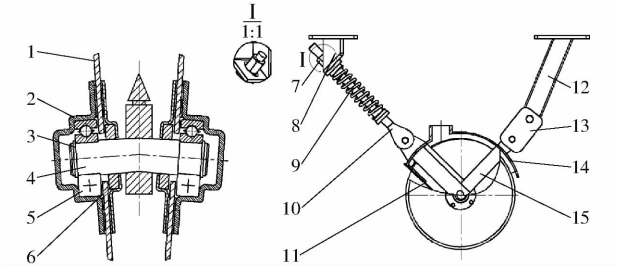


图 2 双圆盘开沟机构

Fig. 2 Double disc trenching mechanism

1. 圆盘 2. 圆盘毂 3. 弹性挡圈 4. 支撑轴 5. 滚珠轴承 6. 毡封 7. 限位螺母 8. 短支撑座 9. 压缩弹簧 10. 限位杆 11. 肥料挡板 12. 长支撑座 13. 连接板 14. 圆盘护盖 15. 开沟支撑架

工作时,靠重力及附加弹簧力入土,圆盘滚动前进将土层切开并推向两侧而形成肥沟。双圆盘开沟机构安装于整机的两排缺口耙片之间,6 组双圆盘开沟机构排布间距与棉花种植行间距 760 mm 保持一致,并且双圆盘的聚点与前排缺口耙片刃口切点轨迹共线,减小了双圆盘开沟阻力。

2.1.1 双圆盘开沟性能分析

双圆盘刃口在前下方相交于聚点 m,其与竖直方向形成角度 β,两圆盘之间形成夹角 φ,如图 3 所示。开沟时,聚点位于土层表面稍上方,若聚点 m 位置过低,则易造成双圆盘开沟堵塞;若聚点 m 位置过高,则角度 β 和夹角 φ 均偏大,会使沟底凸起变大,影响施肥效果。参照文献[22],β 取 55°~75°。

开沟宽度 b 受圆盘直径 D 和双圆盘夹角 φ 的影响,开沟宽度 b[23] 和沟底凸起高度 H[24] 计算式为

$$b = D(1-\cos\beta)\sin\frac{\varphi}{2} \tag{1}$$

$$H = \lambda h \tag{2}$$

式中 h——圆盘入土深度,mm

λ——土壤坍塌系数,小于等于 1

由式(1)可知,开沟宽度 b 会随着圆盘直径 D 和双圆盘夹角 φ 的增大而变大。双圆盘夹角 φ 是

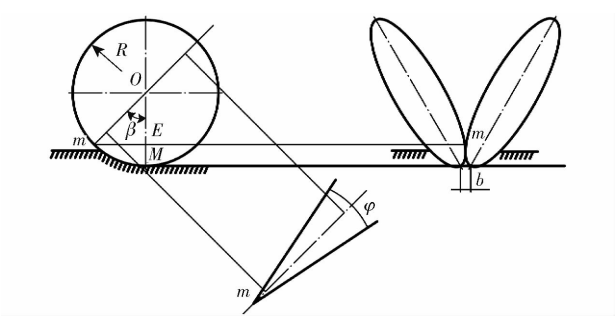


图 3 双圆盘聚点位置示意图

Fig. 3 Schematic of location of gathering point of double disks

保证开沟施肥性能稳定的关键,一般来说双圆盘夹角 φ 越小,开出的肥沟就越小,工作阻力也越小,施肥点也更精确,但过小会使双圆盘之间无法容纳排肥管,同时双圆盘开沟前端已由缺口耙片完成碎土,使双圆盘受到的工作阻力降低,经反复试验,双圆盘夹角 φ 取 15°~20°较适宜。由式(2)可知,开沟深度 h 和土壤坍塌系数 λ 直接影响沟底凸起高度,进而影响施肥深度,经对南疆大田土壤实地取样分析,取 λ 为 0.15~0.20。

双圆盘开沟时,圆盘将受到多个方向的力,主要包括整机前进的牵引力、作业过程中土壤对双圆盘的阻力以及受到双圆盘切割土壤和向两侧推压时的反作用力。因此,将从圆盘刃口楔入土壤切削阻力 F_L、圆盘推土侧移正压力 N 和圆盘与土壤之间相对运动产生的剪切力 T 等 3 个方面对单个圆盘开沟过程进行受力分析,如图 4 所示。

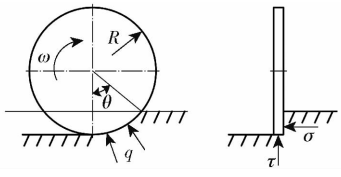


图 4 圆盘与土壤作用力图

Fig. 4 Disk and soil interaction diagram

刃口切削阻力 F_L 计算式为

$$F_L = \int_l q\mathrm{d}l \tag{3}$$

其中

$$l = R\theta = R\arccos\frac{R-h}{R} \tag{4}$$

式中 l——圆弧刀刃与土壤接触弧长,mm

q——弧长 l 所受单位阻力,N

R——圆盘半径,mm

θ——弧长 l 对应圆盘夹角,(°)

整理可得

$$F_L = \int_0^{\arccos\frac{R-h}{R}} q\mathrm{d}(R\theta) = qR\arccos\frac{R-h}{R} - \frac{h}{R\sqrt{2Rh-h^2}} \tag{5}$$

由式(5)可知，当 $R > h$ 时，根据偏导数求解可知 F_L 为增函数，可得切削阻力 F_L 与圆盘直径 D 呈正相关关系。

圆盘侧面正压力 N 计算式为

$$N = \iint_s \sigma \mathrm{d}s = kgs \tag{6}$$

其中

$$s = \int_0^h 2\sqrt{2Rh - h^2}\mathrm{d}h = R^2 \arccos\frac{R-h}{R} - (R^2 - Rh)\sqrt{2Rh - h^2} \tag{7}$$

式中　k——土壤变形比压，kg/cm^2

g——重力加速度，取 9.8 m/s^2

s——圆盘侧面与土壤接触面积，cm^2

σ——圆盘侧面所受水平方向的力，N

由式(6)、(7)可知，正压力 N 与圆盘直径 D 呈正相关。

圆盘剪切力 T 计算式为

$$T = \iint_s \tau \mathrm{d}s \tag{8}$$

式中　τ——圆盘所受土壤垂直方向的力，N

由式(7)、(8)可知，随着圆盘直径 D 的增加，正压力 N 增加。

通过分析双圆盘开沟时受到的主要作用力可知，圆盘直径 D 与双圆盘夹角 φ 会直接影响双圆盘开沟受力。在双圆盘设计过程中，关键参数有圆盘直径 D、聚点 m 位置、开沟宽度 b 以及双圆盘夹角 φ 4 个要素相互影响。由文献[25]得知，圆盘直径 D 取 300 ~ 350 mm，由前述对双圆盘受力分析可知，圆盘直径 D 增加会使圆盘的受力也增加，进而导致开沟阻力增加，但该开沟机构安装在两排缺口耙片之间，其开沟阻力明显降低，因此选择偏大的圆盘直径，即 D = 340 mm，且在保证排肥管安装的前提下，确定双圆盘夹角 φ 为 20°。由于新疆棉田的土壤中存有部分残膜和棉杆，为防止双圆盘开沟时堵塞，β 取 65°。将上述数值代入式(1)得出开沟宽度 b 为 34 mm。按照农具作业要求，施肥深度为 80 ~ 120 mm，结合式(2)得圆盘入土深度 h 为 94 ~ 150 mm。

2.1.2　开沟机构限深设计

施肥深度是评价整机工作性能的重要指标，为使施肥深度在合格范围内，需保证开沟机构入土能力和稳定性。因此双圆盘开沟机构利用压力弹簧来控制双圆盘开沟深度，工作时受力情况如图 5 所示。

在开沟施肥过程中，压力弹簧需具有一定的预拉力，双圆盘能受到土壤较大的反作用力。在双圆盘不往上抬的情况下，杆 CD 与杆 BC 处于共线，取杆 ABC 为研究对象，有

$$l_1 F_{Bx} + l_2 F_{By} - l_2 G - l_3 F_{Cx} - l_3 F_{Cy} = 0 \tag{9}$$

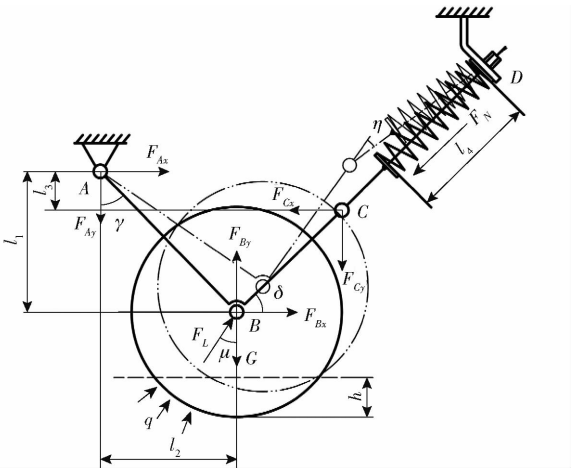


图 5　限深过程受力情况

Fig. 5　Force situation of process of limiting depth

其中

$$\begin{cases} F_{Cx} = F_N \sin\delta \\ F_{Cy} = F_N \cos\delta \\ F_{Bx} = F_M \sin\mu \\ F_{By} = F_M \cos\mu \end{cases} \tag{10}$$

$$F_N = k_a(l_0 - l_4) \tag{11}$$

式中　G——双圆盘重力，N

F_M——圆盘入土阻力，mm

δ——杆 BC 与水平方向夹角，(°)

μ——圆盘入土阻力与垂直方向夹角，(°)

F_N——弹簧预压力，N

k_a——弹簧弹性系数，N/mm

l_0——弹簧原始长度，mm

l_1——连接板铰接点与圆盘中心垂直距离，mm

l_2——连接板铰接点与圆盘中心水平距离，mm

l_3——连接板铰接点与限位杆铰接点垂直距离，mm

l_4——弹簧预压后长度，mm

稳定工作状态下，圆盘侧面正压力 N 和圆盘剪切力 T 对限深受力影响较小，故切削阻力 F_L 近似等于圆盘入土阻力，则

$$F_M \approx F_L \tag{12}$$

当施肥中遇到某处土块较硬使双圆盘向上抬起时(点 D 处为槽口，杆 CD 可以上下摆动)，弹簧将被压缩使入土压力增大，迫其恢复原有深度，此时杆 CD 与杆 BC 不共线，并假设点 A 和点 C 处于同一水平位置时压缩弹簧将承受最大入土阻力，如图 6 所示。

取杆 ABC 为研究对象，有

$$F'_L \sin\mu' l'_1 + F'_L \cos\mu' l'_2 - F'_N \cos(90° + \eta - \delta') = 0 \tag{13}$$

其中

$$F'_N = k_a(l_0 - l'_2) \tag{14}$$

式中　F'_L——最大入土阻力，N

μ'——最大入土阻力与垂直方向夹角，(°)

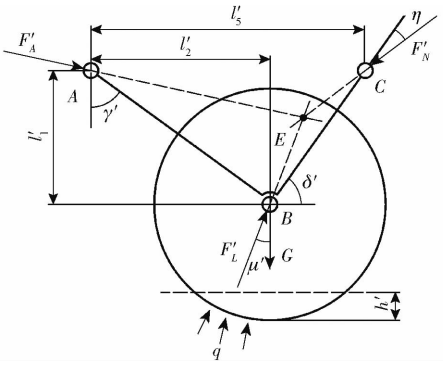


图 6 圆盘承受最大阻力时受力情况

Fig. 6 Force of disc when it bore maximum resistance

η——点 C 受力方向与杆 BC 夹角,(°)

F'_N——弹簧最大受压力,N

经以上分析可见,弹簧弹性系数小,需设定的预压力也应大,但预压力过大,易使开沟深度变浅,因此选择压力弹簧时,在保证有一定预压力的前提下应该选用弹性系数大的弹簧,当入土压力增大时以减少双圆盘上升量。

将入土深度 h =150 mm 代入式(4),得出圆弧刀刃与土壤接触弧长 l =246.99 mm。按照文献[26]的方法计算土壤阻力,计算式为

$$P_T = \frac{Ka_1b_1}{10^7} \tag{15}$$

式中 P_T——牵引阻力,N

K——土壤比阻,kPa

a_1——平均入土深度,mm

b_1——平均开沟宽度,mm

根据前期对新疆沙壤土的调研,整地后土壤比阻 K 取 14 kPa,由式(15)计算出双圆盘与土壤接触弧线土壤切削阻力为 29.1 N。当入土阻力持续增大时,难以判定其增大的范围,故将此过程看作是在未耕地条件下进行开沟,参照文献[27-28],开沟深度为 10 mm 的未耕地条件下双圆盘切削阻力 F_L 约为 1 226.7 N。

以碎土与镇压组件最底端作为土壤水平位置,确定该装置构件尺寸 l_1 =213 mm,l_2 =193 mm,l_3 =15 mm,l_4 =165 mm,并参考 GB/T 2089—2009《普通圆柱螺旋压缩弹簧》确定其参数:直径为 8 mm,弹簧中径为 45 mm、自由高度为 200 mm、节距为 16 mm,工作圈数为 13.5 圈、材料为 65Mn 钢、弹性系数 k_a 为 15.7 N/mm。由式(9)、(10)、(13)确定弹簧变形量 Δl 为 10~17 mm。

2.2 缺口耙片组设计

传统的圆盘耙整地系列的结构形式多为双列偏置式和对置式[25]。由于整机两列耙片之间需安装双圆盘开沟机构,两列间距需保持一定距离,为使整机布局紧凑、整地稳定及整地效果好,选择单体缺口耙片,以偏置方式排布。独立缺口耙片偏置排布方式与圆盘耙组偏置排布方式略有不同,独立缺口耙片每个都是独立体,可以实现前后列耙片组平行并排,但前后列依然存在不同的偏角,且同样需要偏置牵引,使得耙片整地作业能受力平衡,即耙片组在水平面、垂直面内受力平衡。

若使缺口耙片组在水平面内保持平衡,需要满足在偏牵引状态下的平衡条件,如图 7 所示。安装时前后列耙片朝向相反,查阅文献[25],确定前列耙片偏角为 15°,后列耙片偏角为 23°。

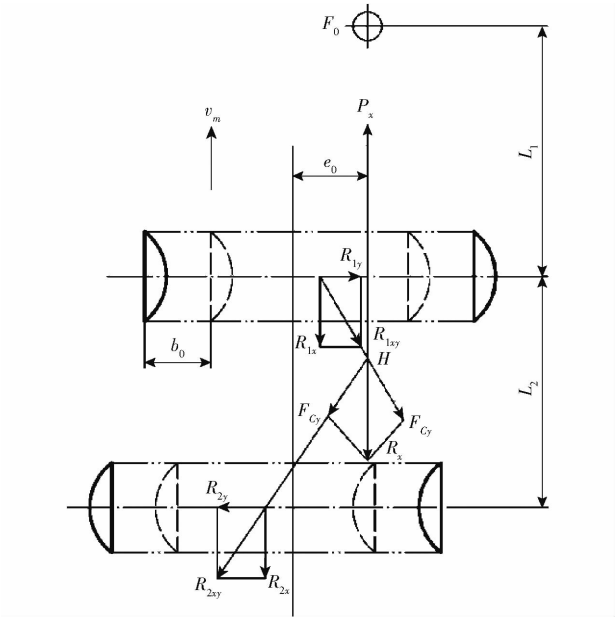


图 7 偏置式缺口耙片在水平内受力情况

Fig. 7 Balance of offset notch rake in horizontal direction

偏置量计算式为

$$e_0 = \frac{L_2R_{1y}}{R_{1x}+R_{2x}} \tag{16}$$

式中 L_2——前后列耙片间距,mm

R_{1x}——前耙组 x 轴向土壤阻力,N

R_{2x}——后耙组 x 轴向土壤阻力,N

R_{1y}——前耙组 x 轴向土壤阻力,N

由式(16)可得,缺口耙片偏置量为 282 mm,已耕地沙壤土圆盘式耙地比阻 k_b 取 21 kPa,确定耙片直径 D_r 为 510 mm 的轻型耙片。

由于力偶 $M_N=(D_r-a)/2$ 的存在,缺口耙片组凹面处耙深将变大,凸面处耙深将减小,因此,为使缺口耙片组在垂直面内受力平衡,保证其耙深一致,将耙片组重心配置在缺口耙片凸端处。缺口耙片在垂直面内受力情况如图 8 所示,其主要受自身重力 G_e、土壤对耙片的垂直分力 R_x 和轴向反作用力 R_2,根据耙片间距和耙片截面尺寸,确定重心偏移量 e_0 为 110 mm。根据机具作业幅宽,前后列设置独立缺

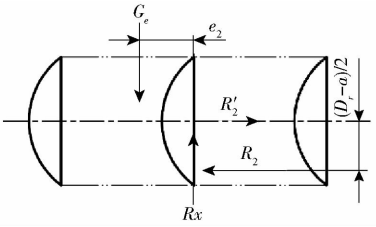


图 8　缺口耙片在垂直面内受力情况

Fig. 8　Balance of notch rake in vertical plane

口耙片各 18 个，耙片间距 b_0 为 253 mm，设计耙深 S_h 为 160 mm，耙幅宽度为 4 306 mm。

2.3　碎土与镇压组件设计

碎土与镇压组件包括镇压调节机构、碎土辊、固定框架、镇压辊 4 部分，如图 9 所示。该组件可施加压力、可仿形、可调节并且整体质量较小，镇压力调节只需改变机构上部螺母位置即可，不需要另加限位装置。

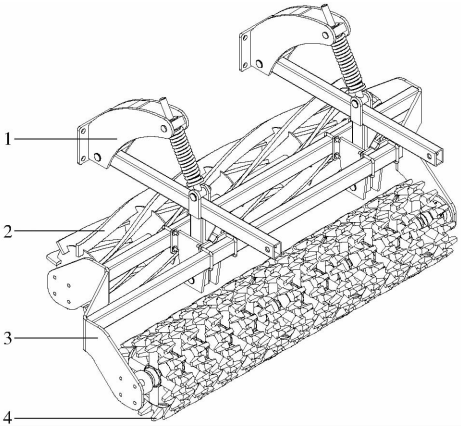


图 9　碎土与镇压组件结构示意图

Fig. 9　Broken soil and suppression component structure diagram

1. 镇压调节机构　2. 碎土辊　3. 固定框架　4. 镇压辊

镇压调节机构中压力弹簧是施加压力的关键零件，若压力弹簧刚度 k_ρ 小，则附加压力和仿形效果不佳，弹簧压力 F_y 的力臂 u_3 与地面作用力 N_y 的力臂 u_1 比值为 1∶2，如图 10 所示。

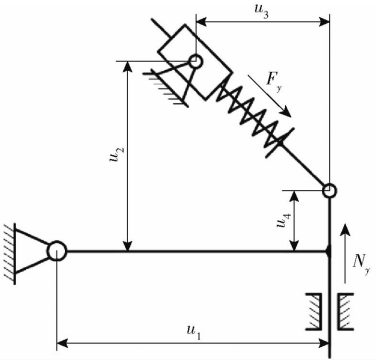


图 10　镇压调节示意图

Fig. 10　Suppression adjustment diagram

弹簧刚度计算式为[29]

$$k_\rho = \frac{G_y D_y}{8n\varepsilon^4} \tag{17}$$

其中

$$\varepsilon = D_y / d_1 \tag{18}$$

式中　G_y——弹簧材料切变模量，MPa

D_y——弹簧中径，mm

ε——旋绕比

n——弹簧有效圈数

d_1——弹簧直径，mm

由式(17)可知，弹簧旋绕比 ε 对弹簧刚度 k_ρ 影响最大。为使镇压调节机构设计较为紧凑和弹簧变形时具有良好的导向，根据弹簧支撑杆直径确定弹簧中径 D_y 为 40 mm(弹簧支撑杆直径为 38 mm)，选用弹簧直径 d_1 为 10 mm 的碳素弹簧钢丝，即 ε 为 4。所以 k_ρ 可达 10.2 N/mm，其中弹簧有效圈数 n 为 20。最后根据弹簧特性，设计整体机构，确定 u_1 为 442 mm，u_2 为 273 mm，u_3 为 312 mm，u_4 为 52 mm。

碎土辊用于破碎土块，主要包括曲形条、碎土辊支撑轴、曲形条座和圆形轴承座 4 部分，如图 11 所示。厚度为 13 mm 的曲形条共计 9 条并均布在曲形条座上，曲形条两端固定在左边曲形条座第 1 点和右边曲形条座第 5 点，从而形成曲条状，以实现良好的碎土效果。根据作业幅宽为 4 560 mm 和 3 组碎土与镇压组件之间需留有间隙，确定碎土辊工作长度 t_1 为 1 430 mm。

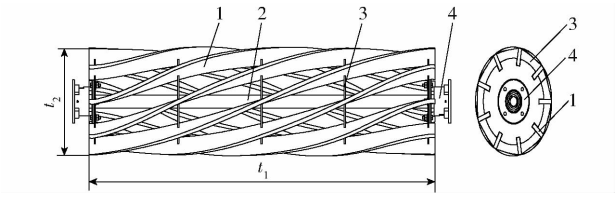


图 11　碎土辊示意图

Fig. 11　Broken soil roller schematic

1. 曲形条　2. 碎土辊支撑轴　3. 曲形条座　4. 圆形轴承座

镇压辊主要包括镇压单体、镇压支撑轴和圆形轴承座 3 部分，如图 12 所示。镇压轴上并排设置有 12 个镇压单体，镇压单体宽度设计为 108 mm，镇压辊工作长度 t_3 为 1 430 mm。

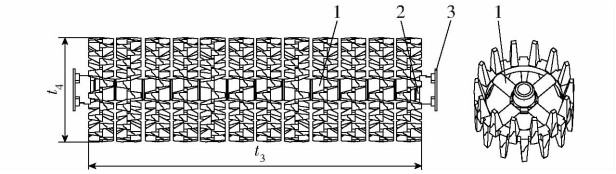


图 12　镇压辊示意图

Fig. 12　Pressure roller schematic

1. 镇压单体　2. 镇压支撑轴　3. 圆形轴承座

镇压辊正常转动条件为[25]

$$R_r \geqslant \frac{1\,000\omega_r}{Q_r f} \tag{19}$$

式中 R_r——镇压辊半径,mm

ω_r——轴套中摩擦力矩,N·mm

Q_r——镇压辊重力及其附加负荷,N

f——土壤对镇压辊摩擦因数

由于该组件滚动支撑选用圆形轴承座,ω_r 较小,所以算出的半径较小,但田间作业条件较恶劣,有较大的土块,为使镇压辊具有一定的越障性,增大土壤镇压能力,结合式(19),将镇压辊直径 t_4 设计为 310 mm。为保证碎土辊越障性和碎土能力,其直径 t_2 同样设计为 310 mm。

3 变量施肥控制系统设计

3.1 硬件选型设计

变量施肥控制系统由北斗 GNSS 接收天线、车载显控终端、高度传感器、变量施肥控制器、控制开关和排肥电机等组成,控制系统硬件构成如图 13 所示。

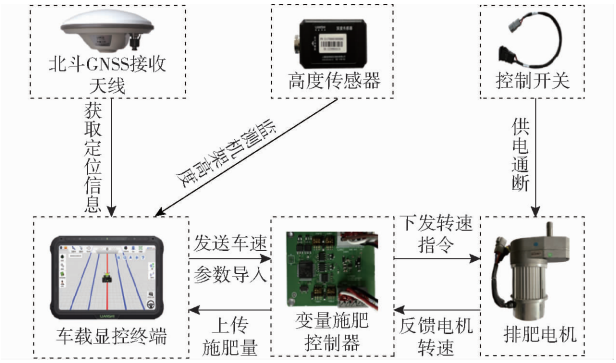


图 13 控制系统硬件构成图

Fig. 13 Hardware composition diagram of control system

变量施肥控制器核心处理器选用单片机 STM32F405;车载显控终端选用上海联适导航技术股份有限公司研发生产的 T100 型一体化智能机,支持 BDS、GPS 等多星系统定位;高度传感器测量范围为 0 ~ 50 m、波特率为 9 600 b/s(可调)、输出角度误差为 0.01°,排肥电机选用直流无刷电机,电机内部装有三相霍尔传感器用于检测转速,并反馈转速信息至变量施肥控制器中形成闭环控制。

北斗 GNSS 接收天线安装在拖拉机篷顶,与车载显控终端通过 RS - 485 通讯,将定位信息(定位精度为 0.25 ~ 0.45 m(CEP))及速度信息(测速精度为 0.03 m/s)发送给变量施肥控制系统。同时,如图 14 所示,安装在机架前方的高度传感器用于实时监测变量施肥联合整地机作业高度,监测值将作为变量施肥控制系统中农机具作业状态判定依据。



图 14 高度传感器安装实物图

Fig. 14 Height sensor installation physical map

车载显控终端采集系统所需的农机具作业幅宽、排肥器每转排肥的排肥标定、1 hm^2 目标施肥量以及农机具作业高度范围高度设定等基础信息,并通过 CAN 总线将信息传送至变量施肥控制器中。最后变量施肥控制器对接收的信息进行解析和处理,将车速信息和采集的基础信息转换成排肥电机转速指令,并通过 RS - 232 通讯将转速指令发送至排肥电机的驱动器。驱动器根据接收的转速指令驱动排肥电机工作,与此同时,电机转速情况通过电机内的霍尔编码器反馈至变量施肥控制器中,实现闭环控制。变量施肥控制器电路如图 15 所示。

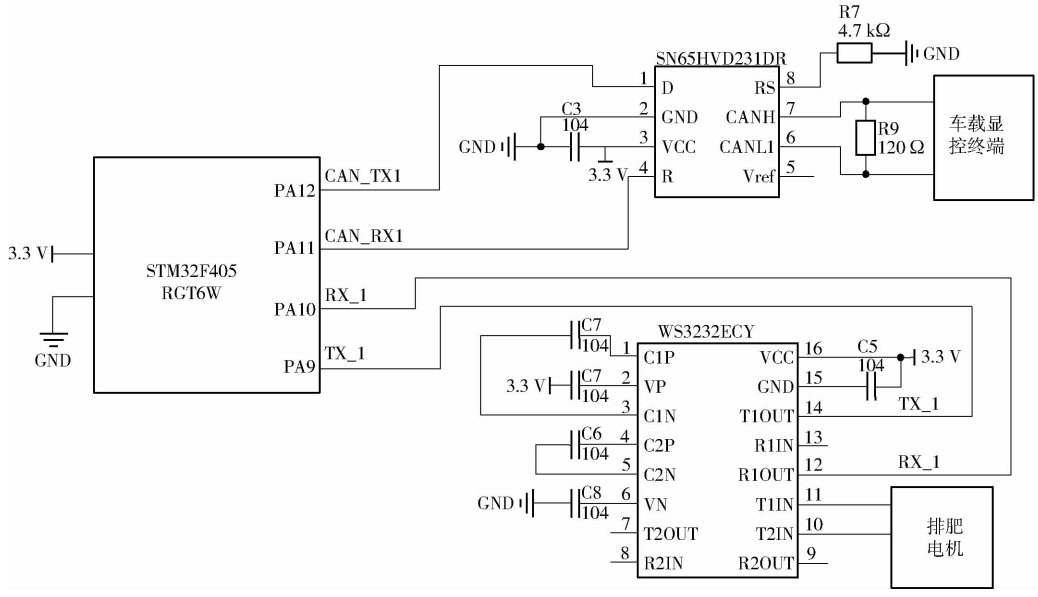


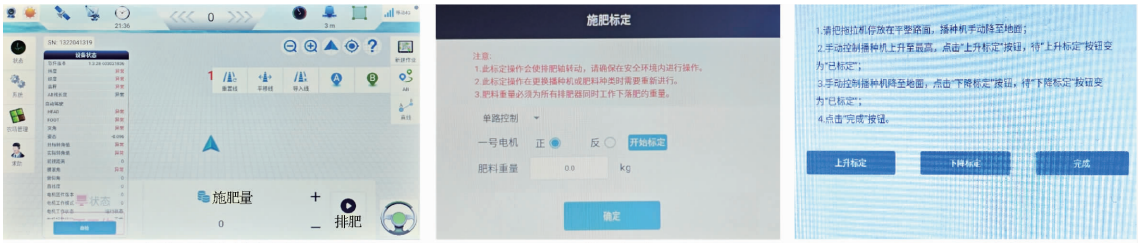
图 15 变量施肥控制器电路图

Fig. 15 Variable fertilization controller circuit diagram

3.2　软件设计

在上海联适导航技术股份有限公司的“智慧农业”软件界面中进行变量施肥控制应用程序的界面设计，应用程序主要包括项目参数设定与采集、作业参数显示等功能，程序界面如图 16 所示。

应用程序根据车载显控终端中北斗自动导航驾



(a) 车载显控终端主界面　(b) 排肥标定　(c) 上升、下降标定

图 16　变量施肥控制系统程序界面

Fig. 16　Variable fertilization control system software interface

驶系统获取整机行进速度；在变量施肥应用程序中设有“排肥标定”功能，该功能将控制排肥电机以转速 1 r/s 工作 60 s，对所有行排出的肥料称量并记为标定肥量，以此方式获取排肥电机转动一圈排出的肥量，当更换其他肥料或调节了排肥器外槽轮的有效工作长度时，需重新进行“排肥标定”来校正参数值；利用高度传感器实时监测整机垂直高度，整机在临近作业高度时，标记为“下降标定”，整机处于“上升标定”和“下降标定”的高度之间判定为“非作业状态”，整机处于“下降标定”高度以下判定为“作业状态”；根据整机结构设计和棉花种植要求建立整地作业幅宽；根据田间土壤养分确定农田 1 hm^2 施肥量，在程序中创建“目标施肥量”。当变量施肥应用程序参数采集完成时，车载显控终端主界面将显示“作业参数”，此时车载显控终端采集的参数信息和车速信息将发送至变量施肥控制器。

变量施肥控制器接收车载显控终端发送的信息，并对其进行解析，得到前进速度、机架高度、目标施肥量、排肥标定、作业幅宽等信息，随后判断整机是否处于“作业状态”，如判定结果为作业状态，则计算得出排肥电机转速，并将转速指令发送至排肥电机驱动器，控制系统流程如图 17 所示。

变量施肥控制器计算排肥电机转速表达式为

$$N_n = \frac{VBQ_m}{10^4 q_m} \tag{20}$$

式中　N_n——电机转速，r/s

Q_m——目标施肥量，kg/hm^2

V——机具前进速度，m/s

B——整地作业幅宽，m

q_m——排肥标定肥量，kg/r

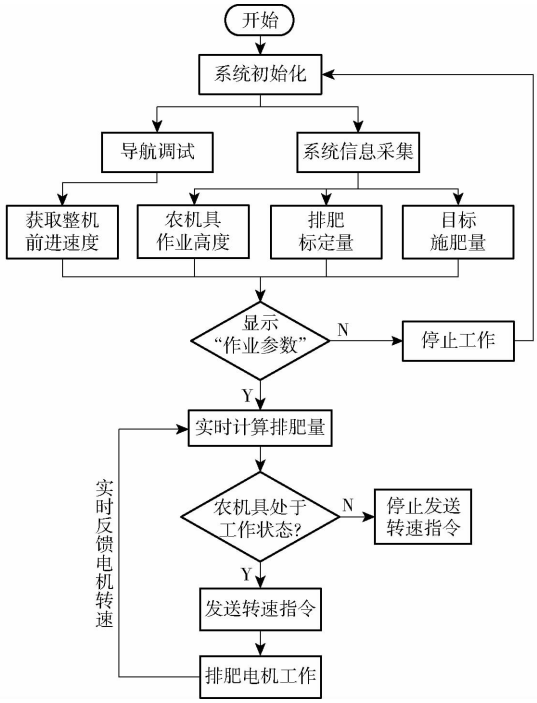


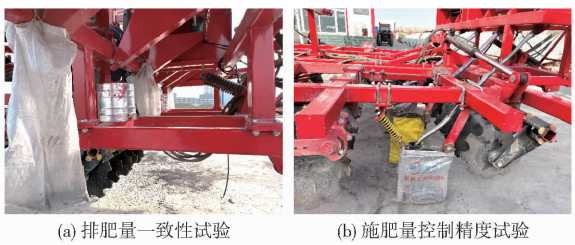
图 17　控制系统流程图

Fig. 17　Flowchart of control system

4　试验与结果分析

4.1　施肥性能试验

在新疆维吾尔自治区阿克苏市西工业园区空场地进行施肥性能试验，如图 18 所示。参照 GB/T 35487—2017《变量施肥播种机控制系统》对该样机的各行排肥量一致性、施肥量控制精度进行检验。试验肥料选用磷酸二铵颗粒肥，堆密度为 1.582 g/cm^3。



(a) 排肥量一致性试验　(b) 施肥量控制精度试验

图 18　施肥性能试验

Fig. 18　Fertilization performance test

4.1.1　排肥量一致性试验

各行间排肥量一致性反映样机施肥均匀性，采用各行排肥量一致性变异系数作为评价指标。排肥

器开度(外槽轮工作长度)为 20 mm 时排肥流动性较为稳定[30],故所有排肥器开度一致调至 20 mm,利用电机调整排肥轴转速 10 ~ 60 r/min,排肥工作 1 min,每个转速条件重复试验 3 次,取均值作为试验结果,将 6 行排出口从左到右依次编号,在每个排肥口放置小桶收集肥料并称量统计,试验结果如表 2 所示。

表 2 各行排肥量一致性试验结果

Tab. 2 Test results of fertilizing amount consistency among each row

排肥轴转速/(r·min⁻¹)	各行排肥量/kg						平均排肥量/kg	变异系数/%
	1	2	3	4	5	6		
10	0.631	0.657	0.689	0.621	0.629	0.667	0.653	4.27
20	1.323	1.274	1.364	1.317	1.238	1.341	1.310	3.51
30	1.883	1.934	1.979	1.825	1.85	1.922	1.899	3.01
40	2.587	2.652	2.711	2.529	2.524	2.663	2.611	3.93
50	3.162	3.324	3.375	3.129	3.156	3.329	3.246	3.33
60	4.027	4.131	4.389	3.976	4.019	4.162	4.117	3.66

由表 2 可知,当排肥轴转速为 10 r/min 时,各行排肥量一致性变异系数为 4.27%,随着转速的增加,各行之间的排肥一致性增加,排肥稳定性增加,一致性变异系数平均值为 3.62%,整机具有较好的排肥稳定性。

4.1.2 施肥量控制精度试验

施肥量控制精度是评价样机变量施肥控制系统作业性能的重要指标。以拖拉机后驱动轮中心为参照点建立 60 m 试验区间,在车速为 4、7、10 km/h[31]的条件下进行施肥作业,每个行驶速度条件下依次建立目标施肥量 225、300、375 kg/hm^2,收集排出的肥料并称量统计,试验重复进行 3 次,总肥量平均值作为试验结果,试验结果如表 3 所示。排肥量控制精度计算式为

$$C_\delta = \left(1 - \frac{|G_1 - G_2|}{G_2}\right) \times 100\% \tag{21}$$

式中 C_δ——排肥量控制精度,%

G_1——实际排肥总质量,kg

G_2——理论排肥总质量,kg

结果分析表明,3 种目标施肥量,在同等行驶速度条件下施肥控制精度变化不大,当行驶速度为 4、7 km/h 时,控制精度最小值分别为 96.70%、95.35%,达到 GB/T 35487—2017 的要求,当行驶速度 10 km/h 时,控制精度不小于为 94.14%,未达到要求。随着行驶速度增加,变量施肥控制系统匹配行驶速度的响应时间将增加,影响了整机在高速下的施肥控制精度。

表 3 排肥量控制精度试验结果

Tab. 3 Test results of fertilizer control accuracy

车速/(km·h⁻¹)	目标施肥量/(kg·hm⁻²)	理论排肥量/kg	实际施肥量/kg	绝对误差/kg	控制精度/%
4	225	6.15	6.353	0.203	96.70
	300	8.20	8.447	0.247	96.99
	375	10.25	10.551	0.301	97.06
7	225	6.15	6.436	0.286	95.35
	300	8.20	8.577	0.377	95.40
	375	10.25	10.703	0.453	95.58
10	225	6.15	6.507	0.357	94.20
	300	8.20	8.651	0.451	94.50
	375	10.25	10.851	0.601	94.14

4.2 田间试验

4.2.1 试验条件

田间试验于 2023 年 4 月在新疆维吾尔自治区兵团第一师三团场六连进行,坐标为 79.929 189°E、40.428 836°N。试验田长度约为 750 m,宽度约为 135 m,已经完成犁地作业,土壤类型为沙壤土,空气相对湿度为 17%。测得试验田 100 mm 深处平均土壤紧实度为 368 kPa,平均土壤含水率为 25%,试验肥料为磷酸二铵,田间试验如图 19 所示。



(a) 田间施肥整地

(b) 试验效果 (c) 试验结果测定

图 19 田间试验

Fig. 19 Field validation tests

4.2.2 试验方法及评价指标

参照 DG/T 096—2021《联合整地机》、GB/T 20346.2—2022《施肥机械第 2 部分:行间施肥机》,以耙深稳定性变异系数、地表平整度标准差、碎土率和施肥深度合格率作为评价指标,并划分试验区间长度为 120 m,宽度为试验样机 6 倍幅宽。

4.2.2.1 耙深稳定性试验

试验区间的前 3 倍工作幅宽范围内设置 12 处测点,试验样机在指定测点停止,以耙列轴线为测量基准,测量耙列两侧的入土深度。耙深稳定性变异

系数计算式为

$$L_p = \frac{S_L}{\bar{x}} \times 100\% \tag{22}$$

其中

$$S_L = \frac{\sum (x_i - \bar{x})}{n_1 - 1} \tag{23}$$

式中　x_i——各测点耙深，mm

$\bar{x}$——平均耙深，mm

n_1——耙深测点数

S_L——耙深标准差，mm

L_p——耙深稳定性变异系数，%

4.2.2.2　地表平整度标准试验

试验区随意划分 6 个测试区间，每个区间长度为 5 m 且均布 6 个测点，以试验样机幅宽为宽度，耙地后地表线上最高点作水平直线为基准线，测量测点至基准线垂直距离。地表平整度标准差计算式为

$$S_D = \sqrt{\frac{\sum (m_i - \bar{m})^2}{n_2 - 1}} \tag{24}$$

式中　m_i——各测点垂直距离，mm

$\bar{m}$——平均距离，mm　　n_2——记录点数

S_D——地表平整度标准差，mm

4.2.2.3　碎土率试验

在试验区随机抽取 6 处，以 400 mm × 400 mm 范围设计耙深层内的土样，经筛网筛除粒径不大于 50 mm 的土块。碎土率计算式为

$$C_S = \frac{G_S}{G_Z} \times 100\% \tag{25}$$

式中　G_S——粒径不大于 50 mm 的土块质量，kg

G_Z——土块总质量，kg

C_S——碎土率，%

4.2.2.4　施肥深度合格率试验

试验区间的后 3 倍工作幅宽范围内设置 9 处测点，测定行数为 6 行，拖拉机在速度 7 km/h 范围变速行驶，试验 6 样机正常施肥和整地作业之后，正对双圆盘开沟施肥位置扒开土层，以施肥整地覆土后的地面为基准面，测定肥料至基准面的距离，肥深为 80 ~ 120 mm 记为合格。平均施肥深度，施肥深度合格率计算式为

$$\gamma_h = \frac{N_3}{n_3} \times 100\% \tag{26}$$

式中　n_3——施肥测点数

N_3——施肥深度合格数

γ_h——施肥深度合格率，%

4.2.3　试验结果

由表 4 可知，试验样机平均耙深为 147.33 mm，耙深稳定性变异系数不大于 5.34%，各测试点耙深浮动较小，说明耙地性能稳定；由表 5 可知，试验样机地表平整度标准差不大于 4.69 mm，标准差平均值为 4.20 mm，各整地组件配合作业具有良好的整地效果；由表 6 可知，试验样机碎土率为 96.16%，因沙壤土较为松散，田间板结情况较少，故碎土率较高，以上 3 种评价指标均达到 DG/T 096—2021 要求。由表 7 可知，施肥平均深度为 95 mm，施肥深度在 80 ~ 120 mm 范围内肥深合格率为 87.04%，达到

表 4　耙深稳定性试验结果

Tab.4　Measurement results of rake depth stability

测点序号	耙深/mm	
	左侧	右侧
1	150.0	157.0
2	155.0	145.5
3	147.5	157.0
4	135.0	145.0
5	150.0	147.5
6	160.0	155.0
7	145.5	140.0
8	140.0	145.0
9	157.0	142.5
10	135.5	140.0
11	147.5	135.0
12	145.0	150.0
平均值/mm	147.33	146.63
标准差/mm	7.87	7.03
变异系数/%	5.34	4.80

表 5　地表平整度试验结果

Tab.5　Surface roughness measurement results　mm

序号	各测点垂直距离						平均值	标准差
	1	2	3	4	5	6		
1	12.5	2.0	7.0	14.5	6.5	6.0	8.08	4.60
2	1.0	11.0	9.0	4.0	7.0	11.5	7.25	4.12
3	6.0	13.5	1.5	5.0	9.5	9.5	7.50	4.21
4	13.5	10.5	3.0	7.0	3.0	2.0	6.50	4.69
5	7.5	12.5	3.5	2.0	8.0	6.0	6.58	3.71
6	4.0	13.0	7.0	5.0	1.5	5.5	6.00	3.89

表 6　碎土率试验结果

Tab.6　Measurement results of broken soil rate

序号	土块质量(粒径大于 50 mm)/kg	土块质量(粒径不大于 50 mm)/kg	总质量/kg	碎土率/%
1	0.40	12.33	12.73	96.86
2	0.62	8.44	9.06	93.16
3	0.71	10.35	11.06	93.58
4	0.30	9.26	9.56	96.86
5	0.42	13.73	14.15	97.03
6	0.21	13.05	13.26	98.42
平均值	0.44	11.19	11.64	96.19

表 7 施肥深度试验结果

Tab. 7 Fertilization depth test results

序号	测定点施肥深度/mm						平均值/ mm	施肥深度合格点数
	1	2	3	4	5	6		
1	76	80	84	98	92	83	85.5	5
2	87	93	96	103	77	88	90.7	5
3	94	82	107	85	97	87	92.0	6
4	74	93	101	83	110	85	91.0	5
5	93	95	115	84	82	89	93.0	6
6	81	99	73	80	87	83	83.8	5
7	101	96	125	112	114	98	107.7	5
8	112	107	104	124	110	133	115.9	4
9	97	88	103	86	94	101	93.3	6

GB/T 20346.2—2022 的要求,在试验过程,发现作业速度过快时,整地组件和开沟机构甩土较为严重,且作业遇到小土堆时,平土板处土壤分流不及时,导致施肥深度有起伏,影响了施肥深度合格率。

5 结论

(1)设计了一种变量施肥整地联合作业机,实现一次进地可完成耙地、变量施肥、平土、碎土和镇压等多道作业工序。通过静力学分析得到了影响其工作性能的关键因素,并确定了关键部件结构参数;基于北斗自动导航驾驶系统获取行驶速度,并以 STM32F405 为核心处理器,搭建了变量施肥控制系统硬件,控制系统可以匹配不同的肥料种类和目标施肥量。

(2)进行了各行排肥量一致性排肥试验、排肥量控制精度试验和试验样机田间试验。试验结果表明,当排肥轴转速为 10 ~ 60 r/min 时,各行排肥量一致性变异系数不大于 4.27%,各行之间排肥均匀、稳定;排肥量控制精度随着拖拉机行驶速度提高而降低,当行驶速度 4、7、10 km/h 时,排肥量控制精度不小于 96.70%、95.35% 和 94.14%,该整机具有较好的排肥稳定性和准确性。

(3)以耙深稳定性、地表平整度标准差、碎土率为整地性能评价指标,以施肥深度合格率为肥深性能评价指标,开展了田间试验。试验结果表明,耙深稳定性变异系数不大于 5.34%,地表平整度标准差不大于 4.69 mm,碎土率为 96.16%,施肥平均深度为 95 mm,施肥深度合格率为 87.04%。该样机工作效率高、整地效果良好、施肥量控制精准,各项指标均达到施肥机械和整地机械标准要求。

参 考 文 献

[1] 武建设, 陈学庚. 新疆兵团棉花生产机械化发展现状问题及对策[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 5 - 10.
WU Jianshe, CHEN Xuegeng. Present situation, problems and countermeasures of cotton production mechanization development in Xinjiang Production and Construction Corps[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(18): 5 - 10. (in Chinese)

[2] 国家统计局. 关于 2023 年棉花产量的公告[N]. 中国信息报, 2023 - 12 - 26.

[3] 汤明尧,沈重阳,张炎,等. 新疆棉花化肥利用效率研究[J]. 中国土壤与肥料, 2022(4): 161 - 168.
TANG Mingyao, SHEN Chongyang, ZHANG Yan, et al. Investigation of fertilizer use efficiency for cotton in Xinjiang[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2022(4): 161 - 168. (in Chinese)

[4] 吕宁,祝宏辉,程文明. 农业化肥减量及生物肥料替代可行性研究:来自新疆棉区调查数据的实证[J]. 地理研究, 2022, 41(5): 1459 - 1480.
LÜ Ning, ZHU Honghui, CHENG Wenming. Feasibility study on reduction of agricultural chemical fertilizer and substitution of bio-fertilizer: an empirical study of cotton survey data in Xinjiang[J]. Geographical Research, 2022, 41(5): 1459 - 1480. (in Chinese)

[5] 陈金,赵斌,衣淑娟,等. 我国变量施肥技术研究现状与发展对策[J]. 农机化研究, 2017, 39(10): 1 - 6.
CHEN Jin, ZHAO Bin, YI Shujuan, et al. Research on present situation and the development countermeasures of variable rate fertilization technology in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(10): 1 - 6. (in Chinese)

[6] 付宇超,袁文胜,张文毅,等. 我国施肥机械化技术现状及问题分析[J]. 农机化研究, 2017, 39(1): 251 - 255, 263.
FU Yuchao, YUAN Wensheng, ZHANG Wenyi, et al. Present situation and problem analysis of the technology of fertilizer mechanization in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(1): 251 - 255, 263. (in Chinese)

[7] 初金哲,庄卫东,衣淑娟. 精准变量施肥控制软件设计研究[J]. 农机化研究, 2019, 41(12): 110 - 114, 124.
CHU Jinzhe, ZHUANG Weidong, YI Shujuan. Research on the design of precision variable fertilizer control software[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(12): 110 - 114, 124. (in Chinese)

[8] 任灵杰,田敏,李江全,等. 我国变量施肥技术的研究现状与发展分析[J]. 农机化研究, 2023, 45(10): 10 - 15, 23.
REN Lingjie, TIAN Min, LI Jiangquan, et al. Research status and development analysis of variable fertilization technology in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(10): 10 - 15, 23. (in Chinese)

[9] MICHÁLEK T, ZELENKA J. Modelling of flexi-coil springs with rubber-metal pads in a locomotive running gear[J]. Applied and Computational Mechanics, 2015, 9(1): 21 - 30.

[10] 安晓飞,付卫强,魏学礼,等. 基于处方图的垄作玉米四要素变量施肥机作业效果评价[J]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 66 - 70.
AN Xiaofei, FU Weiqiang, WEI Xueli, et al. Evaluation of four-element variable rate application of fertilization based on maps [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 66 - 70. (in Chinese)

[11] 白由路. 国内外施肥机械的发展概况及需求分析[J]. 中国土壤与肥料, 2016(3): 1-4.
BAI Youlu. Development and demand analysis of fertilizing machinery at home and abroad[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2016(3): 1-4. (in Chinese)

[12] 孙冬霞,张爱民,宫建勋. 1SZL-250A 型深松旋耕施肥联合整地机的设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(4): 1-6.
SUN Dongxia, ZHANG Aimin, GONG Jianxun. Design and experiment on 1SZL-250A type sub soiling rotary tillage fertilizer combined soil working machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(4): 1-6. (in Chinese)

[13] 林静,王磊,李宝筏,等. 2ZZ-3 型深松培垄施肥联合作业机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 9-17.
LIN Jing, WANG Lei, LI Baofa, et al. Design and test of 2ZZ-3 type deep scarification-terrace ridge-fertilization combine inter till machine[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(24): 9-17. (in Chinese)

[14] 夏俊芳,许绮川,王志山,等. 2BFS-8 型水稻芽种播种施肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 44-47.
XIA Junfang, XU Qichuan, WANG Zhishan, et al. Design and test of 2BFS-8 type rice bud seed sowing and fertilizer machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 44-47. (in Chinese)

[15] 金鑫,李倩文,苑严伟,等. 2BFJ-24 型小麦精量播种变量施肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 84-92.
JIN Xin, LI Qianwen, YUAN Yanwei, et al. Design and test of 2BFJ-24 type variable fertilizer and wheat precision seed sowing machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(5):84-92. (in Chinese)

[16] 付乾坤,荐世春,贾洪雷,等. 玉米灭茬起垄施肥播种机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(4): 9-16.
FU Qiankun, JIAN Shichun, JIA Honglei, et al. Design and experiment on maize stubble cleaning fertilization ridging seeder [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(4): 9-16. (in Chinese)

[17] 王辉,刘艺豪,周利明,等. 施肥播种机肥料流量分段式 PID 控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023,54(2): 32-40, 94.
WANG Hui, LIU Yihao, ZHOU Liming, et al. Design and test of fertilizer flow piecewise PID control system of fertilizer planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(2):32-40, 94. (in Chinese)

[18] 马旭,赵旭,刘赛赛,等. 水稻高速插秧机固体颗粒肥料变量施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023,54(9): 99-110.
MA Xu, ZHAO Xu, LIU Saisai, et al. Design and experiment of solid particle fertilizer variable rate fertilization device for high-speed rice transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(9):99-110. (in Chinese)

[19] 王秀,赵春江,孟志军,等. 精准变量施肥机的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2004,20(5): 114-117.
WANG Xiu, ZHAO Chunjiang, MENG Zhijun, et al. Design and experiment of variable rate fertilizer applicator[J]. Transactions of the CSAE, 2004,20(5): 114-117. (in Chinese)

[20] 王金武,潘振伟,周文琪,等. SYJ-2 型液肥变量施肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 53-58.
WANG Jinwu, PAN Zhenwei, ZHOU Wenqi, et al. Design and test of SYJ-2 type liquid variable fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(7):53-58. (in Chinese)

[21] 刘成良,苑进,刘建政,等. 基于 ARM 和 DSP 的双变量施肥控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(增刊): 233-238.
LIU Chengliang, YUAN Jin, LIU Jianzheng, et al. ARM and DSP-based bivariable fertilizing control system design and implementation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.): 233-238. (in Chinese)

[22] 左春柽,张守勤,马成林,等. 圆盘开沟器减粘降阻的试验研究[J]. 农业机械学报, 1997,28(增刊): 41-44.
ZUO Chuncheng, ZHANG Shouqin, MA Chenglin, et al. The study on the adhesion-decreasing and resistance-reducing of disc opener[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1997,28(Supp.): 41-44. (in Chinese)

[23] 张守勤,左春柽,马成林. 圆盘开沟器受力模型的研究[J]. 农业机械学报, 1998,29(增刊): 71-75.
ZHANG Shouqin, ZUO Chuncheng, MA Chenglin. The study on the force model of disc opener[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1998,29(Supp.): 71-75. (in Chinese)

[24] 薛维良. 仿生减阻双圆盘开沟器设计与研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
XUE Weiliang. Design and research on bionic double disc opener with drag reducing[D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)

[25] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(上册)[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.

[26] 周训谦,张建,肖洁,等. 基于 LS-dyna 的双圆盘开沟器切削过程的仿真[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(5): 288-291, 307.
ZHOU Xunqian, ZHANG Jian, XIAO Jie, et al. Simulation of cutting process with double-disc colter based on LS-dyna[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(5): 288-291, 307. (in Chinese)

[27] 张建,王淑红,王颖,等. 基于 LS-dyna 的油菜单圆盘开沟器切削茎秆土壤动态仿真[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2015, 30(6): 941-945.
ZHANG Jian, WANG Shuhong, WANG Ying, et al. Dynamic simulation of soil cutting with coleseed single-disc colter based on LS-dyna[J]. Journal of Yunnan Agricultural University(Natural Science), 2015, 30(6): 941-945. (in Chinese)

(下转第 284 页)

[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(12):23 - 32. (in Chinese)
[23] PASI P S, TIMO O. Automatic working depth control for seed drill using ISO 11783 remote control messages[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 116: 30 - 35.
[24] 刘宏俊. 东北丘陵地区播种机镇压装置关键技术研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
LIU Hongjun. Research on key technologies of press device for planter in hilly region of northeast China[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2019. (in Chinese)
[25] 付卫强, 董建军, 梅鹤波, 等. 玉米播种单体下压力控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018,49(6):68 - 77.
FU Weiqiang, DONG Jianjun, MEI Hebo, et al. Design and test of maize seeding unit downforce control system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(6):68 - 77. (in Chinese)
[26] 高原源, 翟长远, 杨硕, 等. 精密播种机下压力和播深 CAN 总线监控与评价系统研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 15 - 28.
GAO Yuanyuan, ZHAI Changyuan, YANG Shuo, et al. Development of CAN-based downforce and sowing depth monitoring and evaluation system for precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(6): 15 - 28. (in Chinese)
[27] 薛冰, 周利明, 牛康, 等. 基于自适应模糊 PID 的小麦播深控制系统研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊 1):93 - 102.
XUE Bing, ZHOU Liming, NIU Kang, et al. Sowing depth control system of wheat planter based on adaptive fuzzy PID[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(Supp. 1):93 - 102. (in Chinese)
[28] 王志超, 杨然兵, 陈栋泉, 等. 基于 PID 调控的割台仿形高度控制系统的设计[J]. 农机化研究, 2024,46(2):97 - 102.
WANG Zhichao, YANG Ranbing, CHEN Dongquan, et al. Design of header profiling height control system based on PID regulation[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2024,46(2):97 - 102. (in Chinese)
[29] 刘伟健, 罗锡文, 曾山, 等. 基于模糊 PID 控制的再生稻自适应仿形割台性能试验与分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(10):1 - 9.
LIU Weijian, LUO Xiwen, ZENG Shan, et al. Performance test and analysis of the self-adaptive profiling header for ratooning rice based on fuzzy PID control[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(10):1 - 9. (in Chinese)
[30] 宫元娟, 金忠博, 白晓平, 等. 甘蔗收获机割台随动控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(2):119 - 128.
GONG Yuanjuan, JIN Zhongbo, BAI Xiaoping, et al. Design and experiment of servo control system for sugarcane header[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(2):119 - 128. (in Chinese)
[31] 石磊, 王娟铃, 许明祥, 等. 陕西省农田土壤紧实度空间变异及其影响因素[J]. 西北农业学报, 2016, 25(5):770 - 778.
SHI Lei, WANG Juanling, XU Mingxiang, et al. Spatial variability and influence factors of cropland soil compaction in Shaanxi Province[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2016, 25(5):770 - 778. (in Chinese)
[32] 左爱华. 玉米沟播机械化作业技术规程[J]. 农业科技与装备, 2022(2):8 - 9.
ZUO Aihua. Technical regulations for mechanized operation of corn furrow sowing[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2022(2):8 - 9. (in Chinese)
[33] 李毅, 梁嘉平, 王小芳, 等. 改善土壤理化性质和作物出苗率的最佳生物质炭施用量[J]. 土壤学报, 2024, 61(1): 64 - 76.
LI Yi, LIANG Jiaping, WANG Xiaofang, et al. The most appropriate biochar application rate for improving soil physicochemical properties and crop germination rates[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(1):64 - 76. (in Chinese)
[34] 中华人民共和国农业部. NY/T 2851—2015 玉米机械化深松施肥播种作业技术规范[S]. 北京: 中国农业出版社, 2015.

(上接第 261 页)

[28] 车建壮,于磊,李其昀. 双圆盘式小麦免耕播种机设计与试验研究[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2011, 25(6): 25 - 28.
CHE Jianzhuang, YU Lei, LI Qiyun. Design and study on the double-disk no-till planter for wheat[J]. Journal of Shandong University of Technology(Natural Science Edition), 2011, 25(6): 25 - 28. (in Chinese)
[29] 闻邦椿. 机械设计手册(第 3 卷): 机械零部件设计[M]. 5 版. 北京: 机械工业出版社, 2012.
[30] 祝清震,武广伟,陈立平,等. 槽轮结构参数对直槽轮式排肥器排肥性能的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 12 - 20.
ZHU Qingzhen, WU Guangwei, CHEN Liping, et al. Influences of structure parameters of straight flute wheel on fertilizing performance of fertilizer apparatus[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 12 - 20. (in Chinese)
[31] 张季琴,刘刚,胡号,等. 排肥单体独立控制的双变量施肥控制系统研制[J]. 农业工程学报, 2021, 37(10): 38 - 45.
ZHANG Jiqin, LIU Gang, HU Hao, et al. Development of bivariate fertilizer control system via independent control of fertilizing unit[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(10): 38 - 45. (in Chinese)