

# 车载智能土壤采样系统设计与试验

贾洪雷<sup>1,2</sup> 房殿海<sup>1</sup> 刘慧力<sup>1,2</sup> 郭慧<sup>1,2</sup> 张胜伟<sup>1</sup> 卢长刚<sup>3</sup>

(1. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130022; 2. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130022;  
3. 吉林大学汽车工程学院, 长春 130022)

**摘要:** 针对传统土壤样本采集操作复杂、劳动强度大、采集精度低和缺乏信息化管理的问题,设计了一种车载智能土壤采样系统。该系统安装于无人驾驶采样车上,系统包括土壤样本自动采集装置和电气控制系统。对系统整个工作过程进行分析,确定了各关键机构及控制硬件的主要工作参数。电气控制系统以运动控制器为控制核心,土壤样本自动采集装置对不同深度范围的土样进行采集,并按地理位置信息分类收集,通过RFID读写器将GPS系统定位所解算的目标采样点的经纬度地理信息和采样深度等信息写入收集土样采样筒底部的电子标签中。性能试验表明,安装于无人驾驶采样车的车载智能土壤采样系统工作运行稳定、可靠,能够对农耕层0~200 mm任意深度范围的土壤进行自动分层采样,效率高、精度高、全程自动化,能够按照位置信息进行分类管理,较好地满足了智能化高质量采集土样的需求。

**关键词:** 智能土壤采样系统; 车载; 运动控制器; RFID读写器

中图分类号: S237 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)11-0292-10

OSID:



## Design and Experiment of Vehicle-mounted Intelligent Soil Sampling System

JIA Honglei<sup>1,2</sup> FANG Dianhai<sup>1</sup> LIU Huili<sup>1,2</sup> GUO Hui<sup>1,2</sup> ZHANG Shengwei<sup>1</sup> LU Changgang<sup>3</sup>

(1. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China

2. Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China

3. College of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of complicated operation of traditional soil sample collection, high labor intensity, low collection accuracy and lack of information management, a vehicle-mounted intelligent soil sampling system was designed. The system was installed on an unmanned sampling vehicle and included an automatic soil sample collection device and an electrical control system. The key working parameters of each mechanism and control hardware were determined, and the entire working process of the system was analyzed; the electrical control system was controlled by a motion controller. The soil sample automatic collection device collected soil samples in different depth ranges and collected them according to geographic location information. The geographic information of longitude and latitude and sampling depth of the target sampling point calculated by the GPS system were written into the electronic tag at the bottom of the soil sampling cylinder through the RFID reader. Through performance tests, it was shown that the designed vehicle-mounted intelligent soil sampling system worked stably and reliably with the unmanned sampling vehicle. It can automatically layer samples of soil in any depth range of 0 ~ 200 mm in the agricultural layer with high efficiency and high accuracy, full-process automation and classified management according to location information, which satisfied the need for intelligent and high-quality soil sample collection.

**Key words:** intelligent soil sampling system; vehicle-mounted; motion controller; RFID reader

收稿日期: 2020-07-18 修回日期: 2020-09-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0300207-5)和吉林省科技发展计划项目(20190303082SF)

作者简介: 贾洪雷(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事仿生智能农业机械与保护性耕作研究,E-mail: jiahl@vip.163.com

通信作者: 刘慧力(1970—),男,高级工程师,主要从事测控技术及电气自动化研究,E-mail: liuhuili@163.com

## 0 引言

土壤是生态环境的基础,土壤成分测定在精准农业和测土配方施肥中具有重要地位<sup>[1-3]</sup>。目前,农药过度使用、污水灌溉和大气重金属沉降造成的土壤重金属污染已经严重影响土壤的生态功能、人类健康和土地的可持续利用<sup>[4-5]</sup>。对受重金属污染的土壤进行采样,一般取土壤的耕作层作为样品<sup>[6-7]</sup>。东北地区耕地面积广,土壤解冻到播种的时间短,需要设计一种车载智能土壤采样系统来快速检测土壤中的污染物含量。取土器是采集土壤样本的主要工具之一,其可靠性、操作方便性和机动性不仅可以减少土壤调查工作量、提高取土效率,而且可以扩展土壤采样的适应性<sup>[6]</sup>。

目前,我国使用的农业用取土器仍以手动居多,其适用范围较窄。周雪青等<sup>[8]</sup>设计了一种土壤容重测定用分段式原状取土器,将环刀法和原状取土管法结合,取土效率提高了 4~8 倍。邵睿等<sup>[9]</sup>在分析中国科学院水利部水土保持研究所土壤采样器的基础上,结合现有电动螺旋压力机传动形式,将原有取土器由重力锤击式改为螺旋传动与齿轮传动相结合,在刮土清理和定位方式上加以改进,提高了整机工作可靠性。倪祥祥等<sup>[10]</sup>设计了一台螺旋取土钻,该钻切碎土壤并推升土壤向上移动,将土壤直接输送到收集盒内,具有减小阻力和减粘脱土的作用。沈立娜等<sup>[11]</sup>提出一种中空螺旋无水取土钻具,采用无水循环、单动双管回转钻进工艺和超前管靴合金钻头结构设计,降低了对土样的扰动,但需人力手动操作。张和锋等<sup>[12]</sup>设计了直压式汽油机取土器,该取土器以汽油机为动力直压进入土壤,便于携带、操作简单、取土效率高。张凯等<sup>[13]</sup>设计了车载液压振动式土壤采集装置,通过设计具有双凸结构的采样管提高了装置的可靠性与稳定性。文献[14-15]设计了适应多种环境的车载土壤快速采集装置,通过液压冲击器驱动采样管上下移动,完成取土作业。国外的取土器研究始于 20 世纪 60 年代,大部分以机械式为主,但需要手动操作<sup>[16-17]</sup>。KARAHASHI 等<sup>[18]</sup>设计了一种新型土芯取样器,以电机为动力源,取土时三脚架将装置固定在地面,消除了挖掘时穿透阻力反作用力造成的装置升力,取土精度和效率较好。SEWART<sup>[19]</sup>设计了小增量电取土器,使用电动线性执行器将土芯从取土管中推出,降低了采样变异性。在回转压入式取土器中有代表性的主要有 Pitcher 型取土器和 Denison 型取土器,它们在管靴上端安装了卡簧,可以起到防止土样脱落的作用,但卡簧容易损坏,另外取土器的价格和使用成本相

对较高,取土工艺复杂<sup>[20]</sup>。ABU-HAMDEH 等<sup>[21]</sup>设计了一种与拖拉机配套使用的液压驱动式取土装置,利用拖拉机自带的液压系统提供动力,能够进行不同深度的土样采集,省时省力。随着农业智能化技术的发展,车载智能土壤采集系统将具有良好的应用前景。通过设计车载土壤采集装置、开发土壤样本信息管理平台,可快速采集土壤样本,并实现土样信息化管理<sup>[22-24]</sup>。

本文在前期研究基础上,设计一种安装于无人驾驶车的车载智能土壤采样系统,由电气控制系统自动控制采集土壤样本、收集土样和标识土壤样本,以提高采集全程的自动化程度,减轻劳动强度。

## 1 整机结构与工作原理

### 1.1 设计要求

依据 HJ/T 166—2004《土壤环境监测技术规范》要求,针对农田土壤环境检测,一般采集耕作层土壤作为土样,种植农作物的土壤取样深度在 0~20 cm。

整体设计的基本要求:实现对种植农作物 0~20 cm 内任意深度范围的土壤自动快速采集,实现分层取样;实现对不同采样点的土样进行地理信息标识并分类;保证全过程采集土样自动化,高效率高精度采集土样。

### 1.2 整机结构

车载智能土壤采样系统安装在无人驾驶采样车上,整机主要由无人驾驶系统和车载智能土壤采样系统组成。任务由远程计算机发布后,无人驾驶车到达指定的采样点,为车载智能土壤采样系统实现采集土样提供目标样本;车载智能土壤采样系统的工作过程由电气控制系统控制完成。整机结构如图 1 所示。

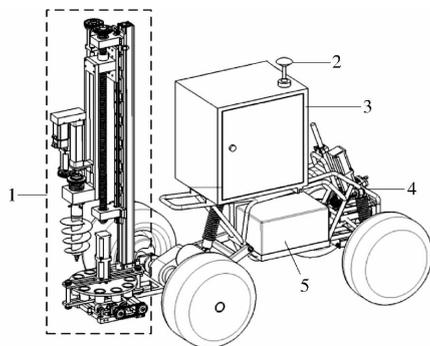


图 1 整机结构图

Fig. 1 Structure sketch of overall machine

1. 土壤样本自动采集装置 2. GPS 天线 3. 电控箱 4. 无人驾驶车 5. 电池

### 1.3 系统组成与土样采集流程

车载智能土壤采样系统由土壤样本自动采集装

置和电气控制系统组成。土壤样本自动采集装置由升降机构、取土机构、收集土样机构等组成,如图2所示。升降机构可控制取土机构的自动升降;取土机构在升降机构的控制下,可自动钻土、自动采集土样;收集土样机构在取土机构采集完土样后,对不同地理位置的土样进行分类收集并实时标识不同地理位置的土样。电气控制系统位于电控箱内,电控箱内安装工业控制计算机、运动控制器、电源等电气设备,用于升降机构、取土机构、收集样土机构之间的通信及控制。

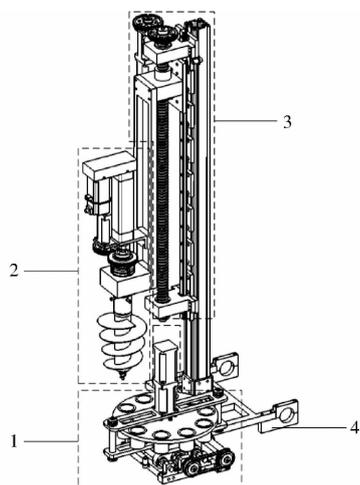


图2 土壤样本自动采集装置结构图

Fig.2 Sketch of automatic soil sample collection device

1. 收集土样机构 2. 取土机构 3. 升降机构 4. 机架

车载智能土壤采样系统作业流程如图3所示,整个土壤样本采集过程在电气控制系统的控制下完成:由升降机构控制取土机构向下移动,当钻尖即将到达地面时,螺旋输送机开始旋转,在取土机构下降速度和螺旋输送机转速组合参数的控制调节下,取土机构实现钻土功能。当钻尖到达设定深度时,取土机构采集土样。随后升降机构控制取土机构向上移动,螺旋输送机随之向上移动的同时反向旋转,散落在螺旋叶片的土壤在离心力的作用下落入土槽内,当钻尖脱离地面后螺旋输送机停止反向旋转,升降机构继续带动取土机构向上移动直至恢复零位。然后,收集土样机构到达取土机构正下方收集采集的土样,随后收集土样机构恢复至零位。工业控制计算机控制RFID读写器将采样点的定位信息写入采集筒底面的电子标签内。

## 2 关键机构设计

### 2.1 升降机构

#### 2.1.1 工作原理

升降机构主要由丝杠、导轨、伺服电机、减速器、位置传感器等部件组成,如图4所示。

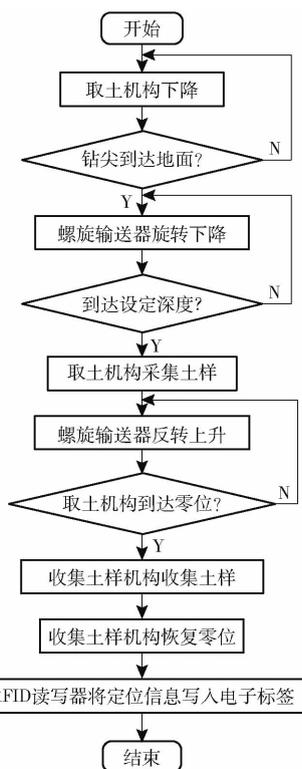


图3 车载智能土壤采样系统作业流程图

Fig.3 Flow chart of soil sample automatic collection system

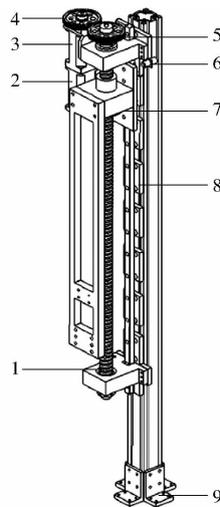


图4 升降机构结构示意图

Fig.4 Schematic of lifting system

1. 丝杠 2. 伺服电机 3. 减速器 4. 主动齿轮 5. 被动齿轮  
6. 位置传感器 7. 滑台 8. 导轨 9. 支架

在电气控制系统的控制下,升降机构驱动取土机构(图2)从零位开始运动,在地面以上以速度 $v_1$ 上下移动。当螺旋输送机向下钻进工作时和向上运动钻尖脱离地面之前,取土机构以速度 $v_2$ 上下移动。当取土机构上升返回零位时,位置传感器感应到移动滑台恢复零位并向电气控制系统发出信号,电气控制系统控制升降机构停止运行。

#### 2.1.2 升降功率计算

伺服电机通过两相同齿轮传动驱动丝杠旋转,进而驱动取土机构上下移动,由导程的定义<sup>[25]</sup>得出

$v_1$  计算公式为

$$v_1 = \frac{n_1}{60i_1} P_{h0} \quad (1)$$

式中  $n_1$ ——伺服电机转速, r/min

$i_1$ ——减速器减速比

$P_{h0}$ ——丝杠导程, mm

丝杠型号为米思米 C-BSSC2020, 长度为 0.76 m, 直径为 30 mm, 导程  $P_{h0}$  为 20 mm, 伺服电机转速  $n_1$  为 3 000 r/min, 减速器减速比  $i_1$  为 20, 计算得取土机构最大移动速度为 0.05 m/s。设计升降机构的总长度为 0.92 m, 导轨的长度为 1.35 m。为保证钻进工作的稳定性, 通过试验得钻进速度  $v_2$  不超过 0.025 m/s。

满载时取土机构总质量  $m_0$  最大为 30 kg, 因此升降机构所需功率为<sup>[26]</sup>

$$P_0 = (\mu_1 + \mu_2 + \mu_3) m_0 g v_2 + Q v_2 - m_0 g v_2 \quad (2)$$

其中  $Q = 1\,000 \times (30 \sim 50) R_2$

式中  $P_0$ ——升降机构所需功率, W

$g$ ——重力加速度, m/s<sup>2</sup>

$\mu_1$ ——取土机构与导轨的摩擦因数

$\mu_2$ ——轴承摩擦因数

$\mu_3$ ——丝杠与丝母的摩擦因数

$Q$ ——螺旋输送机轴向压力, N

$R_2$ ——钻孔半径, m

经计算, 升降机构沿导轨滑动所需功率为 69.75 W, 考虑到启动转矩及功率裕量, 伺服电机额定功率取 200 W, 额定扭矩 0.637 N·m。

## 2.2 取土机构

### 2.2.1 工作原理

取土机构主要由螺旋输送机、钻尖、推杆、电缸、减速器、伺服电机等部件组成, 如图 5 所示。

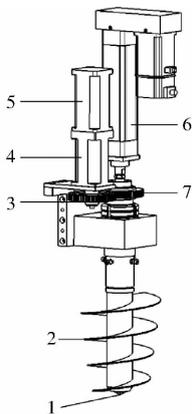


图 5 取土机构结构示意图

Fig.5 Schematic of soil sampling system

1. 钻头 2. 螺旋输送机 3. 主动齿轮 4. 减速器 5. 伺服电机  
6. 电缸 7. 被动齿轮

设计螺旋叶片厚度为 1.5 mm。螺旋输送机轴

作为空心取土管, 取土管内有推杆, 推杆上方固定连接电缸伸缩杆, 推杆下方固定连接钻头, 电缸可通过推杆驱动钻头在取土管内外上下移动。由伺服电机驱动螺旋输送机旋转, 钻头在取土前与取土管共同旋转, 钻头在取土管的原位置如图 6b 所示。当钻尖到达设定深度时, 在电缸内部位置传感器控制下, 电缸伸缩杆驱动钻头上升一段距离, 此距离为需要采集土层的深度范围, 从而取土管下端形成取土空间, 如图 6a 所示。同时, 螺旋输送机继续旋转下降, 钻头下方的土样被挤入取土空间形成柱形土样。当钻头到达不同设定深度时, 电缸伸缩杆驱动钻尖上升形成取土空间, 螺旋输送机继续钻进将土样挤入取土空间, 因此可实现土壤的分层取样。取土完毕后, 土壤样本采集控制系统控制螺旋输送机上升的同时反向旋转, 螺旋输送机上的土壤在离心力的作用下滑落在钻土形成的土槽内, 从而减少对地表的破坏。当收集土样机构收集土样时, 电缸伸缩杆推动钻头恢复原位, 钻头将进入取土管的柱形土样推出取土空间, 为收集土样机构所收集。

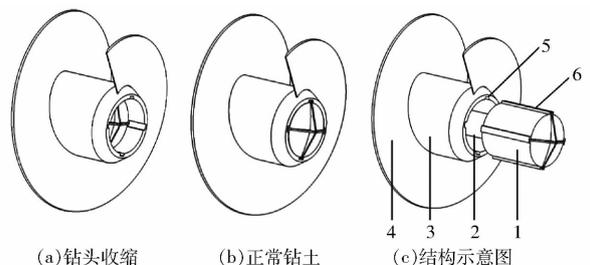


图 6 钻尖结构示意图

Fig.6 Structure of spiral drill

1. 钻头 2. 推杆 3. 取土管 4. 螺旋叶片 5. 内花键 6. 外花键

### 2.2.2 结构及参数设计

钻头在向下钻孔时起到切去中心部分土壤的作用, 并将中心部分的土壤引向四周, 从而土壤被螺旋输送机输送。因锥形钻头的平稳性好, 本设计选用锥形钻头<sup>[27]</sup>。钻头锥角太小, 钻头将进入取土管的柱形土样推出取土空间时会导致破坏土样, 还会导致土壤粘附在钻头, 考虑到应尽量减少土壤粘附在钻头和对原层土样破坏, 锥角设计为 150°。为保证钻土过程中钻头与螺旋输送机同时旋转, 钻头圆柱表面设计外花键, 取土管内壁开有内花键, 两者相互配合, 此设计可以使钻尖在钻土时既能随螺旋输送机同速旋转, 又能使钻尖在电缸的驱动下沿内花键上下移动。钻尖结构如图 6 所示, 正常工作过程中钻头只有图 6a、6b 两种状态。

在土样进入取土空间过程中, 取土管内壁的内花键结构可有效减少进入取土管的柱形土样与钻体内壁的接触面积, 从而有效减小柱形土样对钻体内

壁的摩擦阻力。同时,这种相对凸凹的内壁表面还具有减粘脱土作用,有利于原状土柱保持原状。取土管靴的主要技术参数包括刃口尖端宽度  $l$ ,取土管靴内径  $d_e$ ,取土管靴高度  $b$ ,管靴刃口角  $\phi$ ,管靴切削深度  $a$  和取土管管靴外径  $d_w$ 。取土管靴是取土器的主要入土部件,如图 7 所示,其参数的设计对取土质量的影响较大<sup>[10]</sup>。

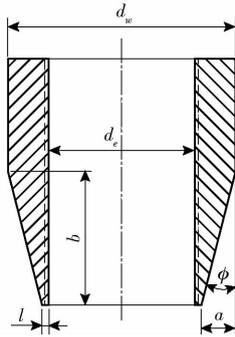


图 7 取土管靴剖面简图

Fig. 7 Profile of soil sampling tube boot

刃口尖端宽度  $l$  是影响切土阻力的主要参数之一。一般刃口尖端宽度越小,切土阻力越小,但同时越易发生刃口迸裂和变形。确定刃口尖端宽度  $l$  为 1.5 mm。设计取土管靴的内径  $d_e$  等于取土管内径。取土管靴高度  $b$  不宜过大,管靴高度大则对所取土样的摩擦阻力大, $b$  的适宜范围为 20 ~ 30 mm。

管靴刃口的形式及角度对土样的质量影响很大。试验测得土样无侧限抗压强度(试样在无侧向压力情况下,抵抗轴向压力的极限强度)百分比与管靴刃口角对应的关系,如图 8 所示。

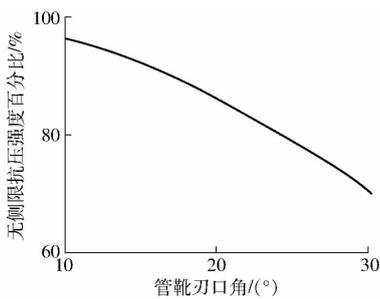


图 8 无侧限抗压强度百分比与管靴刃口角关系曲线

Fig. 8 Relationship between unconfined compressive strength and soil sampling tube boot cutting angle

管靴刃口角为  $10^\circ$  时,无侧限抗压强度百分比达 90% 以上;管靴刃口角为  $30^\circ$  时,无侧限抗压强度百分比仅为 70% 左右。因而取土器的管靴刃口角应不大于  $10^\circ$ <sup>[28]</sup>。

设计螺旋叶片轴向长度为 300 mm,螺旋输送机外径  $D'$  为 120 mm。取土机构进行钻土工作时,螺旋输送机旋转对取土管产生扭矩,考虑到取土管的强度,设计取土管内径  $d_e$  为 42 mm,取土管外径  $d_w$  为

50 mm,则取土管壁厚为 4 mm。钻头上端圆柱直径为 42 mm,与取土管内径间隙配合。

取  $a = 2.5$  mm,当  $b = 20$  mm 时,由公式

$$\tan\phi = \frac{a}{b} \quad (3)$$

计算得  $\phi = 7.13^\circ$ ,满足要求。

### 2.2.3 取土功率计算

螺旋输送机转速较低时,土壤从钻孔底面被挤上地面<sup>[29]</sup>。螺旋升角较大,提土时土块容易滑落<sup>[30]</sup>,选择适当的螺旋升角可以使输土流畅,叶片的螺旋升角一般应在  $8^\circ \sim 30^\circ$  之间<sup>[31]</sup>。综合这两种因素,本螺旋输送机叶片螺旋升角  $\alpha$  选为  $15^\circ$ 。

螺距  $S$  可以根据螺旋升角  $\alpha$  和螺旋轴直径  $D$  的关系<sup>[30]</sup> 求出,计算公式为

$$\alpha = \arctan \frac{S}{\pi D} \quad (4)$$

计算得螺距  $S$  约为 42 mm。

螺旋输送机钻土的功率主要消耗在 3 方面:钻进功率、输土消耗功率、钻具与孔壁的摩擦消耗的功率<sup>[32]</sup>。

钻进功率  $N_1$  计算公式为

$$N_1 = (Kv_2 + 25\,000f_2\omega_c)R_2^2 \quad (5)$$

式中  $K$ ——切削比阻力, kPa

$f_2$ ——刀刃与土壤间的摩擦因数

$\omega_c$ ——螺旋轴角速度, rad/s

在螺旋输送器的螺旋作用下使钻头切削下来的土壤从钻头与孔底土壤的接触面挤入螺旋内,上层土壤由下层土壤推挤着向上运动,输土功率  $N_2$  计算公式为

$$N_2 = \frac{F_1(\cos(\alpha_l - \alpha) - f_1 \sin(\alpha_l - \alpha))\pi R_2^2 v_2}{(\cos\alpha_l - f_1 \sin\alpha_l)(R_2 - R_1)\varepsilon} \quad (6)$$

其中

$$F_1 = m_a \omega^2 r f_2 (f_1 \sin\alpha - \cos\alpha) + m_a g (f_1 \cos\alpha + \sin\alpha) \quad (7)$$

$$m_a = \pi(R_2^2 - R_1^2)l_1 \rho_s \varphi \quad (8)$$

$$r = \frac{R_1 + R_2}{2} \quad (9)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{f_1 r} (f_2 \cos\alpha + \sin\alpha)} \quad (10)$$

式中  $F_1$ ——下层土壤对钻头的挤推力, N

$m_a$ ——整个螺旋输送机轴上土壤质量, kg

$R_1$ ——螺旋输送机轴半径, m

$\alpha_l$ ——钻头叶片螺旋升角, ( $^\circ$ )

$\varepsilon$ ——土壤压缩系数

$r$ ——叶片上土壤重心处的半径,由于土壤被挤压充满叶片中,视为均匀分布, m

$f_1$ ——土与土的摩擦因数

$\rho_t$ ——松散土壤密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$

$l_1$ ——螺旋输送机轴的长度,  $\text{m}$

$\omega$ ——螺旋输送机临界角速度<sup>[33]</sup>,  $\text{rad}/\text{s}$

钻杆转速低于临界转速时, 外层土壤的离心力不足以克服各种阻力压向孔壁。土壤在叶片上堆积, 叶片上土壤堆积后与孔壁接触, 可以近似看作一个  $90^\circ$  的斜坡与一个墙面接触。在孔壁与土体之间产生主动土压力, 可用朗金土压力理论来计算。孔壁与螺旋输送机土柱摩擦消耗功率  $N_3$  公式为

$$N_3 = \pi R_2^2 \rho_t g K_0 S l_1 f_2 \omega_c \quad (11)$$

式中  $K_0$ ——土的静止侧压系数

综上, 可得螺旋输送机钻进的总功率为

$$N = N_1 + N_2 + N_3 \quad (12)$$

所需伺服电机功率和螺旋轴扭矩为

$$P > \frac{N}{Z} \quad (13)$$

$$M = 9545 \frac{P}{n_1} Z \quad (14)$$

式中  $P$ ——伺服电机 1 功率,  $\text{W}$

$Z$ ——减速器效率

$M$ ——螺旋轴扭矩,  $\text{N} \cdot \text{m}$

螺旋叶片半径为  $0.06 \text{ m}$ , 切削比阻力为  $50 \text{ kPa}$ , 钻进速度为  $0.025 \text{ m}/\text{s}$ , 刀刃与土壤间的摩擦因数为  $0.3$ , 得钻尖轴向压力为  $2100 \text{ N}$ , 螺旋轴的最大转速为  $75 \text{ r}/\text{min}$ , 土块与钻孔间的摩擦因数为  $0.4$ , 螺旋输送机临界角速度为  $7.85 \text{ rad}/\text{s}$ , 最大钻土深度  $20 \text{ cm}$ , 土壤容重为  $1560 \text{ kg}/\text{m}^3$ , 土壤的静止侧压系数为  $0.45$ , 减速器效率为  $0.9$ , 计算得螺旋输送机钻进总功率为  $214.66 \text{ W}$ , 所需伺服电机功率为  $238.51 \text{ W}$ , 螺旋轴的扭矩为  $27.32 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

在保证转速的同时应尽量增大扭矩, 考虑到启动功率以及现场其他损耗功率, 伺服电机的额定功率为  $600 \text{ W}$ , 额定扭矩  $1.91 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 选择减速器的减速比为  $40$ , 可提供扭矩  $76.4 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 转速为  $3000 \text{ r}/\text{min}$ 。

## 2.3 收集土样机构

### 2.3.1 工作原理

收集土样机构主要由移动机构、导轨、伺服电机 1、减速器 1、位置传感器 1、RFID 读写器等部件组成。移动机构主要由多孔转盘、采样筒、支架、伺服电机 2、减速器 2、位置传感器 2 组成, 如图 9 所示。

伺服电机 2 及减速器 2 位于支架上端, 多孔圆盘位于支架内, 其中心与减速器的输出轴固定连接, 伺服电机 2 驱动减速器输出轴从而带动多孔转盘转动, 一次转动  $36^\circ$ 。采样筒内径设计为  $50 \text{ mm}$ , 10 个

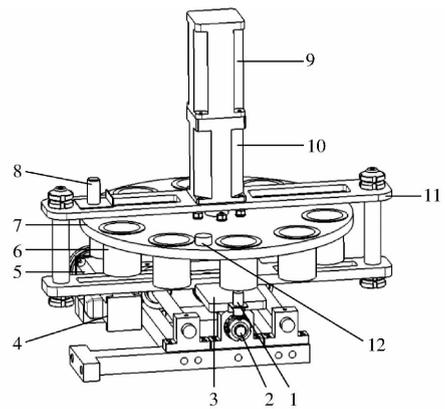


图 9 收集土样机构示意图

Fig. 9 Sketch of soil sample collection system

1. 位置传感器 1 2. 丝杠 3. RFID 读写器 4. 伺服电机 1 5. 减速器 2 6. 采样筒 7. 多孔转盘 8. 位置传感器 2 9. 伺服电机 2 10. 减速器 2 11. 支架 12. 铁块

采样筒均匀分布在多孔转盘 10 个孔内, 每个采样筒底面有电子标签, 多孔转盘相邻孔中心之间夹角为  $36^\circ$ 。取土机构取土完毕上升至初始位置后, 收集土样机构开始工作。伺服电机 1 驱动移动机构以一定的速度沿导轨移动到取土管中心的正下方, 移动距离为  $0.13 \text{ m}$ 。同时, 伺服电机 2 驱动多孔转盘逆时针转动, 当位置传感器 2 感应到铁块时发出信号, 多孔转盘停止旋转, 此位置为多孔圆盘零位, 随后伺服电机 2 通过减速器驱动多孔转盘顺时针转动一定的角度, 即将收集土样的采集筒轴线与螺旋输送机轴线相重合。其中采样点为  $k+1$  个时多孔转盘顺时针转动角度为

$$A = 36k \quad (15)$$

随后电缸推杆推动钻头, 将取土管内的柱形土样推入采样筒内, 移动机构再沿导轨以相同的速度反向移动, 当位置传感器 1 感应到机架返回零位并向电气控制系统输出信号, 电气控制系统控制收集土样机构在零位停止。计算机在取土机构返回零位后, 控制 RFID 读写器将定位信息一次性地写入电子标签。待无人驾驶车到达下一个采样点取土机构完成取土后, 重复上述收集样土的工作流程, 直至 10 个采样筒收集完土样。

### 2.3.2 移动机构功率计算

由于转盘驱动所需扭矩和功率较小, 伺服电机 2 选择  $40\text{M}-\text{R1630F5}-\text{E}$  型, 工作电压  $48 \text{ V}$ , 额定功率  $50 \text{ W}$ , 减速器减速比为  $40$ 。

收集土样机构沿导轨移动, 由伺服电机 1 及减速器经丝杠驱动, 收集土样机构满载质量  $m$  为  $10 \text{ kg}$ , 因此收集土样机构所需功率  $P_1$  计算公式为<sup>[15]</sup>

$$P_1 = mg(\mu_4 + \mu_5 + \mu_6)gv_3 \quad (16)$$

$$v_3 = \frac{n_2}{60i_2} P_{h1} \quad (17)$$

式中  $\mu_4$ ——收集土样机构与钢轨的摩擦因数

$\mu_5$ ——轴承摩擦因数

$\mu_6$ ——丝杠与丝母的摩擦因数

$v_3$ ——收集土样机构移动速度, m/s

$n_2$ ——伺服电机额定转速, r/min

$i_2$ ——减速器减速比

$P_{h1}$ ——丝杠导程, mm

得收集土样机构左右移动所需功率为 6 W。

考虑到启动转矩及功率裕量选择 40M - R1630F5 - E 型电机, 工作电压 48 V, 额定功率 50 W,

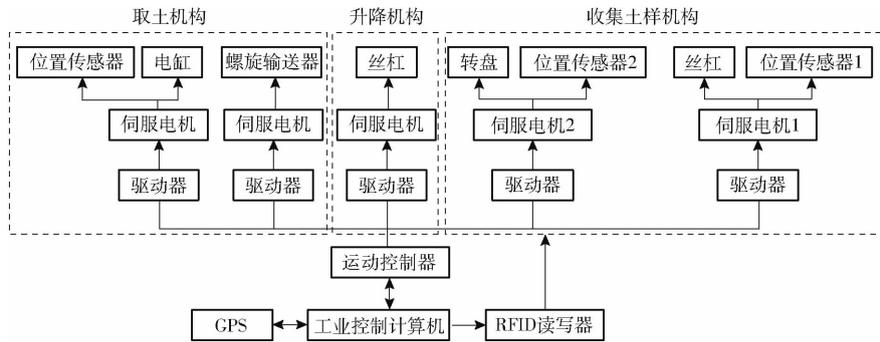


图 10 电气控制系统结构框图

Fig. 10 Structure diagram of electrical control system

### 3.2 采样运动控制系统设计

规划采样点信息通过无线网络发布到无人驾驶采样车主控计算机上, 计算机根据采样点信息自动规划行驶路径, 依据惯性/卫星组合导航系统(GPS)定位信息和激光雷达避障系统, 完成目标位置的自主导航定位。到达目标位置后, 控制车载智能土壤采样系统采集土样, 目标位置的经纬度地理信息和采样深度等信息可通过 RFID 读写器写入当前收集土样采样筒底部的电子标签中。

运动控制器选用深圳市雷赛控制技术有限公司的 SMC106A - BAS 型六轴运动控制器, 运动控制器调试界面如图 11 所示, 运动控制器输入输出点设有 J0 ~ J5、J6 ~ J8 和 Ethernet 接口, J0 ~ J5 接口用于伺服电机脉冲和方向输入, J6 ~ J8 接口用于原点信号

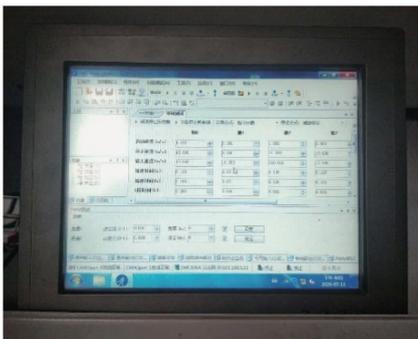


图 11 运动控制器调试界面

Fig. 11 Debug interface of motion controller

减速器减速比  $i_2$  为 10, 采用米思米 C - BSSC2010 型丝杠, 直径 10 mm, 导程  $P_{h1}$  为 10 mm, 收集土样机构单行程 0.13 m, 经计算收集土样机构最大移动速度为 0.05 m/s, 收集土样机构工作所需时间为 2.60 s。

## 3 电气控制系统设计

### 3.1 电气控制系统总体方案

电气控制系统以运动控制器作为控制核心, 主要部件由工业控制计算机、运动控制器、直流伺服电机及驱动器、惯性/卫星组合导航系统、RFID 读写器等部分组成。电气控制结构框图如图 10 所示。

和限位信号输入, Ethernet 接口用于以太网通信。采用脉冲/方向信号连接方式, 运动控制器通过向电机驱动器发送脉冲和方向信号来控制直流伺服电机旋转角度和旋转方向, 通过丝杠转换为直线运动。直流伺服电机采用 2500 P/r 增量式编码器, 电子齿轮比为 1:1, 根据丝杠螺距和减速机减速比可精确计算出脉冲当量, 计算公式为

$$\delta = \frac{P_h}{ipg_0} \quad (18)$$

式中  $\delta$ ——脉冲当量

$P_h$ ——丝杠导程, mm

$i$ ——减速器减速比

$p$ ——每转一圈控制脉冲数

$g_0$ ——电子齿轮比

直流伺服电机工作在位置控制方式, 运动控制器可进行定速运动和定长运动(相对位移和绝对位移), 设置脉冲当量和运动速度等参数后, 可通过调用运动控制器提供的 API 函数完成各机构的精确运动。运动控制器具有零位和正负限位接口, 通过零位和限位磁感应传感器, 可完成取土机构和收集土样机构归零工作。运动控制器通过以太网接口与工业控制计算机连接, 采用 TCP/IP 协议, 进行数据交换和控制命令的解析。

惯性/卫星组合导航系统选择北京星网宇达科

技股份有限公司的 XW-GI5630 型,主机内部安装有 2 个 GPS 和北斗二合一接收机、1 个 MEMS 惯性测量单元等,通过使用 MEMS 陀螺和 MEMS 加速度计,融合里程计信息,辅以改进组合导航与姿态测量算法,可进行厘米级精度的定位解算,航向精度  $0.1^\circ$ ,姿态精度  $1^\circ$ ,GPS 差分数据通过 4 芯圆形连接器输入 XW-GI5630 主机的输入接口,经过差分的数据通过串口连接到工业控制计算机。工业控制计算机将输入的数据通过 RFID 读写器写入电子标签中。

## 4 性能试验

### 4.1 试验条件

为了验证样机的性能和可靠性,于 2020 年 7 月在吉林农业大学试验田进行了现场性能试验。车载智能土壤采样系统所采集土壤类型为壤土,车载智能土壤采样系统配套车辆为吉林大学自主研发的无人驾驶采样车。试验仪器主要有秒表、电子天平等。样机试验如图 12 所示。

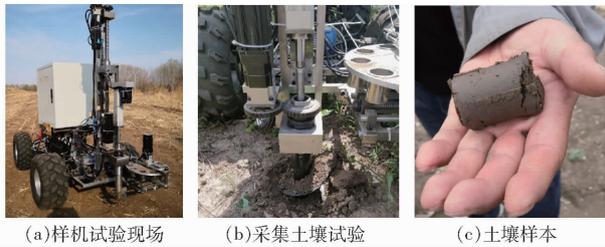


图 12 样机试验

Fig. 12 Test of prototype

### 4.2 试验方法与结果

试验时,车载智能土壤采样系统安装于无人驾驶采样车上,无人驾驶采样车按照控制指令到达采样点。按照作业机设计功能要求,选取试验田 12 个经纬度不同的土样采集点进行采样试验,以采样时间误差、土样质量误差、电子标签的经纬度误差为评价指标。试验采集土样深度范围分别为  $0 \sim 50$  mm、 $50 \sim 100$  mm、 $100 \sim 150$  mm、 $150 \sim 200$  mm,每个深度范围的土样分别采集 3 次,每次采集土样质量为  $108.06$  g。同时考察升降机构、取土机构和收集土样机构的工作运转情况,观测电缸推动钻头将柱形土样从取土管推入收集土样机构的采集筒时,柱形土样是否会粘附在钻头上。

收集土样机构的多孔圆盘面到地面垂直高度  $h_1$  为  $380$  mm,设计钻尖到多孔圆盘水平面的垂直距离为  $20$  mm。取土机构的钻头距离地面高度  $h$  处为零位,则取土机构的钻头距离地面高度  $h$  为  $400$  mm,采集土样的深度  $h_2$  范围为  $0 \sim 200$  mm。取土系统在地面以上做无阻力运动,为提高整个过程的效率,地

面以上的运动速度选定最大的移动速度,升降机构工作时间计算公式为

$$t = 2 \left( \frac{h}{v_1} + \frac{h_2}{v_2} \right) \quad (19)$$

分层采集土样时,升降机构工作时间分别为  $20$ 、 $24$ 、 $28$ 、 $32$  s,再加上收集土样机构运动时间和推杆推出土样时间,计算采样时间分别为  $23.6$ 、 $27.6$ 、 $31.6$ 、 $35.6$  s。当车载智能土壤采样系统启动开始采集土样时,记录每次采集土样工作时间,计算采样时间误差。当无人驾驶车将 12 个采样点的目标土样采集完毕后,按采集的顺序将采样筒内的土样进行称量,记录采集土样的质量,计算土样质量误差。各个采集点的采样时间误差和土样质量误差如表 1 所示。计算每次试验采样时间误差和土样质量误差的平均值,采样时间平均误差和土样质量平均误差随采集土层深度变化,如图 13、14 所示。

表 1 现场性能试验结果

Tab. 1 Field experiment performance results

序号	土层深度/ mm	采样 时间/s	采样时间 误差/%	采样 质量/g	土样质量 误差/%
1	0 ~ 50	23.92	1.36	106.40	1.54
2	0 ~ 50	24.09	2.08	103.92	3.83
3	0 ~ 50	23.84	1.02	105.19	2.66
4	50 ~ 100	28.55	3.44	103.46	4.26
5	50 ~ 100	27.94	1.23	105.70	2.18
6	50 ~ 100	28.32	2.61	104.03	3.27
7	100 ~ 150	32.61	3.20	105.15	2.69
8	100 ~ 150	32.29	2.29	103.18	4.52
9	100 ~ 150	32.57	3.07	103.89	3.86
10	150 ~ 200	36.66	2.98	101.26	6.29
11	150 ~ 200	36.53	3.08	103.52	4.20
12	150 ~ 200	36.89	2.85	104.62	3.48

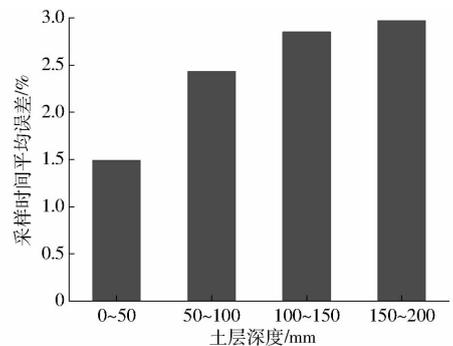


图 13 采样时间平均误差的变化

Fig. 13 Change in average error of sampling time

采集土样试验结束后,在工业控制计算机终端依次获得采样筒底面电子标签内的坐标位置信息,将这些经纬度信息分别与试验前选取试验田 12 个经纬度进行比较,计算两者的误差。坐标位置信息采集数据的处理和计算结果如表 2 所示。

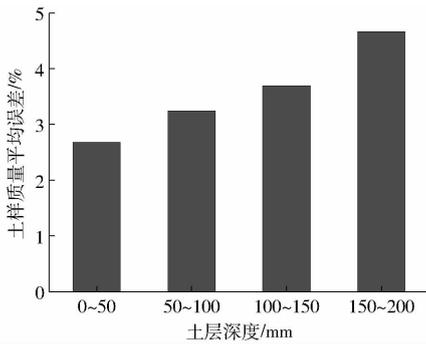


图14 土样质量平均误差的变化

Fig. 14 Change in average error of soil sample quality

表2 采集坐标信息试验结果

Tab. 2 Coordinate information collection test results

序号	土层深度/ mm	选取采样坐标值(经度,纬度)/ (°,°)	电子标签内坐标值(经度,纬度)/ (°,°)	坐标误差/ cm
1	0~50	(125.420 048 33,44.032 611 54)	(125.420 048 65,44.032 610 92)	8
2	0~50	(125.420 045 16,44.032 660 25)	(125.420 044 83,44.032 610 59)	6
3	0~50	(125.420 042 88,44.032 743 52)	(125.420 043 43,44.032 743 95)	6
4	50~100	(125.420 039 53,44.032 830 77)	(125.420 039 94,44.032 831 26)	4
5	50~100	(125.420 036 13,44.032 969 81)	(125.420 035 74,44.032 970 32)	7
6	50~100	(125.420 279 17,44.032 989 50)	(125.420 279 82,44.032 989 01)	8
7	100~150	(125.420 298 94,44.032 910 64)	(125.420 298 29,44.032 911 21)	9
8	100~150	(125.420 302 75,44.032 847 82)	(125.420 303 28,44.032 848 35)	8
9	100~150	(125.420 308 30,44.032 819 57)	(125.420 308 91,44.032 819 87)	6
10	150~200	(125.420 319 54,44.032 748 97)	(125.420 318 98,44.032 748 74)	5
11	150~200	(125.420 334 49,44.032 655 68)	(125.420 334 01,44.032 656 21)	7
12	150~200	(125.420 348 37,44.032 591 21)	(125.420 348 95,44.032 590 73)	7

试验过程中发现,升降机构、取土机构和收集土样机构的工作运转平稳,顺利完成采集土样的整个工作。每次进行收集土样时,电缸推动钻头将柱形土样推入采集筒,此过程柱形土样可顺利进入采样筒,没有发生柱形土样粘附在钻头的现象。采样时间误差和土样质量误差在较小的范围内,能够对0~200 mm任意深度范围的土壤进行分层采集,并且在较短的时间内完成土样采集。该系统对不同地理位置的土样分类收集,电子标签内的坐标值误差小,采集土样获得的地理位置信息有较高的精度,采集土样的结果符合设计要求。

## 5 结论

(1)设计了一种安装在无人驾驶采样车上的车载智能土壤采样系统,系统包括土壤样本自动采集装置和电气控制系统。分别对土壤样本自动采集装置的升降机构、取土结构、收集土样机构和电气控制系统进行设计,阐述了各部件的结构组成和工作原理,

## 4.3 结果分析

由试验结果可以得出,采集土层深度为0~50 mm时,采样时间误差不超过2.08%,而在最深的土层范围采集土样时,采样时间误差最大不超过3.44%,采样时间平均误差随着采集土样深度的增加而增加;在采集较浅的土层范围时,土样质量平均误差较小,随着采集土层深度的增加,土样质量平均误差也越来越大,土样质量误差最大不超过6.29%。由表2可知,试验前选取采样点坐标值与电子标签内坐标值之间的误差不大于9 cm。

完成了关键工作参数的分析和计算,以实现对不同深度范围的土样进行采集并按地理位置信息分类收集。电气控制系统以运动控制器为控制核心,通过RFID读写器将GPS系统定位所解算的目标采样点经纬度地理信息和采样深度等信息写入当前收集土样采样筒底部的电子标签中。

(2)车载智能土壤采样系统采集土样的精度和效率均较高,采样时间误差和土样质量误差较小。当采集土层深度为0~50 mm时,采样时间平均误差不超过2.08%,在最大土层深度采集土样时,采样时间平均误差不超过3.44%,采样时间平均误差和土样质量平均误差随着采集土层深度的增加而增加。

(3)系统将不同采样点的土样通过标识实时的定位信息进行分类,试验前选取采样点坐标值与电子标签内坐标值之间的误差不大于9 cm。

(4)系统能够对农耕层0~200 mm任意深度范围的土壤进行自动分层采样,采样全程自动化,各机构运行稳定,钻头无粘附柱形土样的现象。

## 参 考 文 献

- HE Dongjian, YANG Chenghai, YANG Qing, et al. Research progress of real-time measurement of soil attributes for precision agriculture[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(7): 78-85. (in Chinese)
- [2] 赵春江. 精准农业研究与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [3] 张汪寿, 李晓秀, 黄文江, 等. 不同土地利用条件下土壤质量综合评价方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 311-318. ZHANG Wangshou, LI Xiaoxiu, HUANG Wenjiang, et al. Comprehensive assessment methodology of soil quality under different land use conditions[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(12): 311-318. (in Chinese)
- [4] 李延荣. 农业土壤重金属污染防治与管控对策研究[J]. 农业技术与装备, 2019(5): 59-60. LI Yanrong. Study on prevention and control of heavy metal pollution in agricultural soil[J]. Agriculture Technology & Equipment, 2019(5): 59-60. (in Chinese)
- [5] 闫岩, 张利飞. 土壤污染状况详查的质量管理与质量控制[J]. 世界环境, 2018(3): 20-22. YAN Yan, ZHANG Lifei. Quality management and control in detailed soil pollution investigation[J]. World Environment, 2018(3): 20-22. (in Chinese)
- [6] 郑波. 固体直接进样测土壤重金属的方法与技术研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016. ZHENG Bo. Studies on measuring method and technology of soil heavy metals by using direct solid sampling[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016. (in Chinese)
- [7] 尤冬梅. 农田土壤重金属污染监测及其空间估值方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014. YOU Dongmei. Monitoring and spatial estimation of contents of soil heavy metals[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [8] 周雪青, 李洪文, 何进, 等. 土壤容重测定用分段式原状取土器的设计[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 127-130. ZHOU Xueqing, LI Hongwen, HE Jin, et al. Design of multi-segment in situ soil sampler testing bulk density[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 127-130. (in Chinese)
- [9] 邵睿, 张炜, 海江波, 等. 农田土壤采样器的改进设计[J]. 农机化研究, 2013, 35(6): 81-84. SHAO Rui, ZHANG Wei, HAI Jiangbo, et al. Improved design of soil sampler[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(6): 81-84. (in Chinese)
- [10] 倪祥祥, 赵新. 螺旋取土钻的设计与研制[J]. 农业装备与车辆工程, 2011(12): 3-5. NI Xiangxiang, ZHAO Xin. Design and development of the spiral earth drill[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2011(12): 3-5. (in Chinese)
- [11] 沈立娜, 阮海龙, 刘海龙, 等. 中空螺旋取土钻具的研制[J]. 地质装备, 2018, 19(5): 12-16.
- [12] 张和锋, 马帅超, 何予鹏, 等. 直压式汽油机取土器的研制[J]. 河南农业大学学报, 2018, 52(2): 232-237. ZHANG Hefeng, MA Shuaichao, HE Yupeng, et al. Development of direct pressure gasoline engine sampler[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2018, 52(2): 232-237. (in Chinese)
- [13] 张凯, 刘成良. 车载液压振动式土壤采集装置研究[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2010, 2(4): 297-301. ZHANG Kai, LIU Chengliang. Study on vehicle-mounted soil sampling device by hydraulic vibration[J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology(Natural Science Edition), 2010, 2(4): 297-301. (in Chinese)
- [14] 杨佺. 土壤快速采集装置研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2011. YANG Quan. Study on fast soil sampling equipment[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2011. (in Chinese)
- [15] 郑长奇. 农田土壤快速信息采样设备设计研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008. ZHENG Changqi. The study on fast equipment for farmland soil[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [16] WALKER M E, STANSELL J R, SHANNON J E. Precision soil sample[J]. Agronomy Journal, 1976, 68(2): 431-432.
- [17] JENSEN M E, SLETTEN W H, OCHS R L. Mechanized soil sampler with offset drive[J]. Transactions of the ASABE, 1960, 3(1): 22-24.
- [18] KARAHASHI M, MORIMOTO K, GOTO T, et al. Development of a new soil-core sampler[J]. JARQ—JAPAN Agricultural Research Quarterly, 1987, 21(1): 28-35.
- [19] SEWART B W. Small-increment electric soil sampler[J]. Soil Physics Note, 2008, 72(6): 1554-1556.
- [20] 常士骠. 工程地质手册[M]. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.
- [21] ABU-HAMDEH N H, AL-JALIL H F. Hydraulically powered soil core sampler and its application to soil density and porosity estimation[J]. Soil & Tillage Research, 1999, 52(12): 113-120.
- [22] 莫迪. 车载土壤采样装置控制系统的设计与实现[D]. 上海: 上海交通大学, 2014. MO Di. The design and implementation of the vehicle-mounted soil sampling control system[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [23] 闫全涛. 小型农田土壤采集移动平台研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019. YAN Quantao. Mobile platform of farmland soil collection[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [24] 朱洪涛. 智能土壤样品信息采集系统研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012. ZHU Hongtao. Study on intelligent acquisition system of soil sample information[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2012. (in Chinese)
- [25] 濮良贵, 陈国定, 吴立言. 机械设计[M]. 9版. 北京: 高等教育出版社, 2016.

- economic analysis on the cropping system adjustment countermeasure[J]. *Journal of Water Resources Research*, 2019, 8(6): 575 - 580. (in Chinese)
- [27] 康绍忠, 孙景生, 张喜英, 等. 中国北方主要作物需水量与耗水管理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.
- [28] SUN Q P, KRÖBEL R, MÜLLER T, et al. Optimization of yield and water-use of different cropping systems for sustainable groundwater use in North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(5): 808 - 814.
- [29] 聂堂哲, 张忠学, 林彦宇, 等. 1959—2015年黑龙江省玉米需水量时空分布特征[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(7): 217 - 227.  
NIE Tangzhe, ZHANG Zhongxue, LIN Yanyu, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of maize water requirement in Heilongjiang Province during 1959—2015 [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(7): 217 - 227. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20180726&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180726&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.026. (in Chinese)
- [30] 李玖颖, 王欣亮, 王忠波, 等. 黑龙江省近50年大豆需水量与干旱时空分布特征研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2020, 51(8): 223 - 237.  
LI Jiuying, WANG Xinliang, WANG Zhongbo, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of soybean water requirement and drought in Heilongjiang Province in recent 50 years [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(8): 223 - 237. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20200825&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200825&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.08.025. (in Chinese)
- [31] LIU C M, ZHANG X Y, ZHANG Y Q. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 111(2): 109 - 120.
- [32] ZHANG X Y, CHEN S Y, SUN H Y, et al. Changes in evapotranspiration over irrigated winter wheat and maize in North China Plain over three decades[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(6): 1097 - 1104.
- [33] 刘钰, 汪林, 倪广恒, 等. 中国主要作物灌溉需水量空间分布特征[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(12): 6 - 12.  
LIU Yu, WANG Lin, NI Guangheng, et al. Spatial distribution characteristics of irrigation water requirement for main crops in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(12): 6 - 12. (in Chinese)
- [34] 王道波, 邢素丽, 李会龙, 等. 河北平原农田用水现状及灌溉方式和保证率对农田用水的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(2): 21 - 24.  
WANG Daobo, XING Suli, LI Huilong, et al. Effects of current farmland water uses as well as irrigation modes and irrigation guaranty rates on the farmland water uses in the Hebei plain in terms of ArcGIS[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(2): 21 - 24. (in Chinese)
- [35] 罗建美. 京津冀平原农业种植结构优化及其节水效应研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.  
LUO Jianmei. Evaluating water saving effects due to planting structure optimization in the Beijing - Tianjin - Hebei plain[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)

(上接第 301 页)

- [26] 刘莫尘, 马郡祥, 韩守强, 等. 固态发酵饲料自动发酵饲喂一体设备设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(11): 141 - 147.  
LIU Mochen, MA Junxiang, HAN Shouqiang, et al. Design and experiment of automatic fermenting and feeding equipment for solid-state fermented feed[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(11): 141 - 147. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20181116&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181116&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.016. (in Chinese)
- [27] 薛子萱. 立式螺旋开沟机工作部件设计及优化[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.  
XUE Zixuan. Design and optimization of working parts in upright screw ditcher[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2011. (in Chinese)
- [28] 张力群. 取土器的合理选用与改进[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2003(3): 33 - 34.
- [29] 夏蓓娅, 胡欣欣. 长螺旋钻机工作参数与土的运动[J]. *建筑机械*, 1999(4): 3 - 5.  
XIA Beiya, HU Xinxin. Efficiency analysis and working parameters of an earth auger[J]. *Construction Machinery*, 1999(4): 3 - 5. (in Chinese)
- [30] 王子铭. 螺旋钻机主要参数计算[J]. *筑路机械与施工机械化*, 1998, 15(6): 8 - 10.
- [31] 郭峰, 李瑰贤, 赵伟民. 螺旋钻具输土速度与阻力的实验[J]. *工程机械*, 2006(9): 23 - 26, 105.  
GUO Feng, LI Guixian, ZHAO Weimin. Test for soil delivering speed and resistance of auger drill[J]. *Construction Machinery and Equipment*, 2006(9): 23 - 26, 105. (in Chinese)
- [32] 刘丹. 长钻尖孔机全液压自动钻进系统的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.  
LIU Dan. Researching on full-hydraulic automatic drilling system[D]. Changsha: Central South University, 2007. (in Chinese)
- [33] 杨晓刚. 螺旋钻进钻屑运移规律及临界转速的研究[J]. *中国矿业大学学报*, 1994, 23(4): 101 - 108.  
YANG Xiaogang. Study on transportation rule of screw drilling sludge and critical rotational speed[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1994, 23(4): 101 - 108. (in Chinese)