

履带式自走水力采藕机设计与试验

刘莫尘^{1,2} 梁文倩¹ 肖化超¹ 李映秀¹ 宋占华^{1,3} 闫银发^{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. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018)

摘要: 黄河三角洲地区莲藕种植深度为 30 ~ 40 cm, 其采收以人工为主, 采收环境恶劣, 劳动强度大。为解决莲藕采收问题, 本文设计了一种智能、高效、低损伤的履带式自走水力采藕机。对采藕机整机结构、工作原理、各关键机构进行了设计和选型, 并开展了田间试验进行验证。采藕机主要由底盘及履带式自走机构、水力系统、液压系统、动力系统和控制系统等组成。总动力由柴油机提供, 行走机构为履带式, 具有良好的稳定性和灵活的转向性能, 能适应复杂的藕田作业环境; 射流冲刷方式为摆动射流, 由提升液压缸和摆动液压缸分别带动喷嘴阵列上升、下降和左右循环摆动作业; 能进行坡度 0° ~ 40° 的转场作业, 作业幅宽为 2.3 m, 能够对莲藕表层以上淤泥快速有效冲刷。在 3 个不同藕田进行了莲藕采收试验, 试验结果表明, 该机器能适应 100 cm 以下不同水深的藕田, 采藕机莲藕采净率大于等于 95%, 莲藕损伤率小于等于 5%, 作业油耗率小于等于 215 g/(kW·h), 作业时行驶速度和平均工作效率分别为 3 m/min 和 0.04 hm²/h, 采收效率为人工采藕效率的 4 ~ 5 倍。采藕机工作性能稳定, 能够射流冲刷掉莲藕表面淤泥且未损伤莲藕, 满足莲藕采收要求。

关键词: 采藕机; 射流; 水力系统; 田间试验

中图分类号: S225.92 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)S2-0061-10

Design and Experiment of Crawler-type Self-propelled Hydraulic Lotus Root Harvester

LIU Mochen^{1,2} LIANG Wenqian¹ XIAO Huachao¹ LI Yingxiu¹ SONG Zhanhua^{1,3} YAN Yinfa^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China
2. Shandong Engineering Laboratory of Agricultural Equipment Intelligence, Taian 271018, China
3. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machinery and Equipment, Taian 271018, China)

Abstract: Lotus root is an important aquatic vegetable and special agricultural product that is easy to grow and difficult to harvest, with good nutritional value and economic benefits. The lotus root is commonly planted in the Yellow River Delta region at a depth of 30 ~ 40 cm, but it is mainly harvested manually, which is a harsh environment, labor-intensive, and requires long hours in cold water, which is extremely harmful to the lotus root farmers' health. To solve the low efficiency and high labor intensity of lotus root manual harvesting, an intelligent, effective, and low-damage crawler self-propelled hydraulic lotus root harvester was designed, which can improve the mechanization and efficiency of lotus root harvesting, and promote the large-scale development of lotus root industry. The harvester was mainly composed of power system, water circuit, hydraulic system, and control system. The total power of the machine was provided by the diesel engine, the moving mechanism was crawler type, which had good stability and flexible steering performance and can adapt to the complex root field operating environment. The mode of flushing slit was swinging jet, which was driven by the lifting hydraulic cylinder and oscillating hydraulic cylinder to ascend and descend the nozzle array and oscillate in a left-right cycle respectively, and was capable of 0° ~ 40° slope transit operation, with an operating width of 2.3 m. It can quickly and effectively wash the silt above the surface of the lotus root. Harvesting experiments were conducted in three different lotus root fields. The results showed that the lotus root harvesting depth was

收稿日期: 2023-06-28 修回日期: 2023-08-25

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2018GNC112004)

作者简介: 刘莫尘(1980—), 女, 副教授, 博士, 主要从事现代农业机械装备研究, E-mail: liu_mochen@126.com

通信作者: 闫银发(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事智能农业装备研究, E-mail: sd28@163.com

40 ~ 50 cm, the harvesting ratio was no less than 95%, and the lotus root damage ratio was no more than 5%, and the fuel consumption was no more than 215 g/(kW · h). In ordinary fields, speed of the harvester was 3 m/min and the average working efficiency was 0.04 hm²/h, which was 4 ~ 5 times of manual harvesting. In the experimental process, the lotus root harvester had stable working performance, which met the requirements of lotus root harvesting.

Key words: lotus root harvester; jet flush; water circuit; field experiment

0 引言

莲藕在北方种植主要集中在黄河三角洲、白洋淀等地区,其中黄河三角洲地区的莲藕种植面积超过 2.2×10^4 hm²^[1],具有单塘面积大、藕塘密集,适合大型机械采收等特点。然而,莲藕在田间的分布无明显规律,呈随机分布状态,其深入淤泥 30 ~ 40 cm,采收难度大。目前莲藕采收以人工采收为主,包括铲挖式和高压水冲式 2 种方式,莲藕人工采收作业环境恶劣,劳动强度大,且用工成本高,尤其对藕农身体伤害较大;人工采收方式容易损伤藕体影响莲藕品质,且采出率低,影响经济效益^[2-3]。

为了提高莲藕产业的经济效益,推动产业高效化、规模化发展,国内外很多机构和学者根据莲藕的种植特点,研制了适合不同地区的采藕机。欧美国家对莲藕采收技术研究较少^[4],东南亚国家普遍种植莲藕^[5],使得莲藕采收技术得到了发展。20 世纪 80 年代日本日东工业有限公司研制了喷流式采藕机,但在实际操作中该采藕机操作复杂、采出率低。近年,我国也研制了多种类型的水力采藕机,如南京农业大学研制了 4SWJ-1 型船式水力采藕机^[6],其水力系统包括水泵、分水器、软管和喷头,选用的清水离心泵,流量 94.1 m³/h,扬程 44.2 m,轴功率 14.8 kW,该采藕机作业效率为 0.007 hm²/h,采净率大于等于 95%,破损率小于等于 5%,工作效率为人工水冲式挖藕的 3 倍以上;华中农业大学研制的 4CWO-3.2 型采藕机选用 6SH-6 型离心泵,流量 126 m³/h,扬程 84 m,轴功率 40 kW,喷嘴水压 0.5 ~ 0.7 MPa,采藕深度 0.8 m,工作效率 0.08 ~ 0.30 hm²/h,莲藕采净率大于等于 95%,破损率小于等于 3%^[7-10]。目前小型采藕机大多为浮筒式采藕机,其在一定程度上提高了采挖效率与经济效益。但多为漂浮式采藕机,在藕田作业中存在工作不稳定、转场困难的问题,更适合南方深水种植的藕田。针对北方莲藕种植的采收机械装备还处在积极探索阶段^[11-12]。

针对黄河三角洲地区莲藕种植的特点,本文设计履带式自走水力采藕机,能够适应复杂的作业环境和便于转场作业,以期在保证莲藕品质的前提下提高莲藕采收效率、降低劳动强度,为采藕机研究及

推广提供借鉴参考。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

履带式自走水力采藕机由行走机构、动力系统、水力系统、液压系统、控制系统等组成。其中动力系统包括柴油机、离合器、传动轴、胶带轮等;水力系统包括水泵、主水管分水器、吸水管、过滤器、高压软管、喷头组件等;液压系统包括液压泵、液压马达、液压油缸、液压油管、溢流阀和换向阀等;控制系统包括电控箱、PLC、继电器、电池组等。柴油机与水泵通过传动轴直连,通过胶带与液压泵连接。摆动机构安装在方管架后端,吸水管和水泵通过 2 个 90° 弯管以及法兰连接在一起。散热扇安装在柴油机外侧,可以在柴油机工作发热时有效降温,避免温度过高降低柴油机寿命。整机结构如图 1 所示。

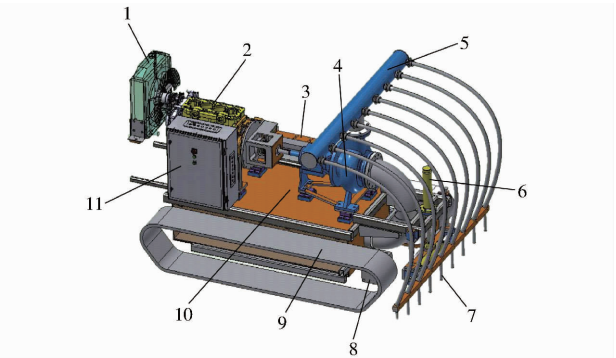


图 1 采藕机整机结构图

Fig. 1 Structure diagram of lotus root harvester

1. 散热器 2. 柴油机 3. 液压泵 4. 水泵 5. 分水器 6. 提升机构 7. 喷嘴阵列 8. 液压马达 9. 履带 10. 底盘 11. 控制箱

1.2 工作原理

履带式自走水力采藕机动力总成主要由柴油机、离合器等组件组成,柴油机通过传动装置连接水泵和液压泵,液压泵为液压缸和液压马达提供动力。采藕机工作过程为:液压马达驱动履带行走及转向;水泵由藕塘吸水,水流经吸水管进入水泵,由水泵增压后经主水管分水器分流,通过高压软管输送到喷嘴,水射流从喷嘴喷出,冲击破碎莲藕表面的淤泥,直至莲藕完全裸露在水底,由于莲藕密度比水小,莲藕会在自身浮力作用下浮出水面,再由人工打捞,完成采藕作业。采藕过程中,喷嘴阵列由摆动液压缸带动进行

左右循环摆动喷水,作业幅宽为 2.3 m;提升油缸可带动喷嘴阵列上升,减少行走过程中的阻碍,能够进行坡度 0°~40°的藕塘转场作业。履带式自走水力采藕机主要性能及结构参数如表 1 所示。

表 1 履带式自走水力采藕机采藕机结构性能参数
Tab.1 Crawler-type self-propelled hydraulic lotus root harvester structure performance parameters

参数	数值/形式
结构形式	履带式自走
外形尺寸/(mm×mm×mm)	3 980×2 757×1 466
结构质量/kg	2 500
作业速度/(m·min ⁻¹)	3
作业幅宽/mm	2 300
适水深度/mm	400~1 000
工作效率/(hm ² ·h ⁻¹)	0.054
最大前进速度/(m·min ⁻¹)	9
摆动速度/(r·min ⁻¹)	4

2 关键机构设计

2.1 底盘及履带式行走机构

2.1.1 底盘

为避免油箱体积过大影响安装空间,将油箱和底盘方管架焊接在一起组成承重底盘,起到节省空间和增强承重能力的作用。如图 2 所示,油箱分为柴油箱和液压油箱,吸水管嵌于液压油箱内,两个油箱之间用隔板隔开。履带安装在承重底盘两侧,通过支架管焊接在油箱上,液压马达放置于履带后端内侧,为机器行走提供动力。

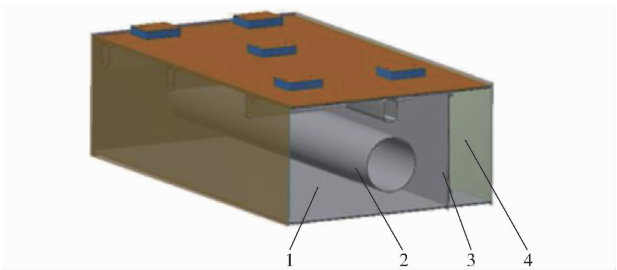


图 2 油箱内部结构图

Fig.2 Internal structure of oil tank

1. 液压油箱 2. 吸水管 3. 隔板 4. 柴油箱

2.1.2 履带式行走机构

选择橡胶履带式行走机构,包括履带、导向轮、驱动轮、支重轮、托带轮和张紧装置^[13-14],如图 3 所示。履带底盘将环状的循环履带环绕在驱动轮和一系列滚轮外侧,通过驱动轮带动履带,实现车轮在履带上的相对滚动的同时,履带在地面反复向前铺设,从而带动底盘运动^[15-16]。履带关键结构参数计算包括节距、宽度、接地长度、驱动轮节圆直径、支重轮节圆直径等。由于黄河三角洲地区的土壤由黄河沙

沉积而来,藕田底部以砂壤土为主,因此履带设计中不需要考虑在深泥脚田中行走的问题。

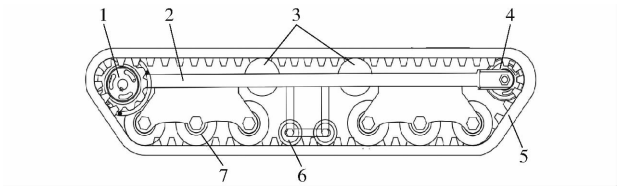


图 3 履带行走机构示意图

Fig.3 Schematic of crawler walking mechanism

1. 导向轮 2. 张紧装置 3. 底梁 4. 驱动轮 5. 履带 6. 浮动轮 7. 支重轮

履带节距根据整机质量的不同而不同^[17-19],计算公式为

$$t_0 = (12 \sim 14.5) \sqrt[4]{m} \quad (1)$$

式中 t_0 ——履带节距,mm

m ——整机质量,kg

履带板宽度 b 计算式为

$$b = (0.9 \sim 1.3) \times 209 \sqrt[3]{10^{-3} m} \quad (2)$$

履带接地长度 L 需与履带板宽度 b 相匹配,其计算式为

$$L = \frac{b}{\lambda'} \quad (3)$$

式中 λ' ——比例系数,取 0.185

履带轨距 B 计算式为

$$B = (3.5 \sim 4.5) b \quad (4)$$

选择驱动轮齿数为 12,驱动轮节圆直径 D_k 计算式为

$$D_k = \frac{t_0}{\sin \frac{180^\circ}{Z}} \quad (5)$$

式中 Z ——驱动轮齿数

导向轮安装在履带装置的前端,防止履带跑偏和脱落。导向轮直径 D_t 计算式为

$$D_t \approx (0.8 \sim 0.9) D_k \quad (6)$$

支重轮共 6 个,采用多支点支撑,均匀分布在履带底部,支重轮节圆直径 d_z 计算式为

$$d_z \approx (0.5 \sim 1) D_t \quad (7)$$

整机质量为 2 100 kg,柴油箱和液压油箱加满油共计 2 500 kg。根据式(3)~(7)计算得到履带行走机构的主要参数如表 2 所示。

2.2 水力系统

2.2.1 水力系统组成

水力系统结构图如图 4 所示,水泵与柴油机通过传动轴和离合器连接,由吸水口从田间吸水,经吸水管、弯管、水泵、分水器后由高压软管输送至喷嘴阵列执行冲藕动作。

表 2 履带结构参数

Tab.2 Structural parameters of crawler

参数	数值
履带接地长度 L/mm	1 890
履带板宽度 b/mm	350
履带轨距 B/mm	1 250
履带节距 t_0/mm	85
驱动轮节圆直径 D_k/mm	320
导向轮直径 D_l/mm	256
支重轮节圆直径 d_z/mm	128
单边履带尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	2 395 × 350 × 400

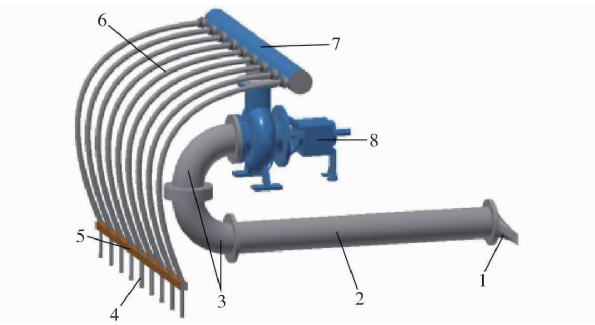


图 4 水力系统结构图

Fig.4 Hydraulic system structure drawing

1. 引水闸门 2. 吸水管 3. 弯管 4. 喷嘴 5. 摆动支架 6. 高压软管 7. 分水器 8. 水泵

高压软管共 9 根,连接主水管与喷嘴,摆动灵活并且方便拆卸与清洗。喷嘴固定在摆动支架上,每个喷嘴间隔 0.24 m,喷嘴阵列宽 2 m,水平行程 0.3 m,作业幅宽共 2.3 m。喷嘴阵列由摆动液压缸带动进行水平往复运动,由提升液压缸带动进行上升和下降。

2.2.2 水泵选型

前期实地考察测得,藕农手持高压水枪采挖莲藕所需的水泵流量为 100 m³/h 左右、扬程 15 m,考虑水路能量损失,选择水泵为山东鲁驰泵业制造有限公司生产的 IS200-150-315B 型清水泵,其具体规格参数如表 3 所示。

表 3 水泵性能参数

Tab.3 Performance parameters of water pump

参数	数值
转速/(r·min ⁻¹)	1 450
流量/(m ³ ·h ⁻¹)	346
扬程/m	24
效率/%	78
叶轮直径/mm	301.5
泵质量/kg	191
轴功率/kW	29
配套电机功率/kW	>37

2.2.3 水路能量损失计算

水路能量损失 h_l 分为沿程损失 h_f 和局部损失

h_m ^[20], 计算式为

$$h_l = \sum h_f + \sum h_m$$

(8)

(1) 沿程能量损失

采藕机水路沿程损失主要集中在吸水管和高压软管上。计算式可表示为

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}$$

(9)

式中 λ ——沿程阻力系数

l ——管道长度, m

v ——断面平均流速, m/s

d ——管径, m

g ——重力加速度, 取 9.8 m/s²

沿程阻力系数 λ 与水流流速、流动状态、管道粗糙度以及流体性质等因素有关,一般由莫迪图确定,通过雷诺数和摩阻系数在莫迪图中确定阻力系数 λ ^[21]。

高压软管共有 9 根,单根高压软管中水的流量 Q 为

$$Q = \frac{Q_{\text{all}}}{9} = \frac{346 \text{ m}^3/\text{h}}{9} = 38.44 \text{ m}^3/\text{h} = 0.01 \text{ m}^3/\text{s}$$

(10)

管道中流速计算式为

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi d^2}$$

(11)

式中 A ——管道断面横截面积, m²

高压软管直径为 0.064 m,计算可得水在高压软管中流速为 3.11 m/s。

雷诺数 Re 计算式为

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu}$$

(12)

式中 ρ ——流体密度, kg/m³

μ ——流体动力粘度, Pa·s

采藕机工作环境温度最低为 0℃,对应动力粘度 1.519 8 × 10⁻³ Pa·s,计算得高压软管中雷诺数 Re 为 133 560,吸水管中雷诺数 Re 为 366 371,二者的雷诺数均大于 2 000,故流动状态均属于紊流状态。

摩阻系数 f 计算式为

$$f = \frac{\Delta}{d}$$

(13)

式中 Δ ——当量粗糙度, m

高压软管为橡胶材质,当量粗糙度 Δ 为 2 × 10⁻⁵ m,代入式(13)可得 f 为 3.1 × 10⁻⁴。根据莫迪图可查到当 $Re = 135 560$, f 为 3.1 × 10⁻⁴ 时阻力系数 λ 为 0.014 8。高压软管管长 2.1 m,直径 0.064 m,阻力系数 0.014 8,断面流速 3.11 m/s,代入式(9)计算可得高压软管沿程损失 h_{f1} 为 0.239 6 m。

吸水管是耐锈钢材质,当量粗糙度 Δ 为 3×10^{-5} m,代入式(13)可得 f 为 1.4×10^{-4} 。根据莫迪图可查到当 $Re = 366\ 371$, f 为 1.4×10^{-4} 时阻力系数 λ 为 0.012 7。吸水管长度 1.83 m,直径 0.21 m,阻力系数 0.012 7,断面流速 2.77 m/s,代入式(9)计算可得吸水管沿程损失 h_{f2} 为 0.043 3 m。

总沿程能量损失 h_f 为

$$\sum h_f = h_{f1} + h_{f2} = 0.282\ 9\ \text{m} \quad (14)$$

(2)局部能量损失

实际流体在经过管道连接件和管道构件等局部障碍装置(如阀门、变截面管、弯头等)时,由于过流断面发生变化,流动方向改变、速度重新分布、质点间进行动量交换,会产生局部能量损失。对于采藕机来说,局部能量损失 h_m 主要存在于两个弯管、分水器和喷嘴处,其计算式为

$$h_m = \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (15)$$

式中 ζ ——局部阻力系数

两个 90° 弯管形成一个 180° 弯管连接吸水管和水泵,如图 5 所示。其局部阻力系数为

$$\zeta_{180^\circ} = k\zeta_{90^\circ} \quad (16)$$

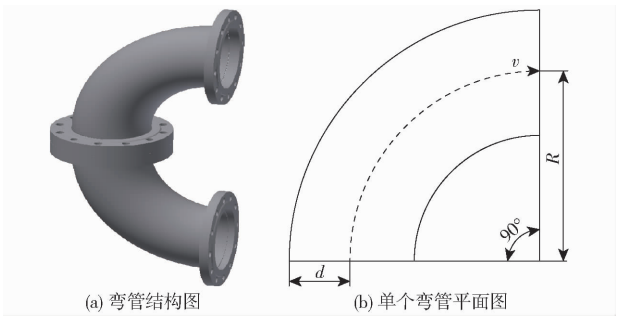


图 5 弯管
Fig. 5 Structure elbow

90° 弯管管径 d 与转弯半径 R 之比为 0.7,查常用管件局部水头损失系数表可知,其局部阻力系数 $\zeta_{90^\circ} = 0.2$, $k = 1.41$,代入式(16)计算得 $\zeta_{180^\circ} = 0.282$;两弯管与吸水管直接相连,可取其水流速度为 2.77 m/s,代入式(15)得到弯管中局部能量损失 h_{m1} 为 0.110 4 m。

水流经水泵增压后经分水器分水进入高压软管,分水器如图 6 所示,其入水口相当于等径三通分支结构,示意图如图 7 所示。查常用管件阻力系数表知其局部阻力系数 ζ 为 1.5。主管直径为 0.16 m,流量为 $0.10\ \text{m}^3/\text{s}$,由式(11)计算得水流速度为 4.97 m/s。将局部阻力系数和水流速度代入式(15),计算可得分水器入水口局部水头损失 h_{m2} 为 1.890 4 m。

分水器出水口连接高压软管,其阻力损失属于

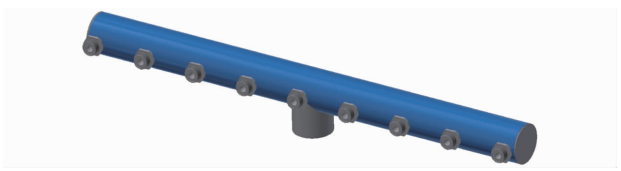


图 6 分水器
Fig. 6 Main water segregator

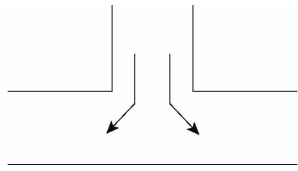


图 7 主分水器入口结构示意图
Fig. 7 Inlet structure of main water separator

变管径损失中的管道进水口水头损失,不同进口形式造成的损失系数有很大差异,如图 8 所示。分水器出水区属于锐缘进口,对应的局部阻力系数为 0.5,其水流速度即高压软管中的水流速度为 3.11 m/s,代入式(15)计算得出水口局部损失 h_{m3} 为 0.246 7 m。

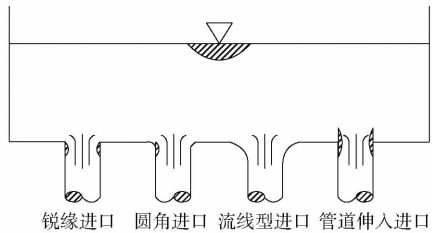


图 8 主分水器出口结构示意图
Fig. 8 Schematic of outlet structure of main water separator

喷嘴和高压软管直接对应连接,属于管径突然缩小的情况,其局部阻力系数计算式为

$$\zeta = 0.5 \left(1 - \frac{A_2}{A_1} \right) \quad (17)$$

式中 A_1 ——流入管道截面积

A_2 ——流出管道截面积

高压软管直径为 0.064 m,喷嘴直径为 0.022 m,代入式(17)计算得到喷嘴局部阻力系数为 0.441,代入式(15)计算可得喷嘴局部水头损失 h_{m4} 为 0.217 6 m。

总的局部水头损失为

$$\sum h_m = h_{m1} + h_{m2} + h_{m3} + h_{m4} = 2.465\ 1\ \text{m} \quad (18)$$

计算得到总的水头损失 h_l 为 2.748 m。

水泵标定扬程 $H_0 = 24$ m,所以水泵实际扬程为

$$H = H_0 - h_l = 21.252\ \text{m} > 15\ \text{m} \quad (19)$$

选用该水泵时藕承受最大压力 p 与扬程的关系式为

$$p = \rho g H \quad (20)$$

水泵实际扬程为 21.252 m,水密度取 1 000 kg/m³,重力加速度取 9.8 m/s²,代入式(20)可得选用该水泵采藕时,藕所承受的最大压力为 0.21 MPa,根据文献[22]可知,莲藕最大抗压强度为 2.22 MPa。因此,实际水压小于莲藕最大抗压强度极限,满足采收时不损伤莲藕品质要求。

2.3 液压系统

液压系统回路包括左履带液压马达回路、右履带液压马达回路、喷头摆动液压缸回路、喷头提升液压缸回路、闸门启闭液压缸回路和卸荷回路,如图 9 所示。液压系统能够完成履带行走、调速、转弯,喷嘴阵列摆动、提升,以及引水闸门开合。液压泵为 CBW-F316 型齿轮泵,其额定压力为 20 MPa,公称排量为 16 mL/r,稳定转速为 2 500 r/min,质量为 2.9 kg。

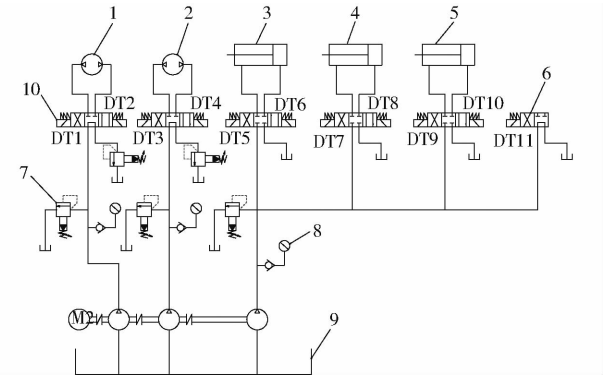


图 9 液压系统原理图

Fig. 9 Principle of hydraulic system

1. 左履带液压马达 2. 右履带液压马达 3. 摆动液压缸 4. 提升液压缸 5. 闸门启闭液压缸 6. 两位四通电磁换向阀 7. 溢流阀 8. 液压表 9. 油箱 10. 三位四通电磁换向阀

马达选型需考虑的关键性能参数主要有压力、排量、输出转矩、最大转速 4 个参数,根据负载压力、转矩、转速要求,确定马达排量,然后根据 4 个主要参数进行综合考虑选取,马达排量计算式为

$$V_m = \frac{2\pi M_m}{P_m \eta_m}$$
 (21)

- 式中 V_m ——马达流量, mL/r
 M_m ——马达转矩, N·m
 P_m ——马达压力, MPa
 η_m ——马达机械效率,取 0.9

计算得该马达排量为 1 598 mL/r,根据匹配功率和行走要求,选择 HMV-1600 型摆线液压马达,基本参数如表 4 所示。

2.4 动力系统

2.4.1 柴油机选型

柴油机是整机动力源,其动力消耗分为水力系统消耗和液压系统消耗,所需功率为

表 4 马达主要参数

Tab. 4 Main parameters of motor

参数	数值
理论排量/(mL·r ⁻¹)	1 600
额定压力/MPa	25
最高转速/(r·min ⁻¹)	250
最大扭矩/(N·m)	5 500

$$P = K(P_1 + P_2)$$
 (22)

其中

$$P_2 = \frac{p_c E}{60 \eta_p}$$
 (23)

式中 K ——安全系数,取 1.1

P_1 ——水泵功率, kW

P_2 ——液压系统消耗功率, kW

p_c ——液压系统压力, MPa

E ——齿轮泵排量, L/min

η_p ——液压系统效率,取 0.93

根据所选液压泵, p_c 为 20 MPa, E 为 40 L/min, 则 $P_2 = 14$ kW,代入式(22)可得柴油机所需功率至少为 47.3 kW,故选择东方红 YT4B4U23/0515E 型柴油机,其具体参数如表 5 所示。

表 5 东方红柴油机具体参数

Tab. 5 Dongfanghong specific parameters of diesel engines

参数	数值/形式
气缸冷却方式	水冷
气缸排列	直列
标定功率/kW	40.4
转速/(r·min ⁻¹)	2 200
冲程数	4
缸径/mm	108
行程/mm	130
排量/L	4.76
最低油耗/(g·(kW·h) ⁻¹)	215
对应功率/kW	35~75
净质量/kg	480
外廓尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 100×950×1 100

2.4.2 履带式底盘最大行驶阻力计算

驱动轮与履带啮合转动,实现采藕机行走作业,底盘所承受的驱动力为

$$F_k = \frac{M_k}{r_k}$$
 (24)

式中 M_k ——驱动轮驱动力矩, N·m

r_k ——驱动轮半径, m

计算可得驱动力为 2.5×10⁴ N。

履带式采藕机在藕田作业或者转场工作时,需克服各种外部阻力,主要有滚动摩擦阻力、坡道阻力、内部阻力,由于速度较低,忽略空气阻力等因素,考虑到水田工作环境恶劣,为了防止陷车,应留有一定余量,整机质量按 2 500 kg 计算。

(1)滚动摩擦阻力

$$F_f = fG \tag{25}$$

式中 G ——额定整机质量,kg

由于藕田多为砂壤土,为保证动力充足,故阻力系数取 0.06。

(2)坡道阻力

采藕机在爬坡时与水平地面形成最大夹角为 40° ,车体重力的分力在坡道方向与车辆行驶方向相反,表现为阻碍车辆爬坡的坡道阻力,即

$$F_p = G\sin\theta \tag{26}$$

式中 θ ——爬坡角, $(^\circ)$

(3)履带轮内部阻力

履带轮内部阻力涉及到的零部件较多,主要包括导向轮、张紧轮、支重轮等转动时与履带的摩擦以及内部轴承转动产生的摩擦,驱动轮与履带啮合时的摩擦等,计算较复杂,通常根据受到的载荷根据阻力系数进行估算,一般取内部阻力系数 f_n 为 0.06,计算式为

$$F_n = f_n G \tag{27}$$

综上所述,最大行驶阻力为

$$F = F_f + F_p + F_n \tag{28}$$

计算得最大行驶阻力为 1.3×10^4 N。

2.4.3 传动设计

总传动路线分为两路传动:一路是经柴油机带动传动轴,经离合器连接水泵,为水泵工作提供动力;另一路是传动轴上主动轮带动胶带传递给从动轮,从动轮带动液压泵工作,液压泵分别给左右液压马达和两个液压油缸提供动力,如图 10 所示。

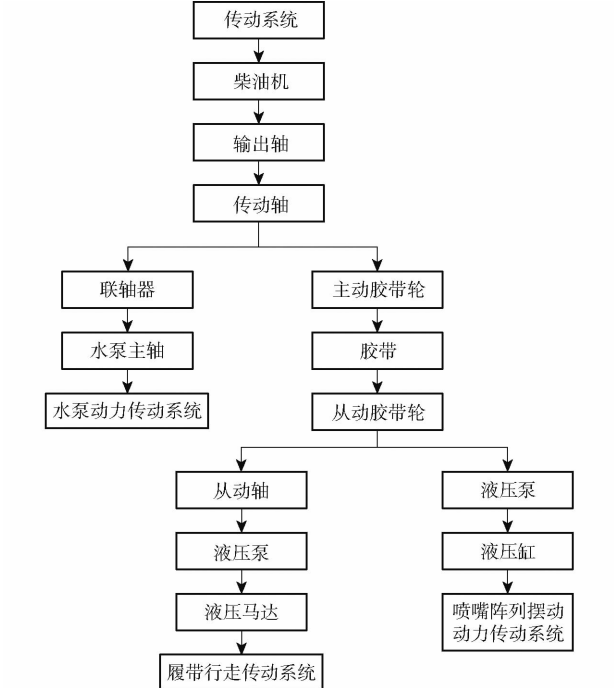


图 10 传动示意图

Fig. 10 Transmission diagram

2.4.4 动力输出装置

由于柴油机没有自带的动力输出装置,所以需考虑设计装置将动力引出。结合采藕机各部件在承重盘上的布置,柴油机需带动水泵工作,并且需将一部分动力传递给液压泵,带动整个液压系统,设计柴油机的输出轴使柴油机与水泵直连,输出轴上有胶带轮和离合器,通过胶带传输带动液压泵工作。动力输出装置设计如图 11 所示,即保证了动力的各个输出,又可以使采藕机整体呈线性布置,重心集中于中心线上,保证左右重量分布均匀,有利于整机平衡。

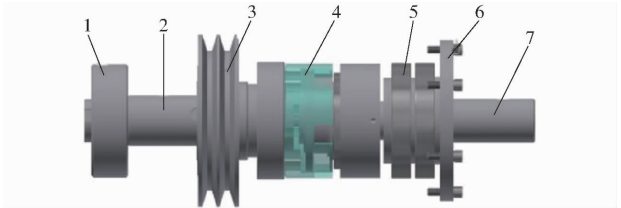


图 11 动力输出装置

Fig. 11 Power take-off unit

1. 柴油机传动法兰 2. 输出轴 3. 主动胶带轮 4. 电磁离合器
5. 滚动轴承 6. 轴承盖 7. 传动轴

柴油机与液压泵之间采用胶带传动,与齿轮传动相比,胶带传动具有结构简单、安装方便、传动平稳、价格低等优点。柴油机传递的动力经输出轴输出,带动轴上的胶带轮转动,通过胶带传动驱动液压泵工作。

2.4.5 胶带传动设计

胶带设计初始条件^[23]:传递功率为 6 kW,主动轮转速 n_1 为 2 200 r/min,从动轮转速 n_2 为 2 500 r/min,传动比 i 为 1.14。设计的胶带传动设计参数如表 6 所示。

表 6 胶带传动设计参数

Tab. 6 Specific parameters for belt drive design

参数	数值
设计功率/kW	6.6
小带轮基准直径/mm	180
大带轮基准直径/mm	198
带速/(m·s ⁻¹)	21
实际中心距/mm	550
小带轮包角/($^\circ$)	175
胶带数量	2
单根 V 带预紧力/N	164
压轴力/N	657

2.5 控制系统

控制系统硬件部分主要由 PLC、控制柜、遥控器、LoRa(Long range radio)无线通信模块、蓄电池等组成。为了方便水田作业,可以在控制柜的控制面

板进行操作也可以通过遥控器进行操作。

控制器采用三菱 FX2N-32MR-D 型 PLC, 总 I/O 点数为 32 点, DC24V 输入 16 点, 继电器输出 16 点, 供电为 24 V 蓄电池, 通过相应的开关控制采藕机的动作, 采用 LoRa 无线通信。LoRa 无线通信模块由遥控器和接收器组成, 结构如图 12 所示, 其 MCU 采用 STM32F103 芯片、收发器采用 SX1278 芯片, 具有 8 路数字信号和 4 路模拟信号。LoRa 模块在郊区的无线传输距离为 15 km^[24], 功耗小于等于 500 mW, 接收器与接收遥控器指令并传输至 PLC, PLC 执行程序并控制相应继电器动作, 从而带动运动组件动作。

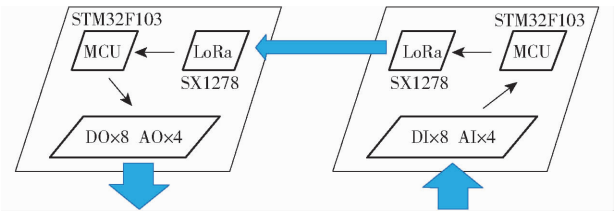


图 12 LoRa 无线通信模块
Fig. 12 LoRa wireless communication module

控制系统工作模式分为手动控制和自动控制。手动控制可进行喷嘴阵列的左右摆动和升降、引水闸的开合、左右履带的单独控制等单步控制; 自动控制模式下, 由遥控器控制履带行走, 喷嘴阵列自动循环进行左右摆动喷水, 具体流程如图 13 所示。

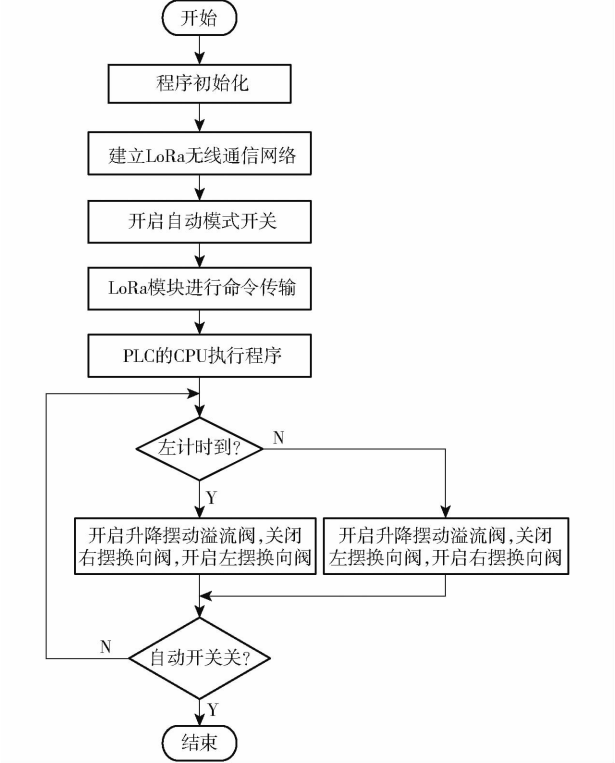


图 13 自动控制流程图
Fig. 13 Flowchart of automatic control

3 采藕机田间试验

3.1 试验设备与材料

为了测试采藕机的实际工作性能, 以莲藕采净率、损藕率、作业油耗率和采藕行驶速度等为主要性能指标, 在东营市黄河口镇进行了莲藕收获试验, 试验样机如图 14 所示。



图 14 采藕机样机
Fig. 14 Prototype of lotus root harvester

3.2 试验方法与性能指标

在 3 块藕田进行田间试验, 现场工作图如图 15 所示。藕田水深分别为 50、70、100 cm, 种植莲藕品种均为新垦莲藕, 入泥深度约为 40 cm。分别测试采藕机性能指标, 操作方法和性能指标检测为:

(1) 在采藕机前进方向上量取 20 m, 测量机器通过该距离所需时间, 由位移和时间公式计算采藕机行驶速度。让采藕机反复采收行驶 3 次, 取平均值, 即为采藕机田间行驶速度。



图 15 采藕机工作图
Fig. 15 Diagram of lotus root harvester working

(2) 量出长宽为 20 m × 23 m 的藕田, 在藕田内进行采收作业, 然后人工采挖尚未被冲刷出的莲藕, 将人工采挖的莲藕和机采莲藕分别称量, 计算出莲藕挖净率 η , 计算式为

$$\eta = \frac{M_1}{M_1 + M_2} \times 100\% \quad (29)$$

式中 M_1 ——机采莲藕质量, kg
 M_2 ——人工采藕质量, kg

(3) 统计采藕机采出的表面出现损伤和藕节折断的莲藕数量在机采莲藕中的占比, 计算得损藕率。

(4) 统计试验前后燃油量, 确定总行驶距离, 计算出作业油耗率。

(5) 已知采藕机工作总量为 20 m × 23 m 的藕田,根据每块藕田的作业时间,可计算出平均工作效率 n ,计算式为

$$n=\frac{W}{t}$$

(30)

表 7 田间作业性能检测结果

Tab. 7 Performance test results of lotus root field

性能指标	莲藕采净率/%	损藕率/%	作业油耗率/(g·(kW·h) ⁻¹)	采藕行驶速度/(m·min ⁻¹)	平均工作效率/(hm ² ·h ⁻¹)
设计要求	≥95.0	≤5.0	≤215.0	3.00	0.040
藕田 1(水深 50 cm)	96.1	3.6	211.2	3.14	0.042
藕田 2(水深 100 cm)	95.3	3.2	213.3	3.07	0.041
藕田 3(水深 70 cm)	92.0	4.6	221.7	2.61	0.037

以上,藕田 1 采净率达到 96.1%,而藕田 2 略高于设计要求,2 块藕田损藕率分别为 3.6% 和 3.2%,显著优于设计要求,另外,作业油耗率、行驶速度和平均工作效率均满足设计要求,藕田 1 作业油耗率比设计要求低 3.8 g/(kW·h),藕田 2 低 1.7 g/(kW·h),且在行驶速度上,藕田 1 和藕田 2 分别比设计要求快 0.14、0.07 m/min,平均工作效率分别为 0.042、0.041 hm²/h,均大于 0.040 hm²/h。莲藕生长深度一般为 40 cm,在试验过程中发现,莲藕浮出时间段集中在 1 s 左右,在采藕机工作的前 20 s 左右,冲刷深度随着时间的增加而增加,但在 20 s 以后,冲刷深度基本保持在 0.45 m 左右。而跨行采挖的莲藕不易浮出水面,原因可能是边缘区域的冲刷时间较短,覆盖莲藕的泥土未被完全冲开,但是莲藕采净率已达到 95% 以上,满足设计要求。

由表 7 可知,水深对采藕机的影响不大。藕田 3 的试验结果不理想,莲藕采净率未达到设计要求,只有 92%,作业油耗率较高、平均工作效率较低,采藕行驶速度较慢,原因是藕田 3 是由苗圃基地改造而来的藕田,树木砍伐后留有部分树根和矮树桩,导致采藕机行走过程中因底部不平略有发生倾斜,影响了采藕机行走的稳定性,所以行驶速度较慢,作业油耗率和平均工作效率较高。

挖出的莲藕表面和藕节处未见损伤,藕芽保持完整,如图 16 所示。莲藕表面几乎无泥土浮着,说明采藕机的水流冲击力能够完全冲刷掉莲藕表面淤泥且不会损伤莲藕,采藕机整机质量和履带设计合理,不会在行走过程中压坏莲藕。

在藕田间行走和爬坡测试中,采藕机行走速度

式中 W ——采藕机工作总量, hm²
 t ——工作时间, h

3.3 试验结果分析

采藕机在藕田内采收的试验结果如表 7 所示。由表 7 可知,藕田 1 和藕田 2 莲藕采净率均在 95%



图 16 采出的莲藕
Fig. 16 Harvested lotus root

最大为 3 m/min,最大爬坡坡度为 40°,符合设计要求。

4 结论

(1)设计了一种高效低损伤的履带式自走水力采藕机,分别对动力系统、水力系统、液压系统、控制系统进行了计算、设计、选型,该机器能适应 100 cm 以下不同水深的藕田进行采藕作业,并且能够完成藕田间爬坡转场,显著降低莲藕采收的劳动强度并提高作业效率。

(2)采用履带式行走系统既可以适应复杂的藕田作业环境,又能进行快速转场作业;设计的摆动喷射式冲水方式,能够实现淤泥的有效冲刷且莲藕损失率低;控制系统基于 PLC 和 LoRa 无线通信模块,传输距离远、功耗低、控制可靠。

(3)经藕田采收试验测试,履带式自走水力采藕机采收深度为 0.45 m 时,藕田作业速度可达到 3 m/min 且基本不受水深影响,平均工作效率为 0.04 hm²/h,是手工采藕效率的 4~5 倍,采藕机莲藕采净率大于 95%,损藕率小于 5%。藕田采藕试验效果优良,采藕机工作性能稳定,未出现熄火和水泵堵塞情况。

参 考 文 献

[1] 黄河三角洲盐碱地综合利用的调研报告[R]. 中国人民政治协商会议东营市委员会, 2022.

[2] 孙虎,周洁,雷颜瑞. 基于人机环境系统的喷射式挖藕机改良设计[J]. 包装工程, 2019, 40(22): 130-135.

- SUN Hu, ZHOU Jie, LEI Yanrui. Improved design of jet flow lotus root based on man-machine environment system[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(22): 33–36. (in Chinese)
- [3] 吴昊, 夏俊芳, 张国忠, 等. 基于 EDEM-Fluent 仿真的自旋射流式挖藕机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(5): 9–14.
- WU Hao, XIA Junfang, ZHANG Guozhong, et al. Design and experiment of a spin-jet flow type lotus root digging machine based on EDEM-Fluent[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(5): 9–14. (in Chinese)
- [4] BROGHAMMER A, KRUSELL L, BLAISE M, et al. Legume receptors perceive the rhizobial lipochitin oligosaccharide signal molecules by direct binding[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012, 109(34): 13859–13864.
- [5] WEN B, LI D, TANG D, et al. Effects of simultaneous ultrasonic and cysteine treatment on antibrowning and physicochemical quality of fresh-cut lotus roots during cold storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 168: 111294.
- [6] 王维, 顾宝兴, 姬长英. 4SJW-1 型船式水力挖藕机研制[J]. 农业机械, 2009(4): 88–90.
- [7] THIN K C, KHAING M M, AYE K M. Design and performance analysis of centrifugal pump[J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2008, 46(1): 422–429.
- [8] 谢荣盛, 华尔天, 徐高欢, 等. 轴流泵双驼峰特性与内流场测试研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 178–185.
- XIE Rongsheng, HUA Ertian, XU Gaohuan, et al. Research on double hump phenomenon of axial flow pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 178–185. (in Chinese)
- [9] LIU Y, ZHOU Y, LÜ W, et al. Design and experiment of hydraulic scouring system of wide-width lotus root digging machine[J]. Agriculture, 2021, 11(11): 1110.
- [10] 夏俊芳, 许绮川, 黄海东, 等. 加快莲藕采挖机械的研究[J]. 农业机械, 2005(5): 79.
- [11] 王静, 柯卫东, 郭宏波. 我国北方莲藕的种植模式和病虫害防治[J]. 长江蔬菜, 2013(18): 146–149.
- WANG Jing, KE Weidong, GUO Hongbo. Cultivation status of lotus root in north China and related pests and diseases control methods[J]. Yangtze River Vegetable, 2013(18): 146–149. (in Chinese)
- [12] 杨大亮. 船式自动挖藕机设计与应用[J]. 农业机械, 2022(5): 88–92.
- YANG Daliang. Design and application of boat type automatic digging machine for lotus root[J]. Agricultural Machinery, 2022(5): 88–92. (in Chinese)
- [13] 廖庆喜, 何坤, 万星宇, 等. 履带联合收获机式动力平台油菜直播机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(12): 54–64.
- LIAO Qingxi, HE Kun, WAN Xingyu, et al. Devices for rapeseed direct seeder on tracked combined harvesting power platform[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 54–64. (in Chinese)
- [14] WANG T B, WANG H P, XIAO P, et al. Substation inspection robot crawler obstacle-navigation platform complex environment research[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 415: 65.
- [15] 扈凯, 张文毅, 李坤, 等. 高地隙三角履带底盘多体动力学建模与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 386–394.
- HU Kai, ZHANG Wenyi, LI Kun, et al. Multi-body dynamic modeling and experiment of triangular track chassis with high ground clearance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 386–394. (in Chinese)
- [16] 韩振浩, 朱立成, 苑严伟, 等. 山地果园履带底盘坡地通过性能分析与优化设计[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 413–421, 448.
- HAN Zhenhao, ZHU Licheng, YUAN Yanwei, et al. Analysis of slope trafficability and optimized design of crawler chassis in hillside orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 413–421, 448. (in Chinese)
- [17] FAN G J, WANG Y Z, ZHANG X H. Development and experiment of lifting platform for orchards in hilly area[J]. Applied Mechanics and Materials, 2017, 865: 111–117.
- [18] 刘平义, 王振杰, 李海涛, 等. 行星履带式农用动力底盘设计与越障性能研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(增刊): 17–23.
- LIU Pingyi, WANG Zhenjie, LI Haitao, et al. Design and overcoming obstacles ability research of tracked driving chassis with planetary structure[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.): 17–23. (in Chinese)
- [19] 孙景彬, 楚国评, 潘冠廷, 等. 遥控全向调平山地履带拖拉机设计与性能试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 358–369.
- SUN Jingbin, CHU Guoping, PAN Guanting, et al. Design and performance test of remote control omnidirectional leveling hillside crawler tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 358–369. (in Chinese)
- [20] ZHANG L Z, HUANG S M. Coupled heat and mass transfer in a counter flow hollow fiber membrane module for air humidification[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, 54(5–6): 1055–1063.
- [21] 宁希南. 新设计通用莫迪图[J]. 林业建设, 2020(5): 67–68
- NING Xi'nan. Newly designed universal Moody diagram[J]. Forestry Construction, 2020(5): 67–68. (in Chinese)
- [22] 肖科星, 夏俊芳, 陈子林. 莲藕力学特性的试验研究[J]. 华中农业大学学报, 2016, 35(5): 125–130.
- XIAO Kexin, XIA Junfang, CHEN Zilin. Experimental study on mechanical properties of lotus root[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2016, 35(5): 125–130. (in Chinese)
- [23] 濮良贵, 纪明刚. 机械设计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [24] 赵全, 徐光, 郝龙, 等. 基于 LoRa 的无线多参数环境监测系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(6): 120–124.
- ZHAO Quan, XU Guang, HAO Long, et al. Design of wireless multi-parameter environmental monitoring system based on LoRa[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 38(6): 120–124. (in Chinese)