

电动自走式温室水体修复植物收获机设计与试验

邹福星¹ 李建平^{1,2} 何相逸¹ 季明东¹ 杨肖娥³

(1. 浙江大学生物系统工程系, 杭州 310058; 2. 农业部设施农业装备与信息化重点实验室, 杭州 310058;
3. 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058)

摘要:为解决温室大棚内人工湿地空间狭小、现有收获机械无法进入水池进行收获作业,以及达不到环保作业要求的问题,设计了一种可沿着铺设在水池上方的两条平行固定轨道行走的电动自走式收获机完成温室湿地水池内种植的挺水植物的收获。该机由蓄电池提供动力,设计了电气控制系统,实现了机器的自动行走,机械部分主要由割台、行走机构、旋转机构等组成。试验结果表明,在割刀平均速度 0.92 m/s、收获机前进速度 0.75~0.92 m/s 时,收获效果好,收获作业效率可达 7 500~9 000 m²/h;收获过程中无漏割和重割现象,收获的水草能够自动输送到机器右侧并铺放在通道上;收获过程安静、无废气排放污染,能满足室内收获对作业质量、效率与环保的要求。

关键词: 自走式收获机; 人工湿地; 水体修复植物; 设计; 试验

中图分类号: S225.99 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)06-0061-06

Design and Experiment of Self-propelled Water Body Restoration Plants Harvester

Zou Fuxing¹ Li Jianping^{1,2} He Xiangyi¹ Ji Mingdong¹ Yang Xiaoe³

(1. Department of Biological Systems Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

2. Key Laboratory of Equipment and Informatization in Environment Controlled Agriculture, Ministry of Agriculture, Hangzhou 310058, China

3. College of Environmental & Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: A variety of harvesting machines were developed to finish different harvesting works, such as combine-harvester for wheat and rice, harvesting boat for aquatic plants in rivers and lakes, trailer mower for grassland. But these machines are not suitable for aquatic plants growing in orderly arranged pools in large-scale greenhouses, which are used to purify tail water from sewage plants, because water in these pools is deep and space inside greenhouses is not enough for these machines to work in. Additionally, combustion engines are usually used to supply power for existing harvesters, consequently noises and exhaust pollution are serious problems in closed greenhouses. Aquatic plants grow rapidly and need to be cut regularly, which need a lot of labor. To satisfy the need of plants harvesting in greenhouses, research work on the functions, the basic structure, as well as the design of electric control system of a new type of harvester were done. A group of batteries was used in the new harvester to supply power for motors, which were used to drive cutting device, walking system and rotating mechanism separately. When it was working, the harvester walked along two parallel tracks above pools in greenhouses, cut grass in pools and transferred the grass from the left to the right, and then laid down grass on passages between two adjacent rows of pools. By experiments and calculation, the key parameters for the above mentioned mechanisms, such as main sizes, cutting power consumption, motor power, and walking speed were

收稿日期: 2015-12-16 修回日期: 2016-01-10

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAC17B02)和科技部国际合作交流项目(2010DFB33960)

作者简介: 邹福星(1976—),男,讲师,博士生,主要从事智能化农业装备研究,E-mail: fuxing_zou@aliyun.com

通信作者: 李建平(1962—),男,教授,博士,主要从事超高压加工及智能化农业装备研究,E-mail: jpli@zju.edu.cn

decided. Harvesting tests showed that when the machine walked at 0.75 ~ 0.92 m/s and average cutting speed of the cutter was 0.92 m/s, good results can be achieved, there were no repeated-cutting or uncut areas. Harvesting efficiency reached 7 500 ~ 9 000 m²/h, which was more than 20 times of artificial work.

Key words: self-propelled harvester; artificial wetland; water restoration plants; design; testing

引言

建设人工温室湿地,种植具有良好水体净化能力的水生植物,可有效去除污水中的氮、磷等物质,防止水体富营养化^[1]。在温室内,水生植物能常年生长,持续进行水体修复。由于湿地内的水生植物生长速度快,需要频繁、及时收获,对于规模较大的人工湿地,人工收获需要大量的劳动力。

现有的收获机械如联合收获机、水草收获船等收获机械^[2-5]都只能在地面或开阔水域作业,无法进入空间狭小的人工水池内进行收获作业。且现有的收获机械均使用汽油机或柴油机作为动力,存在排放污染,均不适合在封闭的温室内作业。

澳大利亚等国在水生植物的收获机械设备研究方面起步比国内要早^[6-7],国内生产的类似设备基本上也是以这些国家的收获设备为基础进行改进设计,但专门用于温室内人工湿地收获任务的收获机械研究目前还未见报道。

针对人工温室湿地内挺水植物的收获需要,设计全电动收获机,采用固定轨道自走式行走系统,使收获机沿着温室水池上方布置的轨道移动,进行收获作业,将收获的水草自动输送到温室内的通道上,实现对温室内水体修复植物的收获。

1 整机结构和工作原理

1.1 整机结构

收获机总体结构如图1所示,收获机主要由割台^[8-9]、割台减速器、割台电动机、蓄电池组、旋转电动机、蜗杆减速器、驱动齿轮、转盘轴承、上骨架、下骨架、驱动轮、驱动车桥、行走电动机、轨道夹持轮、从动轮等组成。

割台固定在上骨架的前端,由割台电动机来驱动;蓄电池组安装在上骨架的后部,为收获机上的所有电动机提供电力;上骨架通过转盘轴承与下骨架相联接,在旋转电动机、蜗杆减速器和驱动齿轮的驱动下,连同割台相对下骨架在水平面内旋转;驱动车桥和从动轮安装在下骨架的下方,分别位于下骨架的前后两端,在驱动车桥两端的制动器上分别安装有1只驱动轮。在下骨架中部的两侧,各设有2组轨道夹持轮,夹持轮的外圆柱面与轨道的腹板内侧相

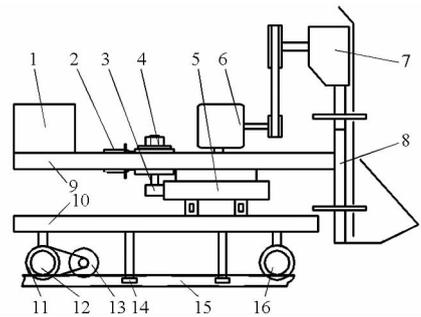


图1 收获机结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of harvester structure

1. 蓄电池组 2. 旋转电动机 3. 驱动齿轮 4. 蜗杆减速器
5. 转盘轴承 6. 割台电动机 7. 割台减速器 8. 割台 9. 上骨架
10. 下骨架 11. 驱动车桥 12. 驱动轮 13. 行走电动机
14. 轨道夹持轮 15. 导轨 16. 从动轮

对,并保持一定间距,可防止收获机因意外事故倾倒是和脱轨。

1.2 工作原理

收获机的工作环境为外形呈长方形的玻璃温室,内设排列整齐的水池,水池宽度为3 m,水池中种植绿苇和旱伞草等挺水植物,每隔两列水池设有一条较宽的通道,水池上方轨道铺设如图2所示。

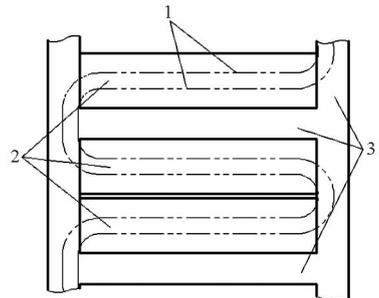


图2 轨道铺设示意图

Fig.2 Sketch map of tracks layout

1. 轨道 2. 水池 3. 通道

收获机工作时,使用手持控制装置控制行走电动机带动驱动车桥两端的驱动轮驱动收获机沿着铺设在水池上方的2条固定的平行导轨运动,可以实现前进、倒车、制动及行走速度的调节;通过控制割台电动机带动割台工作,将割下的水草向右输送到收获机右侧的通道上。由于割台横向宽度大,完成一系列水池的收获作业后,启动旋转电动机带动转盘轴承及上骨架和割台在水平面内旋转一定角度,以减小收获机的横向尺寸,使得收获机能顺利通过水池

两端和温室墙壁之间的狭小通道,转移到相邻水池继续收获作业。

2 整机电气系统设计

整机电气系统框图如图 3 所示,包括手持控制装置、电气控制箱、无刷直流电动机控制装置^[10-11]、48 V/220 V 逆变器、行走电动机、割台电动机、旋转电动机和蓄电池组。整机的主要电路元件集中安装在电气控制箱中,通过手持控制装置和电气控制箱可以实现对收获机所有电气设备的控制。

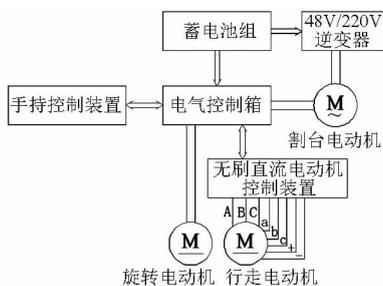


图 3 整机电气系统框图

Fig. 3 Electrical system block diagram

为了收获作业安全,电气控制系统的设计需充分考虑电气互锁和控制对象的接电顺序。整机电气控制逻辑如表 1 所示。

表 1 电气系统逻辑控制

Tab. 1 Logic control of electric system

控制功能	割台电动机	旋转电动机	行走电动机
割台启动	通电	断电	断电
割台旋转	断电	通电	断电
收获机行走	通/断	断电	通电
收获机制动	断电	断电	断电-反接

3 关键部件设计

3.1 割台结构设计及功率消耗分析

割台结构如图 4 和图 5 所示,主要由割台电动机和胶带传动装置、减速器、链传动装置、曲柄机构、切割器^[12]、输送链、分禾器、拨禾轮、压禾弹簧和面板组成^[13-14]。

割台电动机通过胶带传动装置驱动割台减速器。减速器输出的动力分两路,一路通过链传动装置驱动上、下 2 条链式输送装置转动,另一路通过曲柄机构带动切割器中的往复式割刀做往复运动^[15-17]。

割台中部装有平行的上、下 2 条输送链,输送链的链板上安装有顶角 30° 的拨齿,齿高 70 mm。割台前方装有分禾器,其顶部装有塑料拨禾轮,由上输送链上的拨齿带动旋转。每个分禾器骨架上装有上、下 2 根压禾弹簧,均弯制成弧形,由弹簧钢丝制成,

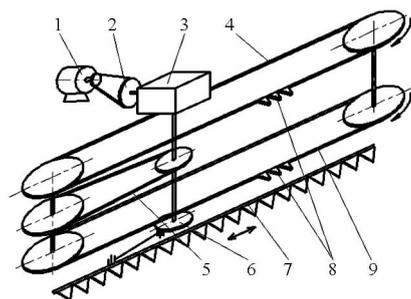


图 4 割台传动机构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of cutting platform transmission mechanism

1. 割台电动机 2. 胶带传动装置 3. 割台减速器 4. 上输送链
5. 链传动装置 6. 曲柄机构 7. 切割器 8. 拨齿 9. 下输送链

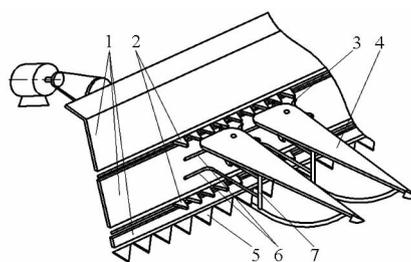


图 5 割台前视图

Fig. 5 Front view graph of cutting platform

1. 面板 2. 上、下输送链 3. 拨禾轮 4. 分禾器 5. 切割器
6. 压禾弹簧 7. 分禾器骨架

一端固定在分禾器支架上,另一端与割台面板保持大约 15 mm 左右的距离,在高度方向上位于 2 条输送链之间。

在收获作业时,拨禾轮在上层拨齿链的带动下将草拨向割台,割刀将水草从根部切断,然后水草被夹持在上、下 2 根压禾弹簧、相邻拨齿和面板围成的空间中,由拨齿链输送至割台右侧进行摆放。

割台的功率消耗 P 为

$$P = (P_1 + P_2) / \eta \quad (1)$$

其中 $P_1 = P_g + P_k$ $P_g = BL_0$ $P_2 = L_1 B$

式中 P_1 ——切割器的功率消耗, kW

P_2 ——链式输送装置功耗, kW

η ——机械传动效率

P_g ——切割功耗, kW

P_k ——空转功耗, kW

B ——切割器割幅, m

L_0 ——割刀单位长度功耗, kW/m

L_1 ——单位长度割幅输送功耗, kW/m

对温室中种植的 2 种主要挺水植物绿苇和旱伞草进行切割试验^[18],得出 L_0 为 0.2 ~ 0.25 kW/m;通过试验测定割刀单位长度空载功耗 P_k 约 0.15 kW/m,单位长度割幅输送功耗 L_1 约为 0.12 kW/m。

选择割台电动机时,额定功率 $P_e \geq P$,即

$$P_e \geq (P_1 + P_2) / \eta \quad (2)$$

3.2 行走机构设计及主要参数确定

行走机构主要包括行走电动机、驱动车桥、驱动轮、轨道夹持轮等^[19-21],结构如图6所示。根据收获机质量及收获机运行速度,综合考虑,选择650 W的无刷直流电动机作为动力,驱动桥有高、低2个挡位可供选择,低速挡用于机器的收获工作,高速挡用于收获机非工作状态时快速移动^[22]。驱动轮踏面形状设计为圆柱形,与导轨接触为线接触。

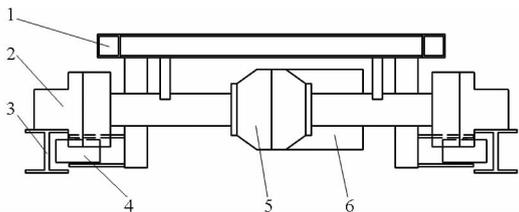


图6 行走机构

Fig. 6 Walking mechanism

1. 下骨架 2. 驱动轮 3. 轨道 4. 安全夹持轮 5. 驱动桥
6. 行走电动机

收获机工作时前进速度和割刀切割速度关系分析:

在收获机作业过程中,割刀的切割速度 v_2 和收获机的前进速度 v_1 的比例应该处于合理范围内。机器行进速度过快会产生漏割,速度太慢会使草被反复切割导致水草根部被切碎,造成水池内水体污染。

割刀平均切割速度 v_2 为

$$v_2 = \frac{2n_0s}{60 \times 1000} \quad (3)$$

式中 n_0 ——曲柄转速, r/min
 s ——割刀行程, mm

收获机前进速度 v_1 为

$$v_1 = \frac{nD}{60000i_i} \quad (4)$$

式中 n ——行走电动机转速, r/min
 D ——轨道轮踏面直径, mm
 i_i ——行走装置总传动比

割刀的平均切割速度 v_2 与收获机前进速度 v_1 之比 β 的合理数值应在1~1.2范围内^[23]。

根据 β 值范围,可以确定轨道轮踏面直径 D 的合理范围,经圆整,取 $D=70$ mm。

3.3 旋转装置受力分析及参数计算

收获机旋转装置结构如图7所示^[24]。回转轴承带齿圈部分与下骨架相联接保持固定,其回转部分通过螺栓与上骨架相联接,电机和蜗杆减速装置通过螺栓也与上骨架相联接,蜗杆减速器输出轴上装有直齿小齿轮,该齿轮与回转轴承的齿圈相啮合,驱动回转轴承的回转部分连同上骨架相对下骨架

旋转。

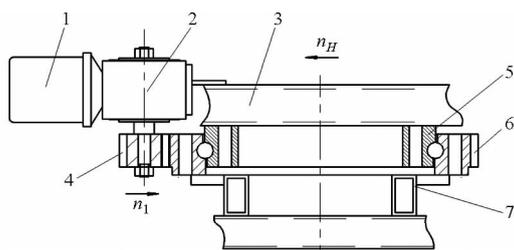


图7 收割机旋转装置

Fig. 7 Rotating device of harvester

1. 旋转电动机 2. 蜗杆减速器 3. 上骨架 4. 驱动齿轮 5. 转盘轴承回转部分 6. 转盘轴承外齿圈 7. 下骨架

旋转装置承受的载荷主要包括上骨架及其上安装的割台和蓄电池组等部件的自重、旋转部分运动产生的惯性力、驱动齿轮和回转轴承外齿圈之间的啮合力、回转轴承工作时产生的内部摩擦力,以及由于收获机回转部分重心与回转轴承中心不重合产生的倾覆力矩。回转装置承受的载荷可以向回转中心转换为水平力 F_H 、垂直力 F_V 和倾覆力矩 M 。回转装置受力分析如图8所示。

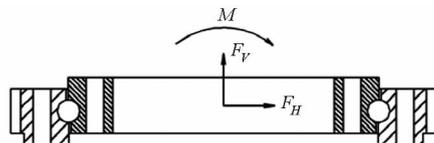


图8 回转轴承受力分析

Fig. 8 Force analysis of pivotal bearing

考虑收获机实际工作情况,回转阻力矩 T_H 主要由摩擦阻力矩 T_f 和回转惯性力矩 T_g 两部分构成。其中, T_g 由各分散质量惯性力矩向回转中心折算得到。摩擦阻力矩为

$$T_f = \mu \frac{D_0}{2} (\sum N_{VM} + F_H) \quad (5)$$

式中 μ ——轴承当量摩擦因数

D_0 ——回转轴承轨道中心圆直径, m

$\sum N_{VM}$ ——垂直力 F_V 和倾覆力矩 M 在回转支撑上产生的法向力之和, N

F_H ——回转支承上承受的水平力之和, N

根据回转轴承的结构特点,取 $\sum N_{VM} = 1.414F_V$, F_V 为作用在回转轴承上的垂直力,计算中近似等于回转部分所受的总重力,水平方向合力很小,可取 $F_H=0$ 。

旋转电动机功率 P_e 为

$$P_e = \frac{KT_H n_H}{9550\eta} \quad (6)$$

式中 K ——载荷系数,取 $K=1.5$

n_H ——割台回转速度, r/min

经计算,旋转电机额定 $P_e=40$ W,选用08SP型

直流电机作为动力。

考虑到收获机回转部分质量较大,为了安全作业,设定割台的旋转速度 n_H 为 2 r/min 左右,根据行星机构运动原理

$$\frac{n_1 - n_H}{-n_H} = -\frac{z_2}{z_1} \quad (7)$$

其中

$$n_1 = n_e / i_0$$

式中 n_1 ——小齿轮转速, r/min

z_1 ——小齿轮齿数

z_2 ——转盘轴承齿圈的齿数

i_0 ——蜗杆减速器速比

$z_2 = 94$, 综合考虑, 取 $z_1 = 12$, 计算得 $n_H = 2.18$ r/min, 符合设计要求。

4 温室收获试验

收获试验的目的主要是检验收获机是否能够顺利完成温室内的水草收获任务, 以及收获机功能是否符合设计要求^[25]。试验的评价指标有: 收获速度与人工速度的对比、不同收获速度的漏割率、是否割碎、水草是否被拔起、水草输送和摆放是否正常。

4.1 试验条件与方法

2015年7月在浙江省临安市第一污水处理厂

人工温室湿地内, 对水池内种植的绿苇植物进行了收获试验(图9)。试验条件为: 水池宽度为 3 m, 水池内水深 4 m, 水草植株顶部距离地面高度 1.3 ~ 1.5 m, 植株密度 90 ~ 100 株/m², 割茬高度 200 mm, 割幅 3 m。



图9 收获试验照片

Fig. 9 Picture of harvesting test

收获作业时, 曲柄转速约为 550 r/min, 割刀的平均切割速度 0.92 m/s。根据前面的分析, 割刀平均切割速度 v_2 与收获机前进速度 v_1 之比, 即 β 值合理范围为 1 ~ 1.2, 则 v_1 应在 0.75 ~ 0.92 m/s 范围内, 在低于 0.75 m/s 和高于 0.92 m/s 的速度范围内按照用 0.1 m/s 间隔进行收获作业试验, 并对试验数据进行处理, 结果如表 2 所示。其中漏割率 S 为未割掉的面积占总收获面积的百分比。

表2 收获作业试验结果

Tab. 2 Results of harvesting test

机器前进速度/ (m·s ⁻¹)	漏割率 S/%	机器收获效率/ (m ² ·h ⁻¹)	人工收获效率/ (m ² ·h ⁻¹)	水草拔起 情况	水草割碎情况	水草输送 与摆放
0.55	0		300	无	有明显割碎	正常
0.75 ~ 0.92	0	7 500 ~ 9 000	300	无	无割碎	正常
> 1.12	5		300	无	无割碎	正常

4.2 试验结果及分析

从表2可看出, 收获机前进速度低于 0.55 m/s 时, 收获过程中出现了明显割碎的情况, 说明收获机前进速度偏低, 没有跟上割刀的切割速度, 出现植株根部被重复切割的现象; 当收获机前进速度高于 1.12 m/s 时, 虽然没有出现割碎现象, 但出现了约 5% 的漏割, 说明收获机前进速度相对割刀的切割速度是偏高的。在收获机前进速度在 0.75 ~ 0.92 m/s 时, 没有出现漏割和水草割碎的情况, 说明收获机前进速度与割刀的切割速度配合比较合理, 有较好的作业效果。

收获过程中未出现水草被拔起的情况、水草的输送和摆放正常, 表明割台能够进行正常切割作业, 没有出现割不断和缠刀的现象, 切割刀具的选择是适合的。

5 结论

(1) 收获试验表明, 该电动收获机能够将温室人工湿地内的植物顺利割下, 输送到通道上自动摆放以便于收集, 能够胜任温室内水体修复植物的收获任务。

(2) 收获机收获作业效率高, 是人工收获效率的 20 倍以上, 大幅度减轻了收获作业的劳动强度、降低了温室维护的人力成本。

(3) 收获机采用蓄电池组作为动力, 无废气排放和噪声污染, 能够满足温室内收获作业的环保要求。

(4) 收获机在进行正常收获作业时, 行走速度为 0.75 ~ 0.92 m/s, 与人步行速度相近, 便于操控, 设计合理。

参 考 文 献

- 1 方云英,杨肖娥,常会庆,等. 利用水生植物原位修复污染水体[J]. 应用生态学报,2008,19(2):408-409.
FANG Yunying, YANG Xiaoe, CHANG Huiqing, et al. In-situ remediation of polluted water body by planting hydrophytes[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008,19(2):408-409. (in Chinese)
- 2 李旭英,尚士友,杜建民,等. 9GSCC-1.4H型沉水植物收割机船队的设计[J]. 农业机械学报,2006,37(1):60-61.
LI Xuying, SHANG Shiyu, DU Jianmin, et al. Design on 9GSCC-1.4H type submerged plants harvesting boat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2006,37(1):60-61. (in Chinese)
- 3 久保田株式会社. 联合收割机:日本,201010167939.9 [P]. 2010-11-17.
Kubota Corporation. Combine harvester; Japan, 201010167939.9 [P]. 2010-11-17. (in Chinese)
- 4 张家港市海丰水面环保机械有限公司. 收割船:CN 201130457634.7 [P]. 2012-05-30.
Zhangjiagang Haifeng water environmental protection machinery Co., Ltd., Harvesting boat; CN 201130457634.7 [P]. 2012-05-30. (in Chinese)
- 5 王俊,杜冬冬,胡金冰,等. 蔬菜机械化收获技术及其发展[J]. 农业机械学报,2014,45(2):82-85.
WANG Jun, DU Dongdong, HU Jinbing, et al. Vegetable mechanized harvesting technology and it's development[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(2):82-85. (in Chinese)
- 6 O'Toole Christopher Brian, Lane Gary Charles. Freshwater environmental management pty Ltd., Aquatic plant harvester; US, US8479481(B2) [P]. 2013-07-09.
- 7 WEICHHOLDT Dirk, SCHMITT Wolfgang. Plant harvester; DE, DE200610017404 [P]. 2007-10-25.
- 8 廖宜涛,陈传节,舒彩霞,等. 4SY-1.8型手扶式油菜割晒机设计与试验[J]. 农业机械学报,2014,45(增刊):94-98.
LIAO Yitao, CHEN Chuanjie, SHU Caixia, et al. Design and experiment of 4SY-1.8 rape walking windrower[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(Supp.):94-98. (in Chinese)
- 9 李平,廖庆喜,李磊,等. 4SY-1.8改进型油菜割晒机主要装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2014,45(1):54-57.
LI Ping, LIAO Qingxi, LI Lei, et al. Design and experiment of the main device of 4SY-1.8 modified rape windrower[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(1):54-57. (in Chinese)
- 10 李孟秋,汪亮,黄庆,等. 自抗扰参数模糊自整定无刷直流电机控制研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2014,41(5):72-75.
LI Mengqiu, WANG Liang, HUANG Qing, et al. Brushless dc motor control based on fuzzy self-tuning of active-disturbance rejection parameters[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences,2014,41(5):72-75. (in Chinese)
- 11 张红涛,王杰,亓迎川,等. 基于重复控制的无刷直流电机控制[J]. 电源技术,2015,39(6):1305-1307.
ZHANG Hongtao, WANG Jie, QI Yingchuan, et al. Control of brushless dc motor based on repetitive control[J]. Chinese Journal of Power Sources,2015,39(6):1305-1307. (in Chinese)
- 12 赵满全,张宁,杨铁军,等. 双圆盘割草机切割器虚拟样机设计与试验[J]. 农业机械学报,2014,45(8):102-105.
ZHAO Manquan, ZHANG Ning, YANG Tiejun, et al. Design and experiment of virtual prototype of double disc mower cutter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(8):102-105. (in Chinese)
- 13 郝付平,陈志,张子瑞,等. 拨禾星轮式玉米收获台设计与试验[J]. 农业机械学报,2014,45(6):112-115.
HAO Fuping, CHEN Zhi, ZHANG Zirui, et al. Design and experiments of corn harvester head with reel star wheel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 112-115. (in Chinese)
- 14 耿爱军,李汝莘,刘双喜,等. 玉米收获机割台性能试验[J]. 农业机械学报,2013,44(增刊2):28-30.
GENG Aijun, LI Ruxin, LIU Shuangxi, et al. Performance experiment of corn harvester head[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.2):28-30. (in Chinese)
- 15 刘志刚,王德成,翟改霞,等. 往复式双动刀灌木收割机设计与试验[J]. 农业机械学报,2013,44(2):103-105.
LIU Zhigang, WANG Decheng, ZHAI Gaixia, et al. Design and experiment of reciprocating double knife shrub harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2):103-105. (in Chinese)
- 16 徐秀英,张维强,杨和梅,等. 小型牧草收获机双动切割装置设计与运动分析[J]. 农业工程学报,2011,27(7):156-161.
XU Xiuying, ZHANG Weiqiang, YANG Hemei, et al. Design and kinematic analysis of double acting cutting device of walk type pasture reaper[J]. Transactions of the CSAE,2011,27(7):156-161. (in Chinese)
- 17 麻芳兰,韦荣发,范志达,等. 小型整秆式甘蔗收割机切割系统的改进与试验[J]. 农业工程学报,2014,30(15):18-22.
MA Fanglan, WEI Rongfa, FAN Zhida, et al. Improvement and experiment on cutting system of small whole-stalk sugarcane harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(15):18-22. (in Chinese)
- 18 侯加林,蒋韬,吴彦强,等. 小麦秸秆往复式切割试验台设计与应用[J]. 农业机械学报,2014,45(增刊):104-106.
HOU Jialin, JIANG Tao, WU Yanqiang, et al. Design and experiment of wheat straw cutting reciprocating test bench[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(Supp.):104-106. (in Chinese)
- 19 李善军,邢建军,张衍林,等. 7YGS-45型自走式双轨道山地果园运输机[J]. 农业机械学报,2011,42(8):86-87.
LI Shanjun, XING Junjun, ZHANG Yanlin, et al. 7YGS-45 type self-propelled dual-track mountain orchard transport[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8):86-87. (in Chinese)

- 79 WALLACH R, JURY W A, SPENCER W F. Transfer of chemicals from soil solution to surface runoff: a diffusion-based soil model[J]. Soil Science Society of American Journal, 1988, 52(3): 612 - 618.
- 80 SHARMA P P, GUPTA S C, FOSTER G R. Predicting soil detachment by raindrops [J]. Soil Science Society of American Journal, 1993, 57(3): 674 - 680.
- 81 SHARMA P P, GUPTA S C, FOSTER G R. Raindrop-induced soil detachment and sediment transport from interrill areas [J]. Soil Science Society of American Journal, 1995, 59(3): 727 - 734.
- 82 JAYAWARDENA A W, BHUIYAN R R. Evaluation of an interrill soil erosion model using laboratory catchment data [J]. Hydrological Processes, 1999, 13(1): 89 - 100.
- 83 GOVINDARAJU R S. Modeling overland flow contamination by chemicals mixed in shallow soil horizons under variable source area hydrology [J]. Water Resources Research, 1996, 32(3): 753 - 758.
- 84 DENG Z Q, DE LIMA J L M P, SINGH V P. Transport rate-based model for overland flow and solute transport: parameter estimation and process simulation [J]. Journal of Hydrology, 2005, 315(1): 220 - 235.
- 85 王道涵, 梁成华. 农业磷素流失途径及控制方法研究进展 [J]. 土壤与环境, 2002, 11(2): 183 - 188.
WANG Daohan, LIANG Chenghua. Research progress on ways and control method of agricultural phosphorus loss [J]. Soil and Environmental Sciences, 2002, 11(2): 183 - 188. (in Chinese)
- 86 王百群. 黄土丘陵区地形对坡地土壤养分流失的影响 [J]. 土壤侵蚀与水土流失学报, 1999, 5(2): 18 - 22.
WANG Baiqun. Effect of topography on soil nutrient loss of sloping land in loess hilly region [J]. Journal of Soil Erosion and Soil Loss, 1999, 5(2): 18 - 22. (in Chinese)
- 87 黄丽. 三峡库区紫色土养分流失的试验研究 [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(1): 8 - 13.
HUANG Li. Experimental study on nutrient loss of purple soil in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Journal of Soil Erosion and Soil Loss, 1998, 4(1): 8 - 13. (in Chinese)
- 88 BRONICK C J, LAL R. Soil structure and management: a review [J]. Geoderma, 2005, 124(1): 3 - 22.
- 89 PAGLIAI M, VIGNOZZI N, PELLEGRINI S. Soil structure and the effect of management practices [J]. Soil and Tillage Research, 2004, 79(2): 131 - 143.
- 90 ASGHARI S. Effect of four organic soil conditioners on pore size distribution, aggregate stability, hydraulic and solutes transport parameters in a sandy loam soil [D]. Tabriz: Tabriz University, 2009.
- 91 ABBASI F, SIMUNEK J, FEYEN J, et al. Simultaneous inverse estimation of soil hydraulic solute transport parameters from transient field experiments: homogeneous soil [J]. Transactions of the ASAE, 2003, 46(4): 1085 - 1095.
- 92 ASGHARI S, ABBASI F, NEYSHABOURI M R. Effects of soil conditioners on physical quality and bromide transport properties in a sandy loam soil [J]. Biosystem Engineering, 2011, 109(1): 90 - 97.
- 93 HEATHWAITE L, SHARPLEY A, GBUREK W, et al. A conceptual approach for integrating phosphorus and nitrogen management at watershed scales [J]. Journal of the Environmental Quality, 2000, 29(1): 158 - 166.
- 94 GBUREK W J, SHARPLEY A N, HEATHWAITE L, et al. Phosphorus management at the watershed scale: a modification of the phosphorus index [J]. Journal of Environmental Quality, 2000, 29(1): 130 - 144.

(上接第 66 页)

- 20 张凯鑫, 张衍林, 周波, 等. 果园运输机单轨道橡胶辊驱动装置驱动性能研究 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊 2): 112 - 114.
ZHANG Kaixin, ZHANG Yanlin, ZHOU Bo, et al. Driving performance of single track rubber roller driving device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 2): 112 - 114. (in Chinese)
- 21 张俊峰, 张衍林, 张唐娟, 等. 遥控牵引式单轨运输机的设计与改进 [J]. 华中农业大学学报, 2013, 32(3): 131 - 133.
ZHANG Junfeng, ZHANG Yanlin, ZHANG Tangjuan, et al. Design and improvement of the remote control traction monorail transporter [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2013, 32(3): 131 - 133. (in Chinese)
- 22 赵建柱, 王枫辰, 于斌, 等. 农用仿形履带式动力底盘设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 21 - 24.
ZHAO Jianzhu, WANG Fengchen, YU Bin, et al. Research on all-terrain profiling crawler power chassis [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 21 - 24. (in Chinese)
- 23 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: 机械工业出版社, 1988: 923 - 925.
- 24 张青, 张瑞军. 工程起重机结构与设计 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 98 - 103.
- 25 邬备, 王德成, 王光辉, 等. 小型自走式割草机仿形装置仿真分析与试验 [J]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 124 - 127.
WU Bei, WANG Decheng, WANG Guanghui, et al. Simulation analysis and experiment of profiling device of small self-propelled mower [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 124 - 127. (in Chinese)