doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.010

甘蔗横向种植机补种系统设计与试验

何永玲[1]　吴　飞[2]　李尚平[3]　刘天翔[2]　玉运发[2]　邓樟林[2]

(1.北部湾大学机械与船舶工程学院,钦州 535011;2.广西大学机械工程学院,南宁 530004;
3.广西民族大学信息科学与工程学院,南宁 530006)

摘要:针对甘蔗横向种植机在种植过程中出现的漏播问题,设计了一套基于 51 单片机的甘蔗实时补种系统。通过对充种、储种、供种、护种及投种过程进行运动学和动力学的仿真分析,确定了影响补种效果的主要因素,设计了补种系统的关键部件。该系统采用 AT89C52 单片机、3 套对射型激光传感器分别对漏种、补种箱和储蔗槽中蔗种余量不足的情况进行信号采集,进行漏种计数显示和实现蔗种余量不足时的报警,步进电机作为动力源,驱动辊耙转动完成补种过程。选取行进速度和补种辊槽数为试验因素,以补种成功率和重置率为补种性能指标,进行了二因素五水平的正交旋转组合试验。结果表明,行进速度对补种成功率的影响极显著,补种辊槽数对补种成功率的影响极显著;利用 Excel 软件进行了二次回归方程分析,得出当行进速度为 3 km/h、补种辊槽数为 10 个时,补种成功率达到 93.97%,重置率为 1.69%。设计的实时补种系统性能稳定可靠,解决了播种器工作过程中的漏种问题。

关键词:蔗种;横向种植机;对射型激光传感器;补种

中图分类号:S223.99　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2020)01-0094-09　　**OSID**:

Design and Test of Replenishment System for Sugarcane Horizontal Planter

HE Yongling[1]　WU Fei[2]　LI Shangping[3]　LIU Tianxiang[2]　YU Yunfa[2]　DENG Zhanglin[2]

(1. *College of Mechanical and Marine Engineering, Beibuwan University, Qinzhou* 535011, *China*
2. *College of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning* 530004, *China*
3. *College of Information Science and Engineering, Guangxi University for Nationalities, Nanning* 530006, *China*)

Abstract: Aiming at the problem of seeding omission of sugarcane transverse planter in the process of planting, a kind of replanting device with hierarchical transmission was designed. Through the kinematics and dynamics simulation analysis of filling, storing, supplying, protecting and throwing process, the main factors affecting the effect of replanting were determined, and the key components of replanting system were designed. A sugarcane real-time replenishment system based on 51 single chip computer was developed. The AT89C52 chip and three pairs of laser sensors were used to collect signals of sugarcane seed leakage, replenishment box and sugarcane storage tank for insufficient sugarcane seed reserve. The signal was counted and displayed. The alarm circuit realized the alarm of insufficient sugarcane seed reserve, and the stepper motor was used for the alarm. For power source, the driving roll rake rotated to complete the seed replenishment process. The bench test showed that by choosing two factors, i.e. the traveling speed and the number of grooves, and taking the success rate and the replacement rate as the performance index, the orthogonal rotation test of two factors and five levels was carried out. It was concluded that the traveling speed had a very significant influence on the success rate of replanting, followed by the number of grooves. The quadratic regression equation analysis with Excel showed that the success rate of replanting was 93.97% and the replacement rate was 1.69% when the traveling speed was 3 km/h and the number of grooves was 10. The performance of the real-time seeding replenishment system was stable and reliable, which solved the problem of seeding leakage in the process of seeder operation.

Key words: sugarcane; horizontal planter; laser sensor of counter-firing type; replant

收稿日期:2019-08-05　修回日期:2019-09-26

基金项目:广西区科技厅重点研发项目(桂科 AB16380199)

作者简介:何永玲(1967—),女,教授,主要从事机械设计制造研究,E-mail:hyl55885000@126.com

通信作者:李尚平(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事先进制造技术、CAD/CAE 及制造技术信息化研究,E-mail:spli501@vip.sina.com

0　引言

甘蔗种植是甘蔗生产过程中劳动强度最大的环节之一，其作业质量直接影响新植蔗或宿根蔗的产量。我国甘蔗种植机研究较为薄弱，因此制约了甘蔗产量的增长[1]。目前，我国生产的甘蔗种植机大多数是实时切种式，其自动化程度低，机种率约36%，辅助排种需要人工多，劳动强度大[2-3]。与人工种植相比，甘蔗机械化种植过程中易出现漏播、排种不均匀现象[4]，作业中常常通过人工补种来降低漏种率，因此加大了人工劳动强度，提高了生产成本等。

目前，国内外对播种监测系统进行了很多研究，如国外应用光电传感器、激光等方法检测甜菜、玉米等种子的粒距均匀性。国内利用光电传感器、高速摄影等方法监测排种情况[5-7]。也有研究设计了补种装置[8]，但目前对于甘蔗漏种还处于漏种监测与标识的水平。预切种式横向种植技术采用深种浅覆盖的方法，其排种的方向与垄沟垂直，具有植株密度合理、出芽率高、产量高、用种少的特点，有利于甘蔗抗倒伏和宜于甘蔗芽出苗。

本文针对其种植密度均匀性差、人工补种的劳动强度大、生产效率低等问题，从提高补种准确性和补种稳定性出发，提出在甘蔗横向种植机上加装一套补种装置和控制系统，以实现横向种植机的实时补种。该系统采用分级传动方式，通过对补种装置的充种、储种、供种、护种及投种过程分析和试验探讨，以期达到连续供种和连续补种的目的。

1　结构与工作原理

1.1　种植机整体结构

甘蔗横向种植机主要由开沟器、机架、倾倒装置、链式播种器、补种装置、辅助轮、覆土机构、地轮、施肥机构等组成。横向种植机整体结构如图 1 所示。

1.2　整机工作原理

如图 2 所示，工作时，拖拉机牵引种植机作业，由地轮转动为播种器和施肥机构提供动力。将已装框的蔗种通过倾倒装置有序倒入集蔗槽中，两侧均有 12 框蔗种，可连续供种到集蔗箱中，再通过链式播种器连续有序地提升传送进行播种。补种系统安装在链式播种器的传送链上方，当发现有漏种情况，补种装置立即进行实时补种，同时由单独的供种箱向补种装置供种，使其连续作业，蔗种最终通过链式播种器将蔗种导出横向掉落到开沟器开好的沟中。然后利用施肥机构进行施肥，覆土机构进行最后覆土，完成蔗种种植过程。

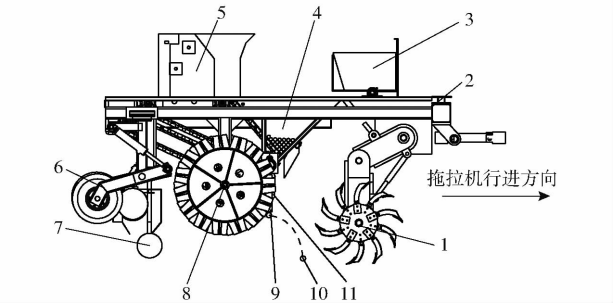

图 1　横向种植机整体结构图

Fig. 1　Overall structure diagram of transverse planter

1. 开沟器　2. 机架　3. 倾倒装置　4. 链式播种器与集蔗箱　5. 补种装置　6. 辅助轮　7. 覆土机构　8. 地轮　9. 施肥机构　10. 蔗种落点　11. 导蔗槽

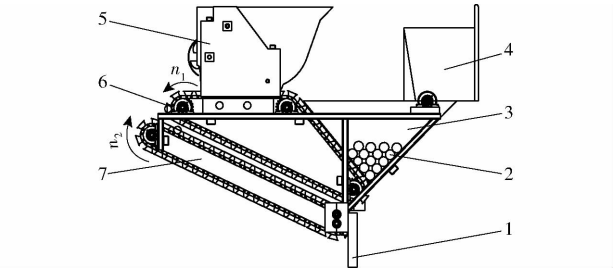

图 2　试验样机结构示意图

Fig. 2　Schematic of test prototype structure

1. 导蔗板　2. 蔗种　3. 集蔗箱　4. 倾倒装置　5. 补种装置　6. 播种器输送带 1　7. 播种器输送带 2

1.3　补种装置结构

基于农艺要求设计了具有有序排种、连续供种和及时精确补种功能的辊槽式补种装置，该装置主要由补种箱、提升机构、储蔗槽、补种辊耙、漏种检测装置、导流板、机架等组成，辊耙式甘蔗补种装置结构示意图如图 3 所示。

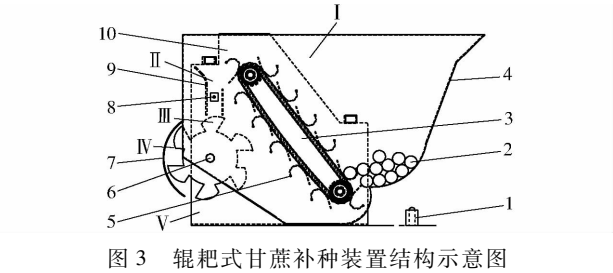

图 3　辊耙式甘蔗补种装置结构示意图

Fig. 3　Structural schematic of rake-roller sugarcane replanting device

1. 漏种检测装置　2. 蔗种　3. 提升机构　4. 补种箱　5. 半圆槽　6. 补种辊耙　7. 导流板　8. 余量不足检测装置　9. 储蔗槽　10. 支架　Ⅰ. 充种区　Ⅱ. 储种区　Ⅲ. 供种区　Ⅳ. 护种区　Ⅴ. 投种区

1.4　补种装置工作原理

工作时，采用分级传动控制，由供种过程和补种过程组成。①供种过程：当储蔗槽中蔗种余量不足时，余量不足检测装置将检测的信号传给控制器，控制提升机构动作，及时将蔗种从补种箱里斜向上输

送,当链槽越过最高点时,蔗种不再受链槽支持力,只受重力作用,蔗种做类平抛运动掉入到储蔗槽中,完成对补种辊耙的供种过程。②补种过程:当漏种检测装置检测发现播种器传送带的链槽中出现漏种,将信号传至单片机,单片机输出 PWM 脉冲信号控制补种辊耙工作,蔗种在离开导流板瞬间做近似斜抛运动完成投种过程,即完成补种过程。

当补种箱内蔗种余量不足时,报警电路发出报警,提醒工作人员对补种箱蔗种进行补给。在整个补种过程中,由于提升机构的有序排种,储蔗槽的有序储蔗以及补种辊耙的准确补种,补种装置实现了不堵蔗、不卡蔗,实现了连续和准确补种的功能。

2 关键部件设计与分析

2.1 充种过程分析

充种过程中,提升机构做角速度为 ω(rad/s)的旋转运动,底层蔗种随着机构有序地从补种箱中提升,提升机构的半圆槽在提升过程中依次将蔗种充入槽内。经反复试验提升机构与水平面夹角 θ 取 55.3°较合适,既可满足将甘蔗提起又能保证一个槽只有一根蔗种[9]。

当提升机构工作时,蔗种的充种过程分析如图 4 所示。

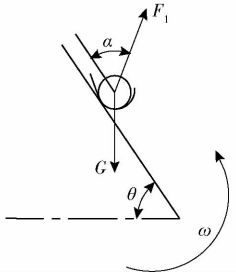

图 4 充种过程分析图

Fig. 4 Stress analysis diagram of sugarcane species

由图 4 蔗种受力分析可得

$$G\sin\theta = F_1\cos\alpha \tag{1}$$

$$G\cos\theta = F_1\sin\alpha \tag{2}$$

式中 G——蔗种重力,N

F_1——半圆槽对蔗种的支持力, N

α——F_1 与提升斜面的夹角,(°)

由式(1)、(2)可知,在提升机构匀速提升过程中,半圆槽对蔗种的支持力 F_1 一直存在,其随着提升位置改变而改变,但蔗种始终保持相对平衡的状态。

当蔗种通过提升链送至储种区时,由于蔗种从半圆槽中转出时仅受自身重力和传送带的离心力作用,蔗种所受的向心力不足以维持蔗种在槽内的稳定状态,因此蔗种沿半圆槽斜面切线滑出,蔗种按照斜抛运动被抛出,落入储蔗槽中,完成储蔗过程[10]。其储蔗过程分析如图 5 所示。

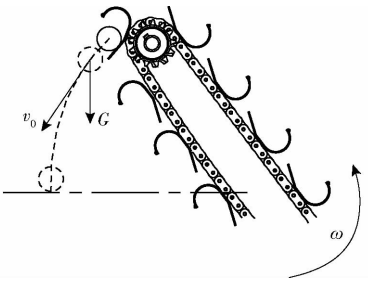

图 5 储蔗过程分析图

Fig. 5 Analysis diagram of sugarcane storage process

2.2 补种辊耙设计

2.2.1 辊槽截面形状

辊槽形状和尺寸受蔗种品种、尺寸、形状等的影响。本文选取半年蔗蔗种,按照双蔗芽蔗种要求进行预切种,经测量蔗种直径为 25 ~ 30 mm,长度 380 mm左右,蔗种形状近似圆柱体,有微小的弯曲变形,根据蔗种的形状特征将槽型定为近似矩形(如图 6 所示)。

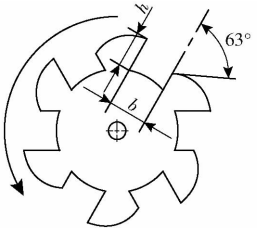

图 6 补种辊耙结构示意图

Fig. 6 Schematic of replanting roller rake structure

本研究选用有助于顺利供种和减轻供种过程中储蔗槽对蔗种损伤的矩形形状槽型,其一侧带有圆弧倒角,将储蔗槽对蔗种的力有效地分解掉,同时蔗种在此过程中发生滚动从而保护了蔗种不被损伤。根据控制设计要求,每个辊槽中只能存放一根蔗种,辊槽宽度 b 和高度 h 须满足[11]

$$\begin{cases} 1.1d_{max} > b > 0.9d_{max} \\ 1.1d_{max} > h > 0.9d_{max} \\ b = d_{max} + k \end{cases} \tag{3}$$

式中 d_{max}——蔗种最大直径,mm

k——蔗种挠度补偿系数,mm

通过抽取 150 kg 甘蔗样品得到甘蔗最大直径 $d_{max} \approx 35$ mm,$d_{min} \approx 20$ mm。考虑到蔗种挠度且预切种时已对蔗种挑选过,$k \leqslant 0.1d_{max}$,取 3.5 mm。由式(3)计算得 35 mm < b < 42 mm,31.5 mm < h < 38.5 mm。经反复试验,取 b = 39 mm,倒角为 63°,h = 36 mm。

2.2.2 辊耙直径

排种轮直径的设计也尤为重要,设计得较大会导致排种器及其他部件增大;设计得太小会导致供种的困难。因此,排种轮直径设计时,既要满足种子

良好的填充性能，又要保证相对紧凑合理的部件结构，考虑到补种辊耙上应同时有 4 个槽储备蔗种的要求，根据蔗种平均直径计算，本研究补种辊耙直径初定为 200 mm[12]。

2.3　供种过程分析

当补种辊耙工作时，储蔗槽中的蔗种沿辊耙的曲面滚动到辊槽中完成供种过程[13]。供种过程分析如图 7 所示。

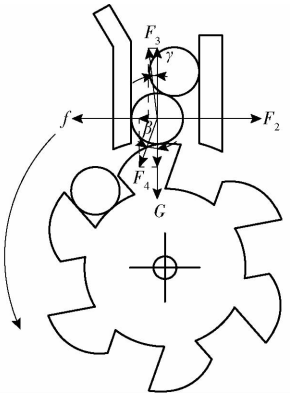

图 7　供种过程分析图

Fig. 7　Analysis diagram of seed supply process

蔗种在储蔗槽中的受力情况如下

$$G + F_4\cos\beta = F_3\cos\gamma \tag{4}$$

$$f + F_3\sin\gamma + F_4\sin\beta = F_2 \tag{5}$$

式中　F_2——储蔗槽对蔗种的作用力，N

F_3——辊耙对蔗种的弹力，N

F_4——蔗种间相互作用力，N

f——辊槽对蔗种的摩擦力，N

β——蔗种之间的作用力方向与竖直方向的夹角，(°)

γ——蔗种对补种辊耙的弹力方向与竖直方向的夹角，(°)

随着辊耙的转动，蔗种沿辊耙槽的圆弧曲面滚动，同时 F_2 也随之变化，最后落入到辊槽中完成供种过程。

2.4　护种过程分析

当补种辊耙工作时，辊槽中的蔗种做圆周运动完成护种过程，避免过多的蔗种落入，确保补种的精确性。蔗种在补种辊槽中的受力分析如图 8 所示。

蔗种在辊槽中受力分析为

$$G\sin\eta = F_5 \tag{6}$$

$$F_6 - G\cos\eta = F = m\frac{v^2}{R} \tag{7}$$

式中　F_5——补种辊槽对蔗种的弹力，N

F_6——导流板对蔗种的支持力，N

F——提供蔗种做圆周运动的向心力，N

η——向心力方向与竖直方向的夹角，(°)

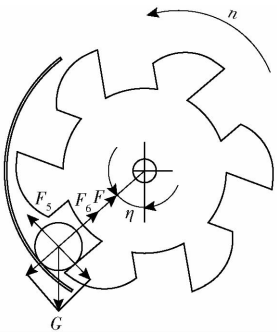

图 8　护种过程分析图

Fig. 8　Analysis diagram of seed protection process

v——补种辊耙的转动线速度，m/s

m——蔗种质量，kg

R——补种辊耙半径，mm

2.5　投种过程分析

对投种过程中蔗种进行运动学分析，蔗种在辊耙中做转速为 n 的旋转运动，蔗种在离开导流板瞬间，只受重力作用，使蔗种沿导流板切线方向以初速度 v_1 做斜抛运动[14]，其投种运动过程分析如图 9 所示。

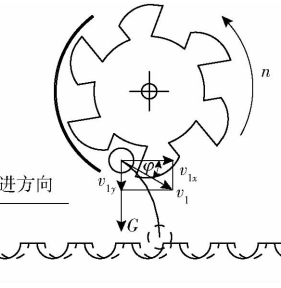

图 9　投种过程分析图

Fig. 9　Analysis diagram of seed feeding process

在忽略空气阻力影响下，对投种临界位置进行速度分析，受辊耙切向力的作用，蔗种经导流板投出的初速度为 $v_1 = 2\pi Rn$。速度为

$$\begin{cases} v_{1x} = v_1\cos\varphi \\ v_{1y} = v_1\sin\varphi \end{cases} \tag{8}$$

在重力作用下蔗种的运动轨迹为

$$\begin{cases} x = v_{1x}t_0 \\ y = v_{1y}t_0 + \dfrac{1}{2}gt_0^2 \end{cases} \tag{9}$$

将式(8)代入式(9)可得蔗种绝对运动轨迹为

$$\begin{cases} x = 2\pi Rnt_0\cos\varphi \\ y = 2\pi Rnt_0\sin\varphi + \dfrac{1}{2}gt_0^2 \end{cases} \tag{10}$$

式中　x——正面水平方向位移，mm

y——侧面竖直方向位移，mm

g——重力加速度，m/s^2

φ——蔗种经导流板投出的速度方向与水平方向的夹角，(°)

t_0——蔗种投送运动时间,s

v_{1x}——投种速度水平方向分量,m/s

v_{1y}——投种速度竖直方向分量,m/s

2.6 辊耙补种过程仿真分析

利用 SoildWorks 建立模型导入 ADAMS 中,仿真模型如图 10 所示。研究蔗种在辊耙储蔗槽和导流板作用下的受力情况及轨迹变化[15],位移-时间变化曲线如图 11 所示,加速度-时间变化曲线如图 12 所示。

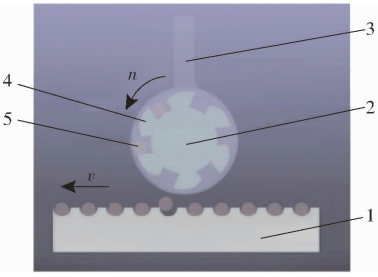

图 10 辊耙补种过程仿真模型

Fig. 10 Simulation model of roller rake replenishment process

1. 播种器输送带 2. 补种辊耙 3. 储蔗槽 4. 导流板 5. 蔗种

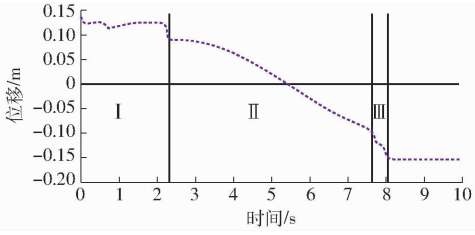

图 11 位移-时间变化曲线

Fig. 11 Changing curve of displacement with time

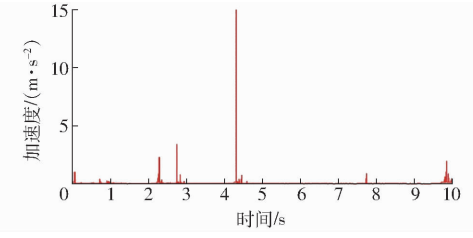

图 12 加速度-时间变化曲线

Fig. 12 Changing curve of acceleration with time

图 11 中Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ分别代表供种、护种和投种过程,由图 12 可分析出,0.8 ~ 2.3 s 时间段内,蔗种在辊耙槽的圆弧曲面滚动完成供种过程对应的合力由大变小,将集中力通过圆弧曲面分解,同时将蔗种耙入槽内,有效解决了卡蔗和堵蔗问题,仿真情况与理论分析一致,说明该补种结构设计合理。

3 补种控制系统设计

3.1 漏种检测系统组成与检测原理

控制系统以 AT89C52 单片机为控制中心,由电源模块、光电检测、中央处理单元、补种模块、数码管显示模块、蜂鸣报警模块等构成,补种控制系统硬件结构框图如图 13 所示。

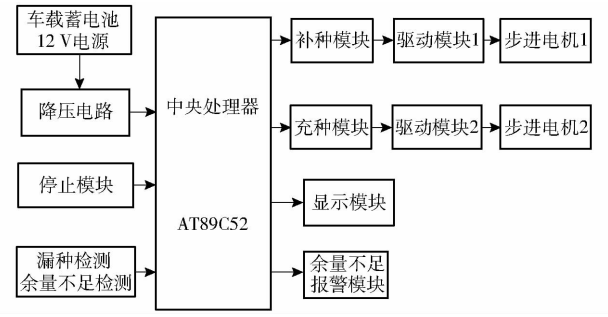

图 13 补种控制系统硬件结构框图

Fig. 13 Hardware structure block diagram of replenishment control system

其中,光电检测部分采用对射型激光传感器。该传感器的工作原理为:对射型光电传感器将光源发射器与接收器相对放置,工作时光线正常导通,当光线被遮挡时,接收器在未收到光线时输出信号[16]。当蔗种播种传送带正常工作时,光电传感器检测链槽中有无蔗种,将光照强度的变化转换成电信号[17],当链槽中有蔗种时传感器输出高电平,反之,传感器输出低电平,单片机判断该链槽漏种。根据实际需要本设计采用 E3F - 5DN1 NPN 型激光传感器,补种检测控制装置实物图如图 14 所示。

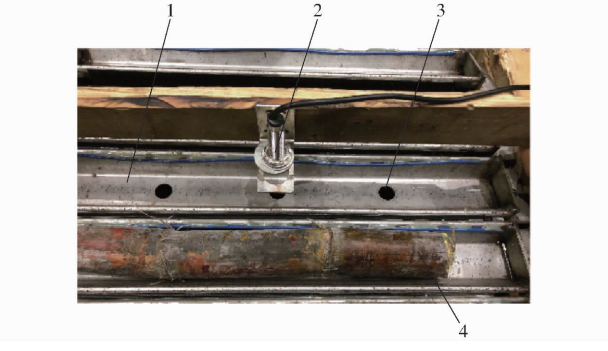

图 14 补种检测控制装置实物图

Fig. 14 Physical map of replenishment testing

1. 链槽 2. 激光传感器 3. 链槽孔 4. 蔗种

3.2 自动供种原理

当储蔗槽里蔗种不足时传感器输出低电平信号,单片机判断该储蔗槽余量不足,驱动供种电机动作,将预先切好的蔗种通过提升链槽传送到储蔗槽中,保证补种动作的正常进行,储蔗槽余量检测示意图如图 15 所示。

3.3 自动补种原理

补种试验过程中,设从传感器位置到辊耙将蔗种导出投落到链槽的位置为 S(m);蔗种通过辊槽转动 $1/N$ 周掉落到链槽中,播种器输送带 1 的速度为 v_0(m/s),则延时时间为 t_2(s),计算式为

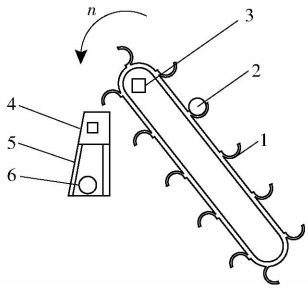

图 15　供种检测示意图

Fig. 15　Replanting detection diagram

1. 提升链槽　2,6. 蔗种　3. 供种电机　4. 激光传感器　5. 储蔗槽

$$\begin{cases} t = \dfrac{S}{v_0} \\ t_1 = \dfrac{T}{N} = \dfrac{1}{Nn} \\ t_2 = t - t_1 \end{cases} \tag{11}$$

式中　t_1——完成一次补种所用时间，s

t——从检测到漏种信号到补种完成所用时间，s

T——补种辊耙转动周期，s

N——补种辊耙槽数

3.4　硬件设计

控制系统中，单片机系统模块主要由单片机和外围电路组成。单片机作为该控制系统的主核心芯片，对传感器采集的信息具有处理分析的功能。AT89C52 是一款高性能 CMOS 8 位单片机，4k 字节 FLASH 闪速存储器，128 字节内部 RAM，32 个 I/O 口线，2 个 16 位定时/计数器，1 个 5 向量两级中断结构，1 个全双工串行通信口，片内振荡器及时钟电路[18]。其外围电路主要包括外部时钟电路、复位电路、电机驱动模块及步进电机等。单片机与外围电路连接图如图 16 所示。

3.5　软件设计

补种系统的控制部分主要依靠激光传感器监测链槽漏种情况，在发生漏播时，步进电机启动开始执行补种作业，在集蔗槽出现余量不足时，步进电机执行供种作业，在集蔗箱余量不足时进行报警通知，相应的补种控制流程如图 17 所示。

4　台架试验与结果分析

4.1　补种试验台

本试验主要是对蔗种补种系统的补种性能进行

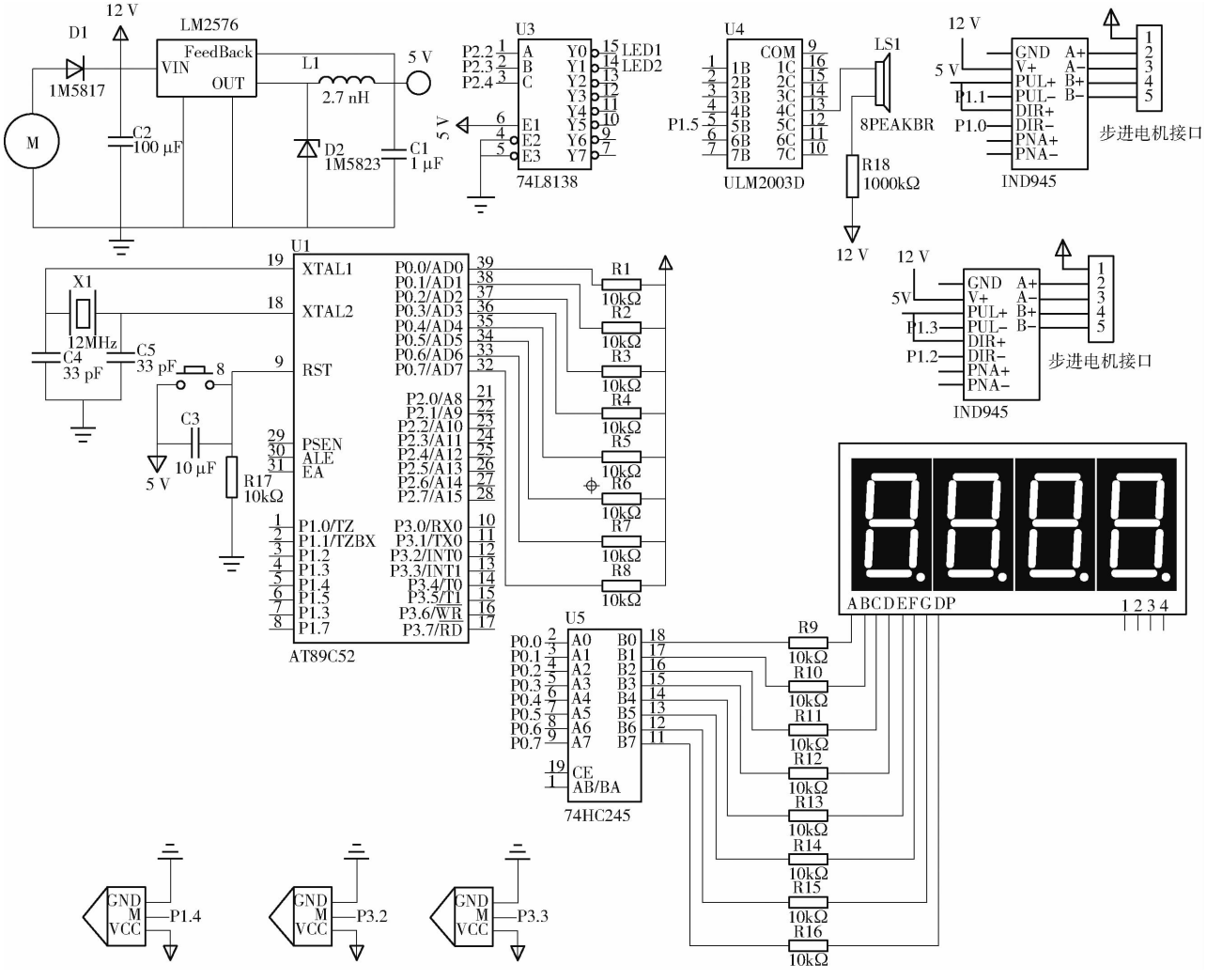

图 16　单片机与外围电路连接电路

Fig. 16　Connecting circuit between single chip microcomputer and peripheral circuit

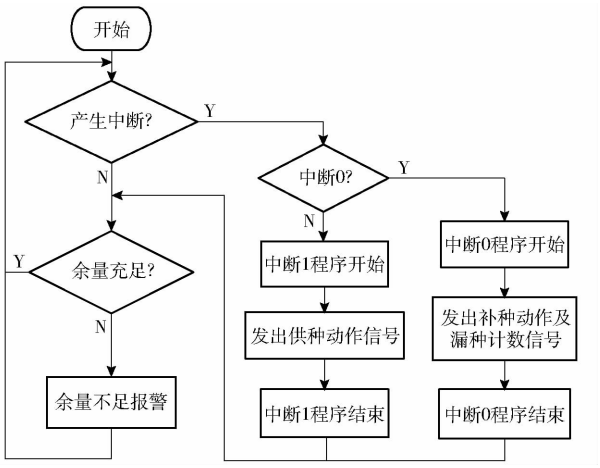

图 17 补种控制流程图

Fig. 17 Flow chart of supplementary control

检测,建立试验平台对系统进行试验,并测试其相关技术指标[19]。补种试验台实物图如图 18 所示。



图 18 补种试验台实物图

Fig. 18 Physical photo of replenishment test-bed

1. 计算机 2. 播种器 3. 单片机控制系统 4. 补种装置 5. 示波器 6. 电机 7. 电机变频器

在试验过程中,补种装置固定在机架上,播种器输送带逆时针转动完成排种动作,通过摄像装置进行实时检测并采集数据,以实现准确测量各项性能指标。

4.2 试验内容与方法

试验材料为提前切好的蔗种段,放入蔗种框中,每框平均 75 根,将每框蔗种通过倾倒装置倒入播种器集蔗箱中进行排种,在播种器排种株距保持在 30 cm 内的情况下,当排种过程中出现漏种时进行补种试验,每次试验重复 3 次。播种器的输送带用电机模拟拖拉机的 5 个速度挡位,对应播种器输送带的 5 个行进速度。自主设计自动补种试验装置并搭建试验平台,以此为基础进行试验研究。试验选取行进速度 x_1 和补种辊槽数 x_2 两个因素,根据拖拉机行进挡位要求,确定影响因素取值范围为 3 ~ 8 km/h、补种辊耙槽数 2 ~ 10 个,以补种成功率、重置率为指标。试验采用二因素五水平二次旋转正交组合设计试验。

补种成功率:在种植过程中,用摄像装置记录漏种(排种器输送带上的链槽中没有蔗种)次数和补种次数,补种成功率则为补种成功次数与漏种次数比值。每种试验重复 3 次,取平均值。其计算公式为

$$y_1 = \frac{n_1}{H} \times 100\% \tag{12}$$

式中 y_1——补种成功率

n_1——补种成功次数

H——漏种次数

重置率:在种植过程中,用摄像装置记录重置(排种器输送带上链槽中多补的蔗种)次数,重置率则为重置次数与每次试验所用蔗种的根数百分比。每种试验重复 3 次,取平均值。其计算公式为

$$y_2 = \frac{n_2}{M} \times 100\% \tag{13}$$

式中 y_2——重置率 n_2——重置次数

M——每次试验所用蔗种的根数

4.3 多因素试验及结果分析

4.3.1 试验方案及结果

根据单因素试验研究结果,进一步研究补种辊槽数和行进速度两因素组合对补种装置补种性能的影响。固定提升电机转速为 12.9 r/min,补种电机转速为 12.9 r/min,补种轴高度为 215 mm 时[20-21],试验因素编码如表 1 所示(表中 x_2 取值为圆整结果),试验方案与结果如表 2 所示。

表 1 试验因素编码

Tab. 1 Coding of experimental factors

编码	因素	
	行进速度 x_1/(km·h^{-1})	补种辊槽数 x_2/个
1.414	7.00	10
1	6.41	8
0	5.00	6
-1	3.59	4
-1.414	3.00	2

根据正交旋转试验所得的结果以及方差分析(表 3)得,$F_{x_1} = 216.46 > F_{0.05}(1,10) = 4.96$,$P < 0.01$;由表 3 可得,$F_{x_2} = 68.49 > F_{0.05}(1,10) = 4.96$,$P < 0.01$。由此可知行进速度对补种成功率的影响为极显著,补种辊槽数对补种成功率的影响为极显著。

4.3.2 两因素交互作用对性能指标的影响

通过 Design-Expert 8.0.6 软件对数据进行处理,得出行进速度和补种辊槽数对补种成功率和重置率的响应曲面如图 19 所示。

由图 19a 可知,当补种辊槽数一定时,随着行进速度的增大,补种成功率呈现降低的趋势;当行进速

表 2　试验方案与结果

Tab. 2　Test plan and experimental result

试验序号	因素		补种成功率 y_1/%	重置率 y_2/%
	行进速度 x_1/(km·h^{-1})	补种辊槽数 x_2/个		
1	6.41	8	40.00	4.00
2	6.41	4	22.22	5.78
3	3.59	8	78.89	3.56
4	3.59	4	61.81	4.89
5	7.00	6	16.18	3.11
6	3.00	6	74.64	4.00
7	5.00	10	71.67	4.89
8	5.00	2	32.22	3.11
9	5.00	6	53.00	4.00
10	5.00	6	10.00	2.67
11	5.00	6	46.67	3.11
12	5.00	6	46.67	3.11
13	5.00	6	46.67	3.11
14	5.00	6	46.67	3.11
15	5.00	6	46.67	3.11
16	5.00	6	46.67	3.11

表 3　补种成功率方差分析

Tab. 3　Variance analysis of success rate of replenishment

方差来源	平方和	自由度	F	P
模型	4 354.20	5	58.07	0.000 1
x_1	3 246.25	1	216.46	0.000 1
x_2	1 027.16	1	68.49	0.000 1
x_1x_2	0.12	1	8.168×10^{-3}	0.929 8
x_1^2	0.073	1	4.886×10^{-3}	0.945 6
x_2^2	80.49	1	5.37	0.043 0
残差	149.97	10		
失拟	65.43	3	1.81	0.233 8
误差	84.54	7		
总和	4 504.17	15		

注：$P<0.01$ 表示差异极显著；$0.01\leqslant P\leqslant0.05$ 表示差异显著，下同。

度一定时，随着补种辊槽数的增加，补种成功率显现上升的趋势。补种成功率最大值出现在行进速度为 3.0 km/h 处、补种辊槽数为 10 个处，行进速度对补种成功率的影响大于补种辊槽数的影响。

图 19b 为重置率的双因素响应曲面。当补种辊槽数一定时，随着行进速度的增大，重置率呈现增加的趋势；当行进速度一定时，随着补种辊槽数的增加，重置率呈现缓慢增加的趋势，但是变化幅度较小。重置率最小值出现在行进速度为 3 km/h、补种辊槽数为 2 个处，补种辊槽数对重置率无显著性影响，行进速度对重置率有显著性影响。

4.3.3　验证分析及其优化

由 Excel 软件对全部试验数据进行二元二次回归分析可得回归方程模型

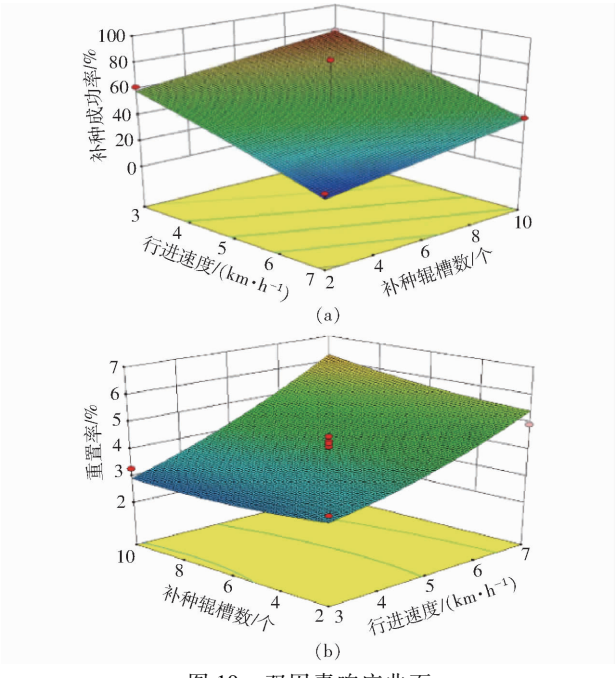

图 19　双因素响应曲面

Fig. 19　Two-factor response surface

$$y_1 = -2.549 + 16.31x_1 + 10.90x_2 - 1.336x_1x_2 - 2.213x_1^2 - 0.006\,5x_2^2 \quad (14)$$

由表 4 可知，行进速度对重置率影响显著（$P<0.01$），其他项对重置率影响不显著（$P>0.01$），故剔除其他项后的方程为

$$y_2 = -3.58 + 1.758x_1 \quad (15)$$

表 4　重置率方差分析

Tab. 4　Variance analysis of reset rate

方差来源	平方和	自由度	F	P
模型	4.76	5	1.32	0.000 3
x_1	15.22	1	67.81	0.000 1
x_2	0.044	1	0.53	0.483 0
x_1x_2	0.051	1	1.52	0.245 2
x_1^2	1.39	1	2.14	0.174 4
x_2^2	3.27	1	0.80	0.391 6
残差	7.19	10		
失拟	6.01	3	2.47	0.145 9
误差	1.18	7		
总和	11.95	15		

由 Excel 规划求解求得最优解：行进速度为 3 km/h、补种辊槽数为 10 个，得补种成功率为 93.97%，重置率为 1.69%，与图 19 所得分析结果一致。

5　结论

（1）结合设计的甘蔗横向种植机，设计了一套基于 51 单片机控制的甘蔗实时补种系统，设计了分级传动的实时补种装置，通过光电传感器的实时检测和单片机控制，可实现漏种检测，并对甘蔗种植过

程进行实时补种。

(2)以行进速度和补种辊槽数为试验因素,以补种成功率和重置率为补种性能指标,进行了二因素五水平正交旋转组合试验。试验结果表明,行进速度对补种成功率的影响极显著,补种辊槽数对补种成功率影响极显著;当行进速度为 3 km/h、补种辊槽数为 10 个时,补种成功率为 93.97%,重置率为 1.69%。

(3)试验表明,仅通过播种器很难实现精准播种,而运用机电结合的方式可以较好地解决蔗种漏种的问题,实现漏种检测和实时补种,从而提高甘蔗的播种率。

参 考 文 献

[1] 何冯光,张伟,李明,等. 甘蔗种植机排种装置的现状及发展趋势[J]. 农机化研究,2018,40(6):82 - 88.
HE Fengguang, ZHANG Wei, LI Ming, et al. The situation and development trend of planting unit for sugarcane planting machine [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(6):82 - 88. (in Chinese)

[2] 韩杰,文晟,刘庆庭,等. 预切种式甘蔗种植机的设计与试验[J]. 华南农业大学学报,2019,40(4):109 - 118.
HAN Jie, WEN Sheng, LIU Qingting, et al. Design and test of pre-cutting type sugarcane planter[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(4):109 - 118. (in Chinese)

[3] 董学虎,刘信鹏,李明,等. 我国甘蔗机械化种植的发展情况[J]. 现代农业装备,2018(6):27 - 32.
DONG Xuehu, LIU Xinpeng, LI Ming, et al. Development of sugarcane mechanized planting in China[J]. Modern Agricultural Equipment, 2018(6): 27 - 32. (in Chinese)

[4] 王美美,陈联诚,刘庆庭,等. 甘蔗种植机漏播监测与标记系统[J]. 农机化研究,2013,35(6):50 - 55.
WANG Meimei, CHEN Liancheng, LIU Qingting, et al. Leakage sowing monitoring and marking system for sugarcane planter [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(6): 50 - 55. (in Chinese)

[5] 李丹,耿端阳,马柄腾,等. 玉米精密播种机性能监测系统研究[J]. 农机化研究,2013,35(11):71 - 74.
LI Dan, GENG Duanyang, MA Bingteng, et al. Study on performance monitoring system of corn precision seeder [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(11): 71 - 74. (in Chinese)

[6] 孟鹏祥,耿端阳,李玉环,等. 基于单片机与 DGUS 显示的精密播种机监测系统研究[J]. 农机化研究,2017,39(2):171 - 175,180.
MENG Pengxiang, GENG Duanyang, LI Yuhuan, et al. Photoelectric sensor based intelligent track racing car[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(2):171 - 175, 180. (in Chinese)

[7] 吴南,林静,李宝筏,等. 免耕播种机漏播补偿系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(7):69 - 77,120.
WU Nan, LIN Jing, LI Baofa, et al. Design and test on no-tillage planter reseeding system for miss-seeding [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7):69 - 77, 120. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170709&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.009. (in Chinese)

[8] 牛康,周利明,苑严伟,等. 勺链式马铃薯排种器自补种系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(增刊):76 - 83.
NIU Kang, ZHOU Liming, YUAN Yanwei, et al. Design and experiment on automatic compensation system of spoon-chain potato metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.):76 - 83. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2016s012&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.012. (in Chinese)

[9] 杨锴,段宏兵,宋波涛,等. 半杯勺式马铃薯排种器的设计与试验[J]. 华中农业大学学报,2018,37(2):103 - 109.
YANG Kai, DUAN Hongbing, SONG Botao, et al. Design and trial of half-cup type potato seed-metering device [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2018, 37(2):103 - 109. (in Chinese)

[10] 王金武,唐汉,周文琪,等. 指夹式精量玉米排种器改进设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(9):68 - 76.
WANG Jinwu, TANG Han, ZHOU Wenqi, et al. Improved design and experiment on pickup finger precision seed metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9):68 - 76. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20150910&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.010. (in Chinese)

[11] 王珏,杨欣,侯为康,等. 一器双排交错排种器及开沟装置的设计及其机制[J]. 江苏农业科学,2018,46(3):207 - 211.

[12] 王增垚. 三七精密播种机关键部件研发及整机设计[D]. 昆明:昆明理工大学,2015.
WANG Zengyao. The virtual simulation and experimental research on *Panax notoginseng* transplanting manipulator [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)

[13] 邢鹤琛,廖庆喜,王磊,等. 油麦兼用斜锥型孔轮式集排器设计与试验[J]. 华中农业大学学报,2019,38(5):143 - 151.
XING Hechen, LIAO Qingxi, WANG Lei, et al. Design and test of oblique taper hole-type wheel centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2019, 38(5):143 - 151. (in Chinese)

[14] 王希英. 双列交错勺带式马铃薯精量排种器的设计与试验研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2016.
WANG Xiying. Design and experimental research on double-row criss-cross spoon-belt potato precision seed metering device [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016. (in Chinese)

(下转第 138 页)

axial flow turbine[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2006,42(6):211 - 216. (in Chinese)
[20] 郝宗睿, 刘锦涛, 王乐勤. 水泵水轮机临界空化系数的数值预测[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(9):774 - 777.
HAO Zongrui,LIU Jintao,WANG Leqin. Numerical prediction of critical cavitation number in pump-turbine[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(9):774 - 777. (in Chinese)
[21] 黄剑峰, 张立翔, 王文全,等. 基于大涡模拟的水轮机内瞬态湍流场特性分析[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(6): 502 - 505.
HUANG Jianfeng,ZHANG Lixiang,WANG Wenquan, et al. Analysis of transient turbulent flow field characteristics in hydraulic turbine based on large eddy simulation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(6):502 - 505. (in Chinese)
[22] 梅祖彦. 抽水蓄能发电技术 [M]. 北京:机械工业出版社,2000.
[23] 刘锦涛, 李永, 胡齐,等. 基于湍动能的水泵水轮机无叶区流动分析[J]. 工程热物理学报, 2015, 36(9):1933 - 1936.
LIU Jintao,LI Yong, HU Qi, et al. Analysis on flow in vaneless space of a pump-turbine base on kinetic energy[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(9):1933 - 1936. (in Chinese)
[24] 杨琳, 樊红刚, 陈乃祥. 基于涡动力学的可逆转轮双向流动诊断及优化设计[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(5):686 - 690.
YANG Lin,FAN Honggang,CHEN Naixiang. Bidirectional flow diagnosis to optimize the design of a pump-turbine runner using vorticity dynamics theory[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2007, 47(5):686 - 690. (in Chinese)
[25] 李威. 水泵水轮机“S”区的瞬态特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2016.
LI Wei. Dynamic characteristics analysis of pump-turbine in “S” operating zone[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
[26] 胡秀成, 张立翔. 水泵水轮机增减负荷过程三维流动特性大涡模拟分析[J]. 水利学报, 2018, 49(4):492 - 500.
HU Xiucheng,ZHANG Lixiang. Numerical simulation of unsteady flow for a pump-turbine in transition cases with large-eddy simulation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(4):492 - 500. (in Chinese)
[27] 黄剑峰,张立翔,杨松,等. 水轮机槽道内导叶动态绕流水力特性大涡模拟分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(4): 125 - 130.
HUANG Jianfeng, ZHANG Lixiang, YANG Song, et al. Analysis on hydraulic characteristics of dynamic flow around vane in hydro-turbine channel using large eddy simulation[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(4): 125 - 130. (in Chinese)

(上接第 102 页)

[15] 袁俊杰,王锦涛,郭无极. 基于 ADAMS 宏命令的物料输送机械建模研究[J]. 装备制造技术,2018(10):140 - 144.
YUAN Junjie,WANG Jintao, GUO Wuji. Study on modeling of material conveying machinery based on ADAMS macro programs [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2018(10):140 - 144. (in Chinese)
[16] 赵朝闻,段杰,李辉. 对射光电传感器模拟海洋环境下作用距离试验研究[J]. 水下无人系统学报,2017, 25(3): 262 - 266.
ZHAO Zhaowen, DUAN Jie,LI Hui. Experimental study on operating range of correlation type photoelectric sensor in simulative ocean environment[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2017, 25(3): 262 - 266. (in Chinese)
[17] JIN Xin, ZHAO Kaixuan, JI Jiangtao, et al. Design and implementation of intelligent transplanting system based on photoelectric sensor and PLC [J]. Future Generation Computer Systems,2018,88: 127 - 139.
[18] 周晓玲,刘俊峰,李建平. 免耕穴播播种机播种过程监测系统的研究[J]. 农机化研究,2008,30(5):81 - 83.
ZHOU Xiaoling, LIU Junfeng, LI Jianping. Research on monitoring system of seeding process for no-tillage hill-drop planter [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2008,30(5):81 - 83. (in Chinese)
[19] 龚丽农,戴玉华,蒋金琳. 具有自动补种功能的机械式精密排种系统[J]. 农业机械学报,2008,39(7):60 - 63
GONG Linong, DAI Yuhua, JIANG Jinlin. Experimental investigation of a new mechanical precision metering device with automatic compensative [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(7): 60 - 63. (in Chinese)
[20] 毛欣,衣淑娟,杨立,等. 玉米植质钵育秧盘芽播装置囊种过程的试验研究[J]. 农机化研究,2016,38(12):168 - 172,178.
MAO Xin,YI Shujuan,YANG Li,et al. Study on the seed-filling performance of maize bowl-tray precision seeder[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2016,38(12):168 - 172,178. (in Chinese)
[21] 赵立军,颜珊珊,王宇杰,等. 气吸式单、双排精密通用排种器的设计与试验[J]. 农机化研究,2019,41(7):136 - 141.
ZHAO Lijun, YAN Shanshan, WANG Yujie, et al. Experiment and design on air suction single and double row precision universal metering device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019,41(7):136 - 141. (in Chinese)