俯仰式播种单体仿形性能检测试验台设计与试验

衣淑娟　李怡凯　陈继国　王　淞　赵　斌
（黑龙江八一农垦大学工程学院，大庆 163319）

摘要：为解决播种单体仿形机构性能难以检测的问题，设计了俯仰式播种单体仿形性能检测试验台。阐述了试验台组成结构与工作原理，对其高速传动系统、液压升降系统、监控系统以及关键部件参数进行设计。应用 ANSYS 软件对台架整体和关键部件进行静力学分析和模态分析，验证结构设计的合理性。为检验俯仰式播种单体仿形性能检测试验台的实际检测效果，以德邦大为 1205 型牵引式免耕精量播种机播种单体为研究对象，先以液压杆伸出量与传送带速度为试验因素，以监控系统误差为评价指标进行试验。试验得出，在液压杆伸出量为 0～200 mm 范围内，监控系统角度传感器最大误差为 0.69 mm；在传送带速度 8～19 km/范围内，光电编码器最大误差为 0.18 km/h。确认监控系统准确性后，再以单体速度为试验因素，采集速度 8、10、12 km/h 下地块的起伏数据为目标曲线，以地形起伏模拟曲线的绝对误差平均值为指标进行单因素试验，试验得出，所设计的试验台可有效模拟田间地面的起伏频率与起伏量，绝对误差平均值为 1.86 mm，满足播种单体仿形性能检测需求。

关键词：高速播种机；仿形机构；试验台架；农田地形；液压系统

中图分类号：S223.2　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000-1298(2024)02-0090-11　　**OSID：**

Design and Test of Pitching Seeding Unit Profiling Performance Testing Bench

YI Shujuan　LI Yikai　CHEN Jiguo　WANG Song　ZHAO Bin
(*College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing* 163319, *China*)

Abstract: In order to solve the problem that it is difficult to test the performance of seeding unit profiling mechanism, a pitching seeding unit profiling performance testing bench was designed. The composition and working principle of the test bench were described, and the high-speed transmission system, hydraulic lifting system, monitoring system and key components were designed. ANSYS Workbench was applied to carry out static analysis and modal analysis on the whole test stand and key components to verify the reasonableness of the structural design. In order to test the actual testing effect of the pitching seeding unit profiling performance testing bench, taking the seeding unit of Debont 1205 tractor-type no-till precision planter as the research object, the first test was carried out with the hydraulic rod extension and conveyor belt speed as the test factors, and with the error of the monitoring system as the evaluation indexes. After confirming the accuracy of the monitoring system, the maximum error of angle sensor of the monitoring system was 0.69 mm within the range of hydraulic rod extension of 0～200 mm, and the maximum error of the photoelectric encoder was 0.18 km/h within the range of conveyor belt speed of 8～19 km/h. After confirming the accuracy of the monitoring system, taking the speed of the monocoque as the test factor, the data of the land's undulation curve was collected at speeds of 8 km/h, 10 km/h and 12 km/h for the objective of the test curve, the absolute error average of the terrain undulation simulation curve as an indicator of the single-factor test, the test concluded that the designed test bench can effectively simulate the field ground undulation frequency and the amount of undulation, the absolute error average value was 1.86 mm, which can meet the needs of seeding monomer profiling performance testing.

Key words: high speed seeder; profiling mechanism; test bench; farmland topography; hydraulic system

收稿日期：2023-10-25　修回日期：2023-11-26

基金项目：黑龙江省重点研发计划重大项目(2022ZX05B02-02)和黑龙江省“百千万”工程科技重大专项支撑行动计划项目(2020ZX17B01-3)

作者简介：衣淑娟(1965—)，女，教授，博士生导师，主要从事玉米播种机械研究，E-mail：yishujuan_2005@126.com

0　引言

仿形机构是播种机的重要组成部分，通过仿形机构的调节，可保证播种单体在作业过程中遇到不平整的田间地面时始终保持播种深度一致，控制出苗时间的一致性以促进粮食增产[1-2]。仿形机构主要分为机械仿形、液压仿形等，目前国内运用最为广泛的是被动机械仿形，它具有结构简单、安装调整方便等优点，但是仿形精度较差。随着现代作业对播种速度与精度的要求日渐提高，当前高速播种机作业速度可达 18 km/h[3]。传统播种单体被动仿形无法应对播种机在高速作业环境下遇到的大幅度、高频率的起伏曲线，因此仿形机构正在朝着主动仿形的方向发展[4-11]。但仿形机构作业情况与信息难以采集，无法准确地对播种单体仿形性能进行监测与试验，需要通过台架试验来测验播种单体仿形性能[12]。

国内学者对仿形机构试验台进行了大量研究。蔡国华等[13]通过简化播种单体结构的方式，配合地表模拟板设计了开沟深度自控系统试验台，但模拟的地表高度变化曲线单一，无法模拟田间起伏曲线且不能有效采集相应数据。文献[14-16]设计了结合称重仪器采集仿形机构数据的播种单体试验台，可通过称重仪上的数据直观反映仿形机构性能，但无法有效模拟田间起伏曲线。在此基础上，付卫强等[17]设计了通过承载板和浮动机构相互配合来模拟地面起伏状态的播种单体试验台，双液压缸结构配合传感器可有效模拟地面起伏并采集相应数据，但仍然不能配合起伏曲线模拟播种单体前进时的作业环境。丁启朔等[18]设计了播种单体田间试验台，配合传感器可检测播种单体在某一地块缓慢前行时的仿形性能，可同时模拟起伏与前进的作业环境，但该试验台的试验环境为室外，操作困难且仅能进行低速试验。现有的播种单体试验台存在着操作不便、无法采集仿形机构相应数据或采集数据过于单一、无法模拟播种单体作业时的田间起伏曲线或高速前进环境等问题。因此不能有效反映仿形机构的调节性能，更无法满足当前高速作业环境下播种单体的试验需求。

鉴于此，本文设计俯仰式播种单体仿形性能检测试验台，通过液压缸与传动带的配合，模拟播种单体高速前进时随地面起伏的作业状态。设计计算机监控系统，通过计算机还原田间起伏曲线的同时，运用传感器采集试验台模拟起伏量、播种单体仿形量、播种单体前进速度等数据，实现对播种单体仿形机构作业性能检测的同时，便于研究作业速度、地面起伏曲线等因素对播种单体仿形机构作业效果的影响。

1　结构与工作原理

1.1　俯仰式播种单体仿形性能检测试验台结构

俯仰式播种单体仿形性能检测试验台总体结构如图 1 所示，主要包括整体台架、动力系统、液压系统、传动系统、监控系统。

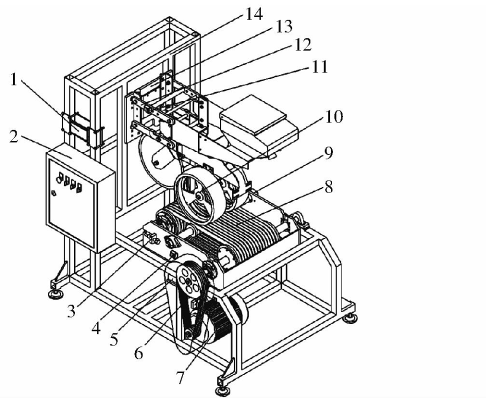


图 1　俯仰式播种单体仿形性能检测试验台结构图

Fig. 1　Structural diagram of pitching seeding unit profiling performance testing bench

1. 计算机　2. 控制箱　3. 张紧装置　4. 俯仰平台角度传感器　5. 液压系统　6. 电机传动系统　7. 电机　8. 俯仰平台　9. 托辊光电编码器　10. 播种单体限深轮　11. 仿形机构角度传感器　12. 播种单体四杆仿形机构　13. 可调节安装板架　14. 组装台架

动力系统主要由电机、变频器组成；液压系统主要由液压缸、液压泵组成；传动系统主要由带轮、平台支架、V 带、V 带驱动辊、托辊组成；监控系统主要由计算机、角度传感器、光电编码器组成。电机固定在组装台架底部与小带轮相连，小带轮通过 A 型 V 带与大带轮相连，大带轮与俯仰平台上的主动 V 带驱动辊固定连接，并与双耳轴承座同轴。液压升降系统位于整体台架上并与俯仰平台下端相连。两个角度传感器分别安装在俯仰平台侧面以及播种单体四杆仿形机构上，光电编码器安装在托辊上，计算机与控制箱位于台架侧面。此外，两个带传动张紧装置分别位于电机安装板以及俯仰平台两侧。俯仰式播种单体仿形性能检测试验台性能指标如表 1 所示。

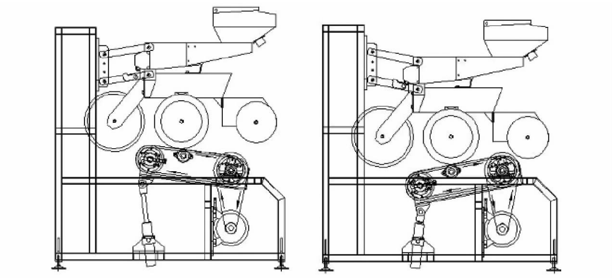
表 1　俯仰式播种单体仿形性能检测试验台主要性能参数

Tab. 1　Main performance parameters of pitching seeding unit profiling performance testing bench

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 735×1 296×1 772
配套动力/kW	3
俯仰平台速度/(km·h⁻¹)	8～19
俯仰平台倾斜角/(°)	-12～9
俯仰平台升降高度/mm	-63～51

1.2 试验台工作原理

BDS－16 型俯仰式播种单体仿形性能检测试验台工作原理如图 2 所示。



(a) 液压缸伸出(仰)　(b) 液压缸收缩(俯)

图 2 俯仰式播种单体仿形性能检测试验台工作原理图

Fig. 2 Working schematics of pitching seeding unit profiling performance testing bench

将播种单体通过安装板与俯仰式播种单体仿形性能检测试验台固定连接,工作时,电机带动传输带与大带轮,大带轮与俯仰平台上的主动驱动辊同轴旋转,俯仰平台开始运作。V 带在主动 V 带驱动辊的作用下开始传动,模拟播种单体在拖拉机牵引下的高速作业。俯仰平台传动过程中,可通过底部液压缸的升降来模拟播种单体在高速作业过程中遇到的地表起伏。计算机根据目标地形数据实时控制液压系统,液压系统配备节流阀与电磁溢流阀,计算机通过液压元件的控制实现对伸出量与伸出速度的精确调控以模拟地面起伏曲线。同时,位于播种单体仿形机构与俯仰平台的角度传感器和位于托辊的光电编码器在该试验台运行过程中实时采集相应数据,并根据数据得出仿形机构仿形量、试验台模拟起伏量、播种单体前进速度等数据,显示在屏幕上。通过比较仿形量与模拟起伏量的差值可以检测该播种单体仿形机构的调节精度,差值越大,精度越差。通过比较仿形量与模拟起伏量到达最终值时的时间差可以检测该播种单体仿形机构的调节速度,时间差越大,调节速度越慢。通过该播种单体在试验台不同传动速度与起伏曲线下测得的仿形量、调节精度、调节速度等,可以检测该仿形机构的综合仿形性能。

2 关键系统设计

2.1 传动系统设计

俯仰式播种单体仿形性能检测试验台高速传动系统选用博能牌 MH100M4B30HL1－F0N00－111 型电机,电机功率为 3.3 kW,电压为 380 V,转速为 1 450 r/min。由于试验台中心距较小,转速较快,因此,传动系统均设计为 V 带传动。V 带传动具有中心距变化范围大、传动平稳、易维护等特点。

俯仰式播种单体仿形性能检测试验台高速传动系统主要由大带轮、小带轮、A 型 V 带、电机以及俯仰平台组成。其中,俯仰平台是俯仰式播种单体仿形性能检测试验台的关键部件,整体设计为俯仰结构升降,主要由主动 V 带驱动辊、从动 V 带驱动辊、C 型 V 带、托辊以及俯仰平台张紧装置组成。其作用是通过 15 根 C 型 V 带的传动,带动播种单体限深轮转动,以起到模拟单体前行的效果。以我国北方土壤为例,质地多为上轻下粘,表面以粘壤土为主,摩擦因数为 0.2～0.5。C 型 V 带的外表面材料为橡胶,摩擦因数为 0.3～0.5,因此,采用 C 型 V 带模拟田间高速作业[19]。试验台传动系统具体结构如图 3 所示。

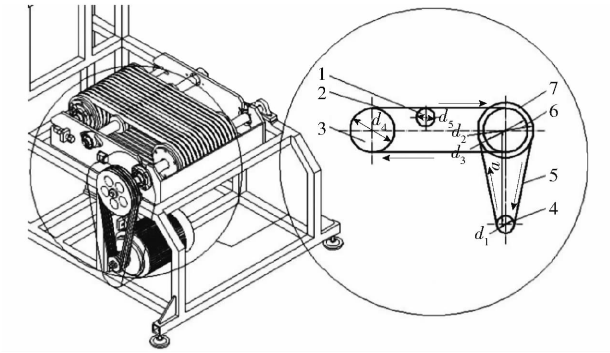


图 3 试验台带传动系统示意图及其传动简图

Fig. 3 Schematic of test bench belt drive and its drive simple

1. 托辊 2. C 型 V 带 3. 从动 V 带驱动辊 4. 小带轮 5. A 型 V 带 6. 主动 V 带驱动辊 7. 大带轮

设计小带轮直径 d_1 = 80 mm、大带轮直径 d_2 = 250 mm、主动 V 带驱动辊直径 d_3 = 200 mm、从动 V 带驱动辊直径 d_4 = 200 mm、托辊直径 d_5 = 100 mm、大小带轮中心距 a = 483.5 mm,可知小带轮转速 n_1 (r/min)、大带轮转速 n_2 (r/min)、主动辊转速 n_3 (r/min)、从动辊转速 n_4 (r/min)、托辊转速 n_5 (r/min),以及 A 型 V 带线速度 v_0 (km/h)、C 型 V 带线速度 v_1 (km/h)分别为[20]

$$\begin{cases} n_1 = n_0 \\ n_2 = n_3 = n_5 = \dfrac{n_0 d_1}{d_2} \\ n_4 = \dfrac{n_0 d_1 d_3}{d_2 d_5} \end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases} v_0 = \dfrac{60\pi n_1}{1\,000} \\ v_1 = \dfrac{60\pi n_2}{1\,000} \end{cases} \tag{2}$$

式中 n_0——电机转速,r/min

当前我国自主生产的 6 行以上气吸式播种机前进速度约 12 km/h,部分高速播种机可达 18 km/h。

结合当前播种机高速化、精确化的发展趋势，所设计的试验台应满足传动速度 v_1 最大值不小于19 km/h，以满足播种单体仿形机构的性能测试要求。在变频器不同挡位下，n_0 为 725 ~ 1 595 r/min，代入式（1）、（2）可得俯仰平台传送带速度 v_1 为 8.0 ~ 19.0 km/h，满足设计要求。

试验台传动比 i 计算公式为

$$i = \frac{n_0}{n_3} \tag{3}$$

将 $n_0 = 1\ 595$ r/min、$n_3 = 510$ r/min 代入式（3）中，得 i 为 3.2，因为 $2 \leqslant i \leqslant 4$，故试验台传动系统传动比合适。

包角是指带与带轮接触弧所对的圆心角，用符号 α_1 表示。一般要求包角 $\alpha_1 \geqslant 120°$，考虑到单体重量与运行速度，要求 $\alpha_1 \geqslant 150°$。包角计算公式为

$$\alpha_1 \approx 180° - (d_2 - d_1)\frac{57.3°}{a} \tag{4}$$

将 d_1、d_2、a 数值代入式（4）计算可得电机带传动包角 $\alpha_1 = 159.85°$。$\alpha_1 \geqslant 150°$，满足设计要求。

张紧装置的主要作用是使 V 带获得必要的初拉力，以保证俯仰平台的正常运转。如图 4 所示，俯仰平台张紧装置位于从动辊两端，可通过旋转螺栓改变轴间距，从而调节张紧程度。

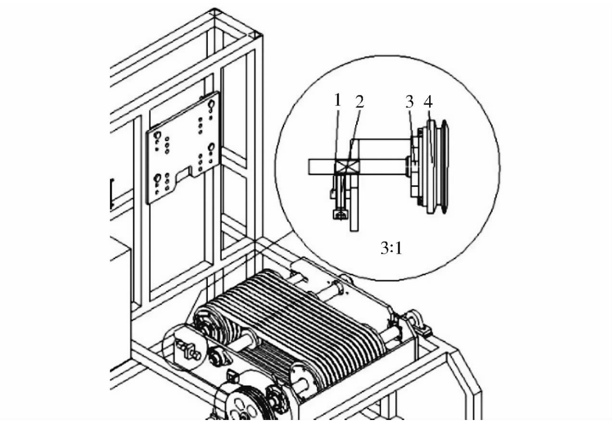


图 4　俯仰平台张紧装置结构示意图

Fig. 4　Schematic of structure of pitching platform tensioning device

1. 耳板　2. 螺栓　3. 带凸台圆形座外球面轴承　4. 从动 V 带驱动辊

传动带的初拉力是指在安装传动带时配合张紧装置所施加的张力，用符号 F_0（N）表示。初拉力过小会引起 V 带滑动甚至脱落，初拉力过大会增大传动系统磨损甚至引起 V 带断裂[21]。俯仰平台单根 V 带初拉力 F_0 计算公式为

$$F_0 = 1\ 800\frac{(2.5 - K_a)P_{ca}}{K_a Z v_1} + 0.077 q_c v_1^2 \tag{5}$$

式中　K_a——包角系数，取 1

P_{ca}——功率，kW　　Z——V 带根数

q_c——C 型 V 带单位长度质量，取 0.3 kg/m

将 $P_{ca} = 3.3$ kW、$Z = 15$、$v_1 = 19.0$ km/h 代入式（5）计算得 $F_0 = 39.6$ N，在此基础上，对台架进行静力学分析。

2.2　液压系统设计

俯仰式播种单体仿形性能检测试验台液压系统的作用是：在平台传动过程中，通过不同速度与高度的升降来模拟播种单体作业过程中遇到的地面起伏。液压缸连接方式设计为中间铰轴固定，设计液压缸行程 200 mm、外径 68 mm、内径 50 mm、活塞杆直径28 mm、有杆腔有效面积 13.47 cm^2、无杆腔有效作用面积 19.63 cm^2。液压升降系统简图如图 5 所示。

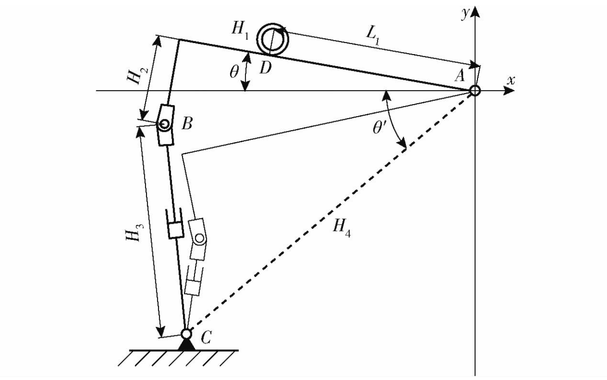


图 5　试验台液压升降系统简图

Fig. 5　Test bench hydraulic lifting system sketch

图 5 中，A 为主动辊轴心线所在位置，B 为液压缸与俯仰平台的上铰接点，C 为液压缸与整体台架的下铰接点。H_1 为经过点 B 的俯仰平台垂直面到点 A 的距离，为 630 mm；H_2 为经过传送带主动辊轴心的俯仰平台平行面到点 B 的距离，为 186 mm；H_3 为点 B 到点 C 的距离，由液压缸初始安装尺寸（214 mm）与液压缸伸出量 l 组成，mm；H_4 为点 A 到点 C 距离，为 793 mm；θ 为俯仰平台倾斜角，（°）；θ' 为点 A、C 连线与 x 轴水平线的夹角，为 40°。

结合三角函数，可得 θ 的计算公式为

$$\theta = \arctan\frac{H_2}{H_1} + \arccos\frac{H_1^2 + H_2^2 + H_4^2 - H_3^2}{2H_4\sqrt{H_1^2 + H_2^2}} - \theta' \tag{6}$$

将 $H_1 = 630$ mm、$H_2 = 186$ mm、$H_3 = l + 214$、$H_4 = 793$ mm 代入式（6），可得俯仰平台倾斜角 θ 与液压缸伸出量 l 之间的关系式为

$$\theta = \arccos\frac{1.01 \times 10^6 - l^2 - 428l}{1.04 \times 10^6} - 23.55 \tag{7}$$

l 取 0 ~ 200 mm 代入式（7），可得俯仰平台倾斜角 θ 为 $-12° \sim 9°$，适宜大型机械化作业的地块，坡度级以 1 ~ 2 级为主，因此满足设计需求[22-23]。

试验台架液压控制原理图如图 6 所示。

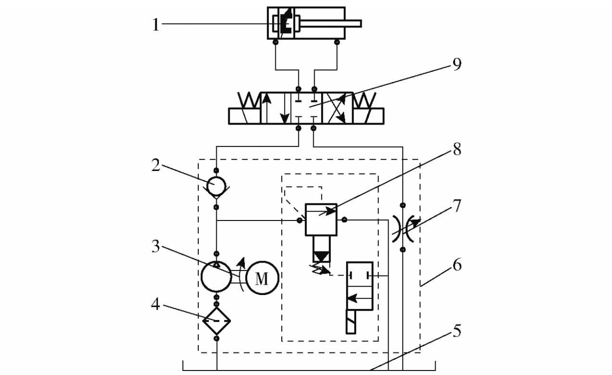


图6 试验台架液压系统控制原理图

Fig. 6 Schematic of test bench hydraulic system

1. 液压缸 2. 单向阀 3. 变量泵 4. 过滤器 5. 油箱 6. 液压泵站 7. 节流阀 8. 先导式电磁溢流阀 9. 三位四通电磁换向阀

该液压系统主要研究模拟起伏，其工作动作循环为：液压挺杆快进、工进（静止）、快退、停止。

结合播种速度、一般田间起伏频率以及起伏量，设计液压缸最大进给速度以及快进、快退速度为 0.08 m/s。p 为液压缸压力，q 为液压缸流量，快进阶段计算公式为

$$p=\frac{F}{A_1-A_2}+\frac{A_2}{A_1-A_2}p_b \tag{8}$$

$$q=(A_1-A_2)v_l \tag{9}$$

工进阶段计算公式为

$$p=\frac{F}{A_1}+\frac{A_2}{A_1}p_b \tag{10}$$

$$q=A_1v_h \tag{11}$$

快退阶段计算公式为

$$p=\frac{F}{A_2}+\frac{A_1}{A_2}p_b \tag{12}$$

$$q=A_2v_l \tag{13}$$

式中 F——负载，快进或快退阶段为 736.8 N，工进阶段为 2 193.7 N

A_1——液压缸无杆腔有效作用面积，cm^2

A_2——液压缸有杆腔有效作用面积，cm^2

p_b——背压，取 0.5 MPa

v_l——快进、快退速度，m/s

v_h——最大进给速度，m/s

将 $A_1=19.63\ cm^2$、$A_2=13.47\ cm^2$、$v_l=0.08$ m/s、$v_h=0.08$ m/s 代入式（8）~（13）计算得各工作阶段压力和流量后，可求得液压缸功率 P 为

$$P=\frac{pq}{60} \tag{14}$$

计算结果如表2所示。

表2 液压缸在各工作阶段压力、流量和功率

Tab. 2 Pressure, flow rate and power of hydraulic cylinders at each stage of operation

工作阶段	工作压力 p/MPa	流量 q/($L\cdot min^{-1}$)	功率 P/kW
快进进给	2.30	2.96	0.113
工进进给	1.70	9.42	0.267
快退进给	1.30	6.47	0.140

基于此，液压泵站设计参数为系统额定压力 6.0 MPa，液压泵排量选 13 mL/r。液压缸中的关键元件先导式电磁溢流阀采用 DBW10 型，最大流量为 250 L/min，工作电压为 24 V。

2.3 监控系统设计

2.3.1 监控系统组成

仿形机构的调节精度与调节速度是检验仿形机构调节性能的重要指标，该指标可在台架运行后通过监控系统获取[24]。如图7所示，俯仰式播种单体仿形性能检测试验台监控系统主要由计算机、DYL626S 型角度传感器、E6B2-CWZ1X2000 型光电编码器、SD 存储卡以及触摸屏组成。根据目标地形起伏曲线，计算出模拟该曲线时对应的液压缸活

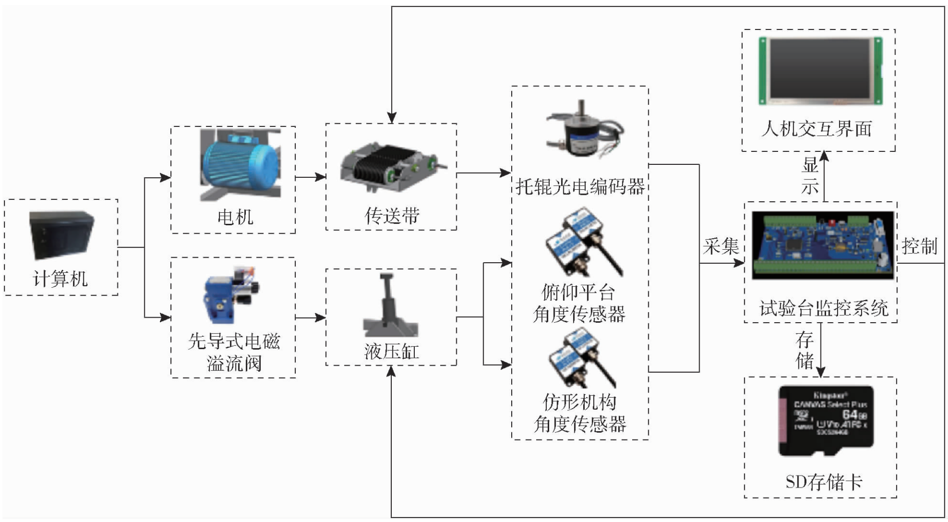


图7 试验台监控系统工作原理图

Fig. 7 Schematic of test bench monitoring system

塞杆位移与速度，并控制各液压元件工作模拟地面起伏曲线。传感器采集的初始数据，由监控系统结合测量模型后得出所需数据，SD 存储卡保存数据并由人机交互界面显示。

2.3.2 角度传感器测量模型

DYL626S 型角度传感器分别位于俯仰平台侧面以及平行四边形仿形机构上，以仿形机构上角度传感器为例，传感器将采集所在点的角度变化，从而计算出仿形机构实际仿形量，如图 8 所示[25]。

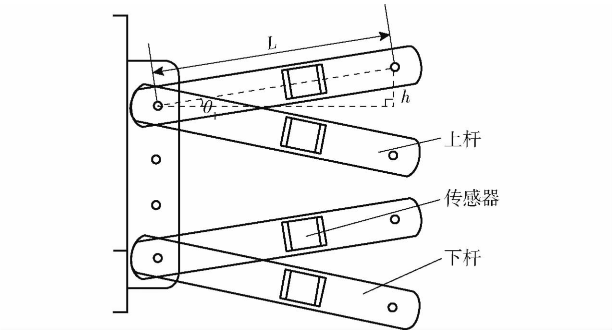


图 8　仿形机构角度传感器安装位置示意图

Fig. 8　Schematic of angle sensor of profiling mechanism

图 8 中，h 为所求仿形机构仿形量，mm；θ_1 为仿形机构角度传感器采集到的角度变化值，(°)；L 为仿形机构连架杆长度，mm，为固定值。因此求得仿形量 h 为

$$h = \sin\theta_1 L \tag{15}$$

同理，位于俯仰平台侧面的角度传感器，也可以在采集俯仰平台角度变化值后，计算出俯仰平台模拟起伏量 h_t，公式为

$$h_t = \sin\theta_2 L_t \tag{16}$$

式中　θ_2——俯仰平台角度传感器采集到的角度变化值，(°)

L_t——播种单体与俯仰平台接触点到主动 V 带驱动辊轴垂直面的距离，mm

比较仿形机构仿形量 h 与台架模拟起伏量 h_t的差值可检验仿形机构的调节精度，比较四杆机构仿形量 h 与台架模拟起伏量 h_t达到最终值时的时间差可检验仿形机构的调节速度。

2.3.3 光电编码器测量模型

如图 9 所示，E6B2 - CWZ1X2000 型光电编码器位于试验台托辊上，可采集托辊转速，从而计算出传送带速度 v_1。图中，d_5 为托辊直径，为 100 mm。结合式(1)、(2)，求得传送带速度 v_1计算式为

$$v_1 = 0.006\pi n_5 \tag{17}$$

通过计算传送带速度 v_1，可实现高速传动系统与液压升降系统的相互配合，同时模拟出不同作业速度下的前行效果以及该速度下的对应起伏曲线，模拟效果更贴合实际，便于精确检测播种单体在各

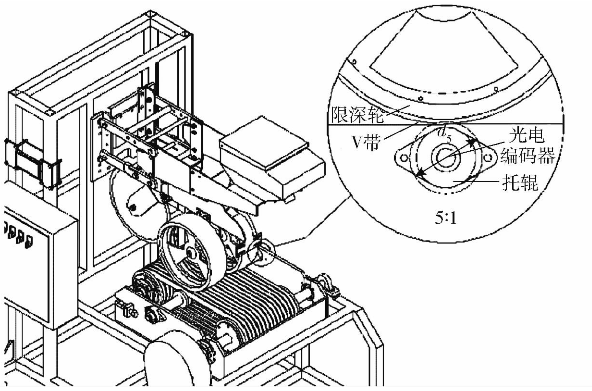


图 9　托辊光电编码器安装位置示意图

Fig. 9　Schematic of optical encoder for roller

个作业速度下的仿形性能。

3 运动过程力学分析

3.1 整体静力学分析

3.1.1 静力学分析目的

俯仰式播种单体仿形性能检测试验台，既有液压升降系统又有传动系统，结构较为复杂，因此在高速工作过程中会产生一定的应力应变。通过静力学分析可以得出试验台架的最大应力、应变和其所在的区域，从而分析俯仰式播种单体仿形性能检测试验台结构设计的合理性并校核材料强度。

3.1.2 静力学分析过程及结果

图 10 为俯仰式播种单体仿形性能检测试验台三维模型及其简化后的模型。

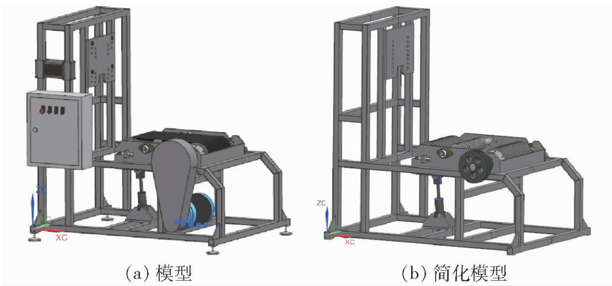


图 10　俯仰式播种单体仿形性能检测试验台模型及其简化模型

Fig. 10　Pitching seeding unit profiling performance testing bench model and its simplified model diagrams

将该模型导入 ANSYS Workbench 2022 软件中，设置工程数据，选择材料为结构钢，划分网格，并细化。网格划分完成后，共划分网格单元 89 986 个，节点 171 170 个，具体网格图像如图 11 所示。

根据试验台工作过程中的情况，设置预紧力、单体对托辊的压力等，然后进行静力学求解，所得结果如图 12 所示。

由图 12 可见，俯仰式播种单体仿形性能检测试验台的最大应力区域出现在液压缸与俯仰平台连接

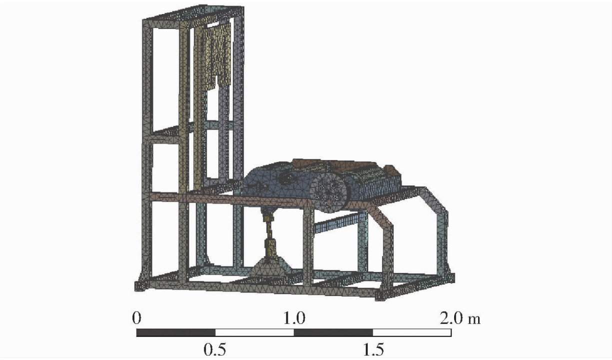


图 11 俯仰式播种单体仿形性能检测试验台网格划分图

Fig. 11 Pitching seeding unit profiling performance testing bench mesh delineation diagram

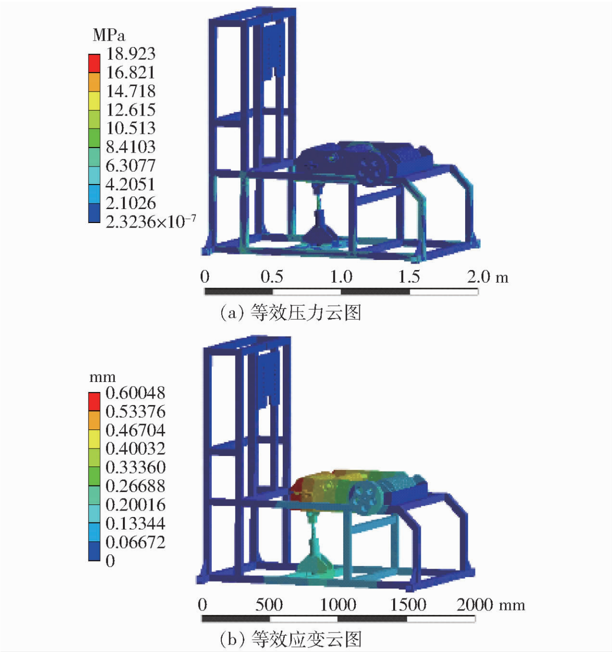


图 12 俯仰式播种单体仿形性能检测试验台静力学分析结果

Fig. 12 Pitching seeding unit profiling performance testing bench static analysis results

位置，最大应力为 18.9 MPa，出现该位置的主要原因是该部分区域受到大部分单体以及俯仰平台的重力以及液压缸对平台的支撑力，受力情况复杂。整体应力并没有超过材料屈服极限，因此当前应力分布并不会对结构造成伤害，可以满足使用要求。最大变形处位于传送带从动辊及其附近区域，主要是因为该部分区域受到单体重力的同时，还受到 C 型 V 带与张紧装置张紧力。最大变形量为 0.600 48 mm，变形量较小，满足使用要求。

3.2 托辊模态分析

3.2.1 模态分析目的

托辊是试验台架中的关键部件，结构如图 13 所示，托辊位于俯仰平台内部、两个 V 带驱动辊之间，其作用是在传动的同时承载播种单体大部分的重量，以防止 V 带因单体过重而断裂。在台架工作过程中，托辊在承载播种单体重量的同时需要高速旋转，故受力方式具有复杂性。托辊的受力分析如图 13，单体重量由 15 根 V 带共同分摊，成为均布载荷施加在托辊带槽区域，同时，托辊两端受到轴承座的支撑力。图中，q_d 为托辊受到的均布载荷，N；F_N 为托辊受到的支撑力，N。

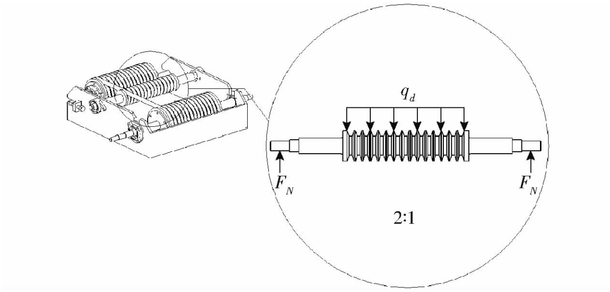


图 13 托辊结构及其受力分析图

Fig. 13 Roller structure and its force analysis diagram

因此，托辊在工作过程中，会因为设计和制造误差等原因产生一定的振动，在承载播种单体的情况下可能会产生局部变形。通过模态分析可以得出托辊的基本振动特性频率和容易发生变形的区域，以验证托辊设计的合理性。

3.2.2 模态分析过程及结果

打开 ANSYS Workbench 2022 软件，导入托辊三维模型，设置工程数据，选择的材料为灰铸铁，参数选择默认，利用网格划分工具生成网格，并通过调整过渡与跨度角中心来细化网格。网格划分完成后，共划分网格单元 26 609 个，节点 43 308 个，具体网格图像如图 14 所示。

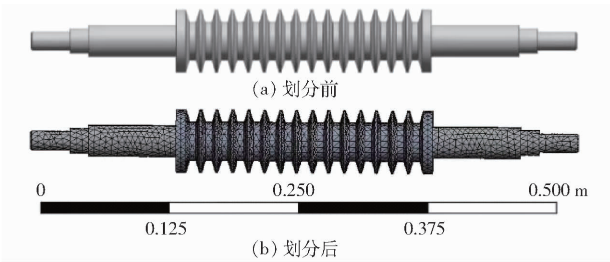


图 14 托辊网格划分图

Fig. 14 Roller meshing diagrams

根据托辊工作状况，施加约束与对应的力，求解试验台架前 8 阶振型，结果如图 15 所示。

前 8 阶固有频率为 268.76、269.32、799.74、800.91、810.54、1 648.80、1 650.50、2 196.70 Hz。

在研究转动体模态分析中，通常认为低阶模态下振动能量最大，从图 15 中也发现，托辊在第 1 阶振动模态时，驱动辊中间大部分区域出现了振动变形。计算驱动辊在最大转速状态下的工作激励频率为

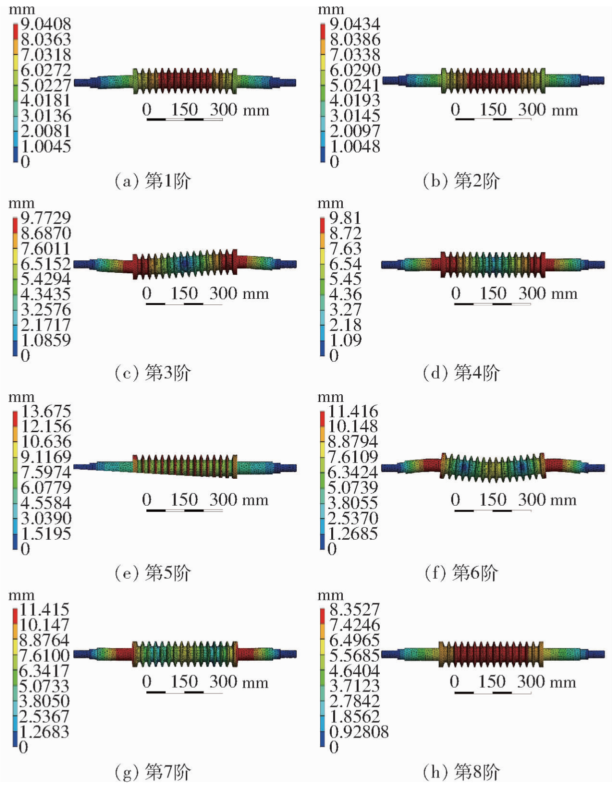


图 15　托辊前 8 阶模态分析结果

Fig. 15　Roller eighth-order modal analysis results

$$f = n_5/60 \tag{18}$$

式中　f——振动频率，Hz

n_5 = 1 012 r/min，代入式(18)计算可知，此时托辊的最大振动频率为 16.87 Hz，在第 1 阶振动模态下托辊固有频率为 268.76 Hz，托辊在最大转速下的工作振动频率远远小于第 1 阶振动模态下的 75%，并且托辊固有振频和工作激励振频不在同一区间段内，因此托辊的设计符合安全要求。

4　试验

4.1　评价指标

俯仰式播种单体仿形性能检测试验台的试验指标为监控系统准确性指标与模拟曲线精确性指标。监控系统准确性指标为：试验台监控系统中的角度传感器能在不同起伏量下准确采集角度值，并根据测量模型得出仿形机构仿形量、俯仰平台模拟起伏量。同时，试验台监控系统中的光电编码器能在不同传送速度下准确采集托辊旋转圈数，并根据测量模型得出模拟作业速度。监控系统所得出的数值与实际数值之差即为传感器误差，若角度传感器误差小于 1.00 mm，且光电编码器误差小于 0.20 km/h，即为该试验台监控系统准确性指标合格。

模拟曲线精确性指标为：试验台可令播种单体达到作业速度 8.0 ~ 19.0 km/h 时，模拟出单体在该作业速度下遇到的地面起伏曲线，若模拟出的地面起伏曲线与目标曲线绝对误差平均值小于 2.00 mm，即为该试验台模拟曲线精确性指标合格。

4.2　试验设备

为验证播种单体高速台架试验性能，选择德邦大为 1205 型牵引式免耕精量播种机播种单体进行试验，该单体可进行高速播种，满足台架速度指标测试的要求。

试验在黑龙江八一农垦大学播种实验室进行。试验前，选择安装板合适的挡位通过螺栓螺母将播种单体固定在试验台上，如图 16 所示，所选的安装挡位需保证试验台液压缸在半伸状态时，俯仰平台与播种单体仿形机构处于水平状态。

图 16　播种单体固定示意图

Fig. 16　Schematic of seeding unit fixing

1. 传感器　2. 计算机　3. 控制箱　4. 液压缸　5. 电机　6. 俯仰平台　7. 播种单体　8. 仿形机构

其他主要试验设备：卷尺（量程 5 m，精度 1 mm）、游标卡尺（量程 150 mm，精度 0.01 mm）、DT－2234B 型非接触高精度光电测速仪（测量范围 1 ~ 100 000 r/min）。

4.3　试验方法

4.3.1　监控系统准确性试验

在进行仿形机构角度传感器准确性试验时，将传感器通过连接件固定在四杆仿形机构上，用卷尺测得仿形机构连架杆长度 L 为 320.00 mm。

打开电机，启动俯仰式播种单体仿形性能检测试验台的液压升降系统，控制液压杆完全缩回。此时，角度传感器将采集角度变化值 θ_1，经测量模型求得仿形量 h，并显示在屏幕上。关闭电机，再用游标卡尺测量仿形机构实际仿形量。实际仿形量用 h'表示，单位为 mm；播种单体仿形机构角度传感器误差用 Δh 表示，单位为 mm。Δh 可评价播种单体仿形机构角度传感器的精确性与测量模型的精确性。计算式为

$$\Delta h = |h - h'| \tag{19}$$

此时，用卷尺测量播种单体与俯仰平台接触点到主动 V 带驱动辊轴垂直面的距离 L_t = 360.00 mm 后，监控系统得出台架模拟起伏量 h_t。用同样的方

法进行俯仰平台角度传感器准确性试验。用游标卡尺测量俯仰平台实际模拟起伏量 h_t'，单位为 mm；俯仰平台角度传感器误差用 Δh_t 表示，单位为 mm。Δh_t 可评价俯仰平台角度传感器的精确性与测量模型的精确性，计算式为

$$\Delta h_t = |h_t - h_t'| \tag{20}$$

将液压缸逐步伸出，以伸出量 20 mm 为一组重复上述试验，直至液压杆完全伸出。记录试验结果。

在进行托辊光电编码器准确性试验时，先通过液压缸调整俯仰平台至水平。打开电机，启动俯仰式播种单体仿形性能检测试验台的高速传动系统，配合测速仪控制传送带实际速度 v_1' 为 8 km/h，读取此时显示屏上的光电编码器显示值 v_1（km/h）；试验台光电编码器误差用 Δv_1（km/h）表示，Δv_1 可评价光电编码器的精确性与测量模型的精确性，计算式为

$$\Delta v_1 = |v_1 - v_1'| \tag{21}$$

逐渐提高传送带速度，再以 9、10、11、12、13、14、15、16、17、18、19 km/h 为试验组别，重复以上步骤，记录试验结果。

4.3.2 模拟曲线精确性试验

采用 RTK－GNSS 对黑龙江八一农垦大学试验示范田（125°09′57.6″～125°10′8.4″E、46°34′51.6″～46°35′9.6″N）进行测量。为突出试验台模拟效果，选择起伏较大的同一地块进行采集，将测量数据通过高斯变换转换为大地坐标数据后提取三维地形数据。将包含时间、位置、起伏量、起伏频率的目标地形数据以文本形式存入计算机作为地形输入试验台监控系统，结合液压缸最大快进、快退速度以及系统所需的响应时间，将采集后的数据频率调整为 8 Hz。分别采集 8、10、12 km/h 下的起伏曲线进行试验，传送带速度与目标地形起伏曲线来源速度始终一致，对比同一时间下传感器采集的试验台模拟起伏曲线与目标起伏曲线，求出绝对误差平均值[26－28]。

4.4 试验结果与分析

监控系统准确性试验结果如图 17 所示。试验结果显示，俯仰式播种单体仿形性能检测试验台的角度传感器在液压杆伸出量为 0～200 mm 范围内的最大误差出现在俯仰平台角度传感器中，为0.69 mm，出现该偏差的原因可能为俯仰平台升降过程中，平台与播种单体的接触点产生了微小移动，使得 L_t 产生微小变化，一定程度上影响了测量模型的精确性，但角度传感器误差始终小于 1.00 mm；光电编码器在传送带速度 8～19 km/h 范围内，由于滑移率通常与速度成正比，传送带滑移率会导致 v_1 与 v_1' 差值变大，因此，在传送带速度为 19 km/h 时，光电编码器误差最大，为 0.18 km/h，小于 0.20 km/h。故俯仰式播种单体仿形性能检测试验台的监控系统准确性指标试验合格，该试验台可精确采集播种单体仿形量、台架模拟起伏量以及台架模拟前进速度等数据，可确保后续模拟曲线精确性指标试验结果数据的可靠性。

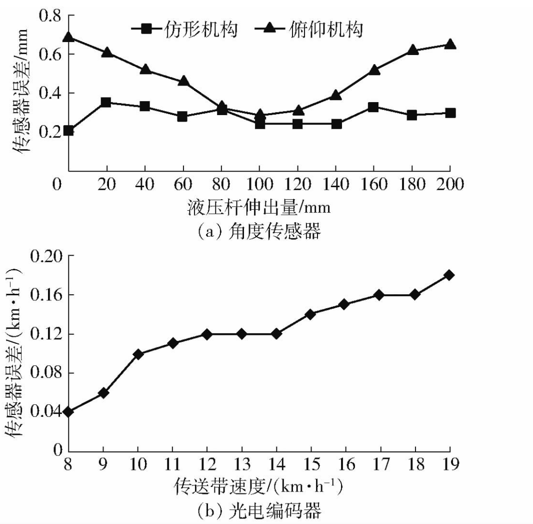


图 17 监控系统准确性试验结果

Fig. 17 Monitoring system accuracy test results

模拟曲线精确性试验结果如图 18 所示。试验

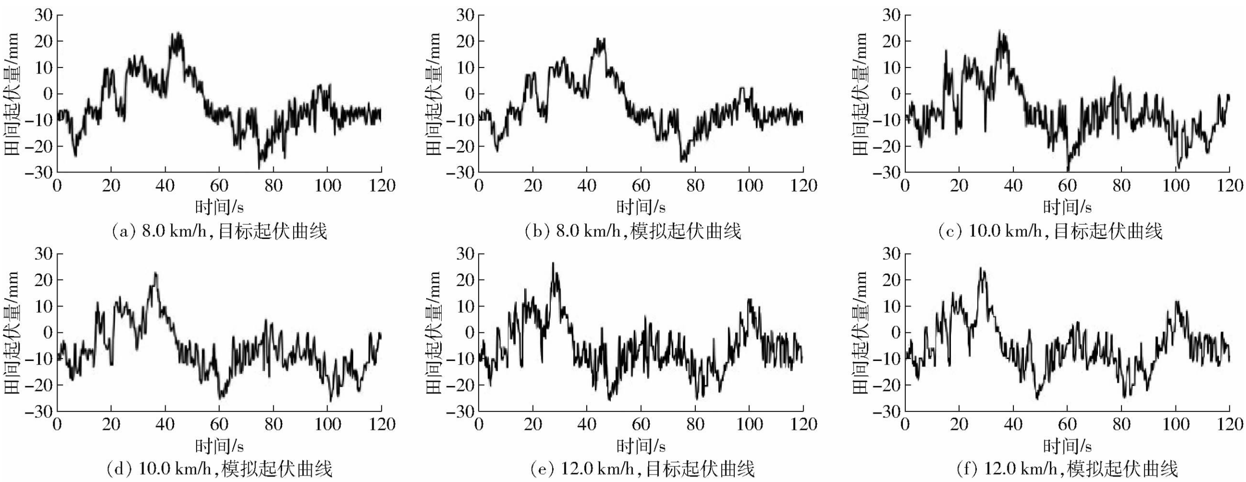


图 18 模拟曲线精确性试验结果

Fig. 18 Simulation curve accuracy test results

结果显示，俯仰式播种单体仿形性能检测试验台可还原不同速度下的地形起伏曲线，起伏频率、起伏量与目标起伏曲线基本吻合，最大绝对误差出现在模拟快速下降区间，该区间误差较大的原因是液压缸收缩量较大、伸缩时间较短，以及该伸出量下 Δh_t 值较大。绝对误差平均值为 1.86 mm，小于 2.00 mm。故该台架可满足田间地形模拟的精确性要求，所模拟的作业环境可用于检测播种单体仿形性能。

5　结论

（1）研制出一种播种单体仿形性能检测试验台，该试验台设计为俯仰结构，可实现 $-12° \sim 9°$ 的起伏，配合传送带模拟 8.0 ~ 19.0 km/h 的作业速度并采集数据，以检验仿形机构调节性能。

（2）设计一种高速俯仰平台，以多槽 V 带托辊作为其关键部件，通过静力学分析与模态分析得台架最大应力为 18.9 MPa、最大变形量为 0.600 48 mm，托辊最大振动频率为 16.87 Hz，验证了设计的合理性。

（3）对试验台进行监控系统准确性试验与模拟曲线精确性试验，得出角度传感器最大误差为 0.69 mm、光电编码器最大误差为 0.18 km/h，模拟曲线绝对误差平均值为 1.86 mm。结果表明该试验台可精确采集数据的同时有效模拟播种单体作业环境，为播深控制技术的研究提供室内试验平台。

参　考　文　献

[1]　李玉环，孟鹏祥，耿端阳，等. 玉米播种深度智能调控系统研究[J]. 农业机械学报，2016，47(增刊)：62 − 68，42.
LI Yuhuan，MENG Pengxiang，GENG Duanyang，et al. Intelligent system for adjusting and controlling corn seeding depth[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(Supp.)：62 − 68，42. (in Chinese)

[2]　刘斌祥，程秋博，周芳，等. 种子大小与播种深度对玉米出苗、苗期光合特性与保护酶活性的影响[J]. 华北农学报，2020，35(2)：98 − 106.
LIU Binxiang，CHENG Qiubo，ZHOU Fang，et al. Effects of seed size and sowing depth on maize seedling emergence and photosynthesis characteristics and protective enzyme activities in seedling stage[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica，2020，35(2)：98 − 106. (in Chinese)

[3]　杨丽，颜丙新，张东兴，等. 玉米精密播种技术研究进展[J]. 农业机械学报，2016，47(11)：38 − 48.
YANG Li，YAN Bingxin，ZHANG Dongxing，et al. Research progress on precision planting technology of maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(11)：38 − 48. (in Chinese)

[4]　XU Zeyu，YANG Zhou，DUAN Jieli，et al. Design and experiment of symmetrical shape deployable arc profiling mechanism based on composite multi-cam structure[J]. Symmetry，2019，11(8)：958.

[5]　宫元娟，金忠博，白晓平，等. 甘蔗收获机割台随动控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报，2023，54(2)：119 − 128，138.
GONG Yuanjuan，JIN Zhongbo，BAI Xiaoping，et al. Design and experiment of servo control system for sugarcane header[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(2)：119 − 128，138. (in Chinese)

[6]　NAN Yulong，ZHANG Huichun，ZHENG Jiaqiang，et al. Research on profiling tracking control optimization of orchard sprayer based on the phenotypic characteristics of tree crown[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2022，192：106455.

[7]　范永奎，翟志强，朱忠祥，等. 丘陵山地拖拉机电液悬挂仿形控制系统研究[J]. 农业机械学报，2020，51(增刊1)：517 − 524.
FAN Yongkui，ZHAI Zhiqiang，ZHU Zhongxiang，et al. Electro-hydraulic hitch terrain-adaptive control system for hillside tractors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(Supp.1)：517 − 524. (in Chinese)

[8]　金诚谦，刘岗微，倪有亮，等. 基于 MBD − DEM 耦合的联合收获机割台仿形机构设计与试验[J]. 农业工程学报，2022，38(2)：1 − 10.
JIN Chengqian，LIU Gangwei，NI Youliang，et al. Design and experiment of header profiling mechanism for combine harvester based on MBD − DEM coupling[J]. Transactions of the CSAE，2022，38(2)：1 − 10. (in Chinese)

[9]　梁方，雷淇奥，郑思远，等. 开沟深度定压电液仿形控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报，2019，35(21)：1 − 8.
LIANG Fang，LEI Qi'ao，ZHENG Siyuan，et al. Design and experiment of electro-hydraulic profiling system with consistent pressure for drilling depth of furrow opener[J]. Transactions of the CSAE，2019，35(21)：1 − 8. (in Chinese)

[10]　祝露，尤泳，王德成，等. 悬挂式割草机折叠机构优化与液压仿形系统研究[J]. 农业机械学报，2022，53(9)：122 − 130.
ZHU Lu，YOU Yong，WANG Decheng，et al. Optimal design and experiment of folding mechanism and hydraulic profiling system of hanging mower[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2022，53(9)：122 − 130. (in Chinese)

[11]　汤庆，吴俊，蒋兰，等. 油菜耕整移栽联合作业机液压仿形系统设计与试验[J]. 农业机械学报，2021，52(11)：95 − 102.
TANG Qing，WU Jun，JIANG Lan，et al. Design and test of hydraulic profiling system for rape seedling combined transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2021，52(11)：95 − 102. (in Chinese)

[12]　苑严伟，白慧娟，方宪法，等. 玉米播种与测控技术研究进展[J]. 农业机械学报，2018，49(9)：1 − 18.
YUAN Yanwei，BAI Huijuan，FANG Xianfa，et al. Research progress on maize seeding and its measurement and control technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(9)：1 − 18. (in Chinese)

[13]　蔡国华，李慧，李洪文，等. 基于 ATmega128 单片机的开沟深度自控系统试验台的设计[J]. 农业工程学报，2011，27(10)：11 − 16.

CAI Guohua, LI Hui, LI Hongwen, et al. Design of test-bed for automatic depth of furrow opening control system based on ATmega128 single chip microcomputer[J]. Transactions of the CSAE, 2011,27(10):11－16. (in Chinese)

[14] 高原源,翟长远,杨硕,等. 精密播种机下压力和播深CAN总线监控与评价系统研究[J]. 农业机械学报, 2020,51(6):15－28.
GAO Yuanyuan, ZHAI Changyuan, YANG Shuo, et al. Development of CAN-based downforce and sowing depth monitoring and evaluation system for precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(6):15－28. (in Chinese)

[15] ZHOU Liming, MA Yihua, ZHOU Haiyan, et al. Design and test of sowing depth measurement and control system for no-till vorn seeder based on integrated electro-hydraulic drive[J]. Applied Sciences, 2023, 13(10): 5823.

[16] 白慧娟,方宪法,王德成,等. 玉米播种机播深和压实度综合控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020,51(9):61－72.
BAI Huijuan, FANG Xianfa, WANG Decheng, et al. Design and test of control system for seeding depth and compaction of corn precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(9):61－72. (in Chinese)

[17] 付卫强,董建军,丛岳,等. 基于玉米播深控制的农田地形模拟系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017,48(增刊):58－65.
FU Weiqiang, DONG Jianjun, CONG Yue, et al. Design and test of farmland-terrain simulation system for corn sowing depth control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(Supp.):58－65. (in Chinese)

[18] 丁启朔,尤勇,邢全道,等. 基于精确播深控制目标的播种单体田间台架试验[J]. 农业机械学报, 2022,53(11):100－107.
DING Qishuo, YOU Yong, XING Quandao, et al. Field bench test of seeding unit based on precise seeding depth control objective[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(11):100－107. (in Chinese)

[19] 酒建刚,许庆峰,吴蒙,等. 摩擦型V带传动的工作特点与几何计算[J]. 拖拉机与农用运输车, 2023,50(2):77－82.
JIU Jian'gang, XU Qingfeng, WU Meng, et al. Working characteristics and geometric calculation of friction-type V-belt drive[J]. Tractor & Farm Transporter, 2023,50(2):77－82. (in Chinese)

[20] 王铁军,王铁良,崔红光,等. 喂入调节式秸秆破包揉丝机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021,52(6):148－158.
WANG Tiejun, WANG Tieliang, CUI Hongguang, et al. Design and experiment of adjustable feeding straw bale-breaking and rubbing filament machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(6):148－158. (in Chinese)

[21] 孙新城,陈建能,武传宇,等. 三轮非圆同步带传动试验台设计与应用[J]. 农业机械学报, 2021,52(1):73－81.
SUN Xincheng, CHEN Jianneng, WU Chuanyu, et al. Design and application of three-wheel non-circular synchronous belt drive test rig[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(1):73－81. (in Chinese)

[22] ZHANG Bo, ZHANG Wei, QI Liqiang, et al. Information acquisition system of multipoint soil surface height variation for profiling mechanism of seeding unit of precision corn planter[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018,11(6):58－64.

[23] 杨冰玉,白亚伟,赵映秋,等. 大面积地形复杂区基于DEM的耕地坡度级别快速提取方法探讨[J]. 矿产与地质, 2022,36(4):900－904.
YANG Bingyu, BAI Yawei, ZHAO Yingqiu, et al. Discussion on fast extraction method of DEM-based cultivated land slope grade in complex topography district of large area[J]. Mineral Resources and Geology, 2022,36(4):900－904. (in Chinese)

[24] NI Youliang, JIN Chengqian, CHEN Manyuan, et al. Computational model and adjustment system of header height of soybean harvesters based on soil-machine system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 183: 105907.

[25] 齐江涛,张书慧,于英杰,等. 基于蓝牙技术的变量施肥机速度采集系统设计[J]. 农业机械学报, 2009,40(12):200－204.
QI Jiangtao, ZHANG Shuhui, YU Yingjie, et al. Development of a ground speed collecting system for the variable rate fertilizer machine based on bluetooth[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(12):200－204. (in Chinese)

[26] 高原源,翟长远,杨硕,等. 播种单体对地下压力测量方法和数学模型[J]. 农业工程学报, 2020,36(5):1－9.
GAO Yuanyuan, ZHAI Changyuan, YANG Shuo, et al. Measurement method and mathematical model for the seeding downforce of planter row unit[J]. Transactions of the CSAE, 2020,36(5):1－9. (in Chinese)

[27] 汪沛,冯达文,陈高隆,等. 农田精准平整过程中三维地形实时测量方法研究[J]. 农业机械学报, 2023,54(3):41－48.
WANG Pei, FENG Dawen, CHEN Gaolong, et al. Real-time 3D terrain measurement method and experiment in farmland leveling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(3):41－48. (in Chinese)

[28] 景云鹏,刘刚,金志坤. GNSS双天线结合AHRS测量农田地形[J]. 农业工程学报, 2019,35(21):166－174.
JING Yunpeng, LIU Gang, JIN Zhikun. Topographic survey of farmland based on GNSS dual antenna combined with AHRS[J]. Transactions of the CSAE, 2019,35(21):166－174. (in Chinese)