doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.011

双自由度多铰接仿形免耕精量播种单体设计与试验

侯守印　陈海涛　史乃煜　邹　震　纪文义　王业成

（东北农业大学工程学院，哈尔滨 150030）

摘要： 针对 2BMFJ 系列原茬地免耕覆秸播种机播后镇压效果和播种深度一致性不理想的问题，设计了双自由度多铰接仿形免耕精量播种单体，应用保守系拉格朗日方程建立了种沟深度数学模型，初步确定了影响种沟深度的关键结构与工作参数。采用四因素五水平二次回归正交旋转中心组合试验方法，选取弹簧初始增量、初始牵引角、弹簧刚度、机具作业速度为影响因素，开沟深度合格率、土壤坚实度合格率和开沟深度变异系数为性能评价指标，得到影响开沟深度合格率各因素由大到小顺序为：弹簧刚度、机具作业速度、弹簧初始增量、初始牵引角，影响土壤坚实度合格率各因素由大到小顺序为：弹簧刚度、机具作业速度、初始牵引角、弹簧初始增量，影响开沟深度变异系数各因素由大到小顺序为：初始牵引角、机具作业速度、弹簧刚度、弹簧初始增量。对试验数据进行优化处理，结果表明，在初始牵引角 0°、弹簧刚度 10 N/mm 条件下，弹簧初始增量 15 ~ 19.5 mm、机具作业速度 6.7 ~ 7.8 km/h 范围内，开沟深度合格率大于 95%，土壤坚实度合格率大于 95%，开沟深度变异系数小于 10%。

关键词： 播种单体；双自由度；多铰接仿形；免耕

中图分类号： S223.2　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1000-1298(2019)04-0092-10

Design and Experiment of Two-degree-of-freedom Multi-articulated Profiling No-tillage Precision Drill Unit

HOU Shouyin　CHEN Haitao　SHI Naiyu　ZOU Zhen　JI Wenyi　WANG Yecheng

(*College of Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: Based on the design concept of 2BMFJ series no-tillage precision planter, which is light weight and uniform in sowing depth, a two-degree-of-freedom combined profiling no-tillage precision drill unit was designed. Based on Lagrange equation, a mathematical model of ditching depth of precision drill unit was established, and the key structure and working parameters affecting the ditching depth were determined. The autumn untreated maize stubble field was selected as the test plot. Four-factor and five-level quadratic regression orthogonal rotation center combination test method was applied, experimental optimization on structure and working parameters affecting the performance of precision drill unit was done, and the initial increment of spring, initial traction angle, spring stiffness and working speed were selected as influencing factors. The qualified rate of ditching depth, soil hardness and variation coefficient of ditching depth were selected as evaluation indexes, the primary and secondary relations of factors affecting the qualified rate of ditching depth were obtained as follows: spring stiffness, working speed, initial increment of spring and initial traction angle, the primary and secondary order of factors affecting qualified rate of soil hardness were as follows: spring stiffness, working speed, initial traction angle and initial increment of spring, and the primary and secondary order of the factors affecting the variation coefficient of ditching depth were follows: initial traction angle, working speed, spring stiffness and initial increment of spring. Design-Expert 6.0.10 software was used to establish regression equation, significance and optimization parameters of the test data were tested, the results showed that under the conditions of initial traction angle of 0°, spring stiffness of 10 N/mm, initial spring increment of 15 ~ 19.5 mm and working speed of 6.7 ~ 7.8 km/h, the qualified rate of ditching depth was more than 95%,

收稿日期：2019-01-29　修回日期：2019-02-20

基金项目： 国家重点研发计划项目(2018YFD0201004)、现代农业产业技术体系建设专项资金项目(GARS - 04)和黑龙江省普通高等学校东北农业大学工程学院重点实验室开放课题项目(KF18-05)

作者简介： 侯守印(1986—)，男，工程师，博士生，主要从事旱作农业机械装备研究，E-mail: houshouyin.cn@163.com

通信作者： 陈海涛(1962—)，男，教授，博士生导师，主要从事农业机械装备及生物质材料研究，E-mail: htchen@neau.edu.cn

the qualified rate of soil hardness was more than 95%, and the variation coefficient of ditching depth was less than 10%.

Key words: drill unit; two-degrees-of-freedom; multi-articulated profiling; no-tillage

0　引言

近年来，原茬地高速精密播种已成为播种技术重点研究方向[1-2]。播种深度一致性是播种机具作业性能的重要评价指标，不同作物的播种深度农艺要求不同，并有严格范围，合格的播种深度能够使种子与湿润的土壤紧密接触，提高土壤紧实度，使苗带土壤吸收水分能力增强，起到提墒、保墒和持续供墒作用，能够提高种子出苗率、出苗整齐度，改良幼苗及生长发育状况，提高粮食产量。影响播种深度一致性的主要因素是开沟深度合格率和镇压强度合格率[3-16]。

目前，国外免耕播种机播种单体播深控制理论主要集中于破茬圆盘配套重型同位仿形播种单体的研究[17-18]。国内专家针对不同地域免耕播种播深一致性关键技术开展了研究[19-21]。文献[22-24]设计了清秸覆秸种床整备装置，为播种作业进行良好的种子着床前种床工艺技术处理，但与传统播前精细整地作业创造的良好种床相比，其工作环境相对恶劣，未耕地开沟入土困难、牵引阻力大、秸秆根茬残留、窄行播种堵塞、机具纵向不平衡等因素直接影响播种单体的作业性能。

因此，本文设计一种在原茬地条件下窄行轻量化播种单体，通过理论分析确定影响工作性能指标的关键结构与工作参数，应用二次回归正交旋转中心组合试验方法求得该装置最优参数组合，以满足系列原茬地免耕播种机对播深稳定性关键技术要求。

1　结构及工作原理

双自由度多铰接仿形免耕精量播种单体（以下简称播种单体）结构如图 1 所示，由压紧弹簧、平行四杆仿形装置、弹簧压紧装置、传动系统、种箱、覆土镇压调节装置、后仿形镇压轮、覆土装置、多铰接仿形装置连杆、气吸排种器、开沟器、多铰接仿形装置摇杆、前仿形轮等零部件组成。

工作原理如图 2 所示。当播种单体处于状态Ⅰ，即经凸起向凹陷地块运动时，单体向下仿形，后仿形轮绕 D 点转动并向下移动（图 3），通过连杆 BC 使前仿形镇压轮绕 A 点向上转动，减小了前仿形轮对地面的正压力，由于多铰接连杆作用，前仿形轮不能向上移动，从而迫使平行四杆仿形装置继续向下

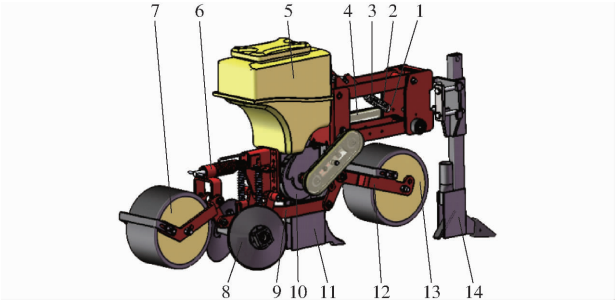

图 1　免耕播种单体结构简图

Fig. 1　Structure diagram of no-tillage planter unit

1. 压紧弹簧　2. 平行四杆仿形装置　3. 弹簧压紧装置　4. 传动系统　5. 种箱　6. 覆土镇压调节装置　7. 后仿形镇压轮　8. 覆土装置　9. 多铰接仿形装置连杆　10. 气吸排种器　11. 种子开沟器　12. 多铰接仿形装置摇杆　13. 前仿形轮　14. 施肥开沟器

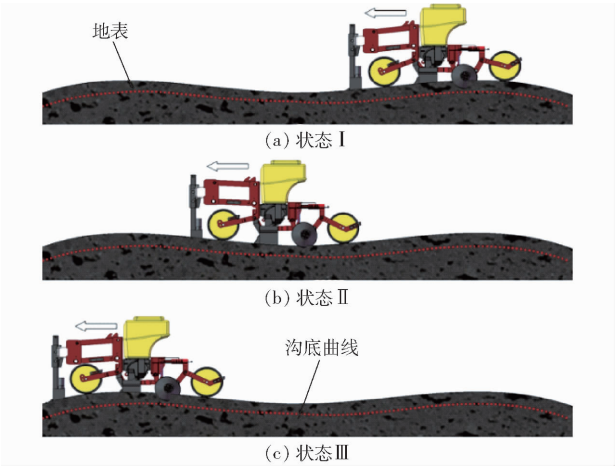

图 2　工作原理

Fig. 2　Sketches of working principle

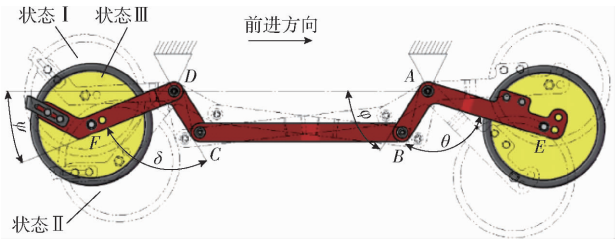

图 3　多铰接仿形装置结构及仿形原理图

Fig. 3　Structure and schematic of multi-articulated profiling device

运动，同时，连接在机架 AD 上的开沟器也随之向下运动，保证了开沟深度的一致性。同理，在状态Ⅱ、Ⅲ条件下，开沟深度受多铰接仿形的影响同样降低了开沟深度波动量，而且变化缓慢，仿形可靠。

2　多铰接仿形装置结构参数设计

为了保证播种单体极限仿形量和部件结构空间

布置要求，对多铰接仿形装置结构尺寸加以确定。多铰接仿形装置结构为以 A、D 固定点为机架的摇杆机构，如图 3 所示。φ 为 AB 杆与 AD 夹角（多铰接仿形偏角），ψ 为 DF 杆与 AD 夹角，θ 为 AB 杆与 AE 杆夹角，δ 为 DF 杆与 CD 杆夹角。前仿形轮与 E 点铰接，后仿形镇压轮与 F 点铰接，当播种单体作业时，E 点和 F 点随同前、后轮上升或下降。AE 杆、DF 杆分别与 AB 杆、CD 杆固装，BC 为连杆。根据前仿形轮、后仿形镇压轮、种子开沟器及覆土装置等部件结构及装配尺寸，确定 AE 杆和 DF 杆长度为 260 mm，θ 与 δ 为 $4\pi/9$。根据播种单体总仿形量设计值为上下仿形各 10 cm，确定 E 点和 F 点仿形量应为上下各 40 cm。各杆件尺寸关系为

$$\begin{cases} l_{AB}\cos\varphi + l_{BC}\cos\gamma + l_{CD}\cos(\pi-\delta-\psi) = l_{AD} \\ l_{AB}\sin\varphi - l_{BC}\sin\gamma - l_{CD}\sin(\pi-\delta-\psi) = 0 \end{cases} \tag{1}$$

式中 γ——BC 杆与水平面夹角，rad

l_{AB}——AB 杆长度，mm

l_{BC}——BC 杆长度，mm

l_{CD}——CD 杆长度，mm

l_{AD}——AD 杆长度，mm

令 $l_{BC}/l_{AB}=a$，$l_{CD}/l_{AB}=b$，$l_{AD}/l_{AB}=c$，代入式(1)得

$$\rho_1\cos(\delta+\psi) - \rho_2\cos(\delta+\psi-\varphi) - \rho_3 = \cos\varphi \tag{2}$$

其中

$$\begin{cases} \rho_1 = b \\ \rho_2 = \dfrac{b}{c} \\ \rho_3 = \dfrac{b^2+c^2-a^2+1}{2c} \end{cases} \tag{3}$$

根据多铰接仿形装置设计仿形量极限及正常工作状态条件，φ 与 ψ 分别对应 $\pi/3$、$\pi/4$、$4\pi/9$ 和 $\pi/9$、$\pi/6$、$2\pi/9$ 3 个极限角度，将其分别代入式(2)可得 $\rho_1=0.99$，$\rho_2=0.14$，$\rho_3=1.8$。由式(3)得 $a=5.22$，$b=0.99$，$c=7.07$。根据气吸排种器、覆土装置、种子开沟器等部件结构及配置尺寸可以确定 AD 长度350 mm，通过计算可得 AB 杆长度 49.5 mm，BC 杆长度 258 mm，CD 杆长度 49 mm。考虑加工制造，设计 AB 杆长度为 50 mm，BC 杆长度为 260 mm，CD 杆长度为 50 mm。

3 种沟深度数学模型建立

多铰接仿形播种单体的开沟深度受到多铰接仿形装置结构参数影响，为了简化求解过程，将整个单体仿形系统视作保守系统，应用拉格朗日方程对开沟深度进行模型建立[25]。结构尺寸及受力如图 4 所示。

选取牵引角 α 和多铰接仿形偏角 φ 作为广义坐标系，由于多铰接仿形装置位移量较小，为了便于后续方程的化简，忽略其对质心的影响。

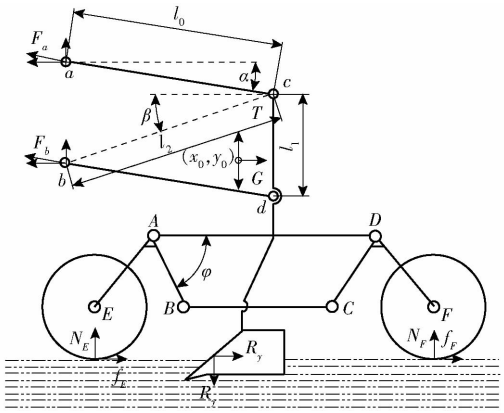

图 4 播种单体结构尺寸及受力简图

Fig. 4 Structure and force diagram of planer unit

如图 4 所示，以单体前、后仿形轮中心连线与理论水平作业平面平行为势能零点，系统势能为

$$V = mg(h-h_0-h_1) + \frac{k\Delta}{2} \tag{4}$$

其中

$$\begin{cases} h-h_0 = l_0(\sin\alpha_0 - \alpha - \mu\varphi) \\ h_1 = \mu\varphi \\ \Delta = \sqrt{l_1^2 + l_0^2 + 2l_1l_0\cos(\alpha_0-\alpha-\beta)} - l_2 \end{cases} \tag{5}$$

式中 V——系统广义坐标势能，J

m——系统广义坐标内的质量，kg

h——系统纵向波动后质心高度，mm

h_0——系统纵向波动前质心高度，mm

h_1——多铰接仿形装置对系统质心的调节高度，mm

k——弹簧刚度，N/mm

Δ——弹簧伸长量，mm

l_0——上下连杆长度，mm

α_0——初始牵引角，rad

α——系统受波动牵引角，rad

μ——多铰接仿形偏角对质心位置影响的相对系数

β——弹簧夹角，rad

l_1——后连杆长度，mm

l_2——平行四杆对角线长度，mm

应用广义坐标及其导数表示此系统动能为

$$T = \frac{mv^2 + I_1\omega_1^2 + I_2\omega_2^2}{2} \tag{6}$$

其中

$$\begin{cases} v = \sqrt{v_0^2 - 2v_0l_0\dot{\alpha}\sin(\alpha_0-\alpha-\mu\varphi) + l_0^2\dot{\alpha}^2} \\ I_2 = I_{AB} + (2I_{BC} + m_{BC}l_s^2)\dfrac{l_{AB}^2}{l_{BC}^2} + I_{CD}\dfrac{l_{AB}^2l_{CE}^2}{l_{BD}^2l_{BE}^2} \\ \omega_1 = \dot{\alpha} \\ \omega_2 = \dot{\varphi} \end{cases} \tag{7}$$

式中 I_1——平面系统对质心转动惯量，kg·m^2

v——系统质心移动速度，m/s

I_2——多铰接仿形装置对质心等效转动惯量，kg·m²

v_0——系统质心初始移动速度，m/s

ω_1——系统转动角速度，rad/s

ω_2——多铰接仿形装置相对转动角速度，rad/s

I_{AB}——AB 杆转动惯量，kg·m²

I_{BC}——BC 杆转动惯量，kg·m²

I_{CD}——CD 杆转动惯量，kg·m²

l_s——瞬心到 BC 杆的质心距离，mm

在牵引角 α 和多铰接仿形偏角 φ 作为广义坐标系中建立 2 个自由度的拉格朗日函数

$$L = T - V = L(\alpha, \varphi, \dot{\alpha}, \dot{\varphi}) \tag{8}$$

故拉格朗日微分方程组为

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\dfrac{\partial L}{\mathrm{d}\dot{\alpha}}\right) - \dfrac{\partial L}{\mathrm{d}\alpha} = 0 \\ \dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\dfrac{\partial L}{\mathrm{d}\dot{\varphi}}\right) - \dfrac{\partial L}{\mathrm{d}\varphi} = 0 \end{cases} \tag{9}$$

由式(4)、(6)、(8)可得

$$L = \frac{1}{2}m(v_0^2 - 2\dot{\alpha}v_0 l_0 \sin(\alpha_0 - \alpha - \mu\varphi) + l_0^2\dot{\alpha}^2) - \frac{k}{2}\sqrt{l_1^2 + l_0^2 + 2l_0 l_1 \cos(\alpha_0 - \alpha - \beta)} + \frac{l_1\dot{\alpha}^2}{2} + \frac{l_2\dot{\varphi}^2}{2} + b_1 \tag{10}$$

其中　$b_1 = \dfrac{1}{2}mv_0^2 - mg(h_0 + h_1) + \dfrac{k}{2}l_2$

将式(10)代入式(9)得

$$\begin{cases} \dfrac{\partial L}{\partial \alpha} = mv_0 l_0 \dot{\alpha}\cos(\alpha_0 - \alpha - \mu\varphi) - \dfrac{kl_0 l_1 \sin(\alpha_0 - \alpha - \beta)}{2\sqrt{l_1^2 + l_0^2 + 2l_0 l_1 \cos(\alpha_0 - \alpha - \beta)}} \\ \dfrac{\partial L}{\partial \varphi} = mv_0 l_0 \dot{\alpha}\varphi\cos(\alpha_0 - \alpha - \mu\varphi) - \dfrac{kl_0 l_1 \sin(\alpha_0 - \alpha - \beta)}{2\sqrt{l_1^2 + l_0^2 + 2l_0 l_1 \cos(\alpha_0 - \alpha - \beta)}} \end{cases} \tag{11}$$

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\dfrac{\partial L}{\mathrm{d}\dot{\alpha}}\right) = ml_0^2\ddot{\alpha} + I_1\ddot{\alpha} + I_2\ddot{\varphi} + mv_0 l_0 \cos(\alpha_0 - \alpha - \mu\varphi)(\dot{\alpha} + \mu\dot{\varphi}) \\ \dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\dfrac{\partial L}{\mathrm{d}\dot{\varphi}}\right) = I_2\ddot{\varphi} \end{cases} \tag{12}$$

将式(11)、(12)代入式(9)得牵引角的广义坐标方程为

$$ml_0^2\ddot{\alpha} + mv_0 l_0 \cos(\alpha_0 - \alpha - \mu\varphi)(\dot{\alpha} + \mu\dot{\varphi}) + I_1\ddot{\varphi} + I_2\ddot{\alpha} - mv_0 l_0 \dot{\alpha}\cos(\alpha_0 - \alpha - \mu\varphi) + \frac{kl_0 l_1 \sin(\alpha_0 - \alpha - \beta)}{2\sqrt{l_1^2 + l_0^2 + 2l_1 l_0 \cos(\alpha_0 - \alpha - \beta)}} = 0 \tag{13}$$

对式(13)积分得

$$ml_0^2\dot{\alpha} + mv_0 l_0 \cos(\alpha_0 - \alpha - \mu\varphi)(\alpha + \mu\varphi) + I_1\dot{\varphi} + I_2\dot{\alpha} + I_2\dot{\varphi} + \frac{kl_0 l_1 \sin(\alpha_0 - \alpha - \beta)t}{2\sqrt{l_1^2 + l_0^2 + 2l_1 l_0 \cos(\alpha_0 - \alpha - \beta)}} = mv_0 l_0 \dot{\alpha}\cos(\alpha_0 - \alpha - \mu\varphi) + C_1 \tag{14}$$

根据机构工作时，系统受波动牵引角变化范围很小，令

$$\begin{cases} C_1 = \mu\varphi m v_0 l_0 \cos\alpha_0 \\ b_2 = \dfrac{kl_0 l_1 \sin\alpha_0 t}{2\sqrt{l_1^2 + l_0^2 + 2l_1 l_0 \cos\alpha_0}} \end{cases} \tag{15}$$

将式(15)代入式(14)得

$$ml_0^2\dot{\alpha} + I_1\dot{\alpha} + I_2\dot{\varphi} + b_2 t = 0 \tag{16}$$

对式(16)积分得

$$ml_0^2\alpha + I_1\alpha + I_2\varphi + \frac{1}{2}b_2 t^2 + C_2 = 0 \tag{17}$$

根据机构工作状态可知，当 $t = 0$ 时，$\alpha = 0$，$\varphi = \dfrac{\pi}{4}$，得

$$C_2 = \frac{-\pi I_2}{4} \tag{18}$$

将式(18)代入式(17)得

$$ml_0^2\alpha + I_1\alpha + I_2\varphi + \frac{1}{2}b_2 t^2 - \frac{\pi I_2}{4} = 0 \tag{19}$$

同理，可求多铰接仿形偏角的广义坐标方程，整理拉格朗日微分方程组得

$$\begin{cases} ml_0^2\alpha + I_1\alpha + I_2\varphi + \dfrac{1}{2}b_2 t^2 - \dfrac{\pi I_2}{4} = 0 \\ I_2\varphi - \mu m v_0 l_0 \alpha\cos(\alpha_0 - \alpha - \mu\varphi)t - \dfrac{b_2 t^2}{2} - \dfrac{\pi I_2}{4} = 0 \end{cases} \tag{20}$$

对式(20)整理后得

$$\alpha = \frac{I_2}{ml_0 + I_1}\left(\frac{\pi}{4} - \varphi\right) - \frac{b_2 t^2}{2(ml_0^2 + I_1)} \tag{21}$$

由式(21)可知，多铰接仿形偏角 φ 在播种单体工作过程中为变量，间接影响牵引角 α，从而影响开沟器开沟深度一致性，实现共同仿形功能。同时，机构的质量与尺寸配置、加力弹簧力学性能指标等对开沟性能也具有一定影响。

4　参数优化试验

4.1　试验条件

试验于 2018 年 10 月 1—8 日在东北农业大学向阳试验基地实施，试验地块为未处理玉米原茬地，如图 5a 所示。土壤为黑土，平均硬度：0 ~ 5 cm 为 25.6 kg/m²，5 ~ 10 cm 为 21.4 kg/m²，10 ~ 15 cm 为 22.1 kg/m²；平均含水率：0 ~ 5 cm 为 28%，5 ~ 10 cm

为 30%，10～15 cm 为 27.5%；地表玉米秸秆及杂草覆盖量为 1.87 kg/m^2（包括未经过机械处理玉米秸秆），秸秆平均含水率 32.7%，未经过机械处理秸秆平均高度 165.5 mm，占总秸秆量 87.4%；清秸刀齿入土深度为 50～70 mm。

(a) 2BMFJ-BL5型原茬地免耕覆秸精量播种机作业及作业环境

(b) 双自由度多铰接仿形免耕精量播种单体作业

图 5 试验条件及装置

Fig. 5 Test conditions and devices

4.2 试验仪器及设备

约翰迪尔 954 型拖拉机、2BMFJ－BL5 型原茬地免耕覆秸精量播种机的清秸覆秸装置，如图 5b 所示，包括 SZ－3 型土壤硬度计（kg/m^2）、SU－LB 型土壤水分测定仪（%）、米尺（量程 50 m，精度 2 mm）、钢板尺（量程 20 cm，精度 1 mm）、角尺和数码摄像机等。

4.3 试验方案

采用四因素五水平二次回归正交旋转中心组合试验方法[26]。设计初始多铰接仿形偏角为 π/4，由式(21)可知，开沟深度由初始牵引角、弹簧刚度和弹簧夹角所决定，而弹簧夹角变化量可以通过弹簧增量表示，所以，选取弹簧初始增量 Δl、初始牵引角 α_0、弹簧刚度 k、机具作业速度 v_m 作为试验因素，开沟深度合格率 η_1、土壤坚实度合格率 η_2、开沟深度变异系数 η_3 为评价指标，共实施 36 组试验，应用 Design-Expert 6.0.10 进行数据处理及优化最佳试验因素水平下参数组合。试验因素编码如表 1 所示。

各评价指标测量方法如下[27]：播种机作业后，清除沟底及沟边土块，在原地表与两沟壑交线之间放置角尺，测量沟底中心到角尺距离。在每个处理工况条件下选取 5 个 10 m 作业长度，每个作业长度按平均距离标定 20 个点进行测量，如图 6a 所示。

表 1 因素编码

Tab. 1 Experimental factors and coded levels

编码	因素			
	弹簧初始增量 Δl/mm	初始牵引角 α_0/(°)	弹簧刚度 k/(N·mm^{-1})	机具作业速度 v_m/(km·h^{-1})
2	25	10	14	10
1	20	5	12	9
0	15	0	10	8
－1	10	－5	8	7
－2	5	－10	6	6

(a) 开沟深度测定 (b) 土壤坚实度测定

图 6 性能指标测定

Fig. 6 Determination of performance index

开沟深度合格率计算式为

$$\eta_1 = \frac{n_1}{N_1} \times 100\% \tag{22}$$

式中 n_1——开沟深度合格数量，个

N_1——开沟深度测定总数量，个

对距离地表 5 cm 处的土壤坚实度进行测量，每个处理工况条件下选取 5 个 10 m 作业长度，每个作业长度按平均距离标定 20 个点进行测量，如图 6b 所示。土壤坚实度合格率计算式为

$$\eta_2 = \frac{n_2}{N_2} \times 100\% \tag{23}$$

式中 n_2——土壤坚实度合格数量，个

N_2——土壤坚实度测定总数量，个

通过计算开沟深度变异系数评价播种单体开沟深度的一致性效果，计算式为

$$\eta_3 = \frac{S}{\overline{X}} \times 100\% \tag{24}$$

式中 S——各处理开沟深度标准差，mm

$\overline{X}$——各处理平均开沟深度，mm

4.4 试验结果与分析

试验结果如表 2 所示，方差分析如表 3 所示。

由表 3 可知，对开沟深度合格率，因素 k、v_m 对试验结果有极显著影响，因素 α_0、Δl 对试验结果有显著影响，影响由大到小顺序为：弹簧刚度 k、机具作业速度 v_m、弹簧初始增量 Δl、初始牵引角 α_0；对于土壤坚实度合格率，因素 k、v_m 对试验结果有极显著

表 2　试验方案与结果

Tab. 2　Experiment layout and results

试验序号	弹簧初始增量 Δl/mm	初始牵引角 α_0/(°)	弹簧刚度 k/(N·mm^{-1})	机具作业速度 v_m/(km·h^{-1})	开沟深度合格率 η_1/%	土壤坚实度合格率 η_2/%	开沟深度变异系数 η_3/%
1	10	-5	8	7	81	80	9.1
2	20	-5	8	7	94	92	9.3
3	10	5	8	7	75	73	8.9
4	20	5	8	7	87	85	9.4
5	10	-5	12	7	94	93	9.1
6	20	-5	12	7	98	96	8.7
7	10	5	12	7	90	89	9.7
8	20	5	12	7	94	93	9.4
9	10	-5	8	9	78	76	8.8
10	20	-5	8	9	81	79	9.4
11	10	5	8	9	69	66	8.9
12	20	5	8	9	75	73	9.1
13	10	-5	12	9	85	83	8.7
14	20	-5	12	9	94	91	8.9
15	10	5	12	9	78	75	9.2
16	20	5	12	9	82	80	8.9
17	5	0	10	8	74	71	9.4
18	25	0	10	8	80	77	9.4
19	15	-10	10	8	84	82	8.8
20	15	10	10	8	74	72	9.4
21	15	0	6	8	74	72	9.1
22	15	0	14	8	90	88	9.8
23	15	0	10	6	87	85	9.4
24	15	0	10	10	74	72	9.4
25	15	0	10	8	94	91	9.4
26	15	0	10	8	94	92	9.1
27	15	0	10	8	92	91	9.2
28	15	0	10	8	92	92	9.1
29	15	0	10	8	92	91	9.1
30	15	0	10	8	94	92	9.2
31	15	0	10	8	93	93	8.7
32	15	0	10	8	94	90	9.4
33	15	0	10	8	94	91	9.1
34	15	0	10	8	92	92	8.7
35	15	0	10	8	94	93	8.7
36	15	0	10	8	92	92	9.4

影响，因素 α_0、Δl 对试验结果有显著影响，影响由大到小顺序为：弹簧刚度 k、机具作业速度 v_m、初始牵引角 α_0、弹簧初始增量 Δl。对开沟深度变异系数，因素 α_0 对试验结果有显著影响，其余因素对试验结果无显著性影响，影响由大到小顺序为：初始牵引角 α_0、机具作业速度 v_m、弹簧刚度 k、弹簧初始增量 Δl。

4.4.1　各因素对性能指标的影响分析

由图 7a、7d 可知，随着初始牵引角的增大，开沟深度合格率和土壤坚实度合格率均呈现先升高后降低，并且在初始牵引角为 0°左右时，两项性能评价指标达到最大，说明单体平行四杆仿形机构初始牵引角越接近水平位置对开沟深度合格率和土壤坚实度合格率越有利，因此，机具作业过程中在保证基本仿形量的前提下，牵引角波动量保证在小范围内波动。

由图 7a、7b 可知，随着弹簧初始增量的增大，开沟深度合格率亦呈现先升高后降低的趋势，并且在弹簧初始增量为 15 ~ 20 mm 范围内出现最大值，说明弹簧对播种单体加载预拉力不能过大，过大的预拉力将清洁覆秸装置质量转移给开沟和镇压部件，土壤压实力过大，导致前后仿形镇压轮限深不稳定，开沟深度过大。

由图 7b、7e 可知，随着机具作业速度增大，开沟深度合格率和土壤坚实度合格率呈现明显下降趋势，并且降低速率逐渐增大。说明机具作业速度增加播种单体开沟深度和镇压强度受系统惯性及其他条件扰动影响比较大，因此，在保证机具作业效率前提下，需对

表 3 方差分析

Tab. 3 ANOVA

指标	变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
开沟深度合格率 η_1	回归	2 517.14	14	179.8	9.16	<0.000 1**
	弹簧初始增量	240.67	1	240.67	12.25	0.002 1*
	初始牵引角	216.00	1	216.00	11.00	0.003 3*
	弹簧刚度	504.17	1	504.17	25.67	<0.000 1**
	机具作业速度	468.17	1	468.17	23.84	<0.000 1**
	剩余	412.42	21	19.64		
	拟合	287.50	10	28.75	2.53	0.071 7
	误差	124.92	11	11.36		
	总和	2 929.56	35			
土壤坚实度合格率 η_2	回归	2 772	14	198	9.79	<0.000 1**
	弹簧初始增量	204.17	1	204.17	10.09	0.004 5*
	初始牵引角	266.67	1	266.67	13.18	0.001 6*
	弹簧刚度	522.67	1	522.67	25.84	<0.000 1**
	机具作业速度	486.00	1	486.00	24.03	<0.000 1**
	剩余	424.75	21	20.23		
	拟合	251.75	10	25.17	1.60	0.225 8
	误差	173.00	11	15.73		
	总和	3 196.75	35			
开沟深度变异系数 η_3	回归	1.39	9	0.150	2.54	0.030 6*
	弹簧初始增量	0.082	1	0.082	1.34	0.257 0
	初始牵引角	0.43	1	0.43	7.02	0.013 5*
	弹簧刚度	0.082	1	0.082	1.34	0.257 0
	机具作业速度	0.20	1	0.200	3.32	0.080 1
	剩余	1.58	26	0.061		
	拟合	1.23	15	0.082	2.59	0.058 7
	误差	0.35	11	0.032		
	总和	2.97	35			

注：** 为极显著，* 为显著。

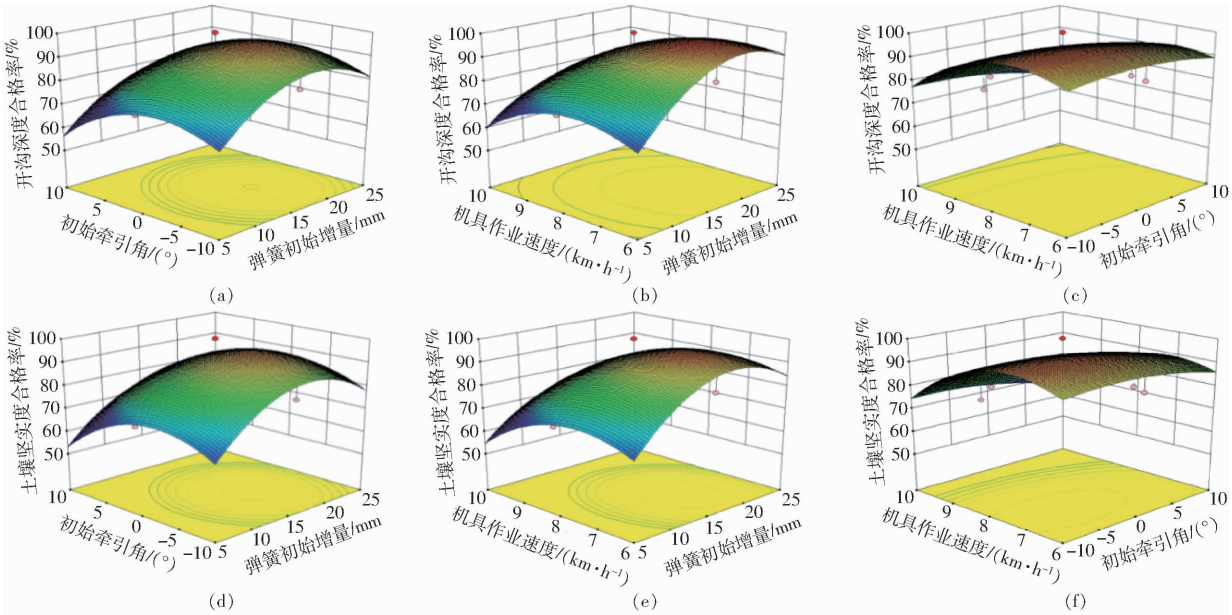

图 7 各因素对指标的影响

Fig. 7 Effects of factors on indexes

其他参数进行优化处理，找出合理的取值范围。

由表 2 可知，开沟深度变异系数均在免耕播种机质量评价关于播深一致性优等品指标数值范围内，说明双自由度多铰接仿形原理能够精确、稳定保

正开沟深度一致性要求。

4.4.2　试验结果优化

试验优化原则是在保证开沟深度合格率和土壤坚实度合格率前提下，提高机组作业效率。

根据优化原则，运用 Design-Expert 6.0.10 进行优化，结果如图 8 所示。在初始牵引角 0°、弹簧刚度 10 N/mm 条件下，弹簧初始增量 15～19.5 mm、机具作业速度 6.7～7.8 km/h 范围内，开沟深度合格率大于 95%，土壤坚实度合格率大于 95%，开沟深度变异系数小于 10%。

4.4.3　优化结果验证

根据优化分析得出的最优参数区间，选取两组数据进行田间验证试验，每组试验数据重复 5 次取均值，结果如表 4 所示。

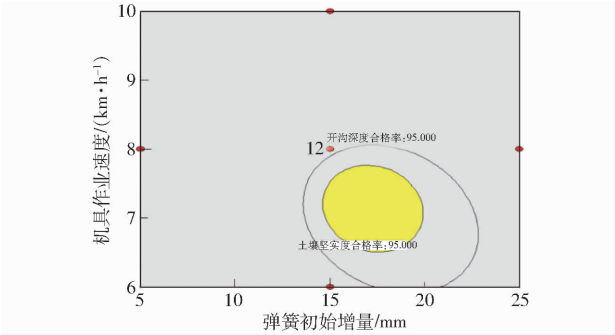

图 8　试验优化结果

Fig. 8　Experimental optimization result

表 4　验证试验结果

Tab. 4　Results of verification experiment

序号	Δl/mm	α_0/(°)	k/(N·mm^{-1})	v_m/(km·h^{-1})	η_1/%	η_2/%	η_3/%
1	17	0	10	7.0	95.5	97.4	9.1
2	16	0	10	7.5	95.5	97.6	8.9

由表 4 可知，试验结果与优化结果相吻合。

4.4.4　对比试验

对优化后的播种单体与 2BMFJ 系列免耕播种机后仿形播种单体和正位仿形播种单体进行性能比较试验，结果如表 5 所示，试验效果如图 9 所示。

表 5　对比验证试验结果

Tab. 5　Contrastive verification test results　　%

项目	开沟深度合格率变化率	土壤坚实度合格率变化率	开沟深度变异系数变化率	质量变化率
多铰接仿形与正位仿形	−4.0	+4.0	+1.5	−15.0
多铰接仿形与后仿形	+14.5	+10.5	−12.5	+10.0

注："−"为前一个项目相对后一个项目减少，"+"为前一个项目相对后一个项目增加。

图 9　不同结构仿形播种单体开沟镇压后地表效果

Fig. 9　Ground surface effect of different structures of imitated seeding monomers after ditching and suppression

1. 多铰接仿形单体　2. 后仿形单体　3. 正位仿形单体

通过分析对比试验数据和作业效果，双自由度多铰接仿形播种单体在保证了开沟深度合格率与土壤坚实度合格率的前提下，降低了单体本身的质量，实现了 300 mm 窄行播种无堵塞功能。

5　结论

（1）开沟深度合格率和土壤坚实度合格率各因素影响由大到小顺序均为：弹簧刚度 k、机具作业速度 v_m、初始牵引角 α_0、弹簧初始增量 Δl；开沟深度变异系数各因素影响由大到小顺序为：初始牵引角 α_0、机具作业速度 v_m、弹簧刚度 k、弹簧初始增量 Δl。

（2）在初始牵引角 0°、弹簧刚度 10 N/mm 条件下，通过弹簧压紧装置，调节压紧弹簧长度，控制弹簧初始增量在 15～19.5 mm 范围内，将拖拉机调至中速 3 挡，通过控制油门，保证机具作业速度在 6.7～7.8 km/h 之间，此时开沟深度合格率大于 95%，土壤坚实度合格率大于 95%，开沟深度变异系数小于 10%，满足播种农艺要求。

（3）在 2BMFJ 系列原茬地免耕覆秸精量播种机上应用后仿形和正位仿形播种单体后，质量分别增加了 10% 和减少了 15%，开沟深度合格率分别提高了 14.5% 和降低了 4%，土壤坚实度合格率分别提高了 10.5% 和 4%，开沟深度变异系数减少了 12.5% 和增加了 1.5%，并且实现了 300 mm 窄行距作业无堵塞。

参 考 文 献

[1] 张冲,吴努,张延化,等.国内外免耕播种技术发展现状及趋势[J].江苏农业科学,2018,46(16):1-5.
ZHANG Chong,WU Nu,ZHANG Yanhua,et al. Development status and trend of no-tillage sowing technology at home and abroad [J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2018,46(16):1-5. (in Chinese)

[2] 贾洪雷,陈忠亮,马成林,等.北方旱作农业区耕作体系关键技术[J].农业机械学报,2008,39(11):59-63.
JIA Honglei,CHEN Zhongliang,MA Chenglin,et al. Key technologies for the tillage system in area of dry farming of northern China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2008,39(11):59-63. (in Chinese)

[3] CHEN Ying,TESSIER S,IRVINE B. Drill and crop performances as affected by different drill configurations for no-till seeding [J]. Soil and Tillage Research,2004,77(2):147-155.

[4] 林静,李宝筏,李宏哲.阿基米德螺线型破茬开沟和切拨防堵装置的设计与试验[J].农业工程学报,2015,31(17):10-19.
LIN Jing, LI Baofa, LI Hongzhe. Design and experiment of archimedes spiral type stubble breaking ditching device and stubble breaking anti blocking device[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(17):10-19. (in Chinese)

[5] 林静,李博,李宝筏,等.阿基米德螺线型缺口圆盘破茬刀参数优化与试验[J/OL].农业机械学报,2014,45(6):118-124.
LIN Jing, LI Bo, LI Baofa, et al. Parameter optimization and experiment on archimedes spiral type of gap cutting disc[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(6):118-124. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20140619&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.06.019. (in Chinese)

[6] 张守勤,马成林,马旭,等.精密播种单体仿形机构的计算机仿真[J].农业工程学报,1994,10(1):50-55.
ZHANG Shouqin, MA Chenglin, MA Xu, et al. Computer simulation of precision seeding monomer copying mechanism[J]. Transactions of the CSAE,1994,10(1):50-55. (in Chinese)

[7] 孙福辉,封俊,胡鸿烈.单体仿形压轮式播种单组结构的模拟计算[J].中国农业大学学报,1998,3(5):68-72.
SUN Fuhui,FENG Jun,HU Honglie. Simulation calculation of single body shaped pressure wheel sowing single group structure [J]. Journal of China Agricultural University,1998,3(5):68-72. (in Chinese)

[8] 李复辉,杜瑞成,刁培松,等.舵轮式玉米免耕精量施肥播种机设计与试验[J/OL].农业机械学报,2013,44(增刊1):33-38.
LI Fuhui, DU Ruicheng, DIAO Peisong, et al. Design and experiment of helm-shaped no-tillage precision fertilization planter for corn[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(Supp. 1):33-38. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=2013s107&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.007. (in Chinese)

[9] 孙伟,吴建民,黄晓鹏,等.2BFM-5型山地免耕播种机的设计与试验[J].农业工程学报,2011,27(11):26-31.
SUN Wei,WU Jianmin, HUANG Xiaopeng, et al. Design and field experiments of 2BFM-5 hilly no-tillage seeder[J]. Transactions of the CSAE,2011,27(11):26-31. (in Chinese)

[10] 郑亭,樊高琼,王秀芳,等.耕作方式、播深及覆土对机播套作小麦麦苗素质的影响[J].农业工程学报,2011,27(5):164-168.
ZHENG Ting, FAN Gaoqiong, WANG Xiufang, et al. Effect of tillage management, sowing depth and soil-covering on the seedlings quality of mechanical sowing wheat under intercropping condition[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5):164-168. (in Chinese)

[11] 杨丽,张瑞,刘全威,等.防堵和播深控制机构提高玉米免耕精量播种性能[J].农业工程学报,2016,32(17):18-23.
YANG Li, ZHANG Rui, LIU Quanwei, et al. Row cleaner and depth control unit improving sowing performance of maize no-till precision planter[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(17):18-23. (in Chinese)

[12] 王庆杰,李洪文,何进,等.凹形圆盘式玉米垄作免耕播种机的设计与试验[J].农业工程学报,2011,27(7):117-122.
WANG Qingjie, LI Hongwen, HE Jin, et al. Design and experiment on concave disc type maize ridge-till and no-till planter [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7):117-122. (in Chinese)

[13] 郑嘉鑫.大豆精密播种机种沟构建技术及开沟装置研究[D].长春:吉林大学,2017.
ZHENG Jiaxin. Furrow construction technology and furrowing machine for soybean precision planters[D]. Changchun:Jilin University, 2017. (in Chinese)

[14] 张守勤,胡树荣,马成林.精密播种单体的动力学分析[J].农业机械学报,1984,12(4):26-33.
ZHANG Shouqin, HU Shurong, MA Chenglin. The dynamic analysis of the precision drill unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1984, 12(4): 26-33. (in Chinese)

[15] FALLAHI S, RAPUFAT M H. Row-crop planter attachments in a conservation tillage system: a comparative study[J]. Soil &Tillage Research,2008,98(1):27-34.

[16] AHMAD F, DING W, DING Q, et al. Forces and straw cutting performance of double disc furrow opener in no-till paddy soil [J]. Plos One,2015,10(3):e0119648.

[17] KARAYEL D, ÖZMERZI A. Evaluation of three depth-control components on seed placement accuracy and emergence for a precision planter[J]. Applied Engineering in Agriculture,2008, 24(3):271-276.

[18] CANAKC M, KARAYELD,TOPAKCI M, et al. Performance of a no-till seeder under dry and wet soil conditions[J]. Applied Engineering in Agriculture,2009, 25(4):459-465.

[19] 贾洪雷,郑嘉鑫,袁洪方,等.仿形滑刀式开沟器设计与试验[J].农业工程学报,2017,33(4):16-24.
JIA Honglei, ZHENG Jiaxin, YUAN Hongfang, et al. Design and experiment of profiling sliding-knife opener[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(4): 16-24. (in Chinese)

[20] 张瑞. 一年两熟地区麦茬地玉米免耕播种播深控制机构的研究[D]. 北京：中国农业大学，2016.
ZHANG Rui. Study on precision depth-control mechanism of corn no-till planter in double-cropping area[D]. Beijing：China Agricultural University，2016.（in Chinese）
[21] 贾洪雷，朱龙图，黄东岩，等. 基于 Flex 传感器的免耕播种机播深自动控制系统[J]. 吉林大学学报，2012，42(1)：166－175.
JIA Honglei，ZHU Longtu，HUANG Dongyan，et al. Automatic control system of sowing depth for no-till planter based on Flex sensor[J]. Journal of Jilin University，2012，42(1)：166－175.（in Chinese）
[22] 王汉羊，陈海涛，纪文义. 2BMFJ－3 型麦茬地免耕精播机防堵装置[J/OL]. 农业机械学报，2013，44(4)：64－70.
WANG Hanyang，CHEN Haitao，JI Wenyi. Anti-locking mechanism of type 2BMFJ－3 no-ill precision planter for wheat stubble fields[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2013，44(4)：64－70. http：//www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no＝20130412&flag＝1. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2013.04.012.（in Chinese）
[23] 陈海涛，查韶辉，顿国强，等. 2BMFJ 系列免耕精量播种机清秸装置优化与试验[J/OL]. 农业机械学报，2016，47(7)：96－102.
CHEN Haitao，ZHA Shaohui，DUN Guoqiang，et al. Optimization and experiment of cleaning device of 2BMFJ type no-till precision planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(7)：96－102. http：//www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no＝20160714&flag＝1. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.014.（in Chinese）
[24] 顿国强. 大垄密植原茬地免耕精量播种机关键技术研究[D]. 哈尔滨：东北农业大学，2013.
DUN Guoqiang. Key technology research of no-tillage precision planter on grand ridge planting with original stubble[D]. Harbin：Northeast Agricultural University，2013.（in Chinese）
[25] 哈尔滨工业大学理论力学教研室. 理论力学(Ⅱ)[M]. 北京：高等教育出版社，2009.
[26] 侯守印，陈海涛. 立式轴流大豆育种脱粒机参数优化[J]. 农业工程学报，2012，28(5)：19－25.
HOU Shouyin，CHEN Haitao. Parameters optimization of vertical axial flow thresher for soybean breeding[J]. Transactions of the CSAE，2012，28(5)：19－25.（in Chinese）
[27] GB/T 20865—2007　免耕施肥播种机[S]. 2007.

（上接第 35 页）

[19] SANDLER M，HOWARD A，ZHU M，et al. MobileNetV2：inverted residuals and linear bottlenecks[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition，2018：4510－4520.
[20] SIMONYAN K，ZISSERMAN A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition[J]. arXiv preprint arXiv：1409.1556，2014.
[21] YU F，KOLTUN V，FUNKHOUSER T A. Dilated residual networks[C]//CVPR，2017，2：3.
[22] 孙俊，何小飞，谭文军，等. 空洞卷积结合全局池化的卷积神经网络识别作物幼苗与杂草[J]. 农业工程学报，2018，34(11)：159－165.
SUN Jun，HE Xiaofei，TAN Wenjun，et al. Recognition of crop seedling and weed recognition based on dilated convolution and global pooling in CNN[J]. Transactions of the CSAE，2018，34(11)：159－165.（in Chinese）
[23] MEHTA S，RASTEGARI M，CASPI A，et al. ESPNet：efficient spatial pyramid of dilated convolutions for semantic segmentation[J]. arXiv preprint arXiv：1803.06815，2018.
[24] XU B，WANG N，CHEN T，et al. Empirical evaluation of rectified activations in convolutional network[J]. arXiv preprint arXiv：1505.00853，2015.
[25] HINTON G E，SRIVASTAVA N，KRIZHEVSKY A，et al. Improving neural networks by preventing co-adaptation of feature detectors[J]. Computer Science，2012，3(4)：212－223.
[26] IOFFE S，SZEGEDY C. Batch normalization：accelerating deep network training by reducing internal covariate shift[J]. arXiv preprint arXiv：1502.03167，2015.
[27] HOWARD A G，ZHU M，CHEN B，et al. Mobilenets：efficient convolutional neural networks for mobile vision applications[J]. arXiv preprint arXiv：1704.04861，2017.
[28] ABADI M，BARHAM P，CHEN J，et al. Tensorflow：a system for large-scale machine learning[C]//OSDI，2016，16：265－283.
[29] PEZZEMENTI Z，TABOR T，HU P，et al. Comparing apples and oranges：off-road pedestrian detection on the national robotics engineering center agricultural person-detection dataset[J]. Journal of Field Robotics，2018，35(4)：545－563.
[30] SHRIVASTAVA A，GUPTA A，GIRSHICK R. Training region-based object detectors with online hard example mining[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition，2016：761－769.
[31] DOLLÁR P，WOJEK C，SCHIELE B，et al. Pedestrian detection：an evaluation of the state of the art[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence，2012，34(4)：743－761.