doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.013

丘陵地区刚性镇压轮性能仿真与试验

刘宏俊　韩济远　陈佳奇　吕金庆　赵淑红
(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 东北丘陵地区镇压作业时,不同地形及地势土壤含水率差异较大,若要实现较优的镇压效果,需要与之相对应的载荷和前进速度相配合。为了寻找丘陵地区刚性镇压轮作业的最优水平组合,首先在基于准静态原则的镇压与土壤机理模型基础中加入速度变量建立动态镇压与土壤的机理模型,寻求土壤含水率、载荷、前进速度与土壤下陷量、作业阻力的关系,然后基于 SPH 算法在 LS-DYNA 软件中构建刚性镇压轮与土壤的三维仿真模型,模拟刚性镇压轮与土壤相互作用的动态过程。将数值模拟方法与中心面复合响应试验方案相结合进行仿真试验,仿真试验获得土壤含水率、载荷、前进速度与土壤下陷量、作业阻力的数学回归模型,在此基础上,采用 R 语言中的蚁群算法对数学回归模型进行多目标优化,获得 Pareto 最优解集,并从中选出含水率(12±0.1)%、(14±0.1)%、(16±0.1)%、(18±0.1)%、(20±0.1)%对应的 5 组最优解。进行土槽试验对最优解进行验证,试验结果与预测结果误差均小于 12%,表明了试验优化结果的可靠性,同时也验证了仿真的可行性。

关键词: 丘陵地区; 刚性镇压轮; SPH 算法; 下陷量; 作业阻力
中图分类号: S222.23　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2018)11-0114-09

Performance Simulation and Experiment on Rigid Press Wheel for Hilly Area

LIU Hongjun　HAN Jiyuan　CHEN Jiaqi　LÜ Jinqing　ZHAO Shuhong
(*College of Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: For the repression of hilly area in Northeast China, the soil moisture content of different topography is different and the topography varies greatly. To achieve better repression effect, the corresponding load and forward speed need to be matched. In order to find the optimal level combination of rigid crushing wheel operation in hilly areas, velocity variables were firstly added to establish a dynamic repression and soil mechanism model based on quasi-static principle of repressive and soil mechanism model, and seek soil moisture content, load and advancement. The relationship between speed and soil subsidence and working resistance was then obtained based on SPH algorithm to construct a three-dimensional simulation model of rigid repression wheel and soil in LS-DYNA software to simulate the dynamic process of interaction between rigid repressing wheel and soil. The numerical simulation method was combined with the central surface composite response test scheme to carry out the simulation test. The mathematical regression model of soil water content, load, forward speed, soil subsidence and working resistance was obtained by simulation test. On this basis, the R language was used. The ant colony algorithm performed multi-objective optimization on the mathematical regression model to obtain the Pareto optimal solution set, and the water contents of (12±0.1)%, (14±0.1)%, (16±0.1)%, (18±0.1)% and (20±0.1)% were selected to find the five optimal solutions. The soil trough test was carried out to verify the optimal solution. The error between the test result and prediction result was less than 12%, which indicated the reliability of test optimization result and also verified the feasibility of simulation. The research result can provide theoretical and data basis for the research of planter and supporting technology in hilly area.

Key words: hilly area; rigid press wheel; SPH method; sinkage; working resistance

收稿日期: 2018-05-30　修回日期: 2018-07-20
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700705)
作者简介: 刘宏俊(1990—),男,博士生,主要从事保护性耕作触土部件研究,E-mail: langji7tianya@163.com
通信作者: 赵淑红(1969—),女,教授,博士生导师,主要从事田间农业机械及力学特性研究,E-mail: shhzh091@sina.com

0　引言

在丘陵地区镇压作业时，由于地块小，坡度大，在保证播种机平稳性的前提下[1-2]，对镇压要求较高。丘陵地区的土壤条件差异较大，如地势高的土壤含水率与地势低的土壤含水率差异明显；阳面坡地与阴面坡地的土壤含水率差异较大[3]。当土壤含水率变化时，需要控制载荷和加载时间（前进速度），达到较优的刚性镇压轮压实效果。载荷、前进速度和土壤含水率共同影响刚性镇压轮压实效果。由上述可知，在研究丘陵地区刚性镇压轮与土壤相互作用时，不能像平原地区采用准静态原则研究镇压与土壤相互作用机理[4-5]，而应该加入速度变量，研究动态作用机理。本文对丘陵地区镇压对应的动态下陷量进行机理研究，完善适应于丘陵地区的镇压技术理论，逐步完善提升地区配套农业机械技术及装备，缩短与平原地区配套农业机械技术水平的差距[6-7]。

农业机械关键部件的研究多采用传统试验法（田间试验方法和土槽试验法）[8-10]。随着土壤本构模型及光滑粒子流体动力学（SPH）算法的日益完善[11-14]，基于 SPH 算法的仿真试验法在农业机械中的触土部件与土壤的相互作用研究中越来越受到重视[15-18]。上述研究表明，SPH 算法应用于刚性镇压轮与土壤的相互作用的研究具有可行性。

本文通过机理分析确定丘陵地区的动态土壤下陷量与土壤条件、工作参数的关系，并在此基础上建立刚性镇压轮与土壤相互作用的三维动态有限元模型，采用 SPH 算法研究刚性镇压轮与土壤的动态过程。以土壤含水率、载荷和前进速度为试验因素，选择下陷量和作业阻力为试验指标，旨在揭示丘陵地区刚性镇压轮-土壤的工作机理，以期为丘陵地区播种机及配套技术的研究提供理论及依据。

1　丘陵地区镇压作业机理分析

1.1　动态下陷量机理分析

镇压过程中土壤的力学性质和变形过程较为复杂，目前对某些参数（流动性、时间效应及应力应变等）的综合分析及相互作用关系的研究还不完善，而且丘陵山区条件下的相互作用研究鲜有报道。由于丘陵地区的特殊地形，镇压作业时土壤的物理性质、载荷、速度相互作用是个动态的过程，动态过程中刚性镇压轮下陷量的机理模型还未有人提出，而目前研究该过程多是在一定的假设条件下进行分析推算或由试验方法测得，往往是一种准静态预测。本文在基于准静态原则的镇压与土壤的机理模型中加入速度变量，建立动态镇压与土壤的机理模型。

图 1 中，z_1 为刚性镇压轮的最大下陷量；z_0 为轮边缘 D 点对应的镇压轮下陷量；$\mathrm{d}Q$ 为土壤作用在轮边缘上某一微小段的抗压反作用力；x 为 D 点的 x 轴坐标值；x_1 为 C 点的 x 轴坐标值；$\mathrm{d}x$ 为 D 点对应的微小段（弧长为 s）沿 x 轴方向的微位移，即 $\mathrm{d}s = \cos\theta_0 \mathrm{d}x$；$\mathrm{d}z$ 为 D 点对应的微小段（弧长为 s）沿 z 轴方向的微位移，即 $\mathrm{d}s = \sin\theta \mathrm{d}z$；$\overset{\frown}{CDA}$ 为触土面；θ_0 为下陷量 z_1 对应的圆心角；θ 为下陷量 z_0 对应的圆心角；v_1 为 D 点随圆心点 O_1 的平动速度（牵连运动）；v_2 为 D 点沿圆边缘的切线运动速度（相对运动）；v_{2x} 为 v_2 沿 x 轴的速度；v_{2z} 为 v_2 沿 z 轴的速度；W 为刚性镇压轮施加给土壤的载荷（重力和外载荷）；v 为前进速度；ω 为角速度。刚性镇压轮的运动可近似看作纯滚动，即 $v = \omega r$，r 为刚性镇压轮的半径。

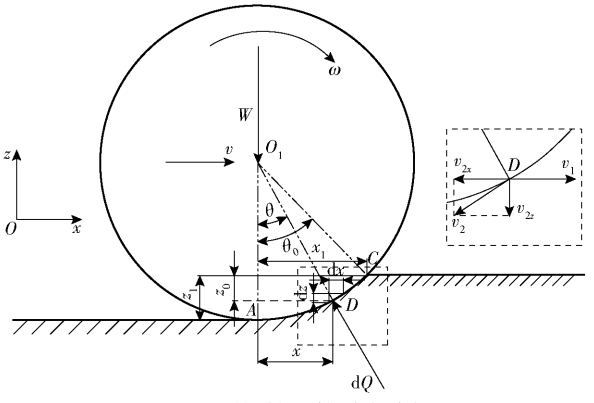


图 1　刚性镇压轮受力分析

Fig. 1　Force analysis of rigid press wheel

$\mathrm{d}Q$ 为 $\overset{\frown}{CDA}$ 触土面 D 点对应的微小段的抗压反作用力，即

$$\mathrm{d}Q = pB\mathrm{d}s \tag{1}$$

式中　B——刚性镇压轮宽度

p——土壤抗压强度

刚性镇压轮受到的载荷与土壤的总抗压反作用力大小相等，则

$$W = \int \mathrm{d}Q\cos\theta_0 = \int pB\mathrm{d}s\cos\theta_0 \tag{2}$$

又因 $\mathrm{d}s = \cos\theta_0 \mathrm{d}x$，可求出 $\overset{\frown}{CDA}$ 触土面的总载荷为

$$W = \int_0^{x_1} pB\mathrm{d}x \tag{3}$$

由 Bekker 经验公式确定土壤抗压强度 p 与下陷量 z_0 关系方程为

$$p = kz_0^n \tag{4}$$

式中　k——土壤变形模量　　n——土壤变形指数

土壤变形模量 k 与速度 v_{2z} 的关系方程为[19]

$$k = k_0 v_{2z}^m \tag{5}$$

式中 k_0——土壤变形静态模量

m——速度变化指数

由基点法及三角形相似定理得

$$v_{2z} = v\frac{x}{r} \tag{6}$$

联立式(3)~(6)可得

$$W = \int_0^{x_1} k_0 \left(v\frac{x}{r}\right)^m z_0^n B\mathrm{d}x \tag{7}$$

式(7)中有两个变量:x 和 z_0。式(7)积分前,需将 x 替换 z_0。由图 1 的几何关系找出 x 与 z_0的关系式为

$$x^2 = r^2 - [r - (z_1 - z_0)]^2 \tag{8}$$

简化式(8)可得

$$x^2 = 2r(z_1 - z_0) - (z_1 - z_0)^2 \tag{9}$$

下陷量差值$(z_1 - z_0)$相对刚性镇压轮直径 $2r$ 较小,一般忽略不计[4],简化式(9)可得

$$x^2 = 2r(z_1 - z_0) \tag{10}$$

对式(10)进行变换得

$$z_0 = z_1 - \frac{x^2}{2r} \tag{11}$$

将式(11)代入式(7)中,可得

$$W = \int_0^{x_1} k_0 \left(v\frac{x}{r}\right)^m \left(z_1 - \frac{x^2}{2r}\right)^n B\mathrm{d}x \tag{12}$$

将 $\left(z_1 - \frac{x^2}{2r}\right)^n$ 展开成级数 $z_1^n - nz_1^{n-1}\frac{x^2}{2r} + \cdots$,并取其前两项,于是式(12)成为

$$W = \int_0^{x_1} k_0 \left(v\frac{x}{r}\right)^m \left(z_1^n - nz_1^{n-1}\frac{x^2}{2r}\right)B\mathrm{d}x \tag{13}$$

对式(13)进行积分可得

$$\frac{r^m W}{v^m k_0 B} = \frac{x_1^{m+1}}{m+1}z_1^n - \frac{n}{2r}\frac{x_1^{m+3}}{m+3}z_1^{n-1} \tag{14}$$

由式(11)可知,当 $z_0 = 0$ 时,x_1与 z_1的关系式为

$$x_1 = \sqrt{2rz_1} \tag{15}$$

将式(15)代入式(14)得

$$z_1 = \left[\frac{W}{2^{\frac{m+1}{2}} v^m k_0 B r^{\frac{1-m}{2}}\left(\frac{1}{m+1} - \frac{n}{m+3}\right)}\right]^{\frac{2}{2n+m+1}} \tag{16}$$

由式(16)可知,刚性镇压轮的结构参数、土壤条件、前进速度和载荷共同影响土壤下陷量。实际镇压状态时,不同下陷情况下,刚性镇压轮与土壤的相互作用及运动趋势均不确定,而土壤作用模型可以获得之间的关系,前进速度越大,下陷越小,反之相反。载荷越大,则下陷量越大,反之相反。土壤相关参数对下陷量有影响,而具体的影响规律有必要通过试验进一步确定。

1.2 作业阻力机理分析

镇压作业时,由刚性镇压轮与土壤在接触处变形和摩擦而产生的力为作业阻力[20-21],其由 3 部分组成:刚性镇压轮压实土壤过程中前进阻力;推移土壤,形成波浪状凸起所需的推土阻力;土壤粘附在刚性镇压轮表面上所需的粘附阻力。由于形成土壤粘附的因素较多且复杂,无法用合适的数学公式表达,同时仿真模拟时无法模拟土壤粘附,在研究过程中重点分析前进阻力和推土阻力。由文献[22]和图 1 可确定前进阻力 F_1和推土阻力 F_2为

$$F_1 = (K_{c1} + BK_\gamma)\frac{z_1^{n+1}}{n+1} \tag{17}$$

$$F_2 = \frac{B\sin(\varphi + 1 - \theta_0)}{2\sin(1-\theta_0)\cos\varphi}(2zc_1K_{c_1} + \gamma z^2K_\gamma) + \frac{\pi l^3\gamma(90^\circ - \varphi)}{540} + \frac{c_1\pi l^2}{180} + c_1l^2\tan\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) \tag{18}$$

其中

$$K_{c_1} = (N_{c_1} - \tan\varphi)\cos^2\varphi$$

$$K_\gamma = \left(\frac{2N_\gamma}{\tan\varphi} + 1\right)\cos^2\varphi$$

$$l = z_1\tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$$

式中 N_{c_1}、N_γ——太沙基承接能力系数

φ——土壤内摩擦角

c_1——土壤内聚力

γ——土壤密度

刚性镇压轮镇压过程中的作业阻力 F_3为

$$F_3 = F_1 + F_2 \tag{19}$$

由式(16)、(17)可知,前进阻力 F_1与结构参数、土壤条件、前进速度和载荷有关;由式(18)可知,推土阻力 F_2主要与土壤条件和结构参数有关。故确定前进阻力 F_1和推土阻力 F_2的合力(作业阻力 F)与结构参数、土壤条件、前进速度和载荷等均有关系,而具体的影响规律有必要通过试验进一步研究。

2 刚性镇压轮动力学模型建立

刚性镇压轮在丘陵山区的市场占有率很高,同时由于本文的丘陵地区镇压作业机理分析是基于刚性镇压轮建立的,为了保证研究的连贯性且具有代表性,本文选择刚性镇压轮作为研究对象。

2.1 土壤本构模型

针对东北丘陵地区黑壤土的特性,仿真采用 LS-DYNA 中的 MAT147(MAT_FHWA_SOIL)土壤材料模型。该土壤材料模型采用修正的 Mohr Coulomb 屈服准则,其应力不变量等式表示为

$$-P\sin\varphi+\sqrt{J_2K(\theta)^2+\alpha^2\sin^2\varphi}-c\cos\varphi=0 \tag{20}$$

式中　P——静水压力

J_2——应力偏张量的第二不变量

$K(\theta)$——应力罗德角函数

α——修正后屈服面和标准 Mohr－Coulomb 屈服面之间贴近程度的参数

c——黏聚力

将土壤视为各向同性材料，及各部分的含水率、坚实度、密度等物理参数一致。为了解土壤条件对丘陵地区镇压轮的影响规律，选择 3 种典型东北地区土壤。东北丘陵地区黑壤土的主要参数如表 1 所示，其余参数采用软件默认值。

表 1　土壤材料参数

Tab. 1　Parameters of soil

参数	数值		
土壤含水率/%	12	16	20
土粒相对密度	2.56	2.64	2.79
体积模量/Pa	2.8×10^6	3.1×10^6	3.7×10^6
剪切模量/Pa	2.5×10^6	2.7×10^6	3.1×10^6
内聚力/Pa	2 100	3 100	4 300
内摩擦角/rad	0.316	0.406	0.426
土壤密度/(kg·m^{-3})	1 642	1 754	1 874

2.2　刚性镇压轮-土壤相互作用有限元模型

2.2.1　刚性镇压轮有限元模型

为了控制仿真时间等问题，忽略影响仿真精度较弱的部位，简化刚性镇压轮物理模型为中空圆柱体（直径为 300 mm，宽度为 210 mm）。在 LS－PrePost 软件直接进行三维建模，并采用 sweep 方式对其进行网格划分，其网格单元类型为 Solid164，如图 2 所示。刚性镇压轮材料参数：密度为 7 800 kg/m^3；弹性模量为 2.1×10^{11} Pa；泊松比为 0.3。

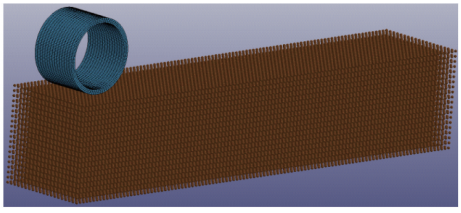


图 2　刚性镇压轮-土壤有限元模型

Fig. 2　Finite element model of wheel and soil

2.2.2　土壤有限元模型

在 LS－PrePost 软件中直接按土壤模型长度为 1 200 mm、宽度为 400 mm、高度为 400 mm 的尺寸生成 SPH 土壤粒子，临近粒子之间的距离为 10 mm，如图 2 所示。

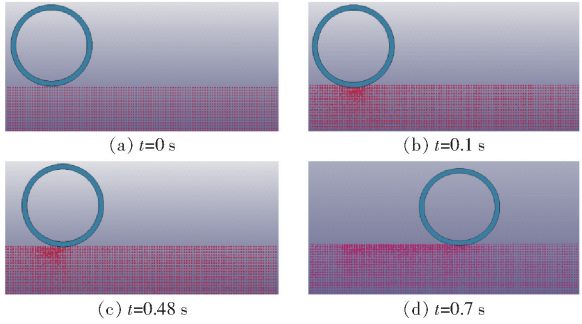
2.3　边界条件

边界约束：约束模型中土壤底部的全部自由度；约束刚性镇压轮除绕轴转动以外的所有旋转自由度，同时仅约束刚性镇压轮横向移动自由度；整个模型加入重力，重力加速度为 9.8 m/s^2。接触算法为 contact-automatic-nodes-to-surface。载荷加载：按照仿真要求，对镇压轮施加载荷及前进速度。LS－PrePost 软件生成相应的 K 文件，然后递交给 MPP LS－DYNA R8.1.0 处理器求解，生成求解报告。

2.4　镇压作业过程分析

镇压轮在不同工况下，虽然指标数值不同，但是状态及规律相类似[23－24]，故本文以前进速度为 3 km/h、载荷为 600 N、土壤含水率为 12% 仿真模型为例，重点分析刚性镇压轮与土壤相互作用的动态过程。

图 3 为不同时刻刚性镇压轮与土壤相互作用状态。由图 3 中的整个运动过程可知，不同深度处土壤竖向应力均有所增加，但不同土壤深度处，土壤竖向应力相差较大，且振幅的变化对表层土壤的竖向应力影响较大，而对深层土壤的竖向应力影响较小。



(a) t=0 s　(b) t=0.1 s　(c) t=0.48 s　(d) t=0.7 s

图 3　刚性镇压轮镇压土壤动态过程

Fig. 3　Soil dynamic process of wheel

图 4 为下陷量的时间过程曲线。由图 4 可知，当载荷一定时，只要时间足够长，下陷量就能达到最大值，同时相比运动状态时，下陷量更大。由图 3b 到图 3d 过程中，刚性镇压轮的下陷量降低。由图 3 的定性分析和图 4 的定量分析确定前进速度影响下陷量。图 4 中包括 3 阶段：①a_1 阶段为静压阶段，土壤被向下和向两侧挤压，发生土壤变形，此阶段下陷量先陡增，后期平稳，这与平板试验的结果相符合，该阶段可证明仿真试验结果的可靠性。②b_1 阶段属于静压稳定状态，土壤阻力和载荷及重力几乎相等。③c_1 阶段为刚性镇压轮运动阶段，在 c_1 阶段的初始阶段，由于前两阶段的下陷，造成轮子下方的土壤变硬。由 b_1 阶段向 c_1 阶段过渡时，在给定刚性镇压轮前进速度后，刚性镇压轮运动被向上抬起，故刚性镇压轮向上运动更大，进而土壤下陷量降低。在 c_1 阶段的中后期，刚性镇压轮运动趋于相对平稳，但相比

于 b_1 阶段,下陷量围绕某一值上下波动,出现这种现象的主要原因是镇压作业时,土壤阻力发生变化,造成刚性镇压轮激振,这与实际情况相符合。在 0.55 ~ 1.2 s,刚性镇压轮向前运动,轮子下方的土壤发生挤压变形,后方的土壤发生塑性变形,对距离土壤表面越远的土壤作用越轻。土壤向斜向下方挤压土壤,挤压的土壤发生变形,变形量较大。

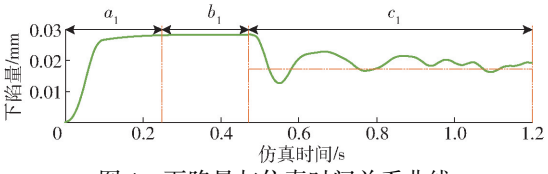


图 4 下陷量与仿真时间关系曲线

Fig. 4 Relationship curve between sinkage and simulation time

3 多目标优化试验

3.1 中心复合试验设计

借助数值模拟法研究试验因素(前进速度、载荷和土壤含水率)对试验指标(土壤下陷量和作业阻力)的影响规律。为了保证试验具有很好的序贯性、避免水平增加带来的复杂性和减少试验误差,采用中心复合表面试验设计(Central composite face-centered design,CCF)方法优化设计试验方案。基于 CCF 方案的编码值如表 2 所示,每组试验重复 3 次取平均值,在 $P=0.05$ 水平进行 F 检验。

表 2 因素编码

Tab. 2 Experimental factors and codes

编码	因素		
	载荷 W/N	前进速度 v/(km·h^{-1})	土壤含水率 σ/%
1	800	7	20
0	600	5	16
-1	400	3	12

3.2 中心复合试验结果与分析

按照试验方案安排仿真试验,仿真试验结果如表 3 所示。其中 x_1、x_2、x_3 分别表示载荷 W、前进速度 v 和土壤含水率 σ 编码值。

3.2.1 回归方程

采用 Design-Expert 8.0.5b 软件对试验数据进行分析,在置信度 $\alpha=0.05$ 下进行 F 检验,将不显著的因素和交互作用的偏平方和及自由度并入剩余平方和后,重新进行分析,保证所有因素都达到显著或极显著水平,得到优化的回归方程

$$z=14.46+5.75x_1+2.69x_2+3.81x_3-2.24x_1x_3+1.76x_2x_3+6.51x_1^2 \quad (21)$$

$$F_3=69.22+10.51x_1+4.49x_2-4.96x_3-3.19x_1x_2-5.44x_1x_3+7.33x_2^2-16.12x_3^2 \quad (22)$$

表 3 试验方案与结果

Tab. 3 Experiment scheme and results

序号	试验因素			土壤下陷量	作业阻力
	x_1	x_2	x_3	z/mm	F_3/N
1	0	0	-1	9.8	52.5
2	0	0	0	13.4	67.1
3	0	1	0	18.3	84.3
4	-1	1	1	25.4	55.4
5	-1	0	0	19.2	56.2
6	-1	-1	-1	7.8	43.5
7	0	0	0	12.2	69.4
8	-1	1	-1	8.3	58.3
9	0	0	0	14.6	72.9
10	1	0	0	26.8	77.8
11	0	0	1	16.4	56.4
12	-1	-1	1	15.4	41.4
13	1	1	1	33.2	61.2
14	1	-1	1	23.6	55.6
15	1	1	-1	27.5	81.5
16	1	-1	-1	22.5	83.8
17	0	-1	0	16.5	71.5

3.2.2 回归方程方差分析

由表 4、5 可知,两指标的回归模型均极显著($P<0.01$),说明所选的模型恰当,试验指标与试验因素之间存在着模型确定关系。同时失拟项均不显著($P>0.1$),说明模型是合适的,没有未加控制因素对指标存在影响,同时模型的拟合效果好。由表 4 中的影响因素显著系数可知,二次项(x_2^2)、交互项(x_1x_2)均不显著($P>0.1$),其他各项均显著或非常显著。从表 5 可以看出,由模型中的影响因素显著系数可知,二次项(x_1^2)、交互项(x_2x_3)均不显著($P>0.1$),其他各项均显著或极显著。

表 4 土壤下陷量回归模型方差分析

Tab. 4 Variance analysis of regression equation for sinkage

项目	平方和	自由度	均方	F	P
模型	811.32	9	90.15	16.96	0.000 6 ***
x_1	330.63	1	330.63	62.22	<0.000 1 ***
x_2	72.36	1	72.36	13.62	0.007 8 ***
x_3	145.16	1	145.16	27.32	0.001 2 ***
x_1x_2	2.1	1	2.1	0.4	0.549 4
x_1x_3	40.05	1	40.05	7.54	0.028 7 **
x_2x_3	24.85	1	24.85	4.68	0.067 4 *
x_1^2	136.59	1	136.59	25.7	0.001 4 ***
x_2^2	6.36	1	6.36	1.2	0.310 3
x_3^2	20.41	1	20.41	3.84	0.090 9 *
残差	37.2	7	5.31		
失拟项	34.32	5	6.86	4.77	0.182 5
纯误差	2.88	2	1.44		
总和	848.52	16			

注:* 表示较显著($0.05<P<0.1$);** 表示显著($0.01<P<0.05$);*** 表示极显著($P<0.01$),下同。

表 5　作业阻力回归模型方差分析

Tab. 5　Variance analysis of regression equation for working resistance

项目	平方和	自由度	均方	F	P
模型	2 686. 46	9	298. 50	13. 46	0. 001 2 ***
x_1	1 104. 60	1	1 104. 60	49. 80	0. 000 2 ***
x_2	201. 60	1	201. 60	9. 09	0. 019 5 **
x_3	246. 02	1	246. 02	11. 09	0. 012 6 **
x_1x_2	81. 28	1	81. 28	3. 66	0. 097 1 *
x_1x_3	236. 53	1	236. 53	10. 66	0. 013 8 **
x_2x_3	6. 30	1	6. 30	0. 28	0. 610 5
x_1^2	19. 06	1	19. 06	0. 86	0. 384 8
x_2^2	181. 61	1	181. 61	8. 19	0. 024 3 **
x_3^2	620. 39	1	620. 39	27. 97	0. 001 1 ***
残差	155. 26	7	22. 18		
失拟项	138. 20	5	27. 64	3. 24	0. 252 5
纯误差	17. 06	2	8. 53		
总和	2 841. 72	16			

3. 2. 3　各因素对试验指标影响规律

因素交互与试验指标之间的关系规律如图 5 所示。由图 5a 可知，在载荷一定时，前进速度与下陷量的关系趋于线性，同时随着前进速度的增加，下陷量增加；在前进速度一定时，下陷量随着载荷的增加，先降低后增加。当载荷较大和前进速度较大时，下陷量较大。当载荷较小和前进速度较小时，下陷量较小。由图 5b 可知，在载荷一定时，土壤含水率与下陷量的关系趋于线性；在土壤含水率一定时，载荷与下陷量的关系也趋于线性。下陷量均随着因素增加而增加。由图 5c 可知，在载荷一定时，当前进速度较小时，前进速度增加，作业阻力增加不明显，而当前进速度超过某一前进速度后，作业阻力增加迅速；在前进速度一定时，载荷对作业阻力影响较明显，随着载荷递增，工作阻力增加。由图 5d 可知，在载荷一定时，当土壤含水率较大或较小，作业阻力较小，而当土壤含水率处于中间水平附近，作业阻力较大。在一定土壤条件下，以一定的载荷压实土壤时，由于土壤中含水率由少增多，土壤下陷量逐渐增加。当土壤中含水率达到某一值时，下陷量最大。

3. 3　基于 R 语言蚁群算法的多目标优化

蚁群算法已经成功应用于若干领域，其中最成功的应用是组合优化问题[25-26]。作为一种全局搜索算法，蚁群算法能够有效地避免局部极优，但对于大空间的多点全局搜索，却不可避免地增加搜索时间。为了使算法能够更好更快的找到问题获得最优解，在其搜索过程中加入针对具体问题的局部搜索算法。

基于 R 语言的蚁群算法对多目标进行优化。采用加权距离法将两个目标方程合并成一个全局方

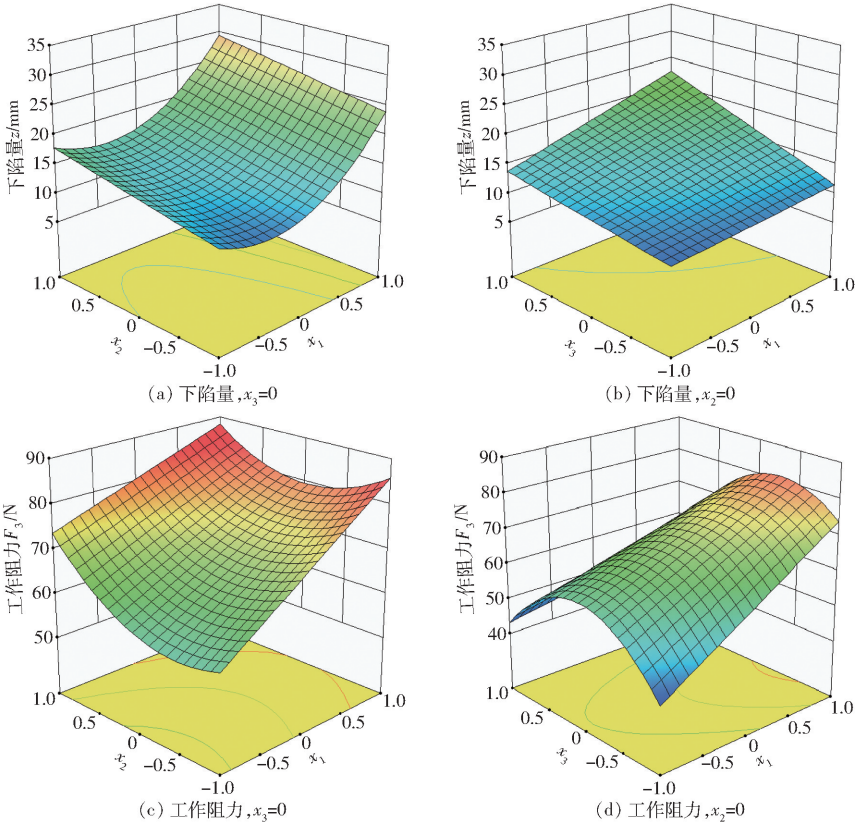


图 5　因素之间的交互作用影响试验指标的响应曲面

Fig. 5　Response surfaces between interactions of factors and experimental indicators

程,具体转换方程 y_1 为

$$y_1 = \mu_1 \frac{|z - t_{1d}|}{t_{1x}} + \mu_2 \frac{|F_3 - t_{2d}|}{t_{2x}} \tag{23}$$

式中 t_{1x}、t_{2x}——第 1、2 项指标最大值与最小值的差值

t_{1d}、t_{2d}——第 1、2 项指标的平均值

μ_1、μ_2——第 1、2 项指标权重

下陷量直接影响出苗率与幼苗生长情况,并且最终影响作物产量;作业阻力直接影响功耗,即作业成本。由此可知,在镇压作业过程中,下陷量是主要考虑指标,而作业阻力是次要考虑指标。根据各指标的重要性及专家经验法,确定下陷量、作业阻力的权重 μ_1、μ_2 分别为 0.75、0.25。

目标函数 $\min(y_1)$

$$\text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant x_1 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant x_2 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant x_3 \leqslant 1 \end{cases}$$

对目标函数进行蚁群算法多目标优化后,获得目标函数之间的权衡曲线,一组非支配解(Pareto 最优解)如图 6 所示。

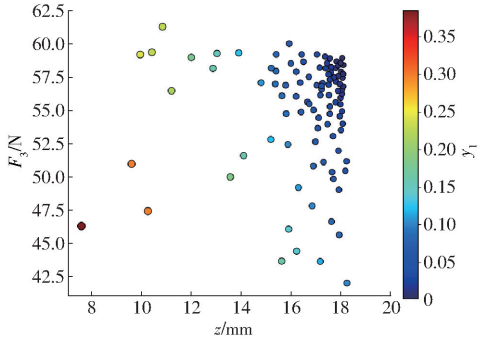


图 6 蚂蚁算法优化后的最优解前沿分布

Fig. 6 Distribution of Pareto front from ant colony algorithm

丘陵地区实际作业时,土壤含水率随着地形及地势改变而改变,属于不可控因素。当土壤含水率改变时,若不改变相应的载荷和前进速度,镇压效果较差。同时土壤含水率的实际变化是一个连续变化的过程,若不是智能镇压系统,则无法实时改变载荷和前进速度,来保证镇压效果。由文献[27]可知,丘陵地区的土壤含水率一般在 12% ~20% 波动。本文将土壤含水率范围分成 5 份,由优化结果得到每个土壤含水率对应的载荷和前进速度,进而保证丘陵地区镇压作业时镇压效果一直处于较优水平。由该原则从 Pareto 最优解集中筛选出土壤含水率为(12 ±0.1)%、(14 ±0.1)%、(16 ±0.1)%、(18 ±0.1)%、(20 ±0.1)% 的 5 组最优解,并将求解时的水平与实际值进行编码转换,得到最优水平组合,如表 6 所示。

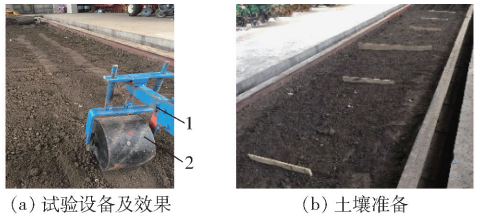
表 6 最优水平合集

Tab. 6 Optimal level set

载荷/N	前进速度/(km·h^{-1})	土壤含水率/%	下陷量/mm	作业阻力/N
483	5.0	12 ±0.1	10.4	59.3
320	3.6	14 ±0.1	11.2	56.4
324	4.1	16 ±0.1	12.8	58.1
302	4.8	18 ±0.1	18.1	53.9
446	4.9	20 ±0.1	17.6	46.6

3.4 试验验证

验证试验在黑龙江省农业机械工程科学研究院的室内土槽中进行,如图 7 所示。试验设备:双向仿形镇压装置[19];刚性镇压轮;TCC-3 型土槽试验车;土槽;六分力测试装置;SC-900 型土壤坚实度仪。试验条件:土壤为典型东北黑土;土壤容重为 1 311 kg/m^3;土壤内摩擦角为 18.1°。



(a) 试验设备及效果 (b) 土壤准备

图 7 土槽试验

Fig. 7 Soil bin tests

1. 双向仿形镇压装置 2. 刚性镇压轮

试验前,按照含水率由小到大依次排列对土槽分段,共 5 段,每段长度为 5 m,如图 7b 所示。在土槽内每段土壤含水率均达到对应表 6 中土壤含水率后,镇压轮按照图 8 的箭头方向进行运动。同时按照表 6 中土壤含水率对应的工作参数进行试验,每组验证试验重复 4 次。试验验证结果与仿真优化结果如图 9 所示。

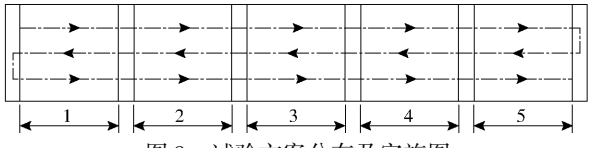


图 8 试验方案分布及实施图

Fig. 8 Distribution and implementation diagram of test plans

由图 9 可知,仿真结果与实测结果相差较小,出现这种现象可能是土槽中的土壤情况更复杂,数值模拟无法完全模拟出来,但是模拟结果的误差均小于 12%,由此表明试验优化结果的可靠性,同时也验证了仿真的可行性。

4 结论

(1)针对丘陵地区镇压作业特点,在传统刚性镇压轮与土壤作用模型的基础上加入前进速度变量,建立刚性镇压轮作业时刚性镇压轮与土壤的动

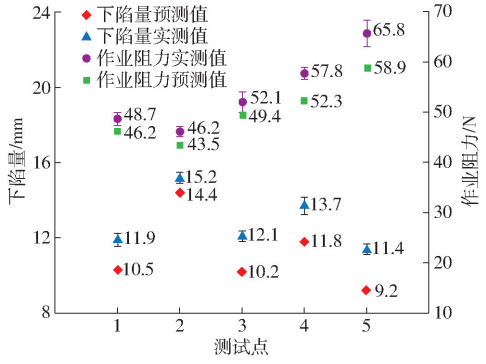


图 9　试验验证图

Fig. 9　Chart of verification test result

态相互作用模型，为研究丘陵地区镇压动态过程中土壤阻力和变形过程提供理论支撑。

(2)采用 SPH 算法建立刚性镇压轮与土壤相互作用的三维动态有限元模型，重点分析刚性镇压轮与土壤的相互作用，预测不同的作业参数对刚性镇压轮作业效果的影响。

(3)选择土壤含水率、载荷、前进速度为试验因素，选择下陷量和作业阻力为试验指标，采用中心复合表面试验方案获得回归模型，然后采用蚁群算法对回归模型进行多目标优化，获得不同含水率下的最优水平组合，然后进行土槽试验对最优水平组合加以验证，对比结果表明试验结果合理。

参　考　文　献

1　罗锡文. 对发展丘陵地区农业机械化的思考[J]. 农机科技推广, 2011(2): 17 - 20.

2　陈伟, 朱继平, 陈小兵, 等. 我国坡耕地农业机械化发展现状[J]. 农机化研究, 2017, 39(5): 1 - 5.
CHEN Wei, ZHU Jiping, CHEN Xiaobing, et al. The current situation of the development of agricultural mechanization of slope-farmland in our country[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(5): 1 - 5. (in Chinese)

3　宫兴龙, 付强, 王斌, 等. 丘陵-平原-湿地复合区降雨径流数值模型[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 142 - 149. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20161119&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.019.
GONG Xinglong, FU Qiang, WANG Bin, et al. Numerical model of rainfall runoff in hills - plain - wetland compound area[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 142 - 149. (in Chinese)

4　庄继德. 计算汽车地面力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.

5　丁亮, 高海波, 邓宗全, 等. 基于应力分布的月球车轮地相互作用地面力学模型[J]. 机械工程学报, 2009, 45(7): 49 - 55.
DING Liang, GAO Haibo, DENG Zongquan, et al. Terramechanics model for wheel-terrain interaction of lunar rover based on stress distribution[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(7): 49 - 55. (in Chinese)

6　潘彪, 田志宏. 中国农业机械化高速发展阶段的要素替代机制研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 1 - 10.
PAN Biao, TIAN Zhihong. Mechanism of factor substitution during rapid development of China's agricultural mechanization[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(9): 1 - 10. (in Chinese)

7　罗锡文. 补短板促全面提升我国农业机械化发展水平[J]. 现代农业装备, 2017(5): 7 - 12.
LUO Xiwen. Improve the weakness, promote the comprehensive, raise the level of agricultural mechanization in China[J]. Modern Agricultural Equipment, 2017(5): 7 - 12. (in Chinese)

8　佟金, 张清珠, 常原, 等. 肋条型仿生镇压辊减粘降阻试验[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 135 - 140. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20140421&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.021.
TONG Jin, ZHANG Qingzhu, CHANG Yuan, et al. Reduction of soil adhesion and traction resistance of ridged bionic press rollers [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 135 - 140. (in Chinese)

9　刘庆福, 栾光辉. 垄上镇压式玉米精密播种机保墒抗旱播种试验[J]. 农业机械学报, 2007, 38(4): 197 - 198.

10　邱立春, 李宝筏. 自激振动深松机减阻试验研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(6): 72 - 76.
QIU Lichun, LI Baofa. Experiment study on the self-excited vibration subsoiler for reducing draft force[J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(6): 72 - 76. (in Chinese)

11　任德志, 白雪卫, 刘德军, 等. 玉米秸秆皮瓤分离碾压揭皮辊设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 93 - 99. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20180111&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.011.
REN Dezhi, BAI Xuewei, LIU Dejun, et al. Design and test on roller-teeth husking roller in rind-pith separation of corn stalks [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 93 - 99. (in Chinese)

12　佟金, 张清珠, 常原, 等. 仿生镇压辊减粘降阻的有限元分析与试验验证[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 85 - 92. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20140714&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.07.014.
TONG Jin, ZHANG Qingzhu, CHANG Yuan, et al. Finite element analysis and experimental verification of bionic press roller in reducing adhesion and resistance[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 85 - 92. (in Chinese)

13　杨望, 李晓月, 王蓉蓉, 等. 木薯块根拔起的最大应力数值模拟及试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 58 - 64.

YANG Wang, LI Xiaoyue, WANG Rongrong, et al. Numerical simulation test of maximum stress of tuber in cassava lifting[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(6): 58 - 64. (in Chinese)

14 钟江, 蒋建东, 姜涛, 等. 基于光滑粒子流体动力学仿真的板结土壤深旋耕技术[J]. 机械工程学报, 2010, 46(19): 63 - 69.
ZHONG Jiang, JIANG Jiandong, JIANG Tao, et al. Deep-tillage rotavator technology based on smoothed particle hydrodynamics simulation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46 (19): 63 - 69. (in Chinese)

15 王景立. 精密播种机覆土与镇压过程对种子触土后位置控制的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
WANG Jingli. The research of position control after seed contacting soil in the process of soil covering and rolling with precision seeder[D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)

16 康建明, 李树君, 杨学军, 等. 基于多体动力学的圆盘式开沟机虚拟仿真与功耗测试[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 57 - 63. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20170108&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.008.
KANG Jianming, LI Shujun, YANG Xuejun, et al. Virtual simulation and power test of disc type ditcher based on multi-body dynamics[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 57 - 63. (in Chinese)

17 卢彩云, 何进, 李洪文, 等. 基于 SPH 算法的平面刀土壤切削过程模拟[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 134 - 139. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20140822&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.022.
LU Caiyun, HE Jin, LI Hongwen, et al. Simulation of soil cutting process by plane blade based on SPH method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 134 - 139. (in Chinese)

18 张志君, 孙旭伟, 金柱男, 等. 大豆播种机破碎式仿生覆土装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 34 - 40, 73. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20180205&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.005.
ZHANG Zhijun, SUN Xuwei, JIN Zhunan, et al. Design and test of crushing bionic soil covering device of soybean seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 34 - 40, 73. (in Chinese)

19 WRIGHT A. Tyrelsoil interaction modelling within a virtual proving ground environment[D]. Shrivenham: Cranfield University, 2012.

20 贾洪雷, 王文君, 庄健, 等. 仿形弹性镇压辊设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 28 - 34. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20150605&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.005.
JIA Honglei, WANG Wenjun, ZHUANG Jian, et al. Design and experiment of profiling elastic press roller[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 28 - 34. (in Chinese)

21 北京农业机械化学院. 农业机械学(上)[M]. 北京: 农业出版社, 1981.

22 张克健. 车辆地面力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.

23 佟金, 张智泓, 陈东辉, 等. 凸齿镇压器与土壤相互作用的三维动态有限元分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(10): 48 - 58.
TONG Jin, ZHANG Zhihong, CHEN Donghui, et al. Three-dimensional dynamic finite element analysis of interaction between toothed wheel and soil[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(10): 48 - 58. (in Chinese)

24 SHINGO O, KOSUKE H, CARMINE S, et al. Finite element analysis of periodic ripple formation under rigid wheels[J]. Journal of Terramechanics, 2015, 61: 11 - 22.

25 黄辰, 费继友, 刘洋, 等. 基于动态反馈 A* 蚁群算法的平滑路径规划方法[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 34 - 40, 102. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20170404&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.004.
HUANG Chen, FEI Jiyou, LIU Yang, et al. Smooth path planning method based on dynamic feedback A* ant colony algorithm [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 34 - 40, 102. (in Chinese)

26 韩兴国, 宋小辉, 殷鸣, 等. 熔融沉积式 3D 打印路径优化算法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 393 - 401, 410. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20180350&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.050.
HAN Xingguo, SONG Xiaohui, YIN Ming, et al. Path optimization algorithm of 3D printing based on fused deposition modeling [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 393 - 401, 410. (in Chinese)

27 段良霞, 黄明斌, 张洛丹, 等. 黄土高原沟壑区坡地土壤水分状态空间模拟[J]. 水科学进展, 2015, 26(5): 649 - 659.
DUAN Liangxia, HUANG Mingbin, ZHANG Luodan, et al. State-space prediction of soil water content on a hillslopein the gully region of the Loess Plateau, China[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(5): 649 - 659. (in Chinese)