doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.022

基于 SPH 算法的平面刀土壤切削过程模拟*

卢彩云　何　进　李洪文　王庆杰　郑智旗　张祥彩
(中国农业大学现代农业装备优化设计北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 以我国华北一年两熟区保护性耕作地土壤为原型,利用 ANSYS/LS_DYNA 对平面刀切削土壤过程进行数值模拟,并通过理论分析和试验,验证 SPH 算法在模拟平面刀切削土壤过程方面的可行性。结合 MAT147 土壤材料模型,SPH 算法及点-面侵蚀接触,运用 ANSYS/LS_DYNA 软件对平面刀切削土壤过程进行有限元分析。仿真结果表明,SPH 算法能够直观模拟平面刀切削土壤整个过程,最大等效应力为 5.851 MPa,主要集中在与平面刀接触的土壤上;平面刀切削全过程表明,土壤所受等效应力波动较小,切削过程比较平稳;稳定切削时切削功耗在 10.2 kW 附近波动,通过理论和试验验证,仿真切削误差不大于 0.05。由此说明 SPH 算法进行平面刀切削过程的数值模拟是可行的。

关键词: 平面刀　土壤切削　数值模拟　SPH 算法
中图分类号: S220　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2014)08-0134-06

引言

目前,田间试验方法是农机具设计和研究的主要方法,作业效果直观,可靠性强[1-2],但这种研究方法季节性强,耗费大量人力和财力,而且很难观测到土壤微观变化,如土壤运动轨迹、应力变化等[3-5]。近年来,有限元分析方法采用有限元数值模拟技术可以在计算机上模拟农业机械作用下土壤运动轨迹并测试相关力学数据,有利于在此基础上对部件进行结构设计和改进,为样机设计加工提供依据[6-7]。采用有限元分析方法,研究不同土壤参数条件下农机具性能、作业效果及土壤微观变化,具有重要意义。

SPH 算法,即光滑粒子流体动力学方法,是将连续的固体用相互作用的质点组来描述,各个物质点上承载各种物理量,包括质量、速度等,通过求解质点组动力学方程和跟踪每个质点运动轨道,求得整个系统的力学行为。与自适应网格算法和 ALE 算法等方法对比,SPH 算法是一种纯 Lagrangian 方法,无需借助网格,能够有效避免极度大变形时导致的网格扭曲和精度破坏等问题,SPH 算法是近年来发展起来的一种无网格的新方法,在农业机械方面的应用还较少[8-10]。

平面刀是免耕播种机防堵装置的关键部件之一,本文借助 ANSYS/LS_DYNA 软件,采用 SPH 算法对平面刀切削土壤过程进行数值模拟,并在此基础上对土壤抛撒特性、应力和功耗等参数进行分析,通过理论分析和试验,验证 SPH 算法可行性,并揭示平面刀对土壤的作用机理,以期为我国保护性耕作防堵机具的理论和优化设计提供科学依据。

1　有限元模型的建立

1.1　平面刀结构参数及简化

根据实际作业情况,设计平面刀回转半径 225 mm,转速 320 r/min,入土深度 80 mm,机具前进速度 2 ~ 4 km/h,边界曲线为螺旋线,平面刀通过销钉固定在刀轴的刀座上,随刀轴一起转动,其结构图如图 1 所示。

考虑到平面刀、刀座和刀轴均为金属材料,服从各向同性,其运动轨迹一致,按照结构简化原则,忽略螺栓螺母,将平面刀组合简化模型如图 2 所示。

1.2　平面刀有限元模型

ANSYS/LS_DYNA 主要包括直接建模和间接建模两种方式,考虑到实体的复杂性,直接在 ANSYS/LS_DYNA 软件中建立实体模型,单元类型选择 Solid164 实体单元,材料模型选择刚性材料,材料的密度 7.83×10^{-6} g/mm^3、弹性模量 207 GPa、泊松比 0.3,约束设定为 y 与 z 方向的移动约束及 x 与 y 方

收稿日期: 2013-08-06　修回日期: 2013-12-16
*国家自然科学基金资助项目(51175499、51205398)和教育部创新团队发展计划资助项目(IRT13039)
作者简介: 卢彩云,博士生,主要从事保护性耕作研究,E-mail: lucaiyun888@163.com
通讯作者: 何进,副教授,博士生导师,主要从事保护性耕作研究,E-mail: hejin@cau.edu.cn

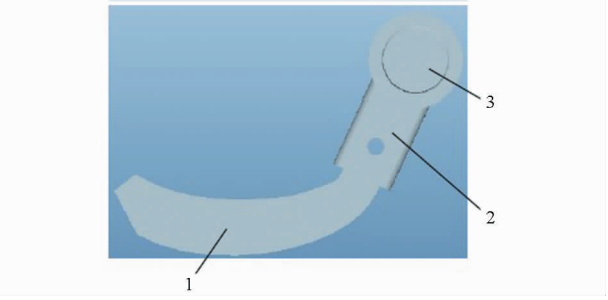

图 1　平面刀组合

Fig. 1　Straight blade installation

1. 平面刀　2. 刀座　3. 刀轴

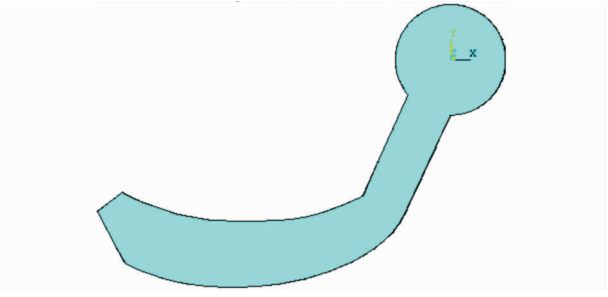

图 2　平面刀简化模型

Fig. 2　Simplified model of straight blade

向的转动约束。考虑平面刀的不规则性，采用自由网格划分方式划分有限元网格。

1.3　土壤材料模型

土壤是由土壤颗粒、孔隙气和水组成的三相材料，在很多应用实例中，土壤被理想化为连续介质[11]。本文采用 ANSYS/LSPREPOST 提供的 MAT147（＊MAT_FHWA_SOIL）材料模型作为土壤模型。该材料模型在 ABBO 和 SLOAN 工作基础上对 Mohr-Coulomb 准则进行了一些修正[12]，扩展了含水率、应力软化、运动学硬化和变形率等的影响和单元删除，其仿真结果与实际土壤特性更相近。准则修正后屈服面与 Mohr-Coulomb 屈服面呈双曲线拟合，表述为

$$Q = -p\sin\varphi + \sqrt{J_2K(\theta)^2 + ah_1yq^2\sin^2\varphi} - F_n\cos\varphi = 0 \tag{1}$$

式中　p——压力　　φ——内摩擦角

J_2——偏应力张量的第二不变量

$K(\theta)$——偏应力面中的极角

F_n——内聚力

a、h_1、y、q——定义修正后屈服面和标准 Mohr-coulomb 屈服面之间贴合度参数

该材料模型包括 5 个弹性和土壤特性参数、4 个塑性参数、3 个孔隙-水影响参数、2 个硬化参数、3 个软化参数、2 个粘塑性参数、2 个单元删除参数和 3 个其他参数。结合我国华北一年两熟区保护性耕作地块土壤特性，设计土壤模型主要参数如表 1 所示。

表 1　土壤参数

Tab. 1　Parameters of soil

参数类别	参数	数值
弹性和土壤特性参数	土壤体积模量/GPa	0.003 25
	土壤剪切模量/GPa	0.001 3
	土粒相对密度/(g·mm^{-3})	2.79
	土壤含水率/%	15
	土壤密度/(g·mm^{-3})	2.4×10^{-6}
塑性参数	内摩擦角/rad	1.1
	土壤内聚力/GPa	6.2×10^{-6}
软化参数	初变形时体积应变	1×10^{-5}
	破坏能量/J	6×10^{-8}
	最小内摩擦角/rad	0.001
粘塑性参数	粘塑性	0
	粘塑性参数	1.1
	水密度/(g·mm^{-3})	1.0×10^{-6}
	最大迭代级数	10

在考虑平面刀切削方式及边界条件处理要求前提下，建立如图 3 所示仿真模型，土体尺寸为 800 mm×200 mm×80 mm 的长方形模型。

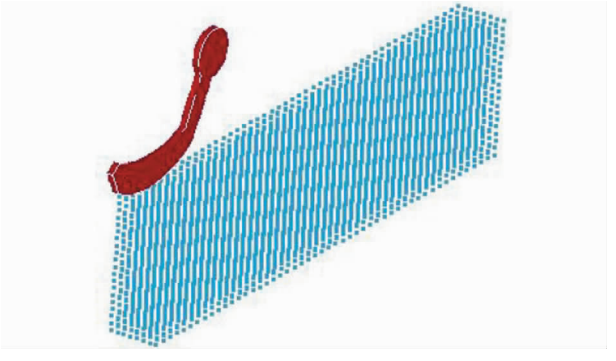

图 3　土壤切削有限元模型

Fig. 3　Finite element model of cutting soil

2　边界条件的设置

2.1　SPH 算法简述

SPH 算法最早在 1977 年由 Lucy 和 Gingold 等提出[13-14]，使用固定质量的可动点进行运算，可以有效解决土壤多相、松散和物性分散等问题。

SPH 方法用于求解一批点（粒子）在任意时刻的速度和能量。要正确表征粒子运动，必须构造一个表征粒子运动信息的近似函数

$$\prod{}^{h}f(x) = \int f(y)\,W(x-y,h)\,\mathrm{d}y \tag{2}$$

式中，W 为核函数（插值核），使用辅助函数 θ 进行定义

$$W(x,h) = \frac{1}{h(x)^v}\theta(x) \tag{3}$$

式中 v——空间维数 h——光滑长度

$W(x,h)$是尖峰函数,SPH 中最常用的光滑核是三次 B-样条,定义为

$$\theta(\mu)=\begin{cases}(1-1.5\mu^2+0.75\mu^3)C & (|\mu|\leqslant 1)\\ 0.25C(2-\mu)^3 & (1<|\mu|<2)\\ 0 & (2\leqslant|\mu|)\end{cases} \tag{4}$$

式中 C——常数,由空间维数确定

2.2 边界条件施加

作业过程中,平面刀入土深度为 80 mm,其运动轨迹为绕刀轴中心高速旋转的同时,随播种机向前运动。数值模拟中,添加如下边界条件:①设定数值算法为 SPH 算法。②机组前进速度为 1 mm/ms,刀具旋转速度为 320 r/min,切土深度为 80 mm。③借助 spc 设定土壤底端为固定约束。④添加平面刀与土壤之间的接触为点面侵蚀接触(*ERODING_NODE_TO_SURFACE)。⑤设置求解时间为 250 ms。

在 ANSYS/LSPREPOST 中设置完成后生成 K 文件,提交 ANSYS/LS_DYNA 求解器进行求解。

3 结果与分析

3.1 切削过程分析

图 4 是平面刀对土壤切削过程的一个周期,可以清晰看出土壤在切削过程中的位移变化情况。平面刀初始位置位于土壤上方,与土壤无接触(图 4a),平面刀运动瞬间开始与土壤接触,土壤由于受到剪切和挤压作用被破坏(图 4b)。随着平面刀与土壤接触面积增大,土壤被破坏范围逐渐变大(图 4c和图 4d);当 $t=64$ ms 时,平面刀旋转至土壤边缘既而远离土壤,土壤由于惯性和内力作用,继续保持运动,使切削不断向未切削土壤推进,从而实现平面刀对土壤连续切削;$t=188$ ms 平面刀旋转至下一个循环,从图 4f 可以看出,土壤运动仍在进行,进一步说明平面刀对土壤切削的连续性。

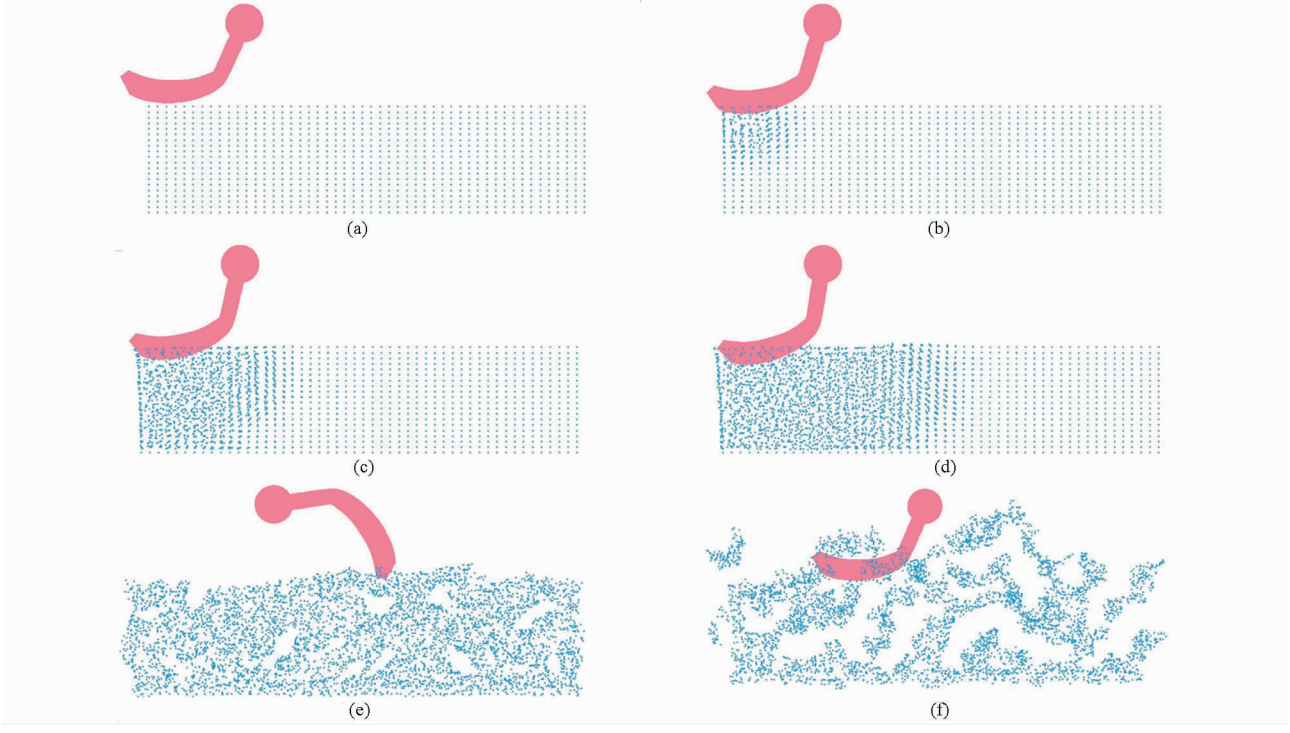

图 4 平面刀切削土壤过程

Fig. 4 Process of cutting

(a) $t=0$ ms (b) $t=4$ ms (c) $t=6$ ms (d) $t=8$ ms (e) $t=64$ ms (f) $t=188$ ms

3.2 土壤应力变化

图 5 为平面刀切削过程中不同时刻土壤等效应力变化情况。平面刀开始切削土壤时随着平面刀进入土壤的面积增大,土壤所受等效应力不断变大,被波动的土壤面积不断变大。土壤被平面刀完全破坏时等效应力趋于稳定值:当 $t=4$ ms 时最大等效应力为 2.656 MPa;$t=8$ ms 时最大等效应力为 4.687 MPa;$t=12$ ms 时最大等效应力为 5.126 MPa;$t=14$ ms 时土壤完全被破坏,最大等效应力为 4.231 MPa;$t=64$ ms 时平面刀开始切出土壤,最大等效应力 5.851 MPa;$t=188$ ms 时平面刀进入下一个切削循环,最大等效应力为 5.820 MPa。由整个过程可以看出,土壤所受等效应力波动较小,切削过程比较平稳。土壤最大等效应力主要集中在与平面

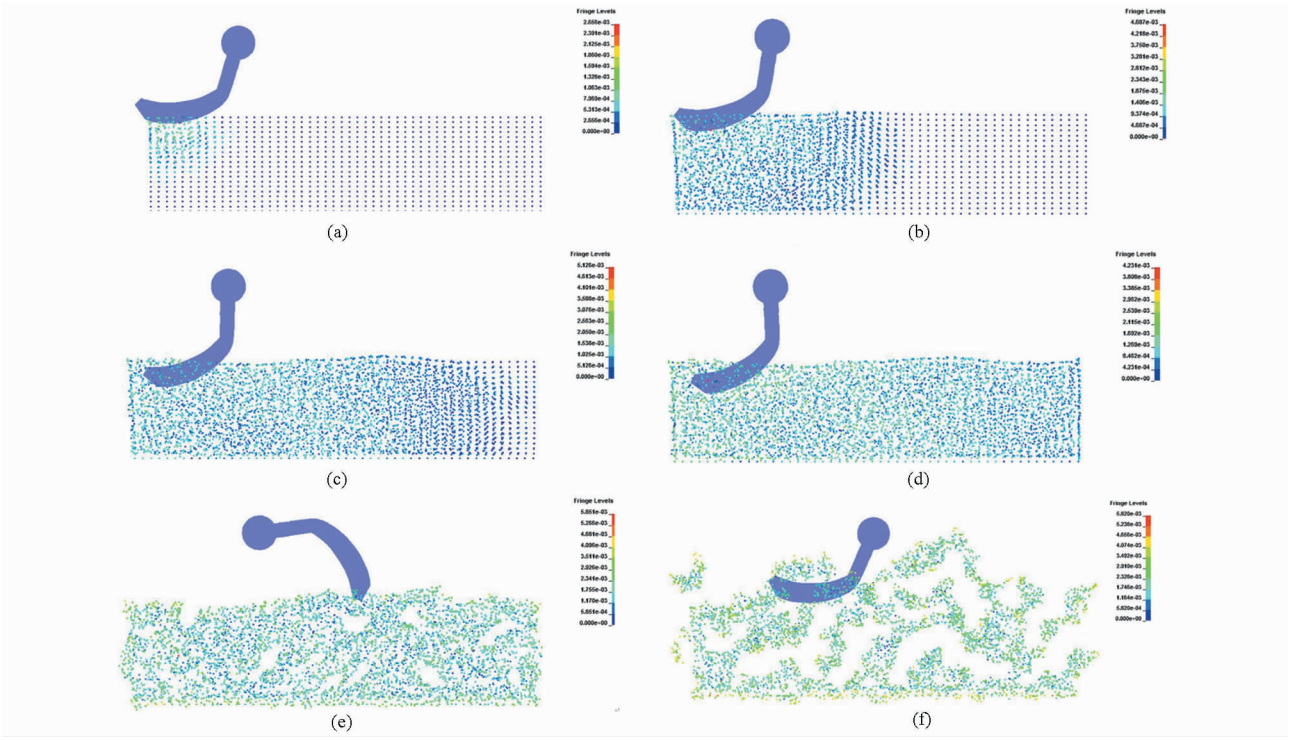

图 5　切削过程中土壤应力的变化情况

Fig. 5　Von mises stress of model during process of cutting

(a) t = 4 ms　(b) t = 8 ms　(c) t = 12 ms　(d) t = 14 ms　(e) t = 64 ms　(f) t = 188 ms

刀接触的土壤上,这是由于此处的土壤受到平面刀强烈的挤压作用。

3.3　切削功耗分析

切削过程中,总能耗主要来自维持平面刀旋转和土壤模型运动所需的动能及平面刀和土壤相互作用的内能。刀辊转速一定时动能为定值,模型功率消耗主要随土壤变形或运动导致的功耗变化而变化,总功耗变化规律如图 6 所示。功耗随时间不断增加而增大,这是由于土壤功率消耗的增大导致的。在切削初期,总能耗变化速率较快,随着切削的进行,能量变化逐渐趋于稳定,这是由于土壤颗粒在被破坏后相互之间的结合力减小,总功耗变化变慢。由图 6 可知,稳定切削时功耗在 10.2 kW 附近波动。

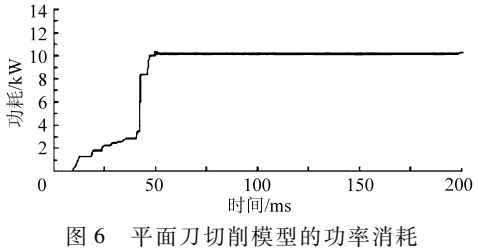

图 6　平面刀切削模型的功率消耗

Fig. 6　Power consumption of model for plane blade

3.4　理论验证

参照功耗计算经验公式[15]

$$N = 0.1K_{\lambda}dv_mB \tag{5}$$

其中

$$K_{\lambda} = K_gK_1K_2K_3K_4 \tag{6}$$

式中　N——平面刀切削土壤和抛送土壤所需功耗,kW

d——平面刀入土深度,cm

v_m——机组前进速度,m/s

B——耕幅,m

K_{λ}——旋耕比阻,N/cm^2

参照农业机械手册并结合田间土壤条件选择设计参数如下:K_g = 14 N/cm^2,K_1 = 1.0,K_2 = 0.95,K_3 = 1.0,K_4 = 0.68;d = 8 cm,v_m = 4 km/h,B = 1.3 m,由此得出功耗 N = 10.45 kW。

与 3.3 节模拟数据(10.2 kW)对比,其相对误差为(10.45 − 10.2)/10.45 = 0.024 ≤ 0.05,在允许的误差范围内,由此说明采用 SPH 算法的模拟方法是可行的。

3.5　试验验证

(1) 田间试验验证

田间试验在河北省涿州市一年两熟试验地进行,0 ~ 100 mm 土层土壤含水率为 15%,土壤紧实度为 2 MPa。平面刀安装在具有变速箱的小麦播种机机架上进行田间试验,机具前进速度 4.0 km/h,切土深度 80 mm,刀轴转速 320 r/min。播种机悬挂在田间综合测试系统[16]后方进行试验,试验重复 3 次。试验结果表明,平面刀的通过性良好,作业过程中六分力测得的牵引力如表 2 所示。

由功率消耗计算公式

$$N = Fv \tag{7}$$

表 2 作业过程中产生的牵引力

Tab. 2 Tractive force during working kN

次数	1	2	3
牵引力	9.18	9.25	9.12

可得作业过程中平均功耗为 $N = 10.20$ kW,与 3.3 节和 3.4 节的结论一致。由此说明采用 SPH 算法进行数值模拟仿真是可行的。

(2) 平面刀与弯刀对比验证

对平面刀进行仿真分析的结果初步表明 SPH 算法进行模拟仿真的可行性,为深入验证 SPH 算法在样机设计和优化方面发挥的作用,本文采用 SPH 算法分别对平面刀和弯刀模拟仿真进行对比分析。为使结果准确有效,弯刀作业的土壤参数与平面刀的土壤参数一致;弯刀结构和运动参数与平面刀相同,即回转半径为 225 mm,转速为 320 r/min,切土深度 80 mm,前进速度为 4 km/h,弯刀结构如图 7 所示。



图 7 弯刀结构图

Fig. 7 Structure of bent blade

对弯刀进行模拟仿真,得到其功率消耗变化规律如图 8 所示,弯刀切削功耗稳定在 55 kW 左右。平面刀切削功耗稳定在 10.2 kW 左右,远远小于弯刀切削功耗(图 6)。由此可以看出,平面刀切削时所需牵引阻力小,能够降低功耗,因此进行刀具设计时,在满足切削要求的前提下,优先考虑平面刀。

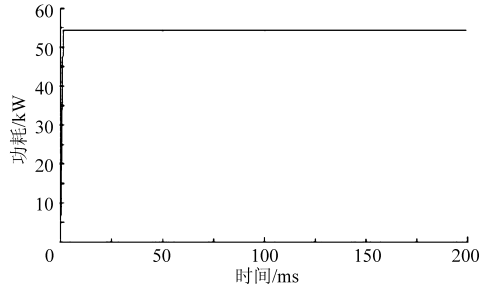

图 8 弯刀切削模型的功率消耗

Fig. 8 Power consumption of model for bent blade

4 结论

(1) 采用 SPH 算法研究平面刀切削土壤的过程,建立了土壤切削有限元数值仿真模型,直观展示了平面刀作用下土壤运动过程。

(2) 对平面刀作用下土壤切削仿真研究表明,不同方向等效应力变化规律不同,整个切削过程中最大等效应力 5.851 MPa,整个切削过程土壤所受等效应力波动较小,切削过程比较平稳。土壤最大等效应力主要集中在与平面刀接触的土壤上。

(3) 对平面刀作用下土壤切削仿真研究表明,总切削功耗随时间不断增大,增大到 10.2 kW 时切削趋于稳定,总切削功耗在 10.2 kW 附近波动,通过理论和试验验证,其误差控制在允许的范围内,由此可推断出采用 SPH 算法对平面刀进行研究是可行的。

参 考 文 献

1 廖庆喜,高焕文,王世学,等. 免耕播种机新型锯切防堵装置的试验研究[J]. 农业机械学报,2003,34(6): 91 - 95.
Liao Qingxi, Gao Huanwen, Wang Shixue, et al. Experimental study on sawtooth anti-blocking mechanism for no-tillage planter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(6): 91 - 95. (in Chinese)

2 张喜瑞,何进,李洪文,等. 免耕播种机驱动圆盘防堵装置单元体的设计与试验[J]. 农业工程学报,2009,25(9): 117 - 121.
Zhang Xirui, He Jin, Li Hongwen, et al. Design and experiment on the driving disc of snit-blocking unit for no-tillage planter[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(9): 117 - 121. (in Chinese)

3 马爱丽,廖庆喜,田波平,等. 基于 ANSYS/LS_DYNA 的螺旋刀具土壤切削的数值模拟[J]. 华中农业大学学报,2009, 28(2): 248 - 252.
Ma Aili, Liao Qingxi, Tian Boping, et al. Numerical simulation of soil cutting by spiral cutter on the basis of ANSYS/LS_DYNA [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2009, 28(2): 248 - 252. (in Chinese)

4 杨帆,李问盈,李洪文,等. 免耕播种机缺口圆盘刀有限元静强度分析[J]. 农业机械学报,2010,41(6):53 - 55.
Yang Fan, Li Wenying, Li Hongwen, et al. Finite element analysis for gap disc of no-till planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 53 - 55. (in Chinese)

5 Abo-Elnor M, Hamilton R, Boyle J T. 3D dynamic analysis of soil-tool interaction using the finite element method [J]. Journal of Terramechanics, 2003, 40 (1): 51 - 62.

6 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)
7 廖宜涛,廖庆喜,舒彩霞,等.基于 ANSYS/LS-DYNA 的芦柑切割-进给速度匹配研究[J].农业机械学报,2011,42(增刊):30-34.
Liao Yitao, Liao Qingxi, Shu Caixia, et al. Matching of cutting and feeding speed for reaping arundo donax L. based on ANSYS/LS-DYNA[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.): 30-34. (in English)
8 Cuomo S, Prime N, Iannone A, et al. Large deformation FEMLIP drained analysis of a vertical cut [J]. Acta Geotechnica, 2013, 8(2): 125-136.
9 Moresi L, Dufour F, Muhlhaus H B. A Lagrangian integration point finite element method for large deformation modeling of viscoelastic geomaterials[J]. Journal of Computational Physics, 2003, 184(2):476-497.
10 Pastor M, Haddad B, Sorbino G, et al. A depth-integrated, coupled SPH model for flow-like landslides and related phenomena [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2009, 33(2):143-284.
11 罗汀,姚仰平,侯伟,等.土的本构关系[M].北京:人民交通出版社,2010:1-5.
12 U. S. Department of Transportation Federal Highway Administration. Manual for LS_DYNA soil material model 147[R]. Georgetown: Turner-Fairbank Highway Research Center, 2004.
13 高建民,周鹏,张兵,等.基于光滑粒子流体动力学的土壤高速切削仿真系统开发及试验[J].农业工程学报,2007,23(8):20-26.
Gao Jianmin, Zhou Peng, Zhang Bing, et al. Development and test of high speed soil-cutting simulation system based on smooth particle hydrodynamics[J]. Transactions of the CSAE, 2007,23(8): 20-26. (in Chinese)
14 李良晶.基于 SPH 法的板结土壤深耕技术研究[D].杭州:浙江工业大学,2010.
Li Liangjin. Research on deep plowing for compacted soil based on SPH[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2010. (in Chinese)
15 中国农业机械科学研究院.农业机械设计手册(上)[M].北京:中国农业科学技术出版社,2007:237-238.
16 乔晓东.后悬挂机组田间综合测试系统及其应用研究[D].北京:中国农业大学,2013.
Qiao Xiaodong. Development and application of the field integrated testing system for the rear suspension tools[D]. Beijing: China Agricultural University, 2013. (in Chinese)

Simulation of Soil Cutting Process by Plane Blade Based on SPH Method

Lu Caiyun　He Jin　Li Hongwen　Wang Qingjie　Zheng Zhiqi　Zhang Xiangcai
(*Beijing Key Laboratory of Optimized Design for Modern Agricultural Equipment*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: This paper numerically simulated the soil cutting process of plane blade, one of the important components in no-till working implement, by ANSYS/LS_DYNA, with soil of conservation tillage in one year two crops area of North China. By theoretical analysis and test, the viability of SPH method on simulating the soil cutting process of plane blade was verified. By using MAT147 soil material model, SPH method and nodes-surface eroding contact, the finite element analysis on the soil cutting process of plane blade was implemented by ANSYS/LS_DYNA. Simulation result showed that SPH method could visually simulate the soil cutting process. The maximum Von Mises stress was 5.851 MPa and focused on the soil touching with plane blade. The Von Mises stress of soil had small fluctuation, so that the cutting was stable. The power consumption was approximately 10.2 kW at steady state, and the simulation error was not more than 0.05. It was proved that SPH method was viable, and finite element simulation could obtain parameters easily, such as scatter feature, force and power consumption, and reduce experimental cost and time. It provided a scientific basis for design optimization of conservation tillage anti-blocking implements.

Key words: Plane blade　Soil cutting　Numerical simulation　SPH method