

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.01.012

土壤旋切振动减阻的有限元分析*

蒋建东¹ 高洁¹ 赵颖娣¹ Willem Hoogmoed² 张宪¹

(1. 浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 杭州 310014;

2. 瓦赫宁根大学, 瓦赫宁根 6700 HB, 荷兰)

【摘要】提出了一种对旋耕机具施加振动载荷进行压实土壤切削减阻的方法。对板结土壤参数进行土壤三轴测试试验,结合LS-DYNA的MAT147材料模型,测试土壤材料模型参数,并建立了南方丘陵地带板结土壤本构模型及土壤振动旋切过程的有限元数值模型。通过三维数值模拟和计算,分析了外加激励的振型、频率及振幅等因素对土壤切削阻力的影响及变化规律,并得到实现最优减阻效果的各项参数组合。研究结果表明,采用振动旋耕机具进行土壤作业过程中,选择合适振动频率、幅值以及振动类型的外加刀具振动能实现土壤耕作减阻,有效降低机具的土壤切削功率。

关键词: 压实土壤 旋耕 振动 减阻 有限元分析

中图分类号: S222.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)01-0058-05

Finite Element Simulation and Analysis on Soil Rotary Tillage with External Vibration Excitation

Jiang Jiandong¹ Gao Jie¹ Zhao Yingdi¹ Willem Hoogmoed² Zhang Xian¹

(1. The Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology, Ministry of Education,

Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China 2. Wageningen University, Wageningen 6700 HB, The Netherlands)

Abstract

A method of compacted soil rotary tilling with variant frequency vibrationis proposed. The tea garden soil physical parameters was measured with soil triaxial test referring to the MAT147 soil model from LS-DYNA material library, then a soil constitutive model of the southern hills' harden soils and the finite element numerical simulation model for soil vibratory rotary cutting process were built. Through 3-D numerical simulation and analysis, the influence rules on soil cutting resistance caused by many factors of external vibration excitation such as amplitude, frequency and vibration model were studied, and the optimal vibration operation parameters conducive to soil cutting resistance reducing was deduced and confirmed. The results show that the finite element method SPH is effective for large strain and high strain rate numerical simulation of compacted soil rotary cutting, and choosing appropriate vibration frequency, amplitude and vibration types of vibration excitation can reduce tillage mechanism power and improve working efficiency.

Key words Compacted soil, Rotary tillage, Vibrating, Resistance reducing, Finite element analysis

引言

土壤振动切削是近几年快速发展起来的一种土

壤耕作方式,研究土壤振动切削问题的目的是减少牵引力以减少能耗,振动用于土壤耕作在国内起步较晚,而国外相关学者进行过此类研究^[1~9]。这些

收稿日期: 2011-04-08 修回日期: 2011-05-12

* 国家自然科学基金资助项目(50375146)和浙江省现代农业装备与实施产业创新团队建设项目(2009R50001)

作者简介: 蒋建东,副教授,博士,主要从事农机一体化研究,E-mail: jiangjd@zjut.edu.cn

通讯作者: 张宪,教授级高级工程师,主要从事农用机械研究,E-mail: xianzh168@126.com

研究均是在试验的基础上发展起来的,而且试验研究的花费也较大。

近年来用有限元方法研究土壤切削问题取得了较大的进展^[10~16]。对于土壤振动切削,根据经验公式可以预测土壤在加速度时的切削性能,但目前还没有统一的理论来考察土壤的切削性能。郭志军等^[17]采用二维有限元分析了抛物面型耕作部件的切削性能,提出一种利用计算机仿真对振动刀具不同前倾角进行力的预测,并建立了力学模型。殷涌光等^[18]研究二维振动切削(振动方向与切削方向垂直)的减阻机理,指出铲刀阻力与振动频率、切削速度的关系。朱建新等^[19]研究了液压挖掘机振动掘削的减阻机理,发现振动掘削能减小铲斗与土壤之间的摩擦力和粘附力,从而减小铲斗切入阻力。基于前面的研究,本文采用三维有限元动力学仿真,运用 ANSYS/LS-DYNA 中的 SPH 法对土壤旋切进行仿真,分析振幅、频率等因素对旋切阻力和碎土效果的影响。

1 土壤振动旋切减阻机理及运动方程

旋耕机作业时,随机组前进的同时,自身也在进行着旋耕切削作业。本文设计一种新型的振动机构,如图 1 所示,刀轴是一根空心轴,空心管轴上开有沟槽安装旋耕刀具,内轴是一根凸轮轴,凸轮轴轴线与空心管轴轴线保持一致,在两轴之间添加弹簧,弹簧和刀具均固定在空心管轴上,当空心轴以一定的角速度旋转时,刀具会沿着凸轮的轨迹曲线内外摆动,从而形成振动切削作用。图 2 是旋耕机构的三维示意图。

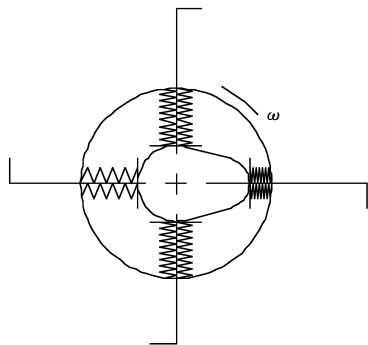


图 1 旋耕刀具外加振动激励示意图

Fig. 1 Schematic diagram for extra vibration exciting

旋耕机进行耕作时,外面的空心轴会带动刀具一起旋转,同时凸轮轴保持静止,由于凸轮结构的轮廓曲线不规则,凸轮会随时间不断地压缩弹簧而使得旋耕刀具不断摆动,形成振动切削,所以凸轮的外轮廓曲线就决定了从动件的运动规律。

凸轮从动件的运动规律主要有多项式运动规律

和三角函数运动规律两大类,多项式运动规律的一般表达式为

$$s = C_0 + C_1\delta + C_2\delta^2 + \cdots + C_n\delta^n \quad (1)$$

式中 s ——从动件位移 δ ——凸轮转角

C_0, C_1, C_2 ——待定系数,通过边界条件确定
简谐运动规律的一般表达式为

$$s_1 = h(1 - \cos(\pi\delta/\delta_0))/2 \quad (2)$$

$$s_2 = h(1 + \cos(\pi\delta/\delta'_0))/2 \quad (3)$$

式中 s_1 ——升程位移 s_2 ——回程位移

δ_0 ——升程运动角 δ'_0 ——回程运动角

通常,旋耕刀具在切削时,土壤由于受到刀具的挤压力而产生裂纹,裂纹慢慢扩张,使其破碎,其间土壤还会随着刀具运动。而此时土壤受多个力的共同作用,如挤压力、摩擦力等。正是由于上述几种力在前进方向的分量组成了前进阻力。由于刀具的外加振动,使旋耕刀上产生较有利的切削条件及对土壤破坏有利的受力状态,其中部分阻力由振动部件的振动作用所承担。在理想的前进速度及切削阻力下,刀具的位移、速度、加速度会呈周期变化。

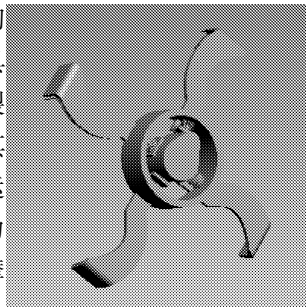


图 2 三维示意图

Fig. 2 Schematic diagram for 3-D model

产生较有利的切削条件及对土壤破坏有利的受力状态,其中部分阻力由振动部件的振动作用所承担。在理想的前进速度及切削阻力下,刀具的位移、速度、加速度会呈周期变化。

如图 1 所示,刀轴旋转速度为 ω ,凸轮轴固定,在旋耕切削过程中刀具某一时刻的伸出速度

$$v = \omega R \quad (4)$$

式中 R ——凸轮推动刀具的位移

因为凸轮是周期性的运动,所以旋耕刀的伸出速度也是周期性变化。

以刀轴旋转的中心作为原点来建立相对坐标系,水平前进方向为 x 轴正向,垂直向上方向设为 y 轴的正向。耕作作业的初始时,刀具的刀尖在旋耕机作业的前进方向,建立旋耕刀刀尖的相对运动方程为

$$\begin{cases} V_x = -\omega(R + R_1)\sin\delta + v_s \\ V_y = -\omega(R + R_1)\cos\delta \\ \delta = \omega t \end{cases} \quad (5)$$

式中 R_1 ——旋耕刀的长度

V_x, V_y ——旋耕刀端点在任意时刻相对速度的水平分量和垂直分量

v_s ——机组前进速度

该振动旋切系统亦可以采用微分方程描述为

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = F_0\sin\omega t + R(t) \quad (6)$$

式中 m ——刀具质量, kg
 b ——阻尼系数, N·s/m
 k ——刀具弹性模量, N/m
 x ——刀具振动位移, m
 $R(t)$ ——土壤剪切阻力, N
 F_0 ——驱动力, N t ——时间, s

2 旋耕刀的振动模态及激振频率

振动切削很重要的一点是振动频率要避开刀具固有频率以免共振。因此,采用 LMS Test. Lab 模态试验系统对 JF-168 型小型农业作业机旋耕机组进行了试验模态分析,并得其一阶振型如图 3 所示。

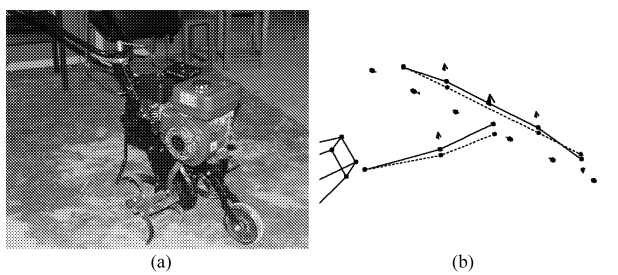


图 3 JF-168 型小型农业作业机及旋耕刀具一阶振型
Fig.3 First model shape of JF-168 small agricultural machinery and rotary blade
(a) 旋耕机 (b) 振动模态

采用 PolyMAX 对旋耕刀具模态总频响稳态图进行识别提取的前 6 阶模态如表 1 所示。

表 1 旋耕刀具前 6 阶模态

Tab.1 The first 6 modes of rotary blade

模态阶数	固有频率/Hz	阻尼比/%
1	144.568	4.78
2	378.787	1.80
3	478.183	2.98
4	664.001	0.77
5	712.014	0.48
6	824.446	1.64

通常工程中振动切削一般频率采用 2~150 Hz, 振幅多为 0.8~15 mm。从人机工程理论可知,人手振动的敏感频率为 0.01~20 Hz 之间,因此考虑到农业作业机操纵舒适性,旋耕机组的土壤振动机构的试验激振频率范围选取为 20~50 Hz。

3 仿真土壤参数及土壤切削仿真建模

试验土壤采自浙江省杭州市龙井村,采样地点为优质茶园,土质为红壤,取土为山腰部分表层至约 20 cm 深,试样土样高度为 8 cm,直径为 3.91 cm。采用 TSZ 系列全自动三轴仪,按照土工试验方法标准

GB/T 50123—1999 进行土壤物理参数测定,结果如表 2 所示,绘制的有效应力路径曲线如图 4 所示。

表 2 试验测定的茶园红土物理参数

Tab.2 Physical parameters of red soil in tea garden by test

参数	数值	参数	数值
密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	2.35	粘聚力/kPa	9.5
容积密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	1.57	抗剪强度/kPa	35
含水率/%	11.72	弹性模量/kPa	85 700
孔隙度/%	33.2	泊松比	0.38
内摩擦角/ $^{\circ}$	23.6	剪切模量/kPa	31 050

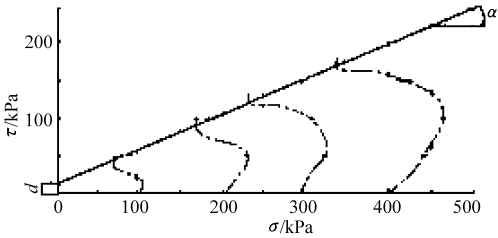


图 4 土壤试样测定的有效应力路径曲线
Fig.4 Effective stress path curve for testing soil sample

采用 SPH 粒子法仿真研究振动旋耕刀正转切削土壤。由于刀具受迫振动形式取决于凸轮的外轮廓曲线,选取 3 种凸轮外轮廓曲线,使得刀具运动方式分别为正弦波、三角波和矩形波,同时考虑到旋耕机具设计形式及 SPH 粒子法所建模型规则化,将问题简化,即假定刀具为刚性体、切削速度稳定、足够锋利而不考虑磨损。本构模型采用 LS-DYNA971 提供的土壤材料 MAT147 (MAT_FHWA_SOIL),为了精确模拟土体结构,选用 LS-DYNA 为模拟地球动力学系统提供的无反射边界条件,边界条件设定为土壤的底部和两侧节点固定。土壤采用 SPH 粒子法,接触采用自动点面接触,滑动界面惩罚因子设为 10,动、静摩擦因数分别设为 0.18、0.20。仿真模型按旋耕刀的刀刃宽度与耕深设计一个沟槽,切入深度为 150 mm,刀具前进速度为 0.25 m/s,刀轴的旋转速度为 22 rad/s,振动方向为 y 方向,即上下方向。建立的土壤振动切削模型如图 5 所示。

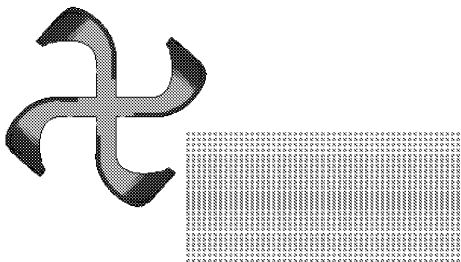


图 5 刀具切削土壤有限元模型
Fig.5 Finite element model for rotary blade cutting soil

4 土壤振动切削仿真与结果分析

相对于波形与频率,振幅对振动切削的影响较为简单,在其他振动研究中振幅的确定均较单一,故先固定振幅为 10 mm。考虑仿真的精度及试验效率,可以把频率变化范围取 4 个典型值,分别为 24、32、40 和 48 Hz,振动类型根据凸轮的外轮廓曲线分别选择标准矩形波、正弦波和三角波进行土壤振动切削模拟,仿真方案及结果如表 3 所示(方案 13 为无振动切削)。其中 F_y 为振动旋耕切削过程中,旋耕刀受到的最大垂直力,该力反映了切削过程的平稳性; F_x 为旋切过程中所产生的最大水平力,该力反映了旋耕作业中推动机具前进力和功率; T_p 为平均切力矩。其中阻力由仿真软件提取,扭矩由提取结果在 Matlab 中求得。旋耕机具切削水平力及扭矩如图 6 所示。

表 3 振幅为 10 mm 时振动切削仿真结果
Tab.3 Vibration cutting simulation results at amplitude 10 mm

序号	振动频率	振动类型	F_y/kN	F_x/kN	$T_p/\text{N}\cdot\text{m}$
1	24.0	正弦波	0.467	0.673	25.79
2	24.0	矩形波	0.412	0.791	24.53
3	24.0	三角波	0.354	0.753	25.57
4	32.0	正弦波	0.383	0.642	22.87
5	32.0	矩形波	0.367	0.761	23.65
6	32.0	三角波	0.391	0.716	24.54
7	40.0	正弦波	0.322	0.632	21.62
8	40.0	矩形波	0.378	0.706	22.46
9	40.0	三角波	0.390	0.694	24.73
10	48.0	正弦波	0.381	0.665	22.87
11	48.0	矩形波	0.305	0.867	24.70
12	48.0	三角波	0.413	0.761	25.52
13			0.421	0.746	31.53

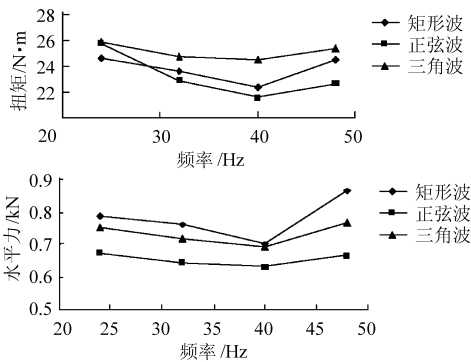


图 6 振幅为 10 mm 时振动切削仿真结果
Fig.6 Vibration cutting simulation results at amplitude 10 mm

由于振动旋耕切削时接触等复杂因素的影响,刀具受到的切削阻力变化较剧烈。由表 3 可以看出,矩形波及正弦波对扭矩减小效果较好,三角波减阻效果较差,但与无振动时相比均有较大改善,正弦波在振动频率为 40 Hz 时减阻达到最大,与无振动时相比,减阻达 31.44%。矩形波与三角波相对于正弦波水平力与垂直力峰值较大,波动明显,有可能对机具造成一定伤害,不利于机具寿命和机具操作,且脉冲波的产生需较大功率。综合考虑,由于扭矩反映了其振动减阻的效果(即功耗),而水平力最大值反映了在实际作业时作业机的稳定性及用于推动机具前进的最大功率,因此正弦波对振动减阻最优。

从图 6 可以看出无论是正弦波、矩形波还是三角波,频率的变化对平均力矩 T_p 均有较大的影响,当频率从 24 Hz 变化到 40 Hz 时,平均力矩将减小 12.3% 左右,与无振动时相比,减小 26%。其中矩形波对频率的敏感性较大,其频率为 48 Hz 时,水平力与扭矩明显增大很多是接近振动切削临界速度条件所致。在临界速度附近,刀具出现纯“凿削”,故其冲击力峰值明显增加,而平均扭矩也略有增加。

由上面分析可知,正弦波在振动频率为 40 Hz 时,振动切削减阻效果最好。故设计在此波形与频率的条件下,对振动旋耕振幅做一组数值模拟,振幅选取与仿真结果如表 4 和图 7 所示。

表 4 不同振幅的振动切削仿真结果
Tab.4 Vibration cutting simulation results for different amplitudes

序号	振幅/mm	F_y/kN	F_x/kN	$T_p/\text{N}\cdot\text{m}$
1	2	0.354	0.586	26.44
2	6	0.370	0.602	24.53
3	10	0.348	0.632	21.62
4	12	0.377	0.752	21.16

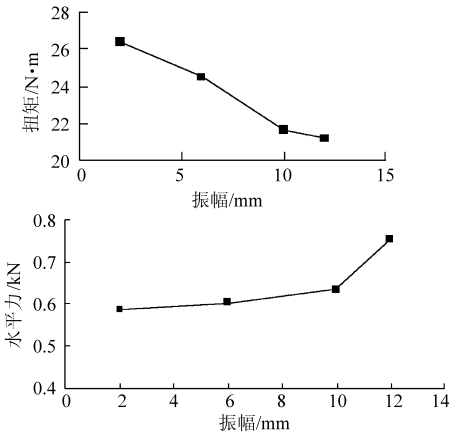


图 7 不同振幅下的振动切削扭矩及水平力曲线
Fig.7 Torque and forward resistance of vibration cutting for different amplitudes

从图7可以看出,振幅12 mm时的扭矩比振幅3 mm时减小了19%。而最大水平力随着振幅的增加略有上升。在振幅12 mm之后扭矩变化较平缓,在0~15 mm振幅范围内一直处于下降趋势。由于振幅增加导致激振能量呈二次方增加,且振幅太大时对机具操控有较大影响,故在可行的适当范围内,可尽量选取较大振幅。

下的振动切削过程进行了三维数值模拟,分析了不同振幅、频率及波形对土壤切削阻力的影响。结果表明,振动切削土壤有明显的减阻效果,其中采用正弦波激振且在频率40 Hz时振动减阻效果最好,比不进行振动切削时的土壤切削能耗减少30%左右,在0~15 mm振幅范围内,振幅越大,土壤切削减阻效果越好。

5 结束语

采用SPH法对振动旋耕切削在板结土壤条件

参 考 文 献

- Niyamapa T, Salokhe V M. Force and pressure distribution under vibratory tillage tool [J]. Journal of Terramechanics, 2000, 37(1): 139~150.
- Butson M J, MacIntyre D. Vibratory soil cutting I. soil tank studies of draught and power requirements [J]. Journal of Terramechanics, 2004, 40(1): 186~190.
- Gupta C P, Rajout D S. Effect of amplitude and frequency on soil break-up by an oscillating tool in a soil bin experiment [J]. Soil & Tillage Research, 1993, 25(4): 329~338.
- Yowa J, Smith J L. Sinusoidal vibratory tillage [J]. Minnesota Extension Service, 1993, 11(2): 22~25.
- Muro T, Tran D T. Regression analysis of the characteristics of vibro-cutting blade for tuffaceous rock [J]. Journal of Terramechanics, 2004, 40(3): 191~219.
- Godwin R J, Dogherty M J O. Integrated soil tillage force prediction models [J]. Journal of Terramechanics, 2007, 44(1): 3~14.
- 王雪艳. 振动深松技术与关键部件研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
Wang Xueyan. Research for vibration sub-soiling technology and key components [D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- 孙彦君, 司振江, 周宙, 等. 振动式深松旋耕灭茬机: 中国, 200620021644. X[P]. 2007-08-22.
- 徐宗保. 振动式深松中耕作业机的设计与试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2009.
- Mouazen A M, Nemenyi M. Tillage tool design by the finite element method: part1. finite element modeling of soil plastic behavior [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1999, 72(1): 37~51.
- Arraya K, Gao R A. non-linear three-dimensional finite element analysis of sub-soiler cutting with pressurized air injection [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1995, 61(2): 115~128.
- Fielke J M. Finite element modeling of the cutting edge of tillage implements with soil [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1999, 74(1): 91~101.
- Chi L, Kushwaha R L. Finite element analysis of forces on a plane soil blade [J]. Can. Agric. Engng, 1989, 31(2): 135~140.
- Chi L, Kushwaha R L. A non-linear 3-D finite element analysis of soil failure with tillage tools [J]. Journal of Terramechanics, 1990, 27(4): 343~366.
- Chi L, Kushwaha R L. A non-linear three dimensional finite element analysis of soil failure with curved tillage tools[C]. ASAE Paper 90~114, 1990.
- 陆怀民, 张云廉, 刘晋浩. 土壤切削弹粘塑性有限元分析[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(2): 100~105.
- 郭志军, 周志立, 佟金, 等. 抛物线型切削面切削性能二维有限元分析[J]. 洛阳工学院学报, 2002, 23(4): 1~4.
Guo Z J, Zhou Z L, Tong J, et al. A 2-D finite element analysis for enlong performance of a parabolic curved cutting surface [J]. Journal of Luoyang Institute of Technology, 2002, 23(4): 1~4. (in Chinese)
- 殷涌光, 程悦荪, 李俊明. 振动式二维切削土壤减小阻力机理[J]. 农业机械学报, 1992, 23(2): 11~16.
Yin Y G, Chen Y S, Li J M. The reasons of resistance reduction for vibratory cutting soil in two directions [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 1992, 23(2): 11~16. (in Chinese)
- 朱建新, 赵崇友, 郭鑫. 液压挖掘机振动掘削减阻机理研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 3~4.
Zhu J X, Zhao C Y, Guo X. Research on mechanism of vibratory excavation of hydraulic excavators [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8): 3~4. (in Chinese)
- 杨望, 蔡敢为, 杨坚. 土壤直剪试验的动力学仿真[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 96~101.
Yang Wang, Cai Ganwei, Yang Jian. Dynamics simulation of direct shear test [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 96~101. (in Chinese)