

基于 ls-dyna 的振动旋耕三维数值模拟^{*}

张 宪, 孔 涛, 蒋建东, 王扬渝

(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, 浙江 杭州 310014)

摘要: 为了改善小农机前进阻力及扭矩, 对振动旋耕切削进行了力学分析, 并采用显示动力学软件 Ls-dyna 求解器, 运用 ANSYS 进行了仿真设置, 结合 MAT147 材料模型就松土刀具对土壤的切割过程进行了三维动态仿真。初步分析结果表明, 数值模拟结果是合理的, 较精准地模拟了松土刀具对土壤的切割过程。仿真结果表明, 振动旋耕切削对前进阻力及扭矩都有着较大改善, 是一种有效的技术途径和方法。

关键词: 振动; 旋耕; 数值模拟

中图分类号: TH6; TH161.6; S222.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)02-0144-04

3-D numerical simulation of vibrational rotary tillage based on ls-dyna

ZHANG Xian, KONG Tao, JIANG Jian-dong, WANG Yang-yu

(The MOE Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing
Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In order to improve the working performance of the small agricultural machinery's forward resistance and torque, the vibrational rotary tillage force analysis was taken. Using dynamic software Ls-dyna solver and ANSYS simulation settings, combined with MAT147 material model, the cutting tool of soil on the 3D dynamic simulation was investigated. Preliminary analysis shows that the numerical simulation results are reasonable, and the soil cutting process simulation is accurate and precision. The experimental results show that the vibrational rotary tillage has good effect on forward resistance and torque. It is an effective technical approach and method.

Key words: vibration; rotary tillage; numerical simulation

0 引 言

土壤是人类赖以生存的自然资源, 当土壤压实严重限制根系生长而降低作物产量时, 采用深耕作业, 对土壤的理化性能有显著影响和明显的改良效果, 因此成为了改良压实土壤的最主要的物理手段和方法。山区板结土壤由于地形复杂, 普通大型深耕作业机难以作业, 因而多采用小型作业机。深松机具的驱动力随耕深的加大而增大, 是田间能耗最大的机具, 成为制约其发展的主要因素之一。笔者根据现有旋耕机, 介绍一种振动旋耕切削技术, 旨在减小切削力。

振动切削是指切削工具相对以一定切削速度运动, 并利用另外设置的振动源, 使刀具以一定的振幅、

频率振动来完成加工的方法^[1]。T. Niyamapa 和 V. M. Salokhe 通过实验法研究了振动刀具在试验台中切削土壤时其正向力与竖直力的大小及其变化, 得出其正向力与竖直力的大小随着其振动频率的增大而减小, 但振幅在 20 mm ~ 26 mm 之间变化时, 力的大小却没有变化^[2]。Eggenmuller^[3]采用直观的力学分析方法, 将振动的一个周期分为提升阶段和切削阶段, 而这两个阶段的水平分力都远远小于不振动的犁的水平阻力, 因而提出垂直切削方向的振动减阻机理来解释振动犁面阻力减少的原因, 但是对铲刃和铲柄的减阻机理没有给出相应的分析。中国农业大学王雪艳等^[4]采用试验手段对深松旋耕作业机具进行了强迫振动深松机构和自激振深松机构的牵引阻力对比研究, 其结

收稿日期: 2010-09-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50805131); 国家支撑计划资助项目(2006BAD11A10-02); 浙江省科技重大专项资助项目(2007C12089, 2008C02006-3)

作者简介: 张 宪(1954-), 男, 山东临邑人, 教授级高工, 硕士生导师, 主要从事农业机械及装备, 机电一体自动化生产线设计与制造技术研究。
E-mail: ktflyqq@163.com

果表明牵引阻力平均减少 10.58%, 机具各项指标达到农艺要求, 作业质量良好。沈阳农业大学邱立春等^[5]设计了自激振式深松机构, 并进行了计算机仿真和田间实验研究, 结果表明安装弹性元件与未安装弹性元件相比牵引力平均减少 12.79%, 采用自激振动可实现深松旋耕减阻节能。以上研究对耕作振动减振机理尚未有系统阐释。对于采用振动旋耕切削, 目前鲜有研究。

本研究通过对振动切削进行运动分析, 同时, 采用光滑粒子流体动力学方法对振动正旋旋耕刀具切削土壤的过程进行三维数值的模拟仿真, 从而得出不同振动参数下旋耕刀具的受力情况。

1 振动切削减阻机理分析

由于旋耕刀为刚性部件, 旋耕刀切土和破碎的过程是同步进行, 土壤在切削力的作用下, 沿剪切面周期性断裂, 这样土壤就很容易沿着裂纹破碎, 而静态切削时裂纹面不会像振动切削这样明显, 这样静态切削就需要较大的切削力来形成土壤破坏。振动切削改变了旋耕刀与土壤的摩擦与粘附力, 旋耕刀不振动切削时, 刀具侧面受土壤的作用, 形成摩擦与粘附力, 刀具振动后, 其振动作用使其土壤在附着在刀片上的机会大大减小, 且接触时间减小, 因而刀具侧面所受的摩擦力与粘附力大大减少。另一方面, 在实际非振动切削时, 由于刀具磨损及土壤的粘性等因素, 土壤很容易在刀具刃口尖部形成一个小土块, 俗称切削核。切削核的存在, 不仅消耗大量的能量, 而且使旋耕刀前刃面滑出时摩擦力很大(土壤与切削核为同性材料, 亲和作用很大)。而振动切削是使连续发生的有规律的脉冲力作用到土壤进行破碎的一种切削方法。这样切削核较难生成扩大, 从而减少了能量的消耗。

这时作用在土壤上的力除摩擦力、剪切力、提升力外, 还有作用于部件刃口上的切削力。由于振动作用, 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, 使前进阻力减少。

2 土壤模型及边界条件

本研究采用龙井村红壤土进行三轴试验, 测定其各种力学参数, 其余所需材料参数可根据刀具本构关系求得。当红壤土土层深度为 10 cm ~ 20 cm 时, 其容重为 1.57 g/cm³, 孔隙度为 33.2%, 泊松比为 0.38, 剪切强度为 35 kPa, 剪切模量为 31.05 MPa, 内摩擦角为 23.6°。

土壤材料特性的模拟对于土壤切削过程的数值仿真也非常重要。土壤计算模型的核心是土壤的本构关系以及具体参数。本研究在进行松土切削土壤的三维仿真研究中, 采用 LS-DYNA971 中 * MAT_FHWA_SOIL 卡片提供的 MAT147 材料模型。它是一种针对实体单元且考虑损伤特性的各向同性材料模型, 该模型主要是在 Abbo 和 Sloan 工作的基础上对 Mohr-Coulomb 准则进行了一些修正^[6], 模型扩展了含水率影响、变形率影响和单元删除, 修正后的屈服面与 Mohr-Coulomb 屈服面呈双曲线拟合, 它与应力主轴(剪切强度为零)相交处是一个光滑面, 并与应力主轴垂直, 其屈服面表述为^[7]:

$$F = -P \sin \varphi + \sqrt{J_2 K(\theta)^2 + ahyp^2 \sin^2 \varphi} - c \cos \varphi = 0 \quad (1)$$

式中: P —压力, φ —内摩擦角, J_2 —应力偏张量的第二不变量, $K(\theta)$ —张量平面角的函数, $ahyp$ —定义修正后屈服面和标准 Mohr-Coulomb 屈服面之间贴合度的参数。

当 $ahyp$ 采用默认参数时, 上式恢复为标准 Mohr-Coulomb 屈服面, 它取接近零的一个数值(如图 1 所示)。

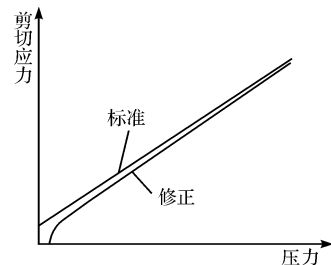


图1 Mohr-Coulomb 屈服面在剪应力—压力空间中的比较

由于土壤具有多相、松散和物性分散的特性, 采用连续体力学理论及其数值解法(有限单元法或者边界元法)很难描述反旋齿切板结土壤过程。离散单元法(DEM)把介质看作由一系列离散的独立运动的粒子(单元)所组成, 粒子的尺寸是细观的, 其运动受经典运动方程控制, 整个介质的变形和演化由各单元的运动和相互位置来描述。但该方法也有其局限性: 离散单元法是为分析离散颗粒的集合而建立的, 它的计算需要花费大量的时间; 离散单元法的参数对计算结果的影响十分复杂, 目前主要通过经验公式和试验的方法确定参数, 所以常存在很大的误差; 对单元间的力学关系进行的假设和近似与实际有差距, 累加后误差较大, 目前只能通过实际试验进行修正。

无网格法利用节点数据建立插值函数, 不需要定义网格, 易处理接触碰撞中的大变形与畸变等有限单元法和边界元法无法处理的问题。无网格法中应用比

较多的方法是 SPH (Smooth Particle Hydrodynamics, 光滑粒子流体动力学) 方法, 这是一种纯拉格朗日方法, 本质上不需要借助于网格, 可以有效地解决上述问题。

为了用有限的空间来模拟无限大的三维土体, 在这里引入无反射边界条件, 它需要用有限域来表示地下空间或大块岩体。对于这类问题, 为了避免边界处波的反射对求解域的影响, 可以对有限域表面施加无反射边界条件来模拟无限大的空间。定义刀具前进方向为 X 向, 竖直方向为 Y 向, 刀轴方向为 Z 向。本研究约束土块 Y 与 Z 方向自由度, 进而得到和实际情况很近似的数值模型, 增加了计算结果的精度, 并约束土块 Y 与 Z 方向自由度。

3 机具结构与运动参数的确定

振动切削其振动方向多为其运动切削方向, 由其切削时脉冲力达到与非振动时不一样的效果。旋耕切削时, 刀具切削土壤时其切削方向主要为 Y 向, 故此处选用振动载荷方向为 Y 向。

设振动切削时对刀具的强迫振动为不衰减的简谐振动^[8], 即:

$$y' = A' \sin (\omega' t + \varphi') \quad (2)$$

式中: y' —刀具位移, A' —刀具振动幅值, ω' —刀具振动角频率, t —时间, φ' —刀具振动相位。

刀具振动的速度为:

$$v_T = \frac{dy'}{dt} = A' \omega' \cos (\omega' t + \varphi') \quad (3)$$

刀具振动的加速度为:

$$a_T' = \frac{dv_T'}{dt} = -A' \omega'^2 \sin (\omega' t + \varphi_0) \quad (4)$$

旋耕切削时, 由旋耕切削理论可知, 刀具端点运动方程为:

$$\begin{cases} x_0 = R \cos \omega t + v_s t \\ y_0 = R \sin \omega t + A' \sin (\omega' t + \varphi') \end{cases} \quad (5)$$

式中: x_0, y_0 —旋耕刀端点在任意时刻的位置坐标, R —旋耕刀端点的转动半径 (旋耕刀回转半径), t —时间, ω —刀具旋转角速度, v_s —机组前进速度。

对其求导可得速度方程:

$$\begin{cases} V_x = -\omega R \sin \omega t + v_s \\ V_y = \omega R \cos \omega t + A' \omega' \cos (\omega' t + \varphi') \end{cases} \quad (6)$$

其刀尖端点的绝对速度:

$$V' = \sqrt{V_s^2 + A'^2 \omega'^2 \cos^2 (\omega' t + \varphi') - 2 V_s \omega R \sin \omega t + \omega^2 R^2 + 2 \omega R A' \omega' \cos \omega t \cos (\omega' t + \varphi')} \quad (7)$$

从式(5~7)反映了刀具运动轨迹及规律。由式

(7) 可知其速度变化较为复杂, 由于 ω' 要大于 ω , 而振幅 A' 远小于 R , 故其运动轨迹为在原旋耕余摆线基础上叠加正弦波纹。这种振动轨迹使刀具与土壤接触力不周期性变化, 刀具侧面所受的摩擦力与粘附力大大减少。其运动示意图如图 2 所示。

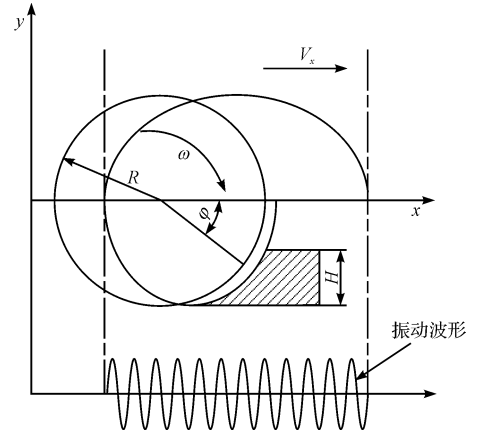


图 2 振动旋耕运动轨迹示意图

旋耕刀平均阻力可直接从仿真软件提取, 其扭矩可由平均力求得。由于旋耕刀切削过程其接触面不断变化, 故用其平均力臂计算。工作中每把刀齿力矩的计算公式为:

$$\tau = \int_0^{t_0} \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \times L_0 \sin \theta dt \quad (8)$$

其中:

$$\theta = \arctan \frac{F_x}{F_y} \quad (9)$$

式中: F_x, F_y — t 时刻刀具所受的横向力与纵向力, L_0 —刀具与土壤接触的平均长度, t_0 —刀具切削时间。

4 数值模拟及数据分析

4.1 数值模拟环境分析

笔者研究振动旋耕刀正转切削土壤的仿真, 因考虑到旋耕机具先凿后耕的整体设计形式及 SPH 法所建模型规则化, 将问题进行一定简化后, 建立如图 3 所示的三维模型。土壤模型的三维尺寸为 $500 \text{ mm} \times 236 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$, 其沟槽三维尺寸为 $500 \text{ mm} \times 110 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 。考虑到整体机具的设计, 凿切刀位于旋耕刀的前方。在机具作业过程中, 为了提高旋耕刀切削土壤的仿真效果, 故在建模型时按凿切刀的凿切宽度与耕深设计一个沟槽。旋耕刀具切入深度为 150 mm , 刀具前进速度为 0.25 mm/ms , 旋转速度为 0.022 rad/ms , 振动方向为 Y 方向。在仿真过程中, 假定刀具为刚性体、切削速度稳定、足够锋利而不考虑磨损, 则切削模型如图 3 所示。刀具材料为 65Mn, 土壤模型参数如章

节 2 所述,由三轴仪测量所得。刀具及土壤的材料参数及仿真如表 1 所示。



图 3 某时刻刀具切削土壤仿真图

表 1 数值模拟环境条件参数

参数名称	数值
土壤密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	2.35
土壤容重/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.57
土壤孔隙度/(%)	33.2
含水率/(%)	11.72
内摩擦角/($^{\circ}$)	23.6
黏聚力/kPa	9.5
抗剪强度/kPa	35
弹性模量/MPa	85.7
泊松比	0.38
剪切模量/MPa	31.05
机组前进速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.25
刀具回转速度/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	2.67~3.33
刀具回转半径/mm	190
刀具厚度/mm	6
耕宽/mm	64
耕作深度/m	150
刀具密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	7.83
刀具泊松比/ σ	0.35
刀具弹性模量/GPa	210
计算时间/s	800

4.2 振动切削及数值模拟实验

低频振动切削频率一般采用 $2\text{ Hz} \sim 150\text{ Hz}$ ^[9],而振动切削土壤振幅一般多为 $0.8\text{ mm} \sim 15\text{ mm}$ 。此振幅在实际切削时较易实现,耕作后土壤结构良好。振动波形多采用正弦波,亦有少量研究采用三角波和矩形波。为避免振动引起刀具共振,故先采用 ANSYS 对刀具进行模态分析,得到其 1~15 阶的固有频率范围为 $112\text{ Hz} \sim 900\text{ Hz}$ 。为了减少工作量且更好的筛选到最适合的振型,本研究先在较大范围内做了一次三因素正交试验,旨在找出适合旋耕切削的范围,正交分析结果为正弦波在频率为 $8\text{ Hz} \sim 20\text{ Hz}$,振幅在 $6\text{ mm} \sim 12\text{ mm}$ 时,振动减阻效果较为明显,而矩形波及三角波减阻效果一般,且脉冲波的产生需较大功率^[10-11]。振幅为 8 mm 时,3 种波形的扭矩如图 4 所示。综合考虑,在此本研究选用正弦波型。

针对 4.1 节所述的切削土壤及旋耕刀,本研究采用正交试验法对振动频率、振幅进行仿真方案的设计,

该方案含有两因子,如果仅仅将变化范围的两端点取为每个因子的水平,就不能很好地反映变化范围中间部分的影响,为此设计一个两因子正交试验:

其因子与水平为:

- A. 振动频率(Hz) $A_1 = 8 \quad A_2 = 10 \quad A_3 = 12 \quad A_4 = 16 \quad A_5 = 18 \quad A_6 = 20$
- B. 振动幅值(mm) $B_1 = 6 \quad B_2 = 8 \quad B_3 = 10 \quad B_4 = 12$

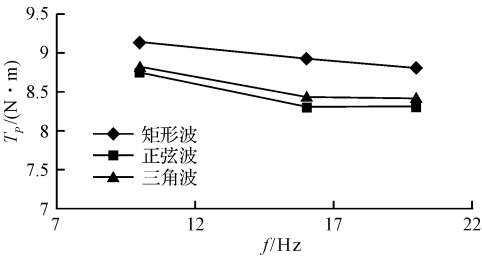


图 4 振幅 8 mm 下各波形扭矩图

根据两因素多水平正交试验,按照每个试验号的水平进行振动旋耕切削土壤的仿真试验,并与无振动(第 13 组)切削时比较。最后提取得到旋耕切削土壤的前进阻力(F_x),纵向力(F_y)及扭矩等数据。由于切削具有周期性,在此提取第二把刀齿数据。数据结果如表 2 所示。

表 2 振动方案及实验结果

No.	A	B	F_y/kN	F_x/kN	$T_p/\text{N} \cdot \text{M}$
1	1	1	0.377	0.645	8.98
2	3	1	0.371	0.626	8.84
3	5	1	0.354	0.604	8.54
4	2	2	0.390	0.598	8.75
5	4	2	0.381	0.571	8.30
6	6	2	0.391	0.559	8.32
7	1	3	0.481	0.552	8.43
8	3	3	0.398	0.521	7.90
9	5	3	0.394	0.511	7.82
10	2	4	0.414	0.487	7.63
11	4	4	0.405	0.473	7.42
12	6	4	0.400	0.480	7.49
13	0.365		0.731	10.54	

将求得各种数据与其他学者在同类小型旋耕机切削实验测得数据相对比。丁为民教授采用反转旋耕在耕深 155 mm 时,测得其力矩为 $14\text{ N} \cdot \text{m} \sim 35\text{ N} \cdot \text{m}$ 之间,与本研究仿真数据相仿,故仿真数据可信。

4.3 振幅及频率对旋耕扭矩的影响

从图 5 以及表 2 中可以定性的得出如下结论:振动旋耕切削可以明显减小旋耕机牵引阻力与扭矩;振幅大小对耕作所需的平均扭矩影响很大;在同样的频率下,振动幅值越大,旋耕所需扭矩越小。当然振幅越大所需激振功耗越大,而且振幅过大对机具的操控及寿命产生极大影响。而随着振动频率的增加,旋耕所

(下转第 152 页)

用电路面积大、调试不方便等问题。

(2) 电路的频率适应范围广,对高、低频键相信号都能产生很好的倍频脉冲,电路的倍频系数可根据实际需要进行选择,与传统的固定倍频系数电路相比,更加灵活、更加实用。

(3) 电路具有转子周期线性预测功能,根据转子当前周期和上一周期的周期计数值,采用线性插值的预测方法,计算出转子下周期的周期预估值,从而有效提高键相信频信号的倍频精度。

有待深入研究的地方在于,建立一个更加合理、有效且便于 FPGA 实现的转子周期预估模型,对转子的运行周期进行预估计算,以进一步提高键相信频信号触发转子振动信号整周期等相位采样的精度,从而进一步提高信号频谱分析的精度。

参考文献 (References):

- [1] 陈新轩,许 安. 工程机械状态检测与故障诊断[M]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [2] 熊诗波,黄长艺. 机械测试技术基础[M]. 3 版. 北京:机械工业出版社,2006.

- [3] MESSINA A R, VITTAL V. Nonlinear, non-stationary analysis of interarea oscillations via Hilbert spectral analysis[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2006, 21 (3): 1234-1241.
- [4] 董永贵,向 莉. 多路振动信号的伪同步采样及其在转子动平衡中的应用[J]. 仪表技术与传感器,2004(8):43-46.
- [5] 任达千,杨世锡,严拱标,等. 一种新型的键相信号处理电路及其误差分析[J]. 汽轮机技术,2003,45(1):49-53.
- [6] 刘 凡,司马文霞,马文营,等. 基于多周期同步和倍频锁相的频率跟踪技术[J]. 高电压技术,2006,32(3):102-104.
- [7] 陈虎勋,田新启. 一种基于 CPLD 的全数字键相信号处理电路[J]. 自动化仪表,2009,30(9):65-70.
- [8] 侯宝生. 基于 VHDL 的数字倍频器设计[J]. 科学与工程,2009,9(3):705-707.
- [9] XU Jin, LI Yong-kang, XIA Jie, et al. Implementation of High-Dynamic Phase-Locked Loop Based on DSP [C]//2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA). Changsha: [s. n.], 2010:494-497.
- [10] RODRIGUEZ-ANDINA J J, MOURE M J, VALDES M D, et al. Features, design tools, and application domains of FPGAs[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2007, 54(4):1810-1823. [编辑:柴福莉]

(上接第 147 页)

需扭矩减小。在振动频率大于 18 Hz 后,随着振动频率的增加,扭矩减小不明显。从分析数据可以看出,在振动频率为 12 Hz ~ 20 Hz 之间,平均扭矩相对无振动时减小 10% 以上。

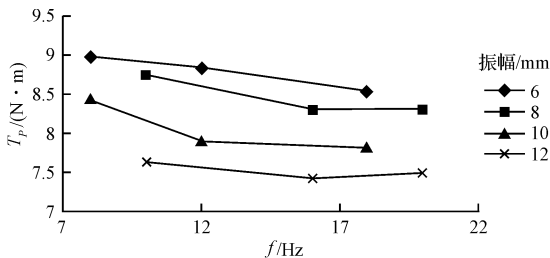


图 5 振动旋耕各方案扭矩图

5 结束语

本研究采用 Ls-dyna 对振动旋耕刀在板结土壤条件下的切削过程进行了三维数值模拟。模拟结果表明,在选择合理的振型、频率、振幅的情况下,振动旋耕切削相对于普通旋耕切削,其扭矩及前进阻力都有很大改善。在正弦波形频率为 12 Hz ~ 20 Hz,振幅为 6 mm ~ 12 mm 时,平均扭矩相对无振动时减小 10% 以上。振动旋耕切削研究为实现减阻节能,降低机具耕作阻力提供了一条有效的技术途径和方法。

参考文献 (References):

- [1] 周丽丽,张平宽,王慧霖,等. 振动切削技术的研究与应用[J]. 煤矿机械,2009,30(2):10-12.
- [2] NIYAMAPA T, SALOKHE V M. Force and pressure distribution under vibratory tillage tool[J]. **Journal of Terramechanics**, 2000, 37(1):139-150.
- [3] BANDALAN E P, SALOKHE V M, GUPTA C P, et al. Performance of an oscillating subsoiler in breaking a hardpan [J]. **Journal of Terramechanics**, 1999, 36(1):117-125.
- [4] LI Qi-yun, LU Li-qun, WANG Xue-yan. Study on the Subsoiling Unit of Subsoiling-rotary-seeder[C]//2004 CIGR International Conference. Beijing: [s. n.], 2004:255-260.
- [5] 邱立春,李宝筏. 自激振深松机减阻试验研究[J]. 农业工程学报,2000,16(6):72-75.
- [6] LEWIS B A. Manual for LS-DYNA soil material model 147, Mclean, VA [R]. USA: Federal Highway Administration Research and Development Turner-Fairbank Highway Research Center, 2004.
- [7] 姜 涛,张 宪,乔 欣,等. 基于 SPH 法的土壤切削三维数值模拟[J]. 机电工程,2009,26(6):44-46.
- [8] 马 晓,左景涛,张 则. 低频振动切削过程的理论研究[J]. 佳木斯大学学报,2005,23(3):469-504.
- [9] 佟富强,张飞虎,陈光军,等. 低频振动切削对加工表面影响的机理研究[J]. 华中科技大学学报,2007,35(z1):68-70.
- [10] 胡火焰. 液压挖掘机铲斗振动掘削减阻及能耗机理研究[D]. 长沙:中南大学机电工程学院,2007.
- [11] 杨晓明,赵 滨,王宝荣. 振动切削技术特点及其应用状况[J]. 机械,2008,35(2):44-46. [编辑:柴福莉]