犁面前部土体表层位移场分布有限元分析*

翟力欣　姬长英　丁启朔　郁隐梅
（南京农业大学工学院，南京 210031）

【摘要】 由三坐标测量机获得犁体曲面的点云数据，然后利用 Pro/E 的逆向造型工具反求出犁体曲面，并将反求模型导入 ANSYS/LS－DYNA 软件中完成犁体耕作过程的动力学模拟仿真。仿真结果表明，在与土体-犁体接触点垂直的平面内，土体位移以与犁体接触点为中心呈环带状向四周逐渐减小。并将模拟结果与土槽试验的结果进行对比分析，验证了模拟过程的可行性。

关键词：犁体曲面　逆向工程　土体位移　有限元　土槽试验
中图分类号：S233.1　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2011)10-0045-06

Analysis of Distribution of Displacement on Soil Surface in Front of Plow with FEM

Zhai Lixin　Ji Changying　Ding Qishuo　Yu Yinmei
(*College of Engineering*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 210031, *China*)

Abstract

The plough surface was re-formed by using Pro/E's functions based on measured points, which were scaled with 3-D coordinate scale instrument. And then ANSYS/LS－DYNA software was used to carry out the turning dynamics simulation of the tilling plough. The direction of soil velocity was vertical to the surface of plough, and its distribution was like radiating. The distribution of equivalent stress was like isoline, and the data was becoming smaller from the contact point to outer. The results of simulation were verified by the data of experiments in soil bin.

Key words　Plough surface, Reverse engineering, Soil displacement, Finite element analysis, Experiment in soil bin

引言

随着计算机技术的发展和性能的提高，对各种非线性理论模型的改进，以及对土壤本构关系逐步深入地揭示，有限元法成为土壤深松部件与土壤接触系统研究中应用较多的理论分析方法[1]。有限元方法可以用来预测土壤的应力分布、变形状况、破坏的位置、耕作部件的法向和切向的应力分布，进而为耕作部件形状的优化设计提供依据[2~3]。

Yong 等首次应用二维有限元方法分析了土壤变形和应力场的分布状况[4]。Chi 等采用三维非线性有限元方法分析了土壤及耕作部件表面的应力分布状况、土壤的破坏区域、位移状况，应用此方法还模拟了不同形状耕作部件的土壤切削行为[5~6]。陆怀民将土壤看作粘弹塑性体对土壤切削问题进行了模拟[7]。Arraya 等用三维有限元研究了带高压空气射流的深耕铲的土壤切削性能[8]。Fielke 用二维有限元模拟耕作部件刃口的几何形状对切削性能的影响，分析了牵引力、竖向分力及耕作部件边缘的土的位移模式[9]。郭志军等采用二维有限元分析了抛物面型耕作部件的切削性能，应用相同的方法还分析了仿生弯曲形切削工具的切削性能，得到不同的纵深比土壤具有不同的位移场[10~11]。Kushwaha 等采用修正的 Duncan－Chang 双曲线应力-应变模型建立土壤本构关系，考虑了土壤变形过程中的材料非线性和几何非线性，建立了二维有限元模型，预测

收稿日期：2010－10－27　修回日期：2010－12－14
* 国家自然科学基金资助项目(50675107)
作者简介：翟力欣，博士生，主要从事土壤-机器系统研究，E-mail：xiaozhaixin@sohu.com
通讯作者：姬长英，教授，博士生导师，主要从事土壤-机器系统研究，E-mail：chyji@njau.edu.cn

了窄齿在粘重土壤中运动的耕作阻力[12]。

研究耕作部件土壤切削问题的目的是为了减小阻力以节省能耗,并且在保持对土壤良好耕作效果的同时减少耕作部件的磨损、降低工作阻力、提高工作效率,是人们一直关注的问题[13~15]。故本文采用计算机模拟仿真的方法对在耕作过程中土壤表层位移场的分布进行预测,并与试验结果进行对比分析,为减少复杂的室内试验提供依据。

1 建立犁体曲面模型

犁体曲面模型的建立是基于 Pro/E 的犁体曲面逆向造型的逆向工程(reverse engineering,简称 RE),它已发展为 CAD/CAM 系统中的一个相对独立的分支[16]。所谓逆向工程,就是从实际物体上采集大量的三维坐标点,并由此建立该物体的几何模型。

为了保证测量精度,本文采用 MISTRAL070705 型三坐标测量机采集犁体曲面上的点数据。Pro/E 的小平面特征和重新造型特征构成了一个完整的犁体曲面逆向造型设计的解决方案。小平面建模包括:输入犁体曲面的点云,纠正点云中的错误,创建包络,精调以完善多面(三角形化)犁体曲面。重新造型则是一个逆向工程环境,用来在多面(三角形化)数据的顶部重建犁体曲面 CAD 模型。犁体曲面逆向造型基本过程为:在 Pro/E 环境下读入犁体曲面空间点数据,创建包络,调整完善小平面,然后通过重新造型生成犁体曲面。根据这建模过程,生成的犁体曲面模型如图 1 所示。

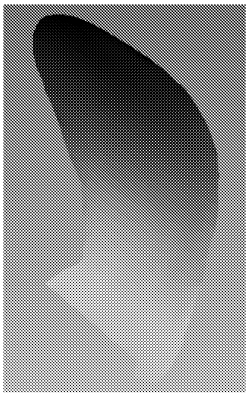


图 1 犁体的 Pro/E 模型

Fig. 1 Plough model in Pro/E

2 水田土壤力学模型

土壤是一种松散的颗粒堆积物,由固体颗粒、液体和气体所组成的三相多孔介质[7]。尤其是农业水田土壤,是一种具有流变性质的粘/弹塑性体。对于一个粘塑性单轴压缩模型,可以把总应变$\{\varepsilon\}$分解为弹性应变$\{\varepsilon\}_e$和粘塑性应变$\{\varepsilon\}_{vp}$[17]即

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon\}_e + \{\varepsilon\}_{vp} \tag{1}$$

其中

$$\{\varepsilon\}_e = [D^{-1}]\{\sigma\} \tag{2}$$

式中 $[D^{-1}]$——应力应变矩阵

$\{\sigma\}$——弹性应力

粘塑性应变率$\{\dot{\varepsilon}\}_{vp}$与当前应力、应变历程和应力路径等因素有关,但最简单的选择就是认为它仅取决于当前应力,即

$$\{\dot{\varepsilon}\}_{vp} = \lambda F \frac{\partial Q}{\partial \{\sigma\}} \tag{3}$$

式中 λ——控制粘塑性流动变化率的流动参数

F——屈服面函数 Q——塑性势函数

土壤的破坏条件一般采用 D-P 准则,即

$$F_1(p,q) = 3\alpha p + \frac{1}{\sqrt{3}}q - K = 0 \tag{4}$$

$$q = Mp + \bar{c} \tag{5}$$

其中

$$\alpha = \frac{\sin\phi}{\sqrt{3}\sqrt{3+\sin^2\phi}} \quad K = \frac{\sqrt{3}c\cos\phi}{\sqrt{3+\sin^2\phi}}$$

$$M = -3\sqrt{3\alpha} \quad \bar{c} = \sqrt{3}K$$

式中 p、q——八面体应力

$\bar{c}$——土壤内聚力

ϕ——土壤内摩擦角

3 犁体耕作过程的模拟

犁体曲面对土壤的耕作过程属于非线性的结构冲击动力学问题,其中土壤呈现材料非线性,犁体曲面与土壤之间的接触属于状态非线性,因而采用非线性动力分析的方法来探讨犁体曲面对土壤的耕作过程。由于研究对象为含水率较高的粘性土壤,故选用 ALE 方法作为模拟算法[18]。

3.1 犁体切割土壤的有限元模型

将上述建立的犁体曲面,保存为 .IGES 格式并导入 ANSYS 中,同时在此环境下建立长方体形状的土体模型,犁体-土体接触模型如图 2 所示。

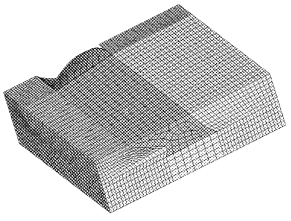


图 2 犁体和土垡的有限元模型

Fig. 2 FEM of plough and soil

本文采用的犁体是南京农业大学工学院农机实验室的现有犁体。犁体材质为 65 Mn,弹性模量 E = 210 GPa,泊松比为 0.3。在耕作过程中,犁体以耕深 25 cm、耕速 0.17 m/s 垂直于土体的横断面方向运动。将犁体曲面的单元模型定义为 SOLID164 实体单元,材料属性定义为刚体。土体单元模型定义为 SOLID164 实体单元,其本构关系为弹塑性模型,材料为 MAT147(MAT_FHWA_SOIL),材料模型在 K 文件中添加。

3.2 网格划分及接触定义

LS-DYNA 建立有限元模型过程中,对形状规则的土壤模型采用扫掠的方式(sweep)划分网格,

对既不满足扫掠划分条件也不满足映射划分(mapped)条件的犁曲面采用自由(free)网格划分方式。

接触问题的处理是衡量有限元软件分析能力的一个重要指标[19]。在耕作过程中,运动的犁体曲面对不动的土壤进行切削破坏,所以两者的接触类型选择接触面为犁体、目标面为土体的面-面侵蚀接触即 ESTS 的接触类型。

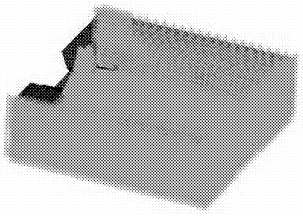


图 3　约束后的有限元模型

Fig. 3　FEM of plough and soil with restriction

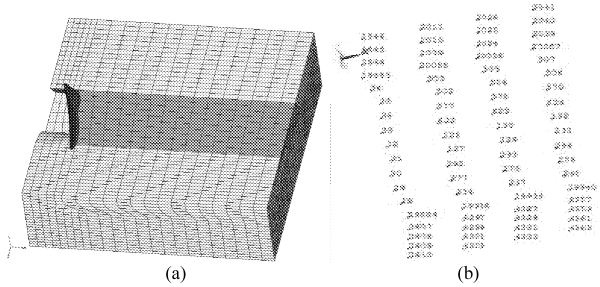
在翻土过程中需将土垡下底面自由度全部约束,同时约束犁体前进方向 x 以外的 y 和 z 方向自由度,然后软件将约束自动转换到节点上,如图 3 所示。

3.3　K 文件修改

ANSYS 进行前处理后,会输出一个后缀为 .K 的文本文件。通过 Ultraedit 文本编辑软件进行修改,添加土体的 * MAT147 关键字,添加犁体速度关键字,修改计算终止时间关键字、时间步长控制关键字等。通过直接剪切试验得到土壤弹性模量为 1 159.63 kPa、剪切模量为 414.15 kPa、内聚力为 9.56 kPa、内摩擦角为 15.7°,进而计算得到泊松比为 0.4,Ahyp 为 1.7×10^3,并测得土壤含水率为 34%,土粒相对密度为 2.43 等参数。将修改后的 K 文件进行保存。

3.4　模拟结果

将修改的 K 文件输至 LS-DYNA 求解器进行求解计算。求解结束后,通过 lsprepostd 程序可得到土壤初期各个时刻的位移云图。为了分析土体表面点的位移场分布情况,选取土体模型表面的 72 个点作为研究对象,如图 4 所示。利用 ANSYS 软件读入模型结果,经通用后处理将研究节点的位移进行提取,并针对某一时刻对提取的数据应用 Matlab 平台下编写的后处理程序进行分析,最终得到土体表面监测点随时间变化的位移变化规律,其结果如图 5 所示。



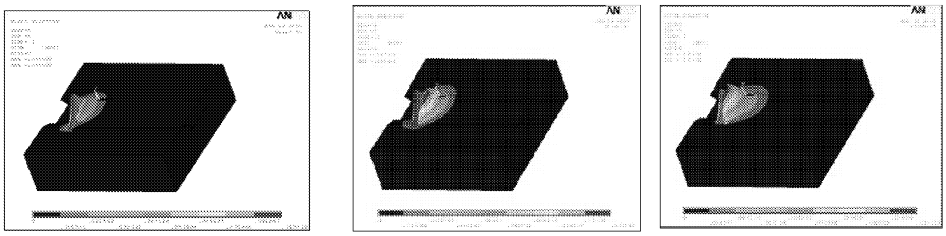
(a)　(b)

图 4　位移场研究对象

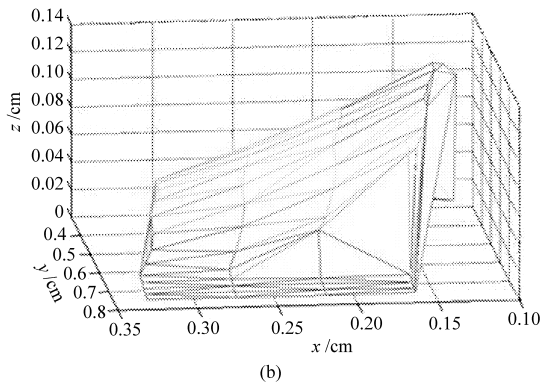
Fig. 4　Research object of displacement

(a) 土体表面点的选择　(b) 土体表面点的简化

拟合图中的 x、y 坐标表示土体研究点的平面位置,z 坐标表示各个研究点所发生的位移。由图 5 的位移云图可以看出,只有接近犁体的土体发生较大的位移,且位移以接触点为中心呈环带状分布,并向四周逐渐减小。就土壤变形而言,当土壤受到的外力作用超过了土壤内部最薄弱部分发生运动所需



(a)



(b)

图 5　不同时刻位移场的分布

Fig. 5　Displacement distribution at different times

(a) 0.1 ~ 0.3 s 不同时刻的位移云图　(b) 0.3 s 时的拟合曲面

要的应力或临界应力,土壤就要发生变形。在犁体与土壤相互作用的起始阶段,土壤由于内部产生挤压而隆起,随着犁体的前进土壤内部的挤压程度变大,以至于使土壤沿着犁体曲面爬行,随着犁体的继续前进土壤内部的挤压力继续加大,最终使得部分土壤团块破碎并分离,进而产生较大的位移。

4 试验验证

4.1 位移场测量系统

土体表层位移场的测量系统主要包括计算机图像处理系统和双目摄像机两部分,如图 6 所示。在试验过程中,双目摄像机主要作用是对土体表层进行实时拍摄,并将图片提供给图像处理系统;计算机图像处理系统主要是对图片进行实时处理,以记录土体表层的变形过程。在测量系统中,双目摄像机的测距是关键。本文选用由 Point Grey 公司生产的 Bumblebee2 型双目摄像机,其最大的优点就是成像模型简单,能大大降低运算量,提高系统处理的实时性。

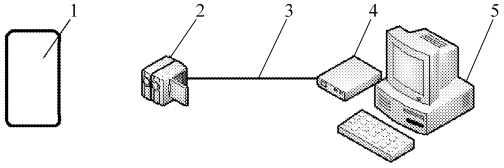


图 6 位移场测量系统组成

Fig. 6 System of displacement measurement

1. 被测物 2. 双目摄像机 3. 数据传输线 4. 数据采集系统 5. 计算机

图 7 为双目立体视觉模型的示意图。利用双目系统可以确定具有像平面坐标点(x_1, y_1)和(x_2, y_2)的世界点 W 的坐标(X, Y, Z)。当摄像机某一个 CCD 坐标系统和世界坐标系统重合后,像平面与世界坐标系统的 XY 平面也是平行的。上述条件下,W 点的 Z 坐标对两个摄像机坐标系统都是一样的[19]。在这种情况下双目成像可借助在 XZ 平面的立体视觉测距原理示意图(图 8)来分析。

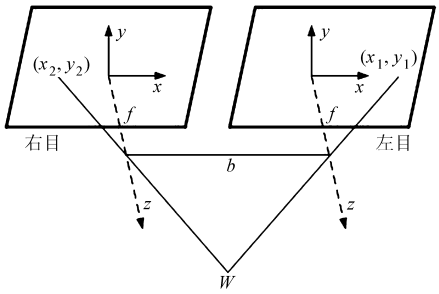


图 7 双目立体视觉模型

Fig. 7 Binocular stereo vision model

图 8 中左、右两个 CCD 像机光学中心相距 b,即为系统的基线,光轴平行,具有相同的焦距 f,Q 是待测距物点,到像机的垂直距离为 R,在左、右像机上形成的像点分别是 Q_1 和 Q_2。利用相似三角形性质可得

$$\frac{R}{p_1} = \frac{R+f}{p_1 + x_2} \quad (6)$$

$$\frac{R}{p_1 + b} = \frac{R+f}{p_1 + b + x_1} \quad (7)$$

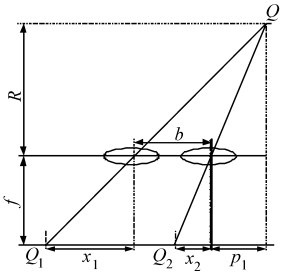


图 8 平面的立体视觉测距原理示意图

Fig. 8 Principle of stereo vision ranging

由式(6)和(7)得 Q 点的距离 R 为

$$R = \frac{bf}{x_1 - x_2} \quad (8)$$

式(8)中的 $x_1 - x_2$ 是 Q 点在左、右两幅图像上像点位置差(又称为视差),它通过图像配准方法在两个像面上找出对应点而得到。

4.2 土体表层位移场的测量与计算

系统的测试精度是保证测量数据可信性的一项必不可少的技术工作,只有清楚地了解测量系统的精度,才可以更加合理地利用测量所得的试验数据。为了确定测量系统的测量精度,对待测点的数据进行误差检定,如图 9 所示。参与标定的是图 9b 所示的红色区域中 60 个黑白相间的角点。得到目标点在世界坐标系(摄像机左 CCD 坐标系)中位置的计算值与实测值之间的差值为标定误差。图 10 是参与标定的 60 个点的误差。

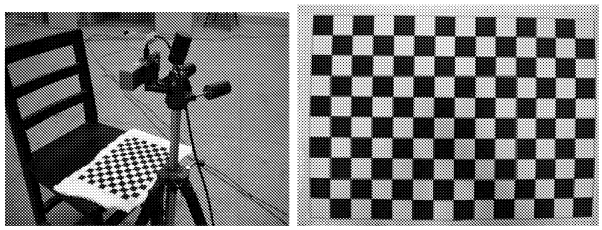


图 9 误差检定

Fig. 9 Errors measurement

(a) 拍摄过程 (b) 参与误差检定的 60 点

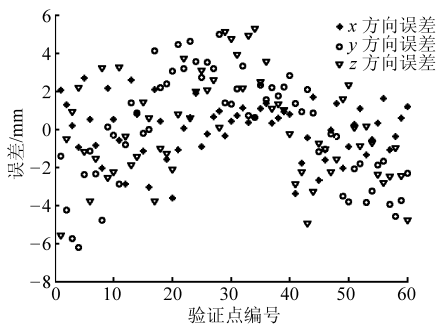


图 10 参与标定 60 个点的误差

Fig. 10 Errors of 60 points

由试验结果可见,目标点在世界坐标系中位置

坐标的各个分量上最大标定误差小于 6 mm。在本文的研究中，此误差完全可以接受。

为了测量土壤表层的位移场，并能较好地与数值分析结果进行对比，应将土壤表面处理平整，且使犁体以与模拟的耕作条件相同情况下进行工作。在耕宽 25 cm，耕作方向上 45 cm 为长度的矩形区域内，以间距为 15 cm，均匀地在矩形区域放置测量检测物，监测点分布如图 11 所示。利用双目摄像机拍下耕作过程中的图片，其中图 12 为耕作过程的始末两幅图片。利用双目摄像机的测距原理[19~20]计算不同时刻 8 个监测点的位移结果，并将其与数值分析中对应点的位移进行比较，如表 1 所示。误差值基本在 15% 以内，在很大程度上说明数值模拟的可行性。同时，对犁体的翻垡性能进行了检测，即若 1~4 检测点在犁体耕后的 Y 向位移大于其耕宽 25 cm，则说明犁体的翻垡性能良好。

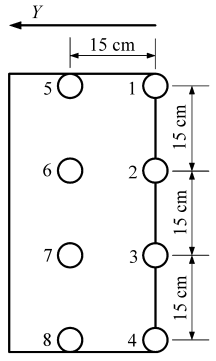
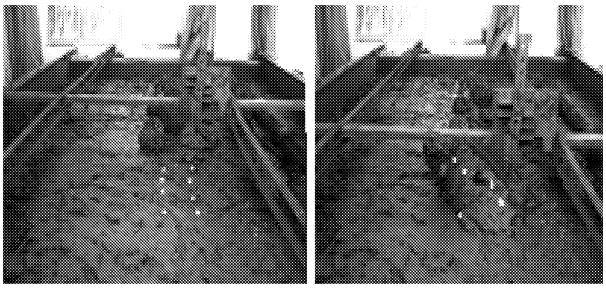


图 11　监测点分布

Fig. 11　Distribution of measured objects



(a)　(b)

图 12　耕作过程

Fig. 12　Tillage process

(a) 耕作起始状态　(b) 耕作终止状态

4　结论

(1)采用三坐标测量机采集犁体曲面上的点数据，并利用 Pro/E 的反求技术建立了犁体曲面模型。

(2)模拟土壤的材料模型采用 MAT147(MAT_FHWA_SOIL)材料模型，该模型采用修正的 D－P 屈服准则，同时考虑了塑性硬化、塑性软化、应变速率效应、土体粘性和孔隙水压力效应，其数值模拟的结果与试验结果相吻合。

(3)对犁体模型运用显式动力学的方法进行耕作土壤的数值模拟，接触算法采用对称罚函数法，接触类型采用面-面侵蚀接触。通过模拟得到土体的位移云图的分布。

表 1　试验与数值分析结果

Tab. 1　Results of experiment and simulation

测量时间/s	测量点	模拟位移/cm	测量位移/cm	误差/%	Y 向位移/cm
0.5	1	21.96	24.12	8.96	11.24
	2	10.34	11.15	7.26	5.87
	3	9.18	10.16	9.65	4.15
	4	7.62	8.20	7.07	0
	5	17.25	18.56	7.06	
	6	8.79	9.61	8.53	
	7	8.22	8.97	8.36	
	8	7.43	8.04	7.59	
1.0	1	24.98	27.69	9.79	16.13
	2	19.39	21.38	9.31	10.40
	3	18.36	20.00	8.20	7.74
	4	7.86	8.20	4.15	0
	5	20.45	22.53	9.23	
	6	10.44	11.58	9.85	
	7	9.02	9.53	5.35	
	8	7.59	8.04	5.59	
1.5	1	44.99	49.97	9.97	30.07
	2	41.85	46.19	9.40	21.62
	3	36.99	41.04	9.87	19.24
	4	7.94	8.20	3.17	0
	5	20.98	22.84	8.14	
	6	19.92	21.93	9.17	
	7	19.02	19.98	4.80	
	8	7.89	8.04	1.87	
2.0	1	50.15	54.96	8.75	37.95
	2	42.55	47.26	9.97	27.46
	3	39.72	44.75	11.24	24.22
	4	11.43	12.86	11.12	8.52
	5	38.02	42.51	10.56	
	6	20.11	22.89	12.15	
	7	20.06	21.61	7.17	
	8	9.57	10.78	11.22	
2.5	1	57.37	67.27	14.72	48.79
	2	55.67	64.97	14.31	37.05
	3	49.62	55.71	10.93	31.35
	4	17.89	20.24	11.61	12.34
	5				
	6				
	7	31.33	36.34	13.79	
	8	21.46	24.97	14.06	
3.0	1	62.67	75.22	16.68	52.55
	2	58.48	66.97	12.68	38.00
	3	50.39	56.24	10.40	31.95
	4	20.88	24.72	15.53	15.06
	5				
	6				
	7				
	8	25.98	30.78	15.59	

(4)从定性、定量上同时分析了仿真结果的正确性,表明建立的有限元模型适合于土体耕作的数值仿真。

参 考 文 献

1 Kushwaha R L, Zhang Z X. Evaluation of factors and current approaches related to computerized design of tillage tools: a review[J]. Journal of Terramechanic, 1998, 35(1): 69 ~ 86.

2 Oñate E, Rojek J. Combination of discrete element and finite element methods for dynamic analysis of geomechanics problems [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2004, 193(27 ~ 29): 3 087 ~ 3 128.

3 夏俊芳,张国忠,许绮川,等. 多熟制稻作区水田旋耕埋草机的结构与性能[J]. 华中农业大学学报,2008,27(2):331 ~ 334.
Xia Junfang, Zhang Guozhong, Xu Qichuan, et al. Research on the mechanized technology of rotary tillage and stubble-mulch for paddy field under multiple rice cropping system[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2008, 27(2): 331 ~ 334. (in Chinese)

4 Yong R N, Hanna A W. Finite element analysis of plane soil cutting[J]. Journal of Terramechanic, 1977, 14(3): 103 ~ 125.

5 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.

6 Chi L, Kushwaha R L. Finite element analysis of soil forces on two shapes of tillage tool [J]. Canadian Agricultural Engineering, 1991, 33(1): 39 ~ 45.

7 陆怀民. 切土部件与土壤相互作用的粘弹塑性有限元分析[J]. 土木工程学报,2002,35(6):79 ~ 81.
Lu Huaimin. Finite element analysis for the interaction of soil cutting part and soil[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(6): 79 ~ 81. (in Chinese)

8 Arraya K, Gao R. A non-linear three-dimensional finite element analysis of subsoiler cutting with pressurized air injection [J]. J. Agric. Engng. Res., 1995, 61(2): 115 ~ 128.

9 Fielke J M. Finite element modeling of the cutting edge of tillage implements with soil[J]. J. Agric. Engng. Res., 1999, 74(1): 91 ~ 101.

10 郭志军,周志立,佟金,等. 抛物线型切削面刀具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 Zhijun, Zhou Zhili, Tong Jin, et al. A 2-D finite element analysis for cutting performance of a parabolic curved cutting surface[J]. Journal of Luoyang Institute of Technology, 2002, 23(4): 1 ~ 4. (in Chinese)

11 郭志军, 周志立. 仿生弯曲形切削工具切削性能的二维有限元分析[J]. 机械工程学报,2003,39(9):106 ~ 109.
Guo Zhijun, Zhou Zhili. 2D finite element analysis for the cutting performance of bionic curved cutting tools[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(9): 106 ~ 109. (in Chinese)

12 Kushwaha R L, Shen J. Finite element analysis of the dynamic interaction between soil and tillage tool[J]. Trans. of the ASAE, 1995, 37(5): 1 315 ~ 1 319.

13 徐中华,王建华. 有限元分析土壤切削问题的研究进展[J]. 农业机械学报,2005,36(1):134 ~ 137.
Xu Zhonghua, Wang Jianhua. Advances in finite element analysis of soil cutting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(1): 134 ~ 137. (in Chinese)

14 郭志军,佟金,周志立,等. 耕作部件——土壤接触问题研究方法分析[J]. 农业机械学报,2001,32(4):102 ~ 104.
Guo Zhijun, Tong Jin, Zhou Zhili, et al. Research method on the interacting problem of tillage toolsoil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(4): 102 ~ 104. (in Chinese)

15 郭志军,佟金,周志立,等. 深松技术研究现状与展望[J]. 农业工程学报,2001,17(6):169 ~ 174.
Guo Zhijun, Tong Jin, Zhou Zhili, et al. Review of subsoiling techniques and their applications[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2001, 17(6): 169 ~ 174. (in Chinese)

16 张士国. 基于 Pro/ENGINNER 二次开发的犁体曲面计算机辅助设计研究[D]. 南京:南京农业大学, 2007.
Zhang Shiguo. Researeh on CAD of plough surface based on further development of Pro/ENGINEER software[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2007. (in Chinese)

17 欧文,辛顿. 塑性力学有限元——理论与应用[M]. 北京:兵器工业出版社,1989.

18 李裕春,时党勇,赵远. ANSYS 10.0/LS - DYNA 基础理论与工程实践[M]. 1 版. 北京:中国水利水电出版社,2006.

19 徐光佑. 计算机视觉[M]. 北京:清华大学出版社,2002.

20 王力超,熊超,王晨毅,等. 基于竞争机制的简化双目立体视觉测距算法及系统设计[J]. 传感技术学报,2007,20(1):150 ~ 153.
Wang Lichao, Xiong Chao, Wang Chenyi, et al. Simplified binocular stereo distance-measurement algorithm and a system based on competition[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(1): 150 ~ 153. (in Chinese)