

# 犁曲面的动力学仿真研究

张延<sup>1,2</sup>, 刘娟<sup>3</sup>

(1. 大连理工大学, 辽宁大连 116024; 2. 黄河水利职业技术学院, 河南开封 475004; 3. 开封广播电视大学, 河南开封 475004)

**摘要** 采用数学软件 MathCAD 建立了翻土型犁曲面的数学模型, 利用 ANSYS/LS-DYNA 建立了犁曲面 - 土壤系统显式动力分析的仿真模型, 并通过物理样机试验对模型的仿真结果进行了验证。

**关键词** 犁曲面; 显式动力分析; 牵引阻力

**中图分类号** S222.1 **文献标识码** A **文章编号** 0517 - 6611 (2009) 23 - 11160 - 03

## Simulation Study on Kinetics of Plow Surface

ZHANG Yan et al (Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024)

**Abstract** The mathematical model of uncovering plow surface was established with mathematical software MathCAD. The simulation model of plow surface-soil system for explicit dynamic analysis was established with ANAYS/LS-DYNA, and its simulation result was verified by physical prototype.

**Key words** Plow surface; Explicit dynamic analysis; Traction resistance

犁作为农业田间作业的基本工具对农业生产起着重要作用。犁的工作性能(即碎土、翻土性能), 主要由犁曲面的形状决定。另外, 犁曲面的形状还直接决定着犁耕的工作效率。目前, 犁曲面的形状优化已成为国内外许多学者研究犁体工作性能的关键。

### 1 犁体曲面的工作原理

犁体曲面的功能主要表现为起土、翻土和碎土<sup>[1]</sup>, 其工作过程如下:

(1) 切垡: 铧刃和胫刃分别沿水平和垂直面切出土垡的底面和左侧面, 其耕深为  $a$ 、耕宽为  $b$ 。

(2) 推垡: 被切出的土垡在犁铧面和犁胸的作用下, 左边被抬起, 绕右下角  $D$  点回转。

(3) 翻垡: 土垡在回转过程中, 通过直立状态, 然后在犁翼的作用下继续绕  $C'$  点回转, 最后靠在前一行程的土垡上(图 1)。

假定土垡在翻转过程中不变形、无侧移并且始终绕一棱角转动, 则每一垡片在翻转后均保持确定的几何位置。实现土垡的稳定铺放即彻底翻扣(不出现回垡现象)是犁体曲面工作和设计的关键。是否回垡主要取决于犁曲面的形状, 即曲面的设计参数及耕深、耕宽等。

以临界状态为研究对象, 确定土垡翻转过程中不产生回垡的基本条件, 可为犁体曲面的设计提供参考。经计算, 土垡的宽深比一般为  $k \geq 1.27$ 。 $k$  值稍大可保证翻垡稳定, 但  $K$  值过大时单犁体幅宽和垡块较大, 形成的垄沟较深。一般轻沙壤土  $k = 1.1 \sim 1.5$ , 一般土壤  $k = 1.3 \sim 2.0$ , 黏重潮湿土壤  $k = 2 \sim 3$ <sup>[2]</sup>。

### 2 犁曲面数学模型的建立

**2.1 导曲线的数学模型** 由图 2 可知, 直线 I 和 II 的方程可分别表示为:

$$I: y = x \cdot \tan \epsilon \tag{1}$$

$$II: y = h_{\max} - (x - L) \cdot \tan (90^\circ - \Delta \epsilon) \tag{2}$$

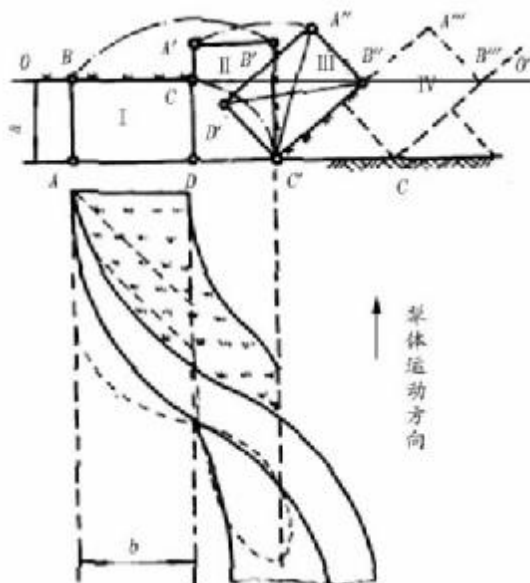


图 1 翻垡过程

Fig. 1 Turning process

直线 I 和直线 II 交点的坐标可通过 (1) (2) 联立求得:

$$\begin{cases} x_E = \frac{h_{\max} + L \cdot \tan (90^\circ - \Delta \epsilon)}{\tan (90^\circ - \Delta \epsilon) + \tan \epsilon} \\ y_E = x_E \cdot \tan \epsilon \end{cases} \tag{3}$$

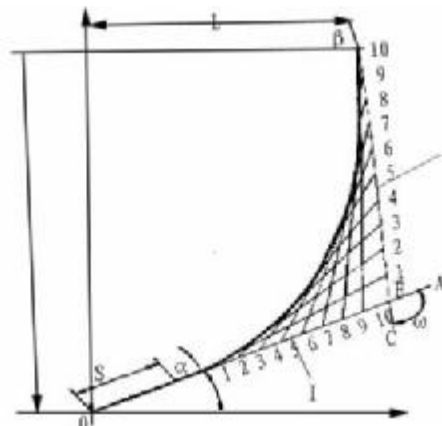


图 2 导曲线的形成原理

Fig. 2 Formation principle of oriented curve

基金项目 河南省教育厅自然科学基金(2006110006)。

作者简介 张延(1973 -), 男, 满族, 河南开封人, 硕士, 讲师, 从事数控技术、CAD/CAM 技术研究。

收稿日期 2009-04-22

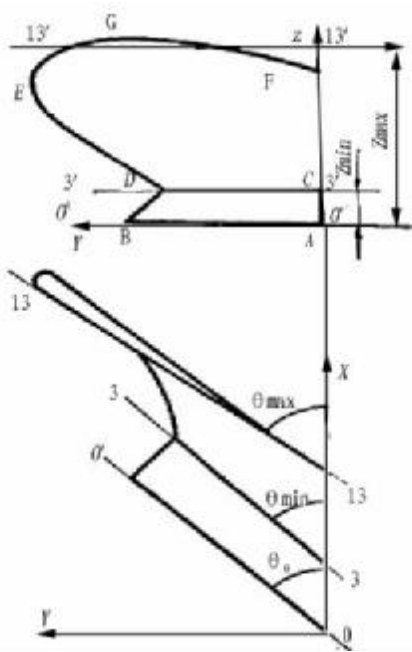


图3 犁体曲面轮廓图

Fig.3 The curved surface contour of plow

逐个将直线 I 和直线 II 上相应的点连接, 求出该组数的最小值。即为导曲线上相应于元线号  $n$  的开度数值, 其坐标为:

$$\begin{cases} x(n) = x(n, i)_{\min} \\ z(n) = \Delta h \cdot n \end{cases} \quad (4)$$

**2.2 犁体曲面的数学模型** 假设第  $n$  根直元线与导曲线交点的坐标为  $xD(n)$ 、 $yD(n)$ , 由图 3 中的俯视图, 得到以下几何关系<sup>[1]</sup>:

$$\begin{aligned} x(n, i) = s \cdot \cos \varepsilon + i \cdot \frac{h + \frac{h}{\eta} \cdot \tan(\omega - \varepsilon)}{\tan(\omega - \varepsilon) + \tan \varepsilon} - s \cdot \cos \varepsilon + [\Delta H \cdot n - s \cdot \sin \varepsilon + i \cdot \frac{h + \frac{h}{\eta} \cdot \tan(\omega - \varepsilon)}{\tan(\omega - \varepsilon) + \tan \varepsilon} - s \cdot \sin \varepsilon] \\ \times \frac{h + \frac{h}{\eta} \cdot \tan(\omega - \varepsilon)}{\tan(\omega - \varepsilon) + \tan \varepsilon} - i \cdot \frac{h + \frac{h}{\eta} \cdot \tan(\omega - \varepsilon)}{\tan(\omega - \varepsilon) + \tan \varepsilon} - \frac{h}{\eta} - s \cdot \cos \varepsilon - i \cdot \frac{h + \frac{h}{\eta} \cdot \tan(\omega - \varepsilon)}{\tan(\omega - \varepsilon) + \tan \varepsilon} - s \cdot \cos \varepsilon \\ \frac{h + \frac{h}{\eta} \cdot \tan(\omega - \varepsilon)}{\tan(\omega - \varepsilon) + \tan \varepsilon} \cdot \tan \varepsilon + i \cdot \frac{h + \frac{h}{\eta} \cdot \tan(\omega - \varepsilon)}{\tan(\omega - \varepsilon) + \tan \varepsilon} \cdot \tan \varepsilon - s \cdot \sin \varepsilon - i \cdot \frac{h + \frac{h}{\eta} \cdot \tan(\omega - \varepsilon)}{\tan(\omega - \varepsilon) + \tan \varepsilon} - s \cdot \sin \varepsilon \end{aligned} \quad (7)$$

根据轮廓点的横坐标确定直元线方程中  $x$  的取值范围。改变元线号  $n$  将得到一系列直元线的参数方程。从而得到不同的直元线表达式和不同的犁曲面模型。根据得到的犁曲面的直元线参数方程, 在 Pro/Engineer 中创建犁体曲面的实体模型<sup>[4]</sup>。

**3 显式动力学有限元分析**

基于已建立的犁曲面—土壤系统的仿真模型, 退出 ANSYS 前处理, 进入 LS-DYNA 求解器, 对能量选项、体积粘滞系数、求解时间等进行设定, 并将系统合力 (RCFORC) 等的 ASCII 信息写入关键字文件 (K 文件), 将 K 文件输入 LS-DYNA 求解器进行求解计算<sup>[5]</sup>。求解结束后, 在 lsprepostd 后处理程序中可察看犁曲面翻土的仿真过程 (图 4)。犁耕过程中犁体所受的牵引阻力如图 5 所示。耕作速度分别为 1.33、2.00 和 2.33 m/s 时, 犁曲面所受到的牵引阻力分别为 5.44、

$$\begin{cases} xD(n) = OO' \cdot \cos \theta_0 + x(n) \cdot \sin \theta_0 \\ yD(n) = OO' \cdot \sin \theta_0 - x(n) \cdot \cos \theta_0 \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $\theta_0$  为初始元线角。

经整理, 得曲面元线表达式为:

$$\begin{cases} Z = Z(n) \\ Y = Y(n) = yD(n) + \tan \theta(n) \cdot [X(n) - xD(n)] \\ X = X(n) = [y(n) - yD(n) + \tan \theta(n) \cdot xD(n)] / \tan \theta(n) \end{cases} \quad (6)$$

**2.3 在 MathCAD 中建立犁体曲面的数学模型** 选择耕深  $a$ 、耕宽  $b$ 、导曲线高度与开度比  $\eta$ 、直线 I 和 II 被分割的份数  $m$ 、切土角  $\varepsilon$ 、导曲线两 endpoint 切线夹角  $\omega$ 、直线段长度  $S$ 、初始元线角  $\theta_0$ 、元线号  $n$ 、元线角  $\theta(n)$ 、防漏耕的重叠宽度  $\Delta b$  ( $\Delta b = 20 \sim 30 \text{ mm}$ ) 和最小元线角所在高度  $z_{\min}$  为自变量<sup>[2]</sup>。其中,  $a, b, m, S, \theta_0$  和  $z_{\min}$  为固定自变量,  $\eta, \varepsilon, \omega, n$  和  $\theta(n)$  为可变自变量。土堡的耕深和耕宽为  $a = 350 \text{ mm}, b = 450 \text{ mm}$ , 犁曲面最高点  $h_{\max} = 570 \text{ mm}$ 。选择适当的直元线数目不仅可较准确地表达犁曲面的形状, 还不会过多增加绘制犁曲面所用的时间, 因此选取  $\Delta h = 30 \text{ mm}$ , 故直元线数目为 20 条, 元线号  $n$  的取值范围为  $0 \sim 19$ 。直线段长度一般为  $S = 30 \sim 60 \text{ mm}$ , 当  $S$  取较大值时, 翻土作用较强<sup>[3]</sup>。因此取  $S = 60 \text{ mm}$ 。防漏耕的重叠宽度  $\Delta b = 20 \text{ mm}$ , 直线 I 和 II 被分割的份数  $m = 7$ <sup>[2]</sup>, 初始元线角  $\theta_0 = 36^\circ$ <sup>[3]</sup>,  $z_{\min} = 90 \text{ mm}$ <sup>[1]</sup>。根据相关资料<sup>[1]</sup>, 求得土堡铺放角  $\delta = 51.06^\circ$ , 图 3 中犁刃线 endpoint B 的坐标为  $(647, 470, 0)$ , 壁翼线 endpoint E 的坐标为  $y_E = 655, z_E = 560$ , 壁翼线与犁翼线的交点 D 的坐标为  $y_D = 253, z_D = 90$ , 得直元线表达式:

5.58 和 5.73 kN。

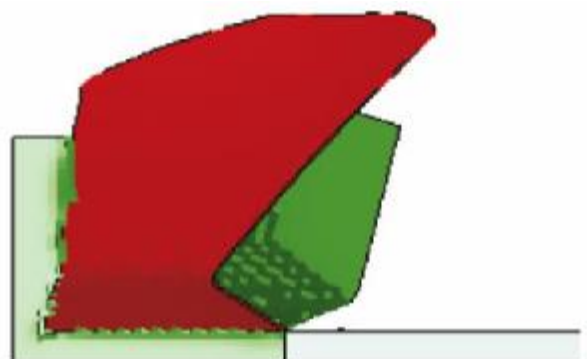


图4 犁体曲面翻土仿真

Fig.4 The curved turning simulation of plow body

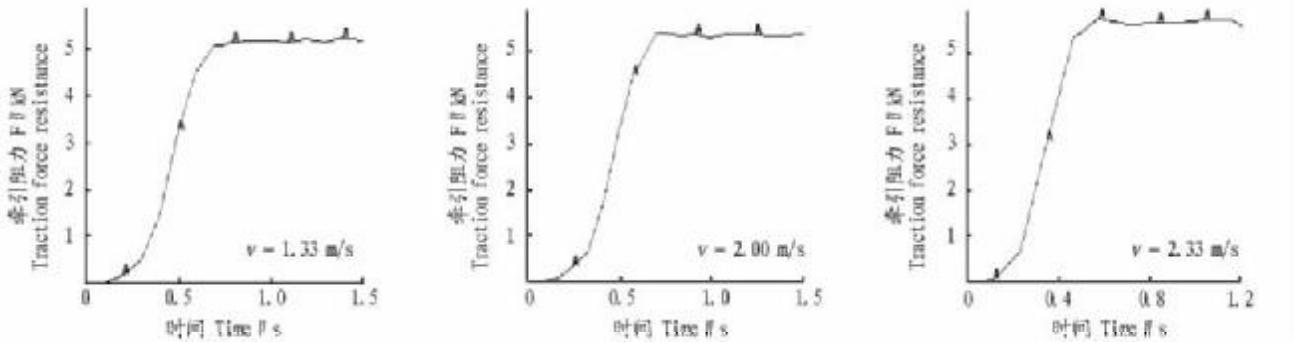


图5 曲面受力曲线

Fig.5 The curved force curve

4 仿真模型的验证

采用仿真试验获得的牵引力和物理试验获得的牵引力对比验证仿真模型。该研究将仿真试验得到的数据与丁金玲 [6] 的研究结果进行比较 (犁曲面参数相同), 由表 1 可知,

表1 仿真试验结果与物理样机试验结果的比较

Table 1 The comparison between simulation test results and physical machine test results

拖拉机前进速度 // m/s Forward speed of tractor	犁耕牵引阻力 / kN Traction resistance of plowing			误差 // % Error
	田间实际情况 Actual field situations	仿真试验结果 Simulation test results		
1.33	5.20	5.44		8.8
2.00	5.25	5.58		6.3
2.33	5.52	5.73		3.8

物理试验与仿真试验的误差分别为 8.8%、6.3%、3.8%。说明所建立的犁曲面模型具有较高的精度, 可用于模型仿真研究工作。

参考文献

[1] 李宝筏. 农业机械学 (上册) [M]. 北京: 中国农业出版社, 2003: 323 - 326, 339 - 346.  
 [2] 北京农业工程大学. 农业机械学 (上册) [M]. 2 版. 北京: 中国农业出版社, 1994: 110 - 111.  
 [3] 电机工程手册编辑委员会. 机械工程手册 (第 65 篇) [M]. 北京: 机械工业出版社, 1980.  
 [4] 石林, 吕钊钦, 景奉水, 等. 计算机在犁体设计中的应用研究 [J]. 山东农业大学学报, 2001, 31 (2): 161 - 162.  
 [5] 尚晓江, 苏建宇, 王化锋, 等. ANSYS/LS-DYNA 动力分析方法与工程实例 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.  
 [6] 丁金玲. 1LD-440 型深耕犁犁架的仿真优化研究与优化设计 [D]. 南宁: 广西大学, 2007.

(上接第 11144 页)

的恶化为代价。经济规模的扩大以及建设用地 (城镇、农村居民点、工矿、道路等) 的扩张导致优质耕地减少, 坡地和陡坡地的开垦使得林、草地遭受破坏, 从而造成生态环境的恶化。受经济利益的驱动, 同时又因将草地和林地开垦为耕地的代价较低的缘故, 促使人们大面积地毁林毁草以开垦耕地。由此可见, 农作物与牧业产品的价格比的变化也是土地利用发生变化的因素之一。

城市化进程是社会经济发展的必然产物, 随着国民经济的进一步发展, 城市扩张和居民地增加是现在乃至将来的发展趋势。宏观政策对土地利用也是有重要影响的, 它引导着社会的经济生产活动, 进而影响土地利用的方式和强度。例如, 在 20 世纪 80 年代中期, 由于畜牧产品价格下跌, 而粮食价格受到国家政策的保护, 使得开荒种地比经营畜牧业更有利可图, 加上受全国新一轮开发后各土地资源浪潮的影响, 致使许多牧民弃牧从农, 导致草地减少, 耕地增加。20 世纪 90 年代后期以来, 随着吉林省和黑龙江省“生态省建设”工程的实施, 退耕还林还草等生态保护措施才得到加强。

4 结论与讨论

(1) 东北黑土区生态环境建设和农业持续发展的关键问题在于解决好水土资源的持续利用与保护。该文的研究结果表明, 1986~2000 年期间, 东北黑土区土地利用的主要变化为: 耕地和城镇工矿地面积呈增加趋势, 林地、草地、未利

用地和水域面积呈减少趋势。东北黑土区土地利用变化转换情况主要为: 林地向耕地转换、草地向耕地转换、未利用地向耕地转换以及耕地向城镇工矿用地转换。

(2) 在自然因素和人文因素的综合驱动作用下, 东北黑土区土地利用发生了显著的变化, 人地系统矛盾突出。因此, 制定合理的土地利用政策, 调整产业结构与土地经营方式, 促进东北黑土区农业生产持续发展和加速区域环境整治已势在必行。

参考文献

[1] TURNERII B L, SKOLE D, SANDERSON S, et al. Land-use and land-cover change, science/research plan (IGBP Report No. 35, HDP Report No. 7) [M]. Stockholm and Geneva: IGBP of the ICSU and HDP of the ISSC, 1995.  
 [2] JONATHAN A F, RUTH DEFRIES, ASNER GREGORY P, et al. Global consequences of land use [J]. Science, 2005, 309: 570 - 574.  
 [3] 贾宁凤, 姚春龙, 徐振君. 土地利用生态系统分析及服务价值估算——以北京市平谷区白各庄村为例 [J]. 中国生态农业学报, 2006, 14 (3): 188 - 191.  
 [4] 刘纪远. 国家资源环境遥感宏观调查与动态监测研究 [J]. 遥感学报, 1997, 31 (1): 225 - 230.  
 [5] 摆万奇, 丁贤忠. 内蒙古自治区奈曼旗土地利用变化预测研究 [J]. 资源科学, 2003, 25 (2): 73 - 76.  
 [6] 王秀兰, 包玉海. 土地利用动态变化研究方法探讨 [J]. 地理科学进展, 1999, 18 (1): 81 - 87.  
 [7] 王成. 河北太行山区河谷土地利用特征研究 [J]. 中国生态农业学报, 2003, 11 (3): 146 - 148.  
 [8] 李平, 李秀彬, 刘学军. 我国现阶段土地利用变化驱动力的宏观分析 [J]. 地理研究, 2001, 20 (2): 129 - 138.