

基于 SPH 法的板结土壤深耕技术研究^{*}

张 宪, 李良晶, 孔 涛

(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:为解决板结土壤的耕作问题,提出了用于小型作业机的反旋凿切和正旋旋耕相结合的耕作机具。利用光滑粒子流体动力学 (SPH) 方法对正旋旋耕土壤过程进行了三维数值模拟,从而得出不同参数下旋耕刀具的受力情况,结合反旋凿切的仿真数据,进行刀具的匹配并设计相应的相位角,使反旋凿切刀和正旋旋耕刀相互抵消各自的作用力,降低能耗,提高工作效率,从而开发出适合在板结土壤上进行耕作的小型作业机。本研究方案所得数据和分析过程对于小型作业机的开发设计具有重要意义。

关键词:板结土壤;正旋旋耕;相位角;小型作业机;光滑粒子流体动力学

中图分类号:TH122;TH6

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2010)09-0001-06

Research on deep plowing for compacted soil based on SPH

ZHANG Xian, LI Liang-jing, KONG Tao

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

Abstract: To solve the problem of cultivation of compacted soil, farming machinery with the combination of anti-screwdrivers-cut and positive spin rotary cutting was proposed. Smooth particle hydrodynamics (SPH) method was applied to the three-dimensional numerical simulation for rotary soil process of rotating, and thus the force characteristics of rotary cutting tools under the different parameters were drawn. Combining with the simulation datas of counter-rotating cutting chisel, the work of tool matching was done and relevant phase angle was designed. So it can make the force of anti-screwdrivers rotary blade cutter and positive spin offset respectively. Accordingly, the small agricultural machinery can reduce energy consumption and improve efficiency. Based on these methods, the small farming machinery will be developed which is fit for farming in compacted soil. The datas and analysis program based on the study are of great significance for the small farming machinery.

Key words: compacted soils; positive spin rotary; phase angle; small operation machine; smooth particle hydrodynamics (SPH)

0 引 言

耕作是农业文明的象征,也是耗能最多的田间作业。不断改进耕作机具和关键部件以利于精耕细作和节省能耗,历来是农民和业界追求的目标。在中国南方山区,利用山区丘陵地带的地理和资源优势,大力发展特种经济作物,如茶叶、中药材、油茶等,其生长环境大多为板结土壤,土壤耕作环境恶劣、劳动强度大,为解决板结土壤的耕作问题,提出了用于小型作业机的

反旋凿切和正旋旋耕相结合的耕作机具。目前,国内外采取的旋耕方式以正旋或反旋为主,其在刀位的排列和设置上相对来说比较清晰,而采用正反旋相结合的较少,本研究介绍的耕作机具具有反旋凿切和正旋旋耕相结合的特点。

近年来很多学者采用了有限单元法 (Finite Elements Method, FEM)^[1] 和边界元 (boundary element method, BEM) 来分析土壤和机械之间的相互作用关系,然而,这些分析需要假设土壤是连续体,在不设置

收稿日期:2010-01-25

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, 浙江杭州人, 教授, 硕士生导师, 主要从事农业机械及装备, 先进制造技术与装备等方面的研究. Email: xianzh168@126.com

复杂边界条件的情况下,很难模拟土壤复杂的动态行为,针对这一情况,近年来在旋耕刀切削土壤的研究中引入了无网格法。无网格法在形函数近似和对局部特性的描述、无需划分单元、易处理接触碰撞中的大变形与畸变等诸多方面都具有有限单元法和边界元法无可比拟的优点^[2],适合于解决土壤切削中网格法的大变形状况。本研究采用无网格法中应用比较多的方法,即光滑粒子流体动力学(Smooth Particle Hydrodynamics, SPH)方法,对正旋旋耕刀具切削土壤的过程进行三维数值的模拟仿真,从而得出不同参数下旋耕刀具的受力情况,对于设计旋耕机具有重要的意义,极大地提高田间的工作效率,减少劳动强度。

1 反凿正旋结合的板结土壤深耕技术特点

正旋耕耘具有很多优点,如:能使动力直接传递至土壤,具有耕地和耙地双重作用,耕后土地松碎、地表平整,但功率消耗较多,若增加耕深,其负荷、功耗急剧增加,且耕深上下波动、稳定性差;潜土逆转耕耘方式入土性能好、作业稳定、功耗低,对残茬有良好的覆盖性能,但是国内进行的潜土逆转旋耕研究,所使用的旋耕刀仍然是国标系列正转旋耕刀,其最主要的缺陷在于切削土前方抛掷所形成的刀轴前方的壅土,造成已耕土的重耕,从而导致旋耕功耗的增加。

本研究介绍的机具通过先凿后耕的旋耕方式,可以利用机具前部的凿切刀具,先把表层的板结土壤敲碎,然后采用后部的刀具旋耕泥土,因此整个旋耕装置受到的阻尼力相对较小,使整个旋耕装置的驱动功率有明显的缩小;同样,本研究设计的先凿后耕深松刀具装置采用凿切刀具反转破土,旋耕刀具正转深松,利用一正一反的旋转方式,在一定程度上相互制约了各自刀具对机具的阻力。作为一种新的板结土壤深松方法,这种旋耕方法还处于发展阶段。为了全面掌握和完善这种板结土壤旋耕方法,本研究先从基础理论和仿真着手,对反旋凿切和正旋旋耕进行土壤切削过程的理论受力进行分析,从而为设计板结土壤旋耕装置提供一定的参考。由于土壤切削过程中有太多的不确定性因素,因而在设计和参数选择上应力求与实际作业环境相符。

2 土壤模型

本研究在进行切削土壤的三维仿真过程中,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^[3]和 Sloan 工作基础上对 Mohr-Coulomb 准则进行了一些修正^[4],扩展了含水率影响、应力软化、运动学硬化、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,它在与应力主轴(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^[5]:

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

式中 P —压力; φ —内摩擦角; $\sqrt{J_2}$ —偏应力张量的第二不变量的平方根; $K(\theta)$ —偏应力面中的极角; c —内聚力; $ahyp$ —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 $ahyp$ 采用默认参数零时,上式恢复为标准 Mohr-Coulomb 屈服面,它取接近零的一个数值。Mohr-Coulomb 屈服面在剪应力—压力空间中的比较如图 1 所示。

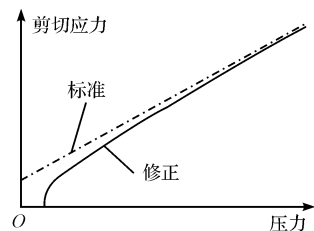


图 1 Mohr-Coulomb 屈服面在剪应力—压力空间中的比较

3 SPH 方法的原理

SPH 法的离散化不使用单元,而是使用固定质量的可动点即质点或节点,有点类似于质点网格方法(PIC-Particle in Cell)^[6]。质量固定在质点的坐标系上,这种离散化使之与耕作土壤的松散物性更接近;SPH 法不用网格,没有网格畸变问题,可以很精确地描述对象的非线性大变形以至破坏的过程。而旋耕土壤具有多相、松散的特点,因此,SPH 法非常适于耕作过程的动力学描述^[7]。

SPH 方法的核心是插值理论^[8]。在计算空间导数时通过一个称为“核函数”的积分进行“核函数估值”近似^[9],将连续性介质的偏微分方程转化为积分形式。整个物体被离散成一系列“粒子”,所有物理量(密度、压力、速度、内能等)均由这些粒子携带。在计算过程中仅涉及各离散粒子的信息,因此积分必须通过对邻近粒子的求和得到。SPH 方法由于在求解过程中仅仅使用了离散粒子处的值和一个插值核函数,通

过分步积分可以把对物理量的空间导数转化为对核函数的求导,因此在计算空间导数时不需要使用任何网格。

采用 SPH 法进行数值运算,需要引入一个特殊函数作为核函数。场函数经过核函数“光滑化”,再在整个求解域上积分,便得到了场函数的核估计。对场函数 $f(x)$,其核估计记为 $\Pi^h f(x)$,计算式如下:

$$\Pi^h f(x) = \int_{\Omega} f(y) \omega(x-y, h) dy \quad (2)$$

式中 w —核函数(插值核函数); h —核函数的滤波宽度(光滑长度)。

核函数应满足如下基本条件:

$$\int_{\Omega} f(y) \omega(x-y, h) dy = 1 \quad (3)$$

$$\int_{\Omega} (x-y) f(y) \omega(x-y, h) dy = 0 \quad (4)$$

$$\lim_{h \rightarrow 0} \omega(x-y, h) = \delta(x-y) \quad (5)$$

当 $|x-y| > kh$ (一般 k 取 2) 时:

$$\omega(x-y, h) = 0 \quad (6)$$

为了处理土壤动力学问题,在 SPH 方程中加入人工粘性项对冲击波进行光滑处理,避免产生不连续性。Monaghan 和 Gingold 导出了适用于 SPH 方法的人为粘性项^[10]:

$$\Pi_{ij} = \begin{cases} \frac{-\alpha_{\Pi} \bar{c}_{ij} \phi_{ij} < 0 + \beta_{\Pi} \phi_{ij}^2}{\bar{\rho}_{ij}} & u_{ij} \cdot x_{ij} < 0 \\ 0 & u_{ij} \cdot x_{ij} \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中 c_i, c_j —粒子的声速; $\alpha_{\Pi}, \beta_{\Pi}, \varepsilon$ —可调参数。

通过上述人为粘性表达式可以看出,只有当 $\Phi_{ij} < 0$ (即粒子相互靠近时) 时人为粘性才存在,而当粒子分离时人为粘性为零。J. W. Swegle 给出了修正公式,忽略了 Φ_{ij} 的影响,使粒子分离时也存在人为粘性:

$$\Pi_{ij} = \frac{\phi_{ij} (\alpha_{\Pi} \bar{c}_{ij} + \beta_{\Pi} |\phi_{ij}|)}{\bar{\rho}_{ij}} \quad (8)$$

4 旋耕刀运动分析及结构参数的确定

旋耕机工作时,旋耕刀一面旋转,一面随旋耕机前进,其绝对运动是刀轴旋转和旋耕机前进两种运动的合成,运动轨迹是摆线。正转时,刀轴的旋转方向和拖拉机行走轮前进的转动方向一致;反转时,刀轴的旋转方向和拖拉机行走轮转动的方向相反^[11]。

现考虑正转的情形,本研究以刀轴旋转中心为原点建立固定坐标系, x 轴正向和旋耕机前进方向一致, y 轴正向垂直向下(如图 2 所示)。设旋耕机前进速度为 v_m ,刀轴旋转角速度为 ω ,开始时刀片端点位于前方

水平位置与 x 轴正向重合,则旋耕刀端点的运动方程为:

$$\begin{cases} x = R \cos \omega t + v_m t \\ y = R \sin \omega t \end{cases} \quad (9)$$

式中 x, y —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(刀辊回转半径)。

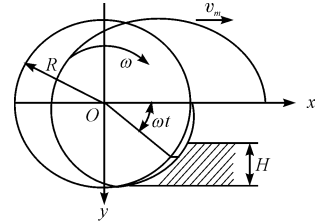


图2 正转旋耕刀的运动

5 正旋旋耕模型的建立和数值模拟

5.1 旋耕刀切削土壤的仿真

本研究主要任务是对旋耕刀正转切削土壤过程的仿真,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,笔者将问题进行一定简化后,建立了如图 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,为旋耕刀开好沟槽。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了一个沟槽。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 。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。

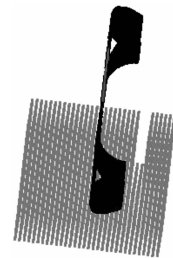


图3 旋耕刀具切削三维模型

刀具的材料参数为:密度 $\rho = 7.83 \text{ g/cm}^3$,泊松比 $\nu = 0.26$,弹性模量 $E = 210 \text{ GPa}$ 。土壤的材料参数为:密度 $\rho = 2.35 \text{ g/cm}^3$,土壤相对密度 $SPGRAV = 2.79$,水密度 $\rho = 1.0 \text{ g/cm}^3$,含水率 $MCONT = 0.34$ 。将土壤模型的底部和侧面上的节点设置约束将其固定。旋耕刀具回转半径为 230 mm ,厚度为 6 mm ,耕深为 150 mm ,

耕宽为 64 mm,总共计算时间为 400 ms。

旋耕刀切削土壤过程中,某一时刻的被切削土壤的具体变形情况如图 4 所示。土壤随着旋耕刀的切入和旋转,因受切削力作用而出现较大规模的变形,且被切削土壤顺着旋耕刀推进的相反方向抛出,通过这样的模拟仿真能够比较直观地反映旋耕刀切削土壤过程的物理现象。



图 4 某一时刻的刀具仿真模拟

数值模拟的数据图如图 5 所示,从图 5 知,旋耕刀在正旋切削土壤时,旋耕刀一边随耕机前进,一边旋转,所以在 X 轴方向上,旋耕刀具受到泥土的推进作用以及 Y 轴方向上的切向力。通过对旋耕力的分析,可以得到切削不同耕深力的变化情况,从而对不同切削深度要求的土壤进行不同的机具参数设计。

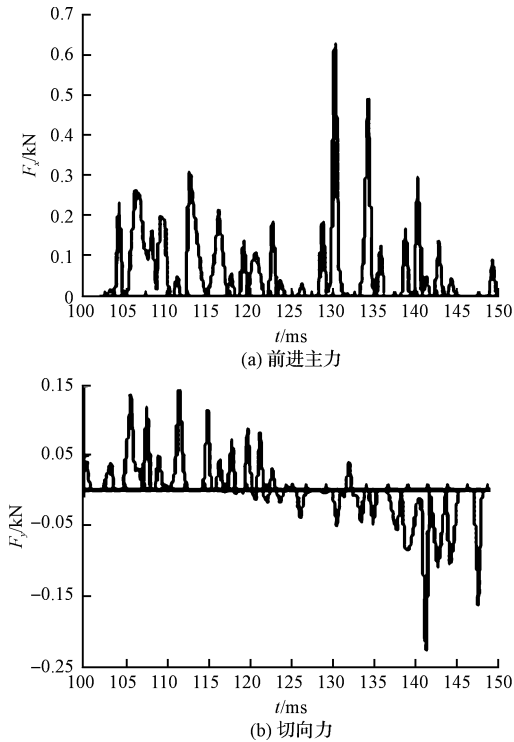


图 5 数值模拟的数据图

5.2 耕深对旋耕扭矩的影响

由理论可知,在旋耕刀进行作业时,加大旋耕深度,其扭矩增大,所消耗的能量也将增大。为实现不同

旋耕深度的机具设计,在保持机具前进速度与旋转速度不变的情况下,本研究对 100 mm ~ 150 mm 的旋耕深度进行了仿真试验,得出如表 1 所示的相关数据,考虑到土壤仿真模型,本研究不考虑第一把刀的受力情况,而提取第二把刀切削土壤的结果数据进行分析。

表 1 不同深度试验结果

No.	旋耕深度 h/mm	X 方向 合力/kN	Y 方向 合力/kN	总扭矩 T/N	平均扭矩 Tp/(N·m)
1	100	1.83	-0.64	256.47	4.65
2	110	3.24	-0.63	394.33	6.79
3	120	3.98	-0.12	588.66	8.07
4	130	5.05	0.16	828.59	9.86
5	140	5.62	-0.12	1 168.06	10.84
6	150	6.12	-0.17	1 395.24	11.82

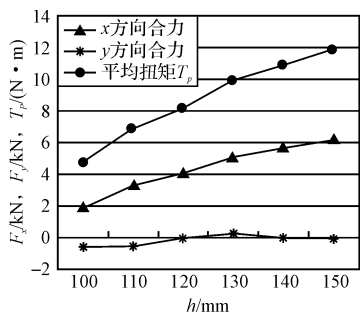


图 6 不同深度下的受力及扭矩情况示意图

如图 6 所示,对旋耕刀具在不同深度下的受力及扭矩情况进行分析,从表 1 和图 6 中可以得出以下的结论:正旋旋耕过程中,在保持前进速度与旋转速度不变的情况下,随着耕深的增加, X 方向合力速度增大,总扭矩及平均扭矩也速度增大,即切削消耗的功能与被切削土壤的总体面积成正比。而 Y 方向合力在旋耕过程中合力变化比较平缓,因而可知, X 方向的力对扭矩的作用比较大。通过分析机具的不同能耗,为设计不同的耕深机具以及凿切刀与旋耕刀的匹配提供了必要的数据。

6 反旋凿切和正旋旋耕数据结合分析

根据反旋凿切刀的数值模拟的分析结果可知,所设计的反旋凿切刀将采用斜形刀的形式,结构后隙角在 6° 左右,结构切土角为 $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$,斜角为 25° 。在保持结构后隙角和斜角不变的情况下,反旋凿切刀的结构切土角 $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 的数据如表 2 所示,结合表 1 中正旋耕深 150 mm 的数据,所作的正反旋平均扭矩比例图如图 7 所示。

表 2 不同结构后隙角试验结果

No.	结构切土角/(°)	F_x/kN	F_q/kN	$T_p/(\text{N} \cdot \text{m})$
1	60	0.304	0.419	7.50
2	63	0.413	0.454	8.94
3	65	0.495	0.493	10.22
4	66	0.525	0.536	11.03
5	67	0.543	0.584	12.15
6	70	0.585	0.650	14.16

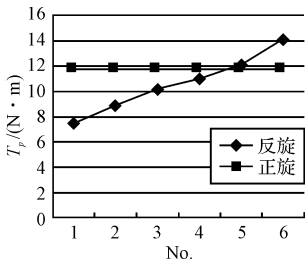


图 7 平均扭矩比例图

平均扭矩比例图如图 7 所示,考虑到机具是前进作业,反旋凿切刀的平均扭矩应小于正旋旋耕刀的平均扭矩,以及尽可能地使正反旋的扭矩相互抵消,所以从图 7 中,可以得出以下结论:结构切土角超过 67° 时,其反旋凿切的平均扭矩大于正旋旋耕,不宜机具作业;结构切土角为 60°~66° 时,其反旋凿切的平均扭矩匀小于正旋旋耕,但考虑到尽可能地相互抵消作用力,结构切土角为 65°、66° 更宜机具作业,考虑到仿真数据存在一定的误差,进行现场试验时,分别对 65° 或 66° 两把刀具的配合进行必要的测试,从中找出更合理的结合方式。从以上的仿真数据分析可知,选择结构后隙角为 6°,结构切土角为 65° 或 66°,斜角为 25° 的反旋凿切刀的刀形以及厚度为 6 mm,扭曲角度为 90°,旋转半径为 230 mm 的正旋旋耕刀进行组合,能达到降低能耗,提高能源利用率以及工作效率的作用。

7 两把刀具相位角匹配的分析

以下选择结构后隙角为 6°,结构切土角为 65°,斜角为 25° 的反旋凿切刀的刀形以及厚度为 6 mm,扭曲角度为 90°,旋转半径为 230 mm 的正旋旋耕刀进行组合,对其相位角进行必要的分析,两把刀具在 X 轴方向的受力图如图 8 所示。

本研究主要从前进方向上凿切刀反旋带来的阻力和旋耕刀产生的主力来考虑相位角的关系,从图 8 中力的分布图中可知,一把刀旋转 90°,以顺时针方向旋转角度为正,凿切刀阻力最大出现在 -36° 左右处,而旋耕刀前进主力最大出现在 54° 左右处,取其最高点进行分析,两者的角度差为 18°。从而在切削过程中,

考虑到将两把刀的最大力尽可能地互相抵消,旋耕刀应先旋过 18°,以纵轴方向为例,安装时旋耕刀中心线向右偏 18°,如图 9 所示。

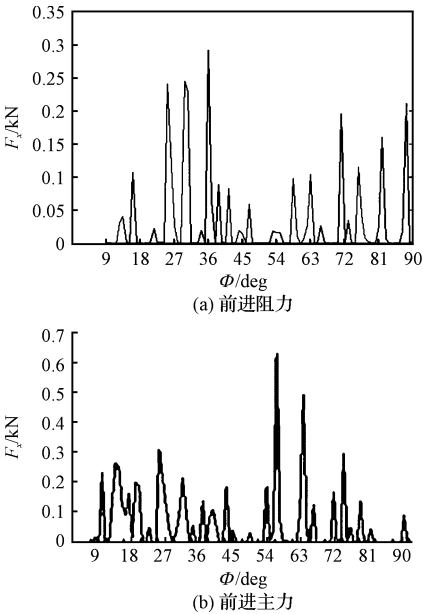


图 8 两把刀具在 X 轴方向的受力图

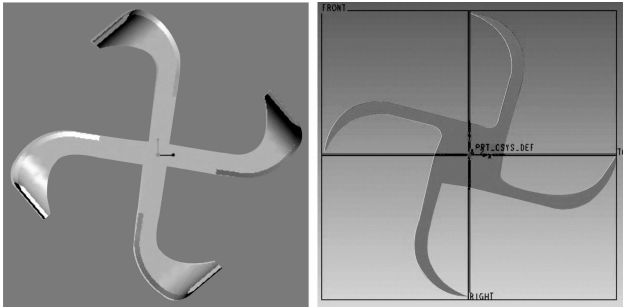


图 9 两把刀具安装方式

通过将两把刀具按如图 9 所示的方式进行安装,能够最大限度地相互抵消各自的作用力,降低能耗,提高工作效率,以达到理想的耕作效果。

8 结束语

本研究应用 SPH 的无网格法(Meshless Method),结合 Pro/E、ANSYS/LS-DANA 等相关软件,采用 MAT147 材料模型,建立旋耕刀具与土壤 SPH 粒子相互作用的切削过程,不仅较为直观地体现了整个切削过程的物理现象,而且仿真结果也基本上客观反映了旋耕刀具切削土壤的受力过程。通过对不同耕深的切削过程受力的分析,为凿切刀与旋耕刀的匹配以及对切土功耗指标进行预测和控制提供了一定的数据,从而为设计开发适用于小型作业机在板结土壤上进行耕作的机具提供了重要的理论依据,该作业机具的开发

(下转第 52 页)

4 结束语

本研究设计了一种基于 FPGA 和串行解串器及光纤通讯模块组成的高速光纤通讯系统,利用串行解串器内部的锁相环和并串/串并转换功能,降低了系统的成本,提高了产品的稳定性。实际测试光纤的传送速率达到 300 Mbps。喷绘机在连续 120 小时可靠性测试中没有出现打图错误。本方案已成功运用在大型彩色喷墨打印机点到点的高速度大容量数据传输,可满足现有喷绘机高速打印时 200 Mbps ~ 300 Mbps 通讯带宽的要求,完全达到了预期的设计目标。

参考文献 (References):

- [1] USB. org. Universal Serial Bus Specification Rev. 2. 0 [EB/OL]. [2006 - 01 - 01]. <http://www.usb.org/developers/docs/>.
- [2] 李履信,沈建华. 光纤通信系统[M]. 北京:机械工业出版社,2007:5 - 7.

- [3] 钱 峰. EZ-USB FX2 单片机原理、编程及应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2006:279 - 282.
- [4] 赵 鸿,彭碧玉,王宏卓. 基于 VHDL 的 CRC 校验及其在测控通信中的应用[J]. 通信技术,2010,43(2):64 - 66.
- [5] Xilinx Inc.. Spartan-3 FPGA Family: complete DataSheet [EB/OL]. [2006 - 01 - 05]. <http://www.xilinx.com/legacy.html>.
- [6] Texas Instruments Inc.. SN65LV1023A Datasheet [EB/OL]. [2006 - 01 - 03]. <http://www.ti.com>.
- [7] BELHADJ M, SYSTEMS C. 高速串行接口的编码技术[J]. 光波通信,2007,6(2):20 - 23.
- [8] 薛小刚,葛毅敏. Xilinx ISE 9. x FPGA/CPLD 设计指南[M]. 北京:人民邮电出版社,2007:34 - 35.
- [9] Cypress Inc.. CY7C68013 DataSheet [EB/OL]. [2003 - 01 - 01]. <http://www.cypress.com>.
- [10] 卢 敏,张子墨. 基于 FPGA 的 LVDS 光纤通讯系统的实现[J]. 信息技术,2007,12(12):164 - 166.

[编辑:柴福莉]

(上接第 5 页)

能够极大提高田间工作效率,对于南方地区的板结土壤的破除有相当重要的意义。该作业机具的设计成功将为实现我省乃至全国的茶园管理机械化作业提供关键装备,为茶园管理全程机械化打下一个坚实的基础。在从根本上解决目前茶园管理作业劳动力紧张的同时,可以改善茶园的土壤结构,促进我省乃至全国茶叶行业的可持续发展。

参考文献 (References):

- [1] MOUAZEN A M, NEMENYI M. Tillage tool design by the finite element method: part 1. finite element modelling of soil plastic behaviour[J]. **J. A gric. Engng. Res.**, 1999, 72(1):37 - 51.
- [2] BENSON D J. Computational methods in Lagrangian and Eulerian hydrocodes[J]. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 1992, 99(2 - 3):235 - 394.
- [3] 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.
- [4] LEWIS B A. Manual for LS-DYNA Soil Material Model 147

- [R]. Department of Transportation: Federal Highway Administration, U. S. A, 2004.
- [5] 张学言. 岩土塑性力学[M]. 北京:人民交通出版社, 1993.
- [6] 况惠孙,蒋伯诚,张树发,等. 计算物理引论[M]. 长沙:湖南科学技术出版社,1987.
- [7] 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.
- [8] MONAGHAN J J. Shock simulation by the particle method SPH[J]. **JCP**, 1983, 52(2):374.
- [9] GINGOLD R A, MONAGHAN J J. Smoothed particle hydrodynamics theory and application to non-spherical stars[J]. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, 1977, 1(4):375 - 389.
- [10] MONAGHAN J J, GINGOLD R A. Shock simulation by the particle method SPH [J]. **Comput. Phys.**, 1983 (52):374 - 389.
- [11] 丁为民,王耀华,彭嵩植. 正、反转旋耕刀性能分析及切土扭矩比较试验[J]. 南京农业大学学报, 2001, 24(1): 113 - 117.

[编辑:张 翔]