苹果起苗铲有限元分析与结构设计*

杨　欣[1]　刘俊峰[1]　李建平[1]　许述财[2]　冯晓静[1]　刘洪杰[1]

（1. 河北农业大学机电工程学院，保定 071001；2. 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室，北京 100084）

【摘要】 在 AIP 中创建苹果起苗铲三维参数化特征模型，根据起苗铲结构、材料、载荷和受力情况等，利用内嵌于 AIP 的 ANSYS 技术模块创建了起苗铲三维有限元模型，划分了有限元网格，获得了起苗铲三维应力、变形和安全系数。根据设计要求和分析结果，将起苗铲结构改进为 L 形，节省了材料，降低了工作阻力，安全系数达到设计要求。通过样机起苗试验，改进的起苗铲工作阻力小、起苗作业可靠，取得了预期的效果。

关键词：苹果　起苗机　起苗铲　有限元分析　设计

中图分类号：S223.1⁺4；S661.1　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2011)02-0084-04

Structural Design and Finite Element Analysis of Apple Seeding Lifter

Yang Xin[1]　Liu Junfeng[1]　Li Jianping[1]　Xu Shucai[2]　Feng Xiaojing[1]　Liu Hongjie[1]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Agricultural University of Hebei*, *Baoding* 071001, *China*

2. *State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy*, *Tsinghua University*, *Beijing* 100084, *China*)

Abstract

The 3-D parameterized model of apple seeding lifter was created using autodesk inventor professional (AIP) system. The finite element analysis (FEA) of the lifter were performed through ANSYS technology embedded in AIP analysis types based on the structure, material, loads and forces of the lifter, the 3-D FEA mesh was created, and stress, displacement, and safety factor were obtained after finite element calculation. Then some modifications of lifter configuration were made according to the FEA results. The new lifter with L shape could save materials, reduce resistance. The safety factor could also achieve design purpose. The experiment of lifting seeding results showed that the lifter could provide better working performance with less resistance and obtain the expected effect.

Key words　Apple, Seeding lifting machine, Seeding lifter, Finite element analysis, Design

引言

苹果苗木生产中，成品苗木的挖掘是关键作业之一。传统起苗方式是利用铁锹等工具进行人工挖掘，作业强度大、重复操作多、苗木根系易受损伤，且生产效率低。近年来，一些苗圃基地采用简单改装的犁或林木起苗机挖掘苹果树苗[1~3]，但作业质量均不理想。根据果树栽培专家提出的优质矮砧苹果苗木起苗要求，设计开发了苹果成品苗专用起苗机。起苗铲是起苗机的核心工作部件，铲体结构直接影响机具的作业性能。根据苹果苗木起苗要求确定的铲体结构和尺寸，在首次样机起苗试验中阻力偏大，起苗质量欠佳。为获得起苗铲最佳结构参数，本文利用 AIP(autodesk inventor professional)软件创建起苗铲的三维参数化特征模型，并采用 ANSYS 技术对其实施三维结构有限元分析，以期获得较好结构参数，减小工作阻力，提高作业性能，保证苗木质量。

收稿日期：2010-03-19　修回日期：2010-05-10

* 国家现代农业产业技术体系建设专项资金资助项目(nycytx-08-02-05)、河北农业大学第六批重点资助教研项目(08-A8)和河北农业大学非生命学科与新兴学科科研发展基金项目(Fs20091403)

作者简介：杨欣，副教授，博士，主要从事地面机械系统安全与节能性能设计研究，E-mail：yangxin@hebau.edu.cn

通讯作者：刘俊峰，教授，主要从事果园机械装备和新型农机装备性能设计研究，E-mail：liujf@hebau.edu.cn

1　起苗铲三维参数化特征造型

1.1　起苗机结构与工作原理

起苗机主要由机架、圆犁刀、起苗铲和限深轮等组成，拖拉机与起苗机采用后三点悬挂，如图 1 所示。工作时，圆犁刀切开苗带以保证土垡断口整齐，起苗铲达到规定深度后，地轮着地保持入土深度恒定，工作隙角 α 确保带苗土垡略有抬起并松动土壤，挖掘后的苗木直立在松动的土壤中以便于捡拾。阻力铲主要是平衡整机受力状态，有助于拖拉机的直线行驶。

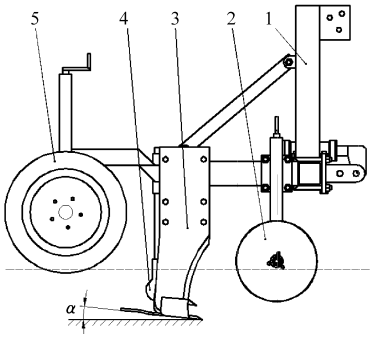


图 1　起苗机结构组成

Fig. 1　Configuration of seeding lifting machine

1. 机架　2. 圆犁刀　3. 起苗铲　4. 阻力铲　5. 限深轮

1.2　起苗铲参数化特征模型

为寻求起苗机最佳结构配置，在保证零部件强度的前提下，尽量减小机具质量和工作阻力，提高入土性和工作稳定性，利用 AIP 软件创建起苗铲三维参数化特征模型，如图 2 所示。

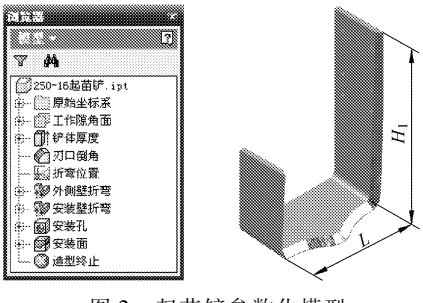


图 2　起苗铲参数化模型

Fig. 2　Parametric model of seeding lifter

利用参数化功能建立尺寸驱动关联关系[4~5]，以便于控制铲体特征模型变化，为后续有限元分析模型的更新带来方便。起苗铲特征模型的 f_x 参数如图 3 所示。

在有关数据中，工作隙角 α、铲宽 L 和安装壁总高度 H_1 是根据苹果树苗根系尺寸和起苗要求直接确定的，也是在原产品样机中采用的铲体结构尺寸，其余参数则根据有限元分析结果进行确认或调整。

参数名称	单位	等式	公称值	公差	模型数值	输出参数	备注
模型参数							
α	deg	5 deg	5.00000		5.000000		工作隙角（保证作业稳定性）
L	mm	450 mm	450.000		450.000000		设计铲宽（挖掘宽度-2X折弯半径）
α1	deg	α	5.00000		5.000000		铲壁后倾等于工作隙角
α2	deg	α1	5.00000		5.000000		等于工作隙角
H1	mm	820 mm	820.000		820.000000		安装壁总高度（根据苗木根系确定）
H2	mm	400 mm	400.000		400.000000		外侧壁总高度
B	mm	350 mm	350.000		350.000000		铲体钢板宽度
H3	mm	400 mm	400.000		400.000000		安装部位高度
R1	mm	100 mm	100.000		100.000000		铲尖圆弧半径
M1	mm	B + 50 mm	400.000		400.000000		铲尖前伸量（钢板宽度+伸出量）
d15	mm	300 mm	300.000		300.000000		铲尖两侧圆弧
H	mm	440 mm	440.000		440.000000		可调刃深度
t	mm	25 mm	25.0000		25.000000		铲体钢板厚度

图 3　起苗铲模型参数

Fig. 3　Model parameters of seeding lifter

2　起苗铲有限元分析

2.1　起苗铲材料的基本假设

ANSYS 有限元分析技术在结构静力学分析中获得了很好的应用[6~8]。静力学分析的数学模型是物理系统通用运动方程的一个子集，即

$$\boldsymbol{Kx} = \boldsymbol{F} \tag{1}$$

式中　$\boldsymbol{K}$——刚度矩阵　　$\boldsymbol{x}$——节点位移矢量

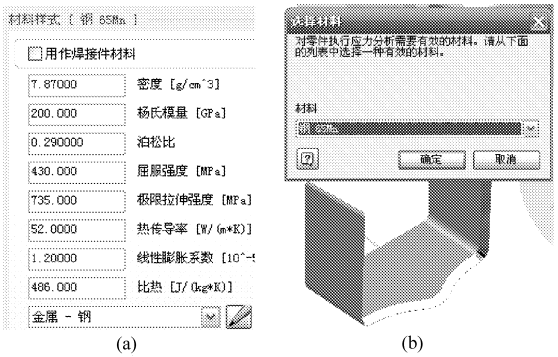
$\boldsymbol{F}$——载荷向量

式(1)中没有与时间相关的量，仅分析零件在静载荷作用下的响应，为设计提供参考。为确保分析结果的正确性，作基本假设：①起苗铲材料为各向同性的线性材料。②与起苗铲结构尺寸相比，起苗铲变形量很小。③不考虑温度对起苗铲材料的影响。

2.2　定义边界条件

2.2.1　定义材料属性

选择起苗铲材料，应在保证挖掘性能的前提下，减小质量，节省材料，降低阻力。优质碳素结构钢 65Mn 的刚性好、耐磨损，常用作犁铧等入土工作部件[9~10]，故在 AIP 中定义起苗铲材料属性为 65Mn 钢(图 4)。



(a)　(b)

图 4　定义起苗铲材料属性

Fig. 4　Defining material parameters of seeding lifter

(a) 定义 65Mn 材料　(b) 选择材料属性

2.2.2　施加约束与载荷

起苗铲通过螺栓固定在机架连接板上，因此将固定约束施加在螺栓孔上，以限定该处自由度。根

据模型位置坐标,定义起苗铲的重力方向为 $-Z$,重力加速度为 9.81 m/s^2。配套动力为 55.2 kW 拖拉机,作业速度 v 为 1.1 ~ 1.2 m/s。为保证起苗作业,起苗铲最大变形量不能超过 5 mm。拖拉机的挂钩牵引力 T 的计算式为[10]

$$T = \frac{P_T}{v} \tag{2}$$

式中 P_T——拖拉机牵引功率,kW

考虑机组作业时,拖拉机行走在已经起完树苗的松软土壤上,取拖拉机的牵引功率 P_T 为[10]

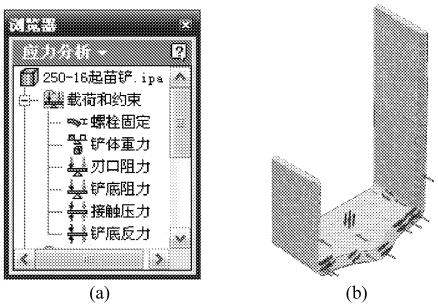
$$P_T = 0.40P_e \tag{3}$$

式中 P_e——发动机额定功率,kW

经计算,拖拉机挂钩牵引力为 18.4 kN,分配到起苗铲上的牵引力为 50%(另 50% 用于牵引阻力铲),拖拉机最大牵引效率约为 55%[10],挖掘带苗土垡质量为 25 kg 时,计算得到起苗铲总阻力为 5.6 kN。总阻力作用在工作隙角 α 倾斜面和刃口部位,根据作用面积将总阻力进行等效载荷细分,土壤摩擦力以沿坐标轴的分量形式施加并与机组前进方向相反,正压力为均布且垂直指向各作用表面。施加载荷如图 5a 所示。

2.3 网格划分

网格相关性在默认值为零时网格稀疏而不均匀,因此增加为 80,共得到 2 978 个单元和 6 559 个节点(图 5b)。精细的网格虽然求解时间长,但结果更为准确[11]。



(a) (b)

图 5 起苗铲的边界条件和有限元网格模型

Fig. 5 Restriction and loads and finite element gridding model of lifter

(a) 起苗铲的载荷和约束 (b) 有限元网格模型

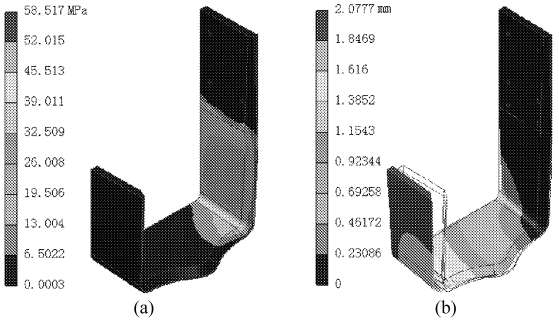
2.4 计算分析

完成起苗铲材料、约束、载荷等设置和有限元网格划分后,即运行 ANSYS 进行计算分析,得到起苗铲三维应力及等效应力 σ_e[11~12],即

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2}{2}} \tag{4}$$

式中 σ_1、σ_2、σ_3——3 个法向主应力

图 6 为起苗铲在最大阻力情况下的等效应力图和结构变形图。



(a) (b)

图 6 起苗铲等效应力与变形

Fig. 6 Equivalent stress and deformation of original lifter

(a) 等效应力 (b) 结构变形

为了判断材料是否发生永久变形,对可延展材料按照最大等效应力失效原理计算安全系数 k[11~12],即

$$k = \frac{[\sigma]}{\sigma_e} \tag{5}$$

式中 $[\sigma]$——材料最大许用应力

安全系数 k 在 2 ~ 4 之间的设计较为合理[4, 11~12]。表 1 列出了起苗铲三维应力初始分析结果。

表 1 起苗铲初始设计应力分析结果

Tab. 1 Stress analysis results of original lifter

参数	最小值	最大值
等效应力/MPa	0.003	58.520
最大主应力/MPa	-21.950	71.310
最小主应力/MPa	-84.480	19.680
变形/mm	0	2.078
安全系数	7.348	

由表 1 可知,起苗铲安全系数为 7.348,即起苗铲结构尺寸偏大。等效应力最大值发生在安装壁一侧,而最大结构变形发生在外壁(图 6)。由此可以判断出,起苗铲的外壁过高,在挖掘作业中起苗铲整体发生扭转导致外侧壁的总变形量过大。虽然不会造成起苗铲的永久变形或拉裂,但会增加阻力,易引起拖拉机驱动轮打滑。因此,必须对铲体参数进行调整。

3 起苗铲结构改进

3.1 尺寸调整

根据设计要求,工作隙角 α、铲宽 L 和安装壁总高度 H_1 3 个参数不能改变,其他参数均可调整。实际作业中,土壤松动主要是靠工作隙角 α 保证,起苗铲外壁切土效果并不明显。为获得较小尺寸,将铲体钢板宽度和厚度、外壁高度、底部摩擦面、刃角

等参数通过 f_x 参数表进行调整，驱动模型更新后，分别进行有限元计算。最后确定的起苗铲参数和分析结果与原起苗铲对比如表 2 所示，等效应力和变形如图 7 所示。

表 2　改进前后参数与分析结果对比

Tab. 2　Comparison for parameters and analysis results between original design and modified

参数	改进前	改进后
铲体厚度/mm	25	16
铲外壁高度/mm	400	100
铲体体积/m^3	0.010	0.004
铲底面积/m^2	0.117	0.072
铲体质量/kg	79.720	34.248
等效应力/MPa	58.520	92.230
最大变形/mm	2.078	4.163
安全系数	7.348	3.795

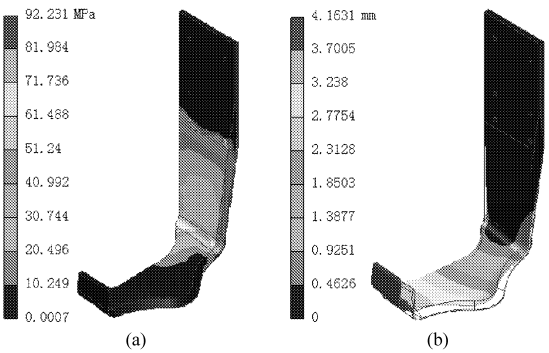


图 7　改进结构后铲体等效应力与变形

Fig. 7　Equivalent stress and deformation of improved lifter

(a) 等效应力　(b) 结构变形

由表 2 可知，改进后的起苗铲厚度变薄，质量变轻，摩擦面积变小。铲外壁高度减小，使得铲体由原来的 U 形转变为 L 形，安全系数为 3.795，已满足在 2～4 之间的要求。最大变形量为 4.163 mm，发生在铲体外侧壁（图 7）。通过动画观察到，此变形量主要是由安装壁板扭转引起的，在设计要求的 5 mm 之内。

3.2　样机起苗试验

2008 年 11 月，在国家苹果产业技术体系综合实验站苗圃基地进行田间试验（图 8），配套动力为 55.2 kW 拖拉机，苗木为二次嫁接 3 年生“三优”矮砧苹果成品苗，主根深 150～400 mm，侧根宽 200～500 mm，侧根厚 150～300 mm。使用改进的起苗铲与原起苗铲初次试验（2008 年春季同一苗圃基地和拖拉机）相比，机组作业顺畅，作业速度由原来的 0.6 m/s 提高到 1.2 m/s，作业效率提高近一倍。这表明改进的起苗铲工作阻力减小，不但节省了材料，还保证了强度，没有发生永久变形。动土深度、宽度一致，苗木根系完整，达到了苗木质量要求。

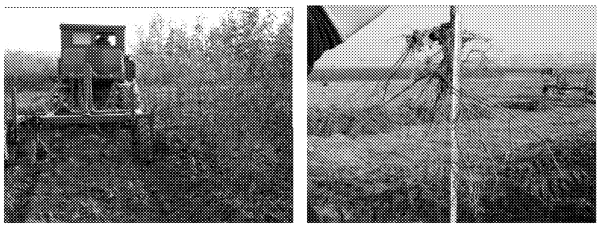


图 8　苹果苗木起苗试验

Fig. 8　Experiments of lifting apple seeding

(a) 起苗作业　(b) 树苗根系

4　结论

(1) 利用 AIP 创建了起苗铲三维参数化特征模型，建立了参数之间的关联关系，为通过修改参数而驱动模型更新提供了方便。

(2) 在基本假设前提下，对起苗铲施加约束和载荷，进行有限元网格划分和三维应力计算。结果表明，改进的 L 形起苗铲结构轻便，安全系数和变形量达到预期的设计要求。

(3) 起苗机田间试验表明，改进后的起苗铲起苗阻力较小，作业中铲体没有发生永久变形和破坏，且挖出的苹果苗木根系发达，满足优质苹果苗木质量指标。

参　考　文　献

1　刘俊峰. 苹果果园机械化辅助作业技术与机械装备[C]//河北苹果产业发展战略研讨会，保定，2008.

2　刘俊峰，杨欣，冯晓静，等. 我国苹果栽培与管理机械化技术现状与发展[C]//中国农业工程学会 2009 学术年会论文集，太谷：山西农业大学，2009.

3　李建民. 林木起苗机[J]. 新疆农机化，2003(2):36.
Li Jianmin. Seeding lifter of forest[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2003(2):36. (in Chinese)

4　陈伯雄. Autodesk inventor professional 2008 机械设计实战教程[M]. 北京：化学工业出版社，2008.

5　Yang Xin, Liu Junfeng, Tong Jin. Virtual assembling associative design for combined digging spade of potato harvester[C]// International Agricultural Engineering Conference, Bangkok, Thailand, 2005.

(下转第 125 页)

validation with particle image velocimetry data[C]. Journal of Physics: Conference Series, 2007,75:012023.

4 Nobuyuki F, Satoshi S. Observations of dynamic stall on darrieus wind turbine blades[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89(2): 201 ~ 214.

5 Vasilis A R, Spyros G V. Dynamic stallmodeling on airfoils based on strong viscous-inviscid interaction coupling[J]. International Journal for Numerical Methods, 2007, 56(3):185 ~ 208.

6 Larsen J W, Nielsen S R. Dynamic stallmodel for wind turbine airfoils[J]. Journal of Fluids and Structures, 2007, 23(7): 959 ~ 982.

7 Leishman J G, Beddoes T S. A semi-empirical model of dynamic stall[J]. Journal of American Helicopter Society, 1989, 34(3): 3 ~ 17.

8 Sandeep G, Leishman J G. Dynamic stall modelling of the S809 aerofoil and comparison with experiments[J]. Wind Energy, 2006, 9(6):521 ~ 547.

9 Øye S. Dynamic stall simulated as time lag of separation[R]. Department of Fluid-Mechanics, Technical University of Denmark, 1991.

10 Hansen M H, Gaunaa M, Madsen H A. A beddoes-leishman type dynamic stall model in state-space and indicial formulations[R]. Ris－R－1354(EN), Risø National Laboratory, Denmark, 2004.

11 吴子牛. 空气动力学[M]. 北京:清华大学出版社,2007:135 ~ 145.

12 Willmer A. Aerodynamic investigation into the feasibility of a 25 m vertical axis windmill[R]. Aero Rt. 124, BAe Filton, England, 1979.

13 Leishman J G, Beddoes T S. A generalised model for airfoil unsteady aerodynamic behaviour and dynamic stall using the indicial method[C]. Presented at the 42nd Annual Forum of the American Helicopter Society, Washington DC, 1986.

14 Robert E S, Paul C K. Aerodynamic characteristics of seven symmetrical airfoil sections through 180-degree angle of attack for use in aerodynamic analysis of vertical axis wind turbines[R]. SAND80－2114, Sandia National Laboratory, 1981.

15 Mark H W. Aerodynamic performance of the 17 meter diameter darrieus wind turbine[R]. SAND78－1737, Sandia National Laboratory, 1978.

(上接第 87 页)

6 Yang Xin, Feng Xiaojing. Virtual assembly associative design and finite element analysis for digging spade of potato harvester [C]// Proceedings of 2007 ICAE., Baoding, China, 2007.

7 贾晶霞, 刘汉武, 郝新明, 等. 马铃薯收获机挖掘铲有限元静力学分析[J]. 农业机械学报, 2006,37(9): 86 ~ 88.
Jia Jingxia, Liu Hanwu, Hao Xinming, et al. Finite element analysis for blade of potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(9): 86 ~ 88. (in Chinese)

8 杨欣, 佟金, 陈东辉, 等. RFT 内支撑三维结构有限元静力学分析与改进设计[J]. 农业机械学报, 2008,29(1): 10 ~ 14.
Yang Xin, Tong Jin, Chen Donghui, et al. Three-dimensional structural finite element analysis of run-flat tire insert[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 29(1): 10 ~ 14. (in Chinese)

9 姬长英, 尹文庆. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社,1996.

10 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册:上册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社,2007.

11 过小容, 吴洁. Autodesk inventor professional R9/10 培训教程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.

12 唐湘民. Autodesk inventor 有限元分析和运动仿真详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.