

基于 ADAMS 的拨指链式扶蔗装置的虚拟试验

张 杨^{1,2}, 区颖刚^{1*}, 牟向伟¹

(1. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术省部共建教育部重点实验室, 广州 510642;
2. 广州铁路职业技术学院机电工程系, 广州 510430)

摘 要: 针对整秆式甘蔗收割机收割倒伏严重的甘蔗时出现堵塞, 收割不畅的情况, 设计了拨指链式扶蔗装置, 以便对甘蔗进行有效的扶起, 达到顺利收割的目的。应用动力学仿真软件 ADAMS 建立了甘蔗—拨指链式扶蔗装置虚拟样机模型。通过虚拟正交试验和虚拟双因素试验研究了扶蔗器的结构参数和运动参数对扶蔗效果的影响规律, 并在此基础上进行了实验室台架试验以验证虚拟试验的结论。结果表明: 在虚拟试验中, 甘蔗最终扶起倒伏角随着下链轮转速的增加而增加, 随着前进速度的增加而减小, 呈线性关系。在台架试验中下链轮转速和机车前进速度对甘蔗最终扶起角度的影响数值结果略有差异, 但各因素对扶蔗效果的影响趋势是一致的, 证明虚拟试验的结论在给定条件下是可用的。

关键词: 扶蔗装置, 拨指链, 虚拟试验, ADAMS

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.07.016

中图分类号: S225.5⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-7-0088-06

张 杨, 区颖刚, 牟向伟. 基于ADAMS的拨指链式扶蔗装置的虚拟试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 88—93.

Zhang Yang, Ou Yinggang, Mou Xiangwei. Virtual test on the finger-chain type sugarcane-lifter based on ADAMS[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7): 88—93. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

中国甘蔗主产区集中在广东、广西和海南省^[1], 受季风气候影响, 甘蔗在生长过程中, 倒伏情况严重, 对甘蔗的机械化收获造成很大影响^[2-3]。目前国外主要采用切段式联合收割机收获甘蔗^[4], 采用将甘蔗推倒切割后从根部拖入的方式, 不需考虑扶起问题, 所采用的螺旋起分离作用, 因此目前国外较少研究整秆式甘蔗收割机的扶起装置。而中国当前甘蔗生产的规模一般较小, 收获机械化刚起步, 故研究工作多集中在整秆式的收获方式上, 整秆式收割机对倒伏严重的甘蔗适应性差, 因此需要扶起能力强的扶蔗机构, 它的扶起性能直接影响着甘蔗收获的效率和质量^[5]。目前国内研制的整秆式收割机对倒伏严重的甘蔗收获不理想^[1]。本研究针对中国整秆式甘蔗收割机的技术特点和甘蔗生长特点, 结合广东湛江广丰农场甘蔗生长状态的调查数据, 建立甘蔗虚拟样机模型和拨指链式扶蔗装置的虚拟样机模型。应用机械系统动力学仿真分析软件 ADAMS 对影响扶蔗效果的结构参数和运动参数进行虚拟试验, 对扶蔗过程进行运动仿真, 并

进行实验室台架试验验证。为拨指链式扶蔗装置的设计提供理论依据。

1 甘蔗—扶蔗器虚拟样机模型

在 ADAMS/VIEW 中直接建立甘蔗模型。根据对广东湛江广丰农场甘蔗进行田间调查结果, 设定甘蔗直径为 29 mm, 甘蔗长度为 2 000 mm, 密度为 4.38E-7 kg/mm³。在建模中, 忽略甘蔗本身的小变形, 甘蔗按照等截面匀质的圆柱刚体进行建模, 按照球铰链和橡胶轴套约束来模拟地面对甘蔗的约束作用^[6-10]。根据高建民对湛江广丰农场蔗田种植的台糖-16 甘蔗进行的田间生长力学性能测试试验, 得到甘蔗的平均刚度系数 3 300 N·m⁰^[11]。通过静平衡试验对田间实测到的甘蔗刚度系数进行修正, 刚度系数修改为 2 510 N·m⁰, 甘蔗刚好能被扶起的力矩为 5 000 N·mm。

在 ADAMS/VIEW 中采用直接方法创建拨指扶蔗器的刚体模型。在创建模型时, 简化了扶蔗器的链轮、导轨、液压马达、螺栓等元件, 把链条以及链轮对拨指的运动约束等效为拨指在扶蔗器倾斜平面内的运动, 把机车的前进运动等效为模型的直线运动, 使得运动模型简洁清晰。扶蔗器与机车一起沿地面的直线运动通过在扶蔗器和地面之间添加移动副来模拟; 拨指在链盒中的运动既有旋转运动又有沿链盒的直线运动, 通过在拨指与链盒平面之间施加平面副来模拟。

忽略空行程时的运动, 拨指的工作运动轨迹可以分成两个阶段^[12], 第 1 阶段为拨指绕下链轮圆心作回转运动, 且随收割机前进, 拨指运动轨迹为曲线; 第 2 阶段为拨指沿扶蔗器链盒的侧边运动, 同时随收割机一起前进, 拨指运动轨迹为直线。

收稿日期: 2008-08-18 修订日期: 2009-02-18

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划资助项目(2006BAD11A07-2); 国家自然科学基金项目(50875091); 广东省科技厅科技攻关项目(2007A020300010-2); 农业科技成果转化基金项目(2008GB2E000235)
作者简介: 张 杨(1979—), 女, 河北廊坊人, 博士, 中国农业工程学会会员(E040000050A), 主要从事机械设计与制造的研究。广州 广州铁路职业技术学院, 510430。Email: zy12306@163.com

*通信作者: 区颖刚(1947—), 男, 广东新会人, 博士、教授, 中国农业工程学会会员(E041100037S), 主要从事甘蔗收获机械化的研究。广州 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术省部共建教育部重点实验室, 510642。Email: ouying@scau.edu.cn

牟向伟, 中国农业工程学会会员(E040000053A)

甘蔗—扶蔗器虚拟样机模型如图 1 所示。

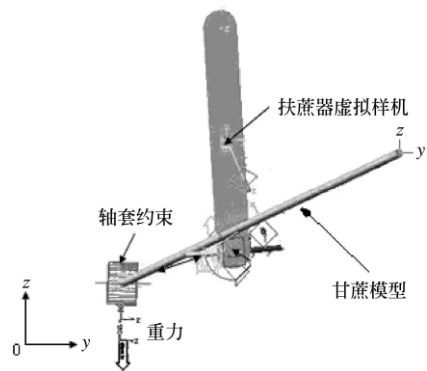
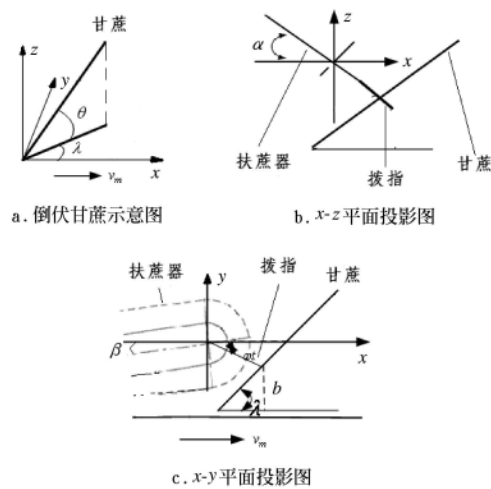


图 1 甘蔗—扶蔗器虚拟样机模型
Fig.1 Sugarcane & sugarcane-lifter virtual proto type

2 扶蔗过程虚拟试验

2.1 试验方法

在甘蔗—扶蔗器虚拟试验中，主要研究影响拨指链式扶蔗器扶蔗效果的结构参数和工作参数。通过虚拟正交试验寻找设计参数的最佳组合，观察各因素对结果的影响趋势。根据正交试验的结果，对具有重要影响的因素进行虚拟单因素试验，总结该因素对扶蔗效果的影响规律。



注： α —扶蔗器安装倾角； β —扶蔗器在水平面内的投影与前进方向的夹角； λ —甘蔗侧偏角； v_m —机器前进速度； ωt —拨指转过的角度

图 2 倒伏甘蔗与扶蔗器位置图
Fig.2 Location of lodging sugarcane and lifter

在研究中采用甘蔗生长状态角（包括倒伏角 θ 和侧偏角 λ ）来描述甘蔗倒伏状态，如图 2a 所示，倒伏角 θ 指甘蔗与其水平面上的投影间的夹角，侧偏角 λ 指甘蔗在水平面的投影与前进方向的夹角。一般按生长状态角把甘蔗的倒伏情况分为 6 种形式^[13]：直立生长（ $\lambda=0^\circ$ ， $\theta=90^\circ$ ）、顺倒伏（ $\lambda=0^\circ$ ， $\theta<90^\circ$ ）、侧顺倒伏（ $0^\circ<\lambda<90^\circ$ ， $\theta<90^\circ$ ）、侧倒伏（ $\lambda=90^\circ$ ， $\theta<90^\circ$ ）、逆倒伏（ $\lambda=180^\circ$ ， $\theta<90^\circ$ ）、侧逆倒伏（ $90^\circ<\lambda<180^\circ$ ， $\theta<90^\circ$ ）。根据在湛江的田间调查，甘蔗倒伏状态以侧顺倒伏和侧逆倒伏为主，平均侧偏角约为 45° ，倒伏角为 $30^\circ\sim$

50° 。因此在虚拟样机扶起运动仿真试验中，甘蔗倒伏角及侧偏角均选取为 45° 。扶蔗器的安装倾角 α 为 60° ，与前进方向夹角 β 为 10° ，拨指工作长度为 110 mm ，链轮直径为 60 mm 。甘蔗根部距离下链轮中心的垂直距离为 400 mm ，扶蔗器轨道长度为 800 mm 。

结构参数如图 2b、c 所示，包括扶蔗器安装倾角 α 、扶蔗器上下链轮中心连线在地面上的投影与机器前进方向的夹角 β ，工作参数包括机车前进速度 v_m 和下链轮转速 ω 。

2.2 试验指标

通过对扶蔗器的工作参数进行试验研究发现，甘蔗最终能否被夹持并砍切，与甘蔗被拨指扶起的最终角度和扶起的最终偏角有密切的关系。扶起的最终倒伏角及最终侧偏角达到 60° 以上时容易被夹持砍切，因此采用甘蔗被扶起的最终倒伏角 θ 和最终侧偏角 λ 这两个指标来衡量扶蔗效果。

2.3 虚拟正交试验

2.3.1 试验设计

各试验参数参照华南农业大学研制的 4ZZX-48 型小型整秆甘蔗收获机田间试验参数设定。

进行四因素三水平正交试验，正交试验因素与水平安排见表 1，选用 $L_{27}(3^{13})$ 正交表。

表 1 虚拟正交试验因素与水平综合
Table 1 Factors and levels of virtual orthogonal test

因 素	水平		
	1	2	3
A 安装倾角 $\alpha/(^\circ)$	60	70	80
B 与前进方向夹角 $\beta/(^\circ)$	10	15	20
C 下链轮转速 $\omega/\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	450	500	550
D 前进速度 $v_m/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.972	1.111	1.25

2.3.2 试验结果分析

虚拟试验结果如图 3 所示。从图 3 对正交试验的结果进行极差分析，得到甘蔗的最终扶起角度 θ 随着扶蔗器安装倾角、与前进方向的夹角及机车前进速度的增大而减小，随着链轮转速的增大而增大。

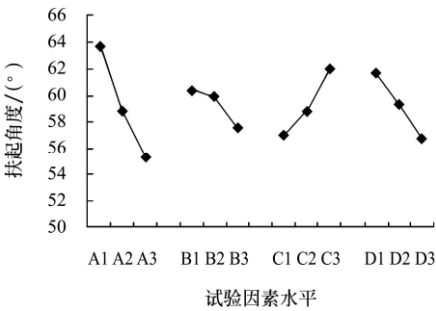


图 3 虚拟正交试验结果
Fig.3 Result of virtual orthogonal test

综合考虑，A1B1C3D1 是较好的组合。但在正交试验表中没有这组组合，补做这组试验，试验结果为 68.42° ，扶起角度大于其他组合。因此，虚拟正交试验优化出的最佳参数组合是 A1B1C3D1。

2.4 虚拟双因素试验

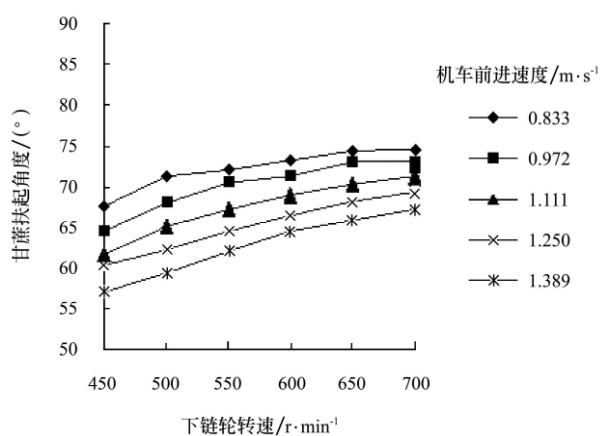
2.4.1 试验设计

由正交试验分析得出前进速度和链轮转速之间对扶蔗效果的影响存在交互作用。下面通过虚拟双因素试验来研究影响规律。虚拟双因素试验因素与水平安排见表 2。

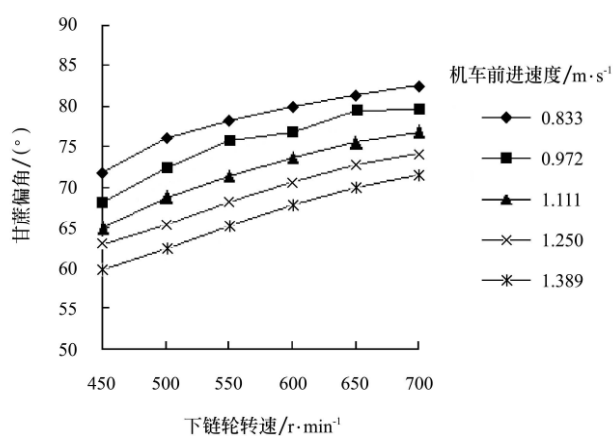
表 2 虚拟双因素试验因素与水平表

Table 2 Factors and levels of virtual two-factor tests

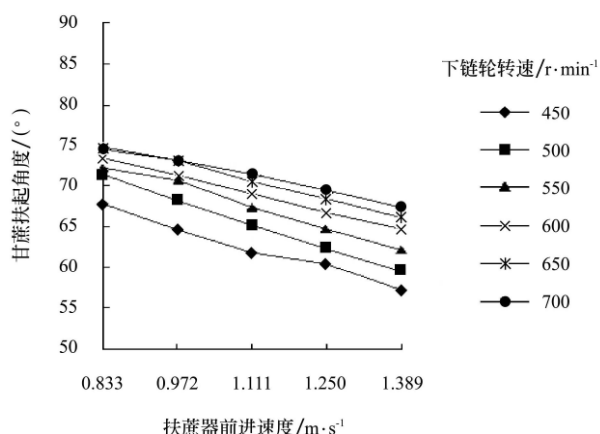
因素	水平					
	1	2	3	4	5	6
链轮转速/ $r \cdot \min^{-1}$	450	500	550	600	650	700
前进速度/ $m \cdot s^{-1}$	0.833	0.972	1.111	1.250	1.389	
试验指标/(°)	甘蔗最终扶起角度, 甘蔗最终扶起偏角					



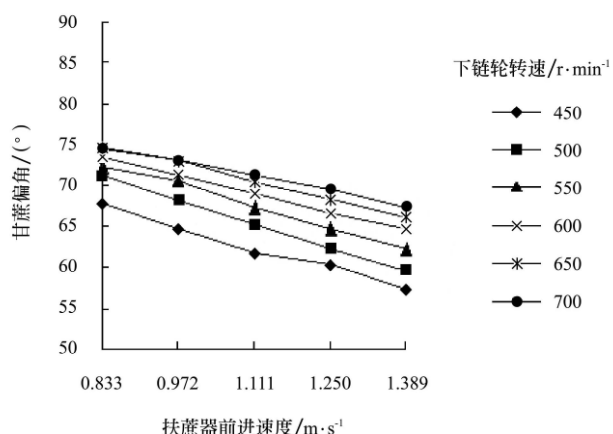
a. 链轮转速对扶起角度的影响



b. 链轮转速对扶起偏角的影响



c. 前进速度对扶起角度的影响



d. 前进速度对扶起偏角的影响

图 4 虚拟双因素试验结果

Fig.4 Results of virtual two-factor tests

应用 spss11.5 统计软件对甘蔗的侧偏角与速比之间的关系进行线性回归, 如图 5 所示, 可得甘蔗最终扶起的侧偏角与速比之间的直线方程为

$$y = 14.377K + 47.991 \quad (2)$$

式中: y ——甘蔗最终扶起的侧偏角; K ——扶蔗速比。

F 检验表明在 95% 的置信区间内, 甘蔗最终扶起的侧

2.4.2 试验结果分析

试验结果如图 4 所示, 结果表明:

1) 在前进速度相同的情况下, 甘蔗最终扶起倒伏角和侧偏角均随着下链轮转速的增加而增加。在下链轮转速相同的情况下, 甘蔗最终扶起的倒伏角和侧偏角随着前进速度的增加而不断减小。前进速度为 0.833 m/s、下链轮转速为 700 r/min 时, 甘蔗最终扶起倒伏角和侧偏角最大, 分别为 74.7° 和 82.47°。

2) 下链轮转速与前进速度存在一定的速比关系。将下链轮转速换算为拨指线运动速度, 速比公式为

$$K = \frac{v_b}{v_m} \quad (1)$$

式中 v_b ——拨指沿链盒直线运动的速度; v_m ——扶蔗器前进的速度。

偏角与扶蔗速比之间有显著的直线关系。

此式是在虚拟试验中, 甘蔗生长倒伏倾角 45°, 侧偏角 45° 的情况下, 得到甘蔗最终扶起的侧偏角在 $\leq 90^\circ$ 范围内, 与速比之间存在的直线关系, 超出这个范围不能随意外推。K 值过小, 则收割机收割效率低下, K 值过大, 会造成链轮过高, 加快链轮磨损, 引起断链。因此前进

速度和链轮转速比值要在一定范围内取值, 不能过大也不能过小。

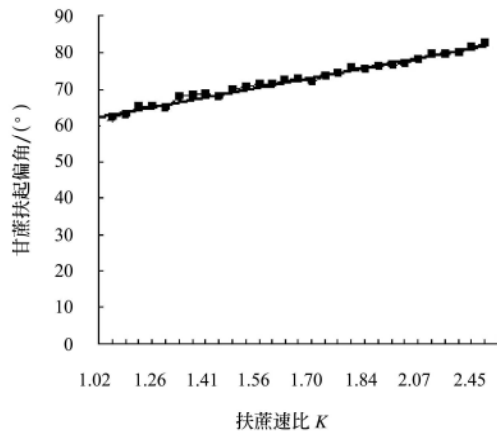


图 5 扶蔗速比与甘蔗扶起偏角关系图

Fig.5 Relation of velocity ratio and final side angle of sugarcane

3 扶蔗过程实验室台架试验

为验证虚拟试验的结果, 在华南农业大学工程学院土槽实验室进行了台架试验。

3.1 台架正交试验

3.1.1 试验设计

试验装置如图 6 所示。由于台车前进速度不能太高, 因此试验选取了如表 4 所示的试验水平, 通过分析台架试验数据来验证虚拟仿真的结果。

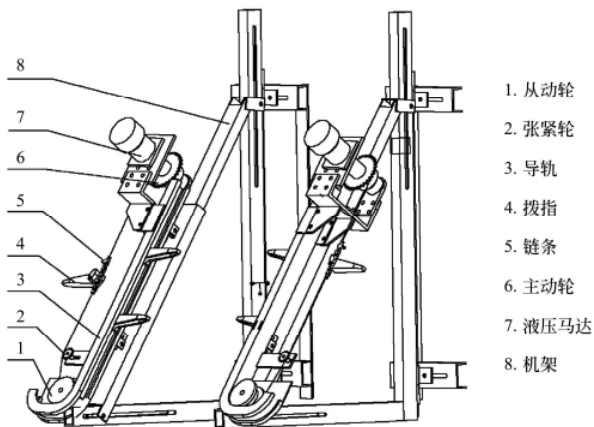


图 6 拨指链式扶蔗装置的设计图

Fig.6 Design of rake finger chain sugarcane-lifter

表 4 台架正交试验因素与水平综合

Table 4 Factors and levels of real orthogonal tests

因 素	水平		
	1	2	3
A 扶蔗器安装倾角 $\alpha/(^{\circ})$	60	70	80
B 扶蔗器与前进方向夹角 $\beta/(^{\circ})$	10	15	20
C 扶蔗器下链轮转速 $\omega/r \cdot \min^{-1}$	150	200	250
D 机车前进速度 $v_m/m \cdot s^{-1}$	0.25	0.35	0.45

3.1.2 试验结果分析

试验结果如图 7 所示, 分析比较台架正交试验与虚拟正交试验结果, 得到:

- 1) 各因素对扶蔗效果的影响趋势一致。
- 2) 优化出的最佳参数组合均是 A1B1C3D1

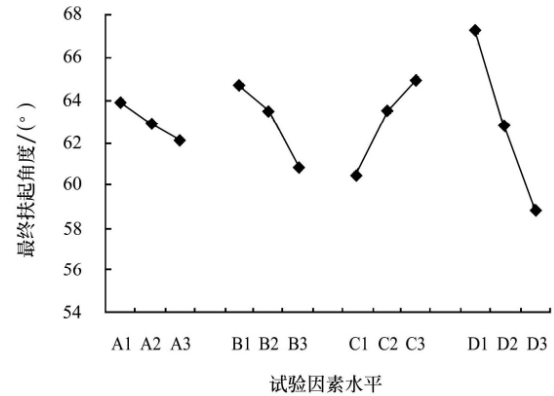


图 7 台架正交试验结果

Fig.7 Result of real orthogonal tests

3.2 前进速度与链轮转速单因素试验

为验证虚拟双因素试验的结论, 设计了前进速度和链轮转速两个单因素试验。

3.2.1 试验设计

1) 下链轮转速单因素试验

前进速度为 0.25 m/s, 下链轮转速选取 150、200、250、300、350、400 r/min 6 个水平。

2) 前进速度单因素试验

下链轮转速设定为 250 r/min, 前进速度取 0.1、0.15、0.2、0.25、0.3、0.35、0.40、0.45 m/s 8 个水平。

试验中其他因素设定为正交试验优化的最优参数, 每次试验扶起一根甘蔗, 每组试验重复 10 次, 取平均值, 并计算标准差。

3.2.2 试验结果分析

试验结果如图 8 所示, 分析试验数据得到:

1) 下链轮转速单因素试验, 甘蔗最终扶起的倒伏角和侧偏角均随着下链轮转速的增加而增加(如图 8a、b 所示); 最终扶起倒伏角在后面有所下降(如图 8a 所示), 但降幅并不明显。与虚拟试验的趋势基本一致。

2) 前进速度单因素试验(如图 8c、d 所示), 甘蔗最终扶起的倒伏角和侧偏角均随着前进速度先有所增大, 但增幅并不明显, 达到最大值后降低。与虚拟试验的趋势也基本一致。

3) 前进速度为 0.2 m/s、下链轮转速 250 r/min 时, 甘蔗最终扶起的侧偏角达到最大值。在虚拟试验中, 根据式(2), 甘蔗被扶起侧偏角为 90° 时, 速比应为 2.922, 则下链轮转速为 250 r/min 时, 机车前进速度为 0.268 m/s, 略有差别。这除了试验误差以及试验设计的差别外, 是因为台架试验中甘蔗在低的前进速度情况下, 存在滑脱出拨指的现象, 而在虚拟试验中没考虑这点所致。

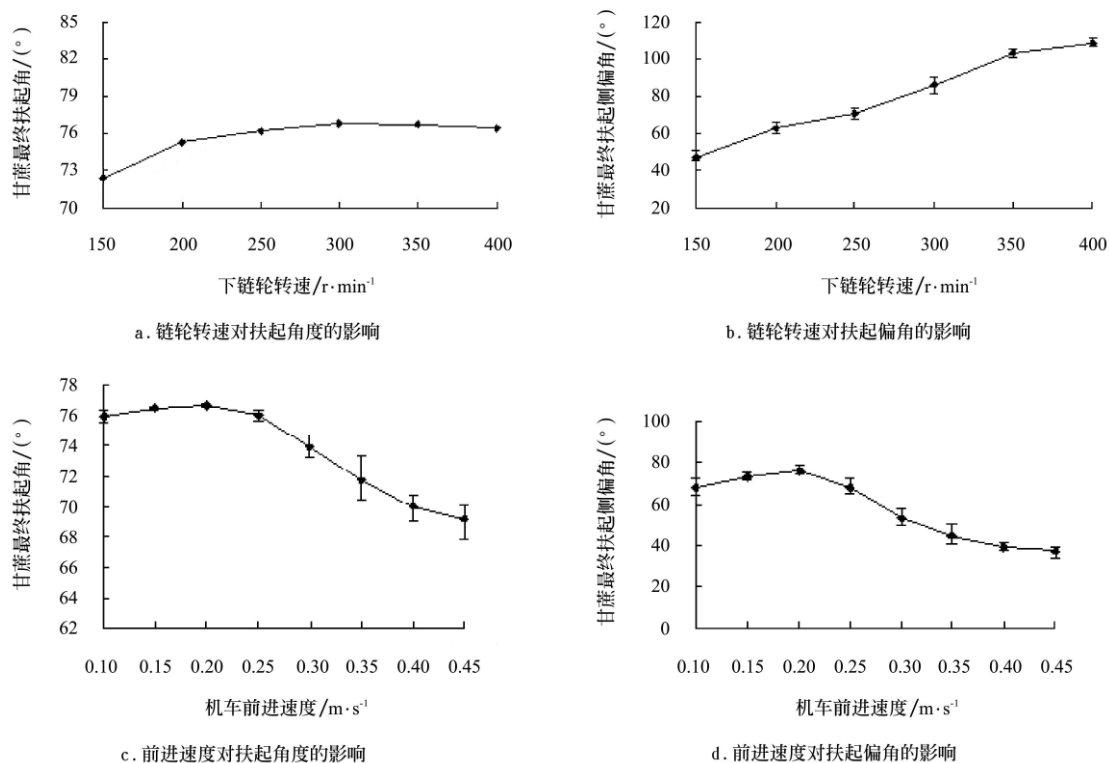


图8 前进速度与链轮转速单因素试验结果

Fig.8 Results of single factor tests on v_m and ω

4 结 论

1) 建立了基于 ADAMS 的甘蔗——拨指链式扶蔗装置的虚拟样机模型。

2) 虚拟正交试验和台架正交试验得出的最优参数组合都是 A1B1C3D1, 即在虚拟试验中, 安装倾角 $\alpha=60^{\circ}$, 与前进方向夹角 $\beta=10^{\circ}$, 下链轮转速 $\omega=550 \text{ r/min}$, 机车前进速度 $v_m=0.972 \text{ m/s}$, 由于实际台架试验中台车速度不能太高, C、D 因素取值与虚拟试验不同, 但结果表明各因素对扶蔗效果的影响趋势一致。

3) 台架因素试验对虚拟双因素试验结果进行了验证, 结果证明, 虚拟试验得到的甘蔗最终扶起侧偏角方程, 由于台架试验中甘蔗存在滑脱出拨指的现象, 与虚拟试验的结果略有差别, 但是对扶蔗效果的影响趋势基本一致。证明虚拟试验的结论在给定条件下是可用的。

参 考 文 献

- [1] 吕勇, 杨坚, 乔艳辉. 甘蔗收割机械的发展概述[J]. 南方农机, 2006, (5): 26—27.
- [2] 邓劲莲, 李尚平, 杨家强. 倒伏甘蔗扶起过程的动态仿真分析[J]. 机械设计与制造, 2003, (2): 26—29.
Deng Jinlian, Li Shangping, Yang Jiaqiang. The simulation research on the processing of lodging situation sugarcane[J]. Machinery Design & Manufacture, 2003, (2): 26—29. (in Chinese with English abstract)
- [3] 刘楚强. 整秆式甘蔗收获机的研发现状及展望[J]. 广西蔗糖, 2002, (4): 21—22.
- [4] 钮公藩. 赴巴西、墨西哥和泰国糖业考察报告. 广西蔗糖

[J]. 2001, (1): 54—59.

- [5] 王国强, 张进平, 马若丁. 虚拟样机技术及其在 ADAMS 上的实践[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2002.
- [6] 周敬辉. 基于虚拟样机技术的小型履带式甘蔗联合收割机的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2004.
Zhou Jinghui. The Research of the Small-scale Track Type Sugarcane Combined Harvester Based on Virtual Prototype Technology[D]. Nanning: Guangxi University, 2004. (in Chinese with English abstract)
- [7] 林青云. 轮式小型甘蔗收获机的虚拟样机研究及其运动仿真分析[D]. 南宁: 广西大学, 2004.
Lin Qingyun. Virtual Prototype Research and Kinematics Simulation Analysis of Wheeled Small-scale Sugarcane Harvester[D]. Nanning: Guangxi University, 2004. (in Chinese with English abstract)
- [8] 刘先杰. 小型甘蔗联合收割机流程虚拟仿真分析及集蔗机构的改进[D]. 南宁: 广西大学, 2006.
Liu Xianjie. Flow Virtual Simulation Analysis and Collecting Device Amelioration of the Minitype Sugarcane Harvester[D]. Nanning: Guangxi University, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [9] 孙秀花. 小型甘蔗联合收获机运动学、动力学虚拟仿真研究[D]. 南宁: 广西大学, 2005.
Sun Xiuhua. Kinematics and Dynamucs Virtual Studying of the Mini-type sugarcane Harvester[D]. Nanning: Guangxi University, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [10] 周俊. 基于 ADAMS 的小型甘蔗收获机—地面系统建模与仿真[D]. 南宁: 广西大学, 2004.
Zhou Jun. Research of Modeling and Simulation of Minitype

- Sugar Cane Harvester_soil System Based on ADAMS[D]. Nanning: Guangxi University, 2004. (in Chinese with English abstract)
- [11] 高建民, 区颖刚. 甘蔗螺旋扶起机构的理论研究及虚拟样机仿真. 农业工程学报[J], 2004, 20(3): 1—5.
Gao Jianmin, Ou Yinggang. Theoretical study on spiral sugarcane-lifting mechanism of sugarcane harvester and virtual prototype simulation. Transactions of the CSAE[J], 2004, 20(3): 1—5. (in Chinese with English abstract)
- [12] 巫尚荣. 旋转链式稻、麦收割机的虚拟设计[D]. 南宁: 广西大学, 2004.
- Wu Shangrong. A Virtual Design of Paddy and Wheat Reaping Machine with Revolving Chain Cutter[D]. Nanning: Guangxi University, 2004. (in Chinese with English abstract)
- [13] 李志红. 甘蔗收获圆弧轨道式柔性夹持输送机机理研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2006.
- Li Zhihong. Study on the Arc-Track -Type Flexible Holding and Conveying of Sugarcane Harvester[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2006. (in Chinese with English abstract)

Virtual test on the finger-chain type sugarcane-lifter based on ADAMS

Zhang Yang^{1,2}, Ou Yinggang^{1✉}, Mou Xiangwei¹

(1. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment (South China Agricultural University),
Ministry of Education, Guangzhou 510642, China;

2. Electrical and Mechanical Engineering Department of Guangzhou Institute of Railway Technology, Guangzhou 510430, China)

Abstract: The author designed a finger-chain type sugarcane-lifter in order to solve the problem that the sugarcane harvester does not work well when the sugarcane lodges seriously. The model of sugarcane and finger-chain type sugarcane-lifter virtual prototype was established by using the dynamic simulation software—ADAMS. The regularities of effect of structural parameters and motion parameters on sugar-lifting were studied through virtual orthogonal tests and virtual two-factor tests. Meanwhile the real tests in the lab were undertaken to verify the conclusions of virtual tests. The results showed that in the virtual tests the sugarcane final lift-angle increased with wheel speed increasing or decreased with lifter forward speed increasing linearly. The relations between sugarcane final lift-angle and forward speed or wheel speed show a slight difference between virtual tests and real ones, however, the trends of the regularities between all factors and sugarcane-lifting, are similar. It showed that the conclusions of virtual tests were reliable.

Key words: sugarcane-lifter, rake finger chains, simulation tests, ADAMS