

基于 Abaqus 的果园运输车橡胶辊滚动过程仿真

张凯鑫¹ 张衍林¹ 梁秀英¹ 张闻宇¹ 赵亮¹ 张瑶²

1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 华中农业大学外国语学院, 武汉 430070

摘要 为提高果园轨道运输中橡胶辊的性能,使其根据驱动力自动调整正压力至合理值,并均分扭矩和差分转速,设计了将连杆系和锥差轮系作为橡胶辊的动力驱动机构。针对该机构对橡胶辊的影响,利用 Abaqus 对橡胶辊的滚动过程进行了动力学仿真。仿真中使用 Abaqus 提供的 Mooney-Rivlin 模型和非线性接触算法进行数值计算。仿真结果得到正压力与滚动过程中的功率关系和速度与效率的关系。对比试验结果表明,正压力对功率的影响与试验结果基本相符,该机构作用下橡胶辊效率为 0.7。测试结果表明,设计的机构可充分利用 2 个橡胶辊的驱动能力,符合自动适应弯道的条件并在低载状态下节能,可以提高橡胶辊在果园运输中的性能。

关键词 运输车; 橡胶辊; 驱动机构; 仿真

中图分类号 S 432.4⁺4; S 436.44 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2014)04-0124-06

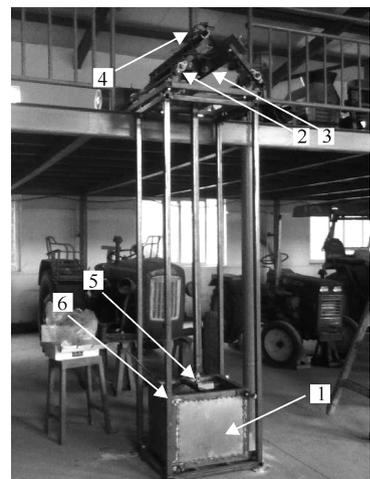
提高效率、降低功耗、增强牵引力等是橡胶辊设计需要考虑的问题。通常轨道运输均采用钢制滚动体,为了达到牵引力,所需要的正压力较大,因此,配套的基础设施厚重^[1]。为适应山地果园作业,并降低运输成本和提高牵引力,笔者所在课题组曾提出了双边双自由度橡胶辊与导轨的驱动方式^[2]。该驱动方式需要一对一定大小的夹紧力和相向扭矩即可驱动。工作时因橡胶材料变形量大,多余的夹紧力会产生不必要的能耗损失,而且单个橡胶辊存在摩擦极限,相向扭矩不均匀,造成牵引能力浪费,所以动力驱动机构需要为 2 个橡胶辊提供合理的正压力和均等的扭矩。

笔者利用非线性有限元方法模拟出橡胶辊的静态驱动状态,确定了单个橡胶辊的牵引能力,设计了正压力自适应连杆机构和锥齿轮差动轮系机构,并利用有限元软件 Abaqus 对橡胶辊在此机构作用下的滚动过程进行柔体动力学仿真,旨在得出功率损耗与效率和正压力与扭矩的关系,为运输机的合理设计提供科学依据。

1 结构与原理

对 2 个橡胶辊施加正压力和扭矩,驱动副即可运行。正压力不合理会导致打滑或能耗高;双边扭

矩不合理会导致单边打滑;左右两辊的自由度为“1”则会在弯道卡死。针对上述问题,设计橡胶辊执行机构。设计时采用连杆自适应结构和锥齿轮差动轮系,使之节能、充分利用扭矩且差分转速,从而更适应工况,并通过试验台对其性能进行测试。图 1 和图 2 分别为试验台结构及其提升原理示意图。



1. 配重 Weight; 2,3. 扭矩传感器 Torque sensors; 4. 加速度传感器 Acceleration sensor; 5. 拉压力传感器 Pull-pressure sensor; 6. 线速度传感器 Linear velocity sensor.

图 1 试验台

Fig. 1 Test bench

收稿日期: 2013-09-05

基金项目: 国家现代产业技术体系建设专项(CARS-27)和国家公益性行业(农业)科研专项(200903023)

张凯鑫, 博士研究生. 研究方向: 农业机械. E-mail: drkaixin@163.com

通信作者: 张衍林, 教授. 研究方向: 农业机械. E-mail: zhangyl@hzau.edu.cn

为了准确测试,将执行机构固定,使导轨进行相对运动,从而驱动副的动态相互作用,故执行机构设置成倒置状态。测试时利用橡胶辊向上提升重物,并在导轨下方的料斗加载进行试验。

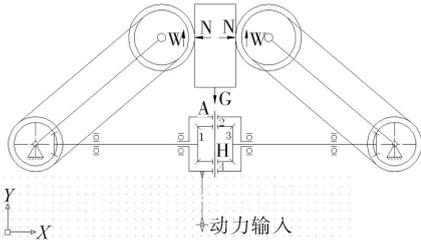


图 2 试验台提升原理示意图

Fig. 2 The principle diagram of the test bench hoisting mechanism

1.1 工作原理

试验台由锥齿轮差动轮系、连杆系和驱动副组成。锥差轮系由锥齿轮 1、2、3、4 和行星杆 H 组成,其中 1、3 为太阳轮,2、4 为行星轮,左右 2 个太阳轮 1、3 的传动比为

$$\frac{n_1 - n_H}{n_3 - n_H} = -\frac{Z_3}{Z_1} \quad (1)$$

式中 n_1 为轮 1 的转速, r/min; n_3 为轮 3 的转速, r/min; n_H 为杆 H 的转速, r/min; Z_1 为轮 1 的齿数; Z_3 为轮 3 的齿数。

由于左右 2 个太阳轮齿数相等,即 $Z_1 = Z_3$,将其代入式(1)可得

$$n_1 - n_H = n_H - n_3 \quad (2)$$

所以行星杆 H 的转速 n_H 为左右 2 个太阳轮转速 n_1 和 n_3 的平均值

$$n_H = (n_1 + n_3) / 2 \quad (3)$$

由式(3)可以看出,差动轮系的自由度为“2”,若将 H 杆作为动力输入并限定 n_H ,则轮 1 与轮 3 允许存在速度差^[3],可使运输机具有符合自动适应弯道的条件。从结构上看,行星轮 2 或轮 4 的左右 2 个啮合点与轮 1、轮 3 的轴线等距,所以轮 1 和轮 3 获得的扭矩相等且同向,因此,该轮系能够均分扭矩、差分转速。

机构工作时,动力通过链轮输入到行星杆 H, H 通过锥差轮系均分到左右两轴,左右两轴分别通过 2 对锥齿轮带动连杆上的链轮,再带动橡胶辊转动,从而提升带配重的导轨。运行时,连杆支承胶辊,倾角保持不变。橡胶辊受到正压力 N 与摩擦力 f 。由于连杆是二力构件^[4],二者合力的倾角 $\alpha = \arctan$

(f/N) ,即 $N = f / \tan \alpha$ 。在 α 角固定的情况下,式中 N 与 f 成正比,因此,使用时正压力 N 能够根据摩擦力 f 自动调整适应,其系数 $\tan \alpha = f / N = \mu$ 即为摩擦因数。根据静态试验并考虑安全系数,取 $\mu = 0.5$,即可得连杆倾角 $\alpha = 26.6^\circ$,通过连杆倾角可以自动调整正压力至合理值。该试验台由于制造原因,故实际连杆倾角 $\alpha = 28^\circ$ 。

1.2 测试指标

1) 平均扭矩。

$$\bar{M} = \frac{M_1 + M_2}{2}$$

式中 M_1 为左橡胶辊扭矩, N·m; M_2 为右橡胶辊扭矩, N·m。

2) 输入功率。

$$P = (M_1 n_1 + M_2 n_2) / 9\ 549\ \text{kW}$$

式中 n_1 为左橡胶辊转速, r/min; n_2 为右橡胶辊转速, r/min。

3) 橡胶辊效率。

$$\eta = p / P, p = 9.8 G v$$

式中 p 为输出功率, W; G 为导轨配重, kg; v 为导轨线速度, m/s。

1.3 测试方法

需要测试的指标有左、右橡胶辊的扭矩 (M_1, M_2) 和转速 (n_1, n_2) 以及导轨的拉力 G 和线速度 v 。为测试准确,将 2 个扭矩传感器 CXN-305 (量程 0~100 nm, 输出 1~5 V; 量程 0~200 r/min, 输出脉冲信号) 分别同轴安装在左、右橡胶辊上。拉压力传感器 KQ-LY03 (量程 700 kg, 输出 0~5 V) 安装在导轨与料斗之间。线速度传感器 HTR-MVV (量程 0.2~0.5 m/s, 输出 TTL 方波信号) 用来测得相对线速度。以上传感器均为首次使用,采用厂家标定的数据。所有信号通过 NI 数据采集卡 NI USB-6341 采集。通过 LABVIEW 编写程序,测试面板如图 3 所示。数据信号采用计数滤波器 A^[5]。模拟信号采用 Butter Worth 低通滤波器。测试时连续采集 1 000 次求平均值为 1 次有效的采样值。

2 测试结果与分析

分别以负载、速度、时间为试验因素进行单因素试验。通过料斗加载和变频器 HYO5D543D 调速完成试验。在调整电机频率 5.5 Hz 的条件下,分别在负载 50~255 kg 范围内,每间隔 5 kg,共设 42 个水平。每个水平重复 3 次,同时测平均扭矩、输入功

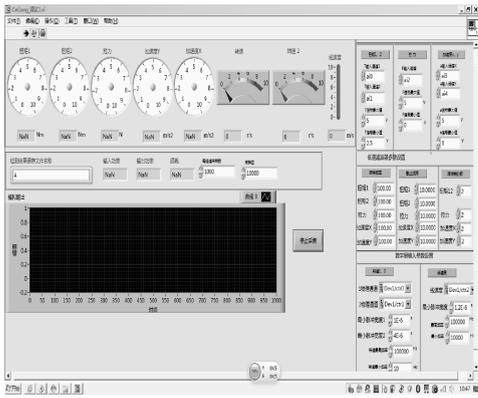


图 3 测试面板
Fig. 3 Test panel

率和橡胶辊效率,分析负载对上述 4 个指标的影响;在负载 100 kg 的条件下,分别在电机频率 5.5~13.0 Hz 范围内,每间隔 0.5 Hz,共设 16 个水平。每个水平重复 3 次,同时测平均扭矩、输入功率和橡胶辊效率,分析负载对上述 4 个试验指标的影响。

由图 4 可知,在负载 50~170 kg 范围内扭矩变化平缓,负载 170~230 kg 时扭矩有明显波动,负载大于 230 kg 时扭矩出现下降,说明负载小于 230 kg 时能够顺利驱动,而超过 230 kg 则有打滑现象。

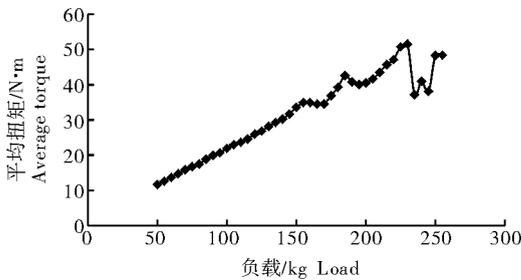


图 4 负载对平均扭矩的影响

Fig. 4 Effect of load on average torque

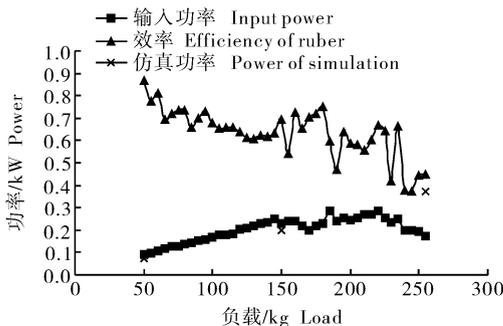


图 5 负载对功率和效率的影响

Fig. 5 Effect of load on power and efficiency

图 5 是负载对功率和效率的影响结果,其中仿真功率是在仿真过程中提取的橡胶辊输入功率值

(图中只有 3 个点,分别在负载 50、150、250 kg 处,其中在负载 50 kg 处仿真功率与输入功率重合)。由图 5 可知,负载超过 230 kg 以后效率明显下降,输入功率也开始下降。这是由于橡胶辊在被压之后,材料内部产生能量,且这些能量以应变能的形式不能利用而产生损耗,所以效率呈下降趋势,输入功率呈上升趋势。

$$F = 7.08 > F_{0.01}(41, 42) = 2.08, P < 0.01$$

F 检验结果显示,负载对其影响极显著,表明低负载状态相对于重载下能够节能。

调整频率 5.5~13 Hz 进行试验,测得平均扭矩为 25~26 N·m,呈小幅下降趋势,其均值为 25.65 N·m。*F* 检验结果表明,频率对平均扭矩的影响不显著。其原因是由于转速增长快后,齿根与齿顶之间的交互影响不明显(图 6)。

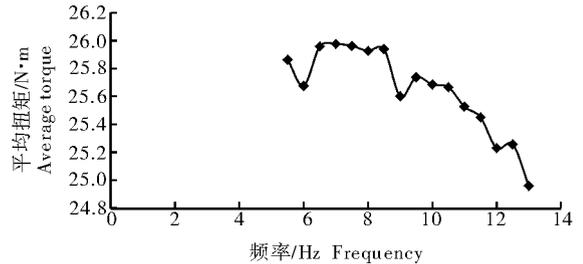


图 6 频率对平均扭矩的影响

Fig. 6 Effect of frequency on average torque

图 7 为频率与功率和效率的关系。试验效率在调频过程中平均值 0.717。*F* 检验结果显示,频率对效率的影响不显著,表明调频过程中,功率输入均匀增加,没有出现打滑现象。

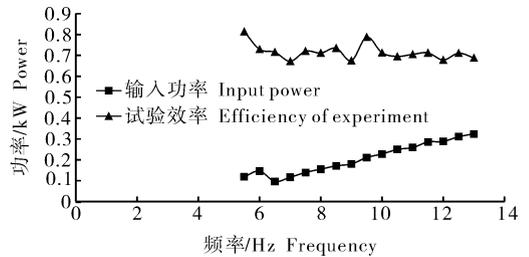


图 7 频率对功率和效率的影响

Fig. 7 Effect of frequency on power and efficiency

3 模型的建立

驱动副包含导轨、橡胶套和齿轮芯,三者构成多体系统。橡胶套属于超弹性体且变形量大,因此,采用刚柔耦合建模对驱动副进行动力学仿真,其中齿轮芯与轨道设置为刚体,橡胶套设置为柔体。

3.1 几何模型

橡胶辊由齿轮芯与橡胶压铸而得,实际结构如图 8 所示,其齿轮芯模数 2 mm、橡胶辊外径 80 mm、厚度 40 mm,部件包含导轨、齿轮和橡胶套。导轨采用 50 方钢管结构,壁厚 4 mm。

几何模型如图 9 所示,模型与实际一致。导轨为刚体面,网格比较稀疏。齿轮芯与橡胶套的网格比较均匀,在二者交面处比较细。整个模型节点为 71 658 个,单元为 60 247 个。



图 8 橡胶辊
Fig. 8 Rubber roller

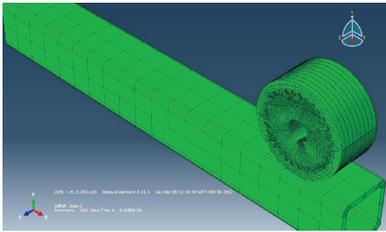


图 9 几何模型与网格划分
Fig. 9 Geometrical model and meshing

3.2 材料模型

由于橡胶的优良特性,如弹性和柔软性好、变形大等^[6],所以选择橡胶材料作为驱动副。但因其力学特征具有高度的非线性行为,故试验多通过连续介质力学法构建本构模型,一般都以应变能模型^[7]来表达其力学性能。

$$W = \sum_{i,j=0}^{\infty} C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j$$

式中 C_{ij} 为材料常数; I_1 为柯西-格林变形张量; I_2 为不变量。

所有模型都是应变能函数的特殊表达形式,其中 Neo-Hookean 模型只保留第一项,即 $W_{NH} = C_{10} (I_1 - 3)$,其参数少,不够精确。

应变能函数模型: $W_Y = C_{10} (I_1 - 3) + C_{20} (I_1 - 3)^2 + C_{30} (I_1 - 3)^3$,虽然对炭黑填料橡胶

辊很适合,但对小变形区则存在一定的精度问题。

Mooney 在 1940 年提出 Mooney-Rivlin 模型^[8]: $W_{MR} = C_{10} (I_1 - 3) + C_{01} (I_2 - 3)$,在工程上被广泛应用,一般能比较准确地进行预测^[9-10]。

因此,本试验采用 Mooney-Rivlin 模型对橡胶材料进行模拟, C_{10} 和 C_{01} 是模型中需要确定的 2 个材料参数。

$$\text{根据 } E(\text{MPa}) = \frac{15.75 + 2.15H_A}{100 - H_A}$$

$$C_{10} = E/6, C_{01} = 0.25C_{10}^{[11]}$$

式中 H_A 为邵氏硬度,通过邵氏硬度计测得其值为 80。由此可确定橡胶材料参数(表 1),其余参数在 Abqus 中选择。橡胶材料选择各向同性,应变势能选择 Mooney-Rivlin,模量时间尺度选择“长期”,应变势能阶次选择 1 次;钢材料类型均选择各向同性,密度分布选择一致,模量时间尺度选择“长期”。

表 1 模型的材料参数

Table1 Material parameters of models

材料 Mmaterial	质量密度/(g/cm ³) Mass density	弹性/超弹性力学参数 Elasticity/Superelasticity parameter
钢 Steel	7.85	$E = 2.09 \times 10^5 \text{ MPa}, \mu = 0.3$
橡胶 Rubber	1.23	$E = 9.39 \text{ MPa}, \mu = 0.47$ $C_{10} = 1.565, C_{01} = 0.391$

3.3 边界条件的定义与加载

橡胶辊在正压力和扭矩的共同作用下驱动,仿真采用先施加正压力后再施加扭矩的方法进行加载,因此,加载过程分为 Step 1(压缩)和 Step 2(滚动)两步。Step 1:施加正压力,产生压缩;Step 2:再施加扭矩,使正压力、扭矩共同作用,开始滚动。

分析步均采用显式动力学分析,各分析步设置如下。

Step 1:正压力载荷,在 Datum csys-3 坐标系上原点处加载 CF2 方向上 -1 000 N 的恒定集中力。边界条件:Datumsys-3 除 U_2 方向全部选择;

Step 2:正压力载荷同 Step 1,在 Datumsys-3 坐标系上原点处加载 CM3 方向上 70 Nm 的恒定集中力。边界条件:Datumsys-3, U_3, U_{R1}, U_{R2} 。

接触副的设置:第一表面为方钢管导轨的上表面以及 2 个相邻的圆角区;第二表面为橡胶辊的外圆柱面,力学约束公式采用运动接触法,并采用有限滑移方式。边界条件:方钢导轨相对于全局坐标系完全固定和橡胶辊在浮动坐标系中 U_3, U_{R1}, U_{R2} 。接触属性:摩擦方式一罚函数^[11],系数为 0.5。切向特性:允许最大弹性滑移比为 0.1。

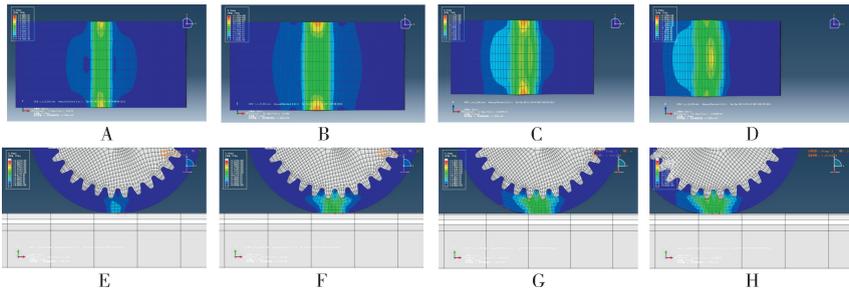
4 仿真结果与分析

计算机通过数值迭代算法进行仿真计算,结果总共 216 帧,其中压缩阶段为 1~12 帧,滚动阶段为 13~216 帧。

4.1 动态应力分布

图 10 为不同时刻下的等效应力云图,分别对应第 7、10、16、27 帧。图 10-A~D 为正压缩阶段。橡胶辊受正压力与导轨接触。等效压力峰值出现在接触面与两端面的交界处,约为 1.97 mPa。应力分布

关于中轴线对称。第二阶段(图 10-E~H)为滚动阶段。接触面上的等效应力会出现波动,峰值仍然出现于两面交界处。由于扭矩加载后,橡胶套整体等效应力向前进方向扩散,并从其反方向收敛,使表面节点进入和离开摩擦区域的状态不同。滚动过程中,在图 10-E 所示的接触面上,应力峰值中间出现 2 个狭长的局部峰值区域。当 $t = 10.4 \text{ ms}$ 时,图 10-G 接触面上仅出现 1 个局部峰值区域。其原因是由于滚动过程中轮芯的齿廓所致,使在接触面上齿顶与齿根所对应的点出现局部峰值现象。



A, B: Step 1, $t = 0.218 \text{ s}$; C, D: Step 1, $t = 0.759 \text{ s}$; E, F: Step 2, $t = 5.48 \text{ ms}$; G, H: Step 2, $t = 10.4 \text{ ms}$.

图 10 压缩与滚动状态等效应力云图

Fig. 10 Equivalent stress nephogram in states of compression and rolling

4.2 最大主应力分析

为观察接触面上齿顶与齿根对应点的应力随时间的变化,根据齿轮的轴向结构对称,在模型中取了 20 个节点(图 11 中的红点,其中位于接触面上与齿顶对应的点 10 个,与齿根对应的点 10 个)。

从图 12 可以看出,所有节点历经微量拉大幅压、小幅拉的过程。齿顶节点与齿根节点的曲线保持着 0.001 s 的相位差。位于中心节点的曲线幅值最大,位于两端节点的曲线幅值最小。

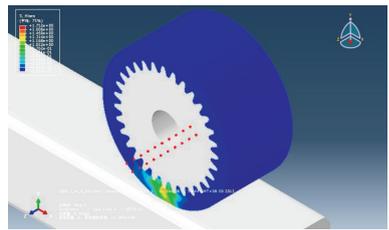


图 11 齿顶与齿根对应节点的选择
Fig. 11 The corresponding nodes of addendum and dedendum

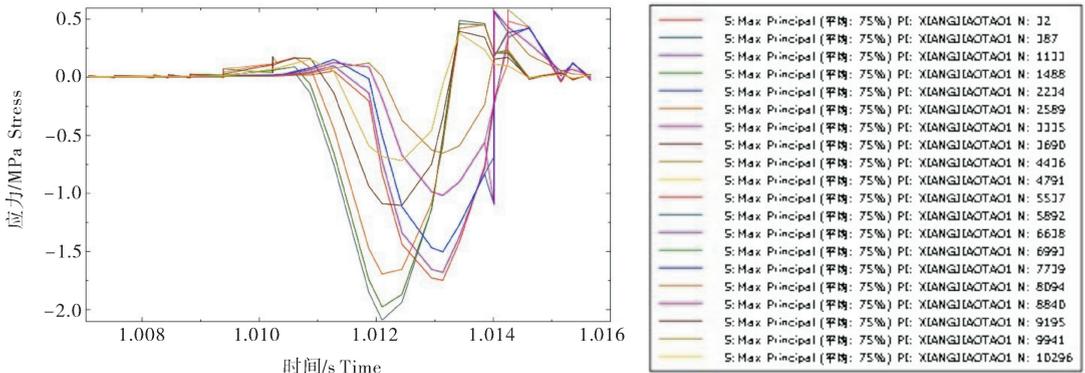


图 12 滚动过程中节点的最大主应力

Fig. 12 The maximum principle stress of nodes when rolling

5 讨论

本试验针对果园运输机设计了锥差轮系与连杆自适应机构作为橡胶辊的动力驱动机构,达到了根据摩擦力自动调整至合理正压力、平衡扭矩和差分转速的目的,能有效利用橡胶辊结构对运输机进行驱动。与现有的果园运输机驱动执行机构相比,设计的驱动机构提高了性能,节约了能耗。

通过几何与材料非线性显式动力学对橡胶辊在执行机构作用下的滚动过程进行数值计算,得到动态应力云图,可以发现接触面与端口接触出现等效应力峰值,接触面中心起着主要承载作用,橡胶辊动力驱动机构最大主应力最大。试验结果表明,当连杆角度为 28° 且负载小于230 kg时,机构能顺利驱动;负载大于230 kg时有打滑现象;转速对扭矩和效率影响均不显著。果园运输机橡胶辊滚动过程的仿真与试验结果基本相符。

参 考 文 献

[1] 洪添胜,张衍林,杨洲. 果园机械与设施[M]. 北京:中国农业出版社,2012:103-146.

- [2] 张凯鑫,张衍林,周波,等. 单轨道橡胶辊驱动装置驱动性能研究[J]. 农业机械学报,2013,44(增刊):260-265.
- [3] 陆宁,樊江玲. 机械原理[M]. 北京:清华大学出版社,2012:105-108.
- [4] 张俊彦,赵荣国. 理论力学[M]. 2版. 北京:北京大学出版社,2011:25-61.
- [5] 张楠,杨建武,崔晶. Lab VIEW 计数滤波器在信号降噪中的应用[J]. 微计算机信息,2009,28:77-79.
- [6] LARABA-ABBES F, IENNY P, PIQUES R. A new 'Tailor-made' methodology for the mechanical behaviour analysis of rubber-like materials: II. Application to the hyperelastic behaviour characterization of a carbon-black filled natural rubber vulcanizate [J]. Polymer, 2003, 44(3): 821-840.
- [7] BOYCE M C, ARRUDA E M. Constitutive models of rubber elasticity: a review [J]. Rubber Chemistry and Technology, 2000, 73(3): 504-523.
- [8] MOONEY M. A theory of large elastic deformation [J]. Journal of Applied Physics, 1940, 11(9): 582-592.
- [9] 李晓芳,杨晓翔. 橡胶材料的超弹性本构模型[J]. 弹性体, 2005, 15(1): 50-58.
- [10] 王伟,邓涛,赵树高. 橡胶 Mooney-Rivlin 模型中材料常数的确定[J]. 特种橡胶制品, 2004(4): 8-10.
- [11] WRIGGERS P, ZAVARISE G. Computational contact mechanics [M]. New York: John Wiley & Sons, Ltd, 2002: 225-360.

Simulation of orchard transporter's rubber roller in rolling process based on Abaqus

ZHANG Kai-xin¹ ZHANG Yan-lin¹ LIANG Xiu-ying¹ ZHANG Wen-yu¹
ZHAO Liang¹ ZHANG Yao²

1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. College of Foreign Languages, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract To improve rubber roller's performance in rail transportation, a power drive mechanism for rubber roller was designed by using linkages and differential bevel gears for the purpose of adjusting vertical pressure automatically to reasonable value according to the driving force and achieving torque equalization and differential speed. In the experiment, Abaqus was applied to conduct dynamic simulation of rubber roller in the rolling process, which was to study effect of the mechanism on rubber roller. In the simulation, Mooney-Rivlin model and nonlinear contact algorithm, both from Abaqus, were applied in numerical calculation. The relation between vertical pressure and power in rolling process and the relation between speed and efficiency were obtained from simulation. By contrast, it was found that the effect of the vertical pressure on power was basically in accordance with the experiment results. The experiment indicated that the efficiency of rubber roller was 0.7. The results showed that the mechanism can make good use of driving force of two rubber rollers, automatically adapt to curve and save energy in the state of low load, and thus it improves rubber roller's performance in orchard transportation.

Key words transporter; rubber roller; driving mechanism; simulation

(责任编辑:陈红叶)