

## 果实快速夹持复合碰撞模型研究\*

刘继展<sup>1</sup> 白欣欣<sup>1</sup> 李萍萍<sup>2</sup> 毛罕平<sup>1</sup>

(1. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013; 2. 南京林业大学森林资源与环境学院, 南京 210037)

**摘要:** 针对具备持续动力输入和果实约束变形两大特殊性的果实夹持碰撞问题, 以果实黏弹性 Burger's 模型为基础, 提出并建立了夹持器恒速模式与负载能力限定下的果实夹持碰撞三阶段复合模型。试验证实初始夹持速度 19.2 mm/s 下, 该模型的峰值碰撞力预测误差仅为 1.12%。基于该三阶段复合模型对果实夹持碰撞规律的分析发现, 以恒速模式实施果实夹持时, 初始夹持速度 6 mm/s 完成绿熟期、变色期、红熟初期与红熟中期番茄果实夹持所需时间分别仅为 0.62 s、1.06 s、1.19 s 和 1.24 s, 而超过 10 mm/s 后继续加大初始夹持速度对提高作业效率的作用有限。峰值碰撞力和果实变形分别与夹持速度呈线性和近似线性关系, 随着初始夹持速度的提高果实破裂损伤的概率大大增加, 当初始夹持速度低于 20 mm/s 时番茄果实损伤概率反而呈现绿熟期最高而红熟初期最低的现象。该模型为揭示夹持碰撞的特殊规律和实现果实快速柔顺夹持作业提供了借鉴和依据。

**关键词:** 果实 黏弹性 快速夹持 碰撞 模型

**中图分类号:** TP242; TS201.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)04-0049-06

## 引言

在果蔬收获、移运、分选各个环节, 碰撞是造成果实机械损伤的决定性因素, 并一直是果蔬研究的重点领域。已有研究主要集中于果实储运、搬移等过程中的跌落和果实之间的接触碰撞问题<sup>[1-12]</sup>。

果实在被夹持时极易产生损伤, 因而果实柔性夹持成为相关领域机器人研究的关键课题<sup>[13-18]</sup>。在快速夹持作业中, 碰撞将产生瞬时的过大载荷而导致果实的损伤, 但已有果实柔性夹持研究仅以静态力平衡分析为基础<sup>[16-18]</sup>, 仅文献[19-20]对果实快速夹持碰撞的力变化规律进行了初步试验研究, 但尚未实现对果实夹持碰撞过程的模型描述。与接触碰撞问题相比, 夹持碰撞过程中具有持续能量输入和果实约束变形两大特征, 其碰撞机理与形式存在着极大的差异。

本文以电动机驱动的果实快速夹持碰撞为对象, 基于果实黏弹性模型建立三阶段碰撞复合模型并进行试验验证, 进而利用该模型对夹持速度与碰撞峰值力、碰撞时间和变形的关系进行分析, 从而为实现果实的快速夹持作业提供理论依据。

## 1 果实黏弹特性的 Burger's 模型

以经典的 Burger's 四元件模型来表达果实的黏

弹力学行为, 如图 1 所示。Burger's 模型的基本流变微分方程为

$$\ddot{D} + \frac{E_2}{\eta_2} \dot{D} = \frac{1}{E_1} \left[ \ddot{N} + \left( \frac{E_1}{\eta_2} + \frac{E_1}{\eta_1} + \frac{E_2}{\eta_2} \right) \dot{N} + \frac{E_1 E_2}{\eta_1 \eta_2} N \right] \quad (1)$$

式中  $D$ ——果实变形(手指位移量), mm

$N$ ——果实的变形抗力, N

$E_1$ ——瞬时弹性系数, N/mm

$\eta_1$ ——串联黏性元件黏度系数, (N·s)/mm

$E_2$ ——延迟弹性系数, N/mm

$\eta_2$ ——并联黏性元件黏度系数, (N·s)/mm

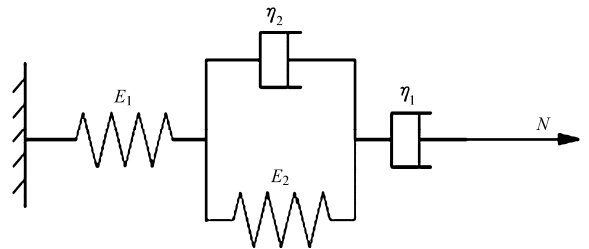


图 1 Burger's 四元件模型

Fig. 1 Schematic diagram of 4-element Burger's model

## 1.1 果实夹持碰撞的研究对象特征

以机器人操作中应用广泛的直流伺服电动机驱动双指式夹持器为研究对象, 其特征为: 由直流伺服电动机驱动, 恒速度模式运行; 设定最高电流限制以

避免堵转对电动机造成损伤;夹持器相应具有最大静夹持力  $F_0$ ;夹持器具有自锁性能。

## 1.2 夹持碰撞阶段及其动力学特征

夹持碰撞过程中,电动机驱动手指合拢,接触果实并持续输入动力使果实发生变形,直至在反作用力下手手指停止运动。该过程包含4个阶段并分别具有下述动力学特征:

(1) 空载进给阶段:在电动机驱动下,夹持器以一定速度  $v_0$  合拢,直至手指与果实发生接触(图2a)。

(2) 匀速加载阶段:当手指接触果实并继续以速度  $v_0$  合拢时,果实发生黏弹变形并产生变形抗力  $N$  ( $N \leq F_0$ )(图2b)。匀速加载阶段的果实变形条件为

$$\begin{cases} \dot{D} = v_0 \\ \ddot{D} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

(3) 碰撞减速阶段:当果实变形继续增大使变形抗力  $N$  超过最大静夹持力  $F_0$  以后,手指开始减速直至停止(图2c)。根据牛顿第二定律,碰撞减速阶段的动力学特征为

$$m_e \ddot{D} = F_0 - N \quad (3)$$

式中  $m_e$ ——夹持器机电系统对手指的等效质量, kg

(4) 应力松弛阶段:夹持器处于自锁状态,果实恒定的压缩变形下,发生应力松弛现象(图2d)。该阶段的果实变形条件为

$$D = 0 \quad (4)$$

在夹持碰撞的匀速加载与碰撞减速两阶段内,

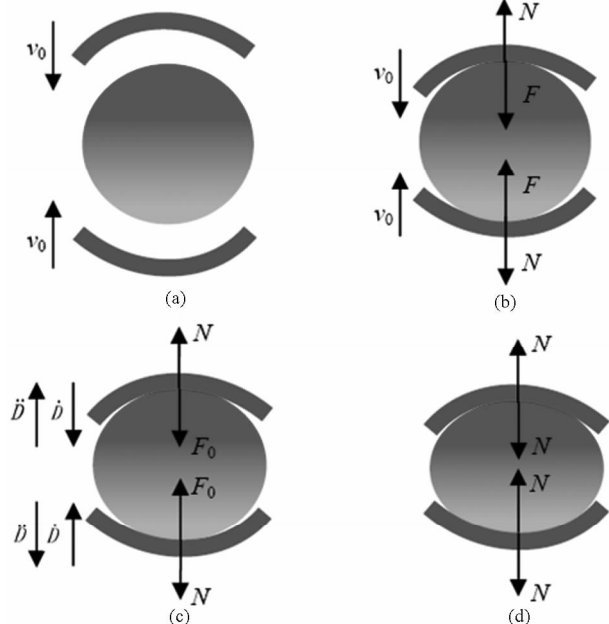


图2 夹持碰撞过程各阶段的阶段动力学特征

Fig.2 Dynamical features in different stage of gripping

(a) 空载进给 ( $N=0$ ) (b) 匀速加载 ( $N \leq F_0$ )

(c) 碰撞减速 ( $N > F_0$ ) (d) 应力松弛

由电动机进行持续的能量输入,同时果实被约束在两手指间发生变形。而在接触碰撞中,能量仅来源于果实接触时的初始动能,同时果实仅产生单向的非弹性碰撞变形。二者的碰撞机理与形式存在着极大的差异,建立对夹持碰撞的特殊规律描述具有重要的价值。

## 2 夹持碰撞三阶段复合模型求解

### 2.1 匀速加载阶段与应力松弛阶段

分别将匀速加载阶段与应力松弛阶段的果实变形条件,即式(2)和式(4)代入式(1),可得

$$\ddot{N} + \left( \frac{E_1}{\eta_2} + \frac{E_1}{\eta_1} + \frac{E_2}{\eta_2} \right) \dot{N} + \frac{E_1 E_2}{\eta_1 \eta_2} N = \frac{E_1 E_2}{\eta_2} v_0 \quad (5)$$

$$\ddot{N} + \left( \frac{E_1}{\eta_2} + \frac{E_1}{\eta_1} + \frac{E_2}{\eta_2} \right) \dot{N} + \frac{E_1 E_2}{\eta_1 \eta_2} N = 0 \quad (6)$$

式(5)和式(6)分别为二阶常系数非齐次和齐次线性微分方程。根据两阶段的初始条件可分别得到两阶段的模型解<sup>[21-22]</sup>

匀速加载阶段

$$N = v_0 \left( \eta_1 + \frac{-E_1 - \eta_1 r_2}{\sqrt{\Delta_1}} e^{r_1 t} + \frac{E_1 + \eta_1 r_1}{\sqrt{\Delta_1}} e^{r_2 t} \right) \quad (7)$$

应力松弛阶段

$$N = \frac{D_0 \left( \frac{E_1 E_2}{\eta_2} + E_1 r_1 \right)}{\sqrt{\Delta_1}} e^{r_1(t-t_1)} + \frac{D_0 \left( -\frac{E_1 E_2}{\eta_2} - E_1 r_2 \right)}{\sqrt{\Delta_1}} e^{r_2(t-t_1)} \quad (8)$$

其中  $\Delta_1 = \left( \frac{E_1}{\eta_2} + \frac{E_1}{\eta_1} - \frac{E_2}{\eta_2} \right)^2 + 4 \frac{E_1 E_2}{\eta_2^2}$

式中  $t_1$ ——从手指接触果实直至停止运动所用时间, s

$D_0$ ——果实的碰撞峰值变形, mm

$\Delta_1$ ——式(5)和式(6)的特征方程判别式

### 2.2 碰撞减速阶段

由式(1)有

$$\ddot{D} + \frac{E_2}{\eta_2} \dot{D} = \frac{1}{E_1} \left[ \ddot{N} + \left( \frac{E_1}{\eta_2} + \frac{E_1}{\eta_1} + \frac{E_2}{\eta_2} \right) \dot{N} + \frac{E_1 E_2}{\eta_1 \eta_2} N \right] \quad (9)$$

将碰撞减速阶段的动力学特征,即式(3)代入式(9),可得

$$\ddot{N} + \left( \frac{E_1}{\eta_2} + \frac{E_1}{\eta_1} + \frac{E_2}{\eta_2} \right) \dot{N} + \left( \frac{E_1 E_2}{\eta_1 \eta_2} + \frac{E_1}{m_e} \right) N + \frac{E_1 E_2}{m_e \eta_2} N - \frac{E_1 E_2}{m_e \eta_2} F_0 = 0 \quad (10)$$

式(10)为三阶常系数非齐次线性微分方程,为

分析方便,令

$$\begin{cases} p_1 = \frac{E_1}{\eta_2} + \frac{E_1}{\eta_1} + \frac{E_2}{\eta_2} \\ q_1 = \frac{E_1 E_2}{\eta_1 \eta_2} + \frac{E_1}{m_c} \\ q_2 = \frac{E_1 E_2}{m_c \eta_2} \end{cases} \quad (11)$$

则式(10)可表达为

$$\ddot{N} + p_1 \dot{N} + q_1 N + q_2 N - q_2 F_0 = 0 \quad (12)$$

由文献[23],当式(12)特征方程的判别式 $\Delta_2 =$

$$\left(\frac{p_1 q_1}{6} - \frac{p_1^3}{27} - \frac{q_2}{2}\right)^2 + \left(\frac{q_1}{3} - \frac{p_1^2}{9}\right)^3 > 0 \text{ 时,式(12)的特}$$

征方程有1个实根 $\lambda_1$ 和2个共轭复根 $\lambda_{2,3} = \alpha \pm i\beta$  ( $\alpha, \beta \in \mathbf{R}$ ),式(12)的解为

$$N = F_0 + [C_1 \cos(\beta(t - t_0)) + C_2 \sin(\beta(t - t_0))] \cdot e^{\alpha(t - t_0)} - C_1 e^{\lambda_1(t - t_0)} \quad (13)$$

碰撞减速阶段的方程初始条件为

$$\begin{cases} N|_{t=t_0} = F_0 \\ \dot{D}|_{t=t_0} = v_0 \\ D|_{t=t_0} = v_0 t_0 \end{cases} \quad (14)$$

式中 $t_0$ ——匀速加载阶段完成所用时间,s

根据式(14)可解得

$$\begin{cases} C_1 = mv_0 \frac{\alpha\beta\lambda_1^2(\alpha\beta t_0 - 2)}{2\beta\lambda_1^2 + \alpha^2\lambda_1^2 + \alpha^2\beta^2 - \beta^2\lambda_1^2 - 2\alpha\beta\lambda_1} \\ C_2 = mv_0 \left( \beta + \frac{\alpha\beta^3\lambda_1^2 t_0 - 2\beta^2\lambda_1^2 - \alpha^2\beta^3\lambda_1 t_0 + 2\alpha\beta^3\lambda_1}{2\beta\lambda_1^2 + \alpha^2\lambda_1^2 + \alpha^2\beta^2 - \beta^2\lambda_1^2 - 2\alpha\beta\lambda_1} \right) \end{cases} \quad (15)$$

因而常数 $C_1, C_2$ 均与初始夹持速度 $v_0$ 呈正比。

### 3 夹持碰撞规律的试验验证与分析

#### 3.1 夹持碰撞过程的力变化规律

三阶段复合模型中,不同成熟期番茄果实的Burger's模型参数由果实流变试验拟合获得<sup>[20]</sup>(表1)。

表1 不同成熟期番茄果实的Burger's模型参数

Tab.1 Parameters in Burger's model for tomato fruit of different ripeness

参数	绿熟期	变色期	红熟初期	红熟中期
$E_1 / (\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	11.22	4.602	3.797	3.554
$\eta_1 / (\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{mm}^{-1})$	8365	2000	1959	1786
$E_2 / (\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	66.43	20.46	16.24	14.74
$\eta_2 / (\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{mm}^{-1})$	511.8	123.3	132.9	117.4

以绿熟期果实为例,图3反映了三阶段复合模型对夹持碰撞力变化规律的描述。果实的低速夹持表现为准静态加载过程,其碰撞减速阶段 $t_1 - t_0$ 所占比例及对峰值力的贡献极小,同时需较长过程 $t_1$

完成果实的夹持。随着初始夹持速度 $v_0$ 的提高,完成夹持所需时间 $t_1$ 迅速下降,并主要由碰撞减速阶段导致峰值碰撞力的显著增加。在达到峰值碰撞力后手指停止运动,果实呈现应力松弛现象,图3描述了缓慢应力松弛过程的初期变化。

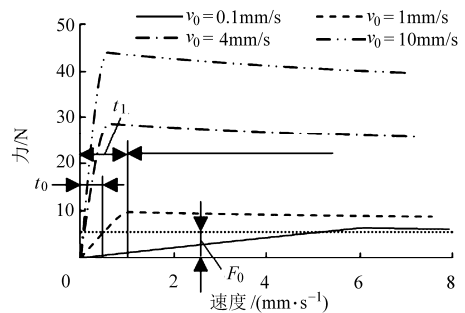


图3 夹持碰撞过程的力变化曲线(绿熟期)

Fig.3 Simulated force curve in gripping

### 3.2 试验验证

#### 3.2.1 试验材料与方法

以手工采自镇江市丹徒区番茄种植基地的金鹏5号绿熟期番茄果实为试验材料,利用自主开发的采摘机器人末端执行器系统对该三阶段夹持碰撞复合模型进行了验证(图4)。番茄的赤道面直径及高度分别为69.84~82.09 mm和50.35~65.22 mm;质量为129.8~217.8 g。末端执行器的手指由功率为60 W的Maxon直流电动机驱动,并通过其EPOS控制器界面程序实现电动机的速度设定。手指上安装有丽景MDS微型力传感器,量程为100 N,精度0.01 N。根据传动比进行电动机转速设定,分别以0.48、1.44、2.40、4.80、9.60、14.40、19.20 mm/s夹持速度水平对随机选择的9个番茄果实在赤道面位置进行加载,于采摘后36 h内完成夹持碰撞试验并记录峰值碰撞力。

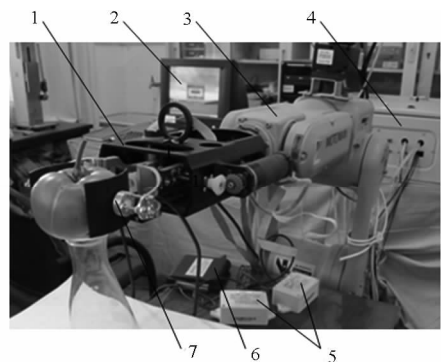


图4 采摘机器人末端执行器夹持试验装置

Fig.4 Schematic diagram of experimental apparatus

1. 末端执行器 2. 主机及EPOS软件 3. 机械手 4. 控制箱  
5. 放大器 6. 数据采集卡 7. 力传感器

#### 3.2.2 验证结果分析

图5为夹持峰值碰撞力的三阶段复合模型计算值与试验均值及标准差的比较,计算值与试验均值

均与初始夹持速度呈现近似线性关系,初始夹持速度 19.20 mm/s 下的峰值碰撞力误差为 1.12%。试验结果证实该三阶段复合模型较准确反映了夹持碰撞的峰值力发生情况。

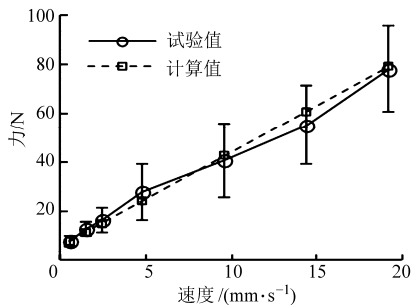


图5 峰值碰撞力的试验值与模型计算值比较

Fig. 5 Comparison between test and computed value of peak impact force

### 3.3 果实夹持碰撞规律的模型分析

#### 3.3.1 夹持速度与果实成熟度对碰撞时间的影响

碰撞时间  $t_1$  由匀速加载和碰撞减速两阶段所需时间构成。由式(7)和边界条件(14),匀速加载阶段所需时间  $t_0$  与初始加载速度  $v_0$  呈非线性负相关。碰撞减速阶段所需时间  $t_1 - t_0$  则由式(13)根据下列边界条件及式(3)所确定

$$D|_{t=t_1} = 0 \quad (16)$$

式(16)难以得到  $t_1 - t_0$  的显式解,但可以发现  $t_1 - t_0$  为式(12)特征方程的实根  $\lambda_1$ 、复根实部  $\alpha$  和虚部  $\beta$  的函数

$$t_1 - t_0 = f(\alpha, \beta, \lambda_1) \quad (17)$$

由于  $\lambda_1$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  决定于 Burger's 模型的四元件参数,因而特定成熟度果实的碰撞减速阶段所需时间  $t_1 - t_0$  为常数,而与初始夹持速度  $v_0$  无关。

利用三阶段复合模型可以得到下述结论:

(1) 随着初始夹持速度  $v_0$  的增加,匀速加载阶段所需时间  $t_0$  迅速减少,而碰撞减速阶段所需时间  $t_1 - t_0$  保持恒定。

(2) 随着初始夹持速度  $v_0$  的增加,碰撞过程存在时间  $t_1$  的极限值,该值由碰撞减速阶段所决定。

图6反映了上述规律,同时亦表明,果实成熟度越高,果实变软,完成夹持碰撞所需的时间越长。手指以初始速度 0.1 mm/s 完成绿熟期、变色期、红熟初期与红熟中期果实夹持所需时间分别达 6.17、16.01、19.29 和 20.81 s;手指以夹持速度 6 mm/s 完成绿熟期、变色期、红熟初期与红熟中期果实夹持所需时间分别为 0.62、1.06、1.19 和 1.24 s,分别仅为初始速度 0.1 mm/s 下夹持所需时间的 10.0%、6.6%、6.2% 和 6.2%。而当初始夹持速度超过 10 mm/s 时,碰撞时间趋于由碰撞减速阶段所决定

的极限值,因而继续加大初始夹持速度对提高作业效率的作用非常有限。

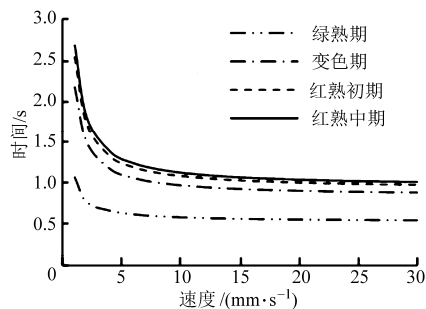


图6 碰撞时间与初始夹持速度关系

Fig. 6 Relation between impact time and initial gripping speed

#### 3.3.2 夹持速度与果实成熟度对碰撞变形的影响

果实夹持碰撞的匀速加载阶段变形为

$$D|_{t=t_0} = v_0 t_0 \quad (18)$$

由于  $t_0$  与初始加载速度  $v_0$  呈非线性负相关,果实夹持碰撞的匀速加载阶段变形与  $v_0$  呈图7所示非线性关系,低速时匀速加载阶段变形较大,但一定速度后趋于稳定。

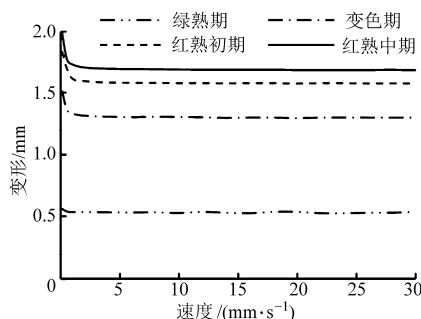


图7 果实匀速加载阶段变形与初始夹持速度关系

Fig. 7 Relation between impact deformation in constant-speed loading stage and initial gripping speed

由式(3)、(13)和(15)可得碰撞减速阶段变形

$$D|_{t=t_1} = \left[ \left( -\frac{C_2}{\alpha^2} + \frac{C_2}{\beta^2} - \frac{2C_1}{\alpha\beta} \right) \sin(\beta(t_1 - t_0)) + \left( -\frac{C_1}{\alpha^2} + \frac{C_1}{\beta^2} + \frac{2C_2}{\alpha\beta} \right) \cos(\beta(t_1 - t_0)) \right] e^{\alpha(t_1 - t_0)} - \frac{C_1}{\lambda_1^2} e^{\lambda_1(t_1 - t_0)} \quad (19)$$

由于  $t_1 - t_0$  为常数,而  $C_1$ 、 $C_2$  与初始夹持速度  $v_0$  呈正比,故碰撞减速阶段变形亦正比于初始夹持速度  $v_0$ 。

果实碰撞变形  $D_0$  由匀速加载和碰撞减速两阶段变形所构成,因而除低速区外,其与夹持速度呈现近似线性关系(图8)。手指以 0.1 mm/s 初始速度完成绿熟期、变色期、红熟初期与红熟中期果实夹持时,果实变形分别仅为 0.60、1.57、1.90 和 2.05 mm;手指以 30 mm/s 初始速度完成绿熟期、变色期、红熟初

期与红熟中期果实夹持时,果实变形则分别达10.77、17.32、19.20和19.91 mm。

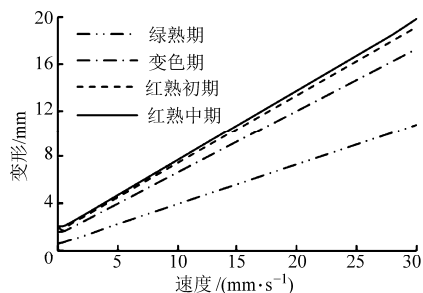


图8 果实碰撞变形与初始夹持速度关系

Fig. 8 Relation between impact deformation and initial gripping speed

### 3.3.3 夹持速度与果实成熟度对碰撞峰值力的影响

由式(13)得夹持碰撞峰值力为

$$N_0 = N|_{t=t_1} = F_0 + [C_1 \cos(\beta(t_1 - t_0)) + C_2 \sin(\beta(t_1 - t_0))] e^{\alpha(t-t_0)} - C_1 e^{\lambda_1(t-t_0)} \quad (20)$$

由于 $t_1 - t_0$ 为常数,而 $C_1$ 、 $C_2$ 与初始夹持速度 $v_0$ 成正比,故夹持碰撞峰值力与初始夹持速度 $v_0$ 呈线性关系。在低速下夹持过程近似静态加载,其峰值碰撞力接近最大静夹持力 $F_0$ ,而高速碰撞则会产生极大的峰值力。

模型模拟得到的峰值碰撞力与初始夹持速度关系如图9所示。当夹持速度为10 mm/s时,绿熟期、红熟初期和红熟中期番茄果实的平均夹持碰撞力分别为43.96、27.92和27.18 N;而当夹持速度达到40 mm/s时,各成熟期番茄果实的平均夹持碰撞力可依次分别高达157.84、93.69和90.72 N。

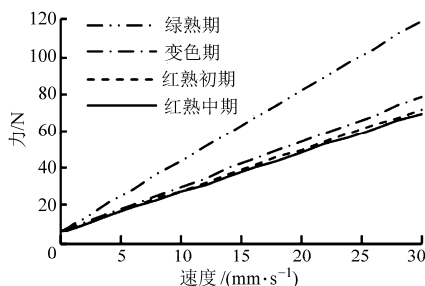


图9 峰值碰撞力与初始夹持速度关系

Fig. 9 Relation between peak impact force and initial gripping speed

将初始夹持速度-峰值碰撞力与果实挤压破裂力试验结果<sup>[24-25]</sup>相结合,得到图10所示初始夹持速度-果实破裂损伤概率曲线。可以发现,当初始夹持速度为10 mm/s时各成熟期番茄果实的破裂损伤

概率依次分别仅为2.0%、0.4%和0.4%。而初始夹持速度继续加大,只会导致果实破裂损伤迅速增加,却无益于作业效率的继续提高。

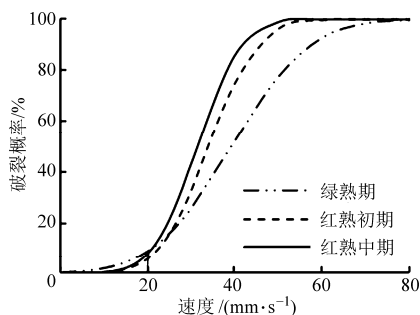


图10 不同初始夹持速度下的果实破裂损伤概率

Fig. 10 Probability of skin rupture under different initial gripping speed

同时,当初始夹持速度低于20 mm/s时,由于峰值碰撞力与挤压破裂阈值的双重影响,反而导致红熟初期和绿熟期番茄果实的损伤概率分别为最低与最高的现象。但初始夹持速度更大之后,果实成熟度越高则呈现明显的更高破裂损伤可能。

## 4 结论

(1)提出了在恒定静负载能力和恒速模式下,夹持器对果实夹持碰撞过程的匀速加载、碰撞减速、应力松弛的阶段性的,以果实黏弹性Burger's模型为基础建立了夹持碰撞三阶段复合模型。试验证实该三阶段复合模型能够准确预测碰撞的峰值力发生情况,19.2 mm/s初始夹持速度下的峰值碰撞力误差为1.12%。

(2)随着初始夹持速度 $v_0$ 的增加,匀速加载阶段所需时间 $t_0$ 迅速减少,而碰撞减速阶段所需时间 $t_1 - t_0$ 保持恒定。因此,完成碰撞所需时间 $t_1$ 存在极限值,当初始夹持速度超过10 mm/s时,继续加大初始夹持速度对提高作业效率的作用非常有限。

(3)果实夹持碰撞的匀速加载阶段变形与初始夹持速度 $v_0$ 呈非线性负相关,碰撞减速阶段变形则与 $v_0$ 呈正比,果实碰撞变形 $D_0$ 与夹持速度呈现近似线性关系。

(4)峰值碰撞力与初始夹持速度 $v_0$ 呈线性正比关系,当初始夹持速度低于20 mm/s时红熟初期和绿熟期番茄果实的损伤概率分别为最低与最高,更高速夹持时则果实成熟度越高其破裂损伤概率越大。

## 参 考 文 献

- 1 Fei Lu, Ishikawa Y, Kitazawa H, et al. Measurement of impact pressure and bruising of apple fruit using pressure-sensitive film technique[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 96(4): 614-620.
- 2 Idah P A, Ajisejiri E S A, Yisa M G. An assessment of impact damage to fresh tomato fruits[J]. AU J. T., 2007, 10(4): 271-275.
- 3 Stroppek Z, Gołacki K. Determining apple mass on the basis of rebound energy during impact[J]. Teka Kom. Mot. Energ. Roln,

- 2007(7):100-105.
- 4 Nabil S N, Mostafa M A, Ayman H E. Mechanical properties of tomato fruits under storage conditions[J]. Journal of Applied Sciences Research, 2012, 8(6): 3053-3064.
- 5 Fluck R C. Impact force and tomato bruising[R]. Florida State Horticultural Society, Florida Agricultural Experiment Station Journal Series, 1973: 238-242.
- 6 Chen P, Ruiz-Altisen M, Barreiro P. Effect of impact mass on firmness sensing of fruits[J]. Transactions of the ASAE, 1996, 39(3): 1019-1023.
- 7 Gołacki K, Bobin G, Stropek Z. Bruise resistance of apples (melrose variety)[J]. TEKA Kom. Mot. Energ. Roln. - OL PAN, 2009(9): 40-47.
- 8 李小昱, 王为. 苹果碰撞响应数学模型的研究[J]. 农业工程学报, 1996, 12(4): 204-207.  
Li Xiaoyu, Wang Wei. The research on mathematical model of apple impact response[J]. Transactions of the CSAE, 1996, 12(4): 204-207. (in Chinese)
- 9 吴杰, 郭康权, 葛云, 等. 香梨果实跌落碰撞时的接触应力分布特性[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 250-254.  
Wu Jie, Guo Kangquan, Ge Yun, et al. Contact pressure distribution characteristics of Korla pear fruit at moment of drop impact[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 250-254. (in Chinese)
- 10 卢立新. 跌落冲击下果实时动态力学模型[J]. 工程力学, 2009, 26(4): 228-233.  
Lu Lixin. Non-linear viscoelastic modeling of the fruits under dropping impact[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(4): 228-233. (in Chinese)
- 11 卢立新. 苹果-瓦楞纸板缓冲跌落动力学模型[J]. 农业工程学报, 2008, 24(9): 276-280.  
Lu Lixin. Cushioning dropping modeling of a falling apple on the corrugated board[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(9): 276-280. (in Chinese)
- 12 Groves J D. Prediction physical properties of tomatoes with impact force analysis[D]. Columbus, Ohio: The Ohio State University, 1985.
- 13 Flood S J. Design of a robotic citrus harvesting end effector and force control model using physical properties and harvesting motion tests[D]. Gainesville, FL: University of Florida, 2006.
- 14 刘继展, 李萍萍, 李智国. 番茄采摘机器人末端执行器的硬件设计[J]. 农业机械学报, 2008, 39(3): 109-112.  
Liu Jizhan, Li Pingping, Li Zhiguo. Hardware design of the end-effector for tomato-harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 109-112. (in Chinese)
- 15 陈军, 王虎, 蒋浩然, 等. 猕猴桃采摘机器人末端执行器设计[J]. 农业机械学报, 2012, 43(10): 151-154, 199.  
Chen Jun, Wang Hu, Jiang Haoran, et al. Design of end-effector for kiwifruit harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 151-154, 199. (in Chinese)
- 16 王学林, 姬长英, 周俊, 等. 基于力外环控制的果蔬抓取控制研究[J]. 浙江农业学报, 2009, 21(6): 627-632.  
Wang Xuelin, Ji Changying, Zhou Jun, et al. Technology of grasp fruit and vegetable based on external force control loops[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2009, 21(6): 627-632. (in Chinese)
- 17 Peng Chen, Hasegawa Y, Yamashita M. Grasping control of robot hand using fuzzy neural network[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2006, 3972: 1178-1187.
- 18 Domínguez-López J A, Damper R I, Crowder R M, et al. Adaptive neurofuzzy control of a robotic gripper with on-line machine learning[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2004, 48(2-3): 93-110.
- 19 Li Zhiguo, Liu Jizhan, Li Pingping, et al. Study on the collision-mechanical properties of tomatoes gripped by harvesting robot fingers[J]. African Journal of Biotechnology, 2009, 8(24): 7000-7007.
- 20 白欣欣. 采摘机器人快速夹持的碰撞仿真与参数优化[D]. 镇江: 江苏大学, 2011.  
Bai Xinxin. Dynamic collision simulation and parameter optimization of rapid gripping process of tomato harvesting robot[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2011. (in Chinese)
- 21 封基良, 黄晓明. 沥青粘结料粘弹性参数确定方法的研究[J]. 公路交通科技, 2006, 23(5): 16-18, 22.  
Feng Jiliang, Huang Xiaoming. Study on the method of determining viscoelastic parameters of asphalt binder[J]. Journal of Highway and Transportation and Development, 2006, 23(5): 16-18, 22. (in Chinese)
- 22 于怀昌, 李亚丽, 刘汉东. 粉砂质泥岩三轴压缩应力松弛本构模型研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(8): 1258-1263.  
Yu Huaichang, Li Yali, Liu Handong. Study of stress relaxation model of silty mudstone under triaxial compression[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(8): 1258-1263. (in Chinese)
- 23 吴檀. 三阶常系数非齐次线性微分方程的通解[J]. 北京科技大学学报, 1994, 16(2): 195-199.  
Wu Tan. The general solutions of nonhomogeneous linear differential equations of third-order with constant coefficients[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 1994, 16(2): 195-199. (in Chinese)
- 24 刘继展, 李萍萍, 李智国, 等. 面向机器人采摘的番茄力学特性实验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 66-70.  
Liu Jizhan, Li Pingping, Li Zhiguo, et al. Experimental study on mechanical properties of tomatoes for robotic harvesting[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12): 66-70. (in Chinese)
- 25 刘继展. 番茄采摘机器人真空吸持系统分析与优化控制研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2010.  
Liu Jizhan. Analysis and optimal control of vacuum suction system for tomato harvesting robot[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2010. (in Chinese)

**Abstract:** In order to explore the impact of mineralization degrees on infiltration character of soil under moistube-irrigation, an indoor soil box simulation experiment method was used to investigate the infiltration character of soil water under five different mineralization degrees selectively. Results indicated that the degree of mineralization had small impact on the shapes of soil wetted zone, and the wetting front shape were similar to circle. Degree of mineralization had a relatively bigger influence on the volume of wetted soil. The volume of wetted soil in mineralized water was bigger than that in pure water. When the degree of mineralization was 3 g/L, the wetting front (horizontal, vertical up and down) migration distance was the farthest, which had a power function relationship with time. The mineralized water could increase cumulative infiltration. However the relationship between cumulative infiltration and degree of mineralization was not linear relationship. The cumulative infiltration and average soil moisture content was the biggest when the degree of mineralization was 3 g/L. The results of this study provided reference for the utilization of moistube-irrigation with mineralized water.

**Key words:** Mineralization degrees Wetting front Infiltration Moistube-irrigation

---

(上接第 54 页)

## Complex Collision Model in High-speed Gripping of Fruit

Liu Jizhan<sup>1</sup> Bai Xinxin<sup>1</sup> Li Pingping<sup>2</sup> Mao Hanping<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education,

Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

**Abstract:** This paper focused on the special collision phenomenon of fruit gripping with its own characteristics of continuous energy input and restrained deformation. The gripping collision process was divided into three stages: constant-speed loading, collision decelerating and stress relaxation, and a three-stage gripping collision model was put forward under the conditions of constant static loading capacity and constant speed control mode, which was based on the stage dynamic characteristic of gripping collision process and viscoelastic Burger's model of fruits. It was proved by test that the prediction of the peak collision force was feasible, and the prediction error under initial gripping speed of 19.2 mm/s was 1.12%. By calculating with this model, it was found that time needed to grip fruit in different ripe period under initial speed of 6 mm/s was 0.62 ~ 1.24 s, and further raising the initial speed might have very limited effectiveness to improve the gripping efficiency. The peak collision force and fruit deformation were proportional and approximately proportional to initial gripping speed, respectively. Probability of skin rupture increased greatly with initial gripping speed. When initial gripping speed was under 20 mm/s, probability of skin rupture of green ripening stage and early red ripening stage were the greatest and the least, respectively. This three-stage gripping collision model may provide helpful reference to discover the special law of gripping collision and to achieve high-speed safe gripping of fruits.

**Key words:** Fruit Viscoelastic High-speed gripping Collision Model