

## 摘要

为了探明鲜食葡萄采运全周期的落粒—伤粒力学机制与规律,研究了鲜食葡萄果穗系统振碰复合动力学模型构建方法。以葡萄果穗振动模型为基础,提出了改进的葡萄果穗振碰复合模型。并根据此模型,基于绝对节点坐标法和自然坐标法分别描述了果粒主穗轴和支梗果梗,并得到了果穗系统振动动力学方程。基于虚功原理和连续介质力学原理推导得到了果粒主穗轴和果粒的弹性和应力表达式,同时基于Hertz模型和Kelvin模型得到了果粒碰撞力的表达式,代入振动动力学方程,考虑了果穗各部位的约束作用,最终得到了鲜食葡萄果穗振碰复合动力学模型,并简介了解求方法。

## 目的

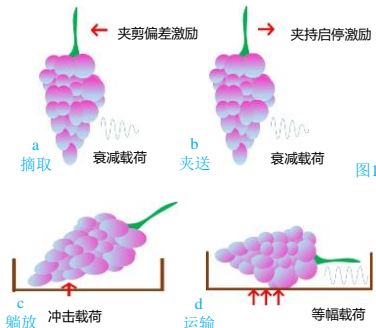


图1. a) 摘取过程中果穗顶部经受夹剪偏差激励。b) 夹送过程中果穗顶部经受夹持启停激励。c) 躺放过程中果穗底部经受冲击载荷激励。d) 运输过程中果穗侧面经受等幅载荷激励。

鲜食葡萄采运过程中,所受激励种类繁多且交叉存在,导致果穗振碰交织造成的落粒、果粒伤粒明显增加。因此,运用多体系统动力学建模方法探明果穗激励传递规律和果穗振碰分布时空规律对于解决落粒—伤粒具有重要意义。

## 方法

## 1. 总述

葡萄果穗振碰模型中,分别建立刚性体分枝穗轴、果梗和柔性体主穗轴和果粒的振动动力学方程,在第一类拉格朗日方程框架下引入碰撞动力学方程,得到了葡萄果穗的振碰复合动力学方程。

## 2. 动力学方程的建立

## ①图2. 刚性体k的位置和方向

$$d^k = [r_A^k \quad r_B^k]^T$$

## ②刚性体的动力学方程

$$\begin{cases} M^k \ddot{d}^k + C_{d^k}^T \lambda^k = Q^k \\ C^k = 0 \end{cases}$$

## ③图3. 柔性体i的单元y上任意一点p的绝对坐标r的位移

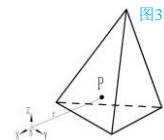
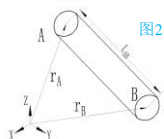
$$r^{xy}(\xi, t) = N^y(\xi) e^{xy}$$

## ④单元y的弹性力

$$F_e^{xy} = \int_{V_0} (B_L^{xy} + B_{NL}^{xy})^T \sigma^y dV$$

## ⑤柔性体i的动力学方程

$$M^i \ddot{z}^i + F^i = Q^i$$



## ⑥图4. 果粒的碰撞力

$$f_n = K \delta + C \dot{\delta}$$



## ⑦柔性体的应力

$$\sigma(t) = \frac{1}{1+N_i} \left\{ [D_0] \varepsilon(t) + \sum_{j=1}^{N_{j,i}} N_{j,i} [D_1] \varepsilon(t-jh) - \sum_{j=1}^{N_{j,i}} N_{j,i} [D_2] \delta(t-jh) \right\}$$

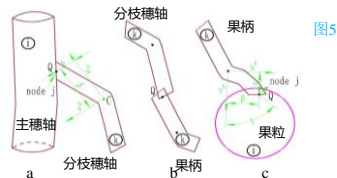


图5. a) 主穗轴与分枝穗轴之间存在旋转约束。b) 分枝穗轴与果柄之间存在旋转约束。c) 果柄与果粒之间存在固定连接约束。

## ⑧图5.a) 旋转约束的约束方程

$$r_j^i - (r_c^k + A^k r_0^k) = 0$$

## ⑨图5.c) 固定连接约束

$$e_j^i - \hat{I}(b v^k + a u^k) = 0$$

## ⑩综合上式,得到鲜食葡萄果穗系统振碰复合动力学方程

$$\begin{bmatrix} M^i & 0 \\ 0 & M^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}^i \\ \ddot{d}^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F^i \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ C_{d^k}^T \lambda^k \end{bmatrix} + C_r^i \lambda = \begin{bmatrix} Q^i \\ Q^k \end{bmatrix}$$

$$F^i = \int_{V_0} (B_L^i + B_{NL}^i)^T \sigma^i dV$$

$$\sigma(t) = \frac{1}{1+N_i} \left\{ [D_0] \varepsilon(t) + \sum_{j=1}^{N_{j,i}} N_{j,i} [D_1] \varepsilon(t-jh) - \sum_{j=1}^{N_{j,i}} N_{j,i} [D_2] \delta(t-jh) \right\}$$

$$C(q^i, d^k, t) = 0$$

$$C^k(d^k, t) = 0$$

## 3. 解法简介

采用隐式BDF格式对葡萄果穗系统动力学方程时间积分。根据 $t_{n+1}$ 时刻的广义坐标 $y$ 与某个过去的时间点 $t_0$ 的广义坐标来求解 $t_{n+1}$ 时刻的广义速度 $\dot{y}$ ,同理可以求解该时刻的广义加速度 $\ddot{y}$ 。

$$\dot{y}(t_{n+1}) = \sum_{i=0}^k \alpha_i y(t_{n+1-i})$$

$$\ddot{y}(t_{n+1}) = \sum_{i=0}^k \alpha_i \dot{y}(t_{n+1-i})$$

通过积分方法可以得到式⑩的非线性方程组,采用牛顿迭代法求解方程组的jacobian矩阵,方程即可求解。

## 结论

- 构建了一种新的面向鲜食葡萄振碰复合的动力学模型,既考虑了果穗的振动、果粒之间的碰撞以及振动碰撞的交织性,又结合了多体系统模型的刚柔耦合性,在农作物建模领域具有突破性。
- 通过动力学方程可以发现,振碰复合动力学模型能够实现多种激励下葡萄果穗状态变量数值化。后续可基于MATLAB平台构建动力学方程程序,以实现葡萄果穗系统整体的振碰实现。进而为之后探究激励沿穗轴多级传递规律和果穗振碰规律提供理论依据。

## 主要参考文献

- [1] 曹大志, 赵治华, 任革学, 强洪夫, 粘弹性体的多体系统动力学建模[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(04): 483-488+493
- [2] Bathe K J. Finite element procedures [M]. Englewood cliffs, NJ: Prentice Hall, 1996.

## 联系方式

联系人: 阳开雨  
手机: 18852854671  
邮箱: 2281131558@qq.com

