

基于四元数的单轴对称水果定向控制力矩分析*

丁湘燕, 王春耀, 黄春阳, 罗建清

(新疆大学机械工程学院 乌鲁木齐, 830047)

摘要 研究单轴对称水果在传输过程的定向机理,旨在为定向装置结构优化和参数设计提供必要的依据。首先,针对杏子在定向装置内的运动,借助四元数转换不同坐标系间角速度,并将欧拉运动学方程转换成姿态差运动学方程,成功构造控制力矩矩阵,利用 Lyapunov 函数证明其能确保姿态差运动学方程达到稳定;然后,通过建立 Simulink 仿真求解,与理论分析结果吻合,设置的控制力矩合理;最后,通过正交试验,结果表明试验数据与仿真结果基本吻合,最终得出当控制力矩为 150 N·mm 时是杏子的最佳切割参数。

关键词 单轴对称; 四元数; 控制力矩; 滑模面

中图分类号 TH113

引 言

在鲜果切分去核加工中,为了有效切分去核,首先要对水果进行定向处理。目前,国内外对水果定向研究主要侧重于输送、检测、切分等装置研发,很少有对其定向机理的研究^[1-6],且多是对定向稳定性分析,而对控制力矩的研究甚少^[7-8]。文献[2-6]借助工业相机全程监测苹果沿特定斜面轨道整个纯滚动过程,发现苹果以果梗与果萼连成的轴线为自旋轴旋转逐渐定向^[4-6]。单轴对称水果因其自身物理特性在输送过程中实现自我定向^[7-8]。对其施加合适的约束力矩能有效地加快定向过程,以实现快速切分、加工。以杏子为例,视其为刚体,杏子在定向输送过程中的运动是非线性的,而求解此类非线性动力学系统时,往往难以得到精确解,只能进行近似求解^[9-10]。因此,为了研究此非线性动力学系统,借助四元数,以实现角速度在不同坐标系间的转换,将杏子欧拉运动学方程转化成姿态差运动学方程求解,同时构造控制力矩矩阵对杏子姿态进行控制,使其在特定轨道内实现定向输送。运用 Simulink 对姿态差运动学方程进行仿真求解,分析后得到角速度差、角速度和控制力矩,并分析仿真结果。最后通过德国动应变测量系统以及正交试验来验证控制系统的正确性。

1 四元数的转换和杏子姿态动力学方程

1.1 四元数的转换

为了研究杏子姿态动力学方程,引入四元数对问题进行求解。设惯性坐标系 I , 本体坐标系 B , 最终达到稳定状态时的参考坐标系 D , 四元数 \bar{q} 为相对于惯性坐标系 I 到本体坐标系 B 的转换^[11], 其表达式满足方程

$$\bar{q} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi/2) \\ \mathbf{e} \sin(\varphi/2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_0 \\ \mathbf{q} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{q}^T \mathbf{q} + q_0^2 = 1 \quad (2)$$

其中: $\mathbf{e} = [e_1 \ e_2 \ e_3]^T$ 为欧拉轴; φ 为欧拉角; $\mathbf{q} = [q_1 \ q_2 \ q_3]^T \in \mathbf{R}^3$ 为四元数列向量; $q_0 \in R$ 为四元数标量部分。

符号 \otimes 表示四元数乘法^[12-13], 其定义如下

$$\bar{q}_1 = \begin{bmatrix} q_{0,1} \\ \mathbf{q}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{0,1} \\ q_{11} \\ q_{12} \\ q_{13} \end{bmatrix}; \bar{q}_2 = \begin{bmatrix} q_{0,2} \\ \mathbf{q}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{0,2} \\ q_{21} \\ q_{22} \\ q_{23} \end{bmatrix};$$
$$\bar{q}_1 \otimes \bar{q}_2 = \begin{bmatrix} q_{0,1} & -q_{11} & -q_{12} & -q_{13} \\ q_{11} & q_{0,1} & -q_{13} & q_{12} \\ q_{12} & q_{13} & q_{0,1} & -q_{11} \\ q_{13} & -q_{12} & q_{11} & q_{0,1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_{0,2} \\ q_{21} \\ q_{22} \\ q_{23} \end{bmatrix} =$$

* 国家自然科学基金资助项目(51165042)
收稿日期: 2015-05-27; 修回日期: 2015-07-23

$$\begin{bmatrix} q_{0,1}q_{0,2} - \mathbf{q}_1^\top \mathbf{q}_2 \\ q_{0,1}\mathbf{q}_2 + q_{0,2}\mathbf{q}_1 + \mathbf{q}_1^\times \mathbf{q}_2 \end{bmatrix}^\circ$$

向量 $\mathbf{a} = [a_1 \ a_2 \ a_3]^\top$ 的符号 \mathbf{a}^\times 定义如下所示的斜对称矩阵

$$\mathbf{a}^\times = \begin{pmatrix} 0 & -a_3 & a_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

1.2 杏子姿态和差动力学方程

在杏子传输过程中: $\boldsymbol{\omega} = [\omega_1 \ \omega_2 \ \omega_3]^\top$ 为在杏子本体坐标系 B 中的角速度; $\mathbf{J} \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 为在本体坐标系中的惯性矩,在文中视作常量; $\mathbf{U} \in \mathbf{R}^3$ 为控制力矩向量; \mathbf{I}_3 为 3×3 的单位矩阵; $\mathbf{D} \in \mathbf{R}^3$ 为外加干扰向量。则杏子运动学方程^[8,14-16]如下

$$\mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega}^\times \mathbf{J}\boldsymbol{\omega} = \mathbf{U} + \mathbf{D} \quad (4)$$

$$\dot{\bar{\mathbf{q}}} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}\bar{\mathbf{q}}^\top \\ \frac{1}{2}(\bar{\mathbf{q}}^\times + q_0\mathbf{I}_3) \end{bmatrix} \boldsymbol{\omega} \quad (5)$$

杏子以任意姿态进入传输通道,但其初始角速度为零。 $\boldsymbol{\omega}^f$ 和 $\bar{\mathbf{q}}^f$ 分别表示在相对于惯性坐标系 I 的参考坐标系 D 中的角速度和四元数。

在任意时间段的本体坐标系 B 和参考坐标系 D 之间有一定的位置差,坐标系 B 相对于坐标系 D 下,其四元数差为 $\bar{\boldsymbol{\eta}} = [\eta_0 \ \boldsymbol{\eta}^\top]^\top$,同时其满足 $\boldsymbol{\eta}^\top \boldsymbol{\eta} + \eta_0^2 = 1$,也是 $\bar{\mathbf{q}}$ 与最终的 $\bar{\mathbf{q}}^f$ 之间的差,关系式为: $\bar{\boldsymbol{\eta}} = (\bar{\mathbf{q}}^f) * \otimes \bar{\mathbf{q}}$ (令 $(\bar{\mathbf{q}}^f) * = [q_0 - \mathbf{q}^\top]^\top$) 而相应的角速度差为 $\tilde{\boldsymbol{\omega}} = \boldsymbol{\omega} - \mathbf{R}(\bar{\boldsymbol{\eta}})\boldsymbol{\omega}^f$,则

$$\boldsymbol{\omega} = \mathbf{R}(\bar{\boldsymbol{\eta}})\boldsymbol{\omega}^f + \tilde{\boldsymbol{\omega}} \quad (6)$$

其中: $\mathbf{R}(\bar{\boldsymbol{\eta}}) \in \mathbf{SO}(3)$, 是一个行列式为 1 的李群正交矩阵。

从坐标系 D 到坐标系 B 相应的坐标变换^[15-16]为

$$\mathbf{R}(\bar{\boldsymbol{\eta}}) = (\eta_0^2 - \boldsymbol{\eta}^\top \boldsymbol{\eta})\mathbf{I}_3 + 2\boldsymbol{\eta}\boldsymbol{\eta}^\top - 2\eta_0\boldsymbol{\eta}^\times$$

已有研究表明^[15-16],其满足 $\mathbf{R}^\top \mathbf{R} = \mathbf{I}$, $\|\mathbf{R}\| = 1$, $\det(\mathbf{R}) = 1$,及

$$\dot{\mathbf{R}}(\bar{\boldsymbol{\eta}}) = -\tilde{\boldsymbol{\omega}}^\times \mathbf{R}(\bar{\boldsymbol{\eta}}) \quad (7)$$

对式(6)求一阶导,并将式(7)代入其中得到

$$\dot{\boldsymbol{\omega}} = \dot{\tilde{\boldsymbol{\omega}}} + \mathbf{R}(\bar{\boldsymbol{\eta}})\dot{\boldsymbol{\omega}}^f - \tilde{\boldsymbol{\omega}}^\times \mathbf{R}(\bar{\boldsymbol{\eta}})\boldsymbol{\omega}^f \quad (8)$$

将式(8)代入式(4),得到杏子姿态差动力学方程^[14]如下

$$\mathbf{J}\dot{\tilde{\boldsymbol{\omega}}} + \boldsymbol{\omega}^\times \mathbf{J}\boldsymbol{\omega} + \mathbf{J}(\mathbf{R}(\bar{\boldsymbol{\eta}})\dot{\boldsymbol{\omega}}^f - \tilde{\boldsymbol{\omega}}^\times \mathbf{R}(\bar{\boldsymbol{\eta}})\boldsymbol{\omega}^f) = \mathbf{U} + \mathbf{D} \quad (9)$$

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{\eta}}} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}\tilde{\boldsymbol{\eta}}^\top \\ \frac{1}{2}(\tilde{\boldsymbol{\eta}}^\times + \eta_0\mathbf{I}_3) \end{bmatrix} \tilde{\boldsymbol{\omega}} \quad (10)$$

若能够证明 $\lim_{t \rightarrow 0} \boldsymbol{\eta}(t) \rightarrow 0$ 和 $\lim_{t \rightarrow 0} \tilde{\boldsymbol{\omega}}(t) \rightarrow 0$, 则 $\boldsymbol{\omega}$ 和 \mathbf{q} 最终达到稳定,即杏子姿态最终稳定。

2 滑模面和控制力矩的设计

2.1 滑模面的设计

滑模控制(sliding mode control,简称 SMC)又成为变结构控制,为控制不连续的非线性控制,结构不固定的系统初始状态不一定在滑模面上,滑模控制动态地迫使系统的状态变量由当前任意状态逐渐变化并到达滑模面,且沿着滑模面运动,以达到预定的“滑动模态”即平衡点。要使定向系统到达平衡点 $\lim_{t \rightarrow 0} \boldsymbol{\eta}(t) \rightarrow 0$ 和 $\lim_{t \rightarrow 0} \tilde{\boldsymbol{\omega}}(t) \rightarrow 0$,设计滑模面为

$$\mathbf{S} = \mathbf{J}(\tilde{\boldsymbol{\omega}} + \mathbf{c}\boldsymbol{\eta}) \quad (11)$$

其中: $\mathbf{S} = [S_1 \ S_2 \ S_3]^\top$; \mathbf{J} 为杏子姿态运动中的惯性矩矩阵,且为正; \mathbf{c} 为一个确定的正常数矩阵。

Li 等^[17]已证明,由式(11)可知,若有 $\mathbf{S} = 0$,即

$$\mathbf{J}(\tilde{\boldsymbol{\omega}} + \mathbf{c}\boldsymbol{\eta}) = 0 \quad (12)$$

则可以证明

$$\lim_{t \rightarrow 0} \boldsymbol{\eta}(t) = \lim_{t \rightarrow 0} \tilde{\boldsymbol{\omega}}(t) = 0 \quad (13)$$

综合以上及式(9)和式(10)所表述的姿态差动力学方程,若滑模面 \mathbf{S} 能趋于零,则传输过程中杏子运动最终能达到稳定的姿态。

2.2 控制力矩的设计

为使杏子姿态差动力学方程从滑模面之外快速有效地向滑模面收敛,且保持在滑模面上,设计一个控制器,考虑到式(9)和式(10),获得以下控制器

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{\omega}}} + \mathbf{c}\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{p} + \mathbf{d} + \mathbf{J}^{-1}\mathbf{U} \quad (14)$$

其中

$$\mathbf{p} = -\mathbf{J}^{-1}\boldsymbol{\omega}^\times \mathbf{J}\boldsymbol{\omega} + (\tilde{\boldsymbol{\omega}}^\times \mathbf{R}(\bar{\boldsymbol{\eta}})\boldsymbol{\omega}^f - \mathbf{R}(\bar{\boldsymbol{\eta}})\dot{\boldsymbol{\omega}}^f) + \frac{1}{2}\mathbf{c}(\boldsymbol{\eta}^\times + \eta_0\mathbf{I})\boldsymbol{\omega} \quad (15)$$

$$\mathbf{d} = \mathbf{J}^{-1}\mathbf{D} \quad (16)$$

在杏子定向输送过程中,外加干扰主要由侧向皮带和底部输送带振动引起。此干扰随机性较大,难以测量,但其值有界,故作以下假设

$$\|\mathbf{d}\|_1 \leq \beta \quad (17)$$

其中: β 为一个正常数; $\|\cdot\|_1$ 为 1-范数导出矩阵。

设计杏子控制输入力矩如下

$$\mathbf{U} = -\mathbf{J}(\mathbf{p} + \mathbf{K}\mathbf{S} + \beta \text{sgn}(\mathbf{S})) \quad (18)$$

其中: \mathbf{p} 如式(15)所示; \mathbf{K} 为一个确定的正增益矩阵; \mathbf{S} 由式(11)确定, $\text{sgn}(\mathbf{S}) = [\text{sgn}(S_1) \ \text{sgn}(S_2) \ \times \ \text{sgn}(S_3)]^\top$ 。

定义 sgn 符号, $\text{sgn}(\cdot)$ 为

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & (x > 0) \\ 0 & (x = 0) \\ -1 & (x < 0) \end{cases}$$

结合式(9),(10)杏子姿态运动方程和式(18)控制力矩,为证明系统能达到如式(11)所示的滑模面 $\mathbf{S}=0$,利用 Lyapunov 方程来判定,设

$$\mathbf{V} = \frac{1}{2} \mathbf{S}^T \mathbf{J}^{-1} \mathbf{S} \quad (19)$$

对 \mathbf{V} 求一阶导,同时代入式(11),(14)及(18),可得

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{V}} &= \mathbf{S}^T \mathbf{J}^{-1} \dot{\mathbf{S}} = \mathbf{S}^T (\dot{\tilde{\boldsymbol{\omega}}} + \mathbf{c}\dot{\boldsymbol{\eta}}) = \mathbf{S}^T (\mathbf{p} + \mathbf{d} + \mathbf{J}^{-1} \mathbf{U}) = \\ &\mathbf{S}^T \mathbf{d} - \mathbf{S}^T \mathbf{K} \mathbf{S} - \beta \|\mathbf{S}\|_1 \leq \|\mathbf{S}\|_1 \|\mathbf{d}\|_1 - \mathbf{S}^T \mathbf{K} \mathbf{S} - \\ &\beta \|\mathbf{S}\|_1 \leq \beta \|\mathbf{S}\|_1 - \mathbf{S}^T \mathbf{K} \mathbf{S} - \beta \|\mathbf{S}\|_1 = \\ &-\mathbf{S}^T \mathbf{K} \mathbf{S} \leq 0 \end{aligned} \quad (20)$$

由 Lyapunov 理论知,当导数 $\dot{\mathbf{V}} \leq 0$ 时,则 $\lim_{t \rightarrow 0} \mathbf{S} = 0$ 。正如第2节中的理论所说,可以从 $\lim_{t \rightarrow 0} \mathbf{S} = 0$ 推出 $\lim_{t \rightarrow 0} \boldsymbol{\eta}(t) \rightarrow 0$ 和 $\lim_{t \rightarrow 0} \tilde{\boldsymbol{\omega}}(t) \rightarrow 0$,即:杏子姿态最终稳定。

3 Matlab 仿真求解

借助于 Matlab 中的 Simulink 模块,对整个运动系统进行仿真。

取杏子平均惯性矩矩阵如下

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 925 & 0 & 0 \\ 0 & 864 & 0 \\ 0 & 0 & 821 \end{bmatrix} (\text{g} \cdot \text{mm}^2)$$

设干扰向量为

$$\mathbf{d} = [0.1 \sin(t), 0.1 \sin(t), 0.1 \sin(t)]^T (\text{N} \cdot \text{mm})$$

其最大值 $d_{\max} = 0.1 \text{ N} \cdot \text{mm}$ 。杏子进入输送通道时初角速度为零,故当选择最终角速度为 $\boldsymbol{\omega}^f = [31 \ 1 \ 1]^T \text{ rad/s}$ 时,则初始的角速度差为 $\tilde{\boldsymbol{\omega}} = [31 \ 1 \ 1]^T \text{ rad/s}$ 。设杏子进入通道的初始姿态为 $\boldsymbol{\theta} = [\pi/3 \ \pi/3 \ \pi/3]^T$ 。控制参数的值如下

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0.01 & 0 \\ 0 & 0 & 0.01 \end{bmatrix};$$

$$\boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix}$$

对杏子在定向输送通道中的整个运动系统进行仿真求解,设置仿真时间为 10 s,图像在仿真时间 1 s 后达到稳定,为方便观察只绘出仿真时长 1.4 s

的图形,仿真结果如图(1~3)所示,其中,图 3(b)是图 3(a)稳定后的局部放大图。

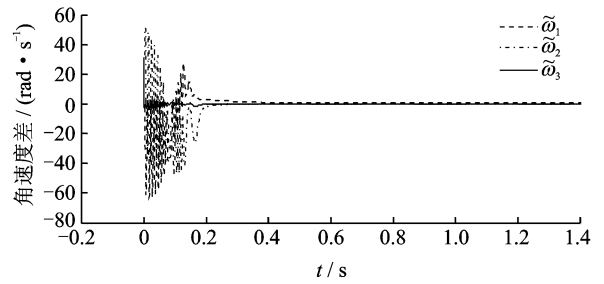


图1 角速度差

Fig. 1 Angular velocity error

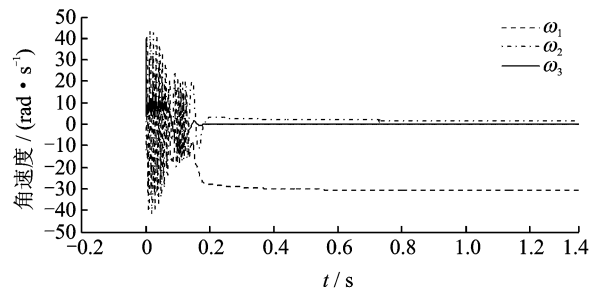
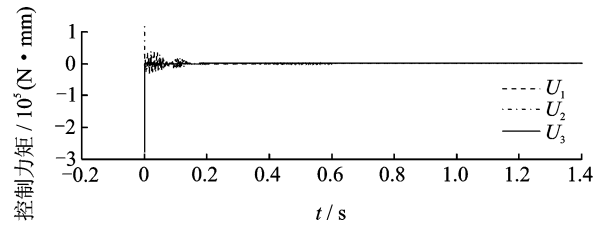


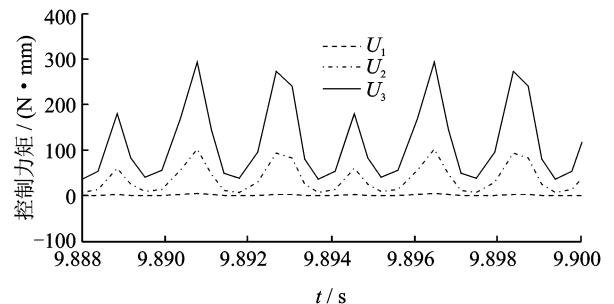
图2 角速度

Fig. 2 Angular velocities



(a) 整体图

(a) Overall enlargement



(b) 局部放大图

(b) Partial enlargement

图3 控制力矩

Fig. 3 Control torques

由图1可知,初始运动时,角速度差变化大,且逐渐趋于稳定,最终在零附近微小震荡。与之对应的角速度(图2)中,初始运动时, ω_1 变化大,随后其

在 ω_1^d 附近保持稳定, ω_2 和 ω_3 也趋于稳定, 在零附近微小震荡。由图 3 可知, 控制力矩初始时变化很大, 渐渐趋于稳定, 且 U_1 趋于零, 而 U_2 和 U_3 是在某一个值附近震荡, U_2 在 $150 \text{ N} \cdot \text{mm}$ 附近震荡, 而 U_3 在 $50 \text{ N} \cdot \text{mm}$ 附近震荡, U_3 是 U_2 的 3 倍左右。由理论可知, 杏子运动最终都会趋于定向, 施加合适的约束力矩可以有效地加快定向过程的实现; 结合试验可知, ω_2 和 ω_3 之所以震荡, 是因为夹持带本身有振动, 其对杏子施加的力矩有影响, 进而引起杏子的角速度变化, 而底部输送带平稳, 几乎没有振动, 故 U_1 的值最后相对平稳, 从而 ω_1 最后稳定, 几乎没有震荡。

4 试验结果与分析

杏子定向装置简图如图 4 所示, 由夹持带、底部输送带、夹持装置弹簧片等组成试验装置, 并将整个通道分为 5 个区域。杏子定向正交试验将使用此装置。夹持带间宽度由宽渐渐变窄到不变, 杏子以随机姿态进入输送通道, 底部输送带与杏子间摩擦力矩使杏子在定向输送通道中旋转, 夹持带保持杏子平行旋转并为其旋转提供转轴, 并将已定向的杏子定向地输送到切分部分进行切分。

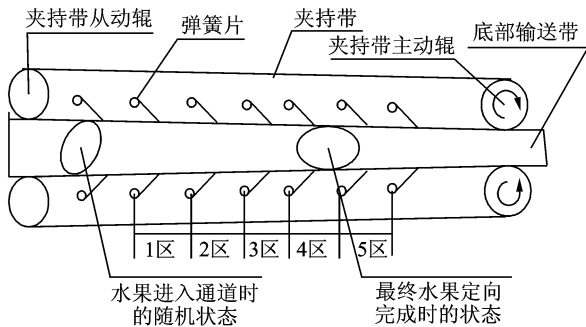


图 4 杏果定向装置简图

Fig. 4 Directional device diagram of apricots

为对控制力矩理论分析及仿真结果进行验证, 做了 9 组正交试验, 试验现场如图 5 所示。设计定向切分试验装置正交试验, 其设计因素水平如表 1 所示。

表 1 正交试验因素水平

Tab. 1 The factors and levels of orthogonal test

因素水平	入口通道宽度 D/mm	杏子短径 I/mm	相对速度差 $\Delta V/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$
1	25	32~34	40
2	30	34~35	55
3	35	35~37	70



图 5 试验现场

Fig. 5 The experimental scene

利用高速摄像仪对杏果运动状态实时记录, 杏果的定向过程如图 6 所示, 对整个试验数据整理后得如表 2 所示。表中: $D_1 \sim D_3, I_1 \sim I_3, \Delta V_1 \sim \Delta V_3$ 分别表示表 1 中对应的 $D, I, \Delta V$ 的第 1~3 的水平, 如 D_3 表示入口通道宽度为 35 mm 。

在正交试验的同时, 为获得夹持装置弹簧片上(见图 4)的外载荷, 采用德国动应变测量系统进行采样。



(a) 初始态 (a) Initial (b) 定向中 (b) Orientating (c) 定向 (c) Orientated

图 6 定向过程

Fig. 6 The orientation process

表 2 正交试验表

Tab. 2 Orthogonal experimental sheet

试验号	因素			试验结果		
	通道宽度 D/mm	杏子尺寸 I/mm	相对速度差 $\Delta V/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	空白列	定向成功率/%	定向稳定区域
1	1(D_1)	1(I_1)	1(ΔV_1)	1	92.3	第 3 区域
2	1(D_1)	2(I_2)	2(ΔV_2)	2	89.2	第 2 区域
3	1(D_1)	3(I_3)	3(ΔV_3)	3	88.1	第 2 区域
4	2(D_2)	1(I_1)	2(ΔV_2)	3	100.0	第 3 区域
5	2(D_2)	2(I_2)	3(ΔV_3)	1	94.4	第 3 区域
6	2(D_2)	3(I_3)	1(ΔV_1)	2	93.3	第 2 区域
7	3(D_3)	1(I_1)	3(ΔV_3)	2	93.9	第 2 区域
8	3(D_3)	2(I_2)	1(ΔV_1)	3	93.9	第 3 区域
9	3(D_3)	3(I_3)	2(ΔV_2)	1	95.8	第 3 区域

应变片黏贴在弹簧片上, 首先对弹簧片进行静态标定, 测定载荷及对应的应变绘制成图并进行线性拟合(图 7); 外加载荷与应变成线性关系, 其表达式为: $y=0.0785x+0.3373$ 。通过此公式, 可以

由应变得到相应的载荷值,其值整理后如表3所示。

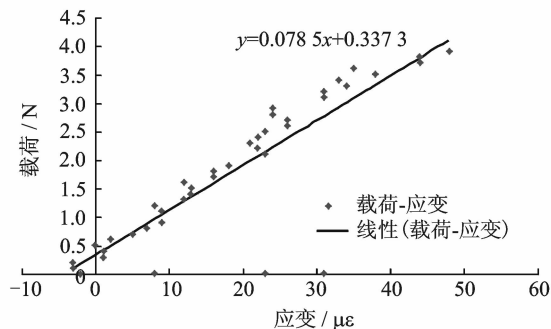


图7 载荷与应变拟合曲线

Fig.7 The curve fitting of load and strain

表3 力与力矩数值表

Tab.3 Table of the experimental load and torque data

组号	应变均值 $\epsilon_{si}/\mu\epsilon$	荷载值 P/N	动载因数 k	动荷载值 F/N	试验力矩 $U/(N \cdot mm)$
1	-400.0	-31.1	3.1	-48.5	-127.6
2	-405.0	-31.4	3.7	-58.7	-172.5
3	-421.5	-32.8	3.5	-56.8	-182.0
4	-395.5	-30.7	4.6	-70.0	-184.4
5	-396.5	-30.8	4.9	-75.4	-221.8
6	-388.0	-30.1	4.8	-72.0	-230.6
7	-367.5	-28.5	2.8	-40.5	-106.6
8	-379.0	-29.4	3.7	-54.6	-160.4
9	-369.0	-28.6	3.1	-44.2	-141.7

由表3得到了杏子在实际运动中受到的外加力矩,结合各组定向成功率分析后,过大或过小力矩会造成定向成功率不稳定。如:第3组与第4组定向成功率与控制力矩对比,第1组与第7组定向成功率与控制力矩对比。过大力矩会损伤杏子,过小力矩,杏子定向时间过长。综合分析,当外加力矩为 $150 N \cdot mm$ 左右时,定向成功率相对稳定于95%左右。又通过与仿真数据对比分析,得到了试验数据与仿真数据基本吻合,即控制入口通道宽度,弹簧加持片的松紧,使控制力矩为 $150.0 N \cdot mm$ 时,可以得到杏子的最佳切割参数。

5 结论

1) 借助四元数转换不同坐标系间角速度,并将欧拉运动学方程转换成姿态差运动学方程,成功构造控制力矩矩阵,利用 Lyapunov 函数证明其能确保姿态差运动学方程达到稳定。

2) 建立 Simulink 仿真求解,分析结果,角速度差渐渐趋于稳定,在零附近震荡,角速度随之趋于稳定,杏子最终以最大惯性矩主轴旋转,达到稳定定向状态,这与理论分析结果吻合,故控制力矩合理的。

3) 结合正交试验结果,得到的试验数据与仿真结果基本吻合,因此控制入口通道宽度,弹簧加持片的松紧,使控制力矩为 $150.0 N \cdot mm$ 时,此为杏子的最佳切割参数。

综上所述,应用四元数对杏子定向过程中控制力矩的研究是有效可行的,为杏子切分去核设备的设计、改进提供了理论依据。

参 考 文 献

- [1] Narayanan P, Lefcourt A M. Tests of the ability to orient apples using their inertial properties[C] // Proceedings of 2007 ASAE Annual Meeting. Minneapolis, America: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2007:076246.
- [2] Lefcourt A M, Narayanan P, Taschb U, et al. Orienting apples for imaging using their inertial properties and random apple loading[J]. Biosystems Engineering, 2009,104(1):64-71.
- [3] Narayanan P, Lefcourt A M, Rostamian T U, et al. Theoretical aspects of orienting fruit using stability properties during rotation[C] // Proceedings of 2006 ASAE Annual Meeting. Minneapolis, America: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2006:061144.
- [4] Lefcourt A M, Narayanan P, Tasch U, et al. Algorithms for parameterization of dynamics of inertia-based apple orientation[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2008,24(1):123-129.
- [5] 刘木华,赵杰文,郑建宏,等.无损检测中高光谱图像技术的应用进展[J].农业机械学报,2005,36(9):139-143.
Liu Muhua, Zhao Jiewen, Zheng Jianhong, et al. Review of hyperspectral imaging in quality and safety inspections of agricultural and poultry products [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005,36(9):139-143. (in Chinese)
- [6] 曹其新,曹雄强,郭峰,等.准球形水果自动单列传输的三级传送装置:中国,200410018023.1[P]. 2005-01-26.
- [7] 王春耀,梁勤安,闵磊,等.水果输送过程中定向机理的分析与试验[J].农业工程学报,2012,28(20):95-98.

- Wang Chunyao, Liang Qin'an, Min Lei, et al. Analysis and test for orientation mechanism in fruit transportation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(20): 95-98. (in Chinese)
- [8] 黄春阳,王春耀,张红梅,等. 四元数在杏果定向输送过程中的应用与研究[J]. 农机化研究, 2015, 37(4): 32-35.
Huang Chunyang, Wang Chunyao, Zhang Hongmei, et al. Application and research apricots of directional transport process using the quaternion[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(4): 32-35. (in Chinese)
- [9] 陈金宝,成玫,聂宏,等. 空间站通用停靠机构设计及动力学分析[J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(3): 417-422.
Chen Jinbao, Cheng Mei, Nie Hong, et al. Investigation on scheme design and dynamic analysis for space station common berthing mechanism[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(3): 417-422. (in Chinese)
- [10] 张春巍,李芦钰,欧进萍,等. 悬吊结构体系摆振响应测试及非线性误差修正[J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(3): 227-231.
Zhang Chunwei, Li Luyu, Ou Jinping, et al. Swing response measuring and nonlinear error modification of suspended structure system in pendulum vibration mode[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(3): 227-231. (in Chinese)
- [11] Wu Baolin, Wang Danwei. Decentralized sliding-mode control for attitude synchronization in spacecraft formation[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2013, 23(11): 1183-1197.
- [12] Wertz J R. Spacecraft attitude determination and control[M]. Reidel, Dordrecht, Netherlands: Springer, 1980: 165-178, 235-276.
- [13] Ahmed J, Coppola V T, Bernstein D S. Adaptive asymptotic tracking of spacecraft attitude motion with inertia matrix identification[J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 1998, 21(5): 684-691.
- [14] 陈文良,洪嘉振,周鉴如. 分析动力学[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1991: 32-55.
- [15] Huges P C. Spacecraft attitude dynamics[M]. Wiley, New York; Cambridge University Press, 1986: 34-46.
- [16] Sidi M J. Spacecraft dynamics and control [M]. London, Britain: Cambridge University Press, 1997: 88-97.
- [17] Li Zhengxue, Wang Benli. Robust attitude tracking control of spacecraft in the presence of disturbances [J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2007, 30(4): 1156-1159.



第一作者简介:丁湘燕,女,1989年11月生,硕士生。主要研究方向为机械系统动力学。曾发表《KMT动应变测量系统在水果定向中的应用》(《农机化研究》2015年第37卷第6期)等论文。
E-mail: ddingxiangyan@yeah.net

通信作者简介:王春耀,男,1956年6月生,教授。主要研究方向为力学及机械系统动力学。
E-mail: wangchun_yao@126.com

欢迎订阅《振动、测试与诊断》

《振动、测试与诊断》由工业和信息化部主管,南京航空航天大学 and 全国高校机械工程测试技术研究会联合主办,是反映振动、动态测试及故障诊断学科领域的科研成果及其应用情况的技术性刊物。主要刊登国内外以振动测试与故障诊断为中心的动态测试理论、方法和手段的研究及应用方面的技术文献,包括实验测试技术、测试仪器的研制、方法和系统组成、信号分析、数据处理、参数识别与故障诊断以及有关装置的设计、使用、控制、标定和校准等,不拘泥于行业和测试项目。

本刊为 EI Compendex 数据库收录期刊和中文核心期刊,双月刊,每逢双月末出版,每本定价 20 元,全年 120 元。欢迎订阅和投稿,欢迎在本刊刊登各类广告和科技信息。

编辑部地址:南京市御道街 29 号 邮政编码:210016 电话:(025)84893332
传真:(025)84893332 E-mail:qchen@nuaa.edu.cn 网址:http://zdc.nuaa.edu.cn

