

钟 兴,张东风. 樱桃番茄采摘机械手的运动学分析[J]. 江苏农业科学,2018,46(9):219-223.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.09.053

樱桃番茄采摘机械手的运动学分析

钟 兴¹, 张东风²

(1. 江苏农林职业技术学院机电工程系, 江苏镇江 212400; 2. 江苏省现代农业装备工程中心, 江苏镇江 212400)

摘要:设计了 1 种新型樱桃番茄 5 自由度采摘机械手的本体结构,根据 Denavit - hartenbery (D - H) 法建立各关节运动学方程,推出末端执行器在基坐标系中的坐标值方程,并采用各关节给定步距角转动的方法得到机械手的工作空间,结果显示工作空间连续,结构紧凑。利用 MATLAB 机器人工具箱对机械手的轨迹规划进行仿真,结果显示机械手各关节角度、角速度及角加速度的轨迹曲线均连续平滑,证明机械手可平稳安全地到达工作空间内指定位置,机械手的运动学方程正确,本体结构设计合理,为后续本体结构进一步优化和动作控制提供了依据。

关键词:樱桃番茄;机械手;采摘;运动学;MATLAB

中图分类号: S225.92 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)09-0219-04

目前,国内樱桃番茄的采摘收获主要靠手工完成。由于收获季节短,劳动力短缺,劳动强度大,大大限制了农场的种植规模。因此,樱桃番茄采摘机械手的研发对现代农业的规模化、多样化、精确化发展有着重要意义^[1]。

自 1960 年开始,国外已开始果蔬收获机械手的研究,由于大多数果蔬需选择性收获,需要较高的科技水平和先进的机器人技术,因此很多产品的性能和成本没有达到商业要求。近年来,高架栽培技术使水果与叶分离,且温室的工作环境比野外好,这为实现机械手采摘收获提供了机会^[2]。本研究设计了 1 种 5 自由度的关节式樱桃番茄采摘机械手的本体结构,根据 Denavit - hartenbery (D - H) 法在各关节建立坐标系^[3],推出各个关节及末端执行器的运动学方程;根据末端执行器位姿方程,采用数值法对机械手的工作空间进行求解;对末端执行器运动轨迹进行仿真,验证运动学模型的正确性,以便更好地进行机械手结构优化。

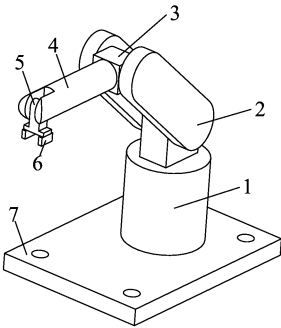
1 机械手运动学分析

1.1 建立运动学模型

樱桃番茄采摘机械手采用关节式结构,由 5 个连杆在关节处连接构成,共 5 个自由度,详见图 1。旋转座 1 和小臂 4 做旋转运动,大臂 2、连接臂 3 和腕关节 5 做摆动运动,5 个关节配合运动,可实现末端执行器 6 不同的预期运动。

机械手运动学分析是机械手本体结构设计的重要组成部分^[4],本采摘机械手可看作一系列通过转动关节联结起来的连杆,根据 D - H 法,在机械手各连杆关节和末端执行器建立坐标系(图 2)。表 1 为各连杆和末端执行器的 D - H 参数,其中, θ_n 是轴 x_{n-1} 变换到轴 x_n 时绕轴 z_n 的旋转角; d_n 是轴

x_{n-1} 和 x_n 之间沿轴 z_n 方向平移的距离; a_{n-1} 是轴 z_{n-1} 和 z_n 之间沿轴 x_{n-1} 方向的平移距离; α_{n-1} 是轴 z_{n-1} 和轴 z_n 共面时绕轴 x_{n-1} 的旋转角。



1—旋转座; 2—大臂; 3—连接臂; 4—小臂;
5—腕关节; 6—末端执行器; 7—基座

图1 樱桃番茄采摘机械手

表 1 机械手 D - H 参数

n	θ_n	d_n	a_n	α_n
1	$\theta_1(0)$	0	0	0
2	$\theta_2\left(\frac{\pi}{2}\right)$	d_2	0	$\frac{\pi}{2}$
3	$\theta_3(0)$	0	a_3	0
4	$\theta_4(0)$	0	a_4	$\frac{\pi}{2}$
5	$\theta_5(0)$	d_5	0	$\frac{\pi}{2}$
6	0	0	a_6	0

1.2 正运动学求解

机械手的正运动学问题,是指给定 1 组关节角的值,计算工具坐标系相对于基坐标系的位置和姿态,一般情况下,这个过程被称为从关节空间描述到笛卡儿空间描述的机械手位置表示^[3]。

把杆件坐标系固定在该杆件的上关节处,相邻连杆间的转动可以通过矩阵变换加以描述,由坐标系 $\{n\}$ 向坐标系 $\{n-1\}$ 作变换的齐次变换矩阵:

收稿日期:2016-12-16

基金项目:江苏省农业三新工程[编号: SXGC(2015)310];江苏省高校优秀中青年教师和校长境外研修计划。

作者简介:钟 兴(1983—),男,江苏镇江人,硕士,讲师,主要从事机械设计、制造及 CAE 分析的研究。E - mail: light200888@163.com。

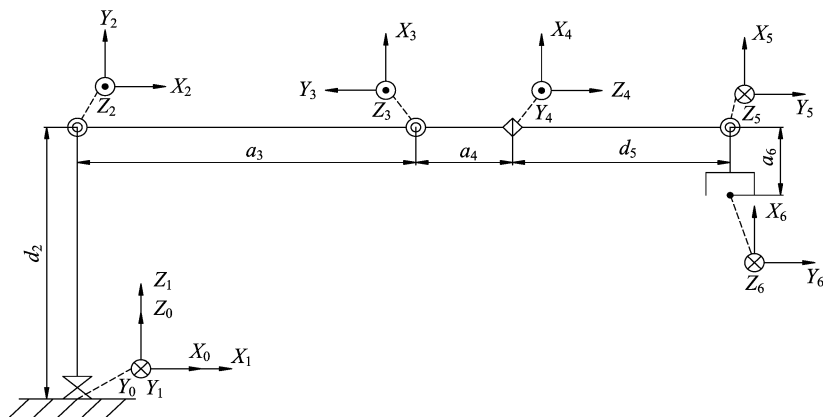


图2 采摘机械手 D-H 关节坐标系

$${}_{n-1}^n T = \begin{bmatrix} \cos\theta_n & -\sin\theta_n \cos\alpha_n & \sin\theta_n \sin\alpha_n & a_n \cos\theta_n \\ \sin\theta_n & \cos\theta_n \cos\alpha_n & -\cos\theta_n \sin\alpha_n & a_n \sin\theta_n \\ 0 & \sin\alpha_n & \cos\alpha_n & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

将表 1 中各连杆和末端执行器的 D-H 参数代入式(1), 依次计算出相邻 2 连杆的齐次变换矩阵:

$${}^0_1 T = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & 0 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$${}^1_2 T = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & 0 & \sin\theta_2 & 0 \\ \sin\theta_2 & 0 & -\cos\theta_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$${}^2_3 T = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & a_3 \cos\theta_3 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & a_3 \sin\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$${}^3_4 T = \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & 0 & \sin\theta_4 & a_4 \cos\theta_4 \\ \sin\theta_4 & 0 & -\cos\theta_4 & a_4 \sin\theta_4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$${}^4_5 T = \begin{bmatrix} \cos\theta_5 & 0 & \sin\theta_5 & 0 \\ \sin\theta_5 & 0 & -\cos\theta_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$${}^5_6 T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_6 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

将上述齐次变换矩阵连乘即可得到末端执行器的坐标系 {6} 向基坐标系 {0} 作变换的齐次变换矩阵 ${}^0_6 T$:

$${}^0_6 T = {}^0_1 T {}^1_2 T {}^2_3 T {}^3_4 T {}^4_5 T {}^5_6 T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

由式(2)可知, ${}^0_6 T$ 是关于 5 个关节变量的函数。如果得到机械手关节位置传感器的值, 末端执行器在基座坐标系中的位姿便可通过 ${}^0_6 T$ 计算出来。

式(2)中:

$$n_x = c_{12} c_{34} c_5 + s_{12} s_5;$$

$$n_y = s_{12} c_{34} c_5 - c_{12} s_5;$$

$$n_z = s_{34} c_5;$$

$$o_x = c_{12} s_{34};$$

$$o_y = s_{12} s_{34};$$

$$o_z = -c_{34};$$

$$a_x = c_{12} c_{34} s_5 - s_{12} c_5;$$

$$a_y = s_{12} c_{34} s_5 + c_{12} c_5;$$

$$a_z = s_{34} s_5;$$

$$p_x = a_3 c_{12} c_3 + a_4 c_{12} c_{34} + d_5 c_{12} s_{34} + a_6 (c_{12} c_{34} c_5 + s_{12} s_5);$$

$$p_y = a_3 c_{12} c_3 + a_4 c_{12} c_{34} + d_5 c_{12} s_{34} + a_6 (s_{12} c_{34} c_5 - c_{12} s_5);$$

$$p_z = d_2 - d_5 c_{34} + a_3 s_3 + a_4 s_{34} + a_6 s_{34} c_5.$$

其中, 正、余弦运算符号简写如下: $s_1 = \sin\theta_1$, $c_1 = \cos\theta_1$, $s_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2)$, $c_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2)$, $s_{45} = \sin(\theta_4 + \theta_5)$, $c_{45} = \cos(\theta_4 + \theta_5)$ 。为验证末端执行器位姿 ${}^0_6 T$ 的正确性, 把关节变量 $\theta_1 = 0$, $\theta_2 = 0$, $\theta_3 = 0$, $\theta_4 = 0$, $\theta_5 = 0$ 代入式(3), 得到变换矩阵 T :

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_3 + a_4 + a_6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_2 - d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

计算结果表示的位姿与机械手给定的初始位姿相同, 证明运动学方程是正确的。

1.3 逆运动学求解

逆运动学是指给定机械手末端执行器的位置和姿态, 计算所有可达给定位姿的关节角, 是正运动学的反向求解过程^[3]。

由式(2)各元素可得:

$$\theta_5 = \arctan \frac{a_z}{n_z};$$

$$\theta_{34} = \arccos o_z;$$

$$\theta_3 = \arcsin = \frac{p_z - d_2 + d_5 c_{34} - a_4 s_{34} - a_6 s_{34} c_5}{a_3};$$

$$\theta_4 = \theta_{34} - \theta_3;$$

$$\theta_{12} = \arctan \frac{o_y}{o_x}。$$

用 ${}^0_1T^{-1}$ 同时乘以式(2)的两边,可得

$$\theta_2 = \arctan \frac{[(n_x + n_y)c_{34}c_5 - n_y s_5](o_x^2 + o_y^2) - o_x s_{34}(n_x^2 + n_y^2)}{o_y s_{34}(n_x^2 + n_y^2) - n_x s_5(o_x^2 + o_y^2)};$$

$$\theta_1 = \theta_{12} - \theta_2。$$

由各个关节角的表达式可见,运动学逆解不是唯一的,需根据各关节角的取值范围选取合适的解,以实现最优运动轨迹规划。

2 机械手工作空间求解

机械手的工作空间,是指正常操作时末端执行器的坐标原点能活动的最大空间范围^[5],根据数值求解法,将各关节给定步距角转动,选取关节变量组合,再利用正运动学解 0T 得出末端执行器在基坐标系中的坐标,机械手的工作空间将由这些坐标点构成,各关节转动的步距角越小,坐标点越多,求解的工作空间越精确^[6]。

具体求解步骤:

(1)由关节变量正运动学方程式(2)得到机械手末端执行器在基坐标系中的坐标值,如式(3)所示。取 $d_2 = 0.6$ m,

$$a_3 = 0.55 \text{ m}, a_4 = 0.12 \text{ m}, d_5 = 0.5 \text{ m}, a_6 = 0.16 \text{ m}。$$

(2)关节 1 和 4 的角度变化范围为 $-180^\circ \sim 180^\circ$, 关节 2、3、5 的角度变化范围为 $-170^\circ \sim 170^\circ$, 关节 1 转动步距角为 80° , 其余关节为 50° 。各关节依次在变化范围内以给定的步距角转动,并且前一关节转动变化后,后面的关节需依次按给定的步距角在自己的变化范围内从最小值转动到最大值,即可得到多组关节变量组合。

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_3 c_{12} c_3 + a_4 c_{12} c_{34} + d_5 c_{12} s_{34} + a_6 (c_{12} c_{34} c_5 + s_{12} s_5) \\ a_3 s_{12} c_3 + a_4 s_{12} c_{34} + d_5 s_{12} s_{34} + a_6 (s_{12} c_{34} c_5 - c_{12} s_5) \\ d_2 - d_3 c_{34} + a_3 s_3 + a_4 s_{34} + a_6 s_{34} c_5 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

(3)将各组关节变量代入式(3),求出机械手末端执行器相应位置的向量值。

(4)通过 MATLAB 编程,得到的末端执行器的坐标值按打点的方式显示。根据步骤(2)中给定的各关节角度变化范围,得到约 12 万个坐标点,工作空间如图 3 所示。如果步距角减小,点数增多,可以得到更精确的工作空间。

从工作空间 x 、 y 、 z 3 个方向的投影及三维图可以看出,该机械手的工作空间连续,没有空腔和空洞,结构紧凑,证明机械手结构设计合理。

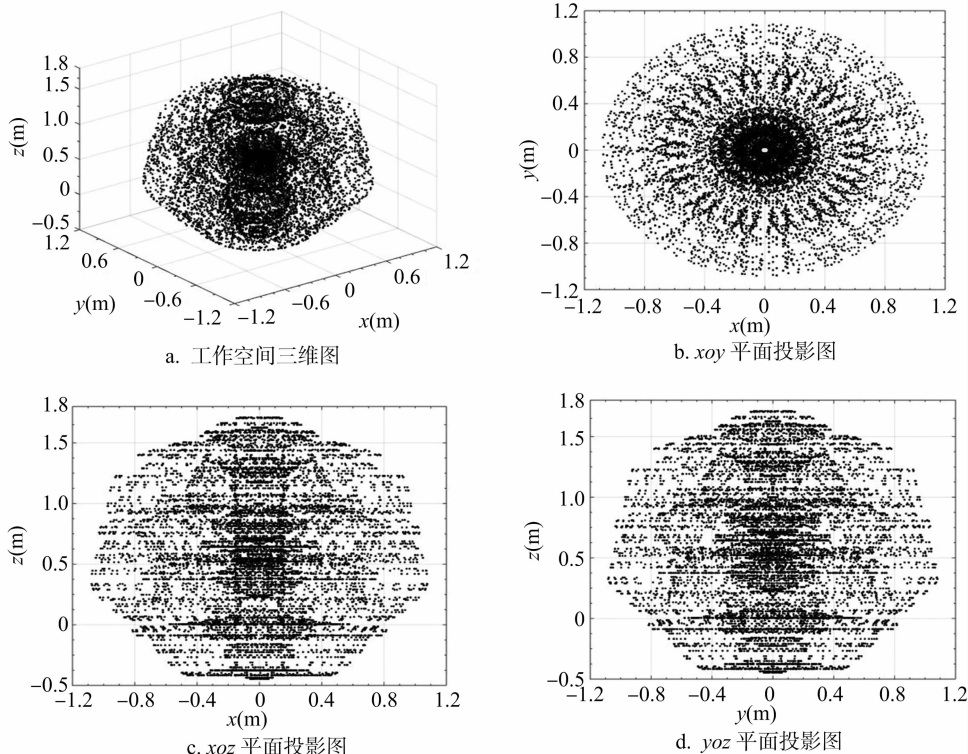


图3 机械手工作空间

3 MATLAB 轨迹规划仿真

3.1 建立机械手模型

根据表 1 中机械手各连杆和末端执行器的 D-H 参数,利用 MATLAB 机器人工具箱 (Robotics Toolbox) 中的 Link 和 SerialLink 函数,创建机械手三维模型^[7](图 4)。

3.2 轨迹规划仿真

轨迹指的是机械手每个自由度的位置、速度和加速度的

时间历程^[8],给定末端执行器 1 个目标位姿,轨迹规划仿真将描述机械手在工作空间中的期望运动,在轨迹生成时需计算出各关节和末端执行器的位移、速度和加速度^[9]。本例轨迹规划仿真采用点到点的运动规划,主要研究末端执行器和各关节转动角度、速度和加速度变化。

选用起点位置 $q_1 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$, 终点位置 $q_2 = [-\pi/4 \ \pi \ 3\pi/4 \ -\pi/2 \ \pi/2]$, 设 2 点处机械手的初、末速度为零,机械手从 q_1 到 q_2 的时间为 2 s, 采用插值算法,插

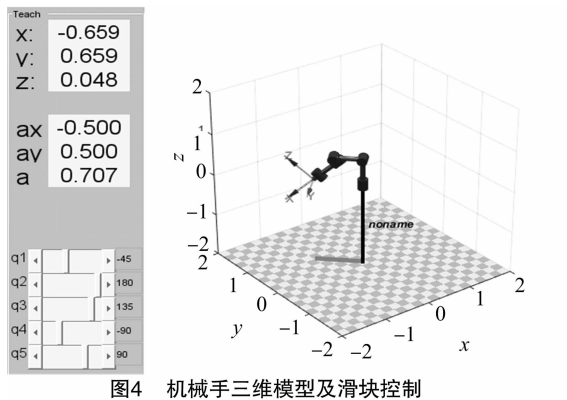
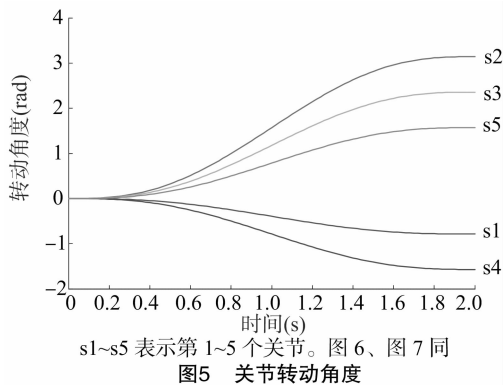


图4 机械手三维模型及滑块控制

值步长取 0.02 s, 得到各关节角度变化轨迹^[10-11], 如图 5 所示。对转动角度分别进行一阶和二阶求导运算, 即得各关节的速度曲线(图 6)和加速度曲线(图 7)。采用节点间最简单路径法, 可得末端执行器在工作空间的运动轨迹^[12], 如图 8 所示。



s1~s5 表示第 1~5 个关节。图 6、图 7 同

图5 关节转动角度

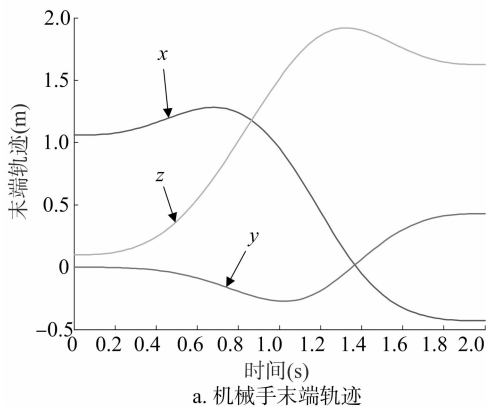


图6 关节角速度

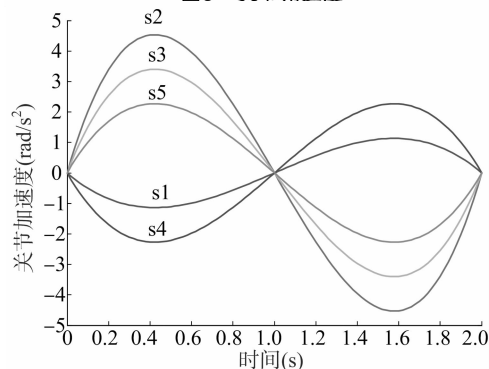


图7 关节加速度

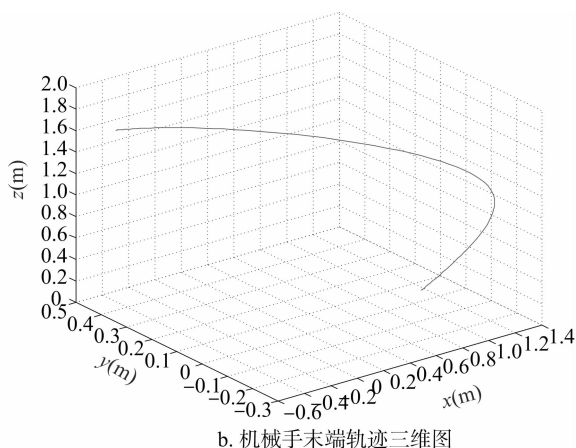


图8 末端执行器位置变化轨迹

4 结论

本研究采用 D-H 法建立机械手各连杆坐标系, 根据各连杆和末端执行器 D-H 参数建立正、逆运动学数学模型。运用各关节给定步距角转动的方法, 结合 MATLAB 求解出机械手的工作空间, 结果显示工作空间连续, 没有空腔和空洞。利用 MATLAB 软件对樱桃番茄采摘机械手进行点到点的运动轨迹仿真, 各关节的角度变化曲线、角速度及角加速度曲线均连续平滑, 表明机械手运动平稳, 安全可靠, 可准确到达工作空间内的指定位置, 证明机械手结构设计合理, 运动学方程

由图 5 可以看出, 关节 2 角度变化最大, 关节 1 角度变化最小; 由图 6 和图 7 可以看出, 速度和加速度曲线都保持连续平滑, 没有突变, 说明机械手在工作过程中运行平稳, 无较大振动。

正确, 为后续的运动控制提供数学模型, 也为机械手结构的进一步优化打下基础。

参考文献:

- [1] 蒋昊俟, 胡 军, 宋 健. 收获采摘机器人的运动学分析及仿真——基于 ADMAS[J]. 农机化研究, 2016, 38(12): 7-11.
- [2] Hayashi S, Shigematsu K, Yamamoto S, et al. Evaluation of a strawberry - harvesting robot in a field test [J]. Biosystems Engineering, 2010, 105(2): 160-171.
- [3] Craig J J. Introduction to robotics: mechanics and control[M]. Upper

王 哲. 基于射频阻抗法的谷物在线含水量信息检测[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(9): 223–226.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.09.054

基于射频阻抗法的谷物在线含水量信息检测

王 哲

(天津现代职业技术学院, 天津 300351)

摘要:在科学分析阻抗法检测谷物在线含水量基本原理的基础上, 研究基于射频阻抗法的谷物在线含水量检测技术, 为谷物含水量测量传感器的高精度、大范围、自动化、微型化及智能化研发提供科学依据。结果表明: 在不同频率信号源的激励下, 设计传感器的输出电压与相应的含水量成线性关系, 而在频率为 1 MHz 的信号激励下, 湿度差值相同, 输出电压值差最大。因此, 把 1 MHz 确定为该传感器的特征频率, 预测模型为 $y = 12.74 - 23.052x (r^2 = 0.8173)$ 。利用圆柱形谷物水分传感器设计了一套在线水分检测仪, 经过试验得出: 在频率为 1 MHz 的信号源的激励下, 该在线水分检测仪的预测模型为 $y = 21.476 - 87.288x (r^2 = 0.9861)$ 。检测仪的测量精度较高, 误差仅为 $\pm 1.2\%$, 完全符合小型谷物干燥机的控制要求。

关键词: 谷物含水量; 射频阻抗法; 检测技术; 回归模型; 温度; 测量精度; 谷物干燥机

中图分类号: TP274 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)09-0223-04

在利用干燥机进行长时间、高降水率谷物干燥过程中, 如何进行不同环境条件下、不同谷物含水量的精确在线测量, 对于及时和准确地调整干燥机的工作状态、实现谷物合理干燥和粮食储藏具有重要意义^[1]。谷物水分是谷物中自由水与结合水的总称, 自由水是通过物理吸附作用凝聚在谷物颗粒内部毛细管内和分子间隙中的水分; 结合水是通过化学作用吸附在谷物细胞内或谷物分子结构中的水分。自由水具有普通水的一般性质, 直接影响谷物的物理和化学特性^[2]。就谷物含水量的检测而言, 谷物含水量就是指自由水的含量。一方面, 为使谷物在存储及加工过程中, 维持生命和保持谷物所固有的色、气、味、种用品质及食用品质, 对谷物的含水量进行精确检测就显得非常重要^[3]。另一方面, 在谷物干燥过程中, 含水量的测量结果直接影响干燥系统的控制精度。因此, 研制精度高、响应快的谷物水分在线检测装置就非常有必要。现有的检测装置离线工作时精度较高, 可靠性好, 但不宜安装到工业现场, 不能对谷物含水量进行实时测量。目前, 我国生产的大部分谷物干燥机还没有高质量的含水量在线检测装

置, 烘后谷物过干或未达安全含水量的情况相当普遍。国内外对含水量检测的研究开展较早, 主要有直接检测和间接检测 2 种, 对于在线测量一般用间接检测, 它包括红外式、微波式、核磁共振式、中子式、电导式、电容式等^[4]。前 4 种由于结构复杂, 造价昂贵, 使用维修不方便, 多用于大型生产线的在线检测, 而且取得了较满意的成果, 电容式和电导式是常用的方法。电导式存在着测试精度较低、受电解质及被测谷物的温度影响大等缺点^[5]。本试验在分析电容法原理的基础上, 以谷物含水量测量为核心, 研究了基于射频阻抗法的谷物在线含水量检测技术, 为谷物含水量测量传感器的高精度、大范围、自动化、微型化及智能化研发提供科学依据。

1 阻抗法检测谷物在线含水量的基本原理

阻抗法主要是把水稻种子作为电容器的介质, 而夹在 2 个圆柱形极板间的谷物由于含水量不同, 所表现的介电常数也是不同的, 在相同频率信号的激励下, 所呈现的阻抗也不相同。尽管它们之间所对应的函数关系是未知的, 但可以通过实验研究找到它们的对应关系。

1.1 传感器的理论分析

图 1 是谷物在圆柱形极板间流动的模式图^[6], 把流动的谷物分成 3 个部分: 一是谷物间的空气隙; 二是谷物的水分; 三是谷物干物质。根据电容的计算公式可得模型总电容 C_s :

Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2005.

[4] 张 将, 秦训鹏, 胡泽启. 一种选择性柔性五自由度机器人的运动学分析[J]. 机床与液压, 2016, 44(9): 42–47.

[5] 陶建国. 机器人技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005.

[6] 钟 勇, 朱建新. 一种新的机器人工作空间求解方法[J]. 机床与液压, 2004(4): 66–67.

[7] 郭清达, 万传恒, 史步海. 基于遗传算法的工业机器人时间最优轨迹规划及仿真研究[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(4): 1240–1242.

[8] 李万莉, 陈熙巍, 茹 兰. 基于 SimMechanics 的 4 自由度机器人

的轨迹规划和仿真系统设计[J]. 中国工程机械学报, 2008, 6(2): 144–148.

[9] 刘逸群, 邓完全, 刘 振, 等. 液压驱动六足机器人一种低冲击运动规划方法[J]. 机械工程学报, 2015, 51(3): 10–17.

[10] 陈 桂, 王建红, 汤玉东. KUKA 机器人运动学仿真与实验研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2014(8): 94–97.

[11] 张兴国, 张 磊. 禽蛋吸运分级机械仿真与分析[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(5): 157–160.

[12] 罗家佳, 胡国清. 基于 MATLAB 的机器人运动仿真研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2005, 44(5): 640–644.