

上甑机器人运动学分析及轨迹研究

Kinematics analysis and trajectory research for upper-retort-robot

庆毅辉¹王淑青^{1,2}张子蓬^{1,2}周喜悦¹QING Yi-hui¹ WANG Shu-qing^{1,2} ZHANG Zi-peng^{1,2} ZHOU Xi-yue¹

(1. 湖北工业大学, 湖北 武汉 430068; 2. 武汉奋进智能机器有限公司, 湖北 武汉 430205)

(1. Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China;

2. Wuhan Fenjin Intelligent Machine Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430205, China)

摘要:在利用运动学模型实现上甑机器人的控制中,针对旋转式上甑机器人的特殊结构,通过改进 Denavit-Hartenberg 法建立其正运动学模型,随后解析其逆解表达式并加以验证。工作空间的仿真结果表明,该试验设计的上甑机器人可完成整层平铺、探气上甑的工作任务;同时利用混合曲线法生成运动轨迹,并分析关节角、角速度及加速度的时间历程,结果表明该方法适用于上甑机器人。

关键词:上甑机器人;运动学;工作空间;轨迹生成

Abstract: In using the kinematics model to realize the control of the upper retort robot, for the special structure of the rotary upper retort robot, the forward kinematics model was established by improving the Denavit-Hartenberg method, and then the inverse solution expression was analyzed and verified. The simulation results of the workspace showed that the upper retort robot designed in this experiment could complete the tasks of tiling the whole layer and detecting the upper retort. Meanwhile, the hybrid curve method was used to generate the motion trajectory, and the time history of joint angle, angular velocity and acceleration were analyzed. It showed that the method was suitable for the retort robot and provided a basis for the follow-up trajectory tracking control.

Keywords: upper-retort-robot; kinematics; working space; trajectory generation

中国白酒历史悠久,独特的酿造工艺造就其独具一格的风味^[1]。发酵后酒醅的上甑操作直接决定固态蒸馏的好坏,影响白酒的出酒率和质量。传统的上甑操作由人工探气上甑,一层层地将酿酒原料轻撒均铺,其工作强度大、环境差^[2]。半自动化上甑技术解决了人工上料强

度大的问题,有效降低了人工成本,但存在甑筒内铺料不均的问题,需人工不断地码平。因此,酿酒行业急需一批完全代替人工上甑的专用型机器人。上甑机器人大体分为通用式与旋转式两类,通用式利用多关节机器人及末端的撒料装置可实现多区域铺料^[3],但较难实现不间断铺料,且对跑气点补料速度慢^[4]。旋转式上甑机器人因其特殊结构,内嵌物料输送腔并装有布料头等特殊装置,通用式上甑机器人可实现连续性均匀铺料且补料快,是上甑机器人未来的主要研究发展对象。试验拟针对旋转式上甑机器人的运动学模型及轨迹进行研究,通过改进 Denavit-Hartenberg 法建立其正运动学模型,解析其逆解表达式并加以验证,旨在为后续运动控制及工作空间仿真提供依据。

1 上甑机器人的运动学

1.1 结构分析

旋转式上甑机器人结构及其等效关节分布如图 1 所示。为了将酿酒原料逐层、均匀地撒至甑筒内,该机器人设计 4 个旋转关节,分别为大臂旋转关节(Joint₁)、大臂俯仰关节(Joint₂)、小臂旋转关节(Joint₃)与小臂摆动关节(Joint₄)。

为简化运动学模型,通过改进 Denavit-Hartenberg 法对特定型号的上甑机器人进行坐标系建立,如图 2 所示。坐标系*i*的原点为 Joint_i轴线和 Joint_{i+1}轴线相交点,若 Joint_i轴线和 Joint_{i+1}轴线不相交,则规定公垂线与 Joint_i轴线的交点为原点。令 Z_i轴沿 Joint_i轴线指向, X_i轴沿 Joint_i轴线和 Joint_{i+1}轴线的公垂线指向,若 Joint_i轴线和 Joint_{i+1}轴线相交,则规定 X_i轴垂直于 Joint_i轴线和 Joint_{i+1}轴线的所在平面。初始状态下,设定参考坐标系{0}与坐标系{1}重合^[5]。相应的连杆参数见表 1。

1.2 正运动学分析

在以 θ_i 为变量,坐标系*i-1*至坐标系*i*的变换矩阵的一般表达式为^[6]:

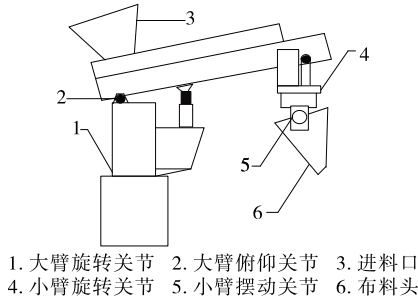
基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(编号:61603127)

作者简介:庆毅辉,男,湖北工业大学在读硕士研究生。

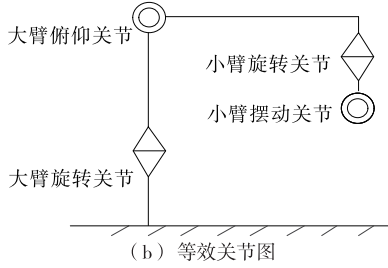
通信作者:王淑青(1969—),女,湖北工业大学教授,博士。

E-mail: 254831618@qq.com

收稿日期:2020-05-27



(a) 结构图



(b) 等效关节图

图1 旋转式上甌机器人结构设计

Figure 1 Structural design drawing of rotary upper-retort-robot

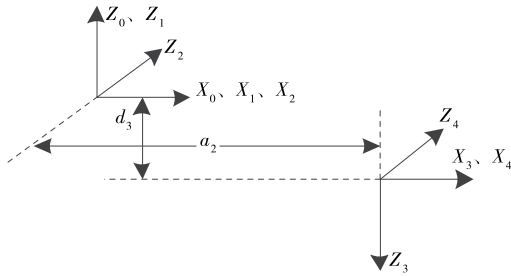


图2 上甌机器人坐标系

Figure 2 Coordinate system of the upper-retort-robot

表1 上甌机器人连杆参数[†]

Table 1 Connecting rod parameters of the upper-retort-robot

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i	变化范围
1	0	0	0	θ_1	$-2\pi/3 \sim 2\pi/3$
2	$-\pi/2$	0	0	θ_2	$-\pi/9 \sim \pi/9$
3	$-\pi/2$	a_2	d_3	θ_3	$-\pi \sim \pi$
4	$\pi/2$	0	0	θ_4	$-\pi/3 \sim \pi/3$

[†] $a_2 = 2\,000\text{ mm}$, $d_3 = 342\text{ mm}$.

$${}^i_{i-1}\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin\theta_i \cos\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1}d_i \\ \sin\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

根据上甌机器人坐标系和特定连杆参数,得各位姿

变换矩阵:

$${}^0_1\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & 0 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$${}^1_2\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_2 & -\cos\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$${}^2_3\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & a_2 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ -\sin\theta_3 & -\cos\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$${}^3_4\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & -\sin\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin\theta_4 & \cos\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

连乘可得坐标系{4}相对于坐标系{0}的变换矩阵 ${}^0_4\mathbf{T}^{[7]}$:

$${}^0_4\mathbf{T} = {}^0_1\mathbf{T} {}^1_2\mathbf{T} {}^2_3\mathbf{T} {}^3_4\mathbf{T} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\begin{cases} r_{11} = (c_1 c_2 c_3 + s_1 s_3) c_4 - c_1 s_2 s_4 \\ r_{12} = -(c_1 c_2 c_3 + s_1 s_3) s_4 - c_1 s_2 c_4 \\ r_{13} = c_1 c_2 s_3 - s_1 c_3 \\ r_{21} = (s_1 c_2 c_3 - c_1 s_3) c_4 - s_1 s_2 s_4 \\ r_{22} = (c_1 s_3 - s_1 c_2 c_3) s_4 - s_1 s_2 s_4 \\ r_{23} = s_1 c_2 s_3 + c_1 c_3 \\ r_{31} = -s_2 c_3 c_4 - c_2 s_4 \\ r_{32} = s_2 c_3 s_4 - c_2 c_4 \\ r_{33} = -s_2 s_3 \\ p_x = a_2 c_1 c_2 - d_3 c_1 s_2 \\ p_y = a_2 s_1 c_2 - d_3 s_1 s_2 \\ p_z = -a_2 s_2 - d_3 c_2 \end{cases}. \quad (7)$$

其中, $s_i = \sin(\theta_i)$, $c_i = \cos(\theta_i)$,式(7)构成了上甌机器人运动学模型。在 Matlab 环境下使用 RTB 工具箱建立机器人模型,使用 $\text{fkine}(q)$ 函数计算关节角度变量 $q_a[pi/6, pi/9, -pi/4, 0]$ 和 $q_b[-pi/3, -pi/9, pi/3, pi/6]$ 两种不同位形的运动学正解 $\mathbf{T}_1$ 和 $\mathbf{T}_2^{[8]}$ 。

$$\mathbf{T}_1 = \begin{bmatrix} 0.221\,9 & -0.296\,2 & -0.929\,0 & 1\,526.0 \\ 0.944\,6 & -0.171\,0 & 0.280\,1 & 881.2 \\ -0.241\,0 & -0.939\,7 & 0.241\,8 & -1\,005.0 \\ 0.000\,0 & 0.000\,0 & 0.000\,0 & 1.0 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} -0.360 & 0.405 & 0.839 & 998.2 \\ -0.875 & -0.163 & -0.455 & -1\,729.0 \\ -0.321 & -0.899 & 0.296 & -362.7 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

将 q_a, q_b 代入式(7),求得结果与式(8)、(9)相同,证明了所建上甑机器人模型的正确性^[9]。

1.3 逆运动学分析

逆运动学对上甑机器人需移动至跑气点的路径规划提供了依据,考虑上料对实时性要求高及上甑机器人的特定构型,采用解析法计算逆解。将式(6)两边左乘 1_0T ,可得:

$${}^1_0T_4T = {}^1_2T_3T_4T \quad (10)$$

规定 $L(i, j)$ 与 $R(i, j)$ 描述等式左右对应的 i 行 j 列元素,根据 $L(2, 4)$ 与 $R(2, 4)$ 相等可得:

$$\theta_1 = A \tan(p_y / p_x) \quad (11)$$

联立 $L(1, 4) = R(1, 4)$ 与 $L(3, 4) = R(3, 4)$ 可得:

$$\theta_2 = A \sin(-a_2 p_z - d_3 k_1 / d_3^2 + a_2^2) \quad (12)$$

其中 $k_1 = c_1 p_x + s_1 p_y$, 将式(6)两边左乘 2_0T ,可得:

$${}^2_0T_4T = {}^2_3T_4T \quad (13)$$

根据 $L(2, 2) = R(2, 2)$ 、 $L(2, 3) = R(2, 3)$ 可得:

$$\theta_3 = A \cos(k_2), \theta_4 = A \sin(k_3 / s_3) \quad (14)$$

其中 $k_2 = c_1 r_{23} - s_1 r_{13}$, $k_3 = c_1 r_{22} - s_1 r_{12}$ 。将上述矩阵 T_2 中对应元素代入式(11)、(12)、(14),所得关节角度与 q_b 相同,证明了逆解表达式的正确性。

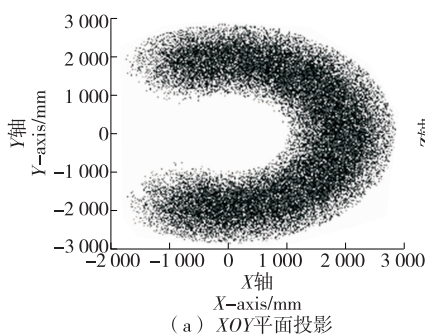
2 上甑机器人工作空间分析

明确上甑机器人末端执行器所能到达的位置,可为后续发酵车间的整体设备布局提供依据。在定义上述运动变换时,认为上甑机器人的原点位于大臂俯仰机构,即坐标系 $\{2\}$ 的原点,为使模型完整并分析工作空间,进行基座变换,将机器人的原点转移至与地面相连的底座下端部,将式(7)中 p_z 表达式进行替换,以改进运动学模型:

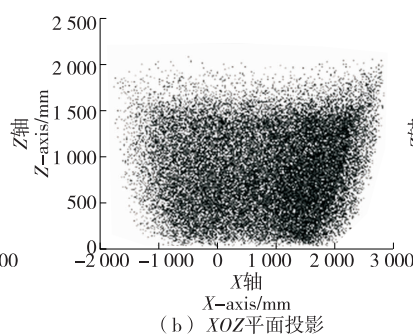
$$\overline{p_z} = -a_2 s_2 - d_3 c_2 + 1\,875, \quad (15)$$

式中:

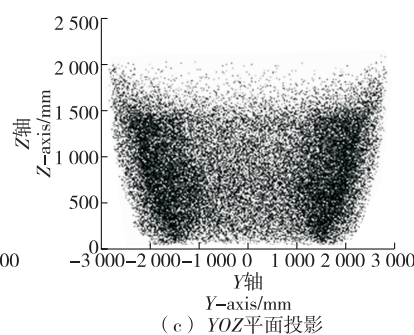
1 875——坐标系 $\{2\}$ 的原点距离底座下端部的距离,mm。



(a) XOY平面投影



(b) XOZ平面投影



(c) YOZ平面投影

图 4 上甑机器人工作空间

Figure 4 Working space of upper-retort-robot

式(16)为上甑机器人的运动学方程,可描述 $Jiont_4$ 固连的坐标系 $\{4\}$ 的位置和姿态。

$$T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

对于上甑机器人需定义一个工具变换,反映布料头装置(末端执行器)的顶端相对于坐标系 $\{4\}$ 的变换,采用的布料头装置顶端沿坐标系 $\{4\}$ 的 y 轴延伸了 845 mm,其坐标系模型见图 3,其中 X_{tool} 与 Z_{tool} 为固连布料头坐标系的 X 轴与 Z 轴。

随后采用 Monte-Carlo 法,在各关节的变化范围内随机产生关节变量,结合正运动学模型,计算得到上甑机器人的工作空间^[10],并为后续的轨迹生成提供参考,工作空间投影见图 4。

对于半径 1 600 mm、高 2 000 mm 的甑筒,根据 3 个平面的上料范围投影及相对上甑机器人的位置,可确定上甑机器人能完成全覆盖的整层铺料任务。

3 上甑机器人的轨迹生成

为使布料头平滑地移动,需进行轨迹生成,以保证快速移至跑气点^[11]。采用混合曲线法通过抛物线过渡线性函数生成平滑运动轨迹,可根据期望速度提供匀速控制^[12]。该方法在给定参数下的最大速度:

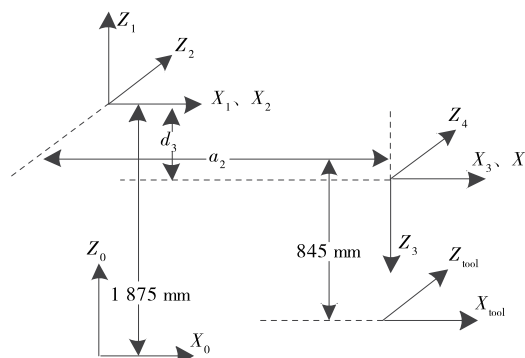


图 3 坐标系模型

Figure 3 Coordinate system model

$$\dot{\theta}_m = \sqrt{\frac{2\ddot{\theta}_1\ddot{\theta}_2(\theta_1 - \theta_2) - \ddot{\theta}_1\dot{\theta}_1^2 + \ddot{\theta}_2\dot{\theta}_2^2}{\ddot{\theta}_1 - \ddot{\theta}_2}}, \quad (17)$$

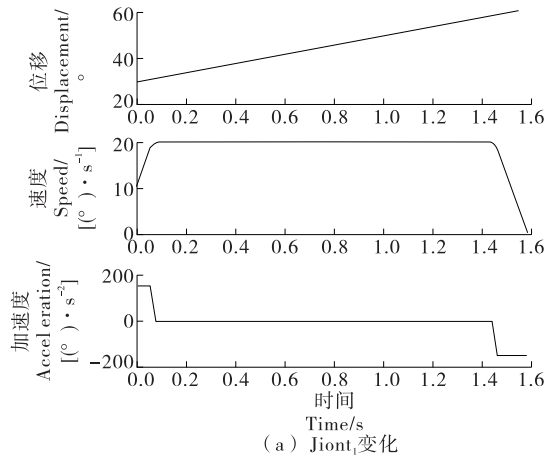
式中:

θ_1, θ_2 ——初始位置与终止位置的角度,°;

$\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2$ ——初始位置与终止位置的角速度,(°)/s;

$\ddot{\theta}_1, \ddot{\theta}_2$ ——初始位置与终止位置的角加速度,(°)/s²。

当设定匀速段速度为 $\dot{\theta}_s$ 时,过渡加速段 t_1 、匀速段 t_2 与过渡减速段 t_3 的角位移:

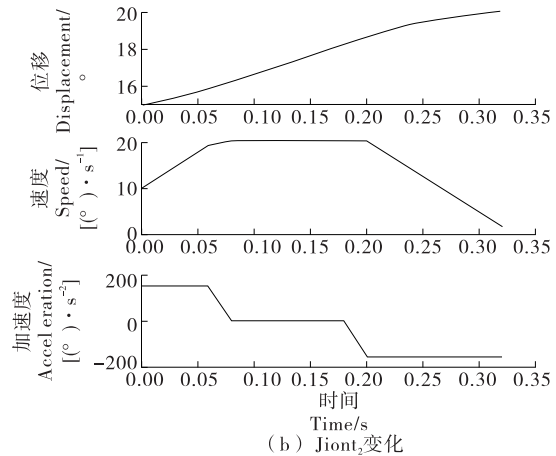


(a) Jiont₁变化

$$\begin{cases} \theta_1 = \dot{\theta}_1 t_1 + \frac{1}{2} \ddot{\theta}_1 t_1^2 \\ \theta_s = \dot{\theta}_s t_s \\ \theta_2 = \dot{\theta}_s t_2 + \frac{1}{2} \ddot{\theta}_2 t_2^2 \end{cases} \quad (18)$$

设定上甑机器人的初始位置为 $q_c[\pi/6, \pi/12, 0, 0]$,终止位置为 $q_d[\pi/3, \pi/9, 0, 0]$,混合曲线法生成轨迹曲线如图5所示。

由图5可知,混合曲线法在具有初始速度情况下,不



(b) Jiont₂变化

图5 轨迹曲线

Figure 5 Track curve

存在角位移中间值超过终止值的情况,且平均速度高。实际系统中,混合曲线法占用硬件资源较少,加速度突变造成的机器人震动在允许范围内,适用于对精度要求不高的上甑机器人驱动。

4 结论

试验建立了上甑机器人的运动学模型,并验证了正逆解的正确性。结合改进运动学模型,对上甑机器人工作范围进行了仿真计算,确定了机器人可对具体尺寸甑筒全覆盖的整层铺料,同时说明了上甑机器人连杆参数合理。在关节具有一定初始速度的情况下,利用混合曲线法生成轨迹,并根据结果确定该方法适用于上甑机器人。但由于上甑机器人控制的复杂性,后续应深入研究其动力学模型,提高轨迹跟踪控制精度并应用至实际系统。

参考文献

- [1] 张治刚, 张彪, 赵书民, 等. 中国白酒香型演变及发展趋势[J]. 中国酿造, 2018, 37(2): 15-18.
- [2] 王玉. 白酒机械化酿造技术设备应用进展与展望[J]. 云南化工, 2019, 46(8): 39-41, 44.
- [3] 李宏, 花勇. 机械装甄布料控制系统 PLC 设计[J]. 食品与机械, 2015, 31(4): 114-118.

- [4] 张贵宇, 庾先国, 李杉, 等. 上甑机器人在白酒固态蒸馏中的应用现状与探讨[J]. 食品工业科技, 2017, 38(13): 216-219, 224.
- [5] 郭发勇, 梅涛, 赵江海. D-H 法建立连杆坐标系存在的问题及改进[J]. 中国机械工程, 2014, 25(20): 2 710-2 714.
- [6] LEE Rong-shean, LIN Yan-hong. Development of universal environment for constructing 5-axis virtual machine tool based on modified D-H notation and OpenGL[J]. Robotics & Computer Integrated Manufacturing, 2010, 26(3): 253-262.
- [7] ZHAGN Hua, LU Wen-qi, WU Chuan-yu, et al. Velocity optimization algorithm of 4-DOF robot end-effectors[J]. Cluster Computing, 2018(15): 1-10.
- [8] 黄旭楠, 岳夏, 洗颂智. 基于 MATLAB 的码垛机械手运动学分析与仿真[J]. 机床与液压, 2017, 45(5): 35-39.
- [9] 李璐陈, 曾谊晖. 六关节工业机器人工作空间及轨迹规划仿真[J]. 食品与机械, 2017, 33(10): 98-103.
- [10] 杨吕剑, 沈林勇, 丁航. 四自由度上肢康复机器人运动轨迹规划与仿真[J]. 计算机仿真, 2016, 33(8): 332-337.
- [11] 蔡春堂. 小型袋装食品自动装箱机器人设计及运动仿真[J]. 食品与机械, 2018, 34(7): 98-100.
- [12] 张文佳, 尚伟伟. 2 自由度绳索牵引并联机器人的高速点到点轨迹规划方法[J]. 机械工程学报, 2016(3): 1-8.