

食品分拣机器人动力学仿真

Dynamics simulation of food sorting robot

蒋毅^{1,2} 李正洋^{1,2} 应在恩^{1,2} 平雪良^{1,2}

JIANG Yi^{1,2} LI Zheng-yang^{1,2} YING Zai-en^{1,2} PING Xue-liang^{1,2}

(1. 江南大学机械工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China; 2. Jiangsu Province Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

摘要:针对六自由度关节式食品分拣机器人的结构特点,运用拉格朗日法对所设计的机器人进行动力学分析。建立机器人的虚拟样机模型,并在 ADAMS 中对其进行刚体动力学仿真,得到各关节角度、角速度、角加速度、力矩以及功率曲线,发现该机器人具有较好的运动稳定性以及动态响应性,可为电机选型提供理论依据。采用 SimDesigner,对所设计的机器人进行刚柔耦合动力学仿真,结果表明机械臂设计合理,可为食品分拣机器人的设计与改进提供指导。

关键词:食品分拣机器人;虚拟样机;动力学仿真;刚体动力学;刚柔耦合动力学

Abstract: According to the structural features of food sorting robots with six degrees of freedom, kinetic theory analysis was carried out by using Lagrange approach. Virtual prototype modeling was established, and the curves of angle, angular velocity, angular acceleration, moment and power were obtained by rigid body dynamics simulation within ADAMS. The results showed that the robot had a good motion stability and dynamic response, which in addition provide a theoretical basis for motor selection. Coupled dynamics simulation was also carried out by SimDesigner, which demonstrates the rationality of the manipulate design.

Keywords: food sorting robot; virtual prototype; dynamics simulation; rigid dynamics; rigid-flexible coupling dynamics

机器人在工业化食品包装生产过程中的应用愈发广泛。随着以视觉技术为代表的食品传感检测技术的发展,机器人已可实现自主性较强的农产品与食品的自动化分拣。目前的分拣机器人多采用并联式机构,尽管可满足大部分需求,但在大载荷高速工况下,存在振动强烈、动态性能恶化等问题。因此,研究采用串联式结构的食品分拣机器人,并对其

大负载、高速运动下的动力学特性进行研究,具有一定的应用意义。

机器人动力学主要研究和描述机器人的运动与力(力矩)之间的关系。对机器人进行动力学计算与仿真是确定机器人运行时所受的力或力矩、承载能力和工作稳定性的前期必要工作^[1],对机器人系统的设计与控制有着至关重要的作用。机器人动力学的研究经历了两个阶段:① 机器人刚体动力学分析,刚体动力学分析就是把机器人各连杆当作刚性机构,不考虑机械臂的变形等因素;② 机器人刚柔耦合动力学分析,考虑机器人运动过程中弯曲、扭转和拉伸等变形情况,使机器人的设计与控制精度更高。

机器人系统是多刚体系统,目前针对多刚体系统建立动力学方程常用的方法有拉格朗日方程法、Newton-Euler 法(牛顿—欧拉法)、罗伯逊—威登伯格法、Kane 法(凯恩法)、和高斯最小约束原理法等^[2]。其中比较常用的是拉格朗日方程法、牛顿—欧拉法法和凯恩法。凯恩法的计算速度较快,但是对机器人的类型有所限制;牛顿—欧拉法法其推导过程简便,具有求解速度快的优点,但是对于复杂的机器人系统,这种方法显得非常复杂和繁琐。

在机器人动力学仿真研究中,基于 ADAMS 的动力学仿真研究较为普遍,也出现了多种软件联合仿真^[3-7]。蓝培钦等^[3]在建立机器人虚拟样机模型的过程中联合采用了 UG 与 ADAMS,并在此基础上进行了动力学仿真分析;王斌锐等^[4]利用 ADAMS 建立虚拟样机模型,在 MATLAB 中编写方程求解算法,对柔性机械手进行刚柔耦合仿真;梁浩等^[5]将 ADAMS 与 ANSYS 结合,建立了柔性机器人动力学仿真系统;管小清等^[6]采用凯恩法进行了码垛机器人动力学特性的理论分析,在虚拟样机模型建立时采用了 ADAMS 软件,同时进行动力学仿真。

本研究拟运用拉格朗日法进行食品分拣机器人的动力学分析,在虚拟样机模型建立过程中联合采用 Pro/E 和 ADAMS,样机的相关参数严格按照实际情况进行设定,最后在 ADAMS 和 SimDesigner 软件中分别开展机器人的刚体动

基金项目:江苏省科技支撑计划重点项目(编号:BE2013003)

作者简介:蒋毅(1981—),男,江南大学讲师,博士。

E-mail: jiangyi@jiangnan.edu.cn

通讯作者:平雪良

收稿日期:2015-05-21

力学仿真和刚柔耦合动力学仿真工作。

1 机器人动力学分析

1.1 机器人结构模型

为满足单体较重的火腿、哈密瓜、西瓜等食品的自动化分拣需求,食品分拣机器人应能承受较大的载荷;同时为满足无损抓取要求,末端执行机构姿态应能灵活调整。为此,设计了一台具有 6 个自由度的关节型食品分拣机器人,设计负载达 6 kg,可在视觉系统和专用柔性手爪配合下实现自动化的分拣与包装,其结构见图 1。



图 1 六自由度关节型食品分拣机器人虚拟样机模型

Figure 1 Virtual prototype model of the six degrees of freedom articulated food sorting robot

该机器人拥有 6 个关节,且均为旋转关节,机器人末端手腕的位置通过前 3 个关节控制,机器人末端手腕的姿态通过后 3 个关节控制。该机器人关节由不同规格的电机进行驱动,经过减速机构后,连杆在关节的驱动下运动,使手爪到达所需的位姿。

1.2 机器人动力学分析

采用拉格朗日法对机器人进行动力学分析。分析前,为了简化动力学模型,可以忽略影响很小的摩擦力作用。在机器人动力学方程的推导过程中采用了第二类拉格朗日方程^[8],其方程式:

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} \quad (1)$$

式中:

τ_i ——系统广义的力或力矩, N, N · m;

q_i ——系统广义坐标, m;

$\dot{q}_i$ ——与 q_i 相应的速度, m/s;

L ——系统动能 K 减势能 P 之差, J;

K ——系统动能, J;

P ——系统势能, J。

六自由度食品分拣机器人机械臂的总动能 K_t 为:

$$K_t = \sum_{i=1}^6 K_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^6 \text{Trace} \left[\sum_j \sum_{k=1}^i \frac{\partial \mathbf{T}_i}{\partial q_j} \mathbf{I}_i \frac{\partial \mathbf{T}_i^T}{\partial q_k} \dot{q}_j \dot{q}_k \right] \quad (2)$$

式中:

K_i ——机械臂的总动能, J;

$\mathbf{I}_i$ ——机械臂的伪惯量矩阵;

$\mathbf{T}_i$ —— $\{i\}$ 相对于基坐标系的齐次变换矩阵;

K_i ——各机械臂动能, J;

q_i ——系统广义坐标, m;

$\dot{q}_i$ ——与 q_i 相应的速度, m/s。

机器人传动装置的总动能 K_a 为:

$$K_a = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^6 I_{ai} \dot{q}_i^2 \quad (3)$$

式中:

K_a ——传动装置总动能, J;

I_{ai} ——传动装置的等效转动惯量, kg · m²;

$\dot{q}_i$ ——与 q_i 相应的速度, m/s。

由式(2)和式(3)可得机器人系统总动能为:

$$K = K_t + K_a = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^6 \text{Trace} \left[\sum_j \sum_{k=1}^i \frac{\partial \mathbf{T}_i}{\partial q_j} \mathbf{I}_i \frac{\partial \mathbf{T}_i^T}{\partial q_k} \dot{q}_j \dot{q}_k \right] + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^6 I_{ai} \dot{q}_i^2 \quad (4)$$

一般而言,机器人传动装置的势能远比其机械臂的势能小,可以被忽略,则机器人系统总势能为:

$$P = \sum_{i=1}^6 P_i = - \sum_{i=1}^6 m_i g^T \mathbf{T}_i^T \mathbf{r}_i \quad (5)$$

由式(4)和式(5)可得机器人拉格朗日函数为:

$$L = K - P = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^6 \text{Trace} \left[\sum_j \sum_{k=1}^i \frac{\partial \mathbf{T}_i}{\partial q_j} \mathbf{I}_i \frac{\partial \mathbf{T}_i^T}{\partial q_k} \dot{q}_j \dot{q}_k \right] + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^6 I_{ai} \dot{q}_i^2 + \sum_{i=1}^6 m_i g^T \mathbf{T}_i^T \mathbf{r}_i \quad (6)$$

将式(6)代入式(1)就可得到食品分拣机器人的动力学方程为:

$$\tau_i = \sum_{j=1}^6 D_{ij} \ddot{q}_j + I_{ai} \ddot{q}_i + \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^6 D_{ijk} \dot{q}_j \dot{q}_k + D_i \quad (7)$$

其中:

$$D_{ij} = \sum_{p=\max(i,j)}^6 \text{Trace} \left(\frac{\partial T_p}{\partial q_j} I_p \frac{\partial T_p^T}{\partial q_i} \right)$$

$$D_{ijk} = \sum_{p=\max(i,j,k)}^6 \text{Trace} \left(\frac{\partial^2 T_p}{\partial q_j \partial q_k} I_p \frac{\partial T_p^T}{\partial q_i} \right)$$

$$D_i = \sum_{p=i}^6 -m_i g^T \frac{\partial T_p}{\partial q_i} \mathbf{r}_p$$

式(7)右边第 1 项~第 4 项分别为加速度惯量项、电机驱动器惯量项、科里奥利力和向心力项、重力项^[9]。

2 机器人虚拟样机建模

六自由度关节机器人的结构较为复杂,若要在 ADAMS 中完成建模比较困难,故采用了 Pro/E 对机器人三维零件进行设计。在建立机器人装配体模型时,为了减少仿真的出错几率,舍掉一些对仿真影响较小的零部件,如螺栓、螺钉、传动带及驱动器等。

在 Pro/E 中完成机器人的造型和装配后,利用 Pro/E 与 ADAMS 的连接软件 Mechanism/Pro 对机器人零部件之间的连接方式进行定义。

首先创建刚体部件,采用 MECH/Pro → Set Up Mechanism → Rigid Bodies → Create → Automatic-All Part 命令;然后为各关节添加旋转约束,采用 MECH/Pro → Constrains → Joint → Create → Revolute 命令;最后为了对底座进行固定,

采用 MECH/Pro → Constrains → Joint → Create → Fixed 命令。至此完成了 Pro/E 的建模过程。

同时,采用以上命令,将其他零部件固定于已设置关节零件上。约束完成后,机器人装配模型的自由度为 6 个。

为将上述建立的模型从 Pro/E 中导出,并使得 ADAMS 能够识别使用,可采用 MECH/Pro → Interface → ADAMS/View → Only Write Files 的命令选项,导出模型文件需被重命名为 .cmd 格式。

将上述模型文件导入到 ADMAS 中,即为如图 1 所示的完整的机器人虚拟样机模型。

3 食品包装机器人刚体动力学仿真

机器人在驱动力矩下各关节受力、速度和加速度的情况可通过所建立的机器人动力学模型方便地进行分析,包括动力平衡、动态响应等,从而可对其动力学特性进行综合评估^[10,11]。

3.1 动力学仿真建模

为了尽可能在机器人动力学仿真过程中真实地反映其动力学特性,需要建立的仿真模型尽可能地与实际情况相吻合,因此需要考虑机械臂的零件材质以及机械臂的重力。按照实际机器人零部件的材质定义前 3 个用于控制机器人末端手腕位置的关节材质为钢(steel),后 3 个用于控制机器人末端手腕姿态的关节材质为铝(aluminum)。在机械臂末端施加 5 kg 载荷,并根据实际情况,在 ADAMS 中定义重力加速度的大小方向。

3.2 机器人动力学仿真实例

设定一个简单的工况,即首先让机器人末端连杆沿垂直方向向下移动,移动距离为 535 mm,再以该点为起始点,在水平面上以直径为 400 mm 做逆时针圆周运动。以这一工况为例对机器人进行动力学仿真。在 ADAMS 中给 6 个关节添加完成该轨迹所需的驱动,分别为 MOTION-S、MOTION-L、MOTION-U、MOTION-R、MOTION-B、MOTION-T,并对添加的 6 个驱动进行定义。

在 ADAMS 中设置仿真时间为 16.6 s,步长为 200 步。由此可以得到机器人各关节角度值、角速度值、角加速度值、力矩值及功率值随时间的变化曲线。以大臂所在的 L 关节为例,其角度、角速度、角加速度、力矩及功率曲线分别见图 2~4。

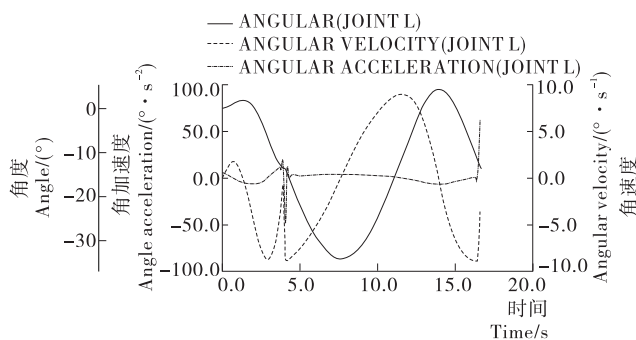


图 2 关节 L 的角度曲线、角速度曲线和角加速度曲线

Figure 2 Angle, angular velocity and angular acceleration curves of the joint L

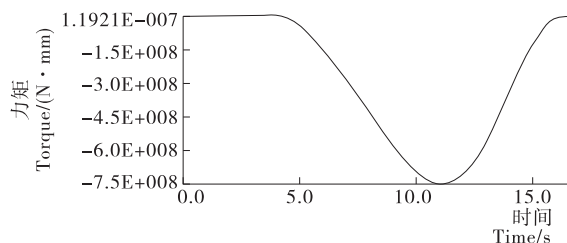


图 3 关节 L 的力矩曲线

Figure 3 Moment curve of joint L

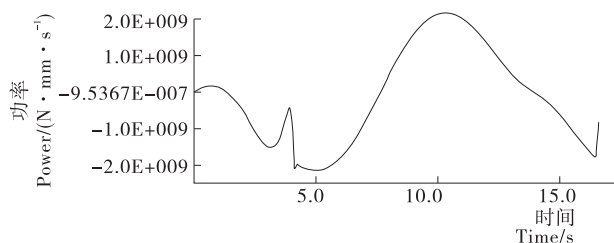


图 4 关节 L 的功率损耗曲线

Figure 4 Power loss curve of joint L

由图 2~4 可知,L 关节角度、角速度和角加速度曲线平滑连续,其他关节类似。由此可见,该机器人具有较好的运动稳定性以及动态响应性。通过对机器人各关节功率损耗曲线的分析,可以为选择食品分拣机器人各关节的驱动电机提供有力的理论依据。

4 食品分拣机器人刚柔耦合动力学仿真

食品分拣机器人在实际工作过程中,特别是当抓取大质量物体时,机械臂都会有一定的变形情况,而刚体动力学仿真并未考虑这一变形情况,尤其机器人大臂在运行过程中承受的力比较大,因此很有必要对大臂进行应力分析,来指导大臂的结构设计。

本研究以第 3 节中的简单工况为例,利用 SimDesigner 对机器人进行刚柔耦合动力学仿真。通过 SimDesigner 把第 3 节中的仿真模型导入 CATIA 中,并对各关节添加旋转约束及对应的驱动电机。为了分析运行过程中大臂的受力情况,对大臂进行网格划分,见图 5。

在 SD Motion WorkBench 中激活大臂模态分析模块,通过选择 SMO Player,则在仿真过程中所选择的大臂模态分析文件将由 SimDesigner Motion Workbench 自动调用,从模态分析文件中计算大臂的应力。设置仿真类型为 Dynamic,仿真时间为 16.6 s,仿真步长为 200 步,由此可以得到仿真过程中任意时刻大臂的应力情况,此处截取 2.075 s 时的应力状态,见图 6。

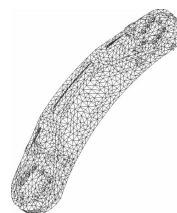


图 5 大臂的网格划分

Figure 5 Meshing of the big arm

(下转第 148 页)

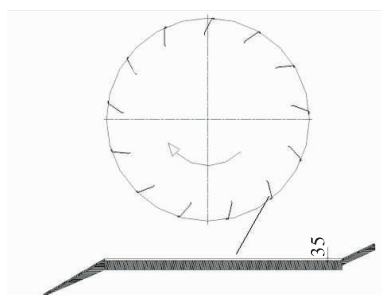


图 5 改造后的叶丝回潮导流板结构

Figure 5 The deflector structure after the renovation of the humidition of tobacco cylinder

3 改进后的效果

改进后的 RC-80 叶丝回潮系统,由于在进入 RC-80 叶丝回潮机前的冷却设备增加低风压吹风设备,使得进入回潮机前的烟丝温度降低至 40°C ,很好地解决了冷凝水在回潮滚筒内部的产生,以致减少了粘丝量;而对回潮滚筒内部导流板的改造,更进一步地解决了烟丝的造碎及烟丝湿球/挂壁的产生。在生产过程中,通过对 RC-80 叶丝回潮系统优化改造后的多批次数据测量,回潮滚筒粘丝及湿团重量由优化改造前的 13 kg/批 降至 9 kg/批 ,碎丝率由之前的 4.2% 降至 2.8% ,烟丝的填充值增加了 0.3 g/cm^3 ,应用结果表明,此次的 RC-80 叶丝回潮系统优化改造,对减少烟丝的造碎,降低粘丝和湿团量是有效的,达到了改善产品质量,降低烟丝损耗的目的。鉴于此,龙岩烟草工业有限责任公司将此成果应用在制丝车间加香工序上加以推广使用,也取得了良好的效果。

参考文献

- 1 王兵,杨达辉,林平,等. 新的卷烟生产工序品质评价方法的建立[J]. 烟草科技, 2002(11): 16~18.
- 2 罗登山,姚光明,刘朝贤. 中式卷烟加工工艺技术探讨[J]. 烟草科技, 2005(5): 4~8.
- 3 崔伟,李洪涛,王海滨,等. 提高 CO_2 膨胀烟丝内在质量的技术研究[J]. 食品与机械, 2012, 28(5): 216~219.
- 4 国家烟草专卖局. 卷烟工艺规范[M]. 北京: 中央文献出版社, 2003.
- 5 韦小玲,康金岭. 管板式烘丝机工艺参数对卷烟香气的影响[J]. 食品与机械, 2012, 28(6): 193~196.
- 6 康金岭,黄贤飞,刘远涛,等. 预处理工艺对烟梗回透率的影响[J]. 食品与机械, 2012, 28(6): 205~208.
- 7 孙哲建,丁伟,吴贵平,等. RC-80 叶丝回潮机的改造研究[J]. 湖南文理学院学报, 2011(9): 79~80, 84.
- 8 刘磊,刘斌. 关于 CO_2 膨胀叶丝生产线回潮系统的改进[C]//中国烟草学会工业专业委员会烟草机械学术研讨会论文集.[出版地不详]:[出版者不详], 2008: 53~55.
- 9 张文杰. RC-80 再回潮筒稳压净水系统的改进[J]. 安徽烟草科技, 2000(3): 17~18.
- 10 韦小玲,康金岭,徐吉铭,等. 叶丝回潮过程加水比例对膨胀丝整丝率的影响[J]. 食品与机械, 2013, 29(2): 41~43.
- 11 周俊,王艳伟. 隧道式烟丝流动冷却机对烟丝质量的影响探讨[J]. 广西烟草, 2003(4): 27~29.
- 12 邓国栋,王宏生,李斌,等. 滚筒烘丝机中烟丝运动的模拟与试验[J]. 烟草科技, 2007(9): 13~17.
- 13 苏福彬,张伟,江家森,等. 叶丝回潮系统: 中国, 201420036894.5[P]. 2014-07-09.

(上接第 95 页)

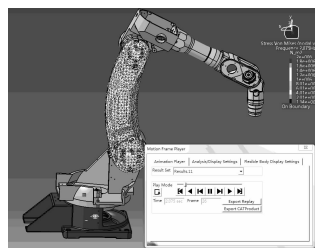


图 6 运行过程中大臂的应力状态

Figure 6 Stress state of the big arm during operation

分析机器人运行中任意时刻大臂的应力情况可以得到,该六自由度关节机器人的大臂设计合理,应力分布合理。用同样的方法可以对机器人其他构建进行应力分析,由此可以指导机械臂的设计与改进。

5 结论

为满足单体较重食品的自动化分拣要求,以设计负载为 6 kg 的六自由度关节式食品分拣机器人为研究对象,运用拉格朗日法对机器人的动力学进行了分析推导,并搭建了食品分拣机器人虚拟样机模型,在 ADAMS 中进行了载荷状态下的刚体动力学仿真,在 SimDesigner 中进行了刚柔耦合动力学仿真,结果表明该机器人具有较好的运动稳定性以及动态响应性,机械臂设计合理,应力分布合理,可为驱动电机的选择以及机械臂的设计与改进提供理论依据。

参考文献

- 1 鲁墨武,石磊,谭娜,等. 基于 Matlab 的机器人建模与动力学仿真[J]. 机械工程师, 2011(1): 40~42.
- 2 何延俊. 单纵臂横扭杆独立悬架驱动桥设计研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2004.
- 3 蓝培钦,言勇华. 码垛机器人动力学仿真及控制[J]. 机械设计与制造, 2010(7): 149~151.
- 4 王斌锐,方水光,严冬明. 机器人手臂的刚柔耦合建模及摆动模态对比[J]. 中国机械工程, 2012, 23(17): 2 092~2 097.
- 5 梁浩,余跃庆,张成新. 基于 ADAMS 及 ANSYS 的柔性机器人动力学仿真系统[J]. 机械科学与技术, 2002, 21(6): 892~895.
- 6 管小清,吕志强. 工业码垛机器人动力学仿真分析与研究[J]. 食品与机械, 2013, 29(1): 149~151.
- 7 Arenz A, Schneider E. Modeling and control a flexible goliath robot a case study using ADAMS/controls[C]//13th European ADAMS Users Conference. Paris: TU Braunschweig, 1998: 1~10.
- 8 王四玲. 围棋机器人动作控制系统的实现[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- 9 刘涛. 层码垛机器人结构设计及动态性能分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2010.
- 10 梁青,宋宪玺,周烽,等. 基于 ADAMS 的双足机器人建模与仿真[J]. 计算机仿真, 2010, 27(5): 62~64.
- 11 管小清,罗庆生. 码垛机器人交错式码放样式算法的研究[J]. 食品与机械, 2012, 28(2): 83~86.