

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2020.03.022

烹饪机器人搅拌机构设计及其多体动力学分析

Design and multi-body dynamics analysis of stirring mechanism of cooking robot

黄良海 王小龙 李亚明

HUANG Liang-hai WANG Xiao-long LI Ya-ming

(广东万家乐燃气具有限公司, 广东 佛山 528300)

(Guangdong Macro Gas Appliance Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528300, China)

摘要:对某类型烹饪机器人搅拌机构进行了 3 种设计(单轴搅拌机构、正反转搅拌机构和行星搅拌机构),并对各种设计进行多体动力学仿真分析(采用颗粒流模拟菜肴物料),得到仿真动画视频及菜肴颗粒运动轨迹。研究表明,行星搅拌机构搅拌物料最充分。

关键词:烹饪机器人;搅拌机构;多体动力学;颗粒流;搅拌性能

Abstract: The author firstly designs three kinds of stirring mechanism of a certain type of cooking robot, which are called uniaxial stirring mechanism, forward and backward stirring mechanism, planetary stirring mechanism, and then carries out multi-body dynamic simulation analysis for each kind of design. The spherical particle flow is used to simulate the dish material, and the simulation animation video and the motion trajectory of food particles are obtained. The results show that the planetary stirring mechanism can stir the material most thoroughly.

Keywords: cooking robot; stirring mechanism; multi-body dynamics; particle flow; mixing performance

搅拌机构是烹饪机器人最重要的机构之一^[1-2],主要作用是对物料进行搅拌翻炒,使其混合充分,受热均匀。当前烹饪机器人所用搅拌机构形式多样,祝俊^[3]和李鲜明^[4]对大型烹饪机器人搅拌机构进行了设计研究,但其结构较为复杂,且不适合小型烹饪机器人;雷鸣等^[5]设计的搅拌机构搅拌运动轨迹复杂,可实现物料充分混合,但是结构很复杂,需使用气缸,成本高且不便清洗,故不适合家用及小型餐厅;彭放^[6]设计的家用炒菜机采用滚筒式翻炒机构,依靠锅具滚动实现菜的翻炒,此类炒菜机仅适合电炒锅,应用范围有限;周晓燕等^[7-8]设计的搅

拌机构为单轴驱动搅拌,此类搅拌机构适合餐厅商用或家用,但是搅拌运动轨迹简单,混合不够充分,容易受热不均导致部分菜肴过熟。

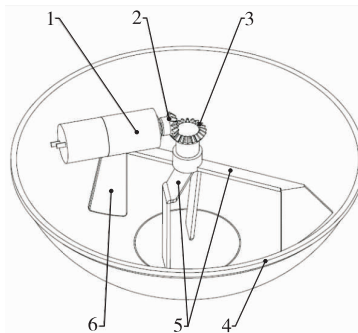
试验拟设计 3 种不同的搅拌机构,对各种设计进行多体动力学分析,并制造样机进行验证,以期获得适用于餐厅商用或家用烹饪机器人的搅拌机构。

1 搅拌机构设计

烹饪机器人以目前市面上最常见的燃气用平底圆锅为锅具^[9]。锅具布置在颠锅机构上,搅拌机构布置在锅盖臂上。根据以上布局及锅具特征,拟设计单轴搅拌、同轴正反转搅拌及行星搅拌 3 种搅拌机构。

1.1 单轴搅拌机构设计

单轴搅拌机构方案如图 1 所示。减速电机 1 水平布置,其输出轴与主动锥齿轮 2 固连,主动锥齿轮 2 与锥齿轮轴 3 啮合(二者齿数相同)。锥齿轮轴 3 下端与横梁 5 固连,且其通过轴承与机座转动连接。锅 4 与锥齿轮轴 3 同轴,并位于搅拌片 6 的下方。搅拌片 6 共 4 片,分别沿



1. 减速电机 2. 主动锥齿轮 3. 锥齿轮轴 4. 锅 5. 横梁
6. 搅拌片

图 1 单轴搅拌机构方案图

Figure 1 Schematic diagram of uniaxial stirring mechanism

作者简介:黄良海(1986—),男,广东万家乐燃气具有限公司工程师,硕士。E-mail: huanglianghai1986@163.com

收稿日期:2019-12-17

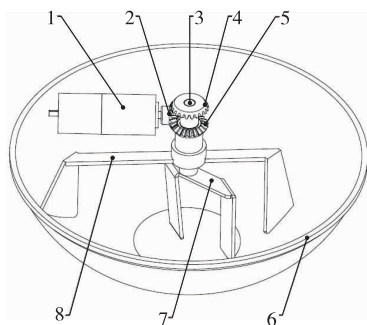
径向和圆周方向错开布置在横梁 5 上,且与锥齿轮轴 3 径向呈夹角,锥齿轮轴 3 旋转一圈,搅拌片 6 可覆盖锅内侧大部分区域。搅动时依靠搅拌片 6 倾角使物料沿流向滑动,此外不同区域物料加速度不同将会形成惯性冲击,从而实现物料的混合。

1.2 同轴正反转搅拌机构

同轴正反转搅拌机构方案如图 2 所示,减速电机 1 水平布置,输出轴与主动锥齿轮 2 固连。主动锥齿轮 2 上、下分别与上锥齿轮 4 和下锥齿轮轴 5 啮合,上锥齿轮 4 和下锥齿轮轴 5 齿数相同。搅拌内轴 3 的上、下端分别与上锥齿轮 4 和主搅拌铲 7 固连,下锥齿轮轴 5 的下端和副搅拌铲 8 固连,副搅拌铲 8 上的副搅拌片与下锥齿轮轴 5 径向呈夹角。下锥齿轮轴 5 内、外侧分别通过轴承与搅拌内轴 3 和机座转动连接。锅 6 与搅拌内轴 3 同轴,且位于主副搅拌铲的下方。

主搅拌铲搅动锅中心区域物料,副搅拌铲搅动锅外围区域物料。副搅拌铲不仅可以搅拌物料,还可以将锅边缘物料导入锅中心区域。另外,正反转主副搅拌铲各自搅动的物料在相互接近时产生冲击互混,可加强对物料的搅动。

正反转搅拌机构主副搅拌铲具有很好的可扩展性,搅拌片可根据实际情况有多种形式的布置,其形成的搅拌效果也有所差异。但是主搅拌铲靠近旋转中心的区域线速度很小,理论极限值为零,要想该区域搅拌充分需依靠物料之间的互混和冲击,以及主搅拌片加、减速或者离心力形成的惯性冲击。



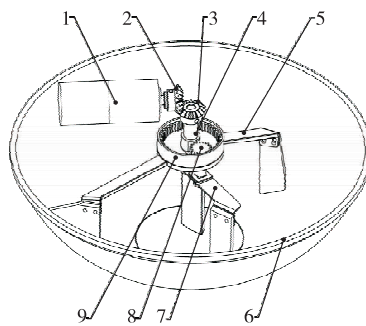
1. 减速电机 2. 主动锥齿轮 3. 搅拌内轴 4. 上锥齿轮 5. 下锥齿轮轴 6. 锅 7. 主搅拌铲 8. 副搅拌铲

图 2 正反转搅拌机构方案图

Figure 2 Schematic diagram of forward and backward stirring mechanism

1.3 行星搅拌机构设计

行星搅拌机构方案如图 3 所示,减速电机 1 水平布置,其输出轴与主动锥齿轮 2 固连,主动锥齿轮 2 与从动锥齿轮 3 啮合,二者齿数相同。从动锥齿轮 3 固定在搅拌轴 4 的上端,搅拌轴 4 下端与副搅拌铲 5 固连,副搅拌



1. 减速电机 2. 主动锥齿轮 3. 从动锥齿轮 4. 搅拌轴 5. 副搅拌铲 6. 锅 7. 主搅拌铲 8. 行星齿轮轴 9. 内齿轮

图 3 行星搅拌机构方案图

Figure 3 Schematic diagram of planetary stirring mechanism

片 5 与搅拌轴 4 径向呈夹角。副搅拌铲 5 上布置有行星齿轮轴 8。行星齿轮轴 8 下端与主搅拌铲 7 相连,上端与内齿轮 9 内啮合,内齿轮 9 齿数 50,行星齿轮轴 8 齿数 17。内齿轮 9 与机座固连。锅 7 与搅拌轴 4 同轴,并位于主副搅拌铲的下方。

主搅拌铲绕搅拌轴公转同时绕行星齿轮轴自转,搅动锅中心区域物料。副搅拌铲搅动锅外围区域物料,还可以将锅边缘物料导入锅中心区域。另外,主副搅拌铲的旋转方向相反,各自搅动的物料在相互接近时产生冲击互混,而且主搅拌铲本身的旋转速度大约是副搅拌铲转动速度的 3 倍,加之运动轨迹为平面螺旋扫描,因而该方式能使物料得到充分搅动。

2 多体动力学分析

根据离散元物料简化方法,用球形颗粒集合来模拟菜肴物料,建立多体动力学仿真模型,模拟搅拌机构搅拌物料运动状态。

2.1 颗粒流的离散元法

颗粒流是指颗粒物质在内外力综合作用下发生的类似于流体的运动状态^[10]。颗粒流现象广泛存在于自然界中,诸如泥石流、雪崩、滑坡等。随着人们对颗粒流机理认识的深入以及现代计算机技术的发展,数值模拟方法被广泛用于模拟和分析颗粒流问题^[11-15]。目前常用的数值模拟方法有连续介质模型和非连续介质模型,其中非连续介质模型中最常用的是离散元法^[16]。研究^[11-15]实践表明,基于离散元的数值模拟方式是散体力学分析的一种有效的工具。

离散元法的思想源于早期的分子动力学。其基本思想是将研究对象分离为刚性元素的集合,使每个元素满足牛顿第二定律,并求解各元素的运动方程,从而求得研究对象的整体运动形态。

设时间步 Δt ,球颗粒的平动方程和转动方程为:

$$\begin{cases} F_i - \beta_g V_i = \frac{m\Delta V_i}{\Delta t} \\ M_i - \beta_g \omega_i = \frac{I\Delta \omega_i}{\Delta t} \end{cases} \quad (i = 1, 2, 3, \dots), \quad (1)$$

式中:

F_i ——不平衡力, N;

M_i ——不平衡力矩, N·m;

V_i 、 ΔV_i ——分别为线速度及增量, m/s;

ω_i 、 $\Delta \omega_i$ ——分别为角速度及增量, rad/s;

m ——质量, kg;

I ——转动惯量, kg·m²;

β_g ——整体阻尼, N·s/m。

解式(1)可得线速度和角速度, 然后根据式(2)可求得该球的新位置。由各球的新位置坐标可决定相邻颗粒是否接触。相互接触的球会产生假性重叠 α , 再由接触模型公式分别求出接触力 F_i 和 M_i 返归式(1)迭代。

$$\begin{cases} X_{i+1} = X_i + V_i \Delta t \\ \Phi_{i+1} = \Phi_i + \omega_i \Delta t \end{cases} \quad (i = 1, 2, 3, \dots), \quad (2)$$

式中:

X_i ——平动位置, m;

V_i ——速度, m/s;

Φ_i ——转动位置, rad;

ω_i ——角速度, rad/s。

2.2 多体动力学分析前处理

利用 CREO 创建搅拌机构三维模型, 模型进行适当简化, 比如去掉不重要零件及零部件结构局部简化等。之后将模型以 *.x_t 中性格式导入多体动力学软件中, 并对模型进行检查和修复^[1]。多体动力学分析前处理还包括定义相互作用及边界条件、定义材料、定义模拟菜肴的颗粒、设置驱动及参数、设置结果输出参数等。3 种搅拌机构参数设置保持一致, 菜肴球颗粒直径 12 mm, 搅拌主轴驱动参数设置为 50 r/min, 转动时间设置为 4 s(在此时间下主轴可转 3.3 r), 球颗粒与搅拌片等均设置为刚体^[17]。

2.3 多体动力学分析结果

前处理设置完后提交求解, 可以得到搅拌机构搅拌菜肴颗粒动画视频, 通过动画视频可以直观地了解搅拌情况。为了更好地显示仿真结果, 选取不同径向分布的颗粒进行标识, 得到其运动轨迹, 以更加准确地判断搅拌机构搅拌性能。

2.3.1 单轴搅拌机构结果分析 根据单轴搅拌机构仿真动画可知, 颗粒周向运动较明显, 径向窜动不明显, 不易翻滚, 相互之间也不易分散。选取 2 颗颗粒进行标识所得运动轨迹如图 4 所示。

由图 4 可知: 颗粒周向运动明显, 并且周向运动轨迹较长, 说明颗粒周向运动速度较大, 径向窜动不明显; 颗

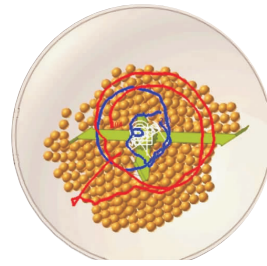


图 4 单轴搅拌机构 2 颗粒运动轨迹

Figure 4 Two particles movement trajectory of single-axis stirring mechanism

粒运动轨迹较为简单, 没有太多的停留、波折和局部转圈, 表明物料之间冲击少, 颗粒很少翻滚。说明单轴搅拌机构搅拌效果较差。

2.3.2 正反转搅拌机构结果分析 根据正反转搅拌机构仿真动画可知, 颗粒成组不明显, 颗粒之间较容易分散且互混较明显, 径向窜动也较好。选取 2 颗颗粒进行标识所得运动轨迹如图 5 所示。

由图 5 可知: 颗粒周向运动明显, 径向窜动较明显; 颗粒运动轨迹较复杂, 有较多的停留、波折和局部转圈, 表明物料之间冲击较多, 颗粒翻滚较多。说明正反转搅拌机构搅拌效果较好。

2.3.3 行星搅拌机构结果分析 根据行星搅拌机构仿真动画可知, 颗粒很容易分散开, 径向窜动和互混均明显。选取 2 颗颗粒进行标识所得运动轨迹如图 6 所示。

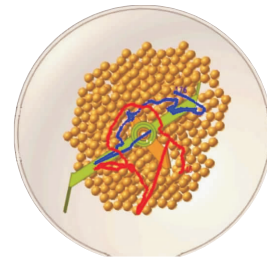


图 5 正反转搅拌机构 2 颗粒运动轨迹

Figure 5 Two particles movement trajectory of forward and backward stirring mechanism

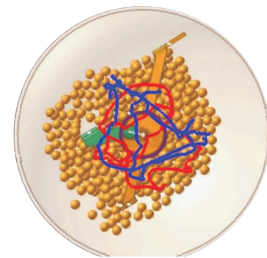


图 6 行星搅拌机构 2 颗粒运动轨迹

Figure 6 Two particles movement trajectory of planetary stirring mechanism

由图 6 可知:颗粒做周向及径向运动,且运动轨迹很复杂,覆盖面广,说明运动特性很好;颗粒在某些点会临时停留并在局部转圈,说明在物料的相互冲击下,颗粒不断翻滚。相比正反转搅拌机构颗粒运动轨迹曲线图,行星搅拌机构颗粒运动轨迹曲线更长,说明颗粒在相同时间作用下运动速度更快,而且翻转更频繁。说明行星搅拌机构搅拌效果相比正反转搅拌机构更优。

为了更全面地确定行星搅拌机构的搅拌效果,将搅拌时间设置延长到 12 s,即 10 r。沿径向方向选取 4 颗颗粒分别标识为 a、b、c 和 d,得到的运动轨迹如图 7 所示。由图 7 可知,行星搅拌机构的搅拌效果理想,满足设计需求。

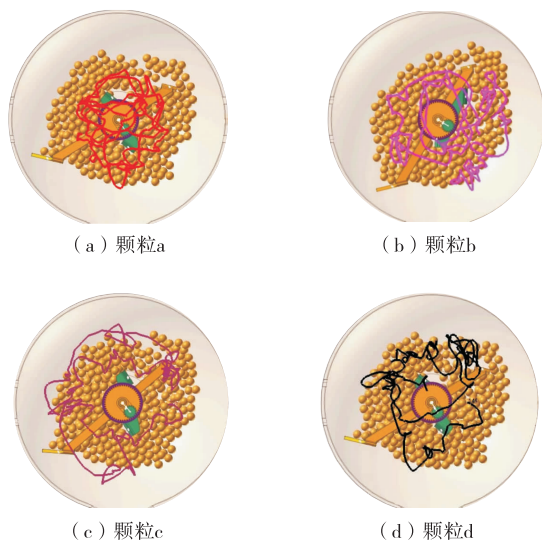


图 7 行星搅拌机构对物料的搅拌效果

Figure 7 Stirring effect of planetary stirring mechanism on materials

3 结论

试验对某类型烹饪机器人设计的 3 款搅拌机构进行了研究,通过多体动力学仿真软件对其进行分析。研究表明:单轴搅拌机构搅拌效果最差,行星搅拌机构搅拌性能最优,其运动轨迹复杂,能使物料充分混合。试验行星搅拌机构适用于商用餐厅或家用烹饪机器人。后续将通过多体动力学仿真软件对搅拌片的流向进行优化,以期获得更好的搅拌效果。

参考文献

[1] YAN Wei-xin, GUAN En-guang, MA Wen-tao, et al. Automatic cooking robot with a novel feeding system[C]// ICIRA 2010, Part I, LNAI 6424. Berlin Heidelberg GER: Springer-Verlag, 2010: 519-529.

[2] 刘银华, 闫维新, 周晓燕, 等. 自动烹饪机器人[J]. 上海交通大学学报, 2007(1): 119-122.

[3] 祝俊. 智能炒菜机及其关键技术的研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2014: 6-10.

[4] 李鲜明. 炒菜机关键机构的研究与设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006: 3-24.

[5] 雷鸣, 管声启, 王杰, 等. 新型商用炒菜机器人搅拌系统结构与轨迹分析[J]. 西安理工大学学报, 2019, 33(6): 660-665.

[6] 彭放. 家用炒菜机的关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016: 11-22.

[7] 周晓燕, 朱云龙, 张建军, 等. 一种用于烹调设备的翻动工具: 中国, 200610035592.6[P]. 2007-11-28.

[8] 贾晓芸, 葛文化, 邓鹏飞, 等. 用于烹饪机器人的搅拌组件及烹饪机器人: 中国, 201810082713.5[P]. 2018-06-08.

[9] 艾德江, 李亚明, 林国汉, 等. 一种烹饪系统: 中国, 201910845997.3[P]. 2019-12-13.

[10] 郭鸿. 复杂颗粒流体力学特征仿真模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 1-3.

[11] 焦志勇, 段玉如, 杨春宏, 等. 基于 RecurDyn 的斗轮取料机铲斗工作过程仿真[J]. 天津科技大学学报, 2011, 26(5): 44-46, 60.

[12] 贾树强, 尚涛, 王昕, 等. 新型摆动式球磨机运动机理及性能[J]. 吉林大学学报, 2012, 42(1): 71-76.

[13] 张翀, 舒赣平. 筒仓卸料的颗粒流模拟及仓壁侧压力研究[J]. 四川建筑科学研究, 2016, 42(4): 11-16.

[14] 何华, 陈兴强, 刘春景. 基于颗粒流理论的敞车静侧压力研究[J]. 华东交通大学学报, 2018, 35(5): 17-21.

[15] 李力, 吕敬科. 基于颗粒流理论的海底沉积物剪切特性模拟研究[J]. 矿冶工程, 2017(6): 1-6.

[16] 杨洋, 唐寿高. 颗粒流的离散元法模拟及其进展[J]. 中国粉体技术, 2006, 13(5): 38-43.

[17] 孙其诚, 王光谦. 颗粒流动力学及其离散模型评述[J]. 力学进展, 2008, 38(1): 87-100.

(上接第 62 页)

[14] 吴振兴, 程果, 肖西志, 等. 固相萃取-液相色谱-串联质谱法检测番茄酱中 6 种交链孢霉毒素[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(3): 700-704.

[15] 周贻兵, 李磊, 吴玉田, 等. QuEChERS 净化-超高效液相色谱-串联质谱法测定番茄中 5 种链格孢霉毒素的含量[J]. 理化检验: 化学分册, 2019, 55(9): 1 036-1 041.

[16] 何强, 李建华, 孔祥虹, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法同时测定浓缩苹果汁中的 4 种链格孢霉毒素[J]. 色谱, 2010, 28(12): 1 128-1 131.

[17] 马良, 钟红, 王佳曼, 等. 细交链格孢菌酮酸化学发光酶联免疫吸附分析方法[J]. 分析实验室, 2017, 36(6): 667-670.

[18] 向俊, 王芳斌, 荆辉华, 等. 基于不同检测器高效液相色谱法测定食品中糖醇的研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(9): 92-95.

[19] 邓维琴, 李阿霜, 彭贤, 等. 高效液相色谱-紫外检测法测定微生物降解体系中己烯雌酚含量[J]. 食品与机械, 2016, 32(1): 51-55.

[20] PAVÓN M Á, LUNA A, DE LA CRUZ S, et al. PCR-based assay for the detection of Alternaria species and correlation with HPLC determination of altenuene, alternariol and alternariol monomethyl ether production in tomato products[J]. Food Control, 2012, 25(1): 45-52.