

控制与决策

Control and Decision

基于一致性算法的多模式搅拌器微波加热系统温度均匀性优化

杨彪, 刘志邦, 李鑫培, 周烈兴, 邓卓, 母其海, 朱娜

引用本文:

杨彪, 刘志邦, 李鑫培, 等. 基于一致性算法的多模式搅拌器微波加热系统温度均匀性优化[J]. *控制与决策*, 2021, 36(12): 2901–2909.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0986>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

孤岛微电网异构电池储能系统的分布式有限时间次级控制

Distributed finite-time secondary control for heterogeneous battery energy storage systems in an islanded microgrid
控制与决策. 2021, 36(8): 2034–2041 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0012>

乘型一致性毕达哥拉斯模糊偏好关系

Multiplicative consistent Pythagorean fuzzy preference relation
控制与决策. 2021, 36(4): 1010–1016 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0967>

分布式多无人机的时变编队非线性控制设计

Time-varying formation nonlinear control of distributed multiple UAVs
控制与决策. 2021, 36(10): 2490–2496 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0136>

有向切换拓扑条件下多航天器分组姿态协同控制

Group attitude coordinated control of multi-spacecraft with directed switching topologies
控制与决策. 2021, 36(10): 2389–2398 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0311>

自适应事件触发的马尔科夫跳变多智能体系统一致性

Adaptive event-triggered consensus for Markovian jumping multi-agent systems
控制与决策. 2020, 35(11): 2780–2786 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1507>

基于一致性算法的多模式搅拌器微波加热系统温度均匀性优化

杨彪^{1,2,3†}, 刘志邦¹, 李鑫培³, 周烈兴³, 邓卓¹, 母其海¹, 朱娜¹

(1. 昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 昆明 650500; 2. 昆明理工大学 云南省人工智能重点实验室, 昆明 650500; 3. 昆明理工大学 非常规冶金教育部重点实验室, 昆明 650093)

摘要: 微波加热的内部传热方式及热点的随机分布特性导致采用常规测量方法难以获得温度的准确信息, 在改进机械设计的研究中, 螺旋辐射单模式搅拌器微波加热系统能够改善温度分布的均匀性. 在单模式搅拌器的基础上, 进一步探索具有多个模式搅拌器的微波加热系统的温度均匀性及其计算问题; 同时, 由于微波加热过程中多物理场的深度耦合及边界条件的时变特性, 如何协同模式搅拌器的状态特征与有效计算温度场, 开展温度均匀性的优化处理成为关注的重点. 为此, 应用一致性算法表达模式搅拌器的状态信息, 对温度场分布的均匀性进行优化计算. 一方面通过一致性算法将加热空间电磁场边界条件的时变特性用编队队形表征, 组合模式搅拌器的位置状态信息表达编队队形的变换; 另一方面由整型变量与连续型变量混合的优化问题构建温度有限元模型, 并对温度场的均匀分布优化解开展有效计算. 数值计算结果验证了所提出一致性算法及其计算方法对微波加热温度均匀性的优化是可行和高效的.

关键词: 微波加热; 协同控制; 模式搅拌器; 一致性算法; 有限元分析

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.0986

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 杨彪, 刘志邦, 李鑫培, 等. 基于一致性算法的多模式搅拌器微波加热系统温度均匀性优化[J]. 控制与决策, 2021, 36(12): 2901-2909.

Temperature uniformity optimization of multi-mode stirrer microwave heating system based on consensus algorithm

YANG Biao^{1,2,3†}, LIU Zhi-bang¹, LI Xin-pei³, ZHOU Lie-xing³, DENG Zhuo¹, MU Qi-hai¹, ZHU Na¹

(1. Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. Yunnan Key Laboratory of Artificial Intelligence, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 3. Key Laboratory of Unconventional Metallurgy of Ministry of Education, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: The internal heat transfer mode and the random distribution of hot spots of microwave heating make it difficult to obtain the accurate temperature by conventional measurement. According to the improvement of mechanical design research, it can be found that the microwave heating system with rotary radiation single-mode stirrers can improve the uniformity of temperature distribution at present. Based on the single-mode stirrers, it is necessary to explore furtherly the temperature uniformity and its calculation of microwave heating system with multiple-mode stirrers in this paper. At the same time, due to the deep coupling of the multiple physical field and the time-varying characteristics of boundary conditions in the microwave heating system, the focuses have been on how to coordinate the state characteristics of the mode stirrers and effectively calculate the temperature field to carry out the optimization of temperature uniformity. The consensus algorithm has been used to describe the state information of the mode stirrers, and the optimal value of the uniform distribution of the temperature field can be effectively worked out. On the one hand, the time-varying field boundary conditions of the electromagnetic in heated space are characterized by formation, and the transformation formation is expressed by the combination of position and state information of mode stirrers. On the other hand, the finite element model of the temperature is constructed by the optimization problem of mixing integer and continuous variables, and the optimal solution of the uniform distribution of the temperature field is calculated effectively. The results of numerical calculation show that the proposed consensus algorithm and its calculation method are feasible, efficient and accurate to optimize the uniformity of temperature distribution of microwave heating.

Keywords: microwave heating; cooperative control; mode stirrer; consensus algorithm; finite element analysis

收稿日期: 2020-07-18; 修回日期: 2020-09-29.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61863020).

责任编辑: 张国山.

†通讯作者. E-mail: ybiaocn@163.com.

0 引言

微波加热与传统的加热方式相比,可以直接与物料内部的极性分子和带电粒子相互作用进行加热,具有加热效率高、从内部进行加热和选择性加热等特点^[1].但物料受热不均匀是微波加热需要解决的主要问题之一.由于物料在微波加热过程中热点的产生具有随机性,不但难以对其温度进行测量,且易引发加热失控,降低产品质量甚至引发爆炸等安全事故^[2].

专家们研究了许多有效改善微波加热均匀性的方法.如引入转盘或传送带改变物料在腔体中的位置,优化微波馈送方式,通过模式搅拌器改变谐振腔内的电场分布等^[3-5].Jain等^[6]分析了金属食品载体对电磁场分布的影响,通过对转盘进行合理设计,使加热后的物料温度分布更加均匀.从改进微波馈送方式的角度出发,Zhu等^[7]设计了一种旋转辐射结构,并以马铃薯为介质与传统转盘及静态微波加热效果进行了比较.Tang等^[8]基于积分方程理论,对微波频率发生微小变化时的加热均匀性进行分析,发现采用频率选择方法可以有效地提高加热均匀性和加热效率.Ye等^[9]基于隐函数与水平集算法对微波加热过程中快速旋转的模式搅拌器与慢速运动的转盘进行了数值计算,并分析了模式搅拌器与马铃薯试样在不同距离时的加热均匀性与加热效率.

模式搅拌器作为一种可以移动的金属元件,在微波加热过程中以旋转的方式对微波产生反射,可改变谐振腔内的场分布,对物料所在位置处的电磁边界条件进行调节.由文献[9]的研究结果可知,当模式搅拌器与物料之间的距离产生变化时,对加热效果的影响是显著的.但这一研究并没有考虑多个模式搅拌器与物料之间的距离连续变化对微波加热均匀性的影响.因此,可应用一致性算法表征多模式搅拌器编队队形变换的状态信息,实现多个模式搅拌器编队的一致性,更加灵活地调节谐振腔内的场分布,减少局部过热现象的产生,抑制随机分布的热点出现,使微波加热的均匀性问题得到进一步优化.

近些年,由于移动机器人集群控制、无人飞行器编队、航天器姿态校准等方面的实际应用需求日益增多.基于图论的多智能体分布式控制理论得到了迅速发展.一致性算法作为多智能体分布式控制理论的重要研究内容受到了学者们的广泛关注^[10-12].Zheng等^[13]基于代数图论与系统变换的方法,分析了不同动态智能体的交互方式,提出了两种适用于混合多智能体系统的一致性算法.Wang等^[14]研究了有向

图通信拓扑非线性多智能体系统的分布式动态平均一致性问题,建立了使一阶非线性系统状态收敛至平均值的分布式一致性算法.Han等^[15]通过代数图论,对固定拓扑和切换拓扑情况下非线性领航-跟随者多智能体系统的多编队控制问题进行了研究,给出了系统达到并保持多编队控制的充分条件.

本文提出一种新型多模式搅拌器微波加热数值计算模型.从改变谐振腔内电场分布的角度出发,应用一致性算法实现多个模式搅拌器的队形变换,调节谐振腔内的时变电磁边界条件,优化温度场分布的均匀性.应用COMSOL多物理场数值分析技术,采用有限元(FEM)与时域有限差分(FDTD)方法,构建了解决整型变量与连续型变量混合优化问题的数值计算模型.实验结果表明,本文提出的多模式搅拌器微波加热模型相比于单模式搅拌器微波加热可进一步有效优化微波加热的温度分布均匀性.

1 预备知识

1.1 符号和图论

图 $G = (V, \varepsilon, A)$ 用来描述通信拓扑结构.其中: $V = \{1, 2, \dots, N\}$ 为有限节点的集合, N 为节点数目, $\varepsilon \subseteq V \times V$ 为有向边集合, $A = [a_{ij}] \in R^{n \times n}$ 为邻接矩阵.在有向图中, $(i, j) \in \varepsilon$ 说明节点 j 可接收节点 i 的信息且节点 i 为节点 j 的一个邻居.节点 i 的邻居集由 $N = \{j \in V : (i, j), j \neq i\}$ 表示.如果有向图 G 的每个节点到其他所有节点都存在一条有向路径,则称图 G 是强连通的.如果存在一个根节点,该节点有一条通往其他所有节点的有向路径,则称图中含有向生成树. $D = \text{diag}(d_1, d_2, \dots, d_n)$ 为入度矩阵, 对角元素 $d_i = \sum_{j=1}^N a_{ji}, i \in V$. $L = [l_{ij}] \in R^{n \times n}$ 为对

应的拉普拉斯矩阵, $l_{ii} = \sum_{j=1, j \neq i}^N a_{ji}, l_{ij} = -a_{ij}, i \neq j$. 因为 L 的各行元素和为0,所以0为 L 的一个特征值,对应的特征向量为 $(1, \dots, 1)^T \in R^{n \times 1}$. 在无向图中 $(i, j) \in \varepsilon$ 与 $(j, i) \in \varepsilon$ 等价,即智能体 i 和 j 可以互相接收到对方的信息.邻接矩阵 A 定义为当 $(i, j) \in \varepsilon$ 时 a_{ij} 是一个正权值,否则 $a_{ij} = 0$. 当任意两个不同节点之间存在一条无向路径时该无向图是连通的.

1.2 微波加热控制方程

在微波加热系统中振荡的电磁波由振荡的电场和磁场组成,麦克斯韦方程组表述了电磁场在空间和时间上的联系,有

$$\begin{cases} \nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}; \\ \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}; \\ \nabla \cdot D = \rho; \\ \nabla \cdot B = 0. \end{cases} \quad (1)$$

其中: H 表示磁场强度, J 表示电流密度, E 表示电场强度, B 表示磁感应强度, D 表示电位移矢量, ρ 表示电荷密度.

谐振腔内的电磁能量分布可由式(1)导出的 Helmholtz 方程^[16]表示, 即

$$\begin{aligned} \nabla \times \mu_r^{-1}(\nabla \times E) - k_0^2 \left(\varepsilon - \frac{j\sigma}{\omega} \right) E &= 0, \\ k_0 &= \omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}. \end{aligned} \quad (2)$$

其中: μ_r 表示相对磁导率, k_0 表示自由空间的波数, ε 表示介质的相对介电常数, ε_0 表示真空介电常数, σ 表示电导率, ω 表示角频率, μ_0 表示真空磁导率.

在微波加热过程中, 热能由物料的介电损耗和磁滞损耗转化而成, 即

$$Q = \frac{1}{2} \omega [\varepsilon_0 \varepsilon'' |E|^2 + \mu_0 \mu'' |H|^2]. \quad (3)$$

其中: Q 表示微波耗散功率, ε'' 表示介电常数虚部, μ'' 表示磁导率虚部. 当物料在加热过程中没有明显磁化时, 物料的磁滞损耗可以忽略, 式(3)可简化为

$$Q = \frac{1}{2} \omega \varepsilon_0 \varepsilon'' |E|^2. \quad (4)$$

再由传热控制方程

$$Q + k \nabla^2 T = \rho C_\rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

计算出物料的温度分布情况. 其中: ρ 、 C_ρ 、 k 分别表示物料的密度、比热容及导热系数.

将式(4)代入(5)可表示微波加热过程中电场分布与物料温度分布之间的耦合关系, 有

$$\frac{1}{2} \omega \varepsilon_0 \varepsilon'' |E|^2 + k \nabla^2 T = \rho C_\rho \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (6)$$

由式(6)可知, 通过改变谐振腔内微波角频率及电场分布情况, 可以影响加热物料温度分布, 从而改善物料在加热过程中的温升效果.

2 一致性算法及其实现

2.1 一致性算法

固定拓扑连续时间多模式搅拌器微波加热系统的编队状态信息

$$\dot{x}_i(t) = u_i(t). \quad (7)$$

其中: t 表示时间, $\dot{x}_i(t) \in R^n$ 和 $u_i(t) \in R^n$ 分别表示第 i 个模式搅拌器的状态信息和输入.

为说明一致性算法应用于多模式搅拌器微波加热系统的具体实现过程, 现给出如下定理.

定理1 若 $A = [a_{ij}] \in R^{n \times n}$ 为定常矩阵, 当有向图 G 强连通且平衡或无向图 G 连通时, 基本一致性算法^[17-18]

$$u_i(t) = - \sum_{j=1}^n a_{ij} (x_i(t) - x_j(t)) \quad (8)$$

实现渐近一致, 即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|x_i(t) - x_j(t)\| = 0. \quad (9)$$

一致性算法广泛应用于多智能体系统. 给出连续时间多智能体系统的期望状态偏差一致性算法^[19]

$$\begin{aligned} u_i(t) &= \dot{\delta}_i(t) - \sum_{j=1}^n a_{ij}(t) [(x_i(t) - x_j(t)) - \\ &(\delta_i(t) - \delta_j(t))]. \end{aligned} \quad (10)$$

其中: $A = [a_{ij}]$ 为无向图 G 所对应的邻接矩阵, $\dot{\delta}_i(t)$ 为期望状态信息, $\delta_i(t) - \delta_j(t)$ 为 $\xi_i(t)$ 与 $\xi_j(t)$ 的期望状态偏差.

2.2 多模式搅拌器的一致性算法实现

由式(7)和(10)可得

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) - \dot{\delta}_i(t) &= \\ - \sum_{j=1}^n a_{ij}(t) [(x_i(t) - \delta_i(t)) - (x_j(t) - \delta_j(t))]. \end{aligned} \quad (11)$$

令 $\tilde{x}_i(t) = x_i(t) - \delta_i(t)$, 有

$$\dot{\tilde{x}}_i(t) = - \sum_{j=1}^n a_{ij}(t) [\tilde{x}_i(t) - \tilde{x}_j(t)]. \quad (12)$$

再由定理1可知, 当时不变系统通信拓扑的无向图 G 连通时, 有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\tilde{x}_i(t) - \tilde{x}_j(t)\| = 0, \quad (13)$$

即 $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{x}_i(t) - \dot{\delta}_i(t) = 0$.

多模式搅拌器的一致性算法可表示成如下矩阵形式:

$$\dot{x}(t) = \dot{\delta}(t) - L[x(t) - \delta(t)]. \quad (14)$$

其中: $\delta(t)$ 为期望状态偏差向量, 根据需要恰当地选取 $\delta(t)$ 可使各模式搅拌器状态信息偏差有限时间渐近收敛于期望值. 模式搅拌器的初始位置信息与不同时刻的期望偏差信息可由如下向量表示:

$$\delta(t)_{x_i} = \begin{bmatrix} x_{1i} \\ x_{2i} \\ \vdots \\ x_{(n-1)i} \\ x_n \end{bmatrix}, \quad \delta(t)_{y_i} = \begin{bmatrix} y_{1i} \\ y_{2i} \\ \vdots \\ y_{(n-1)i} \\ y_n \end{bmatrix},$$

$$\delta(t)_{Z_i} = \begin{bmatrix} z_{1i} \\ z_{2i} \\ \vdots \\ z_{(n-1)i} \\ z_n \end{bmatrix}$$

给出算法的伪代码如下。

- 1) 节点 i 发送自身信息并接收相邻节点信息
- 2) for $i = 1; i < n; i++$
- 3) for $j = 1; j < n; j++$
- 4) if ($i \neq j$)
- 5) if (节点 i 接收到节点 j 的信息)
- 6) { $a_{i,j} = 1; d_{i,i}++$ }
- 8) end /* 计算通信拓扑邻接矩阵及入度矩阵对应项元素 */
- 9) end
- 10) for $i = 1; i < n; i++$
- 11) for $j = 1; j < n; j++$
- 12) { $l_{i,i} = d_{i,i}; l_{i,j} = d_{i,j} - a_{i,j}$ }
- 14) end
- 15) end
- 16) do $L \leftarrow l_{i,j}$ 通信拓扑的拉普拉斯矩阵
- 17) 计算当前各节点的相对位置信息 $x(t)$
- 18) update 期望状态偏差向量 $\delta(t)$
- 19) return $x(t), \delta(t)$
- 20) end

2.3 参数设计与仿真

仿真模型由微波反应腔体、5个模式搅拌器、马铃薯块及位于谐振腔侧面的微波源组成。模式搅拌器搅拌拨片的材料为铜,轴体由聚四氟乙烯 (PTFE) 材料制成,其相对介电常数为 $2.1 - j0.0003$ ^[20],介电损耗角很小,为透波材料,且轴体体积较小,进行数值计算时可忽略搅拌器轴体对微波加热过程的影响。微波加热系统的模型尺寸如图1所示。

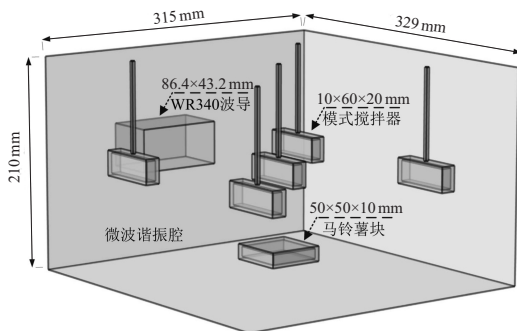


图1 微波加热三维几何模型

微波加热几何模型的俯视图如图2所示,为了更加清楚地表述各模式搅拌器在腔体内的位置分布,图中分别标注了各模式搅拌器的编号及坐标。其中将腔体中心位置的模式搅拌器3作为基准位置,其坐标为(0,0),其余4个模式搅拌器均匀分布在四周,坐标分别为模式搅拌器1(-100,100),模式搅拌器2(-100,-100),模式搅拌器4(100,100)及模式搅拌器5(100,-100)。

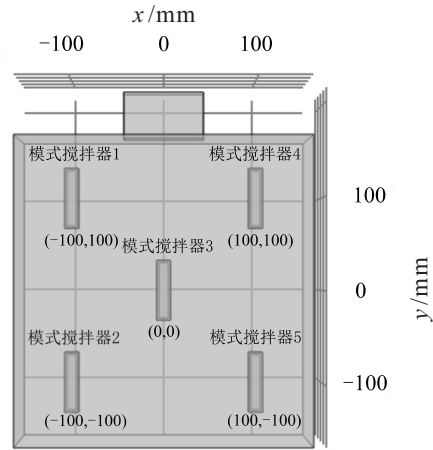


图2 几何模型俯视图

假定微波加热系统的多个模式搅拌器之间具备通信单元,可感知相邻模式搅拌器的位置等状态信息。各模式搅拌器之间的通信结构为固定拓扑的无向连通图,即 $L(t) = L, L^T = L, t \in \forall$ 。其中: L 表示拉普拉斯矩阵, t 表示时间。其通信拓扑结构如图3所示。

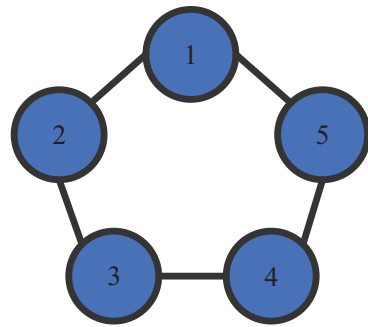
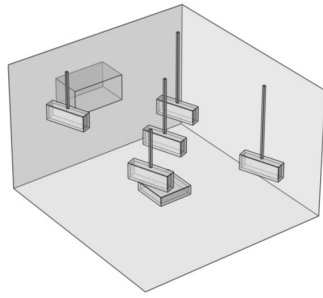


图3 系统通信拓扑结构

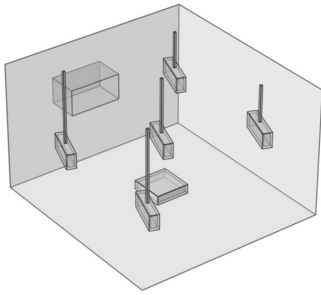
对应的拉普拉斯矩阵为

$$L = D - A = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 2 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

在该模型中,将各模式搅拌器之间相对位置偏差作为期望的状态偏差。模型中设定的两种队形如图4所示。



(a) 编队队形1



(b) 编队队形2

图4 多模式搅拌器编队队形

各模式搅拌器在不同时刻所期望的相对位置关系可通过相对位置偏差向量进行描述. 由于本文设计的多模式搅拌器编队队形只需进行OZ轴方向的位置变化, XOY平面内的相对位置偏差向量不随时间和队形的变化而改变.

$$\delta(t)_X = \begin{bmatrix} -100 \\ -100 \\ 0 \\ 100 \\ 100 \end{bmatrix}, \delta(t)_Y = \begin{bmatrix} 100 \\ -100 \\ 0 \\ 100 \\ -100 \end{bmatrix},$$

$$\delta(3)_Z = \begin{bmatrix} -30 \\ -30 \\ 0 \\ 30 \\ 30 \end{bmatrix}, \delta(6)_Z = \begin{bmatrix} 30 \\ 30 \\ 0 \\ -30 \\ -30 \end{bmatrix}, \delta(9)_Z = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

其中: $\delta(t)_X$ 、 $\delta(t)_Y$ 为各模式搅拌器在 XOY 平面内的位置信息, $\delta(3)_Z$ 为初始基准状态, $\delta(6)_Z$ 与 $\delta(9)_Z$ 分别对应3次变换的相对位置偏差向量. 5个模式搅拌器通过一致性协议实现3次变换的仿真结果如图5所示.

由图5可以得出, 各模式搅拌器可通过具有期望状态偏差的一致算法实现相对位置变换, 且每次完成队形变换所需的时间约为3s. 其中: 位于腔体中心的模式搅拌器始终保持在固定位置, 其余4个模式搅拌器分别根据邻居的状态信息沿Z轴方向改变自身位

置, 以实现多模式搅拌器的编队.

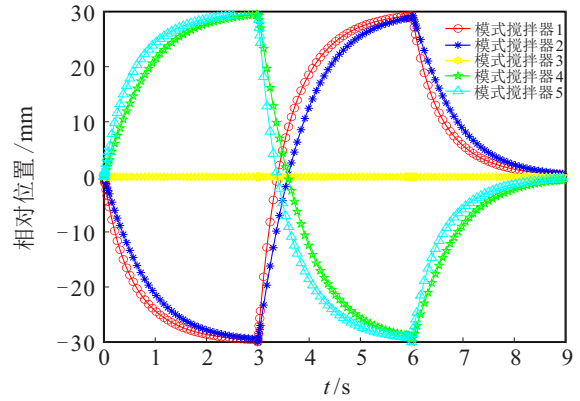


图5 模式搅拌器相对位置

3 数值计算与分析

3.1 模型参数与边界条件

系统初始温度为20°C, 使用WR340标准波导, 馈送的微波功率为500 W, 频率为2.45 GHz, 加热时间为9 s. 微波谐振腔与波导壁的材料为铜, 内部为空气域. 模式搅拌器的材料同样设置为铜, 在旋转过程中对微波产生反射改变腔体内的电磁场分布. 为得到更加准确的温度分布情况, 土豆的介电常数定义为随温度变化的函数^[21].

$$\varepsilon(T) = -6.4 \times 10^{-3}T^2 + 2 \times 10^{-1}T + 56.8 - j(-1 \times 10^{-4}T^2 - 1.08 \times 10^{-1}T + 16.1). \quad (16)$$

仿真模型中的参数设置如表1所示.

表1 参数设置

属性	材料	量值	来源
相对介电常数	空气	1	文献[21]
	铜	1	COMSOL 内置材料
	马铃薯	$\varepsilon(T)$	文献[22]
相对磁导率	空气	1	文献[21]
	铜	1	COMSOL 内置材料
	马铃薯	1	文献[21]
电导率/(S/m)	空气	0	文献[21]
	铜	5.998×10^7	COMSOL 内置材料
	马铃薯	0	文献[21]
导热系数/(W/m·K)	马铃薯	0.648	文献[21]
密度/(kg/m ³)	马铃薯	1 050	文献[21]
恒压热容/(J/kg·K)	马铃薯	3 640	文献[21]

边界条件的合理设定对于得到准确的仿真结果是非常重要的. 模型中, 谐振腔及波导壁设置为阻抗

边界条件,其控制方程为

$$\sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon - j \frac{\sigma}{\omega}}} n \times H + E - (n \cdot E)n = (n \cdot E_s)n - E_s. \quad (17)$$

对流热通量作为传热边界条件,用于近似样品表面与空气之间的热量交换,定义为如下方程:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} - h(T - T_{\text{air}}) = 0. \quad (18)$$

其中: k 为导热系数, $\partial T/\partial n$ 为温度梯度, T 为马铃薯表面温度, T_{air} 为环境空气温度, h 为传热系数($10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})$),假设马铃薯与腔体底部的接触边界热绝缘^[22],即

$$-nq = 0, \quad (19)$$

其中 q 表示热通量.

为模拟模式搅拌器的自转,将整个加热过程划分为多个时间步^[23-24],并在每一时间步更新搅拌器的初始位置,模式搅拌器各点坐标与时间关系的函数表示如下:

$$\begin{cases} (x^n - x_0) = (x^{n-1} - x_0) \cos(\hat{\omega} \Delta t) - (y^{n-1} - y_0) \sin(\hat{\omega} \Delta t); \\ (y^n - y_0) = (x^{n-1} - x_0) \sin(\hat{\omega} \Delta t) - (y^{n-1} - y_0) \cos(\hat{\omega} \Delta t). \end{cases} \quad (20)$$

其中: (x^n, y^n) 与 (x^{n-1}, y^{n-1}) 分别为模式搅拌器各点在第 n 与 $n - 1$ 时间步的坐标, (x_0, y_0) 为各模式搅拌器自转中心点的坐标, $\hat{\omega}$ 为模式搅拌器的角速度, Δt 为时间步长.

z 轴方向上模式搅拌器各点坐标与时间的关系可由分段函数进行定义,其相邻时间步各参数的继承关系依然满足 $z^n = z^{n-1}$.

每一时间步内假设模式搅拌器是静止的,并在两个时间步之间实现温度的继承.将第 $n - 1$ 个时间步内计算出的温度及电磁场分布作为第 n 个时间步初始状态,并对网格重新进行划分.

仿真模型的网格尺寸根据Nyquist准则进行校准^[25],准则如下:

$$S_{\text{max}} < \frac{\lambda}{2} = \frac{C_0}{2f\sqrt{\epsilon_0 \mu_r}}. \quad (21)$$

其中: λ 为波长, C_0 为真空中光速, ϵ_0 为真空介电常数.

3.2 数值计算结果与讨论

通过COMSOL仿真实验分别对静态微波加热,单模式搅拌器微波加热及多模式搅拌器编队微波加

热过程进行对比分析.首先对数值结果与真实加热结果进行对比以验证模型构建的准确性,实验设备如图6所示.



图6 微波加热装置

在马铃薯表面选取9个采样点进行测温并对比实验结果,图7给出了马铃薯表面俯视图及各测温点的位置坐标.

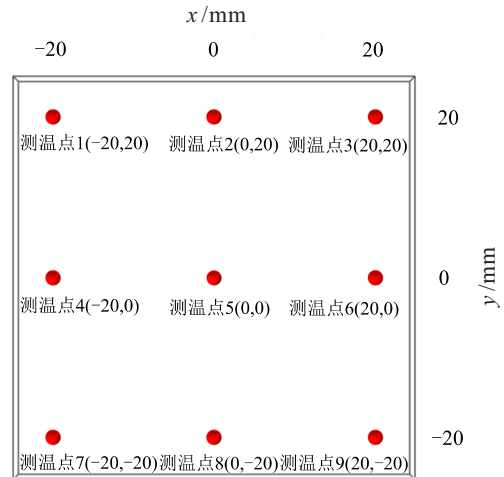


图7 测温点位置坐标

数值计算及真实实验结果如图8所示,在允许的误差范围内,说明所构建模型的数值计算结果可靠.

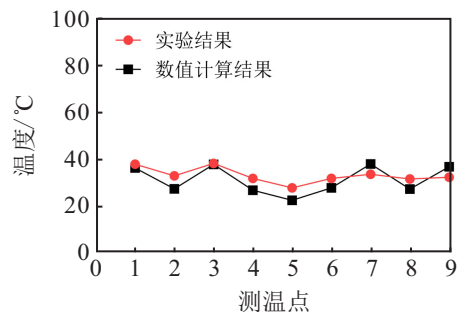


图8 实验对比结果

为研究3种加热方式对微波加热均匀性的影响,保持谐振腔尺寸,微波源功率及马铃薯块位置不变.两种方式加热9s后,马铃薯温度分布情况如图9所示.

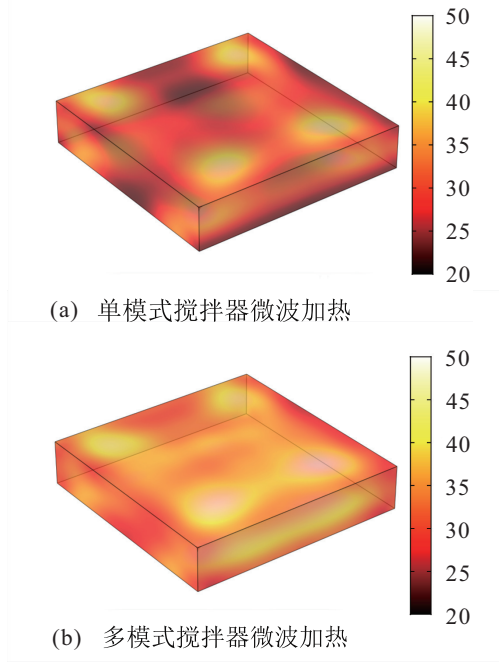


图9 温度分布

由图9可以得出,多模式搅拌器微波加热温度分布及加热速率均优于单模式搅拌器微波加热.其中,多模式搅拌器加热过程不同时刻马铃薯内部电场分布情况如图10所示.

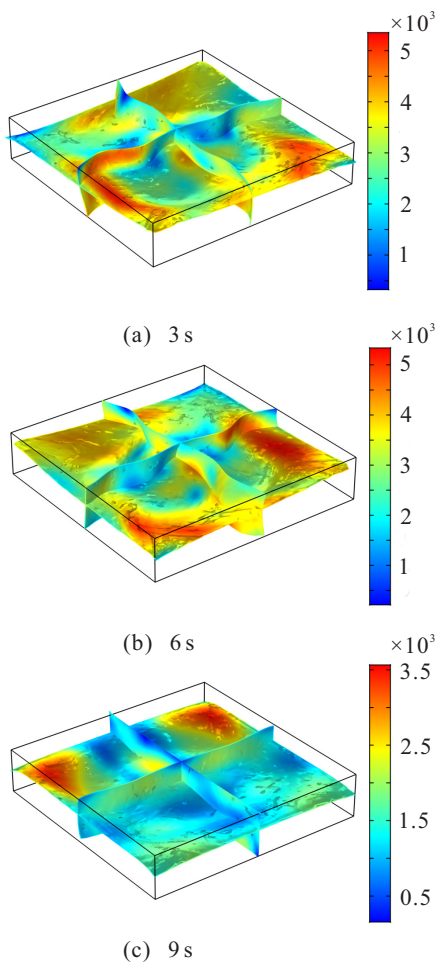


图10 电场分布

为定量分析微波加热的均匀性,引入温度变化系数

$$COV = \frac{\sqrt{\frac{\sum (T_i - T_a)^2}{n}}}{T_a - T_0} \quad (22)$$

其中: n 为温度测量点总数, T_i 为所选测量点温度, T_a 为所选区域平均温度, T_0 为初始平均温度.

3种加热方式对应的不同截面高度(不同层)之间的温度变化系数如表2所示.

表2 温度变化系数

截面高度/cm	静态加热	单模式搅拌器	多模式搅拌器
0.0	0.5902	0.5788	0.3196
0.2	0.4749	0.4874	0.2506
0.4	0.4532	0.4551	0.2431
0.6	0.5055	0.4809	0.2469
0.8	0.5701	0.5141	0.2686
1.0	0.6287	0.5782	0.3424

由表2可知,采用传统静态微波加热方式,马铃薯0.0cm(下表面)、0.2cm、0.4cm、0.6cm、0.8cm、1.0cm(上表面)各截面对应的COV值分别为0.5902、0.4749、0.4532、0.5055、0.5701、0.6287,采用单模式搅拌器微波加热方式各截面对应的COV值分别为0.5788、0.4874、0.4551、0.4809、0.5141、0.5782,而改用多模式搅拌器微波加热方式,马铃薯各截面的COV值分别为0.3196、0.2506、0.2431、0.2469、0.2686、0.3424,均小于静态微波加热及单模式搅拌器微波加热.说明本文提出的多模式搅拌器微波加热模型相比单模式搅拌器微波加热可以有效改善物料温度的均匀性.

分别对3种微波加热方式对应的马铃薯各截面平均温度进行了定量分析,结果如表3所示.

表3 平均温度

截面高度/cm	静态加热/°C	单模式搅拌器/°C	多模式搅拌器/°C
0.0	28.40	29.73	35.19
0.2	28.21	29.18	35.38
0.4	26.78	28.15	34.31
0.6	26.66	28.27	33.95
0.8	27.80	29.42	34.60
1.0	28.30	29.89	34.74

由表3中的数据可知,多模式搅拌器微波加热对应的各截面平均温度在33°C以上,明显高于单模式搅拌器微波加热与静态微波加热方式.表明本文所提出的多模式搅拌器微波加热模型可以有效提高微

波加热速率.

4 结论

本文提出一种新型多模式搅拌器微波加热数值计算方法,并引入一致性算法,建立了微波加热时变电磁边界条件与多物理场深度耦合的多模式搅拌器混合优化数值计算模型.对微波加热过程进行了时间划分,在相邻时间步长之间更新模式搅拌器的位置,并采用时间步继承方式拟合了电磁场与温度场的连续变化,实现了整型变量模式搅拌器与连续型变量温度场及电磁场的混合优化.通过对本文所提出的多模式搅拌器微波加热与静态加热及单模式搅拌器微波加热方式进行比较,多模式搅拌器微波加热的COV值在0.243 1~0.342 4之间,温度均匀性优于静态微波加热(COV: 0.453 2~0.628 7)与单模式搅拌器微波加热(COV: 0.455 1~0.578 8).此外,多模式搅拌器微波加热各截面获得的平均温度在33.95°C~35.38°C之间,明显高于静态微波加热(26.66°C~28.40°C)与单模式搅拌器微波加热(28.15°C~29.89°C).结果表明,所提出的多模式搅拌器微波加热可以在有效改善温度均匀性的同时提高微波加热速率.

参考文献(References)

- [1] Bhattacharya M, Punathil L, Basak T. A theoretical analysis on the effect of containers on the microwave heating of materials[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2017, 82: 145-153.
- [2] Nasrollahzadeh F, Varidi M, Koocheki A. Effect of microwave and conventional heating on structural, functional and antioxidant properties of bovine serum albumin-maltodextrin conjugates through Maillard reaction[J]. *Food Research International*, 2017, 100: 289-297.
- [3] 杨彪, 王世礼, 郭林嘉, 等. 基于动网格的微波加热温度均匀性数值计算方法[J]. *控制与决策*, 2019, 34(1): 113-120.
(Yang B, Wang S L, Guo L J, et al. Numerical calculation of temperature uniformity in microwave heating based on moving mesh[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(1): 113-120.)
- [4] Shi Xin, Li Jiannan, Xiong Qingyu. Research of uniformity evaluation model based on entropy clustering in the microwave heating processes[J]. *Neurocomputing*, 2016, 173: 562-572.
- [5] Geedipalli S S R, Rakesh V, Datta A K. Modeling the heating uniformity contributed by a rotating turntable in microwave ovens[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2007, 82(3): 359-368.
- [6] Jain Deepali, Tang Juming, Liu Frank. Computational evaluation of food carrier designs to improve heating uniformity in microwave assisted thermal pasteurization[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2018, 48: 274-286.
- [7] Zhu Huacheng, He Jianbo, Hong Tao. A rotary radiation structure for microwave heating uniformity improvement[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 141: 648-658.
- [8] Tang Zhengming, Hong Tao, Liao Yinhong. Frequency-selected method to improve microwave heating performance[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 131: 642-648.
- [9] Ye Jinghua, Lan Junqing, Xia Yuan. An approach for simulating the microwave heating process with a slow-rotating sample and a fast-rotating mode stirrer[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 140: 440-452.
- [10] Wang Yujuan, Song Yongduan. Leader-following control of high-order multi-agent systems under directed graphs: Pre-specified finite time approach[J]. *Automatica*, 2018, 87: 113-120.
- [11] Yi Xinlei, Yang Tao, Wu Junfeng, et al. Distributed event-triggered control for global consensus of multi-agent systems with input saturation[J]. *Automatica*, 2019, 100: 1-9.
- [12] Wang Gang. Distributed control of higher-order nonlinear multi-agent systems with unknown non-identical control directions under general directed graphs[J]. *Automatica*, 2019, 110: 108559.
- [13] Zheng Yuanshi, Zhao Qi, Mao Jingying. Second-order consensus of hybrid multi-agent systems[J]. *Systems & Control Letters*, 2019, 125: 51-58.
- [14] Wang Zhu, Wang Dong, Wang Wei. Distributed dynamic average consensus for nonlinear multi-agent systems in the presence of external disturbances over a directed graph[J]. *Information Sciences*, 2019, 479: 40-54.
- [15] Han Tao, Guan Zhi-Hong, Chi Ming. Multi-formation control of nonlinear leader-following multi-agent systems[J]. *ISA Transactions*, 2017, 69: 140-147.
- [16] Torres F, Jecko B. Complete FDTD analysis of microwave heating processes in frequency-dependent and temperature-dependent media[J]. *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, 1997, 45(1): 108-117.
- [17] Reza Olfati-Saber, Richard M Murray. Consensus problems in networks of agents with switching topology

- and time-delays[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(9): 1520-1533.
- [18] Zheng Yuanshi, Wang Long. Consensus of switched multiagent systems[J]. IEEE Transactions on circuits and systems—II: Express Briefs, 2016, 63(3): 314-318.
- [19] Wei Ren, Randal W Beard. Distributed consensus in multi-vehicle cooperative control: Theory and applications[M]. Berlin: Springer, 2008: 1-35.
- [20] 张兆镗, 钟若青. 微波加热技术基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 1988: 18-19.
(Zhang Z T, Zhang R Q. Fundamentals of microwave heating technology[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 1988: 18-19.)
- [21] Ye J, Tao H, Wu Y. Model stirrer based on a multi-material turntable for microwave processing materials[J]. Materials 2004, 10(2): 95.
- [22] Zhou Jie, Yang Xiaoqing, Chu Yue, et al. A novel algorithm approach for rapid simulated microwave heating of food moving on a conveyor belt[J]. Journal of Food Engineering, 2020, 282: 110029.
- [23] 王建林, 马琳钰, 邱科鹏, 等. 基于SVDD的多时段间歇过程故障检测[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(11): 2752-2761.
(Wang J L, Ma L Y, Qiu K P, et al. Multi-phase batch process fault detection based on support vector data description[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument 2017, 38(11): 2752-2761.)
- [24] 曹雪, 王建林, 邱科鹏, 等. 基于PARAFAC2的多时段间歇过程时段划分[J]. 北京化工大学学报: 自然科学版, 2019, 46(2): 77-82.
(Cao X, Wang J L, Qiu K P, et al. PARAFAC2-based phase partition of multiphase batch processes[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology: Natural Science, 2019, 46(2): 77-82.)
- [25] Mairabito C, Nareyanan A, Erez D, et al. Femlab model of a couple electromagnetic-thermal boundary value Problem[R]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2006: 1-58.

作者简介

杨彪(1974—), 男, 教授, 博士, 从事复杂过程的优化和控制、多智能体的协调输出与分布式协同控制等研究, E-mail: ybiaocn@163.com;

刘志邦(1993—), 男, 硕士生, 从事冶金多物理场耦合分析及数值计算、多智能体协同控制的研究, E-mail: 524251500@qq.com;

李鑫培(1973—), 男, 实验师, 从事微波设备制备及技术应用的研究, E-mail: 1223342338@qq.com;

周烈兴(1979—), 男, 讲师, 博士, 从事微波冶金物料的SEM等研究, E-mail: zhouliexing@163.com;

邓卓(1995—), 男, 硕士生, 从事冶金多物理场耦合分析、微波加热过程的突变稳定性分析及热失控的控制的研究, E-mail: 2413906421@qq.com;

母其海(1996—), 男, 硕士生, 从事冶金多物理场耦合分析、多智能体协同控制的研究, E-mail: 1373767419@qq.com;

朱娜(1994—), 女, 硕士生, 从事冶金多物理场耦合分析、基于小波分析的故障检测的研究, E-mail: 2298139593@qq.com.

(责任编辑: 孙艺红)