

# 控制与决策

Control and Decision

## 基于一致性理论的多源微波加热温度均匀性优化

杨彪, 高皓, 李鑫培, 成成, 杜婉, 刘承, 马红涛

引用本文:

杨彪,高皓,李鑫培,成,杜婉,刘承,马红涛. 基于一致性理论的多源微波加热温度均匀性优化[J]. *控制与决策*, 2023, 38(4): 989–998.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1204>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 低阶多智能体系统快速一致性优化设计的解析方法

Analytic solutions to the optimal design for fast consensus of low-order multi-agent systems

*控制与决策*. 2022, 37(10): 2543–2551 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0151>

#### 基于事件驱动的多智能体有限时间分群一致控制

Finite-time group consensus for second-order multi-agent systems with event-triggered control

*控制与决策*. 2022, 37(11): 2925–2933 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0162>

#### 多智能体系统的事件触发无模型迭代学习双向一致性

Event-triggered model-free adaptive iterative learning bipartite consensus control for multi-agent systems

*控制与决策*. 2022, 37(10): 2552–2558 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0401>

#### 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

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

*控制与决策*. 2021, 36(12): 2901–2909 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0986>

#### 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>

# 基于一致性理论的多源微波加热温度均匀性优化

杨彪<sup>1,2,3†</sup>, 高皓<sup>1</sup>, 李鑫培<sup>3</sup>, 成宸<sup>1</sup>, 杜婉<sup>1</sup>, 刘承<sup>1</sup>, 马红涛<sup>1</sup>

(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:** 在使用多微波源阵列进行空间功率合成的微波应用装置时, 如何协同多微波源馈入功率的状态信息以利用温度分布的自组织特性优化温度均匀性是研究的重点. 为此, 一方面, 提出微波源构成智能体的必要要素, 并构建技术方案. 在此基础上, 引入基于代数图论的二阶非全连接通信拓扑一致性算法协同多微波源的功率馈入状态信息, 保证在利用自组织特性优化温度分布的过程中不会有新的热点产生; 另一方面, 使用有限元方法, 构建解决整型变量和连续型变量混合优化的数值计算模型, 开展优化温度场分布均匀性的有效计算. 最后通过仿真实验验证微波源智能化方案的有效性, 数值计算结果表明: 所提模型较通用加热模型在各水平和铅垂截面能够分别提升 24.3% ~ 55.5% 和 20.4% ~ 82.9% 的均匀性; 同时能提升 10.0% ~ 43.7% 的热能转化效率. 以上结果验证了所提基于一致性理论的多源微波加热温度均匀性优化方法是可行且高效的.

**关键词:** 微波加热; 多源; 智能化; 一致性理论; 协同控制; 数值计算

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.1204

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 杨彪, 高皓, 李鑫培, 等. 基于一致性理论的多源微波加热温度均匀性优化[J]. 控制与决策, 2023, 38(4): 989-998.

## Temperature uniformity optimization of multi-source microwave heating based on consistency theory

YANG Biao<sup>1,2,3†</sup>, GAO Hao<sup>1</sup>, LI Xin-pi<sup>3</sup>, CHENG Cheng<sup>1</sup>, DU Wan<sup>1</sup>, LIU Cheng<sup>1</sup>, MA Hong-tao<sup>1</sup>

(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:** In a microwave application device that uses a multi-microwave source array for spatial power synthesis, how to coordinate the feed-in power status information of multiple microwave sources to use the self-organization characteristics of temperature distribution to optimize temperature uniformity is the focus of this research. For this reason, on the one hand, this paper proposes the necessary elements for microwave sources to form an agent and constructs a technical solution. On this basis, the second-order non-fully connected communication topology consensus algorithm based on the algebraic graph theory is introduced to cooperate with the power feed state information of multiple microwave sources to ensure that there will be no new hot spots in the process of using self-organization characteristics to optimize temperature distribution. On the other hand, the finite element method is used to construct a numerical calculation model that solves the mixed optimization of integer variables and continuous variables. The effective calculations are carried out to optimize the uniformity of temperature field distribution. The simulation experiment verifies the effectiveness of the microwave source intelligentization scheme. The numerical calculation results show that the proposed model can improve the uniformity of 24.3% ~ 55.4% and 20.4% ~ 82.9% at each horizontal and vertical section respectively compared with the general heating model. Simultaneously, the thermal energy conversion efficiency can be improved by 10.0% ~ 43.7%. The above results verify that the proposed multi-source microwave heating temperature uniformity optimization method based on the consistency theory is feasible and efficient.

**Keywords:** microwave heating; multi-source; intelligentization; consistency theory; cooperative control; numerical calculation

收稿日期: 2021-07-12; 录用日期: 2022-01-28.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61863020).

责任编辑: 王燕舞.

†通讯作者. E-mail: ybiaocn@163.com.

## 0 引言

作为一种在工业与生活中已被大众广泛认知与接受的加热方式,微波加热有着诸多优点<sup>[1-2]</sup>.但微波加热其复杂的内部产热机理<sup>[3]</sup>、热点产生的随机性以及难以求解的无穷维数学模型导致常规手段很难准确获得优化的温度分布<sup>[4]</sup>.

为提高微波加热过程中的被加热物体的均匀性,诸多学者做出了大量的研究和努力.各类研究中的改进均匀性手段可分为两类:

1) 在反应腔体内加入机械结构,利用运动的物体改变微波的吸收情况或者改变腔体内部电磁场的分布,以此提高均匀性<sup>[5]</sup>.前者如在反应腔体内加入转盘,后者如加入模式搅拌器.更进一步地,学者们在此基础上也同时进行了一些拓展: Meng等<sup>[5]</sup>研究了嵌在转盘上的金属点对加热均匀性的影响,结果显示旋转的金属点对加热均匀性和效率有显著提升,并揭示了当加热周期大于旋转周期时,旋转速度对均匀性有轻微影响; Ye等<sup>[6]</sup>将转盘分为两半,每半使用不同的材料,研究了3种不同的组合,最终得出,多材料的转盘相对单材料转盘能提高26%~47%的均匀性; Ye等<sup>[7]</sup>同时仿真研究了腔体中同时具有转盘和模式搅拌器的加热情况,提出了一种基于步进式的隐函数和水平集算法,得到了转盘的主要功能是提高加热均匀性,模式搅拌器的主要功能在于提高加热效率; Liao等<sup>[8]</sup>从研究腔体的角度出发,提出了一种带有滑块的可变形腔体结构,使用相移的方法,利用该结构能够提高25%~58%的加热均匀性.

2) 提高均匀性的手段便是使用多微波源,使用多微波源改善均匀性本质上是通过改善腔体内部电磁场的分布实现的. Yang等<sup>[3]</sup>数值模拟了工业中多馈口微波加热连续液体流时的情况,提高了对该动态过程的理解和优化; Boonthum等<sup>[9]</sup>研制了一个四源微波反应器,可以在数分钟内将SiC加热到1000°C; 针对双源微波加热系统, He等<sup>[10]</sup>研究了一种旋转的波导结构,使用梯度下降算法优化了波导在不同角度加热的时间,能够显著提高加热的均匀性; Xiong等<sup>[11]</sup>和赵虹<sup>[12]</sup>使用915 MHz和2450 MHz的双频率加热; Ahn等<sup>[13]</sup>另辟蹊径,提出了一种含有竖直和水平狭缝阵列的波导,通过此波导馈入微波,其功能类似于多源加热,并通过实验对比传统微波加热设备,能提高77.4%的加热均匀性.同时,限于单个微波源的功率有限,使用多源还能满足现代工业对大功率微波加热设备的需求,就此便引出了多微波源的输出功率对一致性的要求.保持一致的输出功率,使得各个

源能够平均分摊负载,并且当需要加热系统的总功率按照一个设定的函数曲线变化时,各个源输出功率一致才能叠加出理想的功率曲线.

近年来,分布式多智能体一致性问题在航空器集群控制、姿态校准、分布式控制等方面迅速发展. Wang<sup>[14]</sup>针对控制方向未知的高阶非线性多智能体系统在无领导状态下的一致性控制问题,提出了一种在一般有向图下的单个智能体仅利用本地信息的分布式控制算法; Li等<sup>[15]</sup>在代数图论的基础上通过状态增强和预测控制方法,将领导-跟随者一致性问题转化为有限/无限水平LQR问题,提出了一种领导者轨迹可预测的多智能体一致性控制算法; Wu等<sup>[16]</sup>同样基于代数图论,针对非同质的多智能体系统,提出了时变拓扑结构下含通信时滞分布式分组一致性算法; 杨彪等<sup>[17]</sup>首次将一致性算法引入微波加热系统中,建立了基于一致性算法多模式搅拌器协同的数值计算模型,研究表明一致协同编队的多模式搅拌器微波加热系统能提高加热的均匀性和效率.

在使用多微波源阵列进行空间功率合成的微波应用装置中,由于多物理场强耦合、被加热介质的异质特性等复杂特性使得温度分布均匀性难以直接优化控制,于是采用间接控制的思路,利用被加热试样中温度分布的自组织特性,在保证整体平均温度持续上升的趋势下,缓慢地降低功率,使得热点温度向相对低温区传导,达到提高温度均匀性的目的.但在此过程中,不能有新的热点产生,所有的微波源智能体功率都需按照一致的功率曲线一致变化,为此引入一致性理论协同各微波源智能体的功率输出.这种间接控制方法相对使用复杂控制算法直接控制优化温度均匀性更简单实用,更具有工程实施价值.

本文提出一种将多源微波加热过程中各磁控管智能化设计并构建一种新型多微波源协同一致加热数值计算模型. 1) 从通信方式、拓扑结构、计算能力、数据反馈等方面出发,设计微波加热过程中各磁控管智能化的实现方案. 2) 从优化反应腔体内电磁场分布的角度出发,考虑磁控管输出特性,应用基于代数图论的一致性算法实现多个源的功率输出协同一致,利用自组织特性优化温度场分布的均匀性. 3) 采用有限元(FEM)方法,构建可以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.最后通过数值计算和分析验证以微波源智能化方案为基础的多微波源变功率协同输出的微波加热模型相对于其他加热模型可进一步地有效优化加热的均匀性和效率.

## 1 微波加热计算方程

微波加热过程中耦合的振荡电场和磁场互相激发,它们在时间上的关系可由Maxwell方程组描述,该方程可写成如下形式:

$$\begin{cases} \nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} + J_e, J_e = \sigma E; \\ \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} - J_m, J_m = \sigma_m H; \\ \nabla \cdot D = \rho_e; \\ \nabla \cdot B = \rho_m. \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $J_e$ 、 $J_m$ 、 $\rho_e$ 、 $\rho_m$  分别表示电流密度、磁流密度、电荷密度和磁荷密度,  $\sigma$  和  $\sigma_m$  分别表示媒质的电导率和磁电阻率 ( $\Omega/\text{m}$ ) 对应磁场的损耗,  $H$  表示磁场强度,  $E$  表示电场强度,  $B$  表示磁感应强度,  $D$  表示电位移矢量。

微波反应腔体中的电场分布可以通过求解如下Maxwell波形方程<sup>[1-2]</sup>获得:

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

其中:  $\mu_0$  和  $\mu_r$  分别表示真空磁导率和媒质的相对磁导率,  $\varepsilon_0$  和  $\varepsilon_r$  分别表示媒质的真空介电常数和相对介电常数,  $\omega$  表示入射电磁波角频率,  $k_0$  表示自由空间的波数。

微波加热过程中,热量由媒质的介电损耗  $Q_e$  和磁滞损耗  $Q_m$  产生,即

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

其中:  $Q$  表示微波耗散功率,  $\varepsilon''$  和  $\mu''$  分别表示介电常数虚部和磁导率虚部。

加热过程中同时伴随着固体热传导,被加热媒质的温度可以由如下热传导方程解出:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - k \nabla^2 T = Q. \quad (4)$$

其中:  $T$  表示温度,  $\rho$  表示媒质的密度,  $C_p$  表示比热容,  $k$  表示导热系数。

同时若媒质在加热过程中不会出现明显磁化时,热量主要由介电损耗转化而来,则可忽略式(3)中的磁滞损耗,即令  $Q_m = 0$ ,结合式(3)与(4)有

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - k \nabla^2 T = \frac{1}{2} \omega \varepsilon_0 \varepsilon'' |E|^2. \quad (5)$$

从式(5)可以看出,当被加热介质保持不变时,其温度分布可通过调节功率进而调节电场强度  $E$  的分布和电磁波角频率  $\omega$  优化。

## 2 微波源智能化

磁控管和固态微波源是最为常见的两种微波源。但在实际日常运用和工业生产过程中,相比成本

高昂且额定功率较小的固态微波源,廉价高功率的磁控管运用更加广泛。在大功率微波反应设备中,反应器的总功率可表示为

$$P(t) = \sum P_i \cdot P_i(t), i = 1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

其中:  $P_i$  表示投入使用的第  $i$  号磁控管,  $P_i(t)$  表示第  $i$  号磁控管在  $t$  时刻的功率。固态微波源可以方便地控制产生微波的幅值相位,但磁控管调制起来会复杂很多。想要在大功率微波反应设备中分布式协调控制磁控管阵列,以解决微波加热过程中被加热物料异质性和馈入功率时变性等问题,首先需要将磁控管智能化。

基于上述分析,构成智能体需要3种要素:功能性、信息交换、状态采集。磁控管仅作为产生微波的执行部件,并不存在构成智能体的要素。为满足第一条功能性,需要使磁控管正常可控工作。文献[18]详细阐述了磁控管的工作原理,并指出可以通过控制阳极电压调节磁控管的输出功率。于是给每个磁控管加上一个输出阳极电压可控的电源,可确保功能性要素得以满足。针对信息交换这一要素,需要为磁控管加上通信功能。针对多智能体系统,其拓扑结构具有变化性和复杂性,使用生产消费型的总线通信方式更为合适。信息交换的内容便是各智能体的状态参数等信息,故还需满足状态采集要素。对磁控管智能体而言,反馈信息中最关键的就是输出功率。输出功率值可测量,功率的变化速度不便测量,可采用间接方式:功率变化值 =  $(P_i(t + \Delta t) - P_i(t)) / (\Delta t)$ 。综上所述,满足以上3要素的微波源便可视为智能体。

如图1所示,实际过程中为每个磁控管配备了一个工业用数字化变频高压驱动器,同时添加了一块单片机作为控制器。变频高压驱动器保证磁控管作为智能体的功能性,同时以数字化形式接收控制信号,输出受到监控的电压以驱动磁控管,即输出功率可被反馈,保证了智能体的状态采集要素。单片机作为控制器,为磁控管智能体提供了一定的独立运算能力,为分布式控制奠定了基础;运用其不同的总线接口与硬件设计,构建整个系统的信息交换环节。进一步展开如下:整个信息交换环节是构建在CAN(controller area network)总线技术上的。CAN通信是一种生产消费型的通信方式,当多个智能体挂载在CAN总线上时,通信数据会被编码并广播在总线上,需要的智能体单元才能获取这些信息。这个过程可以通过设置单片机CAN控制器里的信息过滤器和信息编码过程中每一帧报文的仲裁段来实现。仲裁过程由硬件电平逻辑控制,无需软件干预,效率很高且易

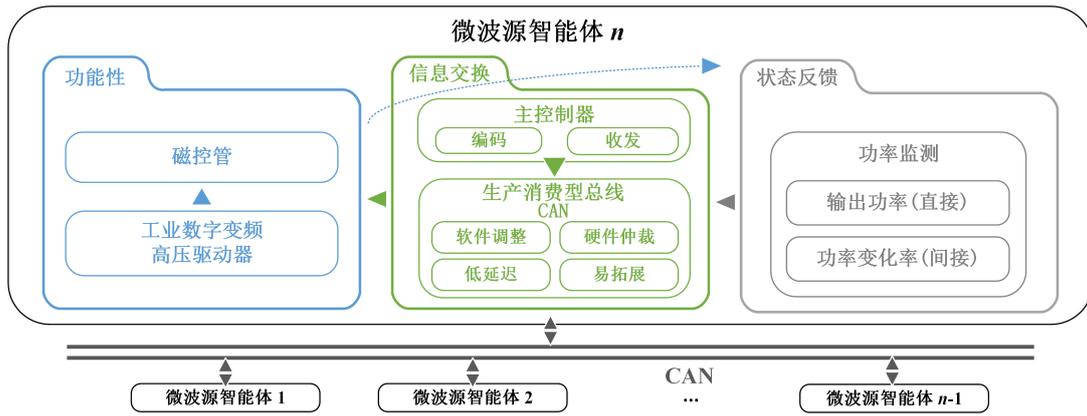


图1 微波源智能化结构

于拓展. 由此, 挂载在一条总线上的多个智能体可以根据软件的设置方便地构成不同的通信拓扑结构, 包括过程中切换拓扑, 以满足多智能体一致性算法中各种拓扑结构的设计.

使用1 Mbps波特率的CAN总线, 根据信息传输速率计算公式  $I = S \times \log_2 N$ . 其中:  $I$  表示传信率;  $S$  表示波特率;  $N$  表示单个符号承载信息, 因CAN协议使用NRZ编码方式, 故  $N = 2$ . 所以有  $I = 1 \times 10^6$  bit/s. 使用标准格式数据帧的CAN协议的一个报文满数据有108位, 若使用6个智能体, 则在总线最拥挤的时候, 拥有最低优先级的数据将会最大有  $6.48 \times 10^{-4}$  s的时滞. 由于数值很小, 后续的一致性算法中可以忽略通信时滞带来的影响.

### 3 一致性算法及其实现

#### 3.1 一致性算法

通过调节磁控管阳极电压进而调控磁控管输出功率的控制过程是一个二阶动态系统<sup>[18]</sup>, 所以固定拓扑连续时间下的多源微波功率输出状态可以描述为

$$\dot{\xi}_i = \zeta_i, \dot{\zeta}_i = u_i, i = 1, 2, \dots, n. \quad (7)$$

其中:  $\xi$  表示磁控管的状态信息, 即输出功率值;  $\zeta$  表示状态的变化值, 即功率的变化速率;  $u$  表示控制信息的输入;  $i$  表示各智能体的编号.

为跟踪理想功率变化曲线, 整个智能体系统需要一个参考目标. 使用领导者-跟随者 (leader-following) 策略, 引入一个虚拟的领导者. 文献[19]提出了一种领导者非全连接的固定拓扑的一致性算法

$$u_i = \frac{1}{\kappa_i} \sum_{j=1}^n a_{ij} [\dot{\zeta}_j - K_{ri}(\xi_i - \xi_j) - K_{vi}(\zeta_i - \zeta_j)] + \frac{1}{\kappa_i} a_{i(n+1)} [\dot{\zeta}^r - K_{ri}(\xi_i - \xi^r) - K_{vi}(\zeta_i - \zeta^r)]. \quad (8)$$

其中:  $a_{ij}$  表示拓扑网络邻接矩阵的元素, 引入虚拟领导者后, 需对邻接矩阵进行拓展: 第  $n+1$  行全为零, 第  $n+1$  列为虚拟领导者与各智能体的连接情况;  $\kappa_i \triangleq \sum_{j=1}^{n+1} a_{ij}$ ;  $K_v$  和  $K_r$  表示权值向量.

结合式(7)与(8), 有

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{n+1} a_{ij} u_i - \sum_{j=1}^n a_{ij} u_j - a_{i(n+1)} \dot{\zeta}^r = \\ - K_{ri} \left[ \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot (\xi_i - \xi_j) + a_{i(n+1)} (\xi_i - \xi^r) \right] - \\ K_{vi} \left[ \sum_{j=1}^n a_{ij} (\zeta_i - \zeta_j) + a_{i(n+1)} (\zeta_i - \zeta^r) \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

转化为矩阵形式, 有

$$L_{n \times (n+1)} \bar{u} = -K_r L_{n \times (n+1)} \bar{\xi} - K_v L_{n \times (n+1)} \bar{\zeta}. \quad (10)$$

其中:  $\bar{u} \triangleq [u | \dot{\zeta}^r]^T = [u_1, u_2, \dots, u_n, \dot{\zeta}^r]^T$ ,  $\bar{\xi} \triangleq [\xi | \xi^r]^T = [\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n, \xi^r]^T$ ,  $\bar{\zeta} \triangleq [\zeta | \zeta^r]^T = [\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n, \zeta^r]^T$ ,  $L_{n \times (n+1)}$  表示拉普拉斯矩阵  $L_{n+1}$  的前  $n$  行.

将  $L_{n \times (n+1)}$  改写为  $[M | b]$ , 即  $M = L_n$ ,  $b = [-a_{1(n+1)}, -a_{2(n+1)}, \dots, -a_{n(n+1)}]^T$ , 进一步改写式(10)有

$$Mu + b\dot{\zeta}^r = -K_r(M\xi + b\xi^r) - K_v(M\zeta + b\zeta^r). \quad (11)$$

由于  $G_{n+1}$  含有向生成树时,  $L_{n+1}$  的秩为  $n$ , 同时  $L_{n+1}$  的最后一行全为零, 故  $M$  满秩. 同时  $L_{n+1}$  的第  $n+1$  列可由前  $n$  列决定, 即  $b = -M\mathbf{1}_n$ . 于是对式(11)有

$$u - \mathbf{1}_n \dot{\zeta}^r = -K_r(\xi - \mathbf{1}_n \xi^r) - K_v(\zeta - \mathbf{1}_n \zeta^r). \quad (12)$$

令  $\sigma = \xi - \mathbf{1}_n \xi^r$ , 式(12)可写为

$$\dot{\sigma} = -K_r \sigma - K_v \dot{\sigma}. \quad (13)$$

由式(13)可得: 当  $t \rightarrow \infty$  时,  $\xi_i \rightarrow \xi^r$ ,  $\zeta_i \rightarrow \zeta^r$ .

由此可知, 当且仅当引入领导者的拓扑图  $G_{n+1}$

的邻接矩阵  $A_{n+1} = [a_{ij}] \in R^{(n+1) \times (n+1)}$  有一个有向生成树且领导者节点为根节点时, 使用控制律(8), 二阶系统能实现渐近一致  $\xi_i \rightarrow \xi^r, \zeta_i \rightarrow \zeta^r$  [19-20].

### 3.2 多源微波一致性算法的实现

第2节中已经提出了将微波源智能化的方案, 这里设系统有6个微波源智能体, 其基于CAN总线结构的固定通信拓扑设置如图2所示.

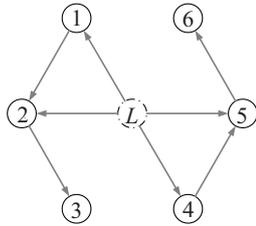


图2 系统通信拓扑结构

图2中1~6号节点代表6个微波源智能体, 其在腔体的分布如图3所示. 中心的L节点代表虚拟的领导者, 它为其他节点提供跟踪的参考轨迹. 根据拓扑图可以清晰地判断它们之间的关系. 显然该拓扑图满足3.1小节中一致性算法的条件.

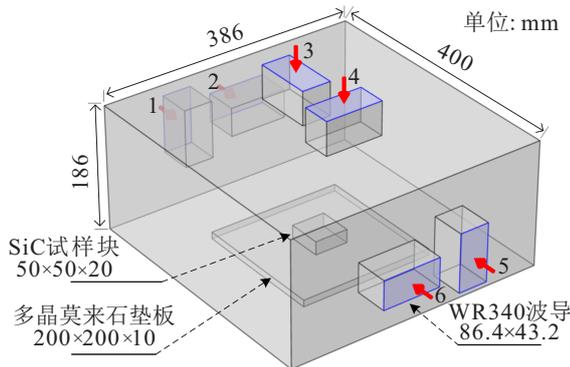


图3 多源分布三维几何模型

由图2可以得到其邻接矩阵为

$$A_{6+1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

式(7)中提及基于此拓扑的多微波源智能系统是二阶系统, 各智能体之间交换的数据需要包含: 状态信息  $\xi$  即输出功率值; 状态变化值  $\zeta$  即功率的变化速率. 不失一般性地, 设各微波源智能体输出功率(W)初始值  $\xi_0 = [65, 175, 260, 85, 500, 115]^T$ , 功率变化速率(W/s)初始值  $\zeta_0 = [10, 25, 30, 70, 50, 62]^T$ , 系统初

始输入  $u_0 = \mathbf{0}_6$ . 为加快收敛速度, 将权值向量设为  $K_r = K_v = \mathbf{3}_6$ . 假设虚拟领导者提供的目标参考轨迹  $\xi^r = 200(\cos(0.5t) + 1), \zeta^r = \dot{\xi}^r, u_r = \ddot{\xi}^r$ . 使用控制律(8)后功率输出和功率变化率输出结果分别如图4和图5所示.

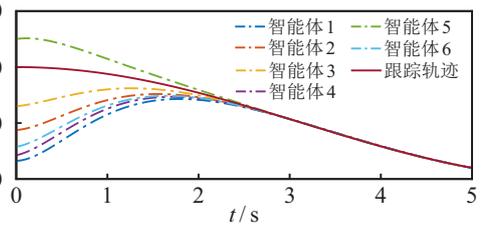
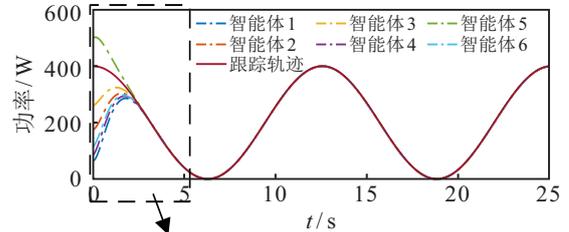


图4 多微波源智能体功率一致输出

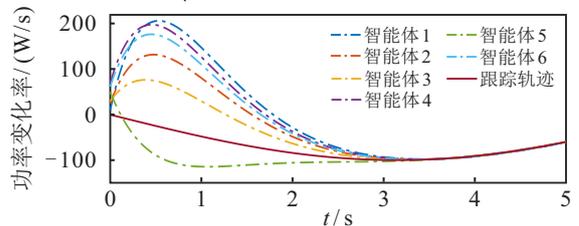
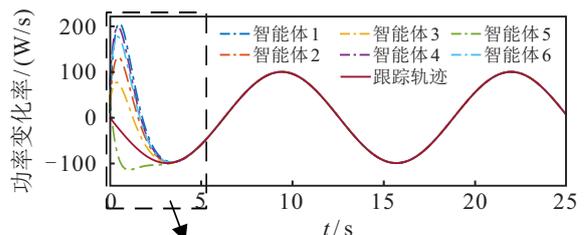


图5 多微波源智能体功率变化率一致输出

由图4和图5可以看出, 各微波源智能体可以通过非全连接固定拓扑的一致性算法有效跟踪参考轨迹, 协同输出一致变化的功率值, 且经过约3s系统状态收敛一致, 并在后续过程中保持跟踪.

## 4 数值计算与分析

### 4.1 模型参数与边界条件

模型使用一个长方体作为反应腔体, 腔体中介质为空气. 腔体与WR340型标准波导使用铜材质, 馈送微波频率2.45 GHz, 模式TE<sub>10</sub>. 系统从室温  $T_0 = 20^\circ\text{C}$  开始加热, 被加热媒质为SiC, 加热时间为31s(功率曲线变化约两个半周期, 第一个半周期收敛一致, 后两个周期一致加热).

其他建立模型中应用的初始输入参数设置如表1所示.

表1 参数设置

材料属性	SiC <sup>[21]</sup>	铜 <sup>[21]</sup>	空气 <sup>[10,21]</sup>
相对介电常数(实部)	$\epsilon'(T)$	1	1
损耗正切角	$\tan \delta(T)$	—	—
相对磁导率	1	1	1
电导率/(S/m)	—	5.998 e+7	0
导热系数/(W/(m·K))	$k(T)$	400	0
密度/(kg/m <sup>3</sup> )	3 100	8 700	—
恒压比热容/(J/(kg·K))	$C_p(T)$	3 640	—

在表1中:铜与空气的参数设置同时也参考了COMSOL内置材料;SiC各参数温度特性如下:

$$\begin{aligned} \epsilon'(T) &= -2e-4T^2 + 0.4503T + 124.26, \\ \delta(T) &= 5e-10T^3 - 9e-7T^2 + 6e-4T + 0.2801, \\ k(T) &= 8e-5T^2 - 0.325T + 326.69, \\ C_p(T) &= 4e-7T^3 + 17e-4T^2 + 2.3729T + 115.43. \end{aligned} \quad (15)$$

边界条件分为电磁边界条件和热传导边界条件<sup>[6,8]</sup>.针对电磁边界条件,反应腔壁和波导壁材料为铜,可视为完美导体,用以下公式<sup>[6,8,11]</sup>描述:

$$\begin{cases} \vec{n} \times E = 0, \\ \vec{n} \cdot B = 0, \end{cases} \quad (16)$$

其中 $\vec{n}$ 表示腔壁表面的单位法向量.

热传导边界条件描述了在不同温度域表面的热对流情况<sup>[8]</sup>.比如被加热媒质和包裹其周围的空气发生的能量交换可由下式<sup>[1,2,6]</sup>表达:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h \cdot (T - T_{\text{air}}). \quad (17)$$

其中: $\partial T/\partial n$ 表示垂直于温度域表面的温度梯度, $T_{\text{air}}$ 表示反应腔体内空气介质的温度, $h$ 表示空气的热传系数(10W/(m<sup>2</sup>·K)).同时,假设由于多晶莫来石垫板极好的保温性和透波性忽略其对加热过程的影响;以及被加热介质底面和垫板表面接触边界热绝缘,即<sup>[1,2,11]</sup>:

$$\vec{n} \cdot q = 0, \quad (18)$$

其中 $q$ 为热通量.

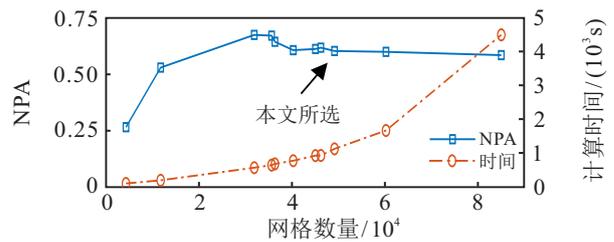
## 4.2 数值计算结果与分析

### 4.2.1 模型设置

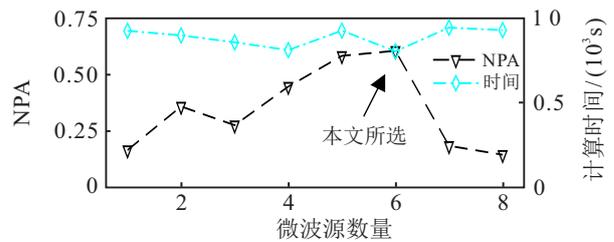
在有限元数值计算过程中,选取合适的网格划分大小会对最终结果的准确性造成显著的影响.但过密的网格划分并不能提升计算精度,反会在计算过程中带来庞大的时间复杂度,浪费计算资源.学者们在研究该问题时引入了归一化吸收功率(NPA)<sup>[1-2,10-11]</sup>这一概念.结合前文及式(3)所述,本模型中使用的NPA的计算方法如下:

$$\text{NPA} = \frac{\int_0^t \int_V Q_e(\tau) dV d\tau}{\int_0^t P(\tau) d\tau}. \quad (19)$$

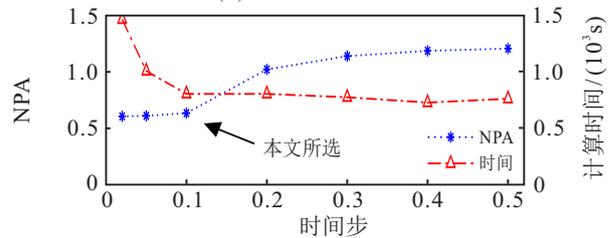
其中:分子表示被加热媒质吸收的能量,分母表示系统馈入的总能量, $Q_e(\tau)$ 表示 $\tau$ 时刻电磁功率损耗密度(W/m<sup>3</sup>), $t$ 表示加热时间, $P(\tau)$ 表示总馈入功率.绘制NPA变化趋势如图6(a)所示.由图6(a)可以看出,在最大网格大小逐渐变小后,NPA趋于稳定,本文数值计算模型选取被加热媒质区域最大网格大小为5.5 mm.该值可以让数值仿真模型在计算精度和时间复杂度上达到平衡.



(a) NPA与网格大小划分关系



(b) NPA与源个数关系



(c) NPA与时间步关系

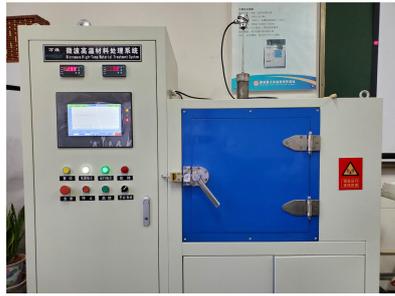
图6 NPA随网格大小划分与模型设置的关系趋势

同样,可以利用NPA确定所使用微波源个数和时间步的选取.由图6(b)可以看出,在馈入总能量相同的情况下,在当前腔体尺寸和微波源位置设置情况下,使用6个源能够使得吸收的能量效率最高,故确定使用源个数为6.而针对时间步而言,如图6(c)所示,当时间步设置大于0.1 s时,NPA大于1,显然这是不正确的,也就是计算结果极不准确.当时间步小于0.1 s时,NPA趋于稳定,但随时间步变小,时间复杂度会剧烈上升.综合考虑,本文时间步选用0.1 s.

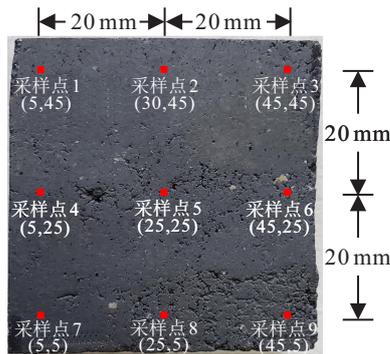
### 4.2.2 模型验证

为验证模型建立的准确性,需将数值计算模型与真实实验加热结果进行对比.使用切割机将结烧的SiC板制备成50 mm×50 mm×20 mm的立方体块.微

波应用装置和实验样品分别如图7(a)和图7(b)所示. 图7(b)同时标出了SiC试样块的表面选取的9个采样点的位置.



(a) 微波反应器



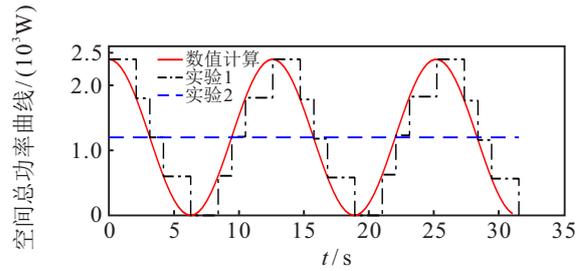
(b) SiC 试样

图7 微波反应器与加热试样

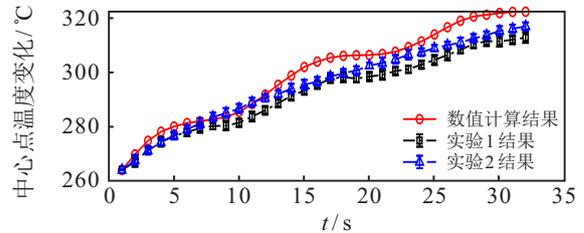
受当前实验设备条件的限制,在总馈入能量相同的情况下,跟踪总功率曲线如图8(a)中实验1、实验2所示. 结合式(6),实验1通过按照时间周期调整投入的定功率磁控管个数来模拟跟踪总功率曲线,实验2则通过各源同时馈入固定功率来模拟. 分别进行5组和3组重复实验,使用标准差作为误差线变量. 数值计算和实验加热结果如图8(b)和图8(c)所示,图8(b)的中心点即为采样点5.

对比图8(a)与图8(b)可以看出,在实验2中,物料中心点的温度随着馈入功率的变化而变化. 同时由于热惯性从时间上来看有所滞后,但这种情况更有利于本文的控制思路,在温度升高速率逐渐趋于平缓的情况下,馈入功率已经提升,这样利用温度自组织特性优化温度分布时,不会出现整体温度下降的情况. 由图8(c)可以看到,实验相比数值计算,温度偏低,且8、9两个采样点温度皆呈现下降趋势,这是因为打开腔体使用红外测温仪按顺序测温过程中,最后两个点已经有不少热量散失.

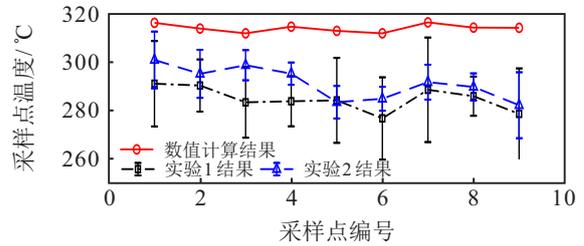
对采样点的实验结果进行不确定度分析后,得到如表2所示的拓展不确定度. 在表2中:以算数平均值作为测量结果;以样本标准差衡量A类标准不确定度;在计算标准B类标准不确定度时,红外测温仪的仪器误差为 $\pm 2\%$ ,置信因子 $k = \sqrt{3}$ ;而在计算



(a) 跟踪空间总功率



(b) 中心温度变化



(c) 各采样点温度

图8 实验对比结果

表2 不确定度分析

采样点	实验1/ $^{\circ}\text{C}$		实验2/ $^{\circ}\text{C}$	
	测量值	拓展不确定度	测量值	拓展不确定度
1	291.1	17.3	301.0	15.2
2	290.4	11.9	295.2	13.4
3	290.4	14.8	298.8	10.0
4	283.9	11.6	295.3	08.7
5	284.2	17.2	283.5	10.4
6	276.8	16.7	284.9	09.0
7	288.6	20.5	291.8	10.8
8	286.0	10.0	289.8	09.5
9	278.7	18.2	282.2	17.2

拓展不确定度时,包含因子取 $k_p = 2$ . 例如采样点1,表2中数据含义为:采样点1在实验1中的测量值落在区间 $[291.1 - 17.3, 291.1 + 17.3]^{\circ}\text{C}$ 的置信水平约95%. 同时,不确定度保留一位小数,则对应的测量值也相应保留一位小数. 从不确定度分析表格来看,实验的真实值有极大概率落在相应测量值的 $\pm 2.9\% \sim \pm 7.1\%$ 区间内.

同时由图8(b)和图8(c)可以看出,实验结果与数值计算略有偏差,但总体趋势相同. 分析误差原因有:1)数值仿真模型的各项参数和条件是理想化的,与实际实验有差别(包括物料含量、特性参数、保温条件、传热条件等);2)测温时使用红外测温仪需要打开腔体,有热量散失;3)测量和仪器误差. 加热实验结果

与不确定度分析结果表明,在一定误差允许范围内,数值计算模型结果可靠.

4.2.3 数值计算结果与分析

本小节中反应腔体中馈入的总能量在各个计算实验中均是一致的,皆需满足

$$P_{in} = \sum_{i=1}^n \int_0^t P_i(\tau) d\tau. \quad (20)$$

其中:  $n$  表示激励的微波源智能体个数,  $P_i(\tau)$  表示第  $i$  个智能体以时间  $\tau$  为自变量的功率曲线.

设各微波源智能体的初始值如3.2节中的  $\xi_0$ , 使用图4中一致性算法产生的功率曲线,利用第4节所提数值计算模型,加热31s(功率曲线变化约两个半周期).对比多源恒定功率(保持初值)与跟随领导者一致变功率加热,单源恒定功率与变功率加热,表面温度加热结果如图9所示.

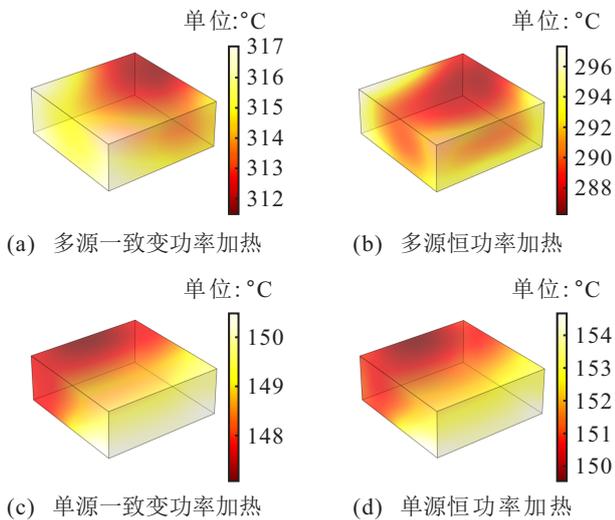


图9 加热效果对比

由图9可以看出:使用一致性算法跟踪参考轨迹的变功率加热(图9(a))温度分布优于多源恒定功率

加热(图9(b)),加热效率也略高,更是远远优于单源加热(图9(c)和(图9(d))的效果.为进一步定量分析,引入温度变化系数(COV)<sup>[5-10]</sup>衡量温度分布均匀性;引入反射功率与馈入功率的比率  $|S_{11}|$ <sup>[1-2]</sup> 和平均温度变化值  $\Delta T$  来衡量加热效率. COV 和  $|S_{11}|$  可分别表示如下:

$$COV = \frac{\sqrt{n^{-1} \sum_{i=1}^n (T_i - T_a)^2}}{\Delta T}, \quad \Delta T = T_a - T_0; \quad (21)$$

$$|S_{11}| = \frac{P_r}{P_{in}} = \frac{P_{in} - \int_0^t \int_V Q_e(\tau) dV d\tau}{P_{in}}. \quad (22)$$

其中:  $T_a$  表示所选区域平均温度,  $P_r$  表示反射功率. 加热效果截面如图10所示.

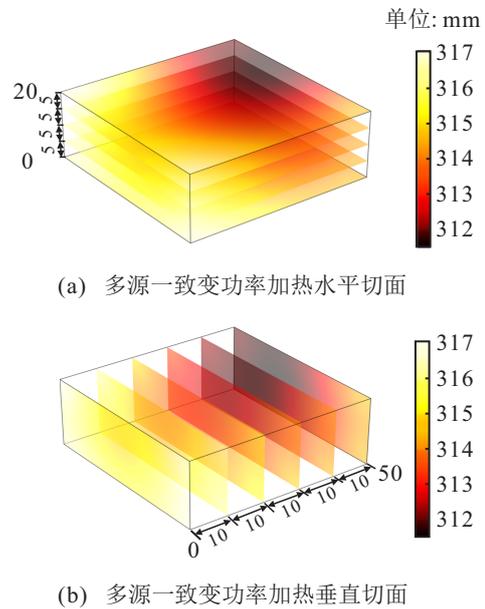


图10 加热效果截面

分别对4种加热方式在不同水平截面(如图10(a))和不同垂直截面(如图10(b))的COV进行计算,结果分别如表3和表4所示.

表3 水平截面COV

截面高度/mm	多源一致变功率	多源恒功率	单源变功率	单源恒功率
20	0.0056	0.0106	0.0074	0.0090
15	0.0055	0.0102	0.0075	0.0092
10	0.0055	0.0094	0.0079	0.0100
5	0.0056	0.0099	0.0088	0.0118
0	0.0057	0.0102	0.0093	0.0128

表4 垂直截面COV

截面深度/mm	多源一致变功率	多源恒功率	单源变功率	单源恒功率
0	0.0025	0.0084	0.0054	0.0096
10	0.0022	0.0078	0.0058	0.0111
20	0.0021	0.0075	0.0061	0.0123
30	0.0025	0.0074	0.0061	0.0122
40	0.0035	0.0088	0.0057	0.0110
50	0.0043	0.0109	0.0054	0.0096

由表3和表4数据可知,本文提出的基于一致性算法的多微波源智能体加热模型相对其他3种加热模型,在各水平截面和铅垂截面皆有最小的温度变化系数,能够有效提升微波加热的均匀性.分析主要原因在于:随着功率逐渐下降,试样中的热点区域的温度会自发地向相对低温区辐射状传导,同时由于馈入

功率依然存在,整体温度不会下降.多源功率的变化保持一致使得不会有新的热点产生,于是实现了利用温度分布自组织特性提高均匀性.计算4种模型在加热过程中的 $|S_{11}|$ 以及不同截面的 $\Delta T$ ,结果分别如表5~表7所示,与前文实验的不确定度保持一致的修约规则,数值计算的温度结果仅保留一位小数.

表5 不同模型 $|S_{11}|$ 

加热模型	多源一致变功率	多源恒功率	单源变功率	单源恒功率
$ S_{11} $	0.386	0.486	0.828	0.823

表6 水平截面 $\Delta T$ 

截面高度/mm	多源一致变功率	多源恒功率	单源变功率	单源恒功率
20	294.1	270.7	128.5	131.5
15	294.1	270.4	128.6	131.6
10	294.0	269.9	128.7	131.8
5	294.1	270.2	128.9	132.2
0	294.2	270.6	128.9	132.3

表7 垂直截面 $\Delta T$ 

截面深度/mm	多源一致变功率	多源恒功率	单源变功率	单源恒功率
0	296.0	272.4	128.7	132.1
10	295.4	271.4	128.6	131.8
20	294.3	270.1	128.5	131.5
30	293.3	269.1	128.6	131.5
40	292.7	268.8	128.6	131.8
50	292.7	269.3	128.7	132.1

由以上数据可知,本文所提模型在整个加热过程中,拥有最小的 $|S_{11}| = 0.386$ ,即反射功率最小,有约61.4%的馈入功率被吸收转化为热能.同时各水平截面 $\Delta T$ 均大于 $294^\circ\text{C}$ ,各铅垂截面 $\Delta T$ 均大于 $292^\circ\text{C}$ ,皆高于多源恒功率加热,更是远远高于单源加热方式.分析其原因主要是温度分布在加热过程中随着功率变化有一个周期性平缓过程,试样中各个点的介电系数变化差别不大,不容易出现突变和热失控,促使吸收的功率均匀.使得该模型能有效地提升加热效率.

## 5 结论

本文提出了一种将多源微波加热过程中各磁控管智能化设计方案,并构建了一种新型多微波源协同一致加热数值计算模型,用之研究多源微波加热的温度均匀性优化问题.

1) 本文提出了微波源构成智能体的必要要素,并针对各要素选择适用的技术策略,构建了设计方案.

2) 从优化反应腔体内电磁场分布和加热过程热传导的角度出发,考虑磁控管功率输出特性,引入基于代数图论的二阶非全连接通信拓扑一致性算法协同多微波源的功率馈入状态信息.保证在利用温度

分布自组织特性过程中不会产生新的热点.

3) 使用有限元方法,构建解决整型变量和连续型变量混合优化的数值计算模型,展开了优化温度场分布均匀性的有效计算,并通过加热SiC实验验证其准确性.

仿真实验验证了本文提出的微波源智能化方案是合理可行的.同时数值计算结果显示,多微波源变功率协同输出的微波加热模型在水平截面和铅垂截面拥有最小的COV(水平:0.0055~0.0057,铅垂:0.0021~0.0043),明显优于通用加热模型.同时反射功率比率 $|S_{11}|$ 最小(0.386),各截面的平均升温温度 $\Delta T$ 也更高(水平: $> 294^\circ\text{C}$ ,铅垂: $> 292^\circ\text{C}$ ).以上结果表明,所提出的新型多源一致协同微波加热数值计算模型可以在有效改善温度分布均匀性的同时显著提升加热效率.在后续研究中,将利用强化学习等算法进一步探究多微波源智能体协同跟踪的功率曲线形式,以获得更好的温度场分布优化效果.

## 参考文献(References)

- [1] Zhou J, Yang X Q, Ye J H, et al. Arbitrary Lagrangian-Eulerian method for computation of rotating target during microwave heating[J]. International Journal

- of Heat and Mass Transfer, 2019, 134: 271-285.
- [2] Zhang M, Jia X B, Tang Z X, et al. A fast and accurate method for computing the microwave heating of moving objects[J]. Applied Sciences, 2020, 10(8): 2985-2999.
- [3] Yang B, Sun J, Li W, et al. Numerical modeling dynamic process of multi-feed microwave heating of industrial solution media[J]. Journal of Central South University, 2016, 23(12): 3192-3203.
- [4] 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.
- [5] Meng Q, Lan J Q, Hong T, et al. Effect of the rotating metal patch on microwave heating uniformity[J]. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 2018, 52(2): 94-108.
- [6] Ye J H, Hong T, Wu Y Y, et al. Model stirrer based on a multi-material turntable for microwave processing materials[J]. Materials, 2017, 10(2): 95-108.
- [7] Ye J H, Lan J Q, Xia Y, et al. 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.
- [8] Liao Y H, Lan J Q, Zhang C, et al. A phase-shifting method for improving the heating uniformity of microwave processing materials[J]. Materials, 2016, 9(5): 309-321.
- [9] Boonthum D, Chanprateep S, Ruttanapun C, et al. Development of hightemperature multimagnetron microwave furnace for material processing[J]. Songklanakarin Journal of Science and Technology, 2019, 41(3): 494-500.
- [10] He J L, Yang Y, Zhu H C, et al. Microwave heating based on two rotary waveguides to improve efficiency and uniformity by gradient descent method[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 178: 115594.
- [11] Xiong G C, Zhu H C, Huang K M, et al. The impact of pins on dual-port microwave heating uniformity and efficiency with dual frequency[J]. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 2020, 54(2): 83-98.
- [12] 赵虹. 多源多频微波炉的关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019: 62.  
(Zhao H. Research on key technologies of multi-source and multi-frequency microwave oven[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019: 62.)
- [13] Ahn S H, Lee W S. Uniform microwave heating system design and evaluation with an orthogonally slot-loaded array waveguide[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2020, 62(11): 3419-3424.
- [14] Wang G. Distributed control of higher-order nonlinear multi-agent systems with unknown non-identical control directions under general directed graphs[J]. Automatica, 2019, 110: 108559.
- [15] Li G L, Ren C G, Chen C L P. Preview-based leader-following consensus control of distributed multi-agent systems[J]. Information Sciences, 2021, 559: 251-269.
- [16] Wu H, An B R, Li B. Distributed consensus control protocols for heterogeneous multi-agent systems with time-varying topologies[J]. IEEE Access, 2020, 8: 152772-152779.
- [17] 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.  
(Yang B, Liu Z B, Li X P, et al. Temperature uniformity optimization of multi-mode stirrer microwave heating system based on consensus algorithm[J]. Control and Decision, 2021, 36(12): 2901-2909.)
- [18] 杨彪. 大功率微波加热系统热性能数值模拟及智能控制研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014: 65-73.  
(Yang B. Research on numerical simulation and intelligent control of thermal performance of high power microwave heating system[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2014: 65-73.)
- [19] Ren W. Second-order consensus algorithm with extensions to switching topologies and reference models[C]. Proceedings of the American Control Conference. New York, 2007: 1431-1436.
- [20] Ren W, Beard R W. Distributed consensus in multi-vehicle cooperative control[M]. London: Springer, 2008: 113-115.
- [21] Tamang S, Aravindan S. 3D numerical modelling of microwave heating of SiC susceptor[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 162(3): 114250.

## 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、多物理场耦合软测量及数值计算等研究, E-mail: ybiaocn@163.com;

高皓(1993—), 男, 硕士生, 从事微波加热控制系统的数值计算与研发、多智能体的协调输出与分布式协同控制的研究, E-mail: oinops@outlook.com;

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

成成(1995—), 男, 博士生, 从事微波冶金多物理场耦合分析、模型预测控制理论与方法的研究, E-mail: 1072024993@qq.com;

杜婉(1996—), 女, 硕士生, 从事冶金多物理场耦合分析、微波冶金过程智能控制、复杂生产过程的优化控制的研究, E-mail: duwan916@163.com;

刘承(1996—), 男, 硕士生, 从事冶金多物理场耦合分析、微波加热数据建模及其温度控制的研究, E-mail: 3166530586@qq.com;

马红涛(1996—), 男, 硕士生, 从事冶金多物理场耦合分析及数值计算、微波加热温度模型降维、微波加热温度控制的研究, E-mail: mahone2077@126.com.

(责任编辑: 闫妍)