

文章编号: 2095-4980(2015)02-0255-07

## 基于专家 PID 控制的微波加热功率主动控制方法

李荣昆, 周新志, 雷印杰

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 针对现有微波功率控制方法存在的过渡时间长, 稳定性差等问题, 提出微波源功率专家比例积分微分(PID)主动控制法, 在防止出现“热失控”的前提下, 根据物料的介电特性、反射功率等先验知识, 建立专家控制规则库, 将控制规则预存于控制器, 解决微波加热过程实时控制难, 控制精确度差等问题。仿真实验结果证明, 专家 PID 控制比经典 PID 控制达到稳态的用时节约 70%, 效率提高 89%, 精确度提高 87%。

**关键词:** 非线性系统; 微波加热; 专家比例积分微分(PID)控制; 功率控制; 热失控

**中图分类号:** TN015

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201502.0255

## Active control on microwave heating power based on expert-PID control

LI Rongkun, ZHOU Xinzhi, LEI Yinjie

(School of Electronic and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China)

**Abstract:** It is difficult to describe the microwave heating procedure with accurate mathematical modeling since it is nonlinear and time-delayed. The existing microwave power control methods generally adjust and control parameters according to the results identified by the system. Because those methods feature a long transition time and low stability, a method of expert-Proportion Integration Differentiation (PID) active control on the source power of microwave is proposed. When 'thermal runaway' is prevented, the database of experts' control rules is set up in line with such prior knowledge as dielectric properties and reflected power of materials. The control rules are in advance stored in the controller, so the problems of hard real-time control and low accuracy of control in the microwave heating procedure can be solved. Compared with the classical PID control, the simulation findings show that the expert-PID control saves about 70% of time taken to reach the state of being stable, improves the efficiency by 89% and increases the accuracy by 87%.

**Key words:** nonlinear system; microwave heating; expert-Proportion Integration Differentiation(PID) control; power control; thermal runaway

微波加热技术从上世纪 60 年代开始逐渐应用于工业、食品、采矿等领域, 具有加热速度快, 热量损失小, 成本低等优点。与传统加热方式不同, 微波加热过程遵循麦克斯韦电磁方程和热传导方程。加热过程中微波的输出功率-物料温度-加热时间呈互相关联的非线性关系, 很难用精确的数学模型来描述, 传统的控制方法无法对微波功率进行有效的实时控制。本文通过对“热失控”影响因素分析以及被控对象的动态特征辨识, 提出一种专家 PID 微波源功率主动控制方法。根据系统在不同升温阶段物料特性对反射功率和温度增量的影响, 在专家控制规则和经验指导下确定控制模式和整定 PID 控制参数, 调整微波源功率输出, 使物料温度快速向目标温度靠近并具备良好的稳定性和抗干扰性, 从而改善系统的控制效果, 实现微波功率的主动实时调节。

### 1 相关工作与本文方法综述

#### 1.1 相关工作综述

在现有的微波功率控制方法的研究中, LI 等<sup>[1]</sup>通过建立微波加热的线性模型并求出传递函数, 从而实现微波

收稿日期: 2014-08-04; 修回日期: 2014-09-17

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2013CB328903)

输出功率调制。模型建立的合理性依赖于对功率反射率、热对流等因素测量的准确性。通常情况下, 这些参数的测量都有一定的误差, 因此控制系统输出的微波功率通常不是最佳值, 可能会导致超调的出现。Borrell 等<sup>[2]</sup>提出一种综合运用手动控制、开环控制和 PID 控制的混合控制方法, 离散状态下运用手动控制、开环控制, 连续状态下运用 PID 控制, 这种方法的控制效果受限于操作人员的经验丰富程度和模型建立的准确程度。傅天煜<sup>[3]</sup>等针对隧道式微波加热温度提出自整定模糊 PID 控制, 通过计算得出物料实际测量温度和目标温度的偏差并进行模糊化处理, 按模糊规则校正 PID 参数, 控制输出功率。这种方法仅对温度进行检测分析, 忽视了加热过程中物料的其他特性对控制精确度的影响。刘长军等<sup>[4]</sup>提出基于温度阈值的双微波功率控制方法, 先用较大功率微波快速升温至一定温度阈值, 再降低至最终功率维持物料的稳态温度, 这种方法可以防止热失控的出现, 同时缩短进入稳态的过渡时间, 但系统可调性不强, 易出现波动。杨琴<sup>[5]</sup>等提出对温度和吸收功率建立目标函数, 通过网格划分实现微波功率的目标优化控制。这种控制法能有效避免热失控的出现, 但这种控制方法需要有丰富经验数据作为先验知识。

总之, 这些方法在一定程度上提高了微波加热系统控制的精确度, 加快了系统进入稳态的速度, 但这些方法都是根据系统辨识的结果来调整控制参数, 不同程度地存在过渡过程长、稳定性差和稳态误差大等问题, 系统控制的主动性、稳定性和控制精确度等方面还有待提高。因此有必要建立一种新的、有效的微波功率控制方法, 在保证安全运行的条件下, 根据物料对微波的响应和物料温升状态调整微波的输出功率, 以实现微波能的高效应用。

## 1.2 本文方法综述

在微波加热过程中, 物料在吸收微波功率提高温度的同时还产生反射、折射和透射等能耗, 物料的电导率、介电常数、热传导系数等特性随温度的变化而变化<sup>[6-9]</sup>。本文将微波加热系统的能耗简化为 2 部分: 一部分用于加热物料, 另一部分则以反射、折射和透射等形式所耗散。将文献[1]中的物料在微波加热系统中的温升方程简化为:

$$\frac{dT}{dt} = KQ(T)K''(T)(P - P_d) \quad (1)$$

式中:  $T$  为温度;  $K$  为由物料特性决定的系数;  $Q(T)$  为谐振腔的负载品质因素;  $K''(T)$  为微波损耗因子;  $P$  为输入功率;  $P_d$  为微波的耗散功率。由于热对流和传导等损耗对控制影响较小, 本文将耗散功率简化为反射功率进行分析。本文设计的专家 PID 主动控制算法将试样加热升温的微波功率反射特性、稳态温度与功率的关系作为先验知识, 以温差  $e$ 、温差变化量  $\Delta e$  及反射功率为识别依据, 按照预设专家控制规则控制输出和整定 PID 参数(见 2.4)。算法的流程见图 1,  $e_n$  为  $n$  时刻的温差,  $e_b$  为预设值,  $P_H$  为反射功率,  $\Gamma$  为反射功率系数。

控制思路: 当温差较大时, 系统以较大功率加热, 加快物料向目标温度靠近的速度; 同时, 按照一定的采样周期对物料表面温度进行监测; 当温度到一定阈值后, 改变功率控制方式, 根据专家系统的指导进行 PID 参数调节, 直至最终使物料稳定在目标温度。系统的响应情况同时反馈到专家知识库进行储备, 知识库对控制规则的有效性进行判断并进行优先级排序, 系统结构见图 2。图中,  $T_0$  为被加热物料的目标温度,  $T_i$  为采样温度,  $R_p$  为功率反射率,  $K_p, K_i, K_d$  为 PID 的输入变量。

## 1.3 本文创新之处

本文分析了物料的微波反射功率和温度增量对微波加热过程控制的影响, 研究了热失控现象的防控, 综合运用专家控制和 PID 控制方法, 利用专家控制进入稳定状态快、鲁棒性好等优点, 解决微波加热过程控制的时变性和滞后性等问题。在控制过程中, 专家系统根据对象特性设计控制规则并将规则下的调整方法及调整参数预存于控制器, 控制器不是按系统对控制量辨识的结果或某一目标函数整定 PID 参数, 而是按当前状态对参数进行调整, 从而真正实现控制的主动性, 改善系统的控制效果。

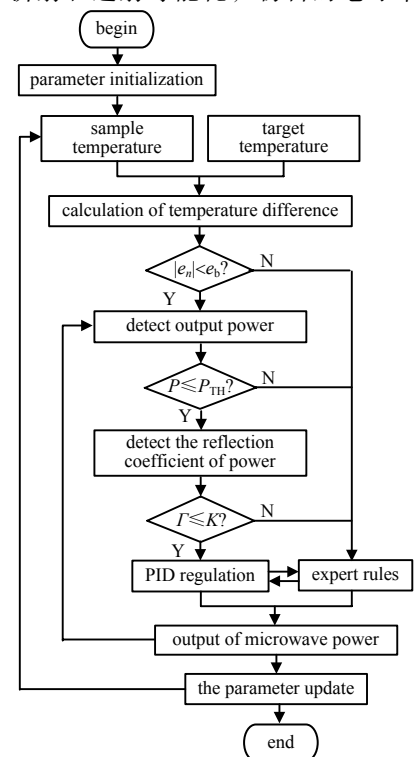


Fig.1 Flow chart of Expert-PID active control algorithm for microwave power  
图 1 微波源功率专家 PID 主动控制算法的流程图

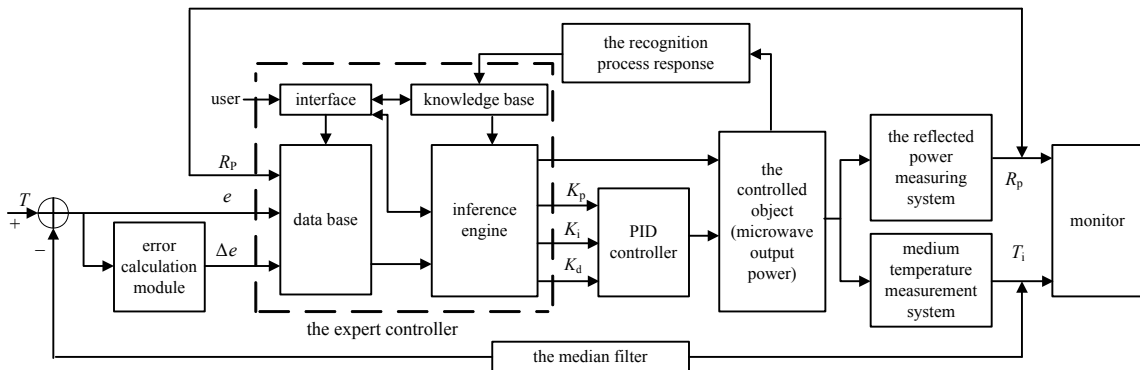


Fig.2 Structure of microwave heating Expert-PID control system  
图 2 微波加热专家 PID 控制系统结构图

## 2 专家 PID 控制的实现

### 2.1 热失控现象的分析与控制

热失控是微波加热过程中出现的一种非稳定的热现象，是微波和物料相互作用形成正反馈的结果，微波输入功率的微小改变会引起加热对象温度迅速发生很大变化。黄卡玛等<sup>[10]</sup>研究认为热失控与控制系统的温度传感器响应时间、输入功率以及物料介电常数、形态等有关；刘长军等<sup>[11]</sup>研究认为加热对象的材料特性，如几何参数、介电常数、导热系数和电导率对温度的依赖关系会影响热失控的功率阈值。

微波加热过程中，如果一直以低功率加热，能有效避免热失控，但加热效率很低。为提高加热效率和避免热失控的出现，本文设定了安全上限功率  $P_H$  和门限温度  $T_0$ 。系统最开始以安全上限功率运行，当物料温度到达门限温度后，系统开始按照专家系统的预设规则调整输出功率。文献[10]研究了微波腔中出现热失控时温度场的变化情况。假定系统从上限功率降至最终稳态功率的时间为  $\Delta t$ 。在  $\Delta t$  时间内，如果物料的温升  $\Delta T > T(P_{TH}) - T_0$ ，系统将出现热失控。当物料温度达到门限温度后，为防止热失控出现，微波的温度场的变化应当满足下列条件：

$$\left. \frac{\partial T}{\partial E_{in}} \right|_{T=T_0} < \frac{T(P_{TH}) - T_0}{P\Delta t} \quad (2)$$

式中： $T$  选取腔内物料的最热温度； $E_{in}$  为输入微波反应器的微波能量； $P$  为输入反应器的微波功率； $T(P_{TL})$  和  $T(P_{TH})$  分别为微波功率阈值  $P_{TL}$  和  $P_{TH}$  在上分支和下分支对应的稳态温度，参见图 3。

### 2.2 功率上限的确定

设定微波加热功率的上限值要以试样温升实验数据为依据。以微波加热陶瓷为例，微波加热的一维数学模型<sup>[12]</sup>见图 3，其中  $P_{TL}$  和  $P_{TH}$  分别为稳态温度曲线的上、下支临界稳态温度对应的功率值。在低温初始条件下，微波功率  $P_{TH}$  附近的一个微小变化就会导致陶瓷稳态温度突变，从而出现热失控现象。故可设定  $P_H \approx P_{TH}$  为微波加热中热失控的功率上限值。

### 2.3 门限温度阈值的确定

在低温初始条件下，微波加热系统是非线性、感应滞后系统，专家控制系统既要使物料温度向目标值靠近，又要避免因惯性过大造成振荡或热失控。故直接以大功率输出与 PID 调整切换的门限温度阈值  $T_0$  选择是确保系统控制安全和平稳的关键。门限温度设定过高，易造成热失控的出现；门限温度设定过低，会增加达到稳态温度的时间。设  $P_0 (P_{TL} < P_0 < P_{TH})$  为物料目标温度  $T_0$  对应的微波功率，则门限温度  $T_0$  限定为：

$$T_0 \leq T(P_{TH}) + \frac{T(P_{TL}) - T(P_{TH})}{P_{TH} - P_{TL}} (P_0 - P_{TH}) \quad (3)$$

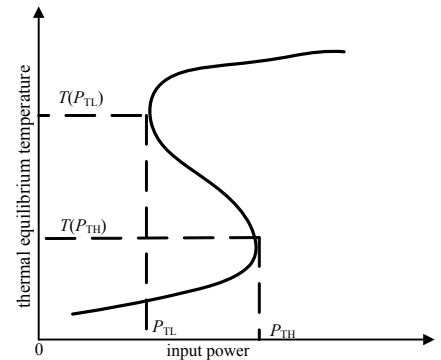


Fig.3 Relation between the microwave power and center temperature of ceramic  
图 3 微波功率与陶瓷中心稳态温度关系

2.4 专家 PID 控制方法中的专家系统指导

在专家 PID 控制系统设计中，规则库的设计是最重要也是最复杂的一项工作。PID 控制器进行参数整定。在 PID 控制器参数( $K_p, K_i, K_d$ )初始值设定之后，将不同系统状态下对应的 PID 控制器  $K_p, K_i, K_d$  的选取值和输出功率  $U$  预存到专家系统的规则库中。系统根据实际运行的控制效果不断对规则库进行调整和完善，优先采用控制效果好的规则进行控制。表 1 为本文初期设计的较简单的控制规则及 PID 参数调整趋势。在项目发展过程中，专家 PID 控制的规则库在实验过程中得到不断的优化和完善，规则库会逐渐趋于复杂化。

表 1 专家控制整定 PID 参数规则调整趋势分析表

Table1 Trend analysis table of Expert control adjust PID parameter

NO.	system state	state analysis	system output
1	the required output is greater than the upper limit value	debase on the rise of sample temperature	$U=P_H, P_H \gg P_{TH}$
2	the power reflectivity is too large	the material's microwave absorption rate is reduced, affecting the rate and limits of temperature rise	according to the sample temperature, reduce the output
3	$e(k) > e_b$	no matter how $\Delta e$ changes, control system outputs the maximum, speeds up the response and adjusts the error rapidly	$U=P_H, P_H \gg P_{TH}$
4	$e_a \leq  e(k)  < e_b$	$e(k)\Delta e(k) > 0$	the system deviation is increasing, the suddenly increase of $e$ may cause system differential super saturation, no matter $e(k) > 0$ or $e(k) < 0$ , should curb this trend, in order to avoid overshoot
5		$e(k)\Delta e(k) < 0$	the absolute value of error decreases, the temperature is close to the target temperature, reduce the amount of control
6		$e(k)\Delta e(k) = 0$	error in the extreme point, reduce the amount of control
7	$ e(k)  < e_a$	the system error is smaller, using traditional PID control, to avoid oscillations near the equilibrium point	reduce $K_p, K_i$ , and $K_d$ takes a medium or small value
8	$ e(k)  < \varepsilon, \varepsilon$ as a permissible error	system error is very small, add integral to reduce steady-state error	$K_p=0, K_d=0$ , and $K_i$ takes a small value

设  $e_a$  和  $e_b (e_a < e_b)$  为温差  $e$  的 2 个临界值， $e_a = T_{TH} - T_0$ ， $e_b = T_{TH} - T_0$ 。  $T_i(k)$  表示离散化的  $k$  时刻采样温度；令  $e(k) = T_i(k) - T_0$  表示第  $k$  次采样得到的温差； $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$  表示  $k$  时刻的温差变化量， $K_p$  为比例系数， $K_i$  为积分系数， $K_d$  为微分系数。在低温初始条件下，设定微波输出功率上限： $U_{max} = P_H, P_H \gg P_{TH}$ 。

3 实验与仿真

3.1 实验背景

本文用于微波加热温度采样实验的物料为海拉尔出产的褐煤，重 100 kg，初始状态含水量约为 10%~35%。在褐煤静止状态下，通过人工依据经验调节微波加热系统的输出功率。实验设备为样机，见图 4，目前处于调试阶段。实验设备原理见图 5，主要由微波源系统、波导系统、微波加热传感信息检测系统和实时控制系统 4 部分组成。

实验设备采用红外温度传感器对温度进行采样，传感器安装于腔体中央位置。实验设备的技术参数见表 2。



Fig.4 Microwave heating equipment  
图 4 微波加热设备

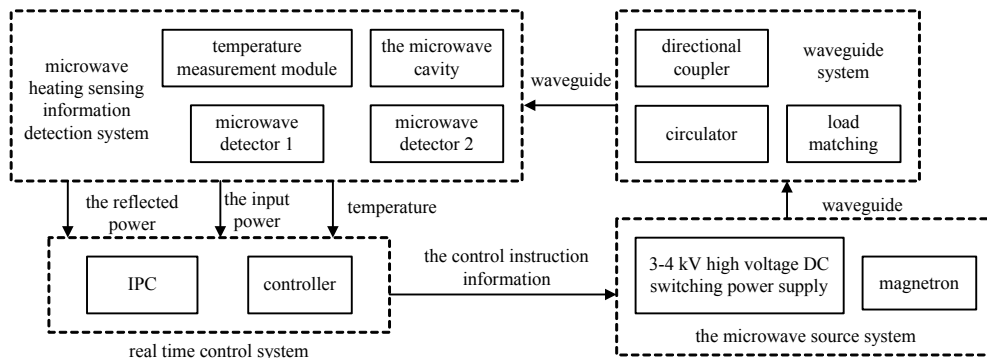


Fig.5 Diagram of microwave power control experimental system  
图 5 微波源功率控制实验系统原理图

表 2 实验设备技术参数表  
Table 2 Technical parameters of experimental equipment

$f/\text{MHz}$	output/kW	size(L×W×H)/mm <sup>3</sup>	input voltage/V	microwave leakage limit/(mW·cm <sup>-2</sup> )	cavity material
2 450	50(adjustable)	5 000×2 000×1 500	380	≤1	304 industry stainless steel

### 3.2 实验数据获取

在试样微波加热实验中, 实验环境温度 15 ℃, 采用手动方法调节设备的输出功率, 实时对加热对象进行温度采样并记录数据, 温度采样周期  $T_s=30\text{s}$ , 同时记录输出功率和反射功率。在确保不出现热失控的前提下逐步调整设备的输出功率, 得到实验过程中物料的稳态温度、输出功率的数据, 消除数据毛刺并进行数据拟合, 得到相应曲线分别见图 6 和图 7。

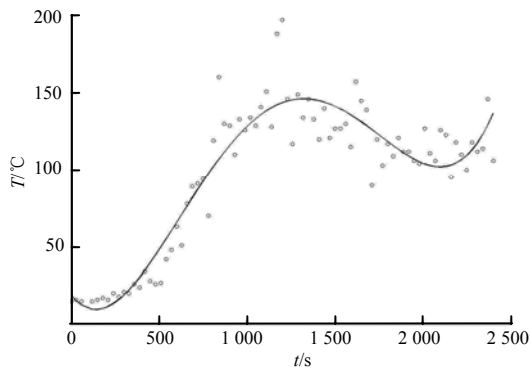


Fig.6 Experiment data of sample heating(time-temperature)  
图 6 试样升温实验数据(时间-温度)拟合曲线

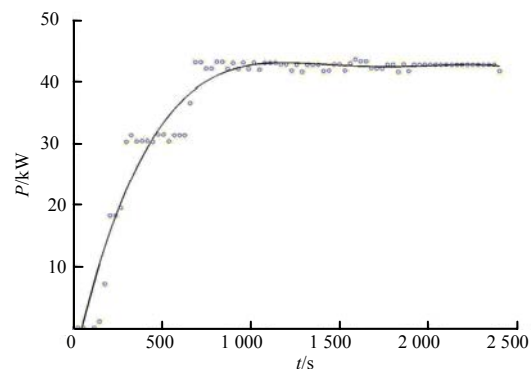


Fig.7 Experiment data of sample heating (time-power)  
图 7 试样升温实验数据(时间-功率)拟合曲线

从实验可知, 试样升温过程可以分为稳定升温、近似恒温和跳变这 3 个阶段; 稳定升温阶段, 物料的温度随微波输出功率的增大稳定上升, 输出功率越大, 温升越快; 当微波输出功率到 42.3 kW 后, 物料稳态温度开始出现跳变, 分析原因, 可以排除由温度传感器误差造成, 可能是升温过程物料中的水分逸出, 水蒸气的存在使温度出现不稳定; 物料在加热阶段出现损坏可能发生在高温跳变阶段, 这与其他资料<sup>[13]</sup>中的结论类似; 在不施加控制的情况下, 输出功率近似维持稳定时, 物料的温度无法保持稳定, 出现波动, 因此对微波源的输出功率进行有效控制是非常必要的。

### 3.3 控制效果仿真对比

定义相对温度  $\theta_c=(T_i-T_e)/(T_o-T_e)$ ,  $T_i$  为采样温度,  $T_e$  为实验环境温度。PID 控制器系统初始参数取参考值, 煤的密度和比热系数选取实验参考值, 相对介电常数  $\epsilon=2.31$ , 在 matlab 中, 分别对经典 PID 控制、模糊 PID 控制和专家 PID 控制进行仿真。其中专家 PID 控制相对偏差临界值:  $E_a=0.08$ ,  $E_b=0.10$ , 门限温度相对值  $\theta=0.8$ , 上限功率值为 43 kW。

#### 1) 不同控制方法的相对温度响应情况

经典 PID 控制、模糊 PID 控制和专家 PID 控制这 3 种控制方法仿真得到的相对温度响应曲线分别对应图 8 中的曲线 A,B,C。设与目标温度误差  $\leq 5\%$  即满足控制要求。

从仿真实验数据可知, a) 控制速度方面: 经典 PID 控制温度达到稳态用时 2 260 s, 模糊 PID 控制用时 720 s, 少用时 1 540 s, 专家 PID 控制则用时 760 s, 少用时 1 500 s; b) 控制稳定性方面: 经典 PID 控制受惯性的影响, 经过 9 次波动才达到稳态, 模糊 PID 控制经过 2 次波动到达稳态, 专家 PID 控制只出现一次波动; c) 控制准确性方面: 经典 PID 控制的最高相对温度达到 1.623, 误差高达 62.3%; 模糊控制的相对温度波峰波谷值分别为 1.137 和 0.897 3, 误差分别为 13.7% 和 -10.27%; 专家 PID 控制的最高相对温度为 1.079, 误差为 7.9%。由此可以看出经典 PID 控制很难实现对微波加热过程的有效控制, 而模糊 PID 控制和专家 PID 控制都能较好地实现对微波加热过程的调控。

通过实验对比发现, 和经典 PID 控制相比, 专家 PID 控制达到稳态用时节约 70%, 效率提高 89%, 精确度提高 87%, 所以专家 PID 控制在控制的响应速度、稳定性和精确度方面均优于经典 PID 控制。

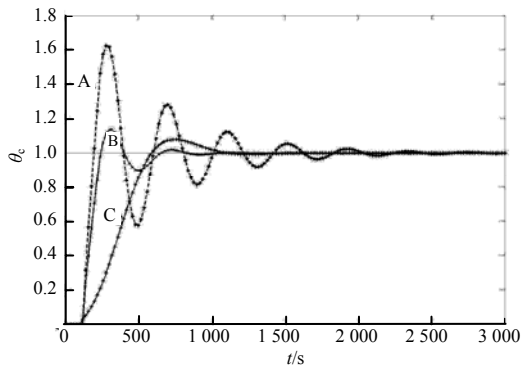


Fig.8 Relative temperature responses of different control modes  
图8 不同控制方式的相对温度响应波形图

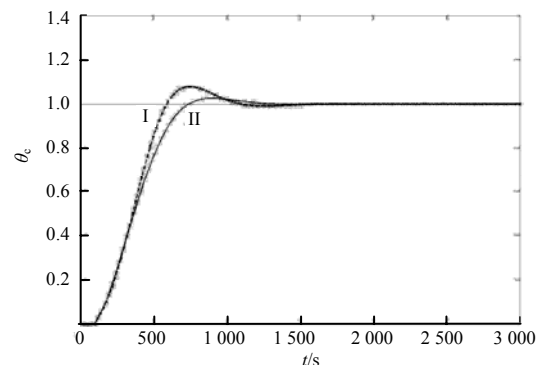


Fig.9 Relative temperature responses of different threshold temperatures  
图9 不同门限温度的专家PID控制相对温度响应波形图

与模糊PID控制相比,专家PID控制到达稳态的时间稍长。分析原因,可能是为确保系统运行安全,专家PID控制的上限功率设定值小于模糊PID控制中的最大输出功率。专家PID控制的稳定性和准确性均优于模糊PID控制。故综合考虑系统运行安全和控制效果,优选专家PID控制以实现微波源输出功率的主动控制。

#### 2) 不同门限温度对专家PID控制的影响

选取  $\theta_1=0.8, \theta_2=0.6$  对专家PID控制效果进行仿真,得到相对温度响应曲线分别对应图9中的曲线I和II。

从实验数据可知, a) 控制速度方面:专家PID控制I到达稳态用时760 s,而专家PID控制II则用时880 s,多用时120 s; b) 控制稳定性方面:专家PID控制I和II都只出现一次波动; c) 控制准确性方面:专家PID控制I的最高相对温度为1.079,误差为7.9%;专家PID控制II的最高相对温度为1.026,误差为2.6%。从实验可知,相对门限温度的选择会影响到专家PID控制误差的大小,相对门限温度越大,误差越大,当相对门限温度大到一定值阈时,即使较小的输出功率也可能会造成热失控的出现,这与文献[4]的实验结论一致。

## 4 结论

本文提出微波加热功率专家PID主动控制法,根据试样升温实验获得的先验知识设计控制规则,在专家系统的指导下进行PID控制参数整定。通过微波加热控制效果的仿真对比可以看出,使用专家PID主动控制方法后,微波加热系统的动态性能有较大提高,系统进入稳定状态快,超调量下降明显且不会出现振荡,对实际工程有很重要的意义。获取知识建立对应的知识库并建立对应的规则库是专家PID控制系统的核心所在。建立的专家系统控制规则是否科学和合理直接影响到控制的效果好坏。在工程应用中,根据先验知识设计的专家控制系统控制规则是不够完善的,更多的要通过后续的系统学习来完善和优化,通过对反馈数据的分析和对控制效果的判别,设计新的控制规则,对控制效果进行排序,采用优先级高的规则来实施系统的控制,从而达到更优的控制效果。

#### 参考文献:

- [1] LI Mengli, Beale Guy O, TIAN Yonglai, et al. Modeling and control for microwave heating of ceramics[C]// Proceedings of the American Control Conference. Seattle, WA: IEEE Press, 1995, 2: 1235-1239.
- [2] Borrell A, Salvador M D, Peñaranda-Foix F L, et al. Adaptive microwave system for optimum new material sintering[C]// 2013 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Seattle, WA: IEEE Press, 2013: 1-4.
- [3] 傅天煜, 王希, 杨国辉. 隧道式微波加热温度自动控制电路模块的设计[J]. 微波学报, 2010(s2): 285-288. (FU Tianyu, WANG Xi, YANG Guohui. Design of automatic-temperature-control circuit module in tunnel microwave heating system[J]. Journal of Microwaves, 2010(s2): 285-288.)
- [4] 刘长军, 申东雨. 微波加热陶瓷中热失控现象的分析与控制[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2008, 38(7): 1097-1105. (LIU Changjun, SHEEN Dongwoo. Analysis and control of the thermal runaway of ceramic slab under microwave heating[J]. SCIENCE CHINA: Technological Sciences, 2008, 38(7): 1097-1105.)
- [5] 杨琴, 周新志. 基于网格划分策略的微波功率的实时控制[J]. 测控技术, 2014, 33(3): 68-71. (YANG Qin, ZHOU Xinzhi. Microwave power real-time control based on grid partition strategy[J]. Measurement & Control Technology, 2014, 33(3): 68-71.)

- [6] Beale Guy O, LI Mengli. Robust temperature control for microwave heating of ceramics[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1997,44(1):124-131.
- [7] WU X, Thomas J R Jr. Control of thermal runaway in microwave resonant cavities[J]. Journal of Applied Physics, 2002,92(6):3374-3380.
- [8] Nelson S O, Bartley P G Jr. Measuring frequency-and temperature-dependent permittivities of food materials[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2002,51(4):589-692.
- [9] Parris P E, Kenker V M. Thermal runaway in ceramics arising from the temperature dependent of the thermal conductivity[J]. Phys. Status Solidi B, 1997,200(1):39-47.
- [10] 黄卡玛, 卢波. 微波加热化学反应中热失控条件的定量研究[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009,39(2):266-271. (HANG Kama, LU Po. The precise condition of thermal runaway in microwave heating on chemical reaction[J]. SCIENCE CHINA: Technological Sciences, 2009,39(2):266-271.)
- [11] 刘长军, 闫丽萍, 黄卡玛. 微波加热中“热失控”的一维数值模拟[C]// 2005 全国微波毫米波会议论文集(第 3 册). 广东, 深圳:[s.n.], 2005:1040-1043. (LIU Changjun, YAN Liping, HUANG Kama. One dimensional numerical simulation on the thermal runaway during microwave heating[C]// Microwave&Millimetre-wave Symposium of China(2005'CNMWS). Shenzhen, Guangdong, China:[s.n.], 2005:1040-1043.)
- [12] Kriegsmann G A. Thermal runaway in microwave heated ceramics-A one-dimensional model[J]. Journal of Applied Physics, 1992,71(4):1960-1966.
- [13] WANG Sen, HE Tingshu, SUN Yuanjun, et al. Temperature and power control in microwave drying of molybdenum[C]// 2011 International Conference on Information Science and Technology(ICIST). Nanjing, Jiangsu, China:[s.n.], 2011:402-405.

#### 作者简介:



李荣昆(1983-), 男, 四川省资阳市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为智能控制技术. email:rongkunlee@163.com.

周新志(1966-), 男, 成都市人, 博士, 教授, 主要研究方向为人工智能、智能控制技术及应用、分布式测控系统等.

雷印杰(1983-), 男, 成都市人, 博士, 讲师, 主要研究方向为模式识别、智能系统.

(上接第 254 页)

- [11] Choi Gil Wong, Kim Hae Jin, Kim Hyoung Jong, et al. The self-injection-locked magnetron[C]// 2008 Vacuum Electronics Conference(IVEC 2008). Monterey, CA:IEEE, 2008:445-446.
- [12] 魏惠月. L 波段磁控管锁相及功率合成技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2011. (WEI Huiyue. Research of magnetron phase-locking and power combining at L band[D]. Chengdu Sichuan, China:University of Electronic Science and Technology of China, 2011.)

#### 作者简介:



霍飞向(1990-), 男, 陕西省渭南市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为电磁场与微波技术. email:huofeixiang@gmail.com.

刘征宇(1989-), 男, 四川省绵阳市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为电磁场与微波技术.

黄何平(1987-), 女, 河南省南阳市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为电路与系统、无线电物理.

银振宇(1990-), 男, 四川省乐山市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为电磁场与微波技术.

刘长军(1973-), 男, 河北省邢台市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电磁场与微波技术.