

# 基于前馈模糊逻辑的微波功率控制设计与分析

吴建凯<sup>1,2</sup>, 屈卫东<sup>1</sup>, 王金荣<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学 自动化系, 上海 201206;

2. 康宁(上海)有限公司, 上海 200000)

**摘要:** 描述和设计了一类生产陶瓷载体的大型微波干燥控制系统; 针对微波干燥过程中微波功率控制不准确、产品缺陷率高的问题, 分析了过程变量与控制变量之间的关系特点, 并在现有算法基础上, 设计了一种基于前馈模糊逻辑的微波功率控制模型; 最后对此控制模型设计算法, 并应用于实际进行实验分析, 得出了很好的效果。

**关键词:** 微波; 干燥; 基于模糊逻辑前馈; 微波功率控制

## Design and Analysis on Fuzzy Logic—Based Feed—Forward Microwave Power Control

Wu Jiankai<sup>1,2</sup>, Qu Weidong<sup>1</sup>, Wang Jinrong<sup>2</sup>

(1. Dept. of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 201206, China;

2. Kangning (Shanghai) Company, LTD., Shanghai 200000, China)

**Abstract:** This paper describes and designs a type of large-scale drying control system that produces ceramic substrate. Aiming at the inaccurate Microwave power control and high defect product issues, the article analysis the relation of process variables and control variables, and design an model of Feedforward Based Fuzzy Logic Power Control based on the current control algorithm. At last, we develop the control program and apply it in production with experiment, and conclude a very good result.

**Key words:** microwave; drying; fuzzy logic—based feed—forward; microwave power control

### 0 引言

微波干燥具有以下优点: 加热速度快、可选择性加热、加热均匀和有效利用能量, 因此微波干燥技术被广泛应用于微电子材料、蜂窝陶瓷载体和农业等领域。近些年国内外对微波干燥的研究主要集中在干燥工艺方面, 很少涉及到过程自动化和控制智能化方面的研究。

微波干燥是一个多变量、非线性和大滞后的一个过程, 很难精确地描述其数学模型。一旦微波输出功率没控制好, 会严重影响产品质量, 降低生产效率。因此本文设计一种智能控制方式, 对微波输出功率与被干燥的物料长度和重量建立模型关系, 并实验证明其效果。

### 1 微波干燥过程与控制

#### 1.1 微波干燥原理及控制系统介绍

用于干燥蜂窝陶瓷产品(Log)的隧道式微波干燥系统由3~5个微波发生器和干燥炉腔组成。如图1所示, 每个炉腔连接一个微波发生器, 发生器产生的微波能通过波导器传导至干燥炉腔。单个微波发生器功率为100 kW, 总共400~500 kW。“挤出”的产品Log被放在托架上以一定速度通过所有炉腔, 并不断吸收各炉腔中的微波能, 使水分蒸发干。

产品在经过干燥后, 质量取决于Log的最终温度或干燥度, Log的最终温度应控制在105~120℃, 由温度决定Log干燥程度(如图1)。而温度由微波发生器的功率输出决定, 因此微波功率须控制精确, 否则会产生大量缺陷产品(如气泡、弯曲度问题)<sup>[1]</sup>。

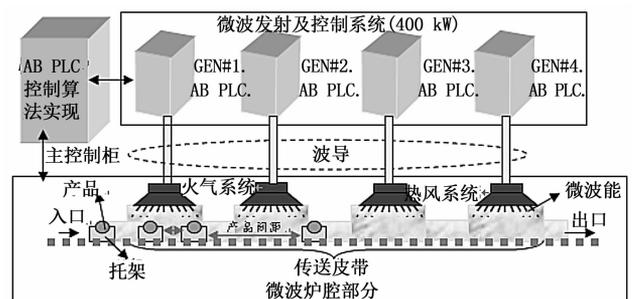


图1 微波干燥控制系统

按功能划分微波干燥控制应包含4个子系统(图1所示)。微波发生器、主控制系统、火气系统和热风控制系统。其中“微波发生器”控制磁控管产生微波。“主控制系统”协调各子系统并控制炉腔和功率;“火气系统”用于监控火灾;“热风系统”用于通风和保持炉腔温湿度。控制系统均采用Allen—Bradley的控制解决方案, 包括ControlLogix5000、红外线温度探头(Pyrometer)、伺服驱动(Kinetix6200)、变频驱动(Powerflex753)等传感和执行设备。

收稿日期: 2013-10-12; 修回日期: 2013-12-29。

作者简介: 吴建凯(1983-), 男, 江西上饶市人, 在职硕士研究生, 主要从事控制工程方向的研究。

### 1.2 微波功率控制问题

前面说到 Log 的出口温度/干燥度决定着产品质量, 而 Log 表面温度由微波功率决定。

文献 [2] 描述了一种根据每个炉腔里 Log 的数量来控制发生器输出功率的方式。文献 [3] 中, 作者是通过测量炉腔里的反射功率来与设定值进行比较, 根据偏差来对微波输出功率进行 PID 调节<sup>[2]</sup>。而当前应用广泛的微波功率控制方式是基于某一炉腔的物料长度, 控制关系式如式 (1) 所示<sup>[4]</sup>:

$$\text{输出功率} = \left[ \frac{\text{实际物料长度}}{\text{可达最大物料长度}} (P_{\text{Max}}^{\text{Setpoint}} - P_{\text{Min}}^{\text{Setpoint}}) \right] + P_{\text{Min}}^{\text{Setpoint}} \quad (1)$$

这里, 实际物料长=单位长度×根数; 最大可达物料长度由炉腔长度、前端挤出速度、传送皮带等决定。这一功率控制方式能将温度标准差控制在 8~9 °C。但如果两产品间距超过正常值, 就会导致 Log 温度偏差大, 且间距越大其温度偏差就越大, 呈非线性关系。同时, 不同重量的产品会形成干扰, 影响 Log 温度。因此本文设计了以下智能功率控制方式, 以减少 Log 过冷或过热, 并降低温度偏差。

## 2 基于前馈的模糊逻辑功率控制设计

### 2.1 前馈控制与模糊逻辑原理

前馈控制被应用于补偿和克服外部干扰对控制变量的影响, 且补偿必须是在干扰对控制量产生影响之前。对于微波干燥控制, 其前馈控制器主要是通过监测干扰变量实际物料长度和 Log 的重量变化, 来补偿和消除它们对 Log 温度的影响<sup>[5]</sup>。

模糊逻辑控制<sup>[6]</sup> (FLC) 作为一种智能控制通常用于控制复杂的非线性系统。模糊控制是基于模糊规则“IF X AND Y THEN Z”去解决控制问题, 而非建立数学模型, 因此模糊控制有赖于经验知识或直觉, 模糊逻辑包括: 模糊化、规则库、推理机以及解模糊<sup>[6]</sup>。

### 2.2 微波控制系统设计

由前面知道控制量与干扰变量呈非线性关系, 本文设计了基于前馈补偿的模糊控制方法, 如图 2 所示。这里物料长度 S 为模糊逻辑输入和过程干扰输入, 而重量 W 为非连续性的干扰变量。

图 2 所示过程系统的干扰变量 S 被监测到后被传送至模糊控制器, 模糊控制器再根据模糊规则和运算决定输入功率 (P<sub>out</sub>), 即微波发生器的微波功率设定值。最终过程系统的输出为微波炉腔出口的产品 Log 温度。

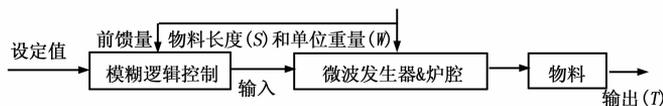


图 2 基于前馈的模糊逻辑原理图

#### 1) 模糊输入与隶属函数确定

设计中干扰变量“物料长度 S”和“单位重量 W”作为模糊控制器的输入变量。W 为非连续的量, 故不做模糊化。干扰输入量 S 模糊化: 将炉腔里“最大可达物料长度”按百分比划分为 5 个区间, 每个区为总可达长的 20% (如图 3 所示)。假设最大可达物料长度为 1 500 mm, 每个物料 300 mm, 则每个炉腔最多 5 个产品, 分成 5 等分, 那么每区域也是

300 mm。

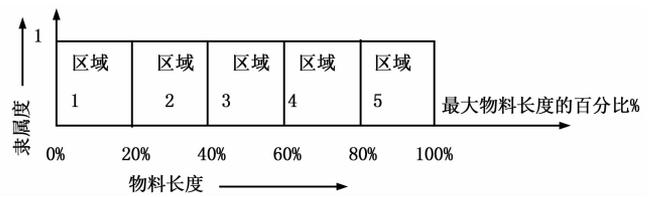


图 3 输入变量隶属函数

隶属度函数可以使用长方形、梯形函数和 S 函数, 为了方便计算, 这里使用长方形隶属函数来描述物料长度的模糊区域。输入论域量化后为: E = {0, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%}。模糊参考集 (语言描述) 为: F = {1 区, 2 区, 3 区, 4 区, 5 区}。

例如物料长度为 800 mm, 为最大可达物料长度的 53.3%, 属于 3 区。因此对应于语言变量“3 区”隶属函数 {0, 0, 1, 0, 0}。

#### 2) 模糊推理设计

这里采用假言推理的模糊控制规则:

已知: IF (所测得物料长度属于 N 区) THEN (基于 N 区参数计算微波功率 P<sub>N</sub>) (2)

实际: IF (所测得物料长度属于 N~区) THEN (基于 N~区参数计算微波功率 P<sub>N~</sub>)

其中, N~和 P<sub>N~</sub>分别为模糊量。某一物料长度所需微波功率 P 的具体计算按以下公式:

$$P = x_1(M - TI)^2 + x_2(M - TI) + x_3 \quad (3)$$

这里, M 为最大可达物料长, TI 为某炉腔实际物料长度。系数 x<sub>1</sub>、x<sub>2</sub>、x<sub>3</sub> 通过解以下方程获得:

$$AX = B \quad (4)$$

$$A = \begin{bmatrix} M^2 & M & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} P_{\min} \\ P_{\max} \\ \frac{(M-1)P_{\max}}{M} \end{bmatrix} \quad (5)$$

P<sub>max</sub> 为某炉腔最大功率设定值, 而 P<sub>min</sub> 则根据所测的物料长度所在哪一区域来决定。以上行列式 |A| = -M<sup>2</sup> + M, 当且仅当 M = 0 或 1 时, |A| 才为零, 而 M 被定义为最大可达物料长度, 永远大于 1. 所以方程 (5) 总有解。剩下问题就是求 P<sub>min</sub> 了, 因此模糊推理规则 (2) 可重新表述为:

IF (测得物料长度在 N 区) THEN (基于方程 (4) 和 (5) 和 P<sub>minN</sub> 计算功率 P) (6)

因此须知道 P<sub>minN</sub> (此炉腔物料长度在 N 区时的最小输出功率) 才能由模糊规则得出微波输出功率。现已知温度波动偏差大小跟产品 Log 重量存在以下关系:

$$\Delta T = a_1 W^3 + a_2 W^2 + a_3 W + a_4 \quad (7)$$

$\Delta T$  为产品间距引起的平均偏差温度,  $W$  为产品重量,  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  和  $a_4$  可通过对实验数据采用最小二乘法得出。因此要消除温差  $\Delta T$  需补偿的功率为:

$$\Delta P_{req} = \frac{\Delta T}{T_r} \quad (8)$$

$T_r$  (°C/kW) 为单位微波功率使产品提升的温度,  $\Delta P_{req}$  为产品间距波动情况下须补偿的微波功率。当产品间距过大时, 为使这一控制方法比采用之前的功率控制算法时的温度波动更少, 则需使以下费用函数 (Cost Function) 最小:

$$J = \left\{ \left[ \max \left[ \sum_{j=1}^{i=0\% \text{ to } 40\% \text{ 物料长}} (P_{P,i} - P_{L,i}) \right] \right] - \Delta P_{req} \right\} \quad (9)$$

这里  $P_{P,i}$  为经模糊逻辑得出功率输出,  $P_{L,i}$  为之前采用式 (1) 的所得功率输出。联合前面各方程并使费用函数最小, 可得到对应于  $N$  区间的  $P_{minN}$ 。同理当产品间距过小时, 可使费用函数:

$$J = \left\{ \left[ \max \left[ \sum_{j=1}^{i=60\% \text{ to } 100\% \text{ 物料长}} (P_{P,i} - P_{L,i}) \right] \right] - \Delta P_{req} \right\} \quad (10)$$

通过求费用函数的最优解使  $J$  最小可得到此时的最小功率  $P_{minN}$ 。而对于物料长度在中间区域 (40%~60%) 时的最小输出功率, 可通过分析历史数据得到一常数作为最小功率, 如 6 kW。

由此可求得  $P_{min}$ , 然后根据式 (3) 和式 (4) 最终求出输出功率  $P$ 。这里  $P$  为模糊变量, 需要进行解模糊, 即要经过模糊判决。对长方形或梯形做输入变量隶属函数, 可采用重心法 (加权平均值) 进行解模糊。例如, 物料长度在 1 区和 2 区之间, 分别得出 1 区输出功率  $P_1$  和 2 区功率  $P_2$ , 那么最终微波功率为:  $P = 0.5P_1 + 0.5P_2$ 。最终微波发生器产生  $P$  功率的微波。

### 3 系统软件设计

本控制逻辑可通过 PLC 程序实现, 将此模糊逻辑算法 (FLC) 作为一个模块植入到控制系统。但干燥系统有 5 个微波发生器和炉腔, 可采用分散化植入算法, 也可以集中化植入

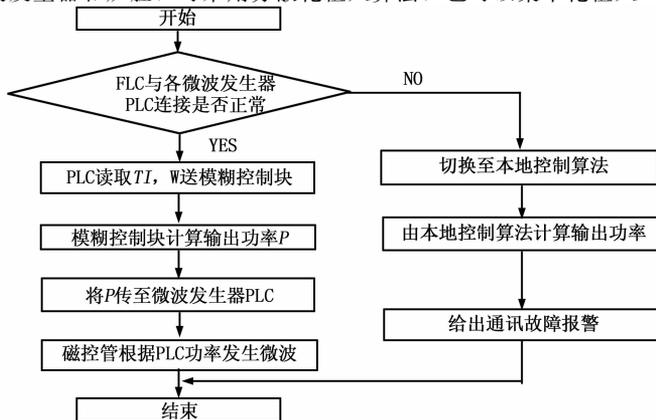


图 4 微波功率前馈模糊控制算法流程图

算法。分散化植入算法就是在每个微波发生器控制 PLC 植入一个模糊算法, 这样分散处理可提高安全性和分别处理的能力, 但开发和维护成本较高。因此本系统采用集中化植入算法, 即将前馈模糊控制逻辑统一植入到主控制系统来分别计算各微波发生器的输出功率。具体算法流程如图 4 所示。

### 4 试验结果与分析

根据前面描述的前馈微波功率控制系统模型, 应用 PLC 程序实现此算法。并应用此系统进行了 8 h 的实验。对实验数据进行统计分析, 图 5 为微波功率模糊控制算法应用前后的产品温度波动正态分布分布比较图, 可以看出在开启模糊控制算法前产品温度正态分布呈现扁胖形状, 温度偏差较大。在开启模糊控制后温度分布呈尖瘦形状, 产品温度偏差明显减小。应用后, 产品 Log 平均温度的波动范围减少了大概 18%, 同时, 在微波炉腔末端过热和过冷 Log 减少了将近 50%。

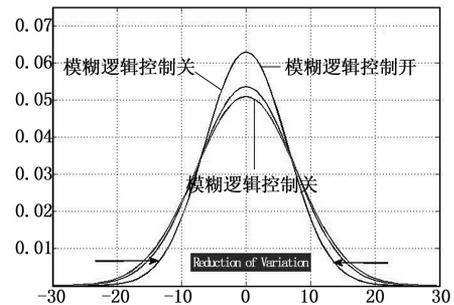


图 5 微波功率模糊控制算法应用前后的产品温度波动分布比较图

### 5 结束语

通过以上分析, 基于前馈模糊逻辑的微波控制系统能大量地减少由于微波发射功率波动所引起的产品温度波动问题, 从而减少产品缺陷率, 提高了生产效益, 同时也提高了控制过程的智能化程度, 简化了操作过程的和数据处理工作。

#### 参考文献:

[1] 王喜鹏. 微波真空干燥过程的特性及应用研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2006.  
 [2] Ishikawa S, Katou H, Goto S, et al. Apparatus for drying ceramic molded articles using microwave energy [P]. U. S. Patent, US 7, 087, 874, Aug 8, 2006.  
 [3] Araya C R. Method for microwave drying of ceramics [P]. U. S. Patent, US 6, 259, 078 B1, 2001.  
 [4] Harihara P, Terwilliger B. Feed-forward control of microwaves dryer [Z]. US, Corning Corporation, Technique Document, 2008.  
 [5] 马克茂, 朱 奕. 带有前馈补偿的模糊控制系统及其在锅炉水位控制中的应用 [J]. 计算机测量与控制, 2004, 12 (6): 537-539.  
 [6] 姜长生, 王从庆, 魏海坤, 等. 智能控制与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.