

漆包机烘炉热能平衡模糊控制系统设计与实现

张晓栋, 李扬, 陈少浩, 陈鼎, 王智

(广东工业大学 机电工程学院, 广州 510006)

摘要: 漆包机烘炉温度系统的实时性和稳定性, 关系到漆包线产品质量; 针对漆包机烘炉热能系统特点, 提出了一种的漆包机烘炉的热能平衡模糊控制系统, 该系统提出了模糊热能平衡控制、PID 温度控制结合的漆包机温度控制系统的设计思路; 针对漆包机烘炉结构和系统特性进行研究, 根据热能平衡方程建立漆包机烘炉系统的温度模型; 利用热力学相关知识分析热能的输入输出的主要组成部分, 计算烘炉的总热量; 并提出热能平衡模糊控制系统原理流程图, 设计相关的软、硬件模块加以实现; 试验与测试表明, 该热平衡系统为烘炉内各加热区域的温度调节提供了可靠保障; 使烘炉的温控能够自适应环境温度的变化; 热平衡系统以节约电能为准则, 最大限度地减少电能消耗, 提高产能比。

关键词: 模糊控制; 漆包机; 热能平衡; 温度控制; 智能控制

Design and Implementation of Heat Balance Fuzzy Control System for Baking Machine of Enameling Machine

Zhang Xiaodong, Li Yang, Chen Shaohao, Chen Ding, Wang Zhi

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The stability and real-time performance of temperature control of enameling machine are related to the quality of enameled wire products. According to the characteristics of enamelling machine oven temperature system, this paper presents a fuzzy control system of heat balance for an enamelling machine oven, the design idea of enamelling machine fuzzy temperature control system of heat balance control, PID temperature control system with the proposed. The structure and system characteristics of the baking machine for enameling machine are studied. The temperature model of the baking system of the enameling machine is established according to the heat balance equation; The main part of the input and output of energy by using the thermodynamic theory of knowledge, the total calculation of heat oven; and put forward the fuzzy control system of heat balance principle flow chart, design of hardware and software modules related to implement; self tuning PID parameter control method combined with temperature monitoring points. Test shows that the thermal equilibrium system provides a reliable guarantee for the heating area in the oven temperature regulation; the oven temperature control can change adaptive temperature; heat balance system to save energy as the criterion to minimize power consumption, improve the productivity ratio.

Keywords: fuzzy control; enameling machine; thermal energy balance; temperature control; intelligent control

0 引言

在电工线材生行业, 漆包机是生产漆包线的主要设备, 生产工序主要包括放线、退火、涂漆、烘焙、冷却、收线等工序, 其中在烘焙工序是影响漆包线质量的关键工序, 所以在漆包线的生产工艺中, 烘炉温度的控制是相当重要的部分^[1]。

漆包机的生产工序中存在着非线性、滞后性强、强耦合等控制现象。有着复杂的温度控制难题, 其中两个重要影响因素是大气的温度和气压。不同的地理位置与海拔高度, 使得气温与气压会随着一天内时间的推移而发生变化, 从而导致漆包机烘炉的温度出现较大异常, 采用传统的对温度变量建模、分析和控制的方法难以对其进行综合控制。

为此本文研究了漆包机烘炉系统的热能特性, 提出了一种

模糊热能平衡控制与 PID 温度控制结合的漆包烘炉温度控制系统的设计思路。

1 系统分析

1.1 漆包机烘炉物理模型分析

漆包机烘炉结构如图 1 所示。当漆包线上的绝缘漆在烘炉内蒸发后, 与循环热风、两侧的漏风以及新风通过循环风机的作用, 依次经过前炉、中炉和后炉加热蒸发, 催化燃烧后的气体一部分经循环风机进入烘炉炉膛以保证漆包线固化和蒸发所需的温度, 另一部分经过排废风机排出烘炉^[2]。漆包机生产时, 漆包漆中的溶剂在高温中比较容易蒸发, 与氧气结合发生一系列化学反应, 产生大量的热能, 使得漆包机烘炉内部温度在前期变化很大。当进入正常工作状态后, 内部气流稳定, 漆包机内部存在着热能平衡关系, 热能输入有: 电热管加热, 蒸发溶剂两次催化燃烧; 而热量输出有: 排废时废气带走的热量、预热烘干新鲜空气时的热量利用、烘炉热能泄露等。

1.2 漆包机烘炉热能模型分析

漆包机烘炉内部的热量循环是挥发气体燃烧和电加热管加热后热能转换成空气、漆包线等物质内能的过程, 其中伴随着各种复杂的物理、化学过程等情况, 要准确地从理论上描述整个系统的热量平衡状况十分困难, 因此将实际情况进行简化,

收稿日期: 2017-10-27; 修回日期: 2017-11-16。

基金项目: 广东省省级科技计划项目(2013B011304008); 南沙区科技计划项目(2016CX006)。

作者简介: 张晓栋(1990-), 男, 河南南阳人, 在读硕士研究生, 主要从事智能工厂方向的研究。

李扬(1966-), 男, 广东湛江人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事智能工厂, 智能控制算法及感知车间方向的研究。

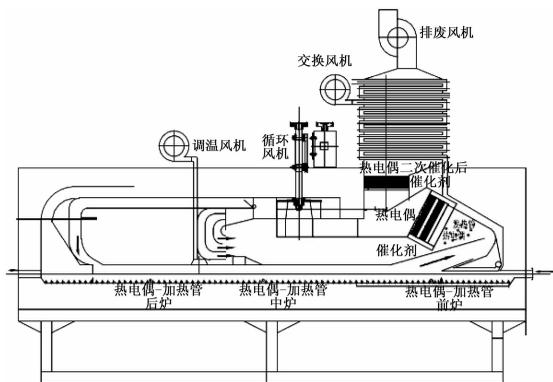


图 1 漆包机烘炉结构图

从而得到便于进行计算分析的烘炉热能平衡模型，假设以下两点^[3]：

1) 烘炉内的原有空气、经过预热吸入的新鲜空气和炉内挥发气体被视为理想气体，整个循环中物理及化学性质保持不变，比热容为常数。

2) 不考虑空气与催化燃料的泄露损失，即视总的质量保持不变，在整个生产环境下新鲜空气补充了排放失去的气体。

漆包机进入稳定工作的状态下，根据热力学第一定律，热量经过转换后总量保持不变，同时以一种或多种不同形式存在，即设备的热量输入与输出相等，因此得到烘炉的热能平衡式的模型为^[4]：

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 \quad (1)$$

式中， Q_1 为烘炉内的电加热能 (kJ/h)； Q_2 为有机溶剂蒸汽经过催化燃烧后释放的化学能 (kJ/h)； Q_3 为排放烟气带走的热能 (kJ/h)； Q_4 为导线上聚酯漆固化吸收的热能 (kJ/h)； Q_5 为炉体散热 (kJ/h)； Q_6 为逸出蒸汽的热能 (kJ/h)。

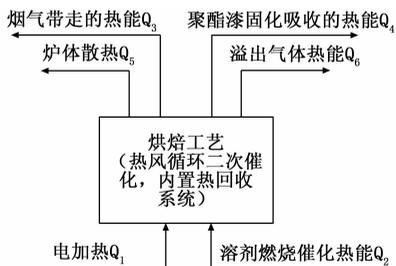


图 2 烘炉热能平衡模型示意图

1.3 热能的计算

烘炉内混合气体在不同温度下的密度和比热容可采用公式 (2)、(3) 进行计算：

$$\rho_c = \sum \rho_i V_i \quad (2)$$

$$C_c = \frac{\sum V_i M_i C_i}{\sum V_i M_i} \quad (3)$$

其中： ρ_c 为混合气体密度 (kg/m^3)； ρ_i 为各种组成气体的密度 (kg/m^3)； C_i 为混合气体比热容； V_i 为组成气体占混合气体的体积百分比； M_i 为组成气体质量；新风的成分是空气，废气的成分根据油漆溶剂的催化燃烧来计算。

利用前文研究分析，计算风量时只需要计算废气，其他风

机调节的混合气体不需要考虑。铜线选定线径为 0.15 mm，漆膜外径为 0.18 mm，根据经验估计新风风量为 $V=420 \text{ m}^3/\text{h}$ ，根据热力学中物料守恒定律得到漆包机烘炉内物料平衡的关系，如式 (4) 所示：

$$M_{\text{油}} + M_{\text{铜}} + M_{\text{新}} = M_{\text{漆}} + M_{\text{铜}} + M_{\text{废}} \quad (4)$$

1.4 漆包机烘炉系统热能

漆包机设备在正常连续生产时，首先加热管并不是一直工作，排废风机工作时一般是固定转速，排出的热量此时可以看作是一个定量；然后炉体散热所带走的热量可以看作是一个固定常数，而且在系统总热量当中影响不大；接着由于可以忽视容积功（因压力差作用，烘炉内的热力系统对外做功）、气体动能和位能的变化，另外有机溶剂蒸汽的内化学能总是补充了为进行催化燃烧时所吸收的热量能，基本维持了一定的平衡态^[5]，因此系统总热量的计算式简化为：

$$\Delta Q = VC_v d_T \quad (5)$$

其中： ΔQ 为排废风机需要改变的转速从而改变排出的热量 C_v 为烘炉热蒸汽的比热， d_T 为炉内测得的实际温度与设定温度之差，即 $d_T = (t - t_0)$ ， t 为实际温度， t_0 为设定温度。

由于本文研究的漆包机烘炉是经过加长到 4 米的，为了使温度控制效果更加准确，现把烘炉按照前、中、后 3 个部分计算，则系统热量变化计算式进一步演变成：

$$Q = V_f C_f (t_f - t_1) + V_m C_m (t_m - t_2) + V_b C_b (t_b - t_3) + V_A C_A (t_A - t_4) + V_B C_B (t_B - t_5) \quad (6)$$

式中， V_f 、 V_m 、 V_b 分别为前炉、中炉、后炉的容积，同时 $V_f = V_m = V_b = V_H/3$ ， V_H 为烘炉容积。 t_f 、 t_m 、 t_b 和 t_1 、 t_2 、 t_3 分别是实际温度和设定温度。 V_A 、 V_B 分别为催化前和催化后炉腔的容积， t_A 、 t_B 和 t_4 、 t_5 为相对应的实际温度和设定温度，为了计算和控制方便， C_f 、 C_m 、 C_b 三个比热容都取相对值 0.63。 C_A 、 C_B 两个比热容都取相对值 1.9。系统热量计算公式为：

$$Q = \frac{(0.63V_H)}{3} (t_f + t_m + t_b - t_1 - t_2 - t_3) + 1.9V_A(t_4 - t_0) + 1.9V_B(t_5 - t_0) \quad (7)$$

将结果作为热能平衡控制系统的给定值添加到模糊控制当中，通过控制排废风机以达到烘炉整体的热量平衡。

2 热能模糊控制系统设计

2.1 热能控制系统整体设计

根据上文对漆包机物理模型和烘炉热能模型的分析，可以建立如图 3 所示控制系统整体原理图。烘炉内热量的产生有以下两种：漆包线有机溶剂蒸汽的两级催化燃烧和电加热，而消耗则有烟气排放、炉体散热等形式^[7]。在前面的论述当中，最后的结果是把热量变化值添加到模糊控制中作为设定值，然后通过调节排废风机转速来控制整个漆包机烘炉的总热量，保持系统的热能平衡，并为后面对于烘炉内各个区域温度的控制提供保证。先根据热能平衡公式计算理论热能值，该结果将作为模糊控制的输入量进行模糊、解模糊处理，经过 D/A 转换后对排废风机进行控制，根据风机实时转速与设定基准作比较来判断系统是否需要加热。热能控制方法原理如图 4 所示。

2.2 热能模糊控制器设计

一般模糊控制器可以分为一维、二维和三维控制器，理论上精度随着维数增多而提高，但随之出现的问题是模糊规则和模糊决策的复杂度大大提升，要求控制系统在硬件上有良好的

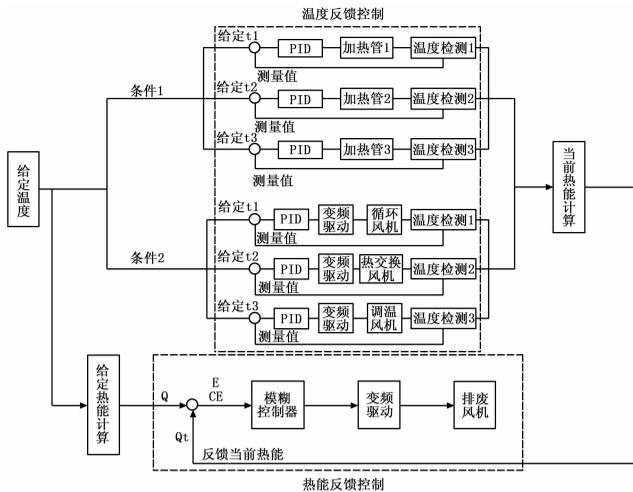


图 3 热能控制系统设计图

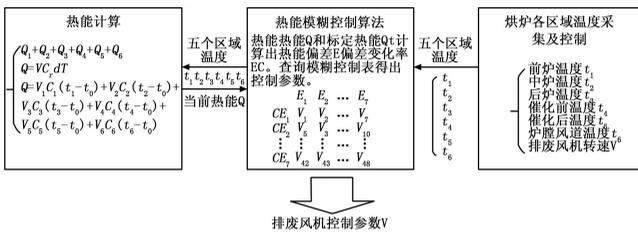


图 4 热能控制方法原理示意图

计算能力。考虑到漆包机系统的迟滞性和系统复杂性, 本文采用常规的二维模糊控制器^[6], 根据当前热能与设定热能对排废风机进行模糊控制。以实现图 3 中所示热能反馈控制部分。控制变量设置如下: 控制对象为烘炉热能; 主控制变量为排废风机转速; 副控制变量为电加热管输出功率。

2.2.1 模糊控制

模糊控制主要由下列几部组成: 1) 模糊化控制器的输入量; 2) 根据实践经验建立相应模糊规则库; 3) 进行基于知识的模糊推理; 4) 将推理得到的控制量进行解模糊。模糊控制的基本原理如图 5 所示, 把系统经过模数转换的控制量进行模糊处理, 首先按照模糊规则进行模糊推理, 然后进行解模糊化, 最后把控制量进行数模转换输出。

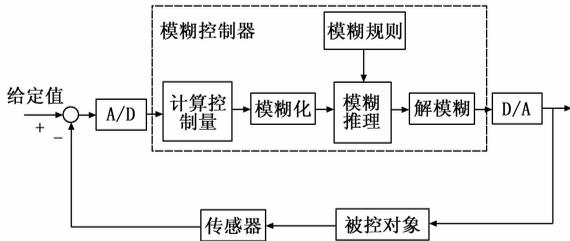


图 5 模糊控制的基本原理

2.2.2 模糊化

本文中模糊论域选择了“大”、“中”、“小”3个级别描述输入输出变量的状态, 因此总共划分了正大、正中、正小、零、负小、负中、负大7个模糊集合, 各状态的英文缩写为PB、PM、PS、ZO、NS、NM、NB。其中模糊集合中特征函数被称为“隶属函数”, 本文采用三角形隶属度函数进行模

糊化^[7]。通过式 (2) 可知, 检测到的温度 Q 以及设定的温度计算热能值 Q_t , 热能误差 $E=Q-Q_t$ 。相对偏差量化关系如表 1 所示。 $E_c=d_E/d_t$ 为热能误差变化率, 用误差的差值变化率 $E_c=E_n-E_{n-1}$ 来代替。偏差变化率量化关系表如图表 2 所示。

表 1 相对偏差量化关系表

实际误差	$[-\infty, -6]$	$[-3, -1]$	$[1, 3]$	$[3, 6]$	$[6, \infty]$		
量化等级	-3	-2	-1	0	1	2	3

表 2 偏差变化率量化关系表

偏差变化率	$[-\infty, -1]$	$[-0.6, -0.3]$	$[0.3, 0.6]$	$[0.6, 1]$	$[1, \infty]$		
量化等级	-3	-2	-1	0	1	2	3

2.2.3 模糊推理

模糊控制器的主要作用是模糊推理, 它是模仿人的逻辑推理 (例如, 人们根据条件“假如西红柿是红的”, 推出“则西红柿是熟的”), 把一个或者几个已知的信息根据一定的原则或者经验推理出一个新的判断的方法, 并通过实验和使用效果不断进行修正和完善。利用语言归纳模糊控制决策的过程, 实际上就是模糊控制器控制规则的建立过程^[8]。模糊推理的过程, 是由模糊蕴含关系与模糊集合之间的合成运算规则来实现。

表 3 排废风机输出控制规则表

		EC						
	U	-3	-2	-1	0	1	2	3
E	-3	+3	+3	+3	+2	+1	0	-1
	-2	+3	+3	+3	+2	+1	0	-1
	-1	+3	+3	+2	+1	+0	-1	-2
	0	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3
	1	+2	+1	0	-1	-2	-3	-3
	2	+1	+2	-1	-2	-3	-3	-3
	3	+1	0	-1	-2	-3	-3	-3

如表 3 所示, U 表示模糊控制的输出, 为了兼顾模糊控制器的精度和反应速度, 用 7 档来表示, 所对应的模糊词集为 {正大, 正中, 正小, 零, 负小, 负中, 负大}, 表示调节当前排废风机转速的控制量, 控制量 u 由式 (8) 得出:

$$u = (e \times ec)^\circ R \tag{8}$$

2.2.4 解模糊

由于模糊推理后的值都是模糊数值, 不能直接应到执行机构中, 需要把模糊量转化为被控对象可识别的实际精确值, 此过程成为反模糊化。解模糊判决是指从模糊集合中选出一个相对最合适代表这个集合的精确值的过程。本文所采用的解模糊判断方法是最大隶属度法, 即使用隶属度中极大元素作为输出量。根据表 3 排废风机输出控制规则表和表 4 排废风机输出功率率量化表, 可得出风机的实时调整状态, 即排废风机需要调整的输出功率变化范围。

表 4 排废风机输出功率率量化表

量化输出等级	-3	-2	-1	0	1	2	3
U 输出控制/%	-30	-20	-10	0	10	20	30

2.3 热能模糊控制流程

对于热能平衡控制系统来说,热量的产生有以下两种:漆包线有机溶剂蒸汽的两级催化燃烧和电加热,而消耗则有烟气排放、炉体散热等形式。漆包机控制系统的控制流程如图 6 所示,先根据热能平衡公式计算理论热能值,该结果将作为模糊控制的输入量进行模糊化、解模糊处理,经过 D/A 转换后对排废风机进行控制,根据排废风机实时转速与设定基准作比较来判断系统是否需要加热。控制规则如图 2.2 所示。根据当前热能 Q 和标定热能 Q_0 ,计算出热能偏差 E 和热能偏差变化率 EC 作为模糊输入,以起到对排废风机的控制。

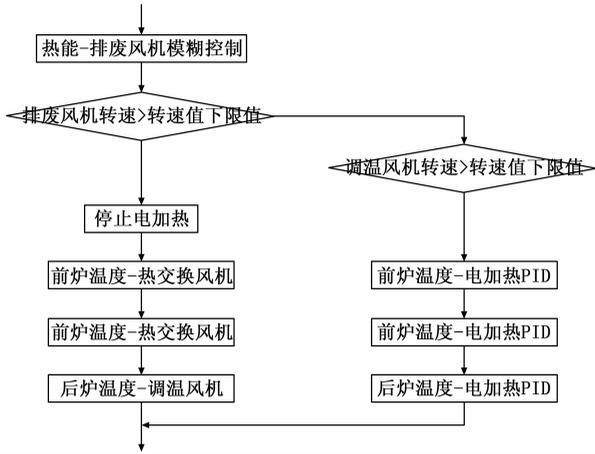


图 6 热能平衡系统的控制流程图

3 试验与测试

本文采用现场测试来验证本文所述模糊控制系统。该部分的实现流程如下:软件控制算法在触摸屏组态软件中实现,首先在 MCGS 触摸屏^[9]上设计好控制界面,编写好控制代码,然后通过 RS232 总线与信息交互模块相接后基于 RS485 分别与温控表、变频器并行连接。其中温控表用以采集监控点的温度数据和控制电加热管进行加热,变频器是对排废风机进行控制以调节烘炉总的热能平衡。硬件连接如图 7 所示。

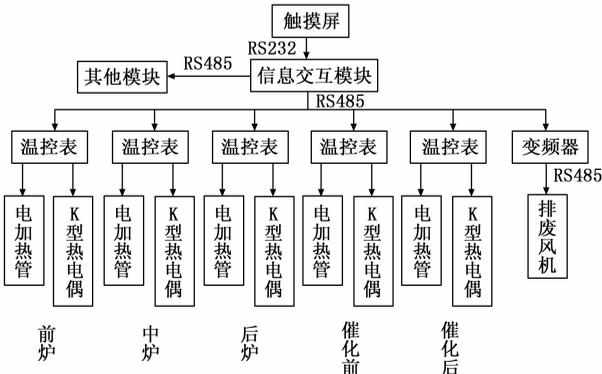


图 7 热能平衡模糊硬件系统

通过多次现场试验使用 Matlab 观察在控制器存储的历史数据中可得,图 8 漆包机开机过程中两种控制算法的对比;图 9 漆包机稳定生产运行下两种控制算法对比。由图 8 可得,传统温度控制方式下开机时温度超调量略微高于本文所述热能模糊控制方法;由图 9 可得,本文所述热能模糊控制方法可以有

效抑制炉温波动现象。结果表明,此模糊控制算法用于漆包机烘炉温度控制系统中,系统响应快于传统控制方法,连续生产烘炉温度波动小,比较平稳,控制效果良好,相对更加稳定的位于标准生产温度。

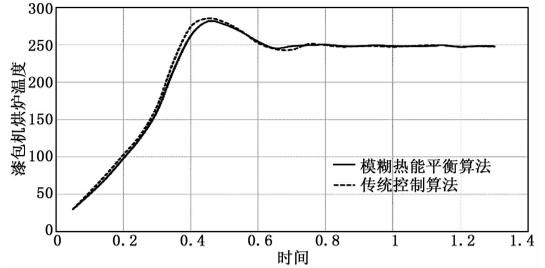


图 8 开机过工程中两种算法对比

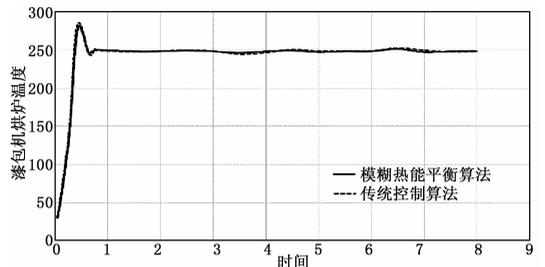


图 9 稳定运行下两种算法对比

4 结束语

本文所述方法通过给出了漆包机烘炉的热能平衡模型,提出相应的热能平衡控制方法,经现场测试验证,使用此方法可以解决漆包线生产过程中外界因素对漆包机烘炉温度产生的扰动。该热平衡控制方法具有优点如下:热平衡系统为烘炉内各区域的温度调节提供了可靠保障;使烘炉的温控能够自适应环境温度的变化,不受春夏秋冬和昼夜气温变化的影响;热平衡系统以节约烘炉内加热管消耗电能为准则,最大限度地减少电能消耗,提高产能比。

参考文献:

- [1] 凌春华,李福.漆包线生产工艺及技术的新进展[J].电线电缆,2010(02):1-3,9.
- [2] 张家元,谭小湾,宋志文.高速漆包机烘炉热工过程仿真及结构优化[J].冶金能源,2016,35(05):34-38.
- [3] 杜军特.漆包机烘炉的控制系统建模与分布式温控点的模糊 PID 解耦控制[D].广州:广东工业大学,2013.
- [4] 廖文高.漆包机烘炉内炉膛温度均匀性优化研究[D].长沙:中南大学,2013.
- [5] 龚志军,武文斐.热动专业“热能转换与利用”教学内容设计[J].教育教学论坛,2015(03):139-140.
- [6] 万百五,韩崇昭,蔡远利.控制论——概念、方法与应用[M].北京:清华大学出版社,2009.
- [7] 窦振中.模糊逻辑控制技术及其应用[M].北京:北京航空航天大学出版社,1995.
- [8] 席爱民.模糊控制技术[M].西安:西安电子科技大学出版社,2008.
- [9] 邹伟,杨平,徐德.基于 MCGS 组态软件的上位机控制系统设计[J].制造业自动化,2008(12):103-108.