

一种用于中国烹饪机器人的火候模糊控制系统

马文涛^{1,2}, 闫维新^{1,2}, 付庄^{1,2}, 赵言正^{1,2}

(1. 机械系统与振动国家重点实验室, 200240 上海; 2. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 200240 上海, yzh-zhao@sjtu.edu.cn)

摘要: 为使中国菜肴烹饪机器人具备自主烹饪的能力, 提出了一种火候模糊控制系统. 该系统可根据锅内内容的颜色和温度变化, 以及燃烧器中燃气压力和空气泵的输出压力, 结合当前烹饪步骤、当前烹饪原料信息, 在模糊化后, 经过火候设定模糊推理与火力随动模糊推理, 获得燃气比例阀驱动电流、空气泵控制电压、烹饪工序预期完成时间等输出量的模糊值, 解模糊后控制燃气引射装置中的气泵流量, 调整加热时间. 实验表明, 采用该模糊控制系统后, 燃烧器能够达到较好的燃烧效果, 烹饪机器人也能够烹饪出品质优良的菜肴.

关键词: 中国烹饪机器人; 模糊控制系统; 火候控制

中图分类号: TH133; TP183

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)01-0120-06

A heating fuzzy control system for Chinese cooking robots

MA Wen-tao^{1,2}, YAN Wei-xin^{1,2}, FU Zhuang^{1,2}, ZHAO Yan-zheng^{1,2}

(1. State Key Lab of Mechanical System and Vibration, 200240 Shanghai, China; 2. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, 200240 Shanghai, China, yzh-zhao@sjtu.edu.cn)

Abstract: To make the Chinese cooking robot have the ability to cook autonomously, this paper presents a heating fuzzy control system. With the current cooking process and other information of cooking materials, the system is input materials' colors and temperature in the wok, the output pressure of a gas proportional valve, and the output pressure of an air pump. After fuzzification, and through a heating set fuzzy inference and a power servo fuzzy inference, the fuzzy values of control current of gas proportional valve, the control voltage of air pump and the expected completion time of cooking process will be obtained. After defuzzication, these values will be used to adjust the gas proportional valve, the air pump and the left time of current cooking process. Experiments show that, after adopting the fuzzy control system, the burner can combust very well, and the Chinese cooking robot can also cook dishes with good quality.

Key words: Chinese cooking robot; fuzzy control system; heating control

《辞海》中“火候”的释义是:烹饪时火力的强弱和时间的长短. 中国烹饪最重要的就是掌握火候, 因此, 中国烹饪机器人必须具备掌控火候的能力. 对于一个经验丰富的厨师来说掌握火候是驾轻就熟的, 然而对于烹饪机器人来说却是一个巨大的挑战. Yan 等^[1]介绍了第一台中国烹饪机器人, 该机器人用示教再现的方式进行火候控制, 做

出了有益的探索.

中国烹饪的传承一直沿用师徒相授的传统, 师傅传授时往往采用模糊的词语和说法, 即便在与烹饪相关的文献中也频繁地使用“中火”、“猛火”、“文火”等模糊词句表示火力的大小, 用“片刻”、“少顷”等模糊词句表示时间的长短, 而对菜肴烹饪效果的评价更是难以精确. 由于中国烹饪具有明显的模糊性, 因此用模糊数学和模糊控制进行处理就成为自然而然的选择. 自 Zadeh^[2]提出模糊集以后, 模糊集合、模糊数学和模糊控制就得到了广泛的应用. Davidson^[3-4]阐述了应用模糊逻辑和推理技术控制食品加工的方法, 指出模

收稿日期: 2010-09-24.

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2006AA040205; 2007AA041601; 2007AA041602; 2007AA041603).

作者简介: 马文涛(1980—), 男, 博士研究生;

赵言正(1965—), 男, 教授, 博士生导师.

糊表示适用于那些天生可变的量(例如,原料由于供应商或者生长季节的易变性)或不均匀性(例如,物理尺寸和形状、大范围内的温度),模糊规则能够表示那些派生于数字仿真、实验观察或二者的结合的控制知识,并将模糊控制应用于花生的烤制.文献[5]提出了一种用于烤面包的模糊控制器.文献[6]提出了一种煮的模糊控制系统,并指出在煮的过程中,人的头脑中要考虑的是如何正确地控制输出到加热面板上的火力的时序.虽然煮、烤等烹饪工艺相对中国烹饪工艺而言比较单一,但这些研究对于中国烹饪中火候控制的自动化和智能化有重要的参考价值.

本文提出了一种火候模糊控制系统,该系统能够监控原料加热时的颜色变化、锅内原料的温度变化以及燃气和喷射空气的压力,结合当前的烹饪阶段和烹饪工序,调整火力大小和当前烹饪工序时间,实现火候的智能控制.

1 中国烹饪机器人及其火力系统

Yan 等^[1]第一次提出了中国烹饪机器人,该机器人能够较完整地实现各种中国烹饪工艺,能够自主地、完整地、完成菜肴的烹饪.在此基础上本文提出了一种用于助老助残的烹饪机器人(如图 1),其中火力系统在文献[1]的基础上做了改进.

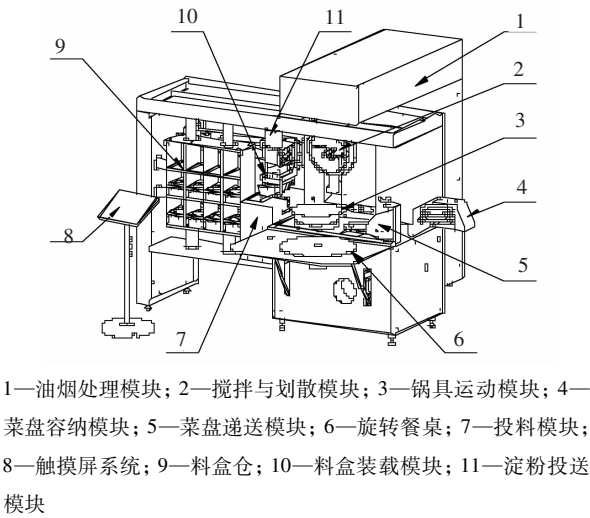


图 1 助老助残中国烹饪机器人结构

火力系统所用的燃烧器采用了一种双引射源方式^[7],由火盖、引射管和喷嘴等几个部分组成.燃烧必须具备的关键条件是燃气中的可燃成分和空气中的氧气需按一定比例成分子状态混合^[8].空气和燃气充分混合是一个燃烧器的基本要求,它是燃烧器燃烧过程中一氧化碳浓度达标的关键,是提高燃烧热效率的关键,也是提高燃烧稳定性的关键.

中国人工煤气的主要成分为丙烷和丁烷,GB 13611—2006^[9]中给出的液化石油气 20Y 的基准气为 75% 的丙烷和 25% 的丁烷,其分子式可写为 $C_{3.25}H_{8.5}$. 然而在实际应用中,液化石油气中丙烷和丁烷的比例往往会有所变化,一般丁烷的比例比标准略大.按照国家标准,根据燃气量可计算理论上需要的空气量,

$$C_{3.25}H_{8.5} + 7.5O_2 = 4.25H_2O + 3.25CO_2.$$

若空气中氧气的体积分数按 20.942% 计,则 1 mol 的液化石油气 20Y 需要的空气量为 $7.5/0.20942 = 35.813$ mol. 实际空气供给量与理论空气需要量之比为过剩空气系数 a_v ,通常 $a_v > 1$,民用燃烧器一般控制在 1.3 ~ 1.8. 在实际燃烧过程中正确的 a_v 值十分重要: a_v 过小则燃气的化学能不能充分转换; a_v 过大,烟气体积增大,增加排烟热损失,降低燃烧器的热效率^[10].

烹饪机器人通过控制燃烧器的燃气入口和空气入口处的燃气和空气的压力来控制燃烧器的输出热负荷,仿真和实验表明,高压空气(入射空气)的压力和燃气压力必须在一定范围内进行匹配才能达到良好的燃烧效果.由于燃烧器内流体的动力学情况复杂,计算量很大,对实际需要的空气量和燃气量的精确控制不但很难实现,而且没有必要,而模糊控制恰能满足要求.

2 原料成熟度的视觉识别

由于炒锅的颜色为黑色,而用于烹饪的动物性原料和植物性原料中几乎没有呈黑色的,因而易于将原料和背景区分开来.据此提出了一种提取烹饪典型对象,计算锅内目标原料的平均饱和度、色品和亮度的方法.表 1 的数据是在 9 次烹饪猪肉片的过程中分别在 0(烹饪前)到 24 s(肉片成熟)的时间里每隔 6 s 拍照的照片进行图像处理,去除反光和背景等干扰后,求得的原料的色品(H)、饱和度(S)和亮度(B)的平均值.

表 1 在烹饪过程中猪肉的 HSB 变化情况

t/s	H	$S/\%$	$B/\%$
0	55	41	53
6	54	35	59
12	57	35	61
18	60	34	58
24	63	17	56

注: H 变化值 8; H 变化率 2.2%; S 变化率 24%; B 变化率 8%.

由表 1 可见,烹饪前后色品的变化很小,而亮度的变化也不显著,但饱和度的变化不但显著,而

且具有明显的规律性——逐渐减少. 在对多种原料烹饪前后的颜色变化进行分析后也发现, 多数动物性原料的平均色品几乎不变或者变化较小, 而亮度的变化也并不显著或者无明显规律. 但部分原料, 尤其是动物性原料的饱和度发生了明显的规律性变化, 因此可以作为烹饪阶段划分的标志.

3 火候的模糊控制

3.1 火候模糊控制的总体结构

火候的控制系统主要完成两项功能, 一是根据需要进行调整火力的大小; 二是根据当前的颜色、温度等信息决定是否应该延长当前工序的时间, 如

果需要延长那么估计延长多长时间. 火候模糊控制系统的结构如图 2 所示, 在火候模糊控制系统中, 存在两个模糊推理机, 一个是火力随动模糊推理机, 用作火力的动态调节; 另一个是火候设定模糊推理机, 用作调整火力和烹饪时间. 燃气压力和空气泵的输出气体压力分别由西门子公司的 QBE64 - DP01 和 QBE64 - DP05 测量; 锅具内部温度, 则通过 DTA LT - 05S 红外温度传感器 (广州圣高测控科技) 进行非接触测量. 系统采用德国映美精公司的 DFK21BG04. H 型 CCD 工业相机作为视觉输入. 各输入、输出变量采用模糊三角函数表达, 使用 Mamdani 类型的模糊推理和中心解模糊算法.

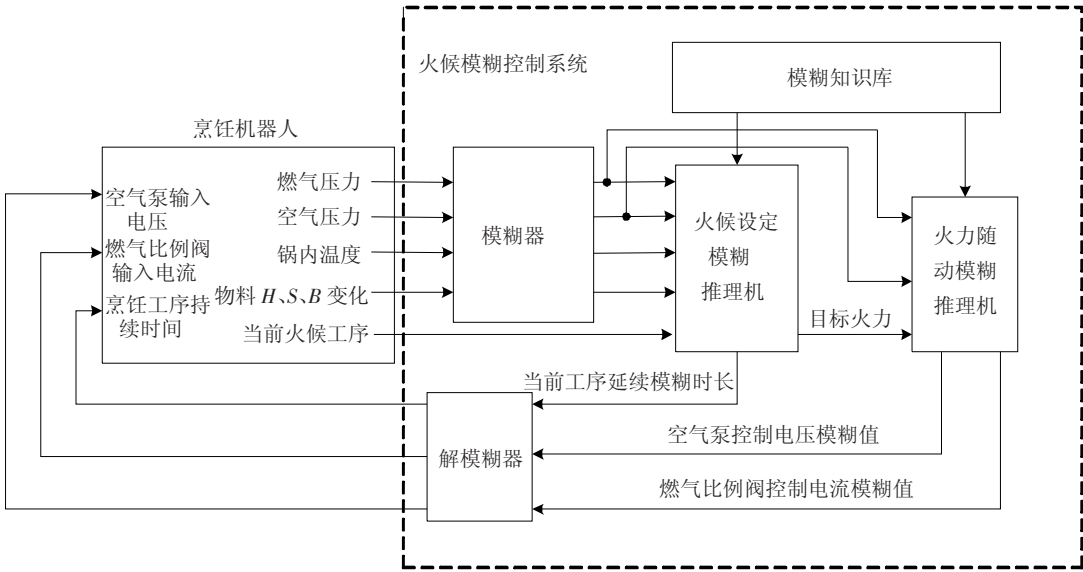


图 2 火候模糊控制系统结构图

3.2 火候模糊控制系统的模糊语言

火候模糊控制系统的输入输出变量及其模糊语言见表 2. 模糊语言值的隶属度可由三角函数给出, 设 $A = A(a^L, a^C, a^R)$, 其中 a^L 、 a^C 和 a^R 分别表示下限、中心和上限. A 的隶属度可由下式确定^[11]:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & \text{for others;} \\ \frac{x - a^L}{a^C - a^L}, & \text{for } a^L < x \leq a^C; \\ \frac{a^R - x}{a^R - a^C}, & \text{for } a^C < x \leq a^R. \end{cases}$$

经过反复让厨师对不同火力、不同原料数量、不同烹饪时间、不同温度等进行评级并给出不同级别的隶属度, 经一致性检验等处理后可得出各输入输出变量模糊语言值的 a^L 、 a^C 和 a^R , 相应的模糊函数的图形见图 3.

表 2 输入/输出变量的模糊语言

参数	类型	模糊词
火力	输入\输出	很低, 低, 中, 高, 很高
高压空气压力(或入射空气压力)	输入	很低, 低, 中, 高, 很高
燃气压力	输入	很低, 低, 中, 高, 很高
当前和目标原料 S 值的差距 (或原料饱和度变化)	输入	很不明显, 不明显, 中, 明显, 很明显
主料或辅料的多少	输入	很少, 少, 中, 多, 很多
锅内温度	输入	很低, 低, 中, 高, 很高
空气气泵电压	输出	很低, 低, 中, 高, 很高
燃气比例阀电流	输出	很低, 低, 中, 高, 很高
烹饪完成时间预期	输出	很短, 短, 中, 长, 很长

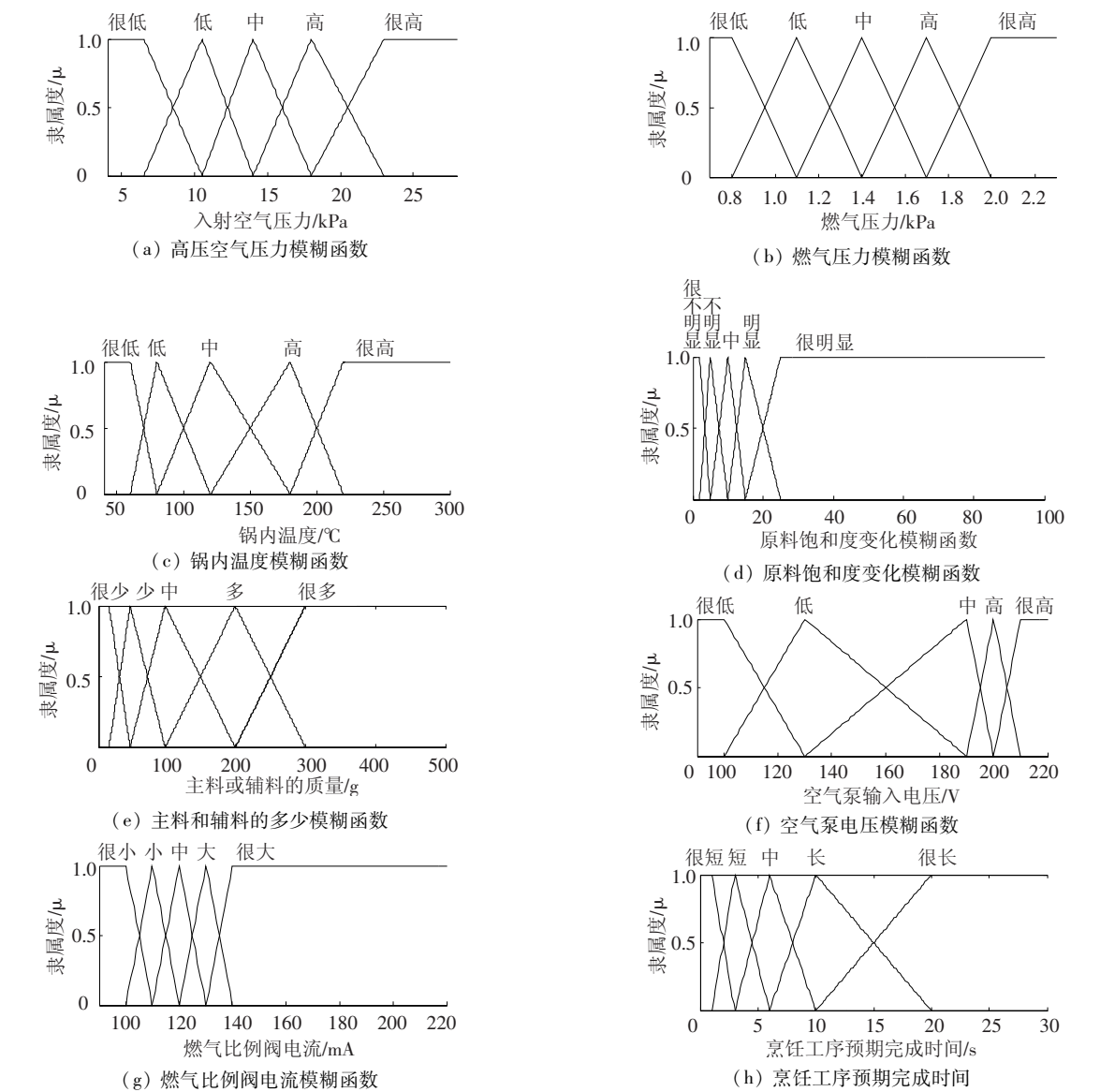


图 3 各输入、输出参数的模糊函数图

3.3 火候控制规则

一个完整的烹饪过程可以分为多个阶段,每个阶段由一个或几个烹饪工序动作组成. 烹饪工序动作可分为主干工序、火力工序(仅调节火的大小)和火候工序(仅控制烹饪时长)等. 主干工序往往涉及原料的转移,能够标示当前的烹饪阶段,主要有加油、回锅、投主料、投辅料、投调味汁、投香辛料和加淀粉等. 火力工序仅控制火力大小,不控制烹饪时间,如点火、调火和关火等. 火候工序仅控制烹饪时间和原料的运动,不调节火力的大小,主要有晃锅、搅拌、翻锅和加热等. 火力和时间需要进行匹配才能达到好的烹饪效果. 因此,火候控制过程是对火候工序过程中使用的火力大小和火候工序的时间进行控制. 在进入某一烹饪阶段时,首先需要确定当前采用的火力大小,而在火

候工序持续过程中还要根据当前原料的颜色变化或温度情况对火力和时长及时予以调整.

进入某一烹饪阶段时,首先根据各阶段预设火力规则,产生预设的空气泵控制电压和燃气比例阀控制电流的目标值. 预设完成后,系统进入自动调节燃气与空气配比的状态,此时使用表 3 的空气压力随动模糊规则.

表 3 火力随动模糊规则

前件			后件	
目标火力	压力点 2 的压力 (当前燃气压力)	压力点 1 的压力 (高压空气压力)	燃气比例 阀电流	气泵 电压
低	非低	非低	低	低
较低	非较低	非较低	较低	较低
中	非中	非中	中	中
较高	非较高	非较高	较高	较高
高	非高	非高	高	高

在烹饪的某一阶段,根据当前气体压力,按照表 4 中的模糊规则,估计当前的实际火力,进而根据实际火力大小、原料质地和形状、色品值、锅内温度、当前烹饪工序,确定烹饪是否继续延续以及延续时间长短,其模糊规则见表 5、6. 火候模糊规则库中的多数规则都是直接来源于数位高级厨师的经验.

表 4 当前火力估计模糊规则

前件		后件
高压空气压力	燃气压力	当前火力估计
低	低	小
较低	较低	较小
中	中	中
较高	较高	较大
高	高	大

表 5 几种常见主料划散阶段的饱和度变化规律

预处理	主料名	S 变化方向	S 变化大小
上浆	瘦猪肉片	减小	中
上浆(加生抽)	牛腩条	增大	中
上浆	鸡脯肉丝	减小	明显
上浆	虾仁	增大	中

表 6 上浆处理的瘦猪肉片在划散阶段的火候模糊规则

前件			后件	
主料量	当前饱和度与目标饱和度差别	当前火力	预计持续时间	目标火力
少	中	很高	中	很高
少	不明显	很高	短	高
少	很不明显	高	很短	高
中	中	很高	长	很高
中	不明显	很高	中	很高
中	很不明显	很高	很短	高

原料质地不同,烹饪过程中 H 、 S 、 B 的变化不同,例如对于猪肉(瘦猪肉片)来说, H 值和 B 值的变化不大,但 S 值变化显著. 表 5 给出了几种常见原料在烹饪前后饱和度的变化规律. 对于植物性原料,例如土豆丝,在烹饪前后, H 、 S 、 B 的值几乎没有变化,因此对于该类原料视觉信息将失去价值,而原料的温度则成了重要的参照信息. 不同烹饪阶段,不同原料,预期达到的目标温度不同,其模糊规则与饱和度变化规则类似,这里不再赘述.

根据烹饪工序、原料和当前传感器信息,按照火候模糊规则预估烹饪还需持续的时间和后继使用的火力. 表 6 给出了经上浆处理后的瘦猪肉片在划散阶段的火候模糊规则,其他原料和烹饪阶段的模糊规则并未一一列出.

在实际烹饪中,预估时间将作为烹饪中划散时所用工序的持续时间,如果估计时间为“Very long”那么,在 30 s 后将重新评估预期的时间. 虽然各火候工序的时间使用相同的模糊函数,但由

于不同火候工序下,原料受热的效率不同,在解模糊后,不同的火候动作还要再乘以各自的调整因子. 这些因子都是在大量的烹饪实践中总结出来的经验值. 加热、晃锅、搅拌和翻锅的调整因子分别为 0.80、0.90、1.00 和 0.85.

4 实 验

为了验证火候模糊控制系统的性能,在助老助残烹饪机器人上完成了下面两方面的实验. 一方面的实验用于检验燃气和空气的随动调节的效果和燃烧效果,主要通过测试一氧化碳的浓度、过剩空气系数来确定其性能,实验装置中各测试点的示意如图 4 所示.

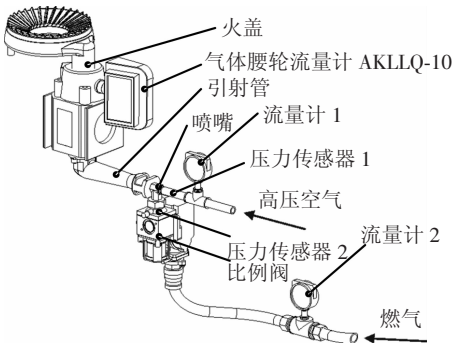
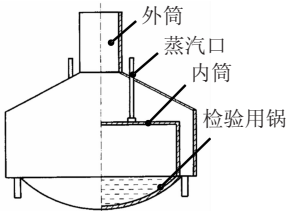


图 4 实验用燃烧器及其传感器的安装示意图

实验使用的燃料为液化石油气 20Y(深圳深南燃气公司). 入射空气的气压(压力传感器 1)和入射燃燃气压(压力传感器 2)由集成在机器人上的压力传感器记录. 流量计 1(用于测量高压空气流量)、流量计 2(用于测量燃气流量)、气体腰轮流量计(用于测量总的气体流量)的测量结果用于计算过剩空气系数. CO 浓度用于检测燃烧器的燃烧情况. 另一方面的实验则是通过评价机器人的实际烹饪的菜肴,综合评估火候模糊控制系统的优劣.

体现燃烧器燃烧效果的一个重要指标就是燃烧时干烟气中的 CO 含量. 文献[12]给出了干烟气 CO 含量检测的标准方法,设计如图 5(b)中的取样罩和取样器,然后使用烟气分析仪(如图 5(a),烟气分析仪采用德图的 Testo327)实时测量燃烧过程中的 CO 含量. 通过对 Testo327 录像,可以获得较连续的 CO 含量变化情况. 根据标准,CO 的体积分数要求低于 0.1%^[12].

图 6 给出了 10 次调火实验中,燃气入射压力和空气入射压力的实测曲线. 在 5、10、15、20、25 s 时,火力被分别设为 1 档(微火)、2 档(文火)、3 档(中火)、4 档(大火)和 5 档(猛火).



(a) 烟气分析仪 (b) 取样罩及取样器

图 5 一氧化碳含量测试照片与测试装置

对应图 6,图 7 中分别给出了 10 次调火实验中测得的 CO 含量. 从图 7 中可以看出, 各个档位下

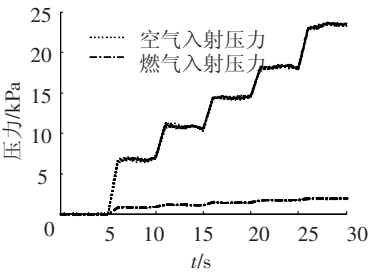


图 6 不同档位下入射空气、燃气压力的实测曲线

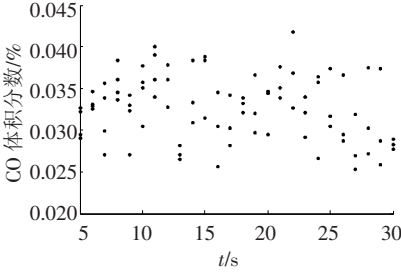


图 7 调火过程中干烟气的 CO 体积分数

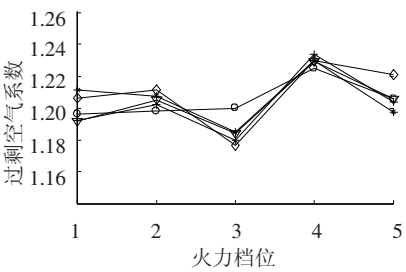


图 8 五组实验测得的过剩空气系数

菜肴烹饪实验中,选择了几种对火候比较敏感的菜肴,分别是小炒肉、水晶虾仁和银牙鸡丝. 7 位评委分别对机器人自主烹饪的菜肴进行了评价,评价结果如表 7 所示. 可见,烹饪机器人能够出色地完成这些敏感菜肴的烹饪.

表 7 评委对敏感菜肴的最后评价

菜肴名称	颜色	口味	外形	营养	气味
小炒肉	G	E	G	G	G
水晶虾仁	E	G	E	E	G
银牙鸡丝	G	E	E	E	G

E 为优;G 为良;M 为中;B 为差.

5 结 论

1) 本文提出了一种包含火候设定模糊推理机与火力随动模糊推理机的火候模糊控制系统,其参数与控制规则均来源于厨师的主观感觉与经验.

2) 燃烧实验表明,该火候模糊控制系统能够很好地完成火力的随动控制,燃烧充分且过剩空气系数小.

3) 烹饪实验表明,采用火候模糊控制系统的烹饪机器人,也能够较好地完成对火候要求敏感的菜肴.

致 谢

机械系统与振动国家重点实验室自主课题资助项目 (MSV-MS-2010-03), 国家自然科学基金资助项目 (61075086, 60875058).

参考文献:

[1] YAN Weixin, FU Zhuang, LIU Y H. A novel automatic

CO 的体积分数都比较低,最高的不到 0.045%,远低于 0.1% 的要求.

根据燃气流量计算理论空气需要量,根据总流量减去燃气流量计算实际空气供给量,进而可以计算出过剩空气系数. 5 组流量测试实验中计算的过剩空气系数如图 8 所示,每组实验对应一根曲线. 由图 8 可见过剩空气系数为 1.17~1.23,优于一般的民用燃烧器. 综合 CO 含量(图 7)和过剩空气系数(图 8)可知,采用模糊控制的火力系统既能够充分燃烧,又能有效减少能量损失.

cooking robot for Chinese dishes [J]. Robotica, 2007, 25(4): 445-450.

[2] ZADEH L. Fuzzy sets [J]. Information Control, 1965 (8): 338-353.

[3] DAVIDSON V J. Fuzzy control for food processes [C]//Computerized control systems in the food industry. New York: Marcel Dekker, 1996: 179-206.

[4] DAVIDSON V J. Fuzzy control system for peanut roasting [J]. Journal of Food Engineering, 1999, 41(3/4): 141-146.

[5] DAVIDSON V J, SMITH K D. A fuzzy controller for a batch cooking process [J]. Journal of Food Engineering, 1995, 24:15-24.

[6] JAZBEC A, MRAZ M, BAJEC I L, et al. Towards automated cooking process [J]. Food Research International, 2007, 40: 733-741.

[7] 王伟森, 闫维新. 鼓风引射式燃气燃烧器: 中国, 200920135754. 2[P]. [2010-08-29].

[8] 同济大学. 燃气燃烧与应用[M]. 第 2 版. 北京: 中式建筑工业出版社, 2005: 3-5, 138, 175-176.

[9] 中华人民共和国建设部. GB/T 13611-2006 城市燃气分类和基本特性[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007: 4.

[10] 刘蓉, 刘文斌. 燃气燃烧与燃烧装置[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 9-12.

[11] KAHRAMANLI H, ALLAHVERDI N. Design of a hybrid system for the diabetes and heart diseases [J]. Expert Systems with Applications, 2008, 35(1-2): 82-89.

[12] 中华人民共和国建设部. CJ/T28-2003 中餐燃气炒菜灶[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005: 8-11.

(编辑 杨 波)