

基于模糊 PID 控制的茶叶炭焙烘焙机设计与试验

Design and test of tea charcoal roasting machine based on fuzzy PID control

高育森¹ 任金波¹ 李梅娟² 林建¹ 吴传宇¹

GAO Yu-sen¹ REN Jin-bo¹ LI Mei-juan² LIN Jian¹ WU Chuan-yu¹

(1. 福建农林大学机电工程学院, 福建 福州 350002; 2. 湄洲湾职业技术学院, 福建 莆田 351119)

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China; 2. Meizhouwan Vocational Technology College, Putian, Fujian 351119, China)

摘要:针对目前茶叶木炭烘焙方式存在劳动强度大、效率低,炭烘焙温度不易控制导致茶叶品质差等问题,设计了一种采用自适应模糊 PID 控制系统的智能茶叶炭焙烘焙机,控制系统经过两输入后进行模糊化等处理,实现三输出参数的实时变化,从而达到烘焙温度的设计要求。试验表明:烘焙 20 min 后箱体内部整体温度能够保持在 $(80 \pm 2)^\circ\text{C}$;香气测试中发现木炭烘焙反-橙花叔醇、植物醇、法尼烯 3 种化合物的含量均高于电烘焙,且茶叶中的生化成分与电烘焙存在显著差异;感官评审对比中,木炭烘焙茶叶感官评审综合得分为 92.66 分,大于电烘焙的综合得分(91.44 分);炭烘焙机在烘焙过程中性能稳定,烘焙茶叶品质整体优于电烘焙,可有效提升茶叶烘焙品质。

关键词:自动控制;木炭烘焙机;模糊控制

Abstract: In view of the current tea charcoal roasting methods, there are problems such as high labor intensity, low efficiency, and difficult control of the carbon roasting temperature, resulting in poor tea quality. An intelligent tea charcoal roasting machine using an adaptive fuzzy PID control system is designed. The control system undergoes fuzzification and other processing after two inputs to achieve real-time changes of three output parameters, so as to meet the design requirements of baking temperature. Experiments show that the overall temperature inside the box can be kept within $(80 \pm 2)^\circ\text{C}$ after baking for 20 minutes; the aroma test found that the content of charcoal baking trans-neryl alcohol, plant alcohol, and farnesene are all higher than electric baking, and the biochemical components in the tea are significantly different from electric baking. In the sensory evaluation comparison, the sensory evaluation score of charcoal roasted tea is 92.66

points, which is greater than the 91.44 points of electric baking. The charcoal roaster has stable performance during the roasting process, and the quality of roasted tea is better than electric roasting, which can effectively improve the roasting quality of tea.

Keywords: automatic control; charcoal roaster; fuzzy control

烘焙在整个茶叶加工工艺中占有至关重要的位置。通过烘焙可以降低茶叶含水量,有利于其贮藏;在烘焙过程中茶叶会发生一些化学变化,如其中的儿茶素、氨基酸等物质会相互作用提高茶叶的香气^[1]。目前,茶叶烘焙方式有木炭烘焙、电烘焙、电焙笼烘焙、微波、远红外烘焙等^[2]。成子龙等^[3]认为电烘焙的温度、时间可以控制,烘焙出的茶叶品质稳定。炭烘焙品质好,但烘焙程度难以控制,品质不稳定;邵静娜等^[4]研究表明微波长时间烘焙会使茶叶发涩,香气欠佳,远红外技术的烘焙品质较接近于传统烘焙。吴全金等^[5]认为,远红外烘焙能够改善茶叶品质,但是远红外烘焙设备造价较高,维护成本高且复杂。整体上,微波、电烘焙及红外线烘焙能够准确地控制温度、时间等烘焙参数,但机器耗能耗大、烘焙效果远不及木炭烘焙。木炭吸附性强,能吸附硫化物等,且燃烧释放的二氧化碳能与茶叶的内含物质进行物理或化学作用,提高茶叶口感及香气^[6]。木炭的火源能够很大程度降低电能损耗,从目前的茶叶烘焙市场调研来看,木炭烘焙更受消费者喜爱^[7]。但是木炭燃烧烘焙温度不易控制,不能很好地实现智能烘焙。文章拟设计一种新型模糊 PID 控制炭焙的茶叶烘焙机,旨在解决木炭烘焙温度不易控制的问题,为木炭的智能烘焙研究提供依据。

1 智能炭焙烘焙机整体结构

1.1 机械结构设计

茶叶炭焙烘焙机主要由箱体、木炭燃烧室、排气口、

基金项目:福建省教育厅项目(编号:KLA18044A);福建省科技引导项目(编号:2019N0008)

作者简介:高育森(1990—),男,福建农林大学初级实验员,硕士。E-mail: 864810175@ qq.com

收稿日期:2020-10-21

托盘、电动推杆、温度传感器、流量控制装置、控制系统等组成(图 1)^[8]。热源为木炭燃烧的热辐射,温度传感器分布在烘焙机箱体的左右及顶部;通过电动推杆的伸缩用来控制空气流量装置的关与开;茶叶托盘为镀锌板制成的四方形盘,其主要设计参数见表 1。

1.2 自适应模糊 PID 控制原理

恒温烘焙有利于茶叶色泽及香气的保持。木炭烘焙控制存在大惯性、大滞后、非线性、不稳定性等特点,目前对于温度的控制,大部分采用 PID 控制^[9]。木炭烘焙容易受控制流量、木炭量等因素影响,而传统 PID 控制中的 K_p 、 K_i 、 K_d 为常数,很难实现恒温的控制要求。而模糊控制具有鲁棒性强、适应能力强等特点,能够更好地进行温度控制^[10]。文章采用了传统 PID 与模糊控制相结

合的自适应温度控制系统,它能够实时修正 PID 控制的 3 个输出参数,其结构图如图 2 所示。

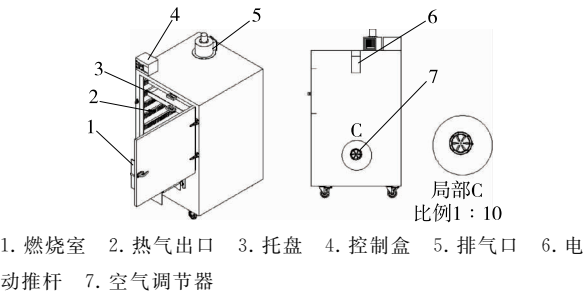


图 1 木炭烘焙机整体结构图
Figure 1 Overall structure diagram of charcoal roasting machine

表 1 木炭烘焙机主要参数
Table 1 Main parameters of charcoal roaster

结构	推杆行程/ mm	推杆速度/ (mm · s ⁻¹)	温度误差/ ℃	外形尺寸/ mm	加热方式	加热火源
抽屉式	150	12	±2	800×700×1 500	间歇式	木炭

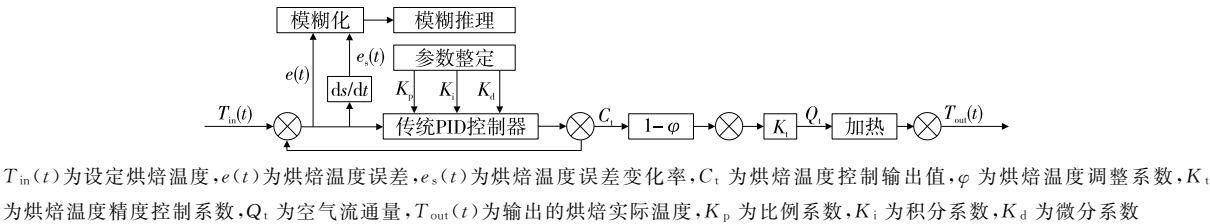


图 2 自适应模糊 PID 控制结构图
Figure 2 Structure diagram of adaptive fuzzy PID control

该模糊 PID 控制器为两输入三输出,两输入为 $e(t)$ 、 $e_s(t)$,三输出为 K_d 、 K_i 、 K_p ,PID 控制器工作时可以实时获取 $e(t)$ 和 $e_s(t)$ 进行模糊化推理分析,输出相应的 K_d 、 K_i 、 K_p 值,在自适应模糊 PID 控制输出后,引入温度调整系数以更好地控制空气流量,其表达式为:

$$Q_t = K_i \times (1 - \varphi) \times C_t, \varphi = 0 \sim 1. \quad (1)$$

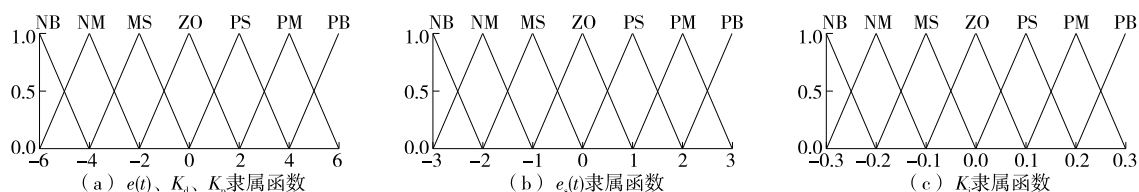
φ 可由经验试验确定,分别取 0.0,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1.0,当 $\varphi = 0$ 时, Q_t 值最大,此时空气调节器装置处于打开极限;当 $\varphi = 1$ 时, $Q_t = 0$,空气调节器装置处于关闭状态。 φ 由 1 慢慢变小,空气调节器装置慢慢打开,烘焙机的温度振幅产生不同的变化,样机试验结果表明,当 $\varphi = 0.6$ 时,烘焙机的温度振幅较为随和,振幅波动较小。

1.2.1 模糊化设计 茶叶的最佳烘焙温度为 80℃,故将烘焙温度控制为 74~86℃,温度偏差 $e(t) \in [-6, 6]$ ℃, $e_s(t) \in [-3, 3]$ ℃, $e(t)$ 的模糊论域定义为 $N_e(t) = \{-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6\}$, $e_s(t)$ 的模糊论域定义为 $N_{es}(t) = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ 。 $K_p = \{-6, -4, -2,$

$0, 2, 4, 6\}$, $K_i = \{-0.3, -0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2, 0.3\}$, $K_d = \{-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6\}$,用 PB(正大)、PM(正中)、PS(正小)、ZO(零)、NS(负小)、NM(负中)、NB(负大) 7 个等级表示 $e_s(t)$ 、 $e(t)$ 、 K_d 、 K_i 、 K_p 的模糊变量,即模糊子集为 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}。当烘焙温度误差为 PB(正大)时,烘焙误差变化率为 PB(正大),此时应关闭空气调节装置阻断空气流量,即降低温度。模糊子集的隶属度函数采用三角形函数(图 3)。

1.2.2 控制规则 PID 的 3 个输出参数 K_p 、 K_i 、 K_d 与不同时刻的 $e_s(t)$ 、 $e(t)$ 相关联,比例系数 K_p 可提高控制系统的响应速度, K_p 过大容易产生超调;积分系数 K_i 可控制系统稳定程度,减少系统误差,调节控制系统的精度;微分系数 K_d 会影响系统的动态响应性能,可对偏差的变化产生影响。根据控制经验并参照相关文献^[11-12],制定关于 K_d 、 K_i 、 K_p 的整定原则:

(1) 当 $|e(t)|$ 大时,表明目标值与设定值偏差大,此时 K_p 应取大才能提高系统的响应速度,使目标值尽快地与设定值靠拢; K_d 、 K_i 不能取大,应选较小,以免系统超

图 3 $e_s(t)$ 、 $e(t)$ 、 K_d 、 K_i 、 K_p 隶属函数Figure 3 The membership function for $e_s(t)$ 、 $e(t)$ 、 K_d 、 K_i 、 K_p

调、不稳定。

(2) 当 $|e(t)|$ 和 $|e_s(t)|$ 适中时, K_p 应取适中, 以免较大使系统产生超调, 为了避免微分环节对系统的偏差增加抑制作用及不稳定性, K_i 取较小, K_d 取适中。

(3) 当 $|e(t)|$ 值小时, 在确保整个系统稳定的同时应减小系统在设定值周围产生较大的波动, 此时, K_p 、 K_i 应取较大, K_d 应根据 $|e_s(t)|$ 的取值大小选择适中的值。

(4) 当 $|e_s(t)|$ 值较大时, 此时 K_p 取小, K_i 取大。

结合 K_d 、 K_i 、 K_p 的整定原则, 设计 49 个模糊规则^[13]:

If $e(t) = \text{NB}$ and $e_s(t) = \text{NB}$ Then $K_p = \text{PB}$, $K_i = \text{NB}$, $K_d = \text{PS}$

If $e(t) = \text{NB}$ and $e_s(t) = \text{NM}$ Then $K_p = \text{PB}$, $K_i = \text{NB}$, $K_d = \text{NB}$

...

K_p 、 K_i 、 K_d 模糊规则见表 2。

表 2 K_p 、 K_i 、 K_d 模糊规则表Table 2 Table of fuzzy rule for K_p , K_i and K_d

$e_s(t)$	$e(t)$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/PS	PB/NM/ZO	NM/NM/ZO	NM/NM/ZO	NS/ZO/ZO	PM/ZO/ZO
NM	PB/NB/NS	PB/NB/NM	PB/NM/NM	NS/NS/NS	NS/NS/NS	ZO/ZO/NS	PM/ZO/ZO
NS	PM/NB/NB	PM/NM/NB	PM/NS/NS	ZO/NS/MS	ZO/ZO/ZO	ZO/PS/PS	PS/PS/PM
ZO	PM/NM/NM	PM/NM/NB	PM/NS/NS	ZO/ZO/ZO	PS/PS/PS	PS/PM/PM	PM/PM/PM
PS	PS/NM/NM	PS/NS/NS	ZO/ZO/NS	ZO/PS/NS	PS/PS/PS	PM/PM/PM	PM/PB/PS
PM	PM/ZO/NS	NS/ZO/ZO	NS/PS/PS	PS/PS/NS	PM/PM/PM	PM/PB/PB	PB/PB/PS
PB	PS/ZO/PS	PM/ZO/ZO	NB/PS/ZO	PM/PM/ZO	PM/PM/PM	PB/PB/PB	PB/PB/PB

对于 PID 控制的 3 个参数的计算, 首先需优化 3 个参数的初始值, 再根据 $e(t)$ 和 $e_s(t)$ 确定 K_p 、 K_i 、 K_d 相应的修正值, 并与对应的比例因子相乘^[14-15]。

$$K_p = K_{p0} + A_p \Delta K_p, \quad (2)$$

$$K_i = K_{i0} + A_i \Delta K_i, \quad (3)$$

$$K_d = K_{d0} + A_d \Delta K_d, \quad (4)$$

式中:

A_p 、 A_i 、 A_d —— K_p 、 K_i 、 K_d 对应的比例因子;

K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0} —— K_p 、 K_i 、 K_d 对应的初始值;

ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d —— K_p 、 K_i 、 K_d 对应的模糊推理变化值。

1.3 模糊控制系统设计

为了实现对炭自动控制烘焙机茶叶烘焙温度的控制, 设计了一种以 Stc12c5a60s2 单片机为主要控制核心, 外接温度检测模块、空气流量调节模块和人机交互模块的控制系统, 其结构如图 4 所示。烘焙机内的温度传感器检测阵列输出的信号经 A/D 转换被单片机控制核心采集, 单片机系统通过对检测温度与设定温度差值的运算分析得到空气流量的调节参数, 然后经 D/A 转换成执

行电机的通电时长调整空气调节装置的流量, 进而实现控制烘焙温度的目的。整个烘焙工作包含自动控制模式和手动控制模式, 显示器主要显示烘焙时间、温度及工作电压。烘焙时, 茶农可根据经验选择手动模式, 结合显示器上的显示参数进行茶叶的烘焙。系统采用模块化结构, 其主程序如图 5 所示。

1.4 工作原理

茶叶木炭烘焙机选择生物炭为火源, 生物炭于抽屉

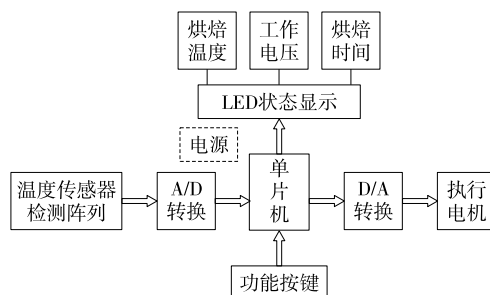


图 4 温度控制系统原理图

Figure 4 Schematic diagram of temperature control system

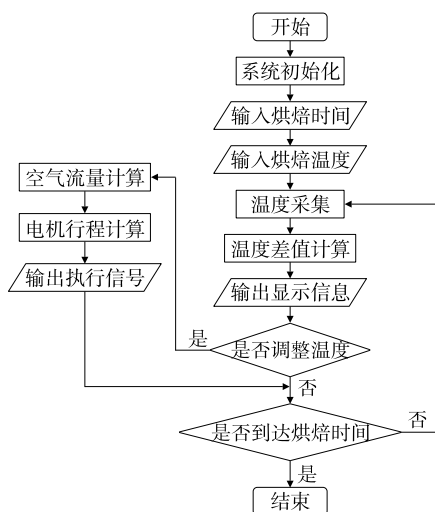


图5 主程序流程图

Figure 5 Main program flow chart

式的燃烧室1内燃烧,再通过热辐射方式向两侧的出热气口2发出,对置于托盘3中的茶叶进行烘焙,整个箱体上端装有可调节大小的排气口5,当传感器检测到的温度大于烘焙设定温度时,电动推杆6开始工作,伸长推杆关闭空气进出调节器7,使燃烧室内的生物炭因缺少氧气降低烘焙温度,当传感器检测到的温度小于烘焙设定温度时,电动推杆6收缩,打开进出调节器7,增加空气流通,从而提高温度。整个烘焙过程中翻茶环节由人工来实现。

2 试验方法

2.1 试验方案

为了更好地判定试验设计的茶叶烘焙机性能及茶叶品质,采用以下几种方法进行验证。① 木炭烘焙机连续烘焙茶叶以判断烘焙机性能的稳定;② 与电烘焙茶叶进行品质对比,采用香气成分测定+生化成分测定+感官评审三者相结合综合评价木炭烘焙机烘焙的茶叶品质。目前,茶叶香气成分的提取方法较多,如蒸馏萃取法(SDE)、顶空固相微萃取法(HS-SPME)、溶剂辅助风味蒸发法(SAFE)等,试验采用灵敏度高、操作简单,被广泛应用的顶空固相微萃取法结合GC-MS分析(HS-SPME/GC-MS)方法^[16-17],通过香气物质的萃取、生化成分分析及感官评审对所设计的木炭烘焙机进行可行性探讨。

将选取的祥华清香型铁观音半成品12 kg平均分成两份,分别在自行设计的木炭烘焙机和安溪兴民机械生产的电烘干机上烘焙。将茶叶摊放于烘焙机托盘上,每个托盘1 kg左右,摊平厚度为4 cm左右;根据林起存^[18]的方法,选择共同的烘焙温度80℃,烘焙3 h,烘焙完成后打开烘焙机箱门使茶叶冷却。

2.2 性能指标测定

2.2.1 温度 为了更好地反映温度上升速度,于烘焙

5 min时首次测量,后每10 min测量一次。

2.2.2 香气成分 将烘焙后的铁观音磨成粉末,分别准确称取6 g于250 mL锥形瓶中,并加入1.5% NaCl溶液,随后加入100 mL纯净水和10 μL癸酸乙酯,60℃水浴6 min,插入SPME吸附针吸附70 min,取10 μL浓缩液进行检测分析,根据各化合物峰面积百分比与定标物峰面积之比计算各香气成分含量,每种茶叶进行3次重复取平均值。

2.2.3 生化成分

- (1) 水分:按GB/T 8304—2013执行。
- (2) 水浸出物:按GB/T 8305—2002执行。
- (3) 游离氨基酸:按GB/T 8314—2002执行。
- (4) 茶多酚:按GB/T 8313—2002执行。
- (5) 可溶性糖:采用蒽酮比色法。
- (6) 咖啡碱:按GB/T 8312—2002执行。

2.2.4 感官评审 按SB/T 10157—1993及NY/T 787—2004执行。由5位具有高级评茶师(男性)的评审员采用密码审评法进行打分及集体讨论评语,采用品质因子加权百分平均法和评语法相结合进行评定^[19],各因子加权百分数分配见表3,其评审综合得分按式(5)计算。

表3 因子权数分配表

Table 3 Distribution of factor weights

序号(j)	因子(A)	权数(a)/%
1	外形	10
2	叶底	10
3	滋味	30
4	汤色	15
5	香气	25
6	色泽	10

$$g_{\text{rade}} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^6 A_j a_j, \quad (5)$$

式中:

g_{rade} ——综合评审平均数;

i ——专家编号;

j ——因子序号;

A_j ——评审因子得分;

a_j ——评审因子权数。

2.2.5 数据处理 试验数据以多次试验求得的平均值表示,采用Excel 2007与SPSS 2.0相结合对试验数据进行统计、计算及显著性分析。

3 试验结果对比分析

3.1 烘焙机性能测试

由图6可知,试验设计的烘焙机在3 h的烘焙时间中性能稳定可靠,且能够很好地控制温度。炭烘焙温度误

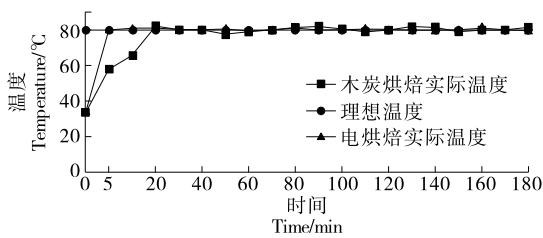


图 6 温度测量曲线

Figure 6 Temperature measurement curve

差为 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,烘焙 20 min 后整个温度基本能够保持在 $(80\pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$;电烘焙温度误差为 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$,烘焙 5 min 后能保持在 $(80\pm 1)\text{ }^{\circ}\text{C}$;虽然木炭烘焙机的温度控制误差大于电烘焙机的,但能满足日常烘焙要求,同时也符合试验设计目标。

3.2 香气成分

由表 4 可知,铁观音茶叶中共测出 23 种主要香气化合物。两种烘焙工艺下,铁观音的香气成分组成相同,但含量有所差异,其中芳樟醇类含量最多,其次为酯类和烃类;铁观音中各化合物含量顺序为反-橙花叔醇>植物醇>法尼烯,且木炭烘焙茶叶中的含量显著高于电烘焙的,说明木炭烘焙的香气比电烘焙的浓,且茶叶品质更好。

3.3 生化成分

由表 4 可知,与电烘焙相比,木炭烘焙茶叶中水分、水浸出物、茶多酚、咖啡碱含量差异显著。其中木炭烘焙的茶叶水分、可溶性糖、咖啡碱含量略低于电烘焙,水浸出物、氨基酸、茶多酚含量略高于电烘焙。水分少易于贮藏;水浸出物较少说明茶叶汤色较薄;氨基酸含量较多反映了茶汤鲜爽味较浓,香气持久;茶多酚和可溶性糖含量较多可以使茶汤甜醇;咖啡碱含量较少,说明茶叶中苦味降低^[20-21]。综上,木炭烘焙与电烘焙在生化成分上有显著差异,木炭烘焙的茶叶品质略好,与占琪等^[22]的结果相符;同时也说明试验设计的木炭烘焙机的烘焙效果好。

3.4 感官评审

由表 6 可知,木炭烘焙茶叶感官评审综合得分为 92.66,电烘焙的感官评审综合得分为 91.44,木炭烘焙得分略高于电烘焙;在外形和叶底上,两者无显著差异,但在滋味、汤色、香气上,木炭烘焙得分高于电烘焙。综上,木炭烘焙机性能良好,其烘焙茶叶品质优于电烘焙,茶叶加工中可以采用木炭烘焙机进行烘焙。

表 4 木炭与电烘焙铁观音主要香气成分的组成及平均含量[†]

Table 4 Composition and average content of main aroma components of charcoal and electric baking Tieguanyin %

种类	名称	木炭烘焙	电烘焙
芳樟醇类	芳樟醇	2.59±0.11 *	2.05±0.10
	苯甲醇	1.82±0.09	2.21±0.08 *
	苯乙醇	1.48±0.07	1.89±0.09 *
	脱氢芳樟醇	2.36±0.09	2.48±0.09
	植物醇	10.90±0.55 *	9.84±0.49
	α -松油醇	0.69±0.03	0.74±0.04
	香叶醇	2.66±0.11	2.80±0.09
	糖醇	0.96±0.04	1.03±0.05
	反-橙花叔醇	11.79±0.31 *	10.88±0.54
	反式芳樟醇氧化物	1.30±0.05	1.38±0.06
	磷酸三丁酯	1.70±0.07	1.76±0.06
	己酸叶醇酯	0.90±0.05	0.98±0.05
	棕榈酸甲酯	0.83±0.03	0.88±0.03
酯类	二氢猕猴桃内酯	0.93±0.04	1.01±0.05
	丁酸苯乙酯	0.50±0.02	0.60±0.03 *
	丁酸-2-甲基-2-苯乙酯	2.41±0.13	2.55±0.10
	茉莉内酯	2.28±0.08 *	2.15±0.04
酮类	苯甲酸己酯	0.92±0.05	1.01±0.05
	β -紫罗酮	1.95±0.09	1.80±0.09
烃类	法尼烯	9.91±0.25 *	8.36±0.42
含氮类	苯乙腈	1.44±0.04	1.54±0.08
	吡嗪	2.81±0.10	3.10±0.14 *

[†] * 表示差异显著 ($P<0.05$)。芳樟醇类总含量:木炭烘焙 $(36.55\pm 0.14)\%$,电烘焙 $(35.30\pm 0.16)\%$;酯类总含量:木炭烘焙 $(10.47\pm 0.06)\%$,电烘焙 $(10.94\pm 0.05)\%$;含氮类总含量:木炭烘焙 $(4.25\pm 0.07)\%$,电烘焙 $(4.64\pm 0.11)\%$ 。

4 结论

设计了一种采用自适应模糊 PID 控制系统的智能茶叶炭焙烘焙机,该烘焙机可以满足茶叶的烘焙要求,且烘焙的茶叶品质优于电烘焙的。自适应模糊 PID 控制系统可以使智能茶叶炭焙烘焙机在烘焙过程中的温度控制在

表 5 烘焙对茶叶主要生化成分含量的影响[†]

Table 5 The effects of different baking on the main biochemical components of tea %

烘焙方式	水分	水浸出物	氨基酸	茶多酚	可溶性糖	咖啡碱
木炭烘焙	3.46±0.11	38.67±0.47 *	1.79±0.04 *	21.50±0.91	5.43±0.08	2.32±0.05
电烘焙	3.80±0.03 *	37.46±0.69	1.66±0.07	20.19±0.84	5.67±0.05	2.44±0.06 *

[†] * 表示差异显著 ($P<0.05$)。

表 6 感官评审结果
Table 6 Sensory evaluation results

专家	木炭烘焙						电烘焙					
	外形	叶底	滋味	汤色	香气	色泽	外形	叶底	滋味	汤色	香气	色泽
1	8.90	9.30	28.50	13.80	24.00	9.50	9.00	9.40	27.90	13.80	23.80	23.00
2	9.10	8.90	27.90	13.50	23.50	9.10	9.10	8.90	27.60	13.70	9.40	9.00
3	8.90	9.00	27.90	14.00	23.80	9.20	8.90	8.90	27.00	13.70	23.30	9.10
4	8.70	9.00	28.50	13.50	23.80	9.20	8.80	9.00	27.90	13.50	23.00	22.00
5	9.40	9.20	27.60	13.80	22.50	9.30	9.40	9.30	27.00	13.50	9.10	9.20
平均值	9.00	9.08	28.08	13.72	23.52	9.26	9.04	9.10	27.48	13.64	23.02	9.16
综合得分	92.60						91.44					

(80±2)℃,从而解决了木炭智能烘焙的关键问题,为茶叶烘焙提供了一种高效简易的方法,但设计中未进行优化试验,后续可进一步对其整体结构、控制系统进行优化仿真分析。炭烘焙可以提高茶叶品质,但其燃烧产生的二氧化碳等对环境不力,后续可以积极探索采用生物炭或其他对环境影响小的新能源。

参考文献

[1] 邓仕彬,林国荣,周凤超.制茶工艺对白茶品质影响研究进展[J/OL].食品工业科技.(2020-07-27)[2020-11-17].
http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1759.TS.20200727.1041.006.html.

[2] 谢振邦.闽南乌龙茶烘焙技术初探[J].南方农业,2019,13(6):81-83.

[3] 项应萍,徐邢燕,刘国英,等.乌龙茶烘焙技术研究进展[J].亚热带农业研究,2019,15(3):211-216.

[4] 邵静娜,孙威江,葛国平,等.微波、远红外技术烘焙乌龙茶的工艺研究[J].中国食品学报,2017,17(8):156-164.

[5] 吴全金,孙威江,吴占富.远红外加热技术在茶叶加工及制品中的研究进展[J].农机化研究,2014,36(4):220-224,228.

[6] 苏成家.不同焙火工艺对乌龙茶品质的影响[J].现代食品,2018(15):167-169,174.

[7] 胡波.远红外加热技术在茶叶加工中的应用[J].南方农机,2019,50(4):1,31.

[8] 高育森.抽屉式温度控制茶叶木炭烘焙机:201720019171[P].2017-01-09.

[9] 郭成林,蒋日鹏,李晓谦,等.基于Fuzzy-PID的大规格铸锭结晶器液位控制[J].机械工程学报,2018,54(22):212-217.

[10] 王欢,陈春俊,杨露,等.基于模糊PID迭代学习的气压模拟系统控制算法研究[J/OL].中国测试.(2020-10-10)[2020-11-17].
http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1714.TB.20201010.1552.002.html.

[11] 李喜武,徐博,袁月明.自适应模糊PID算法仔猪床温度控制系统研究[J].中国农机化学报,2020,41(10):48-

53,73.

[12] 张宝峰,张耀,朱均超,等.基于模糊PID的高精度温度控制系统[J].传感技术学报,2019,32(9):1425-1429.

[13] 张申宇,马天兵,罗松松,等.基于模糊自适应PID真空室温度控制的研究[J].组合机床与自动化加工技术,2019(11):92-95.

[14] 刘华,刘敏层.基于模糊PID在锅炉温度控制系统的仿真研究[J].自动化与仪表,2018,33(4):20-25.

[15] 裴刚,黄俊仕,艾施荣,等.基于STM32茶叶红外杀青机温湿度模糊控制系统设计[J].现代电子技术,2020,43(19):79-83.

[16] 陈林,余文权,张应根,等.基于SDE和HS-SPME/GC-MS的乌龙茶香气组成特征分析[J].茶叶科学,2019,39(6):692-704.

[17] 孙振杰,王梦馨,崔林,等.普洱茶香气成分研究进展[J].茶叶通讯,2020,47(1):13-19.

[18] 林起存.烘焙提香条件对提升东方美人茶品质的影响[J].福建茶叶,2019,41(12):13.

[19] 李兵,孙长应,李为宁,等.基于光电控制的六安瓜片烘焙机设计[J].食品与机械,2018,34(5):106-109.

[20] 王丽,官晓倩,余能煌,等.不同焙火程度对武夷岩茶品质和抗氧化活性的影响[J].食品科技,2020,45(8):68-74.

[21] 孙庆磊,梁月荣,陆建良,等.不同浸提方法对茶汤品质的影响[J].茶叶,2005(2):91-94.

[22] 占琪,任洪涛,杨雪梅,等.电焙和炭焙武夷岩茶与常规烘焙铁观音香气成分分析[J].云南农业大学学报(自然科学),2018,33(1):113-119.