

远红外茶叶提香机设计与试验

孙 燕^{1,2} 喻晓柳¹ 曹成茂^{2,3}

(1. 安徽农业大学电子与电气工程学院, 合肥 230036; 2. 安徽省智能农机装备工程实验室, 合肥 230036;
3. 安徽农业大学机械与车辆工程学院, 合肥 230036)

摘要: 针对传统热风式茶叶提香机控温精度低、茶叶受热不均、含水率偏高及香气品质不稳定等问题, 本文设计了一种远红外茶叶提香机。阐述了远红外茶叶提香机整体结构和工作原理, 进行了关键部件设计与试验; 基于西门子 S7-200 SMART PLC 与昆仑通态触摸屏构建了 PID 闭环控制系统, 实现温度精准调控与多段式提香工艺程序化运行。以黄山毛峰茶为原料, 采用三因素三水平正交试验对增香阶段工艺参数进行优化, 建立了含水率与碎茶率回归模型。结果表明, 增香阶段最优参数组合为提香温度 110℃、提香时间 20 min、滚筒转速 18 r/min。在此优化条件下结合预热与稳香阶段进行三段式工艺验证试验。试验结果表明, 成品茶含水率为 5.48%、碎茶率为 1.81%、感官评审平均得分为 95.12。整机生产率为 50 kg/h, 电耗率为 0.68 kW·h/kg, 较传统热风式滚筒提香机节能 24.4%。该设备运行稳定可靠, 提香品质均匀一致。研究结果可为茶叶提香装备技术升级提供参考。

关键词: 茶叶提香机; 远红外加热; PLC 控制; 正交试验

中图分类号: S226.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298 (2026) 20-0263-11

OSID:



Design and Test of Far-infrared Tea Aroma Enhancement Machine

Sun Yan^{1,2} Yu Xiaoliu¹ Cao Chengmao^{2,3}

(1. School of Electronics and Electrical Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

2. Anhui Intelligent Agricultural Machinery Equipment Engineering Laboratory, Hefei 230036, China

3. School of Mechanical and Automotive Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: Focusing on addressing the problems of low temperature control accuracy, uneven heating, high moisture content and unstable aroma quality commonly found in traditional hot-air tea aroma-enhancing equipment, a far-infrared tea aroma-enhancing machine was designed. The overall structure and working principle of the machine were elaborated, and its key components were designed and tested. A PID closed-loop control system was constructed based on a Siemens S7-200 SMART PLC and a Kunlun Tongtai touch screen, through which precise temperature regulation and programmed operation of a multi-stage aroma-enhancing process were achieved. With Huangshan Maofeng tea as the raw material, a three-factor and three-level orthogonal experiment was conducted to optimize the process parameters of the aroma-enhancing stage, and regression models for moisture content and broken tea rate were established. The results showed that the optimal parameter combination for the aroma-enhancing stage was a temperature of 110℃, a duration of 20 min and a drum rotation speed of 18 r/min. Under these optimized conditions, a three-stage process verification test combining the preheating and aroma-stabilizing stages was carried out. The experimental results indicated that the moisture content of the finished tea was 5.48%, the broken tea rate was 1.81%, and the average sensory evaluation score was 95.12. The machine productivity was 50 kg/h and the specific power consumption was 0.68 kW·h/kg, representing an energy saving of 24.4% compared with conventional hot-air drum aroma-enhancing machines. The equipment was proved to be stable and reliable in operation, with uniform aroma quality. The findings can provide a reference for the technological upgrading of tea aroma-enhancing equipment.

Key words: tea aroma-enhancing machine; far-infrared heating; PLC control; orthogonal test

收稿日期: 2026-05-04 修回日期: 2026-05-18

基金项目: 安徽省科技重大专项(18030701195)和农业农村部农机研发制造推广一体化试点项目(YTH0104)

作者简介: 孙燕(1978—), 女, 副教授, 主要从事智能农机装备研究, E-mail: syxkl19@ahm.edn.cn

通信作者: 曹成茂(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事智能检测与控制技术研究, E-mail: caochengmao@sina.com

0 引言

我国茶叶产量连续多年呈上升趋势,从 2019 年到 2024 年累计增长 9.597×10^5 t,全国茶园总面积达 3.4952×10^5 hm²^[1]。提香是将初烘后茶叶在特定温度与时间条件下进行二次烘焙的加工工序,为绿茶加工关键环节,对形成和提升茶叶香气品质具有决定性作用^[2-4]。传统提香多采用燃煤、薪柴等供热方式,存在热效率低、污染严重等问题,已逐步被机械化加工替代^[5]。目前,在生产中茶叶提香设备普遍使用箱式烘干机和普通滚筒式烘焙机。安徽省萃华科技股份有限公司设计的箱式热风烘焙提香机,采用波谷交替式翻面结构,可使茶叶干燥,但仍存在温度控制精度不足、品质不稳定等问题^[6]。普通滚筒式烘焙机依靠筒壁传导热量,虽能对茶叶进行充分翻动,但茶叶在运动中与筒壁及茶叶间持续摩擦、碰撞和挤压,易造成破碎,对提香温度、时间及滚筒转速配合要求较高。

当前茶叶加工机械研究主要集中在鲜叶分级^[7-8]、杀青^[9-10]、理条^[11-12]等工序,针对烘焙装备研究相对较少。李兵等^[13]设计了基于模糊 PID 控制的远红外输送带式烘焙机,实现了温度闭环控制,碎茶率低于人工烘焙,成茶品质优于炭火烘焙。李兵等^[14]通过动力学分析与 EDEM 离散元仿真,探究了滚筒转速、导叶板螺旋角及导叶板个数对茶叶颗粒运动及烘焙效果的影响,获得了优化参数组合。在提香工艺方面,已有研究探讨了不同温度和时间对茶叶品质的影响,陈凤哲^[15]确定乌龙茶较优提香温度为 80℃;刘素强等^[16]发现 100~110℃ 可凸显红茶甜醇口感,120℃ 易产生高火味;叶飞等^[17]得出远安黄茶最优工艺参数:提香温度为 130℃、提香时间为 20 min;李为宁等^[18]基于离散元法优化了滚筒式提香机结构参数,确定最佳转速为 33 r/min。

上述研究或聚焦于装备结构设计,或侧重于工艺参数优化,未能将二者结合,且缺乏自动控制系统融入。现有设备多采用热风供热,易造成茶叶外干内湿,热效率较低,供热方式仍有待改进。远红外辐射加热以电磁波形式传递能量,波长与茶叶有机分子吸收波段相匹配,可实现物料内外同步受热,加热效率高且能较好保持茶叶色泽和香气^[19-21]。目前,远红外加热与滚筒提香相结合的装备研究尚未见报道。

本文设计一种远红外茶叶提香机。对提香滚筒、远红外加热装置等关键部件进行结构与参数计算,设计基于 PID 算法的 PLC 自动控制系统,并通过正交试验优化提香工艺参数,以验证设备提

香效果,以期茶叶提香装备技术升级提供参考。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

远红外茶叶提香机整机由调控风机、机架、进料斗、远红外加热装置、挡片、支撑轮盘、滚轮、电动推杆、碎茶托盘、驱动电机等组成,整机三维结构图如图 1 所示,主要技术参数如表 1 所示。

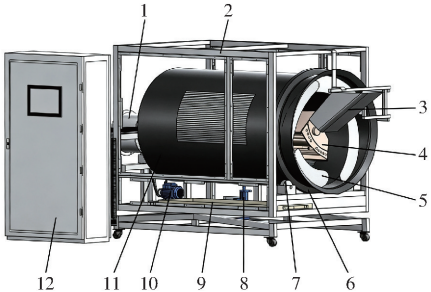


图 1 远红外茶叶提香机整机三维结构图

Fig. 1 Overall structure of far-infrared tea aroma enhancer

1. 调控风机 2. 机架 3. 进料斗 4. 远红外加热装置 5. 挡片
6. 支撑轮盘 7. 滚轮 8. 电动推杆 9. 碎茶托盘 10. 驱动电机
11. 提香炒干烘焙滚筒 12. 控制柜

表 1 远红外茶叶提香机主要技术参数

Tab. 1 Main technical specifications of far-infrared tea aroma enhancer

参数	数值
整机外形尺寸(长×宽×高)/(m×m×m)	2.3×1.39×1.86
整机总质量/kg	280
生产率/(kg·h ⁻¹)	50
滚筒驱动电机功率/kW	0.75

1.2 工作原理

远红外茶叶提香机以初步烘干的茶叶为原料,通过进料斗送入提香炒干烘焙滚筒内。提香过程中,远红外加热管对茶叶进行热处理,提香炒干烘焙滚筒在电机驱动下正转,滚筒内部设置的挡片可防止茶叶泄漏,翻动组件则确保茶叶均匀受热。控制系统通过温度传感器实时监测滚筒内温度,并基于反馈信号运用控制算法动态调节远红外加热管输出功率,同时精确控制滚筒转速与运转时间,以满足工艺要求。制茶过程产生的碎茶可通过提香炒干烘焙滚筒外壁上碎茶漏网排出,由碎茶托盘收集。加工陈茶或含水率较高的茶叶时,可手动开启调控风机,以祛除陈化并排除水气。

提香作业结束后,驱动电机首先停止提香炒干烘焙滚筒正转,随后驱动其反转;与此同时,电动推杆将机架顶升至一定高度,使茶叶借助重力从挡片间隙快速排出,完成出料流程。传动部件协同运作

具体表现为：驱动电机负责提香炒干烘焙滚筒（下文简称提香滚筒）的正反转运动控制，电动推杆则执行机架的升降动作。控制系统通过集成远红外加热技术、变频控制加热功率和电机转速、机械传动逻辑与控制算法，实现了茶叶提香工艺高效化与参数精准化。

2 关键部件设计

2.1 提香滚筒设计

2.1.1 提香滚筒基本结构

提香滚筒作为整个茶叶提香机核心零部件，主要包含筒体、导叶板、加热装置、支撑轮盘以及碎茶漏网等部分，具体结构如图 2 所示。为使滚筒满足相应结构强度要求，同时契合茶叶生产的卫生安全标准，滚筒主体与导叶板均选用食品级 SUS304 不锈钢材料加工制成，板材厚度设定为 2 mm。滚筒两端设计为锥形结构并分别开设圆形通孔，其中左侧圆孔兼具进料与出料功能，右侧圆孔内侧装配有圆形不锈钢网罩。支撑轮盘布置在提香滚筒前后两侧，与机架上支撑滚轮相配合，主要起承载支撑的作用，同时确保滚筒能够平稳顺畅地旋转。在滚筒内部中间位置安装有远红外加热装置，固定朝向，工作时滚筒回转，加热装置不旋转。在滚筒内壁沿轴向布置有纵向导叶板，滚筒旋转过程中，茶叶在导叶板带动下实现连续翻抛与轴向输送，在加热装置作用下达到含水率降低、激发香气物质的产生以及外形紧实的效果。

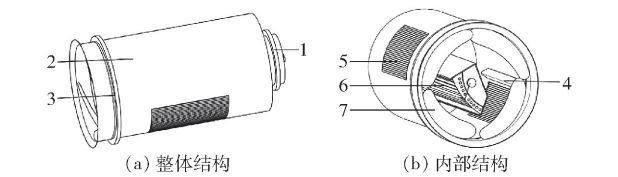


图 2 提香滚筒结构示意图

Fig. 2 Structural schematic of aroma-enhancing drum
1. 后支撑轮盘 2. 筒体 3. 前支撑轮盘 4. 导叶板 5. 碎茶漏网 6. 加热装置 7. 挡片

2.1.2 提香滚筒尺寸

茶叶提香机单次加工茶叶质量为 25 kg。由于加热装置安装在滚筒内部，茶叶在滚筒内抛撒过程需与加热管保持一定距离，以避免产生焦糊现象，同时考虑到茶叶在滚筒内容积也会直接影响受热均匀性。取茶叶平均密度 ρ 为 532.4 kg/m³，为保证滚筒中茶叶不会撒落到滚筒外部及加热装置上，设定滚筒内茶叶填充体积占滚筒总容积的 7%^[22]。

滚筒长径比计算式为

$$\lambda = \frac{L}{2R} \tag{1}$$

式中 λ ——滚筒长径比
 L ——滚筒轴向长度, m
 R ——滚筒半径, m

为保证茶叶在滚筒内有足够的停留时间和设备结构合理性，取 $\lambda = 1.3$ ，即 $L = 2.6R$ 。

则滚筒半径 R 为

$$R = \sqrt[3]{\frac{m}{(2.6 \times 0.07) \pi \rho}} \tag{2}$$

式中 m ——单次茶叶加工质量, kg
计算得滚筒半径 $R = 0.43$ m，取 $R = 0.5$ m，则滚筒轴向长度 $L = 1.3$ m。

2.1.3 提香滚筒转速

在提香过程中，当茶叶颗粒被带至滚筒最高位置时，滚筒所需的最小转速即为极限转速^[23]。当茶叶颗粒运动到滚筒最高点时，对茶叶颗粒进行受力分析如图 3 所示。

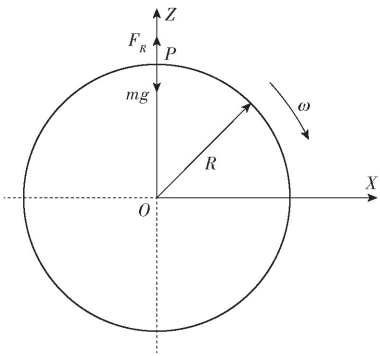


图 3 点 P 时茶叶颗粒受力分析图

Fig. 3 Force analysis diagram of tea particles at point P

当茶叶颗粒运动至最高点 P 时，重力正好提供茶叶做圆周运动的向心力，忽略导叶板对茶叶的影响，茶叶本身重力 G 与离心力 F_R 相等，即

$$\begin{cases} G = m_1 g \\ F_R = m_1 \omega^2 R \\ \omega = \frac{\pi n_{\text{lim}}}{30} \end{cases} \tag{3}$$

式中 m_1 ——茶叶颗粒质量, kg
 g ——重力加速度, m/s²
 ω ——滚筒转动角速度, rad/s
 n_{lim} ——滚筒极限转速, r/min

由式(3)可得

$$n_{\text{lim}} = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g}{R}} \tag{4}$$

计算得滚筒极限转速 n_{lim} 为 42.3 r/min，为保证茶叶的提香效果，滚筒实际速度不应低于极限转速的 30%^[24-25]。取滚筒转速下限 n_{min} 为 12.69 r/min。

2.1.4 导叶板

基于滚筒式茶叶加工设备的物料运动规律，

茶叶在滚筒内抛落式与泻落式复合运动是实现均匀加工的基础,导叶板作为调控该运动状态的核心部件,需兼顾翻抛与导向的功能。设计导叶板沿滚筒内壁周向分布,采用焊接固定方式,焊接接口采用圆角过渡以避免划伤茶叶。2 个三角形导叶板对称布置,主要承担茶叶翻抛与料幕形成功能,1 个螺旋形导叶板位于两者之间,负责茶叶轴向导向与匀速输送,三者协同确保茶叶在周向翻抛充分、轴向移动平稳。图 4 为导叶板在滚筒内部的布置方式。

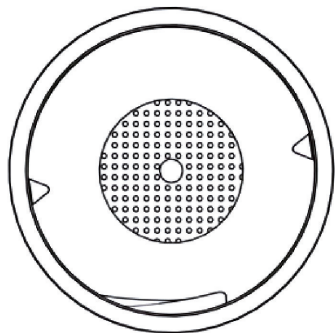


图 4 导叶板在滚筒内布局

Fig. 4 Layout of guide vanes inside drum

三角型导叶板高度 H 需满足茶叶升举高度要求,确保形成连续料幕,计算式为

$$H = \frac{D}{6} \sqrt{\frac{\varphi}{\sin \alpha}} \quad (5)$$

式中 φ ——茶叶填充率,取 7%

α ——导叶板安装倾角,取 8°

D ——滚筒直径, m

计算得 $H \approx 0.118$ m, 取 $H = 120$ mm。

三角形顶角 $\gamma = 60^\circ$, 导叶板宽度采用渐变设计,根部 $b_1 = 100$ mm,端部 $b_2 = 80$ mm,以减少茶叶流动阻力。为保证截面尺寸满足强度要求,根据弯曲强度条件验证其强度合理性,应力计算式为

$$\sigma = \frac{3F_{\max} a}{2bH^2} \leq [\sigma] \quad (6)$$

式中 $F_{\max}$ ——茶叶对导叶板的最大冲击力,取 15 N

a ——导叶板长度,取 1.2 m

b ——导叶板平均宽度,取 90 mm

$[\sigma]$ ——304 不锈钢许用应力,取 160 MPa

计算得 $\sigma = 0.02$ MPa, 满足强度要求。

螺旋形导叶板导程 P 为茶叶轴向移动 1 周的距离,计算式为

$$P = \frac{\pi D}{\tan \beta} \quad (7)$$

式中 β ——螺旋升角,取 18°

计算得 $P = 9.6$ m, 由于导叶板长度为 1.2 m, 覆盖导程数。

2.2 加热装置设计

设计远红外茶叶提香机由多根远红外加热管组成,需对加热功率进行计算,为计算方便,对每小时提香所需的能量进行分析,确定远红外加热管电功率。茶叶所需的能量分为 2 部分:茶叶含水率需从 15% 降至 5% 和干物质所吸收的能量。

水分汽化所需的热量 Q_1 为

$$Q_1 = M_1 (\lambda_1 - \lambda_2) [C_1 (T_2 - T_1) + r] \quad (8)$$

式中 M_1 ——茶叶质量, kg

λ_1 ——提香作业前茶叶含水率, %

λ_2 ——提香作业后茶叶含水率, %

C_1 ——水的比热,取 4.2 kJ/(kg·K)

T_1 ——茶叶初始温度,取 25°C

T_2 ——水的沸点,取 100°C

r —— 100°C 时水汽化热,取 2 260 kJ/(kg·K)

提香作业前茶叶含水率为 15%, 因此茶叶在升温过程所吸收的热量 Q_2 为

$$Q_2 = (C_1 M_2 + C_2 M_3) (T'_2 - T_1) \quad (9)$$

式中 M_2 ——提香作业前茶叶中水分质量, kg

C_2 ——茶叶干物质比热,取 1.5 kJ/(kg·K)

M_3 ——茶叶干物质总质量, kg

T'_2 ——提香机工作时最高温度,取 120°C

考虑到提香滚筒属于开放式系统结构,在设备运行期间不可避免地会产生一定的热能散失,依据相关茶叶加工设备资料及实践经验,设该工艺过程热效率 η 为 0.64^[26]。则在提香工序中所需总热量 Q_3 为

$$Q_3 = \frac{Q_1 + Q_2}{\eta} \quad (10)$$

计算得 $Q_3 = 17.13$ kW/h。取远红外加热管总功率为 18 kW, 尺寸为 90 cm, 功率为 2 kW, 为了达到三相交流电负荷平衡, 每 3 根加热管为 1 组, 共 9 根, 组成三相平衡负载。加热装置固定安装于滚筒内部中心轴线位置, 采用悬臂式支撑结构, 通过支架与滚筒端盖连接固定, 不随滚筒转动。如图 5 所示, 9 根远红外加热管平行分布, 整体呈长条形阵列式布局, 所有加热管电源接线及 K 型热电偶温度传感器线缆均通过滚筒中心空心的支撑管道引出至外部控制柜, 管道内部采用耐温绝缘材料进行隔离保护, 确保电气安全。

2.3 机架设计

如图 6 所示, 机架结构设计采用上下分体式结构, 上部为核心功能机架, 采用 304 不锈钢方管焊接, 用于安装提香滚筒与传动组件, 下部为承重底座, 配备万向脚轮。为实现茶叶自动出料, 上部机架设计为可倾斜结构, 上部机架与下部底座通过轴承



图 5 加热装置结构图

Fig. 5 Structure diagram of heating device

1. 远红外加热管 2. 温度传感器 3. 支撑管

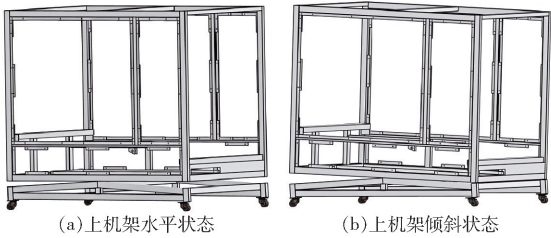


图 6 整机机架结构

Fig. 6 Overall frame structure of machine

铰接,形成旋转支点,倾斜动作由电动推杆驱动。当需要出茶时,控制系统启动电动推杆,伸缩杆向外伸出,以旋转支点为圆心,平稳地将上部机架的后端向上顶起,使提香滚筒整体向下倾斜一定角度以实现出茶。

为确定电动推杆选型和参数,建立上部机架倾斜运动机械简图,如图 7a 所示。以旋转点 O 为原点,电动推杆固定于下部底座,下端铰接于底座固定点 B ,上端铰接于上部机架点 A ,如图 7b 所示。

图 7a 中 γ 为水平状态下 OA 与水平方向夹角; θ 为上部机架绕点 O 顺时针倾斜角。规定出茶时 $\theta > 0^\circ$,为保证茶叶无残留出料并满足机构运动余量,确定机架工作最大倾斜角 $\theta_{\max} = 20^\circ$ ^[27]。 AB 为电动推杆最小安装尺寸,取 475 mm; $A'B$ 为电动推杆最大安装尺寸,对应推杆完全伸出状态; OB 为电动推杆离旋转轴水平距离,取 440 mm。

电动推杆行程 S 为

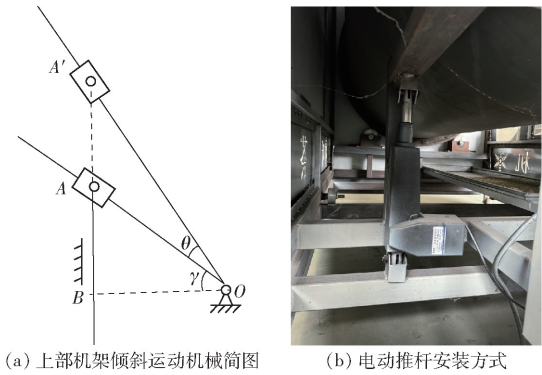


图 7 上部机架倾斜传动设计

Fig. 7 Tilting transmission design of upper frame

$$S = L_{OB}(\tan(\gamma + \theta_{\max}) - \tan\gamma) \tag{11}$$

计算得电动推杆行程 $S = 300\text{ mm}$ 。

3 控制系统设计

3.1 控制系统硬件选型

控制系统硬件组成如图 8 所示。采用昆仑通态 TPC1021ET 工控屏作为上位机,以西门子 S7-200 SMART 型 PLC(CPU 型号为 ST30)作为下位机控制中心。该型号 PLC 提供 18 路 DC24V 数字量输入和 12 路晶体管源型输出。温度采集选用 K 型热电偶,测量范围为 $0 \sim 600^\circ\text{C}$,其信号接入模拟量扩展模块 EM AT04,该模块支持直接连接热电偶,可简化信号调理电路;模拟量输出则采用 EM AM06 模块,提供多路模拟量输出,用于向变频器发送调速或功率调节信号,驱动电机的启停与调速由台达 VFD2A7MS43 型变频器实现,远红外加热管的输出功率调节由台达 VFD300CP43B21 型变频器完成。风机选用 AC220V 调控风机。此外,选用 LX600 电动推杆,负载力为 6 000 N,行程 300 mm,速度为 50 mm/s。PLC 控制系统 I/O 端口定义如表 2 所示。

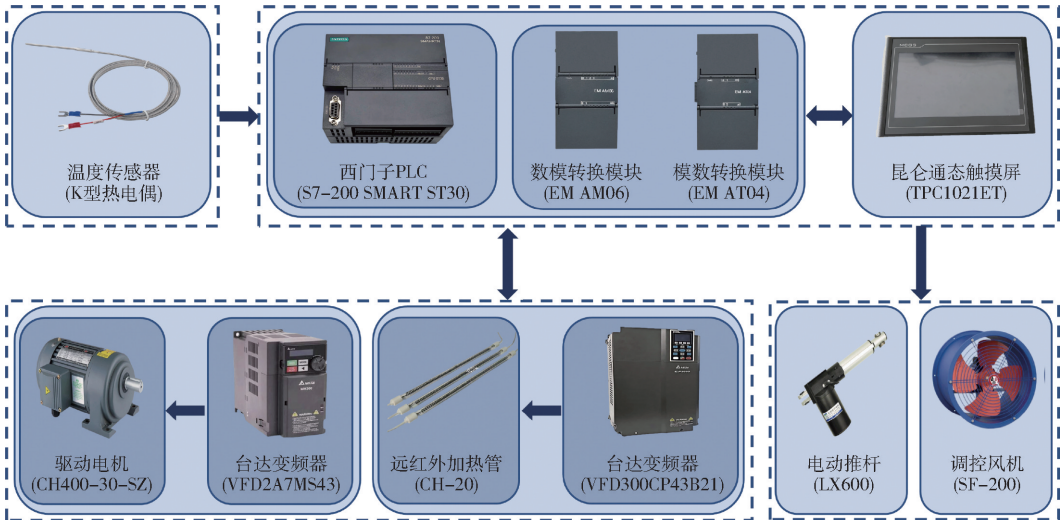


图 8 控制系统硬件组成

Fig. 8 Hardware composition of control system

表 2 PLC 控制系统 I/O 端口定义

Tab.2 I/O port assignment for PLC control system

序列	端子分配	端子描述
1	I0.0	急停按钮
2	Q0.0	提香滚筒正转
3	Q0.1	提香滚筒反转
4	Q0.2	调控风机开启
5	Q0.3	电动推杆伸出
6	Q0.4	电动推杆收缩
7	Q0.5	远红外加热管开启
8	AIW36	获取当前温度
9	AQW16	控制加热管变频器
10	AQW18	控制驱动电机变频器

3.2 控制系统软件设计

远红外茶叶提香机控制系统主要实现提香参数设定、一键启停、状态监控及提香作业全流程自动运行等功能。系统软件采用 STEP7 - MicroWIN SMART 进行程序编写与硬件配置。系统软件控制流程如图 9 所示。控制系统设自动与手动 2 种模式:自动模式下,仅需选择加工茶叶类型,系统自动调用 PLC 预设提香工艺参数;手动模式下,设备上电自检后通过触摸屏自定义设定温度、时间及转速等参数。设备启动后,PLC 根据预设工艺曲线,结合温度传感器实时反馈信号,采用 PID 算法动态调节远红外加热管输出功率与滚筒转速。当实际温度达到目标值后,系统进入恒温计时阶段,完成当前工艺段后依次切换至下一阶段,直至提香作业结束。作业过程,工控屏实时显示当前温度、剩余时间及运行阶段等信息,遇急停或异常情况可自动切断加热,保障设备与人员安全。

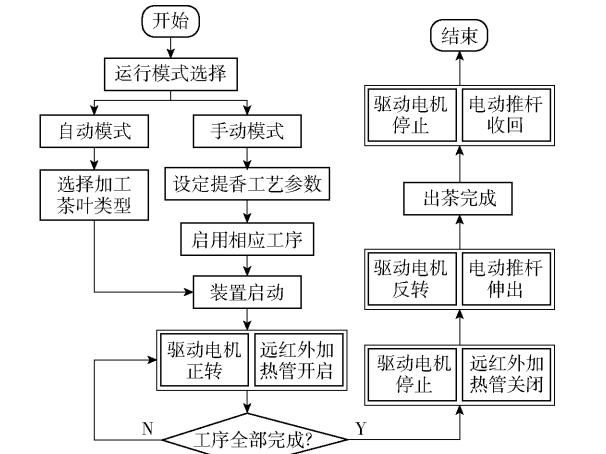


图 9 系统软件控制流程

Fig.9 Control flowchart of system software

人机交互界面采用昆仑通态 MCGS PRO 开发,设计了系统登录界面、手自动模式选择界面、参数设置界面和状态监控界面。参数设置界面如图 10 所示。



图 10 参数设置界面

Fig.10 Parameter setting interface

3.3 PID 温度控制整定

以目标温度 110℃ 开展空载 PID 参数整定,采用临界比例度法确定初始参数后,在线微调获得最优控制参数。为验证系统温控性能,设目标温度 80、110、130℃ 进行升温试验,通过触摸屏每 0.2 min 采集 1 次温度并绘制响应曲线如图 11 所示。结果表明,系统在各设定温度下均能在约 1 min 内升至目标值并保持稳定,控制精度为 ±3℃;自 130℃ 自然降温至 80℃ 约需 2 min,可满足连续作业要求。

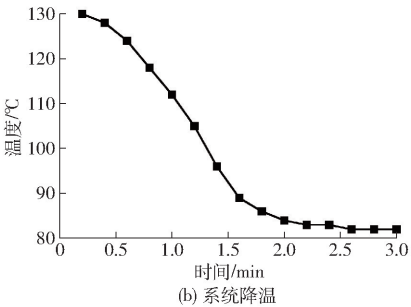
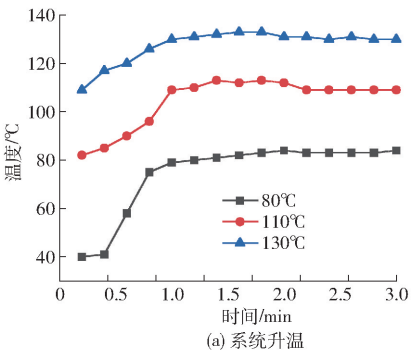


图 11 控制系统温度响应曲线

Fig.11 Temperature response of control system

4 样机试验

4.1 试验材料与方法

2025 年 7 月在安徽省六安市霍山县叶王农机制造有限公司进行了样机试验。选用同一批次、经初步干燥至含水率为 15% 的黄山毛峰茶作为试验原料。

在前期对当地典型茶叶加工企业的实地调研时,发现当前生产中多采用三段式提香工艺,即预热阶段、增香阶段和稳香阶段。其中,增香阶段是香气

物质生成与累积核心环节,对成品茶叶香型特征及感官品质具有决定性影响。为精确优化该阶段工艺参数,以增香阶段提香温度、提香时间和滚筒转速为试验因素。根据前期预试验,选取滚筒转速为 15 ~ 21 r/min、提香温度为 100 ~ 120℃、提香时间为 15 ~ 25 min。在最优范围内,各选取 3 个水平,利用 Design-Expert 13 软件进行三因素三水平正交试验方案设计^[28-30]。因素编码如表 3 所示。

表 3 试验因素编码

Tab.3 Coding of experimental factors

编码	因素		
	提香温度 A/℃	提香时间 B/min	滚筒转速 C/(r·min ⁻¹)
-1	100	15	15
0	110	20	18
1	120	25	21

试验时,当第 1 道工序完成后,将茶叶原料从进料斗倒入提香滚筒内,待工序全部完成,茶叶原料全部从滚筒内排出,则完成 1 组提香试验。进行下 1 组试验前,预先根据试验方案调整各试验因素水平,直至完成全部试验组。

4.2 评价指标

提香后茶叶含水率和碎茶率最能体现提香机性能,选用含水率 Y_1 和碎茶率 Y_2 作为评价指标。对提香前后茶叶质量进行称量,抽取茶叶样品按对角线多点法随机取样,充分混合均匀后,称取测定小样 10 g,采用快速水分测定仪法测定茶叶含水率,测量时,将待测茶叶放入测量盘中,测试平均 3 ~ 5 min,茶叶含水率即可通过仪器上的控制面板直接读出。

按照文献[31]进行测定。称取茶叶样品 100 g 左右,置于孔径 1.25 mm 分样筛上,以水平圆周运动筛分 5 min,使碎茶与完整茶叶分离,收集碎茶并称量。

4.3 试验结果与分析

整个试验过程中,远红外茶叶提香机在 PLC 控制系统下,滚筒正反转切换顺畅,电动推杆在反转开始后约 6 s 内完成顶升动作,机架上升平稳,加热管在设定时间到达时立即停止工作,未出现延迟或持续加热现象。试验结果如表 4 所示。

通过上述试验数据,利用 Design-Expert 13 软件对表 4 试验结果进行回归分析,得到含水率 Y_1 和碎茶率 Y_2 回归方程分别为

$$Y_1 = -21.336 + 0.497A - 0.085B + 0.25C - 0.01BC - 0.002A^2 + 0.009B^2 + 0.002C^2 \quad (12)$$

$$Y_2 = 26.704 - 0.439A - 0.327B + 0.385C + 0.003AB + 0.001A^2 - 0.003B^2 - 0.017C^2 \quad (13)$$

对试验结果进行方差分析,结果如表 5 所示。

表 4 正交试验结果

Tab.4 Orthogonal test results

试验 编号	因素			含水率 Y_1 /%	碎茶率 Y_2 /%
	提香温度	提香时间	滚筒转速 C/		
	A/℃	B/min	(r·min ⁻¹)		
1	100	15	18	5.18	2.84
2	110	15	21	5.14	2.25
3	110	20	18	4.87	2.5
4	100	20	21	5.24	2.08
5	100	25	18	5.69	2.03
6	110	20	18	4.84	2.6
7	110	20	18	4.88	2.45
8	110	25	21	5.17	1.88
9	120	15	18	3.96	3.14
10	110	20	18	4.86	2.58
11	120	25	18	4.55	2.72
12	120	20	15	4.01	2.98
13	120	20	21	4.09	2.47
14	100	20	15	5.16	2.68
15	110	20	18	4.85	2.55
16	110	25	15	5.59	2.22
17	110	15	15	4.59	2.78

表 5 方差分析结果

Tab.5 ANOVA results

评价指标	来源	平方和	自由度	均方	F	P
含水率 Y_1	模型	4.03	9	0.447 0	1 439.76	<0.000 1 **
	A	2.71	1	2.70	8 736.16	<0.000 1 **
	B	0.567 1	1	0.588 6	1 825.19	<0.000 1 **
	C	0.010 5	1	0.000 0	33.83	0.000 7 **
	AB	0.001 6	1	0.001 6	5.15	0.057 5
	AC	0.000 01	1	0.000 01	0.000 01	1.000 0
	BC	0.235 2	1	0.270 4	757.05	<0.000 1 **
	A ²	0.276 5	1	0.255 3	889.82	<0.000 1 **
	B ²	0.245 1	1	0.230 1	788.70	<0.000 1 **
	C ²	0.001 9	1	6.579 × 10 ⁻⁶	6.12	0.042 6 *
	残差	0.002 2	7	0.000 3		
	失拟项	0.001 2	3	0.000 4	1.57	0.329 1
	误差	0.001 0	4	0.000 3		
	总和	4.03	16			
碎茶率 Y_2	模型	1.59	9	0.176 3	51.12	<0.000 1 **
	A	0.262 8	1	0.262 8	76.19	<0.000 1 **
	B	0.460 8	1	0.460 8	133.59	<0.000 1 **
	C	0.485 1	1	0.485 1	140.64	<0.000 1 **
	AB	0.115 6	1	0.115 6	33.51	0.000 7 **
	AC	0.002 0	1	0.002 0	0.587 1	0.468 6
	BC	0.010 0	1	0.010 0	2.90	0.132 4
	A ²	0.122 8	1	0.122 8	35.59	0.000 6 **
	B ²	0.039 4	1	0.039 4	11.43	0.011 8 *
	C ²	0.100 2	1	0.100 2	29.04	0.001 0 **
	残差	0.024 1	7	0.003 4		
	失拟项	0.009 2	3	0.003 1	0.824 4	0.544 9
	误差	0.014 9	4	0.003 7		
	总和	1.61	16			

注: ** 表示影响极显著 ($P < 0.01$), * 表示影响显著 ($0.01 \leq P < 0.05$)。

由表 5 可知,茶叶含水率 Y_1 回归模型极显著 ($P < 0.0001$),表明所选因素对含水率有显著影响,回归模型失拟项不显著 $P = 0.3291 > 0.05$,影响程度不明显。试验因素对含水率的影响从大到小依次为: A 、 B 、 A^2 、 B^2 、 BC 、 C 、 C^2 、 AB 、 AC 。同时得到模型决定系数 $R^2 = 0.9995$,表明该模型预测值与实际值有较高的相关性。

同理可得,在茶叶的评价指标碎茶率的方差分析中, Y_2 回归模型极显著($P < 0.0001$),影响较为明显。试验因素对碎茶率的影响从大到小依次为: C 、 B 、 A 、 A^2 、 AB 、 C^2 、 B^2 、 BC 、 AC 。失拟项 $P = 0.5449 > 0.05$,且模型决定系数 $R^2 = 0.985$,表示该模型的拟合程度高,可用来模型预测。

滚筒转速和提香时间交互作用对茶叶含水率的影响响应曲面如图 12a 所示。由图 12a 可知,含水率随提香时间延长和转速增加而逐渐降低,在低转速区域含水率随时间下降速率较快,而在高转速区

域时间对含水率的影响趋于平缓。表明适当提高转速可在较短时间内达到相近的干燥效果,二者存在协同增强效应。提香温度和提香时间交互作用对茶叶含水率的影响响应曲面如图 12b 所示。由图 12b 可知,随着温度由 100°C 升高至 120°C ,含水率呈持续下降趋势,曲面在此区间内下降幅度较大,而时间由 15 min 延长至 25 min 时,含水率虽有下降但变化相对平缓,曲面坡度较为缓和。如图 12c 所示,当提香时间固定为 20 min 时,含水率随提香温度的升高而显著降低,随滚筒转速的增加亦呈下降趋势,但温度对应的曲面坡度更为陡峭,表明温度对含水率的影响远大于转速。分析原因是因为提香温度升高显著增强远红外辐射强度,加速水分蒸发,而转速主要通过改变茶叶翻抛频率影响受热均匀性,对传质过程贡献有限。在低转速条件下,适当延长时间即可达到较好干燥效果;但转速较高时,茶叶内部水分向外迁移速率受限,继续延长时间对降低含水率的作用减弱。

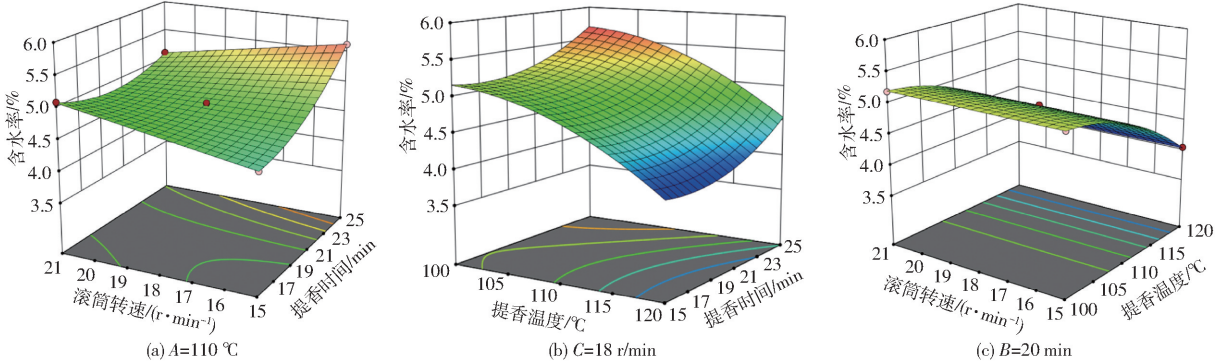


图 12 含水率响应曲面

Fig. 12 Response surfaces for moisture content

提香温度和提香时间的交互作用对碎茶率的影响响应曲面如图 13a 所示。由图 13a 可知,在低温区,碎茶率随提香时间延长略有上升但变化平缓,但在高温区碎茶率随时间的延长急剧上升。其原因在于:高温加剧茶叶叶片热应力与脆性,增加翻抛过程中断碎的产生,而转速的影响相对较小。由图 13b 可知,当提香时间固定为 20 min 时,碎茶率

随提香温度升高和滚筒转速增加均呈上升趋势,但温度轴方向的曲面坡度明显大于转速轴,表明温度对碎茶率的影响更为突出。提香时间与滚筒转速的交互作用对碎茶率的影响如图 13c 所示。由图 13c 可见,时间轴方向的曲面坡度略大于转速轴,表明时间对碎茶率的影响略高于转速。茶叶在提香过程中不断与筒壁及茶叶间发生摩擦、碰撞和挤压,导致断

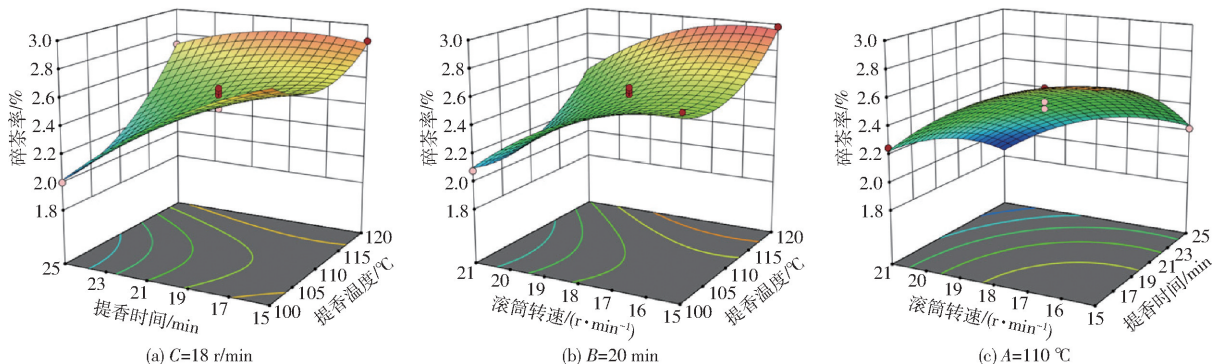


图 13 碎茶率响应曲面

Fig. 13 Response surfaces for broken tea rate

碎。加工时间越长,机械损伤概率越大;高温远红外辐射使叶片快速失水、脆性增加,此时高转速带来的频繁碰撞与长时间加工叠加,使叶片在脆化状态下反复承受机械冲击,碎茶率急剧上升。

针对茶叶含水率与碎茶率的回归模型,为求各个工作参数最佳组合,对所建立的含水率 Y_1 、碎茶率 Y_2 全因子二次回归方程进行优化求解,确定约束范围为

$$\begin{cases} 4\% \leq Y_1 \leq 6\% \\ 1\% \leq Y_2 \leq 3\% \\ 100^\circ\text{C} \leq A \leq 120^\circ\text{C} \\ 15\text{ min} \leq B \leq 25\text{ min} \\ 15\text{ r/min} \leq C \leq 21\text{ r/min} \end{cases} \quad (14)$$

运用 Design-Expert 13 对目标参数的数学模型进行优化求解,圆整后得到各工作参数最佳参数为:提香温度为 110℃、滚筒转速为 18 r/min、提香时间为 20 min,此时含水率为 4.86%,碎茶率为 1.99%。

在初步确定增香阶段较优工艺参数范围基础上,需对预热阶段和稳香阶段两道次要工序参数进行验证与微调,以确保整机多段工序工艺协调性与稳定性。固定增香阶段参数为温度 110℃、时间 20 min、转速 18 r/min,预热阶段温度选取 80℃作为基准值,时间设定为 5 min,转速与增香阶段保持一致,稳香阶段温度选取 100℃,时间设定为 10 min,转速保持不变。在此参数组合下进行 3 批次重复试验,以成品茶含水率和碎茶率为评价指标,验证整段工艺可行性,试验结果显示,3 批次成品茶含水率平均值为 5.42%,碎茶率平均值为 1.85%,表明预热阶段和稳香阶段参数设置合理,与增香阶段参数匹配良好。

4.4 整机提香工艺验证试验

为验证优化后三段式提香工艺参数实际应用效果,在上述研究基础上进行 3 次整机提香验证试验,试验结果如表 6 所示,优化后参数组合条件下平均感官评审分数为 95.12,茶叶含水率小于 6%,碎茶率小于 3%,各项指标均满足 GB/T 19460—2008《地理标志产品 黄山毛峰茶》要求,表明该模型可保证远红外茶叶提香机提香质量满足加工要求。

表 6 远红外茶叶提香机提香试验结果

Tab. 6 Aroma-enhancing test results of far-infrared tea aroma enhancer

序号	含水率/%	碎茶率/%	感官评审分数
1	5.50	1.80	93.50
2	5.34	1.83	96.00
3	5.62	1.82	95.85
平均值	5.48	1.81	95.12

图 14 为黄山毛峰茶经远红外茶叶提香机处理前后样品对比。提香前,鲜叶原料色泽鲜艳翠绿,叶片自然舒展,形态较为宽大。经优化后三段式提香工艺处理后,茶叶色泽转为褐绿,绿色减弱、亮度降低、整体色泽加深,这是由于远红外热穿透性强,色素降解更为明显,同时在高温条件下发生美拉德反应与焦糖化反应所致。茶叶形态明显改善,叶片卷紧,条索紧结匀整,外形更加紧实饱满,质感显著提升。此外,茶叶香气清高持久,兼具兰花香与板栗香特征,感官品质显著改善。整体而言,经远红外提香处理后,黄山毛峰茶外形与内质均得到有效提升,品质风格更加突出。



图 14 茶叶提香试验

Fig. 14 Tea aroma-enhancing test

对提香前后茶叶进行称量,得到提香 1 次电耗量,电耗率计算式为

$$\eta = \frac{T}{M_2 - M_3} \quad (15)$$

式中 η ——电耗率, kW·h/kg
 T ——远红外茶叶提香机运转耗电量, kW·h

依据安徽省农业机械鉴定站对省内主流热风式滚筒提香机的测试数据,以 6CCT-25 型热风式滚筒茶叶提香机(电耗率为 0.9 kW·h/kg)为对照,设备通过阶梯式变温加热与变频装置等设计,实测生产率 50 kg/h,电耗率为 0.68 kW·h/kg,较传统设备节能 24.4%。

5 结论

(1)设计了一种远红外茶叶提香机,采用远红外辐射加热与滚筒内导叶板翻抛相结合的方式,实现茶叶内外同步均匀受热;设计了可倾斜机架与电动推杆联动出料机构,出料顺畅无残留;采用两端开放滚筒式结构设计,远红外加入管提供热源,解决了传统“密闭”方式,提香效果差、影响色泽的问题,满足茶叶提香工艺要求。

(2)构建了以 PLC 为控制核心、配合 PID 算法的自动控制系统,通过触摸屏完成多段式提香温度、时间及滚筒转速的参数设置与状态监测,实现了加

热功率动态调节与提香作业的程序化精准调控,解决了控温精度低、茶叶受热不均、含水率偏高及香气品质不稳定的问题。

(3)采用三因素三水平正交试验对增香阶段提香温度、提香时间和滚筒转速进行优化,得到最优参数组合为:提香温度 110℃、提香时间 20 min、滚

筒转速 18 r/min;在此参数下结合三段式提香工艺进行验证试验,成品茶含水率 5.48%、碎茶率 1.81%,感官评审平均得分 95.12;样机生产率为 50 kg/h,电耗率为 0.68 kW·h/kg,较传统热风式滚筒提香机节能 24.4%,各项指标满足茶叶提香作业要求。

参 考 文 献

- [1] 梅宇. 2024 年中国茶叶生产与内销形势分析[J]. 中国茶叶, 2025, 47(6): 24–30.
Mei Yu. Analysis of China's tea production and domestic sales situation in 2024[J]. China Tea, 2025, 47(6): 24–30. (in Chinese)
- [2] 李璐,温明椿,张海伟,等. 茶叶香气成分研究进展[J]. 中国茶叶加工, 2025(2): 5–21.
Li Lu, Wen Mingchun, Zhang Haiwei, et al. Research progress on aroma components of tea[J]. China Tea Processing, 2025(2): 5–21. (in Chinese)
- [3] Qu Fengfeng, Li Xiaohan, Wang Peiqiang, et al. Effect of thermal process on the key aroma components of green tea with chestnut-like aroma[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 103(2): 657–665.
- [4] 马莹,刘谢缘,王碧生,等. 焙火工艺对白芽奇兰茶叶挥发性香气成分的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(19): 123–129.
Ma Ying, Liu Xieyuan, Wang Bisheng, et al. Effect of baking process on volatile aroma components of Baiyaqilan tea[J]. Food Science, 2024, 45(19): 123–129. (in Chinese)
- [5] 罗桂华. 茶叶生产机械装备现状与需求趋势浅析[J]. 中国农机装备, 2024(5): 44–46.
Luo Guihua. Analysis of status and demand for machinery and equipment by tea production[J]. China Agricultural Machinery Equipment, 2024(5): 44–46. (in Chinese)
- [6] 安徽省萃华科技股份有限公司. 一种茶叶烘焙提香机: 202323354007.7[P]. 2024-07-09.
- [7] 吴坚,叶梦焱,张同锋. 茶鲜叶智能分级装置设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(3): 139–145.
Wu Jian, Ye Mengyan, Zhang Tongfeng. Design and experiment of intelligent tea leaves grading device[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(3): 139–145. (in Chinese)
- [8] Gunaratnam A. Fresh tea leaf grading: a comprehensive overview of methods and technologies toward an intelligent approach[J]. Journal of Food Process Engineering, 2026, 49(3): e70426.
- [9] 余磊,毕海军,吴启龙,等. 茶叶杀青理条机理条部件的试验研究[J]. 农机化研究, 2025, 47(8): 225–231, 237.
Yu Lei, Bi Haijun, Wu Qilong, et al. Experiment on the components of the tea finishing machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(8): 225–231, 237. (in Chinese)
- [10] 王文明,宋志禹,陈巧敏,等. 我国茶叶杀青机研究进展分析[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(2): 86–91.
Wang Wenming, Song Zhiyu, Chen Qiaomin, et al. Research progress of tea smashing machine in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(2): 86–91. (in Chinese)
- [11] 秦宽,步坤亭,沈周高,等. 连续复式茶叶理条机优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(3): 382–393.
Qin Kuan, Bu Kunting, Shen Zhougao, et al. Optimization design and experiment of continuous compound tea leaf barber[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 382–393. (in Chinese)
- [12] 徐勇,闫建伟,喻丽华,等. 茶叶理条机加热结构优化及温度场仿真分析[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(6): 206–212.
Xu Yong, Yan Jianwei, Yu Lihua, et al. Optimization of heating structure and simulation analysis of temperature field in tea carding machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(6): 206–212. (in Chinese)
- [13] 李兵,李尚庆,夏涛. 基于模糊 PID 控制的六安瓜片远红外烘焙机设计[J]. 农机化研究, 2011, 33(8): 149–152.
Li Bing, Li Shangqing, Xia Tao. The design of Liu'an Guapian tea far infrared baking machine based on fuzzy PID controller[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(8): 149–152. (in Chinese)
- [14] 李兵,李飞龙,夏程龙,等. 基于 EDEM 的六安瓜片滚筒式烘焙机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2025, 41(12): 310–321.
Li Bing, Li Feilong, Xia Chenglong, et al. Design and experiment of roller roasting machine for Lu'an Guapian based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(12): 310–321. (in Chinese)
- [15] 陈凤哲. 乌龙茶精制工艺的烘焙温度对成品茶品质的影响[J]. 蚕桑茶叶通讯, 2022(6): 26–29.
Chen Fengzhe. Effect of baking temperature in Wulong Tea refining process on finished product quality[J]. Newsletter of Sericulture and Tea, 2022(6): 26–29. (in Chinese)
- [16] 刘素强,杨娟,袁林颖,等. 烘焙提香条件对红茶感官品质及主要生化成分的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(4): 1301–1306.
Liu Suqiang, Yang Juan, Yuan Linying, et al. Effect of baking and aroma-improving conditions on the black tea sensory quality and major biochemical components[J]. Journal of Food Safety and Quality Inspection, 2015, 6(4): 1301–1306. (in Chinese)

[17] 叶飞,滕靖,龚自明,等. 提香时间对远安黄茶理化品质的影响[J]. 现代食品科技, 2017, 33(11): 96 – 101.
Ye Fei, Teng Jing, Gong Ziming, et al. Effects of raising fragrant time on the physico-chemical quality of Yuan'an yellow tea [J]. Modern Food Science and Technology, 2017, 33(11): 96 – 101. (in Chinese)

[18] 李为宁,柏宣丙,李兵. 滚筒式茶叶提香机结构参数优化[J]. 浙江农业学报,2020,32(2):348 – 358.
Li Weining, Bai Xuanbing, Li Bing. Optimization of structural parameters of drum type tea re-dryer[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2020, 32(2): 348 – 358. (in Chinese)

[19] 仇方方,曾维超,曲凤凤,等. 提香方式对工夫红茶品质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(11): 82 – 87.
Qiu Fangfang, Zeng Weichao, Qu Fengfeng, et al. Effect of aroma enhancement methods on the quality of Congou black tea [J]. Food Science, 2019, 40(11): 82 – 87. (in Chinese)

[20] 权启爱,叶阳. 远红外烘干机的结构及其在名优绿茶加工中的应用[J]. 中国茶叶,2007(2):20 – 21.
Quan Qiai, Ye Yang. Structure of far-infrared dryer and its application in processing of premium green tea[J]. China Tea, 2007(2): 20 – 21. (in Chinese)

[21] 刘飞,王云,张娟,等. 远红外变温提香技术对工夫红茶风味品质的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(13): 94 – 102.
Liu Fei, Wang Yun, Zhang Juan, et al. Effect of far-infrared variable-temperature aroma enhancement technology on the flavor quality of Congou black tea[J]. Food Science, 2021, 42(13): 94 – 102. (in Chinese)

[22] 刘立山,吕宝君,匡军,等. 滚筒式种子干燥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2004, 35(4): 77 – 80.
Liu Lishan, Lü Baojun, Kuang Jun, et al. Development of a crop seeds dryer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004,35(4): 77 – 80. (in Chinese)

[23] 赵章凤,任超,郑劲松,等. 球形茶炒制设备的做功效率与茶叶成形关系研究[J]. 茶叶科学, 2018, 38(5): 527 – 536.
Zhao Zhangfeng, Ren Chao, Zheng Jinsong, et al. Study on the relationship between work efficiency of spherical tea frying equipment and tea formation[J]. Journal of Tea Science, 2018, 38(5): 527 – 536. (in Chinese)

[24] 石鑫,牛长河,王学农,等. 滚筒筛式废旧地膜与杂质风选装置设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33(18): 19 – 26.
Shi Xin, Niu Changhe, Wang Xuenong, et al. Design of roller screen type air separation device for waste plastic film and impurities[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(18): 19 – 26. (in Chinese)

[25] 李兵. 基于 EDEM 的茶叶滚筒杀青机参数优化及试验研究[J]. 中国茶叶加工, 2021(3): 24 – 33.
Li Bing. Parameter optimization and experimental research of tea cylinder fixation machine based on EDEM[J]. China Tea Processing, 2021(3): 24 – 33. (in Chinese)

[26] 张开兴,王文中,赵秀艳,等. 滚筒式茶叶热风复干机设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(5):377 – 386.
Zhang Kaixing, Wang Wenzhong, Zhao Xiuyan, et al. Design and experiment of drum-type hot air re-dryer for tea[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 377 – 386. (in Chinese)

[27] 李如强,李新昂,朱杰,等. 太阳能推杆在跟踪装置仰俯机构中的应用[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(11): 124 – 128.
Li Ruqiang, Li Xinang, Zhu Jie, et al. Application of solar push rod in pitch mechanism of tracking device[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(11): 124 – 128. (in Chinese)

[28] 高朋飞,张新伟,姜春霞,等. 轴向滚筒式鲜食玉米脱粒装置优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(增刊 2): 145 – 156.
Gao Pengfei, Zhang Xinwei, Jiang Chunxia, et al. Optimized design and text of axial roller fresh corn threshing device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(S2): 145 – 156. (in Chinese)

[29] 唐汉,王紫恒,徐福东,等. 玉米高速精量排种器轮式导种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(7): 316 – 327.
Tang Han, Wang Ziheng, Xu Fudong, et al. Design and text of wheel-type seed guide device for high-speed maize precision seed metering apparatus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7): 316 – 327. (in Chinese)

[30] 秦宽,郎旭涛,沈周高,等. 茶园仿生往复式开沟松土机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(3):29 – 39.
Qin Kuan, Lang Xutao, Shen Zhougao, et al. Design and experiment of reciprocating furrowing and loosening machine for tea garden[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3): 29 – 39. (in Chinese)

[31] GB/T 8311—2013 茶粉末和碎茶含量测定[S].