基于动态称重监测的茶叶杀青含水率控制方法与系统研究

□蔡宝杰 [1,2,3]

1. 福建省计量科学研究院　2. 国家市场监督管理总局重点实验室（力值计量测试）

3. 福建省力值计量测试重点实验室

【摘　要】针对传统茶叶杀青依赖人工经验、工艺参数固定、含水率无法实时监测等问题，本文提出一种基于动态称重监测的茶叶杀青含水率控制方法与系统。该方法通过在滚筒杀青机底部设置基于非自动衡器的动态称重系统对茶叶的实时重量进行数据采集，采用周期同步滑动平均滤波算法消除滚筒旋转偏心、振动带来的周期性干扰，保障动态称重数据的有效性，进而推算茶叶实时含水率及水分蒸发速率。同时引入模糊PID算法动态调节杀青机的加热温度与滚筒转速，实现杀青过程的动态调控。实验结果表明，相较于传统固定参数人工管控工艺，采用本系统杀青后茶叶重量波动更加稳定，平均重量偏离值由0.63kg降至0.29kg，含水率的一致性得到显著提升，平均杀青时长缩短35s，在稳定茶叶杀青品质的同时提升加工效率，可为茶叶杀青智能化、连续化装备升级提供可行技术方案。

【关键词】茶叶杀青工艺；非自动衡器动态称重；周期滑动滤波；模糊PID；含水率控制

文献标识码：A　　**文章编号：**1003-1870（2026）07-0010-06

Study on Moisture Content Control Method and System for Tea Fixation Based on Dynamic Weighing Monitoring

【Abstract】Addressing the issues where traditional tea fixation relies on manual experience, utilizes fixed process parameters, and lacks real-time moisture content monitoring, a moisture content control method and system for tea fixation are proposed in this paper based on dynamic weighing monitoring. The method is used to acquire real-time weight data of tea by installing a dynamic weighing system based on a non-automatic weighing instrument at the bottom of the drum tea fixation machine. It employs a period-synchronized sliding average filtering algorithm to eliminate periodic interference caused by drum rotation eccentricity and vibration, thereby ensuring the validity of dynamic weighing data, and subsequently calculates the real-time moisture content and moisture evaporation rate of the tea; In addition, a fuzzy PID algorithm is introduced to dynamically adjust the heating temperature and drum speed of the fixation machine, achieving dynamic regulation of the fixation process. Experimental results demonstrate that compared with the traditional manual control process using fixed parameters, the weight fluctuation of tea after fixation using this system is more stable, with the average weight deviation reduced from 0.63 kg to 0.29 kg. The consistency of moisture content is significantly improved, and the average fixation time is shortened by 35 s. While stabilizing the quality of tea fixation, it also enhances processing efficiency, providing a feasible technical solution for the intelligentization and continuous processing equipment upgrading of tea fixation.

【Keywords】tea fixation process; dynamic weighing of non-automatic weighing instruments; periodic sliding filtering; fuzzy PID; moisture content control

---

该论文依托2024年福建省市场监督管理局科技计划项目（项目名称：基于过程称重监测方法的茶叶杀青工艺控制系统的研制与应用，项目编号：FJMS2024025）

引言

杀青是茶叶初制关键工序，其含水率是影响茶叶色泽、香气、口感的核心指标，通常要求杀青后含水率维持在55%~60%[1]。传统杀青依赖人工经验或固定参数控制[2,3]，含水率信息仅能在杀青结束后通过取样测定获取，无法在加工过程中实时获取与调整。近年来，部分学者提出基于排气湿度、进出料称重差值等方式间接推算含水率[4,5]，但测量信号存在滞后，难以实现含水率实时监测。

鉴于杀青时鲜茶水分持续蒸发、整体重量单调递减的特征，可通过重量的实时变化推导含水率，实现杀青过程中含水率的实时监测，但滚筒杀青机运行时常伴随旋转振动、偏心载荷等影响，传统的非自动衡器静态称重难以获取稳定有效的重量信号。

为解决上述问题，本文通过基于非自动衡器的动态称重系统获取茶叶的称重信号，采用周期同步滑动平均滤波算法实现动态称重数据有效采集，进而通过监测茶叶的实时重量约束其含水率，同时结合模糊PID（Proportion IntegrationDifferentiation）算法调节，实现茶叶在杀青过程中的含水率的动态调控。

1　动态称重监测系统设计

茶叶在杀青过程中处于振动、偏心载荷等复合恶劣工况[6]，传统非自动衡器静态称重难以获取稳定真实的重量信号。本章节通过硬件架构、称重原理、核心算法和模糊PID 控制四个层面，系统阐述动态称重监测系统的技术实现路径。

1.1　动态称重监测系统硬件架构

滚筒式杀青机主要由滚筒、加热装置、传动机构、机架等组成，可实现茶叶的连续翻炒与高温加热，以达到快速杀青的目的。为实现基于动态称重监测的茶叶杀青含水率控制，设计一种动态称重监测系统，如图1 所示。该系统四点对称布置高精度电阻应变式称重传感器，形成矩形称重框架，框架上部设称重面板承载滚筒杀青机整机。在称重面板四周安装限位机构，称重传感器底部安装橡胶隔振+ 阻尼缓冲复合抗振结构，外部设有高温隔热层、防水密封套及防尘防护罩，抑制振动、高温、粉尘等干扰，共同组成非自动衡器。此外，同步采集与管控动态称重、滚筒壁温、滚筒转速等信号，实现“感知—解算—控制”的全链路闭环。

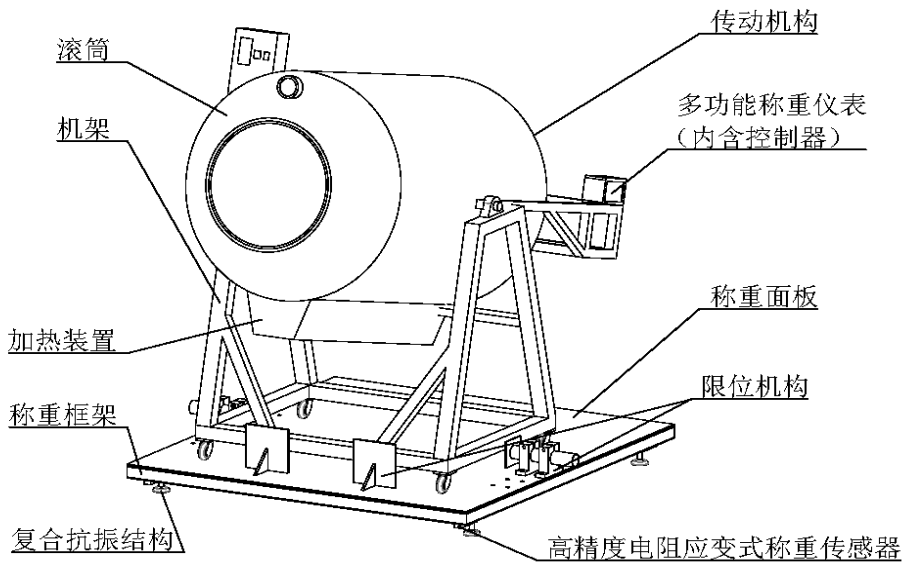


图1　动态称重监测系统硬件架构示意图

该系统采用四层分层架构进行设计如表1 所示，分别为感知层、调理层、控制层和执行层，信号流向为：称重传感器输出毫伏级模拟信号，经信号调理模块完成放大、滤波与模数转换后，通过工业总线传输至多功能仪表；仪表同步采集滚筒温度传感器、转速编码器的工况数据，通过内置算法解算茶叶实时重量与含水率，最终输出控制信号至加热装置与滚筒电机，完成工艺参数的动态调节。

表1　动态称重监测系统硬件架构

层级	核心组件	主要功能
感知层（信号采集端）	高精度电阻应变式称重传感器（对称四角布置，内置温度补偿）；热电偶；编码器	将茶叶整机重量、滚筒壁温、滚筒转速三类物理量转化为对应电信号输出，为后续解算与控制提供原始工况数据。
调理层（信号处理端）	24 位 Σ－Δ 型ADC 采集芯片；二阶RC 低通滤波；前置放大器；EMI 电源滤波模块	放大毫伏级信号、降噪、抗电磁干扰，保证信号传输质量。
控制层（运算决策端）	多功能仪表（含主控芯片、存储单元、通讯接口）；触控屏；数字量I/O 接口模块	同步采集重量、温度、转速多通道数字信号，运行周期同步滑动平均滤波、模糊PID 等核心算法，解算茶叶实时重量、含水率与水分蒸发速率，生成并输出动态调节指令。
执行层（工艺执行端）	加热装置；滚筒电机	接收控制指令，动态调整杀青加热功率与滚筒转速，实现水分蒸发速率的闭环调控。

1.2　动态称重原理与干扰机理

动态称重是指在被测对象处于运动或振动状态下实时获取其质量信息的测量技术，其物理基础为牛顿第二定律。称重传感器所采集的力信号是静载荷与各类动态载荷叠加的复合力学响应，动态称重的核心任务是从复杂的实时动态力信号中精准提取反映真实重量的静态分量[7]。滚筒运行时，称重传感器采集的力信号是由滚筒杀青机自身的静载荷、茶叶杀青过程中水分蒸发变化导致的变载荷、旋转惯性力、偏心载荷等多源耦合的复合力学响应，如图2 所示。

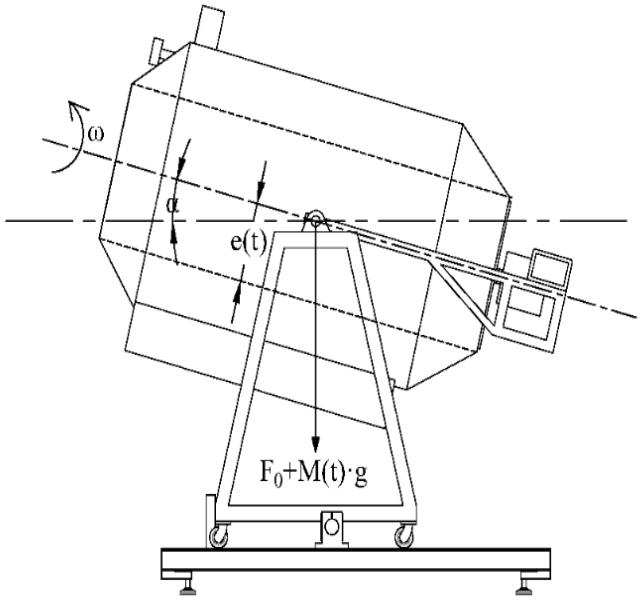


图2 茶叶杀青机动态受力示意图

基于刚体动力学与振动理论，建立茶叶杀青机动态称重的力学模型。称重传感器采集的实时力值信号可表示为：

$$F(t)=F_0+M(t)\cdot g+M(t)\cdot\cos\alpha\cdot e(t)\cdot\omega^2\cdot\sin(\omega t+\phi) \quad (1)$$

式中：$F(t)$——动态称重监测系统获得的实时力值，N；F_0——空载静止时的零点基准值，N；$M(t)$——茶叶的实时重量，随杀青过程中水分蒸发而变化，kg；g——重力加速度，m/s²；α——滚筒轴线与地面的夹角，°；$e(t)$——等效偏心距，茶叶质心偏离滚筒轴线的瞬时距离，m；ω——角频率，由滚筒的电机转速决定，rad/s；ϕ——初相位，rad。

该模型表明，茶叶杀青机在动态称重过程中，主要面临以下干扰：一是旋转惯性力干扰，滚筒旋转时茶叶随筒壁提升至一定高度后抛落，茶叶质心偏离滚筒轴线的距离呈周期性变化，产生与转速平方成正比的离心惯性力，滚筒转速通常为15 r/min ~25 r/min，表现为低频简谐周期性信号，是造成动态称量示值失真的主要误差来源；二是偏心载荷干扰，鲜茶叶在滚筒内分布不均，整机质心随滚筒旋转而周期性偏移，产生交变力矩叠加于称重传感器输出中。

1.3 动态称重算法及计量特性

1.3.1 动态称重算法

针对滚筒旋转引入的简谐周期性干扰项，利用正弦函数在完整周期内积分为零的数学特性，设计匹配滚筒实时转速的周期同步滑动平均滤波算法，实现有效信号与干扰信号精准解耦，消除正弦波干扰[8,9]。

一个旋转周期内的采样点数为：

$$N=\frac{60f}{n} \quad (2)$$

式中：f——采样频率，Hz；n——滚筒转速，r/min。

在任意时刻t_k，以单个完整旋转周期作为滑动窗口，过去的一个周期内的平均载荷$F_{avg}(t_k)$为：

$$F_{avg}(t_k)=\frac{1}{N}\sum_{i=k-N+1}^{k}F(t_i) \quad (3)$$

扣除空载静止时的零点基准值后即可解算茶叶的实时重量$M(t_k)$为：

$$M(t_k)=\frac{F_{avg}(t_k)-F_0}{g} \quad (4)$$

通过实时重量推导实时水分蒸发速率v，该参数作为工艺闭环控制的核心输入量，选取30s 时长滑动窗口进行求解：

$$v=\frac{M(t_k-\Delta t)-M(t_k)}{M(t_k-\Delta t)\cdot\Delta t}\times100\% \quad (5)$$

同时，通过实时重量也可得到茶叶实时含水率R，用于判断是否终止杀青：

$$R=\frac{M(t_0)\cdot\lambda-\left[M(t_0)-M(t_k)\right]}{M(t_k)}\times100\% \quad (6)$$

式中：λ——茶叶初始含水率，%。

该算法可随滚筒转速自动调整滤波窗口长度，经过信号解耦处理后，可消除滚筒动态干扰。此外，上述算法将重量变化直接映射为茶叶实时含水率与水分蒸发速率，可更直观地判断杀青是否结束以及对杀青工艺进行调控。

1.3.2 核心计量特性

该动态称重监测系统满量程设计为800 kg，可覆盖大多数滚筒杀青机整机自重与最大茶叶投料载荷；静态工况下（零点校准），其静态示值误差不超过 ± 0.05% FS；动态工况下，滚筒在15 r/min ~25 r/min 常用转速区间内运转，原始称重信号受周期性载荷影响，峰值波动约为总载荷的0.8%~1.2%；在额定转速20 r/min、单批次投料量30 kg 的典型生产工况下，其动态相对示值误差不超过 ± 0.5%，绝对误差不超过 ± 150 g。

1.4 基于动态称重的模糊PID 联动调节

通过动态称重系统获得的实时重量推算出水分蒸发速率v，结合目标水分蒸发速率v_{target}，将水分蒸发速率偏差$E=v_{target}-v$作为输入变量输入模糊控制器，输出变量为PID 三组控制参数实时修正量ΔK_p、ΔK_i、ΔK_d。以水分蒸发速率为核心指标，驱动模糊PID 实时输出控制量，联动调节加热功率与滚筒转速，当$v<v_{target}$，代表茶叶蒸发速率不足，控制器同步提升加热功率并降低滚筒转速，延长茶叶与滚筒内壁的接触时间，促进水分蒸发。当$v>v_{target}$，判定存在杀青过度风险，控制器同步减小加热功率，提高滚筒转速，增加茶叶翻动频率，强化散热效果。模糊推理采用Mamdani 运算规则，重心法完成

参数解模糊，实时更新PID 参数后输出执行机构调节信号，实现基于动态称重的模糊PID 联动调节。

2　动态称重监测系统应用

2.1　动态称重监测流程

首先，将动态称重监测系统置零，设定茶叶的初始总质量，初始含水率、目标含水率、加热温度、电机转速、目标水分蒸发速率等参数。随后，滚筒杀青机预热升温阶段滚筒空载运转，待温度稳定后向滚筒投放给定重量的鲜叶。杀青阶段系统通过实时采集称重载荷信号，经周期同步滑动平均滤波算法获得茶叶的实时重量，推导水分蒸发速率，并通过模糊PID 联动调节加热温度与电机转速。同时，系统可通过实时重量变化推导杀青过程中茶叶的含水率，当含水率达到工艺预设的目标含水率时切断加热装置，滚筒保持持续转动30s，避免余热堆积。最后，杀青出料完成后，称重系统回归空载零点，自动归档并生成本批次完整动态称量——含水率时序曲线。动态称重监测流程如图3 所示。

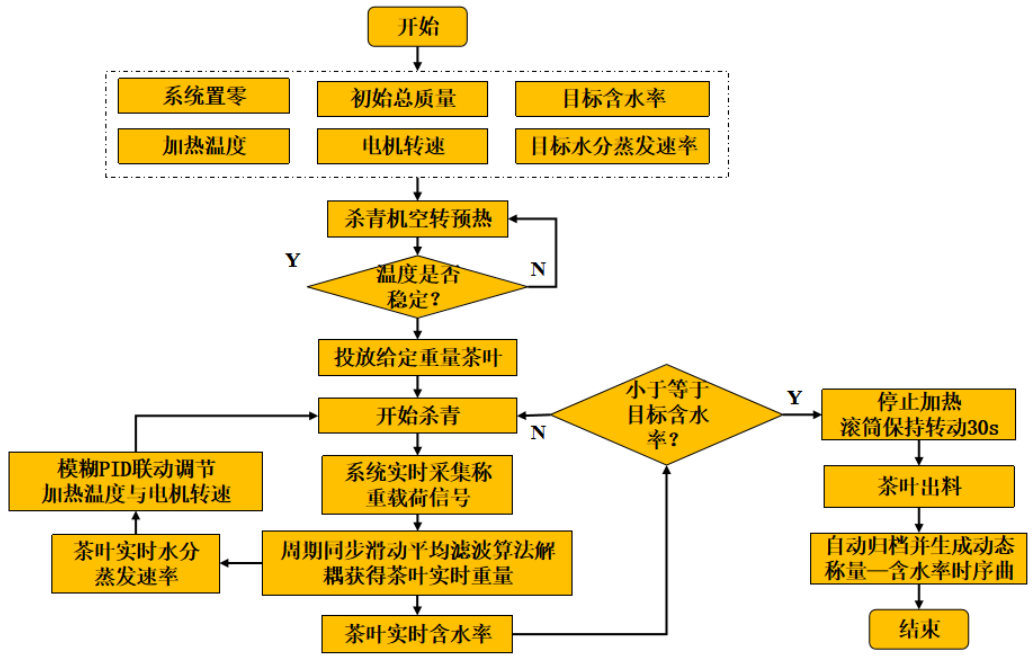


图3　动态称重监测流程图

2.2　试验数据与结果分析

2.2.1　试验准备与试验流程

选择某型号滚筒杀青机作为试验对象，设计传统组跟实验组试验各10 批次。传统组根据经验设置杀青参数，设置杀青温度为230℃，滚筒转速为20 r/min，设备全程无实时反馈与动态调节，根据经验终止杀青。实验组采用该系统，设置目标水分蒸发速率为2.0 %/min，目标含水率为60%，其余与传统组一致。试验统一选用当地高山鲜叶，经水分测定仪抽检鲜叶含水率为74% ± 1%，单批次固定投料量控制在30 kg。本次试验目标含水率统一设定在60%。试验结束后，各实验组每批次随机抽取50g 样品，采用烘干法测定含水率，取平均值作为该批次最终含水率；杀青时间以投料完成至滚筒完全停止的时长为准，水分蒸发速率取单批次平均速率作为统计值。

2.2.2　试验结果

由表2 可知，在本次实验中，由于传统组完全依赖人工经验预判杀青终点，每批次失水程度一致性差，杀青后茶叶实际重量波动范围为17.90kg~20.16kg，跨度为2.26kg，平均重量为19.38kg，偏离理论值0.63kg。而实验组杀青后茶叶实际重量波动范围为18.89kg~19.38kg，跨度仅为0.49kg，平均重量为19.04kg，偏离理论值0.29kg，相较于传统组波动范围更加稳定，且更接近理论重量；另一方面，由于该系统以重量变化作为反馈闭环，从茶叶总量层面约束整体水分蒸发程度，含水率

的一致性显著提升。此外，实验组整体杀青时长更短，平均杀青时长缩短35s，生产效率进一步提升，更契合现代化茶叶连续化加工的生产需求。

表2　不同组别下的实验结果参数

序号	项目	传统组	实验组
1	杀青后茶叶理论重量（kg）	18.75	18.75
2	杀青后茶叶实际重量波动范围（kg）	17.90~20.16	18.89~19.38
3	杀青后茶叶平均重量（kg）	19.38	19.04
4	含水率波动范围（%）	58.1~62.8	60.3~61.3
5	含水率平均值（%）	61.3	60.6
6	平均杀青时间（s）	524	489
7	杀青时间波动范围（s）	495 ~ 563	481 ~ 498

3 结语

本文针对茶叶杀青过程中含水率难以实时监测的问题，搭建一套基于非自动衡器的动态称重系统，采用周期同步滑动平均滤波消除滚筒旋转振动、偏心载荷干扰，以获得有效的动态称重数据，通过监测茶叶的重量变化约束茶叶含水率以及水分蒸发速率，同时结合模糊PID 算法实现杀青工艺的动态调控。试验表明，该系统可使杀青后的重量更接近理论值，且大幅降低重量波动，保证含水率的一致性，同时缩短加工时长，适配茶叶规模化连续生产，可为茶叶初制智能装备升级、标准化高效制茶提供可靠技术支撑，具备良好工程应用价值。

参考文献

[1] 黄芳, 钱佳佳, 傅秀敏. 茶叶氨基酸合成代谢及转化研究进展[J]. 中国茶叶,2023,45(9):10−18.

[2] 杨成松. 茶叶加工机械化技术应用研究与分析[J]. 现代农机,2021,(3):12−13.

[3] 高一聪, 许晨, 林琼等. 茶叶生产装备自动化与智能化技术研究进展与展望[J]. 农业机械学报,2024,55(7):1−14

[4] 吴鑫, 宋飞虎, 裴永胜等. 基于机器视觉的茶叶微波杀青中品质变化与预测研究[J]. 茶叶科学,2021,41(6):854−864.

[5] 段东瑶, 赵丽清, 殷元元等. 绿茶加工过程含水率变化规律及预测模型研究[J]. 中国农机化学报,2022,43(3):75−83.

[6] 郝朝会. 滚筒式红外茶叶杀青机的设计研究[D]. 山东理工大学,2012.

[7] 张瑞良. 分段线性系统的数学建模与动力学分析[D]. 石家庄铁道大学,2024.

[8] 李银平. 基于STM32 的动态称重分选系统的研发与实现[D]. 重庆大学,2016.

作者简介

蔡宝杰（1997—），男，汉族，福建莆田，硕士研究生。现供职于福建省计量科学研究院，主要从事动态汽车衡、称重传感及专用设备的计量技术研究工作。