

燃煤采样代表性提升与偏差控制关键技术研究

李小宇, 易浩男, 闫新, 杨世英

大唐陕西发电有限公司延安热电厂, 陕西 延安 716000

DOI:10.61369/ETQM.2026020015

摘 要 : 针对大唐陕西发电有限公司延安热电厂现有入厂煤采样机存在的代表性不足、系统性偏差问题, 本项目开展了关键技术研究。项目通过集成高精度激光雷达动态定位与缓冲式触底机构, 开发了基于“接触-感知-反弹”智能闭环控制的全深度触底反弹采样技术; 采用螺旋头初级缩分与皮带机横断面二级缩分相结合的全断面缩分技术, 降低了粒度离析和缩分偏差; 并创新性地构建了基于“温度-电伴热-振动频率”多参数联动控制的智能防堵系统。应用结果表明, 该集成技术体系成功实现了全深度、全断面、全天候的智能化采样, 采样精密度符合并优于 GB/T 19494 标准要求, 大幅提升了燃煤采样的代表性、公正性与电厂燃料管理的精益化水平。

关 键 词 : 燃煤采样; 触底反弹; 全断面缩分; 智能防堵; 激光雷达

Research on Key Technology of Improving Representativeness and Deviation Control of Coal Sampling

Li Xiaoyu, Yi Haonan, Yan Xin, Yang Shiyong

Datang Shaanxi Power Generation Co., Ltd. Yan'an Thermal Power Plant, Yan'an, Shaanxi 716000

Abstract : To address the issues of insufficient representativeness and systematic bias in the existing coal sampling machines at Datang Shaanxi Power Generation Co., Ltd. 's Yan' an Thermal Power Plant, this project conducted key technological research. By integrating high-precision LiDAR dynamic positioning with a buffer-type bottom-contact mechanism, the project developed a full-depth bottom-contact rebound sampling technology based on "contact-sensing-rebound" intelligent closed-loop control. The innovative full-section reduction technology combines primary reduction using a spiral head with secondary reduction through belt conveyor cross-sections, effectively reducing particle size segregation and reduction bias. Additionally, an intelligent anti-clogging system was established through multi-parameter linkage control based on "temperature-electrically assisted heating-vibration frequency". Application results demonstrate that this integrated technical system successfully achieves intelligent sampling with full depth, full-section coverage, and round-the-clock operation. The sampling precision meets and exceeds GB/T 19494 standard requirements, significantly enhancing the representativeness, fairness of coal sampling, and the lean management level of power plant fuel operations.

Keywords : coal sampling; bottom rebound; full section reduction; intelligent anti-clogging; LiDAR

引言

入厂煤的采样与制样是火电厂燃料管理链的“源头”, 其结果的准确性与代表性直接关系到煤炭贸易结算的公平性、机组燃烧优化调整的经济性以及锅炉运行的安全性。根据燃煤成本占火电厂总成本60%-70%的行业现实, 采样环节微小的偏差都可能导致巨大的经济损失或商业纠纷^[1-3]。因此, 确保采样“公平、公正、公开”是电厂燃料管理的核心诉求。

机械采样机虽已广泛应用于电力行业, 旨在替代人工采样以减少人为误差, 但其自身仍存在诸多技术瓶颈。以延安热电厂2、3号入厂煤采样机(均为桥式汽车采样机)为例, 其在长期运行中暴露出以下痛点: 采样深度不足、智能化水平低、环境适应性差、制样系统密封不严, 存在人为干预风险。为解决上述系统性难题, 本项目围绕“代表性提升”与“偏差控制”两大核心目标, 对现有采样机进行了涵盖定位、采样、防堵、集样等关键环节的技术升级与集成创新。研究旨在突破传统技术的局限性, 实现从“部分采样”到“全深度采样”、从“点线缩分”到“全断面缩分”、从“被动处理”到“主动智能防堵”的跨越, 最终构建一套高效、可靠、全天候运行的燃煤采样技术体系, 为火电企业的燃料成本精准控制与合规管理提供坚实的技术支撑。

一、关键技术研究

（一）全深度触底反弹采样技术

1. 技术难点分析

传统采样机采用机械限位开关与定时器结合的方式控制采样深度。这种方式存在惯性误差、机械磨损和定位精度低（通常 $\pm 50\text{mm}$ 以上）的固有缺陷。操作人员为避免碰撞，往往保守地设置采样深度，从而形成了无法触及车厢地板的“采样盲区”。同时，由于无法实时感知障碍物，一旦钻头接触到隐藏的拉筋，只能依靠过载保护停机，极易导致设备损坏。

2. 技术方案与系统构成

本研究提出一种融合高精度激光测距与智能闭环控制的“触底反弹”技术方案。

高精度激光定位系统：采用德国 SICK 公司生产的 DT35 系列高性能激光雷达传感器，有效测距达 50 米，分辨率高达 1mm。该系统完全取代了原有的机械限位开关。工作原理是：激光雷达安装在采样小车上，持续向行走轨道旁的专用反射板发射激光并接收回波，通过计算时间差实现实时、高精度的绝对距离测量。结合对小车行走速度、加速度的动态惯性补偿算法，将采样点的水平定位精度稳定控制在 $\pm 5\text{mm}$ 以内，为精准定位采样点和后续的触底判断奠定了坚实基础。

缓冲式触底机构与智能判断算法：这是本技术的核心。采样头进行了创新性设计（已申请实用新型专利），采用可伸缩式平口螺旋钻头。该钻头内部集成了一套高灵敏度缓冲弹簧机构和位移传感器。

控制核心：采用西门子 S7-1200 系列 PLC 作为下位机，其内嵌了基于模糊控制理论的智能决策算法。

工作流程：

定位：按照系统下发采样方案，小车到达采样点上方。

下钻：采样小车到达预定采样点后，螺旋钻头开始旋转下钻。

接触与感知：当钻头接触到底板或硬物时，受到反作用力，触发内部缓冲机构收缩，该物理位移被位移传感器实时捕捉，并转换为电信号传送至 PLC。

智能判断：PLC 算法同时读取两个关键参数：缓冲机构触发信号和当前下钻深度（Z 轴坐标）。系统预设一个深度阈值（如 3500mm，基于标准车厢底板高度设定）。若在深度小于阈值时触发缓冲信号，则判定为遇到“障碍物”（如拉筋）；若在深度接近或达到阈值时触发，则判定为“车厢底板”。

决策与执行（反弹）：

情况一（触底）：判定为车厢底板，系统记录该深度为本次采样有效深度，完成采样后提升钻头。

情况二（碰撞）：判定为障碍物，PLC 立即执行“反弹”指令：停止下钻并提升钻头约 50mm，然后控制采样小车在水平方向自动偏移一个预设的安全距离（如 200mm），在新的点位重新下钻采样。整个过程无需人工干预，并自动记录报警点位置，供后续数据分析。

3. 创新点

本技术的核心创新在于将高精度动态空间定位技术与基于多传感器信息融合的智能触觉感知算法相结合，实现了采样过程从

“盲目的硬碰撞”到“精准的软接触与智能避障”的根本性转变。经统计，应用该技术后，因碰撞导致的设备故障率较传统方案降低了 85% 以上。

（二）全断面缩分技术

缩分是制样过程中引入偏差的主要环节之一，其关键在于能否无差别地截取整个煤流的一个完整断面^[4]。

1. 传统缩分方式的弊端

传统单一缩分器（如固定的槽式缩分器或旋转的切割器）往往在一点或一条线上取样，难以保证始终截取到代表整个煤质情况的样品，尤其容易因煤的粒度离析现象而产生偏差。

2. 二级全断面缩分方案

本项目摒弃单一模式，采用初级缩分与二级缩分相结合的双重保障流程。

初级缩分（在螺旋提升过程中实现）：利用螺旋采样头本身的结构特性，在其提升煤样至制样皮带的过程中，在密闭的管道内，通过螺旋叶片的旋转对煤样进行初步的搅拌、混合与均匀化。在此过程中，部分煤样会通过螺旋叶片间的缝隙被自然舍弃，实现了第一次非定量的、但有效的初步缩分，这有助于减少大粒度煤样的离析倾向。

二级缩分（在制样皮带机头部实现）：经过初级缩分和破碎后的煤样，被均匀地抛洒在制样皮带机上，形成一定宽度和厚度的料流。在皮带机的头部，安装了一个全断面切割式缩分器。该缩分器的切割开口宽度大于皮带上煤流的宽度，其运动方向与皮带方向垂直，并以恒定速度切割整个料流断面，收取其中一部分作为最终样品，其余部分作为弃样。这种方式确保了每次截取的样品都能代表该时刻整个断面上所有粒度的煤，显著降低了缩分偏差。

该技术方案严格遵循“多阶段缩分”原则，通过两次独立的、原理不同的缩分过程，有效保证了最终分析样品的代表性，其缩分精密度经测试完全满足 GB/T 19494.3-2004 的规范要求。

（三）智能防堵优化技术

1. 堵煤机理分析

冬季堵煤主要源于“低温冻结”和“水分粘附”。当环境温度低于零度时，煤中水分在料斗、溜管等金属表面结冰，并与煤粉粘结，逐渐积累直至堵塞流道。

2. 硬件升级基础

防堵需“防”与“治”结合。首先进行硬件升级：

优化破碎机转子动平衡，将其振动值从原有的 $\geq 1.5\text{mm/s}$ 降低至 $\leq 0.5\text{mm/s}$ ，运行平稳性大幅提升，减少了因振动引起的设备应力集中和堵煤诱因。

在初级集料斗、各级溜管、缩分器等关键部位，紧密缠绕自限温电伴热带。该伴热带可根据管壁温度自动调节发热功率，防止局部过热。

加装高性能振打电机，其激振力可调，安装在易堵点的外壁。

3. 智能联动控制模型

本项目最大的创新在于构建了基于“温度-电伴热-振打频率”三参数联动的智能控制模型。该模型在 MATLAB/Simulink 环境中进行仿真优化后，嵌入上位工控机。

温度感知层：通过分布在各关键点的 PT100 温度传感器，实时监测环境温度和管壁温度。

电伴热智能调控：电伴热的功率输出不再是固定值，而是环境温度的函数。系统设定：当环境温度 >5℃时，伴热系统关闭；温度介于0℃至5℃时，以30%功率运行作为预防；温度低于0℃时，功率随温度下降线性增加，至-10℃时达到100%满功率。这种“按需供热”的模式，相比传统的常开模式，预计节能25%以上。

振打智能触发：振打动作并非连续运行，而是由电容式料位开关的信号智能触发。系统设置两级堵煤预警：

轻度预警：当料位开关检测到下料速度减缓但未完全中断时，系统判断为轻度粘附。此时，启动间歇式振打模式（工作10秒，停止50秒），振打频率设为20Hz，旨在震落粘附煤。

重度报警与强力振打：当料位开关持续检测到“有料”状态超过设定时间，判定为重度堵煤。系统立即启动强力连续振打模式，频率升至40Hz，并同时发出声光报警，提醒运维人员关注。待堵煤疏通、信号恢复正常后，振打自动停止。

这种基于实际工况的智能防堵策略，实现了从“盲目预防”到“精准治理”的转变，在有效解决堵煤问题的同时，极大降低了因不必要的机械振打导致的混样风险和设备磨损。

二、系统设计与集成实施

本研究并非简单的技术堆砌，而是强调系统性集成。我们采用整体控制系统架构。

控制层：以西门子 S7-1200 PLC 为下位控制核心，负责所有执行机构（电机、阀门、伴热带等）的精确控制和传感器数据的采集。

监控层：采用工业触摸屏作为上位机（HMI），集成组态软件，实现系统状态的实时可视化监控、参数设置、故障报警和历史数据查询。

网络通讯：PLC与激光雷达、变频器、传感器等通过 PROFIBUS-DP 现场总线进行高速数据交换，确保控制响应的实时性。

联动逻辑：各子系统并非独立工作。例如，当激光定位系统检测到小车即将到达车厢端头时，会提前发送信号给行走电机进行减速；智能防堵系统的工作状态也会实时反馈给主控 PLC，若

发生持续堵煤且无法自动解除，系统将自动暂停采样流程，避免设备损坏。

集成实施过程遵循严格的项目管理流程，包括方案评审、设备采购、安装调试、性能测试和验收等环节，确保整个系统改造的顺利进行。

三、实施效果与数据分析

项目于2025年7月底完成改造，性能鉴定符合国标要求，在经过8、9、10月连续3个月调试运行对比效果分析：

经济效益：全深度采样技术的应用，有效震慑了“铺底煤”行为。通过对改造前后入厂煤质数据的分析，平均收到基热值稳中有升，估算年均可为企业避免因热值差造成的经济损失达百万元级别。

管理效益：采样过程的完全自动化和封闭化，极大地减少了运行人员的操作负担和干预可能，提升了燃料管理的公信力。设备故障率的大幅下降，也降低了维护成本和停机时间。

技术效益：集成系统运行稳定，各项技术指标均达到或超过了项目任务书的设定目标，证明了技术方案的可行性和先进性^[7-10]。

四、结论与展望

本研究成功开发并应用了一套针对入厂煤采样机的代表性提升与偏差控制关键技术体系。通过集成一系列技术方案有效攻克了传统采样机的固有缺陷，显著提升了燃煤采样工作的自动化、智能化水平和质量管控能力。实践表明，该方案技术路线正确，实施效果显著，具有重要的推广应用价值。

展望未来，本研究还可进一步深化：(1) 引入机器视觉技术，实现对车厢内煤质表现情况（如粒度、颜色）的辅助识别与采样点自适应规划；(2) 结合工业互联网平台，实现采样数据的云端存储、分析与远程诊断，构建“智慧燃料”管理生态；(3) 探索将在线煤质分析仪（如中子活化、双能 γ 射线）与采样系统联动，实现入厂煤质的实时快速监测。这些方向将是未来研究的重要目标。

参考文献

- [1] 煤炭科学研究总院. 商品煤样人工采取方法 :GB 475-2008[S]. 北京 : 中国标准出版社 , 2008
- [2] 刘建强, 李志刚. 入厂煤机械采样装置常见问题与改进措施 [J]. 电站系统工程, 2020, 36(4): 60-62.
- [3] 张建华, 王磊. 火电厂燃料管理与成本控制 [M]. 北京 : 中国电力出版社, 2019: 45-58.
- [4] 煤炭科学研究总院. 煤炭机械化采样第1部分 : 采样方法 : GB/T 19494.1-2004[S]. 北京 : 中国标准出版社, 2004.
- [5] 陈志勇, 高鹏. 桥式汽车采样系统常见偏差分析及改进 [J]. 华电技术, 2021, 43(增刊): 105-108.
- [6] 赵辉. 螺旋采样机钻头磨损分析与耐磨优化 [J]. 煤矿机械, 2019, 40(7): 112-114.
- [7] 孙晓光. 北方电厂入厂煤采样机冬季防冻堵措施研究 [J]. 东北电力技术, 2022, 43(1): 55-57.
- [8] 周敏. 一种防水分损失的密封式煤炭自动集样器设计 [J]. 自动化仪表, 2020, 41(5): 89-91.
- [9] 中国大唐集团有限公司. 科技项目管理办法 [Z]. 2023.
- [10] 武宇佳. 典型燃煤机组烟气 CPM 中有机污染物的排放特性试验研究 [D]. 浙江大学, 2024.