

皮带机物料水分率在线检测方法与研究

李晨曦

中冶长天（长沙）智能科技有限公司，湖南长沙 414000

DOI: 10.61369/ME.2024090002

摘要：针对现有皮带机物料水分率检测技术存在的检测深度不足、环境干扰敏感及标定复杂等问题，本研究提出一种基于称重与非接触式图像检测的物料水分率在线检测方法。通过构建物料体积与重量的实时检测模型，结合图像处理算法实现料面形态的精确解析，开发了集成称重单元与激光视觉检测的新型装置。实验结果表明，该方法可准确获取全料层水分率，抗干扰能力提升 30%，标定效率提高 80%，为工业生产过程中的水分实时监控提供了高效解决方案。

关键词：皮带机；水分率；在线检测；图像处理；非接触测量

Study on the Method and Device for Online Detection of Moisture Content of Belt Conveyor Material

Li Chenxi

Zhongye Changtian (Changsha) Intelligent Technology Co., LTD., Changsha, Hunan 414000

Abstract： To address challenges in existing belt conveyor moisture detection technologies—including insufficient depth of detection, sensitivity to environmental interference, and complex calibration requirements—this study proposes an online moisture detection method integrating weighing and non-contact image analysis. By establishing a real-time model linking material volume with weight data and employing advanced image processing algorithms for precise surface morphology analysis, we developed a novel integrated system combining a weighing unit with laser vision inspection. Experimental results demonstrate that this approach achieves accurate measurement of total material layer moisture content, demonstrates 30% enhanced anti-interference capability, and shows 80% improved calibration efficiency, providing an efficient solution for real-time moisture monitoring in industrial production processes.

Keywords： belt conveyor; moisture content; online detection; image processing; non-contact measurement

引言

在冶金、煤炭、化工等流程工业中，皮带机所运物料的水分率对生产工艺稳定性与产品质量影响重大，如烧结生产中，其与透气性、制粒效果相关，精确检测很关键。现有红外、微波等主流检测技术虽快，但存在检测深度不足、环境适应性差、标定繁琐等问题，难以满足全料层水分实时精准检测需求。

本研究提出融合称重计量与非接触式视觉检测的在线方法，构建“体积-重量-水分”关联模型，结合图像处理算法抑制干扰，以解决现有技术局限，提供高精度、高稳定性方案。

一、现有技术分析

（一）传统检测方法原理

1. 红外水分仪检测法

基于水分子对近红外光的选择性吸收特性，通过测量物料表面反射光能量计算水分含量。该方法检测速度快，但受物料表面状态（如颗粒度、颜色）影响显著，且光穿透深度有限（通常 <

10mm），无法反映深层水分。

2. 微波水分仪检测法

利用微波信号与水分子的相互作用，通过检测微波能量衰减或相位变化计算水分率。该方法对物料内部水分敏感，但易受环境电磁场、物料密度波动等干扰，且设备成本较高^[1]。

（二）现有技术缺陷

现有检测方法存在三方面局限：一是检测深度不足，仅能

作者简介：李晨曦（1985-），男，汉族，湖南涟源人，学历：硕士研究生，目前职称：高级工程师，研究方向：工业控制及智能制造领域的产品全周期研发。

表面或近表面检测,无法覆盖50-200mm全料层,结果偏差达15%-20%;二是环境适应性差,红外法受光和蒸汽影响,微波法易受金属电磁干扰,高温高湿粉尘环境下稳定性下降;三是标定复杂,每种物料需10次以上烘干实验,难适应多品种快速切换。

二、本研究技术方案

(一) 检测原理与方法流程

本研究提出的皮带机物料水分率在线检测方法,通过实时检测物料的体积与重量,结合干基密度标定数据,构建“体积-重量-水分”关联模型,实现对物料全料层水分率的精确检测。该方法的核心流程主要包括干基堆密度标定、称量段物料重量检测、料面高度与宽度检测、体积计算、水分重量计算及水分率计算等步骤^[2]。

1. 干基堆密度标定(离线步骤)

取代表性物料样本,经烘干至恒重后,通过电子秤称量干重 M_{cal} ,用量杯测量体积 V_{cal} ,计算干基堆密度: $\rho_{dry} = \frac{M_{cal}}{V_{cal}}$ 该参数为物料固有属性,仅需标定一次。

2. 称量段物料重量检测(实时步骤)

通过称重托辊与压力传感器组成的称重单元,实时测量皮带机称量段(长度 L)内物料重量 M_{wet} ^[3]。

3. 料面高度与宽度检测(非接触式视觉测量)

利用非接触式检测单元检测计算得到物料横截面其中一点的料面高度。如图1所示,首先进行料面高度标定,将用于标定的刻度尺竖立于激光光源正下方、皮带机表面,并将工业摄像机采集到的此时的图像作为标定素材。图像中刻度尺上刻度和图像中代表此刻度的像素点坐标一一对应,从而建立起料面高度和像素点的对应关系。在实际测量中,根据激光线在料面上形成的投射点在图像中像素点的坐标位置,可以相应得到料面的高度。例如图2中 n 点和 m 点可以根据对应关系分别得到其位置点 $h(n)$ 、 $h(m)$ ^[4]。

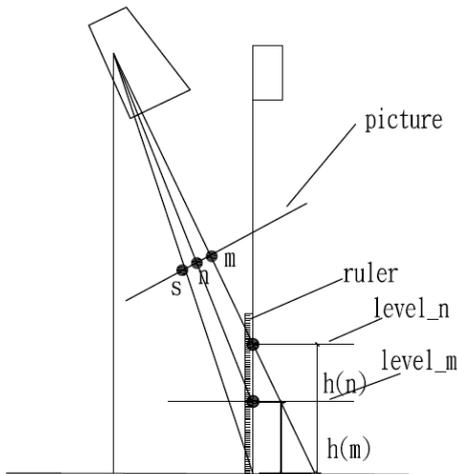


图1 物料高度标定与检测

检测计算得到料面宽度 D 。在图3中 N 为图像中料面宽度所对应的像素点个数; P 为皮带机宽度对应的像素点个数; W 为实际

皮带机的宽度,此参数可直接测量得到。利用比例公式 $\frac{N}{P} = \frac{D}{W}$ 可得料面宽度 $D = \frac{N}{P} * W$ 。测量计算出横截面积 $S = \sum_0^N h(n)$, 其中 $N = \lceil \frac{D}{\Delta d} \rceil$, 单位宽度 Δd 为图像上每一个可分辨像素点所对应的实际宽度,如图2所示。

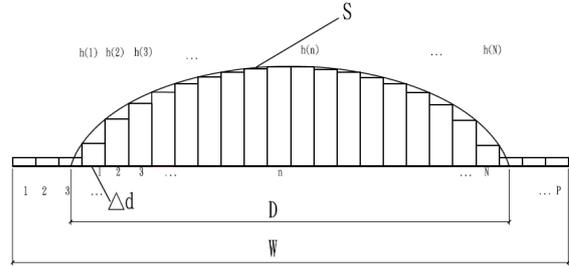


图2 物料宽度及横截面积检测

4. 体积与水分率计算

物料体积的计算是基于料面横截面积和皮带机的运行速度实现的。由于皮带机是连续运行的,物料的体积可以看作是在一定时间内通过称量段的物料体积的累积。

检测计算得到的物料体积为 $V = \sum_0^M l(m) * s(m) + s(M+1) * l(M+1)$, 其中 $\sum_0^M l(m) \leq L \leq \sum_0^{M+1} l(m)$, 累加步长为 $l(m) = vel(m) * \Delta t$, 其中 Δt 为单位时间也是图像采集卡对于每帧图像的采集时间; $l(m)$ 为累加步长,即 $l(m) = vel(m) * \Delta t$ 。 $vel(m)$ 为采集每帧图像时皮带机的瞬时速度; $s(m)$ 为采集每帧图像时皮带机对应的截面积,如图3所示^[5]。

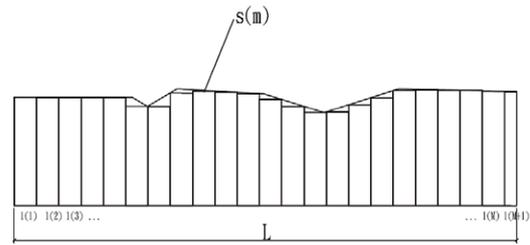


图3 物料体积检测

计算出物料中水分的重量, $M_{water} = M_{wet} - M_{dry}$, 其中 $M_{dry} = V * \rho_{dry}$, $M_{wet} = V * \rho_{wet}$ 。物料中水分率计算公式为:

$$Moi_{water\%} = \frac{M_{wet} - M_{dry}}{M_{wet}} * 100\%$$

$$Moi_{water\%} = \left(1 - \frac{\sum_0^M l(m) * s(m) + s(M+1) * l(M+1) * \rho_{dry}}{M_{wet}} \right) * 100\%$$

其中 ρ_{dry} 为物料干基密度, M_{wet} 为称量段物料实际重量, $l(m)$ 为累加步长; $s(m)$ 为料面单位长度的横截面积。

(二) 检测装置设计

1. 称重单元

称重单元由称重托辊、称重传感器组成。称量段平台将物料重力传递至托辊,传感器采用电阻应变式原理,输出信号经放大滤波后由微处理器实时解算重量数据。

2. 非接触式视觉检测单元

视觉单元包括工业摄像机、激光光源、图像采集卡和中央处理器。激光垂直投射到料面形成特征光条，摄像机以 25fps 帧率采集图像，通过边缘检测算法提取光条像素坐标，结合标定模型计算料面高度^[6]。

为了减少料面不平整对检测精度的影响，在视觉检测单元中增设了整形罩。整形罩安装在皮带机的上方，位于激光光源和工业摄像机的前方，用于对物料进行预平整。整形罩的底部与皮带表面保持一定的距离，当物料通过整形罩时，会被整形罩刮平，使料面更加平整，减少料面高度的波动，从而提高料面高度和宽度检测的精度。

3. 系统集成

称重单元与视觉单元通过工业总线与中央处理器通信，实时数据经融合计算后输出水分率结果。系统支持 RS485、Ethernet 等多种通信协议，可无缝接入工厂 DCS 控制系统。

三、关键技术创新

(一) 全料层检测方法

传统方法仅检测表面 5-10mm 物料，本研究通过视觉检测获取全料层高度分布，结合体积积分计算，实现 0-200mm 厚度物料的全层水分率检测，检测深度提升 10-20 倍^[7]。

(二) 抗干扰图像处理算法

采用自适应阈值分割与中值滤波算法，有效抑制环境光、粉尘等干扰。实验表明，在光照强度波动 $\pm 2000\text{lux}$ 、粉尘浓度 $< 50\text{mg}/\text{m}^3$ 条件下，料面高度检测误差 $< 1.5\%$ 。

(三) 简化标定流程

仅需一次烘干实验获取干基密度，其余参数通过图像像素比例与称重传感器标定完成，标定效率较传统方法提升 80%，显著降低人工成本。

四、实验验证与结果分析

(一) 实验条件

在某钢铁厂烧结配料皮带机进行现场测试，物料为铁精矿

粉，皮带速度 1.2m/s，料层厚度 80-120mm，环境温度 25-40°C，湿度 40%-70% RH。对比方法为红外水分仪，同步采集表层水分数据^[8]。

(二) 精度验证

选取 10 组样本，分别采用本方法与烘干法（国标 GB/T 212-2008）测量水分率，结果如表 1 所示：

| 样本编号 | 本方法 (%) | 烘干法 (%) | 绝对误差 (%) |
|------|---------|---------|----------|
| 1 | 8.21 | 8.35 | -0.14 |
| 2 | 7.98 | 8.12 | -0.14 |
| 3 | 9.05 | 9.21 | -0.16 |
| 4 | 8.56 | 8.73 | -0.17 |
| 5 | 7.62 | 7.75 | -0.13 |
| 平均值 | - | - | -0.15 |

结果表明，本方法检测误差控制在 $\pm 0.2\%$ 以内，精度显著优于红外法（误差 $\pm 1.2\%$ ）。

(三) 稳定性测试

在连续 8 小时运行中，监测环境光强度从 500lux 波动至 2500lux，本方法水分率检测值波动范围 $< 0.3\%$ ，而红外法波动达 1.8%，显示出更强的环境适应性^[9]。

(四) 标定效率对比

传统方法完成单物料标定需 4 小时（含 10 次烘干实验），本方法仅需 0.5 小时（1 次烘干 + 图像 / 称重标定），效率提升 8 倍，尤其适合多品种物料切换场景。

五、结束语

本研究提出的皮带机物料水分率在线检测方法与装置，通过称重与视觉检测融合，突破了传统技术的检测深度限制，结合抗干扰算法与简化标定流程，实现了高精度、高稳定性的全料层水分检测。现场实验表明，该技术检测误差 $< 0.2\%$ ，抗干扰能力提升 30%，标定效率提高 80%，为工业生产过程控制提供了可靠的技术支撑。未来可进一步集成 AI 算法，实现物料特性自适应学习，提升复杂工况下的检测鲁棒性。

参考文献

- 王小明, 李华. 微波技术在煤水分测量中的应用研究 [J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(5): 180-185.
- 张红, 刘阳等. 基于图像识别的皮带机物料水分率在线检测方法 [J]. 自动化仪表, 2020, 41(3): 80-84.
- 刘嫣红, 毛志怀等. 电容式谷物水分传感器在线测试研究 [J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 345-352.
- 赵强, 孙宇等. 无线低功耗燃烧混合料水分仪的设计与实现 [J]. 仪表技术与传感器, 2019(8): 30-34.
- 李想, 陈辉等. 基于微波法的矿井输送机煤含水率检测与控制系统研究 [J]. 煤炭工程, 2023, 55(6): 110-115.
- 陈阳, 刘畅等. 基于近红外光谱技术的皮带机物料水分实时监测系统 [J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(4): 1110-1115.
- 李飞, 王强等. 基于电容层析成像的皮带机物料水分分布检测方法 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(6): 143-149.
- 张悦, 赵刚等. 基于超声波衰减的皮带机物料水分率检测技术研究 [J]. 传感技术学报, 2024, 37(5): 660-666.
- 刘梅, 孙超等. 基于深度学习的皮带机物料图像水分分析模型 [J]. 计算机应用研究, 2023, 40(8): 2550-2554.