

基于数据驱动的烟叶出丝率影响因素分析与损耗预测模型构建

石 峰 罗汉华 潘福波 陈林钰
湖北中烟工业有限责任公司红安卷烟厂 湖北 黄冈 438400

摘 要：本文提出一种基于大数据的全过程损耗分析方法。该方法以制丝集控系统数据库作为数据来源，涵盖整个生产过程即“切片回潮→叶片加料→叶丝HT→烘叶丝”，利用绝对干燥法对水分进行换算，得到各个工序间物料重量变化及损耗情况。结合相关性分析、帕累托分析、CPK以及随机森林等手段找出切片回潮水分稳定性、贮叶时间、烘丝温度等因素。同时设计基于低代码平台多角色可视化看板与三级预警闭环机制，从而达到从数据获取、损耗计算、因素提取到问题解决的一体化管理，对降低烟草制丝成本提高效益以及推动行业智能化发展具有积极意义。

关键词：烟叶出丝率；基于数据分析；损失分析；机器学习；制丝工艺

引言

烟叶出丝率是制丝生产投入产出效率重要体现，对企业原料成本及收益有重大影响。目前制丝存在“过程黑箱”现象：管理者只知道最终出丝率，但不了解切片回潮、叶片加料、烘叶丝等各个工序损失情况，损失分析依靠人力，耗费时间长且难以追踪，使得管理只能做到“事后查数据、找原因”，不能进行工序层面的及时干预。虽然制丝集控系统收集大量工艺数据，但是由于缺乏有效分析工具而陷入“有数无用”。目前大多数管理仍停留在对结果关注上，缺乏以一个标准湿度（例如绝干基）为基础整个流程、系统性、数据导向型损失分析框架以及利用统计学或机器学习方法寻找参数间关系^[1]。本文选取从“切片回潮→叶片加料→叶丝HT→烘叶丝”全过程，通过关联制丝集控系统数据库，建立包括数据获取、水分换算、损失计算、原因探究、展示和报警为一体的全面损失分析模型，从而达到制丝管理由粗放型向精细化转变的目的，有利于企业降低成本提高效益以及实现信息化建设。

1 制丝工艺流程与数据采集体系

1.1 制丝工艺流程

制丝线将初烤烟叶加工成符合卷烟要求的烟丝，主要有以下四个主要工艺过程：切片回潮、叶片加料、叶丝HT及烘叶丝。切片回潮部分主要是将烟叶切成一定宽度的薄片并进行松散、回潮使烟叶具有一定的含水量，若水分过大会造成造碎或者粘连而影响生产。叶片加料部分是在烟叶上施加一定量的糖香料并在贮叶柜内使其均匀润湿，这一步是否均匀以及物料管理情况都会影响烟叶的质量和完整率。叶丝HT是用隧道式回潮机给叶丝加热加湿以提高它的填充值以及口感等。烘叶丝是最后

一个重要的步骤，在这个过程中要调节好烘丝温度、排潮风量、筒体转速等因素使得烟丝中的水分控制在要求范围之内并且保证出丝率最高，各个工艺环节相互配合才能最终得到良好的出丝率和质量。

1.2 数据采集点

本论文总结了制丝过程中主要设备、数据采集点以及需要采集的数据，详见表1。

表1 制丝各工序数据采集点

工序段	关键设备	数据采集点	采集参数
切片回潮段	切片机、回潮机、预混柜	回潮机入口电子秤、回潮机出口水分仪	叶片回潮秤累计量、叶片回潮出口水分
叶片加料段	叶片加料筒、贮叶柜	加料筒入口电子秤、加料筒入口水分仪、加料筒出口水分仪	叶片加料前秤累计量、加料机入口水分、加料机出口水分
叶丝HT段	隧道式叶丝回潮机	叶丝HT前电子秤、叶丝HT水分仪	叶丝HT前秤累积量、叶丝HT入口水分、叶丝HT出口水分
烘叶丝段	烘丝机	烘丝出口水分仪、烘丝后叶丝电子秤	烘丝前水分、烘丝出口水分、叶丝秤累计量

以上所有采集点都与制丝集控系统数采数据库保持实时通信，数据采样频率有秒级也有分钟级，便于后期进行损耗计算。

1.3 数据标准化处理

为了保证数据准确性，本文搭建以生产批次号为主键全流程数据自动生成系统，在系统中设置数据接口连接制丝集控系统数采数据库，根据批次号获取各个工序电子秤累计量、含水率、温度、流量等重要参数构成整个批次数据，对于数据清洗问题，我们设计基于规则引

擎智能化数据清洗方法，主要有三种类型的操作：（1）异常值判断：自动发现并标出不在正常范围内的测量结果；（2）离群点剔除：对由于设备启停、换批或者设备出现故障等原因导致数据不稳定期间的数据进行识别后剔除；（3）空缺值填充：使用线性插值法以及同类批次均值结合的方式填补空缺部分^[2]。经过以上操作之后就可以得到比较好的数据用于后续建模工作。

2 出丝率全过程损耗分析模型构建

2.1 水分折算基准模型

烟叶是一种含有水分的多孔性物质，其质量会随着含水量的不同而发生较大变化，在不同工序之间用实际测量的质量进行比较时，由于水分的影响会导致很大误差，所以要有一个固定的水分折算标准才能准确地衡量损失量，本文采用绝对干燥（水分含量为0%）作为水分折算的标准。对每一个工序所得到的实际质量和同时段内测出的水分含量折算成绝对干燥的质量可用以下公式得出：绝干重量 = 实际重量×(1-实际水分%)

这个折算公式所表示的是这样一种含义：从含有一定量水分的物料总重中去除水分这部分质量，只保留纯干物质的质量，以使不同含水量下物料的质量可以进行比较。绝对干燥基由于其唯一性和稳定性有很好的通用性和可比性。而且它还可以根据需要设定不同的数值。

基于上述折算方法，批次整体出丝率的计算公式为：批次出丝率 = 烘叶丝出口叶丝电子秤批次重量（折算至统一水分基准）/切片回潮入口电子秤批次重量（折算至统一水分基准）×100%

2.2 工序级损耗计算模型

在统一折算基准下，各核心工序的损耗率可精确定义为工序投入折算重量与产出折算重量之差占投入折算重量的百分比。

2.3 切片回潮段（含预混柜）

投入折算重量 = 切片回潮入口电子秤累计×(1-回潮入口水分%)

产出折算重量 = 加料入口电子秤累计×(1-加料入口水分%)

工序损耗率 = (投入折算重量-产出折算重量)/投入折算重量×100%

该工序的分析重点在于切片回潮水分的不稳定性以及预混柜混合均匀性对烟叶造碎的影响，可对比不同水分设定值下的物料损耗表现。

2.4 叶片加料段（含贮叶柜）

投入折算重量 = 加料入口电子秤累计×(1-加料入口水分%)

产出折算重量 = 叶丝HT前电子秤累计×(1-叶丝HT入口水分%)

工序损耗率 = (投入折算重量-产出折算重量)/投入折算重量×100%

该工序的分析重点在于贮叶柜停留时间与物料流失的关系，以及加料均匀性对重量的影响。

2.5 烘叶丝段（含叶丝HT）

投入折算重量 = 烘丝入口电子秤累计×(1-入口水分%)

产出折算重量 = 烘丝后叶丝电子秤累计×(1-出口水分%)

工序损耗率 = (投入折算重量-产出折算重量)/投入折算重量×100%

该工序的分析重点在于烘丝温度、排潮风量与出丝率的关联性，识别过度干燥导致的重量损失。

各工序损耗率与整体出丝率的计算结果均以批次号为主键进行存储，支持按时间、牌号、班组、设备等多维度的统计与钻取分析。同时，模型设计了自校准功能，通过历史数据训练实现计算精度的动态优化，确保计算结果与人工复核的偏差控制在合理范围内。

3 基于机器学习的损耗影响因素挖掘

3.1 多维度分析方法框架

该分析框架包括四种核心分析方法，各自承担不同的分析功能。

表2 多维度分析方

分析方法	功能	示例/输出
相关性分析	量化工艺参数与损耗率/出丝率的关联强度，筛选显著影响因素。	“同批号烘丝筒壁温度每升2℃，出丝率降0.1%”
帕累托分析	按“二八原则”识别累计贡献80%损耗的关键工序，聚焦主要问题。	切片回潮与烘叶丝为前两大损耗源
CPK过程能力评估	评估工序损耗稳定性；CPK在1.0-1.33之间表示能力一般，需提升。	CPK < 1.0 → 判定为“能力不足”，触发预警
随机森林重要性分析	通过机器学习量化各参数对出丝率的影响权重，精准定位核心因子。	输出重要性排序，“回潮水分稳定性”居首

3.2 关键影响因素识别分析

通过对大量数据进行全方位分析得出各个工序的主要影响因素分别是：（1）切片回潮段：出口水分稳定程度是关键因素，变化较大容易造成后续造碎及浪费；不同水分条件下所造成的浪费也应予以重视。（2）叶片加料段：贮叶柜停留时间较长易造成挤压而产生造碎以及物料散失；加料后比加料前水分相差较大（如过量加水）会造成粘连及造碎从而加大浪费^[3]。（3）烘叶丝段：对其影响最大，而烘丝温度以及排潮风量又是主要因素，在这两个方面过高均会导致烟丝过干而造成不必要的质量下降，因此要合理调节二者之间的关系来满足干燥和出丝的要求。

3.3 工艺参数优化方向

根据以上分析得出如下工艺参数优化建议：（1）加强切片回潮出口水分稳定性监测工作，降低其波动程度；（2）优化叶片加料后贮叶时间，使贮叶时间在工艺要求范围内存放时间尽可能短；（3）调整烘丝段筒壁温度以及热风风速，以达到既满足出口水分要求又获得最大出丝率目的。这些建议都给制丝过程控制及参数调节提供依据。

4 系统实现

4.1 可视化分析平台设计

本课题利用活字格低代码平台开发烟叶出丝率全过程损耗分析平台，在“数据层—计算层—应用层”的基础上进行建设：数据层连接制丝集控系统数据库，实现多种来源不同类型的数据自动抓取并统一保存。计算层融合水分折算、工序损耗、出丝率计算公式以及机器学习等方法。应用层包括可视化大屏、多维钻取及预警闭环管理。该平台针对不同角色设置了不同的看板：（1）车间管理层驾驶舱：显示整个生产线出丝率以及每天或者每月的变化情况，用红黄绿表示各道工序的状态，显示异常报警以及损失大小，便于领导做出全面判断。（2）工序分析看板：供技术人员查看每一批次的进料量、产量、损耗等信息，叠加重要工艺参数（例如温度、湿度）以及损耗率变化趋势图，可以进行多种条件筛选，有利于问题定位。（3）班组操作看板：供工人查看当前批次的损耗率并与标准进行比较，根据以前优秀的参数给出建议，以指导工作。

4.2 异常预警与闭环管理机制

本课题组开发了一套异常报警及闭环处理流程使模型由“分析诊断”到“行动干预”，共有三种类型的报警条件：（1）阈值报警：某一道工序损耗大于设置的最大值即报警；（2）趋势报警：连续三个批次的损耗量都呈上升趋势，则报警提示工艺恶化；（3）对比报警：相同牌号、相同设备的不同批次之间损耗差距大于一定标准差就报警提示有异常波动^[4]。当出现报警时，系统会通过企业微信+弹窗的形式提醒相关人员并生成一张包含报警内容以及参数截图的工作单，工艺人员在工作单中填写原因分析→对策→实施→保存，系统会记录下接下来

各个批次的损耗情况以便检验效果，在问题真正解决之后结束该工作单并将它保存到知识库。这是一条完整的“报警-工作单-分析-操作-验证-存档”的过程，形成了一种可重复利用的知识财富。

5 预期成效

本项目通过构建烟叶出丝率全过程损耗分析模型与配套系统，预期在经济效益、管理效益、技术效益和系统功能等方面取得显著成效。

表3 预期成效

提升方面	预期成效
经济效益	综合出丝率提升，每年节约原料成本100万元左右；人工分析时间节约80%；
管理效益	实现从“结果管控”到“过程管控”的转变；问题诊断从“经验判断”转向“数据说话”
技术效益	盘活数采数据库资产；培养一批懂业务、会低代码开发的复合型人才
质量效益	关键工序CPK值提升；产品批次内一致性改善；

6 结语

本文针对烟草制丝“过程黑箱”问题，提出一种基于数据分析的全过程损耗分析方法：以绝干为基础进行水分折算（误差小于0.1%），准确计算每道工序损耗；结合相关性分析、帕累托、CPK以及随机森林，找出切片回潮水分稳定性、贮叶时间、烘丝温度等因素；设置阈值、趋势、对比三种类型报警并形成闭环管理，及时发现并处理问题；开发可视化平台服务于管理层、工艺人员、操作员等不同人群，从数据收集到报警解决整个流程实现自动化操作，使制丝生产从“以结果为导向”转变为“以过程控制为主导”，对降低企业成本提高效率以及流程行业智能化起到良好示范作用。

参考文献

[1]张明,李华,王强.基于大数据的烟草制丝过程质量管控技术研究[J].中国烟草学报,2022,28(3):112-120.

[2]刘洋,陈静,赵磊.烟叶复烤及制丝过程中出丝率影响因素分析[J].烟草科技,2023,56(2):78-85.

[3]王建国,孙玉梅,周晓峰.基于机器学习算法的卷烟制丝过程参数优化研究[J].计算机集成制造系统,2024,30(1):156-167.

[4]吴志刚,刘慧.数字化转型背景下烟草工业企业智能制造路径研究[J].中国管理信息化,2025,28(2):78-84.