

基于因子分析法的气流干燥工艺控制稳定性因素分析

吴昌军 谢夕阳 邢应杰

安徽中烟工业有限责任公司合肥卷烟厂 安徽 合肥 230601

摘要: 本文结合意大利COMAS公司的CTD气流干燥机过程加工任务,采用因子分析法,对该工序的叶丝入口流量、入口水分、工艺气体温度和出口水分4个核心工艺质量评价指标进行权重计算和分析。研究结果表明,4个主要指标对该工序的影响贡献度分别为23.81%, 51.92%, 8.70%, 15.57%,理论统计分析结果与实际工艺控制经验相一致。

关键词: 因子分析法; 工艺气体温度; 权重系数; 入口水分

随着“大数据”概念的提出和应用成果展现,人们越来越重视数据挖掘和处理技术。我国卷烟工业企业的设备越来越先进,其数采数据也更加庞大和全面。对这些数据的分析和挖掘必然能够科学地指导卷烟生产和质量控制。因此,本文运用多元统计技术,基于因子分析法^[1]对叶丝气流干燥工序的过程数据进行分析,探索一种新的统计计算方式确定各指标的权重,从而消除传统地运用“专家评价法”带有主观色彩地确定权重方式,更加科学地评价气流干燥工序的质量控制水平^[2]。

1 背景与现状

卷烟工厂在叶丝加工环节常用到气流干燥设备进行叶丝干燥加工。目前国内主流设备为意大利COMAS公司的CTD气流烘丝机、德国HDT烘丝机、中国SH系列烘丝机等。以HF卷烟厂为例,该企业使用意大利COMAS公司的CTD气流烘丝机。传统运行过程的控制逻辑一般是恒定叶丝入口流量和入口水分,以控制出口水分目标值为最终输出,实际上就是通过调控过程工艺气体温度实现工序工艺加工目标。而实践经验表明,满足气流烘丝机工艺控制要求,控制重点均集中在入口流量、入口水分和工艺气体温度上,但并不能有效对各项指标的贡献度进行科学、客观、合理的判断和评价。

本文基于多元统计分析角度,以该工序核心工艺参数指标为出发点,运用因子分析法分析研究各项指标对工艺控制的贡献权重,为经验做法提供理论支持。

2 数据及数据处理

本文所述气流干燥工序设备是意大利COMAS公司生产的CTD塔式气流烘丝机。在统计分析中,本文根据HF卷烟厂A牌名生产过程中生产和质量控制要求,确定需要

作者简介: 吴昌军,研究生,工程师,卷烟工艺技术方向。

基金来源: 安徽中烟工业有限责任公司科技项目“CTD仿真及故障诊断应用研究”2022138

采集的指标数据包括叶丝入口流量、叶丝入口水分、工艺气体温度、叶丝出口水分^[3]。

2.1 数据采集

本文借助气流烘丝机与数采集控数据平台,选取有代表性的生产批次,即剔除过程断流异常批次、过程强人工干预控制批次等特殊情况,选取批次共计20批,底层原始数据数采频率为10秒/次。

2.2 数据处理

逐批对原始数据进行数值清洗。处理规则包括:①采用时间序列对齐方式剔除过程因传感器采集、传输异常导致的明显超出指标范围的数值;②剔除设备工艺加工过程因PID自控调节过程料头和料尾非稳态阶段数据;③对原始采集数据进行简单平均计算,每批的4项指标作为1组统计数据。

3 分析模型及结果分析

3.1 因子分析模型

根据指标数量,本文的因子分析的数学模型可以这样描述:

$$X = AF + B$$

$$\begin{cases} x_1 = \alpha_{11}f_1 + \alpha_{12}f_2 + \alpha_{13}f_3 + \alpha_{14}f_4 + \beta_1 \\ x_2 = \alpha_{21}f_1 + \alpha_{22}f_2 + \alpha_{23}f_3 + \alpha_{24}f_4 + \beta_2 \\ x_3 = \alpha_{31}f_1 + \alpha_{32}f_2 + \alpha_{33}f_3 + \alpha_{34}f_4 + \beta_3 \\ x_4 = \alpha_{41}f_1 + \alpha_{42}f_2 + \alpha_{43}f_3 + \alpha_{44}f_4 + \beta_4 \end{cases}$$

x_1, x_2, x_3, x_4 是分别代表入口流量、入口水分、工艺气体温度、出口水分;

$F = (f_1, f_2, f_3, f_4)$ 是 $X = (x_1, x_2, x_3, x_4)$ 的公共因子;

$$A = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \alpha_{14} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & \alpha_{24} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} & \alpha_{34} \\ \alpha_{41} & \alpha_{42} & \alpha_{43} & \alpha_{44} \end{bmatrix} \text{是公共因子 } F = (f_1, f_2, f_3, f_4)$$

的系数,称作因子载荷矩阵,其中的 α_{ij} ($i = 1, 2, 3, 4$; $j = 1, 2, 3, 4$)称为因子载荷,或将其看作第*i*个变量在第*j*

个公共因子上的权重，表示 x_i 对 f_j 的依赖程度或相关程度。

$B = (\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_p)$ 是 $X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_p)$ 的特殊因子，是不被前 k 个公共因子包含的部分，也可理解为误差项，一般情况下可忽略。

通过上述统计分析模型可计算各指标的权重系数，基本步骤如下：

第一步：计算矩阵 A 的特征值 $\lambda = |\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4|^T$ 和方差贡献率；

第二步：用载荷矩阵和特征值计算变量得分；

第三步：计算各指标权重系数。

3.2 计算结果

本文采用SPSS统计软件对气流干燥工序各指标数据进行因子分析^[4]，采用KMO-Bartlett检验法进行数据检验。检验结果显示，K-B值为0.476，说明模型可信，见表1：

表1 因子分析KMO—Bartlett 检验结果

取样足够度的 Kaiser-Meyer-Olkin 度量。		.476
Bartlett 的球形度检验	近似卡方	13.022
	df	6
	Sig.	.043

模型计算矩阵结果如表2、表3：

表2 因子分析各主成份特征值及方差贡献率

解释的总方差						
成份	初始特征值			提取平方和载入		
	合计	方差的 %	累积 %	合计	方差的 %	累积 %
1	2.080	52.005	52.005	2.080	52.005	52.005
2	1.434	35.838	87.842	1.434	35.838	87.842
3	.339	8.483	96.325	.339	8.483	96.325
4	.147	3.675	100.000	.147	3.675	100.000
提取方法：主成份分析。						

表3 模型各指标变量的成份得分系数矩阵

成份得分系数矩阵				
	成份			
	1	2	3	4
入口流量	.334	.413	-1.165	-.650
入口水分	.238	.546	1.088	.606
气体温度	.393	-.337	.586	-1.649
出口水分	.397	-.340	-.249	1.815
提取方法：主成份。				

由表2可知，4个指标的特征值为

$$\lambda = |\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4|^T \\ = |2.080, 1.434, 0.339, 0.147|^T$$

可计算出或直接从表2中得到该矩阵中的公共因子水平即方差贡献率为：

$$F = (f_1, f_2, f_3, f_4) \\ = (0.52005, 0.35838, 0.08483, 0.03675)$$

由表3可知，4个指标的载荷矩阵为

$$A = \begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \alpha_{14} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & \alpha_{24} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} & \alpha_{34} \\ \alpha_{41} & \alpha_{42} & \alpha_{43} & \alpha_{44} \end{vmatrix} \\ = \begin{vmatrix} 0.334 & 0.413 & -1.165 & -0.650 \\ 0.238 & 0.546 & 1.088 & 0.606 \\ 0.393 & -0.337 & 0.586 & -1.649 \\ 0.397 & -0.340 & -0.249 & 1.815 \end{vmatrix}$$

由此可知，入口流量、叶丝入口水分、工艺气体温度、叶丝出口水分4个指标的因子分析数学模型为：

$$\begin{cases} \text{入口流量} = 0.334 \times 0.5200 + 0.413 \times 0.3584 - 1.165 \times 0.0848 \\ \quad - 0.650 \times 0.0368 \\ \text{入口水分} = 0.238 \times 0.5200 + 0.546 \times 0.3584 + 1.088 \times 0.0848 \\ \quad + 0.606 \times 0.0368 \\ \text{工艺气体温度} = 0.393 \times 0.5200 - 0.337 \times 0.3584 + \\ \quad 0.586 \times 0.0848 - 1.649 \times 0.0368 \\ \text{出口水分} = 0.397 \times 0.5200 - 0.340 \times 0.3584 - 0.249 \times 0.0848 \\ \quad + 1.815 \times 0.0368 \end{cases}$$

其中，特殊因子 $B = (\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4)$ 作为误差项，在本文统计分析中忽略不计。

进一步计算各指标得分为：

$$\begin{vmatrix} 0.334 & 0.413 & -1.165 & -0.650 \\ 0.238 & 0.546 & 1.088 & 0.606 \\ 0.393 & -0.337 & 0.586 & -1.649 \\ 0.397 & -0.340 & -0.249 & 1.815 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 0.52005 \\ 0.35838 \\ 0.08483 \\ 0.03675 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.19899 \\ 0.43401 \\ 0.07272 \\ 0.13019 \end{vmatrix}$$

各指标权重系数或贡献度可通过归一化处理进行计算，即：

$$\text{入口流量权重系数} = \frac{0.19899}{0.19899 + 0.43401 + 0.07272 + 0.13019} \\ = 0.2381$$

$$\text{入口水分权重系数} = \frac{0.43401}{0.19899 + 0.43401 + 0.07272 + 0.13019} \\ = 0.5192$$

$$\text{入口水分权重系数} = \frac{0.07272}{0.19899 + 0.43401 + 0.07272 + 0.13019} \\ = 0.0870$$

$$\text{入口水分权重系数} = \frac{0.13019}{0.19899 + 0.43401 + 0.07272 + 0.13019} \\ = 0.1557$$

得到入口流量、叶丝入口水分、工艺气体温度、叶丝出口水分4个指标的权重系数分别为（23.81%，51.92%，8.70%，15.57%）。

由计算结果可知CTD工序各指标的重要性排序依次为：叶丝入口水分、叶丝入口流量、叶丝出口水分、工艺气体温度。其中入口水分重要性占比超过50%，入口流量重要性贡献约四分之一，而工艺气体温度则不到10%，而出口水分由于是事后变量和提供反馈信息，其重要性则相对较低。

3.3 结果讨论

根据因子分析法分析计算结果可知，入口水分对CTD气流干燥过程影响程度最大，占比超过50%，从设备工艺控制逻辑和实践经验可知，两者是一致的。气流干燥从叶丝物理变化来看，除了卷曲性能之外，其核心目的就是运行高速高温气流进行脱水，也就是根据入口物料的含水量、物料进入总量，在高温下进行快速脱水，实际上是在干燥过程中进行传热、传质的转化。

入口水分、入口流量决定着在此过程中需要提供的热量大小，也就是工艺气体温度的高低，从而对工艺气体温度控制结果产生决定性影响。同时受入口物料来料过程电子流量秤的实时控制，入口流量相对稳定，进而决定了叶丝入口水分的变化则直接影响了工艺气体温度的控制结果以及叶丝出口水分的稳定性。

根据CTD干燥机设备过程加工性能的表现及过程控制目标调整历史来看，①叶丝入口水分对工序过程质量控制的影响最大，因为在稳定的脱水量前提下，入口水分的波动直接导致出口水分波动，同时由于叶丝含水量的变化，其脱水所需热量有所不同，间接导致工艺气体温度出现波动；②叶丝入口流量直接关系到叶丝在干燥机内填料比，进而影响总脱水量和工艺气体温度控制以及出口水分的控制；③工艺气体温度的变化直接反映到脱水量的变化，直接影响出口水分控制；④工艺气体温度、出口水分直接关系到叶丝加工后的物理、化学质量以及感官质量。

综上所述，理论统计分析的结果表明，CTD气流干燥过程工艺控制稳定性影响因素重要性排序为：叶丝入口水分 > 叶丝入口流量 > 叶丝出口水分 > 工艺气体温度。这与数值理论分析结果和实际控制经验得出的结论很好的符合^[5]。

4 结论与展望

本文通过因子分析法模型，计算CTD干燥机过程控制指标的权重，其理论统计结果与CTD运行控制模式和长期以来的工艺控制实际经验方法相一致。

加强CTD气流干燥入口水分的稳定性控制是保持工艺气体温度稳定、叶丝出口水分稳定的核心因素。作为CTD工序次重要参数叶丝入口流量，也是在提升该工序过程加工稳定性的重要因素，同时受CTD物料进入的特点影响，未来就如何改进物料进入方式，保持其连续性、稳定性是进一步提升加工质量的研究方向。

参考文献

- [1]孙增禹，王燕，张志鹏等，基于因子分析法的闲置土地影响因素及处置措施分析[J]，价值工程，2024-43(34)
- [2]王惠敏，汪海年，孔庆鑫等，基于因子分析法的粗集料形态特征综合评价[J]，材料科学与工程学报，2023-41(06)
- [3]杨春强，张建勋，杨伟平等，干燥方式及加工强度对典型烟叶模块风格的影响[J]，烟草科技，2022-55(02)
- [4]乔小燕，统计软件SPSS在“统计学”教学中的应用研究——以因子分析为例[J]，教育教学论坛，2023(21)
- [5]李兆波，卷烟制丝工艺质量控制的要点分析，中国高新区，2018(12)