



李锦,罗冲,闫瑛,等.基于 Kriging 模型的造纸法再造烟叶筛分工艺参数优化方法[J].轻工学报,2024,39(1):103-108.
LI J, LUO C, YAN Y, et al. Optimization of sieving process parameters for paper-based reconstituted tobacco based on Kriging model[J]. Journal of Light Industry, 2024, 39(1): 103-108. DOI:10.12187/2024.01.013

基于 Kriging 模型的造纸法再造烟叶筛分工艺参数优化方法

李锦¹, 罗冲¹, 闫瑛¹, 马建荣², 李高辉²

1. 河南卷烟工业烟草薄片有限公司, 河南 许昌 461000;
2. 郑州轻工业大学 机电工程学院, 河南 郑州 450002

摘要:为充分考虑造纸法再造烟叶筛分工艺参数的随机变化,以水流速度和烟浆固含量为设计参数,以筛分后 12 目以上纤维质量占比和 50 目以下纤维质量占比为性能响应,提出了基于 Kriging 模型的造纸法再造烟叶筛分工艺参数优化方法。首先,以当前工艺参数为继承点进行继承拉丁超立方采样和筛分实验,在此基础上构建初始 Kriging 模型以拟合水流速度和烟浆固含量与 12 目以下纤维质量占比和 50 目以上纤维质量占比间的隐式关系;其次,采用局部自适应采样方法开展序列采样以提高 Kriging 模型在优化迭代关键点的精度;最后,利用蒙特卡罗仿真-序列二次规划计算最优的再造烟叶筛分工艺参数。结果表明:优化得到的水流速度和烟浆固含量分别为 6.31 L/min 和 0.53%,该工艺参数下的 12 目以下纤维质量占比为 13.72%,较优化前提升了 7.19%;50 目以上纤维质量占比为 17.65%,较优化前降低了 4.13%。该方法能够满足造纸法再造烟叶筛分工艺参数优化需求。

关键词:造纸法再造烟叶;Kriging 模型;继承拉丁超立方采样;概率约束;局部自适应采样

中图分类号:TS49 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-1553(2024)01-0103-06

0 引言

再造烟叶(Reconstituted Tobacco Sheet, RTS)是将碎烟叶、烟末、烟梗等原料,通过工艺成型、重组而成的薄片状烟草制品^[1]。再造烟叶以烟草为原料,加工过程属于物理变化^[2],其物质基础与天然烟叶相同,但物理结构更疏松,燃烧性更好,且焦油含量更低^[3-4]。因此,在卷烟中掺入一定比例的再造烟

叶可以减少对人体和环境的危害^[5],且能够提高再造烟叶利用率、减少烟草原料消耗,具有显著的社会效益^[6-7]。

再造烟叶技术主要包括辊压法、稠浆法和造纸法。其中,造纸法将烟草生产中的废料重新加工,经过废料处理、纸浆制备、纸张生产等步骤,将烟草废料转化为可用于香烟、雪茄和烟斗制造的再造烟叶产品。造纸法再造烟叶能够避免辊压法中出现的烟

收稿日期:2023-06-17;修回日期:2023-07-25;出版日期:2024-02-15

基金项目:河南省科技攻关项目(222102210276);河南中烟工业有限责任公司科技项目(A202065)

作者简介:李锦(1982—),男,河南省新乡市人,河南卷烟工业烟草薄片有限公司工程师,主要研究方向为再造烟叶生产加工技术。E-mail:lijin_scu@163.com

通信作者:闫瑛(1989—),女,陕西省宝鸡市人,河南卷烟工业烟草薄片有限公司工程师,主要研究方向为再造烟叶工艺技术。E-mail:yanyingmy@sina.cn

叶物理强度低、填充性能差、烟叶表面白色斑点多及稠浆法中出现的生产过程复杂、投资规模大、生产成本高等缺点^[8-10],在烟草生产废料的利用方面具有较大优越性。制浆和筛分是造纸法生产再造烟叶的关键工序,其中纤维筛分是将制浆后经过稀释的烟浆悬浮液依次通过多个具有不同尺寸筛孔的筛网,小而短的纤维直接流入下一级,而较大的纤维则被阻留在筛板上^[11]。上述工序中,水流速度和烟浆固含量起着关键作用,不仅会影响筛分效率,还会影响不同目数烟末颗粒纤维的质量占比。烟末粒径会影响烟草基片的松厚度和抗张强度,较小的烟末粒径能够提供更好的吸附性能,且增加基片的紧密性,提高烟草基片的抗张强度。然而,过高的抗张强度会降低烟草薄片的柔软性、口感等,过低的松厚度会影响卷烟的燃烧性能,不利于烟叶充分燃烧,且会加剧CO等有害气体的产生^[12-13]。因此,制浆和筛分效果直接关乎纤维浆料抄造成基片或薄片的难易程度及后续成品纸张的质量,进而对再造烟叶的物理性能(松厚度、多孔性、透气性能、燃烧性能等)产生影响。

目前,针对造纸法再造烟叶的工艺参数研究多集中于制浆工艺参数^[14-17],而筛分工艺参数的优化研究较少。实际生产往往采用标准筛分工艺参数(如水流速度 8 L/min,烟浆固含量 0.5%)或仅凭生产经验进行参数粗调,导致再造烟叶中 12 目以下纤维占比过少或 50 目以上纤维占比过多,严重影响再造烟叶的松厚度和柔软性。此外,现有方法未考虑工艺参数不确定性对筛分效果的影响。Kriging 模型是一种半参数化的插值模型^[18],通过对设计空间已知训练样本信息进行线性加权组合,以评估未知测试样本的响应信息^[19],最常用的变量-响应隐式关系拟合模型之一,其能够兼顾变量的不确定性。基于此,本文拟以水流速度、烟浆固含量为设计参数,以筛分后烟末颗粒中 50 目以上纤维质量占比为概率约束,以 12 目以下纤维质量占比为优化目标,提出基于 Kriging 模型的造纸法再造烟叶筛分工艺参数优化方法。

1 Kriging 模型构建

为降低直接调用筛分实验进行工艺参数设计优

化的计算成本,本文采用适应性好、建模简单的 Kriging 模型。以当前工艺参数为继承点进行继承拉丁超立方采样(ILHS)和筛分实验,在此基础上构建 Kriging 模型,拟合水流速度、烟浆固含量与 12 目以下和 50 目以上纤维质量占比间的隐式关系。

1.1 继承拉丁超立方采样

近似模型的构建依赖于样本点的选择,常用方法有全因子试验设计、部分因子试验设计、正交试验设计^[20]、均匀试验设计、拉丁超立方试验设计(LHS)^[21]和继承拉丁超立方采样^[22]。在再造烟叶筛分工艺参数优化中引入 ILHS 方法,可以充分利用现有筛分参数下的运行数据,减少优化所需的实验次数,且能够保证 Kriging 模型在初始优化迭代点附近的近似精度。

ILHS 既包含给定继承点,又具有 LHS 的均匀性^[22]。以二维空间 4 个样本点(包含 1 个继承点)为例,对 ILHS 进行描述,如图 1 所示。首先,将设计空间的两个维度分别等分为 4 个区间(共 16 个小网格),移除继承点占据的 7 个灰色小网格,形成缩减设计空间(如图 1b);其次,将缩减设计空间的两个维度分别等分为 3 个区间(共 9 个小网格),并用 LHS 选取 3 个样本(如图 1b)黑色圆点);最后,将图 1b)中 3 个黑色圆点映射到图 1a)的空白区域。

1.2 样本数据收集

再造烟叶筛分实验流程如图 2 所示。由图 2 可知,在给定时间点收集各筛网上的纤维并烘干称重,最后计算各筛网上留存纤维的质量相对于投入试样的质量占比。本文利用鲍尔纤维筛分仪(英特耐森精密仪器有限公司制造)测量烟浆中不同长度纤维的质量占比,并根据不同长度纤维在浆料中的分布情况,优化筛分工艺参数,以提升再造烟叶的填充

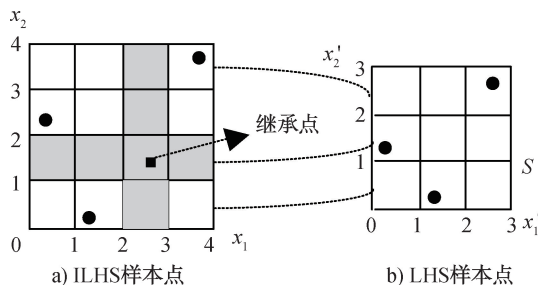


图 1 ILHS 示意图

Fig. 1 Diagram of inherited Latin hypercube sampling

性能。

本文以当前筛分工艺参数(水流速度 8 L/min, 烟浆固含量 0.5%)为继承点,采用 ILHS 选取 9 组水流速度和烟浆固含量数据,并对除继承点外的 8 组数据开展筛分实验,获得不同筛分工艺参数下的性能响应数据(12 目以下纤维质量占比和 50 目以上纤维质量占比)。ILHS 筛分工艺参数及性能响应数据见表 1。

1.3 模型构建

不同水流速度和烟浆固含量下的纤维质量占比需要通过筛分实验来确定。而烟浆筛分工艺参数优化涉及多次迭代,每次迭代均需进行筛分实验,优化成本很高。因此,本研究拟利用少量筛分实验数据构建筛分工艺参数与性能响应间隐式关系的 Kriging 模型,然后在优化迭代中直接调用 Kriging 模型来获得最优的筛分工艺参数,以大幅降低优化成本。

在 Kriging 模型^[23-25]中,测试样本的响应并不仅仅取决于设计参数,还会受样本点分布的影响。Kriging 模型的响应函数(见公式(1))由一个多项式回归模型 $f(\mathbf{x})^T\boldsymbol{\eta}$ ($\boldsymbol{\eta}$ 为多项式系数项)和一个随机过程 $Z(\mathbf{x})$ 组成^[23]。

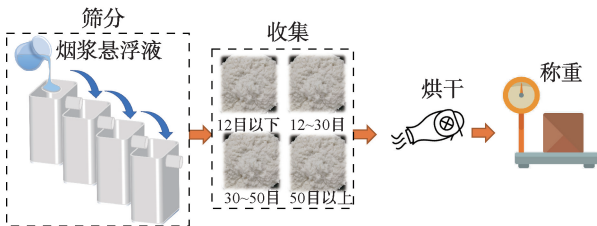


图 2 再造烟叶筛分实验流程
Fig. 2 Flowchart of sieving experiment for reconstituted tobacco

表 1 ILHS 样本点及性能响应数据
Table 1 ILHS sample points and performance response data

序号	水流速度/ (L·min ⁻¹)	烟浆 固含量/%	12 目以下 占比/%	50 目以上 占比/%
1	5.41	1.01	14.60	16.88
2	7.15	0.95	11.83	19.48
3	6.51	1.12	12.71	18.54
4	10.71	1.27	10.49	18.64
5	8.54	0.81	12.87	18.50
6	9.04	1.41	12.49	19.41
7	9.81	1.39	12.80	18.43
8	5.86	0.63	12.86	18.36
9	8.00	0.50	12.80	18.41

$$\hat{g}(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x})^T\boldsymbol{\eta} + Z(\mathbf{x}) \tag{1}$$

式中: $\mathbf{x}$ 是筛分工艺参数, $\hat{g}(\mathbf{x})$ 是性能响应。通过采集不同筛分工艺参数下的性能响应数据,便可利用公式(1)构建工艺参数与性能响应间隐式关系的 Kriging 模型。

2 筛分工艺参数优化

筛分过程中,水流速度和烟浆固含量往往会随着烟浆流动而发生波动,两参数的变化可近似为正态分布。若采用确定性优化设计,则很难真实反应筛分工艺参数对性能响应的影响规律,从而导致优化结果失效。因此,在 Kriging 模型基础上,使用概率约束和局部自适应采样方法进行烟浆筛分工艺参数优化。具体步骤如下:1) 构建烟浆筛分工艺参数优化模型;2) 利用局部自适应采样方法(LAS)对 Kriging 模型进行更新;3) 利用蒙特卡罗仿真-序列二次规划(MCS-SQP)计算最优的再造烟叶筛分工艺参数。

2.1 概率约束

以水流速度和烟浆固含量为随机优化参数,12 目以下纤维质量占比最大为优化目标,50 目以上纤维质量占比为概率约束,构建烟浆筛分工艺参数的可靠性优化模型如下:

$$\begin{aligned} &\text{find: } \mathbf{d} = [d_1, d_2] \\ &\text{max: } f(\mathbf{x}) \\ &\text{s. t: } P(g(\mathbf{x}) > 18) \leq \Phi(-\beta') \\ &\quad 5 \leq d_1 \leq 11, 0.5 \leq d_2 \leq 1.5 \\ &\quad x_1 \sim N(d_1, 0.1^2) \\ &\quad x_2 \in N(d_2, 0.01^2) \end{aligned}$$

式中: $f(\mathbf{x})$ 是目标函数,表示 12 目以下纤维质量占比; $\mathbf{x} = [x_1, x_2]$ 为优化变量, x_1 和 x_2 分别表示水流速度和烟浆固含量; $\mathbf{x} = [x_1, x_2]$ 服从以 $\mathbf{d} = [d_1, d_2]$ 为均值的正态分布; $g(\mathbf{x})$ 为 50 目以上纤维质量占比,小于 18%为企业要求; $P(g(\mathbf{x}) > 18)$ 为 50 目以上纤维质量占比超过 18%的概率; $\Phi(-\beta')$ 为累计概率分布, $\beta' = 3$ 为根据企业要求确定的目标可靠度。

2.2 局部自适应采样方法

本文中性能响应与筛分工艺参数之间存在复杂

的隐式关系,由表 1 中 ILHS 数据构建的 Kriging 模型精度难以满足优化要求,因此有必要利用序列采样方法对 Kriging 模型进行更新。在设计优化和可靠性分析过程中,迭代设计点附近的区域相对于其他区域更为重要,且该区域内的极限状态约束边界应被优先考虑^[24]。因此,本文引入对迭代设计点区域内约束边界进行重点拟合的 LAS 选取序列样本点。LAS 示意图如图 3 所示,其中,黑色圆点为初始的 ILHS 样本点, x 为序列样本点, d^0 为初始设计点, $d^{1\sim3}$ 为第 1 到 3 次迭代设计点, d^{opt} 为最优设计点,绿色椭圆形为迭代设计点的局部采样区域。由图 3 可知,在 LAS 方法中,序列样本点大多位于迭代设计点附近的小区域中,因此能够实现概率优化求解过程中样本利用率的最大化。

2.3 优化流程

- 基于 ILHS 和 LAS 的可靠性优化流程如下:
- 1) 以当前运行的筛分工艺参数为继承点,利用 ILHS 选取 9 个样本点作为初始样本集合 S^0 。
 - 2) 通过纤维筛分实验获取 S^0 处的 12 目以下纤维质量占比和 50 目以上纤维质量占比,并依据现有样本及其响应值建立 Kriging 模型。
 - 3) 在第 k 次迭代中,依据目标可靠度和迭代点附近概率约束函数的非线性程度计算局部采样区域的半径^[26]。
 - 4) 在步骤 3) 确定的局部采样区域内,利用 LAS 方法选择序列样本点,并通过纤维筛分实验获取 12 目以下纤维质量占比和 50 目以上纤维质量占比,然

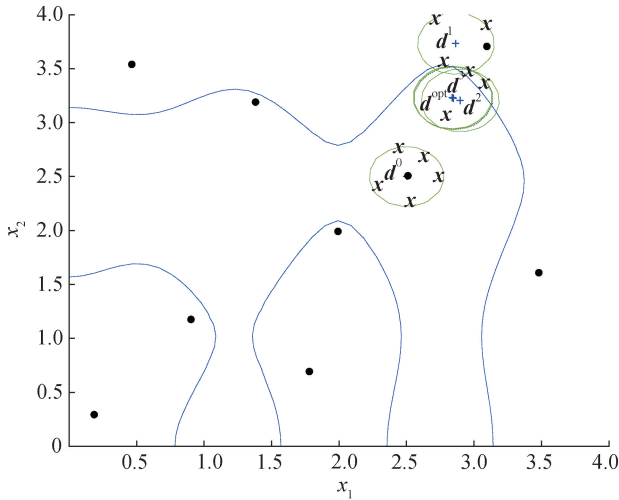


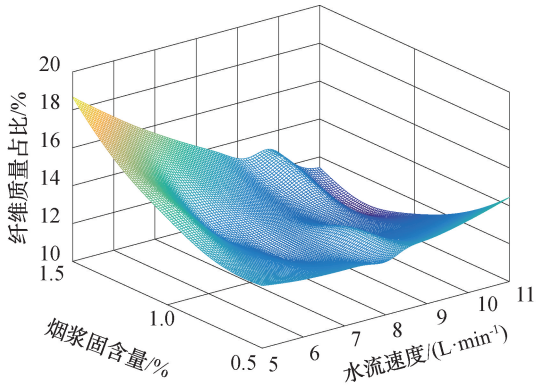
图 3 LAS 示意图

Fig. 3 Diagram of local adaptive sampling method

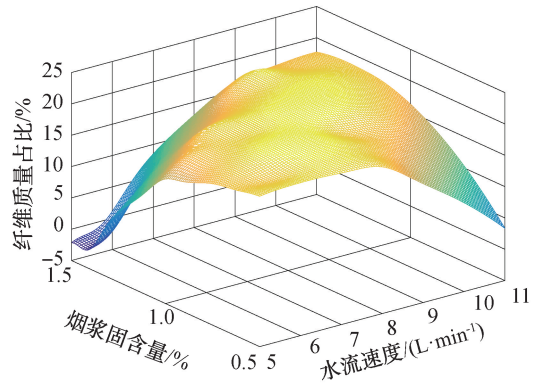
- 后依据已有样本及其响应更新 Kriging 模型。
- 5) 利用蒙特卡罗仿真 (MCS)^[27] 计算当前筛分参数下的失效概率及梯度,并利用序列二次规划 (SQP)^[28] 计算下一个筛分参数。
 - 6) 如果收敛,则整个筛分工艺参数优化过程结束;否则, $k=k+1$,转向步骤 3),继续后续步骤。

3 结果与分析

利用以当前工艺参数为继承点的 ILHS 获取初始样本点并构建目标函数及约束函数的初始 Kriging 模型,进而在概率优化求解过程中利用 LAS 方法对 Kriging 模型进行序列更新,最终构建目标函数及约束函数 Kriging 模型所需的总样本数目为 30。本文构建的 Kriging 模型响应面如图 4 所示。由图 4 可知,水流速度和烟浆固含量与 12 目以下纤维质量占比和 50 目以上纤维质量占比存在非线性关系。当水流速度和烟浆固含量同步增大时,12 目以下纤维质量占比呈下降趋势,而 50 目以上纤维质量占比呈上升趋势。



a) 12目以下纤维质量占比



b) 50目以上纤维质量占比

图 4 Kriging 模型响应面

Fig. 4 Kriging model response surface

基于 Kriging 模型,利用 MCS-SQP 计算最优的筛分参数,并分别对优化前后的筛分参数进行纤维筛分实验,最优解处的性能响应对比见表 2。由表 2 可知,优化后的最优水流速度和烟浆固含量分别为 6.31 L/min 和 0.53%,该工艺参数下的 12 目以下纤维质量占比相较于优化前提升了 7.19%;50 目以上纤维质量占比相较于优化前降低了 4.13%。此外,相较于优化前,优化后的工艺参数能够满足企业的可靠度要求($\beta \geq 3$)。

表 2 筛分工艺参数优化前后对比
Table 2 Comparison of screening process parameters before and after optimization

参数组合	水流速度/ (L·min ⁻¹)	烟浆固 含量/%	纤维质量占比/%		β
			12 目以下	50 目以上	
优化前	8.00	0.50	12.80	18.41	1.59
优化后	6.31	0.53	13.72	17.65	3.01

4 结论

本文以 12 目以下纤维质量占比为优化目标,以水流速度、烟浆固含量为设计参数,以 50 目以上纤维质量占比为概率约束,构建了造纸法再造烟叶筛分工艺参数可靠性优化 Kriging 模型,利用 MCS-SQP 计算最优筛分工艺参数并对其性能响应进行验证。得到如下结果:采用 ILHS 开展实验设计,并通过筛分实验获取了 9 组水流速度和烟浆固含量的 12 目以下纤维质量占比和 50 目以上纤维质量占比数据,能够保证 Kriging 模型在优化迭代点附近的近似精度。利用 Kriging 模型拟合筛分工艺参数与性能响应间的非线性关系,并采用 LAS 方法对 Kriging 模型进行序列更新,取得了良好的建模效果。通过调用 Kriging 模型及利用 MCS-SQP 进行优化求解,得到最优的水流速度和烟浆固含量分别为 6.31 L/min 和 0.53%。优化后 12 目以下纤维质量占比提升了 7.19%,50 目以上纤维质量占比降低了 4.13%,且优化后的工艺参数能够满足企业的可靠度要求($\beta \geq 3$)。

本文提出的基于 Kriging 模型的方法能够满足造纸法再造烟叶筛分工艺参数优化需求,未来可将该方法推广于烟草工业其他工艺参数优化中。

参考文献:

[1] 韩文佳,赵传山. 造纸法烟草薄片发展现状[J]. 黑龙江造纸,2007,35(4):47-49.

[2] HU L Z,ZHANG S J,YU X P,et al. Estimation of cut stalk filaments and slices content in blends of tobacco filaments by uniform design-PLS-NIR method[J]. Acta Tabacaria Sinica,2010,16(2):26-30.

[3] 董高峰,田永峰,尚善斋,等. 用于加热不燃烧(HnB)卷烟的再造烟叶生产工艺研究进展[J]. 中国烟草学报,2020,26(1):109-117.

[4] 高金玲,李书芳,朱国成,等. 真空回潮工序对造纸法再造烟叶的质量影响[J]. 郑州轻工业学院学报(自然科学版),2012,27(5):55-58.

[5] WANG L,WEN Y B,SUN D P. Study on the decrease of harmful substance in paper-process reconstituted tobacco sheet[C]//Advanced Manufacturing Technology. Part 3.: Trans Tech Publications,2011,314:2338-2343.

[6] 刘思芬,王春琼,彭丽娟,等. 造纸法再造烟叶质量监控技术开发应用[J]. 纸和造纸,2022,41(4):23-27.

[7] MCADAM K G,GREGG E O,LIU C,et al. The use of a novel tobacco-substitute sheet and smoke dilution to reduce toxicant yields in cigarette smoke[J]. Food and Chemical Toxicology: An International Journal Published for the British Industrial Biological Research, 2011, 49(8):1684-1696.

[8] 罗一鸣,张献英,何国兴. 造纸法再造烟叶加工技术分析[J]. 广东化工,2021,48(14):104-105.

[9] 王诗雨,张柯,王乐,等. 加热卷烟不同工艺再造烟叶等温干燥动力学研究[J]. 烟草科技,2021,54(9):80-89.

[10] 孙德坡,尚善斋,赵伟,等. 造纸法再造烟叶萃取和涂布液工艺研究综述[J]. 郑州轻工业学院学报(自然科学版),2014,29(6):17-21.

[11] 苏宗元. 几种纤维筛分仪的介绍[J]. 天津造纸,1987(2):23-27.

[12] 聂一平. 影响卷烟中一氧化碳量的几种因素[J]. 烟草科技,1999(2):26-28.

[13] 董浩,王澍,周明珠,等. 卷烟表观燃烧性能质量状况分析[J]. 烟草科技,2022,55(4):70-78.

[14] 薛洋. 再造烟叶低浓打浆工艺研究[J]. 企业技术开发(下半月),2016,35(18):9-10,13.

[15] 张婷婷,谢益民,瞿方,等. 烟梗混合打浆工艺的研究[J]. 湖北造纸,2012(3):62-64.

[16] 温洋兵,罗冲,胡惠仁,等. 改善造纸法烟草基片松厚度的研究[J]. 中国造纸,2012,31(4):30-33.

[17] 罗冲,温洋兵,胡惠仁,等. 制浆工艺对造纸法烟草薄片性质的影响[J]. 纸和造纸,2012,31(7):37-40.

[18] LI X K,ZHU H,CHEN Z Z,et al. Limit state Kriging modeling for reliability-based design optimization through clas-

- sification uncertainty quantification [J]. Reliability engineering & system safety, 2022, 224: 108539.
- [19] MI X, LIANG G, SHAO X Y, et al. A generalised collaborative optimisation method and its combination with Kriging metamodells for engineering design [J]. Journal of Engineering Design, 2012, 23(4/5/6): 379–399.
- [20] 王瑾婷. 基于 GC-MS、GC×GC-MS、ICP-MS 对辣椒中特征成分和特征元素的筛查方法研究[D]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2022.
- [21] 张忠元, 矫承轩, 桑涛, 等. 车身响应面模型参数的拉丁超立方采样仿真[J]. 计算机仿真, 2021, 38(7): 123–127.
- [22] 李晓科, 马军, 陈振中, 等. 基于继承拉丁超立方采样与局部 Kriging 近似的可靠性设计优化[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(12): 3107–3119.
- [23] ZHENG J, SHAO X Y, LIANG G, et al. A hybrid variable-fidelity global approximation modeling method combining tuned radial basis function base and Kriging correction [J]. Journal of Engineering Design, 2013, 24(7/9): 604–622.
- [24] LI X K, QIU H B, CHEN Z Z, et al. A local sampling method with variable radius for RBDO using Kriging[J]. Engineering Computations, 2015, 32(7): 1908–1933.
- [25] BYEONG-SOO K, YONG-BIN L, DONG-HOON C. Comparison study on the accuracy of metamodeling technique for non-convex functions[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009, 23(4): 1175–1181.
- [26] CHEN Z Z, QIU H B, GAO L, et al. A local adaptive sampling method for reliability-based design optimization using Kriging model[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2014, 49: 401–416.
- [27] 郭耀斌, 张文明, 张国芬. 基于蒙特卡罗法的螺旋锥齿轮接触疲劳可靠性分析[J]. 农业机械学报, 2008, 39(4): 157–159.
- [28] 王林军, 邓启程. 基于序列二次规划法的结构可靠度计算方法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018(11): 12–15.

Optimization of sieving process parameters for paper-based reconstituted tobacco based on Kriging model

LI Jin¹, LUO Chong¹, YAN Ying¹, MA Jianrong², LI Gaohui²

1. Henan Cigarette Industry Tobacco Sheet Co., Ltd, Xuchang 461000, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China

Abstract: In order to fully consider the random variation of sieving process parameters, this paper constructs the reliability-based optimization model for reconstituted tobacco process parameters, which taking the percentage of fibers below 12 mesh as the optimization objective, water flow rate and pulp concentration as the design parameters, and the percentage of fibers over 50 mesh as the probabilistic constraint. Firstly, the current process parameters are used as inheritance points for Latin hypercube sampling and screening experiments. Based on this, an initial Kriging model is constructed to fit the implicit relationship between water flow velocity, smoke slurry solid content, and the proportion of fiber mass below 12 mesh and above 50 mesh. And local adaptive sampling (LAS) was carried out to update the Kriging model to ensure the approximate accuracy of key positions at optimization iteration. Finally, Monte Carlo simulation (MCS)-Sequential quadratic programming (SQP) was used to solve the optimization model of screening process parameters. The results indicated that the optimized water flow rate and pulp concentration were 6.31 L/min and 0.53%, respectively. Under this process parameter, the proportion of fiber below 12 mesh was 13.72%, which was 7.19% higher than before optimization. The proportion of fibers over 50 mesh was 17.65%, which was a decrease of 4.13% compared to before optimization. This method could meet the optimization requirements of screening process parameters for paper making reconstituted tobacco leaves.

Key words: paper-based reconstituted tobacco; Kriging model; inheriting latin hypercube sampling; probabilistic constraint; local adaptive sampling

[责任编辑: 吴晓亭]