第35卷 第2期 石家庄铁道大学学报(自然科学版) Vol. 35 No. 2

2022年6月 Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition) Jun. 2022

基于响应面法的除沙料斗优化研究

郝腾达1, 高占凤2, 吴文江3

(1. 石家庄铁道大学 机械工程学院,河北 石家庄 050043;
2. 石家庄铁道大学 工程训练中心,河北 石家庄 050043;
3. 石家庄铁道大学 教务处,河北 石家庄 050043)

摘要:料斗作为除沙车最重要一部分,影响着清理积沙的效率。为了增大料斗式除沙车的 除沙量及降低最大除沙阻力,对料斗的工作参数进行响应面优化。首先,采用 Box-Benhnken 设 计方法对料斗转速、料斗张角及除沙深度等主要因素进行三因素三水平试验设计;然后,创建关 于响应目标的回归模型并进行方差分析;最后,分析各因素交互作用对响应目标的影响,通过响 应面法对料斗工作参数加以优化。结果表明,对响应目标影响程度从大到小依次为除沙深度、 斗张角与转速;当料斗转速为 25 r/min,料斗张角为 125°,除沙深度为 105 mm 时,除沙量达到最 优值 43.375 7 kg,最大除沙阻力达到最优值 335.135 N。该研究可对料斗式除沙车相关设计提 供参考。

关键词:料斗;试验设计;响应面法;参数优化

中图分类号: TH164 文献标志码: A 文章编号: 2095 - 0373 (2022) 02 - 0113 - 07

铁路作为提供火车等交通工具行驶的轨道线路,在中国占据重要地位,运营范围广泛。其中不乏有 分布在沙漠、戈壁等多风沙区域的西北地区,风沙来临时,堆积的沙粒会掩盖运输道路,产生道岔移动困 难、道床板结和道砟滑落等问题^[1],对列车的正常运行造成重大影响,因此,机械清理轨道集沙显得十分 必要。石家庄铁道大学自主研制了一款料斗式除沙车,可用于清理铁轨积沙,其料斗作为除沙车核心部 件,起着清理积沙的重要作用。中国对除沙车的优化研究较少,其中李晨阳等^[2]对自主设计的除沙车进 行研究,优化了集沙铲形状,提高了除沙效率;胡庆江^[3]对集沙铲进行响应面优化,集沙性能得到改善;郑 明军等^[4]对抛沙板进行参数优化,得到抛沙板最佳参数组合,但很少有关于料斗式除沙车的优化研究。

以单个集沙料斗为研究对象,选取在除沙过程中对料斗除沙量和最大工作阻力影响较大的料斗转速、料斗张角和集沙深度等为自变量,以除沙量和最大工作阻力为主要优化目标,基于 Design-Expert 软件建立回归模型,采用响应面法进行优化分析,最终确定料斗最优工作参数组合,以达到提高除沙效率目的。

1 总体结构与工作原理

料斗式除沙车主要由连接装置、集排沙装置、支撑装置、控制装置及行走装置组合而成,如图1所示。 工作原理如下:工作时,位于铁轨上的行走装置驱动整车前进,同时通过集沙装置上的料斗,使除沙车完 成集沙工作;集沙时,通过集沙装置上回转支承外圈的旋转运动带动料斗转动,进而使料斗与积沙完成切 割运动,实现清理沙粒目的,随着料斗转动到最高点,沙粒顺着挡沙板掉落在传送带上并输送到轨道两侧 实现排沙目的。料斗作为整车核心部件,其技术参数如表1所示。

收稿日期:2022-03-01 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j. cnki. sjztddxxbzrb. 20220026

基金项目:河北省自然科学基金(E2017210166)

作者简介:郝腾达(1997—),男,硕士研究生,研究方向为机械设计及理论。E-mail:243594432@qq.com

郝腾达,高占凤,吴文江.基于响应面法的除沙料斗优化研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2022,35(2):113-119.



表1 料斗主要技术参数

料斗宽度/mm	料斗张角/(°)	料斗转速/(r・min ⁻¹)	前进速度/(m・s ⁻¹)
1 327	128	20	1

2 料斗优化流程

料斗的优化流程如图 2 所示。首先,选取所要优化的工作参数,进行试验设计生成样本点;然后,拟合出响应目标和工作参数 的近似模型并进行精度检验;最后,对代理模型进行最优计算,生成最优参数组合并加以验证。

3 试验设计与回归模型的建立

3.1 试验设计方案与结果

除沙料斗的转速、料斗张角、除沙深度等工作因素及交互作用 直接影响着料斗的除沙量与最大工作阻力,选取以上工作参数为 优化变量,料斗的除沙量及除沙阻力作为评价指标,对除沙料斗进 行参数优化。Box-Behnken设计方法具备较少的试验次数及更为 可靠的试验保障,根据Box-Behnken中心组合试验设计理论^[5-6]对 料斗转速、料斗张角和集沙深度开展三因素三水平试验研究。目

前料斗转速为 20 r/min,根据当前料斗的参数对料斗转速的变化范围进行选取,若料斗转速过大,则沙粒 会由于较大的离心作用而扬出料斗,若料斗转速过小,则会降低整体的除沙效率,根据设备的多次试验仿 真,确定料斗转速为 15、20 及 25 r/min;目前料斗张角为 128°,若斗张角过小,会有较少的沙粒与料斗进 行切割作用,不利于进行大面积除沙,若斗张角过大,料斗由圆周切割转为竖直提升运动时会有大量沙粒 流失,根据设备的多次试验仿真,确定料斗张角为 120°、128°、136°;据测量,轨道道钉与铁轨表面的竖直距 离为 70 mm,考虑到轨道表面以上也会堆积沙粒,本次除沙深度参数选取 70、90、110 mm。根据以上料 斗工作参数的数值,在 Design-Expert 软件中建立如表 2 所示的因素编码表进行试验,其生成的试验样 本数据共 17 组,通过 EDEM 离散元仿真,将结果填写在 Design-Expert 样本数据中,试验结果如表 3 所示。

	工作参数				
小平 -	转速 A/(r・min ⁻¹)	斗张角 B/(°)	除沙深度 C/mm		
-1	15	120	70		
0	20	128	90		
1	25	136	110		

表 2 试验因素编码表



确认优化变量

序号	转速 $A/(r \cdot min^{-1})$	斗张角 B/(°)	除沙深度 C/mm	除沙量 M/kg	除沙阻力 <i>F</i> /N
1	-1	-1	0	37.736 7	339.5
2	-1	0	-1	19.373 1	195.8
3	0	0	0	31.845 2	252.4
4	1	-1	0	37.792 6	349.8
5	1	0	-1	24.595 5	217.5
6	0	1	1	38.059 6	537.8
7	-1	1	0	24.079 7	473.5
8	0	1	-1	18.556 4	170.2
9	0	-1	1	44.599 8	404.2
10	0	-1	-1	25.766 5	167.6
11	0	0	0	31.845 2	252.4
12	-1	0	1	36.507 7	287.1
13	0	0	0	31.845 2	252.4
14	1	0	1	44.818 6	353.2
15	0	0	0	31.845 2	252.4
16	1	1	0	31.350 6	329.6
17	0	0	0	31.845 2	252.4

表 3 试验设计结果

3.2 回归模型建立及方差分析

根据表 3 试验数据,在 Design-Expert 软件中建立编码值的多项式回归方程

 $M = 31.85 + 3.36A - 3.48B + 9.46C + 0.30AB + 0.77AC + 0.17BC - 0.51A^{2} - 0.092B^{2} - 7.90 \times 10^{-3}C^{2}$ (1)

F = 252.40 - 5.73A + 31.25B + 103.90C - 38.55AB + 11.10AC + 32.08A² + 88.63B² - 21.08C² (2) 式中, A 为料斗转速; B 为斗张角; C 为除沙深度; M 为除沙量; F 为最大除沙阻力。

对上述回归方程进行方差分析,其除沙量和最大除沙阻力方差分析如表4与表5所示。

方差来源 —					
	平方和	均方和	自由度	F	Р
Model	907.38	100.82	9	5 030.72	<0.000 1
Α	90.18	90.18	1	4 499.98	<0.0001
В	96.95	96.95	1	4 837.53	<0.0001
C	716.20	716.20	1	35 737.22	<0.0001
AB	0.37	0.37	1	18.42	0.003 6
AC	2.38	2.38	1	118.99	<0.0001
BC	0.11	0.11	1	5.60	0.049 9
A^2	1.11	1.11	1	55.42	0.000 1
B^2	0.035	0.035	1	1.77	0.225 4
C^2	2.628×10^{-4}	2.628 $\times 10^{-4}$	1	0.013	0.912 0
Residual	0.14	0.020	7		
Lack of Fit	0.14	0.047	3		
Pure Error	0.000	0.000	4		
Cor Total	907.52		16	—	—

表 4 除沙量方差分析表

方差来源						
	平方和	均方和	自由度	F	Р	
Model	1.448×10^{5}	16 089.85	9	4.70	0.026 8	
A	262.21	262.21	1	0.077	0.790 0	
В	7 812.50	7 812.50	1	2.28	0.174 7	
С	86 361.68	86 361.68	1	25.22	0.001 5	
AB	5 944.41	5 944.41	1	1.74	0.229 2	
AC	492.84	492.84	1	0.14	0.715 7	
BC	4 290.25	4 290.25	1	1.25	0.300 0	
A^2	4 331.81	4 331.81	1	1.26	0.297 8	
B^2	3 3071.12	33 071.12	1	9.66	0.017 1	
C^2	1 870.13	1 870.13	1	0.55	0.484 0	
Residual	23 974.94	3 424.99	7		—	
Lack of Fit	23 974.94	7 991.65	3		—	
Pure Error	0.000	0.000	4		—	
Cor Total	1.688×10^{5}	_	16		_	

表 5 除沙阻力方差分析表

方差分析能够表述设计变量与响应目标函数拟合的程度,依据方差分析表中的 P(Prob > F)值的大 小可验证回归模型拟合情况^[7], P 值代表了参数与响应拟合时存在的误差项,针对因子对 P 值的影响,当 P 值小于 0.01 时,该误差项很小,说明此参数影响异常显著; P 值小于 0.05 时,该误差项较小,此参数影 响较为显著,符合拟合要求; P 值大于 0.05 时,该误差项较大,此参数影响不显著,应剔除该参数后对模 型重新生成。决定系数 R^2 常用来作为检验模型拟合精度的一种常用指标,其表达式为

$$R^{2} = 1 - \sum_{i=1}^{n} (y_{i} - \hat{y})^{2} / \sum_{i=1}^{n} (y_{i} - \overline{y})^{2}$$
(3)

式中, \hat{y} 为模型的预测值; y_i 为响应面优化变量对应的实验值; \overline{y} 为实验值的均值。

由表 4 可知,除沙量 M 的回归模型 P 值小于 0.01,表明此模型极其显著;此模型决定系数 R^2 为 0.999 8,表示此模型可以解释说明 99%以上评价指标,可以用此模型进行分析和预测^[8];通过 F 值大小 可得知各变量对除沙量的影响顺序为 $C>B>A>AC>A^2>AB>BC>B^2>C^2$;此模型中参数项 A、B、 C、AB、AC、 A^2 对模型影响极其显著(P<0.01),BC 对模型显著(p<0.05),筛选掉对模型不显著项,对模 型 M 加大优化,其模型如式(4)所示,根据新模型 P<0.000 1 呈显著状态可知回归模型可靠。

 $M=31.80+3.36A-3.48B+9.46C+0.30AB+0.77AC+0.17BC-0.52A^2$ (4) 由表 5 可知,最大除沙阻力 F 的回归模型 P 值等于 0.026 8(P<0.05),表明此模型显著;此模型决定系 数 R^2 为 0.858 0,表示此模型可以解释说明 85%以上评价指标,可以用此模型对料斗受到的最大除沙阻力 进行优化;通过 F 值大小可得知各变量对最大除沙阻力的影响顺序为 $C>B^2>B>AB>A^2>BC>C^2>$ AC>A;此模型中参数项 C 对模型影响极其显著(P<0.01),C、 B^2 对模型显著(p<0.05),筛选掉对模型 不显著项,对模型 F 加大优化,其模型如式(5)所示,根据新模型 P=0.000 3 呈显著状态可知回归模型 可靠。

 $F = 257.29 + 31.25B + 103.90C + 89.24B^2$ (5)

4 各参数交互作用的响应面分析

在对参数的优化过程中,响应目标和参数变量往往具备复杂的函数关系,一般的函数模型很难进行 表达,而响应面模型可以近似代替真实模型并很好地反映设计变量与输出参数的复杂关系。响应曲面法 可以通过较少的试验组数,借助数学统计方法,建立较接近现实的多维复杂空间曲面,通过图形可以直观 观察各因素相互作用对响应值的影响程度^[9],使用响应曲面法进行优化可以很好地降低运行时间,提高 优化效率。用 Design-Expert 绘制料斗转速、斗张角和除沙深度对料斗除沙量 M 及最大除沙阻力 F 的响应面图,如图 3 所示。其中,等高线形状为椭圆形代表交互作用显著^[10]。



图 3 各因素对除沙量与最大除沙阻力的影响

图 3(a)、图 3(b)及图 3(c)的等高线为椭圆状态,表明斗张角、料斗转速及除沙深度交互作用明显。 图 3(a)为料斗张角和转速对除沙量交互作用的响应面图,从中可以看出,提升转速并且减小斗张角有利 于除沙量的增多。图 3(b)为除沙深度与转速对除沙量交互作用的响应面图,从中可以看出,除沙量的增 加可以通过增大除沙深度和提高料斗转速的方法实现。图 3(c)为除沙深度及料斗张角对除沙量交互作 用的响应面图,从中可以看出,通过增加除沙深度并减小料斗张角能够实现除沙量的增多。根据响应面 图各因素陡峭程度,能够得知各因素对除沙量的影响显著程度从大到小分别为:除沙深度、斗张角和转 速。这与除沙量的回归模型方差分析结果一致。

图 3(d)、图 3(e)及图 3(f)的等高线都不是椭圆状态,表明斗张角、料斗转速及除沙深度交互作用不显 著。图 3(d)为料斗张角和转速对料斗受到的最大除沙阻力交互作用的响应面图,从中可以看出,当料斗 转速一定时,除沙阻力随着斗张角的增大呈现先降后升走向;当斗张角一定时,除沙阻力随着料斗转速增 大先减小后增大,当斗张角位于 120°及 136°附近时,除沙阻力随着料斗转速增大分别呈现升高和降低走 势;当斗张角变化时,除沙阻力变化区间较大,斗张角对除沙阻力指标的影响更为显著。图 3(e)为除沙深

(6)

度和转速对料斗受到的最大除沙阻力交互作用的响应面图,从中可以看出,当料斗转速一定时,除沙阻力 随着除沙深度的增大而增大;当除沙深度一定时,料斗转速对除沙阻力影响没有显著变化;当除沙深度变 化时,除沙阻力的变化区间较大,除沙深度对除沙阻力指标的影响更为显著。图3(f)为斗张角和除沙深 度对料斗受到的最大除沙阻力交互作用的响应面图,从中可以看出,当斗张角一定时,除沙阻力随着除沙 深度增大而增大;当除沙深度一定时,除沙阻力随着斗张角增大先减小后增大;当除沙深度变化时,除沙 阻力的变化区间较大,除沙深度对除沙阻力指标的影响更为显著。根据响应面图各因素陡峭程度,能够 得知各因素对最大除沙阻力的影响显著程度从大到小分别为:除沙深度、斗张角和转速。这与除沙阻力 的回归模型方差分析结果一致。

5 料斗参数优化及验证

5.1 参数优化

为了更好地实现料斗除沙性能,在得到除沙量最多前提下,除沙阻力尽可能小,由于各参数对除沙量 和除沙阻力的影响趋势不同,因此为了得到最佳的参数方案,对所建立的除沙量 M 和除沙阻力 F 2 个响 应目标进行多目标优化,寻找最优参数解。其优化数学模型为

 $\begin{array}{l} \max M \\ \min F \\ \text{s. t. } 15 \leqslant A \leqslant 25 \\ 120 \leqslant B \leqslant 136 \\ 70 \leqslant C \leqslant 110 \end{array}$

在上述优化模型基础上,利用 Design-Expert 软件对料斗工作参数进行优化,得到料斗的最优参数组 合为:料斗转速为 25 r/min、料斗张角为 125.208°、除沙深度为 104.992 mm,此时料斗除沙量为 43.375 7 kg,除沙最大阻力为 335.135 N。

5.2 验证试验

将优化后的斗张角修正为 125°,除沙深度修正为 105 mm,利用此组合参数建立料斗集沙仿真模型, 对其进行模拟验证。验证结果如图 4 所示,料斗集沙量为 41.938 4 kg,料斗集沙最大阻力为 357.158 N, 两者结果与 Design-Expert 优化结果相差不大,误差分别为 3.3%和 6.5%,说明优化结果准确,可应用于 料斗工况参数。



6 结论

(1)根据 Box-Benhnken 设计方法,在 Design-Expert 软件中进行对料斗转速、料斗张角和除沙深度的 三因素三水平的正交试验,建立关于除沙量和最大除沙阻力的回归模型并进行回归检验,保证了拟合模 型的可行性。

(2)分析了不同变量参数的响应面交互作用及显著性程度,对料斗除沙量影响顺序为除沙深度>斗 张角>转速;对料斗受到的最大工作阻力影响顺序为除沙深度>斗张角>转速。 (3)利用 Design-Expert 软件的 Optimization 优化功能,得到料斗的最优工作参数组合,当料斗转速 为 25 r/min、料斗张角为 125°及除沙深度为 105 mm 时,料斗除沙量与所受最大阻力达到最优,分别为 43.375 7 kg 与 335.135 N。

(4)该优化方法能在较短试验时间内获取较高的优化效率,为进一步改善料斗式除沙车提供了理论 基础,具备一定意义。

参考文献

[1]程建军,蒋富强,杨印海,等.戈壁铁路沿线风沙灾害特征与挡风沙措施及功效研究[J].中国铁道科学,2010,31(5): 15-20.

[2]李晨阳,吴文江,王振兴.轨道除沙车集沙铲功耗分析与形状优化[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2017,30(4): 62-67.

[3] 胡庆江. 轨道除沙装置关键部件的结构分析及优化[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2018.

[4]郑明军,杨摄,吴文江,等.铁路轨道除沙车抛沙板参数优化[J].工程设计学报,2020,27(1):87-93.

[5]徐向宏,何明珠. 试验设计与 Design-Expert、SPSS 应用[M]. 北京:科学出版社,2010.

[6]茆诗松,周纪芗,陈颖. 试验设计[M]. 北京:中国统计出版社,2004.

[7]马清勇. SPS 烟囱结构轻量化设计及其力学性能研究[D]. 镇江:江苏科技大学,2020.

[8]武悦,王坤,牛广财,等.响应曲面法优化黑豆丹贝固体发酵条件的研究[J].中国调味品,2019,44(7):29-33.

[9]马川,杨铁滨,林文树,等.平贝收获机工作参数优化研究[J].中国农机化学报,2019,40(7):19-24.

[10]张俊. 基于离散元法的秸秆还田机仿真优化与试验研究[D]. 合肥:安徽农业大学,2018.

Optimization of Sand Removal Hopper Based on Response Surface Methodology

Hao Tengda¹, Gao Zhanfeng², Wu Wenjiang³

(1. School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Engineering Training Centre, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

3. Office of Academic Affairs, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: As the most important part of the sand removal truck, the hopper affects the efficiency of cleaning the sand, in order to increase the sand removal capacity of the hopper type sand removal truck and reduce the maximum sand removal resistance, the response surface optimization of the working parameters of the hopper was carried out. Firstly, the Box-Benhnken design method was used to carry out a three-factor and three-level experimental design for the main factors such as hopper rotation speed, hopper opening angle and sand removal depth, then created a regression model on the response target and perform ANOVA, finally, the influence of the interaction of various factors on the response target was analyzed, and the working parameters of the hopper were optimized by the response surface method. The results show: the degree of influence on the response target is in descending order of sand removal depth, bucket opening angle and rotational speed; when the speed of the hopper is 25 r/min, the opening angle of the hopper is 125°, and the sand removal depth is 105 mm, the sand removal amount reaches the optimal value of 43. 375 7 kg, and the maximum sand removal resistance reaches the optimal value of 335. 135 N. This research can provide a reference for the design of the hopper-type sand removal vehicle.

Key words: hopper; design of experiments; response surface methodology; parameter optimization