

陈立锋,张仕林,彭向前,等. 基于正交实验的输送带滚筒安装参数优化设计[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版),2020,35(1):71-76. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2020.01.010

Chen L F, Zhang S L, Peng X Q, et al. Optimization design of installation parameters of conveyor belt drum based on orthogonal experiment [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2020,35(1):71-76. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2020.01.010

# 基于正交实验的输送带滚筒安装参数 优化设计

陈立锋<sup>1\*</sup>,张仕林<sup>1</sup>,彭向前<sup>1</sup>,刘玲<sup>1</sup>,马水<sup>2</sup>

(1.湖南科技大学 机电工程学院,湖南 湘潭 411201;2.株洲市微朗科技有限公司,湖南 株洲 412007)

**摘要:**针对传统滚筒安装参数的选择缺乏理论支持的问题,对输送带滚筒安装参数进行了优化设计.考虑输送带实际安装情况,创建了滚筒和输送带的有限元模型,分析了输送带等效应力.以输送带最大等效应力最小为目标,以滚筒的安装参数变化范围为约束条件,建立了输送带滚筒安装参数优化模型.采用正交试验方法分析了4个安装参数对等效应力的影响,研究了不同滚筒安装参数对输送带等效应力影响程度,获得了输送带滚筒安装参数的优选方案,为输送带设计提供了数据参考.

**关键词:**安装参数;优化设计;正交试验;有限元法;输送带

**中图分类号:**TH132.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2020)01-0071-06

## Optimization Design of Installation Parameters of Conveyor Belt Drum Based on Orthogonal Experiment

Chen Lifeng<sup>1</sup>, Zhang Shilin<sup>1</sup>, Peng Xiangqian<sup>1</sup>, Liu Ling<sup>1</sup>, Ma Shui<sup>2</sup>

(1.School of Mechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2.Wavelane Technology Co., Ltd., Zhuzhou 412007, China)

**Abstract:** In view of the lack of theoretical support for the selection of traditional roller installation parameters, the installation parameters were optimized, that of conveyor belt roller. Considering the actual installation of the conveyor belt, the finite element model of the roller and conveyor belt was created and the equivalent stress of the conveyor belt was analyzed. Taking the maximum equivalent stress of the conveyor belt and the minimum as the objective, and taking the range of installed parameters of the roller as the constraint, the optimization model of installed parameters of the conveyor belt roller is established. By means of orthogonal experiment, the influence of the equivalent effect force of four installation parameters were analyzed, studied the influence degree of the equivalent stress of the conveyor belt with different installation parameters, and obtains the optimal selection scheme of the installation parameters of the conveyor belt roller, which provides data reference for the design of the conveyor belt.

**Keywords:** installation parameters; optimize the design; orthogonal test; finite element method; Conveyor belt

收稿日期:2018-07-01

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(51605158);湖南省战略性新兴产业科技攻关与重大科技成果转化项目(2018GK4013);湖南省自然科学基金资助项目(2018JJ3179)

\*通信作者,E-mail: hnustchen@163.com

带式输送机相对其他散状物料连续输送设备具有可靠性强,安全性高,输送成本低等优点<sup>[1-2]</sup>,其中输送带的使用寿命是制约其使用的主要因素,因此为提高输送带的使用寿命,需要选取合理的滚筒安装参数.另一方面,传统的滚筒安装参数主要是查阅相关手册或凭借工作经验进行选择,其结果可能导致输送带在张紧状态下的等效应力幅值比较大,因此本文研究输送带安装参数对输送带等效应力的影响具有较大的研究价值.

开展输送带系统结构强度的研究首先要确定输送带系统中各部件的模型,国内外针对输送带的动态特性使用输送带的粘弹性模型进行了较为深入的研究<sup>[3-4]</sup>,对于输送带的静态结构强度的研究则需使用输送带的有限元模型即可<sup>[5]</sup>.

输送带结构强度的影响因素包括结构参数和安装参数等,目前,国内外对基于结构强度的传动滚筒结构优化设计进行了大量的研究,获得了一些有理论指导意义的成果,但从安装角度研究输送带强度的变化规律鲜见报道.

陈清华<sup>[6]</sup>使用 COSMOS WORKS 研究滚筒壁厚对带式输送机传动滚筒静结构强度的影响,指出加强肋和加强环有利于降低滚筒焊缝处应力集中水平.程刚<sup>[7]</sup>通过灵敏度分析方法对传动滚筒的 4 个结构尺寸参数进行分析,获得所选结构尺寸参数对滚筒质量、应力和位移的影响规律.程相文<sup>[8]</sup>采用灵敏度分析方法指出滚筒辐板间距和筒体厚度是影响滚筒静结构强度的重要影响参数.刘铁钢<sup>[9]</sup>研究了加强环数量和尺寸对滚筒结构强度的影响,得到了滚筒最优结构形式和加强环参数值.于玉真<sup>[10]</sup>通过灵敏度分析发现筒壳厚度相对筋板厚度、辐板厚度而言对滚筒的综合力学特性影响大,使用 Design Exploration 模块对其进行多目标优化分析,使滚筒力学性能得到了显著提高.

由于输送带安装参数多,因此如何合理设计和优化安装参数是输送带设计的难点之一.在优化目标函数未确定的情况下,传统优化方法难以进行有效优化,而实验设计 DOE 分析方法可以克服此困难,因而可在实验设计分析方法(DOE)中选取合适的分析方法可以实现滚筒安装参数的优化设计.

现阶段根据实验设计点的选取可将实验设计方法分为响应面分析方法、完全因子设计、部分因子设计和正交试验方法<sup>[11]</sup>等.其中部分因子设计、完全因子设计和正交试验分析方法一般用于在较多因素中寻找显著因素的分析,也可用于优化水平设计;响应面分析法一般在其他分析方法使用完成后对其中的 2~3 个显著因素进行回归分析,利用拟合的回归曲线进行优化设计.考虑到正交试验方法不仅能使试验的次数减少,而且能够用直观分析、方差分析、主成分分析和回归分析等方法对试验结果进行分析并引出许多有价值的结论,因此本文拟采用正交试验方法研究安装参数对输送带强度的影响.

本文首先对单个安装位置的有限元模型进行分析,然后考虑到输送机滚筒安装参数比较多、安装参数变化范围比较大,因而采用正交试验表安排正交仿真实验.通过极差分析和主效应分析找到了一定范围内输送带安装参数的最优组合,从而降低输送带应力幅值.通过方差分析得到各安装参数对输送带等效应力的影响程度,找到输送带最大等效应力的主要影响因素,为进一步使用响应面法分析奠定基础.

## 1 单个滚筒安装位置的有限元模型分析

在对文献[11-12]研究的基础上,根据滚筒和托辊及输送带的空间结构特点(如图 1 所示),在 ANSYS workbench 的 DM 组件中完成了几何模型的创建,并按照表 1 将材料属性赋予对应零件几何体.基于 ANSYS 分析平台,使用多域网格划分方法和扫略网格划分法对装配体进行网格划分,在接触区域进行加密处理以提高接触区域的网格质量,构建的有限元模型如图 2 所示.

表 1 模型材料属性表

| 零件  | 材料    | 密度/(kg/m <sup>3</sup> ) | 杨氏模量/Pa             | 泊松比 |
|-----|-------|-------------------------|---------------------|-----|
| 输送带 | 聚四氟乙烯 | 2 100                   | 1.7×10 <sup>9</sup> | 0.4 |
| 滚筒  | 45 号钢 | 7 850                   | 2×10 <sup>11</sup>  | 0.3 |
| 托辊  | 45 号钢 | 7 850                   | 2×10 <sup>11</sup>  | 0.3 |

根据零件的运动关系,建立滚筒与机架的旋转副,在滚筒上施加角速度来模拟滚筒的旋转运动;根据滚筒、托辊与输送带的接触特点,分别以输送带作为目标面施加摩擦系数为 0.4 和 0.1 的接触对;考虑到重力的影响,对该模型施加重力加速度作为惯性载荷;考虑到输送带的张紧状态,给输送带上端施加了 5 mm 的轴向位移约束,下端施加轴向固定约束;考虑输送带的大变形影响,在分析设置的 Solver Controls 区域中将 Large Deflection 下拉列表设置为 on 选项.图 3 为安装参数取  $[x_1, x_2, x_3, x_4] = [150, 210, 300, 100]$  时,输送带的等效应力分布图.

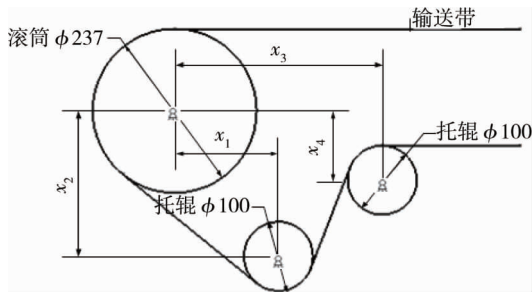


图 1 滚筒安装位置及设计尺寸

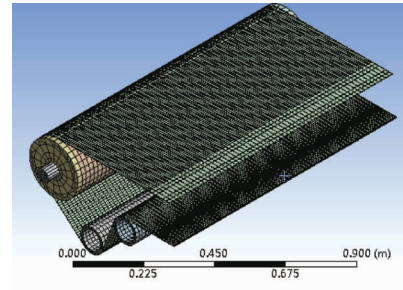


图 2 有限元网格

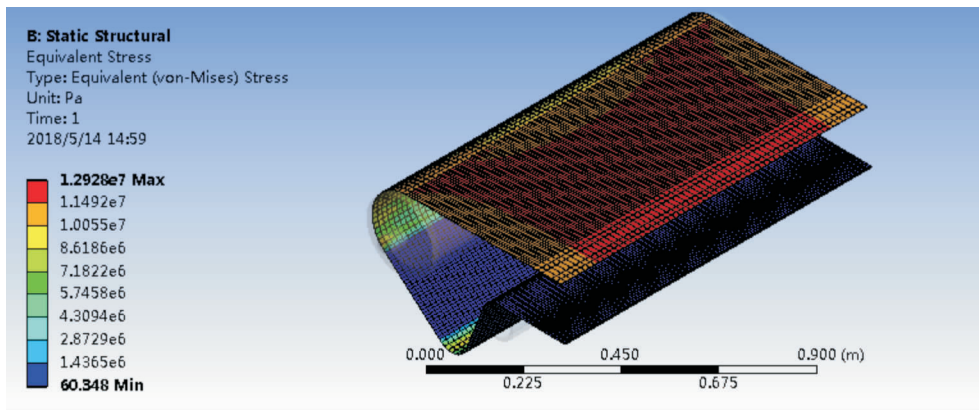


图 3 输送带等效应力

## 2 基于正交实验的滚筒安装参数优化

根据输送带安装在托辊和滚筒上的特点,明确设计变量为 4 个安装参数(如图 1 所示),优化变量为  $\mathbf{X} = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T$ , 优化函数为输送带最大等效应力记为  $\sigma_{\max}$ , 优化模型为

$$\begin{aligned} \min \quad & f(\mathbf{X}) = \sigma_{\max}; \\ \text{s.t.} \quad & g_1(\mathbf{X}) = 150 - x_1 \leq 0; \\ & g_2(\mathbf{X}) = x_1 - 200 \leq 0; \\ & g_3(\mathbf{X}) = 210 - x_2 \leq 0; \\ & g_4(\mathbf{X}) = x_2 - 260 \leq 0; \\ & g_5(\mathbf{X}) = 300 - x_3 \leq 0; \\ & g_6(\mathbf{X}) = x_3 - 350 \leq 0; \\ & g_7(\mathbf{X}) = 100 - x_4 \leq 0; \\ & g_8(\mathbf{X}) = x_4 - 150 \leq 0. \end{aligned}$$

考虑到输送机滚筒安装参数变化范围比较大,采用水平数为 5 且不考虑交互作用的正交试验表进行优化设计,不同水平下的因子数值根据式(1)确定,优化设计因子水平表如表 2 所示.

$$x_{ji} = x_{j\min} + (i - 1) \frac{(x_{j\max} - x_{j\min})}{5 - 1}, \begin{cases} j \text{ 为变量数, } j = 1, 2, 3, 4; \\ i \text{ 为水平数, } i = 1, 2, 3, 4, 5. \end{cases} \quad (1)$$

表2 优化设计因子水平表

| 变量/mm | 水平 1 | 水平 2  | 水平 3 | 水平 4  | 水平 5 |
|-------|------|-------|------|-------|------|
| $x_1$ | 150  | 162.5 | 175  | 187.5 | 200  |
| $x_2$ | 210  | 222.5 | 235  | 247.5 | 260  |
| $x_3$ | 300  | 312.5 | 325  | 337.5 | 350  |
| $x_4$ | 100  | 112.5 | 125  | 137.5 | 150  |

基于有限元分析方法可以得到单参数下输送带各节点的等效应力的最大值  $y_i$ , 据此可以创建 4 因素 5 水平的正交实验表, 正交试验结果如表 3 所示。

表3 正交试验结果统计表

| 仿真序号 | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $x_4$ | $y_i/\text{MPa}$ | $y_i^2$   |
|------|-------|-------|-------|-------|------------------|-----------|
| 1    | 162.5 | 222.5 | 337.5 | 112.5 | 12.166           | 148.011 5 |
| 2    | 200.0 | 210.0 | 312.5 | 112.5 | 12.616           | 159.163 4 |
| 3    | 187.5 | 210.0 | 325.0 | 125.0 | 12.538           | 157.201 4 |
| 4    | 150.0 | 222.5 | 35.0  | 125.0 | 12.048           | 145.154 3 |
| 5    | 175.0 | 210.0 | 337.5 | 137.5 | 12.392           | 153.561 6 |
| 6    | 162.5 | 235.0 | 325.0 | 137.5 | 12.080           | 145.926 4 |
| 7    | 187.5 | 222.5 | 312.5 | 150.0 | 12.540           | 157.251 6 |
| 8    | 200.0 | 222.5 | 300.0 | 137.5 | 11.975           | 143.400 6 |
| 9    | 200.0 | 247.5 | 337.5 | 125.0 | 12.653           | 160.098 4 |
| 10   | 187.5 | 247.5 | 350.0 | 137.5 | 12.317           | 151.708 4 |
| 11   | 175.0 | 247.5 | 300.0 | 150.0 | 12.244           | 149.915 5 |
| 12   | 162.5 | 247.5 | 312.5 | 100.0 | 12.192           | 148.644 8 |
| 13   | 162.5 | 210.0 | 350.0 | 150.0 | 12.399           | 153.735 2 |
| 14   | 187.5 | 235.0 | 300.0 | 112.5 | 12.149           | 147.598 2 |
| 15   | 150.0 | 235.0 | 337.5 | 150.0 | 12.173           | 148.181 9 |
| 16   | 150.0 | 210.0 | 300.0 | 100.0 | 12.328           | 151.979 5 |
| 17   | 175.0 | 222.5 | 325.0 | 100.0 | 12.568           | 157.954 6 |
| 18   | 200.0 | 260.0 | 325.0 | 150.0 | 12.416           | 154.157 0 |
| 19   | 150.0 | 247.5 | 325.0 | 112.5 | 12.276           | 150.700 1 |
| 20   | 175.0 | 260.0 | 350.0 | 112.5 | 12.286           | 150.945 7 |
| 21   | 162.5 | 260.0 | 300.0 | 125.0 | 11.997           | 143.928 0 |
| 22   | 187.5 | 260.0 | 337.5 | 100.0 | 12.250           | 150.062 5 |
| 23   | 200.0 | 235.0 | 350.0 | 100.0 | 12.560           | 157.753 6 |
| 24   | 150.0 | 260.0 | 312.5 | 137.5 | 12.276           | 150.700 1 |
| 25   | 175.0 | 235.0 | 312.5 | 125.0 | 12.455           | 155.127 0 |

由表 3 可以看出, 第 8 组安装参数下输送带的最大等效应力最小, 为探讨正交试验中第 8 组安装参数是否为正交试验中的最优参数组合, 需对表 3 的数据进行极差分析和主效应分析。极差分析的分析结果见表 4 所示,  $K_i$  为优化变量取水平  $i$  时 5 组实验结果  $y_i$  之和,  $\bar{K}_i = K_i/5$  为优化变量取水平  $i$  时 5 组实验结果  $y_i$  的平均值, 其中  $i=1, 2, 3, 4, 5$ 。

根据极差分析表, 创建了各变量对输送带最大等效应力的主效应图, 各优化变量的主效应图如图 4 所示, 从主效应分析的角度可以看出, 为使输送带最大等效应力最小, 各变量参数值应选取为  $[x_1, x_2, x_3, x_4] = [150, 235, 350, 112.5]$ , 根据该优化参数结果, 对输送带最大等效应力进行分析, 可得到  $y_i$  为 12.102 MPa, 大于正交试验第 8 组的 11.975 MPa, 这说明基于正交试验得到的优化模型参数为局部最优参数, 其值为  $[x_1, x_2, x_3, x_4] = [150, 235, 300, 137.5]$ 。在优化参数的取值范围内, 第 8 组优化参数下的最大等效应力比其他安装参数下的计算结果降低幅值最多达到了 0.678 MPa, 应力幅值降低了 5%。

表 4 正交试验极差表

| 项目/MPa              | $x_1$    | $x_2$    | $x_3$    | $x_4$    |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|
| $K_1$               | 61.101 0 | 62.273 0 | 60.693 0 | 61.898 0 |
| $K_2$               | 60.834 0 | 61.297 0 | 62.079 0 | 61.493 0 |
| $K_3$               | 61.945 0 | 61.417 0 | 61.878 0 | 61.691 0 |
| $K_4$               | 61.794 0 | 61.682 0 | 61.634 0 | 61.040 0 |
| $K_5$               | 62.220 0 | 61.225 0 | 61.610 0 | 61.772 0 |
| $\bar{K}_1 = K_1/5$ | 12.220 2 | 12.454 6 | 12.138 6 | 12.379 6 |
| $\bar{K}_2 = K_2/5$ | 12.166 8 | 12.259 4 | 12.415 8 | 12.298 6 |
| $\bar{K}_3 = K_3/5$ | 12.389 0 | 12.283 4 | 12.375 6 | 12.338 2 |
| $\bar{K}_4 = K_4/5$ | 12.358 8 | 12.336 4 | 12.326 8 | 12.208 0 |
| $\bar{K}_5 = K_5/5$ | 12.444 0 | 12.245 0 | 12.322 0 | 12.354 4 |
| 极差 $R$              | 0.277 2  | 0.209 6  | 0.277 2  | 0.171 6  |

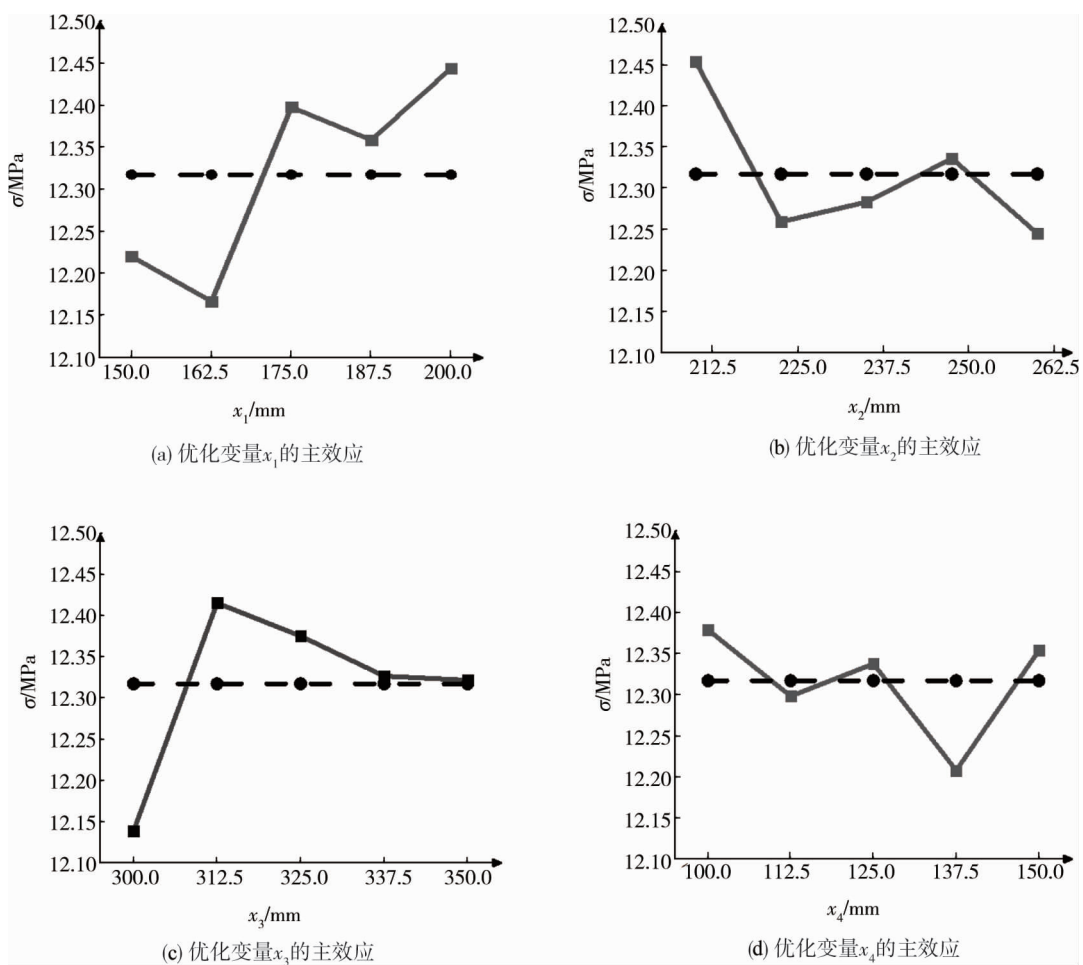


图 4 各优化变量的主效应

通过正交试验,得到了一定范围内的最优安装参数组合,如需得全局范围内的安装参数最优组合,需要采用响应面分析方法.过多的优化变量将会导致计算量的增加,常规的响应面分析法选取 2~3 个优化变量.通过方差分析可得到各变量对计算结果的影响程度,据此确定响应面分析方法的优化变量.为确定各优化变量对输送带最大等效应力的影响程度,对正交分析表 3 中的数据进行方差分析,方差分析的计算方法如表 5 所示.

将正交试验结果代入到表 5 得到  $F_{x_1} = 3.080 9, F_{x_2} = 1.621 2, F_{x_3} = 2.529 1, F_{x_4} = 1.007 4$ , 显著性检验的临界值为  $F_{0.25}(4, 8) = 1.66, F_{0.1}(4, 8) = 2.81, F_{0.05}(4, 8) = 3.84, F_{0.01}(4, 8) = 7.01$ . 通过对  $F$  值与临界值比

较分析可知,  $x_1$  对输送带最大等效应力的影响比较显著,  $x_2$  对输送带最大等效应力的影响次之,  $x_3$  对输送带最大等效应力的影响不显著,  $x_4$  对输送带最大等效应力的影响最小. 由此可见,  $x_1$  和  $x_2$  为输送带最大等效应力的主要影响因素, 在进行响应面法分析时, 只需对  $x_1$  和  $x_2$  进行响应面法分析即可.

表5 方差分析计算公式

| 来源     | 偏差平方和     | 自由度   | 均方值                           | F 值                       |
|--------|-----------|---|-------------------------------|---------------------------|
| $x_1$  | $S_{x_1}$ | $f_{x_1} = r - 1$                                     | $V_{x_1} = S_{x_1} / f_{x_1}$ | $F_{x_1} = V_{x_1} / V_e$ |
| $x_2$  | $S_{x_2}$ | $f_{x_2} = r - 1$                                     | $V_{x_2} = S_{x_2} / f_{x_2}$ | $F_{x_2} = V_{x_2} / V_e$ |
| $x_3$  | $S_{x_3}$ | $f_{x_3} = r - 1$                                     | $V_{x_3} = S_{x_3} / f_{x_3}$ | $F_{x_3} = V_{x_3} / V_e$ |
| $x_4$  | $S_{x_4}$ | $f_{x_4} = r - 1$                                     | $V_{x_4} = S_{x_4} / f_{x_4}$ | $F_{x_4} = V_{x_4} / V_e$ |
| 误差 $e$ | $S_e$     | $f_e = f_T - (f_{x_1} + f_{x_2} + f_{x_3} + f_{x_4})$ | $V_e = S_e / f_e$             |                           |
| 总和     | $S_T$     | $f_T = n - 1$   |                               |                           |

### 3 结论

1) 以输送带的最大等效应力最小为优化目标, 建立了安装参数的优化模型, 使用正交试验方法确定了安装参数 4 因素 5 水平的因子水平值, 确定了正交试验方案.

2) 在建立滚筒与输送带装配体有限元模型的基础上, 分析了不同滚筒安装参数下输送带等效应力分布情况.

3) 基于有限元分析结果, 利用正交试验法的直观分析方法, 得到了 1 组比较优化的安装参数的水平组合, 水平组合为  $[x_1, x_2, x_3, x_4] = [200, 222.5, 300, 137.5]$ , 其最大等效应力比其他安装参数下的计算结果降低幅值最多达到了 0.678 MPa, 应力幅值降低了 5%.

4) 通过正交试验的方差分析发现,  $x_1$  和  $x_2$  为输送带最大等效应力的主要影响因素, 为后续输送带全局最优安装参数的确定奠定了基础.

### 参考文献:

- [1] Imai A. Pipe conveyor development, benchmark and future trend [J]. Bulk Solid Handling, 2015, 20(2): 1-9.
- [2] Nie R, He B Y, Yuan P, et al. Novel approach to and implementation of design and analysis of armored face conveyor power train [J]. Science China Technological Sciences, 2015, 58(12): 2153-2168.
- [3] Rudolphi T J, Reicks A V. The importance of non-linear strain consideration in belt conveyor indentation loss [J]. Bulk Solids Handling, 2012, 32(2): 52-57.
- [4] Rudolphi T J, Reicks A V. Viscoelastic indentation and resistance to motion of conveyor belts using a generalized Maxwell model of the backing material [J]. Rubber chemistry and technology, 2006, 79(2): 307-319.
- [5] Molnár V, Fedorko G, Stehlíková B, et al. Analysis of asymmetrical effect of tension forces in conveyor belt on the idler roll contact forces in the idler housing [J]. Measurement, 2014, 52: 22-32.
- [6] 陈清华, 潘地林. 带式输送机传动滚筒的有限元分析及其优化设计 [J]. 煤矿机械, 2004(1): 12-15.
- [7] 程刚, 郭永存, 胡坤. 基于 Pro/E 带式输送机传动滚筒相关参数灵敏度分析 [J]. 煤矿机械, 2012, 33(1): 89-91.
- [8] 程相文, 刘钊, 魏荣. 基于 ANSYS Workbench 带式输送机传动滚筒的多目标优化设计 [J]. 矿山机械, 2013, 41(3): 70-73.
- [9] 刘铁钢. 传动滚筒筒体结构有限元分析 [D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [10] 于玉真, 王飞, 董小雷, 等. 基于 ANSYS 传动滚筒的结构改进及优化 [J]. 机械传动, 2016, 40(6): 86-89.
- [11] 吕辉, 于德介, 谢展, 等. 基于响应面法的汽车盘式制动器稳定性优化设计 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(9): 55-60.
- [12] 刘玲. 基于有限元分析的带式输送机滚筒中加强环的研究 [J]. 煤矿机械, 2015, 36(12): 176-178.
- [13] 张文强, 宾光富, 李学军, 等. 基于有限元模型的圆管带式输送机传动滚筒结构力学特性分析 [J]. 机械传动, 2017, 41(4): 110-114.