

梳齿式滤袋折叠机设计与参数优化试验

向瞿烱¹, 刘星亮¹, 鲁灵捷¹, 迟德霞¹, 钟小焯¹, 杜沛松¹, 关甄宇²

¹辽宁石油化工大学机械工程学院, 辽宁 抚顺

²辽宁石油化工大学体育学院, 辽宁 抚顺

收稿日期: 2024年9月8日; 录用日期: 2024年10月1日; 发布日期: 2024年10月8日

摘要

本文针对人工折叠滤袋劳动强度大、生产率低等问题, 设计了一种滤袋的自动折叠机。首先对梳齿式滤袋折叠机进行了方案设计和结构设计, 对梳齿式滤袋折叠机折叠滤袋的过程进行了几何分析; 开展了下压气缸输入压强、滤袋材质、下压气缸杆运行速度对下压气缸对滤袋推力的影响因素的三因素三水平正交试验。极差分析结果表明: 下压气缸对滤袋推力的影响最大组合为A₁B₃C₃, 下压气缸对滤袋推力值为94.5 N; 下压气缸对滤袋推力值最小组合为A₃B₂C₁, 下压气缸对滤袋推力值为20.2 N。方差分析结果表明: 下压气缸输入压强和滤袋材质对下压气缸对滤袋推力的影响显著, 下压气缸杆运行速度对下压气缸对滤袋推力的影响不显著。试验结果为滤袋折叠机的设计和开发提供了理论依据。

关键词

除尘滤袋, 梳齿式, 滤袋折叠机

Design and Parameter Optimization Test of Comb-Type Filter Bag Folding Machine

Quhui Xiang¹, Xingliang Liu¹, Lingjie Lu¹, Dexia Chi¹, Xiaoye Zhong¹, Peisong Du¹, Zhenyu Guan²

¹College of Mechanical Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun Liaoning

²College of Physical Education, Liaoning Petrochemical University, Fushun Liaoning

Received: Sep. 8th, 2024; accepted: Oct. 1st, 2024; published: Oct. 8th, 2024

Abstract

This paper addresses issues such as the high labor intensity and low productivity associated with manually folding filter bags and proposes the design of an automatic filter bag folding machine. Initially, a conceptual and structural design was carried out for a comb-type filter bag folding machine,

文章引用: 向瞿烱, 刘星亮, 鲁灵捷, 迟德霞, 钟小焯, 杜沛松, 关甄宇. 梳齿式滤袋折叠机设计与参数优化试验[J]. 机械工程与技术, 2024, 13(5): 432-439. DOI: 10.12677/met.2024.135050

and a geometric analysis was performed on the filter bag folding process of the comb-type folding machine. A three-factor, three-level orthogonal experiment was conducted to examine the effects of the input pressure of the pressing cylinder, the filter bag material, and the operating speed of the pressing cylinder rod on the thrust exerted by the pressing cylinder on the filter bag. The range analysis results indicate that the combination producing the maximum thrust on the filter bag by the pressing cylinder is $A_1B_3C_3$, with a thrust value of 94.5 N. Conversely, the combination yielding the minimum thrust is $A_3B_2C_1$, with a thrust value of 20.2 N. The variance analysis results show that the input pressure of the pressing cylinder and the filter bag material significantly affect the thrust exerted by the pressing cylinder on the filter bag, while the operating speed of the pressing cylinder rod does not have a significant impact. The experimental results provide a theoretical basis for the design and development of the filter bag folding machine.

Keywords

Dust Filter Bag, Comb Type, Filter Bag Folding Machine

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

除尘滤袋是袋式除尘器中的核心部件,除尘滤袋由纤维织物等材料编织而成,利用颗粒自重、静电吸附、纤维空隙过滤等方式达到气体净化的目的,在我国每年消耗大约 6000 万条[1]。滤袋长度通常为 1~12 米,滤袋折叠主要依靠人工完成,工人需要在十多米的工作台往返两三趟才能折叠一条滤袋,工人劳动强度高、效率低,滤袋折叠尺寸不一致。因此,研发一种适用于大尺寸、全种类滤袋的自动折叠机具有重要意义。

在滤袋折叠研究方面发表的文献不多,现整理了关于毛巾、布料、薄膜等折叠方面的研究,为滤袋折叠机研究提供理论借鉴。Chaos Xiaoxun 等人研究了旋转曲面的分割、映射和折叠方法,开发了一种新的折叠方法对具有旋转面的复杂织物进行模拟[2]。P.M. Liyanage 等人研究了用于膜的改进螺旋折叠模式,可用于任意多边形模块,这种折叠的空间占用率较低[3]。Sachiko Ishida 研究了可展开非轴对称管的规则折叠模式,可用于生产展开的环形管[4]。张国忠等人针对混凝土泵车布料结构的折叠方式进行了分析,提出卷绕型结构在空间上占用量小,Z 型结构具有快速展开和收回的优点[5]。徐彦等人针对可展开薄膜结构折叠方式和展开过程进行了研究,结果表明叶内折叠展开时间较长,叶外折叠方式最为平稳、平面度也较高[6]。刘敏慧等人针对 CAB 不同折叠方式及展开状态进行了研究,仿真结果表明在 X 方向上全 Z 的折叠方法最好[7]。

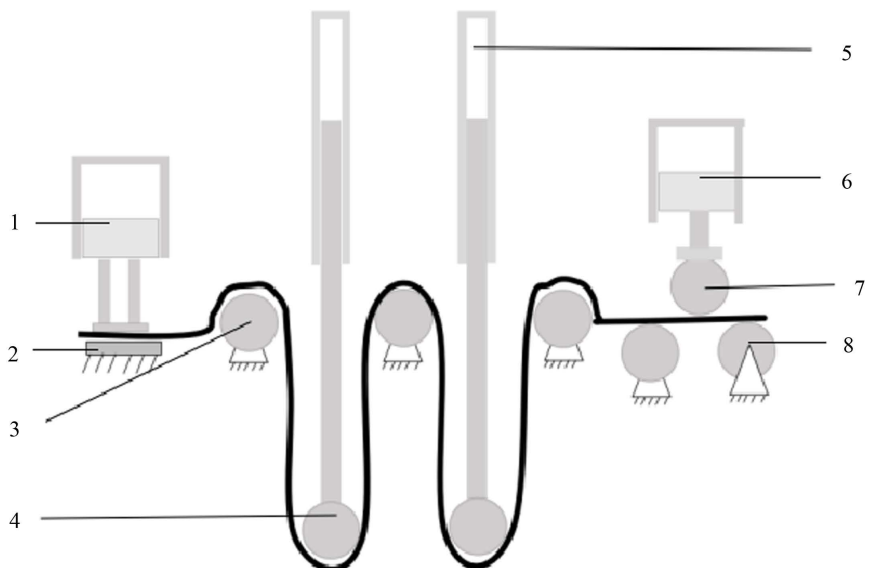
本研究拟设计一种滤袋的自动折叠机,先对梳齿式滤袋折叠机进行了方案设计和结构设计,对梳齿式滤袋折叠机折叠滤袋的过程进行了几何学分析;然后开展下压气缸输入压强、滤袋材质、下压气缸杆运行速度对下压气缸对滤袋推力试验。

2. 梳齿式滤袋折叠机设计

2.1. 梳齿式滤袋折叠机方案设计

梳齿式滤袋折叠机结构为平整装置、夹紧装置、折叠装置、推出装置和机架等组成,如图 1 所示。首先,夹紧气缸 1 与夹紧横梁 2 共同完成对滤袋夹紧,使得滤袋折叠的时候固定一端,另一端能够随着

折叠而移动；平整气缸 6 杆上安装有平整移动滚筒，滤袋在平整移动滚筒和平整固定滚筒中通过，挤出滤袋中的空气、抚平滤袋褶皱、单次翻转滤袋等作用。最后下压气缸杆 5 上安装有下压移动滚筒 4，滤袋在下压移动滚筒和下压固定滚筒形成的力下完成折叠，通过增减下压气缸数量达到对不同长度滤袋折叠。

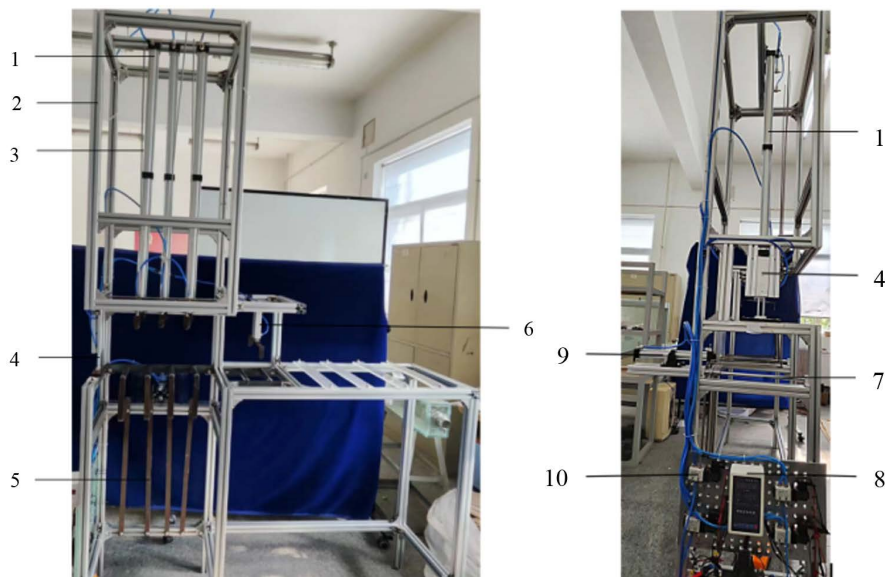


1. 夹紧气缸、2. 夹紧横梁、3. 下压固定滚筒、4. 下压移动滚筒、5. 下压气缸、6. 平整气缸、7. 平整移动滚筒、8. 平整固定滚筒

Figure 1. Folding principle of comb-type filter bag folding machine

图 1. 梳齿式滤袋折叠机折叠原理

2.2. 梳齿式滤袋折叠机结构设计



1. 下压气缸、2. 机架、3. 光轴、4. 夹紧气缸、5. 支架、6. 平整气缸、7. 横向光轴、8. 气缸控制器、9. 推出气缸、10. 电磁阀

Figure 2. Prototype of comb-type filter bag folding machine

图 2. 梳齿式滤袋折叠机样机

梳齿式滤袋折叠机结构包括平整装置、夹紧装置、折叠装置、推出装置和机架。平整装置包括平整气缸、平整气缸内牙滚筒等；夹紧装置包括夹紧气缸、夹紧气缸推板；折叠装置包括下压气缸、移动内牙滚筒等；推出装置包括推出气缸、推板、光轴等。梳齿式滤袋折叠机结构三视图如图 2 所示。

2.3. 折叠滤袋过程的几何学分析

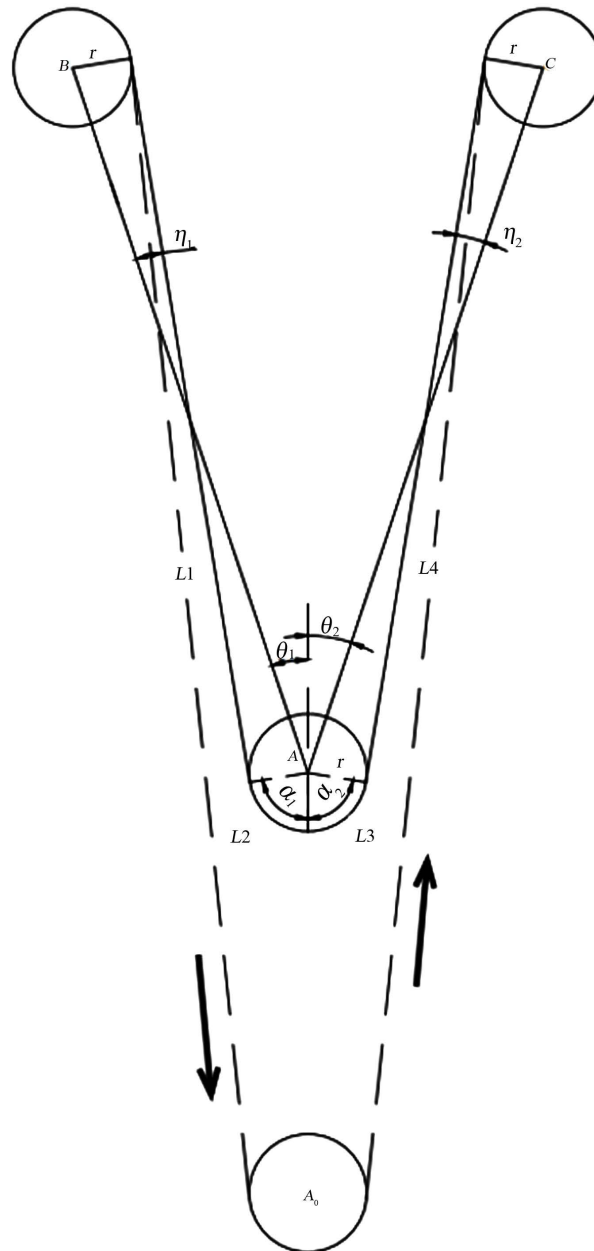


Figure 3. The position diagram of the moving inner tooth roller and the fixed inner tooth roller

图 3. 移动内牙滚筒与固定内牙滚筒的位置示意图

如图 3 为移动内牙滚筒与固定内牙滚筒的位置示意图，设 A_0 为坐标原点， A 点坐标为 (x_A, y_A) B 点坐标为 (x_B, y_B) ， C 点坐标为 (x_C, y_C) 滤袋与下压滚筒组件的左右包角分别为 α_1 ， α_2 ，固定滚筒与下压滚筒的半

径均为 r ，故将滤袋分为四大段[8]， BA 段滤袋的长度、滤袋左包角对应的滤袋长度、袋右包角对应的滤袋长度、 AC 段滤袋的长度分别是 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 。

$$L_{AB} = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2}, \quad \sin \eta_1 = \frac{2r}{L_{AB}},$$

式中， L_{AB} 为 AB 段长度， η_1 为 AB 中心点连线与 AB 切线夹角。

BA 段滤袋的长度为：

$$L_1 = L_{AB} \cos \eta_1 = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2} - 4r^2 \quad (1)$$

$$\theta_1 = \arctan \left[\frac{(y_B - y_A)}{(x_B - x_A)} \right] \quad (2)$$

式中， θ_1 为原点 A_0 垂线与 AB 中心点连线夹角。

滤袋左包角

$$\alpha_1 = \pi - \left(\frac{\pi}{2} - \eta_1 \right) - \theta_1 = \frac{\pi}{2} + \eta_1 - \theta_1 \quad (3)$$

$$\alpha_1 = \left[\frac{\pi}{2} + \arcsin \left(\frac{2r}{\sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2}} - \arctan \left(\frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} \right) \right) \right]$$

式中， α_1 为 A 处左边包边对应角度。

滤袋左包角对应的滤袋长度为：

$$L_2 = r\alpha_1 = r \left(\frac{\pi}{2} + \eta_1 - \theta_1 \right) \quad (4)$$

$$\theta_2 = \arctan \left[\frac{(y_C - y_A)}{(x_C - x_A)} \right] \quad (5)$$

式中， θ_2 为原点 A_0 垂线与 AC 中心点连线夹角。

滤袋右包角

$$\alpha_2 = \pi - \left(\frac{\pi}{2} - \eta_2 \right) - \theta_2 = \frac{\pi}{2} + \eta_2 - \theta_2 \quad (6)$$

式中， α_2 为 A 处右边包边对应角度。

$$\alpha_2 = \left[\frac{\pi}{2} + \arcsin \left(\frac{2r}{\sqrt{(x_C - x_A)^2 + (y_C - y_A)^2}} - \arctan \left(\frac{y_C - y_A}{x_C - x_A} \right) \right) \right]$$

滤袋右包角对应的滤袋长度为：

$$L_3 = r\alpha_2 = r \left(\frac{\pi}{2} + \eta_2 - \theta_2 \right) \quad (7)$$

式中， η_2 为 AC 中心点连线与 AC 切线夹角

$$L_{AC} = \sqrt{(x_C - x_A)^2 + (y_C - y_A)^2}, \quad \sin \eta_2 = \frac{2r}{L_{AC}}$$

AC 段滤袋的长度为：

$$L_4 = L_{AC} \cos \eta_2 = \sqrt{(x_C - x_A)^2 + (y_C - y_A)^2} - 4r^2 \quad (8)$$

联立(式 1)、(式 4)、(式 7)、(式 8)得滤袋总长度 L 为：

$$\begin{aligned}
L &= L_1 + L_2 + L_3 + L_4 = L_{AB} \cos \eta_1 + r \left(\frac{\pi}{2} + \eta_1 - \theta_1 \right) + r \left(\frac{\pi}{2} + \eta_2 - \theta_2 \right) + L_{AC} \cos \eta_2 \\
&= r \left[\frac{\pi}{2} + \arcsin \left(2r / \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2} - \arctan (y_B - y_A) / (x_B - x_A) \right) \right] \\
&\quad + r \left[\frac{\pi}{2} + \arcsin \left(2r / \sqrt{(x_C - x_A)^2 + (y_C - y_A)^2} - \arctan (y_C - y_A) / (x_C - x_A) \right) \right] \\
&\quad + \sqrt{(x_C - x_A)^2 + (y_C - y_A)^2 - 4r^2} + \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 - 4r^2}
\end{aligned} \tag{9}$$

3. 下压气缸对滤袋推力影响因素试验

3.1. 正交试验因素及水平的选取

为了分析气缸输入压强、滤袋材质、下压气缸杆运行速度等因素对下压气缸运行时阻力，即折叠滤袋时下压气缸对滤袋的作用力，开展正交试验。影响因素分别为下压气缸输入压强、滤袋材质、下压气缸杆运行速度，分别用 A、B、C 表示，根据工厂生产的实际状况确定各因素的水平，其值如表 1 所示。

Table 1. Orthogonal test factors and level table

表 1. 正交试验因素及水平表

编码水平	因素		
	下压气缸输入压强 A/(MPa)	滤袋材质 B	下压气缸杆运行速度 C/(m/s)
1	0.30	1	0.20
2	0.40	2	0.25
3	0.50	3	0.30

3.2. 极差分析

Table 2. Pressure cylinder to filter bag thrust range analysis table

表 2. 下压气缸对滤袋推力极差分析表

项	因素		
	下压气缸输入压强 A/(MPa)	滤袋材质 B	下压气缸杆运行速度 C/(m/s)
水平 1	0.30	1	0.20
水平 2	0.40	2	0.25
水平 3	0.50	3	0.30
K1	802.1	974.4	922.9
K2	794.8	376.2	523.4
K3	506.8	753.1	657.4
1 水平平均值 k1	72.92	64.96	57.68
2 水平平均值 k2	66.23	34.20	58.16
3 水平平均值 k3	38.98	75.31	59.76
极差 R	33.93	41.11	2.08
主次因素	BAC		
影响最大组合	A ₁ B ₃ C ₃		

经对下压气缸对滤袋推力影响因素做极差分析[9]，结果如表 2 所示，对下压气缸对滤袋推力影响从大到小依次为滤袋材质、下压气缸输入压强、下压气缸杆运行速度。下压气缸对滤袋推力的影响最大组合为 A₁B₃C₃，即下压气缸输入压强为 0.30 MPa，滤袋材质为 P84，下压气缸杆运行速度为 0.30 m/s，下压气缸对滤袋推力值为 94.5 N；下压气缸对滤袋推力值最小为 20.2 N，组合为 A₃B₂C₁，即下压气缸输入压强为 0.50 MPa，滤袋材质为 PTFE 覆膜，下压气缸杆运行速度为 0.20 m/s。由图 4 可知，当下压气缸输入压强逐渐增大，对下压气缸对滤袋推力的影响反而减小。滤袋材质 3 对滤袋推力的影响最大，材质 1 次之，材质 2 最小。

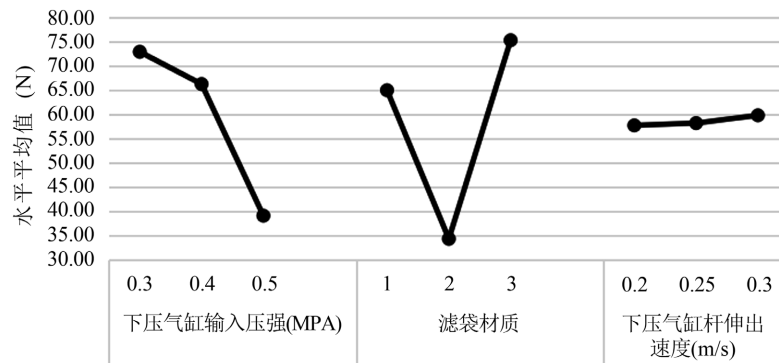


Figure 4. Pressure cylinder to filter bag thrust range analysis table

图 4. 下压气缸对滤袋推力极差分析表

3.3. 方差分析

Table 3. Pressure cylinder to filter bag thrust variance analysis table

表 3. 下压气缸对滤袋推力方差分析表

源	III 类平方和	自由度	均方	F	显著性
修正模型	16806.230a	26	646.393	99.798	0.000
截距	106323.936	1	106323.936	16415.521	0.000
A	3850.194	2	1925.097	297.219	0.000
B	9435.468	2	4717.734	728.378	0.000
C	32.549	2	16.275	2.513	0.136
B*C	124.320	4	31.080	4.798	0.024
A*C	129.715	4	32.429	5.007	0.021
A*B	1190.302	4	297.576	45.943	0.000
A*B*C	288.988	8	36.123	5.577	0.009
误差	58.293	9	6.477		
总计	139796.570	36			
修正后总计	16864.523	35			

a. R² = 0.997 (调整后 R² = 0.987)

注：A 为下压气缸输入压强，B 为滤袋材质，C 为下压气缸杆运行速度。

对下压气缸对滤袋推力影响因素作方差分析[10]，结果如表 3 所示，通过主体间的效应分析来判断单

因素和多因素对下压气缸对滤袋推力的影响程度。从表 3 可知, 下压气缸输入压强和滤袋材质对下压气缸对滤袋推力的影响显著, 其 p 值均小于 0.05; 下压气缸杆运行速度对下压气缸对滤袋推力的影响不显著, p 值大于 0.05。在两因素共同作用下, 下压气缸输入压强和滤袋材质、下压气缸输入压强和下压气缸杆运行速度、下压气缸杆运行速度和滤袋材质、三种因素共同作用下均对下压气缸对滤袋推力的影响显著, p 值均小于 0.05。通过 F 值可以看出对下压气缸对滤袋推力影响最大的单因素为滤袋材质。通过 F 值可知两种因素共同作用下, 下压气缸输入压强和滤袋材质对下压气缸对滤袋推力影响最大, 其次为下压气缸输入压强和下压气缸杆运行速度, 下压气缸杆运行速度和滤袋材质对下压气缸对滤袋推力影响最小。

4. 结论

本研究设计了一台梳齿式滤袋折叠机, 对滤袋折叠过程进行了几何学分析。开展了下压气缸输入压强、滤袋材质、下压气缸杆运行速度对下压气缸对滤袋推力影响的三因素三水平正交试验。极差分析结果表明: 下压气缸对滤袋推力最大值组合为 $A_1B_3C_3$, 推力值为 94.5 N; 下压气缸对滤袋推力值最小组合为 $A_3B_2C_1$, 推力值为 20.2 N。方差分析结果表明: 下压气缸输入压强和滤袋材质对下压气缸对滤袋推力的影响显著, 气缸杆运行速度对下压气缸对滤袋推力的影响不显著。

基金项目

2023 年大学生创新创业训练计划项目, 项目编号 202310148007。

参考文献

- [1] 柳静献, 毛宁, 孙熙, 等. 我国袋式除尘技术历史、现状与发展趋势综述[J]. 中国环保产业, 2022(1): 47-58.
- [2] Zhao, X., Yu, L., Yang, X. and Zhang, S. (2019) Segmentation Mapping and Folding Method of Surfaces of Revolution and Its Applications. *Engineering Computations*, **36**, 1305-1322. <https://doi.org/10.1108/ec-06-2018-0271>
- [3] Liyanage, P.M., Gangasudan, N. and Mallikarachchi, H.M.Y.C. (2021) Modified Spiral Folding Pattern for Deployable Membranes. *Aerospace Science and Technology*, **117**, Article 106926. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.106926>
- [4] Ishida, S., Nojima, T. and Hagiwara, I. (2015) Regular Folding Pattern for Deployable Nonaxisymmetric Tubes. *Journal of Mechanical Design*, **137**, Article 091402. <https://doi.org/10.1115/1.4031070>
- [5] 张国忠, 周淑文, 姜雪梅. 混凝土泵车臂架布料机构及其运动学仿真方法的研究[J]. 沈阳大学学报, 2004, 16(6): 27-31.
- [6] 徐彦, 关富玲. 可展开薄膜结构折叠方式和展开过程研究[J]. 工程力学, 2008, 25(5): 176-181.
- [7] 刘敏慧, 韩芳, 王明. CAB 不同折叠方式及展开状态研究[J]. 汽车实用术, 2021, 46(14): 51-52, 128.
- [8] 周春雷. 柔性膜非连续放卷系统张力控制建模、仿真及实验[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [9] 周磊, 李金乐, 卞玲玲, 等. 螺旋槽丝锥切削性能影响因素分析[J]. 工具技术, 2023, 57(6): 38-41.
- [10] 李宝强, 张众垚, 孔景临, 等. 基于方差分析的质谱性能影响因素量化研究[J]. 质谱学报, 2020, 41(5): 435-442.