

基于Kriging模型的双密封圈竹节接头多目标优化

王 艳,王金凯

(上海科创职业技术学院智能制造学院,上海 201620)

摘 要: 为研究双密封圈竹节接头多目标优化,建立了2D有限元模型。利用材料双折线塑性本构、Mooney-Rivlin5橡胶本构,生成 L_{25} 正交试验仿真数据,拟合Kriging高斯回归模型。探究接头端面外径(x_1)、密封槽外径(x_2)、竹节外径(x_3)、密封槽宽度(x_4)、竹节端部直线段(x_5)5个参数与插入力(y_1)、最大接触应力(y_2)、接头最大等效应力(y_3)、竹节头密封有效接触宽度(y_4)的关系。结果表明: x_1 、 x_3 、 x_5 对 y_4 最为敏感。交互作用显示, x_5 在中值时, y_4 随 x_1 、 x_3 的增大呈显著单调上升趋势。 x_3 在中值时, y_4 随 x_1 增大和 x_5 减小而增加。 x_1 在中值时, y_4 随 x_3 增大和 x_5 减小而增加。利用加权求和遗传算法多目标寻优,优化结果分别为: $y_1=902.72$ N, $y_2=54.18$ MPa, $y_3=16.69$ MPa, $y_4=2.30$ mm。最优解 $x_1=19.00$ mm, $x_2=22.20$ mm, $x_3=25.20$ mm, $x_4=2.10$ mm, $x_5=0.84$ mm。与原始数据相比,多目标优化后 y_1 增加5.86%, y_2 增加13.66%, y_3 降低24.24%, y_4 增加12.75%。

关键词: 双密封圈竹节接头;Kriging模型;正交试验;有效接触宽度;加权求和遗传算法

中图分类号: TQ320.5

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)07-0181-06

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.07.033

Multi-objective Optimization of a Double-seal Spigot Joint Based on Kriging Model

WANG Yan, WANG Jinkai

(College of Intelligent Manufacturing, Shanghai Technical and Innovation Vocational College, Shanghai 201620, China)

Abstract: To study the multi-objective optimization of the double-seal spigot joint, a 2D finite element model was established. The bilinear plastic constitutive model for materials and the Mooney-Rivlin 5-parameter rubber constitutive model were employed to generate L_{25} orthogonal experimental simulation data, based on which the Kriging Gaussian regression model was fitted. The relationships between five parameters—the end face outer diameter of the joint (x_1), the outer diameter of the seal groove (x_2), the outer diameter of the bamboo joint (x_3), the width of the seal groove (x_4), and the straight segment at the end of the bamboo joint (x_5)—and four responses—the insertion force (y_1), the maximum contact stress (y_2), the maximum equivalent stress of the joint (y_3), and the effective contact width of the bamboo joint seal (y_4)—were investigated. The results showed that x_1 , x_3 , and x_5 were the most sensitive to y_4 . Interaction analysis revealed that when x_5 was at its median value, y_4 increased significantly and monotonically with increasing x_1 and x_3 . When x_3 was at its median value, y_4 increased with increasing x_1 and decreasing x_5 . When x_1 was at its median value, y_4 increased with increasing x_3 and decreasing x_5 . Multi-objective optimization was performed using the weighted sum genetic algorithm. The optimized results were as follows: $y_1=902.72$ N, $y_2=54.18$ MPa, $y_3=16.69$ MPa, and $y_4=2.30$ mm. The optimal solution was $x_1=19.00$ mm, $x_2=22.20$ mm, $x_3=25.20$ mm, $x_4=2.10$ mm, and $x_5=0.84$ mm. Compared with the original data, the multi-objective optimization achieved a 5.86% increase in y_1 , a 13.66% increase in y_2 , a 24.24% decrease in y_3 , and a 12.75% increase in y_4 .

Keywords: Double-seal spigot joint; Kriging model; Orthogonal test; Effective contact width; WeightedSum-GA

管路接头是新能源汽车和储能冷却系统介质传输的重要载体,主要用于连接冷板以冷却电池电芯。其因便捷

性、安全性及轻量化等优势在上述场景中大量使用,一旦发生泄漏将造成不可挽回的损失,甚至威胁人员安全,因

收稿日期 Submitted date 2026-01-29; 修回日期 Revised date 2026-02-15; 录用日期 Accepted date 2026-03-26

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52475063); 上海市松江区科普项目(2025SJKPW005)

联系人, wy1530567647@126.com

引用本文: 王艳,王金凯. 基于Kriging模型的双密封圈竹节接头多目标优化[J]. 塑料科技, 2026, 54(7): 181-186.

Citation: WANG Y, WANG J K. Multi-objective optimization of a double-seal spigot joint based on kriging model[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(7): 181-186.

此密封性能至关重要。研究人员对此开展大量研究并取得一定成果。许玉涵等^[1]对两种阴接头型梁氏管路连接结构进行优化设计与密封性能对比。结果表明,椭圆凹槽型阴接头的 S 指数较双锥面型阴接头高64%。夏芝玮等^[2]分析带装配偏差下的飞机管路连接件密封性能,发现正轴向偏差对密封性能影响最大。钱进等^[3]对管路连接件粗糙表面进行接触力学与密封性能分析,得到接触表面达到密封所需的最小接触应力值。杜双言等^[4]评估角度误差下管路连接结构的装配及密封性能,指出角度偏差增大时密封环宽度不断减小。夏芝玮等^[5]基于有限元计算代理对飞机液压系统管路密封性能进行评估,结果表明,轴向偏差由负向正增加时,密封性能趋于改善。张旭等^[6]将仿真分析与试验验证,研究飞机管路连接件装配偏差对密封性的影响,发现轴向偏差会降低密封性,径向偏差则影响较小。

本文以双密封圈竹节接头为研究对象,该接头具有较高的可靠性,在装配过程中可形成多处密封区域,实现密封冗余设计。本文基于五参数 L_{25} 正交试验^[7],通过ANSYS有限元分析拟合插入力、最大接触应力、接头最大等效应力及有效接触宽度等4个目标的Kriging响应面函数,拟合优度均大于90%。随后采用加权求和遗传算法(Weighted Sum-GA)进行多目标寻优,获得最优解,并通过解析解与仿真验证了结果的准确性,最终实现了双密封圈竹节接头管路装配过程的多目标优化。

1 Kriging 模型

Kriging^[8-10]常用的相关模型包括高斯函数、线性函数和指数函数等。本文采用高斯过程回归模型,数学表达式为:

$$\hat{y}(x) = \mu + k(x)^T K^{-1}(y - \mu \cdot 1) \quad (1)$$

式(1)中: $\hat{y}(x)$ 为预测值; x 为输入变量; μ 为全局均值项(模型估计的常数趋势); K 为协方差矩阵(由核函数生成); $k(x)$ 为新点与样本点的协方差向量; y 为样本的真实响应值; 1 为 n 维全1列向量; T 为向量/矩阵转置。

协方差函数为:

$$k(x_i, x_j) = \sigma_f^2 \exp\left(-\sum_{k=1}^n \frac{(x_{ik} - x_{jk})^2}{2l_k^2}\right) \quad (2)$$

式(2)中: l_k 为第 k 个输入的长度尺度; σ_f 为信号方差,控制整体波动幅度; i, j 为样本点编号。

2 建立数值分析模型

2.1 几何模型

图1为3D剖面模型。从图1可以看出,模型包括管路、接头、密封圈^[11-12]。管路内径为 F ,外径为 H 。密封圈线径为 O 。接头端部到第一密封圈槽端部距离为 L_1 ,到第二密封圈槽端部距离为 L_2 ,到竹节端部距离为 L_3 。接头端部外径为 x_1 ,密封槽外径为 x_2 ,竹节外径为 x_3 ,密封槽宽度为 x_4 ,竹节端部连接直线段为 x_5 。根据企业设计规范, F 为21 mm, H 为24 mm, M 为16 mm, L_1 为7.8 mm, L_2 为19 mm,

L_3 为34 mm。

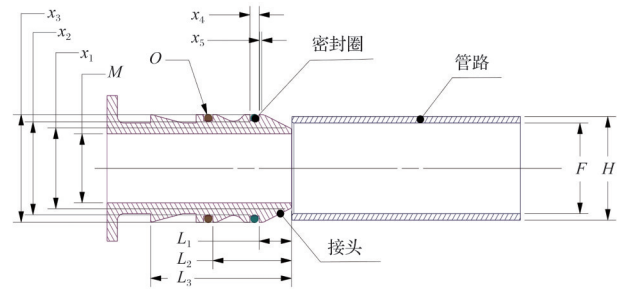


图1 3D剖面模型

Fig.1 3D sectional model

2.2 力学模型

2.2.1 材料参数

本研究管路材料为聚酰胺12(PA12),采用双折线塑性模型^[13]。图2为PA12塑性段真实应力-应变数据^[14]。橡胶采用Mooney-Rivlin^[15]模型描述三元乙丙橡胶(EPDM)的超弹性行为。该模型适用于应变小于35%的工况,其不可压缩应变能函数^[16]为:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{02}(I_2 - 3)^2 + 1/D(J - 1)^2 \quad (3)$$

式(3)中: W 为不可压缩应变能; C_{10} 为低应变刚度项; C_{01} 为中等应变硬化项; C_{20} 为高应变拉伸硬化项; C_{11} 为高阶耦合项; C_{02} 为高应变压缩剪切项; I_1, I_2 为变形不变量,描述材料变形; D 为体积压缩刚度项; J 为弹性体积比。

根据单轴拉伸数据,拟合得到以下数据。 $C_{10}=9.5224 \times 10^5$ Pa, $C_{01}=1.4623 \times 10^5$ Pa, $C_{20}=27870$ Pa, $C_{11}=1.1307 \times 10^5$ Pa, $C_{02}=95622$ Pa, 橡胶不可压缩, $J=1$ 。表1为管路接头材料的力学性能。

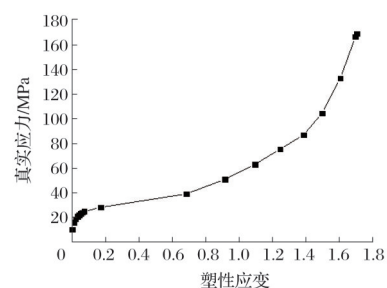


图2 PA12塑性段真实应力-应变数据

Fig.2 True stress-strain data of PA12 in plastic region

表1 管路接头材料的力学性能

Tab.1 Mechanical properties of pipeline joint materials

结构	材料	弹性模量/MPa	泊松比	屈服强度/MPa
管路	PA12	794	0.43	24.1
接头	聚酰胺66(PA66)	7500	0.35	135

2.2.2 有限元分析模型

基于Ansys2021 R1版本仿真环境建立2D轴对称模型。将接头与管路、管路与密封圈之间的摩擦因数设为0.1。六面体网格,单元类型为SOLID185,网格尺寸为

0.1 mm。进行网格无关性验证。

管路插入接头的过程为:接头支座端面固定,管路端面施加位移载荷插入 45 mm。因密封圈与密封槽有初始过盈,在第一步接触设置 APDL 命令流 keyopt,cid,9,2,让其实现自过盈。整个插入过程表现为非常强烈的接触非线性、材料非线性。图 3 为 2D 有限元模型。

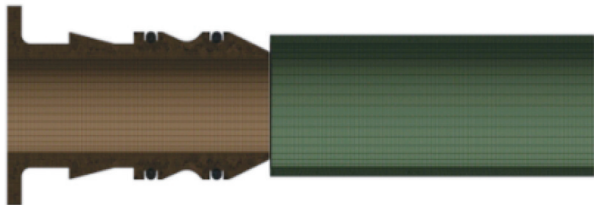


图 3 2D 有限元模型

Fig.3 2D finite element model

3 结果与讨论

3.1 有限元结果分析

密封圈过盈配合嵌在密封槽上,管路插入竹节的过程先沿着导向结构缓慢向上,此时管路发生严重的大变形,有明显塑性屈服,当达到竹节最大外径时接触应力最大,随后管路接触密封圈将其从槽中间位置向边缘挤压,从而增大密封圈的密封性能。再继续插入,因为竹节的杉树状结构设计,利用材料的弹塑性性能向内收缩从而增加接触应力,实现密封冗余设计。图 4 为装配应力、管路应力、接头应力、接触应力云图。从图 4a 可以看出,密封圈凹槽的直角边缘最大应力为 54.530 MPa,此为应力奇异点,数值不可取。接头最大应力在第一个密封圈凹槽奇点的边缘区域,数值为 18.180 MPa。从图 4b 可以看出,应力最大位置分布在接头导向位置,最大应力为 24.282 MPa。通过图 4d 可见接头、管路、密封圈之间的接触应力^[17]。一般认为,接触应力越大密封性能越好。工程上流体介质工作压力 200 kPa,考虑到各种因素的影响,安全系数推荐值 7.5 倍以上,也就是接触应力达到 1.500 MPa 以上。图上显示为红色区域,共有两段,第一段为管路 with 接头在前端导向的接触,接触应力较大且接触宽度也较长;第二段为管路与密封圈的接触。

表 2 为有限元分析结果。插入力、最大接触应力、接头最大等效应力以及竹节头密封有效接触宽度分别对应变量 $y_1(x)$ 、 $y_2(x)$ 、 $y_3(x)$ 和 $y_4(x)$ [以下简称 y_1 、 y_2 、 y_3 、 y_4]。4 个响应分别对应 4 个独立的 Kriging 模型,输入参数 $X=[x_1,x_2,x_3,x_4,x_5]$,预测方程为:

$$\hat{y}(x)=\mu+\sum_{i=1}^{25} \alpha_i \cdot \exp \left(-\sum_{k=1}^5 \frac{\left(x_{ik}-x_{jk}\right)^2}{2 l_k^2}\right)$$
 (4)

图 5 为 y_1 、 y_2 、 y_3 的双轴图。从图 5 可以看出, y_1 最大值是管路越过竹节头斜坡第一高点时产生,然后 y_1 逐渐降低,后面 y_1 由两个次高点峰值并不是密封圈产生,而是接头后面两处竹节结构造成。从接触应力曲线可以看到, y_2

与 y_1 最大值位于同一点,后续接触应力基本无波动趋于平衡。当管路在接头斜坡爬坡过程中时, y_3 就已经趋于平衡且并未越过斜坡最高点。

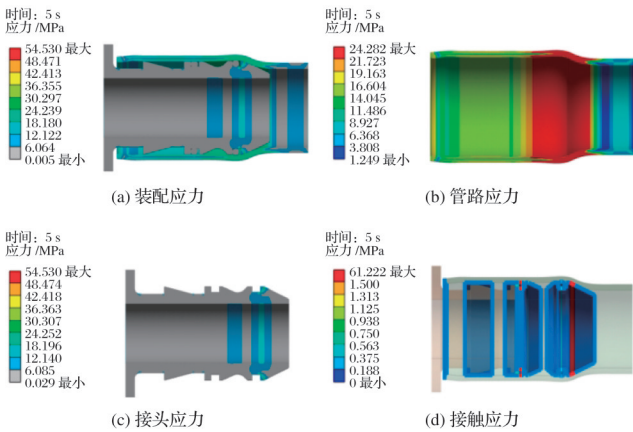


图 4 装配应力、管路应力、接头应力和接触应力云图

Fig.4 Contour plots of assembly stress, pipeline stress, joint stress and contact stress

表 2 有限元分析结果

Tab.2 Finite element analysis results

x_1 / mm	x_2 / mm	x_3 / mm	x_4 / mm	x_5 / mm	y_1 / N	y_2 / MPa	y_3 / MPa	y_4 / mm
18.3	21.8	24.6	2.0	0.5	791.9	43.3	22.2	1.39
18.3	21.9	24.8	2.1	0.7	839.2	62.1	20.1	1.39
18.3	22.0	25.0	2.2	0.9	888.2	61.2	18.2	1.52
18.3	22.1	25.2	2.3	1.1	875.1	44.9	16.9	1.65
18.3	22.2	25.4	2.4	1.3	922.1	41.0	16.2	1.65
18.5	21.8	24.8	2.2	1.1	827.9	45.9	16.7	1.30
18.5	21.9	25.0	2.3	1.3	862.5	44.5	15.6	1.39
18.5	22.0	25.2	2.4	0.5	909.5	39.3	21.6	2.28
18.5	22.1	25.4	2.0	0.7	923.1	40.3	20.1	2.32
18.5	22.2	24.6	2.1	0.9	826.8	65.3	16.0	1.26
18.7	21.8	25.0	2.4	0.7	838.8	45.6	19.9	2.15
18.7	21.9	25.2	2.0	0.9	876.8	41.9	18.5	2.15
18.7	22.0	25.4	2.1	1.1	911.5	40.8	16.4	2.15
18.7	22.1	24.6	2.2	1.3	825.6	51.3	13.1	1.07
18.7	22.2	24.8	2.3	0.5	809.9	44.7	19.1	2.02
18.9	21.8	25.2	2.1	1.3	875.1	44.2	15.7	2.06
18.9	21.9	25.4	2.2	0.5	922.4	46.3	21.6	2.14
18.9	22.0	24.6	2.3	0.7	801.3	55.8	17.7	1.93
18.9	22.1	24.8	2.4	0.9	855.5	53.3	16.0	2.02
18.9	22.2	25.0	2.0	1.1	878.5	62.2	14.7	2.04
19.1	21.8	25.4	2.3	0.9	940.3	58.1	17.4	2.05
19.1	21.9	24.6	2.4	1.1	815.7	51.5	14.8	1.80
19.1	22.0	24.8	2.0	1.3	808.2	41.3	13.5	1.84
19.1	22.1	25.0	2.1	0.5	884.9	57.4	19.3	2.11
19.1	22.2	25.2	2.2	0.7	908.6	52.9	17.6	2.25

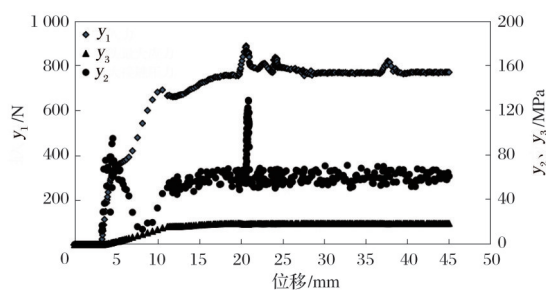
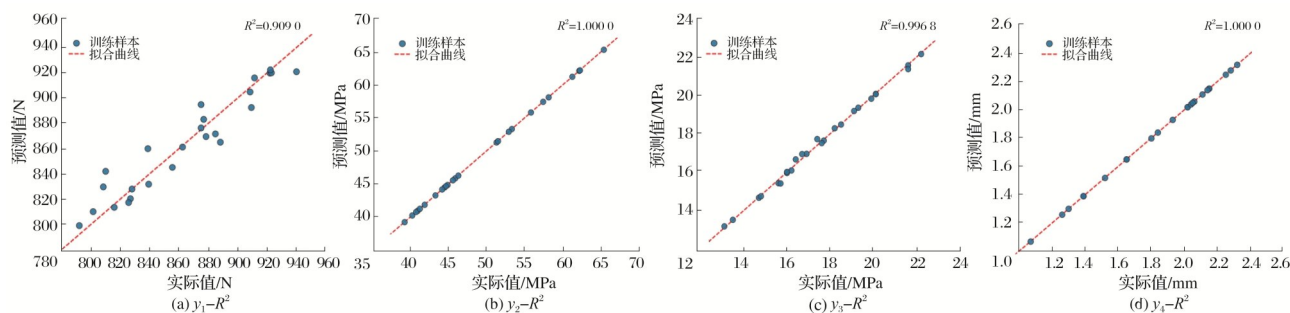
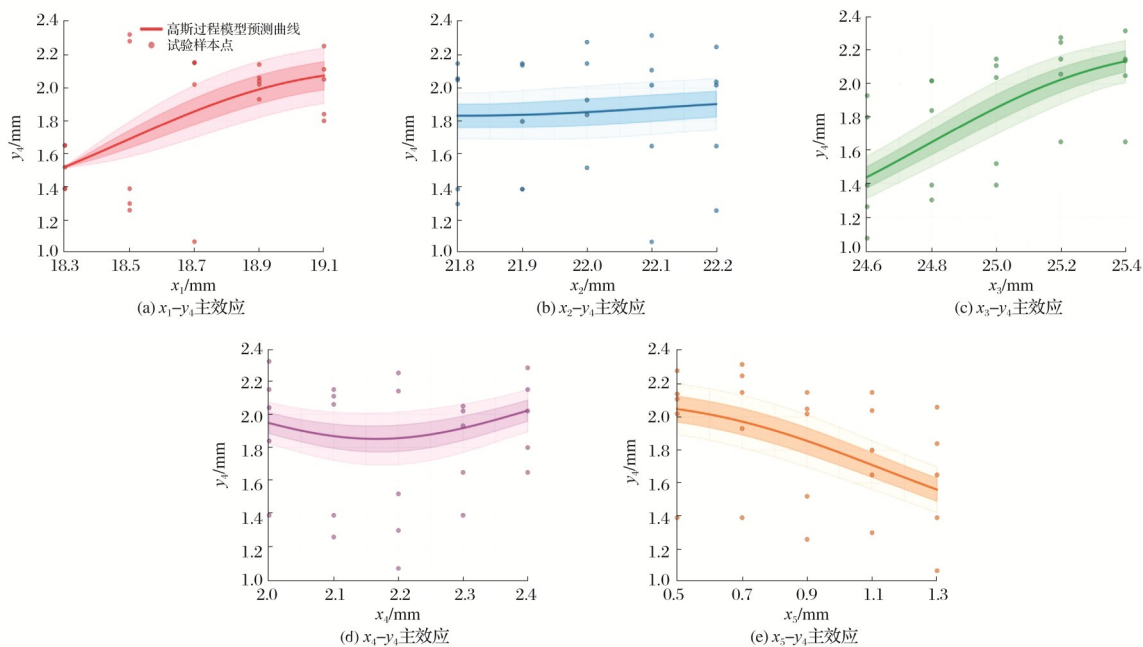
图5 y_1 、 y_2 、 y_3 的双轴图Fig.5 Dual-axis image of y_1 , y_2 and y_3 

图6 Kriging模型拟合优度诊断

Fig.6 Diagnostic goodness-of-fit plots for Kriging model

图7 $(x_1 \sim x_5)$ - y_4 主效应Fig.7 Main effect of $(x_1 \sim x_5)$ - y_4

固定 x_2 、 x_4 在22.0 mm和2.2 mm,探究其余3个参数的交互作用对响应目标 y_4 的影响规律^[18]。图9为 x_1x_3 - y_4 、 x_1x_5 - y_4 和 x_3x_5 - y_4 二维响应等高线。从图9a可以看出, x_5 在中值时, y_4 随 x_1 、 x_3 的增大呈显著单调上升。当 x_1 处于18.8~19.1 mm、 x_3 处于25.2~25.4 mm时, y_4 可达到2.20 mm以上。从图9b可以看出, x_3 在中值时, y_4 随 x_1 的增大和 x_5 的减小而增加。当 x_1 处于18.8~19.1 mm、 x_5 处于0.5~0.7 mm时, y_4 可达到2.10 mm以上。从图9c可以看出, x_1 在中值时, y_4 随 x_3 的增大和 x_5 的减小而增加。当 x_3 处于25.2~25.4 mm、 x_5 处

3.2 参数对有效接触宽度的影响

图6为Kriging模型拟合优度诊断。从图6可以看出, R^2 分别为0.909 0、1.000 0、0.996 8、1.000 0,均大于0.900 0。这表明模型具有较高的预测精度和良好的泛化能力,能够较为准确地反映输入参数与响应目标之间的非线性映射关系。

图7为 $(x_1 \sim x_5)$ - y_4 主效应,图8为有效接触宽度敏感度。从图7可以看出, x_2 - y_4 和 x_4 - y_4 的主效应相对平缓,其余主效应变化较大。从图8可以看出, $x_1 \sim x_5$ 对有效接触宽度的敏感度指数(μ^*)分别为0.497、0.069、0.500、0.228、0.444,得出 x_1 、 x_3 、 x_5 最为敏感。

于0.5~0.7 mm时, y_4 可达到2.20 mm以上。

3.3 多目标优化

在现代优化设计中,有时需要达到多项设计指标的最佳优化方案,例如强度高、质量轻、刚度低、成本低等,但往往每个独立的设计指标的最优结果都是矛盾和抵触的,这就需要多目标优化^[19-21]。本文是基于汽车管路接头的密封性能研究,其目的是在保证接头强度和刚度的前提下 y_1 、 y_2 、 y_3 和 y_4 的多目标优化。根据经验得到,此规格管节接头与管路的 y_1 要求小于920.0 N,密封圈不会移位, y_2 大于

1.5 MPa, 这样能保证 200 kPa 工作压力、7.5 倍安全系数下不会发生泄漏。在此基础上, y_4 大于 2.00 mm, 密封路径越长越不容易发生泄漏。 y_3 小于屈服强度 135.0 MPa。数学模型如下:

$$U-\begin{cases} \min \hat{y}_1(x) \\ \max \hat{y}_2(x) \\ \min \hat{y}_3(x) \\ \max \hat{y}_4(x) \\ x \in D \end{cases}$$

(5)

接头管路多目标优化数学模型如下:

$$\min y(x) = \omega_1 \hat{y}_1(x) - \omega_2 \hat{y}_2(x) + \omega_3 \hat{y}_3(x) - \omega_4 \hat{y}_4(x)$$
$$\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 = 1$$
$$\begin{cases} \hat{y}_1(x) < 920 \\ \hat{y}_2(x) > 1.5 \\ \hat{y}_3(x) < 135 \\ \hat{y}_4(x) > 2 \\ x_1 \in [18.3, 19.1] \\ x_2 \in [21.8, 22.2] \\ x_3 \in [24.6, 25.4] \\ x_4 \in [2.0, 2.4] \\ x_5 \in [0.5, 1.3] \end{cases}$$

(6)

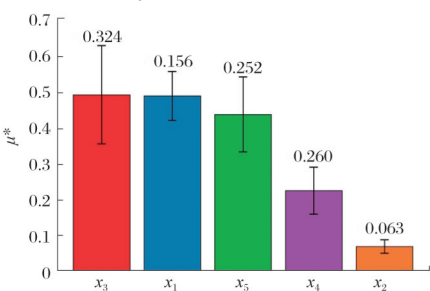


图 8 有效接触宽度敏感度

Fig.8 Sensitivity plot of effective contact width

在建立 Kriging 模型并明确各响应目标的优先级后, 根据表达式(5)和(6), 采用加权求和遗传算法^[22-24]进行多目标优化求解。确定各响应目标的优先级顺序为 $y_4 > y_2 > y_1 >$

表 3 解析与仿真结果对比

Tab.3 Comparison of analytical and simulation results

求解类型		最优解					最优值			
		x_1/mm	x_2/mm	x_3/mm	x_4/mm	x_5/mm	y_1/N	y_2/MPa	y_3/MPa	y_4/mm
解析计算	原始数据	18.70	21.80	25.00	2.00	0.50	852.74	47.67	22.03	2.04
	多目标优化数据	19.00	22.20	25.20	2.10	0.84	902.73	54.18	16.69	2.30
有限元计算	原始数据	18.70	21.80	25.00	2.00	0.50	856.90	49.80	22.40	2.01
	多目标优化数据	19.00	22.20	25.20	2.10	0.84	886.00	56.15	18.05	2.43
原始数据相对偏差/%		0	0	0	0	0	0.48	4.27	1.65	1.49
多目标优化相对偏差/%		0	0	0	0	0	1.88	3.51	7.53	5.35
解析计算变化幅度/%		1.60	1.83	0.80	5.00	68	5.86	13.65	24.24	12.74

y_3, y_4 为最优优先级。加权系数分别为 0.5、0.3、0.2、0.1, 采用加权求和法将多目标问题转化为单目标优化问题进行求解。得到的最优结果分别为 $y_1=902.72 \text{ N}$, $y_2=54.18 \text{ MPa}$, $y_3=16.69 \text{ MPa}$, $y_4=2.30 \text{ mm}$ 。多目标最优解 $x_1=19.00 \text{ mm}$, $x_2=22.20 \text{ mm}$, $x_3=25.20 \text{ mm}$, $x_4=2.10 \text{ mm}$, $x_5=0.84 \text{ mm}$ 。为验证上述多目标优化结果的准确性与可靠性, 分别采用仿真分析与解析计算方法对最优解进行验证。表 3 为解析与仿真结果对比。

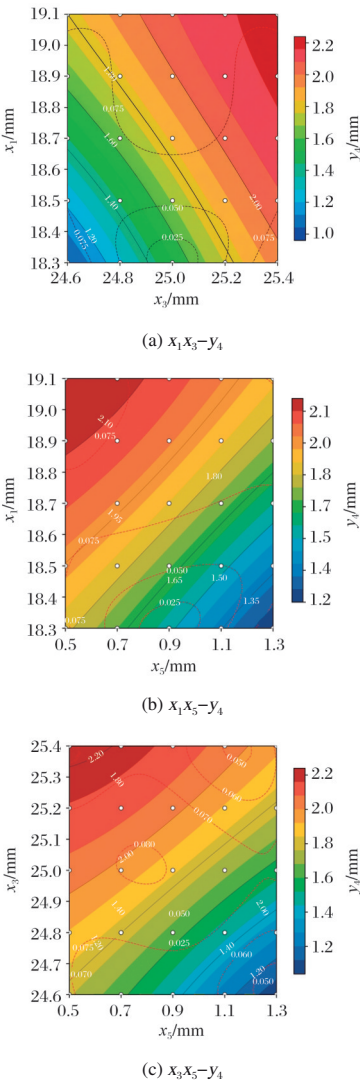


图 9 $x_1x_3-y_4$ 、 $x_1x_5-y_4$ 和 $x_3x_5-y_4$ 二维响应等高线

Fig.9 2D response contour plot of $x_1x_3-y_4$, $x_1x_5-y_4$ and $x_3x_5-y_4$

从表3可以看出,原始数据的4个响应值相对偏差分别为0.48%、4.27%、1.65%和1.49%。多目标优化的相对偏差分别为1.88%、3.51%、7.53%和5.35%。从对标结果来看,仿真与Kriging函数的计算结果基本一致。多目标优化比原始数据 y_1 增加5.86%, y_2 增加13.66%, y_3 降低24.24%, y_4 增加12.75%。多目标优化5参数结果均比原始数据尺寸增加,增加幅度最大的是 x_5 ,达到68.00%。

4 结论

本文做了基于Kriging模型的双密封圈竹节接头多目标性优化。结果表明:建立了双密封圈竹节接头与管路2D参数化几何模型与有限元模型, L_{25} 正交试验,Kriging高斯回归模型并对5个参数对 y_1 、 y_2 、 y_3 、 y_4 的影响进行详尽分析。选用双折线塑性本构模型,Mooney-Rivlin5橡胶本构为数值分析提供了可靠的材料基础。分析结果表明: x_5 在中值时, y_4 随 x_1 、 x_3 增大呈显著单调上升。当 x_1 处于18.8~19.1 mm、 x_3 处于25.2~25.4 mm时, y_4 可达到2.20 mm以上。 x_3 在中值时, y_4 随 x_1 的增大和 x_5 的减小而增加。当 x_1 处于18.8~19.1 mm、 x_5 处于0.5~0.7 mm时, y_4 可达到2.1 mm以上。 x_1 在中值时, y_4 随 x_3 的增大和 x_5 的减小而增加。当 x_3 处于25.2~25.4 mm、 x_5 处于0.5~0.7 mm时, y_4 可达到2.20 mm以上。加权求和遗传算法多目标寻优,优化结果分别为 $y_1=902.72$ N, $y_2=54.18$ MPa, $y_3=16.69$ MPa, $y_4=2.30$ mm。多目标最优解 $x_1=19.00$ mm, $x_2=22.20$ mm, $x_3=25.20$ mm, $x_4=2.10$ mm, $x_5=0.84$ mm。与原始数据相比,多目标优化后 y_1 增加5.86%, y_2 增加13.66%, y_3 降低24.24%, y_4 增加12.75%。

参考文献

- [1] 许玉涵,崔颖,冯文轩,等.两种阴接头型梁式管路连接结构优化设计与密封性能对比[J].航空动力学报,2026,41(6):175-183.
- [2] 夏芝玮,钱进,陈果.带装配偏差下的飞机管路连接件密封性能分析[J].中国工程机械学报,2024,22(3):341-345.
- [3] 钱进,陈果,赵正大,等.管路连接件粗糙表面接触力学与密封性能分析[J].润滑与密封,2024,49(5):112-119.
- [4] 杜双言,张伟,瞿品祥,等.角度误差下管路连接结构装配及其对密封的影响[J].润滑与密封,2023,48(6):119-123.
- [5] 夏芝玮,樊新田,赵旭升,等.基于有限元计算代理的飞机液压系统管路密封性能评估[J].润滑与密封,2021,46(12):147-156.
- [6] 张旭,夏芝玮,樊新田,等.飞机管路连接件装配偏差对密封性影响的仿真分析与试验验证[J].润滑与密封,2021,46(8):99-107.
- [7] 张毅,曹学鹏.基于正交试验的深海Y形密封圈结构优化[J].润滑与密封,2023,48(7):153-158.
- [8] 代俊男.基于预插值与聚类优化Kriging的结构可靠性分析方法[D].常州:江苏理工学院,2025.
- [9] 王龙滢,叶成君,徐健,等.基于Kriging模型的涡轮风机转子结构优化及噪声分析[J].排灌机械工程学报,2026,44(3):261-267.
- [10] 王相兵,苏振恒,周航.基于Kriging响应面的门式起重机刚性支腿多目标优化设计[J].机械设计与研究,2025,41(6):370-376.
- [11] 周霞,黄剑.基于ANSYS的热力管道用橡胶密封圈优化设计与分析[J].润滑与密封,2024,49(4):189-196.
- [12] 李涛,薛志武.新型L形密封圈密封性能有限元分析[J].润滑与密封,2024,49(8):189-196.
- [13] 马天宇,田石柱.基于双折线模型更新的桥梁框架墩混合试验[J].广西大学学报(自然科学版),2020,45(1):17-24.
- [14] 徐正杰.多层波纹管爆破特性的实验与数值分析[J].塑料科技,2025,53(4):151-155.
- [15] 彭扬林,陈书赢,闫慧龙,等.基于Mooney-Rivlin模型的橡胶密封圈性能优化[J].航天医学与医学工程,2025,36(2):174-177.
- [16] 张毅飞,孟维园,巩加玉,等.端面动密封用O型圈润滑与密封性能研究[J/OL].摩擦学学报(中英文),1-16[2026-03-10].<https://link.cnki.net/urlid/62.1224.O4.20251219.1100.006>.
- [17] 富绪光,陈江弥,罗震宇.往复运动密封装置中O形橡胶密封圈的滑动摩擦力有限元分析[J].橡胶工业,2021,68(5):332-338.
- [18] 华文,董炜,杨滢,等.考虑无功电压交互影响的新能源低电压穿越控制参数优化方法[J].可再生能源,2025,43(11):1527-1536.
- [19] 孟繁龙,董金善.基于多目标遗传算法的真空热处理设备密封性能优化[J].润滑与密封,2025,50(12):112-121.
- [20] 高俊峰,李伟,杨玲玲,等.基于响应面法的全焊接球阀密封结构参数多目标优化[J].机电工程,2023,40(11):1718-1726.
- [21] 毕恩哲,李双喜,沙廉翔,等.高温动压胀圈密封结构参数多目标优化分析[J].化工学报,2023,74(6):2565-2579.
- [22] 祝铭志,颜廉忠,李旭阳,等.基于CFD模拟和多目标遗传算法的涡轮流量计结构及性能优化研究[J].计量学报,2025,46(11):1581-1590.
- [23] 潘为民,侯森,时可可,等.基于响应面模型及多目标遗传算法的弹性支承轴承套圈优化设计[J].轴承,2026(3):22-28.
- [24] 向红妮,张冠勇,黄胜,等.基于多目标遗传算法的新能源汽车CVT带轮变形分析与优化[J/OL].工程设计学报,1-13[2026-03-10].<https://link.cnki.net/urlid/33.1288.th.20251203.0933.002>.