

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2022.06.007

# 基于响应面法的螺纹接头快速连接器 分瓣内螺纹片优化设计

伍开宇<sup>1</sup>, 朱海清<sup>1</sup>, 沈伟<sup>2</sup>, 方明<sup>2</sup>

(1. 江南大学机械工程学院, 江苏无锡 214122; 2. 嘉兴市计量检定测试院, 浙江嘉兴 314001)

**摘要:**螺纹接头快速连接器在工作过程中,分瓣内螺纹片结构的变形会使O形圈密封端面间隙增大,降低连接器的密封性能。课题组提出了以减小分瓣内螺纹片的最大变形量和等效应力的同时最小化结构质量为优化目标的结构优化设计方法,通过拉丁超立方试验设计方法选取试验设计点,建立分瓣内螺纹片设计变量与质量、最大变形量和最大应力的二阶响应面模型;采用多目标遗传算法优化求解出Pareto最优解集,并通过设计变量灵敏度分析对最优解进行修约。结果表明:当结构质量仅增加6.16%时,结构最大变形量减小了35.75%,最大应力减小了29.7%。该设计方法以结构质量的微幅增大实现了最大变形量与应力的大幅减小,优化效果显著。

**关键词:**压力计量器具;快速连接器;响应面法;多目标遗传算法;拉丁超立方试验设计法

中图分类号:TH812 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2022)06-0038-06

## Optimization Design of Divided Internal Thread Plate of Male Adapter Quick Connector Based on Response Surface Method

WU Kaiyu<sup>1</sup>, ZHU Haiqing<sup>1</sup>, SHEN Wei<sup>2</sup>, FANG Ming<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

2. Jiaxing Institute of Metrology, Jiaxing, Zhejiang 314001, China)

**Abstract:** In the process of working, the deformation of the internal thread plate structure will increase the end clearance of O-ring seal and reduce the sealing performance of the connector. A structural optimization design method was proposed to minimize the maximum deformation and the equivalent stress of the internal thread plate while minimizing the structural mass. The second-order response surface model of the design variables, maximum deformation and maximum stress of the internal thread plate was established by selecting test design points through Latin hypercube experimental design method. The Pareto optimal solution set was optimized by multi-objective genetic algorithm, and the optimal solution was modified by design variables sensitivity analysis. The results show that when the structure mass increases by 6.16%, the maximum deformation and maximum stress decrease by 35.75% and 29.7% respectively. The proposed method achieves a significant reduction in maximum deformation and stress with the slight increase of the structure mass, and the optimization effect is remarkable.

**Keywords:** pressure measuring instrument; quick connector; response surface method; multi-objective genetic algorithm; Latin hypercube experimental design method

压力表、真空压力表、真空表及压力变送器等压力计量器具在众多行业中被广泛应用,为了保证其计量性能稳定可靠,需进行定期检定。多数用户采用的方

式是将压力计量器具拆下送到计量检定单位进行离线检定。目前国内大多数计量检定设备的连接头多为传统内螺纹接头,压力计量器具离线检定时的安装与拆

收稿日期:2022-03-09;修回日期:2022-07-15

第一作者简介:伍开宇(1998),男,湖南娄底人,硕士,主要研究方向为现代机械设计。E-mail:1480206015@qq.com

卸主要依靠扳手,工作人员劳动强度大且工作效率低。而螺纹接头快速连接器采用弹簧按压式可快速连接与拆卸,与传统内螺纹接头相比,其操作简便,灵活性高,可提高检定工作效率同时减轻了检定员工作强度。

螺纹接头快速连接器最高工作压力为 16 MPa,其可靠性不容忽视。而分瓣内螺纹片为固定压力计量器具螺纹接头的主要受力部件,工作时分瓣内螺纹片的过大变形会扩大其端面密封间隙导致 O 形密封圈出现挤隙现象,很可能导致 O 形密封圈接触压力达不到要求而密封失效。因此,对其进行结构尺寸参数优化,降低分瓣内螺纹片的结构变形量对于提高螺纹接头快速连接器的运行寿命、可靠性具有重要意义。

## 1 分瓣内螺纹片结构仿真分析

### 1.1 螺纹接头快速连接器整体结构

螺纹接头快速连接器结构如图 1 所示,该装置主要由 5 部分组成,分别是分瓣内螺纹片、按压套筒、内芯、固定底座和密封圈(包括压缩弹簧)组成。其中分瓣内螺纹片是快速连接器的核心部分,由 6 块沿周向均布的相同分瓣内螺纹片组成,套筒与内芯分别有支撑的压缩弹簧。安装时,螺纹接头按压内芯,分瓣内螺纹片向内闭合,套筒在弹簧的作用下上弹使分瓣内螺纹片抱住螺纹接头,将压力计量器具的螺纹接头稳定地固定在检定设备上,并保证良好的密封性能。拆卸时,按压套筒,套筒下移,分瓣内螺纹片张开,内芯在弹簧的作用下将螺纹接头推出,从而轻松拆卸。

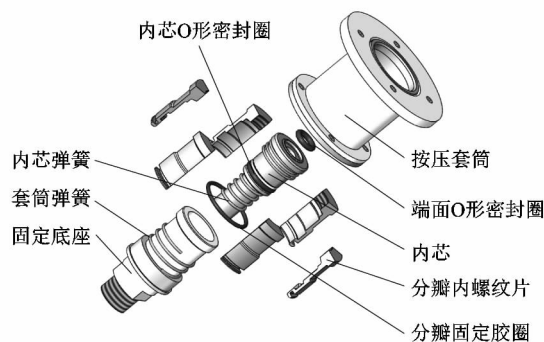


图 1 螺纹接头快速连接器爆炸图  
Figure 1 Quick connector explosion diagram of threaded connector

### 1.2 分瓣内螺纹片结构参数模型

分瓣内螺纹片的结构参数如图 2 所示。由于抓取机构是由 6 块沿周向均布的分瓣内螺纹片组成,且受力情况相同,所以文中选取其中的一片进行有限元分析。

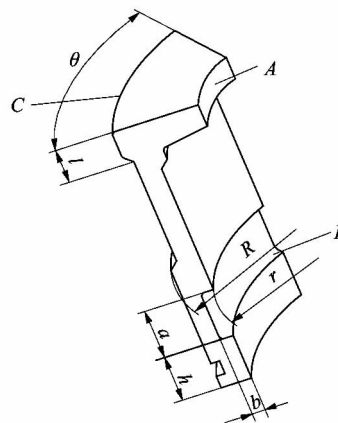


图 2 分瓣内螺纹片参数化模型  
Figure 2 Parameterized model of internal thread plate

### 1.3 仿真分析

分瓣内螺纹片的材料选用 45 号钢,材料属性如表 1 所示。螺纹接头工作温度为室温,安全系数取 1.3;其许用应力 $[\sigma]$ 为 273 MPa。

表 1 45 号钢材料属性

Table 1 45 steel material property

屈服强度 $\sigma_s$ /MPa	抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	泊松比	弹性模量/GPa	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
355	600	0.269	209	7 890

将分瓣内螺纹片参数化模型导入 ANSYS Workbench 软件的 Static Structural 模块,采用六面体网格对其进行网格划分,网格大小设置为 0.4 mm,划分完的网格节点数为 148 382,单元数为 32 946,网格平均质量为 95.2%,网格质量较高<sup>[1]</sup>。

静力学分析模拟极限危险工况,即待检定压力计量器具螺纹接头为 M20 × 1.5、检定压力为 16 MPa 工况下的分瓣内螺纹片受力情况。内芯受力  $F$  为压力产生的推力  $F_1 = 5\,966.00\text{ N}$  加上弹簧产生的推力  $F_2 = 69.44\text{ N}$ ,  $F$  为 6 035.44 N;内芯受力最终通过螺纹接头传导至分瓣内螺纹片。其中分瓣内螺纹片将螺

纹接头压紧在校验座上时,分瓣内螺纹片的内螺纹与接头外螺纹接触,经计算校核内螺纹不会失效,将其简化为受力面平行受力。

对图2中标记面A处施加大小为 $F/6$ ,方向平行于接触面A向上的力载荷,B面施加固定约束,C面添加圆柱面约束,得到分瓣内螺纹片总变形云图与等效应力云图如图3所示。从图3可以看出分瓣内螺纹片最大变形量为0.027 mm,最大等效应力 $\sigma_{\max} = 265.32$  MPa。最大变形量相对于密封间隙0.195 mm而言,变动量为15.3%,因此需对其结构尺寸参数进行优化,减小变形量。

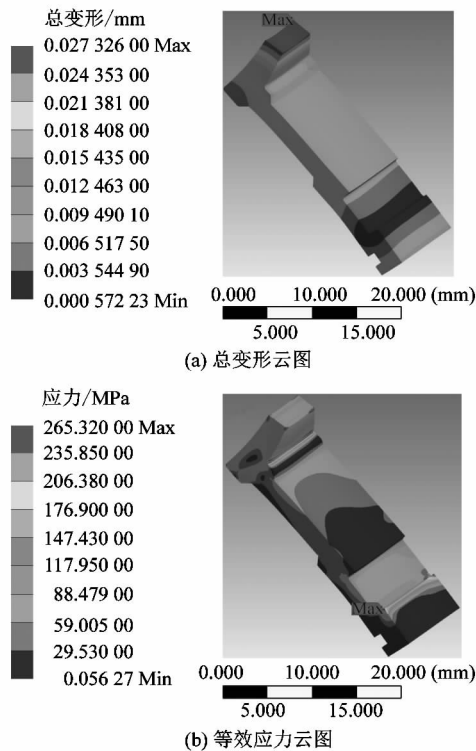


图3 优化前分瓣内螺纹片计算云图

Figure 3 Computing cloud image of internal thread plate before optimization

## 2 基于响应面法的结构优化

响应面法是一种采用试验设计理论对指定的设计点集合进行试验,得到目标函数和约束函数的响应面模型,从而预测非试验点响应值的方法<sup>[2-4]</sup>,具有精度高、周期短、试验次数少且能考虑各设计变量间相互影响趋势等优点。响应面模型的建立包含试验点的选取、拟合函数的选取以及模型合理性评估3个部分<sup>[5-8]</sup>。

### 2.1 设计变量的确定

影响快速接头分瓣内螺纹片结构性能的因素很多,在其它条件不变时,选取分瓣内螺纹片上的内螺纹部分厚度 $l$ 、凹槽深度 $a$ 、凹槽宽度 $b$ 、凹槽离底面高度 $h$ 、内壁半径 $r$ 、外壁半径 $R$ 以及成型旋转角度 $\theta$ 为设计变量,研究其对分瓣内螺纹片的弹性变形与等效应力的影响。

### 2.2 试验设计

试验设计(design of experiment, DOE)作为数理统计的分支之一,其目的是在设计空间选取较少的试验点,在满足统计分析要求的前提下达到缩短试验周期以及降低试验成本的目的<sup>[9]</sup>。常用的试验设计方法有:全因子试验设计、正交实验设计、BBD设计(box-behnken design)与拉丁方试验设计(Latin square design)等。

试验点的选取作为响应面模型构建的第1步,对响应面的精度有很大影响。其中拉丁方试验设计相较于其他的试验设计方法更具填充性与均匀性,是一种覆盖率高、均衡性好的试验设计方法<sup>[10]</sup>。

课题组选取分瓣内螺纹片的设计变量个数为7,设计变量的初始值及取值范围如表2所示。其中外壁半径 $R$ 在设计时有最小尺寸限制为18.5 mm。采用拉丁方试验设计方法可确定仿真计算样本数为79。

表2 设计变量初始值和取值范围

Table 2 Initial value and value range of design variables

取值	$l/\text{mm}$	$a/\text{mm}$	$b/\text{mm}$	$h/\text{mm}$	$r/\text{mm}$	$R/\text{mm}$	$\theta/(\text{°})$
初始值	3	1.5	6.5	6	15	18.5	55
最小值	3	1.0	5.0	5	14	18.5	53
最大值	5	2.5	8.0	7	16	20.0	57

### 2.3 响应面模型建立

响应面模型采用目前较为常用的二阶多项式表达<sup>[11]</sup>:

$$y(x) = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i=1}^k a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=2}^k \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

式中: $y(x)$ 为拟合函数; $x_i$ 和 $x_j$ 为输入设计变量; $k$ 为设计变量数; $a_0, a_i, a_{ii}$ 和 $a_{ij}$ 为回归系数,回归系数的个

数为  $n$ 。

$n$  的计算公式:

$$n = \frac{(k+1)(k+2)}{2} \quad (2)$$

## 2.4 模型合理性评估

工程中一般根据模型的多重决定系数  $R^2$  及多重调整决定系数  $R_a^2$  来评估其预测准确度,当  $R^2$  和  $R_a^2$  的值大于 0.9 时模型具有的较高的预测准确度,且  $R^2$  值越接近 1,表明模型预测值与实际仿真计算值越贴合,即预测准确度越高<sup>[12]</sup>。

决定系数  $R^2$  与校正决定系数  $R_a^2$  计算式如下:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

$$R_a^2 = 1 - \frac{n-1}{n-k-1} \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

式中: $m$  为样本数量; $k$  为设计变量数目; $y_i$  为样本响应值; $\hat{y}_i$  为回归模型预测得到的响应值; $\bar{y}$  为响应值均值。

从试验设计样本集中随机抽取 50 个样本点对模型进行误差分析,总质量  $M$ 、结构最大变形量  $D_{\max}$  与最大等效应力  $\sigma_{\max}$  3 个目标参数的  $R^2$  和  $R_a^2$  值如表 3 所示,均大于 0.9,且非常接近 1。说明课题组建立的响应面模型预测准确性高,能够较好地拟合输入设计变量与输出目标参数之间的关系。

表 3 响应面模型的  $R^2$  值及  $R_a^2$  值

Table 3  $R^2$  and  $R_a^2$  of response surface model

目标参数	$R^2$	$R_a^2$
$M$	0.999 9	0.999 9
$D_{\max}$	0.999 6	0.998 9
$\sigma_{\max}$	0.980 6	0.950 7

建立的二阶响应面模型的拟合度曲线如图 4 所示,通过其可判断二阶响应面模型的预测值与试验设计所取样本点的仿真计算值之间的拟合程度。模型预测的分瓣内螺纹片总质量  $M$ 、最大变形  $D_{\max}$  与最大等效应力  $\sigma_{\max}$  的预测值均分布在  $y = x$  直线附近,说明课题组所建立的响应面模型预测值与试验设计所取样本点的仿真计算值具有很好一致性,响应面模型预测能力满足后续对分瓣内螺纹片进一步优化分析的需求。

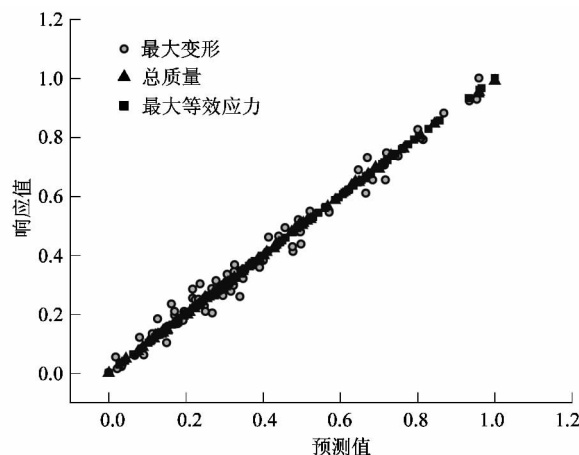


图 4 预测模型拟合度曲线

Figure 4 Prediction model fit curve

## 3 多目标优化

### 3.1 目标函数和约束条件

分瓣内螺纹片结构优化的目的是提高结构的可靠性。本研究所涉及的优化模型将分瓣内螺纹片结构的最大变形量与最大等效应力的值最小作为优化目标,约束条件为最大等效应力小于材料的许用应力  $[\sigma]$ ,最大变形量应低于优化前的结构最大变形量 0.027 mm。对其建立的多目标优化数学模型如下:

$$\begin{aligned} & \min (D_{\max}(x), \sigma_{\max}(x)); \\ & \text{s. t. } \left\{ \begin{array}{l} D_{\max}(x) \leq \overline{D_{\max}}, \\ \sigma_{\max}(x) \leq [\sigma], \\ x_{i,d} \leq x_i \leq x_{i,u} \end{array} \right. \quad (5) \end{aligned}$$

式中: $D_{\max}(x)$  为结构最大变形量, $\sigma_{\max}(x)$  为结构最大等效应力; $\overline{D_{\max}}$  为未优化前结构的最大变形量; $x_i$  为各设计变量; $x_{i,u}$  为设计变量取值范围上限; $x_{i,d}$  为设计变量取值范围下限。

### 3.2 基于多目标遗传算法求解

传统的多目标优化方法都是将多目标转化为单目标再进行求解,如权重加和法、约束法与理想点法等,上述优化方法的权重系数均需人为设定,易受主观因素的影响,其优化结果不一定为最优解<sup>[13]</sup>。多目标遗传算法通过迭代遗传同时对多个目标进行并行处理,且算法具有很强的鲁棒性,被公认为最有效的多目标优化算法之一。课题组基于多目标遗传算法对分瓣内螺纹片的多目标优化问题进行求解。

遗传算法的初始样本数量设置为 7 000，每次样本迭代数量设置为 1 000。图 5 为遗传算法经 20 次迭代后求解的最优 Pareto 解，从图中可以看出分瓣内螺旋纹片的最大变形量  $D_{max}$  与结构质量  $M$  是呈负相关的，最大变形量  $D_{max}$  的减小会伴随着结构质量  $M$  的增大。权衡这 2 个性能指标，课题组重点关注结构最大变形量的优化，故选择算法给出的 3 组最优解中最大变形量最小的一组解作为分瓣内螺旋纹片的优化设计方案。

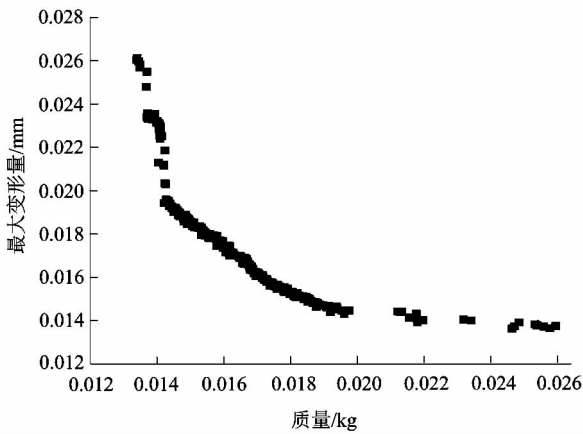


图 5 遗传算法最优 Pareto 解  
Figure 5 Pareto optimal solution of genetic algorithm

#### 4 优化结果与分析

为使多目标优化求解所得最优解的尺寸便于实际加工制造，应在其基础上将其修约为一位小数。对输入设计变量与目标参数进行相关性灵敏度分析，根据相关性对尺寸进行修约，从而使结构更贴合预期的优化目标<sup>[14]</sup>。对于分瓣内螺旋纹片结构，过大变形将导致 O 形密封圈的密封间隙增大而出现“挤隙”现象，严重影响螺纹接头快速连接器的密封性能，因此课题组根据图 6 所示设计变量与结构最大变形量的灵敏度来对各遗传算法求取的最优解进行尺寸修约。

由图 6 可知，最大变形与凹槽宽度  $b$ 、内壁半径  $r$  呈正相关；与凹槽离底面高度  $h$ 、凹槽深度  $a$ 、成型旋转角度  $\theta$ 、外壁半径  $R$  及内螺纹部分厚度  $l$  呈负相关。优化前后与对最优解修约后各设计变量值的对比如表 4 所示。

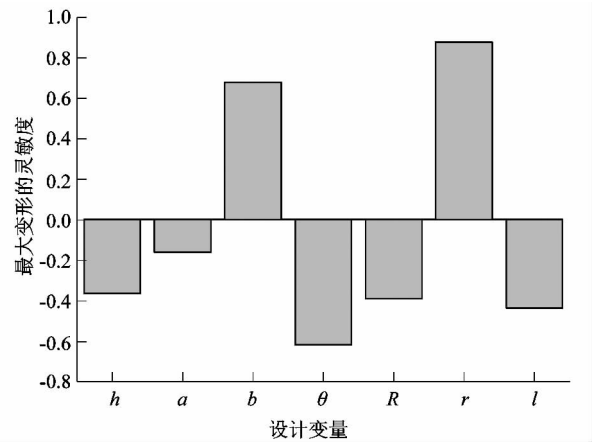


图 6 设计变量对最大变形的灵敏度  
Figure 6 Sensitivity of design variables to maximum deformation

表 4 优化前后设计变量值

Table 4 Design variables before and after optimization

取值	$l/mm$	$a/mm$	$b/mm$	$h/mm$	$r/mm$	$R/mm$	$\theta/(^\circ)$
初始值	3.0	1.5	6.5	6.0	15.0	18.5	55.0
最优解	4.449 4	2.395 6	7.715 2	6.886 1	14.424	18.547	55.304
修约后	4.5	2.4	7.7	6.9	14.4	18.6	55.4

优化前后的各目标参数响应值对比如表 5 所示，从中可以看出分瓣内螺旋纹片结构最大变形量减小了 35.75%，最大等效应力减小了 29.7%，总质量仅增大了 6.16%。同时从表 4 可以看出分瓣内螺旋纹片的各目标参数响应值的变化主要由  $l, a, b$  及  $h$  的大幅增大与  $r$  的小幅减小引起，说明其优化结果一定程度上符合前文所述的灵敏度分析。优化后的分瓣内螺旋纹片结构的最大变形量  $D_{max}$  与最大等效应力  $\sigma_{max}$  均大幅降低，结构总质量仅略微增大，分瓣内螺旋纹片为小尺寸零件，对其质量的大小并无要求，优化效果符合预期目标，验证了本优化方法的可行性。

表 5 结构优化前后目标参数响应值对比

Table 5 Comparison of target paramment response value before and after structural optimization

目标参数	总质量 $M/g$	最大变形/ $\mu m$	最大等效应力 $\sigma_{max}/MPa$
优化前	14.78	27.33	265.32
优化后	15.69	17.56	186.51

根据表 4 所示的修约后的设计变量值建立分瓣内螺旋纹片的三维模型并对其进行有限元分析，其最大变形及等效应力云图如图 7 所示。

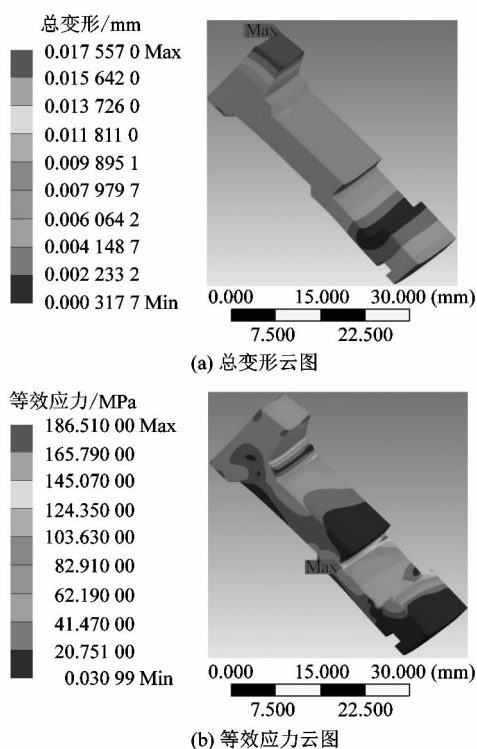


图7 优化后结构计算云图  
Figure 7 Optimized structure computing cloud image

### 5 结语

课题组利用 ANSYS Workbench 软件对螺纹接头快速连接器的关键受力部件分瓣内螺纹片进行了多目标优化设计以降低其结构变形量。首先通过拉丁超立方试验设计选取试验样本点进行仿真计算,然后建立分瓣内螺纹片结构设计变量与目标参数响应值之间的响应面预测模型,并对模型的合理性进行了评估,模型的多重决定系数  $R^2$  和多重调整决定系数  $R_a^2$  均在 0.9 ~ 1.0 之间,模型的预测能力较好。最后利用多目标遗传算法求解了分瓣内螺纹片结构尺寸最优解,并依据设计变量的灵敏度对其进行尺寸修约,通过与初始值

的各目标参数仿真计算值对比,发现分瓣内螺纹片的结构质量微幅增加了 6.16%,而最大变形量减小了 35.75%,最大应力减小了 29.7%。优化设计提高了快速连接器的密封稳定性和可靠性,效果较好。

### 参考文献:

[1] 刘明亮,朱海清,李超.基于 ANSYS Workbench 的安全阀自动上料机械手抓取机构优化设计[J].现代制造工程,2019(12):140-144.

[2] 曾漾,周俊,沈志远,等.基于响应面法的复合材料舱壁结构优化设计[J].重庆大学学报,2020,43(6):82-89.

[3] 李兵,刘奎武,高鹏,等.基于响应曲面法的传动带成形工艺参数优化[J].锻压技术,2017,42(2):189-192.

[4] 李明瑞,邓国勇,米永振,等.基于响应面法的乘用车消声器声学性能优化[J].上海交通大学学报,2017,51(9):1031-1035.

[5] 万锋,管锋,王琼.基于响应面法的丢手释放接头优化设计[J].机械强度,2021,43(1):114-121.

[6] 姜衡,管贻生,邱志成,等.基于响应面法的立式加工中心动静态多目标优化[J].机械工程学报,2011,47(11):125-133.

[7] 孙江,常高爽.基于二次响应面模型前保险杠低速碰撞优化设计[J].农业装备与车辆工程,2021,59(10):148-152.

[8] 孙成智,曹广军,王光耀.为提高低速碰撞性能的轿车保险杠吸能盒结构优化[J].汽车工程,2010,32(12):1093-1096.

[9] 蒋水华,李典庆,周创兵.基于拉丁超立方抽样的边坡可靠度分析非侵入式随机有限元法[J].岩土工程学报,2013,35(增刊2):70-76.

[10] 缪鹏彬,余娟,史乐峰,等.基于改进非参数核密度估计和拉丁超立方抽样的电动公共客车负荷模型[J].电工技术学报,2016,31(4):187-193.

[11] 李天津.安全阀智能上料车自动对中系统研究[D].江南大学,2021:21-22.

[12] 田阿利,魏震,张海燕,等.基于响应面法的SPS舱口盖结构多目标优化[J].船舶力学,2021,25(4):502-508.

[13] 李绍军,王惠,钱锋.多目标遗传算法及其在化工领域的应用[J].计算机与应用化学,2003,20(6):755-760.

[14] 王欣欣,李中凯,刘等卓.基于响应面法的玻璃钻孔支撑结构优化设计[J].组合机床与自动化加工技术,2021(2):131-135.

(上接第 37 页)

[17] NOH S, KIM K, KIM J I, et al. Direct-write printing for producing biomimetic patterns with self-aligned neurites- science direct [J]. Additive Manufacturing,2020,32:10107.

[18] 陈向阳. CoreXY 结构桌面型 3D 打印机工艺细化研究[J].工程

技术,2017(1):00105.

[19] 伍文进,徐中云.基于 Marlin 固件的膏状体 3D 打印研究[J].机械研究与应用,2021,34(1):5.

[20] 朱晓伟,刘禹,刘彤,等.3D 打印硅橡胶基堆积结构开孔材料及其压缩性能[J].材料科学与工程学报,2020,38(4):6.