

## 基于 Kriging 代理模型的锥柱形膜片 屈曲载荷计算

周 算<sup>1</sup>, 强洪夫<sup>1</sup>, 王学仁<sup>1</sup>, 王 广<sup>1</sup>, 周志清<sup>2</sup>

(1. 第二炮兵工程大学 动力工程系, 西安 710025;

2. 第二炮兵装备研究院 航天飞行器生存技术与效能评估实验室, 北京 100085)

**摘 要:** 基于 Kriging 代理模型,建立了一种考虑膜片半径与厚度、锥段高度与角度等典型结构特征的计算屈曲载荷的工程方法,并选取典型样本点对模型进行了数值验证.结果表明:基于 Cubic 相关函数建立的 Kriging 代理模型预测未知样本点屈曲载荷误差控制在 5% 以内,较常用的 Gauss 相关函数更适合建立锥柱形膜片屈曲载荷的 Kriging 代理模型;此代理模型能准确计算未知样本点的屈曲载荷,减少了繁杂的有限元建模与计算过程;根据设定的屈曲载荷,代理模型可计算各典型特征的特征值,并可作为锥柱形膜片结构优化设计的约束函数或目标函数.

**关 键 词:** 锥柱形膜片; 屈曲载荷; 正交试验设计; 代理模型; Kriging; Cubic 相关函数

**中图分类号:** V434

**文献标志码:** A

## Buckling load computation of spherical-cone diaphragms based on Kriging metamodel

ZHOU Suan<sup>1</sup>, QIANG Hong-fu<sup>1</sup>, WANG Xue-ren<sup>1</sup>,  
WANG Guang<sup>1</sup>, ZHOU Zhi-qing<sup>2</sup>

(1. Power Engineering Department, Xi'an Hi-Tech Institute,  
Xi'an 710025, China;

2. Survival Technology and Efficiency Assessment of Aerospacecraft Laboratory,  
Equipment Academy of the Second Artillery Force, Beijing 100085, China)

**Abstract:** Regarding typical structural characteristics of radius and thickness of diaphragms, height and angle of cone section, a method was built to compute the buckling load of diaphragms based on Kriging metamodel. The Kriging metamodel was validated by typical samples. Research results show that: for the Kriging metamodel based on Cubic correlation function, the error percentage to compute buckling loads at untried inputs is less than 5%, more suitable for computing the buckling loads of spherical-cone diaphragms than that based on Gauss correlation function; the metamodel could precisely compute buckling loads at untried inputs, without need of modeling and simulation by finite element method; the metamodel could compute parameter values of typical structural characteristics according to a set buckling load, and also could be used as bound function or object function for structural optimization design of spherical-cone diaphragms.

**Key words:** spherical-cone diaphragms; buckling load; orthogonal test design; metamodel; Kriging; Cubic correlation function

金属膜片贮箱是空间推进系统对推进剂实行控制和储存的装置<sup>[1]</sup>,其中用于推进剂刚性排出的金属膜片将贮箱内的气体与推进剂隔离,防止发生气液掺混而导致推进剂流动不连续.金属膜片具有工作原理简单,流量可调范围大,失重状态下受干扰加速度影响很小等优点,广泛应用于要求机动性强、经常变轨、频繁调整姿态的航天器上.20 世纪 60 年代,美国<sup>[2-3]</sup>开始了膜片式贮箱的相关研究,1978 年,“和平保卫者”洲际弹道导弹(MX)第 4 级推进剂贮箱内使用了阿德公司<sup>[4]</sup>设计研制的环加强 304L 不锈钢挤压膜片,排空效率大于 98.8%,解决了液体推进系统可靠性与成本之间的矛盾.国内国防科学技术大学<sup>[5]</sup>、西北工业大学<sup>[6]</sup>、哈尔滨工业大学<sup>[7]</sup>近年来均进行了相关研究,在神州载人飞船<sup>[8]</sup>推进分系统中就使用了金属膜片贮箱.

屈曲载荷是膜片翻转的作动载荷,其值太小,膜片在运输或工作过程中由于微小的扰动极易坍塌;其值太大,需要较大的作动压力才能使其翻转,不易控制其翻转过程.常用的锥柱形膜片几何结构复杂,至今鲜见其屈曲载荷的解析解,不能系统得到膜片半径与厚度、锥段高度与角度等典型结构特征对膜片屈曲载荷的影响等信息.因此,工程设计人员针对某一屈曲载荷进行膜片结构设计就显得比较盲目,只能基于经验方法进行试算,工作效率极低.本文基于 Kriging 代理模型,建立一种考虑膜片半径与厚度、锥段高度与角度等典型结构特征的计算屈曲载荷的工程方法,对锥柱形膜片建立系统、深入认识的同时,为锥柱形膜片的设计提供方向性指导,具有一定的工程应用价值.

## 1 金属膜片贮箱

金属膜片贮箱是液体火箭发动机推进剂供应系统的重要组成部分<sup>[1]</sup>(见图 1),负责推进剂的贮存与管理.金属膜片贮箱的工作过程为:高压气体通过进气口进入贮箱内挤压锥柱形膜片,在内外压差作用下,膜片产生大变形,从上半球翻转至下半球<sup>[5]</sup>,同时将推进剂挤入输送管路,完成推进剂的管理和控制.因此,金属膜片贮箱能否实现推进剂的管理与控制,主要取决于金属膜片结构设计的优劣.而良好的金属膜片需要控制膜片半径

与厚度<sup>[9]</sup>、锥段高度与角度等典型结构特征的参数值,使膜片屈曲载荷在工程许可范围.

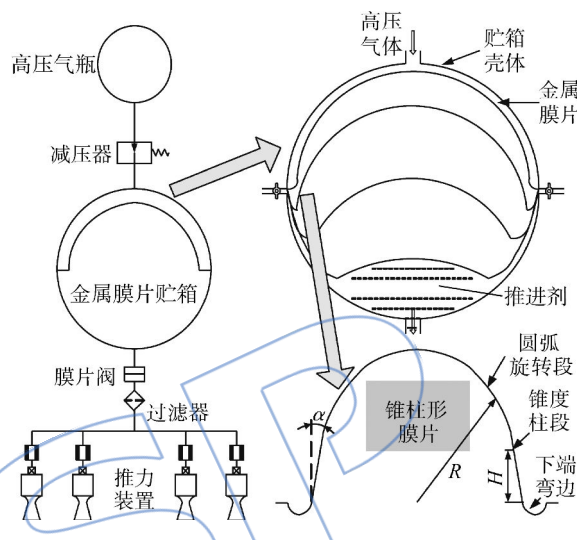


图 1 推进剂供应系统

Fig. 1 Propellant supply system

## 2 Kriging 模型简介

Kriging 模型最早由南非地质学者于 1951 年提出,用来确定地质中矿产储量分布. Giunta<sup>[10]</sup>于 1997 年在其博士论文中初步研究了 Kriging 模型在多学科设计优化(MDO)中的应用, Simpson 等<sup>[11]</sup>作了多项式响应面与 Kriging 模型的对比研究.目前 Kriging 模型已经成为一种具有代表性的代理模型近似方法,广泛应用于结构形状优化<sup>[12]</sup>、注塑成形<sup>[13-14]</sup>、固体发动机装药可靠性<sup>[15]</sup>、航空发动机设计优化<sup>[16-17]</sup>等方面.

Kriging 模型是一种估计方差最小的无偏估计模型,其通过相关函数的作用,具有局部估计的特点.响应量  $y(\mathbf{x})$  用一个全局模型和一个偏差项来表示<sup>[18]</sup>

$$y(\mathbf{x}) = F(\mathbf{x}) + z(\mathbf{x}) \quad (1)$$

其中  $\mathbf{x}$  为设计变量(如有  $n$  个设计变量则其为  $n$  维向量),  $F(\mathbf{x})$  为全局近似模型,即  $y(\mathbf{x})$  的数学期望,一般取多项式模型;  $z(\mathbf{x})$  代表局部偏差近似,即  $y(\mathbf{x})$  的局部变化.所以, Kriging 模型常写成

$$y(\mathbf{x}) = [\Phi(\mathbf{x})]^T \boldsymbol{\beta} + z(\mathbf{x}) \quad (2)$$

其中  $\Phi(\mathbf{x})$  为多项式基函数.

Kriging 模型假设局部偏差  $z(\mathbf{x})$  为一个随机

过程,服从正态分布  $N(0, \sigma^2)$ ,但它的协方差非零,即  $z(\mathbf{x})$ 不独立,但是同分布.

$$\text{cov}[z(\mathbf{x}^i), z(\mathbf{x}^j)] = \sigma^2 R_{i,j}(\mathbf{x}^i, \mathbf{x}^j) \quad (3)$$

式中  $R_{i,j}(\mathbf{x}^i, \mathbf{x}^j)$ 是任意两设计点  $\mathbf{x}^i$  和  $\mathbf{x}^j$  的空间相关方程.它对模型的精度起决定性作用,由用户自定义.本文选择的相关方程是 Gauss 相关方程与 Cubic 相关方程<sup>[19]</sup>.

Gauss 相关方程为

$$R_{i,j}(\mathbf{x}^i, \mathbf{x}^j) = \exp[-\theta d(\mathbf{x}^i, \mathbf{x}^j)^2] \quad (4)$$

Cubic 相关方程为

$$R_{i,j}(\mathbf{x}^i, \mathbf{x}^j) = 1 - 3\xi^2 + 2\xi^3$$

$$\xi = \min\{1, \theta | d(\mathbf{x}^i, \mathbf{x}^j) | \} \quad (5)$$

其中  $d(\mathbf{x}^i, \mathbf{x}^j)$ 是任意两设计点  $\mathbf{x}^i$  和  $\mathbf{x}^j$  的距离函数.

### 3 代理模型的建立流程及试验设计

#### 3.1 Kriging 代理模型的建立流程

代理模型是指计算量小,但其计算结果与有限元等高精度模型的计算结果比较接近的分析模型<sup>[20]</sup>.在工程中计算锥柱形膜片的屈曲载荷,可用代理模型替代原有的有限元分析模型,以避免出现计算量过大的问题.构造代理模型一般需要 3 个步骤:①用某一试验设计方法产生关于设计变量的样本点;②用有限元模型对样本点进行数值计算,获得设计变量及其有限元响应值;③用 Kriging 方法针对设计变量及其响应值构造出代理模型,并检验该代理模型的计算精度.代理模型技术主要包含两方面的内容,其一是如何选取构造模型的样本点,这属于试验设计的范畴;其二是如何建立预测模型,这在数学上属于近似方法的范畴,是代理模型的主体.

基于代理模型技术的锥柱形膜片屈曲载荷计算由 3 部分构成:正交试验设计选定样本点、有限元建模和计算、建立膜片屈曲载荷的近似函数表达式并进行未知样本点求解.具体的算法流程图见图 2.

#### 3.2 设计变量与目标函数

影响锥柱形膜片屈曲载荷的典型结构因素主要是膜片半径  $R$ 、膜片厚度  $h$ 、锥段高度  $H$  与角度  $\alpha$ ,本文以这 4 个结构因素为影响膜片屈曲载荷的设计变量.根据一般工程应用情况以及参考膜片研究文献,确定 4 个结构因素的取值范围,可以获得求解某一个确定膜片屈曲载荷的数学模型

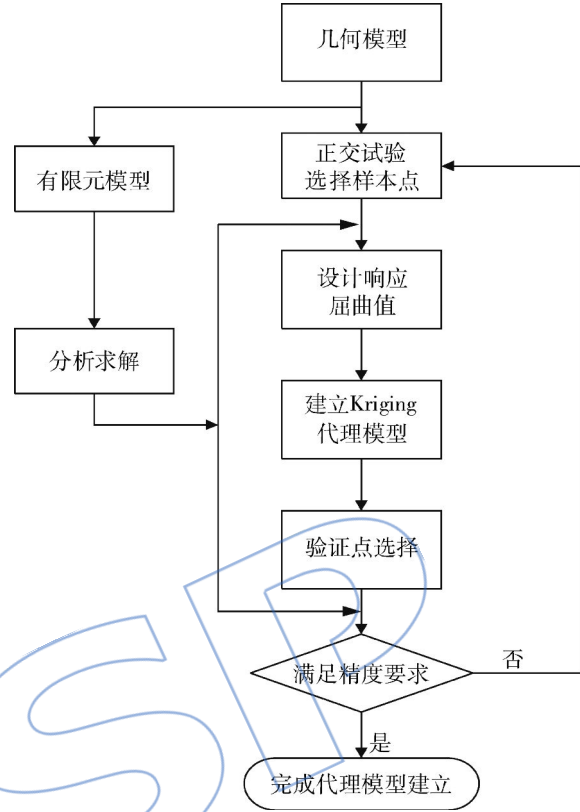


图 2 建立 Kriging 代理模型的算法流程图

Fig. 2 Algorithm flow chart for building Kriging metamodel

Set Buckling\_load( $\mathbf{x}$ )  
 $\mathbf{x} = [R, h, H, \alpha]$   
 s. t.  $200 \text{ mm} \leq R \leq 300 \text{ mm}$   
 $0.4 \text{ mm} \leq h \leq 0.9 \text{ mm}$   
 $50 \text{ mm} \leq H \leq 100 \text{ mm}$   
 $5^\circ \leq \alpha \leq 10^\circ$

#### 3.3 正交试验设计

利用正交表安排的正交试验具有“均衡分散、整齐可比”的特点,并且在减小了试验和计算工作量的情况下,仍能得到基本上反映全面情况的试验结果.

研究膜片半径与厚度、锥段高度与角度这 4 个结构因素对锥柱形膜片屈曲载荷的影响,每个因素均选取 6 个水平,膜片半径  $R$  取值为 200, 220, 240, 260, 280, 300 mm;膜片厚度  $h$  取值为 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 mm;锥段高度  $H$  取值为 50, 60, 70, 80, 90, 100 mm;锥段角度  $\alpha$  取值为  $5^\circ, 6^\circ, 7^\circ, 8^\circ, 9^\circ, 10^\circ$ . 4 个因素 6 个水平构成正交数值试验表  $L_{36}(6^4)$ ,具体参见表 1.

表 1 正交试验表  
Table 1 Orthogonal test table

| 序号    | R/mm | h/mm                    | H/mm               | $\alpha/(^{\circ})$ |
|-------|------|-------------------------|--------------------|---------------------|
| 01~06 | 200  | 0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9 | 50,60,70,80,90,100 | 5,6,7,8,9,10        |
| 07~12 | 220  | 0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9 | 60,70,80,90,100,50 | 10,5,6,7,8,9        |
| 13~18 | 240  | 0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9 | 70,80,90,100,50,60 | 9,10,5,6,7,8        |
| 19~24 | 260  | 0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9 | 80,90,100,50,60,70 | 8,9,10,5,6,7        |
| 25~30 | 280  | 0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9 | 90,100,50,60,70,80 | 7,8,9,10,5,6        |
| 31~36 | 300  | 0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9 | 100,50,60,70,80,90 | 6,7,8,9,10,5        |

## 4 有限元计算分析

### 4.1 特征值屈曲分析法

屈曲分析<sup>[21]</sup>用于确定结构开始变得不稳定时的屈曲载荷和屈曲模态。经典的屈曲分析主要采用特征值屈曲分析法,它用于预测一个理想弹性结构的理论屈曲载荷,主要是使用式(6)计算结构出现负刚度时的应力刚度阵的比例因子。

$$(\mathbf{K} + \lambda \mathbf{S})\boldsymbol{\psi} = 0 \quad (6)$$

式中  $\mathbf{K}$  为刚度矩阵; $\lambda$  为特征值(也叫比例因子); $\mathbf{S}$  为应力刚度矩阵; $\boldsymbol{\psi}$  为位移特征矢量。利用式(6)可以计算膜片的屈曲载荷与屈曲模态。

### 4.2 单元选择

本文研究的锥柱形膜片,其几何结构复杂,目前板壳理论界少见其理论解。本文以球壳屈曲临界载荷理论解来检验网格单元。

设球壳半径<sup>[22]</sup>为  $R'$ ,球壳厚度为  $h'$ ,材料为纯钛,承受均匀外压  $p$ 。在球坐标下进行计算,则算子  $\Delta$  为

$$\Delta = \frac{1}{R'} \left[ \frac{1}{R'^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\cot \varphi}{R'^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} + \frac{1}{R'^2 \sin^2 \varphi} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right]$$

基本状态

$$T_{1i} = T_{2i} = -\frac{1}{2} p R' = \bar{T}^0$$

$$T_{12i} = T_{21i} = 0$$

求解

$$D \Delta^4 w + \frac{E h'}{R'^2} \Delta w - \bar{T}^0 \Delta^2 w = 0$$

得出

$$-\bar{T}_{cr}^0 = \frac{E h'^2}{\sqrt{3(1-\mu^2)} R'}$$

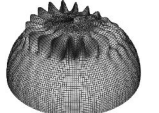
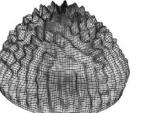
则

$$p_{cr} = \frac{2}{\sqrt{3(1-\mu^2)}} E \left( \frac{h'}{R'} \right)^2$$

其中  $T_{1i}, T_{2i}, T_{12i}, T_{21i}$  表示球壳的受力状态; $w$  表示挠度; $E, \mu$  分别表示材料的弹性模量与泊松比。

取球壳半径为 300 mm,球壳厚度为 0.6 mm,应用旋转划分网格的方法,选择四边形单元 S4R, S4, S8R 将球壳划分为轴对称网格,具体数值解与理论解的对比见表 2。从屈曲载荷角度分析,单元 S4R 与 S8R 较好;从屈曲模态角度分析,由于结构划分网格对称,仅单元 S4R 计算结果合理。因此,本文选择 S4R 单元离散膜片结构,这种单元计算精度高,并广泛应用于薄、厚壳单元,并可模拟无限薄膜应变问题。

表 2 数值解与理论解的对比  
Table 2 Comparison of numerical and theoretical solutions

|             | S4R                                                                                         | S4                                                                                           | S8R                                                                                          |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 理论解/<br>MPa | 0.5304                                                                                      | 0.5304                                                                                       | 0.5304                                                                                       |
| 数值解/<br>MPa | 0.5293                                                                                      | 0.5549                                                                                       | 0.5299                                                                                       |
| 屈曲<br>模态    | (1)<br> | (2)<br> | (3)<br> |

### 4.3 计算模型与工况

图 1 中给出了纯钛锥柱形膜片的结构示意图,膜片由三部分组成:圆弧旋转段、锥度柱段、下端弯边。有限元计算模型按照表 1 中给定参数进行建立,分别计算出膜片各结构因素对应的屈曲载荷响应值。膜片下端弯边与贮箱壳体交接处为焊接结构,数值计算时对膜片边缘作固支处理。同时将膜片内外表面的压差  $\Delta p$  简化为作用在膜片外表面的压力载荷,取值为 0.2 MPa。

## 5 Kriging 代理模型的建立及应用

### 5.1 建立 Kriging 代理模型

#### 5.1.1 回归模型

根据正交试验设计选择的 36 个样本点进行有限元计算,得出膜片的屈曲载荷响应值. 选择一次回归模型,代入膜片各设计变量值及相应的屈曲载荷响应值,求得系数  $\beta$  见表 3,  $\beta_0 \sim \beta_4$  分别为对应于常数项、膜片半径与厚度、锥段高度与角度的系数. 根据各项系数,得出膜片屈曲载荷随各结构因素的变化趋势:膜片厚度对屈曲载荷影响最显著,且呈正相关趋势;膜片半径与锥段高度对膜片屈曲载荷影响次之,且呈负相关趋势;锥段角度对屈曲载荷影响最小.

表 3 回归模型系数  $\beta$  值  
Table 3  $\beta$  value for regression model

|       | $\beta_0$ | $\beta_1$ | $\beta_2$ | $\beta_3$ | $\beta_4$ |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Gauss | 0.2556    | -0.2617   | 0.9391    | -0.4831   | 0.0166    |
| Cubic | 0.5553    | -0.3176   | 0.9772    | -0.4710   | 0.0070    |

表 4 最优  $\theta$  值  
Table 4 Optimization value for  $\theta$

|       | 初始值 ( $\theta_1 \sim \theta_4$ ) | 优化值 ( $\theta_1 \sim \theta_4$ ) | 寻优次数 |
|-------|----------------------------------|----------------------------------|------|
| Gauss | [0.2, 0.2, 0.2, 0.2]             | [0.2997, 0.1, 0.1, 0.1]          | 26   |
| Cubic | [0.2, 0.2, 0.2, 0.2]             | [0.2119, 0.2529, 0.2466, 0.1]    | 30   |

### 5.2 模型检验

基于本文所建立的 Kriging 代理模型,随机选择一组数据作为输入,将 Kriging 代理模型计算得到的膜片屈曲载荷与有限元分析所得膜片屈曲载荷进行比较,用于检验 Kriging 代理模型的准确性,结果如表 5 所示. 由表可知,基于 Gauss 相关函数建立的 Kriging 代理模型预测未知样本点屈曲载荷误差较大,仅样本点 5 的误差在工程误差许可 5% 以内,而样本点 4 的误差超过 50%,不适合用于工程预测膜片屈曲载荷. 基于 Cubic 相关函数建立的 Kriging 代理模型预测未知样本点屈曲载荷误差控制在 5% 以内,样本点 1, 4 的误差在 1% 以内,计算精度满足工程实际需要. 因此,基于 Cubic 相关函数建立的 Kriging 代理模型有很好的近似精度,能用于工程预测锥柱形膜

#### 5.1.2 相关函数中 $\theta$ 值的优化选择

由于膜片半径与厚度、锥段高度与角度对膜片屈曲载荷影响差异较大,因此需要针对不同因素设定不同的  $\theta$  值,上述 4 个结构因素分别对应于  $\theta_1 \sim \theta_4$ .

对式(4)~式(5)中  $\theta$  值采用最大似然估计值,得出其表达式(7),约束条件是  $\theta_i > 0 (i=1 \sim 4)$ .  $\theta$  的估计值在式(7)取得最大值处获得<sup>[18]</sup>.

$$-\frac{m \ln(\sigma^2) + \ln |R|}{2} \quad (7)$$

其中  $\sigma^2$  和  $|R|$  是  $\theta_i$  的函数,  $m$  为正交数值试验选择的样本点数. 对于给定的一组  $\theta_i$  值均能建立插值模型,但最优 Kriging 模型是求解式(7)的非线性无约束优化问题.  $\theta$  初值取为 [0.2, 0.2, 0.2, 0.2],求得的最优  $\theta$  值见表 4.

片的屈曲载荷,减少了繁杂的有限元建模与计算过程,提高了工作效率,并适用于其他复杂的膜片结构或航空航天结构,具有较大的工程应用价值.

### 5.3 模型应用

#### 5.3.1 预测未知点的屈曲载荷

传统的锥柱形膜片屈曲载荷计算需要根据设定的膜片半径与厚度、锥段高度与角度进行几何建模,然后通过有限元离散与计算求得屈曲载荷. 改变设计变量的任一参数,均需要重新建模并计算,计算过程及周期较长,工作效率较低. 通过代理模型能在保证工程计算精度情况下,预测未知设计点的屈曲载荷,极大提高了工作效率,见表 5.

表 5 Kriging 代理模型的精度检验  
Table 5 Accuracy test for Kriging metamodel

| 序号 | 参数   |      |      |                     | 有限元<br>计算值 | 代理模型计算值<br>(Gauss) | 误差/%<br>(Gauss) | 代理模型计算值<br>(Cubic) | 误差/%<br>(Cubic) |
|----|------|------|------|---------------------|------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
|    | R/mm | h/mm | H/mm | $\alpha/(^{\circ})$ |            |                    |                 |                    |                 |
| 1  | 210  | 0.65 | 75   | 7.5                 | 0.2213     | 0.2407             | 8.77            | 0.2234             | 0.95            |
| 2  | 230  | 0.55 | 65   | 6.5                 | 0.1477     | 0.2050             | 38.79           | 0.1503             | 1.76            |
| 3  | 250  | 0.75 | 85   | 8.5                 | 0.2070     | 0.2463             | 18.99           | 0.1991             | -3.82           |
| 4  | 270  | 0.45 | 55   | 5.5                 | 0.0866     | 0.1306             | 50.81           | 0.0834             | -3.70           |
| 5  | 290  | 0.85 | 95   | 9.5                 | 0.1971     | 0.2056             | 4.31            | 0.1963             | -0.41           |

### 5.3.2 结构优化设计的约束函数

锥柱形膜片几何结构复杂,至今鲜见其屈曲载荷的解析解.依靠传统计算锥柱形膜片屈曲载荷的方法,存在 2 个主要问题:一是根据工程设计需要确定一定范围的屈曲载荷,无法快速得出膜片各结构参数;二是由于传统方法不能根据膜片结构参数确定屈曲载荷,无法将膜片屈曲载荷作为膜片结构优化的约束函数,而膜片作动压力是膜片优化设计需考虑的关键因素.

建立的 Kriging 代理模型能较好解决上述 2 个问题.以常用的 0.2 MPa 屈曲载荷为例,检验 Kriging 代理模型求解膜片结构参数的能力,考虑到 1% 的许可误差,屈曲载荷设定为 0.198~0.202 MPa.通过 Kriging 代理模型计算得到的各结构参数及屈曲载荷见表 6.由于根据给定的典型结构因素参数值能快速准确地预测未知点的屈曲载荷,因而建立的 Kriging 代理模型也能作为锥柱形膜片结构优化设计的约束函数或目标函数.

表 6 结构参数及屈曲载荷

Table 6 Structural parameters and buckling loads

| 序号 | R/mm | h/mm | H/mm | $\alpha/(^{\circ})$ | 屈曲载荷/MPa |
|----|------|------|------|---------------------|----------|
| 1  | 240  | 0.6  | 60   | 6                   | 0.2005   |
| 2  | 240  | 0.7  | 80   | 7                   | 0.1988   |
| 3  | 260  | 0.6  | 50   | 10                  | 0.1999   |
| 4  | 260  | 0.7  | 70   | 8                   | 0.1990   |
| 5  | 260  | 0.8  | 100  | 5                   | 0.1996   |
| 6  | 280  | 0.7  | 70   | 5                   | 0.1982   |

## 6 结 论

基于 Kriging 代理模型,建立一种考虑膜片半径与厚度、锥段高度与角度等典型结构特征的

计算屈曲载荷的工程方法,并选取典型样本点对模型进行了数值验证.建立的 Kriging 代理模型能用于工程预测锥柱形膜片的屈曲载荷,减少了繁杂的有限元建模与计算过程,提高了工作效率.同时,模型也能作为膜片结构优化设计的约束函数,根据工程需要设定膜片屈曲载荷,进行结构因素参数值的计算.这一方法适用于其他复杂的膜片结构或航空航天结构,具有较大的工程应用价值.

1) 膜片厚度对屈曲载荷影响最显著,且呈正相关趋势;膜片半径与锥段高度对膜片屈曲载荷影响次之,且呈负相关趋势;锥段角度对屈曲载荷影响最小.

2) 基于 Cubic 相关函数建立的 Kriging 代理模型预测未知样本点屈曲载荷误差控制在 5% 以内,较基于 Gauss 相关函数建立的模型更适合用于工程预测锥柱形膜片的屈曲载荷.

## 参考文献:

- [1] 毛根旺,唐金兰.航天器推进系统及其应用[M].西安:西北工业大学出版社,2009.
- [2] Cardullo M W. Metal expulsion diaphragm development for spherical propellant tanks[R]. NASA 62-666,1962.
- [3] Stofan A J, Sumner I E. Experimental investigation of the slosh-damping effectiveness of positive-expulsion bags and diaphragms in spherical tanks[R]. NASA TN D-1712,1963.
- [4] Friona A J, Wood R. MX stage 4 propellant storage assembly[R]. AD A103844,1997.
- [5] 何星星,袁杰红,周仕明.内环向加筋圆柱形金属膜片变形数值仿真与失效分析[J].强度与环境,2007,34(6):16-21.  
HE Xingxing, YUAN Jiehong, ZHOU Shiming. Deformation numerical simulation and failure analysis of ring-stiffened metal diaphragm for positive expulsion tanks[J]. Structure and Environment Engineering, 2007, 34(6): 16-21. (in Chinese)
- [6] 张绪虎,唐斌,李金山,等.航天器贮箱用钛制隔膜变形过

- 程的数值模拟[J]. 宇航学报, 2010, 31(9): 2184-2188.
- ZHANG Xuhu, TANG Bin, LI Jinshan, et al. Deformation numerical simulation of titanium diaphragm for spacecraft tank[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(9): 2184-2188. (in Chinese)
- [7] 王刚. 推进剂管理用金属膜片挤压变形有限元分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- WANG Gang. The finite element analysis of metal diaphragm deformation for propellant management device [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)
- [8] 臧家亮. 神州载人飞船推进分系统的研制[J]. 航天器工程, 2004, 13(1): 57-64.
- ZANG Jialiang. The development of the propulsion subsystem of Shenzhou manned spaceship[J]. Spacecraft Engineering, 2004, 13(1): 57-64. (in Chinese)
- [9] 强洪夫, 周算, 王广, 等. 径厚比对锥柱形金属膜片屈曲和后屈曲状态的影响[J]. 航空动力学报, 2012, 27(11): 2521-2528.
- QIANG Hongfu, ZHOU Suan, WANG Guang, et al. Effect of ratio of radius to thickness on buckling and post-buckling behaviors of metallic spherical-cone diaphragms for positive expulsion tanks[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(11): 2521-2528. (in Chinese)
- [10] Giunta A A. Aircraft multidisciplinary design optimization using design of experiments theory and response surface modeling methods[D]. Blacksburg, US: Virginia Polytechnic Institute, 1997.
- [11] Simpson W, Mauery T M, Korte J J, et al. Comparison of response surface and linear models for multidisciplinary design optimization[R]. AIAA 98-4755, 1998.
- [12] 刘克龙, 姚卫星, 穆雪峰. 基于 Kriging 代理模型的结构形状优化方法研究[J]. 计算力学学报, 2006, 23(3): 344-347, 362.
- LIU Kelong, YAO Weixing, MU Xuefeng. A method of structural shape optimization based on Kriging model[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2006, 23(3): 344-347, 362. (in Chinese)
- [13] 陈巍, 周雄辉, 张汝珍, 等. 基于 Kriging 代理模型的注塑产品翘曲优化[J]. 上海交通大学学报, 2010, 44(4): 588-592.
- CHEN Wei, ZHOU Xionghui, ZHANG Ruzhen, et al. Warpage optimization for injection molding based on Kriging metamodel[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2010, 44(4): 588-592. (in Chinese)
- [14] 谢延敏, 徐笑梅, 罗征志. 基于 Kriging 模型的翻边成形参数优化[J]. 塑性工程学报, 2010, 17(5): 4-9.
- XIE Yanmin, XU Xiaomei, LUO Zhengzhi. Research on parameter optimization in flanging process based on Kriging metamodel[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2010, 17(5): 4-9. (in Chinese)
- [15] 刘纪涛, 刘飞, 张为华. Kriging 模型在固体火箭发动机装药可靠性分析中的应用[J]. 航空动力学报, 2010, 25(1): 193-197.
- LIU Jitao, LIU Fei, ZHANG Weihua. Application of Kriging model to reliability analysis of solid rocket motor grain [J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(1): 193-197. (in Chinese)
- [16] 韩永志, 高行山, 李立州, 等. 基于 Kriging 模型的涡轮叶片多学科设计优化[J]. 航空动力学报, 2007, 22(7): 1055-1059.
- HAN Yongzhi, GAO Hangshan, LI Lizhou, et al. Kriging model-based multidisciplinary design optimization for turbine blade[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(7): 1055-1059. (in Chinese)
- [17] 陈志英, 任远, 白广忱, 等. 粒子群优化的 Kriging 近似模型及其在可靠性分析中的应用[J]. 航空动力学报, 2011, 26(7): 1522-1530.
- CHEN Zhiying, REN Yuan, BAI Guangchen, et al. Particle swarm optimized Kriging approximate model and its application to reliability analysis[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(7): 1522-1530. (in Chinese)
- [18] Sacks J, Welch W J, Mitchell T J, et al. Design and analysis of computer experiments[J]. Statistical Science, 1989, 4(4): 409-435.
- [19] Lophaven S N, Nielsen H B, Søndergaard J. DACE: a matlab Kriging toolbox[R]. Informatics and Mathematical Modelling Report, IMM-REP-2002-12, 2002.
- [20] 王琦. MDO 优化算法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- WANG Qi. Research on arithmetic of MDO[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.
- [21] 嵇晓宇, 徐兵, 郁向东, 等. 薄壳结构的非线性屈曲有限元分析[J]. 固体力学学报, 2003, 24(增刊): 214-217.
- JI Xiaoyu, XU Bing, YU Xiangdong, et al. Finite element analysis of nonlinear buckling for thin shell[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2003, 24(suppl): 214-217. (in Chinese)
- [22] 黄克智. 板壳理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 1987.