

运用代理模型方法预测潜艇结构模型的振动声辐射

郭明慧^{1,2}, 黎胜^{1,2}

1 大连理工大学 运载工程与力学学部 船舶工程学院, 辽宁 大连 116024

2 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024

摘要: 基于 Kriging 模型和最优对称拉丁超立方体抽样方法, 以简化的水下潜艇结构模型为例建立水下相对复杂结构振动声辐射计算的代理模型, 可对水下潜艇结构模型进行共振频率和声功率级的预测。建立的代理模型可以在整个设计变量尺寸范围内对模型的振动声辐射进行实时预测。由计算结果得出, 使用基于 Kriging 方法的代理模型能较准确地完成固有频率和声功率级的预测。所建立的代理模型能快速、准确地预报在整个设计变量尺寸范围内潜艇结构模型的振动声辐射。

关键词: Kriging 模型; 振动; 声辐射; 潜艇结构模型

中图分类号: U661.44

文献标志码: A

文章编号: 1673-3185(2013)06-69-06

A Surrogate Model for Structural Vibration and Acoustic Radiation of Underwater Submarine Structures

GUO Minghui^{1,2}, LI Sheng^{1,2}

1 School of Naval Architecture Engineering, Faculty of Vehicle Engineering and Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

2 State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

Abstract: In this paper, a surrogate model based on the Kriging model and the optimal symmetric latin hypercube sampling method is established to calculate the resonant frequency and the corresponding power level of acoustic radiation for underwater submarine structures. Particularly, this model can achieve real-time estimation of the vibro-acoustic response in the whole design space. It is observed that the Kriging model provides estimation results with high accuracy, and the overall surrogate model is applicable for the rapid prediction of submarine shell vibration and acoustic radiation.

Key words: Kriging model; vibration; acoustic radiation; submarine structure model

0 引言

代理模型指的是计算量相对较小、但其计算结果与高精度模型的计算结果非常接近, 以至于可以替代高精度计算结果的一种模型。黎胜等^[1]运用代理模型, 以水下加筋板为例进行了振动声辐射的预测, 计算结果表明, 运用代理模型计算水

下加筋板的共振频率和声功率级精度很高。可见, 运用代理模型对潜艇振动声辐射特性进行研究具有一定的发展前景。

目前, 常用的代理模型构造方法有支持向量机法^[2]、多项式响应面法、径向基方法、人工神经网络法和 Kriging 方法^[3-6]。支持向量模型通过结构风险最小化原理提高泛化能力, 在处理非线性

与高维问题方面具有一定的优势,但对其内部参数的确定至今还没有明确的理论和方法。多项式响应面模型具有良好的连续性和可导性,但在处理高度非线性的高维问题时预测效果不太理想。径向基函数模型灵活性好、结构简单,计算量也相对较少,但缺乏有效的精度评价方法,缺乏合理的更新体系。人工神经网络模型可以在大量数据中找出隐含的潜在规律。Kriging模型则是一种估计方差最小的无偏估计模型。前4种方法各有其优点,但对于拟合高度非线性的高维问题,Kriging方法最为合适。

由于建立Kriging模型需要在整个设计空间中选取一定数量的样本,因此需要用到试验设计方法来选取样本点。最为常见的试验设计方法有正交设计、均匀设计和拉丁超立方体抽样设计^[7]。正交设计是根据因子设计的分式原理采用正交表来设计安排试验,并对结果进行统计分析的多因子试验方法。均匀设计是采用均匀设计表安排试验,并用回归分析进行数据分析的一种试验设计方法。拉丁超立方体抽样方法是一种充满整个设计空间的方法,能够避免抽取重复的样本,抽样效率较高,该方法可在抽取较少样本点的情况下得到较高的计算精度。

值得注意的是,以往应用代理模型分析结构振动声辐射特性时都是针对简单的平板结构,而对水下相对复杂结构(潜艇等)进行分析会更有意义,因此本文将针对潜艇结构简化模型进行更为准确的分析计算。

对复杂船体结构固有频率的快速计算可基于经验或统计数据的数据库和图表进行,也可使用根据数据统计和回归获得的近似公式进行预报^[8]。本文将使用代理模型对复杂结构固有频率的计算进行探讨,该方法基于样本点数据,不仅能快速、准确地预报结构固有频率,还能对结构的辐射声功率进行预测。

本文将采用Kriging方法构造代理模型,应用最优对称拉丁超立方体抽样方法^[2]选取样本点建立潜艇结构简化模型的代理模型,分析计算其固有频率和声功率级。

1 Kriging模型

影响代理模型预测精度的因素^[9]很多,其中原模型的复杂程度是选择样本时必须考虑的因素之一。定性地说,原模型的结构越复杂,建立代理模型所要选取的样本点就越多。一般而言,代理模型的预测误差会随着样本点数量的增多而减

小,但当样本点数量达到一定程度时,样本点继续增多对减小预测误差也无益。

构造代理模型时,首先要确定设计变量,然后根据选择的试验设计方法确定样本点。目前,常用的选取样本点的方法是取设计空间维数的一定倍数作为样本的大小^[10]。设计空间维数即设计变量的个数。目前,2种主要的试验设计方法是拉丁超立方体抽样方法和均匀设计方法^[11]。样本点选取之后,可以计算出各样本点处的响应值。

Kriging模型表示的未知函数 $y(\mathbf{x})$ 为^[12]

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

式中: \mathbf{x} 为 m 维变量,即 m 个设计变量; β 为一个确定的整体模型; $z(\mathbf{x})$ 是这个整体模型的局部误差,用随机过程表示。

$Z(x^i)$ 和 $Z(x^j)$ 之间的相关性与 x^i 和 x^j 这两点间的距离关系很大。在Kriging模型中,一个特殊的加权距离替代了常规的欧几里德距离,其计算公式如下所示:

$$d(x^i, x^j) = \sum_{k=1}^m \theta_k |x_k^i - x_k^j| \quad (2)$$

式中: θ_k 是相关变量参数 θ 的第 k 个分量; i, j 是样本空间中任意的两点,且 $1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n$ 。

x^i 和 x^j 两点间的空间位置关系用相关函数 R 表示:

$$R(Z(x^i), Z(x^j)) = \exp[-d(x^i, x^j)] \quad (3)$$

$Z(\mathbf{x})$ 的均值为0,方差为 σ^2 ,协方差为

$$\text{cov}(Z(x^i), Z(x^j)) = \sigma^2 R(x^i, x^j) \quad (4)$$

Kriging模型的预测值为

$$\hat{y}(\mathbf{x}) = \hat{\beta} + \mathbf{r}^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y} - \mathbf{I}\hat{\beta}) \quad (5)$$

式中: $\hat{\beta}$ 是 β 的估计值; \mathbf{R} 为 $n \times n$ 矩阵,其第 (i, j) 个点为 $R(Z(x^i), Z(x^j))$; $\mathbf{y} = [y(x^1), \dots, y(x^n)]$; \mathbf{r} 为样本点与预测点之间的相关向量,其第 i 个分量为

$$r_i(\mathbf{x}) = \text{cov}[R(Z(\mathbf{x}), Z(x^i))] \quad (6)$$

构建Kriging模型需要估计未知参数 θ ,这一参数可以根据最大似然函数来估计:

$$\ln(\hat{\beta}, \hat{\sigma}^2, \theta) = -(n/2)\ln(2\pi) - \frac{1}{2}\ln(|\mathbf{R}|) -$$

$$(n/2)\ln(\hat{\sigma}^2) - (1/2\hat{\sigma}^2)(\mathbf{y} - \mathbf{I}\hat{\beta})^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y} - \mathbf{I}\hat{\beta}) \quad (7)$$

其中, \mathbf{I} 为 m 维的单位向量。求解上式的方法见文献[9]。

对于一个给定的 $\theta, \hat{\beta}, \hat{\sigma}^2$,可以定义为:

$$\hat{\beta} = (\mathbf{I}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{y}) / (\mathbf{I} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{I}) \quad (8)$$

$$\hat{\sigma}^2 = (\mathbf{y} - \mathbf{I}\hat{\beta})^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y} - \mathbf{I}\hat{\beta}) / n \quad (9)$$

2 拉丁超立方体抽样

在构建 Kriging 模型时,采用的试验设计方法为最优对称拉丁超立方体抽样。拉丁超立方体抽样方法是 McKay 等专门为仿真试验提出的一种试验设计方法,后又被许多学者进行了大量改进^[13-14]。该方法相对于其它方法而言抽样样本少且样本空间相对完备,因此被广泛应用于复杂但可随机输入变量的模型中。另外,通过该方法得到的参数为无偏估计值。

拉丁超立方体抽样方法的本质是一种在各个维度上都较均匀的分层抽样方法,只需较少的样本就可实现快速收敛。拉丁超立方体抽样方法可以避免重复抽取样本,减少抽样次数;此外,使用该方法抽样时还可使分布两端的样本参与其中,这使得抽样的样本覆盖面更广。

假设拉丁超立方体设计中有 d 个设计变量,即 d 维设计空间,样本点数量取为 n 。该方法是将各设计变量的取值范围分成 n 个相等区间,整个设计变量空间被分成 n^d 个子区间;产生 $n \times d$ 的矩阵 U , U 的每一列均为 $\{1, 2, \dots, n\}$ 的一个随机全排列; U 的每一行都对应一个子区间,在每个被选中的子区间中随机生成一个样本点,就得到了 n 个样本点。

最优对称拉丁超立方体抽样方法是在拉丁超立方体抽样方法的基础上外加一准则,用此准则来筛选拉丁超立方体抽样,以求得在此准则下的最优设计^[11]。一般准则有总均方差、极小极大距离和极大极小距离。本文采用总均方差准则得到最优对称拉丁超立方体抽样方法。

3 算例与分析

本文所计算的浸没在水中的简化潜艇结构模型如图 1 所示。潜艇长 $L=62\text{ m}$, 平行舯体长为 $l=42\text{ m}$, 宽 $B_1=7.5\text{ m}$, $B_2=5.98\text{ m}$, $B_3=0.7\text{ m}$, 壳体厚度 $D=0.032\text{ m}$, 潜艇的材料为钢材, 密度为 $\rho=7\ 850\text{ kg/m}^3$, 杨氏模量 $E=2.1 \times 10^{11}\text{ N/m}^2$, 泊松比 $\nu=0.3$ 。

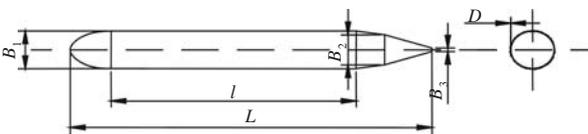


图1 潜艇结构模型

Fig.1 Submarine structure model

流体介质为海水, 密度为 $\rho=1\ 025\text{ kg/m}^3$, 水中的声速为 $c=1\ 500\text{ m/s}$ 。潜艇在水中的有限元模型如图 2 所示。

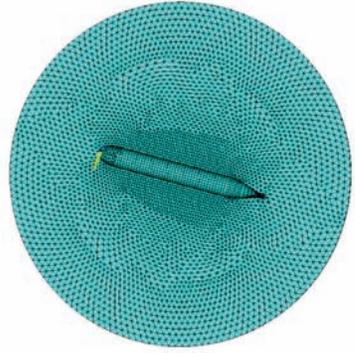


图2 潜艇结构模型在水中的有限元模型

Fig.2 Finite element model of submarine underwater

水中潜艇结构模型的设计变量取为 3 个, 分别为潜艇长度 L , 潜艇宽度 B_1 和壳体厚度 D , 各自变量取值范围如表 1 所示。

表1 设计变量及其取值范围

Tab.1 Design variables and their ranges

| design variables | value ranges |
|---|-----------------|
| length L/m | 49.6~74.4 |
| breadth B_1/m | 6~9 |
| thickness of cylindrical shell D/m | 0.025 6~0.038 4 |

本文采用最优对称拉丁超立方体抽样方法选取样本点。样本大小根据设计空间维数的一定倍数确定。由于潜艇结构模型相对复杂, 当样本大小取 4 倍设计空间维数时, 计算所得误差偏大。因此, 增大样本点, 取 $n=6d$ (n 为样本点数量, d 为设计变量的个数), 得到 18 个样本点的具体数值如表 2 所示。

表2 选取的 18 个样本点

Tab.2 Selected sample points

| sample point No. | length L/m | breadth B_1/m | thickness of cylindrical shell D/m |
|------------------|---------------------|------------------------|---|
| 1 | 53.976 5 | 6.176 5 | 0.027 1 |
| 2 | 70.023 5 | 8.823 5 | 0.036 9 |
| 3 | 74.400 0 | 7.235 3 | 0.030 9 |
| 4 | 56.894 1 | 9.000 0 | 0.031 6 |
| 5 | 58.352 9 | 7.941 2 | 0.038 4 |
| 6 | 65.647 1 | 7.058 8 | 0.025 6 |
| 7 | 67.105 9 | 6.000 0 | 0.032 4 |
| 8 | 49.600 0 | 7.764 7 | 0.033 1 |
| 9 | 71.482 4 | 8.294 1 | 0.026 4 |
| 10 | 52.517 6 | 6.705 9 | 0.037 6 |
| 11 | 72.941 2 | 6.529 4 | 0.034 6 |
| 12 | 51.058 8 | 8.470 6 | 0.029 4 |
| 13 | 61.270 6 | 8.647 1 | 0.033 9 |
| 14 | 62.729 4 | 6.352 9 | 0.030 1 |
| 15 | 68.564 7 | 7.588 2 | 0.028 6 |
| 16 | 55.435 3 | 7.411 8 | 0.035 4 |
| 17 | 59.811 8 | 6.882 4 | 0.027 9 |
| 18 | 64.188 2 | 8.117 6 | 0.036 1 |

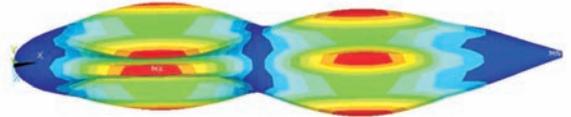
用 ANSYS 分别建立这 18 个模型, 计算求解得到 1-3 阶、2-2 阶和 2-3 阶这 3 阶的共振频率, 18 个样本点的共振频率如表 3 所示。

表 3 结构的共振频率

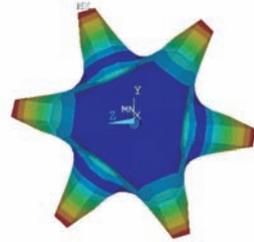
Tab.3 The resonance frequencies of structure

| sample point No. | resonance frequency /Hz | | |
|------------------|-------------------------|-----------|-----------|
| | order 1-3 | order 2-2 | order 2-3 |
| 1 | 2.761 | 4.740 | 4.278 |
| 2 | 1.824 | 3.634 | 2.956 |
| 3 | 2.233 | 2.740 | 2.817 |
| 4 | 1.628 | 5.264 | 4.001 |
| 5 | 2.504 | 5.229 | 4.314 |
| 6 | 1.858 | 3.232 | 2.805 |
| 7 | 3.691 | 3.287 | 4.224 |
| 8 | 2.391 | 6.674 | 5.503 |
| 9 | 1.344 | 2.912 | 2.301 |
| 10 | 3.547 | 6.037 | 5.483 |
| 11 | 3.316 | 2.943 | 3.778 |
| 12 | 1.835 | 6.150 | 4.911 |
| 13 | 1.793 | 4.614 | 3.565 |
| 14 | 2.929 | 3.691 | 3.784 |
| 15 | 1.819 | 3.189 | 2.742 |
| 16 | 2.638 | 5.454 | 4.575 |
| 17 | 2.229 | 4.051 | 3.503 |
| 18 | 2.156 | 4.192 | 3.482 |

立了可实时预报设计空间任一点 1-3 阶、2-2 阶和 2-3 阶这 3 阶共振频率的代理模型。代理模型建立后, 须要检验其预测精度, 由此, 在设计变量空间中选取 (68.2, 6.75, 0.035 2) 和 (49.6, 9, 0.025 6) 两个预测点, 使用代理模型计算这两点的 1-3 阶、2-2 阶和 2-3 阶这 3 阶的共振频率, 如表 4 所示。表 4 还给出了采用常规耦合方法求得的共振频率。从表 4 中可以看到, 使用代理模型对共振频率的预报误差最大为 2.33%, 可见代理模型具有较高的精度。其中, 2-3 阶振型图如图 3 所示。



(a) 2 阶径向振型图



(b) 3 阶轴向振型图

图 3 潜艇结构模型振型图

Fig.3 Vibration model of submarine structure

基于 18 个样本的共振频率和 Kriging 方法, 建

表 4 基于耦合计算和代理模型的结构共振频率

Tab.4 The resonance frequencies of the structure determined by finite element-boundary element coupling method and through surrogate model method

| | frequency/Hz | | | | | |
|-----------|-----------------------|-----------------|---------|--------------------|-----------------|---------|
| | (68.2, 6.75, 0.035 2) | | | (49.6, 9, 0.025 6) | | |
| | coupling method | surrogate model | error/% | coupling method | surrogate model | error/% |
| order 1-3 | 3.124 | 3.131 | 0.22 | 1.623 | 1.651 | 1.73 |
| order 2-2 | 3.414 | 3.403 | 0.32 | 6.174 | 6.091 | 1.34 |
| order 2-3 | 3.795 | 3.767 | 0.74 | 5.024 | 5.141 | 2.33 |

以上是选取 18 个样本点的计算结果, 预测误差最大为 2.33%。当选取 12 个样本点时, 预测误差最大达到了 6.7%。一般情况下, 是样本点数量越多, 预测精度越高。然而样本点越靠近设计变量中间值, 相对也越好, 因此在 12 个样本点的基础上增加各设计变量中间值 (62, 7.5, 0.032) 这一特殊样本点后, 预测误差最大变为 2.27%。计算结果表明, 13 个样本点的预测精度高于 18 个样本点, 且 13 个样本点的计算量明显少于 18 个样本点的计算量。选取的 13 个样本点如表 5 所示。

同样用 ANSYS 分别建立这 13 个模型, 计算求解得到 1-3 阶、2-2 阶和 2-3 阶这 3 阶的共振频率, 同时运用 Virtual Lab Acoustics 计算得到共振频率处的声功率级, 13 个样本点的共振频率和声功率级如表 6 所示。

表 5 选取的 13 个样本点

Tab.5 Selected sample points

| sample point No. | length L/m | breadth B_1/m | thickness of cylindrical shell D/m |
|------------------|--------------|-----------------|--------------------------------------|
| 1 | 56.363 6 | 6.272 7 | 0.025 6 |
| 2 | 67.636 4 | 8.727 3 | 0.038 4 |
| 3 | 51.854 5 | 9.000 0 | 0.032 6 |
| 4 | 72.145 5 | 6.000 0 | 0.031 4 |
| 5 | 58.618 2 | 7.090 9 | 0.037 2 |
| 6 | 65.381 8 | 7.909 1 | 0.026 8 |
| 7 | 74.400 0 | 6.818 2 | 0.027 9 |
| 8 | 49.600 0 | 8.181 8 | 0.036 1 |
| 9 | 63.127 3 | 6.545 5 | 0.033 7 |
| 10 | 60.872 7 | 8.454 5 | 0.030 3 |
| 11 | 54.109 1 | 7.636 4 | 0.029 1 |
| 12 | 69.890 9 | 7.363 6 | 0.034 9 |
| 13 | 62.000 0 | 7.500 0 | 0.032 0 |

表6 结构共振频率及共振频率处声功率级

Tab.6 The resonance frequencies of structure and the corresponding radiated power

| sample point No. | order 1-3 | | order 2-2 | | order 2-3 | |
|------------------|---------------|-----------------------|---------------|-----------------------|---------------|-----------------------|
| | frequency /Hz | sound power level /dB | frequency /Hz | sound power level /dB | frequency /Hz | sound power level /dB |
| 1 | 2.458 | 65.95 | 4.243 | 75.93 | 3.791 | 80.56 |
| 2 | 1.983 | 63.77 | 3.973 | 77.76 | 3.238 | 78.44 |
| 3 | 1.864 | 71.95 | 6.392 | 84.70 | 5.058 | 84.08 |
| 4 | 3.551 | 70.14 | 2.815 | 70.27 | 3.947 | 75.54 |
| 5 | 3.043 | 67.73 | 4.890 | 80.94 | 4.453 | 78.14 |
| 6 | 1.552 | 61.57 | 3.485 | 76.11 | 2.762 | 77.88 |
| 7 | 2.240 | 67.17 | 2.561 | 75.59 | 2.752 | 75.78 |
| 8 | 2.433 | 67.20 | 7.064 | 83.13 | 5.803 | 84.72 |
| 9 | 3.178 | 70.53 | 3.884 | 81.10 | 4.048 | 75.80 |
| 10 | 1.638 | 61.79 | 4.411 | 81.15 | 3.384 | 78.18 |
| 11 | 1.993 | 65.99 | 5.296 | 82.03 | 4.222 | 81.44 |
| 12 | 2.530 | 66.06 | 3.328 | 79.18 | 3.296 | 79.18 |
| 13 | 2.200 | 68.35 | 4.140 | 77.45 | 3.507 | 79.43 |

基于这13个样本点重新建立代理模型,同样选取(68.2, 6.75, 0.035 2)和(49.6, 9, 0.025 6)这两个预测点,使用代理模型分别计算这两点的1-3阶、2-2阶和2-3阶这3阶的共振频率与声功率级,分别如表7和表8所示。同时,表7和表8还给出了采用常规耦合方法求得的共振频率和相应的声功率级。采用ANSYS和Virtual Lab

Acoustics常规耦合方法计算一次结构的声功率级约需10 min以上,而基于样本点结果的无偏估计模型则可实时预测结构声功率级。从表中可以看到,使用代理模型对共振频率的预报误差最大为2.27%,对共振处的声功率级的预报误差最大为5.77%,可见代理模型具有相对较高的预测精度。

表7 基于耦合计算和代理模型的结构共振频率

Tab.7 The resonance frequencies of the structure determined by finite element-boundary element coupling method and through surrogate model method

| | frequency/Hz | | | | | |
|-----------|-----------------------|-----------------|---------|--------------------|-----------------|---------|
| | (68.2, 6.75, 0.035 2) | | | (49.6, 9, 0.025 6) | | |
| | coupling method | surrogate model | error/% | coupling method | surrogate model | error/% |
| order 1-3 | 3.124 | 3.141 | 0.54 | 1.623 | 1.632 | 0.55 |
| order 2-2 | 3.414 | 3.406 | 0.23 | 6.174 | 6.167 | 1.35 |
| order 2-3 | 3.795 | 3.786 | 0.24 | 5.024 | 4.910 | 2.27 |

表8 基于耦合计算和代理模型的结构共振频率处声功率级

Tab.8 Radiated power corresponding to the resonance frequencies of the structure determined by finite element-boundary element coupling method and through surrogate model method

| | sound power level/dB | | | | | |
|-----------|-----------------------|-----------------|---------|--------------------|-----------------|---------|
| | (68.2, 6.75, 0.035 2) | | | (49.6, 9, 0.025 6) | | |
| | coupling method | surrogate model | error/% | coupling method | surrogate model | error/% |
| order 1-3 | 69.00 | 70.05 | 1.52 | 69.43 | 65.94 | 5.03 |
| order 2-2 | 77.13 | 76.83 | 0.39 | 83.10 | 87.45 | 5.23 |
| order 2-3 | 74.24 | 78.52 | 5.77 | 84.96 | 84.45 | 0.60 |

4 结 语

本文基于Kriging模型建立了水下潜艇结构模型振动声辐射的代理模型,可以预测整个设计变量空间内任一点的共振频率和声功率级。首先根据最优对称拉丁超立方体抽样方法选取样本

点,在选取样本点时考虑了模型的复杂程度,故选取18个样本点,并分别计算得出各样本点的共振频率,由此构造了代理模型,验证了模型的精确性。其次,对样本点的选取在最优对称拉丁超立方体抽样方法的基础上稍作改进,选取了13个样本点,由此构造的计算共振频率的代理模型精度

要优于18个样本点的。最后,由13个样本点构造的代理模型计算得到共振频率处的声功率级。

结果表明,使用基于Kriging方法的代理模型能够实时预测整个设计变量空间内水下潜艇结构模型的共振频率和声功率级,且在选取样本点时增加某特殊点还可让结果达到理想的精度。基于Kriging方法建立的代理模型为因计算量过大而较难实施的水下复杂结构振动声辐射优化设计提供了一种快速计算模型。

参考文献:

- [1] 黎胜,杨婧媛.水下加筋板振动声辐射的代理模型研究[J].声学学报,2010,35(6):659-664.
LI Sheng, YANG Jingyuan. Research on surrogate models for structure vibration and acoustic radiation of underwater stiffened plates [J]. Acta Acustica, 2010, 35 (6):659-664.
- [2] 陈国栋.基于代理模型的多目标优化方法及其在车身设计中的应用[D].长沙:湖南大学,2012.
- [3] SIMPSON T W, BOOKER A J, GHOSH D, et al. Approximation methods in multidisciplinary analysis and optimization: a panel discussion [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2004, 27 (5) : 302-313.
- [4] JIN R, CHEN W, SIMPSON T W. Comparative studies of metamodeling techniques under multiple modeling criteria [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2001, 23(1): 1-13.
- [5] SIMPSON T W, POPLINSKI J D, KOCH P N, et al. Metamodels for computer-based engineering design: survey and recommendations [J]. Engineering with Computers, 2001, 17(2): 129-150.
- [6] 曾会华,余雄庆.基于代理模型的气动外形优化[J].航空计算技术,2005,35(4):84-87.
ZENG Huihua, YU Xiongqing. Aerodynamic shape optimization using surrogate models [J]. Aeronautical Computer Technique, 2005, 35(4):84-87.
- [7] 安治国.径向基函数模型在板料成形工艺多目标优化设计中的应用[D].重庆:重庆大学,2009.
- [8] 金咸定,赵德有.船体振动学[M].上海:上海交通大学出版社,2000.
- [9] MARDIA K V, MARSHALL R J. Maximum likelihood estimation of models for residual covariance in spatial regression[J]. Biometrika, 1984, 71(1): 135-146.
- [10] 张德虎,高正红,李焦赞,等.代理模型选择准则研究[J].空气动力学报,2011,29(6):719-725, 732.
ZHANG Dehu, GAO Zhengong, LI Jiaozan, et al. Research on surrogate model sampling criterion [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2011, 29 (6) : 719-725, 732.
- [11] 方开泰.均匀试验设计的理论、方法和应用——历史回顾[J].数理统计与管理,2004,23(3):69-80.
FANG Kaitai. Theory, method and application of uniform experimental design: historical review [J]. Journal of Applied Statistics and Management, 2004, 23 (3):69-80.
- [12] JEONG S, MURAYAMA M, YAMAMOTO K. Efficient optimization design method using kriging model [J]. Journal of Aircraft, 2005, 42(2): 413-420.
- [13] 王群.基于对称拉丁超立方设计的多目标进化算法[D].西安:西安电子科技大学,2011.
- [14] 文文.车身薄件装配误差控制方法研究[D].长沙:湖南大学,2012.

[责任编辑:喻 菁]