

文章编号:1674-8190(2019)05-587-06

一种归一化的代理模型精度指标

张碧辉¹, 岳良明², 王军¹

(1. 中国航天空气动力技术研究院 彩虹无人机科技有限公司, 北京 100074)

(2. 中国航天空气动力技术研究院 第二研究所, 北京 100074)

摘要: 衡量代理模型精度的量化指标种类繁多,但是要横向对比不同种类数据的模型精度,常见的精度指标存在一些不足之处。分析现有代理模型精度指标的不足,提出一种“归一化绝对误差均值”指标;以某战术导弹模型为例,采用参考文献中的试验设计加点策略与交叉验证策略,建立 11 种气动参数的 Kriging 代理模型;通过对“归一化绝对误差均值”指标与相关性图进行比较,验证所提指标的有效性。结果表明:提出的指标不仅能够有效表征代理模型精度,而且能对不同种类数据进行横向对比,具有一定的应用价值。

关键词: 代理模型;精度指标;Kriging;气动参数

中图分类号: V211

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2019.05.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



A Normalized Accuracy Index for Surrogate Model

Zhang Bihui¹, Yue Liangming², Wang Jun¹

(1. Caihong UAV Technology Limited Company, China Academy of Aerospace Aerodynamics, Beijing 100074, China)

(2. The Second Research Institute, China Academy of Aerospace Aerodynamics, Beijing 100074, China)

Abstract: There are a considerable number of accuracy indexes for surrogate models to measure. However, most of these indexes are not capable of comparing surrogate models of different data types. The drawbacks of the existing indexes are firstly discussed. Then a new index named “Mean Normalized Absolute Error(MNEA)” is introduced. Kriging models of 11 different types of aerodynamic parameters from a tactical missile model are built, with the adding-points design of experiment method and cross-validation verification methods. The effectiveness of MNEA is verified by comparing the MNEA value and the correlation plots of the example, which proves that MNEA can be used to compare the accuracy of surrogate models of different data types.

Key words: surrogate model; accuracy index; Kriging; aerodynamic parameter

0 引言

代理模型(Surrogate Model 或 Metamodel)是指通过有限数据,逆向定义一个关于一系列设计变量的连续函数^[1]。以代理模型代替原数值分析模

型或物理试验,具有使计算量大幅减小但又保证准确度的特点,适用于任何“改变输入反复调用计算模型”的领域^[2]。

代理模型种类繁多,常见的包括:多项式插值(Polynomial Regression)、径向基函数(Radial Ba-

收稿日期:2018-10-31; 修回日期:2018-12-25

通信作者:张碧辉,370574116@qq.com

引用格式:张碧辉,岳良明,王军. 一种归一化的代理模型精度指标[J]. 航空工程进展, 2019, 10(5): 587-592,627.

Zhang Bihui, Yue Liangming, Wang Jun. A normalized accuracy index for surrogate model[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(5): 587-592,627. (in Chinese)

sis Functions)、支持向量机(Support Vector Machine)、神经网络(Neural Network)、克里金法(Kriging)等。Wang Liping 等^[3]和 Jin Ruichen 等^[4]对以上各种代理模型方法进行了较全面的介绍。

作为一种低成本近似技术,代理模型应具有足够的精度,因此如何衡量代理模型精度成为一项必要的研究工作。常见的代理模型精度检验指标名目繁多,不同文献所采用的指标各异。常见指标有:标准残差值 SR^[5]、误差平方 R2^[4]、均方根误差 RMSE^[6-7]、正则化均方根误差 NRMSE^[8]、相对最大绝对误差 RMAE^[6-9]、相对平均绝对误差 RAAE^[6]、代理模型接受率 MAS^[9]、平均百分比误差 APE^[10]等。

总结以上各种指标,计算过程中普遍采用:

(1) 函数真值与模型预测值之差的绝对值;

(2) 先求出函数真值与模型预测值的差值,再计算该差值与函数真值的比值;

(3) 先求出函数真值与模型预测值的差值,再计算该差值与函数真值标准差的比值。

在代理模型的应用中,通常在选定一种模型后,对多种数据分别进行拟合。例如,飞行器气动参数的研究,需要对升阻力系数、俯仰力矩系数等一系列气动参数进行建模,但是对于具有不同单位制、不同数值的两种数据,以上代理模型精度指标无法将二者进行横向比较:

(1) 飞行器的阻力系数数值都小于 1,而力矩系数数值可能达到上百,第一类方法显然不可取;

(2) 某些气动参数数值分布在 0 的附近,会导致第二类方法得到的指标值失真;

(3) 采用第三种方法,模型精度会受到函数真值分布情况的影响。一般情况下,样本点越分散越能够包含更多函数信息,则模型越准确。但是认为模型准确度与样本点的标准差成反比是不合理的。

为了解决以上问题,实现对代理模型不同种类拟合数据的横向对比,本文提出归一化绝对误差均值(Mean Normalized Absolute Error, 简称 MNAE)来表征模型准确度,并通过某飞行器算例的计算结果,以证明该指标的有效性。

1 归一化绝对误差均值

本节给出归一化绝对误差均值的计算方法。

假设在代理模型建模过程中,有 m 个样本点的真实函数值为 $[f_1 f_2 \cdots f_m]$,相应的代理模型预测值为 $[\hat{f}_1 \hat{f}_2 \cdots \hat{f}_m]$,令:

$$f_{\text{mean}} = \frac{\sum_{i=1}^m |f_i|}{m} \quad (1)$$

根据代理模型预测数据的性质,当真实函数值同时为正或同时为负时,取:

$$\begin{cases} f_{\text{upper}} = 2 \times f_{\text{mean}} \\ f_{\text{lower}} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

当真实函数值既有正数又有负数时(即跨越 0 时),取:

$$\begin{cases} f_{\text{upper}} = 2 \times f_{\text{mean}} \\ f_{\text{lower}} = -2 \times f_{\text{mean}} \end{cases} \quad (3)$$

于是,任意函数真实值的归一化为

$$f_i^{\text{norm}} = \frac{f_i - f_{\text{lower}}}{f_{\text{upper}} - f_{\text{lower}}} \quad (4)$$

任意函数模型预测值的归一化为

$$\hat{f}_i^{\text{norm}} = \frac{\hat{f}_i - f_{\text{lower}}}{f_{\text{upper}} - f_{\text{lower}}} \quad (5)$$

代理模型的准确度,定义为归一化后真实值与归一化预测值差值的绝对值的均值:

$$MNAE = \frac{\sum_{i=1}^m |\hat{f}_i^{\text{norm}} - f_i^{\text{norm}}|}{m} \quad (6)$$

MNAE 值越小,说明代理模型预测精度越高。MNAE 值的定义,重点在于归一化计算的上下界如何确定。对于样本函数值“同时在零点一侧”和“分布区间跨越零点”两种情况,分别选择不同的方法计算上下界。本文将上下界的区间设定的足够大,以使得所有样本点函数值归一化之后都落在 $(0, 1)$ 区间。

2 算例

本节算例为某型战术导弹。导弹弹体为圆柱形,弹头为圆锥型,弹翼采用常规式纵向布局、“X”型周向布局,主翼、尾翼均采用双弧型对称翼型,尾翼为全动舵面。其主要尺寸如图 1 所示。

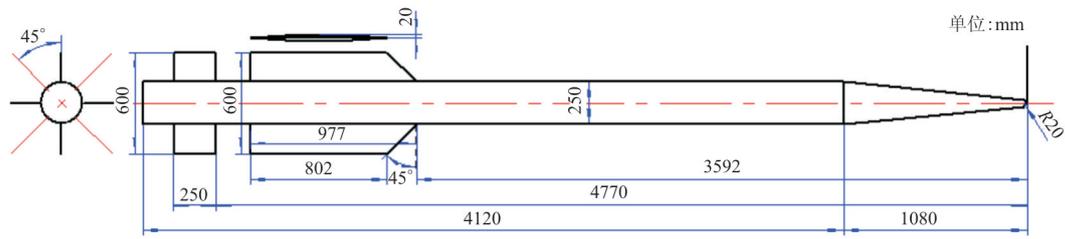


图 1 导弹主要几何尺寸示意图

Fig. 1 Dimensions of the missile example

导弹的外形设计参数确定后,调用 Missile Datcom^[11]计算不同飞行状态下的气动数据,得到代理模型样本点。

表征不同飞行状态的代理模型设计变量包括:攻角、侧滑角、速度、高度、飞行器重心位置,其取值范围如表 1 所示。

表 1 设计变量及取值范围
Table 1 Design variables and range

变量	取值范围	
	上限	下限
攻角/(°)	10	-10
侧滑角/(°)	10	-10
Ma	3.3	0.1
飞行高度/m	0	10 000
重心到前缘距离/m	2.600	3.120

根据飞行器仿真程序的需求,气动数据共有 11 种,如表 2 所示。

表 2 气动数据明细
Table 2 Explanations of aerodynamic coefficients

编号	缩写	参数解释	单位制
1	CN	法向力系数	1
2	CM	俯仰力矩系数	1
3	CY	侧向力系数	1
4	CLN	偏航力矩系数	1
5	CNA	法向力系数对攻角导数	deg ⁻¹
6	CMA	俯仰力矩系数对攻角导数	deg ⁻¹
7	CYB	侧向力系数对侧滑角导数	deg ⁻¹
8	CLNB	偏航力矩系数对侧滑角导数	deg ⁻¹
9	CMQ	俯仰力矩系数对俯仰角速度导数	s · deg ⁻¹
10	CLNR	偏航力矩系数对偏航角速度导数	s · deg ⁻¹
11	CD	阻力系数	1

3 Kriging 模型及相关方法

Kriging 模型的思想^[12]是由南非工程师 D. G. Krige 于 1951 年提出的,之后发展成为一种地质统计学插值方法。1989 年, J. Sacks 等^[13]将 Kriging 理论进一步推广到确定性计算机实验领域,并给出了一种较实用的 Kriging 算法。此后该方法在众多研究领域得到发展和应用。Kriging 模型的基本思路详见文献^[14]。Kriging 模型在各种代理模型方法中建模工作相对复杂,但其拟合能力较强,在飞行器气动参数拟合领域得到广泛应用^[15-17]。

实验设计是建立代理模型的必要准备工作,它的主要内容是:在设计变量空间内合理地布置有限的样本点,使其能够获得尽可能多的函数信息。常见的实验设计方法包括:拉丁超立方(Latin Hypercube)、正交表(Orthogonal Array)、蒙特卡洛法(Monte Carlo)等^[18]。

对于飞行器气动性能这类复杂问题,响应函数在设计空间上的分布特性通常难以把握。本文在初次建立代理模型时选择较少样本数量,建立气动函数的粗略分布规律;基于初始样本得到的代理模型,通过一系列加点方法加入新的样本点,进而迭代修正代理模型。

根据文献^[19],本文 Kriging 模型建模过程中每次添加:函数极小值点,与现有样本距离之和最大点,预测方差最大点,改进期望值取不同系数所得到的 5 个最大值点。共计 8 个样本点。

以上各极值求解均选用遗传算法进行优化求解。

根据文献^[20],气动数据代理模型中总存在着

一些“奇异点”，它们的真实值与代理模型预测值之间的误差很大，且不会随着样本点的增加而有所改善。剔除与“主流”数据点响应趋势不相符的“奇异点”能显著改善模型精度。本文在每一轮加点的同时，同样采用遗传算法求解出模型检验指标最差的 3 个点，将其从样本点中剔除。

综上，先增加 8 个样本点再删除 3 个样本点，一次样本更新后样本点数增加 5 个。

除了确定模型精度指标之外，计算模型精度的策略主要分两种：加点验证方法和交叉验证方法。加点验证方法简单直观，但却不能充分利用全部样本点来构建代理模型。交叉验证方法的基本思想可以简单描述如下：首先将样本点集 S 随机分成样本数目大致相等的 m 个样本点子集，在验证代理模型精度时，将其中的任一个样本点子集作为待验证的数据，其余的 $m-1$ 个用于构建接受检验的代理模型，这样可以得到该子集对应的验证误差；当遍历 m 次，所有样本点子集都充当了验证数据后，就可以得到所有子集的精度指标。本文采用交叉验证方法进行代理模型精度检验。

综上所述，本文 Kriging 代理模型的建模、加点、检验方法流程如图 2 所示。

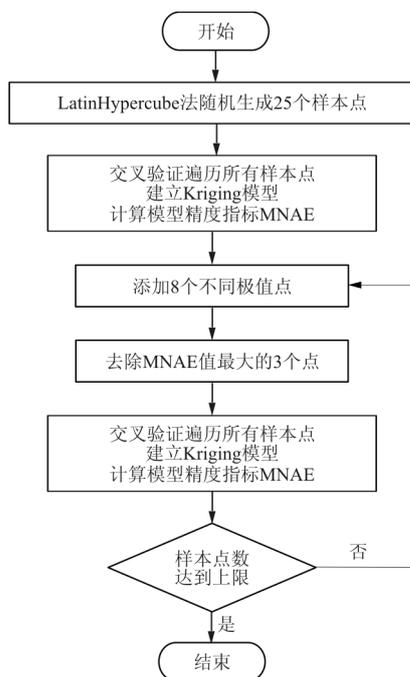


图 2 代理模型建模流程

Fig. 2 Modelling process of the surrogate

4 计算结果

为了验证代理模型精度指标的准确性，将 MNAE 值与相关性图进行比较。

相关性图以最直观的方式表达代理模型的准确度：它的横坐标为一组输入数据的真实函数值，纵坐标为相同数据经过代理模型得到的预测值。相关性图中数据点的分布越接近 $y=x$ 这条直线，说明代理模型预测得越准确。相关性图的局限性在于其分布情况只能通过目视观察，而不能给出定量的指标。

根据第 3 节所述方法，得到各气动参数 70 样本点 Kriging 模型的相关性图，如图 3~图 13 所示。根据使用经验，阻力系数 CD 的 Kriging 模型选择二阶回归项与 Gauss 相关函数，其他气动参数统一选择一阶回归项与 Exp 相关函数。考虑个别气动系数集中分布在距离零点较远处，为了准确表达 Kriging 模型预测精度，各参数相关性图均包含零点。

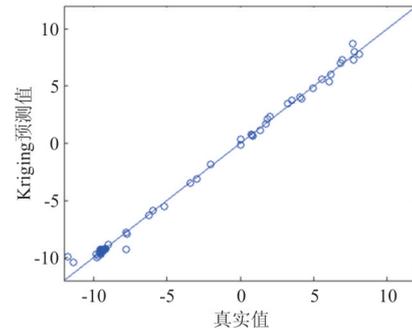


图 3 CN 系数相关性图

Fig. 3 Regression plot of CN

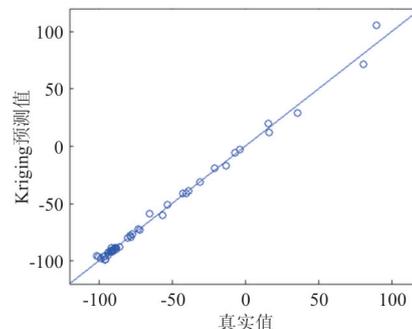


图 4 CM 系数相关性图

Fig. 4 Regression plot of CM

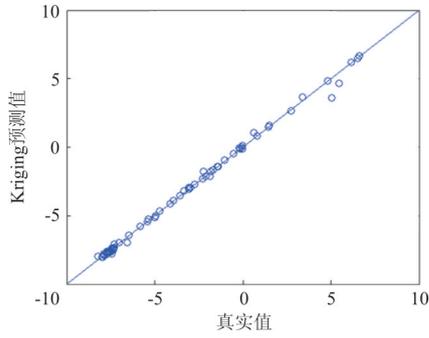


图 5 CY 系数相关性图
Fig. 5 Regression plot of CY

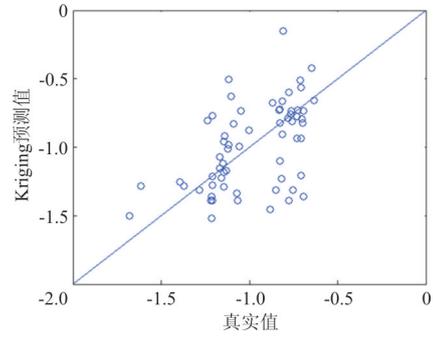


图 9 CYB 系数相关性图
Fig. 9 Regression plot of CYB

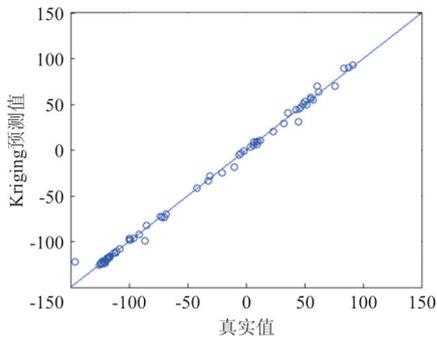


图 6 CLN 系数相关性图
Fig. 6 Regression plot of CLN

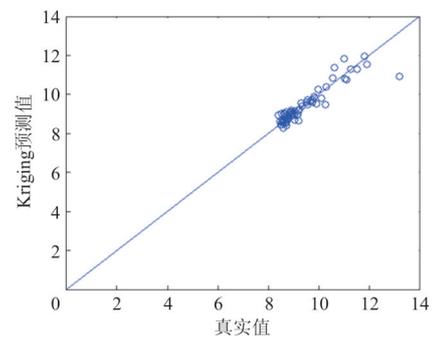


图 10 CLNB 系数相关性图
Fig. 10 Regression plot of CLNB

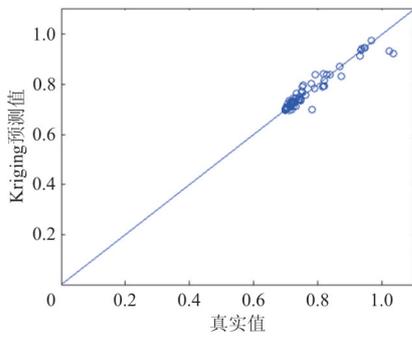


图 7 CNA 系数相关性图
Fig. 7 Regression plot of CNA

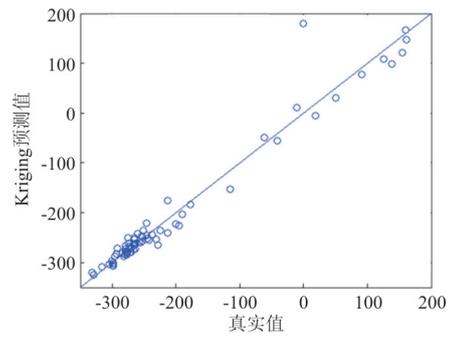


图 11 CMQ 系数相关性图
Fig. 11 Regression plot of CMQ

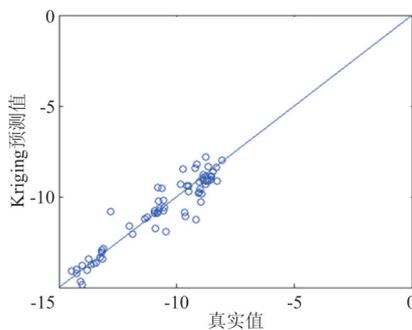


图 8 CMA 系数相关性图
Fig. 8 Regression plot of CMA

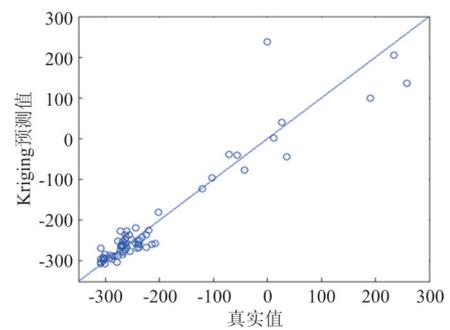


图 12 CLNR 系数相关性图
Fig. 12 Regression plot of CLNR

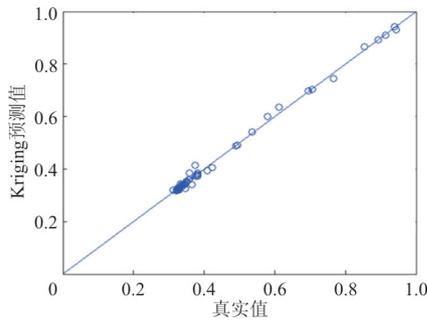


图 13 CD 系数相关性图

Fig. 13 Regression plot of CD

不同气动系数分布规律不同,拟合难度不同,所得到的 Kriging 预测准确度自然也不同。对比图 3~图 13,按图中数据点与直线 $y=x$ 接近程度将各系数分类,结果如下:

预测准确的系数:CY、CD、CM、CN、CLN、CNA

预测较准确的系数:CLNB、CMA、CMQ、CLNR

预测不准确的系数:CYB

将各系数的 MNAE 值按照从小到大排列,结果如表 3 所示。

表 3 各系数 MNAE 值列表

Table 3 MNAE value of aerodynamic coefficients

编号	气动系数	MNAE 值
1	CM	0.005 0
2	CY	0.006 1
3	CD	0.007 1
4	CN	0.007 2
5	CLN	0.008 0
6	CNA	0.009 3
7	CLNB	0.012 0
8	CMQ	0.015 5
9	CMA	0.023 3
10	CLNR	0.023 4
11	CYB	0.115 8

由相关性图得到各系数预测准确等级,将其与 MNAE 值进行比较,可以发现二者一致。表明在横向比较不同类型数据时,MNAE 值能够较好地表征代理模型的准确度。

5 结 论

基于算例对 11 种气动参数的计算结果,通过对 MNAE 值与相关性图的比较,验证了本文提出

的精度指标不仅能够有效表征代理模型的准确度,而且可以对不同类型的数据进行横向对比。

参考文献

- [1] Nestor V Queipo, Raphael T Haftka, Wei Shyy, et al. Surrogate-based analysis and optimization[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2005, 41(1): 1-76.
- [2] Keane A, Nair P. Computational approaches for aerospace design: the pursuit of excellence[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2005: 211-212.
- [3] Wang Liping, Don Beeson, Gene Wiggs. A comparison of meta-modeling methods using practical industry requirements [C]. Rhode Island: 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2006.
- [4] Jin Ruichen, Chen Wei, Timothy W Simpson. Comparative studies of metamodeling techniques under multiple modeling criteria[C]// Long Beach: 8th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, 2000.
- [5] Jones D R, Schonlau M, Welch W J. Efficient global optimization of expensive black-box functions[J]. Journal of Global Optimization, 1998, 13(4): 455-492.
- [6] Swiler L P, Slepoy R, Giunta A. Evaluation of sampling methods in constructing response surface approximations [C]. Rhode Island: 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2006.
- [7] Mackman T J, Allen C B, Ghoreysy M, et al. Comparison of adaptive sampling methods for generation of surrogate aerodynamic models[J]. AIAA Journal, 2013, 51(4): 797-808.
- [8] Yoel Tenne, Armfield S W. Metamodel accuracy assessment in evolutionary optimization[C]. IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2008.
- [9] Aute V C, Abdelaziz O, Azarm S, et al. Cross-validation based single response adaptive design of experiments for deterministic computer simulations[C]. Victoria: 12th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, 2008.
- [10] Krishnamurthy T. Comparison of response surface construction methods for derivative estimation using moving least squares, Kriging and radial basis functions[C]. Austin: 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference, 2005.
- [11] William B Blake. Missile datcom user's manual-1997 fortran 90 revision[R]. AFRL-VA-WP-TR-1998-3009, Ohio: Wright-Patterson Air Force Base, 1998.
- [12] Krige D G. A statistical approach to some mine valuations and allied problems at the witwatersrand[D]. Johannesburg: University of Witwatersrand, 1951.

- [20] 刘建华, 杨荣华, 孙水华. 离散二进制粒子群算法分析[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 2011, 47(5): 504-514.
Liu Jianhua, Yang Ronghua, Sun Shuihua. Analysis of discrete binary particle swarm optimization algorithm [J]. Journal of Nanjing University: Natural Science Edition, 2011, 47(5): 504-514. (in Chinese)
- [21] Eberhart R, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory[C]// Mhs95 Sixth International Symposium on Micro Machine & Human Science, 2002.
- [22] Kennedy J. Particle swarm optimization[C]. IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia, 1995.

作者简介:

叶泽龙(1995—),男,硕士研究生。主要研究方向:空域规划与安全管理。

吴明功(1966—),男,硕士,教授。主要研究方向:空域规划与安全管理。

朱德山(1987—),男,学士,专业技术十级。主要研究方向:管制调配与指挥。

温祥西(1984—),男,博士,讲师。主要研究方向:空域规划与安全管理。

(编辑:马文静)

(上接第 592 页)

- [13] Sacks J, Welch W J, Mitchell T J, et al. Design and analysis of computer experiments[J]. Statistical Science, 1989, 4(4): 409-435.
- [14] Søren N Lophaven, Hans Bruun Nielsen, Jacob Søndergaard. DACE-A MATLAB Kriging toolbox (Version 2.0) [R]. Technical Report IMM-TR-2002-12, Copenhagen: Technical University of Denmark, 2002.
- [15] Norazila Othman, Masahiro Kanazaki. Efficient flight simulation using Kriging surrogate model based aerodynamic database[C]. Kissimmee: 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2015.
- [16] James A Tancred, Markus P Rumpfkeil. Aerodynamic response quantification of complex hypersonic configurations using variable-fidelity surrogate modeling[C]. Kissimmee: 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2015.
- [17] Mark Carpenter, Roy Hartfield, John Burkhalter. A comprehensive approach to cataloging missile aerodynamic performance using surrogate modeling techniques and statistical learning[C]. Honolulu: 29th AIAA Applied Aerodynamics Conference, 2011.
- [18] Anthony A Giunta. Overview of modern design of experiments methods for computational simulations[C]. Reno:

41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2003.

- [19] 马洋. 基于代理模型和 MOEA/D 的飞行器气动外形优化设计研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.

Ma Yang. Research on the aerodynamic shape optimization of vehicle based on surrogate model and MOEA/D [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014. (in Chinese)

- [20] Keane A J. Wing optimization using design of experiment, response surface, and data fusion methods[J]. Journal of Aircraft, 2003, 40(4): 741-750.

作者简介:

张碧辉(1986—),男,硕士,工程师。主要研究方向:飞行器优化设计。

岳良明(1982—),男,硕士,工程师。主要研究方向:空气动力学。

王军(1983—),男,博士,高级工程师。主要研究方向:飞行器结构设计。

(编辑:马文静)

(上接第 600 页)

- [20] 赵群. 复合材料翼面结构布局优化设计方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
Zhao Qun. Research on the layout optimization design method of composite wing structures[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [21] 吴莉莉, 姚卫星. 复合材料加筋板结构的二级协同优化设计方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43(5): 645-649.
Wu Lili, Yao Weixing. Two-level collaborative optimum design method for composite stiffened panel[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2011, 43(5): 645-649. (in Chinese)

作者简介:

王毅(1988—),男,博士研究生。主要研究方向:结构优化设计。

姚卫星(1957—),男,博士,教授。主要研究方向:结构优化设计、结构疲劳。

刘梦(1993—),女,硕士,助理工程师。主要研究方向:结构振动疲劳。

(编辑:丛艳娟)