

利用代理模型的客机总体参数敏感性分析

张陈力子^{1,2}, 宋晓玉², 祝雯生¹, 余雄庆¹

(1.南京航空航天大学飞行器先进设计技术国防重点学科实验室,南京,210016;
2.中国商用飞机有限责任公司上海飞机设计研究院,上海,200232)

摘要 为了减少客机总体参数敏感性分析的计算量并实现分析结果的实时显示,研究一种客机总体综合分析模型的代理模型建模方法并用于快速敏感性分析。首先,明确设计变量和目标量并选取合适的多维设计空间,然后,用最优拉丁超立方设计方法在该设计空间选取一定数量样本点,用客机总体综合分析模型对样本点分别计算分析,得到一系列关心的目标量;随后,用二阶多项式作为响应面构建近似模型;最后,基于该近似模型快速生成多种图形反映总体参数对目标量的影响趋势。以某型宽体客机总体参数敏感性分析算例表明,当样本点数目为设计参数的15倍左右时,代理模型的精度满足要求;通过趋势图、曲面图、Pareto图可实时显示单、多参数对客机性能指标等目标量的影响关系。

关键词 客机;总体设计;敏感性分析;代理模型

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.03.004

中图分类号 V221 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)03-0018-05

Analysis of Parameters Sensitivity for Airliner Conceptual Design Using Surrogate-Model

ZHANG Chenlizi^{1,2}, SONG Xiaoyu², ZHU Wensheng¹, YU Xiongqing¹

(1.Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense-Advanced Design Technology of Flight Vehicle,Nanjing University of Aeronautics Astronautics,Nanjing 210016, China;2.Shanghai Aircraft Design and Research Institute Commercial Aircraft Corporation of China Limited,Shanghai 200232,China)

Abstract: In order to reduce the computational burden of parameters sensitivity analysis in airliner conceptual design and realize the true-time indication of analysis results, a surrogate-model method for comprehensive analysis of airliner performance is investigated. Firstly, determine design variables and objective parameters as well as select suitable multi-dimensional design space. Secondly, the sample points in design space are selected with Opt LHD (Optimal Latin hypercube design) method, and are analyzed by an airliner conceptual multidisciplinary analysis code to obtain a series of required objective parameters. A second-order polynomial response surface is used to construct the surrogate-model to replace the multidisciplinary analysis code. Finally, various kinds of diagrams are generated using this surrogate-model to reflect influence of conceptual parameters toward objective parameters. An example of parameters sensitivity analysis

收稿日期:2015-09-18

基金项目:南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(kfjj20150108)

作者简介:张陈力子(1991),男,江西新余人,硕士生,主要从事民航运输机总体多学科设计研究,E-mail:clz_zhang@sina.com

引用格式:张陈力子,宋晓玉,祝雯生,等.利用代理模型的客机总体参数敏感性分析[J].空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(3):18-22. ZHANG Chenlizi, SONG Xiaoyu, ZHU Wensheng, et al. Analysis of Parameters Sensitivity for Airliner Conceptual Design Using Surrogate-Model[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(3): 18-22.

for a certain airliner conceptual design is used to verify the method. The results show that the surrogate-model accuracy is very satisfied when sample points are around 15 times number of design parameters, and the impacts of major design parameters on airliner performance can be depicted simultaneously with tendency chart, surface chart, and Pareto chart.

Key words: airliner; conceptual design; sensitivity analysis; surrogate-model

参数敏感性分析可作为考察客机总体参数与性能指标间关系的一种方法^[1-2],表征总体参数变化时各性能指标变化的趋势和程度^[3],分析结果可用趋势图和地毯图等表达^[4]。

客机总体综合分析模型^[5]是总体参数敏感性分析的基础,它由多个学科分析模型组成,结构复杂,计算量大。反复调用该分析模型比较耗时,同时可能存在的数值噪声。

代理模型^[6-7]为该问题提供了解决途径。代理模型计算量小,计算结果与原始模型接近。在敏感性分析中,可用代理模型替代原有模型;不仅可以缩短求解时间;还可以解析地表达多个目标量与多个变量组合之间的数学关系;并且,代理模型在建立过程中,由于采用“平滑的”高阶多项式,会自动过滤掉原始计算模型可能产生的计算噪声。

1 代理模型

本文以客机总体参数设计为研究背景,以客机总体综合分析模型^[8](分析模型框架见图 1)为基础研究一种基于代理模型的总体参数敏感性分析方法。主要过程分为 3 步:①用某种试验设计方法^[9]产生设计变量的样本点;②用原始分析模型对这些样本点进行分析,获得一组输入/输出的数据;③用某种拟合方法^[10]来拟合这些输入/输出的样本数据,构造出近似模型(即代理模型),并对该代理模型的可信度进行评估。客机总体综合分析系统的代理模型建立过程见图 2。

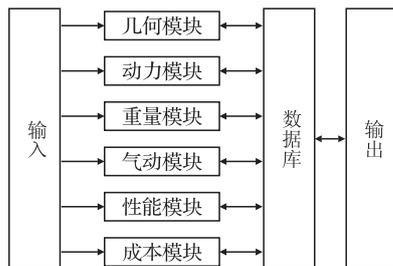


图 1 喷气客机总体综合分析模型框架

Fig.1 Jet airliner conceptual synthesis analysis model

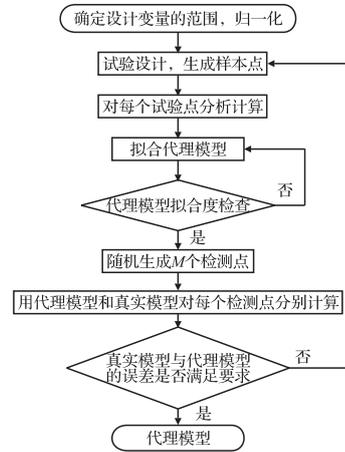


图 2 综合分析系统的代理模型建立过程

Fig.2 Creating process of surrogate-model

1.1 设计参数样本点

选取对客机性能有重要影响的总体参数为设计参数。各设计参数的取值范围以初始方案的数据为中值,分别增加和减少 10% 作为上限和下限^[11],从而形成设计空间。

采用试验设计方法在设计空间中生成设计参数的样本点。样本点的数目一般为设计参数数目的 10~15 倍^[12]。试验设计方法应能够进行“空间填充”,以提高试验效率,缩小随机误差的影响。

目前主要有 2 种试验设计方法获得广泛应用,即拉丁超立方和均匀设计^[13-14]。其中拉丁超立方的一种改进方法是最优拉丁超立方设计,它改善了随机拉丁超立方设计的均匀性(参见图 3),使因素和响应的拟合更加精确。本文采用最优拉丁超立方设计,原因是其具有高效的空間填充能力^[9],适合客机总体参数敏感性分析问题的需要。

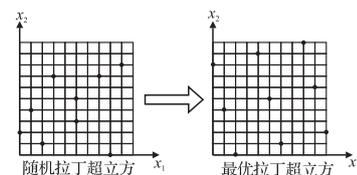


图 3 随机拉丁超立方设计和最优拉丁超立方设计

Fig.3 Random and optimal latin hypercube design

1.2 样本点分析

在航程等于设计航程的条件下,用客机总体综合分析模型对每个设计样本点进行分析,获得每个设计样本点的 12 个性能指标,包括起飞场长、起飞

平衡场长、着陆场长、进场速度、二阶段爬升梯度、最大起飞重量、使用空重、轮挡燃油、设计燃油、座公里油耗、航次成本和直接运营成本。

1.3 代理模型建立

根据样本点分析结果,用多项式响应面方法建立设计参数与性能指标的代理模型。采用带交互项(混合项)的2阶多项式。函数形式下式由定义:

$$\tilde{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_M x_M + \beta_{M+1} x_1^2 + \beta_{M+2} x_2^2 + \dots + \beta_{2M} x_M^2 + \sum_{i \neq j} \beta_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

式中: β_i 为多项式系数; x_i 为各个变量; \tilde{y} 为输出量。

代理模型的拟合效果可以通过残差平方和(Residual Sum of Squares, RSS)来检验:

$$RSS = \sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y}_i)^2 \quad (2)$$

式中: y_i 为样本点计算模型实际输出值; \tilde{y}_i 是样本点拟合函数输出值; n 为构造响应面模型样本点数。RSS越小,说明代理模型的拟合度越好。

1.4 代理模型的检验

建立好代理模型之后,需检验代理模型的精度^[15]。检验代理模型精度的方法是:在设计空间随机生成 M 个点,每个点上用代理模型和真实计算模型分别计算 N 个指标,最后可以根据式(3)得到平均误差 E_A :

$$E_A = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \frac{|\eta_{ij} - \tilde{\eta}_{ij}|}{\tilde{\eta}_{ij}} / (MN) \quad (3)$$

式中: η_{ij} 为代理模型计算值; $\tilde{\eta}_{ij}$ 为原始模型计算值; AE 越小,说明代理模型的精度越高。

2 应用算例

以某宽体客机总体方案设计为背景,验证基于代理模型客机总体参数敏感性分析的可行性。

宽体客机基本设计要求为:全经济舱布局339人;航程8500 km;设计巡航马赫数0.85。该宽体客机基准方案的主要总体参数见表1。

本算例关注的总体参数为机翼平面参数和发动机参数,包括机翼面积、展弦比、1/4弦线后掠角、机翼平均相对厚度、梯形比和海平面最大静推力,共6个设计参数。这些参数的取值范围见表2。用最优化拉丁超立方设计生成90个样本点(即样本点数目为设计参数数目的15倍)。

拟合度检验结果表明,该代理模型的残差平方

和RSS小于 10^{-2} 。然后在设计空间随机生成5个点,每个点上用代理模型和真实计算模型分别计算各个性能指标,得到各项相对误差和平均相对误差,见表3。从表3中数据看出,代理模型具有很好的精度,可用于总体参数敏感分析。

表1 宽体客机的主要总体参数

Tab.1 Major conceptual parameters of wide-body airliner

参数名称	参数值
机身最大宽度/m	5.796
机身总长/m	57.28
海平面最大静推力/kN	302.5
涵道比	11
总压比	52
机翼面积/m ²	362.6
机翼展弦比	12
机翼梯形比	0.18
机翼后掠角/(°)	35
机翼平均相对厚度	0.14

表2 设计参数及其取值范围

Tab.2 Design parameters and data eange

参数名称	取值范围
机翼面积/m ²	[326.3, 398.9]
展弦比	[10.8, 13.2]
1/4弦线后掠角/(°)	[31.5, 38.5]
机翼平均相对厚度	[0.126, 0.154]
梯形比	[0.162, 0.198]
海平面最大静推力/kN	[272.3, 332.8]

表3 代理模型的误差

Tab.3 Errors of surrogate model

性能指标	相对误差/%
起飞场长	0.019 5
着陆场长	0.157 2
平衡场长	0.131 5
进场速度	0.127 6
二阶段爬升梯度	1.070 1
最大起飞重量	0.074 6
使用空重	0.015 1
轮挡燃油	0.103 2
设计燃油	0.253 7
座公里油耗	0.101 8
航次成本	0.212 4
直接运营成本	0.107 1
平均误差	0.197 8

2.1 单参数敏感性分析

单参数对某个指标的影响主要通过二维曲线来表示。图4给出了机翼面积变化对最大起飞重量和燃油重量的影响。随着机翼面积的增大,最大起飞重量和燃油重量先减小后增大。这是因为巡航阶段升阻比随着机翼面积增大而增大,从而导致重量、油

耗和成本随着机翼面积增大而减小,但当机翼面积增大到一定程度,结构重量增大的影响占主要地位,故重量和油耗随后逐渐增大。其它设计参数对各性能指标的影响,均可以通过这种方式来显示。

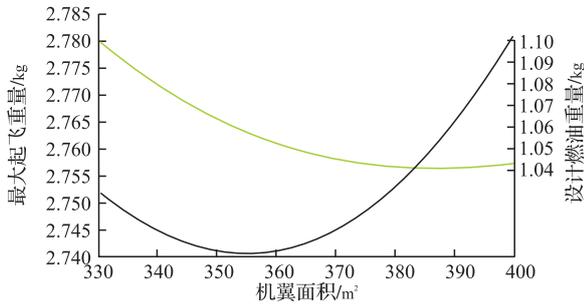


图 4 机翼面积变化对最大起飞重量的影响

Fig.4 Wing area versus MTOW and fuel weight

2.2 组合参数敏感性分析

当需要研究 2 个参数共同作用下对某个指标的影响时,传统方法主要通过地毯图来表达。对于某些组合参数作用下,指标变化呈现增减性不一致的特点,此时地毯图易出现图线相互遮挡,难以观察。本文采用曲面图解决该问题^[16]。通过鼠标旋转曲面图,可以观察整个设计空间任意 2 个设计参数组合对某个指标的影响,通过颜色深浅直观地观察该指标在设计空间内的变化情况,鼠标点取曲面上的任意一点可以显示该点的详细坐标。

例如,考察机翼平均相对厚度和展弦比组合参数共同作用下对最大起飞重量的影响,见图 5。图中曲面类似“峡谷”,在某一长条形区域,最大起飞重量较小,随着任一参数偏离这条“谷底”,最大起飞重量增大。这是因为机翼展弦比和厚度是联系紧密的,展弦比增大要求相对厚度也要增大,否则机翼结构特性变差,导致结构重量增大;另一方面,相对厚度增大要求展弦比也增大,否则气动特性变差导致油耗增大^[17]。

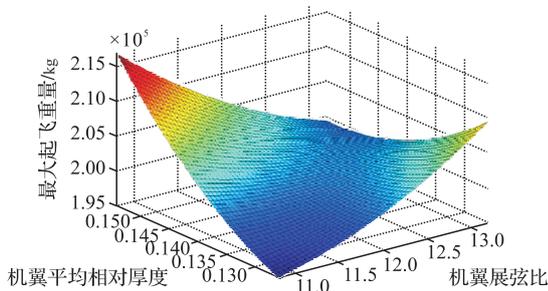


图 5 组合参数(机翼相对厚度和展弦比)对最大起飞重量的影响

Fig.5 Combined parameters (WT and AR) versus MTOW

2.3 多参数敏感性分析

根据多项式响应面,可用 Pareto 图显示多个参数对某指标的影响程度^[18],通过影响比重大致地表

征设计参数对某一指标影响的主次顺序。

用 Pareto 图考察 6 个设计参数对起飞平衡场长的影响贡献大小,见图 6。图中 6 个设计参数分别为海平面最大静推力(T0)、机翼面积(SW)、后掠角(SWEEP)、展弦比(AR)、相对厚度(TC)、梯形比(TR)。从图中可见,海平面最大静推力是最主要的影响因素,因为起飞时推力直接影响加速度大小继而影响起飞场长;由于机翼后掠角和机翼面积对重量和气动特性影响较大,因而对起飞阶段也有较大影响;而展弦比、相对厚度、梯形比对起飞场长的影响较小。

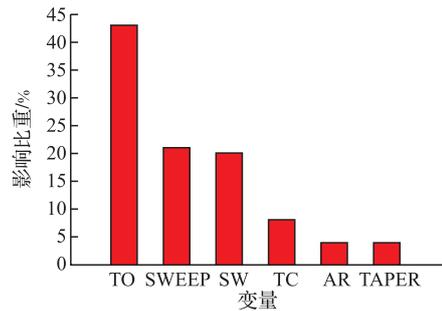


图 6 设计参数对起飞场长影响的 Pareto 图

Fig.6 A pareto chart of design parameters versus takeoff field length

3 结论

本文基于最优拉丁超立方设计和多项式响应面方法构建了的代理模型,能有效地替代客机总体综合分析模型,大大缩短了计算时间,参数敏感性分析结果可实时显示。通过比较,当样本点数目为设计参数数目的 15 倍时,代理模型的精度最好。综合应用二维曲线图、三维曲面图和 Pareto 图表达参数敏感性分析结果,可清晰地观察总体参数对各项性能指标的影响规律。

参考文献(References):

[1] RAYMER D P. Aircraft Design: A Donceptual Approach [M].Reston: AIAA Inc., 1999.

[2] TORENBECK E. Advanced Aircraft Design [M]. Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd,2013.

[3] JENKINSON L R. Regional Fanjet Aircraft Optimization Studies [J]. AIAA Journal of Aircraft, 1993, 30(2): 168-177.

[4] 张帅,余雄庆. 中短程客机总体参数敏感性分析[J]. 航空学报,2013, 34(4): 809-816.

ZHANG Shuai, YU Xiongqing. Sensitivity Analysis of Primary Parameters in Preliminary Design of a

- Short/Medium-haul Airliner[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(4): 809-816. (in Chinese)
- [5] KRISTOF R, ECKHARD A, TIM L, et al. An Integrated Environment for Preliminary Aircraft Design and Optimization [R]. AIAA 2010-1675.
- [6] SIMPSON T W, Peplinski J, Koch P N, et al. Metamodels for Computer-based Engineering Design: Survey And Recommendations [J]. *Engineering with Computers*, 2001, 17(2): 129-150.
- [7] 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.
- [8] 张帅. 客机总体综合分析及优化及其在技术评估中的应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
ZHANG Shuai, *Integrated Analysis and Optimization in Conceptual Design of Airliners with Applications to Technology Assessment* [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [9] 赵选民. 试验设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 55-59.
ZHAO Xuanmin, *Design of Experiments Approaches* [M]. Beijing: Science Press, 2010: 55-59. (in Chinese)
- [10] JIN R, CHEN W, SIMPSON T W. Comparative Studies of Metamodeling Techniques under Multiple Modeling Criteria [J]. *Journal of Structural Optimization*, 2001, 23(1): 1-13.
- [11] CAVES B E, JENKINSON L R, RHODES D P. Adapting Civil Aircraft Conceptual Design Methods to Account for Broader Based Constrains [R]. AIAA 1997-5595.
- [12] KNILL D L, GIUNTA A A, Baker C A, et al. Response Surface Models Combining Linear and Euler Aerodynamics for Supersonic Transport Design [J]. *Journal of Aircraft*, 1999, 36(1): 75-86.
- [13] MCKAY M D, BECKHAM R J, Conover W J. A Comparison of Three Methods for Selecting Values of input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code [J]. *Technometrics*, 1979, 21(2): 239-245.
- [14] LIEFVENDAHL M, STOCKI R. A Study on Algorithms for Optimization of Latin hypercubes [J]. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 2006, 136(9): 3231-3247.
- [15] Golovidov, Oleg B, Mason, et al. Response Surface Approximations for Aerodynamics Parameters in High Speed Civil Transport Optimization [R/OL]. Virginia Polytechnic Institute and State University. [2015-9-18]. <http://historical.ncstrl.org>
- [16] RISSE K, Anton E, etc. An Integrated Environment for Preliminary Aircraft Design and Optimization [J]. AIAA 2012-1675.
- [17] PASQUALE M S. Commercial Airplane Design Principles [M]. University of Florida: Butterworth-Heinemann, 2014: 156-158.
- [18] 维弗雷多·帕累托. 省时省力的二八法则[M]. 太原: 山西教育出版社, 2010: 22-25.
PARETO Vilfredo. 2:8 Law of Saving Time and Power [M]. Taiyuan: Shanxi Education Press, 2010: 22-25. (in Chinese)

(编辑: 徐敏)