

基于变复杂度近似模型的汽车安全性和轻量化优化

廖代辉 成艾国 钟志华

湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室,长沙,410082

摘要:针对汽车安全性优化过程中考虑冲压效应的计算复杂性特点,采用最优拉丁方实验设计,利用较少样本点数据在传统模型和高精度模型间建立一个差值补偿响应面模型,再通过传统模型和差值补偿响应面模型构造新的实验样本点,在此基础上建立 Kriging 响应面模型,应用多目标粒子群优化算法对此响应面模型进行优化求解,进行了整车正面碰撞和轻量化多目标优化设计。结果表明,该方法能够在保证响应面精度的前提下,快速收敛于优化解。

关键词:汽车安全性;冲压;变复杂度;近似模型;多目标优化

中图分类号:U462.2

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2013.15.025

Study on Optimization for Automobile Safety and Lightweight Based on Variable Complexity Approximate Model

Liao Daihui Cheng Aiguo Zhong Zhihua

State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body, Hunan University, Changsha, 410082

Abstract: Aiming at the complexity characteristics of automobile safety optimization considering the effects of stamping, a compensation response surface model was created by using optimal Latin square design through the small sample data spanning the traditional model and high accuracy model. And then a new Kriging response surface model was established on the basis of new test data which was created through the traditional model and compensation response surface model. A multi-objective particle swarm optimization algorithm was used to solve and optimize the response surface model. The method was applied to vehicle frontal impact and lightweight multi-objective optimization design. The results show that this method can ensure the response surface precision, rapid convergence to the optimal solution.

Key words: automobile safety; sheet metal forming; variable complexity; approximate model; multi-object optimization

0 引言

随着人们对汽车安全性和经济性要求的逐步提高,高强度钢板在车身结构中的应用越来越广

泛。与普通钢板相比,高强度汽车板材冲压效应对整车及零部件碰撞性能具有更为显著的影响,如果采用传统的碰撞仿真模型进行整车耐撞性和轻量化优化,往往不能达到满意的减重效果,因此,有必要在整车优化过程中充分考虑这些部件的冲压效应。

收稿日期:2012-03-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50625519);长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT0719)

[9] Son J, Lee D, Kim I, et al. A Study on On-line Learning Neural Network for Prediction for Rolling Force in Hot-rolling Mill[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 164/165(5): 1612-1617.

[10] 夏中山,郑申白. 高精度板带轧制力计算模型研究[J]. 河北冶金, 2007(2): 13-16.
Xia Zhongshan, Zheng Shenbai. Research about Calculating Model for Rolling Load in Production of High-precision Steel and Strip[J]. Hebei Metallurgy, 2007(2): 13-16.

(编辑 王艳丽)

作者简介:李志杰,男,1979年生。燕山大学国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心博士研究生。主要研究方向为金属塑性成形及材料组织性能控制。发表论文9篇。彭艳(通信作者),男,1971年生。燕山大学国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心教授、博士研究生导师。刘宏民,男,1959年生。燕山大学机械工程学院教授、博士研究生导师。王素芬,女,1982年生。燕山大学国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心博士研究生。肖力子,男,1988年生。中国第一重型机械集团大连设计研究院助理工程师。

目前,在汽车耐撞性优化过程中往往采用近似方法构建近似模型来代替物理模型以简化计算过程。但是,传统的“白网格”模型由于忽略冲压效应的影响,与实车碰撞结果存在较大误差,采用这种物理模型构造近似模型,很难保证优化结果收敛于真实模型;而考虑冲压效应的碰撞模型与传统模型相比虽然具有更高的计算精度,但建立该模型时需要主要吸能部件进行冲压成形分析、数据转换以及碰撞边界条件修正等,工作量非常大,如果采用这种物理模型来构造近似模型,获取样本点的成本高,计算复杂,导致优化效率低。

为了提高优化结果的收敛性同时保证计算效率,本文提出采用近似模型技术结合变复杂度方法来解决上述问题。该方法首先利用较少次数的实验样本点数据在传统模型和高精度模型之间构造一个差值补偿响应面模型,然后通过传统模型和差值补偿响应面模型密化并构造新的实验样本点,并在新构样本点和高精度模型计算的样本点数据基础上建立变复杂度 Kriging 响应面模型,最后,利用多目标遗传算法对变复杂度 Kriging 模型进行优化求解。

1 基于变复杂度方法的 Kriging 近似模型方法

在汽车结构设计过程中,设计人员常常希望采用高精度的模型进行分析(如在碰撞仿真中引入冲压成形结果),使得仿真计算结果更具有可信性。然而高精度模型分析会带来大量的计算,有时这种计算负担是难以承受的。变复杂度优化方法是近年来发展起来的解决计算复杂性问题并保留模型分析精度的有效技术,其主要思想是:同时引入高精度分析模型和低精度分析模型,两种模型能够描述同一优化问题,若高精度模型和低精度模型的响应偏差在可信范围内,则用得到的新的设计点更新近似模型;迭代运行直至收敛。该方法的特点是:在优化过程中可以同时使用高精度分析模型和低精度分析模型,大量使用低精度分析模型可以降低计算成本;而少量使用高精度分析模型可以提高整个优化的精度^[1-3]。

本文提出的基于变复杂度方法的近似模型修正流程如图 1 所示。

假定分析过程中存在两种不同精度的模型:计算效率低的高精度模型 $f_H(x)$ 和计算效率高的低精度模型 $f_L(x)$, 分别产生样本集 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ 和 $S' = \{s'_1, s'_2, \dots, s'_n\}$, 其中, m 和 n 分别为实验设计 1 和实验设计 2 的样本点个数, $m <$

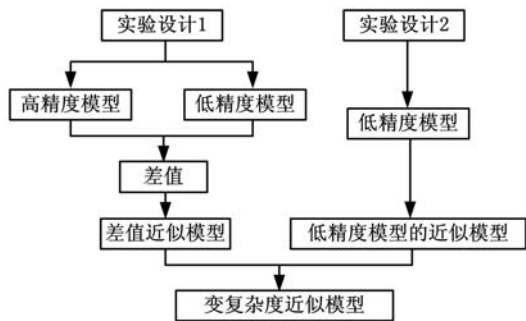


图 1 基于变复杂度方法的近似模型修正流程图

n 。在实验设计 1 中利用 m 个样本点分别计算高精度模型 $f_H(x)$ 和低精度模型 $f_L(x)$ 的响应及其差值,并利用这 m 个差值构造差值响应面近似模型 $\sigma(x)$;在实验设计 2 中利用 n 个样本点计算低精度模型 $f_L(x)$ 的响应并构建其近似模型,则变复杂度近似模型构造如下:

$$f_H(x) = f_L(x) + \sigma(x) \quad (1)$$

式中, x 为设计变量矢量。

Kriging 模型是一种基于统计学理论的半参数化插值技术,其目的就是通过部分已知的信息去模拟某一点的未知信息。Kriging 模型比其他响应面模型在对未知信息的模拟精度和整体性上要更加优秀,作为一种新型的近似模型技术,许多学者对 Kriging 插值方法进行了研究。Welch 等^[4-5]和 Simpson 等^[6-7]分别将 Kriging 插值法应用到实验设计及航天飞机的设计中。文献[8-10]对 Kriging 插值方法在试验及工程设计优化中的应用进行了研究。

变复杂度 Kriging 近似模型的特点是通过较少个高精度模型取样点和较多个低精度模型取样点,建立精度和效率折中的高精度模型的 Kriging 近似模型,从而降低取样点的计算成本^[11-12]。

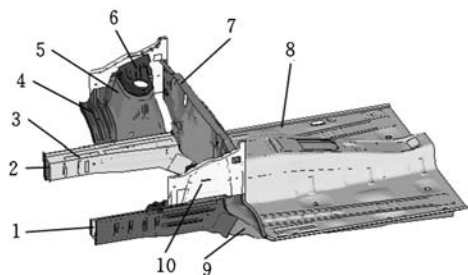
2 基于变复杂度近似模型的汽车耐撞性及轻量化多目标优化

汽车安全性问题固然重要,但汽车轻量化问题也不容忽视。汽车轻量化是节约能源、提高燃料经济性和改善汽车性能的最有效途径之一。目前,汽车轻量化技术已成为各个汽车公司的核心竞争技术。研究表明,将部分车身零件的材料由低碳钢板替换为高强度薄钢板可以在保证车身耐撞性的同时达到轻量化的目的,因此,整车碰撞安全性结构设计优化问题应该是一个既要保证整车安全性能又要满足汽车轻量化的多目标优化问题。

2.1 优化问题描述

针对本文研究的整车正面碰撞优化问题,由于

整车的部件数量巨大,且整车正面碰撞一次的计算成本也较高,故把整车前部的每一个部件都当成设计变量是不切实际的,而且,正面碰撞在整车结构安全设计中我们主要考虑的是使变形吸能部件在碰撞过程中最大可能地吸收能量,使得前隔板侵入量最小,同时尽量减小传递到乘员身上的载荷,从而达到保护乘员安全的目的。因此,本文选取了车辆前部 10 个部件的板厚为设计变量来进行正面碰撞优化分析,该 10 个部件中包括了整车结构中的主要吸能部件(前纵梁内外板)、对乘员舱有重要影响的部件(如前隔板)以及考虑冲压效应后的吸能变化率比较大的部件(如前轮罩外板加强板等),各部件名称、零件代号如图 2 所示。



1. 前大梁外板 2. 前大梁封板 3. 前大梁加强板
4. 前轮罩前板 5. 前轮罩 6. 前轮罩上板 7. 前隔板
8. 前地板 9. 中大梁 10. 前轮罩加强板

图 2 正面碰撞优化设计部件

在汽车耐撞性和轻量化优化设计中,将整车碰撞加速度峰值 a_B 最小、整车质量 m 最小同时作为优化设计的目标函数,其他响应作为约束函数,将主要吸能部件的材料和厚度作为设计变量,建立整车耐撞性和轻量化的多目标优化问题的数学模型如下:

$$\left. \begin{aligned} \min \quad & m, I_r \\ \text{s. t.} \quad & t_{iL} \leq t_i \leq t_{iU} \\ & mat_i = [1, 2, 3, 4, 5] \\ & i = 1, 2, \dots, 10 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中, I_r 为汽车前隔板侵入量; i 表示零件编号; t_i 为第 i 个零件的板料厚度; t_{iL} 和 t_{iU} 分别为设计变量的上下限; mat_i 为第 i 个零件的材料类型, $[1, 2, 3, 4, 5]$ 分别代表五种材料类型,其对应的材料牌号和性能参数如表 1 所示,表 1 中材料的延伸率主要用以表征其成形性。

表 1 材料类型及其性能参数

材料类型	屈服强度(MPa)	抗拉强度(MPa)	延伸率(%)
1	170	305	44
2	228	370	36
3	289	475	30
4	344	590	24
5	409	790	19

2.2 变复杂度 Kriging 近似模型构建

整个优化过程中,近似模型的构建起到了主导作用。本文为了在耐撞性优化设计中充分考虑冲压效应,提高优化结果的计算精度,同时保证优化计算效率,在优化设计中分别建立两种不同复杂度的模型:一种是考虑冲压效应的整车碰撞有限元模型,并把它作为高精度模型;另一种是传统的不考虑冲压成形的“白网格”模型,这里把它处理为低精度模型。结合变复杂度方法和 Kriging 近似模型技术,通过这两种模型构建精度和效率折中的变复杂度 Kriging 近似模型。

构建变复杂度 Kriging 近似模型的基本步骤如下:

(1) 首先通过最优拉丁方实验设计方法在设计空间生成 10 个样本点的用于构造差值响应面模型的近似模型。选取四次样条函数为权函数分别构造 I_r 和 m 的移动最小二乘差值响应面模型并对其进行误差分析。

工程中常用复相关系数 R^2 和修正的复相关系数 R_{adj}^2 来表征近似模型的逼近程度,其表达式分别为

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

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y}_i)^2 (n-1)}{\sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y}_i)^2 (n-k-1)} \quad (4)$$

式中, n 为实验点的个数; k 为自由度,其值为调整参数的个数减 1; y_i 为响应量的实测值; \tilde{y}_i 为响应量的预测值; \bar{y} 为响应量实测值的平均值。

R^2 和 R_{adj}^2 越接近于 1,说明近似模型的拟合精度越好。

$\sigma_{I_r}(\mathbf{x})$ 和 $\sigma_m(\mathbf{x})$ 的 R_{adj}^2 值分别如下:对于 I_r 的差值近似模型 $\sigma_{I_r}(\mathbf{x})$, $R_{adj}^2 = 99.86\%$; 对于 m 的差值近似模型 $\sigma_m(\mathbf{x})$, $R_{adj}^2 = 99.99\%$ 。可以看出两个差值响应面模型具有较高的精度。

(2) 再次利用最优拉丁方实验设计方法在低精度模型设计空间生成 60 个样本点的用于构造低精度模型的近似模型。

(3) 采用变复杂度方法对以上建立的近似模型进行差值补偿,得到变复杂度 Kriging 响应近似模型,并对模型进行误差评估。本文所构建的 I_r 和 m 的近似模型的 R^2 和 R_{adj}^2 分别如下:

对于 I_r 近似模型

$$R^2 = 96.77\%, R_{adj}^2 = 98.35\%$$

对于 m 近似模型

$$R^2 = 99.97\%, R^2_{adj} = 99.63\%$$

表明近似模型针对采样设计点具有较高的精度。

同时为了验证近似模型对设计空间的随机测试点的预测误差,在设计空间随机生成 7 个测试样本点,检验近似模型与有限元计算的真实值之间的相对误差。

图 3 为测试样本点处 I_r 的相对误差示意图,可以看出,检测样本点集最大相对误差为 2.11%。由此可以看出,本文所构建的近似模型精度较高,可以代替真实的有限元模型进行优化计算。

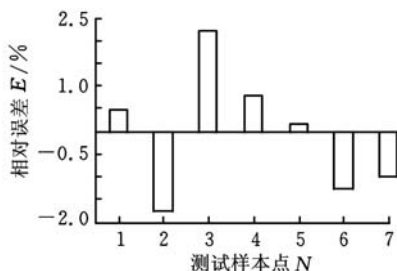


图 3 测试样本点处 I_r 的相对误差

2.3 优化结果

采用多目标粒子群算法对前隔板侵入量和质

量目标子函数的近似模型进行优化,得到多目标优化问题的 Pareto 前沿如图 4 所示。可以看出,计算结果提供了多种可供选择的材料匹配方案,但其前隔板侵入量和质量两个目标函数是相互矛盾的,二者不可能同时达到最优化,如方案 1 中质量目标函数达到最优即 m 值最小,但此时其前隔板侵入量目标函数最劣即 I_r 值最大;相反,在方案 2 中前隔板侵入量目标函数达到最优即 I_r 值最小,但此时其质量目标函数最劣即 m 值最大。综合各种设计要求和实际情况,选择方案 3 为最优解,该方案中的设计变量及其响应初值和优化结果见表 2。

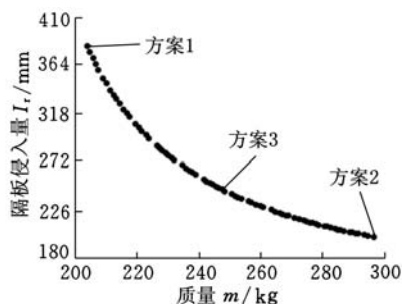


图 4 正面碰撞和轻量化优化的 Pareto 前沿

表 2 设计变量及目标响应优化结果

设计变量及其响应	mat_1	mat_2	mat_3	mat_4	mat_5	mat_6	mat_7	mat_8	mat_9	mat_{10}	I_r (mm)
优化结果	5	5	5	4	4	3	2	2	1	1	246
设计变量及其响应	t_1 (mm)	t_2 (mm)	t_3 (mm)	t_4 (mm)	t_5 (mm)	t_6 (mm)	t_7 (mm)	t_8 (mm)	t_9 (mm)	t_{10} (mm)	m (kg)
优化结果	1.513	1.273	1.228	1.526	0.802	0.755	0.961	0.922	1.072	0.911	247.326

由表 2 可知,通过采用变复杂度方法与近似模型技术相结合的方法对涉及安全性与轻量化的多目标问题进行优化研究,不仅避免了高精度模型在样本点获取方面计算量大的问题,而且优化结果也在满足轻量化的同时使整车的碰撞安全性有了较大的提高,整车质量比优化前减轻了 24.674kg,且其前隔板侵入量比优化前降低了 10.55%。

3 结论

(1)针对考虑冲压效应的碰撞模型高复杂性特点,结合近似建模技术和变复杂度方法,提出一种基于变复杂度方法的差值补偿响应面模型,应用该模型可以基于较少的高精度模型(考虑冲压效应的整车碰撞有限元模型)取样点和较多的低精度模型(未考虑冲压效应的整车碰撞有限元模型)取样点构造精度和效率折中的高精度模型的近似模型。

(2)在汽车正面碰撞和轻量化多目标优化问

题中,利用最优拉丁方实验采样和变复杂度 Kriging 近似模型技术构建了汽车正面碰撞和轻量化多目标优化的近似模型,误差评估表明,该模型具有较高的计算精度。

(3)采用多目标粒子群优化算法对多目标问题的近似模型进行优化后,提供了多种可供选择的材料匹配方案。

参考文献:

[1] 龚春林,袁建平,谷良贤,等. 基于响应面的变复杂度气动分析模型[J]. 西北工业大学学报,2006,24(4):532-538.
Gong Chunlin, Yuan Jianping, Gu Liangxian, et al. Improving Variable Complexity Model (VCM) for Aerodynamic Analysis[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2006, 24(4):532-538.
[2] 孙光永,李光耀,龚志辉. 基于代理模型的变复杂度方法在板料成形优化中的应用[J]. 机械工程学报,2009,45(9):201-210.

(下转第 2129 页)

Automatic Transmission Vehicle[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(1):205-209.

[4] 张勇,宋健,许纯新. 车辆质量参数对最佳换挡点的影响[J]. 农业机械学报, 2002, 33(2):8-10.
Zhang Yong, Song Jian, Xu Chunxin. The Influence of Vehicular Mass Parameters on the Optimum Shift Point[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(2): 8-10.

[5] Bael H S, Ryu Jihan, Gerdes J C. Road Grade and Vehicle Parameter Estimation for Longitudinal Control Using GPS[C]//Proceedings of the 4th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Oakland, CA, 2001: 166-171.

[6] Würtenberger M, Germann St, Isermann R. Modeling and Parameter Estimation of Nonlinear Vehicle Dynamics[J]. American Society of Mechanical Engineers, Dynamic Systems and Control Division, 1992, 44: 53-63.

[7] 陈士安,何仁,陆森林. AMT 车辆运行状态参数辨识的新方法[J]. 轻型汽车技术, 2003, 10(2):17-20.
Chen Shian, Heren, Lu Senlin. A New Recognition Method for AMT Vehicle Parameters [J]. Light Vehicles, 2003, 10(2):17-20.

[8] 金辉,葛安林,秦贵和,等. 基于纵向动力学的坡道辨识方法研究[J]. 机械工程学报, 2002, 38(1):79-86.
Jin Hui, Ge Anlin, Qin Guihe, et al. Study on Slope Recognition Method Based on Vehicles Longitudinal Dynamics[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(1): 79-86.

[9] Arthur J, Bryson E, Ho Y C. Applied Optimal Control Optimization, Estimation, and Control [M]. New York: Hemisphere Publishing, 1975.

[10] 何宁,赵治国,李瑜婷. 双离合器自动变速器换挡规律及其仿真评价[J]. 中国机械工程, 2011, 22(6) 367-373.
He Ning, Zhao Zhiguo, Li Yuting. Shift Schedule and Simulation Evaluation for Dual Clutch Automatic Transmission[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(6): 367-373.

(编辑 王艳丽)

作者简介:赵治国,男,1971年生。同济大学汽车学院副教授、博士研究生导师。主要研究方向为车辆动力学控制及混合动力汽车动力传动系统控制。发表论文70余篇。王琪,男,1989年生。同济大学汽车学院硕士研究生。刁威振,男,1987年生。同济大学汽车学院硕士研究生。陈海军,男,1989年生。同济大学汽车学院硕士研究生。

(上接第 2121 页)

Sun Guangyong, Li Guangyao, Gong Zhihui. Application in Sheet Metal Forming Optimization Based on Variable Complexity Model of Metamodeling Technique[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(9):201-210.

[3] Sakata S, Ashida F, Zako M. An Efficient Algorithm for Kriging Approximation and Optimization with Large - scale Sampling Data [J]. Comput. Methods Appl. Mech. Eng., 2004, 193: 385-404.

[4] Welch W J, Buck R J, Sacks J. Screening, Predicting and Computer Experiments [J]. Technometrics, 1992, 34(1):15-25.

[5] Welch W J, Mitchell T J, Wynn H P. Design and Analysis of Computer Experiments [J]. Statistica Science, 1989, 4(4): 409-435.

[6] Martin J D, Simpson T W. Use of Kriging Models to Approximate Deterministic Computer Models [J]. AIAA J., 2005, 43(4):853-863.

[7] Simpson T W, Mauery T M, Korte J J, et al. Comparison of Response Surface and Kriging Models for Multidisciplinary Design Optimization [C]//7th Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, St Louis, MJ, AJAA-98-4755, 1998.

[8] Sakata S, Ashida F, Zako M. An Efficient Algorithm for Kriging Approximation and Optimization with Large - scale Sampling Data [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2004, 193:385-404.

[9] Sakata S, Ashida F, Zako M. Structural Optimization Using Kriging Approximation [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2003, 192:923-939.

[10] Huang D, Allen T T, Notz W I, et al. Sequential Kriging Optimization Using Multiple - fidelity Evaluations [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2006, 32:369-382.

[11] Wang H, Li G Y, Li E Y, et al. Development of Metamodeling Based Optimization System for High Nonlinear Engineering Problems [J]. Adv. Eng. Softw., 2008, 39(8):629-645.

[12] 张登峰,高金源. 用于变复杂度建模的 Kriging 模型研究[C]//中国航空学会第十三届学术年会. 呼伦贝尔, 2007:1-21. (编辑 苏卫国)

作者简介:廖代群,女,1979年生。湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室博士研究生。主要研究方向为车身结构分析与优化、薄板冲压成形技术及其优化。发表论文8篇。成艾国,男,1972年生。湖南大学机械与运载工程学院教授。钟志华,男,1963年生。湖南大学机械与运载工程学院教授、博士研究生导师,中国工程院院士。