基于组合近似模型的城市客车车架轻量化研究*

赵东伟，尹怀仙，张洪信，赵清海，付磊
（青岛大学 机电工程学院，山东 青岛 266071）

摘要： 近似模型在城市客车车架轻量化设计分析中有重要应用，不同的近似模型在不同状态变量预测中精度不同。文中以国内某城市客车底盘车架的有限元模型为研究对象，以车架质量和应力为响应值，分别建立响应面、径向基神经网络、克里格和正交多项式 4 种设计变量与响应的近似模型，通过对比分析 4 种近似模型响应的误差散点图、确定性系数及均方根误差，按照一定的权系数线性叠加建立组合近似模型并用于城市客车车架轻量化设计。结果表明，将组合近似模型用于车架轻量化设计可实现车架轻量化目标，并能提高车架的强度。

关键词： 汽车；城市客车；车架；轻量化；组合近似模型

中图分类号： U469.1 **文献标志码：** A **文章编号：** 1671－2668(2020)01－0001－05

车架作为城市客车的核心零部件之一，是基本的承载、连接件，有着较大的质量占比。试验表明，汽车整备质量减少 10%，能量消耗减少 6%～8%，续航能力、转向灵活性等也得到提高。因此，在满足客车车架强度、刚度要求的前提下对车架进行轻量化十分必要。

由于传统的有限元优化分析方法计算量大、效率低，通常建立近似模型代替原始模型来处理复杂工程的结构优化问题。目前大多数研究是从多种近似模型中选择拟合精度最好的模型进行结构优化，对于复杂机械优化问题，各种近似模型对各种状态变量的预测能力表现各异，在优化设计中选取单一近似模型易造成局部最优。如 Pan F.等利用单一的支持向量回归近似模型对目标函数进行优化迭代，其不能保证约束函数的全局精度；Chen S. K.等基于 Kriging 近似模型和水平集表征法对响应的不确定区域进行量化，其对试验设计采集的样本数依赖性较大，可能导致结果局部最优。因此，该文以某混合动力城市客车底盘车架为研究对象，通过对响应面、径向基神经网络、克里格及正交多项式 4 种近似模型的预测能力的对比分析，按照一定的权系数线性叠加建立组合近似模型，对城市客车车架进行结构轻量化优化设计，验证组合近似模型在城市客车车架轻量化设计中的可靠性。

1 建立近似模型

近似模型是通过建立相应数学模型来近似模拟一组激励参数与响应参数之间的关系，以精确拟合实际模型。其建立流程见图 1。

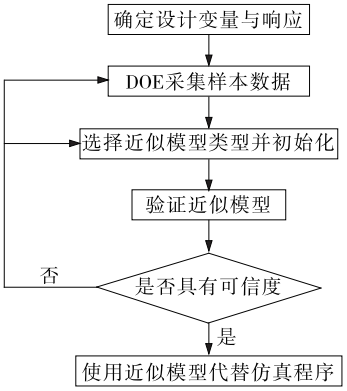


图 1 近似模型建立流程

1.1 径向基神经网络模型

径向基神经网络(RBF)以待测点与样本点之间的欧几里得距离为自变量，即假设 $x_1,\cdots,x_N\in\Omega\subset R^N$ 代表一组基函数的输入变量：

$$g_i\equiv g(\|x-x_i\|^c)\in R\ (i=1,\cdots,N) \tag{1}$$

式中：$\|x-x_i\|$ 为 x 与第 i 个样本点 x_i 在设计空间上的距离；c 为控制参数，$0.2\leqslant c\leqslant 3$。

径向基函数的基本形式为：

$$\hat{y}(x)=\sum_{i=1}^{m}\beta_i\cdot\phi(r_i,c) \tag{2}$$

式中：m 为基函数的个数；β_i 为基函数的加权系数；ϕ 为基函数；$r_i=\|x-x_i\|$。

1.2 响应面模型

响应面模型(RSM)基于数理统计技术，利用多

* **基金项目：** 山东省重点研发计划(2017GGX50106)；山东省重大创新工程项目(2017CSGC0502)

项式函数拟合设计空间，具有计算效率高、适用范围广和鲁棒性好等优点。其基本形式为：

$$\hat{y}=\alpha_0+\sum_i\alpha_i x_i+\sum_i\sum_{j>i}\alpha_{ij}x_i x_j+\sum_i\alpha_{ii}x_i^2+\sum_i\sum_{j>k}\sum_{k>j}\alpha_{ijk}x_i x_j x_k+\cdots+\sum_i\alpha_{ii\cdots i}x_i^d \tag{3}$$

式中：x_i 为第 i 个设计分量；α_0，α_i，α_{ij}，α_{ii}，α_{ijk}，…，$\alpha_{ii\cdots i}$ 为多项式待定系数；d 为响应面的最高阶数。

1.3 正交多项式模型

当试验因素较多时，采用最小二乘法求响应面模型参数的计算过程相当复杂，可采用正交多项式拟合响应面模型（Chebyshev）使计算过程简化，同时弥补使用最小二乘法求系数过程中的不足。

1.4 克里格模型

克里格方法（Kriging）是基于变异函数理论和结构分析，在规定区域内对区域化变量取值，并进行无偏、最优估计的一种空间局部内插方法。其基本表达式为：

$$\hat{y}(x)=p(x)+z(x) \tag{4}$$

式中：$p(x)$为最基本的多项式；$z(x)$为均值为零的随机项，通常取高斯函数作为相关函数。

1.5 组合近似模型

组合近似模型（EM）由多个近似模型（如多项式、径向基函数、克里格和正交多项式等）加权线性叠加构成。其一般表达式为：

$$y_{\mathrm{EN}}(x)=\sum_{i=1}^{M}\omega_i(x)y_i(x) \tag{5}$$

式中：y_{EN}为组合近似模型的响应预测值；M 为单一近似模型的个数；ω_i、y_i 分别为第 i 个模型的权系数和响应预测值；设计变量 x 为矢量。

式(5)中权系数之和等于 1。组合近似模型的关键是计算权重系数。采用启发式方法计算权重系数的公式如下：

$$\omega_i=\frac{\omega_i^*}{\sum_{j=1}^{M}\omega_j^*} \tag{6}$$

$$\omega_i^*=(E_i+\alpha\bar{E})^{\beta} \tag{7}$$

$$\bar{E}=\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}E_i \tag{8}$$

式中：ω_j^* 为两种模型的确定性系数（即 E_i 的值）之和；E_i 为第 i 个单一近似模型的确定性系数；$\bar{E}$ 为所有单一近似模型的平均确定性系数；α 和 β 为近似模型控制参数，α 和 β 分别为 0.05、−1 时，组合近似模型精度较高。

2 单一近似模型精度分析

2.1 车架有限元模型

根据城市客车的二维图纸，利用 CATIA 软件构建车架几何模型并以 IGES 文件储存，导入有限元分析软件 ANSYS 中。网格单元尺寸为 10 mm。划分网格后的车架网格单元为 255 727 个，节点为 257 049 个（见图 2）。

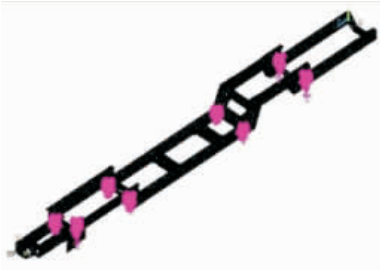


图 2 客车车架有限元模型

2.2 设计变量与响应的确定

车架轻量化设计中必须保证车架强度满足要求。以车架所受最大应力和总质量为响应量，选取车架中 9 个板料的厚度为设计变量（见图 3），按照工程常用钢板厚度将 X_1～X_9 的取值范围设定为 2～20 mm。

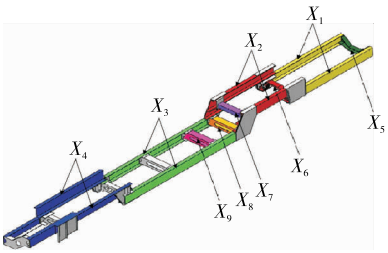


图 3 设计变量的选取

2.3 最优拉丁超立方试验设计

对 9 个设计变量采用最优拉丁超立方试验设计产生样本点。最优拉丁超立方设计改进了随机拉丁超立方设计的均匀性，使所有试验点尽量均匀分布在设计空间，使因子和响应的拟合更精确真实。抽取 200 组试验样本组成试验设计矩阵（见表 1）。

2.4 近似模型拟合效果分析

从响应拟合效果图可直观地看出近似模型的精度高低，响应拟合效果图中纵坐标为有限元分析得到的仿真计算值，横坐标为同一样本点通过近似模型预测的响应值，对角线代表真实的适应度，残差为零。采集的样本点落在对角线或其附近越多，则响应的预测精度越好。确定性系数R^2和均方根误差

表 1　试验设计数据　mm

组别	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9
1	7.00	14.20	7.30	8.02	6.46	4.86	9.41	6.96	5.65
2	7.96	14.04	8.50	6.70	6.12	5.58	8.12	6.44	8.12
3	9.24	13.08	5.98	7.06	8.38	6.06	10.04	8.20	7.27
4	10.68	12.28	7.42	6.94	6.22	4.62	10.52	6.60	6.49
5	8.12	15.00	6.58	6.34	6.94	6.42	11.0	8.85	6.82
6	7.80	13.40	5.74	8.26	5.98	6.36	9.56	5.44	5.45
7	8.44	13.72	7.18	7.54	5.52	6.98	9.88	6.92	7.48
8	8.76	12.92	6.46	7.92	8.26	7.54	7.32	7.72	6.94
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
200	9.56	11.48	7.78	7.66	7.36	7.02	8.28	6.84	7.28

$RMSE$ 反映近似模型的整体精度，其计算公式分别见式(9)、式(10)。要求 $R^2 \geqslant 0.9$、$RMSE \leqslant 0.2$。

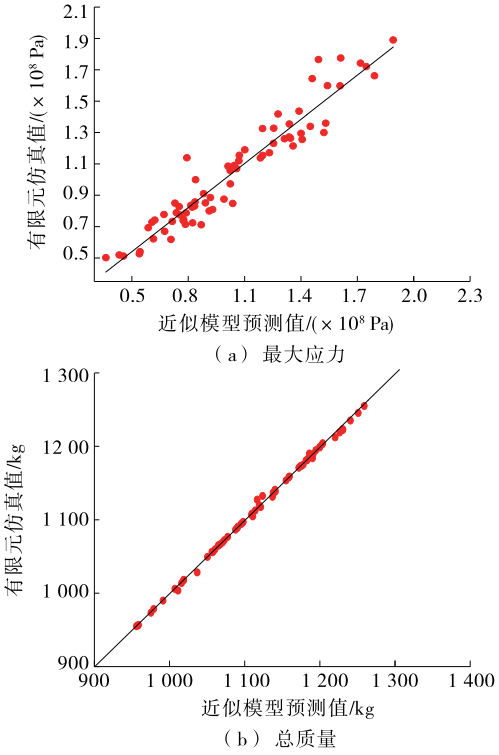
$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y}_i)^2} \tag{9}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{y}_i)^2} \tag{10}$$

式中：n 为试验样本的数量；y_i 为测试样本点通过有限元计算的实际响应值；y_i 为近似模型下响应的预测值；$\bar{y}_i$ 为实际响应值的均值。

以车架各主要承载梁 $X_1 \sim X_9$ 的厚度为优化输入变量、车架使用性能相关参数(总质量和最大应力)为优化输出变量，根据表 1 中样本点对 4 种近似模型的拟合效果进行分析。径向基神经网络近似模型的拟合效果和精度分别见图 4、表 2，响应面近似模型的拟合效果和精度分别见图 5、表 3，正交多项式近似模型的拟合效果和精度分别见图 6、表 4，克里格近似模型的拟合效果和精度分别见图 7、表 5。

由图 4～7、表 2～5 可知：正交多项式近似模型中最大应力响应的确定性系数小于 0.9，不能代替有限元模型进行计算；其他 3 种模型的精度符合要求，均可代替有限元模型进行后续优化设计。就响应的整体精度而言，克里格和响应面近似模型的整体精度最高；就车架最大应力响应的拟合精度而言，克里格近似模型的精度最好；就车架总质量响应的拟合精度而言，响应面和正交多项式近似模型的预测精度最高，克里格近似模型与之相比略有下降。综上，选取克里格和响应面模型构建车架最大应力和总质量的组合近似模型。



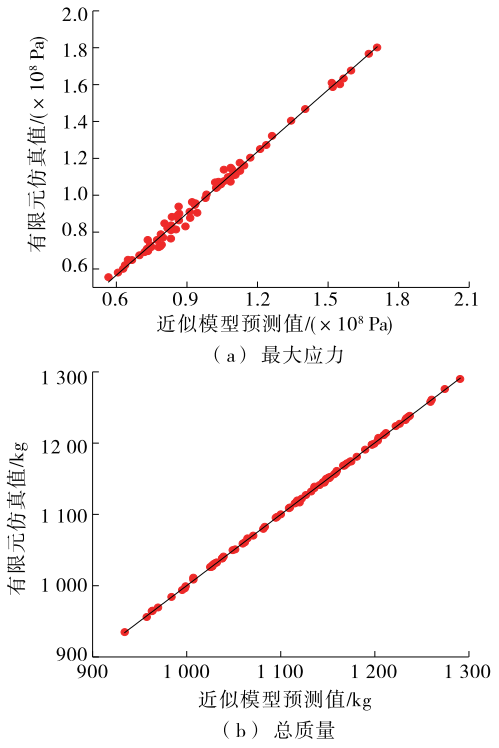
(a) 最大应力

(b) 总质量

图 4　径向基神经网络近似模型各响应的拟合效果

表 2　径向基神经网络近似模型的拟合精度

项目	$RMSE$	R^2
最大应力	0.068 79	0.935 52
总质量	0.002 98	0.989 84



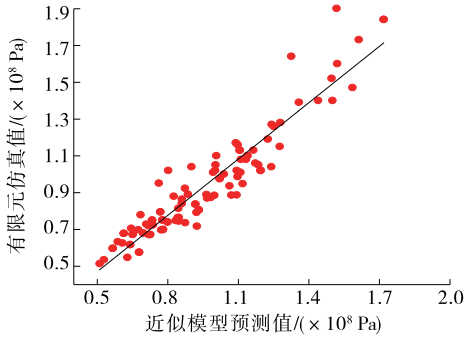
(a) 最大应力

(b) 总质量

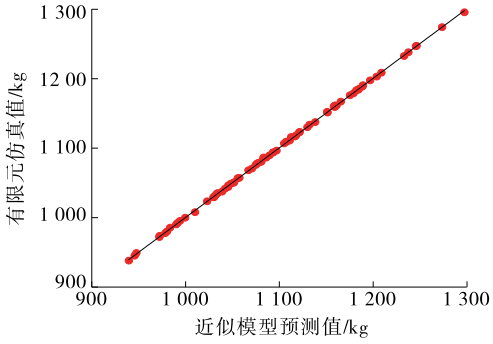
图 5　响应面近似模型各响应的拟合效果

表 3 响应面近似模型的拟合精度

项目	*RMSE*	R^2
最大应力	0.012 13	0.971 26
总质量	0.003 28	0.999 81



（a） 最大应力



（b） 总质量

图 6 正交多项式近似模型各响应的拟合效果

表 4 正交多项式近似模型的拟合精度

项目	*RMSE*	R^2
最大应力	0.097 88	0.897 59
总质量	0.002 51	0.999 86

3 基于组合近似模型的车架轻量化设计

3.1 权系数的确定

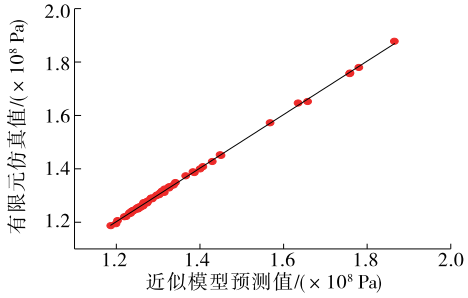
采用启发式计算法，针对不同响应，根据式(6)～(8)计算组合近似模型中各单一近似模型的权系数，结果见表 6。

利用单一近似模型的权系数构建组合近似模型，并对其拟合效果进行分析，结果见图 8。

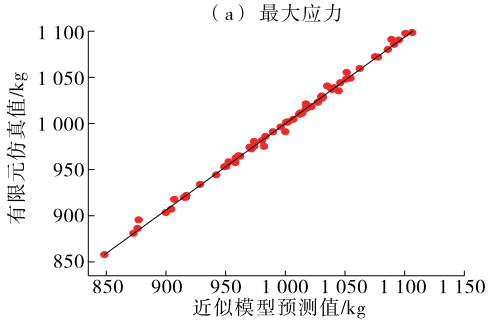
由图 8 可知：有限元仿真值和组合近似模型的预测值误差较小，预测精度略高于单一近似模型，且适合各种状态变量的预估。因此，可采用该组合近似模型代替有限元模型进行优化计算。

3.2 优化数学模型

以车架的最大应力和变形为约束、质量最小为



（a） 最大应力



（b） 总质量

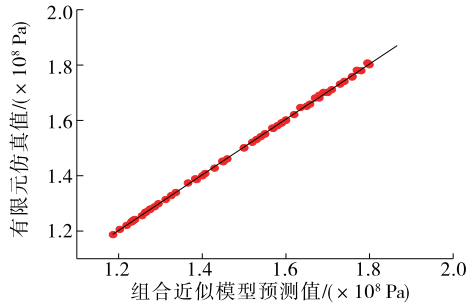
图 7 克里格近似模型各响应的拟合效果

表 5 克里格近似模型的拟合精度

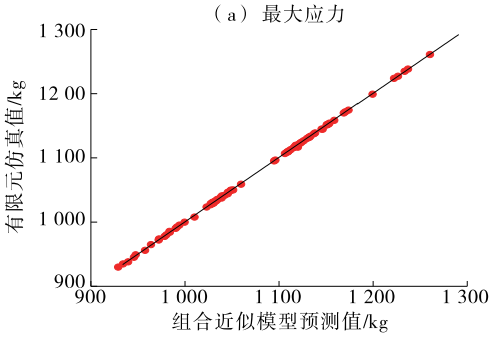
项目	*RMSE*	R^2
最大应力	0.005 72	0.999 30
总质量	0.017 60	0.989 57

表 6 近似模型的权系数

响应指标	权系数	
	RSM	Kriging
最大应力	0.483	0.517
总质量	0.529	0.471



（a） 最大应力



（b） 总质量

图 8 组合近似模型各响应的拟合效果

目标的优化数学模型可定义为：

$$\mathrm{Min}M(X)$$

$$\text{s.t.}\begin{cases}\Delta r_{\max}(X)\leqslant 0.06\\ \lambda\sigma_{\max}(X)\leqslant\sigma_s=3.45\times10^8\\ X_{i\min}\leqslant X\leqslant X_{i\max}\end{cases}\tag{11}$$

式中：$M(X)$为车架的总质量；X 为设计变量的可行域，$X=[X_1,X_2,X_3,X_4,X_5,X_6,X_7,X_8,X_9]$；$\Delta r_{\max}(X)$为车架的刚度变形，其最大值为 0.06 m；$\lambda$ 为强度安全系数，$\lambda=1.5$；$\sigma_{\max}$ 为车架受到的最大应力；σ_s 为材料的屈服强度，$\sigma_s=345$ MPa。

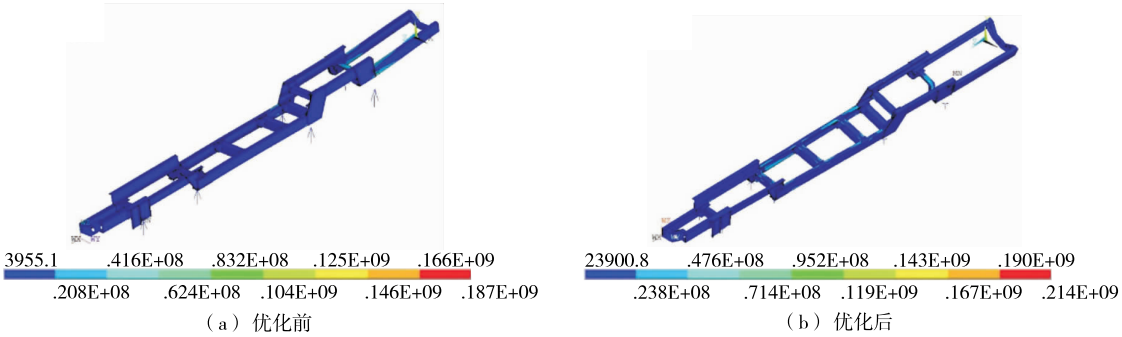
3.3　模型求解

采用霍克—吉维斯直接搜索法在优化空间中寻找全局最优解。组合近似模型优化前后各设计变量的比较见表 7。

表 7　优化前后各设计变量对比

变量	初始解/mm	最优解/mm	变化量/%	变量	初始解/mm	最优解/mm	变化量/%
X_1	9	7.5	−16.7	X_6	6	8.6	43.3
X_2	13	8.0	−38.4	X_7	9	5.5	−38.9
X_3	7	5.8	−17.1	X_8	7	5.0	−28.5
X_4	7	8.0	14.2	X_9	7	6.4	−8.5
X_5	7	6.0	−14.2				

对优化后车架重新建立有限元模型进行分析，结果显示：优化后车架质量为 865 kg，比优化前的 989 kg 减轻 12.54%；优化后车架的最大应力由 187 MPa 增至 214 MPa（见图 9），安全系数达到 1.6，满足设计要求。



（a）优化前　　（b）优化后

图 9　优化前后车架等效应力（单位：Pa）

4　结论

（1）比较响应面、径向基神经网络、克里格及正交多项式 4 种近似模型对车架状态变量的估算精度，克里格近似模型对最大应力的估算精度最高，响应面近似模型对总质量的估算精度最高。

（2）基于克里格和响应面近似模型构建的车架状态变量估算组合近似模型对各类状态变量都有较高的估算精度，将其用于车架轻量化设计，与优化前车架相比，优化后车架减轻 12.54%，优化目标得以实现；虽然应力有所增大，安全系数有所减小，但都在合理范围内。

参考文献：

[1]　辛天佐.轻量化 LNG 罐车的强度分析与疲劳研究[D].南京：南京理工大学，2012.

[2]　朱剑峰，林逸，史国宏.实验设计与近似模型结合下的副车架结构轻量化优化[J].汽车工程，2015，37(2).

[3]　李伟平，陶祺臻，张宝珍.牵引车架结构强度优化设计与仿真[J].现代制造工程，2016(7).

[4]　吕晓江，谷先广，王国荣，等.基于组合近似模型的可靠性优化方法在行人柔性腿型碰撞中应用研究[J].机械工程学报，2016，52(10).

[5]　王国春，成艾国，顾纪超，等.基于混合近似模型的汽车正面碰撞耐撞性优化设计[J].中国机械工程，2011，22(17).

[6]　屈小章，韩旭，毕仁贵.基于 Kriging 近似模型的轨道主冷叶轮多目标遗传优化[J].中国机械工程，2015，26(14).

[7]　Pan F，Zhu P，Zhang Y. Metamodel-based lightweight design of B-pillar with TWB structure via support vector regression[J].Computers & Structures，2010，88(1～2).

[8]　Chen S K，Xiong Y，Chen W. Multiresponse and multistage metamodeling approach for design optimization [J].Aiaa Journal，2009，47(1).

[9]　王凡，朱晖，杨志刚.基于近似模型的整车气动外形优化[J].计算机辅助工程，2016，25(6).

（下转第 10 页）

参考文献：

[1] GB/T 31498－2015，电动汽车碰撞后安全要求[S].

[2] 颜先华，施卢丹，王纯，等.某微型乘用车后面碰撞结构安全优化设计[J].公路与汽运，2013(6).

[3] 叶子波，符兴锋，周斯加，等.HEV 后碰撞安全性仿真和试验研究[J].华南理工大学学报：自然科学版，2011，39(11).

[4] 李仲奎，宋景良，夏卫群，等.插电式混合动力汽车后碰撞性能改善[A].2013 年中国汽车工程学会年会论文集[C].2013.

[5] 苏忠根，龙江启，周斯加，等.增程式纯电动汽车后碰撞安全性仿真和试验研究[J].中国机械工程，2013，24(7).

[6] 胡远志，胡源源，刘西，等.基于 LS－DYNA 的某座椅鞭打性能分析和优化[J].重庆理工大学学报：自然科学版，2017，31(6).

[7] GB 20072－2006，乘用车后碰撞燃油系统安全要求[S].

[8] GB/T 31467－2015，电动汽车用锂离子动力蓄电池包和系统[S].

[9] 崔萌，杨志刚，王大勇，等.基于正面 RCAR 试验的汽车结构性能改进设计研究[J].上海汽车，2013(4).

[10] 涂文兵，何海斌，刘乐平，等.诱导结构对汽车前纵梁碰撞性能的影响[J].重庆理工大学学报：自然科学版，2018，32(7).

[11] 杨桂通.弹塑性动力学基础[M].北京：科学出版社，2008.

[12] 冉清华.中型客车驾驶室正碰结构安全性仿真研究[J].客车技术与研究，2012(4).

[13] 吴长风，那景新，杨佳宙，等.客车正面碰撞车身结构耐撞性分析与改进[J].客车技术与研究，2018(4).

[14] 王力，吴旭，魏然，等.某乘用车追尾碰撞分析及结构改进研究[J].轻型汽车技术，2012(增刊 3).

[15] 朱平，肖国锋，张宇，等.轿车追尾碰撞仿真及结构耐撞性改进研究[J].中国机械工程，2008，19(6).

[16] 孔国栋.某微型纯电动车正面碰撞安全分析与优化[D].长沙：湖南大学，2017.

[17] 李文龙.纯电动汽车正面碰撞安全性分析与优化[D].武汉：武汉理工大学，2013.

[18] 雷正保，刘助春，廖卓.纯电动汽车白车身耐撞性拓扑优化设计方法[J].郑州大学学报：工学版，2016，37(5).

[19] 雷正保，肖林辉，阳彪，等.纯电动汽车的碰撞相容性与 NVH 多目标拓扑优化[J].武汉理工大学学报：交通科学与工程版，2016，40(1).

[20] 王希杰.汽车侧面碰撞安全性能分析与优化[D].重庆：重庆汽车学院，2012.

[21] 葛云飞.电动汽车碰撞安全性分析[D].淄博：山东理工大学，2013.

收稿日期：2019－07－01

（上接第 5 页）

[10] 谢晖，陈龙，李凡.RBF 近似模型在汽车碰撞变复杂度建模中的应用[J].机械科学与技术，2016，35(10).

[11] 李铁柱，李光耀，陈涛，等.基于 Kriging 近似模型的汽车乘员约束系统稳健性设计[J].机械工程学报，2010，46(22).

[12] Yu Cheng Liu.Crashworthiness design of thin-walled curved beams with box and channel cross sections[J]. International Journal of Crash Worthiness，2010，15(4).

[13] Forrester A I J，Keane A J.Recent advances in surrogate-based optimization[J]. Progress in Aerospace Sciences，2009，45(1).

[14] 潘锋.组合近似模型方法研究及其在轿车车身轻量化设计的应用[D].上海：上海交通大学，2011.

[15] 马锦.基于组合近似模型的插秧机秧箱轻量化设计[D].合肥：安徽农业大学，2017.

[16] 孙杨.组合近似模型预测设计方法及应用研究[D].大连：大连理工大学，2016.

[17] 周美施，尹怀仙，张铁柱，等.考虑疲劳寿命的负载隔离式电动汽车车架轻量化研究[J].公路与汽运，2016(4).

[18] 唐锐东，胡霞东，吴东，等.某 6.6 m 纯电动客车轻量化设计[J].客车技术与研究，2016(3).

[19] 继刚，王淑丽，许夏.整体前桥全承载车型轻量化设计与分析[J].客车技术与研究，2014(1).

[20] 王楠，张洪信，赵清海，等.基于 RSM 近似模型的客车车架稳健性设计[J].机械制造与自动化，2019(1).

[21] 王楠.基于拓扑和稳健设计的客车车架轻量化研究[D].青岛：青岛大学，2018.

[22] 张勇.基于近似模型的汽车轻量化优化设计方法[D].长沙：湖南大学，2009.

收稿日期：2019－09－26