

基于梯度强度立柱的客车侧翻 安全性多目标优化设计

周莎, 张勇, 张成, 李奇

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 提出一种新型梯度强度立柱结构,使侧翻时客车立柱不同位置的强度与受力匹配.对梯度立柱分析表明:新型梯度强度立柱结构明显提高了客车侧翻安全性能.结合最优拉丁方实验设计和径向基近似技术,构建了设计响应的高精度近似模型,并采用多目标遗传算法对其寻优.优化结果表明:通过对梯度强度立柱结构的强度与壁厚的合理匹配,不仅使得客车的侧翻安全性得到较大的改善,而且达到了客车轻量化设计的目的.

关键词: 客车; 梯度强度; 立柱; 多目标优化; 侧翻安全性

中图分类号: U 271.1 **文献标志码:** A

客车侧翻事故是特大交通事故的主体.客车因其所载乘客较多,经常出现群死群伤的现象,造成恶劣的社会影响.因此,对客车侧翻安全性进行研究具有重要意义^[1].为了更好地研究客车侧翻事故,国内外都相继出台了客车侧翻实验的法规,较典型的是欧洲的 ECE R66 法规,GB 17578—2013《客车上部结构强度要求及试验方法》详细地规范了客车上部结构强度要求和相关的试验方法^[2-3].对于客车侧翻安全性的研究,Su 等^[4]基于代理模型,利用响应面来实现客车多目标优化;Liang 等^[5]通过优化每根立柱厚度来改善客车上部结构强度和吸能性;高云凯等^[6]基于客车上部结构关键零部件截面形状进行侧翻安全性多目标优化.然而,这些研究并未考虑到侧翻过程中侧围立柱不同位置受力不均匀的特点.本文针对这一现象提出一种新型的梯度强度立柱结构,使立柱不同位置的强度与受力匹配,从而减小侧围的挤压变形,提高侧翻安全性.

1 客车有限元模型的建立

以某型号全承载大客车为研究对象,并建立该客车的有限元模型,如图 1 所示.模型主要包括车身骨架、底架和车轮等.其他部件如发动机、油箱、蒙皮和座椅等均以集中载荷或均布载荷等效配重的方式加载到对应几何位置的节点上,保证整车有限元模型的质心高度位置和实车的基本吻合,误差控制在 2% 以内^[7].基于 ECE R66 法规建立的客车有限元侧翻模型,其主要包括车身部分、翻转平台和地面.并且,为方便评价客车上部结构的强度及安全性,模型依据 ECE R66 定义了乘员的生存空间.

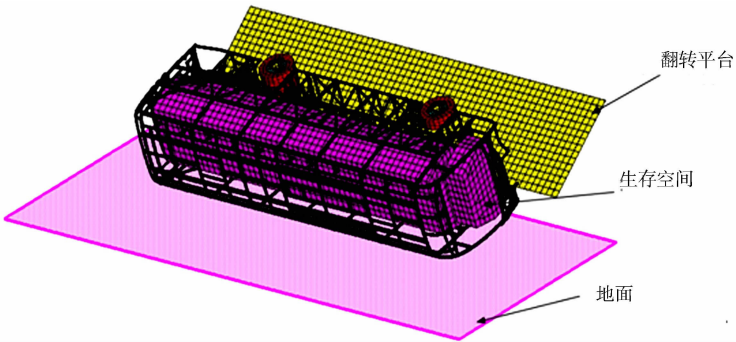


图 1 客车侧翻有限元模型
Fig. 1 Bus rollover finite element model

收稿日期: 2014-06-16
通信作者: 张勇(1980-),男,副教授,博士,主要从事汽车碰撞安全性的研究. E-mail:flashzy1980@163.com.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51205141);中国博士后科学基金资助项目(2014T70613);华侨大学中青年教师科技创新支持计划资助项目(ZQN-PY202)

为了保证乘员安全性,客车侧翻过程中车身部件不能侵入生存空间.整车有限元模型共有 412 967 个单元,419 535 个节点.车身骨架的材料为 Q345,密度为 $7\,800\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$;弹性模量为 210 GPa;泊松比为 0.3;屈服极限为 345 MPa.

2 客车侧翻安全性分析及验证

建好的客车侧翻有限元模型采用 LS-DYNA 进行数值仿真分析,整个分析过程从客车撞地瞬间到车身完全离开地面为止,历时 250 ms.侧翻碰撞过程中车身与地面的撞击力,如图 2 所示.由图 2 可知:整个过程有两个波峰值,从开始到 0.008 s 时车身结构与地面发生撞击,此时撞击力达到最大值 1 570 kN;到 0.078 ms 左右时碰撞力达到另一个峰值 551 kN,此时车身变形量达到最大;到 0.215 s 后,碰撞力几乎为零,说明此时车身开始弹离开地面.

碰撞过程中的能量曲线,如图 3 所示.由图 3 可知:整个过程能量守恒,沙漏能所占比例小于 5%.为验证该有限元模型的有效性,结合与该车型结构相近的对标车型的侧翻实验,进行对比分析,结果如表 1 所示.表 1 中:侧翻过程中侧围每根立柱与生存空间的最小距离(入侵量)分别为 $D_1,D_2,D_3,D_4,D_5,D_6,D_7$.由表 1 可知:对标模型的侧翻初始侵入与当前模型较为吻合,因此,可认为整车模型和分析都是合理、可靠的^[8].

侧翻碰撞过程中在立柱上间隔均匀选取 5 个测试点,侧围立柱的应力云图,如图 4 所示.由图 4 可知:侧翻过程中其立柱不同位置的应力水平差别较大.

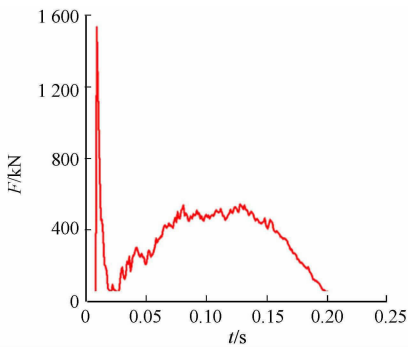


图 2 撞击力曲线

Fig. 2 Impact force curve

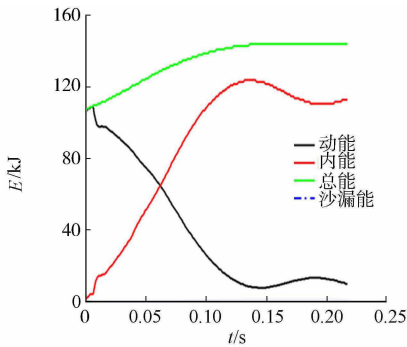


图 3 车身能量曲线

Fig. 3 Body energy curve

表 1 对标模型与当前模型侧翻入侵对比

Tab. 1 Rollover invasion comparison of simulation and experiment model

模型	D_1/mm	D_2/mm	D_3/mm	D_4/mm	D_5/mm	D_6/mm	D_7/mm
仿真模型	-17.15	-38.19	-30.43	-22.70	-19.15	-11.99	-14.76
对标模型	-20.26	-35.52	-30.33	-23.23	-20.75	-13.64	-14.55

侧翻过程中车身结构最大变形,如图 5 所示.由图 5 可知:碰撞过程中,生存空间明显被入侵,不满足 ECE R66 法规要求,因此,需要强化车身上部结构强度来提高客车侧翻安全性能.

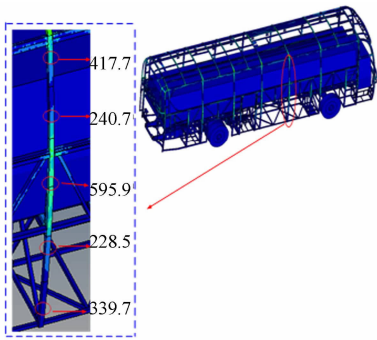


图 4 侧围立柱的应力云图

Fig. 4 Stress nephogram of side wall pillar (MPa)

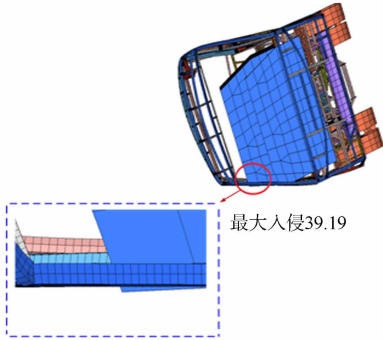


图 5 侧翻入侵示意图

Fig. 5 Schematic view of rollover invasion (mm)

3 梯度强度立柱结构侧翻安全性的优化

3.1 设计流程的优化

从客车侧翻过程可以看出:侧围立柱是关键 的承力部件,侧翻碰撞过程中客车立柱不同位置受力相当不均匀. 因此,提出了一种新型的梯度强度立柱结构,使立柱不同位置的强度与受力匹配,从而减小侧围的挤压变形,提高侧翻安全性. 为了进一步使立柱结构强度分布更加合理,基于客车梯度强度立柱的强度匹配进行客车侧翻安全性的多目标优化流程,如图 6 所示.

3.2 梯度强度立柱结构及侧翻分析

客车梯度强度立柱结构是把立柱均匀分为 6 单元,每个单元强度不一样,且呈梯度变化,客车侧围梯度强度立柱结构示意图,如图 7 所示.

采用热成型方法^[9-10]加工的梯度强度立柱结构,如图 8 所示. 该结构将客车每根立柱均匀分为 6 个单元: $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6$,6 个单元的强度沿高度变化. 根据热成型的梯度强度立柱结构具有 5 种屈服强度,6 个单元对应的屈服强度为 400,500,650,800,1 000,1 000 MPa.

为了验证梯度强度结构的性能,将初始客车立柱替换为梯度强度立柱,对其进行数值仿真分析,得到的各立柱对生存空间的入侵量,如表 2 所示. 表 2 中:负数表示有入侵情况. 由表 2 可知:相对于原始模型的侧翻,采用梯度强度立柱结构后的安全性有了明显提高,但立柱对生存空间还有一定的侵入量,因此,仍需要对其进行的优化设计.

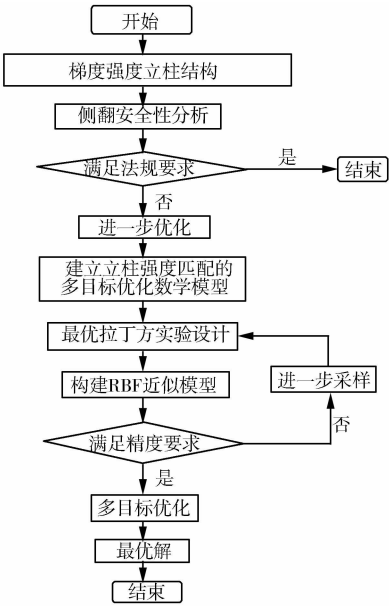


图 6 客车车身多目标优化设计流程图
Fig. 6 Design flow chart of bus body multi-objective optimization design flow

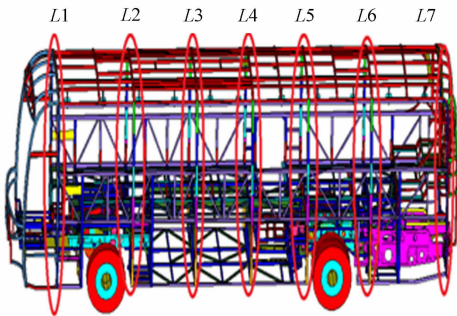


图 7 客车侧围立柱结构示意图
Fig. 7 Bus side wall pillars structure

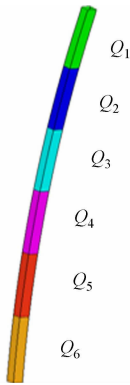


图 8 梯度强度立柱结构
Fig. 8 Gradient strength pillar structure

表 2 立柱对生存空间入侵量

Tab. 2 Pillar on the amount of living space invasion

立柱	D_1/mm	D_2/mm	D_3/mm	D_4/mm	D_5/mm	D_6/mm	D_7/mm
初始设计	-17.150	-38.190	-30.430	-22.700	-19.150	-11.990	-14.760
初始梯度立柱	8.279	-5.799	-0.208	-1.400	-2.817	0.821	14.978

3.3 客车侧翻多目标优化数学模型

虽然单目标优化能够改善设计性能,但单目标优化在复杂的设计要求下不能为设计师提供多种可选的设计方案^[11]. 在汽车优化设计中应该综合考虑汽车各方面因素,实现汽车更多性能要求. 多目标优化不同于单目标优化,最后所得的最优解不是唯一解,而是一个 Pareto 最优解集或 Pareto 前沿. 求解多目标问题实质就是寻求 Pareto 最优解集的过程^[12].

客车侧翻过程中,乘客受伤害有两种主要形式^[13]:被入侵的生存空间对乘客进行的挤压,乘客与车体之间的二次碰撞.因此,为降低客车侧翻时对乘客的伤害,以客车梯度强度立柱结构为优化对象,选取立柱 6 个单元的屈服强度和每根立柱厚度做为设计变量,以生存空间的侵入量为设计约束,以侧翻碰撞后车身吸收能量和立柱质量为设计目标,建立基于梯度强度立柱结构强度匹配的客车车身多目标优化数学模型,即

find $[Q_1, Q_2, \cdots, Q_6; t_1, t_2, \cdots, t_7]^T$,

min $f(x) = [-E, M]$,

s. t. $D_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \cdots, 7,$

$t_{j,t} \leq t_j \leq t_{j,h}, \quad t = 1, 2, \cdots, 7,$

$Q_1, Q_2, \cdots, Q_6 \in [400, 500, 650, 800, 1\ 000].$

}

(1)

式(1)中: E 为侧翻中车身吸收的能量; M 为立柱结构质量; Q_1, \cdots, Q_6 为立柱结构 6 个单元的屈服强度; t_1, t_2, \cdots, t_7 为对应的每根立柱厚度;立柱厚度下限 $t_{j,l}$ 为 1.5 mm,上限 $t_{j,h}$ 为 3.5 mm; D_i 为入侵量.

3.4 近似模型的建立

在工程优化问题中,对于一些高度非线性问题,如汽车碰撞分析等,直接利用有限元模型进行优化迭代过程非常耗时.因此,近似模型技术得到了广泛的关注和应用.由于径向基近似模型(radial basis function, RBF)针对客车侧翻碰撞这类高度非线性问题有较好的预测精度和稳健性,因此,基于 RBF 径向基方法构建了各个响应的近似模型.近似模型的建立包括实验设计采样和近似模型技术两方面^[14].

3.4.1 最优拉丁方实验设计 最优拉丁方采样方法能使采样点比较均匀地分布在采样空间,是一种“充满空间”采样技术,用较少的试验点就能真实地反映采样空间信息的特点^[15].因此,对客车梯度强度立柱结构 6 个单元的屈服强度(Q_1, \cdots, Q_6)和每根立柱厚度(t_1, t_2, \cdots, t_7)进行了 60 次最优拉丁方采样.

3.4.2 RBF 近似模型 RBF 是以径向函数为基函数,通过线性叠加的方式构造出来的模型.一般情况下任何函数都可以表示为一组基函数的加权和,可以实现从样本输入到基函数输出之间的一种非线性映射关系^[16],其基本数学表达式为

$$y(x) = \sum_{i=1}^n w_i \varphi_i(\|x - x_i\|).$$

(2)

式(2)中: x 为设计变量; n 为样本点个数; w_i 为线性叠加权重系数; $\|x - x_i\|$ 为对应预测点和第 i 个样本点之间的欧氏距离;径向函数为 $\varphi_i(\|x - x_i\|)$.

3.4.3 近似模型的精度检查 近似模型的精度决定了最优结果的可行性,因此,必须开展近似模型精度的验证.采用工程中常用的复相关系数 R^2 检测, R^2 定义^[17]为

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

(3)

式(3)中: n 为样本数; \hat{y}_i 为第 i 个样本点的近似模型预测值; y_i 为第 i 个样本点的真实值(有限元计算值); \bar{y} 为样本均值.

R^2 的值在 0 到 1 之间, R^2 越接近 1,则表明近似模型的精度越高.通过验算,基于最优拉丁方样本点与 RBF 近似技术得到的各近似模型的 R^2 值,如表 3 所示.

由表 3 可知:所有近似模型的 R^2 值都较接近 1,说明近似模型的精度都比较高,可用它来代替有限元模型进行多目标优化.

表 3 设计响应的近似模型精度
Tab. 3 Approximate model accuray cof design responses

项目	D_1/mm	D_2/mm	D_3/mm	D_4/mm	D_5/mm	D_6/mm	D_7/mm	E/kJ	m/kG
R^2	0.959	0.965	0.978	0.962	0.957	0.95	0.971	0.967	0.999

部分响应的高精度 RBF 近似模型,如图 9 所示.

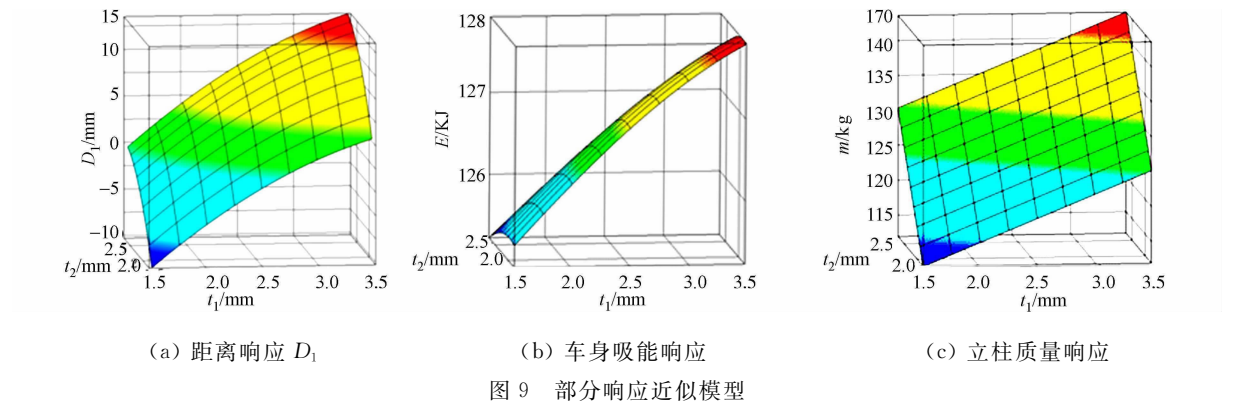


Fig. 9 Approximate model of partial response

4 优化结果与讨论

采用 NSGA-Ⅱ 对各个响应的近似模型进行多目标寻优,质量与能量吸收之间的 Pareto 前沿曲线,如图 10 所示. Pareto 前沿是一个优化解集,相对单目标优化而言,它能为工程设计人员提供更多的设计方案,常根据设计的实际需求和经济性来选取最优设计方案. 图 10 中:红色标记为在 Pareto 前沿曲线间隔均匀选取的 3 组解.

3 组最优设计变量所对应响应值,如表 4 所示. 由表 4 可知:3 组皆满足 ECE R66 法规的要求;解 1 侧重于车身减重;解 2 兼顾车身减重和能量吸收;解 3 侧重于能量吸收. 综合兼顾吸能和轻量化的目的,最后决定以解 2 为最终解.

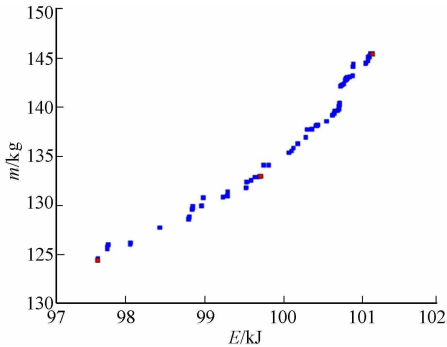


图 10 设计目标的 Pareto 前沿
Fig. 10 Pareto front of design objectives

表 4 3 组 Pareto 最优解对应的响应值

Tab. 4 Three groups of Pareto optimal solutions corresponding response

解序号	D_1 /mm	D_2 /mm	D_3 /mm	D_4 /mm	D_5 /mm	D_6 /mm	D_7 /mm	E /kJ	m /kg
初始值	-17.15	-38.19	-30.43	-22.7	-19.15	-11.99	-14.76	103.43	149.7
1	17.54	1.51	6.69	6.83	1.05	0.83	16.61	97.65	124.5
2	12.50	1.05	2.11	4.05	1.42	3.87	18.71	99.77	134.11
3	11.22	0.17	0.14	1.34	3.25	2.21	13.31	101.15	145.51

由于优化后整车重量减轻,侧翻时初始能量减小及车身变形减小,车身吸能比优化前减少了,而乘客与车体发生二次碰撞而受伤害的可能性并没有增大. 初始设计和优化后车身与地面碰撞时的撞击力曲线,如图 11 所示. 由图 11 可知:优化后碰撞力峰值比初始模型降低 16.9%,从而大大降低二次碰撞时对乘员的伤害.

5 结论

根据客车侧翻过程中立柱不同位置受力不同的特点,提出了一种新型梯度强度立柱结构,把每根立柱强度沿高度方向均匀分为 6 个单元,使得立柱不同位置强度与受力匹配.

结合最优拉丁方实验设计采样与 RBF 近似技术,对立柱结构的强度与厚度进行了多目标最优匹配. 优化结果表明:1) 梯度强度立柱结构能明显提高客车侧翻安全性能;2) 针对客车侧翻优化问题,采用 RBF 径向基近似模型有较高的精度,并大幅提高了优化效率;3) 梯度强度立柱结构实现立柱结构减

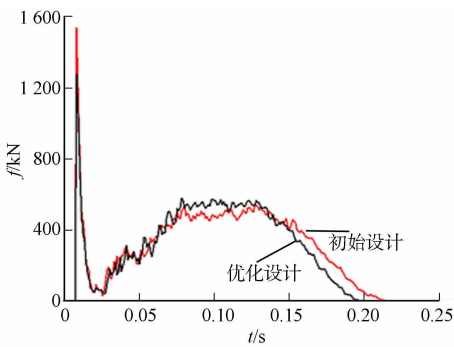


图 11 优化前后碰撞力曲线对比
Fig. 11 Comparison of the collision force before and after optimization

质量 10.4%,达到了轻量化的目的;4) 结合 RBF 模型和 NSGA-II 算法应用于客车侧翻的多目标优化中,得出了 Pareto 最优解集,可以为设计人员提供多套设计方案参考。

参考文献:

[1] 苏奎,李高波,吕光辉.长途客车交通事故原因及实例分析[J].交通企业管理,2013(8):71-72.

[2] 中国公路车辆有限公司,金龙联合汽车工业有限公司.GB 7578—2013 客车上部结构强度要求及试验方法[S].北京:中国标准出版社,2014:13-18

[3] 杨瑞峰,樊江顺,崔海涛,等.基于 ECE R66 法规的某大客车上部结构强度[J].公路交通科技,2011,28(10):136-140.

[4] SU Rui-yi,GUI Lian-gjin,FAN Zi-jie. Multi-objective optimization for bus body with strength and roller safety constraints based on surrogate models[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization,2011,44(3):431-441.

[5] LIANG C C,LE G N. Optimization of bus rollover strength by consideration of the energy absorption ability[J]. International Journal of Automotive Technology,2010,11(2):173-185.

[6] 高云凯,张朋,吴锦妍,等.基于 Kriging 模型的大客车侧翻安全性多目标优化[J]. 同济大学学报:自然自然版,2012,40(12):1882-1887.

[7] 胡泊,客车侧翻安全性仿真研究及试验验证[D]. 西安:长安大学,2012:55-58.

[8] 马晓光,王秋林,那景新,等.客车侧翻结构安全性仿真分析及改进设计[J]. 客车技术与研究,2011,41(8):31-33.

[9] 高云凯,高大威,余海燕,等.汽车用高强度钢热成型技术[J]. 汽车技术,2010(8):56-60.

[10] 林建平,王立影,田浩彬,等.超高强度钢板热冲压成形研究与发展[J]. 热加工工艺,2008,37(21):140-144.

[11] ZHANG Yong,SUN Guang-yong,LI Guang-yao. Optimization of foam-filled bitubal structures for crashworthiness criteria[J]. Materials and Design,2012,38:99-109.

[12] 关志华,寇纪淞,李敏强.一种改进的非支配排序遗传算法 INSGA[J]. 天津大学学报:自然科学版,2002,35(4):429-434.

[13] 范子杰,马林,桂良进,等.大客车侧翻安全性多目标优化[J]. 系统仿真学报,2012,24(5):1109-1113.

[14] 李恩颖,近似模型优化体系关键技术研究及应用[D]. 长沙:湖南大学,2009:2-8.

[15] 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.

[16] 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,2012:12-18

[17] 廖兴涛,张维刚,李青,等.响应表面法在薄壁构件耐撞性优化设计中的应用[J]. 研究工程设计学报,2006,13(5):298-302.

Multi-Objective Optimization Design for Bus Rollover
Safety Based on Gradient Strength Pillar

ZHOU Sha, ZHANG Yong, ZHANG Cheng, LI Qi

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to make the strength of the pillar in different locations match with the impacting force, a new gradient strength pillar structure is proposed in this paper. The rollover simulation analysis for gradient pillar shows that the gradient strength pillar structure obviously improves rollover safety of the bus. The paper establishes high precision approximate models of design response by combining optimal latin hypercube experimental design with radial basis function (RBF) approximation techniques, and multi-objective optimization design is performed based on approximate models of design responses by using the multi-objective genetic algorithm (NSGA-II). The optimization results show that a reasonable match of strength and wall thickness for the pillar structure, not only can improve bus rollover security greatly, but also can achieve the purpose of bus lightweight design.

Keywords: bus; gradient strength; pillar; multi-objective optimization; rollover safety