DOI: 10.3901/JME.2015.06.118

基于不同年龄的自适应儿童乘员 约束系统参数优化研究*

白中浩¹ 陈亚枫¹ 程胜华² 王玉龙¹

(1. 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室 长沙 410082;
2. 泛亚汽车技术中心有限公司 上海 201201)

摘要: 针对单一碰撞工况匹配的儿童乘员约束系统不能保证在其他碰撞工况下儿童乘员的保护, 而且极易造成更大的伤害。基于内置式自适应儿童约束系统的参数可调的特征, 选取坐垫高度、坐垫长度、安全带限力值为优化变量, 以儿童综合伤害评价价值 I 及颈部损伤临界值 N_{km} 为优化目标, 采用多项式回归近似模型和非支配遗传优化算法(Non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)相结合的方法, 分别对 3、6、10 岁儿童假人在法规 GB 27887 规定的正面碰撞和追尾碰撞工况下进行多目标优化计算。优化结果表明, 在优化设计点, 3 个年龄段的儿童假人在两种碰撞工况下都能获得较好的保护。基于文中 3 个年龄段假人的优化设计点, 拟合出优化变量与儿童身高和体重的相关关系模型, 从而对不同身高和体重的儿童乘员都能达到很好的保护效果。

关键词: 多碰撞工况; 自适应儿童约束系统; 非支配遗传算法; 多目标优化

中图分类号: U461

Research on the Optimization of Intelligent Child Restraint Systems Based on Children of Different Ages

BAI Zhonghao¹ CHEN Yafeng¹ CHENG Shenghua² WANG Yulong¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body,
Hunan University, Changsha 410082;
2. Pan Asia Technical Automotive Center Co., Ltd., Shanghai 201201)

Abstract: Child restraint systems designed to match child occupant only under one collision condition can't provide effective protection for children under other collision condition. An adaptive child restraint system, which characteristic parameters are adjustable, is used to analyze the optimum parameters of restraint system for child occupants at different ages. The seat height, the cushion length and the force limiter value of the seat belt are chosen as optimization variables, and children's comprehensive damage evaluation I and neck injury threshold N_{km} are chosen as optimization objectives. The methods of approximate model of polynomial regression and non-dominated sorting genetic algorithm II are combined to conduct, multi-objective optimization for 3, 6, 10 years old child dummy respectively in both the front impact and rear impact according to GB 27887. The results show that the optimized parameters of restraint system can provide a better protection for children of the three age group in the two collision conditions. The correlation model between optimum parameters and child's height and weight is fitted based on optimization design points of the three age groups. Therefore, good protection effect can be achieved to children with different height and weight.

Key words: different collision condition; adaptive child restraint system; non-dominated sorting genetic algorithm II(NSGA-II); multi-objective optimization

0 前言

儿童道路交通伤害是全球关注的问题, 据公安

部交通管理局《道路交通事故统计年报》显示, 2010 年在中国交通事故中死亡的 12 岁以下儿童总人数为 2 842 人, 受伤 10 156 人^[1]。在中国独生子女占多数情况下, 儿童交通事故往往是一个家庭的灾难。研究表明儿童约束装置的使用能大大降低儿童乘员在交通事故中所受的伤害。为此, 我国强制性标准

* 国家自然科学基金资助项目(51105137, 51475153)。20140323 收到初稿, 20140917 收到修改稿

GB 27887-2011《机动车儿童乘员用约束系统》要求自 2012 年 7 月 1 日实施。然而, 普遍存在的儿童安全座椅误用大大降低了其保护效果, 在一些事故中反而引起严重的误伤^[2]。

自适应儿童约束系统能够根据儿童的身高和体重等体征参数进行调节, 对儿童乘员起到较好的保护, 杜绝了乘员约束系统的误用, 是目前解决儿童乘员安全问题的热点研究课题。然而, 由于汽车碰撞条件复杂, 约束系统参数众多, 各参数之间存在强烈的交互影响, 针对单一碰撞工况进行的约束系统匹配在其他碰撞工况下不能对儿童乘员提供最优的保护, 有时甚至造成更严重的损伤。在国内, 吉林大学的张君媛^[3]对 HybridIII 50 百分位男性假人和 5 百分位女性假人在不同速度的正面碰撞工况下进行了研究分析, 但并没有针对不同类型碰撞工况进行分析。项目组前期针对不同碰撞工况分别进行了单一碰撞工况下儿童约束系统各个参数的优化设计^[4], 但没有进行不同碰撞工况下各参数的协同优化分析。

本文对已获得国家专利的置于汽车后排座椅的新型内置式儿童安全座椅^[5]在 GB 27887 规定的正面碰撞和追尾碰撞情况下分别针对 3 岁、6 岁和 10 岁儿童乘员的保护, 建立并验证了多刚体模型及逐步回归代理模型, 采用非支配遗传优化算法 (NSGA-II) 对可调变量进行了多目标优化。结果显示, 优化后儿童假人伤害值在不同的碰撞工况下都显著降低。

1 内置式自适应儿童约束系统

1.1 仿真模型的建立

本文内置式自适应儿童乘员约束系统仿真模型采用荷兰 TNO 公司开发的多刚体动力学分析软件 MADYMO 按照座椅的实际尺寸建立。模型主要包括汽车后排内置式儿童安全座椅、三点式安全带以及儿童假人模型。该自适应儿童安全座椅的可调参数有坐垫高度、坐垫长度和安全带限力值; 实物中采用普通三点式成人式安全带, 仿真模型中采用多刚体和有限元相结合的混合式安全带模型; 儿童假人模型采用 MADAMO 软件中 P 系列 3 岁、6 岁和 10 岁多刚体假人模型, 通过预模拟对假人坐姿进行调整。实物模型和多刚体仿真模型分别如图 1 和图 2 所示。

1.2 仿真模型的验证

我国于 2012 年 7 月 1 日开始实施的《机动车儿童乘员约束系统》(GB 27887-2011) 要求对儿童乘员约束系统进行正面碰撞试验和追尾碰撞试验, 并规定加速度曲线在一定的区间内。由于本文是正面

图 1 内置式儿童安全座椅实物图

图 2 内置式儿童安全座椅多刚体仿真模型

碰撞和追尾碰撞的协调优化, 因此, 模型在正面碰撞和追尾碰撞情况下均进行了试验验证。

按照法规要求在湖南大学汽车碰撞实验室进行了正面碰撞和追尾碰撞的台车试验, 并采集了儿童假人头部和胸部的三向加速度以及台车中间加速度。经过台车试验, 在正面碰撞和追尾碰撞中获得的加速度曲线及法规要求加速度区间分别如图 3 和图 4 所示, 加速度曲线基本在法规要求的范围之内, 因此试验结果可以用于与仿真对比分析。

图 3 台车正面碰撞试验加速度曲线及法规要求

图 4 台车追尾碰撞试验加速度曲线及法规要求

将试验获得的台车碰撞加速度反向加载在建立的 Madymo 模型中的假人上, 获取假人响应曲线以及伤害值与试验结果进行对比分析(图 5、6)。在正面碰撞试验中, 为防止靠背连接失效而设置的保护装置在 0.10~0.12 s 时起作用, 导致合成胸部加速度产生有一个峰值, 在仿真中没有进行模拟, 但峰值较小, 对结果影响不大; 追尾碰撞仿真中, 在 0.10 s 时, 躯体向前反弹而造成头部与靠背发生

轻微碰撞, 使头胸部合成加速度产生一个峰值, 但此峰值对假人损伤值影响较小。除以上对假人伤害值影响较小的两个峰值外, 仿真加速度曲线和试验加速度曲线变化趋势及峰值拟合较好, 假人伤害值计算误差也均在 10% 以内(表 1), 因此可将仿真模型作为仿真计算的基本模型进行进一步的研究。

表 1 试验与假人伤害值对比

	头部合成加速度峰值/g		胸部合成加速度峰值/g	
	正面碰撞	追尾碰撞	正面碰撞	追尾碰撞
试验	52.7	33.5	39.1	21.3
仿真	51.9	34.4	40.1	20.8
误差(%)	1.5	2.6	2.6	2.3

2 试验设计及优化

2.1 优化变量的选取及其变化范围

该内置式自适应儿童安全座椅可调参数有坐垫高度、坐垫长度以及安全带限值。本文将以此三个参数作为优化变量。首先针对 6 岁儿童保护的可调变量进行优化, 然后参照 6 岁儿童参数优化过程, 对 3 岁、10 岁儿童进行优化。坐垫高度变化范围以假人肩部不超过靠背高度为准; 普通成人安全带限值一般为 4~5 kN, 由于儿童的损伤耐受限度较低, 因此选择范围为 2.0~4.5 kN; 坐垫长度为 0.32 m 时, 6 岁儿童假人膝部自然弯曲, 故将设计变量取为 0.29~0.40 mm。各参数变化范围如表 2 所示。

表 2 设计变量及其变化范围

设计变量	变化范围
坐垫高度/m	0~0.19
坐垫长度/m	0.29~0.40
安全带限值/kN	2.0~4.5

2.2 优化目标的选取

正面碰撞: ECE R44、FMVSS 213 和 GB 27887-2011 等儿童标准和 E-NCAP 中的评分包含头部和胸部的多项响应指标。

张君媛^[6]参考 FMVSS 208 中提出正面碰撞伤害评价价值(Weighed injury criterion, WIC)的方法, 提出了一种多目标综合伤害评价方法

$$I = 0.7 \left(\frac{HIC_{36}}{1000} \right) + 0.3 \left(\frac{C_{3ms}}{60} \right) \quad (1)$$

式中 I ——综合伤害评价价值;

HIC_{36} ——头部加速度综合伤害指标的数值, 1 000 为标准规定值;

C_{3ms} ——胸部 3 ms 加速度准则的数值, 60 为标准规定值。

(a) 头部合成加速度

(b) 胸部合成加速度

图 5 正面碰撞试验与仿真加速度曲线对比

(a) 头部合成加速度

(b) 胸部合成加速度

图 6 追尾碰撞试验与仿真加速度曲线对比

追尾碰撞: 颈部损伤在汽车追尾碰撞中是最常见、危害最大的一种伤害^[7]。颈部损伤临界值 N_{km} ^[8] 损伤准则是 Working Group on Accident Mechanic 小组在 2003 年提出的, 专门用来评价追尾碰撞中的乘员颈部损伤。由于追尾碰撞情况下缺少综合伤害评价价值, 因此本文以比较易受伤的颈部作为保护目标, 颈部损伤临界值 N_{km} 作为追尾碰撞优化目标

$$N_{km} = \frac{F_x}{F_{int}} + \frac{M_y}{M_{int}} \quad (2)$$

式中 F_x ——颈部剪切力;

M_y ——总弯矩;

F_{int} ——临界力;

M_{int} ——临界弯矩;

2.3 优化拉丁超立方试验设计

拉丁超立方试验设计是一种基于随机抽样的试验设计方法, 具有效率高、自由度高等特点^[9]。它将每个因子的设计空间都均匀地划分开(所有因子都具有相同数目的分区), 然后这些水平值随机地组合在一起, 再通过优化准则保证样本分布的均匀性。

本文共进行 9 次仿真试验, 试验参数如表 3 所示。

表 3 优化变量的试验设计及水平值

试验编号	坐垫高度/m	坐垫长度/m	限值/kN
1	0.024	0.345	4.19
2	0.119	0.372	4.50
3	0.142	0.304	2.31
4	0.166	0.386	2.62
5	0.071	0.359	2.00
6	0.048	0.400	3.25
7	0	0.317	2.94
8	0.19	0.331	3.56
9	0.095	0.290	3.88

2.4 多项式响应面代理模型

本文采用二阶多项式响应面模型构建仿真代理模型^[10], 基本形式为

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i x_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j \geq i}^m \beta_{ij} x_i x_j \quad (3)$$

式中 y ——响应面拟合函数;

$x_1, x_2, \dots, x_m$ ——设计变量;

m ——设计变量个数;

$\beta_i, \beta_j, \beta_{ij}$ ——待定系数, 通过最小二乘法可计算出待定系数。

通过方差分析中的决定系数 R^2 验证响应面拟合精度。

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

式中 m ——设计变量的个数;

y_i ——响应变量的仿真值;

$\hat{y}_i$ ——响应变量的预测值;

$\bar{y}$ ——响应变量仿真值的平均值。

决定系数 R^2 越接近于 1 说明近似模型的拟合效果越好。

2.5 多目标优化及非支配遗传算法

多目标优化是指在满足给定的约束条件下, 从设计变量的取值范围内搜索最佳设计点。而一般情况下, 多个目标处于冲突状态, 很难存在一个最优设计点使所有的目标同时达到最优, 因此多目标优化寻求的是 Pareto 解集^[11]。多目标优化的数学表达式如下。

优化变量

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$$

优化目标

$$\max \{f_i(x)\} \quad i=1, 2, \dots, s \quad \text{或} \quad \min \{f_i(x)\} \quad i=1, 2, \dots, s$$

变量约束

$$\text{s.t. } g_j(X) \geq 0 \quad j=1, 2, \dots, p$$

$$h_k(X) = 0 \quad k=1, 2, \dots, q \quad (5)$$

式中 n ——优化变量个数;

s ——目标函数个数;

p ——不等式约束个数;

q ——等式约束个数。

非支配遗传算法(Non-dominated sorting genetic algorithm, NSGA)与传统多目标优化方法相比, 具有计算速度快、多方向、全局搜索和高精度的优点。

非支配遗传算法 NSGA-II 是 DEB 等^[12]于 2002 年对算法 NSGA 的改进, 是迄今为止公认的最为优秀的遗传算法之一。NSGA-II 在 NSGA 的基础上加入快速非劣排序和新的多样性保持策略, 保证了种群多样性, 降低了计算的复杂度。

本文按照多目标优化算法要求, 利用 DEB 等提出的遗传算法 NSGA-II 在 Matlab 软件中进行多目标优化计算。

3 6 岁儿童约束系统的优化结果

3.1 试验设计的计算结果

将已验证的仿真模型, 按照拉丁超立方试验设计的方案在正面碰撞和追尾碰撞工况下分别进行计算。获得的假人伤害值及计算所得综合伤害评价价值 I 与颈部损伤临界值 N_{km} 如表 4 所示。

表 4 优化拉丁超立方试验中 6 岁儿童假人的伤害值

试验编号	正面碰撞			追尾碰撞
	头部指标 HIC_{36}	胸部指标 C_{3ms}	综合伤害评价价值 I	颈部指标 N_{km}
1	454.44	33.12	0.484	0.257
2	459.82	36.59	0.505	0.356
3	511.18	33.48	0.525	0.426
4	631.16	34.43	0.614	0.295
5	424.59	32.88	0.462	0.303
6	504.36	31.96	0.513	0.302
7	446.71	31.55	0.470	0.384
8	704.98	33.73	0.662	0.776
9	437.06	35.03	0.481	0.277

3.2 多项式代理模型的构建

基于上述试验结果,利用逐步回归方法得到优化目标变量关于三个设计变量的二阶多项式响应面模型的多元回归方程为

$$\begin{cases} f_1 = -0.288 + 0.824x_1 + 1.700x_2 + 0.203x_3 + 9.431x_1^2 - \\ \quad 4.134x_1x_2 - 0.103x_1x_3 - 0.269x_2x_3 - 0.0145x_3^2 \\ f_2 = 0.404 + 2.776x_1 + 2.432x_2 - 0.430x_3 + 35.521x_1^2 - \\ \quad 37.744x_1x_2 + 1.473x_1x_3 + 0.151x_2x_3 + 0.038x_3^2 \end{cases} \quad (6)$$

式中 f_1 ——正面碰撞儿童综合伤害评价价值 I ;

f_2 ——追尾碰撞颈部临界伤害值 N_{km} ;

x_1 ——坐垫高度;

x_2 ——坐垫长度;

x_3 ——限值。

回归方程 $f_1(x)$ 和 $f_2(x)$ 的决定系数 R^2 分别为 99.8% 与 99.9%。为进一步验证响应面模型精度,本文随机选取 5 个样本点对其进行检验。表 5 列出了 5 个样本点的仿真分析结果与响应面模型预测结果以及相对误差。可以看出,仿真预测结果与响应面模型预测结果误差均在 5% 以内。由此,可以认为本文响应面代理模型具有较高的拟合精度,能够较好地替代多刚体模型用于后续研究。

表 5 响应面模型精度验证

编号	坐垫高度/m	坐垫长度/m	限值/kN	正面碰撞儿童综合伤害评价价值 I			追尾颈部临界伤害值 N_{km}		
				仿真分析	响应面	误差(%)	仿真分析	响应面	误差(%)
1	0.117	0.296	2.89	0.501	0.498	0.599	0.329	0.330	0.304
2	0.122	0.374	4.22	0.515	0.521	1.170	0.325	0.318	2.150
3	0.134	0.358	3.47	0.546	0.550	0.733	0.311	0.312	0.322
4	0.147	0.327	2.26	0.548	0.569	4.040	0.385	0.384	0.260
5	0.029	0.393	2.14	0.496	0.489	2.250	0.527	0.512	2.850

3.3 基于非支配遗传算法的多目标优化

本文采用非支配遗传算法(NSGA-II)对 6 岁儿童假人在正面碰撞和追尾碰撞情况下的响应面模型回归方程进行多目标优化求解。该多目标优化问题的数学表达式和约束条件为

$$\begin{aligned} \min f_1(x) &= f_1(x_1, x_2, x_3) \\ \min f_2(x) &= f_2(x_1, x_2, x_3) \\ \text{s.t. } 0 &\leq x_1 \leq 0.19 \\ 0.29 &\leq x_2 \leq 0.4 \\ 2 &\leq x_3 \leq 4.5 \end{aligned} \quad (7)$$

将代理模型及约束参数编写入非支配遗传算法,经 100 代遗传算法迭代获得了其 Pareto 前沿曲线,如图 7 所示。

图 7 针对 6 岁儿童乘员优化参数的 Pareto 前沿曲线

在多目标优化问题中,希望不同的优化目标值都能够达到最优值,但如图 7 所示,正面碰撞综合伤害评价价值 I 和追尾碰撞颈部损伤准则值 N_{km} 成负相关。因此可根据实际情况,选择其中一个解作为优化设计点。研究表明,在碰撞过程中,如果使用

成人安全带，肩带可能勒住儿童颈部，使儿童颈部折断或窒息死亡^[13]，因而在 Pareto 解集中，选取坐垫高度较高的点。此次优化中选取的设计点为 $x_1=0.087$, $x_2=0.332$, $x_3=3.84$ ，此时，正面碰撞伤害评价价值 $f_1=0.488$ ，追尾碰撞颈部伤害准则 $f_2=0.225$ 。将设计点置于 Madymo 仿真模型里面进行计算，正面碰撞结果得到 $HIC_{36}=415.77$, $C_{3ms}=36.30$ ，计算得 $I=0.473$ ；追尾碰撞结果得到 $N_{km}=0.235$ 。正面碰撞和追尾碰撞仿真结果值与响应面模型预测值误差分别是 3.0%与 4.2%，目标函数的仿真预测与优化解的相对误差在可接受范围之内。

在优化设计点时，仿真试验的假人伤害值相对于最劣情况，在正面碰撞和追尾碰撞情况下分别降低 40%和 230%，优化效果显著。

4 3 岁和 10 岁儿童约束系统的优化

4.1 针对 3 岁和 10 岁儿童设计变量的变化范围

参照 6 岁儿童设计变量变化范围的选取准则，本文针对 3 岁和 10 岁儿童保护的优化设计变量的变化范围如表 6 所示。

表 6 设计变量及其变化范围

设计变量	针对 3 岁儿童保护	针对 10 岁儿童保护
	变量范围	变量范围
坐垫高度/m	0.05~0.19	0~0.10
坐垫长度/m	0.27~0.35	0.30~0.45
安全带限值/kN	2.0~4.0	3.5~4.5

4.2 多项式代理模型的构建

按照设计变量的变化范围，分别进行优化拉丁超立方试验设计，并采用逐步回归方式构建响应面代理模型。

针对 3 岁儿童乘员，优化目标关于三个设计变量的二阶多项式响应面模型为

$$\begin{aligned}
 f_1 &= -7.944 - 0.349x_1 + 42.353x_2 + 1.678x_3 + 29.157x_1x_2 - \\
 &\quad 2.191x_1x_3 - 65.255x_2x_3 - 2.619x_2x_3 - 0.104x_3^2 \\
 f_2 &= 4.752 - 5.356x_1 - 25.94x_2 - 0.044x_3 + 24.898x_1x_2 - \\
 &\quad 0.896x_1x_3 + 38.248x_2x_3 + 0.272x_2x_3 + 0.007x_3^2 \\
 \text{s.t. } &0.05 \leq x_1 \leq 0.19 \\
 &0.27 \leq x_2 \leq 0.35 \\
 &2 \leq x_3 \leq 4
 \end{aligned} \quad (8)$$

针对 10 岁儿童乘员，优化目标关于三个设计变量的二阶多项式响应面模型为

$$\begin{aligned}
 f_1 &= -2.335 - 2.937x_1 - 10.973x_2 + 2.517x_3 - 18.608x_1x_2 + \\
 &\quad 2.541x_1x_3 + 11.103x_2^2 + 1.035x_2x_3 - 0.383x_3^2 \\
 f_2 &= -6.341 + 14.724x_1 - 11.531x_2 + 4.441x_3 - 28.348x_1x_2 - \\
 &\quad 0.916x_1x_3 + 15.337x_2^2 + 0.464x_2x_3 - 0.5854x_3^2 \\
 \text{s.t. } &0 \leq x_1 \leq 0.1 \\
 &0.30 \leq x_2 \leq 0.45 \\
 &3.5 \leq x_3 \leq 4.5
 \end{aligned} \quad (9)$$

4.3 基于非支配遗传算法的多目标优化

验证上述回归模型的有效性后，参照 6 岁儿童乘员优化变量的多目标优化过程利用非支配遗传优化算法进行多目标优化，针对 3 岁与 10 岁儿童乘员优化参数的 Pareto 解集分别如图 8、9 所示。

图 8 针对 3 岁儿童乘员优化参数的 Pareto 前沿曲线

图 9 针对 10 岁儿童乘员优化参数的 Pareto 前沿曲线

如图 8、9 所示，针对 3 岁儿童保护和针对 10 岁儿童保护时，正面碰撞综合伤害评价价值 I 和追尾碰撞颈部损伤准则值 N_{km} 均呈负相关。

在 Pareto 前沿曲线中，综合考虑正面碰撞综合伤害评价价值 I 与追尾碰撞颈部伤害准则值 N_{km} ，分别选取一点作为最优解，针对 3 岁儿童乘员保护选取的设计点为 $x_1=0.135$, $x_2=0.315$, $x_3=3.72$ 。针对 10 岁儿童乘员保护选取的设计点为 $x_1=0.04$, $x_2=0.367$, $x_3=4.12$ 。将优化设计点分别输入到 Madymo 模型里面进行计算，计算结果及预测值如表 7 所示。目标函数的预测值与仿真值的误差均在 5%以内，误差在可接受范围之内。

表 7 3 岁和 10 岁儿童乘员在优化设计点的试验值及预测值

年龄	正面碰撞儿童综合伤害评价			追尾颈部临界伤害值		
	试验值	预测值	误差(%)	试验值	预测值	误差(%)
3	0.711	0.697	2.0	0.549	0.543	1.1
10	0.613	0.595	2.9	0.556	0.576	3.6

在优化设计点时, 3 岁和 10 岁儿童假人仿真试验的伤害值相对于最劣情况, 在正面碰撞和追尾碰撞情况下, 分别降低 32.4%、33.0%和 21.7%、56.6%, 优化效果比较显著。

5 基于身高和体重的座椅控制策略

NHTSA 推荐儿童在 12 岁时, 可使用成人约束系统, 内置式儿童安全座椅以成人约束系统点作为 12 岁儿童的最优设计点。儿童身高体重与优化后的座椅可调参数如表 8 所示。集成式儿童安全座椅在优化过程中, 坐垫高度主要与儿童的身高相关, 坐垫长度主要与儿童股骨的长度相关, 而安全带限力值主要受体重影响。仅仅依靠身高或体重中的一项来推导可调参数误差较大, 因此本文采用逐步回归方法综合考虑身高体重影响, 并侧重于影响大的参数。其基本关系模型为

$$y_i = ax_1^2 + bx_1 + cx_2^2 + dx_2 + e \quad (10)$$

式中 x_1 ——身高;

x_2 ——体重;

y_i ——约束系统参数, 表示坐垫高度和坐垫长度时, 主要考虑身高影响, 令 $c=0$; 表示限力值时, 主要考虑体重影响, 令 $a=0$ 。

表 8 假人身高体重与优化后坐垫参数

年龄	身高/m	体重/kg	座高/m	座深/m	限力值/kN
3	0.95	14.5	0.135	0.315	3.72
6	1.16	21.0	0.087	0.332	3.84
10	1.44	35.5	0.040	0.367	4.12
12	1.52	43.0	0	0.425	4.50

通过计算得到坐垫高度、坐垫长度和安全带限力值函数表达式分别为

$$\begin{cases} y_1 = 0.697 9x_1^2 - 1.283 2x_1 - 0.013 5x_2 + 0.92 \\ y_2 = -0.774 9x_1^2 + 1.086 4x_1 + 0.020 3x_2 - 0.312 7 \\ y_3 = 6.088 2x_1 + 0.003 8x_2^2 - 0.313 4x_2 + 1.680 3 \end{cases} \quad (11)$$

式中 y_1 ——坐垫高度;

y_2 ——坐垫长度;

y_3 ——安全带限力值。

通过系统自动识别儿童乘员身高和体重, 代入回归方程, 儿童约束系统即能快速调整到最佳保护点, 对不同身高体重的儿童乘员都能提供很好的保护。

6 结论

(1) 通过建立多刚体模型及逐步回归代理模型, 进行多目标优化, 分别得到了自适应儿童座椅在正面碰撞和追尾碰撞工况下保护 3 岁、6 岁、10 岁儿童乘员时的最优约束系统参数匹配值, 使得儿童乘员在正面碰撞和追尾碰撞工况下都能获得较好的保护。

(2) 基于不同年龄儿童乘员约束系统参数的最优匹配值, 推导出坐垫高度、坐垫长度和限力值与儿童乘员的身高体重的基本关系, 从而对不同体型的儿童乘员都能提供较好的保护。

(3) 利用逐步回归代理模型和非支配遗传算法(NSGA-II)相结合的方法能够解决在乘员约束优化中的高度非线性难题, 并且能够为设计人员提供多种优化方案。

(4) 在侧面碰撞情况下, 坐垫高度、坐垫长度对乘员伤害值影响较小, 统计表明, 座椅扶手、头枕侧翼则影响较大, 可在后续的研究中对侧面碰撞工况单独进行优化。

参 考 文 献

- [1] 公安部交通管理局. 中华人民共和国道路交通事故统计年报(2010 年度)[R]. 北京: 公安部交通管理科学研究所, 2011.
Public Security Traffic Management Bureau. Report on road traffic accident statistics(2010)[R]. Beijing: Traffic Management Research Institute, 2011.
- [2] DECINA L E, LOCOCO K H. Child restraint system use and misuse in six states[J]. Accident Analysis & Prevention, 2005, 37(3): 583-590.
- [3] 张君媛. 基于多工况的汽车碰撞乘员约束系统参数匹配的研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(24): 3006-3008.
ZHANG Junyuan. Study on the optimization of occupant restraint system based on multiple load cases[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(24): 3006-3008.
- [4] 白中浩, 颜强, 龙瑶, 等. 基于独立碰撞工况的儿童约束参数优化[J]. 湖南大学学报, 2012(11): 47-51.
BAI Zhonghao, YAN Qiang, LONG Yao, et al. Optimization of child restraint system parameters based on independent crash cases[J]. Journal of Hunan

- University, 2012(11): 47-51.
- [5] 任锡娟. 集成式汽车儿童安全座椅的关键技术研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2010.
- REN Xijuan. The key technology of integrated vehicle child safety seat[D]. Changsha: Hunan University, 2010.
- [6] 张君媛. 面向欧洲新车评价的汽车正面碰撞儿童座椅参数设计[J]. 中国机械工程, 2010(8): 983-987.
- ZHANG Junyuan. Child restraint system parameter design of a car for the frontal crash mode in E-NCAP[J]. China Mechanical Engineering, 2010(8): 983-987.
- [7] International Research Council on the Biomechanics of Impact. Future research directions in injury biomechanics and passive safety research[EB/OL]. [2006-05-01]. <http://www.ircobi.org>.
- [8] SCHMITT Kai-Uwe, MUSER M. How to calculate the N_{km} [R]. Working Group on Accident Mechanics 2nd Revision, 2003.
- [9] OLSSON A, SANDBERG G, DAHLBLOM O. On latin hypercube sampling for structural reliability analysis [J]. Structural Safety, 2003, 25: 47-68.
- [10] 张维刚, 廖兴涛, 钟志华. 基于逐步回归模型的汽车碰撞安全性多目标优化[J]. 机械工程学报, 2007, 43(8): 142-147.
- ZHANG Weigang, LIAO Xingtao, ZHONG Zhihua. Multi-objective optimization for crash safety design of vehicles using stepwise regression model[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(8): 142-147.
- [11] 胡朝辉, 成艾国, 陈少伟, 等. 多材料—多零件规格组合结构多目标优化的应用[J]. 机械工程学报, 2010, 46(22): 111-116.
- HU Zhaohui, CHENG Aiguo, CHEN Shaowei, et al. Application of muti-objective optimization of muti-material-muti-part specification composite construction[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(22): 111-116.
- [12] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [13] BURDI A R, HUELKE D F, SNYDER R G, et al. Infants and children in the adult world of automobile safety design: Pediatric and anatomical considerations for child restraints[J]. Journal of Biomechanics, 1969, 2: 267-280.
-
- 作者简介: 白中浩(通信作者), 男, 1978 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为汽车安全、汽车电子、汽车车身设计。
E-mail: baizhonghao@hnu.edu.cn