

DOI: 10.3901/JME.2011.12.079

轿车侧碰撞中儿童乘员约束系统的多目标优化*

杨济匡^{1,2} 杨杏梅¹ 张超尘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. 查尔摩斯理工大学应用力学系 哥德堡 41296 瑞典)

摘要: 在轿车侧面碰撞事故中, 儿童乘员头、胸部是主要损伤部位。为最大限度地降低儿童乘员头、胸部的损伤风险, 对儿童约束系统和侧面气囊的安全性能进行优化设计。采用多体动力学软件 MADYMO 建立儿童乘员侧面碰撞仿真模型, 并通过台车试验结果验证仿真模型的有效性。以头、胸部加速度为优化目标, 运用试验设计方法和方差分析进行相关设计变量的灵敏度分析, 并确定主要的优化设计变量为侧面气囊的泄气率常数、儿童安全座椅的上固定点位置和下固定织带的刚度系数, 进而构建优化目标的二阶多元回归代理模型, 利用 NSGA-II 多目标优化算法对构建的代理模型进行优化求解, 获得包含头、胸部加速度最优解集的 Pareto 前沿曲线。通过权衡分析选取使头、胸部的损伤风险同时降低的最优解, 最后确定侧面气囊的泄气率常数 0.037, 儿童座椅的上固定点 x 向位置 -0.25 m, 座椅下固定织带的刚度系数 0.5 为儿童约束系统主要设计参数的最优配置。在最优设计配置条件下得到的儿童头部合成加速度峰值比初始值下降了约 24%, 胸部合成加速度峰值比初始值下降约 30%。

关键词: 侧面碰撞 儿童约束系统 侧面安全气囊 NSGA-II 算法 多目标优化

中图分类号: U46

Multi-objective Optimization of Child Restraint System for Vehicle Side Impact

YANG Jikuang^{1,2} YANG Xingmei¹ ZHANG Chaochen¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082;
2. Department of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology, Gothenburg 41296, Sweden)

Abstract: The head and thorax of the child occupant are mainly injured regions in passenger car side impacts. In order to reduce the injury risks of head and thorax, a multi-objective optimization design of child restraint system (CRS) and side airbag is conducted in terms of CRS safety performances. A mathematical model of a child occupant in side collision is developed by using MADYMO software and the validity of the model is evaluated by comparing results between simulation and sled test. For the purpose of minimizing accelerations of child head and thorax, a sensitivity analysis of the design variables is conducted using the orthogonal design of experiment (DOE) and analysis of variance. The primary design variables are therefore determined, including material permeability of side airbag, location of top tether in X-direction and stiffness coefficient of lower anchorage. The objective functions for accelerations of child head and thorax are generated with second-order multinomial regression equations in terms of the determined design variables. Optimization is carried out by using non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II). The optimized configuration of the CRS is obtained by further analysis based on the Pareto-optimal solutions. The results indicate that main design parameters of child restraint system are material permeability 0.037 of side airbag, location -0.25 m of top tether in X-direction, stiffness coefficient 0.5 of lower anchorage. Under the optimized condition, the peak value of head acceleration is minimized by about 24 percent. The peak value of thorax acceleration is declined by about 30 percent.

Key words: Side impact Child restraint system(CRS) Side airbag NSGA-II algorithm Multi-objective optimization

0 前言

侧面碰撞事故中儿童乘员面临较高的伤亡风

险, 尤其对于近碰撞侧位置的儿童而言^[1-2]。通过对中国长沙市交通事故数据库中的儿童乘员事故数据进行统计分析发现, 小型客车(轿车占大部分)是主要的事故车型; 侧面碰撞是发生最多的事故形态; 伤亡儿童乘员中, 0~3 岁年龄段的儿童所占比例最高^[3]。欧美日等许多发达国家和地区都有法规要求 0~3 岁儿童乘车必须使用专门的汽车儿童约束系

* 国家高技术研究发展计划 (863 计划, 2006AA110101)、教育部国家外国专家局“111 计划”(111-2-11)、国家财政部高水平汽车自主创新能力建设“中气项目”(J2007J237 号)和湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室研究 (60870004)资助项目。20100625 收到初稿, 20110121 收到修改稿

统。此外,越来越多的车辆通过配置侧面安全气囊来提高乘员侧面防护性能^[4]。HOU 等^[5]应用迭代优化算法对驾驶员约束系统的主要参数进行优化设计后指出,同时对气囊和其他约束系统进行优化将会得到最大的安全性能。

侧面碰撞中,儿童乘员约束环境包括儿童安全座椅和侧面安全气囊。YANG 等^[6]采用 DOE 方法通过组合不同碰撞条件、不同参数水平,对前碰撞中乘员侧自适应安全气囊设计参数的最优配置进行研究。参数不同水平组合方法虽然能够找到设计变量的最优配置,但计算量较大。对儿童安全座椅及侧面安全气囊同时进行优化设计将涉及大量参数,并且参数间存在交互影响,整个系统具有高度的非线性,优化过程计算量大。而张维刚等^[7-8]等分别构建逐步回归和序列响应面代理模型对汽车结构耐撞性进行优化,结果表明代理模型优化方法对于计算耗时的优化问题是非常有效的。HONG 等^[9]将中心组合设计方法应用到乘员正面碰撞仿真中,建立了成人乘员头部伤害值、3 ms 胸部加速度、胸部变形以及左右股骨载荷的二阶多元回归方程,并进行了优化研究,结果表明,构建代理模型的优化方法能够快速有效地找到成人乘员约束系统优化问题的最优解。目前,构建代理模型的优化方法在儿童乘员约束系统安全性设计方面的应用研究相对较少。因此,本文以 3 岁儿童乘员为研究对象,结合 MADYMO 多体动力学仿真模型,通过试验设计分析确定主要设计变量,进而利用 Matlab 软件构造二阶多元回归代理模型,并对构造的代理模型采用带精英策略的非支配排序遗传算法(Non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)进行多目标优化计算,从而对侧面碰撞中儿童约束系统的优化设计进行研究。

1 侧面碰撞仿真模型的概述

1.1 仿真模型的建立

本文建立的仿真模型如图 1 所示,主要包括汽车座椅(即试验座椅)、汽车车门(采用刚性平板模拟)、儿童座椅及系带、儿童座椅固定器(Lower anchors and tethers for children, LATCH)上下固定织带、侧面安全气囊和 Hybrid III 3 岁儿童假人。其中,试验座椅模型由两个超椭球组成,分别代表座椅垫和座椅靠背,这两个超椭球被定义为两个刚性体,由旋转铰表示二者的连接关系;汽车车门模型由矩形刚性平板模拟,刚性平板与儿童座椅外侧 LATCH 锚固点的距离为 508 mm;儿童座椅模型是基于德国生产的 Radian 80 可折叠式座椅而建立起来的有限元模型,儿童约束系统(Child restraint system, CRS)座椅骨架选用四边形壳单元,儿童座椅通过 LATCH 织带

固定到试验座椅上。LATCH 织带采用多体安全带模拟,儿童座椅系带即集成的五点式安全带采用多体带和有限元带组成的混合型安全带来模拟。侧面安全气囊采用 MADYMO 数据库中经过验证的均匀压力模式胸部气囊模型,并对此模型进行几何方位改变。

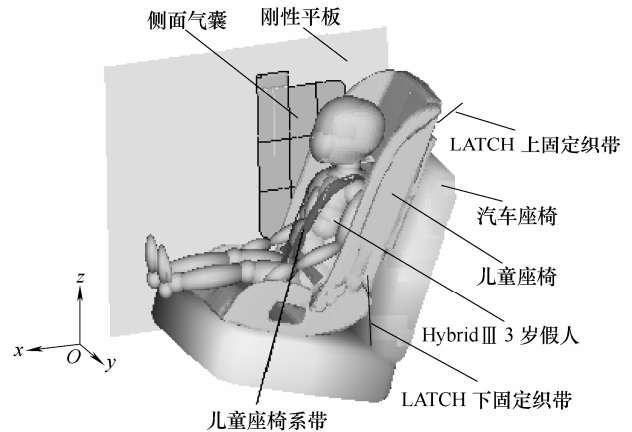


图 1 Hybrid II 儿童假人、座椅及约束系统仿真模型

1.2 儿童乘员损伤评价指标

侧面碰撞中 3 岁儿童乘员的头部和胸部是最常见的损伤部位^[1]。因此选择儿童假人头部和胸部合成加速度作为头、胸部的损伤评价指标及优化目标。

1.3 仿真模型的验证

为了验证 CRS 仿真模型的有效性,按照美国高速公路交通安全管理局(National Highway Traffic Safety Administration, NHTSA)试验研究中心(Test Research Center, TRC)所做的台车试验条件设置仿真模型。

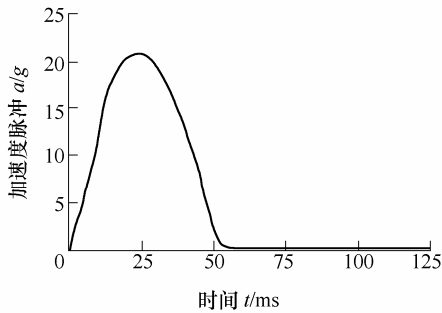
NHTSA 的 TRC 在 2001 年进行了此台车试验,编号为 4585,图 2a 为试验条件外形设置。在该试验中^[10],使用一刚性结构代表车辆侧面结构,此刚性结构定位在距离最远的 LATCH 锚固点为 508 mm 的位置,邻近儿童约束系统;平面部分靠近座椅装置,且从试验座椅坐垫位置向上延伸约 762 mm,此高度确保若假人的头部接触到该结构时,应该接触到平面部分而非边缘部分;向前延伸的长度约为 813 mm,同样此长度是为了确保假人头部只可能接触到平面部分;当受到载荷时,此结构不能发生凹陷,不能产生明显的弯曲;表面被一层铝板覆盖。速度接近 24.1 km/h 的加速度脉冲(图 2b)被用于此台车试验。试验假人采用 Hybrid III 3 岁儿童假人,被约束于前向儿童安全座椅中,儿童安全座椅由 LATCH 系统及顶端系带固定于试验座椅上。

图 3 和图 4 分别为仿真与试验中儿童假人头部 y 向加速度和胸部 y 向加速度结果对比。从图 3 和图 4 可以看出,仿真结果曲线与试验结果曲线的峰值及其产生时间存在一定偏差,但该差异小于 15%,

由此可以认为该仿真模型是有效的，可作为基本模型进行后续的优化研究。



(a) 儿童试验假人与约束系统 CRS 试验设置



(b) 加速度脉冲

图 2 NHTSA 的 TRC 的试验情况

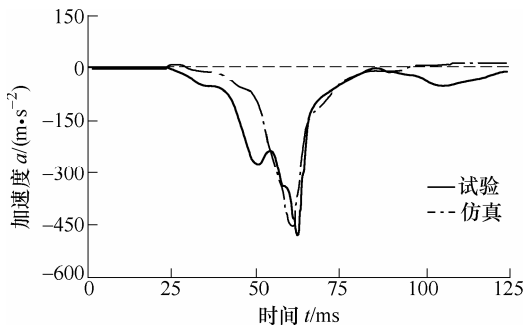


图 3 头部 y 向加速度对比曲线

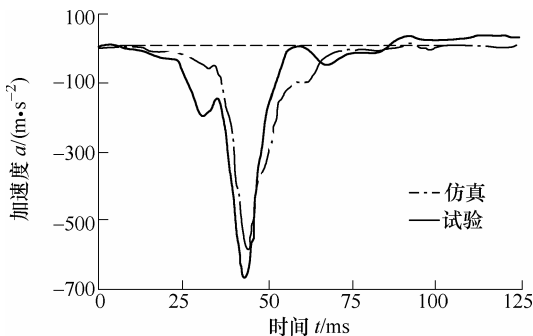


图 4 胸部 y 向加速度对比曲线

2 优化方法

图 5 为研究儿童约束系统多目标优化的基本流程。

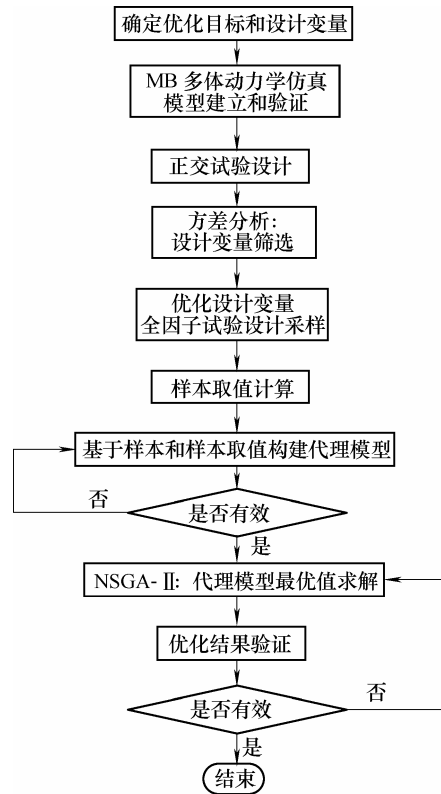


图 5 基于代理模型的优化方法基本流程

在多目标优化研究过程中的具体步骤如下。

- (1) 确定 2 个优化目标，挑选 7 个设计变量。
- (2) 建立 MB(Multi-body)多体动力学仿真模型并验证其有效性。
- (3) 利用正交试验设计、MADYMO 仿真程序、方差分析筛选出 3 个设计优化变量。
- (4) 利用全因子试验设计对筛选后的 3 个设计优化变量进行采样。
- (5) 利用 MADYMO 仿真程序计算设计优化变量样本的目标函数值。
- (6) 利用 Matlab 软件，采用 3 个设计优化变量样本及相应的函数值构建优化目标的二阶多元回归代理模型。
- (7) 利用 Matlab 软件对步骤(6)构建的代理模型采用 NSGA-II 算法进行多目标优化计算。
- (8) 挑选最优设计值，对优化结果进行仿真验证。

2.1 正交试验设计

本文采用 $L_{18}(3^7)$ 正交表表示可以安排 7 个水平数为 3 的因素，进行 18 次仿真试验。

2.2 全因子试验设计

全因子试验设计有 3 个明显的特点。

- (1) 它要求试验时全部因素同时施加，即每次做试验都将涉及每个因素的一个特定水平。
- (2) 因素对定量观测结果的影响地位平等。

(3) 可以准确地估计各因素及其各级水平交互作用的效应大小。

2.3 多元回归模型

本文采用的二阶多元回归模型的基本形式为

$$f(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i x_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j>i}^m \beta_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

式中, x_i 为 m 维自变量 x 的第 i 个分量; β_0 、 β_i 、 β_{ij} 为未知参数, 将它们按照一定次序排列, 可以构成列矢量 β , 求解多项式模型的关键就是求解矢量 β 。把试验设计的样本点值代入式(1), 利用最小二乘法可以求得矢量 β 的值。

2.4 多目标优化与 NSGA-II 算法

多目标优化问题一般可描述如下: 设 S 是 $n(n \geq 1)$ 维 Euclid 空间 \mathbf{R}^n 中的非空集合, $f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x))^T$ 是 S 上的 $m(m \geq 2)$ 维矢量函数, $g(x) = (g_1(x), g_2(x), \dots, g_p(x))^T$ 和 $h(x) = (h_1(x), h_2(x), \dots, h_q(x))^T$ 分别是 S 上的 $p(p \geq 1)$ 维和 $q(q \geq 0)$ 维矢量函数, 则在约束条件 $g_i(x) \leq 0$ ($i = 1, 2, \dots, p$) 和 $h_j(x) = 0$ ($j = 1, 2, \dots, q$) 下, 以 $f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)$ 为目标函数的有限 m 维多目标优化问题记作

$$\begin{aligned} & \min \text{ 或 } \max (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x))^T \\ & \text{s.t. } g_i(x) \leq 0 \quad i=1, 2, \dots, p \\ & \quad h_j(x) = 0 \quad j=1, 2, \dots, q \end{aligned} \quad (2)$$

根据式(2)寻找出满足条件的 x 矢量解。对于本研究而言, $m=2$, 基于两个目标函数求头部和胸部合成加速度的最小值, 两个目标函数 $f_1(x)$ 和 $f_2(x)$ 的具体表达形式都如式(1)所示。

由于多个目标之间可能存在相互影响, 因此各目标或许不能同时达到各自的最优值; 各目标由于具有不同的量纲及物理意义, 因此各目标之间无法进行定量比较。因此, 多目标优化问题通常不存在唯一的全局最优解, 而是存在多个最优解的集合, 也即 Pareto 最优解集。

与传统的多目标优化方法(如加权法、约束法、目标规划法等)不同, 遗传算法具有多方向和全局搜索的特点, 这一特点可以确保带有潜在解的种群能够一代一代维持下来, 这种从种群到种群的方法对于搜索 Pareto 解非常有益^[11-12]。

在求解多目标优化问题时, 对简单的遗传算法进行一些改进是必要的。DEB 等^[13]在 NSGA 的基础上加入了快速非支配排序算法, 降低了算法的计算复杂度; 提出了拥挤度和拥挤度比较算子, 使得 Pareto 最优解前沿中的个体能够均匀地扩展到整个 Pareto 域, 保证了种群的多样性; 引入精英策略, 扩大采样空间, 提高种群水平。此种带精英策略的算法称为 NSGA-II 算法, 其优势明显, 是目前被公

认的最有效的多目标优化算法之一。因此, 本文采用 DEB 等提出的 NSGA-II 算法, 利用 Matlab 软件进行求解计算。

3 优化结果

3.1 设计参数灵敏度分析

侧面碰撞中, 影响儿童乘员乘车安全性的因素主要是侧面安全气囊、儿童座椅的固定方式、儿童座椅与汽车座椅间的相互作用和儿童座椅的设计参数等。利用正交试验设计的方法, 通过方差分析, 筛选出对儿童乘员保护效果最敏感的几个因素, 在这几个最敏感因素基础上进行约束系统的优化设计。本文选择的设计变量及其水平值如表 1 所示。

表 1 设计变量及其水平值

设计变量	水平 1	水平 2	水平 3
质量流速缩放系数 θ	0.8	1.0	1.2
材料泄气率常数 p	0.02	0.04	0.06
起爆时间 t/s	0.005	0.01	0.015
气囊体积 V/L	0.8	1.0	1.2
LATCH 上固定点 x 位置变化 $\Delta x/m$	-0.25	-0.35	-0.45
LATCH 下固定织带刚度缩放系数 ε	0.5	1.0	1.5
车座椅与 CRS 间的摩擦因数 μ	0.2	0.5	0.7

对表 1 选取的 7 个参变量, 利用正交设计表 $L_{18}(3^7)$ 进行试验选点, 共进行 18 次试验(表 2)。然后通过方差分析来判断因素的水平间是否有显著差异, 构造 F 统计量来做检验。在多因素试验设计中, 用 P 值表示各因素在试验中的重要性。 P 值越小, 该因素就越重要。 $0 \leq P \leq 0.01$ 说明该因素高度显著, 非常重要; $0.01 < P \leq 0.05$ 说明该因素显著, 是重要因素; $0.05 < P \leq 0.20$ 说明该因素显著性很弱, 对试验结果有弱影响; $0.20 < P \leq 1$ 说明因素不显著, 对试验结果没有影响。

头部、胸部合成加速度的方差分析结果如表 3 和表 4 所示。从 P 值可以看出, 对于头部合成加速度而言, 材料泄气率常数的影响是显著的, LATCH 上固定点 x 位置和 LATCH 下固定织带刚度系数的影响是弱显著, 其他参数的影响是不显著的。而对于胸部合成加速度来说, LATCH 下固定织带刚度系数的影响是显著的, 材料泄气率常数和 LATCH 上固定点 x 位置是弱显著因素, 其他参数的影响不显著。因此, 本文选取既对头部合成加速度又对胸部合成加速度有影响的 3 个参数: 材料泄气率常数、LATCH 上固定点 x 位置和 LATCH 下固定织带刚度系数进行全因子试验设计。

表 2 $L_{18}(3^7)$ 正交试验表

试验号	质量流速 缩放系数 θ	材料泄气 率常数 p	起爆时间 t/s	气囊体积 V/L	LATCH 上固定点 x 位置变化 $\Delta x/m$	LATCH 下固定织 带刚度缩放系数 ε	车座椅与 CRS 间 的摩擦因数 μ	头部合成加速度 $a_1/(m \cdot s^{-2})$	胸部合成加速度 $a_2/(m \cdot s^{-2})$
1	1	1	1	1	1	1	1	672	918
2	1	2	2	2	2	2	2	711	580
3	1	3	3	3	3	3	3	462	518
4	2	1	1	2	2	3	3	401	294
5	2	2	2	3	3	1	1	659	657
6	2	3	3	1	1	2	2	602	830
7	3	1	2	1	3	2	3	724	574
8	3	2	3	2	1	3	1	875	595
9	3	3	1	3	2	1	2	548	408
10	1	1	3	3	2	2	1	682	673
11	1	2	1	1	3	3	2	652	515
12	1	3	2	2	1	1	3	570	759
13	2	1	2	3	1	3	2	534	626
14	2	2	3	1	2	1	3	591	402
15	2	3	1	2	3	2	1	619	542
16	3	1	3	2	3	1	2	797	839
17	3	2	1	3	1	2	3	747	900
18	3	3	2	1	2	3	1	372	283

表 3 头部合成加速度正交试验设计结果方差分析表

	质量流速缩放 系数 θ	材料泄气 率常数 p	起爆时间 t/s	气囊体积 V/L	LATCH 上固定点 x 位置变化 $\Delta x/m$	LATCH 下固定织 带刚度缩放系数 ε	车座椅与 CRS 间的 摩擦因数 μ
平方和	35 994	95 235	18 577	13 680	47 792	54 261	15 027
自由度	2	2	2	2	2	2	2
均方	17 997	47 618	9 288	6 840	23 896	27 131	7 513
F	5.10	13.48	2.63	1.94	6.77	7.68	2.13
P 值	0.108	0.032	0.218	0.288	0.077	0.066	0.265

表 4 胸部合成加速度正交试验设计结果方差分析表

	质量流速缩放 系数 θ	材料泄气率 常数 p	起爆时间 t/s	气囊体积 V/L	LATCH 上固定点 x 位置 变化 $\Delta x/m$	LATCH 下固定织 带刚度缩放系数 ε	车座椅与 CRS 间的 摩擦因数 μ
平方和	31 586	28 453	12 827	5 839	329 359	163 799	10 497
自由度	2	2	2	2	2	2	2
均方	15 793	14 227	6 414	2 919	164 679	81 900	5 248
F	1.15	1.04	0.47	0.21	11.99	5.96	0.38
P 值	0.425	0.085	0.666	0.819	0.037	0.06	0.711

3.2 代理模型的构建

对影响头部合成加速度和胸部合成加速度的参数进行全因子试验设计，利用逐步回归方法得到响应值关于三个参变量的二阶多元回归方程为

$$F_h(x) = -495.8 - 1034.7x_1 - 4989.4x_2 + 488.1x_3 + 16750x_1x_2 + 591.7x_1x_3 + 545x_2x_3 + 26944.4x_1^2 - 4755.6x_2^2 - 88.2x_3^2$$

$$F_t(x) = -3829.5 + 10443.1x_1 - 21715.6x_2 + 855.6x_3 + 29583.3x_1x_2 - 2858.3x_1x_3 + 693.3x_2x_3 - 5694.4x_1^2 - 26694.4x_2^2 - 129.1x_3^2$$

式中， x_1 表示侧面气囊的材料泄气率常数、 x_2 表示

LATCH 上固定点 x 位置、 x_3 为 LATCH 下固定织带刚度系数。

头部合成加速度回归方程的决定系数 R^2 为 88.9%，胸部合成加速度回归方程的决定系数 R^2 为 93.5%，由 R^2 值可以看出，这两个近似模型的拟合精度较好，能够较好地满足预测精度的要求，可以替代多刚体模型用于后续的多目标优化中。

3.3 基于 NSGA-II 算法的多目标优化

采用非支配排序算法(NSGA-II)对头部、胸部合成加速度的代理模型进行优化求解。该多目标优化问题的数学表达式和约束条件如下所述

$$\begin{aligned} \min F_h(x) &= f_1(x_1, x_2, x_3) \\ \min F_t(x) &= f_2(x_1, x_2, x_3) \\ \text{s.t. } 0.02 &\leq x_1 \leq 0.06 \\ &-0.45 \leq x_2 \leq -0.25 \\ &0.5 \leq x_3 \leq 1.5 \end{aligned}$$

设定个体总数为 50, 进化 200 代后求得其 Pareto 前沿曲线如图 6 所示。该前沿曲线包含头部、胸部合成加速度优化的最优解集。

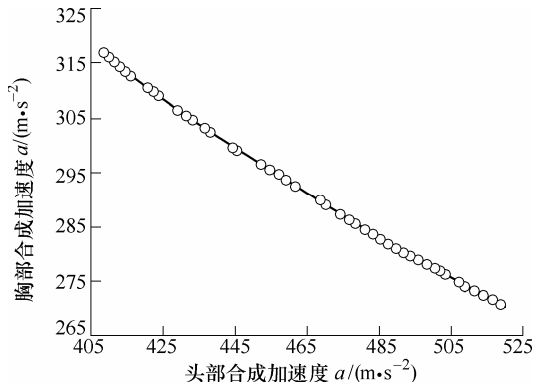


图 6 头胸部合成加速度优化的 Pareto 前沿曲线最优解集

在本文的多目标优化问题中, 希望儿童假人的头部和胸部加速度能同时达到最优, 但由图 6 所示的 Pareto 前沿曲线可知, 这两个目标是负相关的。为了兼顾儿童乘员头、胸部的损伤风险, 这里选择 Pareto 前沿曲线大致中间位置的头、胸部合成加速度值作为本多目标优化问题的最优解, 此时设计点 $x_1=0.037$, $x_2=-0.25$ m, $x_3=0.5$, 头部合成加速度峰值约为 463 m/s^2 , 胸部合成加速度峰值约为 292 m/s^2 。把该设计点输入到 MADYMO 仿真模型中得到头部合成加速度峰值为 441 m/s^2 , 回归方程预测值与仿真计算值的相对误差为 5.0%; 胸部合成加速度峰值为 314 m/s^2 , 回归方程预测值与仿真计算值的相对误差为 7.0%。目标函数的仿真计算值与优化解的相对误差均在可接受的范围之内。

4 结论

(1) 通过试验设计结果显示, 侧面安全气囊的材料泄气率常数, LATCH 儿童座椅的上固定点 x 位置, LATCH 下固定织带刚度系数对儿童乘员的头部和胸部损伤均有显著影响。

(2) 优化得到的 Pareto 前沿曲线包含了头部和胸部合成加速度的最优解集。经分析选取最优解: 侧面气囊的泄气率常数为 0.037, 儿童座椅的 LATCH 上固定点 x 位置为 -0.25 m, LATCH 下固定织带的刚度系数为 0.5。此时得到的头部合成加速度峰值从初始的 579 m/s^2 减少到 441 m/s^2 , 下降了约

24%; 胸部合成加速度峰值从初始的 448 m/s^2 减少到 314 m/s^2 , 下降了约 30%。

(3) 数学仿真与多目标遗传算法相结合是儿童乘员约束系统优化的一种有效方法, 且多目标优化能够快速有效地找到多目标问题的 Pareto 最优解, 为工程设计人员提供更好的设计方案。

参 考 文 献

- [1] MCCRAY L, SCARBORO M, BREWER J. Injury to children one to three years old in side impact crashes[C/CD]// Proceedings of the 20th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles Conference (ESV), Lyon, 2007.
- [2] ARBOGAST K B, YOGANANDAN G, MENON R A, et al. Field investigation of child restraint systems in side impact crashes [J]. Traffic Injury Prevention, 2005, 6: 351-360.
- [3] YANG Xingmei, KONG Chunyu, YANG Jikuang. A study on accident characteristics of child occupants by passenger car and motorcycle in changsha [C]//The 5th Int. Forum of Automotive Traffic Safety. Changsha. 2007: 33-44.
- [4] 刘子健, 黄天泽, 杨济匡. 安全气囊对汽车乘员碰撞损伤防护的研究[J]. 机械工程学报, 2001, 37(5): 12-17. LIU Zijian, HUANG Tianze, YANG Jikuang. Survey of research on airbag for occupant injury prevention from vehicle impacts [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(5): 12-17.
- [5] HOU J F, TOMAS J. Optimization of driver-side airbag and restraint system by occupant dynamic simulation[R]. SAE, 952703, 1995.
- [6] YANG Jikuang, HALAND Y. Modeling of adaptive passenger airbag systems in car frontal crashes[C/CD]// Proceedings of the 15th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles Conference (ESV), Melbourne, 1996: 96-S3-W-10.
- [7] 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.
- [8] 孙光永, 李光耀, 钟志华, 等. 基于序列响应面法的汽车结构耐撞性多目标粒子群优化设计[J]. 机械工程学报, 2009, 45(2): 224-230.

(下转第 91 页)