

# Study on the Optimization Key Technology between Coach Seat and Dummy Damage

Linzhao LU<sup>1</sup>, Xiaoming WU<sup>2</sup>, Songkui YE<sup>1</sup>, Chaojun CUI<sup>1</sup>, Changfeng WU<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CAE Analysis Course, Xiamen King Long United Automotive Industry Co.Ltd., Xiamen, China

<sup>2</sup>Xiamen University, Xiamen, China

Email: lulinzhao82@163.com

**Abstract:** In practical tests based on the test results, and compared to the simulation results verify the reliability of the seat dynamic simulation model and the validity of the test. Based on GB13057-2014, to evaluate the results of the deformation of the seat structure to meet the requirements, but the dummy's head HIC value is too large, does not meet the requirements, the rest of the chest acceleration, left thigh force etc to meet regulatory requirements. Preliminary selected thickness of the seat belt, five variable stiffness foam backrest, cushion stiffness, friction coefficient and backrest cushions strength as the design variables, in order to reduce the dummy WIC multiple target value target, using optimization software to construct the optimization model, using a combination of global optimization strategy and gradient optimization algorithm, the dummy's HIC, chest and legs FAC the best ThAC excellent value.

**Keywords:** Coach Seat; Dynamic Test; Multi-objective Optimization

## 客车乘员座椅与假人损伤的优化关键技术研究

卢琳兆<sup>1,2</sup>, 吴晓明<sup>2</sup>, 叶松奎<sup>1</sup>, 崔朝军<sup>1</sup>, 吴长风<sup>1</sup>

1. 厦门金龙联合汽车工业有限公司, 厦门 中国 361023

2. 厦门大学, 厦门 中国 361005

Email: lulinzhao82@163.com

**摘要:** 以实际试验测试结果为基础, 与仿真结果进行对比, 验证了座椅动态试验仿真模型的可靠性及有效性。依据 GB13057-2014 的评价标准, 得出了座椅结构的变形符合要求, 胸部加速度、左右大腿受力等均满足法规要求, 但假人头部 HIC 值过大, 不满足要求。为了使该座椅能满足法规要求, 初步选取了安全带的厚度、靠背泡棉刚度、座垫刚度、座垫摩擦系数及靠背强度等 5 个变量作为设计变量, 以降低假人 WIC 值为目标, 运用优化软件建立了该仿真分析的多目标优化模型, 采用全局优化与梯度优化组合策略的算法, 得到了假人头部 HIC、胸部 ThAC 及腿部 FAC 的最优值。

**关键词:** 客车乘员座椅; 动态试验; 多目标优化

### 1 前言

目前国内客车正碰事故居高不下, 以及其危害性和严重性, 我国已将 GB13057-2014《客车座椅及其车辆固定件的强度》, 标准升级为强制性标准。为了提高汽车碰撞事故中对乘员的保护能力, 国内外学者及企业在汽车设计及生产过程中广泛采用安全座椅、安全带及安全气囊等乘员约束系统。国内方面, 金龙客车的叶松奎等<sup>[1]</sup>以 LS-DYNA 软件, 在研究校车座椅的动态安全性时, 利用全因子及分式析因试验设计方法, 进行优化分析后, 乘员的 WIC 值比原始数据降低了 20%; 林逸等<sup>[2]</sup>建立了基于 GB15083-2006《汽车座椅、座椅固定装置及头枕强度要求和试验方法》法规要求的座椅模型, 研究了座椅在受到外部的冲击载荷时对乘员的保护能力。国外研究机构对汽车座椅系统进行了更加深入的研究, 其中包括预测座椅骨架结构及材料的失效形式, 座椅安全带固定点强度分析及对座椅的各项性能指标进行参数化, 经过优化分析后提出最优方案, 这样就能在早期进行座椅的设计开发提供正确的指引方向<sup>[3][4][5][6]</sup>。

本文从座椅的动态安全特性出发，先对安全带厚度、座垫摩擦系数、座垫刚度、座椅靠背刚度及靠背骨架强度等五个变量进行灵敏度分析，找出在仿真分析中对乘员损伤影响较大的三个敏感参数，然后对这三个灵敏度高的参数进行后续的优化，得到最优解，能够有效地降低乘员伤害。

## 2 仿真模型的建立及试验验证

### 2.1 座椅试验段的仿真模型

本文使用 Hypermesh 软件建立了客车乘客座椅试验段模型，调整 HybridIII 50 百分位的男性多面体假人姿态，最后把上述已完成的客车座椅及其固定件的 K 文件及调好的 MADYMO 假人模型导入到 MADYMO Coupling Assistant 中去，其次在 coupling 的模块下对假人与座椅安全带、假人与座椅靠背及座垫、假人鞋子与前方座垫进行接触设置后即可导出耦合后的有限元模型的 K 文件和假人模型的 xml 文件，最后同时提交计算，其最终计算模型见图 2.1 所示：

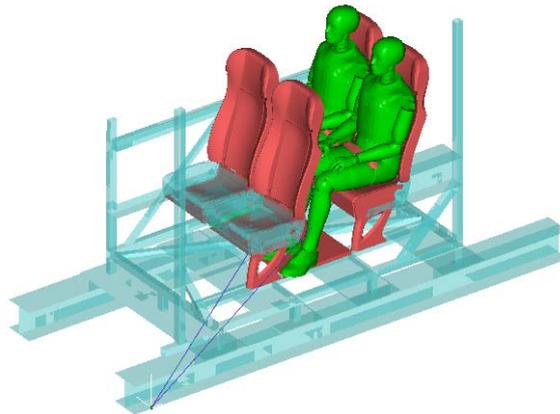


Figure 2.1 the final model  
图 2.1 最终计算模型

### 2.2 与试验结果对标验证

为了确保仿真模型的准确性，必须通过试验来进行对比验证。其目的主要是查看假人的运动姿态、各损伤值等是否与试验结果尽可能接近，达到真实碰撞的再现。如果仿真结果与试验不一致时，则需调整仿真模型，使仿真结果最终能尽可能接近，这样才能利用此仿真模型进行后续的优化计算。

#### 2.2.1 座椅变形及假人运动状态对比

本文截取了乘员不离位状态下  $t=0$ 、62、85、105、140、156ms（即试验开始、小腿与靠背接触、大腿与靠背接触、头部开始与靠背接触、头部完全与靠背接触及头部开始脱离靠背）等六个画面进行试验与仿真分析的时间历程对比，具体如图 2.2 所示。

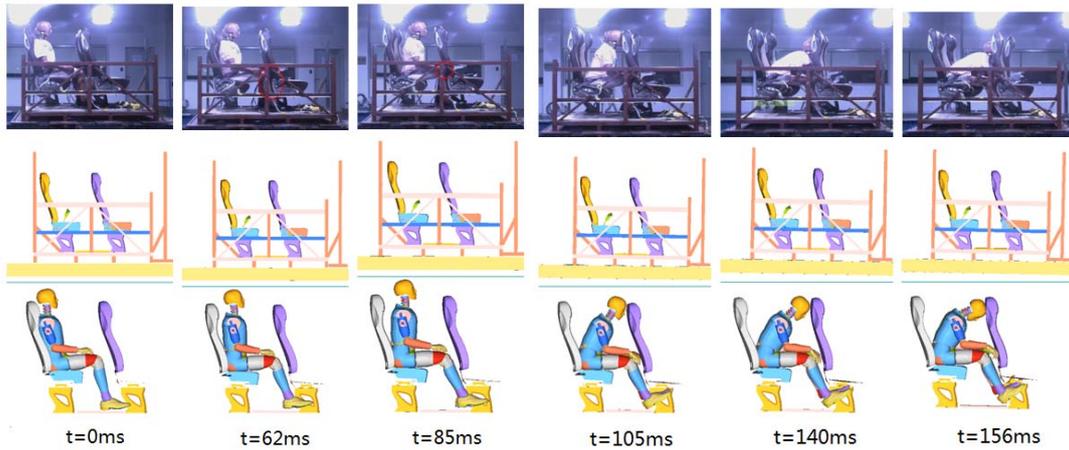


Figure 2.2 the movement process of dummy and seat deformation contrast  
图 2.2 假人及座椅变形运动过程对比

从图中可以看出，在座椅动态试验各过程，仿真模型中假人及座椅靠背的变形与试验较接近。不足的地方，主要是仿真时假人头顶比较多接触座椅靠背表面，试验则脸与靠背接触。

### 2.2.2 假人损伤指标对标

通过对交通事故的数据研究表明碰撞事故中人的头部、颈、胸部及腿部等为经常受伤的部位<sup>[7, 8]</sup>，同时根据 GB13057-2014 法规中的要求，输出假人头部 HIC、胸部 ThAC、腿部 FAC 指标，然后看其值是否满足法规要求。故除了座椅和假人在冲击时间历程中的运动方式相符合外，还需对比乘员的伤害指标。

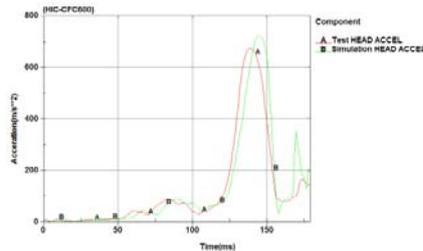


Figure 2.3 the head acceleration curve  
图 2.3 头部合成加速度曲线

从图 2.3 可以看出，头部加速度曲线，仿真模型与试验模型除了峰值不同，还有存在一定的相位差，查阅相关资料，其差值在 15% 以内一般是可以接受的，具体数据对比见表 2.1。

Table 2.1 the result comparison of test and simulation  
表 2.1: 试验与仿真模拟结果对比

	FAC_L (N)	FAC_R (N)	HIC	ThAC (m/s <sup>2</sup> )	WIC
试验模型	1900	1900	560.4	197.4	0.91
仿真模型	2661.7	2792.5	604.5	203.55	0.98
误差	40.09%	46.97%	7.87%	3.11%	7.69%

从上表对比可以看出，仿真模型的 WIC 值为 0.98，试验模型的 WIC 值为 0.91，他们间相差 7.69%。对于重要指标，如 HIC 和 ThAC 的误差分别为 7.87% 和 3.11%，虽然腿部值相差很大，但其这个权重，在 WIC 中只占 5%，故可以看出此仿真模型与试验模型是比较接近的，可以用于后续改进及优化分析。

## 3 假人伤害优化关键技术研究

在科学工程实践中，常常会碰到希望在给定区域内多个目标同时达到最优化。由于多目标优化问题中各个目标间相互制约，改动其中一个目标，往往导致别的目标又变差了，所有无法找到一个最优解，故我们讲的多目标优化，实际上就是找到相对较优解来满足所有目标的要求。图 3.1 为优化流程图。

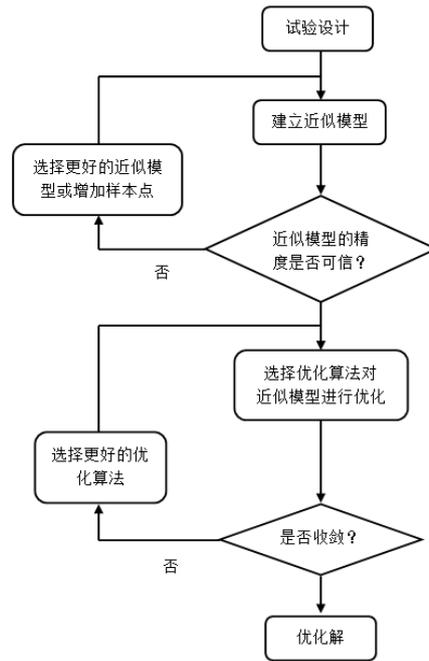


Figure 3.1 optimization flow chart  
图 3.1 优化流程图[9]

### 3.1 座椅系统动态安全性影响因素研究

根据法规 GB13057-2014 要求，选择头部允许指标、胸部允许指标和大腿允许指标作为 3 个子目标函数，并把这三部位的限定值将各个子目标函数进行归一化处理，选取相应的加权系数。最终，目标函数值为加权伤害指数 WIC，其表达式如下：

$$WIC = 0.6 \left( \frac{HIC}{500} \right) + 0.35 \left( \frac{C_{3ms}}{30} \right) + 0.05 (F_L + F_R) / 20 \quad (3.1.1)$$

式中，HIC 为头部允许指标； $C_{3ms}$  为胸部允许指标，单位为 g； $F_L$  为左大腿所受的轴向力， $F_R$  为右大腿所受的轴向力，单位为 KN。

#### 3.1.1 参数灵敏度研究

因座椅的结构能满足使用要求的，在优化分析时就不考虑座椅结构的应力应变及变形情况了，而仅以实现降低假人伤害为目标。故在建立优化模型时，根据客车座椅的实际工艺及改进的可行性，初步选取了安全带的厚度、靠背泡棉刚度、座垫刚度、座垫摩擦系数及靠背强度等 5 个变量作为设计变量。各设计变量的取值范围见表 3.1.1：

Table 3.1 parameter matrix

表 3.1 设计参数

	A: 安全带 厚度	B: 座 垫刚度	C: 靠 背强度	D: 靠 背刚度	E: 座垫摩 擦系数
水平 1	0.8mm	50%	80%	80%	0.8
水平 2	1.0mm	100%	100%	100%	1.0
水平 3	1.2mm	150%	150%	150%	1.2

#### 3.1.2 正交试验

为了建立合适的近似模型来构造设计变量和响应之间的函数关系，需要选取足够多的试验样本来当作近似模型的输入，为此结合设计变量的水平数，利用正交试验方法，选择  $L_{16} (3^5)$  正交设计表，建立试验样本。利用 LS-DYNA 与 MADYMO 软件进行耦合计算，分别得到 16 个头部 HIC 值、胸部加速度曲线、左右大腿的受力及靠背强度。提取结果文件中的目标响应值，建立设计变量与响应的试验样本数据，作为近似模型的样本。

### 3.1.3 结果分析

Isight 根据试验样本点建立多元二次回归方程<sup>[10]</sup>:

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \beta_i x_i^2 + \sum_{i=j} \beta_{ij} x_i x_j \quad (3.1.2)$$

通过系数表进行表达, 如图 3.2 所示:

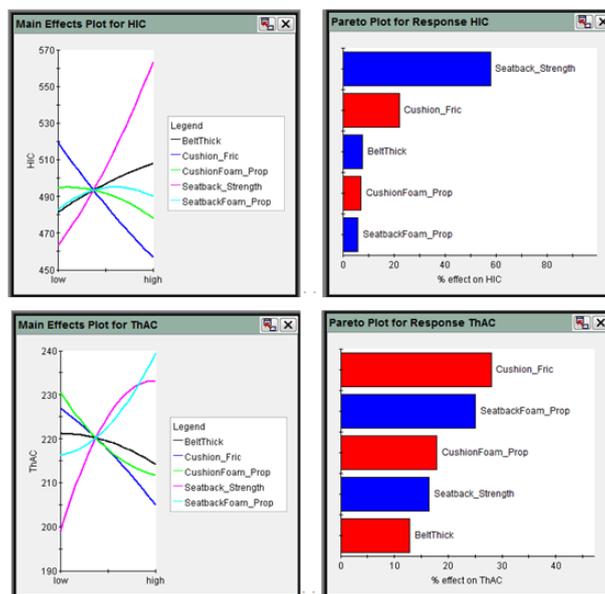
	coefficients	scaled	normalized
constant	0.673744728		
BeltThick	472.8151389	0.009448166667	4.272563094
CushionFoam_Prop	-0.6743625434	-0.01614210938	-7.299636342
Seatback_Strength	0.1164820718	0.08408633854	38.02475119
SeatbackFoam_Prop	0.2504000434	0.01655583854	7.486729144
Cushion_Fric	-0.3193020573	-0.051327651	-23.21091861
BeltThick^2	-116601.5625	-0.0046640625	-2.109139477
CushionFoam_Prop^2	-0.04849205729	-0.001939682292	-0.8771452987
Seatback_Strength^2	-0.04103726852	-9.233385417E-4	-0.4175436691
SeatbackFoam_Prop^2	-0.033565498	-0.004350088542	-1.967157059
Cushion_Fric^2	0.031331901	0.001253276	0.5667449729
BeltThick-CushionFoam_Prop	61.26666667	0.002450666667	1.108217956
BeltThick-Seatback_Strength	-103.2013889	-0.003096041667	-1.400063507
BeltThick-SeatbackFoam_Prop	-83.57581019	-0.006017458333	-2.721159702
BeltThick-Cushion_Fric			
CushionFoam_Prop-Seatback_Strength	0.6293694444	0.01888108333	8.538229972

Figure 3.2 the coefficient of two element regression equation

图 3.2 二次回归模型系数表

从图 3.3 中可以看出, 靠背强度、座垫摩擦系数对 WIC 的影响几乎为线性, 改变这两个因素不会影响别的因素对结果的影响, 或影响很小, 则可以直接改变这两个因素; 而靠背泡棉的刚度对 WIC 的影响为非线性, 故改变此因素的同时最好还要配合其他参数进行修改。

Pareto 图反映样本点经过拟合后模型中所有项目对每个响应贡献程度地百分比<sup>[10]</sup>。蓝色的条形表示效应为正, 红色为负。本次座椅动态试验的影响因素的 Pareto 图如图 3.4 所示。



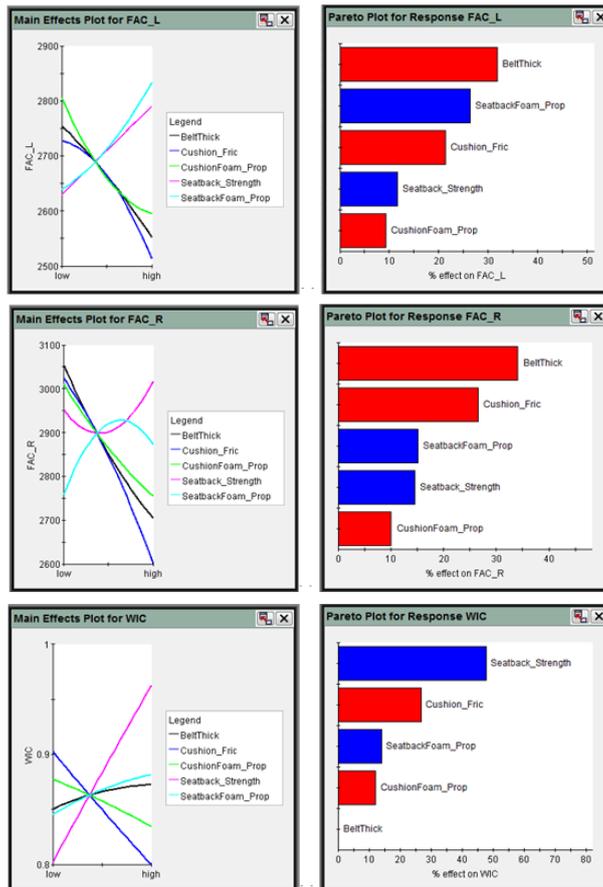


Figure 3.3 main effect plot    Figure 3.4 Pareto plot of the factor  
 图 3.3 各因子的主效应图    图 3.4 Pareto 图

从 Pareto 图可以看出，靠背强度对 WIC 的影响最大，接着是座垫摩擦系数，然后是靠背泡棉刚度，安全带厚度对 WIC 的影响最小。

### 3.1.4 响应因子的效应分析

根据上述因子的敏感程度及在不影响乘员乘坐舒适性的情况下，本文选取了座椅靠背强度、座垫摩擦系数及靠背刚度等三个因子构造后续的响应面模型。

## 3.2 近似模型

### 3.2.1 构建响应面

构造 RSM 模型时，先选择优化拉丁方采样方式进行采样，接着选择四次响应面模型 Quatic，最后设定设计变量的上下限为上文提到的范围，即可得到图 3.5 所示的响应面。

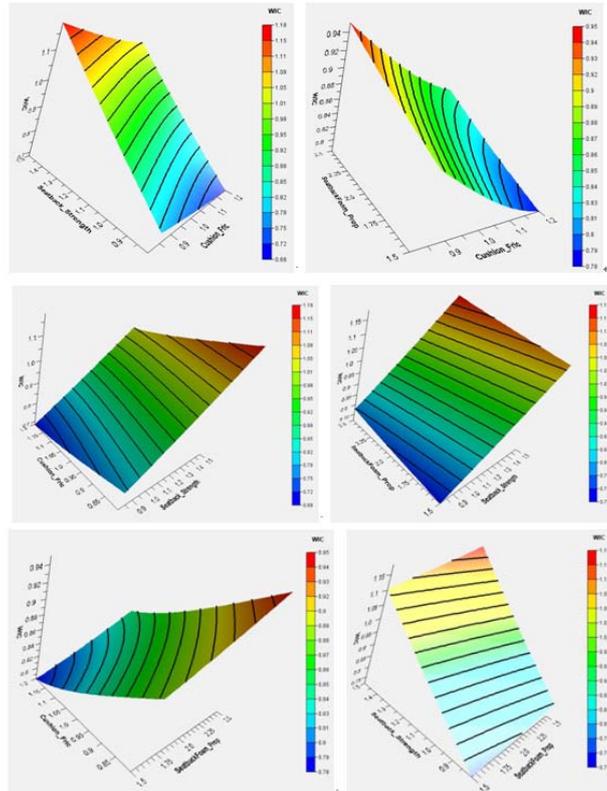


Figure 3.5 3D response surface  
图 3.5 3D 响应面

### 3.2.2 误差分析

由于真实模型与近似模型之间由于样本空间有限，其存在误差是必然的。为了权衡近似模型能否用于后续的优化设计，即需对误差进行分析，看近似模型的精度是否满足后续分析的要求。通过分析发现其平均值误差最大项为右大腿受力，其值约为 4.6%，最大差值法误差为 9.6%， $R^2$  法误差值约为 0.97031，与 1.00 相差约 0.03，故近似模型精度很高，可以替代真实的仿真模型进行优化计算分析。

通过优化拉丁方采样及响应面拟合，得出表 3.2 所示各目标函数的近似模型：

Table 3.2 the coefficient of approximation models of the objective  
表 3.2 各目标的近似模型系数表

FAC_L		FAC_R		HIC	
Polynomial term	Coefficient	Polynomial term	Coefficient	Polynomial term	Coefficient
Constant	170.93	Constant	2860.19	Constant	214.17
x01	226.21	x01	-815.98	x02	319.66
x02	495.73	x02**2	1055.56	x02**2	63.23
x03	1615.88	x01*x02	-508.85	x01*x02	-60.77
x02**2	-221.26	x01*x03	439.48	x02*x03	-7.12
x03**2	-242.15	x02*x03	-257.62	x01**3	-130.61
x01*x03	-208.06	x02**4	-165.51	x03**3	2.60
x02*x03	129.54	x03**4	6.47	x01**4	83.10
ThAC		WIC		备注：	
Polynomial term	Coefficient	Polynomial term	Coefficient	Input Parameters:	
Constant	103.43	Constant	0.43	x01= "Cushion_Fric"	
x02	85.67	x02	0.53	x02= "Seatback_Strength"	
x03	64.75	x02**2	0.05	x03= "SeatbackFoam_Prop"	
x03**2	-6.90	x03**2	0.01	Output Parameters:	
x01*x02	-77.31	x01*x02	-0.15	y01= "FAC_L"	
x01*x03	-46.50	x02*x03	0.03	y02= "FAC_R"	
x02*x03	36.39	x01**3	-0.29	y03= "HIC"	
x01**4	15.62	x01**4	0.18	y04= "ThAC"	
				y05= "WIC"	

### 3.3 优化分析

对于汽车碰撞事故中乘员安全性能评定时，国际上通常用伤害指标来衡量，即头部允许指标 HIC、胸部允许指标 ThAC 及大腿允许指标 FAC 来评价人体的伤害程度，并用加权伤害指数 WIC 将三个部位的限定值进行归一化处理。

#### 3.3.1 基于近似模型的优化模型的建立

本文采用全局优化算法和梯度优化算法的组合优化策略。首先应用全局优化算法中的多岛遗传算法定位目标极值在设计空间中所处的区域，再应用梯度优化算法中的序列二次规划算法对该区域进行精确地寻找最优点，从而获得最佳的设计结果。

#### 3.3.2 优化分析结果

从图 3.6 可以看出优化初始点经过 1001 次的多岛迭代，得到最优值所在的波峰（座垫摩擦系数：1.198，靠背强度：0.800，靠背泡沫刚度：1.572），再用序列二次规划梯度算法进一步找到最优值（座垫摩擦系数：1.2，靠背强度：0.8，靠背泡沫刚度：1.5）。

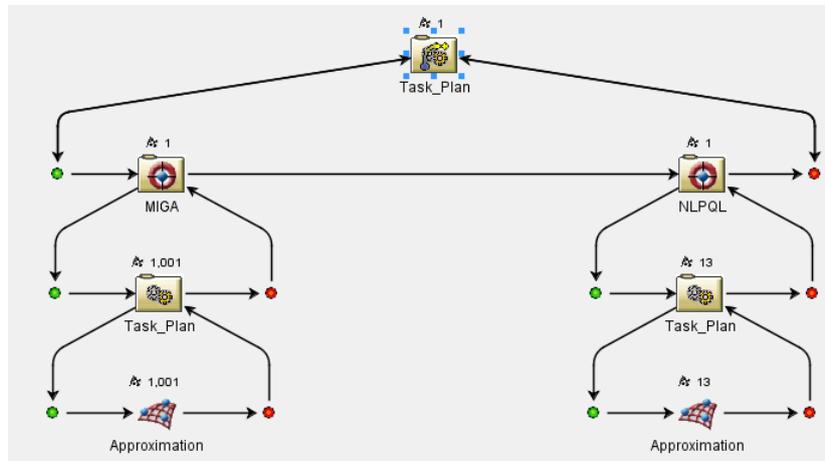


Figure 3.6 the result of the hybrid optimization strategy  
图 3.6 组合优化策略计算结果

✓	1	1	982	1.187750057	0.9699183642	1.640062562	2511.855844	2644.453409	460.380688	183.4769432	0.7753908781
✓	1	1	983	1.187750057	0.8050736248	1.647875181	2465.143465	2585.176153	403.1284193	174.7779035	0.6938668187
✓	1	1	984	1.186968795	0.8031189441	1.640077821	2459.266728	2581.582087	402.3838235	174.5739338	0.692865202
✓	1	1	985	1.187750057	0.8050736248	1.640062562	2459.855259	2581.820023	403.0082891	174.651939	0.6934575894
✓	1	1	986	1.186968795	0.8050736248	1.640077821	2459.955478	2582.220992	403.0436061	174.6788973	0.6935405372
✓	1	1	987	1.187750057	0.8050736248	1.640062562	2459.855259	2581.820023	403.0082891	174.651939	0.6934575894
✓	1	1	988	1.187750057	0.8050736248	1.640062562	2459.855259	2581.820023	403.0082891	174.651939	0.6934575894
✓	1	1	989	1.187750057	0.8050736248	1.640062562	2459.855259	2581.820023	403.0082891	174.651939	0.6934575894
✓	1	1	990	1.187750057	0.8050736248	1.672428947	2481.569653	2595.807389	403.5161993	175.1682716	0.6951601356
✓	1	1	991	0.9977264057	0.8726543069	1.625368124	2493.748182	2703.326663	442.0670428	189.5703735	0.7632720551
✓	1	1	992	0.9977264057	0.8726543069	1.687136645	2538.173394	2723.790143	443.0068093	191.2534735	0.7666367977
✓	1	1	993	0.9522728313	0.8726543069	1.625352865	2498.825854	2728.126543	447.399765	193.4385423	0.7755301274
✓	1	1	994	0.9524132143	0.8726543069	1.874868391	2669.277576	2811.185191	451.8114962	200.4273279	0.7895121825
✓	1	1	995	0.9977264057	0.8726543069	1.640260929	2504.628445	2708.186678	442.2846252	189.9809995	0.7640769197
✓	1	1	996	0.9938565955	0.8726543069	1.625352865	2493.863178	2702.961976	441.9924171	189.5165983	0.7631001332
✓	1	1	997	0.9977264057	0.8726543069	1.639024949	2503.729559	2707.781585	442.2663521	189.9470374	0.7640099678
✓	1	1	998	0.9979766537	0.8726543069	1.640260929	2504.599651	2708.051753	442.2563678	189.9605621	0.7640119407
✓	1	1	999	0.9977264057	1.427345693	1.625352865	2603.224514	2945.150846	659.997931	227.1174467	1.070497182
✓	1	1	1000	0.9977264057	0.8749935149	1.625352865	2494.484582	2704.436628	442.9041715	189.728294	0.764496484
✓	1	1	1001	1.198168917	0.8000106813	1.571564813	2409.432384	2545.644765	399.8743909	172.952248	0.6864331068

Figure 3.7 the optimization result  
图 3.7 优化结果

### 3.4 优化结果验证

以乘员加权伤害指数 WIC 为试验指标，通过优化分析后得到 CID1E3 组合时，由于还无法最终确定近似模型的可靠性，故需对近似模型与真实模型各伤害指标的比较，如表 3.3 所示：

Table 3.3 the analysis of variance between approximation models and true models  
表 3.3 近似模型与真实模型的误差分析

	座垫摩擦系数	靠背强度	靠背泡沫刚度	FAC_L	FAC_R	HIC	ThAC	WIC
近似模型	1.2	0.8	1.5	2357.28	2514.96	398.89	171.70	0.6826

真实模型	1.2	0.8	1.5	2377.1	2468.2	397.14	173.33	0.6909
误差				0.83%	1.89%	0.44%	0.94%	1.19%

### 3.5 优化效果

通过验证近似模型与真实模型各伤害指标的误差，发现它们间的误差很小，精度很高，故对原始模型与最优化模型进行比较，看其优化效果是否有效，如表 3.4 所示：

**Table 3.4 the result comparison between original model and the best optimization model**  
**表 3.4 原始模型与最优化模型的结果对比**

	FAC_L	FAC_R	HIC	ThAC	WIC
原始模型	2661.7	2792.5	579.4	203.55	0.98
最优化模型	2377.1	2468.2	397.14	173.33	0.6909
改进效果	-10.69%	-11.61%	-31.46%	-14.85%	-29.5%

从上表对比可以看出，最优化模型的 WIC 值为 0.6909，即通过组合优化得到的 WIC 为 0.6909，降低了 29.5%，而对于加权系数最重的 HIC，更是降低了 31.46%，另外对于胸部 3ms 加速度的改进效果也很明显，即降低了 14.85%。同时，左右大腿的受力明显的降低。

## 4 结论

本文首先对座椅动态试验中可以改变的变量（如：安全带厚度、座垫泡棉刚度、座垫摩擦系数、靠背泡棉刚度及靠背强度）进行 DOE 分析后，证实了座垫摩擦系数、靠背泡棉刚度及靠背强度对假人的伤害影响较明显，接着对这三个变量构造近似模型，以乘员加权伤害指标 WIC 为目的，采用全局优化算法和梯度优化算法的组合优化策略进行优化分析后，从而得到最优解，降低乘员伤害。从上述数据对比，原始模型的 WIC 值为 0.98，优化分析后得到 WIC 值为 0.6909，降低了 29.5%，优化效果明显。

## 参考文献

- [1] Ye Songkui, Wu Changfeng, Huang Dengfeng. Research and Optimization on Occupant Injury of Dynamic Test for School Bus Seat[J]. BUS & COACH TECHNOLOGY AND RESEARCH, 2014(5): 17-20.
- [2] 叶松奎, 吴长风, 黄登峰. 校车座椅动态试验乘员损伤研究与优化[J]. 客车技术与研究, 2014 (5): 17-20.
- [3] LIN Yi, YAO Wei-min, SUN Dan-dan. Study on Automobile Seat Safety Performance During Impact[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2005, 25 (1): 18-21, 26.
- [4] 林逸, 姚为民, 孙丹丹. 承受冲击时汽车座椅结构安全性研究[J].北京理工大学学报, 2005, 25 (1): 18-21, 26.
- [5] Stephens Gregory D, Long Timothy J, Blaisdell David M. Energy Analysis of Automotive Seat Systems[C].SAE Paper 2000-01-1380.
- [6] Sung Jong Kang, Chun B K. An Effective Approach to Prediction of the Collapse Mode in Automotive Seat Astructure[J].Thin-Walled Structures, 2000, 37:113-125.
- [7] Vangipuram Radesh, Long Luohui, Truong Hai. Parameter Design Based FEA Correlation Studies on Automotive Seat Structures[C]. SAE Paper 2008-01- 0241.
- [8] Sang Do Park, Jong Kweon Pyun, Byung Yong Choi. Seat Common Frame Design Optimization[C].SAE Paper 2010-01-0390. 2006: 23-32.
- [9] Ed Colasanti, Design and Development of a Lightweight Seat Frame Using Magnesium Extrusion and Stamping, SAE Paper, No.940406.
- [10] Zhanghong-hong. Static Strength Analysis and Structure Optimization by FEM in Vehicle Seat[D]: Shenyang: Northeastern University, 2006: 3-9.
- [11] 张红红. 汽车座椅静强度有限元仿真分析及其结构优化[D]: [硕士].沈阳: 东北大学, 2006: 3-9.
- [12] Sun Xilong. Research on Modular Methodology and Multi-objective Optimization of Automobile Passive Safety[D]: Changchun: Jilin university, 2013:89-115.
- [13] 孙喜龙. 汽车被动安全性的模块化建模方法与多目标优化研究[D]: [博士]. 长春: 吉林大学, 2013: 89-115.
- [14] Lai Yuyang. Parameters Optimization Theory and Example Based on Isight[M]. V1. Beijing: BEIHANG UNIVERSITY PRESS, 2012. 赖宇阳. Isight 参数优化理论与实例详解[M].第一版.北京: 北京航空航天大学出版社, 2012.