

# Optimization Design for Crashworthiness of Bumper Based on Linear and S-Type Function TRB

Liu Hongbin, Xiao Zhi, Li Suwen

College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha, China, 410082,

E-mail: 1023172041@qq.com

**Abstract:** To satisfy low-carbon economy requirement, mass reduction of a vehicle is becoming more and more important. Tailor Rolling Blanks (TRB) can significantly increase the vehicle's lightweight, safety and adaptability of structure. Based on the finite element analysis software LS-DYNA, combined with the software MATLAB, for a bumper in low-speed pole impact under 25%, 40%, 50% three different bias, Analysing and Comparing of linear and S-type function TRB bumper energy absorbing characteristics and influence of plate thickness on the energy absorption within and outside. And on this basis, bumper crashworthiness of multi-objective optimization design is taken. The results show that, without increasing the mass, the Tailor Rolling Blanks (TRB) can increase the bumper energy absorption. Comprehensive consideration, S-type function TRB bumper is superior to linear TRB bumper. Energy absorption of the optimized S-type function TRB bumper increased about 30%.

**Keywords:** S-Type Function ; TRB ; Bumper ; Crashworthiness

## 基于线性和 S 型函数连续变截面厚度的保险杠耐撞性优化设计

刘洪斌, 肖志, 李素雯

湖南大学机械与运载工程学院, 长沙, 中国, 410082

E-mail: 1023172041@qq.com

**摘要:** 为适应低碳经济的要求, 汽车轻量化变得越来越重要。连续变截面板 (TRB) 对于车辆的轻量化、安全性和其结构本身的承载适应性都有显著提高。本文基于有限元分析软件 LS-DYNA, 结合 MATLAB 等软件, 针对某保险杠在 25%、40%、50% 三种不同偏置下的低速柱碰, 分析比较线性和 S 型两种不同类型的连续变截面厚度保险杠吸能特性以及保险杠内外板厚度变化对保险杠吸能的影响, 并在此基础上进行保险杠耐撞性的多目标优化设计。结果表明, 在不增加质量的情况下, 连续变截面厚度板能有效提高保险杠的碰撞吸能。综合考虑, S 型 TRB 保险杠优于线性 TRB 保险杠。优化后的 S 型 TRB 保险杠吸能提高了 30% 左右。

**关键词:** S 型函数; 连续变截面; 保险杠; 耐撞性

### 1 引言

汽车正面碰撞要求前部结构能够依靠自身变形来减缓碰撞时的冲击力, 吸收碰撞能量以达到保护乘员的目的。保险杠是进行能量吸收的第一个重要部件, 要提高保险杠的耐撞性, 关键是要提高结构的能量吸收能力。目前一般采用增加板厚和内衬缓冲板来解决吸能不足的问题, 但这会造成整车质量的增加, 不利用当前环保和轻量化的要求<sup>[1]</sup>。

TRB 板是近年来提出具有连续变化厚度的新型板材, 其在长度方向上的硬度变化比较平缓, 无明显的硬度和应力波峰, 具备更好的冲压成形性能。可根据部件负载情况和结构要求设计不同厚度、不同长度的组合及不

同过渡区形状与尺寸的 TRB 板，在满足安全性的前提下获得最佳减重效果<sup>[2]</sup>。现有的研究主要集中在 TRB 板和等厚板的比较以及替换，对于如何设计一个具有最佳厚度曲线的 TRB 板鲜有报道。

本文基于有限元分析软件 LS-DYNA，结合 MATLAB 等软件，在保证质量不变的情况下，针对某保险杠在 25%、40%、50% 三种不同偏置下的低速柱碰，分析比较线性和 S 型两种不同类型的连续变截面厚度保险杠吸能特性以及保险杠内外板厚度变化对保险杠吸能的影响，并在此基础上通过实验设计应用 Kriging 法建立各个偏置下的代理模型，应用多目标优化算法进行连续变截面厚度保险杠耐撞性优化设计。

## 2 保险杠模型

### 2.1 初始模型和试验验证

本文所用的某保险杠模型由保险杠横梁、吸能盒构成，如图 1。横梁包括 1.2mm 厚的外板和 1mm 厚的内板；吸能盒包括 1.6mm 厚的外板和内板。保险杠横梁的弯曲半径为 1490mm，长度为 1155mm，截面外廓尺寸为 42mm×95mm，吸能盒内侧之间的距离为 924mm。横梁的内外板均为 B410LA 材料的钢板。

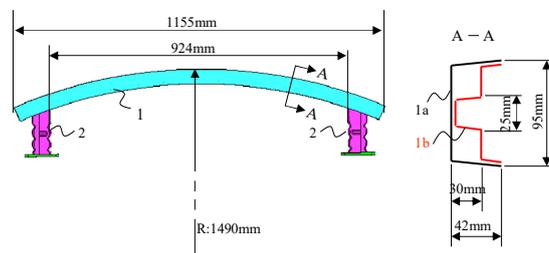


Figure 1. The geometric shapes of the bumper

图 1. 保险杠几何形状

保险杠有限元模型网格平均大小为  $5 \times 5$  mm，共包含 21735 个壳单元。为了检验本文中保险杠模型的准确性，对试件进行三点压试验验证。在进行试件三点压试验时，试件与刚性平台刚性固定，压头的半径  $R=152$ mm，压头初始位置与横梁中部位置刚好接触，如图 2。压头加载速度为 0.001m/s，若无明显破坏，则当加载距离达到 100mm 时停止。

参照试验工况，建立如图 3 仿真模型，压头与横梁之间采用自动面面接触，保险杠自身采用自动单面接触，静摩擦系数为 0.3，动摩擦系数为 0.2。由于静态求解所需时间很长，为减少计算时间，本文采取人为增加压头速度的方法减少求解时间<sup>[3]</sup>。在仿真过程中，压头的加载速度增加至 1m/s。

由静压试验和仿真分析得出的碰撞力-时间曲线如图 4，可知两条曲线变化趋势一致，峰值出现的时间也较吻合，最大误差仅 6.15%，可认为建立的保险杠有限元模型准确性较高，可用于下一步的优化设计。

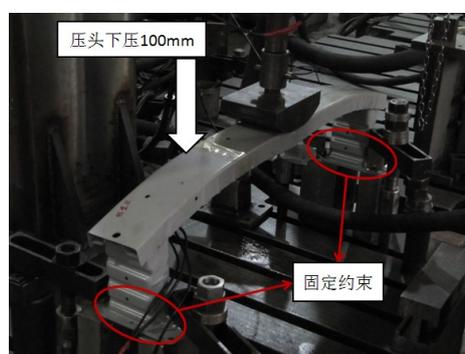


Figure 2. Three-point test of bumper specimen

图 2. 保险杠试件三点压试验

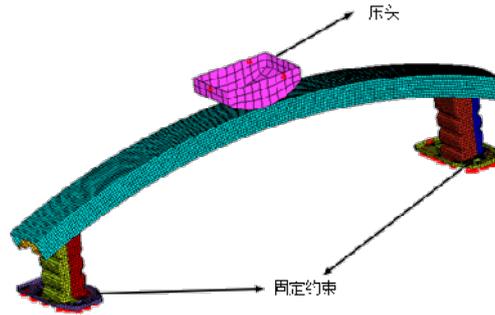


Figure 3. Simulation of three-point test of bumper specimen  
图 3. 保险杠三点压试验仿真

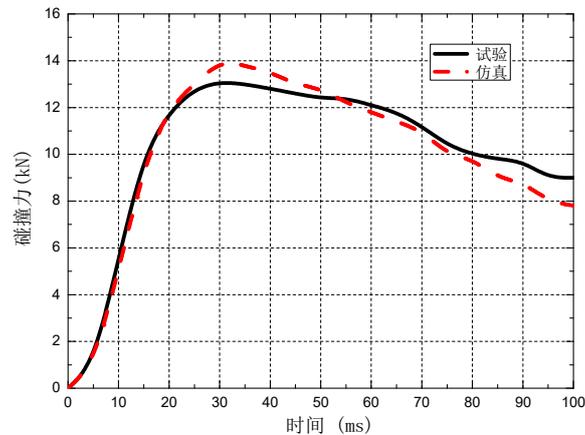


Figure 4. The collision force-time curve of three-point test and simulation  
图 4. 三点压试验和仿真碰撞力-时间曲线

## 2.2 TRB 保险杠模型

由于采用分段等厚度截面的方法建模无法避免刚度的突变，而采用过渡单元的方法则工作量大，且不准确；采用实体单元模拟由于厚度和长度尺度相差较大需要耗费较大的计算资源，效率低。本文采用变厚度的壳单元来建立连续变截面厚度保险杠有限元模型，首先通过抽取薄板中面，根据不同类型的连续变截面厚度保险杠确定薄板截面厚度数据，将保险杠的厚度表示成随空间位置变化的函数，进而使用不等厚度壳单元来建模。

本文考虑线性和 S 型两种不同类型的连续变截面厚度保险杠，对内板厚度在初始值的 50% 范围内变化时不同类型的连续变截面厚度保险杠在三种不同偏置低速柱碰下的吸能及最大碰撞力进行分析。线性和 S 型连续变截面厚度保险杠厚度函数为：

$$\begin{cases} t=2*(t_0-a)*(|x|-0.5)+t_0 & (\text{线性}) \\ t=2*(t_0-a)/(1+e^{(-10*(|x|-0.5))})+a & (\text{S型}) \end{cases} \quad (1)$$

$$x=2*s/L$$

其中  $s$  是保险杠各点到保险杠中央的弧长， $L$  是保险杠总弧长， $t_0$  是原保险杠中央厚度，对于外板为 1.2mm、内板为 1.0mm， $a$  是连续变截面厚度保险杠中央厚度。为保证前后质量不变，各保险杠厚度均经过  $(0.5, t_0)$  点。图 5 为保险杠外板中央厚度  $a$  在原厚度的 50% 范围内变化时不同类型的保险杠截面厚度变化情况。

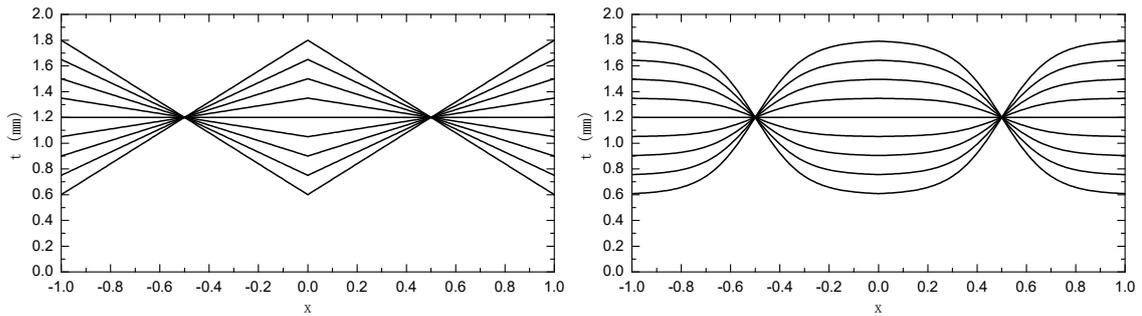


Figure 5. Section thickness of linear and S-type TRB bumper

图 5. 线性和 S 型 TRB 保险杠截面厚度变化

为实现保险杠有限元模型中厚度的连续变化，编写 MATLAB 程序将每一个单元定义为一个与 ELEMENT 同 ID 的 PART，并且引用相同 ID 的 SECTION。同样，为每一个单元定义同 ID 的 SECTION，SECTION 的四个节点厚度分别为此单元相应节点位置处的厚度函数值。这样，保险杠各处厚度就是随节点位置变化的值。建立有限元模型如图 6 所示。

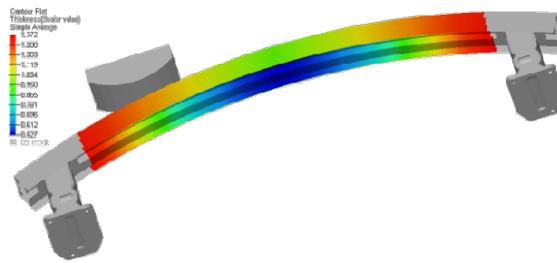


Figure 6. Finite element model of the TRB bumper

图 6. TRB 保险杠有限元模型

### 3 代理模型的建立

基于前面所建立的 TRB 保险杠有限元模型针对其在 25%、40%、50% 三种不同偏置下的低速柱碰，碰撞柱质量为 1100kg，速度为 15km/h。分析比较线性和 S 型连续变截面厚度保险杠吸能特性。

#### 3.1 设计变量及目标

在正面碰撞耐撞性分析中，通常以结构吸能量和最大碰撞力来评价。在本文中，将保险杠吸能量  $E$  最大化作为优化设计目标，同时将最大碰撞力  $F_{max}$  最为耐撞性约束指标。过大的碰撞力容易使得乘员受到伤害<sup>[4]</sup>，在本文中要求最大碰撞力  $F_{max}$  不得超过 30KN。考虑到保险杠内外板厚度变化对保险杠吸能有一定影响，本文选取保险杠外板中央厚度  $t_1$ 、外板中央厚度  $t_2$  作为设计变量。为研究保险杠内外板对吸能的影响，中央厚度  $t_1$ 、 $t_2$  在原厚度上下 50% 范围内变化，如表 1 所示。

Table 1. Design variables

表 1. 设计变量

设计变量	$t_1$	$t_2$
上限	1.8	1.5
下限	0.6	0.5

### 3.2 仿真结果

为建立合适的代理模型需要一定数量的样本数据，采用实验设计的方法来选取样本点。拉丁超立方抽样是一种充满空间设计，在每个区间只抽样产生一个随机数，使输入组合相对均匀地填满整个实验区间，并且每个变量值仅使用 1 次，解决了传统蒙特卡罗抽样设计存在抽样次数多，数据点堆积等问题，使所得的模型能正确反映整个参数变化区域<sup>[5]</sup>。在本文中采用拉丁超立方抽样选出 20 个样本点来构造初始设计空间，得到相应的响应值，其结果如表 2。

Table 2. The samplings and responses

表 2. 采样实验点及结果

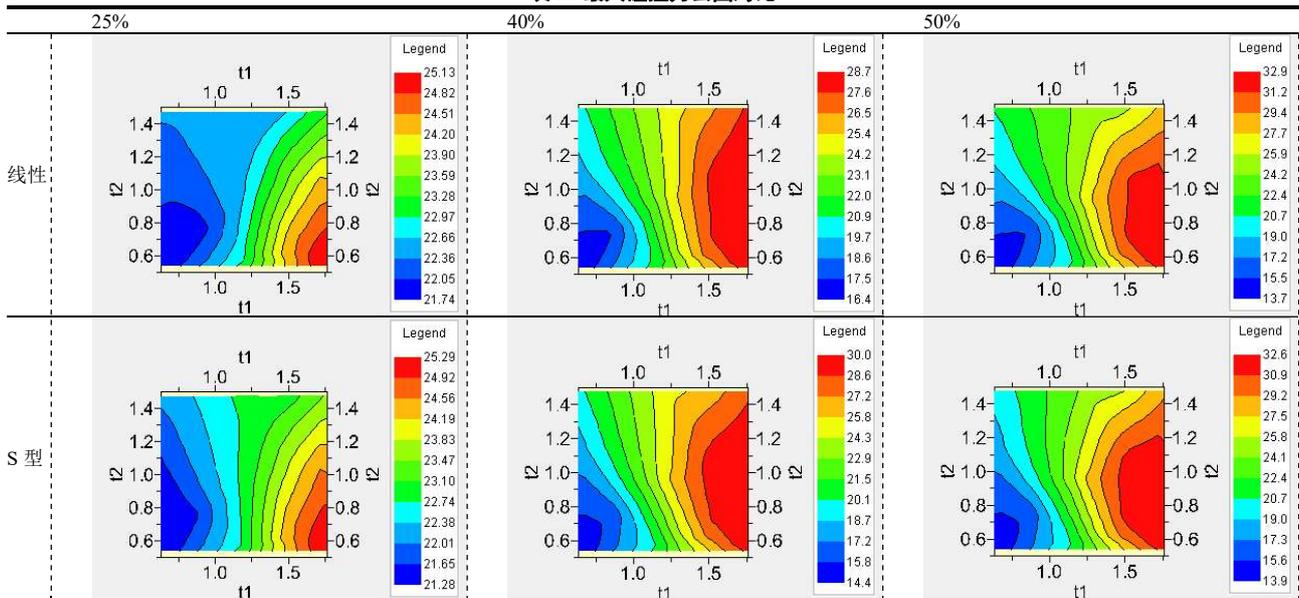
实验号	$t_1$	$t_2$	线性						S 型					
			25%		40%		50%		25%		40%		50%	
			$E$	$F_{\max}$										
1	0.632	1.105	1043.8	22.4	935.9	20.3	981.7	20.6	1014.5	21.5	878.8	18.2	974.3	19.7
2	0.695	1.421	980.0	22.6	1005.0	19.3	1089.0	20.1	973.6	22.1	993.5	18.5	1055.3	18.4
3	0.758	1.000	1073.3	22.4	963.0	19.8	984.6	21.3	1065.6	22.3	943.4	19.8	985.4	21.0
4	0.821	0.579	1176.7	22.4	943.2	16.9	896.9	16.9	1187.3	22.3	917.5	16.1	893.9	16.3
5	0.884	1.474	985.9	22.8	1073.6	19.7	1199.2	21.2	985.9	22.8	1095.9	20.0	1133.3	19.7
6	0.947	0.526	1189.9	22.7	977.3	17.8	936.0	17.4	1217.4	22.2	946.5	16.2	935.6	16.7
7	1.011	0.737	1146.7	22.8	1024.0	21.1	1005.4	19.7	1149.3	22.7	1017.9	20.9	1005.3	19.6
8	1.074	0.684	1160.5	22.9	1038.8	21.8	1023.0	19.7	1164.9	22.8	1035.3	21.5	1023.7	19.5
9	1.137	0.842	1124.7	23.0	1078.6	23.3	1082.8	23.7	1125.4	23.0	1078.0	23.3	1083.1	23.7
10	1.200	1.000	1090.2	22.9	1130.1	24.3	1169.4	27.0	1090.2	22.9	1129.9	24.3	1169.4	27.0
11	1.200	0.947	1101.5	22.9	1120.7	24.2	1154.4	26.5	1101.3	22.9	1120.7	24.2	1154.4	26.5
12	1.263	1.211	1047.8	22.8	1204.7	23.8	1242.9	24.3	1047.3	22.8	1203.6	23.7	1241.4	24.3
13	1.326	1.158	1059.9	22.9	1224.7	24.6	1259.9	25.1	1060.2	22.9	1225.4	24.6	1260.6	25.1
14	1.389	0.895	1118.0	23.1	1186.0	24.9	1237.5	27.7	1118.5	23.2	1187.4	24.9	1238.0	27.7
15	1.453	0.632	1177.6	23.5	1179.3	24.1	1211.4	25.6	1186.8	23.5	1180.0	23.9	1217.1	25.5
16	1.516	1.368	1028.9	23.0	1285.3	24.6	1511.6	24.9	1027.0	23.0	1300.1	24.5	1478.4	24.9
17	1.579	1.263	1047.8	23.5	1312.3	24.8	1464.2	25.3	1051.4	23.6	1325.1	24.7	1451.9	25.2
18	1.642	1.316	1041.3	23.4	1335.0	24.9	1544.9	25.3	1043.5	23.5	1361.2	24.9	1520.6	25.2
19	1.705	0.789	1150.3	24.3	1306.4	26.2	1423.3	27.8	1161.4	24.4	1353.6	27.0	1411.7	27.8
20	1.768	1.053	1094.4	24.1	1378.5	27.8	1490.2	29.4	1116.6	24.4	1445.7	28.0	1491.9	29.2

### 3.3 Kriging 模型

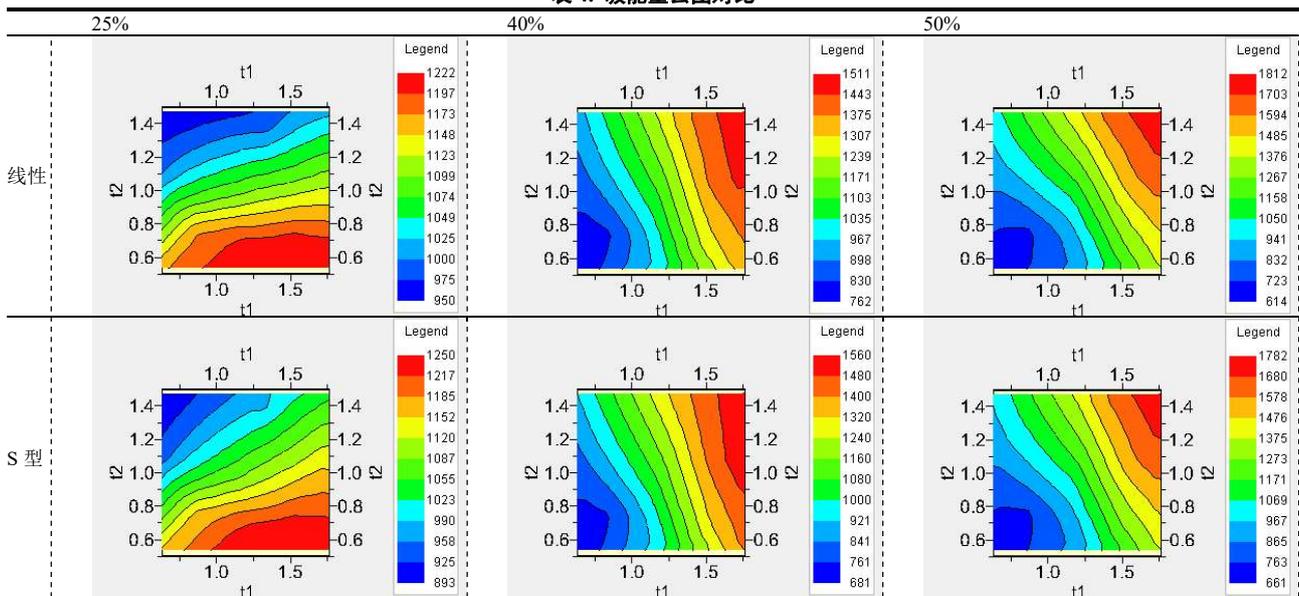
Kriging 插值法又称空间自协方差最佳插值法。它首先考虑的是空间属性在空间位置上的变异分布, 确定对一个待插点值有影响的距离范围, 然后用此范围内的采样点来估计待插点的属性值。该方法在数学上可对所研究的对象提供一种最佳线性无偏估计的方法。它是考虑了信息样品的形状、大小及与待估计块段相互间的空间位置等几何特征以及品位的空间结构之后, 为达到线性、无偏和最小估计方差的估计, 而对每一个样品赋予一定的系数, 最后 进行加权平均来估计块段品位的方法, 在数据点多时, 其内插的结果可信度较高<sup>[6]</sup>。

利用 Kriging 插值法建立各个偏置下最大碰撞力和吸能量的代理模型。表为线性变截面厚度保险杠和 S 型变截面厚度保险杠不同偏置下最大碰撞力云图对比。表为线性变截面厚度保险杠和 S 型变截面厚度保险杠不同偏置下吸能量云图对比。

**Table 3. Comparison of maximum impact force**  
**表 3. 最大碰撞力云图对比**



**Table 4. Comparison of energy absorption**  
**表 4. 吸能量云图对比**



结果表明同等厚度的线性和 S 型函数连续变截面厚度保险杠在碰撞力和吸能量方面没有显著差异。不同偏置下，线性和 S 型函数连续变截面厚度保险杠的最大碰撞力和吸能变化趋势相同。同时保险杠内外板厚度对吸能和最大碰撞力的影响不一样：在 25%偏置柱碰下内板厚度对吸能有很大的影响，而在 40%,50%偏置柱碰下两者都有影响，而外板厚度影响更为明显。当外板厚度较小时最大碰撞力由外板厚度和内板厚度共同决定，当外板厚度较大时最大碰撞力则主要由外板厚度决定。

## 4 优化过程

### 4.1 优化数学模型

出于耐撞性和轻量化的考虑，本文旨在增加横梁的吸能总量和控制横梁质量；另一方面，过大的碰撞力会导致其在低速碰撞下起不到应有的保护作用<sup>[4]</sup>，甚至危害车内乘员的安全，所以碰撞力峰值也必须满足一定的约束要求。因此，TRB 保险杠优化问题可以描述如下：

$$\begin{cases} \max E(25\%, 40\%, 50\%)s \\ \text{s.t. } F_{\max}(25\%, 40\%, 50\%) \leq 30kN \\ 0.6mm < t1 < 1.8mm \\ 0.5mm < t2 < 1.5mm \end{cases} \quad (2)$$

式中  $E$ ,  $F_{\max}$  分别代表保险杠总吸能量与碰撞力峰值；当横梁压缩量达到 100mm 时，取保险杠的内能之和作为保险杠总吸能量  $E$ ；取横梁压缩量达到 100mm 之前的最大碰撞力作为碰撞力峰值  $F_{\max}$ 。

### 4.2 优化结果

利用文中所建立的 Kringing 模型，使用 Isight 软件中的自动优化专家算法 (Pointer) 分别对线性和 S 型函数连续变截面厚度保险杠求解，得到优化结果如下表 5。

### 4.3 结果验证

为了进一步验证优化方案，将 TRB 保险杠厚度的优化结果代入 S 型 TRB 保险杠有限元模型中求解。有限元值和代理模型优化值对比如表 6 所示。结果表明模型误差在 10%以内，优化结果可以接受。

Table 5. Optimization value  
表 5. 优化结果

	t1	t2	25%		40%		50%	
			E/J	$F_{\max}$ /KN	E/J	$F_{\max}$ /KN	E/J	$F_{\max}$ /KN
原始	1.2	1	1090.2	22.9	1130.1	24.3	1169.4	27.0
线性	1.765	1.206	1072.1	23.9	1470.8	28.3	1704.4	29.9
S 型	1.768	1.216	1105.1	24.2	1534.9	28.8	1682.9	30.0

Table 6. Comparison of FEM and model optimization value  
表 6. 有限元值和代理模型优化值对比

	t1	t2	25%		40%		50%	
			E/J	$F_{\max}$ /KN	E/J	$F_{\max}$ /KN	E/J	$F_{\max}$ /KN
原始	1.2	1	1090.2	22.9	1130.1	24.3	1169.4	27.0
S 型模型值	1.768	1.216	1105.1	24.2	1534.9	28.8	1682.9	30.0
S 型有限元值			1085.3	24.7	1444.5	26.3	1549.2	26.5
模型误差 %			1.8	2.0	-5.9	-8.7	-7.9	-11.6
实际优化量 %			-0.4	7.8	27.8	8.2	32.5	-1.8

## 5 结论

在不增加质量的情况下，连续变截面厚度板能有效提高保险杠的碰撞吸能；同等厚度的线性和 S 型函数连续变截面厚度保险杠在碰撞力和吸能量方面没有显著差异。基于线性和 S 型 TRB 保险杠优化设计的前后板厚度基本相同，综合考虑三种不同偏置下的吸能发现 S 型 TRB 保险杠更均衡，对不同偏置下的吸能都有一定提高。

其中 50%偏置下，最大碰撞力减少了 1.8%，而吸能量提高了 32.5%；40%偏置下，最大碰撞力提高了 8.2%，而吸能量提高了 27.8%，吸能优势明显。

## 参考文献 (References)

- [1] 范蓉, 胡平, 王洪兵, 等. 热成形高强钢车身保险杠的耐撞性研究[C]. Proceedings of the 8th International Forum of Automotive Traffic Safety. 2010. Wuhu, China.
- [2] 兰凤崇, 李佳光, 马芳武, 等. 连续变截面板 (TRB 板) 在汽车前纵梁中的应用及优化分析[J]. 机械设计与制造, 2014 (1): 25-28.
- [3] 魏显坤, 杨晶晶, 米林. 铝合金保险杠准静态压溃仿真与试验[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学版, 2013, 27(8): 14-17.
- [4] 刘子建, 张建华, 杨济匡. 碰撞生物力学基础及其应用[J]. 中华创伤杂志, 2001, 5(17): 261-263.
- [5] 邓乾旺, 文文. 基于拉丁超立方抽样的薄板装配误差分析 [J]. 中国机械工程, 2012, 23(8): 947-951.
- [6] 徐增密, 刘立忠, 申国哲, 等. 基于响应面和 kriging 代理模型的汽车 B 柱优化设计[J]. 汽车技术, 2012 (4): 39-43.