

Optimization of Vehicle Frontal Structure Parameter Based on Pedestrian Integrative Protection

Libo Cao, Zhiwei Deng, Lingdong Ye

State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha, China

Email: hdlb@163.com, dzw207@163.com, yldhnu@hotmail.com

Abstract: Injury in head and lower extremities were both considered in this paper. A multi-rigid body model of the vehicle-to-pedestrian crashes was developed. A series of vehicle-to-pedestrian crashes with different frontal structure parameters were conducted using orthogonal experimental design method. The results of the simulations were used to define a equation of response surface, and analysis of variance was conducted based on the results. ISIGHT software was applied to the optimization of the response surface equation, and a set of vehicle's front al structure parameters which have good protection to pedestrian were obtained. The simulation results indicate that the combination of these parameters mitigated the injury severity of pedestrians both in head and lower extremities.

Keywords: pedestrian protection; frontal structure parameter; crash simulation; optimization

行人综合保护的汽车前部结构参数优化研究

曹立波, 邓智伟, 叶灵东

湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点试验室, 长沙, 中国, 410082

Email: hdlb@163.com, dzw207@163.com, yldhnu@hotmail.com

摘 要: 本文考虑了汽车前部结构参数对行人下肢和头部损伤的综合影响。建立了汽车与行人碰撞的多刚体模型, 采用正交试验设计方法对具有不同前部结构参数的汽车与行人碰撞进行了一系列仿真。根据仿真结果建立了对行人实现综合防护的响应表面方程, 并进行了方差分析。利用ISIGHT软件对得到的响应表面方程进行优化, 获得了一组对行人头部和下肢都能实现较好的保护的汽车前部结构参数。

关键词: 行人保护; 汽车前部结构参数; 碰撞仿真; 优化

1 前言

在行人与车辆的碰撞事故中, 行人是易受伤害群体, 在交通事故中的重伤和死亡率极高。在欧洲, 每年有7000人死于行人交通事故^[1]; 在美国, 2006年国家统计数据表明行人死亡人数占交通事故总死亡人数的11%^[2]。在我国, 2006年的行人死亡占交通事故总死亡人数的比例约为25%, 死亡人数高达2.5万人^[3], 因此, 行人安全愈来愈引起世界各国安全专家的重视。统计数据显示, 行人交通事故中行人头部和下肢损伤是主要的受伤部位^[4], 因此, 研究如何降低汽车与行人碰撞中行人头部和下肢的损伤, 减少事故损失, 有着重要的社会和经济意义。

目前, 国内外已经进行了大量单独针对行人下肢或头部损伤保护的研究^[5-7], 但是, 同时综合考虑行人

下肢和头部损伤的研究还较少。然而, 实际的汽车与行人碰撞过程中, 汽车前部结构参数不仅对行人下肢损伤有直接影响, 也会对行人头部损伤有重要影响, 对下肢损伤较小的汽车前部结构参数不一定对行人头部的伤害也小。

因此, 本文建立了汽车与行人碰撞的多刚体模型, 通过正交试验设计, 综合分析了汽车前部几个主要结构参数对行人头部和下肢损伤的影响。建立了行人综合防护响应面模型, 通过优化设计汽车前部结构参数, 探讨了同时对行人头部和下肢损伤较小的汽车前部结构参数。

2 汽车-行人碰撞模型的建立

2.1 汽车模型的建立

利用多刚体软件MADYMO建立了某量产车型的

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50675062)

汽车模型,包括8个椭球和3个平面,分别代表前风窗、发动机盖、发动机盖前端、保险杠、两个前大灯、两个轮胎、保险杠下缘和地板,其前部结构主要尺寸如图1所示:保险杠中心离地高度(BCH)450mm,保险杠自身高度(BW)140mm,保险杠相对发动机罩伸出长度(BL)60mm,发动机罩前端离地高度(HEH)700mm,发动机罩倾角(HA)12.5°,发动机罩长度(HL)1050mm,风挡玻璃倾角(WA)42°。

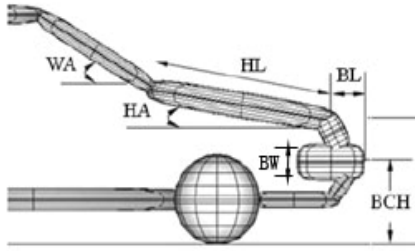


Figure1. Vehicle front structure dimensions
图1. 车型前部结构尺寸参数

2.2 行人模型的建立

本文研究所采用的行人模型为瑞典查尔摩斯大学杨济匡教授等人开发的多体行人模型(简称CMPI)^[8]。该模型是按照欧洲50百分位人体尺寸建立,高1.75m,重78kg,修改后的模型由28个椭球组成,通过27个铰链连接。该模型下肢具有生物特性逼真的膝关节和可模拟骨折的小腿。其中,膝关节采用两个椭球来模拟大腿骨骨节,用四个平面来模拟胫骨骨节及胫骨踝间隆起,用六个弹簧阻尼单元来模拟大腿骨与胫骨之间的韧带及胶原组织。

2.3 汽车-行人碰撞模型的建立

汽车与行人发生碰撞的部位主要是在汽车前部。统计数据表明:在汽车与行人的碰撞事故中,有74%的成年行人处于行走状态,并且有82%的行人是从侧面受撞^[9]。因此,仿真模型设定汽车与行人右侧撞击,如图2所示。根据国际协调研究机构(IHRA)的一项调查报告显示,70%的汽车与行人碰撞事故发生在40km/h的碰撞速度以下,并且在此碰撞速度下的行人死亡率达26%^[5]。所以,仿真中采用的碰撞车速为40km/h。

3 汽车前部结构参数优化

3.1 目标函数的选择

头部损伤是行人事故中致死的主要原因,由于脑

组织的复杂性,评价脑损伤的标准还存在争议。目前,使用最广泛的头部损伤评价指标是基于美国韦恩州立大学Lissner等人提出的WSTC曲线而建立的HIC值计算方法。HIC值定义如下:

$$HIC=[(t_2-t_1)(\frac{1}{t_2-t_1}\int_{t_1}^{t_2} a(t)dt)^{2.5}]_{\max} \quad (1)$$

式(1)中, a 代表头部质心合成加速度, t_2-t_1 代表HIC值达到最大时的时间间隔,在汽车与行人碰撞事故中, t_2-t_1 取15ms。定义头部目标函数为

$$W_1 = \frac{1}{2000} HIC \quad (2)$$

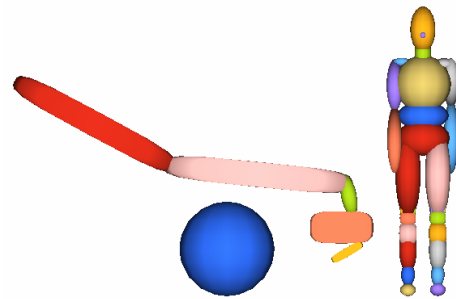


Figure 2. Vehicle - Pedestrian Collision Model
图2. 汽车-行人碰撞模型

下肢损伤是行人事故中最频繁的损伤形式。目前,行人下肢损伤评价指标主要有膝关节的剪切位移 d 、弯曲角度 n 及胫骨上端的加速度 a 等。由于下肢有3个损伤指标,所以下肢优化是一个多目标优化问题。本文采用加权伤害准则(Weighted Injury Criterion)来评价分析结果, W_2 值越低,说明前部结构对腿部的保护性能越好。 W_2 ^[10]的表达式如下:

$$W_2 = \frac{1}{3} \left(\frac{a}{2000} + \frac{n}{26.5} + \frac{d}{28} \right) \quad (3)$$

其中, a 代表胫骨加速度, n 代表膝关节弯曲角度, d 代表膝关节剪切位移。

本文根据EEVC对胫骨加速度和头部评价指标,分别采用2000m/s²和2000作为权重系数;大量文献表明,EEVC采用的下肢冲击器刚度过大,造成弯曲角度和剪切位移的实验测量值过小,因此本文采用Kajzer等人人体实验数据作为权重系数^[10]。

考虑到头部损伤往往造成行人严重损伤,其权重系数应该比下肢的大。因此,定义行人综合防护的目标函数如式(4)所示。 W 值越小,说明对行人保护性能越好。

$$W = 0.6W_1 + 0.4W_2 \quad (4)$$

3.2 优化参数选择

选取对行人头部及下肢损伤影响比较大的汽车前部结构参数作为优化设计参数，包括保险杠中心离地高度BCH、保险杠自身高度BW、保险杠相对发动机罩伸出长度BL、发动机罩前端离地高度HEH。

3.3 约束条件

为了使目标函数W值尽量小，同时考虑到汽车整体前围造型，参数取值设置如下：

$$275\text{mm} \leq \text{BCH} \leq 500\text{mm};$$

$$100\text{mm} \leq \text{BW} \leq 250\text{mm};$$

$$10\text{mm} \leq \text{BL} \leq 100\text{mm};$$

$$600\text{mm} \leq \text{HEH} \leq 800\text{mm};$$

4 正交试验设计

4.1 试验设计

正交试验设计是一种多因素优化试验设计方法，具有试验点分布“均匀分散”，正交表的列之间具有正交性，保证每两个因素的水平在统计学上是不相关的。正交设计表用 $L_n(a^p)$ 表示，其中“L”表示正交设计，“n”表示有n个处理，“a”表示每个因子都有a个水平，指数“p”表示最多允许安排p个因子^[1]。

本文中每个设计因子都采用4个水平，共4个因子，因此采用均匀设计表 $L_{16}(4^5)$ ，试验设计安排如表1。按照表1进行仿真试验，共进行16次试验。根据试验设计点，改变模型的相关参数，以头部HIC值、胫骨加速度、膝关节最大弯曲角度以及膝关节最大剪切位移作为输出参数，仿真结果见表2。

Table 1. Orthogonal design table

表1. 正交试验设计表

试验号	变量1 BCH	变量2 BW	变量3 BL	变量4 HEH
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	1	4	4	4
5	2	1	2	3
6	2	2	1	4
7	2	3	4	1
8	2	4	3	2
9	3	1	3	4
10	3	2	4	3
11	3	3	1	2
12	3	4	2	1
13	4	1	4	2
14	4	2	3	1
15	4	3	2	4
16	4	4	1	3

Table 2. Simulation results

表2. 仿真结果

试验号	HIC	a (m/s*s)	n(°)	d (mm)	W
1	1945.0	964.3	6.5	3.5	0.694
2	1916.4	994.6	11.7	4.0	0.72
3	1759.3	1229.9	23.6	9.5	0.776
4	1239.2	1440.7	27.2	17.5	0.688
5	1707.5	1390.9	23.5	7.4	0.758
6	1367.4	1935.2	51.6	28.5	0.932
7	1765.3	1617.7	5.0	9.0	0.704
8	1946.7	1645.6	5.3	9.0	0.762
9	1386.8	1826.9	43.5	27.5	0.886
10	1792.8	1907.5	24.6	8.4	0.832
11	2000.3	1828.6	20.6	6.0	0.856
12	2003.6	2254.2	17.8	8.7	0.88
13	1869.3	2181.9	51.6	33	1.122
14	1928.8	2938.9	42.4	24	1.1
15	1528.3	1766.4	74.5	46.4	1.168
16	1741.3	2052.5	68.7	37	1.182

4.2 参数影响分析

通过极差计算和直观的水平趋势图，分析各个损伤参数对行人损伤影响的显著性。

如表3所示，水平1至水平4对应的行中的数值为各变量在某一水平值下的头部HIC峰值的平均值。极差就是该参数对应的不同水平时的最大峰值与最小峰值之差。极差的大小可以反映出该因素对HIC值影响的显著性。从表3可看出，四个参变量对HIC值影响的显著性由强到弱为HEH、BL、BCH、BW。依次求得四个参变量对胫骨加速度峰值、膝关节弯曲角度和剪切位移影响的显著性排序为BCH > BW > BL > HEH、BCH > HEH > BL > BW、BCH > HEH > BL > BW。

Table 3. Head HIC value of the mean and range table

表3. 头部HIC值均值与极差表

	BCH(mm)	BW(mm)	BL(mm)	HEH(mm)
水平 1	1715.0	1727.2	1763.5	1910.7
水平 2	1696.7	1751.4	1789.0	1933.2
水平 3	1795.9	1763.3	1755.4	1750.2
水平 4	1767.0	1732.7	1666.7	1380.4
极差	99.2	36.1	122.3	552.7

图3~图6为各因素的水平趋势图。由这些图可知，发动机罩高度增加，HIC值有明显的下降，有利于头部保护；但下肢的胫骨加速度、弯曲角度和剪切位移也都随发动机罩高度增加而增加，腿部损伤变大。从动力学角度来分析，发动机罩前缘高度越高，越接近人体的重心（骨盆），碰撞时更多的能量被骨盆及大腿吸收。同时，人体的绕转半径减小，使得头部与发动机盖接触前的时间减小，从而降低了头部与发动机罩的撞击速度。但是，随着发动机罩高度增加，大腿

与发动机罩接触点位置上升,造成人体平动趋势增加,故整个膝关节的损伤变大。

随着保险杠离地高度上升, HIC值先减小后增加,但变化不是很明显;而下肢损伤,尤其是胫骨加速度,显著增大。当行人与汽车保险杠相撞时,在碰撞初期,胫骨是绕着踝关节旋转。保险杠离地高度增加,弯曲角度会增加。保险杠离地高度越高,碰撞作用点越靠近胫骨骨节端,引起的胫骨加速度和剪切位移越大。因此,保险杠离地高度降低可以减小对下肢的损伤,但头部损伤会有轻微增加。

保险杠伸出量增加,头部损伤有所减少,但不明显;下肢的胫骨加速度有轻微增加,但弯曲角度和剪切位移均减少,下肢损伤呈减少趋势。当保险杠伸出长度越长,腿部先后与保险杠和发动机罩前端接触的时间间隔就越长,冲击力的叠加效果就越不明显,膝关节受到的损伤较小。

保险杠自身高度增加,头部跟下肢的损伤有升有降,可能跟汽车其他参数有交互作用。

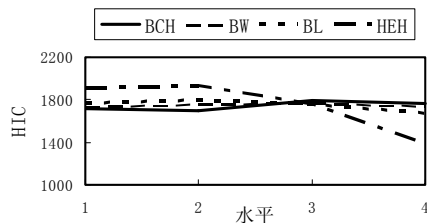


Figure 3. HIC level factors on the trend
图3. 各个因素对HIC水平趋势图

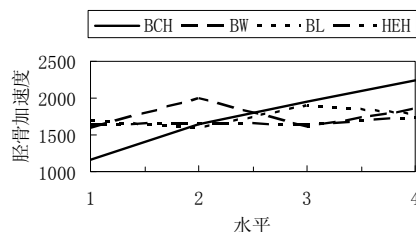


Figure 4. Various factors on the level of the tibial acceleration trend
图4. 各个因素对胫骨加速度水平趋势图

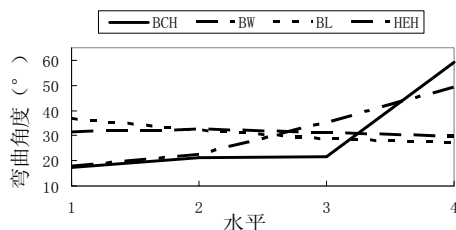


Figure 5. The level of the various factors on the bending angle trends
图5. 各个因素对弯曲角度水平趋势图

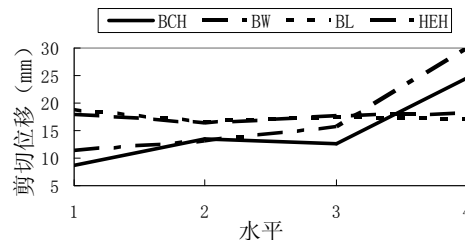


Figure 6. Shear displacement of each factor on the level of trend
图6. 各个因素对剪切位移水平趋势图

由以上分析可知,发动机罩离地高度对行人头部损伤影响最显著,发动机罩高度增加,有利于头部保护,但对膝关节保护不利;保险杠离地高度对下肢损伤影响较大,保险杠离地高度降低,有利于行人下肢保护,但对头部影响较小;保险杠伸出量在一定范围内增加,同时有利于头部和下肢的保护。

因此,为了实现行人头部、下肢的综合防护,需要进一步对车辆前部结构参数进行优化设计。

5 响应表面法分析

本文先用响应表面法建立了试验设计点分析结果的近似响应表面模型,得到响应表面后,再通过方差分析,对响应表面的拟合程度进行验证。

5.1 响应表面法

响应表面法是一种近似模型的方法。利用响应表面法来构造近似模型时,首先要确定近似函数的形式,然后运用统计的试验设计方法在设计空间内选择足够多的设计点,最后运用最小二乘原理得到近似模型来拟合选定设计点上的分析结果^[12,13]。

常用的一次响应表面模型表达式为:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \cdots + a_ix_i \quad (5)$$

二次多项式响应表面模型表达式为:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_ix_i + \sum_{i=1}^n a_{ii}x_i^2 + \sum_{j<i}^n a_{ji}x_jx_i \quad (6)$$

其中 a_0 为响应表面模型方程的常数项, a_i 为第 i 个自变量待定的系数。

将式 (5)、(6) 用矩阵表示为:

$$y = Xa \quad (7)$$

y 矩阵是 y 的 n 次观察值, X 矩阵是 x 的 n 次观察值; a 为系数矩阵。

由此可得方程组:

$$X^T Xa = X^T y \quad (8)$$

则 $a = (X^T X)^{-1} X^T y$

即可以求出响应表面模型系数的估计值。

5.2 响应表面法模型的建立

根据表 2 仿真试验结果,通过SAS软件,建立了行人综合防护目标函数的二阶响应面模型方程:

$$\begin{aligned} W = & -0.47679 - 0.01305X_1 + 0.00567X_2 \\ & - 0.02053X_3 + 0.00842X_4 + 0.000003X_1X_2 \\ & + 0.000051X_1X_3 - 0.000005X_1X_4 \\ & + 0.000015X_2X_3 - 0.000012X_3X_4 \\ & + 0.000019X_1^2 - 0.000013X_2^2 \\ & + 0.000053X_3^2 - 0.000004X_4^2 \end{aligned} \quad (9)$$

其中 $X_1 X_2 X_3 X_4$ 分别代表变量B CH、BW、BL、HEH。

在求得目标函数二阶响应面模型后,本文通过方差分析中决定系数 R^2 和调整的决定系数 R^2_{adj} 来检验设计目标与设计参数之间的拟合程度,决定系数 R^2 和调整的决定系数 R^2_{adj} 定义如下:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^p (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^p (y_i - \bar{y}_i)^2}, \quad (10)$$

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^p (y_i - \hat{y}_i)^2 (P-1)}{\sum_{i=1}^p (y_i - \bar{y}_i)^2 (P-k-1)} \quad (11)$$

其中, P 是设计点的个数, k 是自由度, y_i , $\hat{y}_i$, $\bar{y}_i$ 分别是响应量的实测值、响应量的预测值以及响应量实测值的平均值。 R^2 和 R^2_{adj} 值越接近于1, 近似模型的拟合越好。

根据式(10)、式(11)可知,行人综合防护的目标函数响应面模型的决定系数 R^2 为99.0%, R^2_{adj} 为85.4%, 可见该模型对响应量达到了很好的拟合, 可以进行优化分析。

6 响应表面法模型优化

本文应用二次规划法对建立的行人综合防护代理模型进行优化求解, 表达式为:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \{W\} \\ \text{s.t.} \quad & 275\text{mm} \leq \text{BCH} \leq 500\text{mm}; \\ & 100\text{mm} \leq \text{BW} \leq 250\text{mm}; \\ & 10\text{mm} \leq \text{BL} \leq 100\text{mm}; \\ & 600\text{mm} \leq \text{HEH} \leq 800\text{mm}; \end{aligned}$$

优化后, 得到了一组优化设计方案: 当汽车的保险杠离地高度为345mm, 保险杠伸出量100mm, 保险杠自身高度250mm, 发动机罩高度790mm时, 对行人整体造成的损伤较小。

为了验证代理模型优化结果的有效性, 在该设计点处利用MADYMO软件进行仿真, 将仿真结果与代理模型优化结果进行对比。优化得到的W值为0.602, 仿真值为0.614, 两者误差很小, 为1.99%, 优化结果有效。

表4为模型优化前后, 损伤指标值对比情况。从表4可知, 优化后, 头部HIC值为1355.3, 比改进前降低了约31.2%; 下肢的胫骨加速度、膝关节弯曲角度和剪切位移较优化前也都有了明显的减少, 行人的综合防护效果有了明显的改善。

Table 4. Pedestrian injury in the comparison between before and after optimization

表4. 优化前后行人损伤指标对比

输出目标	优化前模型	优化后模型	改进百分比
HIC	1968.6	1355.3	31.2%
a (m/s*s)	1677.7	1594.0	5.0%
n(°)	47.5	13.8	70.9%
d (mm)	29.4	8.9	69.7%

7 结论

本文建立了汽车与行人碰撞的多刚体模型, 综合考虑了汽车前部结构参数对行人下肢和头部的损伤, 结合正交试验设计方法, 建立了行人保护的响应表面模型, 并对模型进行了优化。结果表明, 发动机罩高度增加, 有利于头部保护, 但下肢损伤会有轻微增加; 保险杠离地高度降低, 下肢损伤减少, 但对头部损伤影响较小; 保险杠伸出量在一定范围内增加, 同时有利于头部和下肢的保护。优化得到的汽车前部结构参数能有效减少行人的损伤, 可用于指导车辆的设计开发。

References (参考文献)

- [1] European Enhanced Vehicle-safety Committee(EEVC) Working Group 1 7 report, Improved test Methods to evaluate Pedestrian Protection afforded by Passenger Cars. 1998.
- [2] National Highway Traffic Safety Administration[R]. 2006.
- [3] Ministry of Public Security Traffic Management Bureau. Road Traffic Accident Statistics Annual Report in P.R.C.[R]. Beijing, 2006.
- [4] 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[R]. 北京, 2006.
- [5] Guanjin Zhang, MS, Libo Cao, PhD, A Field Data Analysis of Risk Factors Affecting the Injury Risks in Vehicle-to-Pedestrian Crashes[C], 52nd AAAM Annual Conference Annals of Ad-

- vances in Automotive Medicine October 2008
- [5] Wei Haiyan. Research on the protection of pedestrian legs during car-pedestrian impact and its assessment method [D]. HNU college of mechanical and vehicle, Changsha, China, 2005.
危海烟.汽车与行人碰撞中行人下肢安全性研究[D]. 长沙: 湖南大学机械与运载工程学院, 2005.
- [6] Robert Kendall, Mark meissner and Jeff Crandall The Causes of Head Injury in Vehicle-Pedestrian Impacts: Comparing the Relative Danger of Vehicle and Road Surface, SAE TECHNICAL PAPER SERIES, 2006-01-0462.
- [7] Huang dong. Research on head & leg injuries and protection measures in the collision of Car-to-Pedestrian. HNU college of mechanical and vehicle, Changsha, China, 2005.
黄冬.轿车-行人碰撞中头部和下肢损伤分析以及防护措施的研究 [D]. 长沙: 湖南大学机械与汽车工程学院, 2008.
- [8] Yang J K, P LOÈ VSUND, C CAVALLERO, J BONNOIT. A Human-Body 3D Mathematical Model for Simulation of Car-Pedestrian[J]. International Journal of Crash Prevention and Injury Control, 2000.
- [9] Yang J K, Yao J F, Dietmar Otte. Correlation of Different Impact Conditions to the Injury Severity of Pedestrian in Real World Accidents[C]. In The 19th ESV Conference. Washington DC, 2005, 8-10.
- [10] Janusz Kajzer, Yasuhiro Matsui , et al. Shearing and Bending Effects at Knee Joint at High Speed Lateral Loading[J], Society of Automotive Engineers, Inc, 1999.
- [11] Liu Wenqing. Experimental Design[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
刘文卿, 试验设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [12] Liao Xingtao, Zhang Weigang, et al. Application research of response surface methodology in thin-walled structural optimization design in crashworthiness[J]. Journal of Engineering Design, 2006.
廖兴涛, 张维刚等, 响应表面法在薄壁构件耐撞性优化设计中的应用研究[J], 工程设计学报, 2006.
- [13] REDHE M, FORSBERG J, JANSSON T, et al. Using the response surface methodology and the 'D—optimality criterion in crashworthiness related problems[J], Structural and Multidisciplinary Optimization, 2002, 24: 185-1 94.
- [14] Zhong Zhihua, Zhang Weigang, Cao Libo. Automobile Collision Safety Technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
钟志华, 张维刚, 曹立波等, 汽车碰撞安全技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.