

文章编号 2097-1842(2023)03-0673-09

基于机器视觉的正碰假人胸部的研究

刘爽¹, 陈立新², 张钧栋², 沙路明², 于征磊^{2*}, 徐涛³, 张琪⁴

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 吉林 长春 130025;

3. 吉林大学机械与航空航天工程学院, 吉林 长春 130025;

4. 长春理工大学机电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要:在汽车被动安全领域,对于驾驶员正碰撞击中胸部的研究具有重要的意义。本文基于机器视觉的方法,通过Hybrid III 50th汽车碰撞实体假人,构建假人胸部模型。利用遗传算法进行参数优化,优化后标定试验的所有指标均符合法规要求,仿真结果与试验测试结果相符,误差小于5%。随后将含有胸部模型的有限元假人模型放入整车系统进行正碰仿真分析,结果表明:胸部伤害得分值为80%,与试验测试结果相比,仿真结果误差不超过10%。实验结果表明该模型有较好的仿真度,可用于汽车碰撞安全性能的研究。

关键词:机器视觉;遗传算法;Hybrid III 50th

中图分类号:U467.14 文献标志码:A doi:10.37188/CO.2023-0005

Design and simulation of the dummy thoracic finite element model based on machine vision

LIU Shuang¹, CHEN Li-xin², ZHANG Jun-dong², SHA Lu-ming², YU Zheng-lei^{2*}, XU Tao³, ZHANG Qi⁴

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Key Laboratory of Bionic Engineering of Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China;*

3. *School of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China;*

4. *College of Mechanical and Electric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)*

* *Corresponding author, E-mail: zlyu@jlu.edu.cn*

Abstract: This paper focuses on the field of automobile passive safety in my country. By scanning the Hybrid III 50th automobile crash dummy, a finite element simulation model of the dummy chest is constructed. The genetic algorithm is used to optimize the parameters. After optimization, all the indicators of the calibration test meet the requirements of the regulations. The simulation results are consistent with the experimental test results, and the error is less than 5%. Then we put the finite element dummy model containing the chest model into the vehicle system for frontal collision simulation analysis. The results show that the score of chest injury is 80%, and the error of the simulation results is less than 10% compared with the test results.

收稿日期:2023-01-01; 修订日期:2023-01-25

The model has a good degree of simulation and can be used for the study of vehicle crash safety performance.

Key words: machine vision; genetic algorithm; Hybrid III 50th

1 引言

随着我国工业化进程的加速,汽车产业有了突飞猛进的发展。截止到 2019 年底,全国汽车保有量达到 2.6 亿辆^[1]。由于汽车数量的增加,交通事故也在逐年增加,这对人们的生命安全和财产造成极大威胁。在所有的碰撞损伤中,胸部损伤的发生率高达 45%,是造成死亡和伤残的主要原因之一。为此,研究胸部的生物力学反应,降低胸部损伤事故的发生率是非常必要的。

从解剖学角度来看,胸部在受到外力冲击时通过位移来保护胸部器官,但当冲击力超过人体胸部所承受的极限时就会产生不同程度的损伤。汽车碰撞中胸部受到的损伤大多是钝性冲击,主要包括压缩、黏性载荷和体内器官的惯性载荷 3 种损伤机理^[2]。相关人员通过测量胸部的加速度、位移等信息,制定了相应的加速度准则^[3-4]、力准则^[5]、压缩准则^[6]和粘性准则^[7],以此来评估汽车碰撞后乘员的人体损伤。

在汽车研发过程中,通常需要进行汽车碰撞试验以评估汽车的被动安全性能。而汽车碰撞实验中,通常用假人代替真人来测试碰撞过程中的受伤害程度,并以此为依据对汽车进行评级。1949 年,美国研发了世界上的第一个假人,主要应用于军用飞机飞行员逃生测试^[8]。1971 开始,美国通用公司先后开发了 Hybrid I、Hybrid II 和 Hybrid III 型假人^[9-11],Hybrid III 型假人在 Hybrid II 的基础上对关键部位进行改进,安装了更多的传感器,使得数据提取更加准确,是目前汽车正碰中使用最广泛的实体假人。

然而,由于实体假人造价高昂,而汽车碰撞安全性试验是破坏性试验,试验成本较高。计算机技术的飞速发展使得汽车领域有了巨大的进步,利用计算机仿真分析法可以大大地减少样品及样车的试制和试验次数,由此极大地减少了设计和研发经费,降低了研发周期。然而,其要求汽车碰撞假人有限元模型需要模拟各种工况下的人体

各部位响应数据,给出详细的人体损伤特性分析^[12]。肖森等^[13]通过计算机仿真方法研究了正面碰撞中安全带高度位置、安全带角度和碰撞速度对乘员胸部损伤的影响,为约束系统的优化提供参考。邓世宽等^[14]通过构建后排女性仿真假人模型,得出假人胸部得分偏低的原因,为新车型的开发设计提供经验。由此可知,计算机仿真方法已经成为汽车碰撞假人研究的有效工具。

由于汽车碰撞模拟设备长期被国外垄断,极大限制了我国汽车安全研究的开展^[15]。因此,自主研究假人结构和材料,对实体假人的开发设计寻找方向和优化数据尤为重要。机器视觉可以通过机器学习将环境中的三维物体的位置、形状和运动等信息进行描述、识别等,具有点云数据稠密、精度高、稳定性高等优点,近年来在汽车、航天等领域应用广泛^[16-17],是可靠性高的检测方法。

本文利用 Maxwell 模型模拟胸部的内脏软组织器官,同时通过机器视觉的方法扫描实体假人胸部构件,建立胸部有限元模型,利用计算机仿真技术与实体标定试验对比验证模型的准确性;同时将有限元假人模型放入整车约束系统,进行正面碰撞试验,以 C-NCAP 法规进一步检验该胸部模型的合理性,这对国内假人的开发、解决汽车被动安全的研究具有重要的意义。

2 胸部模型建立及验证

2.1 汽车碰撞假人有限元模型的建立

2.1.1 Hybrid III 50th 假人结构特点

本文以 Hybrid III 50th 实体假人为基础构建有限元假人模型。Hybrid III 50th 胸部是根据真实人体胸部结构所设计(如图 1 所示)。该模型主要由呈对称分布的六根肋骨组成,其分布间距相同,材料为带有聚合物基阻尼材料的弹簧钢。肋骨前端与胸板相连,后端固定在脊柱上,肋骨向外由泡沫材料构成,起到保护胸部内部结构的作用。皮肤材料为乙烯树脂,包裹在泡沫材料外层;胸板与

脊柱之间安装了一个胸部位移传感器-压式传感器, 用来测量胸部的变形量。

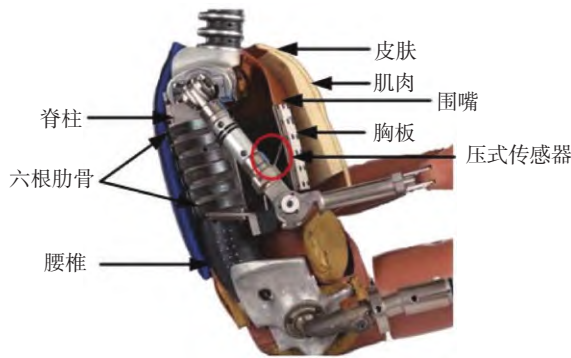


图 1 Hybrid III 50th 男性假人胸部结构图

Fig. 1 Structure of Hybrid III 50th male dummy chest

2.1.2 汽车碰撞假人胸部模型的建立

利用机器视觉方法建立假人模型可以较好地还原假人的表面几何特征。本文所使用的机器视觉假人模型几何参数采集系统基于双目结构光三维重建原理开发, 如图 2 所示。系统由高速相机、图像采集卡、计算机、数据处理软件以及数据输出装置等部分组成。利用该系统本文将对 Hybrid III 50th 胸部的几何尺寸进行测量, 预期尺寸测量精度优于 0.05 mm。

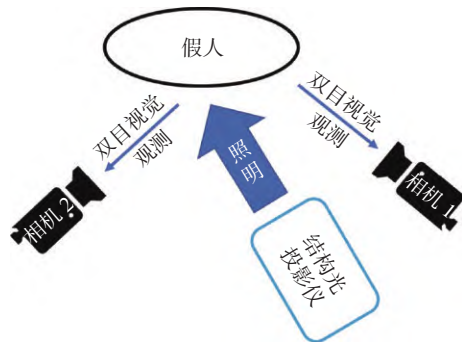


图 2 基于机器视觉原理的假人模型几何参数采集系统

Fig. 2 Geometric parameter acquisition system for dummy model based on machine vision

为减少三维重建的工作量, 对于胸板和脊柱等形状较为规则的零件, 使用三维制图软件直接进行建模。而对于皮肤、肋骨等不规则的部分, 则先利用机器视觉方法得到其几何结构点云数据, 再采用 CATIA 软件进行逆向建模, 获得不规则零件的三维模型。像心脏、肝脾等内脏组织, 在生物力学实验中表现出不可压缩性, 可等效为阻尼作用。通过上述方法建立的假人胸部三维模型如图 3 所示。

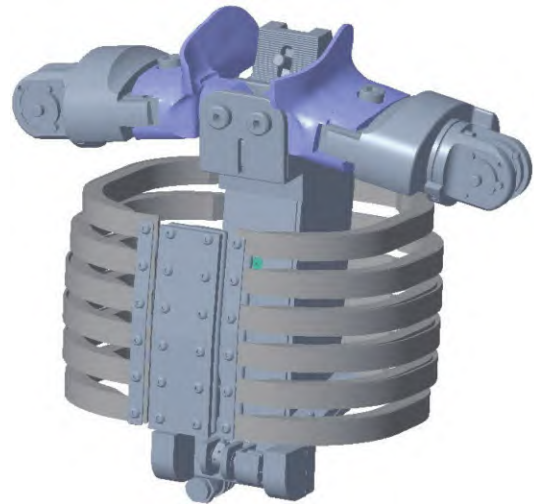


图 3 假人胸内部几何模型装配图

Fig. 3 Assembly drawing of geometric model of dummy interior chest

为保证测量的一致性, 上述机器视觉采集系统也被用于假人碰撞过程中的变形量获取中。为实现在 100 ms 左右的碰撞响应时间内, 对假人变形情况进行高时间分辨率的监测, 测量系统中的相机选用了帧率高于 1000 fps 的高速相机, 以实现实时检测。

2.1.3 材料选取

有限元模型根据实际材料的特性进行材料的赋予, 以在仿真过程中还原真实的力学特性, 因此模型的单元类型和材料参数要具有等效性。本文有限元分析使用 Hypermesh 进行有限元模型网格划分等前处理, 使用 LS-DYNA 进行后处理计算。

为实现对不同材料的有限元仿真, 本文使用弹性材料仿真胸部的软骨、椎间盘、皮肤及肌肉软组织等弹性组织, 使用粘弹性材料仿真假人胸部内的泡沫材料, 使用弹塑性材料仿真可能出现较大变形的肋骨, 使用刚性材料模拟不易发生破坏变形的脊柱椎体。为更好地模拟假人的力学特性, 使用不同的单元对不同组织进行仿真模拟, 假人整体的模型网格大多选用四节点 BT 积分壳单元, 皮肤层等薄层采用壳单元进行模拟, 形状规则的内部松软骨选用 8 节点六面体单面积分实体单元模拟。

基于生物学理论, 本文采用 Maxwell 模型对假人内部结构进行设计, 替代胸部内脏软组织的粘弹性作用。Maxwell 模型可以简化为一个弹性元件和一个阻尼元件串联, 所以在有限元方法中, Maxwell 模型可以看作一个带有阻尼特性的弹簧

单元,其沿胸部脊椎轴向方向呈对称分布(如图 4 所示)。弹簧单元两端分别与脊椎、质量块及肋骨采用共节点连接。

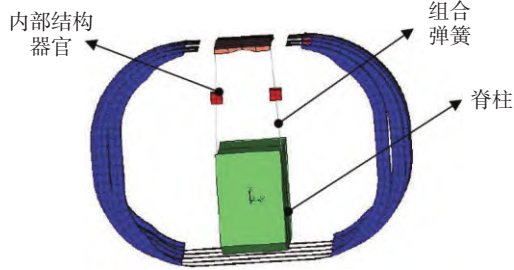


图 4 胸部内部结构器官示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the internal structure and organs of the chest

所有胸部有限元模型材料参数均参考 LSTC 公司开发的假人有限元模型,具体材料参数如表 1、表 2 和表 3 所示。

表 1 胸部模型部分材料参数

Tab. 1 Partial material parameters of chest model

参数	弹性材料 MAT1	弹塑性材料 MAT3	刚体材料 MAT20
弹性模量 E /GPa	0.5	205	205
泊松比 μ	0.30	0.31	0.31
屈服强度 σ /MPa	/	0.6	/
切线模量/GPa	/	0.5	/

表 2 胸部肋骨材料(弹性材料 MAT1) 参数

Tab. 2 Material parameters of thoracic rib (elastic material MAT1)

参数	参数值
体积模量(BULK)	0.33 GPa
短效剪切模量(G_0)	0.11 MPa
衰减常数(BETA)	0.15
长效剪切模量(G_1)	0.024 MPa

表 3 胸部泡沫材料 (MAT57) 参数

Tab. 3 Chest foam material (MAT57) parameters

参数	参数值
杨氏模量(E)	0.005 MPa
拉应力(TC)	0.1
滞后卸载系数(HU)	1.0
粘滞系数(DAMP)	0.1
衰减常数(BETA)	0.1

2.2 标定验证

假人在投入试验之前,必须要进行标定,以保证尽可能准确地模拟真人的受伤情况,从而对汽车的安全性能做出评价。

2.2.1 标定试验方法及要求

目前,我国正面碰撞试验中的胸部标定采用的是 NHTSA CFR Part 572 标准,假人胸部标定原理如图 5(a) 所示。摆锤为刚性圆柱体,其直径为 (152.4 ± 0.25) mm、圆角半径为 (12.7 ± 0.3) mm,重量(包括传感器系统)为 (23.36 ± 0.02) kg,且要求冲击锤与胸部接触面垂直平整。试验开始前,将假人颈部调整块的上下两端的“0”刻度线对齐。为确保假人的手臂水平,肋骨的横向和纵向都水平,骨盆角度为 $13^\circ \pm 2^\circ$ 。同时要保证假人整体的中心对称面和试验平台相垂直,摆锤的中心线与假人的第三根肋骨中心线以下 12.7 mm 相重合,试验速度为 (6.71 ± 0.12) m/s。

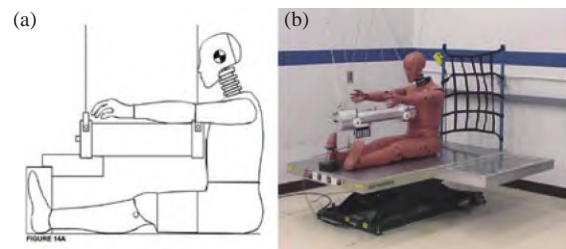


图 5 假人胸部标定试验(a)示意图^[18]及(b)准备图

Fig. 5 (a) Schematic diagram^[18] and (b) preparation diagram of dummy chest calibration test

2.2.2 胸部标定试验及结果对比分析

对 Hybrid III 50th 男性假人胸部进行胸部标定试验前,将假人在温度为 21 °C,湿度为 55% 的实验室放置 24 h。按照标准调整假人的姿态以及摆锤的位置,试验图如图 5(b) 所示。采用机器视觉得到试验过程中胸部的位移曲线和摆锤力曲线。首先对假人胸部坐标进行标定,在胸部标定过程中,利用高速摄像机采集图像并输入到计算机中。计算机的图像处理程序会提取假人胸部轮廓,并得到对应坐标,从而得到假人在每个时刻的位移和速度等参数。

建立 Hybrid III 50th 男性假人其他部位的有限元模型,并完成对头颈部、膝部的标定。根据标定试验的要求,在 Hypermesh 中对假人姿态进行调整,建立刚性试验台、摆锤等部件。设置皮肤与摆锤之间的接触为面面接触,模型部件之间

采用自接触,对各部件建立约束并赋予工况。根据获得的试验数据,将摆锤的初速度设为 6.68 m/s。设置完成后提交 LS-DYNA 进行运算。假人模型标定试验如图 6 所示。摆锤未与胸部接触的一端的中心点作为输出点,用于采集摆锤加速度,从而得出所需要的摆锤力。

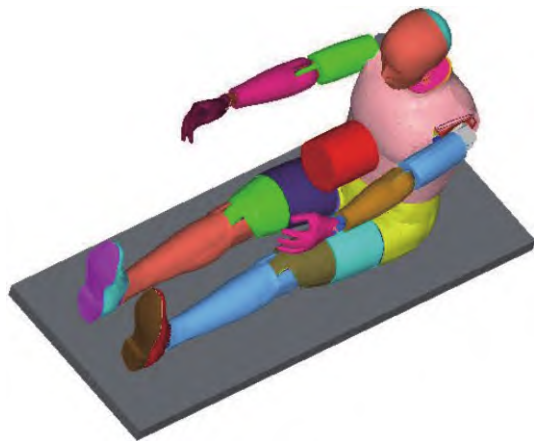


图 6 胸部标定试验有限元模型

Fig. 6 Finite element model of chest calibration test

图 7 为胸部位移-时间曲线。从图 7 可以看出,在碰撞的 0~25 ms,仿真与模拟的胸部位移变化量基本一致,并在 25 ms 时位移量达到最大值,但两者的位移最大值略有出入。根据表 4 可知,仿真的位移峰值为 61.117 mm,试验峰值为 65.402 mm,法规要求两者间的差值为 (63.5 ~ 72.6) mm,本文位移峰值的试验与模拟的误差达到 6.55%,且模拟仿真的胸部位移峰值不满足法规要求,比要求的值要小,说明模型的刚度过大,不容易被压缩。25 ms 之后胸部慢慢回弹,仿真结果与试验结果相吻合。

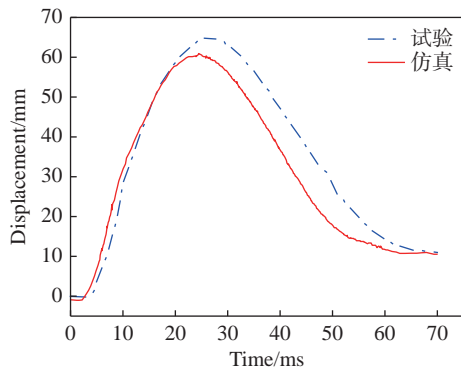


图 7 胸部位移-时间曲线

Fig. 7 Displacement-time curve of chest

表 4 胸部标定试验与仿真结果
Tab. 4 Calibration test and simulation results of chest

类型	位移峰值(mm)	摆锤力峰值(kN)	滞后率(%)
要求	63.5 ~ 72.6	5.16 ~ 5.89	69 ~ 85
试验	65.402	5.788	73.98
仿真	61.117	5.865	70
误差	-6.55	1.33	-5.37

图 8 为胸部标定摆锤力-时间的曲线,从图中可以看出,冲击锤接触胸部后,速度迅速上升,在整个冲击过程中,仿真与试验值基本一致。由表 4 可知,仿真峰值力为 5.865 kN,试验峰值力为 5.788 kN,法规要求误差为(5.16 ~ 5.89) kN,二者的误差为 1.33%,符合要求,且摆锤力峰值也符合法规要求。在碰撞初期(1.5 ms)左右,摆锤力有一个小的峰值。由于胸部皮肤与胸板之间有一定的缝隙,而皮肤材料又相对较软,导致仿真的摆锤峰值力出现时间略早于试验值。

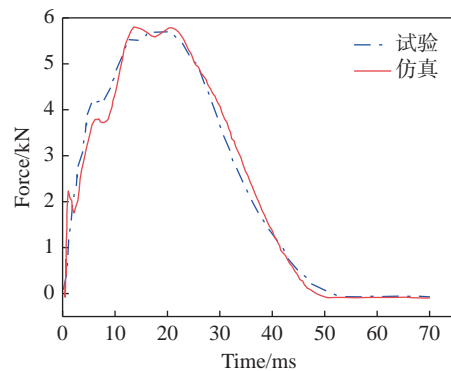


图 8 摆锤力-时间曲线

Fig. 8 Pendulum force-time curve

图 9 为胸部滞后率曲线,这个曲线反应的是

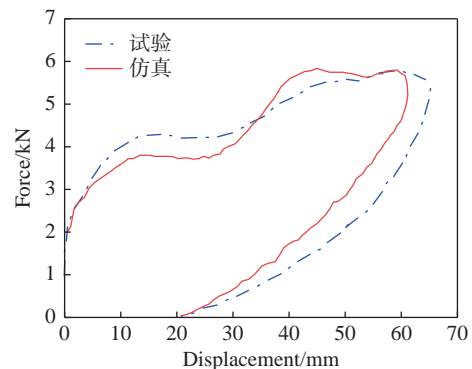


图 9 胸部滞后率曲线

Fig. 9 Chest lag rate curve

位移量与摆锤力的关系。从图 9 中可以看出实验结果与仿真结果基本吻合。试验滞后率为 73.98%，仿真值为 70%，法规值为 69%~85%，试验结果与仿真结果的误差值为 5.37%，符合法规要求。综上所述，仿真标定试验中，胸部位移曲线、摆锤力曲线和滞后率曲线与试验曲线的整体变化趋势近似，峰值出现的时刻也大致重合，说明本文建立的胸部模型响应与实体假人胸部响应相一致，胸部模型具有一定的有效性。但仿真结果中位移峰值不满足法规要求，在后续需对其进行优化改进。

2.3 胸部模型的优化设计

在汽车碰撞过程中，胸部的损伤情况与组织结构材料关系密切。对胸部模型的材料参数进行灵敏度分析，发现肋骨材料 MAT6 的短效剪切模量 G_0 、长效剪切模量 G_1 、衰减系数 β 和皮肤肌肉材料 MAT1 的杨氏模量 E 对胸部的伤害值比较敏感。

因此，选择以上 4 个参数作为优化设计变量 (X_1, X_2, X_3, X_4)，胸部摆锤力峰值 F_{\max} 和胸部位移量峰值 D_{\max} 为优化的目标参数。 W 为 F_{\max} 和 D_{\max} 与实体假人标定结果的误差绝对值之和

$$W = \left| \frac{D_{\max} - D_0}{D_0} \right| + \left| \frac{F_{\max} - F_0}{F_0} \right| \quad (1)$$

本文建立的优化问题的数学模型如下

$$\min -W \quad (2)$$

$$st \begin{cases} F_0 = 5.778 \\ D_0 = 65.402 \\ x_i \in [x_i^L, x_i^U] \end{cases}$$

其中： F_0 为实体假人胸部标定的摆锤冲击力， D_0 为实体假人胸部标定的胸部位移量， x_i^L 为设计变量 x_i 的取值上限， x_i^U 为设计变量 x_i 取值下限。设计变量 $x_i (i=1, 2, 3, 4)$ 的变化取值范围为：

$$\begin{cases} 0.077 \leq x_1 \leq 0.143 \\ 0.020 \leq x_2 \leq 0.030 \\ 0.12 \leq x_3 \leq 0.18 \\ 0.3 \leq x_4 \leq 0.7 \end{cases} \quad (3)$$

本次设计变量有 4 个，每个变量设置了 5 个因素水平，回归正交试验中选择合适的正交试验表 $L_{25}(4^5)$ 。对假人胸部材料参数进行设置，组建 25 个胸部标定模型。利用 LS-DYNA 软件进行求解计算，分别得到 25 个样本的胸部位移-时间曲线，胸部摆锤力-时间曲线和胸部滞后率曲线。提取计算结果中的目标响应值。采用最小二乘法求出 4 个设计变量与 D_{\max} 、 F_{\max} 之间的响应面函数。

$$D_{\max} = 94.058 - 58.157x_1 - 186.68x_2 - 14.848x_3 - 0.01579x_4 + 11.902x_1^2 + 48.111x_1x_2 + 93.533x_1x_3 - 0.01392x_1x_4 + 591.57x_2^2 + 98.441x_2x_3 + 22.448x_3^2 - 0.13126x_3x_4 + 0.00007x_4^2 \quad (4)$$

$$F_{\max} = 3.8945 + 3.7415x_1 - 5.8168x_2 + 2.866x_3 + 0.00272x_4 - 0.6377x_1^2 + 3.2597x_1x_2 - 9.3419x_1x_3 - 0.00164x_1x_4 + 46.616x_2^2 + 4.3084x_2x_3 - 5.7379x_3^2 + 0.010481x_3x_4 - 0.00001x_4^2 \quad (5)$$

通过计算修正系数发现， D_{\max} 和 F_{\max} 的响应面函数拟合精度符合要求，同时决定系数 R^2 优于 0.9，利用此响应面函数进行优化设计是可行的。

通过拟合的响应面公式和优化数学模型，利用遗传算法进行优化计算，在迭代了 65 次后， D_{\max} 和 F_{\max} 与实测结果差值的相对变化率小于 0.1%，认为优化收敛并获得了最优解。根据所得的最优解的参数组合，修正胸部的材料参数，并进行胸部标定试验，得到的结果与原参数结果、试验标定结果进行对比，如表 5 所示。

表 5 优化结果对比

Tab. 5 Comparison of optimization results

	x_1 (MPa)	x_2 (Mpa)	x_3	x_4 (Mpa)	D_{\max} (mm)	F_{\max} (kN)	滞后率(%)
原参数	0.11	0.253	0.15	0.5	61.117	5.865	70.00
优化后	0.087	0.234	0.172	0.439	64.401	5.615	71.13
标定要求	/	/	/	/	63.5 ~ 72.6	5.16 ~ 5.89	69 ~ 85
试验	/	/	/	/	65.402	5.788	73.98
误差(%)	/	/	/	/	-1.5	-2.9	-3.85

对经过参数优化后的胸部模型进行胸部标定试验后,胸部位移峰值、摆锤力峰值和滞后率均满足标定要求,胸部的位移量、滞后率与试验结果的相对误差有所下降,误差都控制在5%以内,提高了胸部有限元模型的准确性。

3 整车模拟

汽车碰撞试验是检验假人有效性的一种方法,优化设计后得到的胸部有限元模型符合胸部的标定要求,表明胸部有限元模型通过了初步的检测验证。通过汽车碰撞后的输出数据可以验证假人能否准确反应乘员在碰撞过程中的损伤情况,进一步验证模型的准确性。

3.1 台车模拟试验

根据C-NCAP法规,正面100%重叠刚性壁障碰撞试验内容为,车辆以(50+1) km/h的速度冲击不动的刚性壁障,要求碰撞重合度为100%。建立如图10所示的整车有限元模型并进行仿真分析。

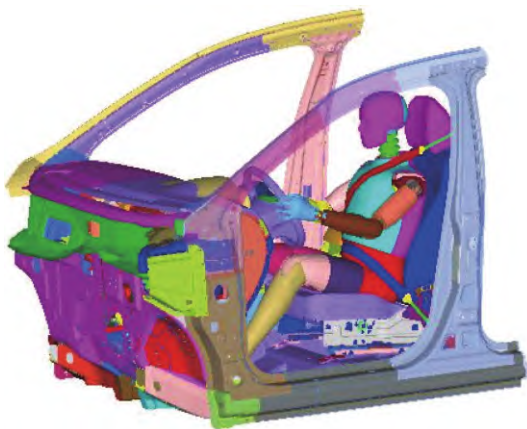


图10 台车正碰有限元模型

Fig. 10 Finite element model of trolley forward collision

(1)安全带有有限元模型建立

安全带由织带、滑环、锁扣和带有预紧力装置的卷收器组成。织带用1D seatbelt单元与2D网格单元相结合的方式模拟,2D单元与假人胸腹部相接触,安全带与假人之间设置一定的摩擦系数。滑环与卷收器功能通过LS-DYNA内置的关键字实现。

(2)座椅有限元模型建立

座椅的有限元模型主要由座椅骨架、坐垫和靠背3部分组成。分别使用壳单元、六面体单元和四面体单元进行模拟。由于重力作用,座椅座

垫和靠背会产生凹陷,为了更好地模拟真实的压痕状况,需要对座椅进行预压缩,使假人对座椅产生预应力,坐垫和靠背材料为具有粘弹性的泡沫材料。

(3)安全气囊有限元模型建立

安全气囊主要防止人体的头颈部与车内饰发生碰撞,有限元模型的组成部分有气囊织物、拉带和盒子等。气囊采用壳单元进行模拟,材料为MAT34号。拉带采用弹簧单元进行模拟,气体发生器的性能参数通过LS-DYNA的气囊关键字定义。

建立好内部带有安全气囊、安全带等的车体模型后,将有限元假人模型放入车体中对其姿态进行调整。假人与座椅之间之间的接触定义为面面接触,其他各部件定义为自接触。为避免运算过程中出现负体积现象,在各部件实体单元外层生成MAT-NULL的壳单元。

3.2 计算结果对比

图11是有限元假人模型在不同时刻的动力学响应结果。从图中可以看出,碰撞过程中假人的运动姿态未出现异常,与实体假人在碰撞过程中的运动姿态类似。运动学响应基本分为3个阶段,在25 ms时,气囊逐渐展开,位于充气状态并开始接触假人胸部,随着碰撞的进一步发生,乘员身体前移,接触面积逐渐增大。时间位于50 ms时,由于安全带等约束系统限制人体向前移动,同

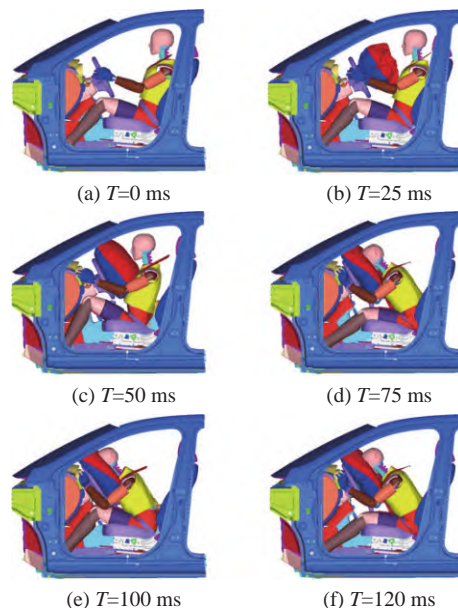


图11 不同时间下台车碰撞仿真结果

Fig. 11 Simulation results of off-stage vehicle collision at different times

时气囊完全展开,开始与假人下颚接触,主要对头颈部及上胸部起到缓冲作用。120 ms 的时候,假人处于与气囊接触的回弹阶段。

图 12 和图 13 分别为胸部的合成加速度和胸部位移曲线,可以看出仿真曲线的形状、峰值力与实车试验基本一致,最大峰值压缩量出现时刻均在 70 ms 左右。在 0~20 ms 时,车体与假人未发生接触,胸部压缩量近似为零;随着碰撞的进行,车体先于假人皮肤发生接触,受力开始产生形变,随之是刚度较大的胸骨以及肋骨,胸部的合成加速度产生峰值,胸部产生明显压缩;最后是假人与车体接触的回弹时期,加速度和压缩量逐渐降

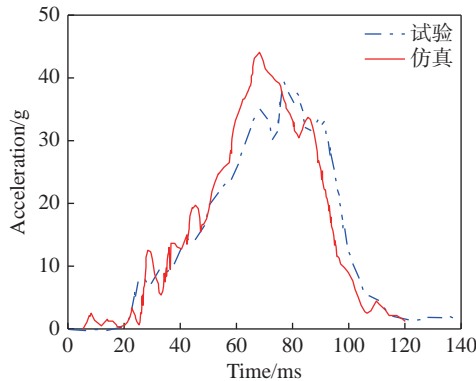


图 12 胸部合成加速度

Fig. 12 Chest composite acceleration

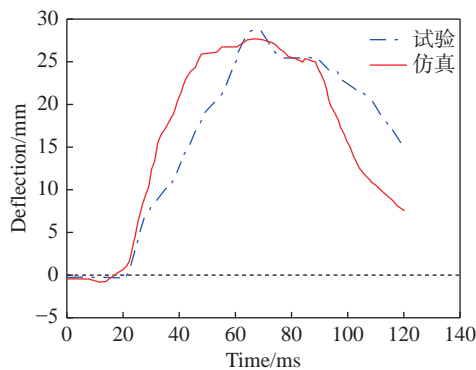


图 13 胸部压缩量

Fig. 13 Chest compression

低。具体数据如表 6 所示,发现胸部加速度为 41.23 g,胸部压缩量为 28.16 mm,数值均介于 C-NCAP 要求的高低性能之间。仿真与试验误差不超过 10%,胸部伤害得分值为 80%,说明该模型有较好的仿真度,可以用于汽车碰撞安全性能研究。

表 6 实车试验和仿真假人胸部伤害指标对比

Tab. 6 Comparison of chest injury index between real vehicle test and dummy

损伤指标	胸部加速度 $C_{3ms}(g)$	胸部压缩量ThPC(mm)
性能限值	38 ~ 60	22 ~ 50
试验值	38.47	29.21
仿真值	42.13	28.16
误差	9.51%	-3.59%
得分率	81.2%	78%

4 结 论

本文基于 Hybrid III 50th 实体假人,提出 Maxwell 模型模拟胸部的内脏软组织器官,建立有限元仿真胸部模型,对其进行仿真标定和台车碰撞模拟测试。具体结论如下:

(1) 仿真胸部位移曲线、摆锤力曲线和滞后率曲线与试验结果曲线的整体变化趋势近似,峰值出现时刻也大致重合,各指标的误差值不超过 7%,但胸部位移峰值不满足法规要求,需进行优化。

(2) 对优化后的胸部模型进行标定试验,得到的标定结果均符合法规标定要求,且误差不超过 5%,提高了有限元胸部模型的准确性。

(3) 基于台车试验,对优化后的胸部模型进行约束系统环境验证,仿真结果与试验结果的误差不超过 10%,胸部伤害得分值为 80%,说明该模型有较好的仿真度,可用于正面碰撞假人和汽车碰撞安全的研究中。

参考文献:

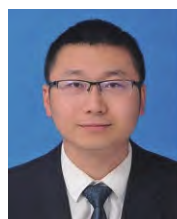
- [1] 中国汽车技术研究中心有限公司. 中国汽车安全发展报告 (2020)[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2020. China Automotive Technology and Research Center. *Annual Report on Automobile Safety in China (2020)* [M]. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2020. (in Chinese)
- [2] 凯-乌韦·施密特, 彼得 F. 尼德雷尔, 马库斯 H. 穆塞尔, 等. 汽车与运动损伤生物力学[M]. 曹立波, 译. 北京: 机械工业出版社, 2012. SCHMITT K U, NIEDERER P F, MUSER M H, et al.. *Trauma Biomechanics: Accidental Injury in Traffic and*

- Sports*[M]. CAO L B, trans. Beijing: China Machine Press, 2012. (in Chinese)
- [3] HAMMON W M. Impact injury and crash protection[J]. *Military Medicine*, 1970, 135(7): 616.
- [4] MERTZ H J, IRWIN A L, MELVIN J W, *et al.*. Size, weight and biomechanical impact response requirements for adult size small female and large male dummies[C]. *SAE International Congress and Exposition*, SAE International, 1989: 133-144.
- [5] PATRICK L M, MERTZ H J, KROELL C K. Cadaver knee, chest and head impact loads[C]. *11th Stapp Car Crash Conference*, SAE International, 1967: 2932-2940.
- [6] KROELL C K, SCHNEIDER D C, NAHUM A M. Impact tolerance and response of the human thorax II[C]. *18th Stapp Car Crash Conference*, SAE International, 1974: 383-457.
- [7] RIDELLA S A, VIANO D C. Determining tolerance to compression and viscous injury in frontal and lateral impacts[C]. *Stapp Car Crash Conference*, SAE International, 1990: 349-356.
- [8] 陈嘉鑫. 基于中国体征的正碰假人仿真研究与应用[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
CHEN J X. Research on simulation of frontal impact dummy with Chinese physical sign and its application[D]. Changchun: Jilin University, 2021. (in Chinese)
- [9] FOSTER J K, KORTGE J O, WOLANIN M J. Hybrid III-A biomechanically-based crash test dummy[C]. *21st Stapp Car Crash Conference*, SAE International, 1977.
- [10] XU T, SHENG X M, ZHANG T Y, *et al.*. Development and validation of dummies and human models used in crash test[J]. *Applied Bionics and Biomechanics*, 2018, 2018: 3832850.
- [11] PHILIPPENS M, NIEBOER J J, WISMANS J. An advanced database of the 50th percentile hybrid III dummy[C]. *International Congress & Exposition*, SAE International, 1991: 121-129.
- [12] RUAN J, EL-JAWAHRI R, CHAI L, *et al.*. Prediction and analysis of human thoracic impact responses and injuries in cadaver impacts using a full human body finite element model[C]. *47th Stapp Car Crash Conference*, SAE International, 2003: 299-321.
- [13] 肖森, 杨济匡, 肖志, 等. 基于正面碰撞实验的胸部损伤有限元分析[J]. *力学学报*, 2017, 49(1): 191-201.
XIAO S, YANG J K, XIAO ZH, *et al.*. Analysis of chest injury in frontal impact via finite element modelling based on biomechanical experiment[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2017, 49(1): 191-201. (in Chinese)
- [14] 邓世宽, 李盼东, 王洪川, 等. 汽车正碰后排假人胸压伤害原因分析和优化[J]. *汽车工程师*, 2019(11): 27-30.
DENG SH K, LI P D, WANG H CH, *et al.*. Cause analysis and optimization of thoracic pressure injury of rear dummy in frontal crash[J]. *Automotive Engineer*, 2019(11): 27-30. (in Chinese)
- [15] 刘志新, 武永强, 马伟杰. 中国体征碰撞测试假人开发路径研究[J]. *中国工程科学*, 2019, 21(3): 103-107.
LIU ZH X, WU Y Q, MA W J. Development path of anthropomorphic test device with Chinese physical signs[J]. *Strategic Study of CAE*, 2019, 21(3): 103-107. (in Chinese)
- [16] 赵长福, 丁红昌, 曹国华, 等. 图像辅助汽车制动主缸补偿孔法线测量[J]. *中国光学*, 2021, 14(5): 1212-1223.
ZHAO CH F, DING H CH, CAO G H, *et al.*. Image aided measurement of the automotive brake master cylinder compensation hole normal line[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(5): 1212-1223. (in Chinese)
- [17] 姜涛, 张桂林, 高俊鹏. 面向机器视觉检测的缸体横孔照明[J]. *中国光学*, 2020, 13(6): 1285-1292.
JIANG T, ZHANG G L, GAO J P. Illumination of a cylinder block transverse hole for machine vision inspection[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(6): 1285-1292. (in Chinese)
- [18] 中国汽车技术研究中心有限公司. 中国新车评价规程 (C-NCAP) 2021 年版[S]. 天津: 中国汽车技术研究中心有限公司, 2021.
China Automotive Technology and Research Center. China-new car assessment programme, version 2021[S]. Tianjin: China Automotive Technology and Research Center, 2021. (in Chinese)

作者简介:



刘爽(1982—),男,吉林长春人,高级工程师,工学硕士,2009年于吉林大学获得硕士学位,主要从事机械工程及自动化。E-mail: liushuang2002@163.com



于征磊(1984—),男,吉林长春人,教授,博导,主要从事仿生结构设计及增材制造。E-mail: zlyu@jlu.edu.cn