

汽车座椅碰撞过程数值模拟分析

邹正宽

(湖南赛孚汽车科技股份有限公司 湖南 长沙 410019)

摘要: 在车辆正面碰撞中, 汽车座椅是乘客安全的重要保障。针对座椅的安全问题是当下汽车碰撞过程中最为关注的乘客安全问题之一, 其主要研究手段为汽车碰撞试验和计算机仿真。目前, 我国对汽车座椅的安全性研究还处于起步阶段, 汽车正面碰撞的数值仿真分析还不完善, 导致汽车座椅零件的强度计算结果与现实有较大的偏差。所以, 建立一个较为精确的仿真模型来分析汽车座椅碰撞过程的安全可靠性, 对于促进我国汽车座椅产业的发展, 有着十分重要的现实意义。本文以我国座椅制造商研制的汽车座椅为例, 针对汽车座椅的安全性能进行了有限元分析。

关键词: 汽车座椅; 正面碰撞; 数值模拟; 有限元

0 引言

汽车座椅是整个汽车被动安全乘员约束系统中最重要部件之一。随着汽车保有量的增加, 汽车企业生产规模的扩大, 汽车座椅产业也在不断地发展和改善。2020 年, 全国共生产 3040.86 万台汽车座椅, 较 2019 年增加 3.56%, 整体销量达到 850 亿元。从这一点可以看出, 我国汽车座椅产业的产值在国民经济中占有一定的比例。汽车座椅设计的优劣, 对乘坐舒适性和乘员安全性都有很大的影响, 因而对座椅的安全设计提出了更高的要求。座椅的安全性是指在发生车祸时, 座椅能够对乘客起到一定的保护作用, 确保乘客不会从座位上脱落, 也不会因为座椅部件的变形而受伤。座椅是汽车安全控制的重要组成部分, 它对驾乘人员在发生交通事故时具有重要的防护作用。为此, 本文对汽车座椅的控制系统和调整系统进行了仿真, 以便于有关技术人员对其进行进一步的优化。

1 座椅碰撞安全性国内外研究现状

现如今, 世界各国已开发出各种小型碰撞测试系统, 按照结构形式可以分为钢索式、机械式和发射式碰撞测试系统, 另外还有液压缓冲、塑料管、钢板吸能器、回弹编程控制器等各种能量吸收设备, 适合各种车辆的碰撞测试。此外, 国外在后排座椅碰撞的数值仿真方面也有很大的进步。首先是假人模拟仿真技术, 多刚体动态仿真手段被广泛采用, 能够较好地模拟实际碰撞时人体的动态反应; 其次是接触算法, 座椅在进行正面碰撞时涉及很多的接触。在碰撞之前, 必须先确定假人之间的接触, 然后再进行座椅内部的零件的接触, 此外在进行碰撞后又会诞生出许多新的接触。

与国外的汽车座椅研究现状不同, 我国在汽车领域展开研究的时间比较短, 在安全性方面的研究还处于起步阶段, 对座椅的研究还很少, 有关的法律和标准也没有足够完善。座椅开发尚处在起步阶段, 也反映在座椅安全的数值仿真分析中。目前, 一些座椅制造商对座椅强度、刚度和碰撞进行了模拟, 但是结果却与实验数据有较大的偏差, 且计算过程耗时较长。总之, 国内对汽车座椅的安全问题相关研究尚有限, 对座椅正面碰撞实验和数值仿真的研究还不够深入, 因此有必要从国外的先进技术中总结出一种安全、舒适的座椅设计方案和开发出一套有效的数值模拟仿真分析系统。

2 座椅有限元模型建立及验证

2.1 座椅结构特征分析

汽车座椅的结构由许多零件组成, 主要有头枕、靠背、坐垫、座椅骨架、调角器、滑道等。为了满足乘客的乘坐舒适性需求, 座椅的头枕、靠背以及坐垫都采用柔软的泡沫材料制成, 以减轻乘坐时的疲劳。而座椅的框架则是由金属构成的, 作为乘客的支撑。调整机构如调角器、滑道等, 可以调整座位的前后位置, 倾斜角度或高度。汽车座椅结构如图 1 所示。

座椅骨架是汽车座椅的主体结构, 它是将各部件连接起来的主要框架。汽车座椅的骨架通常是由冲压板件和金属管件焊接而成, 通过焊点螺栓或调整机构与车体相连。骨架结构在汽车座椅装配中的比重为 60% ~ 70%。所以, 对前排座椅的正面碰撞进行数值仿真和优化设计, 必须从座椅的骨架结构出发。

2.2 有限元分析软件选择

目前, 有限元分析方法已日趋成熟, 大多数项目在实际应用之前, 必须先进行有限元分析, 然后才能进行

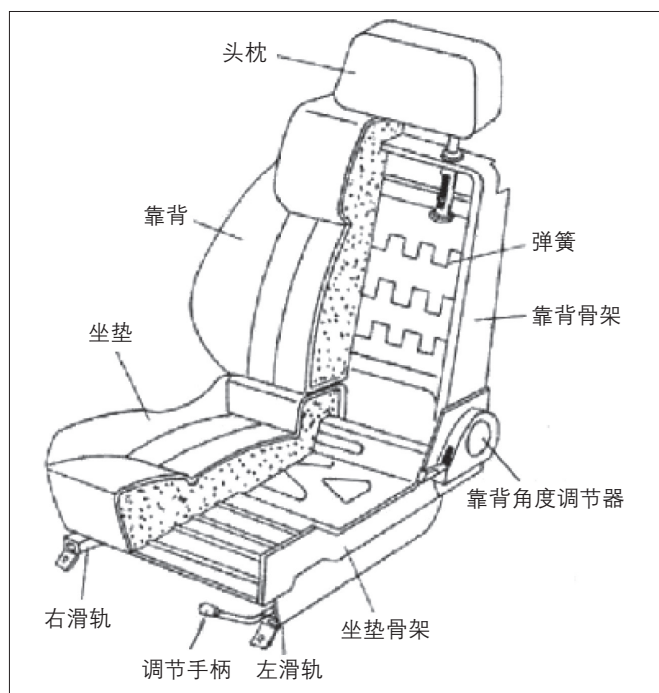


图 1 汽车座椅结构示意图

实际的工程测试。因此，大量的有限元分析软件应运而生，如 ANSYS、LS-DYNA、Abaqus 等。LS-DYNA 软件具有结构分析、电磁分析、流场分析等功能，在某些工作环境中采用这种软件进行分析将更为方便。尽管目前市面上的有限元分析软件种类繁多，但其基本思路大体相通，因此大多数的有限元分析软件都具有互通性。

本文选取了 Hypermesh 和 ANSYS Workbench 两种常用的有限元分析前处理软件，对汽车座椅各部件进行了网格化处理。通过比较，得出了 Hypermesh 与 ANSYS Workbench 在分割大尺寸零件时均能获得良好的网格品质。但 Hypermesh 对非规则零件进行分割，得到了较高的精确度和较好的品质。图 2 显示了两种软件对座椅部件进行网格划分的对比。从图中可以看出，Hypermesh 的网格大小是统一的，大多数是四边形的，

而 ANSYS Workbench 的网格尺寸随着产品的突起处的不同而有很大的差异，且有许多三角形网格元素，使得应力计算和形状参数的计算不精确。座椅的部件比较复杂，有些部件具有很小的突起，采用 Hypermesh 分割网格可以将座椅网格进行有效的离散，因而选取 Hypermesh 软件对座椅进行网格分割更好。

2.3 座椅有限元模型的建立

在采用 Hypermesh 软件对座椅进行建模时，必须通过 CAD 软件来勾勒出座椅的轮廓，以此为基础，利用 SolidWorks 等软件进行 CAD 建模，首先要将 CAD 模型转换成 STP，然后再引入 Hypermesh，这样可以减少几何模型的误差，并能保持零件名称和装配关系相互对应。座椅的 CAD 模型如图 3 所示。

在座椅 CAD 建模成功后，首先要检查和剔除对仿真结果没有太大影响的零部件。座椅 CAD 中包含了许多的电机、电线、滚珠、弹簧等部件，它们对有限元计算结果的影响非常小，因此予以删除或合并。座位部件的螺栓采用 Rigid 单元进行有限元模拟，所以可以去掉螺栓部件。其次，对部件的厚度进行检验，如果部件的厚度太大（尺寸超过 5mm），则用一个实体部件（Solid 部件）来模拟。对于冲压件、空心件和板壳件（厚度低于 5mm），采用壳单元（shell 单元）进行建模，以改善模型的计算精确度和节省计算时长。

3 座椅正面碰撞有限元模型建立

3.1 假人有限元模型的建立

假人是在座椅碰撞实验中替代驾驶员进行损伤力学测试的，所以仿真模型中必须放置有限元假人模型，以实现对人体损伤的精确仿真。目前在汽车工业中使用最多的是 Hybrid III 系列假人，其中主要有 Hybrid III 5th 女性假人、Hybrid III 型 50th 男性假人和 Hybrid III 型 95th 男性假人。正面碰撞测试假人的身上各关键部位都装有传感器，可以检测正面撞击时各个位置的力、位移、加速度，并由计算机进行计算。

目前，大部分的有限单元法（Finite Element Method, FEM）公司都是以 Hybrid III 系列为对象进行有限元仿真，所构建的仿真假人模型具有相同的传感功能，可以方便地进行仿真分析。本文利用 LSTC 公司开发的仿

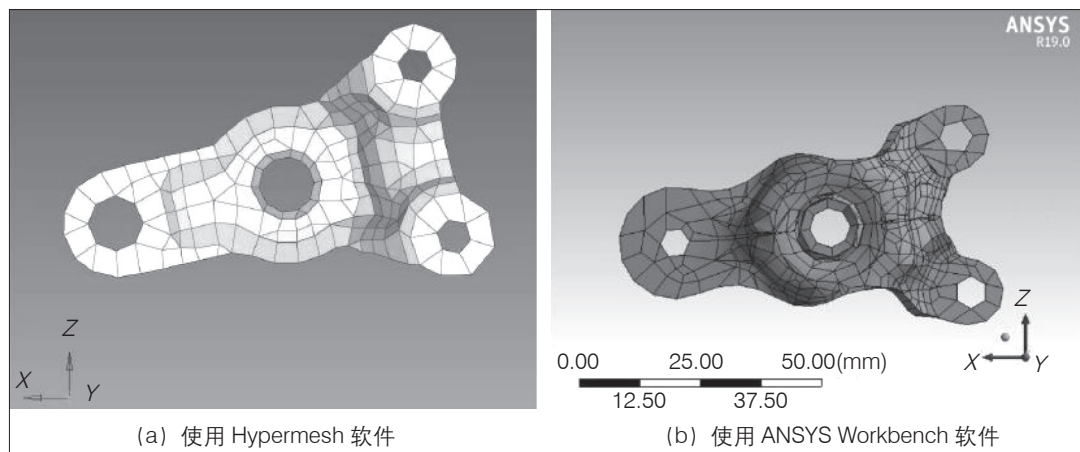


图 2 两种软件对座椅部件进行网格划分的对比图



图3 座椅的 CAD 模型

真模型, 对其进行了仿真分析。由于不同座位的形状和相对位置的差异, 需要调整假人模型的位置和姿势。利用 LS-DYNA 预处理软件对 LSTC 的仿真模型进行了设定, 并利用 HyperView 后处理软件对仿真假人的加速度、位移和伤害数值进行了检测。Hybrid III 50th 假人与座椅的相对位置如图 4 所示。

3.2 安全带有限元模型的建立

本论文所述的座位为三点式安全带, 由织带、卷收器、导向环和锁舌构成, 并由两个固定点和一个锁扣固定。将假人放在座位上后, 将安全带从卷收器中抽出, 通过导向环、胸口、腹部和锁扣将假人固定住。安全带具有预紧功能, 并且在前置的撞击测试中, 安全带能够正常工作。导向环安装在台车立柱上, 安全带能够在导向环上自由滑动。在车辆下部固定点处, 有一个卷收器, 实现安全带预紧限力功能。建立好的安全带有限元仿真模型如图 5 所示。

3.3 正面碰撞过程控制算法设置

在座椅正面碰撞有限元模型建立完成后, 需要建立相关的接触条件, 以免发生部件间的穿透。需要建立的接触包括: 座椅零部件的自接触、发泡与钣金件、安全带与假人、假人与座椅发泡, 以及假人双脚与地板之间的接触。对于座椅正面碰撞分析, 首先对所有座椅零部件建立一个整体的单面接触, 防止单个零件变形过大而

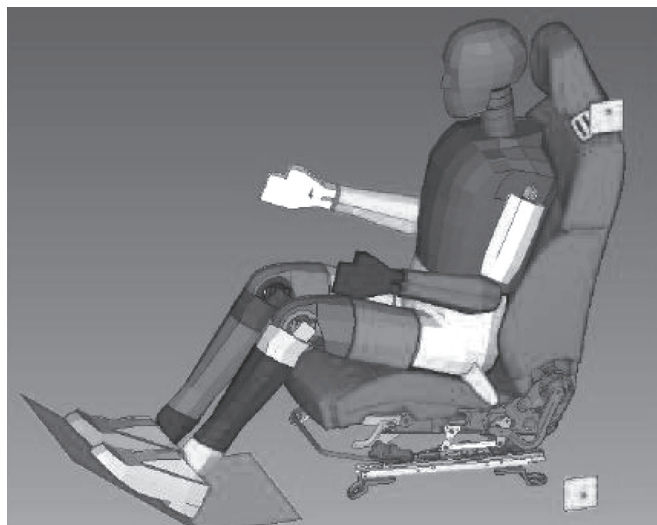


图4 假人与座椅的相对位置示意图



图5 安全带有限元仿真模型

发生穿透。然后对各个零件之间分别建立相应的面面接 触, 防止零件之间因相互挤压而发生穿透。假人与发泡之间并不需要很大的接触摩擦, 将其摩擦系数设为 0.2。为了保证安全带的约束作用, 需要赋予假人与安全带较大的接触摩擦, 因此将其摩擦系数设为 0.3。

以 50km/h 的速度正面碰撞车身 B 柱对前排座椅台车进行加载。假人脚下的地面及歇脚板为刚性板。根据本仿真模拟, 座位后面的两个脚的定位点坐标是: $X=1483.896$ 、 $Y=-586.748$ 、 $Z=6.7$; $X=1484.462$ 、 $Y=-169.386$ 、 $Z=4.58$, 并把坐垫固定在台车刚性板上。座椅台车的碰撞初始速度

为 50km/h，当碰撞发生时，座椅会随预先加载的加速度曲线减速，被安全带束缚的假人相应也会开始减速。如果把座椅台车初速度看作 0km/h，也可以把它看成是在做反向的加速运动。由此，将持续 100ms 的加速度曲线加到座椅台车上，可以对汽车座椅的正撞过程进行仿真。

4 座椅正面碰撞数值模拟与试验结果分析

4.1 座椅正面碰撞数值模拟

采用 20 核 CPU 对前排座椅的正面碰撞进行了有限元分析，得出了前排座椅和假人的动态

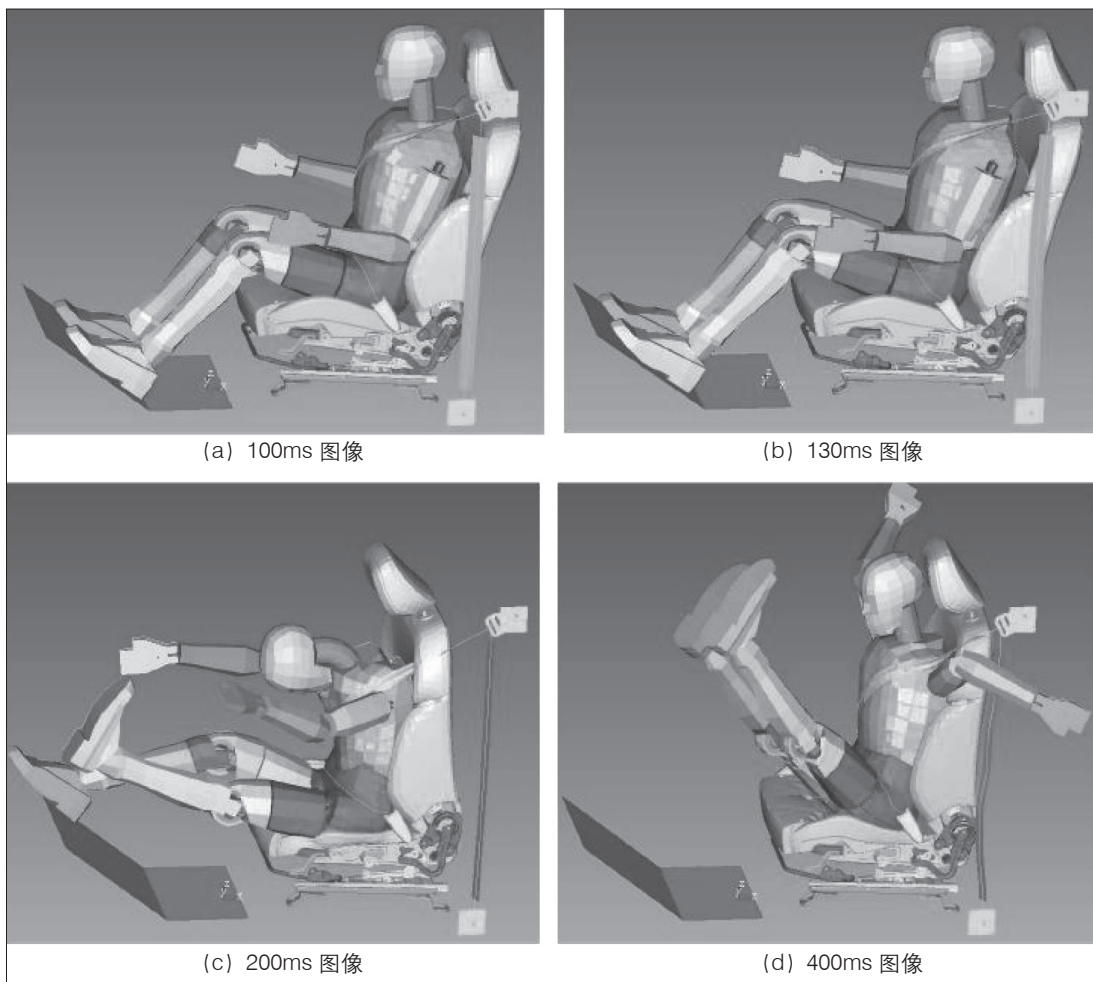


图 6 不同时刻座位的动态反应

特性。通过后处理软件 HyperView，研究了座椅各个部件之间的连接性和假体的完整性。在前碰实验中，假人的运动状况对座椅的受力状况有很大的影响。座椅的动态反应具体如下：假人被放置在座椅上，首先会因自身的重力作用，使坐垫产生变形，完成座椅仿真的预变形过程。

在预变形仿真结束后，正面加速度曲线在 100ms 内被应用。在加速的时候，假人会因为惯性而向前移动，但在 130ms 后，假人在安全带的作用下，向前移动的势头逐渐减弱，而此时，座位上的零件并没有出现太大的变形。在大约 200ms 的时候，撞击加速曲线归零，人体的胳膊和腿向前摆动，头朝下，座椅的零件变形最大。400ms 左右，由于安全带的限制，假人回弹，座椅的塑形变形趋于平稳。在图 6 中显示了座位各个瞬间的动态反应。

4.2 座椅正面碰撞试验结果分析

4.2.1 座椅正面碰撞台车试验

座椅碰撞测试用的是一种用于模拟正面碰撞的台车。本文采用的是中国汽车工程研究院测试中心的座椅碰撞台车的测试。测试之前，将座椅置于测试工具上，根据规定调整座椅的位置，然后用夹具将其固定到台车的滑台上。检查工具的强度，并检查滑台和座位的

各个连接螺栓是否拧紧，确保调角器和导轨均已锁定。接下来，将会调整假人的坐姿。假人必须穿着纯棉半袖的衬衣和短裤，并在两只脚上各穿一只鞋，每双鞋约 570g。座椅正面碰撞数值仿真的结果表明，座椅的强度是充分的，不存在假人被抛飞的现象，所以不需要附加的限制。当假人和安全带装好后，再对其进行检验，确认其位置。用照相机对试验前的假人及座椅进行拍照录像，清理不相干人员，确保试验台上不存在螺钉、垫圈等异物，试验前后座椅及假人状态如图 7 所示。

4.2.2 座椅正面碰撞数值模拟与试验结果对比

从实验的录像来看，假人的运动姿态与仿真模拟的假人运动姿态一致。在测试后，束缚假人的三点式安全带可以人工解除，使假人能够从座位上下来。在测试期间和测试后，座椅固定点安装托架没有出现撕裂、断裂的现象；座椅调节装置试验后可调整，试验中座椅没有出现故障；在测试期间和测试后，座椅上横梁、下横梁、坐盆骨架后的管梁结构没有出现撕裂和断裂的情况。该试验结果与仿真计算中的座椅部件的强度分析相吻合。为进一步检验数值模拟的正确性，将座椅正面碰撞模拟

(下转第 91 页)

带式输送机中同步与功率分配的应用研究[J]. 起重运输机械, 2020(04): 94-96.

[2] 安东. 双层带式输送机系统在散货码头上的应用[J]. 水运工程, 2021(03): 83-87.

[3] 魏正峰, 罗奕, 王旭修. 智能控制变频驱动带式输送系统节能分析[J]. 节能, 2020, 39(02): 20-25.

[4] 刘 鑫, 青先国, 张 宓, 等. 基于三电平矢量控制的变频驱动技术研究[J]. 核动力工程, 2019, 40(S2): 108-111.

[5] 吴磊. 通用散货码头改扩建工程装卸工艺设计[J]. 港口装卸, 2019(02): 63-67.

作者简介: 俞佳宝(1986.10-), 男, 汉族, 福建漳平人, 本科, 工程师, 研究方向: 设备维修管理。

(上接第 87 页)

结果与实验数据进行比较, 并进行误差分析, 对比结果如表 1 所示。

从表格中可以看出, 正面撞击测试后, 座椅坐垫位移的偏差最大值为 9.8%, 坐盆骨架的前后偏差最大值为 2.3%; 座椅滑道的动态变形偏差最大值为 6.3%, 座椅各零部件的动态和静态变形量的模拟与实验结果偏差小于 10%, 正面碰撞模拟与实验中的假人动态反应基本一致, 各零部件在模拟和实验中没有受到破坏, 验证了该数值模拟的正确性和有效性。

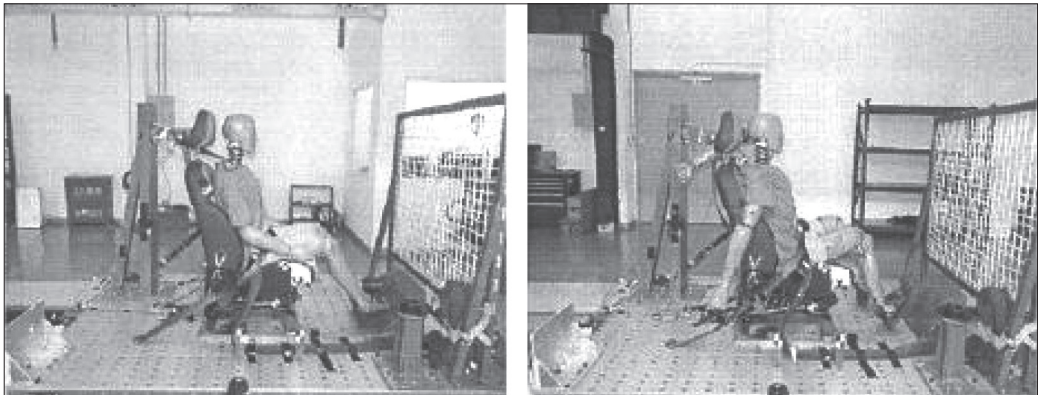


图 7 试验前后座椅及假人状态示意图

表 1 数值模拟与实验结果数据对比

企业要求	位置	试验结果 /mm	仿真结果 /mm	偏差 /%
座椅坐垫的 X 向位移 $\leq 15\text{mm}$	左	9	9	0
	右	9.1	10	9.8
座椅两侧 X、Z 向变形 $< 40\text{mm}$	X	22	21.5	2.3
	Z	18.5	18.8	1.6
座椅滑道变形 $\leq 5\text{mm}$	左	4.9	4.8	2
	右	3.2	3	6.3

5 结语

本文运用数值模拟计算方法, 采用 Hypermesh 和 LS-DYNA 等有限元分析软件, 根据座椅正面碰撞的相关规定, 对某企业座椅进行了模拟仿真和正面碰撞数值模拟分析, 为了进一步验证仿真结果的可靠性, 又展开了对应的试验进一步研究, 对比二者的数据结果, 完全可以说明本文采用的座椅正面碰撞数值模拟方法是合理有效的。这也为相关企业在对座椅结构进一步设计优化时, 提供了一定的理论基础。

参考文献:

[1] 王凯, 刘东春, 张长江. 正面碰撞试验中 50%

男性假人与 5% 女性假人伤害对比研究[J]. 时代汽车, 2021(20): 186-189.

[2] 王复增, 楼灏, 孙靖, 等. 汽车座椅正面碰撞过程的数值模拟与优化[J]. 制造业自动化, 2021(8): 127-131.

[3] 赵民, 周嘉伟, 王宇, 等. 汽车前排座椅正面碰撞的仿真分析及优化[J]. 机械设计与制造, 2020(10): 149-152.

[4] 陈明刚, 孟正华, 周磊, 等. 汽车座椅头枕结构对碰撞吸能性的影响[J]. 机械设计与制造, 2018(2): 149-152.

作者简介: 邹正宽(1984.05-), 男, 汉族, 湖南衡阳人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 汽车被动安全。