

Q6 儿童假人腰椎有限元模型的建立与验证

周加冬

上汽商用车技术中心

摘要：通过测量获得 Q 系列 6 岁假人的腰椎几何，对该几何进行网格划分和材料模型及参数的赋予，获得初步的有限元模型。根据腰椎标定试验的过程和要求，进行腰椎标定试验的仿真模拟，得到标定试验的仿真头部角度曲线，同时和已知的腰椎标定试验头部角度曲线进行对比。通过选取合适的腰椎有限元模型材料参数作为优化量，通过一定的优化方法对优化量进行优化，使优化后的腰椎仿真标定头部角度曲线最大化地逼近真实试验曲线，从而获取一个有效的腰椎有限元模型。

关键词：Q6 儿童假人腰椎；逆向工程；标定试验；优化

中图分类号：U461.91

从 20 世纪 70 年代起，汽车碰撞假人的计算机仿真技术就已经开始在汽车工业中被广泛应用^[1]。目前，LSTC 仅发布了 Hybrid III 6 岁儿童假人的有限元模型，并未发布生物仿真度更高的 Q6 儿童假人有限元模型。

目前仍在广泛使用的儿童假人有 P 系列、CRABI 系列和 Hybrid III 系列^[2-3]。作为一种新型儿童假人，Q 系列儿童假人正在逐步推广和使用。2013 年，欧洲经济委员会(ECE) 开始修订和更新儿童安全法规，并在新法规中引入 Q 系列儿童假人，以取代过去使用的儿童假人。中国的相关机构也以此作为参考制定符合中国国情的儿童安全法规^[4]。作为 Q 系列儿童假人的成员，Q6 儿童假人也在各种科研机构、质检机构和汽车 OEM 中得到推广。因此，研究 Q6 儿童假人重要部件的有限元建模和方法是十分必要的。

人体躯干的弯曲是胸椎和腰椎共同弯曲的结果，但 Q6 儿童假人中胸椎是刚性的，因此整个躯干的弯曲只通过腰椎实现。因此，腰椎在 Q6 儿童假人躯干弯曲中起重要作用。关于 Q6 儿童假人腰椎有限元建模的研究很少。2008 年，Maurath C A. 建立了一个 Q3 儿童假人有限元模型，进行了假人各部件和整体的验证^[5]；2011 年，章龙等综合损伤生物力学、车辆人机工程学、医学 X 光照射和有限元知识，对 Hybrid III 50th 假人有限元模型进行修改验证^[6]；2013 年，卢晋成等对 Hybrid III 6 岁儿童假人的腰椎模型进行了验证和结构改进并指出了其在生物仿真度方面的不足^[7]。为了进一步研究儿童乘员保护，本文建立了 Q6 儿童假人腰椎有限元模型，具有良好的细节和精度。通过对材料参数的敏感性分析和优化，实现了仿真曲线与试验曲线的匹配，验证了模型的有效性。

1 腰椎有限元模型的建立

1.1 腰椎有限元网格划分

Q6 腰椎主要由橡胶体，U 型上盖和下盖，缆绳组件和力学传感器模块组成。其中上下盖板突出部分内嵌在橡胶体中；缆绳组件包括上下缆绳紧固装置和腰椎缆绳，腰椎缆绳由多股钢丝绳缠绕拧紧而成，腰椎缆绳总成正中贯通颈部橡胶块连接上下盖板；在腰椎底端，测力传感器替代物通过螺丝和下盖板连接。

使用三维激光扫描仪扫描获取橡胶体外表面数据，再使用 Geomagic Studio 12 软件对获取的数据进行逆向处理，然后在 Catia V5 软件中进行再处理得到橡胶体的三维几何模型。Q6 腰椎中的其他零部件通过实物测量获取实际尺寸，然后在 Catia V5 软件中建立三维几何模型。对所有零部件进行装配，得到整个腰椎三维几何模型如图 1 所示。

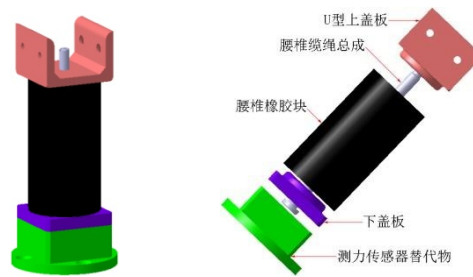


图 1 Q6 儿童假人腰椎三维几何模型

本文利用HyperMesh 10.0软件对几何模型进行前处理和网格划分，建立了具有详细几何特征和较高精度的Q6腰椎网格模型，模型如图2所示。

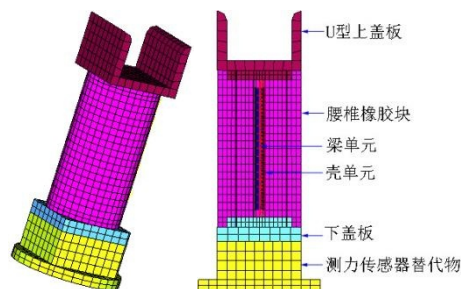


图 2 Q6 儿童假人腰椎网格模型

该模型包括 4799 个 node，19 个 beam，235 个 shell，779 个五面体单元，6198 个六面体单元，平均尺寸为 4mm。考虑到该模型的 3D 网格在仿真模拟中变形较大，对 3D 网格的划分质量进行了相应的要求，具体参数见表 1。

表 1 划分 3D 网格的质量控制要求

质量控制参数	控制值	质量控制参数	控制值
翘曲度	<1.3	歪曲率	<33.2
雅克比	>0.5	最大内角	<135.6°
长宽比	<2.6	最小内角	>64.1°

1.2 腰椎有限元模型材料参数

在图 2 所示的腰椎模型中，U 型上盖板、下盖板和测力传感器替代物均为 3D 网格，实际均为铝制材料制成，在有限元模型中采用 LS-DYNA 软件中的 20 号* MAT_RIGID 刚性体材料。

橡胶体采用 3D 网格划分，橡胶体的中间是一通孔壁。考虑到橡胶体在模拟腰椎标定试验时会产生较大变形，而在大位移非均匀变形过程中材料模型会产生模拟的稳定性问题^[5]，因此在参考以前各机构和公司所发布的假人模型的腰椎材料，并且经过多次的仿真和标定试验的对比验证，选定 62 号*MAT_VICOUS_FOAM 粘性泡沫材料作为腰椎的材料模型。

参照 Hybrid III 6 岁儿童假人腰椎有限元模型的材料参数，初步设定的橡胶体材料参数如表 2 所示（各变量的意义参见 LS-DYNA 使用说明书）。

表 2 橡胶体材料参数

变量	E ₁ /MPa	N ₁	V ₂ /MPa·s	E ₂ /MPa	N ₂	PR
数值	8	0.02	0.86	20	0.92	0.48

腰椎缆绳总成使腰椎获得正确的动态性能并作为橡胶体材料失效时的一种保护措施^[8]。腰椎缆绳总成在有限元模型中处理成多段梁单元和壳单元。梁单元的上下两端和上下盖板进行点连接，壳单元用于模拟缆绳的粗细，其半径和缆绳的半径一致，各层梁单元和壳单元和进行点刚性约束，用于模拟缆绳总成的真实工作情况。模型中梁单元采用 24 号*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY 弹塑性材料，赋予一般

钢铁材料的材料特性，其主要参数如表 3 所示（各变量的意义参见 LS-DYNA 使用说明书）。

表 3 腰椎缆绳梁单元材料参数

变量	E/MPa	NU	SIGY	ETAN	C	P
数值	210000	0.3	352.5		0	0

壳网格采用 9 号*`MAT_NULL` 材料，在该层壳网格和橡胶体之间添加 `CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE` 接触关键字，用于模拟腰椎缆绳总成在受力变形时和通孔壁的接触情况。

2 腰椎有限元模型的验证

2.1 腰椎标定试验

根据 Q6 假人的标定试验说明^[10]进行腰椎模型的标定试验。腰椎标定试验中使用和 CFR 49 part 572.33 (c) 法规要求一致的摆臂，使用一个摆臂接口板来将腰椎倒置安装在摆臂上，使用一个头部替代物来给腰椎施加载荷，该头部替代物如图 4 中所示。

2 个旋转电位器所测量的角度之差就是头部替代物相对于摆臂的旋转角度。安装一个配重块在头部替代物的另一侧来保证腰椎所受载荷对称。摆臂加速度计位于摆臂上距摆臂枢轴 1657.4mm 处，测量摆臂加速度。

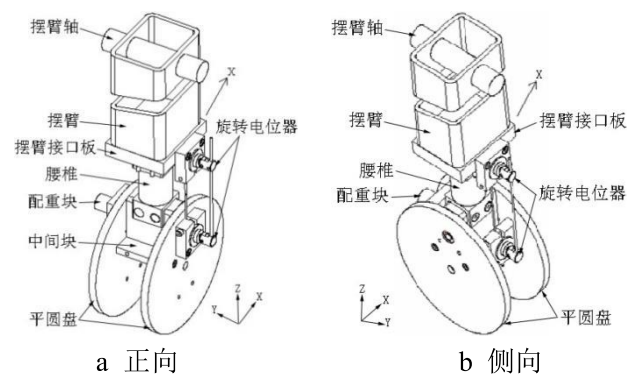


图 4 Q6 儿童假人腰椎标定试验示意

腰椎和头部替代物的组合可用于正向和侧向标定试验。正向标定试验和侧向标定试验相互转换时角度传感器和其配重块须重新进行定位，如图 4a 和图 4b 所示。

在正向标定试验中，将摆臂提升到标定试验预定高度，释放摆臂，蜂窝铝用于缓冲摆臂。其标定要求如下。

1. 碰撞的初始速度须在 4.3m/s 和 4.5m/s 之间。
2. 摆臂速度减小情况应如表 4 所述。

表 4 摆臂速度减小情况

时间/ms	速度下限/m/s	速度上限/m/s
10	1.3	1.7
20	2.7	3.7
30	4.1	4.9

3. 头部角度最大值在 54.0°到 69.0°之间，出现时刻为 45ms 和 75ms 之间。
4. 头部角度最小值在-33.0°和-23.0°之间，出现时刻为 165ms 和 195ms 之间。

侧向标定试验标定要求如下。

1. 碰撞的初始速度须在 4.3m/s 和 4.5m/s 之间。
2. 摆臂速度减小情况应如表 5 所述。

表 5 摆臂速度减小情况

时间/ms	速度下限/m/s	速度上限/m/s
10	1.3	1.7
20	2.7	3.7
30	4.0	4.8

3. 头部角度最大值在 55.0° 到 70.0° 之间，出现时刻为 45ms 和 75ms 之间。

4. 头部角度最小值在 -33.0° 和 -23.0° 之间，出现时刻为 165ms 和 195ms 之间。

从以上可以看出，腰椎正向和侧向标定试验的要求近乎相同，且腰椎模型和标定设备在结构上的对称性较为显著，通过后续的腰椎仿真正向和侧向标定试验，发现仿真得到的头部角度曲线也近乎相同，因此仅需对腰椎进行正向标定试验。Robert Kant 等^[10]发布了腰椎正向标定试验关于头部角度的 3 条试验曲线。本文根据以上信息，进行了相应的腰椎标定试验仿真。

2.2 腰椎标定试验仿真

Q6 和 Q3 假人腰椎标定试验使用的头部替代物相同，根据已发布的 Q3 假人图纸^[9]，建立头部替代物的三维几何模型，并以此建立了头部替代物的有限元模型。因头部模型中所有材料均为金属制成，对应的有限元模型中零件均使用 20 号 *MAT_RIGID 刚性材料模拟，各零件间采用刚性连接。将头部替代物有限元模型连接到腰椎有限元模型上，设置角位移观测点，用以测量头部角度，得到的正向测试用腰椎-头部替代物有限元模型如图 5 所示。

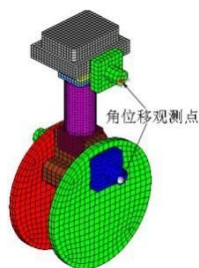


图 5 正向腰椎-头部替代物有限元模型

在 LS-DYNA 软件中，如果将上述腰椎标定试验全部进行模拟，仿真模型将比较复杂，所以本文对仿真模型进行了简化。在简化模型中，摆臂简化成一根从摆臂转轴至摆臂加速度计处长度的刚性梁单元，梁单元的顶端点固定并只释放除 Y 方向的转动自由度，末端点与摆臂接口板刚性固定连接并在其位置处定义一远大于模型中其它部件质量的质量单元，对该质量单元定义试验要求中的速度。其中碰撞初始速度和速度减小量均大约选取标定要求中速度区间的中间值，得到正向标定试验的速度变化情况如表 6 所述。

表 6 正向标定试验摆臂测量点速度

时间/ms	速度/m/s
0	4.5
10	3.0
20	1.3
30	0

对腰椎-头部替代物模型施加 1g 的重力加速度场，选取单点积分方式，采用 LS-DYNA 沙漏标准控制方式，设置时间步长系数为 0.6，设置计算输出结果中头部角度曲线输出频率为 10kHz。腰椎正向标定试验仿真模型如图 6 所示。

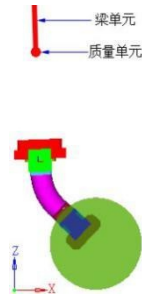


图 6 腰椎正向标定试验仿真模型

经过 CFC600 滤波后的腰椎正向标定试验的头部角度试验曲线与仿真曲线的对比如图 7 所示。

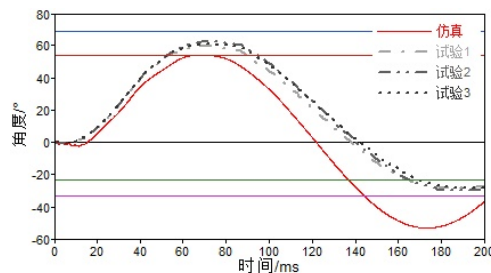


图 7 腰椎正向标定试验头部角度试验曲线与仿真曲线对比

从图 7 可得出腰椎正向标定试验曲线与仿真曲线的对比分析如表 7 所示。

表 7 腰椎正向标定试验曲线与仿真曲线对比分析

	最大头部角 度/°	出现时刻/ms	最小头部角 度/°	出现时刻 /ms
要求	54.0~69.0	45~75	-33.0~-23.0	165~195
仿真	54.2	67.8	-53.0	173.1
试验 1	59.4	73.2	-28.3	180.9
试验 2	62.4	69.8	-29.8	183.7
试验 3	60.9	69.3	-28.0	185.1

从图 7 可以看出，本文所建立的 Q6 儿童假人腰椎有限元模型在正向标定试验与仿真中的头部角度曲线的形状和走势基本一致。由表 5 可知，最大头部角度和最小头部角度出现时刻基本一致且都满足标定要求；最大头部角度相差不大且恰好满足标定要求的下限；但最小头部角度的差异较大，仿真曲线明显超出标定要求的下限，仿真曲线与试验曲线的最小头部角度相差 46.0%。说明该 Q6 儿童假人腰椎有限元模型的材料模型是可行的，其材料参数还需进一步优化，使其更接近于试验结果。

3 腰椎有限元模型材料参数的优化

在 Q6 儿童假人腰椎标定试验中，影响腰椎性能的主要因素是橡胶体和腰椎缆绳的材料模型参数。腰椎缆绳的材料模型和实际较为接近，故不再考虑优化。在橡胶体的材料参数中，其泊松比的大小和材料类型本身有关且变化范围不大，所以其泊松比将不改变； E_2 作为防止时间步长问题的参数，在优化过程中也不考虑改变；对其余 4 个材料参数进行优化计算，这 4 个材料参数分别为弹性刚度 E_1 ，幂指数 n_1 ，粘度阻尼系数 V_2 ，幂指数 n_2 。整个腰椎有限元模型材料参数优化过程的所有步骤都在 LS-OPT 5.0 软件中进行。

采用基于纵坐标的曲线匹配法对腰椎正向标定试验中的头部角度曲线进行曲线匹配计算，采用基于区间缩减序列的响应面法的优化方法。图 8 为腰椎材料参数优化的基本流程。

优化研究过程的具体步骤如下。

(1) 在试验设计中，对选择的 4 个腰椎材料参数变量设定，由于参数未知，其变化范围均设置成原始

- 参数的 10%-1000%。
- (2) 利用 D 最优采样法对变量进行采样，共采样 8 组。
 - (3) 对腰椎正向标定试验仿真模型调用 DYNA 求解器计算其优化变量样本，生成对应的头部角度曲线。
 - (4) 构建优化目标的二次多项式的代理模型。
 - (5) 计算得到正向标定试验对应的头部角度曲线，该曲线和试验目标曲线运用基于纵坐标曲线匹配法构建曲线匹配。
 - (6) 采用 NSGA-II 算法对构建的代理模型和曲线匹配进行优化计算。
 - (7) 优化结束的标识是响应精确度公差达到 0.1 或设置的最大迭代次数 16; 在没有达到结束的条件前，优化程序将相应缩减变量的区间序列，使区间收敛，然后返回步骤 (2) 再次循环计算。
 - (8) 得到优化结果。

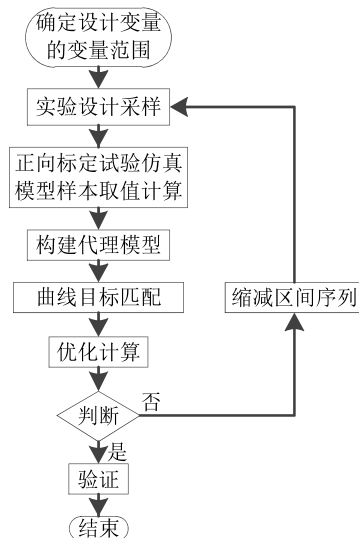


图 8 基于区间缩减序列代理模型的优化方法基本流程

试验目标曲线采用 3 条试验曲线的平均值曲线。在本次优化计算中，优化流程运行完全部 16 次迭代而结束。得到的优化参数值分别为 $E_1=4.04\text{MPa}$ ， $n_1=0.03$ ， $V_2=0.88\text{MPa}\cdot\text{s}$ ， $n_2=1.02$ 。优化后的腰椎有限元模型在正向标定试验中的头部角度仿真与试验曲线的对比如图 9 所示。

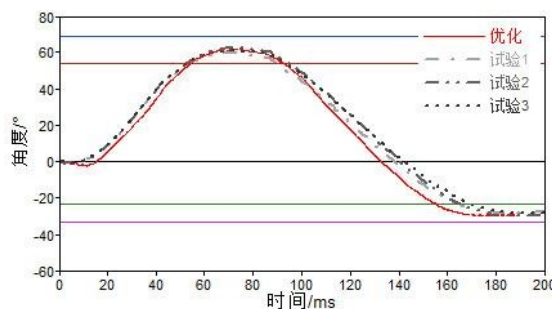


图 9 优化后头部角度试验和仿真曲线对比

优化后最大和最小头部角度的出现时刻在优化后仿真曲线与试验曲线中的相对偏差均较小。最大头部角度为 61.2° ，较试验曲线最大值偏差 1.1%，较优化前减少了 9.9%；最小头部角度为 69.4° ，较试验曲线最小值偏差 5.5%，较优化前减少了 16.2%。优化后的头部角度满足标定要求。

4 结论

本文建立了一个具有较高精度的 Q6 儿童假人腰椎有限元模型，并对腰椎材料参数进行正向标定试验仿真模型的优化，经多次迭代得到其最优解。优化有效地降低了最大和最小头部角度偏差。本文建立的 Q6 儿

童假人腰椎有限元模型满足标定要求，可应用于汽车碰撞假人的仿真研究。

参考文献

- [1] 赵隆茂. Hybrid—III 型 Dummy 刚性有限元模型的研究改进[J]. 汽车工程, 2000, 22(5): 306-309.
- [2] United Nations Economic Commission for Europe. ECE R44. 03 : Uniform provisions concerning the approval of restraining devices for child occupants of power-driven vehicles (Child restraint systems) [S/OL]. (2011-01-01). <http://www.instrument.com.cn/download/shtml/088566.shtml>.
- [3] National Highway Traffic Safety Administration. FMVSS 213: Child Restraint Systems [S/OL]. (2011-01-01). http://www.carseat.org/Legal/0_legalIP.htm.
- [4] 张金换, 李志刚, 胡敬文, 等. 汽车儿童安全保护的欧美法规对比及未来研究方向[J]. 汽车安全与节能学报, 2011, 2(3): 185-191.
- [5] Maurath C A. Development and Validation of a Finite Element Model of the Q3 Anthropomorphic Testing Device [D]. ProQuest, 2008.
- [6] 章龙. Hybrid III 50th 假人有限元模型胸腰椎段研究[D]. 湖南大学, 2011.
- [7] 卢晋成. 六岁儿童碰撞假人有限元模型的开发及验证[M]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- [8] First Technology Safety Systems, Inc. Q6 (Advanced 6 year old child) User Manual [R]. Rev A. Plymouth, USA, 2008.
- [9] UNECE. Drawing Package for Q3 Dummy [R]. Geneva, April 2012.

Development and Validation of a Finite Element Model of the Lumbar Spine of the Q6 Child Dummy

Zhou Jiadong

Abstract: The reverse engineering was used to develop a Q6 child dummy lumbar spine geometric model, then a original Q6 child dummy lumbar spine finite element (FE) model was developed with appropriate material models and parameters. According to the process and request of the lumbar spine calibration test, the simulation of its calibration test was proceed and the simulated head angle curve was obtained, meanwhile a comparison with known tested head angle curve was proceed. Several parameters were optimized using some optimization method with several FE model material parameters selected. After optimization simulated head angle curve was closed to tested head angle curve. Then an effective lumbar spine FE model was obtained.

Keywords: Q6 child dummy lumbar spine; reverse engineering; curve matching; optimization