

子系统仿真和参数识别技术在汽车碰撞分析上的应用

孙涛¹, 陶钧¹, 王熙泉¹

(1. 东风延锋汽车饰件系统有限公司, 武汉 430056)

摘要: 在对汽车碰撞结果进行分析的过程中, 会遇到个别局部实验结果与设计阶段整车 CAE 仿真存在较大差异的情形。这是由于碰撞过程是个高度非线性的问题, 系统整体的小差异可能会引起系统局部的显著差异, 因此分析差异原因是个非常有挑战性的工作。如果还借助整车仿真对这类问题查找问题原因, 无疑是非常困难和昂贵的。为了能较快的查找出问题原因, 本文论述了一种利用子系统仿真技术和参数识别技术相结合的解决办法, 并介绍了一个成功应用此方法查找出碰撞假人小腿伤害问题主因的案例。

关键词: CAE; 子系统仿真; 参数识别; LS-OPT; 汽车碰撞;

前言

汽车碰撞是一个瞬态的复杂物理过程, 为了尽可能的顺利达成碰撞安全性能目标, 在开发设计阶段, 汽车主机厂普遍借助 CAE 技术, 进行整车碰撞仿真来评估汽车的安全性能。但在实际的开发过程中, 由于项目系统本身极其复杂的原因, 汽车碰撞实验结果与仿真结果存在一定的偏差是比较常见的, 差异较大的往往是个别对条件变量比较敏感的局部区域。

对于出现的这些差异问题, 目前大多采取的措施是首先对比整车实验结果与仿真结果, 然后分析产生差异的可能原因, 锁定最可疑的几个因素, 最后逐步排查, 实际上就是借助 CAE 仿真进行重复判断的过程。然而由于影响实验结果的因素众多, 不论是来自设计生产过程, 还是来自实验过程, 有着许多不可控的因素, 整车仿真很难做到所有结果都与实验吻合的较好。对于那种局部差异较大的情形, 如果还在整车仿真中查找问题原因, 无疑是昂贵和费时的。因为对于那些极度敏感的子系统, 很难保证它的边界条件在整车仿真中与实验中保持一致; 并且整车模型考虑了的影响因素数量过多, 导致不能高效分析问题原因, 甚至会把影响子系统的关键因素淹没在整车级别的系统噪声中, 误导我们做出错误的判断。故需要引入一种更为高效的方法-子系统仿真方法。

1 子系统仿真

子系统仿真是相对复杂巨大的总系统而言的, 主要用于详细模拟其内部的局部子系统响应。例如需要详细研究碰撞假人腿部在实验中的运动过程, 就可以把假人腿部仿真模型隔离出来, 看作整车碰撞这个总系统下的一个子系统来研究。

1.1 子系统模型的边界

子系统仿真通常需要来自总系统的必要输入信息, 以用于定义感兴趣的子系统的边界条件, 它既可以通过总系统的仿真计算获得, 也可通过总系统的实验数据获得。需要注意的是, 子系统的边界通常应该简洁明了, 易于定义和传递给子系统模型, 多选在对总系统核心结果影响程度较小的区域, 以忽略子系统的结果差异对总系统其它结果产生的影响。

1.2 子系统模型的复杂边界处理

如果子系统不可避免的存在非常复杂的非稳定边界，例如碰撞过程中子系统与总系统中其它部分的接触作用，那么这类边界的定义就会变得比较复杂不易处理。如果边界信息想从总系统的实验中获取，通常是难以实施的；如果想从总系统的仿真结果中输出得到，通常又会加剧子系统仿真模型的复杂程度，对于这种情况，建议构造合适的简化模型给予替代。

1.3 子系统模型的边界条件优化

如果子系统模型由于边界条件的简化处理，从而导致出现仿真结果与实验结果存在偏差的情况，需要对边界条件的定义进行优化。随着近年来优化理论的逐渐成熟和计算机计算能力的快速发展，CAE 仿真分析越来越多的结合优化算法，来解决系统目标优化、参数识别、可靠性设计等问题。上述边界条件的优化问题就可以利用参数识别技术来解决，通过把模型中用于定义边界条件的变量参数化，借助优化算法来修正输入的初始值，使得子系统仿真的结果更加与实验结果吻合。该方法避免了传统的人工试凑法所具有的主观、盲目、耗时等缺点，提高了子系统边界条件优化的效率。

2 系统参数识别

参数识别问题通常是个非线性逆向求解问题，可通过数学优化来解决。通过探索系统参数空间，优化器可以找到一个可以最大化匹配度量的参数集，其中匹配度量用于量化目标和可变响应之间匹配程度，可变响应则取决于模型中的系统参数。

用于系统参数识别的技术主要由两个组成部分，一是优化方法，二是匹配度量。

2.1 系统参数识别的优化方法

本论文中所使用优化软件是 LS_OPT，它推荐的用于解决参数识别问题的优化方法是基于代理模型的优化。所谓代理模型，是在精度可接受的条件下，构造一个计算量小，但计算结果与 CAE 仿真结果相近的数学模型来代理相应的 CAE 模型^[1]。LS_OPT 软件提供的代理模型有基于多项式的响应面模型、径向基网络模型、前馈神经网络模型、Kriging 模型等。代理模型的构造通常按照以下步骤完成。

- 1) 选择一个合适的代理模型；
- 2) 选择合适的 DOE 方法，用于在设计空间中确定构造代理模型所需的样本点；
- 3) 利用 CAE 分析软件或者其它求解器计算并输出系统在样本点上的响应值；
- 4) 拟合样本点处的响应值，从而构造代理模型。

由于原本的优化问题将在代理模型上实现，从而让优化过程变得非常高效，因此在优化算法的选择时，可以不用过多考虑优化算法的计算成本，应优先选择优化结果精度高、具有全局性优化特点的算法。

2.2 系统参数识别的匹配度量

如何度量目标和响应之间的匹配程度，LS_OPT 软件提供了两种主要形式，分别是数值匹配度量和曲线匹配度量。

要匹配数值，先从求解器的输出中提取相应的响应，然后把这些响应与相应目标值关联起来，通常使用 MSE（均方误差）或 Sqrt MSE（均方根误差）函数作为目标优化函数；对于曲线匹配度量，有均方误差法（Mean Square Error）和曲线映射法（Curve Mapping）。均方误差法是基于坐标的曲线匹配度量。如果要匹配的曲线存在陡峭部分、或者纵坐标值不唯一的情形，则应选择曲线映射法作为匹配度量。因为曲线映射法使用曲线的长度来计算匹配程度，使用中建议过滤噪声明显的曲线^[2]。

尽管总是希望不匹配现象完全消失，但这种情况不可能总会遇到。这涉及到许多因素，如实验误差和噪声、有限元模型的错误构建、材料模型选择不当等等。

3 实例应用

3.1 某车型问题描述

某车型在 50km/h 正面碰撞实验过程中，出现了乘客侧右腿胫骨上部 My 弯矩异常大的问题，弯矩峰值达到 134Nm（图 1），根据 C-NCAP 中胫骨指数的计算公式和评分规则（图 2）可知^[3]，此结果严重影响了小腿部位的得分。

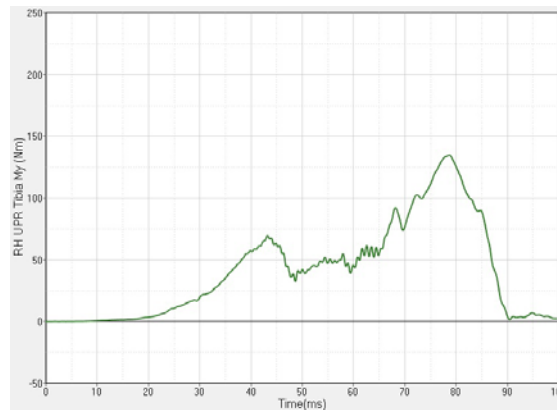


图 1 某车型正碰实验中乘客侧右腿胫骨上部 My 弯矩曲线

计算 TI:

$$M_R = \sqrt{(M_x)^2 + (M_y)^2}$$

$$TI = |M_R / (M_c)_R| + |F_z / (F_c)_z|$$

式中:

M_x —— 绕x轴的弯矩;

M_y —— 绕y轴的弯矩;

$(M_c)_R$ —— 临界弯矩, 按225Nm计;

F_z —— z向的轴向压缩力;

$(F_c)_z$ —— z向临界压缩力, 按35.9kN计;

高性能限值:	胫骨指数 (TI)	0.4
	小腿压缩力	2kN
低性能限值:	胫骨指数 (TI)	1.3
	小腿压缩力	8kN

图 2 C-NCAP 中正碰假人小腿部位评分办法

3.2 问题原因分析

问题出现以后，首先对比了整车 CAE 仿真与实验结果，发现整车仿真中没有再现乘客侧假人小腿的伤害情况（图 3）。依据常规经验，起初判断可能是由于假人右小腿与仪表板之间的剧烈碰撞作用，导致了 My 弯矩较大。但乘客侧假人骨盆 H 点位移结果（最大水平位移为 165mm，这基本等于碰撞发生前膝盖与仪表板之间的空间距离，见图 4 左）和大腿力的结果（腿部接触仪表板之前大腿力处于受拉状态，接触后也并未出现明显受压状态，见图 4 右）表明，整车碰撞过程中假人右腿并未深入侵入仪表板。又根据 MY 弯矩的变大的时刻和方向，于是推测问题原因可能是剧烈的车身减加速度、和地板对脚部的接触力共同作用的结果，仪表板很可能不是导致弯矩较大的主要原因。

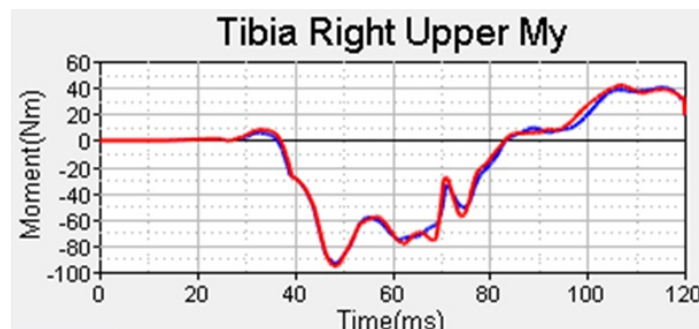


图 3 整车仿真中乘客侧假人右腿胫骨上部 My 弯矩结果

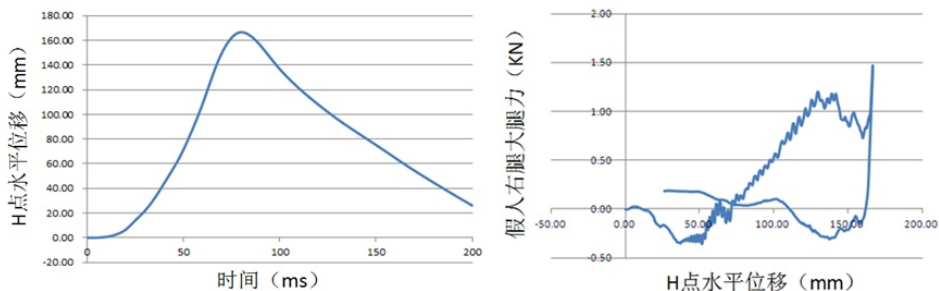


图 4 乘客侧右腿的实验结果

3.3 建立子系统仿真模型

为了证实以上对问题原因的分析判断，决定依据已经获得的实验数据，建立假人腿部的子系统 CAE 仿真模型，来详细模拟腿部的运动过程。子系统仿真模型如图 5 所示，为了提高仿真验证和后续参数识别过程的效率，仅使用假人的一条右腿模型，并把整车碰撞实验中的假人骨盆 H 点位移结果、和 B 柱加速度结果输入到子系统仿真模型中；考虑到在整个 My 弯矩剧烈变化的过程中，假人脚步没有明显的沿地毯搁脚斜面上移（图 6），决定通过定义一个非线性梁单元来简化替代假人脚部与地板的接触作用。由于简化处理后的梁单元材料参数无法获得，初步决定依据地毯泡沫材料的压缩应力应变曲线来定义一条近似的刚度曲线。

对构建好的腿部子系统仿真模型进行计算，初步仿真结果（图 7）表明，即使没有仪表板对腿部的反作用，假人小腿上部 My 弯矩依旧可以产生一个较大的伤害值。后又在整车碰撞分析模型中把仪表板系统去除，比较有无仪表板对假人腿部的伤害情况，仿真结果再次表明，仪表板并不是造成此次实验中假人腿部伤害的主要原因。

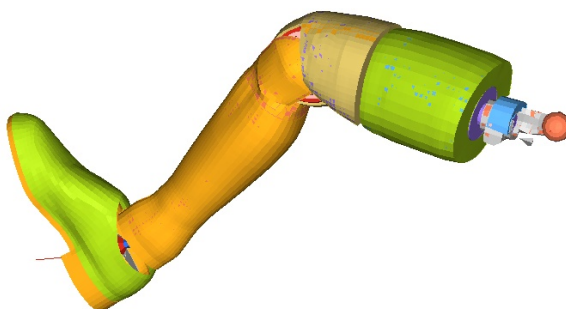


图 5 乘客侧假人右腿子系统仿真模型

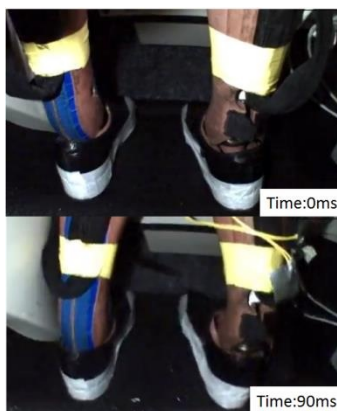


图 6 整车碰撞实验中乘客侧假人脚部运动录像截图

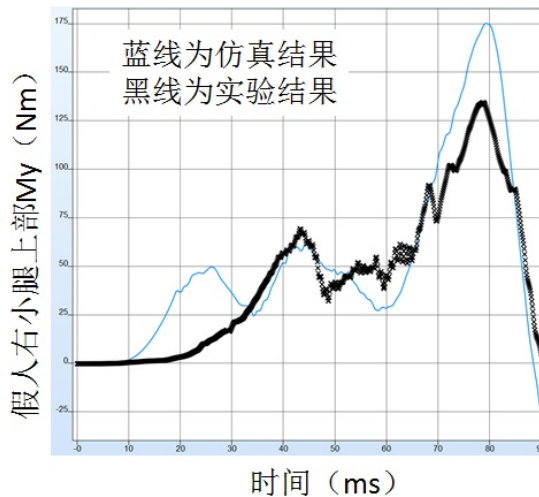


图 7 子系统仿真中假人右腿胫骨上部 My 弯矩的初步结果

3.4 建立子系统参数识别模型

虽然子系统仿真模型的初步结果（My 弯矩曲线趋势）与实验结果相似，但吻合性并不好，推测原因可能是简化处理后的梁单元导致。为了获得更好的 My 弯矩拟合曲线，并为后期的改善提供一个良好的参考基础，决定使用 LS-OPT 优化软件来优化梁单元的刚度参数。

参数识别模型定义如下：

- 变量：定义了八个变量来描述梁单元的刚度；
- 响应：计算输出假人小腿上部的 My 弯矩曲线；
- 优化目标：先把整车碰撞实验中的 My 弯矩结果曲线作为目标曲线，然后利用均方根法来定义 My 弯矩响应与目标曲线之间的匹配度量，最后把定义的匹配度量作为优化目标(图 8)。

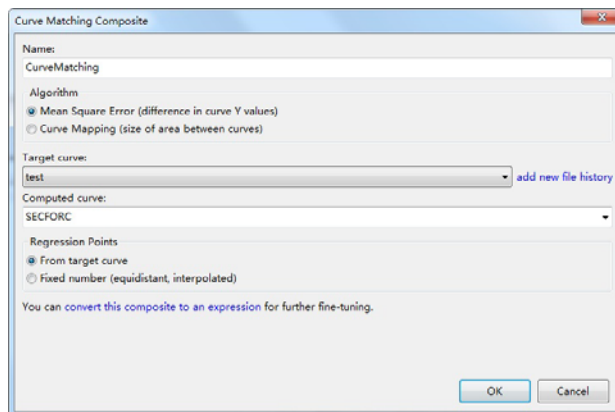


图 8 LS-OPT 软件中曲线匹配度量设置

3.5 子系统仿真模型参数优化结果

本案例采用具有域缩减的顺序优化策略（Sequential with Domain Reduction），优化过程历经 5 次迭代，每次迭代使用 14 个仿真样本（图 9）。最终优化结果显示（图 10），经过对腿部子系统边界条件优化调试后，My 弯矩曲线的仿真结果与实验结果更加匹配，同时也再次证实了对问题主因的判断。

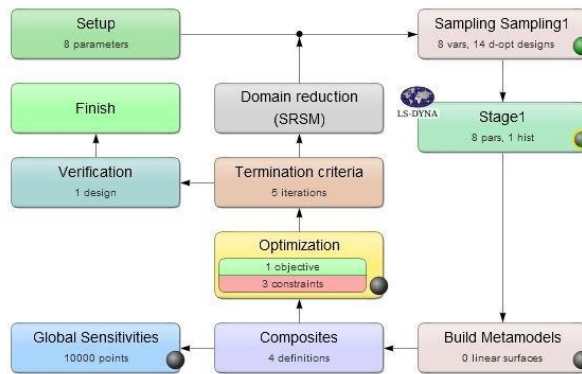


图 9. LS-OPT 软件中参数优化过程设置

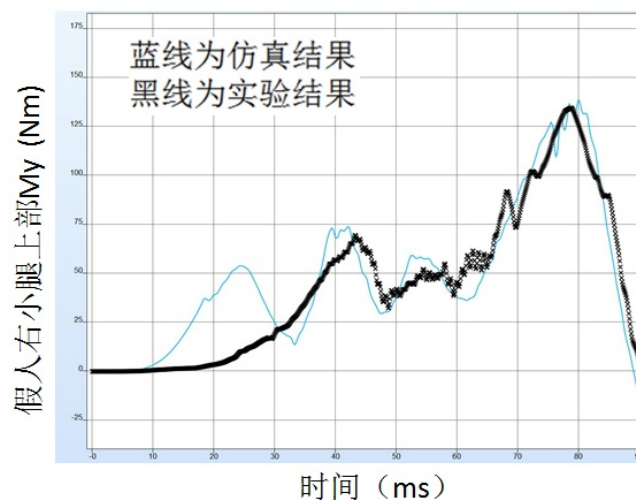


图 10. 子系统模型优化后的 My 弯矩曲线

4 结论

本文论述了一种基于子系统仿真技术和参数识别技术相结合的汽车碰撞问题分析方法，并介绍了一个成功应用此方法查找出碰撞假人小腿伤害问题主因的案例。和传统利用整车仿真分析问题相比，该方法在系统局部问题解决过程中不仅高效、聚焦性强，还可以依据实验结果模拟出更加准确的局部运动过程，为问题的解决打下坚实基础。这种方法有力补充了常规分析方法的不足，为以后此类工程问题的解决积累了宝贵经验。

参考文献

- [1]张维刚, 廖兴涛, 钟志华. 基于逐步回归模型的汽车碰撞安全性多目标优化. 机械工程学报, 2007 年, 第 43 卷 第 8 期.
- [2]LS-OPT User's Manual. LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY CORPORATION, Copyright. 2015.
- [3]C-NCAP 管理规则. 中国汽车研究中心, 2015 年版.