

整车碰撞仿真中加速度精度提升研究

曾宇鹏 廖慧红 杨洪

(宁波吉利汽车研究开发有限公司, 宁波 315336)

摘要: 整车碰撞仿真中加速度计的读数普遍存在异常的微小振荡。这类微小振荡往往会被 CFC 60 级别的滤波器滤除, 一般不受到关注。随着对 CAE 仿真精度要求的提升, 滤波标准也随之提升至更高的频率。采用 CFC 180 滤波器对仿真加速度信号进行滤波情况下, 会突显这些异常振荡, 当加速度信号用于更精确的变形分析, 或用于标定辅助时, 这些偏差会误导分析优化。本文对加速度计异常振荡的来源进行分析, 并提出减小加速度信号振荡的解决方案。经验证, 在减小信号振荡, 提升加速度计读数精度上取得了良好的效果。

关键词: 碰撞; 振荡; 加速度

1 引言

整车碰撞仿真中, 通常采用 CFC 60 等级低通滤波器进行整车加速度滤波。这个滤波等级能够满足整车耐撞性能开发的需要, 但会滤除高频信息。

随着仿真精度的提升以及标准的提升, 拟采用更高的 CFC 180 滤波等级进行加速度信号对标。更高的滤波等级, 突显出碰撞仿真信号中存在的大量细碎振荡, 而在仿真动画中难以识别出这些振荡的原因。

为研究这些异常振动的来源, 采用某款车型的整车高速碰撞模型, 仅保留重力场, 去除包括初速度在内的其它载荷, 进行仿真计算。

仿真加速度数据经 CFC 180 滤波后, 仍能读取到峰值达 2g 的振荡 (如图 1)。这个振荡伴随整个碰撞过程, 并影响最终输出的加速度计信号稳定性。为减小加速度计的振荡, 本文针对该整车碰撞模型的动画、能量曲线等进行了一系列研究, 找到了部分产生加速度振荡的原因, 在不影响整车碰撞边界条件的前提下, 对进行优化改进。本文展示了以上所述的部分改进方案和改进后的效果。

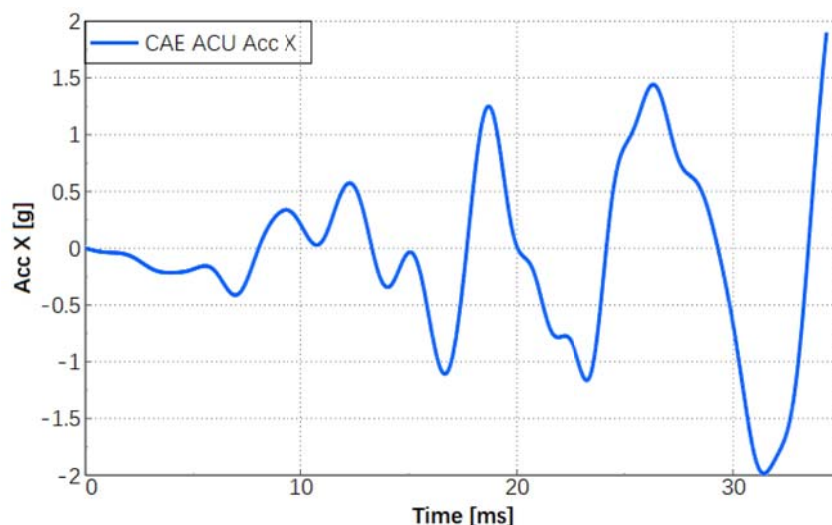


图 1 无初速度整车碰撞仿真中央通道加速度数据

2 加速度计振荡信号的来源

为找出加速度曲线的异常振荡的来源，对碰撞模型的 **d3plot** 动画进行分析。

理论上，无初始动能的碰撞模型应表现为静止，没有明显的运动。但从实际模型的仿真结果上看，发现以下组件存在运动：

- 1) 车身在 50 毫秒时间内，整体下沉了 7mm。
- 2) 气囊在 20ms 左右点爆
- 3) 安全带在 15ms 左右产生跳动
- 4) 部分单元在初始状态（即 **d3plot** 文件记录的状态）及动态松弛后的状态（即 **d3plot01** 文件记录的状态）存在位移

另外，针对能量曲线进行分析，发现轮胎的能量存在较大异常，需重点关注轮胎模型的准确性。

下面针对以上异常项进行分析。

2.1 重力的平衡

整车碰撞模型在建模中，虽然已根据前后轴载荷，对减震器弹簧设置初始预载。但由于不同工况配重的不同，以及计算过程中质量增量的引入，使得整车重力与减震器弹簧反力不平衡。这种不平衡会导致车身在仿真中下沉。

另外，动力总成通过悬置与车身连接，而悬置中的橡胶在计算的零时刻没有设置预应力，导致计算开始后，动力总成也会因为重力场下沉，直至其重力与悬置反力平衡。这个平衡过程需要 1 秒以上，远远超出平时计算碰撞所使用的 100 毫秒时长。因此，动力总成的下沉，也在碰撞仿真的全过程中影响计算结果。

2.2 轮胎的振荡

使用 LS-DYNA 进行整车碰撞仿真，通常采用 ***AIRBAG** 关键字来设置轮胎腔体的气压。经过对能量曲线的研究发现：与初速度的定义不同，***AIRBAG** 关键字定义的气压载荷并未在计算启动前进行初始化，而是在计算开始的零时刻瞬间加载。气压载荷的突然引入会引起轮胎壁的严重振荡。这些振动会经悬架传递到车身，进而引起加速度传感器位置的振动。

2.3 预紧式安全带、气囊的点爆

装配有完整约束系统的整车碰撞模型中包含气囊、预紧式安全带等组件。由于开发初期碰撞仿真模型精度有限，这些组件的点爆一般通过定义点爆时刻进行控制。

本文引用的是正面碰撞仿真模型，其中应用的约束系统，也是采用时间点爆，而非加速度阈值点爆。因此即使整车无加速度，约束系统仍会在指定时刻激活。

气囊、安全带在点爆时会产生震动，并通过车身结构传递到加速度传感器位置，从而影响其读数。

特别是安全带卷收器往往与侧碰加速度传感器距离较近，当预紧式安全带的卷收器点爆时，侧碰加速度传感器会采集到 20g 以上的振动加速度。

2.4 动态松弛阶段发生的振动

为准确模拟螺栓的失效，通常会将螺栓使用实体单元模拟，并在动态松弛阶段施加预紧力来实现零部件之间的连接。一般使用 ***INITIAL_STRESS** 关键字进行螺栓预紧力加载。

在预紧力加载时，以下问题若处理不当，则会引起零部件几何产生变形并产生振动：

- 1) 螺帽与搭接面之间存在间隙。这种情况下，加载时螺帽会与搭接面产生碰撞，引起振动。
- 2) 预紧曲线未设置上升段，而是直接达到峰值。对螺栓瞬间施加较大的预紧力，会引起振动
- 3) 无结构阻尼

若以上情况出现，并且这些预紧螺栓应用在加速度传感器附近，则会影响加速度计的读数。

除了螺栓预紧之外，在动态松弛阶段，整车接触也会起作用。若网格划分过程中处理不当，包含初

始穿透，在仿真计算开始时会转换为零部件的内能，随着仿真计算的进行，这些内应力会逐步转换为动能，引起周边零部件的振动。

3 稳定加速度数值的手段

经多轮的尝试，针对上一节提出的加速度计振荡来源，提出以下方案进行改进：

3.1 使用 dynain 文件进行预应力初始化

在整车碰撞模型中，除重力场外，删除其它所有载荷，进行 100 毫秒以上的计算。通过使用 *INTERFACE_SPRINGBACK 关键字，LS-DYNA 在计算完成后，会对最终状态输出一个 dynain 文件。这个文件包含了所有节点的坐标、单元应力应变等信息。

在进行正式计算时，利用 *INCLUDE 关键字引入该 dynain 文件，即可实现对模型状态的初始化。

这个方法的缺点是：只要模型有所变更，dynain 文件就需要更新。也就意味着，每次模型更新都需要额外进行一次整车碰撞计算，耗费计算资源。

3.2 充分利用动态松弛功能

动态松弛（关键字 *CONTROL_DYNAMIC_RELAXATION）能够在零时刻之前进行初始化计算。在这个初始化阶段，可以将重力、预紧力等载荷加入计算，并可以在这个阶段设置不同的控制参数。在本文关注的整车碰撞仿真中，可以将重力场、轮胎气囊、预紧力加入动态松弛阶段进行仿真，待这些载荷稳定后再开始正式仿真计算。

总体上说，在动态松弛阶段可以采用显式算法进行，也可以采用隐式算法进行。隐式算法更加适合预加载的计算。但 LS-DYNA 的隐式算法，对每百万单元需约 60GB 内存。吉利目前整车单元数已超过 700 万，HPC 无法满足 LS-DYNA 隐式计算的内存需求。故显式算法是目前进行动态松弛计算的首选。

使用显式算法进行动态松弛计算时，需要注意以下事项：

1. 为确保车身的重力与悬架反力的平衡，需确保动态松弛阶段至少运行 30 毫秒。
2. 为了加快振动的衰减，可以在动态松弛阶段引入一个较大的全局阻尼，在正式计算阶段切换为正常阻尼。

应用动态松弛手段进行碰撞仿真分析，每次计算仅需额外 30 毫秒左右的计算时间，相比于使用 dynain 文件映射的方式更节省计算资源，故推荐采用该方案。

3.3 关于安全带、气囊点爆影响的规避

在 LS-DYNA 中定义安全带预紧，通常使用 *ELEMENT_SEATBELT_PRETENSIONER 关键字，并在其中定义回卷的力-时间曲线。尽管这种简化模型在进行乘员保护性能开发时展现出较为良好的精度，但是简化模型产生的振动与物理安全带预紧器通过火药爆炸所产生的振动有所不同，会引起加速度计数值上的偏差。

与预紧式安全带一样，安全气囊的简化模型也存在类似问题：其点爆产生的振动与实际零件爆炸所产生的振动不同。

在面向整车耐撞性能开发的模型中，一般采用刚性假人，应用这些假人的主要目的是获得准确的配重，而非获取准确的假人伤害值。因此，在这些仿真工况下，建议其相对应的约束系统仿真模型不配置安全气囊；安全带仿真模型可以采用传统的紧急锁止式安全带，不采用预紧器设置。此举可以消除因安全带、气囊的点爆引起的异常振动。

3.4 加速度稳定效果

综合应用 3.2-3.3 所述的策略，重新进行无初速的整车碰撞仿真计算。

新的计算结果如图 2 所示，整车加速度振动幅值由 $\pm 2g$ 降低为 $\pm 0.2g$ ，证明以上改进方案能有效降低加速度数值振荡。

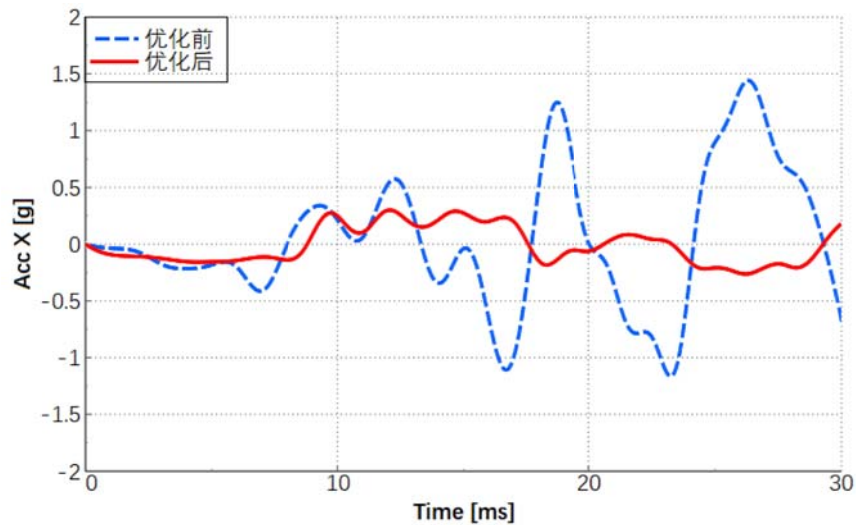


图 2 优化前后整车加速度对比

4 总结

整车加速度曲线的异常抖动有多种不同的来源。充分理解 LS-DYNA 关键字的原理，对模型进行有效地控制，能有效降低加速度曲线的误差。建议的关注点有：

1. 充分利用动态松弛功能，在这个阶段实现重力载荷、轮胎气压加载、螺栓预紧等载荷折平衡，并利用大阻尼进行快速的振动衰减。
2. 控制模型的初始穿透
3. 关闭约束系统的点爆功能

综合考虑以上关注点，可以有效地降低整车加速度的振荡，建议在对加速度数值敏感的工况上推广应用。

参考文献

[1] Hallquist, J. O., *LS-DYNA Keyword User's Manual Volume I*, Livermore Software Technology Corporation (LSTC), Livermore, CA, 2013

Abstract: Noise is usually observed in full vehicle crash simulation pulse. These noise can be masked out by CFC 60 class filter, so they are often omitted. As the increasing accuracy of crash CAE simulation, filter cut off frequency is increased to see more details in the pulse. By using CFC 180 filter, loads of noise in signal is unveiled. Abnormal noise could mislead design optimization when these noise is taken into account. This paper shows some finding on the source of the noise signal and presents some measure to minimize the influences from noises. Validation simulations show these measures are effective on improving simulation pulse accuracy.