MPP/LS-DYNA 模型切分对计算效率及结果精度的影响研究

郑颢 [1]，欧阳俊 [1]，王玉超 [1]，李伟 [1]，卢静 [1]

（1 广州汽车集团股份有限公司汽车工程研究院，广州 511434）

摘要：本文详细介绍了 MPP/LS-DYNA 切分控制的原理、切分核数控制参数设置及切分结果显示参数设置；然后介绍了基于坐标变换的 MPP 切分方式及控制参数，分析了不同的切分方式对计算效率及结果精度的影响，并以某车型偏置碰撞仿真为例，分析了切分方式不同导致计算效率及结果精度的差异，并对产生差异的原理做了简要分析；最后针对某些情况下出现计算结果差异性大的问题提出了一种模型切分控制方法，该方法的核心思想是将影响结果的关键部件分组限定在某个 CPU 内计算，既保证不同 CPU 核计算的结果的一致性又保证计算结果精度的可靠性，通过案例的对比分析表明该方法是行之有效的，该方法的原理是普适性的，汽车碰撞分析的其他工况及其他行业同样可以借鉴使用。

关键词：MPP/LS-DYNA；切分控制；计算效率；结果精度

0 前言

LS-DYNA 并行计算有 MPP（Massively Parallel Processing）版本和 SMP（Symmetric Multi-Processing）版本。SMP 是多个 CPU 之间共享相同的内存总线等资源，一般只能在单机上运行，计算效率受单机 CPU 性能及 CPU 核数限制。MPP 是每个 CPU 有独享的内存总线等资源，CPU 之间通过网络通信交换信息，可以在计算机集群上进行计算，计算速度可以大幅提升。MPP 计算能充分利用计算机 CPU 核数资源，大大提高计算的效率，但存在的问题是同一个模型用不同的 CPU 核数计算得到的结果会有差异，原因在于 MPP 会将模型切分（Decomposition）成许多份提交给每个 CPU 计算，切分的份数不同以及切分方式不同导致切分边界上的结果产生数值误差。

LS-DYNA 提供了很多 MPP 切分控制的参数，本文研究了不同的切分控制参数对计算效率及结果精度的影响，提出了一种减少不同 CPU 核数计算结果之间差异的切分控制方法，并以某款车型的偏置碰撞仿真分析为例，验证了这种方法的有效性。

1 MPP 切分原理介绍

MPP/LS-DYNA 通过切分（Decomposition）来实现多个 CPU 核对同一个模型的并行计算，切分把模型切分为若干个域分配给每个 CPU 核，理想的切分应该是每个 CPU 核的计算量近似相等，达到负载的平衡。域的边界是制约计算效率的一个重要因素，不好的切分将导致域和域之间产生较大的边界线或边界面，因此域和域之间的通信增多导致求解时间增长。

MPP/LS-DYNA 有两种切分算法，分别是 RCB（Recursive Coordinates Bisection）法和 Greedy 法，RCB 法是默认的切分算法。RCB 法的切分原理为：每次对半切分，选三根坐标轴中一根垂直的平面切分，选取沿坐标轴方向模型最长的一根轴作为切分轴，这种方法很容易导致模型沿坐标轴被切分成立方体状。例如建立一个简单的长 200mm 宽 140mm 高 120mm 立方体模型如图 1，长宽高分别对应沿着整体坐标系的 x、y、z 轴，用 8 个 CPU 核计算得到的切分结果如图 2 所示，切分过程如下：1、首先模型在 x 轴的尺寸最长，因此第一次切分将模型沿垂直 x 轴的平面被切成两份，如图 3(a)所示；2、第二次切分时，首次切分后的两

部分均在 y 轴方向的尺寸最长，因此第二次切分的每部分均沿垂直 y 轴的平面被切成两份，得到第二次切分结果如图 3 所示(b)；3、第三次切分时，第二次切分后的四部分的每部分均在 z 轴方向的尺寸最长，因此第三次切分的每部分均沿垂直 z 轴的平面被切成两份，得到最终图 2 的切分结果，模型被切成 8 份。

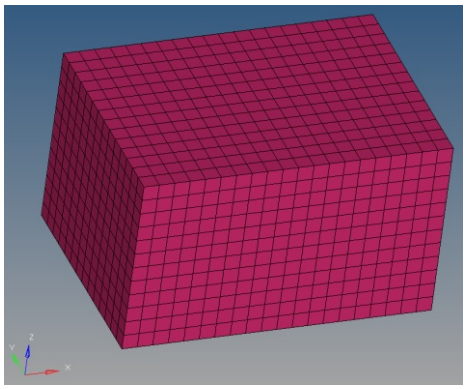


图 1 立方体模型

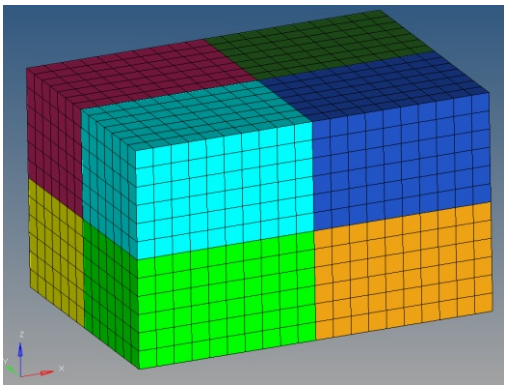
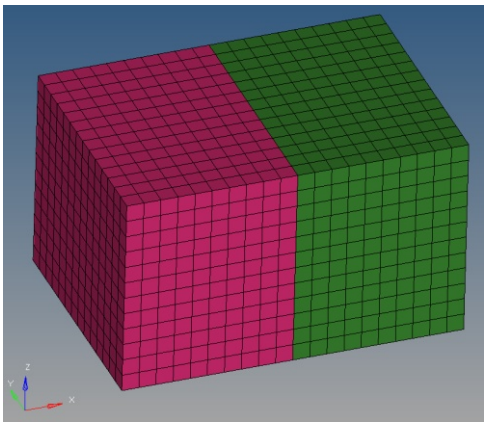
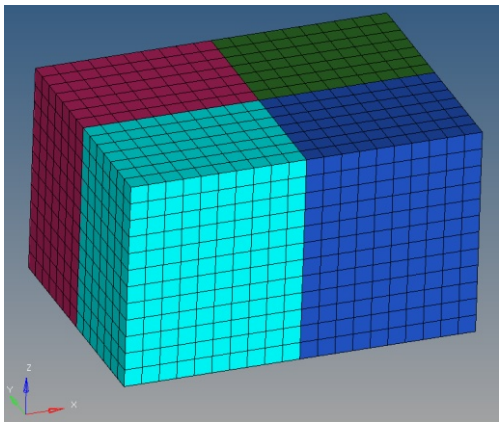


图 2 用 8CPU 核切分后的切分结果显示图



(a) 首次切分结果显示



(b) 第二次切分结果显示

图 3 立方体模型 8CPU 核切分结果示意图

2 切分核数控制及切分结果显示参数

MPP/LS-DYNA 有若干控制参数用于控制切分的核数及切分结果显示，便于查看最终的切分结果是否为需要的切分结果。第一个控制切分核数的参数为 CONTROL_MPP_ DECOMPOSITION_FILE，该参数创建包含切分信息的文件，子参数 NAME 可输入切分信息文件的名字，切分信息文件后缀一般为“.pre”，如果文件存在，则跳过切分步骤直接读取切分信息文件，如果不存在则创建文件。

MPP/LS-DYNA 切分运算比较消耗内存，有时甚至比模型运算消耗的内存更多。MPP 并行计算的提交运算参数中有两个指定内存的参数 memory 和 memory2，其中 memory 参数指定用于切分的内存大小，memory2 指定每个 CPU 核计算用的内存大小；只指定 memory 参数时 MPP/LS-DYNA 会默认 memory2 与 memory 相同，但这种情况下容易出现内存不足退出计算提升。以一个约 150 万单元的汽车正面偏置碰撞模型为例，开启第一个控制参数，在一台 8CPU 核 10G 内存的 64 位系统计算机上初次提交计算，输出得到一个切分信息文件 dcmp.pre，从计算输出信息如图 4 可知，用于切分的内存及 memory 为 163301653 words（ls-dyna 以 word 为内存单位，32 位系统中 1 word=4 Bype，64 位系统中 1 word=8 Bype），而每个 CPU 核需要的内存平均值为 42330746 words，可见模型切分需要的内存大于求解运算时每个 CPU 核需要的内存。第二次提交计算，这时已经有切分信息文件 dcmp.pre，MPP/LS-DYNA 不需要执行模型切分任务，直接调用 dcmp.pre 中的切分信息如图 5 所示，每个 CPU 核计算需要的内存平均为 46320973 words，如图 6 所示，说明由于省下了切分的内存资源，用于计算的内存资源多了。因此在计算机内存不够的情况下可以先执行切

分运算得到一个切分结果的.pre 文件，模型运算时直接调取切分好的结果，这样降低了运算超大模型时对计算机内存的要求。

```
Memory required to begin solution (memory=  163301653  memory2=   24977944 )
         Minimum   18018850  on processor     5
         Maximum   24977944  on processor    10
         Average   21418128

Additional dynamically allocated memory
         Minimum   13822888  on processor     6
         Maximum   26341462  on processor    10
         Average   20912618

Total allocated memory
         Minimum   32009147  on processor     5
         Maximum   51319406  on processor    10
         Average   42330746
```

图 4 首次提交时，内存需求信息输出示意图

```
MPP execution with      16 procs
Previous decomposition results will be read from file dcmp.pre
```

图 5 切分及计算需要的内存信息输出示意图

```
Memory required to begin solution (memory=   92906492  memory2=   92906492 )
         Minimum   18018850  on processor     5
         Maximum   92906492  on processor     0
         Average   26034341

Additional dynamically allocated memory
         Minimum   13822888  on processor     6
         Maximum   26341462  on processor    10
         Average   20286631

Total allocated memory
         Minimum   32009147  on processor     5
         Maximum  108628915  on processor     0
         Average   46320973
```

图 6 再次提交时，内存需求信息输出示意图

第二个控制切分核数的参数为 CONTROL_MPP_DECOMPOSITION_NUMPROC，该参数和上文第一个控制参数同时使用，通过其子参数 N 指定切分用的 CPU 核数。N 必须为提交计算命令行中指定 CPU 核数的倍数，否则按运算机器 CPU 核数切分。比如提交计算命令行中指定 CPU 核数为 16，则 N 必须为 16 的倍数，得到的切分结果才是 N 份，否则为 16 份。如果提交计算命令行中指定 CPU 核数为 1，则参数 N 为任意整数都能得到 N 份切分结果。

第三个控制切分结果显示的参数为 CONTROL_MPP_DECOMPOSITION_SHOW，使用该参数提交计算时会执行切分操作，切分完成后运算终止，生成一个 D3PLOT 文件，D3PLOT 文件可显示切分的结果，切分的份数为提交命令行中指定的 CPU 核数。该参数如果和第二个控制参数同时启用，可以在提交命令行中指定 1 个 CPU 核计算，得到第二个控制参数中指定的任意多个 CPU 核的切分结果。

需要注意，第二个控制参数必须和第一或第三个控制参数同时使用，如果和第一个控制参数同时使用，则写出或读取切分信息文件，计算不会终止，如果和第三个控制参数同时使用，切分完成后计算终止，切分结果在 D3PLOT 中显示。同时开启以上三个控制参数时不会输出切分信息文件，切分完成后计算终止，切分结果在 D3PLOT 中显示。

3 切分方式控制参数

3.1 切分坐标变换参数

上文提到默认的 RCB 切分方法每次都选取沿坐标轴方向模型最长的一根坐标轴作为切分轴对半切分，这样很容易把模型切分成多份的立方体形状，从计算效率考虑这往往不是期望的切分结果。因此 MPP/LS-DYNA 在对模型切分之前提供了一套坐标变换功能，切分算法直接作用于坐标变换后的模型上，切分结果再映射回原始未变换过的模型中。MPP/LS-DYNA 通过参数

CONTROL_MPP_DECOMPOSITION_TRANSFORMATION 实现坐标变换改变模型的切分方式，其输入卡片如下图 7，TYPE 参数指定变换的类型，RX、RY 和 RZ 分别表示对 X、Y 和 Z 轴旋转一个给定的角度，SX、SY 和 SZ 表示对 X、Y 和 Z 按一个给定的值缩放，S2R 表示变换为球坐标，C2R 表示变换为柱坐标，MAT 表示按指定的矩阵变换，VEC3 表示按指定矩阵的逆矩阵变换。

Transformation Card 1. For each transformation this card is required.

Card 1	1	2	3	4	5	6	7	8
Variable	TYPE	V1	V2	V3	V4	V5	V6	
Type	A10	F	F	F	F	F	F	
Default	none	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

Transformation Card 2. Additional card for TYPE set to one of VEC3, C2R, S2R, MAT.

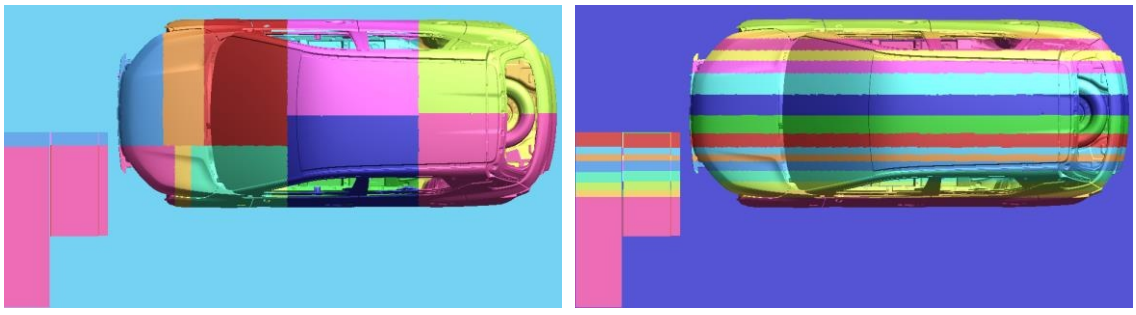
Card 2	1	2	3	4	5	6	7	8
Variable	V7	V8	V9					
Type	F	F	F					
Default	0.0	0.0	0.0					

VARIABLE	DESCRIPTION
TYPE	Which transformation to apply. The allowed values are RX, RY, RZ, SX, SY, SZ, VEC3, C2R, S2R, and MAT.

图 7 切分坐标变换控制参数输入卡

3.2 切分方式对计算效率的影响分析

以汽车整车偏置碰仿真分析工况为例，研究不同切分方式对计算效率的影响。选取某车型整车偏置碰有限元模型，模型规模为 140 万单元，整车前进方向为坐标系 x 轴，车侧面方向为 y 轴。模型 1 保持默认的切分方式，模型 2 开启设置 CONTROL_MPP_DECOMPOSITION_ TRANSFORMATION 参数，坐标变换类型设置 SY=1000，即对模型坐标系的 y 轴放大 1000 倍，对模型 1 和模型 2 执行 16CPU 核切分结果显示如图 8 所示，可见模型 2 的切分都是沿 y 平面切分的。



（a） 默认的切分结果　　（b） 设置坐标变换 SY=1000 的切分结果

图 8 不同切分方式的切分结果显示

在 CPU 性能相同的 HPC 计算平台上，模型 1 和模型 2 分别用 16、24、32 和 48 CPU 核提交计算，最终的计算耗时对比如图 9 所示，模型 2 相对于模型 1 的计算耗时分别减少了 23.9%、19.8%、18.3%和 18.5%，平均减少约 20%，说明切分方式不同确实会影响计算效率。

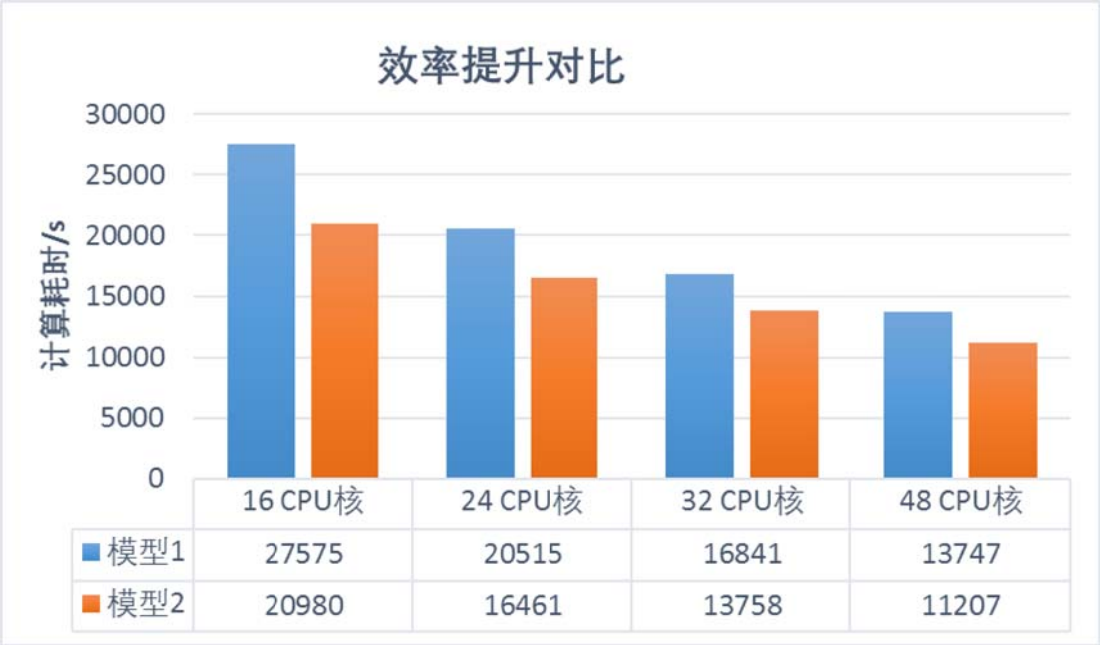


图 9 不同切分方式计算耗时对比图

汽车碰撞仿真中，正面碰撞一般设置 y 轴放大的坐标变换 SY，例如设置 SY=1000，即保证模型最终全部沿 y 平面切分，这种切分控制如上例结果所示对提升计算效率提升有明显的效果；侧面碰撞一般设置 x 轴放大的坐标变换 SX，例如设置 SX=1000，即保证模型最终全部沿 x 平面切分，同样可以明显提升计算的效率。

3.3 切分方式对结果精度的影响分析

对模型 1 和模型 2 用 16CPU 核计算，分析切分方式的改变对结果精度的影响。整车 B 柱下端加速度曲线对比如图 10，可见两者在前 60ms 基本一致，60ms 以后局部峰值上有差异；两者速度曲线对比如图 11，可见两者在前 80ms 基本重合，80ms 后有差异但差异不大。说明计算核数相同的条件下，切分方式的改变对结果精度会产生影响。

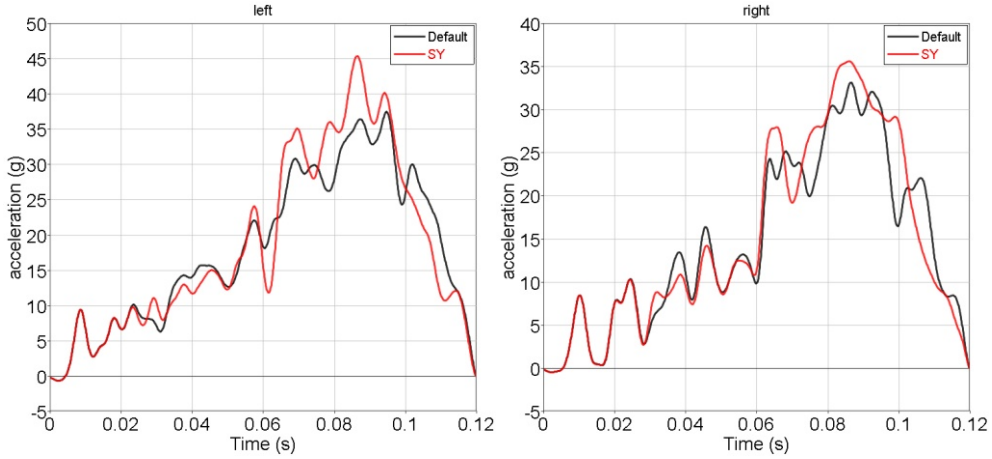


图 10 不同切分方式下 B 柱加速度曲线对比图

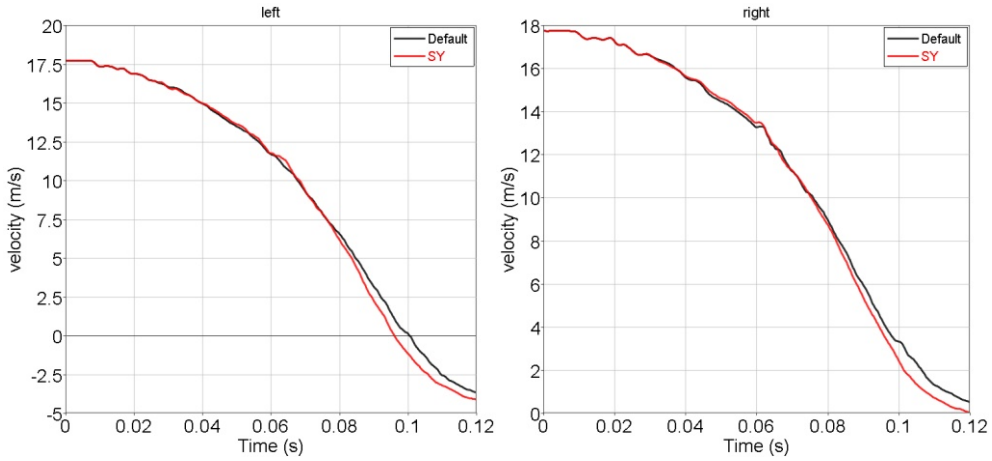


图 11 不同切分方式下 B 柱速度曲线对比图

4. CPU 核对结果精度的影响分析

4.1 CPU 性能不同对结果精度的影响分析

CPU 性能高低是否会对结果产生影响。以上文模型 2 为例，分别用主频为 3.3GHz、2.9GHz 和 2.66GHz 的三组 16 核 CPU 来计算，得到 B 柱加速曲线的结果对比如下图 12，可见三条曲线完全重合，对比前纵梁的变形模式发现完全重合。因此得出结论，CPU 性能高低不会对结果产生影响，同一个模型只要计算的 CPU 核数相同，得到的结果就完全相同。

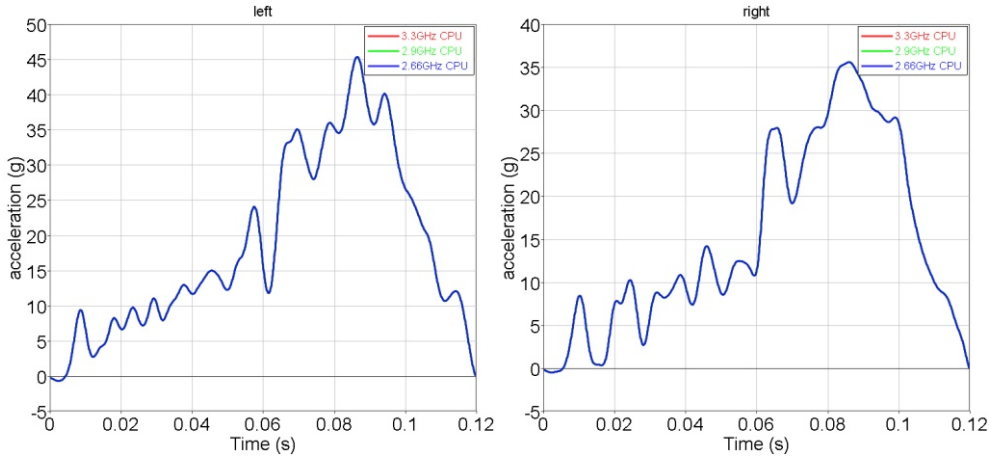


图 12 CPU 核数相同主频不同得到的 B 柱加速度曲线对比图

4.2 CPU 核数不同对结果精度的影响分析

切分方式相同但计算的 CPU 核数不同时结果也会有差异，仍以模型 2 为例，分别用 24 核和 28 核计算，得到的 B 柱加速度曲线如下图 13 所示，可以看出两者有明显的差异，几乎每个峰值都产生了差异。再对比两者的速度曲线，如图 14，可看出速度曲线也有明显差异，速度为零时刻有明显不同。进一步对比发现两者机舱前纵梁的变形模式也有差异，如图 15 所示，两者叠加后的变形可看出明显差异，如图 16 所示。对于汽车正面碰撞工况来说，纵梁是主要承载部件，变形模式是否合理直接影响正碰的性能，这种差异显然是不能接受的。正是由于纵梁是主要的承载部件，因此纵梁变形模式的明显差异导致了加速度以及速度曲线的明显差异。

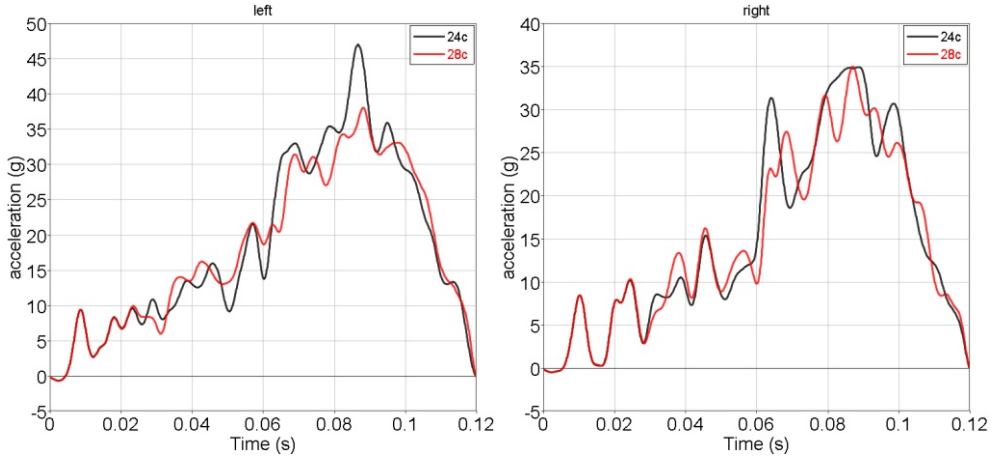


图 13 不同 CPU 核计算得到的 B 柱加速度曲线对比图

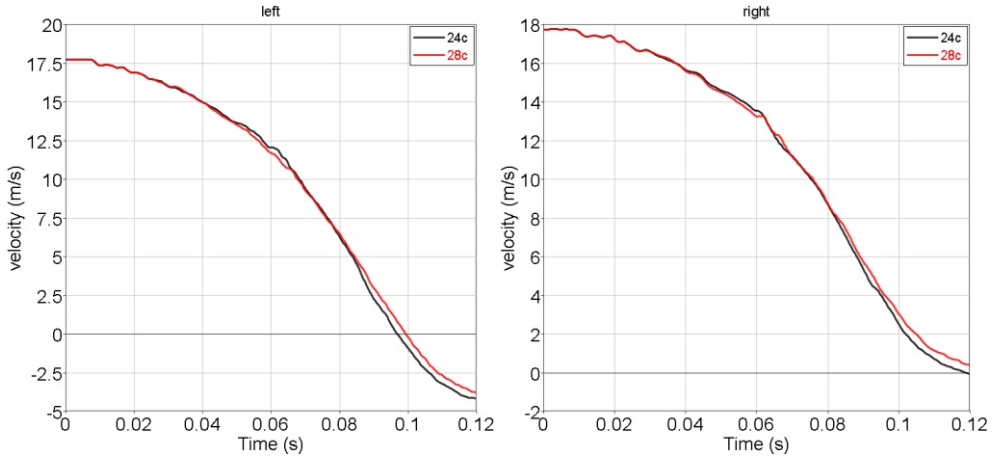
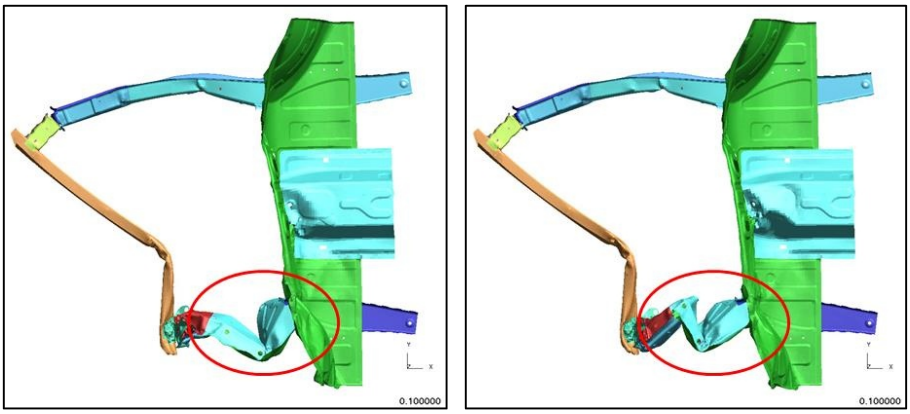


图 14 不同 CPU 核计算得到的 B 柱速度曲线对比图



（a） 24 核纵梁变形模式　　（b） 28 核纵梁变形模式

图 15 不同 CPU 核计算得到的机舱前纵梁变形模式对比图

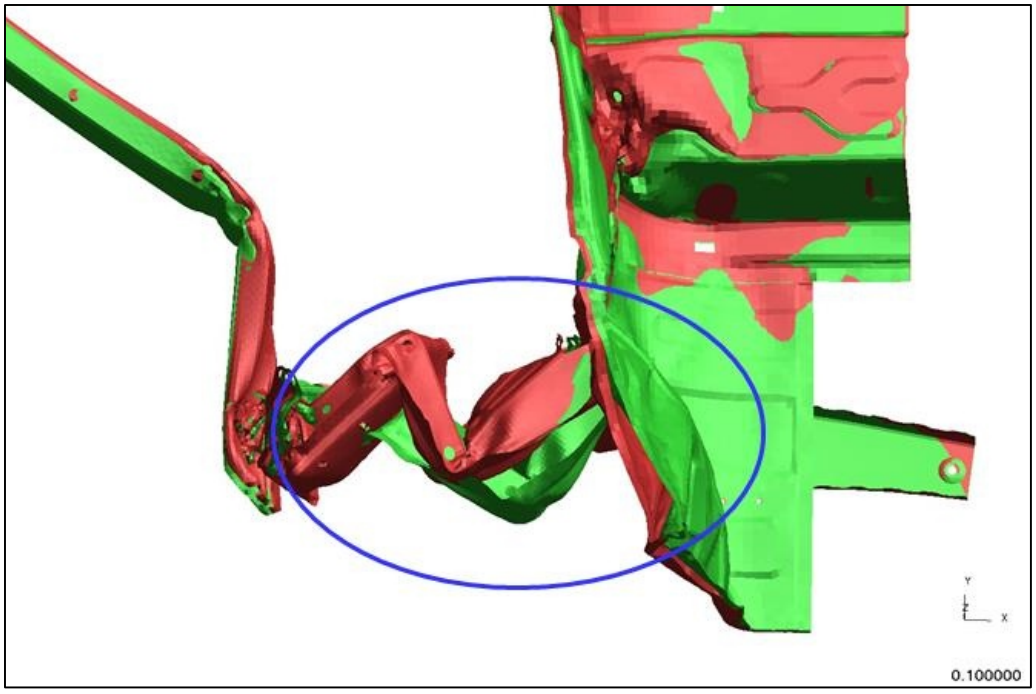


图 16 不同 CPU 核计算得到的前纵梁变形模式叠加（绿色 24 核，红色 28 核）对比图

4.3 结果产生差异的原因分析

Brian Wainscott[2]等的研究认为 CPU 核数不同导致计算结果有差异是由数值计算的舍入误差导致的，典型如几个浮点数的加分运算，计算机每次只能对两个数运算，数与数之间加法运算的顺序不同结果有时会有差异，比如三个浮点数 101.0、1.009 和 0.00910 做四位精度的加法运算，如果运算顺序为如下式子：

$$(101.0 + 1.009) + 0.0910 = 102.0 + 0.0910 = 102.0 \quad (1)$$

则结果为 102.0，如果调整运算顺序为以下式子：

$$101.0 + (1.009 + 0.0910) = 101.0 + 1.100 = 102.1 \quad (2)$$

则结果为 102.1，可见两者有近 0.1%的差异，这种差异如果通过每个步长累计最终就会出现宏观上能看到的明显差异。结合 CPU 切分情况，如果某次 101.0 和 1.009 被切分到同一个 CPU，而 0.0910 被切分到另一个 CPU，自然 101.0 先与 1.009 相加对结果做数值舍入，然后再与 0.0910 相加得到最终结果为 102.0，如果另一次切分 CPU 核不同时，则有可能 1.009 与 0.0910 被切分到同一个 CPU，最终得到 102.1 的结果。因此，CPU 核数不同则结果一般会有差异，差异的大小取决于切分导致的数值计算舍入误差的累计程度。

5. 提升计算精度的控制参数及方法

5.1 计算结果精度可靠性分析

模型 2 用 24 核和 28 核计算的结果有明显差异，这种差异在汽车碰撞仿真中是不能接受的。那么哪个计算的结果与实物模型更接近呢，既然差异是由于 CPU 切分导致的数值计算舍入误差引起的，于是可以断定，如果计算全部在一个 CPU 核内完成，则其精度是相对较高的，因为模型不用切分从而消除了 CPU 核之间数值计算的舍入误差。对模型 2 用一个 CPU 核计算，得到的结果的加速度曲线和速度曲线与 24、28 核计算的结果对比如下图 17、18，可见 28 核计算的结果与一个 CPU 核计算的结果吻合度更高，24 核计算的结果与前两者有明显差异，说明 24 核计算的结果产生了较大的数值舍入误差，其结果的精度较差。

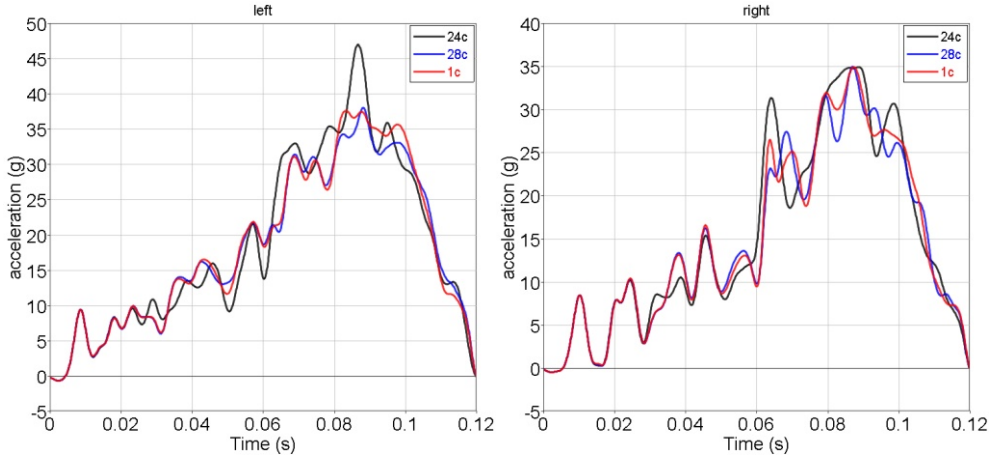


图 17 24、28CPU 核计算与 1CPU 核计算得到的 B 柱加速度曲线对比图

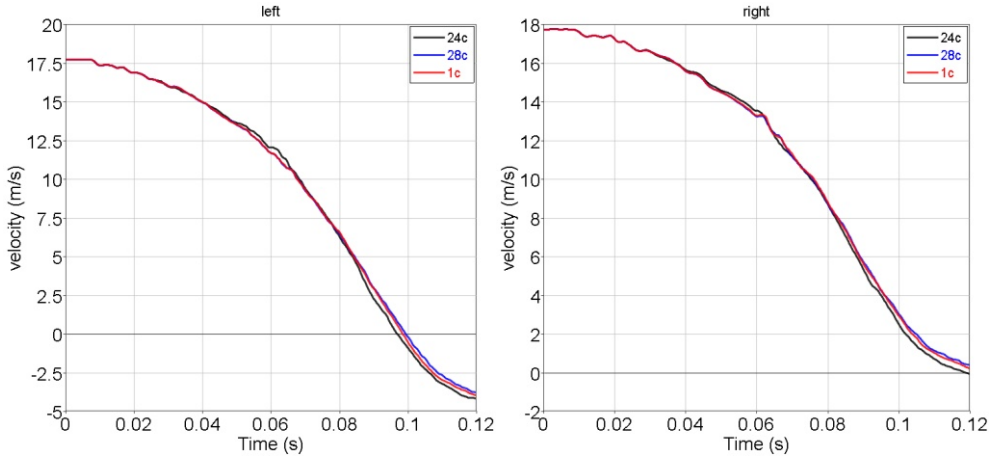


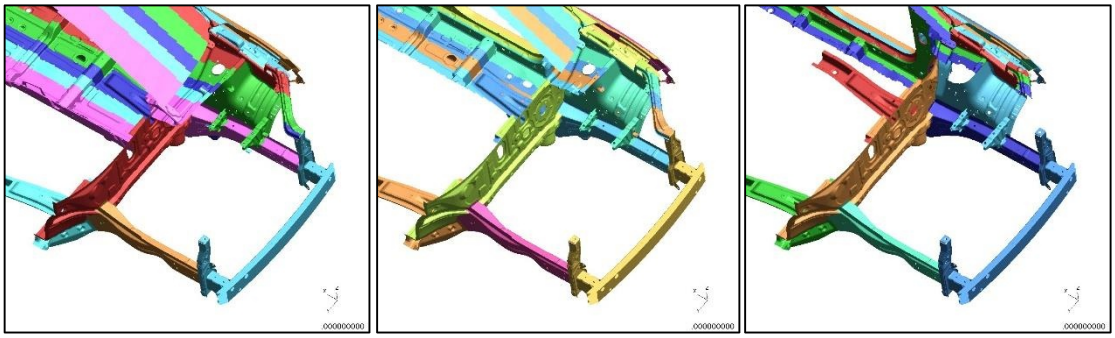
图 18 24、28CPU 核计算与 1CPU 核计算得到的 B 柱速度曲线对比图

5.2 提升结果一致性的控制参数及方法

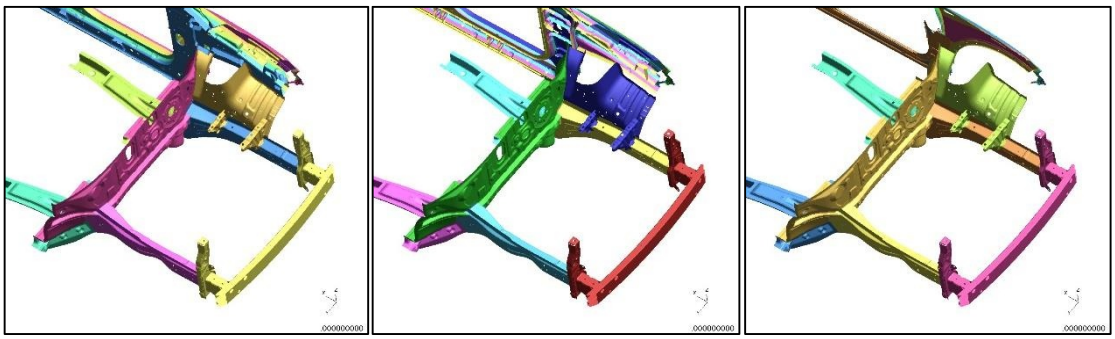
MPP/LS-DYNA 的参数 CONTROL_MPP_DECOMPOSITION_ARRANGE_PARTS 可实现将某个 PART 或 PART SET 定义的部件集合切分到一个 CPU 内，运用此参数及基于上述断定，本文提出了一种减少不同 CPU 核计算的结果之间差异的方法，以模型 2 为例该方法的实施过程如下：开启该参数，将前纵梁、前防撞梁吸能盒、前围板以及纵梁根部结构等与参与变形的关键部件分别建立七个 PART SET 赋予上述参数，部件分组情况如下表 1，输入卡片的 TYPE 设置为 11，即每个 PART SET 包含的部件被切分到一个 CPU 核内，修改后的模型为模型 3。用 12、16、24、28、32 和 48 CPU 核切分显示结果如图 19，七种颜色代表包含七组部件的切分域，与预期结果相符。

PART SET ID	包含的零部件
1	左前纵梁内板、左前纵梁外板
2	右前纵梁内板、右前纵梁外板
3	前防撞横梁，前吸能盒
4	前围板及其上布置的横梁
5	左纵梁根部支撑加强结构
6	右纵梁根部支撑加强结构
7	左悬置安装板、左轮罩板

表 1 用于控制模型切分的 PART SET 分组表



（a） 12 CPU 核切分结果　　（b）16 CPU 核切分结果　　（c）24 CPU 核切分结果



（d） 28 CPU 核切分结果　　（e）32 CPU 核切分结果　　（f）48 CPU 核切分结果

图 19 增加部件切分控制后的切分结果显示

将模型 3 分别提交至 12、16、24、28、32 和 48 核计算得到计算结果。B 柱加速度曲线对比如图 20，可见六条曲线的吻合度非常高，只在局部峰值上略有差异；B 柱速度曲线对比如图 21，可见四条曲线基本完全重合；前纵梁的变形对比如图 22，六种颜色代表六组结果，可见前纵梁变形模式高度一致。从加速度、速度、纵梁变形模式的对比说明六组不同 CPU 核计算得出的结果差异性很小，完全在工程可接受的误差范围内。

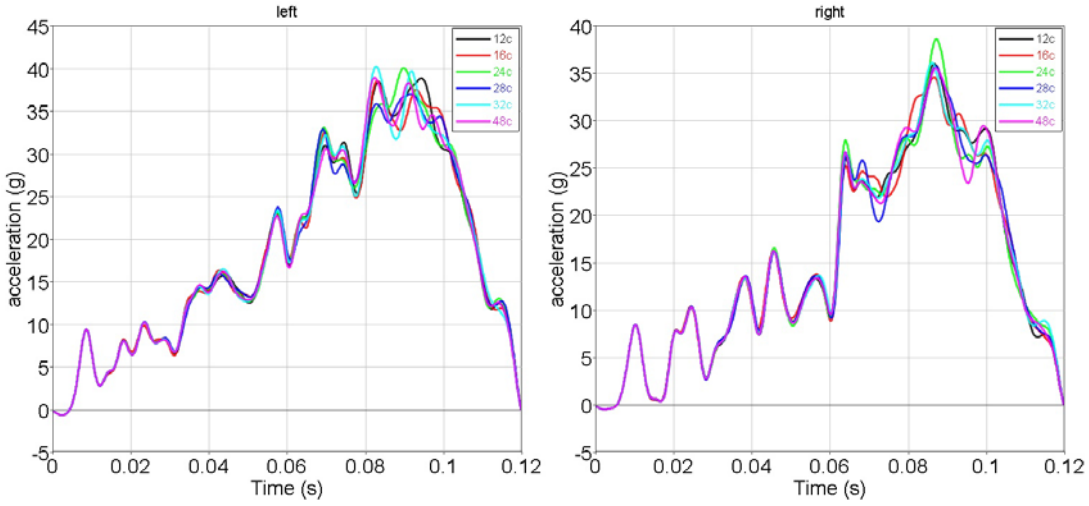


图 20 设置部件切分控制后，不同 CPU 核计算得到的 B 柱加速度曲线对比图

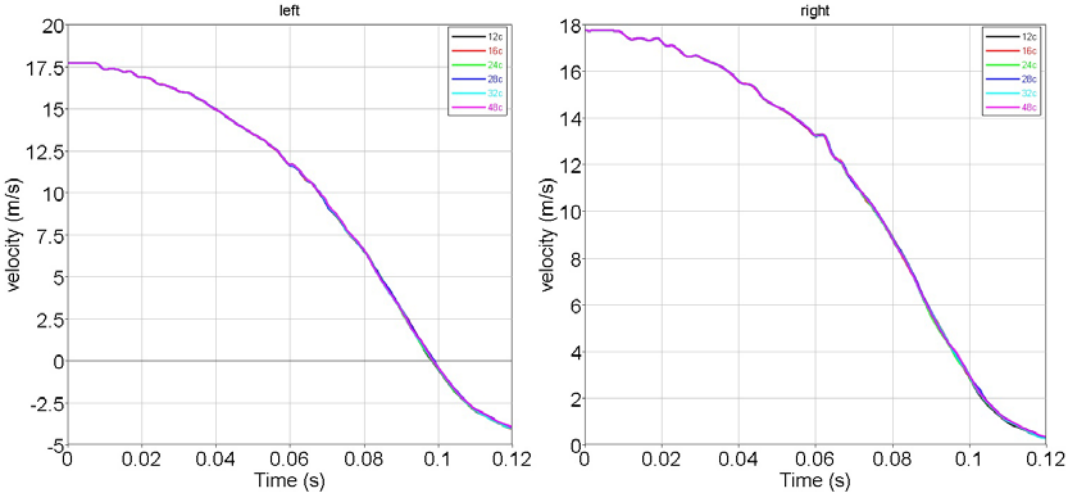
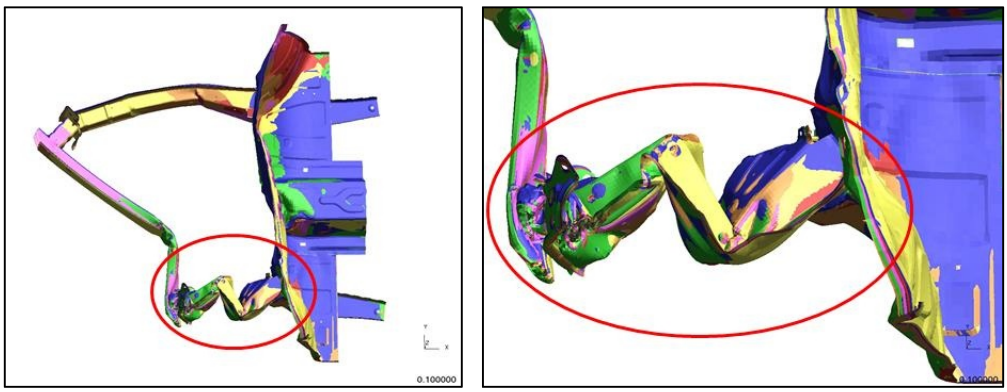


图 21 设置部件切分控制后，不同 CPU 核计算得到的 B 柱速度曲线对比图



（a） 前机舱结构变形结果叠加图　　（b）纵梁变形模式对比图

图 22 设置切分控制后，不同 CPU 核计算得到的纵梁变形叠加对比图

将模型 3 用 28CPU 核计算与模型 2 用一个 CPU 核计算的结果进行对比，如图 23、24 所示，可见加速度与速度曲线两者都是高度吻合的，说明运用本文的控制方法得到的计算结果其精度是可靠的。上述分析表明本方法有效规避了因 CPU 切分导致的数值舍入误差，对保证分析结果的精度有非常明显的效果。需要说明模型 1、模型 2 和模型 3 之间只在多核计算时 CPU 切分不同，用一个 CPU 计算则没有切分区别，计算结果是完全相同的。

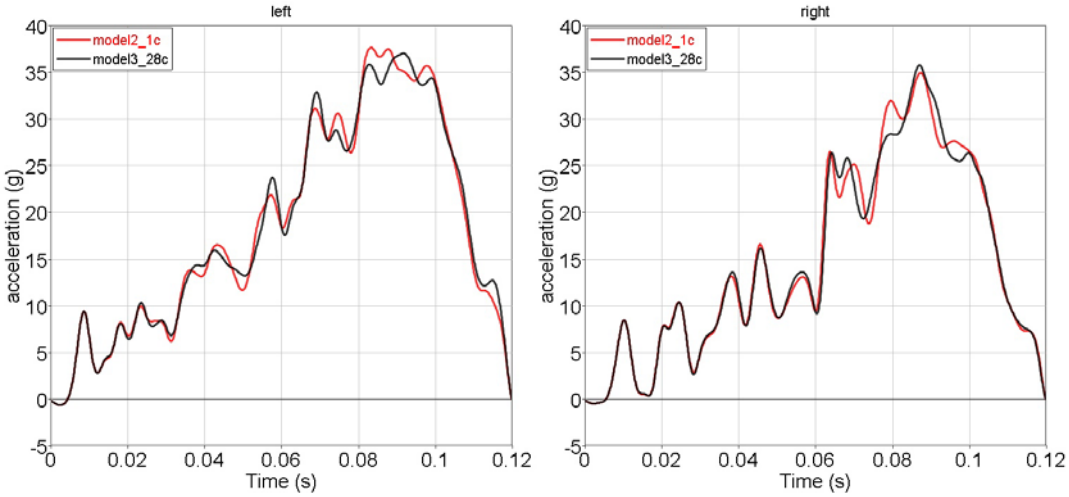


图 23 模型 3 的 28CPU 核计算与模型 2 的 1CPU 核计算得到的 B 柱加速度曲线对比图

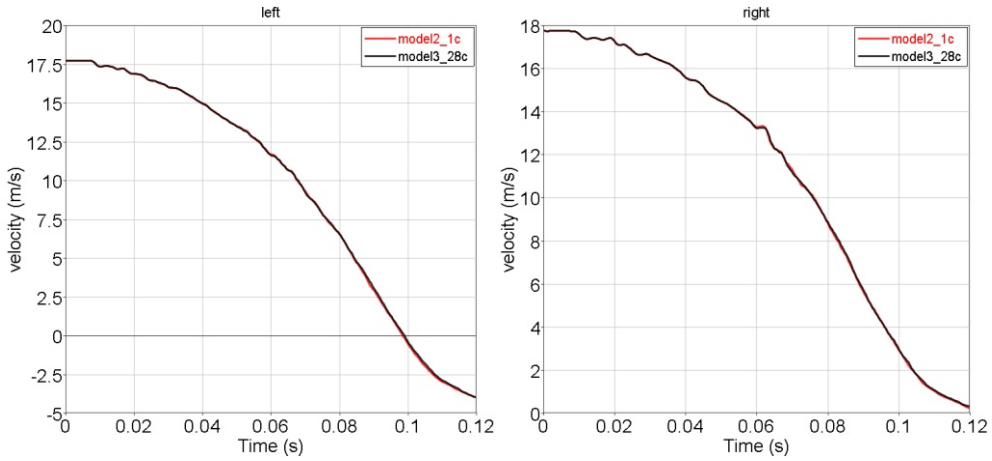


图 24 模型 3 的 28CPU 核计算与模型 2 的 1CPU 核计算得到的 B 柱速度曲线对比图

上述分析表明，本文提出的控制方法能明显减少不同 CPU 核计算的结果之间的差异性，保证计算结果的一致性，同时又保证了计算结果精度的可靠性。对于汽车碰撞仿真的其他工况如侧碰、后碰等，可基于同样的原理对参与变形的主要部件按上述方法设置参数控制，达到不同 CPU 核计算的结果差异性可控的效果。该方法的原理是普适性的，其他行业同样可以根据具体问题灵活借鉴使用。

6 结论及总结

1、介绍了 MPP/LS-DYNA 切分控制的原理；

2、介绍了切分核数控制参数设置及切分结果显示参数设置；

3、介绍了基于坐标变换的切分方式控制方法，以某车型偏置碰撞分析为例说明切分方式对计算效率的影响，表明默认的切分方式在计算效率上往往不是最优的，对于汽车正面碰撞仿真建议设置 SY，使得模型全部沿垂直 y 轴的平面切分，对应汽车侧面碰撞仿真建设设置 SX，使得模型全部沿垂直 x 轴的平面切分；

4、分析了 CPU 核对结果精度的影响，表明 CPU 性能不会影响精度，只要 CPU 核数相同，得到的分析结果完全一致；

5、对不同 CPU 核数计算结果产生差异的原理做了简单介绍，即差异主要是由于数值计算的舍入误差导致的。以某车型偏置碰撞分析为例说明了这种差异有时候会比较大，工程上难以接受。

6、提出了一种减少不同 CPU 核计算结果之间差异的切分控制方法，该方法的核心思想是将影响结果的关键部件分组限定在某个 CPU 内计算，既保证不同 CPU 核计算的结果的一致性又保证计算结果精度的可靠性。以某车型偏置碰撞分析为例进行验证分析，结果表明运用该方法后改善效果显著。该方法的原理是普适性的，汽车碰撞分析的其他工况及其他行业同样可以根据具体问题灵活借鉴使用。

参考文献

[1] LS-DYNA_KEYWORD USER'S MANUAL Volume I R7.1，2014.

[2] Wainscott B, Han Z, Processor Count Independent Results:Challenges and Progress. 11th European LS-DYNA Conference 2017.

Abstract: In this paper, the principle of MPP / LS-DYNA decomposition control, the setting of the parameters for controlling decomposition cores and the parameters for displaying decomposition results are introduced in detail. Then, the MPP decomposition mode and its control parameters based on coordinate transformation are introduced, and the influence on calculation efficiency and result accuracy resulting from different decomposition modes is analyzed. Taking the simulation of one vehicle offset collision(ODB) as an example, the difference on calculation

efficiency and result accuracy caused by different decomposition modes is analyzed, and the principle of producing the difference is also analyzed briefly. Finally, a new control method of model decomposition is proposed to solve the problem on big differences of the results in some cases. The core of this method is to limit the key components that affect the results into one CPU for calculation, so as to ensure the consistency of calculation results from different CPU cores and ensure the reliability of the results' accuracy. Through the comparative analysis of the cases, this method has been proved to be effective and its principle is proved to be applicable. They can also be used as the reference for other conditions of automobile collision analysis and other industries.

Keyword: MPP/LS-DYNA, Decomposition control, Calculation efficiency, Result accuracy