

Simulation and Optimization on Full Vehicle Yaw Vibration Excited by Tire Non-uniformity

轮胎不均匀激起整车横摆振动的模拟与优化

杨树凯

2018年06月

目 录

1

整车横摆振动模拟与验证 Full vehicle yaw vibration simulation and verification

2

整车横摆振动发生机理分析 Mechanism analysis for Full vehicle yaw vibration

3

轮胎不均匀量对整车横摆振动影响分析 Influence of Tire Non-uniformity

4

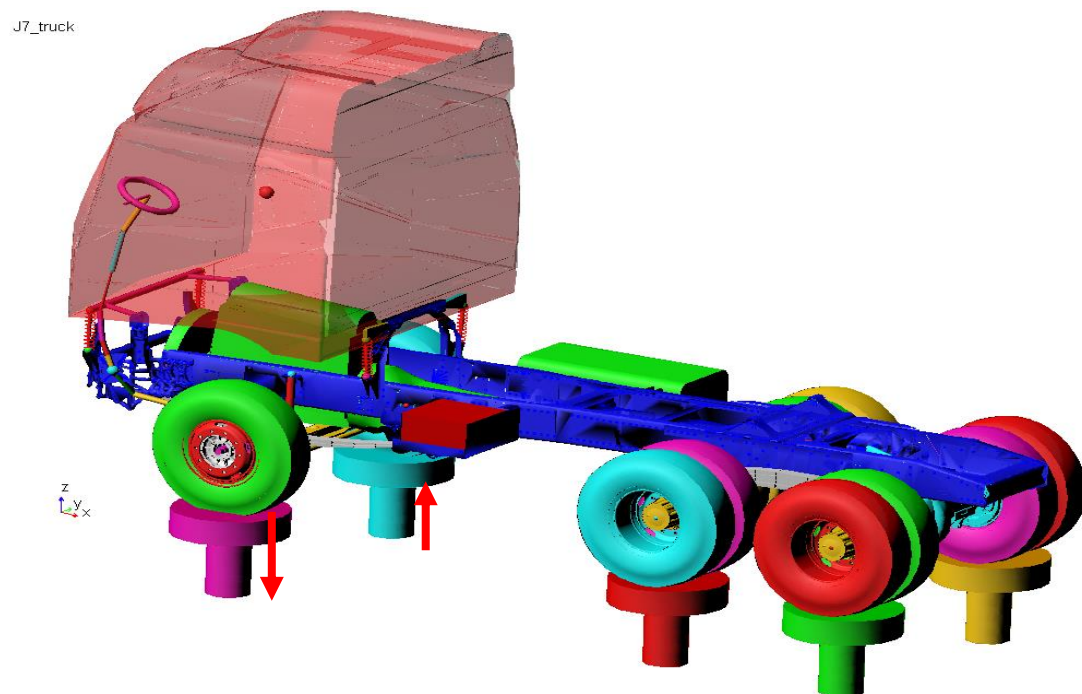
整车横摆振动的改进措施及效果分析 Optimization Measures and Results

5

分析总结 Summary

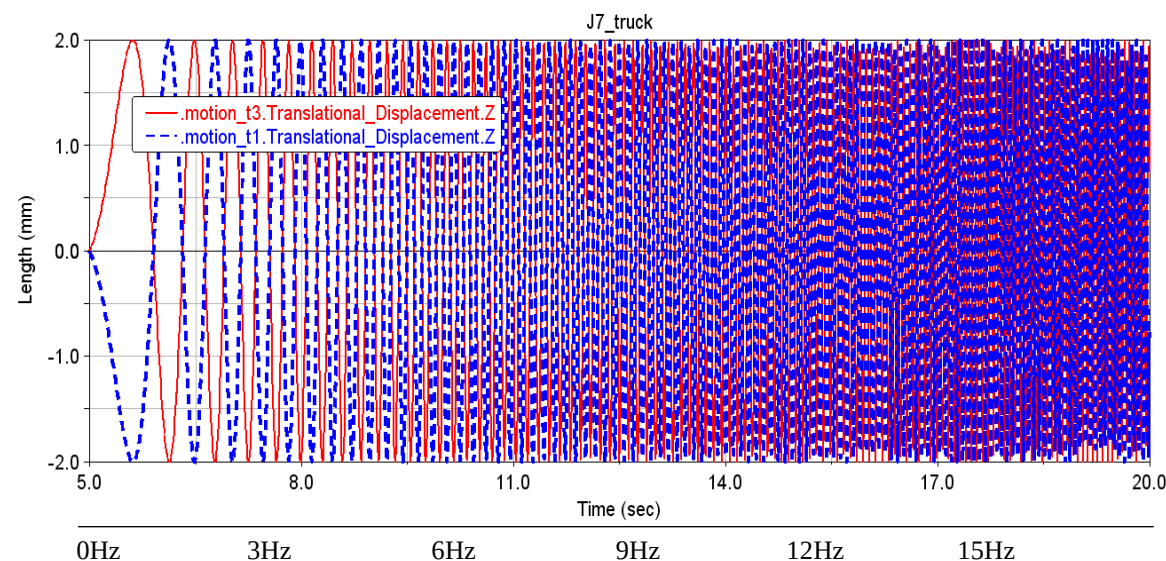
1. 整车横摆振动模拟与验证 Full vehicle yaw vibration simulation and verification

1.1 前桥左右轮胎不均匀对整车的振动输入



`sweep(time,1,5.0,0,1,25,20,0.01)*step(time,4.99,0,5.0,1)`

模型激励：前桥左右轮反相位扫频位移激励



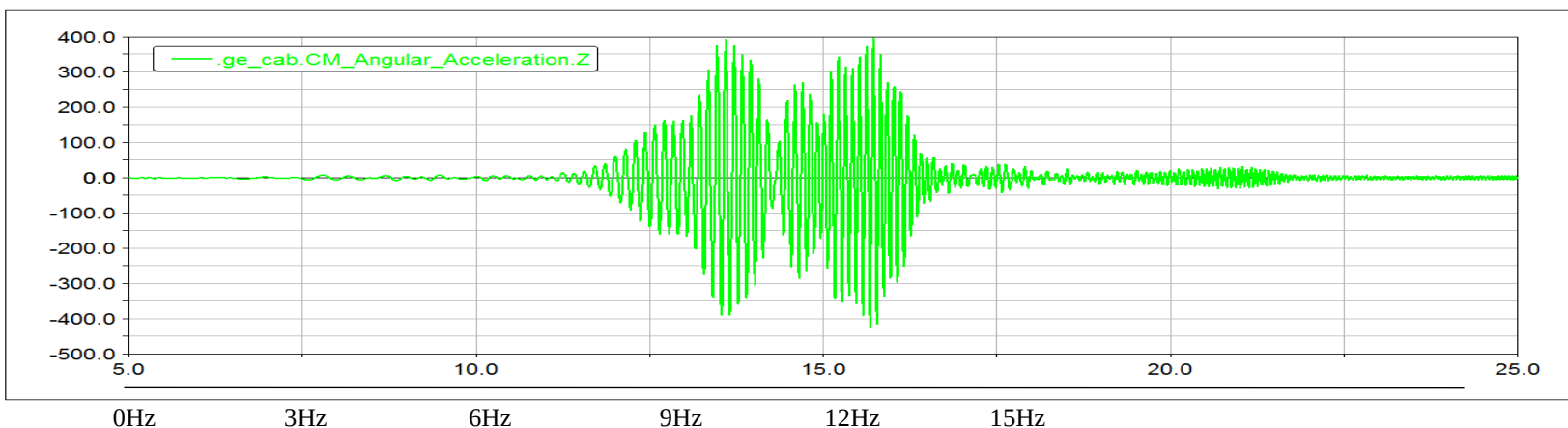
前桥左右轮反相位激励扫频曲线

整车横摆振动的激励源：前桥左右轮反向位扫频激励，幅值2mm，频率0-20Hz。

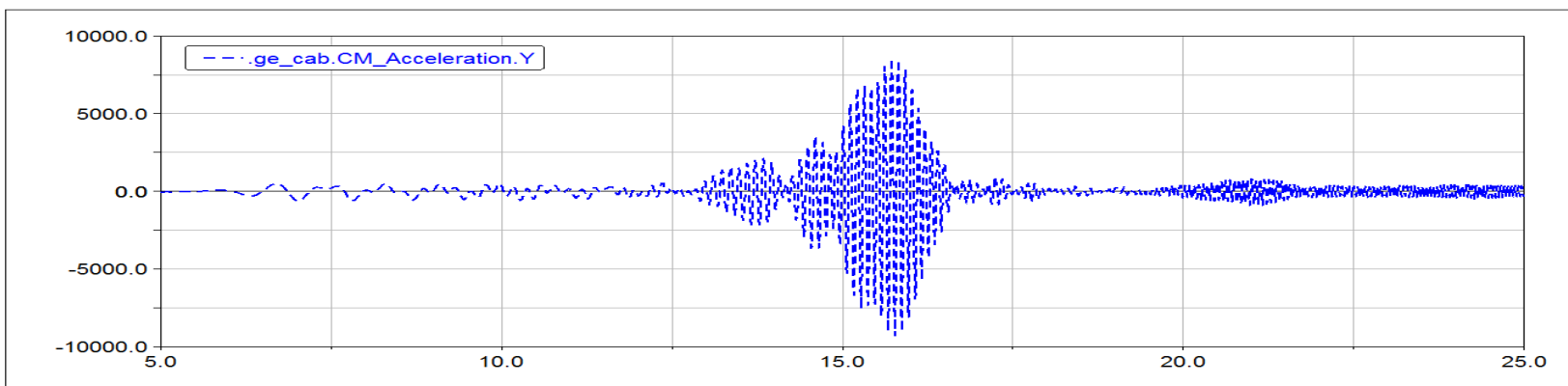
1. 整车横摆振动模拟与验证 Full vehicle yaw vibration simulation and verification

1.2 整车横摆振动现象的模拟结果

Cab横摆角加
速度振动响应



Cab侧向加速
度振动响应

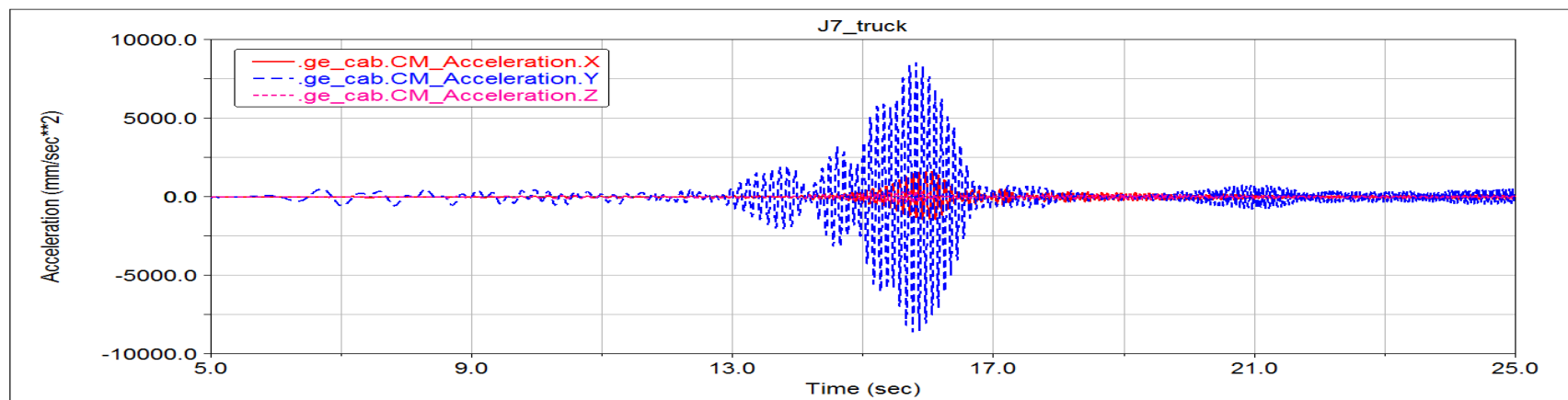


整车横摆振动响应-驾驶室的横摆和侧向振动在8-10Hz处出现峰值。

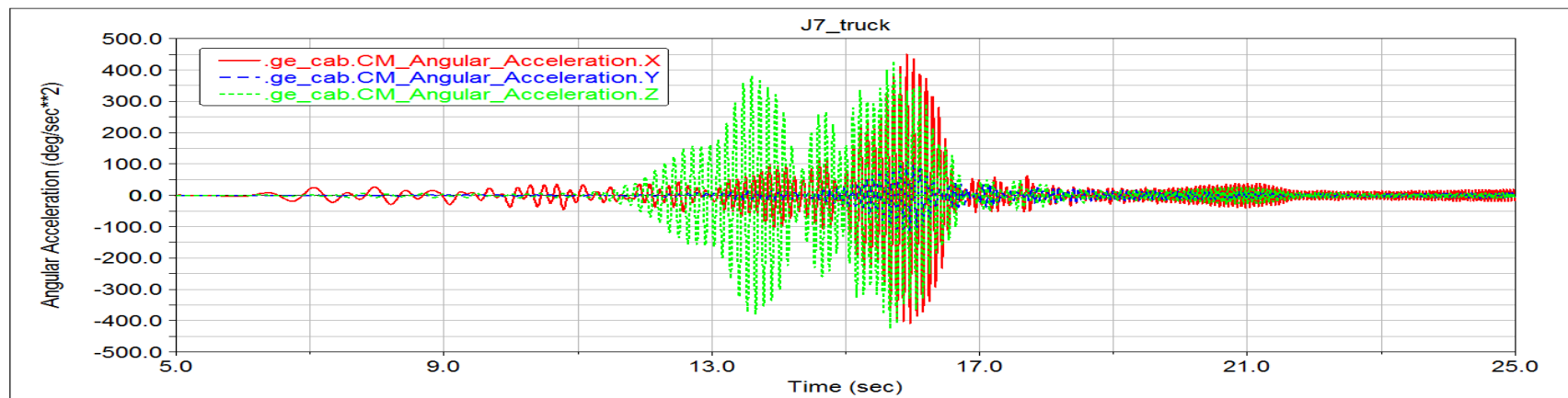
1. 整车横摆振动模拟与验证 Full vehicle yaw vibration simulation and verification

1.3 前桥反相位扫频激起的整车横摆振动现象的模拟结果

Cab三向线振动
加速度响应



Cab三向角振动
加速度响应

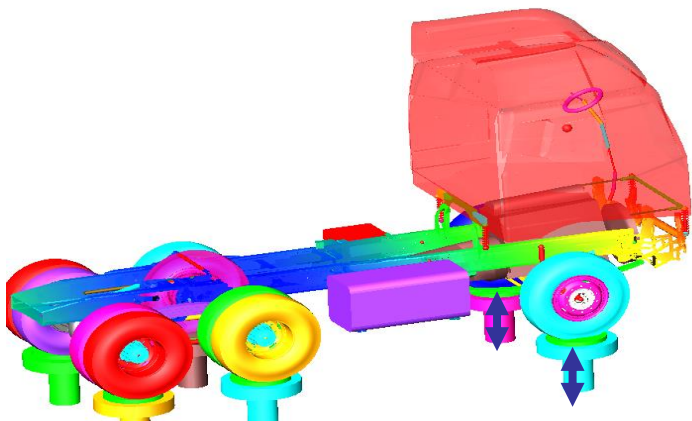


驾驶室的6各个方向振动响应比较看，横摆、侧向与侧倾在8-10Hz附近出现峰值。

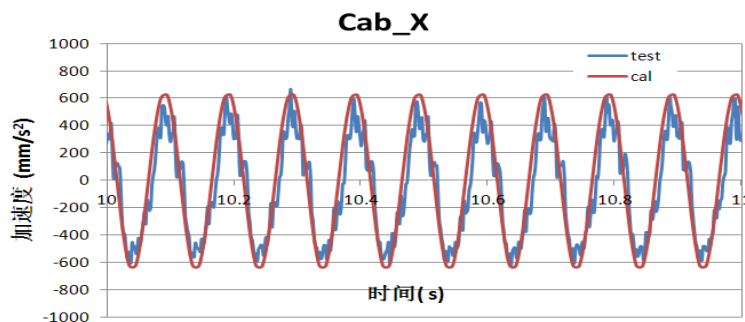
1. 整车横摆振动模拟与验证 Full vehicle yaw vibration simulation and verification

1.4 整车振动响应与模态分析结果的试验验证

1) 整车空载10Hz横摆振动响应模拟分析结果验证



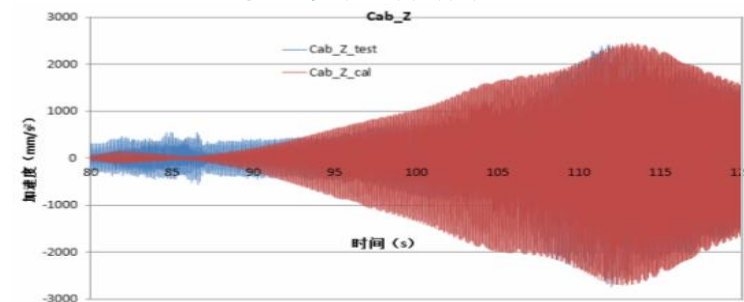
整车空载台架试验后桥平跳



整车定频响应结果验证



台架试验扫频激励



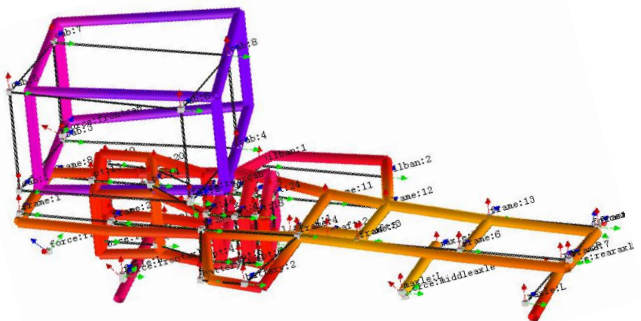
整车扫频响应结果验证

整车横摆异常振动验证：频率精度100%(试验10Hz，计算10Hz)；响应幅值精度95%，振动时域曲线一致好。

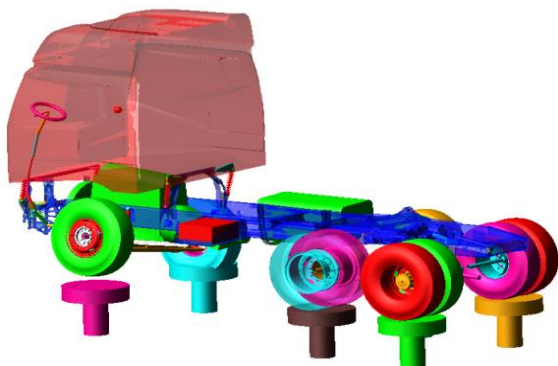
1. 整车横摆振动模拟与验证 Full vehicle yaw vibration simulation and verification

1.4 整车振动响应与模态分析结果的试验验证

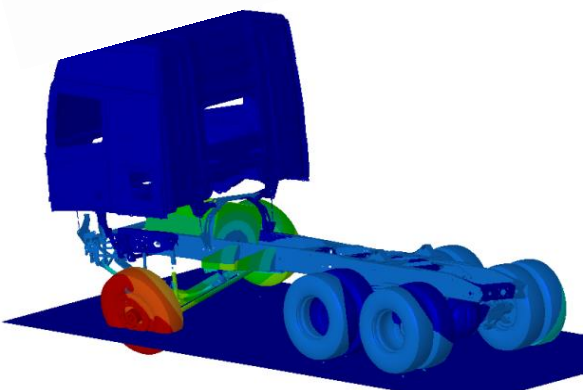
2) 整车横摆异常振动模态的分析结果与试验验证



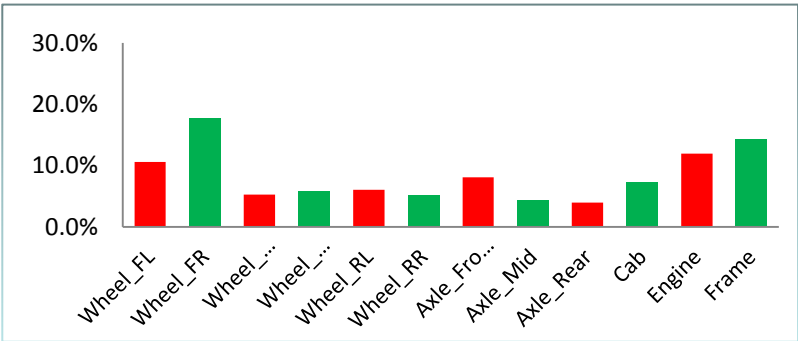
整车模态试验 前桥反跳10.7 Hz



整车多体动力学模态计算 前桥反跳10.1Hz



整车模态综合 前桥反跳10.5Hz



前桥反跳模态贡献量

整车横摆异常振动模态验证：整车模态综合模型10.5Hz、整车多体模型10.1Hz、整车试验10.7Hz，模拟试验结果一致度大于90%。

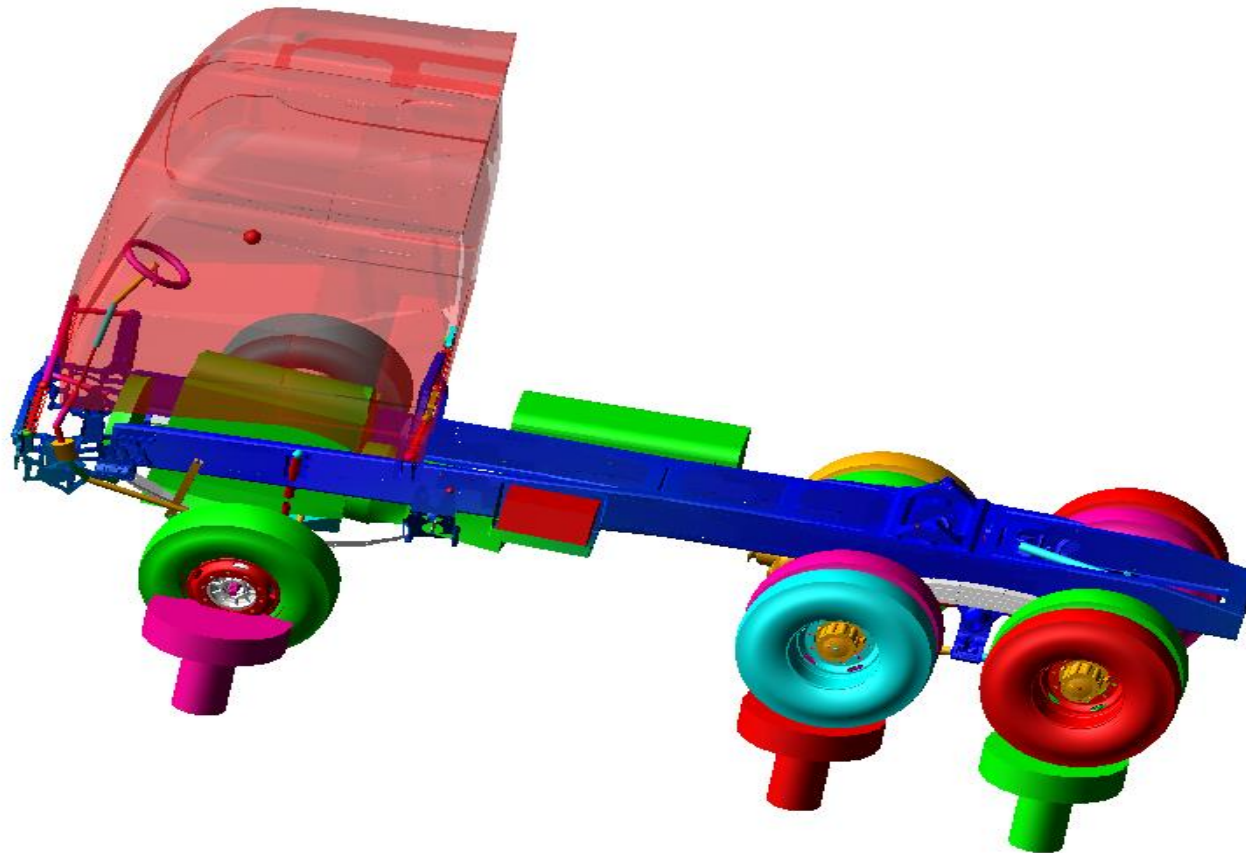
2.整车横摆振动的发生机理分析 Mechanism analysis for Full vehicle yaw vibration

2.1 整车及主要总成的模态分布

1) 10Hz的整车模态

EIGEN_1 Mode=26 Frequency=10.1701 (Hz)

整车低频模态中
10Hz附近驾驶室
横摆、总成横摆
、前桥反相位跳
动振动模态振型



整车振动模态分析结果：10Hz附近存在驾驶室和动力总成横摆及前桥反相位跳动的整车模态。

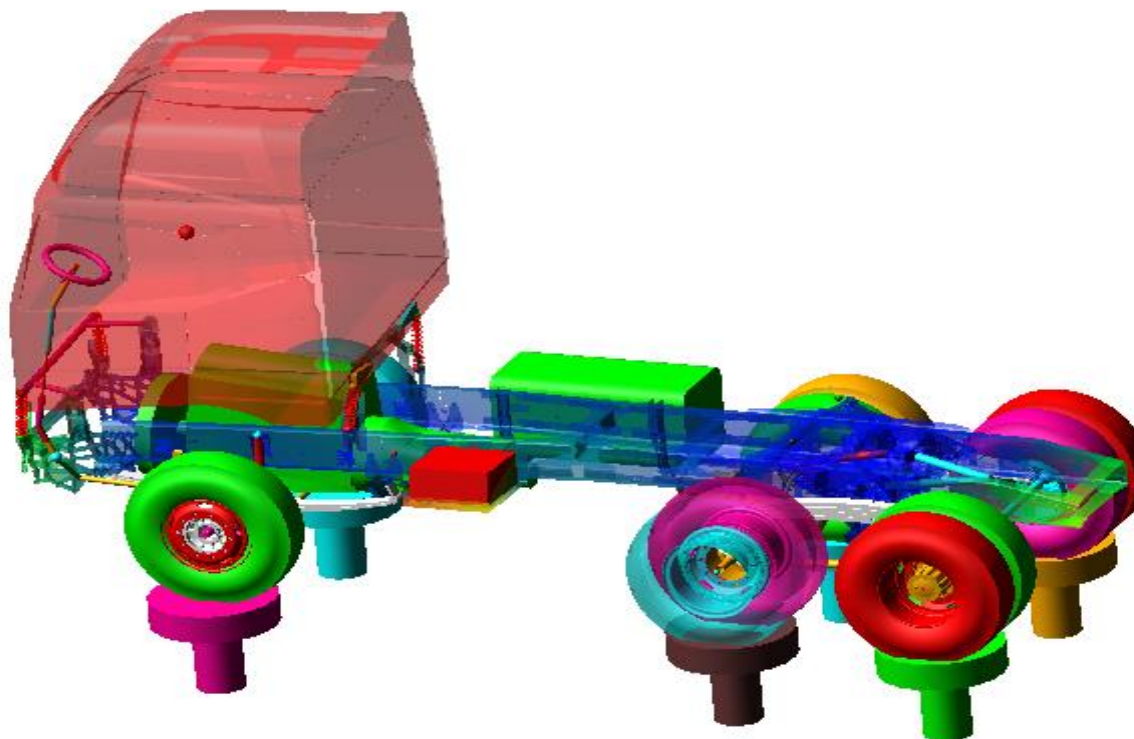
2.整车横摆振动的发生机理分析 Mechanism analysis for Full vehicle yaw vibration

2.1 整车及主要总成的模态分布

2) 8Hz的整车模态

EIGEN_1 Mode=30 Frequency= 7.8411 (Hz)

整车低频模态中
8Hz附近的驾驶
室横摆模态振型

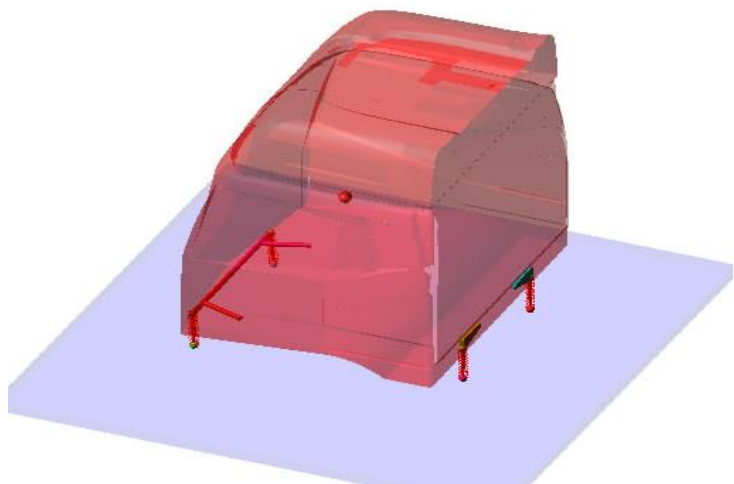


整车振动模态分析结果：8Hz附近存在驾驶室横摆振动为主的整车模态，含总成纵向振动。

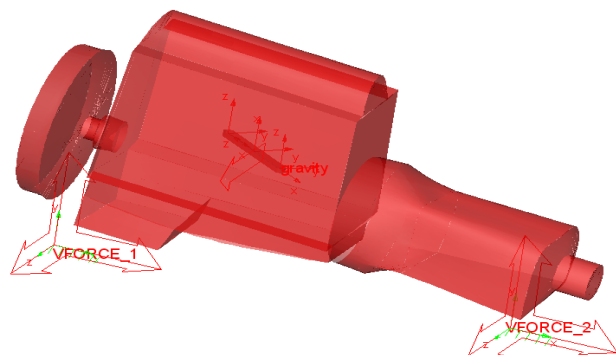
2.整车横摆振动的发生机理分析 Mechanism analysis for Full vehicle yaw vibration

2.1 整车及主要总成的模态分布的不合理性

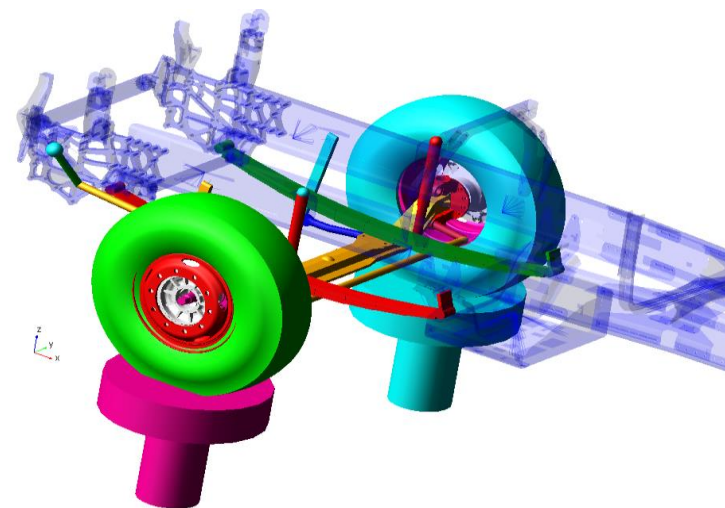
3) 三个子系统模态(整车横摆相关)



驾驶室横摆模态7.9Hz



动力总成横摆模态8.5Hz



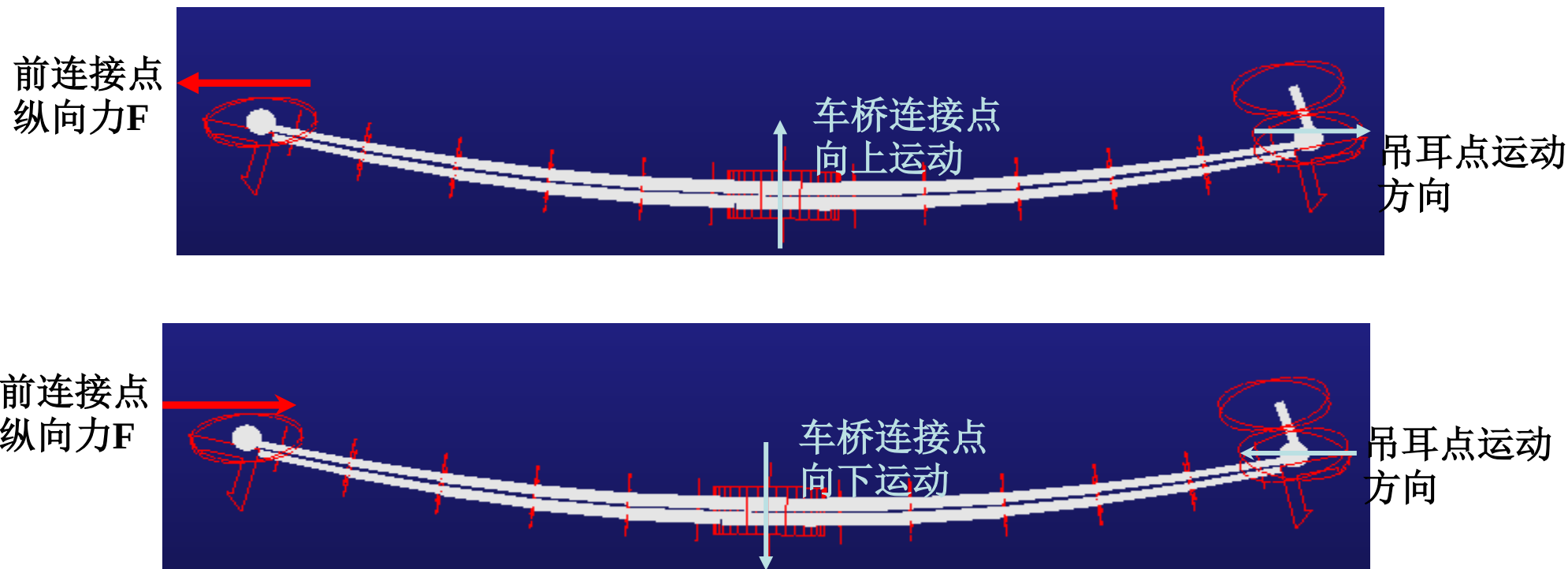
前桥反相跳动模态10.0Hz

各子系统振动模态分析结果：驾驶室横摆、总成横摆及前桥反相跳动模态均在8-10Hz附近。

2.整车横摆振动的发生机理分析 Mechanism analysis for Full vehicle yaw vibration

2.2 前桥左右轮反相位垂向扫频激起整车横摆振动的机理

1) 板簧结构决定车桥踏步伴随横摆运动



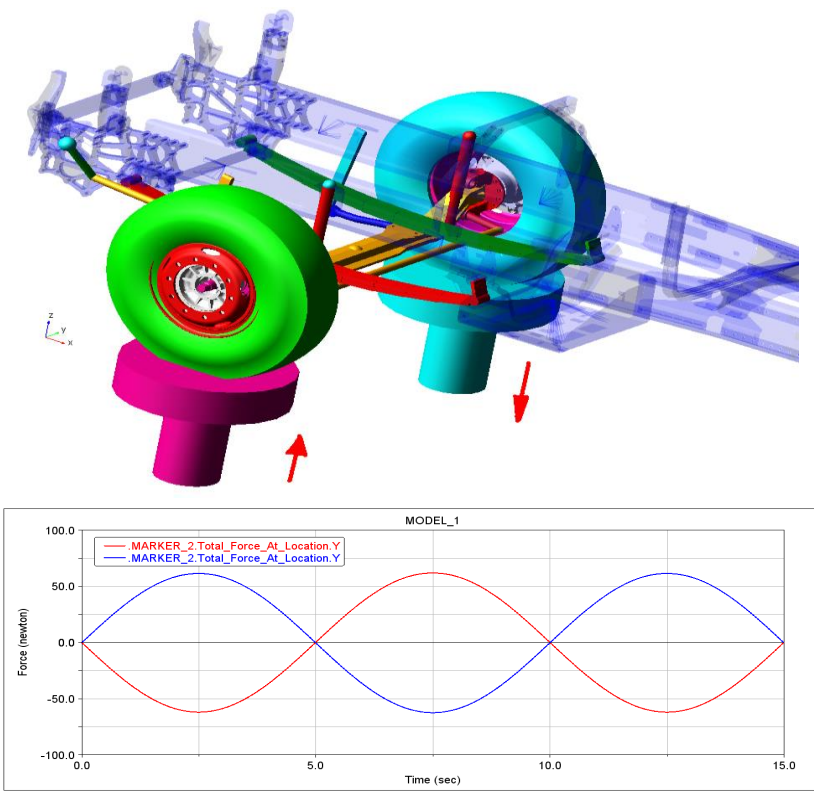
前桥左右车轮上下反向运动导致板簧前连接点纵向力交互变化，形成前桥运动及整车横摆激励力矩。

钢板弹簧悬架结构的基本运动属性：前桥反相位跳动引起车桥横摆运动。

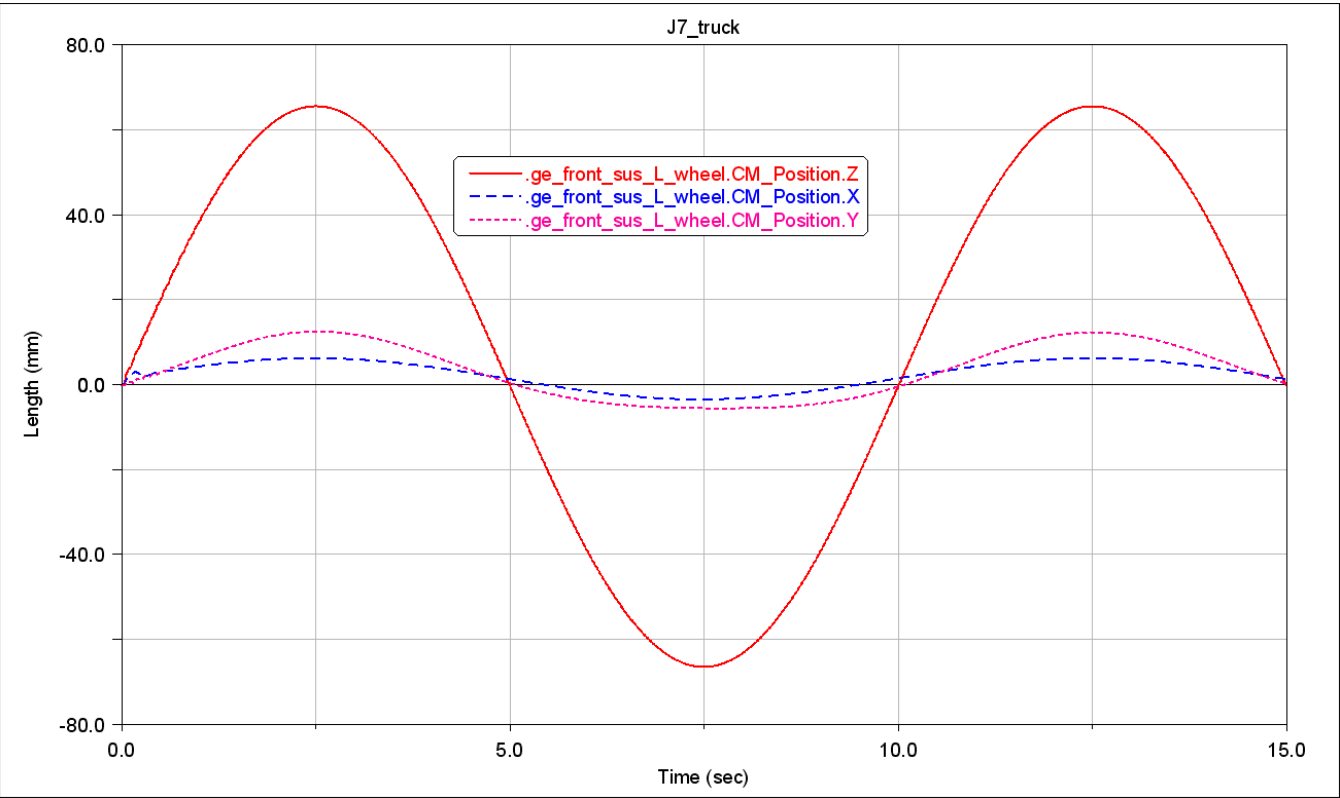
2.整车横摆振动的发生机理分析 Mechanism analysis for Full vehicle yaw vibration

2.2 前桥左右轮反相位垂向扫频激起整车横摆振动的机理

2) 前桥的运动特性分析



前悬架左右轮的反相位运动驱动



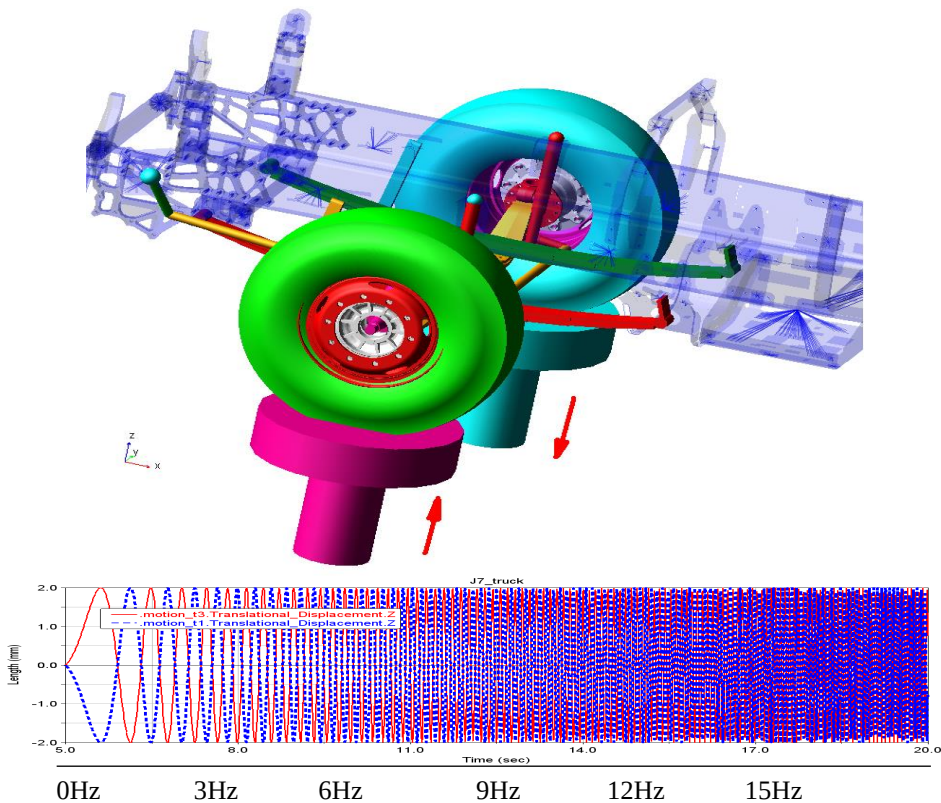
左侧车轮轮心的垂向、纵向及侧向位移量

前桥的运动特性分析--前桥反相位跳动时引起的车桥横摆运动。

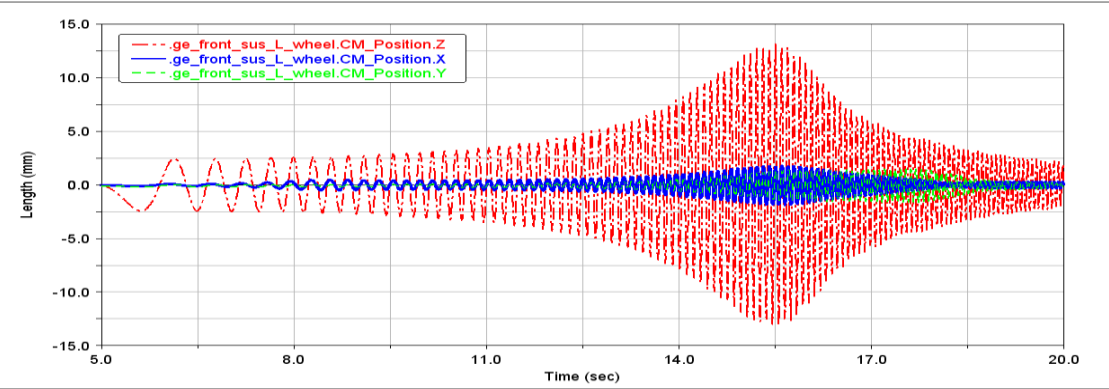
2.整车横摆振动的发生机理分析 Mechanism analysis for Full vehicle yaw vibration

2.2 前桥左右轮反相位垂向扫频激起整车横摆振动的机理

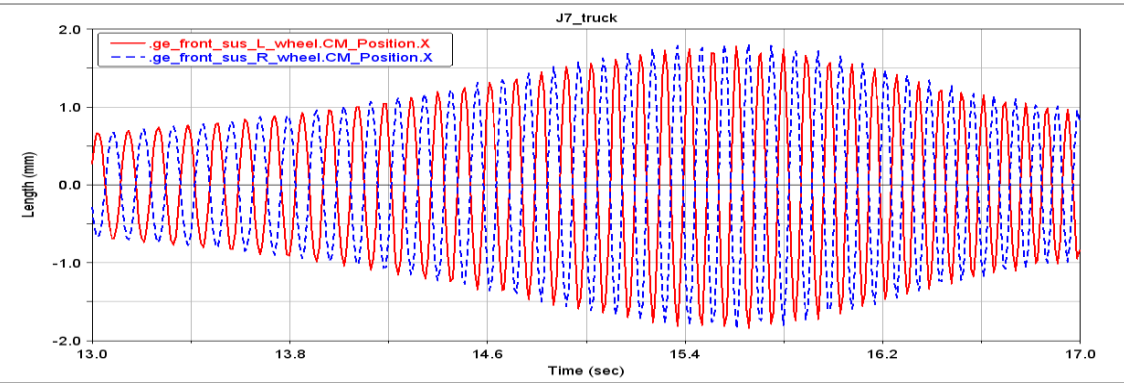
3) 前桥的振动特性分析



对前悬架系统进行左右轮的反相位扫频激励



前桥左侧车轮垂向、纵向、侧向振动响应



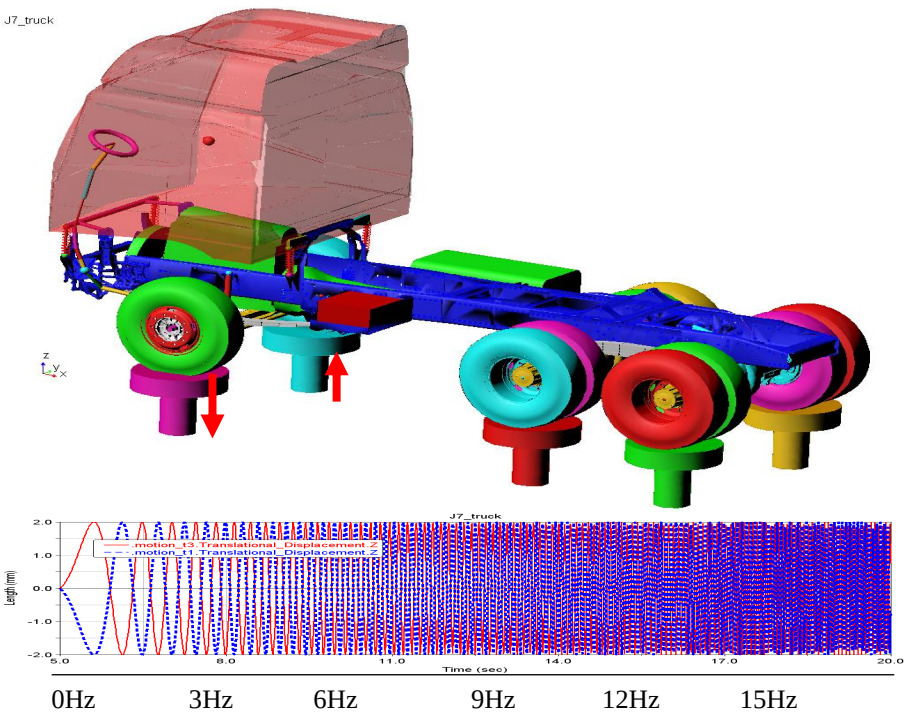
前桥左右轮轮心反相位纵向振动--车桥横摆振动响应

前桥的振动特性分析：左右轮反相扫频激励产生的前桥横摆振动。

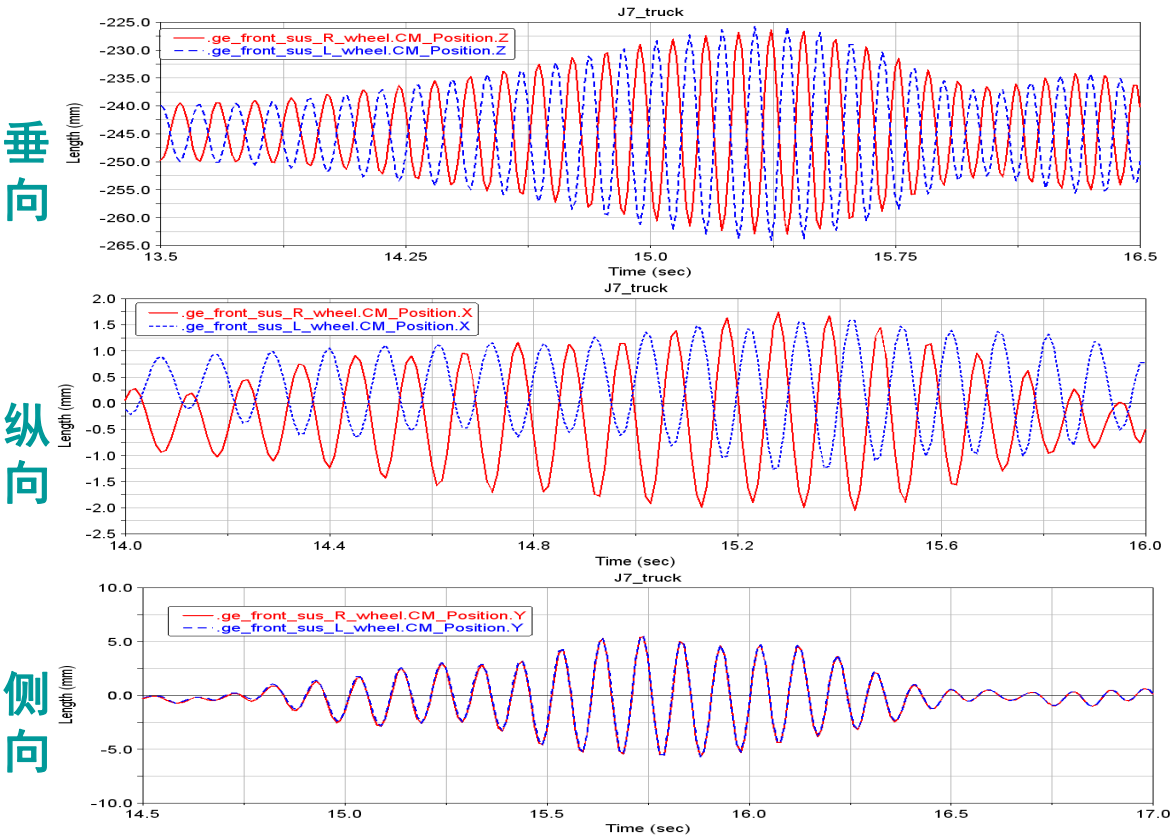
2.整车横摆振动的发生机理分析 Mechanism analysis for Full vehicle yaw vibration

2.2 前桥左右轮反相位垂向扫频激起整车横摆振动的机理

4) 整车扫频激励下前桥的振动特性分析



对整车进行左右轮的反相位扫频激励



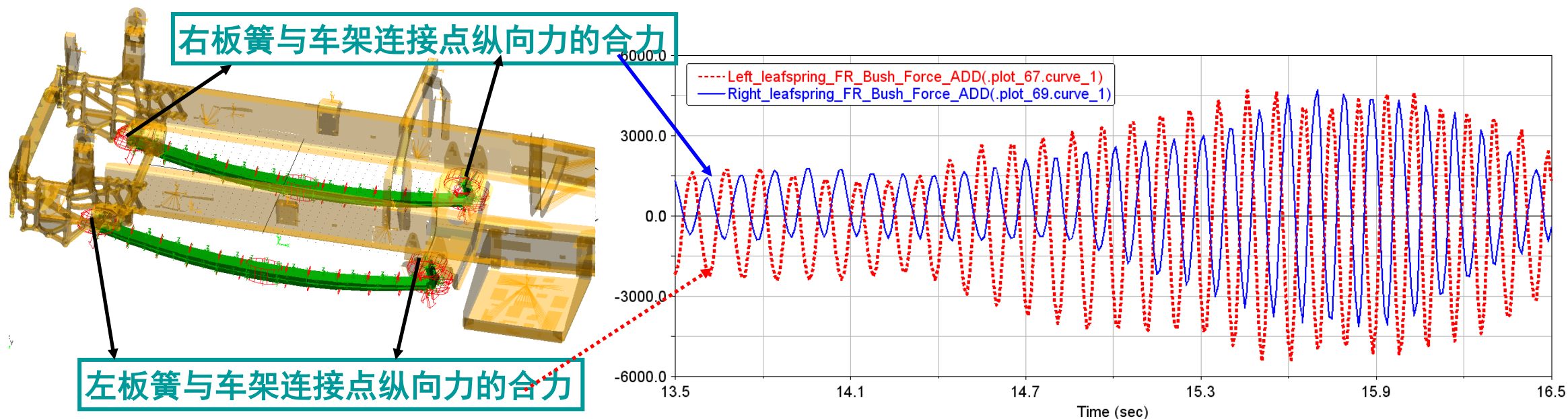
左右轮轮心三个方向的振动响应

在整车状态下对前桥进行反相位扫频激励，产生的前桥横摆、侧倾振动。

2.整车横摆振动的发生机理分析 Mechanism analysis for Full vehicle yaw vibration

2.2 前桥左右轮反相位垂向扫频激起整车横摆振动的机理

5) 整车扫频激励下前悬架两侧板簧对车架激励和横摆力矩的形成

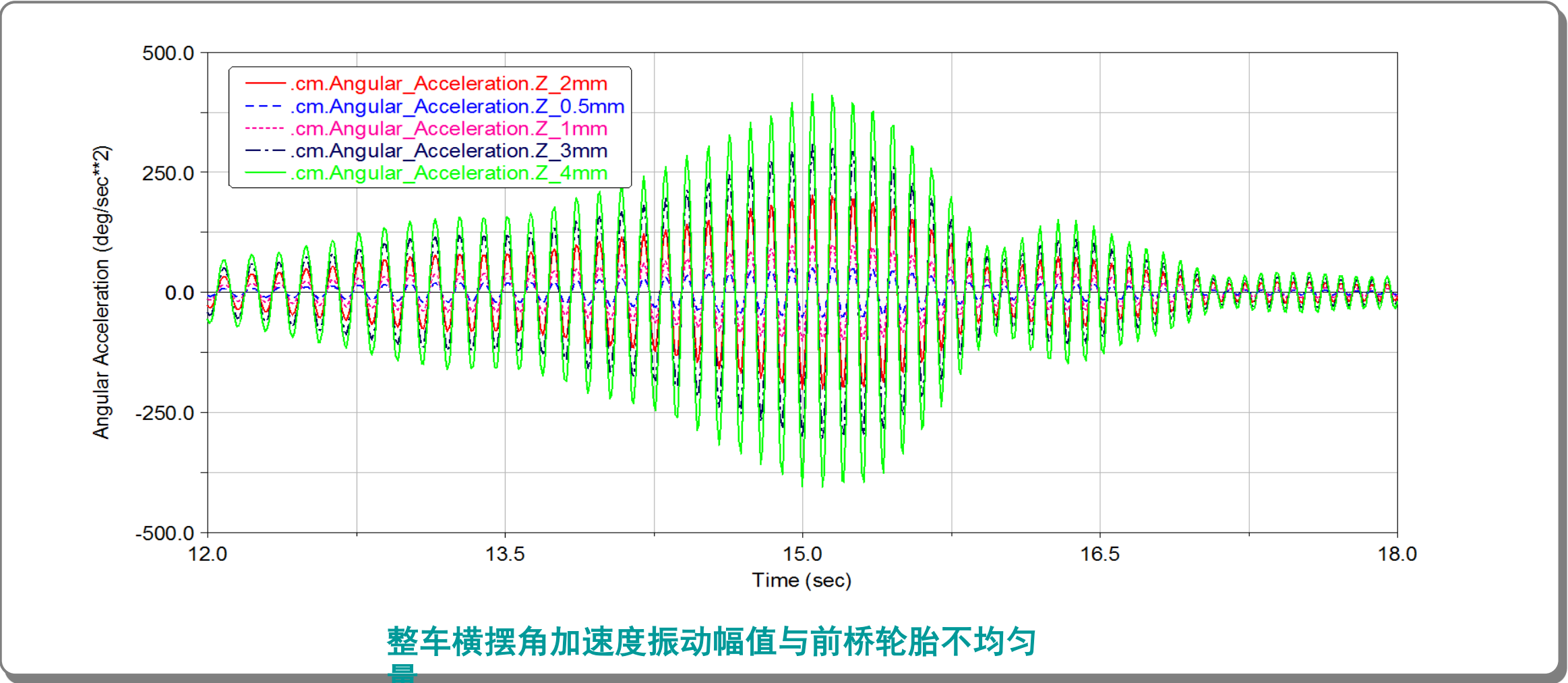


整车扫频激励下左右板簧与车架连接点纵向动态力 左右板簧对车架的纵向激励力反相位---形成整车横摆激励

左右板簧与车架连接点纵向力的合力,反相位,被前桥踏步模态放大, 形成整车横摆激励力。

3.轮胎不均匀量对整车横摆振动幅度的影响分析 Influence of Tire Non-uniformity

3.1 Cab横摆角加速度振动

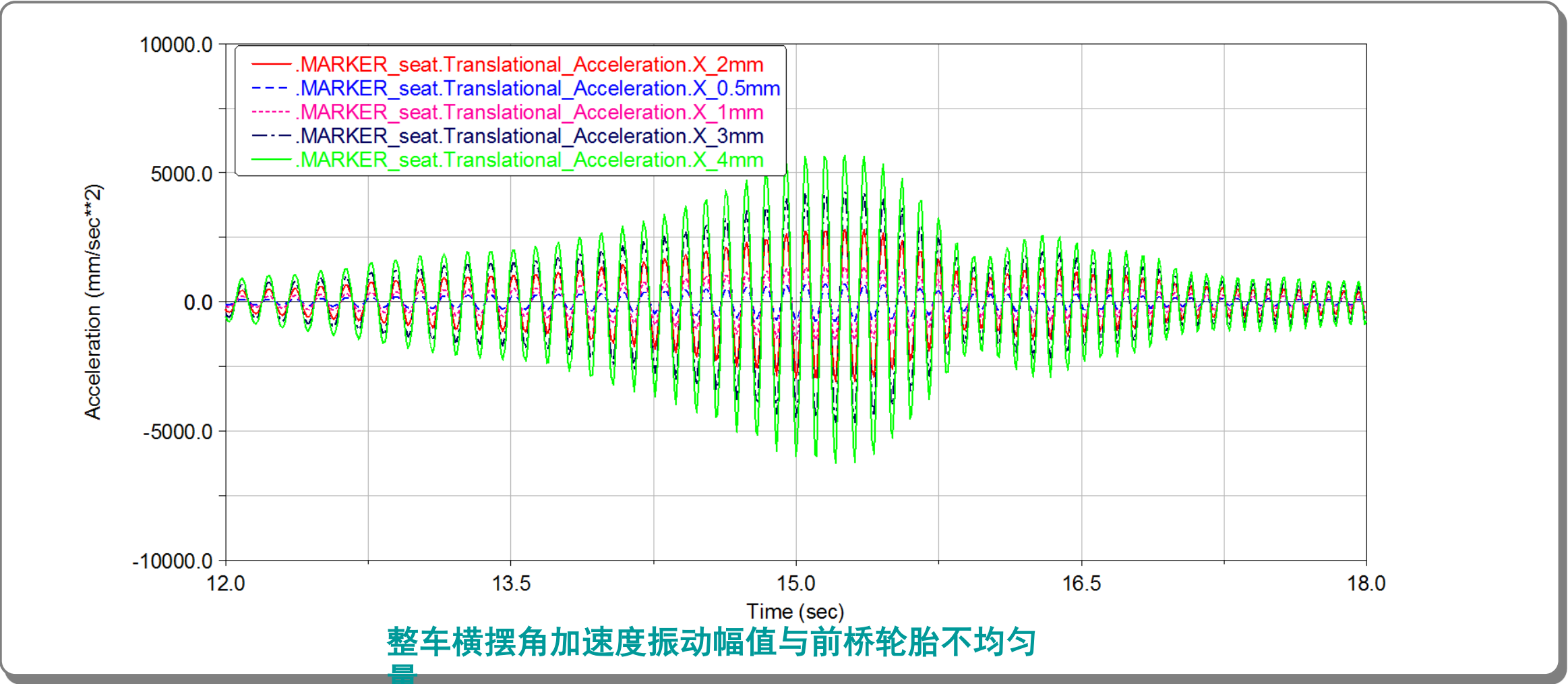


整车横摆角加速度振动幅值与前桥轮胎不均匀量

整车横摆角加速度振动幅值随前桥左右轮胎不均匀量的增加而增加。

3.轮胎不均匀量对整车横摆振动幅度的影响分析 Influence of Tire Non-uniformity

3.2 座椅纵向振动

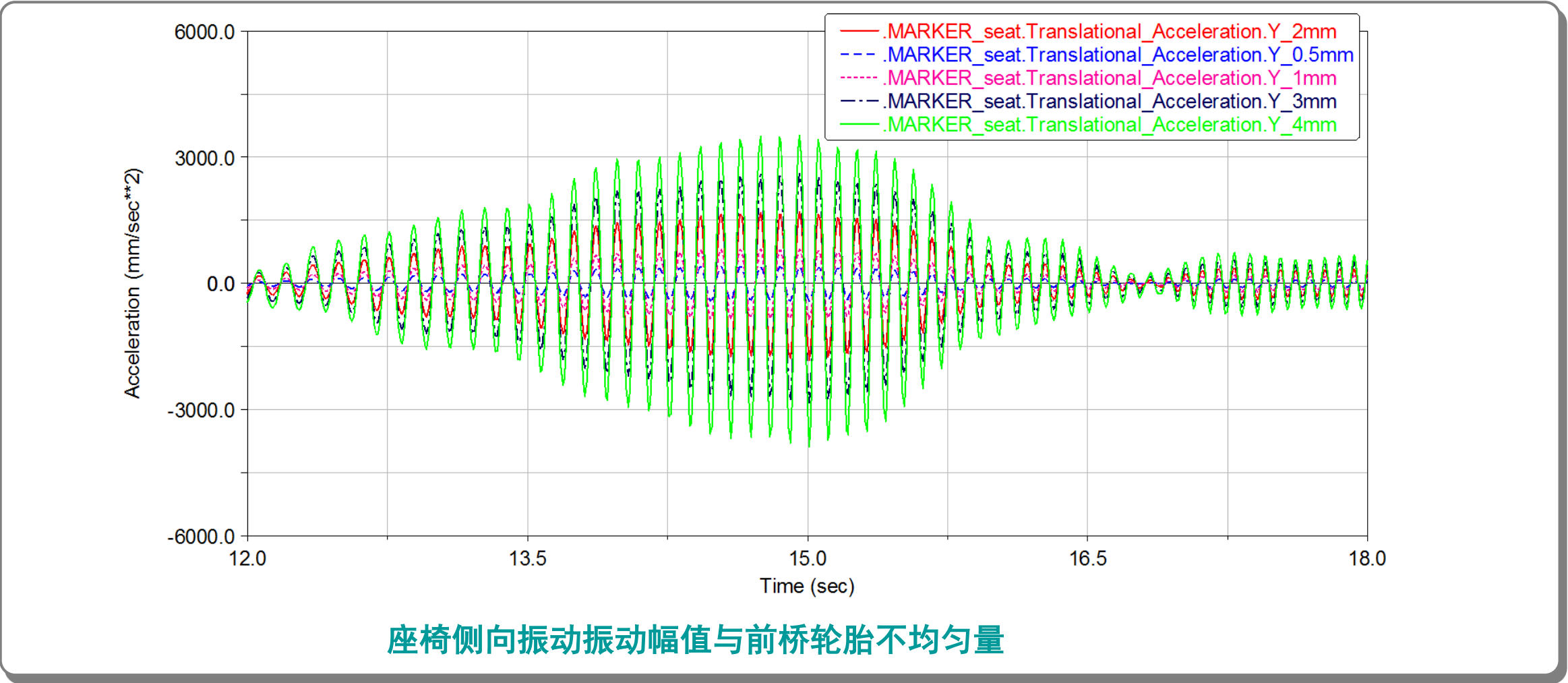


整车横摆角加速度振动幅值与前桥轮胎不均匀量

座椅纵向振动幅值随前桥左右轮胎不均匀量的增加而增加。

3.轮胎不均匀量对整车横摆振动幅度的影响分析 Influence of Tire Non-uniformity

3.3 座椅侧向振动

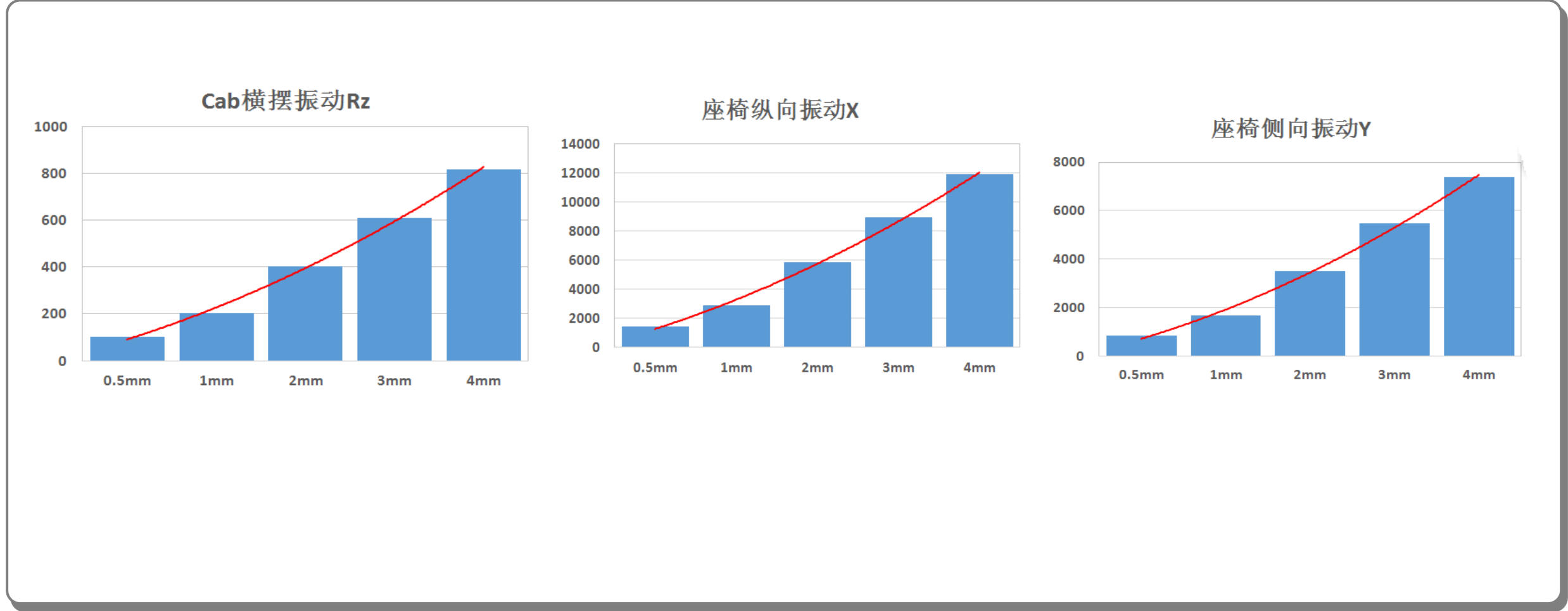


座椅侧向振动振动幅值与前桥轮胎不均匀量

座椅侧向振动幅值与前桥左右轮胎不均匀量的增加而增加。

3.轮胎不均匀量对整车横摆振动幅度的影响分析 Influence of Tire Non-uniformity

3.4 整车振动幅值与轮胎不均匀量的线性关系



Cab和座椅的振动幅值与前桥左右轮胎不均匀量呈线性关系。

4. 整车横摆振动的优化措施及效果分析 Optimization Measures and Results

4.1方案1-减小前桥非簧载质量 – Decrease Unsuspended Mass

1)前悬架非簧载质量减小方案

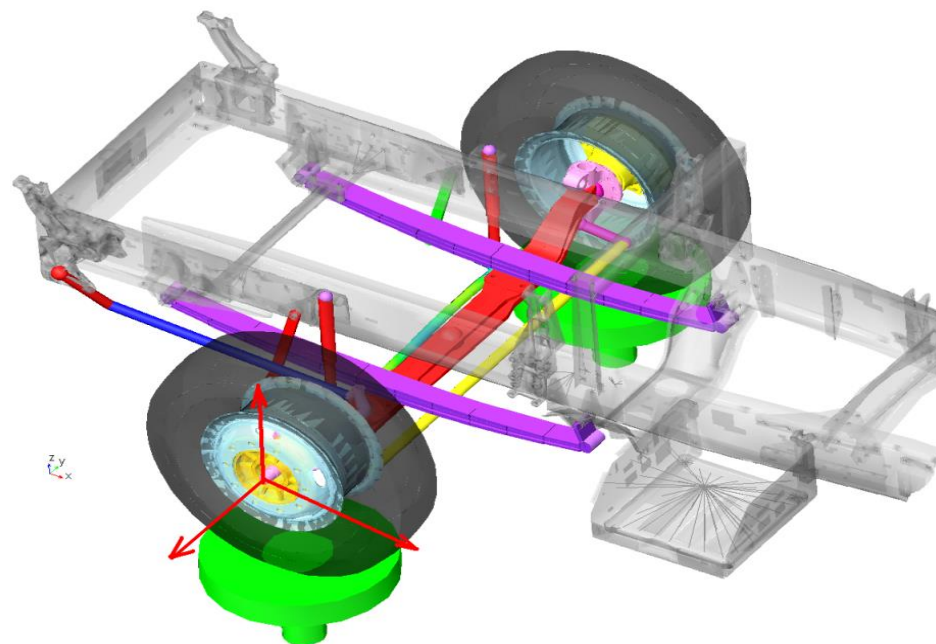
原方案：约800Kg

方案1：减小100Kg

方案2：减小200Kg

方案3：减小300Kg

模型中通过车轮及轮毂质量的减小实现，
各方案中每个轮毂及车轮质量的减站1/4



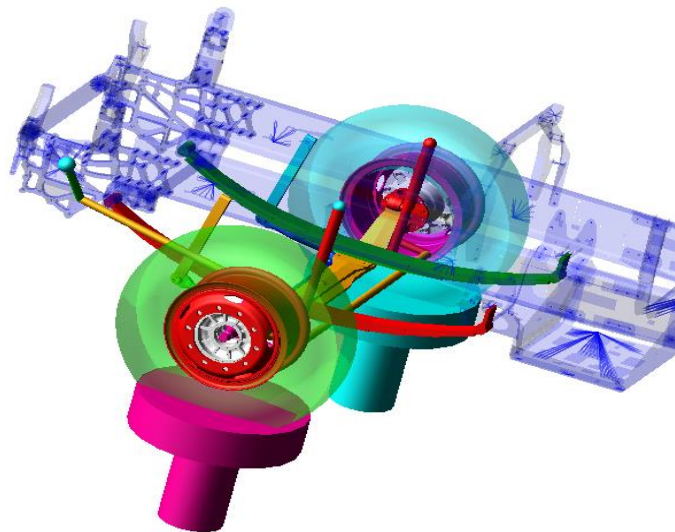
初步统计：
当前重型车前非簧载质量较10年中型车的重约200Kg

减小前悬架非簧质量几种具体方案

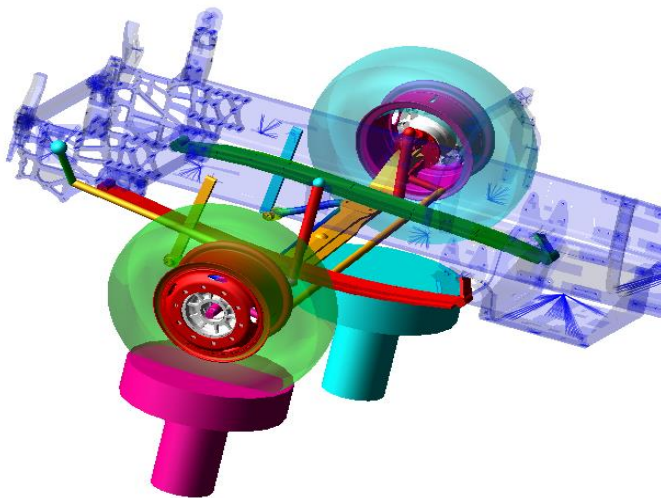
4. 整车横摆振动的优化措施及效果分析 Optimization Measures and Results

4.1方案1-减小前桥非簧载质量– Decrease Unsuspended Mass

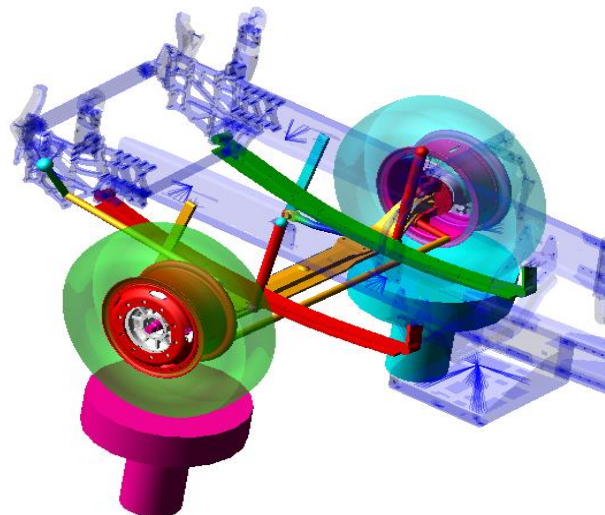
2) 前悬架系统的三个典型模态



同跳模态(Hop)



反跳模态(Tramp)



侧向模态(Lateral)

钢板弹簧前悬架系统的三个典型模态

4. 整车横摆振动的优化措施及效果分析 Optimization Measures and Results

4.1方案1-减小前桥非簧载质量– Decrease Unsuspended Mass

3) 前非簧载质量减小对前悬架三个典型模态的影响

振动模态	原质量	减小100Kg	减小200Kg	减小300Kg
反跳模态频率Hz	10.0	11.1	12.7	15.0
同跳模态频率Hz	6.1	7.7	9.9	12.9
侧向模态频率Hz	11.3	12.5	14.0	16.0

前非簧载质量减小200Kg可使得Tramp模态提高到12.7Hz

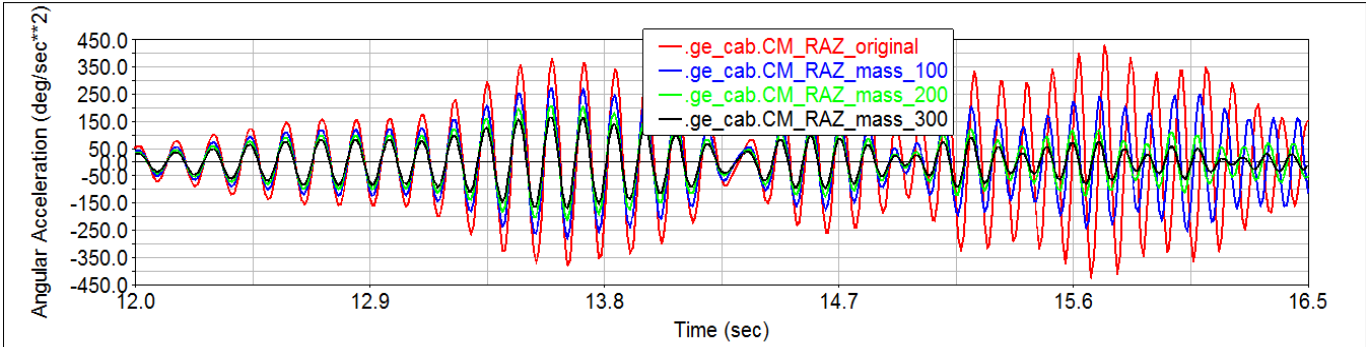
减小前非簧载质量可显著提高前桥三个典型模态的模态频率。

4. 整车横摆振动的优化措施及效果分析 Optimization Measures and Results

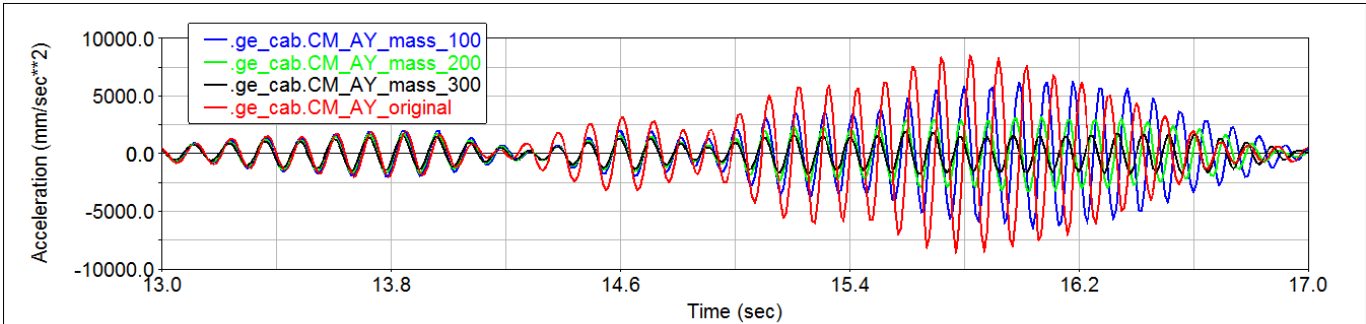
4.1方案1-减小前桥非簧载质量– Decrease Unsuspended Mass

4) 方案1改善效果

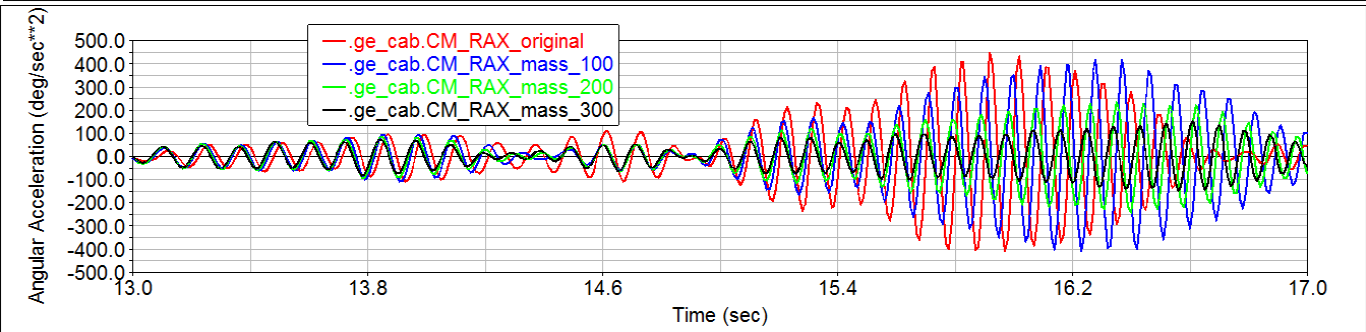
Cab横摆振动改善效果



Cab侧向振动改善效果



Cab侧倾振动改善效果



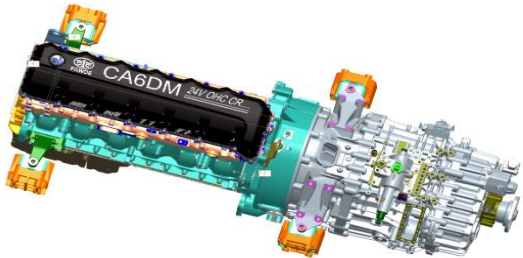
减小非簧载质量对整车横摆振动改善效果明显，减小200Kg时效果已很好。

4. 整车横摆振动的优化措施及效果分析 Optimization Measures and Results

4.2 方案2-调整动力总成悬置刚度 Engine Mount Stiffness

1) 动力总成为悬置系统刚度的调整方案

		纵向刚度	侧向刚度	垂向刚度
原来方案	前悬置	1020	683	1020
	后悬置	1020	680	1500
改动方案1	前悬置	4000	4000	1020
	后悬置	4000	4000	1500
改动方案2	前悬置	6000	6000	1020
	后悬置	6000	6000	1500



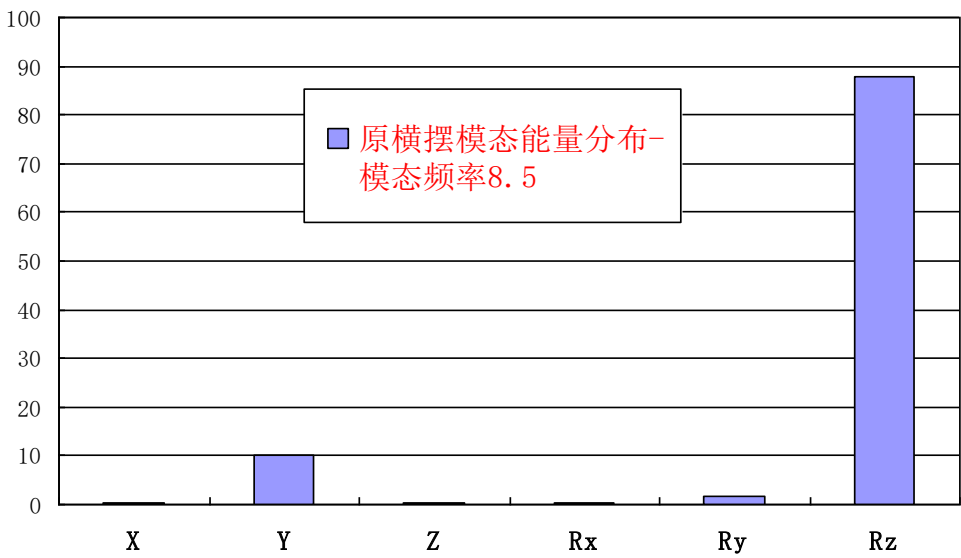
前侧和后侧两个悬置刚度同
动力总成为四点悬置

动力总成悬置刚度的2种调整方案

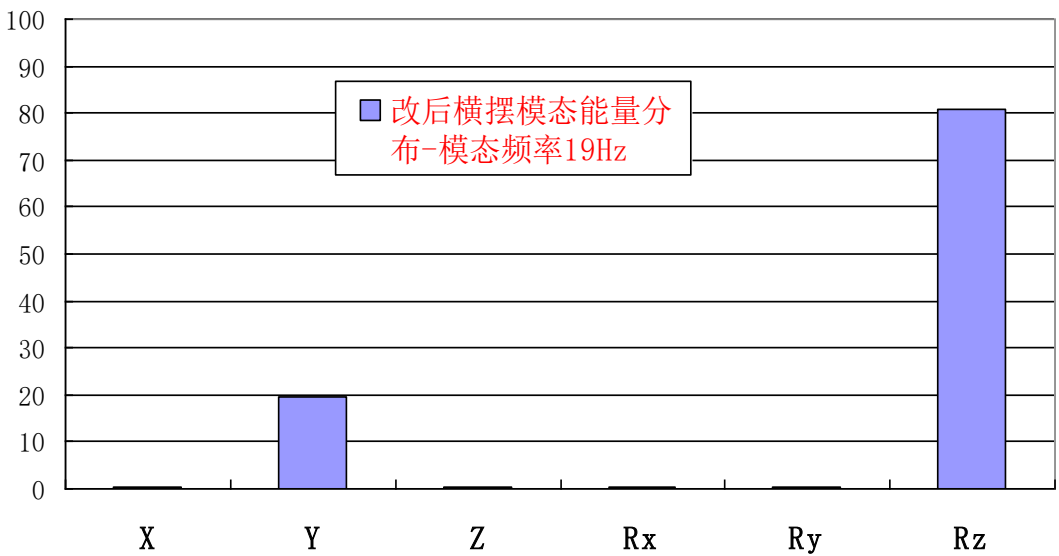
4. 整车横摆振动的优化措施及效果分析 Optimization Measures and Results

4. 2方案2-调整动力总成悬置刚度 Engine Mount Stiffness

2) 总成悬置刚度调整后横摆模态的变动



原悬置系统的横摆模态



改动方案1的横摆模态

调整动力总成悬置刚度可使总成横摆模态从8.5Hz提高到19.0Hz。

4. 整车横摆振动的优化措施及效果分析 Optimization Measures and Results

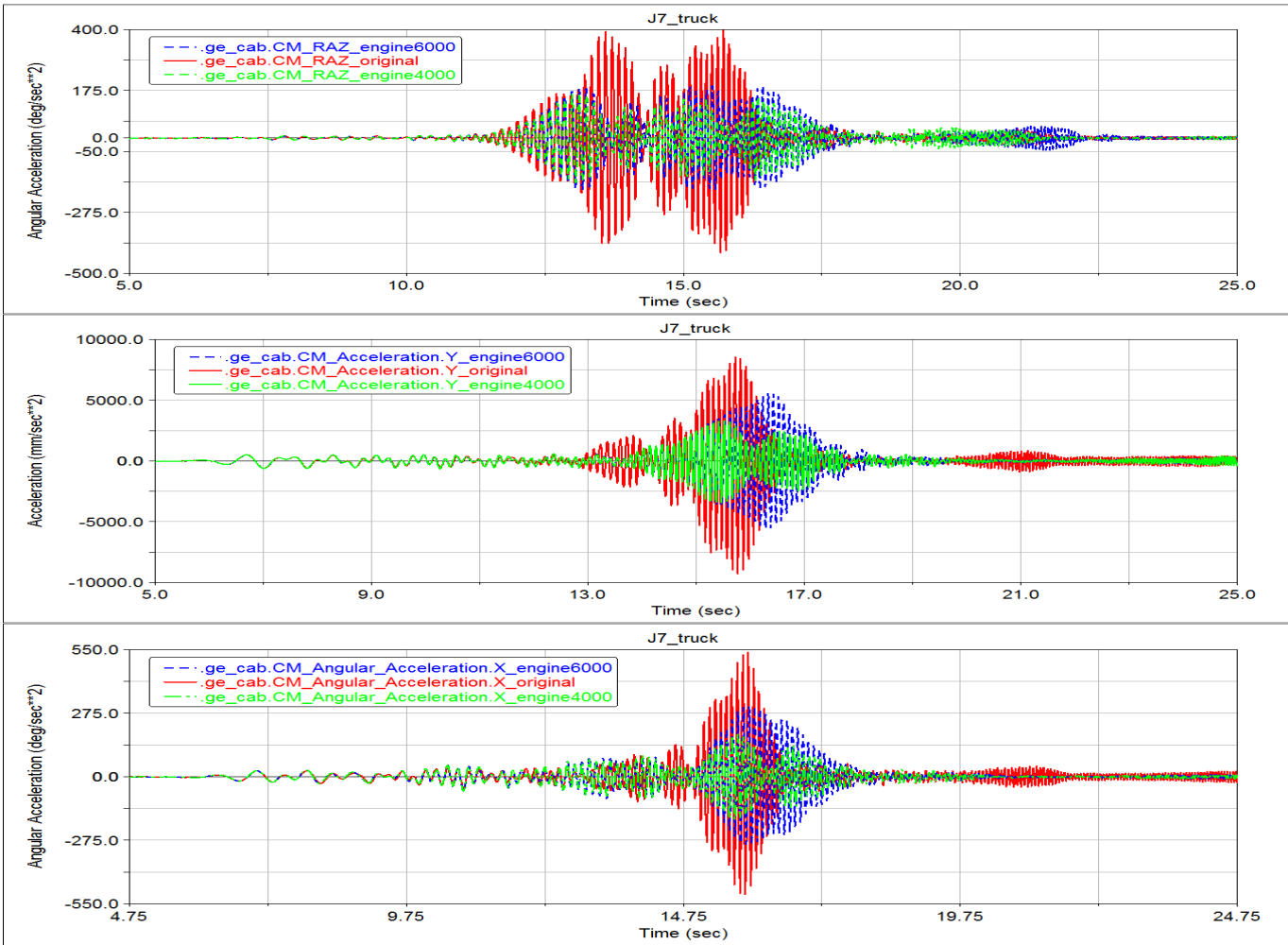
4. 2 方案2-调整动力总成悬置刚度 Engine Mount Stiffness

3) 方案2改善效果

Cab横摆角加速度：
400->180->162

Cab侧向加速度
0.85g->0.53g->0.32g

Cab侧倾角加速度：
530->300->183



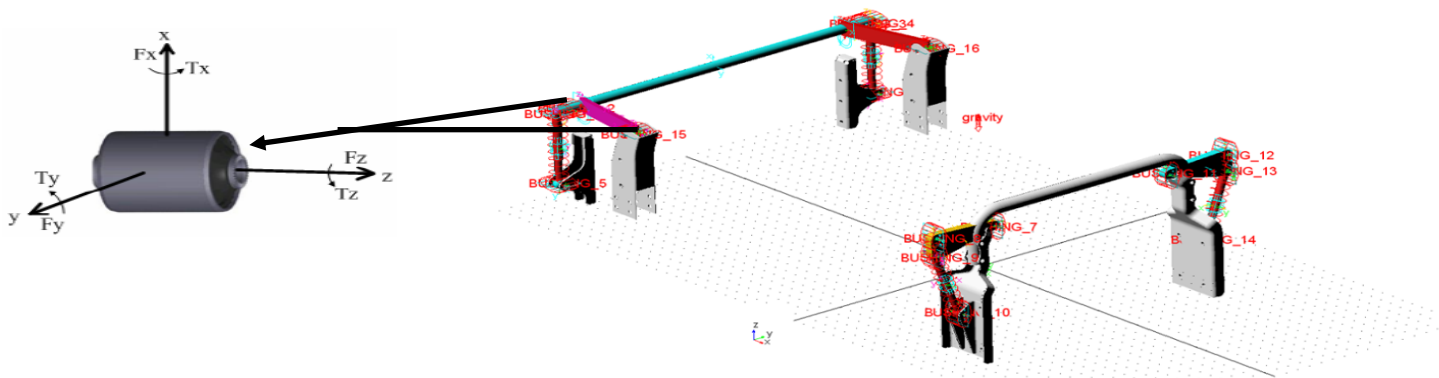
调整动力总成悬置刚度对整车横摆振动具有较好的改善效果

4. 整车横摆振动的优化措施及效果分析 Optimization Measures and Results

4.3 方案3-驾驶室前悬置翻转杆前后衬套刚度调整 Cab Suspension Bushing Stiffness

1) 驾驶室前悬置翻转杆衬套刚度的调整方案：

原衬套刚度：	前衬套：	径向3000，	轴向1255	
	后衬套：	纵向1000，	垂向1500，	轴向160
调整方案1：	前衬套：	径向1500，	轴向627	
	后衬套：	纵向500，	垂向750，	轴向160
调整方案2：	前衬套：	径向750，	轴向627	
	后衬套：	纵向500，	垂向750，	轴向160



驾驶室前悬置翻转杆前衬套为轴对称结构、后悬置非轴对称刚度结构

驾驶室前悬置翻转杆前后衬套刚度的调整方案

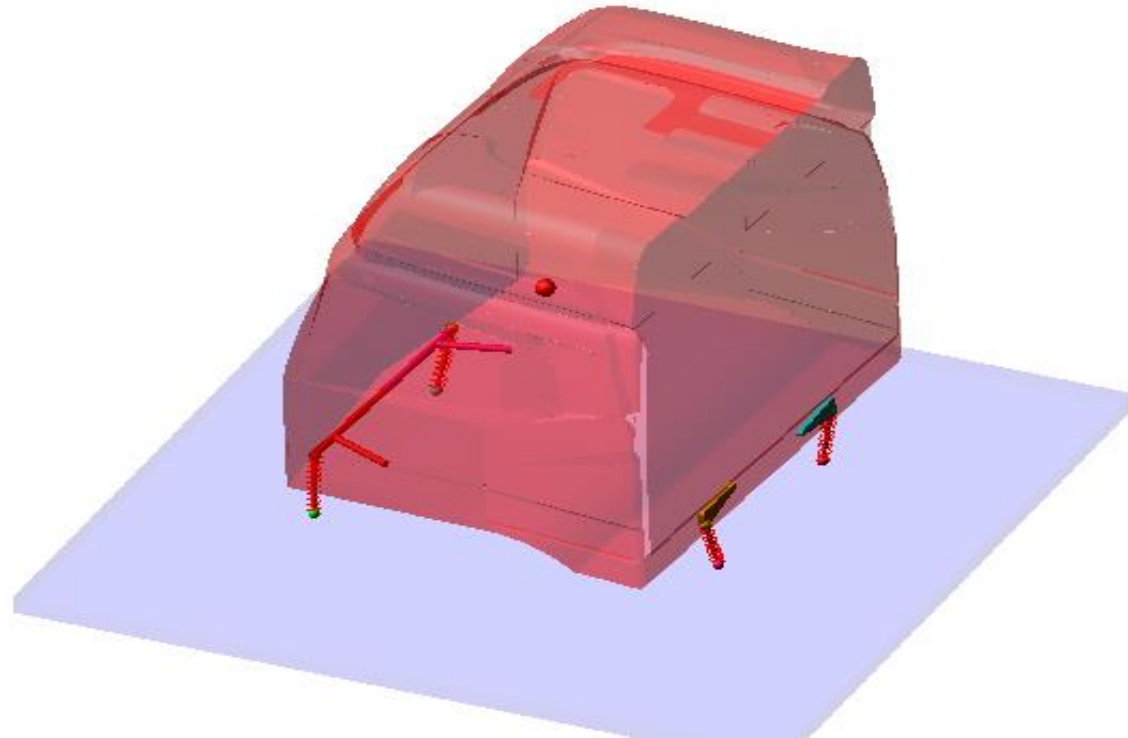
4. 整车横摆振动的优化措施及效果分析 Optimization Measures and Results

4.3 方案3-驾驶室前悬置翻转杆前后衬套刚度调整 Cab Suspension Bushing Stiffness

2) 翻转杆衬套刚度调整对驾驶室横摆模态频率的改变：

EIGEN_2 Mode=6 Frequency= 7.8831 (Hz)

- 1.原来刚度：7.8Hz.
- 2.修改方案1：6.8Hz
- 3.修改方案2：5.9Hz



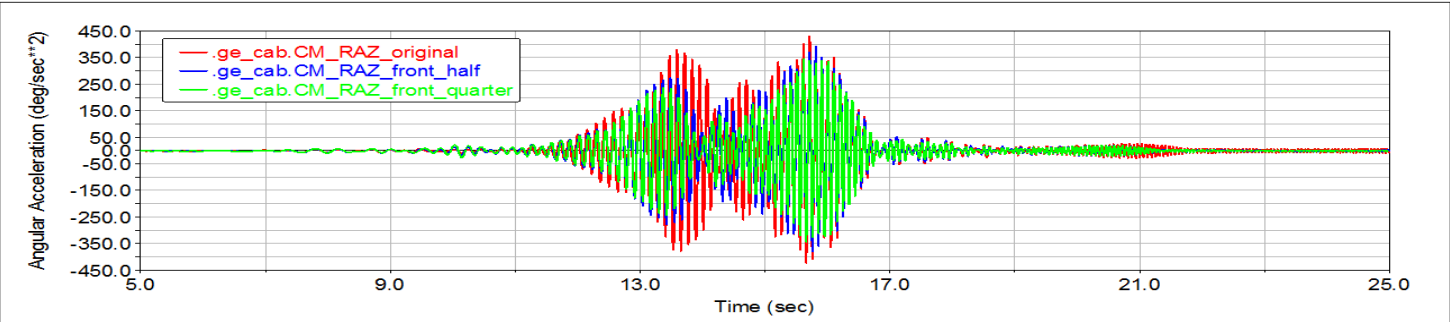
驾驶室前悬置翻转杆衬套刚度的调整可将驾驶室横摆模态频率降低1-2Hz。

4. 整车横摆振动的优化措施及效果分析 Optimization Measures and Results

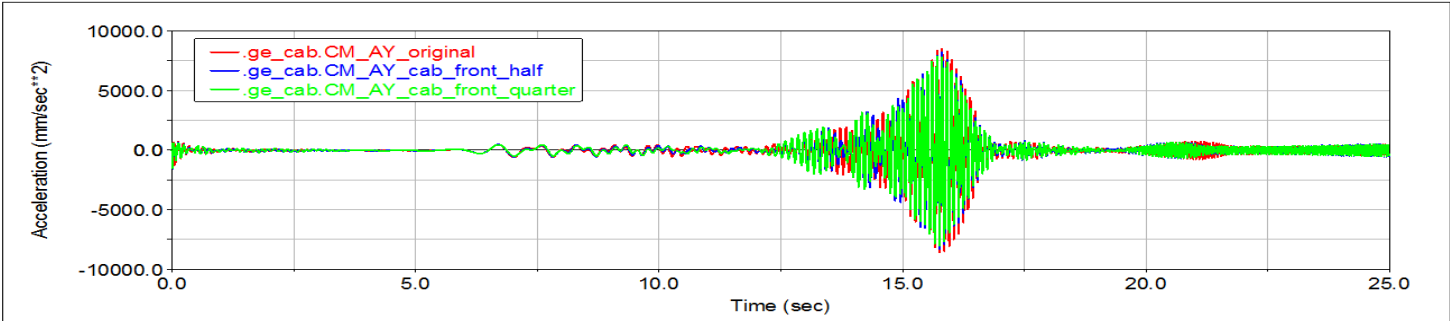
4.3 方案3-驾驶室前悬置翻转杆前后衬套刚度调整 Cab Suspension Bushing Stiffness

3) 方案3改善效果

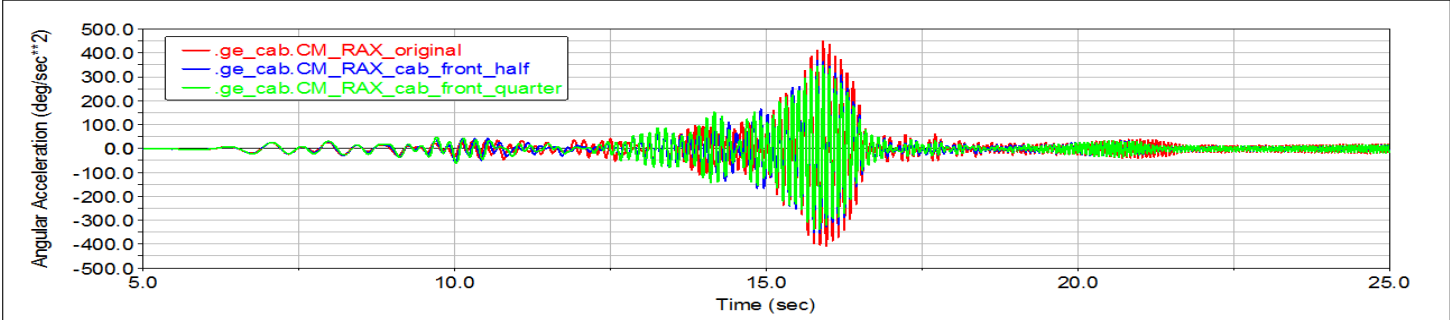
Cab横摆角加速度



Cab侧向加速度



Cab侧倾角加速度

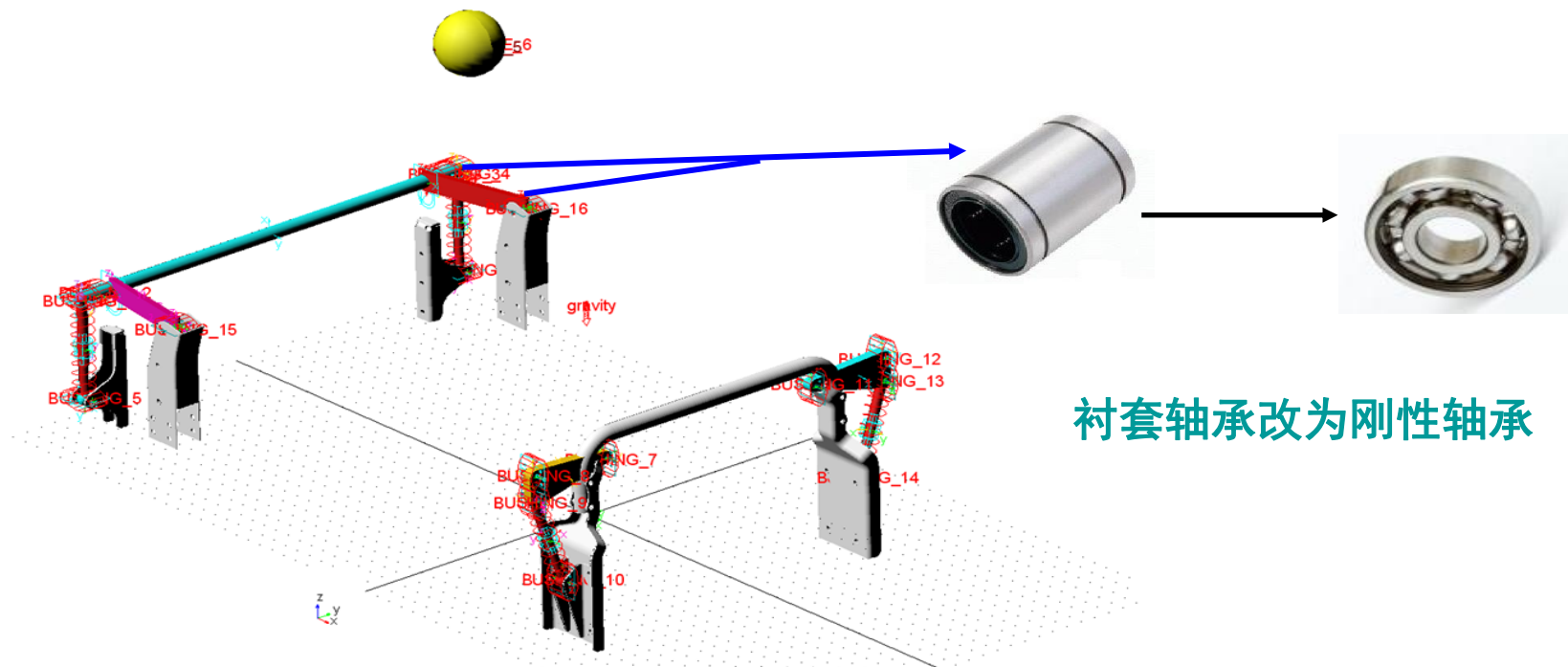


驾驶室前悬置翻转杆前后衬套刚度的调整对整车横摆振动改善具有效果，但不明显。

4. 整车横摆振动的优化措施及效果分析 Optimization Measures and Results

4.4 方案4-驾驶室前悬置翻转杆衬套改为轴承 Cab Suspension Bearing

1) 驾驶室前悬置翻转杆衬套结构变为刚性轴承



驾驶室前悬置系统翻转杆前后衬套结构变为刚性轴承(理论上可取消驾驶室的横摆模态)

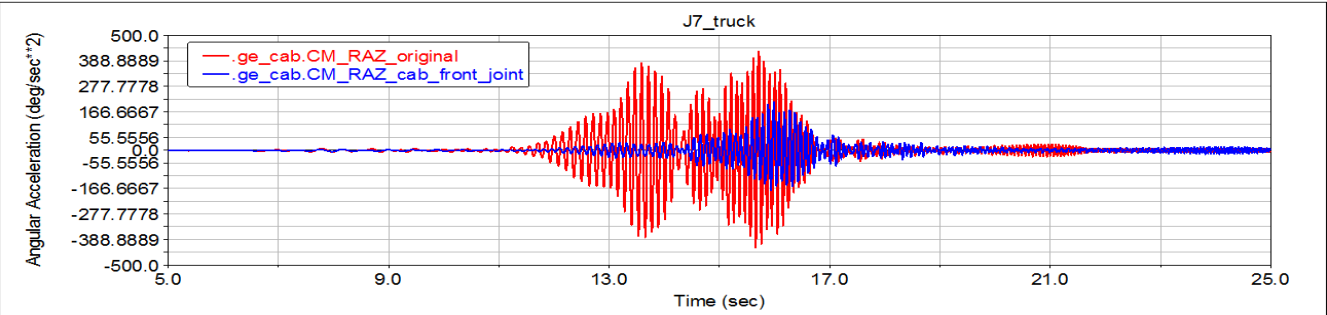
驾驶室前悬置翻转杆衬套结构变为刚性轴承，目的是取消驾驶室的横摆模态。

4. 整车横摆振动的优化措施及效果分析 Optimization Measures and Results

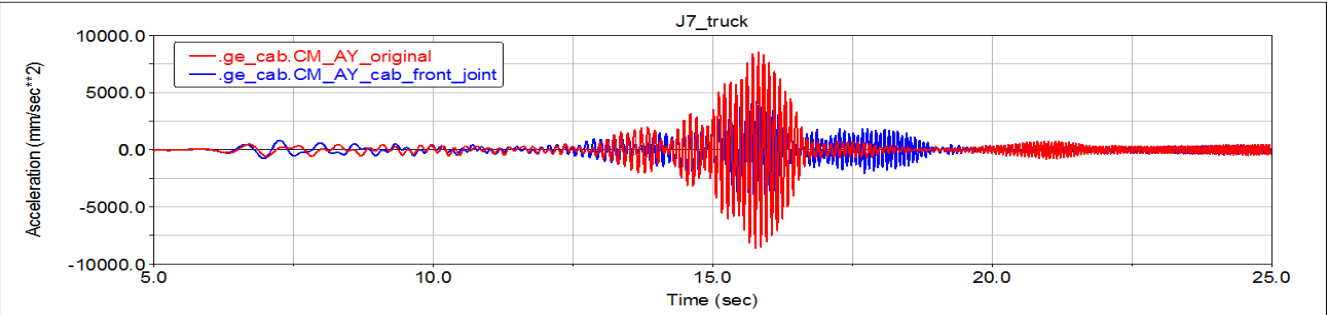
4.4 方案4-驾驶室前悬置翻转杆衬套改为轴承 Cab Suspension Bearing

2) 方案4改善效果

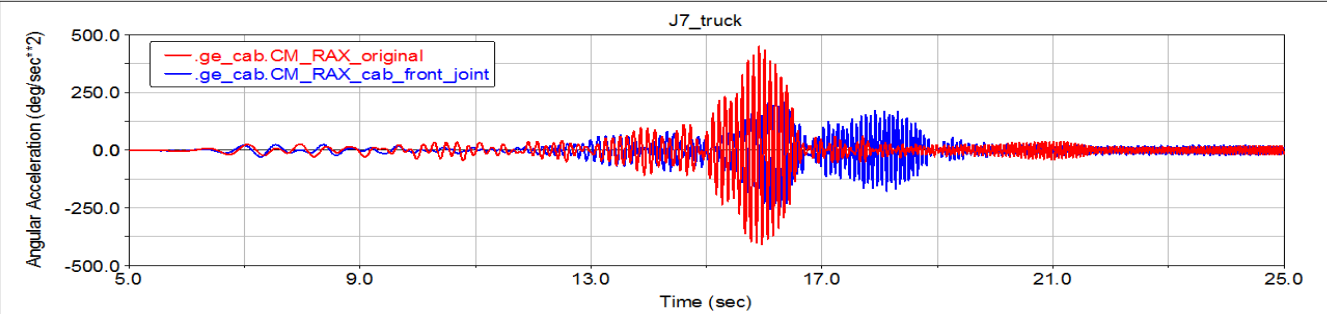
Cab横摆角加速度



Cab侧向加速度



Cab侧倾角加速度



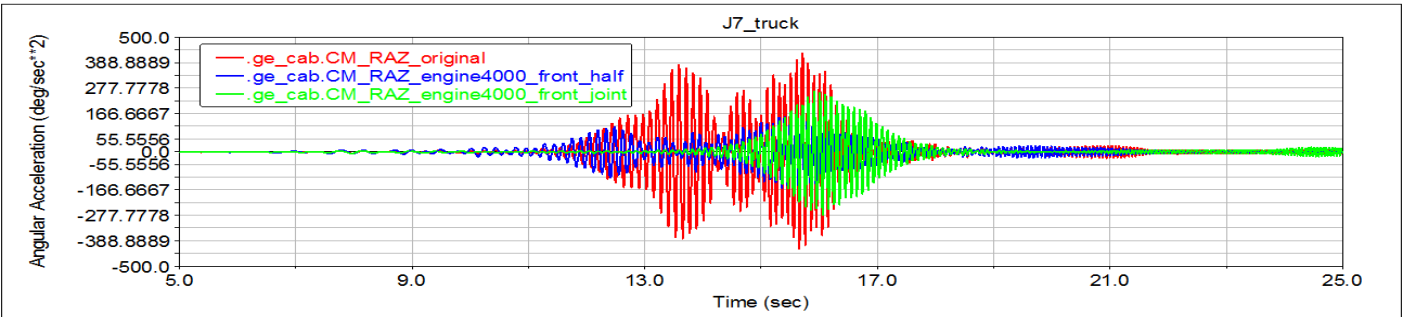
将驾驶室前悬置翻转杆前后衬套改为刚性轴承，对整车的横摆振动具有明显改善效果。

4. 整车横摆振动的优化措施及效果分析 Optimization Measures and Results

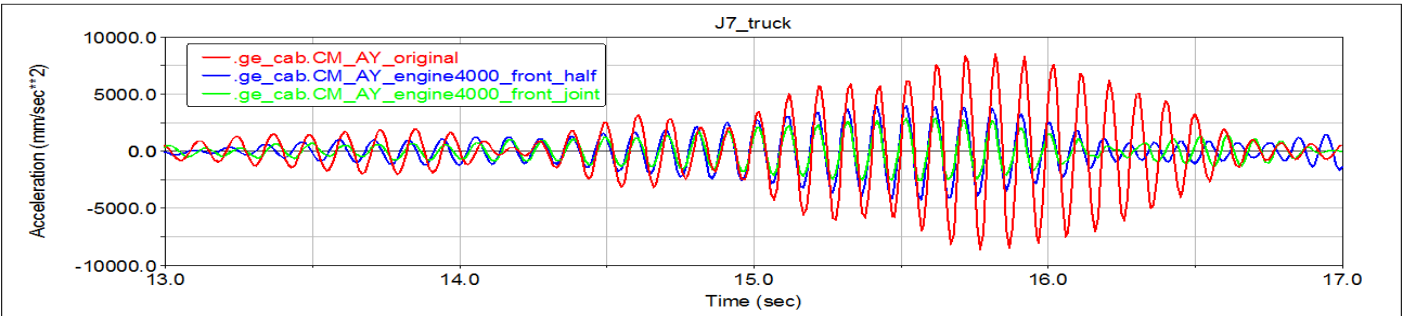
4.5 方案5：总成悬置和驾驶室前悬置衬套同时调整(方案2+方案3) Engine Mount + Cab Bushing

方案5改善效果

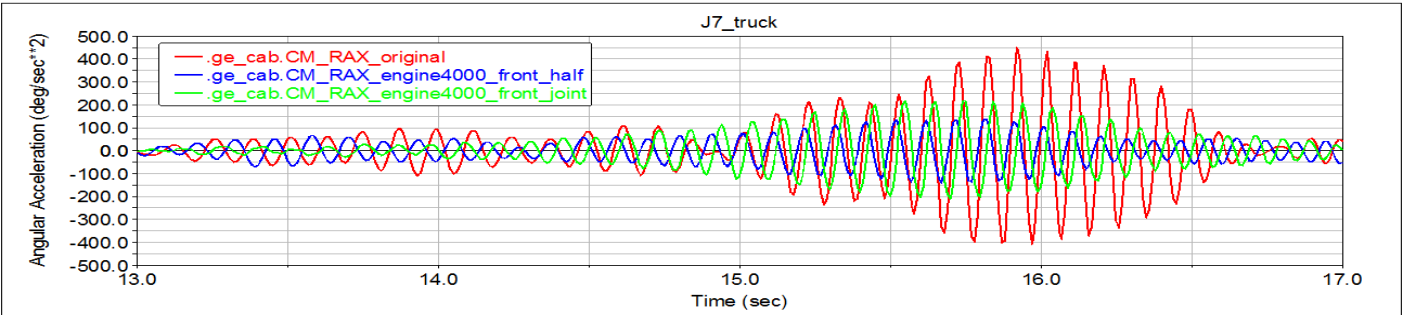
Cab横摆角加速度



Cab侧向加速度



Cab侧倾角加速度



同时调整驾驶前悬置及动力总成悬置刚度，整车横摆振动改善较好。

4. 整车横摆振动的优化措施及效果分析 Optimization Measures and Results

4.6 方案6：轮胎刚度的调整 Tire vertical stiffness

1) 轮胎刚度调整方案

original: 原刚度:

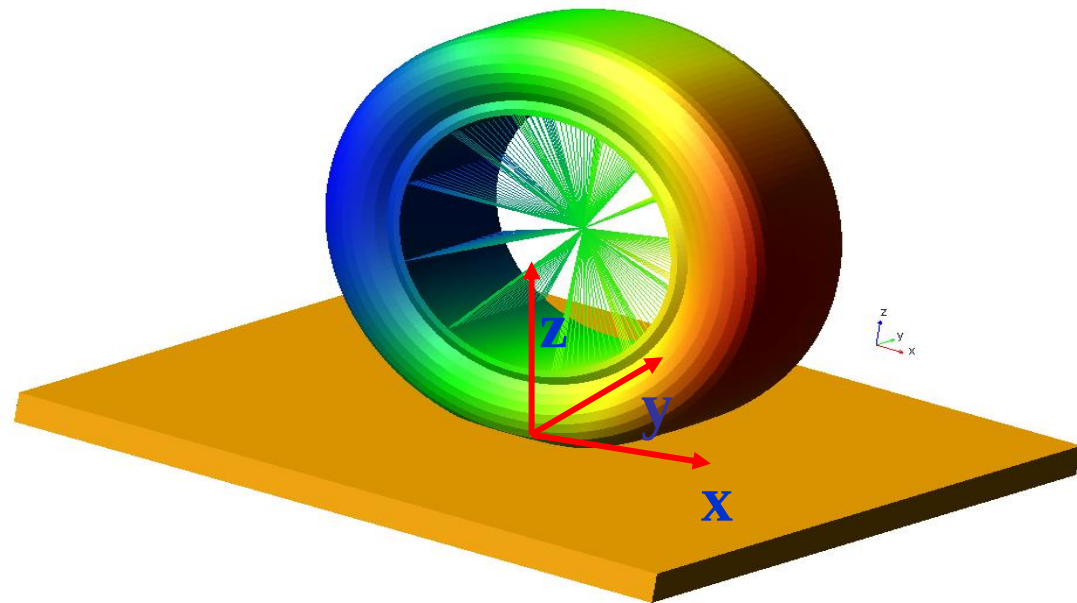
方案1: 90%原刚度

方案2: 110%原刚度

方案3: 120%原刚度

方案4: 150%原刚度

轮胎刚度的调整情况



考虑轮胎三个方向刚度，主要是垂向刚度的影响

轮胎刚度的调整方案，当前采用的子午胎刚度比前些年的斜交胎刚度约小10%。

4. 整车横摆振动的优化措施及效果分析 Optimization Measures and Results

4.6 方案6：轮胎刚度的 Tire vertical stiffness

3) 轮胎刚度调整对前桥模态的影响

振动模式	原刚度	1.1倍原刚度	1.2倍原刚度	1.3倍原刚度	1.5倍原刚度	0.9倍原刚度
反跳模式频率Hz	10	10.4	10.8	11.1	12.4	9.5
同跳模式频率Hz	6.1	6.65	7.15	7.64	8.5	5.5
侧向模式频率Hz	11.3	11.5	11.7	11.8	11.4	11.2

三向刚度同时改变

振动模式	原刚度	1.1倍原刚度	1.2倍原刚度	1.3倍原刚度
反跳模式频率Hz	10	10.5	10.8	11.1
同跳模式频率Hz	6.1	6.7	7.2	7.8
侧向模式频率Hz	11.3	11.5	11.7	11.8

仅改变垂向刚度

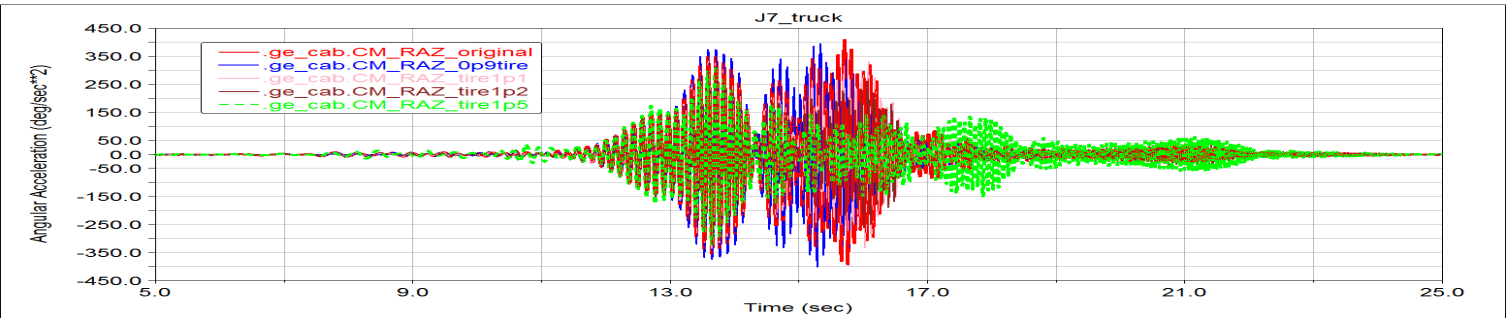
轮胎刚度增加10%，对前桥同跳和反跳模态增加约0.5Hz，对前桥侧向模态影响不大。

4. 整车横摆振动的优化措施及效果分析 Optimization Measures and Results

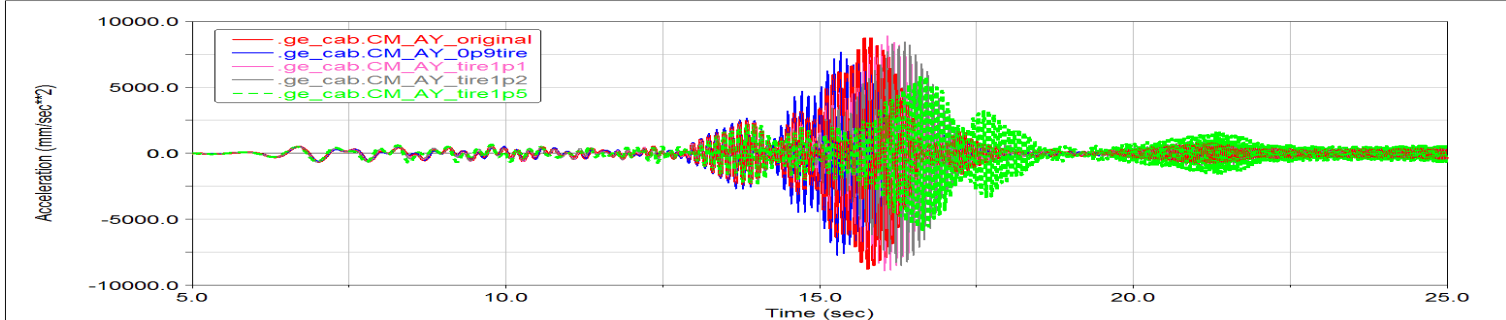
4.6 方案6：轮胎刚度的调整 Tire vertical stiffness

4) 方案6改善效果

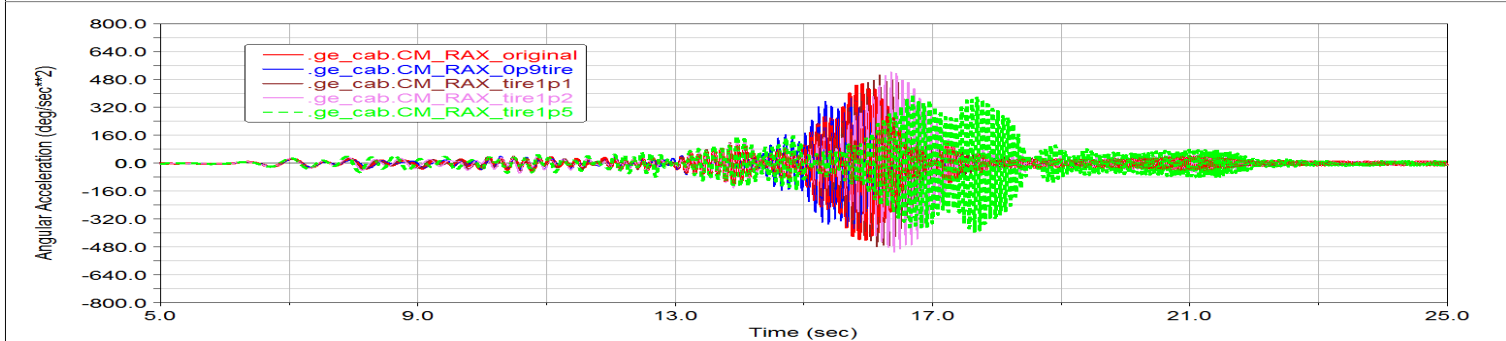
Cab横摆加速度



Cab侧向加速度



Cab侧倾加速度



轮胎刚度增加可提高非簧质量的反跳模态，减小整车横摆振动，但效果不够明显。

5.分析总结 Summary

模拟分析结果表明：

1. 前悬架系统车桥踏步模态、动力总成横摆模态、驾驶室悬置横摆模态分离不理想；
2. 前桥反相位跳动，会伴随车桥的横摆运动，是钢板弹簧悬架系统固有的运动属性；这一属性决定了前桥踏步振动时，也会产生横摆振动；
3. 在轮胎不均匀激励下产生前桥踏步振动时、伴随产生前桥的横摆振动，这一振动又被前桥踏步、驾驶室和动力总成横摆的整车模态放大，产生整车横摆振动，这是产生整车横摆振动的原因；
4. 改善整车横摆振动的基本思想是：降低驾驶室的横摆模态、提高前桥的踏步模态、提高动力总成的横摆模态；
5. 减小非簧载质量、调整动力总成及驾驶室悬置衬套刚对改善整车横摆振动具有较好的改善效果。

Thank You

