

包含悬架系统的车身结构 CAE 分析

谢义杰

(柳州工学院, 广西 柳州 545006)

摘要:目前车身结构 CAE 建模中,多数情况是忽略悬架系统。本文提出应用 MPC 技术建立包含悬架系统的车身结构 CAE 模型,更加符合实际,可改善车身结构 CAE 分析精度。

关键词:CAE 分析; MPC 技术; 悬架系统; 车身结构

中图分类号:U463.82

文献标志码:A

文章编号:1006-3331(2023)03-0010-05

CAE Analysis of Body Structure Including Suspension System

XIE Yijie

(Liuzhou Institute of Technology, Liuzhou 545006, China)

Abstract:Currently, the suspension system is ignored in most cases of CAE modeling for body structure. This paper proposes using MPC technology to establish the CAE model of body structure which includes the suspension system, in order to more conform to the reality and improve the accuracy of CAE analysis on body structure.

Key words:CAE analysis; MPC technology; suspension system; body structure

通过查阅文献资料、与车企研发人员交流发现,目前在车身结构 CAE 分析领域(如强度分析、刚度分析、模态分析),其车身结构有限元模型仍是大多不包含悬架系统,主要原因是悬架系统的复杂性难以解决。而 MPC(multi-point constraints, 多点约束)技术的应用则可解决这个难题。通过 MPC 技术将运动复杂的悬架系统整合到车身结构有限元模型中,从而实现仅用一款 CAE 软件就能够对整车进行强度、刚度分析以及自由、约束模态分析。这种方法不仅使得力学模型更加接近实际情况,提高计算精度,而且能够解决现行分析方案的局限性并简化复杂的流程。

本文以某客车车身为例,应用 HyperWorks 软件,先通过 MPC 技术将运动复杂的悬架系统整合到车身结构有限元模型中,然后进行仿真分析,最后采用现行的分析方案(车身结构忽略悬架系统)与包含悬架系统的车身结构 CAE 技术方案进行分析对比,并加以验证。

1 包含悬架系统的车身结构有限元模型

总结分析国内外研究现状,目前车辆结构有限元仿真分析(强度、刚度、模态)中忽略了对悬架系统的模拟^[1-13],其计算过程、方法及计算精度等仍存在一定的改进空间。而且日本自动车技术会编写的《汽车工程手册》中明确要求车辆的强度、刚度的有限元计算需带有悬架系统。在有限元分析中,MPC 定义的是节点自由度的耦合关系,从而实现不同单元间的载荷传递。

1.1 MPC 技术主要内容

1) 利用有限元 HyperWorks 软件库中的特殊单元,如梁单元、弹簧单元、rbe2 单元等 1D 单元,建立悬架系统的有限元模型。

2) 在有限元软件中进行局部坐标系下各种铰链机构的模拟。

3) 将车身有限元模型与悬架系统有限元模型整合成整车有限元模型。

收稿日期:2023-03-07。

基金项目:2020 年度广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2020KY60009)。

第一作者:谢义杰(1989—),男,讲师;硕士;主要从事车辆结构工程、CAE 结构仿真分析研究工作。E-mail:yijie@yeah.net。

4) 添加载荷及边界条件,然后计算“包含悬架系统的车身结构有限元模型”并得出结果。

1.2 应用 MPC 技术建立悬架有限元模型

本文客车前悬为双摆臂结构,其有限元模型如图 1 所示。构建悬架有限元模型时,需注意以下几点技术要求。

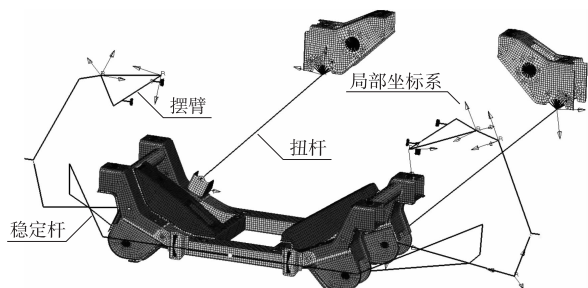


图1 前悬架有限元模型

1) 摆臂、稳定杆以及扭杆都采用圆形截面的梁单元模拟,有利于提取各杆件内力。

2) 各杆件连接位置采用相对应的铰链连接,铰链单元为 RBE2(2 个节点重合);由于摆臂端部主铰链的转动轴和整体坐标系方向不一致,所以需要建立局部坐标系,并将铰链单元的节点分配给该局部坐标系。模拟柱铰链需放开相应方向的转动自由度,模拟球铰链需放开 3 个转动自由度。

3) 主销和轮胎连接位置采用弹簧单元模拟。

后悬架采用钢板弹簧结构,其有限元模型如图 2 所示。弹性部分用 bush 弹簧单元模拟,弹簧单元上端采用 RBE2 模拟板簧定位于车架的安装孔上,弹簧单元下端采用梁单元连接到用 RBE2 模拟的车桥上,并且放开绕 Y 轴的转动自由度,RBE2 下端采用 SPC (single-point constraints,单点约束)模拟地面约束。

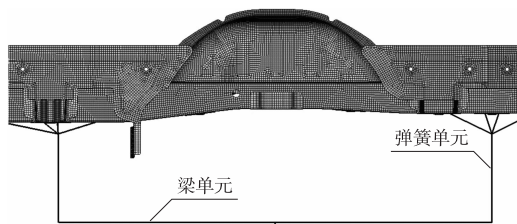


图2 后悬架有限元模型

1.3 包含悬架系统的车身结构有限元模型

为保证较高的计算精度,建立的车身有限元模型必须如实反映车身实际结构的重要力学特性。通过上述 MPC 技术方法建立悬架系统模型后,将其与车

身有限元模型进行整合,最终如图 3 所示。

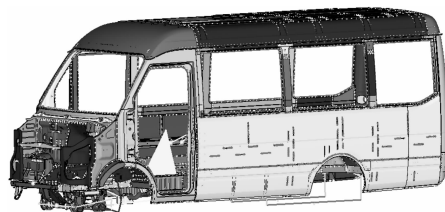


图3 包含悬架系统的车身结构有限元模型

为保证较高的计算精度,选用四边形板壳单元对车身结构钣金件进行离散,达到百万级别单元数量(2 042 489 个),单元平均尺寸为 7 mm。不同焊接方式采用相应的 reb2、acm 单元,车身侧围结构胶采用 adhesives 单元,悬架系统如 1.2、1.3 节所述。

1.4 载荷及边界条件

载荷分为车身结构自重、非结构自重(内饰、座椅等)、乘员、设备重量、行李等,不同工况施加的载荷形式有所不同。在有限元软件中,根据载荷边界类型分为集中力载荷和点质量载荷 2 种形式进行加载。通过 MPC 技术建立悬架系统后,在悬架与轮胎连接位置定义与实际路况相符合的约束或强迫位移。

2 包含悬架系统的车身结构 CAE 分析

2.1 强度分析

不同的工况分析根据实际载荷边界条件进行处理即可,本文以常见的弯曲工况为例,边界条件如图 4 所示。采用 SPC 进行模拟,弯曲工况约束条件左右侧相同,其中 1、2、3 代表移动自由度,4、5、6 代表转动自由度。

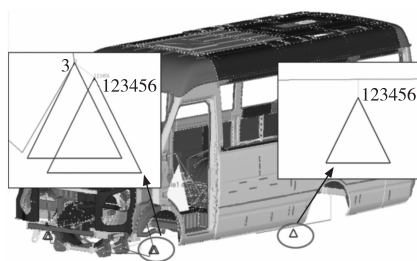


图4 弯曲工况边界条件

车身结构应力分布结果如图 5 所示,由于焊接区域材料性能会发生改变,刚性单元及约束也会导致应力集中的现象,所以主要分析非焊接区域的应力情况。最大等效应力为 282.2 MPa,位于车身下方扭簧

安装座区域,已经超出对应材料的屈服强度,再加上动载系数及安全系数的因素、结构的疲劳极限,其强度性能不满足要求,须更换材料或者实施其他改进措施。

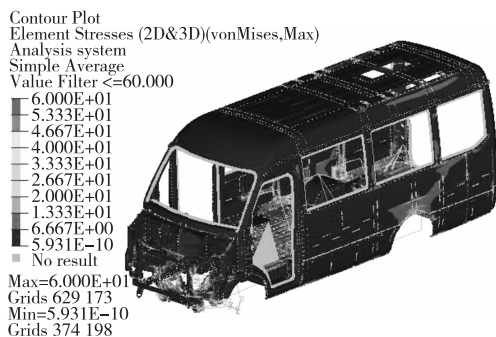


图5 弯曲工况应力云图(Value filter≤60)

2.2 刚度分析

与强度分析的计算模型、边界条件一致,本文同样以弯曲刚度分析为例,弯曲刚度可用车身在垂直载荷作用下产生的挠度大小来描述。在分析模型中采用对结构分析无影响的1D单元plot进行标记、测量挠度变形,通过有限元软件后处理HyperView统计数据即可。车身支撑点之间的两侧纵梁挠度值测量统计如图6所示。

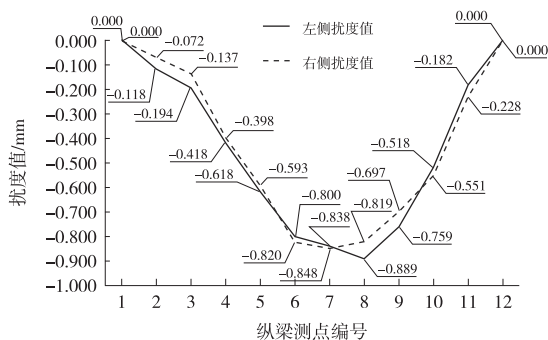


图6 纵梁挠度值测量统计

车身整体弯曲刚度 K 可用车身在垂直载荷作用下产生的挠度大小来描述,可表示为

$$K = \sum \frac{F}{Z_{\max}} \quad (1)$$

式中: F 为施加在车身支撑点之间的等效垂向载荷,为13.35 kN; $Z_{\max}$ 为车身支撑点之间的两侧纵梁挠度最大值的平均值,为0.869 mm。由此计算得出弯曲刚度为15.37 kN/mm。

2.3 模态分析

模态分析同强度刚度分析的有限元模型一致,同样是包含悬架系统的车身结构。不设置任何载荷和约束,即自由模态^[10-14];设置载荷及边界条件,即约束模态,其载荷是以质量形式定义,在悬架与轮胎连接位置定义全约束。

众所周知,自由模态前6阶为刚体位移,模态频率为0。而约束模态计算取得的前6阶频率不为0,前6阶频率的振型是悬架系统及其约束条件所决定的车身振型,本文以约束模态第4阶(图7)为例,模态频率为1.34 Hz,与道路行驶过程中路面激励频率(1~3 Hz之间)重合,存在共振隐患。

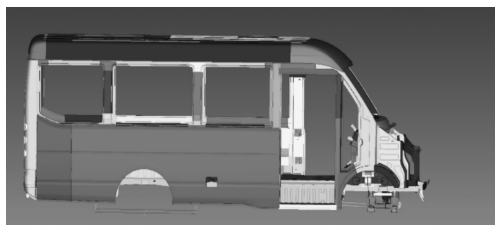


图7 约束模态第4阶

3 技术方案分析验证

为验证MPC技术应用到悬架系统的有效性及其可靠性,采用不同的技术方案、不同的计算方法进行车身结构有限元分析,然后对2种方案的结果进行比较。

第一种技术方案:采用现行的分析方案,车身结构忽略悬架系统^[1-13];第二种技术方案:通过有限元MPC技术,在有限元软件的局部坐标系下建立各种铰链机构模型,实现车辆复杂悬架系统的运动和传递载荷的仿真模拟,进而对包含悬架系统的整车结构进行有限元分析研究。

3.1 强度刚度分析验证

车身结构是否包含悬架系统,也决定着不同的载荷及边界条件,其分析结果必然存在一定的差别,本文以弯扭工况刚度分析为例进行阐述。

弯曲工况计算得出的纵梁挠度曲线,其结果对比如图8所示。现行分析方法中忽略悬架系统,由于采用的是刚性约束悬挂点的静态分析方法,所以挠度曲线在后端悬挂吊耳之间未出现变形,也使得计算的刚

度值偏高。采用 MPC 技术构建详细的悬架系统,其分析计算结果更加符合实际情况。

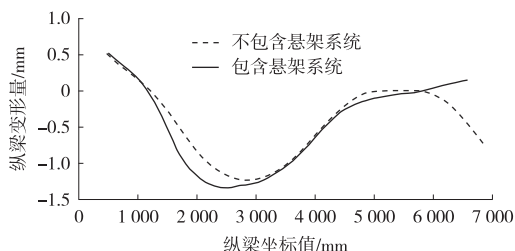


图8 弯曲工况分析结果对比

扭转工况下得出的各横梁扭转角变化曲线结果对比如图9和图10所示。同样,现行分析方法中忽略悬架系统,由于采用的是刚性约束悬挂点的静态分析方法,所以在后端悬挂处的横梁扭转角基本上没有发生变化,也使得计算的刚度值偏高。采用 MPC 技术构建详细的悬架系统,其分析计算结果更加符合实际情况。

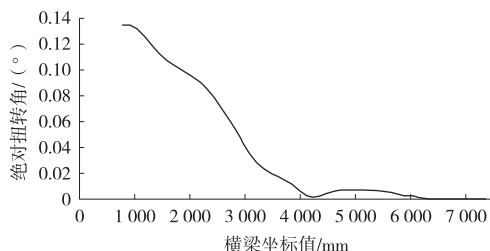


图9 扭转工况分析结果(不包含悬架系统)

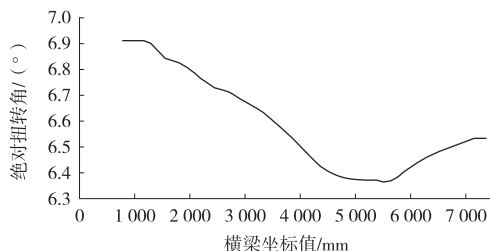


图10 扭转工况分析结果(包含悬架系统)

为验证 MPC 技术整合悬架系统方案的可靠性是否符合实际情况,可通过校核各载荷施加准确与否进行判断。本文以弯曲工况为例,通过提取前悬约束反力和后悬弹簧单元力可求出满载情况下的簧上质量,前悬约束反力和后悬弹簧单元力的分布情况如图11和图12所示。

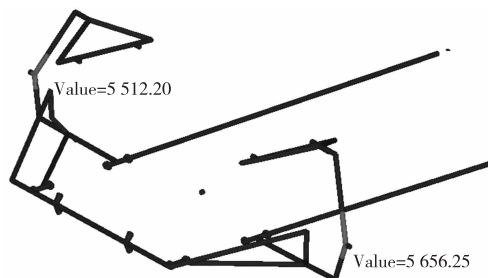


图11 前悬约束反力

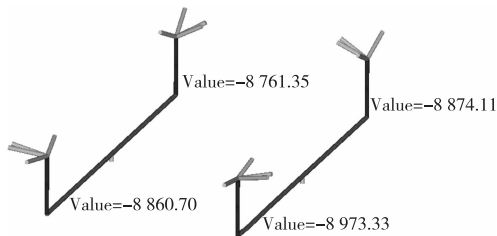


图12 后悬弹簧单元力

对上图数值(力)求和转换为质量4 759 kg,再加上根据车辆簧下各部件的质量数据,可以求出整车最大质量为5 515 kg,和实际值相对误差仅为2%。证明包含悬架系统的车身结构模型的载荷加载及边界条件设置是准确的,符合实际情况。

3.2 模态分析验证

车身结构模型的简化会导致仿真分析数据与实验数据之间出现差异^[15]。车身结构是否包含悬架系统,也决定着不同的质量、载荷及边界条件,因而所求解出的固有频率和振型是有差别的。包含悬架系统的车身结构模态分析结果更符合车辆实际运行中的振动情况。

4 结论

1) 采用 MPC 技术将运动复杂的悬架系统整合到车身结构 CAE 分析模型中,从而实现仅在一个计算模型中能够同时进行强度、刚度分析及自由模态分析,也可设置载荷及边界条件进行与汽车实际振动相关的约束模态分析。

2) 通过 MPC 技术建立包含悬架系统的车身结构力学模型,更加符合实际载荷边界条件,不仅提高了计算结果精度,也改善了整个分析的计算效率、方法。

3) MPC 技术在有限元分析中具有通用性、拓展

性,有理由相信,其应用在汽车研发领域将成为一种趋势。

参考文献:

- [1] 董其娟,韩明亮,夏德伟,等. 基于有限元的全铝车身客车结构强度和刚度分析[J]. 现代制造技术与装备,2023,59(1):122-125.
- [2] 田国富,赵庆斌. 客车车身结构的有限元分析[J]. 机械工程师,2018(5):41-44.
- [3] 刘瑞萍,孔雪,张书豪,等. 轻量化客车车身结构强度分析[C]//中国有色金属加工工业协会. 2018 年中国铝加工产业年度大会论文集,2018:929-933.
- [4] 孙功锐. 钢铝混合结构电动公交车车身骨架刚度及强度分析[D]. 广州:华南理工大学,2017.
- [5] 尹凡. 某商务车车身结构有限元分析及疲劳寿命预测[D]. 武汉:武汉理工大学,2018.
- [6] 沈永峰,郑松林,冯金芝. 公路客车车架与车身骨架强度及模态分析[J]. 现代制造工程,2013(7):90-95.
- [7] 胡志远,浦耿强,高云凯. 轻型客车车身刚度灵敏度分析及优化[J]. 机械强度,2003,25(1):67-70.
- [8] 赵晶,刘锦灿,钟建华,等. 基于有限元法的微型客车车身设计与分析[J]. 制造业自动化,2018,40(11):132-134.
- [9] 王童,杜轶群,陈轶嵩,等. 基于结构轻量化的城市客车车身生命周期评价[J]. 汽车工程,2022,44(5):778-788.
- [10] 任何美,戴作强,郑莉莉,等. 纯电动城市客车底盘车架的模态分析与优化[J]. 制造业自动化,2018,40(1):45-50.
- [11] 王得刚,李朝峰,姚红良,等. 基于车身有限元分析的汽车 NVH 研究[J]. 机械与电子,2008(9):3-6.
- [12] 李长玉,林佳鹏,钱宇晨,等. 基于有限元分析的某轿车白车身轻量化设计[J]. 计算机仿真,2022,39(9):144-149.
- [13] 李洪林,李勤,吴昊,等. 铝合金白车身模态及刚度分析[J]. 有色金属加工,2022,51(3):37-40.
- [14] BRITTO JOHN V. A, SIVASANKARAN S, E LOGANATHAN, et al. Commercial Vehicle NVH Refinement through Test-CAE Development Approach[C]//SAE World Congress and Exhibition,2013.
- [15] ABDULLAH N. A. Z, FOUZI M. S. M, SANI M. S. M. Computational Modal Analysis on Finite Element Model of Body-in-white Structure and Its Correlation with Experimental Data[J]. International Journal of Automotive and Mechanical Engineering,2020,17(2):7915-7926.

欢迎刊登广告

《客车技术与研究》创刊于 1979 年,国内外公开发行,双月刊,国内邮发代号:78-115,国外发行代号:BM 2856,中国标准连续出版物号:ISSN 1006-3331;CN 50-1109/U。

本刊主要发行至客车及其配套件企业、科研单位和大专院校,深受广大读者的欢迎和好评。多年来,本刊在宣传和推广客车配件和设备等新产品、提高产品知名度、促进产品销售以及传播信息等方面发挥了重要作用,已成为客车主机厂选择配套件及设备的主要参考资料。

为了使您的产品能快速赢得市场,提高企业的经济和社会效益,我们竭诚欢迎客车(汽车)及相关企业在本刊刊登广告。

详情咨询:023-62653044。