

驱动桥的整体有限元动态模拟

郭年程¹, 史文库¹, 刘文军¹, 荣如松², 徐忠诚²

(1. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 130022, 长春; 2. 南京依维柯汽车有限公司车桥分公司, 210028, 南京)

摘要: 针对驱动桥试验只能得到桥壳表面振动数据的问题,采用驱动桥整体动态模拟方法来弥补试验数据的不足,从而获得驱动桥内部任意位置的应力、位移、加速度等数据.对驱动桥总成建立三维模型和有限元模型,通过驱动桥总成模态试验与有限元模态计算结果的对比方法,来验证有限元模型的正确性,对驱动桥整体做有限元动态模拟,并利用台架试验对动态模拟结果进行了验证.试验结果表明,驱动桥的整体动态模拟表面振动数据与试验数据相一致,得到的驱动桥内部数据为驱动桥的振动噪声研究提供了直观依据.

关键词: 驱动桥;有限元;动态模拟;台架试验

中图分类号: U463.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)09-0091-05

Dynamic Finite Element Simulation for Driving Axle

GUO Niancheng¹, SHI Wenku¹, LIU Wenjun¹, RONG Rusong², XU Zhongcheng²

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China;

2. Axle Branch of Naveco Company Ltd., Nanjing 210028, China)

Abstract: Dynamic simulation of whole driving axle is chosen to make up the shortcoming that only surface vibration data of driving axle can be obtained by the tests, thus the stress, displacement and acceleration at any position are revealed. A 3D model and a finite element model of driving axle is established and verified by comparing the results from modal tests and computing. The dynamic simulation for whole driving axle is conducted and verified by bench test. It demonstrates that the surface vibration data of dynamic simulation of whole driving axle coincide with that of the bench test, and the obtained driving axle interior data by dynamic simulation can directly support vibration and noise investigation of driving axle.

Keywords: driving axle; finite element analysis; dynamic simulation; bench test

驱动桥作为汽车传动系的主要组成部分,不仅是影响汽车寿命及行驶安全性的主要总成之一,同时也因为驱动桥本身较复杂的结构,使其成为汽车传动系中最主要的振动噪声源之一^[1].影响驱动桥振动噪声的因素很多,涉及到齿轮副传动原理、材料匹配、热处理、加工工艺和装配的质量等,这些因素都给研究驱动桥振动噪声机理,以及采取控制措施带来了相当大的难度^[2].汽车驱动桥噪声的根源在于主减速器准双曲面齿轮副的啮合冲击,以及差速器锥齿轮的啮合冲击和轴承滚动冲击,这些冲击振

动通过轴承外圈传递到桥壳上,从而引起桥壳表面产生振动及声辐射^[3].

由于噪声来源于结构的振动,因此控制噪声的根本在于控制结构的振动,迄今国内外大部分工作也都是围绕这个问题^[4]展开的.为控制驱动桥振动噪声而进行的驱动桥振动测试试验大多是在桥体表面布置加速度传感器,很难直接测得驱动桥内部各零部件的振动及受力情况,而以往对驱动桥的模拟研究也都进行了大量简化,因此很难真实地反映驱动桥总成的振动情况.本文采用有限元方法对某型

收稿日期: 2012-05-18. 作者简介: 郭年程(1985—),男,博士生;史文库(通信作者),男,教授,博士生导师. 基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2007220101002381).

网络出版时间: 2012-06-25

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20120625.1743.004.html>

号驱动桥总成进行了完全弹性体建模,在充分考虑准双曲面齿轮对、差速齿轮系统、圆锥滚子轴承、半轴以及桥壳的刚度和强度的基础上,对包含准双曲面齿轮传动系统和差速系统的驱动桥总成进行动态模拟,希望驱动桥运转时,能够真实地反映各零部件在任意位置的位移、速度、加速度及受力等情况,从而直观地研究驱动桥内部受力原理,从根本上控制驱动桥的振动噪声。

1 驱动桥总成三维模型的建立

为建立准确的驱动桥有限元模型,先要建立精确的驱动桥总成三维模型。利用德国三维光学测量系统 ATOS II 扫描驱动桥总成及各零部件,在三维制图软件(CATIA)中基于反求理论建立驱动桥各零部件的三维数字化模型。根据图纸工艺要求和总成三维扫描数据进行装配,建立的驱动桥总成三维模型如图 1 所示。

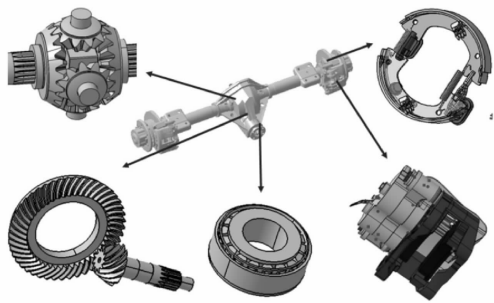


图 1 驱动桥总成三维模型

总成三维模型建立之后,对其进行空间间隙、干涉分析,以及虚拟样机的运动分析,以保证各零部件之间存在合理的间隙和总成的正常运转。

2 驱动桥总成有限元模型的建立

利用 Hypermesh 软件建立驱动桥总成有限元模型,Hypermesh 软件具有强大的几何清理能力和高效的网格划分能力,且支持从 CATIA 中直接导入已存在的三维模型^[5]。将建立好的驱动桥总成三维几何模型导入到 Hypermesh 软件中,并进行适度的几何清理,然后对驱动桥各零部件分别进行网格划分,建立包含各零部件的驱动桥总成有限元模型。由于六面体单元比四面体单元既能提高计算精度又能缩短计算时间,因此在网格划分时将齿轮、轴承等重要零部件均划分为六面体单元。由于主减速准双曲面齿轮对是驱动桥振动噪声的根源,其网格划分的难度也最大,因此建立的主减速齿轮对有限元模

型共有 109 700 个网格。

轴承不仅起到支撑作用,而且还能提高驱动桥总成的固有频率^[6],其支撑方式及位置均对驱动桥模态及动态性能影响很大,是齿轮系统向壳体传递振动的必经之路,因此将驱动桥总成中的 6 个圆锥滚子轴承均划分为六面体网格。

齿轮差速系统由多个齿轮构成,也是驱动桥动态模拟是否准确的关键问题,而在很多研究中将差速器略去是不准确的。本文建立的驱动桥主减速器和差速器齿轮轴承系统的有限元模型如图 2 所示。建立的驱动桥总成有限元模型包括驱动桥所有的齿轮、轴承和半轴等 51 个零部件,共有 444 329 个节点和 539 765 个单元。

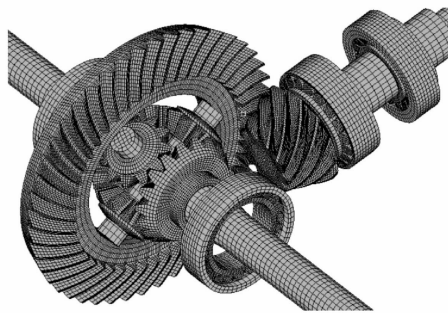


图 2 齿轮和轴承的有限元模型

3 驱动桥总成有限元模型的验证

在对驱动桥总成有限元模型进行动态模拟之前,需验证有限元模型的正确性。本文通过比较驱动桥总成有限元模态计算、驱动桥总成模态试验的频率、振型结果来验证有限元模型的正确性。

将建立好的驱动桥总成有限元模型导入到 Abaqus 软件中,对各零件分别设定材料参数并定义约束条件,进而通过 Lanczos 求解器计算求得驱动桥总成的自由模态参数。对驱动桥总成进行模态计算,得到驱动桥的前 20 阶模态频率和振型,图 3~图 5 仅列出驱动桥的 3 阶典型模态振型,相应的模态频率见表 1。



图 3 驱动桥总成的计算一阶弯曲振型

为了验证有限元模型的正确性,对驱动桥总成



图 4 驱动桥总成的计算二阶弯曲振型



图 5 驱动桥总成的计算三阶弯曲振型

做模态试验. 将驱动桥样件用软弹簧悬挂起来, 模拟自由边界条件, 模态试验中的激励方式选择电磁激励器激励, 驱动桥的悬吊方式及激励器激励位置如图 6 所示. 试验过程中需要足够多的测点来避免空间的混叠, 以驱动桥的有限元模拟计算结果为指导并结合驱动桥外形选取拾振点, 用三向加速度传感器进行振动数据的测量.

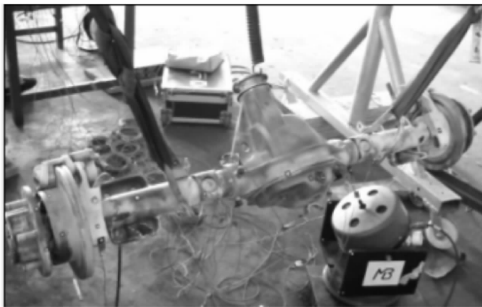


图 6 驱动桥总成的悬吊方式及激励位置

由模态试验测得的驱动桥总成三阶典型模态振型如图 7~图 9 所示, 模态频率的试验值见表 1.

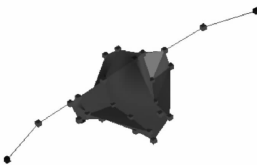


图 7 驱动桥总成的试验一阶弯曲振型

表 1 模态频率的计算值与试验值的比较结果

振型	模态频率/Hz		误差/%
	计算值	试验值	
驱动桥一阶弯曲	80.37	78.54	2.33
驱动桥二阶弯曲	262.81	246.73	6.52
驱动桥三阶弯曲	520.13	501.33	3.75

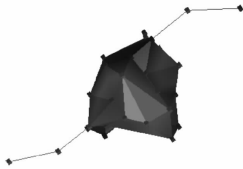


图 8 驱动桥总成的试验二阶弯曲振型

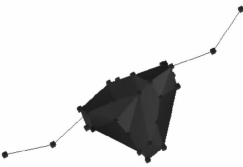


图 9 驱动桥总成的试验三阶弯曲振型

从表 1 中可以看出, 模态频率的计算值比试验值稍高. 这是因为模态求解过程中对接触定义无效, 因此为了求得驱动桥总成模态, 对某些部件的接触位置做了绑定处理, 导致驱动桥总成刚度稍微增加, 从而提高了模型的模态频率. 由于三阶典型模态频率的计算值与试验值相差均在 10% 以内, 且各频率的计算模态振型和试验模态振型吻合得较好, 因此综合分析有限元模型是正确的, 可以做整体动态模拟.

4 驱动桥总成动态模拟

由于 Abaqus 软件能分析复杂的工程力学问题, 而 Explicit 模块对处理接触条件变化的高度非线性问题非常有效, 因此驱动桥总成整体的动态模拟在 Abaqus 软件、Explicit 模块中进行. 对驱动桥的边界条件及接触关系进行定义, 通过约束板簧座上的表面结点, 在输入端加驱动角速度, 按照驱动桥的试验方法^[7], 当车速为 50 km/h、驱动桥主动齿轮转速为 160 rad/s 时, 在两侧轮毂处加 20 N·m 的反向力矩. 在对驱动桥零部件进行接触定义的过程中, 共定义了 28 个接触对, 其中主被动准双曲面锥齿轮啮合接触对最为关键, 其接触类型为面-面接触的连续表面, 如图 10 所示.



图 10 主减速器准双曲面齿接触对

由于驱动桥整体有限元模型的复杂性, 使极少

数单元的稳态时间很短,增加了整个模型的计算时间,因此需对模型进行质量放大.一般质量放大的单元数须小于总数的5%,为减小质量放大对模型计算准确性的影响,本文只对稳态时间增量步小于 6×10^{-8} 的单元进行质量放大,质量放大的单元数只占总数的0.025%,只有主减速器壳上极少数的单元,而没有旋转系统关键部件上的单元.

对驱动桥总成进行动态模拟,因模型太大,计算时间非常长,因此将主动齿轮旋转一周的时间设定为模拟时间(0.039 s).为避免角速度和力矩瞬间加载导致计算出错,设定前0.005 s为角速度和力矩线性的加载时间,并待模型运转稳定后进行数据采集.综合考虑,设总计算时间为0.05 s.通过计算可以得到驱动桥总成在任意时刻和位置的应力、应变、位移、速度和加速度等结果,还可以给出各结果的时间历程曲线,如图11、图12所示.

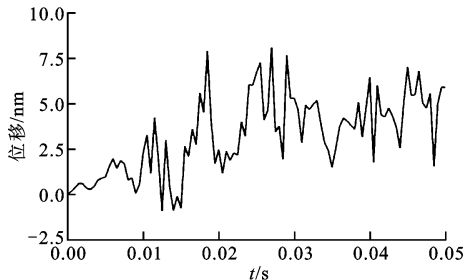


图11 主动齿轮顶端中心点的轴向位移曲线

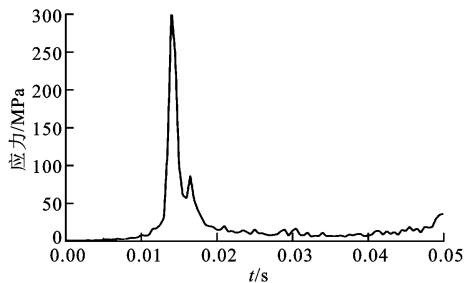


图12 齿轮表面某点的应力变化曲线

当驱动桥工作时,通过试验很容易测得其表面上的各数据,但难以测得内部各位置的振动、受力等参数,而动态模拟则可以得到几乎所有的数据.如图11所示,由于主动齿轮与被动齿轮啮合导致主动齿轮受正向的轴向力,因此主动齿轮存在轴向位移波动,但位移变化较小.图12反映出主动齿轮在旋转一周的过程中,齿面上某点的应力变化情况,由图可见,应力在齿轮旋转一周的过程中变化趋势非常直观,即在啮合瞬间应力突然增大,其余时间应力则

很小.

5 动态模拟的试验验证

通过动态模拟可以得到很多试验难以测得的数据,但动态模拟是否能准确反映实际情况还需通过试验进行验证.驱动桥的表面加速度可以通过试验测得^[8],且动态模拟可以得到任意位置的加速度,因此可通过试验测量驱动桥表面加速度的方法来验证动态模拟的正确性.

在传动系试验台上对驱动桥进行台架试验,以主减速器壳上表面中间位置一点的振动加速度为对比标准,来验证动态模拟的正确性.台架试验现场如图13所示.



图13 驱动桥台架试验

驱动桥台架试验保证了驱动桥的安装状态、运行工况等条件均与动态模拟时一致,即将板簧座固定,同时施加与动态模拟相同的转动角速度和扭矩,待驱动桥运转稳定之后开始测量记录数据.试验得到了主减速器壳上表面中间位置点的振动加速度曲线,取0.01~0.05 s之间的曲线数据与模拟数据进行对比,并分别计算了加速度均方根值,如图14所示.

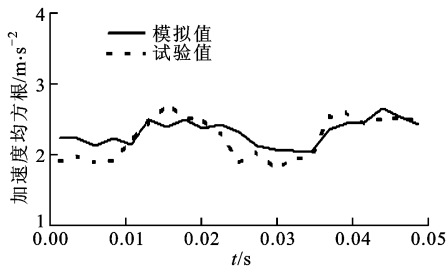


图14 主减速器壳上表面选取点试验与模拟加速度的对比

由图14中试验和模拟选取的加速度均方根值可见,在主动齿轮旋转一周内,模拟值与试验值稍有偏差,但差距较小,两曲线基本都在 2.3 m/s^2 左右上下波动.由于模拟过程受外界影响因素较少,因此

模拟结果的波动比试验结果小.综合分析,对驱动桥的动态模拟方法是正确的.

6 结 论

本文采用有限元法对驱动桥整体建模过程及动态模拟进行了系统研究,主要研究内容有以下几点.

(1)利用逆向工程的方法,建立了包含所有零部件的驱动桥总成三维模型,同时模型与台架试验所用驱动桥为同一件样品,从而保证了验证试验与动态模拟条件的一致性.

(2)根据驱动桥总成三维模型建立了有限元模型,对除壳体以外的所有重要零部件均划分为六面体单元.

(3)对有限元模型进行模态计算,通过模态试验与有限元模态计算结果的对比,验证了有限元模型的正确性.

(4)对驱动桥总成进行整体有限元动态模拟,通过模拟得到了其内部在任何位置的应力、位移、加速度等数据,为研究驱动桥寿命和振动噪声根源控制提供了参考依据.

(5)采用与模拟条件一致的驱动桥台架试验,验证了有限元动态模拟与实际的一致性.因此,可以采用有限元方法对驱动桥总成进行动态模拟,以补充试验数据的不足.

参考文献:

- [1] LEE Sang-Kwon, GO Sung-Kyu, YU Dongjun, et al. Identification and reduction of gear whine noise of the axle system in a passenger van [C]// SAE 2005 Noise and Vibration Conference and Exhibition. Michigan, USA; SAE, 2005:1-14.
- [2] FAYDOR L, ALFONSO F, KENICHI H. Design manufacture stress analysis and experimental tests of low-noise high endurance spiral bevel gears [J]. Mechanism and Machine Theory, 2006, 41(1):83-118.
- [3] 夏秀蓉,杨锋军,孟春景.螺旋锥齿轮质量对驱动桥总成噪声的影响 [J].合肥工业大学学报:自然科学版, 2009,32(S1):167-170.
XIA Xiurong, YANG Fengjun, MENG Chunjing. Influences of hypoid gear quality on rear axle noise [J].

Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2009, 32(S1):167-170.

- [4] FRANK F. Sound and structural vibration radiation transmission and response [M]. London, UK: Academic Press, 1985:27-39.
- [5] 陈静.基于有限元方法的重型车变速器整体动态模拟与寿命预测研究 [D].长春:吉林大学,2009.
- [6] 庞剑,谌刚,何华.汽车噪声与振动:理论与应用 [M].北京:北京理工大学出版社,2006:290-305.
- [7] QC/T 533—1999 汽车驱动桥台架试验方法 [S].长春:长春汽车研究所,1999:12-15.
- [8] 孟庆华,周晓军,庞茂.车辆驱动桥噪声分析及试验研究 [J].振动与冲击,2006,25(1):136-139.
MENG Qinghua, ZHOU Xiaojun, PANG Mao. Analysis and investigation on vehicle driver axle's noise [J]. Journal of Vibration and Shock, 2006,25(1):136-139.

[本刊相关文献链接]

- 汽车驱动桥系统模糊故障树分析研究.2009,43(7):110-114.
- 封闭方腔自然对流的格子 Boltzmann 方法动态模拟.2007,41(1):32-36.
- 直角法兰双辊夹持扩旋成形有限元模型的确定.2010,44(5):66-70.
- 有限元方法的小管径单壁碳纳米管杨氏模量预测.2007,41(9):1066-1069.
- 多支持轴系轴承受力与刚度的有限元迭代计算方法.2010,44(9):41-45.
- 基于结合面的机床摄动分析及优化设计.2010,44(1):96-99.
- 结合面法向动态参数的分析模型.2009,43(9):91-94.
- 悬臂梁平面结合面参数的识别技术研究 2008,42(2):1323-1326.
- 多支承轴系轴承受力与刚度的有限元迭代计算方法.2010,44(11):41-45.
- 直角法兰双辊夹持扩旋成形有限元模型的确定.2010,44(5):66-70.
- 有限元方法的小管径单壁碳纳米管杨氏模量预测.2007,41(9):1066-1069.
- 新型静压气体球轴承的超声速现象研究.2011,45(5):59-63.

(编辑 管咏梅)