

doi:10.3969/j.issn.1008-5483.2012.04.004

基于 ADINA 分动器输出轴齿轮的固—液耦合分析

陈余, 夏萍, 郑泉

(安徽农业大学 工学院, 安徽 合肥 230036)

摘要:以智能四驱车辆分动器的输出轴齿轮及对其润滑的流体润滑油为对象,基于 ADINA 软件建立三维齿轮结构和流体模型,并对齿轮在转动过程中润滑油流体的耦合进行了分析。以 FSI 计算结果为基础,应用分离法,分析了齿轮在转动过程中润滑油流体的流动趋势及位移、速度变化趋势。结果表明:齿轮在转动过程中流体会形成一定的湍流,且齿附近的位移及速度有一定的变化。

关键词:齿轮;分离法;流体;耦合

中图分类号:TH122

文献标志码:A

文章编号:1008-5483(2012)04-0013-03

Coupling Analysis of Solid-liquid for PTU Output Shaft Gear Based on ADINA

Chen Yu, Xia Ping, Zheng Quan

(School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: The 3D model of the gear structure for Power transfer unit (PTU) of the intelligent 4WD vehicle and lubrication gear fluid was established by ADINA software. The oil fluid coupling in the gear rotation process was analyzed in ADINA. The fluid flow trend, oil displacement and velocity changing trend in the process of gear rotation were analyzed by using partition method based on the FSI calculation results. The results show that the oil fluid in the gear rotation process can form certain turbulence, and the displacement and speed nearby the tooth have a certain change.

Key words: gear; partition method; fluid; coupling

随着计算流体力学(CFD)和流固耦合动力学的发展,越来越多的研究人员应用 CFD 和流固耦合动力学来解决日益突出的瞬态载荷作用下的流固耦合问题^[1-9]。

在分动器输出轴齿轮的转动与润滑油的耦合模拟分析中,利用分离法对润滑油及齿轮模型进行耦合分析。对于分离法,流体和结构求解变量是完全耦合的,流体方程和结构方程是按顺序相互迭代求解的,各自在每一步得到的结果提供给另一部分使用,

直到耦合系统的解达到收敛,迭代停止^[10]。

文中首先分别建立了流体及结构的三维模型并导入 ADINA 进行约束、加载等前处理,然后选择流固耦合模块进行仿真计算,从而得到流体运动的一些特征及变化趋势。

1 理论模型

智能四驱车辆分动器^[11-12]输出轴齿轮的流固

收稿日期:2012-07-10

基金项目:安徽省科技攻关重点项目(1101C0603044);安徽省高校自然科学基金重点项目(KJ2010A122)

作者简介:陈余(1987-),男,安徽宿州人,硕士生,从事汽车系统动力学研究。

耦合模型包括齿轮模型及润滑油流体模型。在润滑油流体的流动计算中,将其流动视为三维黏性不可压缩流体的湍流流动,湍流采用标准 $K-\varepsilon$ 模型。

1) 质量守恒方程

$$\operatorname{div} \mathbf{U}=0 \quad (1)$$

2) 动量守恒方程

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t}+\operatorname{div}(u \mathbf{U})=\operatorname{div}\left(V_{\text {grand }} u\right)-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial t}+\operatorname{div}(v \mathbf{U})=\operatorname{div}\left(V_{\text {grand }} v\right)-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial t}+\operatorname{div}(w \mathbf{U})=\operatorname{div}\left(V_{\text {grand }} w\right)-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \end{cases} \quad (2)$$

3) 能量守恒方程

$$\rho \frac{\partial T}{\partial t}+\rho \operatorname{div}(\mathbf{U} T)=\operatorname{div}\left[\left(\frac{\lambda}{c_p}+\frac{u_i}{\sigma_t}\right) \operatorname{grand} T\right]+S_T \quad (3)$$

式中: S_T 为源项和耗散函数之和。

4) 湍能能量方程

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial k}{\partial t}+\rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(u+\frac{u_i}{\sigma_k}\right) \frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+ \\ & u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-\rho \varepsilon \end{aligned} \quad (4)$$

5) 湍能耗散率方程

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}+\rho u_k \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} &= \frac{\partial}{\partial x_k}\left[\left(u+\frac{u_i}{\sigma_\varepsilon}\right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k}\right]+\frac{c_1 \varepsilon}{k} u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \times \\ & \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-c_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $u_i=c_u \rho k^2 / \varepsilon$; c_u, c_1, c_2 为经验系数,分别为 0.09、1.44、1.92; $\sigma_t, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ 为常数,分别为 0.85、1.0、1.3。

6) 近壁区处理方程

$$u_i=k \delta \sqrt{\tau \rho}\left[\ln \left(\frac{E \delta}{v} \sqrt{\tau \rho}\right)\right]^{-1} \quad (6)$$

$$\varepsilon=c_u^{3/4} k^{3/2} /(k \delta) \quad (7)$$

式 (1)~(7) 中: k 和 E 为常数,分别取 0.4 和 9.0; τ 为壁面上的切应力; ρ 为流体密度; v 为流体运动黏度; u_i 为有效动力黏度; k 为湍流动能; ε 为湍流耗散率; λ 为流体的导热系数; c_p 为流体的比热容; $\mathbf{U}$ 为速度矢量,在 3 个坐标上的分量分别为 u, v, w ; p 为压力; $i, j, k=1, 2, 3$; t 为时间变量; T 为温度。

2 建立耦合分析的有限元模型

2.1 建立润滑油流场的有限元分析模型

体积形状非常复杂的流体模型,完全准确地构造几何模型非常困难,在不影响计算的基础上,对几何模型进行了一定的简化和处理,如部分圆角和

倒角、简化或忽略部分尺寸的结构特征等。在划分网格时,局部区域进行了处理,以保证湍流分析的准确性。润滑油流场的模型采用三维 3-D Fluid 4 节点流体分析模块 ADINA-CFD,单元数为 25 695,节点数为 5566。润滑油为 SAE 80W/90(API GL-5),齿轮油加注量为 1 L;此润滑油的粘度为 $1.4 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 密度为 $907 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 对此模型进行载荷、约束的加载并设置相关参数,保存网格模型如图 1 所示。

2.2 建立齿轮结构场的有限元分析模型

结构模型采用三维 3-D solid 10 节点结构模块 ADINA-Structures,单元数为 25 695,节点数为 5566。输出轴齿轮材料为 20CrNiMo,弹性模量为 2.06×10^{11} ,泊松比为 0.3,密度为 7930,对此模型进行载荷、约束的加载并设置相关参数,保存网格模型如图 2 所示。

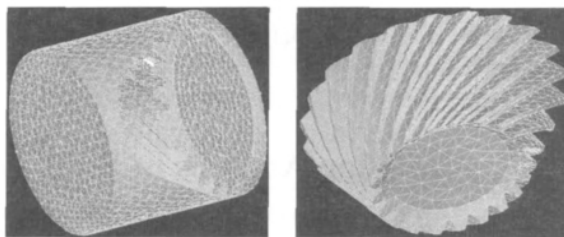


图 1 流场的有限元模型

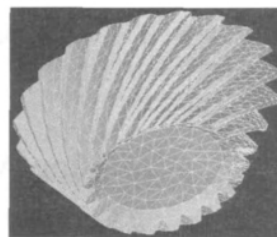


图 2 齿轮结构场的有限元模型

2.3 运行计算

数值模拟计算主要分 3 步: 1) 在流体模型中进行数据保存计算; 2) 在结构模型中进行数据保存计算; 3) 选择 ADINA-FSI 模块,将流体与结构模型加载计算。

3 耦合分析的有限元模型

模拟计算在 ADINA-FSI 模块进行,采用 Pentium (R) Dual-Core 双 CPU 32 位、2G 内存 XP 操作系统,耦合模型的流动与结构耦合计算经过 50 步迭代收敛。

3.1 流体流动趋势模拟

经过润滑油流场的 CFD 计算分析,分别计算出结构体齿轮起始转动瞬间流体流动趋势图及流体场压力分布图。由流体场流动趋势图可清晰看出流体的流动状态,其状态趋势为除了沿齿轮转动的层流外亦形成了湍流的湍涡,即齿槽及近齿锥部分,如图 3 所示;流体场压力图具体的分析结论为:由流体场压力分布图可得知,最小压力为 -2×10^{-5} ,即部分流体是背压的,说明背压的部分流体与其他流体部分运动方向相反,即亦产生了湍流现象,如图 4 所示。

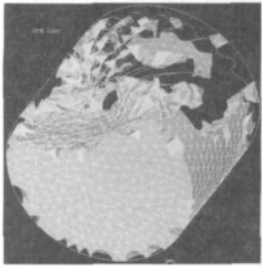


图 3 流体场流动趋势图

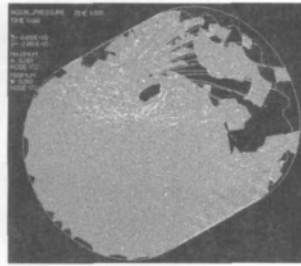


图 4 流体场压力分布图

3.2 耦合模型的速度分析

图 5 为润滑油流动与结构耦合计算迭代收敛后的耦合模型的速度矢量图,可以看出,流体的运动较集中的位于齿轮周围;图 6 为耦合模型的速度分布等值面云图,从整体速度分布图可以看出流体的大部分面积的流动速度是相同的,位于齿轮齿槽位置的速度有较明显的差别,最大为 $3.248 \times 10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最小为 $-3.176 \times 10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,由此数据说明,流场的速度、大小及方向不同,形成了湍流。

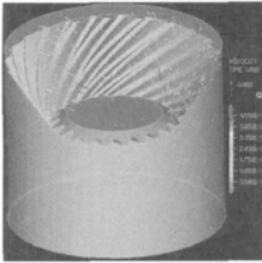


图 5 流体场速度图

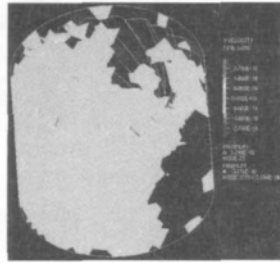


图 6 流体场速度等值面云图

3.3 耦合模型的位移分析

图 7~8 为润滑油流动与结构耦合计算迭代收敛后的耦合模型的切面位移图和等值面云图。从图中可以看出,流体的位移较集中的位于齿轮周围,从整体位移分布图可以看出流体的大部分面积的流动位移是相同的,位于齿轮齿槽位置的流体移动有较明显的变化,齿槽处最大位移为 $7.977 \times 10^{-13} \text{ m}$,亦出现反向位移为 $-9.914 \times 10^{-13} \text{ m}$,由此数据说明,流场的位移方向及趋势不规一,出现混杂流动现象,即形成了湍流。

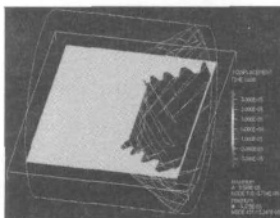


图 7 流体场切面位移图

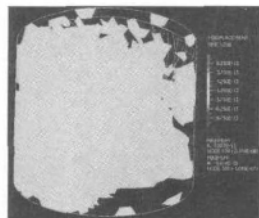


图 8 流体场位移等值面云图

4 结论

应用数值分析软件实现流—固耦合模型的分

析,可以清楚的观察到分动器内部润滑油的流动趋势,为解决复杂结构的分动器内部流—固耦合问题提供了简洁合理的可行性方案。

由于流体及齿轮结构的复杂性,齿轮转动过程中润滑油流体会产生一定的湍流趋势,齿槽处最大位移为 $7.977 \times 10^{-13} \text{ m}$,出现反向位移 $-9.914 \times 10^{-13} \text{ m}$,并产生了湍流现象。同时流体的速度分布存在显著的不均匀性,接近齿的位置速度较大,最大为 $3.248 \times 10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最小为 $-3.176 \times 10^{-18} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,会对齿轮的转动产生方向、大小不同的转动阻力,从而产生一定的震动和噪声。

仿真计算结果表明:齿轮在转动过程中会给附近的润滑油流体一个离心力,使接触齿的液体相对齿轮产生较小的位移,即出现一定的缝隙,在速度较高时润滑油对齿轮的润滑会产生一定的影响。这为下一步进行装配体固—液耦合分析提供参考。

参考文献:

- [1] Hidehiko Kajiura, Yukihiro Fujioka, Tatsuya Suzuki, et al. An analytical approach for prediction of piston temperature distribution in diesel engines [J]. JSAE Review, 2002, 23: 429-432.
- [2] 赵以贤, 毕小平, 王普凯, 等. 车用内燃机冷却系的流动与传热仿真[J]. 内燃机工程, 2003, 24(4): 1-5.
- [3] Oner Arici, John H. Johnson, Ajey J. Kulkarni. The Vehicle Engine Cooling System Simulation: Part I—Model Development [C]. SAE 1999-01-0240.
- [4] Siders J A and Tiucy D G. Optimizing Cooling System Performance Using Computer Simulation [C]. ASE 971802.
- [5] 白敏丽, 吕继组, 丁铁新. 六缸柴油机冷却系统流动与传热的数值模拟研究 [J]. 内燃机学报, 2004, 22(6): 525-531.
- [6] Reipert P, Voigt M. Simulation of the Piston/Cylinder Behavior for Diesel Engines [R]. SAE Technical Paper 2001-01-0563, 2001.
- [7] 张阿漫, 戴绍仕. 流固耦合动力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [8] Mohan K V, Arich O, Yang S L, et al. A Computer Simulation of the Turbocharged Vehicle Engine Cooling System Simulation [C]. SAE 971804.
- [9] 王福军. 计算流体动力学分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [10] 岳戈. ADINA 流体与流固耦合功能的高级应用 [M].

(下转第 19 页)

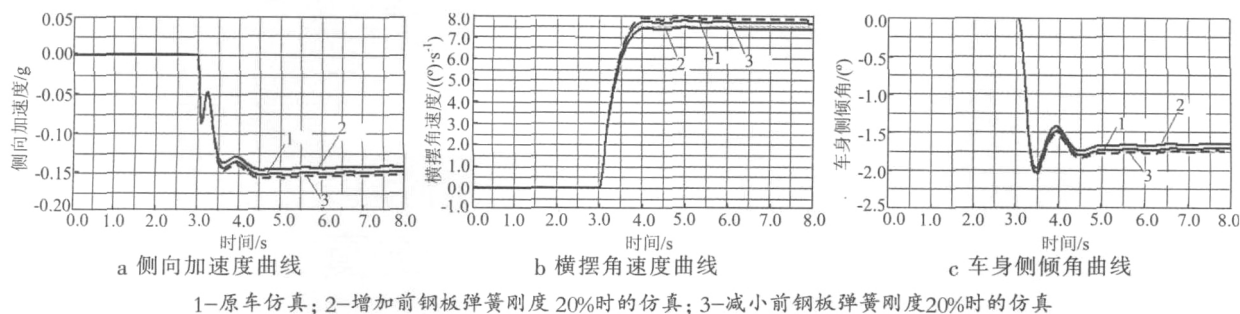


图 9 前钢板弹簧不同刚度下的参数曲线图

仿真试验,综合考虑操稳和平顺性能达到相对的最佳值,使整车得到良好匹配,才是应该需要的最优方案。本文暂且只做操稳性改良分析,为下一步整车匹配做铺垫。

4 结论

通过 Adams 软件搭建了重型汽车的整车模型,并通过实车试验与仿真结果进行比较,验证了模型的可靠性,在此基础上,通过以前钢板弹簧刚度为变参量对模型进行仿真对比的方式,提出了一种改善整车操纵稳定性的方案,为以后该重型汽车的整体性能优化打好了坚实的基础。

参考文献:

- [1] 余志生. 汽车理论[M]. 4 版. 北京:机械工业出版社, 2004.
- [2] 陈军. MSC. ADAMS 技术与工程分析实例[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2008.
- [3] 中国汽车技术研究中心标准化研究所. 汽车整车试验方法标准大全(下册)[K]. 天津:中国汽车技术研究中心, 1993.
- [4] 黄伟. 越野车操纵稳定性和行驶平顺性仿真及应用研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2007.
- [5] 何焜. 特种车辆整车建模与动力学仿真[D]. 合肥:合肥工业大学, 2005.
- [6] 林逸, 张洪欣, 温吾凡. 多刚体系统动力学在汽车独立悬架运动分析中的应用[J]. 汽车工程, 1990(1):15-29.

(上接第 12 页)

参考文献:

- [1] 张胜兰, 郑冬黎, 郝琪, 等. 基于 HyperWorks 的结构优化设计技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2008.

- [2] 别辉, 陈赣, 史建鹏. 结构优化在提高汽车车门把手刚度上的应用[C]//结构及多学科优化工程应用与理论研讨会 2009(CSMO-2009)论文集, 2009.
- [3] 姚玉林. 桑塔纳 2000 型轿车车门把手受力分析[J]. 上海汽车, 2000(11):23-25.

(上接第 15 页)

北京:人民交通出版社, 2010.

- [11] Wang Yuming, Huang Minfeng, Quan Zheng. Finit Element Analysis of Time-sharing 4WD Vehicle Transfer Case Based on Romax [J]. Applied Mechanics

and Materials, 2011(80-81):832-836.

- [12] 黄民锋, 王钰明, 刘恒, 等. 基于 Workbench 的分动器壳体有限元分析 [J]. 湖北汽车工业学院学报, 2011, 25(2):20-22, 27.