

文章编号:1001-2486(2007)04-0121-05

基于整车虚拟道路行驶试验的车辆零部件疲劳分析*

孙宏祝, 陈 循, 梁科山, 丛 楠

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要:针对现有车辆零部件精确疲劳分析依赖成本高昂的实车试验的问题,提出了一种利用整车虚拟样机仿真分析零部件疲劳寿命的方法。该方法通过在 ADAMS/CAR 中用整车虚拟样机在虚拟道路模型上进行行驶试验,利用多体系统动力学基于模态坐标的求解特点,使用模态应力恢复技术准确还原出了用于零部件疲劳寿命分析的载荷历程。将该方法应用于某车辆双横臂前悬中的下控制臂,在较短的时间内获得了该零件的预测疲劳寿命、寿命安全系数及危险部位等信息。应用结果表明,该方法可作为汽车设计过程与测试过程中的有效试验手段。

关键词:汽车零件;虚拟道路;模态应力恢复;疲劳寿命;虚拟样机

中图分类号:U462.3*6;TP391.9 **文献标识码:**A

Fatigue Analysis for Auto Parts Based on the Vehicle Virtual Road Testing

SUN Hong-zhu, CHEN Xun, LIANG Ke-shan, Cong Nan

(College of Mechatronics Engineering and Automation, Nation Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Based on the vehicle virtual prototype simulation, a new method for auto parts fatigue analysis is presented to avoid the real vehicle tests. In consideration of the modal stress recovery (MSR), the method can accurately solve the flexible multi-body system dynamics under the modal coordinate. By using MSR, the loading spectra of auto parts can be acquired after the virtual prototype's road tests. Then the fatigue test of the parts can be conducted with the loading spectra. This test method was applied to a lower control arm (LCA) of a car's front independent suspension. The result indicates that this virtual fatigue test method is an effective means for auto design and test.

Key words: auto parts; virtual road; modal stress recovery; fatigue life; virtual protocol

对汽车零部件进行疲劳寿命试验是保证汽车安全质量的关键环节。目前,针对车辆零部件的可靠性疲劳耐久试验主要在中小型室内振动台架上完成^[1]。这种台架试验要想取得成功,就不得不依赖于实车道路行驶试验去准确地获取该零件在整车真实路面行驶时所受到的载荷历程。由于实车试验成本较高,往往无法大量进行,而有限次的实车试验无法满足任意零部件疲劳试验对载荷历程的需求。特别是当车辆处于设计阶段没有物理样车的情况下,如何快捷准确地预知车辆零部件的疲劳寿命就成为了困扰工程人员的一个难题^[2]。

1 整车虚拟道路行驶试验

1.1 整车虚拟样机及其动力学求解

车辆是一个由上万个零部件组成的复杂系统,在建立整车的虚拟样机时必须对其进行适当的简化。简化后的模型是一个多体系统动力学模型,模型在省略了一切不影响多体动力学求解、与后续疲劳分析无关的结构和零部件的同时,最大程度地保留了零部件间的联结关系和运动形式。

在建模时,考虑到不同种类车辆之间结构的相似性,可将整车系统分解为若干个子系统,分开建模,

* 收稿日期:2007-03-01

基金项目:国家部委资助项目(203020102)

作者简介:孙宏祝(1967—),男,博士生。

最终将各自系统进行“组装”,形成整车模型。如果建立的各子系统具有一定的通用性,即修改一定的参数,就可应用在其他整车模型之中,则能够极大地简化整车建模的工作强度。本文使用目前应用最为广泛的汽车虚拟样机开发软件 ADAMS/CAR,该软件拥有多种类型的子系统模板,基本囊括了现有车辆的各基本构造。利用已有模板,通过输入车身设计模型、悬架特性参数、轮胎模型参数等实际车辆各关键设计参数,即可快速建立车身、传动系统、转向系统、悬挂系统、制动系统、行走系统等子系统模型,再由各子系统间的拓扑信息和安装方式完成整车虚拟样机的建模工作。

初始条件下,所建立的虚拟样机是刚体模型。为了更准确地获得所关心零部件在虚拟道路行驶试验中的载荷历程,考虑道路随机振动环境下零件运动与其弹性变形耦合对其产生的损伤,特将其转化为具有一定模态特性、会产生局部变形的柔性体。针对上述刚体与柔性体两类零部件,将根据式(1)、(2)分别进行动力学求解^[3]。

$$\begin{cases} M\ddot{q} + \Phi^T \lambda = Q \\ \Phi = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} M\ddot{q} + \dot{M}\dot{q} - \frac{1}{2} \left[\frac{\partial M}{\partial \dot{q}} \right]^T \dot{q} + Kq + C\dot{q} + G + \left[\frac{\partial \Phi}{\partial q} \right]^T \lambda = Q \\ \Phi = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, q 为系统广义坐标列阵; Φ 为约束方程; Φ_q 为约束雅克比矩阵; λ 为约束方程 Φ 的拉格朗日乘子; Q 为广义力列阵; M 为惯性矩阵; K 为模态坐标下的刚度矩阵; C 为柔性体的阻尼矩阵; G 为重力。并且两式中 q 、 M 、 Q 的定义对于刚体为笛卡儿坐标,对于柔性体为在模态坐标下的投影。

1.2 路面谱与虚拟路面模型

作为虚拟道路行驶试验的输入,路面模型是虚拟道路行驶试验能否真实再现实车试验,试验结果能否真实反映实车零部件受载情况的关键。大量的测量分析结果表明,路面不平度具有随机、平稳和各态历经的特性,可以用平稳随机过程理论来分析描述。路面谱是对路面不平度的一种描述方式^[4]。

国标 GB7031-86 中使用路面空间功率谱密度来定义路面不平度统计特性,其路面不平度位移功率谱密度拟合表达式:

$$G_d(n) = G_d(n_0) \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-\omega} \quad n > 0 \quad (3)$$

式中, n 为空间频率(m^{-1}); n_0 为参考频率, $n_0 = 0.1 m^{-1}$; $G_d(n_0)$ 为路面不平度系数(m^2/m^{-1}),国标中将路面分为8个等级,并分别定义了 $G_d(n_0)$ 的均值和上下限; $G_d(n)$ 为路面不平度(m^2/m^{-1}); ω 为频率指数,经验值 $\omega = 2$ 。

在式(3)的基础上,即可由下式得到路面不平度的垂向空间随机谱。

$$y(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sqrt{\frac{nf_s G_d[n]}{2}} \cdot \sin\left(\frac{2\pi nk}{N} + \theta[n]\right) \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4)$$

式中, $G_d[n]$ 为 $G_d(n)$ 的采样序列; f_s 为采样频率; N 为序列长度; $\theta[n]$ 为 $[0, 2\pi]$ 上均匀分布的随机数; k 为时域路面纵向位移。

在 ADAMS 中,随机路面是由一系列三节点平面单元组合成的一个三维表面^[5],如图1所示。通过式(4)即可得到一系列结点的 x, y 坐标,通过人为设定表示路面宽度 z ,即可建立随机路面的三维模型。此外,ADAMS 还可以完成轮胎转鼓试验台、平整路面、矩形凸块路、折线路面、凹坑路面、斜坡路面、三角形凸块路面、正弦波路面、正弦变波纹路面、3D 等效容积道路、3D 样条路面等标准化测试路面,这些路面均可应用于以考查零部件可靠性耐久性为目的的虚拟道路行驶试验之上。

1.3 虚拟道路行驶试验过程

对于车辆的虚拟道路试验,其 ADAMS 仿真控制过程如图2所示。其中驱动控制文件(DCF)记录了在仿真中对车辆虚拟样机档位、引擎、气门、制动、转向、离合器等功能部件的控制模式及控制参数。路面描述文件(RDF)中记录着上节中定义的路面信息。利用 DCF 文件以及 RDF 文件即能够精确实现对

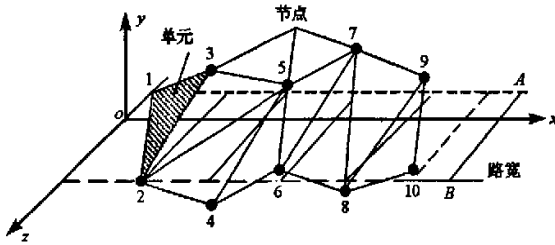


图1 随机不平路面
Fig.1 Stochastic road modeling

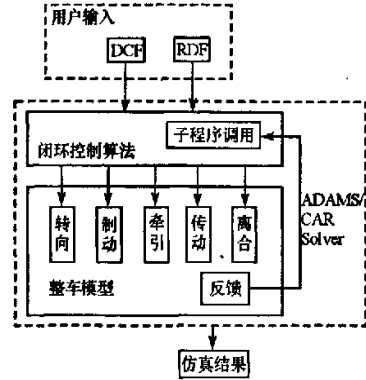


图2 虚拟道路行驶试验
Fig.2 Virtual road experiment

整车虚拟样机在各种行驶条件和状态下的仿真。

图2中所示虚拟道路行驶试验的仿真结果实际上包含了众多信息,但在此仅指零部件在试验过程中所受到的载荷历程,这些载荷历程将作为其疲劳分析的依据。

2 基于模态应力恢复的零部件疲劳寿命分析

2.1 模态应力恢复^[6]

如前所述,疲劳分析所关心的零部件使用了柔性体模型。在ADAMS中,柔性体模型的弹性是由其模态来表示的。由(2)式求解出的广义坐标 q 是定义在其各阶模态坐标上,具体可表示为:

$$q = \{x \ y \ z \ \Psi \ \theta \ \varphi \ \xi_i\}^T = \{R \ \Psi \ \Phi\}^T \quad (5)$$

其中 x, y, z 为局部坐标系在总体坐标中的位置; Ψ, θ, φ 为局部坐标系在总体坐标系中的欧拉角; ξ_i 为柔性体的第 i 阶模态位移,为无单位标量; R, Ψ 为两坐标系中坐标的矢量表达; Φ 为 ξ_i 的矢量表达,即模态位移矢量。

当完成虚拟道路行驶试验后,即可求得 q 的时间历程 $q(t)$ 。对于后续疲劳分析,这里有用的是包含于 $q(t)$ 中的模态位移矢量时间历程 $\Phi(t)$,即各阶模态位移历程 $\xi_i(t)$ 。进而可由模态应力恢复算法求得零部件模型上的模态应力(Modal Stress)历程

$$\sigma(t) = \Phi(t) E_s \quad (6)$$

上式中 E_s 为模态应力矩阵,矩阵中各元素的值与材料弹性模量、泊松比有关,由有限元模型决定。

2.2 零部件的疲劳寿命分析

由于车辆在正常行驶条件下,零部件的疲劳失效大多为高周疲劳破坏,因此,在获得了某零部件模态应力历程的前提下,即可使用名义应力法(S-N法)预测零部件的疲劳寿命。

使用名义应力法的关键是获得零部件的应力-寿命(S-N)曲线。但由于该曲线的获取是建立在大量的对该零部件进行等幅加载疲劳破坏试验的基础上的,要准确获取该曲线有较大难度,成本极高。本文采取了使用材料的S-N曲线附加修正参数的方式获取零件的S-N曲线。

通过疲劳分析可以预测零部件的寿命以及疲劳高危区域的出现位置。

2.3 基于模态应力恢复的零部件疲劳寿命分析流程

由于柔性体模型建模与求解、模态应力恢复均依赖于零部件的模态信息,在进行基于模态应力恢复的疲劳分析之前,必须完成该零部件的有限元模态分析。此外,零部件的疲劳寿命分析亦是针对该零部件的有限元模型。由此可见,零件的有限元建模与分析是完成基于模态应力恢复的零部件疲劳寿命分析必不可少的一个关键环节。整个疲劳分析的流程如图3所示。

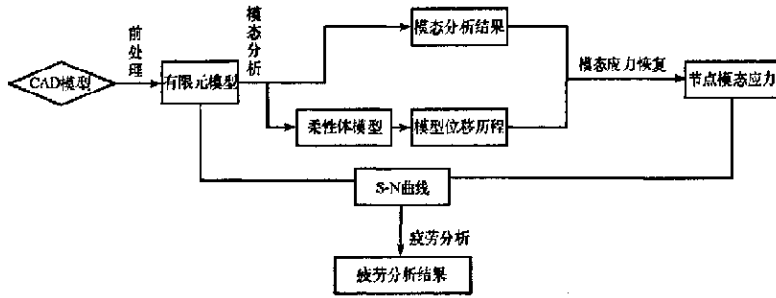


图3 基于模态应力恢复的疲劳分析

Fig.3 Fatigue analysis based on MSR

3 应用实例

在 ADAMS/CAR 环境下建立的整车虚拟样机如图 4 中 1 所示,该虚拟样机中包含前后悬架、行走、制动、动力、车身等子系统。选定该模型中前双横臂独立悬架中的下横臂(Lower Control Arm, LCA)为疲劳分析对象,对其进行了模态分析,得到了柔性体模型,导入原刚体虚拟样机并替换原有刚体模型,如图 4 中 2 所示。该下横臂的设计模型、有限元模型、柔性体模型分别见图 4 中 3a、3b、3c。

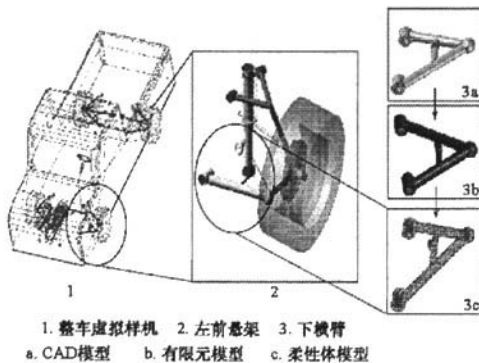


图4 整车虚拟样机与目标零件
Fig.4 Virtual prototypes of the vehicle and the target part

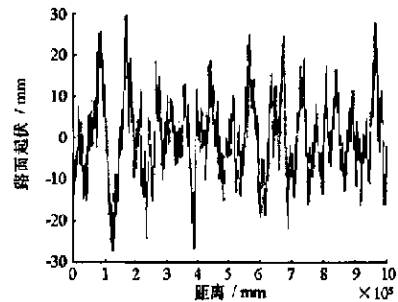


图5 GB7031-86 D级公路路面谱
Fig.5 GB7031-86 D level road spectrum

依照国标 GB7031-86 生成的 D 级路面谱以及按照图 1 所示方法生成的三维随机路面模型分别如图 5、6 所示。在 ADAMS/CAR 中使用 DCF 文件控制该整车虚拟样机以 40km/h 的速度在图 6 所示“路面”上“行驶”1km,完成虚拟道路行驶试验。试验完成后即可得到 LCA 在试验过程中的各阶模态位时间历程,举例如图 7。

选择零件的材料为优质碳素结构钢 55(GB699-88,对应 SAE 牌号 SAE1055),其 S-N 曲线如图 8 所示。通过设置该零件的加工方式为铸造,表面处理方式为表面渗氮,应力集中系数 K_f 为 1.2,对上述材料 S-N 曲线进行修正,供疲劳分析使用。

将图 7 所示的 1km 的历程作为一个循环,预想该 LCA 的寿命为 10 万个循环(即 10 万 km),在置信度 90% 的情况下,分析结果如图 9 所示。结果显示该零件最危险处仍有 1.22 的疲劳安全系数。该分析结果还显示出该零部件的危险位置分布于横臂叉底面部分与减震器安装架周围,且前臂比后臂更容易发生疲劳破坏。

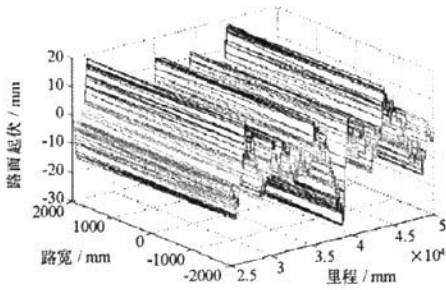


图6 D级随机路面三维模型(部分)
Fig.6 D level road 3D model (Partial)

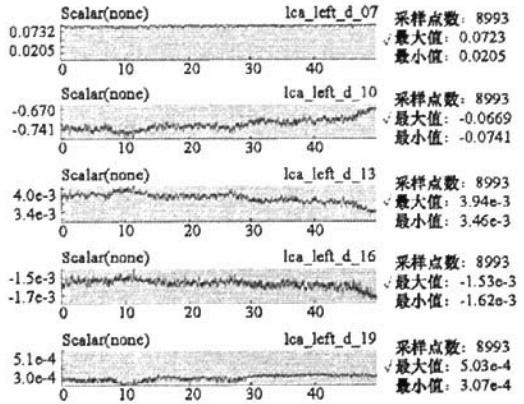


图7 下横臂各阶模态位移历程(部分)
Fig.7 Modal displacement spectra of LCA (Partial)

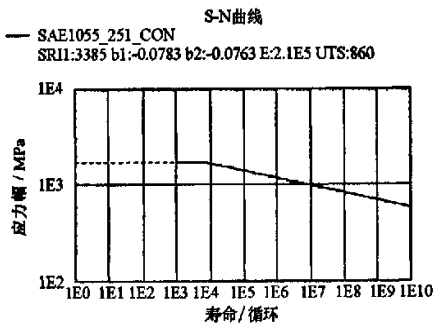


图8 SAE1055的S-N曲线
Fig.8 S-N curve of SAE1055



图9 10万km寿命安全系数分布
Fig.9 Distribution of safety factors under 100,000km fatigue life estimation

根据上述结果中安全系数可知,预计最小疲劳寿命约为12.2万km,在量级上与一般汽车零件的疲劳寿命分析结果一致,疲劳危险部位也与该零件的受力特点相符。该结果已能够供汽车初始设计时预估零部件疲劳寿命所使用,证明了该试验方法的可行性和有效性。

4 结论

提出了一种对车辆零部件进行疲劳寿命分析的方法。该方法无需依赖实车试验,解决了以往同类试验面临的费用高、零件实际加载情况难以测定等难题。使用该方法,在建立了整车动力学模型与道路三维模型的基础上,可以在极短时间内考核各个主要结构零部件的疲劳寿命,为车辆与零部件设计以及可靠性鉴定提供必要的依据。

参考文献:

- [1] 胡玉梅,陶丽芳等. 车身车架疲劳强度试验方案研究[J]. 汽车工程,2006,28(3):301-303.
- [2] 钱峰,张治. 汽车零部件计算机模拟疲劳试验研究[J]. 北京汽车,2002,(4):15-17.
- [3] 郑建荣. ADAMS虚拟样机技术入门与提高[M]. 北京:机械工业出版社,2001.
- [4] 张洪信,陈秉聪,等. 车辆纵振路面谱研究[J]. 汽车工程,2002,24(6):513-515.
- [5] 程超,王等峰,等. ADAMS中三维虚拟路面的实现[J]. 汽车工程,2006,28(2):163-166.
- [6] MSC-Documentation[DB]. MSC Software,2005.
- [7] LEE Y L, Pan J, Richard B H, et al. Fatigue Testing and Analysis[M]. Elsevier Butterworth-Heinemann Press,2005.

