

文章编号:1000-582X(2011)06-031-05

平衡悬架钢板弹簧模型的建立与仿真

李杰,张喆,朱毅杰,张洁,张英朝

(吉林大学汽车动态模拟国家重点实验室,吉林长春 130025)

摘要:为更好分析重型卡车平衡悬架钢板弹簧的性能,应用离散梁单元方法创建了某重型卡车平衡悬架钢板弹簧的多体动力学模型,解决了重型卡车平衡悬架钢板弹簧大变形、接触非线性以及干摩擦等问题。通过调整离散梁单元的各项参数,得出了与实际钢板弹簧的垂向刚度变化和迟滞特性一致的模型。研究表明采用离散梁单元法建立的平衡悬架钢板弹簧模型能更真实、可靠地反映钢板弹簧的特性,也为整车动力学模型的建立提供了既准确又方便的平衡悬架钢板弹簧模型。

关键词:重型卡车;平衡悬架;钢板弹簧;动力学;离散梁单元法

中图分类号:U461.4

文献标志码:A

Modeling and simulation of leaf spring for tandem suspension

LI Jie, ZHANG Zhe, ZHU Yi-jie, ZHANG Jie, ZHANG Ying-chao

(State Key Laboratory of Automobile Dynamic Simulation, Jilin University, Changchun 130025, Jilin, P. R. China)

Abstract: To analyze the performance of leaf spring of tandem suspension of heavy-duty truck, a leaf spring model of multi-body dynamics in tandem suspension for a heavy-duty truck is built with the method of the discrete beam element, and it is a model to solve the problems of the large deformation, non-linear contact and dry friction. The true vertical stiffness change and the hysteresis characteristics of leaf spring can be obtained by adjusting the parameters of the discrete beam in the simulation tests. The characteristic curve of the model can be the same as or similar to the actual leaf spring. The results show that discrete beam method is a better method for describing the real performance of leaf spring of tandem suspension of heavy-duty truck and provide the reliable and convenient leaf spring model for the full vehicle dynamics model.

Key words: heavy-duty trucks; tandem suspension; leaf springs; dynamics; discrete beam method

随着车辆设计制造水平的提高以及公路状况的改善,重型卡车日益成为国内公路运输的主力。平衡悬架钢板弹簧,是重型卡车悬架中应用最为广泛的一种弹性元件,其不同于一般钢板弹簧的结构型式和安装方式,使得其非线性,包括迟滞摩擦特性对车辆动力学的乘坐舒适性、制动性、操纵稳定性的影响尚不明确。因此,建立合理的平衡悬架钢板弹簧多体动力学模型具有重要的现实意义。

目前,国内外学者提出的一般钢板弹簧多体动力学建模方法有:SAE 三连杆建模方法^[1-2]、有限元

模态建模方法^[3-5]、等效中性面建模方法^[6]、ADAMS/Car Leafspring 专业模块建模方法^[7]和离散梁单元建模方法^[8]。SAE 三连杆建模方法可以较好反映钢板弹簧实际的大变形和垂向刚度,但由于其不易于加入钢板弹簧簧片间的摩擦、阻尼等特性参数,因而无法准确体现钢板弹簧的迟滞特性。有限元模态建模方法既需要建立完整的有限元模型,也需要有限元软件和 ADAMS 软件存在版本的匹配关系,这增加了建模和在整车动力学模型中应用的难度。等效中性面建模方法能够较好描述少片钢

收稿日期:2010-12-24

基金项目:“863”国家高科技计划资助项目(2006AA110104);吉林省科技发展计划资助项目(20076029)

作者简介:李杰(1964-),男,吉林大学教授,博士生导师。研究方向为汽车动态仿真与控制,(E-mail)li.jie@ascl.jlu.edu.cn。

板弹簧特性,但用于描述多片钢板弹簧,则过于简化。ADAMS/Car Leafspring 专业模块建模方法是使用 ADAMS/Car 2003 版本中增加的 Leafspring 试验模块,但在其以后的版本取消了该模块,因此 ADAMS/Car Leafspring 专业模块建模方法的实际应用受到限制。离散梁单元建模方法将每片钢板弹簧离散化为若干个刚体,刚体之间由具有线性等截面的梁连接,最终得到一个具有几百个自由度的包含大量非线性接触单元的多体动力学模型。虽然这些方法在一般钢板弹簧多体动力学建模中得到了一定的应用,但哪种方法更适于建立平衡悬架钢板弹簧多体动力学模型,则有待研究。

针对上述问题以及科研工作的需要,将确定最适于建立某重型卡车中桥和后桥之间的平衡悬架钢板弹簧多体动力学模型的方法,以更好模拟钢板弹簧垂向刚度的渐变过程和较真实地反映钢板弹簧的

$$\text{Impact} = \begin{cases} \underbrace{\text{Max}(0, k(x_1 - x)^e)}_{F_K} - \underbrace{\text{STEP}(x, x_1 - d, c_{\max}, x_1, 0) \times \dot{x}}_{F_C} & x < x_1 \\ 0 & x = x_1 \\ 0 & x > x_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: k —定义表面相互作用的接触刚度,对于钢板弹簧来说,这个数值就是簧片与簧片相接触的刚度; e —接触力变形指数,定义力与位移特性曲线的指数,其值越大,曲线的倾斜程度越大; c_{\max} —最大阻尼系数; d —接触深度,定义了一个边界穿透深度,达到这个值 ADAMS/Solver 应用最大阻尼; x —受力接触前点 I 和 J 之间的距离变量; x_1 —名义自由长度。

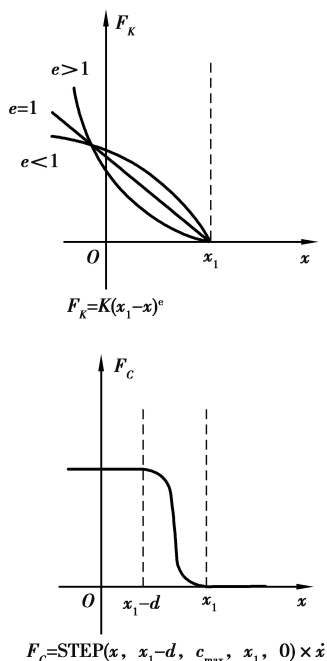


图 1 Impact 函数中的弹性力和阻尼力曲线

实际刚度特性。

1 离散梁建模方法的基本原理

1.1 离散梁

钢板弹簧的离散刚体之间应用离散梁相连。离散梁(discrete beam)描述的是 2 个构件之间的一种作用力与反作用力的关系,通过 Timoshenko 梁理论计算 2 个构件之间的力和力矩^[9]。需要确定的离散梁参数是:梁横截面的属性、梁的材料参数、各个轴的惯性矩、 y 方向和 z 方向的剪切变形系数、弹性模量、剪切模量和阻尼比等。

1.2 钢板弹簧簧片间的接触力

钢板弹簧簧片在受力接触时,会产生接触力,ADAMS 用冲击函数 Impact^[8] 来表示,其函数的表达式为

钢板弹簧受力发生碰撞后,簧片间的 Impact 接触力分为弹性力 F_K 和阻尼力 F_C 2 部分,2 部分力的曲线如图 1 所示。 F_K 是通过刚度和刚度位移指数表征阻碍相对运动的力, F_C 是通过阻尼表征的阻碍相对运动的力,最大阻尼系数 c_{\max} 是接触深度 d 的 3 次函数。

1.3 簧片间摩擦的描述

在钢板弹簧受力产生相对运动的过程中,簧片之间不仅存在接触力,而且还存在摩擦力,采用库伦摩擦力表征簧片间摩擦力的特性。因为库伦摩擦力基于 2 个簧片的相对运动速度描述了静摩擦和动摩擦两种状态,所以它能够客观地描述钢板弹簧簧片间的相互摩擦,如图 2 所示。图 2 中, V_s 表示静滑移速度, V_d 表示动滑移速度, μ_s 表示静摩擦系数, μ_d 表示动摩擦系数。

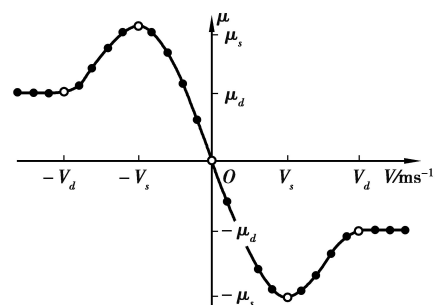


图 2 摩擦系数与构件相对运动速度关系示意图

2 平衡悬架钢板弹簧模型的建立

建模的平衡悬架钢板弹簧的几何数值如表 1 所示。钢板弹簧在中部由 U 型螺栓夹持,使钢板弹簧被夹持部分近似为 1 个刚体,因此在建模过程中钢板弹簧中部用 1 个立方体表示。同一片钢板弹簧的相邻刚体之间采用离散梁来连接。建模过程中近似认为簧片间的相对位移很小,只在上下接近正对位置的 2 个刚体之间建立接触,忽略该刚体与其它刚体可能的接触和摩擦影响。

表 1 钢板弹簧几何参数表

中部刚体	长×宽×高/(mm×mm×mm)		
	100×100×119.5		
簧片序 号(由上 至下)	中部刚体左侧簧片 长×宽×高/ (mm×mm×mm)	中部刚体右侧簧片 长×宽×高/ (mm×mm×mm)	离散梁 单元 数目
1	200×100×29.5	200×100×29.5	2
2	400×100×29.5	400×100×29.5	4
3	600×100×29.5	600×100×29.5	6
4	800×100×29.5	800×100×29.5	8
簧片间隙/mm		0.5	

在第一、二、三片两端的最末刚体上建立该刚体与其正下方刚体的平面副,用来模拟弹簧夹的作用,主要防止弹簧反跳时只有一片钢板弹簧承载的情况发生,如图 3 和图 4 所示。

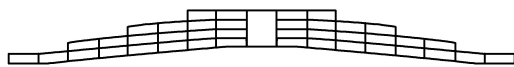


图 3 有平面副约束时上跳仿真

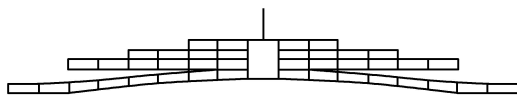


图 4 无平面副约束时上跳仿真

为提高建模速度和便于模型参数的修改,本文采用参数化建模,参数如表 2 所示。其中梁单元和接触力中 Impact 函数的取值参考了 MSC. Software 公司提供的卡车模板库中用于钢板弹簧

的 Beam 单元数值;库伦摩擦的取值参考了有关的文献^[10]。

表 2 钢板弹簧 ADAMS 模型参数表

参数名称	备注	数值
速度/(mm·s ⁻¹)	Speed	0
X 轴惯性矩/(mm ⁴)	Ixx	8.196 29×10 ⁵
Y 轴惯性矩/(mm ⁴)	Iyy	5.633 7×10 ⁴
Z 轴惯性矩/(mm ⁴)	Izz	7.632 92×10 ⁵
Y 方向剪切变形系数	Y Shear Area Ratio	1.2
Z 方向剪切变形系数	Z Shear Area Ratio	1.2
弹性模量/(N·mm ⁻¹)	Youngs Modulus	2.0×10 ⁵
剪切模量/(N·mm ⁻¹)	Shear Modulus	7.7×10 ⁴
柔性梁的横截面积/mm ²	Area Of Cross Section	1 500
阻尼比	Damping Ratio	1.0×10 ⁻⁵
接触刚度/(N·mm ⁻¹)	Stiffness	1.0×10 ⁵
指数	Force Exponent	2.2
阻尼/(N·(mm·s ⁻¹) ⁻¹)	Damping	10
切入深度/mm	Penetration Depth	0.1
静态系数	Static Coefficient	0.25
动态系数	Dynamic Coefficient	0.15
静滑动速度/(mm·s ⁻¹)	Stiction Transition Vel	100
动滑动速度/(mm·s ⁻¹)	Friction Transition Vel	1.0

最终建立的钢板弹簧模型,如图 5 至图 6 所示。

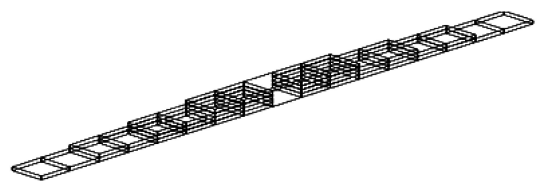


图 5 钢板弹簧线框仿真模型

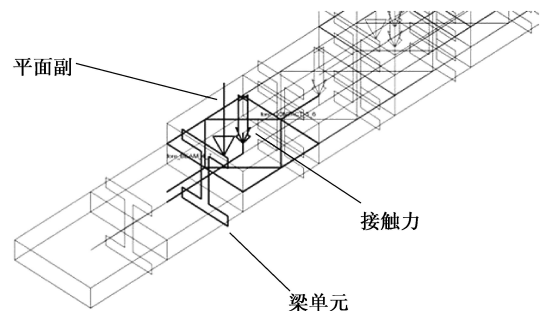


图 6 钢板弹簧模型局部放大图

3 平衡悬架钢板弹簧特性的仿真分析

3.1 约束的施加

参考相关文献^[5-6,11],对上述钢板弹簧模型进行垂向刚度测试,其垂向刚度仿真示意图如图 7 所示。

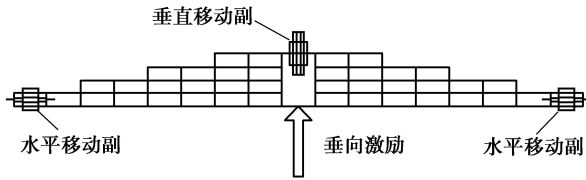


图 7 钢板弹簧垂向刚度仿真示意图

首先模拟钢板弹簧与中、后桥的支承形式,钢板弹簧最末几片的两端分别插入中、后桥的支座内,并在支座内滑动。所以,在第四片两端的离散体上建立与大地相连的移动副约束。

虽然钢板弹簧模型前后对称,在 ADAMS 大地坐标系中水平放置,从力学原理上在钢板弹簧中部施加垂向力不会产生钢板弹簧整体沿纵向的移动,但是由于软件求解模式的原因,计算中产生的微小近似使仿真不可能完全模拟实际的情况,有可能发生钢板弹簧整体沿纵向的移动,与实际相悖。为避免这种情况的发生,在钢板弹簧中部刚体与大地之间建立垂向的移动副约束。这样,钢板弹簧只能在垂向力的作用下沿 z 轴运动,不会产生整体的纵向位移,使仿真符合实际。

3.2 载荷的施加

为消除钢板弹簧自身垂向产生的微小振动,首先在钢板弹簧中部施加一个向上大小为 1 000 N 的预载荷,然后经过 1 s 后在同一位置施加向上的垂直接荷,激励函数为

$$IF(TIME - 1; 0, 0, 60\ 000 \sin(180d \cdot (TIME - 1)))$$

3.3 仿真分析

仿真时间共为 2 s。在仿真中,记录钢板弹簧中部刚体上标记点的位移,绘制仿真曲线,如图 8 至图 9 所示。由图 9 所示,钢板弹簧的位移响应有明显的滞后,此变化即是钢板弹簧的迟滞特性造成的^[12-15]。加载与卸载路径产生了差别,相同载荷卸载时所产生的位移要大于加载时的情况,由此可知板簧的加载刚度大于卸载刚度。图中迟滞曲线所包围的面积是每一次循环中外力功之和。

由如上分析就可以将其与钢板弹簧实际的压缩、回弹曲线进行对比,进行模型的验证。经与合作厂家提供的试验数据对比,建立的模型与试验结果吻合。

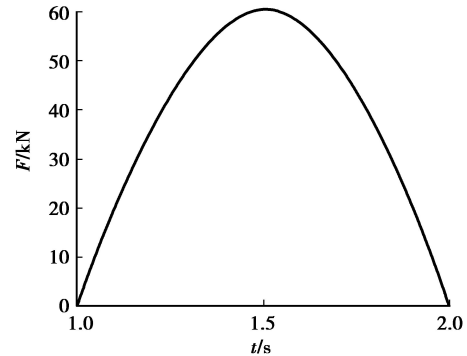


图 8 垂向激励时间历程曲线

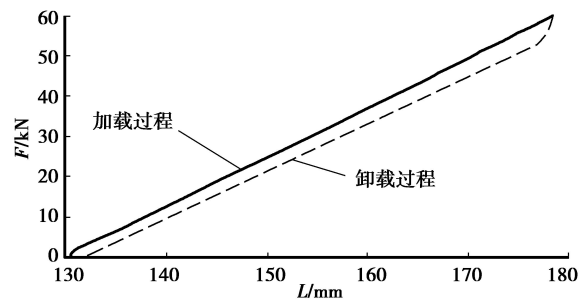


图 9 钢板弹簧垂向位移——垂向激励曲线

4 结 语

在分析离散梁单元建模方法基本原理的基础上,应用离散梁单元建模方法建立了某重型卡车平衡悬架钢板弹簧的多体动力学模型,较准确地考虑到钢板弹簧的大变形以及各簧片间的接触力和摩擦力。对模型进行仿真测试及与试验对比表明,仿真结果合理地表示了平衡悬架钢板弹簧垂向刚度的变化和钢板弹簧的迟滞特性,得出了离散梁单元方法更适合于建立重型卡车平衡悬架钢板弹簧多体动力学模型的结论。从而可以此为基础应用 ADAMS 软件建立完整的平衡悬架动力学模型及其整车动力学模型,为重型卡车动力学仿真和特性分析打下坚实基础。

参考文献:

- [1] JAYAKUMAR P, ALANOLY J, JOHNSON R. Three-Link Leaf-Spring Model for Road Loads[C/OL]//SAE 2005 World Congress & Exhibition, Detroit, MI, USA, April 10-14, 2005. USA; SAE international [2005-04-11]. <http://papers.sae.org/2005-01-0625>.
- [2] 吴碧磊. 重型汽车动力学性能仿真[D]. 吉林: 吉林大学, 2008.
- [3] LEAMY M J, WASFY T M, MECKSTROTH R J. Finite element study of belt-drive frictional contact under harmonic excitation[C/OL]//2004 SAE World Congress. Detroit, Michigan, March 8-11, 2004. USA; SAE international [2004-03-08]. <http://subscriptions.sae.org/content/2004-01-1346>.
- [4] KIRBY D, CHARNIGA R. A Finite element and experimental analysis of a light truck leaf spring system subjected to pre-tension and twist loads[C/OL]//2005 SAE Commercial Vehicle Engineering Conference. Rosemont, IL, USA, November 1-3, 2005. USA; SAE international [2005-11-01]. <http://papers.sae.org/2005-01-3568>
- [5] 郑银环, 张仲甫. 汽车钢板弹簧多柔体建模及仿真研究[J]. 湖北工业大学学报, 2007, 22(4): 35-36.
ZHENG YIN-HUAN, ZHANG ZHONG-FU. Flexible multi body modeling and simulation study on automobile leaf spring [J]. Journal of Hubei University of Technology, 2007, 22(4): 35-36.
- [6] 秦东晨, 潘筱, 陈立平, 等. 汽车钢板弹簧多体模型建立的一种方法[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(5): 111-114.
QIN DONG-CHEN, PAN XIAO, CHEN LI-PING, et al. Method for the simulating models of automobile leaf spring based on multi-body dynamics [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(5): 111-114.
- [7] MSC Software. Using ADAMS/Car Leafspring [R]. Version 2003.
- [8] PRADADE U, MEDEPALLI S, MOORE D, et al. Beam element leaf spring suspension model development and assessment using road load data[C]//SAE 2006 World Congress and Exhibition. April 3-6, 2006, Detroit, MI, USA. USA; SAE international [2005-11-01]. SAE Technical Paper, 2006-01-0994.
- [9] MSC. ADAMS Help Documents. Adams/Solver (C++) Functions [R]. Version 2005r2.
- [10] MOON I D, YOON H S, OH C Y. A flexible multi-body dynamic model for analyzing the hysteretic characteristics and the dynamic stress of taper leaf spring[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2006, 20(11): 1638-1645.
- [11] 刘红领, 柳杨, 陈伟, 等. 渐变刚度板簧的模拟仿真[J]. 机械设计, 2006, 23(11): 37-39.
LIU HONG-LING, LIU YANG, CHEN WEI, et al. Simulation emulation of leaf spring with gradually hanging stiffness[J]. Journal of Machine Design, 2006, 23(11): 37-39.
- [12] RILL G, KESSING N, LAGNE O, et al. Leaf spring modeling for real time applications[R]. Japan; The 18th IAVSD-Symposium in Atsugi, 2003.
- [13] MOHAN A, AHMADIAN M. Nonlinear investigation of the effect of suspension parameters on the hunting stability of a railway truck[C]//IEEE 2004 Joint Rail Conference. April 6-8, 2004, Baltimore, Maryland, USA. [S. l.]: Rail Transportation Division; 327-336.
- [14] YUM Y J. Frictional behavior of automotive leaf spring [C]//The 4th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology. June 27-July 19, 2000, Ulsan, Korea. [S. l.]: IEEE Incorporated, 2002.
- [15] LEIGHTON N J. The application of advanced modeling techniques to reduce prototyping time for a novel active suspension system[J/OL]. IEEE CNF 2006: 117-120. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=00383791>

(编辑 张小强)