汽车动力学模型综述

孙海涛，陈关龙
上海交通大学机械与动力工程学院，上海（200240）

摘　要：随着汽车动态仿真的发展，产生了不同复杂程度的汽车动力学模型，主要分为集中参数模型和多体模型。本文在简要说明汽车动力学发展过程的基础上，介绍了用集中参数模型法建立的动力传动系模型、路面模型以及研究汽车平顺性和操纵稳定性的整车模型，然后介绍了多体模型以及用有限元法和动态子结构法建立的仿真模型，最后提出了汽车动力学模型的发展趋势。

关键词：汽车动力学；集中参数模型；多体参数模型；综述
中图分类号：U461.1　　**文献标识码：A**

1. 汽车动力学历史回顾

汽车动力学主要研究汽车在各种力的作用下的动态特性，并讨论这些动态特性及其对汽车使用性能的影响。最早的有关汽车行驶振动分析的理论可追朔到 1900 年[1]。当时 Lanchester 就认识到运用弹性悬架可使乘客感到更加舒适。Maurice Olley 在 20 世纪 30 年代率先提出了操纵动力学分析理论，并且总结了当时的汽车设计状况[2]。这才形成了汽车动力学的雏形。1993 年 Segel 在机械工程师学会（I.Mech.E）举行的题为“车辆平顺性和操纵稳定性”的会议上发表的论文，对 1990 年以前汽车动力学的发展做了较为全面的总结[3]，见表 1。随着 20 世纪 50 年代后仿真技术的日益成熟，它也被逐渐引入到汽车动力学研究领域。到了 70 年代汽车动态仿真已在国外得到了普及，产出了不同复杂程度的动力学仿真模型。根据所采用的方法可将其分为两大类[4]：集中参数仿真模型和多体参数仿真模型。这两类模型中，集中参数仿真模型需要建模者对汽车进行离散化并推导汽车的运动学方程；而多体仿真模型则需要建模者给定各部件的详细特征、运动学约束和系统的拓扑结构，然后由相应软件工具如：基于 Kane 方法的 SD/FAST，AUTOSIM，SYMBA；基于 Euler 方法的 SD/FAST，AUTOSIM，NASTRAN，SIMPACK；基于 Lagrange 方法的 ADAMS，DADS，MEDYNA，MADYMD 等自动建立运动学方程。集中参数仿真模型较多体仿真模型计算时间短、效率高，所需输入参数较少，但不能全面地得到系统中各子系统的运动及其相互的耦合作用。

2. 集中参数法模型的发展

由于组成汽车的各机械子系统之间的相互耦合作用，使汽车的动态特性非常复杂，通过计算机仿真预测汽车在实际运动中的动态特性，必须根据所要研究的问题，进行相应的抽象和简化，以便建立可描述汽车真实运动的不同仿真模型。集中参数模型法正是依据这一思路，对研究汽车的不同性能建立不同的仿真模型。用集中参数模型法来研究汽车的动力学仿真问题主要包括动力传动系模型、路面模型以及分析汽车平顺性和操纵稳定性的整车模型。

表 1 汽车动力学早期成就总结

第 1 阶段(20 世纪 30 年代前)	第 2 阶段(30 年代到 1952 年)	第 3 阶段(1952 到 1990 年)
1.运用实验观察汽车动力特性进行 2.关注轮胎摆振现象 3.认识到平顺性的重要性	1. 基本理解轮胎侧偏现象 2. 定义不足转向/过度转向 3. 理解稳态转向 4. 建立两自由度操纵稳定性模型 5. 广泛关注平顺性和产生独立悬架	1. 通过对实验结果分析，加深了对轮胎特性的了解 2. 三自由度操纵稳定性模型的建立 3. 扩展操纵稳定性分析内容 4. 运用随机振动理论预测平顺性

2.1 动力传动系模型

动力传动系模型包括发动机模型、传动系模型和轮胎模型，前人在研究动力传动系的动力学特性时发动机多采用多参数模型（例如节气门开度和发动机扭矩[5]），传动系多采用集中参数模型（例如配有机械式变速器的传动系动力学模型[6]，如图 1 所示）。轮胎模型有两种类型。一种是物理模型，另一种是经验公式或半经验公式。物理模型方面有 1954 年，Fiala 通过简化的轮胎弹性圆环模型推导出的车轮侧偏特性侧向力和回正力矩的无量纲表达式。Sakai 等采用简化的胎面刷子模型来分析轮胎的制动和驱动特性。而在研究轮胎振动问题时多采用 M.Loo 模型。近年来，哈尔滨工业大学复合材料研究所提出了一个能较好预测子午线轮胎固有频率的理论模型，即轮胎的圆环模型[7]。经验公式或半经验公式有 1961 年和 1968 年日本桥石轮胎厂提出了 Fiala 理论表达式的试验修正表达式；郭孔辉建立的轮胎模型半经验公式[8]等。

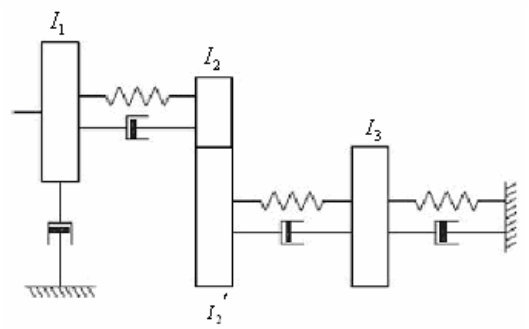


图 1 配有机械式变速器的传动系动力学模型

2.2 路面模型

路面模型包括两方面，一方面为路面几何模型，采用路面谱输入[9]；另一方面为路面状况，即路面为干、湿、结冰的情况，可通过给定不同的滚动阻力系数和路面附着系数来实现[10]。

2.3 分析汽车平顺性的整车模型

在有限的悬架工作空间中，设计人员必须为驾驶员和乘客提供良好的乘坐舒适性、可接受的车身姿态以及对车轮动载荷的合理控制。这就是汽车平顺性所要求的主要性能指标。在汽车平顺性的早期研究阶段，限于当时数学、力学理论、计算手段及试验方法，把系统简化成集中质量—弹簧—阻尼模型。

这类模型与汽车实际结构相比虽然作了较大的简化，但能够定性的分析汽车振动特性和结构参数对平顺性的影响，如应用 2 自由度模型即可分析悬架对平顺性的影响；7 自由度模型（图 2）是最基本的整车三维平顺性模型，可分析车体的垂向、俯仰和侧倾振动。但由于这类模型忽略了部件的弹性效应因而进行平顺性分析时会产生较大的误差。若考虑橡胶元件的影响，则使多自由度的复杂模型手工推导过于烦琐，如图 3 所示[11]。而且，在应用此类简化模型[12]（图 4）分析恶劣路面上的乘员舒适性比较有效，但无法分析汽车的安全性能。所以这类模型也不适合分析复杂的平顺性问题。

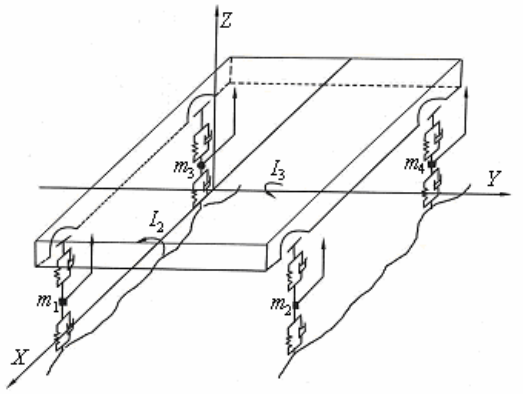


图 2 七自由度整车振动模型

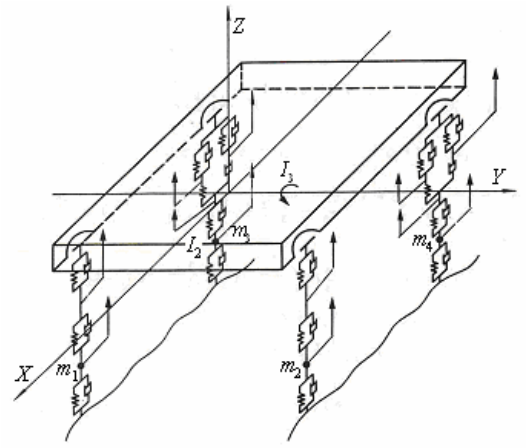


图 3 考虑橡胶元件的整车振动模型

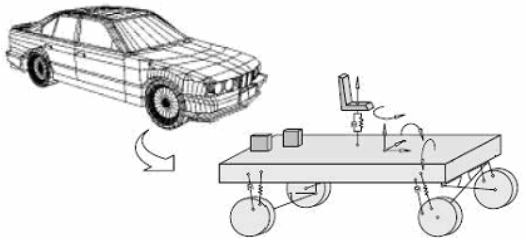


图 4 考虑乘员舒适性的整车振动模型

2.4 分析汽车操纵稳定性的整车模型

建立正确的操纵稳定性模型的关键是对轮胎特性的充分了解。1925 年 Broulheit 发现了汽车轮胎侧偏现象，使人们的认识有了突破。到 1931 年，在可测量充气轮胎力学特性的试验机问世以后，R.D.Evans[13]等人初步研究了汽车转向特性，直到 90 年代中期较为健全的理论才被建立[14]。

最初建立的操纵稳定性模型多为侧向加速度小于 0.3g 的低自由度线性模型，最经典的 2 自由度模型 [15]。此类模型集中了汽车的主要性能，把影响汽车性能的参数减至最少，可求出数学模型的解析解，因而能得出普遍适用的结论，所以它至今仍然被广泛应用[16]。

60 年代到 80 年代，随着计算机技术的迅速发展，促进了汽车操纵稳定性研究的发展。各国学者们建立了许多复杂的车辆模型和相应的仿真程序，如 D.J.Segal 建立的 15 自由度模型[17]、美国密西根大学建立的 17 自由度模型[18]和崔胜民等采用 Kane 方法建立的 18 自由度模型[19]。复杂的模型可以描述汽车的非线性特性和更精确的整车运动动态响应。但由于非线性的引入，使得模型求解过于复杂，且误差增大。

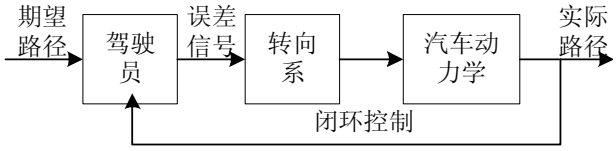


图 5 补偿校正模型

汽车的运动是在驾驶员的操纵下实现的，因此欲对汽车的运动性能作深入分析，必须研究包括驾驶员在内的驾驶员-汽车系统。最早的驾驶员模型是日本学者近藤提出的线性预估校正模型，由于它考虑了驾驶员的预瞄特性，因此对驾驶员的方向控制模型发展产生重大影响。80 年代以来提出的各种模型几乎都是预瞄跟踪模型[20]。另一类驾驶员模型是补偿校正模型，它假定驾驶员只根据当前时刻的预期路径与汽车运动状态之间的横向偏差进行补偿校正，虽然不适用于高速行驶的汽车预瞄跟踪运动，但这个模型具有在理论上可以完全由被控环节的动态特性确定等优点，所以在实际工程中可预测闭环系统抵抗侧向风等外界干扰的稳定性能[21]，如图 5 所示。在 Adams2005 软件中就出现了驾驶员模块（Adams/Car），它可以确定汽车驾驶员的行为特征，确定各种操纵工况，同时确定转向盘的转角或离合器位置、变速器档位等。还可以通过调整驾驶员行为适应各种汽车特定的动力学特性，并具有记忆功能[22]。

3. 多体仿真模型

从 20 世纪 70 年代以后，随着多体系统动力学分析和仿真技术的诞生和发展，汽车建模方法出现了新的改变。由于对汽车模型的精确度要求越来越高，大型的多体系统动力学方程推导十分困难，因而通用的多体仿真软件（如 ADAMS 等）逐渐被应用[23]。应用多体仿真软件建模是将汽车每一部件看作是刚性体或弹性体，它们的连接是通过

各种约束来描述，多体动力学软件自动生成运动学和动力学方程，并利用软件内部有效的数值计算方法准确求解。然而，多体模型包含部件较多，有些参数难以从试验中测量得到，因而不能从整体上保证系统的准确性；另外，复杂的模型在计算机上求解时花费时间较长，而且一旦模型出错，很难准确查找。利用 ADAMS/CAR 的模板库建立了某汽车模型[24]，如图 6 所示。该模型主要包括柔性悬架系统、转向系统、轮胎子系统以及车身。其车身总成模型用一个质量集中的球体表示。输入车身的总质量、质心位置及绕质心的转动惯量等参数可对整车进行各项仿真分析。

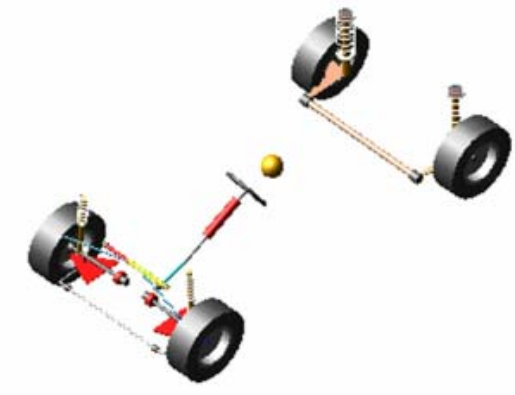


图 6 某整车虚拟样机仿真模型

4. 有限元法和动态子结构法

有限元法诞生于 20 世纪中叶。随着大型有限元通用程序的推广以及计算机硬件技术的飞速发展，有限元技术在 20 世纪 60 年代中期开始被广泛应用于汽车分析设计中[25]。其分析过程分为结构离散化、单元特性分析、坐标变换、边界条件处理和结构综合这几个步骤。目前大型有限元软件有 ANSYS、NASTRAN 和 ABAQUS 等。

虽然对单个部件进行有限元分析，其精度较高，但对整车进行有限元分析时，往往需要解几十万个自由度的问题，计算中会产生较大误差。随着试验方法的改进和对复杂整体结构的深入研究，形成了动态子结构法[26]。动态子结构法分为模态综合法和机械导纳法。由于模态综合法的参数易于求得，所以其应用较多。模态综合法的基本思想是把复杂结构分为若干子结构（部件），而每个子结构利用计算或试验方法求得其模态参数，最后根据实际边界条件，选取合适的子结构界面联接方式（固定界面法或自由界面法），将各子结构的模态特性叠加起来，再通过平衡方程和约束方程将物理坐标约简，就可得到用模态坐标表示的运动方程，进而得到整个系统的动态响应。

由于有限元法能较好地分析某些部件的动态特性，所以在对整车进行动态分析时，常采用集中参数法、有限元法和模态综合法相结合的方法。根据汽车结构特点将车架、车身等弹性体可用有限元法分析得到主模态，而发动机、轮、轴等可简化为刚体或集中质量，连接件则可简化为弹簧。例如，某汽车的动态子结构示意模型如图 7 所示[27]。根据各子结构的结构特点，将动力总成作为刚体，副车架和车身作为弹性体，而非簧载部分作为集中质量考虑。

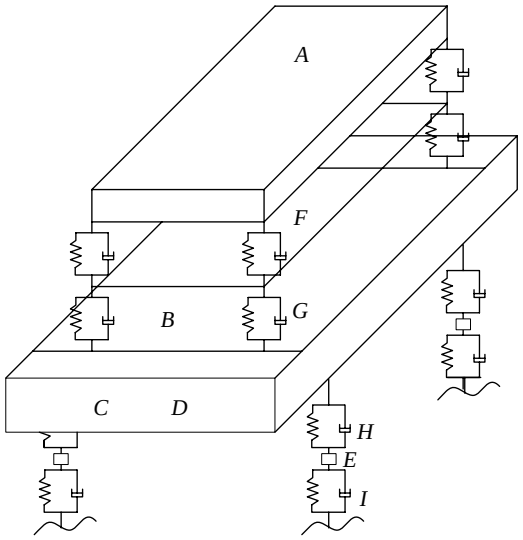


图 7 某汽车的动态子结构示意模型
A—动力总成，B—副车架，C—车身，D—车内流体，E—非簧载质量，F—动力总成悬置，G—副车架支承系统，H—悬架系统，I—轮胎系统

5. 汽车动力学模型发展趋势

由于汽车本身结构负载，再有汽车所承

受的载荷也十分复杂，同时也受到各种路面激励和各种车速条件下惯性力的作用以及各连接构件之间的相互约束作用，因此很难用经典力学方法求解。而有限元法由于其能解决结构形状和边界条件都任意的力学问题的优点，将被得到广泛应用。

20 世纪 90 年代以后，机械系统动力学分析与仿真技术已能成熟应用于汽车行业。其中，多刚体系统的建模理论已经成熟。但在现代汽车的产品开发阶段，已经不满足于传统的弹性分析，更需要进行整车非线性系统分析，即整车操纵稳定性和平顺性不能仅以刚体模型进行分析，还要考虑结构的变形效应。主要体现在以下几方面：

（1）汽车内部电子和电器产品比重的不断增大，涉及到多物理场的仿真问题；

（2）需要进行更精确的非线性分析，如少片弹簧、橡胶轮胎、悬挂的大变形、零部件的柔性和间隙连接等；

（3）从传统的多刚体动力学分析到考虑结构弹性的应力响应，如悬架系统、车身系统等，使得多柔体系统的建模成了一个研究热点。多柔体系统动力学由于本身既存在大范围的刚体运动，又存在弹性变形运动，因而其与有限元分析方法及多刚体力学分析方法有密切联系。

汽车动力学建模的目的是为了更好地设计和分析汽车性能，使仿真结果更好地接近于试验结果。而且汽车性能的好坏主要由汽车最终用户的主观评价所反映。因此，把主观评价标准、试验数据与汽车动力学模型更好的结合，将是汽车动力学模型未来发展的方向。

参考文献

[1] Lanchester，F. W. Some problems peculiar to the design of automobile [J]. Proc. Inst. Automobile Engineers，1908，2 ：187.

[2] Olley M. Independent wheel suspension—its whys and wherefores [J]. SAE Journal，1934，34(3)：73~81.

[3] Segel L. An overview of developments in road vehicle dynamics：past，present and future [J]. Proceedings of IMechE Conference on Vehicle ride and handling. London，1993： 1~12.

[4] Bangalore A.Suresh and Brian J.Gilmore. Vehicle Model Complexity--How Much Is Too Much [J]. SAE 940656，1994：41~45.

[5] R. Pfiffner，L.Guzzella and C.H. Onder. Fuel-optimal control of CVT powertrains [J]. Control Engineering Practice，2003，11： 329~336.

[6] A.R. Crowther and N. Zhang. Torsional finite elements and nonlinear numerical modelling in vehicle powertrain dynamics [J]. Journal of Sound and Vibration，2005，284： 825–849.

[7] 庄继德. 现代汽车轮胎技术[M]. 北京：北京理工大学出版社，2001.

[8] 郭孔辉. 汽车操纵动力学[M]. 长春：吉林科学技术出版社，1991.

[9] 邬勇民，阮米庆. 基于虚拟样机技术的扭杆悬架汽车平顺性仿真[J].上海汽车，2006，8：25~28.

[10] 郭玺，薛青，颜国明等. 视景仿真中车辆在不同路面上运动状态的研究[J]. 系统仿真学报，2006，S1：201~205.

[11] 靳晓雄，张立军. 汽车噪声的预测与控制[M]. 上海：同济出版社，2004.

[12] W. Schiehlen. Multibody System Dynamics: Roots and Perspectives [J]. Multibody System Dynamics，1997： 149~188.

[13] Evans. Properties of Tires Affecting Riding，Steering，and Handling [J]. Journal of the Society of Automotive Engineers，1935(2)：15~17.

[14] Crolla D A. Vehicle Dynamics—theory into Practice [C]. ImechE，1996.

[15] 余志生，赵六奇. 汽车理论[M]. 北京：机械工业出版社，2000.

[16] 孙海涛，陈无畏，王阳阳. 横向稳定杆与汽车稳态转向特性关系的仿真研究[J]. 汽车科技，2005，5：12~15.

[17] Segal D J. Highway Vehicle Object Simulation Model [J]. Validation，1976：19~21.

[18] ADI Technical Staff. Real-time Seventeen-degree-of-freedom Motor Vehicle Simulation [R]. Applied Dynamics International，1990.

[19] 崔胜民，肖利寿，宋宝玉等. 汽车操纵动力学十八自由度模型仿真研究[J]. 汽车工程，1998，20(4)：212~219.

[20] 郭孔辉.人-车-路闭环操纵系统主动安全性的综合评价与优化设计[J]. 汽车技术，1994，4：4~12.

[21] Dave Crolla，喻凡. 车辆动力学及其控制[M]. 北京：人民交通出版社，2004.

[22] 郑凯，胡仁喜. ADAMS 2005 机械设计高级应用实例[M]. 北京：机械工业出版社，2006.

[23] 陈立平，张云清，任卫群等. 机械系统动力学分析及 ADAMS 应用教程[M]. 北京：清华大学出版社，2005.

[24] 于国飞，孔德文，马士泽等. 应用ADAMS/CAR二次开发模块研究汽车操纵稳定性[J]. 吉林大学学报，2005，35(6)：582~586.

[25] 谭继锦. 汽车有限元法[M]. 北京：人民交通出版社，2005.
[26] 张威，张景海，隗海林等. 汽车动力学仿真模型的发展. 汽车技术，2003，2：1~4
[27] 方明霞，陈江红. 基于声固耦合非线性系统的汽车车内噪声计算研究[J]. 汽车工程，2005，27(5)：598～602.

An Overview on Vehicle Dynamic Model

Sun Haitao, Chen Guanlong
(School of Mechanical and Power Energy Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China（200240）

Abstract
With the development of vehicle dynamic simulation, many complex vehicle dynamic models have appeared. They were mainly divided into lumped parameter models and multi-body models. This paper firstly explained the development course of vehicle dynamics and then introduced how to use lumped parameter model to build powertrain models, road surface models and entire vehicle models to research into vehicle ride comfort and steering stability. Furthermore multi-body models and other models using finite element analysis (FEA) and dynamic substructure were discussed. In the end, the development trends of vehicle dynamic model were pointed out.
Keywords: Vehicle Dynamics；Lumped Parameter Model；Multi-body Model；Overview