

计算机仿真 5 种方法在汽车工程中的应用

陈 勇

辽宁工业大学汽车与交通工程学院, 辽宁锦州 121001

[摘要] 数值模拟技术、MATLAB/Simulink 仿真分析方法、虚拟现实技术、硬件在环和高层体系结构是目前常用的计算机仿真分析方法, 在汽车工程领域均有了不同程度的应用, 在汽车整车及其零部件的方案论证、开发设计和试制生产等方面发挥了巨大的作用。本文主要介绍了这些方法在汽车工程中的结构设计和应用现状。

[关键词] 汽车工程; 仿真分析; 有限元方法; 虚拟现实; 硬件在环; 高层体系结构

[中图分类号] U469, TP391.9

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2007)17-0065-09

Applications of 5 Kinds of Simulation Anglyses in Automobile Engineering

CHEN Yong

College of Automobile and Transportation Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, Liaoning Province, China

Abstract: Numerical computation, MATLAB/Simulink simulation, virtual reality, hardware-in-the-loop and high level architecture, as important methods in computer simulation analyses, are applied to automobile engineering in this paper. The principles in scheme determination, design and development, trial-production and manufacture of automobiles and their parts are discussed.

Key Words: automobile engineering; simulation analysis; finite element method; virtual reality; hardware-in-the-loop; high level architecture

CLC Numbers: U469, TP391.9

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2007)17-0065-09

0 引言

由于社会需求的不断增长和科学技术发展的推动, 汽车自 1886 年诞生至今, 已经发展成为高度机电一体化的产品。汽车由上万个零部件组成, 整车及零部件的设计涉及机械、动力、电子、电磁、控制等多个领域。随着社会的发展, 汽车的设计变得更加复杂, 而且许多实际问题已无法用传统的设计方法解决。同时, 汽车的使用条件也复杂多变, 如道路状况、气候条件等, 有时相差很大, 为了使汽车对复杂的使用条件具有良好的适应性和可靠性, 需要做大量的试验。此外, 汽车产品整个开发周期包括零部件设计、试制、试验和整车试验等阶段, 每个阶段需要的时间都将影响整个产品

的开发周期。基于以上原因, 计算机仿真方法正逐渐被应用到汽车工程设计中^[1]。

计算机仿真分析的过程是: 将汽车零部件或整车进行数学描述、建模编程并在计算机中运行, 达到分析的目的。它有许多优点, 例如不会对被仿真件造成破坏, 仿真软件容易修改, 可重复使用; 可以用于产品研制或设计的全过程, 包括方案论证、技术指标确定、设计分析、生产制造、试验测试、维护训练、故障处理等各个阶段; 可以大大缩短产品的开发周期, 降低开发成本, 减少研制费用, 加快产品更新换代, 提高产品的竞争力。本文主要是综述目前汽车工程中应用较多的计算机仿真分析方法, 包括数值模拟方法、MATLAB/

收稿日期: 2007-05-30

基金项目: 辽宁省高等学校优秀人才支持计划项目(RC-05-12)

作者简介: 陈 勇, 辽宁省锦州市士英街 169 号辽宁工业大学汽车与交通工程学院, 教授, 研究方向为车辆系统动力性建模、控制与仿真, 车辆电传动技术, 车辆现代设计技术等; E-mail: chenrong_jz@tom.com

Simulink 仿真方法、硬件在环 (Hardware-In-the-Loop, HIL) 仿真、虚拟现实技术 (Virtual Reality, VR) 和高层体系结构 (High Level Architecture, HLA) 技术。

1 基于数值模拟方法的仿真分析

数值模拟方法包括有限元方法 (Finite Element Method, FEM)、边界元方法 (Boundary Element Method, BEM)、统计能量分析方法 (Statistical Energy Analysis, SEA)、计算流体力学方法 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 和多体动力学分析方法。基于数值模拟的仿真分析主要应用在以下方面。

1.1 汽车结构方面的应用

对汽车的整车和部件进行强度分析、刚度分析、运动校核、疲劳耐久性分析及 NVH (Noise, Vibration and Harshness) 分析等。主要使用基于有限元方法、边界元方法、统计能量分析方法和计算流体力学等开发的软件。

有限元方法不仅计算精度高,而且能适应各种复杂形状,特别适合于低频结构振动模拟和分析,可以完成线性/非线性静力分析、模态分析、简谐响应分析、接触问题分析、随机振动分析、振动和声的耦合分析等功能。目前,有限元方法已经成为所有设计制造业中行之有效的办法,在汽车的结构设计中也得到了广泛的应用^[2-4]。对处理结构声辐射、声散射和结构声腔问题,边界元法有其独特的优越性,在噪声分析中得到了应用。SYSNOISE 软件就是运用有限元方法和边界元方法进行声学建模和声振建模。统计能量分析在预测和分析车内空气噪声方面侧重于应用,而预测和分析车内结构噪声方面却侧重于研究,如用统计能量分析方法进行驾驶室模型的动态响应预测^[5-6]。

通过数值模拟方法的分析可以达到提高优化整车及零部件的结构、提高承载能力、延长使用寿命、降低车辆噪声和减少重量的目的,从而改善整车的动力性、舒适性和经济性等性能。目前,应用较多的大型通用有限元软件主要有 ANSYS, ABAQUS, MARC, ADINA, LS-DYNA, ANSOFT, PATRAN, NASTRAN, DYTRAN, ASKA, SYSTUS, PAFEC 等软件;基于统计能量分析方法的 AutoSEA, SEAMS 等软件;进行流场分析、计算和预测的 CFD 软件 Fluent, Phoenix 等。国内的相关机构组织许多单位亦开发过一些有限元软件,如 JIFEX, FEPC 等。

1.2 汽车被动安全方面的应用

被动安全性^[7]也称汽车碰撞安全性,指汽车发生不可避免的交通事故后,能够对车内乘员或行人进行保护,以免发生伤害或者使伤害降低到最小程度,需要借助试验进行这方面的研究工作。汽车的实车碰撞试验是一种破坏性试验,每个产品样本只能试验 1 次,试验

的成本高。同时,碰撞的形式及测试的内容多种多样,仅实车的碰撞试验就有实车正面碰撞、偏置碰撞、侧面碰撞、追尾碰撞和车对车碰撞,需要进行大量试验。此外,在整个车辆的碰撞安全性设计与改进设计过程中,完全依赖于试验方法需要花费大量的时间,延长了开发周期。所以,汽车碰撞过程的计算机模拟已成为目前汽车碰撞安全性设计与改进的重要方法和手段。

在汽车被动安全研究领域,模拟计算中主要采用的是多刚体力学法和动态大变形非线性有限元法^[8]。融合多体动力学计算功能和有限元计算功能的软件有 MADYMO3D 和 CAL3D,基于有限元方法的软件有 PAM-CRASH, MSC/DYTRAN, ANSYS/LS-DYNA3D 等。在安全气囊与假人相互作用模拟计算中,假人使用多刚体模型,而对气囊则使用有限元模型。国内开展被动安全研究的单位主要有清华大学、吉林大学、湖南大学、江苏大学、辽宁工业大学、中国汽车技术中心、东方久乐安全碰撞实验中心、锦州锦恒汽车安全系统有限公司等。文献[8]中提到利用有限元软件 PAM-CRASH 建立了包含座椅、安全带、仪表板及转向系统在内的分析模型,图 1 是假人的有限元模型^[8],图 2 是气囊优化的有限元模型^[9]。

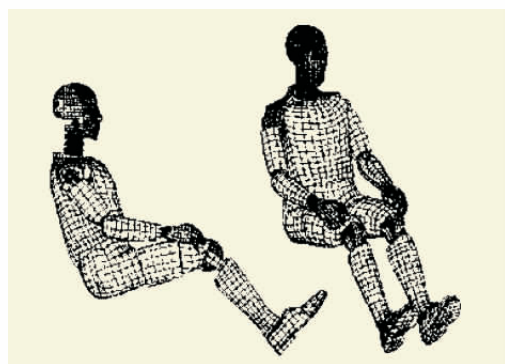


图 1 假人的有限元模型
Fig. 1 FE model of dummy

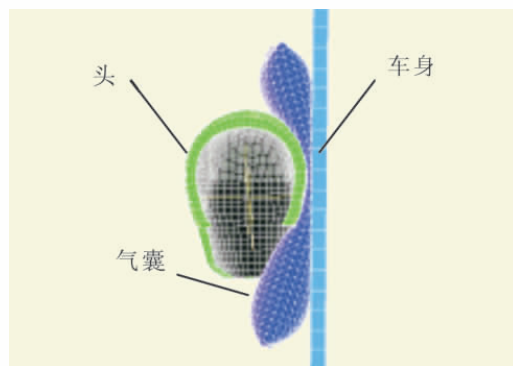
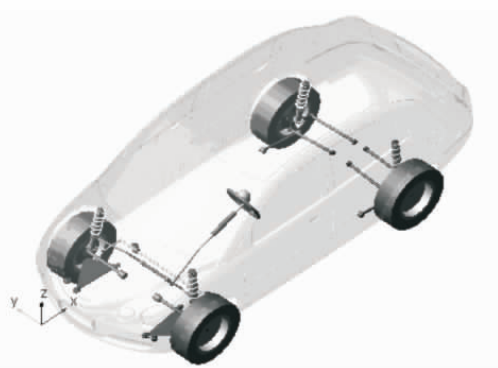


图 2 气囊优化的有限元模型
Fig. 2 FE model of air bag

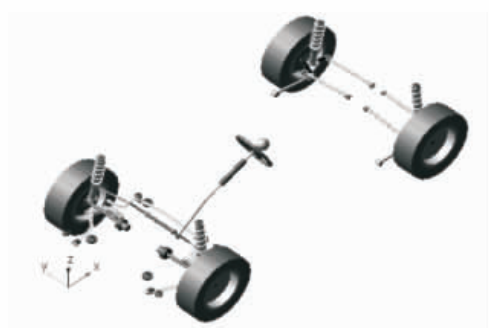
1.3 汽车动力学仿真方面的应用

对汽车整车及部件进行建模分析,应用较为广泛的是 Adams 软件,其中的 Adams/Car 模块可以快速建立高精度的车辆子系统模型和整车模型,通过高速动画直观地再现各种工况下的车辆运动学和动力学响应,并输出表征操纵稳定性、制动性、乘坐舒适性和安全性等性能参数。此外, SIMPACK, AMESim, CarMaker 等也都可以完成特定目的仿真分析。

图 3 和图 4 分别是 Adams 软件的建模和分析结果^[10]。根据图 3 建立的整车多刚体系统动力学模型和整车刚柔耦合系统动力学模型,通过选择车辆在 B 级路面上以 50 km/h 的速度行驶的常见工况,可以从车身质心加速度、悬架动行程、轮胎动载荷等方面来分析多刚体模型与刚柔耦合模型之间的差别和联系。



(a) 刚体模型
(a) Rigid body model

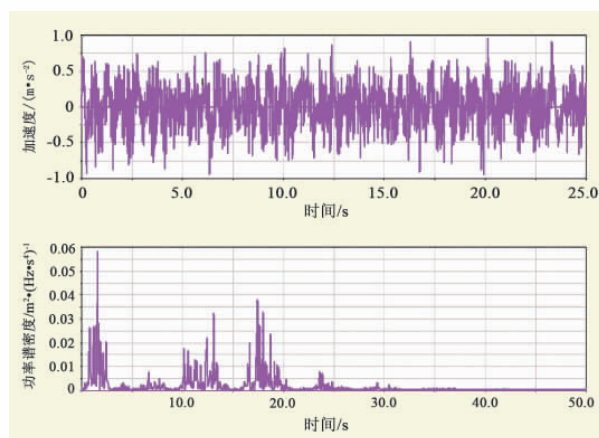


(b) 隐藏车身的刚柔耦合模型
(b) Rigid-flexible coupling model without body

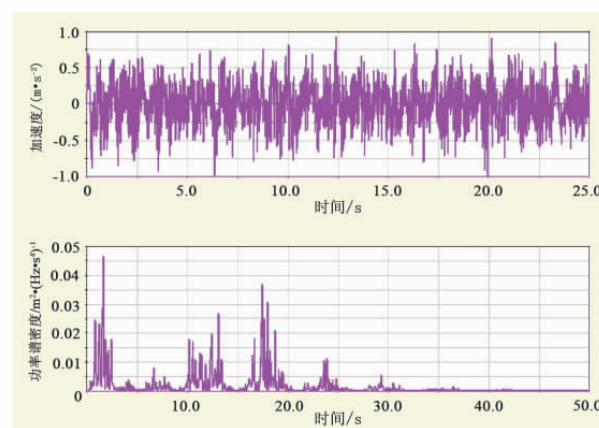
图 3 Adams 建立的车辆模型

Fig. 3 Vehicle modeled by Adams software

图 4 是多刚体模型和刚柔耦合模型的车身垂直加速度及功率谱密度比较。由图可见,刚柔耦合作用并没有改变车身的振动频率,只是降低了车身垂直加速度功率谱密度的幅值,充分体现了柔性体的弹性变形能够吸收一部分由路面传递来的冲击能量的特点,对车内连接部位衬套的选择提供了参考。



(a) 多刚体模型
(a) Multi-rigid body model



(b) 刚柔耦合模型
(b) Rigid-flexible coupling model

图 4 车身垂直加速度及功率谱密度

Fig. 4 Vertical acceleration and power spectrum of body

1.4 虚拟试验场技术

轿车专用试车场是轿车开发过程中非常重要的试验手段,道路试验是开发中必须的试验过程,一般包括高速环道路、强化试验道路、耐久交变试验道路、坡道、动态试验区和制动试验道路等,满足汽车开发过程中各种整车性能试验、道路耐久试验及技术鉴定试验等方面的需求,国内目前有交通部公路交通试验场、襄樊汽车试验场和定远国家试验场等。虚拟试验场技术 (Virtual Proving Ground, VPG)^[11]是针对整车在汽车道路实验场上所进行的各种实验项目的仿真技术,也可以说是对整车系统性能的全面仿真,是在产品设计前期即可得到样车道路实验结果的“整车性能预测”效果的计算机仿真技术^[10]。虚拟试验场技术代表了整车系统分析软件的新水平,包括结构、连接件、机构、轮胎等全部非线性因素,提供了除车身结构以外的,如悬挂、轮胎、减振器、假人、气囊等有限元模型数据库,方便了模

型建立。在载荷方面,提供了各种标准的实验场路面和障碍物,使结果更加真实可信、可比性高。

虚拟试验场技术是由美国工程技术合作公司(Engineering Technology Associates, Inc., ETA) 在 ANSYS/LS-DYAN 软件平台上二次开发的,已在美国、欧洲、日本、韩国和中国获得成功应用,奠定了 VPG 在整车开发技术方面的领导地位。文献[12-13]介绍了 VPG 的设计方法,以及平顺性模型和操纵稳定性仿真分析模型的建立方法。NATC (Nevada Automotive Test Center)^[14]可以帮助用户用原始的有限元模型进行动态分析,通过试验修改的模型可以进行车辆动力学分析以及在各种路面下的加速寿命试验和耐久性试验。

2 基于 MATLAB/Simulink 的仿真分析

MATLAB/Simulink 是对动态系统进行建模、仿真和分析的一个软件包,也可以称之为一体化仿真环境。它支持线性和非线性系统、连续时间系统、离散时间系统及连续和离散混合系统,而且系统可以是多进程的。目前在此环境下开发了许多仿真分析软件,其中美国能源部所属的国家再生能源实验室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)于1994年开发的、已由Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen List (AVL)公司商业化的软件 Advisor^[15]应用最为广泛,其主界面如图5所示。

在 MATLAB/Simulink 环境下,系统模型可以根据实际结构搭建,调整方便,结果输出直观。Advisor 不仅可以对传统汽车(包括轻型车和重型车)进行仿真,而且对电动汽车(包括纯电动汽车、混合动力汽车和燃料电池汽车)也可以进行仿真分析,可以预测多种循环工况下的车辆性能、能量消耗、排放、控制策略实施情况以及零部件的效率。根据仿真过程中信息流动的方向不同,可分为前向仿真和后向仿真两大类^[16]。后向仿真循环的数据流方向与实际系统的能量流动方向相反,即以循环工况作为输入,逆推在此工况要求下,驱动系统各部件必须满足的转矩、功率等要求,一般只能反映系统的静态特性,多用于系统设计阶段的参数匹配、能量控制策略的确定等。而前向仿真中的数据流方向与实际系统的能量流动方向相同,即以驾驶员需求目标作为仿真的起点,驾驶员输出加速踏板和制动踏板信号,前向仿真过程与汽车行驶时各部件的实际工作过程相一致,可以真实地模拟系统运行状态和逻辑结构,可用于控制器的开发与测试。许多文献给出了使用 Advisor 或对 Advisor 进行了二次开发结果^[17-18],以及在 MATLAB/Simulink 环境下对车辆进行的仿真分析研究^[19-22]。图6是 MATLAB/Simulink 环境下开发的超级电容与道路电池混合驱动仿真系统的主界面^[19]。



图5 Advisor 主界面

Fig. 5 Interface of Advisor software

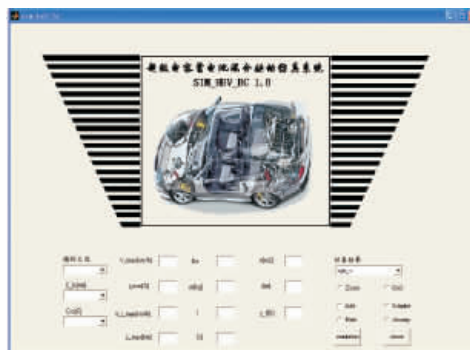


图6 混合驱动系统仿真的主界面

Fig. 6 Interface of hybrid drive simulation system

随着国家“十五”计划 863 电动汽车重大专项的实施,国内许多高校和科研院所都开展了车辆仿真方面的研究工作,但广泛推广使用的不多,没有国外同类软件影响力大。用于传统汽车或电动汽车仿真的国外专业软件还有 V-ELPH;Idaho 国家工程与环境实验室的 SIMPLEV;Lawrence Livermore 国家实验室的 HVEC;Argonne 国家实验室的 PSAT(Powertrain System Analysis Toolkit),GREET Model 和 VISION Model;Idaho 大学开发的 SmartHEV;Mathworks 公司的 SimDriveline, Veh-Prop, Easy 5 和 AVL 公司的 Cruise 等。

3 硬件在环仿真分析

硬件在环仿真,最初应用在结构复杂、价格昂贵的系统的开发和测试上,是将被仿真系统的一部分用数学模型描述,并把它转化为仿真计算模型,其他部分以实物(或物理模型)方式引入仿真回路,可以对虚拟运行环境中的设备进行逼真的模拟,其特点是实时性。这种定义比较早的“半实物仿真”定义更准确^[23]。

一个典型的 HIL 系统包括用于从控制系统接收数据的传感器、用于发送数据的传感器、一个用于处理数据的控制器、一个人机界面(HMI)以及一个开发后仿真

分析平台。通常硬件在环仿真的输入和输出是连续的或模拟的,在这种情况下,连续的输入必须使用 A/D 转换器转换为数字的形式。这种仿真可以充分发挥物理仿真和数学仿真的优越性,避免各自缺点。硬件在环仿真环境实现了物理硬件和软件模型的互换,从而可以在原型车不存在的情况下进行部件或整车的仿真,也可以对潜在的部件及其组合方案进行评价、筛选,直到确定最优方案。

功能强大的高逼真度 HIL 实时仿真不仅可以缩短开发周期,加快了产品上市速度,而且由于测试期间无需使用实际硬件而降低了设备成本以及相关的维护成本。HIL 仿真最显著的优点是可以对实际情况进行模拟,而不会产生实际危险。

3.1 在汽车开发中的应用

在汽车产品开发工程中,硬件在环是一个非常有效的工具,可以完成对车辆子系统(如 ABS、主动悬架系统、转向系统等)的设计、性能评估和测试任务。

汽车电子柴油控制装置(EDCU)的主要功能是在特定时刻控制喷射入发动机的油量。在将 EDCU 装入真正的汽车之前,需要在包含 EDCU 以及汽车模拟器的 HIL 系统中对其进行测试。为了尽可能逼真地模拟汽车,应模拟进入 EDCU 的实际信号并将系统的动态特性考虑在内。这样的 HIL 系统采用硬件来产生和接收实际信号,采用软件来模拟系统的运作,其 HIL 系统结构^[24]如图 7 所示。在汽车的 ABS/ASR 系统开发中也采用了 HIL 方法,结构^[25]如图 8 所示,其中的车辆动力学模型包括车身和车轮部分的动力学模型两部分,车轮速度仿真器根据车辆动力学模型计算结果模拟车轮输出的速度信号。人在回路的仿真(Man-In-the-Loop Simulation, MILS)中对系统特性的影响也可以进行分析。此外,在发动机^[26]、转向系统^[27]、制动系统^[25-28]、传动系统^[29-30]、汽车空调、交流发动机等附件^[31]、电动汽车^[32-34]的开发等方面都有不同程度的应用。硬件在环仿真分析方法在国内已使用较多,特别是在电动汽车的开发中得到了广泛应用。

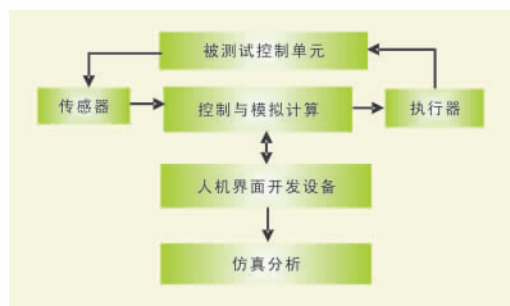


图 7 发动机控制器的 HIL 系统结构

Fig. 7 HIL structure of engine controller

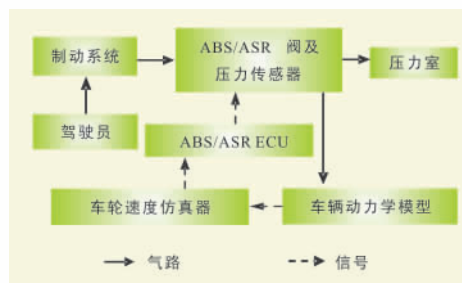


图 8 ABS/ASR 开发系统的 HIL 系统结构

Fig. 8 HIL structure of ABS/ASR development system

3.2 在汽车风洞试验中的应用

汽车风洞试验有模型风洞、实车风洞和气候风洞等。在模型风洞中只能对缩小比例的模型进行试验,根据效果图制作许多一定比例尺寸的外模型和内模型,例如有 1:1(内模型),1:2.5,1:4,1:5 等,其中 1:2.5 外模型要经风洞试验,择优选择其中一些模型,再列出各个模型的设计方案,再试验、比较,再择优选择,从而寻找出最佳方案。经过多次筛选定案,才制作 1:1 外模型。1:1 外模型和内模型经过风洞试验,进行工程分析,再进行 1:1 外模型表面确认。经过几轮全尺寸模型的修改、试验,确定一个模型,进行车身总布置设计及工程分析,作为设计图纸及工装的原始依据,此时即进入了批量开发阶段。汽车风洞在国内有相关文献^[35-36]介绍,国内的科研机构一般利用航空风洞进行汽车空气动力学方面的研究工作^[37-38],同济大学、吉林大学正在进行汽车风洞试验室的建设。

4 虚拟现实技术

虚拟现实技术是 20 世纪 80 年代末、90 年代初崛起的一种实用技术^[39],是采用以计算机技术为核心的技术,生成逼真的视、听、触觉一体化的特定范围的虚拟环境,使用户产生等同亲临真实环境的感受和体验。随着计算机、图像技术、传感器等技术的发展,汽车虚拟现实技术具有良好的发展前景。

利用虚拟样机技术设计的数字化汽车与复杂多变的虚拟试验环境结合起来,用真实驾驶员进行仿真驾驶,以视、听、触觉等作用作用于驾驶员,使之产生身临其境的沉浸、交互感,人-车-环境融为一体,可直接感受汽车的振动、倾斜、噪声等效果,可以无危险、无损坏地进行碰撞、翻倾等极限试验,改进了抽象的数值曲线仿真,突破了难以用数学模型来表达的错综复杂的驾驶员感受与反应等问题。在设计的早期及时发现潜在的问题,进行调整修正,实现优化,具有节省资金、可重复使用、操作无风险等优点。如 Adams/Car 可以建造高精度的整车虚拟样机(包括车身、悬架、传动系统、发动机、转向机构、制动系统等)并进行仿真,通过高速动画

直观地显示在各种试验工况下整车动力学响应, 输出表示操纵稳定性、制动性、乘坐舒适性和安全性的特征参数, 从而减少对物理样机的依赖。这一点与虚拟制造技术的差异只在于应用领域不同而已^[40]。

4.1 汽车动态仿真与控制中的应用

室内模拟试验的进程快, 重复性好, 可用于研究汽车仿真设计方法及人-车-环境闭环系统的控制, 以及汽车底盘主动控制技术, 为车辆的虚拟设计和智能控制奠定了基础。室内道路模拟试验主要借助于电液伺服道路模拟试验台, 不仅可以对整车, 也可以对汽车零部件进行可靠性试验。1996 年, 吉林工业大学(现吉林大学)建立了汽车动态模拟国家重点实验室, 研制出了汽车动态模拟器, 由模拟舱运动模拟、计算机实时模拟与控制、视景模拟、数据采集与触感模拟、声响模拟和中央控制台 6 大子系统构成, 如图 9 所示。山东大学等高校也开始了这方面的研究工作^[41]。浙江大学利用虚拟现实技术进行了汽车平顺性和汽车行驶动力学方面的研究工作^[42-43]。

4.2 在汽车驾驶模拟器中的应用

汽车驾驶模拟器是把一些控制设备与虚拟场景相结合, 用于驾驶员的训练, 可使驾驶员感觉到汽车的振动、侧偏、侧倾等运动, 可以把人的主观感受加入到评价车辆性能中来。借助于汽车驾驶模拟器, 利用计算机仿真技术对驾驶人员进行训练, 可以有效地缓解汽车驾驶培训系统面临的压力。汽车驾驶模拟器需要建立的场景模型^[44]主要包括: 地形地貌模型、地面文化特征景物模型和运动实体模型。

1980 年开始, 汽车驾驶模拟器在我国发展较快, 清华大学、吉林大学、装甲兵工程学院、南京瑞林模拟器实业公司等单位都积极开展研究工作, 并开发出一些初级产品。1990 年以后, 我国已开始研制和生产汽车驾驶模拟器, 如南京模拟研究所、上海中义科教设备有限公司、上海华育公司等单位开发了汽车驾驶模拟器。其中有些模拟器采用了汽车多自由度数学模型, 不仅可实现转向、制动和加速工况的模拟, 而且可实现真实的三维场景及逼真的声音模拟, 还可以选择训练的天气、训练场景科目等, 生成的部分场景如图 10 所示^[45]。自 2000 年以来, 主要是对汽车驾驶模拟器的建模进行研究, 使驾驶模拟器模型与实际情况更接近, 同时, 不断完善仿真功能, 提供更好的人机界面, 并进行硬件升级以提高仿真的速度。

美国军用的 M-1114 HMMWV 的驾驶员培训同样采用了虚拟现实技术^[46], 三通道等离子显示器构建的驾驶环境具有极高的逼真度, 而且可以根据需要定制。在该环境下可以进行车辆倾覆等科目的训练, 通过无危险环境下的训练可以提高驾驶员驾驶的熟练程度, 提高在各种危险环境下做出正确决策的能力。



图 9 吉林大学开发的汽车动态模拟器
Fig. 9 Dynamic simulator of car developed by Jilin University

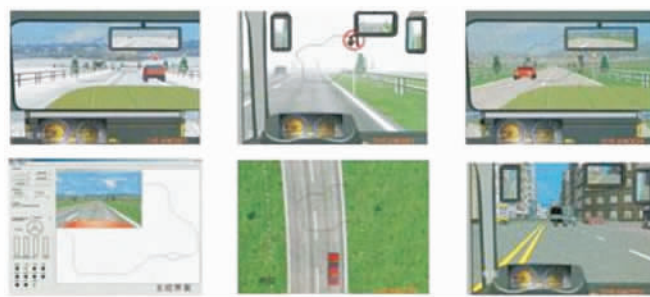


图 10 利用 VR 生成的场景
Fig. 10 Scenes constructed by VR

4.3 虚拟仪器

1986 年, 美国国家仪器公司 (NI) 提出了虚拟仪器 (virtual instruments) 概念^[47], 以 PC 计算机作为仪器统一硬件平台, 将测试仪器的功能、面板及控件均以相应的软件实现, 并以文件形式存储在 PC 机的软件库中。实际上, 虚拟仪器是一个按照仪器需求组织的数据采集系统, 涉及的基础理论主要有计算机数据采集和数字信号处理。虚拟仪器一般由 3 部分组成, 即输入部分、数据处理部分和输出部分。虚拟仪器的硬件构成有多种方案, 基本构成如图 11 所示, 测试系统^[48]如图 12 所示, 可测试汽车的制动性、操纵稳定性等技术指标。目前, 虚拟仪器测试技术在国内应用比较普遍, 已应用于汽车平顺性、电动助力转向系统、AMT 数据采集、汽车仪表等测试中。

5 高层体系结构技术

高层体系结构 (HLA)^[49]是用于构建计算机仿真系统的通用技术框架, 由美国国防部于 1995 年在其建模与仿真计划中首次提出。HLA 最显著的特点是将应用层同底层支撑环境分离, 最大限度地利用各自领域的最新技术来实现标准的功能和服务, 对各种新技术也有良好的适应能力。文献[50]介绍了高层体系结构中底层支撑环境的问题。国外采用高层体系结构开发的具有 6



图 11 虚拟仪器构成框图

Fig. 11 Structure of virtual instruments

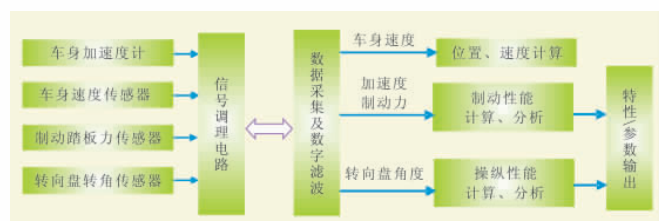


图 12 汽车综合测试系统结构框图

Fig. 12 Structure of integrated testing system for automobiles

个自由度的移动平台 SIDFreD^[51], SIDFreD 的物理子系统如图 13 所示。

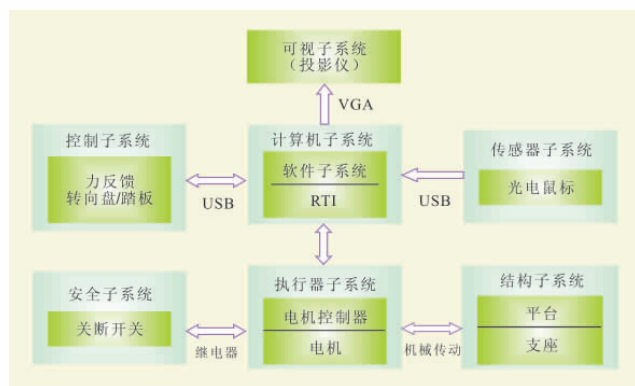


图 13 SIDFreD 的物理子系统

Fig. 13 Physical subsystem of SIDFred

目前, 高层体系结构在汽车驾驶虚拟训练^[49]及交通工程仿真中已有应用^[52], 见诸报道的更多的是航空、航天等军事领域, 如无人驾驶飞机 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV)^[53-54]的开发。总体而言, 在汽车工程领域应用 HLA 技术还较少。

6 结论

在汽车工程中应用计算机仿真分析方法, 不仅与计算机仿真分析技术的成熟程度有关, 而且与汽车结构的适应性有关。基于数值模拟方法和基于 MATLAB/Simulink 的仿真分析方法在汽车工程上的应用将进一

步扩大, 特别是结合汽车结构特点开发的专用软件会越来越普及。硬件在环技术的基本结构容易实现, 可繁可简, 目前已呈现出应用逐渐增多的势头, 相信在汽车零部件以及系统开发的过程中会得到迅速推广。虚拟现实技术在汽车的主观评价和驾驶员训练方面有其优势, 今后需要进一步完善模型和评价指标体系。高层体系结构技术适于复杂大系统, 所以在汽车工程上的应用还很有限, 但在整个交通系统运行管理方面已经体现了其优越性。随着计算机仿真方法研究的不断深入和完善, 汽车工程领域必将进一步扩大计算机仿真分析方法的应用。

参考文献 (References)

- [1] 范文慧, 肖田元. 复杂产品协同设计、仿真、优化一体化平台[J]. 科技导报, 2007, 25(4): 15-24.
FAN Wenhui, XIAO Tianyuan. Collaboration integrative design simulation optimization platform for complex product[J]. Science and Technology Review, 2007, 25 (4): 15-24.
- [2] 谭继锦. 汽车有限元法[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
TAN Jijin. Finite element method in automobiles [M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [3] 高云凯. 汽车车身结构分析 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2007.
GAO Yunkai. Structure analysis of automobile body [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2007.
- [4] 陈立杰, 谢里阳, 李文辉, 等. 桑塔纳汽车后桥强度有限元分析及改进方案[J]. 汽车工程, 2004, 26(4): 488-491.
CHEN Lijie, XIE Liyang, LI Wenhui, et al. Finite element analysis and improvement scheme for rear axle of Santana car[J]. Automotive Engineering, 2004, 26(4): 488-491.
- [5] 孙玲玲, 宋孔杰. 驾驶室结构声的统计能量分析 [J]. 中国公路学报, 2004, 17(4): 101-104.
SUN Lingling, SONG Kongjie. Prediction of structure-borne sound transmission in driver compartment using statistical energy analysis [J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(4): 101-104.
- [6] 靳晓雄, 叶武平, 丁玉兰. 基于统计能量分析法的轿车内室噪声优化与控制[J]. 同济大学学报, 2002, 30(7): 862-867.
JIN Xiaoxiong, YE Wuping, DING Yulan. Car interior noise simulation using statistical energy analysis method [J]. Journal of Tongji University, 2002, 30(7): 862-867.
- [7] 钟志华, 张维刚, 曹立波, 等. 汽车碰撞安全技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
ZHONG Zhihua, ZHANG Weigang, CAO Libo, et al. Automotive crash safety technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [8] 黄世霖, 张金换, 王晓冬, 等. 汽车碰撞与安全 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
HUANG Shilin, ZHANG Jinhuan, WANG Xiaodong, et al. Automobile collision and safety[M]. Beijing: Tsinghua

- University Press, 2000.
- [9] ZHANG Honglu, GOPAL M M, SAXENA R, *et al.* An integrated optimization system for airbag design and modeling by finite element analysis[EB/OL]. SAE Technical Paper Series, 2003-01-05 [2005-06-20]. <http://delphi.com/pdf/techpapers/2003-01-0506.pdf>.
- [10] 张宇. 基于橡胶件的汽车平顺性研究 [D]. 锦州: 辽宁工学院, 2007.
- ZHANG Yu. Study of vehicle ride comfort based on elastomeric elements [D]. Jinzhou: Liaoning Institute of Technology, 2007.
- [11] 汽车 CAE 技术的新进展——虚拟试验场 (VPG) 技术[EB/OL]. [2007-03-22]. http://www.sciei.com.cn/Article/adopt/soft/cae/2007-03/Article_10514.html.
- [12] WANG Guoquan, ZHANG Huicun, YU Qun. Study on establishment virtual proving ground for vehicle ride comfort [EB/OL]. SAE Technical Paper Series, SAE Paper 2005-01-2437 [2007-05-02]. <http://www.sae.org/technical/papers/2005-01-2437>.
- [13] 王国权, 王树凤, 李世雄, 等. 汽车操纵稳定性的虚拟试验技术[J]. 上海交通大学学报, 2006(1): 172-177.
- WANG Guoquan, WANG Shufeng, LI Shixiong, *et al.* The virtual environment test technique on vehicle handling and stability[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006(1): 172-177.
- [14] Virtual Proving Ground [EB/OL]. [2007-04-25]. http://www.natc-ht.com/virtual_proving_Ground.htm.
- [15] ADVISOR simulation tool for vehicle evaluation and testing [EB/OL]. [2006-07-03]. http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/success/advisor_simulation_tool.pdf.
- [16] 陈全世, 仇斌, 谢起成. 燃料电池电动汽车 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- CHEN Quanshi, QIU Bin, XIE Qicheng. Fuel cell electric vehicle[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [17] PRITCHARD E G D. Performance modeling of hybrid and plug-in hybrid electric school buses using ADVISOR[D]. North Carolina: North Carolina State University, 2004.
- [18] 龚海峰. 混合动力电动汽车能量存储系统性能分析与仿真 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2003.
- GONG Haifeng. Performance analysis and simulation of energy storage system of hybrid electric vehicle [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2003.
- [19] 李贵远, 陈勇. 动力电池与超级电容混合驱动系统设计与仿真[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(1): 101-105.
- LI Guiyuan, CHEN Yong. Design and simulation of hybrid-drive system with battery pack and capacitors [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(1): 101-105.
- [20] 郑鹤清. 燃料电池城市客车控制策略研究[D]. 锦州: 辽宁工业大学, 2007.
- ZHENG Heqing. Control strategy study of fuel cell hybrid electric bus[D]. Jinzhou: Liaoning University of Technology, 2007.
- [21] TOUNSI S, NEJI R, BEN N, *et al.* Global optimization of electric vehicle design parameters: The 21st International Electric Vehicle Symposium: EVS-21, Monaco, April 2-6, 2005[C]. Monaco: AVERE, 2005.
- [22] HUANG K D, TSAI Yaowen, CHANG Shunchang, *et al.* Study of system energy management of parallel hybrid electric heavy motorcycle [C]//The 8th International Symposium on Advanced Vehicle Control, Taipei, Aug 20, 2006.
- [23] 廖英, 梁家红, 等. 实时仿真理论与支撑技术 [M]. 长沙: 国防科学技术大学出版社, 2002.
- LIAO Ying, LIANG Jiahong, *et al.* Real-time simulation theory and supporting technology [M]. Changsha: Press of National University of Defense Technology, 2002.
- [24] 硬件在环(HIL)仿真应用中的 LabVIEW FPGA[EB/OL]. http://www.autoelectronics.eetchina.com/ART_8800420504_2100006_AN_2d98b5d7.HTM.
- LabVIEW FPGA in Hardware-in-the-loop Simulation[EB/OL]. http://www.autoelectronics.eetchina.com/ART_8800420504_2100006_AN_2d98b5d7.HTM.
- [25] CHO J M, HWANG D H, LEE K C, *et al.* Design and implementation of HILS system for ABS ECU of commercial vehicles: ISIE 2001, Pusan, KOREA [C/OL]. [2007-04-24]. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/7417/20158099831663.pdf>, 1272-1277.
- [26] ISERMANN R, SCHAFFNIT J, SINSEL S. Hardware-in-the-loop simulation for the design and testing of engine-control systems [J]. Control Engineering Practice, 1999(7): 643-653.
- [27] JANG S H, PARK T J, HAN C S. A control of vehicle using steer-by-wire system with hardware in the loop simulation system [C]. Proceedings of the 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechantronics (AIM 2003), 2003.
- [28] HWANG T H, ROH J H, PARK K H, *et al.* Development of HILS systems for active brake control system [C]. SICE-ICASE international joint conference 2006, Busan, Korea, Oct 18, 2006.
- [29] HAGIWARA K, TERAYAMA S, TAKEDA Y, *et al.* Development of automatic transmission control system using hardware-in-the-loop simulation system[J]. JSAE Review, 2002, 23: 55-59.
- [30] MIANZO L. A transmission model for hardware-in-the-loop powertrain controlsystem software development[C]. Proceedings of the 2000 IEEE international conference on control applications, Alaska, USA, Sept 25, 2000.
- [31] OLSÉN J. Modelling of auxilliary devices for a hardware-in-the-loop application [D]. Linköping: Linköping Universitet, 2005.
- [32] MOORE R M, HAUER K H, RANDOLF G, *et al.* Fuel cell

- hardware-in-loop [J]. Journal of Power Sources, 2006, 162(1): 302-308.
- [33] 秦敬媛. 双轴并联混合动力汽车的实时仿真技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005.
QIN Jingyuan. Study on the real-time simulate technology for the parallel hybrid electric vehicle of double axles[D]. Changchun: Jilin University, 2005.
- [34] 齐占宁, 陈全世, 梁伟铭, 等. 基于机群的电动汽车柔性实时仿真平台的研究与构建 [J]. 机械工程学报, 2005, 41(1): 61-66.
QI Zhanning, CHEN Quanshi, LIANG Weiming, *et al.* Research and construction of flexible real time simulation platform for electric vehicle based on PC cluster [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(1): 61-66.
- [35] 傅立敏. 汽车空气动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
FU Limin. Aerodynamics of automobiles[M]. 北京: China Machine Press, 1998.
- [36] 谷正气. 汽车空气动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
GU Zhengqi. Aerodynamics of automobiles[M]. 北京: China Communications Press, 2005.
- [37] 欧阳鸿武, 唐艳君, 张志沛, 等. EQ1092 型载货车加装气动附加装置的模型风洞试验研究[J]. 汽车技术, 2001(6): 15-18.
OUYANG Hongwu, TANG Yanjun, ZHANG Zhipai, *et al.* Wind tunnel study on EQ1092 truck model with aerodynamic attachment [J]. Automobile Technology, 2001(6): 15-18.
- [38] 高利, 范炜, 蔡红民, 等. 国产客车模型风洞试验研究[J]. 汽车技术, 2002(7): 27-31.
GAO Li, FAN Wei, CAI Hongmin, *et al.* Wind tunnel test research of bus prototype [J]. Automobile Technology, 2002(7): 27-31.
- [39] 刘兴堂, 吴晓艳. 现代系统建模与仿真技术 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2001.
LIU Xingtang, WU Xiaoyan. Modern modeling theory and simulation technology[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2001.
- [40] 肖田元, 张林瑄, 赵银燕. 基于虚拟制造技术加速产品自主创新 [J]. 科技导报, 2007, 25(4): 5-14.
XIAO Tianyuan, ZHANG Linxuan, ZHAO Yinyan. Accelerating Independent Innovation of the Products with VM Technique[J]. Science and Technology Review, 2007, 25(4): 5-14.
- [41] 张竹林. 汽车驾驶模拟器动态模拟系统的研究[D]. 济南: 山东大学, 2005.
ZHANG Zhulin. Study on simulation system of car driving simulator[D]. Jinan: Shandong University, 2005.
- [42] 张金迎. 基于虚拟现实的汽车行驶力学研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
ZHANG Jinying. Ride dynamics research based on virtual reality[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [43] 雷良育. 基于虚拟现实的汽车平顺性仿真试验系统及其关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
LEI Liangyu. A study on simulation test system of vehicle ride comfort based on VR and its key technology [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [44] 李安定, 陈定方. 汽车驾驶模拟器视景建模技术研究 [J]. 湖北工业大学学报, 2006(6): 33-36.
LI Anding, CHEN Dingfang. Research on scene modeling techniques in a visual driving simulation system [J]. Journal of Hubei University of Industry, 2006(6): 33-36.
- [45] SBM-5 型汽车驾驶模拟器. [EB/OL]. [2006-06-11]. <http://www.sobokj.com/ArticleShow.asp?ArticleID=396>.
SBM -5 type automobile driving simulator. [EB/OL]. [2006-06-11] <http://www.sobokj.com/ArticleShow.asp?ArticleID=396>.
- [46] M-1114 HMMWV driver training simulator [EB/OL]. [2007-05-05]. http://www.mpri.com/driver/pdfs/M1114HMMWV_web.pdf.
- [47] Steve Wampler and Bret Goodrich. The virtual instrument concept [EB/OL]. [2005-03-20]. <http://atst.nso.edu/library/docs/RPT-0011.pdf>.
- [48] 孙建民, 杨清梅. 虚拟仪器技术及其在汽车工程测试中的应用[J]. 公路交通科技, 2002(6): 164-167.
SUN Jianmin, YANG Qingmei. Application of virtual instrument technology in automobile engineering [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2002(6): 164-167.
- [49] 吴民. 基于 HLA 和 VR 的汽车驾驶虚拟训练系统 [J]. 甘肃科技纵横, 2007(2): 60-61.
WU Min. HLA and VR-based car driving training system [J]. Gansu Technical Review, 2007(2): 60-61.
- [50] MCGARRY S, DICAPRIO P N. Design issues for the high level architecture (HLA)[EB/OL]. [2007-05-10]. <http://dss.11.mit.edu/dss.web/96.14.104.ps>.
- [51] CHAO H C, PEARCE T W, HAYES M J D. Use of the HLA in a real-time multi-vehicle simulator [C/OL]// Proceedings of the CSME Forum 2004. [2007-05-20]. <http://www.mae.carleton.ca/~jhayes/publications.html>.
- [52] JENKINS J M. Modeling the interaction between passenger cars and trucks[D]. Texas: Texas A&M University, 2004.
- [53] STOLARIK B, GIVENS B. Multiple UAV communication modeling using the HLA [EB/OL]. [2007-05-10] <http://www.isr.us/pdfs/publishedpapers/04S-SIW-104.pdf>.
- [54] STOLARIK B M, NILAND W M, RASMUSSEN S J. Enabling inter-vehicle communication modeling in multi-UAV using the HLA [J/OL]// AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit. Providence, Rhode Island. August 16-19, 2004 [C/OL] [2007-05-10]. http://isr.us/pdfs/publishedpapers/04_AIAA_MST.pdf.

(责任编辑 赵佳)