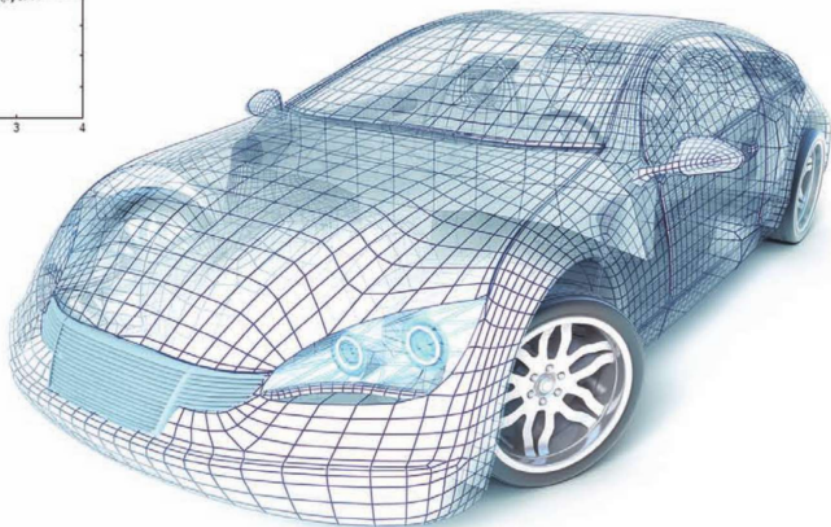
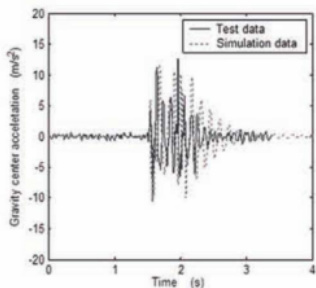


车辆动力学

基于多体理论的空气悬架系统研究

管西强 著



内 容 提 要

本书主要阐述了车辆空气悬架系统的建模、分析及优化的理论和方法。全书基于刚柔耦合多体系统动力学原理,开发了包括前独立空气悬架、转向系、后非独立空气悬架以及轮胎路面模型的整车多体系统虚拟样机仿真模型。在此基础上,对整车的操纵稳定性和舒适性进行研究,为车辆的开发提供理论上的依据;并针对空气弹簧的非线性特性,提出了适合于空气悬架的参数匹配的方法。

本书可作为高等院校车辆工程专业的本科及硕士教材,也可用作企业技术人员的培训教材,对从事车辆工程研究的技术人员也有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

车辆动力学:基于多体理论的空气悬架系统研究 /
管西强著. —上海:同济大学出版社, 2020. 9
ISBN 978-7-5608-9481-2

I. ①车… II. ①管… III. ①车辆动力学 IV.
①U270.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2020)第 170965 号

车辆动力学——基于多体理论的空气悬架系统研究

管西强 著

责任编辑 张智中 责任校对 徐春莲 封面设计 钱如潺

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)
经 销 全国各地新华书店
排 版 南京文脉图文设计制作有限公司
印 刷 大丰科星印刷有限责任公司
开 本 710 mm×960 mm 1/16
印 张 8.5
字 数 170 000
版 次 2020 年 9 月第 1 版 2020 年 9 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5608-9481-2

定 价 48.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

前 言

悬架系统是车辆重要的总成,其设计的成功与否是决定整车设计水平的关键因素之一。随着数学、力学、计算机信息科学等学科的发展而逐步完善起来的多体系统动力学和基于多体理论的数字化虚拟样机技术为解决汽车悬架及整车的分析、设计和优化问题提供了有力的工具。

基于多体系统动力学原理,本书开发了包括前独立空气悬架、转向系、后非独立空气悬架以及轮胎路面模型的整车多体系统虚拟样机仿真模型。建模过程中,对所涉及的约束关系进行了严格的分析,力求合理体现各部件之间的相对运动关系,并通过各种途径对模型中所需运动学、动力学等各种参数进行了收集,力求模型的精确化,并利用最小二乘法拟合了空气弹簧的非线性负载特性,通过试验数据计算得到橡胶衬套的线性刚度。

就橡胶弹性元件对双横臂独立悬架运动学参数的影响作了深入研究,弹性元件的合理使用使得转向轮定位参数向有利于操纵稳定性的趋势发展。提出了空气悬架动态刚度计算的方法,并分析了双横臂导向机构对悬架动刚度的影响。在低地板城市客车道路试验的基础上,利用所开发的整车虚拟样机对操纵稳定性和平顺性进行了仿真研究,包括稳态转向特性、开环瞬态操纵稳定性、驾驶员模型的移线瞬态操纵稳定性、脉冲路面平顺性和随机路面平顺性。

空气悬架具有很强的非线性刚度特性,所以其设计和匹配与普通悬架相比要复杂得多。本书从空气弹簧的静态负载特性试验数据入手,对空气弹簧的刚度特性和有效截面积的变化规律进行了研究,拟合了有效截面积与弹簧高度之间的关系曲线。在此基础上,提出了以设计高度的空气弹簧刚度取代虚拟样机空气悬架的非线性负载特性,按照固定刚度悬架的优化方法进行了悬架参数优选,再恢复到空气弹簧的负载特性的空气悬架参数

优选方法。分析了非独立后空气悬架四连杆式导向机构的布置形式,通过调整横向推力杆的前后位置,仿真计算了导向机构对车辆稳态转向特性的影响,并进行了弹簧刚度改变后导向机构参数的相应匹配。

FOREWORD

Suspension systems are important components for automobiles, which not only take functional role of supporting forces and torques, but also have direct effect on the ride comfort and handling stability. The design of suspension is a key factor that decides the design of the whole vehicle. The theory of multi-body dynamics and virtual prototyping technique that developed with mathematics, mechanics and computer science is finding its wider and wider application in the engineering.

The modeling is built including independent front air suspension, steering system, dependent rear air suspension and tire-road interaction based on the multi-body dynamics. In the model, the constraints of the real parts are analysed strictly and the motion relationships among parts are described reasonably. All kinds of parameters, such as kinetic and kinematics parameters are collected by different ways and the error of the model is reduced. Concerning the load nonlinearity of the air spring and the stroke the suspension, the stiffness of the air spring is adopted by the parameters fitting method. Bushings are important components which have great effect on handling and riding of the vehicle. The linear stiffness of the bushings is taken into account also in the dynamics model and the stiffness is decided according to the test data.

Based on the rigid-flexible coupling model, influence of the bushings on kinematics characteristics for the double wishbone independent suspension system is examined, and the trend of the alignment parameters can be enhanced. A method for determination of dynamic nonlinear suspension stiffness is proposed and nonlinear effects of the double

wishbone guide frame and the air springs on dynamic stiffness of the front suspension are investigated respectively. Road tests are performed for the low floor city bus according to the state regulations for vehicle test including steady manoeuvre condition, open-loop transient handling, close-loop lane change, impulse road input riding and random road input riding. The simulations by the virtual prototyping are also performed accordingly. Through comparison between the test and simulation results it is verified that the present virtual prototyping is valid and accurate as well as that numerical predictions for handling and riding of the low floor city bus are in fairly good agreement with experimental observations.

Because of nonlinearities of the air springs, the optimization of the air suspension parameters is more difficult than that of ordinary suspensions. Based on the test static load characteristics of air spring, the variety of the nonlinear stiffness and effective area of air spring are studied. The conclusion can be made that the effective area is unchangable following the inner pressure. At the mean time, by the analysis of the stiffness characteristics of air spring at the design height, it is shows that there exist linear corelation between the stiffness and inner pressure. According the above analysis, an effective method for the parameters design and match of air suspension is proposed. Firstly, an ordinary spring which stiffness is set as the air spring stiffness at the design height is used in the virtual prototyping. Then the parameters of the suspension can be optimized and designed according to the arithmetic that is used by constant stiffness suspension. And then, the air spring load characteristics should be calculated by the optimal parameters. The guide arm construction should be allocated carefully because of its large influence on the kinematics and dynamics of the suspension. The location of the transverse arm can change the steady handling characteristics of the full bus according to the simulation research based on the full bus digital model. And the further

FOREWORD

optimal research has been performed according to the variable of the stiffness of the air spring. The simulation and analysis is also performed by the low floor city bus virtual prototyping and the results verified the optimal method.

目 录

前言

FOREWORD

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 基于虚拟样机的车辆与悬架设计模式	2
1.3 多体系统动力学概述	8
1.4 空气悬架研究现状	15
1.5 本书主要内容	17
第 2 章 柔性部件柔体模型的建立	20
2.1 多柔体系统动力学理论	20
2.2 横向稳定杆的柔体模型	27
2.3 空气悬架导向机构推力杆的柔体模型	34
2.4 小结	37
第 3 章 独立悬架系统运动学和动力学特性研究	38
3.1 系统动力学方程	39
3.2 双横臂独立悬架多刚体模型及刚弹耦合模型	46
3.3 独立悬架运动学分析	53
3.4 双横臂独立悬架动刚度特性研究	57
3.5 小结	63

第 4 章 城市客车操稳性与平顺性仿真及试验研究	65
4.1 低地板城市客车整车虚拟样机开发	66
4.2 虚拟样机参数准备	71
4.3 低地板城市客车路面试验准备	77
4.4 低地板城市客车操稳性仿真与试验	79
4.5 低地板城市客车平顺性仿真与试验	92
4.6 小结	96
第 5 章 基于整车虚拟样机的空气悬架参数优化	98
5.1 空气弹簧的刚度特性	99
5.2 基于平顺性的空气悬架参数优选	105
5.3 空气悬架导向机构参数优化	109
5.4 小结	112
第 6 章 总结	114
参考文献	116

第 1 章 绪 论

1.1 概述

悬架系统是车辆重要的总成,由弹性元件、导向机构和减振器及横向稳定装置组成,把车架与车轴弹性地连接起来。悬架系统的主要任务是传递作用在车轮与车架之间的一切力和力矩,并缓和由不平路面对车身的冲击载荷,衰减由此引起的承载系统的振动,以保证汽车平顺地行驶。

空气弹簧作为悬架弹性元件的一种,被广泛使用到各种车辆悬架中,国外高级大客车几乎全部使用空气悬架。近年来,随着汽车技术的发展及国外空气悬架的引进,部分国内客车制造企业开始研究和采用空气悬架,如沈阳飞机汽车制造厂、北方汽车制造厂、厦门金龙联合汽车公司、亚星客车集团公司和丹东汽车制造厂等。由于空气悬架具有非线性刚度特性和相对复杂的导向传力机构,增加了空气悬架设计和匹配的难度。随着数学、力学、计算机信息科学等学科的发展而逐步完善起来的多体系统动力学和基于多体理论的数字化虚拟样机技术,为解决汽车悬架及整车的分析、设计和优化问题提供了有力的工具。

传统的车辆系统开发模式是基于物理样机的“设计—试验—设计”过程,已有文献^[1]表明:有 50%~80%的产品及其相关成本取决于设计过程,通常有 1/4 以上的开发时间耗费在物理模型和样机的制造上。显然,在激烈竞争的市场背景下,基于实际样机的设计验证过程严重地制约了产品质量的提高、成本的降低以及市场份额的占有。

虚拟样机技术是一门综合多学科的技术。该技术以机械系统运动学、动力学和控制理论为核心,加上成熟的三维计算机图形技术和基于图形的用户界面技术,将分散的零部件设计和分析技术(如零部件的 CAD 和 Flex 有限元分析)集成在一起,提供一个全新研发机械产品的设计方法。它通过

设计中的反馈信息不断地改进设计,保证产品寻优开发过程顺利进行。虚拟样机技术可使设计人员在各种虚拟环境中真实地模拟系统的工作情况,快速分析多种设计方案;可以帮助设计人员完成无数次物理样机无法进行的仿真试验,直至获得系统的优化设计方案;此外,对于物理样机来说,它还是分析危险工况的最佳手段,如越野车辆的抗侧倾试验等。虚拟样机技术不但可以用于系统方案的论证及评估,而且可以用于产品的概念设计阶段、设计细化阶段、试验规划阶段以及工作状态再现等的全过程;并且可以在设计的早期及时发现潜在的问题。虚拟样机技术是提高产品质量、缩短产品开发周期、降低产品开发成本最有效的途径,是解决车辆与悬架设计问题的强而有力的工具和手段。

1.2 基于虚拟样机的车辆与悬架设计模式

1.2.1 基于虚拟样机的产品开发概念

虚拟样机技术是集信息技术、仿真技术、计算机技术于一体,使人们能够在基于虚拟现实的基础上,运用高速计算机与系统动力学、弹塑性力学、系统工程学、计算机可视化等技术,构造出一个能模拟现实系统的虚拟样机的建造与 CAE 分析环境。

如图 1-1 所示,同传统的基于物理样机的设计方法相比,虚拟样机设计方法具有以下特点:

(1) 全新的研发模式。传统的研发方法从设计到生产是一个串行过程,这种方法存在很多的弊端。而虚拟样机技术真正地实现了系统角度的产品优化,它基于并行工程,使产品的概念设计阶段就可以迅速地分析、比较多种设计方案,确定影响性能的敏感参数,并通过可视化技术设计产品、预测产品在真实工况下的特征以及所具有的响应,直至获得最优工作性能。

(2) 更低的研发成本、更短的研发周期、更高的产品质量。采用虚拟样机设计方法有助于减少或摆脱对物理样机的依赖。通过计算机技术建立产

品的数字化模型(即虚拟样机),可以完成许多次物理样机无法进行的(成本和时间条件不允许)虚拟试验,从而可改进或优化设计方案。因此,不但减少了物理样机的数量,而且缩短了研发周期,提高了产品质量。

(3) 虚拟样机技术是实现动态联盟(Virtual Company)的重要手段。目前世界范围内广泛地接受了动态联盟的概念,即为了适应快速变化的全球市场,克服单个企业资源的局限性,出现了在一定时间内,通过 Internet(或 Intranet)临时缔结成的一种虚拟企业。为实现并行设计和制造,参盟企业之间产品信息的敏捷交流尤显重要,虚拟样机是一种数字化模型,通过网络输送产品信息,具有传递快速、反馈及时的特点,进而使动态联盟的活动具有高度并行性。

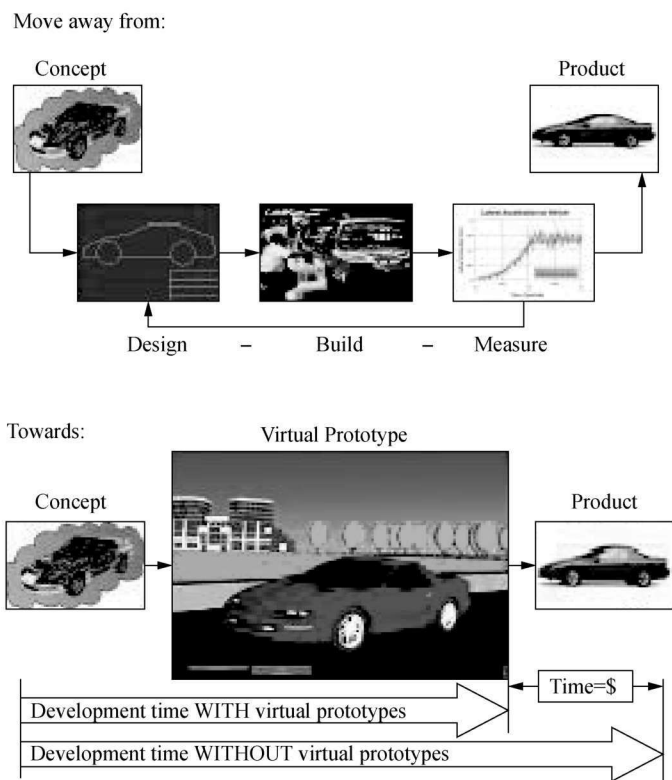


图 1-1 从传统开发手段到基于虚拟样机技术的产品开发

1.2.2 虚拟样机的构建过程

车辆系统虚拟样机的构建一般经历以下几个过程^[2],如图 1-2 所示。

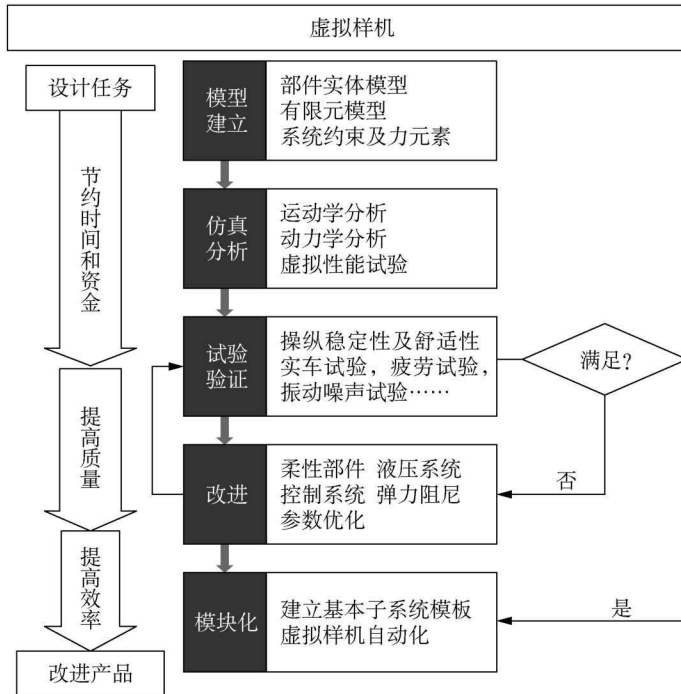


图 1-2 虚拟样机的构建过程

1. 模型建立

实际车辆系统的多体动力学分析模型的建立,包含的内容是非常丰富的:首先建立单个零部件的模型,包括刚体零部件的 CAD 模型、柔性体零部件的有限元模型;然后利用所建的零部件模型,施加相互之间的约束,建立各个子系统模型;子系统模型按照一定的装配关系组合在一起,得到整车系统的仿真分析模型。而且,模型的建立并不是一次成功的,随设计的进程而不断地改进。在最初的概念设计阶段,所建立的系统模型往往比较简单,但求能够反映基本的设计要求,且系统的动力学性能是按照理想的设计数据

曲线来匹配,而不考虑实际车辆系统能达到的性能数据。举例来说,设计车辆悬架系统时,在初始阶段,悬架系统的虚拟样机模型仅仅包含整个车身和一系列体现设计要求的车身与车轮之间运动关系的理想数据曲线,暂不考虑悬架的具体结构形式;在后期的模型完善时,要选择悬架的具体结构形式,并优化悬架系统结构中各零部件的物理和几何参数,使之尽可能符合设计的要求。

2. 仿真分析

对实际的样车而言,性能的测试一般包含室内试验和道路试验。同样,虚拟样机的仿真分析也要完成相同的功能,针对室内测试,需要构建虚拟测试试验台;路面试验,要构建虚拟试验场地和跑道。虚拟样机的仿真分析只有与实际试验紧密配合,才能充分有效地发挥数字化功能样机技术的作用。

在虚拟样机开发的过程中,试验和仿真是即时进行的,而且在不同的开发阶段,内容和要求也是不一样的。

(1) 准备阶段:零部件的测试试验,为整个系统的虚拟样机提供准确的零部件物理和几何特征参数;参考车辆的基本性能试验,为虚拟样机的设计和开发过程提供参考数据。

(2) 概念设计阶段:按照车辆试验标准,进行基本性能的仿真分析,验证系统模型的基本参数和动力学性能参数。

一旦虚拟样机得到初步验证,样机参数的数值就开始趋于明朗。大量的系统或子系统的验证、零部件的选择以及性能参数的选择都可以通过仿真进行。

仿真分析是功能性虚拟样机技术的重要组成部分,同时,在不同的开发阶段,还要进行必要的物理样机试验来验证模型的改进、测试零部件或产品的结构等。

3. 试验验证

设计者能够根据虚拟样机仿真分析所提供的大量信息来快速做出正确决定的前提是这些信息必须能够真实地反映设计车辆的实际动力学性能,这就要求对系统的虚拟样机以及为建立虚拟样机而进行的假设进行严格的

验证。典型的验证过程是首先对虚拟样机和参考车辆进行相同条件的试验,从而得到基本的性能参数;比较试验结果和仿真结果,标出其中有差异的地方,通过对虚拟样机进行灵敏度分析,找出设计参数中对性能影响大而且与试验结果不一致者;通过经验和计算机优化技术来改变这些参数,直至得到满意的结果。

4. 改进

对虚拟样机的改进包括两部分:提高模型的精度和完善产品设计。下面分别介绍。

随产品的设计进程的发展,越来越多的系统功能要在虚拟样机中得以体现,得到细化。随要求的提高,模型会变得越来越精细,越来越复杂。举例来说,对于动力系统的设计,在最初阶段,多刚体模型的精度足以有效地处理速度、布置空间和发动机能量输出之间的关系,可以有效地进行驱动系统拓扑结构的选择和性能参数的设计;随开发过程的深入,要考虑噪声、舒适性和振动等因素,多刚体模型显然已不能满足要求,需进一步改进,例如考虑部件的柔性、添加液压系统以及引入控制系统的模型等。虚拟样机的模型必须能够适应各个子系统不同复杂程度和精度的要求。

虚拟样机经过验证,且能与各子系统有效的配合后,并不意味着任务的完成,还要对样机模型和子系统模型从设计原理上进行完善,在物理样机功能试验的基础上,进一步改进零部件的设计参数、系统的拓扑结构以及制造公差等。

5. 模块化

以上过程可以有效降低产品开发费用,然而要达到同时减少开发时间的目的,还必须做到虚拟样机子系统建模的模块化。要达到虚拟样机模块化的程度,并不那么容易,它需要设计工程师、开发工程师、分析工程师、试验工程师等所有环节工作人员的密切配合。当然,模块化的回报也是巨大的。

1.2.3 虚拟样机技术的应用

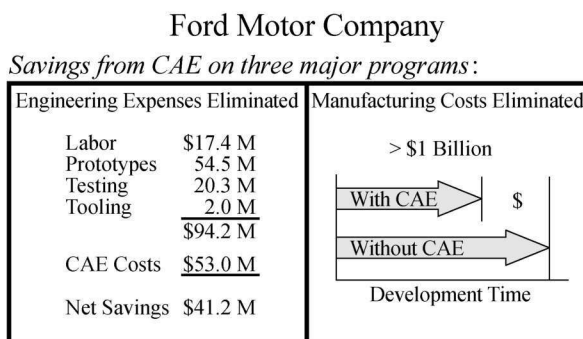
产品的虚拟样机开发起源于 20 世纪 90 年代初波音飞机公司最先进客

机波音 777 飞机的开发。波音公司在计算机上完成了波音 777 飞机的整机设计、零部件设计和测试、整机装配以及各种环境下的试飞,使开发周期从过去 9 年缩短到 4.5 年,开创了数字化设计生产的新时代,是近年来引起科技界、企业界瞩目的一次重大突破。SGI 计算机系统使波音公司成功地建立了波音 777 飞机的虚拟样机,使设计师、工程师们能穿行于这架虚拟飞机中,审视飞机的各项设计。波音 777 飞机由 300 万个零件组成,计算机系统能够调出其中任何一个零件,进行修改设计。这不但使研发周期大大缩短、研发成本大大降低,而且确保了最终产品一次拼装成功。

国外虚拟样机技术的商品化过程已经完成并得到广泛地应用,应用领域从汽车制造业、工程机械、航空航天业、造船业、机械电子工业、国防工业、通用机械到人机工程学、生物力学、医学以及工程咨询等很多方面。美国《21 世纪制造企业的战略》特别强调指出,到 2006 年实现汽车工业敏捷生产/虚拟工程设想方案,实现对全车设计和制造工艺进行虚拟设计与虚拟制造,将开发周期由原来的 40 个月缩短到 4 个月。目前世界各大汽车公司都在采用虚拟样机技术提升产品竞争力。

欧美和日本的汽车公司在利用虚拟样机开发技术方面起步较早,已经具备较高水平的数字化开发能力:能够在开发阶段对汽车的各个分系统实现数字化设计,已经开发出数字化样车,实现了相当水平的汽车产品的虚拟设计和分析能力。例如福特汽车公司采用数字化虚拟产品开发和制造技术使其汽车开发周期由 36 个月缩短至 24 个月,图 1-3 是福特公司于 1996 年 6 月 4 日公布的一组数据,数据显示由于在 3 款新车型的开发项目中采用虚拟样机自动化技术,开发成本节省 4 000 万美元,由于缩短了开发周期,制造成本节省 1 亿多美元;通用汽车公司 1997 年利用 UG II 软件建成了第一个完全数字化的机车样机模型,并围绕这个数字模型并行地进行产品设计、分析、制造、模具/夹具工装设计和可维修性设计;日产汽车公司 1998 年投资 1 亿美元用于数字化汽车样车的开发;韩国和我国台湾在虚拟样机开发技术的利用方面也走在了前面,已经具备了一定的数字化开发能力,能够对汽车的各个分系统实现一定程度的数字化设计。

虚拟样机技术在国内的应用也已经展开。1996 年 3 月,航天部上海航



Source: Investigating Virtual Product Development Conference
June 4, 1996

图 1-3 福特汽车公司公布的数据

天局第八零五研究所,利用虚拟样机分析软件 ADAMS,完成了国防科工委项目“空间站外翻式对接机构”的动力学仿真研究。该项目的主要目的是在空间站开发之前,预测空间站外翻式对接机构的性能,论证外翻式对接机构的结构设计是否合理,通过三维动画形象地演示对接过程。经过 8 个月的努力,第八零五研究所完成了外翻式对接机构虚拟样机的开发工作,课题取得了圆满成功。

虚拟样机技术在国内汽车制造业内引起了很大的关注,许多系统或子系统的性能研究、系统改进及优化等课题都是用虚拟样机技术来进行的。然而,真正如福特、宝马等公司那样进行新产品开发的还没有。

1.3 多体系统动力学概述

多体系统动力学是近 30 年来在经典力学基础上发展起来的专门解决机械系统的运动学和动力学问题的新的科学分支,包括多刚体系统动力学和多柔体系统动力学,与运动生物力学、航天器控制、机器人学、车辆设计、机械动力学等领域密切相关且起着重要作用。

1.3.1 多体系统动力学的发展

20 世纪 60 年代初,宇航及机械领域的一些学者们率先开始了多刚体力