

摘要

随着社会的发展和生活水平的提高，人们对汽车的性能要求也越来越高。汽车悬架是影响汽车性能的重要部件之一，悬架性能的好坏直接影响着汽车行驶的平顺性和操纵稳定性，悬架的性能取决于悬架的开发设计水平，传统的设计方法周期长、成本高。利用电子样机技术对汽车悬架进行动态仿真分析是一种有效的方法。

本文首先对汽车的不等臂式双横臂独立悬架的运动特点进行了分析，针对汽车的不等臂式双横臂独立悬架的运动特点及结构组成，制定了建立汽车悬架的简化建模的方案，应用 **CATIA** 软件的 **Part Design** 模块，建立了汽车悬架的三维立体简化模型。在此基础之上，通过对样机模型施加合理的运动副和驱动命令，建立了简化的运动学仿真模型；应用电子样机模块对悬架的运动学模型进行了动态仿真分析，创建了悬架关键零部件的包络体；并且对整车悬架样机模型进行了静态干涉分析并实现了部件的优化。

本文基于软件 **CATIA** 的电子样机模块 **DMN** 创建的汽车悬架动态仿真分析过程，能够较好地仿真汽车悬架的运动状态，可以使人较形象的了解悬架的运动过程。在分析悬架动态干涉时创建的汽车轮胎包络体，为下一步汽车轮罩的装配设计提供了参考和依据。

关键词：悬架 电子样机技术 虚拟设计 虚拟装配

ABSTRACT

With the development of the society and the improvement of the life, people's demand for ride performance is increasing. Automotive suspension is one of the important components effecting automotive performance, and automotive suspension performances directly determine the ride comfort and the stability. Suspension performances relate to the R&D design for suspension nearly. The periods of conventional design method is long, and the cost is high, however simulation experiment through electronic prototyping technology is a effective method to improve the state at present.

The paper at first investigates particularly movement trait of independence automotive suspension, then based on the characteristic and structure it establishes terse model project about automotive suspension. With Part Design model of CATIA software, it designs simplify the automotive suspension and establishes 3-D model, and sets up kinematic simulation model. Use the module of electronic prototype of a machine to carry on dynamic emulation analysis to the kinematics model of the suspension, have established the net body of the suspension key parts. The static interfere analysis of the whole car suspension model has been done to optimize the parts.

This paper based on software CATIA electronic prototype of a machine module DMN established the suspension dynamic simulation analysis process, can simulate the automobile suspension motion state well, and the movement process of the suspension . The automobile tire net body that established while analyzing the dynamic interfere of suspension , has offered reference and basis for the assembly and design of the automobile wheel covers in next step.

Keywords: suspension; electronic prototyping technology; virtual design; virtual assemblage

重庆交通大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：王淑芳

日期：2007年6月6日

重庆交通大学学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权重庆交通学院可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

学位论文作者签名：王淑芳

日期：2007年6月6日

指导教师签名：林晓

日期：2007年6月6日

第一章 绪 论

1.1 本论文的研究背景和研究意义

自从计算机技术应用到机械行业中来以后，每一项计算机软件的开发和改善，无一不推动着机械行业在深度和广度上的迅速提高，同时社会生产力也得到了不同程度的发展。相应的，计算机软件在汽车行业上的应用，也使的汽车行业在产品开发，生产手段等方面得到了日新月异的改进。汽车悬架产品的开发设计是从传统的手工制图向 CAD 建模方向发展，汽车悬架的产品开发过程是从概念—设计—试制—修正这样一个循环往复的繁琐过程向生动逼真的电子样机技术发展的。按照传统的设计方法，只能在汽车悬架产品设计的最后阶段，甚至是等样车生产出来之后，才能发现汽车悬架的运动是否合乎设计者和客户的实际要求，然后再进行改进。这样一来，不可避免地会造成不必要的人力、物力、财力的巨大浪费。在科学技术是第一生产力的今天，先进技术的应用是决定产品生存淘汰的决定性因素。怎样才能在剧烈的竞争中立于不败之地，产品开发周期的长短是个关键。现在的汽车悬架产品品种多，结构复杂，应用面广。汽车在国民经济建设中作用巨大，并且在交通运输中也占有很大一部分市场份额；随着我国经济的快速发展和公路建设的不断提高，这种发展趋势将会越来越快。当然，广大用户对汽车的性能要求和对汽车的外形设计将会越来越高。因此在汽车悬架的设计上、制造上需要采用更加先进的计算机辅助设计软件才能提高悬架的性能，才会在激烈的市场竞争中立于不败之地^[1]。由于当今市场竞争日益激烈与科学技术进步的加快，使得产品开发的技术含量与复杂程度日益增加，同时也由于产品的生命周期不断地缩短，因此，缩短新产品开发的周期、提高新产品开发的技术水平、降低新产品开发的成本，并保证上市后产品的上市周期，是当前新产品开发面临的需要解决的重要问题。

汽车机械系统中存在着各种各样复杂的运动机构^[2]，其中汽车悬架系统作为影响汽车性能的重要部件，它既是汽车的运动部件，也是汽车的重要总成之一，其参数的选取和各元件的布置对汽车的行驶平顺性、稳定性、通过性及燃料经济性等多种使用性能都有重要的影响。如何对其进行虚拟的运动创建、仿真及检验是现在悬架设计的重点和难点。在 CATIA 软件的电子样机 DMU 模块下就可以将这变为现实；在这一模块下，使产品试制之前就可以在计算机上试装，及时发现设计过程中产生的各系统之间或系统内部的静态或动态干涉，进行行驶系、转向系、传动系的动力总成及相应零部件性能以及操纵稳定性、行驶平顺性、制动稳定性

等整车性能的仿真试验，此外，还可以能够用于电子样车、装配工艺分析、产品展示等。由于轿车的使用性能要求较高，并且具有较为复杂多变的运动工况。如果采用传统的设计方法对悬架系统进行设计，很难将一些设计中潜在的问题解决，而采用电子样机技术，就可以实现对悬架系统的预先设计进行准确的分析校核，从而进一步的发现是否存在干涉问题。运用 **CATIA** 软件的电子样机空间分析模块就可以实现对悬架系统的三维的动态干涉分析，我们可以充分发挥三维模型直观、准确、快速的优势。在 **CATIA** 软件的 DMU 模块中，可以获得运动部件的包络体，即运动部件的最大运动范围。形成悬架上下摆臂运动的包络体后，可以测量其与周围部件的间隙，分析是否符合要求及干涉。DMU 的干涉分析功能主要适用于对装配模型进行碰撞、接触分析和间隙分析，并判断元件之间的干涉程度。根据需要，还可以进行不同水平的干涉分析，可以从简单的干涉探测到详细的碰撞、接触和间隙分析。

本论文就是充分发挥了三维软件的电子样机功能，在软件 **CATIA** 的机械设计中的装配平台上导入并创建了汽车悬架的运动机构模型，也就是需要仿真的样机。然后在空间分析模块下，对创建样机进行了干涉分析，进一步验证了机构的合理性，并对实践上不合理的地方进行改进。在本论文中，就是利用 **CATIA** 的这一功能对汽车悬架进行运动仿真和干涉分析的。

电子样机技术作为一项新兴的计算机软件技术，在汽车行业上的运用越来越受到该行业人士的重视。电子样机技术的运用是缩短车辆研发周期，降低开发成本，提高产品设计和生产质量的一种重要手段。电子样机技术是利用系统仿真的概念，从传统的设计—试验—改进设计到再试验—再设计的设计理念转化成设计—仿真—试验的设计思想。因为电子样机技术可以部分的代替样机进行动态仿真分析，所以这项技术的应用可以使的一些主要问题在概念产品的初级阶段就可以很好的得到解决。电子样机技术的应用能把工程设计人员从繁重的设计试制中解放出来，从而设计人员可以将主要精力应用到具有创造性的工作中来。总的说来，应用电子样机技术建立的动画模型仿真改善了设计人员的工作状况，减少了产品的研究开发周期，提高了技术人员的工作效率，降低了产品的工作成本，并且，还可以很好地向客户展现产品样本。**CATIA** 软件中的模块 DMU (Digital Mockup) 通过自动化的命令和可视化的文件，使用户可以大大提高工作效率。借助于其他电子样机产品的集成，使技术人员对样机的审核及仿真成为可能^[3]。

本文对电子样机技术在汽车悬架仿真分析上的实际应用作出了探索，在分析悬架运动时应用了一种新的方法^[4]。电子样机技术这一方法在汽车悬架动态仿真中的应用，对汽车工业技术水平的提高和降低汽车研发成本、提高企业在竞争中的

地位具有重要的理论和实际的意义^[5]。

1.2 汽车悬架动态仿真技术的发展现状

完美是人类永恒的追求，人类为了乘坐舒适，在汽车上加有了悬架。1776年马车用的叶片弹簧取得了专利，并且一直使用到20世纪30年代，叶片弹簧才逐渐被螺旋弹簧所代替，汽车出现后，随着对悬架深入的研究，相继出现了扭杆弹簧、气体弹簧、橡胶弹簧、钢板弹簧等弹性元件。1934年世界上出现了第一个有螺旋弹簧组成的被动悬架^[6]。被动悬架的参数经过经验或者优化设计来取定，各参数在行使过程中保持不变。它是一系列路况的折中，很难适应各种复杂的路况，减震的效果较差，为了克服这种缺陷，产生了非线性刚度弹簧。被动悬架是传统的机械结构，刚度和阻尼都是不可调的，依照随机振动理论，过去只能保证在良好的路面下才能够较好的行使。但是它的理论成熟、结构简单、性能可靠，成本相对低廉且不需要额外能量，因而应用非常广泛^[7]。

近年来，随着悬架产品复杂性的不断增长，以及企业间竞争的日趋激烈，传统的悬架产品设计方法已经很难满足企业当前生存和发展的需要。为了能在竞争中处于有利位置，实现悬架产品的动态仿真分析势在必行。悬架产品仿真分析过程本质上是一个对信息进行采集、传递、加工处理的过程，其中包含了两种重要的活动：悬架样机动态仿真活动和仿真后的优化活动。因此悬架产品运动分析也可以看作是一个悬架样机仿真活动和样机优化活动彼此交织相互作用的过程。仿真分析活动推动信息流程向前演进，而样机仿真分析则是验证仿真结果的重要手段，二者关系密不可分。随着技术的发展，悬架样机仿真的重要性正在不断加强。到目前为止悬架电子样机仿真技术的发展历程可以大体上划分为以下三个阶段^[8]。

(1) CAx 工具的广泛应用。自 20 世纪 50 年代开始，各种 CAD/CAM 工具开始出现并逐步应用到制造业中。这些工具的应用表明悬架制造业已经开始利用现代信息技术来改进传统的悬架产品设计过程，标志着数字化设计的开始。

(2) 并行工程思想的提出与推行。20世纪80年代后期提出的并行工程是一种新的指导悬架产品开发的思路，是在现代信息技术的支持下，对传统的悬架产品开发方式的根本性改进。PDM（产品数据管理）技术及 DFX 如（DFM、DFA 等）技术是并行工程思想在悬架产品设计阶段的具体体现。

(3) 电子样机技术。随着技术的不断进步，仿真在悬架产品设计过程中的应用变得越来越广泛而深刻，由原先的局部应用（单领域、单点）逐步扩展到系统应用（多领域、全生命周期），悬架电子样机技术正是这一发展趋势的典型代表。悬架电子样机技术是一种基于电子样机的数字化设计方法，是各领域 CAx/DFx 技术

的发展和延伸。悬架电子样机技术进一步融合先进建模/仿真技术、现代信息技术、先进设计制造技术和现代管理技术于一体，将这些技术应用于复杂产品全生命周期、全系统，并对它们进行综合管理。与传统悬架产品设计技术相比，悬架电子样机技术强调系统的观点、涉及产品全生命周期、支持对产品的全方位测试、分析与评估、强调不同领域的虚拟化的协同设计。悬架电子样机技术充分体现了如下图 1.1 所示的产品设计过程，全面突出了仿真的重要性。

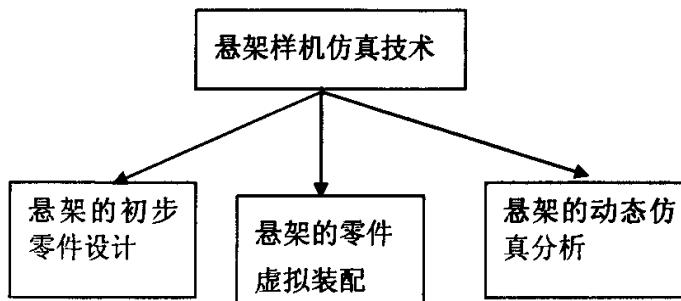


图 1.1 电子样机技术产品设计过程

Fig1.1 Technological products design process of the electronic prototype of a machine

悬架样机仿真技术的实施是一个渐进的过程，其中涉及到许多相关技术，如总体技术、多领域协同建模/仿真/评估技术、数据/过程管理技术、支撑框架技术等等。现在汽车悬架电子样机技术的发展过程主要包括如下三种技术^[9]：

1. 信息管理集成技术

汽车悬架样机开发过程中涉及到大量的人员、工具、数据/模型、项目/流程，对这些元素进行合理的组织和管理，使其构成一个高效的系统，实现整个开发过程中的信息集成和过程集成，是优质成功的必要条件。通过统一管理的集成化、一体化、数字化就能够大大缩短设计开发周期、实现最新悬架设计理论和应用技术的集成和应用、保证设计过程的一体化，从而推动悬架产品在理论方面的研究进展和在实际应用方面走向产业化的进程。

2. 协同仿真技术

协同仿真技术将面向不同学科的仿真工具结合起来构成统一的仿真系统，可以充分发挥仿真工具各自的优势，同时还可以加强不同领域开发人员之间的协调与合作。目前 HLA 规范已经成为协同仿真的重要国际标准。基于 HLA 的协同仿真技术也将会成为电子样机技术的研究热点之一。

3. 多学科设计优化技术（MDO）

悬架产品的设计优化问题可能包括多个优化目标和分属不同学科的约束条

件。现代的 MDO 技术为解决学科间的冲突,寻求系统的全局最优解提供了可行的技术途径。目前 MDO 技术在国外已经有了许多成功的案例,并出现了相关的商用软件,典型的如 Engineous 公司的 ISIGHT,国内关于 MDO 技术的研究和应用也已经展开。

纵观数字化设计技术的发展历程可以看出,虽然几十年来各种技术思想层出不穷,但时空两个方向上的协同始终是发展的主流。宏观上看,数字化设计的发展历程正相当于现代信息技术在产品设计领域中的应用由点发展为线,再由线发展为面的过程。仿真的广泛应用正在成为当前数字化设计技术发展的主要趋势。随着电子样机概念的提出,使得仿真技术的应用更加趋于协同化和系统化。开展关于电子样机及其关键技术的研究,必将提高企业的自主设计开发能力,推动企业的信息化进程。

目前,国内外应用电子样机仿真技术的成功用户很多。美国波音公司的波音 777 飞机是世界上首架以无图纸方式研发及制造的飞机,其设计、装配、性能评价及分析均采用了虚拟样机技术,这不但使研发周期大大缩短(其中制造周期缩短了 50%)、研发成本大大降低(如减少设计更改费用 94%),而且确保了最终产品一次性的成功。通用动力公司 1997 年建成了第一个全数字化机车虚拟样机,并行的进行了产品设计、分析、制造及夹具、模工具装设计和可维修性设计。日产汽车公司,利用虚拟样机进行概念设计、包装设计、覆盖件设计、整车仿真设计等。Caterpiller 公司采用了虚拟样机技术,从根本上改变了设计和试验步骤,实现了快速虚拟试验多种设计方案,从而使其产品成本降低,性能却更加优越。同样,John Deere 公司为了解决工程机械在高速行驶时的蛇形现象及在载下的自激振动问题,利用虚拟样机技术,不仅找到了原因,而且提出了改进方案,而且在虚拟样机上得到了验证,从而大大提高了产品的高速行驶性能和重载作业性能。美国海军的 NAVAIR/APL 项目,利用虚拟样机技术,实现多领域多学科的设计并行和协同,形成了虚拟样机技术,他们研究发现,协同虚拟样机技术不仅使产品的上市时间缩短,而且还使产品的成本减少了至少 20%。在我国的农业机械领域,虚拟样机技术也有应用,有人利用虚拟样机技术来实现甘蔗收割机的仿真分析,取得了良好的效果。

现在我国对 CATIA 软件的功能模块 DMU(Digital Mock-Up)在汽车方面的应用文献资料不是很多,对于应用 CATIA 软件的 DMU 动态仿真技术的具体应用,特别是在汽车悬架开发设计中的应用还较少。有关 DMU 动态仿真技术和汽车悬架动态仿真分析的文献资料有:保定长城华北汽车有限责任公司的刘斌等在《客车技术》上刊登的《CATIA 运动仿真在汽车设计中的应用》一文中,介绍了电子样机虚拟装配及运动仿真模型建立基本过程,根据电子虚拟装配及运动仿真特点,讨论了

动态仿真技术DMU在汽车总体设计中的应用^[10]。浙江大学的叶鸣强,王耘,胡树根在《基于虚拟样机技术的双横臂独立悬架振动仿真技术分析》一文中,分析了悬架系统的振动模型,通过对双横臂独立悬架做出合理的简化,建立了双横臂独立悬架的力学及虚拟样机模型,并在虚拟样机模块上进行仿真,在此基础上对前悬架的各个参数进行优化设计,使得悬架振动达到一个最优值^[11]。合肥工业大学的蒙艳枚,李双平等在《虚拟样机技术及其在创新产品开发中的应用》一文中论述了虚拟样机技术的概念和特点,探讨构建虚拟样机设计环境的基本思路,介绍了机械关键元件虚拟设计的方法及如何去建立机械设计、分析和评价专家系统,给出虚拟样机技术应用于新产品开发的一个实例^[12]。

1.3 本论文的主要研究内容和目标

本论文首先对电子样机技术进行了深入分析;然后,采用了CATIA软件中的电子样机模块,对不等臂式双横臂独立悬架进行了三维实体建模;再后,在CATIA软件的KIN(DMU Kinematics)电子样机平台上对悬架的样机模型施加合理的运动副和驱动命令,实现了用动画对四分之一悬架的样机模型进行仿真演示,从而可以非常形象的分析汽车独立悬架的运动特点;并且根据样机的运动情况来改进概念产品的优化装配,提高概念产品的实用能力;最后,本文还就悬架样机模型的运动仿真进一步对运动进行了动态干涉分析。本论文实现的主要目标如下:

1. 基于CATIA软件的电子样机模块建立整车悬架的样机模型。在本论文中只需建立汽车悬架的四分之一样机模型,然后再通过镜像实现整车悬架的样机模型。
2. 将建立的四分之一悬架的样机模型导入到KIN(DMU Kinematics)平台上,然后通过添加适当的运动副和驱动命令,实现了样机模型的运动仿真。通过创建的悬架运动仿真动画,可以很形象地了解悬架的运动特点。
3. 通过对悬架样机模型的动态仿真分析,可以进一步的分析悬架运动过程中的干涉情况,为下一步设计零部件及装配零部件提供了依据。在这里还需要建立轮胎、上下摆臂和弹性元件等各部件的包络体,有了部件的包络体,就可以在设计与其相关的部件时,对于确定其位置时有了参考。

图1.2是应用软件CATIA的电子样机模块DMU(Digital Mock-Up)进行悬架机构研究的内容逻辑图。

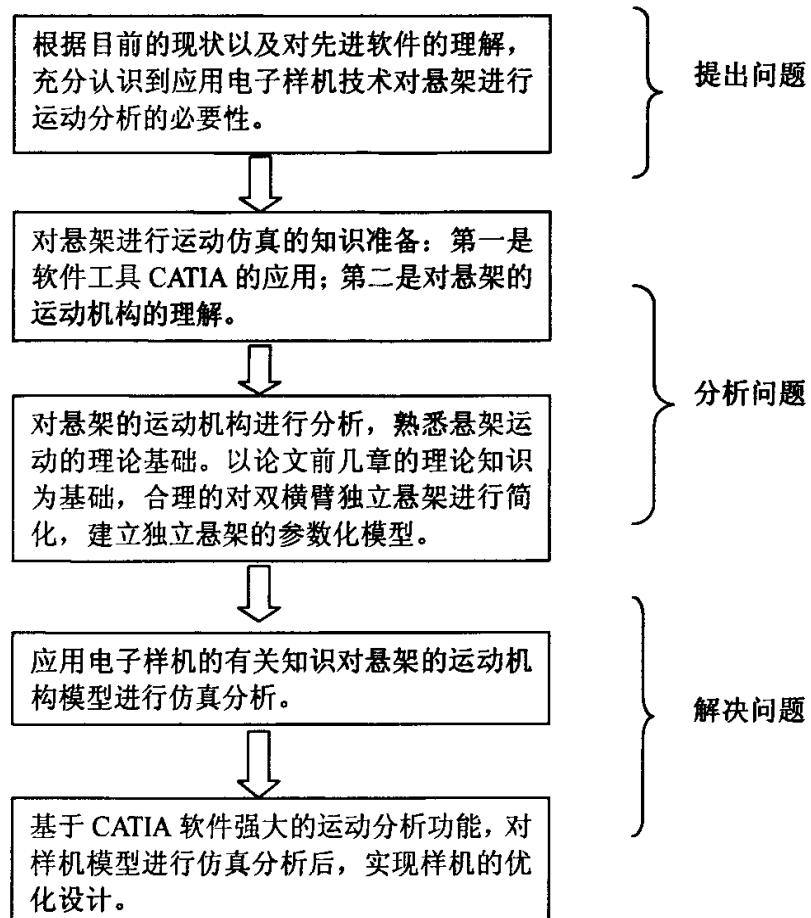


图 1.2 本论文的主要内容逻辑图

Fig 1.2 Logic picture of main content of this thesis

第二章 电子样机技术原理

电子样机技术又称虚拟样机技术、动态仿真技术，是国际上 20 世纪 80 年代随着计算机技术的发展而迅速发展起来的一项计算机辅助工程（CAE）技术。它是一种崭新的产品开发方法，是一种基于产品的计算机仿真模型的数字化设计方法，这些数字模型即我们所称得电子样机。电子样机将不同工程领域的开发模型结合在一起，它从外观、功能和行为上模拟真实产品，令设计者对产品的设计进度更加了解。机械系统动态仿真技术涉及到多体系统运动学与动力学建模理论及其技术实现，是基于先进的建模技术、多领域仿真技术、信息管理技术、交互式用户界面技术和虚拟现实技术的综合性应用技术^[13]。

机械系统动态仿真技术是在 CAX 等(如 CAD、CAE、CAM 等)的技术基础上的发展，它进一步融合信息技术、先进制造技术和先进仿真技术，将这些技术应用于复杂系统全生命周期、全系统，并对它们进行综合管理。传统的机械设计方法是“由下到上”，即从部件设计到整机设计，这种方式的弊端是过分注重细节而忽略了系统整体性能。设计人员借助于机械系统动态仿真技术，使设计过程先从整机开始，按照“由上至下”的顺序进行，从而可以减少代价昂贵的系统设计造成的无谓失误^[14]。

对机械系统建立的电子样机之后，设计者可以在虚拟环境中模拟系统的运动，得到系统的三维动态效果图，完成无数次物理样机无法进行（成本和时间条件不允许）的仿真试验，并通过反复修改系统模型，进行不同设计方案的仿真试验，这种在不浪费制造和试验物理样机所需时间和经费的前提下，就可获得最优的设计方案。运用这一技术，从而可以大大简化机械产品的开发过程，大幅度缩短产品开发周期，大量减少产品开发费用和成本，明显提高产品质量，提高产品的性能，获得最优化和创新的设计产品^[15]。

2.1 电子样机技术的概念

从国内外对电子样机技术 (Virtual Prototyping, VP)的研究可以看出，电子样机技术（又叫虚拟样机技术）的概念还处于发展的阶段，在不同应用领域中存在不同定义。国内外学者对虚拟样机技术的定义大同小异，下面是几种有代表性的论述^[16]。

(1) 电子样机技术是将 CAD 建模技术、计算机支持的协同工作(CSCW)技术、用户界面设计、基于知识的推理技术、设计过程管理和文档化技术、虚拟现实技术集成起来，形成一个基于计算机、桌面化的分布式环境以支持产品设计过

程中的并行工程方法。

(2) 电子样机的概念与集成化产品和加工过程开发 (Integrated Product and Process Development, 简称 IPPD) 是分不开的。IPPD 是一个管理过程, 这个过程将产品概念开发到生产支持的所有活动集成在一起, 对产品及其制造和支持过程进行优化, 以满足性能和费用目标。IPPD 的核心是虚拟样机, 而虚拟样机技术必须依赖 IPPD 才能实现;

(3) 电子样机技术就是在建立第一台物理样机之前, 设计师利用计算机技术建立机械系统的数学模型, 进行仿真分析并从图形方式显示该系统在真实工程条件下的各种特性, 从而修改并得到最优设计方案的技术;

(4) 电子样机是一种计算机模型, 它能够反映实际产品的特性, 包括外观、间关系以及运动学和动力学特性。借助于这项技术, 设计师可以在计算机上建立机械系统模型, 伴之以三维可视化处理, 模拟在真实环境下系统的运动和动力特性并根据仿真结果精简和优化系统;

(5) 电子样机技术利用虚拟环境在可视化方面的优势以及可交互式探索虚拟物体功能, 对产品进行几何、功能、制造等许多方面交互的建模与分析。它在 CAD 模型的基础上, 把虚拟技术与仿真方法相结合, 为产品的研发提供了一个全新的设计方法。

(6) 电子样机也叫数字样机, 功能化样机。它能够让工程设计队伍在提交物理样机之前, 就建造起他们的系统方案, 对其进行测试、审核、改进。它可以帮助用户验证系统性能、原理等, 还可以帮助用户快速可视化排出系统设计的不合理因素。虚拟样机可以充分利用用户已有专业经验, 引导研发人员做出重大决策。当在虚拟样机上完成功能验证之后, 用户还可以通过增加各种功能进行各种设计 (包括试验设备), 另外, 功能化虚拟样机还可以提升为产品性能样机, 进而进行产品的性能验证、性能设计与性能优化, 比如进行产品的寿命优化、动态力学特性优化、振动噪声优化等等。

综上所述, 电子样机有如下特点^[17]:

- a) 设计变更的分析比物理样机试验更快、更节约成本
- b) 在开发流程的每个阶段获得更完善的设计信息从而降低风险
- c) 分析大量的设计方案获得整个系统的优化性能从而提高质量
- d) 方便地改变各种分析要素而无须更改实验仪器、设备以及实验程序
- e) 在安全的环境下工作, 不必担心关键数据丢失或由于恶劣环境造成的设备失效。
- f) 对于软件 CATIA 的 DMU 来说, 还可以形成自己独有的知识工程及专家系统, 可以方便操纵和管理。

2.2 电子样机技术的基础：

传统的产品开发通常分为 4 个阶段：产品设计、试制、制造样机和产品生产。(1)产品设计阶段，包括方案设计、结构设计和零部件设计；(2)实验室试验阶段，主要是对关键零部件的工作进行探索性的研究；(3)制造物理样机阶段，主要是根据设计做出实物样机，以检验设计的合理性，此时要把样机中一些部件或结构做成可调的，必要时还需要做多个零件来替换；(4)产品生产阶段。可以看出传统的产品开发周期长、消耗大、成本高。有明显的局限性，所以不能适应现代化制造业中要求柔性化、快捷及高质量的特点和要求：为从根本改变这种局面，近年来在产品的设计开发中出现了一个新的研究领域——电子样机技术^[18]。

电子样机技术是一种基于智能设计技术、并行工程、仿真工程及网络技术的先进开发技术，它以计算机仿真和建模技术为支持，利用虚拟产品模型，在产品实际加工之前对产品的性能、行为、功能和产品的可制造性进行预测，从而对设计方案进行评估和优化，以达到产品生产的最优目标。虚拟样机技术的发展有赖于以下几项技术的发展和进步。(1)智能设计技术的出现是产品设计历史上一个里程碑。它在很大程度上缩短了产品设计的周期，减少了设计人员的工作量。但现有的CAD技术注重于外形细节设计行为，却忽略了产品概念信息的描述，实际上，设计人员总是先考虑产品的功能，然后才设计出产品的外形。因此，对虚拟样机技术来说产品描述应是超越几何性的。由于虚拟样机技术对概念设计的要求，智能设计技术需要将用于概念设计的分析工具(如有限元分析、快速原型等)、计算机辅助概念设计和CAD技术有机地集成起来，支持产品几何定形前的功能规划和计算。通过分析这种幕后的功能计算，虚拟样机系统指导设计者怎样将几何形状转化为易于装配的、满足功能要求的、具有合适工艺的设计图形。(2)并行工程。并行工程是集成各种技术，并行设计产品及相关过程的一种系统方法。同步实现设计、分析评估、制造、装配、核算和管理。它要求产品开发人员从一开始就考虑到产品整个生命周期的所有因素(质量、成本、工艺、结构、性能等)，且要求实现计算机网络环境下的协同工作并要实现同步的目标，其实质就是整个工作都要在一个共享的数据库下进行信息交互。(3)仿真工程。对于虚拟样机系统来说，必须有一套能有效支持可制造性分析的产品、工艺和生产系统模型。产品模型必须能够管理与制造加工有关的数据(如形位公差等)；工艺模型包括统计分析、计算机工艺仿真、制造数据库和制造规则库等；生产系统模型包括系统生产能力、生产特性的描述及系统动态行为和状态的描述。电子样机系统需要对上述模型进行数字化仿真和可视化，以对产品设计、工艺设计进行评估和优化。(4)网络技术。在网络上进行分布式设计与制造是虚拟企业的生产方式。利用分布式设计与制

造。可以实时地决定合作厂家。实现异地产品设计和制造，不仅节约了时间，而且由于分布节点之间的关系建立在一种全面合作和开放式体系的基础上，所以有利于设计、规划和处理问题^[19]。

2.3 电子样机技术的原理

2.3.1 电子样机技术的原理

电子样机技术是对产品真实化的计算机模拟，通过对样机的计算机模拟，能够满足各种各样的功能，电子样机技术主要指在计算机平台上，通过三维 CAD/CAE/CAM 软件，建立完整的产品数字化模型；组成电子样机的每个部件处理准确定义三维几何图形外，还赋予相互间的装配关系、技术关联、工艺、公差、人力资源、材料、制造资源、成本等信息；电子样机具有从产品设计、制造到产品维护各个阶段的所有功能，为产品和流程开发以及从产品概念设计到产品维护整个生命周期的信息交流和决策提供一个平台。同时，电子样机技术不仅仅是单纯的 3D 设计和装配，实际上，通过装配功能将三维模型装配在一起只是实现电子样机最基本的第一步。电子样机技术还具有下面的功能和特点^[20]：

1. 与 CAX 系统完全集成，并以“上下关联的设计”方式作业。提供强大的可视化手段，除了虚拟显示和多种浏览功能，还集成了 DMU 漫游和截面透视等先进功能。
2. 具备各种功能性检测手段。安装拆卸、机构运动、干涉检查、界面扫描等。
3. 具备产品结构的配置和信息交流功能。

由于电子样机技术加强了设计过程中最为关键的空间和尺寸控制之间的集成，在产品开发过程中不断对电子样机进行验证，缩短了产品开发周期，降低了研发成本。

总的说来，电子样机技术包括从产品的设计、产品的装配、产品的试验和产品的优化这一完整的生命周期过程。电子样机技术使人们在工程决策和过程决策的进行协同工作时，能够对任何复杂的模型进行内部观察、漫游、检查和模拟^[15]。CATIA V5 的电子样机功能有专门的模块组成，从产品造型，上下关联的设计环境，产品的功能分析、产品的浏览和干涉检查，信息交流，产品可维护性分析，支持虚拟现实技术的实施仿真，多 CAX 支持，产品结构管理等多方面提供了完整的电子样机功能，能够完成与物理样机一样的分析、模拟功能、并能进行更多的设计方案验证。

2.3.2 电子样机技术的内涵

需要应用电子样机技术来设计开发的产品，多数要受到安全性、可靠性、舒适性、美观性、可制造性及可维护性等多方面的制约。在虚拟设计环境下，利用

可视化的优势，把技术设计、部件装配、结构分析和性能优化融合在计算机虚拟现实环境中进行，综合考虑各种因素诸如运动约束和可接近性等特征，对产品几何尺寸、技术性能、生产和制造等方面进行交互式的快速建模与分析，生成的模型可被直接操纵与修改，数据可被反复利用^[21]。

2.3.3 电子样机工程的体系结构

电子样机工程系统的体系结构一般有以下结构组成：协同设计支撑平台、产品模型、虚拟样机(VP)和虚拟现实(VR)可视化环境四部分组成。其中协同设计支撑平台提供了一个协同设计环境，包括集成平台/框架、项目管理等工具。产品模型包括产品主模型和各子系统模型，产品主模型负责产品在系统层次上的设计与样机的外观、功能和性能的建模，如样机的动力学、运动学建模仿真。VP包括各领域 Cax/DFx 工具集，对样机外观、功能、性能及环境进行模拟仿真，并将生成的数据送入 VR 可视化环境，从外观、功能及在虚拟样机环境中的各种行为上展示电子样机。

电子样机技术的系统结构如图 2.1 所示。建立一个系统相关的模型，用户接口作为一个核心的组成部分，通过它可以有效地控制模型，还可以从哪里得到系统的一些重要信息。对于一个具体的应用实例来说，由于具体的应用目的不同，其系统结构可能有一些差别^[22]。

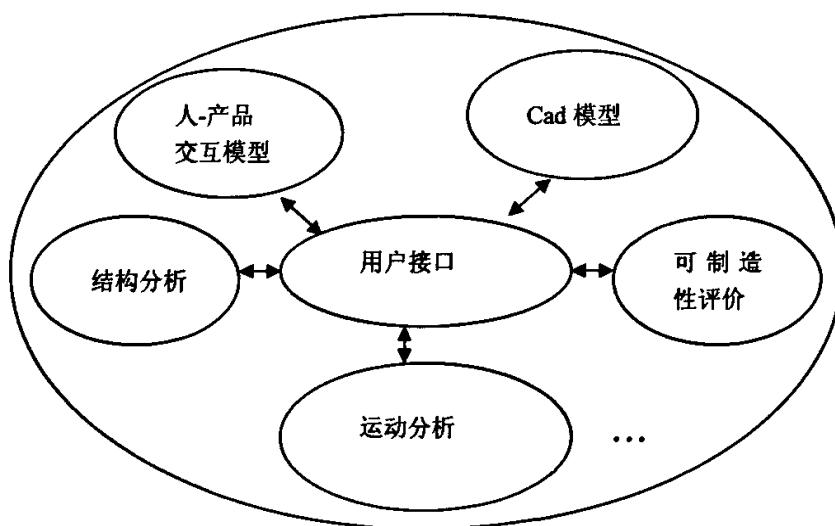


图 2.1 电子样机技术的系统结构

Fig2.1 Systematic structure of the technology of the electronic prototype of a machine

2.3.4 电子样机的开发流程

设计电子样机的过程实际上就是对上述各种先进技术相互支持、相互融合的过程。首先是进行机械设计：设计的原始数据来自设计要求；如干涉尺寸、装配环境等。当方案制定之后，设计师开始构造复杂的几何形状和工程关系。在进行产品设计的早期阶段，要求设计师给定全约束、全尺寸是不可能、不现实的，重要的是能够建立一些方程和规则，体现一些最重要的工程数据，使零件在设计准则下可自动修改。在完整、安全的网络环境下，设计小组成员不必操心数据的完整性，他们能够共享数据，并能主动控制修改和更新。零件最终的形状和尺寸来自各个方面的综合考虑，如装配、应力、加工等，在制定设计文件时。工程技术人员要决定如何描述最后的零件和装配，生成图纸时设计尺寸要转换成工艺尺寸以体现加工、检测的要求。这张图纸和其他技术文件（如应力分析、振动、热分析等）构成了设计的最主要部分。

最后是对最终的设计产品进行仿真。仿真能预测产品在实际环境中的性能，它包含了一系列步骤，从力学分析、建模、施加负载和约束，到预测其在真实工况下的反应，仿真的真正用意不是得到几个数据，而是评估产品的性能和优化产品的结构，进而指导设计、改进设计。在产品设计和仿真阶段，需要使用一些应用软件如三维产品设计软件、有限元分析软件等。根据设计尺寸并利用这些软件，便可以在计算机上构造产品的电子（虚拟）样机，为最终投产做好准备^[23]。

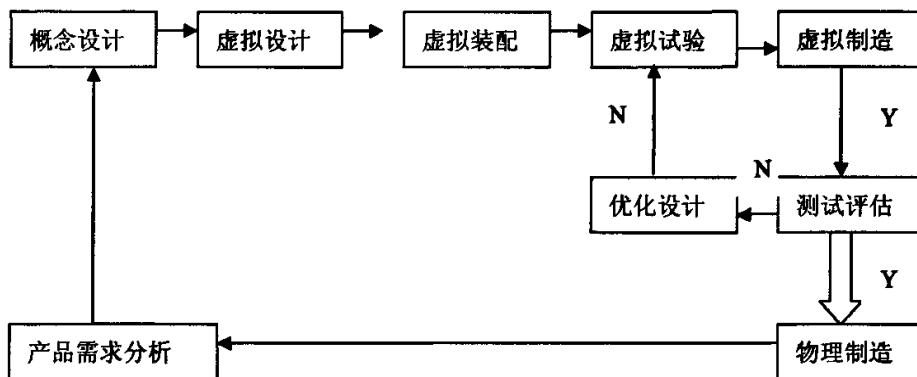


图 2.2 电子样机设计的一般流程

Fig2.2 General procedure that the electronic prototype of a machine is designed

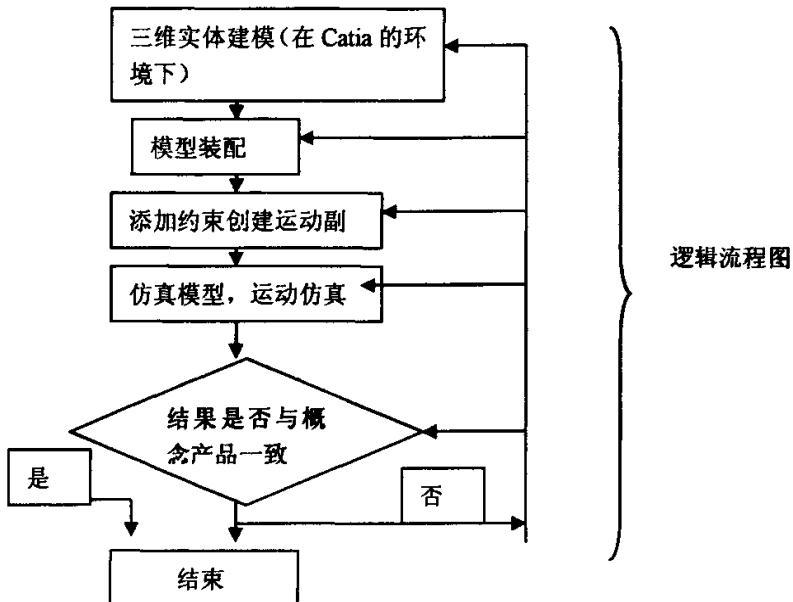


图 2.3 应用电子样机进行仿真的逻辑图

Fig2.3 The logic simulation fig. by using the electronic prototype of a machine

电子样机的开发及逻辑流程如上图 2.2、2.3 所示，从产品需求分析到评估测试，通过使用相关产品开发工具，在虚拟环境中，构造产品的虚拟样机。这是一个循环渐进的过程，基于产品的开发要求，采用相应的仿真分析工具对虚拟样机的功能和性能进行仿真分析，对虚拟样机的行为进行模拟分析，并基于仿真分析的结果，通过产品全生命周期的反复建模/仿真分析与模型的改进，开发出满足产品预期设计目标的虚拟样机。

2.3.5 电子样机的关键技术

1. 电子样机工程的总体技术

电子样机技术发展十分迅速，目前虽然还难以实现可支持产品设计全过程的数字化产品的开发系统，但电子样机工程作为一个庞大的系统工程，总体上还是有一些共性的。电子样机工程总体技术从必然全局出发，解决涉及到系统全局的问题，考虑构成电子样机工程各部分之间的关系，规定和协调各部分系统的运行，并将它们组成为一个有机的整体，实现信息和资源的共享，进而实现总体目标。电子样机的设计主要有以下几个组成部分：初步设计方案的确定、概念设计、详细设计、仿真分析和结构优化设计等。各个部分由不同的设计人员进行并行设计，

而各部分的功能活动存在大量的相互依赖的关系，为保证产品开发队伍的协同工作，实现在分布环境中群体活动的信息交换与共享，必须对设计过程进行动态调整和监控，构造合适的并行设计的工作环境，保证并行设计的顺利进行，这是电子样机缩短开发周期的关键。

2. 虚拟环境下的产品的概念设计和方案评价

在电子样机环境中进行产品的概念设计和方案评价是实现电子样机的前期工作。在计算机虚拟现实环境提供的良好的虚拟现实漫游特性和实时交互性的条件下，相关人员可以对虚拟系统建立模型，包括视觉效果，进行评价与修改。在这个阶段，可以模拟产品的装配过程，解决各部件之间的可接近性和可装配性，通过对零部件的直接装配操作，检验零件的可操作性、装配的难易程度及装配的次序；可以在不耗费实际加工时间和原材料的基础上，进行虚拟测试。通过电子样机的设计、加工和组装、可以对产品多种方案进行快速的成本核算并制定合理的生产管理方案。

3. 电子样机技术的并行工程

电子样机技术支持并行设计，使各环节的工作同时进行，极大地缩短了产品研制周期，加快了产品设计步伐，避免了无谓的失误与风险，可以有效地降低生产成本。工程师可以把新材料、新结构、新工艺结合起来尝试着进行虚拟样机设计，以增强车辆设计的灵活性，提高车辆的质量。并行工程的核心是并行一体化设计，强调产品设计及其相关的过程同时交叉进行，即在设计阶段就要考虑制造、装配等后期阶段所涉及的环节。企业实行并行运行机制，要求设计、制造等各个过程的多项任务交叉进行，减少设计的反复，并行工程的协同效应使得各部门协调工作，能够对众多的方案进行及时准确的评价，以达到最优方案。

4. 电子样机工程的优化设计及数据协调技术

设计的最终目的是要获得一个满足各种要求的最优方案，这就是工程优化问题。实践证明优化设计是保证产品具有优良性能，减轻结构自重或体积，并能降低成本的一种行之有效的设计方法。系统集成与仿真也是企业实现虚拟制造的一个难点，也是企业不能加快实现虚拟制造的一个重要因素。系统集成与仿真需要诸多的技术支持，需要从全局出发考虑各子系统之间的关系，研究各子系统之间接口的关系，是多领域的仿真软件协同的过程，然而一般企业难以购置齐全用于系统仿真分析的软件系统，即使软件全面也会遇到应用繁琐的问题。这就需要参数设计软件与三维设计软件之间能够实现数据通讯。

2.4 电子样机技术的仿真分析专家系统的建立

产品的设计过程是由信息、信息处理及决策活动组成的^[24]。在设计时必须把产品的设计知识、设计经验同设计的对象、设计的资料有机的结合起来。在产品的设计中，一方面应考虑产品的设计是否合理可行，生产成本是否可以接受；另一方面，由于设计中不确定因素的影响，设计方案不是唯一的，设计方案的选择都必须经过仿真和决策支持系统加以确定。因此必须建立设计、分析和评价专家系统。图2.4为电子样机仿真分析专家系统总体框图。

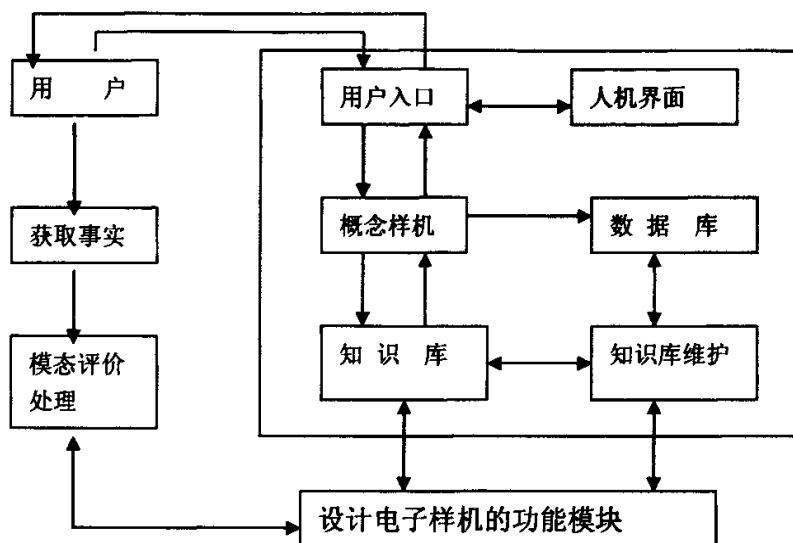


图2.4 电子样机仿真分析专家系统总体框图

Fig2.4 The overall block diagram of machinery design, analyse and evaluation experts syetem

第三章 汽车悬架运动的理论基础

双横臂独立悬架是轿车上常用的悬架结构形式之一, 其运动特性的优劣关系到汽车操纵稳定性、行驶平顺性和轮胎使用寿命等方面。欲设计理想的悬架结构, 确定合理的悬架结构参数, 必须对悬架进行运动学分析。悬架空间运动学分析的目的是通过建立和求解悬架的运动学模型, 确定悬架机构的空间几何参数及其变化规律, 这是进行悬架设计以及分析悬架系统参数对汽车性能影响的基础。由于汽车悬架是比较复杂的空间机构, 特别是前悬架设计成主销内倾和后倾, 并且控制臂轴也大都倾斜布置, 这些都给悬架的运动学分析带来了很多困难。对此, 许多学者利用多体动力学、矢量法、空间解析几何法等不同的数学方法进行了大量的研究^{[25][26][27][28][29][30][31][32]}。

3.1 空间解析几何中悬架模型的数学分析

图3.1为双横臂独立悬架的几何示意，图中OAB为下摆臂，绕轴线OA转动；MNK为上摆臂，绕轴线MN转动。K、B点分别为上下球节点。BK表示主销轴线。G点为车轮中心，车轮轴线交BK于G、J两点，P点为轮胎接地点。转向节臂DF交BK于F点，DF上BK。E、D点分别为横拉杆内外球节点。为分析双横臂导向机构的运动，坐标系的原点O选在下摆臂与车架的前铰接点上，过O点的水平向后方向（平行于汽车的纵向轴线）为X轴的正向，z轴为垂直向上，y轴过O点并与X轴与z轴正交，其方向由右手定则得出。

3.1.1 数学基础

设有坐标系 $Ox_1y_1z_1$ ，绕其 z_1 轴旋转 θ 到 $Ox_1'y_1z_1$ ，其旋转矩阵记为 $E(z, \theta)$ ，再绕 x_1' 旋转 ϕ 到 $ox_1y_1z_2$ ，然后再绕 z_2 旋转 γ 到 $ox_2y_2z_2$ ，其旋转矩阵分别记为 $E(x, \phi)$ 和 $E(z, \gamma)$ ，这就是著名的欧拉变换。见图3.2。从 $Ox_1y_1z_1$ 到 $ox_2y_2z_2$ 的变换矩阵为：

$$E_{12} = E(z, \theta) \cdot E(x, \phi) \cdot E(z, \gamma) \quad (3-1)$$

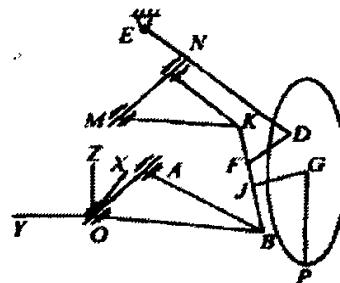


图 3.1 双横臂独立悬架简化模型
Fig3.1 The simplified model of double
arms independence suspension

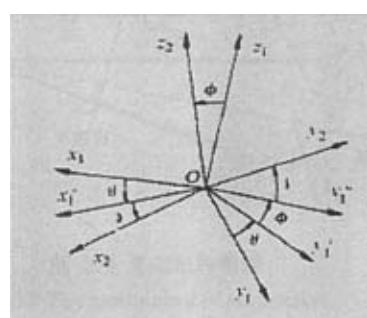


图 3.2 欧拉变换

式中, $E(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ (3-2)

$$E(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$$
 (3-3)

$E(z, \gamma)$ 和 $E(z, \theta)$ 形式相同, 一般说来, 旋转变换矩阵均为正交矩阵, 即:

$$[E(\sigma, \theta)]^{-1} = [E(\sigma, \theta)]^T = [E(\sigma, \theta)]$$
 (3-4)

设某矢量在 $O_m x_m y_m z_m$ 坐标系中可表示为 γ_m , 而在 $O_n x_n y_n z_n$ 中可表示为 γ_n , 那么:

$$\gamma_n = E(mn) \gamma_m$$
 (3-5)

式中 $E(mn)$ 为 m 系到 n 系的旋转坐标变换矩阵。

值得注意的是, 在坐标旋转过程中, γ_m 相对于坐标 $O_m x_m y_m z_m$ 来说是固定不变的。若坐标系的旋转角度是时间 t 的函数, 则对 $E(mn)$ 求导, 便可求得该矢量相对 m 系的速度和加速度。

3.1.2 对悬架进行分析之前的假设

如图3.3为双横臂独立悬架多节点联结的RSSR结构简图。 A_1, A_2 和 D_1, D_2 分别为上下控制臂的接头, B, C, H 和 I 为球头销。 A_1, A_2 和 D_1, D_2 分别为上装有衬套, 而球头销内又装有塑料球碗。由于车轮和车身之间的力和力矩是通过悬架来传递的, 悬架各个节点必然会发生弹性变形。 A_1, A_2 和 D_1, D_2 决定着上下控制臂的轴线的走向, B, C 决定着主销轴线的位置。这6处的弹性变形对悬架的运动特性有着较大的影响。但为了分析的方便, 我们暂先假设它们是刚性的。另外, 下文要提到D-H坐标系是Denavit和Hartenberg提出的建立杆坐标系的方法。

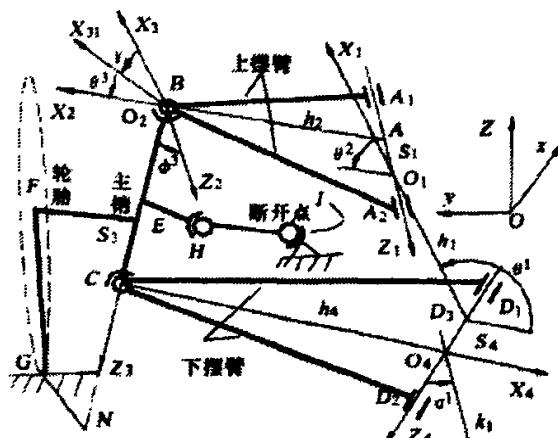


图 3.3 悬架机构简图
Fig3.3 The mechanism of suspension

3.1.3 建立坐标系

0xyz是把整车的制图基础坐标系的x轴调一下方向后所得。根据D-H坐标系规定建立各杆杆坐标系,以上、下控制臂转动副 A_1-A_2 , D_1-D_2 的轴线为 z_1, z_4 轴, 取 z_1, z_4 轴的公垂线为 x_1 , 垂足分别为 D_3, O_1 , 过球心B点引 z_1 轴的垂线为 x_2 轴, 垂足为A, 过球心C点引 z_4 轴的垂线为 x_4 轴, 垂足为 O_4 , z_3 轴通过球心B, C, z_2 轴取通过球心B且平行于 z_1 轴, x_{31} 是 z_2 和 z_3 轴的公垂线, x_3 轴与 z_3 轴垂直, 且与 x_{31} 轴的夹角为 γ_3 。当车辆满载时, γ_3 达到极值。 x_1 轴与 x_4 轴夹角为 θ_1 , x_2 轴与 x_1 轴夹角为 θ_2 , x_2 轴与 x_3 轴夹角为 ϕ_3 , x_2 轴与 x_{31} 轴夹角为 θ_3 , 以上角度正负遵循右手定则。为了建明起见, y 轴没有画出。特别需要指出的是, $O_2x_2y_2z_2$ 到 $O_2x_3y_3z_3$ 的变换是欧拉变换。其中 $s_{(i-1)}$ 、 h_i 分别为第 $(i-1)$ 坐标系到第 i 个坐标系 x 、 y 轴的偏移距离, 其中 i 依次取2, 3, 4, 5, 1。

3.1.4 悬架机构的结构参数

在图3.3中, 依据矢量代数知识, 可得:

$$\vec{OA} = \vec{OA}_1 + (\vec{A}_1B \cdot k_1)k_1, \quad \vec{OD}_3 = \vec{OD}_1 + (\vec{D}_1C \cdot k_4)k_4 \quad (3-6)$$

若 z_1 和 z_4 平行, 过A点作 z_4 的垂线, 垂足为D, 则:

$$\vec{OD}_3 = \vec{OO}_4 + (\vec{O}_4A \cdot k_4)k_4 \quad (3-7)$$

若 z_1 和 z_4 为异面直线时, 由其公垂线垂足公式, 得:

$$\vec{OO}_1 = \vec{OA} + \frac{(\vec{AO}_4 : k_4 : k_1 \times k_4)}{(k_1 \times k_4)^2} k_1, \quad \vec{OD}_3 = \vec{OO}_4 + \frac{(\vec{AO}_4 : k_1 : k_1 \times k_4)}{(k_1 \times k_4)^2} k_4 \quad (3-8)$$

同理可求出 $h_2(\vec{AB})$ 、 $h_4(\vec{CO}_4)$ 、 $s_3(\vec{BC})$ 、 $s_1(\vec{AO}_1)$ 、 $s_4(\vec{D}_3\vec{O}_4)$ 等其他结构参数。

求F、G、H点在坐标系中的坐标 $O_2x_3y_3z_3$ 坐标系中坐标 z_1 轴的单位矢量为:

$$k_1 = \frac{(\vec{OA}_2 - \vec{OA}_1)}{|A_1A_2|}。同理可求出 i_1, k_1 (i_1, k_1 分别为 x_1, z_1 轴的单位矢量)。$$

由 $j = k \times i$ 可求得 y_1 轴的单位矢量 j_1 (以下 i, j, k 符号意义相同), 则:

$$EO_1 = [i_1, j_1, k_1]^T \quad (3-9)$$

在满载位置时, 利用此刻的坐标值, 可求得 i_2, k_3, i_3, i_4 。再利用矢量夹角公式, 如 $\theta_1 = \arccos(i_1 \cdot i_4)$, 求得 $\theta_1, \theta_2, \phi_3, \alpha_1$ 。此刻 $\gamma_3 = 0$, 然后利用 $E12 = E(z, \theta_2)$, $E23 = E(z, \theta_3)E(x, \phi_3)E(z, \gamma_3)$, $E14 = E(x, -\alpha_1)E(z, -\theta_1)$, 可求得 $E12, E23, E14$ 。那么, 矢量 \vec{BH} 在坐标系 $O_2x_3y_3z_3$ 中表示 $(\vec{BH}) = E30(\vec{OH} - \vec{OB})^T$, 式中,

$E30 = E32 \times E21 \times E10$ 。同理, 可求得 $(\vec{BG})_3, (\vec{BF})_3, (\vec{BE})_3$ 。

3.1.5 悬架机构运动方程的建立

B, C 在 $O_1x_1y_1z_1$ 坐标系中可表示为:

$$\vec{O_1B}^T = E12 \begin{bmatrix} h_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ s_1 \end{bmatrix} \quad (3-10)$$

$$\vec{O_1C} = E14 \begin{bmatrix} -h_4 \\ 0 \\ s_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -h_3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3-11)$$

因车轮上下跳动时, $|BC| = S_3$ 恒成立, 故将式(10). (11)代入并简化, 得:

$$A \sin \theta_1 + B \cos \theta_1 + C = 0 \quad (3-12)$$

式中: $A = s_1 h_4 \sin \alpha_1 - h_2 h_4 \sin \theta_2 \cos \alpha_1$ $B = h_1 h_4 + h_2 h_4 \cos \theta_2$

$$C = 0.5(s_4^2 + h_1^2 + s_1^2 + h_2^2 + h_4^2 - s_3^2) + s_4 s_1 \cos \alpha_1 + h_1 h_2 \cos \theta_2 + s_4 h_2 \sin \theta_2$$

3.1.6 转向系与悬架运动的协调方程的建立

$$\vec{BH}^T = E03(\vec{BH})_3^T = E01E12E(z, \theta_3)E(x, \phi_3)E(z, \gamma_3)(\vec{BH})_3^T = EE \times E(z, \gamma_3)(\vec{BH})_3^T$$

式中:

$$EE^T = \begin{bmatrix} l_1 & l_2 & l_3 \\ m_1 & m_2 & m_3 \\ n_1 & n_2 & n_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L \\ M \\ N \end{bmatrix}$$

由 B, H, I 组成的矢量三角形, 得:

$$|\vec{HI}|^2 = |\vec{IB}|^2 + |\vec{BH}|^2 + 2 \vec{IB} \cdot \vec{BH}$$

化简并整理得:

$$X \sin \gamma_3 + Y \cos \gamma_3 + Z = 0 \quad (3-13)$$

$$\text{式中: } X = 2 \left(\left(\vec{BH} \right)_3 (1) M \cdot \vec{IB} - \left(\vec{BH} \right)_3 (2) L \cdot \vec{IB} \right)$$

$$Y = 2 \left(\left(\vec{BH} \right)_3 (1) L \cdot \vec{IB} - \left(\vec{BH} \right)_3 (2) L \cdot \vec{IB} \right)$$

$$Z = 2 \left(\vec{BH} \right)_3 (3) N \cdot \vec{IB} + \left| \vec{IB} \right|^2 + \rightarrow \left| \vec{BH} \right|^2 - \left| \vec{IH} \right|^2$$

式12与式13的求解法完全相同,如要进行速度加速度的分析,则得:

$$\gamma_3 = 2 \arctan \left(\frac{X \pm \sqrt{X^2 + Y^2 - Z^2}}{Y - Z} \right) \quad (3-14)$$

于是得:

$$E23 = E(z, \theta_3) E(x, \phi_3) E(z, \gamma_3) \quad (3-15)$$

那么:

$$\vec{OF} = \vec{OB}^T + E03 \left(\vec{BF} \right)_3^T \quad (3-16)$$

$$\vec{OE}^T = \vec{OB}^T + E03 \left(\vec{BH} \right)_3^T \quad (3-17)$$

$$\vec{OG} = \vec{OB}^T + E03 \left(\vec{BG} \right)_3^T \quad (3-18)$$

3.2 悬架的主要几何特性

1. 车轮前束:

$$\Delta = 4R \sin \left[\arctan \left(\frac{\vec{OE}(1) - \vec{OF}(1)}{\vec{OF}(2) - \vec{OE}(2)} \right) \right] \quad (3-19)$$

$$2. \text{ 主销后倾角: } \alpha = \arctan \left(\frac{k_3(2)}{k_3(3)} \right) \quad (3-20)$$

$$3. \text{ 主销内倾角: } \beta = \arctan \left(\frac{k_3(1)}{k_3(3)} \right) \quad (3-21)$$

$$4. \text{ 车轮外倾角: } \gamma = \arctan \left(\frac{\vec{FG}(2)}{\vec{FG}(3)} \right) \quad (3-22)$$

$$5. \text{ 车轮横向位移: } \Delta B = \vec{OG}(2) - \vec{OGi}(2) \quad (3-23)$$

式中, \vec{OGi} 表示满载时G点的向量。

6. 侧倾中心高度:

设 i_2, i_4 在y-z平面的投影矢量分别为 $i_2^{'}, i_4^{'}$, 那么:

$$i_2^{'} = [0, i_2(2), i_2(3)], i_4^{'} = [0, i_4(2), i_4(3)]$$

如果 $i_2^{'}, i_4^{'}$ 平行, 则:

$$Hm = -\frac{i_2^{'}(3)}{i_2^{'}(2)} \vec{OG}(2) \quad (3-24)$$

如果不平行, 则过A的矢量 $i_2^{'}$ 与过 O_4 的矢量 $i_4^{'}$ 的公垂线在y-z面上的交点为J, 则:

$$\begin{aligned} \vec{OJ} &= \vec{OA} + \frac{\left(\left(\vec{O}O_4 - \vec{OA} \right) \cdot i_4^{'}, i_2^{'} \times i_4^{'} \right)}{\left(i_2^{'} \times i_4^{'} \right)^2} i_2^{'} \\ GJ &= \left[0, \vec{OJ}(2) - \vec{OG}(2), \vec{OJ}(3) - \vec{OG}(3) \right] \end{aligned}$$

$$Hm = -\frac{GJ(3)}{GJ(2)} \vec{OG}(2) \quad (3-25)$$

7. 车轮转臂(NG) (见图3.3)

$$L = \frac{\sqrt{\left((BG)_3(1) \right)^2 + \left((BG)_3(2) \right)^2}}{|k_3(3)|} \quad (3-26)$$

8. 抗点头率

设 k_1, k_4 在x-z平面投影矢量为 $k_1^{'}, k_4^{'}$, 那么:

$$k_1^{'} = [k_1(1), 0, k_1(3)]$$

$$k_4^{'} = [k_4(1), 0, k_4(3)]$$

若 k_1 , k_4 平行, 则导向机构不能产生抗点头效果。

9. 速度和加速度分析

对位移分析一旦证明正确, 速度和加速度分析思路就比较明确。仍以 θ_1 的角速度和角加速度作为输入变量, 对式 (3—13) 求一次和二次导数得 :

$$\frac{d\theta_1}{dt} \quad \text{和} \quad \frac{d^2\theta_1}{dt^2} \quad (3—27)$$

第四章 基于CATIA的汽车悬架样机模型的建立

4.1 CATIA软件中的DMU模块简介

CATIA是Computer-graphics Aided Tri-Dimensional Interface Application的缩写,是世界一流的集CAD/CAE/CAM一体化于一身软件之一^[33]。作为较前沿的三维CAD/CAM软件,它在世界范围内被广泛采用于航空、汽车、船舶的设计和制造领域;CATIA在过去的二十多年里一直保持着骄人的业绩,并继续保持着其强劲的发展趋势。该软件虽然源于宇航业,但现在该软件广泛应用于各个行业,例如:汽车制造业、船舶制造业、机械制造业、电子、电器业、消费品行业等。该软件的集成解决方案贯穿于产品的设计和制造领域,其特有的DMU电子样机模块功能及建模技术更是推动着企业的竞争力和生产力的提高。CATIA提供方便的解决方案,迎合所有的工业领域的大中小型企业的需要,包括从大型的777飞机火箭发动机到化妆品的包装盒,几乎涵盖了所有的制造业产品,在世界上有超过13,000的用户选择了CATIA,CATIA的强大功能得到了各行业人士的认可,波音飞机公司使用该软件完成了整个波音777的电子装配,创造了业界的一个奇迹,从而也确定了CATIA在CAD/CAE/CAM行业的领先地位^[35]。

CATIA V5 电子样机技术 DMU 中共有 7 个模块,每一个模块都有其特殊的功能,分别为: DMU Navigator —— 电子样机漫游器; DMU Space Analysis—— 电子样机空间分析; DMU Kinematics —— 电子样机运动机构定义; DMU Fitting ; DMU 二维查看器 ; DMU 优化器; DMU Tolerancing Review—— 电子样机公差预览。下面对几个常用的模块功能进行简述^[45]:

1) DMU Navigator : 在电子样机漫游器工作平台,可以进行下列操作: 操纵组件; 显示组件; 执行高级组建管理; 创建照相和动画; 文件注释; 执行基本测量等功能。它允许在装配的早期检查时,对设计进行交互式和动画可视化检测。

2) DMU Space Analysis : 电子样机分析模块是CAD一支独立的分支,其主要用于干涉分析、界面选取、测量、3D产品比较、精确测量以及质量和惯性的计算等。此模块提供了电子样机DMU的检验环境,其操作对象的范围可从小的生活用品到大型自动化设备、航空航天设备以及重型机械等。

3) DMU Kinematics : 简称 KIN 通过调用系统提供的大量的运动约束连接方式或者通过自动转换装配约束条件而产生运动约束连接,继而实现电子样机的运动仿真。KIN 可以对任何规模的电子样机进行机构定义。可为线架、曲面、或实体几何模型提供多种类型的 2D 或者 3D 运动副,以及可选用的运动副限定条件。在一

个机构中定义多个运动副。同时，可以使用多个驱动命令进行运动模拟；可输出集合元素的速度和加速度信息。可分析运动过程中的所需空间，并可进行干涉检查。可以同时显示几种不同类型的分析结果曲线。

CATIA是汽车工业的事实标准，是欧洲、北美和亚洲顶尖汽车制造商所用的核心系统。在汽车行业使用的所有CAD/CAM软件中，CATIA已占到了60%以上。CATIA在造型风格、车身及底盘设计等具有独特的长处，为各种车辆的设计提供了全方位的解决方案。CATIA的可伸缩性和并行工程能力可显著缩短产品的上市时间。CATIA的电子样机涉及环境使的汽车生产商能够快速及时地响应和满足客户的需求，向市场推出各种型号的汽车，满足不同消费者的需要^[34]。

应用CATIA对汽车悬架进行设计的流程图如下图4.1, 先在机械设计单元的零件设计平台上将悬架的零件图画出, 在装配设计模块的环境中将零件进行虚拟装配; 然后再在数字模型单元中创建仿真模型, 进一步进行运动机构仿真分析。

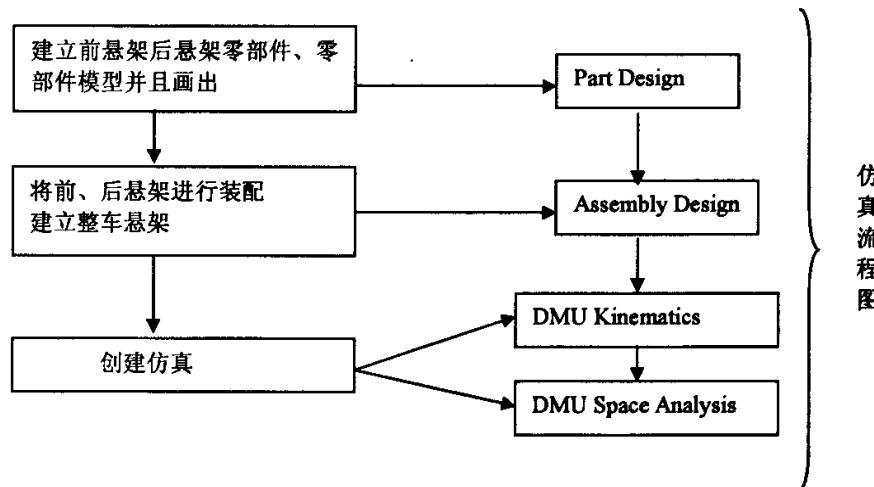


图4.1 应用CATIA软件的设计流程

Fig4.1 The design procedure by using CATIA

4.2 悬架的基本组成及作用

4.2.1 悬架的组成、作用及分类

汽车的基本特性有很多，其中与汽车的乘坐关系最为密切是汽车的舒适性^[14]。舒适性作为轿车最重要的使用性能之一，与车身的固有振动特性有很大关系，而车身的固有振动特性又与悬架的特性相关。这样以来，汽车的悬架系统是保证乘坐舒

适性的重要部件总成。同时，汽车悬架作为车架(或承载式车身)与车轴(或车轮)之间的一切传力和弹性连接装置的总称，又是保证汽车行驶安全的重要部件。因此，汽车悬架往往列为重要部件编入轿车的技术规格表，作为衡量轿车质量的主要指标之一。

汽车车架(或车身)若直接安装于车桥(或车轮)上，由于道路不平和地面冲击，会使货物难以储存并且人会感到十分不舒服，这就需要安装悬架装置。汽车悬架是车架(或承载式车身)与车轴(或车轮)之间的一切弹性连接装置的统称。它的作用是1. 弹性地连接车桥和车架(或车身)，缓和行驶中车辆受到的冲击力；保证货物完好和人员舒适；衰减由于弹性系统引进的振动，使汽车行驶中保持稳定的状态，改善操纵稳定性；2. 同时悬架系统承担着传递垂直反力，纵向反力(牵引力和制动力)和侧向反力以及这些力所造成的力矩作用，以保证汽车行驶平顺；3. 并且当车轮相对车架跳动时，特别在转向时，车轮运动轨迹要符合一定的技术要求，因此悬架的作用还有使车轮按一定轨迹相对车身跳动的导向作用^[35]。

在设计悬架时，悬架的结构形式和性能参数的选择合理与否，直接对汽车行驶平顺性、操纵稳定性和舒适性有很大的影响。由此可见悬架系统的设计在现代汽车设计中占重要地位。现代汽车的悬架尽管有各种各样的不同的结构形式，但是一般悬架由如下三部分组成：弹性元件、导向机构、减振器，其中，导向机构包括横向推力杆和纵向推力杆。

根据汽车导向机构不同悬架种类又可分为独立悬架，非独立悬架。独立和非独立悬架的示意图如图4.2所示。

独立悬架是两侧车轮分别独立地与车架(或车身)弹性地连接，当一侧车轮受冲击，其运动不直接影响到另一侧车轮，独立悬架所采用的车桥是断开式的。这样使得发动机可放低安装，有利于降低汽车重心，并使结构紧凑。独立悬架允许前轮有大的跳动空间，有利于转向，便于选择软的弹簧元件使平顺性得到改善。同时独立悬架非簧载质量小，可提高汽车车轮的附着性。如上图4.2(b)所示。独立悬架的左右车轮不是用整体车桥相连接，而是通过悬架分别与车架(或车身)相连，每侧车轮可独立上下运动。

非独立悬架如4.2图(a)所示。其特点是两侧车轮安装于一整体式车桥上，当一侧车轮受冲击力时会直接影响到另一侧车轮上，当车轮上下跳动时定位参数变化小。若采用钢板弹簧作弹性元件，它可兼起导向作用，使结构大为简化，降低成本。目前广泛应用于货车和大客车上，有些轿车后悬架也有采用非独立悬架。非独立悬架由于非簧载质量比较大，高速行驶时悬架受到冲击载荷比较大，平顺性较差。

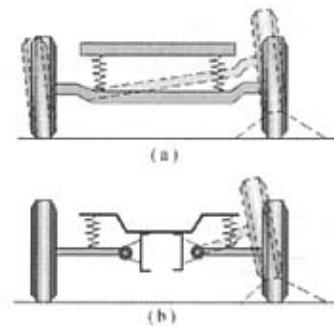


图 4.2 非独立悬架和独立悬架示意图

Fig4.2 The chart of dependent and independent suspensions

4.2.2 汽车悬架的运动特点

汽车悬架在汽车整车中的作用是起连接、传力和减振。对于不等臂式双横臂独立悬架来说它的运动是这样的：在汽车行驶的过程中，地面对前车轮的冲击传给与车轮相连的转向节，悬架的上下摆臂通过球销连接与转向节相连，转向节又与前车轮相连，这样一来，车轮的跳动最后表现为上下摆臂的运动。悬架的上下摆臂又通过轴销与车身相联。这样，车轮虽然跳动，但车身却可以表现为轻微运动。这样，悬架就可以减少路面对车身的振动和冲击。

在建立整车装配模型以后，即可建立运动学仿真模型。在汽车悬架运动系统中，有很多运动机构需要分析，这里仅分析汽车前悬非独立悬架的运动特性，因为，采用的前、后悬架都是不等臂式双横臂独立悬架，所以，通过对悬架的四分之一模型进行有代表性的分析即可。本论文主要是研究前轮的跳动与悬架的运动关系。在开始建立运动机构模型之前，首先需要对要组装的机构运动作出细致的了解，弄清其运动方式、约束条件等。下面是前悬架不等臂长双横臂独立悬架的运动特点分析。

在汽车悬架的运动过程中，主要的运动学元素是^[36]：上、下摆臂、与车轮连接的转向节还有减振器和螺旋弹簧，在本论文中建立的仿真主要表达的是独立悬架的运动特点，并且悬架的作用离不开减振器和螺旋弹簧，所以在创建仿真时，还要对减振器弹簧进行仿真。在本章节中建立的三维立体模型可以得出，独立悬架的运动相当于一个四连杆机构^[37]，但运动副是球副连接。因此，建立悬架的运动学模型时，可以只建立运动的部件，其他的可省略。需要建立的运动杆件为：悬架的上摆臂、

悬架的下摆臂、转向节臂（拉杆）、连接轴 1、连接轴 2。

汽车的前轮的运动特点主要有两个，前轮的跳动和前轮的转动：

(1) 前轮跳动。由上下摆臂通过球销连接带动转向节运动引起车轮跳动。上下摆臂的运动极限由限位块决定。

(2) 前轮转动。由方向盘的转动通过方向杆传递给方向机，方向机通过转向拉杆带动转向节转动从而引起车轮转动，车轮的最大转角由转向限位螺栓决定。

因此，与汽车前轮相连的汽车前悬架必须满足前轮的跳动与转动。悬架的上下横臂分别以球副与转向节相连，这样来就可以满足前车轮的跳动与转动^[38]。

在运动仿真模型中，同时可以建立多个运动副，例如前轮在上下跳动的同时进行转动。在本论文所做的主要工作是要仿真悬架的跳动。在建立仿真模型时必须要有驱动副，本文建立的驱动副是上、下摆臂绕辅助轴销的运动。在运动仿真模型中，还必须有固定件，在本论文的仿真模型中，固定件是与车架相连的辅助轴销。在以上驱动副的作用下，会使悬架的上下摆臂围绕固定轴销转动，从而带万向节运动，通过万向节而带动前轮的跳动。在这里需要说明的是，在实际的工况中，应该是路面的冲击传给车轮，再有车轮的运动带动悬架的运动。本论文所做的仿真只是建立运动机构模拟，便于对运动机构进行干涉分析，所以，在定义驱动命令的时候是对上下摆臂定义的驱动命令，这样并不影响仿真效果。

4.2.3 不等臂式独立悬架的运动特点^[39]

本论文选的悬架是不等臂式双横臂独立悬架如图4.3。双横臂式独立悬架的上下两摆臂不等长，选择长度比例合适，可使车轮和主销的角度及轮距变化不大。这种独立悬架被广泛应用在轿车上。双横臂的臂有做成Y字形有的做成V字形。V形臂的上下2个V形摆臂以一定的距离，分别安装在车轮上，另一端安装在车架上。不等臂式双横臂独立悬架的上臂比下臂短。当汽车车轮上下运动时，上臂比下臂的运动弧度小，这将使轮胎上部轻微地内外移动，而底部影响很小。这种结构有利于减少轮胎磨损，提高汽车行驶平顺性和方向稳定性。

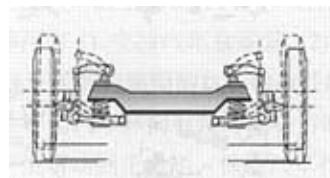


图4.3 双横臂式独立悬架

Fig4.3 The chart of dependent and independent suspensions

4.3 基于CATIA的汽车悬架模型的建立

4.3.1 悬架模型的简化

在用CATIA软件进行汽车悬架的运动仿真时,需要先通过软件中的机械设计模块对悬架的各个部件设计出来,随后进行装配,再后进行仿真分析,在进行仿真分析的时候要施加正确的约束和驱动命令。汽车悬架是一个比较复杂的汽车部件,为了将汽车悬架的样机模型能够实现动态仿真,在这里需要做出一些合理的假设和简化。对一些不影响动态仿真的部件进行省略,而对于对分析结果影响较大的部件,在建模型时要引起足够的重视。

作出的主要简化如下:

1. 为了建模的需要,将转向节作适当的简化。万向节轴是一条可旋转的圆轴,起传递动力的作用。当汽车负荷发生变化或者行驶中路面不平引起的跳动都会使汽车悬架上下摆臂随时发生变化,如果将一条普通的圆轴联接上去,机器将会无法工作。为了解决这个问题,就在圆轴的两端装上了万向转动装置,使两端联接处角度可以随时变化。在本论文中,主要是研究悬架的运动,所以万向节上的主要连接副只建立上下球销即可。
2. 在对悬架进行运动仿真时,为了定义固定件的方便,这里只将把车架和悬架连在一起的轴销画出。
3. 汽车是关于汽车中心线对称的,所以可以只建立汽车悬架的四分之一模型,然后在CATIA平台上进行镜像就得到前悬架模型,再经过镜像即可得到悬架得整车模型。

4.3.2 汽车悬架模型的建立

本论文选的悬架是不等臂式独立悬架,虽然汽车悬架是由导向机构、弹性元件、和减振器组成,但是,轮胎与悬架紧密相连,为了下章创建动态仿真的方便,所以在创建汽车悬架的模型时需要创建汽车轮胎的模型。

车轮与轮胎是汽车行驶系中的主要部件,汽车通过车轮与轮胎直接与地面接触在道路上行驶。其主要作用有 1). 支持汽车总重量; 2). 吸收缓冲汽车行驶时所受到的路面冲击和振动; 3). 保证轮胎与路面的良好附着性能,以提高汽车的动力性、制动性、和通过性; 4). 产生平衡汽车转向行驶时离心力的侧向力,保证汽车正常转向行驶的同时,通过轮胎产生自动回正力矩,保证汽车行驶。

在汽车设计中,汽车轮胎的尺寸由国家制定的汽车轮胎设计标准GB516-82来限制,在本论文中选的轮胎尺寸的代号为185/60R15,汽车轮胎的参数如下表。

表4.1 轮胎参数表

Table4.1 Size parameter of the tire

轮胎参数	B	D	d	H
参数值	185mm	636mm	356mm	110mm

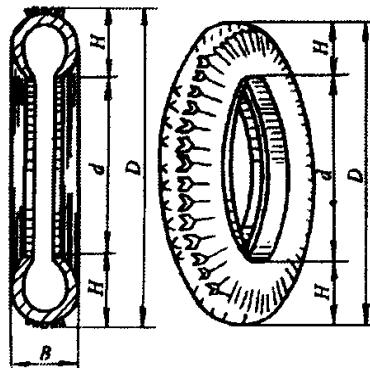


图4.4 轮胎的尺寸参数图解
Fig4.4 Size parameter diagram of the tire

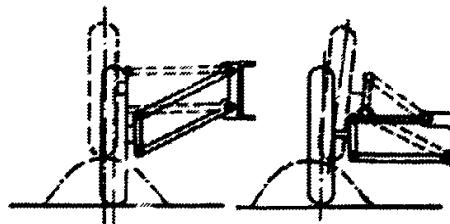


图4.5 汽车悬架运动示意图
Fig4.5 The movement of the automobile suspension

在论文中所建的轮胎模型只是轮胎的形状，而轮毂、轮辐（轮盘）和轮辋都简略，因为这样并不影响仿真效果。

悬架系统中由于弹性元件受冲击力的作用产生振动，为改善汽车行驶平顺性，悬架中与弹性元件并联安装减振器。虽然在创建悬架的仿真后，在做悬架的运动仿

真时，只是上下摆臂的运动，但是为了进一步的分析减振器的在悬架运动时的干涉情况，所以在论文中还需要将减震器的模型建立起来。

螺旋弹簧用于独立悬架中，它只承受垂直载荷，在此载荷作用下，钢丝内产生扭转应力，将外界对汽车悬架的冲击能量转化为弹簧的弹性势能，从而缓冲了不平路面的冲击。为了突出悬架的功能特点，在建悬架的模型时，需要将螺旋弹簧模型建立起来。弹簧的参数如下表4.2所示：

表4.2 减振器弹簧参数表

Table4.2 The spring parameter form of shock absorber

参数	间距(mm)	长度 (mm)	螺旋半径 (mm)
数值	32	339	46.5

万向节是将悬架的上下摆臂和车轮连接起来，所以在这里还要将万向节的模型建立起来，在这里将其模型简化的程度以不影响仿真效果为准。

由于悬架的左右车轮的悬架是通过汽车的中心线对称的，所以可以只建立悬架的四分之一模型图。汽车悬架的四分之一运动模型，根据运动机构来说，实际上是一四连杆机构，示意图参照如图4.5所示^[40]。在论文中，建立悬架的模型图时，可以根据图4.5进行适当的简化，悬架的上摆臂做成V形臂，下摆臂做成Y形臂。

在整车模型中，采用的是不等臂式双平衡臂独立悬架，所以后悬架模型的建立与前悬架模型的建立是完全一样的。由于前后悬架模型都需要建立特征参数，所以，在建立模型时，只可以做到合理即可，对于尺寸的精确度来说，可以根据实际情况的要求，适量调整参数值的大小，达到设计要求。

汽车的前后悬架是通过车架或者承载式车身连接起来的，为了方便和出于方法探索的目的，本论文是用一个假想的车身将前、后悬架模型连接起来的，进而建立整车悬架模型。根据实际要求，在遵循汽车设计手册和国家标准的情况下确定整车模型的外形尺寸，外形尺寸如表4.3。

表4.3 所建模型的相关参数及数值

Table4.3 The relevant parameters of the model built

类型参数	长度	宽度	高度	轴距
数值	5.0m	1.8m	1.5m	2.8m

对汽车悬架的模型进行整合，实际上就是对悬架的各部件进行装配，因此在对

悬架进行整合之前，需要了解一下基于CATIA软件的装配技术^[41]。

装配技术是在CATIA的装配环境下，完成对产品的总体设计进程控制并进行具体模型定义与分析的过程。它可有效支持自顶向下的并行产品设计以及与Master Model相关的可制造性设计和可装配性设计，以缩短产品开发周期。“虚拟装配”（Virtual Assembly）是产品数字化定义中的一个重要环节，在虚拟技术领域和仿真领域中得到了广泛的应用与研究。虚拟装配是一种零件模型按约束关系进行重新定位的过程，是有效分析产品设计合理性的一种手段。该定义强调虚拟装配技术是一种模型重新进行定位、分析过程。该技术是根据产品设计的形状特性、精度特性，真实地模拟产品三维装配过程，并允许用户以交互方式控制产品的三维真实模拟装配过程，以检验产品的可装配性。

本论文是在CATIA软件的机械设计模块中完成汽车悬架的零部件的实体造型，然后再进行计算机装配、干涉分析等多次协调的设计，并通过统一的产品数据管理，实现悬架三维建模过程与悬架零部件制造、装配过程的高度统一。装配技术在悬架动态仿真分析中的应用研究，是一种全新的概念，它为汽车悬架研制提供了一种新的仿真分析方法与实施途径。

为了加强所建建模的通用性和管理的方便，在建模时需要提取所建模性的特征参数。在这里需要介绍一下特征参数的有关知识。

随着计算机技术的发展，生产过程自动化呈现出加速发展趋势，而产品设计过程现在已将被人们认为是提高整个生产率的瓶颈问题，参数化特征建模以其智能化的产品设计方案越来越得到人们的重视，拥有较强的参数化功能已经成为现代 CAD 系统的标志。

参数化特征建模的基本思想是以约束来表达产品模型的形状特征，通过从模型中提取一些主要的定形、定位、或者装配尺寸作为自定义变量，修改这些变量的同时有一些公式计算出并变动其他相关尺寸，从而方便的创建一系列形状相似的零件。这种用尺寸驱动、修改图形的功能为初始产品设计、产品建模、修改系列产品设计提供了有效的手段，能够满足设计具有相同或相近几何拓扑结构的工程系列产品及相关工艺装备的需要^[42]。

参数化特征建模的优点是对设计人员的初始设计要求低，无需精确绘图，只需勾绘草图，然后通过适当的约束得到所需精确图形；便于编辑、修改，能满足反复设计的需要。但是传统的设计方法也存在以下不足之处。

（1）自定义变量只能驱动几何尺寸，即通过一些公式来修改零件的几何尺寸，而零件的形状基本明确，即零件的特征基本明确，经几乎不能改变。

(2) 自定义变量之间相互独立, 不便建立任何函数关系, 也不便对每一个变量作约束。这使得当有些变量的修改量比较大时, 就会出现严重变形, 甚至使该特征与其相关联的其它特征失去约束, 出现悬空状态的特征, 造成信息丢失。

知识工程是人工智能在知识信息处理方面的发展, 它主要研究如何用计算机表示知识, 进行问题的智能求解。知识工程的研究是人工智能的研究从理论转向了应用, 从基于推理的模型转向基于知识的模型, 是新一代计算机的重要理论基础。它的根本目的是在研究知识的基础上, 开发人工智能系统, 补充和扩大大脑功能, 开创人机共同思考的时代。知识表示、知识利用、知识获取构成了知识工程基础。

可以考虑在参数化特征建模中引入知识工程, 结合特征构造理论, 来弥补当前参数化设计的不足。面向对象的技术已被深入应用于特征的描述, 这使得特征本身已包含了参数化变动尺寸值所需的成员变量和成员函数, 特征的尺寸值均可作为其变量, 随时作适当改变。在这个基础上, 进一步使特征及特征之间的依赖关系能随一定的条件改变, 即实现参数化特征。因而在产品设计过程中把涉及产品设计的所有信息集合起来, 包括行业设计标准、产品的尺寸关联、尺寸的约束、特征关联和工艺顺序等, 组成一个产品的知识库。由此可以采用以下办法来解决参数化设计的不足。

1. 建立产品的特征库和产品的特征关联、尺寸关联库。由于一个特征是用一个对象来描述的, 所以为特征设计一个属性 *Activity*。当该属性值为 *True* 时, 该特征被激活; 当该属性为 *False* 时, 该特征隐藏, 不出现在设计中。这样就可以通过自定义变量值的范围、特征参数化设计过程中实现了特征驱动。同时尺寸关联库的建立更能很好的组织和明确各特征的尺寸、特征间的位置关系。这样产品的特征和尺寸的关联信息将更明确、清晰。

2. 引入一些效验。有些变量在设计的过程中有一定的范围限制后手一些标准约束, 有些变量与变量之间存在一定的函数约束关系。可以把它们列出, 定义好其范围或函数约束关系, 并设置好相应的报错信息和推荐建议, 组成一个技术检验库。参数化技术过程中, 一旦有些变量的改变引起其它变量违反其允许值得范围, 即违反某一效验, 则立即提示出相应的报错信息, 同时给出一定的报错方案推荐给技术人员, 技术人员可以及时修正。技术人员也可以通过学习算法将好的技术经验写入技术检验库, 或由技术检验库通过学习算法自动学习知识。这一方法有效的增强了参数化设计的可靠性, 并能积累有效的设计经验, 以扩充产品知识库, 在设计中就能得到产品的最佳设计方案。

在建立产品知识库的基础上进行参数特征建模的基本构架如图 4.6 所示。这种

基于产品知识的参数特征建模把知识工程与参数特征建模有机的结合起来，它用知识工程原理来组织产品数值，表达成产品的知识库，它用较完整的面向对象的高级语言来描述特征，并能在特征造型中使用参数化的同时，又利用结构化的高级语言参数化的变动尺寸和特征。

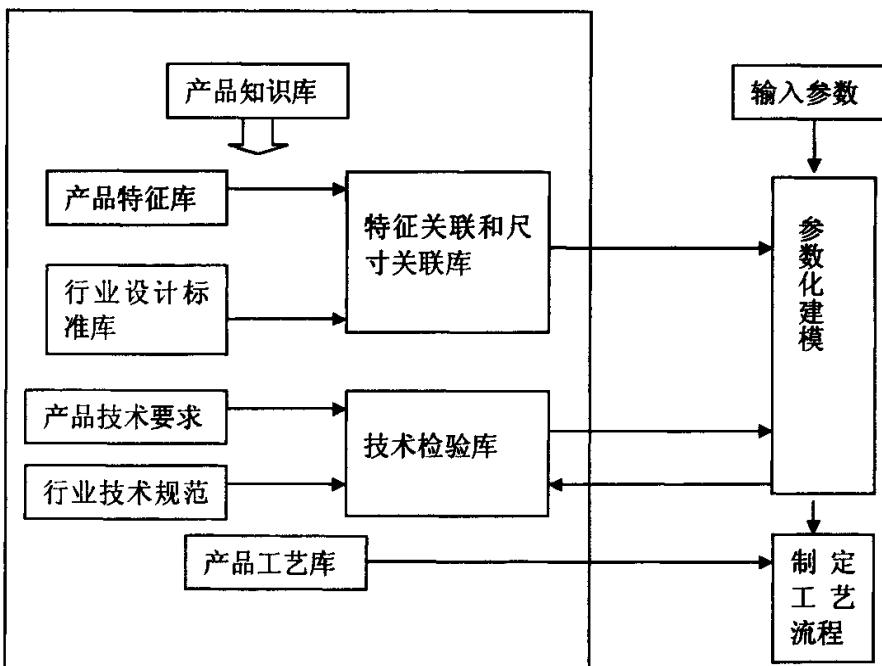


图 4.6 基于知识工程的参数化的基本构架示意图
Fig4.6 The basic sketch map of parametric design based on knowledge engineering

它不仅可以随时调整产品形状和尺寸，而且可以随时调整产品的结构和特征，同时实现尺寸驱动和特征驱动。它又能实施的监督设计过程，检验设计是否符合要求，并提出适当的建议，与技术人员实现人机对话，通过学习算法，技术人员可以不断丰富产品的知识库，更有助于未来的设计。这样的参数化设计极大的方便了产品的修正和改良，对缩短产品设计周期、节省产品设计成本有着巨大的实际意义，从而使产品的设计变得更加灵活、高效、智能。拥有产品工艺库的产品知识库，则能进一步帮助和指导技术人员制定产品的工艺流程。

参数特征建模是 DMU 软件的高级应用，是属于知识工程与专家系统的主要内容。确定汽车悬架的主要参数包括：悬架各部件的主要尺寸，与各部件装配的位置。汽车悬架的结构参照图 4.7 所示：

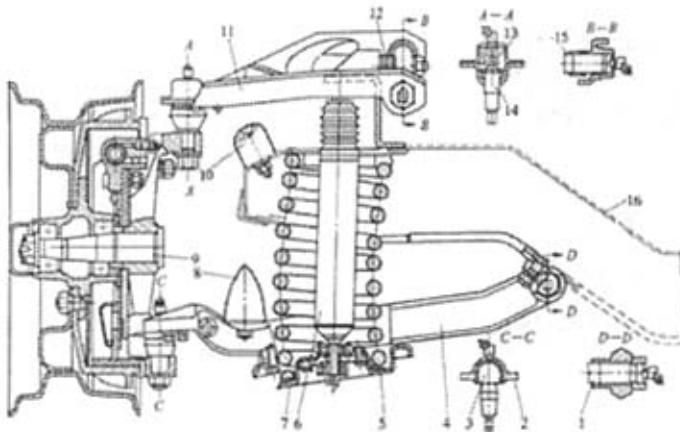


图4.7红旗CA7560型轿车的前悬架结构图

Fig4.7 The front suspension mechanism of CA7560

1. 下摆横臂；2. 垫片；3. 下球头销；4. 下摆臂；5. 螺栓弹簧；6. 筒式减震器；
 7. 橡胶垫圈；8. 下缓冲块；9. 转向节；10. 上缓冲块；11. 上摆臂；12. 调整垫圈；
 13. 弹簧；14. 上球头销；15. 上摆臂轴；16. 车架横梁

一. 定义悬架的特征参数

1. 汽车悬架上下摆臂模型的创建^[43]

为了将悬架的上下摆臂模型进行参数化，需要将悬架的三维零件图建立出来。由于零件的三维建模的起点都是二维视图，所以建模时需要考虑如何建立草图才能使模型简单、易于修改，通用性强，悬架的上下摆臂一个是V形，一个是Y形，在草图中只要做出V、Y形的草图然后再用拉伸命令，即可将悬架的上下摆臂模型画出。悬架的上下摆臂模型如图 4.8、4.9 所示：

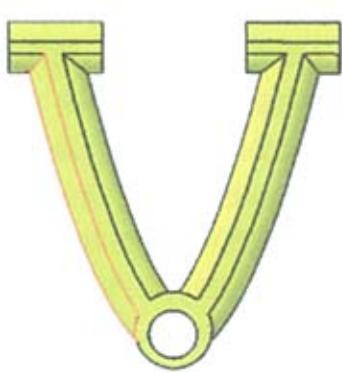


图 4.8 V形臂

Fig4.8 The V arm

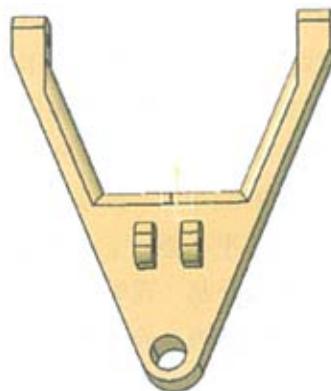


图 4.9 Y形臂

Fig4.9 The Y arm

在建立了悬架的三维模型之后，即可对悬架进行特征参数化，在进行特征参数化之前，需要对悬架的主要特征参数进行明确，因为悬架的上下摆臂在悬架整体中的作用是联结作用，所以在建模的时候充分考虑连接部位和外形尺寸，才能使悬架在运动时要充分的避免与其他的部件发生干涉。主要参数如图 4.10、4.11 所示，参数单位为毫米 mm。

下摆臂臂宽B1	440
下摆臂臂长L1	540
下摆臂臂内宽B1'	340
下摆臂臂厚B3	40

图 4.10 悬架上下摆臂主要参数简图 a

Fig4.10 The main parameters of wave arms a

上摆臂长度L2	362
上摆臂厚度B2	40
上摆臂宽度B1	340
上摆臂内宽B3	200
整数 5	0

图 4.11 悬架上下摆臂主要参数简图 b

Fig4.11 The main parameters of wave arms b

2. 悬架的弹性元件螺旋弹簧模型的创建

由于汽车行驶的路面不可能绝对平坦，路面作用于车轮上的垂直反力往往是冲击性的，特别是在坏路面上高速行使时，这种冲击力达到很大值。冲击力传到车架和车身时，可能会引起汽车机件的早期损坏；传给乘员和货物时，将使乘员感到极不舒服，货物也可能受到损伤。为了缓和冲击，在汽车行使系中，除了采用弹性的充气轮胎之外，在悬架中还必须装有弹性元件，使车架(或车身)与车桥(或车轮)之间作弹性连接。弹性元件用来承受并传递垂直载荷，缓和由于路面不平引起的对车身的冲击。弹性元件的种类包括钢板弹簧、螺旋弹簧、扭杆弹簧、油气弹簧、空气弹簧和橡胶弹簧。在本论文的悬架选的是螺旋弹簧作为弹性元件。弹簧的模型图及主要特征参数图如 4.12、4.13 所示：

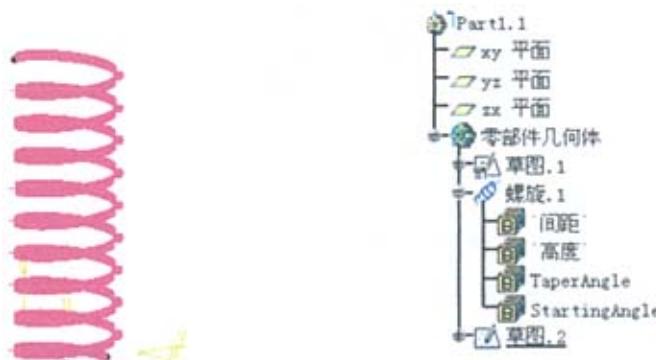


图 4.12 弹簧的模型图

Fig4.12 The model of spring

图 4.13 弹簧特征参数的树形图

Fig4.13 The tree-form plot of spring parameters

3. 悬架减振器模型的创建。悬架系统中由于弹性元件受冲击产生振动，为了改善汽车行驶的平顺性，悬架中与弹性元件并联安装减振器，这样可以衰减振动。汽车悬架系统中采用减振器多是液力减振器，其工作原理是当车架（或车身）和车桥间受振动出现相对运动时，减振器内的活塞上下移动，减振器腔内的油液便反复地从一个腔经过不同的孔隙流入另一个腔内。此时孔壁与油液间的摩擦和油液分子间的内摩擦对振动形成阻尼力，使汽车振动能量转化为油液热能，再由减振器吸收散发到大气中。在这里选用的是筒式减振器，悬架的螺旋弹簧套在减振器的套筒上，在车轮受到外力冲击时，悬架的上下摆臂会发生运动，当运动到一定程度时，会压迫弹簧，只是弹簧发生压缩变形，经过能量转换，缓和冲击；同时，减振器根据其减振原理发生变化。图 4.14 及 4.15 是减振器的主要特征参数。由于减振器是回旋体，

所以选得主要特征参数如下。

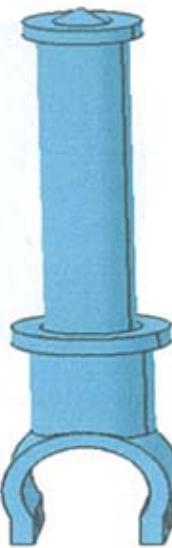


图 4.14 简式减振器

Fig4.14 Tube type shock absorber

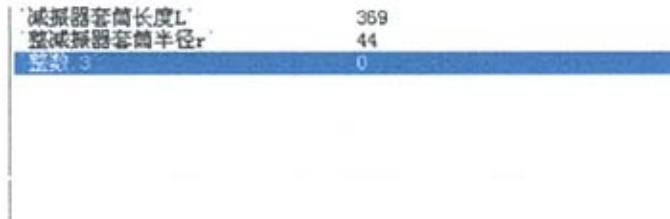


图 4.15 减振器主要参数

Fig4.15 The main parameters of shock absorber

4. 汽车轮胎模型的创建

汽车轮胎可以是个旋转体，也可以不是。为了建模方便，这里应用拔模拉伸的方法来建立轮胎的模型。轮胎的主要特征参数如图 4.16、4.17 所示。



图 4.16 轮胎圈模型

Fig4.16 The model of tire

轮胎外径D0	636
轮胎内径D1	358
轮胎宽度W	185
扁平率	50

图 4.17 轮胎的主要参数

Fig4.17 The main parameters of tire

二. 将悬架特征参数转化为模型特征参数

在这里需要说明的是，在参数特征建模中的参数指的是一些特征，而不仅仅是在实际产品中的某些或者某个参数，虽然不带有任何的物理意义，但是有时候由于某些物理因素联系在一起。参数化建模中的参数为的是绘图方便，而技术人员自行定义的相关特征，这与产品自身的参数没有多大联系。

在建立了悬架的模型图以后，CATIA 就已经将模型中所有的已经定义的尺寸特征参数自动的提炼出来，生成系统参数。为了使参数便于识别，可以修改参数名。汽车悬架的参数化模型的系统参数在模型建立起来之后，就已经存在于系统中。

4.4 定义用户参数公式

将悬架的各部件的尺寸参数以用户参数的形式表达出来,因为用户参数不仅易于辨别,而且也可以很方便的在 CATIA 的环境下进行修改^[44]。

一. 建立悬架用户参数

建立悬架用户参数的目的在于使用户参数通过公式连接 CATIA 系统参数,从而驱动三维参数模型。由于在悬架的参数化模型中,与减振器相配合的螺旋弹簧形状较复杂,在悬架的装配中螺旋弹簧经常有干涉现象发生,所以有必要对螺旋弹簧进行参数化建模,螺旋弹簧的用户自定义参数有间距、长度、螺旋半径。



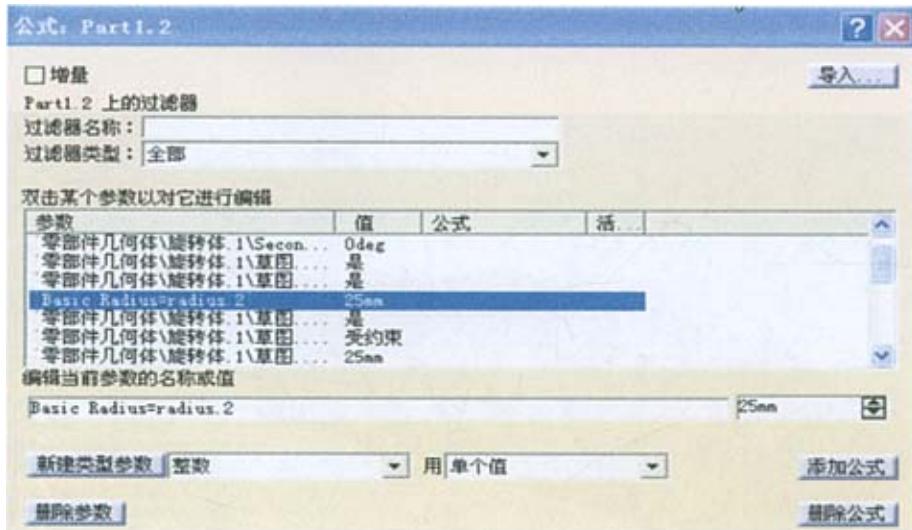
图 4.18 螺旋弹簧的参数化模型中的用户自定义参数

Fig4.18 Self-defining parameter of user in the parameter model of the coil spring

二. 建立系统参数之间的关系

为了使悬架的各个部件基于某一个或者几个基本尺寸,从而实现整个模型的参数化,设定悬架的每个部件系统参数都基于定义的 basic 参数,为了便于从外部驱动模型参数,各个部件都有各自的 basic 值。

在这里,主要讲一下悬架的减振器的系统参数之间关系的建立。由于减振器的是旋转体,在旋转成型后好要加一些几何特征上去,例如用于固定的螺栓孔,其直径和孔深也可以添加公式,编辑的参数如上图 4.19。对于悬架的其他的零部件的所有参数关系在下面的创建规则中都有记录,在这里不便赘写。



4.19 建立参数关系图

Fig4.19 Self-defining parameter of user in the parameter model of the coil spring

三. 建立规则和检查

为了能让悬架的部件的某些参数、特征和事件被很好的控制，这需要建立一些规则，通过这些规则，达到控制这些特征、参数和事件的目的。创建悬架的检查主要目的是针对图形中参数的异常变化给以警示，防止不符合要求的参数破坏三维模型。对螺旋弹簧创建的规则如下图 4.20 所示：

```
间距1间距=true
message( "you have specified 间距_of_螺旋=s,
the original is 34 ,零部件几何体\螺旋.1\间距")
```

图 4.20 螺旋弹簧规则的创建

Fig4.20 Regular establishment of coil spring

根据以上的叙述，需要先将汽车悬架的四分之一模型进行初步的装配，然后再进行整车悬架装配。悬架的整车模型和悬架模型如图4.21、4.22所示：

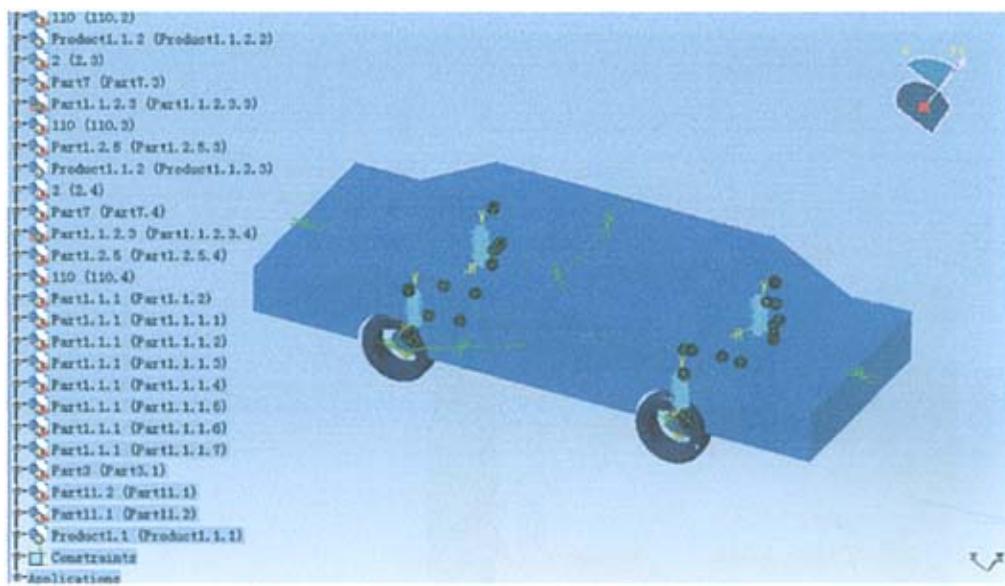


图 4.21 悬架的整车模型图

Fig4.21 The whole car model plot of the suspensions

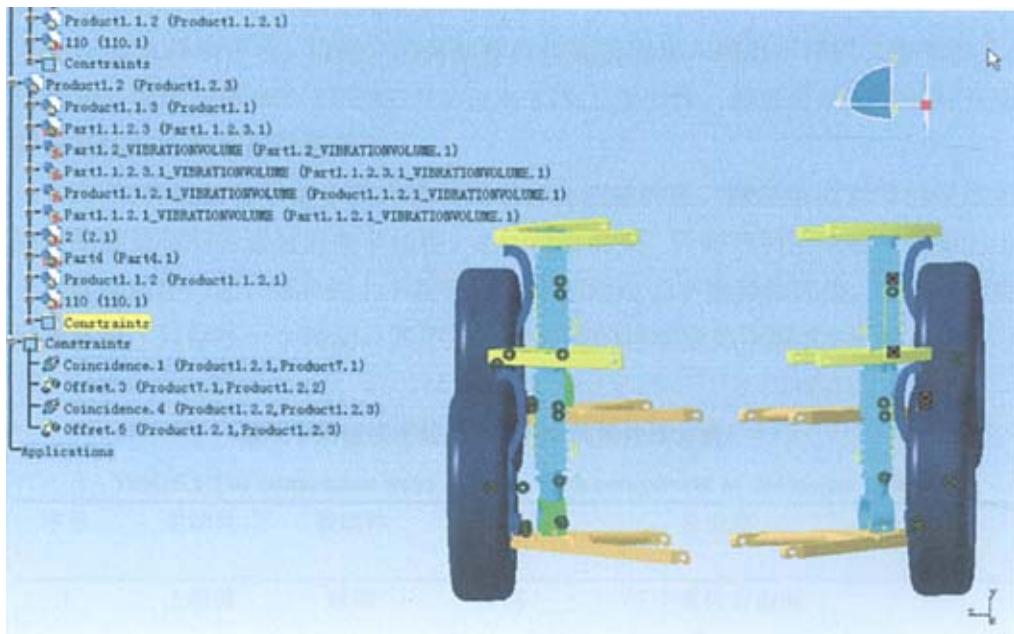


图 4.22 悬架模型图
Fig4.22 The suspensions model plot of the whole car

第五章 悬架样机模型动态仿真分析

5.1 在 CATIA 环境下创建动态仿真

建立了悬架的样机模型之后，就可以对悬架样机模型进行运动学的动态仿真。创建的悬架电子样机运动仿真如下^[36]：

1. 进入样机平台。将建立的悬架样机仿真模型导入到电子样机工作平台上，从 Start 菜单选择 DMU KINEMATICS 进入 KIN 工作平台，然后再从文件处打开所要仿真的文件即悬架样机模型。

2. 对样机的各个部件在样机装配平台上创建约束。根据前面章节的描述可知汽车悬架与车轮通过万向节相连，之间没有约束；转向节利用球幅与悬架的上下摆臂联系在一起；悬架的上下摆臂又与车架通过上下摆臂轴连接，之间的约束是圆柱幅，只存在一个转动。其中各构件之间的运动副如下表 5.1 所示：

表 5.1 所建模型的各个构件之间的连接方式

Table 5.1 The connection ways between each component of the model built

序号	主动件	被动件	约束类型	自由度	驱动命令
1	上横臂	球销	球副	三个旋转自由度	---
2	下横臂	球销	球副	三个旋转自由度	---
3	万向节	球销	球副	三个旋转自由度	---
4	连接轴1	轴销	圆柱副	一个旋转自由度	角度
5	连接轴2	轴销	圆柱副	一个旋转自由度	角度

3. 在 KIN 平台上创建一个机构和运动副。在这里定义的机构是 Mechanism 1 以及一个圆柱副。在创建机构和运动副的过程中，会根据所选的命令自动的进行对话框的更新，在创建机构 1 后会自动进入创建运动副的对话框。机构在样机中是运动机构仿真必需的，将机构创建好之后，只需在此基础上施加操作运动副的驱动命令，就可以进行动态仿真。在这里，将悬架上下摆臂与悬架跟车架相连的轴销建立圆柱副连接。

4. 定义固定件。为了使运动仿真能够正常运行，在电子样机模拟机构中必须要有固定的零件，也就是系统的机架。当没有固定机件机构不能正常运行时，

系统会自动的提示定义固定件。汽车前悬架的运动特点在前面已经知道，在汽车整个运动过程中，悬架对于车架来说，车架相当于是一个固定部分，悬架被看成是运动的部分。因此，在创建的悬架样机模型当中，与车架相连的辅助轴销是固定件，其余的构建是运动件。

5. 定义一个驱动命令。在创建电子样机的运动仿真过程中，为了使模型可以正常运动，驱动命令是必不可少的。在 KIN 的工作平台上，定义驱动命令的方法有两个。第一种方法是在创建运动副的时候直接定义驱动命令；第二种方法是在创建好运动副之后，在双击树形图上的运动副命令，此时会出现定义驱动命令的对话框。在本论文定义的悬架样机上下摆臂的驱动命令都是角驱动。

6. 在 CATIA 环境下对悬架的仿真样机进行运动机构模拟。通过自行键入一个数值来使机件模型运动。

建立好的悬架机构运动模型通过给车轮施加一定的激励冲击来驱动，并通过对悬架四连杆机构角度的更改，来模拟悬架在不同激励下的运动工况。一般只需要对悬架的极限状态来进行模拟分析。汽车悬架的极限状态大致分为：

- 1). 汽车在平稳的路面上行驶时，悬架上下臂在平衡 状态。如图 5.1 所示。
- 2). 汽车在凸起的路面上行驶时，悬架的上摆臂受到上限位块的限制处在的极限位置。如图 5.2 所示。
- 3). 汽车在凹下的路面上行驶时，悬架的下摆臂受到下限位块的限制处在的极限位置。如图 5.3 所示。

通过 CATIA 中的 KIN 模块来定义运行各种工况。

当处在第一种情况时如图 5.1，此时悬架处在自然的平衡状态，上下摆臂不发生变化。在 KIN 平台上表现为，没有激励，即驱动命令出现 0 驱动。

当处在第二种情况时如图 5.2，此时悬架处于向上跳起，上下摆臂会发生相应的变化。

当处在第三种情况时如图 5.3，此时悬架处于向下移动，上下摆臂发生的变化如图所示。

在 DMU 平台上，悬架样机模型的命令树程序段如图 5.4、5.5 所示。

为了更好的利用动态仿真进行悬架对汽车的平顺性研究，还可以进行汽车车身的加速度和悬架的动挠度动态仿真分析，如图 5.6、5.7 所示。该仿真结果可用于加权加速度均方根值^[37]来分析汽车的平顺性。

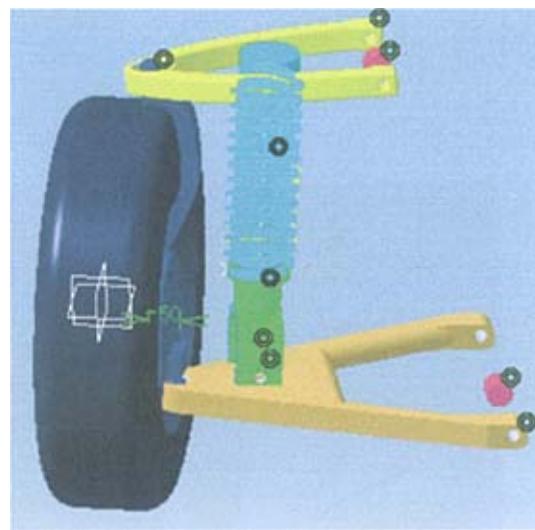


图 5.1 自然状态下悬架状态

Fig5.1 The natural state of suspension

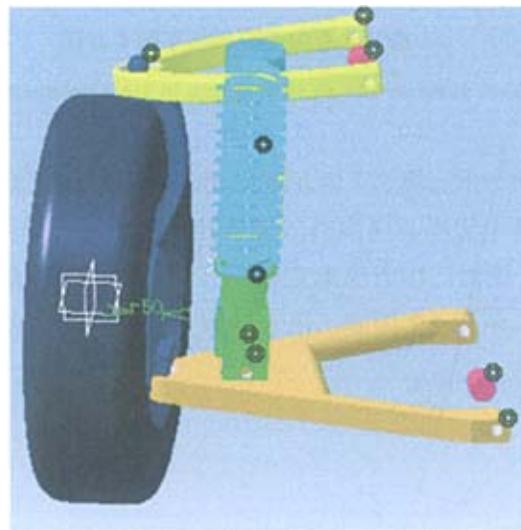


图 5.2 凸起路面下的悬架状态

Fig5.2 The state of suspension on the raised road surface

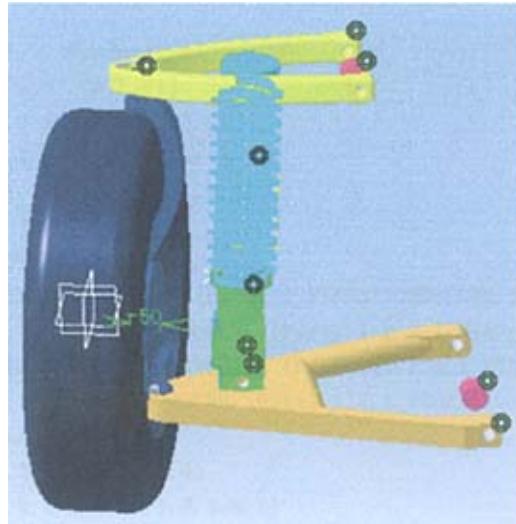


图 5.3 凹下的路面下的悬架状态

Fig5.3 The suspension state of automobile on the concave road surface

这三种运动是前悬架的一侧车轮悬架的运动工况图,另一侧车轮悬架的运动与这一侧完全相同,两侧悬架由于受到车轮的作用而各自发生相应的变化。在实际情况下,当车轮在凸起的路面下时,下限位块起作用,如图 5.2 所示;当车轮在凹下的路面下行驶的时候,上限位块起作用,如图 5.3 所示。

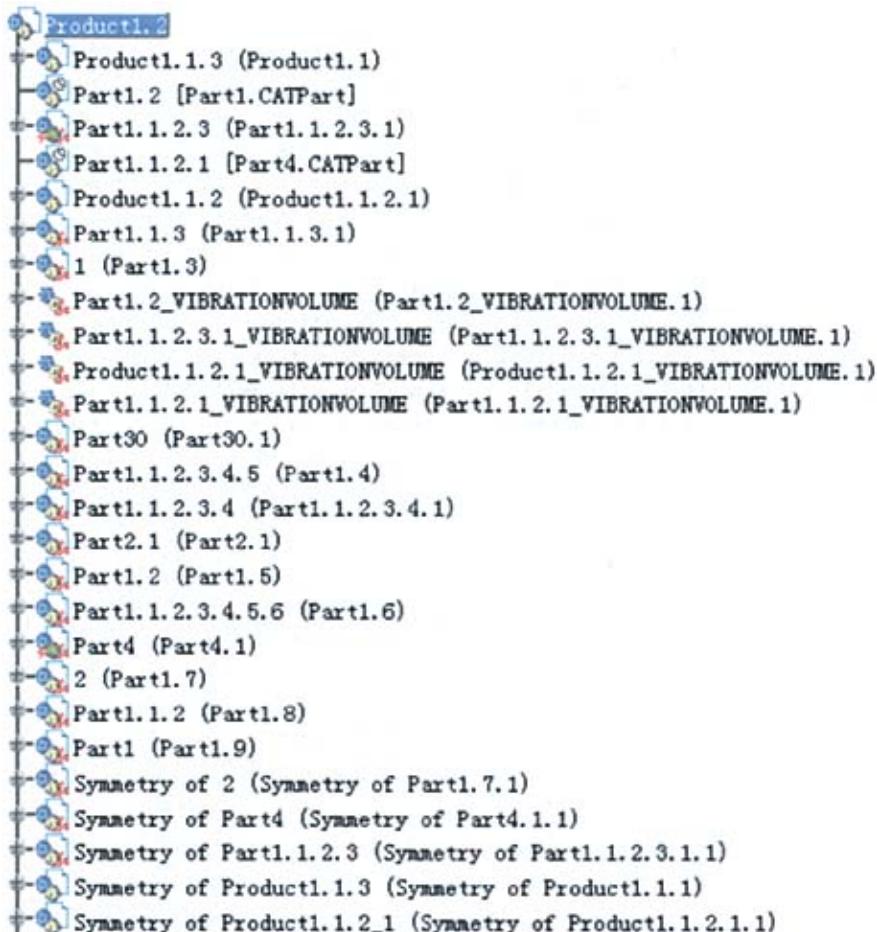


图 5.4 悬架的命令树程序段 a

Fig 5.4 command tree a of suspension

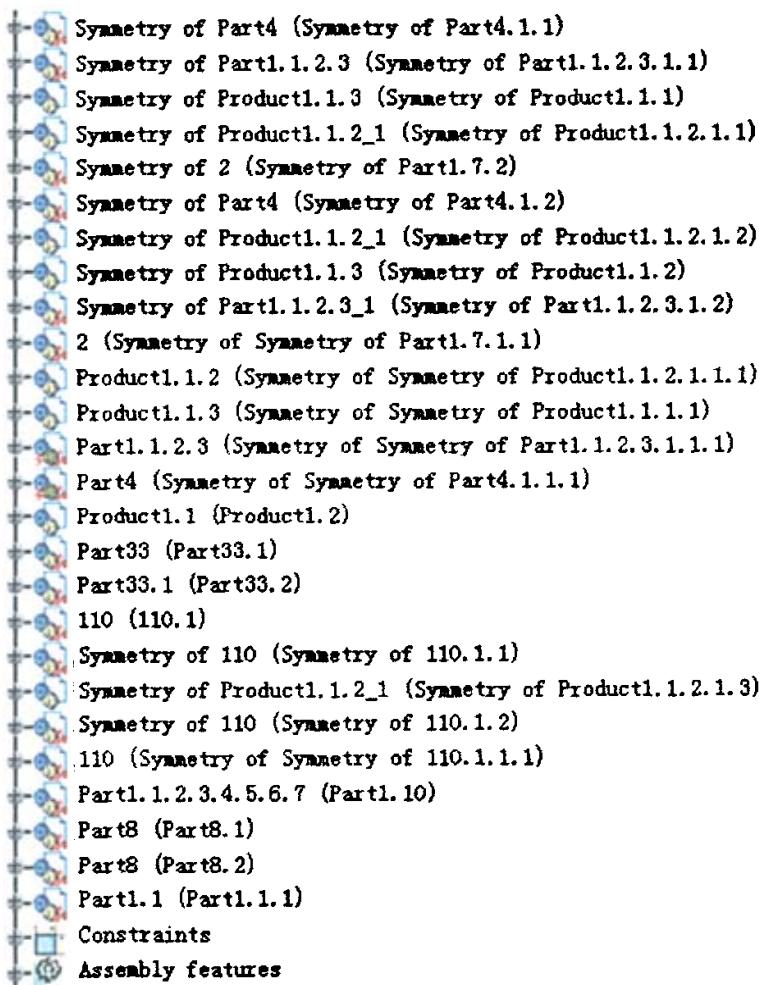


图 5.5 悬架的命令树程序段 b

Fig 5.5 command tree b of suspension

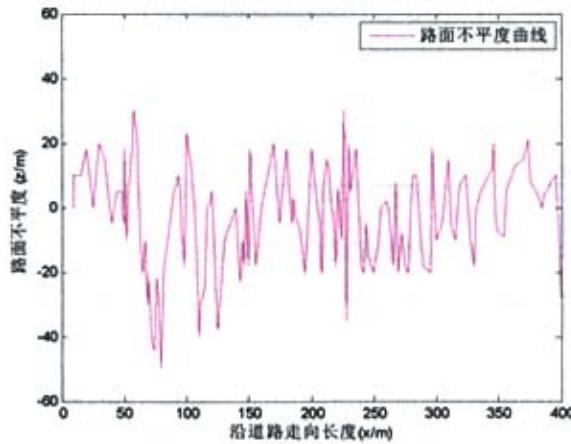


图 5.6 施加于车轮的不平度曲线

Fig 5.6 Curve of road profile randomly generated to tire

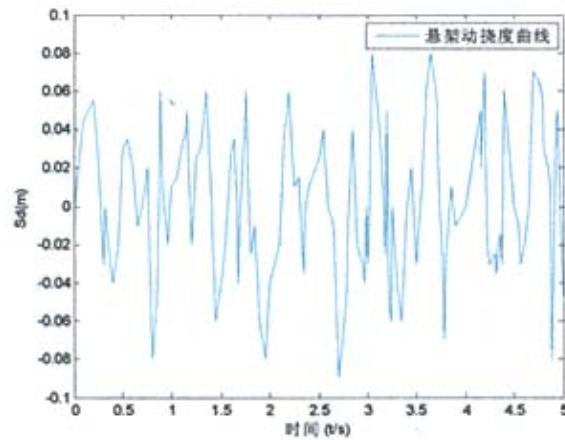


图 5.7 悬架动挠度仿真曲线

Fig 5.7 Simulation Curve of suspension deflection

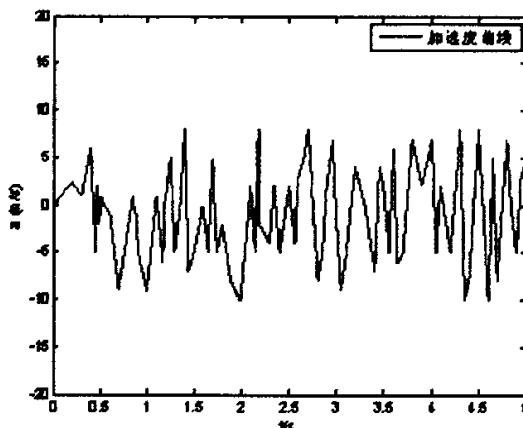


图 5.8 车身加速度仿真曲线

Fig. 5.8 Simulation Curve of Vehicle acceleration

5.2 干涉计算分析

由于客户对轿车的使用性能要求较高，并且具有较为复杂多变的运动工况。如果采用传统的设计方法对悬架系统进行设计，很难将一些设计中潜在的问题解决，而采用电子样机技术，就可以实现对悬架系统的预先设计进行准确的分析校核，从而进一步的发现是否存在干涉问题。

KIN 的干涉分析功能主要适用于对装配模型进行碰撞、接触分析和间隙分析，并判断元件之间的干涉程度。根据需要，还可以进行不同水平的干涉分析，可以从简单的干涉探测到详细的碰撞、接触和间隙分析。本章节就是在软件 CATIA 的机械设计中的装配设计平台上设计并创建了汽车悬架的运动机构模型，也就是需要仿真的样机。然后在空间分析模块下，对创建样机进行了干涉分析，进一步验证了机构的合理性，并对实践上不合理的地方进行改进。

由上一节已经介绍了汽车悬架的运动特点，我们知道汽车悬架的运动在空间上相当于一个四连杆机构，所以检验悬架的运动是否有干涉，实际上就是检验悬架的上下摆臂、连接上下摆臂的转向节摇臂以及作为固定件的车架组成的四连杆机构机构在运动的过程中是否发生干涉，它的设计情况在实际上是否合理。

在检验悬架机构的设计是否干涉之前，在这里需要做出一些说明，那就是悬架的上下摆臂的运动极限是受到上下限位块的限制的，也就是上下摆臂的运动范围受到限制。在对悬架的机构进行干涉分析仿真的过程中，是通过对运动机构添加的驱动命令的角度参数值的变化来限制样机的运动范围的。

悬架机构干涉的检验过程是这样的，首先在装配设计平台上将各元件根据概念产品的初始设计步骤进行装配，得到概念产品，也就是样机模型；其次，装配完成后再导入到 KIN 平台上，对样机进行干涉分析。但是，在作分析前一定

要检查模型的完整性，具体检查的方面有，是否正确命名；是否处于更新状态；是否按正确的系统分类；是否版本统一。

5.2.1 静态干涉分析

悬架的四分之一模型是一个装配件，其模型在第四章中可以看到，因为每个部件几乎都与悬架的运动有关系，所以零部件装配的合理性，直接影响着悬架的运动，从而对悬架进行静态的装配干涉分析是非常有必要的。在结果输出中，还应用了通过矩阵排列形式输出干涉结果，通过矩阵的形式输出可以很快的发现发生干涉的零件以及干涉程度，从而可以很快地将发生干涉的部件优化，直至合乎要求。下面是静态干涉分析结果如图 5.9、5.10、5.11 所示：

1	Part1...	Part1.1.2.3 (Part1.1.2.3.1)	C...	1.79	Relevant
2	Part1...	Part4 (Part4.1)	C...		Not inspected
3	Part1...	2 (Part1.7)	C...		Not inspected
4	Part2...	110 (110.1)	C...		Not inspected
5	Symme...	Symmetry of Part1.2.5 (Symm...	C...		Not inspected
6	Symme...	Symmetry of Part1.2.5 (Symm...	C...		Not inspected
7	Symme...	Symmetry of 110 (Symmetry o...	C...		Not inspected
8	Symme...	Symmetry of Part1.2.5 (Symm...	C...		Not inspected
9	Symme...	Symmetry of Part1.2.5 (Symm...	C...		Not inspected
10	Symme...	Symmetry of 110 (Symmetry o...	C...		Not inspected
11	Symme...	Symmetry of Part2 (Symmetry...	C...		Not inspected
12	Symme...	Symmetry of Part1.1.2.3_1 (...	C...		Not inspected
13	Symme...	Symmetry of Part2 (Symmetry...	C...		Not inspected
14	2 (Sy...	Part1.2.5 (Part1.1)	C...		Not inspected
15	Part2...	110 (Symmetry of Symmetry o...	C...		Not inspected
16	Part1...	Part4 (Symmetry of Symmetry...	C...		Not inspected
17	Part4...	110 (Symmetry of Symmetry o...	C...		Not inspected
18	Symme...	Symmetry of Part2 (Symmetry...	C...		Not inspected

图 5.9 静态干涉分析结果

Fig 5.9 The analysis result of interfere in static behavior

1	Part1.2.5 (Part1.1)	Part1.1.2.3 (Part1...	C...	0	Re...
2	Part1.2.5 (Part1.1)	Part4 (Part4.1)	C...		No...
3	Part1.2.5 (Part1.1)	2 (Part1.7)	C...		No...
4	Part2 (Part2.1)	110 (110.1)	C...		No...
5	Symmetry of 2 (Symme...	Symmetry of Part1...	C...		No...
6	Symmetry of Part4 (S...	Symmetry of Part1...	C...		No...
7	Symmetry of Part2 (S...	Symmetry of 110 (S...	C...		No...
8	Symmetry of 2 (Symme...	Symmetry of Part1...	C...		No...
9	Symmetry of Part4 (S...	Symmetry of Part1...	C...		No...
10	Symmetry of Part2 (S...	Symmetry of 110 (S...	C...		No...
11	Symmetry of Part2 (S...	Symmetry of Part2 ...	C...		No...
12	Symmetry of Part1.2...	Symmetry of Part1...	C...		No...
13	Symmetry of Part1.1...	Symmetry of Part2 ...	C...		No...
14	2 (Symmetry of Symme...	Part1.2.5 (Part1.1)	C...		No...
15	Part2 (Part2.1)	110 (Symmetry of S...	C...		No...
16	Part1.2.5 (Part1.1)	Part4 (Symmetry of...	C...		No...
17	Part4 (Symmetry of S...	110 (Symmetry of S...	C...		No...
18	Symmetry of 110 (Sym...	Symmetry of Part2 ...	C...		No...

图 5.10 优化后的静态分析结果

Fig 5.10 The optimize results of static analysis

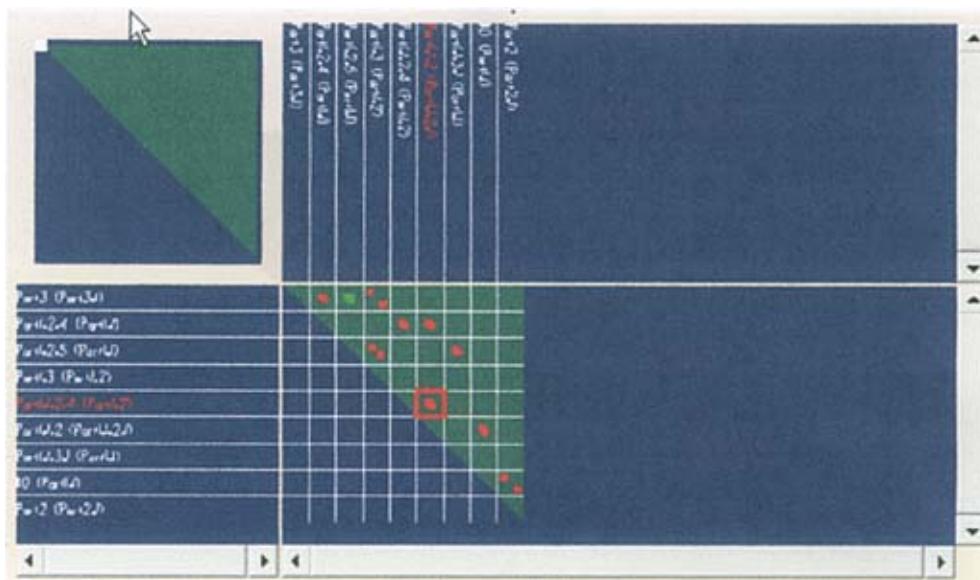


图 5.11 优化后结果的矩阵排列形式

Fig5.11 The matrix arrange of the optimized results

5.2.2 动态干涉分析

在 DMU 模块中进行动态干涉分析，实质上是指根据被定义的位置文件，计算产品或产品组的动态势体外壳。动态实体外壳是根据位置文件 (Adamas 格式，用六个坐标值定义一个位置：三个坐标轴，三个角坐标) 的欧拉坐标中获得，计算生成的结果图形就是零件在每个位置的实体外壳。这个动态干涉分析过程的主要步骤中，汽车悬架模型是根据汽车设计的要求来定义参数的，所以，设计与 DMU 分析实现了很好的集成，充分的发挥了悬架模型动态仿真的作用，一个设计悬架模型在进行零件详细设计控制的同时，也实行了对 DMU 模型的控制，即：悬架模型的修改可以直接反映在零件的详细设计模型上，也可以直接反映在运动机构的定义上，整个产品的设计、修改、DMU 验证可以协同工作，支持并行工程，这样的集成式设计一分析方法可以显著提高开发的效率和质量。

在悬架设计中，进行动态干涉分析的零部件有车轮，因为车轮受到路面冲击时，会发生跳动，在跳动时有可能与轮罩等部件发生干涉；再就是减振器，因为悬架在发生作用的时候，减振器的顶部有可能与汽车底盘的其他的部件发生干涉；还有悬架的上下摆臂，也是因为会与其他的部件发生干涉。所以，有必要对车轮、悬架的上下摆臂、减振器得运动分别进行运动干涉分析。在这里分析的结

果,是以包络体的形式输出的。因为包络体是运动部件运动的最大范围,只要部件、运动部件的位置和包络体位置相互之间不要发生干涉就会合乎要求。下面是运动部件在某一粒度参数下形成的包络体,见图 5.12、5.13、5.14。

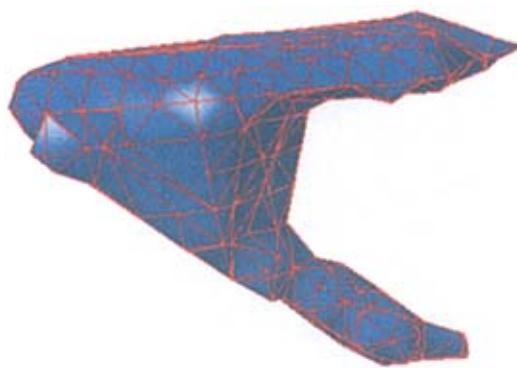


图 5.12 悬架摆臂在设定的粒度参数下形成的包络体

Fig5.12 The net body of wave arm of suspension

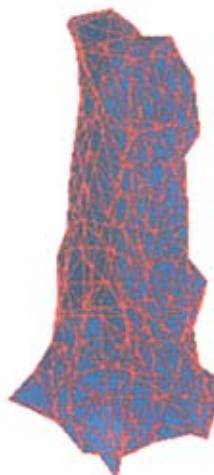


图 5.13 减振器在设定的粒度参数下形成的包络体

Fig5.13 The net body of shock absorbe

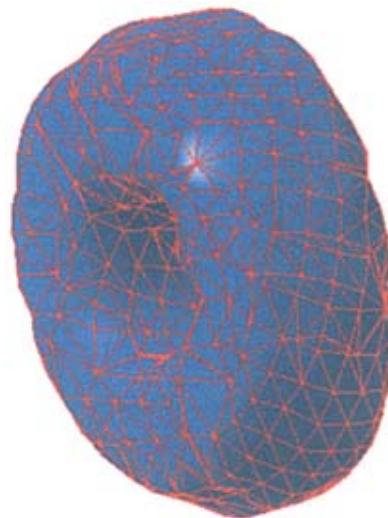


图 5.14 车轮在设定的粒度参数下的形成的包络体

Fig5.14 The net body of tire

通过干涉分析，可以知道发生干涉的零部件，经过修改相应的零部件可以使干涉消除。经过修改后的零部件的干涉情况需要重新进行分析，这就需要对干涉结果进行更新。也就是说，对样机的干涉结果进行编辑也就是将修改后的干涉结果进行更新，然后再进行干涉结果的保存。对更新后的干涉结果的保存时，需要注意的一点是需要将文件的类型选为 **XML**。

第六章 结 论

6.1 本论文的主要工作

随着高速公路的发展，汽车性能的提高，交通密度的增加，安全问题变得日益重要；同时，随着社会生产力的进一步发展，人民生活水平的进一步提高，对汽车性能的要求也进一步的增加。其中与汽车的操纵稳定性和汽车的舒适性密切相关的汽车重要部件是汽车的悬架系统。因此汽车悬架的设计是一个重要的研究方向，而利用 **CATIA** 软件来对汽车悬架进行设计和仿真这一领域来说，在国内的研究还很少。目前，电子样机技术一本广泛的应用到各个领域，本论文就是利用 **CATIA** 软件来对汽车悬架进行建模，然后再进行进一步的干涉分析。本论文所做的工作总结如下：

1、作者在阅读大量文献的基础上，对电子样机技术在设计领域的发展、汽车悬架系统的结构组成及分类、汽车悬架的运动学原理以及电子样机技术原理等做出了详细的阐述。对电子样机技术的功能及应用也做较深入的研究。

2、选用了不等臂式双横臂独立悬架作为所建汽车悬架模型的前悬架，并且建立了汽车前悬架模型；继而建立了汽车后悬模型；在建立了汽车的前悬架模型和后悬架模型的基础上，对汽车的前后悬架模型进行了整合，从而建立了汽车的整车悬架模型。通过汽车的整车悬架模型，详细的分析了汽车悬架的运动特点。并且，在建立汽车悬架模型的过程中，充分的利用了软件 **CATIA** 的功能模块，并且对每个所用的模块作了详细深入的研究。

3、根据汽车悬架的运动特点建立了简化的汽车悬架运动学模型，并且进行了仿真分析。通过分析结果可以得知，在设计悬架的过程中，通过运用 **CATIA** 软件的电子样机技术，可以将一些潜在的错误通过样机的分析结果而提前消除，从而减少不必要的劳动力和财力的浪费。

6.2 本论文存在的不足及学习方向

作者认为，本论文重在探索汽车悬架的电子样机技术，要想做到实用，尚有很多工作要做。本论文主要在于完成汽车悬架的运动副及约束的定义上，这是本论文进行动态仿真分析的关键之处。

由于个人能力有限，作者虽然在课题完成过程中努力工作，但论文中缺点和错误都在所难免，敬请各位老师、专家及同行们批评指正。

致 谢

本文是在导师杜子学教授的悉心指导下完成的。在攻读硕士学位期间，从论文的选题、理论研究和资料查阅都得到了导师的悉心指导和帮助。

在硕士研究生阶段的两年半时间里，恩师严谨求实、刻意创新的治学态度，渊博的专业知识，敏捷的理论思路，踏实工作、对事业无私奉献的工作作风，以及导师循循善诱、诲人不倦的指导，都使我受益匪浅。在导师身边学习的这几年里，导师对工作忘我的投入精神和对科学的研究一丝不苟的品质，让我终生难忘。在生活上，老师更给予学生无微不至得关怀和巨大的帮助，学生才能完成各项工作顺利毕业。

感谢在本文的研究过程中文孝霞和周均师姐在生活和学习上给予我的关怀帮助；以及各位师兄弟妹们给予我得帮助和支持；本文的顺利完成与他们的热情帮助息息相关。

感谢在共同学习工作的两年半时间里同窗好友王红丽、管延武、董新华、李芹英、程阔及叶磊等同学在学习上及生活中给予的无私帮助和有益的启发。

同时，还要衷心的感谢在百忙中评阅论文和参与论文答辩的各位专家、教授！

参考文献

- [1] dassault systemes CAA v5 r12 documentati-on [eb/o]
- [2] LAAKKO,T.and MANTYLA.Feature modelling by incremental features recognition[j].Comput-er-Aided design,1993,25(8) 479-492
- [3] REGLI,W.C.Geometric algorithms for Recognition of Features from solid models[J].Ph.D.thesis,University of Maryland, 1995.
- [4] 李自胜 , 朱颖, 向中凡 , 基于 catia 软件的二次开发技术, 四川工业学院院报 , 2003 , 01
- [5] 孙建民, 孙凤英, 汽车悬架发展及控制及技术研究[j], .黑龙江工程学院学报 , 2001, 15
- [6] del , j.m.castillo and others , optimization for verhicle suspension ,frequeney domain vehicle system dynamics [j] , vehicle system dynamies ,1990,(19).
- [7] 梁新城, 黄志刚, 朱亭, 穆以东, 汽车悬架的发展现状与展望 , 北京工商大学学报 , 2006 , 3
- [8] 姜士湖, 闫相桢, 虚拟样机技术及其在国内的应用前景, 机械设计, 2003 , 2
- [9] 李伯虎, 牟旭东等, 虚拟样机技术[J], 系统仿真学报, 2001.1, (1): 114——117
- [10] 刘斌, 刘秩娅, 韩亚平, CATIA 运动仿真在汽车设计中的应用, 保定长城汽车设计有限公司, 客车技术, 2006, 4
- [11] 叶鸣强, 王耘, 胡树根, 基于虚拟样机技术的双横臂独立悬架振动仿真技术分析, 浙江大学, 林业机械与木工设备, 2005
- [12] 李瑞涛, 方洲, 张文明, 彭龙洲, 虚拟样机技术的概念及应用[J], 2000.7, (7), 38——40
- [13] 贾长治, 王兴贵, 基于虚拟样机的武器系统性能评估方案[J] , 系统仿真学报 , 2001.11, 341——346
- [14] 冯景华, 余冬珍, 机械系统动态仿真技术及 ADAMS 的理论基础研究, 2002
- [15] 蒙艳枚, 李双平, 虚拟样机技术及其在创新产品开发中的应用, 广西科学, 2001.8
- [16] 罗海玉, 参数化设计及关键技术, 甘肃科技纵横, 2003, 19——20
- [17] 祖旭, 张旭, 黄洪钟, 虚拟样机技术及其发展, 农业机械学报, 2004.3
- [18] 胡晓海, 单承赣, 虚拟样机技术在工程车辆中的应用初探, 数字化设计, 2003
- [19] 熊光楞, 李伯虎, 柴旭东, 虚拟样机技术, 系统仿真学报, 2001 .1

- [20] 毛明等, 汽车双横臂独立悬架的运动分析[J], 汽车工程, 1989(4)
- [21] 胡宁等, 双横臂独立悬架运动学分析[J], 汽车工程, 1998, (6)
- [22] 李晓平等, 汽车双横臂式独立悬架机构运动特性分析[J], 合肥工业大学学报, 2001(6)
- [23] 李新耀等, 双横臂扭杆悬架的特性分析及设计计算[J], 汽车工程, 2003(1)
- [24] 韩瑞等, 矢量代数在双横臂独立悬架运动分析中的应用[J], 公路交通科技, 2003(6)
- [25] 戴旭文等, 汽车双横臂独立悬架的运动学分析和计算[J], 车辆与动力技术, 2002(2)
- [26] 金叙龙, 独立悬架运动特性分析[J], 汽车技术, 2001(4)
- [27] 韩锐, 毛务本, 矢量代数在双横臂独立悬架运动分析中的应用, 公路交通科技, 2003, 12
- [28] 苏步青, 华宣积, 应用几何教程[M], 复旦大学出版社, 1990
- [29] 空谢存禧等, 空间机构设计[M], 上海科学技术出版社, 1996
- [30] 张文春, 汽车理论, 机械工业出版社, 2005, 07
- [31] 关文达, 汽车构造, 机械工业出版社, 2005, 1
- [32] 张洪欣, 汽车设计, 机械工业出版社, 1995.2
- [33] 王智明, 杨旭, 平海涛, 知识工程及专家系统, 化学工业出版社, 2006
- [34] 尹万建, 汽车机械基础, 中央广播电视台大学出版社, 2005, 9
- [35] 游立明, CATIAV5 曲面设计从入门到精通, 电子工业出版社, 2006, 7
- [36] 胡挺, 吴立军, CATIA 二次开发技术基础, 电子工业出版社, 2006, 7
- [37] 单岩, 谢龙汉, CATIA V5 机械设计, 清华大学出版社, 2004, 8
- [38] Wiens G J. An Overview of Virtual Manufacturing[A]. Virtual Manufacturing-Proceedings of the 2nd Agile Manufacturing Conference (AMC'95) [C]. Albuquerque, New Mexico, USA 1995, ERI Press, 233-243.
- [39] 李亚军, 黄浩, 虚拟样机技术及其应用, 国家机械局北京机电研究所, 2002, 2
- [40] 杨基厚, 机构运动学与动力学[M], 北京机械工业出版社, 1987,
- [41] 李文君, 蒋永林, 高树新, 陈新, 双横臂独立悬架运动学分析, 汽车工程, 2006, 6
- [42] 宋传学, 蔡章林, 基于 ADAMS / CAR 的双横臂独立悬架建模与仿真, 吉林大学汽车工程学院, 2004
- [43] 陈靖芯等, 基于 CATIA 的三维参数化建模方法及其应用, 扬州大学, 机械设计, 2003, 8
- [44] 吴朝晖, 潘卫平, 运用知识工程在 CATIA V5 环境下参数化建立标准件库的探讨, 武汉大学, 机械设计, 2005, 6
- [45] 高秀华, 王智明, 王继新等, 工程分析及电子样机模拟, 化学工业出版社, 北京, 2004, 9
- [46] 余姗姗, 徐尚德, 雷军向, 多连杆机构分析和虚拟样机技术的发展, 机械设计与制造,

上海理工大学, 2004, 5

[47] 虚拟装配技术在汽车液力变矩器设计中的应用, 武汉理工大学学报, 2005, 6

[48] 许早龙, CATIA 在麦克弗逊式前悬架运动分析中的应用, 应用写真, 2004, 1

[49] 申永胜, 机械原理教程, 清华大学出版社, 2002, 7

附录

作者攻读硕士期间发表论文

1. 王淑芳、杜子学，基于 CATIA 中的电子样机漫游器 DMN 的应用与研究，北京汽车，2005.11