

自然科学与工程类专辑
 基础科学辑
 工程科技 I 辑
 工程科技 II 辑
 农业科技辑
 医药卫生科技辑
 信息科技辑
 人文社会科学类专辑
 社会科学 I 辑
 社会科学 II 辑
 经济与管理科学辑
 哲学与人文科学辑
 编辑委员会

中国优秀硕士学位论文全文数据库 信息科技辑

☐ 2024年
 ☐ 2023年
 ☐ 2022年
 ☐ 2021年
 ☐ 2020年
 ☐ 2019年
 ☐ 2018年
 ☐ 2017年
 ☐ 2016年
 ☐ 2015年
 ☐ 2014年
 ☐ 2013年
 ☐ 2012年
 ☐ 2011年
 ☐ 2010年
 ☒ 2009年
 ☐ 2008年
 ☐ 2007年

☐ 12期
 ☐ 11期
 ☐ 10期
 ☐ 09期
 ☒ 08期
 ☐ 07期
 ☐ 06期
 ☐ 05期
 ☐ 04期
 ☐ 03期
 ☐ 02期
 ☐ 01期

检索项  检索词   栏目

[专辑介绍](#)
[封面](#)
[目次](#)
[征稿通知](#)
[信息](#)
[封底](#)
[页码注释](#)

中国优秀硕士学位论文全文数据库 信息科技辑  
 Chinese Master's Theses Full-text Database Information Science and Technology

中国优秀硕士学位论文全文数据库  
 信息科技辑  
 (月刊)  
 2009 年 第08期  
 2009-07-16—2009-08-15出版

计算机软件及计算机应用

汽车操纵稳定性虚拟仿真研究

彭鹏峰 113

共 1 条 < 1 >

主 管: 教育部  
 主 办: 清华控股有限公司  
 编辑出版: 中国学术期刊(光盘版)电子杂志社  
 地 址:  
 邮政编码: 100084  
 电 话:  
 E-mail:  
 发 行: 同方知网技术有限公司  
 发行范围: 国内外公开发行  
 刊 号: ISSN 1674-0246 CN 11-9144/G  
 订 购 处:

分类号:U27; U46

10710-20050153



长安大学

硕士学位论文

汽车操纵稳定性虚拟仿真研究

彭鹏峰

导师姓名职称	魏 朗 教授		
申请学位级别	硕 士	学科专业名称	车辆工程
论文提交日期	2008 年 05 月 24 日	论文答辩日期	2008 年 05 月 31 日
学位授予单位	长安大学		
	答辩委员会主席	刘晶郁 教授	
	学位论文评阅人	白拴锁 高工	
		刘晶郁 教授	

# **Study on Vehicle Handling and Stability Virtual Simulation**

A Dissertation Submitted for the Degree of Master

**Candidate: Peng Pengfeng**

**Supervisor: Prof. Wei Lang**

Chang'an University, Xi'an, China

## 论文独创性声明

本人声明：本人所呈交的学位论文是在导师的指导下,独立进行研究工作所取得的成果。除论文中已经注明引用的内容外，对论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。本论文中不包含任何未加明确注明的其他个人或集体已经公开发表的成果。

本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名：

年 月 日

## 论文知识产权权属声明

本人在导师指导下所完成的论文及相关的职务作品，知识产权归属学校。学校享有以任何方式发表、复制、公开阅览、借阅以及申请专利等权利。本人离校后发表或使用学位论文或与该论文直接相关的学术论文或成果时，署名单位仍然为长安大学。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

论文作者签名：

年 月 日

导 师 签 名：

年 月 日

## 摘 要

随着汽车技术的飞速发展和道路条件的不断改善,车辆行驶车速大幅度提高,汽车的安全性能倍受重视,与汽车主动安全性能密切相关的操纵稳定性的研究日渐重要。传统的研究方法主要采用实车试验法,不仅需要耗费巨大成本,而且有些试验因其危险性而难以进行。近十多年来,由于计算机技术的飞速发展及对汽车动力学模型和轮胎模型的精确构建,以计算机仿真技术为手段来研究汽车的操纵稳定性成为必要和可能。

本文基于汽车操纵动力学理论和虚拟现实技术,以 Visual C++ 为平台开发了汽车操纵稳定性虚拟仿真系统。其主要内容如下:

1.探讨当前汽车操纵稳定性研究的现状、方法和适用于操纵稳定性分析的九自由度整车动力学模型及轮胎理论力学模型,给出了动力学微分方程的求解方法及编程实现技术。

2.总结出基于 MultiGen Creator 软件建模的关键技术,探讨车辆模型的创建方法与技巧,建立小轿车、货车和客车的三维实体虚拟模型。

3.介绍 MultiGen Vega 应用程序的基本框架,研究基于 Vega 的视景仿真中车辆运动控制、碰撞检测技术、自定义运动模型、运动状态信息实时显示等关键技术。

4.完成了汽车操纵稳定性虚拟仿真系统的开发。并应用该系统对 ZK6100H 客车进行了转向盘角阶跃输入试验、转向盘角脉冲试验、稳态转向特性试验和单移线试验等试验的虚拟仿真分析,获得各试验特性曲线和评价指标。

**关键词:** 虚拟现实, MultiGen Creator/Vega, 操纵稳定性, 虚拟试验

## Abstract

Along with the rapid development of vehicle technique and the continuous improvement of road condition, vehicle running speed increases significantly, and people pay much attention on vehicle's safety performance. So, the study on vehicle handling and stability which is closely related to vehicle's active safety is becoming more and more important. The traditional research method mainly use real car to do experiment. It wastes huge cost and some experiments are difficult to do because of its risk. Due to the fast development of computer technology and precision construction of the car dynamic model and the tire model over the past decade, it is possible and necessary to use computer simulation technology to study vehicle handling and stability.

Based on vehicle handling dynamics theory and virtual reality technique, this paper uses VC++ to develop vehicle handling and stability virtual simulation system. Its main contents are as follows:

1. Study on the present research status and research methods of vehicle handling and stability and describe in detail tire theoretical mechanics model and nine freedom dynamics model which are suitable for studying vehicle handling and stability. Lastly, the solving method of dynamics differential equation and its programming realized technique are given.

2. Summarize the key techniques of using MultiGen Creator software to build model, introduce building method of vehicle model and establish car, truck and bus 3D solid virtual model.

3. Introduce the basic frame of MultiGen Vega application procedure and research on the key techniques of Vega visual simulation, such as vehicle movement control, collision detection technique, self-defined movement model and real-time display of vehicle motion state information.

4. Complete the development of vehicle handling and stability virtual simulation system. This system realizes the virtual simulation analysis of steering wheel angle step input test, steering wheel angle pulse test, steady steering characteristic test and single shift-line test. Take ZK6100H bus as example, each test' characteristic curves and evaluation indexes are outputted.

**Keywords:** virtual reality, MultiGen Creator/Vega, handling and stability, virtual experiment

# 目 录

<b>第一章 绪论 .....</b>	<b>1</b>
1.1 本研究的目的和意义 .....	1
1.1.1 问题的提出 .....	1
1.1.2 本研究的目的和意义 .....	2
1.2 国内外研究现状 .....	2
1.3 本文的主要内容及技术路线 .....	4
1.3.1 本文的主要内容 .....	4
1.3.2 本文的技术路线 .....	4
<b>第二章 汽车操稳性动力学模型 .....</b>	<b>6</b>
2.1 汽车操纵稳定性模型概述 .....	6
2.2 轮胎理论力学模型 .....	7
2.2.1 轮胎参数的计算公式 .....	7
2.2.2 轮胎模型力学特性 .....	10
2.3 九自由度汽车操稳性动力学模型 .....	11
2.3.1 模型的简化原则 .....	11
2.3.2 车轮运动模型 .....	11
2.3.3 汽车合外力的计算 .....	12
2.3.4 动力学方程组 .....	12
2.4 动力学方程组的求解 .....	13
<b>第三章 车辆及试验场景构建技术研究 .....</b>	<b>15</b>
3.1 Multigen Creator 简介 .....	15
3.2 建模关键技术 .....	15
3.2.1 模型优化技术 .....	15
3.2.2 车辆自由度的设置 .....	19
3.2.3 玻璃的制作 .....	19
3.3 三维实体虚拟汽车模型 .....	19
3.3.1 建模方法的选择 .....	20
3.3.2 车辆模型的创建 .....	20

3.4 虚拟试验场模型.....	24
3.4.1 道路模型构建 .....	24
3.4.2 交通工程设施建模 .....	24
3.4.3 辅助设施建模 .....	26
3.4.4 生成场景 .....	26
<b>第四章 基于 Vega 的视景仿真技术研究.....</b>	<b>27</b>
4.1 Vega 简介.....	27
4.2 Vega 应用程序的基本框架.....	27
4.3 场景驱动的关键技术研究.....	28
4.3.1 固定路径漫游 .....	28
4.3.2 碰撞检测技术 .....	30
4.3.3 Vega 环境下的汉字显示技术 .....	32
4.3.4 自定义运动模型的实现 .....	33
4.3.5 车辆运动的实现 .....	36
<b>第五章 汽车操纵稳定性虚拟仿真系统设计 .....</b>	<b>38</b>
5.1 系统开发环境.....	38
5.2 系统实现功能及模块开发.....	38
5.3 系统实现的关键技术介绍.....	39
5.3.1 基于 MFC 的 Vega 编程.....	39
5.3.2 观察者视点的改变 .....	39
5.3.3 运动状态信息的实时显示 .....	41
5.3.4 全屏显示 .....	42
5.3.5 车辆漫游模式 .....	43
5.4 系统界面.....	44
<b>第六章 客车操纵稳定性仿真分析 .....</b>	<b>46</b>
6.1 试验方法介绍.....	46
6.2 虚拟试验.....	48
6.3 试验结果分析.....	49
6.3.1 转向盘角阶跃输入试验结果分析 .....	49
6.3.2 转向盘角脉冲试验结果分析 .....	51



6.3.3 稳态转向特性试验结果分析 .....	53
6.3.4 单移线试验结果分析 .....	55
结论 .....	<b>57</b>
参考文献 .....	<b>59</b>
攻读硕士学位期间取得的研究成果 .....	<b>62</b>
致谢 .....	<b>63</b>

# 第一章 绪论

## 1.1 本研究的目的和意义

### 1.1.1 问题的提出

随着当今世界汽车工业迅速发展和人民消费水平的日益提高,汽车已经成为人们日常生活和工农业生产中不可缺少的重要工具。目前,美国的汽车普及率为 1:1.3,即平均每 1.3 人就有一辆汽车,英国的汽车普及率为 1:2.1。相比于发达国家,我国的汽车普及率较低,但是近年来我国汽车工业发展迅猛,连续保持 20% 以上的增长速度。

然而,随着我国汽车保有量的增加和高速公路的大量修建,交通运输业呈现出车辆高速化、驾驶人员非职业化和汽车密集化的趋势,与此同时,交通事故频频发生。公安部交管局统计显示,2007 年,全国共发生道路交通事故 327209 起,造成 81649 人死亡,380442 人受伤,直接财产损失 12 亿元<sup>[1]</sup>。严峻的现实使人们不得不正视汽车安全性问题。从市场营销的角度看,提高汽车安全性就是增加企业产品的市场占有率;从消费者利益的角度看,提高汽车安全性就是强化对人的生命和财产的保障;从政府管理的角度看,提高汽车安全性就是稳定社会、保证经济繁荣的重要举措。

汽车的安全性分为主动安全性和被动安全性。主动安全性指汽车防止事故发生的能力;被动安全性是指事故发生后,汽车保护乘员和行人的能力<sup>[2]</sup>。从现实生活中可以看到,尽管被动安全技术可以有效地减轻事故灾害,但主动安全技术更为重要,它可以避免人员及车辆的损伤,尤其是可以避免事故后由于交通阻塞引起的间接经济损失,可以防患于未然。因此,汽车必须具有良好的主动安全性,而与汽车主动安全性能密切相关的操纵稳定性的研究也日渐重要。

汽车操纵稳定性是指驾驶员不感到过分紧张、疲劳的条件下,汽车能遵循驾驶员通过转向系及转向车轮给定的方向行驶,且当遭遇外界干扰时,汽车能抵抗而保持稳定行驶的能力<sup>[3]</sup>。传统的研究方法采用实车试验法和数值仿真法。实车试验法需要花费大量的人力、物力、财力,而且有些试验因其危险性而难以进行,同时这种方法明显地具有事后性,不利于汽车产品的开发<sup>[4]</sup>。数值仿真法在一定程度上可以克服上述问题,但此方法用一些表征汽车操纵稳定性的参数来描述汽车的性能,无法直观地获得汽车结构参数与汽车性能的关系。

随着虚拟现实技术的兴起以及对汽车动力学模型和轮胎模型的精确构建,以虚拟仿真技术为手段来进行汽车操纵稳定性的研究成为必要和可能。因此,进行汽车操纵稳定

性虚拟仿真研究是非常有意义的。

### 1.1.2 本研究的目的是和意义

在全面掌握汽车操纵动力学理论并对虚拟现实技术中的建模方法和驱动技术作深入研究的基础上，本研究建立桌面汽车操纵稳定性虚拟仿真系统。利用虚拟现实技术的可视化技术以及人-机交互的功能可以直观、方便地模拟各种操纵稳定性试验，体验车辆在各种工况下的性能，为汽车产品的开发以及定型和性能分析提供了新的平台和方法。

基于虚拟现实技术的汽车操纵稳定性研究具有重要的理论意义和应用价值：

1) 在实际样车试制之前就能够对汽车的性能进行预测，并通过调节车辆的参数来实现车辆性能的优化，不仅缩短车辆研发周期、降低开发成本，而且提高产品设计和制造质量。

2) 利用仿真模型进行虚拟试验，能减少试制、试验的次数，节省资金；可以替代那些难以进行的危险性试验，或用于模拟再现事故的发生。

3) 为汽车造型设计提供新的思路和方法，促进汽车造型设计的研究与发展。

4) 为进行其他的汽车性能试验模拟（如平顺性试验）提供了逼真的虚拟汽车模型和试验场模型。

## 1.2 国内外研究现状

自 1989 年美国计算机科学家雅龙·拉尼尔提出后，虚拟现实技术发展十分迅速，被广泛地应用到汽车的设计和开发中。德国几乎所有的汽车制造公司都建成了自己的虚拟现实开发中心。Daimler- Benz 汽车公司已成功地将虚拟试验技术用于系列化高速轿车的产品开发中，设计者只要给出新车型、新部件的设计方案和参数，就可以通过汽车动态仿真器进行仿真试验，从而准确地预测和评价新型汽车的动力学特性<sup>[6]</sup>。通用汽车公司有一套被称为“虚拟眼睛”(Virtual Eyes)的虚拟现实设计系统，该系统主要目的是评价车身内外饰的设计效果。福特汽车公司在新型汽车设计和开发中已经大量应用虚拟现实技术。宝马公司能在 7 个系列的产品开发中都应用虚拟产品研发的解决方案。丰田公司实施了“前期装载”的概念，进行早期的虚拟设计并配合相应的流程改进，使研发时间和成本降低了 30%~40%。

在 1999 年，美国的 Zhang,Y 等人应用虚拟现实技术研究车辆移线试验，给出了动力学和操纵稳定性的试验结果，这些结果包括轮胎的受力、转向轮在转向时压力分布及

轮胎的压痕的变化、转向轮在转向时倾斜的位置，这些试验结果是用图像实时显示出来的<sup>[7]</sup>。

与国外相比，我国采用虚拟现实技术来进行汽车性能的研究起步较晚，但近年来发展迅速，一些高等院校如长安大学、吉林大学、中国农业大学、合肥工业大学、昆明理工大学在这方面也取得了不少成果。

长安大学汽车学院建立了人-车-路（环境）联合运行虚拟仿真平台，该平台由 RC（Reality Center）系统、模拟驾驶操纵台和数据采集系统组成。驾驶人利用模拟驾驶操作台结合显示系统在虚拟场景中进行仿真试验，研究人员根据仿真过程获得的试验数据进行相应的研究和评价。该系统可以进行人-车-路系统的协调性研究、道路安全性评价和车辆性能虚拟试验。

吉林大学动态模拟国家重点实验室从人-车-环境系统的整体性能为出发点，能够对汽车主动安全性能进行全工况的仿真研究。在动态仿真系统中，可以设定系统相关的各种参数，对人-车-环境进行全工况的仿真；能够对驾驶员模型进行比较精确的模拟，克服了驾驶员行为模型难以用数学描述的困难，系统具有汽车实车场地试验所无法比拟的优势<sup>[8]</sup>。

中国农业大学尹念东、王树凤等人设计了一套桌面虚拟现实系统（DesktopVR）。利用该系统开发了一种汽车操纵稳定性虚拟试验平台，并在平台上进行了汽车双移线的虚拟试验<sup>[9]</sup>。但建立的车辆仿真模型过于简单、缺乏真实感，也没有车内仪表部分，无法以驾驶员的角度来进行虚拟试验。

昆明理工大学熊坚、曾纪国等人研制了用于汽车操纵动力学仿真的虚拟场景自动生成软件，结合汽车操纵动力学仿真数学模型和相关软件，初步建立了一个具有真实视觉感的、实时的汽车操纵动态仿真系统<sup>[10]</sup>。但是该系统在虚拟试验时不能自行控制，不能进行人机交互，且试验过程中无法实时地查看试验数据。

合肥工业大学汪文龙利用 ADAMS/View 模块建立了某轿车的整车模型，进行了稳态回转试验、转向盘角阶跃输入、转向盘角脉冲输入等试验，并建立了基于 OpenGL 的虚拟试验场<sup>[8]</sup>。浙江大学刘星星、杨绪剑等应用 ADAMS 软件进行了转向盘转角脉冲输入的汽车操纵稳定性分析试验，利用虚拟仿真软件 WTK 创建虚拟试验系统，并应用 ADAMS 仿真分析结果驱动虚拟试验系统的汽车模型，实现了整个虚拟试验系统的动态仿真<sup>[11-12]</sup>。这些方法由于采用 ADAMS 软件作为基本软件平台，缺乏地形、道路、环境的三维建模功能，进行二次开发也较为困难。

## 1.3 本文的主要内容及技术路线

### 1.3.1 本文的主要内容

本文以 ZK6100H 客车为仿真对象进行汽车操纵稳定性虚拟仿真系统的研究。根据汽车操纵稳定性的试验要求确定试验参数，编制整车操纵动力学微分方程的求解程序算出在给定试验条件下车辆任一时刻的各运动状态量的值，以此来驱动车辆在虚拟试验场景中完成各种试验，使驾驶员感受车辆在各种工况下的操纵稳定性的性能。在试验过程中，在屏幕上实时地显示车辆在运行过程中各个时刻运动状态参数的值。试验结束后可以输出各试验的特性曲线及评价参数，并实现了对汽车行驶轨迹的模拟。此外，还实现了试验数据的读出，以方便进行详细的后续分析。

本文的主要内容如下：

(1) 探讨当前汽车操纵稳定性研究的现状、方法，系统地介绍轮胎理论力学模型和九自由度整车操纵动力学模型，给出动力学微分方程的求解方法及编程实现技术。

(2) 分析基于 MultiGen Creator 软件建模的关键技术，介绍汽车模型的具体创建方法、技巧，建立小轿车、客车和货车的三维实体虚拟模型。

(3) 介绍 MultiGen Vega 应用程序的基本框架，研究基于 Vega 的视景仿真中车辆运动控制、碰撞检测技术、自定义运动模型、汉字显示、沿固定路径漫游等关键技术的实现方法。

(4) 汽车操纵稳定性虚拟仿真系统的设计。从系统实现的功能入手，划分系统的各个模块。研究观察者视点的改变、运动状态信息的实时显示、全屏显示、车辆漫游模式等虚拟试验实现的关键技术。

(5) 简要介绍汽车操纵稳定性试验方法，应用开发的仿真软件对 ZK6100H 客车进行了转向盘角阶跃输入试验、稳态回转试验、转向盘角脉冲试验和单移线试验的虚拟仿真，并对试验结果进行分析。

### 1.3.2 本文的技术路线

本研究首先根据当前的汽车操纵动力学理论建立适合实时仿真的整车动力学模型，并利用 VC++ 软件编制动力学计算模块，该模块实现在给定试验条件下可以求出任何时刻各个状态参数值。其次，应用 Multigen Creator 建立三维实体虚拟汽车模型；将虚拟汽车模型和试验场模型导入 Vega 中，在 LynX 中设置窗口、通道、环境、碰撞检测等面板，生成 Vega 实例。然后，研究基于 MFC 的 Vega 程序设计技术，根据动力学模块的

计算结果控制车辆在虚拟场景中的运动，完成相应的操纵稳定性试验。最后，对试验数据进行处理，实现试验结果的图形显示及试验数据的读出。本研究的流程图为：

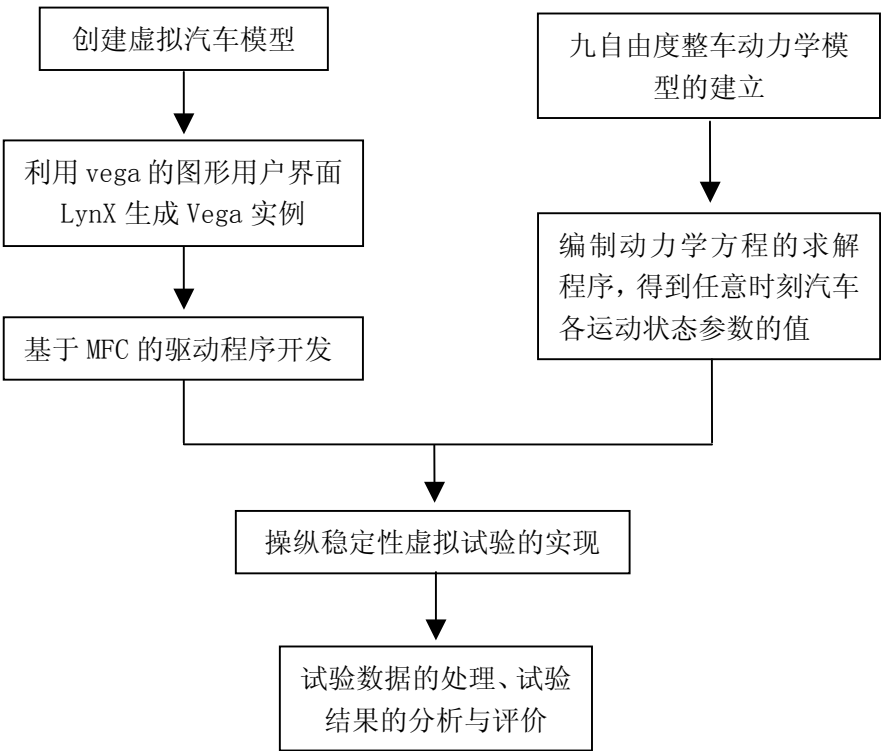


图 1.1 本研究的技术路线图

## 第二章 汽车操稳性动力学模型

在进行操纵稳定性虚拟仿真的研究中，汽车动力学模型的建立是基础的工作之一，本章将建立用于车辆操纵稳定性研究的整车动力学模型。

### 2.1 汽车操纵稳定性模型概述

最初建立的操纵稳定性模型多为侧向加速度小于  $0.3g$  的低自由度线性模型，最经典的模型是 1956 年 Segel 建立的包括横向运动和横摆运动的两自由度模型。此模型集中了汽车的主要性能，把影响汽车性能的参数减至最少，可求出数学模型的解析解，因而能得出普遍适用的结论，所以至今仍然被广泛应用。但是两自由度的简单线性模型存在着缺陷，不能全面描述汽车操纵稳定性。

20 世纪 60 年代到 80 年代，计算机的出现促进了汽车操纵稳定性研究的发展。各国学者建立了许多复杂的车辆模型和相应的仿真程序，如美国密西根大学建立的 17 自由度模型、J. Segal 建立的 15 自由度模型和 Michael 的 18 自由度模型。国内的模型主要有文献[14]建立的一个比较完善的 12 自由度整车动力学模型，用于进行在转向驱动与制动输入条件下汽车的动态响应仿真研究；文献[15]建立了用于模拟汽车在全工况下的操纵和制动动力学特性的 17 自由度动力学模型；文献[16]根据多刚体动力学中的凯恩方法建立的一般两轴汽车的十八自由度数学模型，仿真模型全面考虑了悬架系统、转向系统、空气动力学、载荷转移和轮胎等因素对汽车操纵动力学的影响；文献[17]根据乘员人体工效学和系统动力学原理，建立了考虑乘员人体和纵向制动力的大客车 14 自由度操纵动力学模型。复杂的模型可以描述汽车的非线性特性和更精确的整车运动动态响应。这类模型中许多总成特性是通过试验或人为的方法经过简化，用一组拟合参数来代替的，与汽车运动状态中的动态特性参数有一定的误差，影响了模型的准确度<sup>[13]</sup>。

近年来，随着多体系统动力学的发展，汽车建模方法出现了新的改变。由于对汽车模型的精确度要求越来越高，大型的多体系统动力学方程推导十分困难，因而通用的仿真软件如 ADAMS、DADS 等逐渐被应用。多体动力学软件能自动生成运动学和动力学方程，并利用软件内部的数学求解器准确地求解。这类模型主要用于汽车制造厂家和研究机构进行的汽车辅助工程（CAE）研究。由于多体模型包含部件较多，有些参数难以测量，因而不能从整体上保证系统的准确性。另外，复杂的模型在计算机上求解时运行速度相对较慢，用于实时仿真领域存在较大困难。

## 2.2 轮胎理论力学模型

汽车行驶中转向、制动等行为都必须依靠地面作用力的作用才得以实现，而所有的地面作用力都是通过轮胎作用在车辆上，因此，轮胎的力学特性对汽车操纵稳定性有着非常重要的意义。建立正确的操纵稳定性模型的关键在于所用轮胎模型能否精确有效地表出轮胎的力学特性。

汽车轮胎模型大致分为三类：在对轮胎进行力学简化建立其纯理论物理模型的基础上而得的解析公式；在对轮胎力学特性试验数据进行回归基础上而得的含有拟合参数的经验公式；在理论模型的基础上结合试验统计分析而得的含有拟合参数的半经验公式。著名的经验和半经验模型有：1959年美国密西根公路安全研究所提出的 HSRI 模型，1992年由荷兰学者 H.B.Pacejka 和 E.Bakker 提出的 Magic Formula 模型以及我国吉林大学郭孔辉教授在 Fiala 模型上提出的幂指数公式等<sup>[18]</sup>。经验模型和半经验模型大都具有形式简洁、计算简单、对特定轮胎的计算精度高等优点，但通用性差。相对而言，理论模型以其通用性特征而更具魅力，长期以来一直是轮胎模型研究的主流和方向<sup>[19]</sup>。

在轮胎理论模型的发展中较有影响的是 Fiala 模型、改进 Fiala 模型、Sakai 模型、Gim 模型等，各个模型在侧重于不同方面的分析和计算中各有其优点和不足。评价一个轮胎模型的好坏主要从以下几个方面考察：精确性的高低；计算参数的多少；能否概括轮胎各个状态的力学特性；参数的物理意义是否明确；参数的计算方法是否简单；能否真实地反映试验以外的一些相关因素等。在选取轮胎模型时，需要根据研究目的对各个因素综合考虑确定。

相对其它轮胎理论模型而言，Gim 模型具有计算速度快、工况适应性强、精度较高等优点，因此本文采用 Gim 模型。

### 2.2.1 轮胎参数的计算公式

#### (1) 轮胎弹性特性

轮胎的弹性特性由轮胎的帘布层及轮胎胎冠的变化所决定，其刚度包括纵向刚度  $C_x(i, j)$ 、横向刚度  $C_y(i, j)$ 、侧倾刚度  $C_r(i, j)$

$$C_x(i, j) = \frac{k_x(i, j)wl^2}{2}; C_y(i, j) = \frac{k_y(i, j)wl^2}{2}; C_r(i, j) = \frac{k_y(i, j)wl^3}{12r} \quad (2.1)$$

式中：  $w$ 、 $l$  分别为轮胎接地面宽度和接地线长度；

$k_x(i, j)$ 、 $k_y(i, j)$  分别为轮胎胎冠橡胶的单位面积纵向刚度和单位面积横向刚度；



$i$  表示汽车前、后轮 ( $i=1$  表示前轮,  $i=2$  表示后轮);

$j$  表示汽车左、右轮 ( $j=1$  表示左轮,  $j=2$  表示右轮)。

## (2) 轮胎滑移特性

### a. 轮胎有效侧偏角的计算

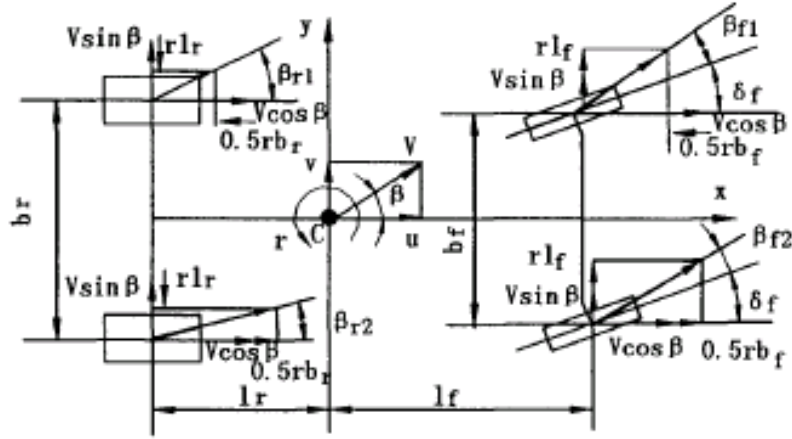


图 2.1 各轮胎的侧偏角

由图2.1所示的汽车运动关系, 可以求得每一个车轮中心的纵向速度  $u_k(i, j)$  和横向速度  $v_k(i, j)$ , 进而可求各车轮的侧偏角  $\beta(i, j)$  [20]。

$$u_k(i, j) = u + (-1)^j b(i) r / 2$$

$$v_k(i, j) = v + (-1)^{i+1} l(i) r / 2$$

$$\beta(i, j) = \arctan\left(\frac{v_k(i, j)}{u_k(i, j)}\right) - D_t(i)$$

所以, 各轮胎的侧偏角为

$$\beta(1, 1) = \arctan\left(\frac{v + rl_f}{u - 0.5rb_f}\right) - \delta \quad (2.2)$$

$$\beta(1, 2) = \arctan\left(\frac{v + rl_f}{u + 0.5rb_f}\right) - \delta \quad (2.3)$$

$$\beta(2, 1) = \arctan\left(\frac{v - rl_f}{u - 0.5rb_f}\right) \quad (2.4)$$

$$\beta(2, 2) = \arctan\left(\frac{v - rl_f}{u + 0.5rb_f}\right) \quad (2.5)$$

### b. 轮胎滑移率的计算

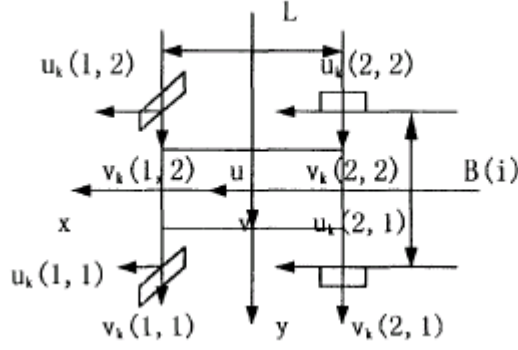


图 2.2 车轮运动关系

将整车的横摆运动看作刚体平面运动，利用基点法，由质心速度  $(u, v)$  求出各车轮中心的纵向速度  $u_k(i, j)$  和横向速度  $v_k(i, j)$ ，然后求得各车轮回转平面方向的速度  $u_w(i, j)$  和回转平面法向方向的速度  $v_w(i, j)$ ，见图2.2示。其中， $\delta(i)$  为车轮转角。

$$u_w(i, j) = u_k(i, j) \cos \delta(i) + v_k(i, j) \sin \delta(i) \quad (2.6)$$

$$v_w(i, j) = v_k(i, j) \cos \delta(i) - u_k(i, j) \sin \delta(i) \quad (2.7)$$

$$\text{纵向滑移率在制动时定义为 } s_x(i, j) = \frac{u_w(i, j) - R_0 w(i, j)}{u_w(i, j)} > 0 \quad (2.8)$$

$$\text{在驱动时定义为 } s_x(i, j) = \frac{u_w(i, j) - R_0 w(i, j)}{R_0 w(i, j)} < 0 \quad (2.9)$$

由侧偏角引起的横向滑移率在制动时和驱动时分别定义为

$$s_y(i, j) = |\tan \beta(i, j)| \text{ 和 } s_y(i, j) = (1 - s_x(i, j)) |\tan \beta(i, j)| \quad (2.10)$$

$$\text{滑移速度 } V_s(i, j) = \sqrt{(u_w(i, j) - R_0 w(i, j))^2 + v_w(i, j)^2} \quad (2.11)$$

$$\text{滑移方向角 } \alpha(i, j) = \arcsin(v_w(i, j) / V_s(i, j)) \quad (2.12)$$

$$\text{仅由轮胎侧倾角 } \gamma \text{ 引起的滑移率 } s_\gamma(i, j) = |\tan \gamma(i, j)| \quad (2.13)$$

### (3) 附着域和滑移域

在轮胎与地面的接触面长度  $l$  范围内沿纵向可分为附着区  $(0 \sim l_a)$  和滑移区  $(l_a \sim l)$ ，分别定义  $l_n = l_a / l$ ,  $S_n = 1$ .  $l_n$  为接触面长度的无量纲值和滑移界限点无量纲值。因为在附着区域分离点处  $(\varepsilon = l_a)$ ，轮胎胎冠弹性应力与摩擦应力相等，据此可求得滑移界限点

$$S_n(i, j) = [(C_x(i, j)s_x(i, j))^2 + (C_y(i, j)s_y(i, j))^2]^{1/2} / 3\mu(i, j)F_z(i, j) \quad (2.14)$$

轮胎弹性变形的侧向临界滑移率  $s_y(i, j)$ 、纵向临界滑移率  $s_x(i, j)$  和  $s_\gamma(i, j)$  的临界值分别为

$$\begin{aligned}s_{yc}(i, j) &= [(3u(i, j)F_z(i, j))^2 + (C_x(i, j)s_x(i, j))^2]^{1/2} / C_y(i, j); \\ s_{xc}(i, j) &= 3u(i, j)F_z(i, j) / C_x(i, j); S_{\gamma c}(i, j) = u(i, j)F_z(i, j) / C_\gamma(i, j);\end{aligned}\quad (2.15)$$

### 2.2.2 轮胎模型力学特性

设作用在轮胎上的纵向力为  $F_x(i, j)$ 、侧向力为  $F_y(i, j)$ 、垂直载荷为  $F_z(i, j)$ 。Gim模型的纵向力特性和横向力特性为<sup>[21]</sup>:

(1)  $\beta(i, j)\gamma(i, j) > 0$  时

① 若  $s_x(i, j) < s_{xc}(i, j), s_\gamma(i, j) < s_{\gamma c}(i, j), s_y(i, j) < s_{yc}(i, j) (0 \leq l_a \leq l)$  则

$$F_x(i, j) = C_x(i, j)s_x(i, j)l_n(i, j)^2 + \mu_x^{(m)}(i, j)F_z(i, j)(1 - 3l_n(i, j)^2 + 2l_n(i, j)^3) \quad (2.16)$$

$$F_y(i, j) = C_y(i, j)s_y(i, j)l_n(i, j)^2 + \mu_y(i, j)F_z(i, j)(1 - 3l_n(i, j)^2 + 2l_n(i, j)^3) + C_\gamma(i, j)s_\gamma(i, j) \quad (2.17)$$

② 若  $s_x(i, j) \geq s_{xc}(i, j), s_\gamma(i, j) \geq s_{\gamma c}$  或  $s_y(i, j) \geq s_{yc}(i, j) (l_a = 0)$  则

$$F_x(i, j) = \mu_x^{(m)}(i, j)F_z(i, j); F_y(i, j) = \mu_y(i, j)F_z(i, j) \quad (2.18)$$

(2)  $C_y(i, j)s_y(i, j) \geq C_\gamma(i, j)s_\gamma(i, j)$  时

① 若  $s_x(i, j) < s_{xc}(i, j), s_y(i, j) < s_{yc}(i, j) (0 \leq l_a \leq l)$  则

$$F_x(i, j) = C_x(i, j)s_x(i, j)l_n(i, j)^2 + \mu_x^{(m)}(i, j)F_z(i, j)(1 - 3l_n(i, j)^2 + 2l_n(i, j)^3) \quad (2.19)$$

$$F_y(i, j) = C_y(i, j)s_y(i, j)l_n(i, j)^2 + \mu_y(i, j)F_z(i, j)(1 - 3l_n(i, j)^2 + 2l_n(i, j)^3) - C_\gamma(i, j)s_\gamma(i, j) \quad (2.20)$$

② 若  $s_x(i, j) \geq s_{xc}(i, j)$  或  $s_y(i, j) \geq s_{yc}(i, j) (l_a = 0)$  则

$$F_x(i, j) = \mu_x^{(m)}(i, j)F_z(i, j); F_y(i, j) = \mu_y(i, j)F_z(i, j) \quad (2.21)$$

(3)  $C_y(i, j)s_y(i, j) < C_\gamma(i, j)s_\gamma(i, j)$  时

① 若  $s_x(i, j) < s_{xc}(i, j), s_\gamma(i, j) < s_{\gamma c}(i, j) (0 \leq l_a \leq l)$  则

$$F_x(i, j) = C_x(i, j)s_x(i, j)l_n(i, j)^2 + \mu_x^{(m)}(i, j)F_z(i, j)(1 - 3l_n(i, j)^2 + 2l_n(i, j)^3) \quad (2.22)$$

$$F_y(i, j) = C_\gamma(i, j)s_\gamma(i, j)(3l_n(i, j)^2 - 2l_n(i, j)^3) - C_y(i, j)s_y(i, j)l_n(i, j)^2 + \mu_y(i, j)F_z(i, j) \times (1 - 3l_n(i, j)^2 + 2l_n(i, j)^3) \quad (2.23)$$

② 若  $s_\gamma \geq s_{\gamma c}$  或  $s_x \geq s_{xc} (l_a = 0)$

$$F_x(i, j) = \mu_x^{(m)}(i, j)F_z(i, j); F_y = \mu_y(i, j)F_z(i, j) \quad (2.24)$$

式中,  $\mu_x^{(m)}$  为纵向最大摩擦系数,  $\mu_y(i, j)$  为横向摩擦系数,  $u_x(i, j) = u \cos \alpha(i, j)$ ,

$u_y(i, j) = u \sin \alpha(i, j)$ 。

## 2.3 九自由度汽车操稳性动力学模型

本文建立了九自由度汽车操稳性动力学模型，这九个自由度分别为方向盘转角、整车纵向速度、侧向速度、侧倾角速度、横摆角速度和四个车轮的回转角速度。该动力学模型可以满足汽车在操纵稳定性试验中转向、加速等行为的需要。

### 2.3.1 模型的简化原则

- (1) 在加减速度、转弯等过程中汽车质心的位置保持不变。
- (2) 忽略轮胎回正力矩的作用。
- (3) 车身的侧倾轴与  $x$  轴一般不一致，但为简单起见，假定车身绕  $x$  轴作侧倾运动。
- (4) 不计轮胎滚动阻力和空气阻力的影响。
- (5) 假设转向系为刚性，输入通过转向盘以固定的传动比施加于转向轮。

### 2.3.2 车轮运动模型

若车辆处于启动、加速状态，驱动轮和从动轮的回转运动受力分析如图 2.3 所示。由此可得驱动轮和从动轮的回转动力学方程如下：

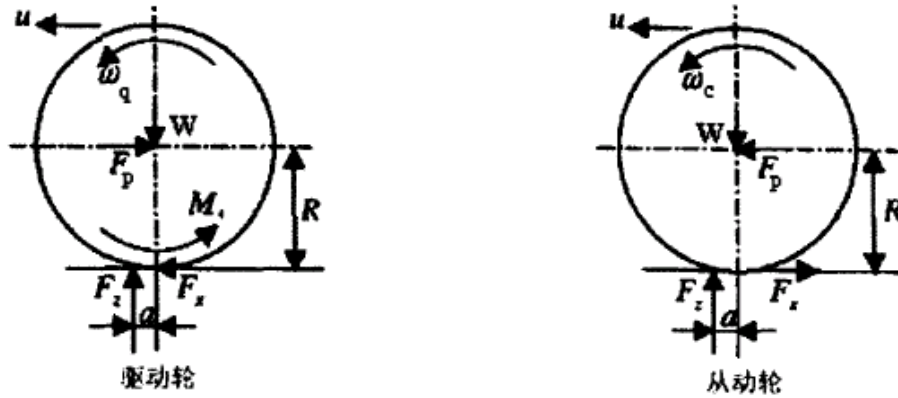


图 2.3 轮胎回转受力图

驱动轮：

$$I_w(i, j)\dot{\omega}(i, j) = M_d(i, j) - F_z(i, j) \cdot f \cdot R - F_x(i, j) \cdot R \quad (2.25)$$

若车辆为后轮驱动，则  $i = 2$ ， $j = 1, 2$ 。

从动轮：

$$I_w(i, j)\dot{\omega}(i, j) = F_x(i, j) \cdot R - F_z(i, j) \cdot f \cdot R \quad (2.26)$$

若车辆处于制动状态，则车轮运动方程为

$$I_w(i, j)\dot{\omega}(i, j) = F_x(i, j) \cdot R - F_z(i, j) \cdot f \cdot R - T_u(i, j) \quad (i = 1, 2; j = 1, 2) \quad (2.27)$$

式中，

$M_d(i, j)$  为作用于驱动轮上的驱动力矩,  $N \cdot m$ ;

$T_u(i, j)$  为作用于车轮上的制动力矩,  $N \cdot m$ ;

$I_w(i, j)$  为车轮绕其中心轴的转动惯量,  $kg \cdot m^2$ ;

$F_x(i, j)$  为地面对车轮的切线反作用力,  $N$ ;

$F_z(i, j)$  为地面对车轮的法向反作用力,  $N$ ;

$f$  为滚动阻力系数,  $f = a/R$ , 本文中  $f$  取零;

$R$  为车轮滚动半径,  $m$ 。

### 2.3.3 汽车合外力的计算

根据Gim轮胎模型计算得到的作用在各个轮胎上的纵向力和横向力, 可以求出整车沿坐标轴方向受到的合力和合力矩。

(1) x轴方向合力  $FX$  的计算

$$F_{xw}(i, j) = F_x(i, j) \cos \delta(i) - F_y(i, j) \sin \delta(i)$$

$$FX = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 F_{xw}(i, j) \quad (2.28)$$

(2) y轴方向合力  $FY$  的计算

$$F_{yw}(i, j) = F_y(i, j) \cos \delta(i) + F_x(i, j) \sin \delta(i)$$

$$FY = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 F_{yw}(i, j) \quad (2.29)$$

(3) 侧倾力矩  $\sum M_x$  的计算

$$\sum M_x = h_g \cdot FY + 0.5(d_f P_{f1} + d_r P_{r1} - d_f P_{f2} + d_r P_{r2}) \quad (2.30)$$

(4) 横摆力矩  $\sum M_z$  的计算

$$\begin{aligned} \sum M_z = & (F_{yw}(1,1) + F_{yw}(1,2))l_f - (F_{yw}(2,1) + F_{yw}(2,2))l_r + (F_{xw}(1,2) - F_{xw}(1,1))b_f / 2 \\ & + (F_{xw}(2,2) - F_{xw}(2,1))b_r / 2 \end{aligned} \quad (2.31)$$

### 2.3.4 动力学方程组

根据动静法原理, 分别对悬架上部、下部进行动力学分析, 整车的动力学状况由这两部分组成, 得到整车动力学微分方程为:

$$m(\ddot{u} - r\dot{v}) + m_s h_s p r = FX \quad (2.32)$$

$$m(\dot{v} + ru) - m_s h_s \dot{p} = FY \quad (2.33)$$

$$\dot{p}I_{xs} - \dot{r}I_{xz} - m_s h_s (\dot{v} + ur) = \sum M_x \quad (2.34)$$

$$\dot{r}I_z - \dot{p}I_{xz} = \sum M_z \quad (2.35)$$

式中参数说明：

$m$ —整车质量， $kg$ ；

$m_s$ —悬挂质量， $kg$ ；

$h_s$ —悬挂质量质心到侧倾轴的距离， $m$ ；

$I_{xs}$ —悬挂质量绕 $x$ 轴的转动惯量， $kg \cdot m^2$ ；

$I_{xz}$ —悬挂质量绕 $x$ 、 $z$ 轴的转动惯性积， $kg \cdot m^2$ ；

$I_z$ —整车质量绕 $z$ 轴的转动惯量， $kg \cdot m^2$ ；

$u$ —汽车纵向速度， $m/s$ ；

$v$ —汽车横向速度， $m/s$ ；

$p$ —汽车侧倾角速度， $rad/s$ ；

$r$ —汽车横摆角速度， $rad/s$ 。

## 2.4 动力学方程组的求解

记  $X^T = \{x_1, x_2, x_3, x_4\} = \{u, v, p, r\}$ ，则  $\dot{X}^T = \{\dot{u}, \dot{v}, \dot{p}, \dot{r}\}$ ，上式动力学方程组可写成如下形式：

$$A\dot{X} = B \cdot x_4 \cdot X + F$$

$$\text{其中, } A = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & -m_s h_s & 0 \\ 0 & -m_s h_s & I_{xs} & -I_{xz} \\ 0 & 0 & -I_{xz} & I_z \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 & m & -m_s h_s & 0 \\ -m & 0 & 0 & 0 \\ m_s h_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} FX \\ FY \\ \sum M_x \\ \sum M_y \end{bmatrix}$$

$$\text{则 } \dot{X} = A^{-1}B \cdot x_4 \cdot X + A^{-1}F \quad (2.36)$$

对于式 (2.36) 这样的一阶常系数线性状态变量微分方程，可以采用很多数值解法进行求解，如改进的欧拉法、泰勒法、龙格-库塔法。常用的方法是龙格-库塔法，但考虑到系统参数的光滑性未知，采用龙格-库塔法在计算过程中计算精度可能会下降，本文采用改进欧拉法<sup>[22-24]</sup>。具体的计算流程如图2.4所示，编制相应的程序，通过反复的迭代可以求得汽车任一时刻的各个状态变量的值。

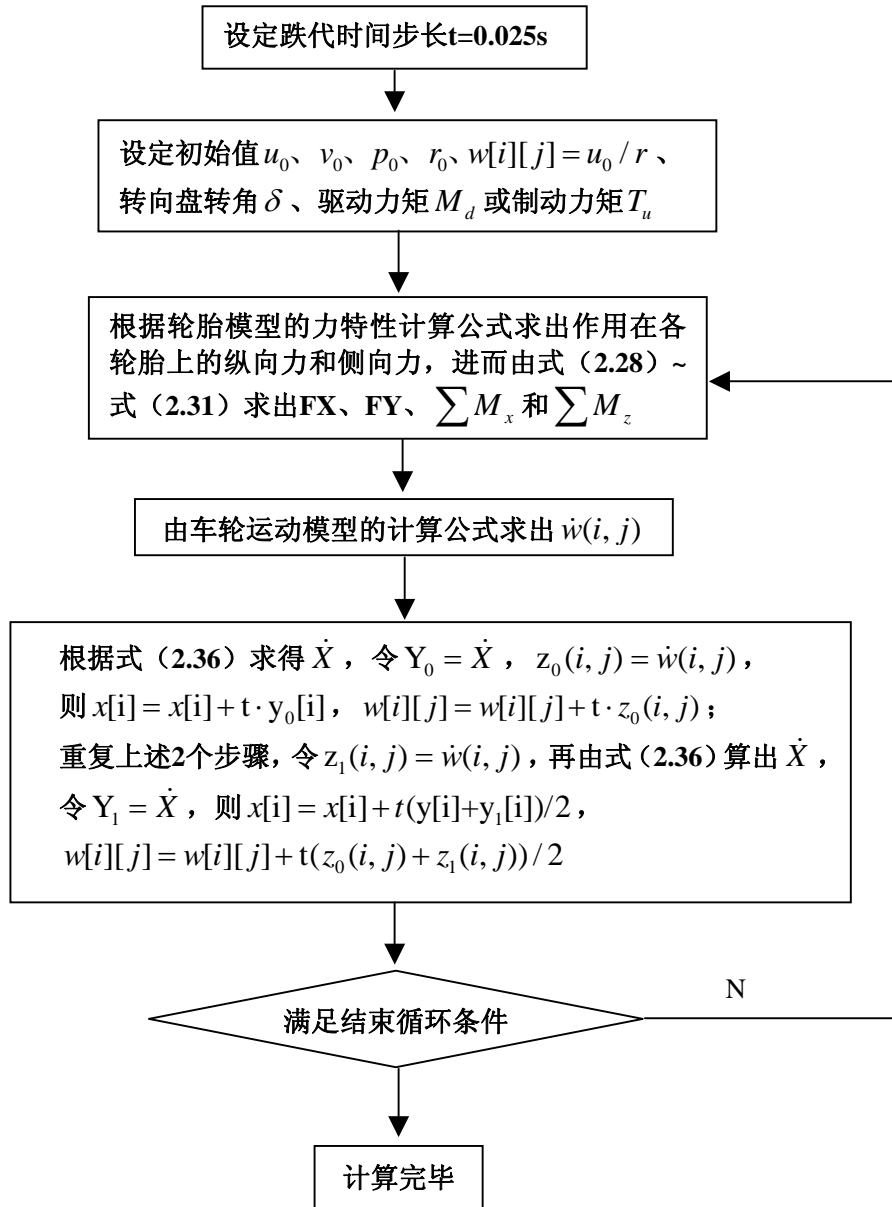


图 2.4 求解九自由度整体动力学方程的流程图

## 第三章 车辆及试验场景构建技术研究

### 3.1 Multigen Creator 简介

MultiGen Creator 软件是美国 MultiGen.Paradigm 公司专门针对可视化仿真行业推出的实时可视化三维建模软件系列，是一套高逼真度、最佳优化的交互式实时三维建模工具。MultiGen Creator 具有强大的多边形建模、矢量建模和大面积地形精确生成功能，以及多种专业选项及插件，还具有 API 程序开发接口，能与实时仿真软件紧密结合，在程序开发中实现模型的各种实时几何变换功能，在视景仿真、模拟训练、城市仿真、交互式游戏及工程应用、科学可视化等实时仿真领域有着世界领先的地位。

MultiGen Creator 系列软件区别于 CAD 等其它建模软件，主要考虑在满足实时性的前提下如何生成面向仿真的、逼真度好的模型。它可以为众多不同类型的图像发生器提供建模系统及工具，它的诸如层次细节、多边形删减、逻辑删减、绘图优先级以及分离面等高级实时功能使得 OpenFlight 格式在实时三维领域中成为最流行的图像生成格式，并成为视景仿真领域事实上的行业标准。

OpenFlight 数据格式是 MultiGen Creator 的基础，是一个分层的数据结构，采用几何层次结构和节点如数据库头 (Database header node)、组 (Group)、体 (Object)、多边形(Polygon)等属性来描述三维物体，它允许用户直接对层次结构及节点进行操纵，可以保证对物体定点、面的控制，使建模过程快捷方便<sup>[25-26]</sup>。

### 3.2 建模关键技术

#### 3.2.1 模型优化技术

在创建模型过程中，视觉效果和运算的实时性是需要统筹兼顾的两个方面，过于简单的模型视觉效果影响仿真的真实性，过于复杂的模型则会影响系统的实时性。合理灵活地应用建模技术能很好地解决模型“实时性”和“真实感”的矛盾。

##### (1) 公告板技术

Billboard 又称公告板，是计算机图形学中增加图形真实感的一种常用手段。在实际的建模中常常需要在场景中添加大量的树木、花卉或者点缀性的装饰，这些模型如果建立其精确的三维模型，则需要足够多的多边形才能完整表示，在仿真时要耗费大量的时间来渲染这些模型，会严重影响系统的实时性。为了提高渲染速率，在实时的计算机图形计算中，常常使用简化的四边形模型，给其添加树木或其他实体的正面图像纹理，这个多边形平面在仿真过程中始终调整自己的垂线沿着观察者视点的方向，给观察者以真



实的视觉效果，这样就用很少的多边形数目加上适当的纹理来表现较为复杂的物体。

在实现 Billboard 中，转动方式要符合以下条件：在 XOY 平面上 Billboard 随着视点的位置变化绕 Z 轴转动，四边形始终平行于 Z 轴，并始终朝向视点。这样，在仿真过程中，所有的四边形都以正面朝向视点位置。

图 3.1 为采用公告板技术创建的树模型，虚拟试验场中所有树木都应用公告板技术。



图 3.1 采用公告板技术生成树木图

## (2) 纹理映射技术

纹理映射(Texture Mapping)是一种将二维图像映射到一个几何形状上来产生特殊效果或真实感的一种技术，并不是实际的几何模型。之所以应用纹理映射技术，一方面，对于复杂实体模型，采用纹理映射可以模拟出丰富的细节，简化模型的构造过程，降低实体模型的复杂度，同时还可以赋予模型鲜明的色彩、贴图特征等。另一方面是在虚拟场景中有大量不规则物体需要模拟，采用纹理映射技术可以较好地模拟这类物体，同时实现逼真度和运行速度的平衡。

纹理的意义可以简单归纳为：用图像来替代实体模型中的可模拟或不可模拟的细节，提高模拟逼真度和显示速度。

使用纹理映射技术有以下优点：

- ①增加了细节水平及景物的真实感；
- ②由于透视变换，纹理提供了良好的三维像素；

③纹理大大减少了环境模型的多边形数据，提高图形显示的刷新率。

Creator 中提供的纹理映射方法有三点投影(3.Point Put)、四点投影(4.Point Put)、表面投影(Surface Project)、球面投影(Spherical Project)、柱面投影(Cylindrical Project)、几何体映射(GeoPut)和环境镜面映射(Environment Map)六种纹理映射方法。Creator 通过将纹理贴图的(u, v)坐标系和几何体表面的像素点(x, y, z)建立起对应关系，来进行纹理的映射。当纹理贴图小于目标平面时，可以根据设定进行平铺或拉伸变换。本文虚拟汽车建模中纹理贴图均采用三点投影法。图 3.2 为虚拟客车模型中车灯、车牌、标识和车轮采用纹理映射技术后的效果图。



图 3.2 车灯、车标、车轮等纹理贴图效果图

### (3) 外部引用技术

外部引用(External Reference)可以直接引用其它数据库的实体到当前的数据库中，当场景特别复杂时，外部引用可以降低模型的复杂程度，提升实时性能。引用的实体模型能够在当前的数据库中重新定位、移动和缩放，但不能修改其实体的内容。在汽车模型构建中，多处使用了外部引用技术，如后视镜、座椅、车轮等。

#### (4) 细节层次 (LOD)技术

细节层次(LOD)技术旨在加快渲染的速度,尽可能地减少在显示一个场景时需要处理的几何元素的个数,而不损失显示效果。LOD 是一系列代表同一个物体或地形但复杂程度不同的特殊节点,实时系统根据距离观察点的远近以及系统可以运行的多边形数选择其中的一个 LOD 节点进行显示。如果观察点距物体很远,则使用一个低级别的 LOD 来表示,当观察点移向该物体时,实时系统依次更换更加复杂的 LOD。LOD 在优化视景仿真时起着很重要的作用,因为每个实时系统对多边形的数量都有一定的限制。当设计一个包含有 LOD 的数据库时,只有在观察者接近物体的情况下,才考虑模型的细节。这样既保证了场景的视觉效果,又能提高场景的绘制帧速,改善系统的实时性<sup>[27-33]</sup>。

#### (5) 子面(subface)的应用

OpenFlight数据库采用层次模型组织,一般的组织结构是数据库头节点.组节点.体节点.面节点。若将面节点设为当前父节点,在其下面创建另一个面节点,那么这个面即为子面。简单地说,子面就是大面内的小面。

对于汽车这样复杂的模型,车身表面有很多形状不规则、复杂的结构件,例如视宽灯、散热器隔栅、行李箱手柄等,若直接生成所需要形状的面,可能需要由很多的多边形来构成;而在已生成的大面的基础上,直接添加一个所需形状的子面,则大大地减少模型中多边形的数量。以行李箱上的把手和视宽灯为例,采用子面的方法,只需要3个多边形;而采用直接生成法,则需要33个多边形。

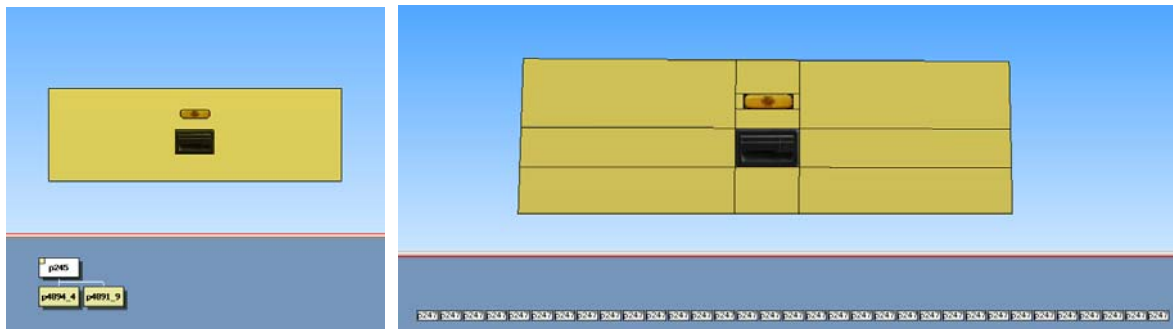


图 3.3 分别采用子面和直接生成法创建行李箱上的视宽灯和把手

#### (6) 选中状态显示工具的应用

选中状态显示(Toggle Display)控制是否在图形视图中显示选中的节点。在虚拟场景建模过程中,由于模型很大,全部显示会影响系统的显示速度。因此,在建模过程中把那些暂时没用到的模型先关闭显示,只显示需要创建、修改的那部分模型,这样可以显著地提高绘图效率。

### 3.2.2 车辆自由度的设置

MultiGen Creator 中自由度 DOF 实际上是一组数据库的节点。一个自由度节点决定了其子节点所属几何体的运动，节点的属性决定了它的运动形式，如绕轴的转动、沿轴线的平动及其各自的运动范围。运动量的大小和方向是由 DOF 所决定的局部坐标系决定的。

在进行操纵稳定性虚拟仿真时，让车辆在虚拟试验场中运动来模拟操稳性试验，因此车辆模型需要定义一定的自由度。考虑到 Creator 中 DOF 节点必须是组节点(Group Node)的直接子节点，因此在建模时把整车分为车身 body1、左前轮 lfw、右前轮 rfw、左后轮 lrw 和右后轮 rrw 等几大组成部分。其中，四个车轮的 DOF 节点的运动形式均是绕车轴中心线（y 轴）旋转，旋转范围是  $0\sim 360^\circ$ 。对于转向轮，其运动形式除了绕自身轴的转动之外，还有转向运动，即转向轮还有绕 Z 轴的转向运动，设置旋转范围为  $-45\sim 45^\circ$ 。而对于车身而言，车身具有绕自身坐标系的俯仰、侧倾运动，因为这两种运动的幅度都较小，在本文中均设置为  $-10\sim 10^\circ$ 。此外，在操纵稳定性试验中车辆要进行转向运动，因此，车身内的方向盘除了继承了车身的自由度外，还应具有绕转向轴的转动自由度，旋转范围设置为  $0\sim 360^\circ$ 。

在应用 DOF 节点时，应该注意以下三个方面：

(1) DOF 节点的名称的字符数量不能是 2 或 4 的倍数，否则在 VC 编程的时候使用 VgFindPart()函数无法找到节点。

(2) DOF 节点下不能有外部引用，否则也无法找到节点。

(3) DOF 节点上、下都不能有变换矩阵，例如 g2(T)。

### 3.2.3 玻璃的制作

在绘制车辆模型时，窗户、前风窗、车门等处都要用到玻璃，通常情况下玻璃是透明的，所以应在需要添加玻璃的位置先绘制多边形，然后给这些多边形添加合适的材料，通过调整材料的透明度（Alpha）即可完成玻璃的制作。应打开 View Panel 中 Alpha Blending 开关，否则看不到透明的效果。

## 3.3 三维实体虚拟汽车模型

车辆模型是进行虚拟现实视景仿真的基础，考虑到试验需要各种不同参数的车辆模型，文中建立了三种不同试验汽车(轿车、客车和货车)的模型。下面描述其建模要点。

### 3.3.1 建模方法的选择

汽车的几何尺寸建模就是根据真实汽车的特性，赋予汽车模型以三维尺寸、外形参数、材质、颜色等外观特征。在实际的视景仿真中，由于仅仅需要反映汽车的侧偏、横摆、侧倾等运动，没有必要建立起如同工业造型那样逼真、复杂的模型。在实际的建模中，主要有三种方法建立车辆三维模型：

方法 1：首先利用 AutoCAD 中建立模型的几何尺寸，主要包括汽车的长、宽、高和车身外形轮廓，车轮三维特性以及和车身的相对位置关系，车门、车窗、前围、侧围、后围的三维造型等必要的外形部件，之后保存为 DXF 文件，然后导入到 Creator 中进行修正，添加材质、纹理，修改模型数据库的层次，优化模型结构，最终得到目标模型。

方法 2：利用 3Dmax 软件优秀的放样建模特性，建立起汽车模型的轮廓和各个主要组成部件，然后保存模型为 3DS 格式的文件，用 Creator 导入这些模型。一般来说，导入的模型比较复杂，多边形比较多，需要在 Creator 中进行简化之后才能使用。用这种方法建立的模型外形比较逼真，但是即使进行了简化，其三角形还是比较多，在高性能仿真的平台上仿真的视觉效果比较突出，在一般的桌面虚拟现实系统中，系统的负荷比较重，实时性能有待提高。

方法 3：直接在 Creator 中，按照分层思想，划分汽车模型的各大部件，建立其模型。这种方法建立的模型，层次比较简洁鲜明，实时性能也比较优越<sup>[5]</sup>。

本文中建立的汽车模型需要具有优秀的实时性能，虽然采用前两种方法建立的模型经过转化、优化之后，在专业的图形工作站也可以使用，但是本文所建立的基于 PC 的虚拟仿真系统中，模型的多边形数量不能太多，数据库结构也必须层次分明，故采用第三种方法建立汽车模型。

### 3.3.2 车辆模型的创建

通常情况下，建立具体车辆的三维模型应根据车辆的设计图纸给出的尺寸参数，利用 Creator 提供的建模工具建立车辆模型。然而，一般情况下很难获得车辆的设计图纸或者详细的设计参数，因此通常的做法是用二维图像作为背景图像来创建车辆三维模型，二维图像的作用是提供建模参考点，获得车辆前、后、左、右视图的图片及车辆的基本尺寸参数后就可以按比例对车辆进行建模了。

#### 1) 汽车外观模型

##### (1) 轿车



由于轿车车身的左右两边对称，所以只需画出其一半的模型，利用镜像工具就可以得到车辆的完整模型。图 3.4 为本研究建立的 santana2000 轿车模型。



图 3.4 santana2000 轿车模型

## (2) 货车

货车车头、车厢都具有左右对称的性质，只需画其一半的模型，通过镜像再对局部细节加以修改即可得到完整的车头模型和车厢模型。从车外看实体货车，还会看到底盘上的悬架系统、油箱、水箱、传动轴等，因此还需要绘制这些部件的模型。相比于客车和轿车，货车外观模型的绘制相对比较复杂。

图 3.5 和图 3.6 分别为钢板弹簧悬架和水箱模型图。图 3.7 为 SX1254UM504 载货汽车外观模型图。

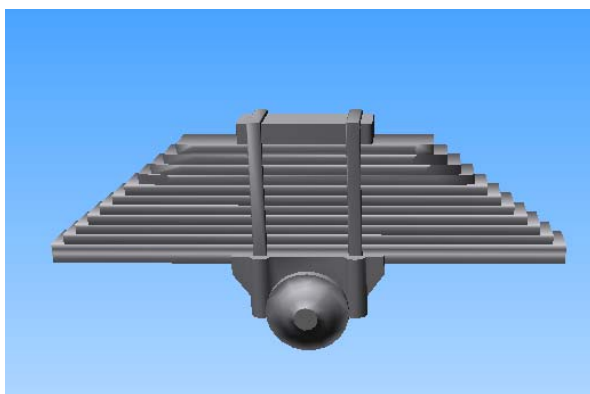


图 3.5 钢板弹簧悬架模型图

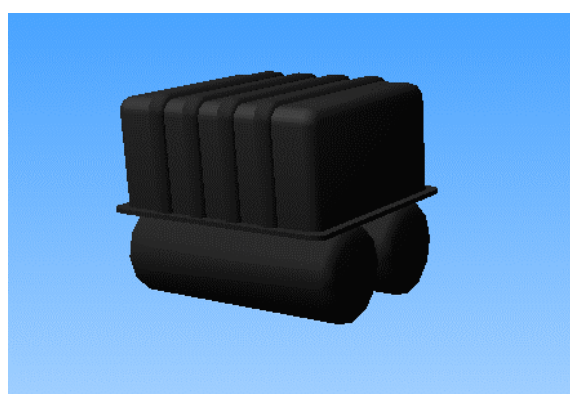


图 3.6 水箱模型



图 3.7 SX1254UM504 载货汽车模型

### (3) 客车

客车的左右侧几乎一样，先画出客车左侧围，然后将左侧围以纵向中心面进行镜像，对车门处进行修改就可以得到客车的右侧围。前、后围关于纵向中心面对称，故只需画出一半再镜像即可。ZK6100H 客车外观模型如图 3.8 所示。



图 3.8 ZK6100H 客车外观模型

### 2) 车身内部模型

对于一般的汽车运动模拟仿真，只需要绘制车辆的外观模型就能够满足仿真的需

要。而本文以 ZK6100H 客车为研究对象进行汽车操稳性试验仿真，试验时以驾驶员或乘员的角度来体验车辆的性能，为达到逼真的仿真效果，除绘制大客车的外观模型外，还得绘制车身内一切肉眼可以看得见的东西，如仪表盘、方向盘、座椅等。

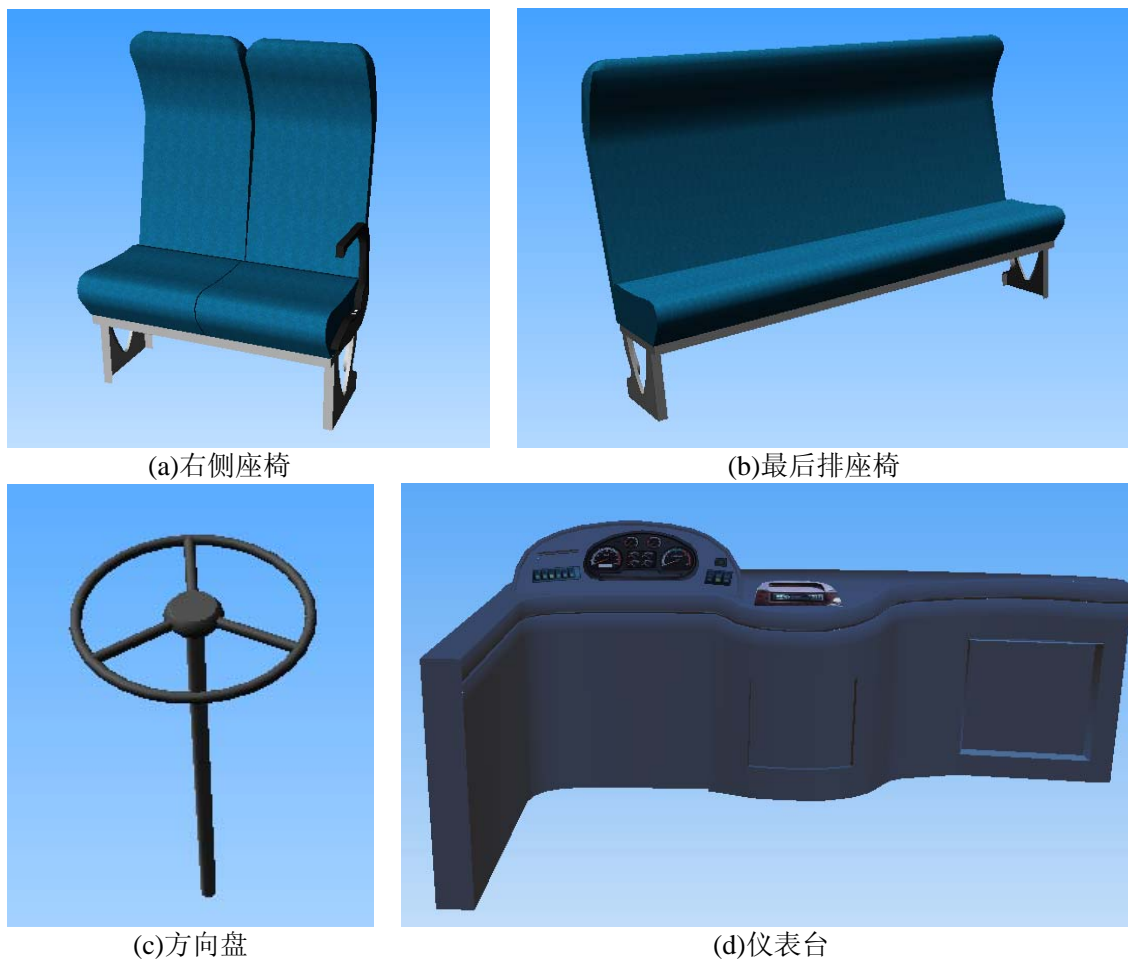


图 3.9 车身内构件模型

最后生成完整的客车模型，如下图所示：



图3.10 ZK6100H客车完整模型



### 3.4 虚拟试验场模型

汽车试验场是专供汽车进行道路试验用的场所。要进行汽车操纵稳定性试验，必须建立虚拟的汽车试验场模型。虚拟试验场景由试验道路、交通标志牌、建筑物、草地和树木等构成。下面简要介绍其构建过程。

#### 3.4.1 道路模型构建

Creator 中有标准的道路建模模块 RoadPro，可以迅速、方便地构造出包含曲线超高、缓和曲线和竖曲线在内的真实的道路模型。应用 RoadPro 进行道路创建可以分成两个步骤：选择 Road/Construction Tools 菜单，在其界面中输入相关的道路参数，构建道路三维中心线模型；选择 Road/Tessellation Tools 来产生细节层次模型并定义不同细节层次水平下道路的外表特征。为了减少建模数据量，仅在高 LOD 中采用外部引用和实例技术在道路线框模型中设置护栏、交通标志等交通工程设施。

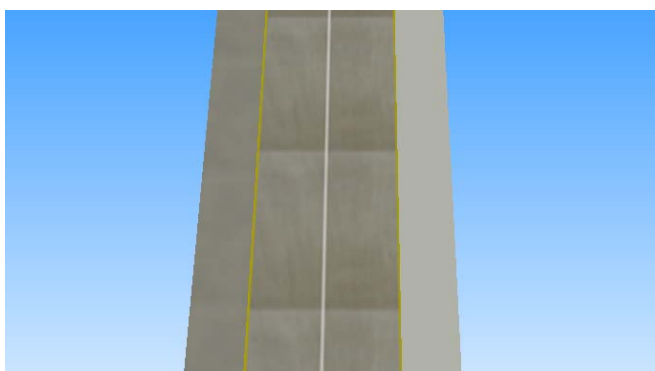


图 3.11 道路模型

#### 3.4.2 交通工程设施建模

为了增强试验场仿真模型的真实感，在道路模型中添加了逼真的交通工程设施模型，以真实、完整地表达虚拟道路及其环境。

##### (1) 安全护栏

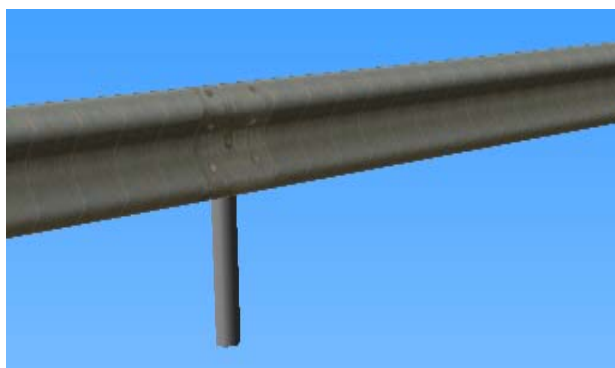


图 3.12 安全护栏三维模型

本研究中安全护栏采用波形梁护栏。根据标准确定护栏从地面到横梁的高度为 755mm，护栏梁宽度 310mm，立柱间距 4m。创建护栏模型如图 3.12 所示。

## (2) 交通标志牌

本研究主要进行各试验路段指示标志牌建模，支持方式为单柱式，模型设计参数根据道路交通标志标准确定。实际上，创建标志牌模型的难点在于纹理的制作。本文采用的方法是在 AutoCAD 中先按要求绘制出版面上的内容，再将其捕捉为图片，然后用 Photoshop 将图片的格式转换为 Creator 软件可用的 RGB 格式。

部分模型如图 3.13 所示。



图 3.13 标志牌

## (3) 道路照明设施

试验场道路照明设施采用柱式，路灯高度 8m，间距 80m。创建照明设施模型如图 3.14 所示。

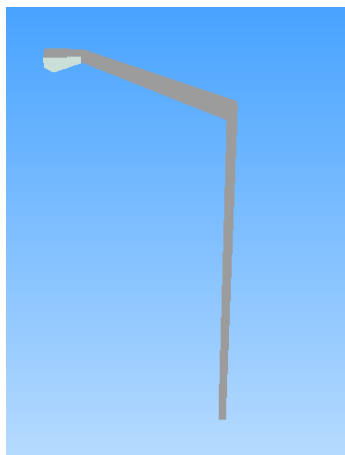


图 3.14 道路照明设施

### 3.4.3 辅助设施建模

以道路模型数据库为基础，参考真实试验场，设计并构建试验道路周边环境辅助设施模型数据库。周边环境辅助设施主要考虑适当的辅助道路和安全带，以及具体的房屋、建筑物等<sup>[34]</sup>。辅助设施模型如图 3.15 和图 3.16 所示。

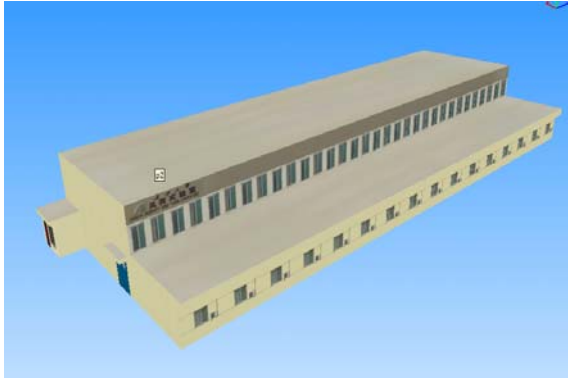


图 3.15 风洞试验室



图 3.16 房屋

### 3.4.4 生成场景

整合上述模型，最后生成虚拟试验场三维仿真模型，如图 3.17 所示：



图 3.17 虚拟试验场模型

## 第四章 基于 Vega 的视景仿真技术研究

### 4.1 Vega 简介

Vega是美国MultiGen.Paradigm公司用于虚拟现实、实时视景仿真、声音仿真以及其他可视化领域的世界级领先应用环境。它将先进的模拟功能和简单易用的工具相结合,使用户可以用简单的操作迅速地创建、编辑和运行复杂的仿真应用程序。MultiGen.Paradigm还提供和Vega紧密结合的特殊应用模块,这些模块使Vega很容易满足特殊模拟要求,例如,声音、航海、红外线、雷达、高级照明系统、动画人物、大面积地形数据库管理、CAD数据输入、DIS等等。

Vega是一种X/Motif基础的可视化图形开发环境Lynx,可以快速、容易、显著地改变应用性能、视频通道、多CPU分配、视点、观察者等功能,而不用编写代码。Lynx可以扩展成包括新的、用户定义的面板和功能,快速地满足用户的特殊要求。Lynx的重要功能是通过可视化操作建立起三维场景框架,并将其存在一个应用定义文件(.ADF)中。WinNT上的Vega支持以下模块: Special Effects特殊效果、Marine海浪模拟、AudioWorks2音响环境生成、面板仪表座仓、DIS/HLA分布交互仿真、SensorVision红外传感器模拟、LADBM大地景数据库管理、Light Lobes移动光源模拟、DI.Guy人体动作模拟。

Vega还包括完整的C语言应用程序接口,为软件人员提供最大限度的软件控制和灵活性。Vega具有功能强大的API函数库,尤其是在图形编程方面可以有效地减少时间的花费。Vega支持多种数据库输入,允许多种数据格式综合显示。通过调用Vega API函数库可以对已经建立好的三维场景进行渲染驱动。Vega最大的优点是为非程序员实现一个视景仿真系统提供了便捷。同时,它支持NT平台,使得借助于PC环境建立视景仿真系统成为可能<sup>[35-38]</sup>。

### 4.2 Vega 应用程序的基本框架

典型Vega应用程序一般都按照图4.1所示的基本框架。Vega应用程序一般分为两个主要的阶段,首先是Vega系统的静态描述阶段,然后进入Vega系统的动态循环。静态描述阶段主要是为确保Vega系统的正常运行进行必要的系统配置,包括三个步骤:

(1) 首先调用vgInitSys()函数对系统进行初始化,所有基于VegaApp的应用程序都必须首先调用该函数;

(2) 创建仿真应用程序所需的各种Vega类事例,这个过程可以通过调用

vgDefineSys()函数来读取事先定义好的ADF文件，也可以直接使用相应的VegaAPI来创建这些实例；

(3) 调用vgConfigSys()函数完成系统配置。系统配置主要完成进程分配的任务，系统根据应用程序所设置的多重处理模式、运行平台的处理器个数等确定具体的进程分配并准备进入Vega主循环。

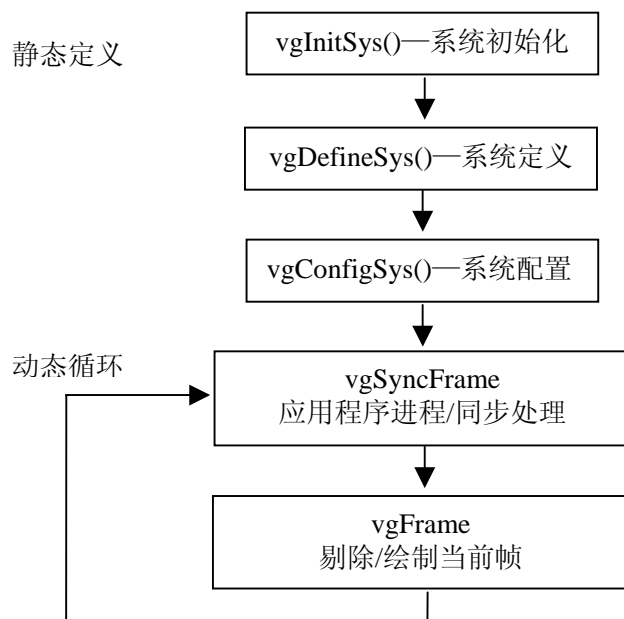


图 4.1 Vega 应用程序基本框架

主要的Vega仿真都是在Vega主循环中实现的，Vega主循环可以分为两个严格有序的步骤：

(1) 调用vgSyncFrame()函数进行当前帧的应用进程同步处理，即保证应用程序与给定的帧频率同步；

(2) 调用vgFrame()函数完成当前帧的剔除和绘制进程及相关处理。

vgSyncFrame()和vgFrame()函数一起决定了Vega进程能够与设定的帧频率保持同步，从而能够保证渲染出流畅的动态视景仿真画面，再加入相应的交互控制代码就可以完成各种各样的仿真应用<sup>[35]</sup>。

## 4.3 场景驱动的关键技术研究

### 4.3.1 固定路径漫游

Vega中的路径（Pathing）模块和导航器（Navigators）模块可以很好地实现虚拟对象沿固定路径在场景中漫游。路径是一组在场景中设置了的控制点；导航器是路径中与这些控制点相关的一组数据信息集合。一个特定的导航器可以解释出路径的数据结构，

并可以通过路径控制导航器穿过其控制点的运动方式。

路径和导航器模块提供了vgPath类和vgNavigator类。vgPath类通过路径对象中的位置作为厄密(Hermite)样条段的控制点。这样，vgNavigator类就可以通过设置切向量、紧密度参数、速度、持续时间等与路径类相结合。样条导航(SplineNavigator)类是从vgNavigator派生得到的，当样条导航器遇到一个新的控制点时，就用相关的方式来处理这一导航数据结构。利用这些信息，导航器通过当前曲线段平滑进入下一曲线段。

Vega的Lynx自带路径设置工具Path Tool可以为用户在未编写路径导航代码时设置控制点和导航参数提供了方便。Path Tool是路径和导航类的图形设置界面，并直接显示所要编辑的三维虚拟场景。使用这个工具，可以在三维场景中移动、插入、删除路径控制点；导航器可以在Path Tool实时环境中创建、编辑导航标记，并预览控制点按照导航标记运动的过程。如果用PathTool创建了一条路径和一个导航器，路径和导航数据就作为路径文件和导航标记文件存在磁盘上，Vega其它基本模块在配置中读入这些文件无需编写任何代码。

路径和导航器也可以完全通过API接口函数编程创建。vgPath类提供函数设置路径控制点，vgNavigator类提供函数设置导航标记。通过编程，可以根据需要动态的改变路径和导航参数，使得路径控制更加灵活<sup>[39]</sup>。

在Lynx中实现沿固定路径漫游的基本步骤：

(1) 创建路径对象，在pathing模块中新建一个路径对象，然后再Control Point File标题下输入路径文件名，扩展名为pth，一般定义路径文件和路径对象名一致。

(2) 创建导航对象，在Navigators模块中新建一个导航器对象，然后再Markers File标题下输入导航器文件名，扩展名为nav，同样，导航器文件名一般和导航器对象名一致。并在Path栏中选择将要导航器经过的路径对象，根据运动场景的需要，导航器对象可以定义多个，只有选中时才有效。

(3) 编辑路径对象和导航器对象，在PathTool中定义路径的控制点并设置导航器参数，保存设置即可生成路径文件和导航器文件，这两个文件默认存放在与ADF文件相同的目录下。若想预览运动对象的运动轨迹，可以选中PathTool右侧的RenderPath（渲染路径）复选框。渲染路径根据所设定的控制点描绘出近似的运动样条曲线，选中它就在图中显示一条红色的路径，如图4.2所示。

(4) 在observers面板中设置Positioning Method 为Path Navigator，并在其下拉菜单中选择步骤2中定义的导航对象名。

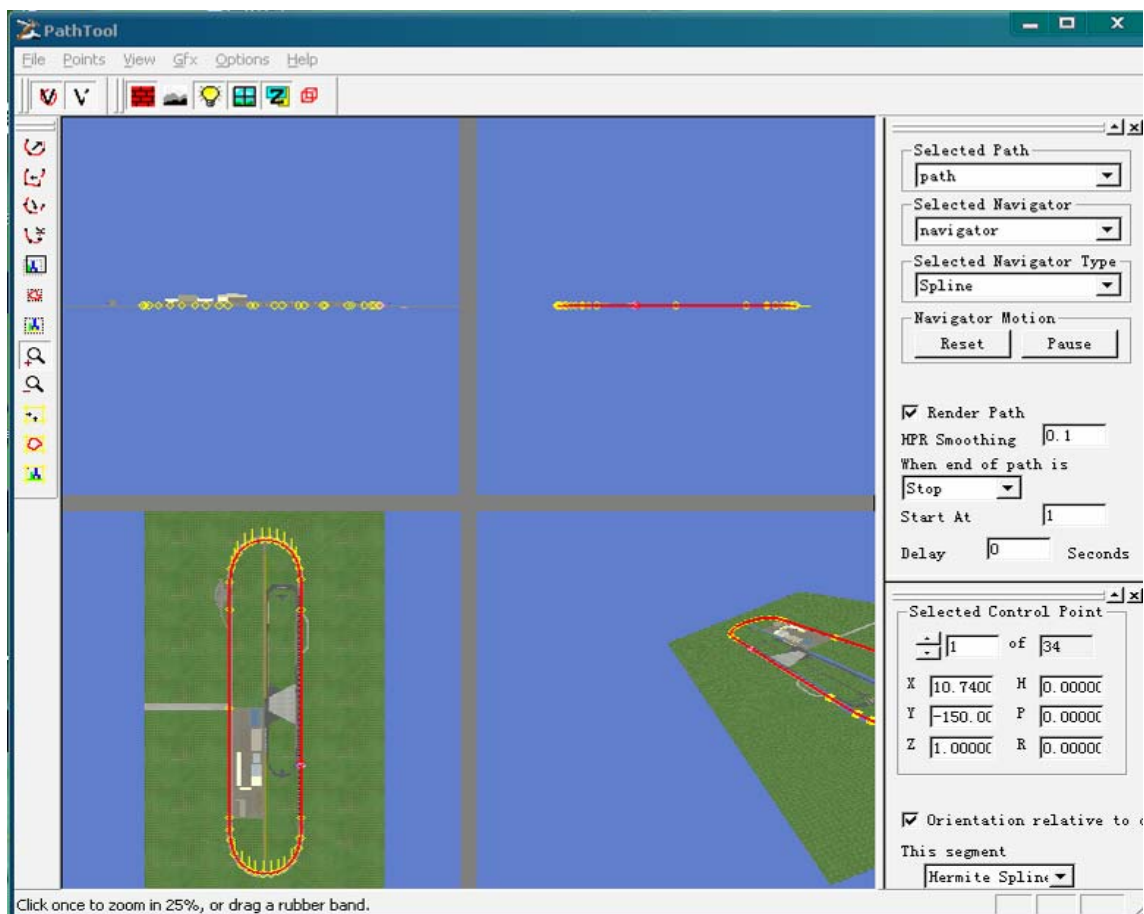


图4.2 路径预览图

#### 4.3.2 碰撞检测技术

虚拟现实技术的主要目标之一是允许用户以尽可能自然的方式与虚拟世界物体直接交互。在视景仿真中，为了模拟真实世界，必须对观察者的移动以及场景中车辆的运动加以限制，这样就能避免遇到建筑物、不平路面时“穿墙而过”、“穿土而入”之类现象的发生。碰撞检测是一种常见的解决方法。

Vega将碰撞检测技术封装成相交矢量类(Isectors)。相交矢量使用一种特别的方法在测试目标与当前方法所对应的体之间进行相交测试。Vega提供了八种方法有效地进行碰撞检测：Z、VOLUME、HAT、ZPR、LOS、TRIPOD、BUMP、XYZPR，同时提供严格定义的输入和输出方法。除Volume方法外，每种方法所对应的体都是内置的，不能更改其类型的。例如，Z方法对应的Volume就是一条垂直的过当前Isector位置的线段，线段的长度由Minimum和Maximum两个参数确定；TRIPOD方法的Volume由三条线段组成，分别是过 $(x.Width/2, y.Length/2)$ 、 $(x+Width/2, y+Length/2)$ 和 $(x, y+Length/2)$ 的三条竖直线段，x和y是代表当前Isector位置的x和y坐标。当前Isector位置即该Isector所绑定的那个对象的当前位置<sup>[35]</sup>。



由于目前Vega只能支持Volume与Scene或Volume与Object之间的相交测试, 还不能进行两个Volume之间的相交测试, 所以Isector的相交测试目标(Target)只能是场景或者模型对象, 可以经 LynX 通过 ADF 文件来确定, 也可以通过 API 函数来确定。

为了能够准确地从整个场景中区分出不同类型的目标, Vega使用了一个32位的Isector掩码, 即Isector Class, 分为地形(Terrain)、静态对象(Static Object)、动态对象(Dynamic Object)和特殊对象(Special Object)四个大组。只有保证Isector的Target Isector Class标识定义跟该Isector实例的测试目标的模型对象Isector类(Object Isector Class)标识定义相一致, 碰撞检测才能正确地进行<sup>[40][41]</sup>。

在Lynx中实现碰撞检测的基本步骤:

(1) 在Object面板的Object Isector Class中设置被检测对象的标识掩码。

(2) 创建一个Isector实例, 选择测试目标(Target)的类型及对象并设置Target Isector Class标识。在Method栏下拉框中选中想使用的相交检测方法, 如Z方法或BUMP方法。

(3) 在Player、Observer或者Motion Models中加入Isector实例, 实现Isectors的绑定。绑定后Isector实例就可以随着绑定对象在场景中定位、运动并实时地进行各种类型的相交测试计算, 然后通过编写相应的应用程序代码使角色对象、观察者或者运动模式等能够实时的根据相交测试中产生的各种信息数据做出响应并在场景中作相应的状态调整, 从而模拟出各种复杂的交互效果。

另外, 可以对物体的某个部分实现碰撞检测, 通过Object Property Editor来实现。

图4.3为把采用TRIPOD方法的相交矢量绑定到场景运动体(车辆)上, 车辆在高速环道上运行时的效果图。图4.4为没有添加相交矢量的车辆运动效果图, 由图可见, 右后轮陷到路面中, 不符合实际情况。



图4.3 碰撞检测效果图



图4.4 无碰撞检测的效果图



### 4.3.3 Vega 环境下的汉字显示技术

在操纵稳定性试验虚拟仿真中，需向驾驶员提供实时的视觉反馈信息如提示信息、行驶参数信息等，因此必须在Vega的视景仿真线程中实时显示仿真的状态信息。

Vega对于字符的显示提供了两种方法，一种用于显示矢量字体，另一种用于显示光栅字体<sup>[42]</sup>。但都只能显示ASCII字符，对于中文字符则不能显示。而在OpenGL中可以显示中文字符<sup>[43]</sup>，因此本文利用OpenGL技术来实现在Vega环境中显示汉字。

在显示字符前，必须进行OpenGL的变换操作，以保存当前图形状态，然后进行字符显示，最后恢复原始状态。这样可以保证较高的实时性和视景显示刷新过程无闪烁。其中，基于OpenGL的汉字显示方法为：

- (1) 创建TrueType字体；
- (2) 用wglUseFontOutlines创建一组显示列表，每个显示列表只渲染一个字符；
- (3) 调用glCallLists()使显示列表在指定设备环境上画出所要显示的字符。

基于OpenGL函数的调用可以在Vega中显示汉字字符，而要在Vega的主循环中实时显示汉字，必须利用VGCHAN\_POSTDRAW回调函数来实现。注册回调函数的方式为：vgAddFunc( chan, VGCHAN\_POSTDRAW, PostDraw, NULL)。

当系统中定义有VGCHAN\_ POSTDRAW回调函数时，在通道渲染好之后、显示视景之前调用这个回调函数便可在即将输出的画面中叠加自己的显示信息，因此所有用户自己的输出须在回调函数中实现<sup>[44][45]</sup>。以下是在回调函数中实现汉字显示的程序代码：

```
void PostDraw(vgCommon *pHandle, void *pData)
{
    CString COText;
    HFONT hFont;
    HDC hDC=wglGetCurrentDC();
    memset(&lf,0,sizeof(LOGFONT));
    glColor3ub(0,0,0);//设定字体颜色
    LOGFONT lf;
    lf.lfHeight = .1; 设置当前字体
    lf.lfWidth = .1;
    .....
    lf.lfPitchAndFamily = VARIABLE_PITCH | TMPF_TRUETYPE | FF_MODERN;
    lstrcpy (lf.lfFaceName, "宋体");
    hFont = CreateFontIndirect(&lf);
    HFONT holdfont=(HFONT)SelectObject(hDC,hFont);
    GLYPHMETRICSFLOAT agmf[12];
    unsigned int ich = 0;
    int i = 0,j = 0;
    int FTextList[12];
    char cch;
    int m=strlen(COText);
    int displaylist=glGenLists(m+1);
```

```

while(i < m)
{
    if (IsDBCSLeadByte(COText[i])) //判断是否为双字节 5
    {
        ich=(256+COText[i])*256+(256+COText[i+1]);
        wglUseFontOutlines(hDC,ich, 1,displaylist+j,0.0f,0.05f,WGL_FONT_POLYGONS,&agmf[j]);
        FTextList[j] = j;
        j++; i++; i++;
    }
    else{
        cch = COText[i];
        wglUseFontOutlines(hDC,cch,1,displaylist+j,0.0f,0.15f,WGL_FONT_POLYGONS, &agmf[j]);
        FTextList[j] =j;
        j++; i++;
    }
}
SelectObject(hDC,holdfont);
DeleteObject(hFont);
glPushMatrix();//保存当前显示状态
glDisable(GL_DEPTH_TEST);//禁用深度测试
glTranslatef(x, y, z); //文本的显示位置
glScalef(0.45f,0.45f,0.45f);
glRotatef(90.0f,1.0f,0.0f,0.0);//Vega坐标系与OpenGL坐标系不同，旋转汉字使其正对屏幕显示
glListBase(displaylist);
glCallLists(m,GL_INT,&FTextList);//显示字符
glPopMatrix();//恢复到原始状态
glDeleteLists(displaylist,m+1);
glFlush();
DeleteDC(hDC);
glEnable(GL_CULL_FACE);//指定是否要忽略物体的前面或背面
glFrontFace(GL_CCW);//定义多边形哪边是前面，哪边是后面
}
}

```

#### 4.3.4 自定义运动模型的实现

在本文中，鉴于Vega提供的运动模型不能完全满足仿真需求，采用用户自定义运动模型。自定义运动模型是Vega中自定义控制场景中运动体运动方式的途径之一。在Vega中，对象物、观察者、场景运动体和特殊效果都能通过vgPos()函数来进行设定，但是当把对象物附加给场景运动体，同时场景运动体附加到自定义的运动模型上之后，场景中物体的移动可以通过改变运动模型的位置来改变。

用户自定义运动模型主要通过Input Device类接收和查询用户的输入，通过在Vega循环中注册回调函数，加载自定义运动模型函数，实现运动体运动方式的按需定制。自定义运动模型的实现步骤如下<sup>[46]</sup>：

- (1) 获取输入设备，为运动模型指定输入设备，如鼠标、游戏杆和数据手套等。
- (2) 使用Vega的API函数vgMotRegister()注册运动模型函数。
- (3) 设置运动模型属性值VGMOT\_MODEL。

(4) 在回调函数中的由输入设备运动激发的事件中定义场景运动体或观察者的位置属性。

当输入设备发送位置信息给运动模型时能激发以下五种类型的事件：初始化事件(VGMOT\_INIT\_EVENT)、重置事件(VGMOT\_RESET\_EVENT)、更新事件(VGMOT\_UPDATE\_EVENT)、停止事件(VGMOT\_STOP\_EVENT)、退出事件(VGMOT\_EXIT\_EVENT)。

事件初始化意味着这是运动模型第一次被激活。

重置事件发生在使用者同时输入设备重置的情况下，把当前运动模型的各种信息都设置到程序初始化的情况下，运动会突然结束，通过vgMotResetPos()重置当前的位置，所有的速度和加速度都被重新设置为零。

更新事件是最普通的事件，vgMotionCallbackStruct中的数据域被初始化为当前输入设备按钮的状态以及当前输入设备游标的位置。由于获得当前仿真时间(以秒计)，因而可以基于计算时间来仿真。新位置产生并存储Motion Model实例中，如果新的位置并没有产生，那么它就不停地使用上一个位置。

停止事件意味着运动模型的速度将被设置为零，但运动模型仍然处于使能状态，并能继续被使用并不引起重置。

退出事件意味着当前运动模型不再被使用。

其中最主要的工作在VGMOT\_UPDATE\_EVENT中完成，应用程序每次轮询输入设备之后就会产生一个更新事件，对场景中运动体的位置改变可以在这个事件中进行<sup>[5]</sup>。

本文将用户定义的运动模型与运动者player联系起来，把观察者observer定位方法设置为Tether Fixed方式，通过一组固定的偏移量把观察者放置到player身上，从而使观察者视点跟随运动模型进行运动。具体实现的过程如下：

(1) 定义用于保存位置信息的控制数据结构体：

```
typedef struct
{
    float x, y, z; /* x, y, z坐标值*/
    float h, p, r; /*方向角*/
    float velocity; /*速度*/
    vgPosition *pos; /*当前位置信息*/
    double now; /*时间计数*/
}motion_model_data;
motion model data *mot_instance_data;
```

(2) 添加自定义运动模型，选择鼠标作为输入设备，详细代码如下：

```
void CMyView::addUserMotion()
```

```

{
    vgMotion *mot;
    vgPlayer *car;
    car=vgGetPlyr(0);
    mot=vgGetPlyrMot(car);
    if(drivemode==0) //进行操稳性试验，采用自定义模型
    {
        mot=vgNewMot();
        vgName(mot,"user defined motion model"); //给运动模型命名
        vgPlyrMot(car,mot);
        vgProp(obs,VGOBS_TETHERSTATE,VGOBS_FIXED); //设置观察者为限定固定值
        vgObservPlyr(obs,car); //设置采用系链方式定位的观察者所参考的角色对象
    }
    vgIDev *idev=vgNewIDev(); //新建vgIDev类实例（输入设备类）
    vgName(idev,"mouse");
    vgProp(idev,VGIDEV_DEVICETYPE,VGIDEV_MOUSE);
    vgIDevOpen(idev);
    vgMotIDev(mot,idev); //设置运动模式所使用的输入设备
    //注册用户自定义的运动模式回调函数,运动模式为用户1
    vgMotRegister(VGMOT_USER1,my_motion_model);
    mot_instance_data=(motion_model_data*)pfCalloc(1,sizeof(motion_model_data),
        vgGetSharedArena()); //为回调数据分配内存
    vgUserData(mot,mot_instance_data); //为运动模型实例初始化回调数据
    vgProp(mot,VGMOT_MODEL,VGMOT_USER1); //设置运动模型属性
}

```

(3) 在步骤2中定义的运动模式回调函数my\_motion\_model中，实现对汽车运动的控制。代码框架如下：

```

int my_motion_model(vgMotionCallbackStruct *mot_cb)
{
    vgMotion *mot;
    vgIDev *input_device;
    static vgPosition *device_pos=NULL,*body_pos=vgNewPos();
    vgPart *body=NULL;vgObject *car=vgFindObj("car");
    body=vgFindPart(car,"body1",NULL);
    float bodyx,bodyy,bodyz,bodyh,bodyp,bodyr; //定义车身位姿的六个分量
    float car_position[6]; //用于保存车辆初始位姿信息
    float dt; //定义帧更新时间
    int toggles[3]; //输入设备按键
    int middlebutton,leftbutton,rightbutton;
    motion_model_data *data;
    mot=mot_cb->mot;
    data=(motion_model_data*)mot_cb->user_data;
    input_device=vgGetMotIDev(mot);
    if(!data)
    {
        printf("motion model callback data not avail");
        return(.1);
    }
    if(!device_pos)
        device_pos=vgNewPos();
    switch(mot_cb->reason)
    {
        case VGMOT_INIT_EVENT: //初始化运动模型数据

```

```

    if(!data.>pos) data.>pos=vgNewPos();
    vgGetPos(mot,data.>pos);
    vgGetPosVec(data.>pos,&data.>x,&data.>y,&data.>z,&data.>h,&data.>p,&data.>r);
    car_position[0]=data.>x; car_position[1]=data.>y;
    car_position[2]=data.>z; car_position[3]=data.>h;
    car_position[4]=data.>p; car_position[5]=data.>r; //保存车辆初始位姿信息
    data.>velocity=v1; //设定行驶速度
    data.>now=mot_cb.>data.now;
    break;
case VGMOT_RESET_EVENT: //运动模型重置事件处理代码
    vgGetPos(mot,data.>pos);
    vgGetPosVec(data.>pos,&data.>x,&data.>y,&data.>z,&data.>h,&data.>p,&data.>r);
    data.>x =car_position[0]; data.>y= car_position[1]; data.>z =car_position[2];
    data.>h =car_position[3]; data.>p= car_position[4]; data.>r =car_position[5];
    data.>now=mot_cb.>data.now;
    break;
case VGMOT_UPDATE_EVENT:
    vgIDevReadToggleData(input_device,toggles,3); //读取鼠标按键信息
    leftbutton=toggles[0];middlebutton=toggles[1];rightbutton=toggles[2];
    dt=mot_cb.>data.now.data.>now;
    data.>now=mot_cb.>data.now;
    if(leftbutton) //按下鼠标左键
    {
        //调用整车动力学模型计算函数，根据计算结果改变车辆的位姿信息，
        //使其按试验得到的数据前进运动
        //调用车轮转动函数实现车轮转动
    }
    if(middlebutton) //按下鼠标中键
    {
        .....
    }
    if(rightbutton) //按下鼠标右键
    {
        .....
    }
    break;
case VGMOT_EXIT_EVENT: //清除运动模型数据
    vgDelPos(data.>pos);
    data.>pos=NULL;
    break;
default:
    vgNotify(VG_WARN,VG_APP,"My motion model:invalid callback event",mot_cb.>reason);
    break;
}
return(0);
}

```

#### 4.3.5 车辆运动的实现

进行汽车操纵稳定性仿真在构造和驱动虚拟场景的同时，场景内部的运动体也必须按照其真实运动形态运行。对于汽车操纵稳定性虚拟仿真，欲保证运动形态的真实性，则要根据仿真的动力学数据实时改变虚拟场景中三维实体虚拟汽车的结构状态，而且须和场景保持同步，只有这样才能产生逼真的虚拟仿真效果。这些结构状态包括车身的侧倾、车轮的转动、转向、侧偏等特征参数的变化。

在Vega中，所有对象物、观察者、运动模型位置参数改变的操作都是通过vgCPos

类来完成的,它源自vgCommon函数。一个基本的改变对象物的操作可以依靠vgGetPos()、vgGetPosVec()和vgPos()三个函数来完成。其中vgGetPos()主要返回对象物、运动模型的位置信息;vgGetPosVec()主要把位置信息分解到变量中。在改变了位置信息中的X、Y、Z坐标以及H(横摆)、P(侧倾)、R(俯仰)之后,可以通过vgPos()设定的新的位置。至此,就可以实现场景中物体的结构参数变化。

### (1) 车轮转动的实现

为增强模拟的逼真度,应在车辆运动时实现车轮的转动。以左前轮为例,具体程序如下<sup>[47]</sup>:

```
float velocity; //定义速度变量
vgPosition *pos=vgNewPos(); //定义位置变量,新建实例
vgObject *car; //定义对象物车辆实例
vgPart *lfront; //定义左前轮部件实例
car=vgFindObj("car"); //得到车辆对象物
lfront=vgFindPart(car,"lfw",NULL); //得到左前轮部件
velocity=vgGetPosCalc(car,VGPOS_VEL_MAG); //得到车辆速度
vgGetPos(lfw,pos); //得到左前轮位置
vgGetPosVec(pos,&x,&y,&z,&h,&p,&r); //获得位置的位姿数据
p+=velocity/r; //根据车速计算车轮转速
vgPosVec(pos,x,y,z,h,p,r); //更新位置的位姿
vgPos(lfw,pos); //更新车轮的位置
vgDelPos(pos); //删除位置实例
```

### (2) 车身自由度的驱动

相对于车轮而言,车身在运动过程中会产生绕 x 轴的侧倾运动和绕 y 轴的俯仰运动,因此,应在车辆运动过程中根据整车动力学计算结果实时地改变车身的侧倾角和俯仰角。更改车身侧倾角的具体实现代码为:

```
vgPositon *body_pos=vgNewPos();
vgPart *body=NULL;
vgObject *car=vgFindObj("car");
body=vgFindPart(car,"body1",NULL);
vgGetPos(body,body_pos);
vgGetPosVec(body_pos,&bodyx,&bodyy,&bodyz,&bodyh,&bodyp,&bodyr);
/*调用动力学模型计算函数*/
bodyp=ceangle*180/3.141526; //修改车身侧倾角的值
vgPosVec(body_pos,bodyx,bodyy,bodyz,bodyh,bodyp,bodyr);
vgPos(body,body_pos); //更新车身的位姿
```

## 第五章 汽车操纵稳定性虚拟仿真系统设计

### 5.1 系统开发环境

本文采用 Multigen Creator/Vega 为建模和驱动软件，以 Microsoft Visual C++6.0 为开发平台进行应用程序的开发。

Vega 包括完整的 C 语言应用程序接口 API，但是自身并没有开发平台，没有面向对象的能力，所以需要借助一个“窗口系统”来完成 Vega 实时仿真的程序设计，本文采用 Visual C++6.0 作为开发平台。Microsoft Visual C++6.0 是一套完全独立的 Windows 开发系统，具有可视化、面向对象、采用消息映射的高级程序设计语言。Visual C++ 由于功能强大而拥有广泛的用户，尤其是在数据库、多媒体、商用系统的用户界面以及一般应用程序的设计等方面，Visual C++ 更是有着其他开发环境所不能取代的优越之处，而且 Visual C++ 6.0 版本的功能和性能都很稳定<sup>[48]</sup>。

### 5.2 系统实现功能及模块开发

本仿真系统的主要目的是根据动力学计算结果，使车辆在虚拟试验场中完成各种操纵稳定性试验，实现对车辆操纵稳定性性能的仿真。该仿真系统的主要功能如下：

（1）设置车辆参数和试验参数输入窗口。只要修改车辆参数及相应的试验参数就能对不同车型的汽车进行操稳性性能仿真。

（2）实现虚拟仿真试验。根据汽车动力学仿真的数据，在虚拟场景中展现试验过程，并在车辆运动过程中实时显示运动状态信息，使用户既能感觉到汽车在试验过程中运动状态的变化，也能精确地知道汽车的具体数据。

（3）试验结束后，输出试验的特征曲线、评价参数及汽车的行驶轨迹。了解汽车的运动路径，以便把虚拟汽车模型放置在试验场中的合适位置来进行虚拟试验。

（4）实现数据文件的输出。将试验过程中车速、转向盘转角、横摆角速度、侧倾角、侧向加速度等数据保存在数据库中，可以在仿真之后调出进行详尽的后续分析。

（5）在进行虚拟试验时采用全屏显示，使用户能够更加投入、沉浸到虚拟试验中，使用户产生“身临其境”的感觉；可以改变观察者的位置，使用户可以以不同角度体验车辆的操纵稳定性。

根据汽车操纵稳定性试验虚拟仿真系统的功能对模块进行划分，各个模块之间通过接口函数进行信息传递，模块的划分增加了系统的灵活性、可扩展性。系统的结构框架图如下：

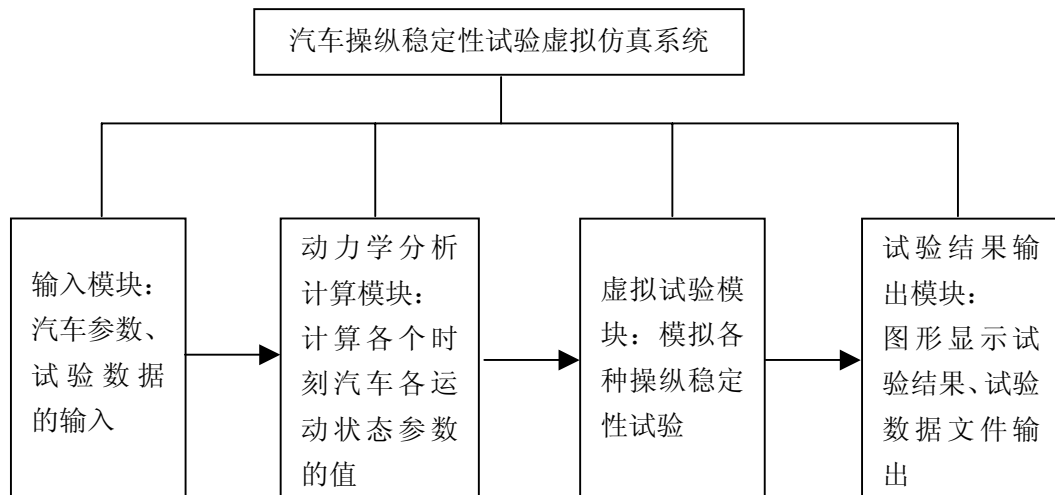


图 5.1 系统结构框架图

## 5.3 系统实现的关键技术介绍

### 5.3.1 基于 MFC 的 Vega 编程

基于 MFC 创建一个项目时会自动产生一个窗口，因此不需要再重新定义窗口，只需在所需的窗口中进行必要的程序设计即可。在程序设计之前，必须建立一个基于视图类的私有类，贯穿于整个程序设计中。头文件根据需要可增加 `vg.h`、`vgwin.h`、`vgutil.h` 等文件。在定义自己的应用类时，应添加所有所需函数如：`void runVega(void);` //运行 vega 程序、`void stopVega( void );` //终止 vega 程序、`void pauseVega( void );` //中断程序、`void unPauseVega( void );` //中断后继续运行该 vega 程序等函数<sup>[49]</sup>。

### 5.3.2 观察者视点的改变

改变观察者的视点可使用户获得不同的视觉效果。视点在车内让用户以驾驶员的角度来体验车辆的性能；视点在车外时，可以看到试验过程中汽车的转向运动、车身的侧倾以及车轮转动等，使用户对整个试验过程有个全面的认识。在虚拟试验时，根据不同的仿真要求来调节视点。

#### （1）视点在车内

从驾驶员的角度来进行虚拟试验时，应把观察者视点设置在车内，以车辆为参照物让周围场景产生运动变化，具体的实现方法为：

- ①把车辆模型绑定在场景运动体上；
- ②设置观察者定位方法为固定式系链（`Tether.Fixed`）模式；
- ③选择场景运动体为参照坐标系；
- ④设置观察者相对于场景运动体（车辆）合适的偏移量。



下图为观察者视点在车内时的虚拟漫游仿真图。



图 5.2 视点在车内

## (2) 视点在车外

观察者视点在车外来进行汽车操稳性试验的基本原理是整个场景不动，只让试验车辆在场景中运动，因此应以世界坐标系为参考坐标系，并修改观察者相对于场景运动体的偏移量。图 5.3 为观察者视点在车外时的虚拟漫游仿真图。



图 5.3 视点在车外

### 5.3.3 运动状态信息的实时显示

在 Vega 环境下显示汉字，实际上是把汉字当作一个对象物添加到场景中。在虚拟试验进行过程中，观察者的视点会跟随着车辆的运动发生变化，因此不能保证以汉字、数字等形式显示的车辆运动状态信息总出现在观察者的视角内。与场景中的其他静态物一样，它在屏幕上的位置会发生移动甚至从屏幕中消失。为了实时地给用户提供反馈信息和获得良好的仿真效果，应保证车辆运动状态信息在屏幕上的显示位置保持不变。下面讨论其实现方法。

(1) 当观察者视点在车外来进行虚拟试验时，整个试验场景不动，只有试验车辆在动，因此让反馈信息的显示位置随着车辆位置的变化同步变化，这样就可以使其在观察者视野内的位置即在屏幕上的显示位置不发生变化。图 5.4 为其原理示意图。

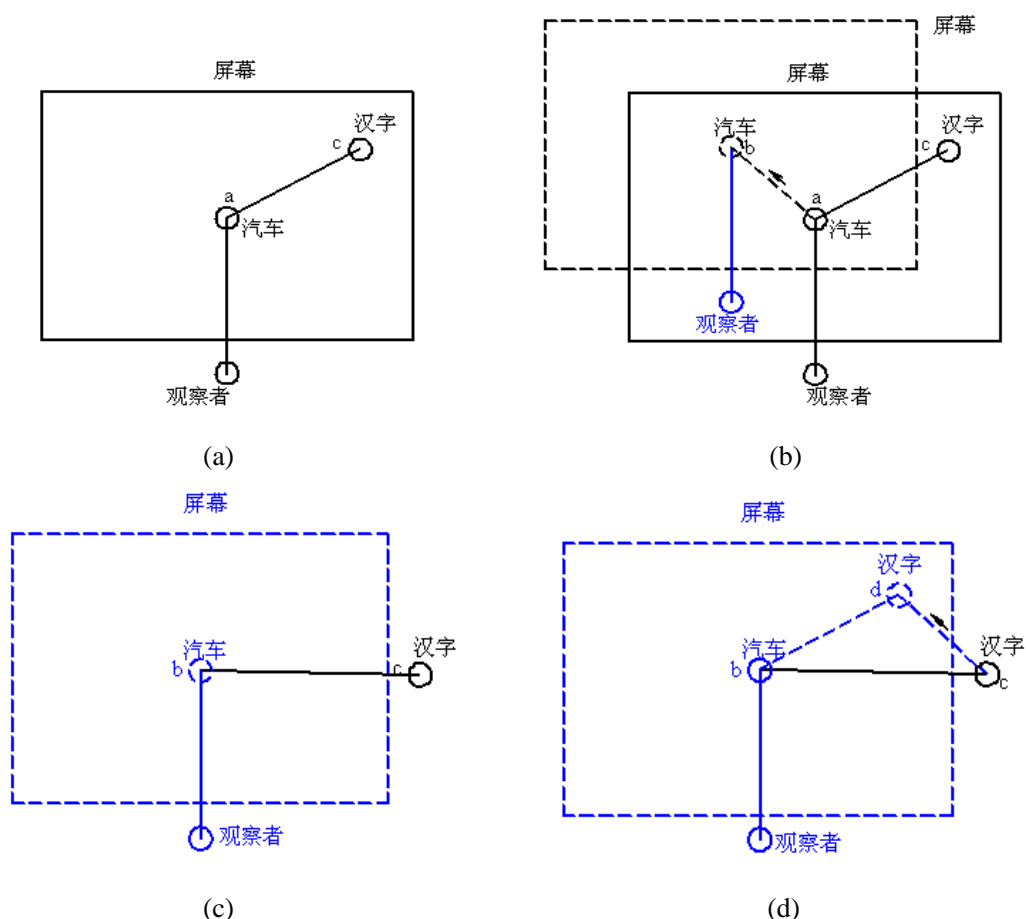


图 5.4 视点在车外时保持汉字显示位置不变原理示意图

图 5.4(a)显示汽车与汉字的最初相对位置关系。当汽车由位置 a 运动到位置 b 时，此时汉字在屏幕外侧，没有在屏幕上显示，如图中(b)、(c)所示。由图 5.4 (d)可见，若给汉字施加与汽车运动量相同的变换，那么汉字从位置 c 移动到位置 d，实现了其在屏幕中的显示位置不变。

(2) 当观察者视点在车内、以驾驶员的角度来进行虚拟试验时, 车辆位置保持不变, 周围场景在运动变化。若信息的显示位置相对于车辆位置为固定的偏移量时, 车辆做直线运动时, 它在屏幕上的显示位置保持不变, 但是当车辆做转向运动时它的位置就发生改变。因为车辆做转向运动时, 周围场景会随之作反方向的旋转, 作为场景内的对象物的信息同样也作了旋转, 反映在屏幕上的位置就发生了变化。

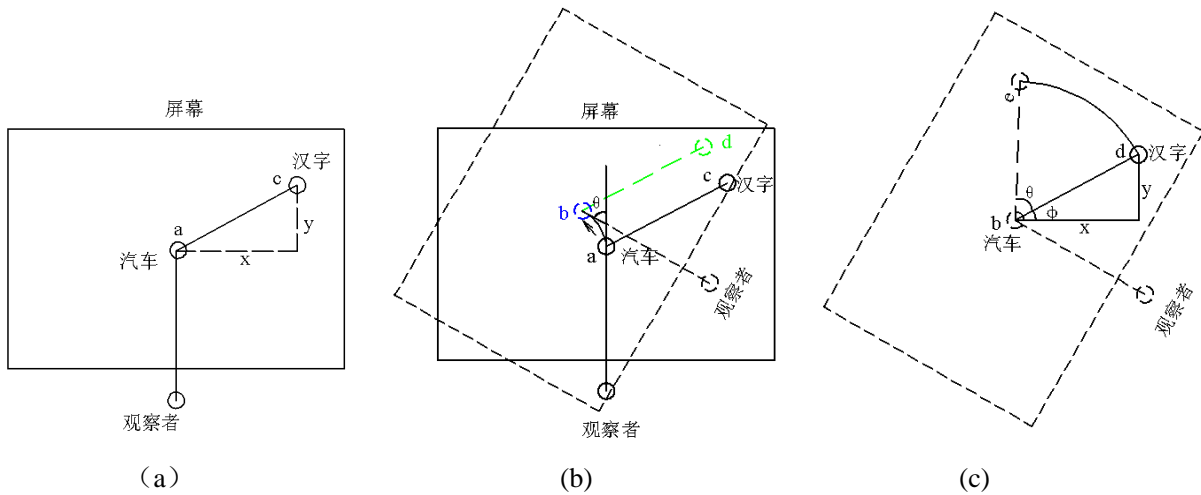


图 5.5 视点在车内时保持汉字显示位置不变原理示意图

由图 5.5(a)可见, 汉字相对于汽车的偏移量为  $(x, y, z)$ 。当汽车做转向运动、由位置  $a$  运动到位置  $b$  同时转动了  $\theta$  角时, 观察者的视点和视野也跟着发生变化, 图 5.5(b)中虚线框包含的对象物为汽车转向后屏幕的显示内容, 此时汉字在屏幕上的显示位置发生了变化。通过以下两个步骤可以实现信息的显示位置不变: 使汉字相对于车辆的偏移量不变, 则汉字由  $c$  点平移到  $d$  点; 以  $b$  点为圆心从  $d$  点旋转  $\theta$  角到  $e$  点。下面为程序实现的部分代码:

```
glTranslatef(carx+x,cary+y,carz+z); // carx,cary,carz 为车辆的位置参数
 $\phi = \text{atan}(y/x); R = \sqrt{x^2+y^2};$ 
 $dx = R \cos(\theta + \phi), dy = R \sin(\theta + \phi);$ 
glTranslatef(dx, dy, 0);
glRotatef( $\theta$ , 0, 1, 0);
```

#### 5.3.4 全屏显示

本研究基于 VC++ 开发的应用程序采用单文档/视图结构, 应用程序界面除默认的文档边框窗口外, 还包含标题栏、菜单栏、工具栏、状态栏等, 在操纵稳定性试验虚拟仿真时会影响“驾驶员”的沉浸感。因此, 为达到更逼真的仿真效果, 建议在仿真时采用全屏显示。

全屏显示不仅需要隐藏主框架窗口、菜单、工具栏等, 而且还得记录原始窗口的位

置和大小等以便能够恢复为全屏显示前的窗口状态。主要代码为：

```
void CMainFrame::OnFullscreen()
{
    m_wndToolBar.ShowWindow(SW_HIDE); //隐藏工具栏
    m_wndStatusBar.ShowWindow(SW_HIDE); //隐藏状态栏
    GetWindowRect(&m_WindowRect);
    long style=::GetWindowLong(m_hWnd,GWL_STYLE);
    style&=~WS_CAPTION;
    ::SetWindowLong(m_hWnd,GWL_STYLE,style); //更改窗口显示属性
    int nfullwidth=GetSystemMetrics(SM_CXSCREEN);
    int nfulllength=GetSystemMetrics(SM_CYSCREEN);
    SetWindowPos(NULL,0,0,nfullwidth,nfulllength,SWP_NOZORDER);
    style=::GetWindowLong(m_hWnd,GWL_STYLE);
    m_bChildMax=(style&WS_MAXIMIZE)?true:false;
    CMenu *oldmenu=GetMenu();
    m_OrgMenu.Attach(oldmenu.>Detach());
    SetMenu((CMenu*)NULL); //隐藏菜单
    this->ShowWindow(SW_SHOWMAXIMIZED); //全屏显示
    m_bFullScreen=true;
}
```

本文设计在全屏状态下按下 ESC 键能够返回窗口的原始状态，为此需要在键盘消息函数中添加相应代码，具体如下：

```
void CMyView::OnKeyDown(UINT nChar, UINT nRepCnt, UINT nFlags)
{
    if(nChar==VK_ESCAPE) //按下 ESC 键，则退出全屏显示
    {
        CMainFrame *pframe=(CMainFrame*)AfxGetApp().>m_pMainWnd;
        if(pframe->m_bFullScreen==true)
            pframe->EndFullScreen(); //调用退出全屏显示函数
    }
}
```

### 5.3.5 车辆漫游模式

按被动式、查询式和交互式虚拟现实分类，可以衍生出三种相应的漫游方式：其一是自动漫游，即按设计者事先精心规划的最佳路径与最佳视角，对虚拟环境进行漫游。其二是查询式漫游，即由用户自行设定一条漫游路径，然后按该路径完成漫游。其三是交互式漫游，即用户用鼠标或键盘实时控制漫游方向、视点高度<sup>[40]</sup>。根据虚拟实验的仿真需求，本系统设置了两种漫游模式。下面详细介绍这两种漫游模式的实现方法。

#### (1) 交互式漫游

本系统中交互式漫游模式采用 Drive 运动模型，输入设备为鼠标。左键对应于汽车的油门踏板，右键对应于汽车的制动踏板，中键相当于紧急制动阀。将鼠标移到左边相当于方向盘向左转，汽车向左运动，移动鼠标到右边会使汽车向右转向。通过调整运动模型的 Max Velocity 来改变汽车运行的最高车速。使用此模式漫游犹如真实地驾驶一辆

汽车在路上行驶，体验驾驶的快乐。在程序中实现代码为：

```
mot=vgFindMot("drive");
player=vgGetPlyr(0);
vgPlyrMot(player,mot);
vgPosVec(pos,.03f,.40f,2.3f,0.0f,0.0f,0.0f);
vgProp(obs,VGOBS_TETHERCOORD,VGOBS_TPLAYER); //设置坐标系为相对于运动体
vgObservPlyr(obs,player); //设置采用系链方式定位的观察者所参考的角色对象
vgObservTetherPos(obs,pos);
```

## (2) 自动漫游

在 LynX 上运用导航器工具可在场景中设置多条自动漫游路径，并给每条路径指定一定的漫游速度，通过 Vega 的 API 函数可交互式控制这些路径并在这些自动漫游路径之间可相互切换。自动漫游方式有点像一般的动画演示，但比后者更易于控制<sup>[40]</sup>。在程序中实现代码为：

```
vgNavigator *nav;
nav=vgGetNavigator(0);
vgProp(obs,VGOBS_TETHERSTATE,VGOBS_NAVIGATOR);
vgObservNav(obs,nav);
```

## 5.4 系统界面

本系统分为文件、初始参数设定、虚拟试验、试验结果输出、试验数据读出、试验场漫游等菜单项，其主界面如图 5.6 所示，各菜单之间的关系即主程序流程图如图 5.7 所示。



图 5.6 系统主界面

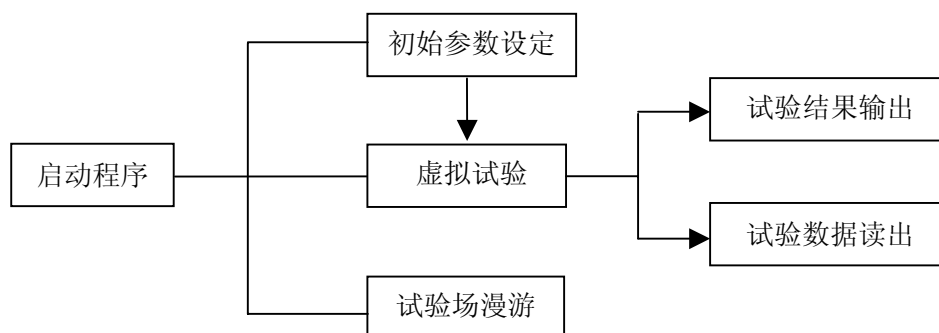


图 5.7 主程序流程图

(1) 初始参数设定。初始参数设定包括车辆固有参数设定和轮胎参数设定。

(2) 虚拟试验。虚拟试验开始前要进行相关的设置，包括观察者视点设置、试验类型的选择、试验条件设置以及全屏显示设置，如图 5.8 所示。

(3) 试验结果输出。试验结果输出主要输出评价某特定试验的特征曲线和汽车的行驶轨迹模拟图。

(4) 试验数据读出。将试验过程中转向盘转角、车速、横摆角速度、侧倾角、侧向加速度等关键参数值保存在程序目录下的名为 text\_data 的记事本文件中，可以查看试验数据、进行后续分析。

(5) 试验场漫游。试验场漫游分为以固定路径漫游和自行漫游两种模式。

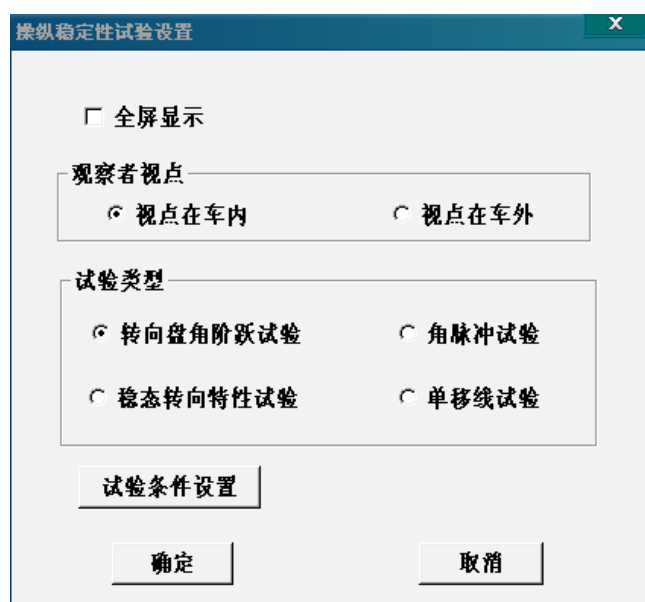


图 5.8 汽车操纵稳定性试验设置窗口

## 第六章 客车操纵稳定性仿真分析

本研究开发的汽车操纵稳定性虚拟仿真系统能够实现转向盘角阶跃输入试验、稳态转向特性试验、转向盘角脉冲试验和单移线试验等试验的仿真分析。本章将采用该软件对 ZK6100H 客车的操纵稳定性做分析。表 6.1 列出动力学计算中用到的客车技术参数。

表 6.1 ZK6100H 客车的主要技术参数表

技术参数名称	参数值	技术参数名称	参数值
整车整备质量(kg)	11027	侧倾力臂(m)	1.30
厂定最大总质量(kg)	14230	侧倾外倾系数	0
最高车速(km/h)	115	前轮距(m)	1.928
车长(m)	10.49	后轮距(m)	1.840
车宽(m)	2.48	转向系角传动比	20
车高(m)	3.58	前悬架侧倾刚度(N·m/rad)	150000
轴距(m)	5.42	后悬架侧倾刚度(N·m/rad)	280000
悬挂质量(kg)	8500	横向稳定杆角刚度(N·m/rad)	188700
质心距前轴距离(m)	3.35	前悬侧倾阻尼系数(N·m·s/rad)	19837.5
绕 x 轴转动惯量(kg·m <sup>2</sup> )	23113	后悬侧倾阻尼系数(N·m·s/rad)	34579.5
绕 z 轴转动惯量(kg·m <sup>2</sup> )	104006	前轴侧倾转向系数(/rad)	0.083
绕 x、z 轴的惯性积(kg·m <sup>2</sup> )	0	后轴侧倾转向系数(/rad)	0

### 6.1 试验方法介绍

#### (1) 转向盘角阶跃输入试验

目前常用阶跃试验来测定汽车对转向盘转角输入时的瞬态响应。试验在平坦的场地上进行,汽车先以直线行驶,达到试验车速后,突然以不小于  $200^{\circ}/s$  或不小于  $500^{\circ}/s$  (美国 ESV 的规定)的角速度打转向盘。转向盘角位移因车速不同而异,但要求达到一定的稳态圆周行驶时的侧向加速度,如  $1\sim 3m/s^2$ ,间隔为  $0.5m/s^2$  或  $0.4g$  (美国 ESV)。转向盘转至应有转角后保持不变,油门亦不变,汽车从直线进入圆周行驶。试验要求在最高车速的 70%车速下或在 40km/h 及 110km/h 两种车速下(美国 ESV)进行。记录汽车车速  $u$ 、时间  $t$ 、转向盘转角  $\delta_{sw}$ 、横摆角速度  $\omega_{r0}$  和侧向加速度  $a_y$  等数据。根据所记录的数据,整理成横摆角速度增益  $\omega_r/\delta$  与稳态横摆角速度增益  $\omega_{r0}/\delta$  之比随时间变



化的曲线。从曲线上可找出反应时间、超调量和稳定时间等参数<sup>[2]</sup>。

## （2）转向盘角脉冲试验

通常以汽车横摆角速度频率特性来表征汽车的动特性。因此，频率特性的测量成为一个重要的试验。这个试验要确定给转向盘正弦角位移输入时，输出（汽车横摆角速度）与输入的振幅比与相位差。通过直接给转向盘正弦角位移输入来测量汽车的频率特性是很困难的，因为一方面准确的正弦输入难以做到，而且要在几个固定车速下给转向盘以不同频率的正弦输入也是很费时间的。所以，通常是用转向盘角位移脉冲试验来确定汽车的频率特性。

转向盘角脉冲试验在平坦的场地上进行。试验车速为最高车速的70%。汽车以试验车速行驶，然后给转向盘一个角脉冲转角输入。转向盘转角输入脉宽为0.3~0.5s，其最大转角应使汽车最大侧向加速度为 $4\text{m/s}^2$ 。输入转向盘角脉冲时，汽车行驶方向发生摆动，经过不长时间回复到直线行驶。记录试验过程的时间 $t$ 、转向盘转角 $\delta_{sw}$ 、车速 $u$ 、横摆角速度 $\omega_r$ 和侧向加速度 $a_y$ 。对试验结果进行处理，便得汽车的频率特性<sup>[2]</sup>。

## （3）稳态转向特性试验

稳态转向试验的目的是测定汽车对转向盘转角输入达到稳定行驶状态时汽车的稳态横摆相应。稳态转向特性决定了汽车作为一个动力学系统在转向输入下是否稳定。我国主要采用定转向盘转角试验法。

试验在水平场地上进行，场地上画有15m或20m的圆周。汽车以最低稳定车速沿所画圆周行驶，此时转向盘的转角为 $\delta_{sw0}$ ；测定车速 $u_0$ 及 $\omega_{r0}$ 。由于车速较低，离心力很小，轮胎侧偏角忽略不计。利用 $u_0$ 及 $\omega_{r0}$ 算出不计轮胎侧偏时的转向半径为 $R_0 = u_0 / \omega_{r0}$ 。保持转向盘转角 $\delta_{sw0}$ 不变的条件下，令汽车缓慢连续而均匀地加速（纵向加速度不超过 $0.25\text{m/s}^2$ ），直至汽车的侧向加速度达到 $6.5\text{m/s}^2$ 为止。连续测量车速 $u$ 与横摆角速度 $\omega_r$ 值，根据瞬时的 $u$ 与 $\omega_r$ 值，按公式 $R = u / \omega_r$ 、 $a_y = u\omega_r$ 求出相应的 $R$ 与 $a_y$ 值，这样就获得了不同侧向加速度下有侧偏角时的转弯半径而求得 $R/R_0 - a_y$ 曲线<sup>[2]</sup>。

## （4）单移线试验

单移线试验方法是研究汽车超车时瞬态闭环响应特性的一种重要试验方法。由于闭环试验的复杂性，实际中常用单正弦角输入代替，从而排除驾驶员主观因数的影响。一般让汽车以最高车速的70%（或100km/h）直线行驶，然后给方向盘一个正弦转角输入，同时记录汽车的横摆角速度、侧向加速度、质心轨迹等值<sup>[14][50]</sup>。



## 6.2 虚拟试验

虚拟试验实现的原理是根据设定的试验条件进行车辆动力学分析计算，并根据计算结果实时地改变车辆的位姿，实现在虚拟场景中再现汽车的试验过程。

试验开始前应调节试验车辆的初始位置至合适的位置并完成相关的试验设置。按下键盘上 S 键开始进行试验，点击菜单项“结束试验”或工具栏上“End”图标来退出虚拟试验系统。试验过程中仿真界面右上方实时地显示车速、转向盘转角、车身侧倾角和横摆角速度等参数值，并在试验开始和结束时刻做出提示。图 6.1 为观察者视点在车内时转向盘角阶跃输入试验的仿真过程画面，图 6.2 为观察者视点在车外时稳态转向特性试验的仿真过程画面。



图 6.1 转向盘角阶跃输入试验仿真画面



图 6.2 稳态转向特性试验仿真画面

## 6.3 试验结果分析

### 6.3.1 转向盘角阶跃输入试验结果分析

试验车速按最高车速的 70% 来确定，本试验车的最高车速为 115km/h，经圆整后试验车速取 80km/h，转向盘转角取为  $80^\circ$ 。假设试验道路为良好的、干燥的混凝土路面，路面附着系数取 0.8。试验结束后对试验数据进行整理得到质心侧偏角、侧倾角、横摆角速度、侧向加速度随时间的变化曲线，如图 6.3~6.6 所示。



图 6.3 转向盘角阶跃输入下的质心侧偏角响应曲线

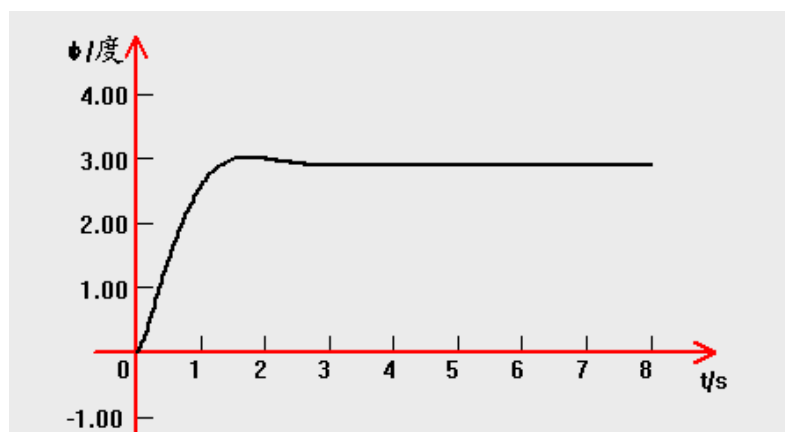


图 6.4 转向盘角阶跃输入下的车身侧倾角响应曲线

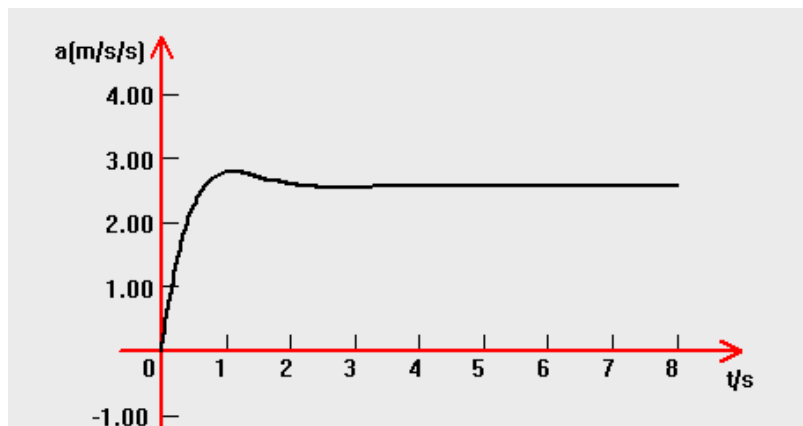


图 6.5 转向盘角阶跃输入下的侧向加速度响应曲线

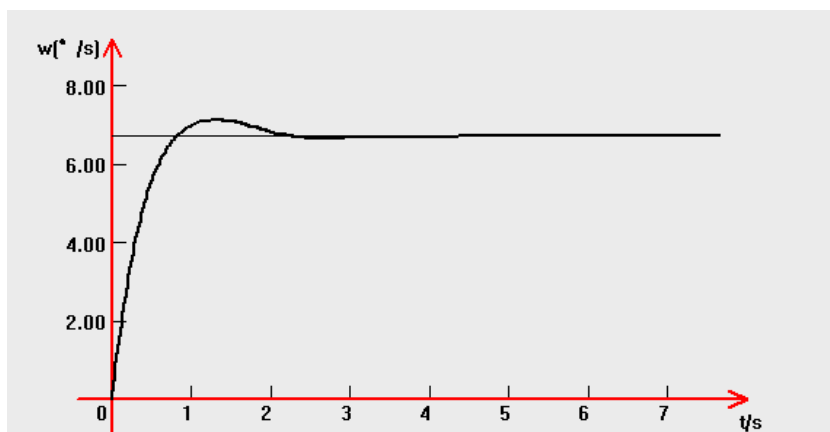


图 6.6 转向盘角阶跃输入下的横摆角速度响应曲线

其中，横摆角速度响应曲线是角阶跃试验最为关心的曲线。通过计算得到了以下几个表征响应品质好坏的参数值：

- (1) 横摆角速度的稳定值  $\omega_0=6.682^\circ /s$ ;
- (2) 反应时间  $t=0.83s$ ;
- (3) 峰值反应时间  $\varepsilon =1.31s$ ;
- (4) 超调量=106.11%;
- (5) 稳定时间  $\sigma =1.94s$ 。

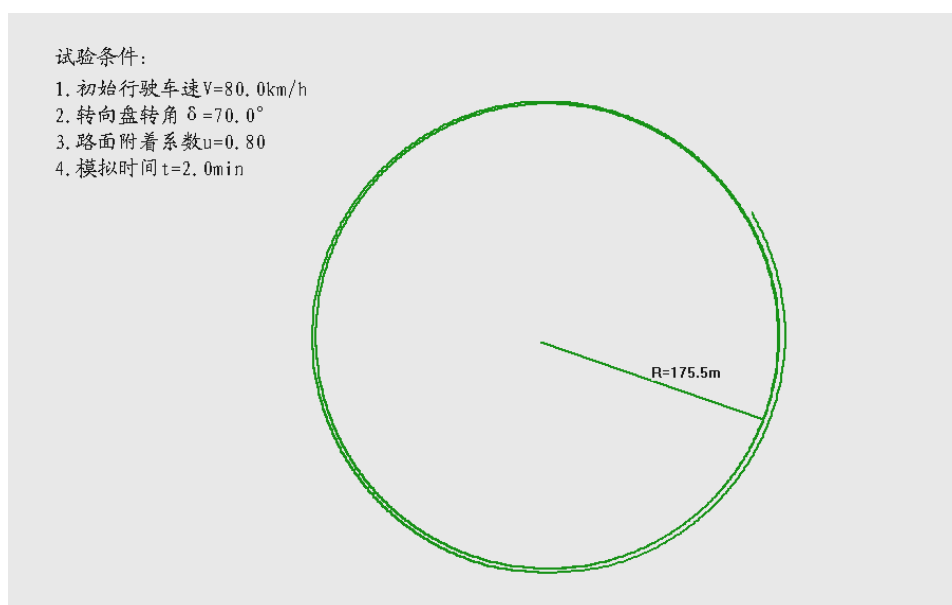


图 6.7 转向盘角阶跃输入试验中行驶轨迹模拟图

模拟汽车运动轨迹，不仅可以直观地看到汽车的运动过程，而且为确定车辆在虚拟试验场的初始位置提供参考。图 6.7 为转向盘角阶跃输入试验中汽车行驶轨迹模拟图。可见，以 80km/h 等速行驶的车辆在转向盘  $70^\circ$  角阶跃输入下进入的圆周运动的转向半径为 175.5m。

### 6.3.2 转向盘角脉冲试验结果分析

按照试验要求，试验车速经圆整后取80km/h，转向盘转角输入脉宽取0.5s。转向盘最大转角取 $240^{\circ}$ ，路面附着系数取0.8。

#### (1) 瞬态响应曲线

在上述试验条件下进行转向盘角脉冲虚拟试验后，对试验中得到的数据做进一步整理，得到质心侧偏角、横摆角速度、车身侧倾角和侧向加速度随时间变化的瞬态响应曲线图，如图 6.8~图 6.11 所示。

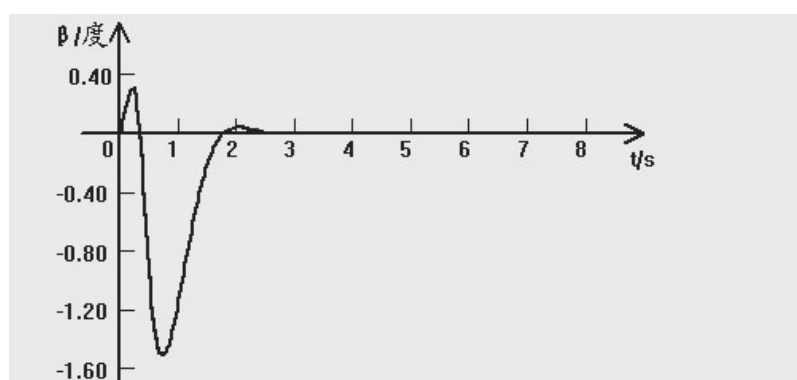


图 6.8 转向盘脉冲跃输入下的质心侧偏角响应曲线

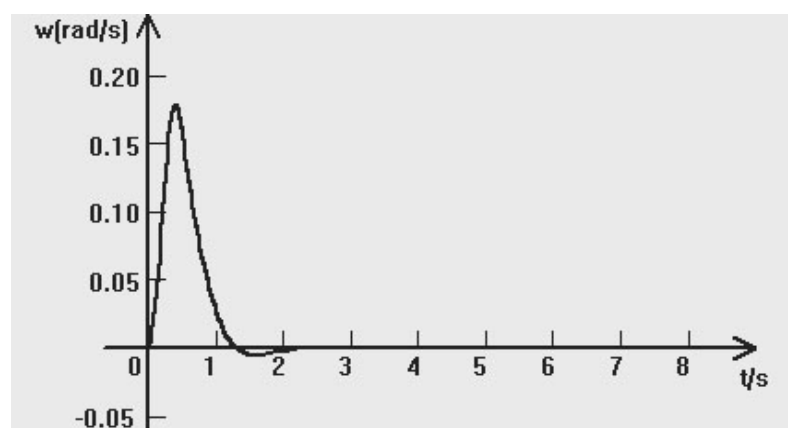


图 6.9 转向盘角脉冲输入下横摆角速度响应曲线

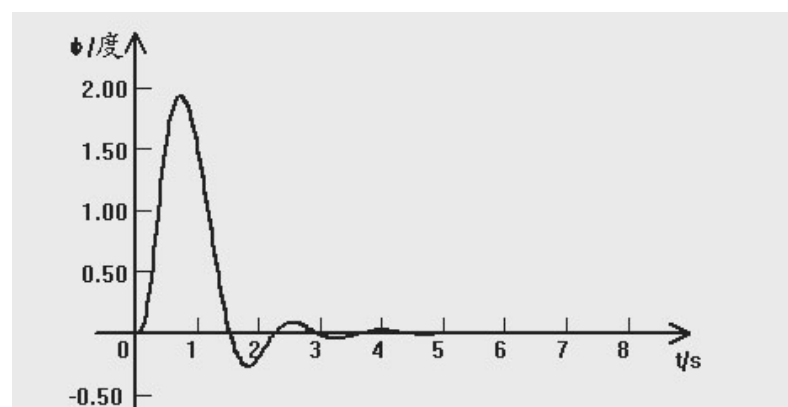


图 6.10 转向盘角脉冲输入下的车身侧倾角响应曲线

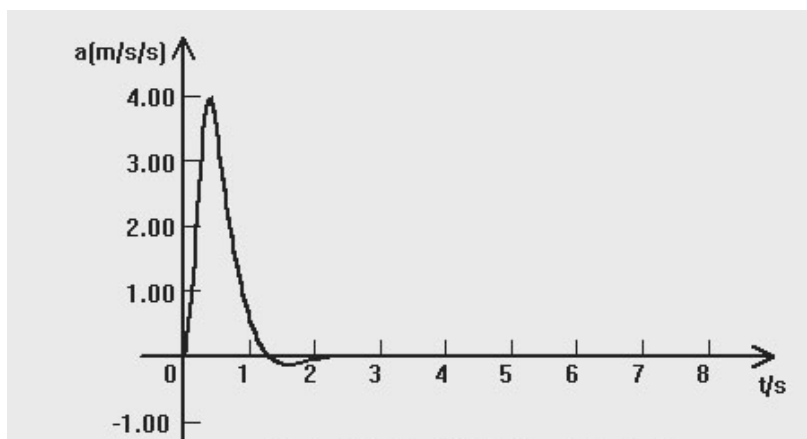


图 6.11 转向盘角脉冲输入下的侧向加速度响应曲线

## (2) 幅频特性和相频特性

幅频特性反映了驾驶员以不同频率输入指令时，汽车执行驾驶员指令失真的程度。相频特性反映了汽车横摆角速度滞后于方向盘转角的失真程度。将转向盘转角转化为前轮转角，转向盘角传动比为20，再对转向盘转角和横摆角速度值进行傅氏变换，得到横摆角速度与前轮转角的幅频特性曲线和相频特性曲线，如图6.12、图6.13所示。图中横坐标均为输入频率的对数值。

从图6.12中可以得到稳态增益为1.77dB，共振峰频率为1.3Hz。共振峰频率越高，操纵稳定性越好，主观评价越好。共振频率处增幅为共振频率处增益与稳态增益差值，应当小些，其值为0.03dB。

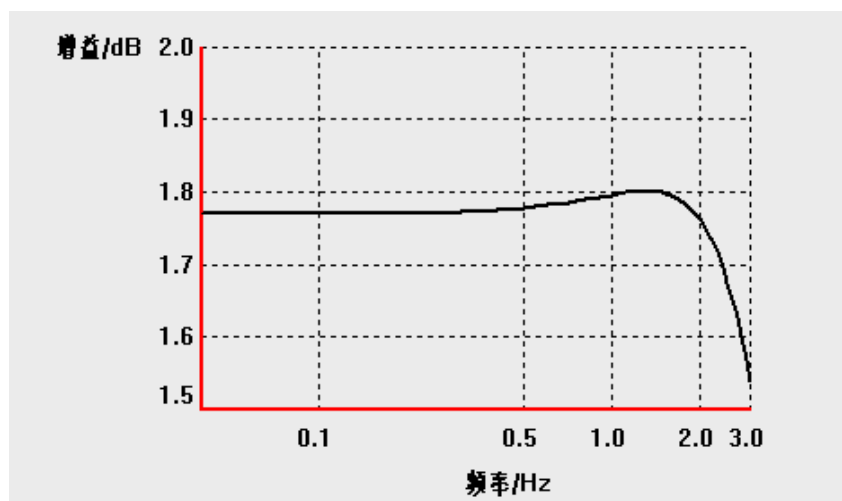


图6.12 横摆角速度与前轮转角的幅频特性

$f=0.1\text{Hz}$ 时的相位滞后角代表缓慢转动方向盘时响应的快慢，这个数应接近于零； $f=0.6\text{Hz}$ 时的相位滞后角代表快速转动方向盘时响应的快慢，其数值应当小些。从图6.13中得到， $f=0.1\text{Hz}$ 时的相位滞后角为 $1.33^\circ$ ， $f=0.6\text{Hz}$ 时的相位滞后角为 $8.20^\circ$ 。

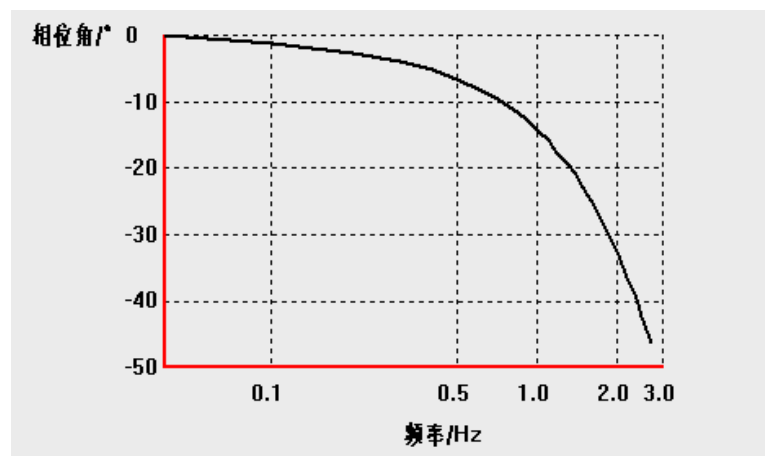


图6.13 横摆角速度与前轮转角的相频特性

### 6.3.3 稳态转向特性试验结果分析

初始车速取 10km/h，假设试验场地上画有 20m 的圆周，为使转向半径为 20m，取不同的转向盘转角试验得到，转向盘转角值为  $310^\circ$  时能满足要求。按照试验要求纵向加速度不超过  $0.25\text{m/s}^2$ ，本次仿真试验中纵向加速度为  $0.2\text{m/s}^2$ 。

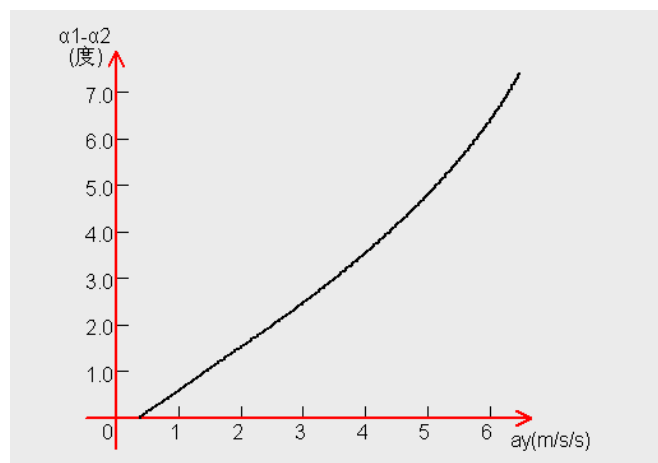


图 6.14  $(a_1 - a_2) - a_y$  曲线

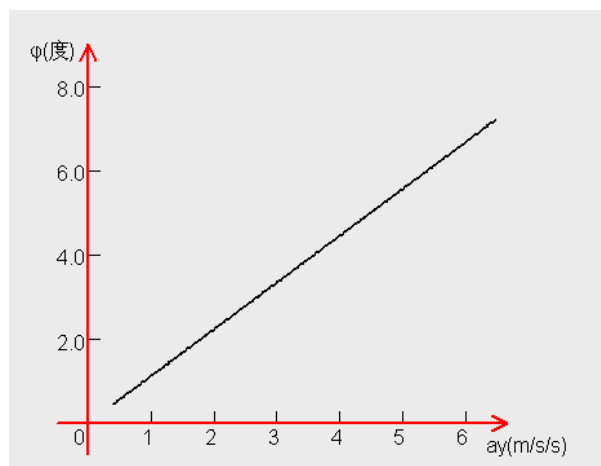


图 6.15 车箱侧倾角与侧向加速度的关系曲线

在上述试验条件下进行稳态转向特性虚拟试验后，可以得到任意时刻汽车速度、侧倾角速度和横摆角速度 $\omega_r$ ，由此就可以求出车箱侧倾角 $\phi$ 、侧向加速度 $a_y = u\omega_r$ 和转向半径 $R = u / \omega_r$ ，并根据 $a_1 - a_2 = 57.3L[1/R_0 + 1/R]$ 算出 $a_1 - a_2$ 的值，从而绘制 $(a_1 - a_2) - a_y$ 曲线、车箱侧倾角 $\phi - a_y$ 曲线和 $R/R_0 - a_y$ 曲线，如图 6.14~图 6.16 所示。

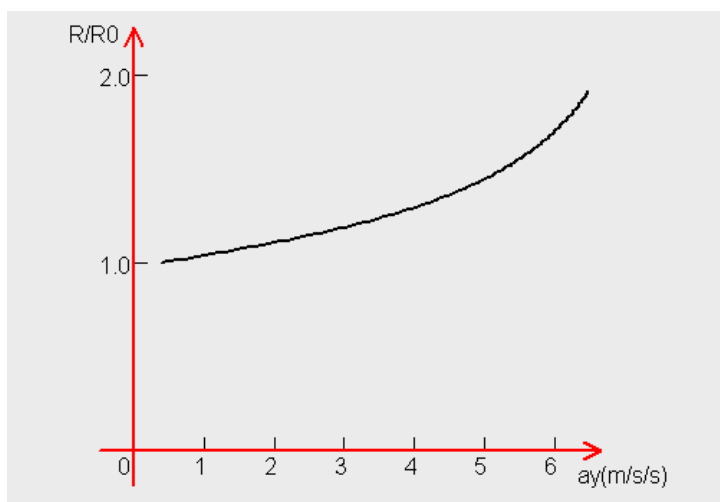


图 6.16  $R/R_0 - a_y$  曲线图

图 6.17 为稳态转向特性试验的汽车行驶轨迹模拟图。由图可见，初始转向半径为 20m，试验结束（即侧向加速度达到  $6.5 \text{ m/s}^2$ ）时转向半径为 38m。试验结果表明，随着车速的增加，汽车的转向半径越来越大。该汽车具有不足转向特性。

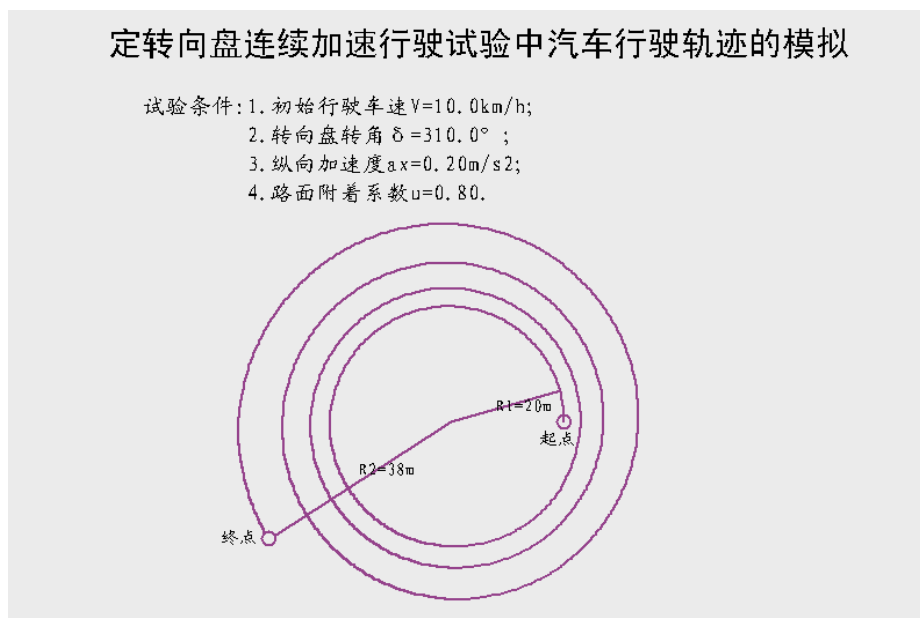


图6.17 稳态转向特性试验中汽车行驶轨迹模拟

本项试验评价指标为：中性转向点的侧向加速度值 $a_n$ 、不足转向度 $U$ 和车箱侧倾度 $K_\phi$ 。中性转向点的侧向加速度值 $a_n$ ，定义为前、后桥侧偏角差与侧向加速度关系曲线

上,斜率为零处的侧向加速度值。由图 6.14 可见,随着车速的增加,  $(a_1 - a_2) - a_y$  曲线斜率越来越大,不可能为零,即不会出现中性转向点,所以可以理解为  $a_n$  值很大。不足转向度  $U$  按前、后桥侧偏角差值与侧向加速度关系曲线上侧向加速度值为  $2\text{m/s}^2$  处的平均斜率(纵坐标值除以横坐标值)计算。车箱侧倾度  $K_\phi$  按车箱侧倾角与侧向加速度关系曲线上侧向加速度值为  $2\text{m/s}^2$  处的平均斜度计算<sup>[51]</sup>。通过计算求得,不足转向度  $U = 0.762^\circ / (m/s^2)$  和车箱侧倾度  $K_\phi = 1.119^\circ / (m/s^2)$ 。

#### 6.3.4 单移线试验结果分析

试验车速按最高车速的 70% 来确定, 取为  $80\text{km/h}$ 。根据换道要求, 正弦角周期为  $4.0\text{s}$ , 方向盘最大转角为  $25^\circ$ , 路面附着系数取  $0.8$ 。

##### (1) 瞬态响应曲线

在上述试验条件下进行单移线虚拟试验后, 得到试验过程的横摆角速度、车身侧倾角、侧向速度、侧向加速度等数据, 对试验数据进行处理、绘制曲线, 见图 6.18~图 6.21 所示。

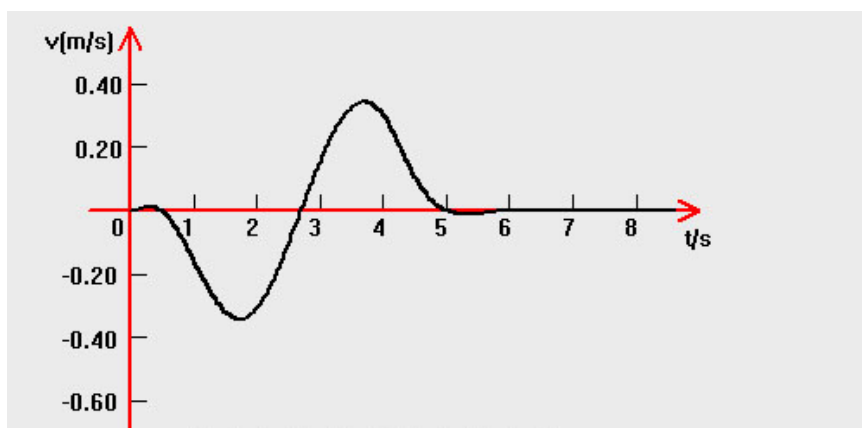


图 6.18 侧向速度随时间变化曲线

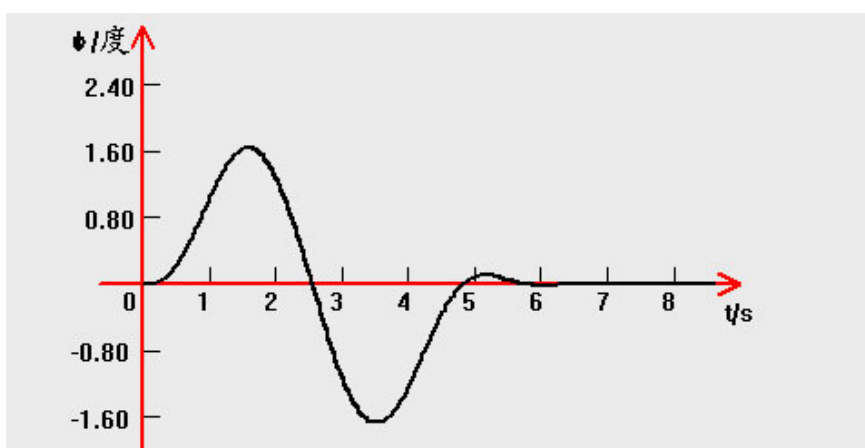


图 6.19 车身侧倾角随时间变化曲线



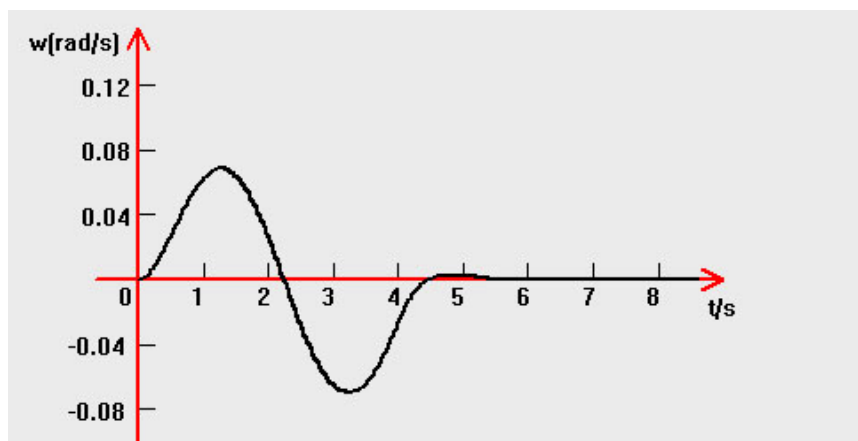


图 6.20 横摆角速度随时间变化曲线

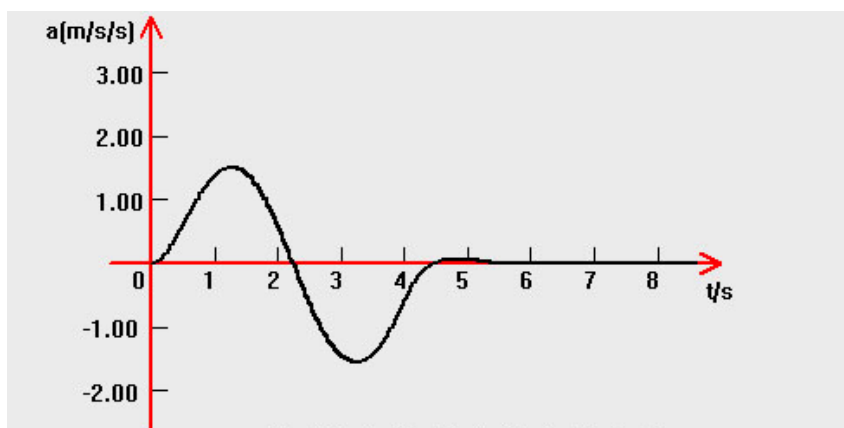


图 6.21 侧向加速度随时间变化曲线

## (2) 车辆行驶轨迹模拟

图 6.22 为单移线虚拟试验的汽车行驶轨迹模拟图。仿真结果表明正弦输入可以较好地表达单移线试验，该车在换道试验中有较好的操控特性。

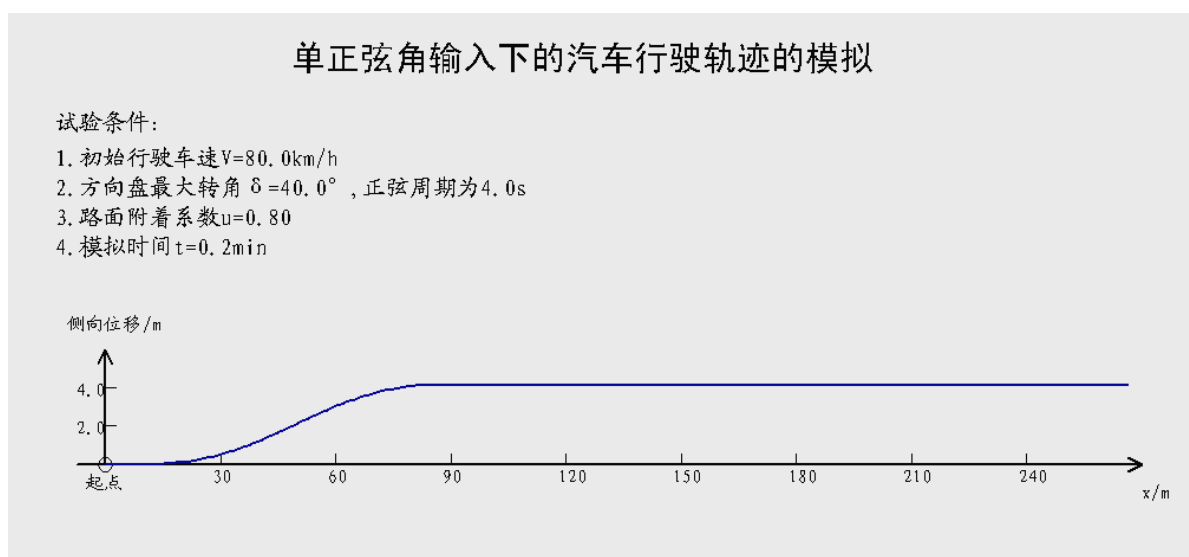


图 6.22 单移线试验中汽车运动轨迹模拟图

## 结论

本文基于汽车操纵动力学理论和虚拟现实技术,以 VC++为开发平台,开发了一套桌面汽车操纵稳定性虚拟仿真系统。该系统可以对转向盘角阶跃输入试验、转向盘角脉冲试验、稳态转向特性试验和单移线试验进行虚拟仿真分析。本文所作的主要工作如下:

(1) 详细介绍了九自由度整车操纵稳定性动力学模型,给出了动力学微分方程的求解方法.改进的欧拉法及编程实现技术。

(2) 介绍了汽车模型的具体创建方法、技巧,创建了轿车、大货车和客车的三维实体外观模型。结合仿真的需要,首次对客车车身内部建模,创建仪表盘、座椅、转向盘等车内构件模型,使客车模型更加逼真。

(3) 实现了基于 Vega 的车辆视景驱动。给出了视景驱动中自定义运动模型、碰撞检测技术、运动状态信息的实时显示和车辆自由度驱动等关键技术的实现方法。为利用 MultiGen Creator/Vega 进行虚拟现实仿真研究提供参考。

(4) 实现了虚拟试验。首先根据国家汽车操纵稳定性试验标准设定试验条件,然后进行车辆动力学分析计算,根据计算结果实时地改变车辆的位姿,实现在虚拟场景中再现汽车的试验过程。在虚拟试验中,可以改变观察者视点的位置,使用户从不同角度体验车辆的操纵稳定性性能;可以全屏显示,使用户能够更加投入、沉浸到虚拟试验中。

(5) 实现了试验结果的输出。试验结束后对试验中记录的转向盘转角、车速、横摆角速度、侧倾角、侧向加速度等数据进行处理,得到各试验的特性曲线和相关评价参数,并对汽车行驶轨迹进行模拟。

(6) 实现了试验数据的读出,以方便进行详细的后续分析。

本研究的完成使得在计算机上进行车辆操纵稳定性试验及评价分析成为了可能,同时提高了数值仿真的直观性,拓展了仿真的方法和手段;可以与相关的主观评价体系相结合,对影响汽车操纵稳定性的相关因素进行分析,丰富了进行汽车性能分析的手段。

然而,利用虚拟现实技术进行汽车操纵稳定性的虚拟仿真分析,是一项复杂、细致而艰巨的研究,在国内尚处于研究探索阶段,本文的工作仅仅是对其进行的探索性研究。对于一个完善的操纵稳定性仿真分析系统来说,还有很多工作需要进一步的研究和探讨:

(1) 为了使虚拟试验更加具有真实感,应该绘制更为逼真的车辆仿真模型,尤其在车内仪表部分应加以完善。

（2）为了获得更为真实的感官体验，使参与者最大程度地沉浸在仿真过程中，以比较真实的状态与系统交互，需要添加人机交互设备，如方向盘、制动踏板、油门踏板等硬件设备。

（3）为了使仿真软件具有通用性，应当建立车辆模型库。当需要评价某一车辆的操纵稳定性时，能导入相应的虚拟汽车模型进行仿真试验。

## 参考文献

- [1]中华人民共和国公安部. 2007年全国道路交通事故情况[EB/OL].  
[http://www.gs.xinhuanet.com/gsgaw/2008-01/08/content\\_12152575.htm](http://www.gs.xinhuanet.com/gsgaw/2008-01/08/content_12152575.htm), 2008-01-18
- [2]黄宁军. 发展中的汽车主动安全技术[J]. 汽车工业研究, 2000.05: 35-37
- [3]余志生. 汽车理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.10
- [4]徐延海, 宁凡坤. 用于汽车操纵稳定性模拟的虚拟现实平台的研究[J]. 系统仿真学报, 2007.19(17): 3984-3987
- [5]赵斌. 汽车操纵稳定性视景仿真建模及驱动技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2005
- [6]尹念东. 汽车操纵稳定性的研究进展[J]. 黄石高等专科学校学报, 2004,20(4): 1-4
- [7]Zhang,Y.,Tang,A.,Palment,T.,and Hazard,C. Virtual Proving Ground- and integrated technology for full vehicle analysis and simulation[J]. Int.J.Vehicle Design, 1999, Vol.21, Nos4/5(Special Issue), pp.450-470
- [8]汪文龙. 车辆操纵稳定性的虚拟仿真技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006
- [9]王树凤. 汽车操纵稳定性的虚拟实验系统的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2002
- [10]熊坚, 曾纪国, 宋健. 汽车操纵稳定性虚拟仿真的研究[J]. 汽车工程, 2002,24(5): 430-433
- [11]刘星星. 基于虚拟技术的汽车操纵稳定性虚拟试验系统的研制[D]. 杭州: 浙江大学, 2006
- [12]刘星星, 杨绪剑等. 基于ADAMS、WTK的汽车操纵稳定性虚拟试验系统的研制[J]. 机电工程, 2006,23(4): 44-48
- [13]赵伟, 周志立, 周学建. 汽车操纵稳定性研究的数学模型评述[J]. 洛阳工学院学报, 2002,23(3): 76-79
- [14]郭孔辉. 汽车操纵动力学[M]. 吉林: 吉林科学技术出版社, 1991.12
- [15]雷雨成, 赵清亮等. 汽车全工况操纵和制动动力学17自由度的建模和仿真[J]. 汽车工程, 1996,18(6): 325-329
- [16]崔胜民, 肖利寿等. 汽车操纵动力学十八自由度模型仿真研究[J]. 汽车工程, 1998,20(4): 212-219
- [17]寇发荣. 大客车操纵动力学14自由度模型仿真研究[J]. 西安科技大学学报, 2005,25(4): 507-510
- [18]刘进伟, 吴志新, 徐达. 汽车操纵稳定性研究方法探讨[J]. 轻型汽车技术, 2006(9): 4-6
- [19]郭应时, 魏朗. 汽车轮胎理论模型的分析[J]. 西安公路交通大学学报, 1998,18(2): 66-68

- [20](日)安部正人. 汽车的运动和操纵[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998
- [21]魏朗. 用于碰撞事故中车辆动力学模拟的轮胎模型分析[J]. 西安公路交通大学学报, 1999,19(2): 73-76
- [22]周文仓. 常微分方程及其数值解法[M]. 北京: 科学出版社, 2003
- [23]封建湖, 车刚明, 聂玉峰. 数值分析原理[M]. 北京: 科学出版社, 2001.9
- [24](美)WILLIAM F.LUCAS. 微分方程模型[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1998
- [25]夏志向. 虚拟现实建模的研究与实现[J]. 光电技术应用, 2005,20(1): 54-57
- [26]孟小梅, 刘文庆. MultiGen Creator 教程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.07
- [27]王延红, 杨平利, 仇小鹏. 仿真建模软件 Creator 的应用技术[J]. 计算机仿真, 2005.7: 179-181
- [28]MultiGen Paradigm,Inc. The MultiGen Creator Online Help Summary[M]. U.S.A: MultiGen Paradigm, 2003
- [29]MultiGen Paradigm,Inc. The MultiGen Creator Desktop Tutor[M]. U.S.A: MultiGen Paradigm, 2003
- [30]MultiGen Paradigm,Inc. Creating Models for Simulations[M]. U.S.A: MultiGen Paradigm, 2003
- [31]焦培刚, 周以齐, 王灿运. 基于Creator可视化仿真建模优化方法的探讨[J]. 机电产品开发与创新, 2006.03: 86-88
- [32]洪光, 李洪儒, 牟建国. 基于 Creator 的三维模型的简化研究[J]. 计算机仿真, 2004.1: 57-58
- [33]王乘, 周均清, 李利军. Creator 可视化仿真建模技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005.03
- [34]陈明. 基于MultiGen Creator的汽车试验场虚拟仿真研究[D]. 西安: 长安大学, 2007
- [35]杨丽, 李光耀. 城市仿真应用工具—Vega软件教程[M]. 上海: 同济大学出版社, 2007.3
- [36]MutiGen-Paradigm, Inc. Vega Lynx User's Guide. Version 3.7, For Windows NT and Windows 2000[M]. U.S.A: 2003
- [37]MutiGen-Paradigm, Inc. Vega Programmer's Guide Version 3.7, For Windows NT and Windows 2000[M]. U.S.A: 2003
- [38]杨波. 虚拟现实技术—MultiGen Vega应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2002
- [39]仇小鹏, 杨平利, 陈晖. 仿真软件Vega中的路径和导航器模块[J]. 计算机仿真, 2006,23(12): 201-204
- [40]何水艳. 虚拟校园的碰撞检测研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2006
- [41]陈涛, 魏朗. 人-车-路虚拟仿真系统研究[J]. 交通与计算机, 2006,24(5): 12-15
- [42]龚卓蓉. Vega 程序设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.9
- [43]王玲. 用OpenGL做三维文字[J]. 西北建筑工程学院学报, 1999,6(2): 66-69

- [44]李雪, 翟正军等. Vega环境下汉字显示技术的实现方法[J]. 测控技术, 2007,26(4): 80-86
- [45]陈涛, 魏朗. 人-车-路视景仿真系统中信息的动态显示[J]. 计算机工程与应用, 2007,43(7): 227-229
- [46]于子凡, 史志勇, 杜贵君. Vega用户自定义运动模式的实现方法[J]. 地理空间信息, 2006,4(2): 4-6
- [47]江学东, 陈无畏. 基于Vega的车辆驾驶模拟视景仿真[J]. 公路与汽运, 2007,3(2): 37-39
- [48]魏朗, 陈涛. Visual C++程序设计攻略教程[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004
- [49]李瑞, 刘鹏远, 张锡恩. Vega程序设计在MFC中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2002,23(8): 55-57
- [50]杨子发. 轿车操纵稳定性的虚拟样机分析与试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006
- [51]QC/T 480-1999, 汽车操纵稳定性指标限值与评价方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999

## 攻读硕士学位期间取得的研究成果

### 发表论文:

- [1]彭鹏峰, 许新权. 改善我国道路交通安全状况的措施[J]. 道路与安全, 2006,6(9): 12-15
- [2]彭鹏峰, 许新权. 钢板弹簧有限元分析[J]. 长安大学研究生学术年会论文集, 2006.11: 221-224
- [3]许新权, 彭鹏峰. 浅析影响水泥路面/轮胎噪声的因素[J]. 江苏交通, 2007.03: 19-22

### 参加课题:

- 1.保龙高速公路运营安全保障系统综合研究
- 2.西汉高速公路秦岭北麓段运营安全性评价研究
- 3.云南省高速公路限速设计研究

## 致谢

本论文是在我尊敬的导师魏朗教授的悉心指导下完成的。在三年的研究生学习期间，魏老师严谨求实的学者风范、平易近人的态度、谦逊待人的生活作风，都深深地感染了我；魏老师渊博的学问和执著的探索精神为我树立了学习榜样。在学业上，魏老师为我创造了许多实践和锻炼的机会，使我学会了学以致用；在生活上，魏老师给予我极大的关注和帮助。在此，我谨向魏老师的辛苦培养和关心表示衷心的感谢并致以崇高的敬意！

研究生学习和论文完成期间还得到了陈涛老师、袁望方博士和赵伟博士对我的帮助，在此表示我诚挚的谢意。

还要感谢所有关心、帮助过我的老师、朋友和同学们！

最后感谢许新权同学在生活和学习上给与的关心和帮助！感谢我的家人！因为有你们的支持，我才能顺利完成学业。