

青 ★ 年 ★ 科 ★ 学 ★ 家 ★ 文 ★ 库

THE SERIAL BOOKS WRITTEN

BY YOUNG SCIENTISTS

# 汽车多体动力学 及计算机仿真

张越今 著



★ 青年科学家文库 ★



ISBN 7-5384-2060-6



9 787538 420609 >

ISBN 7-5384-2060-6/U·160 定价: 25.00 元(平装)  
30.00 元(精装)

青年科学家文库

# 汽车多体动力学 及计算机仿真

张越众 著

吉林科学技术出版社

青年科学家文库

汽车多体动力学及计算机仿真

张越今 著

责任编辑:李玫

封面设计:杨玉中

出版 吉林科学技术出版社 850×1168 毫米大 32 开本 146700 字 7 印张

发行 1998 年 12 月第 1 版 1998 年 12 月第 1 次印刷  
定价:25.00 元(平装)

印刷 长春新华印刷厂 ISBN 7-5384-2060-6/U·160 30.00 元(精装)

地址 长春市人民大街 124 号 邮编 130021 电话 5635183 传真 5635185

电子信箱 JLKJCBS @ public.cc.jl.cn

## 《青年科学家文库》评审委员会

顾 问：王大珩 杨振宁  
主 任 委 员：高景德  
副 主 任 委 员：高 潮 刘东生 卢良恕  
                  丁石孙 鲍奕珊  
委 员：按姓氏笔画排列  
          王寿仁 王泽九 石元春  
          叶耀先 田光华 许 翔  
          杨芙清 吴 博 何耀坤  
          张锐生 陆道培 陈运泰  
          陈佳洱 陈章良 罗 伟  
          赵玉秋 赵柏林 俞鸿儒  
          姜东华 顾方舟 高为炳  
          阎隆飞 雷天觉 黎乐民

## 祖国的希望 未来的曙光

——寄语青年科技工作者

王大珩

翻开吉林科学技术出版社送来的《青年科学家文库》书目及作者名单，一个个自强好学，勇于探索创新的青年人仿佛就在眼前，使我欣慰，感到后生可望。所以在《文库》编辑出版之际，我很乐于借此机会，同广大青年科技工作者讲几句共勉的话。

这些年来，一大批在五星红旗下诞生，成长起来的年轻科技工作者崭露头角，在面向国民经济主战场的应用研究和在基础科学以及高技术研究等诸多方面取得优异成就，有的跻身于国际领先地位，或达到国际先进水平，有的填补国内空白，这些成果对推动科学技术进步，发展国民经济起到了重要作用。为鼓励青年科技工作者的科学研究和发明创造，中国科学技术协会、中国科学院分别设立了青年科技奖和青年科学家奖，规定每两年评选一次。首届青年科技奖评出94名，首届青年科学家奖评出25名，他们是从全国数以百万计的青年科技工作者中层层遴选出的佼佼者。

在此基础上，经过中国科协和中国科学院的推荐，吉林科学技术出版社编辑出版首届部分获奖者的著作，并获得长白山学术著作出版基金的资助，这对广大青年科技工作者是很大鼓舞。

出版社关心青年科技工作者的成长是值得赞扬的。

当今,在激烈的国际竞争中,重要的是看一个国家的综合国力,而其中重要的一个方面是科学技术的进步,所以各国都把科学技术作为推动经济发展和社会进步的重要手段。我国是一个拥有十一亿人口的大国,经济还很落后,但是我们有志气、有能力振兴中华,立足于世界民族之林。实现这样的宏愿,要靠我们几代人的艰苦奋斗。中国科学技术的兴旺发达要靠我们老中青科技工作者团结合作,但归根到底要靠你们青年人。长江后浪推前浪,一代更比一代强。党和人民把国家的前途、民族的命运寄托在你们青年人身上,正如江泽民同志所说:“你们是祖国的希望所在,是中国未来的曙光。”

我们这些人都已年逾古稀,要你们接好班,要有理想、有志气。一个人也好,一个民族也好,都要有一点精神,要有使命感,要有民族自强心,要为国家、为民族争口气,奋发向上,勇于进取;作为优秀的青年科技人才,除业务上有突出成就外,还要有不计名利、无私奉献的高尚精神,现在尤其要提倡这种精神,还要有求实的科学态度,尊重知识,尊重他人的劳动;你们还要发扬中华民族的美德,那就是要有集体主义精神,要团结协作,自力更生,艰苦奋斗,不折不挠地去拼搏,满怀希望,开拓未来!

1990年2月

## 前 言

汽车多体系统动力学及计算机仿真技术,是多体系统动力学理论应用于汽车领域并借以计算机实现的前沿技术,近几年得到了广泛的应用和发展,已成为一门实用技术。目前,我国已有很多汽车生产厂家、科研院所引进和开发了多体系统计算机仿真软件,但由于这些软件的使用需要较多的力学、计算机知识和较深的工程背景,应用起来比较困难,还远没有达到实用阶段,这对科技前沿的多体系统计算机仿真技术的应用开发来说是远远不够的。作者撰写此书就是为了推动多体系统计算机仿真技术的普及和在汽车设计领域中的应用。

作者专门从事汽车多体系统计算机仿真技术的研究已达7年之久,此间大多数时间是在国家重点实验室度过的。此书在作者和同行们的经验基础上,以作者的硕士和博士学位论文内容为主,纳入了作者几年来的研究成果。全书内容包括:第1章至第2章是多体系统动力学和计算机仿真技术的概述;第3章至第9章讨论了应用多体系统动力学理论和计算机仿真软件ADAMS进行汽车悬架、汽车整车、汽车列车的建模和仿真过程,是本书的主要内容;第10章是对本书的总结和对汽车多体系统计算机仿真技术发展的展望。

作者在学生时代,得到了清华大学管迪华教授、宋健博士、陈奎元教授、贾书惠教授、吉林工业大学林逸教授的指导;东风汽车集团公司的张云清、任卫群工程师,北京吉普汽车有限公司张泉、胡东方高工,第一汽车集团公司的刘明辉、陆波高工,总参军械技术研究所穆希辉高工,他们为模型参数获得和模型验证提供了较大帮助。可以说,没有他们便没有此书的诞生。

此书的出版得到了许多朋友的支持和帮助,伍哲同学、张广



志先生为此书的出版做了大量的工作;本书有些内容借鉴了同行的研究成果或是在他们成果基础上创新的,在此一并致谢!

最后,作者衷心地感谢《青年科学家文库》评审委员会、美国MDI北京办事处和吉林科学技术出版社的评审、资助和出版。

张越今

1998年于清华园

# 目 录

<b>第 1 章 多体动力学概述</b> .....	(1)
1.1 多体系统动力学简介 .....	(1)
1.1.1 引言 .....	(1)
1.1.2 多刚体系统动力学的研究方法综述 .....	(3)
1.1.3 柔性多体动力学的研究现状 .....	(5)
1.2 多体动力学软件概述 .....	(6)
1.3 多体动力学在汽车动力学中的应用 .....	(8)
1.4 本书研究的主要内容及意义 .....	(13)
<b>第 2 章 机械系统分析软件 ADAMS 的计算方法</b> .....	(16)
2.1 ADAMS 软件简介 .....	(16)
2.2 分析、计算方法 .....	(17)
2.2.1 广义坐标选择 .....	(17)
2.2.2 动力学方程的建立 .....	(17)
2.2.3 动力学方程的求解 .....	(18)
2.2.4 静力学分析、运动学分析、初始条件分析 .....	(21)
2.2.5 计算分析框图 .....	(24)
2.3 ADAMS 软件应用中解决数值发散的技巧 .....	(26)
2.3.1 数值发散的原因 .....	(27)
2.3.2 解决数值发散的技巧 .....	(28)
<b>第 3 章 整车多体系统模型建立</b> .....	(35)
3.1 麦克弗逊滑柱式前悬架多体系统模型 .....	(35)
3.1.1 刚体模型 .....	(35)
3.1.2 弹性体模型 .....	(37)
3.2 双连杆滑柱式后悬架多体系统模型 .....	(40)
3.2.1 刚体模型 .....	(40)

3.2.2	弹性体模型 .....	(42)
3.3	整车多体系统的开环模型 .....	(43)
3.3.1	轮胎模型 .....	(44)
3.3.2	多刚体模型 .....	(50)
3.3.3	多柔体模型 .....	(50)
3.3.4	计及转向系统柔性的模型 .....	(50)
3.4	整车多体系统模型参数的确定及相关试验 .....	(51)
3.4.1	几何参数、惯性参数的确定 .....	(51)
3.4.2	参数确定的相关试验 .....	(52)
3.5	本章小节 .....	(57)
<b>第4章</b>	<b>整车动力学仿真及优化 .....</b>	<b>(59)</b>
4.1	稳态转向特性仿真分析及试验验证 .....	(59)
4.2	轿车稳态转向特性优化分析 .....	(65)
4.3	带有横向稳定杆的整车多体系统模型 .....	(70)
4.4	角阶跃输入瞬态响应仿真分析 .....	(72)
4.5	直线制动、转弯制动的仿真分析 .....	(73)
4.5.1	直线制动的仿真分析 .....	(74)
4.5.2	转弯制动的仿真分析 .....	(75)
4.6	移线、双移线运动仿真分析 .....	(77)
4.6.1	驾驶员模型 - PID 预瞄控制模型 .....	(79)
4.6.2	简化的三自由度汽车 - 驾驶员模型 .....	(86)
4.6.3	整车多体系统的闭环模型 .....	(88)
4.6.4	驾驶员闭环控制模型中各增益因子的参数化分析 .....	(91)
4.6.5	驾驶员对车辆特性的适应 .....	(95)
4.6.6	单移线行驶特性的仿真分析 .....	(100)
4.7	本章小节 .....	(103)
<b>第5章</b>	<b>滑板式钢板弹簧悬架模型建立及仿真分析 .....</b>	<b>(105)</b>
5.1	滑板式钢板弹簧悬架变接触点动力学模型 .....	(106)

5.2	模型验证 .....	(113)
5.3	仿真结果分析 .....	(115)
5.4	本章小节 .....	(116)
<b>第6章</b>	<b>BJ2022 整车多体系统模型建立及仿真分析</b> ..	<b>(118)</b>
6.1	整车多体系统模型建立 .....	(118)
6.1.1	单纵臂式前悬架多体系统模型 .....	(118)
6.1.2	钢板弹簧非独立后悬架多体系统模型 .....	(119)
6.1.3	转向系统模型 .....	(120)
6.1.4	横向稳定杆模型 .....	(120)
6.1.5	减振器模型 .....	(121)
6.1.6	轮胎模型 .....	(121)
6.1.7	传动系简化模型 .....	(123)
6.1.8	整车多体系统的开环模型 .....	(123)
6.2	整车多体系统模型参数的确定 .....	(124)
6.3	整车动力学仿真及试验验证 .....	(125)
6.3.1	稳态转向特性仿真分析及试验验证 .....	(125)
6.3.2	直线制动、转弯制动的仿真分析 .....	(128)
6.3.3	移线、双移线运动仿真分析 .....	(130)
<b>第7章</b>	<b>多体动力学在汽车转向、悬架系统运动分析中的应用</b> .....	<b>(133)</b>
7.1	滑柱摆臂式悬架及其转向机构运动分析 .....	(133)
7.1.1	模型建立 .....	(134)
7.1.2	模型的简化及运动学关系式 .....	(136)
7.1.3	系统自由度分析及约束方程的建立 .....	(137)
7.1.4	运动分析 .....	(139)
7.1.5	说明 .....	(140)
7.2	双横臂悬架及其转向机构运动分析 .....	(142)
7.2.1	模型建立、简化及运动学关系式 .....	(142)

7.2.2	系统自由度分析及约束方程的建立 .....	(144)
7.2.3	运动分析 .....	(146)
7.2.4	说明 .....	(147)
7.3	单斜臂悬架的运动分析 .....	(147)
7.4	转向、悬架空间运动学分析程序 KASS 简介 .....	(149)
7.4.1	KASS 程序的理论基础 .....	(149)
7.4.2	KASS 程序说明 .....	(150)
<b>第 8 章</b>	<b>汽车转向、悬架运动学计算、验证及结果分析 .....</b>	<b>(151)</b>
8.1	转向、悬架系统的运动特性 .....	(151)
8.1.1	双横臂悬架的运动特性 .....	(151)
8.1.2	滑柱摆臂式悬架的运动特性 .....	(158)
8.1.3	单斜臂悬架的运动特性 .....	(165)
8.2	悬架参数的优选分析 .....	(166)
8.2.1	悬架角度参数的选择 .....	(167)
8.2.2	悬架摆臂长度的选择 .....	(173)
8.3	悬架参数对制动点头的影响 .....	(182)
8.3.1	双横臂悬架参数的匹配 .....	(182)
8.3.2	滑柱摆臂悬架参数的匹配 .....	(185)
8.4	汽车转向力均匀性分析 .....	(187)
8.5	本章小结 .....	(190)
<b>第 9 章</b>	<b>ADAMS 在汽车列车动力学仿真中的应用 .....</b>	<b>(192)</b>
9.1	双轴转向的汽车列车稳态、瞬态转向特性的仿真分析 .....	(192)
9.1.1	模型描述 .....	(192)
9.1.2	数值仿真及试验验证 .....	(194)
9.2	双轴转向的汽车列车参数化分析 .....	(196)
9.2.1	三种参数化分析方法的功能及相互关系 .....	(196)

9.2.2 参数化模型描述 .....	(197)
9.2.3 仿真结果 .....	(198)
9.3 本章小节 .....	(201)
<b>第 10 章 结论</b> .....	<b>(202)</b>
参考文献 .....	(206)

## 第 1 章 多体动力学概述

### 1.1 多体系统动力学简介

#### 1.1.1 引言

多体系统动力学,包括多刚体系统动力学和多柔体系统动力学,是研究多体系统(一般由若干个柔性和刚性物体相互连接所组成)运动规律的科学。多体动力学是在经典力学基础上发展起来的与运动生物力学、航天器控制、机器人学、车辆设计、机械动力学等领域密切相关且起着重要作用的新的分枝。由于近 20 年来卫星及航天器飞行稳定性、太阳帆板展开、姿态控制、交会对接的需求和失败的教训及高速、轻型地面车辆、机械人、精密机床等复杂机械系统的高性能、高精度的设计要求,加之高速度、大容量、多功能现代计算机的发展及计算方法的成熟,多体力学已由早期的多刚体系统动力学发展为多柔体系统动力学。多柔体动力学是分析力学、连续介质力学、多刚体动力学、结构动力学学科发展交叉的必然,这门边缘性学科以当代航天事业的发展为标志,所要研究的问题囊括了宏观世界机械运动的主要问题。

柔体系统不同于多刚体系统,它含有柔性部件,变形不可忽略,其逆运动学是不确定的;它与结构力学不同,部件在自身变

形运动同时,在空间中经历着大的刚性移动和转动,刚性运动和变形运动相互影响、强烈耦合;与一般系统不同,它是一个时变、高度耦合、高度非线性的复杂系统<sup>[1]</sup>。

60年代初,宇宙及机械领域的一些学者们开始了多刚体动力学的研究工作<sup>[2][3]</sup>。到了60年代末70年代初,美国、德国和前苏联的一些学者提出了各自较为系统的理论和方法<sup>[4][5]</sup>。70年代初一些多刚体系统动力学的分析软件相继问世,多柔体系统动力学的理论工作已经展开。1977年,在德国慕尼黑(Munich, FRG)由国际理论与应用力学大会(IUTAM)主持召开的第一次国际性多体系统动力学讨论会<sup>[6]</sup>,1983年,在美国的衣阿华(Iowa, USA)由“北大西洋公约组织(NATO)”的高级学会(ASI)主办了“机械系统动力学计算机分析与优化讲习会”对多体系统动力学的发展起到了很大的推动作用<sup>[7]</sup>。1985年,在意大利的乌迪内,由国际机械(IUTAM)与机构理论联合会(IFToMM)联合主办的第二次国际多体系统动力学研讨会上,展示了代表各种多刚体系统动力学方法体系的最新成果<sup>[8]</sup>。它标志着多刚体系统动力学的日趋成熟。在这次会议上,多柔体系统动力学方面的研究也十分活跃。80年代中期和后期是多柔体发展较快的时期,不仅出现了大量的有关文献<sup>[9]~[12]</sup>,甚至还出现了有关专著<sup>[13]、[14]</sup>。在一些多体软件中,有关柔性体的内容不断增加。1989~1990年由德国斯图加特大学(Univ. of Stuttgart)的Schiehlen教授主持,完成了《多体系统手册》<sup>[15]</sup>的编辑出版工作。该手册对世界上多体系统动力学领域的17个研究团体的工作和成果进行了介绍。在所介绍的软件中,有8个软件考虑了柔性体。其中包括:ADAMS、DADS、DISCOS等著名软件。

我国从1986年多刚体系统动力学研讨会(北京),尤其是1988年柔性多体系统动力学研讨会(长春)以来,在该领域的研究工作进展很快。1992年,多体系统动力学-理论、计算方法



和应用学术会议在上海召开,展示了一批理论和应用的最新成果<sup>[16]</sup>。1996年在山东长岛召开的“全国多体系统动力学与控制学术会议”在理论与计算方法研究、工程应用和实验研究三个方面取得了更新的进展<sup>[17]</sup>。目前,除了自行编制的一些专用软件外,一些单位还引进了国外的先进软件。这对我们学习和借鉴先进的技术 and 经验,加快研究步伐起到了良好的作用。

### 1.1.2 多刚体系统动力学的研究方法综述

20世纪中期,古典的刚体力学、分析力学与现在的电子计算机相结合的力学分支——多刚体动力学在社会生产实际需要的推动下诞生了。目前,已经形成了比较系统的研究方法。其中主要有工程中常用的常规经典力学方法(以牛顿-欧拉方程为代表的矢量力学方法和以拉格朗日方程为代表的分析力学方法),图论(R-W)方法,凯恩方法、变分方法<sup>[18]-[20]</sup>。

#### (1) 牛顿-欧拉法

对作为隔离体的单个刚体列写牛顿-欧拉方程时,铰约束力的出现使未知变量的数目明显增多,故即使直接采用牛顿-欧拉方法,也必须加以发展,制定出便于计算机识别的刚体联系情况和铰约束形式的程式化方法,并致力于自动消除铰的约束能力。德国学者 Schiehlen 在这方面做了大量工作。其特点是在列写出系统的牛顿-欧拉方程后,将不独立的笛卡尔广义坐标变换成独立变量,对完整约束系统用 d'Alembert 原理消除约束反力,对非完整约束系统用 Jourdain 原理消除约束反力,最后得到与系统自由度数目相同的动力学方程,希林等人编制了符号推导的计算机程序 NEWEUL。

#### (2) 拉格朗日方程法

由于多刚体系统的复杂性,在建立系统的动力学方程时,采用系统的独立的拉格朗日坐标将十分困难,而采用不独立的笛