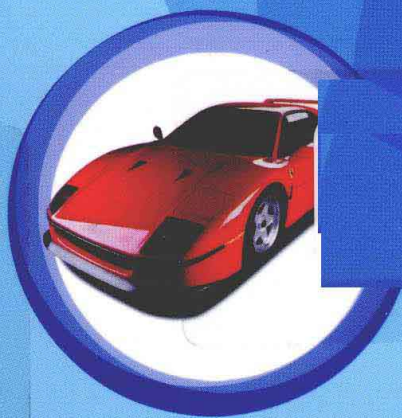


张立军 何 辉 编著

车辆行驶动力学 理论及应用



国防工业出版社

National Defense Industry Press

车辆行驶动力学 理论及应用

张立军 何辉 编著

国防工业出版社

·北京·

前 言

车辆行驶动力学是车辆系统动力学的一个重要方面,主要研究车辆行驶时在随机不平路面的激励下整车及部件的动力学问题。研究内容包括路面激励时频模型、整车动力学模型、部件特性(减振器、弹簧、橡胶件、车体弹性)对整车动力学性能影响,现代车辆行驶动力学还涉及动力学控制和多体动力学问题。车辆行驶动力学是研究汽车行驶平顺性、安全性和零部件可靠性的重要理论基础。

全书共分 11 章,第 1 章介绍了车辆行驶动力学研究现状;第 2、3 章为车辆随机振动理论基础;第 4 章介绍了车辆路面时域和频域模型;第 5 章为车辆动力学模型建立及动力响应的时频分析;第 6、7 章分别介绍车辆非线性行驶动力学、非平稳行驶动力学的分析方法;第 8 章介绍车辆行驶动力学的多体动力学方法;第 9 章介绍了车辆的主动、半主动控制;第 10、11 章分别介绍随机疲劳和随机振动试验及平顺性评价。

本书是在作者多年教学和科研工作基础上撰写而成的。编写特点一是系统性强,既包括了基础理论,如随机振动、多体动力学基础、路面模型等,同时也涵盖了随机振动试验和随机疲劳问题。二是反映了车辆行驶动力学的现代方法,如考虑部件弹性的多体动力学分析以及悬架的控制分析等。本书在介绍理论的同时结合应用实例,有助于读者的全面理解,具有很强的实用性。

本书的部分研究内容得到了辽宁省自然科学基金的资助

(20102094),在此表示感谢。本书在编写过程中得到了东北大学张天侠教授的帮助与指导。本书作者的研究生陈学文、邹晓华、李刚、张宇、赵亮、屈晓贞参加了部分实例的仿真工作,此外本书参考了许多学者的著作、文献,在此一并表示感谢。

由于作者的学识和水平有限,书中错误和不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

作者

2010 年 10 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 车辆行驶动力学的研究内容及现状	1
1.1.1 路面随机激励的研究	2
1.1.2 车辆行驶动力学建模及分析方法	4
1.2 车辆非平稳行驶动力学问题	7
1.2.1 车辆非平稳行驶动力学	7
1.2.2 车辆非平稳行驶动力学研究方法	8
1.2.3 车辆非平稳响应的时频分析	10
1.2.4 车辆非平稳行驶动力学控制	10
第2章 随机振动的统计描述	11
2.1 随机振动	11
2.1.1 随机振动	11
2.1.2 随机振动特点	11
2.2 随机变量及数字特征	11
2.2.1 随机变量的分布函数和概率密度函数	12
2.2.2 随机变量数字特征	12
2.3 随机过程及数字特征	15
2.3.1 随机过程的基本概念	15
2.3.2 随机过程的概率分布和概率密度	16
2.3.3 随机过程的数字特征	17
2.4 随机过程的相关分析	19
2.4.1 相关系数及其意义	20

2.4.2	自相关函数的性质	21
2.4.3	互相关函数及其性质	22
2.5	平稳随机过程和各态历经过程	23
2.5.1	平稳随机过程	23
2.5.2	各态历经随机过程	24
2.6	随机振动的频率特征	25
2.6.1	傅里叶级数及频谱分析	25
2.6.2	傅里叶变换及性质	27
2.6.3	功率谱密度函数(PSD)	31
2.6.4	窄带与宽带随机过程	33
2.6.5	互谱密度与相干函数	36
第3章	线性系统动态特性及响应统计特性	37
3.1	随机振动的分类	37
3.1.1	按自由度分	37
3.1.2	按统计特征分	37
3.1.3	按系统本身特性分	38
3.1.4	按频谱特征分	38
3.2	频率响应函数	38
3.3	脉冲响应函数及其与频响函数关系	39
3.3.1	脉冲响应函数	39
3.3.2	单自由度有阻尼系统的脉冲响应函数	40
3.3.3	脉冲响应函数及其与频响函数关系	41
3.4	系统在任意输入下的响应	41
3.5	多自由度系统频响函数矩阵	42
3.6	多自由度系统脉冲响应函数矩阵(实模态分析)	42
3.7	系统输入、输出统计关系	43
3.7.1	单自由度系统	43
3.7.2	多自由度系统统计量及关系	45
3.8	多自由度系统的时域方法	50

第4章 路面随机输入的时频模型	52
4.1 路面不平度的频域统计特性	52
4.1.1 路面不平度的功率谱密度	52
4.1.2 时间频率功率谱密度 $G_q(f)$	53
4.1.3 路面对两轮的输入功率谱密度	54
4.1.4 路面对四轮的输入功率谱密度	55
4.1.5 四轮相关随机输入通用频域模型	56
4.2 路面不平度的时域模型	57
4.2.1 单轮输入路面时域模型	57
4.2.2 前后两轮输入的路面模型	58
4.2.3 左右轮相关的时域模型	59
4.2.4 四轮相关路面随机输入的状态方程	59
4.3 路面随机输入模拟实例与分析	60
第5章 车辆行驶动力学分析	63
5.1 车辆振动系统的简化	63
5.1.1 空间车辆模型	63
5.1.2 平面模型	64
5.1.3 车身与车轮两个自由度振动系统	64
5.1.4 单自由度车辆模型	66
5.2 车身与车轮双质量系统的振动	66
5.2.1 振动微分方程、振动偏频与主频	66
5.2.2 双质量系统的传递特性	67
5.2.3 系统振动响应均方根值	68
5.2.4 系统参数对振动响应的影响	69
5.3 双轴汽车振动及前后悬架固有频率的匹配	72
5.3.1 无阻尼自由振动运动方程	72
5.3.2 前后悬架固有频率匹配	73
5.4 整车八自由度(DOF)振动时频分析	76
5.4.1 整车振动模型的建立	76

5.4.2	四轮相关路面输入模型	78
5.4.3	系统响应的求解方法	78
5.4.4	实例分析	78
5.5	汽车悬架系统参数的优化	82
第6章	车辆非线性行驶动力学	88
6.1	车辆非线性弹性、阻尼特性	88
6.1.1	弹性元件的非线性	88
6.1.2	阻尼元件的非线性	89
6.2	单自由度系统的统计线性化	90
6.3	多自由度系统的统计线性化	92
6.4	整车非线性随机振动应用实例	93
6.4.1	整车模型简化	93
6.4.2	悬架非线性特性	94
6.4.3	整车振动微分方程	95
6.4.4	统计线性化分析实例及时域方法比较	97
6.5	摄动法	98
6.6	多自由度非线性系统的时域方法	100
6.6.1	多自由度非线性系统的时域方法	100
6.6.2	悬架非线性参数时域优化	101
第7章	车辆非平稳行驶动力学	110
7.1	非平稳随机振动的频域方法	110
7.1.1	双谱法	110
7.1.2	非平稳随机振动的演变谱分析	114
7.2	瞬态空间频响函数法	117
7.2.1	车辆非平稳振动系统的特征	117
7.2.2	时间频率响应函数	117
7.2.3	瞬态空间频率响应函数	118
7.2.4	瞬态空间功率谱密度函数	119
7.2.5	方法验证及实例分析	119

7.3	空间演变谱分析	124
7.3.1	车辆在空间域内的运动微分方程	124
7.3.2	空间域内的演变谱	125
7.4	非平稳响应的时域法	126
7.4.1	单轮路面非平稳随机输入的建模	126
7.4.2	两轮路面非平稳随机输入的建模	127
7.4.3	四轮相关路面非平稳随机输入	128
7.4.4	路面模拟实例与分析	131
7.4.5	非平稳响应的时域方法	133
7.5	协方差等效法	135
7.6	车辆非平稳信号的时频分析	135
7.6.1	维格纳分布(WD)的基本理论	136
7.6.2	伪维格纳分布(PWD)类型及计算机实现步骤	137
7.6.3	交叉项的产生	139
7.6.4	WD 谱在车辆非平稳振动分析中的应用	139
7.7	车辆非平稳振动的极大熵谱分析	142
7.7.1	极大熵谱估计(MESE)法	142
7.7.2	汽车非匀速行驶时的道路实验及熵谱分析	145
第8章	车辆行驶动力学的多体动力学分析	150
8.1	多体系统动力学方程	150
8.1.1	多体刚体动力学方程	150
8.1.2	多柔体系统动力学方程	152
8.2	多体动力学软件介绍	155
8.2.1	ADAMS 软件	155
8.2.2	SIMPACK 软件简介	156
8.3	悬架系统中橡胶件的静、动态特性	156
8.3.1	橡胶元件的特点	157
8.3.2	橡胶元件力学模型	157
8.3.3	橡胶件材料特性参数确定	159
8.3.4	橡胶件弹性特性有限元分析	161

8.4	悬架橡胶件对汽车平顺性影响的多体动力学分析	167
8.4.1	整车平顺性分析多体动力学模型	167
8.4.2	路面激励	174
8.4.3	平顺性仿真和试验验证	176
8.5	悬架构件柔性对汽车平顺性的影响分析	177
8.5.1	整车刚柔耦合模型	177
8.5.2	整车平顺性仿真分析	182
8.6	车架柔性对汽车平顺性的影响分析	185
8.6.1	车架模态分析	185
8.6.2	柔体车身模型的建立	188
8.6.3	整车刚柔耦合模型的建立	189
8.6.4	仿真的结果及分析	190
第9章	车辆主动、半主动悬架控制	194
9.1	车辆主动、半主动悬架	194
9.2	悬架系统最优控制	195
9.2.1	车辆稳态行驶悬架系统最优控制	195
9.2.2	车辆非平稳行驶状态悬架系统控制	200
第10章	随机疲劳分析	206
10.1	可靠性与失效	206
10.1.1	可靠性及可靠性函数	206
10.1.2	瞬时失效率	207
10.2	一次寿命的可靠性分析	209
10.2.1	穿过特定值的次数	209
10.2.2	一次性失效的寿命	211
10.2.3	窄带随机振动的一次性寿命分析	212
10.3	零件随机疲劳破坏寿命估计	214
10.3.1	累积损伤寿命	214
10.3.2	窄带随机疲劳损伤寿命	215

10.3.3 宽带随机疲劳损伤寿命	216
第 11 章 车辆随机振动试验及平顺性评价	218
11.1 汽车行驶平顺性道路试验	218
11.1.1 试验准备	218
11.1.2 试验结果分析	219
11.2 车辆随机振动的室内试验	222
11.2.1 室内道路模拟的目的	222
11.2.2 室内道路模拟方法	223
11.2.3 室内随机振动复现的等价条件	224
11.3 车辆行驶平顺性的评价	225
11.3.1 人体对振动的反应及平顺性的评价方法	225
11.3.2 综合振动舒适度评价方法	228
11.3.3 汽车平顺性的时域评价	231
参考文献	237

第 1 章 绪 论

1.1 车辆行驶动力学的研究内容及现状

车辆系统动力学(Vehicle System Dynamics)是近代发展起来的一门新兴学科,主要研究汽车受到各种力时相互作用和由此产生的各种运动工况。内容包括车辆行驶动力学、驱动、制动动力学、操纵动力学等性能。现代车辆系统动力学还涉及多体动力学问题以及控制理论^[1-8]。车辆行驶动力学(Vehicle Ride Dynamics)是车辆系统动力学的一个重要方面,主要研究车辆行驶时,在随机不平路面的激励下整车及部件的动力学问题,是提高汽车行驶平顺性、安全性和零部件可靠性的重要理论基础。研究内容包括路面激励的时域、频域模型及其特性;悬架系统部件模型和特性,如减振器、弹簧、橡胶连接件特性;整车模型的建立;整车及部件的多刚体和多柔体动力学问题,如考虑车身、车架等部件的柔性;汽车行驶时的 NVH(Noise Vibration Harshness)特性及其控制问题等。

车辆动力学的系统研究始于 20 世纪 50 年代,计算机技术的发展和随机振动理论的应用使车辆行驶动力学得到迅速发展。20 世纪 80 年代初,国际上成立了总部设在荷兰的车辆系统动力学学会,定期出版刊物和举行学术会议,发表大量最新研究成果,使汽车动力学的研究发展到一个崭新的阶段。有代表性的著作是德国 Mitschke. E. M(1963)、Packeja. H. B(1976)、Willmermeit. H. P(1980)所著的《汽车动力学》,美国 Gillespie T. D(1992)所著的《汽车动力学基础》。Mitschke 教授在其著作中详细论述了汽车的驱动、制动、操纵稳定性和车辆的振动,该著作在 20 世纪 80 年代初译成中文,对我国汽车动力学研究产生重要影响,其中 90 年代翻译出版的《汽车动力学》(B 卷)对汽车行驶动力学

进行了全面的论述。我国郭孔辉院士在汽车操纵动力学研究方面在国际上享有盛誉,同时也是国内最早开始应用随机振动理论进行汽车行驶动力学研究的,并在国际上产生重要影响^[9](1976)。国内有代表性的著作是张洪欣教授编著的《汽车系统动力学》,喻凡教授和林逸教授编著的《汽车系统动力学》。系统动力学软件 ADAMS、MEDYNA、DADS、SIMPACT 等的问世加速了汽车动力学的发展,并在汽车的研发过程中得到广泛的应用,对于提高车辆的行驶性能、安全性能和可靠性发挥了重要作用。车辆行驶动力学的主要研究目的是分析车辆在路面随机激励作用下车辆行驶的动态特性、结构和使用参数对动态响应的影响、动态响应的控制问题以及响应指标的评价,即车辆行驶平顺性评价,为此就以上几个方面的研究现状分别作以介绍。

1.1.1 路面随机激励的研究

不平路面的激励(excitation of road irregularity)是汽车行驶时最主要的激励,其他激励如发动机、传动系统、轮胎、风载荷等可以作为次要因素考虑。由于不平路面引起的汽车振动影响车辆行驶平顺性、操纵稳定性和安全性,一般对车辆的动态特性的模拟研究都是通过建立车辆动态模型来实现,因此必须考虑如何建立路面不平度的输入模型。根据整车随机振动响应的研究方法不同,路面不平度随机输入可分为频域模型和时域模型。

1. 路面频域模型(road surface model in frequency domain)

路面频域模型是广泛采用的路面模型。最早研究路面模型的是 Parkhilovskii(1968)^[10],Dodds 和 Robson(1973)^[11]。国际标准化组织文件 ISO/TC108/WG9(1972)^[12]对不同等级路面不平度的功率谱进行了详细描述,我国国家标准 GB7307—87 也采用这种方法^[13,14],路面共分 8 个等级。前苏联和德国有自己的分类方法,但各国路面分类的理论体系是一致的。此方法是在一段有意义的空间频率 n 范围内,根据路面的等级情况给定了路面位移谱密度 $G_q(n)$,路面不平度功率谱密度用指数拟合。Mitschke 教授对上述路面频域模型进行了改进,解决了在 $\Omega=0$ 时路面谱为无穷大的问题。文献[15]、[16]对汽车四轮相关频域模型进行了分析,用相干函数给出了四轮输入的谱矩阵。四

轮相关频域路面模型已经在汽车的动力学及平顺性研究中发挥了很大作用^[17-25]。

文献[26]对四桥专用汽车的八轮路面输入谱进行了研究,为专用汽车的平顺性分析提供了理论基础。以上频域模型的相干函数在空间域 Ω 内是不变的,但在实际应用时都需要用时间频率 ω 表示,因此不同车型在不同路面上以不同车速行驶时的相干函数是变化的,因此在实际应用时有一定困难。

2. 路面时域模型(road surface model in time domain)

在进行车辆动力响应分析和平顺性研究中多采用频域方法,因此相应的振动系统输入也采用频域路面谱。频域路面谱在车辆平顺性和动力响应的研究中发挥了很大作用。但随着主动、半主动悬架的出现,以及处理系统非线性问题的需要,时域研究日益受到重视。为此,进行时域路面不平度输入的研究也成为一项重要基础工作。关于路面不平度的模拟,国内外许多学者进行了大量研究。主要方法有三角级数合成法、滤波白噪声法、AR(ARMA)法、Poisson 等,但多数研究仅考虑单轮输入和前后轮相关的两轮输入。三角级数合成法首先由 Rice (1944) 提出^[27],随后 Shinozuka M 发展了多维过程^[28]。文献[29]、[30]应用该方法进行了路面不平度的模拟。三角级数法是将路面不平度表示成大量具有随机相位的正弦或余弦之和。三角级数合成模型适用于模拟具有任意形状的谱密度的平稳随机过程,该方法的缺点是计算量大。Jenkins G. M. 和 Watts D. G (1968)^[31] 最早应用时间系列(AR、ARMA)对随机过程进行分析,Ventatesan (1981)^[32] 应用 ARMA 模型研究了飞机着陆时的非平稳振动。文献[33][34]用 AR 模型建立了路面时域模型,该模型的应用有两种情况,一种是已知路面不平度的实测系列,用最小二乘法拟合 AR 模型参数,拟合效果较好。另外一种情况是已知路面的功率谱密度,用傅里叶逆变换得到自相关函数,再根据 Yule - walker 公式得到 AR 模型的参数。但在实际的计算中,AR (ARMA)模型并不能保证生成的随机路面是绝对稳定的,要达到稳定需满足其路面不平度拟合方程的系数特征方程的全部复数根都位于单位圆内的条件,这在车辆行驶的实际过程中难以保证,这就使得 AR 模型和 ARMA 模型在路面模拟的应用中受到限制。Shinozuka M

(1972)^[35]和 Racicot R L (1972)^[36]首先用 Poisson 模型模拟了多维随机过程。文献[37]应用该模型进行路面不平度的模拟。但该模型主要的缺点是参数的求取缺乏严密的算法,需要试凑,给应用带来了难度。1983 年 Cebon 及 Newland^[38]提出了一种基于第一类功率谱的 FFT 反变换路面随机激励时域仿真算法,该方法实质和时间系列分析法相同。白噪声滤波法是将白噪声经过一阶或高阶滤波得到平稳随机过程,其物理意义清楚、计算方便。Davenport (1961)^[39]应用该方法进行了风速波动建模,此后,国内外学者开始广泛应用此方法进行路面建模^[40-48]。由于此方法可直接根据路面功率谱数值和行驶车速确定路面模型参数,因此在实际研究中得到了广泛的应用。文献[49]是国内较早进行四轮相关时域随机输入模型研究的,后来一些有关四轮输入时域响应分析多基于这一模型。但遗憾的是该模型存在两点不足:(1)左右轮相干函数来源于一个特定的中型货车车型、而且为实测值,不具有通用性。(2)在四轮相关模型中将路面不平度之间的相关假设成了初始白噪声之间的相关,意义不清楚。

1.1.2 车辆行驶动力学建模及分析方法

1. 传统建模方法(classic modeling)

汽车是一个复杂的多自由度振动系统,进行汽车动力学性能研究首先要建立合适的力学模型。传统的车辆行驶动力学建模方法是集中质量法,根据研究的问题,需要选择适合的自由度(degree of freedom)。基本的定性、定量分析常简化成 2 个或 3 个自由度系统,该方法在现代汽车研究开发中仍发挥重要作用。1976 年郭孔辉院士应用随机振动理论对二自由度汽车悬挂系统进行了详细的分析,这是我国汽车行驶系统动力学研究的开始。随后,1978 年原武汉工学院提出了汽车 9 个自由度振动系统模型,当时计算机技术还没有普遍发展起来,因此该研究在国内汽车学术界引起了很大反响。1984 年张洪欣和林逸教授系统地进行了平面 5 自由度汽车振动仿真和实验研究^[50]。在空间多自由度车辆振动研究方面,长春汽车研究所与原吉林工业大学合作进行的 10 个自由度模型计算机模拟工作,利用了先进的 MTS 电子液压振动台进行 CA141 汽车振动参数的动态识别,获得了与实际结果十分吻

合的模拟结果。文献[51][52]在对铁路车辆平顺性进行研究时考虑了车体弹性的影响。1993年,东风汽车工程研究院建立了18个自由度的半挂汽车列车振动模拟模型,分析了各种结构参数对半挂汽车列车行驶平顺性的影响。在以上建模中,对于少自由度模型,可以使用牛顿定律、达朗贝尔原理、动量矩定理来建立运动微分方程组。对于复杂的多自由度系统,一般用拉格朗日方程来推导出动力学微分方程组。

2. 悬架系统参数优化(parameters optimization)

为获得良好的悬架性能,对被动悬架系统参数优化是一种有效的方法,在车辆的开发和性能研究中发挥了很大作用。频域优化方法应用十分广泛,一般对悬架系统刚度阻尼进行优化,优化模型多数采用1/4车辆模型(quarter model)和平面4个或5个自由度模型,优化时一般以座椅或车身加速度均方根值作为目标函数,对悬架系统动挠度和车轮动载荷进行约束。近几年由于路面激励时域模型的发展,悬架系统参数的时域优化也取得了一定的进展,但时域优化方法的计算量较大。

3. 非线性建模方法(nonlinear modeling)

汽车各个系统之间的作用力以及许多部件如弹簧、减振器、减振垫等往往具有一定的非线性特性。在工程实际问题分析中为方便起见常常假定是线性的,但这种处理结果与实际有一定差异,特别是在必须使用非线性元件时,非线性的优点体现不出来。非线性随机振动有效分析方法之一是统计线性化方法,Caughey T. K(1963)^[55]首先提出这一思想,并由Lutes L. D(1970)^[56]发展,文献[57]利用统计线性化方法对具有迟滞特性的悬架迟滞系统的响应进行了研究。文献[58]应用统计线性化对8自由度汽车非线性随机响应进行了分析和实验研究。研究非线性随机振动的其他方法^[59-62],如基于PLK的精确解法、摄动法、矩截断法、胞映射法等对于解决车辆非线性随机振动问题还有一定的困难。近几年,基于数值分析的非线性时域方法发展较快,但在理论上没有实质性突破^[63]。

4. 模态综合法(modal synthetic analysis)

汽车是由多个子系统构成的复杂系统,对于多自由度系统模型而言,一些参数的获得比较困难,因此结合试验模态分析的模态综合技术

是十分有效的建模方法。文献[53]应用模态分析理论对汽车非线性随机振动进行了深入地研究,将汽车分成发动机、驾驶室、车身、前后桥子系统,先建立模态坐标下的子系统运动方程,再根据系统之间的耦合力的关系建立整车运动方程。这一建模思想在后来的多体动力学软件的自动建模中得到了充分体现。

5. 行驶动力学控制建模(ride dynamics control)

优化方法虽然可以提高汽车动力响应性能,但优化方法受汽车运行工况的限制,如不同车速、不同路面,优化结果要求不同的结构参数,这就限制了其实际应用。汽车振动的主动控制和半主动控制可以较好地解决上述问题。20世纪70年代初 Karnopp^{[65][66]}应用反馈控制和开关阻尼研究了汽车悬架的主动、半主动控制,Thompson 在同一时期也进行了系统研究^[67]。国内从90年代初开始车辆主动控制研究。近十几年,国内外的研究多集中在控制算法研究上^[68-103],如最优控制、自适应控制、神经网络控制、模糊控制、预测控制以及非线性系统的滑模控制等。

6. 多体动力学建模(multi-body dynamics)

车辆动力学系统实际情况十分复杂,传统建模方法的自由度数目不能太多,因此需要对系统作许多简化,降低自由度的个数,这样做就很难得到精确的分析结果。此外刚体与柔性体(如悬挂摆臂、扭转梁等)耦合三维系统,用传统的手工推导动力学方程,是很难实现的。多体动力学可以有效地解决上述问题。多体系统动力学分析是计算机技术与图论方法、分析动力学、机构运动学相结合的一个新兴的力学分支,是将机械系统定义为任意数目物体(刚体及弹性体)与约束副的集合,统一地表示机械系统的各种型式,由计算机程序自动形成多体系统的通用运动方程(包括约束代数方程及动力学微分方程),再由计算机程序自动数值求解方程。多体动力学适用于任意数目刚体(构件)及运动副组成的机械系统或机构,适用于平面(二维)和空间(三维)机构,能够处理运动学、动力学及静力学分析问题。多体系统动力学在20世纪60年代中期,多刚体系统动力学诞生以后发展很快,形成了几种风格不同的流派,代表性的方法有旋量方法、Roberson - Wittenburg方法、凯恩方法和第一类 Lagrange 方法等。90年代后,许多大型通用