



车载武器学丛书

毛保全 张金忠 杨志良 肖虹 陈占峰 编著

# 车载武器发射动力学

CHEZAIWUQIFASHEDONGLIXUE



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

车载武器学丛书

# 车载武器发射动力学

毛保全 张金忠  
杨志良 肖虹 陈占峰 编著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书以车载武器发射时的动力学特性为研究对象,以车载武器发射动力学的基本理论为主线,详细介绍了几种典型车载武器发射动力学分析方法及其实际应用。全书共7章,包括绪论、装甲车辆载体特性分析、车载武器系统载荷识别、坦克炮发射动力学分析、自行火炮发射动力学分析、车载炮发射动力学分析、车载武器发射过程中非线性问题分析,各章节既相互联系又各具独立性。

本书可作为从事火炮自动武器研究、论证、设计及试验的科研人员的参考资料,同时可作为武器相关专业研究生和高年级本科生的教材,也可供相关力学领域工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

车载武器发射动力学 / 毛保全等编著. —北京:  
国防工业出版社, 2010. 8  
(车载武器学丛书)  
ISBN 978-7-118-06797-2

I. ①车... II. ①毛... III. ①军用车辆—武器装备—  
炮弹—弹道学 IV. ①TJ81

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 126960 号

※

国防工业出版社出版发行  
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)  
北京嘉恒彩色印刷有限责任公司  
新华书店经售

\*

开本 710×960 1/16 印张 13 $\frac{1}{4}$  字数 232 千字  
2010 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 35.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422 发行邮购:(010)68414474  
发行传真:(010)68411535 发行业务:(010)68472764

## 《车载武器学》丛书编委会

|       |     |     |     |     |
|-------|-----|-----|-----|-----|
| 名誉顾问  | 朵英贤 | 王哲荣 |     |     |
| 总顾问   | 吴玉金 | 王曙明 | 吴波  | 钱林方 |
| 顾问    | 董文祥 | 王建中 | 马春茂 | 周长军 |
|       | 潘玉田 | 张湘炎 | 宋彦明 | 杨国来 |
|       | 侯健  | 王克运 | 刘振伟 | 刘宝溢 |
|       | 马晓军 | 杨臻  |     |     |
| 主任委员  | 徐航  |     |     |     |
| 副主任委员 | 毛保全 | 刘德刚 | 李胜利 |     |
| 委员    | 邵毅  | 于子平 | 丁焯  | 肖虹  |
|       | 杨志良 | 伍水波 | 龙建华 | 王自勇 |
|       | 郭金茂 | 李保志 | 张金忠 | 王国辉 |
|       | 徐达  | 朱宗平 | 牛守瑞 | 李强  |
|       | 杨明华 | 闫述军 | 刘家健 | 纪兵  |
|       | 吴东亚 | 李向荣 | 常江  | 范栋  |
|       | 韩小平 | 赵俊严 | 徐振辉 | 徐礼  |
|       | 王传有 | 苏忠亭 | 汪凡  | 徐冰川 |
|       | 刘新亮 |     |     |     |

# 前 言

随着坦克装甲车辆以及火炮自行化的不断发展,以装甲底盘为载体的武器已经逐步形成独具特色的车载武器群。车载武器发射时所呈现出的动力学特性,在车载武器研究、论证、分析和设计中越来越受到重视,其分析方法既源于一般动力学理论,又独具特色,其分析结果对车载武器研发和应用水平的影响越来越突出。经过多年发展,车载武器发射动力学已经形成一门有完整理论体系与方法的学科分支。

目前,比较系统全面介绍车载武器动力学理论,体现车载武器发射动力学最新研究和应用水平的专著还很少。本书充分吸收了车载武器发射动力学的最新研究和应用成果,并结合了作者在车载武器系统研究方面的工作积累,对车载武器发射动力学理论进行了全面系统的归纳、总结和提炼。作者衷心期望通过本书的出版,能对车载武器发射动力学的研究和应用起到积极的推动作用。

本书的特色在于重点突出、系统完整、理论联系实际。突出强调了车载武器的结构对发射过程中动态特性的影响规律,系统介绍了各种典型车载武器发射动力学的相关理论和分析方法,注重采用发射动力学理论解决车载武器研究、论证、设计及试验中出现的动力学方面的问题。

本书以车载武器发射时的动力学特性为研究对象,以车载武器发射动力学的基本理论为主线,详细介绍了几种典型车载武器发射动力学分析方法及其实际应用。全书共7章,包括绪论、装甲车辆载体特性分析、车载武器系统载荷识别、坦克炮发射动力学分析、自行火炮发射动力学分析、车载炮发射动力学分析、车载武器发射过程中非线性问题分析,各章节既相互联系又各具独立性。

本书可作为从事火炮自动武器研究、论证、设计及试验的科研人员的参考资料,同时可作为武器相关专业研究生和高年级本科生的教材,也可供相关力学领域工程技术人员参考。

在本书涉及的相关内容中,朵英贤院士、陈运生教授、钱林方教授、于子平高工、周长军高工、董文祥高工、潘玉田教授、刘又午教授、杨国来教授、何永教授、马吉胜教授等曾提供了有益的指导和帮助。全书的文稿处理和插图绘制工作由陈占峰、徐礼、吴东亚、常江等同志完成,邢宏光、韩小平、赵俊严、徐振辉、王传有、房学龙、汪凡、徐冰川、刘新亮等同志参加了文稿整理。在此,谨对上述同志给予的大力支持和辛勤劳动一并表示衷心感谢。本书的编写和出版还得到装甲兵工程学院钟孟春处长、李华刚同志、张志勇同志、杜建智同志、薛俊富同志、兵器工程系李保志政委、郭金茂主任、张金忠副主任、火炮室王国辉主任以及国防工业出版社各级领导的大力支持和帮助,特向他们表示衷心的感谢。

由于水平和经验所限,书中难免有不少缺点和错误,恳请读者予以批评指正。

编者  
2010年4月

# 目 录

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....             | 1  |
| 1.1 车载武器发射动力学研究内容 .....    | 1  |
| 1.1.1 车辆载体的动态特性研究 .....    | 1  |
| 1.1.2 弹丸起始扰动研究 .....       | 2  |
| 1.1.3 振动特性及动力学响应研究 .....   | 2  |
| 1.2 车载武器发射动力学研究方法 .....    | 3  |
| 1.2.1 理论研究方法 .....         | 3  |
| 1.2.2 试验研究方法 .....         | 7  |
| 1.3 车载武器发射动力学研究现状及展望 ..... | 9  |
| 1.3.1 车载武器发射动力学研究现状 .....  | 9  |
| 1.3.2 车载武器发射动力学研究展望 .....  | 12 |
| 第 2 章 装甲车辆载体特性分析 .....     | 14 |
| 2.1 悬挂系统特性分析 .....         | 14 |
| 2.1.1 悬挂系统概述 .....         | 15 |
| 2.1.2 扭杆悬挂特性分析 .....       | 18 |
| 2.1.3 液—气悬挂特性分析 .....      | 22 |
| 2.2 履带装置特性分析 .....         | 28 |
| 2.3 等效质量分析 .....           | 30 |
| 2.3.1 用能量法确定等效质量 .....     | 30 |
| 2.3.2 用集中质量法确定等效质量 .....   | 32 |
| 2.4 等效刚度分析 .....           | 33 |
| 2.4.1 根据结构定义来确定等效刚度 .....  | 33 |
| 2.4.2 根据系统的位能来确定等效刚度 ..... | 34 |
| 2.5 阻尼特性分析 .....           | 36 |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| <b>第3章 车载武器系统载荷识别</b> .....      | 38  |
| 3.1 膛底合力识别 .....                 | 38  |
| 3.1.1 弹丸沿膛内运动时期的膛底合力 .....       | 38  |
| 3.1.2 后效时期的膛底合力 .....            | 40  |
| 3.2 炮身后坐运动及后坐力识别 .....           | 41  |
| 3.2.1 后坐运动概述 .....               | 42  |
| 3.2.2 自由后坐运动诸元 .....             | 44  |
| 3.2.3 驻退后坐运动诸元 .....             | 53  |
| 3.2.4 坦克炮后坐运动诸元 .....            | 56  |
| 3.2.5 后坐全长上不变阻力 $R$ .....        | 61  |
| 3.3 路面激励分析 .....                 | 64  |
| 3.3.1 路面不平度的空间频率谱 .....          | 64  |
| 3.3.2 路面不平度的时间频率谱 .....          | 67  |
| 3.3.3 车辆振动的路面输入 .....            | 68  |
| 3.3.4 由路面谱构造路面不平度 .....          | 69  |
| <b>第4章 坦克炮发射动力学分析</b> .....      | 71  |
| 4.1 坦克原地射击稳定性分析 .....            | 71  |
| 4.1.1 发射对炮架的作用 .....             | 71  |
| 4.1.2 坦克的发射安定性 .....             | 76  |
| 4.2 坦克炮射击精度分析 .....              | 81  |
| 4.2.1 起始扰动对射击精度的影响 .....         | 81  |
| 4.2.2 六自由度外弹道方程 .....            | 85  |
| 4.2.3 射击精度计算方法 .....             | 87  |
| 4.3 坦克炮行进间射击动态特性分析 .....         | 87  |
| 4.3.1 坦克炮行进间射击动力学模型 .....        | 87  |
| 4.3.2 坦克炮行进间射击动态特性实例分析 .....     | 93  |
| 4.4 坦克炮塔座圈强度分析 .....             | 97  |
| 4.4.1 炮塔受力分析 .....               | 97  |
| 4.4.2 座圈钢球的负荷 .....              | 99  |
| 4.4.3 钢球及座圈滚道的强度计算 .....         | 103 |
| <b>第5章 自行火炮发射动力学分析</b> .....     | 104 |
| 5.1 基于多刚体动力学的自行火炮发射动力学特性分析 ..... | 104 |



|              |                          |            |
|--------------|--------------------------|------------|
| 5.1.1        | 多刚体动力学理论的 Kane-Huston 方法 | 104        |
| 5.1.2        | 自行火炮多刚体动力学分析             | 110        |
| 5.2          | 基于柔性多体动力学的自行火炮发射动力学特性分析  | 114        |
| 5.2.1        | 柔性多体动力学分析方法              | 114        |
| 5.2.2        | 履带式自行火炮柔性多体发射动力学分析       | 124        |
| 5.2.3        | 轮式自行火炮柔性多体发射动力学分析        | 132        |
| 5.3          | 基于有限元理论的自行火炮发射动力学特性分析    | 135        |
| 5.3.1        | 有限元理论分析方法                | 135        |
| 5.3.2        | 自行火炮动态特性和动力响应分析结果        | 142        |
| <b>第 6 章</b> | <b>车载炮发射动力学分析</b>        | <b>144</b> |
| 6.1          | 车载炮发射稳定性分析               | 145        |
| 6.1.1        | 车载炮发射稳定性分析模型             | 145        |
| 6.1.2        | 系统参数对发射稳定性的影响            | 150        |
| 6.1.3        | 车载炮发射稳定性的优化              | 153        |
| 6.2          | 车载炮车身冲击响应分析              | 159        |
| 6.2.1        | 基本理论                     | 160        |
| 6.2.2        | 炮口冲击流场分析                 | 163        |
| 6.2.3        | 车身冲击响应分析                 | 164        |
| <b>第 7 章</b> | <b>车载武器发射过程中非线性问题分析</b>  | <b>169</b> |
| 7.1          | 反后坐装置非线性分析               | 169        |
| 7.1.1        | 反后坐装置非线性分析理论             | 169        |
| 7.1.2        | 反后坐装置非线性单元分析             | 172        |
| 7.2          | 弹炮耦合非线性分析                | 174        |
| 7.2.1        | 弹炮耦合的非线性动力学分析理论          | 174        |
| 7.2.2        | 弹炮耦合问题的非线性分析             | 182        |
| 7.3          | 履带系统的几何非线性分析             | 183        |
| 7.3.1        | 几何非线性有限元分析理论             | 183        |
| 7.3.2        | 履带系统非线性模拟                | 186        |
| 7.4          | 履带与地面接触及悬挂的非线性分析         | 187        |
| 7.4.1        | 履带与地面接触的非线性分析            | 187        |
| 7.4.2        | 悬挂系统的非线性振动分析             | 191        |
| 7.5          | 土壤的材料非线性分析               | 191        |

|            |                            |     |
|------------|----------------------------|-----|
| 7.5.1      | 土壤的材料非线性分析理论 .....         | 192 |
| 7.5.2      | 土壤的材料非线性模型本构矩阵 .....       | 193 |
| 7.6        | 考虑各种非线性因素的车载武器动态特性分析 ..... | 196 |
| 7.6.1      | 考虑各种非线性因素的全炮有限元模型 .....    | 197 |
| 7.6.2      | 仿真结果分析 .....               | 197 |
| 参考文献 ..... |                            | 200 |

# 第1章 绪论

车载武器是指以装甲车辆为运输载体的武器,一般包括坦克炮、自行火炮、车载炮、车载小口径自动炮、车载机枪、车载反坦克导弹等。装备车载武器的装甲车辆有坦克、步兵战车、装甲输送车、自行火炮、导弹发射车等,不同载体根据战术功能不同,所装备的车载武器配置也不同。

围绕提高车载武器射击精度和减轻车载武器重量,国内外兵器界广泛开展了武器发射时动态特性变化规律及其控制等方面的研究。美国陆军发展司令部先后召开了十余次火炮与自动武器动力学的会议,发表论文达千篇,其内容涉及一般力学、流体力学、空气动力学、工程物理、控制技术、测试技术等多个领域,对火炮和自动武器的弹道性能、运动和受力特点、射击过程的动态测试等进行了深入研究。自20世纪80年代以来,国内兵器界也开展了对车载武器发射动力学问题广泛深入的研究,并取得大量研究成果,逐步使其形成了有完整理论体系与方法的学科分支,目前车载武器发射动力学已成为车载武器学的重要组成部分。

车载武器发射动力学是研究车载武器在发射过程中的运动和受力规律及其控制手段,寻求发射动力学分析方法的学科,它为减少车载武器射弹散布以提高射击精度、减轻车载武器的重量以提高武器机动性、保证射击稳定性和静止性、提高车载武器的综合性能提供理论依据。

## 1.1 车载武器发射动力学研究内容

车载武器发射动力学研究内容包括车辆载体的动态特性、弹丸起始扰动和武器系统的振动特性及动力学响应等。

### 1.1.1 车辆载体的动态特性研究

车辆载体动态特性研究的主要内容是悬挂系统、履带以及路面激励对武器系统动态特性的影响规律。

悬挂系统对武器系统性能的发挥有很大影响,不同类型的悬挂系统,其刚度特性和阻尼特性不同,对武器影响规律也不同。另外,履带张力、轮胎的质量和

弹性等对武器动态特性都有影响,不可忽略。

对于车辆振动来讲,道路和越野条件下的各种地表的表面不平度是车辆行驶中的重要激励,地面的起伏是引起车载武器系统振动、影响武器射击精度的重要因素。为了分析和仿真车载武器发射过程中的动力学过程及其动态特性,需要建立路面不平度模型,研究路面激励对车体影响规律。在进行路面激励研究时,需采用统计模拟法,由路面激励向量统计模型产生已知概率统计规律的地面或气象环境随机变量、地面环境随机过程、车辆战斗过程随机事件等参量的时间序列样本集,经过必要的假设检验后输入到车载武器动力学模型中去。

### 1.1.2 弹丸起始扰动研究

弹丸起始扰动研究是弹丸发射动力学研究的重要内容,同时也是车载武器发射动力学的重要研究内容。起始扰动是影响弹丸飞行规律和射弹散布的重要参数。弹丸发射动力学是研究弹丸在运动过程中的运动规律,尤其是弹丸起始扰动的一门科学。其任务是通过研究弹丸在弹、炮、药、环境等各种扰动因素作用下,在膛内和后效期内的运动规律,摸索影响起始扰动的主要因素及其规律,从而达到控制起始扰动、减小弹道散布、提高射击密集度的目的。

弹丸起始扰动研究的具体内容包括跳角的形成原因和影响因素、跳角的试验测定和理论计算方法以及跳角与射弹散布的关系;建立考虑弹炮耦合作用、弹炮间隙、膛压、弹重、弹炮摩擦、弹丸的质量偏心与弹带力矩等因素的弹丸动力学模型,并求解起始扰动动力学参数。

### 1.1.3 振动特性及动力学响应研究

振动特性及动力学响应是车载武器发射动力学的重要研究内容。通过对振动特性及动力学响应的研究,不仅可以得到武器系统的固有振动特性,也可求出后坐阻力、炮膛合力、炮口扰动及武器主要部件在发射过程中的运动和受力变化规律。

车载武器系统的射击精度与其自身的结构动态特性密切相关,射击时的冲击振动对弹丸有很大的横向初始扰动,从而影响射击精度,如车载高炮连发射击时射击频率与固有振动频率的匹配关系对其射弹散布的影响非常突出。因此,掌握车载武器结构的振动特性及动力响应规律对武器射击精度的研究与提高有很大作用。

在进行振动特性及动力响应研究时,需要首先解决两个重要问题:①含有刚体和弹性体(或刚性梯度很大)的复杂耦合多体系统固有振动特性的计算问题;

②刚弹耦合多体系统对任意激励动力响应的精确分析。解决这些问题目前有如下困难:①采用一般动力学方法在计算刚弹耦合系统固有振动特性时,不仅计算工作量太大,而且计算中会不可避免地出现病态现象,甚至计算失败;②由于系统刚弹耦合作用,系统的特征矢量不具有通常意义下的正交性,难以用经典的模态方法精确分析其动力响应问题。

## 1.2 车载武器发射动力学研究方法

车载武器发射动力学研究方法归纳起来大致分为理论研究方法和试验研究方法两大类。

### 1.2.1 理论研究方法

#### 一、动力学建模理论

多体动力学理论、有限元法和虚拟样机仿真技术是车载武器发射动力学建模理论的三大支柱。

#### 1. 多体动力学理论

多体系统动力学理论包括多刚体系统动力学理论和柔性多体系统动力学理论,它是20世纪60年代初发展起来的研究多体系统动力学规律的科学,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、武器设计、机械动力学等领域密切相关且起着重要作用的分支。已知武器系统各部件的质量、几何构造、连接关系和作用在构件上的主动力,求系统的运动诸元——位移、速度和加速度,从而获得武器系统的运动规律,以便研究武器系统的工作性能,如武器发射响应、射击频率、可靠性和密集度等。

##### 1) 多刚体系统动力学

多刚体系统动力学是古典的刚体力学、分析力学与现在的电子计算机相结合的力学分支,它的研究对象是由多个刚体组成的系统。多刚体系统动力学的研究方法主要有牛顿—欧拉法,拉格朗日法,Roberson-Wittenberg法,变分方法,Kane方法等。

牛顿—欧拉法为矢量力学方法。牛顿—欧拉法要求对每个刚体列写动力学方程,由于铰约束力的存在,使得动力学方程中含有大量的、不需要的未知变量,所以采用牛顿—欧拉方法,必须制定出便于计算机识别的刚体联系情况和约束形式的程式化方法,并自动消除约束反力。德国学者 Schiehlen 在这方面做了大量工作,他将不独立的笛卡儿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。

拉格朗日法是分析力学的一种方法,是关于约束力学系统的动力学方程。它有两种形式:一种是第一类拉格朗日方程,用直角坐标表示的带有不定乘子的微分方程,既适用于完整系统,也适用于线性非完整系统;另一种是第二类拉格朗日方程,用广义坐标表示的微分方程,只适用于完整系统。实际应用中,由于多刚体系统的复杂性,采用系统的独立拉格朗日坐标非常困难,而采用不独立的笛卡儿广义坐标比较方便;对于具有多余坐标的完整或非完整约束系统,通常采用带乘子的拉格朗日方程处理;以笛卡儿广义坐标为变量的动力学方程是与广义坐标数目相同的带乘子的微分方程,这时还需要补充广义坐标的代数约束方程才能封闭。

Roberson-Wittenberg 法又称图论(R-W)法,其将图论理论引入多刚体系统动力学中,利用其中的一些基本概念和数学工具成功地描述了系统内各刚体之间的联系情况。Roberson-Wittenberg 法以相邻刚体之间的相对位移作广义坐标,对复杂的树结构动力学关系给出了统一的数学模式,得到了系统的非线性运动微分方程。对于非树系统,则利用铰切断或刚体分割方法转变成树系统处理。

Kane 方法是建立一般多自由度离散系统动力学方程的一种方法。它提供了分析复杂机械系统动力学性能的统一方法,其特点是以伪速度作为独立变量来描述系统的运动,所得结果是一阶微分方程组,既适合于完整系统,也适用于非完整系统。然而 Kane 方法并没有给出一个适合于任意多刚体系统的普遍形式的动力学方程,广义速度的选择也需要一定的经验和技巧,但这种方法不用计算动力学函数及其导数,只需进行矢量点积、叉积等计算,节省时间。

## 2) 柔性多体系统动力学

柔性多体系统动力学是分析力学、连续介质力学、多刚体系统动力学、结构动力学学科发展交叉的必然。其研究的是物体的变形和整体刚性运动的耦合问题,区别于多刚体系统动力学,它含有柔性部件,变形不可忽略,其逆运动是不确定的;与传统的结构力学也不同,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。柔性多体动力学系统是一个时变、高度耦合、高度非线性的复杂系统。

车载武器系统是一个复杂的多体系统,采用多体系统动力学分析方法进行车载武器动力学建模与仿真,可以较全面地描述武器发射全过程,特别是后坐部分的大位移运动及自动机系统大位移运动,预测武器发射过程中膛口的动态响应及整个系统瞬态运动与响应情况,预测各部分及构件的作用载荷,从而全面分析武器系统的总体性能,进行总体优化。

## 2. 有限元法

有限元法是从结构动力学角度出发,将车载武器作为弹性体进行研究。其基本思想是把车载武器结构离散成数目有限的基本单元,彼此间在节点处弹性连接,组成一个单元的组合体,以代替原来的实际结构;又在节点处引进等效节点力,代替原来作用于单元上的节点力。通过有限元分析,可以得到结构的应力、应变分布,响应数据以及结构的固有特性。通过设计灵敏度与设计优化分析功能可以调整结构获得理想的结构应力、应变分布,响应数据以及结构的固有特性。

采用有限元法可以分析车载武器的固有动态特性、武器发射过程的振动特性及主要部件的动态应力与应变结果,可深入了解武器发射过程中内部结构的微观动力学特性。

对一个复杂的连续参数系统,在进行有限元分析时,正确建立结构的数学模型是一个十分重要的问题,同时数学模型应适当简化。为了使简化模型与实际结构系统动力等价,以便取得正确的动力学分析结果,在建模过程中要正确处理好刚度分布、质量分布、边界条件及载荷等几个主要影响因素。

## 3. 虚拟样机仿真技术

随着现代科学技术的发展,武器系统产品开发已进入系统仿真设计阶段,系统仿真的核心是机械系统运动学和动力学仿真软件。把车载武器系统仿真同计算机辅助设计、有限元分析技术、多体动力学分析技术、优化技术、随机模拟技术等组合在一起,就可以实现建造车载武器系统的“虚拟样机”。利用该“虚拟样机”即可进行软件状况下的功能测试,各种虚拟工况下(如射击试验、行驶试验、行进间射击)的性能指标测试,进行全武器系统性能仿真,将测试结果和设计的功能指标以及设计的战术技术指标进行对比分析,然后根据有限元计算分析数据、动力学参数和结构参数,重建车载武器系统三维实体模型,形成修改后的新的“虚拟样机”,然后再进行功能测试和性能指标测试,如此反复直到“虚拟样机”达到目标为止。

常用的运动学与动力学分析软件及平台有 ANSYS Workbench、ADAMS 和 RecurDyn 等。

ANSYS Workbench 有限元分析平台具有 CAD/CAE 一体化、仿真数据源同一化的特点,采用网格模型处理新方案、结构仿真求解新技术和基于多学科仿真的结构优化技术,实现结构仿真协同化与平台化。支持市场上所有的主流三维 CAD 软件,包括有 CATIA、PROE、UG 等,并支持 CAD 的新版本。同时可进行 CAD 与 CAE 的双向参数驱动,实现参数共享。采用统一多学科网格环境,自动考虑不同学科要求,生成不同的网格形态。

ADAMS 软件是美国 MDI 公司开发的机械系统动力学仿真分析软件,它集建模、求解、可视化技术于一体,是世界上目前使用范围最广、最负盛名的机械系统仿真分析软件。用户可以建立包括机—电—液一体化在内的、任意复杂系统的多体动力学虚拟样机模型;它能为用户提供从产品概念设计、方案论证、详细设计到产品方案修改、优化、试验规划甚至故障诊断等各阶段、全方位、高精度的仿真计算分析结果。

RecurDyn 是新一代通用多体动力学仿真软件,基于划时代的相对坐标系微分运动方程理论和完全递归算法,运用了独创的有限元和多体动力学相结合的 MFBF 技术,在求解大规模的多体系统动力学问题,特别是大规模的接触动力学问题时,RecurDyn 的快速、稳定的突出特点拓宽了多体动力学的有效应用范围。RecurDyn 除了一般的刚体、柔性混合仿真功能外,还发明了非线性柔体功能,突破了传统模态柔体的局限性,为有大变形或局部变形兼有接触的系统提供了更接近真实世界的解决方案。RecurDyn 在通用功能之上提供了一系列专用工具箱,实现快速建模和分析,如履带模块、链条、皮带滑轮、齿轮、媒质传送机构、控制系统、模态柔体、非线性柔体、轮胎等。

## 二、动力学模型求解方法

车载武器发射动力学模型包含大量多体系统动力学方程,多体系统动力学方程多数情况下是常微分方程组或微分—代数方程组,通常要通过数值方法进行求解。数值算法方面研究的主要问题包括常微分方程的刚性(stiff)问题、微分—代数方程的数值解法问题及多体系统非线性动力学行为的数值分析方法等。对于数值求解问题,寻找一种对时间步长不敏感、计算精度高而且数值稳定的算法一直是计算方法研究问题的主攻方向,近年来对数值方法的研究也取得了许多成果,在众多算法中,以下几种算法是值得关注的,也是应用最广泛的:隐式 Runge-Kutta 法(RK 法),Gear 方法和坐标分离法。

隐式 Runge-Kutta 法是求解初值问题的一类常用的重要方法,1968 年 Ehle 证明了其绝对稳定域包含整个左半平面,故可用于求解刚性方程。多体系统动力学方程隐式算法研究开始于 20 世纪 80 年代末和 90 年代初,与显式算法相比,滞后了近 10 年。隐式算法是建立在系统建模研究和显式算法研究基础上的,其计算量远大于显式算法,隐式算法在数值计算的稳定性和计算精度上明显高于显式算法,也是解决常微分方程刚性问题的有效方法,因此正在逐步得到计算多体系统动力学研究者的重视。由于计算机运算速度的提高,隐式算法已经在多体系统动力学中得到广泛应用。将多体系统动力学方程的具体特点和某一种隐式差分格式的特点相结合,构造计算效率和精度高的计算方法,是多体系统动力学数值算法研究的一个方面。



Gear 方法是通过用向后差分的方法形成差分公式,被认为是求解刚性微分方程很有效的方法,但由于该方法需要计算方程右端的 Jacobbi 矩阵,这对复杂柔性多体系统动力学方程而言几乎是难以做到的,因此该方法多用于求解刚性系统或柔性体数目较少的系统。

坐标分离法的基本思想是对坐标进行分解,将微分—代数方程缩减成用独立的广义坐标表示的纯微分方程,再对其积分求解。该方法适于求解特征值经历突变的系统或高频系统,对冗余约束比较多的系统也有较好的稳定性。在很多诸如 Adams 这样的大型动力学分析软件中,都采用了坐标分离法求解动力学方程。

随着多体系统动力学建模方法和数值计算方法的日趋完善,人们把研究的重点放到分析与研究系统动力学特性方面。在实际工程中,怎样确定系统的参数才能使其运动按照预定的方式进行,系统的运动稳定性如何,系统参数的变化对其运动特性有何影响是人们普遍关心的问题。由于多体系统动力学方程多数情况下为非线性常微分方程组或微分—代数方程组,目前运用解析方法求解还存在相当难度,通常要通过数值方法进行求解。目前,分析多体系统非线性动力学特性常用的数值方法有数值仿真(计算系统运动的时间历程、相图、功率谱等)、Poincare 影射和 Lyapunov 指数等。对较简单的平衡或周期运动,可以通过数值仿真了解系统的动力学特性。但对于研究较复杂的拟周期和混沌运动时,采用数值仿真方法不适用。而用 Poincare 影射和计算 Lyapunov 指数有助于全面分析系统的动力学行为。另外,数值算法研究的另外一个方向是直接构造数值求解系统微分—代数方程组的差分格式,这方面的研究在国内还不多见。

### 1.2.2 试验研究方法

车载武器发射动力学具有激励源复杂、结构复杂、工况复杂和响应复杂四大特殊性,单纯用理论研究的方法不能解决其发展应用过程中遇到的问题,必须同时采用理论和试验密切结合的研究方法,相互促进,取长补短。车载武器发射动力学试验是在可控环境中复现发射过程,利用仪器仔细观察和了解发射过程,记录相关数据,获得各种信息。

#### 1. 力学参数测试方法

复杂形状零部件(如自动机、弹链)的质心、转动惯量以及复杂形状接触体(火炮起落部分和高低齿弧接触体、炮塔回转部分和座圈接触体)的刚度、阻尼的准确测量对力学模型的正确简化和动力学计算结果的准确性至关重要。质心的测试方法主要有摇摆法、悬挂法、平台支撑反力法、零位法、质量反应法、几何作图法等,刚度测试方法主要有机械测量法,阻尼的测试方法主要有扭摆法、共