



国家出版基金项目

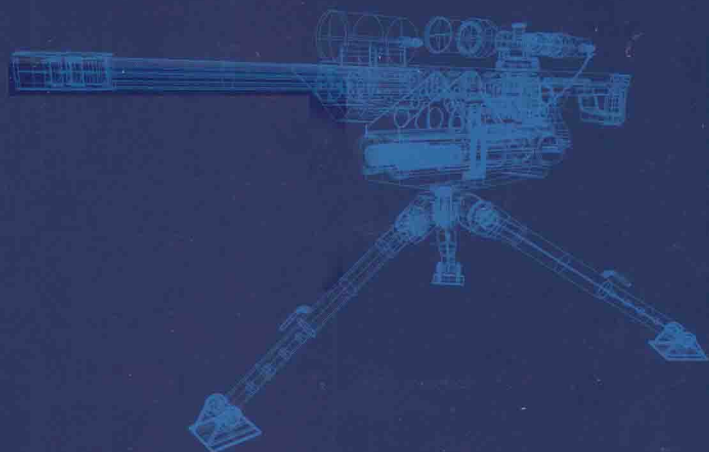
“十二五”国家重点出版物出版规划项目

现代兵器火力系统丛书

火炮与自动武器 动力学

Dynamics of Artillery and Automatic Weapons

王亚平 徐 诚 王永娟 姚养无 编著



 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



国家出版基金项目

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

现代兵器火力系统丛书

火炮与自动武器动力学

王亚平 徐 诚 王永娟 姚养无 编著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书应用现代力学方法描述火炮与自动武器发射的物理过程,重点论述火炮与自动武器动力学新理论和方法,突出“概念”“问题简化方法”及“模型与建模方法”,并且将动力学仿真分析的实例融入全书当中,使读者掌握分析、研究火炮与自动武器动力学问题的基本方法与过程,具有自主解决火炮与自动武器动力学问题的能力。

全书共6章。第1章论述了火炮与自动武器发射过程,火炮与自动武器动力学研究采用的主要研究手段、方法及应用范围。第2章论述了动力学分析基础理论,包括质点系统动力学基本方程、多体系统动力学基本理论及有限元基本理论等内容。第3章结合武器自动机工作过程的特点,论述了常规自动机运动特性估算、常规自动机动力学理论与方法及浮动自动机建模与求解方法,并给出了应用实例。第4章以火炮与自动武器多体系统为对象,论述了动力学模型建立中的基本原则、建模方法、模型参数获取方法和武器系统的优化方法,并给出了火炮与自动武器多体动力学仿真的应用实例。第5章论述了有限元基本知识、一般过程与方法,火炮与自动武器发射动力学有限元模型、方法及实例。第6章论述了武器发射时的射击稳定性和射击密集度分析方法,包括稳定性描述和判定、影响密集度因素分析、射击精度仿真方法等内容。

本书可作为从事武器科研与生产的工程技术人员的参考书,也可供火炮与自动武器专业的本科生和研究生使用。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

火炮与自动武器动力学/王亚平等编著. —北京:北京理工大学出版社,2014.2
(现代兵器火力系统丛书)

国家出版基金项目及“十二五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-5640-8776-0

I. ①火… II. ①王… III. ①火炮-动力学②自动武器-动力学 IV. ①TJ301②TJ201

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第020656号

出版发行/北京理工大学出版社有限责任公司

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010) 68914775(总编室)

82562903(教材售后服务热线)

68948351(其他图书服务热线)

网 址/http://www.bitpress.com.cn

经 销/全国各地新华书店

印 刷/北京地大天成印务有限公司

开 本/787毫米×1092毫米 1/16

印 张/17.75

字 数/327千字

版 次/2014年2月第1版 2014年2月第1次印刷

定 价/68.00元

责任编辑/蔡婷婷

莫 莉

文案编辑/莫 莉

责任校对/周瑞红

责任印制/马振武

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

总 序

国防科技工业是国家战略性产业，是先进制造业的重要组成部分，是国家创新体系的一支重要力量。为适应不同历史时期的国际形势对我国国防力量提出的要求，国防科技工业秉承自主创新、与时俱进的发展理念，建立了多学科交叉，多技术融合，科研、实验、生产等多部门协作的现代化国防科研生产体系。兵器科学与技术作为国防科学与技术的一个重要分支，直接关系到我国国防科技总体发展水平，并在很大程度上决定着国防科技诸多领域的成果向国防军事硬实力的转化。

进入 21 世纪以来，随着兵器发射技术、推进增程技术、精确制导技术、高效毁伤技术的不断发展，以及新概念、新原理兵器的出现，火力系统的射程、威力和命中精度均大幅提升。火力系统的技术进步将推动兵器系统的其他分支发生相应的革新，乃至促使军队的作战方式发生变化。然而，我国现有的国防科技类图书落后于相关领域的发展水平，难以适应信息时代科技人才的培养需求，更无法满足国防科技高层次人才的培养要求。因此，构建系统性、完整性和实用性兼备的国防科技类专业图书体系十分必要。

为了解决新形势下兵器科学所面临的理论、技术和工程应用等问题，王兴治院士、王泽山院士、朵英贤院士带领北京理工大学、南京理工大学、中北大学的学者编写了《现代兵器火力系统》丛书。本丛书以兵器火力系统相关学科为主线，运用系统工程的理论和方法，结合现代化战争对兵器科学技术的发展需求和科学技术进步对其发展的推动，在总结兵器火力系统相关学科专家学者取得主要成果的基础上，较全面地论述了现代兵器火力系统的学科内涵、技术领域、研制程序和运用工程，并按照兵器发射理论与技术的研究方法，分述了枪炮发射技术、火炮设计技术、弹药制造技术、引信技术、火炸药安全技术、火力控制技术等内容。

本丛书围绕“高初速、高射频、远程化、精确化和高效毁伤”的主题，梳理了近年来我国在兵器火力系统相关学科取得的重要学术理论、技术创新和工程转化等方面的成

果。这些成果优化了弹药工程与爆炸技术、特种能源工程与烟火技术、武器系统与发射技术等专业体系，缩短了我国兵器火力系统与国外的差距，提升了我国在常规兵器装备研制领域的理论水平和技术水平，为我国兵器火力系统的研发提供了技术保障和智力支持。本丛书旨在总结该领域的先进成果和发展经验，适应现代化高层次国防科技人才的培养需求，助力国防科学技术研发，形成具有我国特色的“兵器火力系统”理论与实践相结合的知识体系。

本丛书入选“十二五”国家重点出版物出版规划项目，并得到国家出版基金资助，体现了国家对兵器科学与技术，以及对《现代兵器火力系统》出版项目的高度重视。本丛书凝结了兵器领域诸多专家、学者的智慧，承载了弘扬兵器科学技术领域技术成就、创新和发展兵工科技的历史使命，对于推进我国国防科技工业的发展具有举足轻重的作用。期望这套丛书能有益于兵器科学技术领域的人才培养，有益于国防科技工业的发展。同时，希望本丛书能吸引更多的读者关心兵器科学技术发展，并积极投身于中国国防建设。

丛书编委会

前 言

火炮与自动武器动力学是一门理论性和工程性很强的应用学科。传统的火炮与自动武器动力学分析方法，主要是基于等效质量的自动机动力学理论和武器发射稳定性的静态分析。近年来，随着科学研究的方法日趋先进，多体系统动力学、有限元、机械振动、模态理论、优化技术以及试验等新技术逐渐被引入火炮与自动武器动力学领域，现代火炮与自动武器动力学分析已可以全面预测与解决火炮与自动武器研制中最关心的“系统动态特性”“动态响应”等问题。火炮与自动武器动力学的理论基础、分析方法及软件工具已经发生了根本性变化，有必要将这些新的理论、方法与工具进行归纳与总结，为火炮与自动武器设计人员提供新的理论依据与技术手段。

本书重点论述了基于质点动力学和机构传动的自动机动力学、基于多体系统动力学的火炮与自动武器系统动力学及火炮与自动武器有限元分析方法，全面介绍了火炮与自动武器动力学的最新理论与方法。此外，还将作者在科研当中总结的应用实例融入书的主要章节中，为读者提供了运用火炮与自动武器动力学理论解决实际问题的方法。

全书共6章。第1章由王亚平编写，论述了火炮与自动武器发射过程，火炮与自动武器动力学研究采用的主要研究手段与方法及应用范围。第2章由王永娟编写，论述了动力学分析基础理论，包括质点系统动力学基本方程、多体系统动力学基本理论及应用、有限元基本理论等内容。第3章第1节由王亚平编写，第2节和第3节由姚养无编写，结合武器自动机工作过程中的特点，论述了常规自动机运动特性估算、常规自动机动力学理论与方法及浮动自动机动力学建模与求解方法，并给出了应用实例。第4章由王亚平编写，以火炮与自动武器多体系统为对象，论述了多体动力学模型建立的基本原则、建模方法、模型参数获取和武器系统的优化方法，给出了火炮与自动武器系统多体动力学的应用实例。第5章由管小荣编写，论述了有限元基本知识、一般过程与方法，火炮与自动武器发射动力学有限元建模与方法，并给出了应用实例。第6章由徐诚编

写，论述了武器发射时的射击稳定性和射击精度，包括稳定性描述和判定、影响密集度因素分析、射击精度仿真方法等内容。本书的撰写，还要感谢顾克秋、卢其辉、顾新华、姚建军、刘一鸣等同志提供的部分研究成果和应用实例。

由于编者的水平有限，书中疏漏之处在所难免，恳请读者批评指正。

编著者

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 火炮与自动武器发射过程	1
1.2 火炮与自动武器动力学的分析方法	2
1.2.1 质点动力学及质量替换方法	3
1.2.2 多体系统动力学分析方法	3
1.2.3 有限元分析方法	4
1.3 火炮与自动武器动力学的应用范围	5
第 2 章 动力学基础	7
2.1 质点系统动力学	7
2.1.1 基本概念	7
2.1.2 质点系统动力学基础方程	13
2.2 多体系统动力学基本理论	21
2.2.1 多刚体系统动力学	21
2.2.2 多柔体系统动力学	32
2.2.3 碰撞与接触的处理方法	39
2.2.4 数值求解算法	45
2.3 有限元方法基本理论	48
2.3.1 有限元方法的基本原理	48
2.3.2 非线性结构动力学有限元基本理论	55
第 3 章 自动机动力学	64
3.1 常规自动机运动特性估算	64
3.1.1 火药气体作用终了时自动机运动诸元	64

2 火炮与自动武器动力学 ■

3.1.2	后坐时期自动机运动诸元·····	70
3.1.3	复进时期自动机运动速度·····	73
3.1.4	自动武器射击频率·····	74
3.1.5	自动机运动诸元估算实例·····	74
3.2	常规自动机动力学分析·····	76
3.2.1	机构运动微分方程·····	76
3.2.2	机构传速比·····	84
3.2.3	机构传动效率·····	91
3.2.4	机构撞击处理·····	98
3.2.5	典型武器自动机运动计算·····	116
3.3	浮动自动机动力学分析·····	121
3.3.1	浮动自动机简介·····	121
3.3.2	浮动自动机运动微分方程·····	126
3.3.3	浮动自动机运动微分方程的求解·····	134
3.3.4	典型浮动自动机动力学计算实例·····	135
第4章	火炮与自动武器多体系统动力学·····	145
4.1	火炮与自动武器多体系统动力学分析步骤与方法·····	145
4.1.1	火炮与自动武器多体系统动力学分析步骤·····	145
4.1.2	研究对象的分析、简化与假设·····	145
4.1.3	物理建模和数学建模·····	147
4.1.4	多体系统动力学求解及结果分析·····	147
4.1.5	模型的校核、验证和确认·····	148
4.1.6	基于多体系统动力学的优化分析·····	148
4.2	模型参数获取·····	148
4.2.1	模型物理参数获取·····	149
4.2.2	模型载荷参数获取·····	153
4.2.3	模型运动参数获取·····	156
4.3	火炮与自动武器多体系统动力学仿真·····	162
4.3.1	火炮与自动武器主要工作载荷分析·····	162
4.3.2	枪械多体系统动力学仿真·····	172
4.3.3	自行火炮多体系统动力学仿真·····	178
4.3.4	自动武器刚柔耦合动力学仿真·····	181
4.3.5	人枪系统多体动力学仿真·····	188
4.4	火炮与自动武器系统优化设计方法·····	194

4.4.1	火炮与自动武器系统动力学优化的一般过程	194
4.4.2	自行火炮动力学优化设计	195
第5章	火炮与自动武器动力学有限元方法	200
5.1	火炮与自动武器有限元分析一般过程	200
5.1.1	分析对象及简化模型	200
5.1.2	建立有限元分析模型	201
5.1.3	递交分析	205
5.1.4	评价分析结果	205
5.2	火炮动力学问题的有限元方法	206
5.2.1	自行火炮复杂结构有限元建模策略	206
5.2.2	模型简化	207
5.2.3	部件结构有限元建模	208
5.2.4	部件连接关系建模	210
5.2.5	力与约束条件的施加	213
5.2.6	计算过程	215
5.2.7	计算结果及分析	215
5.3	自动武器动力学问题的有限元方法	218
5.3.1	机枪有限元模型建立	219
5.3.2	机枪模态分析	223
5.3.3	机枪枪口响应分析	227
5.4	基于有限元的自动武器稳健优化设计	231
5.4.1	自动武器稳健优化设计原理	231
5.4.2	自动武器稳健优化设计实例	237
第6章	射击稳定性和射击密集度	241
6.1	射击稳定性分析	241
6.1.1	火炮射击稳定性的概念	241
6.1.2	基于动力学仿真的射击稳定性分析方法	244
6.2	武器射击密集度分析方法	247
	参考文献	252
	索 引	254

第 1 章 概 述

1.1 火炮与自动武器发射过程

火炮与自动武器是以发射药作为能源，用身管发射弹丸的武器，包括火炮（口径 20 mm 及以上）与枪械（口径 20 mm 以下）。自动武器是指在一发弹射击之后能自动完成重新装填和发射下一发弹动作的火炮和枪械。自动武器分为内能源式和外能源式，外能源式自动武器由外部辅助能源来完成动作；内能源式自动武器借助火药燃烧产生的高温、高压气体做功，推动弹头及其他动力装置完成动作。

火炮与自动武器的发射过程如下：弹丸与火药被装入身管内，经击发，火药燃烧，瞬时产生大量高温、高压的火药燃气，火药燃气推动弹丸沿身管运动，弹丸获得巨大的动能而飞向目标；同时，火药燃气或外部辅助能源推动身管或自动机向弹丸行进的反方向运动，此后完成一系列动作——开膛、抛壳、后坐、复进、推弹、闭锁等。发射过程时间很短，但是组成发射过程的各环节严格按次序进行。

根据发射的自动化程度，自动武器又分为能连续发射的全自动武器和只能单发发射的半自动武器。

按自动方式来分，自动武器一般分为 5 类：

（1）身管后坐式：利用发射时身管所获得的后坐运动能量进行工作的武器。根据身管后坐距离，又有身管长后坐武器和身管短后坐武器。

（2）导气式：利用身管侧孔导出的部分膛内火药燃气能量推动自动机原动件进行工作的武器。

（3）枪机或炮闩后坐式：利用枪机或炮闩的后坐能量进行工作的武器，又分自由枪机式武器和半自由枪机式武器。这种自动方式在火炮中已很少采用，在枪械中应用较多。

（4）转管式：身管组在外能源或火药气体的驱动下做定轴转动，带动自动机进行自动发射的武器。

（5）链式：通过链条的周向转动，驱动枪机或炮闩后坐、复进的自动武器。

这里以某导气式枪械为例，介绍自动机工作过程。其分解动作如下：

（1）击发：扣压扳机，击锤转动打击击针，击针打击底火，引燃火药，推动弹丸向前运动。

（2）开锁：在导气室燃气压力作用下，导气室活塞推动枪机框后退，带动枪机转动。

- (3) 后坐：枪机框带动枪机一起后退，并压缩复进簧。
 - (4) 退壳：枪机后退过程中，抽出膛内弹壳，并抛出武器之外。
 - (5) 复进：枪机框后坐到位，运动方向反转，在压缩的复进簧力作用下枪机框向前运动。
 - (6) 进弹：枪机在复进过程中推动弹匣中下一发弹入膛。
 - (7) 闭锁：枪机复进到位后，枪机框迫使枪机转动并重新与枪管连接。
- 每发射一发枪弹，都要经过上述动作过程，这一系列动作称为自动武器的循环动作。

并非所有自动武器的自动工作程序都包括上述动作。有的武器不需要开锁、闭锁，有的则没有解脱击锤（或击针）动作；另外，并非所有武器的全部工作步骤都由自动机主动件利用火药燃气能量来完成，外能源式自动武器由外部辅助能源来完成。例如，有不少步兵轻武器用弹簧势能来输弹；而某些航炮和舰载炮则用电机作辅助能源驱动输弹机构，甚至重新击发也用外部电源来点火。

火炮与自动武器发射过程具有如下特点：

- (1) 受到高温、高压及强动载作用。

火药在身管内燃烧时的爆发温度一般可达 $3\,000\sim 4\,000\text{ K}$ ，膛内最大压力一般为 $280\sim 800\text{ MPa}$ ，内弹道时期和后效期时间延续只有几毫秒至几十毫秒，高温、高压瞬变的火药燃气压力在作用于弹丸的同时，也作用于身管膛底，使武器产生后坐及振动。

- (2) 系统复杂、工作环境恶劣。

现代火炮与自动武器是非常复杂的机械系统，如现代火炮由身管、膛口装置、反后坐装置、高低机、方向机、供输弹机、平衡机及车体等部分组成。而且，武器在酷暑严寒、雷雨风沙等各种环境和复杂地形条件下工作，同时地面土壤、人枪耦合等非线性边界条件及自身的间隙、大位移等非线性因素的存在，也使火炮与自动武器动力学问题非常复杂。

- (3) 多体接触、多构件撞击特性。

火炮与自动武器的自动机工作过程中，存在着多体接触和多构件撞击的复杂现象。自动机主动件在工作中所受的力非常复杂，有随时间变化的、带脉冲性质的火药燃气压力，有零部件间撞击产生的冲击力，有随零件位移变化的弹簧力，还有由这些力产生的摩擦力等。自动机的所有机构都分别依序高速运动，且各机构工作时机各不相同，机构在启动、停止或改变运动方向时，往往各主要零件间又要发生剧烈撞击，这是自动机工作的显著特性。

1.2 火炮与自动武器动力学的分析方法

火炮与自动武器动力学是一门理论性和工程性很强的应用学科。

传统的火炮与自动武器动力学分析采用质点动力学等经典力学方法,对结构和边界条件进行大量简化,并利用替换质量、传动比和传动效率等方法来进行机构动力学分析,这种方法可获得武器的一些宏观动力学特性,适合于武器系统运动和动力学特性估算。

在计算机技术飞速发展的今天,科学研究的方法日趋先进,人们将多体系统动力学、有限元、机械振动、模态理论、优化技术以及试验新技术引入火炮与自动武器动力学领域,形成了火炮与自动武器动力学分析的新方法。

1.2.1 质点动力学及质量替换方法

动力学普遍定理为解决质点系动力学问题提供了一种普遍的方法。动力学普遍定理包括质点和质点系的动量定理、动量矩定理和动能定理。动量定理和动量矩定理为矢量形式,动能定理为标量形式,都可用于机械运动的研究,而动能定理还可用于研究运动能量的转化问题。

达朗伯原理为解决非自由质点系动力学问题提供了方法。其中运用静力学研究平衡问题的方法来研究动力学不平衡问题的方法,称为动静法。由于静力学研究平衡问题的方法比较简单,容易掌握,因此动静法在工程中被广泛使用。

虚位移原理适用于研究任意质点系的平衡问题。从位移和功的概念出发,得出任意质点系的平衡条件。虚位移原理是研究平衡问题的一般原理,将其与达朗伯原理相结合,可得到解决动力学问题的动力学普遍方程。动力学普遍方程是研究动力学问题的有效手段,在解决非自由质点系的动力学问题时,十分简捷、规范。

火炮与自动武器的大多数构件形状复杂,质量分布不均,按照实际结构研究传动问题很不方便。采用质量替换理论可使问题简化,即用集中于若干点的替换质量代替原构件,使替换点的质量总和在动力学上与构件等效,替换点的运动相当于构件的运动。

在自动武器的一个射击循环中,普遍存在的一种运动形式就是一个构件运动的同时带动其他构件进行运动,以完成一定的工作,这就是所谓的机构传动。通常采用传动比和传动效率等概念来进行质量替换。

质点动力学及质量替换方法为快速进行火炮与自动武器运动学和动力学特性分析的预估提供了方法,特别是在武器初始方案设计阶段,使问题大大简化。但是质点动力学及质量替换方法仍存在一些缺点,如由于模型的大量简化,武器的许多重要特性无法得到较精确的定量分析,特别是武器内部复杂结构之间的作用和“人—机—环”系统的相互作用无法精确描述;很难给出一个通用的动力学模型,结构类型不同或结构稍有改变时,必须重新建模;同时,经典力学方程表述形式也不易实现计算机自动建模。

1.2.2 多体系统动力学分析方法

已知武器系统各部件和构件的质量、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(运动时间、位移和速度等),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,如发射动态响应、射击频率、动作可靠性和密集度等。这是多体系统动力学方法在火炮与自动武器动力学方面的典型应用。

多体系统理论是20世纪60年代初发展起来,研究多体系统运动规律的理论,是建立在经典力学基础之上,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学科分支。

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。

多刚体系统动力学是古典的刚体力学、分析力学与现代电子计算机相结合的力学分支,其研究对象是由多个刚体组成的系统。多刚体系统中最简单的情况——自由质点和少数多个刚体,是经典力学的研究内容。对于由多个刚体组成的复杂系统,理论上可以采用经典力学的方法,即以牛顿-欧拉法为代表的矢量力学方法和以拉格朗日方程法为代表的分析力学方法。这种方法对于单刚体或者少数几个刚体组成的系统是可行的,但随着刚体数目的增加,方程复杂度成倍增长,寻求其解析解往往是不可能的。

多刚体系统动力学就是为多个刚体组成的复杂系统的运动学和动力学分析建立适宜于计算机程序求解的数学模型,并寻求高效、稳定的数值求解方法。由经典力学逐步发展形成的多刚体系统动力学,在发展过程中形成了各具特色的多个流派。目前,已经形成了比较系统的理论方法,主要有牛顿-欧拉法、拉格朗日方程法、图论(R-W)方法、凯恩方法、变分方法。

多柔体系统动力学是分析力学、连续介质力学、多刚体动力学、结构动力学交叉发展的必然。多柔体系统动力学研究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,多柔体系统含有柔性部件,变形不可忽略,逆运动学也是不确定的;与传统的结构力学不同,柔体部件在自身变形运动的同时,在空间中也经历着大的刚性移动和转动。多柔体系统是一个时变、高度耦合和高度非线性的复杂系统。

火炮与自动武器系统是一个复杂的多体系统,采用多体动力学分析方法进行火炮与自动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、自动机系统大位移及身管的弹性振动,预测武器发射过程中膛口的动态响应及整个系统的瞬态大位移运动情况,预测出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。

20世纪60年代之前,火炮与自动武器动力学的研究一直停留在传统理论上,从70年代到80年代初,多体系统动力学方法逐步引入火炮与自动武器动力学分析。90年代初期开始,多体系统动力学技术发展迅速,许多武器生产商和研究机构在其设计系统中开始采用多体系统仿真分析手段,并与有限元、模态分析、优化设计等方法一起构成一个有机的整体,在火炮与自动武器设计开发中发挥重要的作用。

1.2.3 有限元分析方法

在研究火炮与自动武器构件弹性对发射动态响应的影响和研究系统结构振动问题

时,需要引入连续介质假设,对结构进行离散化,以结构动力学理论为基础,采用数值方法进行求解。

已经发展的数值分析方法可以分为两大类。一类以有限差分法为代表。其特点是直接求解基本方程和相应定解条件的近似解。用有限差分法求解时,首先将求解域划分为网格,然后在网格的结点上用差分方程近似微分方程。当结点足够多时,近似解的精度可以满足分析要求。有限差分法对于具有规则的几何特性和均匀的材料特性的问题,程序设计比较简单,收敛性好。有限差分法能够求解某些相当复杂的问题,特别是求解建立于空间坐标系的流体流动问题。但对于几何形状复杂的问题,其精度将降低,甚至发生求解困难。另一类数值分析方法是有限元方法,有限元方法把一个连续体系统离散成有限个单元,每个单元采用近似函数表示,采用“有限个单元”组成的系统近似连续体系统。有限元方法具有如下的优点:物理概念清晰,对于力学问题,有限元方法一开始就从力学角度进行简化,易于掌握和应用;良好的灵活性与通用性,有限元方法对于各种复杂的因素(例如复杂的几何形状,任意的边界条件,不均匀的材料特性,结构中包含杆件、板、壳等不同类型的构件)都能灵活地加以考虑,而不会发生处理上的困难。

有限元方法也是求解物理场(位移场、热场、流场、电场、磁场)问题的有效数值计算方法,自从其问世以来就得到了工程界的高度重视和广泛应用。有限元方法最初用来求解复杂结构的应力分布,直至20世纪70年代,随着计算机技术的发展和有限元理论的成熟才开始广泛应用于动力学问题的求解中。目前,有限元方法在动力学问题中的应用可以考虑各种非线性因素影响,进行建模和数值分析,主要表现在:

- (1) 考虑材料非线性影响,引入材料非线性本构关系。
- (2) 考虑几何非线性,考虑大形变及大位移运动影响。
- (3) 考虑刚度、阻尼、摩擦及间隙碰撞影响。
- (4) 考虑多物理场耦合,进行精细化建模。

有限元方法在火炮与自动武器中的应用,国外早在20世纪70年代就已经得到了应用,国内在20世纪80年代后期到90年代才开始应用。采用有限元方法分析火炮与自动武器系统的固有动态特性,计算武器发射过程的振动特性、主要部件的动态应力与应变结果,已成为火炮与自动武器设计分析的常用手段。采用有限元方法有利于深入了解武器发射过程中结构内部的应力、应变特性及系统振动响应特性。

1.3 火炮与自动武器动力学的应用范围

火炮与自动武器在发射过程中,受到不同性质力的作用,各组成部分在不同的工作阶段表现出不同的运动特性。这种特定的运动规律,对于武器的工作可靠性、使用寿命、射击稳定性与射击精度,都会产生十分重要的影响,是武器设计过程中必须考虑的主要因素,同时也是评价一个武器品质与性能的标准。火炮与自动武器动力学理论,主

要研究武器系统在发射过程中的运动规律和动态响应,从而能够预测武器的动态特性和动力响应,优化系统总体结构,有助于寻求有效的方法和技术手段,能动地控制武器发射过程,以提高武器的设计质量,缩短研制时间,减少科研投入。火炮与自动武器动力学是火炮与自动武器设计的理论基础和重要的学科方向,主要可以完成下面几项基本任务:

(1) 在现代战争中,减少武器系统射击散布已成为提高武器系统命中概率的一个突出问题,弹丸起始扰动是造成射弹散布的一个主要因素,弹丸起始扰动与武器系统发射过程中膛口动态响应密切相关,因此,火炮与自动武器动力学将为提高射击精度奠定理论基础。

(2) 进行火炮与自动武器多体系统动力学建模和仿真,全面预测发射过程中武器系统的动力学特性,并预测各构件承受的载荷,为评价武器工作特性及进一步开展关重件强度寿命分析奠定基础。

(3) 考虑武器构件弹性,研究武器系统固有振动特性,分析武器系统刚度匹配情况和发射过程动态应力应变情况,为火炮与自动武器系统减重提供科学依据。

(4) 研究自动机在自动循环过程中机构的运动和撞击现象,分析自动机各构件的运动变化影响规律和撞击引起的运动变化,预测射击频率和运动、动作的可靠性。

(5) 在火炮与自动武器系统动力学建模与仿真的基础上,进行武器系统动态性能优化设计,为总体结构布局、参数选取和结构修改提供依据。

第2章 动力学基础

2.1 质点系统动力学

2.1.1 基本概念

1. 约束及其分类

1) 约束和约束方程

在力学中,限制非自由质点系中各质点的位置和运动的各种条件称为约束。不受约束作用的系统称为自由系统。如果把太阳系中各星体简化为质点,则太阳系可视为自由质点系统。与此相反,受到约束作用的系统,则称为非自由系统。工程中所有的机器和机构都是非自由质点系统。

对于非自由质点系统来说,约束对系统中质点的运动提供了限制条件。这些限制条件可以用数学方程表示出来,用数学方程所表示的约束关系称为约束方程。

2) 约束的分类

根据约束性质的不同,约束分为以下几种类型。

(1) 稳定约束和非稳定约束。根据约束是否与时间参数有关,可把约束分为稳定约束和非稳定约束,又称为定常约束和非定常约束。稳定约束是指约束的性质不随时间变化,即在这种约束的约束方程中,不显含时间参数 t 。稳定约束的约束方程一般形式为

$$f_j(x_1, y_1, z_1; \cdots; x_n, y_n, z_n; \dot{x}_1, \dot{y}_1, \dot{z}_1; \cdots; \dot{x}_n, \dot{y}_n, \dot{z}_n) = 0 \quad (j = 1, 2, \cdots, s) \quad (2-1)$$

式中 n ——质点系中质点的数目;

s ——约束方程的数目。

非稳定约束指约束随着时间参数的改变而改变,反映在约束方程中即显含时间参数 t ,非稳定约束的约束方程一般形式为

$$f_j(x_1, y_1, z_1; \cdots; x_n, y_n, z_n; \dot{x}_1, \dot{y}_1, \dot{z}_1; \cdots; \dot{x}_n, \dot{y}_n, \dot{z}_n; t) = 0 \quad (j = 1, 2, \cdots, s) \quad (2-2)$$

如被限制在空间球面上运动的质点 M ,在选取了图2-1所示的空间直角坐标系后,质点的位置坐标 (x, y, z) 必须满足空间曲面方程:

$$x^2 + y^2 + z^2 = l^2$$

这就是约束方程。由于方程中不显含时间变量 t ,所以是稳定约束。

被限制在铅直面内摆动的单摆(如图2-2所示),设单摆的原长为 l_0 ,若另一端拉