国防科工委“十五”规划教材.兵器科学与技术

火炮与自动武器动力学

徐　诚　王亚平　主编

北京理工大学出版社
北京航空航天大学出版社　西北工业大学出版社
哈尔滨工业大学出版社　哈尔滨工程大学出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

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”、“模型与建模方法”及“建模工具使用方法”，并且将动力学仿真软件工具的使用与实例融入全书当中。

本教材适合于火炮与自动武器专业本科生和研究生使用；对于从事武器科研与生产的工程技术人员，也是一本实用的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

火炮与自动武器动力学/徐诚，王亚平主编. —北京：北京理工大学出版社，2006.1
国防科工委“十五”规划教材. 兵器科学与技术.
ISBN 7-5640-0468-1

Ⅰ. 火… Ⅱ. ①徐…②王… Ⅲ. ①火炮-动力学-高等学校-教材②自动武器-动力学-高等学校-教材 Ⅳ. TJ01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 045668 号

火炮与自动武器动力学

徐 诚 王亚平 主编
责任编辑 张玉荣
责任校对 张 宏
北京理工大学出版社出版发行
北京市海淀区中关村南大街 5 号(100081)
电话：010－68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)
http://www.bitpress.com.cn
E－mail：chiefeditor@bitpress.com.cn
北京圣瑞伦印刷厂印制 各地新华书店经销

开本：787×960 1/16
印张：16.75 字数：341 千字
2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月第 1 次印刷
印数：2000 册.
ISBN 7-5640-0468-1 定价：27.00 元

国防科工委“十五”规划教材编委会

（按姓氏笔画排序）

主　任：张华祝

副主任：王泽山　陈懋章　屠森林

编　委：王　祁　王文生　王泽山　田　莳　史仪凯
乔少杰　仲顺安　张华祝　张近乐　张耀春
杨志宏　肖锦清　苏秀华　辛玖林　陈光禹
陈国平　陈懋章　庞思勤　武博祎　金鸿章
贺安之　夏人伟　徐德民　聂　宏　贾宝山
郭黎利　屠森林　崔锐捷　黄文良　葛小春

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
1.3　**火炮与自动武器动力学的应用范围** …… 6
第 2 章　动力学基础…… 7
2.1　**质点系统动力学** …… 7
2.2　**多刚体动力学** …… 37
2.3　**多柔体系统动力学基础理论** …… 45
第 3 章　火炮与自动武器系统动力学…… 49
3.1　**火炮与自动武器系统动力学分析步骤** …… 49
3.2　**火炮与自动武器系统动力学模型建立方法** …… 51
3.3　**模型参数获取** …… 52
3.4　**火炮与自动武器系统动力学仿真** …… 68
3.5　**基于 ADAMS 的火炮与自动武器系统优化** …… 100
第 4 章　自动机动力学…… 114
4.1　**经典自动机动力学理论** …… 114
4.2　**浮动自动机动力学分析** …… 164
第 5 章　火炮与自动武器动力学有限元方法…… 188
5.1　**有限元法基本理论** …… 188
5.2　**有限元分析一般过程** …… 201
5.3　**火炮动力学问题的有限元方法** …… 212
5.4　**机枪发射动力学问题的有限元方法** …… 221
5.5　**基于有限元的武器动态优化** …… 233
第 6 章　射击稳定性和射击密集度 …… 238
6.1　**射击稳定性** …… 238
6.2　**武器射击密集度** …… 242
参考文献…… 257

总　序

国防科技工业是国家战略性产业，是国防现代化的重要工业和技术基础，也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来，在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下，国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中，取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备，满足了我军由单一陆军，发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要，特别是在尖端技术方面，成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术，使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备，使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路，建立了专业门类基本齐全，科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系，奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础；掌握了大量新技术、新工艺，研制了许多新设备、新材料，以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术，大大提高了国家的科技水平和竞争力，使中国在世界高科技领域占有了一席之地。十一届三中全会以来，伴随着改革开放的伟大实践，国防科技工业适时地实行战略转移，大量军工技术转向民用，为发展国民经济作出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业，国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50 多年来，国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍，他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神，勇挑重担，敢于攻关，为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动，成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战，高等院校在培养国防科技人才，生产和传播国防科技新知识、新思想，攻克国防基础科研和高技术研究难题当中，具有不可替代的作用。国防科工委高度重视，积极探索，锐意改革，大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具，但受种种客观因素的影响，现有的教材与专著整体上已落后于当

需要全本请访问 www.ertongbook.com

今国防科技的发展水平，不适应国防现代化的形势要求，对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况，建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系，国防科工委全额资助编写、出版 200 种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量，在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上，以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者，对经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审，评选出近 200 种教材和学术专著，覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者，他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等，具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中，国防特色专业重点教材和专著的出版，将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出，进入 21 世纪，我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标，对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展，提升国防实力，需要造就宏大的人才队伍，而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务，落实科教兴国和人才强国战略，推动国防科技工业走新型工业化道路，加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华，实现志向，提供了缤纷的舞台，希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识，树立正确的世界观、人生观、价值观，努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任，创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好，国防科技工业的明天将再创辉煌。

前　言

火炮与自动武器动力学是火炮与自动武器专业方向的主干课程，是当前培养合格的火炮与自动武器专业技术人才过程中不可缺少的重要环节之一。

目前已使用的火炮与自动武器动力学教材主要涉及经典火炮与自动武器动力学方法，论述基于等效质量的自动机动力学理论及武器发射稳定性的静态分析。近年来，随着动力学仿真商用软件平台的日趋完善及大量火炮与自动武器动力学研究成果的出现，火炮与自动武器动力学已可以全面地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”和系统动态仿真问题。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，有必要将这些新理论、方法与工具反映到火炮与自动武器动力学教材中，以提高火炮与自动武器专业学生的水平。

本书首次以教科书形式论述了火炮与自动武器多体系统动力学模型及火炮与自动武器动力学有限元模型，全面介绍了火炮与自动武器动力学的最新理论与方法。将多体系统仿真软件及有限元分析软件的应用融入到教材的主要章节中，使学生掌握运用火炮与自动武器动力学理论解决实际问题的能力。

全书共分为 6 章。第 1 章由徐诚编写，论述了火炮与自动武器发射过程，火炮与自动武器发射动力学研究采用的主要研究手段与方法，研究的应用范围。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及应用、多刚体动力学基本理论及应用、多柔体动力学等内容。第 3 章由王亚平编写，以火炮与自动武器多体系统为对象，论述了动力学模型建立中的基本原则、建模方法、多体动力学仿真和武器系统的优化方法，介绍多体动力学仿真软件 Adams 的功能、使用方法及在火炮与自动武器系统动力学中的应用实例。第 4 章由姚养无编写，结合武器自动机工作过程中的特点，论述了经典自动机动力学理论与方法，浮动自动机建模与求解方法，并给出了应用实例。第 5 章由胡志刚编写，论述了有限元分析方法基本知识、一般过程与方法，火炮与自动武器发射动力学有限元模型与方法。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。本书的编写，还要感谢王守国、钟元龙、郭岚、管晓荣、郑再象等同志的大力协助。

由于编者的水平有限，书中错误与缺点在所难免，恳请读者批评指正。

编　者

第1章 概 述

1.1 火炮与自动武器发射过程

火炮是指利用火药在管形内膛燃烧形成燃气压力来发射弹丸的一种射击武器。火炮的发射过程如下:弹丸与火药被装入具有一定仰角的炮管内,经击发,火药燃烧,瞬时产生大量高温、高压的燃气推动弹丸沿炮管运动,弹丸运动到炮口时获得巨大的动能而飞向目标;同时,火药燃气也推动炮管向弹丸行进的反方向运动。发射过程所需要的时间很短,常以千分之几秒计,但是,组成发射过程的各环节却是严格按次序进行的。炮弹被装入炮膛,弹丸的弹带与膛线的起始紧贴,药筒底缘抵住炮管后端面,并被炮闩牢固地闭锁。发射的具体过程可以依次进行:击针击发→引燃底火药→点火药燃烧并传火→发射药燃烧→膛内燃气压力逐渐升高→弹丸的弹带嵌入膛线→燃气压力作功→弹丸运动至炮口处获得一定的速度→身管后坐→炮管在复进机的作用下回复到发射前的位置→打开炮闩→抽出炮筒。

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的全部动作的火炮和枪械。自动武器是一种特殊的热力机械,它借助火药燃烧产生的高温、高压气体作功,推动弹头及其他动力装置,完成一定功能。

根据发射的自动化程度,自动武器有全自动、半自动之分。能连续发射的为全自动武器,只能单发发射的为半自动武器。

按自动方式来分,自动武器可分为3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。

(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) 枪机后坐式:利用枪机的后坐能量进行工作的武器。这种自动方式在火炮中已很少采用,在枪械中应用较多。

这里以某导气式自动武器为例,介绍其自动机工作过程。发射时,扣动扳机,弹头发射,当弹头通过身管上一侧孔后,部分高温高压火药气体从枪管侧孔排出,推动活塞、枪机框向后运动。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。

(2) 开锁:枪机框后退少许后,带动枪机转动;

(3) 后坐:枪机框带动枪机一起后退;

(4) 退壳:枪机后退时,抽出膛内弹壳,并将弹壳抛出武器之外;

(5) 复进:枪机框后退时,压缩复进簧,然后在簧力作用下枪机框向前运动;

(6) 进弹:枪机在复进中推弹入膛;

(7) 闭锁:枪机复进到位后,枪机框迫使枪机转动重新与枪管连接;

每发射一发枪弹,都要经过上述动作过程。上述七个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步骤。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,自动武器分为内能源式和外能源式,所以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;而在某些航空用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燃温度一般可达 3 000～4 000 K,膛内最大压力一般在 280～800 MPa 之间,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、高压瞬变的膛内压力在作用于弹丸的同时,作用于膛底,使武器后坐、振动与跳动。

(2) 系统复杂、工作环境恶劣。现代火炮由身管、膛口装置、反后坐装置、高低机、方向机、输弹机、平衡机及车体等部分组成,是一个复杂的机械系统,而且是在酷暑严寒、雷雨风沙等各种环境和复杂地形条件下工作的,同时地面土壤等非线性边界条件及自身的间隙、大位移等非线性因素也使火炮动力学问题非常复杂。自动武器系统除了包括后坐部分和座架等部件外,还包括大位移运动的自动机,在工作时常常需要考虑人—枪—土壤边界所组成的系统,其动力学问题也很复杂。

(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,存在着多体接触和多构件撞击等复杂现象。自动机主动件在工作中所受的力较复杂,有随时间变化的、带脉冲性质的火药燃气压力和由零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,完成其工作,各机构工作的时机和行程各不同,机构在起动、停止或改变运动方向时,主要零件间要发生剧烈撞击,这是武器自动机的显著特性。

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极强的应用学科。

传统的火炮与自动武器动力学分析采用经典力学方法,利用替换质量、传动比和传动效率等概念来对机构进行动力学分析,这种方法可获得武器的一些宏观动力学特性。但存在如下缺点:

(1) 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

内部复杂机构之间的作用和人—机—环系统的相互作用无法精确描述；

(2) 利用经典力学方法不能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，就必须重新建模；

(3) 经典力学方程表述形式不易实现计算机自动建模，不易开发通用分析软件。

在计算机技术飞速发展的今天，科学研究的方法日趋先进，将有限元、多体系统动力学、机械振动、模态理论、优化技术以及试验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 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——位移、速度和加速度，从而获得武器系统的运动规律，以便研究武器系统和武器的工作性能，如武器发射响应、射击频率、可靠性和密集度等。这就是多体系统动力学方法在火炮与自动武器动力学方面的应用。

多体系统理论是 20 世纪 60 年代初发展起来的一种理论，是研究多体系统运动规律的科学，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。

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。目前，已经形成了比较系统的研究方法，其中工程中常用的方法主要有：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。

牛顿-欧拉法为矢量力学方法。牛顿-欧拉法中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。

拉格朗日方程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十分困难，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氏方程处理；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。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

图论(R－W)方法是由罗伯逊(Roberson)和维登伯格(Wittenburg)提出的。将图论法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状况。R－W 方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,则利用铰切割或刚体分割方法转变成树系统处理。

凯恩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。然而凯恩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。

力学中的变分方法是通过将真实运动和其他在同样条件下运动学上许可的运动进行比较,来揭示真实运动所具有的性质和规律。在经典力学中,变分方法只是对力学规律的概括,而在计算技术飞速发展的今天,变分方法已成为可以不必建立动力学方程而借助于数值计算直接寻求运动规律的有效方法。变分方法主要用于工业机器人动力学,有利于结合控制系统的优化进行综合分析,对于变步态系统,可以避免其他方法每次需重建微分方程的缺点。

多柔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。多柔体系统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。多柔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。

多柔体系统动力学的研究虽然取得了一些成果,但是远没有达到多刚体系统动力学的研究水平。

多体系统动力学与传统的经典力学相比,有以下特点:

(1) 不受系统拓扑结构的影响,可实现动力学模型的通用化。

(2) 针对耦合建模,特别是考虑柔体的整体运动与变形运动相耦合的刚-柔耦合建模,可给出一套简明而普遍适用的准则。

(3) 方程的表述形式为系统面向计算机自动建模提供了理论基础。

(4) 建立模型更详尽,考虑因素更多。

火炮与自动武器系统是一个复杂得多体系统,采用多体系统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及自动机系统大位移,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,进行总体优化。

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,没有进展。从 70 年代到 80 年代初,多体系统动力学方法逐步引入到火炮与自动武器动力学中。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安装多体系统仿真分析软件，并与有限元、模态分析、优化设计等软件一起构成一个有机的整体，在武器设计开发中发挥了重要的作用。

1.2.2 有限元分析法

在研究火炮与自动武器构件弹性对动态响应的影响和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，采用数值分析方法进行求解。

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。采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。当采用较多的结点时，近似解的精度可以得到改进。借助于有限差分法，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，有限差分法有自己的优势。因此在流体力学领域内，有限差分法至今仍占支配地位。但用于几何形状复杂的问题时，有限差分法的精度将降低。另一类数值分析方法是有限元法，有限元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”组成的系统来近似连续体系统。有限元法的一般求解步骤如下：第一步将连续体简化为由有限个单元组成的离散化模型；第二步对离散化模型求出数值解答。有限元方法具有如下的优点：

(1) 物理概念清晰。对于力学问题，有限元法一开始就从力学角度进行简化，使初学者易于掌握和应用。

(2) 灵活性与通用性。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，它的程序设计比较简单，收敛性也比有限元法好。但有限元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等)都能灵活地加以考虑，而不会发生处理上的困难。

有限元方法是求解物理场(位移场、热场、流场、电场、磁场)问题的非常有效的数值计算方法。它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。有限元方法在火炮与自动武器中的应用，国外早在 70 年代就已经开始，国内在 80 年代后期到 90 年代才开始应用。采用有限元法可以分析火炮与自动武器系统的固有动态特性，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。

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,受到不同性质的力的作用,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动态响应,从而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,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专业方向的主干课程,是当前培养合格的火炮与自动武器专业技术人才过程中不可缺少的重要环节之一,其主要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,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

一、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个质点的位置和运动的各种条件称为约束。质点系可分为自由系统和非自由系统。不受约束作用的系统称为自由系统。如果把太阳系中各个星体简化为质点，则太阳系就可以视为自由质点系统。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。

对于非自由系统来说，约束对系统中各个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，我们把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

根据约束对质点系限制做出的不同，可以把约束按其性质分为以下几种类型。

(1) 稳定约束和非稳定约束。根据约束是否与时间参数 t 有关，可把约束分为稳定约束(又称定常约束)和非稳定约束(又称非定常约束)。所谓稳定约束，就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

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

式中　n——质点系中质点的数目；

s——约束方程的数目。

所谓非稳定约束，就是指约束随着时间参数 t 的改变而改变，反映在约束方程中则是显含时间参数 t，非稳定约束的约束方程一般形式为

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

例 1　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。

例 2 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，若另一端拉动绳子的速度 v_0 为常数。在选取了图示的坐标系后，单摆中质点 M 的约束方程应为

$$x^2 + y^2 = (l_0 - v_0 t)^2$$

由于约束方程中明显包含了时间变量 t，所以是非稳定约束。

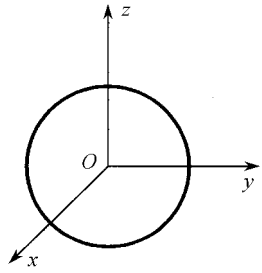


图 2－1 例 1 图示

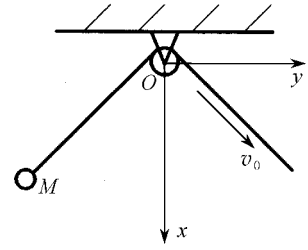


图 2－2 例 2 图示

(2) **几何约束和运动约束。** 根据约束方程中是否含有坐标的导数，约束可分为几何约束和运动约束。所谓几何约束，是指约束只限制系统中各个质点在空间的位置，即在约束方程中不显含质点坐标的导数。几何约束方程的一般形式为

$$f_j(x_1, y_1, z_1, \cdots, x_n, y_n, z_n, t) = 0 \qquad (j = 1, 2, \cdots, s) \tag{2-3}$$

所谓运动约束，是指约束对质点的运动参数(如速度、加速度等)进行限制，即在约束方程中，显含质点坐标的导数。运动约束的约束方程一般形式为

$$f_j(x_1, y_1, z_1, \cdots, x_n, y_n, z_n, \dot{x}_1, \dot{y}_1, \dot{z}_1, \cdots, \dot{x}_n, \dot{y}_n, \dot{z}_n, t) = 0 \quad (j = 1, 2, \cdots, s) \tag{2-4}$$

例 3 图 2－3 所示的质点 M 由刚性杆连接，仅能在铅直平面内绕固定点 O 摆动，杆长 l 不变。取如图所示的平面直角坐标系后，这个约束条件可以表示为

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

这就是几何约束方程。

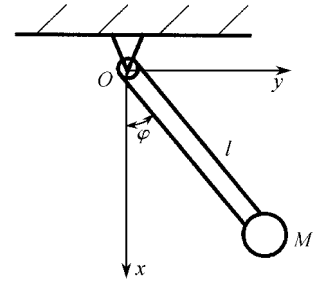


图 2－3 例 3 图示

例 4 半径为 R 的车轮沿固定直线轨道作纯滚动，取如图 2－4 的坐标系后，这个限制条件表示如下。

轮心 C 在 Oxy 平面内且与直线轨道的距离保持不变，即

$$y_c = R$$

每一瞬时，车轮上与地面的接触点 P 必为图形的速度瞬心，即

$$v_c - R\omega = 0$$

或

$$\dot{x}_c - R\dot{\varphi} = 0 \tag{2-5}$$

第一个限制条件是几何约束，第二个限制条件就是运动约束。

在运动约束中，由于约束方程显含质点坐标的导数，因此，运动约束的约束方程是一个微

分方程式(或微分方程组),如果该微分方程式(或组)是可积分的,那么这种约束是属于可积分的。例如方程式(2－5)是可积分的约束方程,通过积分可以转化为几何约束方程。

(3) 完整约束和非完整约束。几何约束和可积分为有限形式的运动约束(这两种约束的数学形式不显含质点坐标对时间的导数),统称为完整约束。完整约束的约束方程一般形式如式(2－3)所示。所谓非完整约束,就是指不可积分的运动约束。非完整约束的约束方程一般形式如式(2－4)所示。

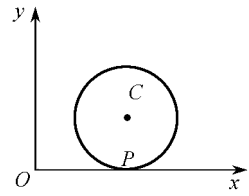


图 2－4　例 4 图示

如上述单摆的约束就属于完整约束,而车轮作纯滚动时的运动约束方程 $\dot{x}_c - R\dot{\varphi} = 0$ 虽是微分方程的形式,但它可以通过积分变化为 $x_c = R\varphi + K$,即可化为不显含坐标对时间导数的几何约束方程,因此仍属于完整约束。

例 5　半径为 r 的圆盘沿着水平面内某一曲线做铅垂滚动,如图 2－5 所示,下面写出圆盘的约束方程。

作直角坐标系 $Oxyz$,设 xy 平面为水平面,圆盘在运动过程中,由于盘面保持铅直,因此,圆盘中心 $C(x_c, y_c, z_c)$ 到水平面 xy 的距离保持常数,即有一个约束方程为

$$z_c = r$$

又因为圆盘做滚动,所以圆盘的瞬时转动轴恒通过圆盘和地面相接触的 A 点。而瞬时角速度 ω 有两个分量,其中一个分量为 $\dot{\varphi}$,它的方向和圆盘平面垂直,且永远处于 Oxy 平面内,此分量表明圆盘滚动的快慢程度;另一个分量 $\dot{\theta}$,它的方向沿着通过 A 点的直径,此分量表明圆盘滚动方向随时间的变化率。于是有

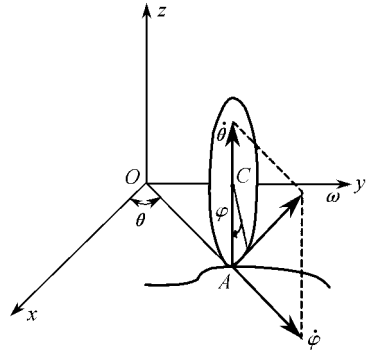


图 2－5　例 5 图示

$$\boldsymbol{\omega} = \dot{\boldsymbol{\varphi}} + \dot{\boldsymbol{\theta}} = \dot{\varphi}\cos\theta\boldsymbol{i} + \dot{\varphi}\sin\theta\boldsymbol{j} + \dot{\theta}\ \boldsymbol{k}$$

由于圆盘做纯滚动,根据圆盘上 A 点速度为零的条件,可得方程如下

$$\boldsymbol{v}_A = \boldsymbol{v}_c + \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{r}_{CA} = 0$$

或

$$\boldsymbol{v}_c - r\,\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{k} = 0$$

式中　$\boldsymbol{i}, \boldsymbol{j}, \boldsymbol{k}$——分别为沿 x, y, z 轴正向的单位矢量;

r——圆盘半径。

将上式向 xOy 平面投影,可得

$$\begin{cases} \dot{x}_c = r\dot{\varphi}\sin\theta \\ y_c = -r\dot{\varphi}\cos\theta \end{cases} \tag{2－6}$$

式中 θ 角也是一个变量,故不能写成可积分的形式。因此,这是非完整约束。非完整约束的约束方程实际上是一个常微分方程(或组)。

需要全本请访问 www.ertongbook.com