



国家出版基金项目



工业和信息化部“十二五”规划专著

航天发射科学与技术

发射动力学

LAUNCHING DYNAMICS

姜 毅 魏昕林 陈 苗 编著



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



国家出版基金项目



工业和信息化部“十二五”规划专著

航天发射科学与技术

发射动力学

LAUNCHING DYNAMICS

姜 毅 魏昕林 陈 苗 编著

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

内 容 简 介

通过本书的学习,读者可以掌握发射动力学的基本理论和方法,为从事弹-架系统动态设计打下基础。全书共分为6章:第1章绪论,介绍发射动力学的研究背景和基本任务;第2章基本概念,介绍与发射动力学相关的基本概念;第3章发射动力学的建模方法,介绍发射动力学建模的方法、基本定律以及相关参数的确定法和识别法;第4章弹-架系统振动的激励因素,介绍激励因素和描述方法,展开分析导弹在发射导轨上运动时的载荷、自旋导弹的不平衡载荷、发动机推力、燃气射流的扰动作用、路面激励、舰艇运动载荷、风载荷;第5章动力学分析,介绍了不同激励下弹-架系统的响应分析;第6章发射动力学仿真计算,介绍了仿真计算方法的基本理论,结合具体实例,实现发射动力学仿真。

本书可作为高等院校相关专业本科生的教科书,以及相关专业硕士研究生的教学参考书,也可供相关专业的科技人员参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

发射动力学 / 姜毅, 魏昕林, 陈苗编著. —北京: 北京理工大学出版社, 2015. 6
(航天发射科学与技术)

国家出版基金项目 工业和信息化部“十二五”规划专著

ISBN 978-7-5682-0775-1

I. ①发… II. ①姜… ②魏… ③陈… III. ①航天器发射-动力学 IV. ①V41

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第138575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)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 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 / 16.5

字 数 / 315千字

版 次 / 2015年6月第1版 2015年6月第1次印刷

定 价 / 63.00元

责任编辑 / 钟 博

文案编辑 / 钟 博

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

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

航天发射科学与技术

编写委员会

名誉主编：于本水 黄瑞松 刘竹生

主 编：杨树兴 包元吉

副主编：（按姓氏笔画排序）

万 全 王生捷 刘 浩

姜 毅 胡习明 贺卫东

葛令民

编 委：（按姓氏笔画排序）

于殿君 王东锋 邓 科

朱恒强 刘占卿 汤元平

李建冬 李 梅 何家声

赵瑞兴 荣吉利 党海燕

傅德彬 路 峰 谭大成

航天发射科学与技术

学术顾问委员会

(按姓氏笔画排序)

丁旭昶	于倩	于建平
王 缜	牛养慈	任跃进
刘淑艳	李喜仁	张泽明
陈亚军	陈登高	周凤广
赵长禄	郝志忠	秦 焯
唐胜景	曾智勇	

总序

世界各国为了进一步提高综合国力，都在大力开发空间资源和加强国防建设。作为重要运载器的火箭、导弹，以及相关的发射科学技术，也相应地都得到了广泛的重视。发射科学技术综合了基础科学和其他应用科学领域的最新成就，以及工程技术的最新成果，是科学技术和基础工业紧密结合的产物。同时，发射科学技术也反映了一个国家相关科学技术和基础工业的发展水平。

航天发射科学技术的发展历史漫长，我国古代带火的弓箭便是火箭的雏形。火箭出现后，被迅速用于各种军事行动和民间娱乐。随着现代科学技术的发展和人类需求的增加，美国、俄罗斯、中国、日本、法国、英国等航天大国，投入了大量的人力、物力进行航天发射的研究和开发，并取得了丰硕成果，代表了世界的先进水平。火箭、导弹的发射水平，决定了一个国家航天活动和国防保障区域的范围。因此，各航天大国均把发展先进的发射和运载技术作为保持其领先地位的战略部署之一。无论是空间应用、科学探测、载人航天、国际商业发射与国际合作，还是国防建设，都对发射技术提出了新的要求，促使航天发射科学技术向着更高层次发展。

综上所述，系统归纳、总结发射领域的理论和技术成果，供从事相关领域教学、研发、设计、使用人员学习和参考，具有重要的意义。这对提高教育水平、提升技术能力、推动科学发展和提高航天发射领域的研发水平将会起到十分重要的作用。

航天发射科学技术构成复杂，涉及众多学科，而且内容广泛，系列丛书的编写需要有关领域的专家、学者来共同完成。因此，北京理工大学、北京航天发射技术研究所、北京机械设备研究所、北京特种机械研究所、总装备部工程设计研究院等国内从事相关领域研究的权威单位组建了本丛书的作者队伍，期望将发射科学技术的

重要成果著作成册，帮助读者更深入地了解 and 掌握航天发射领域的知识和技术，推动我国航天事业的发展。

本丛书力求系统性、完整性、实用性和理论性的统一，从发射总体技术、发射装置、地面支持技术、发射场总体设计、发射装置设计、发射控制技术、发射装置试验技术、发射气体动力学、发射动力学、弹射内弹道学等多个相互支撑的学科领域，以发射技术基本理论，火箭、导弹发射相关典型系统和设备为重点，全面介绍国内外的相关技术和设备、设施。

本丛书作者队伍是一个庞大的教育、科研、设计团队，为了编写好本丛书，编写人员辛勤劳动，做出了很大努力。同时，得到了相关学会，以及从事编写的五个单位的领导、专家及工作人员的关心和大力支持，在此深表感谢！由于种种原因，书中难免存在不当之处，敬请读者批评指正！

编写委员会

前言

本书以火箭导弹的弹-架系统为对象，研究火箭导弹发射过程的动力学现象，解决发射精度与发射可靠性问题。本书研究影响发射精度的初始扰动现象，寻求控制扰动的方法；分析影响结构强度、刚度及发射装置稳定性的动载荷或过载，设法减小振动，提高抗振能力；计算弹架间可能的碰撞量，确定最小的安全让开距离。发射动力学的发展与应用，促使设计方法发生重大变化，设计观点得到更新，产品设计的内在质量得到提高。发射动力学已成为现代发射技术的重要研究内容。

通过本书，读者可以掌握发射动力学的基本理论和方法，为从事弹-架系统动态设计打下基础。全书共分为6章：第1章绪论，介绍发射动力学的研究背景和基本任务；第2章基本概念，介绍与发射动力学相关的基本概念；第3章动力学模型，介绍发射动力学建模的方法、基本定律，以及相关参数的确定法和识别法；第4章弹-架系统振动的激励因素，介绍激励因素和描述方法，展开分析了导弹在发射导轨上运动时的载荷、自旋导弹的不平衡载荷、发动机推力、燃气射流的扰动作用、路面激励、舰艇运动载荷、风载荷等；第5章动力学分析，介绍了不同激励下弹-架系统的响应分析；第6章发射动力学仿真分析计算，介绍了仿真计算方法的基本理论，结合具体实例，实现发射动力学仿真。

本书作者姜毅教授已从事火箭导弹发射方面的研究和教学工作20多年，进行过众多有关火箭导弹发射方面的研究工作，其中不乏我国一些重大或重点工程大型项目。作者在工作过程中，曾获得国家科技进步二等奖一项、部级科技进步一等奖一项、部级科技进步二等奖三项、部级科技进步三等奖五项。本书主要由姜毅教授编写，

学科组的曾伟博士、魏昕林博士、陈苗博士参与了全书的编写及整理工作。本书可作为高等院校的本科生教材，以及相关专业硕士研究生的教学参考书，也可供相关专业的科技人员参考。

本书在编写过程中，参考了大量的国内外资料，在此对原著作者表示深深的谢意！

由于编者水平有限，书中可能还有缺点和错误，衷心希望读者提出宝贵意见。

编 者

目 录

CONTENTS

第1章 绪论	1
1.1 发射动力学的研究背景	1
1.2 发射动力学的基本任务	2
1.3 虚拟样机技术在发射动力学中的应用	4
第2章 基本概念	5
2.1 导弹的滑离方式与发射阶段	5
2.2 火箭的发射精度	7
2.2.1 基本概念	7
2.2.2 发射精度的影响因素	9
2.2.3 影响初始扰动的因素	10
2.2.4 影响飞行扰动的因素	12
2.3 发射时的最小安全让开距离	13
2.4 弹-架系统的动载荷	14
2.4.1 约束条件	14
2.4.2 计算结构内力的位移法与过载法	14
2.4.3 载荷计算状态	17
2.5 弹-架系统的动态设计原理	18
2.5.1 动态设计过程	18
2.5.2 动态设计技术	19
2.5.3 动力修改技术	22

2.6	发射动力学的发展简况	22
2.6.1	不同发射动力系统的特点及发展趋势	22
2.6.2	发射动力学的研究发展情况	24
2.7	关于发射能源及新型推进技术的问题	26
2.7.1	轻气炮	26
2.7.2	电磁推进技术	27
2.7.3	电热推进技术	27
第3章	动力学模型	29
3.1	动力学模型的类型	29
3.2	动力学模型的建立方法	30
3.2.1	理论分析法	31
3.2.2	模态试验法	33
3.2.3	理论-试验法	35
3.2.4	有限单元法建模	35
3.3	建立系统运动方程的基本定律	42
3.3.1	动静法的应用	42
3.3.2	拉格朗日方程的应用	44
3.3.3	矢量-张量分析法的应用	45
3.4	系统的集中参数模型	48
3.4.1	发射时系统的动力学模型	48
3.4.2	贮运时系统的动力学模型	55
3.4.3	瞄准机的动力学模型	60
3.5	系统的分布参数模型	62
3.6	系统的有限单元模型	65
3.7	动力学模型物理参数的试验确定法	70
3.7.1	转动惯量的测量	70
3.7.2	相对阻尼系数的测量	72
3.7.3	刚度系数及质量的测量	76
3.8	动力学模型参数识别法	77
3.8.1	基本原理	77
3.8.2	模型参数的识别方法	84

第4章 弹-架系统振动的激励因素	88
4.1 激励因素与描述方法	88
4.1.1 激励因素	88
4.1.2 描述方法	91
4.2 导弹在发射导轨上运动时的载荷	94
4.2.1 确定性不平直轨面的影响	94
4.2.2 随机不平轨面的影响	97
4.3 自旋导弹的不平衡载荷	100
4.4 发动机推力	104
4.5 燃气射流的扰动作用	106
4.5.1 燃气射流的流动结构	107
4.5.2 燃气射流的扰动作用	111
4.6 路面激励	113
4.6.1 轮式车辆路面谱	114
4.6.2 履带车辆路面谱	116
4.6.3 空间谱与时间谱的关系	116
4.7 舰艇运动载荷	118
4.7.1 舰艇在海浪中的运动	118
4.7.2 舰载弹-架系统的摇摆载荷	124
4.8 风载荷	128
第5章 动力学分析	134
5.1 阶跃激励的多联装弹-架系统的响应分析	134
5.2 行载激励的二度弹-架系统的响应分析	142
5.2.1 弹-架系统的物理模型	143
5.2.2 定向钮载荷的确定	144
5.2.3 火箭弹运动参数的计算	146
5.2.4 各激励因素的影响分析	149
5.3 行载激励的三度弹-架系统的响应分析	157
5.3.1 弹-架系统运动微分方程的建立	157
5.3.2 弹-架系统振动特性参数计算	165
5.4 多自由度弹-架系统的响应分析	167
5.4.1 弹-架系统的物理模型	168

5.4.2	弹-架系统的运动计算	169
5.5	弹性基础导弹系统的响应分析	175
5.6	无重弹性梁系统的响应分析	179
5.6.1	弹-架系统的物理模型	179
5.6.2	位移影响函数	179
5.6.3	导弹运动微分方程	185
5.7	无重弹性梁-杆系统的响应分析	188
5.8	ADAMS 动力学分析	195
第6章	发射动力学仿真计算	200
6.1	仿真计算方法概述	200
6.2	软件简介	204
6.2.1	Creo	204
6.2.2	ADAMS	205
6.2.3	ABAQUS	207
6.2.4	ANSYS Fluent	209
6.3	防空导弹倾斜发射动力学仿真分析实例	213
6.3.1	物理模型	214
6.3.2	ADAMS 模型	215
6.3.3	柔性体	222
6.3.4	刚柔耦合模型	228
6.3.5	模型校正	231
6.3.6	仿真及后处理	232
参考文献	235
索引	237

第 1 章 绪 论

1.1 发射动力学的研究背景

几次局部战争表明,空袭与反空袭作战已成为高技术,特别是信息条件下局部战争的主要作战模式,并贯穿于战争的全过程,甚至决定着战争的结果。随着空袭武器技术日益进步,战场环境日益复杂,反空袭作战的作战使命越来越重大,国土、要地以及野战防空的任务越来越重。在反空袭作战中,发射技术对防空体系的生存能力、反应时间、火力强度、多目标作战能力、使用性能等武器系统性能具有决定性作用。因此,一些军事大国在建立完善防空体系的过程中,非常重视防空导弹发射技术的研究。

导弹发射技术随着科学的发展、作战使用的需要和导弹系统性能的改进而不断发展变化,第二次世界大战末,德国的 V-1、V-2 导弹,分别采用地面固定倾斜和垂直发射。战后,一些国家的战略导弹多采用这两种发射方式。从 20 世纪 50 年代末起,为提高战略导弹在核环境下的生存能力,人们采用了地下井发射。到 20 世纪 60 年代,远程陆基弹道导弹几乎都采用地下井发射,潜地导弹则采用弹射。20 世纪 70 年代后,随着空间侦察技术的不断发展,导弹命中精度的不断提高和分导式多弹头的出现,靠加固地下井已不能确保导弹的生存能力。因此,在进一步加固地下井的同时,一些国家先后研究和改进了各种机动发射方式。随着导弹系统的小型化、自动化技术的不断提高,导弹的发射技术将日趋多样化,向着机动、快速、隐蔽的方向发展。导弹的弹射技术是近几十年发展起来的一门发射技术,具备众多优点,发展迅速,目前已广泛应用于国内外不同类型的战略战术导弹的发射。

导弹按照不同的发射基点可以分为机载导弹、舰载导弹、潜载导弹、陆基导弹等,在不同基点发射的各种导弹的发射方式又包含各种不同的发射姿态以及发射动力,与之对应的是各种不同的发射系统。各种动力形式的比较见表 1-1。

表 1-1 各种动力形式的比较

动力形式	优 点	缺 点
炮式	可使导弹获得极大的初速度,对快速捕捉目标与命中目标十分有利	导弹及其上仪器、设备经受极大的冲击过载,只适用于设备简单的小型反坦克导弹

续表

动力形式	优点	缺点
液压式	快速性好、功率大、功效高	设备精密、复杂、故障率高、维修困难，不宜野外作业
压缩空气式	利用高压气体作为动力源，能将导弹高速弹出	设备庞大、笨重，大容量的高压气瓶制作困难
液压-气动式	其优点是液压式与压缩空气式的叠加	其缺点也是液压式与压缩空气式的叠加
燃气式	将火药的化学能转化为推动导弹运动的动能，能量大，但体积并不大，设备也不复杂，燃气发生器本质上是个固体火箭发动机，可直接装在发射筒内	燃气温度高（一般都在 1500℃ 以上），不仅对本身热设计造成困难，也对弹上设备及发射设施构成威胁
燃气-蒸汽式	在燃气式弹射装置的燃气发生器后面加装水冷却器，使燃气温度降低后进入作动筒，因此能量得以充分利用，并且可调，压力变化平衡，内弹道参数较理想	装置较燃气式复杂，体积也增大，成本增加
电磁式	实质是一个形状特殊的直线电动机，电磁发射利用电磁能量，无声、无光、无污染，对导轨与设备无侵蚀，弹射后可以获得很大的出轨速度	设备庞大、复杂，技术难度大，强大的电磁场会影响弹上设备的正常工作

1.2 发射动力学的基本任务

导弹或火箭的主要用途是使战斗部按预定要求击中目标，因而发射时应有较高的可靠性和精度。导弹-发射装置系统（简称弹-架系统）是弹性系统，发射时作用在系统上的力多为随时间变化的动载荷，所以工作时会产生振动。弹-架系统的振动有可能成为影响导弹或火箭发射的可靠性和精度的重要因素或决定性条件。

所谓可靠性，是指产品在规定时间和使用条件下无故障工作的概率。它不仅指导弹飞行阶段的可靠性，也包括地面的维护使用和发射阶段的可靠性。从事发射技术工作的读者主要关心后者，关心发射装置能否可靠地发射导弹。系统的振动可能使仪器和构件的正常工作受到干扰，甚至使其因强度不够而破坏。由此引起的故障可分为两类：

其一是零部件整体性破坏引起的故障。例如，结构（特别是弹体）所受的载荷超出承载能力，引起不允许的变形或脆性破坏；导线在焊接处断开、折断；密封件破坏等均属于这类故障。

其二是不发生明显破坏性的故障，但设备的正常功能受到影响。例如，结构（特别是导弹，包括固体燃料及其包覆层）的应力虽然未超出许可范围，但在该应力长时间周期性的作用下，损伤累积，导致疲劳裂纹的形成或发展；定向器端部产生过大的挠度，可能与滑离后出现下沉的导弹相碰；可拆件及紧固件松动；气密性受到破坏；继电器触点变动……这些均属于该类故障。

所谓导弹发射精度，是指在发射阶段终点，导弹的实际弹道与理想弹道之间的偏差。它直接影响总的弹着点的散布和偏差。这是发射动力学研究的重要内容。

弹-架系统的振动对发射精度有较大的影响。例如，系统的振动有可能增大导弹的初始扰动，或增大多联火箭发射装置每发弹初始扰动的散布；系统的振动有可能使导弹在定向器上产生较大弯曲，导弹滑离后弯曲恢复而继续振动，从而引起开始飞行阶段的扰动；对某些将测角仪安装在其上的发射装置，系统振动会引起测角仪的瞄准基准振动，使受控飞行的导弹随基准的变化而变化。

为了提高产品的可靠性和发射精度，在弹-架系统设计时应当控制系统的振动量，提高结构抵抗振动与冲击的能力，把系统的动态优化设计作为重要研究内容。因而可以这样定义：发射动力学是研究弹-架系统动态优化设计的基本理论和方法，其目的在于寻求合理和实用的计算方法，以保证动载作用下结构的安全、经济及使用性能，使导弹的发射精度和可靠性符合要求。发射动力学研究的基本问题是：

- ① 确定火箭滑离时的初始扰动，寻求控制初始扰动的方法。
- ② 确定发射时作用在导弹上的过载。
- ③ 确定发射装置各部件的内力与动反力，以及相应的动强度与动变形。
- ④ 确定导弹发射时的最小安全让开距离。

根据产品研制的不同情况，所要解决的问题和使用的方法是不同的：

① 对正在使用或正在试验中的产品，主要是解决使用或试验中不恰当的振动带来的问题，以提高产品的性能，例如解决发射时的跳弹（弹在定向器上的跳动）、掉弹、失控、散布过大、零件出现裂纹或有残余变形、弹架相碰、发射装置倾翻等问题。

在这种情况下，可用理论与试验相结合的方法进行动力分析，找出薄弱环节，提出改进措施（注意这时的措施受到原有产品的限制）。或制定合理的使用规则（例如选择最优的发射顺序与发射速度）及制造验收技术条件。

② 对新设计的产品，要进行系统动态优化设计，寻求使弹-架系统的动态性能最优的结构。例如，使火箭的散布最小；在满足结构强度和支承稳定性的条件下，使发射装置的重量最轻等。

在这种情况下，主要是按照初拟的设计图纸建立动力学模型，用此模型进行计算，边分析，边改进，边设计。有时要作实物模型（原尺寸或缩小比例），进行动态试验，以验证理论模型的正确性。

1.3 虚拟样机技术在发射动力学中的应用

机械工程中的虚拟样机技术又称为机械动态仿真技术，是20世纪80年代随着计算机技术的发展而迅速发展起来的一项新技术，其核心是机械系统运动学和动力学仿真技术，同时还包括三维CAD建模技术、有限元分析技术、机电液控技术、最优化技术等相关技术。运用虚拟样机技术，可以大大简化机械产品的设计开发过程，大幅度缩减产品的开发周期，大量减少产品开发费用和成本，明显提高产品质量，提高产品的系统级性能，获得最优化和创新的设计产品。因此，此技术一出现，立即受到了各发达国家的重视。虚拟样机技术也逐渐受到我国许多研究机构的重视，我们应用虚拟样机技术对武器装备做了一定的研究。

近二十年来，随着计算机技术的飞速发展和广泛应用，人们将发射动力学和计算机技术相结合，对复杂的发射系统进行大规模的仿真，这是发射系统设计现代化和科学化的现实要求和未来的发展趋势。

至今，多体动力学理论的发展为发射动力学的研究提供了更广阔的理论基础和途径，使发射动力学模型的建立更加简洁和程式化。多体动力学理论、振动理论、现代优化设计方法、数值计算的发展和完善，为发射系统动力学问题的求解提供了新的思路和方法。有限元法及其派生的方法也为解决复杂结构力学问题提供了强有力的工具。