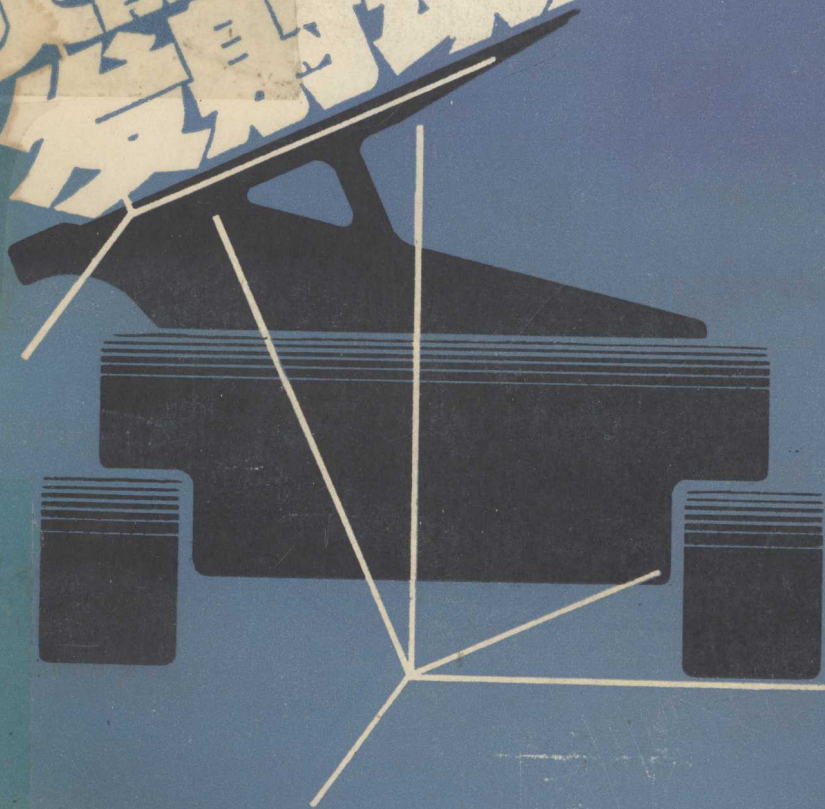


火箭推进动力学



● 姚昌仁 唐国梁 编著

● 北京工业学院出版社

V55
1004

内容简介

火箭导弹发射动力学

姚昌仁 唐国梁 编著



30265143



北京工业学院出版社

628609

1981年12月第1版 1981年12月第1次印刷

北京工业学院出版社

1.89元

内 容 简 介

本书专门阐述导弹(或火箭)-发射装置系统动力分析和动态设计的基本理论和方法。全书共分五章,内容包括:火箭导弹在运输、发射准备和发射时的动载荷的计算方法;火箭发射精度的影响因素;弹-架系统的动力分析与动态设计的方法和步骤;动力学模型的建立方法;系统振动的激励因素分析与计算;典型的集中参数系统与分布参数系统的动力分析方法。

本书是以往研究工作的总结,从典型情况出发系统地介绍分析计算的基本理论与方法,并注意引进新的观点和方法。

本书是高等学校火箭导弹发射技术与设备专业学生用的教材,也可供有关的科技人员参考。

火箭导弹发射动力学

姚昌仁 唐国梁 编著

北京工业学院出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

通县向阳印刷厂印刷

787×1092毫米 32开本 11.25印张 250千字

1987年12月第一版 1987年12月第一次印刷

印数: 1—2,500册

统一书号: 15434·72 定价: 1.85元

前言

在以往的发射装置的设计中，无论是进行载荷和强度计算，还是分析火箭导弹的发射特性，一般都假设结构是刚性系统，都是以刚体静力学作为基础，或仅仅考虑了刚性系统在不稳定运动时的惯性力，或者孤立地考虑火箭导弹的振动问题。现在，人们日益认识到，这种分析方法与实际条件不符，所设计的产品往往难于满足预定的重量轻、精度高、安全可靠等战术技术要求。实际的火箭导弹和发射装置是弹性系统，作用在它上面的外载荷又多为随时间变化的动载荷。这样的系统在工作时将要产生振动，从而改变了结构的内力和变形，改变了火箭导弹的运动特性。因此，在产品的设计时，仅仅作静力分析或单纯地考虑某一部件的振动是不够的，而要把火箭导弹与发射装置作为一个系统，全面地研究这一系统的振动问题。要进行包括动力分析和动态设计在内的全面分析计算。应当采取措施，提高结构的抗振能力，控制系统的振动量，保证系统的动态性能要求。火箭导弹发射动力学就是要研究火箭-发射装置系统工作时的振动问题，研究该系统的动力分析和动态设计的基本理论和方法。以保证系统的正常工作不受干扰；避免结构强度不够而损坏；或提高火箭的发射精度。

发射动力学是现代导弹发射工程的重要研究内容，是从事火箭导弹发射技术工作的工程技术人员和专业学生必须掌握的知识之一。多年来，国内外许多科技工作者，在发射动

力学的研究领域内，已作了许多有意义的工作。提出了一些分析计算的理论和方法，或对一般结构动力学的方法加以改进，用于导弹-发射装置系统的动力分析与动态设计之中。这些研究成果导致产品性能的提高，促进了产品设计方法的重大改变。可以预计，不久定能设计出有更高发射精度、可靠而又轻便的火箭导弹武器系统，而无须反复进行画图-加工-打靶这一过程。但是，目前还设有一本既概括介绍已往的研究成果和基本理论，又对解决工程问题能起指导作用的著作。没有一本可供教学用的书。作者于1981年10月，曾参考有关资料并结合个人工作中的体会，编写了《火箭与导弹发射装置动力学》讲义，是编写这样一本书的初步尝试。此讲义曾作为有关专业学生的教材使用多次，并供给一些单位参考。本书是在原讲义的基础上改写的，吸收了使用中的经验及发射动力学研究的新成果，对重点内容作了补充和完善。以便能更好地综合介绍一些典型情况的应用及参考资料，并对一些重要结果加以评论。

本书是高等学校有关专业学生用的教材，也可供从事导弹发射技术工作的科技人员参考，但在阅读本书之前应掌握机械振动的基本知识。本书共分五章，前三章介绍发射动力学的基本理论与方法，后二章介绍典型情况的应用。重点研究火箭导弹在发射装置上运动时的现象与分析计算方法，涉及结构动力学领域的内容。虽然在现代发射技术的研究中，火箭从定向器上滑离后初始飞行阶段的运动特性也是发射动力学研究的重要内容，但它涉及到另一学科领域——外弹道学的内容，限于篇幅，本书不作介绍，读者可参阅有关专著。

本书的§2-4、§2-9、§3-6、§3-7、§4-8节由唐国梁编写，其余部分由姚昌仁编写。由华东工程学院吴秉贤副教授主审，

航天部吕佐臣高级工程师也审阅了全部书稿，他们进行了全面而详细的审核和校对，提出了许多宝贵的意见。航天部的刘晋彦高级工程师、兵器部教材编审室的姚康年工程师、北京工业学院的赵承庆教授，高明坤、方远翔及袁曾凤副教授参加了审稿会，承蒙这些专家教授们的认真审阅，对提高书稿的质量起了重要作用，特表示诚挚的感谢。

本书编写时虽力图作到既照顾全面，又突出重点；力图作到从典型情况出发，说明发射动力学的基本理论和方法；并注意到引进新的观点和方法。但是，由于作者水平有限，掌握的资料不够，再加上发射动力学所涉及的知识面较广，所以本书还不能令人满意，可能还有谬误之处，请读者批评指正。

姚昌仁 唐国梁

1985年11月

主要符号表

符号	意义
A	振幅; 横截面积
a	加速度
\bar{a}^t	切向加速度
\bar{a}^n	法向加速度
$B_c(x)$	弯曲刚度
C	粘性阻尼系数
C_r	r 阶模态阻尼系数
D_B	火箭定心部直径
E	拉压弹性模量
e	推力偏心距
$F(t)$	激振力
F_n	法向力
F_t	切向力
F_μ	摩擦力
F_{SP}	火箭自旋力
$f(t_1 t_0)$	单位阶跃函数
G	剪切弹性模量, 动量矩
\bar{G}^I	对 O_I 点的动量矩
\bar{G}_R	火箭弹的动量矩
\bar{G}_I	发射装置动量矩
$H(\omega)$	传递矩阵
h	导轨不平度的波高

$I(x_1)$	相对横轴的惯性矩
$I_p(x_1)$	横截面的极惯性矩
$I_m(x_1)$	结构绕纵轴的转动惯量
i	传动比
J_i	零件 i 的转动惯量
\bar{J}^R	导弹的惯性张量
\bar{J}^L	发射装置的惯性张量
$\underline{\underline{J}}$	惯性张量的等效矩阵
J_x^R	火箭极转动惯量
$J_{z_1}^R$	火箭赤道转动惯量
$J_{x_1}^R \nu_1$	火箭的惯性积
K	刚度系数
K_r	r 阶模态刚度系数
k_n	特征值
l	结构长度
l_0	两定向钮之间的距离
$l_1 l_2$	前、后定向钮到质心的距离
l_3	定向钮到弹纵轴的高度
$M(x_1, t)$	断面 x_1 的弯矩
$M_K(x_1, t)$	断面 x_1 的扭矩
M_s	不平衡力矩
M_δ	推力偏心力矩
M_w	导轨不平引起的惯性力
\bar{M}_{SP}	火箭自旋力矩
$m(x_1)$	单位长度的质量
m_R	火箭质量
m_r	r 阶模态质量

$N(x_1, t)$	断面 x_1 的纵向力	
N_1, N_2	定向钮载荷	
n	过载系数	
n_0	振动衰减系数	
$P(t)$	理想推力	
$P_i^*(t)$	真实推力	
Δp	推力波动分量	
P_a	平衡推力	
P_s	不平衡力	
p	压强	
Q	闭锁力	
Q_i	广义力	
$Q(x_1, t)$	断面 x_1 的剪力	
q_0	风压平均值	
$q(h, t)$	高度为 h 处的风压	
R_s	静不平衡度	
$Ri(t)$	燃气流冲击力	
S_l	导轨滑离长	
S_R	火箭质心相对定向器的位移	
$S(\omega)$	功率谱密度	
$S_q(\omega)$	路面不平的功率谱密度	
T	动能, 转置, 周期	
t_1	火箭滑离时间	
U	位能	
$u(x_1, t)$	断面 x_1 的纵向位移	
$u(h, t)$	高度 h 处的风速	
v	火箭质心的纵向速度	

v_i	火箭滑离速度
W	重量
W_R	火箭重量
W_i	发射装置重量
x_R, y_R	火箭质心坐标
x_i, y_i	发射装置质心坐标
$Y_n(x)$	振型函数
α	火箭攻角; 风的常数因子
β_0	方向瞄准角
β_D	动不平衡角
γ	火箭自旋角
δ	δ 函数; 对数衰减率
δ_P	推力偏心角
δ_{ij}	柔度系数
ε	螺旋导轨的螺距
ζ_r	r 阶模态阻尼比
η	传动效率; 位移
θ_d	扰动角
θ_s	广义坐标
λ	导轨不平度波长
μ	动力系数; 摩擦系数
$\mu_p(t)$	均值
ρ	质量密度
σ	方差
τ	时间间隔
φ	俯仰瞄准角
φ_d	发射装置扰动角

ϕ	相位角
$\varphi(x, t)$	断面 x 的扭转角
ψ	火箭偏角
ω	频率; 角速度
Ω	空间频率

常用矩阵符号表

$[C], \underline{C}$ 阻尼矩阵

$[K], K$ 刚度矩阵

$[M], \underline{M}$ 质量矩阵

$[I]$ 单位矩阵

$[\delta], \underline{\delta}$ 柔度矩阵

$\underline{\lambda}$ 反对称张量

$\dot{\bar{\omega}}_L$ 矢量 $\bar{\omega}$ 在基底 $\bar{e}^{(L)}$ 中对时间导数的矩阵

$\dot{\bar{\Omega}}_R$ 矢量 $\bar{\Omega}$ 在基底 $\bar{e}^{(R)}$ 中对时间导数的矩阵

目 录

主要符号表

第一章 绪论	1
§1-1 概述.....	1
§1-2 弹性振动和冲击引起的动载荷.....	4
一、结构内力的计算方法.....	4
二、弹-架系统工作时的载荷情况.....	7
§1-3 发射精度.....	8
一、基本概念.....	8
二、初始扰动对发射精度的影响.....	10
三、无控飞行中的扰动对发射精度的影响.....	17
§1-4 弹-架系统的动力分析与动态设计.....	19
一、动力分析的基本概念和方法.....	19
二、动态设计的基本概念和步骤.....	22
§1-5 发射动力学的发展简况.....	24
第二章 弹-架系统的动力学模型	28
§2-1 建立动力学模型的方法.....	28
一、子结构分析法.....	29
二、系统识别法.....	33
§2-2 弹-架系统的集中参数模型.....	34
一、发射振动分析用的模型.....	34
二、贮运时系统的动力学模型.....	45
三、瞄准机的动力学模型.....	52
§2-3 弹-架系统的分布参数模型.....	55
§2-4 弹-架系统的有限单元模型.....	60
§2-5 动力学模型的物理参数.....	63
一、用能量法确定等效质量.....	63

二、用集中质量法确定等效质量	68
三、等效刚度的确定	70
四、结构阻尼	74
§2-6 建立系统运动方程的基本方法	76
一、用动静法建立运动方程	76
二、用拉格朗日方程建立运动方程	80
三、矢量-张量分析法的应用	81
§2-7 模态参数的频域识别方法	86
一、结构动力特性的模态表达式	87
二、模态参数的识别	90
§2-8 动力学模型的识别	96
§2-9 模态参数的时域识别方法	102
一、时域模型	102
二、应用问题	105
第三章 弹-架系统振动的激励因素	114
§3-1 概述	114
§3-2 导轨不平直引起的惯性力	117
§3-3 自旋导弹质量分布不均匀引起的惯性力	123
§3-4 推力	132
§3-5 燃气射流的冲击力	140
一、非设计状态的超音速射流的流动结构	141
二、欠膨胀轴对称射流起始段计算	143
三、过膨胀轴对称超音速射流起始段	151
四、射流过渡段计算	156
五、射流基本段计算	159
六、冲击力的计算	160
§3-6 路面激励	162
一、轮式车辆路面谱	163
二、履带车辆路面谱	167
三、空间谱与时间谱之间的关系	168
§3-7 风载荷	169

第四章 集中参数模型的动力分析	172
§4-1 阶跃激励下系统的动力分析.....	172
§4-2 行载激励下二自由度系统的动力分析.....	187
一、弹-架系统的动力学模型.....	187
二、定向扭载荷的确定.....	190
三、导弹运动参数计算.....	193
四、运动方程的近似解.....	198
§4-3 矢量-张量分析在多自由度系统动力分析中的应用.....	211
一、弹-架系统的物理模型.....	212
二、弹-架系统的运动微分方程.....	215
§4-4 行载激励下三自由度系统的动力分析.....	225
一、弹-架系统运动微分方程的建立.....	226
二、弹-架系统振动特性参数计算.....	239
§4-5 研究弹-架系统响应的等效激励法.....	244
§4-6 被动控制发射装置的基本概念.....	249
一、基本原理.....	250
二、被动控制发射装置的结构.....	252
§4-7 导弹在发射台上跳动时的动载荷.....	262
§4-8 随机激励下弹-架系统的动力分析.....	270
第五章 分布参数模型的动力分析	280
§5-1 忽略弹性梁的质量时弹-架系统的动力分析 (一).....	280
一、动力学模型.....	280
二、位移影响函数.....	281
三、导弹运动微分方程.....	289
§5-2 忽略弹性梁的质量时弹-架系统的动力分析 (二).....	293
§5-3 弹-架系统考虑其质量时的动力分析.....	305
一、定向扭载荷的确定.....	306
二、发射过程弹-架系统的振动.....	308
三、导弹在梁上运动时的参数.....	320
§5-4 弹性基础导弹系统的动力分析.....	328
§5-5 导弹-托架系统起竖过程的动力分析.....	334

第一章 绪论

§1-1 概述

我们把发射装置与导弹(或火箭)组成的机械系统称为导弹-发射装置系统, 简称为弹-架系统。实际的弹-架系统是弹性系统, 作用在系统上的外力多为随时间变化的动载荷, 所以工作时会产生振动。和一般机械系统一样, 弹-架系统在外力激励下产生的振动, 根据它们的振动规律, 有可能为下列几种型式:

(1) 周期性振动。激振力可由简谐或周期函数来描述, 振动量是时间的周期性函数;

(2) 瞬态振动。激振力为任意的时间函数, 振动量是非周期性的函数。系统之间动能传递的时间短, 通常持续时间仅仅是系统的几个固有周期;

(3) 冲击。也是一种瞬态振动, 但动能传递的时间更短, 通常小于系统的固有周期;

(4) 随机振动。激振力为随机过程, 振动量不是确定性的, 只能用概率统计法来研究。

这些振动可能出现在系统的贮运过程、发射准备过程及导弹的发射飞行过程中。有可能影响导弹完成主要任务。我们知道, 导弹的主要任务归根到底是要使战斗部按预定精度击中目标, 因而导弹必须具有高的可靠性和精度。弹-架系统的振动有可能成为影响导弹或火箭的可靠性和发射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工作时间和使用条件下无故障工作的概率。不仅指导弹飞行阶段的可靠性，也包括地面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是关心后者，关心所设计的发射装置能否保证可靠的发射。系统的振动可能使设备和机构的正常工作受到干扰，甚至因强度不够而破坏。由此引起的故障可分为两类：

其一是零部件整体性受到破坏引起的故障。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、拆断；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、紧固件松动；气密性受到破坏；继电器触点变动；导弹支于贮运箱中时，悬出部分在运输和发射中产生过大的挠度，有可能使导弹与箱壁相碰；……，这些均属该类故障。

所谓导弹精度，包括发射阶段与控制飞行阶段的精度。发射精度是指发射阶段（导弹起控前的无控飞行段）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与偏差。

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，或增大多联装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的弯曲，导弹滑离后因弹性恢复而出现振

动，从而引起开始飞行段的扰动；某些发射装置，测角仪固联其上，当发射装置振动时，测角仪的瞄准基准随之振动，使受控飞行的导弹随基准变化而变化。

为了提高产品的可靠性和发射精度，在产品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。在现代导弹发射工程中，已把系统的振动问题作为重要的研究内容。早期的产品设计大都假设结构是刚性系统，以刚体静力学为基础，或者仅仅考虑刚性系统在不稳定运动时的惯性力；或者孤立地考虑导弹的局部振动问题。但是，在现在，人们已日益认识到这种设计方法往往不能设计出满足预定战术技术要求的产品。应当考虑到结构的弹性振动问题，把弹-架系统的动力分析和动态设计作为产品设计研究的重要一环。这方面的基本理论和方法正是发射动力学所要解决的问题。

下面进一步阐述发射动力学的主要任务。发射动力学是以导弹(或火箭)-发射装置系统为对象，研究该系统的动力分析和动态设计的基本理论和方法，以满足系统的动态可靠性和发射精度要求。也就是说，要用经济有效的方法，解决系统在工作过程中由于动载作用所产生的问题，以便得到具有预定性能指标的结构。根据产品研制的不同情况，其任务可具体化为如下两方面的内容：

(1) 对正在使用或正在研制中的产品，主要是解决使用或试验中过大的振动带来的问题，以提高产品的性能。例如，解决发射时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、发射装置倾翻等等问题。在这种情况下，可用试验与理论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