

北京理工大学“双一流”建设精品出版工程

Computer Aided Engineering for
Launcher Systems

发射系统CAE分析

傅德彬 陈阵 ○ 编著



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



计算机辅助工程在发射系统中的应用

Computer Aided Engineering for
Launcher Systems

发射系统CAE分析

徐德明 周勇 孙建群

北京理工大学出版社

Beihang University Press

内 容 简 介

本书围绕航天发射系统设计分析中常见的力学问题和常用的计算机辅助分析 (CAE) 方法, 对相关的理论基础、计算方法以及应用模型等进行较为系统的介绍。书中将发射系统 CAE 分析分为三个大类进行阐述: 一是发射气体动力学与计算流体力学分析, 主要对象是燃气射流及其与不同环境的相互作用特性; 二是发射系统结构力学与有限元分析, 主要内容是发射系统的刚强度及动态响应特性; 三是发射动力学与计算多体动力学分析, 重点考察发射系统在发射、运输及操瞄状态下的动力学响应特征。

本书可作为航天发射技术、兵器发射理论与技术等学科专业的学生教材, 也可作为相关领域工程技术人员的参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

发射系统 CAE 分析 / 傅德彬, 陈阵编著. -- 北京:
北京理工大学出版社, 2022. 8
ISBN 978 - 7 - 5763 - 1627 - 8

I. ①发… II. ①傅… ②陈… III. ①航天器-发射
系统-有限元分析-应用软件 IV. ①V55

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2022) 第 153435 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) 68944723 (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 / 保定市中国画美凯印刷有限公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 19.25

字 数 / 452 千字

版 次 / 2022 年 8 月第 1 版 2022 年 8 月第 1 次印刷

定 价 / 79.00 元

责任编辑 / 王玲玲

文案编辑 / 王玲玲

责任校对 / 刘亚男

责任印制 / 李志强

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

发射系统作为火箭、导弹以及其他兵器装备的发射平台，决定着一个国家航天活动和国防保障区域的范围，是航天和国防科技发展的重要组成部分；而航天活动的日益频繁以及新形势下国防建设面临的巨大挑战，又不断对发射系统提出新的要求。随着计算机技术及数值计算方法的发展，计算机辅助分析工程（CAE）正逐渐应用到发射系统设计、分析、评估、使用的各个环节，成为推动航天发射技术向更高层次发展的重要助力。因此，系统归纳、总结发射系统中 CAE 应用的原理和方法，编写供相关领域本科生或研究生学习参考的专门书籍，对提高教育水平和推动学科发展具有重要的意义。

参照教育部相关要求及高等学校教学特点，本书尽力做到将理论、实践与应用相结合，将素材的传统形态与新形态相结合，并力争体现如下特色：①知识结构的系统性。本书围绕发射系统设计应用和评价分析数值研究的主要内容，对发射系统常见流动问题、结构问题以及动力学问题等进行系统的介绍和阐述，保证学习内容的系统性和完整性。②理论方法与实践应用的结合。在系统阐述知识结构的基础上，强调理论、方法与实践应用之间的结合。在具体内容中，以发射系统设计应用的关键问题为导向进行梳理和阐述，并结合实例应用进行分析，如水下发射气液多相流场及发射弹道分析、发射系统载荷及初始扰动特性分析等。③突出新方法与新成果。在内容选择和安排上，突出介绍近年来发射系统计算机辅助分析的新方法及新成果，如动网格技术、发射系统刚柔耦合动力学模型等。④新形态资源的应用。为提高教学效果，增加信息容量，教材中结合现代信息技术融入多种资源。教材中以二维码形式提供了包括实例演示动画、扩展数据及模型信息、交互沟通信息等多种材料。

在内容编排方面，本书从发射系统和 CAE 技术的发展历程入手，阐述发射系统研究的主要内容以及 CAE 技术的应用情况，帮助读者建立发射系统和 CAE 技术的整体概念，并对全书框架脉络形成总体认识。在此基础上，从发射系统涉及的发射气体动力学、结构力学以及发射动力学三个主要力学领域出发，对 CAE 技术应用需要掌握的基本原理和方法进行系统介绍，进而结合近年来新型发射系统设计、研制、使用等环节中的 CAE 应用实例，对发射系统计算机辅助分析的具体方法、流程及典型状

态等进行详细介绍,为结合实例应用的启发式教学提供条件。全书计划分为两篇共7个章节。第一篇为基础篇,包括第1章绪论、第2章发射气体动力学数值模拟基础、第3章发射系统设计与结构有限元基础、第4章发射动力学与计算多体动力学基础。第二篇为应用篇,包括第5章CAE在发射气体动力学中的应用、第6章CAE在发射系统结构分析中的应用、第7章CAE在发射动力学分析中的应用。在实际的教学环节中,可按两种形式进行书中内容的讲授:一是结合书中编排方式,先进行不同力学领域基础知识和计算方法的介绍,再进行CAE应用分析环节的讲授;二是结合不同的力学领域进行授课,即在介绍完第1章绪论后,可将第2章、第5章安排在一起介绍发射气体动力学及CAE应用,将第3章、第6章安排在一起介绍发射系统中的结构力学及CAE应用,将第4章、第7章安排在一起介绍发射动力学及CAE应用。

本书由傅德彬、陈阵编著。傅德彬负责教材大纲的制定、统稿与审定,并完成大部分章节的编写;陈阵完成第7章部分内容编写。何泽鹏、李超艳、刘浩天、杨珺凡等为部分章节进行了实例计算及校核。在编写过程中,得到了北京理工大学宇航学院航天发射技术学科组的大力支持,在此编著者对他们的工作表示衷心感谢。同时,书中参阅了大量国内外相关文献,在此谨向文献作者表示感谢。

由于编著者水平有限,书中可能存在不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编著者

目 录

CONTENTS

基础篇

第 1 章 绪论	003
1.1 发射系统与 CAE 发展概况	003
1.1.1 火箭导弹发射系统	003
1.1.2 CAE 技术的发展及应用	007
1.2 发射系统典型 CAE 分析	010
1.2.1 发射气体动力学分析	010
1.2.2 发射装置结构分析	019
1.2.3 发射动力学响应分析	023
思考题	030
第 2 章 发射气体动力学数值模拟基础	031
2.1 发射气体动力学模型及方程	031
2.1.1 气体流动的基本变量及特性	031
2.1.2 气体流动的控制方程	037
2.1.3 控制方程的定解条件	043
2.2 流动问题的数值计算	047
2.2.1 雷诺平均方法与湍流模型	047
2.2.2 流动方程的数值离散方法	052
2.2.3 流动数值计算模型设置	058

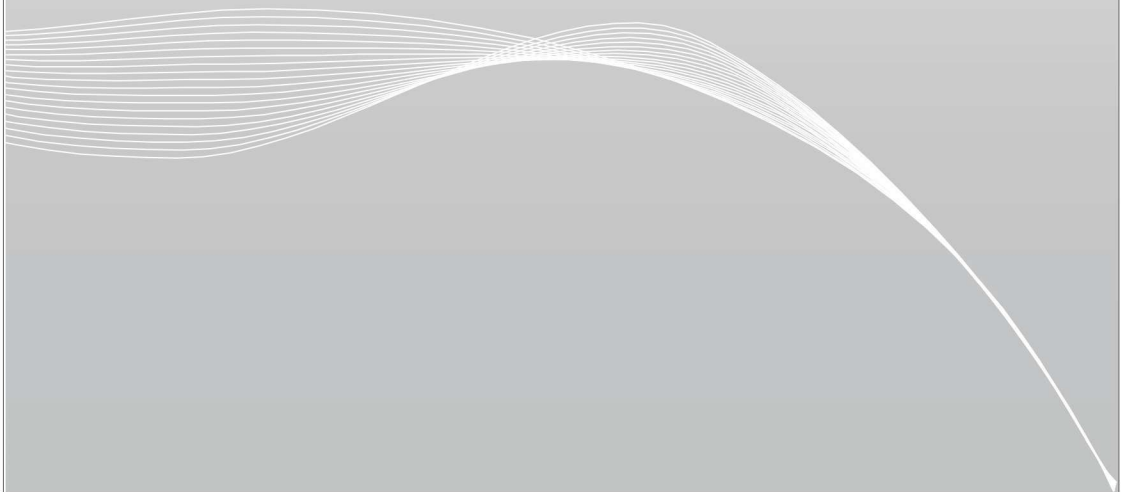
2.2.4 流动分析常用软件与应用流程	065
思考题	068
第 3 章 发射系统设计与结构有限元基础	069
3.1 发射系统结构分析基础	069
3.1.1 结构分析基本变量及关联关系	069
3.1.2 结构力学基本方程与边界条件	073
3.1.3 结构分析基本原理与求解方法	078
3.2 结构有限元分析基础	083
3.2.1 结构有限元分析方法	083
3.2.2 有限元单元性质与边界处理	089
3.2.3 结构动力学有限元分析模型	097
3.2.4 结构分析中的非线性模型	099
3.3 结构分析 CAE 软件应用	106
3.3.1 分析模型及离散方式	106
3.3.2 载荷形式与连接条件	110
3.3.3 计算精度及收敛性	114
3.3.4 结构分析常用软件及应用流程	116
思考题	118
第 4 章 发射系统动力学与计算多体动力学基础	119
4.1 发射系统动力学基础	119
4.1.1 动力学问题的分类和概念	119
4.1.2 运动定律和动力学定理	121
4.1.3 动力学普遍方程	125
4.1.4 多体系统动力学基础	126
4.2 多刚体系统动力学	129
4.2.1 刚体的运动描述	129
4.2.2 约束与约束方程	132
4.2.3 运动学与动力学模型	135
4.2.4 动力学方程的数值方法	138
4.3 发射动力学分析 CAE 软件应用	141
4.3.1 多体动力学工具及应用流程	141
4.3.2 多体系统分析常见问题	144
思考题	149

应用篇

第 5 章 CAE 在发射气体动力学中的应用	153
5.1 超声速燃气射流冲击载荷分析	153
5.1.1 超声速燃气射流冲击特性	153
5.1.2 燃气射流冲击模型与动网格技术	156
5.1.3 燃气射流冲击状态分析实例	159
5.2 水下发射气液多相流场及发射弹道分析	167
5.2.1 水下发射典型流动及作用特性	167
5.2.2 气液多相流与水汽相变模型	172
5.2.3 水下发射多相流场及弹道分析实例	175
5.3 含粒子效应及复燃反应的喷焰流场分析	181
5.3.1 喷焰流动中的粒子效应及计算模型	181
5.3.2 含燃烧化学反应的喷焰流动计算模型	186
5.3.3 含粒子效应及复燃反应的喷焰计算实例	190
5.4 发射气体动力学扩展模型	197
5.4.1 喷焰相变及尾迹云模型	197
5.4.2 空间稀薄环境喷焰流场	203
思考题.....	210
第 6 章 CAE 在发射系统结构分析中的应用	211
6.1 结构分析与结构优化	211
6.1.1 结构分析模型及载荷形式	211
6.1.2 发射系统结构优化方法	216
6.1.3 结构分析及优化实例	225
6.2 发射系统动态响应分析	231
6.2.1 结构动态特性与解算方法	231
6.2.2 振动与冲击响应分析	235
6.2.3 动态响应分析实例	241
6.3 发射系统应用结构特性分析	247
6.3.1 高性能构件设计分析	247
6.3.2 多层复合结构分析	254
6.3.3 结构性能拓展分析	259
思考题.....	264

第 7 章 CAE 在发射动力学分析中的应用	265
7.1 发射过程动力学响应分析	265
7.1.1 发射动力学分析流程及模型	265
7.1.2 发射系统刚柔耦合模型	274
7.1.3 发射动力学分析实例	278
7.2 发射系统的其他动力学响应	285
7.2.1 发射系统运输动力学分析	285
7.2.2 发射系统操瞄动力学响应	290
7.2.3 发射系统典型机构响应分析	294
思考题.....	297
参考文献	299

基础篇



第 1 章

绪 论

1.1 发射系统与 CAE 发展概况

1.1.1 火箭导弹发射系统

通常来讲，火箭导弹发射系统是指火箭导弹进入临射状态到点火起飞并飞抵起控点过程中，一直与导弹保持联系并处于工作状态的所有技术设备。在发射前，发射系统完成对火箭导弹的固定、支撑、射前检查和准备工作；发射过程中，发射系统按照指挥控制系统的指令发射导弹，并赋予导弹初始射向和离轨速度；发射完成后，发射系统与装弹设备一起完成弹药再装填。发射系统是火箭导弹武器系统的重要组成部分，主要完成火箭导弹的可靠发射，并保证要求的发射精度，其结构与组成、功能与性能直接影响武器系统的战术技术性能和作战效能。

为认识和了解火箭导弹发射系统的发展历程，这里分别从发射系统发展的主要阶段和主要形式入手，对其进行简要介绍。

（一）发射系统发展的主要阶段

最早的火箭发射装置可追溯至我国古代三国时期，这里主要关注第二次世界大战以来现代火箭导弹武器兴起后的发射系统发展情况。现代火箭导弹武器兴起的代表是德国 V - I 和 V - II 导弹，如图 1.1.1 所示，在此后的半个多世纪里，火箭导弹武器在世界各国得到飞速发展，与此相对应的发射系统也经历了多个不同发展阶段。



图 1.1.1 德国 V - II 导弹及发射系统

(1) 第一阶段：第二次世界大战至 20 世纪 50 年代末期

在这一阶段，液体导弹发动机及控制等方面取得了重大突破，研制出了第一代地 - 地液体战略导弹。第一代战略弹道导弹主要采用地面固定发射和地下井发射，发射系统设备众多、结构庞大，需要专门的液体燃料加注系统，发射准备时间长，生存能力较低。

(2) 第二阶段：20 世纪 50 年代末期至 60 年代末期

这一阶段火箭导弹发射方式主要是地面阵地发射、地下井自力发射和潜艇水下发射。由于这一时期火箭导弹大多大而笨重，火控系统由多部单功能雷达组成，系统结构复杂，从而使得地面发射系统功能分散、多车配套，不得不采用固定或半固定阵地发射的机制，这些地面发射系统大多采用单装倾斜发射。这个阶段的地下井自力发射、潜艇水下发射和地面拖车牵引式机动方式，发射系统结构复杂，系统反应时间较长，只能对付低速中远程单个目标。第二代发射系统的战术技术指标有了一定的提高，采用潜艇发射有了一定的机动性，提高了生存能力。

(3) 第三阶段：20 世纪 60 年代末期至 80 年代末期

到 20 世纪 60 年代末期，受美苏争霸和当时的冷战环境影响，火箭导弹武器系统开始得到长足的发展。在这一阶段，火箭导弹发射系统类型种类明显增加，指标性能均有了较大提升。在发射动力上，自力发射、外力发射（弹射）均得到了应用；在发射形式上，倾斜发射、垂直发射均已出现；在阵地平台上，涵盖了潜载发射、舰面发射、地下井发射、公路机动发射、机载发射等不同类型的。这个阶段早期的裸弹发射已向箱式或筒式发射方式发展，发射系统具有了较高的生存能力、快速反应能力和较强的环境适应能力。

(4) 第四阶段：20 世纪 90 年代至今

20 世纪 90 年代以来，火箭导弹发射系统反应能力及生存能力均得到了较大的发展，新型发射方式得到了较多的研究和应用。在这一阶段，通用化、模块化、集成化设计应用思路得到广泛认可，贮运发一体化技术、箱装模块互换技术、快速调平起竖技术、共架技术等得到长足的发展和运用，低特征发射、电磁弹射等新型发射技术得到深入的研究和实践，无人值守平台、铁路机动平台、天基平台等新型发射平台也先后涌现。这个阶段发射系统的发展，为火箭导弹武器系统以及航天技术发展提供了有力的支撑。

(二) 发射系统的主要形式

由于火箭导弹类型、发射方式、作战使命等不同，发射系统的组成与结构也有较大区别。火箭导弹的发射方式按发射地点，可分为海基发射、陆基发射和空基发射；按发射姿态，可分为倾斜发射、垂直发射、水平发射等；按发射动力，可分为自力发射、外力发射等；按发射装置是否机动，可分为固定发射和机动发射。依据发射方式。发射系统的主要分类如图 1.1.2 所示。

这里从这些发射方式出发，对发射系统的主要类型和形式进行介绍。

(1) 发射姿态

倾斜发射是指导弹纵轴线与发射点的大地水平面之间呈一定倾角的发射方式。倾斜发射可节约发射后火箭导弹进行程序转弯时所需的横向操控力，有利于减少能量消耗，增大射程；倾斜发射的火箭导弹通常在稠密的大气层中飞行，可充分利用空气动力的作用，实现导弹的可操纵性和稳定性；此外，倾斜发射弹道曲率较小，飞行路径、飞行时间相对较短，有利于攻击活动目标。

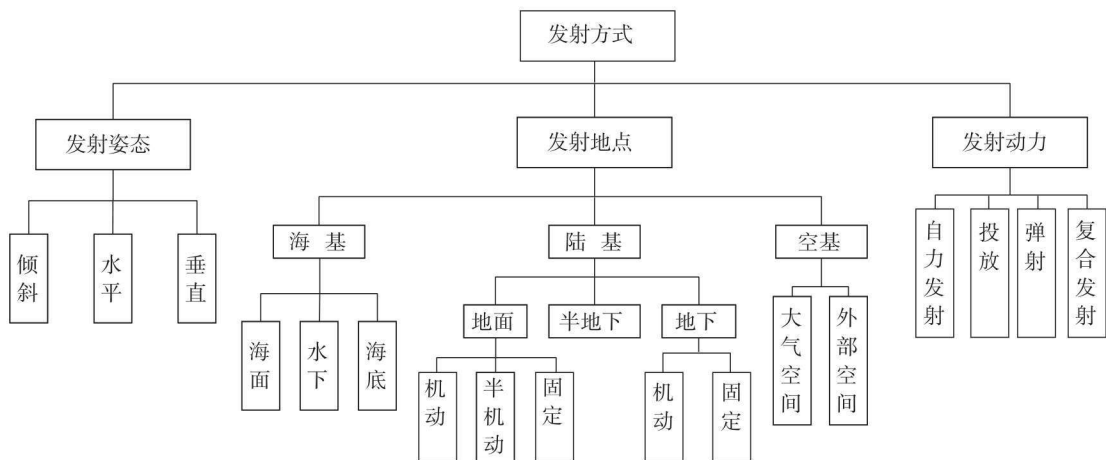


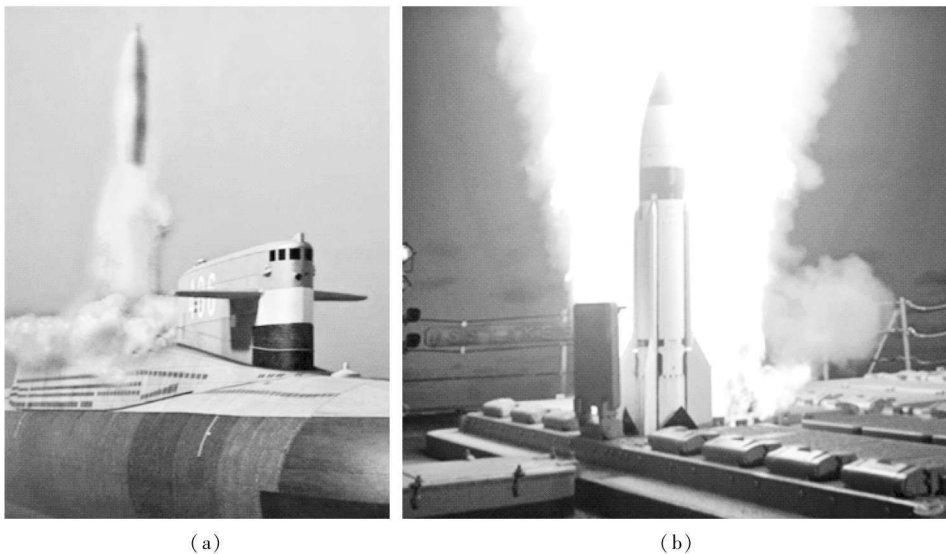
图 1.1.2 依据发射方式的发射系统分类

垂直发射是指火箭导弹呈垂直状态的发射方式。垂直发射的发射装置结构简单而紧凑，并具有如下特点：在推重比较小的情况下，火箭导弹也能正常起飞；火箭导弹在大气层中飞行时间短，动力损失小；燃气流排导较容易，有害作用区域小，对发射场地的空间要求不高；可以减少发射盲区；垂直发射的主要不足是，在近距离攻击活动目标时，会增大导弹杀伤区的近界，影响攻击效果。

水平发射一般采用在潜艇上水平安装现成的鱼雷管作为发射装置，其特点是能够大量节省导弹发射装置研究经费，缩短研制周期，所以，潜艇水平发射导弹方式也得到广泛采用。

(2) 发射地点

海基发射是指以海洋作为火箭导弹发射基点的发射，主要分为潜载水下发射和舰载发射，如图 1.1.3 所示。水下发射通常由携带武器的潜艇实现，具有航速高、自给力大、续航



(a)

(b)

图 1.1.3 海基发射示例

(a) 潜载水下发射；(b) 舰载发射

力强，以及能在水下长期隐蔽活动等优点。水下发射技术非常复杂、技术含量高、难度大且涉及学科范围广，除需解决武器与发射平台的匹配技术外，还需解决水环境适应技术、水动力、水弹道控制技术、发射控制技术、水下发射试验与测试技术等关键技术。舰载发射主要由各类舰船上的专用发射系统实现，舰载导弹在早期多采用倾斜发射，目前多采用垂直发射方式。舰载垂直发射具有高发射率、载弹量大、无发射盲区、模块化、通常化程度高等特点。

陆基发射一般分为地下井发射和车载发射两种发射方式，如图 1.1.4 所示。采用经过加固的地下井发射具有实施稳定、命中精度高、攻击力强等特点，但随着侦察手段的日益完善，对地下井发射的隐蔽性提出了较大挑战。通过公路、越野或铁路机动的发射增加了发射系统的机动能力，但对公路、铁路、桥梁等具有较强的依赖性。地面机动发射的火箭导弹发射车涉及多种专业技术，包括机械设计、结构力学、流体力学、电源系统、车控系统、材料学、制造工艺等。

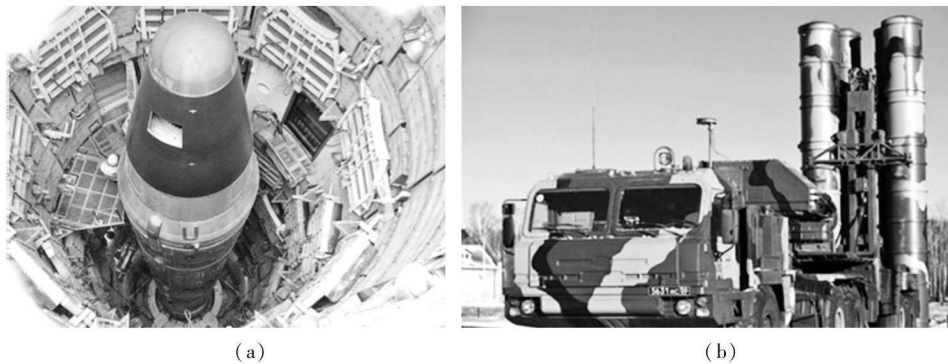


图 1.1.4 陆基发射装置示例

(a) 地下井发射系统；(b) 车载发射装置

机载发射系统是现代飞机、导弹武器系统的一个重要组成部分，它将随飞机导弹系统的发展而协调和同步地发展，依据导弹的安装方式，可分为内埋式和外挂式，如图 1.1.5 所示。为使导弹能搜索和跟踪目标并保证能使导弹发射离机，目前主要采用两种发射装置：一是投放装置，在发射时解除对导弹的固定约束，使其在重力作用下运动至安全距离后点火飞行；二是弹射发射装置，将导弹以一定的初速弹离载机，至安全距离后点火飞行。导弹发射

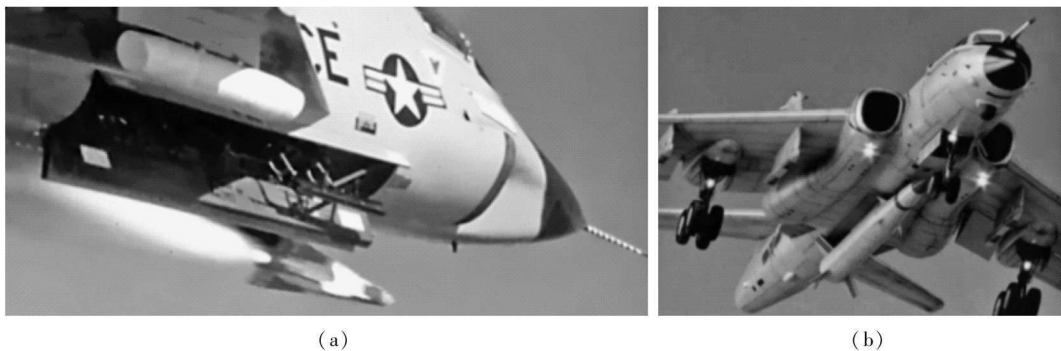


图 1.1.5 机载导弹示例

(a) 内埋式导弹发射；(b) 外挂式导弹

离机瞬间的姿态直接影响其分离特性、载机的飞行安全和导弹的战术效果，是机载发射研究关注的重要内容。

(3) 发射动力

自力发射也称为热发射，是指火箭导弹依靠自身发动机产生的推力离开发射装置的发射方式。自力发射具有如下一些典型特点：发射动力由火箭导弹自身发动机产生，技术成熟，发射可靠性高；发射装置结构简单、使用方便；自力发射排出大量高温高速燃气流，燃气流核心区温度可达 1 000 ℃ 以上，对发射平台及周围环境产生很大影响，考虑燃气流的排导及防护是自力发射需要关注的重要内容。

外力发射也称冷发射或弹射，是指依靠外力将火箭导弹弹离发射装置后，火箭导弹的发动机点火继续飞行的发射方式。外力发射具有如下典型特点：火箭导弹在发动机点火前便获得了一定的初速度；火箭导弹安装在发射筒内，能改善贮存条件；不需要考虑燃气流对发射装置的烧蚀，冲刷问题和导流、排焰、燃气流处理等问题，因而对发射设施及周围环境的适应性较强；发射装置结构较为复杂，火箭导弹发射后，还需要进行尾罩分离及发动机点火等动作，对可靠性的要求很高。

1.1.2 CAE 技术的发展及应用

CAE (Computer Aided Engineering, 计算机辅助工程或计算机辅助分析) 技术是以数值分析为基础，并综合计算力学、工程管理学以及现代计算机技术形成的一门综合型、知识密集型学科。CAE 技术能够对产品进行物理和力学性能的分析、模拟、预测及评价，能够及早了解设计方案的实施性能，了解产品运行的详细状态及演变机制，在为创新和优化提供基础的同时，能够提高设计质量、降低研究开发成本、缩短研究开发周期。随着 CAE 技术的不断发展和推广应用，CAE 在科学研究和工程实践中发挥着越来越重要的作用，已成为科学研究人员和工程技术人员需要掌握的重要研究手段。

为了解 CAE 的发展及应用情况，这里从 CAE 发展情况、技术种类以及应用流程等方面入手，对其进行简要介绍。

(一) 发展情况

CAE 技术基础之一数值分析作为一种求解复杂问题的数学方法发展已有几百年的时间，作为早期 CAE 主要技术种类的有限元法也可追溯到 20 世纪 50 年代，但 CAE 技术的发展还依赖于现代计算机及通用化软件的出现和发展。一般来讲，CAE 技术的发展直接体现为 CAE 软件的兴起和应用。

(1) 发展历程

早期的 CAE 软件只是计算处理特殊单一问题的简单程序，到 20 世纪 60 年代，开始出现大型通用 CAE 软件。在此期间，世界三大 CAE 软件公司 MSC、SDRC 和 ANSYS 先后成立。1963 年，MSC 公司开发了 SADSAM 结构分析软件，并在 1965 年参与美国国家航空航天局发起的计算结构分析方法研究，SADSAM 更名为 MSC/NASTRAN。1967 年，SDRC 公司成立，并在 1971 年推出商用有限元分析软件 SuperTab。1970 年，SASI 公司成立，后来重组并改为 ANSYS 公司，开发了 ANSYS 通用有限元分析软件。

20 世纪 70—80 年代是 CAE 技术的蓬勃发展时期，这期间许多 CAE 软件公司相继成立，如致力于发展高级工程分析通用有限元程序的 MARC 公司；致力于机械系统仿真软件开发

的 MDI 公司；针对大结构、流固耦合、热及噪声分析的 CSAR 公司；致力于结构、流体、流固耦合分析的 ADIND 公司等。

进入 20 世纪 90 年代以来，CAE 开发商为满足市场需求和适应计算机硬、软件技术的迅速发展，对软件的功能、性能，特别是用户界面和前后处理能力进行了大幅扩充，对软件的内部结构和部分模块，特别是数据管理和图形处理部分，进行了重大改造，使得 CAE 软件在功能、性能、可用性和可靠性以及对运行环境的适应性方面基本满足了用户的需要，它们可以在超级并行机、分布式微机群、大/中/小/微各类计算机和各种操作系统平台上运行。

随着我国科学技术现代化水平的提高，CAE 技术也在我国蓬勃发展起来。近年来，CAE 技术研究开发和推广应用在许多行业和领域已取得了一定的成绩。但从整体来看，研究和应用的水平还不高，某些方面与发达国家相比仍存在差距。

(2) 应用情况

早期的 CAE 技术通常指有限元分析技术，一般用于结构分析领域。随着 CAE 的技术发展和软件推广，目前 CAE 已广泛应用于结构力学、动力学、热力学、流体力学、电路学、电磁学等不同领域以及多种学科综合交叉领域。而从工业领域看，现代 CAE 技术已在航空航天、国防军工、核工业、石油化工、土木工程、铁道机械制造，以及能源、汽车、交通、造船、地矿、电子、生物医学、轻工业、水利等学科领域得到了广泛的应用研究。CAE 技术在工程中的典型应用见表 1.1.1。

表 1.1.1 CAE 在工程中的典型应用

应用领域	稳态问题	动态问题	特征值问题
结构力学	结构刚强度，含梁、板、壳结构分析，复杂或混杂结构分析，二维或三维应力分析等；热力耦合分析	应力波的传播，结构对于瞬态载荷的动态响应，热弹性力学与热黏性力学	结构的稳定性，结构的固有频率和振型，线性黏弹性阻尼
流动与传热	定常流动，含流体的势流、黏性流动、空气绕流、喷管流动、射流流动等	扰动波的传播，非定常流动，含瞬态演变流动（如湍流涡生成发展过程）、非定常边界流动（如级间分离）及发射流动等	刚性或柔性容器中流体的晃动，大型水系波动
动力学	平衡分析	运动学与动力学分析，含机构动力学、机械运动受力状态、振动响应特性等	动力学系统的模态与振型
其他（电磁学、声学、光学等）	二维或三维静态电磁场分布、声压分布、声辐射分析、光学辐射传输分析等	二维或三维时变、高频电磁场分析，瞬态声压分析，声辐射及声传播分析，瞬态光学辐射分析	—

(二) 技术种类

CAE 的技术种类很多，既包括传统用于结构分析的有限元法、边界元法，也包括主要用于流动与传热分析的有限差分法、有限体积法等。随着复杂系统和多体系统建模分析技术