

弹道导弹与运载火箭 总体设计

甘楚雄 刘翼湘 编著

国防工业出版社

V421-1
1003-1

V421-1
1003

弹道导弹与运载火箭 总体设计

甘楚雄 刘冀湘 编著



一九九六年九月廿七日



30753084

国防工业出版社

·北京·

753084

图书在版编目(CIP)数据

弹道导弹与运载火箭总体设计/甘楚雄,刘冀湘编著.
—北京:国防工业出版社,1996.1
ISBN 7-118-01449-4

I. 弹… II. ①甘…②刘… III. ①弹道导弹-系统设计②运载火箭-系统设计 IV. ①TJ760.2②V421.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 03582 号



国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 10% 267 千字
1996 年 1 月第 1 版 1996 年 1 月北京第 1 次印刷
印数:1—1500 册 定价:16.70 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。

4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版,随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第二届评审委员会组成人员

名誉主任委员： 怀国模
主任委员： 黄 宁
副主任委员： 殷鹤龄 高景德 陈芳允
 曾 铎
秘 书 长： 刘瑄德
委 员： 尤子平 朱森元 朵英贤
(按姓氏笔画为序) 刘 仁 何庆芝 何国伟
 何新贵 宋家树 张汝果
 范学虹 胡万忱 柯有安
 侯 迁 侯正明 莫梧生
 崔尔杰

前 言

弹道导弹与运载火箭总体设计,是多学科的综合应用。运用系统工程等现代设计理论与方法,综合航天领域各学科的专业技术,指导弹道导弹与运载火箭技术设计的全过程,是协调各分系统设计的依据。因此,不仅专门从事火箭总体设计的专家要掌握,而且从事分系统设计的专家,从事管理、使用导弹火箭系统的人员,也必须具备总体设计的基础知识。

本书对弹道导弹与运载火箭总体设计的基本理论和方法有比较全面深入的阐述,对近年来逐步发展的现代设计理论和方法(系统工程理论、现代优化设计理论、计算机仿真与辅助设计理论等),如何在火箭总体设计中推广应用作了适当的介绍。全书共分 10 章,内容涉及概论、战术技术要求分析与论证、总体方案分析、总体参数优选与总体性能估算、质量模型与质量特性分析计算、轨道及参数优化设计、气动外形设计及结构布局、载荷分析计算及可靠性设计等,并在最后汇集整理了关于弹道导弹总体设计阶段的一个大型练习,以使读者通过练习,系统地回顾和应用所学的内容和方法,达到初步掌握基本内容的目的。

应当指出,本书的内容仅仅涉及导弹与火箭本身的总体设计工作,并未包含导弹与火箭武器系统的全部总体设计内容。

在本书编写过程中,参考了宇航出版社出版的导弹与航天丛书《总体设计》(上)一书,它给我们的编写工作提供了宝贵的素材和经验,使我们选编的内容更加接近工程设计实践的要求,在此深表谢意。

本书由甘楚雄教授主编并审校,刘冀湘同志参加部分章节的

编写工作。由于水平有限,书中缺点错误在所难免,不妥之处敬请读者批评指正。

编 者

1993年9月于长沙国防科大

目 录

| | |
|-----------------------------------|----|
| 符号说明 | 1 |
| 第一章 概论 | 7 |
| 1.1 弹道导弹武器系统和火箭运载系统 | 8 |
| 1.1.1 弹道导弹 | 8 |
| 1.1.2 运载火箭 | 10 |
| 1.1.3 导弹武器系统和火箭运载系统 | 11 |
| 1.2 弹道导弹与运载火箭的组成、功能和典型的总体布局 | 12 |
| 1.2.1 组成与功能 | 12 |
| 1.2.2 弹道导弹与运载火箭的典型总体布局 | 15 |
| 1.3 弹道导弹与运载火箭研制依据 | 19 |
| 1.3.1 弹道导弹武器系统设计的基本要求 | 19 |
| 1.3.2 运载火箭的设计要求 | 21 |
| 1.4 弹道导弹与运载火箭的研制程序 | 23 |
| 1.5 弹道导弹与运载火箭的总体设计 | 24 |
| 1.5.1 总体设计特点和设计思想 | 24 |
| 1.5.2 总体设计的基本内容 | 26 |
| 第二章 战术技术要求的分析论证 | 30 |
| 2.1 弹道导弹的作战性能要求 | 30 |
| 2.1.1 射程 | 30 |
| 2.1.2 威力 | 31 |
| 2.1.3 精度 | 35 |
| 2.1.4 弹道导弹的可靠性指标 | 41 |
| 2.2 弹道导弹的战斗使用要求 | 42 |
| 2.2.1 生存能力 | 42 |
| 2.2.2 突防能力 | 43 |
| 2.2.3 运输维护性能 | 45 |
| 2.2.4 操作使用性能 | 45 |

| | | |
|--------------------------------------|-------------------------|------------|
| 2.3 | 生产经济性要求 | 46 |
| 第三章 弹道导弹与运载火箭的总体方案 | | 47 |
| 3.1 | 概述 | 47 |
| 3.2 | 火箭的总体方案 | 48 |
| 3.2.1 | 火箭的形式 | 48 |
| 3.2.2 | 级数的选择 | 50 |
| 3.2.3 | 有效载荷方案 | 56 |
| 3.2.4 | 推进剂种类和发动机系统方案 | 60 |
| 3.2.5 | 发动机推力向量控制方案 | 62 |
| 3.2.6 | 制导系统方案 | 65 |
| 3.2.7 | 分离系统方案 | 69 |
| 第四章 弹道导弹与运载火箭的质量模型与质量方程 | | 82 |
| 4.1 | 火箭的质量模型 | 82 |
| 4.2 | 装有液体火箭发动机的火箭质量方程 | 83 |
| 4.2.1 | 发动机结构质量 | 84 |
| 4.2.2 | 结构舱段的质量 | 84 |
| 4.2.3 | 推进剂箱体结构质量 | 85 |
| 4.2.4 | 推进剂非工作储量 | 85 |
| 4.2.5 | 第 i 级子火箭推进剂工作储量 | 86 |
| 4.3 | 装有固体火箭发动机的火箭质量方程 | 87 |
| 4.3.1 | 固体火箭发动机的结构质量 | 87 |
| 4.3.2 | 固体火箭的尾段、级间段等的质量 | 88 |
| 4.3.3 | 第 i 级推进剂质量 | 88 |
| 4.4 | 火箭部件的质量分析 | 89 |
| 4.4.1 | 液体推进剂贮箱的质量分析 | 90 |
| 4.4.2 | 加强圆柱壳体轴压下的质量 | 94 |
| 4.4.3 | 截锥壳的质量 | 95 |
| 4.5 | 固体火箭发动机结构的质量 | 95 |
| 4.6 | 质量方程系数的精度对射程的影响 | 101 |
| 第五章 弹道导弹与运载火箭的飞行轨道设计 | | 106 |
| 5.1 | 飞行轨道设计的概念 | 106 |
| 5.2 | 火箭飞行运动坐标系及其受力分析 | 107 |
| 5.3 | 火箭主动飞行段的运动微分方程 | 109 |
| 5.4 | 火箭被动飞行段的运动微分方程 | 111 |

| | | |
|--------------------------------------|-----------------------------|------------|
| 5.5 | 火箭主动飞行段俯仰角程序的选择 | 121 |
| 5.5.1 | 对俯仰角程序选择的要求 | 121 |
| 5.5.2 | 俯仰角程序的选择方法 | 121 |
| 5.6 | 火箭主动飞行段运动微分方程参量的相对化处理 | 126 |
| 5.7 | 运载火箭的飞行轨道设计 | 130 |
| 第六章 弹道导弹与运载火箭总体优化设计 | | 137 |
| 6.1 | 总体优化设计的概念 | 137 |
| 6.2 | 总体设计参数的选择与优化分析 | 139 |
| 6.2.1 | 多级火箭的最优级间质量比 | 139 |
| 6.2.2 | 火箭的初始推重比 P_0 的选择 | 144 |
| 6.2.3 | 火箭的最大直径和各级长细比的选择 | 150 |
| 6.3 | 弹道导弹与运载火箭总体设计参数综合优化 | 154 |
| 6.3.1 | 目标函数选择 | 154 |
| 6.3.2 | 设计参数与方程 | 155 |
| 6.3.3 | 优化方法及编程特点 | 156 |
| 6.3.4 | 举例 | 157 |
| 6.4 | 弹道导弹与运载火箭的最优飞行轨道问题 | 159 |
| 6.4.1 | 最优过程问题的提出 | 159 |
| 6.4.2 | 变分法和极大值原理 | 163 |
| 6.4.3 | 弹道导弹的弹道优化设计分析 | 169 |
| 6.4.4 | 动态规划法及其在总体设计中的应用 | 185 |
| 第七章 弹道导弹与运载火箭的外形设计与结构布局 | | 198 |
| 7.1 | 火箭外形设计与结构布局的基本要求 | 198 |
| 7.2 | 火箭弹体与翼面的空气动力特性分析 | 199 |
| 7.2.1 | 火箭的外形特点 | 200 |
| 7.2.2 | 弹体与翼面的空气动力特性 | 203 |
| 7.3 | 火箭在大气中飞行的稳定性分析 | 215 |
| 7.3.1 | 弹体的稳定度 | 216 |
| 7.3.2 | 弹体的纵向稳定性分析 | 217 |
| 7.4 | 火箭外形参数的确定方法 | 223 |
| 7.4.1 | 头部外形参数的确定 | 223 |
| 7.4.2 | 弹身外形参数的确定 | 225 |
| 7.5 | 结构布局与计算机辅助部位安排 | 229 |
| 7.5.1 | 部位安排的基本要求 | 229 |

| | |
|---------------------------------------|------------|
| 7.5.2 计算机辅助部位安排 | 231 |
| 第八章 弹道导弹与运载火箭飞行中的载荷计算与分析 | 236 |
| 8.1 火箭飞行中的载荷分析 | 236 |
| 8.1.1 火箭飞行中作用在弹体上的载荷及其分类 | 236 |
| 8.1.2 火箭飞行中作用在弹体上的气动载荷分析 | 237 |
| 8.1.3 火箭飞行中作用在弹体上的气动载荷计算 | 240 |
| 8.1.4 火箭飞行中作用在翼面上的气动载荷分布 | 243 |
| 8.2 过载系数的概念 | 246 |
| 8.3 主动飞行段中轴向载荷分析计算 | 248 |
| 8.4 主动飞行段中的横向载荷分析计算 | 251 |
| 8.5 扰动存在时弹体横向载荷分析 | 256 |
| 8.5.1 风对横向载荷的影响 | 256 |
| 8.5.2 风的扰动对弹体横向过载系数的影响 | 258 |
| 8.6 弹体的纵向与横向振动分析 | 260 |
| 8.6.1 弹体的纵向自由振动特性分析 | 260 |
| 8.6.2 弹体纵向受迫振动特性分析 | 266 |
| 8.6.3 弹体的横向振动特性分析 | 267 |
| 8.6.4 弹体横向受迫振动分析示例 | 270 |
| 第九章 弹道导弹与运载火箭的可靠性分析与设计 | 273 |
| 9.1 导弹与运载火箭可靠性的基本概念 | 273 |
| 9.1.1 可靠性的定义及其重要性 | 273 |
| 9.1.2 可靠性的主要指标 | 273 |
| 9.1.3 系统可靠性工作程序 | 275 |
| 9.2 导弹与运载火箭零部件的可靠性 | 276 |
| 9.3 典型系统的可靠性模型 | 284 |
| 9.3.1 串联模型 | 285 |
| 9.3.2 并联模型 | 286 |
| 9.3.3 串并联式系统 | 287 |
| 9.4 导弹与运载火箭系统的可靠性设计 | 287 |
| 9.4.1 导弹系统可靠性指标的确定 | 288 |
| 9.4.2 可靠性指标的分配 | 290 |
| 9.4.3 提高导弹系统固有可靠性的设计技术 | 292 |
| 9.5 导弹与运载火箭系统的可靠性评估 | 295 |
| 第十章 弹道导弹总体设计示例 | 299 |

| | | |
|------|--------------------------|-----|
| 10.1 | 弹道导弹总体设计及其模型 | 299 |
| 10.2 | 弹道导弹总体设计的基本步骤与基本方法 | 301 |
| | 参考文献 | 316 |

符号说明

- A ——核物质的 TNT 当量;振动的振幅
- A_F ——弹射器所作的功
- a ——弹着点散布中心坐标;表格函数的参数
- b ——弹着点散布中心坐标;表格函数的参数;推进剂燃烧产物多变指数的函数
- C ——产品成本;弹簧刚度系数
- C_P ——生产成本
- C_u ——使用成本
- C_z ——综合成本
- c_D ——锥形头部波阻系数
- c_{DF} ——蛋形头部波阻系数
- c_f ——平板摩擦阻力系数
- c_{fb} ——弹体摩擦阻力系数
- c_N ——法向力系数
- c_x ——火箭阻力系数
- c_{xh} ——头部阻力系数
- c_{xk} ——分离级阻力系数
- c_y ——火箭升力系数
- c_y^a ——升力系数对攻角 α 的导数
- D ——弹体直径;代价函数
- D_h ——弹头端头直径
- d ——截锥体小头直径
- E ——火箭载荷比;材料弹性模量;单位质量的机械能

- E_x —— x 方向的公算偏差
 E_y —— y 方向的公算偏差
 e ——自由飞行段运动方向的偏心率
 F ——分离力;结构的承载能力;弹簧的截面积
 F_m ——质量力
 F_s ——表面力
 f ——火药力;可靠性中成败型子样失败数
 $f(t)$ ——故障密度函数
 G ——重力;结构的载荷
 g ——重力加速度
 $g[\cdot]$ ——约束条件
 H ——哈密顿函数
 h ——动量矩
 I ——发动机总冲;可靠性比例因子
 I_{sp} ——发动机比冲
 J ——转动惯量
 K ——火箭全射程与椭圆弹道射程之比值;质量方程中的经验系数;头锥母线形状常数
 K_c ——固体发动机质量与总冲的统计比例系数
 K_{cy} ——圆柱壳质量方程的统计修正系数
 k ——绝热指数;安全系数
 L ——火箭的全射程
 L_e ——椭圆弹道射程
 l ——部件的结构长度
 \bar{l} ——长细比
 l_h ——头部长度
 M ——质量
 Ma ——马赫数
 Ma_b ——附面层外流马赫数
 M_z ——俯仰力矩

m ——质量

m_0 ——火箭的总质量

m_c ——火箭在发动机熄火时的质量

\bar{m}_c ——火箭的结构质量比

m_{ca} ——末级控制设备质量

m_{cd} ——封头质量

m_d ——结构质量

m_{en} ——发动机结构质量

m_{in} ——隔热层质量

m_p ——推进剂质量

m_{pb} ——推进剂贮箱总质量

m_{pe} ——有效载荷质量

m_{re} ——弹头再入质量

m_t ——火箭尾段, 仪表舱, 电缆网等质量

m_{ish} ——战斗部质量

N ——法向力

N_i^0 ——质量方程中无因次统计系数

N_i —— i 级火箭结构质量系数

$N(t)$ ——可靠性中正常工作零件数

n ——级数; 试验次数; 过载系数

n_{x1}, n_{y1} ——过载系数在弹体坐标轴上的分量

P ——发动机推力

P_1 ——单发命中概率

P_{an} ——突防概率

P_g ——制导概率

P_n —— n 发命中概率

P_w ——威力不小于规定值的概率

P_m ——火箭截面载荷系数

P_{sp} ——发动机比推力

- $\bar{P}_0 = P_0 / m_0 g_0$ —— 火箭初始推重比
 P^* —— 产品合格率的无偏点估计
 P_i^*, P_u^* —— 可靠度上、下限
 p —— 压强; 椭圆方程中的半通径
 p_H —— 初始燃气压力
 p_a —— 喷管出口断面之大气压强
 p_e —— 喷管出口断面之气流压强
 Q —— 剪力
 q —— 速压头, 弹头 TNT 当量
 q_x —— 横向载荷沿 x 轴的分布
 R —— 弹体半径; 离爆心距离; 空气动力合力
 R_{ch} —— 参数型故障系统的参数可靠度
 R_z —— 弹头威力半径
 R_t —— 目标半径
 $R(t)$ —— 可靠度
 r —— 推进剂混合比
 S —— 参考面积
 S_{bh} —— 弹头底部面积
 S_{bp} —— 弹体侧向投影面积
 S_a —— 喷管出口面积
 S_{kp} —— 喷管喉部面积
 S_{max} —— 弹体最大横截面积
 S_{ts} —— 贮箱壳体面积
 s —— 成败型子样成功数
 T —— 温度; 动能
 T_r —— 气流恢复温度
 T_w —— 物面平均温度
 T_δ —— 附面层外气流静温
 t —— 时间