



国防特色教材·航空宇航科学与技术

# 战术导弹总体设计

ZHANSHU DAODAN ZONGTI SHEJI

——○于剑桥 文仲辉 梅跃松 龙腾 编著○——

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 哈尔滨工业大学出版社  
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社



国防特色教材·航空宇航科学与技术

# 战术导弹总体设计

于剑桥 文仲辉 梅跃松 龙腾 编著

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 哈尔滨工业大学出版社  
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社

## 内 容 简 介

本书从闭环有控动力学系统角度建立了导弹总体分析与设计的基本框架,对战术导弹总体设计的基本概念、原理和方法作了系统的阐述。

其主要内容包括:战术导弹战术技术要求分析、战术导弹总体方案设计步骤及数据流管理、导弹总体参数设计、导弹外形设计、导弹部位安排设计、导引弹道分析、战术导弹动力学建模及动力学特性分析、滚转导弹动力学特性分析、战术导弹制导控制系统分析与设计、增益调度技术及导弹总体多学科设计优化。

本书可作为高等学校飞行器设计与工程专业本科生及相关专业研究生的教材,也可供从事导弹设计工作的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

战术导弹总体设计 / 于剑桥等编著. — 北京:北京航空航天大学出版社,2010.6

ISBN 978-7-5124-0092-4

I. ①战… II. ①于… III. ①战术导弹—总体设计  
IV. ①TJ761.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 089267 号

版权所有,侵权必究。

## 战术导弹总体设计

于剑桥 文仲辉 梅跃松 龙 腾 编著

责任编辑 刘晓明

\*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:bhpress@263.net 邮购电话:(010)82316936

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

\*

开本:787×960 1/16 印张:18 字数:403 千字

2010 年 6 月第 1 版 2010 年 6 月第 1 次印刷 印数:2 500 册

ISBN 978-7-5124-0092-4 定价:59.00 元

# 前 言

随着我国国防实力的不断提升,对战术导弹的性能要求越来越高,高超声速飞行、大攻角机动、精确点命中、智能毁伤等需求被不断提出。在这种情况下,导弹总体设计专业在设计思想和设计方法上都面临着新的挑战,总体工程技术人员必须有能力从闭环有控动力学系统高度,全面深入地把握导弹设计各专业之间的关系,以便最大限度地实现系统资源的精准配置,满足越来越高的战术技术性能要求。鉴于此,有必要对导弹总体设计的内涵进行扩展,编写一本能够从闭环有控动力学系统角度建立导弹总体分析与设计框架的新的总体设计教科书。本教材正是为此目的而编写的。

本书在内容组织上有以下3个特点。

## 1. 突出了动力学与控制的内容

除战术技术要求分析、总体参数优化设计、气动外形设计、部位安排设计等传统总体设计教学内容外,本教材还从总体设计角度对与导弹闭环系统特性密切相关的动力学建模、分析与设计技术,制导控制系统分析与设计技术,以及它们与导弹总体性能的关系进行了较为系统的阐述,使读者能够更全面、系统地把握导弹总体设计各环节,形成“闭合”的知识体系结构。

## 2. 突出了导弹设计各专业之间的参数传递和影响关系

本教材建立了由“战术技术要求”出发到完成“导弹总体方案设计”的较为完整的设计步骤及设计参数传递过程;同时,还把对导弹设计各专业之间参数交联影响关系的分析作为一条主线贯穿融入到全书的内容之中,使读者能够建立起关于导弹设计各专业之间相互关系的清晰概念,具备解决跨学科综合性问题的能力。

## 3. 注重引入本学科领域理论与技术发展的新成果

20世纪90年代以来,导弹设计领域在理论与技术方面发展迅速,取得了一系列重要成果。这些新理论、新技术的出现和成熟,对导弹总体设计在思想和方法

的发展上起到了非常大的推动作用,本教材内容将力求反映出这些最新进展。

全书共分为 12 章,包含内容如下:

- ① 战术导弹的特点、研制过程以及战术技术要求的分析(第 1、2 章);
- ② 战术导弹总体方案设计步骤及数据流管理(第 3 章);
- ③ 战术导弹起飞质量数学模型的建立及主要总体参数设计(第 4 章);
- ④ 战术导弹外形设计和部位安排(第 5、6 章);
- ⑤ 导引弹道动力学分析模型的建立及系统特征参数需用值的获得(第 7 章);
- ⑥ 导弹动力学建模及动力学特性分析(第 8、9 章);
- ⑦ 导弹制导控制系统分析与设计以及增益调度技术(第 10、11 章);
- ⑧ 导弹总体多学科设计优化(第 12 章)。

本教材适合高等学校飞行器设计与工程专业本科生及相关专业的研究生教学使用。教材第 11 章“增益调度技术”对读者的数学和控制理论基础有一定要求,主要作为研究生课程的教学内容,对于本科教学可不作为重点讲解。

本书第 1、2、3、4、7、8、9、10、11 章由于剑桥编写,第 5、6 章由文仲辉和梅跃松编写,第 12 章由龙腾编写。全书由于剑桥主编。

本书由北京航空航天大学过崇伟教授和北京理工大学唐胜景教授负责审稿,提出了很多宝贵意见,给予作者很大帮助,在此深表谢意。

在本书编写过程中,参考了大量国内外文献资料和兄弟院校的相关教材,在此对这些文献的作者表示衷心的感谢。

本书中包含了编著者多年从事教学和科研工作的所感、所悟,部分内容为国内同类教材中首次出现,希望能对读者有所帮助。尝试从闭环有控动力学系统角度编写导弹总体设计的教材在国内尚属首次,由于经验不足、水平有限,若书中有缺点和错误,恳切希望读者和同行专家批评指正。

编著者

2009 年 10 月于北京理工大学

# 主要符号表

$\mathcal{A}$	复姿态角
$a_{11}, \dots, a_{24}, \dots$	纵向扰动运动动力系数
$\mathcal{B}$	复攻角
$b_a$	平均气动力弦长
$b_k$	弹翼的翼梢弦长
$b_p$	平均几何弦长
$b_0$	弹翼的翼根弦长
$b_{22}, \dots, b_{34}, \dots$	偏航扰动运动的动力系数
$c$	翼型厚度
$\bar{c}$	相对厚度
$c_p$	压力系数
$c_x$	阻力系数
$c_y$	升力系数
$c_y^\alpha$	升力系数对攻角的导数
$c_y^{\delta_z}$	升力系数对升降舵偏角的导数
$c_z^\beta$	侧向力系数对侧滑角的导数
$D_e$	导弹弹底端面直径
$D_m$	弹径
$F_c$	瞬时控制力
$F_{\delta_z}$	舵面控制力
$f_y$	法向加速度
$f_{yc}$	法向加速度指令
$f_{yeq}$	平衡状态下的法向加速度
$G$	重力
$H$	飞行高度
$J_x, J_y, J_z$	导弹绕 $Ox_1, Oy_1, Oz_1$ 轴的转动惯量
$\mathcal{H}$	复合指令系数
$K_a$	加速度计增益
$K_{au}$	自动驾驶仪稳态增益
$K_g$	陀螺增益

$K_I, K_D, K_P$	PID 校正网络参数
$K_m$	导弹增益
$K_{ol}$	控制系统开环增益
$K_s$	舵机增益
$K_y, K_z$	指令系数
$L$	导弹的特征长度
$L_k$	舵控力臂
$L_{bd}, L_{ha}, L_{ta}$	分别为弹身长度、头部长度、尾部长度
$l$	翼展
$l_w$	单独弹翼的翼展
$Ma$	马赫数
$Ma_{cri}$	临界马赫数
$Ma_{cri}^0, Ma_{cri}^\chi$	后掠角分别为 0 和 $\chi$ 时的临界马赫数
$M_y$	偏航力矩
$M_y^{K_z}$	偏航力矩对指令系数的导数
$M_y^\alpha$	偏航力矩对攻角的导数
$M_y^\beta$	偏航力矩对侧滑角的导数
$M_y^{\omega_x}$	偏航力矩对滚转角速度的导数, 即马格努斯力矩导数
$M_y^{\omega_y}$	偏航阻尼力矩导数
$M_z$	俯仰力矩
$M_z^{K_y}$	俯仰力矩对指令系数的导数
$M_z^V$	俯仰力矩对速度的导数
$M_z^\alpha$	俯仰力矩对攻角的导数
$M_z^\beta$	俯仰力矩对侧滑角的导数
$M_z^{\omega_x}$	俯仰力矩对滚转角速度的导数, 即马格努斯力矩导数
$M_z^{\omega_z}$	俯仰阻尼力矩对俯仰角速度的导数
$M_z^{\delta_z}$	俯仰力矩对升降舵偏角的导数
$M_z^\alpha$	俯仰力矩对攻角变化率的导数
$M_{\delta_z}$	控制力矩
$m$	导弹质量
$m_c$	质量秒流量
$m_y^\alpha$	偏航力矩系数对攻角的导数
$m_y^\beta$	偏航力矩系数对侧滑角的导数

$\bar{m}_y^{\omega_x}$	马格努斯力矩系数导数
$\bar{m}_y^{\omega_y}$	偏航阻尼力矩系数导数
$m_z$	俯仰力矩系数
$m_z^\alpha$	俯仰力矩系数对攻角的导数
$m_z^\beta$	俯仰力矩系数对侧滑角的导数
$\bar{m}_z^{\omega_x}$	马格努斯力矩系数导数
$\bar{m}_z^{\omega_z}$	俯仰阻尼力矩系数导数
$m_z^{\delta_z}$	俯仰力矩系数对升降舵偏角的导数
$n_y, n_{yn}, n_{yk}$	分别为法向过载、需用法向过载、可用法向过载
$P$	发动机推力
$P^V$	推力对速度的导数
$p$	翼载
$q$	动压
$R_{ha}$	正切尖拱形头部圆弧的半径
$R_M$	导弹到制导站的距离
$R_T$	目标到制导站的距离
$S$	特征面积
$s$	拉氏变换算子
$s_1, s_2, s_3, s_4$	特征根
$T$	时间常数
$T_c, T_p$	分别为代理模型的构造时间、预测时间
$t$	时间变量
$V$	导弹飞行速度
$V_T$	目标运动速度
$X$	阻力
$X^V$	阻力对速度的导数
$X^\alpha$	阻力对攻角的导数
$x_g$	导弹质心坐标
$x_p$	导弹焦点坐标
$x^*$	导弹质心到焦点的距离
$Y$	升力
$Y_\alpha$	攻角引起的升力
$Y_{eq}$	平衡状态下的升力



$Y^V$	升力对速度的导数	
$Y^a$	升力对攻角的导数	
$Y^{\delta_z}$	升力对升降舵偏角的导数	
$y_t$	导弹质心的期望 $y$ 坐标	
$y_m$	导弹质心的实际 $y$ 坐标	
$Z$	侧向力	
$Z^\beta$	侧向力对侧滑角的导数	
$\alpha$	攻角	
$\alpha_B$	平衡攻角	
$\alpha_{cri}$	临界攻角	
$\alpha_k$	可用攻角	
$\alpha^*$	极限攻角	
$\beta$	侧滑角	
$\rho$	空气密度	
$\theta$	弹道倾角	
$\sigma$	相对误差标准差	
$\sigma_h$	头部半顶角	
$\lambda_r$	舵面的展弦比	
$\lambda_w$	弹翼的展弦比	
$\eta$	导弹速度矢量前置角	
$\eta_T$	目标速度矢量前置角	
$\eta_w$	弹翼根梢比	
$\xi$	阻尼比	
$\xi_m$	导弹阻尼	
$\xi_s$	舵机阻尼	
$\varepsilon$	弹翼前缘角	
$\varepsilon_M$	导弹高低角	
$\varepsilon_T$	目标高低角	
$\delta_e$	有效舵偏角	
$\delta_y$	方向舵偏角	
$\delta_z$	升降舵偏角	
$\delta_{zc}$	升降舵偏角指令	
$\delta_{z_{eq}}$	平衡状态下的舵偏角	
$\vartheta$	俯仰角	

$\vartheta_{eq}$	平衡状态下的俯仰角
$\gamma$	滚转角;性能指标
$\omega_{au}$	自动驾驶仪的无阻尼振荡频率
$\omega_c$	截止频率
$\omega_m$	导弹固有频率;校正网络几何中心频率
$\omega_{PID}$	PID 校正网络的转折频率
$\omega_s$	舵机频率
$\omega_x, \omega_y, \omega_z$	导弹分别绕 $Ox$ 轴、 $Oy$ 轴、 $Oz$ 轴的旋转角速度
$\chi$	弹体波束角;弹翼后掠角
$\phi$	复数的相角
$\phi_m$	校正网络最大超前角;最大滞后角
$\psi$	偏航角
$\psi_v$	弹道偏角
下标	
max	最大值
前置符号	
$\Delta$	偏量;增量

# 主要缩写表

ADM	自动微分法
AIO	一体化设计方法
ATC	解析目标层解
BLISS	二级集成系统综合
BRL	有界实引理
CA	学科分析
CO	协同优化
CSSO	行子空间
CVM	复变量方法
DoE	试验设计
ECO - PMGA	基于 Pareto 多目标遗传算法的协同优化方法
ECO - SM	基于 SUMT 方法的改进协同优化方法
FDM	有限差分法
GSE	局灵敏度方程
IDF	单学科可行法
KM	Kriging 模型
LFT	线性分式变换
LMI	线性矩阵不等式
LPV	线性参数变化
LQG	线性二次高斯型
LTI	线性时不变
MDA	多学科分析
MDF	学科可行法
MDO	多学科设计优化
MIMO	多输入多输出
MLSM	移动最小二乘法
NAND	成套分析与设计方法
OSA	最优灵敏度分析方法
PRSM	多项式响应面
RBF	径向基函数
SA	系统分析
TLISS	三级集成系统综合方法

# 目 录

<b>第 1 章 绪 论</b> .....	1
1.1 作为设计对象的战术导弹 .....	1
1.1.1 战术导弹武器系统 .....	1
1.1.2 战术导弹的特点 .....	2
1.1.3 战术导弹的研制过程 .....	3
1.1.4 战术导弹的设计模型 .....	4
1.2 导弹总体设计 .....	5
1.2.1 导弹总体设计的内涵 .....	5
1.2.2 总体设计工作的特点 .....	5
1.2.3 总体设计工作的内容 .....	9
思考题 .....	11
<b>第 2 章 战术导弹战术技术要求分析</b> .....	12
2.1 战术技术的意义 .....	12
2.2 战术技术要求的内容 .....	12
2.3 战术技术要求对导弹总体设计方案的约束 .....	17
思考题 .....	17
<b>第 3 章 战术导弹总体方案设计步骤及数据流管理</b> .....	18
3.1 战术导弹总体方案设计的特点 .....	18
3.2 导弹系统总体方案设计 .....	19
3.3 战术导弹总体方案设计数据流 .....	39
3.4 战术导弹分系统设计参数交联影响分析 .....	39
思考题 .....	40
<b>第 4 章 导弹总体参数设计</b> .....	45
4.1 导弹的主要总体设计参数 .....	45
4.2 起飞质量设计的约束条件 .....	45
4.3 起飞质量设计的数学模型 .....	46

4.3.1	导弹速度方案	46
4.3.2	起飞质量的组成	46
4.3.3	燃料质量比的推导	47
4.3.4	起飞质量设计的数学模型	49
4.3.5	基本数学模型的推广	52
4.3.6	模型误差分析	53
4.4	具有末端速度约束的导弹起飞质量的处理	53
4.5	算例	54
	思考题	55
<b>第5章</b>	<b>导弹外形设计</b>	<b>56</b>
5.1	总体设计与气动外形设计的关系	56
5.1.1	导弹外形与机动性的关系	56
5.1.2	导弹外形与起始质量的关系	57
5.2	外形设计的主要要求	58
5.3	战术导弹常用的气动布局形式	59
5.3.1	翼面在弹身周向的配置形式	59
5.3.2	翼面沿弹身纵向的配置形式	60
5.4	外形几何参数的选择和几何尺寸的确定	64
5.4.1	弹翼几何参数的选择	64
5.4.2	舵面几何尺寸的确定	74
5.4.3	弹身几何参数的选择	77
	思考题	81
<b>第6章</b>	<b>导弹部位安排设计</b>	<b>82</b>
6.1	导弹部位安排的任务及其基本要求	82
6.2	导弹部位安排与总体设计方案之间的关系	82
6.3	导弹部位安排设计	86
6.3.1	部位安排应保证稳定性及操纵性要求	86
6.3.2	部位安排应保证工艺性及使用维护性要求	89
6.3.3	部位安排典型实例	89
6.4	质心和转动惯量计算	92
	思考题	94

<b>第 7 章 导引弹道分析</b> .....	95
7.1 战术导弹的主要导引方法 .....	96
7.2 导引弹道运动学分析方法 .....	97
7.2.1 导引弹道运动学分析模型 .....	97
7.2.2 需用法向过载计算分析 .....	98
7.3 导引弹道动力学分析方法 .....	99
7.3.1 导引弹道动力学分析基本思路 .....	99
7.3.2 导引弹道动力学分析模型 .....	101
7.3.3 需用攻角计算分析 .....	102
7.3.4 需用舵偏角计算分析 .....	104
思考题 .....	105
<b>第 8 章 战术导弹动力学建模及动力学特性分析</b> .....	106
8.1 动力学特性分析的目的和意义 .....	106
8.2 导弹扰动运动方程组及传递函数的建立 .....	107
8.2.1 导弹长周期扰动运动方程组及传递函数 .....	107
8.2.2 导弹短周期扰动运动方程组及传递函数 .....	109
8.3 导弹动力学特性的特点 .....	110
8.4 导弹状态空间表达式的建立 .....	120
8.4.1 状态变量及状态空间表达式 .....	120
8.4.2 基于雅可比线性化的导弹状态空间表达式的建立 .....	122
8.4.3 基于准线性化建模方法的导弹状态空间表达式的建立 .....	125
8.5 导弹线性分式变换模型的建立 .....	130
8.5.1 线性分式变换 .....	130
8.5.2 导弹线性分式变换模型 .....	135
思考题 .....	140
<b>第 9 章 滚转导弹动力学特性分析</b> .....	141
9.1 滚转导弹动力学特性的特点 .....	141
9.2 滚转导弹扰动运动方程组 .....	142
9.3 滚转导弹状态空间模型 .....	144
9.4 滚转导弹动力学的复数分析方法 .....	144
9.5 滚转导弹弹体的传递函数 .....	145

9.6	滚转导弹弹体的动态稳定性分析 .....	147
9.6.1	动态稳定性条件 .....	147
9.6.2	动态稳定转速边界的确定 .....	149
9.7	关于复数分析方法合理性的证明 .....	150
9.8	滚转导弹动态失稳机理分析 .....	153
9.8.1	马格努斯效应 .....	154
9.8.2	滚转导弹动态失稳机理 .....	154
9.8.3	计算实例 .....	157
9.8.4	结 论 .....	159
9.9	滚转导弹转速设计 .....	159
9.9.1	单通道控制滚转导弹转速设计与动力学特性的关系 .....	160
9.9.2	鸭式气动布局单通道控制滚转导弹最优转速设计 .....	161
9.9.3	设计实例 .....	164
	思考题 .....	166
<b>第 10 章</b>	<b>战术导弹制导控制系统分析与设计 .....</b>	<b>167</b>
10.1	导弹制导控制系统的结构及作用 .....	167
10.2	制导回路设计 .....	168
10.2.1	制导回路开环增益的确定 .....	168
10.2.2	制导回路开环截止频率的确定 .....	169
10.2.3	校正网络作用分析及设计 .....	170
10.3	过载自动驾驶仪分析与设计 .....	177
10.3.1	过载自动驾驶仪的作用 .....	177
10.3.2	过载自动驾驶仪特性分析 .....	182
10.3.3	过载自动驾驶仪设计方法 .....	184
10.3.4	过载自动驾驶仪与弹体动力学结构一致性分析 .....	188
10.4	舵机动力学对导弹系统总体性能的影响 .....	188
10.4.1	舵机动力学对导弹系统总体性能的影响分析 .....	188
10.4.2	从总体角度进行舵机特性分析的实例 .....	189
10.5	控制系统设计与导弹动力学及总体设计的关系 .....	198
10.6	导弹弹道、制导与控制一体化设计的一个例子 .....	198
10.6.1	导入段弹道设计 .....	199
10.6.2	弹道仿真 .....	201
10.6.3	小 结 .....	202

---

思考题	203
<b>第 11 章 增益调度技术</b>	<b>204</b>
11.1 增益调度技术的发展及对导弹总体设计思想的影响	204
11.2 鲁棒增益调度方法	206
11.2.1 鲁棒控制的特点	207
11.2.2 LPV 系统	208
11.2.3 LPV 系统的 LFT 模型	209
11.2.4 LPV 系统的 $H_\infty$ 控制	210
11.2.5 求解一般 scaled $H_\infty$ 问题	212
11.2.6 $H_\infty$ 增益调度问题的求解	213
11.2.7 不确定 LPV 系统 $H_\infty$ 增益调度问题的求解	215
11.2.8 对鲁棒增益调度技术的评价	218
11.3 设计实例	218
11.3.1 鲁棒增益调度自动驾驶仪设计	218
11.3.2 仿真试验	223
思考题	228
<b>第 12 章 导弹总体多学科设计优化</b>	<b>229</b>
12.1 多学科设计优化概述	229
12.2 多学科设计优化的关键技术	231
12.2.1 灵敏度分析技术	232
12.2.2 代理模型技术	242
12.2.3 优化算法	249
12.2.4 MDO 策略	250
12.2.5 MDO 框架	258
12.3 导弹总体多学科设计优化	259
12.3.1 导弹参数化几何建模	259
12.3.2 学科分析模型的建立	261
12.3.3 系统级分析模型的建立	262
12.3.4 多学科集成优化设计	262
12.4 小 结	266
思考题	266
<b>参考文献</b>	<b>267</b>



# 第1章 绪论

## 1.1 作为设计对象的战术导弹

导弹武器系统有多种分类方式,其中,根据导弹武器系统在战争中的地位和作用,可将导弹划分为战术导弹和战略导弹。战略导弹一般用于攻击敌方的政治经济中心、交通枢纽、军事基地等具有战略意义的目标,射程通常可以达到洲际。战术导弹是指用于攻击战术性目标的导弹,如打击空中机动目标的地空导弹、用于空中格斗的空空导弹、用于攻击地面坦克和工事的反坦克导弹等。战术导弹用途广泛、体系庞杂,已被广泛地应用于现代战争中。本书主要讲解战术导弹总体设计原理。

### 1.1.1 战术导弹武器系统

一般而言,战术导弹必须与其他系统或设备配合,构成一个功能上相对完整和独立的整体,才能完成要求的作战任务,这个整体称为导弹武器系统。导弹武器系统通常由导弹系统、火控系统和保障系统三大部分组成。不同类型的导弹武器系统在具体组成和结构上会有所差异,一个示例性的框图如图 1.1 所示。

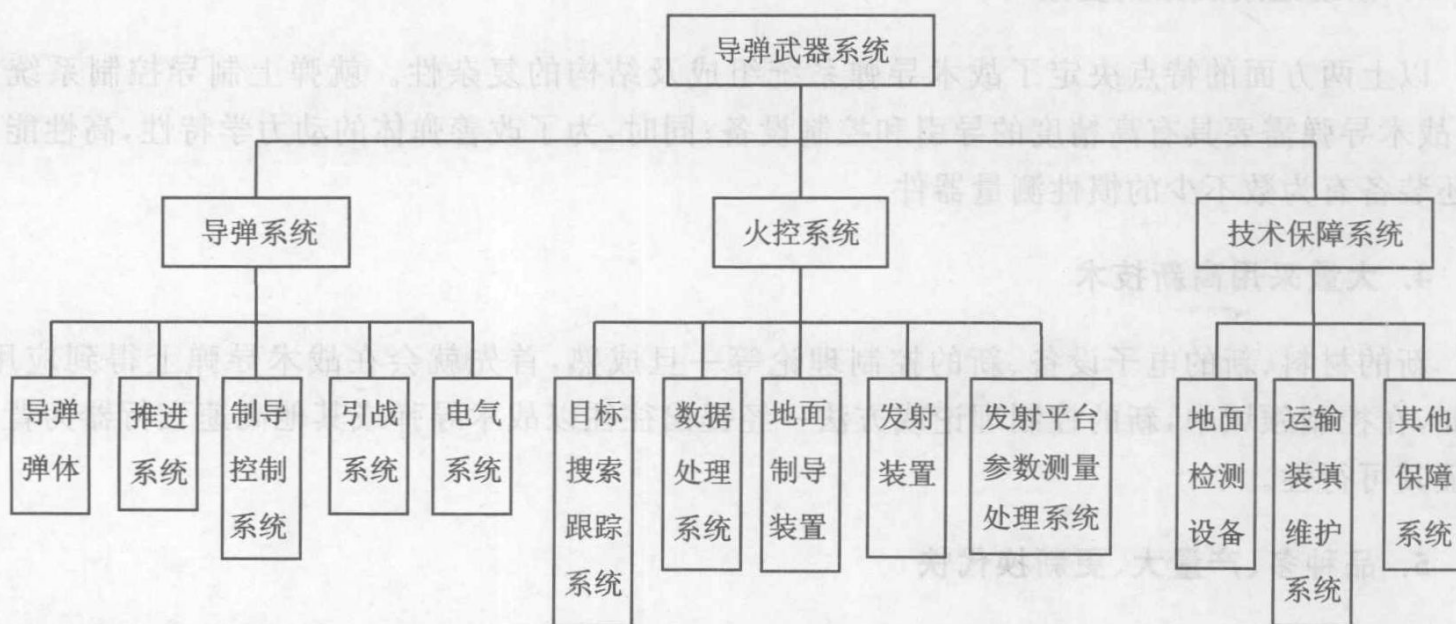


图 1.1 导弹武器系统组成框图