



普通高等教育“十二五”规划教材



# 导弹总体结构与分析

DAODAN ZONGTI JIEGOU YU FENXI



常新龙 胡宽 张永鑫 武文明 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 导弹总体结构与分析

常新龙 胡 宽 张永鑫 武文明 编著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书主要以弹道导弹的弹体结构为对象,论述了其结构设计思想和强度分析计算方法。主要内容包括:导弹总体设计思想与结构设计的任务及原则;导弹结构总体设计的思想和方法;弹体典型结构的设计;作用在导弹上的载荷分析;导弹结构强度计算理论与典型结构的强度计算;可靠性优化设计方法及其在导弹结构设计中的应用;导弹结构设计中有关强度试验等。

本书既可作为高等院校航空宇航推进理论与工程学科专业本科生的教材使用,也可供从事导弹结构设计的工程技术人员和研究生阅读参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

导弹总体结构与分析/常新龙等编著. —北京:国防工业出版社, 2010.8

ISBN 978-7-118-06973-0

I. ①导… II. ①常… III. ①导弹结构—结构分析  
IV. ①TJ760.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第158253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100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

\*

开本 710×960 1/16 印张 19 1/4 字数 355 千字

2010年8月第1版第1次印刷 印数 1—3000册 定价 52.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010) 68428422 发行邮购:(010) 68414474

发行传真:(010) 68411535 发行业务:(010) 68472764

# 前 言

随着我国航天科学技术的进步，导弹武器也得到了快速的发展，导弹结构设计与分析在导弹武器的研制和使用中也变得日益重要。从事导弹武器系统使用的部队工程技术和指挥人员，不仅需要熟练掌握导弹武器系统的结构组成、功用、性能、操作使用和维护，而且还需要对导弹武器设计研制的相关知识有所了解，特别是需要对导弹结构总体设计的基本理论与方法，弹体典型结构的设计思想与强度计算等内容有深入的了解和掌握，以有利于培养创新思维能力，更好地掌握、使用和维护好手中的武器。基于这种考虑，我们编写了本教材。

在这里，需要说明两点：一是考虑到随着我国导弹研究的快速发展，导弹的类型和型号也日益增多，特别是飞航导弹和弹道导弹在结构上的区别相当明显，很难统一，所以本书仅以弹道导弹为主；二是由于弹道导弹结构系统十分复杂庞大，很难面面俱到，本书中结构分析与设计的对象，也仅以导弹总体受力的弹体结构及主要承力构件为主。基于此，作者根据多年来从事导弹结构分析与强度计算的理论研究、教学工作和部队使用中积累的丰富经验，在原教材《导弹总体与结构》的基础上，参考相关文献和资料，编写了《导弹总体结构与分析》一书。

全书共分为 7 章，第 1 章主要叙述了导弹的基本概念、研制程序、总体设计思想、结构设计任务及原则等；第 2 章介绍了导弹结构总体设计的基本概念、思想和方法；第 3 章具体分析了导弹弹体典型结构的形式、特点和设计思想；第 4 章系统分析了作用在导弹上的载荷及内力计算；第 5 章介绍了载荷分析、模型简化、薄板的计算、薄壳理论、板壳的稳定性以及复合材料结构强度理论，并对导弹弹体典型

结构进行了强度计算；第 6 章介绍了可靠性优化设计方法及其在导弹结构设计中的应用；第 7 章介绍了导弹结构设计中有关的静动力强度试验。

本书由常新龙教授担任主编，其中第 1, 2, 7 章由常新龙编写，第 3 章由张永鑫编写，第 4 章由武文明编写，第 5 章由常新龙、张永鑫编写，第 6 章由胡宽编写。

全书由常新龙教授统稿，关正西教授担任主审。本书编写过程中得到了强洪夫、张世英、陈家照、周伟等同行、专家和教授的大力帮助，在此表示感谢。

由于编者水平有限，错误或不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。同时也参考了国内外大量的文献及教材，在此对原作者表示诚挚的谢意。

# 目 录

第 1 章 概述	1
1.1 导弹的分类、组成及功用	1
1.1.1 火箭与导弹	1
1.1.2 导弹的分类	2
1.1.3 导弹的组成及功用	4
1.2 导弹武器研制依据与研制程序	6
1.2.1 研制依据	6
1.2.2 研制程序	9
1.3 导弹武器总体设计思想	12
1.3.1 总体设计特点	12
1.3.2 总体设计内容	14
1.4 导弹结构设计的任务、方法和步骤	16
1.4.1 导弹结构设计的任务	17
1.4.2 导弹结构设计的方法和步骤	17
1.5 导弹结构设计准则	18
1.5.1 导弹结构设计中的基本原则	18
1.5.2 材料选用原则	21
1.6 导弹结构设计的发展趋势	22
1.6.1 导弹结构的发展趋势	22
1.6.2 结构设计方法的发展趋势	23
习题与思考题	24
第 2 章 导弹结构总体设计	25
2.1 概述	25
2.1.1 导弹结构总体设计的地位和作用	25
2.1.2 导弹结构总体设计的特点	26
2.1.3 导弹结构总体设计的任务	26
2.1.4 设计原则与基本要求	27
2.2 导弹总体布局	28

2.2.1	总体布局要求	28
2.2.2	结构工艺和使用要求	29
2.2.3	弹上仪器的配置要求	29
<b>2.3</b>	<b>导弹结构总体方案选择</b>	<b>30</b>
2.3.1	舱段部位安排及结构方案	31
2.3.2	弹上设备的布置方案	34
2.3.3	分离系统结构方案	37
2.3.4	部段连接结构方案	43
<b>2.4</b>	<b>结构总体协调与设计</b>	<b>48</b>
2.4.1	主要任务与原则	48
2.4.2	弹体与发动机的结构协调	49
2.4.3	弹体与弹载设备的结构协调	52
2.4.4	弹体与地面设备的结构协调	55
2.4.5	弹体开口及突起物布局安排协调	57
2.4.6	部段对接结构协调	58
2.4.7	弹体结构偏差控制与计算	59
	习题与思考题	60
<b>第 3 章</b>	<b>导弹弹体结构设计</b>	<b>61</b>
<b>3.1</b>	<b>典型弹体结构形式及特点</b>	<b>61</b>
3.1.1	弹体的受力构件	61
3.1.2	弹体的结构形式及特点	62
<b>3.2</b>	<b>弹头结构设计</b>	<b>64</b>
3.2.1	弹头的要求和分类	64
3.2.2	弹头的结构方案	65
3.2.3	弹头的防热结构设计	68
<b>3.3</b>	<b>储箱结构设计</b>	<b>69</b>
3.3.1	概述	69
3.3.2	储箱的结构形式	71
3.3.3	储箱的容积和外形尺寸计算	71
3.3.4	储箱典型结构元件设计	72
3.3.5	储箱的断裂力学设计	79
3.3.6	储箱材料选择	82
3.3.7	储箱的制造工艺	84
<b>3.4</b>	<b>舱段结构设计</b>	<b>85</b>

3.4.1	舱段的功用及要求	85
3.4.2	舱段外形和结构	87
3.4.3	舱段的结构布局	90
3.4.4	各舱段的对接方法	92
3.4.5	舱段的材料选择	93
<b>3.5</b>	<b>分离机构设计</b>	94
3.5.1	对分离机构的要求	94
3.5.2	分离机构的形式	95
3.5.3	头体分离机构	98
3.5.4	级间分离	98
<b>3.6</b>	<b>尾罩结构设计</b>	100
3.6.1	功用与要求	100
3.6.2	设计特点	101
3.6.3	结构组成与布局	102
3.6.4	承力壳体设计	104
<b>3.7</b>	<b>复合材料结构设计</b>	107
3.7.1	复合材料概述	107
3.7.2	复合材料结构的力学特点	108
3.7.3	复合材料结构设计的几个主要问题	109
3.7.4	纤维缠绕结构设计	112
	习题与思考题	118
<b>第 4 章</b>	<b>导弹受力分析及载荷计算</b>	120
<b>4.1</b>	<b>导弹的飞行弹道</b>	120
<b>4.2</b>	<b>作用在导弹上的力和力矩</b>	121
4.2.1	推力 $P$	122
4.2.2	重力 $G$	123
4.2.3	柯里奥利惯性力 $F_K$	124
4.2.4	空气动力和空气动力矩	126
4.2.5	控制力和控制力矩	128
4.2.6	载荷的分类和平衡方程	129
<b>4.3</b>	<b>导弹的载荷系数</b>	130
4.3.1	载荷系数的概念	130
4.3.2	平移载荷系数和旋转载荷系数	132
<b>4.4</b>	<b>导弹在主动段飞行时的内力计算</b>	136



4.5	导弹竖立在发射台上时的载荷	137
4.6	导弹在地面使用时的载荷	139
4.6.1	地面存放时的情况	139
4.6.2	运输时的载荷	140
4.6.3	起吊及竖立过程中的载荷	141
4.7	导弹弹体结构载荷分析与计算	142
4.7.1	载荷计算情况	142
4.7.2	计算载荷和计算应力	143
4.7.3	破坏载荷和破坏应力	144
4.7.4	强度储备系数	144
	习题与思考题	144
<b>第5章</b>	<b>导弹弹体结构强度计算</b>	<b>146</b>
<b>5.1</b>	<b>强度计算概述</b>	<b>146</b>
5.1.1	强度计算的分类	146
5.1.2	强度计算的内容	147
5.1.3	安全系数	147
<b>5.2</b>	<b>强度计算模型简化</b>	<b>151</b>
5.2.1	载荷性质	151
5.2.2	计算工况确定	151
5.2.3	计算模型简化	152
<b>5.3</b>	<b>薄板强度理论</b>	<b>152</b>
5.3.1	定义及基本假设	152
5.3.2	条形板的筒形弯曲	153
5.3.3	薄板的横向弯曲和挠曲面微分方程	156
5.3.4	平板问题的求解	161
<b>5.4</b>	<b>薄壳理论</b>	<b>169</b>
5.4.1	关于壳体的一些概念和假设	169
5.4.2	壳体的变形和内力	170
5.4.3	旋转壳的无矩理论	174
<b>5.5</b>	<b>板壳的稳定性分析</b>	<b>178</b>
5.5.1	概述	178
5.5.2	压杆稳定性	181
5.5.3	平板的稳定性	187
5.5.4	壳体稳定性	191

5.6	光筒壳计算	192
5.6.1	光筒壳强度计算	192
5.6.2	光筒壳稳定性计算	193
5.7	球壳计算	196
5.7.1	球壳强度计算	196
5.7.2	球壳稳定性计算	197
5.8	网格结构强度计算	198
5.8.1	中长网格筒轴压临界应力	198
5.8.2	短网格筒轴压临界应力计算	201
5.8.3	网格结构蒙皮局部稳定性计算	202
5.8.4	网格圆筒壳的内压强计算	202
5.8.5	轴内压联合作用下的网格圆筒壳计算	203
5.8.6	外压作用下的网格圆筒壳	203
5.8.7	轴外压作用下的相关方程	203
5.9	薄壁加筋壳结构计算	205
5.9.1	结构元件的计算	205
5.9.2	轴压极限载荷	213
5.9.3	轴压作用下的中间框刚度判别式	214
5.9.4	集中力扩散式加筋壳的承载能力	217
5.9.5	外压计算	226
5.9.6	轴压和外压联合作用下的承载能力	227
5.9.7	锥壳的承载能力计算	228
5.10	特殊结构强度计算	228
5.10.1	焊缝强度计算	228
5.10.2	吊点载荷分析及强度计算	231
5.11	复合材料结构强度计算	239
5.11.1	单向复合材料强度准则	240
5.11.2	复合材料层合结构的强度理论	242
5.11.3	纤维缠绕壳体的强度计算	246
	习题与思考题	254
第6章	导弹弹体结构的优化设计方法	254
6.1	概述	254
6.2	结构优化设计理论与方法	255
6.2.1	结构优化设计的数学模型	255

6.2.2	结构优化设计理论与方法	257
<b>6.3</b>	<b>弹体结构的优化设计</b>	<b>266</b>
6.3.1	基于网络的平衡型纤维缠绕壳体基本方程	267
6.3.2	优化模型	270
6.3.3	算例	273
<b>6.4</b>	<b>弹体结构可靠性优化设计</b>	<b>274</b>
6.4.1	结构可靠性及设计的基本概念	274
6.4.2	结构可靠性分析方法	276
6.4.3	结构可靠性优化数学模型及求解方法	281
6.4.4	弹体结构的可靠性优化	285
	习题与思考题	290
<b>第7章</b>	<b>导弹弹体结构强度试验</b>	<b>291</b>
<b>7.1</b>	<b>概述</b>	<b>291</b>
7.1.1	强度试验的重要性	291
7.1.2	强度试验分类及目的	292
<b>7.2</b>	<b>弹体结构的静强度试验</b>	<b>293</b>
7.2.1	试验方案及试验件	293
7.2.2	试验载荷及边界条件的确定	294
7.2.3	导弹壳体在轴外压联合作用下的稳定性试验	295
7.2.4	液体导弹推进剂储箱的静力试验	298
7.2.5	固体导弹尾罩静力强度试验	299
<b>7.3</b>	<b>弹体结构的动力试验</b>	<b>300</b>
7.3.1	试验目的与内容	301
7.3.2	振动试验	301
7.3.3	冲击试验	304
7.3.4	导弹压力容器的疲劳试验	304
	习题与思考题	305
	参考文献	306

# 第 1 章 概 述

## 1.1 导弹的分类、组成及功用

### 1.1.1 火箭与导弹

火箭是依靠自身动力装置—火箭发动机推进的飞行器。它有两类：一类是无控火箭，其飞行轨迹不可导引、控制；另一类是可控火箭，其飞行轨迹由制导系统导引、控制。

火箭发动机是喷气发动机的一种。它的工作原理是把自身内部的工作物质，经过燃烧后以很高的速度向后喷出，产生反作用力推动火箭运动。火箭发动机与空气喷气发动机不同之处是它随身携带所需的全部工作物质（燃烧剂和氧化剂），不需要从外界空气中引入氧助燃，因此，它不仅可以在大气层里工作，也可在外层空间工作。

导弹是载有战斗部，依靠自身动力装置推进，由制导系统导引、控制其飞行轨迹，并导向目标的飞行器。显然，载有战斗部的可控火箭就是导弹。但导弹不一定都依靠火箭发动机推进，它也可依靠空气喷气发动机或组合型发动机推进。导弹之所以成为武器，就是因为载有战斗部。

导弹由动力装置、制导系统、战斗部、弹体和弹上电源 5 个分系统组成。由于导弹本身是一个复杂的系统，为了从系统的观点出发研究问题，所以人们又常把上述 5 个分系统组成的导弹称为导弹系统。

要使导弹系统能作为武器使用，还需要一套发射系统、勤务保障设备系统、侦察瞄准系统和指挥通信系统。这样，上述 4 个大系统就构成了导弹武器系统。

导弹技术尽管已发展到了相当高的水平，但是由于现代战争的更高要求以及科学技术飞速发展，导弹技术还在进一步向前发展。其发展的主要动向有以下几个方面：

(1) 提高可靠性。导弹武器系统由许多复杂的装置、设备和分系统组成，只要任何一个方面出了问题都会导致导弹失效。因此，有必要采取使用固态电路和标准模块等措施提高系统的可靠性。

(2) 加强突防能力。为了使我方导弹能突破敌方反击及干扰，有效打击敌

方，必须提高突防能力，目前比较先进的突防手段有多弹头技术、变弹道技术等。

(3) 增强通用性。采用一弹多用；应用部件模块，以减少导弹品种。

(4) 研究和改进制导技术和方法。采用新技术如毫米波、热成像以及光导纤维等制导技术，同时加快发展超视距雷达和体积小重量轻的机械雷达，采用复合制导技术，提高导引精度和抗干扰能力。

(5) 提高机动发射的能力。努力简化发射装置和设备，使之小型化、轻便化。

(6) 发展全天候和快速反应的自动化导弹武器系统。

## 1.1.2 导弹的分类

目前，世界各国发展的导弹有好几百种，为了便于研究、设计、生产和使用，通常将它们进行分类。导弹分类的方法尽管很多，但每一种分类都应概括地反映出它们的主要特征。此外导弹尚处于迅速的发展中，新的型号还在不断出现，因而目前的分类还会有所变化和发展。

通常导弹按发射点和目标位置的不同，可分为4类，即面对面、面对空、空对面、空对空。此外还按照作战使命、结构与弹道特征、射程远近进行分类。详细情况如图1.1所示。

根据导弹所用发动机的种类可分为液体导弹和固体导弹。

根据制导系统的形式可以分为自主制导系统的导弹和组合制导系统的导弹。自主制导系统的导弹主要是靠惯性制导系统制导，这种制导系统完全是自主的，由一些装在弹上的设备所组成。组合制导系统是在自主制导系统之外加无线电制导。无线电制导系统是通过地面无线电导引站向弹上仪器发送无线电指令的办法控制导弹飞行的。

根据级数的多少又有单级和多级之分。每级火箭的组成包括：发动机、推进剂箱、推进剂（这一级发动机工作期间所要消耗的）、接头和控制仪器（属于被分离的那一级），还有壳体和承载结构。在飞行中各级按一定的顺序抛掉。在最后一级的组成中并不包括弹头。多级火箭可以分为二级或三级。

根据多级导弹级间的连接方式可以分为串联式、并联式和组合式，多级弹道式导弹结构的连接形式不尽相同，各有其特点。

### 1. 串联式

串联式就是各级火箭的头尾沿主向依次相连的配置，而且在飞行过程中各级的分离是沿着火箭主向垂直的平面分离的。因此，有时也称为横向分离火箭。

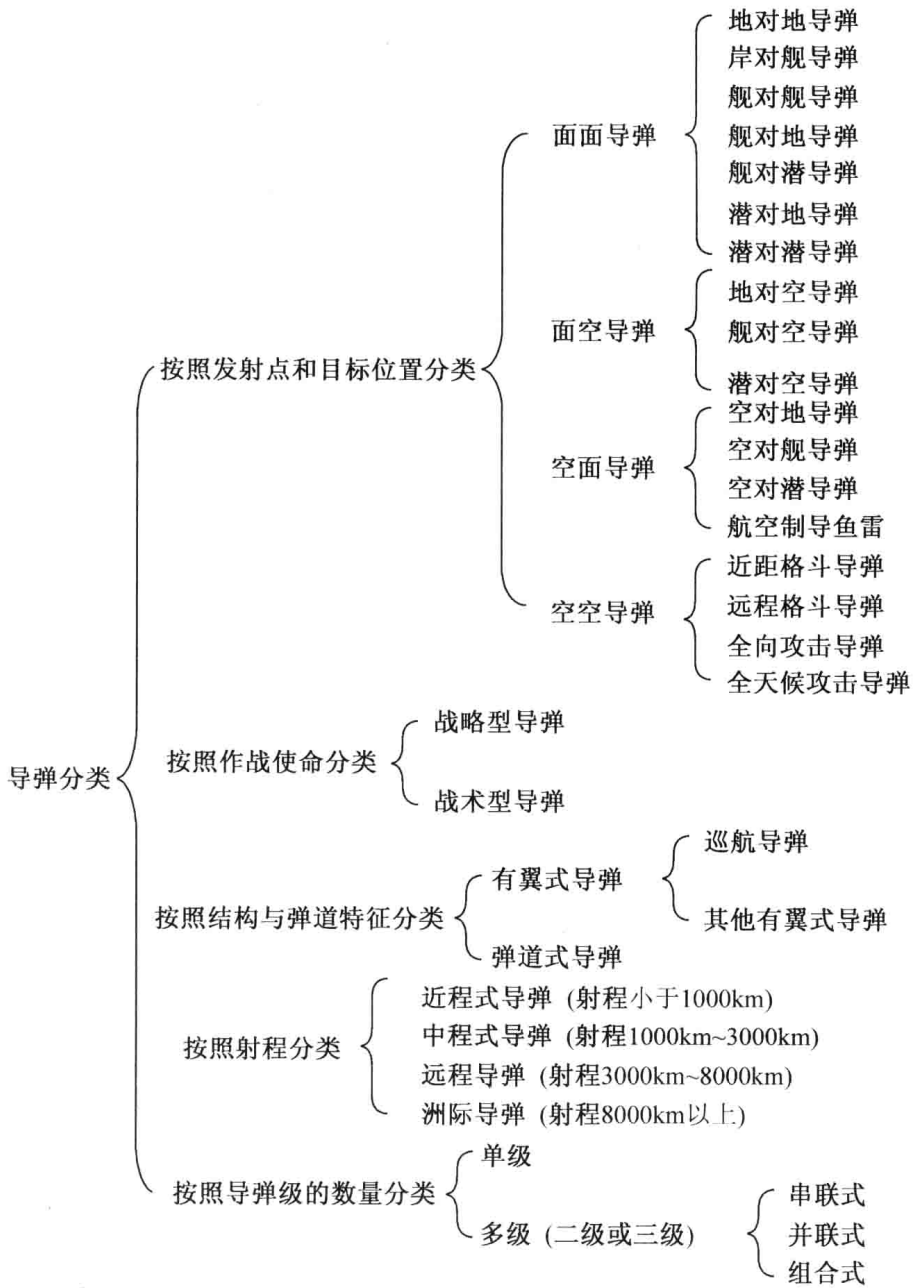


图 1.1 导弹分类

串联式有以下优点：

- (1) 结构紧凑简单。
- (2) 横剖面面积较小，气动阻力较小。

(3) 与其他机构相比, 对接机构简单, 级间分离时故障小。

(4) 发射设备简单。

(5) 容易分解成单独部件, 且分解装配简单, 从而简化了运输及发射前的准备工作。

串联式有以下缺点:

(1) 这种导弹的长细比大、弯曲刚性差、对横向过载极为敏感。因此, 需加强结构的强度和刚度, 增加了结构重量。

(2) 因导弹长度大, 陆基发射时, 使发射阵地的发射准备和发射勤务工作复杂。

(3) 在飞行中第二级及以后发动机的点火均处于低气压或真空状态, 建立点火压力较困难, 因此增加了故障率而降低了导弹的可靠性。

## 2. 并联式

并联式是指各级纵轴相互平行或稍倾斜一个小角度连接成一束, 有时也称为“捆绑式”。发射时, 或是仅旁侧发动机点火或是所有发动机一起点火, 旁侧发动机燃料耗尽时被抛弃, 第二子火箭则继续飞行。

并联式有以下优点:

(1) 长度短。

(2) 发射时所有发动机一起点火, 可靠性高。

(3) 结构粗短, 弯曲刚性好。

(4) 大型运载火箭的运输问题可以解决。

并联式有以下缺点:

(1) 横向尺寸大, 因此发射设备很复杂。

(2) 级间机构较复杂, 装配麻烦, 起飞质量大。

(3) 级间分离时, 干扰大。

(4) 横行尺寸大, 气动阻力大。

## 3. 混合式

混合连接方案, 就是并联式和串联式合在一起, 例如第一级和第二级为并联而第三级为串联, 我国的“长征”-2号E运载火箭就是这种结构形式。

### 1.1.3 导弹的组成及功用

导弹通常由五部分组成, 即动力装置、制导系统、战斗部、弹体和弹上电源。

## 1. 动力装置

动力装置以发动机为主体，为导弹提供飞行动力，有时也称这部分为推进分系统。它保证导弹获得需要的射程和速度。

导弹上的发动机大都是喷气式发动机，发动机类型分为火箭发动机（固体和液体火箭发动机）、空气喷气发动机（涡轮喷气发动机和冲压喷气发动机）以及组合型发动机（固液结合的火箭发动机和火箭冲压组合的发动机）。

## 2. 制导系统

制导系统是导引和控制导弹飞向目标的仪器、装置和设备的总称。为了能够将导弹导向目标，一方面需要不断地测量导弹实际运动情况与所要求的运动情况之间的偏差，或者测量导弹与目标相对位置的偏差，以便向导弹发出修正偏差或跟踪目标的控制指令信息；另一方面还需要保证导弹稳定的飞行，并操纵导弹改变飞行姿态，控制导弹按所要求的方向和轨迹飞行而命中目标，完成前一方面的任务是导引系统，完成后一方面的任务是控制系统，两个系统合在一起构成了制导系统。

## 3. 战斗部

这是弹上直接毁伤目标，完成其战斗任务的部分，所以称为战斗部。由于通常放置在导弹的头部，所以大多数人称之为弹头。

战斗部可装普通炸药、核装料或生物、化学战剂。载有普通炸药战斗部的导弹称为常规导弹；载有核装料战斗部的导弹称为核导弹。

由于导弹所攻击的目标和类型有所不同，相应地有各种毁伤作用和不同结构类型的战斗部、如爆破战斗部、杀伤战斗部、聚能破甲战斗部、化学战斗部、生物战剂战斗部以及核战斗部等。

## 4. 弹体

导弹弹体是用于构成导弹外形，连接和安装导弹各系统的整体结构，具有良好的气动外形。主要由弹身、气动面、弹上机构及一些零部件连接而成。按导弹的推进剂类型可分为液体导弹弹体和固体导弹弹体；按导弹的飞行轨迹可分为弹道导弹弹体和巡航导弹弹体。当采用对接战斗部、固体火箭发动机或液体推进剂受力式储箱时，它们的壳体、箱壁就是弹体外壳的一部分。

弹身是由各舱（战斗部装药舱、仪器舱、发动机舱）、段（过渡段、储箱段）、整流罩等组成。

气动面包括产生升力的弹翼、产生操纵力的舵面及保证导弹稳定飞行的安定面（尾翼）。对弹道式导弹，由于大部分在大气层外飞行，在主动段只作程序转弯飞行，因此没有弹翼或根本没有空气动力翼面。

弹上机构是指操纵机构、分离机构和折叠机构等。



## 5. 弹上电源

弹上电源是供给弹上各分系统工作用电的电能装置，除电池外还包括各种配电和变电设备。常用的电池有银锌电池，它单位储藏的电能比较大，能较长期储放，有的导弹局部用电部分采用小型涡轮发电机来发电。有的巡航导弹采用涡轮风扇吹气发动机带动小型发电机来供电。有的导弹（个别有线制导的反坦克弹）上没有电源，由地面电源供弹上使用。

## 1.2 导弹武器研制依据与研制程序

### 1.2.1 研制依据

导弹（火箭）是按照研制任务书进行研制的，研制任务书是导弹（火箭）的基本设计依据。

#### 1. 对导弹武器系统的设计要求

导弹的研制任务书，主要包括导弹武器系统的战术技术指标、研制周期和经费等。战术技术指标是完成特定作战任务而必须具备的战术技术性能和使用条件的总和。分述如下：

##### 1) 射程

射程有最大和最小的要求。最大射程是导弹的重要战术指标，是导弹运载能力设计的重要依据。最小射程的确定是考虑和其他型号导弹射程的衔接，以便实现合理的火力配置。

##### 2) 弹头质量和威力

对于核弹头，要给出核弹头质量和核装置（含引爆控制系统）的质量及威力，威力用 TNT 当量来量度。对于普通装药弹头，要给出质量和不同杀伤情况的威力半径。

由最大射程和弹头质量决定导弹所应具备的运载能力。

##### 3) 命中精度

命中精度用圆公算偏差 CEP 表示。其含意是导弹的弹着点落在以瞄准点为中心、CEP 为半径的圆内的概率是 50%。导弹制导系统精度越高，CEP 值越小。

弹头的威力和命中精度组合起来构成导弹的杀伤概率。对点目标的摧毁概率与威力的  $2/3$  次方成正比，与 CEP 的 2 次方成反比。所以，当摧毁概率不变时，CEP 减小一半，弹头威力可以减小到原来的  $1/8$ 。由此可见，提高制导精度比单纯加大装置当量更为有利。