

# 弹道导弹 攻防仿真系统建模

鲜勇 郑晓龙 著



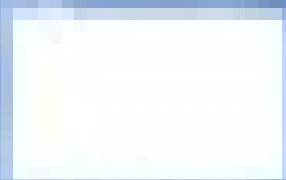
国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 弹道导弹

## 攻防仿真系统建模

张 勇 王 强 等 著



---

# 弹道导弹攻防 仿真系统建模

鲜勇 郑晓龙 著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书在分析弹道导弹与反导系统攻防体系的基础上,以导弹流程和要素为主线,全面分析和构建了弹道导弹飞行仿真模型、预警卫星探测模型、探测跟踪雷达仿真模型、反导控制模型和反导导弹飞行仿真模型,考虑到导弹攻防仿真系统构建实际工作的需要,针对导弹攻防仿真对精细度和仿真速度的要求,详细论述了并行仿真体制、网络控制体制,最后给出了三维战场环境构建模型,构成了弹道导弹与反导系统完整的仿真架构。

本书注重理论分析,强调应用性,可以作为飞行器设计专业和作战运用专业研究生教学用书,也可以作为其他相关专业科研工作者的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

弹道导弹攻防仿真系统建模/鲜勇,郑晓龙著. —北京:国防工业出版社,2013.8

ISBN 978-7-118-08973-8

I. ①弹... II. ①鲜... ②郑... III. ①弹道导弹—系统仿真②弹道导弹—系统建模 IV. ①TJ761.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 156908 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)

北京嘉恒彩色印刷责任有限公司

新华书店经售

\*

开本 710×960 1/16 印张 14½ 字数 330 千字

2013 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 49.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

# 前 言

弹道导弹与反导系统的对抗是国家战略力量的对抗。通过攻防仿真对武器系统效能进行评估、对作战方案进行验证、对先进技术开展研究是当前通行方法,弹道导弹与反导系统的攻防对抗是一个复杂的体系对抗,只有通过仿真手段对其流程、体系、性能进行深入分析,才能真正掌握对抗作战的效能。建立导弹攻防仿真系统是弹道导弹突防能力评估,与突防技术研究、战法研究和关键技术研究评估的重要手段。本书以弹道导弹飞行仿真、预警卫星探测仿真、反导指控仿真和反导导弹飞行仿真为核心,以仿真网络控制、战场态势显示为辅助,全面介绍弹道导弹与战区反导系统对抗仿真的模型和仿真体制。

本书在分析弹道导弹与反导系统攻防体系的基础上,以导弹流程和要素为主线,全面分析和构建了弹道导弹飞行仿真模型、预警卫星探测模型、探测跟踪雷达仿真模型、反导控制模型和反导导弹飞行仿真模型,考虑到导弹攻防仿真系统构建实际工作的需要,针对导弹攻防仿真对精细度和仿真速度的要求,详细论述了并行仿真体制、网络控制体制,最后给出了三维战场环境构建模型,构成了弹道导弹与反导系统完整的仿真架构。本书在注重理论分析的基础上,具有强烈的应用性,可以作为飞行器设计专业和作战运用专业研究生教学用书,也可以作为其他相关专业科研工作者的参考用书。

本书共分为 10 章。第 1 章简要分析了导弹防御系统的发展历史、组成和各部分功能,在此基础上介绍了反导作战基本流程,为导弹攻防仿真系统体系建立奠定基础。第 2 章是在第 1 章的基础上,以近程弹道导弹与战区导弹防御系统攻防对抗仿真为目标,构建了攻防仿真体系,明确了攻防仿真所应该具备的要素。第 3 章给出了弹道导弹标准弹道模型,在发动机推力偏差、起飞质量偏差、大气参数偏差、大气风干扰、惯性导航误差等几项主要干扰模型的基础上,构建了干扰弹道模型,根据弹道导弹作战实际,建立了多发导弹并行仿真模型,为实现多弹和多弹种的并行对抗仿真奠定基础。第 4 章通过对预警卫星预警探测原理的分析,建立了预警探测模型,在对弹道导弹被动段动力学分析的基础上,给出了弹道预测计算、落点预报模型,并对预报精度进行了详细分析。第 5 章分析了相控阵雷达工作原理,给出了相控阵跟踪探测雷达的探测仿真模型。第 6 章

以预警卫星、跟踪探测雷达探测数据为输入,构建了威胁评估、弹道预测模型,以弹道导弹被动段弹道精确预测模型、反导导弹飞行仿真标准模型为基础,构建了作战单元、预定拦截点、发射时刻决策模型。第7章分别针对反导导弹不同的飞行阶段,建立了初段、中段和末制导段的飞行仿真模型,重点构建了末导引头仿真模型,为分析攻防作战最终效能打基础。第8章针对仿真步长为非连续情况,构建了连续时间条件下的脱靶量计算模型,更真实地反映了导弹攻防效能。第9章给出了弹道导弹攻防作战所特有的大场景三维环境的构建方法,提供了仿真过程的可视化环境构建方法。第10章在分析导弹攻防仿真数据关系、仿真流程、仿真成员、仿真控制特点的基础上,构建了具有灵活运用特性的仿真体制,建立了适应多任务仿真要求的脚本运行机制,重点给出了多弹并行仿真体制,为实现高速度、可靠的攻防仿真提供了切实可行的解决方案。

在本书撰写过程中,李邦杰负责了第6、7章的编写,雷刚负责了第4章的编写;同时,王明海教授、张毅教授也给予了无私支持,在此一并表示衷心感谢!

由于科学技术的不断发展和作者水平有限,本书难免存在缺点和不足,恳请读者批评指正。

作者

2013年1月于西安

# 目 录

第 1 章	绪论	1
1.1	导弹防御系统发展	1
1.2	典型反导防御系统介绍	3
1.3	导弹防御系统组成	8
1.4	GBMMD 系统作战流程	10
第 2 章	弹道导弹攻防仿真系统组成	14
2.1	战术弹道导弹武器系统	15
2.2	战术弹道导弹防御系统	17
2.3	导弹攻防仿真系统结构	19
2.4	导弹攻防仿真系统总体设计	23
第 3 章	弹道导弹飞行仿真系统建模	27
3.1	弹道分段	27
3.2	弹道导弹标准弹道计算模型	29
3.3	弹道导弹诸元计算模型	43
3.4	干扰弹道模型	46
3.5	弹道导弹并行飞行仿真模型设计	52
第 4 章	卫星预警系统建模	64
4.1	预警卫星发展状况	64
4.2	预警卫星系统功能分析	68
4.3	预测弹道模型	69
4.4	预警模型分析	81
第 5 章	反导系统雷达仿真模型	88
5.1	反导系统雷达数学仿真方案	88

5.2	目标特性数学模型 .....	92
5.3	雷达天线仿真数学模型 .....	94
5.4	雷达系统功能仿真模型 .....	96
5.5	雷达探测数据处理 .....	100
5.6	雷达探测系统仿真软件设计 .....	106
<b>第6章</b>	<b>反导指挥系统建模 .....</b>	<b>112</b>
6.1	反导指控系统原理 .....	112
6.2	威胁评估模型 .....	116
6.3	预定拦截点计算 .....	117
6.4	反导指控系统仿真模型设计 .....	122
6.5	反导指挥系统仿真多线程设计 .....	125
<b>第7章</b>	<b>反导导弹飞行仿真建模 .....</b>	<b>131</b>
7.1	反导导弹常用坐标系定义 .....	131
7.2	反导导弹初段仿真模型设计 .....	132
7.3	反导导弹中段飞行仿真模型设计 .....	137
7.4	反导导弹导引头仿真模型 .....	138
7.5	反导导弹末段飞行仿真模型设计 .....	146
7.6	仿真过程中的数据技术处理 .....	147
<b>第8章</b>	<b>拦截效果评判系统建模 .....</b>	<b>149</b>
8.1	脱靶量计算方法分析 .....	149
8.2	脱靶量计算模型 .....	151
<b>第9章</b>	<b>虚拟战场环境构建 .....</b>	<b>155</b>
9.1	虚拟战场环境概述 .....	155
9.2	计算机图形学简介 .....	158
9.3	三维图形引擎与工具 .....	161
9.4	三维地形仿真 .....	167
9.5	粒子系统仿真技术 .....	172
9.6	其他战场环境仿真关键技术 .....	175
9.7	导弹攻防仿真系统虚拟战场环境构建 .....	179



<b>第 10 章 网络管理系统设计</b> .....	204
10.1 网络管理系统总体设计 .....	204
10.2 网络协议 .....	209
10.3 并行运行机制 .....	213
10.4 脚本运行机制 .....	217
10.5 网络进程控制 .....	220
<b>参考文献</b> .....	223

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 导弹防御系统发展

弹道导弹自第二次世界大战末期出现以来,已经经历了 70 多年的发展历程,美苏冷战期间弹道导弹技术更是飞速发展,两国都企图从战略进攻性武器上压倒对方,双方发展了大量进攻性战略弹道导弹。弹道导弹自出现以来,就具有独特的“反拦截”能力,主要原因有:①飞行速度极高,除主动段飞行前段期间速度较低外,弹道导弹在主动段后期、自由段和再入段均拥有极高的飞行速度,远程和洲际弹道导弹飞行马赫数最高达 20 ~ 30。②飞行时间短,远程和洲际弹道导弹最长飞行时间不过 30 多 min。③飞行高度高,近程弹道导弹弹道最高点一般也高于 100km,对于远程和洲际弹道导弹更是高达 1000 ~ 2000km。④探测难度大,弹道导弹主要采用惯性系统进行导航控制,不向外辐射也不接收其他无线电信号,加之飞行速度快、飞行高度高,因此很难探测。⑤发射突然性高,弹道导弹一般采用隐藏性好的井下发射、公路(铁路)机动发射、水下潜射方式,事前难以侦测,具有较高的战略突然性。由于上述诸多因素,弹道导弹一度被认为是无法拦截的,因此美苏双方将发展重点都放在了弹道导弹这种进攻性武器的发展上,力图通过进攻压制对方。

为达到遏制对方战略力量的目的,美苏从 20 世纪 50 年代末期都开展了反导防御系统的研制,但都遇到了前所未有的技术挑战和政治危机。由于弹道导弹具有飞行速度极大、飞行高度极高、完全自主飞行的特点,实现反导拦截被认为比“子弹打子弹”还要复杂得多,因此双方均选择了以核反核的拦截思想,依靠核弹空中爆炸达到摧毁来袭弹头的目的。

世界上第一个具有实战反导能力的反导武器系统是苏联研制的“橡皮套鞋”反导防御系统(galoshy anti ballistic missile system),用于拦截洲际弹道导弹的核弹头或低轨道卫星。苏联从 1957 年开始研制反导防御系统,并于 1964 年开始在莫斯科防区部署“橡皮套鞋”反导防御系统。“卫兵”反导防御系统(safeguard anti ballistic missile system)是美国研制的一种分层反弹道导弹武器系统,1969 年在“奈基”X 系统的基础上修改而成,1975 年 4 月至 1975 年 10 月部

署,主要用于保卫北达科他州大福克斯的“民兵”导弹基地。“卫兵”系统由于生存能力低、识别真假弹头的能力差、可靠性差、维护费用高等原因,于1976年2月关闭,仅保留远程预警雷达继续工作。

“橡皮套鞋”反导系统与美国的“卫兵”反导系统都是冷战时期的产物,都存在拦截效率不高的问题,主要原因有三点。

(1) 在大规模核导弹袭击下保卫目标的作用甚微,因为仅漏过少数弹头,就足以造成极大的伤亡和破坏。

(2) 在大气外不能对付先进的突破防御措施,进入大气层后,虽然诱饵和假目标能被识别出来,但此时已近地面,拦截困难。

(3) 固定的反导雷达易遭破坏,在核爆炸下很难保全。

第一代反导防御系统存在诸多技术障碍,也是造成拦截能力低下的重要原因,主要技术障碍有:

(1) 精确制导技术。精确制导武器这一术语起源于20世纪70年代中期,美国在越南战争中首次使用了精确制导炸弹,1973年第四次中东战争中的苏制雷达制导SA-6地空导弹、美制电视制导的“小牛”空地导弹初步具有了精确制导性能,但这一时期能满足长时间、高速度、高精度、高可靠性的用于反导的精确制导技术尚不成熟。

(2) 小型高速计算机技术。第一代计算机(1946年—1958年)以电子管为基本电子器件,第二代计算机(1958年—1964年)以晶体管为主要器件,第三代计算机(1964年—1971年)普遍采用集成电路,第四代计算机(1971年至今)才以大规模集成电路为主,也才具备小型化、高速度的性能,而小型化高速计算机是反导系统中制导、指挥、探测、预警各环节必须拥有的基本设施。其他技术障碍,如高速网络通信技术、高精度远程探测雷达技术等,这些技术都制约着第一代反导防御系统的发展。

尽管第一代反导防御系统实战性能受到广泛质疑,但反导防御系统的发展仍然刺激了导弹技术的进步,这一进步主要体现在多弹头、独立分导再入大气层飞行器(Multiple Independently Target Reentry Vehicles, MIRVs)的发展,它的出现可以使防御系统的对抗能力达到饱和,多弹头代替单弹头使得部署的核弹头数量大大增加,以致美、苏双方的领导人都感到震惊,双方不得不重新坐到谈判桌前,并且于1972年5月签署了一项限制部署反导系统(Antiballistic Missile, ABM)条约,规定双方只能部署一套反导防御系统。

苏联在20世纪70年代末试验了高能武器,这被美国人认为是试图发展ABM的一种高级形式,美国受苏联高能武器发展报告的震动,再加上美国物理学家爱德华·泰勒(Edward Teller)所描述的前景影响,美国总统里根于1983年

3月启动了战略防御计划(Strategic Defence Initiative, SDI),其目的是通过拦截并且摧毁其投掷平台使得核武器无效和过时<sup>[1]</sup>,这一提案被广泛称为“星球大战计划”(源于乔治·卢卡斯的科幻小说和同名电影)。随着苏联1991年解体,SDI计划存在理由不复存在,并在1993年被布什政府终止,它的管理机构战略防御组织被弹道导弹防御组织替代,国家导弹防御计划(National Missile Defense, NMD)取代了SDI计划。NMD与SDI有两个重大区别:一是NMD的任务限制在对抗相对简单且数目少的导弹袭击;二是NMD仅仅依靠陆基的反导导弹,过多的类似星球大战一类的技术并未使用,但后续发展陆续突破了这一初始目标。

随着战区弹道导弹(Theater Ballistic Missile, TBM)技术的扩散,来自第三世界的TBM威胁在20世纪80年代中期被美国认为是对其局部战争冲突的新威胁,特别是1988年的两伊战争中的“袭城战”,使得战区弹道导弹成为全世界的焦点。在“袭城战”中伊拉克共向伊朗发射弹道导弹189枚,伊朗向伊拉克发射弹道导弹77枚,最后伊拉克迫使伊朗让步,达到了其“以炸逼和”的目的。由于弹道导弹相对低廉的价格(当时一架米格-25飞机价值400万美元,而一枚“飞毛腿”弹道导弹价值50万美元,且未考虑飞机的战损),这一次“袭城战”使得全世界看到了弹道导弹巨大的战略作用,很多国家开始购买、改进和研制弹道导弹,以图利用弹道导弹达到非对称战略作用。

随着制导技术、雷达探测技术、卫星预警技术、通信技术和计算机技术的不断发展,制约反导拦截的远距离探测、精确制导、高速通信和高速计算技术取得了长足的发展,在技术进步的支持下,美国政府为了削弱他国的战略威慑能力,为了维持美国一统独霸世界的地位,20世纪80年代后加速了全面研究和部署导弹防御系统的决心和步骤。反导防御系统由单一的以核反核的防御系统已经发展为多层动能拦截系统,美国总统小布什将克林顿政府时期的NMD系统和TMD系统修改为统一的导弹防御系统(MDS),并将陆基中段导弹防御系统(GBMMD)分为助推段防御系统(BDS)、中段防御系统(MDS)和末段防御系统(TDS)三个部分,末段防御系统又可以分为末段高层拦截系统和末段低层拦截系统。发射方式也由单一的陆基固定发射方式发展为陆基机动发射、海基机动发射和陆基固定发射三种方式,特别是中段防御系统又分为陆基中段导弹防御系统(GBMMD)和海基中段防御系统(SBMMD)。

## 1.2 典型反导防御系统介绍

经过20世纪80年代到21世纪前十年的发展,世界上已经有多个国家发展

了各具特色的反导防御系统,本书通过对资料的收集整理,对目前几种典型的反导防御系统进行简要介绍。

### 1.2.1 美国反导防御系统

#### 1. “卫兵”反导防御系统

“卫兵”反导防御系统是美国研制的一种分层反弹道导弹武器系统,1969年在“奈基”X系统的基础上修改而成,主要用于保卫北达科他州大福克斯的“民兵”导弹基地。在美苏1974年7月签订的《反导条约补充议定书》中,规定双方都只保留已建的一个反导系统,美国保留导弹发射场的反导系统。

“卫兵”系统于1963年至1970年进行分系统研制,1970年至1974年进行系统综合试验,1975年4月至1975年10月部署。系统包括一部远程预警雷达、一部导弹阵地雷达、四个遥控发射场,共部署30枚“斯帕坦”拦截弹和70枚“斯普林特”拦截弹。

“卫兵”系统装备的“斯帕坦”拦截弹为“奈克-宙斯”导弹的改进型,高空拦截导弹。采用三级固体火箭发动机,无线电指令制导,地下井垂直发射。弹长16.82m,弹径1.07m,翼展2.94m,战斗部为200万tTNT当量的核战斗部,杀伤半径大于8km。作战半径最大640~960km,最小185km,最大作战高度320km,最小160km。“斯普林特”拦截弹为低空拦截弹,采用两级固体火箭发动机,无线电指令制导,地下井垂直发射。弹长8.23m,弹径最大1.37m,战斗部为1000tTNT当量的核战斗部,杀伤半径400m。最大射程56km,作战高度32~48km。

#### 2. “爱国者”反导防御系统

“爱国者”反导防御系统(patriot anti ballistic missile system)是美国针对苏联SS-12、SS-21、SS-23弹道导弹的威胁,在MIM-104系统的基础上改进的反导防御系统,共有三种型号,即PAC-1、PAC-2和PAC-3,目前具有反导能力的主要是PAC-2和PAC-3系统。

PAC-2系统由美国雷声公司研制,具有反飞机和反战术弹道导弹的双重能力。系统于1987年11月发射试验成功,1989年初开始生产并装备部队。1991年1月18日,PAC-2导弹在海湾战争中成功地拦截了一枚伊拉克发射的“飞毛腿”导弹。在这次战争中伊拉克共发射了88枚改进的“飞毛腿”导弹,其中53枚攻击PAC-2导弹防御区域,PAC-2导弹共发射了157枚,美军称共拦截了51枚“飞毛腿”导弹,后来经过不断地核实,最后认定极其准确的拦截次数只有10次。美国国会统计部门也公布了类似的统计结果,认定海湾战争期间,“爱国者”防空导弹系统对“飞毛腿”的拦截成功率仅为9%。PAC-3系统是PAC-2的后续型号,由美国洛克希德·马丁公司研制,与PAC-2导弹相比,

PAC-3 导弹主要有三点改进:采用了动能杀伤装置、特殊的飞行高度控制器和末制导主动导引技术。

基本的 PAC-2 反导系统由 AN/MSQ-104 接战控制中心、AN/MPQ-53 相控阵雷达、AN/MSQ-24 电源车和两个火力排组成。每个火力排拥有 4 部四联装导弹发射装置。目前,AN/MPQ-53 雷达探测距离为 3~170km,能同时探测 100 个目标轨迹,但最多只能导引 9 枚具有 TVM 终制导的拦截弹。

PAC-2 导弹采用单级固体火箭发动机,导引方式为指令导引+TVM+半主动雷达导引,战斗部为破片杀伤战斗部。弹长 5.18m,弹径 0.41m,有效射程 3~160km,作战高度 0.06~24.240km,最大飞行马赫数 5,每个发射架 4 枚导弹。

PAC-3 导弹采用单级固体火箭发动机,该导弹前部配置有 180 个控制飞行高度的微型固体发动机,导引方式为惯性+主动式 Ka 波段雷达终端导引,战斗部采用直接碰撞杀伤装置加杀伤增强装置。弹长 5.205m,弹径 0.255m,作战距离 150~160km,作战高度 15~20km,最大飞行马赫数 5,每个发射架 16 枚导弹。

### 3. “标准”反导系统

“标准”反导系统(standard anti ballistic missile system)是美国通用动力公司研制的全天候、中远程舰空导弹。经过多次改进,已经演变成 16 种型号的“标准”导弹系列,在“鞑靼人”、“小猎犬”、“宙斯盾”等舰载防空系统中使用。

“标准”-2IV 型 RIM-67C 导弹是“标准”-2 的增程导弹,计划用于对付各种高性能飞机、巡航导弹和战术弹道导弹。1993 年在“标准”-2IV 型的基础上进行了类似“爱国者”导弹反战术弹道导弹的改进,改型后称为“标准”-2IV A 型,作为“海基战区导弹防御系统”中下层防御系统的拦截器,与“宙斯盾”舰载武器系统匹配,采用垂直发射方式。2001 年 12 月 14 日美国取消了“标准”-2IV A 型的研制。

“标准”-3(SM-3)导弹由三级固体火箭发动机和轻型外大气层弹头(Lightweight Exo-Atmospheric Projectile, LEAP)组成,是由 SM-2IV 型导弹发展而来,二者采用了相同的一级助推器和二级双推力火箭发动机,为增加额外的投送能力,增加脉冲式固体火箭作为三级。导弹根据装备于“宙斯盾”舰的 AN/SPY-1 雷达探测到的弹道导弹数据和指令发射,一级固体火箭(MK72)、二级双推力固体火箭(DTRM)和三级(ATK MK136)将 LEAP 送入预定轨道,飞行中导弹接收来自发射的“宙斯盾”舰的中继制导信息和 GPS 导航信息,飞行至距离目标 30s 左右时,LEAP 动能杀伤弹头根据“宙斯盾”舰给定的信息搜索目标,ATK 固体燃料姿态控制系统导引 LEAP 命中来袭弹头。SM-3 导弹不仅具有拦

截末段高层弹头的能力,还具备拦截卫星的能力。2008年2月21日早上3:26分(UTC),美国USS Lake Erie号“宙斯盾”舰发射一枚SM-3导弹成功击落已经失效的美国卫星USA 193,该卫星轨道高度247km,命中时飞行速度3667km/h。

#### 4. 战区高空防御导弹

战区高空防御导弹(Terminal High Altitude Area Defense, THAAD)是美国陆军研发的一款导弹防御用导弹,由于可拦截高度高于“爱国者”系统,因此防御覆盖面更广大,意图取代“爱国者”反导系统。系统采用推力矢量控制技术、红外导引头,以2500m/s的速度飞向目标以摧毁弹头。发射车载弹量10枚,采用车载AN/TPY-2雷达,可以侦测1000km空间范围内的来袭导弹。

#### 5. 陆基中段反导防御系统

陆基中段反导防御系统(GMD)过去又称为国家导弹防御系统(NMD),主要由外大气层外伤器(EKV)、陆基拦截器(GBI)、战场管理指挥管理通信系统(BMC3)、陆基雷达(GBR)、改良早期预警雷达(UWR)和前置X波段雷达(FBXB)构成。系统主要负责对远程和洲际弹道导弹进行拦截,拦截弹部署于阿拉斯加和加利福尼亚,海基X波段雷达安装于半潜式钻井平台上,部署于阿拉斯加艾达克岛(Adak Island),也可移动部署。

GBI由波音公司主承包,轨道科学公司负责固体火箭(BV)的设计,雷声公司负责大气层外拦截器(EKV)的设计,GBI长16.8m,直径1.27m,重量为22.5t,采用井下发射方式,有效射高2000km,三级火箭脱离时EKV速度可达7~8km/s。2004年7月22日在阿拉斯加格里利堡(Fort Greely)部署了首枚实战地基拦截弹,同时为了二次拦截能力的需要,美国在加利福尼亚的范登堡空军基地部署地基拦截弹。

#### 6. 机载激光反导系统

机载激光反导系统(Air Borne Laser, ABL)是由美国波音公司研制的弹道导弹初段拦截系统。武器系统为兆瓦级化学氧碘激光器(Chemical Oxygen Iodine Laser, COIL),载具为波音747-400F飞机,通过机载高能激光武器在对弹道导弹主动段飞行时的火箭发动机进行破坏,以达到摧毁发射中的弹道导弹的目的。2004年11月,兆瓦级激光器通过了地基发射试验,即第一束光试验;代号YAL-1的机载激光反导系统于2007年首次进行低能激光飞行测试;2010年1月首次进行拦截飞行试验,2月成功摧毁2枚测试导弹,美国于2011年底终止了ABL项目,2012年2月14日机载激光系统进行了最后一次飞行。美国前国防部长盖茨的秘书认为:目前ABL系统将永远不会部署,除非能够具有比目前强

20 ~ 30 倍的激光器。

## 1.2.2 俄罗斯反导防御系统

### 1. “橡皮套鞋”反导防御系统

“橡皮套鞋”反导防御系统是苏联研制的一种反弹道导弹武器系统,用于拦截洲际弹道导弹的核弹头或低轨道卫星。苏联从 1957 年开始研制反导防御系统,并于 1964 年开始在莫斯科防区部署“橡皮套鞋”反导防御系统,是世界上第一个具有实战反导能力的反导武器系统,1969 年投入使用。

“橡皮套鞋”反导系统由四个基地和 64 枚 ABM - 1 导弹组成。每个基地装备 6 部“试加”(Try - Add)制导、一部跟踪雷达、一部“狗窝”(Dog House)和一部“猫窝”(Cat House)战场管理雷达。ABM - 1 反弹道导弹由三级组成。一级为固体火箭发动机,二级、三级为液体火箭发动机。导弹长 15.5m,直径 2.05m,射程为 350 ~ 640km,作战高度最大 320km,采用无线电指令制导,地下井垂直发射方式。该反导导弹在来袭导弹的再入段对弹头进行拦截,采用以核反核的防御方式,依靠自身携带的核弹头爆炸摧毁来袭弹头,核弹头当量为 100 万 ~ 200 万 t TNT,有效杀伤半径 6 ~ 8km,可对付小规模洲际弹道导弹袭击,但无法对付大批的,特别是装有多弹头或先进突防能力的来袭弹。20 世纪 80 年代,苏联完成了莫斯科反导防御体系的全部改进工作,即将只能用于拦截大气层外洲际导弹的“橡皮套鞋”反导防御系统扩大成 8 个基地和 100 枚具有双层拦截能力的导弹组成的 ABM - X - 3 反导系统。其中 SH - 04 导弹 36 枚、射程大于 500km,由“橡皮套鞋”改进而来,用于高层拦截;64 枚 SH - 08 导弹具有较高的加速度,用于在低层大气层拦截来袭导弹弹头<sup>[2]</sup>。

### 2. S - 300V 反导防御系统

S - 300V 反导防御系统(S - 300V anti ballistic missile system)是俄罗斯军队装备的全空域、多用途具有反战术弹道导弹和防空双重功能的地空导弹系统,可同时制导 48 枚导弹,攻击 24 个目标。1986 年系统采用 9M83(北约名称“斗士”(Gladiator))导弹达到了有限作战能力,1992 年采用 9M82(北约名称“巨人”(Giant))导弹达到全部作战能力,据称为世界上第一个拥有实战能力的 ATBM 系统。系统由 1 辆 9S457 - 1 战地指挥车,1 辆 9S15MV 360 度监控雷达车,1 部 9S19M2 扇面扫描雷达,4 个发射单元(每个单元装备 1 部多通道 9S32 - 1 导弹制导雷达站,最多 6 辆运输、起竖、发射和雷达多功能车,每辆车可携带 2 枚 9M82 或 4 枚 9M83 导弹)等组成。系统展开时间为 5min。

系统装备的 9S15MV 监控雷达作用距离 10 ~ 250km,9S19M2 扫描雷达作用距离 20 ~ 175km。系统装备的 9M83 导弹主要为防空设计,弹长 7.5m,弹径



0.5m,有效攻击距离6~75km,有效攻击高度0.25~25km,最大速度1700m/s。9M82导弹具有防空和反战术弹道导弹双重功能,弹长10.0m,弹径0.85m,有效攻击距离13~100km,有效攻击高度1~30km(攻击弹道导弹目标时,有效攻击距离13~40km,有效攻击高度2~25km),最大速度2400m/s。两个型号的导弹均采用惯性+半主动雷达末端导引,两级固体发动机,垂直发射,战斗部装药150kg,并配有近炸引信的聚能破片战斗部,目标最大速度不大于3000m/s。

### 3. S-400 反导防御系统

S-400反导防御系统是俄罗斯第四代防空导弹系统,包括一系列多种型号:近程40N6、中程9M96、远程48N6,既可承担空中防御任务,也可承担战术弹道导弹防御任务。拦截弹道导弹最大射程为50~60km,其火力单元包括一辆指控车、一辆搜索指示雷达车、一辆相控阵制导雷达车和几辆导弹发射车,每辆车可装载不同类和不同数量的导弹,配置灵活。

## 1.2.3 以色列反导防御系统

“箭”式反导系统(arrow anti ballistic missile system)是由以色列和美国共同研制的具有反战术弹道导弹和反飞行器双重功能的防御系统。系统包括四部六联装发射系统、一个发射控制中心、一个通信中心、一个火控中心、一部Elta L波段“Green Pine”-based雷达系统、一个雷达控制中心、一个雷达电源单元、一个雷达冷却单元。采用双模红外被动系统探测、跟踪TBM,采用主动雷达探测跟踪飞行器。

Arrow-2导弹采用二级固体火箭发动机,初段惯性制导+路段同指令制导+被动红外导引导头制导,弹头为近战破片杀伤战斗部。弹长7.0m,弹径0.8m,作战距离90km,作战高度8~50km,最大飞行马赫数为9。导弹采用六联装半拖车热发射式发射装置。

## 1.2.4 印度反导防御系统

印度反导防御系统由两种型号组成:一个型号为“大地”防空导弹(Prithvi Air Defence, PAD),为高层拦截弹;另一个型号为“先进防空”(Advanced Air Defence, AAD)导弹,为低层拦截弹。据称可拦截射程5000km以内的弹道导弹。

# 1.3 导弹防御系统组成

各国反导防御系统有着不同的特点和组成,但反导作战样式基本相同,因而主要的系统组成类似。弹道导弹防御系统的组成首先应该满足作战需求,而弹