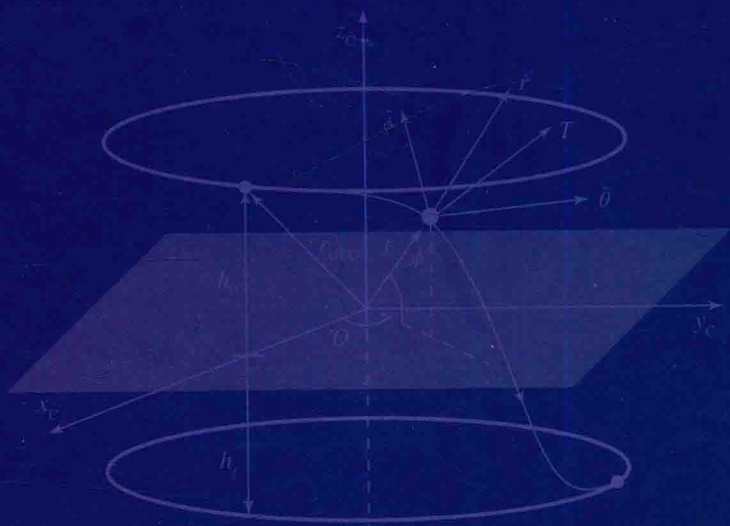




航天科技图书出版基金资助出版

航天器 对抗轨道动力学

袁建平 侯建文 安效民 方群 等著



中国宇航出版社

航天科技图书出版

航天器对抗轨道动力学

袁建平 侯建文 安效民 方群 等著



中国宇航出版社

·北京·

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

航天器对抗轨道动力学 / 袁建平等著. -- 北京 :
中国宇航出版社, 2014

ISBN 978 - 7 - 5159 - 0636 - 2

I. ①航… II. ①袁… III. ①航天器轨道-轨道力学
-动力学-研究 IV. ①V412.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 031222 号

责任编辑 马航

责任校对 祝延萍

封面设计 宇星文化

出版
发行

中国宇航出版社

社址 北京市阜成路 8 号
(010)60286808

邮编 100830
(010)68768548

网址 www.caphbook.com

经销 新华书店

发行部 (010)60286888
(010)60286887

(010)68371900
(010)60286804(传真)

零售店 读者服务部
(010)68371105

承印 北京画中国画印刷有限公司

版次 2014 年 2 月第 1 版

2014 年 2 月第 1 次印刷

规格 880 × 1230

开本 1/32

印张 12

字数 323 千字

书号 ISBN 978 - 7 - 5159 - 0636 - 2

定价 98.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

前言

空间对抗的存在是一个不争的事实。这不仅是人类活动的必然、疆土对抗的延伸，也是空间独特的物理环境、战略地位所决定的必争高地。美国前总统肯尼迪说过，谁控制了空间谁就控制了地球。作者并不是热衷于推动太空的军事化，也不涉及空间武器或其使用，但不能对存在的事实视而不见。为了帮助相关专业人员了解对抗轨道的动力学特征，作者将近年来本团队的研究成果及散见于国内外公开文献的资料集于此册，以使其系统化。

在过去的60年里，空间科学和技术迅猛发展，推动了科学发现，提高了安全水平，增强了国际关系，改善了人们的生活。空间系统在应对天灾人祸、监测长期环境趋势方面不可或缺。空间系统支撑了信息社会的构建，使人们看得更清晰，沟通更顺畅，导航更精确，作业更有保障。美国国防部2011年2月4日公布的《国家安全太空战略》指出，空间能力为美国及其盟友在国家决策、军事行动和本土安全方面提供了史无前例的优势。空间系统能够为应对各种各样的全球性挑战提供快速而又恰如其分的响应，从而为国家安全的决策者提供了不受限制的全球进出能力，创造了决策优势。维护美国在空间的既得利益是其国家安全的一个重心。但是，战略环境的不断演变对美国的太空优势形成了越来越大的挑战。太空——这个不为任何国家所拥有却被所有国家所依赖的疆域——正在变得越来越拥挤，越来越具有对抗性，越来越具有

竞争性。

对抗是人类活动的本能和特征之一，凡有人群活动的地方就有对抗，它与合作同时存在，空间当然不能例外。自从人造飞行器进入空间，就开始了竞争、合作、对抗。美苏的空间对抗活跃期是冷战时期的空间竞赛，也是他们争霸全球的重要部分，包括战略的威慑、技术的领先，甚至是空间事件的全球轰动效应对民众和盟友的激励。

空间对抗，无论人的直接参与或间接参与，都需借助于空间设施，即空间飞行器。为了部署或执行相应的任务，飞行器需要到达相应的空间位置和/或相应的速度，亦即运作于相应的轨道。因此，空间对抗是航天器的一种应用，是一种具有对抗目的的特殊应用。各种轨道的航天器都可能用于对抗，但是专门用于对抗的那些航天器，其轨道有自己的特征。首先，对抗要有应急性，无论是主动攻击还是被动防御的航天器，都要求快速机动，作者的文献《航天器轨道机动动力学》(2010)专门研究了机动轨道。其次，对抗要针对具体目标，轨道运动具有相对性，包括交会、拦截、发射，甚至是多航天器协作，作者的文献《航天器相对运动轨道动力学》(2013)专门研究了相对运动轨道。再则，对抗轨道运动要求自主和准确，在无人参与时完成任务，文献《航天器自主操作的测量与控制》(2011)所述正是。

本书基于太空对抗这个存在的事实，以帮助相关专业人员了解对抗轨道的动力学特征为指导思想，针对航天器的隐蔽、规避、悬浮、拼接、分离、发射、拦截及可达范围等问题，搜集整理最近几年散见于公开文献的资料，将其系统化为9章，第1章首先从人类活动的必然、陆海空对抗的延伸、太空特有的位置和环境等角度叙述了太空对抗的必然性，并对美国、俄罗斯(苏联)伴随人类空间

活动的空间对抗事实进行了综述；第2章是对空间隐蔽轨道的初步研究，包括隐蔽轨道的概念、分类及不同隐蔽轨道的形成；第3章是关于拦截轨道的设计以及相关的拦截制导律、追踪区和摧毁区设计；第4章研究了规避轨道以及规避区判定、规避策略等；第5章是在轨释放与发射动力学、轨迹规划等；第6章则是关于两种在轨发射系统的设计及其地面试验；第7章叙述了在轨分离后飞行器的特殊制导与控制理论和方法；第8章论述了对特定目标的悬浮、编队、轨道拼接等；第9章研究了航天器轨道的可达性，包括数学可达性、物理可达性、工程约束的可达性。第1、3章由袁建平、方群完成，第2章由李恒年、张智斌完成，第4章由方群、袁建平完成，第5章由安效民、阎循良、汤一华完成，第6、7章由侯建文、贺亮完成，第8章由安效民完成，第9章由赵育善、郑伟完成。袁建平承担了全书的策划和统稿工作，和兴锁审阅了全书。

作者

2014年1月

目 录

第 1 章 绪论——空间对抗及其轨道特征	1
1.1 空间对抗的存在和其必然性	1
1.1.1 空间对抗是人类活动的必然	2
1.1.2 空间对抗是疆土延伸的必然	2
1.1.3 空间对抗是其特殊性质的必然	2
1.1.4 空间对抗是美俄一贯的国策	3
1.2 美俄的空间对抗活动	4
1.2.1 美国	4
1.2.2 俄罗斯	14
1.3 对抗轨道的特征	19
1.3.1 隐身轨道	20
1.3.2 规避轨道	20
1.3.3 拦截轨道	21
1.3.4 绕飞轨道	22
1.3.5 伴飞轨道	23
1.3.6 分离轨道	24
参考文献	26
第 2 章 隐蔽轨道的概念设计	27
2.1 被动隐蔽轨道概念	27
2.2 月球借力被动隐蔽轨道概念	28
2.2.1 月球引力辅助的 B 平面分析	29

2.2.2	航天器-月球共振轨道	32
2.2.3	基于航天器-月球共振轨道的隐蔽飞行	36
2.3	洛伦兹力被动隐蔽轨道概念	39
2.3.1	卫星带电与洛伦兹力轨道机动概念	40
2.3.2	洛伦兹力作用下的轨道运动方程	42
2.3.3	基于快速偏离参考轨道的隐蔽飞行	48
2.4	航天器“隐蔽与跟踪”轨道的设计概念	51
参考文献		53
第3章 空间拦截轨道设计		56
3.1	空间轨道拦截策略	56
3.1.1	共面轨道拦截策略	56
3.1.2	异面轨道拦截策略	64
3.2	追踪区、摧毁区和可拦截区的设计	66
3.2.1	追踪区设计	67
3.2.2	摧毁区和可拦截区设计	68
3.3	空间快速拦截轨道设计	70
3.3.1	空间快速共面拦截轨道设计	70
3.3.2	空间快速共面拦截轨道分析	73
3.4	空间拦截末制导律设计	76
3.4.1	坐标系及转换矩阵	77
3.4.2	发动机模型	79
3.4.3	空间拦截中的运动模型	81
3.4.4	导引律设计	82
参考文献		99
第4章 规避轨道的设计		100
4.1	空间目标在轨规避机动	100
4.1.1	几个有代表性的规避过程	100
4.1.2	规避机动的技术途径	102

4.2 危险物体及其判定准则	103
4.2.1 规避对象简介	103
4.2.2 危险物体判定准则	104
4.3 航天器规避机动策略及轨道设计	107
4.3.1 针对空间碎片的规避机动策略	107
4.3.2 针对拦截器的规避机动策略	110
参考文献	130
第5章 在轨释放与发射动力学	132
5.1 概述	132
5.2 相关发射技术分析	132
5.2.1 发射方式分析	133
5.2.2 发射窗口分析	135
5.2.3 发射姿态分析	135
5.3 航天器在轨发射的空间机动路径规划	136
5.3.1 双冲量变轨快速路径规划	137
5.3.2 基于发射窗口的遍历寻优路径规划	147
5.3.3 基于非线性规划算法的组合机动路径规划	152
5.4 航天器在轨释放与发射的轨迹优化	163
5.4.1 基于空间发射的组合机动拦截数学模型	164
5.4.2 多阶段不连续问题的求解技术	167
5.4.3 低轨道目标拦截算例及分析	169
5.4.4 中高轨道目标拦截仿真及分析	174
参考文献	180
第6章 典型在轨分离系统分析与设计	182
6.1 基于弹性势能转换的在轨分离动力学	182
6.1.1 理想情况下弹性势能转换分离过程动力学分析与建模	183
6.1.2 分离过程扰动因素分析与建模	190

6.2	基于滚珠丝杠的大质量体可控分离动力学	202
6.2.1	一种新型大质量体在轨分离系统	202
6.2.2	电机驱动滚珠丝杠副的在轨分离过程动力学分析与建模	208
6.3	在轨释放与分离地面微重力模拟试验	218
6.3.1	基于气浮平台的在轨分离地面模拟试验系统	218
6.3.2	典型在轨分离机构的地面微重力模拟试验	229
参考文献		233
第7章 在轨分离平台的自主制导与控制		235
7.1	在轨分离平台的自主制导与控制问题	235
7.1.1	深度撞击任务	235
7.1.2	罗塞塔任务	239
7.1.3	问题的提出	242
7.2	分离初态对分离后轨道机动准确度的影响分析	243
7.2.1	零速度分离条件下分离窗口求解	243
7.2.2	初始分离速度对轨道拦截机动性能的影响分析	245
7.3	基于母平台信息的子平台自主导航方法	248
7.3.1	自主导航方法	249
7.3.2	自主导航滤波模型	251
7.3.3	自主导航精度分析	254
7.3.4	自主导航方法仿真分析	256
7.4	在轨快速分离过程中的平台姿轨复合控制	261
7.4.1	在轨快速分离过程中子平台姿态稳定控制方法	261
7.4.2	在轨快速分离过程中母平台快速稳定控制方法	268
参考文献		286
第8章 悬浮与拼接轨道优化设计		288
8.1	悬浮轨道的特点与应用分析	288
8.2	基于太阳帆推进的悬浮轨道设计	291

8.2.1 太阳帆航天器推进原理	291
8.2.2 太阳帆悬浮轨道动力学分析	294
8.3 混合小推力推进的地球静止悬浮轨道设计	302
8.3.1 地球静止悬浮轨道特点	302
8.3.2 基于太阳能电推进的悬浮轨道航天器寿命分析	303
8.3.3 基于混合小推力推进的悬浮轨道推进策略	306
8.3.4 针对任务的地球静止悬浮轨道的优化	313
8.4 拼接轨道生成与优化	324
8.4.1 轨道的拼接点及多段轨道生成	324
8.4.2 基于多冲量的悬浮任务的拼接轨道设计	325
参考文献	330
第9章 航天器轨道机动可达范围研究	332
9.1 概述	332
9.1.1 可达性的定义	332
9.1.2 可达性的研究进展	333
9.1.3 研究意义与应用前景	334
9.2 面向自身的轨道机动可达性	335
9.2.1 面向自身的轨道机动可达性描述	335
9.2.2 面向自身的轨道机动可达性建模	339
9.3 面向拦截任务的轨道机动可达性	345
9.3.1 面向拦截任务的轨道机动可达性描述	345
9.3.2 面向拦截任务的轨道机动可达性建模	348
9.4 面向交会任务的轨道机动可达性	361
9.4.1 面向交会任务的轨道机动可达性描述	361
9.4.2 面向交会任务的轨道机动可达性建模	363
9.5 总结	368
参考文献	371

第 1 章 绪论——空间对抗及其轨道特征

1.1 空间对抗的存在和其必然性

空间对抗是一个不争的事实。作者并不是赞成或推动空间的军事化，也不涉及空间武器或其使用，但不能对存在的事实视而不见。为了帮助相关专业人员了解对抗轨道的动力学特征，作者将近年来本团队的研究成果及散见于国内外公开文献的资料集于此册，以使其逻辑化、系统化。

在过去的 60 年里，空间科学、技术、应用迅猛发展，对全球经济做出了极大贡献，提高了国家安全水平，增强了国际关系，推动了科学发现，改善了人们的生活方式。空间系统在应对天灾人祸、监测长期环境趋势方面，也不可或缺。空间系统使人们看得更清晰，沟通更顺畅，导航更精确，作业更有保障。美国国防部在 2011 年 2 月 4 日公布的《国家安全太空战略》^[1]中指出，空间能力为美国及其盟友在国家决策、军事行动和本土安全方面提供了史无前例的优势。空间系统能够为应对各种各样的全球性挑战提供快速而又恰如其分的响应，从而为国家安全决策者们提供了不受限制的全球进出能力，创造了决策优势。维护美国在空间中的既得利益是其国家安全的一个重心。但是，随着战略环境的不断演变，美国的太空优势面临着越来越大的挑战。空间——这个不为任何国家所拥有却被所有国家所依赖的疆域——正在变得越来越拥挤，越来越具有对抗性，越来越具有竞争性。

1.1.1 空间对抗是人类活动的必然

有人群活动的地方就有对抗，它与合作同时存在。这是一个哲学的命题，空间当然不能例外——自从人造飞行器进入空间，就开始了竞争、合作、对抗。因而，空间对抗首先不是人为制造的，而是不可避免的事件，但它后来又是人为制造的、推动的每一个事端。在战略层面上，由于空间的开放性、空间活动的轰动效应和空间安全对国家的主导地位，空间对抗相比其他领域的对抗就更加重要；在技术层面，由于空间技术的前沿性、带动性和对其他行业的扩散性，也始终是各国政府和社会团体关注的焦点。因此，对空间对抗的有关知识我们应该有所准备。

1.1.2 空间对抗是疆土延伸的必然

人类历史上的所有对抗活动都是以争夺资源和疆土开始的，大到国家之间的战争，小到兄弟姐妹的争斗。最初人类的活动只在陆地，对抗活动从石块、弓箭、长矛发展到坦克、火炮、导弹。当飞机开始为长途出行提供方便的同时，对抗活动就延伸到天空，制空权是第二次世界大战后人们对大小战事的共识和结局的主宰。当人造卫星为人类提供通信、气象、电视广播等时，这些技术毫不延迟地被用于军事，甚至很多新的发明首先是为了军事目的。现在又出现了制天权、空间控制，世界各国争相布置空间设施，争夺太空。因此，空间对抗是继陆地、空中之后，人类对抗活动的必然延伸。

1.1.3 空间对抗是其特殊性质的必然

空间对抗比陆地、海洋、空中对抗更具有战略性和主导性，是因其特殊的地位和性质：

1) 空间的高远位置。作用于观测、监视、通信、广播、运输、防御、打击都优于陆地、海洋、空中。

2) 地球的包围带。作为包围着陆地和海洋的无限空间带，其位

置对陆海空不仅形成无缝监视，还对陆海空对抗产生威慑和主宰。

3) 电磁空间的载体。在信息主导现代战事的年代，信息传播在空间，信息节点设施在空间，因而信息对抗也发生在空间。

4) 特殊的物理环境。已经认识到空间的高远位、微重力、强辐射等性质，正在被用来开发地面无法生产的新材料、新产品。其中不乏用于对抗目的。

5) 取之不尽的资源和能源。地球的资源 and 寿命是有限的，而空间是无垠的。我们正在认识和利用太空的资源，特别是新能源。

1.1.4 空间对抗是美俄一贯的国策

对空间对抗必然性的认识是一致的，只是美国和俄罗斯在其强大的国力和领先的技术支撑下率先制定了一系列占据空间对抗优势的政策，发展了一系列从事空间活动的系统和设施。

早在1945年10月，美国海军航空局成立了航天火箭可行性评估委员会，该委员会建议把卫星研制作为高度优先的项目。受军方委托的兰德公司在《实验性环绕地球的航天器初步设计》报告中谈到了卫星的军事应用——侦察、气象观测、通信中继、导弹制导、炸弹落点定位，以及作为观测武器等。1948年3月，美国国防部研究与开发委员会提交了对军用卫星的建议案，将进一步研究的重点放在了太空侦察上。到1960年8月，美国已经发射了第一颗照相侦察卫星、第一颗气象卫星、第一颗导航卫星、第一颗信号情报卫星、第一颗导弹预警卫星、第一颗通信卫星。

20世纪80年代，里根政府提出的“战略防御倡议(SDI)”使太空成为无可争议的战略制高点。

1996年，布什对其航天政策总的指导思想提出了更详细的内容：慑退、警告，必要时抵御敌人进攻；确保敌对武装力量无法阻止美国使用太空；必要时阻止对太空的敌意运用；维持执行太空控制与武力运用等方面任务的能力。当时的国防部长拉姆斯菲尔德主持提交的《美国国家安全太空管理与组织评估委员会报告》指出：与海

洋、陆地、天空相同，太空也是一种媒介，美国将进行往返、驻留和经由太空的各种运作项目，以维护其在地球和太空的国家利益。

新世纪以来，美国接连发布了《空间安全 2003》、《空间安全 2004》和《空间安全 2006》。2011 年 2 月公布的《国家安全太空战略》分析了太空的战略环境，指出其越来越拥挤，越来越具有竞争性，越来越具有对抗性。因此要不断提升美国的太空能力，防止并慑退那些针对美国安全的侵犯行为。

1.2 美俄的空间对抗活动

美国和俄罗斯（苏联）的空间对抗由来已久。我们不可能了解其全部内容，也没有必要列出其每个计划或项目，只是从公开的材料中介绍有代表性的事件以关联轨道动力学问题。

1.2.1 美国

美国一直将其在空间领域的优势看成国家安全的一部分，并在不同时期确立了不同的战略目标，并制定了相应计划，全面研究和验证相关技术。目前，美国主要关注点在于发展跟踪与监视地面和空间目标的能力、空间反卫星能力和空间对地攻击能力。此外，还重启了登月计划、深度撞击、轨道快车等民用项目，这些项目中都含有可用于对抗的技术。

1.2.1.1 反卫星技术

自 20 世纪 60 年代以来，美国、苏联等军事强国一直致力于“以导反星”、“以星反星”和“以能反星”等反卫星武器的研制，并将其作为控制太空、夺取制天权的重要武器装备。反卫星武器形形色色，但从其杀伤机理看，目前已经研制和正在研制的反卫星武器主要分为 4 种类型：

1) 核导弹反卫星武器。利用核弹头在目标航天器附近爆炸产生强烈的热辐射、核辐射和电磁脉冲效应，将航天器结构部件与电子

设备毁坏,或使其丧失工作能力。其作用距离远、杀伤半径大,在武器本身的制导精度较差的情况下仍能破坏目标。但核导弹反卫星武器的缺点是准确度低,附加破坏效应大,容易给己方卫星造成威胁,而且一旦使用,有引发核战争的危险。

2) 动能反卫星武器。动能反卫星武器依靠高速运动物体的动量破坏目标,通常利用火箭推进的方式把弹头加到很高的速度,并使它与目标航天器直接碰撞将其击毁。同时,也可以通过弹头携带的高能炸药爆破装置在目标附近爆炸,产生密集的金属碎片或散弹击毁目标。采用这种杀伤手段的反卫星武器要求高度精密的制导技术,例如美国曾经研制的 F-15 飞机发射的反卫星导弹就能直接命中目标。

3) 定向能反卫星武器。定向能反卫星武器通过发射高能激光束、粒子束、微波束,直接照射与破坏目标。通常把采用这几种射束的武器分别称为高能激光武器、粒子束武器与微波武器。利用定向能杀伤手段摧毁空间目标具有重复使用、速度快、攻击区域广等优点,但技术难度较大,易受天气影响,毁伤目标的效果难以评估。

4) 反卫星卫星。反卫星卫星是一种带爆破装置的卫星,它与目标卫星相同的轨道上,利用自身携带的雷达红外寻的系统探测与跟踪目标,靠近到目标卫星数十米范围之内,将载有高能炸药的卫星战斗部引爆,产生大量碎片,将目标击毁。目前,美国陆军和空军都在加紧研制反卫星卫星。

1959年,美国利用空中发射的弹道导弹率先进行了反卫星武器试验。到20世纪60年代,美国重点研制与试验了带核弹头的反卫星武器,并于1964—1975年在太平洋中部约翰斯顿岛部署了雷神陆基反卫星核导弹。由于这种武器的造价高、附加破坏效应大和使用受到限制,从1978年起美国转向研制小型的常规反卫星武器——空射反卫星导弹。该武器是一种带自动寻的弹头的两级固体导弹,故又称反卫星导弹。其全长5.4 m,直径约0.5 m,质量1 179 kg,弹头部分装有小型拦截器,质量16 kg,长0.3 m,直径0.33 m。整个

导弹由 F-15 战斗机携带到高空发射，在第一、第二级助推器的推动下弹头相对速度达到约 13 km/s 时自动跟踪目标并与其相撞。美国在 1985 年 8 月利用改装的 F-15 战斗机在 1 万米高空发射了一枚反卫星导弹，将一颗在 550 km 上运行的目标卫星击毁，开创了人类第一次用反卫星武器击毁卫星的先例。1984—1985 年美国用反卫星导弹进行了 5 次实弹跟踪目标与打靶试验，原计划再经过 7 次飞行试验后即可装备部队。但是，鉴于苏联在 1983 年以后采取单方面停止向空间发射反卫星武器的行动，美国国会从 1985 年 12 月起已连续 3 年通过法规禁止美国空军进行反卫星导弹的打靶试验，迫使这项计划无法继续实施下去。于是，美国国防部于 1988 年 3 月宣布终止这项历时 10 年的机载反卫星导弹计划。

美国的天基反卫星武器计划主要是指其国防部 1991 年提出的针对有限攻击全球保护系统 (GPALS) 计划。该计划重点发展智能卵石拦截弹，这是一种天基动能反卫星武器，可以大量部署在 450 km 高的低地球轨道上 (多达 1 000 枚)，必要时依靠自身火箭发动机推进，自动寻的撞毁对方的卫星和来袭的弹道导弹。该弹长 1 m，直径 10~13 cm，净重只有几磅，具有体积小、质量轻的特点。它由美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室于 1988 年 8 月开始研制，1990 年首次进行亚轨道拦截空间飞行目标的试验。智能卵石拦截弹主要由导引头、高精度制导系统、惯性测量装置、数传通信系统、推进系统和弹头母舱组成。它采用可见光和紫外线传感器，制导探测用的高分辨率宽视场摄像机具有实时图像处理的能力，光学探测器探测距离远，可以看到数千千米外建筑物大小的目标。它的硬件信息处理能力相当高，相当于两台存储量巨大、运算速度每秒可达 1 亿次的小型计算机，具有一定的智能水平。拦截弹中后部装有径向发动机和多台推力器，可以实现快速控制。为确保碰撞精度，智能卵石拦截弹上设有可以折叠并能径向展开的伞型杀伤增强装置。这种装置在拦截弹向目标接近过程中展开成伞型，迎着近于法线的方向与目标碰撞，从而能增大碰撞面积。不仅如此，该伞型装置还采用穿透