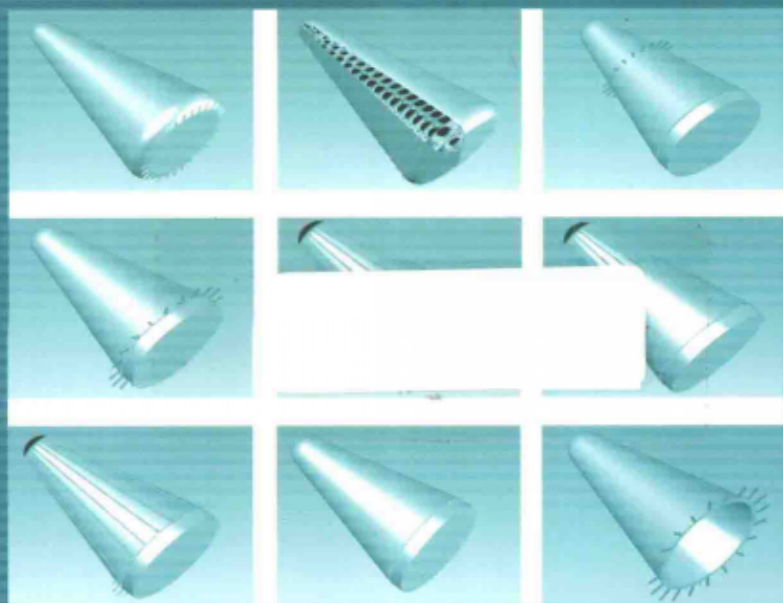




空间低温制冷技术

KONGJIAN DIWEN ZHILENG JISHU

●●●●●●●● 张周卫 汪雅红 著 ●●●●●●●●



兰州大学出版社

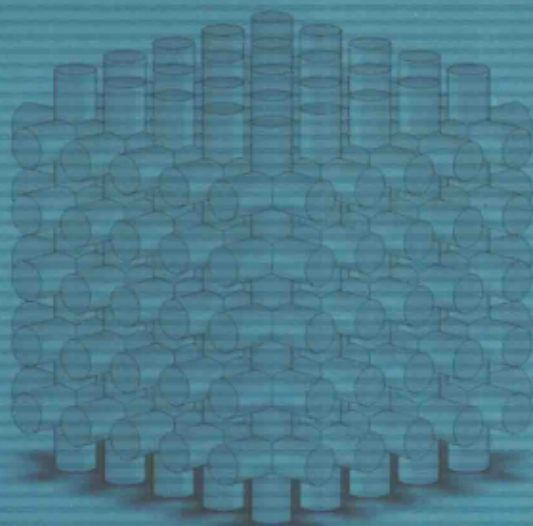
空间低温制冷技术

KONGJIAN DIWEN ZHILENG JISHU

策划编辑 陈红升

责任编辑 陈红升 谢 芮

封面设计 李鹏远



ISBN 978-7-311-04419-0



9 787311 044190 >

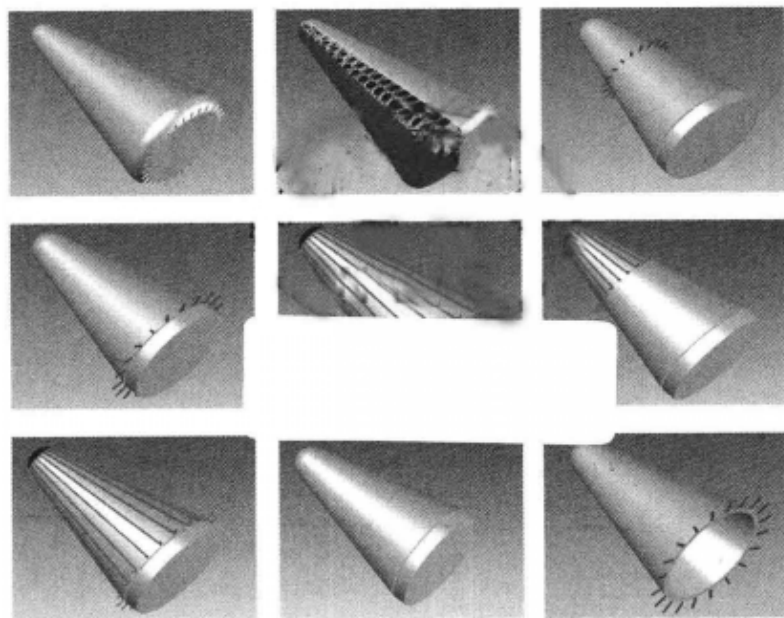
定价：40.00元



空间低温制冷技术

KONGJIAN DIWEN ZHILENG JISHU

张周卫 汪雅红 著



兰州大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

空间低温制冷技术 / 张周卫, 汪雅红著. —兰州:
兰州大学出版社, 2014. 3

ISBN 978-7-311-04419-0

I. ①空… II. ①张… ②汪… III. ①高超音速飞行器—低温—制冷技术 IV. ①V419

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 044381 号

策划编辑 陈红升
责任编辑 陈红升 谢 芮
封面设计 李鹏远

书 名 空间低温制冷技术
作 者 张周卫 汪雅红 著
出版发行 兰州大学出版社 (地址:兰州市天水南路 222 号 730000)
电 话 0931-8912613(总编办公室) 0931-8617156(营销中心)
0931-8914298(读者服务部)
网 址 <http://www.onbook.com.cn>
电子信箱 press@lzu.edu.cn
印 刷 兰州德辉印刷有限责任公司
开 本 787 mm × 1092 mm 1/16
印 张 12.5(插页 1)
字 数 280 千
版 次 2014 年 3 月第 1 版
印 次 2014 年 3 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-311-04419-0
定 价 40.00 元

(图书若有破损、缺页、掉页可随时与本社联系)

前 言

空间低温制冷技术的研究与应用是当前空间技术发展中一项倍受关注的话题,对此技术的深入研究与应用对国民经济的发展及国防安全均具有重要的意义。而与此孪生的红外反探测技术,即隐身技术的研究同样是当前空间技术发展中一个不可或缺的部分。其通过空间深冷剂的相变制冷,使飞行物表面温度降低,有效降低空间飞行物表面的红外辐射力,从而提高飞行器在空间的红外反探测能力,即实现空间红外隐身。本书提出一种以低温深冷剂相变制冷为原理的空间冷屏蔽系统技术,并对空间环境中实现冷屏蔽系统应用的原理及方法进行了深入的探索。

本书重点研究与空间冷屏蔽系统有关的微重力高真空环境下空间冷屏蔽系统表面温度保持在 100 K 以下时的空间制冷技术方法,重点研究对空间冷屏蔽系统性能有重大影响的关键因素,即微重力环境下空间冷屏蔽系统内液氮相变制冷过程中气液两相流动状态及状态参数的分布和变化规律,分析计算微重力状态下深冷剂的物性参数的变化幅度,研究空间低温流体流动过程中含气率随压力和温度的变化规律及速度分布规律,研究深冷剂在毛细材料内由表面张力驱动的热传递问题、毛细提升力和蓄液能力等问题。由于模型在启动过程中存在非稳态变化过程,所以需要对低温气液两相流动状态进行动态数值模拟,研究动态两相流动过程中机械强度与传热、振动频率的变化规律,气液两相的焓、熵的变化规律,温度场、压力场的有效分布规律,研究微重力、超重力环境下以及高真空状态下深冷剂过冷沸腾及过热沸腾时的特性,从而解决模型启动加速过程中非稳态低温流体参数的变化规律及参数对模型结构设计方面的影响因素。本书经过对气液两相流动过程的传热研究,最终确定制冷剂温度、压力、速度等参数的变化规律,从而解决能符合空间环境即微重力高真空环境中制冷装置相变制冷的理论问题。

在当前空间技术的发展中,以低温液体相变制冷为原理的技术应用取得了长足的发展和进步。如果将该技术应用于空间飞行物体,使其在空间实现对外界热量的冷屏蔽效应,就可有效提高其反红外探测识别隐身能力,拓展在空间的实用领域,即本书所谓的空间冷屏蔽系统技术。在任何寻的与识别系统中,一般都是利用物体的光、热、电、磁、红外等信息,对目标进行预警、搜索、发现、识别、跟踪、测轨和拦截等一系列分析处理。目前雷达反识别技术已有了较成熟的发展,然而与雷达相比,红外探测设备具有角分辨率高、质量轻、体积小等优点,可由卫星运载,建立天基监测系统,在空间具有更大的视角,因而目前各国看好和研究发展的对象。

空间高速飞行的各类目标,在运动中的温度及其热辐射有着很大的差别。较小及较轻的飞行物,由于本身的热容量较小,在背景温度为 3 K 左右的高度深冷空间,其表面温度很快下降,红外辐射基本被空间背景辐射所湮没。相比之下,质量和体积都相对较大的飞行物,由于在真空环境中与外界热交换少,仅靠辐射换热本身温度下降不大,所以很容易被红外探测设备发现,从而被监测和拦截。研究资料表明,目前天基红外探测器能从外层空间测出 1600 km 处的人体热辐射;反卫星拦截器携带的红外探测仪的作用距离远至 100~200 km;单元红外探测器的灵敏度可达 10^{-9} W/cm²,多元探测系统则达到 10^{-12}

W/cm^2 ; 成像系统的空间分辨力已达 $0.1\sim 0.2$ mrad, 温度分辨力可达 $0.1\sim 0.3$ $^{\circ}C$ 。为对抗各种红外探测器(或系统)的探测、识别和跟踪, 世界各国都在努力发展反红外探测技术, 于是红外隐身技术应运而生。红外隐身技术从方法上来讲, 可以采用隔热、制冷、辐射遮挡、冷掺、吸热、提高燃烧效果等措施和手段来实现对目标红外辐射特征的抑制; 从本质上来讲, 红外隐身技术所隐藏的信号实际上就是目标的相对辐射能量和红外辐射特征。因而在原理上实现红外隐身主要有三种技术途径, 即降低红外辐射、改变辐射特征和调节红外辐射的传输过程, 三种过程都可采取相应的技术手段来实现。三种技术中, 最为广泛使用的方法主要还是降低目标表面辐射强度。依据红外成像探测仪器的探测原理, 只要减少目标表面发射系数和降低目标表面温度即可实现红外隐身。前者通过在目标表面涂敷具有低发射系数的红外隐身材料来减少目标表面发射系数, 后者则需要通过在目标表面覆盖一层绝热材料的方法或者是利用某些制冷剂 and 相变材料来实现。本课题所研究的空间冷屏蔽系统技术即是利用液氮相变制冷的方法来实现红外隐身。

综上所述, 本书的研究无论从技术意义抑或国防意义上来讲, 都有着一定的应用价值。本文的研究目的主要是针对影响空间冷屏蔽系统表面温度分布的因素进行分析和研究, 以期在红外隐身方面有所实际应用。根据以上分析, 本文重点研究微重力环境下冷屏蔽系统的工作原理问题及毛细材料内深冷剂流动特性问题; 研究过热蒸气及饱和蒸气的排放控制方式以有利于冷屏表面温度控制及不对飞行轨迹产生影响、不会带来摄动问题; 地面模拟高真空微重力环境下空间热辐射对冷屏表面温度分布时要达到天地一致性要求, 最终得到空间运行时的各项参数, 包括气液两相流动参数、设计结构参数、热结构参数等。

由于本书研究课题技术理论难度很大, 理论层次很高, 涉及空间科学、高超声速飞行器、低温制冷、多相流控制等多种基础理论研究, 很多问题是跨学科、跨专业理论问题, 有很大的理论难度、很高的技术含量。限于笔者能力有限, 不能有效开展更深入的研究, 还有很多技术及理论问题未能解决, 也希望通过本书的一点探索性研究, 给将来有兴趣研究空间冷屏蔽系统技术的研究人员一点启示, 一点参考, 以期将来有更多致力于空间低温制冷技术的人将此研究深入下去, 为空间低温制冷技术的研究与发展贡献更多力量。

在本书涉及课题研究过程中, 得到兰州物理研究所真空低温技术与物理重点实验室、国家低温容器检测中心对研究的大力支持, 提供了良好的实验设备和条件。在研究过程中得到了兰州物理研究所多位领导专家的耐心指导, 包括低温分部陈光奇高级工程师、施宝毅研究员、潘雁频研究员、王荣宗研究员、刘详川高级工程师、王小军博士、朱建秉研究员、葛瑞宏高级工程师、黄宏高级工程师等。感谢一起参与研究的温永刚博士、陈联博士、王利红高级工程师、孔冬花工程师、张晓曦工程师等人。同时, 研究过程中得到西安交通大学厉彦忠教授、鱼剑琳教授, 以及兰州理工大学陈叔平教授的悉心指导。出版过程中得到兰州大学出版社陈红升副教授、谢芮老师的耐心修改与宝贵意见, 一并感谢。

兰州交通大学
张周卫 汪雅红

目 录

1 绪论	001
1.1 高超声速飞行器防御系统的发展及现状	001
1.1.1 国家高超声速飞行器防御系统(NMD)的组成及其技术依托	002
1.1.2 战区高超声速飞行器防御系统(TMD)的组成及其技术依托	005
1.1.3 动能拦截弹的发展与现状	006
1.1.4 俄罗斯国家反高超声速飞行器防御系统	009
1.2 高超声速飞行器技术的发展及现状	010
1.2.1 美国高超声速飞行器技术	010
1.2.2 俄罗斯高超声速飞行器技术	010
1.2.3 其他国家高超声速飞行器技术	012
1.2.4 中国高超声速飞行器技术的发展及现状	012
1.3 高超声速飞行器空间隐身飞行技术方法	015
1.3.1 高超声速飞行器隐身技术特性	015
1.3.2 高超声速飞行器红外隐身飞行技术	019
1.4 高超声速飞行器低温冷屏蔽系统的研究现状	025
1.4.1 国外研究现状	025
1.4.2 国内研究现状	027
1.5 主要研究内容及意义	029
2 高超声速飞行器红外隐身技术方案	031
2.1 研究内容	031
2.1.1 红外低温冷屏蔽系统冷蒸气排放控制研究	031
2.1.2 红外低温冷屏蔽系统空间低温流体运动状态研究	032
2.1.3 红外低温冷屏蔽系统分层蓄液制冷过程研究	032
2.1.4 红外低温冷屏蔽系统饱和蒸气出口扩压分流技术研究	033
2.1.5 红外低温冷屏蔽系统近三相点制冷过程研究	034
2.2 研究目标	035
2.3 输入条件	035
2.4 系统模型初步方案	036
2.4.1 基本原理	036
2.4.2 基本物理模型	036
2.4.3 空间制冷过程分析	038

2.5	空间红外低温冷屏蔽系统模型	040
2.5.1	冷屏基本结构模型	040
2.5.2	主要构件物理参数计算	045
3	高超声速飞行器冷屏蔽系统低温吸附特性研究	047
3.1	可用于低温吸附的毛细材料分类	047
3.1.1	低温吸附实验用毛细材料	047
3.1.2	毛细材料内部孔隙结构	048
3.2	毛细材料低温吸附特性	049
3.2.1	低温流体毛细渗流基本概念	049
3.2.2	立方结构毛细吸附提升模型分析	052
3.3	毛细材料中流体流动控制方程	054
3.3.1	单相渗流过程	054
3.3.2	两相渗流过程	057
3.3.3	通用控制方程的离散	063
3.4	毛细材料中低温流体流场数值模拟	067
3.5	毛细材料对低温流体物理性能影响实验研究	068
3.5.1	真空度变化时液氮饱和温度变化规律	069
3.5.2	真空度变化时液氮稳定性实验研究	071
3.5.3	真空度变化时毛细材料内带绝热过热沸腾实验	072
3.5.4	真空度变化时毛细材料内无绝热过热沸腾实验	073
3.6	毛细材料吸附提升液氮实验过程	073
3.6.1	实验方法及装置	073
3.6.2	实验数据整理及分析	074
3.6.3	毛细材料吸附提升液氮高度	078
3.7	本章小结	081
4	冷屏蔽系统单元模型数值模拟及实验研究	082
4.1	单元模型对象的选取	082
4.2	单元模型传热数值模拟	085
4.3	单元模型表面温度及热流分布规律	090
4.3.1	蓄液高度变化时表面温度及热流分布	090
4.3.2	系统压力变化时表面温度及热流分布	096
4.3.3	联结冷却管路时表面温度及热流分布	098
4.3.4	辐射强度变化时表面温度及热流分布	101
4.3.5	冷屏蔽系统底部表面温度及热流分布	102
4.4	单元模型流场数值模拟	104
4.4.1	单元模型内无填充材料	105
4.4.2	单元模型内填充毛细材料	107
4.5	单元模型表面温度分布实验	108

4.6 本章小结	116
5 高超声速飞行器冷屏蔽系统数学模型及数值模拟	118
5.1 红外低温冷屏蔽系统物理模型简化	118
5.2 系统数学模型基本形式	119
5.2.1 蒸气出口管路局部参数关系式	119
5.2.2 绝热起动过程中系统压力与时间对应关系式	120
5.2.3 绝热起动过程中空间环境压力与时间对应关系式	122
5.2.4 中段飞行过程中系统内部流量关系式	122
5.3 风洞实验的数值模拟	123
5.3.1 穿越大气层时弹头表面流场数值模拟	124
5.3.2 穿越大气层时排气管路流场数值模拟	125
5.4 系统模型内部流场数值模拟	126
5.4.1 空间双进口加注系统模型流场数值模拟	126
5.4.2 中段飞行过程中系统模型流场数值模拟	130
5.4.3 2000型无底通用系统模型流场数值模拟	133
5.4.4 控制节流效应出口截面与系统压力对应关系	138
5.5 系统模型节流减压制冷过程	139
5.5.1 节流制冷过程分析	139
5.5.2 双压阀模型及其流场数值模拟	142
5.5.3 双压控制减压阀实验研究	148
5.6 本章小结	150
6 高超声速飞行器冷屏蔽系统实验研究	151
6.1 真空实验装置	151
6.2 静态实验研究	154
6.2.1 控制系统压力 35.0 kPa 时表面温度分布	154
6.2.2 控制系统压力 12.5 kPa 时表面温度分布	156
6.3 动态实验研究	158
6.3.1 垂直旋转时表面温度分布	158
6.3.2 水平旋转时表面温度分布	159
6.4 大气环境中系统模型静态实验表面温度分布	160
6.5 地面实验过程与空间运行过程的差异	162
6.6 本章小结	163
7 高超声速飞行器低温红外隐身关键技术方法	165
7.1 红外低温冷屏蔽系统冷蒸气排放控制技术	165
7.2 红外低温冷屏蔽系统毛细材料低温吸附提升技术	166
7.3 红外低温冷屏蔽系统分层蓄液制冷技术	167
7.4 红外低温冷屏蔽系统饱和蒸气一次扩压分流技术	168
7.5 红外低温冷屏蔽系统过热蒸气二次扩压分流技术	169

空间低温制冷技术	7.6 红外低温冷屏蔽系统低温流体自密封加注技术	170
	7.7 自增压空间低温红外辐射冷屏蔽系统	171
	7.8 空间宽频谱隐身飞行技术方法	172
8 结论与展望		174
	8.1 结论	174
	8.2 展望	176
参考文献		177
附录		182
后记		193

1 绪论

美国率先提出并部署高超声速飞行器防御系统(NMD、TMD及SBIRS)用于拦截来袭战略高超声速飞行器,确保战时不受战略武器威胁,并在东欧的捷克、波兰及苏联的部分加盟共和国部署东欧战区高超声速飞行器防御系统(标准-3)围堵俄罗斯,在亚太地区部署“三线配置”的战区高超声速飞行器防御系统TMD(爱国者-3、标准-3)围堵中国,控制西太平洋地区战略地位极为重要的海峡、航道、海域和岛屿,成为美国在亚太地区推行霸权政策的堡垒,对我国的海上安全和祖国统一构成严重威胁。因此,研制能够突破高超声速飞行器防御系统的隐身高超声速飞行器,提高我国战略武器的突防能力是应付国际突发事件、解决台湾问题和南海争端的需要,也是维护国家主权与领土完整、保持大国之间战略平衡的需要。

1.1 高超声速飞行器防御系统的发展及现状

高超声速飞行器是一种无人驾驶的无翼飞行器,它沿一定的空间轨迹飞行,攻击固定的目标。根据射程远近高超声速飞行器可以分为近程、中程、远程和洲际四种。高超声速飞行器的飞行轨迹由主动段和按自由抛物体轨迹飞行的被动段组成^[1],主动段在动力装置推动下按预定程序飞行,被动段是按主动段终点获得的预定速度和轨迹倾角沿一条椭圆形轨迹做惯性飞行。它一般用来攻击坐标预先已知的固定目标。其中射程不足1000 km的称为战术高超声速飞行器,射程大于这一距离的称为战略高超声速飞行器。高超声速飞行器一般为地对地和潜对地弹道式战略高超声速飞行器,系指从地面(包括地下井)机动发射的和从潜艇上发射的按弹道轨迹飞行的射程大于1000 km打击地面目标的高超声速飞行器。按动力装置的不同,它们又可区分为液体高超声速飞行器和固体高超声速飞行器两种类型。由于其通常携带核弹头,射程远、速度快、命中精度高、杀伤破坏威力大,故而平时是一种强大的威慑力量,在现代军事装备中占有特殊的地位,战时用来打击敌方政治经济中心、军事和工业基地、核武器库、交通枢纽等重要战略目标,能发挥巨大作用。高超声速飞行器具有如下主要特点:一是通常采用垂直发射,高超声速飞行器平稳、缓慢上升,有利于缩短高超声速飞行器在稠密大气层中的飞行时间;二是高超声速飞行器沿着一条预定的轨迹飞行,攻击固定目标;三是高超声速飞行器绝大部分轨迹在稠密大气层以外,故动力装置只能使用火箭发动机;四是飞行器再入稠密大气层时,速度大,空气动力加热剧烈,故须采用有效的防热措施;五是高超声速飞行器飞行姿态的修正,须借助推力方向的调节或改变喷管内排出气流的方向来实现。作为高技术武器的高超声速飞行器,通过制导系统,达到能按预定轨迹飞行,并准确打击目标的目的^[2]。

1.1.1 国家高超声速飞行器防御系统(NMD)的组成及其技术依托

1) 早期预警卫星(Defense Support Program/Space Based Infrared System, 简称 DSP 和 SBIRS High)

美国早期预警卫星用来监测高超声速飞行器的发射并提供粗略的高超声速飞行器发射位置以及有界限误差的轨迹信息^{[3][4]}。这些卫星采用红外探测器探测高超声速飞行器在加速段所喷出的赤热喷流,根据喷流尾迹,预测其飞行轨迹。在高超声速飞行器熄火之后,卫星便不能再看见高超声速飞行器。已经有许多这样的早期预警卫星部署于地球同步轨道,其中包括工作星和备用星,称之为国防支援计划(DSP)卫星。目前,已用天基红外系统 SBIRS High 代替 DSP,由于地球同步轨道很高(约 36000 km),故 SBIRS High 对洲际高超声速飞行器,其预警时间可达 25 min。

2) 空基高超声速飞行器跟踪系统(Space Based Missile Tracking System)

美国正在研制精确跟踪飞行高超声速飞行器的卫星系统,整个星群约有 24 颗星,每颗星上都有好几种探测器,这些探测器包括具有宽视野的红外波长探头用来探测或“捕获”处于加速段飞行的高超声速飞行器,具有窄视野的短红外波长探头以及可见光探头用来跟踪已被发现的目标。跟踪数据力求足够精确,做到在导引拦截器时无须其他探测器的帮助。这种卫星将部署于地球低轨道上,以继续 SBIRS High 的监测工作,故又称为 SBIRS Low。

3) 改进的早期预警雷达(Upgraded Early Warning Radar)

美国在世界范围内部署了好几处早期预警雷达,用来在早期预警卫星失去目标后继续跟踪入侵高超声速飞行器和弹头,这些雷达目前还不能以高精度方式导引拦截器,但改进后会有这种能力。

4) X 波段雷达

NMD 将采用专门设计的相控阵雷达和 X 波段雷达,这些雷达比早期预警雷达具有更好的跟踪性能,并且有助于从空间碎片和假目标中识别弹头。

5) 地面发射拦截器(Ground Based Interceptor)

NMD 的拦截器由一个装在助推器顶端的外大气层动能杀伤器(EKV)组成,助推器是一枚地下发射井中的三级火箭,它将 EKV 加速到 7~8 km/s 再将其释放。EKV 能对地球大气层外的目标进行拦截,它首先利用红外和可见光导引头瞄准目标,最后寻的依靠红外导引头,拦截以“点杀伤”方式进行,即 EKV 以直接碰撞来摧毁目标。

6) 作战管理中心

所有来自不同天基和地基探测器的数据都集中到位于科罗拉多州切因山区的主 NMD 作战管理中心^[5]。

7) 飞行拦截器通讯系统

NMD 高超声速飞行器防御系统主要由以上早期预警卫星、空基高超声速飞行器跟踪系统、改进的早期预警雷达、X 波段雷达、地面发射拦截器、作战管理中心和飞行拦截通讯器等组成^{[6][7]}。NMD 的拦截工作过程主要为:SBIRS High 发现 ICBM 助推火箭红外羽烟→SBIRS Low 宽视场红外阵列、X 波段雷达发现中段飞行弹头→SBIRS Low 窄视场红外阵列跟踪中段飞行弹头→BMC 计算、修正拦截点(拦截高度以上,正、侧向机动能达)→杀伤飞行器红外、可见光探测器发现目标→几十千米内杀伤飞行器红外(3~10 μm)寻的瞄准→

拦截完成(见图 1-1)。

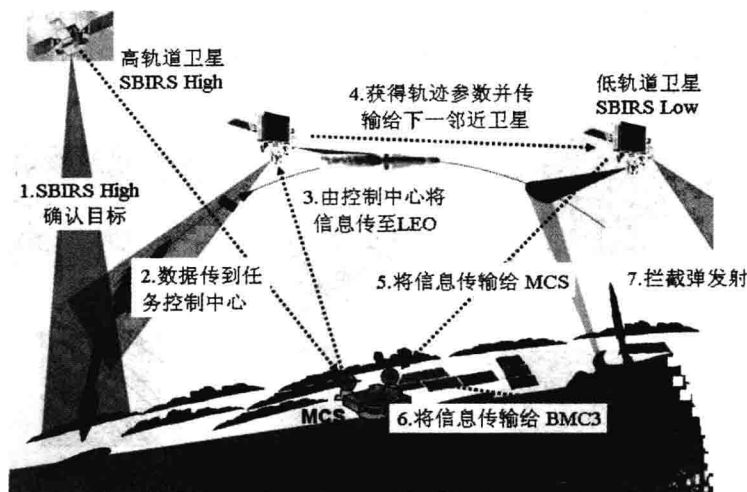


图 1-1 NMD 系统构成及作战简图

洲际高超声速飞行器的助推段典型的工作时间为 200~300 s,助推段后高超声速飞行器就获得了需要的末端速度。然后,在真空中的弹头与弹体进行头体分离,高超声速飞行器进入飞行的末助推段,它是助推段的继续,即弹头定姿态地释放子弹头和突防装置,弹头按照要求,沿轨道以定姿态旋转的状态飞行,这个飞行段首尾大约需要 400~700 s 的时间。此后是中段飞行,高超声速飞行器沿着椭圆轨迹飞行^[8],只有重力能影响它,其有效载荷弹头以 7 km/s 的速度飞行,比步枪子弹快 10 倍,此时弹头飞行在大气层以外约 300~400 km 的高度范围内,相对于落点还需要持续飞行约 1000 s(约 15 min)。第四个飞行段称再入段,大约持续飞行 40 s。

低轨道天基红外系统(图 1-2)是 NMD 对高超声速飞行器的主要监视、识别、跟踪手段,其跟踪探测器要在高超声速飞行器中段提供用于目标跟踪和识别的信息。跟踪探测器将是凝视探测器,使用多个焦平面和波长过滤器,工作在不同的波带。具体使用的波带还未公开,但经过分析认为,探测器将工作在跨越下述频率范围的几个波带下:可见光(0.3~0.7 μm)、短波红外(1~3 μm)、中波红外(3~6 μm)和长波红外(6~16 μm)。中波至长波以及长波红外探测器分辨率太差,不能对弹头大小(约为 2 m)的物体进行成像,相反这些探测器观测到的所有中段物体都是一个点辐射源。探测器也不能分辨相距很近的物体,因此不能观测到突防装置(比如气球)的释放细节。相对于较冷的空间背景,低轨道 SBIRS 探测器的灵敏度似乎足够探测数万千米外的室温、高至中等发射率的弹头大小的目标。低轨道 SBIRS 可见光探测器能探测 6000 km 处的低高度(100 km 切线高度)的目标,但不能测量弹头大小的目标的任何结构细节。NMD 系统能对目标物体的温度进行估算。通过观测目标信号随时间的变化,低轨道 SBIRS 能确定目标是否在翻转,或许还能获得关于目标形状的粗略信息。同样通过观测目标信号随时间的变化,低轨道 SBIRS 还能测量目标温度随时间的变化。这种信号的变化方向能提供关于可见光吸收率对红外辐射率的比值 $\alpha_v/\epsilon_{\text{IR}}$ 的信息。温度变化率还可能反映目标或其外层的热容信息,比如一个具有低热容的氢气球诱饵的温度的变化速度可能比较重的弹头的变化速度更快。低轨道 SBIRS 还可能通过探测反射的太阳光来观测目标,就是说工作在可见光波段。这种

可见光探测器还可能提供关于目标颜色和吸收率的信息。如果把这些信息与发射率-面积结合起来,那么 ε_{ik} 就可以用来更好地估算目标尺寸。实际上,低轨道 SBIRS 并不是唯一的观测目标的探测器,X波段探测器能提供更好的目标尺寸信息,这些信息可与低轨道 SBIRS 的测量信息结合起来。

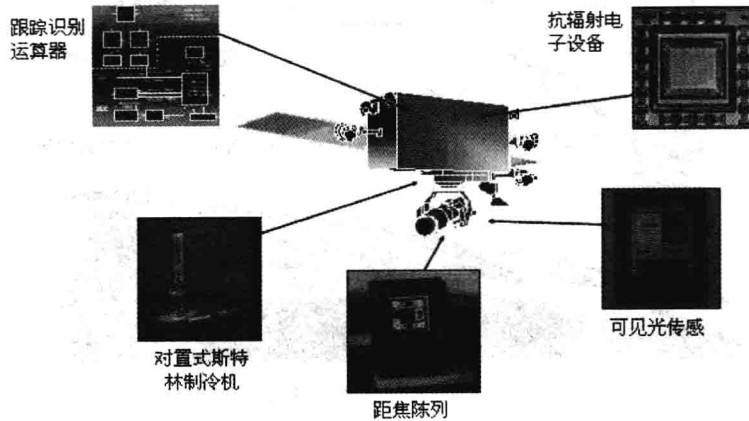


图 1-2 天基低轨红外系统卫星

对来袭高超声速飞行器的拦截可以放在助推段、中段或再入段。NMD 系统则选择在中段击毁弹头目标,主要原因是中段飞行过程最长,空间环境为高真空下深冷背景(2.7 K),经历发射过程后弹头表面温度一般大于 300 K,由于与空间冷背景有很大温差,适于红外探测系统 SBIRS 卫星长时间跟踪。根据星载斯特林制冷机工作原理,在深冷空间冷却温度可达 40~70 K 之间,此温度与弹头表面温度相差 230 K 以上,红外探测器可在千里之外轻易观测并跟踪弹头。助推段拦截比较容易,有利于目标的快速实现,可以在面积较小的有关国家中实施,“就近”发射高超声速飞行器以对飞行在助推段的高超声速飞行器进行拦截。这种方法主要是破坏其助推器,而难以穿透的弹头则原封不动,沿着与原始轨迹近似的轨迹下落,仍然能危害其他地方的非特定目标。

由于来袭高超声速飞行器的发射是来自地球任意地点的任何时间内,所以需要国防支援卫星(即高超声速飞行器预警卫星)不间断地运作并覆盖全部陆地、海洋的表面及自由空间。为了完成该任务所运用的主要手段是观测高超声速飞行器发射时火箭发动机产生的尾焰(强红外辐射)信号,只有地球同步卫星可以完成这一任务,在地球上空约 36000 km 的同步轨道上,星载红外望远镜具有成千上万个光敏元件线列,并以约 10 s 一圈的旋转速率对地面某一特定区域进行扫描,每次扫描可测出红外辐射源位置,连续扫描可测出其移动方向。一旦红外系统发现目标,高分辨率的星载电视摄像机自动或根据地面指令连续向地面站发送目标图像,在地面电视屏幕上显示出高超声速飞行器尾焰的图像运动轨迹,粗略地提供主动段高超声速飞行器目标的运动,并可根据高超声速飞行器尾焰在不同高度上的形状和不同亮度进行目标识别。目前,在地球同步轨道上工作的是 3 颗第三代高超声速飞行器预警卫星,每颗卫星上载有三种探测器:硫化铅 CCD(探测红外 2.7 μm 波段)、碲锡汞双色焦面阵列探测器(探测 4.3 μm 波段)、探测紫外的硅 CCD (0.3~0.5 μm)。高超声速飞行器预警卫星能够提供相对精确的高超声速飞行器测量的第一手数据。一枚正常的洲际高超声速飞行器用 250 s 的燃烧时间就能使弹头飞行大约 5000 km 后击中目标,其燃烧时间的变化有 10 s 之多。

许多布站的GBR地基雷达和X波段雷达站都能够获取并给出有关高超声速飞行器的轨迹和速度数据信息,然而这些雷达不能看到地平线以下的目标。所以,有关这一信息必须依靠即将替代第三代高超声速飞行器预警卫星的天基红外系统的低轨道卫星系统SBIRS Low,该卫星装备了不同的探测系统,包括雷达和热敏传感设备,对空间目标的观测采用三点观测方式,多点观测可以提供更好的信息冗余度。每个空间卫星观测系统的几何位置是不变的,卫星之间的相对运动速度很快,而且每个卫星之间的间隔时间段都很精确。

美国在阿拉斯加格里利堡部署了具有实战能力的拦截弹,完成了美国在格里利堡部署拦截弹的全部计划。从美国部署高超声速飞行器防御系统的行动中,人们发现,美国正在加紧行动,通过发展反导系统,最大限度削弱俄罗斯等国的战略威慑和打击能力。美国进一步加紧对高超声速飞行器防御系统的调试,以确保其具备实战能力,同时提议在欧洲建设高超声速飞行器拦截基地,实际上是把拦截高超声速飞行器部署在俄罗斯的家门口。此外,美国还在加大反导系统的部署力度,把另外两枚拦截弹部署在加利福尼亚州的范登堡空军基地,完成美国反导系统的第1批部署。2005年底,位于阿拉斯加和加利福尼亚州的美军陆基拦截弹数量已达到28枚。

1.1.2 战区高超声速飞行器防御系统(TMD)的组成及其技术依托

TMD计划包括战区高超声速飞行器防御的近期改进计划、核心计划和先进概念研究计划。

1)战区高超声速飞行器防御的近期改进计划

在战区高超声速飞行器防御核心计划尚未完成,还没有形成防御能力以前,近期改进计划要提供高超声速飞行器防御能力,包括以下五个方面的内容:

(1)对PAC-2爱国者高超声速飞行器系统实施快速反应计划和增强制导高超声速飞行器(GEM)改进计划,以提高拦截概率。

(2)霍克高超声速飞行器和TPS-59雷达的改进、改装计划,更新和改进主探测器TPS-59雷达、霍克高超声速飞行器以及二者的通信接口防空通信平台(ADCP)。

(3)改进发射与探测技术,为主动防御提供尽早拦截目标的机会,并为被动防御提供更早的预警。

(4)改进探测器的引导计划,提高火控雷达探测目标的能力,包括战术引导和网络演示,实施增强的机载全球发射测算器(EAGLE)计划,以提高捕获和跟踪在主动段后段与中段飞行的战区高超声速飞行器的能力。

(5)战区司令级高超声速飞行器防御系统试验计划,包括改进战区高超声速飞行器防御系统的指挥、控制和通信系统,完成由战区司令指挥的高超声速飞行器防御作战试验。

2)战区高超声速飞行器防御的核心计划

核心计划由PAC-3爱国者高超声速飞行器系统计划、海基低层战区高超声速飞行器防御计划和战区高空区防御(THAAD)系统计划三部分组成。

(1)PAC-3爱国者高超声速飞行器系统计划:PAC-3系统作为双层陆基高超声速飞行器防御的低层防御系统,这一系统的高超声速飞行器是新研制的增程拦截弹(ERINT),其地面发射车、制导站、雷达和通信系统等采用改进的PAC-2系统相应的地面

设备。

(2)海基低层战区高超声速飞行器防御计划:以美国海军现有的“宙斯盾”系统为基础,改进它的AN/SPY-1A多功能相控阵雷达、MK1控制系统和MK99火控系统,研制标准2IV型高超声速飞行器,提高海基低空战区高超声速飞行器防御能力。

(3)THAAD系统计划:THAAD系统是一个地基机动的高层高超声速飞行器拦截系统,包括THAAD拦截高超声速飞行器及其发射车,地面雷达(GBR),作战管理与指挥、控制、通信、情报(BM/C3I)系统以及其他支援系统等。THAAD系统能在大气层内的高空或大气层外拦截来袭的高超声速飞行器弹头,与PAC-3系统组成双层防御系统。THAAD高超声速飞行器是一种高速动能杀伤拦截弹,由一级固体助推器和一个作为弹头的动能杀伤拦截器(KKV)组成。THAAD系统计划1999年批准,2000年开始部署。

3)战区高超声速飞行器防御的先进概念研究计划

美国高超声速飞行器防御局为了弥补核心计划的不足并对付未来的威胁,提出并实施了先进概念研究计划。

(1)海基高层防御计划:这一计划的拦截方案由“智能眼”(BE)卫星和其他类型超视距探测器提供信息支援,高超声速飞行器采用舰艇垂直发射方式。目前正在进行大气层外轻型射弹(LEAP)的飞行试验、THAAD高超声速飞行器的改进方案的选择以及拦截效能分析评定等。

(2)陆军军级地空高超声速飞行器计划:研制一种新型的地基机动的防空和反导高超声速飞行器系统,用于保护陆军和海军陆战队等机动部队免遭高超声速飞行器和巡航高超声速飞行器的攻击。这一新型高超声速飞行器系统在2000年后替代霍克高超声速飞行器系统。

(3)助推段拦截计划:为将敌方的高超声速飞行器一发射即予以摧毁,高超声速飞行器防御局正在研究和发发展助推段防御系统,主要包括三类:从有人驾驶和无人驾驶飞机上发射高速动能拦截弹方案以及机载激光武器方案等。

美国不仅加紧陆基拦截高超声速飞行器的部署,还加紧了海基拦截高超声速飞行器的部署。至2013年美国导弹防御局将拥有86艘“宙斯盾”战舰。这些战舰装载有可拦截和摧毁中程高超声速飞行器的新型拦截弹,可以用作反导系统前沿预警雷达的平台,从而把预警范围前推到俄罗斯境内。

1.1.3 动能拦截弹的发展与现状

自20世纪80年代以来,美国在高超声速飞行器防御和反卫星计划的名义下,已经论证、研究、研制和试验了各种类型的新概念动能拦截弹及其最核心的技术设备——动能拦截器(KKV)。部署在外层空间或空中,用于拦截助推飞行中的高超声速飞行器的各种动能拦截弹,如部署在空间轨道上的天基拦截弹(SBI)和“智能卵石”(BP)动能拦截弹,以及部署在有人驾驶飞机上的“游隼”(Peregrine)、部署在无人驾驶飞机上的“塔伦”(Talon)动能拦截弹方案等^[9];部署在地面或军舰上,用于在大气层外拦截在中段飞行的高超声速飞行器弹头的各种动能拦截弹,如上层寻的试验(HOE)动能拦截器、大气层外弹头拦截器系统(ERIS)、地基拦截弹(GBI)和标准-3拦截弹等;部署在地面上,用于在大气层内高空或低空拦截已经再入到大气层内的高超声速飞行器弹头的各种动能拦截弹,如大气层内高空防御拦截弹(HEDI)、战区高空区域防御(THAAD)拦截弹和PAC-3动能拦截弹等^[10];

用于反卫星的动能拦截弹,如美国空军研制并试验的由飞机携带在空中发射的微型寻的拦截器(MHV)以及由美国陆军负责研制的地基动能反卫星(KEASAT)拦截弹等。

在这些动能拦截弹中,技术最接近成熟的有三种:一是用于大气层内低层防御近程高超声速飞行器的PAC-3动能拦截弹,该拦截弹在2001年底装备部队;二是可用于大气层高层和大气层外防御中程高超声速飞行器的THAAD动能拦截弹,该拦截弹已经在2000年进入工程研制发展阶段,2007年前后部署;三是用于拦截在大气层外飞行的洲际高超声速飞行器弹头的GBI动能拦截弹,在2005年前后部署这种动能拦截弹。这三种动能拦截弹各具特色,代表了美国当前动能拦截弹的技术发展水平。

1) PAC-3 动能拦截弹

PAC-3动能拦截弹是美国陆军在原“战略防御倡议计划”(SDI)中研制的轻巧灵活制导试验(FLAGE)及其后继型增程拦截弹(ERINT)的基础上发展起来的一种新型动能拦截弹。该拦截弹由一级固体助推火箭、制导设备、雷达导引头、姿态控制与机动控制系统和杀伤增强器等组成。全弹长5.2 m,弹体直径0.25 m,起飞重量315 kg,助推火箭关机后的重量为140 kg。该动能拦截弹在设计上有三个突出的特点:(1)没有可分离的KKV,而是依靠整个拦截弹与目标碰撞摧毁目标;(2)拦截弹采用主动雷达导引头,利用180个小型固体姿控火箭和弹翼进行飞行控制;(3)拦截弹上有一个特殊的杀伤增强器,在拦截弹到达目标附近时通过爆炸装置径向弹射出24个小弹丸,以扩大杀伤半径,主要用于拦截飞机目标。PAC-3动能拦截弹于1994年7月进入工程研制发展阶段,1997年9月,开始进行工程研制阶段的飞行试验,是美国所研制的技术上最成熟的动能拦截弹,与在海湾战争中所用的PAC-2破片杀伤拦截弹相比,PAC-3动能拦截弹有以下几个突出的特点:

(1)尺寸小、重量轻。原来用于发射PAC-2拦截弹的一辆发射车,只能携带4枚PAC-2拦截弹,但改成携带PAC-3拦截弹之后,却可以携带16枚PAC-3拦截弹,从而大大增加了火力。

(2)作战性能提高。海湾战争后经过改进的PAC-2破片杀伤拦截弹也只具有防御射程在600 km以下近程高超声速飞行器的能力,且拦截高度和拦截距离有限,而PAC-3动能拦截弹则可以拦截射程达1000 km的高超声速飞行器,最大拦截距离可以到达40~50 km,最大拦截高度20 km,并兼有反飞机和反巡航高超声速飞行器的能力。

(3)杀伤能力强。PAC-2破片杀伤拦截弹只具有防御携带常规弹头近程高超声速飞行器的能力,而且拦截质量不高(低空拦截所造成的碎片常常对地面构成较大的附带毁伤);而PAC-3动能拦截弹则有能力拦截各种类型的弹头,并通过试验演示了拦截并摧毁化学子母弹头的能力。

2) THAAD 拦截弹

THAAD拦截弹是美国专门为防御战区高超声速飞行器而研制的一种动能拦截弹,由一级固体助推火箭和作为弹头的动能拦截器(KKV)组成。全弹长6.17 m,起飞重量约600 kg。KKV主要由用于捕获和跟踪目标的中波红外导引头、信号处理机、数字处理机、采用激光陀螺的惯性测量装置和用于机动飞行的轨控与姿控推进系统等组成。整个KKV(包括保护罩)长2.3 m,底部直径为0.37 m,重量约60 kg。

THAAD动能拦截弹的论证工作始于20世纪80年代末,1995年4月开始飞行试验。美国国防部于2000年6月批准THAAD系统转入工程研制阶段,在2007年前后装备部队。