

弹道导弹中段弹头表面温度场分布理论分析

张 骏, 杨 华, 凌永顺, 冯云松

(解放军电子工程学院, 安徽 合肥 230037)

摘要: 论述了弹道导弹中段弹头表面温度场分布的理论计算方法, 采用节点网络法, 建立恰当的计算模型, 并运用四阶 Runge-Kutta 法求解了热平衡方程组, 得出弹头中段任意时刻的温度场分布, 最后定量分析了各种因素对弹头温度场分布的影响。

关键词: 弹头; 温度场; 中段

中图分类号: TJ761.3 文献标识码: A 文章编号: 1007-2276(2005)05-0582-05

Theoretical analysis of temperature field on the surface of ballistic missile warhead in midcourse

ZHANG Jun, YANG Hua, LING Yong-shun, FENG Yun-song

(Electronic Engineering Institute of PLA, Hefei 230037, China)

Abstract: The theoretical method calculating temperature distribution of ballistic missile warhead in midcourse is discussed. Based on the network method, an adequate model is established. The Runge-Kutta method is used to solve the heat balance equations, and the temperature field distribution at any time is obtained. In the end, various factors which influence the temperature field are analyzed quantitatively.

Key words: Warhead; Temperature field; Midcourse

0 引言

弹道导弹中段飞行通常位于大气层外, 此时弹头的红外辐射远远超过宇宙背景空间的红外辐射, 再加上中段飞行时间长和弹道固定, 反导系统一般优先考虑中段拦截方案。弹头的红外辐射是反导系统拦截弹头的重要目标特性之一, 中段拦截方案中使用的动能拦截器便采用了多波段红外成像末制导导引头^[1], 因而中段的红外隐身突防显得尤为重要。

研究弹道导弹中段红外隐身的理论和技术, 必须

掌握中段飞行过程中弹头红外辐射的特性, 即弹头在中段的红外辐射的辐射强度及其与频谱、方位、时间和背景辐射的关系。弹头在中段的红外辐射特性可通过实际测量或理论计算来获取, 而实际测量需要大量的物力和财力。因此, 本文将通过理论计算来分析弹头在中段的红外辐射特性。根据普朗克公式可知, 决定黑体辐射出射度的唯一因素是黑体的温度。对于弹头, 其表面可以视为灰体, 灰体的辐射出射度由其表面温度和发射率共同决定, 因此, 计算弹头在中段的红外辐射特性必须掌握弹头在中段的表面温度特性,

收稿日期: 2005-01-13; 修订日期: 2005-03-24

作者简介: 张骏(1981-), 男, 安徽东至人, 硕士生, 主要研究方向为红外/雷达复合干扰。

而物体的表面温度取决于它与周围环境及它们内部自身的热交换和热平衡。本文采用节点网络法,通过求解平衡方程来计算目标表面的温度分布,为进一步建立弹头表面红外辐射特性的理论模型奠定基础。

1 影响弹头温度场分布的因素

热交换方式有三种:热传导、热对流和热辐射。由于大气层外空气分子、游离的原子和宇宙等离子体的中性粒子、离子和电子数的密度非常小,热对流对弹头表面温度分布的影响可以忽略不计,因而在弹头的表面温度计算中只需考虑热传导和热辐射这两种热交换方式。另外,除太阳和地球外,其他星体和宇宙空间与弹头之间的辐射换热可以忽略不计^[2]。弹头表面不存在凹面,相邻部位之间的辐射换热非常微弱,在此也忽略不计。因此,弹头的表面温度分布主要由下列因素决定:

(1) 传播到弹头表面的星体辐射,主要包括:太阳直接投射到弹头表面的辐射(简称太阳直接辐射);地球及其大气系统直接投射到弹头表面的辐射(简称地球辐射);太阳的辐射经地球反射后再投射到弹头表面(简称太阳间接辐射);

(2) 弹头表面向宇宙空间的辐射;

(3) 弹头内部与表面之间的热传导;

(4) 弹头表面相邻部位之间的热传导。

上述因素的综合作用使得中段弹头的表面温度分布不断变化,因此,弹头的表面温度场将是一个时变的瞬态温度场。

2 计算模型的建立

节点网络法的基本思想是把弹头表面划分成若干相对等温且热力特性基本相同的单元,以每个单元作为一个节点,分析节点与弹头内部、节点与背景以及相邻节点间的热交换,从而建立各节点的瞬时热平衡方程式,在一定的初始条件下,递推求解这些方程组,便可以算出弹头表面各节点的温度值及其随时间变化的规律,从而得到中段弹头的表面温度分布及其变化规律。

2.1 目标单元划分及计算坐标系的建立

弹道导弹的弹头外形如图1所示,按照从头部至

底部的顺序,可以将弹头的外表面分成三部分:端头帽面、锥面和底盖面。按照地球经纬线的方式,将其表面划分成 $m \times n$ 份微小的单元,并且把每个单元的几何中心作为一个节点。单元划分得越小,计算结果就越精确;但单元的数目会增加,使计算过程中的计算量显著增加。因此,在实际计算过程中需要折衷考虑、灵活选择单元大小。划分弹头表面单元的原则是:首先,必须使各个单元的表面近似为平面;其次,各个单元的大小应该能很容易地调节,每个单元的体积、面积、几何中心位置等参数都应该比较容易计算,并且表面曲率变化较大的部分尽量多取些单元;最后,在计算机的运算速度和存储空间所能容许的范围内应该尽可能地减小各个单元的尺寸。

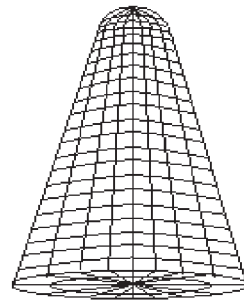


图1 弹头表面面元划分

Fig.1 Partition of the warhead surface

如图2所示,以地球球心为坐标原点,弹头中心位于Z轴,建立计算所需坐标系。弹头在飞行过程中,会围绕其中心轴以较快的速度自旋,可以认为处于同一纬线位置的面元接收环境辐射相同,因此弹头的表面温度将沿中心轴呈对称分布。中段飞行时,弹头中心轴的姿态角保持不变,随着时间的推移,在图2坐标系中,只会引起弹头高度的变化和太阳辐射方向的

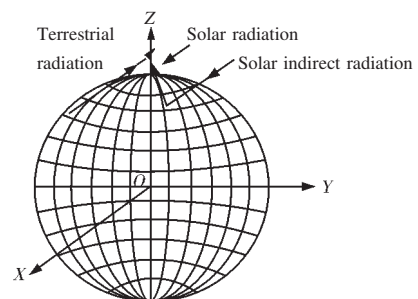


图2 环境辐射示意图

Fig.2 Sketch map of Environment radiation

相对变化。

为了计算地球对弹头的影响,也将它按经纬线划分成若干份。为减小运算量,可以根据弹头高度的不同选择不同的划分精度。

2.2 节点瞬时热平衡方程式的建立

弹头表面的任意单元,在任意瞬间都应该遵守热力学第一定律,设 q_1 为该单元吸收的太阳直接辐射、 q_2 为该单元吸收的太阳间接辐射、 q_3 为该单元吸收的地球辐射、 q_4 为表面相邻单元传导给该单元的热量、 q_5 为弹头内部传导给该单元的热量、 q_6 为该单元朝向宇宙空间的表面(简称为该单元的外表面)辐射到宇宙空间的能量、 q_7 为该单元增加的内能,则有:

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 - q_6 - q_7 = 0 \quad (1)$$

在计算公式(1)各项能量值之前,必须对弹头表面单元作一些理想化假设。首先,假设单元的各个表面均为平面;其次,假设整个单元的温度处处相同;最后,假设单元的外表面是发射率为某一特定值的灰体表面。

(1) 太阳的直接辐射

$$q_1 = E_s S(i, k) \alpha \cos \beta_{so} \quad (2)$$

式中 E_s 表示平均日-地距离为一天文单位时的太阳常数; $S(i, k)$ 为该单元 (i, k) 外表面的面积; α 为单元的吸收率; β_{so} 为单元法线与入射光的夹角。

(2) 太阳的间接辐射

$$q_2 = \frac{E_s S(i, k) \cos \beta_{sc} \cos \beta_{e1} \cos \beta_{jn} \rho_e \alpha}{\pi L_{ik, pq}^2} \quad (3)$$

式中 β_{sc} 表示地球表面单元 (p, q) 法线与入射光的夹角; β_{e1} 表示 (p, q) 法线与 (p, q) 和 (i, k) 两者中心连线的夹角; β_{jn} 表示上述连线与 (i, k) 法线的夹角; ρ_e 表示地球表面单元反射率,为方便理论分析,可取统计年平均值为 0.30^[3]; $L_{ik, pq}$ 表示 (p, q) 和 (i, k) 之间的距离。

(3) 地球辐射

$$q_3 = \frac{M_e S(i, k) \cos \beta_{e1} \cos \beta_{jn} \alpha}{\pi L_{ik, pq}^2} \quad (4)$$

式中 M_e 为 (p, q) 的辐射出射度,可取年平均值 237 W/m²^[4]。当计算环境辐射时,需要考虑遮挡效应。

(4) 相邻单元之间的导热

由于弹头的表面温度沿中心轴呈对称分布,因此,该单元只与沿中心轴方向的前后两个单元进行导热。其导热热量 q_4 为:

$$q_4 = K_w \frac{T_{i+1}(t) - T_i(t)}{\delta_{i+1, i}} S_{i+1, i} - K_w \frac{T_i(t) - T_{i-1}(t)}{\delta_{i, i-1}} S_{i, i-1} \quad (5)$$

式中 K_w 为弹头表面材料的导热系数; $T_i(t)$ 为该单元在 t 时刻的温度; $T_i(i+1)$ 、 $T_i(i-1)$ 分别为两相邻单元在 t 时刻的温度; $\delta_{i+1, i}$ 、 $\delta_{i, i-1}$ 分别为该单元与两相邻单元节点间的距离; $S_{i+1, i}$ 、 $S_{i, i-1}$ 分别为该单元与两相邻单元之间的导热面积。

(5) 内部向表面的导热

弹头内部可视为一内热源,它导给该单元的热量 q_5 为:

$$q_5 = K_w \frac{T_{in}(t) - T_i(t)}{\delta_{in, i}} S_{in, i} \quad (6)$$

式中 $T_{in}(t)$ 为弹头内部相应部位的温度; $\delta_{in, i}$ 为该单元节点与内壁的距离; $S_{in, i}$ 为该单元与内壁的导热面积。

(6) 向宇宙空间的辐射

$$q_6 = \varepsilon \sigma T_i^4(t) S_i \quad (7)$$

式中 ε 为弹头外表面的发射率; σ 为斯忒藩-玻尔兹曼常数。

(7) 内能的增加量

该单元的内能会随着其温度的变化而变化。在任意瞬间,该单元内能的增加量 q_7 为:

$$q_7 = \rho_{wm} C_w V_i \frac{dT_i(t)}{dt} \quad (8)$$

式中 ρ_{wm} 为弹头表面材料的密度; C_w 为弹头表面材料的比热容; V_i 为该单元的体积。

沿弹头中心轴方向取一系列单元,对每一个单元应用以上各式建立一个方程,这些方程的组合便形成一个微分方程组。当已知弹头表面初始温度后,对方程组进行求解,即可得到弹头中段飞行每一时刻表面的

温度值。

3 弹头温度场计算结果分析

微分方程组的解法比较多,如欧拉法、休恩法、泰勒级数法和龙格-库塔法等^[5],参考文献[3]、[6]中提供了一种比较简便的算法,本文采用的是四阶龙格-库塔法^[7,8]。

假设弹头中心轴与 Z 轴夹角为 $\pi/3$, 且初始时阳光直射端头帽面,弹头内部温度恒为 300 K,弹头表面发射率和吸收率为 0.9。从弹头顶部至底部依次取 30、30、15 个节点,如图 3 所示,给出了 680 s 后弹头各节点温度分布。实线为初始温度分布,虚线表示 680 s 后的温度分布。可以看出弹头温度变化很小,温差最大处不到 30 K,这是由假想的弹头表面材料引起的,它的导热系数小、比热容大,并且导热系数随温度的变化率远低于比热容随温度的变化率。图 4 给出了 680 s 后白天和黑夜弹头表面温度场的差别,温差最大处不到 0.6 K,因此,此时环境辐射对温度场的影

响非常小。图 5~图 8 分别给出了 K_w 、 C_w 变化相同倍数情况下的弹头温度场分布。可以看出 K_w 的增大能够加快温度场的变化,但使环境辐射的影响更不明显,而随着 C_w 的减小,既能加快温度场的变化,又可使环境的影响变得较明显。 α 、 ε 也可以影响弹头温度分布,总体来说由于环境的影响不大,所以 α 的影响也不大,但也不能取值太小,否则反射率就会变大。 ε 大能够使弹头较快致冷,但自身辐射也增强。针对弹头的红外隐身,应该选择 K_w 大而 C_w 相对较小的材

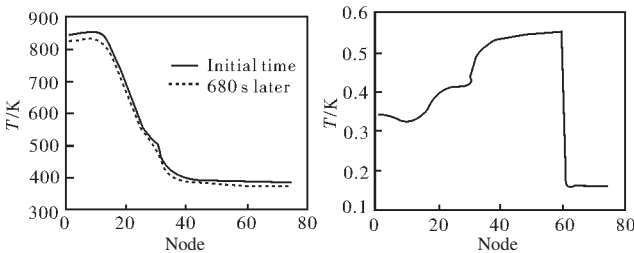


图3 弹头表面温度(白天) 图4 680 s 后各节点白天和黑夜的温度差

Fig.3 Temperature of the warhead surface(day) Fig.4 Temperature difference of every node between day and night after 680 s

料,通过建模评估和工程测试找到具有最佳 K_w 、 C_w 和 α 、 ε 值的材料,以期在最短的时间内达到最低的温度分布,同时不额外增强弹头的红外辐射特征。由于弹头内部热源的作用,靠弹头表面自身散热达到最低的温度也将保持在 300 K 左右,因此必须加装制冷设备对弹头进行降温。

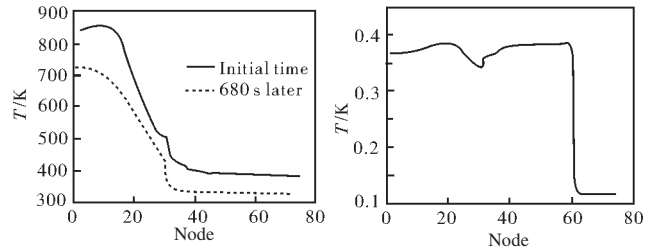


图5 K_w 增大后的弹头表面温度(白天) 图6 K_w 增大后的各节点白天和黑夜的温度差(680 s 后)

Fig.5 Temperature of the warhead surface after increased K_w (day) Fig.6 Temperature difference of every node between day and night after increased K_w (680 s later)

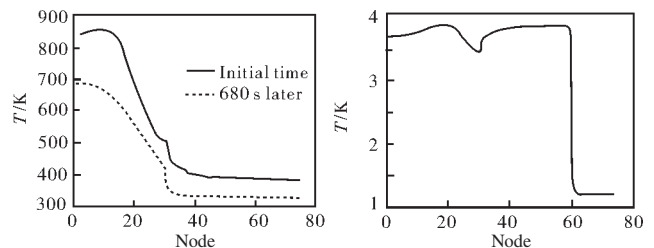


图7 C_w 减小后的弹头表面温度(白天) 图8 C_w 减小后的各节点白天和黑夜的温度差(680 s 后)

Fig.7 Temperature of the warhead surface after decreased C_w (day) Fig.8 Temperature difference of every node between day and night after decreased C_w (680 s later)

4 结束语

本文从节点网络法出发,考虑了太阳辐射、地球辐射以及弹头飞行等因素,建立了计算弹头表面温度分布的模型。该方法简单、切实可行,可以根据需要调整计算精度,为进一步分析弹头表面红外辐射特性建模奠定了基础,为弹头中段红外隐身理论和实践提供了基本参数和理论依据。

参考文献:

- [1] WEN De-yi. The NMD system of USA and analysis of operation style of the NMD system[J].863 Advanced Defence Technology Communication(温德义.美国国家导弹防御系统及其作战方式分析.863 先进防御技术通讯),2001,(1):7-8.
- [2] Itakura Y,Tsutsumi S,Pfaltz J L,et al. Statistical properties of the background noise for the atmosphere windows in the intermediate infrared region[J].Infrared Physics,1974,14(1):17-23.
- [3] YANG Hua. Study on infrared stealth of the ballistic missile in midcourse[D].Hefei:Electronic Engineering Institute(杨华.弹道导弹中段红外隐身研究.合肥:电子工程学院),2002.
- [4] LIU Jing -sheng.Infrared Physics [M]. Beijing : Ordnance Industry Press(刘景生.红外物理.北京:兵器工业出版社),1985.
- [5] WANG Mo-ran.MATLAB and Scientific Calculations[M].Beijing: Electronic Industry Press(王沫然.MATLAB 与科学计算.北京:电子工业出版社),2002.
- [6] WANG Hui -pin,XU Hui,SUN Zhong -kang.Theoretical calculation of IR radiation characteristics of ballistic target out of atmosphere[J].Systems Engineering and Electronics(王慧频,徐辉,孙仲康.大气层外弹道式目标的红外辐射特性的理论计算方法.系统工程与电子技术),1998,20(3):1-6.
- [7] Mathews J H;CHEN Yu,ZHOU Lu,QIAN Fang,et al.Numerical Method [M].Beijing:Electronic Industry Press(Mathews J H;陈渝,周璐,钱方,等.数值方法.北京:电子工业出版社),2002.
- [8] YANG Wei,ZHANG Jian-qi,LIU Jin-song.Theoretical calculations of infrared radiation of the projectile in flight [J].Infrared and Laser Engineering(杨威,张建奇,刘劲松.飞行弹丸红外辐射特性的理论计算.红外与激光工程),2005,34(1):42-45.

(上接第 576 页)

大的情况下,工作 2~3 h 不用进行单点校正;高温(55℃)、低温(-30℃)情况下全部电路板工作正常,能保证系统稳定成像。

参考文献:

- [1] SUN Zhi-jun. Infrared focal-plane technology in twenty years[J]. Sensor World (孙志君.红外焦平面阵列技术的未来二十年.传感器世界),2002,8(11):1-8.
- [2] SOFRADIR CO.LTD. 320×240 LWIR Uncooled Microbolometer Detector Technical Specification[Z].France:SOFRADIR CO.LTD Data sheet,2000.
- [3] Mottin E,Bain A.Uncooled amorphous silicon technology enhancement for 25 μm pixel pitch achievement[A].Infrared Technology and Applications XXVIII,SPIE[C].2002,4820.
- [4] DAI Ming-zhen,ZHOU Jian-jiang.TMS320C54x DSP Framework, Principle and Applications[M].Beijing:Aviation Spaceflight Publishing House(戴明桢,周建江.TMS320C54x DSP 结构、原理和应用.北京:航空航天大学出版社),2001.30-200.
- [5] WANG Yong,ZHAO Bao-Jun.Design of full-digital thermal imager PEU based on DSP and FPGA[J].Laser and Infrared (王勇,赵保军.基于 DSP 和 FPGA 的热像仪电子处理单元全数字化设计.激光与红外),2002,32(2):100-103.
- [6] LI Wu-sen, CHI Ze-ying, CHEN Wen-jian.An initial designing of real-time video image processor with TMS320C6X[J].Infrared Technology (李武森,迟泽英,陈文建.TMS320C6X 为核心的实时视频图像处理器的初步设计.红外技术),2001,23(3):13-15.
- [7] ZHANG Xiong -wei,CAO Tie -yong.The Principle and Application of DSP [M].Beijing:Electron Publishing House (张雄伟,曹铁勇.DSP 芯片的原理与开发应用.北京:电子工业出版社),2000.93-135.
- [8] HU Xiao-mei.Study on IRFPA nonuniformity and its correction [J].Infrared and Laser Engineering (胡晓梅.红外焦平面探测器的非均匀性与校准方法研究.红外与激光工程),1999,28(3):9-12.
- [9] WU Jun-hui,WANG Tao.Nonuniformity correction and emulator of infrared imaging[J].Infrared Technology (吴军辉,王涛.红外图像的非均匀性及仿真.红外技术),2003,25(5):26-29.
- [10] Parrish W J,Woolawa J T.Improvements in uncooled systems using bias equalization[EB/OL].Indigo Systems Corporation.http://www.indigo.com,1999-08.