

•测试、试验与仿真•

红外遮障辐射温度的分析

袁忠才, 赵大鹏

(脉冲功率激光国家重点实验室, 电子工程学院光航系, 安徽 合肥 230037)

摘要: 红外遮障是地面目标重要的红外伪装器材, 它通常由隔热毯和伪装网两部分组成。建立了红外遮障辐射传输过程的物理模型, 对所涉及太阳和天空辐射、辐射换热、热传导、自然对流等进行了分析; 利用有限元方法对该过程进行了仿真分析计算, 得出红外遮障系统最外表面的辐射温度值, 并考察了目标温度以及隔热毯、伪装网材料参数对该温度值的影响。所建立模型以及所得结果可以为红外遮障的遮蔽效果分析和相关工程应用提供参考。

关键词: 红外遮障; 仿真模型; 最外表温度; 参数分析

中图分类号: O435; TK124

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2016)-05-0061-05

Analysis of Radiative Temperature of Infrared Screen

YUAN Zhong-cai, ZHAO Da-peng

(State Key Laboratory of Pulse Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: Infrared screen is an important IR camouflage equipment of ground objects. It is usually composed of heat insulation blanket and camouflage net. The physics model of heat transfer of infrared screen is established. Solar and sky radiation, radiation heat transfer, heat conduction and natural convection involved in above model are analyzed. Simulation analysis and calculation is performed to the process by finite element method. And the radiation temperature values of most outside surface of the infrared screen system are figured out. Then the target temperature and the heat insulation blanket and the camouflage net material parameters influencing on the temperature value are investigated. The established model and calculation results can provide references for the analysis of camouflage effect of infrared screen and relative engineering applications.

Key words: infrared screen; simulation model; temperature on outward appearance; parameter analysis

红外遮障是地面目标重要的红外伪装器材, 它通常由两部分组成, 即隔热毯和伪装网^[1]。隔热毯由隔热性能较好的材料组成, 它的主要作用是遮挡被保护目标的红外辐射; 伪装网则由红外特征可以做到与环境相似的材料组成, 多为不锈钢纤维聚杂纺织物和合成材料聚酯、聚酰胺或聚酯编织物, 它的主要作用是覆盖在隔热毯上, 改变遮挡物的红外特征使其趋于周围背景, 从而增加目标的隐蔽性。

国内外在红外遮障的工程设计、性能测试方面开展了大量的工作^[1-3], 但是对于其辐射特性以及遮蔽性能缺乏理论分析和计算机仿真。文中建立了红外遮障的物理模型, 并基于对太阳和天空辐射、辐射换热、热传导、自然对流的分析, 利用有限元进行了仿真, 得出了多种因素对红外遮障系统最外表面的辐射温度的影响。该方法的计算结果可作为热像仪测量外表面温度和遮蔽效果预估的参考。

收稿日期: 2016-09-27

基金项目: 国防预研基金资助

作者简介: 袁忠才(1977-), 男, 博士, 主要研究方向为光电工程技术。

1 红外遮障中辐射传输过程

1.1 红外遮障辐射模型

假设目标被由隔热毯和伪装网组成的水平红外遮障所覆盖的,周围为地表和大气组成的环境。类似于对地面目标和海面温度的分析^[4-5],在由目标、红外遮障和环境组成的整个系统中,热交换共包含四部分:太阳和天空辐射、辐射换热、热传导和对流换热,如图1所示。

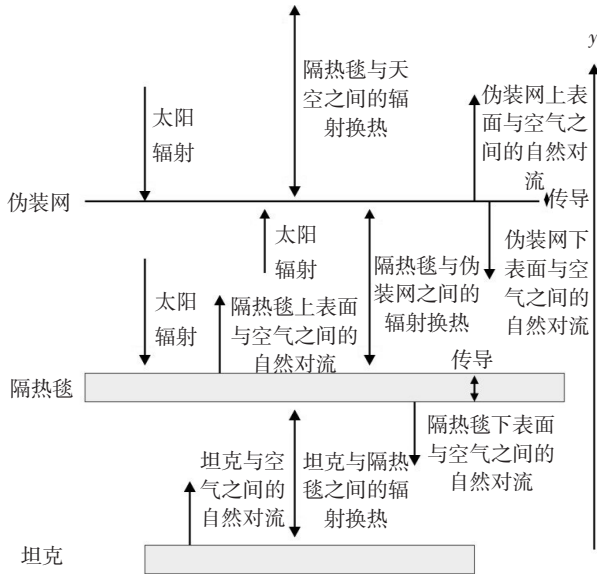


图1 红外遮障与环境的热交换

设目标表面、隔热毯下表面、隔热毯上表面、伪装网下表面、伪装网上表面的发射率分别为 ε_1 、 ε_2 、 ε_3 、 ε_4 和 ε_5 ,反射率分别为 ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 、 ρ_4 和 ρ_5 ,表面温度分别为 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 和 T_5 ,伪装网的透过率为 τ ,空气的温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$,天空的温度为 T_s 、发射率为 ε_s 。

下面分别来考察太阳和天空辐射、辐射换热、热传导和自然对流。

1.2 太阳和天空辐射

设太阳和天空在某一个时间照射到伪装网上的辐射照度为 E_s 。该辐射照度一部分被伪装网上表面吸收,一部分会透过伪装网,其余部分则被伪装网上表面反射。对于透过伪装网的这部分辐照度,会照射到隔热毯上表面上,又由于隔热毯上表面和伪装网下表面都存在有反射和吸收的特性,所以隔热毯上表面和伪装网下表面也都会吸收部分

辐射。

经过无数次的反射与吸收,单位面积的伪装网上表面、下表面和隔热毯上表面所吸收的太阳和天空辐射通量值分别为如下所述。

伪装网上表面为

$$Q_1 = \varepsilon_5 E_s \quad (1)$$

伪装网下表面为

$$Q_2 = \varepsilon_4 \rho_3 \tau E_s + \varepsilon_4 \rho_4 \rho_3^2 \tau E_s + \dots + \varepsilon_4 \rho_3 \tau E_s (\rho_4 \rho_3)^n = \frac{\varepsilon_4 \rho_3 \tau E_s}{1 - \rho_4 \rho_3} \quad (2)$$

隔热毯上表面为

$$Q_3 = \varepsilon_3 \tau E_s + \varepsilon_3 \rho_4 \rho_3 \tau E_s + \dots + \varepsilon_3 \tau E_s (\rho_4 \rho_3)^n = \frac{\varepsilon_3 \tau E_s}{1 - \rho_4 \rho_3} \quad (3)$$

1.3 辐射换热

在整个系统中,存在着目标与隔热毯、隔热毯与伪装网以及伪装网与天空之间的辐射换热。对于发射率为 ε 的灰体表面 A ,如外界入射的辐射照度为 E ,则由该表面出来的辐射出射度有两部分,即表面自身的辐射 εM_b 和反射的入射辐射 $(1-\varepsilon)E$,于是有效辐射出射度为

$$M_e = \varepsilon M_b + (1 - \varepsilon)E \quad (4)$$

A 表面失去的辐射通量应为有效辐射通量减去入射的辐射通量,即为

$$\Phi = M_e A - EA \quad (5)$$

将式(4)代入式(5),并消去 EA 得

$$\Phi = \frac{\varepsilon(M_b - M_e)}{1 - \varepsilon} \quad (6)$$

利用有效辐射出射度,可以求出两个灰体表面间的辐射换热。设 A_1 和 A_2 的有效辐射出射度分别为 M_{e1} 和 M_{e2} ,两个面之间的角系数分别为 F_{1-2} 和 F_{2-1} ,则达到平衡时两灰体表面间的辐射换热为

$$\Delta\Phi_{1-2} = \Phi_{1-2} - \Phi_{2-1} = F_{1-2} A_1 (M_{e1} - M_{e2}) = F_{2-1} A_2 (M_{e2} - M_{e1}) \quad (7)$$

由此可知, A_1 所失去的辐射通量与 A_2 所得到的辐射通量相等,即 A_1 与 A_2 之间的辐射换热可利用式(6)得

$$\Delta\Phi_{1-2} = \frac{\varepsilon_1 A_1 (M_{b1} - M_{e1})}{1 - \varepsilon_1} = \frac{\varepsilon_2 A_2 (M_{b2} - M_{e2})}{1 - \varepsilon_2} \quad (8)$$

由式(7)和式(8)可解出

$$\Delta\Phi_{1-2} = \frac{M_{b1} - M_{b2}}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2} - \frac{1}{A_1 F_{1-2}}} \quad (9)$$

利用式(9),就可以分别求出目标与隔热毯之间、隔热毯与伪装网之间以及伪装网与天空之间的辐射换热。

目标与隔热毯以及隔热毯与伪装网之间的距离较近,远小于各自的尺寸,可将其均视为无限大平板。这时,由于从一个平板上发出的辐射完全落在另一块板上,因此有 $F_{1-2}=1$ 。若 $A_1=A_2=A$,则由式(9)得目标与隔热毯之间的单位面积辐射换热为

$$Q_4 = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2}} \quad (10)$$

类似地,隔热毯与伪装网之间的单位面积辐射换热为

$$Q_5 = \frac{\sigma(T_3^4 - T_4^4)}{\frac{1}{\varepsilon_3} + \frac{1 - \varepsilon_4}{\varepsilon_4}} \quad (11)$$

由于与天空相比,伪装网的面积很小,因此可将其看成一个小面元,可得下式

$$F_{1-2} = \frac{1}{\pi} \int_{\text{上半空间}} \cos \theta d\Omega = 1 \quad (12)$$

这表明,伪装网上表面所发出的辐射全落在天空上。将上式代入式(9)并考虑到天空的面积 $A \rightarrow \infty$,可得单位面积伪装网与天空之间的辐射换热为

$$Q_6 = \varepsilon_5 \sigma(T_5^4 - T_s^4) \quad (13)$$

1.4 热传导

在隔热毯和伪装网的内部存在着热传导,其微分方程的一般形式为

$$\delta_{is} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = \Phi \quad (14)$$

其中, δ_{is} 为与时间相关的系数; ρ 、 C_p 和 k 分别为材料密度、热容和热导率; Φ 为内部热源单位时间、单位体积内发出的热量。这里,结合实际应用,设定 $\Phi=0$ 。

结合材料参数以及边界条件,利用式(14)可以得出隔热毯和伪装网内部的热传导以及温度分布。

1.5 自然对流

在红外遮障系统中,目标上表面、隔热毯、伪装

网都是与空气直接接触的,均与空气之间存在着对流换热。对流换热的量值可以由 Newton 冷却公式给出

$$Q_7 = h(T_w - T_\infty) \quad (15)$$

这里, T_w 和 T_∞ 分别为固体壁和空气的温度; h 为对流换热系数,可以利用边界层对流换热微分方程组来求解。

2 遮障辐射温度的仿真结果

从上面的分析可以看出,要研究红外遮障系统的表面辐射温度 T_s ,就必须考察太阳和天空辐射、辐射换热、热传导与自然对流等各种因素的影响。

工程上通常利用太阳常数、大气透明度和大气质量来简单计算太阳辐射照度,但该方法计算结果精度较差,且不能考察经纬度变化带来的影响。这里,采用 SBDART 方法来计算到达地表的太阳辐射照度^[6]。该方法结合离散坐标辐射传输模块和 LOWTRAN,并利用 Mie 散射理论来考察水滴和冰晶的光散射,可用于计算有无云层条件下到达大气层内任意高度和地表的太阳辐射。

而天空的辐照度由两部分构成,一是晴空状态下大气的辐射 E_{sky} ,二是云层的辐射 E_{cl} 。通常假设大气在环境温度下为一灰体辐射体,其表观发射率与波长无关,则对于水平表面,可由 Brunt 公式得到^[7]

$$E_{sky} = (0.58 + 0.061\sqrt{e})\sigma T_a^4 = \varepsilon_a \sigma T_a^4 \quad (16)$$

其中, e 为空气中的水蒸汽分压,单位为 kPa; T_a 为平均气温。

云层的辐射可利用经验公式求解^[7]

$$E_{cl} = \varepsilon_a (1 + nc^2)\sigma T_{cl}^4 \quad (17)$$

其中, c 为云层覆盖程度; T_{cl} 为云层基本温度; n 为经验参数,低高层是分别为 0.2 和 0.04。

对于红外遮障系统与外界间的辐射换热、热传导与自然对流,利用基于热流耦合的一维模型来求解。

为了使隔热毯、伪装网能起到很好的隔热、伪装效果,假定目标为铁制成,其内部温度均匀点与其上表面距离为 20 cm;隔热毯为尼龙,厚 10 cm,覆盖在目标上,两者相距为 30 cm;伪装网的材料选定为聚甲基丙烯酸甲酯—PMMA,厚 10 cm,它与隔热毯的距离为 50 cm,靠支撑物的支撑覆盖的。这一假定与目标覆盖伪装网时的实际情况基本一致。

沿图1中 y 的方向建立一维模型,各模拟区间的大小以及所设定的材料特征参数与之一一对应,同时考察了边界上的太阳辐射和自然对流以及计算域中的热传导和辐射换热,其中太阳辐射利用SBDART的计算结果。

在分析过程中,设定的一些初始参数的大小值:除了考察红外遮障随太阳辐射来的变化外,均设定时间为中午12:00,对应的太阳辐射照度为 $E_s=1\ 084.6\ \text{W}/\text{m}^2$;目标表面的温度 $T_1=313.5\ \text{K}$ 、 $\varepsilon_1=0.4$;隔热毯下表面 $\varepsilon_2=0.4$;隔热毯上表面 $\varepsilon_3=0.3$ 、 $\rho_3=0.5$;伪装网下表面 $\varepsilon_4=0.5$ 、 $\rho_4=0.3$;伪装网上表面 $\varepsilon_5=0.4$ 、 $\tau=0.5$ 。

2.1 太阳和天空辐射对遮障辐射温度的影响

在固定的地点,不同时间或不同气候条件下,太阳辐射量都会发生变化。图2就是上述经纬度的一天中每个整点,计算得到的太阳和天空辐射量对伪装网表面温度 T_s 大小的影响。

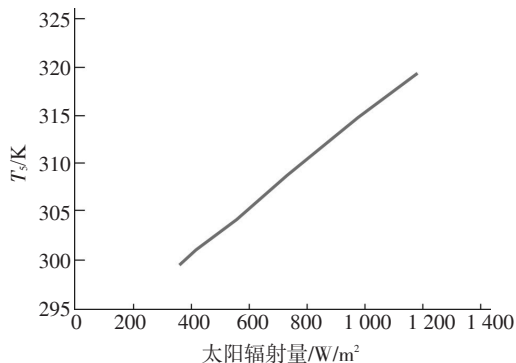


图2 太阳辐射量对 T_s 大小的影响

可以看出,在夜晚由于对应的太阳辐射接近于零,而仅剩余天空的辐射,这时伪装网表面的辐射温度低于目标表面温度;随着太阳和天空辐射量增加, T_s 也跟着变大。这是因为太阳和天空辐射不仅对伪装网表面直接加热,而且影响着整个系统内部的热交换过程,所以它的变化对 T_s 的影响较大。

这一结果表明,在使用红外遮障时,要想达到理想的伪装效果,必须考虑气象条件。

2.2 目标温度对遮障辐射温度的影响

改变目标的温度 T_1 ,通过仿真得到伪装网表面

温度 T_s 的变化如图3所示。

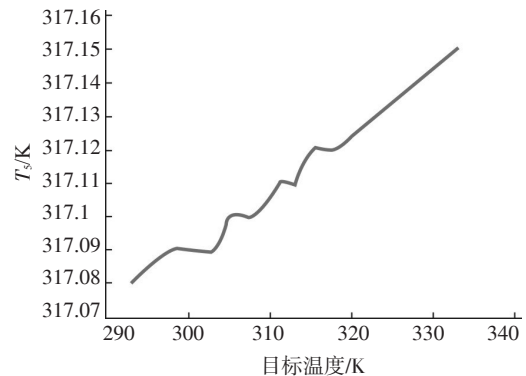


图3 目标温度对 T_s 大小的影响

从图中可以看出,目标温度变大时, T_s 也有增加,但变化的幅度很小,基本保持在317.1 K左右。这可能是由于隔热毯的隔热效果较好,阻挡了目标的红外辐射透过隔热毯。

在计算时,前面假定红外遮障完全遮挡住目标,但如果红外遮障下面是地面背景,图3中的计算结果仍具有参考价值。这一结果表明,由于红外遮障的作用,目标和背景在探测器中表现出的温差大幅下降,这表明红外遮障对目标起到了很好的保护作用。

2.3 材料参数对遮蔽性能的影响

仿真结果表明, T_s 随着伪装网上表面的发射率 ε_s 的变大而减小,随着下表面的发射率的变大而变大,但下表面发射率带来的影响较小。这表明,伪装网上表面的温度,不仅受太阳辐射和伪装网上表面与空气之间的辐射换热、对流换热的影响,还受伪装网下面的隔热毯的影响。

同时,增大隔热毯上、下表面的发射率,均发现伪装网上表面的温度增大,但是温度变化的范围均较小, T_s 基本保持在317.1 K左右。这可能是与所设的目标温度过低有关。通过增大目标的温度,发现在改变隔热毯下表面的发射率时,伪装网表面的温度变化范围增大。

上述结果表明,利用对伪装网和隔热毯上、下表面发射率的控制和优化,不仅可以在红外波段构建出迷彩图案,改变或阻断目标红外辐射的传播,而且结合一个高温热源,可以构建红外假目标。

3 结 论

结合对红外遮障系统中的辐射传输模型中涉及太阳和天空辐射、辐射换热、热传导以及自然对流的分析,通过仿真计算,分析了太阳辐射量、目标温度、伪装网及隔热毯物理参数变化对伪装网上表面辐射温度的影响。结果表明,伪装网上表面辐射温度随着太阳和天空辐射量、隔热毯上表面的发射率的变大而增大,且温度变化较快;而随着目标温度、伪装网下表面的发射率、隔热毯下表面发射率的变大而增大,但温度变化较慢,几乎保持在317.1 K左右。值得特别强调的是,该辐射温度随着伪装网上表面的发射率的变大而减小。

文中所建立的红外遮障辐射模型、分析方法和结果对于红外遮障遮蔽效果的分析具有参考价值。

参考文献

[1] Wallace RE, Koester VJ, Volz WB. Feasibility assessment

of the perfusion screen camouflage concept[P]. ADA120553. 1982-05.

- [2] 曹义,程海峰,郑文伟,等. 伪装遮障热红外辐射温度计算[J]. 激光与红外,2007,37(9):1-3.
- [3] 宣兆龙,易建政,张胜. 一种雷达波衰减型红外迷彩伪装遮障材料设计方案[J]. 军械工程学院学报,2003,15(2):46-49.
- [4] 杨德贵,黎湘. 基于统一模型的典型地表红外辐射特性对比研究[J]. 红外与毫米波学报,2001,20(4):263-266.
- [5] 杨尧,吴振森,姚连兴. 从红外辐照热平衡方程求解海面温度[J]. 红外与毫米波学报,2003,22(5):357-360.
- [6] Ricchiazzi Paul, YANG Shi-ren, Catherine Gautier, et al. SBDART: A research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the earth's atmosphere [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(10): 2101.
- [7] 姚连兴,仇维礼,王福恒. 目标和环境的光学特性[M]. 北京:宇航出版社,1995.

《光电技术应用》期刊简介

《光电技术应用》期刊是中国电子科技集团公司主管,中国电子科技集团公司光电研究院主办,公开发行的学术性中文科技期刊。以光电技术为主要专业特色,传播光电技术、光电系统应用技术专业领域的先进科技信息,报道新型科技成果,推动工程技术交流,促进行业科技进步与发展。

期刊所设栏目主要有:综述,光电系统,光学设计,红外技术,激光技术,光电探测,光电器件与材料,信号与信息处理,电路与控制,测试、试验与仿真等。

期刊拥有优秀的编委会成员,审稿专家涉及光电技术的各个领域,具有审稿速度快、质量高,编辑人员具有较高的职业素质,工作认真负责、反馈速度快,期刊版面设计合理、美观大方,印刷质量好,出刊及时。

竭诚欢迎广大读者踊跃投稿。