

文章编号:1004-4213(2011)04-0602-5

人工光源对地面目标表面温度的影响分析

杜石明^{a,b}, 吕相银^{a,b}, 冯云松^b, 张伟^b, 曾凯^b, 陈善静^b, 吴广业^a

(电子工程学院 a. 脉冲功率激光技术国家重点实验室; b. 安徽省红外与低温等离子体重点实验室, 合肥 230037)

摘 要:研究人工光源对地面目标表面温度的影响对目标红外特性的研究以及红外特征的模拟有重要的意义. 以自然环境下人工光源照射地面目标的物理模型为基础, 通过建立导热微分方程和改变目标的外边界辐射能量, 建立起人工光源照射目标时目标表面温度的计算模型, 结合目标表面温度的计算与目标所处的地理环境与方位有关, 本文以合肥某建筑物正东方位表面为例, 对在不同时间段、不同光照参量时目标的表面温度进行了仿真计算与分析. 结果表明: 改变目标的外边界条件即给目标表面采用人工光源照射时, 目标的表面温度将发生改变, 改变的程度取决于光源的照射功率、照射距离以及光源的入射角, 一般情况下, 晚上照射时表面温度变化明显, 白天照射变化不太明显.

关键词:人工光照; 地面目标; 温度; 计算分析

中图分类号: TN21

文献标识码: A

doi: 10. 3788/gzxb20114004. 0602

0 引言

目标的红外识别、资源的红外遥感和遥测所依据的是物体自身及其所处环境的红外辐射特征和彼此之间红外辐射对比特征. 物体的红外辐射特征主要是取决于物体自身温度分布和表面的辐射特性, 因此研究物体(目标)的红外辐射特征应首先研究物体的温度分布及变化规律^[1], 目前, 国内外对地面目标温度及红外特性的研究较多^[2-5], 但是大多数学者和机构在研究时只考虑了自然环境因素的影响, 而对外界光源的影响却未加考虑. 随着社会的发展, 各种光源广泛应用于各个领域, 使得外界光源对目标与背景的影响不容忽视. 因此, 本文在合理的假设下, 建立了采用人工光源照射目标的模型, 模拟与分析了外界光源对目标表面温度的影响, 为进一步进行目标红外特性的研究以及红外特征的模拟提供依据.

1 人工光源照射目标的理论模型

由于地面目标的结构形状复杂, 外界环境不断变化, 目标与外界不断交换能量, 使得对人工光源照射地面目标表面温度的研究相当复杂, 因此, 作出如下的几种假设对问题进行简化: 1) 目标的长、宽尺寸远大于厚度尺寸, 将三维导热问题简化为一维问题来处理; 2) 目标材料为各向同性的均匀材料, 目标表

面温度分布均匀; 3) 假设目标没有内热源, 目标室内空气温度不变, 忽略目标内壁间的辐射换热与外壁面的汽化潜热. 根据假设建立理论模型图和坐标轴图分别如图 1、图 2.

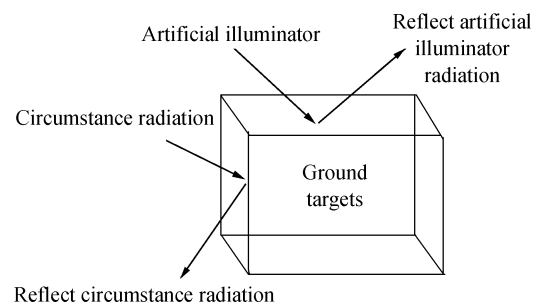


图 1 理论模型

Fig. 1 The theory model

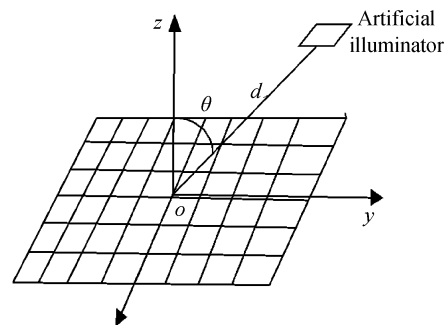


图 2 人工光源照射目标表面的坐标轴

Fig. 2 The coordinate axes of artificial illuminator irradiate the targets's surface

基金项目: 安徽省红外与低温等离子体重点实验室基金(No. 2007A0103013Y)资助

第一作者: 杜石明(1983-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为目标红外特性和光电对抗. Email: dushim@126.com

导师(通讯作者): 吕相银(1978-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光电对抗. Email: lvxiangyin@163.com

收稿日期: 2010-11-04; 修回日期: 2011-01-11

2 目标表面温度的确定

2.1 导热微分方程与边界条件

根据假设,目标围护结构的导热微分方程为^[6-7]

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = k \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \quad (1)$$

式中, ρ 为密度; c 为比热容; τ 为时间; k 为导热系数.

外边界条件为

$$k \frac{\partial t}{\partial n} \Big|_{\text{外边界}} = Q_{\text{外界环境}} + Q_{\text{人工}} + Q_{\text{对流}} - Q_{\text{自身辐射}} \quad (2)$$

式中 n 为边界某处的外法线方向.式(2)左边表示由目标表面向内部导热而损失的热量,右边表示由辐射和对流综合作用造成的目标表面得到的热量.

内边界条件为

$$k \frac{\partial t}{\partial n} \Big|_{\text{内边界}} = h_{\text{in}} (t_{\text{win}} - t_{\text{fin}}) \quad (3)$$

h_{in} 为内部的对流传热系数, t_{win} 为目标内表面温度, t_{fin} 为目标室内温度

2.2 目标温度的计算

用数值方法求解目标温度场时,首先要求解导热微分方程.在解微分方程时,对区域进行离散化,对于方舱式车体外壳、建筑物顶层面、壁面和路面,可将壁体从外向内分为 n 个薄层,设总厚度为 X ,则薄层厚度为 $\Delta x = X/n$,若同时令计算时间 $t = k\Delta\tau$, $k=0,1,2,3\cdots$,则 t 时刻第 i 个薄层的中心温度可表示为 $t(k,i)$.

对于内部节点,利用前向差分法得出内部节点方程

$$\rho c [t(k+1,i) - t(k,i)] / \Delta\tau = k [t(k,i+1) + t(k,i-1) - 2t(k,i)] / (\Delta x)^2 \quad (4)$$

经过整理得

$$t_i^{(k+1)} = (1 - 2F_0) t_i^{(k)} + F_0 (t_{i+1}^{(k)} + t_{i-1}^{(k)}) \quad (5)$$

式中傅里叶数 $F_0 = \frac{\lambda \Delta\tau}{\rho c (\Delta x)^2}$, λ 为目标的热导率.

对于外边界节点方程,需要利用能量平衡方法推出节点方程.则式(2)可以经过推导得节点方程为

$$k \frac{t(k,i-1) - t(k,i)}{\Delta x} + h (t_{\text{air}}^k - t(k,i)) + Q_{\text{radi}}^k + \frac{\epsilon F_{\text{mu}} P \cos(\theta)}{2\pi d^2} - \epsilon \sigma t^4(k,i) = \rho c \frac{\Delta x}{2} \cdot \frac{t(k+1,i) - t(k,i)}{\Delta\tau} \quad (6)$$

式中 t_{air}^k 为空气温度, F_{mu} 为目标表面对光源的角系数, ϵ 为目标表面发射率, Q_{radi}^k 为自然环境作用于目标表面的辐射热能, P 为光源照射功率, d 为光源照

射距离, θ 为被照物体表面法线方向与光源距离之间的夹角(即入射角).在求解此方程时,面临着辐射项温度四次方的问题.为此,利用泰勒公式作线性化处理可得^[8]

$$t^4(k,i) = 4t^3(k-1,i)t(k,i) - 3t^4(k-1,i) \quad (7)$$

对于内边界节点经过整理得

$$t_i^{k+1} = \left[1 - 2F_0 \left(1 + \frac{h_{\text{in}} \Delta x}{\lambda} \right) \right] t_i^k + 2F_0 t_{i-1}^k + 2F_0 \frac{h_{\text{in}} \Delta x}{\lambda} t_{\text{win}} \quad (8)$$

3 仿真计算与分析

以合肥某钢筋混凝土结构的建筑物为例,顶层面积为 $6\text{ m} \times 8\text{ m}$,于2010年5月28日采用氙灯^[9]照射目标.对于光源与该表面的角系数可以采用定义或解析法计算,具体表达式可参考文献^[10],建筑物顶层厚度为 0.25 m ,并把壁面从外向内分为5个薄层.

3.1 不同时间段照射时目标的表面温度

为了准确地对人工光源照射目标的温度进行计算,对当天的温度进行了测量,并作出了气温模拟图.设光源照射功率为 500 W ,垂直入射(指入射角为 0°),光照距离 2 m .分别对目标分为四个阶段进行照射,凌晨 $0 \sim 24$ 点,凌晨 $2 \sim 4$ 点,上午 $10 \sim 12$ 点,晚上 $20 \sim 22$ 点,并对目标中心坐标处面积区域为 $0.6\text{ m} \times 0.8\text{ m}$ 的平均温度进行了仿真计算与实测,见图3至图7.

从图4、5、6、7中的仿真计算与实测值中可以看出,对目标进行人工光照,可以使目标的表面温度发生改变,而且有人工光源照射时目标的表面温度普遍比没有光源照射时的高.从不同时间段来看,目标表面温度改变的程度也不一样,在白天温度改变比较小,变化不太明显.在晚上对目标进行照射时,目标的表面温度变化比较明显,效果比较好,这是因为

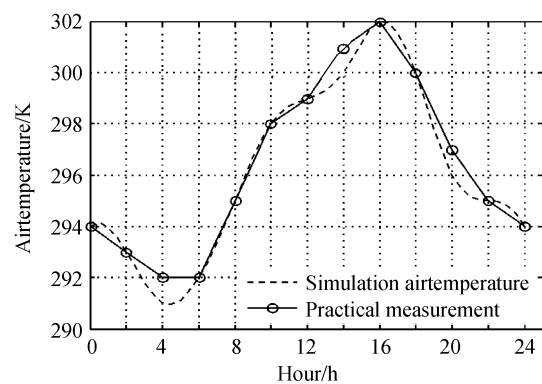


图3 气温实测值与模拟曲线

Fig. 3 The simulation and measured values of air temperature

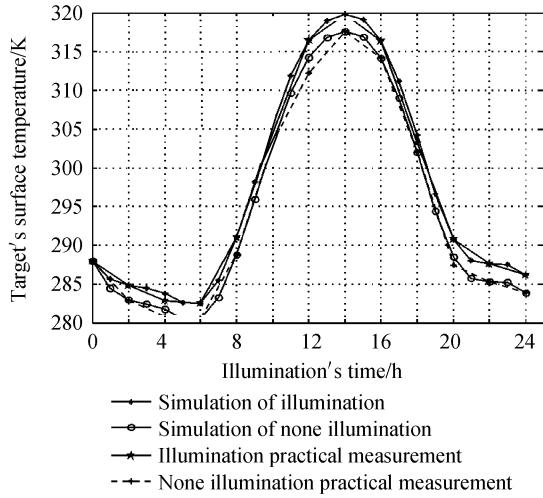


图4 凌晨0~24点仿真计算与实测的目标表面温度
Fig.4 From zero to twenty-four wee hours, calculated and measured values of target's surface temperature

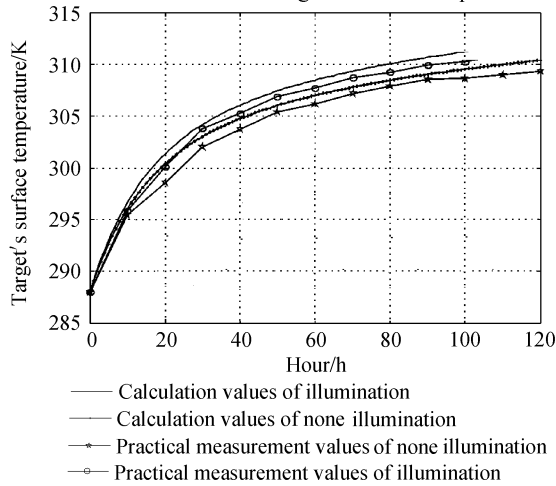


图6 上午10~12点仿真计算与实测目标表面温度
Fig.6 From ten to twelve wee hours, calculated and measured values of target's surface temperature

晚上没有太阳光照射,目标表面温度比较低,当人工红外光源照射时,目标从光源那里得到了能量,使目标的损失能量得到了补偿,因此表面温度变化比较明显.

3.2 不同光照参量时目标的表面温度

1)光照距离的影响

在考虑光源距离与表面温度关系时,假设光源的入射角为 0° ,光源照射功率为500 W,照射时间7点至8点(以1 h为准),如图8.

从图8可以看出,当入射角、照射时间与照射功率一定时,目标的表面温度随着光照距离的增大而减小,光源越靠近目标,目标的表面温度变化越明显,光源越远离目标,目标的表面温度变化越不明显,当距离远到一定程度时,目标的温度趋于平衡,最终目标与背景保持原来的状态,这时光源对目标的温度影响可以忽略.

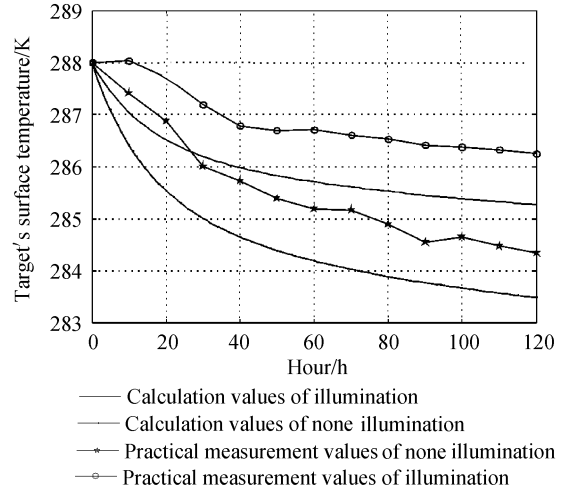


图5 凌晨2~4点仿真计算与实测的目标表面温度
Fig.5 From two to four wee hours, calculated and measured values of target's surface temperature

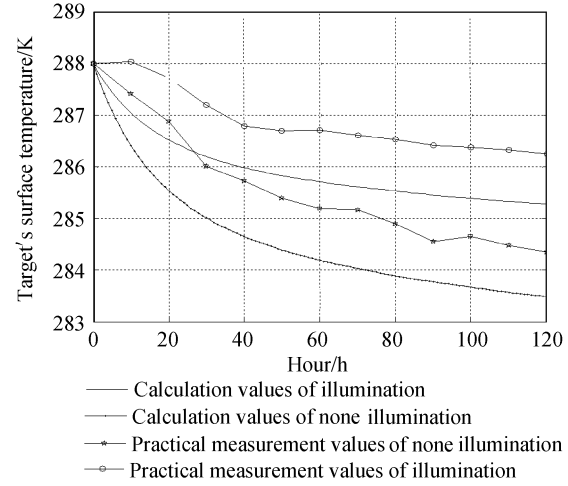


图7 晚上20~22点仿真计算与实测的目标表面温度
Fig.7 From twenty to twenty-two wee hours, calculated and measured values of target's surface temperature

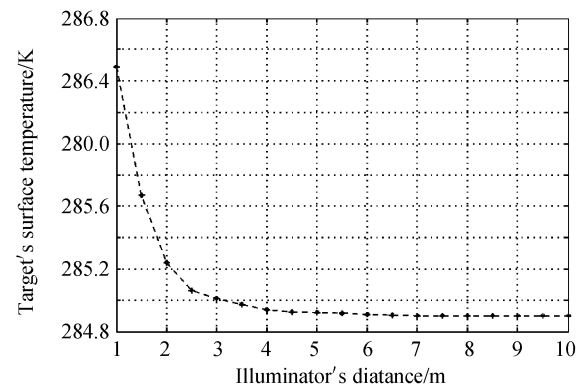


图8 光照距离与目标表面温度的关系
Fig.8 The relationship between illuminator's distance and surface temperature

2)光照功率的影响

在考虑光照功率与表面温度关系时,假设光源的入射角为 0° ,光照距离为2 m,照射时间7点至8点(以1 h为准),如图9.

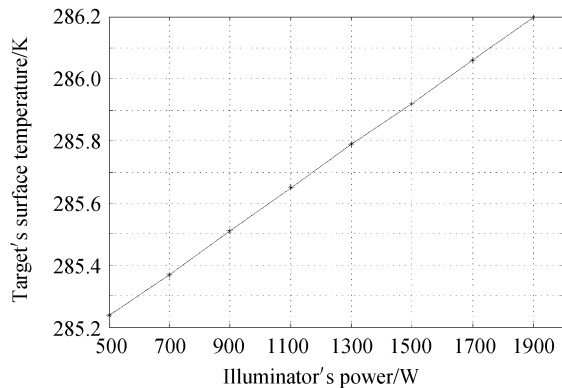


图9 光照功率与目标表面温度的关系

Fig. 9 The relationship between illuminator's power and surface temperature

从图9可以看出,当入射角、光照距离与照射时间一定时,目标表面温度随着光照功率的增加而增加,功率越大,目标表面的温度变化越明显,对目标的表面温度影响越大。

3) 光源入射角的影响

在考虑光源入射角与表面温度关系时,假设光源的照射距离为2 m,光源照射功率为500 W(这个时候光照时间没有多大的关系,因为取任意一个时间段照射时,其变化趋势相同),如图10。

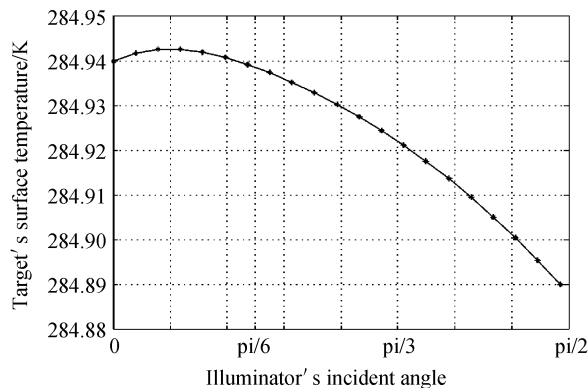


图10 光源入射角与目标表面的关系

Fig. 10 The relationship between illuminator's incident angle and surface temperature

从图10可以看出,当光源照射距离与照射功率一定时,目标表面温度随着入射角的增大而减小,入射角越大,目标温度减小的速度越快,当入射角为 90° 时,既光源与目标平行,此时,光源的照射几乎对目标没有多大的影响,目标的表面温度与环境保持平衡状态,这说明了垂直照射比平行照射对目标表面温度的影响大。

4 结论

通过对人工光源对地面目标表面温度的影响分析,本文得到主要结论为:

1)在自然环境下,改变目标的外边界条件即给

目标表面采用人工光源照射时,目标的表面温度将发生改变,改变的程度取决于光源的照射功率、照射时间、照射距离以及光源的入射角。

2)在人工光照参量一定的情况下,从不同时间段来看,目标表面温度改变的程度也不一样,在白天照射时,目标表面温度改变比较小,变化不太明显;在晚上照射时,目标的表面温度变化比较明显,光源对目标的影响大。

3)在相同条件下,光源的照射功率越大,目标表面的温度变化越大,光源对目标的影响就越大;近距离照射比远距离照射对目标表面温度的影响大;垂直照射比平行照射对目标表面温度的影响大。

参考文献

- [1] 宣益民,韩玉阁.地面目标与背景的红外特征[M].北京:国防工业出版社,2004.
- [2] LU Yan-qin, WANG Zhang-ye, DONG Yan-bin, et al. Study on infrared characteristics of city buildings with season changes and their images[J]. *J Infrared Millim Wave*, 2002, **21**(5): 378-381.
陆艳青,王章野,董雁冰,等.城市建筑物红外特性四季变化及其成像研究[J].*红外与毫米波学报*, 2002, **21**(5): 378-381.
- [3] CHEN Xuan, YUAN Jiang-tao, YANG Li. The simulation of transient infrared signature and stealthy technology of ground targets[J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(5): 706-709.
陈澧,袁江涛,杨立.地面目标动态红外特征模拟与隐身技术的研究[J].*光学技术*, 2007, **33**(5): 706-709.
- [4] WEI Xi-Zhang, LI Xiang, ZHUANG Zhao-wen, et al. Calculation of background radiation and temperature field of infrared target[J]. *J Infrared Millim Wave*, 2000, **19**(2): 140-141.
魏玺章,黎湘,庄钊文,等.红外目标背景及温度场的计算[J].*红外与毫米波学报*, 2000, **19**(2): 140-141.
- [5] GAMBOTTO J P, LEROY V. IR Scene generation under various conditions from segmented real scenes[C]. *SPIE*, 1993, **1967**: 27-38.
- [6] 赵镇南.传热学[M].北京:高等教育出版社,2002.
- [7] CHEN Xuan, YUAN Jiang-tao, YANG Li. The study on infrared characterization and stealthy technology of ground targets[J]. *Journal Engineering Thermophysics*, 2007, **28**(5): 844-846.
陈澧,袁江涛,杨立.地面目标红外特性及其隐身技术研究[J].*工程热物理学报*, 2007, **28**(5): 844-846.
- [8] LÜ Xiang-yin, LING Yong-shun, HUANG Chao-chao. Calculation of surface temperature and infrared radiation for ground target[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(5): 563-567.
吕相银,凌永顺,黄超超.地面目标表面温度及红外辐射的计算[J].*红外与激光工程*, 2006, **35**(5): 563-567.
- [9] CHEN Da-hua. Technology characteristic and application of Xe lamp[J]. *Journal of Lamps and Lighting*, 2008, (4): 18-20.
陈大华.氙灯的技术特性及其应用[J].*光源与照明*, 2008, (4): 18-20.
- [10] 西格尔R,豪厄尔J.R.曹玉璋译.热辐射传热[M].北京:科学出版社,1990.

Analysis of Ground Targets'S Surface Temperature Irradiated Through Artificial Illuminator

DU Shi-ming^{a,b}, LV Xiang-yin^{a,b}, FENG Yun-song^b, ZHANG Wei^b, ZENG Kai^b,
CHEN Shan-jing^b, WU Guang-ye^a

(a. *Pulsed Power Laser Technology State Key Laboratory*; b. *Key Lab of Infrared and Low Temperature Plasma of Anhui Province, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China*)

Abstract: Based on the physical model of which the targets were irradiated through artificial illuminator in normal circumstance, the calculation model of surface temperature was built through building heat conduction differential equations and altering the outedge radiation power. Combing the calculation of surface temperature related to targets's geographical circumstance and orientation, taking the Hefei building's eastward surface for example, the surface temperature was simulational calculated and discussed in different irradiation times and illumination parameters. The results show that altering the targets's outedge namely the targets are irradiated through artificial illuminator, the temperature of targets are changed, the degree of variety is determined by illuminator's power, distance, incident angle, and in general conditions, the surface temperature is changed obviously in the night, but not in the daytime.

Key words: Artificial irradiation; Ground targets; Temperature; Numerical analysis