

## 地面目标与背景的红外辐射对比度特性

娄和利, 吕相银, 周园璞, 吴晓迪

(解放军电子工程学院 安徽省红外与低温等离子体重点实验室, 安徽 合肥 230037)

**摘要:** 红外系统对处于地面背景中的目标探测, 很大程度上取决于目标本身与周围背景之间的红外辐射特征差异, 即两者之间的辐射对比度。简要讨论了辐射对比度与目标发射率及目标背景温差的关系。分析了影响地面建筑物及水泥地面温度的各种因素, 建立了一维有限差分法的计算温度的模型并利用 MATLAB 得以实现。计算了目标与背景在 8~14  $\mu\text{m}$  波段上的红外辐射对比度。结果表明在不同情况下同一目标与背景的红外辐射对比度变化较大, 不同方位墙面与背景的对比度具有不同的变化趋势。

**关键词:** 辐射对比度; 地面目标; 背景; 温度计算

中图分类号: TN21 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2012)08-2002-06

## Infrared radiation contrast between ground target and background

Lou Heli, Lv Xiangyin, Zhou Yuanpu, Wu Xiaodi

(Key Lab of Infrared and Low Temperature Plasma of Anhui Province, Electronic Engineering Institute, PLA, Hefei 230037, China)

**Abstract:** Infrared detection of the ground target was greatly determined by the radiation contrast between the target and its background. The influence of emissivity of target and temperature difference on radiation contrast was briefly discussed. Factors on buildings and cement floor temperature were also analyzed. The model that computed temperature was built on the basis of finite difference method and realized by MATLAB. The target-background radiation contrast at 8-14  $\mu\text{m}$  was calculated on the basis of the simulated temperature. It turns out that the radiation contrast of the same target and background changes significantly under different conditions. Variation trends of radiation contrast of the same target and background when observed in different azimuths are also presented.

**Key words:** radiation contrast; ground target; background; temperature calculation

收稿日期: 2011-12-26; 修订日期: 2012-01-28

基金项目: 安徽省红外与低温等离子体重点实验室主任基金支持项目(2010A001007D)

作者简介: 娄和利(1985-), 男, 硕士生, 主要从事光电对抗方面的研究。Email: louheli2005@163.com

导师简介: 凌永顺(1937-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事研究方向为光电工程方面的研究。

## 0 引言

红外制导武器在发现、识别和目标跟踪的过程中,一般不利用目标的红外辐射特征,而是对目标与周围环境红外辐射的对比度特征来进行分析,将目标与背景区分开完成。随着红外对抗技术的发展,目前世界各国在军用目标上采用了大量隐身措施,如伪装网、红外隐身涂料和其他一些红外抑制措施,为减小目标与背景的红外辐射对比度,使目标完全隐没于背景之中。因此,研究目标与背景或目标不同方位的红外辐射特征及其对比度,对目标识别、红外制导武器研制、红外隐身技术研究、作战模拟训练等具有十分重要的意义和应用价值。

文中以水泥地面为背景,在利用 MATLAB 计算不同表面温度的基础上模拟了地面建筑物各种部位与背景的红外辐射对比度。

## 1 红外辐射对比度的表示方法

红外辐射对比度有多种表示方法,可以用目标与背景的辐射温度、强度、亮度、出射度、功率以及在探测器上的辐射照度表示;所得红外图像可以用目标与背景的灰度表示;由同一物理量表示的对比度还可以分为绝对对比度和相对对比度。对于大多数地面辐射源而言,一定条件下可以视为漫射灰体,并且在工程计算中有足够的准确度<sup>[1]</sup>,因此文中采用常用的辐射出射度表示的相对对比度。

由 Planck 公式和 Wien 位移定律可知,一般地面目标辐射出射度的峰值波长都在 8~14 μm 内,且总的辐射出射度在此波段内占有相当大的比例,考虑到大气窗口的影响,现在的空地红外制导武器的导引头一般都工作在此波段,故研究地面目标与背景在这一波段的对比度具有重要意义。

设目标温度为  $T_0$ ,背景温度为  $T_B$ ,环境温度为  $T_E$ ,可得出目标和背景在 8~14 μm 的有效辐射出射度分别为:

$$M_1 = \varepsilon_0 M_{o,8-14} + (1 - \varepsilon_0) M_{e,8-14} + (1 - \varepsilon_0) M_{b,8-14} \quad (1)$$

$$M_2 = \varepsilon_b M_{b,8-14} + (1 - \varepsilon_b) M_{e,8-14} \quad (2)$$

式中: $\varepsilon_0$ 、 $\varepsilon_b$  分别为目标和背景的发射率。 $M_{o,8-14}$ 、 $M_{b,8-14}$ ,

$M_{e,8-14}$  分别为相对温度的黑体在 8~14 μm 的辐射出射度,表达式如下:

$$M_{o,8-14} = \int_8^{14} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T_0} - 1} d\lambda \quad (3)$$

$$M_{b,8-14} = \int_8^{14} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T_b} - 1} d\lambda \quad (4)$$

$$M_{e,8-14} = \int_8^{14} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T_e} - 1} d\lambda \quad (5)$$

相对于背景对目标的辐射,目标辐射对背景的影响要小得多,故在上述计算中忽略了目标辐射对背景的影响。

目标与背景在 8~14 μm 的辐射对比度表示为:

$$C = \frac{|M_1 - M_2|}{\max\{M_1, M_2\}} \quad (6)$$

红外辐射对比度与目标发射率以及目标背景温差的关系如图 1 所示,其中  $\Delta T = T_0 - T_B$ ,分为背景温度大于和小于目标温度两种情况。

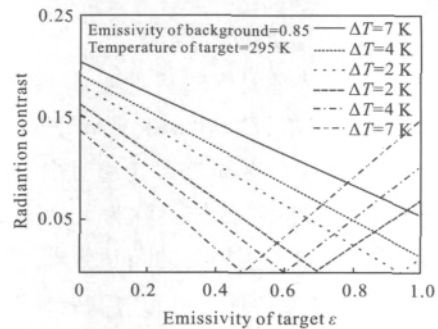


图 1 对比度与发射率的关系

Fig.1 Relationship between contrast and emissivity

由图 1 可知:(1)单纯地减少或增大目标表面的发射率并不能达到降低对比度的效果;也不一定是目标与背景的温差越小,两者的对比度就越小;(2)当目标与背景的温差较小时,可通过改变目标表面的发射率来得到较小的对比度,从而达到隐身效果。当温差较大时,对表面材料的发射率要求较高,通过单一的改变发射率也达不到较好的隐身效果,此时需采取其他措施<sup>[2-3]</sup>;(3)是否存在最佳发射率,使对比度为零从而使目标达到绝对隐身,取决于目标与背景的温差大小和背景的发射率大小。

## 2 目标与背景的温度场模拟

### 2.1 目标的温度场影响因素分析

目标表面的热平衡方程<sup>[4]</sup>为:

$$E_{\text{sun}} + E_{\text{sky}} + M + H + EL + G = 0 \quad (7)$$

式中:  $E_{\text{sun}}$  为单位面积所吸收的太阳短波辐射;  $E_{\text{sky}}$  为单位面积所吸收的大气长波辐射;  $M$  为地表的自身辐射;  $H$  为表面与环境间的显热交换;  $EL$  为表面与环境间的潜热交换;  $G$  为由表面传向内部的导热热量。在表面比较干燥的状况下, 一般可以忽略潜热交换的影响。

#### 2.1.1 太阳辐射

在白天, 太阳辐射的影响是主要的, 其辐射通量随季节、时间、天气及地理条件的不同而不同。一般将其分为直射、散射和地面反射三部分。太阳辐射中的各项可由下面的关系式确定。

任意一个目标表面吸收的太阳直接辐射的定量表示为:

$$Q_{\text{sun,dir}} = \alpha_{\text{sun}} r E_{\text{sun}} p^m F_{\text{sun}} \quad (8)$$

式中:  $\alpha_{\text{sun}}$  为目标表面对太阳辐射的吸收系数;  $r$  为日地间距引起的修正值;  $E_{\text{sun}} = 1353 \text{ W/m}^2$ , 即太阳常数;  $p$  为大气透明系数, 也称为大气透明率;  $m$  为大气质量;  $p^m$  为大气透过率, 传统上称为大气透明度;  $F_{\text{sun}}$  为目标表面对太阳直接辐射的角系数<sup>[5]</sup>。

目标表面吸收的大气对太阳光的散射辐射表为

$$Q_{\text{sun,dir}} = \frac{1}{2} \varepsilon E_{\text{sun}} \sinh \frac{1-p^m}{1-1.41np} \cos^2 \frac{\beta}{2} \quad (9)$$

式中:  $\varepsilon$  为目标表面发射率;  $\beta$  为斜面倾角。水平面时  $\beta = 0^\circ$ ; 竖直墙面时  $\beta = 90^\circ$ 。

目标表面吸收的地面对太阳的反射辐射与目标表面朝向有关。建筑物墙面还需考虑来自地面的反射辐射, 表示为

$$Q_{\text{sun,dir}} = \varepsilon \left[ r E_{\text{sun}} p^m \sinh + \frac{1}{2} E_{\text{sun}} \sinh \frac{1-p^m}{1-1.41np} \right] \cdot \rho_{\text{ground}} \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \beta \right) \quad (10)$$

式中:  $\rho_{\text{ground}}$  为地面的太阳反射率。所以建筑物墙面吸收的太阳辐射表示为:

$$Q_{\text{sun}} = Q_{\text{sun,dir}} + Q_{\text{sun,dis}} + Q_{\text{sun,ref}} \quad (11)$$

北纬  $30^\circ$  夏季 7 月 21 日不同方位的墙面接收的

太阳辐射照度如图 2 所示, 计算结果与参考文献[6]所给数据基本吻合。

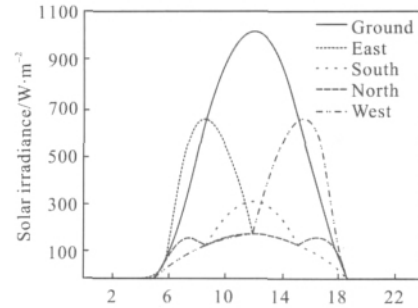


图 2 不同方位墙面的太阳辐射照度

Fig.2 Solar irradiance of different wall surfaces

#### 2.1.2 地面辐射

对于目标墙面而言, 还将受到地面直接辐射的影响, 尤其是在晚上没有了太阳辐射, 地面的辐射影响就变得更加明显。对处于开阔地带水平地面上的物体而言, 地面对物体的张角接近  $180^\circ$ , 即地面可以近似为一个位于下方的无限大水平灰体平面, 目标表面接收到地面的辐射表示为:

$$Q_{\text{ground}} = \varepsilon \varepsilon_{\text{ground}} \sigma T_{\text{ground}}^4 F_{\text{ground}} \quad (12)$$

式中:  $\varepsilon_{\text{ground}}$  为地面的发射率;  $(\varepsilon_{\text{ground}} = 1 - \rho_{\text{ground}}) T_{\text{ground}}$  为地面温度;  $F_{\text{ground}}$  为目标表面对地面辐射的角系数。

#### 2.1.3 大气辐射

目标表面接收到天空的大气辐射为:

$$Q_{\text{sky}} = \varepsilon \varepsilon_{\text{sky}} \sigma T_{\text{sky}}^4 F_{\text{sky}} \quad (13)$$

式中:  $T_{\text{sky}}$  为大气温度;  $F_{\text{sky}}$  为表面对大气等效灰体平面辐射的角系数;  $\varepsilon_{\text{sky}}$  为大气的等效发射率, 它的值一般常用 Brunt 方程式计算, 可得

$$\varepsilon_{\text{sky}} = 0.51 + 0.208 \sqrt{e_a} \quad (14)$$

式中:  $e_a$  为空气中水蒸气分压力, kPa。

#### 2.1.4 目标自身的辐射

目标表面向外部空间辐射损失的热能可由 Stefan-Boltzmann 定律得到:

$$Q_{\text{rado}} = \varepsilon \sigma T^4 \quad (15)$$

#### 2.1.5 显热交换

显热交换是由目标表面与周围空气之间的对流换热引起的, 表达式为:

$$H = h(T_{\text{air}} - T) \quad (16)$$

式中: $h$ 为外表面对流换热系数,其值与空气的热物性、风速等有关; $T_{\text{air}}$ 为空气温度,它和太阳辐射强度一样具有逐年逐日周期性变化的特性。对于晴天,一般在下午 2~3 点时气温达到最高;而在凌晨 4~5 点达到最低。设一天内的最高、最低气温分别为  $T_{\text{max}}$  和  $T_{\text{min}}$ ,则  $\Delta T=T_{\text{max}}-T_{\text{min}}$ ,平均气温为  $T_{\text{aver}}=T_{\text{max}}-0.522\Delta T$ ,则一天内某时刻的气温可由下式可得:

$$T_{\text{air}}(t)=T_{\text{aver}}+0.489\Delta T\cdot\cos\frac{\pi}{12}(t-15.05)+0.062\Delta T\cdot\cos\frac{\pi}{6}(t-1.17) \quad (17)$$

一天内温度变化的实测值和模拟值如图 3 所示。其中  $T_{\text{max}}=302\text{ K}$ , $T_{\text{min}}=292\text{ K}$ 。

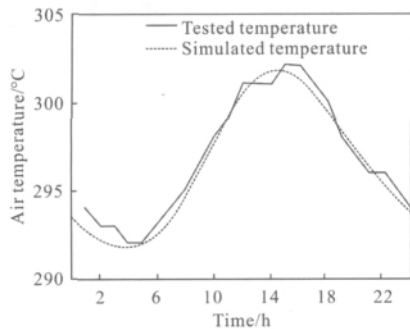


图 3 一天内空气的温度变化  
Fig.3 Air temperature in one day

### 2.2 水泥地面温度场影响因素分析

影响水泥地面温度场的因素与墙面基本相同,只是在表达式上稍有差异。对于水平的水泥地面,只需考虑太阳直射辐射和太阳散射辐射的影响;相对地面目标对目标墙面的影响,墙面辐射对地面的影响较小,故在计算地面温度时可忽略建筑物墙面辐射的影响。

### 2.3 目标与背景的温度场的数值计算

当没有内热源而且平面的高度和宽度远大于厚度时,三维导热则可按一维导热处理。对于大部分地面目标,如水泥路面以及建筑物的外墙壁等很多目标外表面结构,大都满足此条件,温度场的基本方程可简化为无内热源的一维导热微分方程,表达式为:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (18)$$

式中: $\rho$ 为密度; $c$ 为比热容; $\tau$ 为时间; $k$ 为导热系数。

对水泥路面而言,在一定范围内,越往地层内部,温度的变化越小,可认为在达到一定深度后温度不再变化;对于地面建筑物,由于其内部空调等设备

的控温调节措施,通常可认为内壁的温度近似保持不变,也可简化为第一类边界条件。

将求解区域离散化,对于导热微分方程,利用向后差分格式得出内节点方程,表达式为:

$$\rho c \frac{T(m+1,i)-T(m,i)}{\Delta \tau} = k \frac{T(m+1,i+1)+T(m+1,i-1)-2T(m+1,i)}{(\Delta x)^2} \quad (19)$$

对于边界节点,利用能量平衡方法推出边界节点方程表达式为:

$$\rho c \frac{T(m+1,0)-T(m,0)}{\Delta \tau} \cdot \frac{\Delta x}{2} = k \frac{T(m+1,1)-T(m+1,0)}{\Delta x} + Q_{\text{radi}}^{m+1} + H[T_{\text{air}}^{m+1} - T(m+1,0)] - \varepsilon \sigma T^4(m+1,0) \quad (20)$$

式中: $\Delta \tau$ 为时间步长; $\Delta x$ 为薄层厚度; $T(m,i)$ 表示为  $t$  时刻( $t=m\Delta \tau$ )第  $i$  个薄层的温度。

把所有节点的差分方程联立进行迭代求解,可得各个薄层温度随时间变化的曲线, $T(k,0)$ 就是最终所要求解的外表面温度值。

## 3 计算及实验结果分析

朝阳地面以及背阴地面的温度变化和不同方位墙面的温度变化分别如图 4 和图 5 所示。

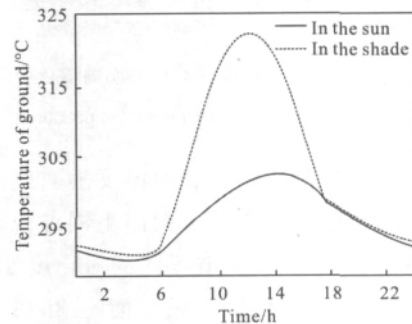


图 4 不同地面的温度变化

Fig.4 Temperature of different grounds

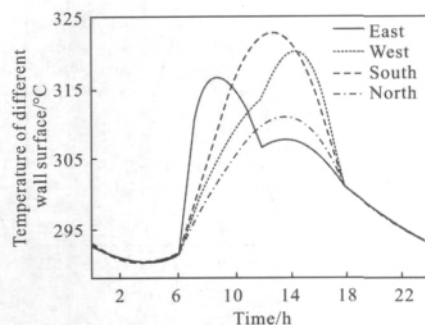


图 5 不同方位墙面的温度变化

Fig.5 Temperature of different wall surfaces

对比不同表面所接收的太阳辐射照度，由图 4 和图 5 可知，在白天，不同表面所受到的太阳辐射多少是决定其温度大小的最重要的因素。

图 6 为不同表面温度的计算值与实测值的比较。由图 6 可见，计算值随时间的变化趋势与实测值一致，但仍存在一定误差。其原因有以下三种：(1) 由文献资料<sup>[8-9]</sup>获得的不同表面的热物性参数(如密度、比热容、导热系数等)与实际地物的热物性存在一定偏差。(2) 另外一些参数如大气透明率、大气中水蒸气分压力等为经验估计值，与实际值可能存在一定误差；(3) 目标所处的实际环境复杂多变，例如在白天有云遮挡时，处于云阴影下的表面温度将明显低于太阳直射表面的温度，而云的高度在 1 min 之内可改变 1 000 m，散射比可改变 40%<sup>[7]</sup>。

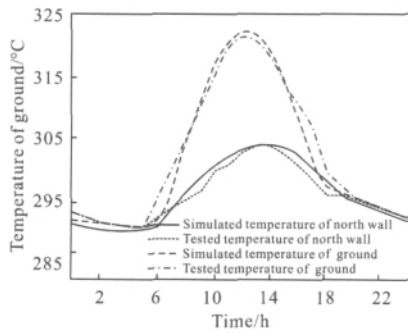


图 6 不同表面温度计算值与实测值比较  
Fig.6 Simulated and tested temperature

图 7 与图 8 在计算各表面温度随时间变化的基础上，利用公式(6)模拟了一天不同方位墙面与不同地面之间在 8~14 μm 波段内的对比度变化。图 9 为不同时刻东向墙面与水泥地面在 8~14 μm 波段内的红外图像。

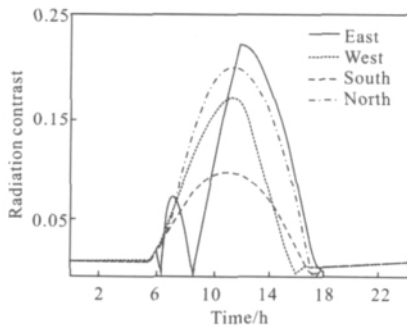


图 7 不同方位墙面与朝阳地面的对比度  
Fig.7 Contrast between wall and ground in the sun

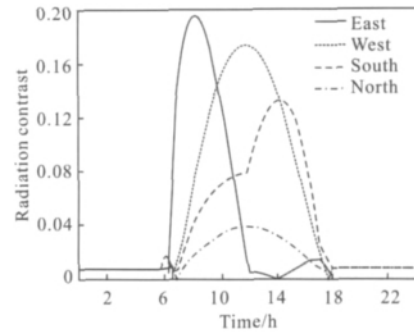


图 8 不同方位墙面与背阴地面的对比度  
Fig.8 Contrast between wall and ground in the shade

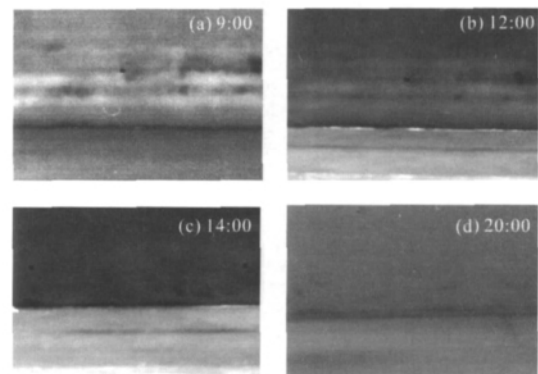


图 9 东向墙面与水泥地面的红外图像  
Fig.9 IR images of east wall and cement

目标与背景的温度差大小是影响两者对比度的最直接因素，而太阳辐射是影响目标与背景在白天的对比度的最终因素；不同表面由于得到的太阳辐射不同，直接导致了不同表面的温度差异，进而使不同方位墙面与背景的对比度有较大变化。在晚上，由于没有了太阳辐射的影响，随着目标、背景与环境间的辐射换热的加强，目标背景的温度减小，使不同方位之间的对比度差别变得很小。对于热惯性大的材料，在太阳照射下，其温度升高速度慢，致使其表面温度比相同条件下热惯性小的材料的温度低；而在晚上，热惯性大的材料受白天的太阳照射的影响还没来得及消除，温度下降的慢。对于热惯性小的材料，情况恰好相反。因此只要目标的构成材料与环境不同，它们的热惯性就不同。这些因素使目标的温度很难和背景融为一体，从而造成对比度的差异始终难以消除。图 10 为两种不同材料在白天和夜晚的红外图像的对比。

由于文中以水泥地面为背景，建筑物外部围护结构为钢筋混凝土，两者之间热物性差异不大<sup>[8-9]</sup>，导致计算所得辐射对比度在夜晚较小见表 1。

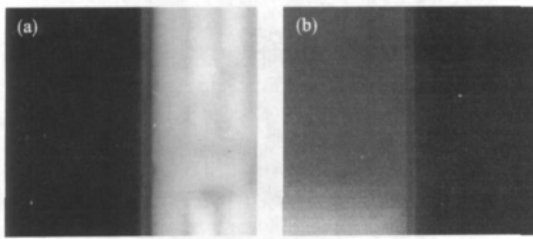


图 10 不同热惯性材料的红外图像

Fig.10 IR images of different thermal inertia materials

表 1 材料的部分热物性参数

Tab.1 Some thermo physical parameters of materials

Material	Steel concrete	Cement
Density/kg/m <sup>-3</sup>	2 500	1 900
Specific heat capacity /kJ·kg <sup>-1</sup> ·K	0.92	0.84
Heat conductivity / W·m <sup>-1</sup> ·K	1.74	0.30
Reflectivity	0.25	0.2
Emissivity	0.92	0.90

#### 4 结束语

文中在计算表面温度的基础上利用 MATLAB 模拟了建筑物不同方位墙面与背景的红外辐射对比度在一天内的变化情况。在同一方位,目标墙面与背景的对比度在一天内变化很大,而当地面背景不同时,同一时刻的对比度又有较大差别;在不同方位,不管是在同一时间,还是同一背景的情况下,对比度都有较大差别。

文中仅分析计算了地面建筑物与水泥地面的对比度,结果就显示出复杂性,而实际地面目标与背景的对比度更加复杂多变,原因有以下 3 个方面:(1)建筑物外部围护结构的构成材质多样,另外透明围护结构和不透明围护结构所占比例的不同,将导致不同的辐射特性。(2)地面目标的背景具有多样性:包括裸露地表(沙地、粘土、河流等),植被(草地、农作物,丛林等),人造材质地表(高速公路、机场跑道等)、雪地等。(3)文中的计算是建立在忽略潜热交换的假设下进行的,而实际的背景为植被、湿润地表时,潜热交换将对温度的计算产生较大影响,因此即使相对于同一背景,在不同条件下也会得到明显不同的对比度。

#### 参考文献:

- [1] Liu Jingsheng. Infrared Physics[M]. Beijing: Weapons Industry Press, 1992. (in Chinese)  
刘景升. 红外物理[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2000.
- [2] Chen Xuan, Yang Li. Optimization and evaluation of stealth performance of coatings based on radiance contrast [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(6): 1043-1047. (in Chinese)  
陈翻, 杨立. 基于辐射对比度的涂料隐身性能优化与评估 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(6): 1043-1047.
- [3] Chen Xuan, Yang Li, Zhang Xiaohuai. Judgment criterion of infrared camouflage coating technology of targets [J]. *Opto Electronic Engineering*, 2008, 35(10): 43-47. (in Chinese)  
陈翻, 杨立, 张晓怀. 目标红外涂料隐身技术评判标准研究[J]. 光电工程, 2008, 35(10): 43-47.
- [4] Zhang Jianqi, Fang Xiaoping, Zhang Haixing, et al. Theoretical model for IR radiance statistics of natural Terrain [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1997, 16(4): 266-272. (in Chinese)  
张建奇, 方小平, 张海兴, 等. 自然地表红外辐射特性统计分析[J]. 红外与毫米波学报, 1997, 16(4): 266-272.
- [5] Lv Xiangyin, Ling Yongshun, Huang Chaochao. Calculation of surface temperature and infrared radiation for ground target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(5): 563-567. (in Chinese)  
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.
- [6] Code for design of heating ventilation and air conditioning (GB50019-2003) [S]. Beijing: China Plan Publishing Company, 2004. (in Chinese)  
采暖通风与空气调节设计规范(GB50019-2003)[S]. 北京: 中国计划出版社, 2004.
- [7] Wang Yi, Fan Wei. Effect of cloud on the target-background contrast [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(3): 281-286. (in Chinese)  
王毅, 范伟. 云的光学特性对目标-背景对比度的影响分析[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(3): 281-286.
- [8] Liang Huan, Han Yuge. Calculation of IR radiation and simulation of IR image for Terrain background [D]. Nanjing: NJUS, 2009 (in Chinese)  
梁欢, 韩玉阁. 地面背景的红外辐射特性计算及红外场景生成[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [9] Huang Chen. The Architectural Environment [M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 372. (in Chinese)  
黄晨. 环境建筑学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 372.