

有罩雷达目标表面温度场求解方法

陈 珊, 马俊春, 刘朝辉, 王 忠

(火箭军工程大学 二系, 陕西 西安 710025)

摘 要: 针对雷达目标在军事打击的重要战略地位, 提出了一种有罩雷达目标表面温度场求解方法。首先, 对雷达目标的结构特性进行分析, 在此基础上将有罩雷达目标简化为椭球目标; 其次, 对雷达目标三维温度场进行建模, 在球坐标系下建立瞬态热传导方程, 分析边界条件, 建立热平衡模型; 最后, 对雷达目标表面温度场模型及边界条件进行简化, 提出了基于降维有限差分的迭代法, 对目标表面温度场进行数值求解。利用文中算法得到的温度场分布及生成的红外仿真图像, 符合实际情况, 其温度变化规律与实际一致, 建立的温度场模型及求解方法切实可行, 为进一步研究目标红外辐射特性提供了基本参数和理论依据。

关键词: 表面温度场; 有罩雷达目标; 降维有限差分迭代法

中图分类号: TN21 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0404002

Calculation method of shrouded radar target surface temperature field

Chen Shan, Ma Junchun, Liu Chaohui, Wang Zhong

(2nd Department, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: A method of shrouded radar target surface temperature field calculation was proposed in this paper, in allusion to the important strategic position of radar target during military attack. Firstly, the structural characteristic of radar target was analyzed, based on which radar target was simplified into spheroid. Secondly, radar target three-dimensional temperature field model was established, including building heat balance equation in spherical coordinates, analyzing boundary conditions, establishing thermal equilibrium model. Finally, through simplifying the surface temperature field model and the boundary condition of the radar target, target surface temperature field was obtained by solving the temperature field model, and a method based on reduced dimension finite difference iterative was proposed. The experimental results show that the calculated distribution of temperature field and the generated infrared simulation images accorded with actual situation, and temperature variation was consistent with the actual, so the temperature field model established and solution method were feasible, which provided basic parameters and theoretical basis for further study on the target infrared radiation characteristics.

Key words: surface temperature field; shrouded radar target;
reduced dimension finite difference iterative method

收稿日期: 2016-08-05; 修订日期: 2016-09-03

基金项目: 省部级高新工程项目(2013EX4217); 学校青年基金(2015QNJJ018)

作者简介: 陈珊(1981-), 男, 讲师, 博士, 主要从事目标红外特性分析方面的研究。Email: chenshan1223@126.com

0 引言

火电厂、油库、雷达、指挥中心等典型军事目标是战争中首要的被打击对象,为了实现前视红外制导武器的精确打击,需要对目标红外辐射特性和红外成像进行研究,而其关键步骤是目标表面温度场的计算^[1-2]。国内已对大量的非军事目标进行了红外温度场建模,仿真生成目标和背景的红外场景^[3-4]。但是,基于军事目标的特殊性,目前很少有对地面固定军事目标红外辐射特性的研究,很少有对油库、球形雷达罩雷达等军事目标的深入研究^[5]。

雷达作为现代军事作战中的有效侦察手段,广泛应用于机载预警、导航、制导、卫星跟踪、战场侦察、靶场测量、武器火控和气象探测等方面,成为重要的军事装备^[6]。

为了提升雷达的环境适应性和生存能力,现代雷达很多都配置了适当的罩盖,因此,罩盖的热辐射特性成为重点研究的内容。地面雷达罩外形多呈截球状,其球心位置基本上与天线主轴重合。基圆直径与球罩内径、截球高度有关,基圆直径一旦确定,罩内空间大小、天线基座及裙墙高度等都是可以确定的。罩壁厚度 t 是雷达罩的又一重要参数,与其工作频段直接相关,一般最好是 $1/4$ 工作波长的奇数倍。

鉴于以上分析,文中将雷达罩简化为椭球目标,对其进行三维温度场建模,求解得到雷达罩表面温度场分布,为进一步研究目标红外辐射特性提供了基本参数和理论依据。

1 雷达目标三维温度场建模

在建立截球形雷达罩三维瞬态温度场模型时,根据雷达罩的结构特点,采用球坐标系 (r, φ, θ) 建立瞬态热传导方程:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{k}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{k}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \varphi^2} \left(\sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{k}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \quad (1)$$

式中: ρ 为密度; c 为比热容; T 为温度; τ 为时间; k 为导热系数。

1.1 边界条件分析

有罩雷达的边界条件主要有外表面与外界环境的热量交换和内表面与球罩内环境的热量交换。内

表面与球罩内环境的热量交换主要包括对流换热及罩内可能存在的热源,主要与罩内具体元器件的参数有关。

外表面与外界环境的热量交换主要包括太阳辐射、地面辐射、大气辐射、对流换热及自身向外界环境的热辐射等。

1.2 热平衡方程

根据雷达罩边界条件分析,将球罩分为三类节点进行热平衡方程讨论。

(1) 雷达罩外表面节点

对于雷达罩外表面节点 i , 根据外表面节点与外界环境的热量交换^[7], 建立该类节点的热平衡方程如下:

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 - q_6 = m_i c_{pi} \frac{dT_i}{dt} \quad (2)$$

式中: q_1 为太阳辐射、地面辐射和大气辐射; q_2 为雷达罩其他节点对其的辐射; q_3 为壁厚内单元的热传导; q_4 为节点所在控制体单元内热源的生成热,这里为 0; q_5 为对流换热; q_6 为节点自身向外界辐射; c_{pi} 为节点比热容; T_i 为节点温度; m_i 为节点质量; $m_i c_{pi} \frac{dT_i}{dt}$ 为节点热量梯度变化。

直角坐标系 (x, y, z) 下,其他节点对外表面节点 i 的热辐射能 $(q_2 + q_3)$ 可表示为:

$$\begin{cases} \Phi_x = -k_e \frac{\partial T}{\partial x} dydz \\ \Phi_y = -k_e \frac{\partial T}{\partial y} dx dz \\ \Phi_z = -k_e \frac{\partial T}{\partial z} dx dy \end{cases} \quad (3)$$

式中: k_e 为导热系数。

通过 $x=x+dx, y=y+dy, z=z+dz$ 三个微元表面导出微元体的热流量 q_6 , 也可按傅里叶定律写出如下:

$$\begin{cases} \Phi_{x+dx} = \Phi_x + \frac{\partial \Phi}{\partial x} dx = \Phi_x + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_e \frac{\partial T}{\partial x} dydz \right) dx \\ \Phi_{y+dy} = \Phi_y + \frac{\partial \Phi}{\partial y} dy = \Phi_y + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_e \frac{\partial T}{\partial y} dx dz \right) dy \\ \Phi_{z+dz} = \Phi_z + \frac{\partial \Phi}{\partial z} dz = \Phi_z + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_e \frac{\partial T}{\partial z} dx dy \right) dz \end{cases} \quad (4)$$

导入微元体的总热流量与导出微元体的总热流量之差 $q_2 + q_3 - q_6$ 转化至球坐标系下表示为:

$$q_2 + q_3 - q_6 = \frac{k_e}{r^2} \times \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{k_e}{r^2 \sin^2 \theta} \times \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} +$$

$$\frac{k_e}{r^2 \sin^2 \theta} \times \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) \quad (5)$$

(2) 雷达罩壁厚节点

针对雷达罩壁厚内节点 i , 其热平衡方程可表示为:

$$q_1 - q_2 = m_i c_{pi} \frac{dT_i}{dt} \quad (6)$$

式中: q_1 为节点所在控制体接收到的相邻面元的热传导; q_2 为节点向周围环境的辐射能。

(3) 雷达罩内表面节点

雷达罩内表面节点 i 的热平衡方程可表示为:

$$q_1 + q_2 + q_3 - q_4 = m_i c_{pi} \frac{dT_i}{dt} \quad (7)$$

式中: q_1 为节点接收雷达工作时系统的热辐射能量, 与雷达工作功率和效率有关; q_2 为节点接收的其他相邻面元的能量; q_3 为节点与雷达罩内空气的对流换热热量; q_4 为节点向外的辐射能。

2 基于降维有限差分迭代法的温度场模型数值求解

对于椭球形目标, 其温度场模型可以通过公式(1)建立, 为三维空间偏微分方程, 可以通过经典的数值解算方法进行求解^[8-11]。考虑到目标结构特点, 文中提出了一种降维有限差分迭代法, 将三维问题转化为一维问题, 建立一维空间各节点的关系, 采用迭代法进行解算, 从而减少了占用内存和运行时间。

如图 1 所示, 雷达罩可以看作球壳, 以球坐标表示, 透视球壳, 外半径为 R , 内半径为 r 。

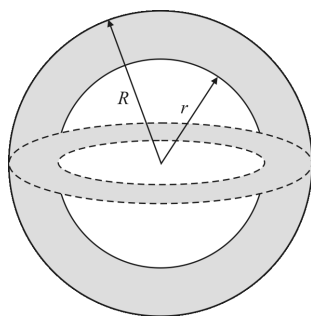
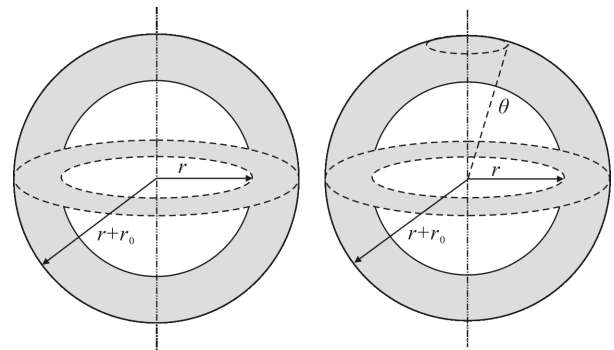


图 1 球壳透视图

Fig.1 Spherical perspective

对于球壳的网络分割, 首先, 用同心球划分球壳, 如图 2(a)所示, 取内半径为 r , 外半径为 $r+r_0$ 的球壳为分割的第一层, 其中 $r_0=(R-r)/L$, L 为半径方向划分的网格数。

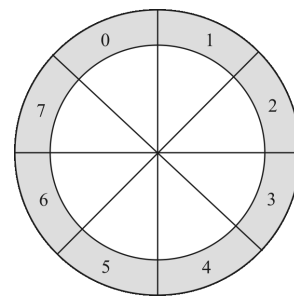


(a) 球壳第一层

(b) 球壳第一层的第一圈

(a) 1st spherical

(b) First circle of first spherical



(c) 球壳第一层第一圈的网格划分(俯视图)

(c) First circle mesh segmentation of first spherical

图 2 球壳网络分割示意图

Fig.2 Spherical mesh segmentation schematic view

在第一层球壳中, 如图 2(b)所示, 将其划分为第一层的第一圈, 其中 $\theta_0=\pi/N$, N 为 θ 方向划分的网格数。

俯视分割所得第一层的第一圈, 如图 2(c)所示, 将其划分为第 1 至第 M 个节点, 其中 $\varphi_0=2\pi/M$, M 为 φ 方向的网格格数, 此处取 8。

其他各层各圈均依此法划分并标注其节点号, 则可得第 a 层, 第 b 圈, 第 c 个节点的标号 i 为: $i=(a-1)MN+(b-1)M+(c-1)$, 该节点 j 时刻的温度为 T_j^i 。球壳网格划分前视效果图如图 3 所示。

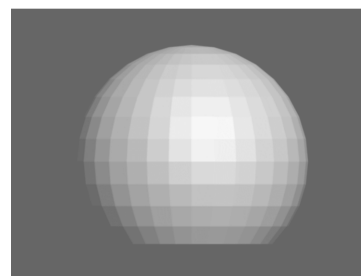


图 3 球壳网格划分前视图

Fig.3 Spherical mesh segmentation front view

网格划分标号完毕后,运用有限差分法把方程(1)

离散化得:

$$T_i^{j+1} = \left(1 - \frac{2Ar_0}{r_i} - 2A - \frac{2B}{(r_i \sin \theta_i)^2} - \frac{\theta_0 C}{r_i^2 \tan \theta_i} - \frac{2C}{r_i^2} \right) T_i^j + \frac{C}{2} T_{i-M}^j + AT_{i-MN}^j + \frac{B}{(r_i \sin \theta_i)^2} T_{i-1}^j + \frac{C}{2} \left(1 + \frac{\theta_0}{\tan \theta_i} \right) T_{i+M}^j + A \left(\frac{2r_0}{r_i} + 1 \right) T_{i+MN}^j + \frac{B}{(r_i \sin \theta_i)^2} T_{i+1}^j + \left(\frac{C}{2} + \frac{\theta_0 C}{r_i \tan \theta_i} \right) T_{i+M}^j \quad (8)$$

式中: $A = \frac{\tau k_e}{\rho c r_0}$; $B = \frac{\tau k_e}{\rho c \varphi_0}$; $C = \frac{\tau k_e}{\rho c \theta_0}$ 。

至此,便将三维问题转化为一维问题求解。

对于一维非稳态导热方程进行网格划分和方程离散化得:

$$\frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{k} = \frac{k_e}{\rho c} \left(\frac{T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i-1,j}}{h^2} \right) \quad (9)$$

式中: $T_{i,j} = T(x_i, x_j)$, $x_i = i \cdot h$, $i = 0, 1, 2, \dots, m$ 。

通过对各节点联立求解,采用“追赶法”、“迭代法”等经典的计算方法,便可以求出各节点温度值。

3 实验结果与分析

为了验证所提算法的可行性和有效性,文中以西安地区某有罩雷达为例进行了表面温度场计算,气象参数及目标特性参数如下:

时间:6月12日;地点:西安;当日最高/最低气温:26/18℃;相对湿度:30%;风力:1级;天气情况:晴;地面类型:混凝土地面,表面发射率为0.92;计算波长:3~5μm;雷达罩材质:玻璃纤维,未涂漆,表面发射率为0.90。

根据以上参数,计算雷达目标表面温度场。图4为0:00雷达各部分温度变化曲线,其他时刻温度曲线与其类似。图5为同一处一天温度变化曲线;实心点表示实测温度值,实线表示文中方法计算所得温度曲线;由于实际测量值的不确定性,为了提高实测值的客观性,文中取同一处所在区域的平均温度值作为该处实测温度值。图6为依据参考文献[12]相关反演算法由温度场变化生成的红外仿真图像,图中灰度最大值/最小值分别表示当天温度的最大值/最小值,灰度值与温度值呈单调映射关系。

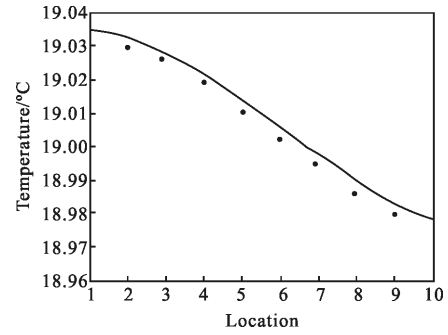


图 4 零时刻各部分温度变化曲线

Fig.4 Temperature curve of each part in 0 h

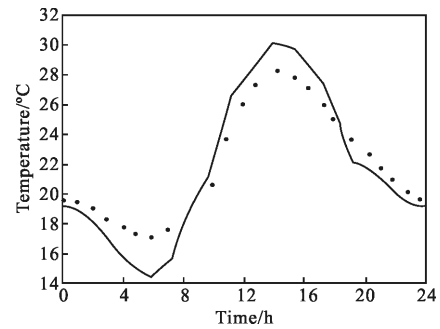
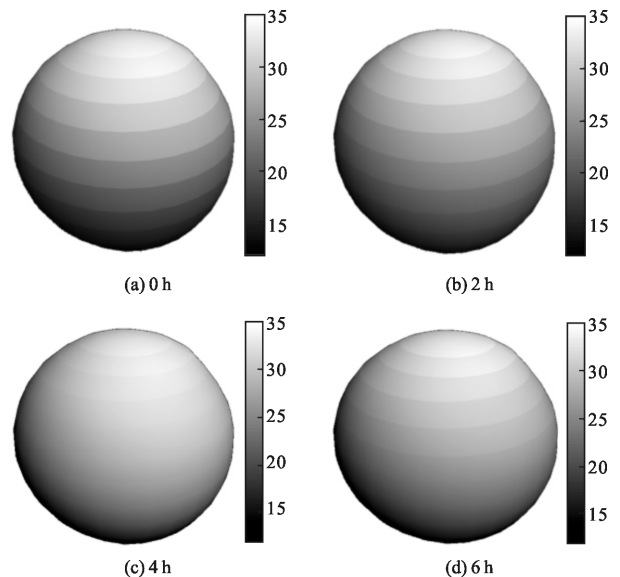


图 5 同一处温度变化曲线

Fig.5 Temperature curve at the same place

从温度变化曲线和红外仿真图像中可以看出,各部分的温度变化规律与实测温度变化规律是相似的。误差的存在是因为对模型进行了简化。在一天中,目标温度(灰度)于日出时出现最低值,而后随着太阳辐射的增大逐渐升高。雷达罩上下半球的温度变化幅度不同,由于光照的原因,下半球一直低于上半球,



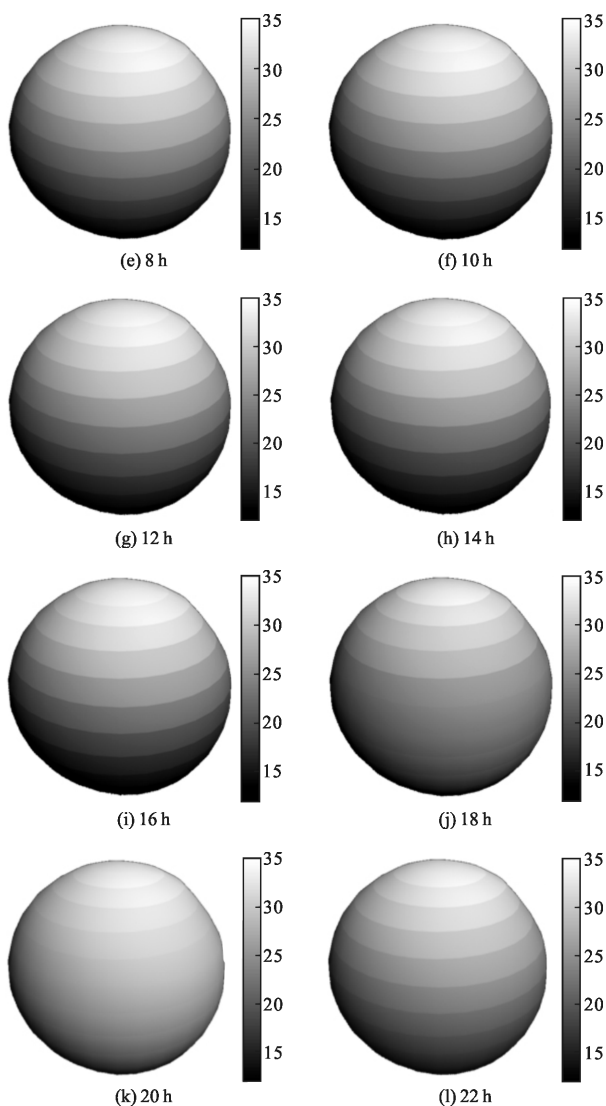


图 6 雷达 24 h 红外仿真图

Fig.6 Radar infrared simulation images during 24 h

其灰度值也一直是较低的。上半球温度在日出后上升比其他区域快(球顶最快),约于下午 13:00 左右达到最高;随后下降,球顶由于顶部风速较大,与空气的对流交换热量较大,因此昼夜温差变化较大,即灰度变化较大。综上分析可知,雷达目标表面红外温度(灰度)一天的变化规律与实际相符,能够真实反映目标表面的温度特性,文中所提算法是切实可行的。

4 结束语

文中分析了有罩雷达目标的结构特性并对目标进行网格划分,建立了控制体热平衡模型,研究了不同部分控制体的热交换过程及各节点之间的几何关

系;建立了温度场平衡模型,得到目标表面温度场。提出了降维有限差分的迭代法实现了表面温度场的数值求解。实验结果表明,计算得到的温度场分布符合实际情况,其温度(灰度)变化规律与实际一致,建立的温度场模型切实可行。为进一步研究雷达目标红外辐射特性提供了基本参数和理论依据。

参考文献:

- [1] Wang Yanxin, Liu Qi, Li Zhaoyi, et al. Analysis on several issues of infrared imaging guided technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 26-32. (in Chinese)
王延新, 刘琪, 李兆熠, 等. 红外成像导引技术应用中若干问题的分析[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1): 26-32.
- [2] Ji Yuanyuan. Study on key techniques of simulation for infrared characteristics of typical ground objects [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2014. (in Chinese)
季园园. 典型地物红外特性仿真关键技术研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2014.
- [3] Fan Yongjie, Jin Weiqi, Liu Chongliang. New progress on FLIR imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(2): 189-194. (in Chinese)
范永杰, 金伟其, 刘崇亮. 前视红外成像系统的新进展[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(2): 189-194.
- [4] Cheng Shengyue, Liu Zhaohui, Deng Zhiping, et al. Research progress on infrared characteristic of military target [J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(7): 577-581. (in Chinese)
成声月, 刘朝辉, 邓智平, 等. 军用目标红外辐射特征研究进展[J]. 红外技术, 2014, 36(7): 577-581.
- [5] Chen Shan, Sun Jiyin, Chen Jie. Temperature field characteristics of oilcan target surface[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 17-21. (in Chinese)
陈珊, 孙继银, 陈捷. 油罐目标表面温度场特性研究[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(1): 17-21.
- [6] Zhang Runkui, Qi Renxin, Zhang Shuxiong, et al. Radar Structure and Technics [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007. (in Chinese)
张润逵, 戚仁欣, 张树雄, 等. 雷达结构与工艺 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [7] Lv Xiangyin, Jin Wei, Yang Li. Infrared stereo feature of ground target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 2810-2814. (in Chinese)
吕相银, 金伟, 杨莉. 地面目标红外立体特征[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(9): 2810-2814.

- [8] Li Yingjie, Lv Xiangyin, Wu Xiaodi, et al. Calculation of infrared radiation of space target using finite difference method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(2): 218–222. (in Chinese)
李颖杰, 吕相银, 吴晓迪, 等. 利用有限差分法计算空间目标红外特征[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(2): 218–222.
- [9] Ren Liang, Chen Qian, Qian Weixian. Infrared target modeling and simulation based on ANSYS [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1426–1431. (in Chinese)
任亮, 陈钱, 钱惟贤. 基于 ANSYS 的目标红外特性建模与仿真方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(6): 1426–1431.
- [10] Cao Jiang. Numerical calculation on thermal field of an induction generator [J]. *Explosion-Proof Electric Machine*, 2014, 49(1): 11–14.
- [11] Wang Chong, Qiu Zhiping. Interval finite difference method for steady-state temperature field prediction with interval parameters[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2014, 2(1): 161–166.
- [12] Chen Shan, Sun Jiyin. IR scene simulation based on visual image [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(1): 23–26. (in Chinese)
陈珊, 孙继银. 基于可见光图像的红外场景仿真 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38(1): 23–26.