空间目标红外特征仿真模型

厉夫兵 许小剑

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 建立了一种基于三维场景的空间目标红外辐射特征计算模型. 模型对多层介质目标进行几何建模与三维剖分,考虑目标微动时太阳和地球对目标加热的影响,计算了目标外表面的辐射散热及内腔壁面元间的辐射换热,在此基础上完成目标的三维导热计算,利用Gauss-Seidel迭代法求解微元体的温度,进而计算了中长波和长波红外波段目标自身的辐射、对外热源的反射以及总的辐射亮度图像和辐射强度曲线. 研究表明,无自旋的目标在圆周方向受太阳加热不均,温差显著;自旋使目标圆周方向温差减小,温度分布趋于均匀.

关 键 词: 热传导; 红外辐射; 仿真

中图分类号: TN 219; V 231.1

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2009)11-1330-05

Infrared signature simulation model for space objects

Li Fubing Xu Xiaojian

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Based on specified three-dimensional scene, an infrared signature simulation model for space objects was developed. Firstly, an object was geometrically modeled and decomposed into micro-elements in three-dimensions. Formulation for surface heating of the object with micro-motion dynamics from the sun and earth was derived. Energy dissipated into space from outer surface as well as the thermal exchange between facets of inner surface was calculated. In this way, three-dimensional thermal conduction of a ballistic object constructed with multi-layer materials was calculated, and the micro-element temperatures were obtained using Gauss-Seidel iteration. Then, radiant components including self-emitted radiation and surface-reflected radiation from the sun and earth in mid-long wave infrared band and long wave infrared band were calculated. It is seen that, because of the sun heating, temperature difference along the circumference is obvious when the object moves without spinning motion in space. Such difference becomes trivial when it undergoes spinning motion.

Key words: heat conduction; infrared radiation; simulation

红外场景建模与仿真能够模拟各种条件下目标及环境的红外辐射特性,在传感器和武器系统设计与试验中具有重要的作用[1]. 近年来,国内外开展了大量的研究工作. 由于技术的敏感性,国外研究成果报道较少. 文献[2]研究了太阳辐射方向改变时对大气层外弹道式目标表面温度的影响,利用角系数计算太阳和地球对面元的加热,计算了表面相邻单元之间的导热,并利用傅里叶导热定律计算内热源对表面温度的影响. 文献[3]基于中段飞行的弹头目标表面温度沿中心轴对称的条件下,利用阳光与面元的夹角计算太阳对目标表面的直接加热,考虑了太阳间接加热,并采用节点网络法计算弹头表面相邻部位的热传导及内热源对表面的热传导,最后得到弹头母线方向的温度变化. 文献[4]分析计算了空间球形目标表面温度随时间的变化. 这些模型对目标的热量流动进行了细致分析,得到目标表面的温度分布.

本文建立了一种空间目标的红外辐射计算模

收稿日期: 2008-10-30

作者简介: 厉夫兵(1982—),男,山东日照人,博士生,lifubing@ee.buaa.edu.cn.

型.该模型实现了对球头锥类目标的三维剖分,并对目标的三维导热进行了计算.模型还考虑了目标微动对传热的影响,推导了微动情况下面元的受热计算公式.

1　仿真场景与目标几何建模

1.1　仿真场景的建立

如图 1 所示,选取地心非惯性坐标系为基础坐标系,引入目标轨迹、传感器坐标及太阳光.通过设定发射点等特定参量,可计算得到目标的空间轨迹.如果目标在空间中的运动时间很短,可将太阳光方向矢量看作常矢量.空基或天基传感器在空间的位置在本文设为固定点,通过计算目标在各个轨迹点的状态信息,可得到传感器捕获的目标红外特征信号.

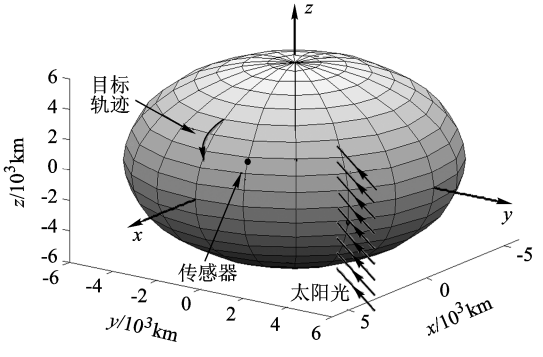


图 1　典型空间仿真场景

1.2　目标几何建模

以多层介质球头锥目标为例,设定头锥球半径、底面圆半径、高度、圆锥壁各层材料的厚度、底板厚度及腔内物体的位置及尺寸,可以确定球头锥三维模型,其内部结构如图 2 所示.

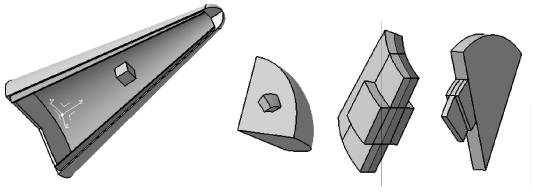


图 2　目标模型及微元体剖分

对目标进行三维剖分时,需要根据目标各部分的几何结构选取合适的坐标系.头锥球按球坐标系三维方向微元体剖分;圆锥体壁按圆锥体母线方向、圆周方向、圆锥壁厚度方向剖分微元体;球头锥底板按圆柱坐标系三维方向剖分微元体;内腔正方体按直角坐标系三维方向进行剖分.通常,将温度节点置于微元体中心位置.图 2 中示出了目标的头锥球、锥壁、底板圆处微元体的剖分示意.

2　传热计算与温度求解

2.1　节点导热计算

对正方体微元体,可建立导热微分方程[5]:

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial t}=\lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)+\dot{q} \tag{1}$$

其中,ρ 为介质密度;c 为介质比热容;T 为节点温度;t 为时间;λ 为介质导热系数;$\dot{q}$ 为微元体内部热产生率.对其它坐标系微元体,应建立相应的微分方程.实际计算中,通常将微分方程转化为差分方程.对某单一材料微元体,如果仅考虑节点导热引起的微元体能量变化,则可建立导热后向差分方程为[6]

$$\rho c\frac{T_p^{t+\Delta t}-T_p^t}{\Delta t}\mathrm{d}v=W_c=\sum_{k=1}^{6}\lambda\frac{S_k}{L_k}(T_k^{t+\Delta t}-T_p^{t+\Delta t}) \tag{2}$$

其中,T_p^t 为微元体节点 p 在 t 时刻的温度;$\mathrm{d}v$ 为微元体体积;W_c 为周围各节点对节点 p 的导热功率;S_k,L_k 分别为节点 p 与相邻节点 k 之间的导热面积及导热距离.通常某个节点周围存在 6 个节点,但边界节点的情况会有所不同.

两层介质接触面的微元体节点置于接触面上,如图 3 所示,A,B 为两种材料,p 为微元体节点.节点 1,2 与 p 的导热可直接利用傅里叶导热定律计算得到,节点 3 与 p 的导热可分为两部分计算:

$$W_3=\left(\lambda_A\frac{S_{abef}}{L_{p3}}+\lambda_B\frac{S_{efcd}}{L_{p3}}\right)(T_3^{t+\Delta t}-T_p^{t+\Delta t}) \tag{3}$$

节点 4,5,6 与 p 的导热可同理求得.仅考虑节点导热而建立的后向差分方程为

$$(\rho_A c_A\mathrm{d}v_A+\rho_B c_B\mathrm{d}v_B)\frac{T_p^{t+\Delta t}-T_p^t}{\Delta t}=W_c=\sum_{k=1}^{6}W_k \tag{4}$$

其中 $\mathrm{d}v_A$,$\mathrm{d}v_B$ 分别为两种材料在微元体中的体积.

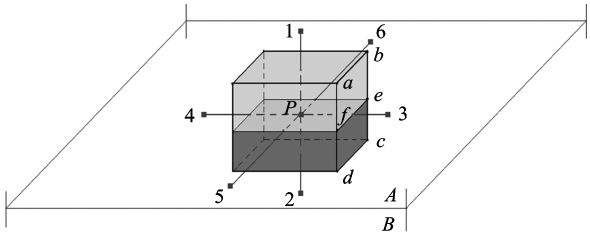


图 3　两种材料接触面处的微元体

2.2　太阳和地球加热计算

物体在空间中的运动可以看作 3 种运动的叠加[7]:质心沿空间轨迹平动,体对称轴绕速度矢量锥旋,锥体自旋,如图 4 所示.在一个传热步长内,

由于目标微动,其外表面面元可能在某些时刻受外热源辐射强烈、其它时刻受太阳、地球辐射较小或接收不到辐射能量,因此需要引入外热源平均照射系数.

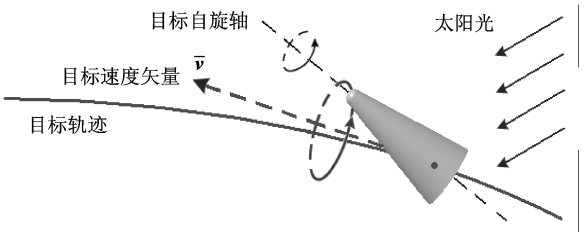


图4 空间目标的微动

引入笛卡尔坐标系,其原点位于球头锥质心并沿目标空间轨迹运动,三坐标轴分别与地心系三坐标轴平行.若已知本体坐标系下面元的单位法矢量 $\boldsymbol{n}_o$ 及目标在 t 时刻对应的姿态转换矩阵 $\boldsymbol{P}_t$,则 t 时刻面元在该引入坐标系下的单位法矢量为

$$\boldsymbol{n}'_o = \boldsymbol{P}_t \cdot \boldsymbol{n}_o \tag{5}$$

其中姿态转换矩阵 $\boldsymbol{P}_t$ 可通过基元旋转矩阵求得.则 t 时刻该面元法矢量 $\boldsymbol{n}'_o$ 与太阳矢量 $\boldsymbol{n}_s$ 夹角 θ_t 的余弦为

$$\cos\theta_t = \boldsymbol{n}_o \cdot \boldsymbol{n}_s \tag{6}$$

将式(6)在一个传热步长内求平均,得到太阳对面元的平均照射系数:

$$\eta_s = \frac{1}{\Delta t}\int_{t_0}^{t_0+\Delta t} u(\cos\theta_t)\cos\theta_t \mathrm{d}t \tag{7}$$

其中 $u(\cdot)$ 为单位阶跃函数.

设太阳常数为 E_0,面元对太阳光的平均吸收系数为 α,面元面积为 S_o,则 Δt 时间内面元吸收的太阳平均辐射功率为

$$W_s = \alpha E_0 \eta_s S_o \tag{8}$$

类似地,地球对面元的平均照射系数为 η_e.将地球看作温度为 T_e、发射率随波长变化的灰体,其半径为 R_e,平均发射率为 e_e,则 Δt 时间内面元吸收的地球平均辐射功率为

$$W_e = e_o\left[e_e\sigma T_e^4\left(\frac{R_e}{r_o}\right)^2\right]\eta_e S_o \tag{9}$$

其中,e_o 为面元对地球辐射的平均吸收率;r_o 为 Δt 时间内目标质心到地心的平均距离;σ 为 Stefan-Boltzmann 常数.此外,面元向空间辐射的功率可表示为

$$W_{sp} = e_o\sigma T_o^4 S_o \tag{10}$$

其中 T_o 为面元温度.

2.3 辐射换热计算

计算内壁面元间的辐射换热需要先求解角系数[5],并需要考虑面元间的遮挡影响.如图5所示,内壁面元的辐出能量 J 由两部分组成:自身辐射 E 和反射的来自其它面元的入射能量 ρG.对面元 i 建立能量平衡方程:

$$J_i S_i = e_i\sigma T_i^4 S_i + (1-e_i)\sum_{j=1}^{N} J_j S_j F_{ji}$$
$$i = 1,\cdots,N \tag{11}$$

其中,N 为内壁面元总数;e_i 为面元平均发射率;T_i 为面元温度;S_i,S_j 为面元面积;F_{ji} 为角系数.迭代计算方程组(11),可得到内壁各面元的辐射出射度 J.则内壁面元截获面元的入射功率为

$$G_i = \sum_{j=1}^{N}(F_{ji}J_j S_j) \tag{12}$$

则内壁面元吸收的净功率可表示为

$$W_i = e_i(G_i - \sigma T_i^4)S_i \tag{13}$$

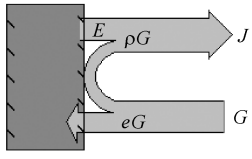


图5 内壁面元的辐射换热

2.4 传热差分方程的求解

根据能量守恒,综合所有热流项,对节点 p 建立后向差分方程:

$$\rho c\,\mathrm{d}v\,\frac{T_p^{t+\Delta t} - T_p^t}{\Delta t} =$$
$$W_c + (W_s + W_e - W_{sp}) + W_i + \dot{q}_p\mathrm{d}v \tag{14}$$

其中,W_c 为节点导热;W_s,W_e 为太阳地球加热;W_{sp} 为外面元辐射散热;W_i 为内面元吸收的净功率;$\dot{q}_p\mathrm{d}v$ 为微元体内热源产热.对特定微元体,方程右侧只有相关项有效.设定计算精度,利用 Gauss-Seidel 迭代法求解式(14),可得到 $t+\Delta t$ 时刻所有节点的温度[5].通过对区间内所有轨道数据点进行计算,可得各个轨道点处目标的温度分布.

3 辐射亮度和辐射强度计算

3.1 面元辐射亮度

传感器观测到的面元光谱辐射亮度 L_k^λ 主要由3部分构成:

$$L_k^\lambda = L_o^\lambda + L_s^\lambda + L_e^\lambda \tag{15}$$

其中,λ 为波长;L_o^λ 为面元自身光谱辐射亮度;L_s^λ,L_e^λ 分别为面元反射太阳、地球能量得到的光谱辐射亮度.由 Planck 方程,面元自身辐射亮度为

$$L_o^\lambda = e_\lambda\frac{C_1}{\lambda^5(\mathrm{e}^{C_2/\lambda T_o}-1)} \tag{16}$$

其中,e_λ为面元的光谱发射率;T_o为面元温度;C_1,C_2分别为 Planck 第 1、第 2 常数. 目标反射太阳能量到传感器方向的光谱辐射亮度为

$$L_s^\lambda = E_s^\lambda \cdot f(\theta_i,\varphi_i,\theta_r,\varphi_r) \tag{17}$$

其中,E_s^λ为大气层外太阳的光谱辐照度;f 为双向反射分布函数(BRDF, Bidirectional Reflectance Distribution Function);(θ_i,φ_i),(θ_r,φ_r)分别为入射、出射方向的天顶角和方位角. 面元反射地表能量到传感器方向的光谱辐射亮度 L_e^λ可同理求得.

将式(15)在观测波段内积分,可求得面元在传感器方向的辐射亮度:

$$L_k = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (L_o^\lambda + L_s^\lambda + L_e^\lambda)\mathrm{d}\lambda \tag{18}$$

3.2　目标辐射强度

目标在观测者处的辐射强度可由所有可见面元的辐射亮度信息计算得到:

$$I_{obj} = \sum_k (L_k \Delta s_k) \tag{19}$$

其中 Δs_k为第 k 个可见面元在传感器方向的投影面积,可由面元深度缓存算法计算得到.

4　仿真结果及分析

本例中仿真场景如图 1 所示,目标空间轨迹的海拔高度随时间的变化如图 6 所示,计算区间选为目标高于 150 km 的所有轨迹数据点. 圆锥壁介质分别为烧蚀材料和金属铝,厚度为 1 cm 和 0.8 cm. 头锥球半径、底面圆半径、目标总高度分别为 10 cm, 40 cm, 160 cm. 内腔正方体边长为 10 cm,热产生率为 0 W/cm^3. 目标运动锥旋角为 5°,锥旋频率为 1 Hz、自旋频率为 5 Hz. 太阳天顶角、方位角为(90°,50°). 天基传感器的球坐标为(7 200 km,65°,20°),视场为 0.848×10^{-6} rad,观测波段为 3～8 μm 和 8～14 μm.

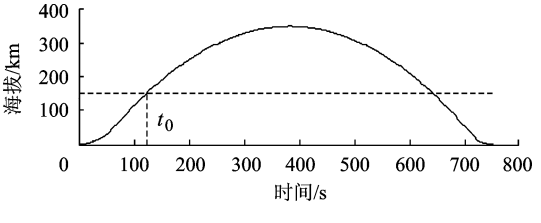


图 6　目标海拔高度随时间的变化

目标母线在初始计算时刻 $t_0=122.55$ s 及经过一段时间后的温度变化如图 7 所示. 在该初始温度下,目标向空间辐射散热占优,母线温度随时间逐渐降低. 本例中,目标底部较少受到太阳光照射,其温度下降速度快于其它面元.

为研究自旋对目标表面温度的影响,改变目标的自旋频率,经过 300 s,锥体表面半径 30 cm

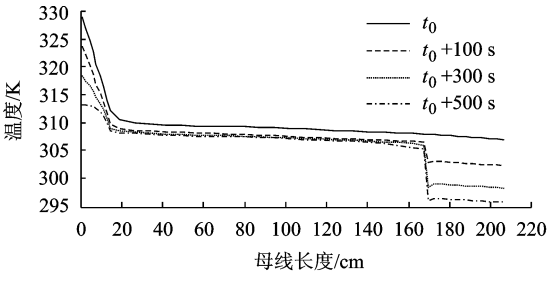


图 7　目标母线温度随时间的变化

处所对应的圆周温度分布如图 8 所示. 由于无自旋的目标在圆周方向受太阳加热不均,导致圆周方向温度差异明显. 对比自旋频率为 0 Hz, 0.01 Hz, 0.1 Hz 和 5 Hz 时的圆周温度曲线,可见随着自旋频率的增加,圆周方向各面元受太阳照射的程度趋于一致,圆周温差变小. 在本例中,当自旋频率大于 0.1 Hz 时,圆周温度分布已经相对平稳,再增加自旋频率不会明显改变圆周温度的分布.

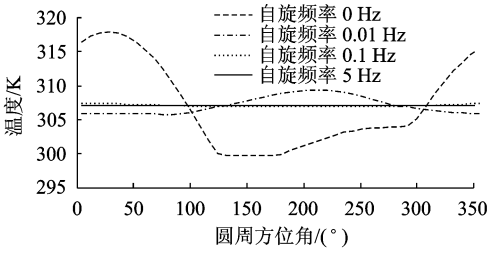


图 8　$t=422.55$ s,不同的自旋频率对圆周面元温度的影响

图 9 为 $t=422.55$ s,在 3～8 μm, 8～14 μm 波段目标总的及各自分量的 360°辐射强度曲线,其中锥头方向为 0°,锥尾方向为 180°. 从图中可以看出,在两个波段,目标自身辐射(已包含外热源对目标温度的影响)均起主要作用,目标反射太阳、地球的能量远小于目标自身辐射. 在 3～8 μm

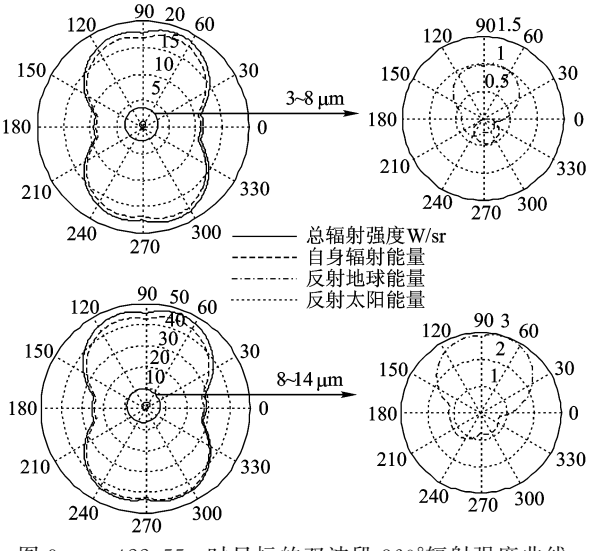
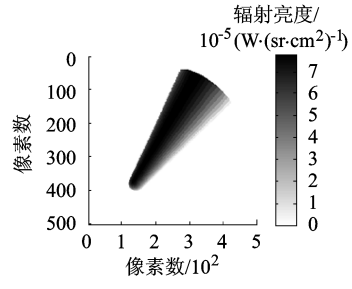


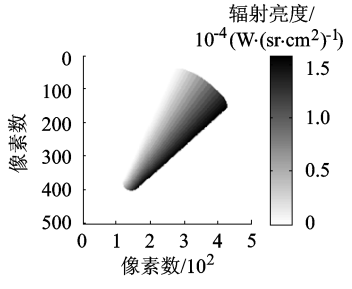
图 9　$t=422.55$ s 时目标的双波段 360°辐射强度曲线

波段，目标反射太阳能量较地球能量相比不可忽略，但在8～14 μm波段，太阳的贡献已远小于地球，这与红外辐射理论相符.

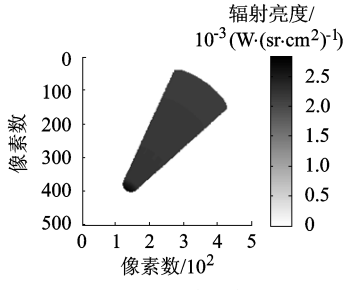
图10a～图10d分别展示了目标反射的太阳、地球能量在传感器方向的辐射亮度、目标自身辐射亮度及总的辐射亮度图像. 对比4幅图可见，在3～8 μm波段，目标自身辐射对辐射亮度的贡献起主要作用，太阳、地球对辐射亮度的影响远小于目标自身辐射. 此外，图10a、图10b还反应了观测者、目标、外热源(太阳或地球)之间的相对位置关系.



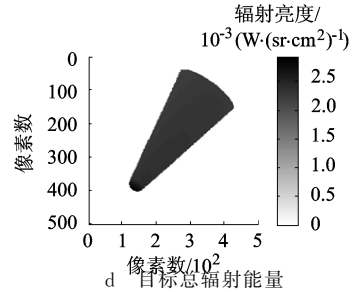
a 目标反射太阳能量



b 目标反射地球能量



c 目标自身辐射能量



d 目标总辐射能量

图10 t=422.55 s，3～8 μm波段，目标在传感器方向的辐射亮度及其分量

5 结束语

本文以多层介质球头锥目标为例，利用传热学理论计算了介质的三维导热，得到了各微元体节点的温度. 模型考虑了目标微动对传热的影响，不同自旋频率下目标圆周温度的计算结果表明，无自旋的目标在圆周方向上温度差异明显. 自旋使圆周方向温差减小，温度趋于一致. 在超过一定自旋频率后，自旋频率对圆周温度的影响不大. 对红外特性的计算结果还表明，在3～8 μm及8～14 μm波段，温度分布于300～320 K的目标，自身能量辐射起主要作用，在8～14 μm波段反射的太阳辐射能量基本可以忽略.

参考文献(References)

[1] 杨贵军，柳钦火，黄华国，等. 基于场景模型的热红外遥感成像模拟方法[J]. 红外与毫米波学报，2007，26(1)：15－21
Yang Guijun, Liu Qinhuo, Huang Huaguo, et al. Methods for simulating infrared remote sensing images based on scene models[J]. J Infrared Millim Waves, 2007, 26(1): 15－21(in Chinese)

[2] 杨华，宣益民，李强. 太阳辐射对大气层外弹道式目标表面温度的影响[J]. 红外技术，2005，27(1)：12－15
Yang Hua, Xuan Yimin, Li Qiang. Effect of sun radiation on surface temperature of ballistic target above aerosphere [J]. Infrared Technology, 2005, 27(1): 12－15(in Chinese)

[3] 张骏，杨华，凌永顺，等. 弹道导弹中段弹头表面温度场分布理论分析[J]. 红外与激光工程，2005，34(5)：583－586
Zhang Jun, Yang Hua, Ling Yongshun, et al. Theoretical analysis of temperature field on the surface of ballistic missile warhead in midcourse[J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(5): 583－586(in Chinese)

[4] 姚连兴，侯秋萍，罗继强. 弹道导弹中段目标表面温度与红外突防研究[J]. 航天电子对抗，2005，21(2)：5－16
Yao Lianxing, Hou Qiuping, Luo Jiqiang. Research of surface temperature and infrared defence of ballistic missile warhead in midcourse[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2005, 21(2): 5－16(in Chinese)

[5] Holman J P. Heat transfer[M]. 9th ed. Beijing: China Machine Press, 2005: 1－5, 77－80, 93－95

[6] 克罗夫特 D R，利利 D G. 传热的有限差分方程计算[M]. 张风禄，译. 北京：冶金工业出版社，1982：62－68，86－100
Croft D R, Lilley D G. Heat transfer calculations using finite difference equations[M]. Translated by Zhang Fenglu. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1982: 62－68, 86－100(in Chinese)

[7] Chen V C, Li F, Ho S S, et al. Micro-doppler effect in radar: phenomenon, model, and simulation study[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 2006, 42(1): 2－21

(编 辑：娄 嘉)