

## 基于黑体红外偏振特性的定量分析探索

陈伟力, 武敬力, 徐文斌, 李军伟, 王淑华, 董雁冰, 姚石磊

(北京环境特性研究所 光学辐射重点实验室, 北京 100854)

**摘要:**通过基于微面元理论的偏振双向反射分布函数模型,推导分析了物体表面红外辐射偏振传输方程的 Stokes 表达式,得出物体表面红外线偏振度与表面反射率(发射率)、波长、探测角度以及波长、目标与背景辐射差异等参数的数学关系;针对环境因素对红外偏振度的影响,开展了不同材质以及标准黑体的中、长波红外偏振成像及红外高光谱偏振成像实验,结果表明:黑体表面的红外偏振度与波长不相关,进而提出以标准黑体红外偏振特性作为溯源基准进行红外偏振定量处理的方法.

**关键词:**红外偏振成像;红外偏振特性;黑体红外偏振特性;定量分析

**中图分类号:**TN215 **文献标识码:**A

## Quantitative analysis based on infrared polarization characteristic of black body

CHEN Wei-Li, WU Jing-Li, XU Wen-Bin, LI Jun-Wei, WANG Shu-Hua,  
DONG Yan-Bing, YAO Shi-Lei

(Beijing Institute of Environmental Features Science and Technology on Optical Radiation Laboratory, Beijing 100854, China)

**Abstract:** Based on the bidirectional reflectance distribution function model, the paper establishes infrared radiation transmission equation of object surface. We deduce the mathematical model with respect to a lot of factors of the degree of polarization. Aim at the infection of circumstance factors, a lot of experiment of the infrared polarization and the infrared hyper-spectral polarization imaging about different material and standard blackbody were developed. The result show that the infrared degree of polarization of blackbody is not relate to waved length, and the method of infrared polarization quantitative analysis is put forward that is based on the infrared polarization characteristics of standard blackbody.

**Key words:** infrared polarization imaging, infrared polarization characteristic, infrared polarization characteristic of black-body, quantitative analysis

**PACS:** 42.25.Ja

### 引言

红外辐射作为电磁辐射的一部分,既具有与可见光相似的特性,又具有粒子性,可以光量子的形式被发射和吸收<sup>[1]</sup>. 物体的红外偏振特性(如偏振度和偏振角)可反映出一些在传统红外辐射信息中难以获得的目标景物信息,有利于红外成像系统更有效地进行探测和识别. 由于红外偏振信息在传输过程中,其偏振态会受到传输介质的影响,与物体表面粗糙度、折射率、反射和自身辐射的空间分布、观测

方位、传输介质、波长等多种因素相关,因此,红外偏振特性定量分析处理研究就成为红外偏振成像探测需要解决的主要问题.

本文首先基于红外辐射偏振传输模型研究辐射温度及物体表面发射率对红外偏振特性的影响;其次,通过开展不同材质及标准黑体在中、长波段的红外偏振成像实验,研究分析环境因素对红外辐射偏振特性的影响,通过对获取的实验数据进行处理和分析,结果表明:黑体辐射红外偏振特性不随辐射温度及环境影响发生变化,可作为偏振度标准源对物

收稿日期:2017-04-18,修回日期:2017-09-12

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(613225)

Foundation items: National Program on Key Basic Research Project of China (613225)

作者简介(Biography): 陈伟力(1979-),女,山西临汾人,博士,主要从事红外成像及其图像处理方面的研究. E-mail: weili1002@bit.edu.cn

Received date: 2017-04-18, revised date: 2017-09-12

体表面的红外辐射偏振特性进行溯源分析,本文研究成果对红外偏振成像定量处理的深入研究具有理论指导意义.

### 1 基于红外辐射 Stokes 矢量表示的红外偏振特性

对于不透明的辐射目标,其表面的发射辐射主要由背景反射和自身辐射组成.图 1 为红外偏振成像辐射传输模型示意图.

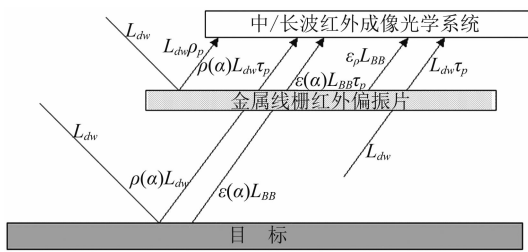


图 1 红外偏振成像辐射传输模型示意图  
Fig. 1 Radiate transmission model of Infrared polarization

假设入射到偏振器件前的 Stokes 矢量记为  $S^{in}$ , 经过偏振器件后的 Stokes 矢量记为  $S^{out}$ , 则对于红外偏振成像系统,两者之间存在线性的转换关系如下式:

$$S^{out} = M \cdot S^{in} \quad (1)$$

其中  $M$  表示偏振器件的穆勒矩阵. 在红外偏振成像实验中,通过偏振成像系统获取并计算得出 Stokes 矢量就是  $S^{in}$ , 即红外辐射偏振传输方程的 Stokes 表达式. 由图 1 可知:场景表面的 Stokes 矢量  $S^{in}$  可表示为对太阳及天空背景的反射 Stokes 矢量  $S^r$  与其自身发射辐射 Stokes 矢量  $S^e$  之和, 即  $S^{in} = S^r + S^e$ .

根据红外偏振成像辐射传输模型可知,对于不透明的辐射物体其入射到红外线栅偏振片前的 Stokes 矢量  $S^{in}$  可表示为

$$S^{in} = S^r + S^e = \int f(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos(\theta_r) d\Omega_r + S^i + \epsilon_{surf} \cdot I_{obj} \quad (2)$$

其中  $S^i$  为入射光 Stokes 矢量,  $I_{obj}$  为目标的辐射强度,  $f$  为基于微面元理论的 Priest-Germer 模型,  $d\Omega_r = \sin \theta_r d\theta_r d\phi_r$ , 用菲涅耳反射 Muller 矩阵及基于微面元理论的 BRDF 模型来表示入射辐射到反射辐射的传输关系,根据入射界面的 Stokes 矢量  $S^i$ , 可得反射的 Stokes 矢量  $S^r$  可表示为:

$$\begin{pmatrix} S_0^r \\ S_1^r \\ S_2^r \\ S_3^r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \int f_{00} \cos \theta_r d\Omega_r & \int f_{01} \cos \theta_r d\Omega_r & \int f_{02} \cos \theta_r d\Omega_r & \int f_{03} \cos \theta_r d\Omega_r \\ \int f_{10} \cos \theta_r d\Omega_r & \int f_{11} \cos \theta_r d\Omega_r & \int f_{12} \cos \theta_r d\Omega_r & \int f_{13} \cos \theta_r d\Omega_r \\ \int f_{20} \cos \theta_r d\Omega_r & \int f_{21} \cos \theta_r d\Omega_r & \int f_{22} \cos \theta_r d\Omega_r & \int f_{23} \cos \theta_r d\Omega_r \\ \int f_{30} \cos \theta_r d\Omega_r & \int f_{31} \cos \theta_r d\Omega_r & \int f_{32} \cos \theta_r d\Omega_r & \int f_{33} \cos \theta_r d\Omega_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_0^i \\ S_1^i \\ S_2^i \\ S_3^i \end{pmatrix} \quad (3)$$

#### 1.1 基于发射率的红外辐射偏振 Stokes 矢量表示

物体的光谱比辐射率定义  $\epsilon(\lambda, T)$  为:在相同温度  $T$  下,目标的光谱辐射亮度  $L_{obj}(\lambda, T)$  与目标的光谱辐射亮度对应的黑体辐射亮度  $L_B(\lambda, T)$  之比,即

$$\epsilon(\lambda, T) = \frac{L_{obj}(\lambda, T)}{L_B(\lambda, T)} \quad (4)$$

式中,  $\lambda$  为辐射波长,对于一般物体,温度变化范围不大时,  $T$  对于  $\epsilon(\lambda, T)$  影响较小,常可忽略,因此下面的讨论中  $\epsilon(\lambda, T)$  不再表示为  $T$  的函数. 将其延伸到红外偏振来分析,则辐射率的简单通式转换为类似于 Stokes 矩阵的矢量,偏振光谱比辐射率的矢量  $\epsilon(\lambda)$  可表为

$$\epsilon(\lambda) = \frac{L_{obj}(\lambda, T)}{L_B(\lambda, T)} \quad (5)$$

由于黑体辐射的非偏性,黑体辐射率矢量表示为  $\epsilon_0 = (1, 0, 0, 0)^T$ .

对于非偏振入射,由 BRDF 的物理意义<sup>[2]</sup>可知, BRDF 是来自表面方向辐射度增量与其所引起的方向反射辐射亮度增量之间的比值,那么物体表面反射辐射亮度增量可表示为

$$dL(\theta_r, \phi_r, \lambda) = dE(\theta_i, \phi_i, \lambda) \cdot f(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \quad (6)$$

该式表示:设波长为  $\lambda$ ,从方向  $(\theta_i, \phi_i)$ ,以辐射亮度  $L(\theta_i, \phi_i, \lambda)$  投射到目标表面,造成立体角为  $d\Omega_i$  的目标表面的辐照度增量为  $dE(\theta_i, \phi_i, \lambda) = L(\theta_i, \phi_i, \lambda) \cos(\theta_i) d\Omega_i$ ,而探测器从方向  $(\theta_r, \phi_r)$  观察目标,接收到来自目标对外来辐射  $dE$  的反射辐射,其亮度值为  $dL(\theta_r, \phi_r, \lambda)$ . 若辐射亮度和辐射照度变为类似于 Stokes 矢量的形式时,偏振 BRDF 变为类似 Muller 矩阵的矩阵,则物体表面反射辐射亮度增量就可表示为

$$dL(\theta_r, \phi_r, \lambda) = f(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos(\theta_i) L(\theta_i, \phi_i, \lambda) d\Omega_i \quad (7)$$

其积分形式为

$$L(\theta_r, \phi_r, \lambda) = \int f(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos(\theta_i) L(\theta_i, \phi_i, \lambda) d\Omega_i \quad (8)$$

对于不透明的辐射目标,通常红外偏振成像接收的辐射包括场景的辐射和对其它辐射源的反射,那么目标表面总的辐射亮度可以表示为

$$L_{tot} = L_e + L_r = L_B \cdot \epsilon_{surf} + \int f(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) L(\theta_i, \phi_i, \lambda) \cos(\theta_i) d\Omega_i \quad (9)$$

为了计算目标表面辐射率,需要引入局部热量动态平衡的概念<sup>[8]</sup>.局部动态平衡首先假设参与辐射和吸收过程中的原子和分子数量可以通过平衡值给出.在这种情况下,材料的分布状态由相同温度下材料的麦克斯韦-玻尔兹曼分布决定的.注意:此处的假设平衡是指材料的不同状态,而不是材料本身与周围环境的平衡.由于入射辐射是与表面同温度的热辐射,故总辐射就是相同温度下的黑体辐射,即

$$L_B \cdot \epsilon_0 = L_B \cdot \epsilon_{surf} = \int f(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \times L_B \cdot \epsilon_0 \cos(\theta_i) d\Omega_i \quad (10)$$

由式(10)可得出目标表面偏振辐射发射率的表达式为

$$\epsilon_{surf} = \left[ 1 - \int f(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos(\theta_i) d\Omega_i \right] \epsilon_0$$

$$= \begin{bmatrix} 1 - \int f_{00}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos(\theta_i) d\Omega_i \\ - \int f_{10}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos(\theta_i) d\Omega_i \\ - \int f_{20}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos(\theta_i) d\Omega_i \\ - \int f_{30}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos(\theta_i) d\Omega_i \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 - \int f_{00}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos(\theta_r) d\Omega_r \\ - \int f_{10}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos(\theta_r) d\Omega_r \\ - \int f_{20}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos(\theta_r) d\Omega_r \\ - \int f_{30}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos(\theta_r) d\Omega_r \end{bmatrix} \quad (11)$$

由此可知,目标表面自身辐射的 Stokes 矢量  $S^e$  可以表示为:  $S^e = \epsilon_{surf} \cdot I_{obj}$ , 其中  $I_{obj}$  为目标的辐射强度.

## 1.2 红外偏振辐射传输的 Stokes 表示

由红外偏振成像辐射传输模型可知,对于不透明的辐射物体其入射到红外线栅偏振片前的 Stokes 矢量  $S^{in}$  可表示为

$$S^{in} = S^r + S^e =$$

$$\int f(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos(\theta_r) d\Omega_r \cdot S^i + \epsilon_{surf} \cdot I_{obj} \quad (12)$$

其中  $S^i$  为入射光 Stokes 矢量,  $I_{obj}$  为目标的辐射强度.假设被动红外成像系统中入射光为自然光,即  $S^i$  可表示为:  $S^i = [I_{bg} \ 0 \ 0 \ 0]^T$ , 则式(12)可表示为

$$S^{in} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{obj} + \int f_{00}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos(\theta_r) d\Omega_r (I_{bg} - I_{obj}) \\ \int f_{10}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos(\theta_r) d\Omega_r (I_{bg} - I_{obj}) \\ \int f_{20}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos(\theta_r) d\Omega_r (I_{bg} - I_{obj}) \\ \int f_{30}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos(\theta_r) d\Omega_r (I_{bg} - I_{obj}) \end{bmatrix} \quad (13)$$

由式(13)可知,场景表面的 Stokes 矢量  $S^{in}$  与  $f_{00}$ 、 $f_{10}$ 、 $f_{20}$  密切相关,  $f_{00}$ 、 $f_{10}$ 、 $f_{20}$  可由菲涅耳反射 Muller 矩阵  $M(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)$  中的  $m_{00}$ 、 $m_{10}$ 、 $m_{20}$  计算得出(由于在计算中通常忽略  $S_3$  参数,故此处略去  $m_{30}$  的求解计算),通过  $M_{i,j}$  ( $i, j = 0, 1, 2, 3$ ) 的计算式可以计算出  $m_{00}$ 、 $m_{10}$ 、 $m_{20}$  为

$$\begin{pmatrix} m_{00} \\ m_{10} \\ m_{20} \\ m_{30} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} r_s^2 + r_p^2 \\ \cos(2\eta_i)(r_s^2 - r_p^2) \\ \sin(2\eta_i)(r_p^2 - r_s^2) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + R_p \\ \cos(2\eta_i)(R_s - R_p) \\ \sin(2\eta_i)(R_p - R_s) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中,  $\eta_i$ 、 $\eta_r$  为将标量 BRDF 偏振化时所引入的参考平面之间变换的旋转角;  $R_s$ 、 $R_p$  为菲涅耳反射率的垂直和平行分量.  $m_{00}$  表示为偏振分量 s、p 的菲涅耳反射率  $R_s$ 、 $R_p$  之和,  $m_{10}$ 、 $m_{20}$  分别表示偏振分量 s、p 的菲涅耳反射率  $R_s$ 、 $R_p$  之差与两倍入射参考平面变换的旋转角  $\eta_i$  的余弦值、正弦值的乘积,  $\eta_i$  的计算表达式为

$$\cos(\eta_i) = \frac{\cos(\theta) - \cos(\theta_i) \cos(\beta)}{\sin(\theta_i) \sin(\beta)} \quad (15)$$

将  $m_{00}$ 、 $m_{10}$ 、 $m_{20}$  代入式(13)可得

$$\begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{obj} + \frac{1}{8\pi\sigma^2} \int \frac{1}{\cos^4\theta} \frac{\exp(-(\tan^2\theta/2\sigma^2))}{\cos(\theta_i)} (R_s + R_p) d\Omega_r (I_{bg} - I_{obj}) \\ \frac{1}{8\pi\sigma^2} \int \frac{1}{\cos^4\theta} \frac{\exp(-(\tan^2\theta/2\sigma^2))}{\cos(\theta_i)} \cos(2\eta_i) (R_s - R_p) d\Omega_r (I_{bg} - I_{obj}) \\ \frac{1}{8\pi\sigma^2} \int \frac{1}{\cos^4\theta} \frac{\exp(-(\tan^2\theta/2\sigma^2))}{\cos(\theta_i)} \sin(2\eta_i) (R_p - R_s) d\Omega_r (I_{bg} - I_{obj}) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

通过  $m_{00}$ 、 $m_{10}$ 、 $m_{20}$  推导得出的 Stokes 各参量完全符合其物理定义. 由此可知, 目标的偏振状态与表面折射率、入射角、反射角、粗糙度等多种因素相关, 同时也与目标背景的辐射强度密切相关.

由式(16)及偏振度、偏振角的定义可推导得出基于偏振 BRDF 模型的偏振度及偏振角数学模型为

$$p = \frac{\sqrt{S_1 + S_2}}{S_0} = \frac{\frac{1}{8\pi\sigma^2} |I_{bg} - I_{obj}|}{I_{obj} + \frac{1}{8\pi\sigma^2} \int \frac{1}{\cos^4\theta} \cdot \frac{\exp(-(\tan^2\theta/2\sigma^2))}{\cos(\theta_i)} (R_s + R_p) d\Omega_i (I_{bg} - I_{obj})} \cdot \sqrt{\left[ \int \frac{1}{\cos^4\theta} \cdot \frac{\exp(-(\tan^2\theta/2\sigma^2))}{\cos(\theta_i)} \cos(2\eta_i) (R_s - R_p) d\Omega_i \right]^2 + \left[ \int \frac{1}{\cos^4\theta} \cdot \frac{\exp(-(\tan^2\theta/2\sigma^2))}{\cos(\theta_i)} \cos(2\eta_i) (R_p - R_s) d\Omega_i \right]^2} \quad (17)$$

目前, 相关参数对偏振信息的影响几乎均为通过实验进行分析归纳, 而本文通过分析基于微面元理论的偏振 BRDF 模型, 推导得出红外偏振辐射发射率模型及红外辐射偏振传输方程的 Stokes 表达式, 并推导得出偏振度关于红外辐射偏振传输方程的数学模型. 另, 由于偏振度数学模型较复杂, 为了研究讨论红外偏振信息, 对探测条件做假设: 若入射光线与反射光线在同一平面内, 那么可以忽略参考平面之间变换的旋转角  $\eta_i$  和  $\eta_r$ , 则式(17)可以简化为

$$p = \frac{\frac{1}{8\pi\sigma^2} |I_{bg} - I_{obj}| \int \frac{1}{\cos^4\theta} \cdot \frac{\exp(-(\tan^2\theta/2\sigma^2))}{\cos(\theta_i)} |R_s - R_p| d\Omega_i}{I_{obj} + \frac{1}{8\pi\sigma^2} \int \frac{1}{\cos^4\theta} \cdot \frac{\exp(-(\tan^2\theta/2\sigma^2))}{\cos(\theta_i)} (R_s + R_p) d\Omega_i (I_{bg} - I_{obj})} \quad (18)$$

由上式可知, 当入射角、探测角、表面材质以及表面粗糙度固定时, 需要分情况讨论: 物体辐射大于周围环境辐射时, 物体表面的红外偏振度随辐射强度增大而发生改变, 且当辐射发生改变时, 由于在中、长波波段范围辐射强度差异较大, 故同一物体表面红外辐射偏振度在不同波段相差会比较大. 通过基于红外辐射偏振传输方程的推导分析, 可初步得出结论: 物体材质表面的红外辐射偏振度取值并不固定, 且与多种因素相关, 环境辐射、自身辐射及目标表面发射率等均会使得材质表面的红外偏振度发生改变; 另, 由红外辐射偏振传输方程的推导分析可知, 红外偏振度与物体以及周围环境的辐射强度相关, 故材质表面的红外线偏振度随探测波长的不同也会发生改变.

综上所述, 物体材质表面的红外线偏振度取值与多种因素相关, 故描述材质表面红外线偏振度需先对材质表面的红外线偏振度进行定量处理研究, 然后才能对材质表面的红外偏振特性进行分析处理.

## 2 不同发射率涂层材质表面及标准黑体红外偏振特性分析

由基于偏振双向分布反射函数的推导过程可知, 物体表面的红外偏振特性与表面发射率、探测波长、探测角度、粗糙度等多因素相关<sup>[6-7]</sup>, 故通过实验探测

得到的红外线偏振度是相对的量值, 且周围环境辐射对物体表面辐射偏振特性的影响也不可忽略, 故需要研究并探索可以作为溯源标准的量值, 进而完成红外辐射偏振特性的定量分析处理. 图 2、3 分别为在模拟真空环境下, 根据中、长波红外偏振成像测试数据计算得出的红外标准板的偏振度图像, 测试设备采用中、长波热像仪, 焦平面探测器像元数  $640 \times 512$ , 像元尺寸  $15\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$  (工作波段:  $3 \sim 5\mu\text{m}$ ) 及  $16\mu\text{m} \times 16\mu\text{m}$  (工作波段:  $8 \sim 10\mu\text{m}$ ), A/D 量化精度 14bit. 根据计算结果得出: 相同测试条件下, 红外标准板的偏振度值在中波波段为 0.07; 长波波段为 0.3. 由此可知, 反射对于物体表面中波红外偏振特性影响较大, 对长波红外偏振特性影响较小.

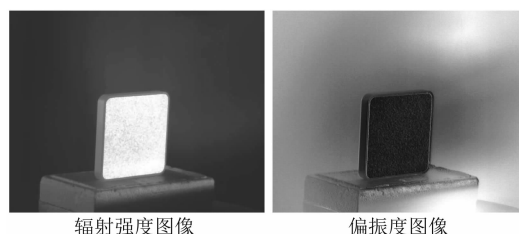


图 2 红外标准板中波辐射及偏振度图像  
Fig. 2 Degree of polarization images and radiation images of mid-wave Infrared standard board

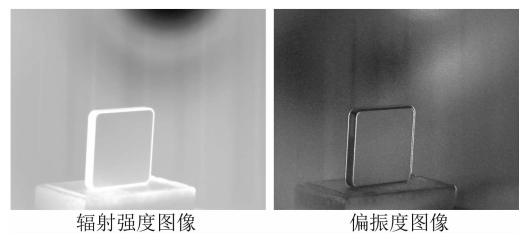


图 3 红外标准板长波辐射及偏振度图像  
Fig. 3 Degree of polarization images and radiation images of long-wave Infrared standard board

根据计算结果可得出初步结论: 物体表面的偏

振度值不是固定值,探测波段范围是影响表面偏振特性的重要因素.由实验结果可知,相同测试环境下,发射率固定的红外标准板在不同探测波段红外线偏振度有较大差异.这主要由于在中波波段,反射削弱红外标准板表面线偏振度.

### 2.1 环境辐射对目标材质表面红外偏振特性的影响分析

由参考文献可知,红外偏振信息参数与测试环境因素相关,比如:环境温度、相对湿度以及周围环境热辐射等.本节通过试验测试分析环境因素对偏振定量处理的影响,测试环境选在两栋建筑物之间的混凝土场地,被测目标包括玻璃、粗糙涂漆金属表面、木板、油布蓬以及混凝土地面,测试期间要求被测目标保持固定位置放置,测试试验布置示意图如4所示.

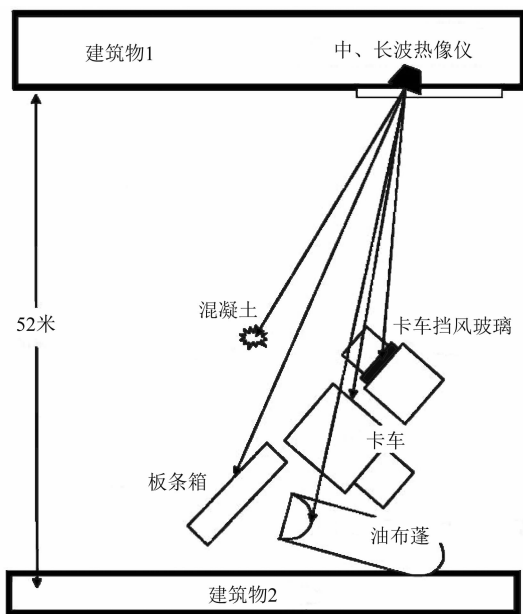


图4 实验分布示意图  
Fig. 4 Sketch map of experimental distribution

实验系统采用热像仪,焦平面探测器像元数  $640 \times 512$ ,像元尺寸  $15\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$ (工作波段:  $3 \sim 5\mu\text{m}$ )及  $16\mu\text{m} \times 16\mu\text{m}$ (工作波段:  $8 \sim 10\mu\text{m}$ ),A/D 量化精度 14bit.热图像采集系统采用测温热像仪自带的图像采集系统,各偏振图像经过系统相同的温度-灰度转换关系,得到标准的偏振热图像.根据不同目标表面统计测试结果,得出结论:

- (1) 中波波段热辐射偏振特性较长波波段敏感,长波波段热辐射偏振特性更稳定;
- (2) 云层、周围辐射环境中的水份份对中波波段红外辐射偏振特性影响较大;

(3) 人造目标(多散射、朗伯面)表面红外辐射偏振特性与周围环境相关性较小.

### 2.2 自身辐射对目标材质表面红外偏振特性的影响分析

根据基尔霍夫理论,热辐射也表现出偏振效应,即目标的反射辐射和自发辐射都含有偏振信息.反射偏振信息与目标的表面粗糙度、纹理走向、表面电导率、材料的理化特性等信息相关,而红外辐射偏振信息不仅与目标的表面粗糙度、纹理、材料的理化特性相关,还与目标材质的辐射及发射率相关.

由红外辐射偏振传输模型的推导过程可知,热辐射的偏振分量在介质表面发生反射时,导致反射辐射中的对应偏振量的比例不平衡,从而引起了反射辐射的部分偏振性.根据基尔霍夫定律,物体的辐射率与其反射率是存在一定关系的,所以反射辐射中的偏振量的不平衡,又间接导致了物体自身辐射中偏振量的不平衡,从而产生了红外热辐射的偏振现象.目标表面自身辐射的 Stokes 矢量  $S^\circ$  可以表示为:  $S^\circ = \epsilon_{\text{surf}} \cdot I_{\text{obj}}$ ,其中  $I_{\text{obj}}$  为目标的辐射强度.根据目标表面自身辐射的 Stokes 矢量计算表达式可知:目标表面辐射直接影响目标辐射 Stokes 矢量,也就是说目标辐射温度的差异对目标表面红外偏振度特性也会产生影响.

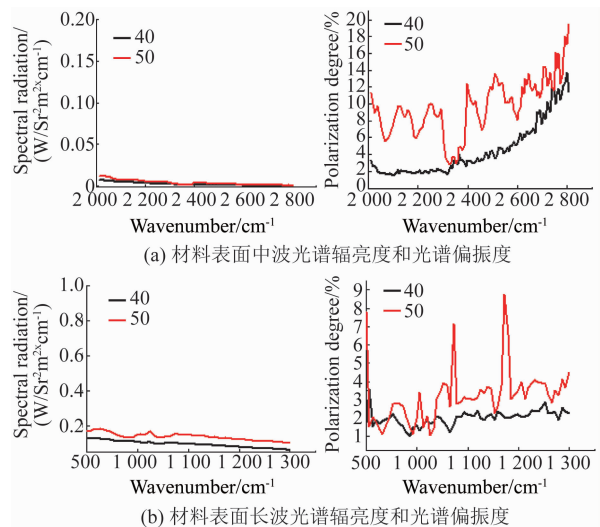


图5 40℃和50℃时材料表面中波长光谱辐亮度和光谱偏振度,(a) 材料表面中波长光谱辐亮度和光谱偏振度,(b) 材料表面长波长光谱辐亮度和光谱偏振度  
Fig. 5 The mid-wave and the long wave infrared spectral brightness and spectral polarization of material science at temperature of 40℃ and 50℃,(a) The mid-wave infrared spectral brightness and spectral polarization of material science surface,(b) The long wave infrared spectral brightness and spectral polarization of material science surface

为了验证分析红外辐射特性对目标表面偏振特性的影响,开展了相同材料在不同辐射温度下的红外高光谱偏振成像试验研究. 试验中使用的 FIRST 中/长波红外高光谱成像仪采用傅立叶变换技术,可在中波 1.5 ~ 5  $\mu\text{m}$  和长波 8 ~ 11  $\mu\text{m}$  高分辨率光谱探测的同时,实现 320  $\times$  256 分辨率的空间成像. 试验测试内容主要是:在同一探测方向,辐射温度 40 $^{\circ}\text{C}$  和 50 $^{\circ}\text{C}$  时对某材料进行光谱辐射亮度和光谱偏振度测量,结果如图 5 所示. 由图可知:目标辐射温度的差异影响目标表面的红外辐射偏振特性.

对温度由 40 $^{\circ}\text{C}$  提升到 50 $^{\circ}\text{C}$  时光谱辐射亮度和光谱偏振度的对比度  $C_p(\lambda)$  进行初步分析,下图为某材料在温度由 40 $^{\circ}\text{C}$  提升到 50 $^{\circ}\text{C}$  时光谱辐射亮度和光谱偏振度的对比度比较图. 光谱偏振度对比度  $C_p(\lambda)$  的计算过程定义为:

$$C_{p(\lambda)} = \frac{P_{\lambda}(T_{\text{高}}) - P_{\lambda}(T_{\text{低}})}{P_{\lambda}(T_{\text{低}})} \quad (19)$$

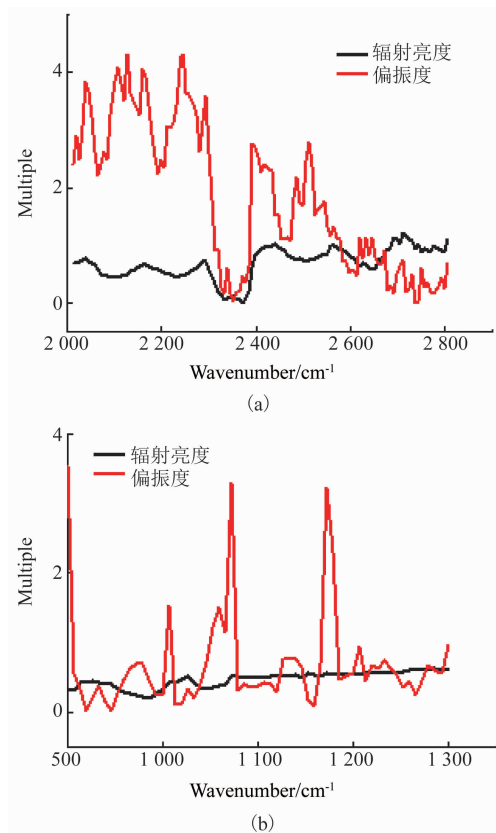


图 6 温度由 40 $^{\circ}\text{C}$  提升到 50 $^{\circ}\text{C}$  时光谱辐射亮度和光谱偏振度对比度比较图, (a) 中波光谱辐射亮度和偏振度提升量, (b) 长波光谱辐射亮度和偏振度提升量

Fig. 6 Contrast map of spectral brightness and spectral polarization at the temperature from 40 $^{\circ}\text{C}$  to 50 $^{\circ}\text{C}$  (a) Enhancement of spectral brightness and polarization degree at mid-wave. (b) Enhancement of spectral brightness and polarization degree at long wave

根据试验可得出结论:无论中波还是长波,当温度由 40 $^{\circ}\text{C}$  提升到 50 $^{\circ}\text{C}$  时,辐射亮度有所提升,但提升量较小,并且随波长的变化比较平缓;而偏振度的提升量较大,并显示具有波段选择性.

### 2.3 不同发射率涂层材质表面外偏振特性实验分析

为了实现红外偏振度的定量处理,需要开展不同发射率材质在不同辐射温度的中、长波红外偏振实验研究. 实验在暗室中将不同发射率涂层材质在暗室环境中依次加热到 30 $^{\circ}\text{C}$ 、40 $^{\circ}\text{C}$ 、...70 $^{\circ}\text{C}$ ,分别用中、长波红外偏振成像系统对材质进行红外高光谱偏振成像探测,试验使用 FIRST 中/长波红外高光谱成像仪,图 7 为实验中材质加热装置. 图 8、图 9、图 10 分别为发射率涂层材质 1(3-5:0.958,8-12:0.963)、发射率涂层材质 2(3-5:0.711,8-12:0.920) 以及普通发黑涂层材质在不同辐射条件下,其表面红外辐射偏振度随表面辐射温度变化的关系曲线. 由图可知,在不同的探测波长范围内,材质的红外辐射偏振度呈不同的变化规律,在中波波段,材质红外辐射偏振度随材质辐射温度的升高而降低;在长波波段,材质红外辐射偏振度随材质辐射温度的升高而呈升高趋势. 由此可知,探测波长对于红外辐射偏振度影响较大,即红外辐射偏振度在不同的探测波段取值波动较大,故常用的描述材质表面红外偏振度方法并不准确,且相同材质表面的红外辐射偏振特性随辐射温度的变化而变化,故需研究红外辐射偏振溯源基准,以正确描述材质表面的红外辐射偏振特性.

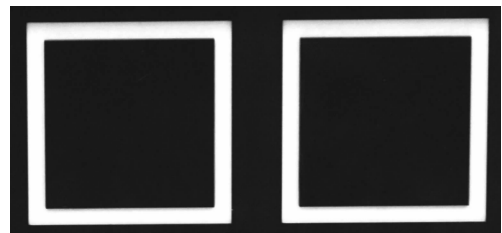


图 7 红外偏振成像实验用加热装置

Fig. 7 The heating device in Infrared polarization test

### 2.4 标准黑体红外偏振特性实验分析

虽然黑体辐射特性与表面特性以及构造形式有关,但由于黑体表面发射率恒定为 1,且由偏振度的定义可知:偏振度是指光束中偏振部分的光强度和整个光强度之比. 由 1.1 节中红外辐射偏振 Stokes 矢量表示推导过程可知: $S^{\circ} = \epsilon_{\text{surp}} \cdot I_{\text{obj}}$ ,而黑体的表面发射率固定,并不随波长的变化而变化,根据计算推导过程可知黑体的辐射线偏振度近似为



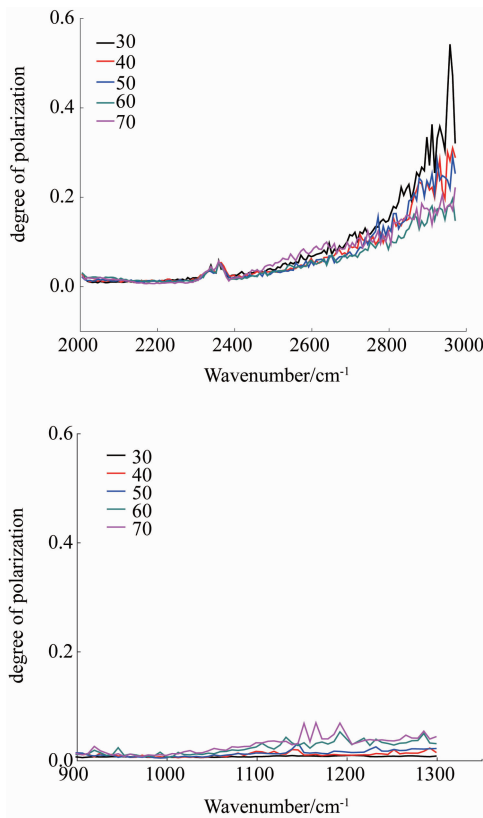


图8 发射率涂层材质-1 中、长波红外偏振度随辐射温度变化曲线  
 Fig. 8 The change curve of Infrared polarization degree vary with radiance temperature of emissivity material-1

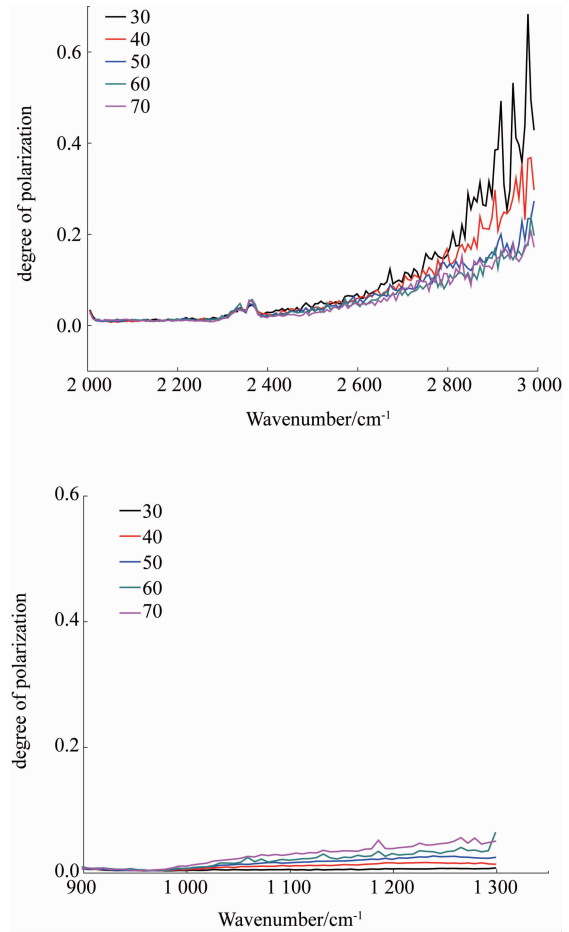


图9 发射率涂层材质-2 中、长波红外偏振度随辐射温度变化曲线  
 Fig. 9 Change curves of Infrared polarization degree vary with radiance temperature of emissivity material-2

零. 理论计算分析与试验分析结论吻合, 由于黑体辐射偏振度值固定, 在红外波段近似为零, 故而将黑体辐射射线偏振度作为目标红外辐射偏振度的“溯源基准”, 进而完成目标红外偏振度的定量分析研究.

为了研究辐射偏振特性的定量处理, 对黑体的中、长波红外偏振特性进行了实验研究. 测试设备采用中、长波热像仪, 焦平面探测器像元数  $640 \times 512$ , 像元尺寸  $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$  (工作波段:  $3 \sim 5 \mu\text{m}$ ) 及  $16 \mu\text{m} \times 16 \mu\text{m}$  (工作波段:  $8 \sim 10 \mu\text{m}$ ), A/D 量化精度 14bit. 实验在暗室中将黑体依次加热到  $30^\circ\text{C}$ 、 $40^\circ\text{C}$ 、 $\dots$ 、 $70^\circ\text{C}$ , 分别用中、长波红外偏振成像系统对黑体进行红外偏振成像测量 (中波积分时间  $1500 \mu\text{s}$ , 长波积分时间  $150 \mu\text{s}$ ). 图 11 为标准黑体加热到  $70^\circ\text{C}$  时, 由中、长波红外偏振成像系统获取的不同偏振旋转方向的辐射强度图像计算得出的偏振度图像. 图 12、13 分别为面黑体—中波、长波标定曲线图. 由图表可知: 黑体表面中、长波红外线偏振度相差较小, 这表明黑体表面的红外辐射偏振特性与波长不相关.

由理论推导分析与实验处理结果可知: 环境辐射、物体表面的辐射强度以及目标表面发射率均影响其红外偏振特性, 且周围环境辐射也对物体表面的红外偏振特性有不可忽略的影响. 本节通过对标准黑体进行红外偏振成像实验研究, 得出黑体表面的红外辐射偏振度不随表面发射率、辐射温度的变化而改变, 故可将黑体作为红外辐射偏振特性溯源的基准, 进而完成表面红外偏振的定量分析处理.

### 3 结论

基于黑体红外偏振特性完成目标红外偏振特性定量处理属于较新的研究课题, 本文工作旨在通过探索溯源基准完成目标表面红外辐射偏振特性的定量处理分析; 通过基于红外辐射偏振传输模型推导分析了红外辐射偏振的 Stokes 表示, 基于理论分析得出物体辐射温度及表面发射率对物体红外辐射偏振特性的影响; 开展了对不同材质及标准黑体的红

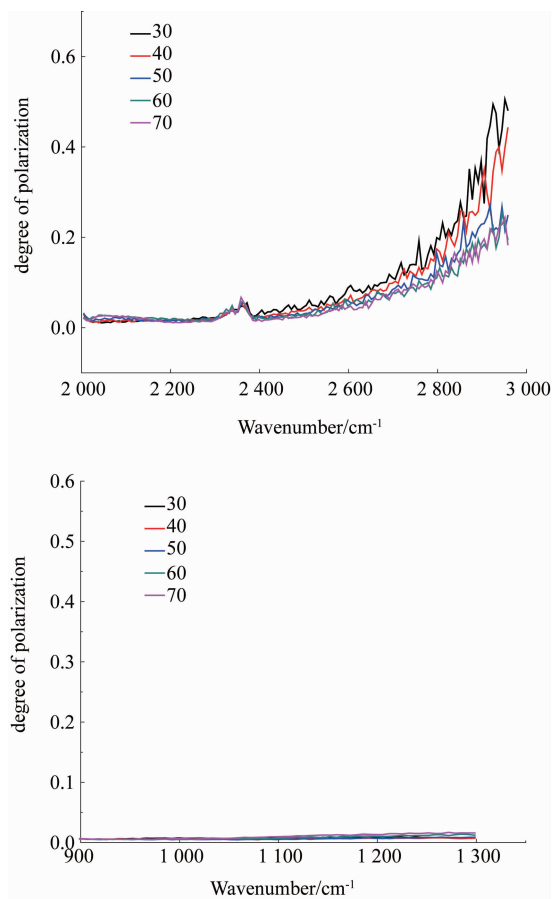


图 10 普通发黑涂层材质中长波红外偏振度随辐射温度变化曲线

Fig. 10 Change curves of Infrared polarization degree vary with radiance temperature of black coating material

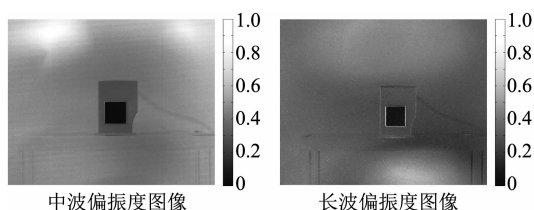


图 11 黑体辐射 70 °C 时中、长波红外偏振度图像

Fig. 11 Infrared polarization degree images of black body at 70 °C

外辐射偏振成像实验, 得出黑体表面红外偏振特性与探测波长及辐射温度不相关的初步结论, 后续将会继续开展大量实验研究, 进一步验证黑体作为红外辐射偏振溯源基准的可行性, 并形成标定方法. 本文研究将为红外偏振特性定量处理提供理论和实验基础支撑, 研究成果有利于提高目标辐射红外偏振特性数据的有效性, 将为进一步提高红外偏振成像系统的探测识别能力提供理论依据和技术支撑.

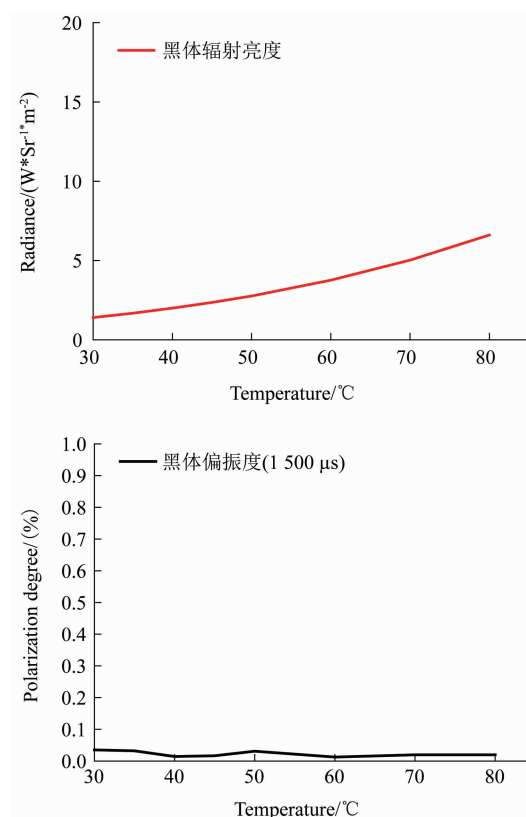


图 12 面黑体一中波标定曲线图 (积分时间 1 500 μs)

Fig. 12 Black body middle-wave demarcate curve

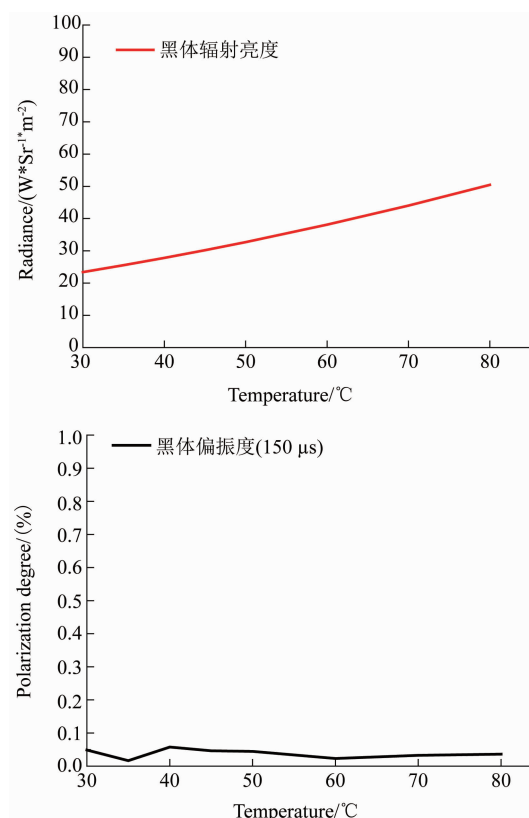


图 13 面黑体—长波标定曲线图 (积分时间 150 μs)

Fig. 13 Black body long-wave demarcate curve



## References

- [1] ZHANG Jian-Qi, FANG Xiao-Ping. *Infrared Physics* [M], Xidian University Press (张建奇, 方小平. 红外物理. 西安电子科技大学出版社). 2004.
- [2] ZHANG Chun-Tao. Experimental study and theoretical analysis of underwater active photoelectric imaging based on polarization [D]. Beijing, Beijing Institute of Technology (张春涛. 基于偏振技术的水下主动光电成像实验及理论分析研究. 北京:北京理工大学). 2007.
- [3] ZHANG Chun-Tao, WANG Xia. Technology progress of infrared polarization imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering* (张春涛, 王霞. 金伟其等. 红外偏振成像技术进展. 激光与红外), 2006, **36**(12): 1096 - 1098.
- [4] NIE Jin-Song, WANG Zhen. Summarize of infrared polarization imaging detection technology [J]. *Infrared Technology* (聂劲松, 汪震. 红外偏振成像探测技术综述. 红外技术), 2006, **28**(2): 63 - 67.
- [5] MA Li-Xiang, LI Fan-Ming, NIU Ji-Yong. Research on influencing factors of target polarization characteristics [J]. *Infrared and Laser Engineering* (马利祥, 李范鸣, 牛继勇. 目标红外偏振特性的影响因素研究. 激光与红外), 2013, **43**(8): 886 - 889.
- [6] CHEN Wei-Li, WANG Shu-Hua, JIN Wei-Qi, LI Jun-Wei. Research of infrared polarization characteristics based on polarization Micro-surface theory [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (陈伟力, 王淑华, 金伟其, 等. 基于偏振微面元理论的红外偏振特性研究, 红外与毫米波学报), 2014, **33**(5): 507 - 514.
- [7] CHEN Wei-Li, SUN Qiu-Ju, WANG Shu-Hua, *et al.* Gesture analysis based on the polarization characteristic for the target edge contour [J], *J. Infrared Millim. Waves* (陈伟力, 孙秋菊, 王淑华, 等. 基于目标边缘轮廓偏振特征的姿态分析初探, 红外与毫米波学报), 2016, **35**(6): 753 - 760, 768.
- [8] Howe J D, Miller M A, Blumer R V, *et al.* Polarization sensing for target acquisition and mine detection [J]. *Proc. of SPIE*. 2000, **4133**: 202 - 213.