

文章编号:1000-8055(2012)11-2635-06

氢氧火箭发动机羽烟紫外辐射参数反演研究

国爱燕¹, 唐 义¹, 白廷柱¹, 黄 刚¹, 朱希娟²

(1. 北京理工大学 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081;

2. 北京环境特性研究所 光学辐射重点实验室, 北京 100854)

摘 要: 针对氢氧火箭发动机羽烟紫外辐射特性参数分析, 提出一种基于紫外 CCD(change coupled device)相机采集的单幅辐射图像, 同时反演羽烟内紫外辐射源项和吸收系数的方法。该方法将羽烟简化为发射-吸收轴对称介质, 通过对辐射图像数据进行 Abel 变换得到三维介质内辐射强度分布, 利用最小二乘法将反演问题转化为使计算得到的与 Abel 变换得到的辐射强度误差最小的最优化问题, 然后利用共轭梯度法求解该最优化问题。通过在求解正问题得到的准确值的基础上添加随机噪声, 模拟辐射图像数据, 分析了测量误差对算法反演精度的影响。结果表明: 该算法对测量误差不敏感, 能够准确的重建羽烟内的辐射源项和吸收系数分布。

关 键 词: 羽烟; 辐射反问题; Abel 变换; 共轭梯度法; 辐射源项; 吸收系数

中图分类号: V430

文献标志码: A

Inverse problem of ultraviolet radiation characteristic parameters in hydrogen-oxygen rocket motor plume

GUO Ai-yan¹, TANG Yi¹, BAI Ting-zhu¹, HUANG Gang¹, ZHU Xi-juan²

(1. Key Laboratory of Photoelectronic Technology and System, Ministry of Education of China, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Science and Technology on Optical Radiation Laboratory, Beijing Institute of Environment Features, Beijing 100854, China)

Abstract: An inverse radiation analysis was presented for simultaneous estimation of the radiative source term and absorption coefficient distribution in the plume of hydrogen-oxygen rocket motor from the knowledge of a single ultraviolet radiation image captured by the CCD camera. Considering the plume as absorbing-emitting cylindrical symmetry media with transparent boundaries, after applying Abel transform to the image data, the inverse problem was formulated as an optimization problem that minimizes the errors between the radiation intensities calculated and the experimental data with Abel transform, and the conjugate gradient method was used to solve the optimization problem. The effects of measurement errors on the accuracy of the estimation were investigated, and the measured data were simulated by adding random errors to the exact solution of the direct problem. Test results show that the radiation characteristic parameters can be estimated accurately, even for data with measurement error.

收稿日期: 2011-11-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20121115.1028.034.html>

基金项目: 预先研究(9140C610301110C61); 国家高技术研究发展计划(2007AA12Z101, 2009AA01Z225)

作者简介: 国爱燕(1984—), 女, 河北衡水人, 博士生, 主要研究方向为羽烟紫外辐射特性数值计算。

通信作者: 唐义(1977—), 男, 吉林白山人, 副教授, 博士生, 主要研究方向紫外光通信技术, 紫外成像光谱技术。

Key words: plume; inverse radiation problem; Abel transform; conjugate gradient method; radiative source term; absorption coefficient

氢氧火箭发动机是比冲最大的化学推进剂火箭发动机,广泛用作导弹和火箭的动力装置.发动机羽烟的紫外辐射特性研究在导弹逼近紫外预警和火箭发动机燃烧分析领域备受关注^[1-3].羽烟的辐射特性参数决定了羽烟的紫外辐射分布,是分析羽烟紫外辐射机理,建立羽烟紫外辐射物理模型的必要参数,但是却难以直接测量.根据羽烟紫外辐射分布测量数据,结合反演算法,重建羽烟内紫外辐射特性参数是解决这一问题的有效方法^[4-6].

反演方法的选择取决于目标参数的分布特性和试验数据的采集方式.氢氧火箭发动机羽烟可以视为轴对称发射-吸收介质,辐射特性参数包括辐射源项和吸收系数^[6].在高温介质辐射测量试验中,作为一种能够提供被测量空间分布的非侵入性测量设备,CCD 相机得到了广泛的应用.基于 CCD 相机采集的辐射图像的反演算法也得到了一定的发展.

根据针孔 CCD 相机采集的图像,周怀春等^[7-8]提出了蒙特卡洛和角度因子概念结合的快速算法,用于重建炉膛内灰气体介质的温度分布.根据边界处的 CCD 相机采集的辐射图像,Liu 等^[9]利用前向蒙特卡洛和最小二乘 QR 分解方法确定了三维介质温度场.在此基础上,王飞等^[10]提出逆向蒙特卡洛和最小二乘 QR 分解法结合的方法,该方法比前向蒙特卡洛法的效率更高.上述算法针对的都是非轴对称的介质,图像是由视场角比较小的针孔相机或者在相机与辐射目标的测量距离比较近的情况下采集的,需要多个相机才能够覆盖整个辐射区域得到足够的信息来进行反演计算.而对于具有轴对称特性的介质来说,一个与对称轴垂直放置,视场覆盖整个辐射区域的 CCD 相机所采集的图像就能够为介质内部辐射特性参数的重建提供足够的信息.

本文根据 CCD 相机采集的单幅辐射图像,提出结合 Abel 变换和共轭梯度法,同时反演轴对称介质内辐射源项和吸收系数的算法.主要内容分为 4 部分,第一小节介绍轴对称羽烟辐射成像过程,第二小节介绍利用 Abel 变换和共轭梯度算法求解辐射反问题的计算过程,第三小节是计算结果与分析,第四小结为结论.

1 辐射成像过程

羽烟轴对称剖面的直径为 2 m,紫外 CCD 相机的视场角为 10°,物镜焦距为 100 mm,滤光片的峰值响应波长为 310 nm,带宽为 10 nm.在测量试验中,为了使 CCD 相机的视场能够覆盖整个羽烟的辐射范围,CCD 相机与羽烟之间的成像距离为 12 m,这个距离满足将入射光视为平行光的条件.当 CCD 相机与羽烟的对称轴垂直时,图像中每一列数据都是与视线方向平行的羽烟剖面内辐射强度沿视线的积分,如图 1 所示.

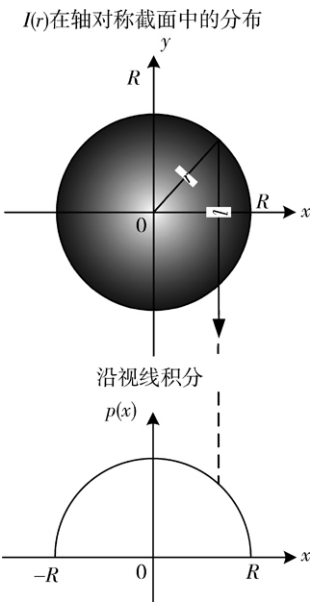


图 1 剖面内辐射强度分布沿视线积分示意图
Fig. 1 Schematic diagram of demonstrating integration of intensity along line of sight in cross section

剖面内辐射强度沿视线方向 l 积分的过程可通过式(1)来描述^[11]

$$I_p(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(r)\delta(x-l)dy \tag{1}$$

式中 I 为剖面介质内的辐射强度, I_p 为沿视线积分后的辐射强度.注意到 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$,将式(1)中的 y 用 r 和 x 来表示,得到

$$I_p(x) = 2 \int_0^{\infty} I(\sqrt{x^2 + y^2})dy = 2 \int_{|x|}^{\infty} \frac{rI(r)}{\sqrt{r^2 - x^2}}dr \tag{2}$$

式(2)被称为 Able 积分方程,在笛卡儿坐标系中,式(2)可以改写为

$$I_p(x) = \int_0^{2R} I(x,y)dy \tag{3}$$

式中 R 为羽烟轴对称剖面的半径.

2 辐射反问题

在辐射反问题中,介质内部的辐射源项分布和吸收系数为未知的.首先利用 Abel 变换将二维积分辐射图像转换为三维介质内的辐射强度分布.然后利用最小二乘法将目标函数表示为求解辐射正问题得到的辐射强度与 Abel 变换得到的辐射强度之差的平方和,将反演问题转化为使目标函数最小的最优化问题.最后利用共轭梯度法求解该最优化问题,计算使目标函数最小的辐射源项和吸收系数分布.

2.1 Abel 变换

Abel 变换方程是 Able 积分方程的逆函数,表示为^[12]

$$I_0(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^\infty \frac{[dI_p(x)/dx]}{\sqrt{x^2 - r^2}} dx \tag{4}$$

本文采用 BASEX(basis set expansion)算法数值计算 Abel 变换^[13],得到的辐射强度为一系列基函数的加权和,如式(5)所示

$$I_0(r) = \sum_{k=0}^{K_r-1} C_k f_k(r) \tag{5}$$

基函数 $f_k(r)$ 的表达式为

$$f_k(r) = (e/k^2)^{k^2} (r/\sigma_{\text{pixel}})^{2k^2} e^{-(r/\sigma_{\text{pixel}})^2}$$

$k = 0, 1, \dots, K_r - 1 \tag{6}$

其中 K_r 为基函数的个数, C_k 为权值, e 为自然数, σ_{pixel} 为像素之间的间距.为了使方程有解, K_r 的取值需要满足下式

$$K_r \leq (N_x + 1)/2 \tag{7}$$

式中 N_x 为辐射图像一行的像素数.

2.2 最优化问题

将介质内部未知的辐射源项分布和吸收系数为表示为一系列基函数的加权和,其中的权值称为未知参数向量.

采用式(6)所示的基函数,介质内部的辐射源项和吸收系数 κ 可以表示为

$$S(r) = \sum_{q=0}^{K_r-1} b_q f_q(r) \tag{8}$$

$$\kappa = b_{K_r} \tag{9}$$

式中 b 为未知参数向量,包含 K_r 个元素.前 $K_r - 1$

个元素为与辐射源项相关的基函数权值,最后一个元素为吸收系数的估计值.

根据辐射源项和吸收系数,利用离散坐标法计算轴对称介质内的辐射强度分布,离散方向为 $S_6^{[14-15]}$.利用最小二乘法,将目标函数定义为离散坐标法计算得到的辐射强度与 Abel 变换重建得到的辐射强度之差的平方和

$$J(b) = \sum_{r=0}^{(N_x+1)/2} [I(r;b) - I_0(r)]^2 \tag{10}$$

式中 $I(r;b)$ 为根据参数向量求解正问题得到的介质内辐射强度, $I_0(r)$ 为对图像数据进行 Abel 变换得到的辐射强度.

2.3 共轭梯度算法

在线性和非线性的参数估计问题中,共轭梯度法是一种直接、强大的迭代算法,经常用于辐射反问题的求解^[16].采用共轭梯度法进行参数向量的迭代,计算未知参数向量 b 的具体方法见文献^[17].

需要注意的是共轭梯度法中的灵敏度系数的计算.由于参数向量 b 内部参数的数量级相差较大,采用如下灵敏度公式^[18]

$$X_{q,r}^* = b_q \frac{\partial I(r;b_q)}{\partial b_q} \tag{11}$$

并利用有限差分近似计算

$$\frac{\partial I(r;b_q)}{\partial b_q} \cong \frac{I(r;b_1, b_2, \dots, b_q + \epsilon b_q, \dots, b_{K_r}) - I(r;b_1, b_2, \dots, b_q, \dots, b_{K_r})}{\epsilon b_q} \tag{12}$$

式中 ϵ 为相对于参数向量 b 内部参数来说很小的正数, r 的取值范围为 $1, \dots, N_x, q$ 的取值范围为 $1, \dots, K_r$.

2.4 迭代停止标准

一般情况下,当目标函数小于一个自定义的小的正数 δ_1^* 的时候,共轭梯度法的迭代就会停止,如式(13)所示

$$J(b^{i_{\text{ite}}+1}) < \delta_1^* \tag{13}$$

式中 i_{ite} 表示迭代次数.

计算中发现目标函数并不能总是满足式(13)所定义的条件,尤其是当测量数据中的噪声较大的时候,为了在这种情况下终止迭代,补充一个并列的迭代停止标准.当连续 2 次迭代的目标函数之差小于一个自定义的较小正数 δ_2^* 的时候,共轭梯度法的迭代也会停止,如式(14)所示

$$|J(b^{i_{\text{ite}}+1}) - J(b^{i_{\text{ite}}})| < \delta_2^* \tag{14}$$

式中 δ_1^* 取值为 10^{-6} , δ_2^* 取值为 10^{-3} .

3 结果与分析

3.1 误差分析

在利用离散坐标法和 Abel 积分方程计算得到的准确的积分辐射强度值的基础上添加噪声模拟试验数据(式(15)),分析测量误差对算法的影响.

$$p(x)_m = p(x)_e + \sigma \zeta \tag{15}$$

式中 σ 为测量数据的标准偏差, ζ 是均值为 0, 标准偏差为 1 的正态分布随机变量, $p(x)_e$ 为准确的积分辐射强度, $p(x)_m$ 为添加随机噪声后的积分辐射强度, 也就是模拟的试验数据.

为了定量表示反演的精度, 采用相对误差和均方根误差 2 种误差表示方法

$$e_{\text{rel}} = \frac{S(x,y)_{\text{est}} - S(x,y)_{\text{exa}}}{S(x,y)_{\text{exa}}} \tag{16}$$

$$e_{\text{rms}} = \left[\frac{1}{4R^2} \int_0^{2R} \int_0^{2R} (S(x,y)_{\text{est}} - S(x,y)_{\text{exa}})^2 dx dy \right]^{1/2} \tag{17}$$

式中 $S(x,y)_{\text{est}}$ 为反演值, $S(x,y)_{\text{exa}}$ 为准确值, e_{rel} 和 e_{rms} 分别为相对误差和均方根误差.

图 2(a) 给出了没有测量误差的情况下, 辐射源项的准确值与反演值, 两者的均方根误差误差为 0.0991, 相对误差如图 2(b) 所示. 吸收系数的准确值为 3 m^{-1} , 反演值为 3.0254 m^{-1} , 相对误差为 0.0085.

不同噪声等级的反演结果见表 1, 噪声等级定义为标准偏差与平均积分辐射强度值之比. 从表 1 中可以看出, 辐射源项的反演精度对于噪声不敏感, 虽然均方根误差随着噪声等级的增加而变大, 但是即使噪声等级已经达到 50%, 均方根误差仍在可以接受的范围内. 相比之下, 吸收系数的反演精度受测量误差的影响较大, 当测量误差

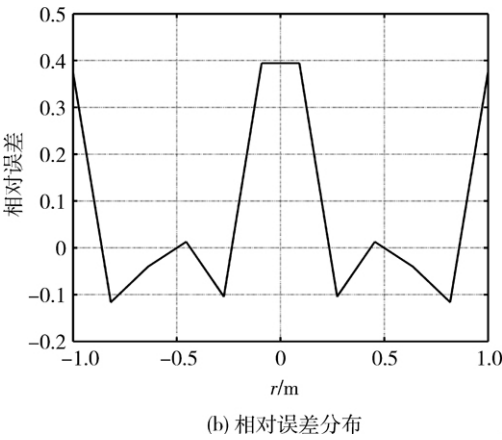


图 2 辐射源项反演结果及误差分布
Fig. 2 Estimated source term distribution and relative error

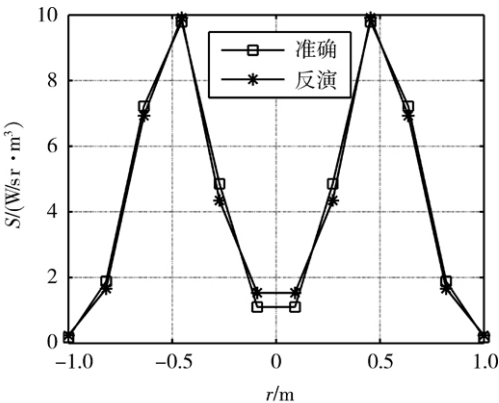
表 1 含噪声数据的辐射源项和吸收系数的反演误差
Table 1 Estimation error with noisy measurement data

噪声等级/%	辐射源项 e_{rms}	吸收系数 e_{rel}
0	0.0991	0.0085
0.5	0.0993	0.1776
5.0	0.1098	0.1797
10.0	0.2196	-0.3414
50.0	0.2234	0.5729

超过 10% 的时候, 吸收系数的相对误差已经严重的偏离的准确值. 当噪声等级大于 50% 时, 该算法不能满足迭代停止标准式(13), 只能满足迭代停止标注式(14), 因此反演结果的精度无法保证.

3.2 实例计算

图 3 为试验中采集的氢氧火箭发动机羽烟紫外辐射图像. 由于火箭发动机是倾斜放置的, 羽烟的对称轴与水平线有一定的角度, 反演计算所采



(a) 辐射项反演值与准确值的比较

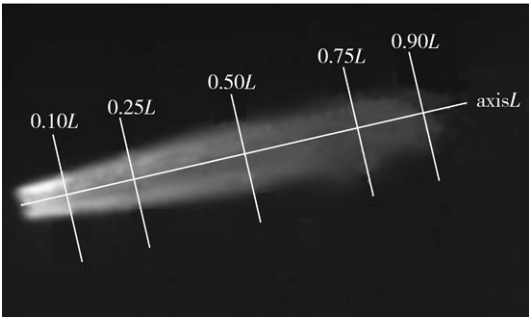


图 3 试验采集的 90°视角羽烟紫外辐射分布图像
Fig. 3 Ultraviolet image of the plume at 90°view angle captured in experiment

用的对称轴和数据如图中的白线所示,羽烟的长度用 L 表示,纵向直线分别对应 $0.1L, 0.25L, 0.5L, 0.75L$ 和 $0.9L$ 位置处径向积分辐射强度分布,半径长度取为 1 m .

图 4 为 Abel 变换后得到的轴对称羽烟剖面内的辐射强度分布. 图 5 为利用共轭梯度法反演得到的剖面内的辐射源项和吸收系数分布. 由于缺少标准紫外辐射源,无法对紫外相机进行辐射定标,所以不能得到辐射图像每个灰度级所对应的积分辐射强度的大小,但对相机进行了相对辐射定标和非线性校正,确保辐射图像的灰度级与像面接受的积分辐射强度成正比. 在反演过程中直接采用图像的灰度级进行计算,图 4 和图 5 的计算结果反映了介质内辐射强度、辐射源项与吸收系数的相对大小.

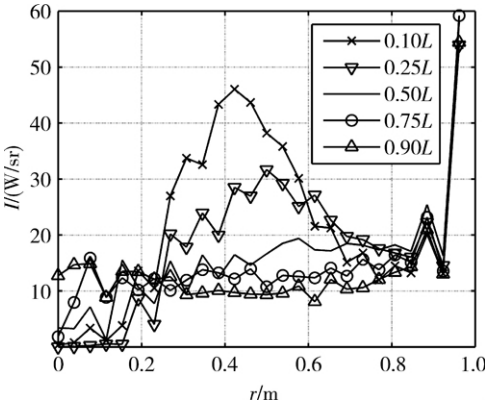
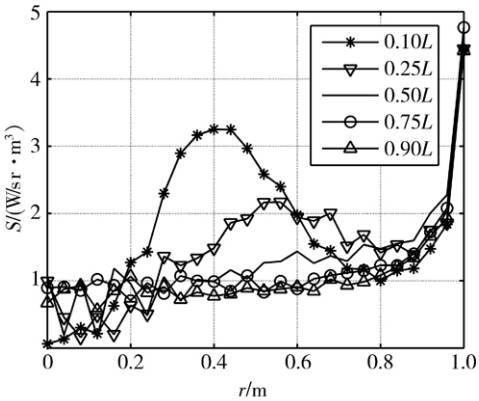


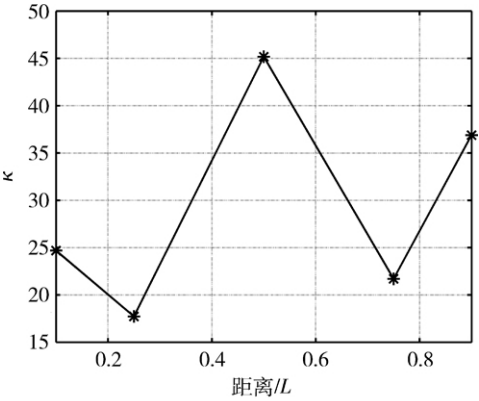
图 4 轴对称介质内的辐射强度分布
Fig. 4 Radiation intensity distribution in axisymmetric medium

从图 5(a)可以看出距离喷管较近的地方羽烟的中心和边缘都存在很强的紫外辐射源,随着距离的增加,中心的紫外辐射源越来越弱,而羽烟边缘处一直都存在很强的紫外辐射源. 造成上述分布的原因是:氢氧火箭发动机羽烟中主要的紫外辐射源为氢气与氧气燃烧产生的 OH(A) ^[19], 试验所采用的氢氧火箭发动机尾气中富含氢气和氧气,从喷管中喷出后,尾气中的氢气不仅与推进剂中剩余的氧气继续燃烧生成 OH(A) ,同时也与周围大气中的氧气燃烧生成 OH(A) ,所以在距离喷管较近的地方,羽烟的中心和边缘都存在很强的紫外辐射源. 随着羽烟的流动,距离喷管越远,推进剂中的氧气的浓度越低,中心的燃烧反应越来越弱,产生的 OH(A) 越来越少,羽烟中心的紫外辐射也就越来越弱,但是周围大气中的氧气

会不断的补充,因此边缘处的燃烧反应能够持续进行,源源不断的产生 OH(A) . 图 5(b)显示羽烟不同位置的吸收系数差距很大,特别是在羽烟的中部,存在吸收系数的峰值,几乎是两端吸收系数 2 倍,因此将羽烟视为吸收系数均匀的介质会给辐射传输计算带来很大误差,需要在羽烟紫外辐射特性分析中同时考虑辐射源项和吸收系数的非均匀性对辐射分布的影响.



(a) 辐射源项分布



(b) 吸收系数分布

图 5 反演得到的辐射源项分布和吸收系数分布
Fig. 5 Estimated source term and absorption coefficient distribution

4 结 论

根据视场范围覆盖整个径向范围的紫外 CCD 相机采集的单幅辐射图像,结合 Abel 变换和共轭梯度法反演羽烟内的紫外辐射源项和吸收系数分布. 通过在准确的计算值上添加随机噪声模拟试验数据,分析测量误差对算法反演精度的影响. 测试表明:辐射源项的反演精度对于测量误差敏感,50% 以内的误差对精度的影响较小. 吸收系数的反演精度受测量误差的影响较大,当测

量误差超过 10% 的时候,吸收系数的相对误差已经严重的偏离的准确值.

致谢:

感谢 Hanna Reisler 和 Mikhail Ryazanov 在 BASEX 算法方面的帮助, 特别感谢 Mikhail Ryazanov 在 BASEX 算法实现过程中对作者遇到的问题耐心解答.

参考文献:

[1] Roblin A, Dubois I, Grisch F, et al. Comparison between computations and measurements of a H₂/LOX rocket motor plume[R]. AIAA-2002-3107, 2002.

[2] 赵永学, 张育林, 李麦亮, 等. 羽流 UV-VIS 辐射在液体火箭发动机故障诊断中的应用技术研究[J]. 宇航学报, 2002, 23(1): 34-39.

ZHAO Yongxue, ZHANG Yulin, LI Mailiang, et al. Study of the fault diagnosis technology for liquid propellant rocket engine by plume UV-VIS radiation[J]. Journal of Astronautics, 2002, 23(1): 34-39. (in Chinese)

[3] 黄庆梅, 陈路, 孙景宁等. 液体火箭发动机羽焰 UV-VIS 光谱的实时采集及分析[J]. 北京理工大学学报, 2008, 28(4): 306-309.

HUANG Qingmei, CHEN Lu, SUN Jingning, et al. Collection and analysis of UV-VIS spectrum for the plume of liquid rocket engine[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2008, 28(4): 306-309. (in Chinese)

[4] Klose A D, Ntziachristos V, Hielscher A H. The inverse source problem based on the radiative transfer equation in optical molecular imaging[J]. Journal of Computational Physics, 2005, 202(1): 323-345.

[5] Liu D, Yan J H, Wang F, et al. Inverse radiation analysis of simultaneous estimation of temperature field and radiative properties in a two-dimensional participating medium[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(21/22): 4474-4481.

[6] Kim K W, Baek S W. Inverse surface radiation analysis in an axisymmetric cylindrical enclosure using a hybrid genetic algorithm[J]. Numerical Heat Transfer, 2004, 46(4): 367-381.

[7] Salinas C T. Inverse radiation analysis in two-dimensional gray media using the discrete ordinates method with a multidimensional scheme[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2010, 49(2): 302-310.

[8] Zhou H C, Sheng F, Han S D, et al. A fast algorithm for

calculation of radiative energy distributions received by pinhole image-formation process from 2d rectangular enclosures[J]. Numerical Heat Transfer, 2000, 38(7): 757-773.

[9] Zhou H C, Han S D, Sheng F, et al. Visualization of three-dimensional temperature distributions in a large-scale furnace via regularized reconstruction from radiative energy images: numerical studies[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2002, 72(4): 361-383.

[10] Liu D, Wang F, Yan J H, et al. Inverse radiation problem of temperature field in three-dimensional rectangular enclosure containing inhomogeneous, anisotropically scattering media[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(13/14): 3434-3441.

[11] Kim K W, Baek S W. Inverse surface radiation analysis in an axisymmetric cylindrical enclosure using a hybrid genetic algorithm[J]. Numerical Heat Transfer, 2004, 46(4): 367-381.

[12] Poularikas A D. Transforms and applications handbook[M]. New York: CRC Press, 2010.

[13] Dribinski V, Ossadtchi A, Mandelshtam V A, et al. Reconstruction of Abel-transformable images: the gaussian basis-set expansion Abel transform method[J]. Review of Scientific Instruments, 2002, 73(7): 2634-2642.

[14] Fiveland W A. Three-dimensional radiative heat-transfer solutions by the discrete-ordinates method[J]. Journal of Thermophysics, 1988, 2(4): 309-323.

[15] Fiveland W A, Jamaluddint A S. Three-dimensional spectral radiative heat transfer solutions by the discrete-ordinates method[J]. Journal of Thermophysics, 1991, 5(3): 335-339.

[16] Kim K W, Baek S W. Efficient inverse radiation analysis in a cylindrical geometry using a combined method of hybrid genetic algorithm and finite-difference Newton method[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2007, 108(3): 423-439.

[17] Li H Y. Inverse radiation problem in two-dimensional rectangular media[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1997, 11(4): 556-561.

[18] Park H M, Yoon T Y. Solution of the inverse radiation problem using a conjugate gradient method[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000, 43(10): 1767-1776.

[19] Platinin Y, Karabadzak G, Khmelinin B, et al. Ultraviolet, visible and infrared spectral modeling for solid and liquid-fuel rocket exhausts[R]. AIAA-2001-0660, 2001.