

爆炸温度场的重建技术研究

崔文丽¹, 韩焱²

(1. 中北大学理学院, 山西 太原 030051; 2. 中北大学信息与通信工程学院, 山西 太原 030051)

摘要:针对爆炸过程反应剧烈, 温度高、速度快, 难于直接测得温度分布的问题, 提出一种利用多光谱辐射测温理论与光学层析技术相结合的三维爆炸温度场的重建方法。通过建立依据参考温度的多光谱测温数学模型, 对光学层析算法进行预处理, 采用正交辐射传感器阵列进行数据采集, 选择级数展开迭代算法进行分析, 完成对爆炸温度场的重建研究。

关键词:多光谱辐射层析; 图像重建算法; 爆炸温度场; 传感器阵列

中图分类号: O551.2 **文献标识码:** A

0 引言

炸药爆炸是单次事件, 历时短、温度高, 直接测量爆炸场的温度分布较为困难, 目前的主要研究手段是将爆炸场模型放在实验室进行研究, 或通过计算机进行数值模拟。另外, 在对爆炸温度场爆温测量的研究中, 虽然利用光学高温辐射计可以准确测量温度场爆温的瞬时变化, 但反映不出整个爆炸温度场的温度变化规律。

结合辐射测量^[1,2]及光学层析形成的辐射光谱层析技术(Emission spectral tomography, 简称EST)引起人们极大关注, 其得益于高温辐射计性能的不断发展和辐射光谱层析技术系统的易实现性, 而且如果在测量中采用高温辐射计阵列, 可同时获得待测三维场各截面沿某一方向的投影数据。因此, 辐射光谱层析技术比起其它光学层析技术获取数据要方便, 较容易重建三维爆炸场的温度分布。

1 多光谱辐射测温模型

常用的多光谱辐射测温模型有3种, 即: 基于检定常量的数学模型、基于亮度温度的数学模型和基于参考温度的数学模型。由于基于参考温度的数学模型测量温度及光谱发射率的准确率相对较高, 所以笔者采用该模型进行分析。原理如下:

设多波长温度计第*i*个通道的输出信号为 V_i , 如式(1)所示, 在定点黑体参考温度 T' 下, 第*i*

个通道的输出信号 V'_i 为

$$V_i = A_{\lambda_i} \frac{C_1}{\pi} \epsilon(\lambda_i, T) \lambda_i^5 \exp(-C_2/\lambda_i T) \quad (1)$$

$$V'_i = A_{\lambda_i} \frac{C_1}{\pi} \lambda_i^5 \exp(-C_2/\lambda_i T') \quad i=1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

式(1)(2)中, A_{λ_i} 是只与波长有关而与温度无关的检定常量, 它与该波长下高温辐射计的光谱响应度、光学系统的性质有关; $\epsilon(\lambda_i, T)$ 为对应波长 λ_i 与温度 T 的待测物光谱发射率, C_1 、 C_2 分别为第一、第二辐射常量。

对于光谱发射率 $\epsilon(\lambda_i, T)$, 可假设光谱发射率只随波长的变化而变化^[3], 且某一温度下光谱发射率的对数与波长呈线性关系, 即:

$$\ln \epsilon(\lambda_i, T) = a_0 + a_1 \lambda_i + a_2 \lambda_i^2 + \dots + a_n \lambda_i^n \quad (3)$$

对(1)和(2)两边取对数, 将(3)代入(1)

(1)-(2)得:

$$\ln(V_i/V'_i) = \left[\ln \left(A_{\lambda_i} \frac{C_1}{\pi} \right) \right] \times \left[-\frac{C_2}{\lambda_i T} + a_0 + a_1 \lambda_i + \dots + a_n \lambda_i^n + \frac{C_2}{\lambda_i T'} \right] \quad (4)$$

令: $A_{-1} = -C_2/T$, $B = \ln \left(A_{\lambda_i} \frac{C_1}{\pi} \right)$,

$$y = \ln(V_i/V'_i)/B + \left(\frac{C_2}{\lambda_i T} - \frac{C_2}{\lambda_i T'} \right)$$

整理得:

$$y = a_{-1} \lambda_i^{-1} + a_0 + a_1 \lambda_i + a_2 \lambda_i^2 + \dots + a_n \lambda_i^n \quad (5)$$

这样在测量中间同一时间(相同温度)下取*m*个波长的光谱进行测量, 就可以得到符合(5)式的*m*个方程, 然后用最小二乘法参数进行回归估计,

收稿日期: 2008-09-22

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60532080)

作者简介: 崔文丽(1980-), 女, 山西阳泉人, 硕士研究生, 研究方向: 工程应用物理。

指导老师: 韩焱, 男, 教授, 博士, 研究方向: 信息处理与重建。

求出 $(a_{-1}, a_0, a_1, a_2, \dots, a_n)$ 便可以拟合待测目标的温度及光谱发射率(由方程组有解的必要条件可知,必须满足 $m \geq n+2$).

以上求解步骤可编成程序在计算机上实现,只要知道爆轰瞬间某个时刻爆轰波在数个波长处的辐射光谱照度值,则整个爆炸场的温度发射率及任一点处温度 T 都能迅速求出.

2 辐射光谱层析技术

2.1 数据采集方法

多光谱辐射测温法针对的是某一定点的温度测量,现要对三维爆炸温度场测量就需要与光学层析技术相结合.把三维爆炸温度场看成由许多截面组成,只要求出每个截面上各点的温度分布,就可得到整个三维温度场的分布.

对其数据采集系统中温度场的任一截面,可采用高温辐射传感器正交阵列获取数据.如图1所示,圆内表示待测爆炸温度场,在其水平与垂直方向各布置32个高温辐射计,在这种布置下,各个传感器所接受各点辐射的影响不同,对边界点来说,传感器的输出只对应该点的辐射强度;但对中间区域而言,传感器的输出对应为经过该方向直线上温度场中所有的点辐射强度 $L(x, y)$ 的累加,整个截面的辐射强度为该截面上所有的传感器单元所接收.最后,使用图像重建算法重建出反映温度分布的图像^[4].

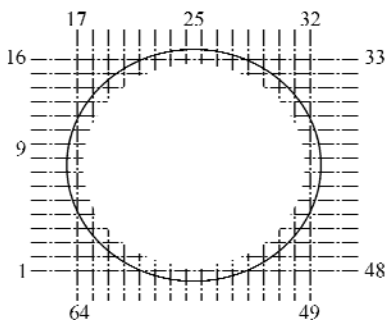


图1 传感器排列布置图

Fig. 1 The array of sensors

2.2 温度场计算机层析重建预处理

为了把光谱测温原理和计算机层析技术结合起来确定瞬态爆炸温度场每个辐射高温计所接收的温度场辐射值,还需要对所研究的温度场进行区域划分,即采用离散化思想,用一组有限个离散点来代替原来的连续空间.其实施过程是:把所计算的区域划分成许多互不重叠的子区域,确定每个子区域中的节点位置以及该节点所代表的控制容积.

另外,在计算机层析重建过程中,由于得到的

仅是温度场有限个离散点的温度值,其投影值不完全,这样,在通过不完全投影值来获得重建场的图像时,就有可能有多个函数满足在给定方向上的投影与已知的投影相吻合,在这种情况下,我们可选择—个图像矢量 \hat{x} ,使得某一目标函数 $\phi_1(\hat{x})$ 最小,如果有多个 \hat{x} 使得 $\phi_1(\hat{x})$ 最小,则在其中选择一个 \hat{x} 使得另一目标函数 $\phi_2(\hat{x})$ 最小, $\phi_1(\hat{x})$, $\phi_2(\hat{x})$ 根据最优准则来确定.如:最小二乘方准则、最大均匀性准则和平滑性准则、最大嫡准则等^[5].

2.3 辐射光谱层析算法

计算机层析技术的目的是通过已知的投影来求取未知图像的分布,而计算机层析算法是计算机层析技术研究的关键,其算法主要有变换类算法和级数展开类算法.但由于变换类算法在处理非完全投影数据时非常困难,而级数展开类算法中的迭代重建算法^[6,7]在重建过程中,不仅可以获得爆炸场每一点的温度分布;而且它在每一次迭代计算中,只用到一条辐射线的信息,体现在数学上只用到矩阵的一行元素,这样可以节省大量的内存空间;另外,迭代重建算法还可以将投影值和观测误差均匀地反投影,而不会使误差集中在一处而造成解的畸变,故本文选用迭代法作为辐射光谱层析算法进行研究.

3 重建爆炸温度场

对于温度场的某一截面来说,各个传感器(辐射高温计)所接受的各点辐射的影响不同,若忽略背景辐射及光谱吸收的影响,则对应于某一波长的输出信号可表示为:

$$V_P(l, \theta) = A_{\lambda_i} \int L(x, y) ds \quad (6)$$

对确定波长而言, A_{λ_i} 是常量,结合(1)、(2)、(6)式可变为:

$$V_P(l, \theta) = \int V_i(x, y) ds \quad (7)$$

(7)式表明,传感器输出为截面各点输出信号 $V_i(x, y)$ 的拉东变换,是沿多个方向角 θ 测量场的辐射,然后结合下述重建算法可求(7)式的拉东反变换 $V_i(x, y)$.

在基于级数展开理论的计算机断层成像术重建算法中,源函数 $V(x, y)$ 的离散表示为

$$V(x, y) = \sum_{k=1}^{MN} V_k b(x - x_k, y - y_k) \quad (8)$$

(8)式中, V_k 为对应于位置 (x_k, y_k) 的源函数值(重建函数区域内 x 方向均分为 M 等份, y 方向均分为 N 等份),共有 MN 个点的函数值需要重

建; b 为基函数, 可选择脉冲基函数, 辛克(sinc)函数, 立方余弦函数等. 但考虑到辐射光学层析技术所研究的三维爆炸场参数在空间分布上的连续性, 若采用局部脉冲基函数, 则它只在所划的网格区域内非零, 而在网格的边界外不连续, 这与三维爆炸场所具有的连续性相矛盾, 导致重建精度降低; 另外, 由于重建的爆炸温度场属于强噪声情况, 在强噪声条件下, 若采用辛克函数将会使重建发散明显, 为此, 本文选用具有线性独立、高阶近似特性且重建收敛性良好的立方余弦函数作为重建爆炸温度场的理想基函数. 用它重建的图像光滑性较好, 误差较小^[6]. 其表示为:

$$b_{xy} = b_x \left[\frac{x - m\Delta_x}{\Delta_x} \right] b_y \left[\frac{y - n\Delta_y}{\Delta_y} \right] \quad (9)$$

(9) 式中

$$b_x(u) = b_y(u) = \begin{cases} \frac{12\pi^2}{5\pi^2 + 16} \left[\left(\frac{1}{3} \cdot u^2 \right) \left(1 + \frac{1}{4} \cos^3 \pi u \right) + \frac{u}{4\pi} \sin^3 \pi u + \frac{2}{3\pi^2} (1 + \cos^3 \pi u) \right], & |u| \leq 1/3 \\ \frac{24\pi^2}{15\pi^2 - 16} \left[0.5(|u| - 1)^2 \times \left(1 + \frac{1}{4} \cos^3 \pi u \right) + \frac{3(1 \cdot |u|)}{8\pi} \times \sin 3\pi |u| - \frac{1}{3\pi^2} (1 + \cos 3\pi u) \right], & 1/3 \leq |u| \leq 1 \\ 0, & |u| > 1 \end{cases} \quad (10)$$

结合(7)式和(8)式得

$$V_{p_d} = \sum_{k=1}^{MN} V_k \int b(x - x_k, y - y_k) ds \quad d = 1, 2, 3, \dots, n_p \quad (11)$$

式中 n_p 为投影测量的总的射线数目, 考虑到投影误差, 则上式矩阵形式为:

$$\mathbf{V}_p = \mathbf{WV} + \mathbf{E} \quad (12)$$

其中: \mathbf{V}_p 为由辐射高温计多方向所测得投影数据, \mathbf{E} 为投影误差, 它们都为 n_p 行的列向量, \mathbf{W} 是由基函数沿不同方向积分得到的 n_p 行 MN 列投影

矩阵, \mathbf{V} 为所需重建的 MN 个点的函数值构成的列向量^[7-8].

通过上述分析, 只要求出投影矩阵 \mathbf{W} , 即可得到基函数表达式, 进而求得源函数 $V(x, y)$. 在求解源函数的过程中, 还可通过 MATLAB 软件编译相应的程序, 来实现对三维爆炸温度场的仿真重建.

4 结 语

本文依据光谱测温理论, 引入计算机层析算法对瞬态爆炸温度场的三维重建技术进行研究. 在完成对爆炸温度场进行重建的过程中, 建立的基于辐射光谱层析技术的光谱测温模型, 可以弥补光谱测温时只能获得沿光线通过路程上平均温度的不足; 且利用级数展开迭代算法可以实现对每个传感器的输出信号的重建处理, 此外, 本文采用的正交传感器阵列及选择的基函数—立方余弦函数将对重建图像的效果起到关键作用.

参考文献:

- [1] 戴景民. 多光谱辐射测温技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1995.
- [2] 周新利, 李燕, 刘祖亮, 等. 炸药爆炸瞬态温度的光谱法测定[J]. 光谱学与光谱分析, 2003, 23(5): 982-983.
- [3] 孙晓刚, 戴景民. 多光谱辐射测温的理论研究—发射率模型的自动判别[J]. 红外与毫米波学报, 1998, 17(3): 43-46.
- [4] 郑莹娜. 光学层析成像空间阵列传感器研究[J]. 激光与光电子学进展, 2001(10): 35-40.
- [5] 杨霖. 瞬态燃烧温度场计算机层析技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2003.
- [6] 万雄. 发射光谱层析算法研究及其三维流场重建应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004.
- [7] 刘侍刚. 高精度三维重建技术的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005.
- [8] 姚红兵, 贺安之. 光学层析重建算法改进的研究[J]. 光学学报, 2004, 24(2): 158-161.

Study of the technology explosion temperature field reconstruction

CUI Wen-li¹, HAN Yan²

(1. School of Science, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Considering the difficulty in measuring the distribution of explosion temperature field because of the fierce, fast and high temperature reaction, the three dimensional explosion temperature field reconstruction method is proposed, which is based on multi-wavelength thermometry and optical computed tomography. Furthermore, in order to complete the study of explosion temperature field reconstruction, mathematical model of multi-wavelength thermometry is founded and optical computed tomography algorithm is treated beforehand. Besides, a radiation data collection system by orthogonal radiation sensor array is designed and series iterative algorithm be chosen.

Key words: multi-wavelength radiation computed tomography; image reconstruction algorithm; bursting temperature field; array sensor

本文编辑:萧 宁



(上接第 37 页)

Study on stability analysis of the typical area in high-steep slope of open pit

XIAO Yun, ZHOU Chun-mei, WU Yan-ling, LI Xian-fu

(School of Environment and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: This article mainly covers a serial of intensive study on stability analysis in west side of Lion Mountain F₉ Fault of Daye Iron Mine slope. By analyzing the engineering situation, the formation lithology of slope, the deformation localization of rocks and the structure characters of the rock mass are comprehensively analysed. The ANSYS numerical modelling method in calculating stability coefficient are used, which concludes that this profile is in unstable status under natural state and water-saturated state.

Key words: high-steep slope of open pit; numerical simulation; finite element; stability evaluation; Daye Iron Mine

本文编辑:萧 宁