

强激光靶耦合产生电磁脉冲信号处理方法研究

李廷帅¹, 杨进文^{1,2}, 刘西云^{1,2}, 杨 鸣¹, 易 涛², 王传珂²,
王 锐¹, 高占忠¹, 刘慎业², 丁永坤², 江少恩²

(1. 电子科技大学能源科学与工程学院 成都 611731; 2. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心 四川 绵阳 621900)

【摘要】基于惯性约束聚变的激光靶耦合过程会产生大量的电磁脉冲,严重影响诊断设备的正常运行和测试数据的精确采集。该文采用Tikhonov正则化结合L-curve参数优化法,通过把电场、电压和传递函数的关系离散化,绘制L曲线图以确定最适正则化参数,从而对测试数据进行优化。结果表明,L-curve在成功消除病态数的同时还具有较强的抗噪声抗干扰性能,达到明显数据优化作用。

关键词 电磁脉冲; 激光靶耦合; L-curve; Tikhonov正则化

中图分类号 O434.12 **文献标志码** A **doi**:10.3969/j.issn.1001-0548.2016.05.008

Study the Methods of Processing Electromagnetic Pulses Generated by the Intense Laser Interacting Solid Targets

LI Ting-shuai¹, YANG Jin-wen^{1,2}, LIU Xi-yun^{1,2}, YANG Ming¹, YI Tao², WANG Chuan-ke², WANG Rui¹,
GAO Zhan-zhong¹, LIU Shen-ye², DING Yong-kun², and JIANG Shao-en²

(1. School of Energy Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731;

2. Laser Fusion research Center, Chinese Academy of Engineering Physics Mianyang Sichuan 621900)

Abstract Massive electromagnetic pulses can be generated by the interactions between intensive laser and solid targets in inertial confinement fusion (ICF), which will lead to malfunction of the diagnostic setups and inaccuracy of experimental data. In order to deeply grasp the physical mechanism of electromagnetic pulses and make well preparations for further electromagnetic shielding, it is significant to correctly collect and treat the pulse signals. Due to various interferences, the captured voltage signal is distortion, which needs to be properly treated. The transfer function, derived by deduction and simulation, is deemed as a bridge to interconnect the voltage signal and electric field. Nevertheless, an ill-posed issue in low frequency ranges will be aroused when using the transfer function to obtain electric field. Therefore, we use a Tikhonov regularization method with an L-curve parameter optimization to eliminate the ill-posed issue that is expected to bring about massive noise. To achieve the final electric field, the L-curve diagram is created to optimize the related parameters. The results indicate the L-curve technique can not only resolve the ill-posed problem, but it can also enhance the anti-interference ability.

Key words electromagnetic pulse; laser target coupling; L-curve; Tikhonov regularization

惯性约束核聚变^[1-2]是利用粒子惯性作用来约束其本身,从而实现核聚变反应的一种方法。通过高能激光打靶驱动聚变燃料燃烧达到点火条件,是实现惯性约束核聚变的有效途径。美国国家点火装置(national ignition facility, NIF)^[3],法国兆焦耳激光器(laser mégajoule, LMJ)^[4]以及中国科学院物理所研制的极光装置和中国工程物理研究院的神光装置在这一研究领域获得了突出进展。而美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(LLNL)对惯性约束聚变的研究一直处于世界领先水平^[5]。激光打靶过程中将产生大

量电磁脉冲,对测试系统造成许多不利影响,影响诊断实验结果,严重时还可能损坏各种诊断设备^[6-7]。搭建合适的脉冲信号采集系统,对电磁波进行实时捕捉与详细分析,在此基础上深入研究激光打靶过程中产生等离子体的物理机制,将为实现惯性约束聚变提供理论基础。文献[8]开展了低能激光打靶辐射脉冲信号的采集工作,并得到许多有意义的成果。因为高能激光与靶材相互作用产生的等离子体效应不同,本文针对高能激光(kJ)打靶产生的脉冲信号进行实时采集,并结合仿真和适当的数学方法,

收稿日期: 2015-04-16; 修回日期: 2015-09-23

作者简介: 李廷帅(1983-),男,博士,副教授,主要从事激光与等离子体相互作用方面的研究。

对测试数据进行更进一步的处理和分析。通过HFSS仿真软件对脉冲天线仿真得到电场值,再结合天线公式推导得出电压与电场之间的线性传递函数,最终通过计算获得激光打靶激发的电场分布。激光打靶测试得到的电压与天线位置处电场之间存在线性关系,因此电压求解电场的问题为线性求逆过程。

针对基于Tikhonov正则化方法来处理各种物理问题或其他领域中的问题已经有过相关报道。文献[9]使用基于L-curve的Tikhonov正则化优化法处理图像复原问题;文献[10]也采用L-curve来处理蠕变柔量和松弛模量间互变现象存在的病态问题;文献[11]通过Extrapolation Tikhonov正则化算法进行重力数据三维约束反演;同时该方法还被应用于处理地面核磁共振(SNMR)反问题中存在的不适定性以及求解热源识别问题等^[12-13]。但是在对激光靶耦合的电磁脉冲数据处理上,还没有详细系统的报道。

在计算过程中,因低频段传递函数自身较小,如果直接通过它计算电场值,不仅不能很好地处理噪声和干扰问题,反而会导致噪声被放大。该病态问题导致无法正确计算出电场值,进而不能形成对电磁辐射机制的全面认识。本文研究着眼于强激光打靶产生的大量电磁辐射现象,还原电磁脉冲信号,获得精确电场值。重点在于使用Tikhonov正则化结合L-curve法消除上述病态问题。结果表明正则化对传递函数有很好的优化作用。该研究结果为深入探讨激光打靶过程产生等离子体的物理机制和进一步实现针对主要诊断设备的屏蔽防护做好铺垫。

1 传递函数的不适定性

激光打靶得到的电压与天线处电场之间存在的线性关系,在频域上表示为:

$$V(\omega) = E(\omega)H(\omega) \quad (1)$$

时域上表示为:

$$V(t) = E(t) \otimes H(t) \quad (2)$$

式中, $H(\omega)$ 为频域上的传递函数; $H(t)$ 为时域上的传递函数。由此可见,传递函数是连接电场和电压值的桥梁。本文采用环形Dot天线采集激光打靶产生的电磁脉冲信号。通过对天线仿真得到的电场值能推导出电压与电场之间的线性传递函数 $H(\omega)$, 该传递函数是一个频域函数。而激光打靶过程中测试得到的电压值 $V(t)$ 为示波器采样数据, 是一个时域数值, 因而首先需将其进行快速傅里叶变换(FFT)得到频域数值。根据式(3)进行计算, 这样计算过程

由卷积运算变为乘积运算, 大大减少了整个过程的计算量。

$$V(k) = \sum_{j=1}^N V(j) \omega_N^{(j-1)(k-1)} \quad (3)$$

式中, $\omega_N = e^{(-2\pi i)/N}$ 。

激光打靶测试得到的电压与天线位置处电场之间存在线性关系, 从电压求解电场的问题是线性求逆过程。在求逆过程中, 本文需要加入对解的幅度限定条件以去除存在的病态问题。

2 Tikhonov正则化

吉洪诺夫于二十世纪60年代提出了正则化方法, 其基本原理是用一组与原不适问题相邻近的适定问题替代不适问题, 去逼近求解原问题, 以此消除病态数, 解决存在的不适问题。病态数往往会导致舍入误差或其他误差的产生, 严重影响计算结果的准确性, 因此急需消除。物理学中, 正则化是一种处理许多不合理表达式例如发散式、无限大等问题的方法, 该方法关键在于选取到一个合适的正则化因子, 增加全部或部分参数加权平方和极小的条件, 以增加约束, 消除病态数, 使结果更加精确稳定。

如何建立有效正则化方法, 取得适当正则化因子是处理不适定问题的关键内容^[14]。病态方程常见解法有共轭梯度法(CG)^[15]、奇异值分解SVD法^[16]、主成分估计、特征根估计法、最小二乘法、偏估计法和牛顿迭代法等。

2.1 构造Tikhonov准则函数

针对传递函数时域线性模型:

$$\mathbf{v} = \mathbf{H}\mathbf{e} \quad (4)$$

式中, \mathbf{v}, \mathbf{e} 为 m 维矢量 (m 为采样点数); \mathbf{H} 为 $m \times m$ 维矩阵, 其每一行为系统冲击响应的时域平移。将时域值通过FFT傅里叶变换后成 $m \times 1$ 计算量, 大大减小了计算的复杂性。同时, 采用Tikhonov正则化法构造准则函数:

$$\min_{\mathbf{e} \in \mathbb{R}^n} (\|\mathbf{H}\mathbf{e} - \mathbf{v}\|^2 + \mu \|\mathbf{e}\|^2) \quad (5)$$

式中, $\|\cdot\|^2$ 代表欧几里得范数; 而 $\|\mathbf{e}\|^2$ 则是作为稳定泛函。构造该准则函数能够将不适定问题转化为适定问题; μ 即为正则化因子, 起平衡欧几里得范数和稳定泛函的作用, 而 μ 的选取十分重要。

2.2 L-curve

为了选取最适正则化因子 μ , 首先给出加入正则化因子求解电场值的公式:

$$e_{\mu,i} = \frac{H_i^* v_i}{H_i^* H_i + \mu} \quad i=1,2,\dots,m \quad (6)$$

加入正则化因子处理后的电场解为:

$$e_{\mu} = (H^T H + \mu I)^{-1} H^T v \quad (7)$$

式中, μ 趋于0时, 上式即为无正则优化, 直接对电场值进行计算, 显然这样无法得出准确电场值。传递函数的不准确性以及电压的噪声都将导致所求解的电场值存在极大误差。但当 μ 过大时, 又会导致计算的主导作用大大偏向于 μ 的取值, 同样使得电场值与实际情况差距甚远。所以得到准确电场值关键在于选取合适 μ 值。

本研究采用L-curve求解得出最适正则化因子^[17]。即对不同 μ 值求解 e_{μ} , 并引入偏差量 $v_{\mu} = He_{\mu} - v$, 以 $\|e_{\mu}\|^2$ 为纵坐标, $\log_{10} \|v_{\mu}\|^2 = \log_{10} \|He_{\mu} - v\|^2$ 为横坐标, 在二维平面上描绘出曲线 $(\log_{10} \|v_{\mu}\|^2, \|e_{\mu}\|^2)$ 。所得曲线为一单调递减L形或Γ形曲线。其中L拐点位置对应的 μ 值即为最适正则化因子。

详细步骤如下: 令 $\alpha = \log_{10} \|e\|^2$, $\beta = \log_{10} \|He - v\|^2$, 则L-curve为众多 (α, β) 点拟合, $\alpha', \alpha'', \beta', \beta''$ 分别为 α, β 一阶和二阶倒数, 该曲线上的曲率为:

$$k = 2 \frac{\alpha' \beta'' - \alpha'' \beta'}{[(\alpha')^2 + (\beta')^2]^{3/2}} \quad (8)$$

计算得曲率最大值 k_{\max} , 对应点为曲线拐点, 即最适正则化因子选取点。将计算选取得到的最适正则化因子 μ 代入式(6)解得最优近似结果。此时的电场值是基于频域上而言, 需采用逆傅里叶变换 (IFFT), 如式(9)所示, 得到最终所求时域电场分布值。

$$e(j) = (1/N) \sum_{k=1}^N E(k) \omega_N^{-(j-1)(k-1)} \quad (9)$$

式中, $\omega_N = e^{(-2\pi i)/N}$ 。

3 结果分析

图1给出了激光3倍频(3 ω)总能量达6.4 kJ的激光束打靶时, 实地测量获得的电压时域图, 信号由开始到衰减至噪音的持续时长超过100 ns, 电压峰值为1.3 V。图2为时域图经FFT后得到的电压频域幅值。整个信号覆盖频率区间将近4 GHz, 峰值分别出现在1~2 GHz和4 GHz。而位于几百兆赫兹区间的信号存在较大扰动, 这是由于各种诊断设备本身以及信号采集传输过程中引入的噪声, 使得测量电压

值被放大, 计算出的电场值极不精准。

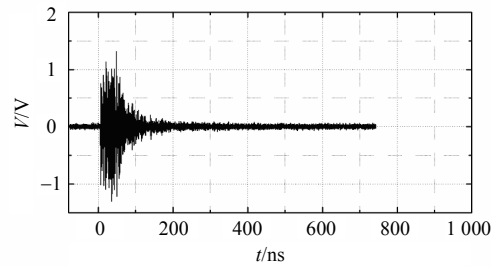


图1 电压时域图

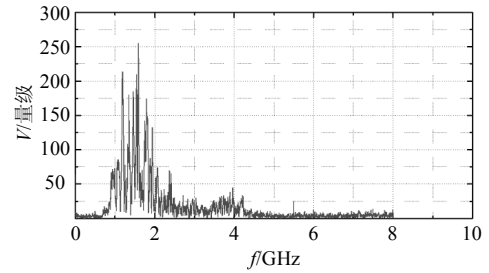


图2 电压频域图

按照吉洪诺夫正则化方法, 图3给出电场频域图在选取极小值 $\mu=1 \times 10^{-12}$ 时的结果。 μ 太小时, 可近似为没有进行Tikhonov正则化, 且对比可得因低频段传递函数过小, 造成低频段噪声被明显放大, 病态问题严重, 因此需借助加入正则化因子进行Tikhonov正则化, 消除病态问题。根据式(6)知, 若 μ 过大时(远大于传递函数), 其取值将主导最终的电场值, 同样使得电场值与实际情况差距甚远。本文令 $\mu=1 \times 10^{-2}$, 求得的电场频域图如图4所示。因 μ 取值过大, 压制了电场分布值, 且放大了高频段噪声, 使得结果严重失真。故 μ 不能取值过大。

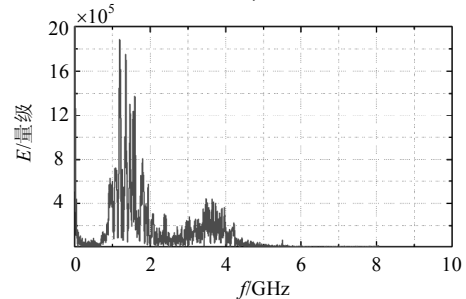


图3 电场频域图 ($\mu=1 \times 10^{-12}$)

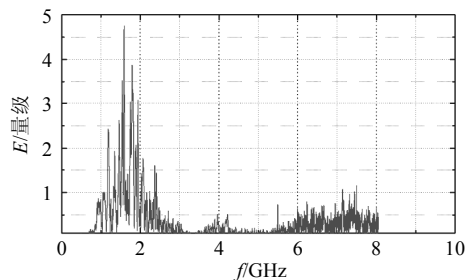


图4 电场频域图 ($\mu=1 \times 10^{-2}$)

为解决该矛盾,以 $Y = \|e_{\mu}\|^2$ 为纵坐标, $X = \log\|v_{\mu}\|^2 = \log\|He_{\mu} - v\|^2$ 为横坐标,在二维平面上描绘出 L 曲线。如图5所示,经过多次迭代计算,最终确定 L 曲线拐点处取值即为最适正则化因子(恰当 μ)。由于 L 图横纵坐标具有明显的对称性,为了方便寻找拐点,在图中画出 45° 切线与曲线相交,能明显看出拐点值。以初值 1×10^{-9} , 间隔 $1 \times 10^{-6}/i (i=50)$, 选取到第3个点,取 $\mu = 4.1 \times 10^{-8}$ 。选取到的 μ 远小于传递函数值,防止了计算的主导作用偏向于 μ 的取值。

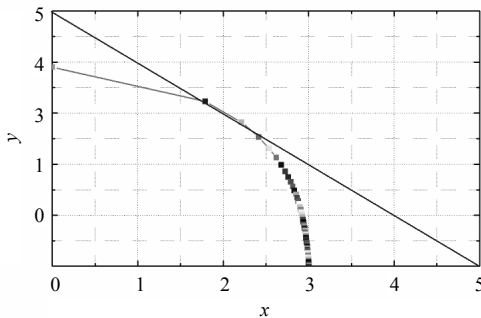


图5 L-curve图

图6为加入最适正则化因子处理所得电场频域分布图。文献[18]通过采用带有耦合线圈的单电流探针测量激光等离子体自发电流。得出激光辐照靶后,整个自发电流产生一个有热离化、电子发射、飞行和迴流的过程。因而自发电流在激光脉冲过后会有短暂的滞后才达到峰值;同理可得电压峰值,时域分布上的众多电压信号并非真实的激光打靶产生的电磁脉冲信号,而是需要被抑制和消除的噪声。可以看出采用Tikhonov正则化能起到很好的噪声抑制作用,这种噪声优化作用在低频段处尤为明显。通过引用正则化因子 μ , 成功解决了因低频段处传递函数过小导致的严重噪声放大的病态问题。通过得到的频域电场值求反傅里叶变化(IFFT)可以得出电场时域分布关系。图7给出了电压时域图和通过变换后获得的电场时域图,由此可知通过Tikhonov正则化优化后的时域波形图,在保持原波形稳定的基础上成功抑制低频噪声,且电场强度达到 2 kV/m 。文献[5]采用高、中、低频段 $B \cdot \dot{}$ 对电磁脉冲信号进行采集,通过电磁场关系 $E = cB$ 近似计算获得电磁脉冲电场分布,电磁脉冲电场峰值近似达到 8 、 4.2 、 0.7 kV ,且脉冲持续约 100 ns ,基于频域而言,主要波形峰簇出现在前十兆赫兹至 4 GHz 。可以看出本文结果与文献[5]结果具有较好的一致性,进一步论

证了处理方法的合理性。在高强度的电磁辐射环境下,需对检测设备进行合理的屏蔽保护。通过观察Tikhonov正则化优化结果,加入正则化因子 μ 后得到电场分布图,明显看出原始病态问题被成功消除,抑制了噪声和干扰,同时电场值与电压值保持相同趋势,正确计算出电场值,起到良好的优化作用。

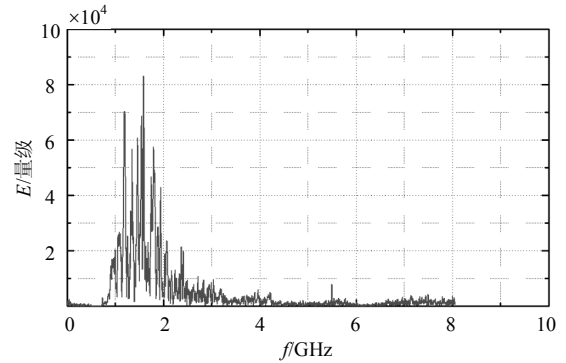


图6 电场频域图($\mu=4.1 \times 10^{-8}$)

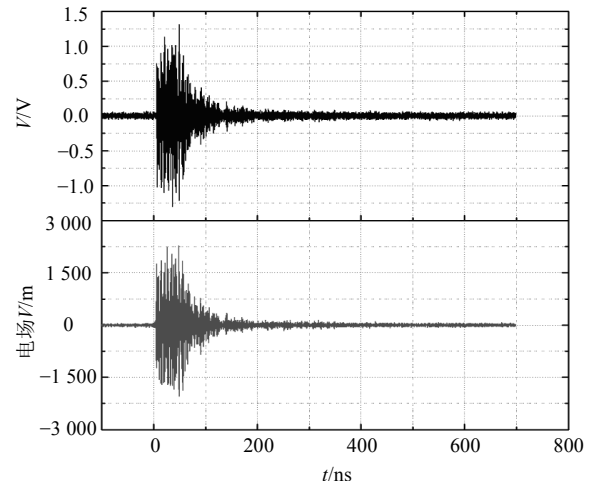


图7 电压电场时域图

为进一步论证基于Tikhonov正则化优化数据的合理性,选取另一组在法兰口处测量结果与优化计算后所得电场值,如图8所示;靶室内测量所得电压值与优化计算后所得电场值,如图9所示。同图7所示靶室外的电压电场分布对比可得:靶室内的电磁脉冲峰值更加明显,持续时长变短。这是因为靶室外的电磁脉冲信号是经过在靶室内进行传输以及多次反射后所得,导致信号有所衰减,持续时长变长。同理,通过Tikhonov正则化对电磁脉冲数据进行处理得到电场时域图,对比后可以看见在不失真原波形的情况下,对噪声亦起到了很好的抑制作用。图10和图11分别给出针对法兰口与靶室内测试数据求证最适正则化因子 μ 的L-curve图。通过计算观察,得法兰口处正则化因子取第5个数, $\mu = 4.95 \times 10^{-7}$,

靶室内正则化因子取第8个数, $\mu=6.88 \times 10^{-7}$ 。

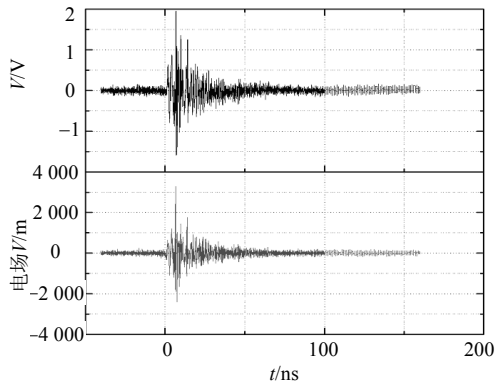


图8 法兰口处电压电场时域图

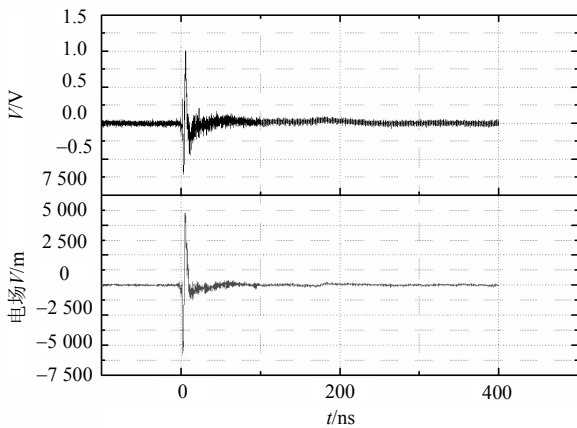


图9 靶室内电压电场时域图

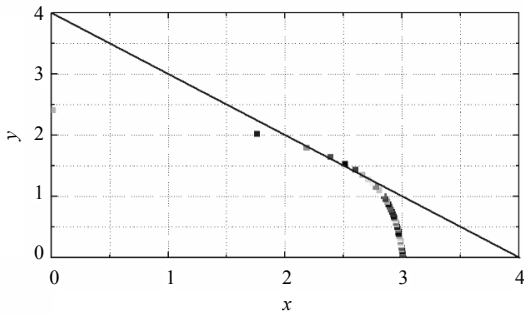


图10 L-curve图(法兰口处)

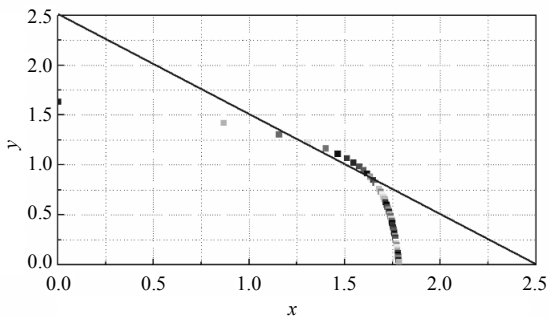


图11 L-curve图(靶室内)

4 结束语

本文详细讨论了激光打靶产生的电磁辐射数值分析方法。通过结合天线公式及仿真推导出的传递函数,对数据进行计算处理,能更好地分析打靶数据,进而反推激光打靶产生热电子诱导电磁脉冲的物理机制。激光打靶测得数据是基于时域分析,检测设备和信号传输过程中引入的噪声对真实波形产生很大影响。在处理数据时,将其转变为频域分析处理降低了计算量以及计算复杂性。正则化参数优化在计算电场值过程中成功解决了存在的病态问题,且对噪声和干扰起到了良好的优化抑制作用。正则化因子选取对处理病态数据有至关重要的作用,本文通过L-curve法则,画图得出最佳正则化因子,简单可行。但在确定最适正则化因子方面,仍有许多方法值得进行深入学习与研究。

本文的工作得到电子科技大学汪彭老师和中物院激光聚变中心工作人员在实验上的帮助,在此表示感谢!

参 考 文 献

- [1] LINDL J D, MCCRORY R L, CAMPBELL E M. Progress toward ignition and burn propagation in inertial confinement fusion[J]. *Physics Today*, 1992, 45(9): 32-40.
- [2] NUCKOLLS J, WOOD L, THIESSEN A, et al. Laser compression of matter to super-high densities: Thermonuclear (CTR) applications[J]. *Nature*, 1972, 239(15): 139-142.
- [3] MOSES E I. Ignition on the national ignition facility: a path towards inertial fusion energy[J]. *Nuclear Fusion*, 2009, 49(10): 104022/1-104022/9.
- [4] PENNEC M L, RIBEYRE X, DUCRET J E, et al. New opacity measurement principle for LMJ-PETAL laser facility[J]. *High Energy Density Physics*, 2015(part A): 162-167.
- [5] BROWN C G, BOND E, CLANCY T, et al. Assessment and mitigation of electromagnetic pulse (EMP) impacts at short-pulse laser facilities[C]//The Sixth International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications. United-Kingdom: *Journal of Physics*, 2010.
- [6] HAMSTER H, SULLIVAN A, GORDON S, et al. Subpicosecond, electromagnetic pulses from intense laser-plasma interaction[J]. *Physical Review Letters*, 1993, 71(17): 2725-2728.
- [7] MORA P, BROWN C G, CLANCY T J, et al. Analysis of electromagnetic pulse (EMP) measurements in the National Ignition Facility's target bay and chamber[C]//International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications. Bordeaux, France: EPJ Web of Conferences, 2013.

- [8] CHEN Z Y, CHEN S, DAN J K, et al. Analytical model for electromagnetic radiation from a wakefield excited by intense short laser pulses in an unmagnetized plasma[J]. *Physica Scripta*, 2011, 84(4): 045506/1-045506/6.
- [9] LANDI G. A lagrange method based L-curve for image restoration[C]//3rd International Workshop on New Computational Methods for Inverse Problems. Cachan, France: Journal of Physics, 2013.
- [10] ZHU Y T, SUN L, XU H L. L-Curve based tikhonov's regularization method for determining relaxation modulus from creep test[J]. *Applied Mechanics*, 2011, 78(3): 031002/1-031002/7.
- [11] 刘银萍, 王祝文, 杜晓娟, 等. 基于Extrapolation Tikhonov正则化算法的重力数据三维约束反演[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(5): 1650-1659.
LIU Yin-ping, WANG Zhu-wen, DU Xiao-juan, et al. 3D constrained inversion of gravity data based on the Extrapolation Tikhonov regularization algorithm[J]. *Chinese J Geophys-ch*, 2013, 56(5): 1650-1659.
- [12] 赵振宇, 由雷. 求解热源识别问题的修正吉洪诺夫正则化方法[J]. *数学物理学报*, 2014, 34A(1): 186-192.
ZHAO Zhen-yu, YOU Lei. A modified tikhonov regularization method for identifying an unknown source in the heat equation[J]. *Acta Math Sci*, 2014, 34A(1): 186-192.
- [13] 余永鹏, 李振宇, 龚胜平, 等. 1D SNMR 吉洪诺夫正则化反演方法研究[J]. *CT理论与应用研究*, 2009, 18(2): 1-8.
YU Yong-peng, LI Zhen-yu, GONG Sheng-ping, et al. The research on 1D SNMR inversion by Tikhonov regularization method[J]. *CT Theory and Applications*, 2009, 18(2): 1-8.
- [14] POURGHOLI R, ESFAHANI A, RAHIMI H, et al. Solving an inverse initial-boundary-value problem using basis function method[J]. *Comp Appl Math*, 2013, 32(1): 27-40.
- [15] CASTELLANOS J L, GÓMEZ S, GUERRA V. The triangle method for finding the corner of the L-curve[J]. *Appl Numer Math*, 2002, 43(4): 359-373
- [16] HANSEN P C, JENSEN T K, RODRIGUEZ G, et al. An adaptive pruning algorithm for the discrete L-curve criterion[J]. *Comput Appl Math*, 2007, 198(2): 483-492.
- [17] HANSEN P C, O'LEARY D P. The use of the l-curve in the regularization of discrete ill-posed problems[J]. *SIAM J SCI COMPUT*, 1993, 14(6): 1487-1503.
- [18] 王润文, 潘成明, 林尊琪, 等. 激光等离子体自发电流[J]. *物理学报*, 1987, 36(4): 452-458.
WANG Run-wen, PAN Cheng-ming, LIN Zun-qi, et al. Spontaneous current generated from laser plasma[J]. *Acta Physica Sinica*, 1987, 36(4): 452-458.

编辑 税红