

固体火箭发动机点火试验燃面退移 最优重建方法研究

王世辉, 陆明, 王欢欢, 黄家骥, 乔文生

(中国航天科工集团第六研究院 601 所, 呼和浩特 010076)

摘要: 为了在固体火箭发动机点火试验中实际测试过程仅能够获得有限的燃面投影数据背景下, 实现燃面退移图像的最优重建, 一方面在 ART 算法基础上采用最小化图像全变分约束技术, 以提高图像边缘重建质量; 另一方面在获取的初步微波 CT 成像场的磁力线路径基础上, 通过电磁场的传播规律增加磁力线路数, 以增加成像信息量, 从而得出不同直径固体火箭发动机燃面退移最优重建图像; 经仿真实例得出了不同直径燃面在应用此最优重建方法得出的图像结果与实际数值之间的误差小于 1 mm, 符合重建要求, 验证了固体火箭发动机点火试验燃面退移最优重建方法的有效性。

关键词: 固体火箭发动机; 点火试验; 燃面退移; 图像全变分; 最优重建

Research on Optimal Reconstruction Method of Combustion Surface Displacement of SRM Ignition Test

Wang Shihui, Lu Ming, Wang Huanhuan, Huang Jiaji, Qiao Wensheng

(601 Institute, CASIC, Hohhot 010076, China)

Abstract: Based on the background that only limited projection data of combustion surface can be obtained in the actual test process of SRM Ignition test, in order to realize the optimal reconstruction of the image. On the one hand, on the basis of the algorithm, the minimum image is constrained by the total variation of the image to improve the quality of image edge reconstruction. On the other hand, The number of magnetic lines of the microwave CT imaging field are increased in order to add the amount of imaging information, so as to achieve the optimal reconstruction of the image of different diameter solid rocket motor's fire surface displacement. The simulation example is used to verify the method, and the error between the reconstruction value and the actual value is less than 1 mm, in line with reconstruction requirements. The effectiveness of the optimal reconstruction method of the combustion surface displacement of SRM Ignition test is proved.

Keywords: solid rocket motor; ignition test; combustion surface recession; total variation of image; optimal reconstruction

0 引言

固体火箭发动机由于体积小、机动性强、维护使用方便等优点, 已成为当今战略、战术导弹武器系统的首选动力装置。随着我国固体导弹武器系统技术的不断发展, 新一代导弹武器系统固体火箭发动机采用了燃值更高、更加敏感的推进剂。但在新型固体火箭发动机研制过程中从燃烧根源上出现了许多问题, 这些问题产生的重要原因就是不清楚固体火箭发动机试验内部燃面动态变化过程, 难以准确获得固体火箭发动机相关的关键参数和变化规律, 严重阻碍我国固体火箭发动机研制进程。到目前为止, 我国固体火箭发动机内部药柱燃面变化仍然测不到或测不准, 严重影响我国固体火箭发动机研制水平、性能改进及质量归零。急需进行固体火箭发动机燃面退移测试技术研究,

而固体火箭发动机燃面退移图像重建方法研究是其中必须攻克的难题之一。

在固体火箭发动机的燃面退移测试过程中, 要想实现燃面推进的精确测试与分析, 必须解决对发动机点火过程燃面边缘变化的全面检测, 同时需要对燃面图像重建的最优求解方法的进一步研究, 使得根据有限的外部测量数据能够获得尽可能准确、全面的燃面截面图像。本文中主要采用了 CT 成像原理, 在固体火箭发动机周向布置 30 个微波收发装置, 采用一发多收机制获取发动机点火过程燃面投影数据, 再通过 CT 反演技术计算获取固体火箭发动机燃面信息。对于 CT 反演计算目前最常用的主要有变换法和迭代法两类。两类算法各有优缺点及适用环境。变换法进行燃面重建要求投影信息完整, 一般要 180 个投影角度以上的数据。而迭代重建方法在稀疏投影角度上, 通过增加先

收稿日期: 2020-11-25; 修回日期: 2020-12-05。

基金项目: 国防基础科研重点项目: JCKY2017204B032。

作者简介: 王世辉(1985-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事固体火箭发动机测试技术方向的研究。

引用格式: 王世辉, 陆明, 王欢欢, 等. 固体火箭发动机点火试验燃面退移最优重建方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(6): 245-248, 254.

验信息作为约束条件,可达到较高的重建质量。经过分析,可以得出,以微波数据为基础进行固体火箭发动机燃面测试,是典型的依靠不够密集数据进行投影最优重建问题,其实投影数据本身并不具备最优重建条件,因此项目最终使用迭代重建法进行固体火箭发动机点火试验燃面最优重建的研究。

通过研究,直接采用 ART 算法进行燃面重建,重建图像边缘清晰度不高,伪影严重,即使燃面的轮廓基本可见,但是重建出来的图像的四周边缘不够明确,这直接影响精确进行燃面测试。为了解决上述问题,研究者进行了大量的分析,得到结论为:投影出的图像本身不是密集的,选择其梯度后形成的新图像可以认为不是密集的,这时就完全可以对投影图像进行全变分转换来进行重建迭代。图像的全变分可以有效地保留对图像重建比较重要的特征信息,比如:图像的锐化边缘和目标轮廓^[1]。

本文是在上述分析基础上,通过对最小化图像进行图像全变分约束,增加微波 CT 成像场的磁力线条数,以增加成像信息量,提高图像边缘重建质量,从而实现不同直径固体火箭发动机燃面退移图像最优重建。

1 固体火箭发动机燃面退移图像重建理论研究

迭代重建主要是通过求解线性方程组:

$$AX = b \quad (1)$$

式中, X 为待求燃面, b 为微波穿过燃面的衰减值, A 为投影矩阵。对于该线性方程组的求解必须先确定投影矩阵 A 。考虑到微波传输路径并非 X 射线的直线传播模式,需要确定微波传输路径,并进行网格划分,再进行投影矩阵刻画,然后通过 CT 反演计算获取发动机燃面退移图像信息。本文研究的固体火箭发动机点火试验燃面退移图像最优重建方法研究流程包括:获取发动机燃面微波 CT 成像场的磁力线路径,获取发动机燃面的微波投影数据,发动机燃面退移图像重建,重建质量判别,完成重建。获取发动机燃面微波 CT 成像场的磁力线路径,获取发动机燃面的微波投影数据是燃面重建的基础,它们是为重建提供充足的数据,提供数据的准确性、完备性直接决定了燃面重建的精确性;发动机燃面退移图像重建步骤是燃面重建的具体算法,是重建的核心内容。其主要包括初值选取、迭代计算、正交投影、TV 降噪、共轭方向更新、终止准则六部分;而重建质量判别主要是判断应用此重建算法得出的燃面图像质量是否符合要求,若符合要求,则燃面重建过程结束,燃面重建成功;否则,重新进行燃面重建,直到结果符合要求。

具体固体火箭发动机点火试验燃面退移图像重建流程如图 1 所示。

1.1 获取燃面微波 CT 成像场的磁力线路径

微波也是电磁波的一类,电磁波在不同介质中传播的理论基础是麦克斯韦方程。麦克斯韦方程非常全面地描写了电磁场在不同介质中的传播规律。在没有源的导电的介质中,描写麦克斯韦方程为:

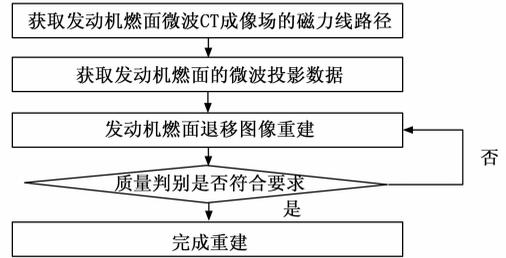


图 1 固体火箭发动机点火试验燃面退移图像重建流程图

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \text{ (法拉第定律)}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \text{ (安培定律)}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \text{ (是涡旋场)}$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0 \text{ (库仑定律)}$$

上面方程中的每个量, \vec{E} 是电磁场的强度 (V/m), \vec{B} 是磁感应的强度 (T), 或磁通量密度 (wb/m²), \vec{H} 是磁场的强度 (A/m), \vec{D} 是电位移的矢量 (c/m²), \vec{j} 是电流场的密度 (A/m²)。

上面方程以电流、电场等参数的变化以及电磁场随空间和时间变化为基础,一方面建立了电流场密度、场强度矢量和电荷的密度三者之间的关系,另一方面还总结概括了电磁变化现象的本质。电磁波在介质中传播的同时会产生不定量的衰减,电磁波的能量会造成损失消耗,主要是因为电磁波的扩散、介质间的吸收,还有其在不同临界面上的折射、反射以及散射。电磁波的损耗衰减主要认为是在电磁场的下,介质产生的磁化、传导和极化所引起的。

根据电磁波衰减特性,仿真电池微波层析成像,再根据 1 次发射 29 次接收的机制,初步获取了微波的 CT 成像的磁力线路径。然后根据电磁场的传播规律,在初步获取的微波 CT 成像场的磁力线路径的每条磁力线两侧各增加 2 条磁力线,以增加信息量,得到燃面微波 CT 成像场的最终的磁力线路径^[2]。

1.2 获取燃面的微波投影数据

根据磁力线仿真路径方程,求解投影矩阵,投影矩阵 A 中 a_{ij} 定义为 i 号射线交 j 号像素的交线长度。根据投影矩阵将重建区域离散化,在以被测物体中心为圆心的圆周上均匀的设置 n 个发射/接收器。每次发射其中之一,然后切换其他接收信号状态,最后一起进行数据检测^[3-4]。此时,微波在被测媒质中的传播满足普通形式的波动方程:

$$(\nabla^2 + k(\vec{r}))\psi(\vec{r}) = 0 \quad (2)$$

其中: $k(\vec{r})$ 表示媒质反射率 $n(\vec{r})$ 的标量函数, ∇^2 为矢量拉普拉斯算符。通过一系列变形运算,公式 (2) 可转化为:

$$(\nabla^2 + k_b^2)\psi(\vec{r}) = -k_b^2(\mu_r \epsilon_r - 1)\psi(\vec{r}) = -k_b^2 O(\vec{r})\psi(\vec{r}) \quad (3)$$

其中: $O(\vec{r})$ 称为目标函数, k_b 表示平面波在背景媒质中的波数, μ_r 和 ϵ_r 表示相对于背景媒质的相对磁导率和相对介电常数。由于总场 $\psi(\vec{r})$ 可表示为入射场 $\psi_{inc}(\vec{r})$ 和散射场

$\psi_{scatt}(\vec{r})$ 的总和, 并且入射波 $\psi_{inc}(\vec{r})$ 可定义为: $(\nabla^2 + k_b^2)\psi_{inc}(\vec{r}) = 0$, 从而, 由公式 (3) 可得:

$$(\nabla^2 + k_b^2)\psi_{scatt}(\vec{r}) = -k_b^2 O(\vec{r})\psi_{tot}(\vec{r}) \quad (4)$$

借助格林函数, 可得由所有源产生的照射为:

$$\psi_{scatt}(\vec{r}) = \int G(\vec{r} - \vec{r}')k_b^2 O(\vec{r}')\psi_{tot}(\vec{r}')d\vec{r}' \quad (5)$$

如此便得到“投影”数据 A。

1.3 燃面退移图像重建

为了充分利用图像的梯度稀疏性, 通过公式 (5), 可得到最小化图像^[5], 即:

$$y = Ax \quad (6)$$

其中: $\|x\|_{TV}$ 为图像 x 的 TV 范数, \vec{x} 表示图像函数, 由 N 个图像像素 x_1, x_2, \dots, x_N 组成。y 为微波穿过燃面的衰减值, A 为投影矩阵。

图像 x 的 TV 范数^[6]的公式如下:

$$\|x\|_{TV} = \|\text{valued}(TV(x))\|_1 = \sum_{i,j} \sqrt{(\nabla x)_{ij}^2 + (\nabla y)_{ij}^2} \quad (7)$$

其中: $\nabla x = x_i - x_{i-1}$, $\nabla y = y_j - y_{j-1}$ 。

以 TV 范数最小化为目标进行图像重建^[7-8], 迭代公式如下:

$$\mu_j^{(k+1)} = \mu_j^{(k)} + \lambda \frac{p_i - \sum_{j=1}^N a_{ij} \mu_j^{(k)}}{\sum_{j=1}^N a_{ij}^2} a_{ij} \quad (8)$$

其中: p_i 为投影测量值, μ_j 为待求的衰减系数, λ 为松弛因子, a_{ij} 为 i 条微波交 j 号像素的长度。

在公式 (8) 的每一步迭代过程中, 为了构造了一种以 TV 范数最小化为基础的图像重建计算方法, 对每步的结果进行了 TV 降噪修正处理和凸集的正交投影变化, 迭代的具体过程如下:

根据公式 (8) 的迭代公式进行重建, 算法具体步骤如下:

1) 初始值进行选取: 命令 S 作为星形的欠缺数据采样矩阵, 起始集 $y_0 = S \otimes DFT(x)$ 为只能在 S 中得出原始图像的傅里叶变换系数, \otimes 为 S 的对应值相乘。然后, 命初值 $x_0 = DFT^{-1}(y_0)$;

2) 迭代重建计算: 通过共轭梯度计算以下迭代式:

$$x_{n+1}^{(1)} = x_n - \lambda_n d_n \quad (9)$$

其中: λ_n 为步长, d_n 为共轭梯度的方向。

3) 正交投影: 向 $y = Ax$ 作投影, 然后计算 $x_{n+1}^{(1)}$ 的 DFT, 保留原始采样上的频域信息 y_0 不变, 使用目前迭代出的结果对不是采样点的频域上的信息进行更替, 而后计算出频域更替的结果的逆向值 DFT, 即:

$$x_{n+1}^{(2)} = DFT^{-1}(y_0 + (I - S) *)DFT(x_{n+1}^{(1)}) \quad (10)$$

4) TV 降噪^[9]: 频域上的星形采样会导致迭代出的结果混有噪声, 所以对迭代出的结果 $x_{n+1}^{(2)}$ 进行降噪处理, 进而得到第 $n+1$ 步迭代结果 x_{n+1} , 即:

$$x_{n+1} = x_{n+1}^{(2)} - TV\text{-denoise} + (x_{n+1}^{(2)}) \quad (11)$$

其中: 对任意给定的二维图像 $x = (x_{ij})$, 其 TV 降噪矩阵为 **TV-denoise** (x) = (t_{ij}) , 并且:

$$t_{ij} = ((\nabla x)_{ij} + (\nabla y)_{ij}) / \sqrt{(\nabla x)_{ij}^2 + (\nabla y)_{ij}^2} \quad (12)$$

5) 共轭更新: 共轭梯度法的搜索方向 d_n 是当前迭代的负梯度方向与上一次迭代搜索方向的组合, 即:

$$d_{n+1} = d_{TV}(x_{n+1}) + \beta d_n \quad (13)$$

其中: $d_{TV}(x_{n+1})$ 表示 $\|x\|_{TV}$ 的梯度下降方向。

$d_0 = d_{TV}(x_0)$, $\beta, \|d_{TV}(x_{n+1})\|_F^2 / \|d_n\|_F^2$ 为比例系数, $\|\cdot\|_F$ 表示矩阵的 Frobenius 范数。

6) 终止条件: 判断当迭代次数达到某一设定数值时或迭代结果收敛时停止迭代, 否则返回 2) 迭代计算继续上述过程。

1.4 重建质量判别

对上述得出的不同直径燃面的重建数值与实际数值进行比较, 两者之间的误差不大于 1 mm 时, 完成迭代, 证明燃面重建质量符合要求, 否则继续迭代, 直到实现两者之间的误差不大于 1 mm 为止。

$$\delta = \max |f_i - f'_i| \quad (14)$$

其中: δ 为重建数值与实际数值的误差, f_i 为图像序号为 i 时的燃面直径真实数值, f'_i 为图像序号为 i 时的燃面直径重建数值。

2 试验仿真结果与分析

以固体火箭发动机药柱直径 200 mm, 环形天线阵列个数为 30 个, 发射天线 (天线距离药柱弧面 10 mm 时) 左右相邻的两个接收天线夹角约为 168° 为例, 进行固体火箭发动机点火试验燃面退移图像重建。

由于天线尺寸较大, 只能围绕火箭发动机外壳布置有限数量的天线, 因此获得的投影数据并不完备。根据 1.1 获取燃面微波 CT 成像场的磁力线路径的方法, 可以得到天线的辐射边缘观察到的强电场仿真结果, 如图 2 所示。

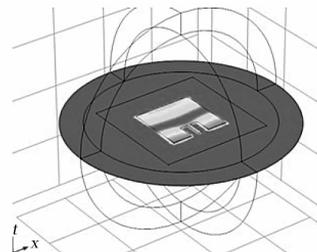


图 2 天线辐射边缘的强电场仿真结果图

从图 2 可以得出, 每个天线都接到了辐射信号。再通过上述的接收装置, 得到 CT 成像的初步的磁力线路线图如图 3 所示。

通过进一步分析重建结果, 发现磁力线在发射端比较密集, 越靠近接收端磁力线变得越稀疏。因此, 随着燃面直径变大, 接收端附近的燃面有磁力线穿过的像素极少, 信息不完全, 从而导致重建燃面直径存在较大偏差。而且随着燃面直径越大, 误差也会越大。针对该问题, 提出增

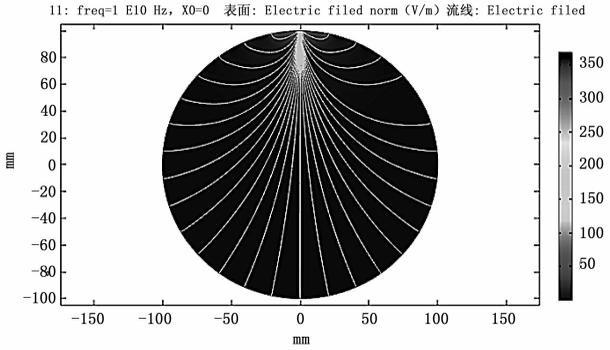


图 3 初步磁力线路径仿真图

加磁力线的方法，因为实际微波探测过程，并非理想的单点探测，而是由一个窄小的面构成面探测，在同一个面上接收到的信息是一样的，因此增加磁力线条数就可以增加信息量，靠近接收端磁力线也会变得相对密集。

然后根据电磁场的传播规律，在图 3 的每条磁力线两侧增加了 2 条磁力线，以增加信息量，得到燃面微波 CT 成像场的最终的磁力线路径，如图 4 所示。

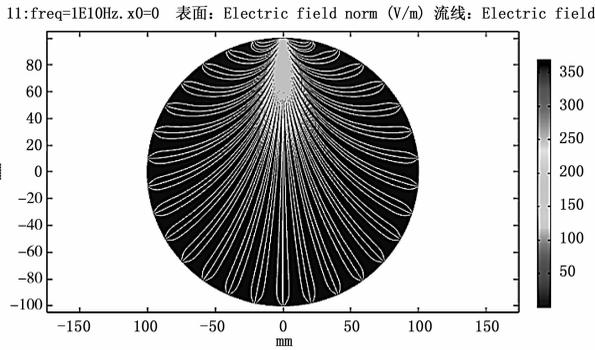


图 4 最终磁力线路径仿真图

对于图 4 的磁力线仿真路径方程，根据 1.2 描述方法，求解投影矩阵如图 5 所示。

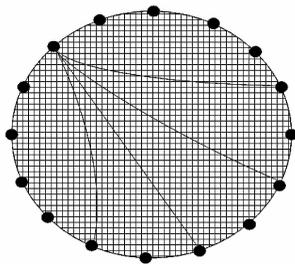


图 5 微波断层成像投影矩阵图

采用如图 5 所示的环形几何模型，将重建区域离散化，在以被测物体中心为圆心的圆周上均匀的设置 29 个发射/接收器。每次发射其中的一个，再转变为接收信号状态，最后共同进行数据。在公式 (4) 得出的投影数据基础上，将燃面微波 CT 成像场的最终的磁力线路径中 3 条磁力线的微波接收值都设置为相同值，得到燃面 30×90 的微波投影数据，如图 6 所示。

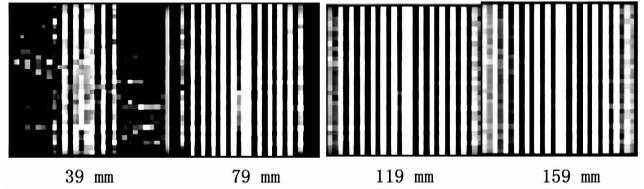


图 6 不同燃面直径的微波投影数据

根据 1.3 描述方法进行重建迭代，经过多次计算，本次迭代进行 100 次，迭代结果已经收敛。这时重建结果如图 7 所示。

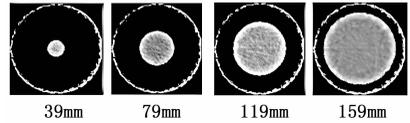


图 7 不同燃面直径的重建结果图

这时得出不同燃面直径重建结果与实际数值对比图 8，图 9 为不同直径燃面的重建数值与实际数值之间的误差曲线，从曲线可得，两者之间的误差不大于 1 mm，证明应用上述发动机燃面退移图像重建算法计算出的燃面重建质量符合要求。

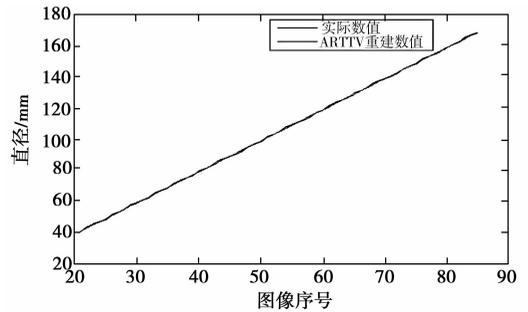


图 8 燃面直径结果对比图

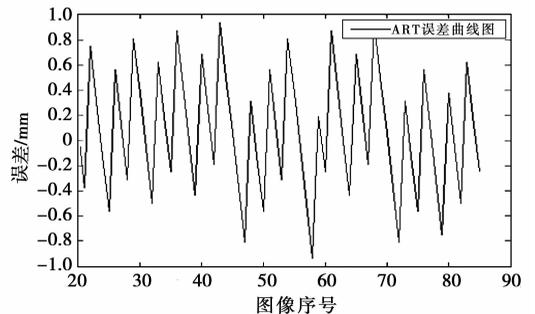


图 9 误差曲线图

3 结束语

固体火箭发动机燃面退移过程直接决定了其内弹道特性。成功进行量化地测量燃面退移变化过程，不但有效地预测发动机内弹道的精度，还对发动机设计具有重要作用，因此本文研究了固体火箭发动机点火试验燃面退移图像

(下转第 254 页)