

文章编号 1004-924X(2014)11-3136-09

流场超声层析成像中图像的迭代滤波反投影重建

柳建楠, 王浩源, 王伯雄*, 崔园园

(清华大学 精密仪器系 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要:为提高流场超声层析成像的图像重建质量,提出了一种迭代滤波反投影图像重建算法。该算法借鉴联合迭代重建算法的原理,将滤波反投影算法引入迭代重建过程。首先,利用滤波反投影算法,通过投影数据残差重建误差图像对流场图像进行修正,实现图像的迭代重建。然后,通过优化迭代步长,使每步迭代后投影数据残差均取得极小值以便加快收敛速度。最后,基于流场连续、紧支撑分布的特点,在迭代重建过程中引入投影数据的细分内插和流场图像的圆域修正。实验表明:相比于滤波反投影算法,迭代滤波反投影算法可使理论流场重建的图像误差平均减少 26%,流量误差由 1.77%减小至 $\pm 0.25\%$ 以内;程序运行时间为 0.63 s,仅为联合迭代重建算法的 0.89%。该算法可实现对直管段内和单弯管下游实际流场的可靠重建,满足流场高精度实时成像的要求。

关键词:流场成像;超声层析;图像重建;迭代滤波反投影;联合迭代重建算法;

中图分类号: TB559; TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142211.3136

Iterative filtered back projection image reconstruction for ultrasonic tomographic flow field imaging

LIU Jian-nan, WANG Hao-yuan, WANG Bo-xiong*, CUI Yuan-yuan

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,
Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

* Corresponding author, E-mail: wangbx@mail.tsinghua.edu.cn

Abstract: To improve the image reconstruction resolution of ultrasonic tomographic flow field imaging, an iterative Filtered Back Projection (FBP) algorithm was proposed. On the basis of the Simultaneous Iterative Reconstruction Technique (SIRT), the FBP algorithm was integrated into an iterative reconstruction process. With the FBP algorithm, an error image was reconstructed by the residual error of the projection data, then the flow field image was revised and the iterative reconstruction of the image was implemented. By optimizing the iteration step size, the residual error of the projection data for each iteration was minimized to improve the speed of convergence. Finally, according to the flow field characteristics in continuity and compact support, the projection data was interpolated and the flow field image was assigned a value of zero outside the circular domain. Simulation results indicate that the iterative FBP algorithm decreases the image error by 26% and the volume flow rate error decreases from an average of -1.77% to $\pm 0.25\%$ as compared with the FBP algorithm. In addition, the computational time of the iterative FBP algorithm is just 0.63 s, only

收稿日期:2014-05-29;修订日期:2014-06-23.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11274199)

0.89% that of SIRT. In actual experiments, the iterative FBP algorithm can reconstruct the flow fields in a straight pipe and downstream of a 90° single bend with high reliability. It concludes that the iterative FBP algorithm implements the reconstruction of flow fields in real-time and higher accurate because of its good reconstruction resolution and high computational efficiency.

Key words: flow field imaging; ultrasonic tomography; image reconstruction; iterative filtered back projection; Simultaneous Iterative Reconstruction Technique(SIRT)

1 引言

流场超声层析成像是一种新颖的流场测量方法,它通过融合时差式超声流速测量与计算机层析成像技术(Computerized Tomography,CT),实现以非侵入的方式对管道内轴向流场的二维成像^[1-5]。与超声多普勒测速^[6]、粒子图像测速^[7]、平面激光诱导荧光^[8]等技术相比,流场超声层析成像对流体适用范围更广,且无需添加指示流体运动的示踪粒子,具有广阔的发展空间。

流场超声层析成像首先利用时差式原理测量得到多条声道上的平均流速,然后以平均流速与声道在管道横截面投影长度的乘积作为投影数据,对流场图像实现层析重建^[1]。受系统成本、探测时间、超声换能器安装尺寸等限制,超声层析成像装置中只能安装少量换能器^[4],因而相较于一般的医学和工业 CT 系统而言,其投影数据非常稀疏。目前,基于稀疏的投影数据对流场图像进行快速、高精度的层析重建是超声流场层析成像技术发展的难点。

目前,超声流场层析成像采用的重建算法可以划分为直接重建算法和代数迭代重建算法两大类。直接重建算法可以根据重建公式由投影数据直接获得流场图像,具体包括 Radon 反变换法^[2]、卷积反投影算法^[4]和滤波反投影算法(Filtered Back Projection, FBP)^[1,5]等,其中 FBP 是目前医学和工业 CT 中应用最为广泛的图像重建方法。FBP 可通过快速傅里叶变换和反变换进行加速,因而重构速度很快,可满足流场重建的实时性要求;代数迭代类重建算法将目标图像的重建抽象为线性方程组问题,并通过各种迭代算法进行求解,其根据求解方式的不同可分为代数重建算法(Algebraic Reconstruction Technique, ART)^[3]、联合迭代重建算法(Simultaneous Iterative Reconstruction Technique, SIRT)^[9]、

子集排序迭代算法(Order Subset Expectation Maximization, OSEM)^[10]等。由于代数迭代类重建算法可以根据问题的物理模型在构造方程组时添加约束条件,并可以在迭代过程对中间结果进行修正,理论上针对流场超声层析成像这一稀疏投影问题,其可以获得比 FBP 等直接重建算法更好的成像效果。但是为保证流场的重建质量,代数迭代类算法需要多次迭代,运算耗时,难以满足实时性要求。

本文借鉴代数迭代类重建算法的原理,提出了一种迭代滤波反投影算法,将 FBP 融入迭代重建,通过对重建图像进行迭代修正,减小重建图像投影数据相对于实测投影数据的残余误差,从而在利用 FBP 计算快速优势的同时,提高了图像重建精度。本文选择投影数据残余误差的 2-范数作为目标函数,对迭代步长进行优化,加快了收敛速度。基于流场超声层析成像问题的特殊性,在流场迭代重建过程中,引入流场连续、紧支撑分布的先验知识,提高了重建精度。

2 流场超声层析成像原理

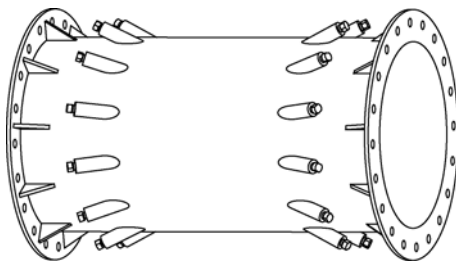
流场超声层析成像的基础是时差式超声流速测量和计算机层析成像,原理如图 1 所示^[1,5]。在测量管段上下游的 2 个横截面上各布置多个超声换能器,每个换能器均可以向位于另一截面上的所有换能器发射超声脉冲,脉冲传播路径在管道横截面上的投影为交错的声道网络。图中, $v(x, y)$ 为轴向流场在管道横截面上的二维分布,A, B 分别为管道上下游的 2 个换能器,二者之间传播路径上的平均流速 $v_l = \frac{1}{L} \int_L v(x, y) dl$ 可由超声脉冲逆流、顺流的传播时间 t_1, t_2 计算得到,如式(1)所示:

$$v_l = \frac{L(t_1 - t_2)}{2 t_1 t_2 \cos \alpha}, \quad (1)$$

式中: α 为传播路径与管道轴线的夹角; L 为传播路径的长度。根据 CT 原理可知, 物体断面的二维图像 $f(x, y)$ 可由其在不同方向和位置的投影数据重建得到^[11]。其中, 投影数据定义为二维图像 $f(x, y)$ 沿指定射线的积分, 即:

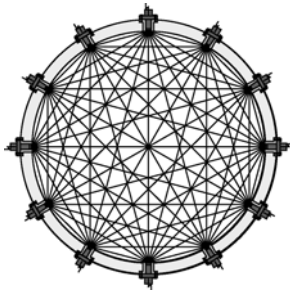
$$p_s = \int_s f(x, y) ds. \quad (2)$$

将轴向流场 $v(x, y)$ 视作二维图像 $f(x, y)$ 的特例。对比投影数据 p_s 和平均流速 v_L 的定义可知, 轴向流场在某一声道上的投影数据等于平均流速 v_L 与声道在管道横截面投影长度的乘积。进而, 可利用 CT 图像重建算法, 根据不同角度和位置的声道上的投影数据计算出轴向流场 $v(x, y)$ 。



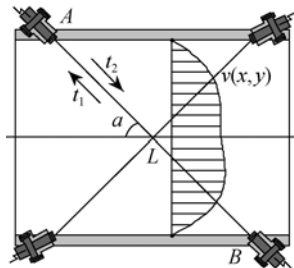
(a) 换能器布置方式

(a) Configuration of transducers



(b) 声道网络侧视图

(b) Side view of chord network



(c) 声道平均流速计算

(c) Calculation of chord average velocity

图 1 流场超声层析成像原理

Fig. 1 Principle of ultrasonic tomographic flow field imaging

3 流场的迭代滤波反投影重建

3.1 迭代滤波反投影算法

对于 FBP, 在平行束扫描模式下, 将投影数据记为射线倾角 θ 和投影距离 s 的函数 $p(\theta, s)$, 则可直接得到待求图像 $f(x, y)$ 为:

$$f(x, y) = \int_0^{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} P_s(\theta, \omega) | \omega | e^{j2\pi\omega(x\cos\theta + y\sin\theta)} d\omega d\theta, \quad (3)$$

式中: $P_s(\theta, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(\theta, s) e^{-j2\pi\omega s} ds$ 。式 (3) 与式 (2) 是互逆运算, 因此, 在连续空间上, $f(x, y)$ 可由 $p(\theta, s)$ 精确重构, 但实际中 $p(\theta, s)$ 是离散的且有限, 所以利用式 (3) 重建的结果只是真实图像的近似值, 特别在投影数据较少时, 重建误差会增大。

利用代数迭代类重建算法重建 CT 图像时, 将待求图像 $f(x, y)$ 离散化为列向量 \mathbf{X} , 投影数据 $p(\theta, s)$ 记为列向量 \mathbf{B} , 从而可将式 (2) 改写为矩阵形式^[11]:

$$\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{B}, \quad (4)$$

式中: \mathbf{A} 是图像 \mathbf{X} 向投影数据 \mathbf{B} 映射的投影矩阵, 其由数据采集方式唯一确定。代数迭代类重建算法是通过迭代求解式 (4) 来实现 CT 图像重建的。以 SIRT 算法为例, 迭代求解的表达式为^[9]:

$$\mathbf{X}^{(k+1)} = \mathbf{X}^{(k)} + \lambda^{(k)} \mathbf{A}^T (\mathbf{B} - \mathbf{A}\mathbf{X}^{(k)}), \quad (5)$$

式中: $\lambda^{(k)}$ 为迭代步长; \mathbf{A}^T 为 \mathbf{A} 的转置矩阵, 矩阵 \mathbf{A} 是由图像空间向数据空间的映射, 而矩阵 \mathbf{A}^T 则是由数据空间向图像空间的映射, 是与投影过程相对应的反投影算子^[9]; 式 (5) 右侧的 $\mathbf{B} - \mathbf{A}\mathbf{X}^{(k)}$ 为当前图像的投影数据相对于实测投影数据的残余误差, $\mathbf{A}^T (\mathbf{B} - \mathbf{A}\mathbf{X}^{(k)})$ 可视为由投影数据残差所重建的误差图像, 通过在当前重建图像上叠加误差图像, 能够减小重建结果的投影数据残差, 使其更逼近于真实图像。

借鉴式 (5) 迭代过程的物理意义, 可将 FBP 融入迭代重建。首先, 采用 FBP, 根据实测投影数据 \mathbf{B} 重建图像; 然后, 计算重建图像投影数据相对实测投影数据的残余误差, 再利用 FBP 由投影数据残差重建误差图像, 并与之前重建的图像相叠加。经过反复迭代, 逐渐减小重建图像的投

影数据残差,提高图像的重建精度。本文将这种将 FBP 融入迭代重建过程的方法称为迭代滤波反投影算法。

将式(3)中的待求图像 $f(x, y)$ 和投影数据 $p(\theta, s)$ 分别记为列向量 \mathbf{X} 和列向量 \mathbf{B} 的形式,定义 Q 为代表式(3)的滤波反投影算子,可得:

$$\mathbf{X} = Q(\mathbf{B}). \quad (6)$$

类似地,定义 F 为代表式(2)的投影算子,可以得到迭代滤波反投影算法的迭代公式:

$$\mathbf{X}^{(k+1)} = \mathbf{X}^{(k)} + \lambda^{(k)} Q[\mathbf{B} - F(\mathbf{X}^{(k)})], \quad (7)$$

迭代的起始条件为 $\mathbf{X}^{(0)} = 0, \lambda^{(0)} = 1$ 。第一步迭代得到的图像 $\mathbf{X}^{(1)}$ 便是 FBP 的重建结果。

相对于矩阵 \mathbf{A}^T , 滤波反投影算子 Q 是正向投影过程的一种更为精确的反变换算子^[9]。所以与式(5)相比,式(7)只需要经过少量迭代,便可以得到精确的重建结果,收敛速度更快。同时,式(7)中的滤波反投影算子 Q 和投影算子 F 均可以分步实现,从而避免了存储规模巨大的投影矩阵 \mathbf{A} , 减小了对运行内存空间的要求。

3.2 迭代步长优化

为使式(7)的迭代过程尽快收敛,要对迭代步长 $\lambda^{(k)}$ 进行优化,使每次迭代后投影数据的残余误差最小,即 $\lambda^{(k)}$ 满足:

$$\hat{\lambda}^{(k)} = \underset{\lambda^{(k)}}{\operatorname{argmin}} \| \mathbf{B} - F(\mathbf{X}^{(k+1)}) \|_2, \quad (8)$$

式中: $\| \cdot \|_2$ 表示 2-范数。将式(7)带入式(8),可得到:

$$\hat{\lambda}^{(k)} = \underset{\lambda^{(k)}}{\operatorname{argmin}} \| \mathbf{B} - F\{\mathbf{X}^{(k)} + \lambda^{(k)} Q[\mathbf{B} - F(\mathbf{X}^{(k)})]\} \|_2. \quad (9)$$

为简便起见,定义误差图像 $\mathbf{E}^{(k)} = Q[\mathbf{B} - F(\mathbf{X}^{(k)})]$, 同时,根据式(2)可知, F 代表的投影算子是线性映射,式(9)可简化为:

$$\hat{\lambda}^{(k)} = \underset{\lambda^{(k)}}{\operatorname{argmin}} \| \mathbf{B} - F(\mathbf{X}^{(k)}) - \lambda^{(k)} F(\mathbf{E}^{(k)}) \|_2. \quad (10)$$

对式(10)进行求导运算,便可以得到使投影数据残余误差快速收敛的迭代步长:

$$\hat{\lambda}^{(k)} = \frac{\langle F(\mathbf{E}^{(k)}), \mathbf{B} - F(\mathbf{X}^{(k)}) \rangle}{\langle F(\mathbf{E}^{(k)}), F(\mathbf{E}^{(k)}) \rangle}, \quad (11)$$

式中: $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 代表向量内积运算。

3.3 流场图像的重建

与一般 CT 应用相比,流场超声层析成像问题有其特殊性,故利用迭代滤波反投影算法对流

场图像进行重建时,需要对算法进行相应调整。

首先,如图 2(a)所示,原始数据受换能器数目和安装位置的影响,在各个投影方向上的声道是非常稀疏的,且非等间距排布,不满足平行束滤波反投影算法进行图像重建的要求。因此,可以根据流场的连续性,对实测投影数据和迭代过程中的投影数据残差进行样条插值,得到如图 2(b)所示的细分投影数据。

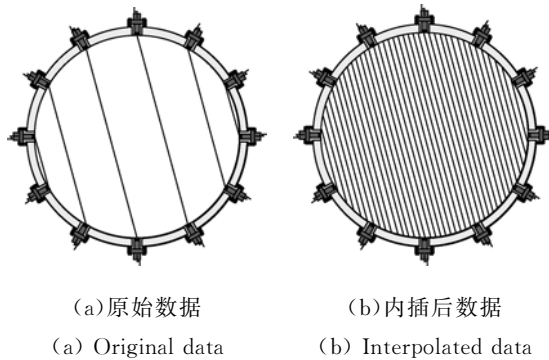


图 2 投影数据的等间距内插

Fig. 2 Equal-interval interpolation of projection data

其次,根据物理意义可知,轴向流场 $v(x, y)$ 属于紧支撑函数,仅可在管道截面所对应的圆域 Ω 内取得非零值,据此,可在迭代过程中对初始重建图像 $\mathbf{X}^{(1)}$ 和误差图像 $\mathbf{E}^{(k)}$ 进行修正,使 $v(x, y)$ 在管道圆截面外的像素点上取值为零,从而提高流场图像的重建精度。

基于以上调整,可以按照图 3 所示的流程,由迭代滤波反投影算法对流场图像进行重建。图中, S 代表对投影数据进行样条内插的算子。迭代终止条件可根据实际情况,从以下几项中选取:

- (1) 投影数据残差或误差图像小于指定阈值;
- (2) 投影数据残差停止收敛;
- (3) 达到预设迭代次数。

4 实验结果与讨论

为评价本文提出的迭代滤波反投影算法的性能,首先利用理论流场仿真重建实验,以便对本文算法与传统算法的重建精度和运算效率进行比较分析,然后通过实际流场测量实验检验本文算法对真实流场的重建效果。仿真实验和实际测量实

验均是以图 1 所示的 12 节点流场超声层析成像系统为基础进行的。重建程序运行的软件平台是 Matlab 2010a, 硬件平台的 CPU 为 Intel Core E8300, 双核 2.83 GHz, 内存为 4 GB。

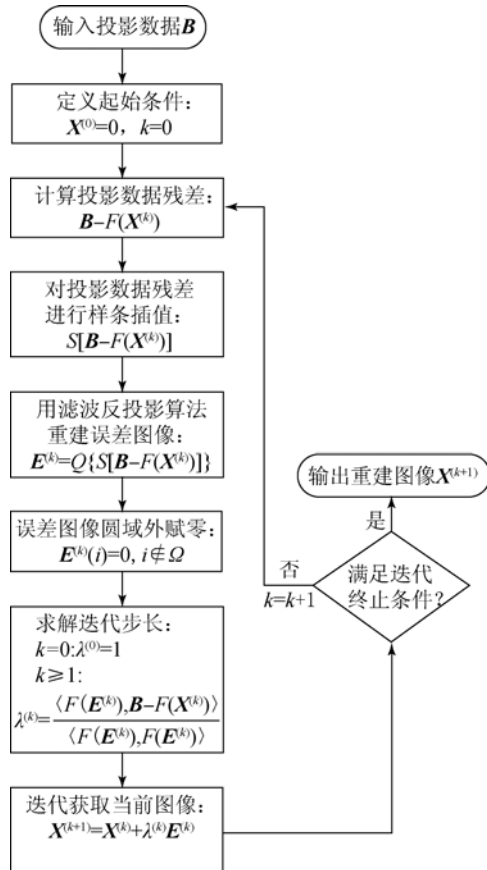


图 3 轴向流场的重建流程

Fig. 3 Reconstruction process of axial flow field

4.1 理论流场的仿真重建

文献[12]提出了利用流速剖面理论模型模拟管道内典型流场的方法。该方法可通过流速剖面理论公式直接求取管道截面各点流速,其计算速度快,求解精度高,已广泛用于流量测量领域的多声道超声流量计的仿真评价。本文借助文献[12]中的流速剖面理论模型进行流场仿真重建实验,首先沿各声道对理论流场进行积分,求取投影数据,并用它们代替实际流速测量过程,然后分别采用 FBP、SIRT 算法和迭代滤波反投影算法根据投影数据,重建流场图像。其中,在利用 SIRT 算法进行流场重建时,为防止高频噪声导致迭代过程迅速发散同时保证重建流场的连续性,在每次迭代后均对图像进行中值滤波降噪。具体步骤

如下:

首先,本文以文献[12]中的 A3 流场为例进行仿真重建实验。A3 流场常用于模拟双弯管下游的流速分布,图 4 给出了其理论流场图像和重建结果的等值线图。实验中,迭代滤波反投影算法和 SIRT 算法的迭代次数分别设置为 3 次和 20 次,重建的流场图像为 200 pixel \times 200 pixel。通过对比 4 幅等值线图可以看出,迭代滤波反投影算法的重建结果与原始流场最为接近,直观重建效果最好,具体体现在原始流场中的 1.15 m/s 等值线只在迭代滤波反投影算法的重建结果中得到表征;而且该算法重建得到的 0.85 m/s、0.95 m/s 等值线与原图中相应等值线的位置、形状最为一致。另外,相对于 SIRT 算法,FBP 和迭代滤波反投影算法重建的流场图像的连续性更好。

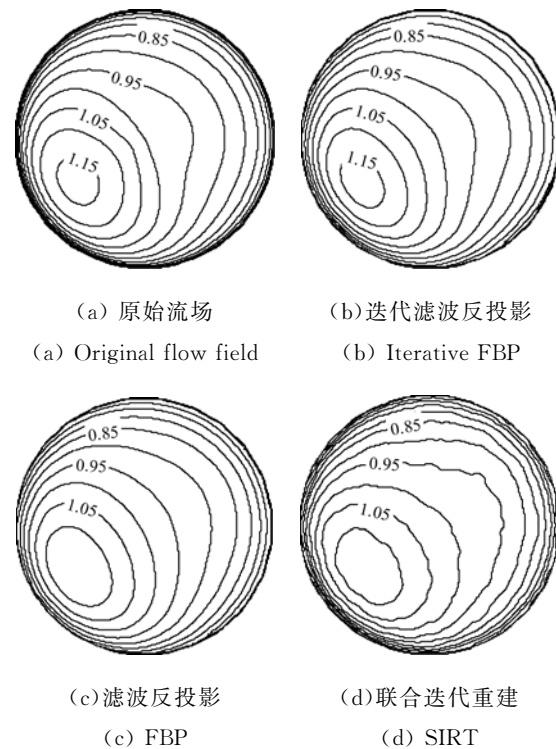


图 4 A3 流场的仿真重建图像

Fig. 4 Reconstruction of flow field A3

为了定量比较 3 种算法的重建质量,本文引入图像误差 $\Delta X^{[13]}$ 、流量误差 ΔV 、投影残差 ΔB 3 项参数对重建得到的流场图像 \mathbf{X} 进行评价,定义分别为:

$$\Delta X = \frac{\| \mathbf{X} - \hat{\mathbf{X}} \|_2}{\| \hat{\mathbf{X}} \|_2} \times 100\%; \quad (12)$$

$$\Delta V = \frac{\sum \mathbf{X} - \sum \hat{\mathbf{X}}}{\sum \hat{\mathbf{X}}} \times 100\%; \quad (13)$$

$$\Delta B = \frac{\| F(\mathbf{X}) - \mathbf{B} \|_2}{\| \mathbf{B} \|_2} \times 100\%, \quad (14)$$

式中: $\hat{\mathbf{X}}$ 为真实的流场图像。3 项参数中, 图像误差 ΔX 表征了重建流场图像与真实流场图像的空间距离; 流量误差 ΔV 表征了采用超声层析成像方法对流量进行计量的精度; 投影残差 ΔB 则是重建流场投影数据相对于实测投影数据的残余误差。




定义了流场重建质量的量化评价指标之后,

可以将仿真重建实验推广至其他典型流场进行分析。表 1 给出了文献[12]中 A3, A7, A9 3 种流场的重建误差。表中, FBP 与 SIRT 算法的投影残差接近, SIRT 算法流量误差仅为 0.2% 左右, 流量计量精度优于滤波反投影算法, 但由于重建结果连续性较差, 图像误差大于 FBP。总体而言, 二者的重建质量接近。相对于 FBP 而言, 迭代滤波反投影算法通过迭代补偿, 可使投影残差平均减小 89.2%, 图像误差平均减小 26.0%, 流量误差由 -1.77% 降低至 $\pm 0.25\%$ 以内, 在 3 种流场重建方法中精度最高。

表 1 典型流场的重建误差

Tab. 1 Reconstruction errors of typical flow fields

%

流场	评价指标	迭代滤波反投影算法	FBP	SIRT 算法
 A3	图像误差	2.299	3.075	4.387
	流量误差	0.222	-1.773	0.193
	投影残差	0.187	2.088	1.944
 A7	图像误差	2.275	3.094	5.440
	流量误差	0.218	-1.821	0.182
	投影残差	0.199	2.117	2.984
 A9	图像误差	2.364	3.208	4.086
	流量误差	0.247	-1.729	0.215
	投影残差	0.294	2.103	0.923

最后, 对 3 种算法的运算效率进行比较。表 2 给出了相应程序的运行时间和占用的内存空间。对于 SIRT 算法, 由于式(5)中的投影矩阵 \mathbf{A} 规模巨大, 在本例中为 $3\ 420 \times 40\ 000$, 所以程序占用了 755.59 MB 的存储空间, 耗费了 74.44 s 的运行时间; 而对于 FBP, 由于式(3)经过分解可以通过傅里叶变换和傅里叶逆变换实现, 且无需迭代, 所以程序运算效率非常高, 运行时间仅为 0.12 s, 而内存空间也只需 4.32 MB, 可用于流场实时成像; 迭代滤波反投影算法的实质是将 FBP 融入迭代重建, 所以相对 FBP 而言, 其运算成本有所增加, 但由于收敛所需的迭代次数非常少, 所以运算速度也很快, 本例中算法程序的运行时间为 0.63 s, 仍然可以满足流场实时成像的要求。

表 2 3 种算法的运算成本

Tab. 2 Computational costs of three algorithms

评价指标	迭代滤波反投影算法	滤波反投影算法	SIRT 算法
迭代次数	3	1	20
运行时间/s	0.63	0.12	74.44
内存空间/MB	10.90	4.32	755.59

4.2 实际流场测量实验

为检验迭代滤波反投影算法对实际流场的重建效果, 以气体介质为测量对象, 搭建了 12 节点的流场超声层析成像系统。系统的测量管段如图 5 所示, 管道内径为 480 mm, 2 个安装截面相距 500 mm, 其上各布置了 12 个中心频率为 65 kHz 的超声换能器。

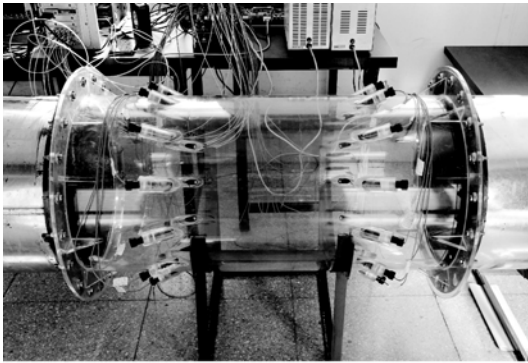


图 5 流场超声层析成像的测量管段

Fig. 5 Detection pipe of ultrasonic tomographic flow field imaging

实验装置的布置方式如图 6 所示。实验中, 先后将测量管段安装于长直管道后和 90°单弯管下游, 通过计算机采集各声道的顺逆流超声信号, 在 Matlab 中采用 Hilbert 数字相关法^[5] 计算出声道平均流速, 并将其与声道在管道横截面的投影长度相乘, 获得投影数据, 最后利用迭代滤波反投影算法进行流场重建, 得到实际流场的等值线图。作为定性参照, 根据管道的实际尺寸建模, 并采用 ANSYS Fluent 软件进行流体动力学仿真, 得到相应条件下的理论流场分布。

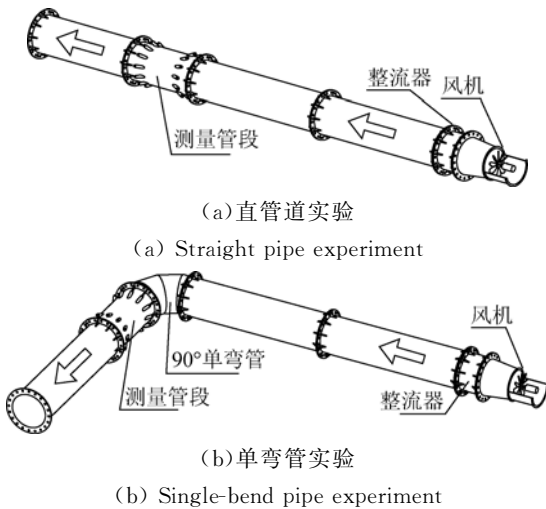
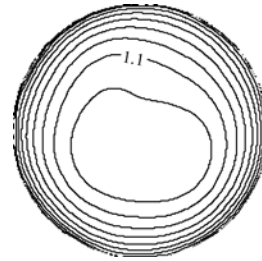


图 6 实验装置布置方式

Fig. 6 Configuration of experimental set-up

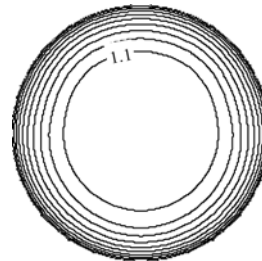
图 7 给出了直管道条件下的测量流场与仿真流场。根据测量结果可知, 管道内的平均流速为 0.99 m/s, 对应雷诺数为 3.02×10^4 , 当气体的流动在直管道充分发展之后, 流场应呈现为理想的紊流流场, 如图 7(b) 所示。紊流流场的特点是整体呈中心对称分布, 流速大小由管道中心向边缘

递减, 流场梯度由中心向边缘递增。图 7 (a) 中的测量流场同理论分析及仿真结果基本一致, 这说明迭代滤波反投影算法适用于实际中心对称流场的重建成像。



(a) 测量结果

(a) Measurement results



(b) ANSYS 仿真结果

(b) ANSYS simulation results

图 7 直管道内流场

Fig. 7 Velocity fields in a straight pipe



(a) 测量结果

(a) Measurement results



(b) ANSYS 仿真结果

(b) ANSYS simulation results

图 8 90°单弯管下游流场

Fig. 8 Velocity field downstream of a 90° single bend pipe

图 8 为 90° 单弯管下游的测量与仿真结果,其中等值线图的左侧对应单弯管的外侧。当气体流入单弯管时,受惯性的影响,高流速的气体会流向单弯管外侧,而低流速气体则会被挤向单弯管。在单弯管出口处,流场会呈现出图 8(b)所示的 C 形分布^[14]。图 8(a)的测量结果与流场的这一特点吻合得很好,从而说明迭代滤波反投影算法对实际非对称流场也可以取得不错的重建效果。

5 结 论

为提高流场图像超声层析重建的精度,本文提出了一种将 FBP 融入迭代过程的迭代滤波反投影算法,并给出了迭代步长的优化方法。基于管道内流场的连续性和紧支撑性,在流场重建过

程中引入了投影数据的细分内插和误差图像的圆域修正。

理想流场的重建实验表明:迭代滤波反投影算法的重建精度要优于 FBP 和 SIRT 算法,相比 FBP 算法,其在 3 次迭代时便可使图像误差平均降低 26.0%,流量误差由平均 -1.77% 减小至 $\pm 0.25\%$ 以内;同时迭代滤波反投影算法也具有较高的运算效率,实验中程序运行时间平均只需 0.63 s,仅为 SIRT 算法的 0.85% 左右。实际流场测量实验中,迭代滤波反投影算法对中心对称流场和非对称流场均取得了较好的成像效果,与仿真分析结果相吻合。本文的研究为流场超声层析成像中图像的高精度实时重建提供了一种可行的解决方案。

参考文献:

- [1] KURNIADI D, TRISNOBUDI A. A multi-path ultrasonic transit time flow meter using a tomography method for gas flow velocity profile measurement [J]. *Particle & Particle Systems Characterization*, 2006, 23(3-4): 330-338.
- [2] CHUN S, YOON B R, LEE K B. Diagnostic flow metering using ultrasound tomography [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2011, 25(6): 1475-1482.
- [3] RYCHAGOV M N, RUCHKIN S V, TERESHCHENKO S A, *et al.*. Imaging of fluid flow by tomographic reconstruction using enhanced multipath ultrasonic measurements [C]. *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium, Honolulu, USA, IUS*, 2003: 803-806.
- [4] TEERAWATANACHAI S, KOMIYA K, SASAMOTO H, *et al.*. An ultrasonic tomography for reconstructing the velocity profile of air flow from nonuniformly spaced projection data [J]. *Trans. of the Society of Instrument and Control Engineers*, 1992, 28(11): 1274-1281.
- [5] 王伯雄,崔园园,柳建楠,等.一种基于超声波的管道流速成像和流量测量方法:中国,201210100169 [P]. 2012.
WANG B X, CUI Y Y, LIU J N, *et al.*. Pipeline flow velocity imaging and flow measuring method based on ultrasonic; China, 201210100169 [P]. 2012. (in Chinese)
- [6] JAAFAR W, FISCHER S, BEKKOUR K. Velocity and turbulence measurements by ultrasound pulse Doppler velocimetry [J]. *Measurement*, 2009, 42(2): 175-182.
- [7] SKUPSCH C, BRÜCKER C. Multiple-plane particle image velocimetry using a light-field camera [J]. *Optical Express*, 2013, 21(2): 1726-1740.
- [8] 王晟,张振荣,邵璐,等.瞬态流场定量测量中平面激光诱导荧光图像的降噪[J].*光学精密工程*, 2013,21(7): 1858-1864.
WANG SH, ZHANG ZH R, SHAO J, *et al.*. Denoising of PLIF images for flow parameter measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(7): 1858-1864. (in Chinese)
- [9] WOLF D, LUBK A, LICHTHE H. Weighted simultaneous iterative reconstruction technique for single-axis tomography [J]. *Ultramicroscopy*, 2014, 136: 15-25.
- [10] YANG Q, DENG B, LV W, *et al.*. Fast and accurate X-ray fluorescence computed tomography imaging with the ordered-subsets expectation maximization algorithm [J]. *Journal Synchrotron Radiation*, 2012, 19: 210-215.
- [11] KAK A C, SLANEY M. *Principles of Computerized Tomographic Imaging* [M]. New York: IEEE Press, 1988.
- [12] MOORE P I, BROWN G J, STIMPSON B P. Ultrasonic transit-time flowmeters modelled with the-

oretical velocity profiles; methodology [J]. *Measurement Science and Technology*, 2000, 11: 1802-1811.

- [13] 吴新杰, 黄国兴, 王静文. 粒子滤波算法在 ECT 图像重建中的应用[J]. *光学 精密工程*, 2012, 20(8): 1824-1830.
WU X J, HUANG G X, WANG J W. Application

of particle filtering algorithm to image reconstruction of ECT [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(8): 1824-1830. (in Chinese)

- [14] KALPAKLI A, ÖRLÜ R. Turbulent pipe flow downstream a 90° pipe bend with and without superimposed swirl [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2013, 41:103-111.

作者简介:



柳建楠(1988—),男,山东聊城人,博士研究生,2010年于清华大学精密仪器与机械学系获得学士学位,主要从事超声流速测量、流场超声层析成像等方面的研究。E-mail: ljn06 @ mails. tsinghua. edu. cn

导师简介:



王伯雄(1947—),男,江苏南通人,教授,博士生导师,1970年、1982年于清华大学分别获得学士、硕士学位,主要从事精密仪器与测试技术, MEMS 技术、光学测量技术、生物医学技术方面的研究。E-mail: wangbx @ mail. tsinghua. edu. cn