

三投影 CT 钢管截面的二值图像重建研究

彭帅军, 吴志芳

(清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

摘要: 尺寸检测是保证钢管质量的重要环节, 相关在线快速检测技术是目前钢管生产中亟待解决的技术难题。射线 CT 成像技术作为一种高效图像检测手段, 能通过重建钢管截面图像获取钢管的大部分尺寸参数, 特别适合对钢管质量进行检测和控制。为减少检测时间, 实现钢管尺寸的在线检测和控制, 本工作研究采用多源多探测器的 CT 扫描方式, 实现了投影数据的快速获取, 并根据钢管截面空间域和像素域的特点, 对最大后验概率(MAP)图像重建算法进行了修正, 实现了不完全投影数据条件下截面图像的重建。模拟试验的结果表明, 修正后的 MAP 算法可做到最少 3 组投影下的钢管截面图像重建, 得到的尺寸精度基本满足国家标准的要求, 这一方法具有一定的理论和实际意义。

关键词: 钢管检测; CT 成像; 扫描方式; 不完全投影; 重建算法

中图分类号: TL99 文献标志码: A 文章编号: 1000-6931(2008)11-1048-05

Research on Binary CT Image Reconstruction of Steel Tube Section From Three Projections

PENG Shuai-jun, WU Zhi-fang

(Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Fast online inspection technology is a difficult problem in the manufacture of steel tube. Radiographic CT imaging technology can reconstruct the image of steel tube section and acquire its most dimension parameters, which is quite appropriate for its inspection and quality control. A scan mode with immobile ray sources and detectors is proposed to reduce the inspection time. It can obtain projection data quickly and meet the need of online inspection. Maximum a posteriori (MAP) reconstruction algorithm is modified based on the space domain and pixel value domain characters of steel tube sections in order to reconstruct its image from few projections. The results of simulation experiment indicate that the modified MAP algorithm can reconstruct the image of steel tube section from at least three projections. The precision of acquired dimension parameters meets the requirement of national standard and the technology is expected to be widely used in practice.

Key words: steel tube inspection; CT imaging; scanning mode; few projections; reconstruction algorithm

在生产和使用过程中,对钢管的参数进行检测和控制是保证其质量并安全使用的重要环节。钢管的检测主要包括缺陷检测和尺寸检测两个方面。目前,缺陷检测技术已较为成熟,达到了在线实时检测的要求^[1];尺寸检测技术除壁厚检测外,还多停留在离线检测的水平上,检测速度慢,精度低,难以满足生产过程中在线快速检测和实时控制的需要。钢管尺寸的在线快速检测技术是目前亟待解决的课题。对钢管来说,其尺寸参数大都集中在截面上,因此,重建出截面图像便可得到其几乎所有尺寸参数,但CT图像的重建一般需要大量的投影数据,其采集和重建过程非常耗时,难以满足钢管在线快速检测的要求。为解决上述问题,本工作从减少投影数目以缩短检测时间的角度对钢管截面CT重建进行研究。

1 投影数据的采集和获取

CT装置的扫描方式直接影响投影数据的采集和获取时间,目前研发的CT装置多采用旋转扫描方式,投影数很多时的采集速度较慢,且一般多适用于对静止物体的扫描。考虑到在生产线上钢管是沿其纵向连续运动的,为保证获取的数据是钢管同一截面上的投影信息,采用射线源和探测器均静止的多源多探测器的扫描方式^[2]。该扫描方式利用每组射线源和探测器来获取被检物体截面的一组投影数据,多组射线源和探测器同时工作,便可获取其截面的若干组投影数据,图1为三源三探测器时的扫

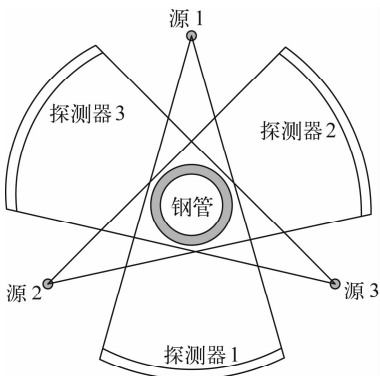


图1 多源多探测器扫描方式示意图

Fig. 1 Sketch of scan mode

with immobile ray sources and detectors

描方式示意图。多源多探测器的扫描方式不仅可保证获取运动钢管同一截面上的投影信息,且能做到数据的迅速采集,大幅减少了投影获取的时间。与钢管生产的速度相比,该数据采集过程很短,可认为是瞬时的,完全可满足钢管在线检测的需要。但多源多探测器的扫描方式要求源和探测器的数目不能太多,否则,将造成系统空间布置过度复杂,增加成本和维护费用,这就决定了该扫描方式只能获取钢管同一截面上的有限组投影数据。在少投影条件下重建出钢管截面图像是解决钢管在线尺寸检测的技术难点。

2 少投影钢管截面重建算法

CT图像重建算法包括解析类算法和迭代类算法。解析类算法直接利用投影数据反变换重建原始图像,可借助硬件完成,重建速度快,但要求投影数据必须完全且均匀分布;迭代类算法通过逐步迭代求最优的方法重建原始图像,与解析类算法相比,其最大的缺点是重建速度慢,但在少投影数据条件下的图像重建效果明显优于解析类算法^[3]。对于钢管截面图像重建,由于采用多源多探测器的扫描方式仅能获得有限组投影数据,对此,迭代类算法显然较为适宜。本工作采用的最大后验概率(maximum a posteriori, MAP)图像重建算法作为一种迭代类算法,既考虑了投影数据的统计特性,又充分利用了图像的先验知识分布,且多次迭代后仍可很好地抑制噪声,具有收敛速度快、重建图像质量高的优点,具有广阔的应用前景^[4]。

2.1 MAP 图像重建算法

MAP算法是一种贝叶斯重建算法,在重建图像上施加了一定的先验约束,即在重建过程中加入一项对图像平滑度(或图像边缘特性、像素非负性约束等)的估计,利用这些估计对图像中过度严重的噪声成分施加一定的约束,以抑制噪声、平滑图像或加强图像边缘等。

令向量 \mathbf{p} 和矩阵 $\boldsymbol{\lambda}$ 分别代表投影数据和真实图像,MAP重建算法采用的准则为在已知 \mathbf{p} 的条件下寻求 $\boldsymbol{\lambda}$,使后验概率 $P(\boldsymbol{\lambda} | \mathbf{p})$ 最大:

$$P(\boldsymbol{\lambda} | \mathbf{p}) = \frac{P(\mathbf{p} | \boldsymbol{\lambda})P(\boldsymbol{\lambda})}{P(\mathbf{p})} \quad (1)$$

其中, $P(\boldsymbol{\lambda})$ 为先验知识分布。

先验知识分布函数有多种,对于 Gibbs 先

验知识分布函数,有:

$$P(\lambda) = \frac{1}{Z} \exp(-\beta U(\lambda)) \quad (2)$$

其中: β 为 Gibbs 参数,它决定 Gibbs prior 对重建图像的影响程度; Z 为正则化常数; $U(\lambda)$ 为图像的能量函数。

Green^[5]运用泊松统计学,给出了如下的迭代公式:

$$\lambda_i^{k+1} = \frac{\lambda_i^k}{\sum_j c_{ij} + \beta \frac{\partial U(\lambda)}{\partial \lambda_i}} \sum_j \frac{c_{ij} p_j}{\sum_i c_{ij} \lambda_i^k} \quad (3)$$

其中: c_{ij} 为像素 i 发出的光子被投影单元 j 检测到的概率; p_j 为投影单元 j 的投影值。

2.2 修正 MAP 图像重建算法

直接利用 MAP 重建算法,可实现 20 组投影数据下的钢管截面图像重建。但对于多源多探测器的扫描方式,20 组源和探测器显然太多,空间布置十分复杂,且重建所需的时间也较长,难以满足钢管尺寸在线实时检测的需要。但钢管的截面具有一些自身的特点,充分利用这些先验知识,可大幅减少重建所需投影的数目,实现少投影下钢管截面的重建。

钢管作为一种标准件,其截面的各尺寸参数均有国家标准^[6]规定,所以,理想钢管的截面形状是一定的。实际钢管虽有所不同,但其截面也大致限定在一环形范围内,所以,在重建过程中,此范围以外的像素值可认为是零。这样,利用 MAP 算法重建钢管截面时,在每次迭代后可对重建像素值做如下修正:

$$\lambda_i^{k+1} = \begin{cases} 0 & \rho < r - \epsilon \text{ 或 } \rho > R + \epsilon \\ \lambda_i^{k+1} & r - \epsilon \leq \rho \leq R + \epsilon \end{cases} \quad (4)$$

其中: ρ 为像素点到截面中心的距离; r 和 R 分别为理想钢管的内、外径; ϵ 为一正数。

钢管截面除上述空间域的特点外,在像素域也具有显著特点。对于匀质钢管,其截面上各点的像素值是相等的常数,而截面外的像素值可认为是零,这样,整个截面即是一幅二值图像。在图像重建过程中,随着迭代次数的增加,图像像素值会越来越接近其真实值,所以,在钢管截面的重建过程中,截面上点的像素值会越来越接近该常数,其它点的像素值会趋近于零。为减少重建所需投影数据,在迭代时对像素值进行了二值化处理^[7]。根据钢管截面的特点,采用了两种二值化方法:直接法和逐渐逼近法。

直接二值化法是最基本也是最常用的二值化方法,在利用 MAP 算法重建钢管截面时,可对像素值做如下修正:

$$\lambda_i^{k+1} = \begin{cases} 0 & k \% k_0 = 0 \text{ 且 } \lambda_i^{k+1} < \lambda_0(k+1) \\ 1 & k \% k_0 = 0 \text{ 且 } \lambda_i^{k+1} \geq \lambda_0(k+1) \\ \lambda_i^{k+1} & k \% k_0 \neq 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中: $\%$ 表示取余运算; k_0 为一正整数,表示在重建时每迭代 k_0 次对像素值进行一次二值化; $\lambda_0(k+1)$ 是二值点,其值是迭代次数的函数,选取合适的二值点是直接二值化法的关键。

逐渐逼近法实质上是一种逐步二值化的过程,在利用 MAP 算法重建钢管截面时,每次迭代后对像素值做如下修正:

$$\lambda_i^{k+1} = \begin{cases} 0 & \lambda_i^{k+1} < \alpha(k+1) \\ 1 & \lambda_i^{k+1} \geq \beta(k+1) \\ \lambda_i^{k+1} & \alpha(k+1) \leq \lambda_i^{k+1} < \beta(k+1) \end{cases} \quad (6)$$

其中: $\alpha(k+1)$ 和 $\beta(k+1)$ 是二值点,其值是迭代次数的函数,一般取 $\alpha(k+1)$ 为增函数, $\beta(k+1)$ 为减函数,且要求 $\beta(k+1) \geq \alpha(k+1)$ 。

直接法和逐渐逼近法各有优缺点,直接法的二值点 $\lambda_0(k)$ 选取较为复杂,但重建所需迭代次数少,收敛快;逐渐逼近法的二值点 $\alpha(k)$ 和 $\beta(k)$ 选取较为简单,但一般需更多次迭代后才能得到钢管截面图像。

经修正后,利用 MAP 算法在少投影条件下重建出钢管截面的图像,对所得图像做最后二值化,获得钢管截面的二值图像,对其进行分析处理,便可得到钢管截面的各尺寸参数。

3 试验结果及分析

为检验钢管截面图像重建算法的效果,进行了模拟仿真试验。用图 2a 模拟标准钢管截面,其内外径分别为 $r=40$ mm 和 $R=50$ mm,壁厚 $S=10$ mm,像素值为 0.1。在 Petium4/2.79 微机上加 128×128 图像大小用 MAP 算法进行重建试验,得到 3 组投影条件下钢管截面的重建图像(图 2b),其中每组投影含 129 路探测器数据。可看出,在 3 组投影数据的条件下,直接利用 MAP 算法无法做到钢管截面的图像重建。

为得到三投影下钢管截面的重建图像,采用修正的 MAP 重建算法进行试验。无论是理

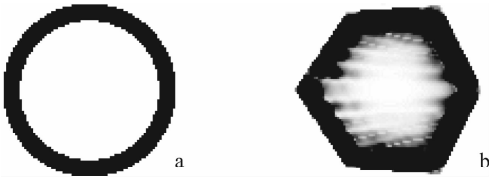


图2 理想钢管截面模型(a)与 MAP 算法重建图像(b)
Fig.2 Simulation model of ideal steel tube section (a) and reconstructed image with MAP (b)

想钢管还是实际钢管,其截面形状都近似于环形,因此,在重建时,可选取内外径分别为 $r-\Delta$ 和 $R+\Delta$ 的环形作为初始迭代图像,以加快算法的收敛速度。每次迭代后利用式(4)对重建图像的空间范围进行修正,取 $\epsilon=5\text{ mm}$ 。

迭代过程中用直接法对图像进行二值化处理时,关键是选取合适的二值点 $\lambda_0(k)$ 。在选取二值点时,一定要保证不能将截面图像上的像素点误判为零,因一旦造成这种误判就会导致该点最终重建的像素值为零,影响图像重建的精度。理想的二值点应略小于截面图像边缘上的最小像素值,但边缘最小像素值的选取较为复杂,为简化计算,在试验中取截面图像内外边缘上的最左、最右、最上、最下边这 8 个点像素值中的最小值作为图像边缘上的最小值。在三投影条件下重建时,每隔 $k_0=4$ 次迭代进行一次二值化,得到如图 3 所示的结果。二值点可取为:

$$\lambda_0(k) = \begin{cases} 0.045 + 0.00125k & \lambda_0(k) \leq 0.055 \\ 0.05 & \lambda_0(k) > 0.055 \end{cases} \quad (7)$$

迭代过程中用逐渐逼近法对图像进行二值化处理时,二值点 $\alpha(k)$ 和 $\beta(k)$ 的选取也很重要。但由于逐渐逼近法对图像的二值化过程是逐步逼近的,二值点的选取过程不如直接法的复杂。为加快算法的收敛速度,一般取 $\alpha(k)$ 为增函数, $\beta(k)$ 为减函数,且要求 $\beta(k) \geq \alpha(k)$ 。需注意的是,开始迭代时, $\alpha(k)$ 的值不能选得太大, $\beta(k)$ 的值不能选得太小,否则,将造成像素值的误判,影响最后图像重建精度。这里,二值点选为:

$$\begin{aligned} \alpha(k) &= 0.05k/K \\ \beta(k) &= 0.1 - (0.1 - 0.05)k/K \end{aligned} \quad (8)$$

其中: K 为总的迭代次数; 0.1 为钢管的像素

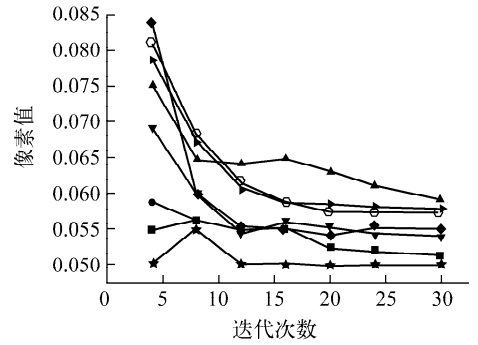


图3 钢管截面边缘最小值随迭代次数的变化
Fig.3 Variation of minimum pixel value of section edge with iterative times

- 外圆左边缘; ●——外圆右边缘; ▲——外圆上边缘;
- ▼——外圆内边缘; ◆——内圆左边缘; ◀——内圆右边缘;
- ▶——内圆上边缘; ○——内圆下边缘; ★——二值点

值;常数 0.05 的选取是为保证迭代过程中始终满足 $\beta(k) \geq \alpha(k)$,且最终 $\alpha(K) = \beta(K) = 0.05$ 。

利用修正的 MAP 算法重建钢管截面,得到如图 4 所示的图像,获得的钢管截面的尺寸参数列于表 1。

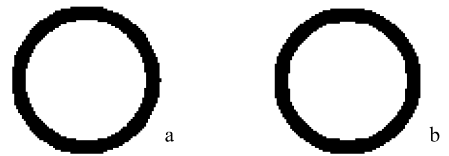


图4 修正 MAP 算法重建的钢管截面图像
(图像大小: 128×128)

Fig.4 Binary image of steel tube section reconstructed with modified MAP (image size: 128×128)

a——直接法;b——逐渐逼近法

表1 钢管截面尺寸参数 (图像大小: 128×128)
Table 1 Dimension parameters of steel tube section (image size: 128×128) mm

方法	r_{\max}	r_{\min}	r_{ave}	R_{\max}	R_{\min}	R_{ave}	S_{\max}	S_{\min}	S_{ave}
直接法	41.75	39.72	40.85	50.37	48.24	49.43	9.89	7.58	8.57
逐渐逼近法	41.22	39.72	40.37	50.67	48.59	49.54	10.49	8.19	9.15
模型	41.27	40.02	40.72	49.93	48.80	49.37	9.91	7.79	8.66

表 1 中, r 、 R 和 S 分别为钢管的内圆半径、外圆半径和壁厚,下角标 max、min 和 ave 分别表示最大值、最小值和平均值。由表 1 可看出,重建图像误差很大一部分来自于模型误差,其

产生原因在于模型虽是根据标准钢管而人为建立的,理论上不应存在任何误差,但实际过程是将整个图像区域划分为 $J = n \times n$ 有限个像素而在计算机上存储和显示,这种离散化的处理过程必然会引入一定的误差。由此可见,模型误差的大小取决于像素个数的多少,像素越多,模型误差越小。按 256×256 图像大小,用修正的 MAP 算法重建钢管截面,得到图 5 所示图像和表 2 所列截面尺寸参数,其中每组投影含 259 路探测器数据。

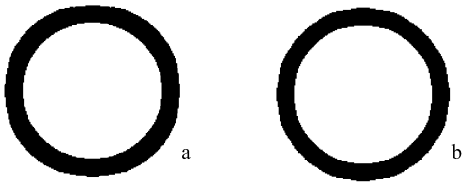


图 5 修正 MAP 算法重建的钢管截面图像
(图像大小: 256×256)

Fig. 5 Binary image of steel tube section reconstructed with modified MAP (image size: 256×256)

a——直接法; b——逐渐逼近法

表 2 钢管截面尺寸参数 (图像大小: 256×256)

方法	r_{\max}	r_{\min}	r_{ave}	R_{\max}	R_{\min}	R_{ave}	S_{\max}	S_{\min}	S_{ave}
直接法	41.04	39.98	40.46	50.72	49.29	49.99	10.16	8.85	9.54
逐渐逼近法	41.04	39.98	40.46	50.47	49.03	49.63	10.42	8.48	9.28
模型	41.62	40.03	40.26	49.98	49.40	49.72	9.91	8.86	9.45

可看出,增大图像可减小模型误差,进而减小重建图像的误差,但因像素点数目的增加,重建时间随之大幅增加(表 3)。所以,增加图像大小可提高精度,但同时又会耗费更多时间。对于直接法和逐渐逼近法,在相同迭代次数下,后者的耗时略小,但因前者的收敛速度较快,在迭代次数较少的情况下,前者的精度略高于后者。对于无缝钢管,国家标准^[6]规定其外径允许偏差可分为 D1~D4 4 个等级,其中,精度要求为 1.5%~0.5%;壁厚允许偏差可分为 S1~S5 5 个等级,最高精度要求为 5%。可见,用上述算法重建的钢管截面图像基本可满足上述精度要求。另外,国内无缝钢管的生产速度多为

10~30 m/min,从表 3 中钢管截面图像重建所需的时间可看出,间隔几米便可对钢管截面进行一次检测,基本满足了目前钢管在线生产和检测的要求。

表 3 钢管截面图像重建时间

Table 3 Reconstruction time of steel tube section image

方法	不同图像大小下的重建时间/s	
	128×128	256×256
直接法	3.484	15.250
逐渐逼近法	3.438	14.469

4 结论

本文采用射线源和探测器均静止的多源多探测器扫描方式,并根据钢管截面图像本身的特点,对 MAP 算法进行了修正,实现了仅 3 组投影数据条件下钢管截面图像的重建。模拟试验的结果表明,该算法在重建精度和检测时间上基本满足目前钢管在线检测的需要,具有一定的理论意义和工程应用价值。

参考文献:

- [1] 刘贵民. 无损检测技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [2] 叶云长. 计算机层析成像检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [3] 庄天戈. CT 原理与算法[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992.
- [4] NUYTS J, BAETE K, BEQUE D, et al. Comparison between MAP and postprocessed ML for image reconstruction in emission tomography when anatomical knowledge is available [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2005, 24(5): 667-675.
- [5] GREEN P J. Bayesian reconstruction from emission tomography data using a modified EM algorithm [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 1990, 9(1): 84-93.
- [6] 冶金工业信息标准研究院. GB/T 17395—1998 无缝钢管尺寸、外形、重量及允许偏差[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [7] SEZGIN M. Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation [J]. Journal of Electronic Imaging, 2004, 13(1): 146-165.