

基于对数解调的递变能量 CT 成像方法

陈平 韩焱 潘晋孝

CT imaging method with varying energy based on logarithm demodulation

Chen Ping Han Yan Pan Jin-Xiao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 138701 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.138701

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.138701>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I13>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种基于 Radon 逆变换的半覆盖螺旋锥束 CT 重建算法

A half-covered helical cone-beam reconstruction algorithm based on the Radon inversion transformation

物理学报.2015, 64(5): 058704 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.058704>

递变能量 X 射线高动态融合图像的灰度表征算法研究

Algorithm of high-dynamic fusion image gray characterization based on variable energy

物理学报.2014, 63(20): 208703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.208703>

基于稀疏优化的计算机断层成像图像不完全角度重建综述

Review of sparse optimization-based computed tomography image reconstruction from few-view projections

物理学报.2014, 63(20): 208702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.208702>

硬 X 射线微分相衬成像的噪声特性分析

Noise analysis of hard X-ray differential phasecontrast imaging

物理学报.2014, 63(16): 168702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.168702>

基于全变分最小化和快速一阶方法的低剂量 CT 有序子集图像重建

Ordered subset image reconstruction studied by means of total variation minimization and fast first-order method in low dose computed tomography

物理学报.2014, 63(13): 138701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.138701>

# 基于对数解调的递变能量CT成像方法\*

陈平† 韩焱 潘晋孝

(中北大学, 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 电子测试技术国家重点实验室, 信息探测与处理山西省重点实验室, 太原 030051)

(2015年1月5日收到; 2015年1月30日收到修改稿)

复杂结构件由于有效厚度差异大和成像系统动态范围受限, 单一能量下的投影数据信息不完整, 常用CT重建算法及不完全数据重建算法无法在数据缺失严重的情况, 有效实现复杂结构件的CT重建. 为此论文提出基于对数解调的递变能量CT成像方法. 该方法在分析直接高动态CT成像所存在问题的基础上, 提出利用对数变换压缩递变能量投影序列动态范围, 并利用现有的基于图像灰度一致性的融合方法, 计算融合加权系数, 再经常规重建算法实现复杂构件的CT成像. 论文并以某复杂仪表为对象, 进行实验, 相比传统的固定能量成像方式, CT信息完整, 质量高. 从而说明论文所提出的方法, 能够实现CT系统动态范围的扩展, 实现复杂结构件的高动态CT成像.

**关键词:** X射线能量, 高动态CT, 复杂结构件, 对数解调**PACS:** 87.59.-e, 81.70.Tx**DOI:** 10.7498/aps.64.138701

## 1 引言

CT技术, 特别是工业CT, 一直是发展高新技术产业、航空航天、国防装备等现代装备工业的重要基础装备<sup>[1]</sup>. 经过多年的发展, 我国CT技术研究从上世纪80年代起步, 90年代初仿研到90年代末自主设计研发, 已经成为能够自主研发的国家. 特别近十年, 我国科学家跟踪国际研究前沿, 我国的CT技术已处于国际先进水平行列. 但是现有的CT技术及系统受成像系统级动态范围的限制, 对于结构复杂、组分多元化的复杂异形工件, 往往达不到较好的成像质量. 例如, 航空发动机叶片、航天飞行器执行部件、飞行器制导执行机构、引信、大马力柴油机缸盖等. 此类复杂结构件在进行X射线检测时, 由于射线透射方向上等效厚度(相对于X射线的衰减能力)变化率较大, 探测器成像系统动态范围有限, 固定能量成像模式易出现过曝光和欠曝光的共存现象, 投影信息缺失严重, 从而影响CT

重建图像质量和检测灵敏度<sup>[2,3]</sup>.

目前的复杂异形工件三维CT, 主要通过算法, 利用投影数据弥补、有限角度CT重建、CT重建后处理等方法实现. 这些方法或许可以实现其CT重构, 但是由于信息缺失估计的合理性以及后处理方法的有效性, 常常会影响CT重建信息的正确性<sup>[4,5]</sup>. 而且结构越复杂, 单投影角度下有效厚度变化率更大, 单能量的投影信息缺失更严重, 数据弥补以及重建后处理方法均无法完成其CT重构. 因此针对现有低动态范围的成像系统, 研究高动态DR/CT成像技术, 对于实现复杂异形工件的检测具有重要的意义.

对于复杂异形工件的高动态成像问题, 中北大学提出了递变能量成像原理及方法, 现已实现了高动态DR成像<sup>[6,7]</sup>. 本文正是在此基础上, 进一步研究递变能量CT成像方法, 实现复杂工件的高动态CT成像. 对于递变能量CT成像属于多能CT研究方向. 但是现有的多能CT, 如美国

\* 国家自然科学基金(批准号: 61171179, 61227003, 61301259, 61471325)、山西省自然科学基金(批准号: 2015021099)、高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20121420110006)和山西省回国留学人员科研资助项目(批准号: 2013-083)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: pc0912@163.com

的 University of California, Irvine, Johns Hopkins University School of Medicine, 国内的清华大学、东北大学的单源双能CT, 美国GE公司研发的宝石CT<sup>[8-12]</sup>, 均是要求每个能量下投影信息完整, 通过能量减影成像方法, 增加获取的信息量, 提高CT重建图像精度. 然而, 对于有效厚度差异大的复杂异形工件, 由于单能量下投影信息不完整, 无法直接进行能量减影成像, 继而无法实现复杂结构件的CT成像.

针对上述问题, 论文提出研究基于对数解调的递变能量CT成像方法, 主要是在现有的低动态范

围的成像系统中, 利用递变能量成像、图像序列变换、融合及重建方法, 扩展现有系统的动态范围, 实现射线能量、检测对象和成像系统的优化匹配, 从而实现复杂异形工件的高动态CT成像.

## 2 复杂构件传统CT成像分析

图1为实际复杂结构件, 该结构件整体表现为复杂多孔、射线透照方向上有效厚度差异较大, 固定能量下同样无法获取其完整结构信息. 如图2所示投影角度 $90^\circ$ 下不同能量的射线图像序列.

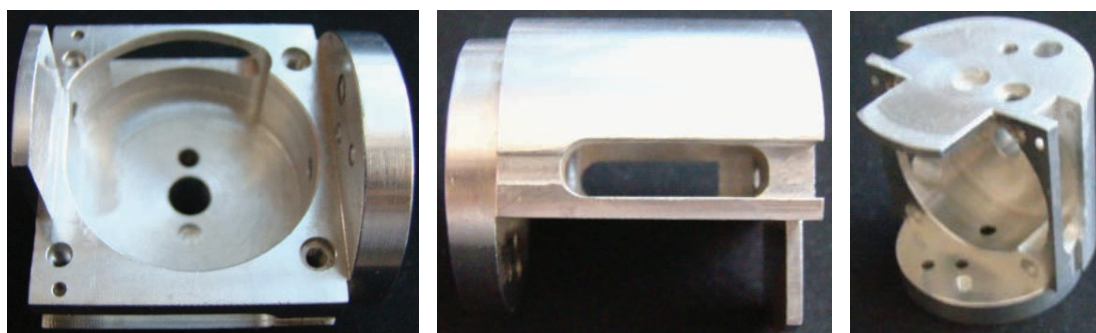


图1 (网刊彩色) 复杂结构件不同视角下的外形图

Fig. 1. (color online) Outline of complex structure with different angles.

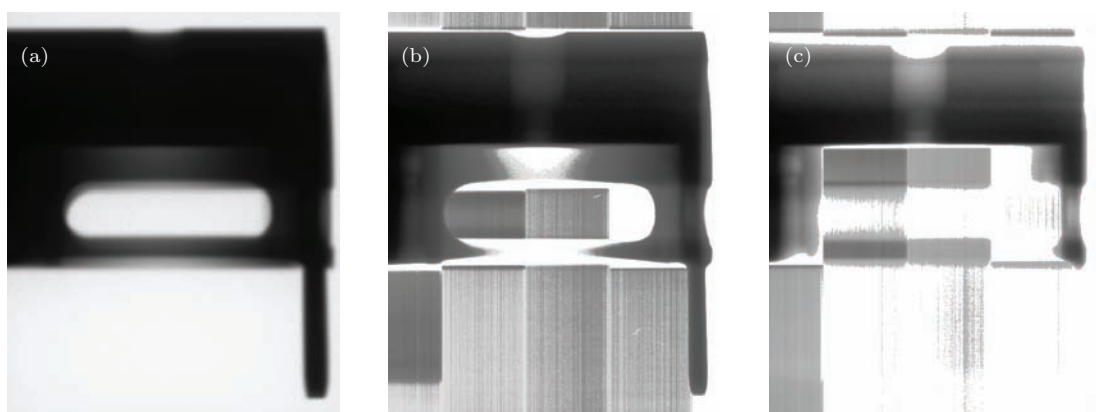


图2  $90^\circ$  下不同能量的射线图像序列 (a) 40 kV; (b) 80 kV; (c) 100 kV

Fig. 2. X-ray images at  $90^\circ$  with different energy: (a) 40 kV; (b) 80 kV; (c) 100 kV.

从图2中可以看出, 低能量下不能显示铝柱轴向上的横孔信息, 高能量下壁薄边缘区域已经由于透过光子强度超出探测器动态范围容限, 产生“饱和开花”现象, 无可利用信息. 在此基础上进行CT重建, 结果如图3所示.

图3中, 低能量下由于射线穿透能力不足, 只能重建工件的外形结构, 高能量下结构件的外形结

构信息丢失. 而结构件顶部CT, 随能量升高, 由表及里逐渐显示结构件内部信息, 最后内部孔洞信息清晰, 而外形边缘缺失严重. 对于该结构件中间镂空多孔部分, 由于有效厚度差异大, 任一能量都不能完整地得到结构件的外形或内部信息. 从而可说明传统固定能量模型的CT成像方法无法完整再现工件内部结构信息.

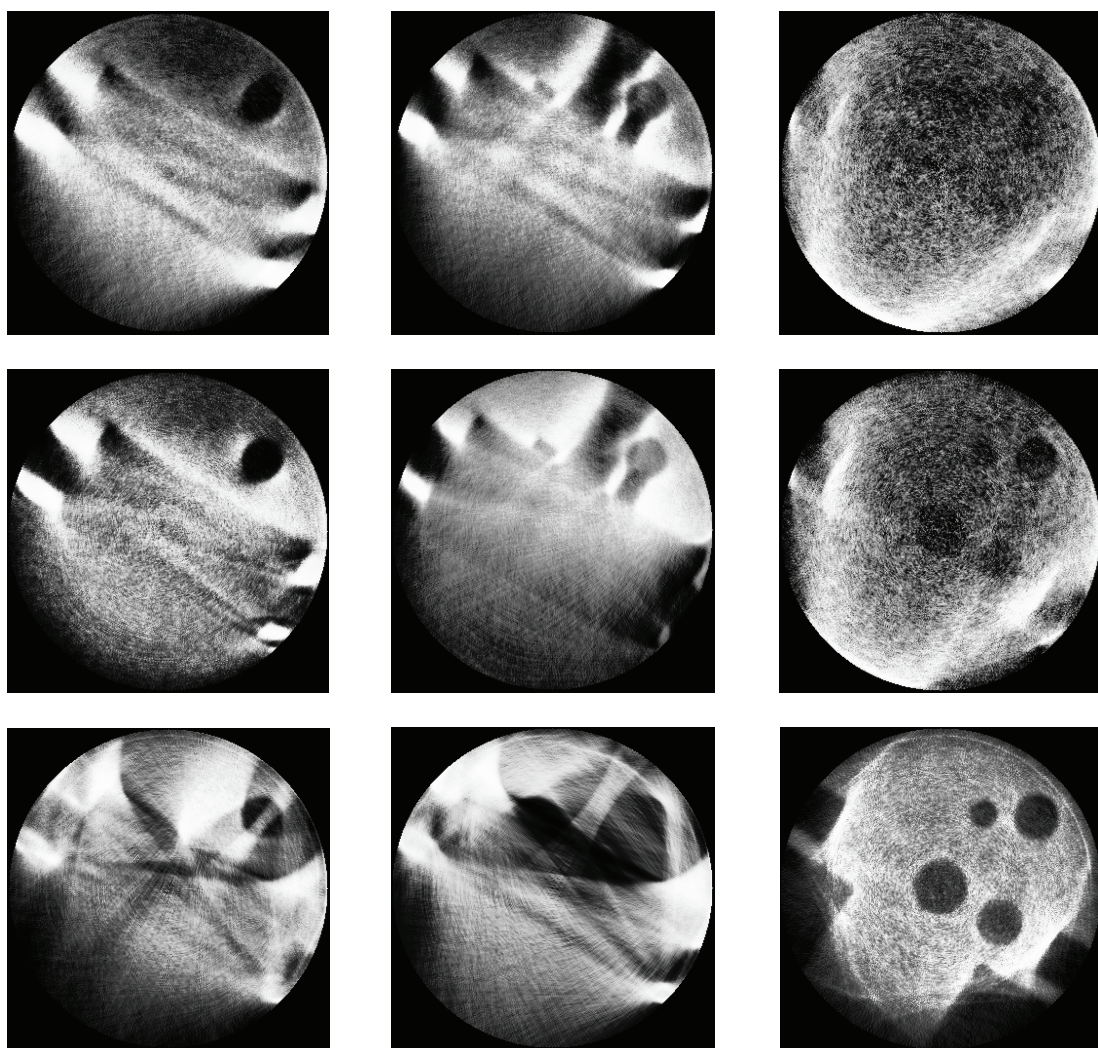


图3 复杂结构件固定能量模式的CT重建图, 从上到下分别代表低能量、适中能量以及高能量的CT重建图; 从左往右分别代表结构件底部、中部以及顶部结构的CT重建图

Fig. 3. CT images of complicated structure with fixed energy model. From top to bottom respectively represent low energy, moderate energy and high energy; from left to right respectively represent bottom, middle and top part of object.

### 3 基于对数解调融合的递变能量CT重建

递变能量成像所获取的是检测对象厚度由薄到厚的局部有效图像序列, 为了能够获取结构信息完整的投影图像, 需要经图像序列融合, 实现信息重组及动态范围扩展, 满足复杂异形工件正常成像的高动态范围需求. 对于递变能量投影序列融合主要是求解每个能量下低动态图像相对于高动态图像的加权因子. 具体公式如下:

$$X = \omega_1 X_1 + \omega_2 X_2 + \cdots + \omega_n X_n, \quad (1)$$

式中,  $X_i (i = 1, 2, \cdots, n)$  为递变能量投影序列, 所对应的射线能量是逐渐增加的,  $X$  为融合后的图像,  $\omega_i$  为加权因子. 在无动态范围约束的情况下, 保证检测对象能够全部成像, 其透射能量应设置为  $X_n$  所对应的能量, 确保最大有效厚度能够正常成像, 有效厚度越小, 灰度值越大. 如此按照 (1) 式, 由于  $X_n$  对应最大有效厚度, 则可以  $X_n$  为基底, 即  $\omega_n = 1$ , 序列  $X_1, X_2, \cdots, X_{n-1}$  分别对应不同的权系数  $\omega_i$ , 叠加到  $X_n$  中. 由于  $X_i$  随着  $i$  的减小, 所对应的有效厚度也逐渐减小, 但在无动态范围约束的成像系统中其所对应的灰度应越来越高, 所以权系数之间的关系为

$$\omega_1 > \omega_2 > \cdots > \omega_n = 1. \quad (2)$$

但是,按照(2)式的权系数进行融合时,递变能量图像序列中的噪声也通过权值进行放大.根据X射线的成像特性,低能量的射线图像由于剂量低,噪声水平较高,由此随着能量减小,噪声放大水平越来越大.由此得到的高动态投影数据噪声水平相对于固定能量模式显著提高,既而会影响CT重建质量.

针对该问题,减小灰度加权倍数及低能量射线图像加权系数成为有效降低高动态投影数据噪声的唯一有效方法.根据基于比尔定理的图像对数解调,投影在经对数解调后,可以缩小图像灰度动态范围,减小加权基值,降低噪声水平.如动态范围为4096:1的射线图像,在不发生光子饱和的临界情况下,经对数解调后,动态范围变为8.4:1,相应的噪声水平得到有效降低,另外随着动态范围的压缩,投影结构的细节信息愈显得明显.由此可以以递变能量射线图像序列的对数解调为数据源,进行数据融合,凸现投影细节信息,减小噪声放大水平.该融合过程可用下式描述:

$$p = v_1 p_1 + v_2 p_2 + \cdots + v_n p_n, \quad (3)$$

式中,  $p_i (i = 1, 2, \cdots, n)$  为递变能量投影序列  $X_i$  的对数解调,  $p$  为对数解调序列融合后的图像,  $v_i$  对数解调序列的灰度加权系数.对应于(1)式,递变能量图像序列融合主要是通过加权,将低能下的投影全部通过加权叠加到最高能量所对应的投影图像.同样,在(3)式中,以  $p_n$  为基底,  $p_1, p_2, \cdots, p_{n-1}$  分别以不同的权系数叠加到  $p_n$  中.

但是在对数解调过程,根据对数变换公式:

$$p = \ln \frac{X_0}{X}. \quad (4)$$

对于无动态范围约束的成像模式,背景灰度  $X_0$  是一定的,有效厚度越薄,图像灰度  $X$  越高,对数变换后,  $p$  越小.如此对于递变能量序列  $X_i (i = 1, 2, \cdots, n)$ , 所对应的有效厚度是逐渐增加,由此能量越小的对数解调需乘以越小的权值,才能满足(4)式中关于透照灰度  $X$  的递减特性.则

$$v_1 < v_2 < \cdots < v_n = 1. \quad (5)$$

对于(2)式中的权系数  $\omega_i$  的求解,论文作者提出了3种方法.如:基于灰度-电压-厚度模型、基于主成分分析、基于灰度一致性<sup>[13-15]</sup>.经实验分析,基于灰度一致性的融合方法,充分考虑递变能量图像序列间重叠区域的灰度一致性,其融合结果的物理表征性相对较好.

对数解调后,只是改变图像序列的灰度分布,而重叠区域未发生改变,如此仍可采用基于灰度一致性的递变能量图像序列融合方法求解对数解调融合的系数  $v_i$ .该方法是依据相邻图像间重叠区域灰度一致性的特性,构建优化目标函数,求解权系数.记相邻能量下对数变换图像  $p_i$  和  $p_{i+1}$  的有效区域的重叠部分为  $\Omega_i$ , 并定义  $p_i$  和  $p_{i+1}$  之间的距离为

$$d(p_i, p_{i+1}) = \sqrt{\sum_{j \in \Omega_i} (\nu_i x_{ij} - \nu_{i+1} x_{i+1,j})^2}. \quad (6)$$

可用  $d(p_i, p_{i+1})$  衡量  $p_i$  和  $p_{i+1}$  在  $\Omega_i$  内的灰度一致性,  $d(p_i, p_{i+1})$  越小,其一致性越高.即选择的  $v_i$  应使变换后各图像间的总距离最小,即图像在重叠区域内的灰度一致性最好.由此可得(7)式的目标优化模型:

$$\begin{aligned} & \min(\nu_1, \nu_2, \cdots, \nu_n) \\ &= \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j \in \Omega_i} (\nu_i x_{ij} - \nu_{i+1} x_{i+1,j})^2, \\ & \text{s.t. } 0 < \nu_i < \nu_{i+1} \leq 1. \end{aligned} \quad (7)$$

依据(5)式中权系数的递变关系,令  $\omega_n = 1$ , 再利用障碍罚函数法优化求解得  $\nu_1, \nu_2, \cdots, \nu_{n-1}$  值,并由(3)式获得融合图像.

融合后的投影即为结构完整的高动态投影数据.如此,利用传统的CT重建算法,如:FBP, FDK, ART等算法进行重建.

## 4 实验结果与分析

针对图1所示的工件,采用递变能量CT扫描成像,每个角度上,能量递变范围为:30—100 keV,递变间隔为10 keV,旋转360°,间隔1°.其中90°的部分投影序列如图2所示.对其利用基于图像灰度一致性的融合方法,计算融合系数如表1所示(以20°、110°及210°为例),结果如图4所示.

从融合结果来看,经递变能量成像,复杂工件的完整结构得以重现,对此利用常规的CT重建算法进行重建.

提取图4投影序列中的某一行,组成二维投影数据,利用FBP重建算法,进行CT重建.结果如图5所示.

表 1  $20^\circ$ ,  $110^\circ$  及  $210^\circ$  下的直接融合系数  
Table 1. Direct fusion coefficients of  $20^\circ$ ,  $110^\circ$  and  $210^\circ$ .

| 投影角度/ $^\circ$ | 30 keV | 40 keV | 50 keV | 60 keV | 70 keV | 80 keV | 90 keV | 100 keV |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| 20             | 7.42   | 5.95   | 4.62   | 3.08   | 2.35   | 1.58   | 1.12   | 1       |
| 110            | 7.54   | 6.08   | 4.71   | 3.13   | 2.40   | 1.63   | 1.13   | 1       |
| 210            | 7.31   | 5.88   | 4.59   | 3.05   | 2.33   | 1.54   | 1.15   | 1       |



图 4 复杂结构件  $20^\circ$ 、 $110^\circ$  及  $210^\circ$  高动态投影数据

Fig. 4. High dynamic projection data of complicated structure of  $20^\circ$ ,  $110^\circ$  and  $210^\circ$ .

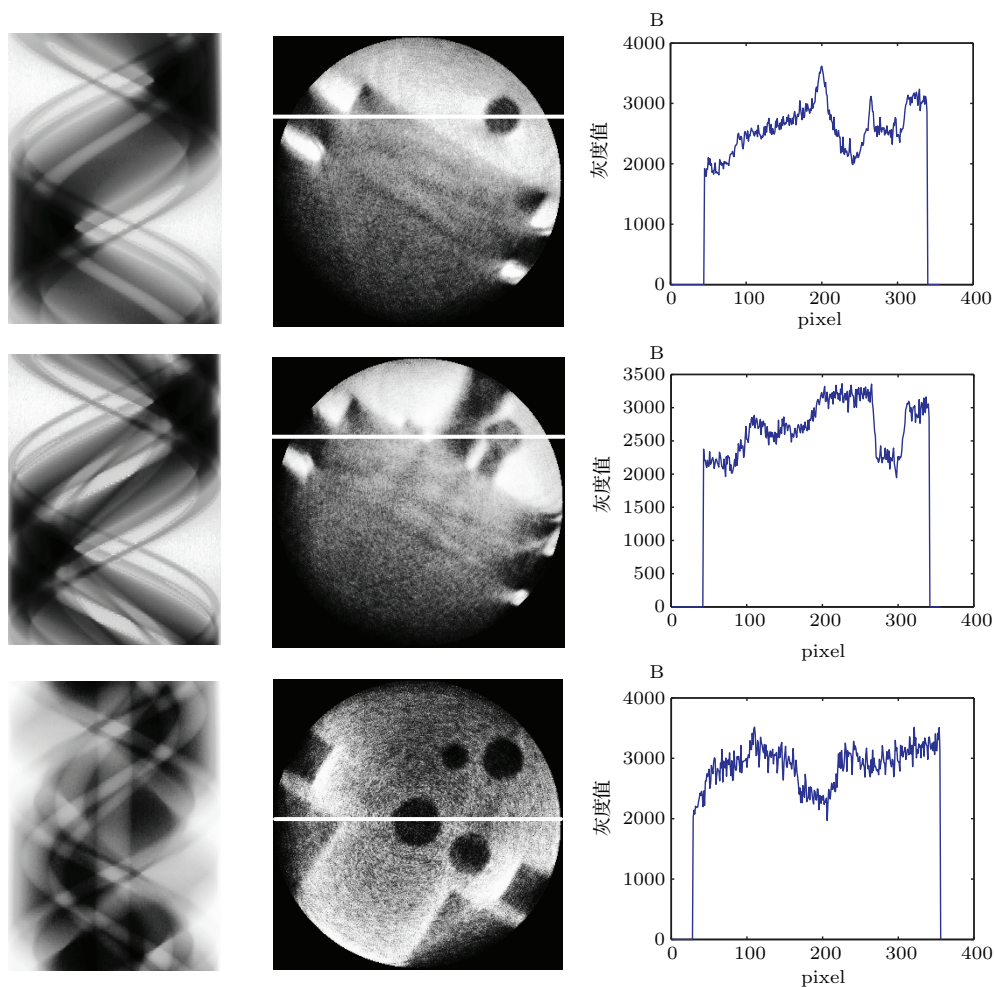


图 5 复杂结构件高动态 CT 重建图, 从左往右分别代表投影、CT 重建以及重建图中白线对应的灰度曲线图 (从上到下分别代表物体的底部、中部以及顶部信息)

Fig. 5. CT image by high dynamic projection. From left to right respectively represent the projection data, CT image and gray curve of CT reconstruction image at the white line in CT image; from top to bottom respectively represent the object's bottom, middle and top information.

从图5来看, 通过对融合后的高动态投影数据进行CT重建, 相对于常规固定能量模式(图3), 其重建效果有了一定的提高, 结构件外形和内部结构信息能在同一幅CT图中完整再现. 从而说明了变能量CT成像方法, 能够有效地克服检测对象的结构及成像系统动态范围约束, 实现复杂结构件

的CT成像. 但是从图中的重建质量, 图像存在较大噪声, 结构边缘信息不清晰, 不适宜工业CT检测. 进一步利用论文提出的基于负对数解调融合的变能量CT成像方法, 与表1对应的融合系数如表2所示. 按表2系数进行融合, 再进行重建, 结果如图6所示.

表2 20°, 45° 及 210° 下的直接融合系数  
Table 2. Direct fusion coefficients of 20°, 45° and 210°.

| 投影角度 | 30 keV | 40 keV | 50 keV | 60 keV | 70 keV | 80 keV | 90 keV | 100 keV |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| 20   | 0.20   | 0.39   | 0.48   | 0.54   | 0.68   | 0.78   | 0.81   | 1       |
| 110  | 0.22   | 0.41   | 0.48   | 0.56   | 0.70   | 0.79   | 0.82   | 1       |
| 210  | 0.23   | 0.38   | 0.46   | 0.52   | 0.68   | 0.79   | 0.79   | 1       |

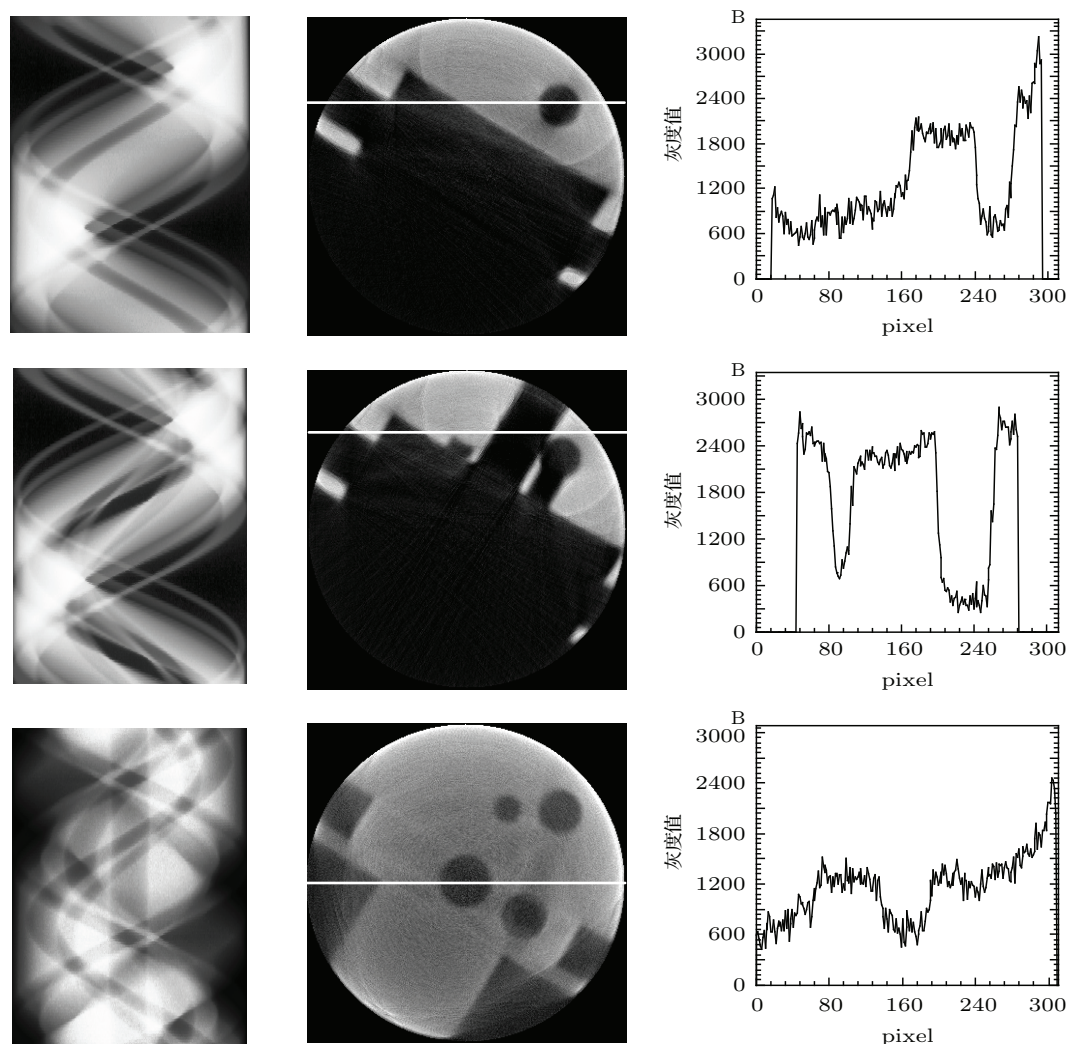


图6 对数解调融合后CT重建图像(从左往右分别代表投影、CT重建以及重建图中白线对应的灰度曲线;从上到下分别代表物体的底部、中部以及顶部信息)

Fig. 6. CT image of logarithm demodulation fusion. From left to right respectively represent the projection data, CT image and gray curve of CT reconstruction image at the white line in CT image; from top to bottom respectively represent the object's bottom, middle and top information.

从图6来看, 噪声得到了有效抑制, 结构件边缘及孔洞信息较清晰, 重建质量有了一定的提高. 从而说明, 经负对数解调的CT成像方法可通过压缩图像灰度范围, 凸显细节信息, 降低噪声水平, 提高CT重建质量. 但是其CT重建图像噪声水平仍然较高, 伪影较重. 如图6的结构件顶部CT图像, 孔洞结构之间存在弱联通区域伪影, 图像的“倒杯状”硬化伪影较严重. 这主要是变能量CT成像是基于融合递变能量投影序列获取高动态的投影数据, 其中包含了多种能量成分, 常规的CT重建算法将会由于单能假设和变能量投影数据多能性的不一致, 易产生如图6的硬化伪影. 为此有必要从变能量CT扫描的多能性出发, 继续研究变能量多能CT重建算法, 保证多能的一致性, 降低伪影, 提高CT重建质量.

## 5 结 论

本文基于前期的递变能量射线图像序列融合技术, 获取信息完整的高动态投影数据, 并利用常规的CT重建算法进行CT重建, 但是由于融合过程中投影数据噪声随加权系数而放大, 导致CT重建图像噪声水平高、质量差, 为此论文进一步提出了对数解调融合重建方法. 该方法通过对递变能量投影序列进行对数解调压缩射线图像灰度范围, 改变有效子集序列灰度恢复权值的获取方式, 以达到抑制噪声和凸显投影细节信息的目的. 最后通过对此实验分析, 改进的重建方法能够有效地提高CT重建质量, 实现复杂结构件的CT成像. 同时提出

对于论文重建结果存在的多能伪影, 有待进一步研究变能量多能CT重建方法, 进行解决.

## 参考文献

- [1] Kalender W A 2006 *Phy. Med. Biol.* **51** 29
- [2] Philipp K, Albert W 2010 *Measurement Science and Technology* **21** 045105
- [3] Wu J G 2009 *Equipment Manufacturing Technology* **2** 131 (in Chinese) [吴建国 2009 装备制造技术 **2** 131]
- [4] Zhang X D, Xia C J, Xiao X H, Wang Y J 2014 *Chin. Phys. B* **23** 044501
- [5] Wang L Y, Liu H K, Li L, Yan B 2014, *Acta Phys. Sin.* **63** 208702 (in Chinese) [王林元, 刘宏奎, 李磊, 闫斌 2014 物理学报 **63** 208702]
- [6] Chen P, Han Y, Pan J X 2012 *Spectroscopy and Spectral Analysis* **32** 2863 (in Chinese) [陈平, 韩焱, 潘晋孝 2012 光谱学与光谱分析 **32** 2863]
- [7] Chen P, Han Y, Pan J X 2013 *Spectroscopy and Spectral Analysis* **33** 383 (in Chinese) [陈平, 韩焱, 潘晋孝 2013 光谱学与光谱分析 **33** 2863]
- [8] Dilmanian F A, Wu X Y 1997 *Phys. Med. Biol.* **42** 371
- [9] Simeone M, Michele F 2007 *Proceeding of IEEE Nuclear Science Conference* Honolulu, HI, US Oct 27-Nov 3 1373
- [10] Wang J, Wang Q 2007 *Chinese Journal of Sensors and Actuators* **31** 1076 (in Chinese) [王进, 王骞 2007 传感技术学报 **31** 1076]
- [11] Li Q H, Wang X W 2008 *Nuclear Electronics & Detection Technology* **28** 821 (in Chinese) [李清华, 王学武 2008 核电子学与探测技术 **28** 821]
- [12] Zhang G W, Cheng J P, Zhang L 2008 *Journal of X-Ray Science and Technology* **16** 67
- [13] Chen P, Han Y, Pan J X 2013 *Optik* **124** 3265
- [14] Liu B, Han Y, Pan J X, Chen P 2014 *Journal of X-Ray Science and Technology* **22** 241
- [15] Chen P, Yin X G, Pan J X, Han Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 208703 (in Chinese) [陈平, 阴晓刚, 潘晋孝, 韩焱 2014 物理学报 **63** 208703]

# CT imaging method with varying energy based on logarithm demodulation\*

Chen Ping<sup>†</sup> Han Yan Pan Jin-Xiao

(National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Shanxi Key Laboratory of signal capturing & Processing, North University of China, Taiyuan 030051, China)

( Received 5 January 2015; revised manuscript received 30 January 2015 )

## Abstract

For complicated structural components with wider X-ray attenuation ranges, the projection information is short of single-energy computed tomography (CT) imaging because the attenuation thickness of the components along the orientation of X-ray penetration exceeds the limit of the dynamic range of the CT imaging system. Then under this circumstance, in the conventional imaging mode of fixed ray energy the phenomenon of overexposure and underexposure easily occurs. The whole structure information cannot be obtained, and the projection information is seriously lacking, hence it will affect the quality of CT reconstruction. This paper proposes a CT imaging method with varying energy based on logarithm demodulation.

For the incomplete projection due to the limited dynamic range, we collect images at various rotation angles, as in standard CT; also, at each angle we collect a series of images at different energies and fuse them into a single high dynamic range (HDR) image. Based on this HDR image, the conventional CT reconstruction methods can get the full construction information. However, the CT quality is poor, because of noise amplification in the fusion process of X-ray image sequences which are gathered during varying the X-ray energy. To solve this problem, this paper proposes to use logarithm transformation to reduce the dynamic range for the varying energy image sequences. This can change the weight coefficients' access in the projection sequences to suppress the noise. Also in the transformation sequences, we can also use the fusion method, which is based on image gray consistency, to compute the weighting coefficient, to obtain the HDR projection, because the logarithm transformation does not change the image structure, and the overlap area between image sequences is definite. Finally we use the conventional CT reconstruction algorithm to make the CT imaging with the complicated structural components.

An accompanying experiment with a complicated instrument demonstrates that the new method can extend the dynamic range of X-ray imaging system and provide a complete representation of the internal structure of the complicated structural components as compared with the conventional CT imaging method. So, it will be of important significance and may be applied to the potential system, so as to improve the detecting sensitivity of the system, and make the high-quality reconstruction about complex products.

**Keywords:** X-ray energy, high dynamic range CT, complicated structural components, logarithm demodulation

**PACS:** 87.59.-e, 81.70.Tx

**DOI:** 10.7498/aps.64.138701

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61171179, 61227003, 61301259, 61471325), the Science Foundation of Shanxi Province (Grant No. 2015021099), SRFDP (Grant No. 20121420110006), and the Shanxi Scholarship Council of China (Grant No. 2013-083).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [pc0912@163.com](mailto:pc0912@163.com)