

变能量 X 射线成像方法中权系数计算方法研究

赵 霞 刘 宾

中北大学 电子测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051

摘要 变能量 X 射线成像执行过程中通过多管电压参数的设置, 获取物体不同厚度范围的有效信息, 并经图像融合处理获取反映物体内部完整结构信息的图像。但是由于物质的衰减系数和荧光转换效率均存在较强的能谱相关性, 现有变能量成像方法中依据实验获取的管电压-厚度-器件响应曲线来确定子图加权系数的方法缺乏通用性, 特别是对于多种材料复合的情况。对多电压情况下对应透照图像灰度的变化规律及关联关系进行研究, 提出基于相邻管电压对应有效透照厚度重叠率约束的管电压递变步长控制方法; 并提出灰度比例直方图的概念, 实现子图加权系数的快速求解。多材质复合工件的变能量成像实验表明, 该方法克服了现有变能量成像算法通用性方面的缺点, 能够实现多材料复合情况下的有效子图融合。

关键词 成像系统; 变能量成像; 加权系数; 能谱; 灰度比例直方图

图分类号 TN957.52

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0711003

Study on Calculation Method of the Weighted Coefficient in X-ray Imaging Based on Variable Energy

Zhao Xia Liu Bin

*National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China,
Taiyuan, Shanxi 030051, China*

Abstract X-ray radiographic imaging technology with variable energies acquires useful information of the object under tests in different thickness ranges by setting changing voltage parameters of the tubes. Such information are fused to show the complete internal structure of the object. In practical, the method to determine weighted coefficient of sub graphs based on tube voltage-thickness-device response curves in existing X-ray radiographic imaging experiments is passing out of current use, especially for composite materials. The reason is that the attenuation coefficient of the material and the fluorescence conversion efficiency of phosphor transform screen of materials are related to each other in energy spectra. A method of controlling varying steps of the tube voltages based on relations between adjacent tube voltages and effective transillumination thickness is presented by studying the gray changing rule of transillumination images under different voltages. And then, the proportion histogram is proposed to calculate the weighted coefficient. X-ray imaging of composite objects with variable energies shows experimentally that the mentioned method can realize fusion of effective sub-graphs of composite objects. It overcomes shortcomings of the existing image processing algorithms in X-ray radiographic imaging technology with variable energies.

Key words imaging systems; imaging based on variable energy; weighted coefficient; energy spectrum, gray scale histogram

OCIS codes 110.7440; 340.7440; 100.3010

1 引 言

X 射线检测系统中, 射线出束统计能量随管电压增加而增加, 其对物体的有效透照厚度也随之增加。当物体有效厚度变化超出系统的透照宽容度时, 常规固定管电压参数透照情况下, 仅能够对一定厚度范围内

收稿日期: 2015-01-21; 收到修改稿日期: 2015-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(61171179, 61301259)、山西省自然科学基金(2012021011-2)

作者简介: 赵霞(1981—), 女, 硕士, 讲师, 主要从事无损检测等方面的研究。Email: zhaoxianuc@126.com

的信息进行有效获取^[1-2]。为了克服X射线数字成像系统在宽动态范围辐射场景信息获取方面的不足,提出了变能量X射线成像技术,即在透照过程中按照一定规律增加管电压,从而获取不同厚度区域对应的子图序列,进而融合子图序列获取能够反映工件内部结构信息的高动态范围X射线图像^[3-6]。同时,变能量成像过程中不同管电压设置对应的能谱分布形态存在一定的差异,从而透照图像序列中能够更好地反映物体材料的谱信息。

但是,X射线具有连续能谱特性,导致其在与物质作用过程中表现出衰减系数的不确定性,同时,目前常用的X射线间接测量系统中,透射X射线束作用到荧光材料,其可见光的量子效率也存在不确定性,导致物体随管电压变化过程中透照图像的灰度变化呈现较强的非线性,而且随着物体材料、系统设备、物理参数的变化表现出较大的差异。因此,利用实验数据统计获取管电压-透照厚度-图像灰度的函数表征,并且利用其对子图进行加权的方法不具有通用性,当系统参数和被检测工件材料发生改变时,上述关系函数需要通过实验重新获取^[7]。

因此,本文针对变能量成像过程中图像灰度的非线性规律进行分析,寻求一种能够对物体材质和系统参数不敏感的子图加权系数求解算法,克服现有变能量X射线成像技术在适用性方面的局限性。

2 管电压-透照厚度-图像灰度关系不确定性分析

X射线在穿透物体的过程中遵循比尔衰减定律^[8],若假设入射X射线为单色能谱,透射射线强度与入射强度的关系可以表示为

$$\ln \frac{I_0}{I} = \mu_m \rho d, \quad (1)$$

式中 I_0 为入射射线初始强度, I 为透射射线强度, μ_m 为物质对应单色能谱射线的质量衰减系数, ρ 为物质密度, d 为射线穿透物质过程中的路径长度。单色X射线具有固定的光子能量,即 μ_m 为固定值,因此(1)式中 $\ln \frac{I_0}{I}$ 与 d 呈良好的线性关系。

但是,由于射线管供电电压脉动特性、电子动能损失、靶面对电子阻止情况等方面的差异,造成电子动能转换的光能的成分不同,导致能谱分布呈现连续能谱特征。此时,必须考虑物质衰减系数的能谱相关性,则X射线穿透物质过程中的衰减可以表示为

$$I = \sum_j I_0(E_j) \exp[-\mu_m(E_j) \rho d], \quad (2)$$

式中 $I_0(E_j)$ 表示能量为 E_j 光子的初始统计强度, $\mu_m(E_j)$ 表示物质对于能量为 E_j 光子的质量衰减系数。

在X射线穿透物质的过程中,物质对不同能量X光子的衰减程度不同,导致 $\ln \frac{I_0}{I}$ 与 d 不再表现出简单的线性比例关系。同时考虑透射X射线经荧光材料进行光谱转换过程,闪烁晶体材料转换效率也具有较强的能谱相关性^[9],因此X射线成像系统中管电压-厚度-灰度的关系无法用确定的表达式来进行表征。

3 变能量成像加权系数确定方法的局限性分析

X射线成像检测系统受探测器动态范围、物理条件、工件厚度范围等因素的约束,固定某一管电压参数对物体进行透照时,物体厚度超出透照宽容度上限值的部分无法有效穿透,而厚度小于宽容度下限值的部分会出现过曝光,无法获取物体完整的内部信息^[10]。上述现象暴露出X射线数字成像系统在检测大动态范围辐射场景信息时的不足。变能量成像技术能够有效解决上述问题,即在透照物体过程中按照一定准则连续变更管电压参数,从而获取不同厚度区域对应的子图序列,进而通过图像融合的方法实现最终高动态范围数字图像的合成。其基本原理如图1所示。

图1中,变能量成像过程中设置连续变化的管电压参数为 $U1、U2、U3、U4(U1>U2>U3>U4)$,该管电压序列能够有效透照的厚度范围为 \overline{AH} 。设置灰度通带对子图中对应的灰度区域进行提取,并根据灰度-电压-厚度关系函数求解子图对应的加权系数并进行融合,最终获取包含 \overline{AH} 厚度区域内完整信息的高动态范围图像。在子图融合过程中,子图权系数的设置是影响融合图像质量和真实性的关键因素,该系数的依

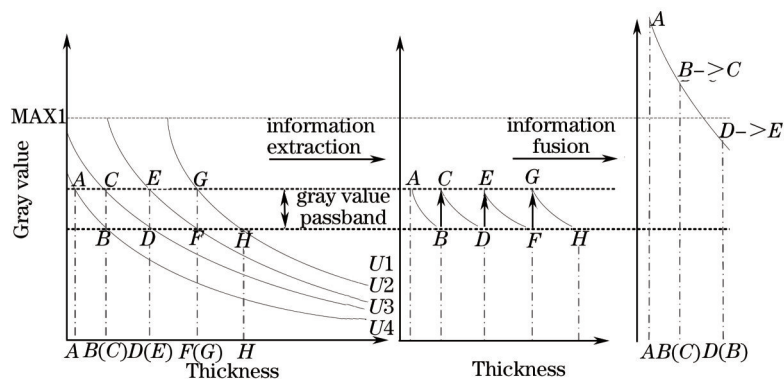


图1 管电压对应子图序列的融合原理示意图。(a) 灰度-电压-厚度关系曲线; (b) 子图有效信息提取; (c) 子图信息融合

Fig.1 Fusion principle of sub-graph sequence corresponding to tube voltage.(a) Gray-voltage-thickness curve;

(b) extraction of effective information of sub-graphs;(c) information fusion of sub-graphs

据是灰度-电压-厚度关系函数。但是由于X射线的连续能谱特性导致其在穿透物质和荧光转换过程中存在较大的不确定性,因此灰度-电压-厚度关系函数必须在确定物理参数和材料的情况下通过实验获取,当系统物理参数和物体材料等参数变化时,需要重新实验,并且当物体为非单一材料时,将大大增加试块制作的难度。因此,必须克服上述物理参数和材料特性造成的约束,研究具有通用性的子图权系数计算方法,使得变能量成像方法具有强适用性。

4 相邻管电压对应点灰度关系分析

由上述分析可知,在X射线成像检测系统中,影响图像灰度的因素包括系统物理参数、曝光参数、物质材料、厚度参数等,多种因素的影响导致利用一通用函数表征灰度-管电压-厚度关系存在很大难度。变能量成像是管电压递变过程下的子图序列融合成像,而子图序列融合过程可以认为是一定厚度范围内的区域在管电压序列中最高电压曝光情况下的灰度估计过程。考虑整个变能量成像过程,本文摒弃灰度-管电压-厚度的复杂关系的研究,而是将整个厚度范围进行分段,并且在合理设置管电压递变步长的情况下,相邻管电压覆盖的厚度区域内所有点在相邻管电压曝光情况下的灰度呈现较好的线性比例关系^[11-12]。因此,重点研究相邻管电压对应有效透照区域内各点在不同管电压下灰度的线性度。设计实验对厚度在0~30 mm范围内变化的钢质楔形块进行曝光检测,实验中固定管电流为1.5 mA,管电压为70~245 kV,步长为1 kV,通过管电压递增可以获取不同管电压下厚度-灰度曲线簇。为方便显示,仅取管电压为70~225 kV之间,步长为5 kV的灰度曲线进行绘制,如图2所示。

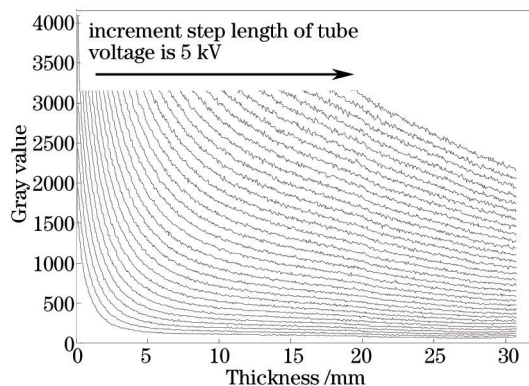


图2 递增管电压对应的厚度-灰度曲线簇

Fig.2 Thickness-gray curves corresponding to increasing tube voltages

从图中可以看出,在一定的管电压设置情况下,图像灰度随厚度呈现类指数规律衰减,随着管电压的递变,该曲线表现出不同的弯曲程度,即当物体厚度区域固定时相邻管电压对应子图灰度间的比例关系随管电压取值和管电压递变步长而不同。因此,基于递变管电压获取的厚度-灰度数据,针对不同管电压取值区域分析管电压递变步长设置对相邻管电压覆盖有效厚度区域内的灰度比例关系的影响。在此过程中将有

效信息对应灰度范围设置为 1200~3000, 考查相邻管电压下灰度增益, 即在厚度重叠区域内各点在相邻管电压下的灰度比值, 结果如表 1 所示。

表 1 不同管电压设置区间和递变步长情况下重叠区域各点对应灰度比值

Table 1 Gray level ratios of all points in the overlap areas under different tube voltage setting ranges and varying steps

Setting range of tube voltage /kV	Interval of tube voltage /kV	Average of the ratio	Relative error /%(max)	Repeat points
72~87	2	1.3	2	147
	5	1.8	5	147
	10	2.6	11	89
	15	-	-	0
97~147	5	1.5	2	1415
	10	1.8	3	1403
	20	2.3	5	1378
	30	2.8	8	1349
	40	3.1	11	1317
	50	3.8	15	1280
147~197	5	1.2	1	1412
	10	1.4	1	1397
	20	1.6	2	1361
	30	2.0	3	1319
	40	2.3	3	1266
	50	2.6	4	1202
192~242	5	1.1	1	1319
	10	1.2	1	1297
	20	1.3	1	1237
	30	1.4	1	1124
	40	1.6	2	1072
	50	1.7	2	958

由表 1 可以看出, 在管电压设置区间偏低时, 有效灰度取值对应物体中厚度较小区域, 管电压递变步长取值较小时, 相邻管电压对应有效透照区域存在较小的重叠区域, 而且随着递变间隔的增加对应点灰度比值的一致性偏差变大, 甚至出现无重叠区域的现象。相反, 在管电压设置区间较高时, 即使在管电压递变步长偏大的情况下, 也能够保证有一定的厚度重叠, 而且对应点灰度比值的一致性较好。因此, 只要设置相邻管电压对应有效透照厚度的重叠率, 便可以有效约束管电压递变步长, 从而保证该区域的相邻管电压对应灰度比值具有较好的一致性。在此种情况下, 可以认为相邻管电压对应有效透照区域灰度比值满足线性比例关系。

5 基于灰度比例直方图的权系数求解算法

为方便分析相邻管电压对应灰度之间的比例关系并求解比例系数, 提出灰度比例直方图的概念, 如图 3 所示, 图中横轴为曝光电压为 U_i 时的灰度取值, 纵轴为曝光电压为 U_{i+1} 电压时的灰度值, 图中任一点 r_{mn} 的坐标为图像中某一点在 U_i 和 U_{i+1} 管电压透照时的灰度值, 图中某点的数值表示相邻管电压下曝光图像灰度符合特定比例的像素数目。

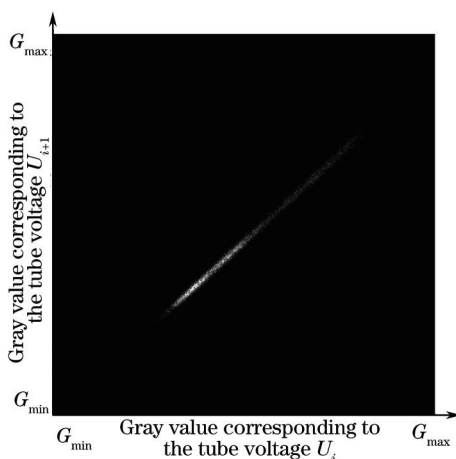


图 3 灰度比例直方图

Fig.3 Gray scale histogram

可以看出,当管电压递变步长设置合理时,灰度比例直方图分布接近线性比例关系,此时拟合直线并求其斜率即可以获得子图的加权系数。为求解此灰度比例系数,认为相邻管电压对应的图像灰度满足变换 f ,设管电压 U_i 对应透照图像为 $X_i=(x_{i1},x_{i2},\dots,x_{in})$,按照设置的有效灰度区间提取的子图为 $V_i=(v_{i1},v_{i2},\dots,v_{in})$,则 v_{ij} 满足

$$v_{ij} = \begin{cases} x_{ij}, j \in P_i \\ 0, j \notin P_i \end{cases}, \quad (3)$$

式中 P_i 表示图像 x_i 中有效像素位置集合,将相邻电压下有效像素位置集合的交集记为 $R, R=P_i \cap P_{i+1}$,借助 x_i 与 x_{i+1} 的 R 中像素灰度的关系求取 U_i 与 U_{i+1} 对应子图灰度的比例关系,表示为

$$x_{(i+1)r} = f(x_{ir}) = a_i x_{ir} + b_i, j \in P_i, \quad (4)$$

式中 a_i 是相邻管电压对应透照子图的灰度比例系数, b_i 是拟合直线段在 y 轴的截距,以数据点到所求直线的距离平方最小为准则对参数 a_i 和 b_i 进行求解,即满足:

$$\min \sum_{r \in R} \frac{[a_i x_{ir} + b_i - x_{(i+1)r}]^2}{1 + a_i^2}. \quad (5)$$

对(5)式关于 a_i 和 b_i 求偏导,得:

$$\begin{cases} \frac{\partial \left[\sum_{r \in R} \frac{a_i x_{ir} + b_i - x_{(i+1)r}}{1 + a_i^2} \right]}{\partial a_i} \\ = \sum_{r \in R} \left\{ 2x_{ir} [a_i x_{ir} + b_i - x_{(i+1)r}] (1 + a_i^2)^{-1} + 2[a_i x_{ir} + b_i - x_{(i+1)r}] (-1)(1 + a_i^2)^{-2} a_i \right\} \\ \frac{\partial \left[\sum_{r \in R} \frac{a_i x_{ir} + b_i - x_{(i+1)r}}{1 + a_i^2} \right]}{\partial b_i} \\ = \sum_{r \in R} 2[a_i x_{ir} + b_i - x_{(i+1)r}] (1 + a_i^2)^{-1} \end{cases}, \quad (6)$$

化简(6)式并令其等于0,得:

$$\begin{cases} \sum_{r \in R} [x_{ir} + a_i x_{(i+1)r} - a_i b_i] [a_i x_{ir} + b_i - x_{(i+1)r}] = 0 \\ \sum_{r \in R} [a_i x_{ir} + b_i - x_{(i+1)r}] = 0 \end{cases}, \quad (7)$$

对(7)式进行化简,得:

$$\begin{cases} \sum_{r \in R} [x_{ir} + a_i x_{(i+1)r}] [a_i x_{ir} + b_i - x_{(i+1)r}] = 0 \\ b_i = \frac{1}{N_R} \left[\sum_{r \in R} x_{(i+1)r} - a_i \sum_{r \in R} x_{ir} \right] \end{cases}, \quad (8)$$

式中 N_R 表示 R 中元素数量,记

$$\begin{aligned} X' &= \sum_{r \in R} x_{ir} \\ Y' &= \sum_{r \in R} x_{(i+1)r} \end{aligned}. \quad (9)$$

由(8)式和(9)式可以得

$$a_i^2 \left\{ \left[\sum_{r \in R} x_{ir} x_{(i+1)r} \right] - \frac{1}{N_R} X' Y' \right\} + a_i \left\{ \frac{1}{N_R} (Y')^2 - \frac{1}{N_R} (X')^2 - \left[\sum_{r \in R} x_{(i+1)r}^2 \right] + \left(\sum_{r \in R} x_{ir}^2 \right) \right\} + \left\{ \frac{1}{N_R} X' Y' - \left[\sum_{r \in R} x_{ir} x_{(i+1)r} \right] \right\} = 0. \quad (10)$$

由(10)式可以解出两个 a_i 值,并且两个数值代表的直线方向相互垂直,在变能量成像过程中, x_i 与 x_{i+1} 的灰度变换关系 f 呈单调递增特性,因此,选取大于零的结果作为最终求解的 a_i 的数值,将 a_i 带入(8)式,便可得 b_i ,通常 b_i 值很小,可以忽略。

6 实验及结果分析

设计实验对具有多种材质的工件分别进行常规固定管电压透照成像和变能量扫描成像并对其成像结

果进行对比。实验用工件拆解图如图4所示,该工件由尼龙、钢、塑料3种材料组成,这3种材料的密度和原子序数具有很大的差异。实验系统射线源为GE公司的ISOVOLT-450,实验过程中固定管电流为2 mA,管电压为40~450 kV可调。探测器为Varian公司的paxscan-2520平板成像器件,动态范围为60 dB。

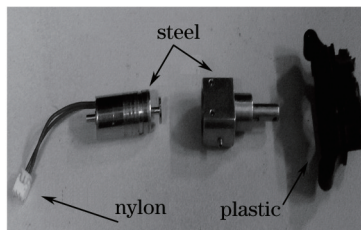


图4 工件拆解图

Fig.4 Diagram of workpiece

将工件进行组装,并设置不同的管电压进行曝光,获取图像如图5所示。

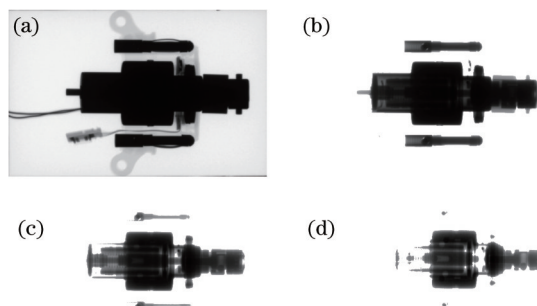


图5 不同管电压设置时的透照图像。(a) 管电压为50 kV时的透照图像;(b) 管电压为90 kV时的透照图像;
(c) 管电压为120 kV时的透照图像;(d) 管电压为140 kV时的透照图像

Fig.5 Images acquired under different tube voltage settings. (a) Image acquired at tube voltage of 50 kV; (b) image acquired at tube voltage of 90 kV; (c) image acquired at tube voltage of 120 kV; (d) image acquired at tube voltage of 140 kV

由于组成物体的3种材料对X射线衰减程度不同,在管电压设置较低时,工件中的塑料和尼龙材料部位能够有效成像,但是钢质材料部位无可用信息,如图5(a)所示。当设置更高的管电压参数,塑料和尼龙材料对应的部位信息被完全淹没,钢质材料对应部位信息开始显现,但是中心部位较厚的区域仍然没有有效穿透,如图5(b)所示。继续提高管电压,钢质部位较厚的区域中的信息开始显现,但是其较薄的区域开始出现饱和,如图5(c)、图5(d)所示。

若采用管电压-厚度-灰度关系对变能量扫描成像过程中子图的权系数进行求解,需要设计标准试块进行透照实验,但是该工件由3种材料组成,并且在结构上不同材料存在一定的交叠,因此试块制作非常困难。鉴于上述问题,采用本文设计的子图权系数求解算法获取子图加权系数,并进行融合获取最终高动态范围图像。

表2 管电压递变序列及子图加权系数取值

Table 2 Gradient sequences of tube voltages and weighted coefficient values of subgraphs

Parameter	Value								
Gradient sequence of tube voltage /kV	50	55	59	64	67	70	75	79	82
Weight coefficient	1.39	1.36	1.36	1.33	1.32	1.30	1.26	1.25	1.25
Gradient sequence of tube voltage /kV	85	89	92	96	100	103	106	109	114
Weight coefficient	1.24	1.23	1.22	1.20	1.19	1.18	1.15	1.13	1.11
Gradient sequence of tube voltage /kV	119	126	133	140	-	-	-	-	-
Weight coefficient	1.09	1.07	1.07	1.06	-	-	-	-	-

实验中设定有效信息对应灰度范围为1000~3000,相邻管电压对应有效透照厚度的重叠率设置为85%~90%,从而对不同管电压取值区域的递变步长进行约束。递变管电压序列及对应子图的加权系数数值如表2所示。按照表2获取的权系数对获取的子图序列进行加权融合,得到最终融合结果如图6所示。

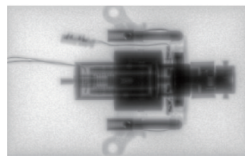


图6 融合结果图像

Fig.6 Fusion image

可以看出,按照本文方法对工件进行变能量成像,并通过相邻管电压对应有效透照厚度重叠率约束管电压递变步长,获取子图序列加权系数后融合图像能够完整地反应内部结构信息

7 结 论

针对变能量成像过程中子图加权系数求解方法和管电压递变步长控制的问题,研究递变管电压情况下透照图像灰度的变化规律及关联关系,得出相邻管电压对应有效透照区域具有一定重叠率的情况下,其对应子图灰度之间比值满足较好的线性比例。在此基础上,将整个透照区间的非线性转换为分段区间上的线性比例关系,并且提出基于灰度比例直方图方法的权系数求解算法。多材质复合工件的变能量成像实验表明,该方法能够有效克服现有变能量成像算法在通用性方面的局限性,能够实现多种材质工件复合情况下的变能量成像。

参 考 文 献

- 1 Yang Ying, Mou Xuanqin, Zhang Min, *et al.*. A technique for extending dynamic range of medical X-ray image[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(12): 1468-1470.
杨莹,牟轩沁,张敏,等.一种医学X射线图像动态范围扩展方法[J].西安交通大学学报,2008,42(12):1468-1470.
- 2 Yang Pei, Dong Qiuying, Yang Min. Bi-energy DR image fusion based on wavelet transform[J]. Nondestructive Testing, 2008, 30(7): 430-433.
杨霏,董秋影,杨民.基于小波变换的双能DR图像融合[J].无损检测,2008,30(7):430-433.
- 3 Chen Ping, Han Yan, Pan Jinxiao. Multi-voltage image stack reconstruction in X-ray digital imaging[J]. Optik, 2013, 124(18): 3265-3268.
- 4 Zhang Huitao, Zhang Peng. X-ray spectrum estimation method from scanning data of computed tomography phantoms[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1134001.
张慧滔,张朋.基于计算层析成像扫描数据的X射线能谱估计方法[J].光学学报,2013,33(11):1134001.
- 5 Philipp Kramer, Albert Weckenmann. Multi-energy image stack fusion in computed tomography[J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(4): 1-7.
- 6 Niu Suyun, Pan Jinxiao, Chen Ping. Multi-spectrum computed tomography imaging method based on energy spectrum filtering separation[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1034001.
牛素莹,潘晋孝,陈平.基于能谱滤波分离的多谱计算机层析成像方法[J].光学学报,2014,34(10):1034001.
- 7 Bin Liu, Yan Han, Jinxiao Pan, *et al.*. Multi-energy image sequence fusion based on variable energy X-ray imaging[J]. Journal of X-Ray Science and Technology, 2014, 22(2): 241-251.
- 8 Chen Mincong, Li Hongmei, Chen Ziyu, *et al.*. An examination of mass thickness measurements with X-ray sources[J]. Appl Radiat Isot, 2008, 66(10): 1387-1391.
- 9 Jiang Xiaoguo, Wang Wei, Wang Wanli. Conversion efficiency of the CsI:Tl crystal excited by X-ray[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2005, 17(2): 203-205.
江孝国,王伟,王婉丽.X光作用下CsI:Tl晶体的转换效率研究[J].强激光与粒子束,2005,17(2):203-205.
- 10 Sun Yi, Zhu Peiping, Yu Jian, *et al.*. Absorption, refraction and extinction contrast computerized tomography of X-ray diffraction enhanced imaging method[J]. Acta Optica Sinica, 2007(04): 749-753.
孙怡,朱佩平,于健,等.X射线衍射增强成像中吸收、折射以及散射衬度的计算层析[J].光学学报,2007(04):749-753.
- 11 Ron Pincu. Digital Radiography and its advantages in field NDT inspections Today[C]. 17th World Conference on Nondestructive Testing, 2008: 25-28.
- 12 Qi Juncheng, Ren Yuqi, Du Guohao, *et al.*. Multiple contrast micro-computed tomography system based on X-ray grating imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1034001.
戚俊成,任玉琦,杜国浩,等.基于X射线光栅成像的多衬度显微计算层析系统[J].光学学报,2013,33(10):1034001.

栏目编辑:张雁