

文章编号: 1671-7449(2024)05-0481-06

# 变电压CT成像中角度间扫描电压预测方法研究

魏交统

(中北大学 信息与通信工程学院, 山西 太原 030051)

**摘要:** 复杂结构件在CT成像时, 不同投影角度等效厚度差异较大, 需要匹配不同透照电压。因此, 投影扫描中需要进行变电压成像, 这需要对角度间的透照电压进行预测。对此, 提出了一种适用于变电压CT成像的角度间扫描电压预测方法。利用负指数函数描述等效衰减系数与电压的关系, 代入基于等效衰减系数表示的不同电压下X射线透过率关系式中, 得到不同透过率对应电压之间的经验公式。在角度间电压预测中, 不断更新公式中参数。对铝楔形块实验, 与文献方法相比, 所有测试点电压预测的最大相对误差由6.24%下降到3.91%。对铝模体进行了变电压扫描CT成像实验, 验证了预测方法的可行性。实验结果表明, 提出的电压预测方法可用于变电压CT成像中的角度间扫描电压预测。

**关键词:** X射线成像; 变电压; CT成像; 透过率; 扫描电压预测

**中图分类号:** TP391

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1671-7449.2024071

**引用格式:** 魏交统. 变电压CT成像中角度间扫描电压预测方法研究[J]. 测试技术学报, 2024, 38(5): 481-486.

WEI Jiaotong. Research on the prediction method of inter-angle scanning voltage in variable voltage CT imaging [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2024, 38(5): 481-486.

## Research on the Prediction Method of Inter-Angle Scanning Voltage in Variable Voltage CT Imaging

WEI Jiaotong

(School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** For CT imaging of a complex structural part, the equivalent thicknesses of different projection angles have large differences. So matched voltages are different for different projection angles. Variable voltage scanning is essential in the CT imaging of complex structural parts. A method for predicting scanning voltages at different angles was proposed for variable voltage CT imaging. The negative exponential function was used to describe the change of the equivalent attenuation coefficient with the imaging voltage. It is substituted into the function relationship of X-ray transmission rates of different voltages represented by equivalent attenuation coefficients. The empirical function relationship of different voltages with corresponding X-ray transmission rates was derived. The parameters were constantly updated for the function relationship with projection angle change in scanning voltage prediction. In the experiment of aluminum wedge block, compared with a method of literature, the max relative error of predicted voltage with the proposed method for all test points was decreased from 6.24% to 3.91%. The experiment of variable voltage CT imaging of aluminum phantom showed the effectiveness of the proposed method for scanning voltage prediction. From the experiments, the proposed method for scanning voltage prediction is suitable

**收稿日期:** 2024-07-29

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(62201520, 62122070, 62301508, U23A20285); 国家重点研发计划课题(2023YFE0205800); 山西省自然科学基金资助项目(202203021222052, 202303021222096, 202303021222095)

**作者简介:** 魏交统(1990-), 男, 讲师, 博士, 主要从事图像重建与处理研究。E-mail: 20170006@nuc.edu.cn.

for the scanning voltage prediction of different angles in variable voltage CT imaging.

**Key words:** X-ray imaging; variable voltage; CT imaging; transmission; scanning voltage prediction

## 0 引言

CT成像技术广泛应用于工业检测中。利用不同角度下X射线投影图像,CT技术可以重建出成像对象的内部结构。管电压是X射线投影成像中的重要参数,影响着投影图像质量,进而影响CT成像质量<sup>[1]</sup>。管电压高,穿透能力强,但对比度下降<sup>[2]</sup>,管电压低,对比度高,但可能穿不透检测对象。在检测中,存在一些复杂结构零部件,不同角度下等效厚度具有明显差异,导致其不同角度下所匹配的透照电压不同。对此,出现了变电压CT成像技术<sup>[3]</sup>。

变电压CT成像中电压预测与控制问题的研究,依赖于X射线成像灰度、衰减系数等物理量与电压之间关系的研究。黄冬琴等<sup>[4]</sup>研究了X射线在钢板中的衰减规律,实验表明穿透厚度不变时,平均线衰减系数随管电压增加不断减小,但减小速率逐渐降低。郭文明等<sup>[5]</sup>给出了X射线成像灰度与电压、电流、透照厚度等的关系式,实验表明,灰度实际值与理论值误差不超过10%。孙朝明等<sup>[6]</sup>研究了钢的等效射线衰减系数的测量方法,并在实验中给出了钢的等效衰减系数随电压的变化关系图。胡景东等<sup>[7]</sup>研究了透照厚度与灰度的关系,给出了衰减系数与电压、透照厚度的关系式。这些研究主要是其它物理量随电压的变化关系,且难以得到电压关于其它物理量的解析式,以直接用于对成像中透照电压的预测。在透照电压预测方面,陈平等<sup>[8-9]</sup>建立了变能量X射线成像中图像灰度与电压的幂指数函数关系,并给出了最佳成像的管电压预测模型。进一步利用X射线强度与电压的关系,给出了变电压CT成像中,角度间扫描电压的预测方法<sup>[10]</sup>。针对变电压CT成像中角度间扫描电压预测问题,本文利用负指数函数近似等效衰减系数与电压的关系,提出了一种基于透过率与电压关系预测电压的方法,相比于已有方法,预测值更准确。

## 1 扫描电压预测方法

由Beer定律,X射线在穿过单材质物体时的强度衰减表达式为

$$I = I_0 e^{-\mu(E)d}, \quad (1)$$

式中: $I_0$ 为X射线初始强度; $I$ 为衰减后强度; $d$ 为穿过材质的厚度; $\mu(E)$ 为X射线能量为 $E$ 时材质的衰减系数。常规CT成像中,X射线管产生的是多能射线,设透照电压 $U$ 对应的归一化X射线能谱是 $S(E)$ ,则有<sup>[11]</sup>

$$\frac{I}{I_0} = \int_0^{E_{\max}} S(E) e^{-\mu(E)d} dE, \quad (2)$$

式中: $E_{\max}$ 为电压 $U$ 下X射线最大能量; $I/I_0$ 为X射线透过率,记为 $t$ 。对式(2),存在一个能量 $E_0(0 < E_0 < E_{\max})$ 使得

$$\frac{I}{I_0} = \int_0^{E_{\max}} S(E) e^{-\mu(E)d} dE = e^{-\mu(E_0)d}, \quad (3)$$

式中:能量 $E_0$ 为电压 $U$ 下X射线穿过物体厚度 $d$ 时的等效能量; $\mu(E_0)$ 为对应的等效衰减系数。由式(3),

$$\mu(E_0) = \frac{\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)}{d} = -\frac{\ln\left(\int_0^{E_{\max}} S(E) e^{-\mu(E)d} dE\right)}{d}. \quad (4)$$

即 $\mu(E_0)$ 由 $S(E)$ 、穿过路径的材料及厚度共同决定。

假设在两个不同电压 $U_1$ 和 $U_2$ 下,X射线初始强度分别为 $I_{01}$ 和 $I_{02}$ ,衰减后强度分别为 $I_1$ 和 $I_2$ ,则有

$$I_1 = I_{01} e^{-\mu(E_1)d}, \quad (5)$$

$$I_2 = I_{02} e^{-\mu(E_2)d}, \quad (6)$$

式中: $E_1$ 和 $E_2$ 分别为电压 $U_1$ 和 $U_2$ 下X射线穿过物体厚度 $d$ 时的等效能量。由式(5)和(6)可得<sup>[12]</sup>

$$\frac{I_2}{I_{02}} = \left(\frac{I_1}{I_{01}}\right)^{\frac{\mu(E_2)}{\mu(E_1)}}. \quad (7)$$

将电压 $U_1$ 和 $U_2$ 下的X射线透过率分别记为 $t_2$ 和 $t_1$ ,则上式变为

$$t_2 = t_1^{\left(\frac{\mu(E_2)}{\mu(E_1)}\right)}. \quad (8)$$

由文献[4,6-7]中实验数据,等效衰减系数随电压升高而减小,且减小速率降低。因此,此处利用负指数函数描述这一关系,即

$$\mu(E_0) = \alpha e^{-\beta U}, \quad (9)$$

式中: $\alpha$ 和 $\beta$ 为未知常数。将电压 $U_1$ 和 $U_2$ 下对应的式(9)代入式(8)可得

$$U_2 = U_1 + \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{\ln(t_1)}{\ln(t_2)}\right). \quad (10)$$

根据式(10),由两个不同电压值及对应的透过率,可求得 $\beta$ 值。因此,在投影数据采集过程

中,可以利用已采集投影数据及对应电压计算出 $\beta$ 值,进而可以根据需要的 $t$ 值,计算出电压值。

式(9)和式(10)是在式(5)和式(6)的基础上得到的,两能量的等效衰减系数是同一成像路径下得到的,即式(9)和式(10)是X射线穿过路径材质和厚度不变的前提下得出的。由于等效衰减系数还受到X射线穿过材质厚度 $d$ 的影响,导致 $\beta$ 值也会受到材质厚度 $d$ 的影响。因此,近似经验式(10),在实际应用中,为提高精度,可以随着角度的变化不断地更新调整 $\beta$ 值。

变电压CT成像中角度间电压预测调节策略如下:

1) 设置期望最低透过率 $t$ ,设置最小电压间隔 $\Delta U$ ;

2) 测试确定起始角度采集电压:

① 起始角度下,采集电压 $U$ 和 $U'=U+\Delta U$ 下两幅X射线图像,计算各自最低透过率;

② 按式(10)计算 $\beta$ 值,然后预测在期望最低透过率 $t$ 时对应的电压 $U'_1$ ;

③ 取 $U_1=[U'_1/\Delta U+0.5]\Delta U$ , $[\cdot]$ 表示取整,采集电压 $U_1$ 下X射线图像;

3) 依据第 $n-1$ 个角度的电压 $U_{n-1}$ 和第 $n-1$ 个角度图像的最低透过率 $t_{n-1}$ 及当前 $\beta$ 值,按式(10)计算第 $n$ 个角度下需要的电压 $U'_n$ ;

4) 对 $U'_n$ 修正,取 $U_n=[U'_n/\Delta U+0.5]\Delta U$ 作为第 $n$ 个角度X射线图像的采集电压,采集图像,如果 $U_n \neq U_{n-1}$ ,对第 $n$ 个角度X射线图像每个像素按照 $I/I_0$ 计算透过率,比较第 $n$ 个角度下图像所有像素的透过率,可得最低透过率 $t_n$ ,将 $t_{n-1}$ , $t_n$ 和 $U_{n-1}$ , $U_n$ 分别作为式(10)中的 $t_1$ , $t_2$ 和 $U_1$ , $U_2$ 代入式(10),计算 $\beta$ 值,对 $\beta$ 值更新,否则,若 $U_n=U_{n-1}$ ,保持 $\beta$ 值不变;

5) 重复3)~4)直到最后一个角度下投影采集完毕。

文中提出的方法只是一种投影采集电压预测方法,不改变其它条件,需要注意投影计算过程中各角度X射线图像需要除以各自电压下的X射线初始强度值 $I_0$ ,对于利用投影进行图像重建的过程没有任何改变。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 铝楔形块实验

对3D打印铝楔形块成像,验证式(10)精度。实物如图1所示,规格如示意图2所示,厚度为

10 mm。

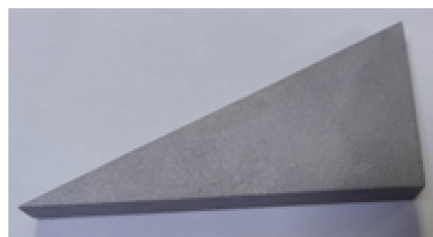


图1 3D打印铝楔形块

Fig.1 Aluminium wedge of 3D printed

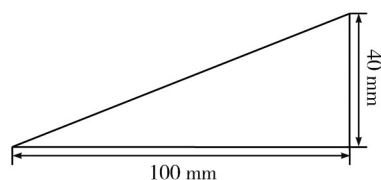


图2 铝楔形块尺寸示意图

Fig.2 Dimensional diagram of aluminium wedge

采用实验室的YXLON的FF20微焦点CT系统,选用微焦点成像模式,探元大小为 $0.127\text{ mm} \times 0.127\text{ mm}$ 。选择60~180 kV,每隔10 kV采集一幅图像,对应电流分别为100, 90, 80, 70, 60, 60, 50, 50, 45, 40, 40, 40, 35  $\mu\text{A}$ 。部分X射线图像如图3所示,各图像中间行(图3(a)蓝色线标识位置)的X射线透过率如图4所示。

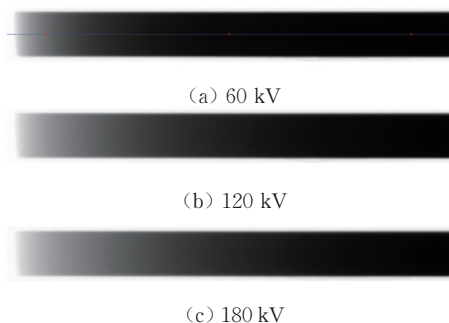


图3 不同电压X射线图像

Fig.3 X-ray images of different voltages

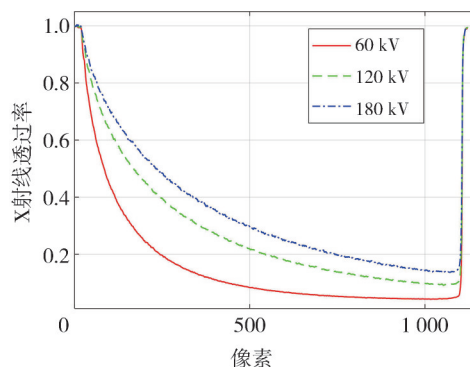


图4 不同电压下图像中间行X射线透过率

Fig.4 X-ray transmissivity of middle row of images with different voltages

选择图像中间一行等间隔的3个点,如图3(a)红色点所示,利用其对应数据进行验证。从左到右,点编号为1,2,3。对每个点,利用前2个电压计算 $\beta$ 值,然后根据其在第3个电压下 $t$ 值,代入式(10)得出预测电压值。将预测值与真实电压比较,得到预测电压的相对误差。对比方法为文献[10]中依据灰度预测电压的方法。

利用本文方法和文献方法的电压预测结果如图5所示,对应相对误差如图6所示。

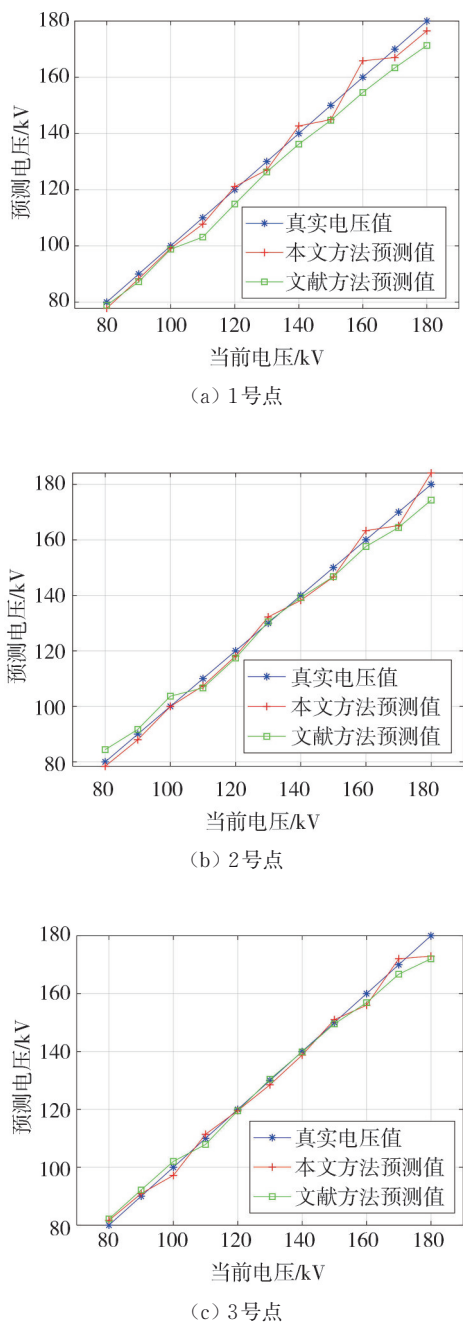


图5 不同点位置电压预测值  
Fig. 5 Predicted voltages of different locations

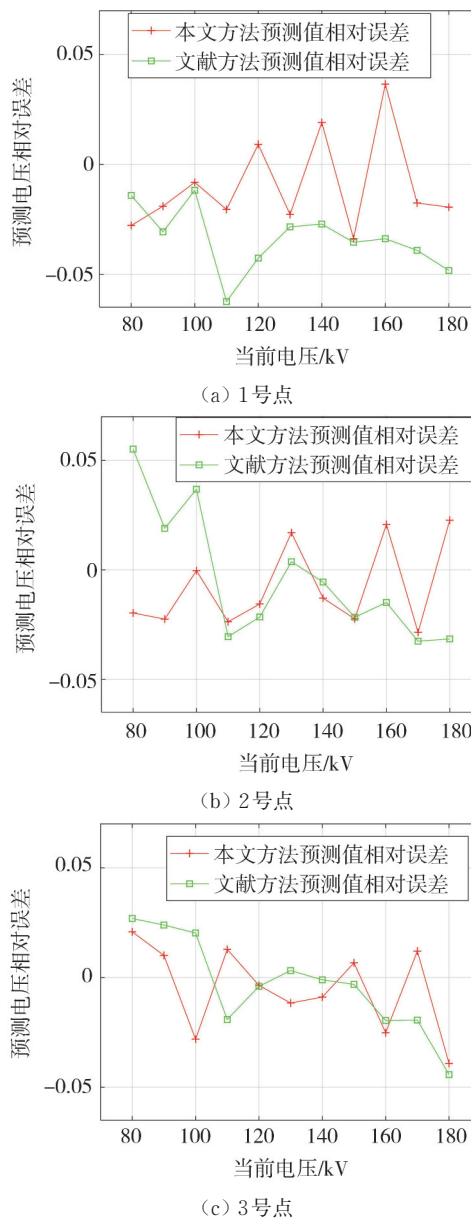


图6 不同点位置电压预测值相对误差  
Fig. 6 Relative errors of predicted voltages of different locations

表1列出了各点数据中文献方法和本文方法预测的相对误差绝对值的最大值,表2列出了各点数据中文献方法和本文方法预测的相对误差绝对值的平均值。从中可看到,对于3个测试点,文献方法预测电压的相对误差绝对值的最大值为6.24%,平均值最大为3.40%,本文方法中,相应值为3.91%和2.12%。相比较于文献方法,本文电压预测方法精度更高。

表1 相对误差绝对值的最大值

点编号	相对误差绝对值的最大值		
	1	2	3
文献方法/%	6.24	5.52	4.42
本文方法/%	3.66	2.85	3.91

表 2 相对误差绝对值的平均值

Tab. 2 The mean value of absolute value of relative error

序号点	相对误差绝对值的平均值		
	1	2	3
文献方法/%	3.40	2.48	1.68
本文方法/%	2.12	1.87	1.63

### 2.2 铝模体变电压扫描 CT 成像实验

对 3D 打印铝模体成像, 实物如图 7 所示, 直径为 20 mm, 厚度为 5 mm。

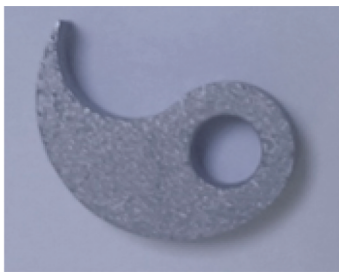


图 7 3D 打印铝模体

Fig. 7 Aluminium sample of 3D printed

实验用 CT 系统与前述实验相同。作为对比, 实验中对 70, 80, 90, 100, 110 和 120 kV 共 6 个不同电压, 对应电流分别为 100, 85, 70, 55, 45, 和 35  $\mu\text{A}$ , 采集每个电压下 360 个角度的投影数据。利用透过率的定义式  $I/I_0$  计算各投影像素点的透过率, 比较可得各电压下各角度投影的 X 射线最低透过率。各角度下最低透过率如图 8 所示。

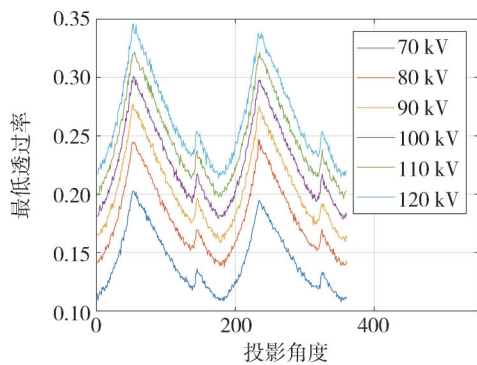


图 8 各角度下 X 射线最低透过率

Fig. 8 Minimum X-ray transmissivity of different angles with different voltages

期望最低透过率选择为 0.2, 利用式(10)进行预测电压采集。第一个角度初始采集电压设为 80 kV 和 90 kV。变电压采集各角度下最低透过率如图 9 所示, 各角度的采集电压如图 10 所示。重建图像如图 11 所示。

从图 9 中可看到, 本文预测电压方法可以将不同角度间 X 射线投影图像的最低透过率控制在期望

值 0.2 附近, 其范围约为  $[0.173, 0.227]$ , 达到了电压预测的目的, 验证了本文电压预测方法的有效性。

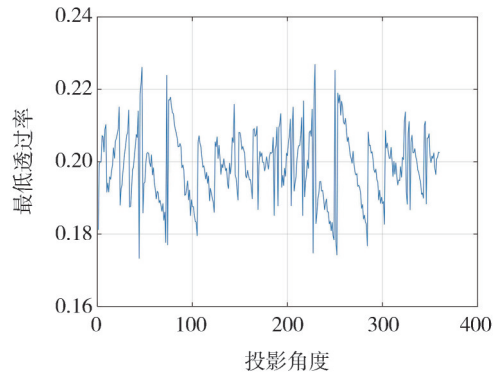


图 9 预测电压采集下各角度投影最低 X 射线透过率

Fig. 9 Minimum X-ray transmissivity of different angles with predicted scan voltages

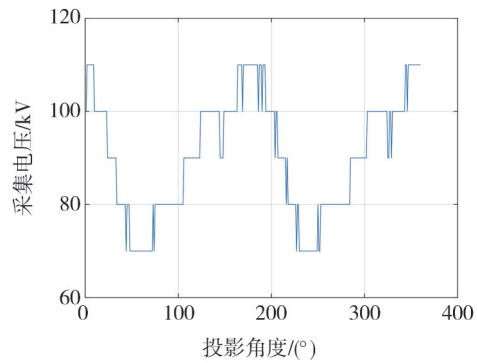


图 10 预测电压采集下各角度投影扫描电压

Fig. 10 Scan voltages of different angles with predicted strategy

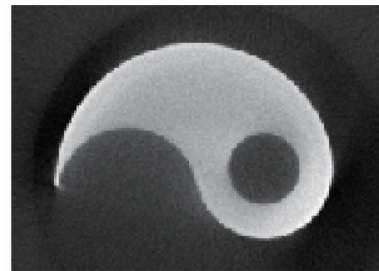


图 11 变电压投影重建图像

Fig. 11 Reconstruction image of projections with variable voltages

### 3 结 论

针对复杂结构件变电压 CT 成像中投影角度间的采集电压预测问题, 提出了一种基于 X 射线透过率与电压关系的预测方法, 其中将等效衰减系数近似描述为电压的负指数函数。实验结果表明, 提出方法表现出更高的预测精度, 显示了方法的有效性。该方法适用于复杂结构件变电压 CT 成像中的电压控制, 相比于多个不同固定电压下全角度投影采集策略, 或对各角度投影先采集再评价后调整的电压

控制策略,可以提高成像效率。但对于结构特别复杂,以至于单个角度下等效厚度差异过大,使得单个电压无法对零件整体正常成像情形<sup>[13]</sup>,当前方法不适用。如文献[13]中零件,一个投影角度下也需要多次变电压成像,然后融合才能获得对应的X射线图像。对于这种情形,需要在此基础上,结合单个角度下投影的变电压采集策略,形成整体的变电压投影采集控制策略。

### 参考文献:

- [1] LI Y, ZHAO X, HAN Y, et al. Improving CT quality for complex objects with the novel autoexposure imaging of stepped voltage scanning[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 4500910.
- [2] 陈乐, 强天鹏, 盛佩军, 等. 管电压对射线数字成像检测成像质量的影响[J]. 无损检测, 2020, 42(2): 12-16.  
CHEN Le, QIANG Tianpeng, SHENG Peijun, et al. Influence of X-ray voltage on image quality of digital radiography[J]. Nondestructive Testing, 2020, 42(2): 12-16. (in Chinese)
- [3] 陈平, 魏交统, 赵晓杰, 等. 能量自适应的X射线DR/CT成像综述: 谨以此文向我国CT成像领域的开创者之一邱佩璋先生致敬[J]. 中国体视学与图像分析, 2022, 27(4): 465-472.  
CHEN Ping, WEI Jiaotong, ZHAO Xiaojie, et al. Review of X-ray DR/CT imaging with energy self-adaptation[J]. Chinese Journal of Stereology and Image Analysis, 2022, 27(4): 465-472. (in Chinese)
- [4] 黄冬琴, 邬冠华, 敖波. X射线在钢板中的衰减规律试验研究[J]. 无损探伤, 2010, 34(2): 31-34.  
HUANG Dongqin, WU Guanhua, AO Bo. Experimental study on attenuation law of X-ray in steel plate[J]. Nondestructive Testing Technology, 2010, 34(2): 31-34. (in Chinese)
- [5] 郭文明, 陈宇亮. X射线图像灰度值与透照厚度的定量关系[J]. 无损检测, 2016, 38(2): 14-17.  
GUO Wenming, CHEN Yuliang. Quantitative relationship between gray value of X-ray image and radiographic thickness[J]. Nondestructive Testing, 2016, 38(2): 14-17. (in Chinese)
- [6] 孙朝明, 盛友萍, 葛继强, 等. 钢的等效射线衰减系数的实验分析[J]. 核技术, 2019, 42(11): 18-24.  
SUN Zhaoming, SHENG Youping, GE Jiqiang, et al. Experimental analysis on equivalent attenuation coefficients of steel[J]. Nuclear Techniques, 2019, 42(11): 18-24. (in Chinese)
- [7] 胡景东, 梁丽红, 刘雪梅, 等. 射线数字成像透照厚度与灰度模型研究[J]. 光学学报, 2021, 41(10): 230-235.  
HU Jingdong, LIANG Lihong, LIU Xuemei, et al. Research on penetrated thickness and gray model of radiographic digital imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(10): 230-235. (in Chinese)
- [8] 陈平. 递变能量最佳成像管电压的幂指数预测模型研究[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(11): 3757-3760.  
CHEN Ping. Optimum tube potential prediction of power exponent model on variable energy imaging[J]. Computer Measurement & Control, 2014, 22(11): 3757-3760. (in Chinese)
- [9] 毕葵, 陈平, 韩焱. 递变能量成像中最佳X射线管电压预测算法[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(3): 820-824.  
BI Yan, CHEN Ping, HAN Yan. The prediction algorithm of the optimal X-ray tube voltage in variable energy imaging[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(3): 820-824. (in Chinese)
- [10] CHEN P, YANG S, HAN Y, et al. High-dynamic-range X-ray CT imaging method based on energy self-adaptation between scanning angles [J]. OSA Continuum, 2020, 3(2): 253.
- [11] 彭光含, 蔡新华, 韩忠, 等. 工业CT在工件检测中X射线硬化校正[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(6): 1426-1429.  
PENG Guanghan, CAI Xinhua, HAN Zhong, et al. X-ray hardening correction for ICT in testing workpiece[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(6): 1426-1429. (in Chinese)
- [12] 魏交统, 陈平, 韩焱. 基于幂函数变换的递变电压X射线图像融合[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2016, 37(4): 414-418.  
WEI Jiaotong, CHEN Ping, HAN Yan. Variable voltage X-ray images fusion based on power function transformation [J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2016, 37(4): 414-418. (in Chinese)
- [13] 魏交统, 陈平, 潘晋孝. 基于主成分分析的递变能量X射线图像融合[J]. 中国体视学与图像分析, 2013, 18(2): 103-108.  
WEI Jiaotong, CHEN Ping, PANJinxiao. Gradient-energy digital radiography image fusion based on principle component analysis [J]. Chinese Journal of Stereology and Image Analysis, 2013, 18(2): 103-108. (in Chinese)