

基于反投影坐标快速算法的木材CT检测系统研究

葛浙东¹ 侯晓鹏¹ 鲁守银² 戚玉涵¹ 张国梁³ 周玉成¹

(1. 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091; 2. 山东建筑大学信息与电气工程学院, 济南 250101;
3. 河北农业大学林学院, 保定 071000)

摘要: 针对木材内部结构复杂、不同树种间密度差异大的特点,提出了一种反投影坐标快速算法,基于此算法构建一套木材无损检测CT成像系统。该系统由X射线发射器、等距平板检测器、旋转载物平台和计算机数据采集成像软件构成。以集成材和小径级原木为试验对象,验证反投影坐标快速算法的可行性。首先采集并修正投影数据;其次根据射线源到旋转中心的距离计算出投影坐标值;最后设置滤波函数并与投影数据作卷积运算,重建木材断层图像。结果表明:应用反投影坐标快速算法,使CT系统图像重建工作平均用时缩短至1s以内,断层图像分辨率达0.052 mm²,可显示木材内部裂纹、孔洞等缺陷及节子、年轮、早晚材变化等构造特征,验证了该算法应用于木材无损检测成像系统的有效性。

关键词: 木材; 无损检测; CT系统; 反投影坐标快速算法

中图分类号: TB115; R445.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)03-0335-07

Wood CT Detection System Based on Fast Algorithm of Inverse Projection Coordinate

Ge Zhedong¹ Hou Xiaopeng¹ Lu Shouyin² Qi Yuhan¹ Zhang Guoliang³ Zhou Yucheng¹

(1. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2. School of Information and Electrical Engineering, Shandong Jianzhu University, Ji'nan 250101, China

3. College of Forestry, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China)

Abstract: Nondestructive detection for wood is more difficult than that for other materials because of characteristics of wood itself. According to the characteristics like complex internal structure and wide density differences among different tree species, a fast algorithm of inverse projection coordinates was proposed. A wood nondestructive detection and CT imaging system can be structured on the basis of this algorithm. This system consists of an X-ray emitter, an offset plate detector, a rotating carrier platform, a data acquisition and imaging software. Setting glued laminated timber and small logs as test objects, the feasibility of the algorithm was verified. Firstly, the projection data were collected and corrected, then the projection coordinates can be calculated according to the distance from the source to the center of rotation, and the filtering function was set up and used to calculate the convolution operation with projection data. The wood faultage image was reestablished at last. The result shows that this algorithm can shorten the image reconstruction time of CT system to less than 1 s. Its image resolution can reach 0.052 mm², and it can also show the internal defects such as holes and cracks, and structural features like wood knots, rings, changes between early wood and late wood, which verify the validity of the algorithm applied to wood nondestructive testing and CT imaging system. This system provides a effective method for wood nondestructive detection.

Key words: wood; nondestructive detection; CT system; fast algorithm of inverse projection coordinates

收稿日期: 2015-11-03 修回日期: 2015-12-30

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项(201304515)

作者简介: 葛浙东(1986—),男,博士生,主要从事木材无损检测、复杂过程分析与控制研究,E-mail: gezhedong@163.com

通信作者: 周玉成(1958—),男,研究员,博士生导师,主要从事复杂过程分析与控制研究,E-mail: zhouyc@caf.ac.cn

引言

CT 技术作为医疗影像诊断中不可缺少的检查手段,已逐步推广到工业、农业、林业等领域^[1-6]。目前,工业 X 射线计算机断层扫描(X-ray computed tomography,CT)空间分辨率已达到 10 μm^[7],分辨率较高,结合图像处理和分析技术可实现对高危油、汽管道材料内部的观测。林业科学研究中,木材内部组织结构可真实反映材种、加工工艺和物理力学性能等信息,对木材内部缺陷进行无损检测具有重要的科学意义和应用价值^[8]。普通的无损检测方法,如微波法、光学法和超声波检测法,其空间分辨率较低,无法满足部分木材对空间分辨率较高的检测要求。因此,国内外先后利用工业 CT 或医用 CT 对木材开展研究。QIANG 等^[9]提出一套算法,可以检测到原木断层 CT 图像中的节子,并实现对枫糖节子、树皮、心边材等结构的识别。OJA 等^[10]以挪威云杉原木为试材,通过 CT 图像识别出节子大小、死节边界等特征。我国将 CT 技术应用于木材领域的研究相对较晚,费本华等^[11]利用 CT 技术结合分形理论分析木材断口形态特征,发现断口截面变化维数可有效反映木材力学和微力学的内在规律。戚大伟等^[12]应用 X 射线对原木进行检测,经处理后的图像可清晰反映原木内部虫眼、空心、腐朽和沉积树脂等缺陷。

木材科学在材性研究方面也需使用工业 CT 或医用 CT 作为分析工具,由此可知,林木培养、林地管理、采伐应用都需要适合木材科学自身的 CT 扫描仪器。目前,木材科学领域尚未有针对木材的 CT 设备,为此,本文开发一套针对木材无损检测的 CT 成像系统,实现对木材的高分辨率断层成像,并通过图像获取木材内部结构信息,为其材性研究和科学利用提供依据。

1 CT 扫描成像原理

CT 是通过具有一定能量和穿透能力的射线与物体的相互作用而成像的,物体置于射线源和检测器之间,射线穿过物体,能量被物体吸收,使射线强度衰减。因此,通过测量物体不同角度下的投影数据,得到物体内部衰减系数分布 $f(x,y)$,可进行 CT 图像重建。目前,国内外的 CT 检测技术主要应用等角扇形束或等距扇形束进行图像重建,而扇形束的图像重建方法可由平行束成像方法推导得出,平行束成像原理如图 1 所示。

平行束扫描过程中,射线源 S 与 X 射线检测器始终保持一条直线上,并且射线源与检测器围绕

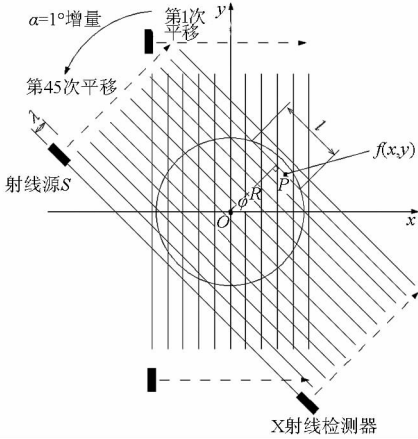


图 1 平行束成像原理

Fig. 1 Imaging principle of parallel beam

被测物体以设定的步进角度旋转。在每一个旋转角 φ 下,射线源与检测器按一定步长 λ 同步移动,平移步数为 $m(0 < m \leq 1\ 280)$, m 的取值视被测物尺寸、距离而定。令旋转步进角为 $\alpha(0 < \alpha \leq 1^\circ)$,当射线源围绕被测物体旋转 360° 时,共得到 $360/\alpha$ 组投影数据,每组检测数据由 m 个投影值构成。

平行束进行卷积反投影重建图像时,将检测器上获得的投影数据与滤波函数进行卷积运算,获得各旋转角的卷积投影函数。再将其按旋转角不同进行反投影,即按照其原路径平均分配到每一矩阵元上,叠加后得到每一矩阵元的 CT 值,经过归一化、灰度转换和截取有效成像区域等处理,即得到被扫描物体的断层图像。数学表达式可由 Radon 投影定理推导出^[13]。

如图 1 所示,在物体断层面建立 $x-y$ 坐标系,射线源 S 在旋转角 φ 下发出某一条沿路径 l 的射线束 x ,穿过衰减系数为 $f(x,y)$ 的物体断层,射线束投影可表示为

$$P(x,y) = \iint f(x,y) dx dy = -\ln(I_m/I_0) \quad (1)$$

式中 I_0 ——x 射线源输出强度
 I_m ——检测器测得的 x 射线束强度

由式(1)得,投影值 $P(x,y)$ 是衰减系数 $f(x,y)$ 在断层平面的二维积分,若测出投影值 $P(x,y)$,即可求出该断层平面上衰减系数 $f(x,y)$ 的二维分布。

在射线源 S 与 X 射线检测器围绕物体旋转扫描过程中,x 射线束的投影值 $P(x,y)$ 与 x 射线束路径 l 相关。在图 1 中建立 $R-\varphi$ 坐标系,用于描述 x 射线束路径 l 在 $x-y$ 坐标系中的位置;令 R 为坐标中心到 x 射线束路径 l 的距离,且与 y 轴夹角为 φ ,则路径 l 可用直线方程 $R = x \cos \varphi - y \sin \varphi$ 表示。令 $\delta(t)$ 函数为筛选因子,则 $f(x,y)\delta(t)$ 为某一路径的衰减系数,某一旋转角 φ 相对应的投影可表示为

$$P_{\varphi}(R,\varphi)=\iint f(x,y)(x\cos\varphi+y\sin\varphi-R)\mathrm{d}x\mathrm{d}y$$

(2)

式中, $P_{\varphi}(R,\varphi)$ 是仅与 R 相关的函数, 记为 $P(R)$; 为消除边缘失锐效应, 选取滤波函数 $h(t)$ 对投影 $P_{\varphi}(R,\varphi)$ 进行滤波运算, 用滤波函数与反投影信号相加, 去除重建图像中失锐部分, 使图像与实物相似; 这种滤波等效于将 $P_{\varphi}(R,\varphi)$ 与 $h(t)$ 进行卷积运算, 即

$$Q_{\varphi}(R,\varphi)=P(R)*h(R)=\int P(t)h(R-t)\mathrm{d}t$$
 (3)

对应旋转角 φ 的反投影可表示为

$$B_{\varphi}(x,y)=\int Q_{\varphi}(R',\varphi)\delta(t-R')\mathrm{d}R'$$
 (4)

将 φ 从 0° 变化到 180° 的所有相应反投影值相加, 可得到断层平面内各点的衰减系数为

$$f(x,y)=\int_0^{\pi} B_{\varphi}(x,y)\mathrm{d}\varphi=$$

$$\iint P_{\varphi}(R',\varphi)h(t-R')\mathrm{d}R'\mathrm{d}\varphi$$
 (5)

式(5)即为平行束反投影图像重建模型。

2 CT 系统构建

基于 X 射线的木材无损检测 CT 成像系统基本组成如图 2 所示。硬件部分由微焦点 X 射线发射器、线性等距平板检测器、步进电动机控制的旋转台和计算机等构成; 软件部分包括数据采集系统和图像重建系统。

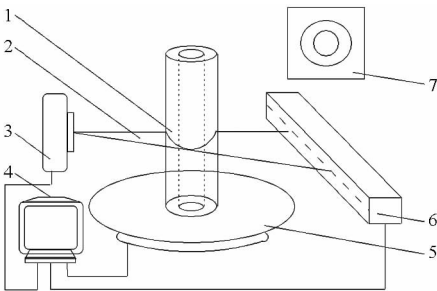


图 2 CT 系统组成示意图
Fig. 2 System configuration of CT

1. 被测物体 2. 扇形射束 3. X 射线发射器 4. 计算机 5. 旋转台 6. 线性等距平板检测器 7. 断层图像

2.1 发射器和检测器

根据本文设计的 CT 硬件系统结构, 选择英国伟杰公司生产的扇形束微焦点 X 射线发射器和平板等距检测器。发射器型号为 IXS160, 工作电压 220 V, 最高连续输出功率 500 W。射线管工作电压 10 ~ 160 kV 连续可调, 稳压误差小于 1%, 工作电流 0 ~ 3.12 mA 连续可调, 稳流误差小于 2%。X 射线点光源焦点尺寸 0.05 mm, 射线最大张角 80° 。检测

器型号为 DS - LINX V3, 由 10 块 XDAS - DH 型模拟数据采集板、2 块 XDAS - SP 型数字信号处理板和 1 块 XDAS - USB 数据输出模块构成; 内部采用一个闪烁体和一维光电二极管阵列, 将可见光转换为电流信号; 电流-电压转换器代替了一系列倍增电极, 将电流信号放大并转换成电压信号。该阵列有效长度 512 mm, 线性等距排列 1 280 个像元, 像元尺寸 0.4 mm × 0.4 mm, 图像传输速率可达 30 帧/s。为减小误差并增加试验稳定性, X 射线发射源和检测器阵列处于同一水平面。

2.2 载物台结构

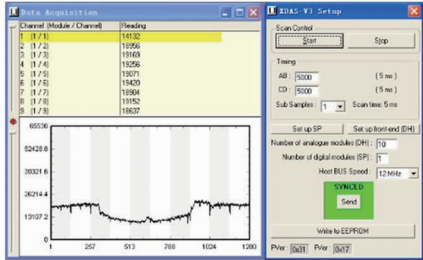
检测载物台结构如图 2 所示, 由旋转台、发射器、检测器和计算机组成。发射器和检测器分别安装于旋转台两侧, 旋转台有效直径 650 mm, 其中心位于射线源焦点和检测器中心的连线上, 距射线源 566 mm, 距检测器 391 mm。工作时, 被检测物体置于以旋转中心为圆心、半径为 146 mm 的扫描范围内。转台由步进电动机驱动, 实现稳定旋转和精确定位, 旋转一周用时 240 s。检测器实时接收数据信号并传入计算机进行处理, 用于图像重建。

2.3 数据采集系统

数据采集系统操作界面如图 3 所示, X 射线发射器和检测器通过 RS232 接口与计算机相连。扫描被测物体前需设置串口号、射线源电压、射线源电流、检测器接收数据积分时间和旋转台转速等参数。扫描完毕, 数据自动保存。每组试验可获取 2 份数表 Air_Scan. xls 和 Wood_Scan. xls, 分别存储射线源输出的射线强度 $I_{0i,j}$ 和射线穿过被测物体衰减后的强度 $I_{i,j}$, 每份数表存储 3 600 行、1 280 列数据, 即



(a) X射线发射器界面



(b) 检测器界面

图 3 数据采集系统操作界面

Fig. 3 Operation interface of data acquisition system

3.4 反投影成像

重建图像由每个滤波投影的反投影组合而成,但计算得出的投影坐标值 $t_{i,j}(\varphi)$ 并非正好为虚拟探测器像元尺寸的整数倍。因此,与该点对应的投影值需用适当的差值方法计算得出,本文采用线性差值运算方法。在极坐标系内,令 (r,θ) 为物体断层内某点 E 的坐标,经过 E 点的所有滤波后的投影在 $\varphi=0\sim2\pi$ 范围内的累加即为该点的反投影数值。根据平行束定理^[20],将式(13)、(14)代入平行束反投影公式(5),得

$$a(r,\theta)=\frac{1}{2}\int_0^{2\pi}\int_{-t_m}^{t_m}p(t,\varphi)h(t)\Big|_{t=ds/\sqrt{s^2+d^2}}\mathrm{d}t\mathrm{d}\varphi$$

(15)

式中 $a(r,\theta)$ ——点 E 反投影数值
 $h(t)$ ——Butterworth-Sinc 滤波函数

遍历扫描范围内所有点,获得断层内每点的反投影数值,做归一化运算后,再转换为 $0\sim255$ 范围内的灰度。将灰度填充到相应的像素点,得到反投影重建图像。

4 试验验证

试验过程中,设置X射线发射器工作电压为120 kV、电流为0.7 mA、检测器积分时间为5 000 μ s,旋转台转速为1.5°/s,试件置于旋转中心,检测器采集投影数据上传至计算机。应用反投影坐标快速算法重建试件断层图像,并在相同窗宽、窗位下显示。

选择方形集成材为扫描对象,如图7a所示。集成材断层切面尺寸80 mm×160 mm,由4块厚度为20 mm的实木板材按不同纹理方向胶合而成。断层重建图像如图7b所示。结果表明,重建图像没有伪影,4块板材胶合界限分明,每块板材纹理自然有序,清晰可见;左右2块板材纹理方向一致,年轮很窄;中间2块弦切板年轮较宽,且容易辨别。

为进一步验证CT系统的可靠性,选择直径为95 mm的小径级原木作为扫描对象,如图8a所示。应用反投影坐标快速算法重建原木断层图像,如图8b所示。结果表明,原木开裂严重,横切面左侧裂纹开口由大到小、径向延伸至髓心处;左下方生长一段直径为10 mm的节子,右上方的细微裂纹痕迹清晰可见;年轮以不规则环形显示,早晚材急变且颜色差异较大;小径级原木断层重建图像噪声少,灰度区域过渡自然,边缘清晰而平滑。

分别统计原木试件实物图像和重建断层图像中年轮数、裂纹数、节子数、裂纹长度和大裂纹角度等数据信息,结果如表1所示。根据断层重建图像可

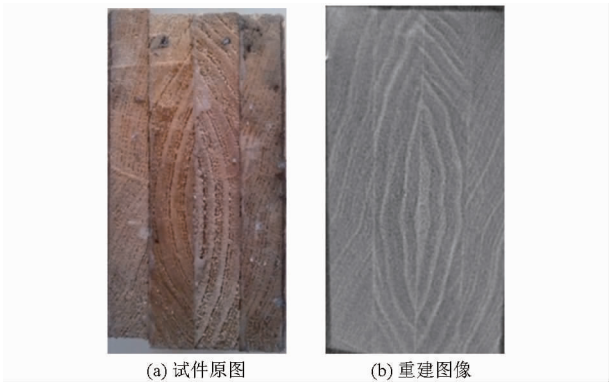


图7 集成材横断面重建图像

Fig.7 Section of glued laminated timber for reconstructed image

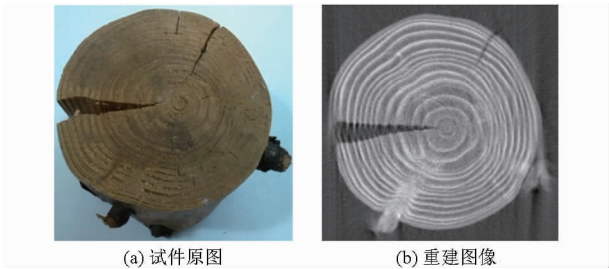


图8 原木横切面重建图像

Fig.8 Transverse section of wood for reconstructed image

知,原木内部结构特征清晰,横截面显示13条年轮、2条裂纹和1个节子,其中,大裂纹长度48.2 mm、角度14.1°,小裂纹长度21.5 mm。经比较分析,图像裂纹长度、角度和试件测量值存在误差,误差小于±1%,其他信息完全一致。

表1 试件原图和重建图像的比较

Tab.1 Comparison of specimens and reconstructed image

参数	试件 原图	重建 图像	误差/%	清晰度	伪影
年轮数	13	13	0	高	小
裂纹数	2	2	0	高	无
大裂纹长度/mm	48.6	48.2	±0.80	高	无
小裂纹长度/mm	21.7	21.5	±0.92	高	无
大裂纹角度/(°)	14.2	14.1	±0.70	高	无
节子数	1	1	0	高	无

为每个年轮编号,靠近髓心的年轮编为1号,由内至外,年轮编号依次增加,最外圈年轮为13号。以试件的髓心为圆心,45°为角度增量,每条年轮测得4组直径数据,加权取平均值。同等条件下计算出重建图像年轮直径数据,绘制原木生长曲线,如图9所示。

最内层1号年轮直径最小,为8.89 mm,最外层13号年轮直径最大,为92.44 mm,接近原木直径。以4a为一个生长阶段进行分析,1~5号、5~9号、9~13号年轮间距分别为39.84、18.85、24.86 mm,

可知树木生长速率随时间呈现快-慢-快的变化规律。对比发现,试件原图和重建图像的年轮直径误差范围在 $-0.16\% \sim 0.22\%$ 之间。试验结果表明,断层图像已基本反映出原木内部年轮结构特征,重建效果理想。

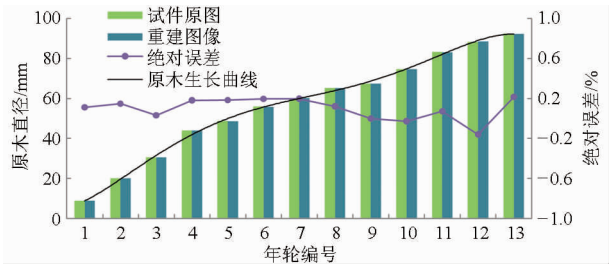


图 9 原木生长曲线
Fig. 9 Growth curves of wood

2 组试件断层图像重建像时间均在 1 s 以内,常规 CT 成像时间需要 5 s 左右^[21]。试验结果表明,本文研发的基于反投影坐标快速算法的木材 CT 成像

系统,可缩短图像重建时间,提高反投影成像效率,且成像结果满足木材无损检测的试验要求。

5 结论

(1)提出了反投影坐标快速算法,可应用于计算机断层成像技术,并开发出一套针对木材的无损检测 CT 成像系统,提高了图像重建效率。

(2)针对木材内部结构复杂、不同材种间密度差异大等特点,采用反投影坐标快算法并结合参数可调的 Butterworth - Sinc 滤波函数,克服了图像重建时间长、图像环形伪影严重等缺陷,重建小径级原木断层图像可显示扫描断层节子、裂纹、年轮和早晚材变化等木材内部结构特征。

(3)试验结果表明反投影坐标快速算法对木材断层结构的检测具有有效性,可用于原木内部结构的快速、精确检测,也可应用于集成材和层积材等结构材的无损检测。

参 考 文 献

- 1 彭冠云,江泽慧,刘杏娥,等. 木材、竹材密度的 CT 技术检测[J]. 光谱学与光谱分析,2012,32(7):1935 - 1938.
PENG Guanyun,JIANG Zehui,LIU Xing'e,et al. Measuring the density of wood and bamboo using computed tomography[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2012,32(7):1935 - 1938. (in Chinese)
- 2 HSIEH J. Computer tomography:principles,design,artifacts,and recent advances[M]. Bellingham, WA:SPIE Press,2003:469 - 534.
- 3 BARCELON E G,TOJO S,WATANABE K. X-ray computed tomography for internal quality evaluation of peaches[J]. Journal of Agricultural Engineering Research,1999,73(4):323 - 330.
- 4 FULLADOSA E,SANTOS E G,PICOUET P,et al. Prediction of salt and water content in dry-cured hams by computed tomography[J]. Journal of Food Engineering,2010,96(1):80 - 85.
- 5 张京平,朱建锡,孙腾. 苹果内部品质的 CT 成像结合傅里叶变换方法检测[J]. 农业机械学报,2014,45(3):197 - 204.
ZHANG Jingping,ZHU Jianxi,SUN Teng. Detection of apples' internal quality using CT imaging technology and fourier transform[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(3):197 - 204. (in Chinese)
- 6 洪冠,赵茂程,汪希伟,等. 肉中异物 X 射线检测的肉厚度激光双三角测量方法[J]. 农业机械学报,2014,45(9):223 - 229.
HONG Guan,ZHAO Maocheng,WANG Xiwei,et al. Research on meat thickness measurement based on laser double-triangulation method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(9):223 - 229. (in Chinese)
- 7 陈惟昌,张朝宗,王自强,等. 显微 CT(μ -CT)——医学 CT 未来的发展方向[J]. CT 理论与应用研究,1998,7(3):40 - 45.
CHEN Weichang,ZHANG Chaozong,WANG Ziqiang,et al. Micro CT(μ -CT)—further development of the medical CT in future[J]. CT Theory and Applications,1998,7(3):40 - 45. (in Chinese)
- 8 丁建文,王宝金,郭晓磊. CT 技术在木材工业中的应用[J]. 木材加工机械,2008(4):44 - 47.
DING Jianwen,WANG Baojin,GUO Xiaolei. Application of CT technology in wood industry[J]. Wood Processing Machinery,2008(4):44 - 47. (in Chinese)
- 9 QIANG Wei,BRIGITTE Leblon,YING Heichui,et al. Identification of selected log characteristics from computed tomography images of sugar maple logs using maximum likelihood classifier and textural analysis[J]. Holzforschung,2008,62(4):441 - 447.
- 10 OJA J. X-ray measurements of properties of saw logs[D]. Lulea Sweden:Lulea University of Technology,1999.
- 11 费本华,赵勇,覃道春,等. 应用 CT 技术研究木材断面形态特征[J]. 林业科学,2007,43(4):137 - 140.
FEI Benhua,ZHAO Yong,QIN Daochun,et al. Applying computerized tomography(CT) to study the feature of wood fracture[J]. Scientia Silvae Sinicae,2007,43(4):137 - 140. (in Chinese)
- 12 戚大伟,牟洪波. 具有图像处理功能的原木 X 射线检测系统[J]. 森林工程,2007,23(1):30 - 31,75.
QI Dawei,MU Hongbo. X-xay log detection system with image processing function[J]. Forest Engineering,2007,23(1):30 - 31,75. (in Chinese)
- 13 庄天戈. CT 原理与算法[M]. 上海:上海交通大学出版社,1992:30 - 61.

Engineering and Technology, 2012, 6(11): 1054 – 1059.

16 陈海生, 梁锡智, 谭春青, 等. 动叶可调轴流式通风机出口流场的实验研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25(4): 412 – 415.
CHEN Haisheng, LIANG Xizhi, TAN Chunqing, et al. Experimental study at the exit flow field of an axial flow fan with variable setting angle[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(4): 412 – 415. (in Chinese)

17 商景泰. 通风机实用技术手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2011:139 – 140.

18 王海桥. 主扇扩散塔结构与出口能量损失实验研究[J]. 湖南科技大学学报, 2008, 23(4): 11 – 15.
WANG Haiqiao. Experiment on structure and loss energy in outlet of primary fan diffuser[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology, 2008, 23(4): 11 – 15. (in Chinese)

19 王柏华. 浅析风机扩散器-塔效率与风机能量利用率关系[J]. 煤矿机械, 2001(5): 32 – 33.
WANG Baihua. Analyzing of the relationship between fan diffuser-tower efficiency and energy utilization ratio[J]. Coal Mine Machinery, 2001(5): 32 – 33. (in Chinese)

20 王海桥, 李威松. 矿井主扇扩散器通风流场数值模拟研究及其应用[J]. 湖南矿业学院学报, 2002, 17(4): 9 – 11.
WANG Haiqiao, LI Weisong. Numerical simulation study and application on diffuser ventilation flow field of mine main fan[J]. Journal of Xiangtan Mining Institute, 2002, 17(4): 9 – 11. (in Chinese)

21 修东亮. 轴流式通风机扩散器数值模拟与研究[J]. 煤矿机械, 2013, 34(3): 57 – 58.
XIU Dongliang. Numerical simulation and research on diffuser of axial fan[J]. Coal Mine Machinery, 2013, 34(3): 57 – 58. (in Chinese)

22 陈世强, 成剑林, 冯进. 主扇扩散器出口速度分布的数值模拟与实验研究[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(8): 32 – 36.
CHEN Shiqiang, CHENG Jianlin, FENG Jin. Numerical simulation and experimental research on the velocity distribution in outlet of main fan diffusers[J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(8): 32 – 36. (in Chinese)

23 潘地林, 程凯, 杨春鱼. 矿用通风机直壁式扩散器参数计算分析[J]. 煤矿安全, 2014, 45(1): 84 – 87.
PAN Dilin, CHENG Kai, YANG Chunyu. Computational analysis of mine ventilator straight-wall diffuser parameters[J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(1): 84 – 87. (in Chinese)

24 潘地林, 程小东, 郑昌球. 矿井主要通风机扩散弯道合理流型的研究[J]. 煤矿安全, 2005, 36(11): 1 – 4.
PAN Dilin, CHEN Xiaodong, ZHENG Changqiu. Influence of microspore structure of coal on coal seam permeability[J]. Safety in Coal Mines, 2005, 36(11): 1 – 4. (in Chinese)

25 LI Baoming, FORD S E, LI Yongxin, et al. Development of a fan testing chamber for agricultural and horticultural fans in China [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2006, 22(1): 115 – 119.

(上接第 341 页)

14 梁丽红, 路宏年, 孔凡琴. 射线检测数字实时成像的不一致性研究[J]. 光学技术, 2003, 29(4): 439 – 440.
LIANG Lihong, LU Hongnian, KONG Fanqin. Non uniform research of X ray real time digital radiography[J]. Optical Technique, 2003, 29(4): 439 – 440. (in Chinese)

15 周正干, 腾升华, 江巍, 等. X 射线平板探测器数字成像及其图像校准[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(8): 698 – 701.
ZHOU Zhenggan, TENG Shenghua, JIANG Wei, et al. X-ray flat-panel-detector-based digital radiography and its image calibration [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(8): 698 – 701. (in Chinese)

16 王远, 许州, 陈浩, 等. 基于平板探测器的高能工业 CT 数据采集系统[J]. CT 理论与应用研究, 2006, 15(3): 53 – 56.
WANG Yuan, XU Zhou, CHEN Hao, et al. Data acquiring system for high energy industrial CT based on flat-panel detector[J]. CT Theory and Applications, 2006, 15(3): 53 – 56. (in Chinese)

17 CHEN G H. A new framework of image reconstruction from fan beam projections[J]. Medical Physics, 2003, 30(6): 1151 – 1161.

18 KAK A C, SLANEY M. Principles of computerized tomographic imaging[M]. New York: IEEE Press, 1988: 75 – 92.

19 文斌, 吴胜利, 潘瑞谊. CT 图像重建预处理滤波器设计[J]. CT 理论与应用研究, 2008, 17(3): 57 – 64.
WEN Bin, WU Shengli, PAN Ruiyi. Design of preprocessing filters for CT reconstruction[J]. CT Theory and Applications, 2008, 17(3): 57 – 64. (in Chinese)

20 闫镔, 李磊. CT 图像重建算法[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 40 – 50.

21 高上凯. 医学成像系统[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010: 46 – 49.