

工业 CT 检测结果的影响因素及质量保证方法

陈晴晴, 张义凤

(上海材料研究所 上海市工程材料应用与评价重点实验室, 上海 200437)

摘要: 随着工业 CT 检测技术的运用越来越广泛, 工业 CT 检测结果的准确性也愈发重要。为提高工业 CT 检测结果的准确性, 分析了影响工业 CT 检测结果的因素, 结合这些因素, 从检测设备、检测人员、检测环境、检测过程等 4 个方面列出对应的质量保证方法, 确保工业 CT 检测结果的准确性和可靠性。

关键词: 工业 CT 检测; 检测结果; 影响因素; 质量保证方法

中图分类号: TG115.28 文献标志码: B 文章编号: 1000-6656(2022)06-0072-04

Influencing factors and quality assurance methods for industrial CT test results

CHEN Qingqing, ZHANG Yifeng

(Shanghai Key Laboratory of Engineering Materials Application and Evaluation,
Shanghai Research Institute of Materials, Shanghai 200437, China)

Abstract: With the industrial CT technology being used more and more widely, the importance of the accuracy of the industrial CT is rising. For the purpose of improving the industrial CT accuracy and quality, this article analyzes the influencing points of the industrial CT results and 4 quality assurance methods are introduced such as inspection instruments, inspection personnel, inspection environment and inspection process to ensure the accuracy and reliability of CT test results.

Key words: industrial CT testing; test result; influencing factor; quality assurance method

工业 CT(计算机断层扫描)作为一种先进的无损检测技术已广泛应用于航空、航天、军工、国防等领域, 这些领域对产品的质量要求较为严格, 产品的内部结构、有无缺陷以及缺陷的类型与大小直接影响对产品合格与否的判定。工业 CT 需要检测人员具备较强的专业水平以及设备具有较高的精度, 利用有效的质量保证措施可以保证 CT 检测结果的准确性。因此, 有针对性地建立和完善工业 CT 实验室质量保证措施, 对保障工业 CT 结果的准确性和提升产品的质量有重要的意义。

1 工业 CT 检测结果的影响因素

CT 检测结果主要来源于 CT 图像提供的正常或异常信息, 优质 CT 图像是检测结果准确性的前提条件, 而影响 CT 图像质量的主要因素包括 3 方面, 即空间分辨率、密度分辨率和伪像。实验室若想得到高质量的 CT 图像, 需对以上 3 个因素进行把控, 下面主要分析影响空间分辨率、密度分辨率和伪像的因素。

1.1 空间分辨率

空间分辨率是指从 CT 图像中能够分辨特定的最小几何细节的能力, 定量表示为能分辨两个细节特征的最小间距。空间分辨率是影响图像质量的首要因素, 其受有效射束宽度的影响, 有效射束宽度越小, 物理意义上系统的临界空间分辨率越高, 有效射束宽度可表示为^[1]

$$W_B \approx \frac{\sqrt{d^2 + [a(M-1)]^2}}{M} \tag{1}$$

收稿日期: 2022-03-10
基金项目: 上海市 2019 年度“科技创新行动计划”技术标准项目 (19DZ2205100)
作者简介: 陈晴晴(1988—), 女, 本科, 工程师, 主要从事质量管理工
通信作者: 陈晴晴, chenqing88913@163.com

式中: W_B 为有效射束宽度; a 为射线源焦点尺寸; d 为探测器孔径; M 为几何放大倍数, $M=L/q$; L 为射线源至探测器的距离; q 为射线源至试件的距离。

由式(1)可以看出,影响空间分辨率的主要因素如下。

- (1) 探测器孔径的尺寸,孔径越窄,几何放大倍数越大,空间分辨率就越高。
- (2) 射线源焦点尺寸,焦点较小的 X 线管产生的 X 射线较窄,可获得较高的空间分辨率。
- (3) 射线源至探测器距离一般为定值。
- (4) 射线源至试件距离存在一个最佳距离,能使 W_B 获得最小值。

除此之外,以下因素也会影响空间分辨率。

(1) 在图像重建中选用的卷积滤波器的形式不同,空间分辨率也不同。

(2) X 射线剂量、矩阵、层厚、像素大小、扫描装置噪声等对空间分辨率均有影响。层厚越薄,空间分辨率越高;但层厚越薄,噪声就越大,低对比分辨率就会降低。

1.2 密度分辨率

密度分辨率,又称为低对比度分辨率,是系统分辨给定物体断层截面射线衰减系数差别(对比度)的能力。定量表示为给定面积上能够分辨的细节与基体材料的最小对比度。密度分辨率可表示为^[1]

$$\frac{|\Delta\mu|}{\mu_{\text{ref}}} = \frac{|\mu_b - \mu_i|}{\mu_{\text{ref}}} \times 100\% = \frac{C\sigma\Delta P}{D\mu_{\text{ref}}} \times 100\% \quad (D \geq W_B) \quad (2)$$

式中: ΔP 为像素宽度; C 为经验系数; σ 为 CT 图像噪声; D 被观测细节(缺陷)的尺寸; μ_b 为细节(缺陷)材料的衰减系数; μ_i 为基体材料的衰减系数; μ_{ref} 为参考衰减系数。

由式(2)可见,密度分辨率的影响因素有图像噪声、像素宽度、经验系数等,其中,影响 CT 系统密度分辨率的一个重要因素是系统噪声,噪声增大,CT 系统能够分辨的最小物体对比度也增大^[2]。

1.3 伪像

伪像是与物体的物理结构不相符的图像特征。产生伪像的原因有很多,测量过程中的一系列误差都可能造成测量数据的不一致,从而引起伪像,如机械系统精度不够、射线源输出能量不稳定、穿透力不足、探测器通道之间不均匀及数据采集系统电路噪声大等,特别要说明的是扫描工艺不适当时会产生严重的伪像^[1],因此,检测人员是否有充足的经验也

是伪像产生的重要影响因素。

2 质量保证方法

工业 CT 与常规的无损检测方法有一定的区别,根据第 1 节的分析可知,CT 检测结果受各参数影响,且 CT 图像一般要求呈现被检测物的微小细节,因此对检测设备的各项参数精度要求较高。工业 CT 对检测人员技能有特殊要求,检测人员经验是否充足也会影响工业 CT 的检测结果。

笔者主要从控制检测设备、检测人员、检测过程等方面对质量保证方法进行详细分析,提出相适应的质量保证方法,从而确保检测结果的准确性。

2.1 检测设备

检测设备的精度、性能、状态是影响检测结果关键的因素,设备精度不满足要求、系统性能不达标、运行不正常会导致后续一系列的操作和分析结果出现误差,因此实验室应保证设备精度能够满足日常检测工作的需求并确保持续有效。

2.1.1 明确设备采购与验收的技术要求

实验室在设备采购之前应有明确的技术要求,需要关注射线源的指标、探测器指标、数据采集传输系统指标、机械系统指标、重建及可视化系统指标等技术要求,应根据实际工作的需求设定每项指标的技术要求,并按照前期技术要求进行验收确认。

2.1.2 实施设备校准或核查

设备的校准是保证检测结果准确性的重要前提和基础保障,也是保证检测结果准确性的主要手段。要确保检测设备状态是否符合要求,需对检测设备进行校准,避免设备使用中产生误差。目前工业 CT 设备没有统一的校准方法,实验室可采用核查空间分辨率、密度分辨来验证系统性能,标准 GB/T 29070—2012《无损检测 工业计算机层析成像(CT)检测 通用要求》对空间分辨率和密度分辨率的性能核查周期建议为每年应不少于一次,如设备调试或者维修后,应进行性能检测,必要时需要重新对空间分辨率、密度分辨率进行核查,以确保图片质量的可信度。

2.1.3 定期维护与保养

随着设备使用频率加大,设备使用过程中会出现故障,也会老化,不注重设备的维护与保养不仅可能造成设备老化加速、故障概率升高,甚至影响设备整体的性能,降低图像质量,最终影响检测结果。定期对设备进行维护与保养尤为重要,实验室可参照表 1 制定工业 CT 设备维护保养计划。

表 1 工业 CT 设备维护保养周期示例

周期	维护对象	保养工作项目
每日	设备运行系统	目视检查防辐射掩体、机械损坏等
		目视检查防辐射掩体
		X 射线功能是否正常
		安全回路检查
		目视检查 X 射线管窗口状态
每周	射线管的靶	旋转靶
	电缆	检查电缆是否损坏、接地连接是否正常，必要时更换
		用轻质油膜保护工作台界面，以防生锈
	工作台界面	
	X 射线管道中的沉淀物	清理沉淀物、必要时更换
每三个月	高压电缆、软管、线	检查软管、线是否连接、扭结、损坏或泄漏
		检查管子和高压发生器上的高压电缆连接是否正常
		打开高压连接器，干净、均匀地涂硅脂并以正确的压力安装
每年	X 射线管的冷却装置	检查冷却液液位，必要时加满冷却液
	安全按钮	检查活动和功能
	门	检查位置是否正确、是否存在间隙；清理污渍、润滑
	机械手，导向架和主轴驱动器	清洁污渍、润滑

2.2 检测环境

工业 CT 设备的关键参数精度要求高，环境对关键参数有不可忽略的影响，因此，实验室需要对检测环境进行控制。实验室检测温度应控制在 4℃～24℃，湿度控制在 40%～60%，检测室应干净、整洁，具有良好的通风及照明设施或条件，建议通风换气每小时不少于两次。

2.3 检测人员

相对于常规的无损检测技术，工业 CT 检测技术对人员的要求更为严格，实验室也应更为注重采取质量保证措施保证检测人员能力，这是保证检测结果质量最直接和重要的影响因素。

检测人员应有基础的专业知识储备与综合判断能力，应为材料、无损检测相关专业或有相关经验的技术人员，应具备计算机软件的基本知识，熟悉使用计算机及图像处理程序。操作人员应持有工业 CT 资格证书，并保持持续的培训学习，对新材料、新工艺、新产品有一定的认知水平后，才能更好地为后期检测参数的选择、设定、数据处理奠定基础，如对伪像的分析处理，需要人员有充足的经验。实验室应制定人员日常监督计划，及时发现检测过程中存在的不合规现象或错误操作问题，从而采取相关的纠

正及预防措施。

2.4 检测过程

检测过程对检测结果的影响至关重要，工业 CT 检测流程图如图 1 所示，检测过程中每个环节都会直接影响检测结果，下面从较为重要的流程来分析质量控制的措施。

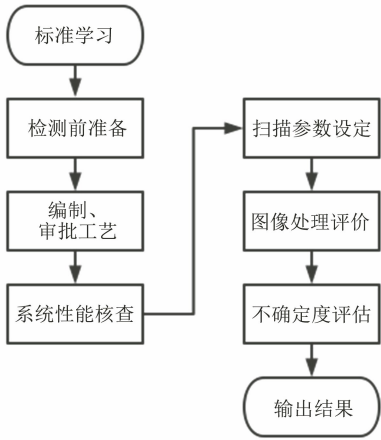


图 1 工业 CT 检测流程图

2.4.1 熟悉检测标准与样品

检测标准是检测人员实施检测的依据文件，不同检测标准对样品、设备性能、检测方法、判定规则等会有一些的差异，在检测工作开展之前应对检测人员开展充足的标准培训与学习，确保其熟悉检测标准。样品的大小、尺寸、结构等会直接影响检测参数的选择与设定，检测人员应了解被检物的结构、尺寸、状态、材料、密度、待检缺陷主要类型等，明确检测需达到的空间或密度分辨率、尺寸或密度测量精度等要求。

2.4.2 编制检测工艺规程

检测工艺规程是指导人员正确实施检测的技术文件，工艺规程应结合检测样品编制，必要时，可用标准试件对工艺规程进行试验验证，得到的图像符合质量要求后才能实施检测。工艺规程应确保被检样品的夹装方式、焦距、物距、旋转角度、焦点尺寸、射线源参数、切片位置、切片数量、切片厚度、扫描视场、采样时间、图像矩阵、扫描方式、重建参数、图像显示及分析方法等参数符合要求。

根据前面的分析，影响密度分辨率的主要因素是系统噪声，而电压、电流是影响系统噪声的关键参数，控制电压与电流是确保密度分辨率符合要求的重要方法。

2.4.3 核查设备系统性能

实施检测系统核查是确保每次检测数据准确性的基础要求，每次开机时应按系统使用说明书或相

关程序对工业 CT 设备进行暗场和空气校准,如系统校准不满足要求应进行重新校准。

2.4.4 评估测量不确定度

任何的测量都会有误差,工业 CT 检测的部分参数(如尺寸)也会产生不确定度。目前,部分实验室对于检测过程产生的测量不确定度还不够重视,忽视测量不确定度的评定,可能造成对产品检测结果的误判,因此,工业 CT 检测需要开展尺寸不确定度的评定^[3-5],仔细分析影响不确定度的主要分量,才能使检测结果的可信赖程度更高。影响工业 CT 尺寸测量不确定度的主要分量有测量模型引入的不确定度、被检工件引入的不确定度、像素尺寸引起的测量标准不确定度、温度差引入的不确定度以及系统误差等,实验室可以按式(3)计算合成标准不确定度。

$$L=l-b+l\alpha\Delta t+\delta_r+\delta_v+\delta_i \quad (3)$$

式中: L 为输出尺寸; l 为被检工件的尺寸测量值; b 为系统误差; α 为标准试块的线膨胀系数; Δt 为实际测量温度与标准温度(20℃)的温度差; δ_r 为像素尺寸对测量结果的影响; δ_v 为标准试块尺寸及其扩展不确定度; δ_i 为动态误差对测量结果的影响。

输出尺寸 L 是关于输入量 $l, b, l\alpha\Delta t, \delta_r, \delta_v, \delta_i$ 的函数,且输入量之间互不相关,根据 GUM(丈量不确定度表示指南)法可得各灵敏系数,即

$$\frac{\partial L}{\partial l}=1+\alpha\Delta t, \frac{\partial L}{\partial b}=-1, \frac{\partial L}{\partial \alpha\Delta t}=l, \\ \frac{\partial L}{\partial \delta_r}=\frac{\partial L}{\partial \delta_v}=\frac{\partial L}{\partial \delta_i}=1 \quad (4)$$

所以,工业 CT 尺寸测量的最终的合成不确定度为

$$u_c(L)=\left[\left(\frac{\partial L}{\partial l}\right)^2u^2(l)+\left(\frac{\partial L}{\partial \alpha\Delta t}\right)^2u^2(\alpha\Delta t)+u_r^2+u_v^2+u_i^2+u^2(b)\right]^{1/2} \quad (5)$$

式中: $u(l)$ 为被检工件的尺寸测量确定度; $u(\alpha\Delta t)$ 为标准试块线膨胀系数和实际测量温度和标准温度差乘积的不确定度; u_r 为像素尺寸引入的不确定度; u_v 为标准试块尺寸引入的不确定度; u_i 为动态误差引入的不确定度; $u(b)$ 为系统误差引入的不确定度。

3 结语

检测是判定产品质量最直观的手段,检测结果会受到设备、人员、环境、过程等各方面的影响,因此采取合理的质量保证方法对检测结果的准确性有重要影响。

笔者分析了影响 CT 检测结果的主要因素,包括空间分辨率、密度分辨率和伪像,针对以上 3 个因素,分别从检测设备、检测人员、检测环境及检测过程等方面介绍了相应的质量保证方法。一方面,上述质量保证方法可以保证检测结果的准确性和可靠性;另一方面,可利用检测数据改善相应的生产工艺,进而提升产品质量。

参考文献:

[1] 倪培君,李旭东.工业 CT 技术第五讲 工业 CT 的图象质量[J].无损检测,1996,18(5):142-147.
[2] 郭智敏,齐子诚,乔日东,等.工业 CT 系统密度分辨率的影响因素[J].无损检测,2010,32(11):898-902.
[3] 齐子诚,倪培君,唐盛明,等.基于工业 CT 直径测量的不确定度评估技术研究[J].兵器材料科学与工程,2017,40(6):96-99.
[4] 齐子诚,倪培君,唐盛明,等.基于工业 CT 的角度测量方法及不确定度分析[J].计算机测量与控制,2017,25(9):43-46.
[5] 付康,倪培君,唐盛明,等.基于工业 CT 线性尺寸测量的不确定度分析[J].强激光与粒子束,2018,30(5):162-167.

欢迎网上投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告