

工业 CT 系统检测过程中缺欠尺寸的测量不确定度

宋 飞,张义凤
(上海材料研究所,上海 200437)

摘 要: 针对工业 CT 系统在缺欠尺寸测量过程中的不确定度问题,对可能引起不确定度的误差源进行了分析,并基于 GUM 法对测量不确定度进行了研究。试验结果表明,所提出的分析方法可以满足工业 CT 系统对缺欠尺寸测量不确定度的评定要求,其中,测量过程中的误差、CT 系统的空间分辨率、密度分辨率、平板探测器像素尺寸、系统误差等是对合成不确定度影响最大的因素。

关键词: 工业 CT;测量不确定度;缺欠;尺寸测量

中图分类号: TG115.28 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2023)02-0044-04

Measurement uncertainty of missing dimensions in the detection process of industrial CT systems

SONG Fei, ZHANG Yifeng
(Shanghai Research Institute of Materials, Shanghai 200437, China)

Abstract: Aiming at the uncertainty in the process of missing dimensional measurement in industrial CT systems, the error sources that may cause uncertainty are analyzed, and the measurement uncertainty is studied based on the GUUM method. The test results show that the proposed analysis method can meet the evaluation requirements of the uncertainties of missing dimensional measurement in industrial CT systems. Among them, the errors in the measurement process, the spatial resolution, the density resolution of the CT system, the pixel size of the plate detector, and the system error are the most important reasons for the synthesis uncertainty.

Key words: industrial CT; measurement uncertainty; default; dimensional measurement

工业 CT 是一种常见的无损检测技术,其可以通过非接触、非破坏性的手段,得到被测工件的二维、三维图像,并用于工件内部缺欠评定和材料密度分布均匀性分析^[1-3]。工业 CT 按照射线源可分为 γ 射线源和 X 射线源,其中 γ 射线源的缺点是射线强度受限于射线源的尺寸,且射线能量无法调节;X 射线源按照能量强度可分为高能 X 射线和低能 X 射线。高能 X 射线是通过直线加速器生成高能量

的 X 射线,可有效穿透高密度和大尺寸的工件,但其分辨率和缺欠检测能力相对较差;低能 X 射线主要用于精密度较高、尺寸较复杂的小尺寸工件的检测,分辨率可达微米级甚至纳米级,对工件缺欠的识别精度较高^[4]。

目前有关工业 CT 的计量特性测量及误差量化的国际标准程序还没有正式发布,其计量化还存在诸多问题,因此需要开展工业 CT 的不确定度研究,将测量误差通过不确定度的形式展现出来^[5]。为此,德国工程师协会(VDI)和德国电气工程师协会(VDE)发布了关于工业 CT 的标准 VDI/VDE 2630—2015《工业 CT 尺寸测量》,并在其中加入了不确定度评定的内容。工业 CT 的尺寸测量受到众多误差源的影响,如噪声、数字化误差、机械轴几何

收稿日期: 2022-10-14
基金项目: 上海市 2020 年度“科技创新行动计划”技术标准项目 (20DZ2203800)
作者简介: 宋 飞(1988—),女,硕士,工程师,主要从事能力验证及标准化的相关工作
通信作者: 宋 飞, songfei0924@126.com

偏差、数据处理误差等,故如何对不确定度分量进行量化就成为一个较为复杂的问题^[6-7]。文章结合工业 CT 成像技术,采用已校准的试件作为试验对象,基于 GUM 法建立不确定度评定模型,得到缺欠尺寸的测量不确定度评定结果,并分析了不同因素对不确定度的影响。

1 工业 CT 测量原理与不确定度影响因素

工业 CT 检测原理如图 1 所示,工业 CT 系统通过发射 X 射线对工件进行透射,将影像投影到高精度平板探测器上,通过旋转基底操作台,得到多角度的投影。通过 FDK 算法等对投影图像进行处理,结合距离、角度等因素,确定反投影路径并进行三维图像重建^[8]。

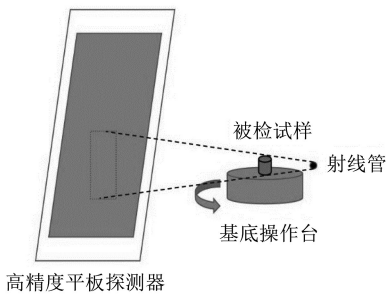


图 1 工业 CT 检测原理示意

在工件铸造、焊接过程中,往往会形成尺寸较小的气孔、缩孔、夹渣等缺欠,而工业 CT 对这些缺欠的识别率和测量准确性往往取决于射线管的分辨率。射线管的分辨率和最大管电压成反比,因此需要针对被测工件的尺寸、材料合理选择射线管型号。

在工业 CT 测量过程中,需要重视测量不确定度的分析,否则将会导致测量结果的误判。在过往的研究中,有学者对工业 CT 尺寸测量过程中的不确定度进行了分析^[9-11]。其中测量过程的重复性、平板探测器的像素尺寸、系统空间分辨率、密度分辨率及温度差等因素都会对测量结果产生影响,需要进行不确定度分析。

测量不确定度评定主要分为 GUM 法和蒙特卡罗(MCM)法。其中 GUM 法主要依据标准 JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》,采用“不确定度传播律”得到测量不确定度,是使用较为广泛的工业 CT 测量不确定度评定方法。GUM 法需要分析测量不确定度的来源,并依据数值分布特性得到测量模型,计算各误差来源的不确定度分量,最终得到合成标准不确定度和扩展不确定度。而 MCM 法主要依据标准 JJF 1059.2—2012《用蒙特卡

洛法评定测量不确定度》,主要通过真实的模拟策略实现对输入量概率分布的解算。

2 工业 CT 测量不确定度评定模型

采用标准 JJF 1059.1—2012 中的 GUM 法,可通过分析不确定度来源和建立测量模型评定工业 CT 测量不确定度。在采用 CT 方法测量缺欠尺寸时,测量结果可能受到测量过程、像素尺寸、系统空间分辨率、密度分辨率、温度差等因素影响,可形成缺欠尺寸测量值 L 的一般表达式,即

$$L = l + \delta_p + \delta_{\text{pix}} + \delta_{\text{sr}} + \delta_d + \delta_t + \delta_{\text{cal}} + \delta_T + b \quad (1)$$

式中: l 为标准温度(20℃)下的缺欠尺寸标称长度; δ_p 为测量过程引起的误差; δ_{pix} 为平板探测器像素尺寸引起的误差; δ_{sr} 为工业 CT 系统空间分辨率引起的误差; δ_d 为工业 CT 系统密度分辨率引起的误差; δ_t 为测量过程中的动态误差; δ_{cal} 为试件校准的扩展不确定度所引起的误差; δ_T 为测试环境温度波动所引起的误差; b 为工业 CT 的系统误差。

由此可知缺欠尺寸测量值 L ,是关于标称长度 l ,以及变量 $\delta_p, \delta_{\text{pix}}, \delta_{\text{sr}}, \delta_d, \delta_t, \delta_{\text{cal}}, \delta_T, b$ 的函数。各变量间互不相关,依照 GUM 法可得到灵敏系数为

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \delta_p} &= \frac{\partial L}{\partial \delta_{\text{pix}}} = \frac{\partial L}{\partial \delta_{\text{sr}}} = \frac{\partial L}{\partial \delta_d} = \frac{\partial L}{\partial \delta_t} = \\ &= \frac{\partial L}{\partial \delta_{\text{cal}}} = \frac{\partial L}{\partial \delta_T} = \frac{\partial L}{\partial b} = 1 \end{aligned} \quad (2)$$

并可推导出工业 CT 的合成不确定度为

$$u_c(L) = [u(\delta_p)^2 + u(\delta_{\text{pix}})^2 + u(\delta_{\text{sr}})^2 + u(\delta_d)^2 + u(\delta_t)^2 + u(\delta_{\text{cal}})^2 + u(\delta_T)^2 + b^2]^{1/2} \quad (3)$$

式中: $u_c(L)$ 为测量尺寸 L 的合成不确定度;而 $u_p, u_{\text{pix}}, u_{\text{sr}}, u_d, u_t, u_{\text{cal}}, u_T$ 分别为变量 $\delta_p, \delta_{\text{pix}}, \delta_{\text{sr}}, \delta_d, \delta_t, \delta_{\text{cal}}, \delta_T$ 所引入的不确定分量。

3 测量不确定度评定实例

3.1 试验设备

试验设备为德国 YXLON 公司生产的 FF85 型工业 CT 检测仪,其配备有两个管电压不同的射线管,可以任意进行切换。试验选用最大管电压为 300 kV 的微焦点 X 射线管,细节分辨率可达 $[2.38 + (L/100)] \mu\text{m}$;数字平板探测器像素矩阵为 $3\,072 \times 3\,072$ (长×宽),像素尺寸为 $139 \mu\text{m}$,帧率为 $25 \text{ 帧} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

所使用的图像分析软件为 VGStudio MAX 3.3,对所识别出的缺欠,基于 ISO 50%等值面阈值分割

方法进行尺寸测量。

3.2 缺欠试件

通常无损检测所检试件存在的自然产生或人工制备的缺欠,而缺欠的尺寸和分布具有随机性,文章中采用长横孔作为测试缺欠。试件结构如图 2 所示,评定模型采用的试件材料为铝合金,形状为圆柱体,内部含有圆柱体形状的长横孔。试件规格为 80 mm×30 mm(直径×高),缺欠尺寸为 1.5 mm×8 mm(直径×长度),缺欠尺寸测量过程中以最大长度和最大直径作为测量结果。

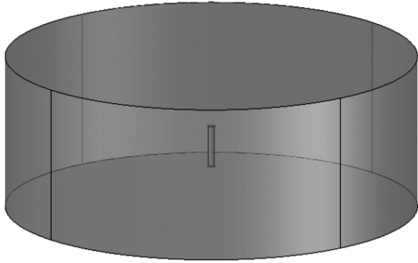


图 2 试件结构示意图

3.3 测量过程引起的标准不确定度

采用 VGStudio MAX 3.3 软件对被检试件进行尺寸测量,测量次数为 10 次,获得缺欠直径 ϕ 和长度 L ,测量结果如表 1 所示。

表 1 试件缺欠尺寸测量结果 mm

| 测量次数 | 缺欠直径 | 缺欠长度 |
|------|-------|-------|
| 1 | 1.490 | 8.073 |
| 2 | 1.506 | 8.069 |
| 3 | 1.513 | 8.045 |
| 4 | 1.503 | 8.041 |
| 5 | 1.496 | 8.049 |
| 6 | 1.506 | 8.056 |
| 7 | 1.511 | 8.050 |
| 8 | 1.503 | 8.034 |
| 9 | 1.504 | 8.029 |
| 10 | 1.501 | 8.036 |

由表 1 得到 10 次测量的 ϕ 和 L 平均值,即 $\bar{\phi}=1.503\text{ mm}$, $\bar{L}=8.048\text{ mm}$ 。

根据贝塞尔公式得到单次试验的标准偏差,即

$$S_{\phi}=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum(\phi_i-\bar{\phi})^2}=0.007\text{ mm}$$
$$S_L=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum(L_i-\bar{L})^2}=0.014\text{ mm}$$

(4)

式中: n 为测量次数; S_{ϕ} 为缺欠直径测量结果的标准偏差; S_L 为缺欠长度测量结果的标准偏差; ϕ_i 为缺欠直径的各次测量结果; L_i 为缺欠直径的各次测

量结果。

实际检测输出一 次结果,则其直径与长度测量不确定度分别为 $u_{p\phi}=0.007\text{ mm}$, $u_{pL}=0.014\text{ mm}$ 。

3.4 平板探测器像素尺寸引起的标准不确定度

试验使用的 CT 系统平板探测器图像像素尺寸为 139 μm ,故可以假定像素尺寸对测量结果的影响满足误差限为 $\pm 69.5\text{ }\mu\text{m}$ 的均匀分布。包含因子 k 为 $\sqrt{3}$,由像素尺寸引起的相对不确定度 u_{pix} 为 0.048 mm。

3.5 系统微焦点的空间分辨率引起的不确定度

由于系统空间分辨率为 $[2.38+(L/100)]\text{ }\mu\text{m}$,按缺欠尺寸为 $\phi\text{ }1.5\text{ mm}\times 8.0\text{ mm}$ 计算,可得出缺欠测量直径方向和长度方向的系统空间分辨率为 0.017 mm 和 0.082 mm,假定其满足均匀分布,包含因子 k 为 $\sqrt{3}$,那么,由系统空间分辨率引起的不确定度 $u_{\text{sr}\phi}=0.010\text{ mm}$, $u_{\text{sr}L}=0.047\text{ mm}$ 。

3.6 系统的密度分辨率引起的标准不确定度

CT 系统的密度分辨率为 0.9%,按照缺欠尺寸为 $\phi\text{ }1.5\text{ mm}\times 8.0\text{ mm}$ 计算,可得出缺欠直径方向和长度方向的分辨率为 0.014 mm 和 0.072 mm,假定其满足均匀分布,包含因子 k 为 $\sqrt{3}$,可得到密度分辨率引起的不确定度 $u_{\text{d}\phi}=0.008\text{ mm}$, $u_{\text{d}L}=0.042\text{ mm}$ 。

3.7 动态误差引起的标准不确定度

试验采用 VGStudio MAX 3.3 软件进行测量,动态误差 δ_t 可忽略不计,故认为动态误差引起的不确定度分量 u_t 为零。

3.8 由已校准试件引起的标准不确定度

被测试件缺欠的校准值以及扩展不确定度由校准证书给出。由校准证书可知,缺欠尺寸的扩展测量不确定度 U 为 0.004 mm,包含因子 k 为 2,则由已校准试件引起的标准不确定度分量 u_{cal} 为 0.002 mm。

3.9 由温度波动引起的标准不确定度

温度波动对尺寸测量结果的影响,体现在温度差 Δt 与膨胀系数 α 对尺寸的直接影响,可表示为

$$\delta_T=l\alpha\Delta t$$

(5)

式中: δ_T 为测试环境温度波动所引入的误差; l 为被测量尺寸; α 为膨胀系数; Δt 为温度差。

其中温度差 Δt 对尺寸测量结果的影响较大,假定测量时试块的温度差 Δt 为在 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内均匀分布,包含因子 k 为 $\sqrt{3}$ 。而膨胀系数 α 变化量对尺寸测量结果的影响远小于 Δt 的影响,故可将试验环境下的膨胀系数 α 认定为常数,铝合金试件的

线膨胀系数 α 为 $23.8 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。故,得到由温度波动引起的不确定度 $u_{T\phi} = 0.041 \text{ } \mu\text{m}$, $u_{L\phi} = 0.0220 \text{ } \mu\text{m}$ 。

3.10 系统误差

针对工业 CT,通常认为系统误差是测量平均值与校准值之间的差值,由前文可知,缺欠直径平均值的值分别为 1.503 mm 和 8.048 mm,而缺欠直径校准值和缺欠长度校准值分别为 1.51 mm 和 7.99 mm,故可得到缺欠直径与长度系统误差 $u_{b\phi} = 0.01 \text{ mm}$, $u_{bL} = 0.06 \text{ mm}$ 。

3.11 合成标准不确定度

工业 CT 在缺欠尺寸测量过程中的测量不确定度分量汇总如表 2 所示,按照式(3)可得到缺欠直径和缺欠长度的标准不确定度,即 $u_c(\phi) = 0.051 \text{ mm}$, $u_c(L) = 0.100 \text{ mm}$ 。

表 2 试件缺欠尺寸测量不确定度分量

| 序号 | 变量类型 | 概率分布 | ϕ 不确定度分量 | L 不确定度分量 |
|----|----------------|------|---------------------|---------------------|
| 1 | δ_p | 正态 | 0.007 mm | 0.014 mm |
| 2 | δ_{pix} | 均匀 | 0.048 mm | 0.048 mm |
| 3 | δ_{sr} | 均匀 | 0.010 mm | 0.047 mm |
| 4 | δ_d | 均匀 | 0.008 mm | 0.042 mm |
| 5 | δ_t | — | 0 | 0 |
| 6 | δ_{cal} | 正态 | 0.002 mm | 0.002 mm |
| 7 | δ_T | 均匀 | 0.041 μm | 0.220 μm |
| 8 | b | 正态 | 0.01 mm | 0.06 mm |

3.12 合成扩展不确定度

如表 2 所示,在 8 个测量不确定度分量中, δ_{pix} 、 δ_{sr} 、 δ_d 、 b 是权重较大的分量,且概率分布情况为 1 个正态分布和 3 个均匀分布。工业 CT 是精密度较高的仪器,需要保证较大的置信区间。由于正态分布和均匀分布合成后的概率分布极为复杂,且不确定度传播定律不宜用于置信区间的传播,无法将合成后的概率分布按照正态分布或梯形分布换算包含因子 k 。现假定合成后的概率分布仅受权重最大参数的正态分布和均匀分布影响,可知当合成后概率分布的包含因子 k 为 1.96,且均匀分布半宽与正态分布标准差比值趋近于 0 时,可得到置信概率 p 的最小值为 0.95。则可得到扩展不确定度,即

$$U(\phi) = K \times u_c(\phi) = 0.100 \text{ mm} \tag{6}$$

$$U(L) = k \times u_c(L) = 0.196 \text{ mm} \tag{7}$$

式中: $U(\phi)$ 为直径扩展不确定度; $U(L)$ 为长度扩展不确定度。

4 结论

对工业 CT 测量结果的影响因素进行了分析,采用 GUM 法建立了缺欠试件的测量不确定度评定模型,并以 FF85 型工业 CT 系统为例,进行了不确定度的分析与计算。其中测量过程、平板探测器像素尺寸、微焦点的空间分辨率、系统误差为不确定度的最大影响因素。结果表明,所提方法可满足工业 CT 系统对缺欠尺寸测量不确定度的评估要求。

参考文献:

[1] 张朝宗,郭志平,张朋. 工业 CT 技术和原理[M]. 北京:科学出版社,2009.

[2] 孙灵霞,叶云长. 工业 CT 技术特点及应用实例[J]. 核电子学与探测技术,2006,26(4):486-488,453.

[3] 王贤刚,田杰漠,张朝宗,等. 用于检测氧化锆人工髋关节的高能 X-CT 系统[J]. 稀有金属材料与工程,2005(S2):1195-1197.

[4] 倪培君,张维国,郭森,等. 工业 CT 检测的实验室能力认可[J]. 无损检测,2021,43(9):58-63.

[5] 李敬,李寿涛,程云,等. 工业计算机断层成像几何尺寸测量不确定度评定[J]. 无损检测,2021,43(1):24-28.

[6] 张朝宗. 工业 CT 技术参数对性能指标的影响(续)——兼谈如何选择工业 CT 产品[J]. 无损检测,2007,29(3):142-145,172.

[7] 邓甜,邓倩妮. 锥束 CT 的 FDK 算法与 CUDA 实现[J]. 微型电脑应用,2011,27(6):46-50,3.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 苏宇航,王倩妮,何方成. 已校准量块的工业 CT 测量不确定度分析[J]. 无损检测,2016,38(2):28-31.

[11] 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.