

DOI: 10.11973/wsjs202109013

工业 CT 检测的实验室能力认可

倪培君¹, 张维国¹, 郭淼², 付康¹, 潘锋²

(1. 中国兵器科学研究院宁波分院, 宁波 315103; 2. 中国合格评定国家认可中心, 北京 100062)

摘要:介绍了工业 CT(计算机层析成像)检测技术能力的实验室认可现状;基于标准 CNAS-CL01:2018《检测和校准实验室能力认可准则》的要求,从人员、设备、检测过程控制、测量不确定度评定及确保结果有效性等方面分析了影响工业 CT 检测技术能力的主要因素,最后提出了工业 CT 技术能力实验室认可的建议。

关键词:工业 CT; 实验室认可; 无损检测; 技术能力

中图分类号: TG115.28 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2021)09-0058-06

Laboratory accreditation of industrial computed tomography testing competence

NI Peijun¹, ZHANG Weiguo¹, GUO Miao², FU Kang¹, PAN Feng²

(1. The Ningbo Branch of Ordnance Science Institute of China, Ningbo 315103, China)

(2. China National Accreditation Service for Conformity Assessment, Beijing 100062, China)

Abstract: This paper introduces the current situation of laboratory accreditation for technical competence of industrial computed tomography. Based on the requirements of CNAS-CL01:2018 "Accreditation criteria for the competency of testing and calibration laboratories", the main factors affecting the technical competence of industrial CT testing from the aspects of personnel, equipment, testing process control, evaluation of measurement uncertainty and ensuring the validity of results are analyzed. Finally, some suggestions on the accreditation for technical competence of industrial CT are given.

Key words: industrial CT; laboratory accreditation; nondestructive testing; technical competence

工业 CT(计算机层析成像)技术是 20 世纪 70 年代在医用 CT 基础上发展起来的先进无损检测技术,其于 20 世纪 90 年代开始在我国取得应用^[1-2]。工业 CT 检测不受试件材料种类、形状结构及表面状况等限制,可以获得与试件几何结构、材料组分及密度特性相对应的二维或三维图像,已广泛应用于航天、航空、兵器、汽车制造、石油、电子、机械、新能源、考古等领域。1999 年以来,国内制定了多项工业 CT 检测国家标准、军用标准及行业标准。

近年来,随着工业 CT 技术及 CNAS(中国合格评定国家认可委员会)实验室认可工作的开展,申请

工业 CT 检测能力认证的实验室日趋增多,这对工业 CT 技术能力的评审和确认提出了新要求。由于现有标准 CNAS-CL01-A006:2018《检测和校准实验室能力在无损检测领域的应用说明》没有针对工业 CT 等新技术制定相应的评审规定,且国外没有现成的经验可以借鉴,所以在实际评审中存在评审过程针对性不强、技术能力确认结果有偏差、评审尺度掌握不一致等问题。因此,急需对工业 CT 检测技术能力认可的关键环节进行研究,提出工业 CT 检测技术实验室认可的政策和建议,提高认可工作的科学性和有效性。

1 工业 CT 实验室认可的基本情况

据粗略估计,目前国内拥有工业 CT 检测设备的单位超过 400 家,在役的各类工业 CT 检测设备总数在 600 台以上。

目前与工业 CT 检测相关的标准有 40 多项,包

收稿日期:2021-04-30

基金项目:中国合格评定国家认可委员会科技项目(2019CNAS07)

作者简介:倪培君(1965—),男,研究员,主要研究方向为工业 CT、数字射线成像检测和超声检测

通信作者:倪培君, nipeijun@vip.sina.com

括国际标准(ISO)4项,美国材料试验协会标准(ASTM)8项,国家标准(GB)20项,国家军用标准(GJB)3项,行业标准(HB、QJ、WJ等)12项。标准的类型有技术导则、检测方法、设备性能测试方法等。

目前国内只有11家实验室通过了CNAS工业CT技术能力认可。申请依据标准GJB 5312—2004《工业射线层析成像(CT)检测》进行认可的实验室最多,共有9家;其次是GB/T 29070—2012《无损检测 工业计算机层析成像(CT)检测 通用要求》,共有3家。其他如ASTM E1570-19《扇形束计算机层析成像(CT)检查的标准规程》、GJB 5311—2004《工业CT系统性能测试方法》、HB 20118—2012《航空发动机用电子束焊接接头工业射线层析成像(CT)检测方法》等标准也有个别实验室通过了认可。

目前在用标准CNAS-AL06:2015《实验室认可领域分类》的第11大类为无损检测,对工业CT技术没有专门分类。虽然CNAS在无损检测领域有不少专业的技术评审员,但熟悉工业CT技术的评审员所占比例较少,在评审员领域代码中也难以识别。

2 工业CT检测人员能力要求

2.1 人员资格要求

按照标准CNAS-CL01:2018《检测和校准实验室能力认可准则》6.2.2节的要求,实验室应将影响实验室活动结果的各职能要求制定成文件,包括对教育、资格、培训、技术知识、技能和经验的要求。通常要求无损检测人员在经过资格认证后,才能从事与取得的资格级别相应的检测工作。

标准GB/T 9445—2015(ISO 9712:2012)《无损检测人员资格鉴定与认证》没有覆盖工业CT技术。近年来,随着工业CT技术的应用,国际的工业CT检测标准对人员资格提出了要求,如标准ISO 15708-3:2017《无损检测 工业射线计算机层析成像检测 第3部分:操作和解释》4.5.2节规定了CT图像分析应由有资格的人员来完成。

目前,ISO 9712—2012人员资格认证标准正在修订之中,据了解,标准ISO/CD 9712—2012草案已将射线检测分为胶片照相、计算机层析成像(CT)、数字射线成像(DR)及计算机X射线摄影(CR)等4个专业,标志着CT检测专业在不久的将来也将纳入人员资格认证范围。

我国工业CT检测国家标准、军用标准和行业标准都规定了工业CT检测人员需取得相关资格证书的要求,如标准GB/T 36232—2018《焊缝无损检测 电子束焊接接头工业计算机层析成像(CT)检测方法》、GJB 5312—2004等。

2.2 人员资格认证情况

2002年11月,国防科工委发布了标准GJB 9712—2002《无损检测人员资格鉴定与认证》,首次把计算机层析成像检测纳入人员资格认证范围,并在宁波建立了培训基地。标准GJB 9712A—2008《无损检测人员资格鉴定与认证》进一步完善了工业CT检测人员资格认证要求。2003~2015年,国防无损检测鉴定委面向国防工业领域累计举办了13期工业CT培训班,颁发CT专业I,II,III级证书超过400张。2016年,政府机构改革和职能转变,国防无损检测鉴定委不再开展无损检测人员资格认证工作,为了满足工业CT无损检测人员培训和资格认证需要,2017年以来,航空、航天、军工等行业以及无损检测学会按照“统一培训,分别认证”的模式,在宁波联合举办了5期工业CT无损检测人员培训班,累计颁发I,II,III级证书超过350张。此外,重庆真测公司2008年以来也开展了工业CT专业I,II级人员培训工作,累计颁发学会(机械工程学会无损检测分会)证书170张左右。

在具体培训和认证时,各行业又有各自的特点,如航空、航天、无损检测学会将工业CT专业归为射线检测类,按照射线检测RT(CT)进行培训和认证;军工行业目前还是执行GJB 9712A—2008标准,工业CT单独认证;无损检测学会将工业CT技术门类分为铸件和焊缝等,航空、航天、军工等行业则无技术门类之分。

3 工业CT检测设备要求

3.1 设备基本配置

工业CT检测设备主要由射线源、探测器系统、机械扫描系统、重建及可视化系统等组成。与医用CT不同,大多数工业CT都是根据用户需求进行定制化设计,设备之间的结构、配置、功能特性、技术指标、软件等都同。不同射线源和探测器可组成不同的检测系统,如单源单探(如微焦点射线源+线阵探测器)、双源单探(如常规射线源和加速器射线源+线阵探测器)、双源双探(微焦点射线源和常规射线源+线阵和面阵探测器)等。射线源-机械扫描系

统-探测器系统的组合对工业 CT 系统性能起决定作用,它决定了工业 CT 检测试件范围及可能获得的信息质量;重建及可视化系统是工业 CT 系统重要组成部分,它决定了如何在短时间内重建出高质量的 CT 图像。

3.2 设备性能指标

工业 CT 设备总体性能指标主要包括检测试件范围、检测时间、图像质量、缺陷检测能力等。检测试件范围指标包括试件材料、尺寸、重量等;检测时间指标包括扫描及重建时间;图像质量指标包括空间分辨率、密度分辨率、伪像等;缺陷检测能力是指发现气孔、裂纹等缺陷的能力。

工业 CT 设备总体性能指标是由各子系统的配置和性能指标所决定的,配置不同,功能特性及性能指标也不同。射线源的指标包括射线能量、射线强度、焦点尺寸、剂量稳定性等;探测器指标包括探元尺寸、通道数量、串扰等;数据采集传输系统的指标包括信噪比、稳定性、动态范围、采集速度、一致性等;机械系统指标包括试件范围(重量、尺寸等)、扫描方式(二代、三代或锥束)、扫描轴的定位精度、重复精度等;重建及可视化系统指标包括重建算法、CPU(中央处理器)运行速度、内存大小、图像处理功能等。另外,工业 CT 成像质量受射束硬化、散

射、扫描及重建参数等多种因素影响,标定、校正和工艺参数选择等对最终的图像质量也有很大影响。

工业 CT 设备总体性能指标之间通常相互制约,如采用高能直线加速器 CT,具有高的射线穿透能力,可以检测高密度及大尺寸试件,但由于其焦点尺寸通常较大,最终空间分辨率和缺陷检测能力相对较差。微纳焦点 CT 系统通常有很高的空间分辨率,可以发现小缺陷,但只能检测几毫米的小试样。

3.3 设备校准及核查要求

CNAS-CL01:2018 认可准则对设备校准及核查提出了一系列要求,如设备投入使用或重新投入使用前,实验室应验证其符合规定要求;用于测量的设备应能达到所需的测量准确度和(或)测量不确定度,以提供有效结果。标准 ASTM E1570-19 和 ISO 15708-4:2017《无损检测-工业射线计算机层析成像检测 第四部分:验证》规定了用于工业 CT 检测的设备应经过验证,在国内外相关检测方法标准中,对工业 CT 设备的性能核查也提出了具体要求。表 1 为不同工业 CT 检测方法标准对设备性能核查的要求,可以看出,空间分辨率、密度分辨率、缺陷检测能力等都是核查的重点指标。相比之下,现有国内标准对设备总体性能、组件性能、伪像、切片厚度及尺寸测量等方面的核查要求缺少细化规定。

表 1 不同标准的工业 CT 设备性能核查要求

| 核查参数 | 标准 | | | |
|----------------|--------------------------|--------------------------|-------------------|-----------------------------|
| | GJB 5312—2004 | GB/T 29070—2012 | ASTM E1570-19 | ISO 15708-4:2017 |
| 总体性能 | — | — | 定期测量和监控 设备参数性能 | 和参考测量结果进行比对, 短周期核查(如每周) |
| 空间分辨率 | ≥1 次/年;安装调试、 维修、更换部件后 | ≥1 次/年;安装调试、 维修、更换部件后 | 1 次/每周 | 缺陷检测和尺寸测量应用 |
| 密度(对比度) 分辨率 | ≥1 次/年;安装调试、 维修、更换部件后 | ≥1 次/年;安装调试、 维修、更换部件后 | 1 次/每周 | 缺陷检测应用 |
| 切片厚度 | — | — | 1 次/每周 | — |
| 伪像 | — | — | 1 次/每周 | — |
| 组件性能 | — | — | 安装、维修或组件发生 变化后 | 组件质量评价或组件变化后, 长周期核查(如每年) |
| 缺陷检测能力 | 检测前进行验证 | 检测前进行验证 | 检测前进行验证 | 检测前进行验证 |
| 尺寸测量能力 | — | — | 检测前进行验证 | 检测前进行验证 |

3.4 设备性能校准及核查方法

由于目前国内外还没有统一的工业 CT 设备校准规范,实际工作中,基本上采用核查的方法对系统性能进行验证。表 2 为不同标准规定的 CT 设备性能核查方法。国内外对空间分辨率、密度(对比度)

分辨率的核查方法大体相同,空间分辨率核查方法有圆盘法、丝型线对卡法、圆孔(方孔)线对卡法等,密度(对比度)分辨率核查方法有圆盘法、密度差法等,但不同测试方法测量结果之间有所差异,其等效性问题还有待深入研究^[3-4]。

表 2 不同标准规定的工业 CT 设备性能核查方法

| 性能参数 | 核查方法描述 | 相关核查标准 |
|-------------|---|---|
| 总体性能 | 对参考样件进行检测, 比对检测结果, 如缺陷(气孔、裂纹)、最薄处、最厚处、厚度等, 对总体性能进行监控 | ISO 15708-4:2017 |
| | 对空间分辨率、密度分辨率等指标进行核查, 检测前对满足使用要求进行验证 | ASTM E1570-19 |
| | 对空间分辨率、密度分辨率等指标进行核查, 检测前对缺陷检测能力进行核查 | GB/T 29070—2012; GJB 5312—2004 |
| 最大穿透等效钢厚度 | 用最大可检测钢厚度测试卡进行测试 | GB/T 37158—2018《无损检测 工业计算机层析成像(CT)检测最大可检测钢厚度测试方法》 |
| 空间分辨率 | 圆盘法(MTF)、条形线对卡法、圆孔线对卡法、方孔线对卡法 | ISO 15708-3:2017; ASTM E1695—2013《计算机层析成像(CT)系统性能测量标准》; GB/T 29069—2012《无损检测 工业计算机层析成像(CT)系统性能测试方法》 |
| 密度分辨率 | 圆盘法、密度差法、空气间隙法 | ISO 15708-4:2017; ASTM E1695—2013; GB/T 29069—2012 |
| 切片厚度 | 用棱锥体、圆锥体、斜板、螺旋槽等核查 | ASTM E1570-19 |
| 伪像 | 和参考图像比较 | ISO 15708-3:2017 |
| | 观察均匀圆盘密度变化 | ASTM E1570-19; GJB 5312—2004 |
| 机械系统 | 使用坐标测量设备(CMMs)检查移位轴轨迹和定位精度 | ISO 15708-4:2017 |
| 图像比例 | 用已知空间结构的高精度球体组合(如球杆、哑铃)检查 | ISO 15708-4:2017 |
| 射束轴与探测器的垂直度 | 使用合适的测试样品(如钨丝或细针、球体等) | ISO 15708-4:2017 |
| 焦点 | 采用扫描方法、针孔照相机射线照相方法、边缘方法、小焦点和微焦点 X 射线管的有效焦点尺寸的测量方法测试; 通过比较不同放大倍数下 CT 扫描获得的尺寸在规定的误差范围之内进行核查。 | ISO 15708-4:2017; GB/T 25758.1-5—2010《无损检测 工业 X 射线系统焦点特性 第 1~5 部分(合订)》 |
| 射线输出稳定性 | 通过测量剂量率检查 X 射线管输出的稳定性 | ISO 15708-4:2017 |
| 探测器 | 和交付状态进行比较核查动态性能。定期核查坏像素。通过一定时间内的强度测量核查输出稳定性 | ISO 15708-4:2017 |
| 重建 | 在重新安装、更换硬件或升级后, 将重建结果和以前的重建结果进行比较 | ISO 15708-4:2017 |
| 可视化 | 在重新安装、更换硬件或升级后, 将可视化和测量结果和以前的结果进行比较 | ISO 15708-4:2017 |
| 缺陷检测 | ① 目标特征可检性的核查(空间分辨率、对比度分辨率、重建、可视化等); ② 适用性验证(采用参考试件结合解剖对比进行验证); ③ 一致性验证(重建、CT 图像比例、正弦图或 CT 投影序列、系统状态等) | ISO 15708-4:2017 |
| | 对是否满足检测要求进行验证 标准或对比试样核查 | ASTM E1570-19 GB/T 29070—2012; GJB 5312—2004 |
| 尺寸测量 | ① 尺寸测量能力的核查(空间分辨率、X 射线穿透性、三维数据等); ② 精度验证(采用可进行测量溯源的参考标准样品或参考试件进行核查); ③ 一致性验证(重建、CT 图像比例、正弦图或 CT 投影序列、系统状态等) | ISO 15708-4:2017 |
| | 标准对比试样(空心柱、校准孔阵列、模拟试件)核查。验证尺寸测量精度的标准样件要经过校准 标准或对比试样核查 | ASTM E 1570-19 GB/T 29067—2012《无损检测 工业计算机层析成像(CT)图像测量方法》 |

缺陷的检测能力、尺寸测量能力通常要求采用标准(对比)试件、参考标准(物体)比对的方法进行验证,ISO 15708-4:2017、ASTM E1570-19 标准特别规定在用标准试件(或参考标准)用于尺寸测量精度验证时,应对标准试件(或参考标准)进行计量溯源。

标准 ISO 15708-4:2017 对 CT 设备组件性能给出了一系列推荐性核查方法,GB/T 25758.1~5-2010 给出了 X 射线焦点尺寸的测量方法。通过定期核查 CT 系统组件性能的变化,来监控 CT 系统的稳定性及检测结果的一致性。

综上所述,国内外对工业 CT 的空间分辨率、密度分辨率、缺陷检测能力、尺寸测量精度等关键指标核查方面都有相关测试方法标准,核查的原理大体相同,采用的标准样件各有特色;新的 ISO 15708-4:2017 标准对组件性能核查也提供了一些参考方法,国内现有标准对这些内容规定相对较少。

3.5 设备性能校准及核查建议

工业 CT 设备组成结构复杂,性能参数多,总体性能受组件性能影响,随着时间的推移,性能指标会发生变化。为此,需要对设备性能进行校准和核查,以满足检测方法要求。工业 CT 设备在验收时,厂家一般要进行性能的全面测试,提供设备性能满足要求的合格证明文件。作为用户,主要关注和应用相关的性能指标,如检测等效钢厚度、空间分辨率、密度分辨率、缺陷检测能力等。笔者建议以检测目标特征为导向,对设备性能进行科学合理的校准和核查。对于直接影响定量检测结果或进行精度验证的标准试件(参考标准)应进行定期校准,如空间分辨率测试卡、密度分辨率测试卡、图像尺寸参考标准件(如哑铃球)等,校准周期可为 1 a;对于总体性能、组件性能等应进行核查,核查的项目参数由实验室根据各自设备的特点及设备使用情况等自行确定,至少应包括以下内容:① 最大可检产品等效钢厚度;② 最佳空间分辨率;③ 最佳密度分辨率;④ 可检测出的最小缺陷;⑤ 尺寸测量精度。

4 检测过程控制要点

工业 CT 检测结果除了与人员、设备等资源条件紧密相关外,检测过程控制也很关键,通常包括检测准备、设备校正、扫描工艺参数选择、图像重建及处理、结果解释及评价等。这些都是现场评审时需要重点关注的要素。

4.1 检测准备

检测前需要了解被检测对象材料的种类、结构、尺寸及检测详细要求,编写工艺规程或工艺卡,并验证是否可以满足检测需求,如能否满足最小缺陷检出、能否达到尺寸测量精度等。工艺规程或工艺卡的验证可以使用标准(对比)试件来进行,其材料、形状尺寸、缺陷特征等应尽量与被检样品相近。

4.2 设备校正

检测前,需要对设备进行校正(标定),通常包括探测器暗场及亮场、中心线、像素尺寸的校正。这些校正可以有效减少最终 CT 图像中的噪声、环形伪像等,提高缺陷检出能力和尺寸测量精度。

4.3 扫描工艺参数选择

选择合适的扫描工艺参数,包括射线能量、焦点尺寸、切片位置、切片厚度、扫描视场直径、滤波方法、散射线校正、扫描时间等。

4.4 图像重建及处理

选择合适的重建参数及图像处理方法,获得高质量的 CT 图像。选取灰度、伪彩色、放大或二维、三维等图像显示方式,并通过全局或局部的对比度、亮度的调整,使图像便于观察。

4.5 结果的解释、评价

对图像进行观察和分析,识别结构影像、缺陷影像及伪像等。根据图像上细节特征的像素值、形状及尺寸等信息,采用相关分析软件,对图像目标细节特征进行分析和解释;根据检测要求及相关标准对 CT 图像目标特征作出定位、定性、定量及符合性等评价。

5 测量不确定度评定

工业 CT 被广泛应用于缺陷检测、尺寸测量、密度表征、逆向重构和孔隙率分析中,在这些应用中,有时需要给出缺陷尺寸、样品特征尺寸、区域面积、密度、孔隙率等定量检测结果。按认可准则要求,这些需要给出定量检测数据的实验室应有能力评定测量结果的不确定度,在一定的置信概率下保证测量结果的可靠性。

测量不确定度评定方法主要有 GUM 法、蒙特卡罗法、Globe 法等。目前在无损检测领域应用最多的还是 GUM 法。GUM 法又分为直接评定法和综合评定法两类。

工业 CT 实际应用中可行的方法是综合评定法,基本思路是将 CT 成像过程当作一个“黑匣

子”,评定时只关注最终图像,在正常的检测条件下,对被检件进行多次重复性检测,综合考虑重复性因素引入的不确定度分量(包括人员、光子统计噪声、机械系统精度、数据采集、重建算法、图像显示等),在此基础上再考虑标准试件的不确定度分量和测量标尺等不确定分量等,最后进行合理评定。有关工业 CT 在尺寸测量不确定评定方面的内容,国内已开展了相关研究工作^[5-6]。值得注意的是,工业 CT 设备测量结果会存在系统误差,为此,检测前需采用与被检测试件材料相同或相近的标准试件对设备进行标定,检测后要对系统误差进行修正;此外,随着设备运行时间的增加,工业 CT 设备的性能也会变化,测量结果的不确定度也在变化,实验室应有能力识别稳定性因素带来的测量结果不确定度。

6 确保结果有效性及其他

为了确保检测结果的有效性,CNAS-CL01:2018 认可准则第 7.7 条规定了各种质量控制方法,这些方法大多都可以应用于工业 CT 检测中。在外部质控方面,国内外还没有通过标准 ISO/IEC 17043:2010《能力验证提供者认可准则》认可的工业 CT 检测项目能力验证计划提供者(PTP),外部质量控制主要是通过实验室之间的比对实施。

由于工业 CT 设备配置及性能差异较大,不同实验室间比对时需要做好策划工作,例如比对设备型号、样品及方法选择、结果评价方法确定等,通常是找能量相近、性能接近的工业 CT 设备进行比对。在内部质量控制方面,可使用空间分辨率测试卡、密度分辨率测试卡等对性能指标进行测试、期间核查、留样再测、报告结果审查、实验室内比对及盲样测试等。

其他方面,还需要关注 CNAS-CL01:2018 认可准则对设施及环境条件控制的要求,如从事工业 CT 检测的机构应取得政府环保部门颁发的《辐射安全许可证》,射线防护应满足 GBZ 117—2015《工业 X 射线探伤放射防护要求》、GB 18871—2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》等标准的要求,工业 CT 扫描室配备安全联锁、监控及报警装置等。随着移动式工业 CT 的应用,在非固定场所实施的工业 CT 检测也应满足法律、法规及检测方法

的要求。

7 结语

工业 CT 技术作为先进的无损检测技术,其设备结构复杂,性能参数差异较大,对检测人员要求高,检测结果受多种因素影响,其实验室技术能力认可有一定难度,对认可工作提出了新的要求。就目前认可现状和认可研究情况看,评审工作中需重点关注人员资质、设备校准及核查、测量不确定度评定等内容。

(1) 工业 CT 检测人员除了满足检测方法和特定行业要求外,应持有 CT 专业资格证书,授权签字人建议持有射线检测Ⅲ级和 CT-Ⅱ级或者持有 CT-Ⅲ级证书。

(2) 工业 CT 检测设备性能需要进行校准和核查,以满足检测要求。用户应重点关注和应用相关的性能指标,如检测等效钢厚度、空间分辨率、密度(对比度)分辨率、缺陷检测能力、尺寸测量精度等,为此,应对空间分辨率测试卡、密度(对比度)分辨率测试卡、图像尺寸参考标准件等设备进行校准,对总体性能、组件性能等应进行有效核查。

(3) 评审中需要重视检测准备、设备校正、工艺参数选择、结果解释评价等内容,开展缺陷定量、尺寸测量等提供定量数据的实验室,应有能力评定测量结果的不确定度。

参考文献:

- [1] 倪培君,李旭东,彭建中. 工业 CT 技术-第六讲:工业 CT 在无损检测中的应用[J]. 无损检测,1996,18(6):173-176.
- [2] 倪培君,李旭东,张维国,等. 工业 X 射线 CT 的应用[J]. CT 理论与应用研究,1997,6(3):36-42.
- [3] 郭智敏,倪培君,乔日东,等. 工业 CT 系统空间分辨力测试方法[J]. 无损检测,2011,33(11):13-16,20.
- [4] 郭智敏,倪培君,曹玉玲,等. 工业 CT 系统空间分辨率两种测试方法分析与评价[J]. CT 理论与应用研究,2015,24(3):393-399.
- [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.
- [6] 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.