|  |  |
| --- | --- |
| ICS | 19.100 |
| CCS | |  | | --- | | T/XXXXX |   F81 |

XXXXXXXXXXXX团体标准

T/XXXX XXX-2025

X射线3D在线检测设备校准方法

Calibration Method for X-ray 3D Online Testing Equipment

(征求意见稿)

2025-XX-XX发布

2025-XX-XX实施

XXXXXXXXX  发布

目次

[前言 II](#_Toc207287703)

[1 范围 1](#_Toc207287704)

[2 规范性引用文件 1](#_Toc207287705)

[3 术语和定义 1](#_Toc207287706)

[4 计量特性 2](#_Toc207287707)

[4.1空间分辨率 2](#_Toc207287708)

[4.2密度分辨力 2](#_Toc207287709)

[4.3探测形状误差 2](#_Toc207287710)

[4.4探测尺寸误差 2](#_Toc207287711)

[4.5空间尺寸测量误差 2](#_Toc207287712)

[4.6空间尺寸测量重复性 2](#_Toc207287713)

[4.7台阶高度尺寸测量误差 2](#_Toc207287714)

[4.8 X射线泄漏辐射 2](#_Toc207287715)

[5 校准条件 3](#_Toc207287716)

[6 校准方法 4](#_Toc207287717)

[6.1校准前准备工作 4](#_Toc207287718)

[6.2空间分辨率 4](#_Toc207287719)

[6.3密度分辨力 4](#_Toc207287720)

[6.4探测形状误差 4](#_Toc207287721)

[6.5探测尺寸误差 6](#_Toc207287722)

[6.6空间尺寸测量误差 6](#_Toc207287723)

[6.7空间尺寸测量重复性 7](#_Toc207287724)

[6.8台阶高度尺寸测量误差 7](#_Toc207287725)

[6.9 X射线泄漏辐射 7](#_Toc207287726)

[7 校准结果与表达 8](#_Toc207287727)

[参 考 文 献 9](#_Toc207287728)

1. 前言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国计量协会提出并归口。

本文件起草单位：XXX、XXX、XXX、XXX、XXX、XXX、XXX、XXX、XXX、XXX。

本文件主要起草人：XXX、XXX、XXX、XXX、XXX、XXX、XXX、XXX、XXX、XXX。

本文件为首次发布。

X射线3D在线检测设备校准方法

* 1. 范围

本文件规定了X射线3D在线检测设备的校准参数、校准项目和校准方法等。

本文件适用于X射线CL平面式扫描3D在线检测设备的校准。

* 1. 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 20737 无损检测 通用术语和定义

GB/T 12604.11 无损检测 术语 X 射线数字成像检测

GB/T 34874.3 产品几何技术规范(GPS) X射线三维尺寸测量机 第3部分:验收检测和复检检测

JJF 1001 通用计量术语及定义

JJF 2043 工业用X射线CT装置校准规范

* 1. 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 X射线3D数字成像 X-Ray Digital radiography

采用数字探测器接收射线，输出数字图像并进行图像处理得到3D图像的一种X射线成像方法。

3.2 空间分辨率 Spatial resolution

X射线无损检测设备扫描图像能鉴别和区分数字图像中最小几何细节特征的能力。

3.3 密度分辨力 Density resolution

在一定条件下，X射线检测设备辨别物体中指定大小区域与周边区域密度差异的能力。

3.4 切片厚度 Slice thickness

三维重建图像在对应轴线上的切割厚度。

3.5 探测形状误差 probing form error

选取标准球扫描3D成像图上的代表点，采用最小二乘法进行处理，得到的高斯拟合球半径变化范围。

3.6 探测尺寸误差 probing size error

选取标准球扫描3D成像图上的测量点，采用最小二乘法进行处理，得到的高斯拟合球直径与标准球校准直径之间的差值。

3.7阶梯标准块 Step standard block

具有相同材料，呈一系列阶梯状的物体。

3.8 X射线泄漏辐射 leakage radiation

穿过屏蔽体的电离辐射束。

3.9 计量单位

3.9.1 X射线的周围环境剂量当量率单位的名称：西弗/每小时；符号：Sv/h 。

3.9.2 空间分辨力单位的名称：线对每毫米；符号：Lp/mm

* 1. 计量特性

4.1空间分辨率

X射线3D在线检测设备空间分辨率在不同放大倍率下满足设备说明书给出的指标值。

4.2密度分辨力

X射线3D在线检测设备密度分辨率在不同放大倍率下满足其分辨率的给出指标值。

4.3探测形状误差

X射线3D在线检测设备探测形状误差MPE：0.01mm。

4.4探测尺寸误差

X射线3D在线检测设备探测形状误差MPE：0.01mm。

4.5空间尺寸测量误差

X射线3D在线检测设备空间尺寸测量误差MPE：±0.05mm。

4.6空间尺寸测量重复性

X射线3D在线检测设备空间尺寸测量重复性不大于 0.03mm。

4.7台阶高度尺寸测量误差

X射线3D在线检测设备台阶高度尺寸测量误差MPE：±0.03mm。

4.8 X射线泄漏辐射

X射线3D在线检测设备工作时，在距装置主体(不含传输带)外表面0.1m的任意处(包括系统的入口、出口处)，X射线的周围环境剂量当量率≤5 μSv/h。

注:作为校准，不判断合格与否，上述计量特性的指标仅供参考。

* 1. 校准条件
     1. 校准测试环境条件

环境温度：20℃±6℃； 相对湿度：≤70%RH，标准器在被测环境内平衡温度时间不少于2小时。

* + 1. 校准测试场地

常温下性能测量校准区域X射线防辐射安全应符合操作安全标准，X射线3D在线检测设备周围环境剂量当量率不超过5 μSv/h。

* + 1. 校准项目和主要标准器及配套设备

校准项目和主要标准器及配套设备如表1所示。

表1 校准项目和主要标准器及配套设备

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **序号** | **校准项目** | **主要标准器** | **技术要求** |
| **1** | 空间分辨率 | 分辨率测试标准器 | 具有特定尺寸间隔的镀金或钨线纹栅格标准器，线纹栅格间隔尺寸（3-50）μm，镀层厚度不小于1μm。 |
| **2** | 密度分辨力 | 空气间隙密度分辨率测试标准件 | 空气间隙密度分辨率测试标准件：基体直径60mm厚度3mm，空气间隙孔直径：5mm，深度：5μm/10μm/20μm/40μm/80μm/100μm，允差小于自身高度10%。 |
| **3** | 探测形状误差 | 单球板 | 单球板由红宝石、碳纤维板组成。球直径2mm或4mm，球直径测量结果不确定度不大于3μm。单球圆度不大于0.5μm。 |
| **4** | 探测尺寸误差 | 单球板 | 单球板由红宝石、碳纤维板组成。球直径2mm或4mm，球直径测量结果不确定度不大于3μm。单球圆度不大于0.5μm。 |
| **5** | 空间尺寸测量误差 | 单/双层阵列球板 | 阵列球板由红宝石、碳纤维板组成。球直径2mm或4mm，球间距测量结果不确定度不大于5μm。  校准时球心距选择不小于被校准倍率下单视场(MFOV)的20%，不大于(MFOV)的80%。 |
| **6** | 空间尺寸测量重复性 | 单/双层阵列球板 | 阵列球板由红宝石、碳纤维板组成。球直径2mm或4mm，球间距测量结果不确定度不大于5μm。  校准时球心距选择不小于被校准倍率下单视场(MFOV)的20%，不大于(MFOV)的80%。 |
| **7** | 台阶高度尺寸测量误差 | 阶梯标准块 | 阶梯标准块：台阶高度：（0.5~10.0）mm，台阶高度测量结果不确定度不大于5μm。 |
| **8** | X射线泄漏辐射 | X射线辐射计量仪 | 相对固有误差-15%~+22%。 |

* 1. 校准方法

6.1校准前准备工作

6.1.1 启动X射线3D在线检测设备预热时长不少于15分钟，待稳定后开始校准工作。

6.1.2 确认X射线3D在线检测设备已完成系统标定，处于正常工作状态。

6.1.3 选择不同的视场范围对设备进行校准，如最高放大倍率下的最小视场和常用放大倍率下的视场进行校准，也可根据用户实际需求增加不同放大倍率下的校准。

6.1.4 校准时按照日常使用状态条件设置X射线3D在线检测设备的管电压、管电流、扫描时间、3D重建所需图像数量、重建体像素等测量参数，并在原始记录中作为前置条件给出。

6.2空间分辨率

将空间分辨率校准标准器传送至被校设备检测区，调整标准器检测区域，使空间分辨率校准标准器处于中心轴线上，并依据空间分辨率标准器中的分辨率图案选择适当的放大倍率进行调焦至图像最清晰状态，此时能分辨的线对数值即为该放大倍率下的空间分辨率值。当要检测该设备的极限分辨率时，将设备的放大倍率调至最大检测能力值，在此环境条件下，观察分辨率标准器的线对值，能分辨清最小线对值即为该设备的极限分辨率值。

6.3密度分辨力

将密度分辨率校准标准器传送至被校设备检测区，调整标准器检测区域，使密度分辨率标准器处于中心轴线上，对密度分辨率标准器的台阶位置进行扫描，在扫描所得的重建图像中选择标准器圆柱或阶梯台阶中间位置的图像进行观察，调整图像的亮度对比度，记录图像中可清晰分辨圆孔的直径和镂空圆柱体的高度值或台阶高度值。分别测试有空气间隙部位和无空气间隙部位(基体)的CT值（测试范围内像素的平均值）。无空气间隙部位(基体)的CT测试不能少于5个部位。求出无空气间隙部位(基体)测试部位点的平均CT值和标准偏差值。

若有空气间隙部位的平均 CT 值与无空气间隙部位(基体)的平均 CT 值差值的绝对值大于无空气间隙部位(基体)平均 CT 值标准差的3倍, 则认为此空气间隙部位的密度与无空气间隙部位(基体)的密度差可分辨。由满足此条件的最小空气间隙计算出的密度分辨力代表了CT 系统的密度分辨能力。

C =h/t×100% （1）

式中:

C------密度分辨能力；

h——空气间隙高度, 单位为毫米( mm )；

t——切片厚度, 单位为毫米( mm )。

6.4探测形状误差

将探测形状误差标准器传送至被校设备检测区，调整标准器检测区域，使探测形状误差标准器处于中心轴线上，对探测形状误差标准器的单球进行扫描并重建三维结构图，探测形状误差为重建图像形状尺寸与被测球实际尺寸的差值。形状误差标准器（红宝石标准球直径）的选取规则参考表（1）

表 1红宝石标准球直径选取规则

|  |  |
| --- | --- |
| 单一视场大小 | 红宝石标准球直径 |
| ≤30 mm放大倍率 | 2 mm |
| ＞30 mm放大倍率 | 4 mm |

由于平面扫描在球顶部会形成伪影，因此在球赤道至球冠不少于1/2位置范围内取分布于标准球上的20个区域，每个区域选取一个典型代表点，代表点应大致均匀覆盖所有检测点。使用被校设备自带或第三方测量软件在有效三维数据球面均匀分布采集不小于20个测量点，探测采点分布如图1所示，利用20个代表点采用最小二乘法(高斯法)拟合高斯球，计算标准球上的测量点与拟合球心的最大距离R max 和最小距离 R min 之差，即为探测形状误差 P F 值：

P F = R max - R min  （2）

式中：

P F*——*重构球面的探测形状误差，mm；

R max*——*重构球面上的测量点与拟合球心的最大距离，mm；

R min*——*重构球面上的测量点与拟合球心的最小距离，mm。



图1 单球3D扫描图取点位置示意图

6.5探测尺寸误差

在6.4的三维扫描结果基础上，利用计算探测形状误差时所用到的20个代表点评估探测尺寸误差。 利用20个代表点计算得到高斯拟合球, 高斯拟合球所确定的测量直径 D a 与标准球的校准直径 D r 间的差值即为探测尺寸误差值:

P S =D a -D r  （3）

式中：

P S*——*重构球面的探测尺寸误差，mm；

D a*——*重构球面高斯拟合直径值，mm；

D r*——*标准球直径值，mm。

6.6空间尺寸测量误差

将空间尺寸测量误差标准器传送至被校设备检测区，调整标准器检测区域，使空间尺寸测量误差标准器处于中心轴线上，对空间尺寸测量球阵列标准器进行扫描并重建三维结构图。①采用单层球板测量阵列球板的空间球心间距，测量值与球间距标准值的差值为空间尺寸误差(如图2(a)所示)；②采用双层阵列球板测量阵列球板的上下层球心间距，测量值与球间距标准值的差值为空间尺寸误差(如图2(b)所示)。根据仪器使用说明书要求，按照用户实际测量应用条件，完成重建拍摄图像数、扫描速度等系统参数设置后，对标准球棒/板进行扫描重建，获得两个标准球三维体数据。

使用仪器自带或第三方测量软件，按照7.1.4给出的方法，在标准球三维数据表面提取测量点，并利用最小二乘法拟合得到两个标准球的球心坐标并计算球心距，得到的球心距尺寸测量值与校准值之差即为校准结果，球心距测量示值误差计算公式如下。

第一层

L2

L1

L3

第二层

L

图2 (a) 单层球板 (b) 双层球板

L S =L a -L r  （4）

式中：

L S*——*球心距测量误差，mm；

L a*——*重构球面高斯拟合后球心距测量值，mm；

L r*——*标准球心距值，mm。

6.7空间尺寸测量重复性

按照6.6的测量方式对单层球板某一特定空间尺寸值进行图像采集10次，并对图像进行尺寸分析测量，将10次测量结果按照贝塞尔公式计算得到空间尺寸测量结果重复性。

贝塞尔公式：

 （5）

 （6）

式中：

——测量重复性，mm；

——第*i*次测量时的测量结果；

——测量误差平均值；

——测试次数（*n*≥10）；

6.8台阶高度尺寸测量误差

将台阶高度尺寸测量误差标准器传送至被校设备检测区，调整标准器检测区域，使台阶高度尺寸测量误差标准器处于中心轴线上，对台阶高度尺寸测量误差标准器进行扫描并重建三维结构图，测量扫描图像的台阶高度值与标准值即为台阶高度尺寸测量误差。高度测量值为一个台阶面到另一个台阶面的垂直距离(如图3所示)。

H

图3 台阶高度尺寸测量值

H S =H a -H r  （7）

式中：

H S*——*台阶高度测量误差，mm；

H a*——*重构台阶高度测量值，mm；

H r*——*标准高度值，mm。

6.9 X射线泄漏辐射

设置被校设备在最高工作电压和相应的最大束流条件下工作，在距离设备主体外表面(包括前后及侧面)0.1m处共选择5个测量点，用防护水平X射线辐射测量仪进行X射线泄漏剂量率测量。在上述规定条件下，每个点测量10次，选取其中最大值作为该X射线3D在线检测设备的泄漏辐射。

* 1. 校准结果与表达

经过校准的X射线3D在线检测设备出具校准报告，报告应包含校准项目和校准结果。

参 考 文 献

[1] GB/T 26593-2011 无损检测仪器 工业用X射线CT装置性能测试方法

[2] GB/T 35391-2017 无损检测 工业计算机层析成像(CT)检测用空间分辨力标准器

[3] GB/T 35386-2017 无损检测　工业计算机层析成像(CT)检测用密度分辨力标准器

[4] JJF 2043-2023 工业用X射线CT装置校准规范

[5] JJF 1596-2016 X射线工业实时成像系统校准规范

[6] JJF 2102-2024 X射线安全检查计算机断层成像装置(CT)校准规范