



中华人民共和国国家标准

GB/T 29068—2012

无损检测 工业计算机层析成像(CT) 系统选型指南

Non-destructive testing—Guide for industrial computed tomography(CT)
system selection

2012-12-31 发布

2013-10-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会 发布

前　　言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由全国无损检测标准化技术委员会(SAC/TC 56)提出并归口。

本标准起草单位:重庆大学 ICT 研究中心、中国兵器科学研究院宁波分院、上海泰司检测科技有限公司、重庆真测科技股份有限公司、中国航天科技集团川南机械厂。

本标准主要起草人:刘丰林、倪培君、卢艳平、谭辉、徐向群、黄建淞、王福全、邹永宁、张政、王珏。

引　　言

工业 CT 系统由一套复杂、精密、相匹配的必备部件构成,可用于重建满足检测需求的图像。CT 用户通常关心应用需求,而供应商则关心满足用户检测需求的系统部件选型。理解 CT 用户的需求和 CT 系统供应商的解决方案,对在现有设备基础上更新部件、满足特殊应用需求有重要意义。本标准旨在说明在选择适当的 CT 系统时,宜考虑和明确的应用需求与工业 CT 系统性能指标之间的关系。

无损检测 工业计算机层析成像(CT) 系统选型指南

1 范围

本标准给出了用户检测需求与工业计算机层析成像(CT)系统参数及性能指标之间的对应关系。本标准提供了一系列的指导准则,用于指导用户将检测需求转换为对 CT 系统指标及组成部件的要求。本标准建议用户与潜在的供应商讨论或向专家咨询以获得更多信息。

本标准适用于工业 CT 系统选型和扫描检测服务选择,也可用于指导 CT 系统用户提出检测需求。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。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 12604.2 无损检测 术语 射线照相检测

GB/T 29034 无损检测 工业计算机层析成像(CT)指南

3 术语和定义

GB/T 12604.2 界定的术语和定义适用于本文件。

4 工业 CT 技术

工业 CT 成像原理见 GB/T 29034。

通常,根据功能模块划分,工业 CT 系统通常包括射线源系统、探测系统、数据采集系统、机械系统、控制系统、图像处理系统、辐射安全防护系统等子系统组成。由于工业 CT 系统各组成子系统可选择范围大,大多 CT 系统配置不一样,有必要了解某个系统部件的特性,以及子系统性能的影响。

5 总则

5.1 概述

由于工业 CT 系统可检测的对象种类多,检测要求也各不相同,因此工业 CT 的针对性较强。在选择工业 CT 系统之前,用户首先应对检测对象和检测需求做好详细地分析。然后,根据需求选择工业 CT 系统的主要功能与性能指标。最后,在满足需求的情况下,选择性价比最高的系统。

图 1 给出了工业 CT 选型通用流程图。

表 1 给出了各种检测需求与 CT 系统的组成部件和子系统的关系。

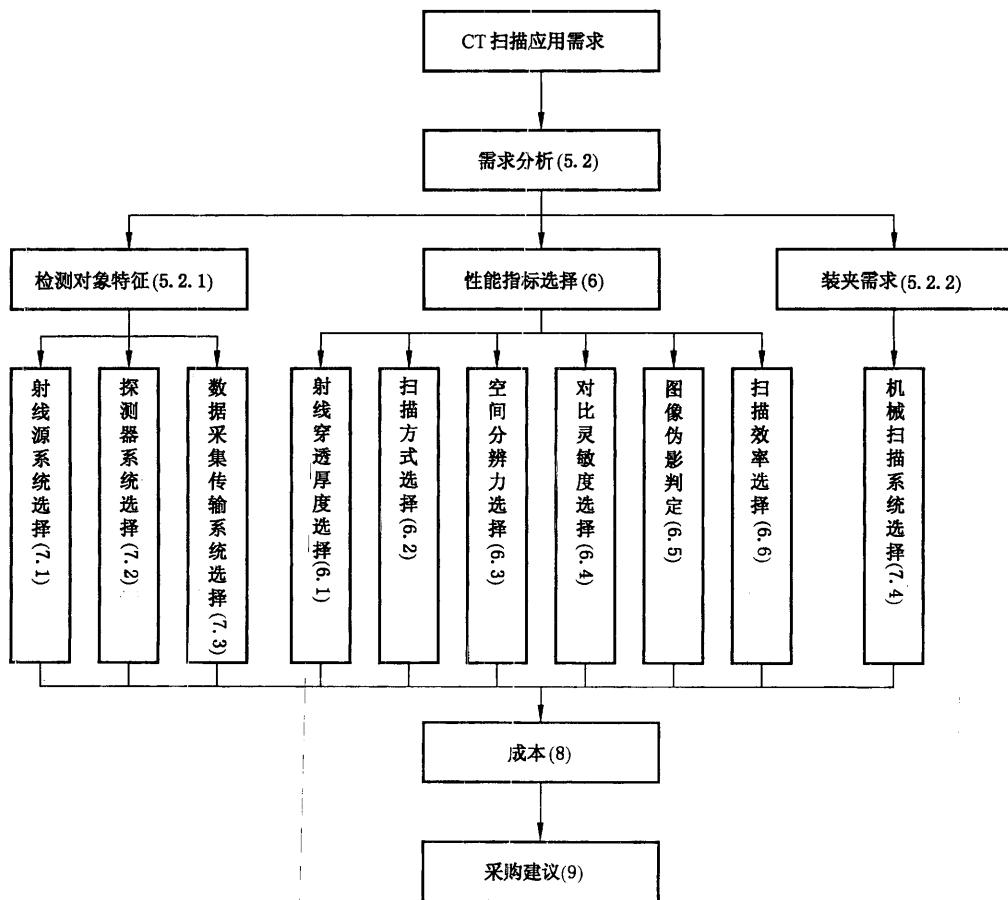


图 1 工业 CT 系统选型流程图与参见章节

表 1 检测需求与对应 CT 子系统主要系统参数

需求	部件/子系统的影响	相应的章条号
检测对象尺寸和质量	机械子系统	5.2
射线穿透厚度	动态范围 射线源	6.6.3 6.3.2, 6.4.3, 7.1
空间分辨力	探测器尺寸/准直器参数 源尺寸/源焦点尺寸 几何放大倍数 机械子系统	7.2 6.3.2 6.3.3 7.4
对比灵敏度	射线强度/能量 探测器尺寸/源焦点尺寸	6.4.3 6.3.2
伪影程度	机械子系统 探测器	7.4 7.2
CT 系统扫描效率	图像矩阵 采样间隔	6.6.2 6.6.5
软件	软件	7.5.2
人机交互界面	操作控制台	7.5.3
计算机资源	计算机资源	7.6.3, 7.6.4
成本		8

5.2 需求分析

5.2.1 检测对象特征

用户选择工业 CT 系统之前应分析检测对象的特征,如几何尺寸、质量、材料、缺陷状况等。检测对象的特征决定了工业 CT 系统中机械子系统、射线源子系统和探测器子系统等的参数。例如,检测对象的最大质量和最大直径决定了工业 CT 系统检测对象的参数范围。检测一个大而重的物体与检测一个小而轻的物体,机械系统的差异很大。检测对象的种类和数量的多少也可能导致系统差异较大。同样,检测对象缺陷状况不同或检测要求不同也可能导致系统差异较大。

5.2.2 装夹需求

夹具是工业 CT 系统用于安装、固定和卸除检测对象的可选附件。夹具可保证设备安全和有利于提高检测效率。用户应根据检测对象的特征选择是否需要夹具,同时根据检测效率的要求选择采用手动夹具还是自动夹具。用户应明白,增加夹具会增加设备成本和系统的复杂度,自动夹具比手动夹具成本和复杂度高。

5.2.3 CT 扫描服务需求

选择工业 CT 系统扫描服务之前,应确定所采用的工业 CT 系统可检测对象的尺寸大小及质量,射线源的能量,探测能力和检测效率是否能满足检测要求。

6 性能指标选择

6.1 射线穿透厚度选择

6.1.1 射线穿透厚度

检测对象的射线穿透厚度要求决定了射线源的最小等效能量和强度。射线穿透厚度与检测对象的材料、密度和形态(外形和特征、几何结构)相关。CT 系统的射线应在穿透扫描平面内最长吸收路径后还保持一定的强度,所要求强度由统计意义上光子数量和射线等效能量共同决定。透射后最小射线信号值至少应大于 CT 系统的暗场数据的标准差。射线穿透厚度通常采用等效钢厚度来衡量。

6.1.2 射线能量的选择

根据检测对象特点及检测要求选择射线能量,参考以下几个原则:

- 所选射线能量对应 8~10 个钢的半值层厚度,应大于检测对象检测断层的最大等效钢厚度;
- 当检测对象由密度差很小的几种材料组成时,在保证足以穿透的前提下,宜选择能量低的射线源,可获得较高的密度分辨力;
- 当检测对象尺寸较大、密度较大或由密度相差很大的材料组成时,宜选择能量高、强度较大的射线源,可提高信噪比和检测效率。

6.2 扫描方式选择

6.2.1 扫描方式

扫描方式是 CT 系统采用特定的运动方式和数据采集方式获取数据的模式。根据工业 CT 系统的扫描和出现的先后顺序,工业 CT 系统已发展有一代、二代、三代、四代等不同扫描方式,可根据需求选择不同扫描方式。工业 CT 系统常用二代和三代扫描方式。

6.2.2 扫描方式的选择

扫描方式的选择应根据检测对象的具体特征进行选择,参考如下:

——二代扫描方式适应较大范围的扫描视场尺寸,适合射线扇形束不能包容整个检测对象的情形。

不足的是扫描时间较长，扫描效率较低，使用成本较高。

——三代扫描方式运动简单、扫描速度较快,适合射线扇形束可包容检测对象的情形。难点是数据校正技术要求高。

——三代扫描方式效率与二代扫描方式效率的比值约为三代扫描插值次数比上二代扫描的旋转次数。在实际系统中，三代扫描的效率是二代扫描的数倍。

示例 1: 设采用电子直线加速器工业 CT 系统进行扫描, 工件旋转直径 $\phi = 600 \text{ mm}$, 加速器触发频率 $f = 200 \text{ Hz}$, 每个视角下采样脉冲个数 $n = 3$, 扇束角度 $\theta = 15^\circ$, 射线源到旋转中心距离 SOD = 2 500 mm, 线阵探测器通道数为 $M = 512$, 扫描矩阵大小 $N \times N = 1 024 \times 1 024$ 。二代扫描的时间 T_{II} , 三代扫描时间为 T_{III} 。 T_{III} 和 T_{II} 的计算分别如式(1)和式(2)所示, 两者的比值如式(3)所示。

所以

6.3 空间分辨力选择

6.3.1 空间分辨率

空间分辨力表征 CT 系统重现被测物体几何细节特征的能力。通常用户会有关于被测物体的空间几何细节尺寸的明确需求,如绝对空间分辨力应达到 0.05 mm ,检测裂纹的宽度小于 0.1 mm 等。CT 供应商应据此确定工业 CT 系统的空间分辨力。工业 CT 系统与其他成像系统一样,空间分辨力是有极限的。受点扩展函数的影响,被测物体的一个无限小、无限密集的点成像时不是一个理想的点,而是一个具有一定尺寸大小的斑。因此,被测物体的 CT 图像具有一定的不清晰度。空间分辨力就是表征这种不清晰度的度量。系统的极限空间分辨力由探测器有效尺寸、射线源焦点尺寸、几何放大倍数确定。其他因素,如系统运动精度、采样、重建矩阵大小、图像显示矩阵大小和图像重建算法等均可不同程度影响 CT 系统的实际空间分辨力。

6.3.2 射线源焦点

射线源焦点是发出 X 射线或伽马射线的放射区域。对于 X 射线源,如 X 射线管或电子直线加速器,焦点是电子撞击靶的区域。对于放射性同位素源,焦点是辐射有效区域。曝光函数取决于源焦点的形状和尺寸。例如,电子直线加速器的源焦斑是典型的高斯分布形状;而 X 射线管的源焦斑通常为双峰。同位素源焦点通常没有明显边界,更没有对称的形状。应用中为了方便,常用源焦点大小定义和度量该有效区域。源焦点大小可以有不同的量化方法。例如,可以采用占辐射总量 99% 的区域定义焦点的半径,或者用强度分布的标准差定义。鉴于以上因素,在不同射线源之间,尤其是在不同供应商提供的射线源之间很难做出焦点尺寸的比较。同时,射线源的焦点位置会随设备使用时间以及加速电压的变化而变化。

6.3.3 几何放大倍数

几何放大倍数采用射线源、探测器与检测对象的旋转中心的相对位置关系来描述物体实际尺寸与

对应影像尺寸之间的比例关系。如图 2 所示,几何放大倍数为射线源与探测器之间的距离(SDD)与射线源与旋转中心之间距离(SOD)的比值。

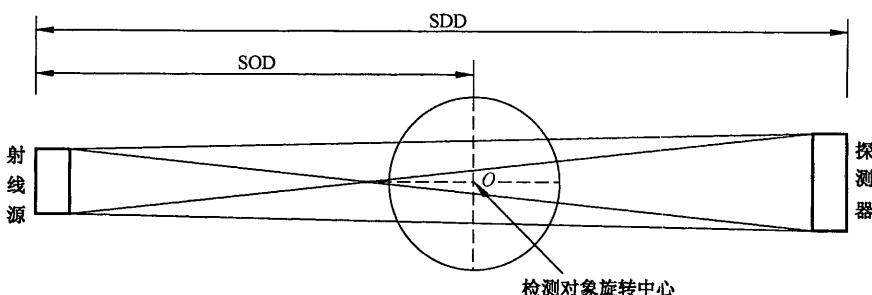


图 2 几何放大倍数示意图

6.3.4 空间分辨力的选择

用户对空间分辨力的要求是影响工业 CT 系统组成及子系统性能的主要因素之一。空间分辨力决定了射线源焦点尺寸、探测器有效尺寸以及系统几何位置关系。因此,一定要结合实际的需求进行空间分辨力选择,参考以下原则:

- 射线源焦点尺寸和探测器有效尺寸越小,越有利于提高系统空间分辨力。但是,当焦点尺寸和探测器有效尺寸变小时,可探测的射线强度也会相应减小,会影响密度分辨力或扫描效率。
- 当对不同检测对象有不同空间分辨力检测要求时,可选择带有可调准直器尺寸的工业 CT 系统。检测时,可根据不同要求进行准直器尺寸的调节达到检测目的。
- 机械子系统误差可能降低系统的固有分辨力。空间分辨力要求较高时系统机械设计精度要求高,从而制造成本也高。当现有系统或设计不能满足要求时,应重新设计使用更高精度的零部件并采用不同的装配工艺。
- 用户可通过如下的经验方法初步判断工业 CT 系统空间分辨力是否满足检测要求:
 - 如果检测需求侧重尺寸测量,不受伪影影响的高对比度边缘定位精度可达系统有效束宽的 1/10,只要系统的精度能够接近定位精度的两倍,那么该系统就是可选的。

示例 2:如果图像边缘定位精度要求为 0.1 mm,那么需要系统精度应高于 0.05 mm,其有效射束宽度约为 0.5 mm。

- 如果检测需求侧重分辨明显特征,对于两个独立特征,其间距至少要大于有效射束宽时,才可认为两个特征在图像上可以分辨出来。因此,只要系统的有效射束宽度小于检测需求的 50%,那么该系统就是可选的。

示例 3:如果要求识别间距小于 0.4 mm 的两个特征,那么要求系统的有效射束宽度至少为 0.2 mm。

6.4 对比灵敏度选择

6.4.1 对比灵敏度

对比灵敏度表征 CT 图像随机噪声的大小。用户通常会有检测材质异常(密度分布、疏松和夹杂)的明确需求。例如:CT 图像中 1 cm^2 范围内的密度变化应小于 1% 等。CT 供应商应据此确定对比灵敏度。工业 CT 的对比灵敏度也是有极限的。受系统噪声的影响,同一材质两个区域的 CT 值平均值呈随机变化。对比灵敏度就是表征这种随机变化的度量。系统的对比灵敏度与探测到光子数量的平方根相关。其他因素,如电子学噪声、图像重建噪声等都会影响系统的对比灵敏度。通常情况下,探测到的光子数越多,系统对比灵敏度越高。而探测到的光子数量与数据采集过程有关的所有扫描参数相关,如采样时间、射线通量、探测器效率等。

6.4.2 采样时间

根据统计学原理,通过增加样本容量,可降低测量的标准差。在其他条件一致时,采样时间与样本容量(探测到的光子数量)成正比。因此,延长采样时间可以改善系统的对比灵敏度。

6.4.3 射线通量

增加射线通量可以通过增大射线源焦点、增大探测器有效尺寸等方法实现,但是同时会降低空间分辨率。所以在保证空间分辨率的前提下,射线源的焦点及探测器有效尺寸的调节范围较小。

6.4.4 探测器效率

探测器的效率是探测器在采集入射光子并将其转换为电信号过程中的有效性度量,与探测器的几何尺寸、材料种类等相关。其他条件相同的情况下,探测器效率越高,对比灵敏度越高。

6.4.5 对比灵敏度的选择

用户对对比灵敏度的要求是影响工业 CT 系统组成及子系统性能的主要因素之一。对比灵敏度决定了射线源焦点尺寸、探测器有效尺寸、探测器类型、电子学系统等的选择。因此,一定要结合实际的需求进行选择,参考以下原则:

- 在一定范围内延长采样时间可显著改善系统的对比灵敏度。超出范围后,延长采样时间就很难改善对比灵敏度,反而会导致扫描时间过度延长,增加使用成本。
- 在保证空间分辨率的前提下,通过调节射线源焦点尺寸与探测器有效尺寸可提高对比灵敏度。
- 用户可通过如下经验方法初步判断工业 CT 系统对比灵敏度是否满足检测要求:
 - 如果对小区域的对比度分辨要求高,如检测夹杂物,当检测特征与背景区域的对比百分数比附近区域的像素噪声高 3 倍~5 倍时,可认为该特征能从背景中区分出来。如果系统的图像噪声小于检测需求的噪声,则认为该系统是可选的。

示例 4:若感兴趣区域的图像噪声约为 2%,那么至少需要 6% 的对比百分数差才能将一个小区域特征区分出来。

- 如果对大区域的低对比度分辨要求较高,如密度分辨,当检测特征与背景区域的对比百分数比临近区域的单像素图像噪声除以像素数平方根的值大 3 倍,可认为该特征能从背景中区分出来。如果系统噪声小于检测需求的噪声,则认为该系统是可选的。

示例 5:若感兴趣区域的图像噪声约为 2%,那么一个大区域(20×20 像素)的特征至少需要 $0.3\%(3 \times 2\% / 20)$ 的对比度百分数差才能区分出来。

- 通常,对比灵敏度优于 0.3% 的系统是很难实现的;对比灵敏度 0.5% 的系统较难实现;对比灵敏度 1% 的系统不难实现。

6.5 图像伪影判定

6.5.1 图像伪影

伪影是 CT 图像中与物体真实物理特性不相符的影像。某些图像伪影的产生原因是 CT 技术中物理和数学上固有的,如射线硬化、射线散射和部分容积效应等的影响;某些图像伪影是由系统的缺陷引起,如机械偏差、探测器响应不一致等。CT 图像中常见的伪影有杯状伪影、部分容积伪影、环状伪影等。

6.5.2 杯状伪影

杯状伪影主要是由多能谱射线硬化效应导致的。杯状伪影表现为图像中心部位衰减系统数较低或密度较低。如图 3 所示。

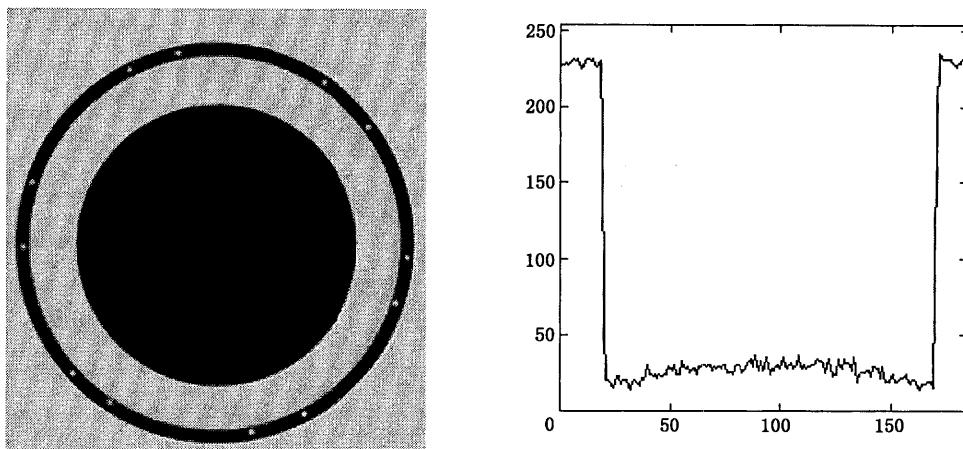
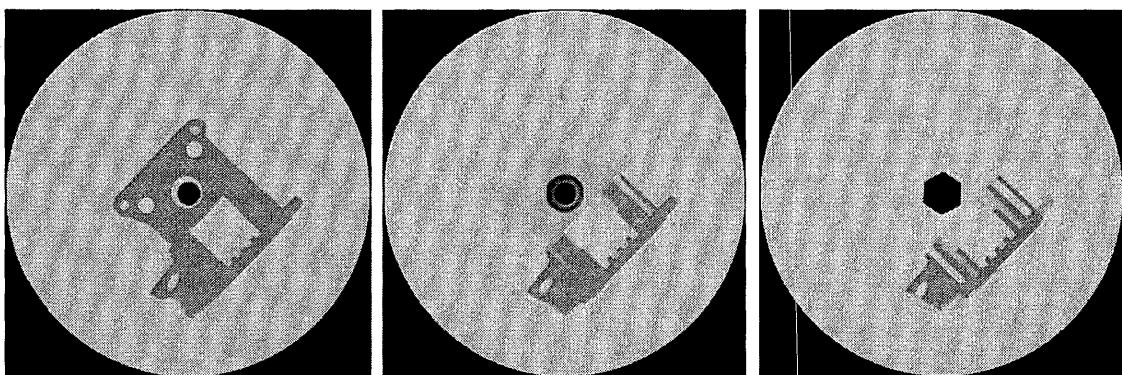


图 3 杯状伪影图

6.5.3 部分容积伪影

当一个体素内包含多种结构特征时,所对应的图像像素值是此体素内各种特征线衰减系数的平均值,这是由于实际 CT 系统中切片不是理想切片以及射束不是理想射束而导致的。图 4 中给出了部分容积伪影。



注:中间图像断层处在左、右两幅图像扫描断层的中间,因此,中间断层包含了部分左、右两幅图像中的细节,故产生了部分容积伪影。

图 4 部分容积伪影图

6.5.4 环状伪影

环状伪影表现为以图像中心为圆心的环状或半环状条或带。环状伪影主要由于探测器的一致性造成的。图 5 给出了未经校正的环状伪影。

6.5.5 图像伪影的判定

图像伪影水平是评价图像质量的主要因素之一。因此用户选择工业 CT 时应充分考虑检测对象的细节特征、检测需求,判断在正常检测参数下是否会产生较多伪影。同时,还应考察供应商在 CT 伪影校正方面的能力。参考以下原则:

- 图像伪影总会在一定程度上表现出来。通常而言,当 CT 系统在设计的极限参数下运行时,图像伪影影响较重。因此,在选型时,应保证绝大多数的检测在正常检测参数下进行。例如,CT 系统在射线穿透极限情况下进行扫描,采集的数据接近或低于由电子学系统噪声和射线散射

引起的噪声时,会引起较严重的图像伪影。

——供应商为了减轻或消除图像伪影,通常会采取很多方法对不同伪影进行校正。而这些校正方法往往是作为商业秘密保护起来,用户很难了解到具体的校正方法。因此,最好的办法就是采用对比观察法对不同供应商提供的相同检测对象的 CT 图像的质量水平进行客观评价。

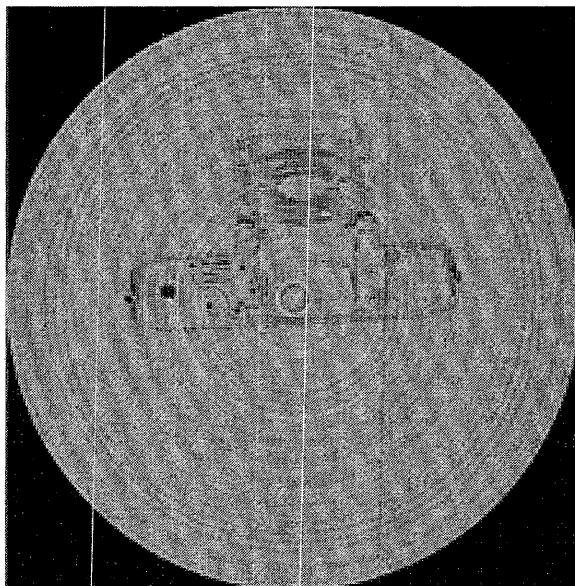


图 5 环状伪影图

6.6 扫描效率选择

6.6.1 扫描效率

通常,以单位时间的扫描次数来表示扫描效率。用户可以通过设置合理的扫描参数来改变扫描效率。影响扫描效率的关键参数包括图像矩阵大小、切片厚度、视场、采样间隔、扫描方式。对一个新的系统,与其他参数变量相比,扫描时间对子系统的选型和成本影响更大。由于空间分辨力受射线源焦点大小的限制,对比灵敏度受检测光子数量的限制,因此扫描时间决定了射线源的最小强度。由于对 X 射线或伽马射线的测量应在规定的采样间隔完成,扫描时间也同样决定了扫描的几何结构、探测器阵列大小,以及机械子系统的速度。机械子系统应能够以一定精度下的指定速度移动负载;因而,机械组件的刚度、以及电机、减速器、传感器和控制器的选择都受扫描时间的影响。探测器子系统应能够以与指定速度匹配的采样频率采集数据。因而,模数转换、实时处理、数据传输率以及计算机体系结构等都受扫描时间的影响。供应商对满足这些要求的子系统部件几乎没有选择空间。又由于高性能的射线源、机械装置和计算机硬件价格昂贵,因此专用 CT 系统可能在技术上可行但成本可能会比较高。

6.6.2 图像矩阵

图像矩阵大小确定了满足图像重建要求的扫描探测次数和每次探测采样数。所需数据量与图像矩阵大小成平方关系。要想缩短扫描时间,应该选择满足检测需求的最小图像矩阵。最小图像矩阵由所需空间分辨力确定,选择图像矩阵通常不考虑对比灵敏度。图 6 为图像矩阵与分辨力的关系。

6.6.3 切片厚度

为缩减已有系统的扫描时间,用户应当选择满足检测需求的最大切片厚度。切片厚度参数影响垂直于扫描平面的轴向空间分辨力,可用的最大切片厚度与检测对象有关。如果切片厚度太大,会导致严

重的部分容积伪影。检测对象在轴向结构变化率越大,所需的切片厚度越小。对于线阵探测器而言,切片厚度的最大值取决于探测器的高度,而这一设计参数将很大程度上影响成本。同样,切片厚度的可选范围越大,探测器以及相关的数据采集电子电路的动态范围要求越高。数据采集系统动态范围的高低也是影响成本的重要因素。

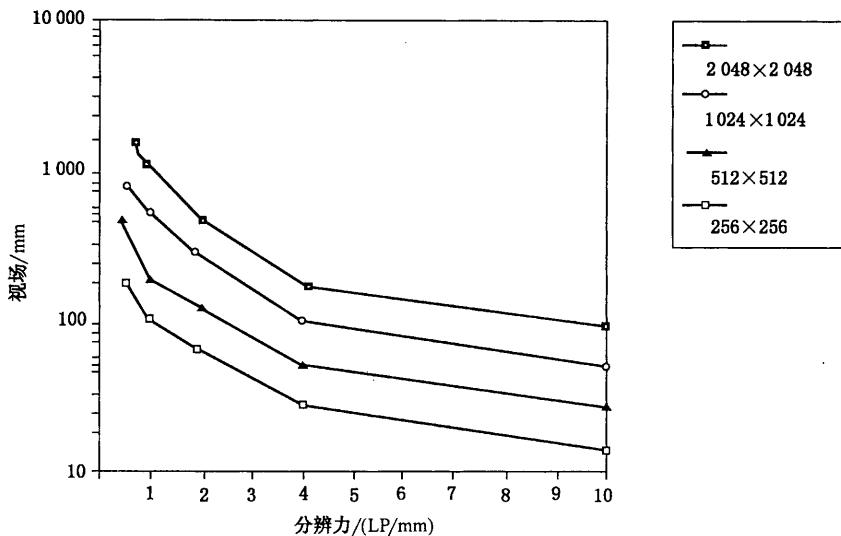


图 6 几种常用图像矩阵的视场与分辨力关系图

6.6.4 视场

视场大小由被检对象尺寸确定。视场大小对二代扫描的效率影响非常大,而对三代扫描的效率基本没有影响。

6.6.5 采样间隔

采样间隔为相邻两次投影数据采样的时间间隔。采样间隔越大,扫描效率越低。

6.6.6 扫描效率的选择

系统扫描效率的重要性取决于用户的应用需求,用户应根据检测对象的技术要求和检测量确定。参考如下原则:

- 对于研究性应用,首先考虑的是空间分辨力和对比灵敏度,扫描效率在一定程度上影响总扫描时间。对于常规的生产检测,因扫描效率与经济效益密切相关,与空间分辨力和对比灵敏度一样,也是主要技术指标。
- 用户需要认识到任何 CT 系统不太可能同时满足扫描效率、空间分辨力和对比灵敏度的应用需求。通常,用户可以通过选择射线源焦点尺寸、探测器有效尺寸以及几何放大倍数等参数来确定系统的最高空间分辨力。如果空间分辨力指标不重要,用户应选择最大有效射束宽度,然后选择应用需求的最小对比灵敏度对应的扫描参数。如果对比灵敏度指标也不重要,那么用户应选择扫描时间最小的 CT 系统。
- 通常,最大像素尺寸为有效射线束宽的一半。从有效射线束宽,可以很容易地确定给定视场的最小矩阵尺寸,这样可以最大限度减少扫描时间。
- 选择三代扫描方式进行扫描通常比选择二代扫描方式效率要高得多。
- 在成本允许的情况下,选择更多的探测器和采集速度更快的电子学系统,可提高扫描效率。
- 在成本允许与运动精度可得到保证的情况下,选择移动速度更快的机械系统,可提高扫描效率。

7 子系统选择

7.1 射线源系统选择

7.1.1 射线源系统

射线源系统为工业 CT 系统提供稳定、可靠的射线束。工业 CT 系统的射线源通常有 X 射线源、放射性同位素源以及同步放射源等几种。

7.1.2 X 射线源

X 射线源是目前工业 CT 中使用最广泛的射线源。工业 CT 中通常采用 X 射线机或电子直线加速器作为 X 射线源。电子回旋加速器由于射线强度低,实际应用少。X 射线机具有射线等效能量和强度连续可调的优点,通常可从几十 keV 到几百 keV。电子直线加速器射线等效能量通常不可调,实际应用范围通常在一 MeV 到十几 MeV 范围,其强度可通过改变触发频率进行调节。X 射线机与电子直线加速器均具有断电即无射线产生的优点,有利于辐射安全防护。X 射线源的焦点尺寸为几百个纳米到几个毫米。减小焦点大小可以降低几何不清晰度,提高系统对细节的分辨能力,但同时会降低 X 射线强度。降低 X 射线强度意味着只能检测更小或更低密度的物体。X 射线源产生 X 射线时,只有小部分能量转换成了 X 射线,大部分能量转换为热能,焦点尺寸越小,阳极靶的局部功率越大,局部温度也越高。因此,在选择 X 射线源时应考虑与之相匹配的冷却系统。冷却系统通常有水冷、油冷以及风冷方式。冷却方式需根据实际使用需要进行选择。X 射线源的缺点是射线能谱的多色性导致图像上产生杯状伪影。

7.1.3 放射性同位素源

放射性同位素源具有设备外形尺寸小、单色性好和输出稳定等优点。缺点是射线峰值能量受限制,且辐射安全防护成本高。目前在工业 CT 系统中应用较少。

7.1.4 同步辐射源

同步辐射源产生的是连续谱射线,但是通过采用单色光谱器后就能产生近似单色的射线。同时,同步辐射源射线强度较大。然而,基于当前技术,实用的同步辐射源能量严格限制在 20 keV~30 keV,受穿透能力的限制,同步辐射系统通常只能检测小尺寸(1 mm~5 mm)的物体,目前在工业 CT 系统中应用很少。

7.2 探测器系统选择

7.2.1 探测器系统

探测器将穿透后的射线转换为电信号。工业 CT 中通常采用的探测器是由闪烁晶体耦合光电二极管或者光电倍增管组成。另外,也有一些系统使用其他类型的探测器,如气体探测器等。探测器尺寸大小由空间分辨率要求确定。

7.2.2 单探测器系统

单探测器系统效率最低,但复杂度最小,不受相邻探测器间散射和探测器不一致性影响,准直和屏蔽很容易做到。

7.2.3 面阵探测器系统

面阵探测器系统数据采集速度高,但需较高的传输带宽和存储容量。同时面阵探测器的探测效率较低,可探测信号动态范围小,准直和屏蔽难以实现。

7.2.4 线阵探测器系统

线阵探测器系统较好地综合了上述两种探测器的优点。其扫描速度较快,探测器单元之间的散射和探测器的不一致性在可接受的范围内,同时,其准直和屏蔽可以较好实现。

7.3 数据采集传输系统选择

数据采集传输系统用于获取和收集信号,它将探测器获得的信号转换、收集、处理和存贮后,供图像重建用。数据采集传输系统主要包括信号调理与转换单元、数据采集控制单元和数据传输控制单元。信号调理与转换单元对探测器输出的信号进行放大、滤波、A/D 转换等处理,获得大动态范围、高信噪比的数字信号;数据采集控制单元负责控制信号调理与转换单元进行数据采集,并进行数据缓存;数据传输控制单元将各通道数据信号收集处理后传送到图像重建处理计算机。数据采集传输系统的主要性能指标有信噪比、稳定性、动态范围、采集速度及一致性等。

7.4 机械扫描系统选择

7.4.1 机械扫描系统

CT 机械扫描系统提供 CT 系统相关功能部件的安装、支撑,以及扫描运动的传动等功能,部分系统需满足工件装夹需求。机械扫描系统由控制系统控制完成 DR/CT 扫描精确运动,同时系统的装配几何精度应满足 CT 系统性能指标相应要求。

7.4.2 机械扫描系统布局结构

通常,CT 系统结构分为立式、卧式结构,通常由检测对象特征确定。例如,检测细而长的工件适宜采用卧式布局 CT 系统,检测短而粗的工件适宜采用立式布局 CT 系统。

7.4.3 机械扫描系统精度

机械扫描系统精度对 CT 系统空间分辨力、图像伪影程度等影响较大。通常,机械扫描系统精度分为扫描运动精度和装配几何精度。例如,CT 系统扫描直线运动的定位精度为 0.005 mm,直线运动导轨平直度要求 0.008 mm。其中,前者即系统扫描运动精度指标,后者为该运动的装配几何精度指标。系统扫描运动精度由机械传动部件精度、控制系统控制精度共同确定,通过选择高精度传动零部件、精密数字控制系统、以及合适的误差补偿措施等能够满足扫描运动精度需求;系统装配几何精度通过精密零件加工、精密装配调试保证。通常,CT 系统难以通过误差补偿方法减小系统装配几何精度的影响,因而机械扫描系统的装配几何精度尤为关键。

7.5 控制系统选择

7.5.1 控制系统

控制系统实现对扫描检测过程中机械运动的精确定位控制、系统的逻辑控制、时序控制及检测工作流程的顺序控制和系统各部分协调,并负责系统的安全防护控制。

7.5.2 控制系统软件

工业 CT 系统中控制类软件通常包括 CT 系统的控制软件、数据采集与传输软件等。控制软件是 CT 系统的核心软件之一,用于控制机械子系统、控制子系统、射线源子系统、探测器子系统等有序的完成 CT 扫描运动、运动位置测量、束、数据采集等。控制软件是影响工业 CT 系统运动精度、同步精度以及采样精度的关键因素之一。

7.5.3 人机交互界面

7.5.3.1 概述

人机交互界面用于操作人员对 CT 系统进行控制,以完成工件装夹、参数设置、扫描检测以及故障诊断等功能。人机交互界面的友好程度决定了工业 CT 系统的可操作性。一般来说,操作控制软件、图像处理软件以及数据交换等功能都集成到人机交互界面。通常,紧急制动、安全联锁以及状态指示也应集成在人机交互界面上。人机交互界面常有程序操作界面、专用控制台或面板、图形用户界面等三类。

7.5.3.2 程序操作界面

通常从键盘输入指令。功能较强大,但友好程度不够。

7.5.3.3 专用控制台或面板

设有特殊功能按钮和状态指示,并具有严格的数据格式和操作要求。

7.5.3.4 图形用户界面

采用图形方式显示的计算机操作环境用户界面。可通过窗口、菜单、按键等方式来方便地进行操作。这种方法具有其他两种类型界面的最优特性。也是目前工业 CT 中应用最多的人机交互界面。

7.6 图像处理系统选择

7.6.1 图像处理系统

图像处理系统主要实现由投影数据重建生成图像,对图像进行处理、分析和测量,并可根据实际应用开发专业的后处理软件,例如缺陷自动识别软件、逆向 CAD 软件等。系统通常由图像处理工作站、图像处理软件、图像显示设备、图像输出设备以及其他相关部件构成。

7.6.2 图像软件

工业 CT 系统中图像软件通常包括数据处理软件、图像重建软件、图像分析软件等。数据处理软件通常用于对扫描原始数据进行重排、校正等处理,处理完的数据作为图像重建软件的输入。因此,处理效果的好坏直接影响重建以及后续应用的效果。图像重建软件用于重建 CT 图像,其主要性能指标就是图像重建速度与质量。图像重建速度与质量取决于供应商所采用的重建算法、编程方法以及加速技术,而这些通常被视为商业秘密。图像分析软件通常是为了实现特定需求在 CT 图像上进行的处理过程,如高精度几何尺寸测量、绝对密度测量、逆向工程应用等。图像分析软件是供应商在工业 CT 系统性能指标基础上结合用户需求设计的具有一定定制特点的软件,常被视为供应商技术水平和竞争力的象征。

7.6.3 计算资源

计算资源用于满足对图像数据进行数学运算尤其是反投影计算的需求。图像重建过程中运算量超

过 10^9 ,运算过程可由阵列处理器或是专门的反投影硬件实现。随着计算机技术的快速发展,可能还会出现其他的计算设备,但是拥有强大的计算能力是这些设备应满足的基本条件。目前,通常采用图像工作站完成相关计算。

7.6.4 存储资源

存储资源用于满足图像及档案存储巨大存储量的需求。商用工业 CT 系统每天可产生几百兆甚至几万兆的图像数据。因此,工业 CT 系统中应具有超大容量、稳定可靠的存储器。目前,通常配备海量存储硬盘和其他存储介质。

7.7 辐射安全防护系统选择

辐射安全防护系统包括辐射防护与报警系统、现场监视系统,也可根据情况选配语音通讯装置。辐射防护与报警系统是指门联锁装置、急停按钮、专用钥匙及声光报警等,必要时可以配备红外和微波双鉴探测装置。现场监视系统包括摄像机、监视器,应尽量保证检测室内无监控盲区。语音通讯装置是指对讲通讯设备,实现检测室操作人员与控制室操作人员的双向语音通讯。

8 成本

8.1 采购成本

工业 CT 系统采购成本主要体现在工业 CT 系统硬件成本、软件开发费用以及为达到辐射安全防护要求的工房等产生的费用。

8.2 使用成本

工业 CT 系统使用成本主要体现在日常的使用消耗、保持系统使用条件所产生的费用、系统寿命周期成本、系统维护成本、人力成本、人员资格认证与培训成本等。

8.3 成本分析

成本分析参考如下:

- 采购工业 CT 系统时宜使用价格明简单的方法,同时对需求进行筛选,可较好控制系统的总成本。根据需求在预算范围内针对工业 CT 系统的基本配置选择增强性能。需要 CT 扫描服务时,在选择检测系统之前,最好先对各种不同 CT 系统进行研究。这样就可以使扫描服务的需求首先从空间分辨力、对比灵敏度、检测报告和检测费用等方面达到最优。
- 设计变更或需求变更可能导致显性成本较大变化。如果计算机系统及外设的花费与常用系统相当,那么由设计变更或需求变更引起的主要成本变化将集中在射线源、探测器以及机械系统上。

示例 6:假设系统扫描对象为金属材料多层卷制并粘接的金属零件,直径为 300 mm,空间分辨力为像素尺寸大小,并假设探测通道数为 512,扫描视场直径为 400 mm,如果要求能够识别在 1 mm 卷制层之间的脱粘裂纹,那么设计的系统除了能容易检测出裂纹之外,还可识别其所在层的位置。如果现在将检测要求改为识别更薄卷制层之间的粘接裂纹,如 0.5 mm,那么具有 512 分辨力的系统将无法区分裂纹在层的哪一边。为满足这种需求,系统应做如下改动:

- 机械系统的精度提高到现有精度的 2 倍以上;
- 扫描时间增加为原来的 4 倍左右;
- 增加采样矩阵,图像存储能力提高为原来的 4 倍;
- 重建计算量增至原来的 8 倍。

这些额外要求增加的支出可能与扫描系统本身差不多。最终,最大的成本似乎是为减少扫描时间而使整个项目进

度减慢。故每一需求的变更都可能会产生这样的结果。

——选择工业 CT 系统时,用户应认识到某些选择会对隐性成本产生较大影响,如扫描方式、质量保证、系统升级、售后服务等。

示例 7: 设采用电子直线加速器工业 CT 系统进行扫描, 工件旋转直径 $\phi = 600 \text{ mm}$, 加速器触发频率 $f = 200 \text{ Hz}$, 每个视角下采样脉冲个数 $n = 3$, 扇束角度 $\theta = 15^\circ$, 射线源到旋转中心距离 SOD = 2 500 mm, 线阵探测器通道数为 $M = 512$, 扫描矩阵大小 $N \times N = 1 024 \times 1 024$ 。二代扫描的时间 T_{II} , 三代扫描时间为 T_{III} 。 T_{III} 和 T_{II} 的计算分别如式(4)和式(5)所示, 两者的比值如式(6)所示。

$$T_{II} = \frac{n}{f} \times N \times \frac{360}{\theta} \times \left(1 + \frac{2 \times SOD \times \tan(\theta/2)}{\phi}\right)$$

$$= \frac{3}{200} \times 1024 \times \left(1 + \frac{2 \times 2500 \times \tan(7.5^\circ)}{600}\right) = 588.8(s) \quad(5)$$

所以

显然,这种情况下,二代扫描的加速器的使用成本是三代扫描的 20 倍左右。

9 采购建议

CT 系统的采购参考如下：

——采购过程中关键之一就是起草需求说明。在准备系统需求说明之前，最重要的是定义系统用途，比如是用于研究还是用于生产，是通用的还是定制的系统。如果可能，还应确定检测对象的尺寸范围、预期数量、扫描效率等要求。为了避免在需求说明中提出不切实际的或者过高的要求，用户应尽早与供应商讨论。通过权衡各种因素，提出一份切实可行的需求说明。

需求说明应将重点集中在特定检测的应用需求上。主要因素包括检测对象的尺寸和组成、缺陷极限尺寸、特征大小、不同成分的密度差异、扫描效率及报告要求等。需求说明不宜详细规定硬件的配置，也不宜在空间分辨力、对比灵敏度、图像矩阵大小以及类似的技术细节上要求过于详尽。这些要根据性能和协议的价格确定。但在性能要求中应详细说明兼容性需求，包括特殊的硬件或是软件的约定。

——参与采购的人员宜进行必要的 CT 知识学习,有必要了解这种无损质量评价方法的知识。可阅读相关标准和文献,与供应商讨论,与其他 CT 用户交流。

——可成立和培训一个小组来参与整个购买过程。一旦购买,从系统的设计到安装,小组都应与供应商紧密协作。这样,小组在设备的生产过程中就可以积累基本的经验知识。一旦交货,就能很快使设备投入运行中。

——在需求说明书起草准备和评估阶段，由 CT 领域的专家来确定一份合理的需求说明书。

——应成立一个监督小组，小组中宜包含来自不同背景的成员，如无损检测工程师、系统工程师、计算机专家、生产工程师、设备工程师、质量人员和管理人员。监督小组应建立一套系统评定与打分标准，考虑如下因素：

- 射线源系统；
 - 机械扫描系统；
 - 探测系统；
 - 数据采集传输系统；
 - 控制系统；
 - 图像处理系统；

- 辐射安全防护系统；
- 空间分辨力；
- 对比灵敏度；
- 检测效率；
- 伪影程度；
- 数据存档；
- 与其他交货系统的一致性；
- 可选功能与升级；
- 技术资料；
- 环境及工房要求；
- 备件与附件；
- 培训；
- 质保；
- 行业影响力；
- 价格。

- 用户通常希望采购的是设计成熟或已经进行过设计改进的 CT 系统。但常常很难避免引入新技术或子系统。新技术或子系统自身的问题也许都得到了解决，但是将其集成到一个已有系统中却要花较长时间，同时可能大幅度增加成本。所以，适当时可稍微降低 CT 系统性能要求，尽可能地采用标准设计、现有软件和标准部件。
 - 当确实需要购买新技术时，尤其是计划用作生产设备时，要从可靠性和可维护性两方面选择一个风险最小的。如果应用大大偏离了预先的设计，那将性能需求说明当作目标而不是要求可减少购买成本和风险。
 - CT 系统的技术资料应包含详细的硬件和软件资料，这样任何一个不熟悉 CT 系统但熟悉该领域的工程师或专家，都能检修故障、分析或维修设备。文件的格式或形式与供应商有关，不宜指定应满足某些规范，但文件所包含细节水平宜在采购合同中详细指明。
-

中 华 人 民 共 和 国

国 家 标 准

无损检测 工业计算机层析成像(CT)

系 统 选 型 指 南

GB/T 29068—2012

*

中国标准出版社出版发行

北京市朝阳区和平里西街甲2号(100013)

北京市西城区三里河北街16号(100045)

网 址 www.spc.net.cn

总编室:(010)64275323 发行中心:(010)51780235

读者服务部:(010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

各地新华书店经销

*

开本 880×1230 1/16 印张 1.25 字数 34 千字

2013年6月第一版 2013年6月第一次印刷

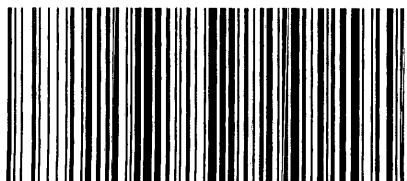
*

书号: 155066·1-47016 定价 21.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换

版 权 专 有 侵 权 必 究

举 报 电 话 : (010)68510107



GB/T 29068-2012