

工业CT无损检测技术在内燃机产业中的应用

刘东^{1,2}, 刘宁^{1,2}, 曹进爱^{1,2}, 李雪梅^{1,2}, 付彬^{1,2}

¹潍柴动力股份有限公司质量部, 山东 潍坊

²国家内燃机产业计量测试中心质量部, 山东 潍坊

收稿日期: 2026年5月22日; 录用日期: 2026年6月15日; 发布日期: 2026年6月22日

摘要

内燃机产业是我国制造业的重要组成部分, 在支撑国民经济发展、推动装备升级与践行“双碳”战略中发挥不可替代的作用。随着内燃机制造技术的飞速发展, 内燃机零部件对于无损检测需求日益增多, 传统无损检测方法(如超声、射线)难以实现复杂结构件的精确、定量和三维分析。本文首先简述了工业CT的检测原理和检测特点, 随后介绍了工业CT在内燃机产品开发、设计验证、生产制造、质量控制和售后服务等环节中的应用, 工业CT凭借其适应材料广、检测精度高等优势能够很好地解决目前内燃机产业中的检测难题。

关键词

无损检测, 工业CT, 尺寸测量, 缺陷分析, 逆向工程, 三维成像

Application of Industrial CT Nondestructive Testing Technology in Internal Combustion Engine Industry

Dong Liu^{1,2}, Ning Liu^{1,2}, Jin'ai Cao^{1,2}, Xuemei Li^{1,2}, Bin Fu^{1,2}

¹Quality Department, Weichai Power Co., Ltd., Weifang Shandong

²Quality Department, National Internal Combustion Engine Industry Measurement and Testing Center, Weifang Shandong

Received: May 22, 2026; accepted: June 15, 2026; published: June 22, 2026

Abstract

The internal combustion engine industry is an important part of China's manufacturing sector and

plays an irreplaceable role in supporting national economic development, promoting equipment upgrades, and implementing the “dual carbon” strategy. With the rapid advancement of internal combustion engine manufacturing technology, there is an increasing demand for non-destructive testing of engine components, and traditional non-destructive testing methods (such as ultrasound and radiography) struggle to achieve precise, quantitative, and three-dimensional analysis of complex structural parts. This paper first briefly describes the detection principles and characteristics of industrial CT, and then introduces the application of industrial CT in various stages of internal combustion engine products, including product development, design verification, production and manufacturing, quality control, and after-sales service. With its advantages of being suitable for a wide range of materials and offering high detection accuracy, industrial CT can effectively address the current testing challenges in the internal combustion engine industry.

Keywords

Nondestructive Testing, Industrial CT, Dimensional Measurement, Defect Analysis, Reverse Engineering, Three-Dimensional Imaging

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在内燃机行业中，无损检测技术应用于产品的全生命周期，对于提升产品质量和可靠性起着至关重要的作用。现有无损检测资源多为磁粉探伤(MT)、超声探伤(UT)和着色探伤(PT)，上述方法都仅限于表面和亚表面的缺陷检测，而且会受到材料晶粒结构和组织均匀性限制。相比之下，工业 CT 技术在无损检测方面展现出显著优势：探测穿透力更强、不受零部件内部复杂结构影响、结果直观、可实现不同材质的检测，而且可以进行定量分析和逆向测绘[1]。

尽管目前计算机断层扫描技术应用越来越广，但受射线源加速器的制约，铸铁材质的内燃机机体、连体缸盖、液压铸件等关键零部件无法实现内部缺陷无损检测。射线能量在 1 MeV 以上的高能工业 CT 系统的应用范围广，但检测产品差异大，难以实现完全的标准化[2]。通过规划 240 kV & 450 kV 普能工业 CT 和 9 MeV 高能工业 CT 实现叠加厚度最大到 380 mm 的等效钢的内部缺陷检测，能够覆盖大多数产品整体检测需求。满足从塑料件、电子件、铝制件到铸铁件等系列内燃机零部件的检测需求。工业 CT 技术的应用不仅能够缩短内燃机零部件的开发周期，同时提升了各类零部件的失效分析能力。由此可见，工业 CT 技术在内燃机零部件无损检测和失效分析领域有着不可替代的地位。

2. 工业 CT 的基本特点

2.1. 工业 CT 概述

工业计算机断层扫描(Industrial Computed Tomography, 简称工业 CT)的基本原理是基于材料对 X 射线的衰减特性。工业 CT 通过发射高能 X 射线穿过被测物体，不同密度的材料会对 X 射线产生不同程度的衰减。探测器接收到的射线强度变化反映了被测物体内部结构的密度分布信息[3]。通过多角度扫描获取大量数据，计算机软件系统依据这些数据重建断层图像，并最终叠加形成三维模型。在实际应用中，操作人员可通过软件对三维模型进行剖切、尺寸测量、孔隙缺陷分析等操作，实现从宏观到微观的全面

检测。

工业 CT 技术的特点包括：无损检测、高分辨率、三维可视化和适用范围广。无损检测意味着可以在不损坏样品的情况下观察其内部结构；高分辨率能够识别微米级的细节，如裂纹、气孔、夹杂等内部缺陷的检测[4]；三维可视化支持从任何角度进行切片分析，从而复原复杂零部件的几何特征，适用范围广涵盖了金属、陶瓷、塑料、复合材料等多种材料的检测需求。

工业 CT 技术虽然在无损检测中具有优势，但也存在一定局限性。首先，工业 CT 设备价格昂贵，中小企业在采购和使用上面临较大的经济压力，同时需要专业技术人员进行操作和维护，进一步增加了人力成本；其次，与传统无损检测方法相比，工业 CT 检测需要对被测物体进行全方位扫描，并通过计算机进行复杂的图像重建和处理，因此耗时较多。此外，在检测几何形状复杂的工件时，X 射线的散射和衰减可能导致图像质量下降，难以准确判断内部缺陷，且工业 CT 技术使用 X 射线或其他射线源，存在一定的辐射风险，需要严格遵守操作规范和安全措施。

2.2. 工业 CT 的组成

工业 CT 设备主要由 X 射线源、探测器、机械扫描运动系统和计算机软件系统四部分构成。X 射线源发射高能射线穿透被测物体，探测器接收衰减后的信号并转化为数字图像；机械扫描运动系统实现被测零部件的平移和 360 度旋转，确保多角度数据采集；计算机软件系统通过滤波反投影等算法将二维投影图像重建为三维模型。如图 1 所示。



Figure 1. Industrial CT system equipment
图 1. 工业 CT 系统设备

3. 工业 CT 在产品研发阶段的应用

逆向工程应用

工业 CT 可实现内燃机各类核心零部件的高精度三维扫描与逆向测绘，通过扫描现有的零部件，生成精准的三维形貌数据。这些数据可供研发人员开展设计与仿真分析工作，并在设计过程中能够直观验证产品的几何尺寸精度和结构合理性，及时发现产品开阶段的问题，从源头保障内燃机零部件研发设计与实际生产过程、使用需求的高度匹配，提高研发效率，降低后续产品研发、迭代升级的成本。例如，某竞品尿素泵市场故障率低、市场占有率稳居行业领先，关键性能指标与整体技术路线均优于普通同类产品。为深入研究其内部结构、掌握核心设计思路与结构布局，采用工业 CT 对该竞品尿素泵进行全结构扫描检测，检测参数如表 1 所示，重点针对金属主体内腔复杂流道开展高精度断层扫描与三维重构

(见图 2), 为后续自主正向结构设计、流道优化及建立尿素泵正向开发体系提供结构数据与设计依据。

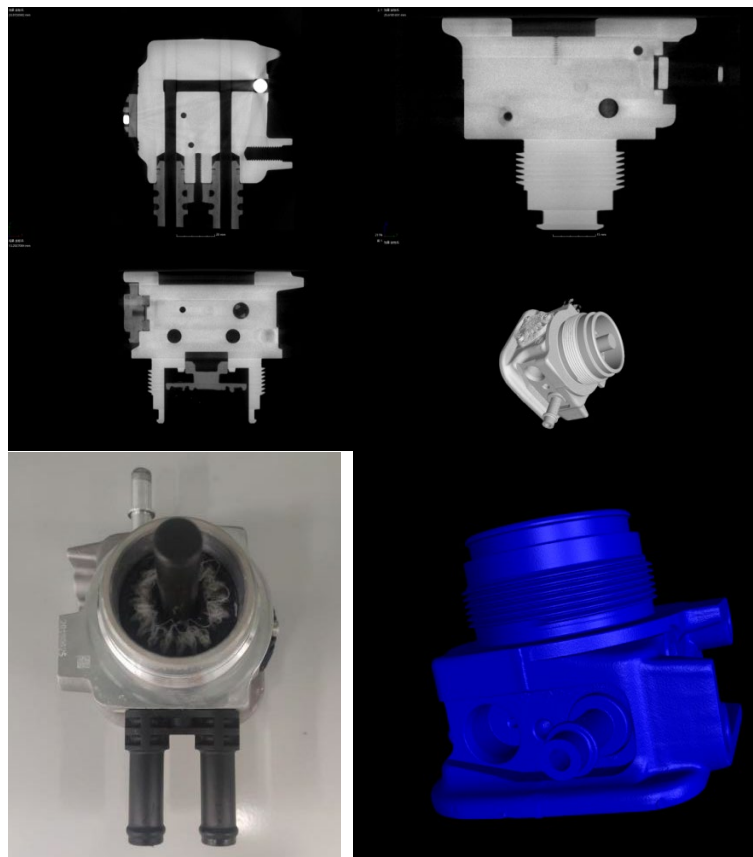


Figure 2. Reverse engineering of urea pump
图 2. 尿素泵逆向开发

Table 1. 450 KV industrial CT scan parameter settings

表 1. 450 KV 工业 CT 检测参数设置

参数类别	参数值	参数类别	参数值
样品材质	铝、钢、塑料	焦点尺寸	68 μm
射线源类型	450 kV 工业 CT	扫描方式	面阵扫描
管电压	400 kV	管电流	170 μA
FOD (射线源 - 物体距离)	1503 mm	FDD (射线源 - 探测器距离)	1016 mm
像素矩阵	1 \times 1	积分时间	334 ms
积分张数	1800	滤波方式	Sn 2.0 μm + Cu 2.0 mm

为加快自主化电堆开发设计, 需对竞品电堆内部结构进行分析。如图 3 所示, 该固体氧化物燃料电池电堆由多种材料组成: 外壳是金属不锈钢, 内部电池片由金属不锈钢和陶瓷组成, 密封绝缘材料由蛭石和云母组成。从三个轴向对电堆内部结构进行三维扫描, 以确定其内部隔板、绝缘板、连接体、集流柱、绝缘管以及气体进出口的直径尺寸、外形结构、排布方式等, 为自主化电堆的设计开发提供重要参考依据。

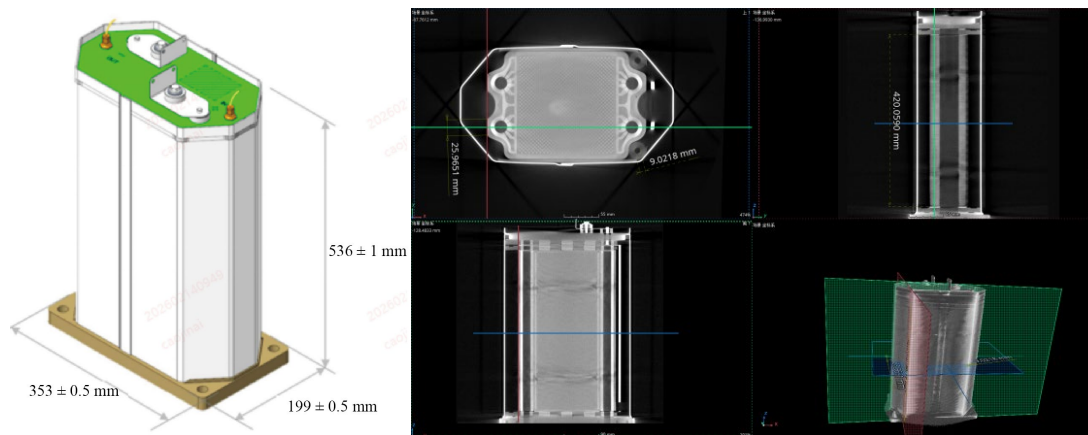


Figure 3. Internal structure analysis of solid oxide fuel cell stack
图 3. 固体氧化物燃料电池电堆内部结构分析

4. 工业 CT 在设计验证阶段的应用

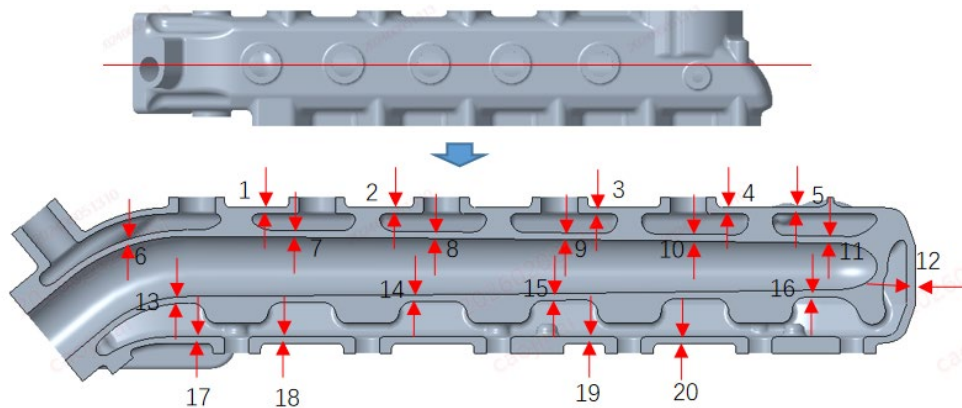
4.1. 数模比对

在研发阶段模具设计人员需要得到试验件与 CAD 数模之间的差距, 根据测量结果进行修模。通过工业 CT 及分析软件可以将扫描结果与 CAD 数模进行最佳拟合, 以直观的色彩偏差快速形象地显示, 不仅可以得到工件整体的偏差, 还能得到关键位置的具体偏差值[5]。实际生产的产品与理想的 CAD 模型可能存在一定尺寸差异从而会影响产品的性能和使用, 帮助分析对比存在的差异反诸于生产工艺的改进。

4.2. 壁厚测量

对于密闭空间内的尺寸测量, 传统的坐标测量方法无法实现。工业 CT 作为一种非破坏性检测技术, 可快速且精确地测量复杂零件壁厚的微小变化。常用于测量管类、复杂零部件等中空结构的壁厚, 能够评估其结构强度和耐用性。例如, 某机型开发的铸铝排气管结构较为复杂, 已完成首批样件验证, 为检测样件缺陷、验证工艺设计的合理性并寻求工艺改进方向, 采用工业 CT 对工件内部整体缩松、气孔、夹渣等缺陷的分布和大小, 以及壁厚进行测量, 如图 4 所示。

如表 2 所示, 工业 CT 五次重复测量结果稳定性良好(极差 $R \leq 0.0312$ mm), 与三坐标测量结果的差值 σ 在 -0.0482 mm ~ $+0.015$ mm 范围内, 整体偏差处于可控水平, 两种测量方法的一致性满足工艺验证要求。



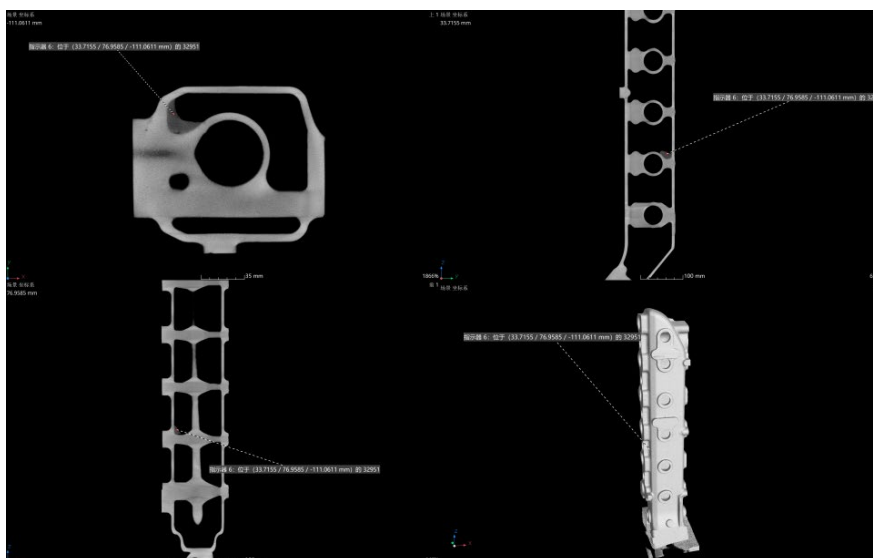


Figure 4. Measurement of wall thickness of cast aluminum exhaust pipe
图 4. 铸铝排气管壁厚测量

Table 2. Comparison of exhaust pipe wall thickness measured by coordinate measuring machine and industrial CT (mm)
表 2. 排气管壁厚三坐标和工业 CT 测量数据对比(mm)

位置	尺寸	1	2	3	4	5	R	\bar{x}	三坐标	σ
1	$7_0^{+0.5}$	6.258	6.249	6.247	6.25	6.255	0.011	6.2518	6.2628	-0.011
6	$6_0^{+0.5}$	6.233	6.213	6.228	6.234	6.239	0.026	6.2294	6.2776	-0.0482
7	$6_0^{+0.5}$	6.257	6.235	6.248	6.242	6.2463	0.022	6.2457	6.235	0.0107
12	$7.5_0^{+0.5}$	7.869	7.851	7.854	7.855	7.845	0.024	7.8548	7.8398	0.015
13	$6.5_0^{+0.5}$	6.842	6.825	6.826	6.849	6.841	0.024	6.8366	6.8687	-0.0321
17	$7_{-0.1}^{+0.5}$	7.252	7.274	7.256	7.269	7.2832	0.0312	7.2668	7.274	-0.0072

注：R——五次测量结果的极差值； \bar{x} ——十次测量结果的平均值； σ ——平均值与三坐标测量结果的差值。

5. 工业 CT 在生产制造中的应用

5.1. 尺寸测量

工业 CT 作为一种新型的非接触式测量手段，常用于内燃机复杂、异形零部件内部封闭区的尺寸测量[6]，传统测量方法需要将零部件进行切割制样，工业 CT 技术能够突破传统测量方式的局限实现无损检测，精准获取零部件各项尺寸参数、形位公差。其数据分析软件中可以实现点、线、面、立体等各种形状的拟合，大量的采样点能带来更高的测量精度，有助于生产加工过程中的精准控制，保障内燃机整体装配质量[6]。

5.2. 气孔、裂纹、孔隙率等缺陷检测

由于复杂零件的结构限制，某些部位的缺陷用传统的射线或超声检测方法无法进行探伤。工业 CT 可快速精准且直观地测量出零部件内部的裂纹、气孔、疏松、夹杂等各类缺陷，能直观呈现孔隙的尺寸规格、分布位置、密集程度等关键信息，实现孔隙缺陷的可视化、量化分析。此外，在增材制造过程中，异形活塞毛坯试样 3D 打印完成后需通过工业 CT 查看其孔隙率等缺陷情况，如图 5 所示。

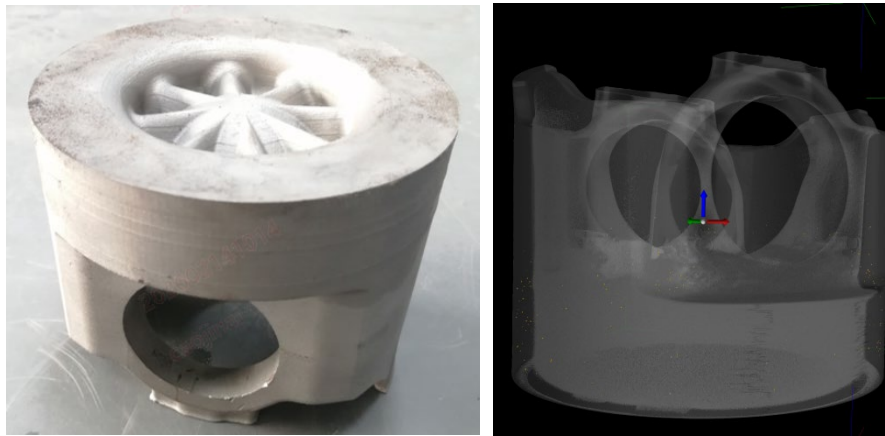


Figure 5. Piston 3D print scan analysis
图 5. 3D 打印扫描分析

Table 3. Scanning data of piston rough samples
表 3. 活塞毛坯试样扫描数据

概率	半径(mm)	体积(mm ³)	表面(mm ²)	间隙(mm)	紧密度
1.00	0.0700598	0.0006878	0.0490841	4.1976552	0.48
1.03	0.1161809	0.0017194	0.1079835	2.2005816	0.26
1.04	0.1107744	0.0017194	0.0981684	4.5558139	0.30
1.01	0.1193682	0.0020632	0.1276187	2.2012405	0.29
1.04	0.1161797	0.0024071	0.1276163	0.5845312	0.37
1.04	0.1107721	0.0024071	0.1276189	2.5378196	0.42
1.01	0.1310681	0.0024072	0.1472490	3.2286325	0.26
1.01	0.1194403	0.0027510	0.1472533	4.5968742	0.39
1.02	0.1136526	0.0027511	0.1374329	2.1455567	0.45
1.04	0.1161797	0.0027511	0.1472462	3.2975049	0.42

采用工业 CT 对活塞试样进行缺陷扫描, 见表 3, 识别出 125 处内部孔隙缺陷, 单孔隙体积区间为 0.00069~0.00309 mm³, 等效孔径分布在 0.14~0.30 mm 范围内, 孔隙缺陷总体积 0.0677 mm³; 经测算活塞有效检测区域整体孔隙率仅为 0.002%。试样内部无大尺寸集中孔隙、无连续疏松及裂纹类缺陷, 整体孔隙率满足设计要求。

6. 工业 CT 在质量控制过程中的应用

焊缝质量诊断

利用工业 CT 扫描技术对铝铸件进行孔隙度分析焊缝质量诊断工业 CT 装置用于焊接质量检测, 能够为技术人员提供准确的焊缝质量数据, 为焊接工艺的改进提供依据[7]。例如, 焊接齿轮位于输出末端, 扭矩较大, 承受脉动扭转载荷, 会使潜在原始裂纹扩展, 需进行焊接裂纹探伤。利用 9 MeV 工业 CT 扫描发现, 焊缝不同深度局部位置有焊接缝隙, 如图 6。

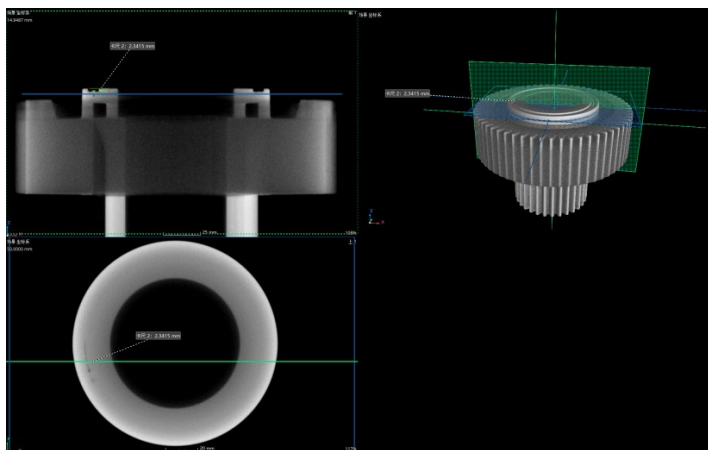


Figure 6. Planetary gear weld inspection
图 6. 行星轮焊缝检测

7. 工业 CT 在售后服务过程中的应用

7.1. 故障检测与诊断

针对售后环节中出现故障、损坏的零部件，可以借助工业 CT 技术进行失效分析和故障诊断与定位，工业 CT 技术能够清晰还原零部件的内部结构状态、缺陷分布及损伤情况，精准定位零部件的失效原因。另外，对于不可拆机电产品、电子元器件和电路板等内部封闭器件也可以借助工业 CT 技术进行故障检测与诊断，工业 CT 在产品失效分析中有巨大的潜在应用空间。例如，市场反馈自主氮氧传感器发现探头失效，经内部分析可能是探头内陶瓷芯片破裂，工业 CT 对探头进行扫描，通过 CT 成像分析陶瓷探头断裂失效位置，协助定位失效原因，如图 7。

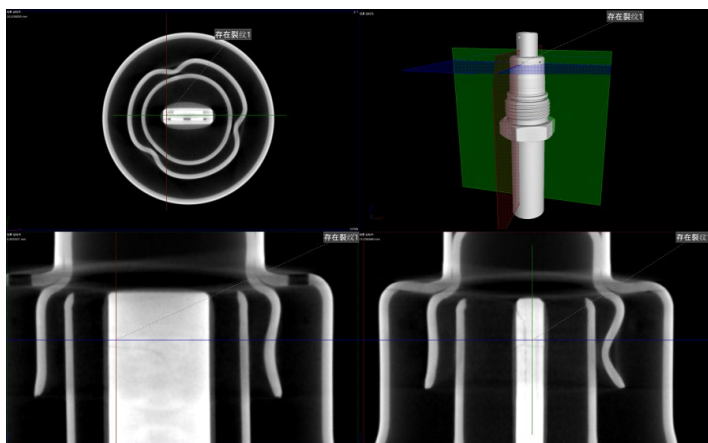


Figure 7. Nitrogen oxide sensor probe failure
图 7. 氮氧传感器探头失效

7.2. 装配分析

对于一些失效件或内部结构复杂的产品，直接拆卸没办法还原其内部状况，过程中还会造成破坏，丢失一些有用的信息。使用 CT 扫描可以不用拆卸，直观了解产品的二维与三维局部整体、透视或截面分析图，可分析与测量组件间装配形成的缝隙，评估工艺，寻找失效原因，解决相关问题，还能降低企业

研发的投入成本。在进行内燃机上某些核心部位的装配检查时,工业 CT 可以清晰地发现装配错位等人为差错。当存在故障分析争议时工业 CT 的价值更大。安装部位的位置准确度、形变、间隙和缺陷等是具体的检查内容,如图 8 所示。对 CVT 轮边轴封进行相关位置的检测,刚性距离为 2.4801 mm,与图纸要求基本一致。但是轴封距离顶面位置与图纸要求不符,一侧滑落高度相差约 2 mm。轴封错位,密封不良,产生漏油,检测参数设置见表 4。

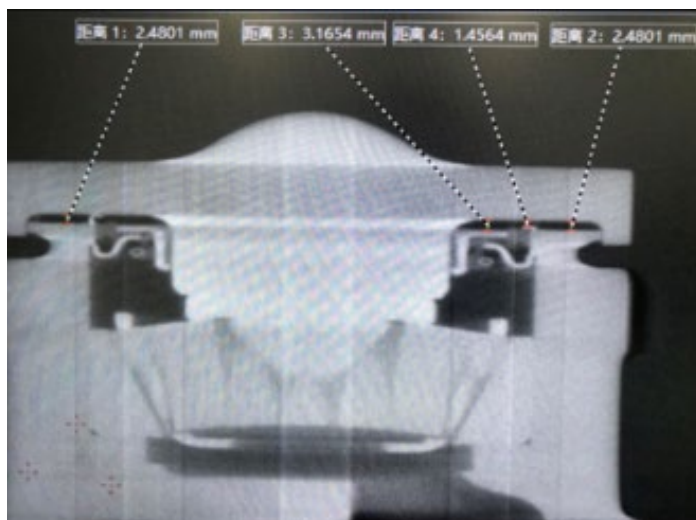


Figure 8. CVT wheel side shaft seal assembly misalignment inspection

图 8. CVT 轮边轴封装配错位检查

Table 4. 9 MeV industrial CT inspection parameter settings

表 4. 9 MeV 工业 CT 检测参数设置

参数名称	参数值	参数名称	参数值
样品材质	铸铁件总成	焦点尺寸	1.0 μm
射线源类型	9 MeV 加速工业 CT	扫描方式	面阵扫描
管电压	8.3 MeV	管电流	0.3 mA
FOD	3200 mm	FDD	2170 mm
像素矩阵	1*1	积分时间	600 ms
积分张数	5000	滤波方式	Sn 4.0 μm Cu 4.0 mm

8. 结束语

经上述分析可知,工业 CT 技术应用于内燃机产品全生命周期的设计研发、生产制造、售后服务等各个核心环节,既能实现零部件的逆向工程分析,也可完成高精度尺寸测量、内部缺陷与孔隙量化检测,还能对售后故障件开展专业失效分析,全方位覆盖内燃机零部件的各类检测场景,有效满足行业对零部件高质量、高精度、无损化的检测核心需求,为内燃机产品的设计优化、工艺提升、质量把控与售后保障提供了科学、可靠的技术支撑。

参考文献

- [1] 凌雪. 不完全投影数据 CT 三维重建算法研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌航空大学, 2024.

-
- [2] 肖永顺, 李砚涛. 基于用户无损检测需求的高能工业 CT 系统定制化解决方案[C]//中国机械工程学会无损检测分会, 中国无损检测学会. 无损检测高等教育发展论坛学术交流会. 重庆: 第五届无损检测高等教育发展论坛学术交流会论文集, 2014: 84-87.
- [3] 杨富强, 张定华, 黄魁东, 等. CT 不完全投影数据重建算法综述[J]. 物理学报, 2014, 63(5): 9-20.
- [4] 周颖, 惠延波, 冯兰芳, 等. 基于 X 射线三维可视化和定量分析小麦籽粒的萌芽[J]. 河南工业大学学报: 自然科学版, 2019, 40(1): 84-88.
- [5] 欧阳壮, 文浩, 樊琼. 450 kV 工业 CT 在汽车用铝铸件质量检测中的应用[J]. 汽车零部件, 2024(8): 74-77.
- [6] 章镇 肖鹏. 工业 CT 在航空工业的应用[J]. 测控技术, 2023, 42(2): 1-6.
- [7] 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(4): 486-488.