DOI：10.11973/wsjc202202004

基于工业 CT 的 GIS 绝缘拉杆缺陷检测方法

章学兵[1]，骆国防[2]

（1. 国网上海市电力公司青浦供电公司，上海 201799；2. 国网上海市电力公司电力科学研究院，上海 200437）

摘　要：绝缘拉杆作为 GIS（气体绝缘金属封闭开关设备）的重要组成部件和传动部件，其机械及电气性能的可靠性是 GIS 断路器实现分、合操作的关键。目前对于绝缘拉杆没有有效的质量检测方法，为此结合工业 CT 技术，提出了基于工业 CT 的 GIS 绝缘拉杆缺陷检测方法，并进行了检测试验。试验结果表明，对比传统的无损检测方法，该方法能精准判定缺陷性质、位置和尺寸，更重要的是能在设备投运前及时、准确地发现缺陷，保障设备质量。该研究为 GIS 绝缘拉杆缺陷检测提供了新的思路，对于提升绝缘拉杆产品质量及保障 GIS 开关设备的稳定运行具有重要意义。

关键词：变电站 GIS；绝缘拉杆；工业 CT；无损检测

中图分类号：TK564；TG115.28　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-6656（2022）02-0017-05

Defect detection method of GIS insulation pull rod based on industrial CT

ZHANG Xuebing[1]，LUO Guofang[2]

（1. State Grid Shanghai Qingpu Power Supply Company，Shanghai 201799，China；

2. State Grid Shanghai Electric Power Research Institute，Shanghai 200437，China）

Abstract：As an important component and transmission part of GIS switcher，the insulation pull rod with high reliability of mechanical and electrical performance is the key to realize the opening and closing operation of the GIS circuit breaker. There is no effective quality inspection method for insulation pull rods currently. Thus，the defect detection method combined with the industrial CT for GIS insulation pull rod is proposed and experiments are carried out. The experimental results show that the avail able method based on industrial CT can determine the nature，location and size of the defect accurately compared with the traditional non-destructive testing methods. More importantly，the method can detect the defects timely and accurately in order to ensure the quality of the equipment before its putting into operation. The research provides a new idea for the defect detection of GIS insulation pull rods，which is of great significance for improving the quality of insulation pull rods and ensuring the stable operation of GIS switcher.

Key words：substation GIS；insulation pull rod；industrial CT；nondestructive testing

绝缘拉杆作为 GIS（气体绝缘金属封闭开关设备）断路器中的关键部件，其作用是将运动从接地部分传送到高电位部分，同时传递拉伸和扭转载荷，实现电气上的通断。由于断路器分、合操作频繁，故要求绝缘拉杆有较高的绝缘性能、机械性能及良好的疲劳性能[1]。

GIS 用绝缘拉杆几乎全部采用纤维增强的环氧材料，该材料具有机械强度高、绝缘性能好、耐热性好等优点，可以与环氧树脂良好结合，再结合真空浸胶工艺，使得绝缘拉杆内部含气量小，均匀性好，成品呈现较高的击穿电压[2-3]；采用芳纶纤维和聚酯纤维增强材料制作的绝缘拉杆，成型后呈空心管状，具有质量轻、机械操作功小等优点，已成为绝缘拉杆的主要型式[4-5]。由于生产工艺控制过程中存在不确定因素，绝缘拉杆成品中可能会存在气孔、分层、空隙、裂纹等缺陷。这类缺陷会引发绝缘拉杆放电击

收稿日期：2021-07-22

基金项目：国家电网公司科技项目（520940180062）

作者简介：章学兵（1990－），男，硕士，工程师，主要从事电网设备金属材料的监督工作

通信作者：章学兵，841893958@qq.com

穿事故，给电力系统造成一定损失，严重威胁电网安全稳定运行[6-13]。

通过查阅 GIS 断路器用绝缘拉杆应用现状、生产工艺、出厂试验以及运行缺陷检测的相关文献，笔者对 GIS 用绝缘拉杆的质量检测方法进行梳理，发现当前绝缘拉杆产品尚无统一的检测规范，且各厂家对于绝缘拉杆产品的出厂检测都不够全面，对材料及工艺方面的检测尤为欠缺，这导致绝缘拉杆在实际使用过程中经常出现不同程度的质量问题，对其可靠性造成一定影响[14-19]；而电气试验及机械试验并不能保证绝缘拉杆的质量，因此，提出用工业 CT 来检测绝缘拉杆中的缺陷，并通过试验验证该方法的可行性和有效性。

1　绝缘拉杆结构

选用的绝缘拉杆试件为上海某 110 kV 变电站 126 kV GIS 设备中绝缘拉杆的同批次产品，产品型号为 ZF21A-126，其采用空心管状结构，试件结构如图 1 所示。

图 1 中金属嵌件材料为铝合金，直径为 45 mm；真空浸胶圆管由芳纶纤维增强环氧树脂复合材料制成（由环氧树脂加液体酸酐组成的胶黏剂和无碱无捻的玻璃布复合而成），厚度为 4 mm。真空浸胶圆管中间部位有一个直径为 5 mm 的孔，以连通真空浸胶管内部及 GIS 闸刀气室；端部金属嵌件间距为 68 mm。

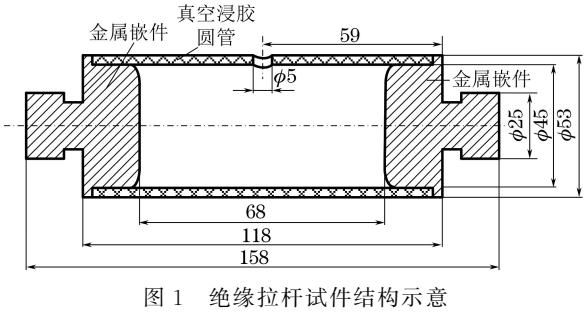


图 1　绝缘拉杆试件结构示意

受芳纶纤维分层布置造成的材料各向异性的影响，绝缘拉杆材料性能方面的检测比较困难。目前各厂家对绝缘拉杆的大多数试验项目都只是关注其电气和机械性能，常规的试验项目有外观检查、工频耐压和局放试验、热试验、力学性能试验、机械寿命试验、雷电冲击试验等。通过对绝缘拉杆现场运行事故进行分析可知，常规试验项目并不能保证绝缘拉杆的质量[14]，更难以检出材料及工艺方面的缺陷。

2　绝缘拉杆检测方法

绝缘拉杆的材料质量及工艺控制是决定其质量的重要因素。目前，绝缘拉杆材料及工艺方面的质量检测主要依靠无损检测。由于绝缘拉杆黏接部位存在两种壁厚相差非常悬殊的材料（环氧树脂/铁或铝合金），生产厂家最常用的方法是常规射线检测（RT）和数字 X 射线成像检测（DR），由于 RT 和 DR 的检测结果都是二维图像，微小缺陷和层间面积型缺陷容易漏检，绝缘拉杆的质量控制效果并不理想；而工业 CT 能发现平面内任何方向分布的缺陷，检测图像层次分明、不重叠，适用于绝缘拉杆黏接部位的层间缺陷检测。

工业 CT 通过多角度透照，对获得的图像进行逆向重构，得到带几何坐标（平面或三维）的点灰度集合，以此实现工件空间连续性（缺陷检测）、密度连续性（密度测量）、几何尺寸、孔隙率等参数的检测。工业 CT 透照系统结构示意如图 2 所示。

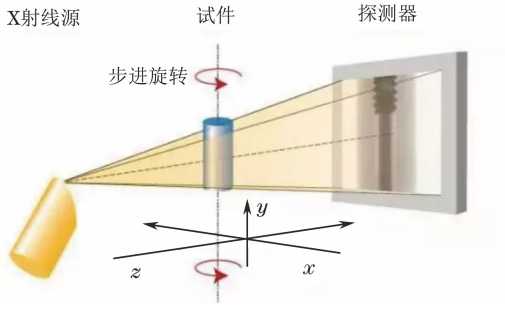


图 2　工业 CT 透照系统结构示意

相比 RT 和 DR 检测，工业 CT 能得到被检工件的密度分布图，且检测图像呈三维立体状，可以对检测图像进行增强、分析、压缩、存档等处理，也可作为数据输入计算机进行计算，还可以进行远距离传输观测。通过适当的校准方法，工业 CT 能准确地测出被检试件的几何尺寸和密度，还能帮助识别材料成分，提供精确的电子密度和原子序数图像。

工业 CT 扫描方式如图 3 所示，检测时在一个

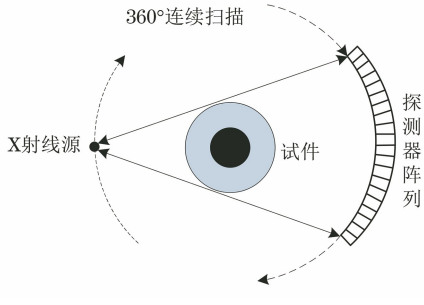


图 3　工业 CT 扫描方式示意

视角下扫描试件整个断面，一次采样该视角下的完整投影；投影数据通过雷当反变换，并经过迭代重建算法或解析重建算法的处理可实现图像重建。这些优点，使得工业 CT 能对绝缘拉杆进行全方位、立体的扫描，尤其是能扫描到处于薄弱环节的环氧树脂与金属黏接部位。

3 试验验证

为验证工业 CT 在检测绝缘拉杆缺陷方面的可行性和有效性，选取编号为 1# 的 126 kV GIS 开关设备绝缘拉杆为试验对象（见图 4），分别采用 RT、DR 和工业 CT 方法对其进行缺陷检测。

图 4 1# 绝缘拉杆试件实物

3.1 RT 检测结果

RT 检测参数设置如表 1 所示，1# 试件的 RT 检测结果如图 5 所示。由图 5 可知，1# 绝缘拉杆试件的环氧树脂层、铝合金嵌件以及黏接部位未显示出气孔、空隙、分层、裂纹等缺陷；图 5 中管体处阴影为连通真空浸胶管内部及 GIS 闸刀气室的直径为 5 mm 的孔。

表 1 RT 检测参数设置

项目	参数
焦点尺寸/mm	2.0×2.0
焦距/mm	600
管电压/kV	180
管电流/mA	5
曝光时间/min	2
增感方式	Pb 增感屏（前后 0.1 mm）
胶片黑度	2.0～4.0
显影时间/min	5

3.2 DR 检测结果

DR 检测参数设置如表 2 所示，1# 号试件的 DR 检测结果如图 6 所示。由图 6 的结果可见，1# 绝缘拉杆试件的环氧树脂层、铝合金嵌件以及黏接部位未显示出气孔、空隙、分层、裂纹等缺陷；管壁中间阴影及管体中间白影为连通真空浸胶管内部及 GIS 闸刀气室的直径 5 mm 的孔。

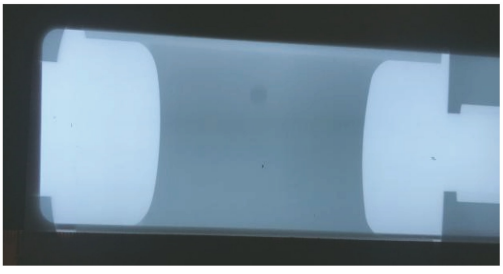


图 5 1# 试件的 RT 检测结果

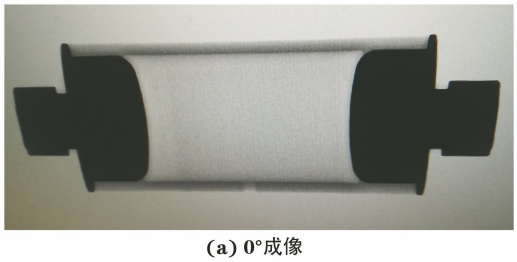
表 2 DR 检测参数设置

项目	参数
焦点尺寸/mm	3.0
焦距/mm	500
管电压/kV	270
管电流/μA	500
曝光率（脉冲数）/（mA/min）	15（脉冲数）
分辨率/μm	120
灰度级/bit	16
实时成像帧率/（帧/s）	4

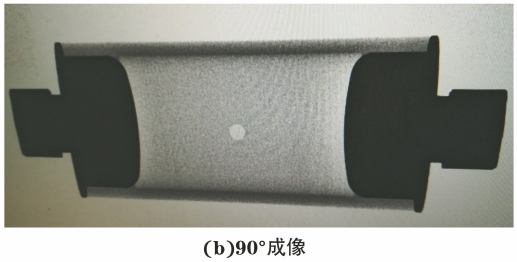
3.3 工业 CT 检测结果

3.3.1 1# 绝缘拉杆的检测

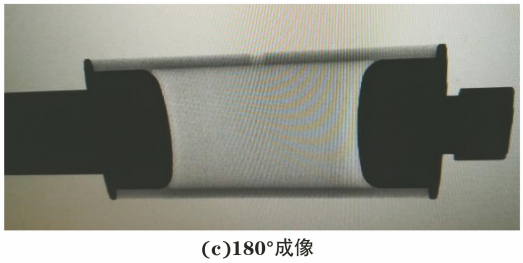
工业 CT 检测参数设置如表 3 所示，1# 绝缘拉杆试件缺陷的 CT 三维检测结果如图 7 所示，试件缺陷的长度、高度、宽度的检测结果如图 8～10 所示。



(a) 0°成像



(b)90°成像



(c)180°成像

图 6 1# 试件的 DR 检测结果

表 3　工业 CT 检测参数设置

项目	参数
扫描方式	面阵扫描
检测比例	100%
射线管类型	小焦点
焦距/mm	1 300
管电压/kV	200
管电流/μA	400
空间分辨率/μm	94.33
曝光时间/ms	500
扫描时间/s	720
采用数量/张	1 440
投影叠加数量(平均)	1
滤波片参数	铜:0.5 mm;铝:0.5 mm
环境温度/℃	20

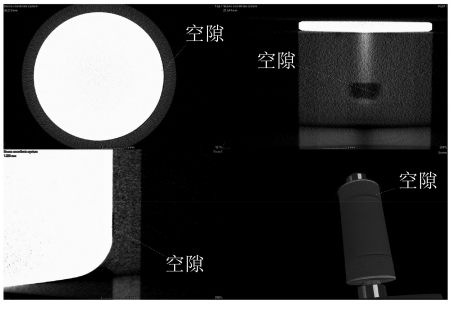


图 7　1# 试件缺陷的 CT 三维检测结果

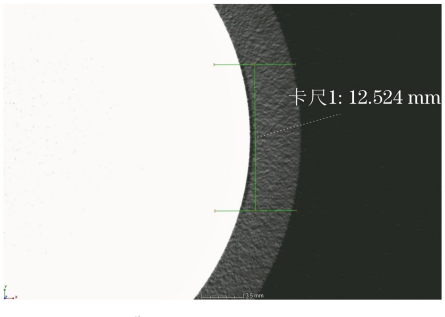


图 8　1# 试件缺陷长度检测结果

由图 7～10 可以看出，1# 绝缘拉杆试件中环氧树脂与铝合金嵌件黏接部位存在一条空隙，具体尺寸为 12.524 mm× 0.357 mm ×3.733 mm(长×宽×高)。

对比 1# 试件的 RT、DR 与工业 CT 检测结果发现，RT 和 DR 方法均未检测出绝缘拉杆中环氧树

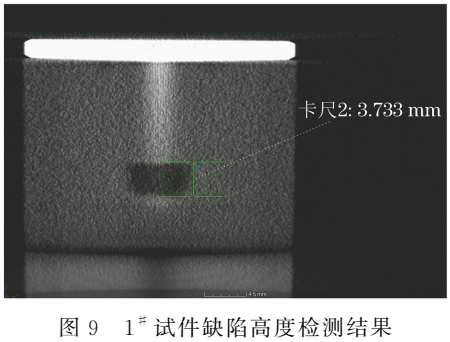


图 9　1# 试件缺陷高度检测结果

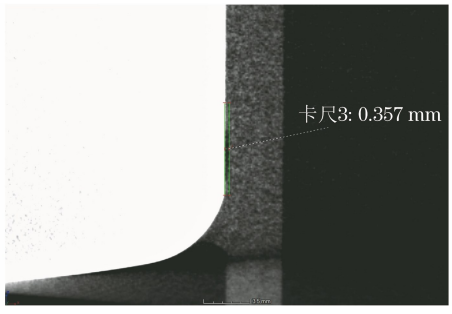


图 10　1# 试件缺陷宽度检测结果

脂与铝合金嵌件黏接部位的空隙缺陷，而工业 CT 检测发现了该处缺陷，并给出了缺陷位置及具体尺寸。初步分析得出工业 CT 检测比 RT、DR 检测更有效、更精准的结论。

3.3.2　2# 绝缘拉杆的检测

为验证工业 CT 对 GIS 用绝缘拉杆缺陷的检出效果，对如图 11 所示编号为 2# 的绝缘拉杆试件进行工业 CT 检测。工业 CT 系统参数设置与表 3 相同，2# 绝缘拉杆试件缺陷的 CT 三维检测结果如图 12 所示，其缺陷的长度、高度、宽度的检测结果如图 13～15 所示。

图 11　2# 绝缘拉杆试件实物

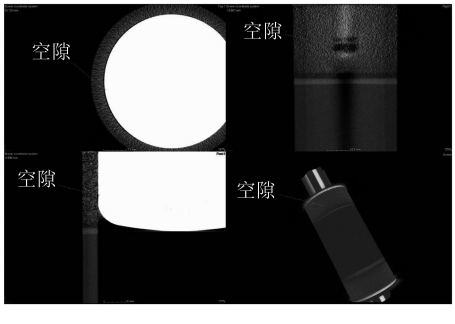


图 12　2# 试件缺陷的 CT 三维检测结果

由图 12～15 可以看出，2# 绝缘拉杆试件中环氧树脂与铝合金嵌件粘接部位也存在一条空隙，具体尺寸为 39.598 mm×0.337 mm×4.177 mm(长×宽×高)。

1# 和 2# 绝缘拉杆试件的工业 CT 检测结果表明，工业 CT 能准确发现绝缘拉杆黏接部位的空隙缺陷，精准判定缺陷性质，并给出缺陷的位置及几何尺寸。试验结果验证了工业 CT 检测绝缘拉杆缺陷的可行性和有效性。

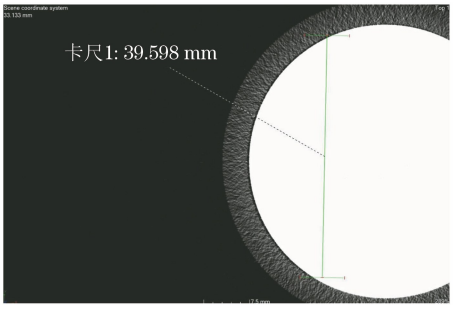


图 13　2# 试件缺陷长度检测结果

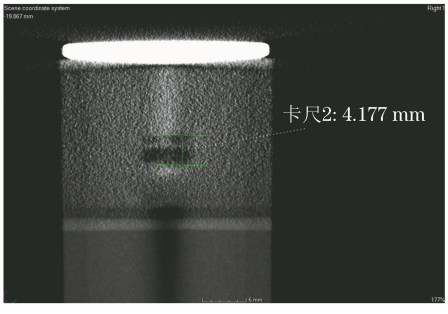


图 14　2# 试件缺陷高度检测结果

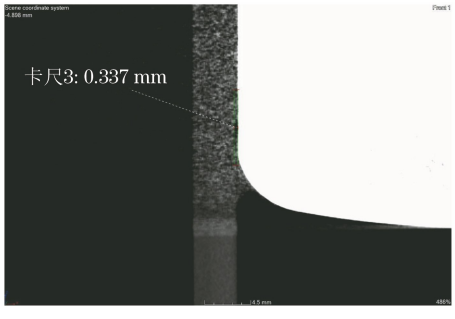


图 15　2# 试件缺陷宽度检测结果

4　结语

文章结合绝缘拉杆的构造特点提出采用工业 CT 的方法检测绝缘拉杆中的缺陷，并通过对比绝缘拉杆试件的 RT 检测、DR 检测和工业 CT 检测结果，得出以下结论。

（1）工业 CT 可以准确发现绝缘拉杆中环氧树脂与金属嵌件黏接部位不同方向的缺陷，检测图像层次分明、不重叠。

（2）工业 CT 可以判定绝缘拉杆中的缺陷性质，精准给出缺陷的位置和几何尺寸。

（3）该研究为绝缘拉杆缺陷检测提供了新的思路，对提升 GIS 开关设备质量及保障电网安全稳定运行具有重要意义。

参考文献：

[1]　钟建英. GIS(气体绝缘金属封闭开关设备)原理与应用[M]. 北京：机械工业出版社，2017.

[2]　陈磊，宋欢，李正胜，等. 芳纶纤维材料在电气绝缘和电子领域中的应用进展[J]. 绝缘材料，2018，51(10)：7-10，15.

[3]　侯亚峰，张敬，侯国良，等. 高性能芳纶绝缘拉杆用环氧树脂配方研究[J]. 热固性树脂，2018，33(6)：27-30.

[4]　邵军，杜静华，侯梅. 芳纶纤维复合材料在高电压等级绝缘拉杆上的基础研究[J]. 科技创新导报，2018，15(9)：123-126.

[5]　颜丙越，张卓，杨威，等. 高压绝缘拉杆真空压力浸渍成型工艺研究[J]. 绝缘材料，2020，53(2)：71-75.

[6]　王朗珠，王浩宇. 550 kV GIS 隔离开关绝缘拉杆质量问题探讨[J]. 绝缘材料，2013，46(1)：63-65.

[7]　张寒，张轩，刘秀，等. 500kV GIS 隔离开关绝缘拉杆故障分析[J]. 云南电力技术，2016，44(2)：52-54.

[8]　舒剑飞，陈骏星溆，吕风仪，等. 500 kV GIS 绝缘拉杆击穿故障原因分析[J]. 湖南电力，2019，39(2)：33-35.

[9]　于晓翔. 500 kV 高压开关设备隔离开关绝缘拉杆故障分析[J]. 电气技术，2021，22(2)：54-58.

[10]　刘芹，程建伟，纪哲夫. 550kV GIS 隔离开关绝缘拉杆故障原因分析与应对措施[J]. 广西电力，2019，42(3)：45-50，61.

[11]　李璐，牛田野，姜国庆，等. 一起 500kV SF6 断路器爆炸事故的分析[J]. 中国电机工程学报，2016，36(S1)：246-250.

[12]　廖巍，季怡萍，周谷亮，等. 126 kV GIS 三工位隔离开关用绝缘拉杆击穿故障分析[J]. 电力与能源，2020，41(2)：194-199.

[13]　李建鹏，胡伟涛，刘海锋，等. 两起芳纶纤维增强型绝缘拉杆典型放电故障的联合分析[J]. 电瓷避雷器，2020(6)：235-240.

[14]　陈允，张鹏飞，崔博源，等. 特高压 GIS 断路器用绝缘拉杆应用现状[J]. 高电压技术，2019，45(9)：2699-2706.

[15]　雷汉坤，贾志杰. 检测 GIS 固体绝缘内部放电缺陷的特高频和 X 射线数字成像联合方法研究[J]. 高压电器，2018，54(1)：224-229.

[16]　邓建青，白晓萍，邱吉庆，等. GIS 隔离开关用绝缘拉杆的放电研究分析及防范措施[J]. 高压电器，2019，55(10)：247-252.

[17]　王昊，马勍，魏劲容，等. 550 kV GIS 断路器用绝缘拉杆孔隙性试验研究[J]. 高压电器，2021，57(1)：55-61.

[18]　陶风波，王帅，贾勇勇，等. 特高压气体绝缘金属封闭式组合电器的现场冲击耐压试验方法[J]. 高电压技术，2018，44(12)：3936-3943.

[19]　卫昕卓，邓宏伟，陈燕南，等. GIS 隔离开关用绝缘拉杆含异物及缺陷时的电场分析[J]. 高压电器，2016，52(4)：103-110，116.