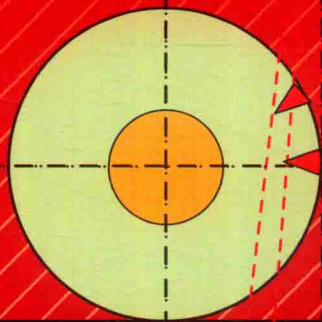


# X射线数字成像 检测技术及应用

国家电网有限公司设备管理部 组编

继电保护



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

# X射线数字成像 检测技术及应用

国家电网有限公司设备管理部 组编



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

·北京·

## 内 容 提 要

随着X射线数字成像检测技术在电网设备检测中的成功应用,实现了GIS、输电线路金具、电力电缆及其附件等电网设备材料内部结构的直观、准确、快速检测。同时,为电网设备的状态检修、状态评价提供了准确、全新的检测手段,节约了大量的检修时间,防止了因设备解体、停电造成的重大经济损失。

本书收集了大量的典型案例,从案例经过、检测分析、检测工艺、经验体会等方面进行了较为详尽的阐述,立足实际、分析透彻,可供从事电网设备运行检修人员、带电检测人员、科研人员使用,也可供高校相关专业师生学习、参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

X射线数字成像检测技术及应用 / 国家电网有限公司设备管理部组编. — 北京:中国水利水电出版社, 2021.7

ISBN 978-7-5170-9730-3

I. ①X… II. ①国… III. ①电气设备—射线检验—故障检测 IV. ①TM07

中国版本图书馆CIP数据核字(2021)第138394号

书 名	X 射线数字成像检测技术及应用 X SHEXIAN SHUZI CHENGXIANG JIANCE JISHU JI YINGYONG
作 者	国家电网有限公司设备管理部 组编
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址:www.waterpub.com.cn E-mail:sales@waterpub.com.cn 电话:(010)68367658(营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话:(010)88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	天津嘉恒印务有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 11印张 228千字
版 次	2021年7月第1版 2021年7月第1次印刷
印 数	0001—5000册
定 价	99.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

# 本书编委会

主任 金 炜

副主任 毛光辉

委员 田洪迅 王 剑 孙 杨 弓建荣

主 编 田洪迅

副主编 弓建荣 王志惠 葛 栋 赵德祥

参 编	何喜梅	刘国勇	康 钧	陈大兵	刘高飞
	解晓东	孙 伟	黄 锐	吕俊涛	邢海文
	任敬国	戈 宁	乔 木	陈 飞	贾晓辉
	黄 河	付宣蓉	邓化凌	张丰丽	袁光宇
	冯云国	张 杰	何 成	管明健	曲 妍
	张黎明	于金山	王志川	倪 辉	甄 利
	谢 亿	庞先海	彭 佳	王志高	冯 超
	赵洲锋	王生杰	陈莲君	贾海龙	梁启军
	张 烁	马永福	林德源	骆国防	戴 强
	管森森	李 田	傅思伟	方 琼	

# 前 言

X射线数字成像检测技术是一种能穿透物体并对物体内部结构进行成像的无损检测技术，其广泛应用于医疗、军事、航空航天等领域，然而电网的应用起步较晚，2009年国家电网有限公司在国内率先系统、全面地研究了电网X射线数字成像检测技术，并取得了良好的应用效果后，该项检测技术很快在电网公司推广应用，X射线对电网带电设备的无损检测实施，节约了大量的检修时间，防止了因设备解体、停电造成的重大经济损失。另外影像分析能直观反应设备内部结构，为准确判定设备内部故障情况提供有力支持，如现场应用的GIS设备吸附剂罩材质判定；GIS设备断路器合闸电阻带电诊断；GIS设备内部触头分合闸不到位、异物、绝缘件开裂等结构性缺陷；线路金具压接质量中压接部位不正确、压接不到位等工艺问题；在电力电缆及其附件检测方面，为外力破坏后电缆的现场质量评价提供了快速有力的技术支持，同时可开展应力锥、半导体层、铜屏蔽安装工艺的有效评价工作。本书详细阐述了X射线数字成像检测技术的工作原理，射线防护技术，同时归纳整理了大量现场应用案例，有效总结了X射线数字成像检测技术在电网设备故障诊断及状态评价方面的应用经验，为此技术在电网设备上的广泛应用奠定了基础。

本书由国家电网有限公司设备管理部组织编写，从射线的发展历程、数字成像的基本原理、射线的防护、GIS设备、输电线路金具压接质量、电力电缆及附件、焊接接头检测技术等方面对X射线在电网设备中的检测进行了详细系统的介绍，并在各地公司收集了大

量的典型案例，从案例经过、检测分析、检测工艺、经验体会等方面进行了较为详尽的阐述，对今后工作中不同电网设备的X射线数字成像检测及故障诊断具有实际指导作用，并对准确判定设备内部故障情况提供了有力支持。

由于编者水平有限，书中错误、纰漏之处在所难免，恳请广大读者提出宝贵意见和建议。

**编 者**

2020年10月

# 目 录

## 前言

第 1 章 概述 .....	1
1.1 背景 .....	1
1.2 现状 .....	2
1.2.1 优势 .....	2
1.2.2 局限性 .....	2
1.3 技术分类 .....	2
1.3.1 胶片照相技术 .....	3
1.3.2 计算机 X 射线照相技术 (CR 检测技术) .....	3
1.3.3 X 射线实时成像检测技术 (DR 检测技术) .....	3
1.3.4 优劣比较 .....	3
1.4 应用 .....	4
1.5 展望 .....	7
第 2 章 X 射线数字成像检测技术原理 .....	8
2.1 X 射线的产生及特点 .....	8
2.1.1 产生 .....	8
2.1.2 特点 .....	8
2.2 X 射线检测原理及检测特点 .....	10
2.2.1 检测原理 .....	10
2.2.2 检测特点 .....	11
2.3 X 射线机 .....	12
2.3.1 分类 .....	12

2.3.2	结构	13
2.3.3	典型 X 射线机	16
2.4	CR 检测技术	17
2.4.1	CR 系统组成	17
2.4.2	工作原理	17
2.4.3	IP 成像板	18
2.4.4	激光扫描仪	20
2.5	DR 检测技术	20
2.5.1	DR 系统组成	20
2.5.2	非晶硅数字平板技术原理	21
2.5.3	非晶硒数字平板技术原理	22
2.5.4	CMOS 数字平板技术原理	22
2.6	检测工艺	23
2.6.1	电压的选择	23
2.6.2	曝光量的选择	24
2.6.3	焦距的选择	24
2.6.4	透照方向的选择	24
2.7	X 射线数字成像检测术语	25
2.7.1	像素	25
2.7.2	图像灵敏度	25
2.7.3	分辨率	25
2.7.4	分辨力	26
2.7.5	系统分辨率	26
2.7.6	图像分辨率	26
2.7.7	数字探测器	26
2.7.8	灰度等级	26
2.7.9	动态范围	26
2.7.10	计算机系统	26
2.7.11	系统软件	27
2.8	图像处理系统	27
2.8.1	窗宽、窗位	27
2.8.2	过滤器	27
2.8.3	放大功能	28
2.8.4	文本注释功能	28

2.8.5	角度测量	28
2.8.6	校准	28
2.8.7	黑度值测量	29
2.8.8	图像旋转	29
2.8.9	正、负片观察	29
<b>第3章 X射线检测安全防护</b>		<b>31</b>
3.1	辐射量	31
3.1.1	照射量	31
3.1.2	比释动能	32
3.1.3	吸收剂量	32
3.1.4	当量剂量	32
3.1.5	有效剂量	33
3.2	生物效应	34
3.2.1	确定性效应和随机性效应	34
3.2.2	影响辐射损伤的因素	35
3.3	辐射监测	36
3.3.1	工作场所辐射监测	36
3.3.2	个人剂量检测	36
3.3.3	个人剂量监测仪选择	37
3.4	屏蔽防护常用材料	38
3.4.1	屏蔽材料的屏蔽原理	38
3.4.2	屏蔽材料的要求	38
3.4.3	常用屏蔽防护材料及特点	39
3.5	防护的基本方法	39
3.5.1	时间防护	40
3.5.2	距离防护	40
3.5.3	屏蔽防护	40
3.6	电网X射线现场检测安全防护距离	40
3.7	检测人员要求	42
<b>第4章 GIS设备检测技术</b>		<b>43</b>
4.1	X射线对SF <sub>6</sub> 气体的影响	43
4.1.1	SF <sub>6</sub> 气体的基本性能	43

4.1.2	影响 SF <sub>6</sub> 气体击穿电压的因素	44
4.1.3	SF <sub>6</sub> 气体样品射线照射稳定性试验	44
4.2	GIS 基本组成及结构	46
4.2.1	GIS 设备的基本元件	46
4.2.2	GIS 设备的结构分类	55
4.3	断路器的检测	57
4.3.1	110kV GIS 设备断路器的检测	57
4.3.2	330kV GIS 设备断路器的检测	59
4.3.3	750kV GIS 设备断路器的检测	60
4.4	隔离开关、接地开关的检测	64
4.4.1	330kV GIS 设备隔离开关、接地开关的检测	64
4.4.2	750kV GIS 设备隔离开关的检测	65
4.5	母线连接部位检测	67
4.5.1	110kV GIS 设备母线连接部位检测	67
4.5.2	330kV GIS 设备母线连接部位检测	68
4.5.3	750kV GIS 设备母线连接部位检测	69
4.6	罐式断路器 X 射线带电检测	70
<b>第 5 章</b>	<b>输电线路金具压接质量检测技术</b>	<b>73</b>
5.1	压接金具的结构及检测区域	74
5.2	压接金具的典型缺陷	75
5.3	检测工艺要求	76
5.4	压接金具检测结果的评价	77
5.4.1	钢锚与外部铝管压接部位射线检测典型图谱	77
5.4.2	锚管与芯线压接部位射线检测典型图谱	87
5.4.3	铝管与铝线压接部位射线检测典型图谱	89
<b>第 6 章</b>	<b>电力电缆及其附件检测技术</b>	<b>93</b>
6.1	电缆及附件结构	93
6.1.1	单芯电缆本体结构及材料属性	93
6.1.2	三芯电缆本体结构及材料属性	94
6.1.3	电缆附件结构及材料属性	96
6.1.4	电缆本体及附件材料、结构属性	96
6.2	电缆本体的检测	98

6.2.1	电缆本体射线检测	98
6.2.2	电缆本体射线检测工艺	98
6.3	电缆附件缺陷检测	102
6.3.1	电缆附件的主要缺陷	102
6.3.2	中低压电缆附件缺陷检测	102
6.3.3	110kV 绝缘套管式电缆终端缺陷检测	106
6.3.4	带有铜网或铜壳的电缆接头缺陷检测	107
6.3.5	小结	108
<b>第7章</b>	<b>焊接接头的检测技术</b>	<b>111</b>
7.1	透照方式	111
7.2	成像几何参数的选择	112
7.3	管件透照次数的确定	113
7.4	透照参数的选择	113
7.5	图像质量	113
7.6	图像评定	114
<b>第8章</b>	<b>典型案例分析</b>	<b>115</b>
8.1	电力电缆检测	115
8.1.1	案例简介	115
8.1.2	检测分析	115
8.1.3	结论及建议	116
8.2	耐张线夹检测	119
8.2.1	案例简介	119
8.2.2	检测分析	119
8.2.3	检测结果分析	123
8.2.4	结论及建议	123
8.3	220kV 断路器弧触头检测	121
8.3.1	案例经过	124
8.3.2	检测分析	124
8.3.3	经验体会	126
8.4	220kV GIS 设备金属颗粒检测	126
8.4.1	案例经过	126
8.4.2	检测分析	126

8.4.3	经验体会 .....	127
8.5	变压器线圈材质工业 CT/DR 鉴别 .....	127
8.5.1	案例经过 .....	127
8.5.2	检测分析 .....	127
8.5.3	经验体会 .....	130
8.6	±800kV 换流站调相机管道焊接接头检测 .....	130
8.6.1	案例简介 .....	130
8.6.2	检测分析 .....	131
8.6.3	经验体会 .....	132
8.7	变压器油管路焊缝质量检测 .....	133
8.7.1	检测目的 .....	133
8.7.2	检测应用 .....	133
8.8	500kV 断路器内部烧蚀 .....	134
8.8.1	案例经过 .....	134
8.8.2	检测分析 .....	134
8.8.3	经验体会 .....	135
8.9	220kV GIS 内部隐患排查 .....	136
8.9.1	案例简介 .....	136
8.9.2	检测分析 .....	136
8.9.3	经验体会 .....	138
8.10	电缆终端螺栓检测 .....	138
8.10.1	案例简介 .....	138
8.10.2	检测分析 .....	139
8.10.3	经验体会 .....	139
8.11	500kV 断路器触头检测 .....	140
8.11.1	案例简介 .....	140
8.11.2	检测分析 .....	140
8.11.3	经验体会 .....	142
8.12	220kV GIS 设备避雷器连接导电杆检测 .....	143
8.12.1	案例简介 .....	143
8.12.2	检测分析 .....	143
8.12.3	经验体会 .....	145
8.13	500kV HGIS 设备隔离开关销钉紧固排查 .....	146
8.13.1	案例简介 .....	146

8.13.2	检测分析 .....	146
8.13.3	经验体会 .....	149
8.14	110kV GIS 母线插接不良诊断 .....	151
8.14.1	案例简介 .....	151
8.14.2	检测分析 .....	151
8.14.3	经验体会及建议 .....	153
8.15	GIS (HGIS) 设备 X 射线专项带电检测 .....	154
8.15.1	案例简介 .....	154
8.15.2	检测分析 .....	155
8.15.3	经验体会 .....	155
8.16	500kV 隔离刀闸屏蔽罩金属异物 .....	156
8.16.1	案例经过 .....	156
8.16.2	检测分析 .....	157
8.16.3	经验体会 .....	158
8.17	110kV 开关螺钉松动 .....	158
8.17.1	案例经过 .....	158
8.17.2	检测分析 .....	158
8.17.3	经验体会 .....	160
	参考文献 .....	161

# 第1章 概述

## 1.1 背景

射线成像检测是利用射线与物质相互作用的光电效应，将穿透被检测工件的射线转换为光、电信号并予以显示的方法。1895年，德国物理学家威廉·伦琴发现了X射线，其发现为诸多科学领域提供了一种行之有效的研究手段，这种“新光线”开始被应用于医学领域，检查骨折和确定枪伤中子弹的位置，但该新技术的理论很快被应用到无损检测领域。例如，早期锌板的X射线检测，说明了焊接质量控制的可能性；20世纪初期，X射线被应用于锅炉、压力容器的检测；现在X射线无损检测是一种常规的无损检测方法，即对材料或部件进行检测以获得相关内部结构，确定有无缺陷以及缺陷的性质、形状、大小、位置及分布等信息，而对被检测材料不造成任何损伤。X射线无损检测方法广泛应用于工业生产过程中产品的生产、制造及服役期的检验，横跨产品的整个生命周期。

自从20世纪80年代引入了计算机化的X射线技术（Computed Radiography, CR）之后，X射线检测发生了巨大的变化，实现缺陷识别、存储以及依靠人为对图像或胶片的解释。CR提供了有益的计算机辅助和图像辨别、存储和数字化传输，剔除了胶片的处理过程，节省了由此产生的费用和时间。

在20世纪90年代后期，数字平板产生了，引入数字化X射线照相检测技术(Digital Radiography, DR)。该技术与胶片和CR的处理过程不同，采用X射线图像数字读出技术，实时成像，真正实现了X射线无损检测自动化。

随着科技的发展，今后该技术会在以下几个方面得到广泛的应用：①在制造、在役检验和过程控制方面使用的数字X射线实时检测系统；②具有数据交换、使用NDT工作站的计算机化的射线检测系统；③小型、低成本的CT系统；④微焦点放大成像的X射线数字成像检测系统；⑤小型高灵敏度的X射线机；⑥大面积的光电导X射线摄像机。

## 1.2 现状

### 1.2.1 优势

(1) 采用X射线对电网设备内部结构进行成像,突破了传统电网设备内部缺陷状况只能靠常规试验数据进行分析,无法达到直观显示故障的阶段。如发生触头部分烧损、导电杆变形、装配不到位、螺丝松动、输电线路金具压接质量、电力电缆及附件等故障时,很难通过常规试验手段准确判定故障原因。另外GIS设备内部结构复杂,拆装困难,为了确定故障点需要做大量反复的测试,通过对测试数据的分析来推断故障原因及故障点,给检修带来很大的困难,当发现异常时其故障已经较为严重,甚至发展成为触头烧损、断路器严重损坏等恶性事故。而采用X射线数字成像技术,可以针对故障易发部位如断路器灭弧室、隔离开关触头部位、母线连接处等部位进行透照成像,观察内部结构的变化情况,如螺丝松动、触指部分烧损、弹簧脱落、合闸不到位等,进而准确掌握内部缺陷的性质,方便检修。同时通过X射线数字成像技术,可以在故障未扩大之前对其进行消缺更换处理,防止设备严重损坏,以及大规模停电事故的发生,保障电网的安全可靠运行。

(2) X射线数字成像系统采用先进的数字图像技术,与传统的需要暗室和冲洗工序的射线胶片相比,大大提高了工作效率。

(3) 辐射剂量减少,数字成像检测的大曝光范围使得在许多情况下只需一次曝光就可以获得所有诊断信息。这样,数字成像板的应用从根本上减少了辐射剂量。

### 1.2.2 局限性

(1) 由于受到便携式射线机能量的限制,目前300kV最大功率的便携式射线机所能穿透钢板的厚度约为55mm,对于一些结构复杂、有效穿透尺寸较大的电网设备,现有的现场便携式X射线成像系统无法实现成像检测。

(2) 对于一些结构较为狭窄,射线机无法摆放的部位无法实现X射线数字成像检测。

(3) X射线对生物细胞具有杀伤作用,因此现场X射线检测防护十分重要,检测人员须经过国家专门机构的培训考核合格后方可开展检测工作。现场检测需要严格划定防范区域,防止非检测人员进入,造成射线伤害。

## 1.3 技术分类

在X射线无损检测中,现阶段按读出方式可分为三类:第一类是胶片照相技术;

第二类是计算机X射线照相技术；第三类是X射线实时成像检测技术。以下分别对三类检测技术进行介绍。

### 1.3.1 胶片照相技术

胶片照相技术是最传统的射线检测方法，是通过把射线胶片放在适当的位置，使其在透过的射线的作用下感光，经暗室显影、定影、水洗、干燥处理，得到被检工件内部结构的影像，再将干燥的底片放在观片灯上观察，根据底片上有缺陷的部位与无缺陷图像的相应部位的黑度差异，就可判断出缺陷的种类、数量、大小等。在检测过程中，射线透照工艺的选择、暗室处理技术的控制等因素均会对射线影像产生影响。

### 1.3.2 计算机X射线照相技术（CR检测技术）

CR技术是指将X射线透过工件后的信息记录在成像板(Image Plate, 简称IP板)上，经激光扫描装置读取成像板，再由计算机产生出数字化图像的技术。整个系统由X射线机、成像板、激光扫描仪、数字图像处理软件和计算机组成。

### 1.3.3 X射线实时成像检测技术（DR检测技术）

DR技术是指在X射线曝光的同时即可观察到所产生的图像的检测技术。X射线透过工件后，被图像采集器接收，图像采集器将采集到的数字信号转换为数字图像，经计算机处理后，还原在显示器屏幕上。图像采集速度要求能够达到25帧/s（PLA制式）或30帧/s（NTSC制式）。

### 1.3.4 优劣比较

目前在射线检测技术方面，较为常用的胶片照相技术、计算机X射线照相技术、X射线实时成像检测技术均有各自的优缺点，见表1-1，使用者可根据被检工件的特性，考虑成本、图片质量、工作效率等因素选择适合的检测方法。

表 1-1 各检测技术优缺点对比表

检测技术	优点	缺点
胶片照相	(1) 无需复杂的检测设备，可达到很高的空间分辨率。 (2) 长期使用胶片所积累的经验较多，检测标准健全	(1) 高质量的影像需要高质量的胶片，需要费时、费力的处理过程，要求较高的暗室环境以及经验丰富的检测人员。 (2) 处理胶片的液体污染环境。 (3) 胶片宽容度小、大宽容度内线性不佳。 (4) 胶片成像不能满足数字化成像、实时检测与评估的要求

检测技术	优点	缺点
CR检测技术	<p>(1) IP板对比度与胶片相仿, 可以多次重复使用, 成像质量接近胶片照相技术。</p> <p>(2) 不需要胶片、化学药品、暗室、相关设备及胶片存储, 在现场可以进行所有操作, 效率高。</p> <p>(3) 图像空间分辨率比DR高, 辅助计算机软件可通过一次曝光就可以获得多数拍摄对象的全部厚度范围内的信息</p>	<p>(1) 图像空间分辨率不如胶片照相。</p> <p>(2) 不能使用在潮湿的环境中和极端的温度条件下。</p> <p>(3) 类似胶片, 不能实时成像。</p> <p>(4) 无成熟的相关电网带电设备的检测标准</p>
DR检测技术	<p>(1) 效率高, 可实现“实时”成像。</p> <p>(2) 宽容度范围远远超过胶片的性能, 影像边缘锐利、清晰, 细微结构表现出色, 成像质量更高。</p> <p>(3) 检测所需的X射线剂量小, 更环保、更经济</p>	<p>(1) 数字平板不能进行分割和弯曲, 其成像时的几何不清晰度比CR大。</p> <p>(2) 数字平板重量比IP板和胶片大, 不易于现场架设; 其灵敏度随温度变化, 一般工作温度为10~35℃。</p> <p>(3) 图像空间分辨率一般比CR和胶片低。</p> <p>(4) 价格昂贵。</p> <p>(5) 无成熟电网带电设备的检测相关标准</p>

## 1.4 应用

目前, X射线数字成像检测技术已广泛应用于医疗、军事、航空航天、普通工业等各领域全寿命阶段周期检测评价。其中, 电力系统相关行业也较早地利用该技术, 解决了电网设备制造、运行、检修等各环节中存在的许多实际问题。2009年, 国网青海电科院首先提出了针对GIS设备X射线数字成像检测系统的研究, 并取得了良好的应用效果后, 该项检测技术很快在电网公司推广应用, X射线对电网带电设备的无损检测实施, 节约了大量的检修时间, 避免了因设备解体、停电造成的重大经济损失。另外影像分析能直观反应设备内部结构, 为准确判定设备内部故障情况提供有力支持。如现场应用的GIS设备吸附剂罩材质判定; GIS设备断路器合闸电阻带电诊断; 设备焊缝缺陷、电缆及金具的检测等。

射线检测技术应用于电网设备带电检测, 主要针对于设备内部结构检测, 其检测工作具有以下特点: ①被检测设备体积大, 内部结构复杂; ②包含材料种类多; ③检测工期紧; ④现场一般没有暗室。因此对于检测效率相对较低、调整工艺参数复杂、要求有暗室进行胶片处理的胶片照相技术来说, 一般难以适用。目前对电网带电设备的X射线检测一般选择计算机X射线照相技术(CR)和X射线实时成