

# 核电站稳压器内表面堆焊层 CCTV 检测分辨率的影响因素

刘 军,严志刚,石 磊  
(中广核检测技术有限公司,苏州 215002)

**摘 要:** 分析了华龙一号压水堆核电机组稳压器内表面堆焊层 CCTV(闭路电视监控系统)检测过程中摄像头分辨率和放大率、照明类型、被检对象、表面状况和查扫速度等因素对检测分辨率的影响,提出可以通过提高摄像头与监视器的分辨率、采用漫反射同轴光、提供充足照明、采用足够慢的扫查速度、改善表面状况等措施提高 CCTV 检测分辨率;同时,采取有效的图像处理措施,可增强缺陷典型特征及分辨率,从而提高缺陷检出率。

**关键词:** 华龙一号机组;稳压器;CCTV 检测;分辨率

中图分类号: TG115.28      文献标志码: B      文章编号: 1000-6656(2022)12-0076-05

## Influencing factors on resolution of CCTV inspection of the pressurizer internal surface of nuclear power plant

LIU Jun, YAN Zhigang, SHI Lei  
(CGNPC Inspection Technology Co., Ltd., Suzhou 215002, China)

**Abstract:** This paper analyses the influence of factors such as camera resolution and magnification, lighting type, surface condition, and scanning speed on the inspection resolution of CCTV (closed-circuit television monitoring system) inspection of the inner surface surfacing layer of Hualong No.1 pressurised water reactor core power unit voltage regulator. It proposes to improve the CCTV inspection resolution by improving the resolution of the camera and monitor, using diffuse coaxial light and providing sufficient lighting. It also suggests to adopt sufficiently slow scanning speed, improving surface conditions and other measures. At the same time, effective image processing measures can enhance the typical characteristics and resolution of defects, so as to improve the detection rate of defect detection.

**Key words:** Hualong No.1 unit; pressurizer; CCTV inspection; resolution

稳压器又称容积补偿器,是压水堆核电站的重要设备之一。在压水堆核电站的运行中,其作用是补偿一回路冷却水温度变化引起的一回路水容积变化,同时调节一回路冷却剂的工作压力,防止一回路系统设备由于压力过高而损坏或压力过低造成堆内冷却剂产生容积沸腾而引起燃料棒过烧事故<sup>[1]</sup>。稳压器壳体材料为低合金钢,内表面堆焊 6~8 mm(厚

度)的不锈钢堆焊层,用以保护壳体金属不受硼酸溶液的腐蚀。在运行过程中系统会受应力、腐蚀、高温作用,因此需按照相关标准要求对稳压器内表面堆焊层进行 CCTV(闭路电视监控系统)检测,检测周期为每 3 年检测一次<sup>[2]</sup>。

文章分析了华龙一号压水堆核电机组稳压器内表面堆焊层 CCTV 检测过程中不同因素对检测分辨率的影响,并提出改进措施,增强缺陷典型特征及分辨率,从而提高缺陷检出率。

### 1 稳压器内表面堆焊层 CCTV 检测过程

稳压器筒体内表面堆焊层筒体 CCTV 检测过程

收稿日期:2022-05-19  
作者简介:刘 军(1981—),男,本科,高级工程师,主要研究方向为 PT/VT 无损检测  
通信作者:刘 军,liujun\_678@163.com

如下:① 按图 1 所示的方式将设备从稳压器人孔装入,摄像头上下运动轴线位于稳压器筒体轴心,CCTV 检测摄像头实物如图 2 所示;② 通过扁平电缆将摄像头放下至人孔口下方一定高度处,然后使用扁平电缆步进回收摄像头;③ 每回收一定高度后停止,摄像头云台旋转 360°,完成一周扫查;④ 钢缆再次步进一定高度,摄像头回转 360°。

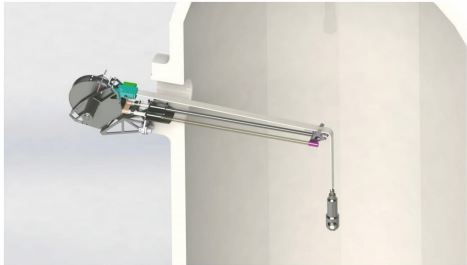


图 1 稳压器 CCTV 设备工作示意

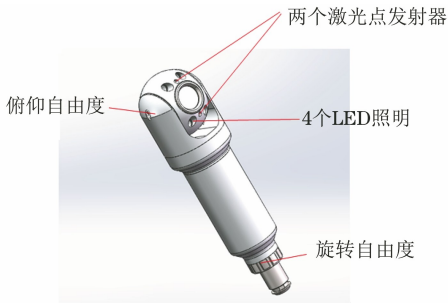


图 2 稳压器 CCTV 检测摄像头实物

稳压器电加热元件支撑板检测过程为:摄像头下放到一定高度后高度固定不变,摄像头由 0°步进到 90°(垂直角度步进),每步进一次,摄像头旋转 360°(水平旋转)。

稳压器上封头内表面 CCTV 堆焊层检测过程为:摄像头回收到一定高度后高度固定不变,摄像头由 90°步进到 180°,每步进一次,摄像头旋转 360°。

## 2 检测分辨率影响因素

### 2.1 摄像头分辨率和放大率

稳压器内表面堆焊层 CCTV 检测系统中,摄像头负责采集视频信号,通过电缆将 SDI(串行数据)信号传输至控制箱,控制箱将电信号变为光信号,再通过光纤将信号送至核岛外光端机,然后通过字符叠加器叠加上字符后分为两路,一路送至显示器显示,供检验人员观察;另外一路送至电脑采集存储,以供后续对比分析。其中摄像头、显示器、人眼组成一套检测系统。CCTV 视频检测系统传输流程如图 3 所示。

摄像头、监视器的分辨率或者人眼状态都会对

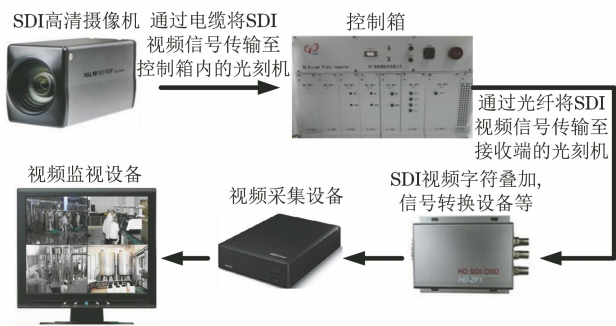


图 3 CCTV 视频检测系统传输流程

检验结果有重大影响。视频信号的主要影响因素为摄像头与监视器,摄像头分辨率与监视器的分辨率对于整个检测系统起决定性作用。一个高分辨率的摄像头匹配一个低分辨率的监视器会使图像变得模糊;同样,一个低分辨率的摄像头匹配一个高分辨率的监视器也会使分辨率达不到要求。

缺陷检测中的一个重要参数是摄像机芯片上每个光敏单元的成像尺寸。该参数受两个影响因素——摄像机的分辨率和放大率。一个分辨率为  $640 \times 480$ (长 $\times$ 宽)的摄像机聚焦  $100 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$ (长 $\times$ 宽)的区域,平均像素尺寸为  $156 \mu\text{m}$ 。假设该区域内有一宽度为  $100 \mu\text{m}$  的裂纹,裂纹的宽度小于平均像素尺寸,裂纹的宽度至少需要用 1 个像素点来显示,这时裂纹与周围背景在图像中就会被平均,大大削弱裂纹图像的清晰度与对比度。由于线性显示的宽度明显小于像素尺寸,线性显示的像素纹理与形成的低对比度图像如图 4 所示。

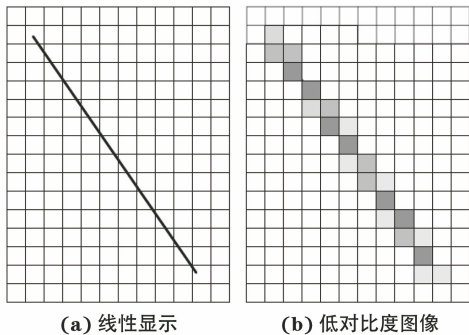


图 4 线性显示的像素纹理与形成的低对比度图像

如果采用分辨率为  $1\,920 \times 1\,080$ (长 $\times$ 宽)的摄像机聚焦  $100 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$ (长 $\times$ 宽)的区域,则平均像素尺寸为  $52 \mu\text{m}$ 。那么,宽度为  $100 \mu\text{m}$  的裂纹需要用 2 个像素点显示,对比度就可以大大提高,得到清晰的图像。所以可通过使用更高分辨率的摄像机来改善分辨率。

但是采用过大的放大率也会带来很多限制,首先,高放大率下不能长距离进行检测。如果想分辨

10  $\mu\text{m}$  以下的裂纹,采用 1 920 $\times$ 1 080 标准摄像机,就必须聚焦 10 mm $\times$ 6 mm 的区域,这在实际操作上是不可能的。其次,在较高分辨率下进行检测,是无法了解周围环境图像的,而在图像内长时间无法看到参照物,检测员则无法判断组件的位置。最后高分辨率会使特定裂纹的分支和弯曲无法呈现在屏

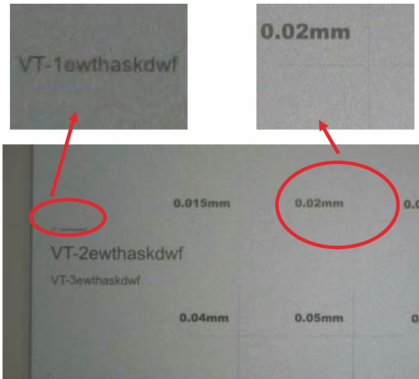


图 5 210 万像素摄像头采集的图像

幕上,从而减少裂纹的检测性。

笔者分别采用两种分辨率不同的摄像头观察同一对象(18%灰度卡),采集的图像如图 5,6 所示,摄像头参数如表 1 所示。从实际的成像效果来看,高分辨率摄像头采集的图像远比低分辨率摄像头采集的图像要清晰。

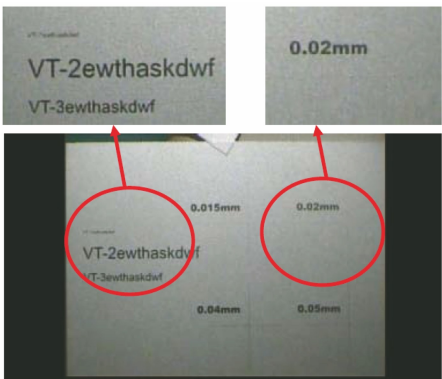


图 6 44 万像素摄像头采集的图像

表 1 摄像头参数比较

项目	参数	
传感器类型	模拟摄像头	高清摄像头
	1/4"Super HAD II CCD	200 万像素 1/2.5" CMOS
图像有效像素	44 万	210 万
图像分辨率	720 $\times$ 576	1920 $\times$ 1080(1080P)
光学镜头	22 倍 $f=3.9\sim85.8$ mm(F1.6 $\sim$ 3.7)	30 倍 $f=4.3\sim129$ mm(F1.6 $\sim$ 4.7)
信噪比/dB	大于 48	大于 50
数字变焦	16 倍	12 倍
对焦距离/mm	广角 10,远焦 1 000	广角 10,远焦 1 200
视频输出	复合影像	1 080P
功耗/W	4.1	3.7
尺寸	130 mm $\times$ 60 mm $\times$ 51 mm	89.7 mm $\times$ 6 mm $\times$ 50 mm

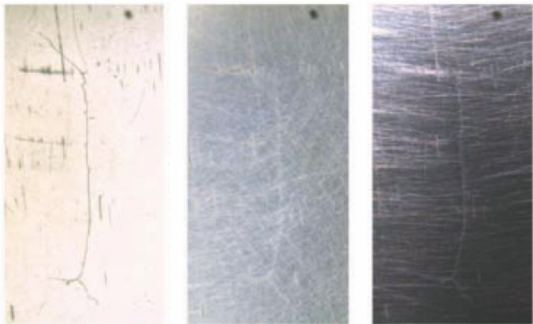
2.2 照明类型

照明条件对于 CCTV 检测有很大的影响,良好的照明可以极大地提高 CCTV 检测的分辨能力,但是当被检表面为镜面反射时,图像中会产生耀斑,从而导致设备分辨能力大大降低,进而产生漏检。

而稳压器内部堆焊层为不锈钢材料,照明通常会在受检表面产生镜面反射,形成耀斑。遇到这种情况,可以通过调整照明亮度、采用多角度检测等措施来降低表面耀斑的影响。

分别采用三种照明类型(聚光灯,散射环形灯和散射同轴灯),使用 130 万像素摄像机进行检测,得到的高反光表面裂纹在不同照明条件下的检测结果如图 7 所示。

结果显示,漫射同轴光是裂纹检测的最佳照明方式。聚光灯和漫射环形灯相似,环形灯在某些方



(a) 漫射同轴光 (b) 漫射环形灯 (c) 聚光灯

面更好。当聚光灯的照明角度平行于裂纹时,效果比环形灯的效果要好。但当聚光灯的照明角度垂直于裂纹,照明结果基本是无效的。

2.3 被检对象

被检对象的各种固有特性对于缺陷检测的影响

是至关重要。缺陷尺寸的大小直接决定了缺陷能否被检出,表面状况和表面耀斑则会影响缺陷检测的难易程度。

在检测设备一定的情况下,随着缺陷长度的增加,检验人员有更大的长度去识别缺陷。但是,缺陷与背景之间的对比度不会随长度的增加而提高。

随着缺陷宽度的增加,缺陷与背景之间的对比度增加;缺陷的形状会随缺陷宽度的增加而更容易识别;缺陷宽度较大时,就不会将其误认为机加工痕迹等无害特征。

18%灰度卡检测图像如图8所示,使用分辨率

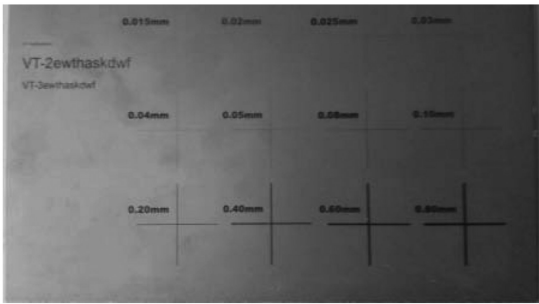


图8 18%灰度卡检测图像

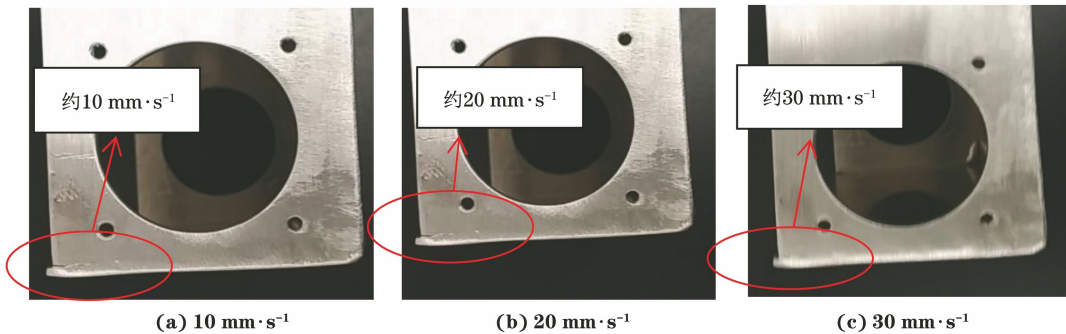


图9 裂纹在3种扫查速度下得到的图像

可见,较低的扫查速度(低于  $20\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )只会轻微降低图像质量,所以在这个速度下扫查不会对检测有害。然而,以大于  $70\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  的速度扫查就会大大降低图像质量。

3 图像处理

上述影响因素的存在,极易导致获取的缺陷图像伴有噪声,因此需采用有效的图像增强处理措施。图像增强的核心思想是将图像中有处理价值的部分进行表征化突出,从而衰减不具备处理价值的部分。常用的图像增强方法为空域法和频域法<sup>[3]</sup>。空域法和频域法可以对图像信息进行过滤,以突出有效信息,并且可以去除无效信息,利于提升缺陷图像的可读性。

为  $1\,920\times1\,080$  的摄像机对一张长约  $200\text{ mm}$ ,宽约  $160\text{ mm}$  的灰度卡进行摄像,灰卡上刻有宽度分别为  $15,20,25\text{ }\mu\text{m}$  的人工黑线,摄像机对于宽度大于  $100\text{ }\mu\text{m}$  的线可以清晰的辨识。对于  $15\text{ }\mu\text{m}$  的黑线则辨识难度大增,表明裂纹检出率大大降低。

2.4 表面状况

被检对象的表面状况对缺陷检测有很大影响。一个表面状况良好的部件,可以检出微小的裂纹。然而,一个机加工痕迹明显的表面会使微小缺陷的检测变得异常困难。在役检测中,硼结晶与水迹等常见表面状况会使检测变得更加复杂,甚至会遮盖部分缺陷。

2.5 扫查速度

使用变焦摄像机在  $10\sim30\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  的速度范围内对一试样裂纹(宽约  $110\text{ }\mu\text{m}$ ,长约  $24\text{ mm}$ )进行记录摄像,并评价得到的图像。该裂纹在3种速度下得到的扫查图像如图9所示,扫查速度较低时几乎不会引起图像的变形,但当以  $30\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  的速度扫查时,图像就会变得模糊不清,导致试样上裂纹几乎不可见。

由于摄像头拍摄的图像为24位或36位彩色图像,因此需要进行图像灰度化处理。通过图像灰度化处理,可以有效增强轮廓在辨识图上的有效信息强度,加快接口数据传输校验效率,提升计算机图像处理速度。灰度图像的每个像素只有一个采样颜色,并且其亮度用灰度值来表示。

边缘检测可采用图像二值化方法,将目标轮廓和背景图像分隔开后,可以获得其二值化图像  $f(x,y)$ ,即

$$f(x,y)=\begin{cases}1,G(x,y)>T\\0,G(x,y)<T\end{cases}\tag{1}$$

式中: $T$  为图像的全局阈值; $G(x,y)$  为图像算法中的算子,用来调节二值图像的数据结果。

图像细化指二值图像的骨架化,即通过一层

层地剥离,从原图像轮廓边缘中去除一些点,提取出形状和结构特征与原图形一致、宽度为一个像素的轮廓骨架。图像细化算法能提取缺陷图像特征,同时不会破坏图形的连通性,有助于图像的后续处理。

由于测试环境具有电磁干扰复杂情况,CCTV 采集到的原始图像、传输过程中的电磁信号均会受到该环境的影响,使得地面接收到的图像具有噪声,进而影响图像识别的精确度。对于图像中的孤立点、

线的噪声和脉冲噪声,可采用中值滤波的方法进行消除。同时,利用中值滤波算法还可以对图像进行局部增强。采用引入扰动因子去关联光照区间段的方法进行全局阈值的定义,对灰度空间进行最优阈值双向检测,结合边缘检测技术对稳压管内表面层的图像进行提取,可以有效解决传统图像增强效果中存在的噪点过多等问题。

利用上述方法对某次试验的图像进行处理,处理结果如图 10 所示。

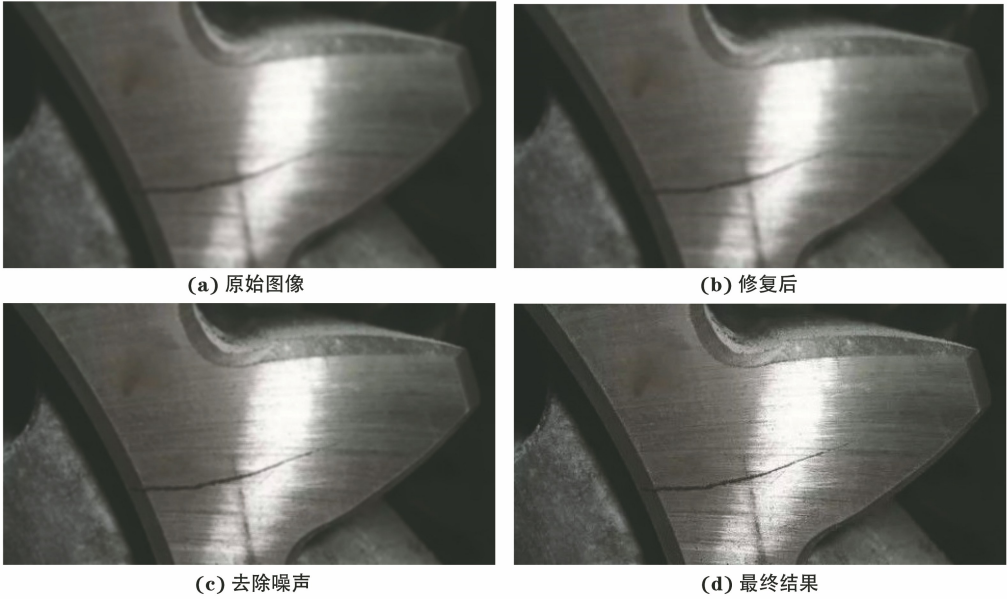


图 10 某次试验的图像处理结果

#### 4 结语

(1) 提高稳压器内表面 CCTV 设备摄像头与监视器的分辨率,可以提高整个 CCTV 检验系统的分辨率。提高放大率也可以提高裂纹的检出率,但是视频采用太大的放大率会失去背景对比度,反而降低摄像头对裂纹的检出率,并且太大的放大率会大大降低检验效率,使检验时间变得不可接受。

(2) 漫射光有助于提高裂纹和金属表面的对比度,漫射同轴光是裂纹检测最好的照明方式。改善光源的类型与摄像头的角度,有利于缺陷的检出。

(3) 当缺陷尺寸不至于过小,表面状况良好,采用充足的照明和足够慢的扫查速度时,分辨率为  $1\,920\times 1\,080$  的摄像机可以可靠地发现尺寸大于  $100\,\mu\text{m}$  的缺陷显示。但对于宽度小于  $15\,\mu\text{m}$  的

裂纹,检出率大大降低。

(4) 改善补检对象表面状况,能提高裂纹检出率。

(5) 稳压器 CCTV 检验系统摄像机的扫查速度对摄像机的分辨率影响很大。低速扫查时,摄像机的分辨率几乎没有损失,但是高速扫查时,图像质量严重降低,检出率急剧下降。

(6) 采用有效的图像处理措施,可增强缺陷典型特征及分辨率,从而提高缺陷检出率。

#### 参考文献:

[1] 陶于春,梁瞻翔,林忠元,等. 压水堆核电站在役检查用无损检测技术发展概况[J]. 无损检测,2009,31(12):959-966.

[2] 李玉龙,彭志珍,夏朋. 间接目视检测技术在 CPR1000 机组在役检查中的应用[J]. 科技信息,2014(1):68-70.

[3] 李华,刘阳,孟祥鹏,等. 基于机器视觉的管道通径内检测技术[J]. 油气储运,2019(10):1165-1169.