

[检测系统]

基于小波变换的燃机电厂高压蒸汽泄漏检测研究

文/赵明逸
大唐泰州热电有限责任公司

燃机电厂蒸汽泄漏检测对于维系电厂人员安全、设备长期稳定运行至关重要。基于电厂管道和电力设备进行蒸汽泄漏的高效巡检，拟解决泄漏区域红外小目标智能检测问题，利用智能巡检边缘计算系统，对监测数据进行图像小波变换和系数阈值去噪等算法设计，进而实现燃机电厂蒸汽泄漏的前端监控和终端定位。通过红外热成像摄像机获取实时监测数据，在智能巡检平台模拟实验后，确定了算法在高压蒸汽泄漏上的可行性与准确性。

燃机电厂管道、设备易受极端天气、操作失误及设备损耗等因素影响产生高压蒸汽泄漏，不仅威胁电厂工作人员生命安全、造成环境破坏和资源浪费，还会引发因供电中断造成的经济损失。电力系统可持续发展离不开发电厂设备安全稳定运行，因此管道蒸汽泄漏智能巡检具有重大的现实意义。硬件设备气体泄漏检测通常使用探测仪和传感检测仪，但此类检测方案通常只针对易挥发的刺激性气体。主流蒸汽泄漏检测方法存在如下问题：

- 1) 可检测气体类型局限，检测环境和应用场景单一。
- 2) 检测设备昂贵，检测装置安装复杂，装卸烦琐。
- 3) 气体泄漏检测操作人工化，检测误差大。
- 4) 检测时间固定，时滞严重且效率低下，红外图像检测法的优越性因此显现。

但国内红外图像检测技术和算法仍相对滞后，使用场景也具有局限性，其中，检测算法设计为目前主要问题。该领域较为前沿且应用场景最广的红外影像预处理技术主要有中值滤波技术、双边滤波技术和形态学滤波技术等。而对于图像检测算法，

传统算法为选择性搜索和DPM算法。近年来，随着计算机视觉技术的普及，对于深度学习和小波理论等方法如何运用于蒸汽泄漏检测成为了重要课题，并涌现出基于CNN的目标检测算法和YOLO系列等算法，其对于实现红外小目标精确定位与实时检测提供了新的实践依据。

燃机电厂有设备构造复杂、长时间连续运作等特点，需要实现实时高效的气体泄漏检测，必须运用算法效率高的图像处理技术和红外小目标定位算法。因此，需要搭建燃机数据中心智能边缘计算并集成现场监控系统、搭载红外热成像技术完成图像采集和温度监测，通过摄像头产生的视频流进行实时的边缘计算、分析并存储中间步骤结果及最终结果，及时发出警报。本文将重点分析气体泄漏中最为关键的红外图像预处理和检测算法设计。

电厂蒸汽泄漏智能巡检平台

本文设计了一套智能巡检平台，该平台主要功能模块为蒸汽气动控制系统和红外图像采集处理系统。通过蒸汽气动控制系统模拟电厂蒸汽泄漏，由于蒸汽泄漏区域与正常区域存在较大温

差,通过红外热成像摄像,各区域对应红外图像呈现出明显的灰度值差异,为实现蒸汽泄漏点精准提供可能。为了提高实验精度,通过调研工件工作环境,经过理论推演发现工件放气时点为工件内外温差达峰值时。因此选择工件放气瞬间为测量时点。基于此获取质量优良的泄漏点监测图像用算法设计。

1. 硬件系统构成

(1) 检测系统闭环设计

实验平台示意图如图1所示,其中核心设备为红外成像摄像机,具体参数为,聚焦方式为自动聚焦,通信方式RS 422/RS 485,帧缓存128 MB,像素为640×480,DC24 V,电源供电功率为3 W;工作温度为-45~70℃,支持透光和强光抑制功能,支持断点状态记忆功能,支持温度数据实时监测实时输出,支持全局和区域测温模式,最多可支持20处同时检测,测温误差小于2℃,支持多种伪彩调色板。

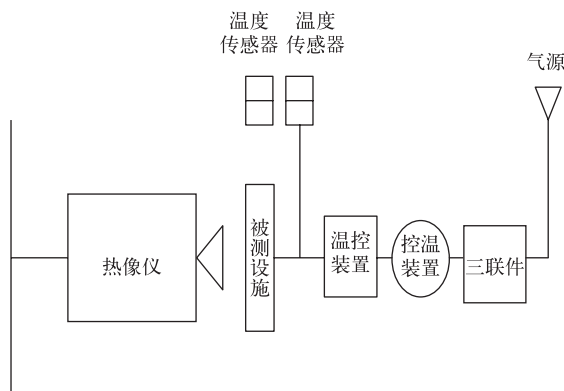


图1 实验平台示意图

实验平台运行流程为:气源气体增压阀调节气压后,通过控温装置将温度调节为电厂蒸汽温度,通过流速阀将被检测设备排气,通过红外热成摄像机实现实时监测,并将记录的红外数据传输至边缘计算平台进行图像处理。

(2) 数据采集控制系统结构

本文数据采集系统结构如图2所示。通过热像仪接口,处理终端可在线获取热像仪数据,随后组织成热像图,进而实现图像边缘计算。利用基于微软Window系统的Visual Studio软件抓取网络传输数据,运用Socket通信网络技术进行编程,将数据解析为热像图。

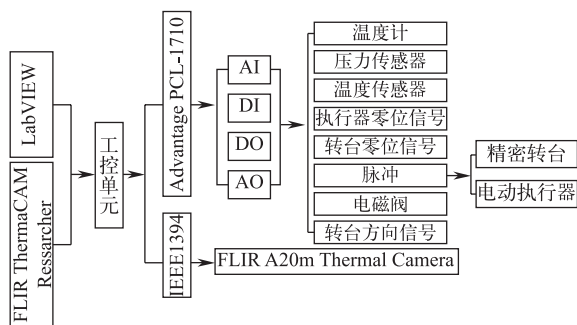


图2 数据采集系统结构图

蒸汽泄露红外图像预处理算法

1. 传统滤波法

传统滤波技术应用最广泛的有中值滤波技术、双边滤波技术和数学形态滤波技术。中值滤波是一种将频率信息进行非线性计算,实现图像去噪处理的技术,具体过程为将监测图像像素点周围像素点灰度值进行中值计算,并将此值赋给原像素点。其运用首先需要定义模板窗口半径,通常为3×3或5×5。随后执行非线性计算,将模板窗口与监测图像像素点一一重合。再将重合区域像素点进行中值计算,并将得到的中值替代原图中突出的灰度值,实现去噪处理。计算公式为

$$g(x, y) = \text{med}\{f(x-k, y-i)\} \quad (1)$$

式中, (x, y) 为原图像素点位于图像的坐标位置; (k, i) 为模板窗口像素点位于模板窗口的位置坐标; $\text{med}\{\}$ 为均值计算过程, $f_{ij}(x-k, y-i)$ 为滤波后像素点对应灰度值。

双边滤波相较于中值滤波应用场景更广,能在更高保真的情况下实现图像模糊处理。双边滤波在中值滤波的基础上考虑了像素间空间关系,是综合考虑像素距离权重和灰度数值的一种方法,虽然像素点的灰度值仍依赖于周围像素,但其捕捉了像素点间灰度值近似关系和距离异质性影响。

数学形态学滤波作为一种非线性滤波,通过原图像像素的生长(膨胀算法),在特定情形中将二值图像中灰度值为零的膨胀为255,或通过将原图灰度值为255的转变二值图中的零值(腐蚀算法)。图像膨胀算法和腐蚀算法需要基于逻辑运算来确定其结构元素。因此,数学形态学滤波技术中结构元素半径设定的主观性常常导致其处理结果具有一定随机性。

2. 小波理论

燃机电厂设备结构复杂,传统的滤波方法显然不可行,因此本文运用较为前沿的小波理论设计电厂蒸汽泄漏目标点的检测算法。小波理论类似于傅里叶变换(Fourier Transform),均能在领域中显示无法检测到的时间数字信号。小波理论相对于中值和双边滤波,可以实现气体泄漏实时检测(能额外捕捉时间信号),相对于傅里叶变换可以实现泄漏点定位(能额外捕捉频率信号),其具体解析过程如图3、图4所示。红外图像如图5所示。

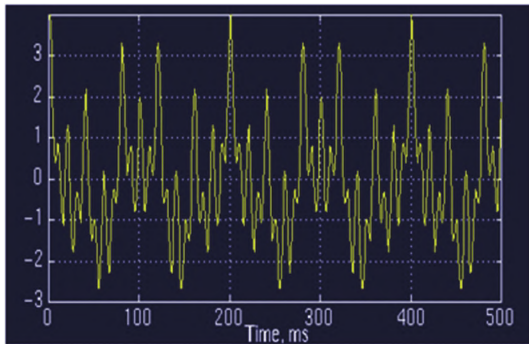


图3 初始信号图

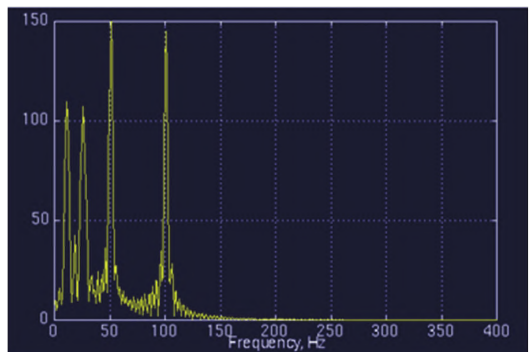


图4 小波变换图

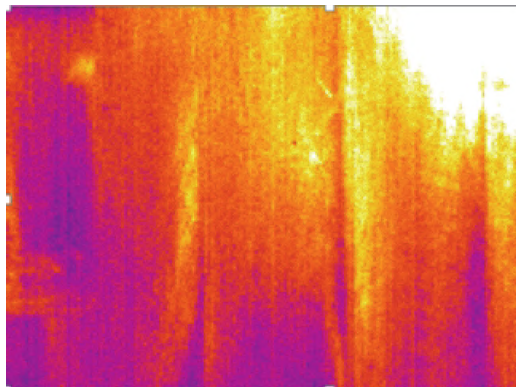


图5 红外图

基于小波变换的泄露点检测方法

小波变换技术已广泛运用于医疗检测、地质勘探和机械故障诊断。小波变换相对于滤波技术的优势在于能将数字信号进行分解、降维、再合成,具有更高的检测准确性。相较于基于CNN的目标检测和YOLO系列等依赖大量实验数据来识别泄漏点目标特征的算法,小波变换能在场景复杂的燃机电厂设备检测中,实现更快捷的检测反馈,极大降低事故蔓延的可能性。

1. 小波变换图像分解原理

小波变换信号分解是需要首先确定其基函数,基函数具体表达式为

$$F(w) = \int f(t)e^{iwt} dt \quad (2)$$

式中, t 表示时间; v 表示频率; j 为恒定参数; e 为自然对数; $F(w)$ 为小波分解后结果。

对式(2)进行积分可得

$$WT(a, \phi) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int f(t) y\left(\frac{t-\phi}{a}\right) dt \quad (3)$$

式中, a 表示尺度; ϕ 表示偏移。

图像信号可以依据标的物 and 干扰因素来划分为目标信号和噪声信号,噪声作为泄漏点检测的干扰因素需要去除。小波变换在图像去噪中具有显著优势。分析其去噪过程先需对待分解的红外原图进行建模,即

$$f(x, y) = T(x, y) + B(x, y) + n \quad (4)$$

式中, $T(x, y)$ 表示泄漏点像素点坐标; $B(x, y)$ 表示与泄漏点无关的像素点坐标; n 表示干扰因素。

小波分解图像如图6所示,左侧为待分解红外原图,右侧为依据横纵坐标分解后的四张分解图。

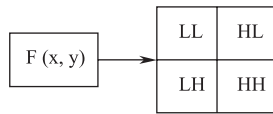


图6 小波分解图像示意图

图6中,红外图像为二维数字信号,小波变换能对原红外图像数据进行降维处理。依据横坐标进行分解,横向的高频信号将被排列至右侧,低频信号被排列至左侧;依据纵坐标进行分解,纵向高频信号将被排列在下侧,低频信号将被排列至右侧,这样就能将原图中高频部分和低频部分分开,而包含气体泄漏目标的像素集中于高频区(HH),背景信息集中于低

频区(LL)。去除高频信息部分后,重组出检测图像并于原始检测图作差分,即可实现去背景功能。

2. 基于小波系数阈值的去噪处理

监测图像去除无关信息后,可得蒸汽泄漏点位置信息和部分干扰信息,而通过小波分解过后的图像信号可按其信号频率系数值高低进行区分,本文通过设定符合燃机电厂蒸汽泄漏的小波系数阈值实现去除干扰信息的功能。如图7所示,监测图像可以被分为四块区域,每块区域图像信号存在唯一的分解系数。由于包含气体泄漏的目标信号仅存于高频段区间(HH),而干扰信息的分解系数通常高于泄漏点信息的分解系数,所以需要通过反复模拟实验以确定适用于燃机电厂蒸汽泄漏情景下的分类阈值。确定阈值系数的方式为

$$F(x,y)=k_1f(x,y)+k_2n(x,y) \quad (5)$$

式中, $F(x,y)$ 表示包含蒸汽泄漏信息的高频像素点; $f(x,y)$ 表示具体泄漏目标像素点; $n(x,y)$ 表示噪声信息像素点; k_1 和 k_2 分别预设的阈值系数。

通过多次模拟实验确定合理的阈值去除干扰因素,分解图像(LL)中仅保留气体泄漏目标信息,即实现对电厂燃机蒸汽泄漏检测。

3. 算法流程

首先,将原监测图像进行通道分离处理,留下监测原图对应的单通道图像,以实现监测图像灰度化处理,随后按照图像灰度值分别进行横向和纵向小波分解,分离出高频部分。去除高频信息部分后,重组出检测图像并于原始检测图作差分,实现去除背景信息的功能。最后,通过小波分解后得到的频率系数按具体适用场景,确定合适的阈值,去除噪声信息留下气体泄漏目标信息,随即整个蒸汽泄漏检测算法执行完毕。

4. 实验结果

本文利用搭建的电厂蒸汽泄漏智能巡检平台,通过红外热成像摄像机捕获的蒸汽泄漏模拟数据,利用本文设计的识别算法得到以下实验结果。红外原图如图7所示,原监测图像表明红外监测仪器适用于燃机电厂的复杂环境,测温精度较高,其分离出的单向通道图也有较好效果,单通道图像如图8所示。运用小波变换得到的分解图如图9所示,表明小波变换对于此类场景的信号频率分类具有较高的适用性,通过差分重组得到的重组图如图10所

示,表明该算法能较好地分离背景信息,进而得到仅包含泄漏点和干扰点的图像,如图11所示。最后基于反复实验确定的小波系数阈值处理伪目标图得到仅含蒸汽泄漏点的目标图如图12所示,目标图内泄漏点监测结果唯一。整体实验结果具有时效性高、定位精准的特征。

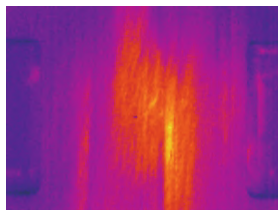


图7 红外原图

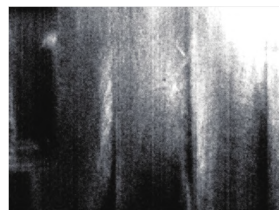


图8 单通道图像

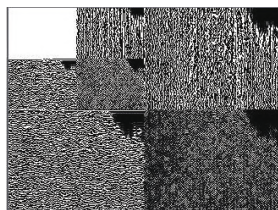


图9 小波分解图

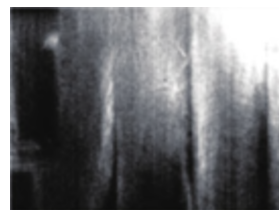


图10 小波重构图



图11 去背景图

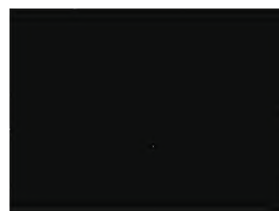


图12 去噪声目标图

结束语

本文研究了基于红外图像的电厂燃机蒸汽泄漏点检测算法,通过红外热成像摄像机获取的监测图像,对其在边缘计算系统进行小波变换等处理后,识别出电厂设备蒸汽泄漏点的准确位置。实验表明,基于小波理论的红外信号分解在频域表现出高低频错落有致的特征,通过去除低频背景信号和保留高频目标信号可实现红外图像去背景与目标信息保真,而合理的小波分解的系数阈值设定能准确分辨出噪声与气体泄露目标点,整体检测实验满足高效、快捷及精确的预期效果。这进一步表明小波理论在例如燃机电厂等复杂环境内,对红外小目标检测的适用性与可行性。EA

(收稿日期:2022-06-20)