

DOI: 10.11973/wsjc202010014

# 流量计焊缝超声检测模拟软件的开发与应用

夏 尚,童良怀,王 涛,慎哲恒

(衢州市特种设备检验中心, 衢州 324000)

**摘要:** 流量计焊缝内部常有未焊透、未熔合等缺陷, 应对其进行 A 型脉冲超声检测, 但由于流量计内部结构特殊, 单个探头无法满足检测要求, 所以需要选用几种不同 K 值的探头来配合使用。以往采用的 K 值筛选方法较为繁琐且容易引起误差, 因此研究人员采用 Visual Studio 等开发工具, 利用 C++ 语言开发出“流量计焊缝超声检测模拟分析软件”, 通过该软件可以直观、高效、准确地筛选出满足扫查要求的探头 K 值组合。

**关键词:** 流量计; 超声检测; 探头 K 值; 模拟软件

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2020)10-0062-03

## The development and application of simulation software for ultrasonic testing of flowmeter weld seams

XIA Shang, TONG Lianghuai, WANG Tao, SHEN Zheheng

(Quzhou Special Equipment Inspection Center, Quzhou 324000, China)

**Abstract:** There are some defects in the weld seams of flowmeter, such as incomplete fusion and penetration. There is a need of ultrasonic examination technique using pulse-A mode type ultrasonic testing. However, single probe cannot meet the needs of the examination because of the special structure of the inner flowmeters, and therefore several probes with different K values need to be used. The normal calculating process is labor consuming and easily leading to errors, so a simulation software of using visual studio and C++ language is developed for the ultrasonic testing of flowmeter weld seam. It meets the requirements of screening out required probes with suitable K values by the software in an intuitive, high efficient and accurate way.

**Key words:** flowmeter; ultrasonic testing; K-value; simulation software

2016 年 8 月 11 日, 当阳市马店研石发电有限责任公司热电联产项目在试生产过程中, 2 号锅炉高压主蒸汽管道上的“焊接式长径喷嘴流量计”裂爆, 造成 22 人死亡, 4 人重伤, 直接经济损失约 2 313 万元。调查表明, 该起事故主要是由喷嘴流量计焊缝裂爆引起的。流量计内部承受高温高压蒸汽, 但流量计未被列入《特种设备目录》, 所以其不受特种设备相关部门的监管, 而流量计制造行业的研究方向主要集中在计量的准确性上, 对于焊接性能方面的研究并不多, 特

别是在焊缝检测环节, 少有报道研究。

## 1 流量计结构及焊缝常见缺陷

喷嘴流量计一般由两个采用对接焊接连接的环室短节及喷嘴组成, 环室短节及焊缝材料为低合金耐热钢, 流量计结构示意如图 1 所示。由于流量计两环室短节较厚, 在焊接时容易产生未焊透缺陷, 当阳事故发生的原因就是焊接接头存在未焊透缺陷, 其最薄处的焊缝有效厚度仅有 2 mm, 承载能力远远不能满足设计要求。衢州市特种设备检验中心项目研究人员对该市 5 家热电企业使用的 20 余台流量计进行了调研, 并采用射线、超声、金相检测后发现, 大部分流量计焊缝都存在未焊透, 少部分还存在裂纹、未熔合、非金属夹杂物等缺陷。项目研究人员经过调研发现, 一般流量计制造企业在制造过程中不对焊缝内部进行检测, 采用的焊接工艺也没有经

收稿日期: 2019-12-03

基金项目: 浙江省市场监督管理局科技计划项目(NQI20190131); 衢州市科学技术局科技计划项目(2018K05)

作者简介: 夏 尚(1985—), 男, 学士, 工程师, 主要从事管道检验研究工作

通信作者: 夏 尚, 47955561@qq.com

过焊接工艺评定。焊缝力学性能试验结果表明,流量计焊缝韧性极差,容易产生焊接缺陷。且流量计实际服役于高温高压环境中,材料易裂化,所以对焊缝内部进行检测非常有必要。

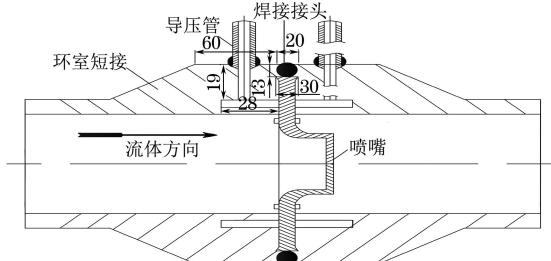


图 1 流量计结构示意

## 2 A型脉冲超声波技术的检测难点

由于流量计中喷嘴结构的存在,所以无法采用射线对其焊缝进行检测。为了验证超声检测的可行性,研究人员首先采用A型脉冲超声检测,同时将流量计沿轴向进行八等分切割,并移除喷嘴后用射线对焊缝进行检测复核,复核结果显示两种检测结果基本一致,故可以采用A型脉冲超声检测技术对流量计焊缝进行内部检测,但由于流量计内部结构特殊(见图2),对其进行超声检测存在以下难点<sup>[1]</sup>。

(1) 超声检测时,探头只能在环室短接处拖动扫查,但环室短接长度 $L_1$ 过短,如果只选用一个探头, $L_1$ 无法满足NB/T 47013—2015《承压设备无损检测》规定的最短探头移动区的要求;同时通气腔 $L_2$ 阻挡了二次波向上传输的路线。

(2) 通气腔、喷嘴、焊缝、环室短接之间存在着3处空隙区(见图2红圈处),超声波声束无法穿越空隙区并到达焊缝内部。

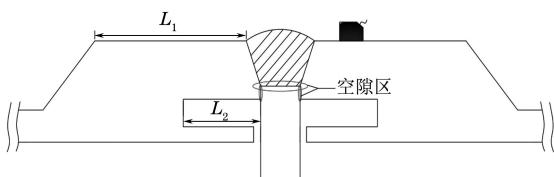


图 2 流量计焊接接头结构示意

综上所述,由于结构特殊,流量计内部的超声波声束传播路线非常复杂,往往一个探头的扫查范围无法覆盖整个焊缝厚度,所以需要选用几个不同K值的探头来组合使用,一般大K值探头的一次波扫查焊缝下部,小K值探头的二次波扫查焊缝上部。

## 3 常规探头的模拟分析方法

为了筛选出能够覆盖整个焊缝厚度的探头K值组合,以往检测人员采用三角函数计算、AutoCAD绘图等人工方式进行计算<sup>[2]</sup>。检测人员绘制流量计结构,再计算出若干个探头的焊缝扫查范围,扫查范围叠加后若能覆盖整个焊缝厚度,即代表该组探头适用。对每一种不同规格的流量计、不同K值的探头都需要单独计算,计算量庞大,容易产生误差,计算出的探头组合可能并不是缺陷检出率最高的组合。

## 4 流量计焊缝超声检测模拟分析软件

### 4.1 软件的开发

为了使流量计焊缝的超声检测结果更加直观、高效、准确,免去人工计算探头组合的繁琐和误差,研究人员以人工三角函数计算为原理,借助计算机的运算能力,开发出了“流量计焊缝超声检测模拟分析软件”,该软件采用Visual Studio 2013 64位、QT 5.6.0 32位、Inno Setup 5.5.4 32位为开发工具,以C++为开发语言,搭建VS2013+QT5.6.0的开发环境,通过VS自身创建QT项目功能创建了原始的空白界面,系统版本号等固定信息存储在mysetting.ini文件中,另外创建了CGlobal.cpp和CGlobal.h来存储全局变量,以便不同页面模块间传递数据。由于默认的标题栏不够美观,所以添加了长条形gif动态图片为标题栏底图,并单独制作放大、缩小、退出等操作按钮。为了将操作界面与绘制界面耦合,单独新建了绘图MyPad界面,作为Scanner界面的子界面,参数设置等都在Scanner界面上。之后通过重写paintEvent(QPaintEvent \*event)的方法,在MyPad界面上绘制图形<sup>[3]</sup>。

### 4.2 软件功能介绍

该软件能够根据检测人员输入的流量计结构参数实时形成对应图形,并根据选择的探头K值模拟出声束路线和扫查范围,最终自动分析出能扫查整个焊缝厚度所需的探头K值组合,节约了检测前的准备时间,极大地提高了工作效率。

该软件操作主页面分为5大区域,操作主页面如图3所示,具体描述如下:1处是流量计结构参数录入区,在此区域检测人员可以录入流量计结构参数,同时左上角会自动显示与坡口垂直的K值(为之后选择最优K值做参考);3处是图形区,根据录

入的流量计结构参数，该区域能够展示对应的图形，并且整个图形可以通过鼠标上下左右拖动，还可以通过鼠标滚轮放大、缩小画面。为了方便缺陷定位，以坡口中心线和平台的交点为零点，鼠标指针处显示当前鼠标坐标；4 处是探头，在手动计算模式时，可以通过鼠标按住探头水平左右拖动（ $L$  范围内拖动），从而实时模拟出超声波声束走向和焊缝扫查范围；2 处是智能计算结果区，根据录入的流量计结构参数和预置探头参数，选择智能计算后会在该区域展示推荐的探头选择方案。

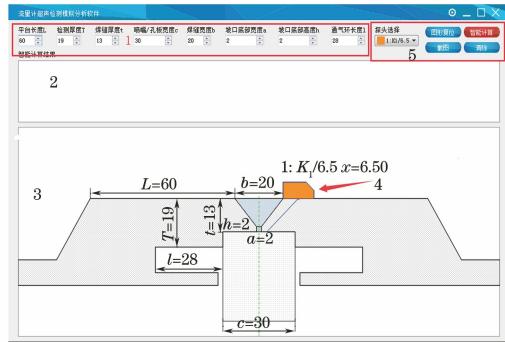


图 3 软件操作主页面

#### 5 处右上角功能介绍：

(1) “探头选择”下拉框表示可以从“探头库”选择不同规格的探头，绘图区域的探头大小和角度也会随之变化。为了提高检出率，探头排列顺序是根据与坡口垂直的  $K$  值大小实时调整的。“探头库”中最多预置 30 个探头，设置探头的参数包括前沿和  $K$  值。

(2) “图形复位”按钮在流量计图形被拖动或放大、缩小后，可以回到最初的状态。

(3) “智能计算”按钮可以在当前结构参数和预置探头的情况下，自动计算可以 100% 覆盖焊缝厚度的探头组合，最多显示 10 组结果。

(4) “清除计算”按钮，可将当前智能计算结果清除，否则会一直显示当前的覆盖图像，无法手动操作。

(5) “截图”按钮可以将当前软件界面截图，并保存至软件安装目录下的“screenShot”文件夹，可输出现场检测的指导图。

#### 4.3 软件的检测案例

检测人员对某热电公司流量计进行超声检测，利用该软件手动扫查或智能计算两种模式，筛选出能够覆盖焊缝全厚度的探头  $K$  值组合。

(1) 手动扫查模式。检测人员首先在软件上部的“流量计结构参数录入区”输入流量计结构参数，图形区自动展示出对应的图形，手动点选橘黄色的  $K_1$  探头并拖动（只允许在  $L$  内拖动），在拖动过程

中被扫查到的焊缝区域会填充相应橘黄色的线条，手动扫查后发现， $K_1$  探头所代表的橘黄色区域无法覆盖焊缝全厚度；检测人员继续选用红色的  $K_2$  探头，以同样的方式在  $L$  内拖动探头，在拖动过程中被扫查到的焊缝区域会填充相应的红色线条，同时左上角显示当前的完成率（即覆盖率），如果 100% 覆盖焊缝厚度，则会弹出提示“扫查完成”。100% 扫查完成示意如图 4 所示，经过手动扫查模式分析出选用前沿 6.5 mm 的  $K_1$  探头和前沿 6.5 mm 的  $K_2$  探头组合，即可 100% 覆盖焊缝全厚度。

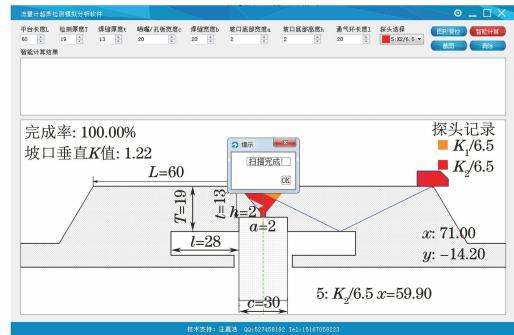


图 4 100% 扫查完成示意

(2) 智能计算模式。智能计算模式下不需要检测人员通过手动拖动探头完成模拟扫查，软件会自动模拟鼠标拖动探头的扫查过程，完成探头筛选。由于流量计的常见缺陷为根部未焊透和坡口未熔合，考虑此类缺陷的检出率，智能计算时软件会优先选择  $K_1$  探头及与坡口角度近似垂直的  $K$  值探头进行自动模拟扫查，如不满足焊缝覆盖率，再继续按探头列表中的其他探头进行自动模拟扫查，以确保覆盖焊缝整个厚度的基础上，首先选用检出率较高的  $K$  值探头。智能计算过程中无法操作鼠标，需要中途退出则按“Esc”键。智能计算结束后，在“结算结果栏”中会最多显示 10 组方案，按所需探头数量由少到多，从左到右排列（见图 5）。该流量计采用的超声检测方案 1 为选用前沿 6.5 mm 的  $K_1$  探头和前

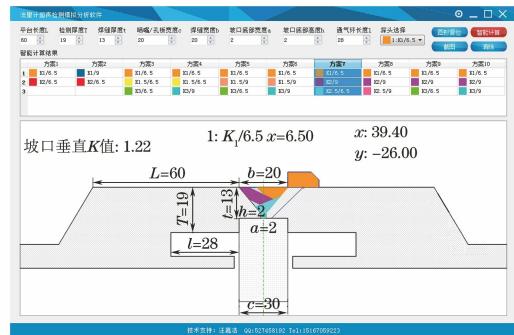


图 5 智能计算结果示意

(下转第 68 页)

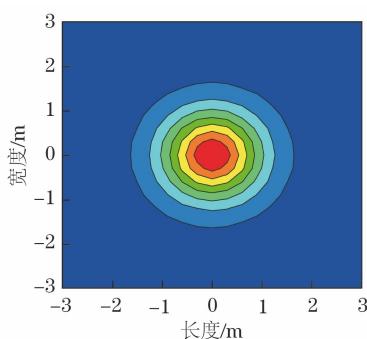


图 8 传统线圈磁场分布云图

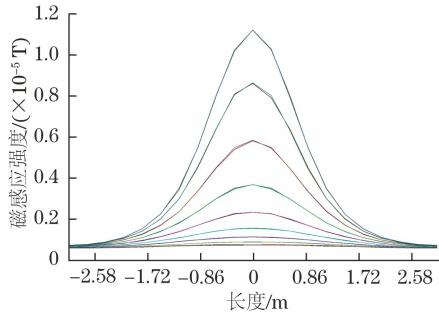


图 9 传统线圈磁感应强度梯度曲线

梯度图(见图 8,9),可以看出磁场覆盖范围  $R = 500 \text{ mm}$ ,磁感应强度  $B = 1.2100 \times 10^{-5} \text{ T}$ 。通过对可知,该聚焦探头磁场分布范围比传统探头的缩小了 42%,中心磁感应强度比传统线圈的增大了 36.78%,确定了该聚焦结构的合理性及有效性。

#### 4 结语

根据设计要求设计了瞬变电磁聚焦探头,其主

(上接第 64 页)

沿 6.5 mm 的  $K_2$  探头,其余还有 9 组其他方案供选择。为了方便检测人员验证每个探头的覆盖情况,检测人员点击不同方案,能显示出对应的覆盖图像。

#### 5 结语

该软件根据流量计结构参数和探头  $K$  值,利用三角函数原理实时生成对应的焊缝扫查图像,并根据坡口角度得到检出率最高的探头  $K$  值组合,实现覆盖整个焊缝厚度,优化了探头组合;借助计算机强大的运算能力,几乎可以瞬时计算出 10 组探头组合供检测人员选用,免去人工计算的繁琐;只要保证流量计结构参数输入正确,软件的计算结果正确率为 100%,极大地提高了超声检测的准确性。同时,软件也具有良好的人机界面,无需联网,硬件要求低,

要由激发线圈、检测线圈、四氟布、内外层骨架及磁芯等组成。利用有限元仿真验证了该结构的合理性及聚焦的有效性,通过与传统探头的结果进行分析对比,结果表明:该聚焦探头磁场分布范围比传统探头的缩小了 42%,中心磁感应强度比传统线圈的增大了 36.78%,满足设计要求。为瞬变电磁法在埋地金属管道上的局部检测提供了关键部件,能确保检测精度和检测效率,可进一步为瞬变电磁法探头的优化设计和应用提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 张维景,胡博,于润桥,等.埋地管道腐蚀的瞬变电磁法检测探头优化设计[J].仪表技术与传感器,2016(12):37-40,68.
- [2] 刘晓青,张涛.基于瞬变电磁法的传感器设计及仿真研究[J].电子测量技术,2019,42(5):123-127.
- [3] 张莹莹,李貅.地空瞬变电磁法研究进展[J].地球物理学进展,2017,32(4):1735-1741.
- [4] 薛国强,于景邺.瞬变电磁法在煤炭领域的研究与应用新进展[J].地球物理学进展,2017,32(1):319-326.
- [5] 何江龙.基于地磁场理论的管线探测技术研究与应用[J].电子测量技术,2017,40(12):182-186.
- [6] 党娜,王维斌,张涛,等.管道腐蚀脉冲涡流检测的三维仿真与试验[J].无损检测,2017,39(2):57-60,74.
- [7] 杜娜,杨玲,张雄等.基于 Comsol 的井下瞬变电磁传感器建模与仿真[J].电子测试,2017(18):27-29,36.

操作直观简单,方便检测人员掌握和使用。

项目组研究人员利用该软件选用了探头组合,在流量计的人工缺陷试块上能够扫查焊缝整个厚度,进一步验证了软件的可靠性,提升了流量计的安全性能,具有很强的工程应用价值。

#### 参考文献:

- [1] 齐高君,岳大庆,杨敬,等.各向异性焊缝相控阵超声检测楔块角度的优化设计[J].无损检测,2019,41(11):1-4.
- [2] 郑晖,林树青.超声检测[M].北京:中国劳动社会保障出版社,2008.
- [3] 起雪梅,张敬东.基于 VC 平台的厚壁无缝钢管超声波探伤系统的软件设计[J].无损检测,2015,37(3):67-72.