

轴类零件的超声波检测系统的仿真建模研究

董月刚, 张吉堂

(中北大学 机械工程与自动化学院, 山西 太原 030051)

摘要: 在超声波检测原理和声线跟踪法的基础上, 开发了一套应用于轴类零件的超声波检测模拟仿真系统。该系统对超声波聚焦探头和超声波传播路径进行了模拟。通过实验, 对模拟的波形和实验获得的波形进行了比较分析。

关键词: 超声波检测; 声线跟踪法; 模拟仿真

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2010)12-0018-04

Research on simulation modeling of ultrasonic inspection system of shaft

DONG Yue Gang, ZHANG Ji Tang

(Institute of Mechanical Engineering and Automation, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In this paper, a simulation modeling system for ultrasonic inspection of shaft is developed based on principles of ultrasonic testing and ray-tracing method. Firstly, the system can simulate the focused ultrasound probe and the ultrasonic propagation path. And then, through experiment, carry out a comparative analysis between simulation waveforms and waveforms obtained from experiment.

Key words: ultrasonic inspection; ray-tracing method; simulate

超声检测是一种重要的无损检测技术, 超声波的特点是传播能量大、方向性好, 而且在介质内传播过程中遇到缺陷时会产生界面发射或者引起声速和能量衰减的变化, 利用这一特性就可以达到检测缺陷的目的。

近年来, 超声检测技术在工业中的应用越来越普遍, 且正在向定量化和无损评价(NDE)的方向发展。目前, 超声检测是发现构件内部裂纹类缺陷最灵敏的技术之一。但是, 现场检测条件的复杂性和超声检测设备的局限性, 使现场探伤仍然以检测波形为主, 即通过传感器位置与信号波形的关系判断和评定缺陷。当工件结构复杂或材质特殊时, 识别缺陷信号愈加困难, 完全依赖于检测人员的实际经验和技术水平。可见, 要提高超声检测的可靠性与柔性化, 必须利用计算机技术进行模拟与仿真^[1]。

本文以面向对象的可视化编程语言 VC++ 6.0 作为系统开发工具, 以 OpenGL 作为场景开发工具, 按照面向对象的程序设计思想开发了超声无损检测仿真系统。根据此系统来深入探讨超声波检测轴类零件的方法研究。

1 超声波聚焦探头检测轴类零件的原理

1.1 超声波检测原理

超声波是指频率高于 20 kHz 的声波。超声波具有

指向性好、传播能量大等特性, 在无损检测领域中得到了广泛应用。超声波的声速、衰减、阻抗和散射特性中包含了丰富的质量信息。超声波检测的基本原理是: 超声波在不同的介质中传播时, 将产生反射、折射、散射、绕射和衰减等现象, 使笔者由接收换能器上接收的超声波信号的声时、振幅、波形或频率发生了相应的变化, 测定这些变化就可以判定建筑材料的性质及结构内部构造, 以达到测试的目的。当超声遇到缺陷面时, 反射回波幅度会异常增大, 根据反射幅度、延迟和相位等就可以判断缺陷的位置、面积和形状, 原理图如图 1 所示。

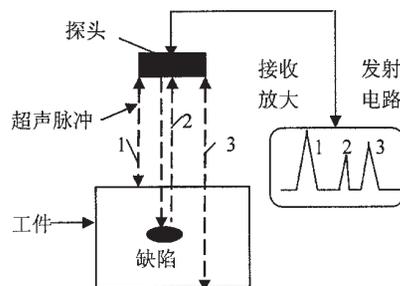


图 1 超声波检测原理图

1.2 超声波聚焦探头的选择

超声检测信号与超声检测探头有着密切的关系,检测探头的性能直接影响到检测信号所包含的缺陷特征的信息量。

水浸法中,因为声束指向性差,对检测不利。为了保证恒定的入射角和不出现许多其他干扰波形,同时提高检测精度和分辨率,多采用聚焦探头,聚焦的原理是在探头晶片配上一个凹面声透镜,只要透镜材料的声速大于水的声速,就能使声束聚焦,如图2所示。

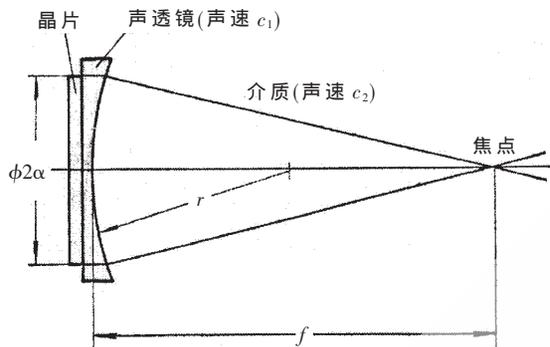


图2 用凹面声透镜使声束聚焦

聚焦探头以类似于光聚焦方式,利用透镜聚焦使射入工件内的超声波在一定深度范围内汇聚成一个声束^[2]。这个声束有声束细、声能集中、分辨率高、信噪比高等优点。聚焦探头特别适用于高分辨率C扫描成像的检测,因此为了利用聚焦探头声能集中入射声压高、分辨率高的优点,把采用聚焦探头作为解决轴类零件检测难题的最重要措施。

1.3 超声波聚焦探头检测轴类零件方法

在采用超声检测系统对轴类零件进行检测时,要求发射和接收超声波的探头时刻保持对准工件被检测点的法线方向,因此必须获得工件型面的几何外形参数^[3]。由于轴类零件被测面为圆柱面,必须知道其直径和轴向尺寸,由此,根据被检测工件的实际情况,提出了轴类零件的超声缺陷检测方法。

首先根据外部数据源(零件设计数据或者测量数据)获取被测工件的尺寸。然后根据被测工件的尺寸模型,通过对检测机构运动学分析和检测路径最优规划,进行数控编程,系统运用通用数控代码,操作人员根据不同的零件编写数控代码,以进行超声检测的运动控制。最后上位机软件读入数控程序,通过对零件尺寸参数和探头参数进行分析、插补和补偿,得出检测的实际运动轨迹。

2 超声波聚焦探头检测轴类零件的仿真建模

2.1 超声波聚焦探头的模拟

由于聚集探头的聚焦声场(参见图3)作为一种衍射现象,聚焦范围是有限的,有上限,也有下限。由于在聚焦声场之外存在近场干扰,所以实用的探伤区域仅局限

于聚焦范围之内(参见图4)。焦柱直径与焦柱长度的关系是: $\phi_F = \frac{1}{2} \sqrt{\lambda L_F}$,它们是相互制约的,焦柱长度越长,焦柱直径越大。因此,在选择 L_F 和 ϕ_F 时,不能一味追求小的 ϕ_F 和长的 L_F ,应根据实际需要来综合考虑^[4]。为了提高分辨率应尽可能采用小焦柱直径的探头,但焦柱直径越小焦柱长度也越短,焦柱长度短也意味着可检测的轴类缺陷区域小。如直径 $\phi 12$ mm,焦距20 mm的探头,焦柱直径 $\phi 1.2$ mm,焦柱长度只有3 mm。

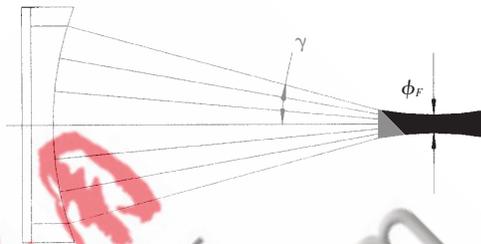


图3 焦柱直径和焦点处声压的集合

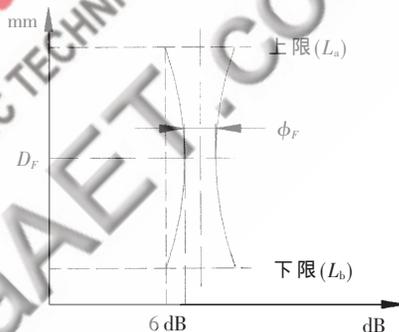


图4 焦柱长度与焦柱直径

因此,本文在设计模拟超声波聚焦探头时,考虑了探头参数以及之间的相互关系,以达到实际探头与模拟聚焦探头能够吻合,如图5为所输入的探头参数。



图5 探头输入参数对话框

2.2 超声波传播路径的模拟

2.2.1 超声波反/折射原理

超声波检测中分析计算通常采用几何光学的简化模型,超声波的传播路径的确定一般也利用光的折射和反射原理,即一般情况下,认为超声波被界面反射后,反射波线和入射波线在一个平面内,并且反射角等于入射角;或超声波由第一媒质进入第二媒质发生折射

《微型机与应用》2010年第12期

后, 折射波线位于入射波线和界面法线所决定的平面内, 折射波线和入射波线分别在法线的两侧, 并且入射角的正弦和折射角正弦的比值, 对折射率一定的两种媒质来说是一个常数。为了方便实现编程模拟, 根据反射和折射原理, 超声波在平面图形内的传播过程可以归结为 6 点:

(1) 波线遇到其传播方向上最近的界面线发生反射与折射;

(2) 反射角等于入射角;

(3) 折射角的正弦等于折射率乘以入射角的正弦;

(4) 反射线和入射线在界面同侧;

(5) 折射线和入射线在界面两侧;

(6) 以上 5 点循环进行。

2.2.2 声线跟踪法

“声线跟踪法”是目前各种声学现象计算机模拟过程中普遍采用的方法^[5]。通常, 介质环境的边界面可以离散成有限的平面。某时刻在边界上的某一个位置向介质内发出脉冲波。假定把波引发振动的分子称之为波粒子, 按照波的传播理论, 这些波粒子在未与边界面相遇之前沿直线运动。称由当前波粒子引发的下一个波粒子振动的过程为单步跟踪过程, 其中把 2 个具有因果关系波粒子之间的连线称之为波线。

将波源对介质内提供的能量离散到波源周围有限的波粒子上。开始时, 每个波粒子所携带能量的方向及大小取决于发射方向和波源发射的总能量。当波线与所有的边界面都没有交点时, 只需进行简单的跟踪计算; 当波线与边界面存在交点时, 计算出波线与边界面的所有交点, 取其传播方向上最近的交点作为反射点, 波线在该面上做镜面反射, 反射后的方向由反射定律确定。以后对该波粒子的跟踪沿着反射后的新方向进行。每次碰撞后, 波粒子的能量减少为原来的 $(1-\lambda)$ (λ 为边界面反射衰减系数), 如果其携带的能量低于事先设定的阈值时, 计算机将停止对该波粒子的跟踪。如此跟踪完所有波粒子之后, 即完成一步跟踪过程。在这个过程中, 当波粒子到达预先设定的接收面积或接收体积时, 计算机将记录该波粒子的到达时间、能量等, 以此得到一个能量的时间分布, 只要时间间隔、步长以及波粒子数目取得合适, 就可以把所有波粒子在介质中当前位置所形成的图形作为超声波传播的仿真图形。

2.2.3 路径模拟的总体流程设计

按照上述思想, 超声波传播路径模拟程序的实现可以按照一定的步距向各个界面线搜索, 或直接从入射线依次与各界面线求交点, 在满足条件反/折射原理的交点中, 求出与上一个反射点(入射点) 距离最小的交点即为新的反射点与折射点。一般地, 按数学方法与界面线方程求交点同按一定的步距搜索相比, 程序实现简单一些, 运行速度要快一些。所以在平面结构的超声波传播路径模拟中采用后面的方案实现。

《微型机与应用》2010 年第 12 期

根据上述基本原理, 实现以长方形(轴的剖面形状)结构的超声波传播路径模拟的方法简述如下: 先根据方便计算的原则, 把长方形结构放在一个合适的直角坐标系中, 建立所有检测工件界面线的数学方程。根据有关参数, 确定入射线方程。然后依次求解入射线和界面线的交点, 并把与入射线不同侧(对该界面线)的交点剔除, 再求解剩余各交点和入射点的距离, 并比较这些距离的大小, 记忆距离最小的交点和其所在的界面线, 该交点即为反射点和下一次的入射点, 界面线即为反射界面线, 下一次反射线必须在该界面线的内侧(对工件而言)。依次类推, 可以求解并绘制出超声波的传播路径。其路径模拟的总体设计流程如图 6 所示。

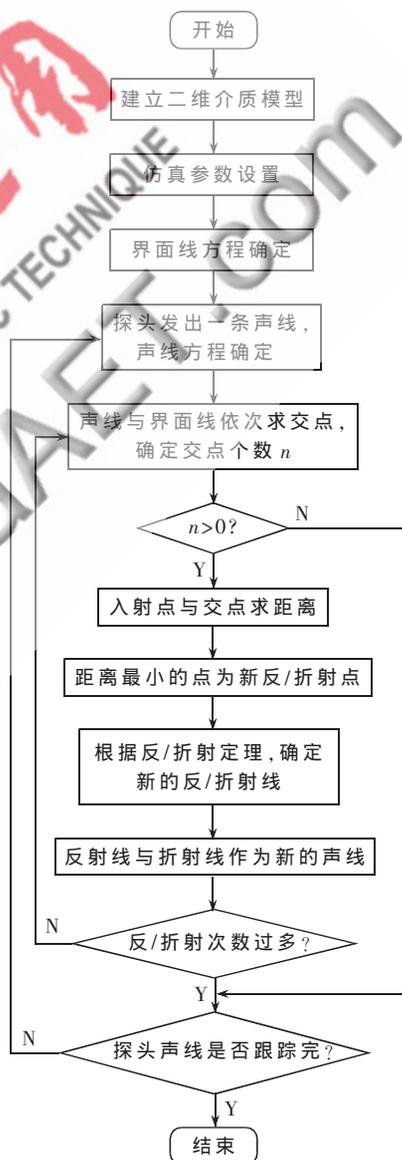


图 6 路径模拟流程图

路径模拟的结果如图 7、图 8 所示。图 7 是模拟聚焦探头斜入射时无缺陷的超声波传播路径情况, 图 8 是模拟聚焦探头垂直入射时有缺陷的超声波传播路径情

软件天地 Software Technology

况。如果采用斜入射方法,需要一发一收两个探头,若工件内部无缺陷,则可根据入射角与工件尺寸确定接收探头的位置,而当工件内部有缺陷时,有时缺陷会改变路径,从而使已确定好的接收探头无法接收到超声波。而当采用垂直入射方法时,只需一个探头就可以发射声波和接收声波,而当工件内部有缺陷时,有时缺陷会改变路径,从而使探头无法接收到超声波。

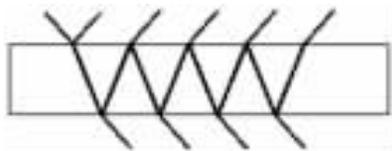


图 7 路径模拟结果(1)



图 8 路径模拟结果(2)

3 波形仿真与实验验证

本实验采用水浸法聚焦探头垂直入射检测轴类零件的方法,当工件内部没有缺陷时,探头可接收到工件表面反射回来的波与底面多次反射回来的波。图 9 是表面波与第一次底面回波的波形图。图 10 是图 9 的模拟波形图。当工件内部的缺陷与轴向方向不平行时,此时缺陷会改变超声波传播的路径,从而使探头无法接收到底面回波或缺陷面反射回来的回波,图 11 是只有表面波的波形图,图 12 是图 11 的模拟波形图。当工件内部的缺陷与轴向方向平行时,探头会接收到工件表面波和缺陷面多次反射回来的波形,图 13 是表面波与第一次、第二次缺陷面反射回来的波形图,图 14 是图 13 的模拟波形图。

前面提到的声场模型是一种理想的声场模拟,实际工程要复杂得多。声场模拟可以说是整个模型中最困难的部分。所以这个部分有很大的提升空间。将模型的波形和实际获得的波形进行比较,发现模型对系统的模拟比较准确。

整个系统具有操作性、界面友好、扩展性强、可靠性高等优点,为用户提供了一个试验平台,帮助用户选择探头入射角度、检测模式和不同的聚焦深度。不仅可用于超声检测的分析计算、可检性评定,还可用于现场辅助检测,对了解超声检测的覆盖范围、工件中某些位置的可检性、确定实际检测工件中缺陷的位置具有重要意义。

参考文献

- [1] 李衍. 超声波探伤的简化模型[J]. 无损探伤, 1997, 2: 26-29.
- [2] 《超声波探伤》编写组. 超声波探伤. 北京: 电力工业出版社, 1980.
- [3] 杨辰龙, 周晓军. 复杂曲面工件的超声无损检测系统研



图 9 表面波与第一次底面回波的波形图

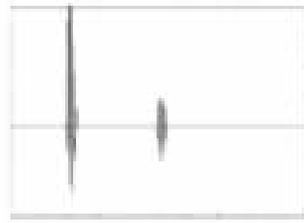


图 10 图 9 的模拟波形图



图 11 只有表面波的波形图



图 12 图 11 的模拟波形图



图 13 表面波与第一、二次缺陷反射后的波形图



图 14 图 13 的模拟波形图

制[J]. 中国机械工程, 2005, 16(18): 1622-1625.

[4] 美国无损检测学会, 美国无损检测手册(下)[M], 上海: 世界图书出版公司, 1996: 143-152.

[5] 石教英, 虚拟现实基础及使用算法[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 262-272.

(收稿日期: 2009-12-29)

作者简介:

董月刚, 男, 1981 年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 模式识别, 超声检测。

张吉堂, 男, 1963 年生, 博士后, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 数控技术, 超声检测。