

桥梁大型混凝土构件的超声波 CT 检测

张晓培¹, 杜立志¹, 刘 铭², 孔 珍³

(1. 吉林大学 建设工程学院,长春 130026; 2. 桂林工学院 资源与环境工程系,桂林 541004;
3. 中国化学工程第一岩土工程有限公司,沧州 061001)

摘要:超声波 CT 成像技术是利用专用设备记录超声波从接收探头到超声震源之间的传播时间,并据此反演、计算弹性波速度分布的一种方法。通过分析目标区内声波速度的分布特征,间接获得目标体强度以及均匀性等信息。介绍了超声波 CT 的工作原理,对比分析不同观测系统进行的正演模拟计算,并对不同反演迭代算法进行了优化设计。该方法已在大型混凝土构件无损检测中进行了实际应用,与其它测试手段相比,该技术效率高、结果直观、对缺陷定位准确,是大型混凝土构件中缺陷普查的首选方法。

关键词:超声波 CT 检测;桥梁;混凝土构件

中图分类号:TG115.28 文献标志码:A 文章编号:1000-6656(2009)08-0600-03

Study of Ultrasonic CT Method in Nondestructive Detection of Large Scale Concrete Structural Member of Bridge

ZHANG Xiao-Pei¹, DU Li-Zhi¹, LIU Ming², KONG Zhen³

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China;
2. Department of Resources and Environmental Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;
3. China Chemical Engineering First Geotechnical Engineering Co Ltd, Cangzhou 061001, China)

Abstract: The ultrasonic computed tomography (USCT) method could record the arriving times of ultrasonic wave between the probes and the sources to calculate the elastic wave velocity in the section using the arrival times. Through analyzing the distribution of seismic velocity in aimed area, the information of the strength and the homogeneity of the investigated zone could be got indirectly. The operational principle of USCT was introduced. According to the calculation result of forward model in partially recording geometry and completely recording geometry and the difference of the inversion algorithm, the better algorithm was chosen and was used to detect the interior defects in large scale concrete structural member. Compared with other exploration methods, this method was more efficient and accurate.

Keywords: Ultrasonic computed tomography testing; Bridge; Concrete structural member

随着我国高等级公路和高速公路建设的迅速发展,桥梁,尤其是大型桥梁越来越多。对新、旧桥梁的健康检测越来越引起人们的重视。混凝土构件是桥梁结构的重要组成部分,它的质量将直接影响结构物的安全。在混凝土结构物的施工及使用过程中,由于施工管理、施工技术、荷载作用以及混凝土

本身的材料性质,有时会造成一些宏观损伤和缺陷,如裂缝、孔洞、蜂窝和局部疏松。这些缺陷的存在往往会影响结构物的承载力和耐久性。因此对混凝土结构物进行现场检测,准确探测其内部缺陷,对工程建设,特别是大体积混凝土工程,具有重要意义。

结构混凝土现场检测的主要项目是混凝土强度检测和缺陷及损伤探测两项,而且这两项测试的具体方法,必须以不损伤结构混凝土本身的使用性能为前提,也就是说,测试方法必须是非破坏的。超声

收稿日期:2008-12-04

作者简介:张晓培(1962—),男,教授,长期从事工程物探仪器研发及物探方法研究工作。

波 CT 成像技术结果直观,测试精度高,是结构无损检测的首选方法。

1 层析成像的理论基础

超声波 CT 是利用超声波在测试目标体中的传播时间,重建弹性波速度分布的一种无损检测方法。震源与接收探头的布设需根据测区的几何形状进行设计。

地震 CT 成像的核心是反演成像。反演成像过程首先将测区分割成很多的成像单元,亦称像元。波在介质中的传播路径被称为波射线。设第 j 个像元的慢度速度的倒数为 S_j ,同样,实测时间也可离散化,设波射线 i 在第 j 个网格上的长度为 δ_j ,则 m 个像元, n 条波射线在第 i 条震源到接收点的射线的旅行时间 t_i 为:

$$t_i = \sum_{j=1}^m \delta_j S_j \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

式(1)对速度成像反演方法较多,主要有反投影技术(BPT)、代数重建技术(ART)、联合代数重建技术(SART)以及联合迭代重建技术(SIRT)等^[1-2]。

当相邻像元的速度差<15%,波射线可认为是直线。当速度差异较大时,此时波射线将不再是直线而是曲线,必须采用 Huygen 理论进行地震射线追踪确定波射线。该理论考虑了波在界面处的折射现象,可较准确地重建模型,进行速度分布的反演计算^[3-4]。

2 数值模拟

在地球物理学中,多相物质组成的地质体的地球物理模型可简化为连续介质模型。所谓连续介质模型,是指研究的空间连续地被物质微团所占有,表征物质性质和物质运动的各种物理量在数学上都可以表示为空间上的分块连续函数。在图像重建过程中,重建区域可以简化为连续介质,并在所划分的网格单元内是均质体,网格与网格之间为连续面,也可为间断面。在利用透射波的信号来进行图像重建时,不考虑介质间断面的作用,而把地球内物质的物理参数,如波速、慢度和密度等统称为图像函数,并作分块函数处理。当然,介质中的间断面(如裂缝)是实际存在的,但由于透射波的能量大于反射波的能量,对只利用透射走时数据作层析成像而言,可把介质参数表示为连续函数^[5]。

数值模型见图 1,取背景速度值为 4 000 m/s,其慢度为 0.250 0; V_1 区为高速异常区(4 800 m/s),其慢度约为 0.208 3; V_2 区代表低速异常区(3 200 m/s),其慢度为 0.312 5。利用射线追踪方法正演走时数据,然后采用不同反演算法重建速度分布图像。考虑到实际采集数据和走时拾取时存在误差,对正演获取的理论投影数据加入 1% 的随机误差。

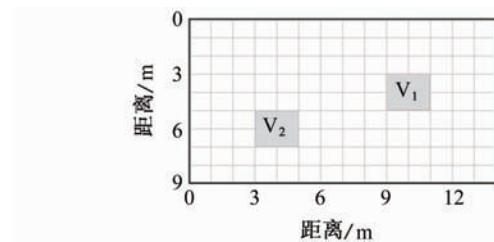


图 1 速度分布模型图

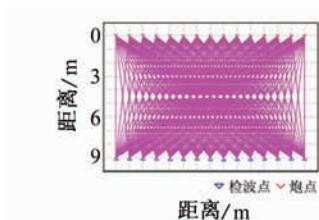
在进行反演计算时,为了研究观测系统对速度重建的影响。分别设计了射线密度相对不均匀的不完全观测系统,即接收点和激发点分别布设在模型的两侧,见图 2(a);同时还设置了射线密度相对均匀的完全观测系统,接收点和激发点布设在测区四周,如图 2(b)所示。

对完全观测系统的正演数据结果分别进行 SIRT, BPT 和 ART 反演计算,结果见图 3。显然 SIRT 反演算法在三种算法中最精准,并且它比 ART 方法收敛速度快,收敛性好。由图 3(a)和(b)所示,由于射线密度在模型两端相对稀疏,使得在进行迭代计算时,在横向收敛稍差。而完全观测系统的结果与模型吻合较好。为了保证反演结果的精度和分辨率,笔者利用 BPT 迭代算法的结果作为 SIRT 算法的迭代初值,采用弯曲射线追踪的方法,直接应用费马原理和最佳路径算法(Dijkstra)^[6] 进行迭代计算,取得了较好的效果。

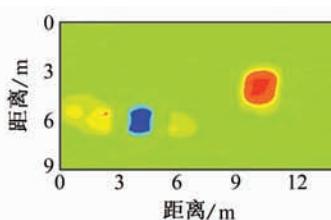
3 工程实例

某大桥主桥上部构造为 90 m+160 m+90 m 三跨预应力混凝土连续钢构箱梁。如图 4 所示,0 号梁的横隔板为本次测试的目标体,其设计强度为 C55。测试观测系统的布置如图 5,相邻震源点与检测点之间的距离为 0.25 m。

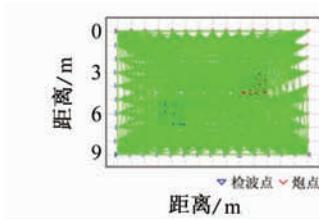
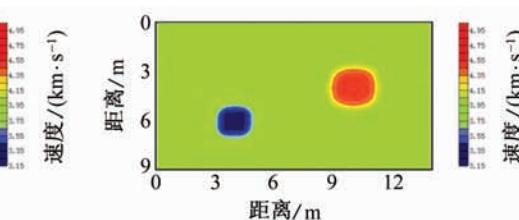
为了确保每张记录都具有较高的信噪比和清晰的初至时间,测试采用磁致伸缩震源(型号为 SRSM-5)。该震源功耗低、无延时、可连续触发并且具有较好的重复性。接收探头要求频带宽、灵敏



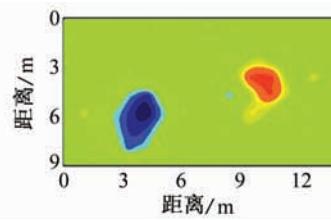
(a) 不完全观测系统



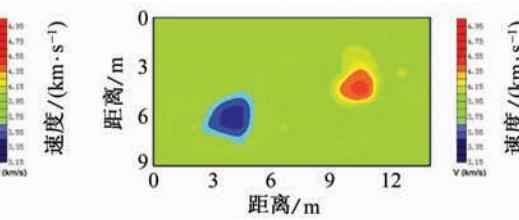
(a) 不完全观测系统 SIRT 反演剖面

(b) 完全观测系统
图 2 观测系统布置图

(a) 不完全观测系统 SIRT 反演剖面



(c) 完全观测系统 BPT 反演成果



(d) 完全观测系统 ART 反演成果

图 3 反演速度分布成果图

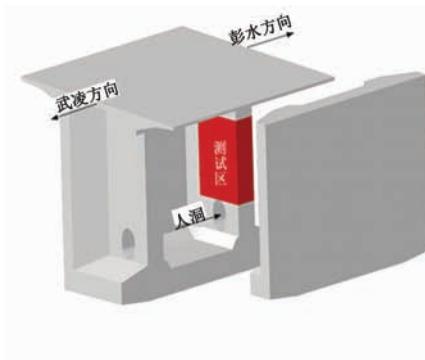


图 4 测区位置示意图

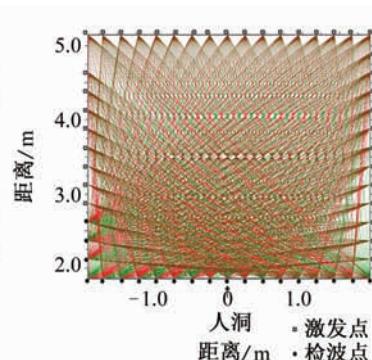


图 5 实测观测系统布置图

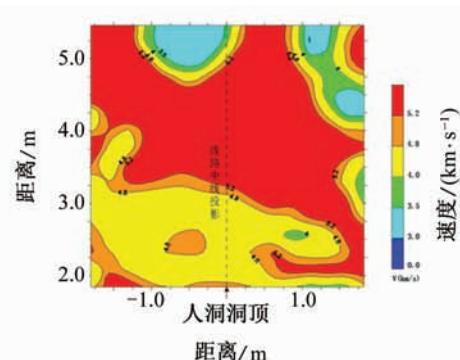


图 6 实测速度分布图

度高并且无非线性失真,由于采用多通道同时接收,要求探头的一致性要好。数据采集系统要求具有完频带、大动态范围和较高的采样率^[7]。

为了提高工作效率,采用多通道分布式数据采集系统(型号 SRS64)。该设备单站 2 道,具体采集站的数目可以根据测试目标区的大小设计。测试采用 10 个站,共 20 个检波器。

由图 6 可知,测区内弹性波速度分布相对较均匀,大部分区域混凝土的速度 $> 4800 \text{ m/s}$ 。根据同批混凝土试块室内试验结果中弹性波速度与单轴抗压强度的相关分析(表 1)可知,测试隔板的强度等级达到了 C60,而该隔板的设计强度等级为 C55。但是在测区上部以及速度谱右侧,发现了明显的低速度区,其速度在 $3000 \sim 3500 \text{ m/s}$ 。因此,推断测

试隔板整体浇注质量良好,上部中间偏左以及右上角存在两处低波速区,其强度值偏低。这与回弹法的测试结果是吻合的。

4 结论

工程实践表明,超声波 CT 测试技术具有较高的工作效率、测试精度高且测试结果直观。该方法不仅可以进行构件缺陷检测,结合同批次混凝土制作试块的室内单轴抗压强度试验结果,还可以对构件进行强度评价。随着分布式超声波数据采集系统的问世,超声波 CT 测试的工作效率必将大幅度提高,也必将推动该方法在大型混凝土构件无损检测中的应用和发展。

参考文献:

- [1] 刘合,王玉普,隋军,等.国外井间地震技术[M].北京:石油工业出版社,1998.
- [2] 邱庆程,李伟和.跨孔地震 CT 层析成像在岩溶勘察中
(下转第 605 页)

表 1 弹性波速度与强度等级关系

速度/(km·s ⁻¹)	强度等级	速度/(km·s ⁻¹)	强度等级
4.0~4.3	C50	4.6~4.8	C60
4.3~4.6	C55		

小值 B_{\min} , 漏磁信号的最大值 B_{\max} , 漏磁信号的中间值 B_{mid} , 漏磁信号最大值与最小值的距离 $X_{\min-\max}$, 漏磁信号的宽度 $X_{\min-\text{mid}}$, 漏磁信号最大值与最小值的一半距离的值 $B_{\text{mid}X}$; 第二个输入样本集是 B_{mid} , 漏磁信号的最大值减最小值($B_{\max} - B_{\min}$), $X_{\min-\max}$, $B_{\text{mid}X}$, $X_{\min-\text{mid}}$; 第三个输入样本集是 B_{\max} , B_{\min} , $X_{\min-\max}$, $B_{\text{mid}X}$ 。输出参数为缺陷的宽度和深度。

3 量化结果

比较了 BP 算法及其改进算法的量化结果,也将使用遗传算法优化 BP 神经网络的初始权值和阈值的量化结果一并比较,如表 2 所示。

表 2 使用不同算法的网络输出结果

方法	隐层节点数/个	达到终止条件所费时间/s	训练样本的宽和深平均误差/%	测试样本的宽和深平均误差/%
BP 算法	95	1 800	4.93	4.40
加入动量因子的 BP 改进算法	95	1 800	2.98	4.50
Levenberg-Marquardt 算法	20	101.4	4.999×10^{-2}	0.42
Marquardt 算法	17	192.9	6.501×10^{-2}	0.76
	12	120.6	0.23	1.10
使用遗传算法优化 BP 神经网络的初始权值和阈值	14	60	0.24	0.37

由表 2 可知,相较于 BP 算法和加入动量因子的 BP 改进算法,使用 Levenberg-Marquardt 算法能够加快网络的收敛速度和提高准确度;在同样使用 Levenberg-Marquardt 算法的情况下,如果正好选到适当的隐层节点个数,不管样本的平均误差还是达到终止条件所花费的时间都会减少;与使用 20 个隐层节点以及 Levenberg-Marquardt 算法的网络量化结果相比,使用遗传算法优化 BP 神经网络的初始权值和阈值达到的效果为测试样本的误差减小,花费的时间能够减少近一半。

(上接第 602 页)

- 的应用[J]. 物探与化探, 2001, 25(3): 236—24.
- [3] Tweeton D R, Jackson M J, Roessler K S. A curved ray tomographic computer program for geophysical applications[R]. Bureau of Mines Report of Investigations, 1992 BOMCRATR, 9411;39.
- [4] <http://www.divapra.unito.it/personale/singolo/dati/files/martinis>, chapter III: 11—13, 2002.

以实际检测得到的裂纹漏磁信号,测试提出的改进型 BP 神经网络。其对裂纹宽和深的预测结果,平均误差在允许范围内,为 0.98%。

笔者使用仿真样本训练了改进型 BP 神经网络。在使用仿真测试样本对其进行测试并得到良好的预测效果之后,使用实际检测中得到的裂纹漏磁信号数据对其性能进行检验。由于现实检测环境受到多因素影响,使得网络对实际检测数据的预测结果不及测试仿真数据,但误差还是在容许范围内,因此,提出的方法有其可行性。

参考文献:

- [1] 彭永胜. 基于漏磁检测机理的钢管小缺陷精确量化识别理论及系统研究[D]. 天津:天津大学, 2005.
- [2] 李久春. 基于 SVR 的管道裂纹漏磁场的预测分析模型[J]. 微计算机信息, 2008, 24(15): 285—287.
- [3] Han Wenhua, Que Peiwen. Defect reconstruction from MFL signals using an improved genetic local search algorithm[C]. IEEE International Conference on Industrial Technology. [S. l.]:[s. n.], 2005: 1438—1443.
- [4] Han Wenhua, Que Peiwen. 2-D defect reconstruction from MFL signals based on genetic optimization algorithm[C]. IEEE International Conference on Industrial Technology. [S. l.]:[s. n.], 2005: 508—513.
- [5] Ameet Joshi, Lalita Udupa, Satish Udupa, et al. Adaptive wavelets for characterizing magnetic flux leakage signals from pipeline inspection[J]. IEEE Trans on Magnetics, 2006, 42(10): 3168—3170.
- [6] 吴欣怡, 赵伟, 黄松岭. 基于漏磁检测的缺陷量化方法[J]. 电测与仪表, 2008, 45(5): 20—22.
- [7] 谭显胜, 周铁军. BP 算法改进方法的研究进展[J]. 怀化学院学报, 2006, 25(2): 126—130.
- [8] 董长虹. Matlab 神经网络与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [9] 雷英杰, 张善文, 李续武, 等. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005.
- [10] 万盛萍. GA 优化 BP 神经网络[J]. 软件导刊, 2007, 3(3): 24—25.
- [5] 孔珍. 地震 CT 技术中图像重建方法的对比研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2007: 20—40.
- [6] Wang G, Lin T H, Cheng P C, et al. A general cone-beam reconstruction algorithm[J]. IEEE Trans on Med Image, 2000, 108(6): 527—533.
- [7] DU Li-zhi, ZHANG Xiao-pei, NIU Jian-jun, et al. The seismic CT method in measuring rock bodies[J]. Applied Geophysics, 2006, 3(3): 192—195.