

文章编号: 1002-0268 (2004) 01-0054-03

# 基于希尔伯特变换的 应力波波速估计的研究

向阳, 彭勇

(武汉理工大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430063)

**摘要:** 研究基于希尔伯特变换的时间延迟估计方法及其算法, 算法通过 MATLAB 语言编程实现。制作了 4 块混凝土板并在其上开展基于冲击反射法的双传感器波速测量实验, 将互相关时延估计和希尔伯特变换时延估计应用到波速估计中, 两者均能解决直接观察法中的人为误差的影响和噪声对测量精度的影响, 取得比较满意的结果, 希尔伯特变换时延估计得到的波速精度比互相关时延估计得到的波速估计精度更高。

**关键词:** 希尔伯特变换; 时间延迟估计; 波速测量

中图分类号: TN352; TU375

文献标识码: A

## Estimation of Wave Speed in Concrete by Hilbert Transform

XIANG Yang, PENG Yong

(School of Power and Energy Engineering, WUT, Hubei Wuhan 430063, China)

**Abstract:** Hilbert transform of cross-correlation function based time delay estimation algorithm is studied in this paper. The algorithm was implemented with Matlab programming. 4 concrete slabs were constructed for experiments. Impact-echo experiments are carried out for measuring wave speed in concrete structure by two displacement transducers. Both the Hilbert transform based time delay algorithm and the cross-correlation function based time delay estimation algorithm have been applied to the wave speed evaluation. The influence of human observation error and noise are eliminated by both estimation methods. Experiment results are satisfied. The precision of the estimation by Hilbert transform is higher than that by cross-correlation function.

**Key words:** Hilbert transform; Time delay evaluation; Wave speed measurement

## 0 引言

对混凝土结构如公路、桥梁、大坝进行无损检测时, 必须首先测量波在混凝土结构中的传播速度, 因为它是估计混凝土结构浇注质量、测量结构厚度、探测缺陷所在位置的基础, 对波速的精确测量也是学者们一直不断进行研究的问题<sup>[1-3]</sup>。图 1 是用 2 个传感器测量波速的示意图, 将 2 个特制的位移传感器装在距离为  $L$  的杆的两端, 垂直压在混凝土板块表面上, 在与 2 个传感器在 1 条直线上的某点产生冲击, 测量应力波到达 2 个传感器的时间差, 就可以得到其传播

速度。图 2 是从图 1 中 2 个位移传感器得到的应力波信号, 求波速的关键问题是如何从这 2 条曲线上确定应力波到达的时间, 即图中的  $t_1$  和  $t_2$ 。传统方法是凭肉眼观察应力波曲线开始上升的点, 将其确定为应力波到达时刻<sup>[4-6]</sup>。这种方法有一定的随意性, 图 3 为对图 2 的 2 个信号在  $t_1$  和  $t_2$  附近的局部放大图, 从图上可以看出究竟哪一点是信号的开始上升点比较难确定, 特别是当信号受到干扰时, 就会产生更大的误差。针对这一问题, 本文研究了用信号处理技术中的时间延迟技术来实现  $t_1$  和  $t_2$  之间时间差的自动估计算法。时间延迟估计的基本问题是利用所接收到的

收稿日期: 2002-12-02

基金项目: 国家自然科学基金 (50275109) 和交通部通达计划 (95-06-02-04) 资助项目

作者简介: 向阳 (1962-), 女, 湖北武汉人, 副教授, 博士, 从事混凝土结构健康监测和智能信号处理的研究。

目标信号, 准确、快速地估计和测定出接收器或接收器阵列之间由于信号传播距离不同而引起的时间延迟, 通过对算法进行计算机编程实现自动估计, 无需肉眼观察。由 2 个传感器测量波速的原理可知, 波速测量问题其实可以看成是同源信号到达不同位置的延时估计。本文针对波速估计这一实际问题, 研究了信号的预处理, 基于希尔伯特变换的时延估计算法, 并将其运用到实验中, 取得了良好的结果。

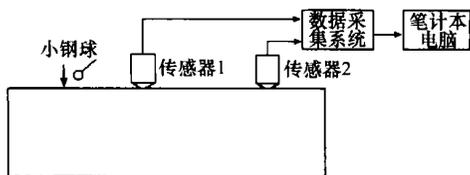


图1 双传感器测量波速法示意图

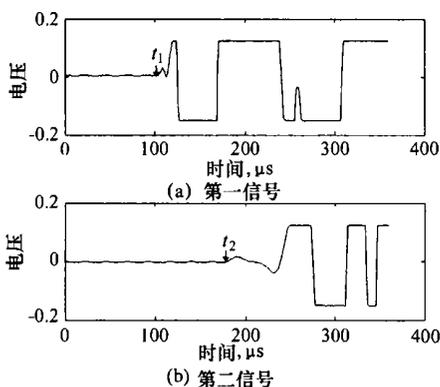


图2 2个传感器得到的应力波时域波形

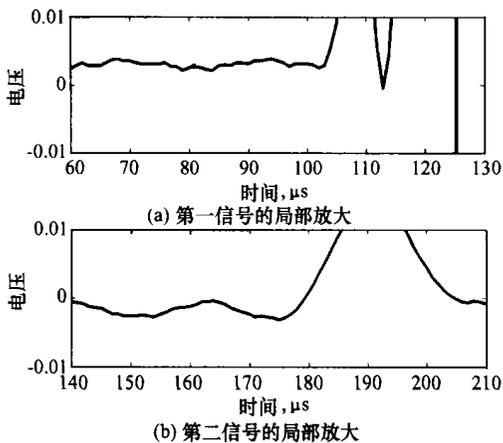


图3 2个信号在  $t_1$  和  $t_2$  附近的局部放大图

### 1 基于希尔伯特变换进行时延估计的原理与算法

同源信号由于信号传播距离不同, 到达不同接收器或接收器阵列之间的时间延迟的估计有很多种方法<sup>[7]</sup>, 基于希尔伯特变换的时延估计是互相关时间延迟估计方法的延伸<sup>[8]</sup>, 基于相关分析的时延估计方法, 是通过相关函数峰值的位置来估计时间延迟的。

但是, 由于信号带宽及噪声等因素的影响, 有时相关峰会展宽而变得比较平坦, 从而影响时延估计的精度。希尔伯特变换是一种可以用来检测信号最大值的线性变换, 利用希尔伯特变换, 可以将检测相关函数峰值的运算转变为相应的过零检测。这样有利于在相关峰平坦的条件下得到较好的时延估计。图4为希尔伯特变换法进行时间延迟估计的原理框图。

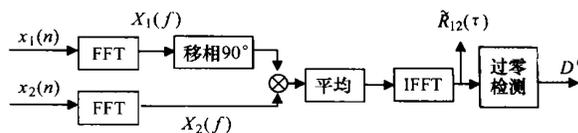


图4 基于希尔伯特变换的时延估计方法原理图

设由冲击源产生的离散应力波信号为  $s(n)$ , 则两个接收的离散应力波时间信号为

$$x_1(n) = s(n) + v_1(n) \quad (1)$$

$$x_2(n) = s(n - D) + v_2(n) \quad (2)$$

其中,  $v_1(n)$  和  $v_2(n)$  为噪声信号;  $D$  为到达两传感器的时间差。计算  $x_1(n)$  和  $x_2(n)$  的相关函数, 有

$$\begin{aligned} R_{12}(\tau) &= E[x_1(n)x_2(n - \tau)] = \\ &= R_s(\tau - D) + R_{sv_1}(\tau - D) + \\ &= R_{sv_2}(\tau) + R_{v_1v_2}(\tau) \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $R_{ss}(\cdot)$  表示信号  $s$  的自相关函数;  $R_{sv}(\cdot)$  表示  $s$  和  $v$  的互相关函数。假定信号和噪声两者互不相关, 这在工程上是成立的, 则有

$$R_{sv_1}(\tau - D) = 0 \quad R_{sv_2}(\tau) = 0 \quad R_{v_1v_2}(\tau) = 0 \quad (4)$$

式(3)变为

$$R_{12}(\tau) = R_{ss}(\tau - D) \quad (5)$$

由自相关函数的性质有

$$|R_{ss}(\tau - D)| \leq R_{ss}(0) \quad (6)$$

可知, 当  $\tau - D = 0$  时,  $R_{ss}(\cdot)$  达到最大值。因此, 选择  $R_{ss}(\tau - D)$  取得最大值的  $\tau$  值

$$D = \arg\{\max_{\tau} [R_{ss}(\tau - D)]\} \quad (7)$$

作为时间延迟  $D$  的估值。上式中,  $\arg[\cdot]$  表示取函数的自变量;  $\max[\cdot]$  表示求函数的最大值。根据希尔伯特变换的定义, 上述相关函数的希尔伯特变换为

$$R_{ss}(\tau - D) = H[R_{ss}(\tau - D)] = \frac{1}{\pi} \int \frac{R_{ss}(\tau - D - \xi)}{\xi} d\xi \quad (8)$$

式中,  $H[\cdot]$  表示希尔伯特变换算子。由希尔伯特变换的性质知, 若自相关函数  $R_{ss}(\tau - D)$  为偶函数, 则其希尔伯特变换为奇函数。这样, 偶函数的自相关

函数变为奇函数的希尔伯特变换函数。自相关函数  $R_{ss}(\tau - D)$  的峰点变为希尔伯特变换函数  $R_{ss}(\tau - D)$  的零点。实际实现时,用图4所给出的原理框图用希尔伯特变换进行时间延迟估计。

## 2 实验及估计结果

实验在自制的4块长为0.5m、厚为0.3m的混凝土模块上进行,用图1所示的双传感器法来测量P波速度,实验中所用的为2个特制的宽频带位移传感器,两位移传感器之间的距离固定为0.3m,采样频率为1MHz,图2即为两传感器在实验中获取的典型应力波信号。实验中,对自制的4个相同尺寸的混凝土模块进行了多次测量,实验中首先凭肉眼确定  $t_1$  和  $t_2$ ,即可得时延,由此估计得到的波速值如表1所示。其最大误差为6.1%,平均误差为5.1%。

| 测量板块                    | 1    | 2    | 3    | 4    |
|-------------------------|------|------|------|------|
| P波速度 (m/s)              | 3972 | 3918 | 3765 | 3716 |
| 平均值 $m$                 | 3800 | 3787 | 3744 | 3747 |
| 标准差 $\sigma$            | 233  | 226  | 130  | 180  |
| $\sigma/m \times 100\%$ | 6.1  | 6.0  | 3.5  | 4.8  |

对两传感器在同一次实验中获取的应力波信号,无需进行肉眼观察,直接用第1部分所述的公式(1)~(7)表达的算法通过编程来进行互相关延时自动估计,图5为对图2所示的两应力波信号进行计算得到的互相关函数,从中得出两信号的时延并根据时延计算波速,其结果如表2所示。其最大误差为3.8%,平均误差为2.4%。

| 测量板块                    | 1    | 2    | 3    | 4    |
|-------------------------|------|------|------|------|
| P波速度 (m/s)              | 3336 | 3306 | 3632 | 3435 |
| 平均值 $m$                 | 3291 | 3328 | 3479 | 3385 |
| 标准差 $\sigma$            | 125  | 26   | 111  | 56   |
| $\sigma/m \times 100\%$ | 3.8  | 0.8  | 3.2  | 1.7  |

对上述实验中获取的信号,同样无需肉眼观察,根据第1部分所述的希尔伯特变换时延估计的算法公式(1)~(8),用MATLAB语言编制了实现这种方法的计算程序,图6即为其希尔伯特变换,从图5和图6中可以发现,互相关函数峰值处的时间坐标与希尔伯特变换过零点处的时间坐标非常接近。读取图6中过

零点处的时间坐标并与信号的自相关峰值处的时间坐标相减就可得到具体时延估计值,由希尔伯特变换自动时延估计得到的波速数据如表3所示。其最大误差为2.5%,平均误差为1.8%。

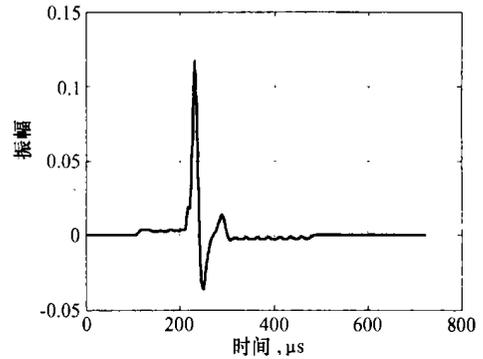


图5 两应力波信号的互相关函数

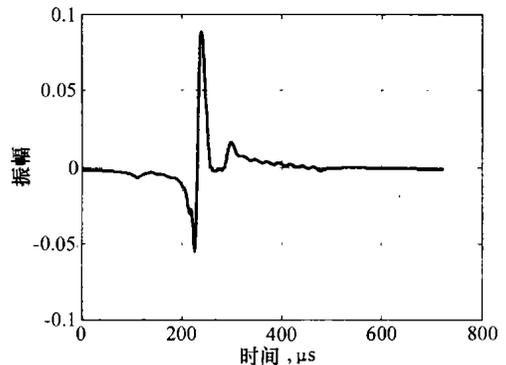


图6 两应力波信号的互相关希尔伯特变换用希尔伯特变换估计的P波速度 表3

| 测量板块                    | 1    | 2    | 3    | 4    |
|-------------------------|------|------|------|------|
| P波速度 (m/s)              | 3911 | 3854 | 4093 | 4062 |
| 平均值 $m$                 | 3965 | 3942 | 4062 | 4032 |
| 标准差 $\sigma$            | 98   | 76   | 26   | 79   |
| $\sigma/m \times 100\%$ | 2.5  | 1.9  | 0.6  | 2.0  |

从表1、表2和表3的比较可以看出,直接肉眼观察所估计的波速其最大误差和平均误差均比用自动时延估计算法所估计的波速的最大误差和平均误差大,这是由于信号和噪声互不相关,自动时延估计算法能抑制与信号不相关的噪声的干扰,避免了肉眼观察所带来的人为误差;互相关自动时延估计算法与希尔伯特变换自动时延估计算法相比,基于相关分析的时延估计方法,是通过相关函数峰值的位置来估计时间延迟的。但是,由于信号带宽及噪声等因素的影响,有时相关峰会被展宽而变得比较平坦,从而影响时延估计的精度。希尔伯特变换是一种可以用来检测

信号最大值的线性变换, 利用希尔伯特变换, 可以将检测相关函数峰值的运算转变为相应的过零检测。这样有利于在相关峰平坦的条件下得到更好的时延估计, 因此本文中用希尔伯特变换时延估计的波速精度高于互相关自动延时估计算法估计的波速的精度。

### 3 结论

本文介绍了希尔伯特变换时间延迟估计法的基本原理, 研究了它的实现算法, 编制了相应的计算程序, 并将该算法应用于双传感器测速计算, 获得了比较满意的结果。它的波速估计精度远远高于用肉眼观察所得的波速精度, 并且其波速估计精度还高于互相关自动延时估计算法估计的波速的精度。在实验中, 我们发现, 进行时延估计时, 在确定两触发点的大致位置后, 将后面的信号全部置零, 这样可以避免后面的反射波信号对时延估计的干扰。在时延估计前, 对所有信号进行这样的预处理, 可以得到满意的结果。研究结果表明希尔伯特变换法用于应力波信号通过混凝土结构这种复杂的非均匀介质传递系统的时间延迟估计是可行的。它是混凝土结构特性参数及缺陷自动识别中所必不可少的技术, 很有必要对其进行进一步的深入研究, 而且, 这一技术还可以延伸到钢结构、

复合材料的无损检测中加以运用。

### 参考文献:

- [1] Achenbach J.D. Wave Propagation in Elastic Solids [M]. Amsterdam: North-Holland Press, 1973: 310—318.
- [2] Andersen J, Nerens P. Wave Velocity in Concrete [J]. Journal of the American Concrete Institute, 1952, 23 (5): 613—635
- [3] Wu T.T, Fang J.S. A New Method for Measuring in Situ Concrete Elastic Constants Using Horizontally Polarized Conical Transducers [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1997, 101 (3): 330—336.
- [4] Pratt D, Sansalone M.J. Impact-echo Signal Interpretation Using Artificial Intelligence [J]. ACI Materials Journal, 1992, 89 (2): 178—187.
- [5] Lin Y, Sansalone M.J. Detecting Flaws in Concrete Beams and Columns Using the Impact-echo Method [J]. ACI Materials Journal, 1992, 89 (4): 394—405.
- [6] Sansalone M.J, Street W.B. Impact-echo: Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry [M]. Ithaca, N. Y: Bullbrier press, 1997: 67—74
- [7] 王宏禹, 邱天爽. 自适应噪声抵消与时间延迟估计 [M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1999: 170—202
- [8] 贝达特 J.S, 皮尔索 A.G, 著, 凌福根, 译. 相关分析和谱分析的工程应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1983: 41—74

(上接第 53 页) 2.0。从表 4 中的计算结果来看, 采用观测方法必须每年进行, 采用超声波探测的方法必须每 3 年进行一次。这样的探测安排间隔较短, 在具体实施中会有困难。因此, 建议对超声波探测间隔小于 10 年的杆件进行加强。这时对应的观测间隔也将提高到 4 年, 这与钢桁梁拷铲油漆的间隔相当, 能够保证下一检测的质量。

### 5 结论

在对桥梁档案进行详细调查基础上, 初步建立了外白渡桥工作模型, 进而与实测静、动力结果进行对比来校正工作模型, 最终建立了反映实际受力性能的三维力学模型。在实桥工作状态模拟的基础上, 联合应用传统疲劳分析和工程断裂力学计算该桥剩余寿命, 并给出确保外白渡桥使用安全的检测间隔和维修策略。本文介绍的老钢桥剩余寿命与使用安全评估方法是确定性的, 在进一步的研究中将引入概率断裂力

学和可靠度理论来评估老钢桥的使用安全性。

### 参考文献:

- [1] 上海铁路局桥梁检定队. 上海市外白渡桥结构试验报告 [R]. 1991.
- [2] 上海铁路局桥梁检定队. 上海市外白渡桥荷载试验报告 [R]. 2000.
- [3] 陈惟珍, 等. 上海市外白渡桥剩余寿命及使用安全性研究 [R]. 2001.
- [4] Bruhwiler E, Smith, I.F.C, Hirt M.A. Fracture and Fatigue of Riveted Bridge Members [J]. J. Struct. Engng., ASCE, 1990, 116 (1): 198—214
- [5] Kulak G.L. Fatigue Strength of Riveted Connection [J]. Stahlbau, 1996, 65 (11): 445—451.
- [6] 陈惟珍, Allbrecht G. 应用断裂力学方法计算老钢桥剩余寿命 [J]. 华东公路, 2000, No 4: 43—46.
- [7] Hensen W. Grundlagen fuer die Beurteilung der Weiterwendung alter Stahlbruecken [D]. Dissertation, RWTH Aachen, 1992.
- [8] Stoetzel G. Verfahren zur Beurteilung der Sicherheit bei Weiterwendung alter Stahlbruecken [D]. Dissertation, RWTH Aachen, 1998