

结构试验中一种高保真的数字滤波算法*

周英武, 王苏岩, 李宏男

(大连理工大学 土木水利学院, 大连辽宁 116024)

摘要:结构试验中在采集诸如荷载挠度曲线等数据时,由于受到外界环境不可预测的信号干扰,往往会使采集的数据产生很大的漂移,而且漂移是随机的,不可预测的,这就严重歪曲了试验的真实曲线,给试验的分析处理带来了困难。本文根据随机干扰信号的特点,采用了一种三阶段的数字滤波算法,每个阶段采用不同的滤波思想,逐步地将干扰信号过滤出去,还原结构试验曲线的真实面貌,并通过两个具体不同的实例,验证了算法的可行性。

关键词:数字滤波; 随机干扰; 改进的一阶差分; 中位数; 滑动平滑

中图分类号:TU32.01 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7329(2006)06-0042-05

A High Fidelity Digital Filter Arithmetic in Structural Experiment

ZHOU Ying-wu, WANG Su-yan, LI Hong-nan

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology; Dalian 116024, P. R. China)

Abstract: During data collection, the experimental data such as curve of force versus displacement are usually disturbed by the environmental uncertain signals, which cause the data to drift greatly. Since the drift is stochastic, uncertain, and has distorted the real experimental curve severely, it brings lots of difficulties in analyzing the experiment results. In this paper, based on the characteristic of the stochastic disturbance signals, a three-phase digital filter arithmetic is given, in which the disturbance signals are filtered in each phase gradually, according to the different filter methods, and then the real curve is reappeared again. Two idiographic and different instances are adopted to prove the validity of the arithmetic at the end.

Keywords: digital filtering; stochastic disturbance; modified first order differential; medians; slipping smoothness

土木工程领域的研究工作,许多是在结构试验的基础上进行的。一次结构试验的成功与否,其影响因素非常多,大到试验方案的设计,小到试验的观测和数据的采集与处理。试验室的工作环境错综复杂,多种试验机器经常同时工作,相互之间就不可避免地产生干扰。电源不稳,接地不良,采集系统屏蔽不佳,以及各种不可预测、无法辨认的电磁波信号,有时会对试验数据的采集造成了严重的影响,甚至导致试验曲线失真。当无法确认干扰原因,试验只能勉强进行,或者当试验数据采集过程中突然产生干扰,试验无法停下来时,这时所记录的实验数据无法直接应用分析,就必须寻找一种合适的数字滤波算法,对试验数据进行预处理。

结构试验干扰信号是随机的,不可预测的,没有一

定的周期,影响的疏密程度和幅值都不一样。但影响的幅值一般都较真实值大很多,且非常明显。针对上述特点,本文采用了一种三阶段的数字滤波方法,每一个阶段针对干扰信号的一个特点和干扰程度的大小与形式,有选择地逐步剔除和代替。第一阶段,采用作者改进的一阶差分法,滤除并代替大的漂移点,但由于一阶差分的局限性(下文将介绍)和干扰的随机性,需进入第二阶段的中位数滤波,中位数滤波能将稀少或有周期性的大漂移点很好地过滤掉^[1-4]。最后就是对试验曲线进行平滑处理^[5,6]的第三阶段。

1 三阶段滤波算法

1.1 第一阶段——改进的一阶差分

一阶差分滤波的思想是假定在足够小的时间段内

* 收稿日期:2006-05-10

基金项目:国家自然科学基金项目(50378711)

作者简介:周英武(1978-),男,广东珠海人,博士生,主要从事碳纤维布(CFRP)加固混凝土研究。

连续几个采样点的间隔应相差很小^[7]。这种间隔的本身也应该满足一定的限值,即需要满足(2)式和(3)式。否则视为漂移点。如图 1 所示, $(y(i-1) - y(i-2)) \approx y(i) - y(i-1)$, 则 $y(i+1)$ 的预估值 $y_g(i+1)$ 可以由(1)式计算得到。 $y(i)$ 、 $y(i-1)$ 、 $y(i-2)$ 为采样序列 $[y(1), \dots, y(i), \dots, y(n)]$ 中满足(2)、(3)式的点,认为是真值点。

$$y_g(i+1) = y(i) + y(i) - y(i-1) \quad (1)$$

$$| [y(i) - y(i-1)] - [y(i-1) - y(i-2)] | \leq e \quad (2)$$

$$| y(i-1) - y(i-2) | \leq m \cdot e \quad (3)$$

式中: e 为偏差的限值,下文将继续讨论; m 为偏差限值的放大系数,建议取 3 至 5,可以达到较好的效果。

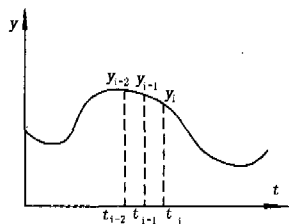


图 1 一阶差分原理简图

1.1.1 初始迭代点的确定 首先,初始迭代点的搜寻可以从采样序列中的第一个数据点 $y(1)$ 或者某个采样真值点 $y(j)$ (j 为某个采样真值点在原始采样序列中的序号) 后的第一个数据点开始进行,直至找到满足(2)式和(3)式要求的连续三点 $y(i)$ 、 $y(i-1)$ 、 $y(i-2)$, 定为初始迭代点。同时认为初始迭代点 $y(i)$ 、 $y(i-1)$ 、 $y(i-2)$ 以前的各个采样点 $y(i-3), \dots, y(1)$ 或者 $y(i-3), \dots, y(j+1)$ ($j < i-4$) 为漂移点,需要对其进行剔除和纠正。纠正分为以下两种情况:

1) 当搜索是从采样序列中的第一个点 $y(1)$ 开始时,对漂移点 $y(1), \dots, y(i-3)$ 的纠正只需在 0 和 $y(i-2)$ 之间按照漂移点的个数线性内插,并用内插值覆盖这几个漂移值即可。此时默认数据采集前的信号都为 0;

2) 当搜索是从原始采样序列中某个采样真值点 $y(j)$ 后一个数据点 $y(j+1)$ 开始时,对漂移点 $y(j+1), \dots, y(i-3)$ ($j < i-4$) 的纠正也只需在 $y(j)$ 和 $y(i-2)$ 之间按照漂移点的个数线性内插,并用内插值覆盖这几个漂移值即可。

同时,为了最大真实度的逼近原采样曲线,有时对 1) 和 2) 中的内插值还要做如下处理:

设 1) 和 2) 中求得的内插值序列为 $[y'(k), \dots, y'(m)]$ (k 和 m 分别为该内插值序列的起始序号和终止序号,在搜索初始迭代点时确定,且 $k < m$), 与该内插

值序列对应的原始段采样序列为 $[y(k), \dots, y(m)]$, 依次对内插值序列 $[y'(k), \dots, y'(m)]$ 中的各个点 $y'(j)$ ($k \leq j \leq m$) 作如下的判断,当 $y'(j)$ 满足(4)式时,则无须用内插值代替原始采样值,直接保留原采样值。

$$| y(j) - y'(j) | \leq e \quad (4)$$

1.1.2 采样数据的滤波过程 当确定初始迭代点后,就可以根据(1)式计算下一个待滤采样点 $y(i+1)$ 的估算值 $y_g(i+1)$, 并根据(5)或(6)式判断 $y(i+1)$ 的真伪,只需满足其中一个条件即为真值,并继续检验下一个采样点。显然,此时的 $y(i)$ 作为一个初始迭代点,也是一个真值点。

$$| y_g(i+1) - y(i+1) | \leq m \cdot e \quad (5)$$

$$\text{或} \quad | y(i+1) - y(i) | \leq m \cdot e \quad (6)$$

若不满足(5)或(6)式,则视 $y(i+1)$ 为漂移点,用 $y_g(i+1)$ 代替 $y(i+1)$ 。继续迭代,当且仅当处于下述情况时,除了满足(5)、(6)式之一外,条件还可以进一步地放宽,可以外加两个判断准则(7)和(8)。

设当前待检验的采样点为 $y(i+j)$ ($j > 1$), 且此时 $y(i+j)$ 的前一个采样点 $y(i+j-1)$ 是一个漂移点,已经被估算值 $y_g(i+j-1)$ 代替,并且假设与 $y(i+j)$ 最近的一个真值采样点(可能是初始迭代点,也可能是经判定的真值采样点)为 $y(i)$, 很显然,此时的 $y(i+1), \dots, y(i+j-1)$ ($j > 1$) 也均已经被判定为漂移点,均被估算值代替了。在这种情况下,就可以外加以下两个判断准则:

$$| y(i+j) - y(i) | \leq m \cdot e \quad (7)$$

$$\text{或} \quad | y(i+j) - y(i) + dy | \leq m \cdot e \quad (8)$$

式中: $dy = y(i) - y(i-1)$ ($y(i-1)$ 是真值点 $y(i)$ 前面的一点,可能是真值点,也可能是估算值)。

若能满足(5)、(8)式之一,就认为是真值。否则,按照(1)式计算估算值,并代替漂移值,如此迭代下去,直至出现以下情况:

1) 若一个漂移点后连续检验出两个真值时,则重新寻找初始迭代点;

2) 若连续不间断地代替了 5 个漂移点后,为了保持曲线的趋势和因差分迭代带来的误差,第 6 个漂移值取等于前一个真值,并从其后的一个采样点开始重新寻找初始迭代点。有时,在寻找到初始迭代点后,为了进一步减小一阶差分带来的误差,需要对这 5 个漂移点和重新寻找所得的初始迭代点前的一系列漂移点在前后两个真值点间一同进行线性内插,并用内插值覆盖漂移值。

1.1.3 偏差限值 e 的确定 在上述滤波过程中,如果 e 取得过大,可能达不到很好的效果,改进的一阶差分的抗干扰能力也就降低;如果 e 取得过小,真实的采样

点被误以为是漂移点的概率就会增大。因此 e 的取值至关重要。

把采样序列 $[y(1), \dots, y(i), \dots, y(n)]$ 前后相减取绝对值, 得到一个新的序列 $[z(1), \dots, z(i), z(n-1)]$ 定义结构试验数据的采样步长 ds (无量纲数) 为: 当任何一种采集信号的变化量超过 ds 时, 系统就将该时刻的所有数据信号采集下来, 则分别统计新序列 z 落在区间 $[0, 1]$ 、 $[1, ds]$ 和 $[ds, 1.5ds]$ 的个数 n_1 、 n_2 、 n_3 , 以及落在各区间内所有数据的和 s_1 、 s_2 、 s_3 , 对新序列 z 在区间 $[0, 1.5ds]$ 内进行加权平均, 就求得偏差限值 e (此时默认相邻采样数据差值的绝对值大于 $1.5ds$ 时为不正常现象, 不予于考虑):

$$e = \frac{s_1 p_1 + s_2 p_2 + s_3 p_3}{n_1 p_1 + n_2 p_2 + n_3 p_3} \quad (9)$$

$$\text{式中: } p_1 = \frac{n_1}{n_1 + n_2 + n_3}; p_2 = \frac{n_2}{n_1 + n_2 + n_3}; p_3 = \frac{n_3}{n_1 + n_2 + n_3}$$

改进的一阶差分滤波法, 可以很有效地剔除与纠正采样数据中的大漂移点, 可以将密集而无任何规律的干扰信号大大地减少, 但从一阶差分的基本假定出发, 不可避免地产生新的漂移点, 但此时的漂移点已经变得非常稀少, 且幅度不大, 只需再经中位数过滤, 就可以得到很好的效果。有时甚至无须经过中位数滤波效果就能满足要求, 但这种情况仅限于原始数据漂移不是太严重的时候。

1.2 第二阶段——中位数法纠正稀疏的大漂移点

中位数滤波的原理^[1-4]就是将一个从待滤序列 y $[y(1), \dots, y(i), \dots, y(n)]$ 中截取的窗口序列 $[x(1), \dots, x(i), \dots, x(w)]$ 按一定的顺序进行排序, 取中间那个数即中位数为本次窗口所截取的滤波值。然后将窗口最前面的数据 $x(1)$ 移出, 将窗口内其它数据依次往前挪动一位, 将最后面的 $x(w)$ 移入一个新的数据, 窗口序列就整体往前滑动了一步, 并重新排序, 再取中位数作为本次滤波值输出, 如此重复下去。由于窗口每次滑动所截取的都是窗口数据的中位数, 因此可以把很大或是很小的数过滤掉。在实际操作中, 取窗口宽度 $w = 2k + 1$, 并在待滤序列 y 的最前面补充 k 个数值等于 $y(1)$ 的数据点, 在待滤序列 y 的最后面补充 k 个数值等于 $y(n)$ 的数据点, 开始时把滑动窗口的中心定在原始序列 y 的 $y(1)$ 上, 窗口滑动 n 次就到了 $y(n)$, 就完成了整个滤波过程。

中位数滤波要想取得很好的效果, 关键就是必须保证一个窗口内漂移点的总数 $p \leq k$, 这才有可能将所有的大漂移点剔除并纠正, 这就要求干扰信号是有规

律的或是有周期的, 并且分布是趋于均匀的或是稀疏的, 这与结构试验中干扰是随机的相矛盾, 因此滤波前必须将没有任何规律的随机干扰信号进行预先处理, 这就是第一阶段滤波所要完成的任务。经一阶差分滤波后, 滑动窗口的宽度就可以根据漂移点的分布特点确定, 只需满足 $p \leq k$ 即可, 一般可取 $k = 5$ 或 10 , 效果都很不错。

经过中位数滤波后, 在曲线的波峰和波谷处将会出现平台, 且滤波窗口越大, 平台越长, 试验的极值点及附近区域就被剔除, 为了解决这个问题需要对平台进行修复。修复的具体方法分为以下几个步骤:

1) 平台的判断。当滑动窗口输出的中位数与前一次输出的中位数在原始数据序列中为同一位置的数时, 则判定平台的开始。之后, 当滑动窗口输出的中位数与前一次输出的中位数在原始数据序列中为不同位置的数时, 则判定平台的结束。

2) 波峰或波谷的判定。因为经过第一阶段的滤波, 大漂移点已被纠正或剔除, 此时与平台相对应的原始数据段的极值点即可初步认为是曲线的峰值点, 取峰值点两侧各若干个数据 (视采集数据的多少确定, 一般可以取 50 或 100), 分别求出这两组数据的平均值, 然后根据峰值点与这两个均值点的关系判定平台是否出现在波峰或波谷。当峰值点与这两个均值点所构成的两条直线的斜率互为相反数时, 则认为平台出现在波峰或者波谷处。

3) 经过 1) 和 2) 的判定后, 就可以对平台进行修复, 还原峰形曲线。以 2) 中找出的峰值点为中心, 沿左右两侧分别以 $w = 2i + 1$ 的窗口宽度对平台范围内的原始数据进行中位数重滤波 (i 为待滤点与峰值点的距离, 即相隔的点数)。

1.3 第三阶段——采集数据的平滑处理

经过上述两阶段滤波后, 所有的干扰信号基本都已经纠正过来。但此时曲线还可能比较粗, 有可能出现凹凸不平的现象, 有必要对曲线做进一步地平滑处理, 这就是第三阶段滤波的主要目的。

平滑处理的实质就是将连续采集的若干个数据组成一个滑动窗口, 窗口内待滤的采样数据按照一定的权值将窗口内所有数据进行加权平均后作为其平滑值输出, 然后, 窗口向前滑动, 对下一点进行平滑处理。根据采用拟合曲线的不同可以分为线性滑动平滑法和非线性滑动平滑法^[5,6]。线性滑动平滑法的工作原理是: 取第 i 点及附近若干点的采样数据, 组成一个滑动窗口, 根据最小二乘法的原则在窗口内确定一条拟合的直线方程, 然后由该直线方程确定滑动窗口内计算采样数据平滑值的权系数。非线性平滑法则是采用非

线性函数作为拟合曲线,然后确定权系数。根据所采用拟合点的个数,即滑动窗口的宽度,可以分为三点、五点和七点等线性滑动平滑,以及五点、七点等非线性滑动平滑。本次应用中,采用了五点线性滑动平滑和五点非线性滑动平滑,它们的权系数分别为^[6]:

五点线性滑动平滑的权系数,可以用以下方阵紧凑地表示:

$$\frac{1}{10} \begin{bmatrix} 6 & 4 & 2 & 0 & -2 \\ 4 & 3 & 2 & 1 & 0 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ -2 & 0 & 2 & 4 & 6 \end{bmatrix} \begin{matrix} i = 1 \\ i = 2 \\ i = 3, \dots, n-2 \\ i = n-1 \\ i = n \end{matrix} \quad (10)$$

五点非线性滑动平滑的权系数,也可以用以下方阵紧凑地表示:

$$\frac{1}{35} \begin{bmatrix} 31 & 9 & -3 & -5 & 3 \\ 9 & 13 & 12 & 6 & -5 \\ -3 & 12 & 17 & 12 & -3 \\ -5 & 6 & 12 & 13 & 9 \\ 3 & -5 & -3 & 9 & 31 \end{bmatrix} \begin{matrix} i = 1 \\ i = 2 \\ i = 3, \dots, n-2 \\ i = n-1 \\ i = n \end{matrix} \quad (11)$$

式中, n 为待滤序列采样点的总数, i 表示滑动窗口中的当前平滑处理的采样数据点在待滤序列中所处的位置。

在结构试验数据采集的过程中,由于干扰因素很复杂,产生的干扰程度也就不一样。当采样数据漂移得很严重时,采用任何单独的一种方法都很难满足试验滤波所要达到的要求,都会或多或少地带来瑕疵,就必须进行三阶段的滤波过程;而当采样数据只是出现局部漂移,且漂移点比较疏散和均匀时,可以直接进入第二阶段的中位数滤波;当采样曲线只是显得比较粗,没有很大或很小的漂移点,或只是偶尔出现凹凸等异常现象时,就可以直接进入第三阶段的平滑处理。

2 实际应用分析

作者编制了一个 700 多行的 FORTRAN 程序,通过对采样数据干扰程度的判断,完成对采样数据的滤波过程。例一为碳纤维布(CFRP)加固高强混凝土柱试验中的一条实测滞回曲线,由图 2 可以看到,试验采样数据受到了严重的干扰,试验曲线也严重失真。采用三阶段数字滤波算法,通过程序的运算,取得了很好的效果,见图 3。例二为碳纤维布(CFRP)加固高强混凝土梁抗剪试验的一条实测荷载挠度曲线,严重的干扰信号淹没了荷载挠度曲线的形状和峰值,见图 4,采用三阶段的滤波算法,不仅驱除了漂移,而且很好地捕捉了曲线的峰值点,保存了曲线的下降段,见图 5,这

对于探求梁极限荷载的试验显得尤为重要。

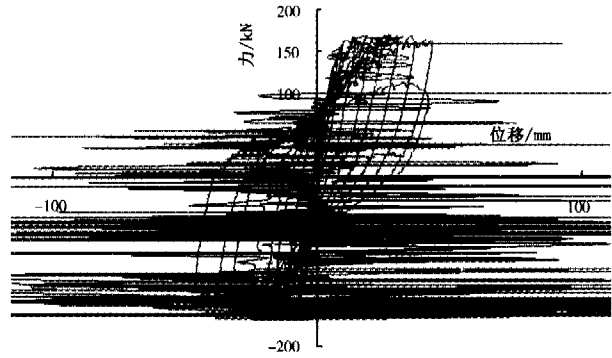


图 2 过滤前的滞回曲线

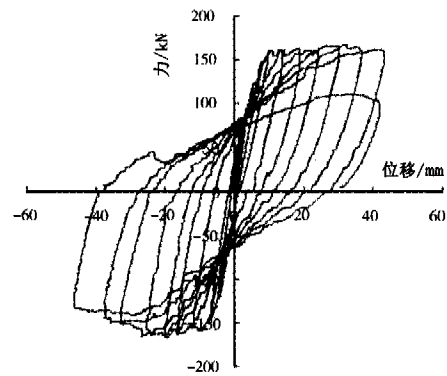


图 3 过滤后的滞回曲线

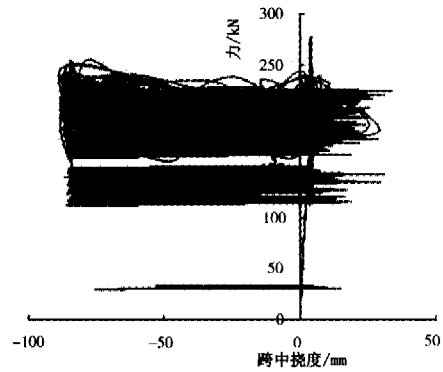


图 4 过滤前的荷载挠度曲线

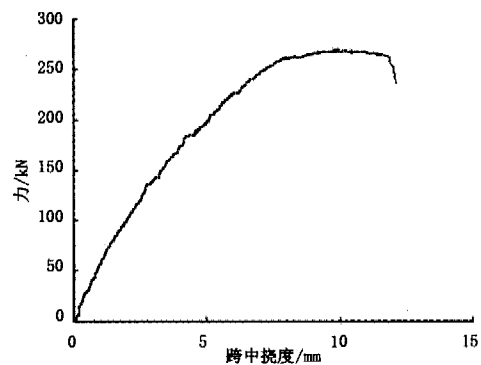


图 5 过滤后的荷载挠度曲线

由图 2 和图 3、图 4 和图 5 的对比中可以看出,三阶段滤波算法不仅驱除了漂移点,而且基本上将曲线坑坑洼洼的地方“拉直”了。而且,更为重要的是曲线

的形状和极值点并没有改变,也就是说经过滤波后,试验的结果得到了真实的保存,这是试验滤波最重要的一点。

3 结论

结构试验的干扰信号是随机的、不可预测的,没有一定的周期,影响的疏密程度和幅值都不一样。单纯的采用上文阐述的三种滤波算法中的一种,都不可能很好地解决漂移的问题,都会或多或少地存在一些瑕疵,除非是在轻微的干扰之下。为此,作者根据干扰的特点,结合每种算法所能实现的效果,分阶段、分目的地逐层过滤,每一阶段只求驱除和纠正同一特征的漂移点,同时又为下一阶段算法的实现提供了必不可少的前提,这就是三阶段数字滤波的思想。由实测数据的实例可以看到,三阶段的数字滤波算法很好地解决了结构试验中数据采集漂移的问题。最大程度地保持了试验曲线的真实面目,曲线的极值点和下降段也相应得到了很好的保存。而且,根据漂移的程度,还可以只选择两阶段甚至一阶段滤波,使用空间比较灵活。

(上接第37页)

好效好便好,创业难守业难知难不难”,这些楹联中透出深刻的人生哲理,反映了徽商贾而好儒、崇文重学的思想。厅内靠太师壁陈设长条木案,案中放自鸣钟一座,东边放一花瓶,西边摆一古镜,寓意为“终身平静(钟声瓶镜)”^[5]。由于徽商长期在外奔波,故里亲人百般牵挂,他们以此祈祷外出的家人平静经商、终身平安。而那些经营成功、回到家乡颐养天年的徽商,希望从此过上没有竞争的平静生活。

5 结语

古民居、祠堂和牌坊被誉为“古徽三绝”,数量众多,风格独特,文化内涵博大精深,代表了中国民间建筑艺术的最高水平。应该说,徽派建筑乃至徽州地域文化的形成,都不是孤立的,而是在长期对外交流、不断博取众长的基础上,精心打造出来的。徽派建筑在成型的过程中,深受地理环境和人文观念的影响,而作

为设计和实施者的徽州工匠所起的作用也十分重要,正是他们“走南闯北”,带回了各地的文化精华和建筑技艺,才使徽派建筑成为独领风骚、独树一帜的中国民间建筑艺术的集大成者。

参考文献:

- [1] 缪华健,胡上序. 中位数高保真数字滤波算法[J]. 高等学校化学学报,1995,16(7):1 020-1 023.
- [2] 任克强,刘晖. 微机控制系统的数字滤波算法[J]. 现代电子技术,2003,(3):15-18.
- [3] 王庆河,王庆山. 数据处理中的几种常用数字滤波算法[J]. 计量技术,2003,(4):53-54.
- [4] 汪忠士,刘利,陈明,等. 两种滤波算法在液压数据采集系统中的应用与研究[J]. 计量技术,2005,(1):103-104.
- [5] 丁玉美,高西全. 数字信号处理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1994.
- [6] 胡上序. 观测数据的分析与处理[M]. 杭州:浙江大学出版社,1996.
- [7] 周跃峰,杨莉,姚燕南. 数据采集中虚假点的识别与纠正方法[J]. 自动化仪表,1999,20(9):12-13.

为设计和实施者的徽州工匠所起的作用也十分重要,正是他们“走南闯北”,带回了各地的文化精华和建筑技艺,才使徽派建筑成为独领风骚、独树一帜的中国民间建筑艺术的集大成者。

参考文献:

- [1] 陈伟. 徽州乡土建筑 and 传统聚落的形成、发展与演变[J]. 华中建筑,2000,18(3):126-127;18(4):123-125.
- [2] 朱永春. 徽州建筑单体形态构成研究[J]. 合肥工业大学学报(社科版),2001,15(1):76-81.
- [3] 胡善凤. 徽州古建筑的风水文化解析[J]. 中国矿业大学学报,2002,(3):155-160.
- [4] 朱永春. 宋元徽州建筑研究——兼论徽州建筑的起源[J]. 小城镇建设,2001,(9):42-45.
- [5] 余治淮. 桃花源里人家[M]. 合肥:黄山书社,2000.