

# 仅用结构响应数据识别系统模态参数的方法研究

霍兵勇<sup>1,2</sup>, 易伟建<sup>1</sup>

(1.湖南大学土木工程学院,长沙 410082; 2.许昌学院土木工程学院,河南许昌 461000)

**[摘要]** 随着实验模态分析方法的广泛应用和不断发展,在工程应用中,研究者希望能减少限制条件,增加分析的可靠性。本文发展一种识别系统模态参数的新方法,本方法无需知道系统的输入信息且不用建立系统模型,仅通过对测试记录的响应信号进行频谱分析即可识别系统的模态参数,依据系统中各响应点的信号,先采用离散反卷积方法从各响应点信号中分离出谐波参数作为初步的识别结果,在此基础上,结合频域空间曲线拟合的方法修正识别结果中受频谱混叠影响而偏差较大的谐波参数,再联合这些已提取的谐波参数得到系统的模态参数。通过对实际结构测试数据的分析,证明本方法只用输出数据识别的模态参数与模态分析软件用传递函数识别的结果一致。

**[关键词]** 仅有输出响应;系统模态参数识别;空间曲线拟合;频谱混叠

**[中图分类号]** TN911.72, TU317.5 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2015)01-0151-10

## 1 前言

对结构进行动力测试时,重大结构往往无法获知激励信息,这种情况下,仅用响应数据识别系统模态参数在工程应用中有重要意义,本文介绍一套此类问题的处理方案。

实验模态方法(EMA)是一种重要的结构动力性能分析方法<sup>[1]</sup>,在多个行业(机械、航空航天和土木等)已得到普遍应用,从测量数据中获取的动力性能参数被公认为是接近于结构实际性能的<sup>[2]</sup>。利用未知激励下(风、交通及环境激励等)的振动信号对结构进行健康监控是当前和未来研究的趋势<sup>[3]</sup>,只用系统的响应数据识别系统的模态参数的研究也越来越受到广泛关注<sup>[4-8]</sup>,但在已有的识别方法中往往依赖于系统的假设模型,进而在经典理论(频响函数<sup>[3,4]</sup>,多自由度系统<sup>[6,9]</sup>,连续弹性体系理论<sup>[8]</sup>)的基础上进行推导得到模态参数的表达式,依靠事先假设的系统模型可能会给计算结果带来不确定

因素,也常常不完全符合实验数据的验证<sup>[10]</sup>。无任何假设模型且仅依赖测试数据的参数识别方法应用于大型工程结构中将更加适当<sup>[11]</sup>。这就需要直接对动力测试的响应数据进行数字信号处理,然后估计出分析结构的模态参数,也有研究者尝试这方面工作<sup>[12]</sup>。

一般情况下,系统一点响应的数字信号中包含多个谐波成分,谐波参数包括频率、初相位、振幅和阻尼比。识别谐波的频率和初相位相对容易,即使在某些小波变换方法识别谐波参数的研究中,仍然可用傅里叶频谱分析识别频率<sup>[13]</sup>,对信号频谱中谱峰较独立的情况,直接拾取峰值来确定频率即可,工程应用中还常会遇到模态密集的情况,谱峰拾取方法并不可靠,因此需要寻求其他方法,比如用频域曲线拟合和多自由度多项式近似的办法<sup>[14]</sup>。

本文先用离散反卷积方法得到系统所有响应点的信号中所包含谐波成分的谐波参数作为初步识别结果,再对识别结果中受频谱混叠影响而偏差

**[收稿日期]** 2013-10-14

**[作者简介]** 霍兵勇,1979年出生,男,河北邢台市人,博士研究生,主要从事结构健康监测研究;E-mail:huo@hnu.edu.cn

较大的谐波参数做进一步修正,参考初步参数识别值,在待修正参数一定范围内设定这些参数的取值区间和步长,依次把这些参数值带入假设表达式中生成理论数字信号,找到其与实验测试信号在同一频段区间上的频域复数序列之差的模的总和最小的一组参数组合,确定为最优谐波参数,最后联合这些结果得到系统的模态参数。分析过程中采用了对实际结构动力测试的数据,被测试构件是两端简支的钢筋混凝土组合梁,用一次脉冲锤击激励条件下得到的包括两端支座在内的11个响应点的加速度响应信号和传递函数。本方法只用输出数据识别的模态参数与模态分析软件用传递函数识别的结果一致。

## 2 系统各响应点信号的频谱分析

若要仅用响应数据识别系统的模态参数,先要得到真实响应数据作为分析对象,然后按步骤展开讨论,找出分析过程中遇到的问题,再逐步解决。

本研究中的测试构件叫做U形钢板-混凝土组合梁,是从U形钢板-混凝土高强螺栓连接组合空腹夹层板楼盖<sup>[15]</sup>结构中分离出来的一条板带,组合梁两端简支,支撑长度7 800 mm,梁高270 mm,下肋和上肋高度均为100 mm,中间有70 mm高的空腹,U形钢板-混凝土组合梁见图1,施工简图见图2。

图2。动力测试中信号采集设备选择迪飞(Data Physics)公司的动态信号分析仪SignalCalc DP730,力锤是PCB公司制造的模态力锤,型号为086D20;加速度传感器为东华IEPE压电式加速度传感器,型号为DH105E。在梁上从一端到另一端按顺序均匀布置11只加速度传感器,动力测试平面布置见图3,通过脉冲锤击激励其中一点,依次得到加速度响应信号a1到a11(包括两端支座在内共11个响应信号),测试中采集信号长度和数据点数分别为4 s和65 536点,为显示信号的更多细节,图4中列出11个响应点1 s内的时域加速度响应信号,图5是加速度响应信号对应频谱s1到s11。从图5中的频谱来看,系统存在5个明显的谐波成分,频率分别是9.25 Hz、26.5 Hz、30 Hz、52 Hz和74.5 Hz。



图1 U形钢板-混凝土组合梁

Fig. 1 U-shaped steel plate-concrete composite beam

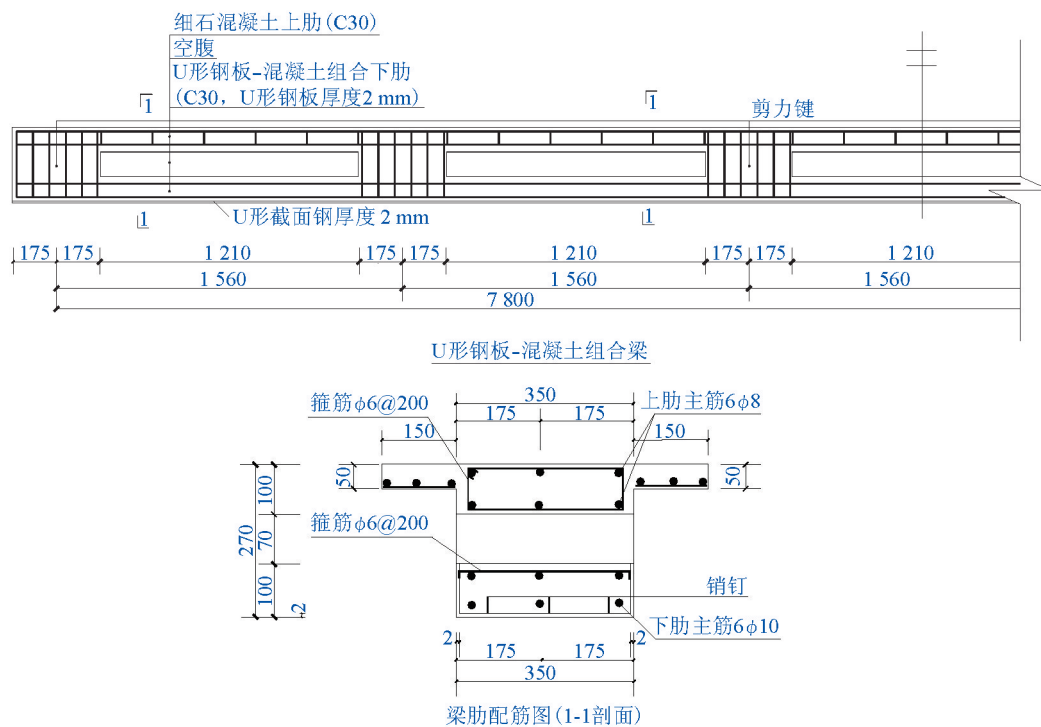


图2 U形钢板-混凝土组合梁施工图(单位:mm)

Fig. 2 Constructional drawing of U-shaped steel plate-concrete composite beam (unit: mm)

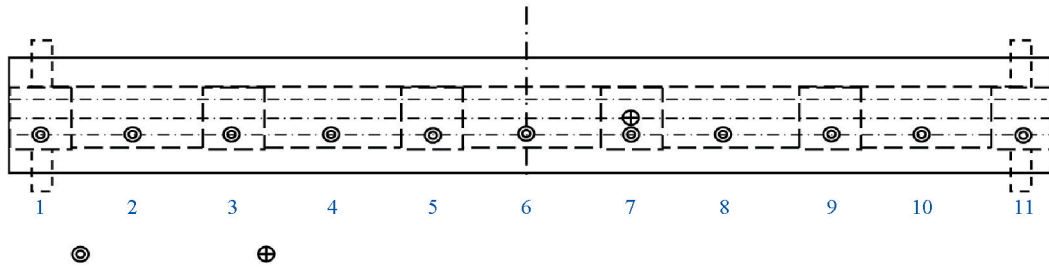


图3 动力测试平面布置图  
Fig. 3 Plan of dynamic test

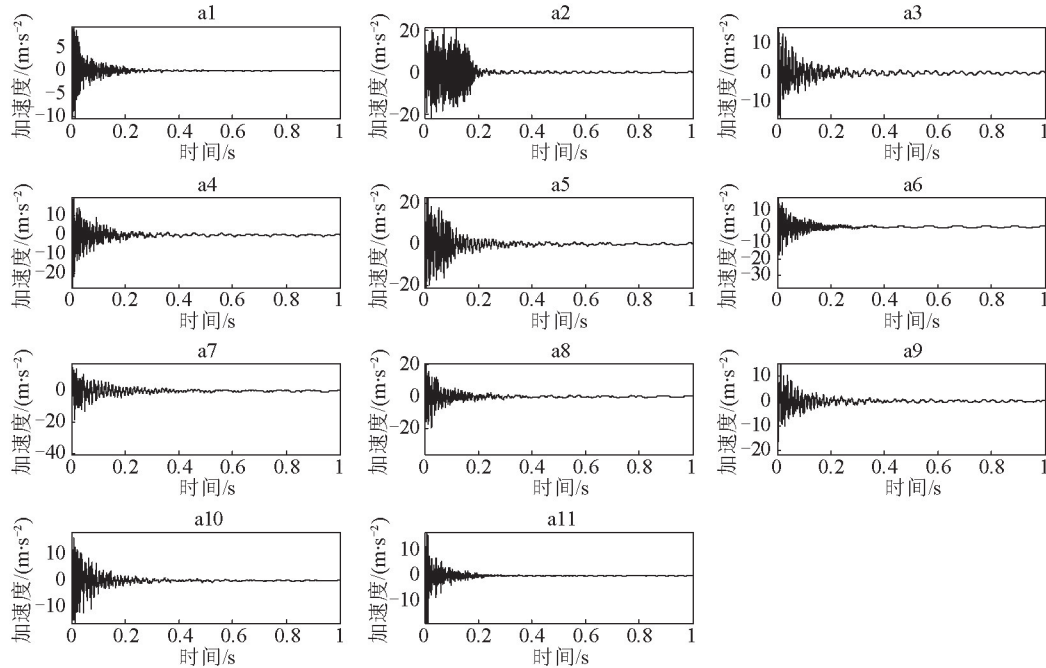


图4 简支梁一次脉冲锤击激励下11点时域加速度响应信号(1 s)  
Fig. 4 Eleven responses of a simply supported beam subjected to impulse excitation (1 s)

在支座附近高频信号中出现峰值密集频谱,从整体上判断这种情况下的密集频谱可能是由于结构与支座的相互作用而产生,最明显的是在响应点11(见图5 s11),在74.5 Hz附近出现了明显的密集频率成分(频率:76.75 Hz),但支座以外的其他响应点则没有该频率谐波,因此不是结构固有频率。在26.5 Hz附近也有类似情况,虽然在跨内响应点6~10有明显谱峰,但是在响应点2~5谱峰很不明显。采用本文介绍的信号处理方法识别模态参数过程中,暂时不分析这两个频率谐波。

在跨中附近,一阶振型的幅值最大,而二阶振型幅值接近于0,这个位置对于基频参数识别最有利;由响应点8信号的频谱可以发现(见图5, s8),正好在52 Hz对应模态振型的节点附近,这种情况对与其相邻的另外两个频率参数识别比较有利;一般

来说有利情况下识别的参数相对较可靠,而节点附近识别的参数偏差较大。这种一般性规律在下面的参数识别值中也会得到证实。

### 3 离散反卷积方法识别系统参数

各响应信号中谐波的频率 $f$ (Hz)和初相位 $\theta$ (degrees)采用细化频谱分析方法得到,用离散反卷积方法识别得到谐波振幅变化的时域序列,再依据识别的时域序列按指数衰减衡量谐波衰减程度,得到谐波的振幅和阻尼比。

为确定各频率谐波的有效信号长度,先任意设定信号分段数再调整这一数值,最后选择合适的分段数,把信号a3分成4段,对每段信号进行离散傅里叶变换(DFT),依次得到频谱part1、part2、part3和part4,如图6所示。

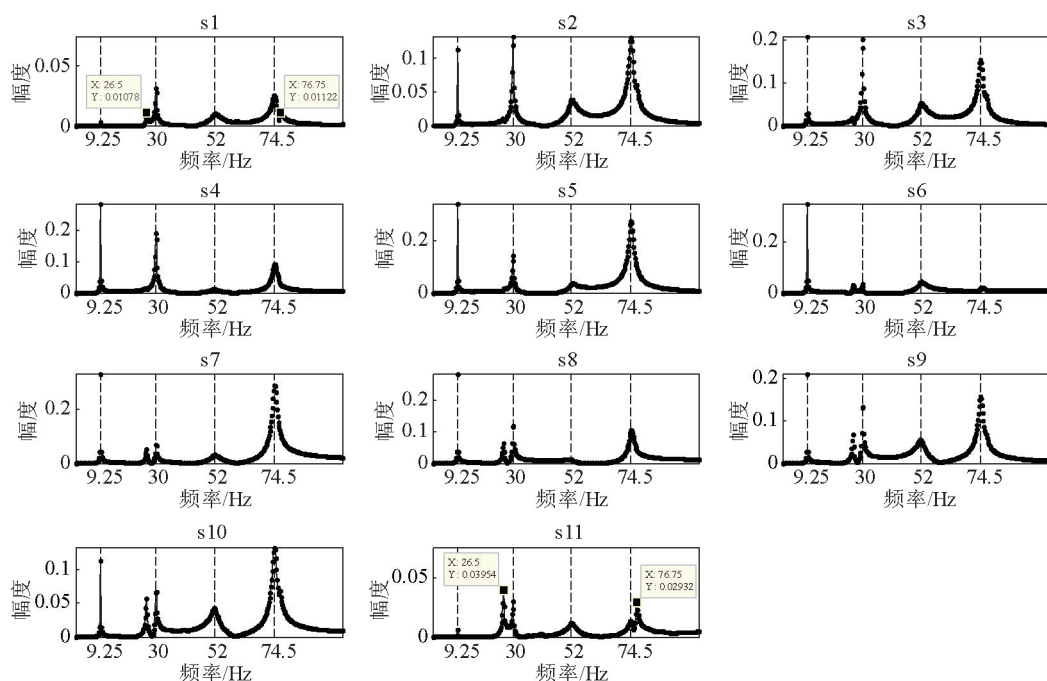


图5 对应加速度响应信号的频谱

Fig. 5 Spectrums of the acceleration responses correspondingly

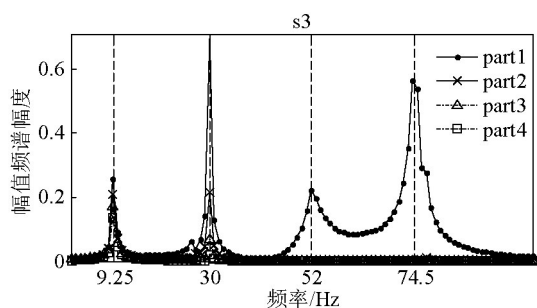


图6 信号a3分4段分别DFT得到的频谱

Fig. 6 Spectrums acquired by means of DFT using four segments that signal a3 is divided into

确定信号中4个明显谐波成分的频率分别是9.25 Hz、30 Hz、52 Hz和74.5 Hz,由各段信号的频谱中各频率谐波幅值明显与否确定4个谐波信号的有效长度分别为4 s、2 s、1 s和1 s。以上各值确定后,就可以计算得到4个频率对应的全部模态参数,图7是从11个响应信号中识别的对应4个频率的全部模态参数,每行对应一个频率的模态参数(频率、初相位、阻尼比和振型),每阶模态阻尼比和振型有两个识别结果,是采用频域序列峰值两边的频域值分

别计算得到。

图7中直接给出了识别得到的模态参数结果,是通过联合各响应点相同频率谐波的参数得到的,具体联合谐波参数得到模态参数的过程再做以下说明:第一,用细化频谱谱峰直接确定谐波频率和初相位;第二,用离散反卷积方法可以识别得到谐波振幅变化的时域序列,然后再以指数衰减模型拟合这个时域序列,得到振幅和阻尼比,理论上各响应点同频率谐波的阻尼比和频率相等,直接显示在图中,振型是依据初相位和振幅一起确定的曲线,每个响应点在其平衡位置附近做简谐振动,一个周期内相位的变化区间为 $[0, 360^\circ)$ ,由初相位可以确定振幅在振动路线上的位置,幅度和位置共同确定出振型。

离散反卷积方法识别得到的是各频率谐波的振幅随时间变化的时域序列,可以称之为阻尼序列,因这些时域序列正是反映了谐波振幅的衰减过程,图8列出了9.25 Hz和30 Hz两个频率谐波的阻尼时域序列。

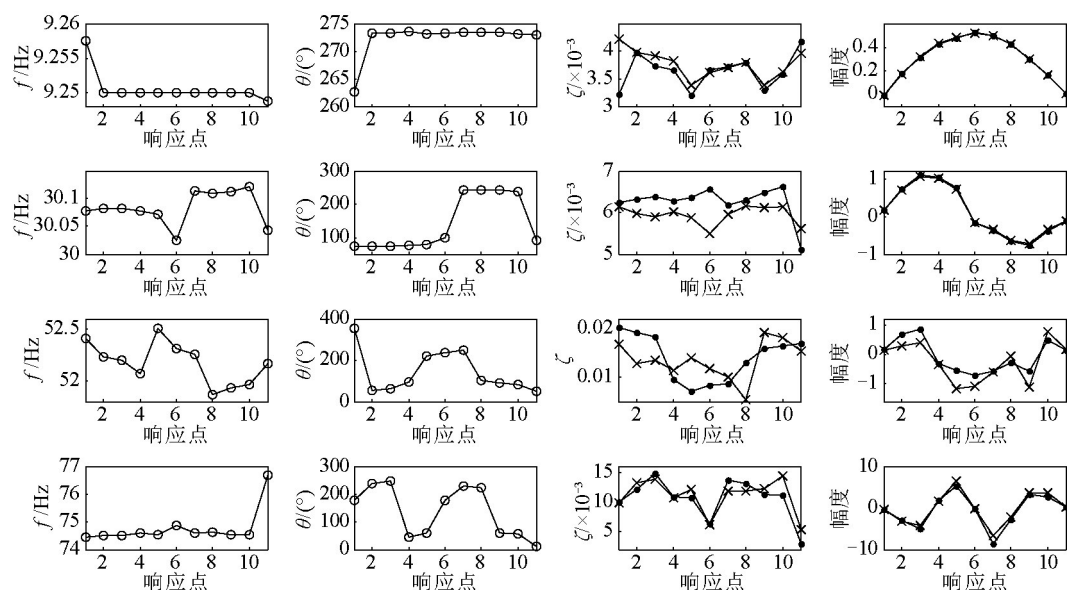


图7 从11个响应信号中识别的对应4个频率的模态参数(频率,初相位,阻尼比和振型)

Fig. 7 Modal parameters (frequency, initial phase, damp ratio and modal shape) obtained from 11 responses

#### 4 对初步识别结果可靠性的判断

通过以上分析计算,得到了系统的模态参数,为判断这些初步识别结果的可靠性,下面列出三方面的特征作为依据。

1)对系统某一确定频率的模态参数,理论上各响应点的识别值符合如下特征:频率完全相同;初相位相等或相差 $180^\circ$ ;阻尼比相等;振型大致符合正弦形状,模态增加一阶,振型的节点增加一个。

2)独立频率信号的频谱有以下特征:从谱峰频率向频域坐标两侧的频谱幅度单调减小到零,谱峰两侧的幅值频谱大致对称。如果符合独立频率信号的频谱特征,说明该频率频谱受周围频谱混叠影响较小,参数识别相对容易,识别的参数也有较高可靠性;如果不符合独立频率信号的频谱特征,比如两个谱峰之间的频谱幅度还未减小到零就连在一起,则参数识别难度增加,参数的误差也明显增大。

3)阻尼序列是谐波振幅变化趋势的时域序列,可作为阻尼比和振幅的识别值可靠与否的参照。若阻尼序列与按假设阻尼模型拟合的曲线比较吻合,说明识别的参数较可靠,若两者的曲线有较大差异,则需要做一定修正,同时也预示系统动力特性较复杂。

依据各响应点的模态参数、频谱及识别的阻尼序列的特征对初步结果进行推断,找出异常的参数

值,然后逐一修正。

一阶模态参数中的频率和初相位,除两个支座处的识别值偏差较大以外,梁跨内的值与理论特征相符,说明识别数据较可靠,简支梁在振动过程中与边界有相互作用,从而在支座处的响应受到外界扰动最大,此处响应信号中识别的参数有一定幅度的偏差是正常现象;各响应点的频谱符合独立频率信号的频谱特征;各响应点的阻尼比有一定波动,其中响应点6(见图5中s6)对参数识别最有利,而且识别的阻尼序列也与指数衰减曲线吻合较好,此响应点识别的参数的可靠性最高,其他响应点的阻尼序列与指数衰减曲线的差异较大,见图8a,比如点2中阻尼序列前端幅值明显大于指数衰减曲线,说明该点的振动在开始时振幅有短暂的快速衰减,而后的更长的时间内衰减速度慢于开始的衰减速度,点5和点9中衰减序列的振幅先有短暂的增加后再单调衰减。可以判定一阶模态参数中,需要修正阻尼序列的拟合区间。

二阶模态参数中各响应点的频率有一定波动,波动最大的两个值,其一是点6因其接近该振型的节点,频谱幅值较小,另一个点在支座处,点2~点5的频率更加接近且整体上略小于点7~点10这4个较接近的值,从频谱中可以发现,点7~点10受周围频谱的影响较大,同时初相位、阻尼比和振型都受到一定影响,但各响应点的参数波动范围并不大;从识别的阻尼序列来看,点2~点5与指数衰减模型

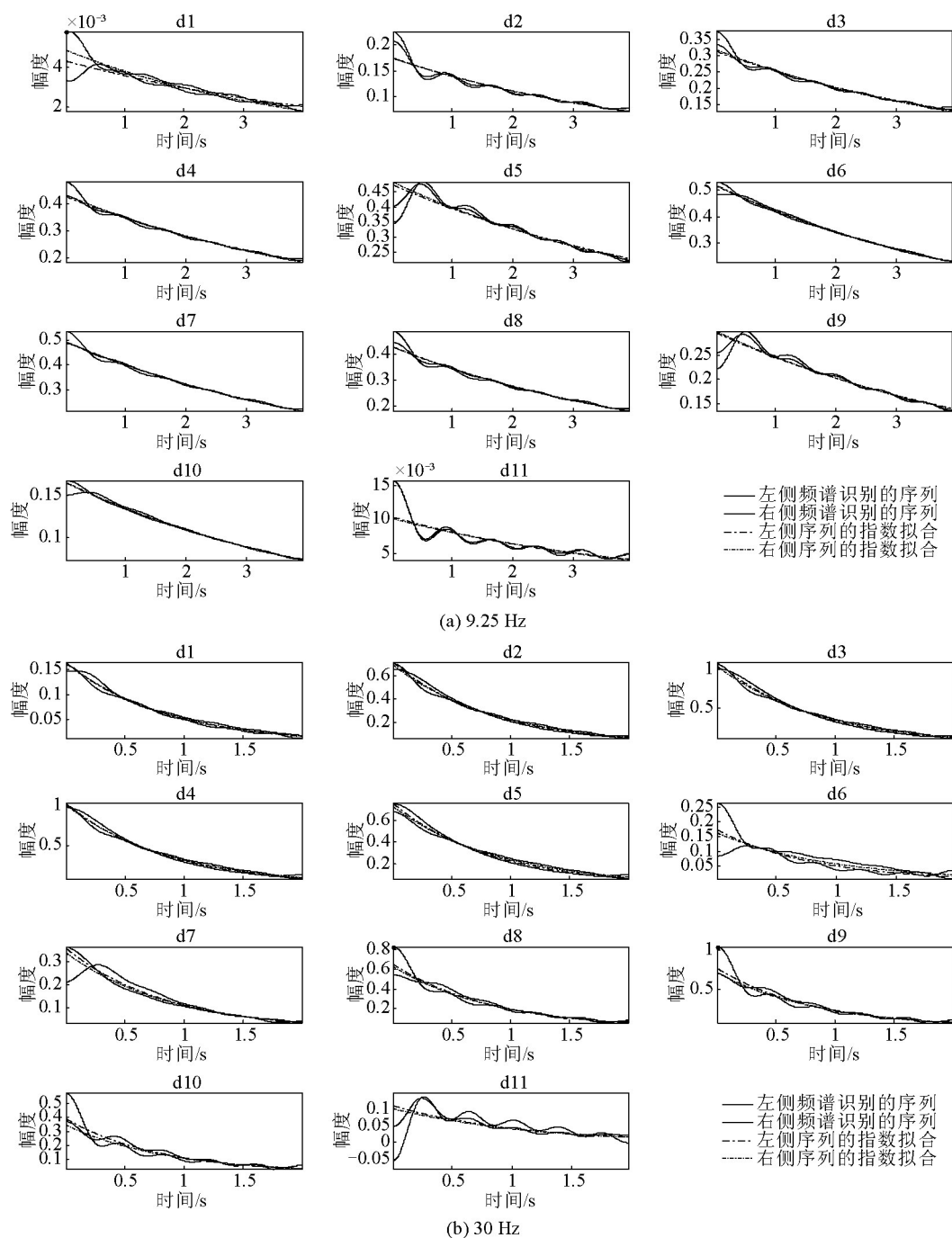


图8 9.25 Hz和30 Hz两个频率在各响应点识别的阻尼时域序列

Fig. 8 Identification of decay sequences correspond to two frequencies 9.25 Hz and 30 Hz

吻合较好,识别值可靠性较高,点7~点10中采用谱峰两侧频域序列识别的阻尼序列有一定差异,依据独立频率信号的频谱特征判断,需要在点9和点10修正混叠频谱的干扰。

对以上两阶模态参数的分析中,包含了全部的修正情况,对介绍参数识别方法已经足够,不再重复判断其他的参数。

## 5 对初步结果的改进

对初步识别结果可靠性进行判断后,得出需要修正的参数有以下两类:一是重新选择阻尼序列的拟合区间;二是受频谱混叠影响较大的参数,或者说是频谱密集区域的谐波参数。

对识别可靠的阻尼序列,且与指数衰减规律有

一定差异的谐波衰减过程,采取截取识别序列的单调衰减部分重新做指数拟合。对图8 a中d5、d6、d9和d10做修正拟合得到新的振幅和阻尼比,图9显示为对图5 a中d5的重新拟合,修正后的阻尼比与其他响应点得到的可靠阻尼比完全相等,修正各点振幅后得到新的振型见图10a。对于结构中的某些响应点中谐波振幅变化出现与指数衰减模型差异较明显的现象,这是结构振动特性本身较复杂的缘故,说明系统的自由衰减响应不完全符合理论上的假设。

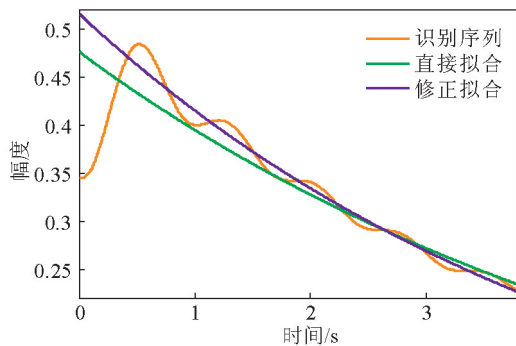


图9 响应点5的基谐波阻尼序列的修正拟合  
Fig. 9 Fitting correction of decay sequence of fundamental frequency for a5

对频谱存在明显混叠的频域序列,整体考虑混叠区段的频谱,并参考对参数识别比较有利的响应点的识别值设定待定谐波参数范围和步长,循环搜索确定最优谐波参数值,即以频率为 $z$ 轴,频域序列实部和虚部分别为 $x$ 轴和 $y$ 轴,这样频域序列就可用空间曲线表示,把设定的各谐波参数的循环值逐一代入式(1)生成理论数字信号,能够使理论信号和实验信号的细化频谱在频谱混叠区段上最接近的一组谐波参数组合值即为最优谐波参数,频域曲线最接近的原则:在同一频域区间上,两频域复序列之差的模的总和为最小。

$$y(t) = \sum_{j=1}^n e^{-\zeta_j 2\pi f_j t} A_j \cos(2\pi f_j \sqrt{1-\zeta_j^2} t + \theta_j) \quad (1)$$

式(1)中, $f_j$ 为循环频率; $A_j$ 为振幅; $\theta_j$ 为初相位; $\zeta_j$ 为阻尼比。

支座的数据各谐波谐噪比较小,而且不是完全的自由响应(和支座之间有相互作用),因此支座处的谐波振幅直接用0做修正值与各响应点的振幅组成完整振型,修正后的各频率模态振型见图10。因对修正参数的判断难免出现人为差错,有些参数修正前后在数值上变化并不大,但上述判断得出需要修正的参数是一个较大的范围,这样对保证结果可靠性方面有利,只是增加了一些计算量。

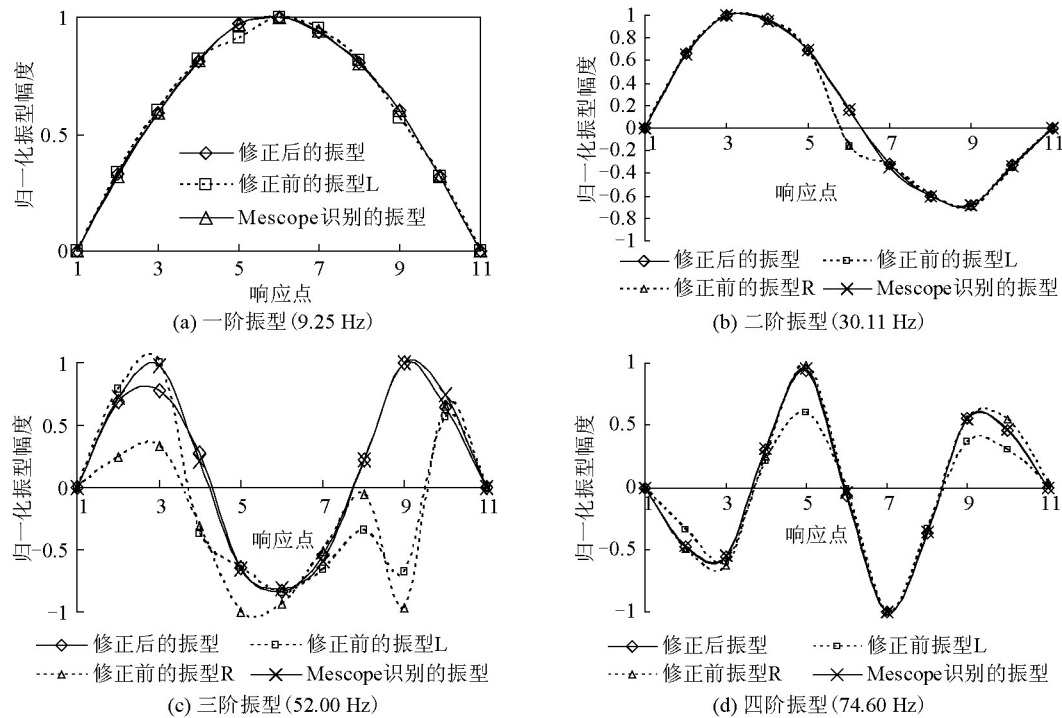


图10 修正前后的振型和 Mescope 识别的振型

Fig. 10 Compare of mode shapes before and after modification with that obtained by Mescope

本次测试的响应结果是用冲击力锤激励得到,同时记录下各点响应对应的传递函数,用模态分析软件 Mescope v5.1 分析传递函数得到各频率谐波对应的振型见图 10,除第三阶振型(对应频率 52 Hz)局部有差异外,其他几乎完全重合,图 10 中为了比较振型的形状,已把振型归一化处理。各响应点识

别的初相位和阻尼比中,第三阶模态与理论特征相差稍大,初相位相差( $0^\circ \pm 10^\circ$ )或( $180^\circ \pm 10^\circ$ ),阻尼比取平均值见表 1,阻尼比最大偏差相对于平均值约有 10% 的波动。其他三个频率对应的模态参数的识别值符合理论特征,两种方法估计的频率和阻尼比基本一致,结果列于表 1。

表 1 初相位和阻尼比估计值比较

Table 1 Estimates of frequency and damp ratio by the method presented and Mescope

	$f_1$	$\zeta_1$	$f_2$	$\zeta_2$	$f_3$	$\zeta_3$	$f_4$	$\zeta_4$
本文方法	9.25	0.003 5	30.11	0.006 2	52.00	0.025	74.60	0.012 0
Mescope 方法	9.25	0.003 7	30.10	0.006 1	52.00	0.027 6	74.50	0.011 8

对从实验数据中识别的模态参数的准确性,通过把识别的参数代入式(1)得到的理论信号和实验信号在对应频域坐标上的空间曲线进行比较来检验,图 11 是响应点 3 的一段频域区间上的两条细化频谱曲线,系统模态参数识别值得到的理论信号与实验信号的频域空间曲线吻合,证明本文介绍方法得到的参数识别值可靠。另外还有部分频域空间曲线理论结果和实验数据在某段频域坐标上不及图 11 中的吻合程度好,是结构本身复杂性所致,最终结果已是频域空间曲线的最优拟合。

8~点 10 的初相位值都在  $50^\circ$  和  $100^\circ$  之间,初相位的循环区间可选为  $[50, 100]$ ,步长定为 5 度,阻尼比参照频谱峰值较大的几个响应点 2、3、9、10 的识别值,循环范围选择  $[0.01, 0.02]$ ,步长定为 0.001,幅值选择初步识别幅值的 0.8 倍和 1.2 倍作为循环范围的两个边界,步长为 0.05。对两个频率频谱混叠的频域区段,先确定谱峰较大的谐波参数,然后确定谱峰较小的谐波参数,而且拟合谱峰较小的谐波时,循序参数虽为两个频率成分的 8 个参数,但选择拟合区间时,只选择该频率单个谱峰附近的频域区间,这样可以减小来自较大谱峰的泄露频谱对较小谱峰的冲击,提高参数识别精度。

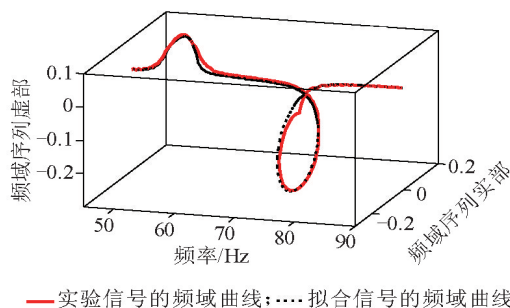


图 11 参数估计值生成的理论信号和实验信号的频域空间曲线比较

Fig. 11 Compare the frequency domain space curve of real data with that of signal generated by the parameters of identification

频域曲线拟合方法识别谐波参数,可以适应于独立频谱和密集频谱,还可以检验模态参数估计的准确程度,但需要对阻尼模型进行假设,另外拟合方法一般总会得到一组参数估计结果,计算过程中若参数设定范围和拟合频率区间选择不当可能会给识别结果的准确性带来一定影响,因此通过比较频域空间曲线的相符情况检验识别的模态参数是必要的,如果相差较大,可以改变设定参数的取值范围重新计算和检验,比如上面对响应点 3 阻尼比循环范围做了重新选择,最后确定为 0.025。

对于密集频谱中待定谐波参数范围和步长如何确定的问题,一般来说在多个响应点中,总能找到较可靠的识别值,参考这些值,再选择一个适当的范围即可,若无从判断,也可选择一个较大的范围,比如三阶模态(52.00 Hz)中响应点 3,频率选择循环区间  $[51, 52.5]$ ,步长选择 0.1 Hz,点 2~点 4 和点

另外,前面没有分析 26.5 Hz 对应的模态,若要选择该频率进行分析,得到振型如图 12 所示,很显然与 30 Hz 频率对应的模态是重复模态,产生的原因是系统与边界之间有相互作用,可从以下几点分辨:a. 从信号频谱来看,该频率成分的谱峰在支座处较明显,在梁的跨内只有部分响应点有明显谱峰;b. 分析此频率对应的振型,形状上与二阶模态相似。重复模态有更明显的特点:有一半的响应点



的幅度明显小于另一半的幅度,支座处的幅度较大。分析过程中不选择这个频率,在此只附带简单说明重复模态问题,对于系统的动力性能不再深入讨论。

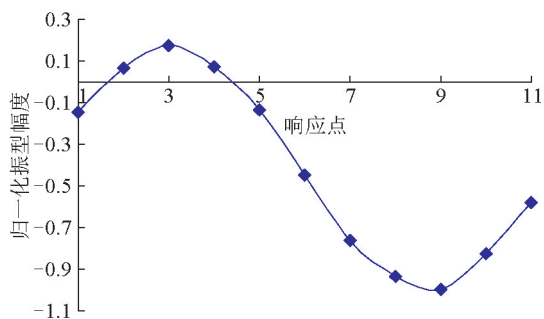


图12 26.5 Hz对应的模态

Fig. 12 Mode shape for frequency 26.5 Hz

## 6 结语

本文通过对真实结构动力测试的响应信号的分析,发展了一种仅用系统响应数据识别系统模态参数的方法。本方法在具体计算过程中,使用测试的响应信号,通过细化频谱分析得到各频率谐波的频率和初相位,进而采用离散反卷积方法得到阻尼比和振型,作为模态参数初步结果,对初步结果的可靠性,依据三方面的特征进行判断并找出需要修正的参数,文中分析的响应数据的初步识别结果中有两种修正情况:修正阻尼序列的拟合区间和修正混叠频谱的干扰。更多的修正情况还有待在具体实践中进一步探讨。

离散反卷积方法识别独立频率频谱的参数,可以客观地揭示结构的阻尼特性,对受混叠影响的频谱,离散反卷积方法的识别结果会出现不同程度的偏差,此时只能事先假设阻尼模型,设定参数范围和步长,带入理论公式生成理论信号,找到使理论信号与实验信号的频域曲线最吻合的一组谐波参数作为识别值,一般两个频率成分混叠的频谱中有8个参数,各参数无法确定在较小的范围内循环时,循环次数成倍增长,计算时间大大增加,应用中一定程度上会受到计算时间限制。对于混叠严重,而且幅值较小的情况,往往出现各响应点初相位相差大大超出 $0^\circ$ 或 $180^\circ$ 的情况,各响应点阻尼比也有明显差异,模态参数的估计值背离了理论上的期望,最终的参数识别值也无法达到其他谱峰较大的频率对应的模态参数的精确程度。当然,系统测试中

由于测试信号本身原因(比如频谱混叠、信噪比低、系统受到随机激励等)导致的识别结果不理想的现象,是绝大多数识别方法都会遇到的,此种情况往往要从识别方法和测试技术等多方面着手去解决问题。

用本文介绍的识别方法得到的模态参数与模态分析软件 Mescope 的分析结果在很大程度上一致,说明本方法仅用响应数据识别系统模态参数能得到满意结果。模态分析软件的集成化程度高,计算速度快,在传递函数测量方便的情况下被普遍采用,本方法分析灵活,需要对数字信号处理原理有一定了解,工程应用中,只要能测试系统的响应数据,即使系统正常运行,模型建立困难,输入激励未知等情况,也可以尝试应用。

## 参考文献

- [1] Mevel L, Benveniste A, Basseville M, et al. Input/output versus output-only data processing for structural identification—Application to in-flight data analysis [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 295(3-5): 531-552.
- [2] Lin R M, Lim M K. Modal analysis of close modes using perturbative sensitivity approach [J]. *Engineering Structures*, 1997, 19(6): 397-406.
- [3] Deraemaeker A, Reynders E, Roeck G D, et al. Vibration-based structural health monitoring using output-only measurements under changing environment [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2008, 22(1): 34-56.
- [4] Rainieri C, Fabbrocino G. Automated output-only dynamic identification of civil engineering structures [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2010, 24(3): 678-695.
- [5] Parlo E, Vanlanduit S, Guillaume P, et al. Increased reliability of reference-based damage identification techniques by using output-only data [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2004, 270(4-5): 813-832.
- [6] Porras J A, Sebastian J D, Casado C M, et al. Modal mass estimation from output-only data using oscillator assembly [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2012, 26: 15-23.
- [7] Spiridonakos M D, Poulimenos A G, Fassois S D. Output-only identification and dynamic analysis of time-varying mechanical structures under random excitation: A comparative assessment of parametric methods [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2010, 329(7): 768-785.
- [8] Lardies J, Minh-Ngi T. Modal parameter identification of stay cables from output-only measurements [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011, 25(1): 133-150.
- [9] Ling Xiaolin, Haldar A. Element level system identification with unknown input with rayleigh damping [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2004, 130(8): 877-885.
- [10] Sohn H, Farrar C R, Hemez F M. A review of structural health monitoring literature 1996—2001 [R]. New Mexico USA: Los Alamos National Laboratory Report, 2003.
- [11] Salawu O S. Detection of structural damage through changes in frequency: A review [J]. *Engineering Structures*, 1997, 19(9):

- 718–723.
- [12] Ruzzene M, Fasana A, Garibaldi L, et al. Natural frequencies and dampings identification using wavelet transform: Application to real data [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1997, 11(2): 207–218.
- [13] Slavic J, Simonovski I, Bboltežar M. Damping identification using a continuous wavelet transform: Application to real data [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 262(2): 291–307.
- [14] Avitabile P. Part 5: 101 ways to extract modal parameters—Which one is for me? [J]. *Experimental Techniques*, 2006, 30(5): 48–56.
- [15] 胡 岚, 马克俭. U形钢板-混凝土高强螺栓连接组合空腹夹层板楼盖结构研究与应用 [J]. *建筑结构学报*, 2012, 33(7): 61–69.

# Identification of system mode parameters using response measurement only

Huo Bingyong<sup>1,2</sup>, Yi Weijian<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. College of Civil Engineering, Xuchang University, Xuchang, Henan 461000, China)

**[Abstract]** With the broadest application and development of modal analysis method, the demands such as less restrictive conditions and to increase the reliability of an analysis have been increased for more convenience in engineering applications. This paper presents a new modal analysis method without input data and any analytical models. Harmonic parameters of a point response can be extracted by spectrum analysis using the measurements obtained from structural testing. Preliminary results calculated by discrete deconvolution techniques are further modified by the frequency domain space curve fitting method. Modal parameters of system just come from a combination of these corrected results. The performed analysis and validation of real data indicate that the approach is feasible for engineering. Therefore, this paper provides the effective estimation scheme of modal parameters for experiment research on the system dynamic performance.

**[Key words]** output-only response; identification of system mode parameters; space curve fitting; spectrum overlapping