文章编号:1001 - 4500(2006)06 - 0001 - 03

频域内利用载荷谱的特征进行识别

李少华[1],时忠民[2],刘玉军[3],龙述尧[1],丁 桦[4]

(1.湖南大学,长沙 410082;2.中海石油研究中心,北京 100027;
3 中海石油(中国)有限公司深圳分公司,深圳 518067;4 中国科学院力学研究所,北京 100080)

摘 要:介绍了在频域内对载荷谱识别的方法,根据载荷谱的形状特征,采用对频率ω的矩的方法来求解反问题。理论计算算例表明,该方法具有较高的精度。

关键词:载荷识别;频域;矩

中图分类号:P75 **文献标识码**:A

海洋平台波浪载荷的确定是平台设计中的关键因素之一,目前我国设计规范中采用的大都是国外的设计参数,而不同的海域有不同的参数,因此要提高我国平台设计水平,须选取合适的参数,直接测量这些参数比较困难,可通过结构响应来反演或识别。这类问题在实际中大量存在,比如:桥梁的车辆载荷、建筑物受到的地震激励等,这些载荷通常无法真接测量或者测量比较困难,必须采用载荷识别的方法来进行载荷的确定。常规的载荷识别方法是将荷载假定为确定性的,用测量的响应数据来识别载荷[1]。载荷识别是结构动力学的反问题,主要有频域法和时域法两种。其中频域法提出较早,主要利用激励和响应间频响函数的求逆实现,识别原理简单直观,便于应用。时域法近年来发展较快,主要利用阶跃力假设的积分方法。对于载荷识别问题,由于识别过程的复杂性,各种因素,例如结构系统的自身特性、频率域、响应测量精度、测点位置数量、甚至激励特性等等,都对识别效果有很大影响[2,3]。一般频域内载荷识别用频响函数矩阵求逆法时,在自振频率附近频响函数矩阵会出现病态,影响识别结果的精度[4],本文在频域内根据载荷谱的特征构造对频率 ω 的矩的方法来进行载荷谱的识别,则避免了这种情况,其结果在一定程度上减小了识别的误差。

1 方法构造

结构在动态载荷作用下其运动方程可由方程描述为:

$$M\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) = F(t) \tag{1}$$

其中 M,C,K 分别为结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵,均为 $n\times n$ 矩阵;$F(t)$ 为载荷列阵。通过傅里叶变换上述方程变为

$$(-\omega^2 M + j\omega C + K)X(\omega) = F(\omega) \tag{2}$$

载荷识别问题是指在已知结构响应(位移、速度、加速度、应变等)的情况下,求得造成该结构响应所受的载荷。

为表述方便,以在一个自由度方向上施加载荷为例来说明方法。若在第一个自由度方向加一载荷 $F(t)$(具体大小未知,但其载荷谱 $F(\omega)$ 的形式已知),M、C、K 均可求得,若能测得其中任意一个自由度的位移例如 $X_2(t)$(测得自由度的数目应大于或等于识别载荷的数目),则可求得载荷 $F(t)$,具体求解过程如下:

把 $X_2(t)$,$F(t)$ 进行傅里叶变换得 $X_2(\omega)$,$F(\omega)$,则$(-\omega^2M + j\omega C + K)$ 可表示为$\begin{bmatrix} a_{11} & b \\ c & d \end{bmatrix}$,其中 a_{11} 为标量;b 为行向量;c 为列向量;d 为对应的矩阵,它们均为 ω 的函数,则(2)式可表示为:

收稿日期:2006-05-22
作者简介:李少华(1980～),男,博士生。研究方向为海洋平台载荷反演。

$$\begin{bmatrix} a_{11} & b \\ c & d \end{bmatrix}_{n\times n} \begin{Bmatrix} X_1(\omega) \\ X_2(\omega) \\ \cdots \end{Bmatrix}_{n\times 1} = \begin{Bmatrix} f(\omega) \\ 0 \end{Bmatrix}_{n\times 1} \tag{3}$$

把 $X_2(\omega)$ 作为已知量,解方程组

$$[c \quad d]_{(n-1)\times n} \begin{Bmatrix} X_1(\omega) \\ X_2(\omega) \\ \cdots \end{Bmatrix}_{n\times 1} = \{0\} \tag{4}$$

(4) 式可变换为 $A_{(n-1)\times(n-1)} X^{w}_{(n-1)\times 1} = B_{(n-1)\times 1} X_2$ (5)

式中 $X^{w}_{(n-1)\times 1}$ 为待求位移向量(若测得位移的数目为 $m(m > 1)$ 个, (5) 式可变为: $A_{(n-1)\times(n-m)} X^{w}_{(n-m)\times 1} = B_{(n-1)\times m} X^{y}_{m\times 1}$,式中 $X^{y}_{m\times 1}$ 为测得位移向量,要求得 $X^{w}_{(n-m)\times 1}$ 需对 $A_{(n-1)\times(n-m)}$ 求广义逆),求解方程组(5) 得出未知位移,则可得

$$[a_{11} \quad b] \begin{Bmatrix} X_1(\omega) \\ X_2(\omega) \\ \cdots \end{Bmatrix}_{n\times 1} = f(\omega) \tag{6}$$

(6) 式给出的结果在结构固有频率邻近会有很大的误差,但在很多反问题中,载荷谱存在一定的模式,反演这些模式的特征参数并不需要直接求出结构固有频率邻近的值,可以通过其它方式来建立反演模型,例如利用矩特征。这里介绍利用矩特征来进行反演的方法。

根据(6) 式对等式两边取矩可得:

$$\int [a_{11} \quad b] \begin{Bmatrix} X_1(\omega) \\ X_2(\omega) \\ \cdots \end{Bmatrix}_{n\times 1} \mathrm{d}\omega = \int f(\omega)\,\mathrm{d}\omega$$

$$\int \omega [a_{11} \quad b] \begin{Bmatrix} X_1(\omega) \\ X_2(\omega) \\ \cdots \end{Bmatrix}_{n\times 1} \mathrm{d}\omega = \int \omega f(\omega)\,\mathrm{d}\omega$$

……

可根据载荷谱的形状特征,来确定取 ω 的几阶矩,然后联立方程组解得 $f(\omega)$ 的特征值,积分区间为测量时的频率区间,把 $f(\omega)$ 进行傅里叶逆变换可得 $F(t)$。

当然也可以对 $f(\omega)$ 进行特征提取如滤波等,建立对应的反演方法,利用综合信息避免由于在结构自振频率邻近求解带来的误差。

2　算例

如图 1 所示两层框架在第一层加一水平作用力 F。长度 a 均为 6, 梁的截面面积为 0.4×0.4,惯性矩为 $0.064/3$,弹性模量为 1.2×10^9,泊松比为 0.3,密度为 7800(单位一致,不考虑阻尼)。已知载荷谱的形式如图 2 所示,确定 l, m, n 值。

利用 ANSYS 建模给出质量矩阵 M(精确值) 和刚度矩阵 K_0(近似值),在 1 节点处施加一载荷谱(如图 2: $l = 3000, m = 1, n = 7$),利用 M 和 K_0 求得第二个节点处的水平位移 $X_2(\omega)$ 作为测量值。

反演过程:求 K_0 对应的精确值 K,然后去掉 M 和 K 中第一行的元素得 M_1 和 K_1,把 X_2(由于刚度矩阵为近似解,故 X_2 也为近似值,即产生了误差) 的值代入方程(4) 中求解各节点其它方向的位移,然后再把 $K - \omega^2 M$ 中第一行的元素与 $X(\omega)$ 中相应的位移值相乘即得所要求的载荷 $F(\omega)$,即 $(K - \omega^2 M)_1 X(\omega) = f(\omega)$,下标 1 表示取括号内矩阵中的第一行元素,把上式的左端分别对频率 ω 积分和取 ω 的一阶矩得:

$$\int_0^{n\times 2\pi} (K - \omega^2 M)_1 X(\omega)\,\mathrm{d}\omega = \frac{1}{2}(m + n) b \times 2\pi$$

$$\int_0^{n\times 2\pi}\omega(K-\omega^2 M)_1 X(\omega)\,\mathrm{d}\omega=\frac{b^2}{6}(m^2+n^2+mn)\times(2\pi)$$

由于只是理论计算,则可由位移变为 0 处的频率来确定 n 值为 7(若没有算得位移为 0 时的情况,则取ω的二阶矩来联立方程组求解,积分区间为测得的最大频率),然后联立方程组求得 l, m 值。经计算当取不同频率间隔时得到不同精度的结果如下表。由表中结果可以看出,当取一定密度的频率间隔时,可以得到相当精确的结果。

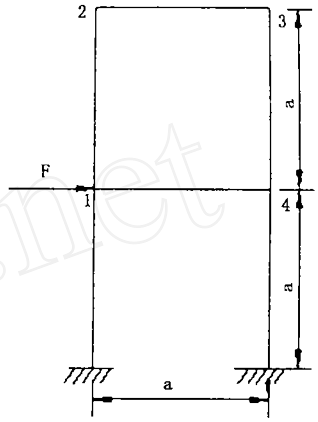

图 1　算例结构

频率间隔	l 值	相对误差	m 值	相对误差
0.1	2836.8	5.44 %	1.33494	33.494 %
0.02	2932.95	2.235 %	1.17506	17.506 %
0.01	2999.71	0.0097 %	1.00742	0.742 %

若用配点法即根据(6)式求得 $F(\omega)$,则可得其载荷谱如图 3 所示,配点法所得载荷与实际值之差的绝对值与频率的变化曲线如图 4 所示,其结果误差与频率取点区间见下表。由图 4 和下表可看出用配点法反演载荷时,取不同频率点处会得到不同的误差,特别是在自振频率附近误差相当大,若用上述方法求解,则可避免取单个频率点处载荷误差偏大的情况,而且得到比较满意的结果精度。图 5 为矩特征法取频率间隔为 0.01 时所得载荷谱与配点法所得载荷谱和真实载荷谱值之间的比较,可看出矩特征法所得结果与真实载荷谱几乎重合。

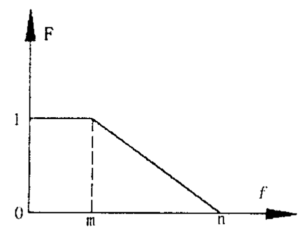

图 2　载荷谱

相对误差	对应频率区间	自振频率
> 0.5 %	[0.23, 0.35] ∪ [0.84, 0.86] ∪ [5.94, 6.05]	0.29226, 0.85008, 6.0069, 6.0430
> 1 %	[0.26, 0.32] ∪ [5.98, 6.05] 和 0.85 点处	
> 2 %	[0.28, 0.30] ∪ [6.01, 6.05] 和 0.85 点处	

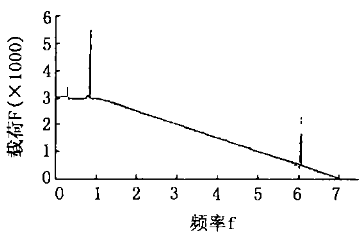

图 3　配点法所得载荷谱

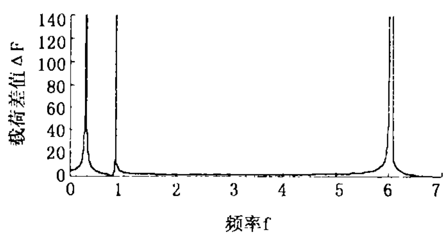

图 4　误差与频率变化曲线

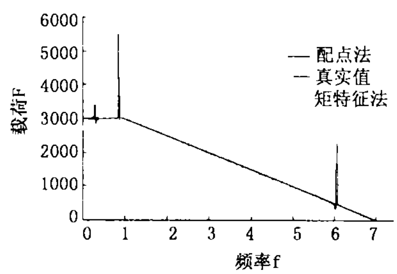

图 5　两种方法所得载荷谱与实际值比较

3　结论

该方法识别载荷谱结果精度较高,避免了配点法随机取点所产生的误差,尤其是在自振频率附近取值误差过大的情况。但缺点就是要有一定长度的频率区间,要有一定密度的频率间隔。该方法可应用于载荷谱形状已知的结构物上。

参考文献

[1]　张韶光等. 海洋平台振动载荷识别研究进展[J]. 济南大学学报,2004(b).

[2]　智浩,文祥荣. 动态载荷的频域识别方法[J]. 北方交通大学学报,2000(4).

[下转第 7 页]

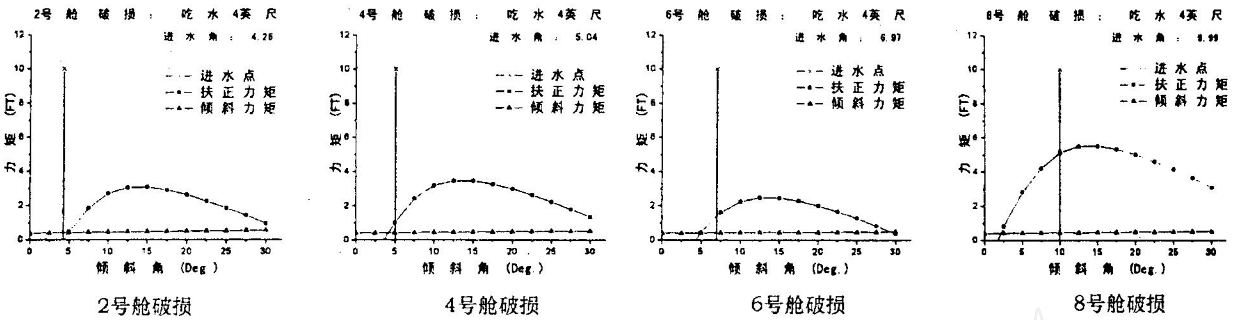

图8 在吃水为4ft时,各舱破损后的稳型

更严格,稳性更难满足要求)。通过具体建模进行计算后,可以定量地看出,稳性要求的严格性在破损稳性中变得极为突出,甚至是至关重要(即由一舱破损就可能造成稳性范围的明显减少而导致破损稳性不能满足要求)。

目前,我国还有一些 lift-boat 是由其他船舶改造的。由于 lift-boat 稳性的特殊性,即其稳性要求的更加严格性,在改造中应将特殊注意。应当在改造中对其稳性,尤其是破损稳性进行重新的校核计算。

参考文献

[1] Barry J. White, Classifying self - elevating lift boats and enforcement responsibility[A]. Standard interpretations[C]. 1985
[2] ABS, Guide for building and classing_liftboats, 2002
[3] DNV, OFFSHORE STANDARD DNV - OS - C301, 2002
[4] Stabcad Manuals, Stabcad Ver 4.0.

OPERATION AND STABILITY CHARACTERISTICS OF LIFT-BOAT

JIANG Yunyun, HE Yanping
(Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: In this Paper. The self - elevating lift-boat is introduced as an important mobile industrial facility. The lift boat is of novel design and has operating characteristics that are unlike conventional seagoing vessels. It is important to research its stability.

Key words: Lift-boat, intact stability, damaged stability

[上接第3页]

[3] 董庆锋,徐兴平. 对海洋平台进行动态载荷识别的研究[J]. 中国海洋平台, 2005(6).
[4] Dynamic force identification based on enhanced least squares and total least - squares schemes in the frequency domain [J]. Journal of Sound and Vibration 282 (2005): 37 - 60.

FORCE IDENTIFICATION BASED ON THE CHARACTERISTIC OF FORCE SPECTRUM IN FREQUENCY DOMAIN

LI Shaohua[1], SHI Zhongmin[2], LIU Yujun[3], LONG Shuyao[1], DING Hua[4]
(1. Hunan University, Changsha 410082; 2. Research Center, China Ocean Oil Co., Beijing 100027; 3. China Ocean Oil Ltd., Shenzhen 518067; 4. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract: This paper presents the identification method of force spectrum in frequency domain. Based on the characteristic of force spectrum the inverse problem is solved through the method of quadrature about the frequency ω. The theoretic calculation shows that this method is precise.

Key words: force identification, frequency domain, quadrature