

# 机械结构模态参数时域识别方法原理及展望\*

□ 杜建华<sup>1,2</sup> □ 黄红武<sup>1,3</sup>

1. 厦门大学 物理与机电工程学院 福建厦门 361005

2. 华侨大学 机电及自动化学院 福建厦门 361021

3. 厦门理工学院 机电工程系 福建厦门 361024

**摘要:**分析了传统模态分析方法在大型机械结构模态识别中的弊端,指出利用基于响应信号的时域信号进行大型机械结构的模态参数识别已日益成为一种趋势。对时域模态参数识别的主要方法进行了论述,分析了各类方法的识别原理及优缺点,在此基础上总结了目前时域识别方法存在的问题,并对今后的研究工作进行了展望。

**关键词:**模态识别 时域方法 随机激励 研究展望

中图分类号:TH113.1

文献标识码:A

文章编号:1000-4998(2013)11-0065-06

振动系统的模态分析在机械结构性能评价、动态设计和故障监测中有着广泛的用途,而机械结构模态参数的识别是模态分析主要任务之一<sup>[1]</sup>。模态参数主要指模态频率、模态振型和模态阻尼等,它属于系统辨识的范畴<sup>[2]</sup>。模态参数识别按信号领域划分主要有频域、时域和时频域等识别方法,传统的模态参数识别主要采用频域分析方法,它通过在振动结构上施加单点或多点激励,同时测量系统的激励信号和响应信号,通过求解系统的频响函数获得系统的各模态参数<sup>[3]</sup>。该方法在中小型结构的应用中已经得到非常成熟的应用。

随着工业技术的不断发展,一些大型机械结构不断涌现,如高架桥梁、海上钻井平台、大型起重机、高速铁路客车、全承载式公路客车、大型水坝和高层建筑

等。由于难以在这些大型结构上施加合适的人为激励或成本过于昂贵,传统的频域方法在此类结构模态参数的识别中受到极大限制。同时,传统测量方法基于实验条件的模态参数测试与被测结构在实际工作中的环境具有一定差距,因此所获得的模态参数与结构真实状态势必产生误差。

时域模态参数识别方法随着计算机技术的迅猛发展而逐渐成熟。它只需要获得系统的时域响应信号,避免了时频域数据变换而产生功率泄露、频率混叠和截断误差等问题,可在被测结构工作状态下进行在线参数识别。以环境激励的工作模态参数识别方法是目前时域识别方法的主要研究方向,它将大地脉动、风力作用、路面不平激励、海浪波动或设备工作振动等环境随机激励因素视为大型结构的激励源,得到随机响应信号。通过时域模态参数识别方法从随机信号中提取出

\* 国家自然科学基金资助项目(编号:50855002)

收稿日期:2013年5月

非工作表面的粗糙度值  $R_a$  不大于  $3.2 \mu\text{m}$ 。

## 6 零件的验收

(1) 零件在 2 个基准孔、8 个被测孔的尺寸全部符合图样要求,在基准轴线 C 对基准轴线 B 的位置度也符合图样要求的前提下才可使用功能量规检测。

(2) 使用组合型功能量规检测零件时,在 8 个检验销插入被测孔,且量规的基准平面 A 和零件的基准平面 A 接触(至少 3 点接触)的情况下零件为合格,否则零件为不合格。

(3) 使用插入型功能量规检测零件时,在量规的基准平面 A 和零件的基准平面 A 接触(至少 3 点接触),8 个插销的检验部分全部插入被测孔,且插至被测孔全长的情况下零件为合格。在量规与零件的基准平面相互接触和其它插至孔全长的插销未拔出的前提

下,某个被测孔如插销的检验部分不能插入或不能插至孔的全长,则该孔为不合格。

(4) 操作者应使用新制的或磨损较少的检具。

(5) 检验者使用与操作者使用的相同型式且磨损较多的检具。

(6) 用户代表使用与操作者使用的相同型式且接近磨损极限的检具。

## 7 结束语

组合型和插入型位置度功能量规的结构不同,使用方法也不同,但都能满足零件的技术要求。量规具有很高的检测精度,结构简单,使用方便、快捷,检测结果直观,对检验工人的技术等级要求不高。该设计案例可以为工程技术人员设计功能量规提供参考。

(编辑 功 成)

自由响应信号,进而获得模态参数。

## 1 时域模态参数识别主要方法

时域模态参数识别技术使用的主要处理手段和方法有随机减量技术、ITD 方法、最小二乘复指数法 (LSCE)、ARMA 时序分析法、自然激励技术法、随机子空间法、经验模态分解法和盲源分离技术等。本文针对以上各类进行总结归纳,介绍其基本原理和适用场合,分析其优缺点。

### 1.1 随机减量技术

一般工程结构的随机振动响应信号可视为是均值为零的平稳随机过程,对均值不为零的平稳随机信号,可通过消去均值的方法转换为均值为零的随机信号。随机减量法根据这些特点通过样本平均的方法,将确定性信号从随机信号中分离出来,从而获得初始激励下的自由响应,然后利用 IDT 方法或 EAR 方法进行参数识别。该方法在 20 世纪 60 年代最先由 Cole 提出并成功地识别出航天飞机模型结构的振动模态参数<sup>[4][5]</sup>。Ibrahim S R 曾对这种方法应用范围及有效性进行了详细的研究,并结合 ITD 方法对空间飞行器的模态参数识别<sup>[6]</sup>,获得了良好的效果。随机减量法使用范围广,数据处理实时性强,模态参数提取效率较高,但该方法仅适用于白噪声激励的场合。

### 1.2 ITD 方法

ITD 方法是与随机减量技术紧密联合使用的一种方法之一,由 Ibrahim S R 于 20 世纪 70 年代提出<sup>[7]</sup>。ITD 方法以一般黏性比例阻尼系统的自由衰减响应可以表示为各阶模态的组合为理论基础,使用同时测得的各测点的自由衰减响应(位移、速度、加速度三者之一),通过三次不同的延时采样,构造自由响应采样数据的增广矩阵,利用自由响应与特征值的复指数关系,建立数学模型及特征方程,求解出特征值后再根据特征值与系统参数的关系估算各阶模态参数。

由于 ITD 方法本身不具备鲁棒性和稳定性, Ibrahim S R 后来提出直接构造 Hessenberg 矩阵,避免求特征值时进行 QR 分解的 STD 方法<sup>[8]</sup>,使 ITD 方法的计算量大为降低,同时提高了系统识别的精度。在后续的研究中,虚拟测点技术、双最小二乘法<sup>[9]</sup>、几何最小二乘法<sup>[10]</sup>和两步法<sup>[11]</sup>等在弥补测点不足、抑制噪声和阻尼比识别方面得到了广泛的应用,极大地提高了系统模态参数的识别精度。

### 1.3 最小二乘复指数法

最小二乘复指数法 (LSCE), 又称 Prony 多项式法。它以  $Z$  变换因子表示脉冲响应,通过构造 Prony 多项式,将脉冲响应模型中复频率的识别转化为与之等效的自回归模型中自回归系数的识别。再由脉冲响应

数据序列构造该测点各阶脉冲响应幅值(留数)的线性方程组,用最小二乘法求解。各测点均按上述方法进行识别,最终得到各阶模态矢量<sup>[12][13]</sup>。

对  $n$  自由度黏性阻尼系统,在第  $f$  点激励,第  $e$  测点获得的脉冲响应函数可写为:

$$h_{ef}(t) = \sum_{i=1}^{2n} R_{efi} e^{s_i t} \quad (1)$$

式中:  $R_{efi}$  为留数;  $s_i$  为极点,  $s_i = -\sigma_{mi} + j\omega_{ndi}$ ,  $\sigma_{mi}$ 、 $\omega_{ndi}$  分别为第  $i$  阶衰减系数和阻尼固有频率。

通过  $Z$  变换因子,对测得的离散时间序列,脉冲响应函数可表示为:

$$h_k = \sum_{i=1}^{2n} R_i z_i^k \quad (2)$$

式中:  $k$  为采样点序号;  $R_i$  和  $z_i$  为待识别参数。

以  $z_i$  为零点,构造 Prony 多项式  $P(z)$ :

$$P(z) = \sum_{p=0}^{2n} a_p z^p = \prod_{i=1}^n (z - z_i)(z - z_i^*) \quad (3)$$

式中:  $a_p$  为 Prony 多项式系数;  $z_i$  为  $P(z)=0$  的根,  $z_i^*$  与  $z_i$  互为共轭。

$z_i$  的求解问题转化为 Prony 多项式系数求解,根据式(2)建立脉冲响应序列的 AR 自回归模型,记为:

$$\begin{aligned} \mathbf{h}_l^T \mathbf{a} &= -h_{l+2n} \\ \mathbf{h}_l &= [h_l \ h_{l+1} \ \dots \ h_{l+2n-1}]^T, \mathbf{a} = [a_l \ a_{l+1} \ \dots \ a_{l+2n-1}]^T \end{aligned} \quad (4)$$

取  $l=0, 1, 2, \dots, m$ , 获得  $m+1$  个样本的自回归方程组成  $\mathbf{a}$  的线性方程组,利用最小二乘法求得:

$$\mathbf{a} = -(\mathbf{T}^T \mathbf{T})^{-1} \mathbf{T}^T \tilde{\mathbf{h}}_{2n} \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{T}$  为实测得到的 Hankel 矩阵,将  $\mathbf{a}$  代入 Prony 方程  $P(z)=0$ ,解得  $2n$  个共轭复根  $z_i$ ,按照 ITD 法求得复模态频率  $\omega_{mi}$  和复模态阻尼  $\xi_{mi}$ 。

最小二乘复指数法只利用一个测点的脉冲响应来识别结构的模态参数,是一种局部识别方法。它使用少量的数据便可以进行分析计算,对计算机的计算能力要求不高。最小二乘复指数法对于结构简单的小阻尼构件具有较高的识别精度,但对于一些复杂结构,该方法存在着自由度无法准确确定、受噪声干扰严重、需要重复测量计算等缺点。

2004 年 Peeters 等提出了多参考最小二乘复频域法 (PolyMax)<sup>[14]</sup>,用于试验模态分析时, PolyMAX 算法以频响函数矩阵为基础;用于工作模态分析时, PolyMAX 算法以自、互谱矩阵为基础。计算极点和模态因子的方法与最小二乘复指数法 (LSCE) 相似,它对于小阻尼、大阻尼以及密集模态结构参数识别都有较好的精度,目前在工程中得到了广泛的应用。

### 1.4 时间序列法

时间序列法基于离散参数模型,利用被测结构输出响应的时间序列识别出模态参数。主要有 AR 自回

归模型、MA 滑动均值模型和 ARMA 自回归滑动均值模型 3 种模型结构。适合于白噪声激励的线性或非线形参数识别。Akaike H 于 1969 年首先利用自回归移动均值模型开展了白噪声激励下的模态参数识别研究<sup>[15]</sup>。20 世纪 70 年代开始, 美籍华人吴贤铭和 Pandit 将时间序列法应用到机械工程领域, 并提出了系统分析方法, 对该方法赋予了清晰的物理概念<sup>[16-18]</sup>。对于一个  $n$  自由度的黏性阻尼系统, 其振动微分方程为:

$$f(t) = M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx \quad (6)$$

式中:  $M$ 、 $C$ 、 $K$  分别为质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵;  $f(t)$  为外部激励力列阵;  $x$ 、 $\dot{x}$ 、 $\ddot{x}$  分别为系统位移、速度和加速度响应。

式(6)等价于一个  $2n$  阶非齐次微分方程组, 将其离散化得到差分方程:

$$x_k - \sum_{l=1}^{2n} a_l x_{k-l} = b_0 f_k - \sum_{l=1}^{2n-2} b_l f_{k-l} \quad k=0, 1, 2, \dots \quad (7)$$

该方程即为该  $n$  自由系统的 ARMA 模型。系数  $a_l$ 、 $b_l$  在离散时间步长  $\Delta t$  一定时只与系统的质量矩阵  $M$ 、阻尼矩阵  $C$ 、刚度矩阵  $K$  有关。时间序列法实质就是识别白噪声激励下时间序列模型的系数。模型系数的估算方法很多, 主要有迭代最优化方法和基于最小二乘原理的次最优化方法。估算出 ARMA 模型的自回归系数  $a_l$  和滑动平均系数  $b_l$ , 便可求其极点和留数, 进而求得各模态参数。

时间序列模型进行参数识别无能量泄漏, 分辨率高, 但时序建模的关键问题是正确确定模型阶次。目前已有多种模型定阶的准则, 但还没有一种是完全成熟的, 因此, 模型定阶问题仍是需要进一步研究的问题。

### 1.5 自然激励技术法

James 等人于 1993 年提出了自然激励技术 (NEXT 法)<sup>[19]</sup>, 在白噪声的环境下, 结构中两点响应之间互相关函数与脉冲响应函数具有相似的表达形式, 在此基础上可利用时域的模态识别方法对模态参数进行识别。对  $n$  个自由度线性时不变结构, 当结构的  $k$  点受到单位脉冲激励时, 结构  $l$  点的脉冲响应为<sup>[20]</sup>:

$$h^{lk}(t) = \sum_{i=1}^n \frac{\phi_i^l \phi_i^k}{m_i \lambda_i} \exp(-\xi_i \omega_i t) \sin(\omega_{di} t) \quad (8)$$

式中:  $\phi_i$ 、 $m_i$ 、 $\lambda_i$  分别为第  $i$  阶模态振型向量、模态质量、特征值;  $\xi_i$ 、 $\omega_i$ 、 $\omega_{di}$  分别为系统第  $i$  阶阻尼比、固有频率和阻尼固有频率。对系统  $k$  点施加白噪声激励,  $l$ 、 $p$  两测点响应的互相关函数为:

$$R^{lpk} = E[x^{lk}(t)x^{pk}(t+\tau)] \quad (9)$$

根据相关函数的定义求解有:

$$R^{lp}(\tau) = \sum_{i=1}^n B_i^p \frac{\phi_i^l \phi_i^p}{m_i \lambda_i} \exp(-\xi_i \omega_i \tau) \sin(\omega_{di} \tau + \theta_i) \quad (10)$$

式中:  $B_i^p$  为与测点及模态阶次  $i$  相关的常数项;  $\theta_i$  为第

$i$  阶模态相位角。

从式(8)和式(10)可看出, 线性系统在白噪声激励下两点响应之间的互相关函数与系统脉冲响应函数具有相似的数学表达式。因此, 可将两测点响应互相关函数代替脉冲响应函数进行环境激励下模态参数识别。

自然激励技术法是以白噪声作为激励, 具有一定的环境噪声抑制能力。它是目前基于环境激励模态参数识别方法中的主要处理技术之一, 已广泛运用于大跨度桥梁、汽轮机叶片和高层建筑等的工作模态参数识别。

### 1.6 随机子空间法

随机子空间法 (SSI) 由 Peeters B 等人于 1995 年提出<sup>[21]</sup>, 它基于线性系统的离散时间状态空间模型, 利用时域响应信号的相关函数构造 Hankel 矩阵, 从而识别结构在平稳随机激励下的模态参数。

对于白噪声激励的  $n$  自由度线性系统, 其离散化的状态空间方程可表示为<sup>[22]</sup>:

$$\begin{cases} x_{k+1} = Ax_k + w_k \\ y_k = Cx_k + v_k \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $x_k \in R^{n \times 1}$  为系统的状态向量;  $y_k \in R^{N \times 1}$  为输出向量,  $N$  为  $v_k$  测点数;  $A \in R^{n \times n}$  为状态矩阵;  $C \in R^{N \times n}$  为输出矩阵;  $w_k$  和  $v_k$  分别为系统的输入白噪声和输出白噪声。

状态矩阵  $A$  的特征值  $\lambda_i$  与振动结构的特征值  $\mu_i$  具有如下关系:

$$\mu_i = \sigma_i + j\omega_i = \frac{1}{\Delta t} \ln \lambda_i \quad (12)$$

式中:  $\Delta t$  为采样间隔;  $\sigma_i$  为阻尼因子。

$$\mu_i, \mu_i^* = -\xi_i \omega_i \pm j\omega_i \sqrt{1 - \xi_i^2} \quad (13)$$

式中:  $\mu_i$  与  $\mu_i^*$  互为共轭。

$$\xi_i = -\frac{\sigma_i}{\sqrt{\omega_i^2 + \sigma_i^2}} \quad (14)$$

结构振型  $\psi$  与系统矩阵  $A$  的特征向量  $\varphi$  和输出矩阵  $C$  相互之间的关系为  $\psi = C\varphi$ 。因此, 只要求出状态矩阵  $A$  和输出矩阵  $C$  便可对结构模态参数进行识别。矩阵  $A$ 、 $C$  利用输出响应的相关函数和 Hankel 矩阵来求解。根据不同的加权矩阵可以形成不同的辨识方法, 当加权矩阵采用单位阵时为 BR 法 (Balanced Realization), 根据能量决定加权矩阵时为 CVA 法 (Canonical Variate Analysis)。

随机子空间对输出噪声有一定的抗干扰能力, 在识别结构模态参数的方法中, 系统阶次的确定对模态参数识别的准确性有着至关重要的作用。传统方法中直接采用奇异值分解确定系统阶次, 易出现虚假模态。后来发展了稳定图、模糊  $C$  均值和谱系聚类等方法确定系统阶次, 性能均有所提升<sup>[23]</sup>, 但在密集模态的识别

上仍需要开展大量的研究。

## 1.7 经验模态分解法

经验模态分解(EMD)是 Huang N E 等人于 1998 年提出的一种适用于非平稳、非线性信号分解的方法<sup>[24]</sup>,它基于信号局部特征的时间尺度,将复杂信号分解成一系列单成分的固有模态函数(IMF)之和。

固有模态函数(IMF)必须满足两个基本条件:首先,在整个数据集上,极值点和过零点的个数相等或者最多相差一个;其次,在任意一点处,由局部极大值构成的上包络线和由局部极小值构成的下包络线的均值为零。EMD 分解过程中,首先找出原始信号  $x(t)$  所有的极值点,用样条曲线分别拟合极大值点和极小值点,获得信号的上下包络线并取平均值,然后在原始信号上剔除平均值得到新的数据序列  $x_1(t)$ ,判断  $x_1(t)$  是否满足 IMF 上述的两个条件,如果不满足,则将  $x_1(t)$  作为原始信号重复上述计算直至条件满足,此时获得的信号记为  $c_1(t)$  便为第一个固有模态分量。继续按照上述步骤重复计算,得到其它固有模态分量  $c_j(t)$  ( $j=1,2, \dots, n$ ),直到最后得到一个不可分解的余量  $r_n(t)$ 。因此,原始信号  $x(t)$  可表示为:

$$x(t) = \sum_{j=1}^n c_j(t) + r_n(t) \quad (15)$$

在获得所有固有模态分量的基础上,利用希尔伯特变换、随机减量技术、ITD、随机子空间或 ARMA 等可识别出系统的模态参数<sup>[25][26][27]</sup>。

由于缺乏准确的数学模型,且分解过程以经验为基础,模态混叠和端点飞翼成为该方法应用到模态参数识别的最大障碍,限制了其进一步的推广。

## 1.8 盲源分离技术

盲源分离是在源信号与混合通道参数均未知的情况下,根据输入源信号的统计特征,通过多传感器获得观测信号来估计源信号和未知混合通道参数的信号处理方法<sup>[28]</sup>。它属于盲信号处理(BSP)的范畴,是目前信号处理中新兴技术之一<sup>[29][30]</sup>。目前,盲源分离技术已成功应用到图像处理、通信、生物医学和振动等众多领域<sup>[31]</sup>,同时盲源分离应用于模态参数识别也日益成为一种趋势<sup>[32][33][34]</sup>。

考虑线性瞬时混合模型,假设系统中  $n$  个统计独立的源信号混合后被  $m$  个传感器探测( $m \geq n$ ),则有:

$$X(t) = AS(t) + n(t) \quad (16)$$

式中:  $A \in R^{m \times n}$  为列满秩混合矩阵;  $S(t) \in R^n$  为源信号矢量;  $n(t)$  是加性噪声矢量。

为便于讨论,假定  $m = n$ 。盲源分离的目标就是求解分离矩阵  $W = A^{-1}$ ,得到:

$$Y(t) = WX(t) \quad (17)$$

$Y(t)$  是对源信号的估计。 $Y(t)$  的各分量  $y_i$  之间的

统计独立性越强,则估计出的信号  $y_i$  越接近真实源信号  $S_i(t)$ ,即获得  $S_i(t)$  的最佳估计。

对于一般的黏性比例阻尼系统,其自由衰减振动响应可表示为:

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^m \phi_j \exp(-\xi_j \omega_{nj} t) \sin(\omega_{dj} t + \theta_j) \quad (18)$$

向量形式为:

$$X(t) = \varphi q(t) \quad (19)$$

当系统各阶固有频率(或有阻尼频率)相互不可通约时,各阶模态间相互独立,可将系统各阶模态视为独立的虚拟信号源,每个观测信号可以看成是各独立虚拟源在该点的线性叠加。此时即满足盲源分离对于源信号的假设条件,对比式(16)和式(19),可知:

$$\varphi = A = W^{-1}$$

$$q(t) = S(t) \approx Y(t) \quad (20)$$

通过对分离矩阵  $W$  和源信号  $S(t)$  的最佳估计  $Y(t)$  进行进一步的分析,可得到结构的模态振动、固有频率和阻尼比。

目前,稳健 SOBI 算法<sup>[35]</sup>、二阶非平稳源 SONS 算法<sup>[36]</sup>、二阶统计量 AMUSE 算法<sup>[37]</sup>和稳健 TPBSS 算法<sup>[38]</sup>已在悬臂梁、密肋复合墙和高速堆垛机等结构的模态参数识别中获得了成功应用。盲源分离技术基于信号统计独立的假设,因此对测试信号噪声及信号混合方式具有较强的敏感性。总之,对于复杂结构的密集模态识别还需在算法上开展进一步的研究。

## 2 时域模态识别展望

模态参数的时域识别方法经过几十年的发展,已在实际工程中得到了广泛的应用。大部分时域模态参数识别方法的理论已较为成熟,但是针对不同结构和测试条件,各种方法仍存在不足和使用局限,主要表现在以下几个方面。

(1) 时域方法大部分以白噪声作为激励,要求响应信号是平稳随机过程。但在实际应用中,工程结构往往存在诸多的干扰因素,造成测量数据存在非平稳性,因此如何有效地滤除噪声和等效平稳计算成为一个重要问题。

(2) 结构复杂的待测工程对象存在着密集模态,如何在低能量的白噪声激励下,尽可能识别出各阶模态参数。同时在有些情况下,实验获得的数据可能并不完备,如何进行数据处理以确保从有限的数据中提取出更多的信息。

(3) 时域识别技术基于数值计算,在结构自由度较大时,会涉及大型矩阵的运算问题,数据的微小误差易引发“病态”矩阵的出现,因此数值分析的准确性对模态参数的正确识别起着关键的作用。

(4) 部分时域识别方法的模态其定阶问题没有得到完整的理论解决办法。

工程结构基于环境激励的在线模态参数测量日益成为一种趋势,为时域识别方法的发展提供了广阔的空间。时域识别方法应在现有研究的基础上,充分利用现代数字信号处理的最新成果,克服环境激励的随机性和响应信号的非平稳性,进一步提高模态参数识别的准度和精度。

### 3 结束语

模态参数测量是准确识别机械工程结构工作状态的一种重要手段,环境激励下的时域识别方法可在被测对象实际运行状态下进行在线测量,对被测对象无破坏且不影响正常工作,因此越来越受到广泛的关注。在信息处理手段迅速发展的背景下,时域识别技术也必将在现有基础上产生更为完善的理论成果并用于工程实践。

#### 参考文献

- [1] 傅志方,华宏星. 模态分析理论与应用[M]. 上海:上海交通大学出版社, 2000.
- [2] 曹文谦,张文德,萧龙翔. 振动结构模态分析——理论与应用[M]. 天津:天津大学出版社, 2001.
- [3] 李德葆, 陆秋海. 实验模态分析及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2001.
- [4] Cole H A. On the Line Analysis of Random Vibrations[J]. American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal, 1968, 288(68):288-319.
- [5] Cole H A. Online Failure Detection and Damping Measurement of Aerospace Structures by Random Decrement Signatures [R]. National Aeronautics and Space Administration Contractor Reports, 1973,2205:1-77.
- [6] Ibrahim S R. Random Decrement Technique for Modal Identification of Structures [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1977,14(11):696-700.
- [7] Ibrahim S R, Mikuleik E C, A Method for the Direct Identification of Vibration Parameters From the Free Response [J]. Shock and Vibration Bulletin, 1977, 47:183-198.
- [8] Ibrahim S R. An Upper Hessenberg Sparse Matrix Algorithm for Modal Identification on Minicomputers [J]. Journal of Sound & Vibration, 1987, 113(1):47-57.
- [9] Ibrahim S R. Double Least Squares Approach for use in Structural Modal Identification [J]. American Institute of Aeronautics and Astronautics journal, 1986, 24 (3):499-503.
- [10] 尚进. 用几何最小二乘法改进 ITD 法的阻尼识别精度[J]. 清华大学学报, 1997, 37(11):46-48.
- [11] 王建有, 陈健云. 提高阻尼识别精度的 ITD 两步法[J]. 世界地震工程, 2003, 19(3):35-38.
- [12] 刘征宇, 陈心昭, 李登啸. 关于最小二乘复指数法的频域--时域模态参数识别技术 [J]. 合肥工业大学学报, 1989, 12(3):10-16.
- [13] 王卫华, 杨转运, 刘会. 利用 LSCE 方法识别桥梁气动导数研究[J]. 实验流体力学, 2009,23(1):85-88.
- [14] Peeters B. The PolyMAX Frequency-domain Method: a New Standard for Modal Parameter Estimation [J]. Shock and Vibration, 2004,11:395-409.
- [15] Akaike H. Power Spectrum Estimation though Autoregressive Model Fitting [J]. Annals of the Institute of Statistical Mathematics, 1969, 21(1):407-419.
- [16] Wu S M. Dynamic Data System: A New Modeling Approach[J]. Journal of Engineering for Industry,1977,99(3):708-714.
- [17] Wu S M, Chow M C, Tobin T H. Signature Analysis for Mechanical Systems via Dynamic Data System (DDS) Monitoring Technique [J]. Journal of Mechanical Design, 1980,102(2):217-221.
- [18] Pandit S M, Wu S M. Time Series and System Analysis with Application[M]. New York:John Wiley and Sons, 1983.
- [19] James H G, Came G T. The Natural Excitation Technique (NExT) for Modal Parameter Extraction from Operating Wind Turbines [R]. Sandia National Laboratory, Albuquerque, New Mexico, 993.
- [20] 姜浩, 乔丽. 基于环境激励的混凝土梁式结构模态参数识别[J]. 吉林建筑工程学院学报, 2011,28(3):5-7.
- [21] Peeters B, Roeck G De, Pollet T, et al. Stochastic Subspace Techniques Applied to Parameter Identification of Civil Engineering Structures[C]. Proceedings of New Advances in Modal Synthesis of Large Structures:Nonlinear, Damped and Nondeterministic Cases, Lyon, France,1995.
- [22] 常军, 张启伟, 孙利民. 稳定图方法在随机子空间模态参数识别中的应用[J]. 工程力学, 2007,24(2):39-44.
- [23] 汤宝平, 章国稳, 陈卓. 基于谱系聚类的随机子空间模态参数自动识别[J]. 振动与冲击, 2012, 31(10):92-96.
- [24] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London A, 1998,1971:903-995.
- [25] 郭淑卿, 梁建文, 张郁山. 用 HHT 方法识别强迫振动下的线性双自由度体系的模态参数 [J]. 自然科学进展, 2006, 16(3):375-379.
- [26] 何旭辉, 余志武, 陈政清. 基于 EMD 和随机减量技术的大型桥梁模态参数识别[J]. 铁道科学与工程学报, 2007(4):

## 多领域联合仿真技术的分析研究\*

□ 赵晓影

长春职业技术学院 信息技术分院 长春 130033

**摘要:**介绍了联合仿真技术的产生背景以及意义。以 Simulink 作为主仿真平台,以多领域软件构建机电液一体化系统联合仿真平台为例,阐述了联合仿真技术的内涵,探讨了各领域软件之间组织协同的方法。针对上述仿真平台在实际应用中出现的问题,给出相应的解决办法,对多领域联合仿真技术的发展趋势作了展望。

**关键词:**多领域系统 联合仿真技术 机电液一体化系统 发展趋势

中图分类号:TP391.9

文献标识码:A

文章编号:1000-4998(2013)11-0070-03

随着计算机仿真技术的普及和发展,研究对象的规模和复杂程度日益增加,特别是在工程机械、精密机床、飞行器、汽车等涉及机械、电子、液压、控制等多学科的行业,多领域系统的交叉耦合作用日益凸显。传统上采用单领域软件对各个子领域分块仿真,然后综合分析的仿真方法,在精度与效率上已经难以满足研究对象的需求<sup>[1]</sup>。目前,在没有一款商用软件能实现建立整个机电液一体化系统联合仿真模型的情况下,集成各学科仿真软件的多领域联合仿真技术为这类问题的解决提供了一种手段。多领域联合仿真技术主要有基于软件接口的方法、基于统一语言的方法、基于 HLA/RTI 的方法、基于语义的组件化方法、基于元模型的方法、基于多学科商用仿真平台的方法等<sup>[2]</sup>。基于接口的方法,是指利用单领域软件的专业优势,在不同的软件中完成不同领域的建模,最后利用商用软件之间的接口实现多领域联合仿真。本文针对机电液一体化系统,介绍利用接口方法,将机械动力学模型、

液压模型分别导入通用性能良好的 Simulink 仿真环境中,进而构建以 Simulink 为主仿真平台的集成化联合仿真平台。并针对多领域联合仿真技术在实际应用中出现的一些常见问题,给出解决办法和建议。在上述分析的基础上,探讨了多领域联合仿真技术的发展趋势。

## 1 联合仿真技术的内涵

考虑到产品研发流程涉及到各个子系统之间的交叉耦合作用,多领域联合仿真技术将不同领域的仿真模型零件组装成系统仿真模型。不同的仿真软件之间建立连接后,将其中某款软件所包含的仿真结果作为系统输入信号传递给另一软件构建的模型,这种信号包括力、力矩、驱动激励等数据,后者的模型在该信号的激励作用下产生相应的响应量,如位移、速度、加速度等,这些响应量又通过接口反馈到前者的模型。据此,仿真数据实现了在不同领域的仿真分析软件中的双向传递,典型仿真软件构件的联合仿真系统如图 1 所示。从图 1 可知,联合仿真技术不仅广泛应用于典型的机电液一体化系统,还能与有限元分析软件联合

\* 吉林省科技发展计划项目(编号 20060334)

收稿日期:2013 年 8 月

- 6-10.
- [27] 禹丹江,任伟新.基于经验模式分解的随机子空间识别方法[J].地震工程与工程振动,2005,25(5):61-66.
- [28] 史习智.盲信号处理:理论与实践[M].上海:上海交通大学出版社,2008.
- [29] 张发启,张斌,张喜斌.盲信号处理及应用[M].西安:西安电子科技大学,2006.
- [30] 孙守宇.盲信号处理基础及其应用[M].北京:国防工业出版社,2010.
- [31] 余先川,胡丹.盲源分离理论与应用[M].北京:科学出版社,2011.
- [32] 李舜酩.振动信号的盲源分离技术及应用[M].北京:航空工业出版社,2011.
- [33] 李炎华,樊可清.独立分量分析在模态分析中的应用[J].计算机工程与应用,2009,45(3):220-228.
- [34] 张晓丹,姚谦峰.基于盲源分离的结构模态参数识别[J].振动与冲击,2010,29(3):150-154.
- [35] 付志超,程伟,徐成.基于 R-SOBI 的结构模态参数辨识方法[J].振动与冲击,2010,29(1):108-112.
- [36] 刘晓伟,李舜酩.基于 SONS 的结构模态参数识别研究[J].中国机械工程,2011,22(12):1454-1458.
- [37] 姚谦峰,张晓丹.二阶统计量盲辨识在模态参数识别中的应用[J].工程力学,2011,28(10):72-77.
- [38] 杨彦龙,程伟.基于 R-TPBSS 的结构模态参数识别方法[J].振动与冲击,2012,31(10):9-13. ▲

(编辑 小 前)