

基于随机减量技术的模态参数识别方法探讨*

聂雪媛, 丁桦

(中国科学院力学研究所 水动力学与海洋工程重点实验室 北京 100190)

摘要:大型基础工程结构的特征参数识别通常是通过对环境载荷激励的结构响应进行分析来实现。随机减量(Random Decrement, RD)技术是环境激励下的模态参数识别方法中应用较广的方法。在实际应用中受环境、测量等条件的限制,信号常为含有某些优势频率的非平稳信号,常常导致随机减量技术在识别结构参数尤其是系统阻尼时带来较大误差。为提高随机减量技术在环境激励作用下识别结构参数的准确性,文中从分析随机减量信号频谱中的频率分布特性入手,结合随机减量函数产生的触发条件,给出了一种利用信号频谱的统计特征进行模态参数识别的方法。数值仿真结果表明该函数能准确识别在含有优势频率环境载荷作用下的结构参数。

关键词:环境激励;随机减量技术;特征参数识别;大型工程结构

中图分类号:TH113.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-2354(2012)08-0001-05

利用结构的动态响应识别结构的损伤是近年发展起来的结构损伤诊断新方法,该方法是建立在结构动态参数识别基础上的,并与配套的监测方案密切相关^[1-2]。模态参数是决定结构动力特性的主要参数,传统的模态参数识别通常是基于实验室条件下,通过人工激励获得结构的响应,同时测得激励信号(单点或多点)和响应信号求得频率响应函数(或它的Fourier逆变换——单位脉冲响应函数)来获得模态参数。该方法已经在各类结构的动态分析中得到广泛应用。但是,对于大型基础工程结构,人工激励的施加是困难的^[3],因此通常解决的办法是采用环境激励。环境激励下的模态参数识别认为系统所处的环境(如自然风、地震或地脉动、交通等)能够提供充分的激励。目前常用的环境激励下的模态参数识别方法很多^[4-5],如:频域分解法、时间序列法、随机减量法、NExT法、随机子空间法等。通常情况下这些方法对结构固有频率的估计具有较高的精度,而对于结构阻尼的估计则偏差较大。

随机减量技术是环境激励下的模态参数识别方法中应用较广的方法,它是由Cole^[6-7]首先提出的。随机减量技术的基本思想^[8]是在线性系统的叠加原理基础上,利用测量的响应信号构造出表征结构自由振动的响应信号,即表征结构特性的一个自由衰减信号。由于随机减量技术实现简单,同时在实际工况下可以实现数据实时分析,现在已经成为一项提取结构自由

衰减信号非常成熟的技术,并且在振动模态分析^[9]损伤检测等^[10]方面得到广泛的应用。随机减量技术的核心是通过随机减量函数给出具有系统自由振动特征的系统近似齐次解。但当随机外激励的均值不为零时,传统的随机减量函数在某些情况下将不再具备这一特征。而在实际应用中,很多时候受环境、测量等条件的限制,信号中夹杂着很多非线性噪声,且这些噪声不一定满足均值为零的条件。这就使得传统随机减量技术的应用受到一定限制,同时给识别精度带来影响。

一般地说,从随机减量函数的Fourier谱可以得到较精确的系统特征频率,它受环境载荷非平稳性等因素的影响不是太大。但是当通过随机减量函数的衰减进行系统阻尼的识别时,环境载荷的非平稳性等因素将会给结果带来很大的误差。文中将针对随机减量法中结构阻尼的识别进行重点探讨,探索一种利用统计特征进行系统参数识别的方法,为解决环境激励下的模态参数识别提供一条新途径。

1 随机减量技术介绍

随机减量技术的核心是利用在随机激励下系统的响应信号构造一个系统的自由振荡信号,即系统的一个齐次解。在随机激励满足零均值的Gauss分布情况下,这种构造能够保证得到一个系统的自由振荡信号。

对于线性系统:

* 收稿日期:2011-09-14; 修订日期:2012-02-28

作者简介:聂雪媛(1978—),女,新疆石河子人,助理研究员,博士,主要从事固体力学研究。

$$LX(t) = f(t) \quad (1)$$

设 $X(t)$ 为随机激励下的系统响应信号, 则传统的随机减量函数定义为:

$$\delta(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(t_i + t) \quad (2)$$

其中 $\{t_i\}$ 为按某种条件给出的采样点序列。此时, 随机减量函数 $\delta(t)$ 将满足方程:

$$L\delta(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N LX(t_i + t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(t_i + t) = F(t) \quad (3)$$

当随机外激励函数 $f(t)$ 是均值为零的 Gauss 分布时, 外激励在采样点序列 $\{t_i\}$ 上的统计平均值在一定条件下 (采样点序列 $\{t_i\}$ 满足水平触发、零穿越触发等) 可近似为零。也就是说, 函数 $\delta(t)$ 可看作系统的齐次解, 即代表了系统的自由衰减振动响应。

随机减量函数严格的数学描述是 Vandiver 等^[11] 在 1982 年首先明确提出的。Vandiver 的结论为: 在满足高斯分布、均值为零的随机过程这一个特定的情况下, 随机减量函数正比于相应随机信号的自相关函数。随后很多学者又进一步得到了互随机减量函数与响应相关函数的关系^[12-13]。但是这些推导都是基于水平穿越触发条件, 即触发条件为常数值 $T_{X(t)} = C$ 。而根据一般形式的触发条件, Asmussen^[14] 和 Brincker 等^[15] 推导出了随机减量函数与响应相关函数之间更一般性的数学关系。刘彬^[16] 等多种触发条件进行了数值分析对比, 指出相比较而言, 极值触发条件给出的结果较好、较稳定。

极值触发条件是选取响应函数的极值点作为触发点, 如图 1 所示。

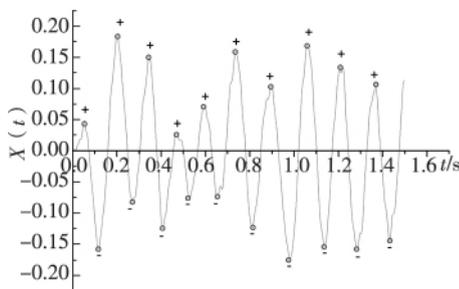


图 1 极值点触发条件

其触发条件可表示为:

$$T_{X(t)} = \begin{cases} 0 \leq X(t) < \max(X(t)) \\ \min(X(t)) \leq X(t) < 0 \end{cases} \dot{X}(t) = 0$$

$$\text{且 } 0 \leq \dot{X}(t) < 0 + \delta 0 \quad (4)$$

此时, 随机减量函数表示为:

$$\delta(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \gamma_i X(t_i + t) \quad (5)$$

$$\text{式中: } \gamma = \begin{cases} 1 & T_{X(t)} (0 < X(t) \leq \max(X(t))) \\ -1 & T_{X(t)} (\min(X(t)) \leq X(t) < 0) \end{cases}$$

这时随机减量函数式(5)将满足初始条件:

$$\delta(0) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \gamma_i X(t_i)$$

$$\dot{\delta}(0) = 0 \quad (6)$$

通过随机减量函数可以得到系统固有频率和阻尼。固有频率可以很容易地从随机减量函数的 Fourier 变换得到, 而阻尼比则是利用随机减量函数的衰减拟合指数函数得到, 如图 2 所示。在通常情况下, 当外激励不是平稳过程时, 很多时候随机减量函数的衰减规律并不理想 (见图 3), 很难通过随机减量函数的衰减规律得到系统准确的阻尼值。

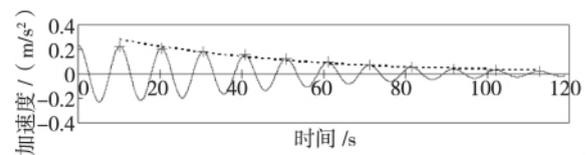


图 2 平稳激励下随机减量函数的衰减示意图

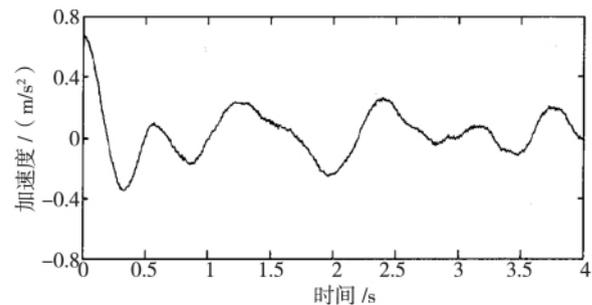


图 3 非平稳激励下随机减量函数的衰减示意图

针对这类情况, 文中的目的就是探索一条新路, 使在通常情况下也能通过随机减量函数得到较精确的系统阻尼比。

2 系统阻尼比的估计

通过对比分析不同激励情况下随机减量函数的频谱可发现, 对随机减量函数影响较大的是其包含的一些优势频率, 这些优势频率导致了随机减量函数的形状畸变, 使得在利用随机减量信号估计阻尼比时带来很大的误差。但是, 在频谱中固有频率峰值附近的分布特征基本与优势频率的存在与否无相关性, 因而可认为在一般情况下随机减量函数频谱中固有频率邻近的分布代表了系统的特征, 它通常与优势频率的分布无关, 只需优势频率与系统固有频率存在一定的距离, 如图 4 和图 5 所示。

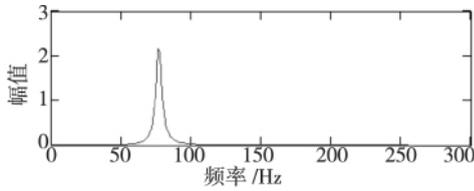


图4 单纯系统自由衰减振动频谱

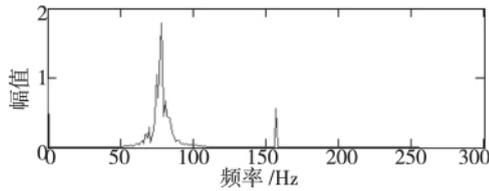


图5 具有不同特征的复合激励信号下的随机减量函数频谱

通过上述对比分析,试图推论:从随机减量函数的频谱中,根据频谱中对应固有频率邻近的频谱分布来提取系统的模态信息将有可能比传统的对衰减规律的拟合得到的模态信息更精确。为达到这一目的,首先以单自由度系统为例来分析系统自由衰减解的频谱特征(一般情况下,多自由度系统可以通过模态分解分解为解耦的多个单自由度系统)。

设 $x(t)$ 为式(7)所示系统的响应,则 $x(t)$ 的 Fourier 谱可以表示为如式(8)所示:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t) \quad (7)$$

$$X(\omega) = x_0 G(\omega) + \dot{x}_0 F(\omega) + Vf(\omega) \quad (8)$$

式中: m, c, k ——系统的质量、阻尼和刚度;

x_0, \dot{x}_0 —— $x(t)$ 和 $\dot{x}(t)$ 在 $t = 0$ (或 $t = t_0$) 时刻(系统)的初值;

$G(\omega), F(\omega), Vf(\omega)$ —— ω 的解析函数。

因为在下面的讨论中只涉及 $G(\omega)$,因此在这里只给出 $G(\omega)$ 的形式:

$$G(\omega) = GR(\omega) + iGI(\omega) \quad (9)$$

$$\text{式中: } GR(\omega) = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}} \left\{ \frac{\omega + \omega_1}{(\omega + \omega_1)^2 + (\xi\omega_0)^2} + \frac{\omega - \omega_1}{(\omega - \omega_1)^2 + (\xi\omega_0)^2} + \frac{(\xi\omega_0)^2}{\omega_1 [(\omega - \omega_1)^2 + (\xi\omega_0)^2]} - \frac{(\xi\omega_0)^2}{\omega_1 [(\omega + \omega_1)^2 + (\xi\omega_0)^2]} \right\}$$

$$GI(\omega) = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}} \left\{ \frac{(\omega - \omega_1)\xi\omega_0}{\omega_1 [(\omega - \omega_1)^2 + (\xi\omega_0)^2]} - \frac{(\omega + \omega_1)\xi\omega_0}{\omega_1 [(\omega + \omega_1)^2 + (\xi\omega_0)^2]} - \frac{\xi\omega_0}{(\omega + \omega_1)^2 + (\xi\omega_0)^2} - \frac{\xi\omega_0}{(\omega - \omega_1)^2 + (\xi\omega_0)^2} \right\}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}};$$

$$\omega_1 = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2};$$

$$\xi = \frac{c}{c_0};$$

$$c_0 = 2m\omega_0.$$

对于极值触发条件下系统的随机减量函数,因为有式(7),其 Fourier 变换可以表示为:

$$\Delta(\omega) = x_0 G(\omega) \quad (10)$$

式中: $x_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \gamma_i X(t_i)$;

$\Delta(\omega)$ ——随机减量函数的傅里叶变换。

实际上它们都应该是系统参数的函数,因此式(10)可以写为:

$$\Delta(\omega, \omega_1, \xi) = x_0 G(\omega, \omega_1, \xi) \quad (11)$$

定义函数:

$$R(\omega_1, \xi) = \frac{I_x(\omega_1, \xi)}{A_x(\omega_1, \xi)} = \frac{I_c(\omega_1, \xi)}{A_c(\omega_1, \xi)} = RG(\omega_1, \xi) \quad (12)$$

式中: $I_x(\omega_1, \xi) = \int_a^b |\Delta(\omega, \omega_1, \xi)|^2 |\omega - \omega_1|^2 d\omega$;

$I_c(\omega_1, \xi) = \int_a^b |G(\omega, \omega_1, \xi)|^2 |\omega - \omega_1|^2 d\omega$;

$A_x(\omega_1, \xi) = \int_a^b |\Delta(\omega, \omega_1, \xi)|^2 d\omega$;

$A_c(\omega_1, \xi) = \int_a^b |G(\omega, \omega_1, \xi)|^2 d\omega$;

a, b ——统计平均区间,是为避开响应中的其他优势频率而选择的,可以根据具体情况而定。

可以看出函数 $R(\omega_1, \xi)$ 与初值 x_0 无关,它在系统自由衰减响应满足初速度为零的条件下等于函数 $RG(\omega_1, \xi)$ ——只与系统自由衰减振荡频率和系统阻尼比相关的函数。由于 $R(\omega_1, \xi)$ 给出的是响应的统计特征,又是只与系统特征相关的量,因此如果能够利用它来确定系统的特征参数,将会减弱激励中优势频率和测量噪声等干扰。

举一个例子,设 $m = 10^2, c = 2.04 \times 10^2, k = 4 \times 10^5$,这时 $\omega_1 = 63.237, \xi = 0.016$,选择 $a = 20, b = 100$,图6给出的是 $RG(\omega_1, \xi)$ 在 $\omega_1 = 63.237$ 时 ξ 在 $(0, 0.8)$ 之间的曲线。

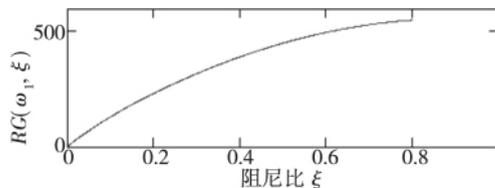


图6 $RG(\omega_1, \xi)$ - 阻尼比曲线

从图 6 中可以看出 $RG(\omega_1, \xi)$ 与阻尼比的关系是单调关系,这样就可以通过 $RG(\omega_1, \xi)$ 反推系统阻尼比。具体步骤如下:

- (1) 利用极值触发得到触发点序列 t_i 和 γ_i ;
- (2) 利用式(6)构造随机减量函数;
- (3) 利用得到的随机减量函数的 Fourier 变换首先确定特征频率 ω_1 ;
- (4) 利用随机减量函数的 Fourier 变换计算出 $R(\omega_1, \xi)$,再利用式(12)反算出系统阻尼比 ξ 。

针对前面的例子,图 5 所对应的响应可以计算出 $R(\omega_1, \xi) = 26.751$,反算出 $\xi = 0.017$,离精确解 $\xi = 0.016$ 相差不大。如果用传统方法,误差将在 30% 左右。

3 结论与展望

给出了一种利用随机减量函数统计特征进行系统参数识别的方法。该方法由于考虑的是统计特征而不是局部特征,因而具有较好的抗干扰能力,尤其是针对环境激励中存在有非系统特征频率的优势频率的情况,并通过简单算例验证了这一方法。

文中提出的方法虽然能够在一定程度上改进参数识别的效果,但还不是最优的结果。进一步的工作将利用随机减量函数的定义(在极值触发条件下)和 $G(\omega)$ 的解析关系,建立一个最小二乘匹配算法,同时给出对应于随机减量函数的初值、系统特征频率、和系统阻尼比的优化方法,进一步提高系统参数识别的精度。

参考文献

- [1] 施斌,徐洪钟,张丹等. BOTDR 应变监测技术应用在大型基础工程健康诊断中的可行性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 493-499.
- [2] 陈健云,王建有. 地下结构动力响应的复合参数识别研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(24): 4514-4518.
- [3] Huang C S, Yeh C H. Some properties of randomdec signature [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1999, 13(3): 491-507.
- [4] 续秀忠,华宏星,陈兆能. 基于环境激励的模态参数辨识方法综述[J]. 振动与冲击, 2002, 21(3): 1-5.
- [5] 朱永梅,曹晓玲,王明强. 基于环境激励的结构模态参数识别方法[J]. 机械设计, 2011, 28(7): 20-23.
- [6] Cole H A. On-the-line analysis of random vibration [C]// AIAA/ASME 9th Structure, Structural Dynamics and Materials Conference, AIAA Paper, 1968: 268-288.
- [7] Cole H A. Method and apparatus for measuring the damping characteristic of a structure: United State, 3620069 [P]. 1971.
- [8] 陈德成,姜节胜. 随机减量技术的方法与理论[J]. 振动与冲击, 1984, 3(4): 31-39.
- [9] Ibrahim S R, Mikulcik E C. A method for the direct identification of vibration parameters from free responses [R]. Shock and Vibration Bulletin, Bulletin 47, 1977.
- [10] Chiu J K. Random decrement based method for parameter identification of wind-excited building models using acceleration responses [D]. USA: Department of Civil Engineering, Colorado State University, 2004.
- [11] Vandiver J K, Dunwoody A B, Campbell R B, et al. A mathematical basis for the random decrement vibration signature analysis technique [J]. Transactions of the ASME Journal of Mechanical Design, 1982, 104: 307-313.
- [12] 吴家驹. 随机减量特征矩阵和相关函数矩阵的关系[J]. 应用力学学报, 1987, 4(3): 1-10.
- [13] Bedewi N E. The mathematical foundation of the auto and cross-random decrement techniques and the development of a system identification technique for the detection of structural deterioration [D]. USA: Department of Mechanical Engineering, University of Maryland, 1986.
- [14] Asmussen J C. Modal analysis based on the random decrement technique application to civil engineering structures [D]. Denmark: Department of Building Technology and Structural Engineering, University of Aalborg, 1997.
- [15] Brincker R, Krenk S, Kirkegaard P H, et al. Identification of dynamical properties from correlation function estimates [J]. Bygningssstatistiske Meddelelser, 1992, 63(1): 1-38.
- [16] 聂雪媛,郭杏林,刘彬等. 一种新的随机减量函数的构造及分析[J]. 计算力学学报, 2009, 26(2): 258-263.

Discussion on modal parameter identification method based on random decrement technique

NIE Xue-yuan, DING Hua

(Key Laboratory for Hydrodynamics and Ocean Engineering, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Characteristic parameters identification of major engineering structures is often performed by analyzing the responses of structure to ambient load excitation, the random decrement (RD) technique is more widely applied method of modal parameters identification under ambient excitation. As the restriction by conditions

基于 C/S 结构的数控设备网络监控系统*

郑魁敬,袁磊,周鑫

(燕山大学机械工程学院,河北秦皇岛 066004)

摘要: 基于 C/S 结构的三层网络运行模式开发了一种集成式数控设备网络控制系统。该系统可同时满足通过串口和以太网口通信的数控设备联网需求,具有多线程运行机制。系统功能模块主要包括通讯管理子系统、数控设备管理子系统、数据库子系统和网络监控子系统等。深入分析了系统的实时性和可靠性,并采用 DES 算法来提高数据的保密性。系统测试结果表明该网络数控系统可以和多个设备及客户端进行信息交换,并能通过网络对数控设备进行视频监控和远程控制。

关键词: C/S 结构; 数控设备; 联网系统; 视频监控; 远程控制

中图分类号: TP242.6 文献标识码: A 文章编号: 1001-2354(2012)08-0005-06

网络技术的发展和运用,大大扩展了企业的制造和销售范围,基于 Internet/Intranet 的全球制造已经成为现代制造技术的发展趋势^[1]。网络数控通过网络对多台数控设备进行综合管理和控制,完成数控程序传输、设备状态监控、信息管理和交换等功能^[2-3]。

目前,我国企业拥有的数控设备利用率偏低,在数控设备的程序传输和信息管理方面也存在着不足^[4-5],如数控资源分配不均、NC 程序传输不畅、程序管理混乱、车间的信息化水平低等。因此,实施数控设备网络化制造^[6],可提高数控设备的利用率,提高数控设备的管理水平,提高车间的信息化水平,优化整合生产资源。

文中开发了一种基于以太网的数控设备监控系统,该系统通过以太网和数控设备连接,可对数控设备进行远程监控,进行数控程序的传输和管理,共享服务器数据库信息,查询和管理数控设备信息,制定和管理

零件工艺流程信息等。

1 网络数控系统构建方案

网络数控系统硬件主要包括:服务器主机、数控设备、I/O 接口、通信单元、数据传输介质等。通讯软件安装在服务器计算机上,能与数控设备实现特定通讯并响应客户端请求。

数控设备提供的通讯接口决定了网络数控系统所能实现的功能。目前比较常见的接口^[7-10]主要有串行通讯接口、专用接口、网络接口。

针对以上各种接口,可以确定联网方案:对于具有串行通讯接口的数控设备,通过串口服务器进行协议转换,然后连到以太网交换机;对于具有网络接口的数控设备,将其直接接入互联网,然后将网络数控系统主

as environment, measurement and etc. in actual application, the signal usually is non-stable signal containing some dominant frequencies, this causes the random decrement technique to bring much bigger deviation in identifying structure parameters, particular in system damping. In order to improve the accuracy of random decrement technique in identifying structure parameters under the action of ambient excitation, by starting from analyzing the frequency distribution characteristics in random decrement signal frequency spectrum, and introducing the trigger condition that generates the

random decrement function, the paper gives a method that carries out modal parameter identification by using statistic characteristics of signal frequency spectrum. Numerical simulation demonstrates that the function can accurately identify structure parameters under the action of ambient load containing dominant frequency.

Key words: ambient excitation; random decrement technique; characteristic parameter identification; major engineering structure

Fig 6 Tab 0 Ref 16

“Jixie Sheji”1515

* 收稿日期: 2011-08-23; 修订日期: 2012-02-09

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2010ZX04004-112); 河北省自然科学基金资助项目(E2012203130)

作者简介: 郑魁敬(1971—),男,河北枣强人,副教授,工学博士,主要从事机器人技术、数控技术、计算机视觉等研究,发表论文30篇。