

ICS 17.160
J 04



中华人民共和国国家标准

GB/T 11349.3—2006/ISO 7626-5:1994
代替 GB/T 11349.3—1992

振动与冲击 机械导纳的试验确定 第3部分:冲击激励法

Vibration and shock—Experimental determination of mechanical mobility—
Part 3: Measurement using impact excitation

(ISO 7626-5:1994, Vibration and shock—
Experimental determination of mechanical mobility—
Part 5: Measurements using impact excitation with
an exciter which is not attached to the structure, IDT)

2006-09-08 发布

2007-02-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 发布
中国国家标准化管理委员会

目 次

前言 ·	· Ⅲ
引言 ·	· IV
1 范围 ·	· 1
2 规范性引用文件 ·	· 1
3 术语和定义 ·	· 1
4 冲击测量的一般特性 ·	· 2
5 在试验中结构的支承 ·	· 4
6 冲击激励 ·	· 4
7 传感器系统 ·	· 7
8 传感器信号的处理 ·	· 9
9 测量有效性的检验 ·	· 16
附录 A(规范性附录) 导纳测量中指数窗影响的修正 ·	· 18
参考文献 ·	· 19

前 言

《振动与冲击 机械导纳的试验确定》系列标准共由三个部分组成:

- 第1部分:基本定义和传感器;
- 第2部分:用激振器作单点平动激励测量;
- 第3部分(本部分):冲击激励法。

本部分是关于机械导纳测量的系列标准的第3部分。本部分等同采用 ISO 7626-5:1994《振动与冲击 机械导纳的试验确定 第5部分:用不与结构相连的激振器进行冲击激励测量》(英文版)。

为便于使用,本部分对 ISO 7626-5:1994 的有关部分作了如下编辑性修改:

- a) 用“本部分”代替“本国际标准”;
- b) 用小数点“.”代替作为小数点的逗号“,”;
- c) 删去国际标准的前言;
- d) 用采用国际标准的我国标准代替对应的国际标准。

本部分代替 GB/T 11349.3—1992。

本部分与 GB/T 11349.3—1992 的主要变化是:

- 增加了第5章,试验中的结构支承状态:悬挂状态和落地状态;
- 在第3章中增加频率响应函数、关注的频率范围、频率平均的导纳幅值等3条术语;
- 8.6 平均技术中的注改变为正文。

本部分的附录 A 和附录 B 均是资料性附录。

本部分由中国机械工业联合会提出。

本部分由全国机械振动与冲击标准化技术委员会归口。

本部分起草单位:中国兵器工业第二〇二研究所、郑州机械研究所。

本部分主要起草人:顾国富、韩国明、焦明纲。

本部分所代替标准的历次版本发布情况为:

- GB/T 11349.3—1992。

引 言

结构的动态特性可以由导纳测量得到的频率响应函数来确定,或由与频率响应函数有关的加速度导纳和位移导纳来确定。每个频率响应函数都是结构平动或转动响应对单点激励的力和运动之比,这些比值的大小和相位是频率的函数。加速度导纳、位移导纳与导纳的区别仅在于分别用加速度或位移替代速度表示运动的响应。为简便起见,在 GB/T 11349 各部分仅使用“导纳”这一术语。当然,所有的试验方法和要求均适用于加速度导纳和位移导纳的确定。

导纳测量的典型应用是:

- 预示结构对已知或假定输入激励的动态响应;
- 确定结构的模态特征(固有频率、振型和阻尼比);
- 预示相连结构的动态相互作用;
- 检查结构数学模型的正确性并改善其精度;
- 确定单一或复合材料的动力学特性(即复弹性模量)。

对某些应用,可能要求测量沿三个相互垂直轴的力和运动以及绕这三个轴的力矩和转动来完整地描述动力学特性。对每个关注的点这些测量给出一个 6×6 的导纳矩阵。对于结构上的 N 个点,系统有一个 $6N \times 6N$ 阶的完整导纳矩阵。对大多数实际应用来说,没有必要知道完整的 $6N \times 6N$ 矩阵,通常只须用单点单方向加激振力,在结构的关键点用测平动响应的办法测量驱动点导纳和传递导纳就已足够了。在另一些应用中,可能关注的仅是旋转导纳。

为了简化,实际遇到的各种导纳测量任务可使用 GB/T 11349 的不同部分,GB/T 11349 将作为 3 个独立的部分颁布。

GB/T 11349.1 基本定义和传感器。这部分内容对大多数导纳测量任务是通用的。

GB/T 11349.2 用激振器作单点平动激励测量。

GB/T 11349.3 (即本部分)冲击激励法。

机械导纳定义为由平动或转动的速度相量与施加的激振力或力矩相量之比构成的频率响应函数,如果响应是用加速度计测量的,还要转换成速度以获得导纳。另外,也可以用被称为加速度导纳的加速度与力之比描述结构的特性。在另一些情况下,还可以用位移导纳,即位移与力之比。

注:历史上,结构的频率响应函数常常表示为上述名称的动力特性之一的倒数,机械导纳的倒数常常称为机械阻抗。然而,应当注意,由于导纳的倒数通常并不表示结构阻抗矩阵的任一元素,不要混淆。导纳试验的数据不能直接用作结构分析阻抗矩阵的任一元素。为了获得数据和模型的兼容性,模型的阻抗矩阵必须转换成导纳矩阵,反之亦然。这一点的详细描述见 GB/T 11349.1 的附录。

关于 GB/T 11349 本部分的介绍

冲击激励已成为测量结构频率响应函数的一个常用方法,这是由于其固有的快速和相对低廉的价格。然而使用冲击方法,导纳测量的精度很大程度上依赖于试验结构的特性和使用的试验技术。对冲击激励而言,在某些情况下,要获得与使用一个连接结构的激振器连续激励所得到的测量精度可能是困难的或者是不可能的,冲击激励方法将带来增加显著测量误差的危险(见参考文献[7])。尽管有这些限制,只要使用得当,冲击试验方法可能仍是一种极其有用的激励技术。

本部分为使用冲击激励的导纳测量提供指导。精确的导纳测量总是要求特别注意仪器的选择以及使用的测量技术;当使用冲击激励时,这些因素特别重要。此外,试验结构的特性,特别是它的非线性程度,将限制其结果的测量精度。4.2 描述了有关冲击激励的一些限制。

由于激振器并不连接到结构上,该方法实际是移动激振器连续地敲击结构上每一个要求的位置,而运动响应传感器保持在结构的某一固定点和固定方向上,测量结构的一系列传递导纳。基于动力学互

易原理,在线性情况下,这样测量得到的导纳与使用连到结构上同一固定位置和方向上的激振器,将响应传感器放到结构上某一要求的点所得的导纳应该是相等的。然而在结构的某一特定位置,在所有要求的方向上敲击结构可能是困难的,在此种情况下,更实际的方法是在结构某一固定位置和方向上使用锤击激励,而在结构要求位置上装一个多轴响应的传感器。

注:在一个固定位置使用一个多轴响应传感器并不能提供其他位置多轴响应的信息。例如,假定在模态分析试验中利用一个固定响应传感器进行测量,并且假定冲击仅作用在每一点的一个方向上,那么,只能获得该方向上的模态分量。

振动与冲击 机械导纳的试验确定

第3部分:冲击激励法

1 范围

本部分规定了如何用—个与结构不相连的冲击激励器激励结构来测量其机械导纳和其他频率响应函数的方法。

对于导纳、加速度导纳、位移导纳的测量,无论是驱动点测量还是传递测量,均可使用冲击激励。其他一些激励方法,如阶跃释放和瞬态随机方法,其信号处理要求类似于冲击数据。然而,这些方法由于它们要使用一个连到结构上的激励器,已超出本部分的范围。

涉及的信号分析方法是基于离散傅里叶变换,其应用范围受到实现这些方法的仪器的功能和使用经验的限制,并不排斥使用当前正在开发的其他方法。

冲击激励也广泛用以获得未校准的频响信息。例如,一个获得近似固有频率和振型的快速的冲击试验,对确定为获得精确导纳测量的随机或正弦试验激励是非常有帮助的。然而,这一为获得定性结果的冲击激励不应与用作导纳测量的冲击激励相混淆。

本部分仅限于为获取精确的导纳测量而使用的冲击激励技术。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过 GB/T 11349 的本部分的引用而成为本部分的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本部分,然而,鼓励根据本部分达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本部分。

GB/T 11349.1—2006 振动与冲击 机械导纳的试验确定 第1部分:基本定义和传感器

GB/T 11349.2—2006 振动与冲击 机械导纳的试验确定 第2部分:用激励器作单点平动激励测量

ISO 2041:1990 振动与冲击 术语

3 术语和定义

下列引自 ISO 2041 的术语和定义适用于本部分。

3.1

频率响应函数 frequency-response function

与频率相关的运动响应相量与激励力相量之比。

注1:频率响应函数是线性动力学系统的特性,它与激励函数的类型无关,激励力可以是简谐、随机或瞬态的时间函数,以某一类型激励器获得的试验结果也可以用以预示系统对任何其他类型激励的响应。

注2:系统线性是取决于系统的类型以及输入幅值的一种状态,实际上线性只能是近似满足。当应用冲击激励时,必须注意避免非线性影响,当已知一些结构是非线性时(例如:某些铆接结构)应不使用冲击激励进行试验,并且当利用随机激励对这些结构试验时,也必须特别注意。

注3:运动可以用速度、加速度或位移表示,相应的频率响应函数则为导纳、加速度导纳或位移导纳,或分别叫阻抗、有效质量和动刚度。

注4:假定为线性,对瞬态法激励的频率响应函数可以等效地定义为运动响应的傅里叶变换与激励力傅里叶变换的复数比。实践中,使用离散傅里叶变换(DFT)作为连续傅里叶变换的一个近似。这一近似的误差可以减小到其他误差之下。因此,使用 DFT 不会影响测量的精度。

3.2

关注的频率范围 frequency range of interest

一个从最低频率到最高频率的范围,单位为 Hz。在此范围内导纳数据是以一个给定的试验系列获得的。

3.3

直接(机械)导纳 Y_{jj} :direct(mechanical) mobility;

驱动点(机械)导纳 driving-point(mechanical) mobility Y_{jj}

机械系统简谐运动时同一点的速度和力的复数比。

注1:驱动点导纳是由结构 j 点的速度响应相量与施加在同一点的激励力相量之比构成的,单位为 $m/(s \cdot N)$ 。此时结构除了应用中支承点具有约束外,其他测点无任何约束。

注2:术语“点”指一个位置和一个方向。术语“坐标”的含意与“点”相同。

3.4

频率平均的导纳幅值 frequency-averaged mobility magnitude

在规定频带上平均得到的 i 点速度响应幅值与 i 点激励力幅值之比的均方根值,单位为 $m/(s \cdot N)$ 。

3.5

传递(机械的)导纳 transfer(mechanical) mobility

在简谐运动期间,机械系统上某点的速度相对于该系统上另一点作用力的复数比。

注:传递导纳由 i 点的速度响应相量与作用在 j 点的激励力相量之比构成的,单位为 $m/(s \cdot N)$,此时结构除了应用中正常支承点有约束点外,其他测点没有任何约束。

3.6

能量谱密度 energy spectral density

一个瞬态信号的功率谱密度乘以计算该瞬态信号谱用的记录长度。时间单位为秒。

4 冲击测量的一般特性

4.1 概述

使用冲击激励进行导纳测量所要求的仪器包括:一个带内装力传感器的冲击锤、一个或多个带信号适调仪的运动响应传感器、一个数字式傅里叶分析系统或是有至少两个输入通道的分析仪。仪器系统如图1框图所示。本部分将提供如何选择和使用这些仪器的信息。

由每次冲击得到的力和响应信号经抗混滤波之后,利用分析仪的瞬态捕捉方式进行数字采样。每一帧数字记录应表示一单次冲击事件。分析仪计算每一个记录的离散傅里叶变换。在一给定点可以进行多次冲击,以获得多个频率响应函数的频域平均以改善其估值。

4.2 冲击激励的优点及局限性

与使用连接式激振器相比,冲击激励具有以下优点:

- a) 测量速度快;
- b) 安装方便;
- c) 易于更换激振点;
- d) 激振时产生的结构附加载荷很小。

另一方面,必须注意冲击激励有以下局限性:

- a) 结构非线性限制;
- b) 信噪比问题;
- c) 频率分辨率限制;
- d) 阻尼限制;
- e) 对操作者技巧的依赖性。

这些局限性将在下面 4.2.1 至 4.2.5 讨论。

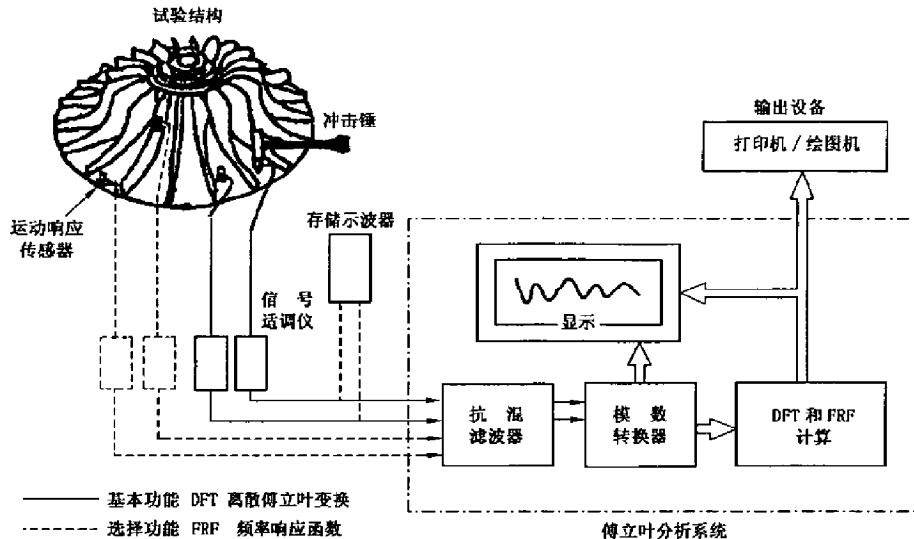


图 1 冲击激励仪器系统的典型框图

4.2.1 结构非线性限制

当结构呈现显著非线性时，其导纳测量要求特别注意，在此情况下，最好使用与结构连接的激振器以正弦或随机激励替代冲击激励技术。采用冲击激励时，由于使响应达到一定幅值所需的能量是在一很短的时间内作用到结构上的，与正弦和随机激励相比冲击激励力要大得多，因此其非线性影响也就增加了。

对非线性明显的结构进行导纳测量，保持激励力记录和系统响应记录是很重要的，在这种情况下最好使用正弦激励技术。如果用一个冲击锤来进行冲击激励，每次力的幅值变化可能很大。因此，对非线性系统，测量的重复性较差。

4.2.2 信噪比问题

冲击测量时，由于信号的平均电平比峰值电平低，因此要求测量系统的试验环境噪声低、动态范围大。所以，一般不宜使用模拟磁带记录仪。由于力信号的持续时间较记录时间长度短得多，可能出现显著的噪声问题，仪器电噪声和机械原因诱发的背景噪声的均方值与输入力信号的均方值相比是不可忽略的，用 8.5 所述的加窗方法可以降低这种噪声。

4.2.3 频率分辨率限制

离散傅里叶变换（包括有限带宽或细化分析）的频率增量（单位 Hz）等于记录长度（单位为 s）的倒数。由于每帧记录代表一个单次冲击事件，所以记录的长度可以取成结构的脉冲响应衰减到与背景噪声相当水平所需的时间。因此，得到的频率分辨率不仅取决于结构的响应，而且取决于背景噪声的大小。在某些情况下，用冲击激励直接得到 GB/T 11349.2—2006 规定的频率分辨率可能是不现实的（也是不必要的）。然而，对大多数应用来说，在是否足够细的频率分辨率的一些离散频率点上均可得到精确的导纳值。如果试验结构呈现高的模态密度（即在一个窄频带内有多个共振频率），对一个精确导纳测量要获得足够的分辨率可能是困难的。在这种情况下最好使用带细化分析的稳态激励方法。

根据冲击激励的固有特性，它的频谱从零到某一个上限频率（见第 6 章），由于不能限制激励频带，从而限制了用“细化”分析改进冲击测量频率分辨率的效果，并且进一步提高了对测量系统动态范围的要求。这也增加了在测量系统中由于频带外信号高幅值形成的不能检出的过载（削波）的危险，见 6.3 和 8.4。

4.2.4 阻尼限制

冲击激励对大阻尼结构试验有局限性；这是因为其响应信号的历程很短，要求试验人员必须在频率

分辨率和背景噪音电平之间作折衷选择,如 4.2.3 所讨论的。这种局限性也可以理解为在一定幅值的冲击力下,大阻尼结构响应的平均能量较低。大阻尼结构可能需要较高的能量持续激励,以平衡它较高的内部能量耗散,并为精确测量提供足够的响应数据。对于阻尼特别小的结构会出现不同的问题。其频率响应函数呈现很尖的共振峰,正如 4.2.3 讨论的那样,需用高分辨率的细化分析去精确地确定共振峰。利用指数窗给数据加上一个已知的衰减有助于解决这一问题。如果使用指数窗,则一定要对最终的导纳测量结果进行修正。如同 8.5 和附录 A 所述。

4.2.5 对操作者技巧的依赖

用手持式冲击锤进行导纳测量的精度取决于操作者保持正确的位置和方向的能力,如果仔细地施加冲击,这些影响通常可以控制在可以接受的限度内,但如果结构较小且要求很精确的空间定位,则这些影响就不可忽视。在避免反弹方面同样也要求操作者有较高的技巧,见 6.4。

5 在试验中结构的支承

结构的导纳测量可以在不落地(自由悬挂)或在落地(连到一个或多个支承上)状态下进行,具体选择取决于试验的目的。

5.1 悬挂状态测量

悬挂状态测量使用一个柔性悬挂试验结构。悬挂的驱动点导纳矩阵各元素的幅值应至少比结构在相同连接点导纳矩阵相应元素的幅值大 10 倍。

5.2 落地测量

落地测量使用试验结构的支承。除非另有说明,支承应代表结构实际应用的支承状态。对支承和连接的说明应包含在试验报告中。

6 冲击激励

6.1 冲击锤

典型的冲击锤由一刚性质量块以及紧固在质量块一端的力传感器和紧固在力传感器另一端的锤头组成,如图 2 所示。锤头的刚度和力锤的质量应按 6.3 进行选择,以获得要求时间宽度的力脉冲并避免反弹。

小质量的冲击锤常做成手锤形式并附有可更换的锤头和质量块。然而,使用冲击锤获得的精度取决于操作者保持冲击正确位置和方向的技巧。对小试验结构,可能需要一个合适的机械装置保持冲击锤在结构的某一指定位置和方向上激励。对需要较高能量的大试验结构,可以把大质量的锤用缆绳吊起来,靠质量的自由下落或摆动进行冲击激励,也可以用弹簧、电磁吸铁或其他方法将较小的质量块加速到较高的撞击速度。

锤头的表面积应足以承受施加的最大冲击力,而又不使锤头和试验结构产生永久变形。另外,如果冲击位置要精确定位,则锤头的面积要小。冲击锤在冲击瞬间,速度矢量应该与力传感器的灵敏轴在同一条线上,并垂直于试验结构表面,其偏差应小于 10 度,细长的冲击锤容易保持合适的冲击方位。

6.2 力谱特性

理论上,无限小持续时间的脉冲在所有频率上含有相同的能量。然而,任何实际力脉冲的力谱只有有限的带宽,且与力脉冲的持续时间成反比。这提供了把激励能量集中在关注的最高频率以下的方法,实际上,典型的单个力脉冲频谱一般还有较高频旁瓣紧跟在低频主瓣之后,它们的幅值随频率的增高而迅速减小。图 3 给出了一个力脉冲和它的能量谱密度,该脉冲的可用频率范围直到大约 1 000 Hz,该范围通常取决于试验结构的响应特性。

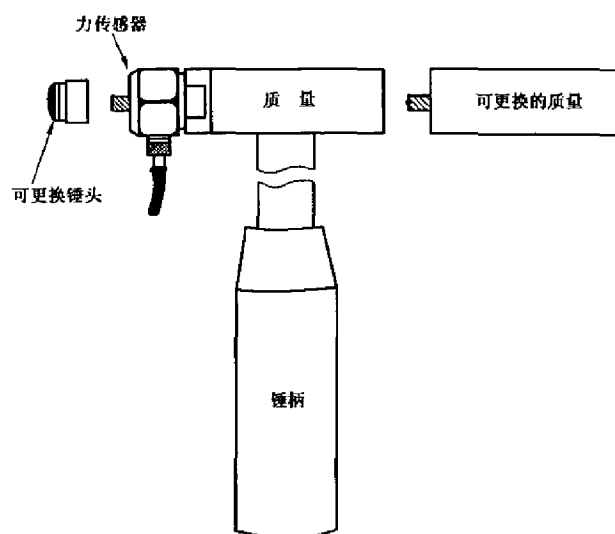
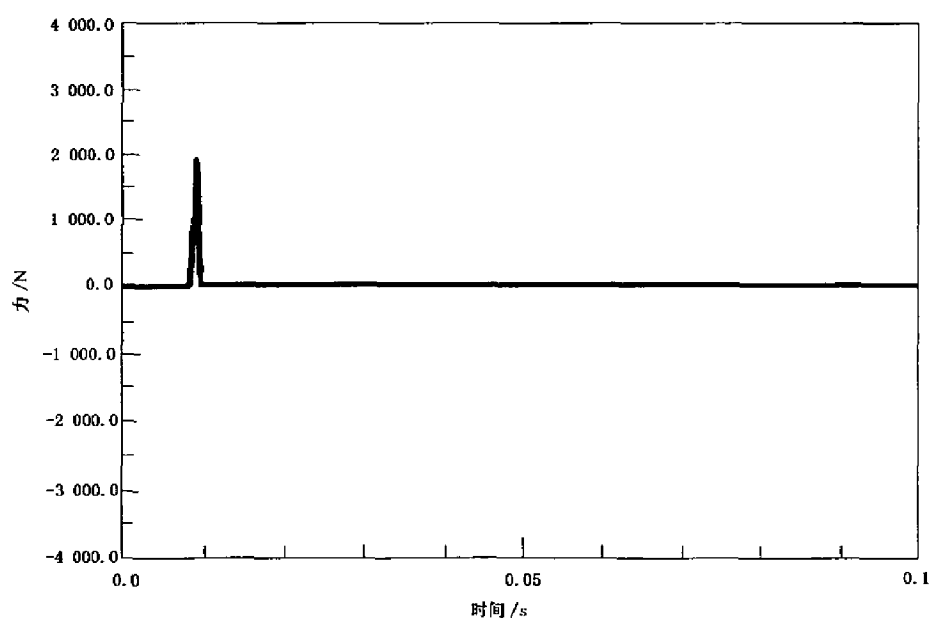
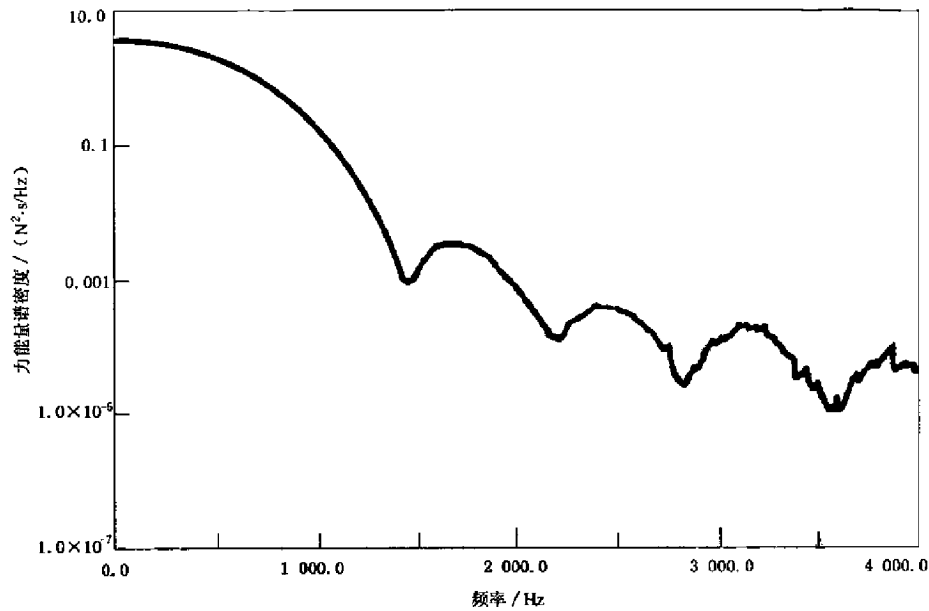


图2 典型的手持式冲击锤



a) 未滤波的冲击力时间历程

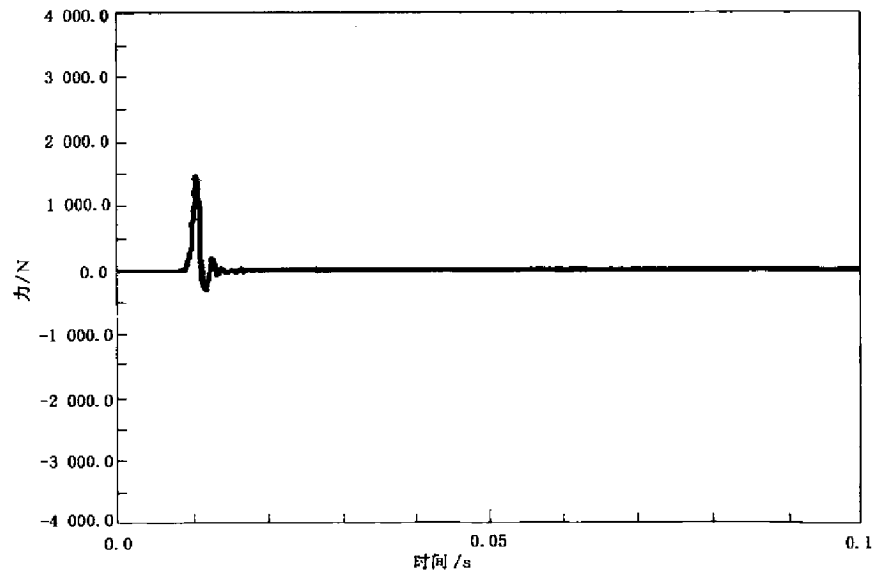
图3 典型的力脉冲和频谱



b) 未滤波的冲击力能量谱密度

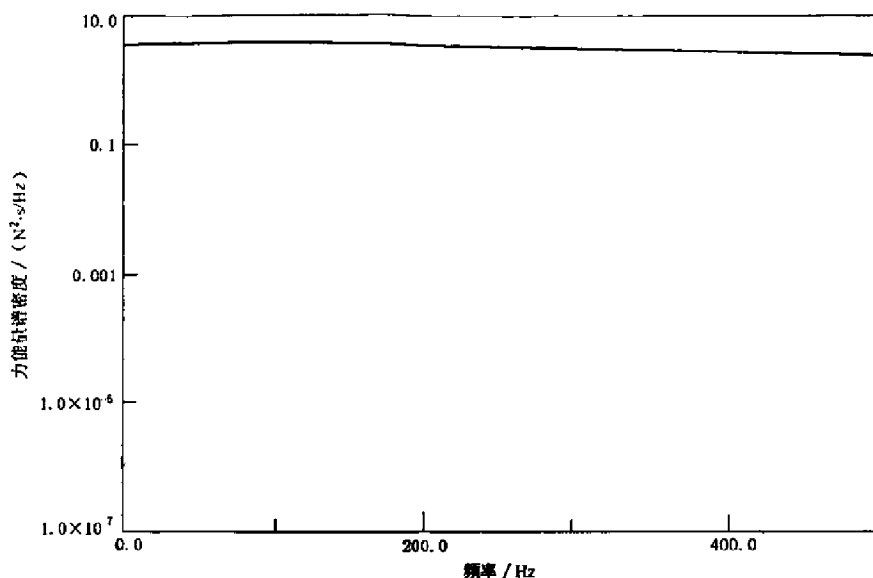
图 3 (续)

注：在离散傅里叶变换中，频域分辨率和时域分辨率是矛盾的，需要折衷。为了获得最大的频率分辨率，分析频率范围应不超出关注的最大频率。由于离散付里叶变换的采样关系（见 8.3 节），力波形只是由傅里叶分析数字记录的很少一些离散样点来表示，并且力的波形也被抗混滤波器改变了形状。当必须精确的频域分析时，数字记录便不适合用来监测冲击测量的力波形（除非分析带宽增加到力脉冲使用频率范围以上）图 4 给出了与图 3 相同的力脉冲，但它作了截止频率为 625 Hz 的低通滤波。我们看到，尽管图 4 所示的数字化力滤波器的形状和峰值与图 3 有明显差别，但它们的能量谱密度很一致。



a) 滤波后的冲击力时间历程(截止频率 625 Hz)

图 4 低通滤波对力脉冲及其频谱的影响



b) 滤波后的冲击力能量谱密度(截止频率 625 Hz)

图 4 (续)

6.3 激励频率范围的控制

为了优化使用测量系统的动态范围,最好使激励的频率范围接近最大关注的频率范围,激励带宽是由锤头的刚度和冲击锤的质量来控制的。可以用减小锤头刚度或增加冲击锤的质量来减缩冲击锤的频率范围。实际获得的频率范围还与试验结构在冲击点有效刚度和有效质量有关。对刚度低的结构难以用增加锤头刚度的办法来增加频率范围,此时用减小冲击锤质量的方法更加有效。

应该使用与试验中可能要施加的最大激振力相当的力,对力谱和响应谱中高于关注的频率范围的能量进行检查。如果需要,应该对冲击锤的特性进行调整以获得需要的频率范围。

6.4 避免冲击反弹

如果一顿数据记录有两个以上的冲击,脉冲的傅里叶变换就会在某些频率上抵消其频率分量,从而在力谱中产生一些尖的下凹(如图 5 所示)。由于力谱在这些频率点上信噪比低,这些频率点上导纳的测量结果会产生显著的误差。对于结构上很敏感的点,如果用较重的冲击激励,即使非常仔细地施加冲击有时也难免发生反弹。解决办法是减少冲击锤的质量,调节锤头刚度以达到需要的激励频率范围。

假如第二次冲击比初始冲击小得多,则力谱可能会呈现轻微的波动而不是尖的下凹。在力谱中,轻微的下凹通常是允许的。多次撞击是很容易通过检查每个撞击位置力谱而找出来的,也可以监测力的时域波形,使用记忆示波器观看未滤波的力信号,以使第二次冲击不会被第一次冲击的抗混滤波器的“振铃”掩盖。

7 传感器系统

7.1 概述

滤波器和信号适配仪组成的传感器系统应根据导纳测量标准 GB/T 11349.1—2006 和 GB/T 11349.2—2006 给出的准则选择。对于冲击测量来说,该系统应具有低噪音和大的线性动态范围是特别重要的。

7.2 冲击锤校准

虽然力传感器和试验结构之间的有效质量不影响运动响应信号,但它对冲击锤的力有显著影响。在每组测量开始和结束时应进行以下的系统校准,并且它应是重复的不随冲击锤的质量或锤头而改变。

这一系统校准是通过测量一个自由悬挂的已知质量的刚性校准块的导纳或加速度导纳执行的。在

整个关注的频率范围内测得的校准块的频率响应与已知值(例如,加速度导纳的幅值为 $1/m$, 这里 m 是校准块的总质量, 包括附加于其上的传感器的质量)之差应在 $\pm 5\%$ 之内。校准时, 应使用校准值已知的响应传感器, 并通过调整力信号的校准常数, 以获得正确的导纳或加速度导纳的幅值。对试验中将要使用的其他传感器(例如多轴向传感器)也要进行系统校准。测量系统和冲击锤的配置应保证校准时和导纳测量时相同。应选择校准块的质量, 以使其导纳值能代表将要测量的导纳范围。假如校准测量不能找到在关注的频率范围内基本上是常数的加速度导纳值, 应研究产生这一偏差的原因并且在试验前解决这一问题。

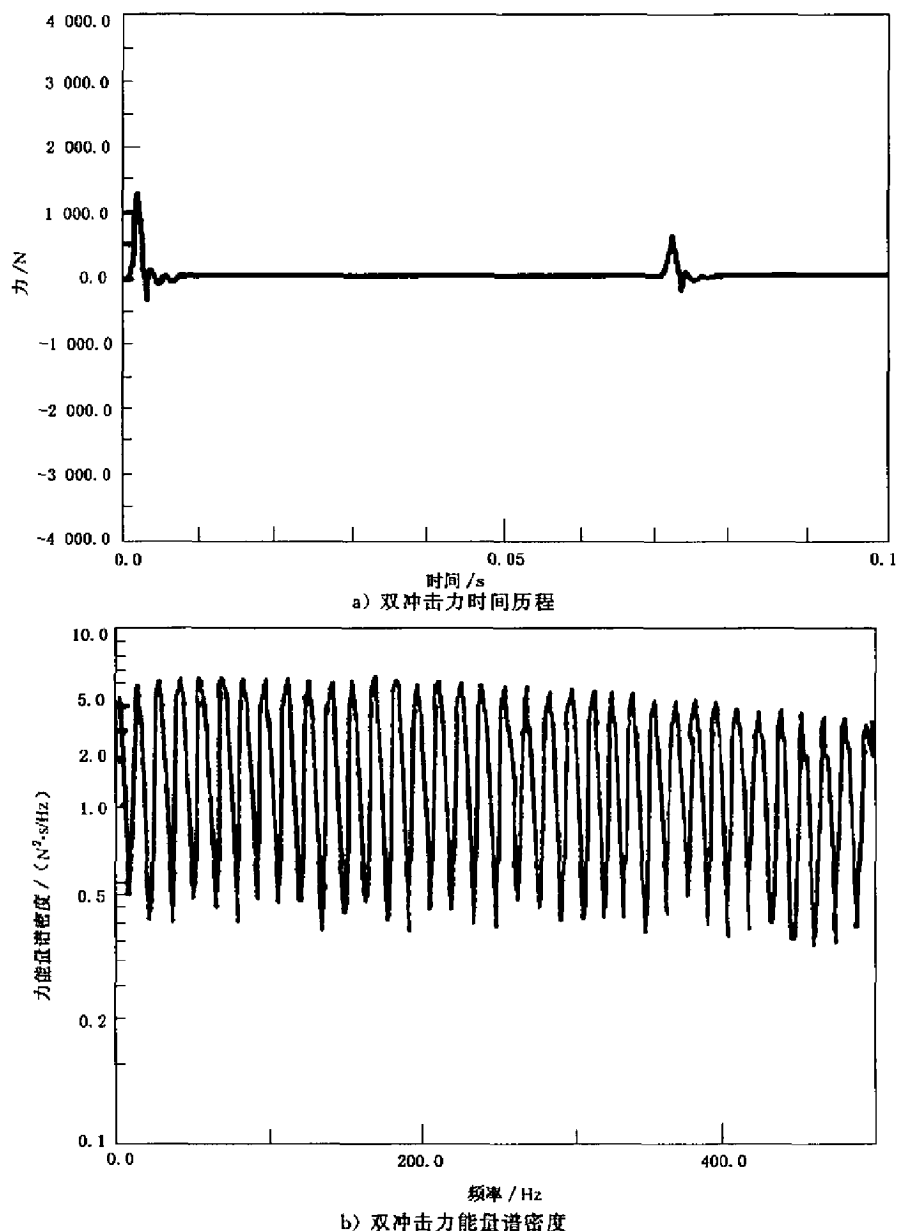


图5 力记录中两次冲击力对力谱的影响

注: 决不能在傅里叶变换之前用“力窗”(见 8.5)清除力记录中的第二次冲击的影响。当用力窗减少力信号中的噪声时, 要注意不要掩盖实际发生的多次冲击, 否则响应中仍然包含多次冲击的影响, 这会导致频率响应函数的错误估计。

8 传感器信号的处理

8.1 滤波

在用傅里叶分析仪对数据采样和数字化以前,必须对传感器信号进行低通滤波,以防止在分析频率范围内混入带外信号而引起混迭。大多数信号分析仪都有内置滤波器,它的截止频率是与分析仪可用的频率范围相匹配的。抗混迭效果可以用一台高质量的信号发生器来检查。检查时,用信号发生器在分析频带以外的若干频率点上给分析仪输入满刻度正弦波,然后检查输出谱在分析频带以内是否有假的频率分量,检查时使用的频率最好大于或等于采样频率与最大分析频率之差。

滤波器的另一个重要特性是在通带内各通道的增益和相位匹配。7.2 给出的系统校准检查包含这些因子以及测量系统的其他方面。滤波器和分析仪各通道的匹配性能可这样来检查,将同一宽带(随机或脉冲)信号输入到所有滤波通道,然后测量每一对通道间的频率响应在整个关注的频率范围内其幅值应该等于 1,误差为 $\pm 5\%$,相位应为 0,误差为 $\pm 5^\circ$ 。

为了充分利用分析仪的动态范围,可以利用高通滤波器对低于关注的频率范围下限的信号分量进行衰减。实际上,滤波器信号中的任何直流分量可以在输入到分析仪之前用“交流耦合”消除,假如使用加窗处理这是特别重要的(见 8.5),如使用高通滤波器,要注意确保它在关注的频率范围内不产生增益或相位误差。

8.2 瞬态捕捉特性

应该用分析仪的瞬态捕捉方式得到每次冲击的数字记录,以使数据的起始点置于数字记录的起点附近。数字记录应该包括少量的预触发数据,以保证不丢失冲击的前沿,见图 6。如果分析仪没有预触发功能,最好对未滤波的力信号使用外触发。

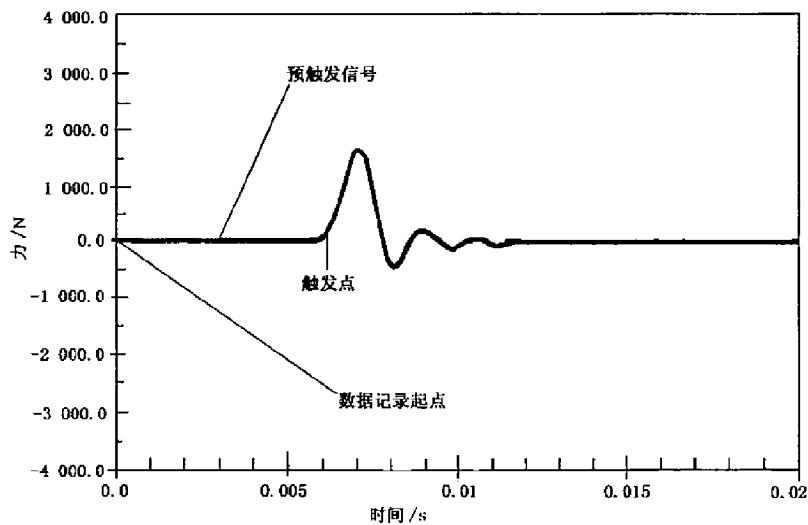


图 6 带有预触发的瞬态捕捉的力时间历程

8.3 采样关系

每个用于傅里叶变换处理的数字记录都是由固定的 N 点组成,这些点是从一个滤波过的模拟波形等间隔离散采样值。由于离散傅里叶变换(DFT)算法的需要,DFT 块的大小 N 通常是 2 的整数次方,典型的块大小是 1024,记录长度 $T=N\Delta t$, Δt 是采样间隔,单位为秒(s),采样频率是 $1/\Delta t$ 。

记录的 DFT 产生 $(N/2)+1$ 个傅里叶系数。这些系数代表从零频率到采样频率的一半(称为奈奎斯特频率或折叠频率)的频率范围内间隔为 $\Delta f=1/T(\text{Hz})$ 的离散点上的频率值。实际上,滤波器的截止频率必须置到“奈奎斯特频率”以下,以防止混迭。这是由于滤波器的滤波特性并非无限陡的。典型的是把采样频率取为滤波器截止频率的 2.56 倍到 4 倍,具体倍数取决于滤波器的截止特性。对块大小为 1024 的情况,DFT 将产生 400 至 256 条有效的频域“谱线”。

当瞬态数据全部包含在数字记录中时,DFT 与所测频率范围上的真实傅里叶变换是一致的。即是说,DFT 的离散谱值是理想的连续谱的采样。对线性结构进行冲击激励时,响应信号是一作指数衰减正弦信号的迭加再加上背景噪声。通常,最好的响应信号是在记录的终端衰减到初始幅值的 1%,这是一个折衷;使用一较长记录使响应信号降到检测的限值,将改善频率分辨率,但将减小测量信噪比;而使用一较短的记录导致响应信号的过度截断,而产生信号处理的“泄漏”误差增大。

因为记录的长度等于块大小和采样间隔的乘积,记录长度似乎可以适当调节这两个因素来控制。然而,采样频率是固定的,由要求的频率范围决定的。并且块大小受所用傅里叶分析仪算法的设计所约束。实际上,如采用这种方法对小阻尼结构可以要求特别大的数据块。以下两种方法更普遍地用以处理这一情况。

- a) 在傅里叶处理之前,可用指数窗(见 8.5)给数据加上一个已知的人为衰减;
- b) 采用细化处理可增加有效记录长度,而实际上并不增加块的大小。细化可以在一缩减的分析频带内提高频率分辨率。

8.4 避免饱和(削波)

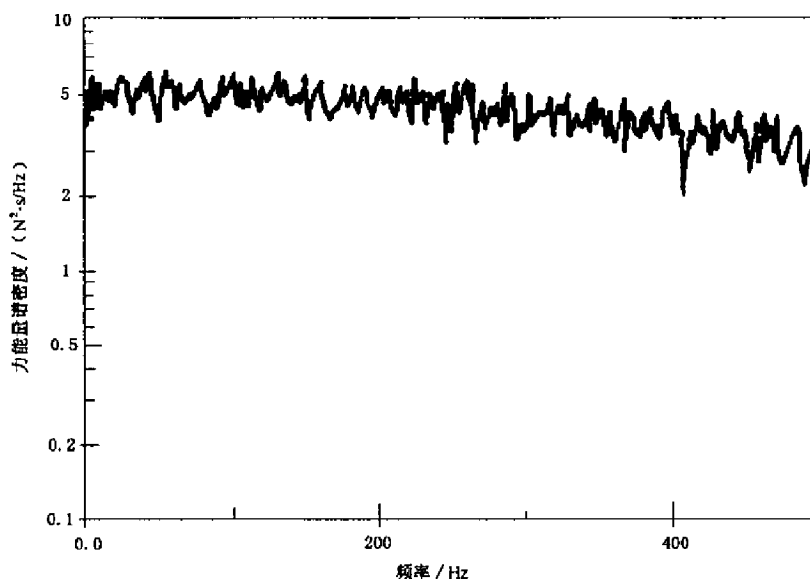
由于冲击激励信号中可能有大量带外能量,所以有造成测量系统饱和的危险。另外,在试验中必须使用最大动态范围,从而使信号的峰值与测量系统不同点上的饱和极限尽可能接近。如 6.2 注所述,测量中数字记录对实际波形提供了不准确的描述,不能用它来检查饱和。避免饱和的最好方法是使用带宽远远超出信号带宽的存储示波器来监视未滤波的信号。如果不能这样做,可以使用傅里叶分析仪,以远远高于数据最高频率分辨率对信号进行采样。应该在导纳测量前在每个位置上执行检查,检查时使用的冲击力应尽量接近测量中使用的最大值。

饱和问题并不总是以波形削顶的形式出现。还应注意制造商提供的线性工作的最大电压的规定。可以通过适当减小冲击力,减小信号放大器或傅里叶分析仪的增益,或者选择较低灵敏度的传感器来消除饱和。

8.5 加窗技术

8.5.1 力信号加窗

由于在用于分析的数字记录中冲击力信号只占很少一部分(一般小于 1%)所以即使是很小的噪声电平也可在力的频谱中产生很大的误差,对使用细化或很大数据块的情况更是如此。因为噪声在力自谱中,它不能通过常用的频率响应函数估计的平均来减小。



a) 没有使用力窗的能量谱密度

图 7 力窗的效果

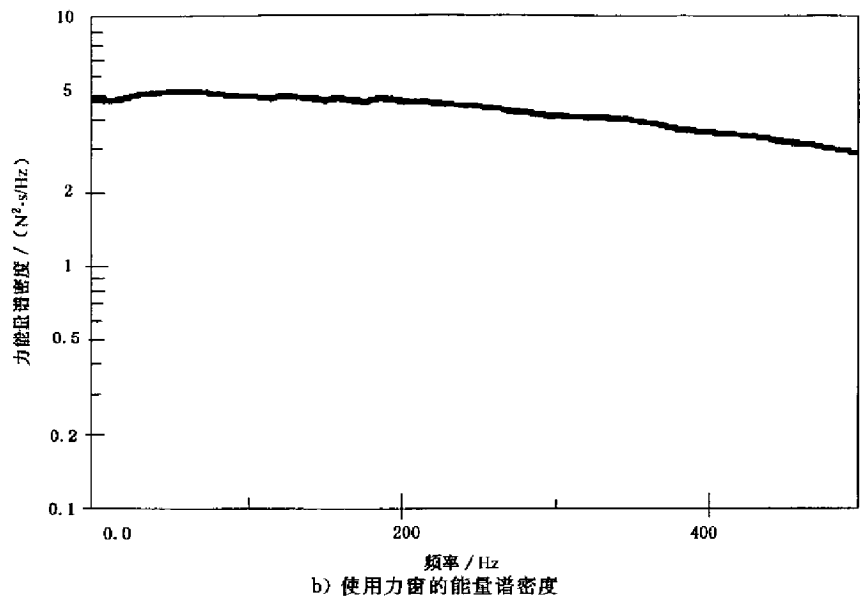


图 7 (续)

在傅里叶处理之前,将力信号记录乘以“力窗”可以大大减小随机噪声。力窗在记录中的力信号(包括滤波器的响应)部分增益为 1。在力信号以外的部分为 0。只要力信号数据没有减少,而且背景噪声是宽带的,这样做不会产生畸变。图 7 比较了一个典型的力脉冲加窗处理前后的能量谱密度。

注:如果力记录中有较大的周期噪声或直流偏置,使用力窗可以减小它们在谱中的幅值。

然而在进行 FFT 时,由于连续噪声信号的截断而引起的泄漏将会使噪声谱遍及一个相当宽的频率范围。因此,在不关注的一些离散频率点上(象 0 Hz 或电源频率)产生的噪声在加窗处理后会污染相当一部分关注的频率范围。虽然使用一个在 1 和 0 之间平滑过滤的力窗可以将泄漏限制在一个比较窄的频带内。如参考文献[4]所述。但最好的方法还是在加力窗之前从数据中消除所有的周期和直流噪声分量。图 8 表示了在 60 Hz 频率上有很大噪声的力信号加矩形力窗后的效果。

注:本提示也适用于 8.5.2 节所述的响应信号加窗。

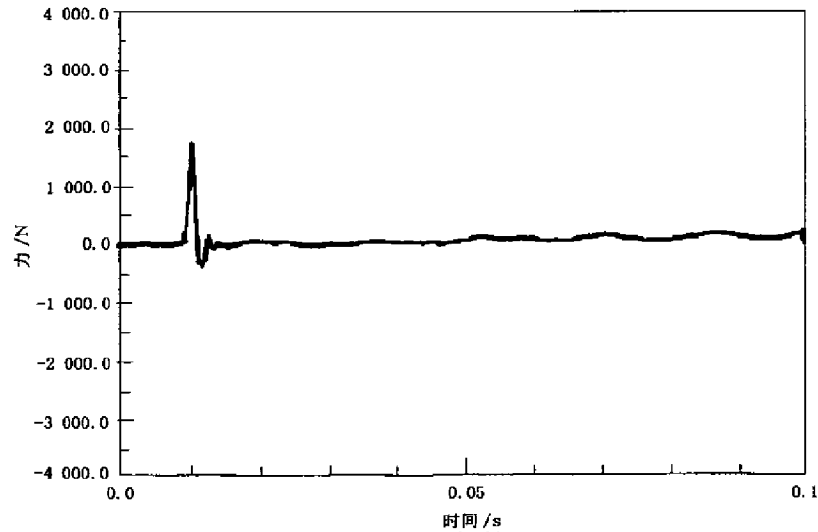
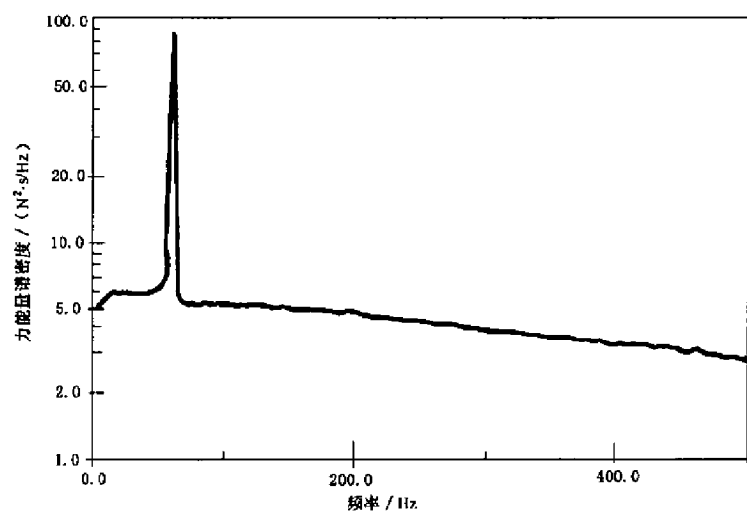
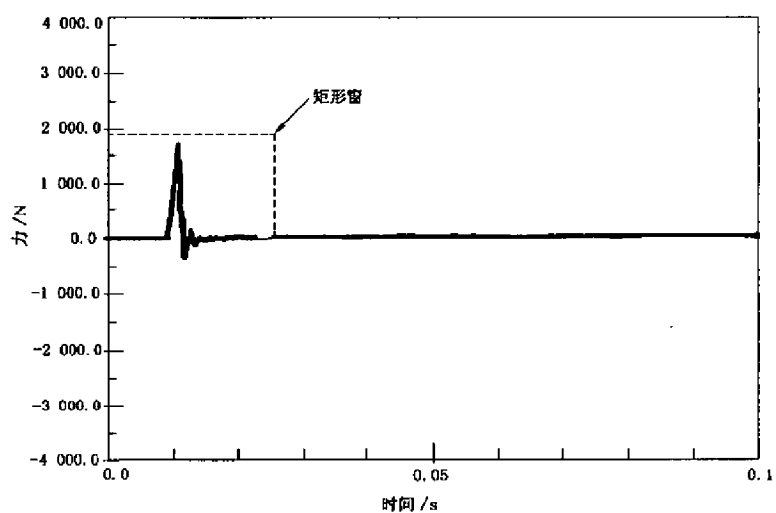


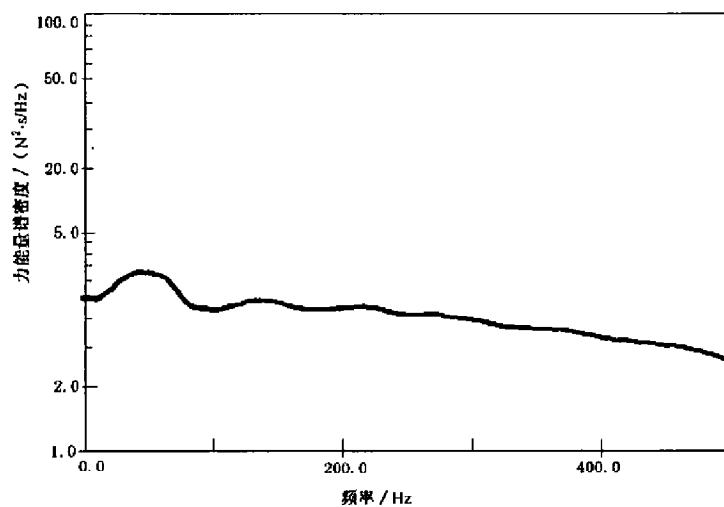
图 8 力窗引起的泄漏误差



b) 没有使用力窗的能量谱密度



c) 使用矩形力窗的力时间历程



d) 使用矩形力窗的能量谱密度

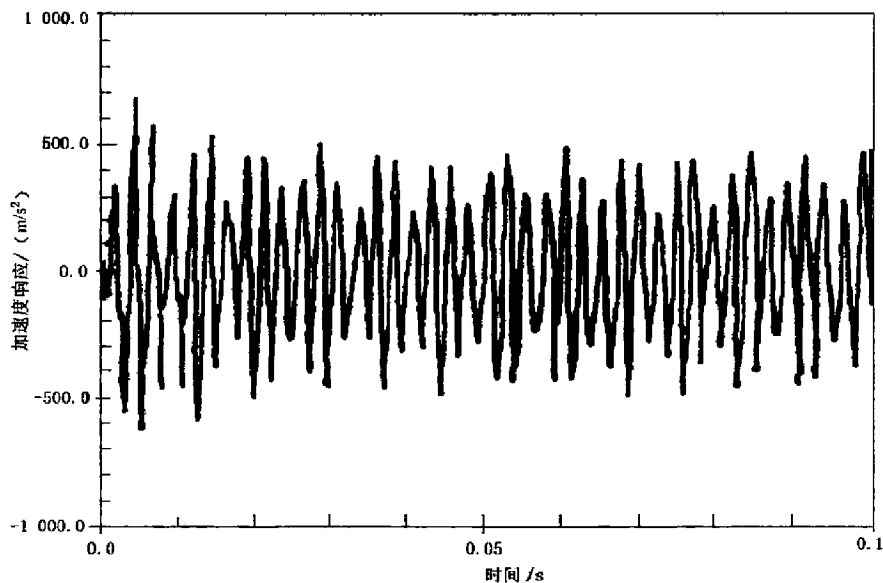
图 8 (续)

8.5.2 响应信号的加窗

如 8.3 所述,为了防止截断误差,响应信号在数字记录的末端应衰减到其初始值 1% 左右。一种方便的检查方法是检验峰值响应信号在记录的中点处是不是最大响应的 10%。对小阻尼结构,它是不可能的(或不要求的)。这是由于它需要傅里叶分析仪有很大的数据块或一个很窄的细化带宽。假如这样细的分辨率不是应用所要求的,那么较好的方法是在傅里叶处理之前给响应时域数据加指数窗。

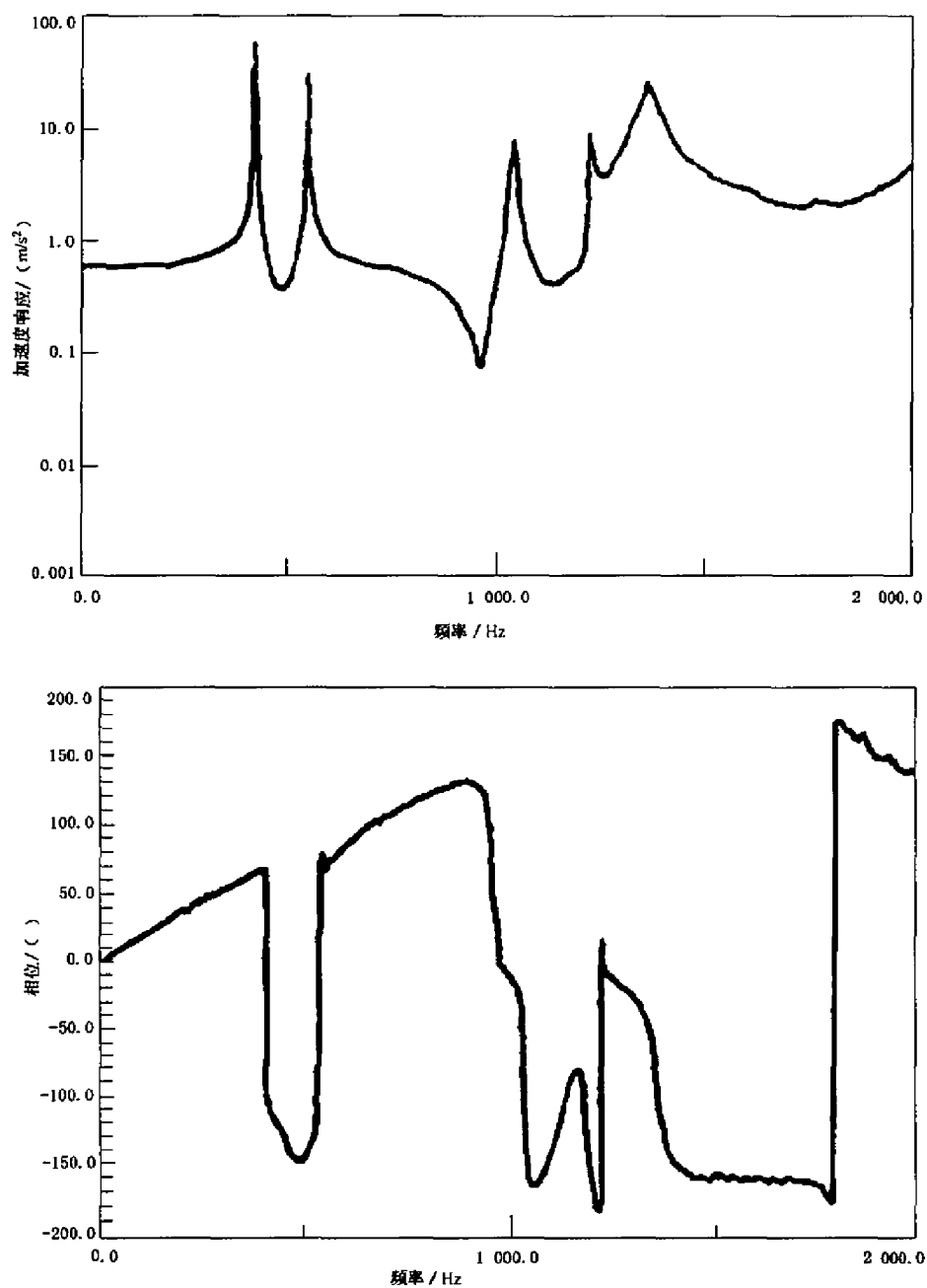
指数窗的初始值是 1,然后按指数衰减,在时间记录末端衰减到某一最终值。图 9 所示为一小阻尼的响应记录 and 相应的频率响应估计。图 10 所示为与图 9 相同的数据使用了衰减到初值的 5% 的指数窗后的结果。图 9 上的频率响应展现出 DFT“泄漏”误差的特征:显著的相位失真和一定的噪声幅值。而且未加窗的频率响应函数会低估每一共振峰的模,低估的量是不可预计的。它取决于在时域记录中被截断的特定振动模态在总响应中所占的比例。

图 10 表明了失真有明显减小,虽然所有的共振峰值也都有减小,但这些幅值可以按附录 A 给出的方法予以修正。这一修正取决于存在于加窗数据中每一振动模态的视在阻尼。然后再扣除由于指数窗所加的已知阻尼。作为一个通用的规则,响应信号在数字记录内应自然衰减到初值的 25% 或更少。否则,幅值修正会对阻尼估计中的任何误差非常敏感。即使时间记录长到足以能够基本上捕捉到所有的响应数据,利用指数窗也可以改善测量的信噪比,这是由于它增加了响应信号中高幅值部分的权。



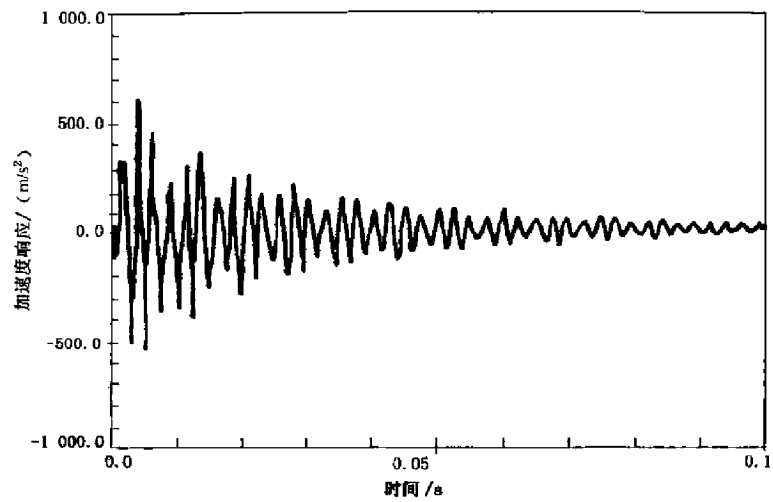
a) 加速度响应

图 9 未加窗的响应信号和频率响应函数

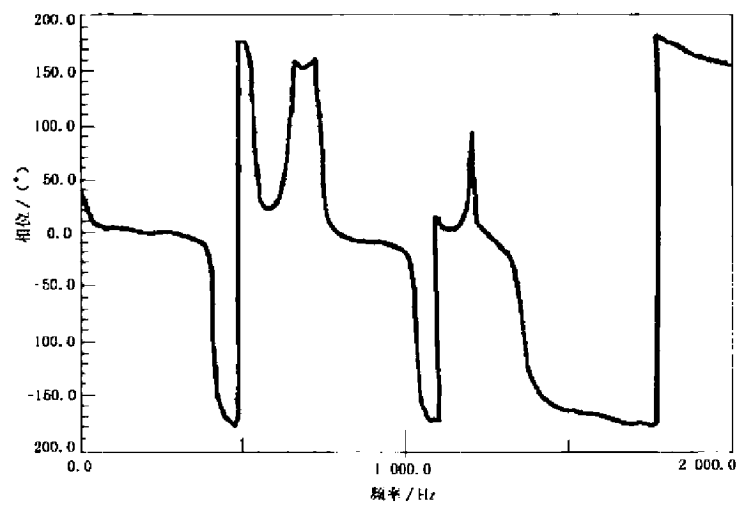
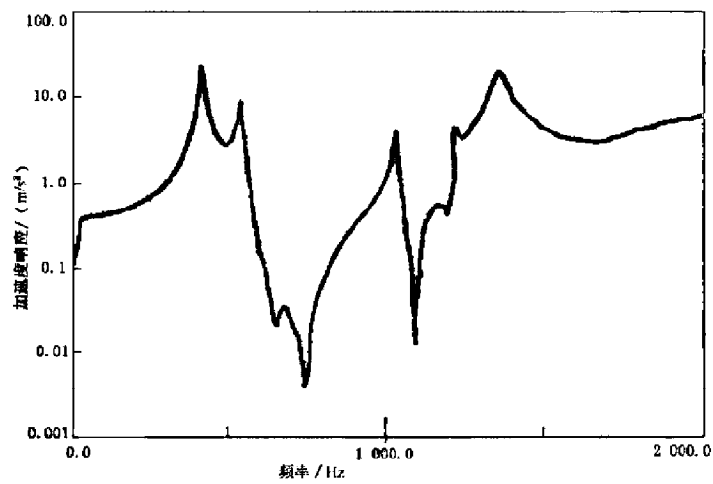


b) 没有使用指数窗的加速度谱 (a/F 幅值与相位)

图 9 (续)



a) 加指数窗的加速度响应



b) 加指数窗的加速度导纳(a 、 F 幅值与相位)

图 10 加指数窗后的响应信号和频率响应函数

8.6 平均技术

为了改善频率响应函数的估计,可以对同一点的若干次冲击数据进行频域平均,频率响应函数是由响应与力的平均的互谱除以力的平均的自谱得到的。平均也用于计算相干函数(见 9.1)。在低噪声环境中,通常进行 3~5 次冲击平均就可以检验数据质量,多次冲击平均可以减少不相关噪声对响应信号的影响。然而,假如平均次数过多,锤击法就失去了速度快的优点。如果背景噪声不能通过平均减少,就应考虑使用其他激励方法。

每当进行下次冲击之前,应确认结构的响应已衰减到检测限值以下,任何剩余的“振铃”将影响到其后响应信号的测量,对小型结构或小阻尼结构,可用手将结构的响应衰减掉。

9 测量有效性的检验

9.1 相干函数

相干函数定义为力与响应的平均互谱的模的平方除以力的平均自谱与响应平均自谱的乘积。相干函数表示每一频率点上响应与力之间线性相关的程度,它的值总在 0~1 之间。相干值小于 1 是可能不良数据质量的一个指示。

相干估计值的精度取决于两个因素,一是谱平均的数据记录帧数,二是相干函数的真值。如果真值高(大于 0.9)则只需要几帧记录(5~10 帧)便可获得高置信度的统计估计精度。有关估计误差的公式在参考文献[6]给出。

注:在反共振频率点上低相干函数并不是由于数据质量引起的。在这些频率点上,结构响应可能与仪器的噪声电平接近,此时低的相干函数仅表明信噪比降低。

冲击测量中低的相干函数值可能由下列原因引起:

- a) 力信号中的噪声;
- b) 响应信号中的噪声;
- c) 在平均时,冲击位置和方向的变化;
- d) 某些典型的非线性。

特别提示:某些类型的误差并不能由相干函数指示。

假如冲击力是可重复的,造成确定性误差的原因可包括如下:

- a) 由于响应的截断引起“泄漏”(频率分辨率不足);
- b) 结构非线性;
- c) 信号削波。

如果低的相干函数值是由响应信号的噪声(背景振动)引起的,用足够高的平均次数仍能实现精确的无偏测量(见 GB/T 11349.2—2006 的附录 A) 力信号中的噪声应该使用合适的加窗技术予以消除。否则频率响应计算将是有偏的(见 8.5.1)。

9.2 重复性检查

在完成一系列导纳测量之后,至少应对其中某一次结果进行复检,以检验吻合程度是否在允许的限度内。这一检验还可以找出其他一些问题,例如结构或他的边界条件的变化,由温度变化引起的变化或测量系统校准的改变等。如果实际可能,这一检验应重复完整的试验设置和安装。

9.3 互易性检查

根据互易性原理,对线性结构如果将其激励点和响应点互换,两点之间的传递导纳应保持不变。这样成对测量结果的一致程度可验证所用试验方法的有效性。若这两者之间吻合程度不好,则表示可能是由于响应传感器附加质量过大或存在某些类型的非线性问题。

9.4 线性检查

许多类型的结构非线性可以用不同大小的激励力重复进行同一导纳的测量来检测。如果实际可能,力的幅值变化至少 10 倍,如果前后导纳测量结果相差较大,则应进行分析研究。

9.5 与使用连接式激振器的测量结果比较

在一些情况下,可能希望与使用连接式激振器连续激励测量的同一导纳进行比较。这一比较需要相当多附加设备和准备时间,所以一般不进行,除非对冲击激励是否适用于所试验的结构有怀疑才进行这一比较。

附录 A

(规范性附录)

导纳测量中指数窗影响的修正

如 8.5 所讨论的,在使用冲击激励的频响测量中加指数窗对减小泄漏误差以及噪声的影响经常是很有用的。然而,这种加窗对导纳测量幅值有很大影响。如果测量数据能用一个线性模型精确地拟合,并在关注的频率范围内能精确地确定每一阶模态的视在阻尼,这些影响便可按以下方法精确地进行修正。在某种意义上,这取决于阻尼估值方法的技术超出了导纳测量范围,并进入到模态分析领域。纵使阻尼估值技术的讨论已超出了本部分的范围,但现在已广泛地通过各种曲线拟合方法获得适当的参数估计。

假定线性系统的响应时间历程为 $x(t)$, 输入力为 $f(t)$, 其线性脉冲响应为 $h(t)$, 其初始条件为 0, 即结构初始状态是静止的, 则 $x(t)$ 可以通过卷积给出。

$$x(t) = \int_0^t h(u)f(t-u)du \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

两边同乘以 e^{-at} 得到:

$$e^{-at}x(t) = \int_0^t e^{-au}h(u)e^{-a(t-u)}f(t-u)du \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

公式(A.2)表示如果给力和响应的时间历程都乘以指数衰减窗函数,则与这些加窗后的时间历程对应的脉冲响应为实际脉冲响应乘以同一指数衰减函数。线性系统脉冲响应是 $A_r e^{s_r t}$ 的叠加,其中 s_r 是一个复数,其实部和虚部分别为第 r 阶振动模态的衰减率和固有频率,而且 A_r 为一复常数。因此,对力和响应加指数窗的效果就是在脉冲响应函数中用 $(s_r - a)$ 代替 s_r 。

如果频率响应函数用了指数窗,并且假定 ξ_r 是测得的第 r 阶模态估计的阻尼因子,那么第 r 阶模态的真实阻尼由下式给出:

$$\xi_r = \xi_r - a/\omega_r \quad \dots\dots\dots (A.3)$$

式中:

ω_r ——阻尼固有频率,单位为弧度每秒(rad/s)。

用修正的阻尼值对关注的频率范围内的所有模态进行综合而得到修正后的导纳值。对小阻尼而且各模态远离的,峰值幅度与阻尼成反比,在此情况下测得的第 r 阶模态的峰值乘以 ξ_r/ξ_r ,便可得到真实的峰值。

实际上,指数窗常常只用于响应的时间历程,而不适用于力的时间历程。由于冲击力信号持续时间很短,因此,给力加指数窗的结果与给力乘以矩形窗的结果相当接近。如果力峰值出现在非常接近数字记录开始点的位置,则它们之间的差别可以完全忽略。如果 7.2 所述的系统校准是在使用与导纳测量相同的窗处理和预触发,则这一影响将自动地包含在力的校准中。

参 考 文 献

- [1] ISO 5347-1:1993, 振动与冲击传感器校准方法 第1部分:激光干涉法一次校准.
- [2] ISO 5348:1987, 机械振动与冲击 加速度计的机械安装.
- [3] IEC 263:1982, 绘制频率特性和极坐标图的比例和尺寸.
- [4] Brown, D. Carbon, G. . and Ramsey, k. . Survey of Excitation Techniques Applicable To the Testing of Automotive Structures, Societe of Automotive Engineers, Paper No. 7700291977.
- [5] Halvorsen, w. and Brown, D. Impulse Techniques for Structural Frequency Response Testing, Sound and Vibration, November 1977.
- [6] Bendat ,J. and Piersol ,A. Random Data: Analysis and Measurement Procedures, Wiley- Inter-science , New York. ,1971.
- [7] Ewins, D. State-of-the-art Assessment of The Mobility Measurement Techniques-Sum-mery of Results, Journal of The Society of Envirnmatal Engineers, 21(1), March 1981.
- [8] Mitchell, L. Improved Method for The Fast Fourier Transform (FFT) Calculation of The Frequency Response Fonction, Journal of Mechanical Design, 104, 1982, pp. 277-279.
- [9] Sisson, Zimmermann, and Martz. Determiation of Modal Properties of Automotive Bodies and Frames Using Transient Testing Techniques, Society of Automotive Engi-neers , Paper NO. 730502, 1973.
- [10] Brown D. AlleMangR. , Zimmarmann, R. , and Mergeay, M. Parameter Estimation Techni-ques for Modal Analysis, Society of Automotive Engineers, Paper NO. 790221 1979.
- [11] Patergon, E. ana Klorterman, A. Obtaining Good Results from an Experimental Modal Survey , Society of Automotive Engineers Conference, November 1977.
- [12] TaBor, R, Brown, o. Vold, H and Rocklim, G. Exponenntial Window for Burst Random Excita-tion, Proceedings of The Third Intermatinal Modal Analysis Conference, January 1985.
- [13] Sohaney, R. and Nieters, J. Proper Use of Weighting Founction for Impact Testing, Proceedings of The Third Intermatinal Modal Analysis Conference, January 1985.
- [14] Ewins, D. Modal Testing: Theory and Practice, Wiley ,1984.