



中华人民共和国国家标准

GB/T 11349.2—2006/ISO 7626-2:1990
代替 GB/T 11349.2—1989

振动与冲击 机械导纳的试验确定 第2部分：用激振器作单点平动激励测量

Vibration and shock—Experimental determination of mechanical
mobility—Part 2: Measurements using single-point translation
excitation with an attached vibration exciter

(ISO 7626-2:1990, IDT)

2006-06-02 发布

2006-11-01 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 测量系统的总体结构 ·	· 2
5 试验结构的支承 ·	· 2
6 激励 ·	· 3
7 激励力与运动响应的测量 ·	· 8
8 传感器信号的处理 ·	· 9
9 激励的控制 ·	· 10
10 有效数据的检验 ·	· 13
11 模态参数识别 ·	· 13
附录 A (规范性附录) 测量结果的有效性检验 ·	· 14
附录 B (规范性附录) 对激励频率增量与持续时间的要求 ·	· 17
附录 C (资料性附录) 模态参数识别 ·	· 18
参考文献 ·	· 19

前 言

GB/T 11349《振动与冲击 机械导纳的试验确定》分为3个部分：

- 第1部分：基本定义与传感器；
- 第2部分：用激振器作单点平动激励测量；
- 第3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2部分。

本部分等同采用ISO 7626-2:1990《振动与冲击 机械导纳的试验确定 第2部分：用激振器作单点平动激励测量》。

为便于使用，本部分做了如下编辑性修改：

- 用“本部分”代替“本国际标准”；
- 用小数点“.”代替作为小数点的逗号“，”；
- 按照GB/T 1.1的要求删去国际标准的前言。

本部分代替GB/T 11349.2—1989《机械导纳的试验确定 用激振器作单点激励测量》。

本部分与GB/T 11349.2—1989相比主要变化是：

- 增补了“目次”和“引言”。
- 补齐了“规范性引用文件”。
- 增加了“第3章 术语和定义”。
- 3.5及正文中的“有关的频率范围”均改为“关注的频率范围”，而未采用“感兴趣的频率范围”。
- 在5.3(1989版4.2)第1段中增加了“悬挂系统与试验结构连接处的驱动点导纳矩阵中所有相关元素的值至少应该比相同点处结构导纳矩阵的相应元素的值大10倍。”和在6.4.4(1989版5.3.3)第3段中增加了“在关注的频率范围内，当激振器和连接件不与结构连接时，激振器连接件的横向和转动驱动点导纳的幅值应当比结构本身的驱动点导纳矩阵中的相应元素的值至少大10倍。”两段话。
- 增加了第10章、第11章、附录C。
- 增加了一些注释。

本部分的附录A和附录B是规范性附录，附录C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：郑州机械研究所。

本部分主要起草人：韩国明、潘文峰。

引 言

0.1 关于导纳测量国家标准 GB/T 11349 的全面介绍

结构的动力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相应的加速度导纳和位移导纳来确定。每个频率响应函数都是由于在单位力或力矩激励下,在结构的某一点的运动响应的相量。这些函数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代替速度表示运动响应。为简便起见,在 GB/T 11349 的各部分中将只用“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:

- a) 预测结构对已知的或假定的输入激励的动力响应;
- b) 确定结构的模态特征(固有频率、振型和阻尼比);
- c) 预测相连结构之间的动力相互作用;
- d) 检验结构的数学模型的有效性并改善其精确度;
- e) 确定单一或复合材料的动力特性(即复弹性模量)。

对于某些应用,可能要求测量沿 3 个相互垂直的轴的力和运动,以及绕这 3 个轴的力矩和转动来完整地描述动力特性。对每个关注的点,这些测量给出一个 (6×6) 的导纳矩阵。对结构上的 N 个点,系统有一个 $(6N \times 6N)$ 阶的完整导纳矩阵。

对于大多数实际应用,没有必要知道完整的 $(6N \times 6N)$ 矩阵。通常只需用单点单方向施加激振力,在结构的关键点测平动响应的办法测出驱动点导纳和一些传递导纳就已足够了。在另一些应用中,可能关注的仅是转动导纳。

为了简化,在实际中对不同的导纳测量可使用 GB/T 11349 的不同部分,GB/T 11349 将作为一套 3 个独立的部分颁布。

GB/T 11349.1 基本定义和传感器。这部分的内容对大多数导纳测量是通用的。

GB/T 11349.2 用激振器作单点平动激励导纳测量。

GB/T 11349.3 冲击激励法。

机械导纳定义为由平动或转动速度响应的相量与施加的激振力或力矩的相量之比构成的频率响应函数。如果响应是用加速度传感器测量,还得转换成速度以得到导纳。也可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,也可以用位移导纳,即位移与力之比。

注:习惯上,结构的频率响应函数通常表示为上述动力特性之一的倒数。机械导纳的倒数通常称为机械阻抗。但是,应该注意这是一种误解。因为导纳的倒数通常并不表示结构的阻抗矩阵中的任一元素,这一点在 GB/T 11349.1—2006 附录 A 中详细说明。

导纳试验数据不能直接用作结构的阻抗模型的一部分。为了使数据和模型协调,模型的阻抗矩阵应转换成导纳矩阵,或者相反(其限制见 GB/T 11349.1—2006 的 A.3)。

0.2 关于 GB/T 11349 本部分的介绍

许多机械导纳数据的应用中,在结构的某一位置、某一方向激励,在一些关键点上测量平动响应,确定驱动点导纳和少量传递导纳已经足够。这些平动激励力可以用连接到试验结构上的激振器或者由不连接到结构上的装置施加上去。

激振装置分为“连接的”和“不连接的”，在将激励点移动到新位置的难易方面有显著差别。例如：用激振锤时，改变脉冲作用的位置，比用一个连接的激振器重新移动到结构上一个新位置要容易得多。两种激励方法都有它们最适合的应用场合。GB/T 11349 本部分涉及用单个连接式激振器的测量；GB/T 11349.3适用于不用连接式激振器的冲击激励测量。

振动与冲击 机械导纳的试验确定

第2部分：用激振器作单点平动激励测量

1 范围

本部分规定了用连接式激振器单点平动激励测量结构(如建筑物、机器和车辆)的机械导纳或其他频率响应函数的方法。

本部分适用于导纳、加速度导纳或位移导纳的测量,既可以是驱动点测量,也可以是传递测量。它还适用于确定这些比值的倒数,如自由有效质量。尽管采用单点激振,但可同时测量的运动响应的测点数目没有限制,例如,模态分析中要求的多点响应测量。

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:基本定义与传感器 (ISO 7626-1:1986, IDT)

GB/T 14412—2005 机械振动与冲击 加速度计的机械安装 (ISO 5348:1998, IDT)

ISO 2041:1990 振动与冲击——词汇

ISO 5344:1980 电动式振动试验设备——设备特性描述方法

3 术语和定义

GB/T 11349.1 和 ISO 2041 确立的以及下列术语和定义适用于 GB/T 11349 的本部分。但为了方便,GB/T 11349 本部分用到的最重要的定义在 3.1~3.5 中给出。

3.1

频率响应函数 frequency-response function

与频率有关的运动响应相量与激振力相量之比。

注1:频率响应函数是线性动力系统的特性,与激励函数的类型无关。激励可以是时间的简谐、随机或瞬态函数由一种激励得到的试验结果可用来预测系统对其他任何类型的激励的响应。随机和瞬态激励的相量及其等价量在 GB/T 11349.1—2006 附录 B 中讨论。

注2:系统的线性是有条件的,实际上只能近似满足,它取决于系统的类型和输入的大小。应当注意避免非线性影响。

注3:运动可用速度、加速度或位移来表示,相应的频率响应函数分别称为导纳、加速度导纳和位移。

注4:本定义摘自 GB/T 11349.1。

3.2

导纳 mobility

速度响应相量与激振力相量之比,或速度响应谱与激振力谱之比构成的频率响应函数。

应满足的边界条件是除在驱动点的激振力之外,结构上的任何点没有作用力。

3.3

驱动点导纳, Y_{jj} driving-point mobility, Y_{jj}

除了表示结构在预计应用中的正常支承之外没有其他任何约束,允许结构上所有其他测点自由响应,这时 j 点速度响应相量与同一点的激振力相量之比构成的频率响应函数。单位为 $\text{m}/(\text{N} \cdot \text{s})$ 。

注1: 术语“点”是指某一个位置及方向,也可使用术语“坐标”,它与“点”的意义相同。

注2: 本定义摘自 ISO 2041。

3.4

传递导纳, Y_{ij} transfer mobility Y_{ij}

除了表示结构在预计应用中的正常支承之外没有其他约束,允许结构上除 j 点外的所有点自由响应,这时 i 点的速度响应相量与 j 点的激励力相量之比构成的频率响应函数。单位为 $\text{m}/(\text{N} \cdot \text{s})$ 。

注: 本定义摘自 ISO 2041。

3.5

关注的频率范围 frequency range of interest

在一组给定的试验中,要得到导纳数据的从最低频率到最高频率的区间。单位为 Hz。

注: 本定义摘自 GB/T 11349.1。

4 测量系统的总体结构

应按 GB/T 11349 本部分的要求选择导纳测量系统的各个组成部分,以适合每个具体的应用。

所有这些系统都应包括如图 1 所示的基本部分。在有关的章节中给出对这些部件特性和用法的要求。

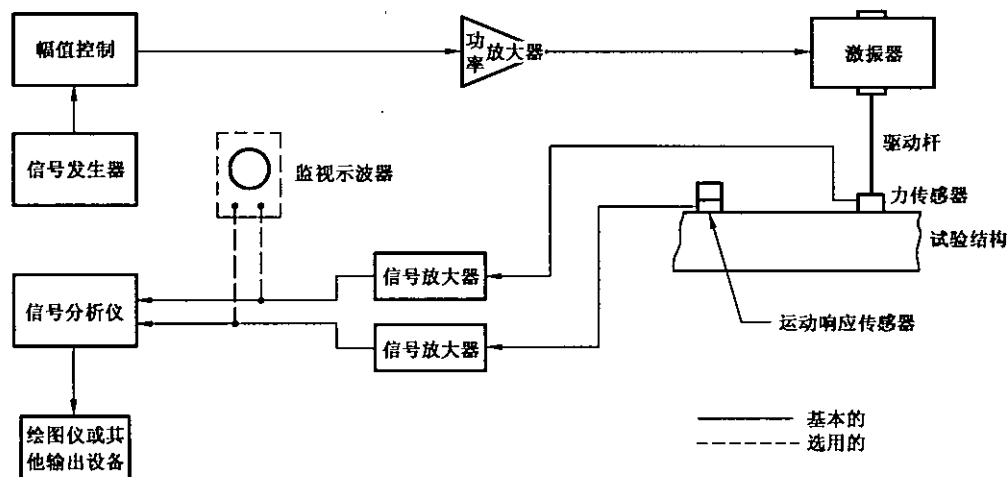


图 1 导纳测量系统框图

5 试验结构的支承

5.1 概述

结构可以在非落地条件下(自由悬挂)或者在落地条件下(用一个或多个支承)进行导纳测量。激振器对结构的约束作用在 6.4 描述。

5.2 落地(支承条件下的)测量

除非特殊说明,试验结构的支承应代表结构在典型应用中的支承状况。试验报告应说明支承条件。

5.3 非落地(自由悬挂条件下的)测量

试验结构应采用柔性悬挂,悬挂系统与试验结构连接处的驱动点导纳矩阵中所有相关元素的值至

少应该比相同点处结构导纳矩阵的相应元素的值大 10 倍。试验报告应详细描述使用的悬挂。

在缺乏定量资料的情况下,悬挂的设计很大程度上是一个判断问题,起码被悬挂结构的所有刚体模态的共振频率应小于最低的关注的频率的二分之一。

柔性悬挂通常使用柔性绳以及像泡沫塑料和橡皮一类材料做成的弹性垫。由于某些悬挂系统具有质量而且阻尼很小,必须保证使悬挂系统的共振频率远离试验结构自身的模态频率。测量中任何靠近试验结构的悬挂部件(如挂钩和螺丝扣)的质量也应该小于结构在每个关注的频率的自由有效质量(加速度阻抗)的十分之一。

为了确定对测量产生影响最小的悬挂位置,应进行预备性试验。悬挂点靠近试验结构的节点能将悬挂系统与结构的相互作用减至最小。若实际情况允许,悬挂绳应该垂直于激励的方向,即使这样,悬挂绳的横向弹性振动对试验数据还是有影响的。

注:还应注意悬挂系统引起的结构的附加阻尼。

6 激励

6.1 概述

激励和响应信号经过适当处理,任何激励波形只要其谱能覆盖关注的频率范围都能使用。

早期研究者使用简谐激励信号,在理想条件下,稳态响应也是简谐信号。简谐响应幅值与激励信号幅值之比给出了在那个特定频率的导纳的模,相位差是幅角。

由于简谐信号的幅值是它的傅里叶变换的模,因此这项技术还在应用,并且简谐激励得到的结果与更复杂信号的傅里叶变换得到的结果相同。但是,为了达到稳态响应,需要在每个激励频率上停留足够的时间。如果激励信号和速度响应的傅里叶变换已经确定则不必这样做。这时可应用短时正弦猝发,从响应谱与力谱的比就能得出在一个限定的频率范围内的正确导纳值。

正弦扫描激励时也会出现相同的情况。若应用傅里叶变换,则不受 9.2.3 描述的扫描速率的限制,而且可以用一个快速正弦扫描信号代替慢速正弦扫描信号。

当利用数字傅里叶变换时,更宜采用周期激励信号(如周期快扫或周期随机信号),其优点是容易防止时域泄漏。

6.2 激励波形

6.2.1 概述

可使用 6.2.2 至 6.2.5 描述的激励波形,但并不局限于这些波形。本标准力求反映已广泛运用的技术,但不包括刚刚出现的或正在研究的测量方法。不同类型波形的优缺点比较在参考文献[1]中讨论。

6.2.2 离散步进正弦激励

在测量中,由一组相继施加的单个离散频率的正弦信号激励。在关注的频率范围内,信号的频率步进式增加,9.2.2 给出了选择频率增量的要求。在每个频率,施加的激励应停留足够长的时间,以便获得在这个特定频率激励下结构固有振动模态的稳态响应,以及对信号进行适当处理。

6.2.3 慢扫描正弦激励

在测量中,激励是一个从关注的频率范围的下限到上限连续扫描的正弦信号。为了获得结构的准稳态响应,扫描频率的速率应足够慢,9.2.3 给出了选择扫描速率的要求。在一个短时间间隔内,激励能量集中在其扫描的频带内。

6.2.4 平稳随机激励

平稳随机激励波形没有显式数学表达式,但具有一定的统计性质。激励信号谱用激励力的谱密度来表示,9.4.3 推荐了把激励集中在关注的频率范围内以形成谱密度的方法。这样,可同时激励起这个频率范围内的所有模态。

6.2.5 其他激励波形

6.2.5.1 至 6.2.5.4 描述的其他类型的波形也能同时激起关注的频率范围内的所有振动模态。这些波形的信号处理和激励控制的方法与平稳随机激励相似。为了正确地测量结构的运动响应,需要进行响应波形的时域同步平均,此时推荐重复使用这些波形。

6.2.5.1 伪随机激励

为了得到期望的谱,在频域内对激励信号进行数字合成。将其进行逆傅里叶变换,产生一个重复的数字信号,再将其变换成模拟电信号,用来驱动激励器。

6.2.5.2 周期正弦快扫激励

周期正弦快扫就是重复的快速正弦扫描信号,其频率在选择频段内上下扫描。该信号可以数字合成,也可以由一个扫描振荡器产生,并与波形平均的信号处理器同步,以提高信噪比。

6.2.5.3 周期脉冲激励

周期脉冲激励通常是由数字合成的适当形状的脉冲函数周期性的重复得到的。信号处理器应与信号发生器同步。应当选择脉冲函数的形状(如半正弦或衰减的阶梯函数),以满足激励频率的要求。

6.2.5.4 周期随机激励

周期随机激励综合了纯随机和伪随机激励的特点,它既能满足周期信号的条件,又随时间变化。因而,它是以纯随机方式激励结构,这要靠每次平均采用不同的伪随机激励来实现。

6.3 激励器

激励器是通常连接到试验结构上对其输入预定波形的力的设备,包括电动式、液压式和压电式激励器(见 ISO 5344)。图 2 给出了每种类型激励器一般适用的频率范围。

对激励器的基本要求是能提供足够的力和位移,这样才能以适当的信噪比在整个关注的频率范围内进行导纳测量。对指定的结构进行足够宽频的随机激励比正弦激励时需要更大的激励器。如果限定随机噪声的带宽或者使用激励和响应信号波形的时域平均,则可以选择较小的激励器(见 6.2.5)。

注:对于背景噪声和电路噪声,可用相干函数衡量激励器的适用性。

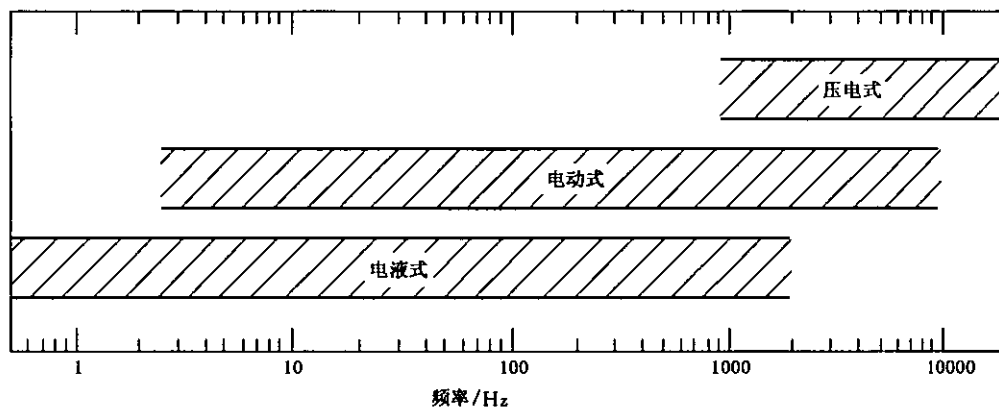
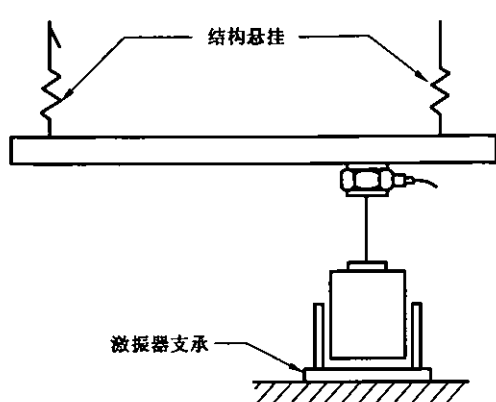
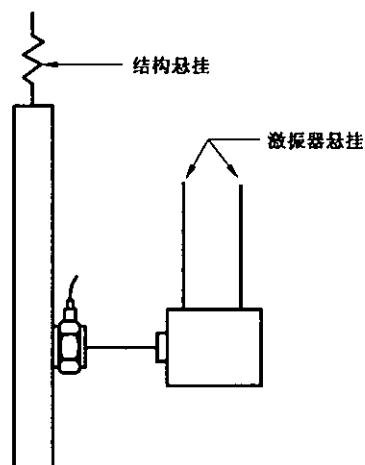


图 2 激励器一般适用的频率范围

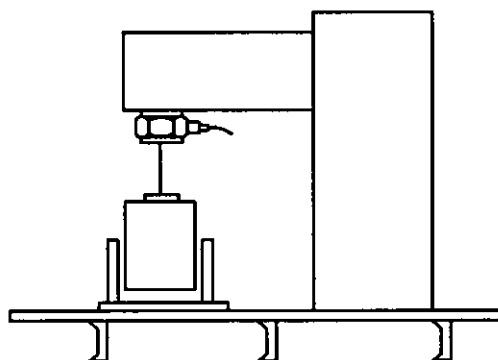
由于激励器支承或激励器的自身惯性,输入结构的激励力会产生反作用力。图 3a)和图 3b)说明了这些情况。若需要,应当把一个附加质量连接到激励器上。图 3c)表示出一个不正确的方案,它让激励器的反作用力通过支承激励器和结构的共同底座而不是通过力传感器传递到结构上。



a) 外部支承的反作用



b) 激振器惯性的反作用



c) 一个安装不正确的例子

图 3 激振器的反作用力

6.4 避免附加力和附加力矩

6.4.1 概述

导纳测量的一个基本要求是应在结构上的某点沿某个方向施加激励力。

任何附加力和附加力矩(不是沿预定方向的预定激励力)将使导纳数据产生误差。驱动点和结构上的所有其他测点应能在无约束的任何方向自由地响应。应当避免结构和传感器之间以及结构和激振器之间的动力相互作用。为了确保避免附加力和附加力矩,应考虑 6.4.2~6.4.4 中的有关因素。

6.4.2 传感器质量负载

在每个传感器连接点上,由于传感器质量的加速度会产生附加惯性力。可选择符合灵敏度要求的质量最小的传感器,将质量负载引起的测量误差减至最小。当测量驱动点导纳时,力传感器负载在一定程度上可以通过电学方法给予补偿(见 7.3)。

6.4.3 传感器转动惯量负载

在每个传感器的连接点上,传感器因角加速度会产生附加惯性力矩(特别是具有大转动惯量的阻抗

头)。应选择绕其安装点具有较小惯性矩的传感器,使这些附加力矩减至最小。

6.4.4 激振器的连接约束

在激振器的连接点上,由于试验结构的转动和横向驱动点响应被约束会产生附加力矩和横向力。例如:激振器与阻抗头组合引起的箝位约束能反过来影响试验结构低阶模态的测量。可用削减锥头的面积使之更接近于点驱动。

注:若使用时没有仔细考虑,减少锥头面积反而会增加产生附加力矩的可能性。

当用固定式激振器测量轻型结构的导纳时,如何避免激振器连接约束经常是最困难的问题。

为了避免由于连接约束造成的测量误差,在关注的频率范围内,当激振器和连接件不与结构连接时,激振器连接件的横向和转动驱动点导纳的幅值应当比结构本身的驱动点导纳矩阵中的相应元素的值至少大 10 倍。

当缺少横向或转动驱动点导纳的定量数据时,常常需要判断是否需要一个特殊的实验装置来避免由于显著的连接约束引起的测量误差。此时,应当考虑以下几点:

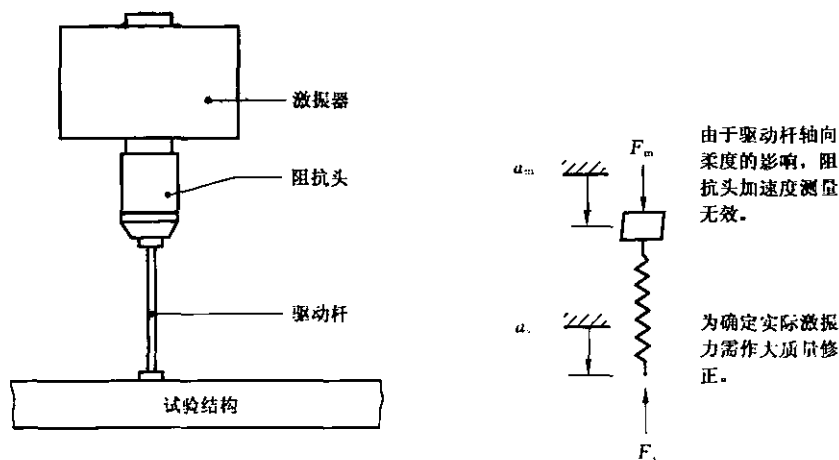
- 使用参考文献[2]中描述的自由浮动音圈激振器;
- 为受惯性控制的激振器设计一个支撑系统,使作用于试验结构上的力的反作用既不会引起激振器的任何转动,也不会引起对力传感器轴的任何横向运动;
- 安装用来连结激振器和力传感器的驱动杆。

驱动杆应设计成轴向具有大刚度、而在其他任何方向具有足够的柔性[3],为此,经常使用细长杆。采用两端较细的杆可能效果更好。应当使激振器与驱动杆和力传感器轴在同一直线上。

如果使用柔性驱动杆,在任何情况下加速度传感器不应当通过任何中间装置(如驱动杆,它的轴向柔度可能使运动响应测量无效)连到结构上[见图 4a)],而必须直接连到结构上。力传感器应安装得使它总是测量由驱动杆传到结构上的力[见图 4b)]。只有格外小心才能把力传感器放在杆的激振器端[见图 4c)]。如无法避免图 4c)那样安装的话,应按照 GB/T 11349.1 所述,检查驱动杆柔度的影响,并用 7.3 规定的方法对驱动杆的质量给予补偿。

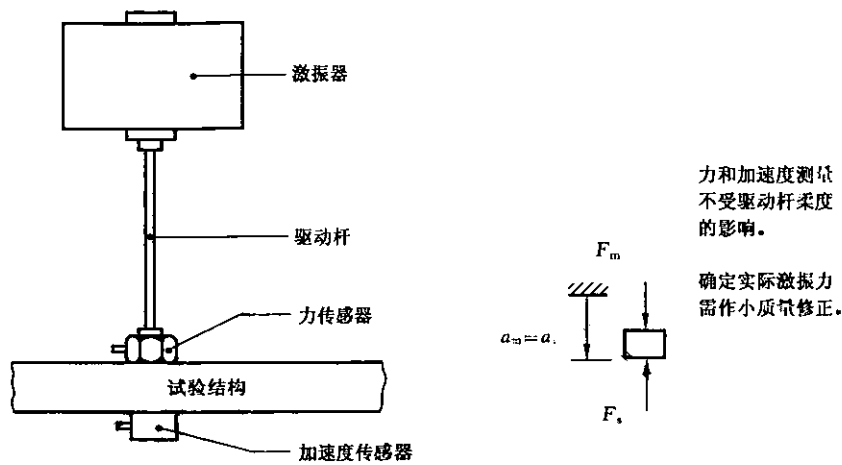
注:驱动杆固有频率在关注的频率范围内的弯曲模态可能影响导纳试验。

此外,激振器运动系统的弯曲模态还能对结构产生力传感器检测不出来的、而又影响响应测量的力矩。

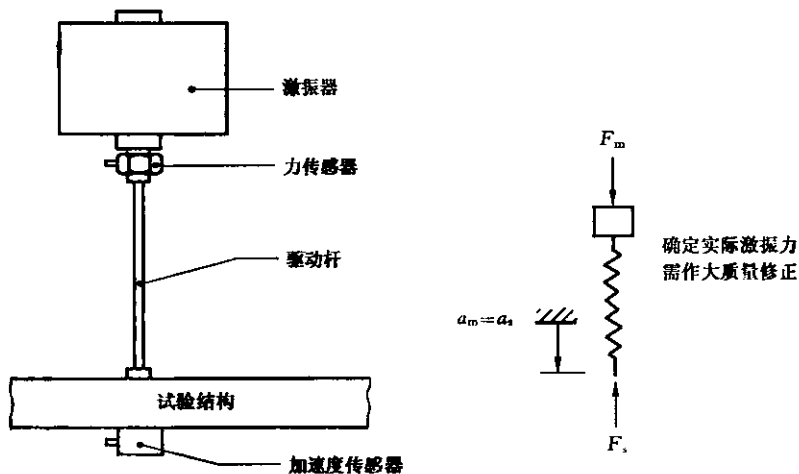


a) 激振器驱动杆的连接——不正确的方法

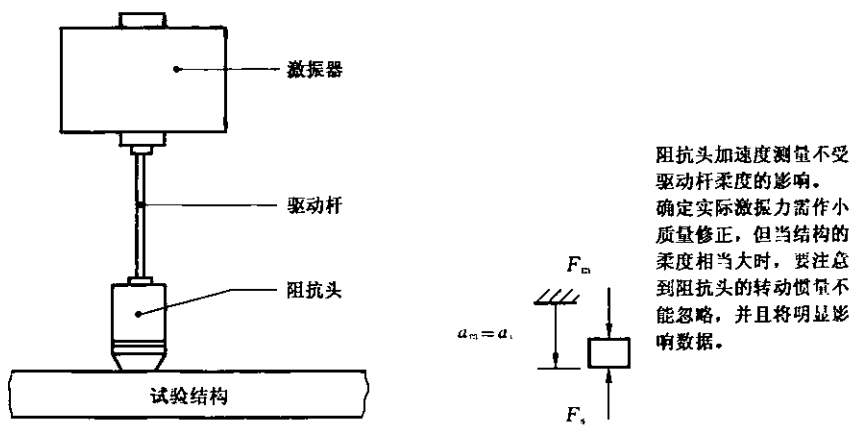
图 4 激振器驱动杆的连接



b) 激振器驱动杆的连接——最佳方法



c) 激振器驱动杆的连接——折衷方法 A



d) 激振器驱动杆的连接——折衷方法 B

图 4(续)

7 激励力与运动响应的测量

7.1 概述

GB/T 11349.1 已规定了选择运动传感器、力传感器和阻抗头的基本准则和要求以及确定这些传感器特性的方法。由于不能用测量激振器的电流和电压来推断激励力的大小,所以激励力用适用的传感器来测量。

通常用于测量结构频率响应的传感器是压电式加速度传感器、压电式力传感器及把它们联为一体的阻抗头。也可用位移或速度传感器代替加速度传感器。某些位移传感器还具有非接触测量的优点。当采用脉冲激励波形时,压阻式加速度传感器具有一定的优点。应该注意的是要保证传感器的频率响应和线性范围足够宽。

对每个频率 f , 用 $(j2\pi f)$ 的正或负整数幂乘以测量结果, 就可用任意形式的运动传感器来确定三种运动形式(位移、速度和加速度)中的任何一种。这里: $j = \sqrt{-1}$, f ——关注的频率。

7.2 传感器的连接

通常用螺栓或粘接剂把力传感器和运动传感器安装在结构上。有关传感器安装方法已在 GB/T 14412 及参考文献[3]、[4]和[5]中详细阐述。

应该用尽可能少的中间件, 直接通过力传感器或阻抗头把激励力传递给结构。如果传感器安装点表面不平, 可以采用某种适当形状的金属固定垫。传感器和安装面之间涂一层黏性液体(如重油或润滑油)的薄膜可以改善高频时两者之间的耦合。应如 GB/T 11349.1 所述的那样检查连接件柔度的影响。应按传感器制造厂推荐的扭矩把力传感器拧紧。

7.3 质量负载和质量消减

如 6.4.2 所述, 试验时附加到结构上的质量应该尽量小。当对轻型结构进行试验时, 可用电气补偿在结构驱动点处的传感器和连接件总的有效质量 m_i 。在关注的频率范围内的所有频率 f (单位: Hz) 处, 当被测结构的驱动点导纳值大于 $0.01/(f m_i)$ 时, 应该考虑质量的电子补偿。质量 m_i (单位: kg) 是用来把力传感器安装到试验结构上的器件的质量和力传感器或阻抗头的有效端部质量(如 GB/T 11349.1 所定义的)的总和。

若不符合上面的准则, 可以考虑下面通常称之为“质量消减”的补偿方法: 在模拟电路或数字电路中, 将得到的激励点的加速度信号乘以补偿的总有效质量。这个乘积是激振器输出力的一部分, 它是使附加到结构上的有效质量产生加速度所需要的力。为了获得作用于试验结构的净激励力, 应在模拟电路或数字电路中把这个力信号从力传感器信号中减掉。

注 1: 如果在力传感器的下面用一个单独的驱动点加速度传感器[(图 4b)和 c)], 则这个加速度传感器的质量也应包含在总的有效质量 m_i 之内。

注 2: 在测量驱动点导纳时, 用于测量结构响应的加速度传感器也可以提供使有效质量产生加速度所要求的力信号。但是在测量传递导纳时, 在结构的驱动点需要有一个单独的加速度传感器以获得用于质量消减的信号。

注 3: 质量的电子消减不能补偿转动惯量负载, 仅能补偿驱动点处沿激励方向的平动的惯性负载。其他所有的附加力只有靠选择小惯性的传感器把它们减至最小。结构的未补偿惯性负载引起的测量误差包括响应峰值频率的偏移。

注 4: 应该在采用质量消减方法之前优先考虑传感器的选择和连接件的重新设计。另外, 为了避免大的测量误差, 只有当连接件和传感器的有效质量与试验结构在驱动点处的自由有效质量的比值大于 0.06 且小于 0.5 的情况下, 才使用质量消减方法。

7.4 信号适调器

压电式力传感器和运动传感器需要与电荷放大器或高输入阻抗电压放大器连用。

注 1: 某些压电式传感器配备有内装的电子线路, 因而它要求与这个线路相匹配的放大器。

注 2: 电压放大器的灵敏度受传感器电缆阻抗的影响。电压放大器比电荷放大器的低频响应限制更严格。

7.5 校准

7.5.1 概述

GB/T 11349.1 规定了对传感器进行基本校准和补充校准的要求。它们是确定导纳测量用的压电式传感器适用性的基础。应每年对传感器进行一次基本校准。

在每次的试验开始前,应按照 7.5.2 对整套测量系统进行系统校准。在每一系列试验结束时,也应进行系统校准来检验。如需要,还可以在试验期间进行补充校准。

7.5.2 系统校准

系统校准是通过测量自由悬挂的、已知质量的刚性校准块的导纳或加速度导纳来完成的。测量系统的所有组成部分应当与试验时相同。测定的校准块的频率响应应与已知值吻合,误差在 $\pm 5\%$ 以内。例如:加速度导纳的幅值应等于 $1/m$ 或者导纳的幅值应等于 $1/(2\pi f m)$ 。这里 m 是校准块的已知质量。系统校准的连接件应与测量时相同,从而就可检测出连接柔度带来的任何误差(见 GB/T 11349.1)。选择校准块的质量,使其导纳在测量的范围内具有代表性。如有必要,为了覆盖所研究的导纳范围,应使用多个合适的校准块进行多次系统校准。

8 传感器信号的处理

8.1 频率响应函数的确定

8.1.1 概述

运动信号和力信号都应当用能滤波的(如有要求,还可进行质量消减)分析仪加以处理,并确定两者之间的幅值之比和相位差,幅值和相位差均是频率的函数。分析仪还应完成将测量的频率响应函数转换成其他形式(例如,将加速度导纳转换成导纳)的数字运算(见 7.1)。8.1.2 和 8.1.3 规定了对 6.2 讨论的各种激励波形的处理要求。

8.1.2 正弦激励

频率响应函数的幅值是两个正弦信号的相量幅值的比,它可以用模拟或数字方法来确定。频率响应函数的相位应由测量这两个信号的相位差来确定。

注:若采用离散步进正弦激励,在每个频率下,把单个响应通道从一个响应传感器切换到下一个响应传感器,则可以得到若干个频率响应函数。若采用慢扫描正弦激励,在一次扫描中,每个响应通道只能测得一个点的频率响应函数。

8.1.3 随机激励

用随机、周期随机、伪随机、周期正弦快扫或脉冲激励产生的传感器信号应通过数字傅里叶变换分析仪处理。如 GB/T 11349.1 中所述,频率响应函数可用运动响应与激励力的互谱密度除以激励力的自谱密度得到。通过对时域加权后的激励和响应信号(见 8.4.3)进行的离散傅里叶变换来计算上述谱。在每个共振频率点,为了取得至少 90% 的置信度,即在每个共振频率计算的谱的驱动点导纳的随机误差小于 5%,应对足够数量的谱进行平均(见附录 A)。在计算相应的传递导纳时至少也应该对相同数目的谱进行平均。

注 1:当测量传递导纳时,不可能达到上述量级的置信度,特别是在传递导纳值很小时测量其响应更是如此。在这种情况下,除了相应驱动点导纳试验所要求的平均谱的数目之外,再增加平均的谱数,作用不大。

注 2:双通道傅里叶分析仪在一次测量中只能得到单个频率响应函数。若想同时测量多个频率响应函数,可采用多通道分析仪。

8.2 滤波

8.2.1 正弦激励

用相应于激励频率的响应和激励信号分量可以计算出频率响应函数。适当的滤波器或同步数字采样可把噪声和谐波分量减至最小,而且不改变激励信号和响应信号间的相位。

注:为此,习惯上采用跟踪滤波器。跟踪滤波器是相位匹配的窄带通模拟设备,它采用外差式处理以自动判断激励

频率。另外,也可采用数字式信号处理装置,使数据采样与激励信号的频率同步进行。

8.2.2 随机激励

采用随机激励时,不可能从激励信号和响应信号中滤出噪声和谐波分量。可用限制频带(细化)技术提高信噪比。应如 9.4.3 所述,选择适当的滤波器以限定激振频带宽度。当运用数字分析仪时,为了避免由高于最高分析频率范围的信号分量所引起的误差,一定要用衰减率高、相位匹配的抗混滤波器。

8.3 避免饱和

为保证测量的有效性,避免信号放大器饱和,应进行增益设定的系统检查。分析仪的过载指示器只有在分析器饱和和发生后才有反应。除非前置放大器装有过载指示器,应当如图 1 所示,用示波器在分析仪之前的线路中监测信号。

注:当饱和波形显示在示波器上时,用目视可以观察到削波。

8.4 频率分辨率

8.4.1 概述

在关注的频率范围内,分辨率应足够高,以分辨出试验结构的全部特征频率,并适当估计模态阻尼。

8.4.2 正弦激励

对于慢扫描正弦激励和离散步进正弦激励,为获得足够的共振频率分辨率,要求激励频率随时间的变化应足够慢(见 9.2)。

8.4.3 随机激励

对于如 6.2.4 和 6.2.5 所述的激励波形,在离散频率傅里叶变换分析中要取得合适的频率分辨率,要求有足够小的频率增量。应根据被试结构的模态密度和模态阻尼确定频率增量(谱线间隔,Hz)。进而,用海宁窗或其他适当的时间加权函数对信号在时域加权,可使频率分辨率提高(见参考文献[6])。

注 1:对于小阻尼结构,若在整个关注的频率范围内计算出激励和响应的信号的谱(即通过一个“基带”傅里叶分析),则所需要的数据样本的数目(即样本“块尺寸”)很大;另外,还可利用限制在某一频带上的傅里叶分析(细化);或者把这两种方法结合起来使用。在任一种情况下,要求的总时间(记录长度)(单位:s)都是所要求的频率增量(分辨率)(单位:Hz)的倒数。

注 2:随机激励可看成是脉冲函数的时间序列(杜哈梅方法)。一个数据块样本起点的响应主要是先前激励的结果,这样的响应与激励并不对应(相干)。靠近数据块的尾部仍然有激励,但响应已被截断,截断的影响取决于衰减时间和数据块总的采样时间的比以及在数据块中激励脉冲的位置,这又会导致弱相干。激励和响应数据相干较好的部分可在数据块的中部找到。有时推荐用海宁窗来改善导纳数据的相干,然而,它对随机激励的导纳测量仍是一种折衷办法。

8.4.4 周期激励

周期随机、周期正弦快扫和脉冲激励与 8.4.3 所遇到的问题不同。因为周期激励产生首尾相连的数据块序列,开始时的瞬态值转移到下一个数据块,并且经过一定时间之后,每个数据块都包括全部的响应数据。从原理上说,不需要取平均。在某些情况下,相干函数可用来估计外部噪声的影响,并指导信号平均次数的选取(见附录 A)。

9 激励的控制

9.1 概述

为了获得适当的频率分辨率,需要控制激励时间;为了获得适当的动态范围,通常需要控制激励的幅值。

9.2 正弦激励要求的时间

9.2.1 概述

为了得到所要求的频率分辨率,无论采用扫描或者步进正弦激励,都应该控制激励频率变化率(或步长和速率)。为了精确地确定幅值和相位,并获得用于计算固有频率和结构阻尼的正确信息,在结构的共振(响应峰值)和反共振(响应波谷)区域内要求较高的分辨率。

9.2.2 离散步进正弦激励

当用步进正弦激励时,最接近结构的每个共振频率的激励频率与该阶的共振频率之差作为频率步进增量的一半,这样,确定共振频率的最大误差是频率增量的二分之一。另外,测量的结构峰值响应的幅值很可能比真正的共振峰值小。表1给出了误差的上界。结构响应峰值的测量误差会导致对结构模态阻尼估计过大。

在共振频率 $\pm 10\%$ 的频率范围内,频率增量的选择,应使测得的峰值响应的幅值和模态阻尼比与它们真实值的误差在5%以内。

在附录B中以共振频率和模态阻尼系数的函数给出了符合这个要求的用于确定最大频率增量的公式。附录B还给出了在每个频率处激励的最小时间间隔(持续时间)。对于共振频率或反共振频率 $\pm 10\%$ 范围以外的频率,可以采用更大的频率增量和更短的持续时间。

表1 用离散步进正弦激励测量结构共振时运动响应幅值的最大误差

步进频率增量与结构模态的 真实半功率带宽的比	响应峰值测量的最大误差	
	%	dB
>1	>29.3	>3.0
1	29.3	3.0
1/2	10.6	1.0
1/3	5.1	0.5
1/4	3.0	0.3
1/5	1.9	0.2
1/6	1.4	0.1
1/7	1.0	0.1
1/8	0.7	0.1

注:上表列出的误差是用参考文献[8]的方程计算出的;但在计算中还包含了一些附加项以改善计算精度。

9.2.3 慢扫描正弦激励

采用慢扫描正弦激励时,频率以时间的线性函数或者以时间的对数函数变化。扫描速率的选择应使在共振频率 $\pm 10\%$ 以内测得的结构运动响应的幅值与真实值的偏差小于5%。

对于线性扫描激励,最大扫描速率 $\left(\frac{df}{dt}\right)_{\max}$ (单位:Hz/min)应为:

$$\left(\frac{df}{dt}\right)_{\max} \leq 54(f_n)^2/Q^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

对于对数扫描激励,最大扫描率 $\left(\frac{df}{dt}\right)_{\max}$ (单位:oct/min)应为:

$$\left(\frac{df}{dt}\right)_{\max} \leq 77.6 f_n/Q^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

上述二式中:

f_n ——估计的共振频率;

Q ——在该共振频率处,估计的结构模态的动力放大(品质)因数。

注:上述两个关系式引自参考文献[8],预计可保证得到基本上是稳态的测量。

9.3 随机激励所要求的时间

施加激励和测量运动响应,要有足够长的持续时间,以便对8.1.3中所规定的数目的谱进行平均。

要平均的谱数是测量系统的信噪比的函数。应该用激励力信号和运动响应信号间的相干函数来确定在90%的置信度内,为使随机误差小于5%必须加以平均的最小谱数(见A.1)。

每个谱所需的激励时间(单位:s)应是离散傅里叶变换的频率增量(单位:Hz)的倒数(见8.4.3的注)。

9.4 动态范围

9.4.1 概述

在关注的频率范围内,小阻尼结构的导纳幅值范围可能会大于 $10^5 : 1$ (100 dB)。每个数据通道除了有个最高工作电压外,还有一个最低电压。若高于最高电压会发生饱和,若低于最低电压则电路噪声和数字系统中与数字化处理有关的噪声与信号相比就变得很显著了。为了测量精确,应该控制激励,使两个通道内的电压都在规定界限以内。9.4.2 和 9.4.3 中给出了当采用不同类型的激励波形进行导纳测量时,为了得到合适的动态范围而进行激励幅值控制的指南。

9.4.2 正弦激励

采用恒幅值激励时,导纳测量可获得的最大动态范围就是测量系统响应信号通道的动态范围(一般大约是 $300 : 1$ 或 50 dB)。为了扩大范围,在每个共振频率(响应峰值)附近应减少激励幅值,而在每个反共振频率(响应陡降处)附近应增加激励幅值。图 5a)说明了采用恒幅值激励可达到的动态范围的局限性。采用恒幅值激励,由于测量最大运动响应时放大器的饱和,测得的最大运动响应值要小于真实的最大运动响应。同样地,由于电路噪声也限制了结构反共振的真实运动响应的测量。图 5b)描述了通过适当控制激励力幅值能改善可达到的动态范围。

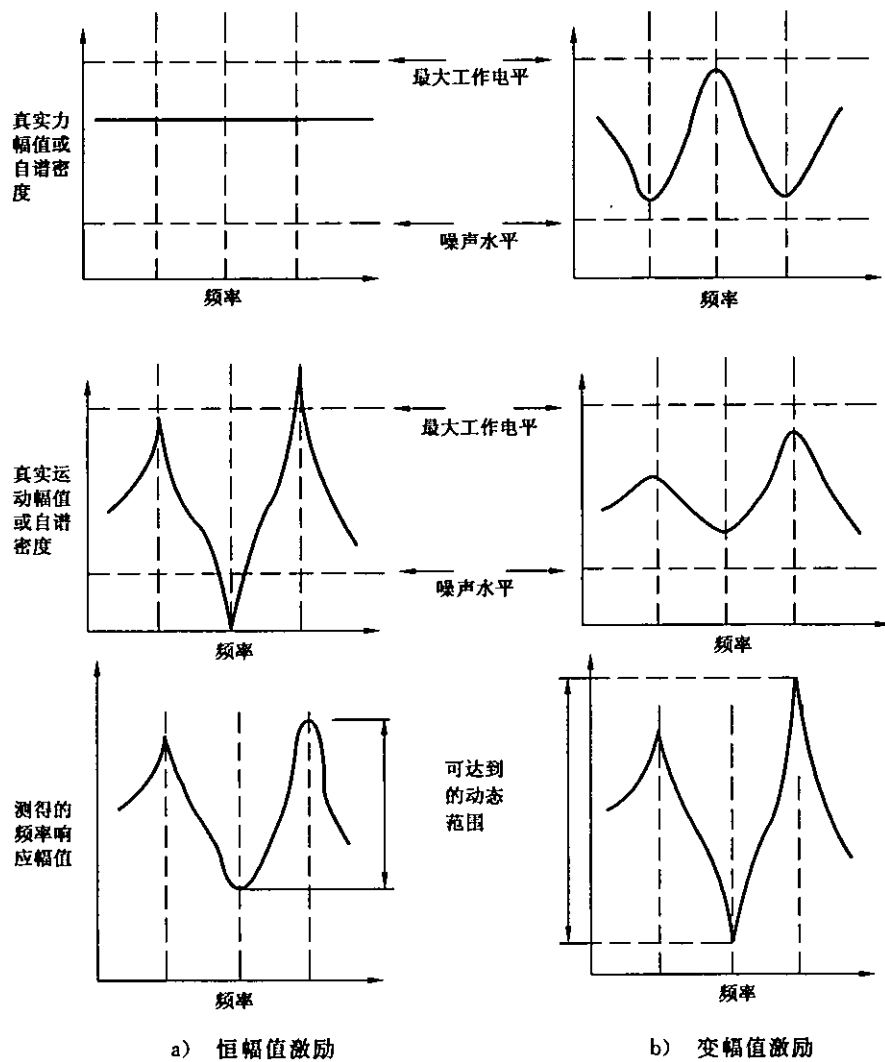


图 5 采用变幅值激励而不用恒幅值激励可增大动态范围的说明

9.4.3 随机激励

当激励力是 6.2.4 或 6.2.5 所述的某一随机波形时,也应当利用在 9.4.2 中所述以及图 5b)说明的激励控制的概念。至少在最大的关注的频率处为消除在其以上的激励和响应信号,应快速截断激励谱。如果用限制带宽分析来提高测量的频率分辨率,那么,应当用带通(或用高通和低通)滤波器把激励限制在为进行高分辨率测量所选定的带宽内(见 8.4.3)。

10 有效数据的检验

当用随机激励测定导纳数据时,可用 A.1 中所述的方法估计为达到指定的置信度而需要平均的最小谱数。A.2 至 A.4 描述了可用于所有类型激励的补充试验。这些补充试验可提供有关试验结果的线性度、互易性和总体有效性的有用信息。

如将数据绘在预先印好的导纳方格纸上(见 GB/T 11349.1),用绘图器可在方格纸上检验出适当的准线。

11 模态参数识别

许多导纳试验是为了识别试验结构的模态参数。为此目的的导纳数据的分析超出了本标准的范围,附录 C 中讨论了一般原理。

附 录 A
(规范性附录)
测量结果的有效性检验

A.1 相干

采用非正弦激励(见 6.2.4 和 6.2.5)时,总要计算出力信号和响应信号间的相干函数 $\gamma^2(f)$,以发现在计算的频率响应函数中某些潜在的误差。为了得到适用的相干函数估计,至少要对两个集合进行平均。

$\gamma^2(f)$ 定义为激励力(输入)和结构的运动响应(输出)间的互功率谱幅值的平方除以输入功率谱和输出功率谱的乘积,如下式:

$$\gamma^2(f) = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_x(f)G_y(f)} \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

由定义可知,相干函数的值总是介于 0 和 1 之间(即: $0 \leq \gamma^2(f) \leq 1$)。图 A.1 就是一个典型的相干函数曲线。

相干函数值较低说明存在下述问题:

- a) 在试验结构的共振和反共振频率处相干函数的凹陷可能是下述某种原因引起的。
 - 1) 频率分辨率不适当(即分析频带太宽,如在参考文献[9]所讨论的);
注:不适当的频率分辨率在计算的频响函数中将会引起系统误差。改善频率分辨率的方法可参考 8.4.3。
 - 2) 在分析仪中使用了不适当的时域加权(见 8.4.3);
 - 3) 试验结构具有非线性(见 A.2)或信号放大器饱和(见 8.3);
 - 4) 有多个输入力;
 - 5) 存在伴随数字化处理的噪声或电路噪声污染,可能是由激振器的不适当的力输入引起的。
- b) 共振频率处相干函数的凹陷也可能说明,在此频率下激振器所产生的激励力由于激振器本身固有的局限性而减小了。若力信号降低到噪声水平以下,而频响函数又是根据运动响应和激励力的互谱密度除以激励力的自谱密度计算的,则频响函数计算幅值将会太小(见 8.1.3)。在参考文献[10]中讨论了可能的补救方法。
- c) 在某个宽频范围上的低相干说明信噪比低。这常常是由于动态范围不适当。可通过把激励谱适当修形使之有所改善(见 9.4)。若应用 6.2.5 中所述的激励波形,也可通过波形的同步时域平均来提高信噪比(见参考文献[1])。
- d) 结构的非线性可能在频率范围内的任一位置导致低相干,这些影响取决于结构非线性的类型。低信噪比会在计算频响函数时产生随机误差。对于给定的信噪比(即对于一给定的相干函数值),频域平均可减小误差。

要达到 90% 的置信度(随机误差小于任意指定值),需要平均的最小谱数(视为测得的相干函数值的函数)可由图 A.2 查出。例如若测得的相干函数值是 0.80,为达到 90% 的置信度,而且计算的频响函数幅值的随机误差小于 $\pm 5\%$,那么至少必须平均 178 个谱。

注 1: 图 A.2 所示的曲线是由参考文献[11]的分析导出的。

注 2: 严格地说,相干函数不能根据激励和响应信号的单个样本来计算,因为这总是会得到一个虚假的单位值。

注 3: 相干函数高并不总能证明数据的有效性,因为它也可能表明力和响应通道之间的互相串扰。

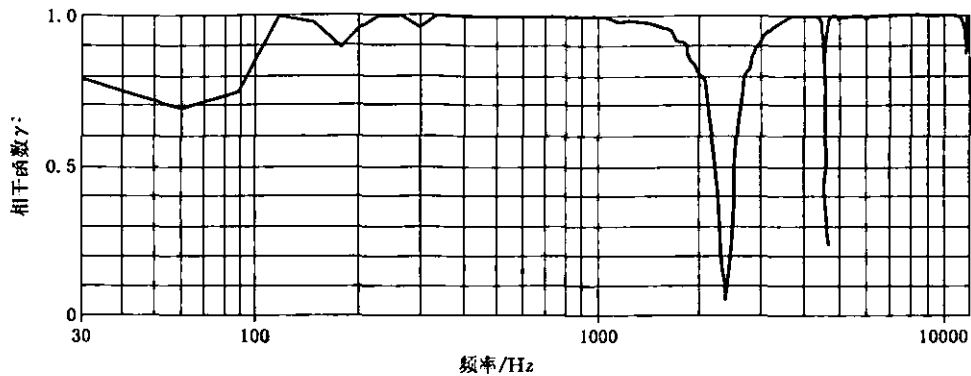


图 A.1 典型的相干函数曲线

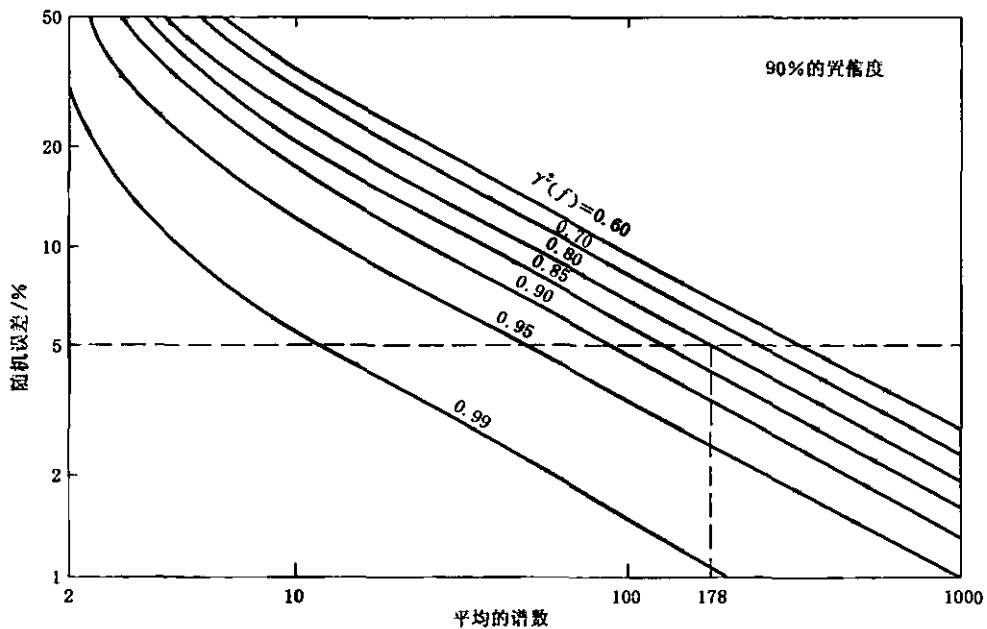


图 A.2 为了达到 90% 的置信度(导纳数据幅值的随机误差不超过规定值,如 5%)需要平均的谱测量数

A.2 线性度

A.2.1 概述

螺栓连接、支承间隙以及实际结构的其他情况都可能会引起非线性响应。为了检测非线性影响,在每次试验过程中应完成 A.2.2 所述的检查。

A.2.2 检验方法

首先按照给定的激励幅值与频率的关系,测量频率响应函数。然后,大幅度增加或减小激励的幅值进行重复测量。若两次试验结果一致,则证实了测量仪器的动态范围是适宜的,而且避免了非线性的影响。如果结果不一致,应确定原因并消除之。

A.3 互易性

对于线弹性结构,动力互易性原理要求对应的传递导纳对相等。设在频率 f ,通过确定结构在 i 点

的速度响应与在 j 点施加的力的相量的比来测量 $Y_{ij}(f)$, 则动力互易性原理规定 $Y_{ij}(f) = Y_{ji}(f)$ 。这里, 新测量值 $Y_{ji}(f)$ 表示上述激励方向在 j 点测量的速度响应与前述响应方向施加在 i 点的力的相量之比。对于一个给定的线性结构, 这样的测量对之间的一致性证实了采用的试验设备和方法是适用的。

尽管大部分结构的传递导纳显示出动力互易性, 但有些系统元件, 如液压动力轴承并不表现为互易。当一个非互易元件位于驱动点和响应点之间时, 则 $Y_{ij}(f)$ 不等于 $Y_{ji}(f)$ 。

A.4 驱动点测量与传递测量的比较

驱动点的频率响应函数在每对共振之间应出现一个反共振。在传递测量中, 两个邻近共振之间并不一定出现反共振。若在驱动点测量中任何相邻共振之间没有反共振, 则表明试验装置有某种不完善(如力和运动传感器之间的小偏心), 这种不完善应予以纠正。

关于驱动点导纳测量有效性的另一个检查是相位角可以落在 -90° 与 $+90^\circ$ 之间。而传递导纳的相位角可以落在四个象限中的任意一个。

附 录 B

(规范性附录)

对激励频率增量与持续时间的要求

B.1 频率增量

为了精确地确定在任一共振频率处试验结构的共振幅值,需要在这个共振频率附近测量足够多个频率的响应。用有限个等间隔的测量频率引起的误差会落在 0 与表 1(见 9.2.2)所示数值之间,这取决于共振频率是与其中某一测量频率一致(误差为 0),还是落在两个相邻频率的中间(误差最大)。

为了利用表 1 确定在共振频率 f_0 附近的最大允许频率增量,必须知道真实的半功率带宽 B 。半功率带宽(单位:Hz)与结构的共振频率及估计的品质因数 Q 有关,如下式所示:

$$B = \frac{f_0}{Q} \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

若共振处频率响应函数幅值最大误差为 5%,则在结构共振频率 $\pm 10\%$ 以内的最大频率增量 $\Delta f_{\max}$ 应小于 $0.32B$ 。

注:尽管表 1 是由离散步进正弦激励导出的,当使用其他激励波形时,该表也给出了在傅里叶变换分析仪中所需要的分辨率。

B.2 激励的持续时间

激励频率每步进一次,结构的运动响应由在稳态响应上迭加瞬态响应组成。瞬态响应幅值 $x(\tau)$ 将按下式衰减:

$$|x(\tau)| = X_i e^{-\pi B \tau} \quad \dots\dots\dots (B.2)$$

式中:

X_i ——初始幅值;

B ——半功率带宽;

τ ——幅值衰减的持续时间。

瞬态响应的初始幅值通常可假设为小于稳态幅值 X_s 的 10%。

鉴于上述假设,衰减到小于稳态值 5%的瞬态幅值所需要的时间 $\tau_{0.05}$ 可用下式估计:

$$e^{-\pi B \tau_{0.05}} = \frac{|x(\tau_{0.05})|}{X_i} = \frac{0.05 X_s}{0.1 X_s} = 0.5$$

则

$$\tau_{0.05} = \frac{\ln 0.5}{-\pi B} = \frac{0.221}{B}$$

对任何一个离散步进频率,应在施加激励 $\left(\frac{0.221}{B}\right)$ 秒之后测量响应。在每个频率处,施加激励力总的持续时间是 $\tau_{0.05}$ 与仪器测量力和运动响应信号所需时间的总和。

附 录 C
(资料性附录)
模态参数识别

C.1 模态参数识别的要求

为了得到所需的包括峰值幅值在内的频率响应函数,并由频率响应测量提取模态阻尼和固有频率值,则要求在结构每个共振点附近的幅值和相位数据要有适当的动态范围和足够高的分辨率。共振峰处的真实幅值和相位测量误差的影响可利用先进的数据简约方法(如拟合圆法)使之减至最小(见参考文献[12])。

C.2 确定模态振型的方法

用 C.2.1 至 C.2.3 所阐述的方法之一,利用导纳测量或测量设备可以得到模态振型。

C.2.1 激振器的位置不变,测量所有关注的响应点和方向的传递导纳。利用每个共振频率上测得的幅值和相位数据,确定相应的模态振型。

注:鉴于动力互易性原理,若只在某个位置和方向上测量响应,而改变激振器的位置和方向,应得到相同的结果(对动力互易性例外的情况,见 A.3)。

C.2.2 首先应由单个导纳测量确定试验结构的共振频率。然后,在每个共振频率依次激励。当以某个共振频率激励结构时,用一个传感器依次测量每个关注的点的运动响应的幅值和相位。

注:本方法有如下缺点:当某个节点碰巧和激振器的位置或运动响应传感器的位置重合时,将会遗漏模态。

C.2.3 C.2.1 和 C.2.2 中所述的方法可改进为:在每个关注的点上各用一个传感器,而共用一台多通道运动响应分析仪或类似的信号处理器。

C.3 获得转动运动响应的方法

参考文献[13]描述了进行导纳试验时,用平动激励和平动响应测量得到转动运动响应的方法。

参 考 文 献

- [1] BROWN, D, CARBON, G. and RAMSEY, K, Survey of Excitation Techniques Applicable to the Testing of Automotive Structures(纵览应用于汽车结构试验的激励技术), *Society of Automotive Engineers Paper No. 770029*, 1977.
- [2] BOUCHE, R. K. Concepts and Transducers Used in Measuring Dynamic Mass(用于测量质量的概念与传感器), in *Proceedings of Machinery Vibration Monitoring and Analysis Seminar*, Vibration Institute, Clarendon Hills IL, 1979.
- [3] MITCHELL, L. D. and ELLIOTT, K. B. How to Design Stingers for Vibration Testing of Structures(如何设计结构振动试验的支架), *Sound and Vibration*, (18-4) April 1984: pp. 14-18.
- [4] BROWNJOHN, J. M. W. STEELE, G. H. CAWLEY, P. and ADAMS, R. D. Errors in Mechanical Impedance Data Obtained with Impedance Heads(用阻抗头获得的机械阻抗数据中的误差), *J. Sound and Vibration*, 73, 1980: pp. 461-468.
- [5] REMMERS, G. M. and BELSHEIM, R. O. Effects of Technique on Reliability of Mechanical Impedance Measurements(技术对机械阻抗测量的可靠性的影响), *Shock and Vibration Bulletin*, 34, Part 3, Dec. 1964: pp. 37-58.
- [6] EWINS, D. J. Measurement and Application of Mechanical Impedance Data(机械阻抗数据的测量与应用), Parts 1, 2, and 3, *J. Soc. Environ. Eng.* Vol. 14. 3, 15. 1 and 15. 2, Dec. 1975-June 1976.
- [7] HARRIS, F. J. On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform(关于用离散富里叶变换进行谐和分析的窗的使用), *Proc. IEEE*, 66, 1978: pp. 51-83.
- [8] BOZICH, D. J. Utilization of a Digital Computer for On-Line Acquisition and Analysis of Acoustic and Vibration Data(利用数字计算机在线搜集和分析声与振动数据), *Shock and Vibration Bulletin*, 35, Part 4, Feb. 1966: pp. 151-180.
- [9] WALKER, A. W. The Effect of Bandwidth on the Accuracy of Transfer Function Measurements of Single Degree of Freedom System Response to Random Excitation(带宽对单自由度系统对随机激励响应的传递函数测量精度的影响), *J. Sound and Vibration*, 74, 1981: pp. 251-263.
- [10] MITCHELL, L. D. Improved Methods for the Fast Fourier Transform (FFT) Calculation of the Frequency Response Function(频响函数的快速富氏变换计算的改进方法), *ASME Transactions, J. of Mech. Design*, 104, 1982: pp. 277-279.
- [11] BENDAT, J. S. and PERSOL, A. G. *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*(随机数据: 分析与测量方法), Wiley-Interscience, New York, 1971: pp. 199-202.
- [12] PETERSON, E. AND KLOSTERMAN, A. Obtaining Good Results from an Experimental Modal Survey(由试验模态测量得到好的结果), *J. Soc. Environ. Eng.* (17-1), Mar. 1978: pp. 3-10.
- [13] SATTINGER, S. S. A Method for Experimentally Determining Rotational Mobilities of Structures. (试验确定结构转动导纳的方法) *Shock and Vibration Bulletin*, 50, Part 2, 1980: pp. 17-28.
- [14] ISO 5348:1987, 机械振动与冲击——加速度计的机械安装.