

中华人民共和国国家标准

GB/T 11349.1—2018/ISO 7626-1:2011
代替 GB/T 11349.1—2006

机械振动与冲击 机械导纳的试验确定 第 1 部分：基本术语与定义、传感器特性

**Mechanical vibration and shock—Experimental determination of
mechanical mobility—Part 1: Basic terms and definitions,
and transducer specifications**

(ISO 7626-1:2011, IDT)

2018-05-14 发布

2018-12-01 实施

国家市场监督管理总局 发布
中国国家标准化管理委员会

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语、定义和符号	1
3.1 术语和定义	1
3.2 符号与单位	6
4 基本原理和一般关系	7
5 力和运动测量传感器的基本要求	8
5.1 概述	8
5.2 运动测量传感器的要求	8
5.3 力测量传感器的要求	8
5.4 阻抗头和被试结构连接件的要求	8
6 校准	9
6.1 概述	9
6.2 系统校准	9
6.3 传感器的基本校准和补充校准	9
7 压电传感器的基本校准	10
7.1 概述	10
7.2 灵敏度	10
7.3 频率响应	12
7.4 加速度计的横向灵敏度	12
7.5 质量	13
7.6 尺寸规格	13
7.7 电阻抗	13
7.8 极性	13
8 补充校准	13
8.1 概述	13
8.2 线性度	14
8.3 力传感器和阻抗头的有效端部质量	14
8.4 阻抗头的柔度	14
8.5 由于环境和副效应的影响需要做的补充校准	15
9 数据的图示	16
9.1 概述	16
9.2 对数图	16
9.3 其他绘图法	16

附录 A (资料性附录) 机械阻抗、导纳和模态分析之间的关系	20
附录 B (资料性附录) 作为频率响应函数的导纳	22
附录 C (资料性附录) 阻抗头连接柔度和阻尼的确定	24
参考文献	26



前 言

GB/T 11349《机械振动与冲击 机械导纳的试验确定》分为以下三个部分：

- 第 1 部分：基本术语与定义、传感器特性；
- 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 GB/T 11349 的第 1 部分。

本部分按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本部分代替 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》。与 GB/T 11349.1—2006 相比，除编辑性修改外主要技术差异如下：

- 修改了标准名称；
- 将“符号与单位”和“术语和定义”合并为第 3 章“术语、定义和符号”；删除了“其他与导纳有关的频率响应函数”一条术语，保留了表 1（见第 3 章，2009 年版的第 3 章和第 4 章）；
- 将 GB/T 11349.1—2006 引言中的部分内容作为正文写入“基本原理和一般关系”条款中（见第 4 章，2009 年版的引言）；
- 将原补充校准项目中的尺寸、质量、极性、频率响应以及加速度计的横向灵敏度调整到基本校准项目中，补充校准项目中增加了传感器带宽的参考阈值，并对章、条顺序做了相应调整（见 6.3，2009 年版的 6.2）。
- 将推荐重复进行基本校准和检验的时间间隔由 1 年改为 2 年（见 7.1，2009 年版的 7.1）。

本部分使用翻译法等同采用 ISO 7626-1:2011《机械振动与冲击 机械导纳的试验确定 第 1 部分：基本术语与定义、传感器特性》（英文版第二版）。

与本部分中规范性引用的国际文件有一致性对应关系的我国文件如下：

- GB/T 3769—2010 电声学 绘制频率特性图和极坐标图的标度和尺寸（IEC 60263:1982，IDT）；
- GB/T 13823（所有部分） 振动与冲击传感器的校准方法 [ISO 5347（所有部分）]；
- GB/T 20485（所有部分） 振动与冲击传感器校准方法 [ISO 16063（所有部分）]。

本部分做了如下编辑性修改：

- 增补了符号“ δ_i ”和“ δ_L ”，以完善公式（4）和公式（5）的等式（见 7.3.2 和 8.2.3）。

本部分由全国机械振动、冲击与状态监测标准化技术委员会（SAC/TC 53）提出并归口。

本部分起草单位：中国计量科学研究院、上海东昊测试技术有限公司、中机试验装备股份有限公司、郑州机械研究所有限公司。

本部分主要起草人：于梅、胡红波、陈立、王学智、韩国明。

本部分所代替标准的历次版本发布情况为：

- GB/T 11349.1—1989、GB/T 11349.1—2006。

机械振动与冲击 机械导纳的试验确定

第 1 部分:基本术语与定义、传感器特性

1 范围

GB/T 11349 的本部分定义了基本术语,并规定了测量机械导纳所使用的阻抗头、力传感器和运动响应传感器的适配性所需进行的校准测试、环境试验和物理测量方法。本部分主要为选择、校准和评定适用于机械导纳测量的传感器和测量仪器提供指导。GB/T 11349 的后续部分对各种环境条件下的导纳测量方法做出了规定。

本部分仅给出了测量各种类型驱动点导纳和传递导纳、加速度导纳和位移导纳的基本信息,不涉及约束阻抗的测量。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 2298—2010 机械振动、冲击与状态监测 词汇(ISO 2041:2009, IDT)

ISO 5347(所有部分) 振动与冲击传感器的校准方法(Methods for the calibration of vibration and shock pick-ups)

ISO 16063(所有部分) 振动与冲击传感器校准方法(Methods for the calibration of vibration and shock transducers)

IEC 60263 绘制频率特性图和极坐标图的标度和尺寸(Scales and sizes for plotting frequency characteristics and polar diagrams)

3 术语、定义和符号

3.1 术语和定义

GB/T 2298 界定的以及下列术语和定义适用于本文件

注:本部分中涉及机械导纳的术语,其定义下面给出的注释比 GB/T 2298 更为详细。

3.1.1

频率响应函数 frequency-response function

与频率相关的线性系统运动响应的傅里叶变换与激励力的傅里叶变换之比。

注 1:激励可以是时间的简谐、随机或瞬态函数。如果测试结构在某一激励或响应范围内可以被视为一个线性系统,频率响应函数就不再依赖于激发函数的类型。在这种情况下,用一种激励获得的试验结果可用于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附录 B 中讨论。

注 2:实际上系统的线性是有条件的,只能近似满足。系统的线性取决于系统的类型和输入的大小。要注意避免非线性的影响,尤其是使用脉冲激励时。不宜对已知的非线性结构(如某些铆接结构)使用脉冲激励试验,并且对这类结构使用随机激励试验时也需要格外细心。

注 3:运动可用速度、加速度和位移表示;对应的频率响应函数分别称为导纳(有时称为机械导纳)、加速度导纳(有时也被误称为“惯量”。由于它与“声惯量”的通用定义有冲突,而且也与“惯量”术语的定义相矛盾,故应避免

使用“惯量”这一术语)和位移导纳(有时称为动柔度)。表 1 汇总了各频率响应函数的等效定义。这些频率响应函数每一个都是结构上某一个点由于单位力(或力矩)激励的运动响应的相量。这些函数的幅值和相位均与频率相关。对应于图 1 中所示的导纳图,典型的加速度导纳和位移导纳的幅值图分别如图 2 和图 3 所示。

注 4: 频率响应函数可以进一步区分为:

- a) 驱动点的响应函数,为了评价频率响应函数,在同一位置测量激励和响应。如使用阻抗头进行测量(在表 1 的公式中 $i=j$);
- b) 传递响应函数,为了评价频率响应函数,不在同一位置测量激励和响应(在表 1 的公式中 $i \neq j$)。

注 5: 改写 GB/T 2298—2010,定义 2.53。

3.1.2

导纳 mobility

机械导纳 mechanical mobility

Y_{ij}

机械系统 i 点的速度与该点或另一点施加的激励力的复数比。

注 1: 除了结构在使用中正常支承表现的约束之外,结构上所有其他测量点没有任何约束,允许其自由响应。此时, i 点的复速度响应与 j 点的复激励力的比率即为导纳。

注 2: 术语“点”是指位置和方向。

注 3: 速度响应可以是平动或转动,激励力可以是力或力矩。

注 4: 如果测得的速度响应是一个平动,并且施加的是激励力,在国际单位制(SI)中导纳的单位是米每牛顿秒 $[m/(N \cdot s)]$ 。典型的曲线图如图 1 所示。

注 5: 机械导纳与机械阻抗互为逆矩阵。

注 6: 改写 GB/T 2298—2010,定义 2.54。

3.1.3

约束阻抗 blocked impedance

Z_{ij}

当所有输出端的自由度连接到一个无限大机械阻抗负载上时的输入端阻抗。

注 1: 当结构上所有其他测量点被约束(即限制其速度为零)时,约束阻抗是由 i 点的约束或驱动力响应与在 j 点施加的激励速度的复数比而得到的频率响应函数。

注 2: 为了获得一个有效的约束阻抗矩阵,需要对完全被约束的结构上所有关注点的所有的力和力矩都进行测量。因此,很少做约束阻抗测量(见参考[16]),并且 GB/T 11349 的各个部分中均不涉及该内容。

注 3: 测量点数量或位置的任何改变都将引起所有测量点约束阻抗的改变。

注 4: 约束阻抗主要用于利用集总质量、刚度和阻尼元件或有限元技术进行结构的数学建模。当将这样的数学模型与试验导纳数据结合或比较时,有必要将解析的约束阻抗矩阵转换成导纳矩阵,反之亦然,见附录 A。

注 5: 改写 GB/T 2298—2010,定义 2.52。

3.1.4

自由阻抗 free impedance

Z

系统所有其他连接点处于自由状态(即约束力为零)时,施加的复激励力与其复速度响应之比。

注 1: 以前经常不区分约束阻抗和自由阻抗,因此,在判读发布的数据时宜明确区分。

注 2: 自由阻抗是导纳矩阵中单一元素的算术倒数。虽然试验确定的自由阻抗可以组成一个矩阵,但该矩阵可能与通过结构数学建模得到的约束阻抗矩阵完全不同。因此,在系统综合理论分析中,它不符合使用机械阻抗的要求。

注 3: 改写 GB/T 2298—2010,定义 2.51。

3.1.5

关注的频率范围 frequency range of interest

在给定的试验系列中,要获得导纳数据的最低频率到最高频率的范围。

表 1 与机械导纳相关的各种频率响应函数所用的等效定义

	用速度表征运动	用加速度表征运动	用位移表征运动
术语 符号 单位 边界条件 参见	导纳 ^a $Y_{ij} = v_i / F_j$ m/(N·s) $F_k = 0; k \neq j$ 图 1	加速度导纳 ^b a_i / F_j m/(N·s ²)=kg ⁻¹ $F_k = 0; k \neq j$ 图 2	位移导纳(动柔度) ^c x_i / F_j m/N $F_k = 0; k \neq j$ 图 3
注释	试验时边界条件容易满足		
术语 符号 单位 边界条件	约束阻抗 $Z_{ij} = F_i / v_j$ (N·s)/m $v_k = 0; k \neq j$	约束有效质量 F_i / a_j (N·s ²)/m=kg $a_k = 0; k \neq j$	动刚度 F_i / x_j N/m $x_k = 0; k \neq j$
注释	试验时边界条件非常困难或不可能实现(可参见 A.2)		
术语 符号 单位 边界条件	自由阻抗 $F_j / v_i = 1/Y_{ij}$ (N·s)/m $F_k = 0; k \neq j$	有效质量(自由有效质量) F_j / a_i (N·s ²)/m=kg $F_k = 0; k \neq j$	自由动刚度 F_j / x_i N/m $F_k = 0; k \neq j$
注释	边界条件易于实现,但在系统建模中要慎重使用试验结果		
<p>^a 导纳有时被称为机械导纳。</p> <p>^b 加速度导纳有时也被误称为“惯量”。由于它与“声惯量”的通用定义有冲突,而且也与“惯量”术语的定义相矛盾,故应避免使用该术语。</p> <p>^c 位移导纳也被称为“动柔度”。</p>			

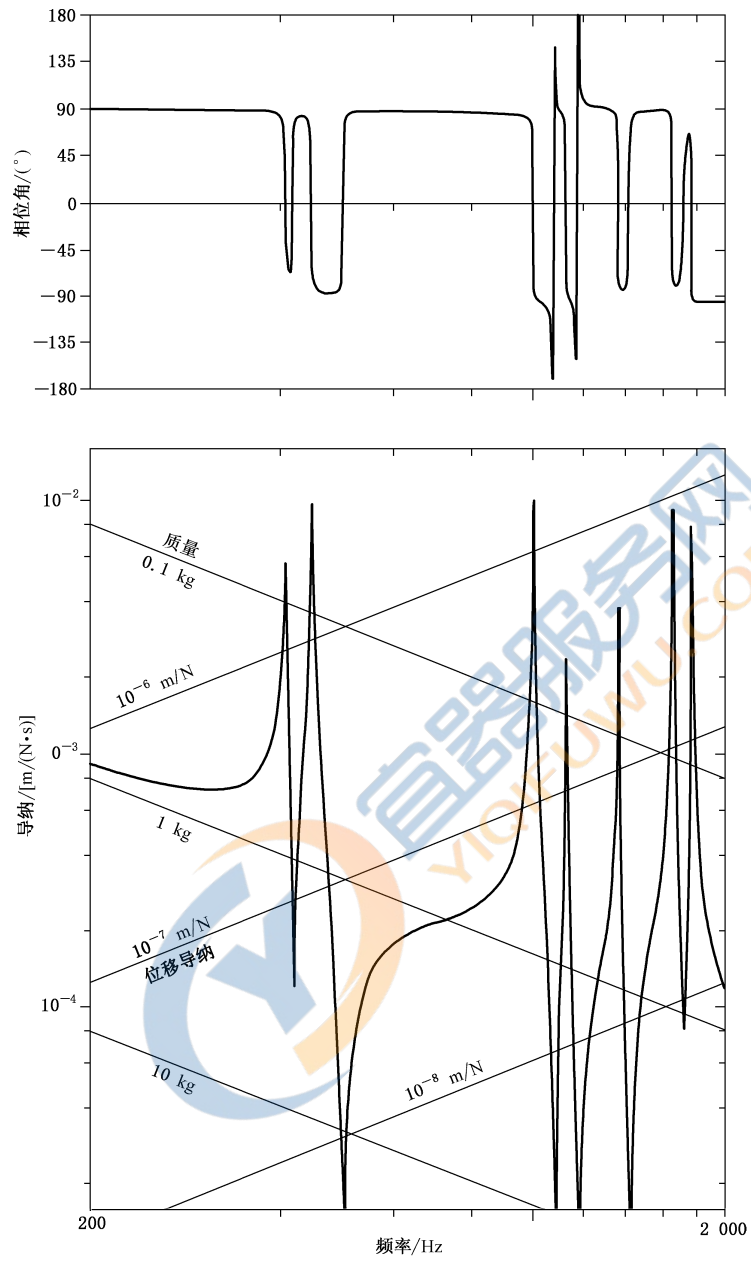


图 1 典型的导纳试验结果图

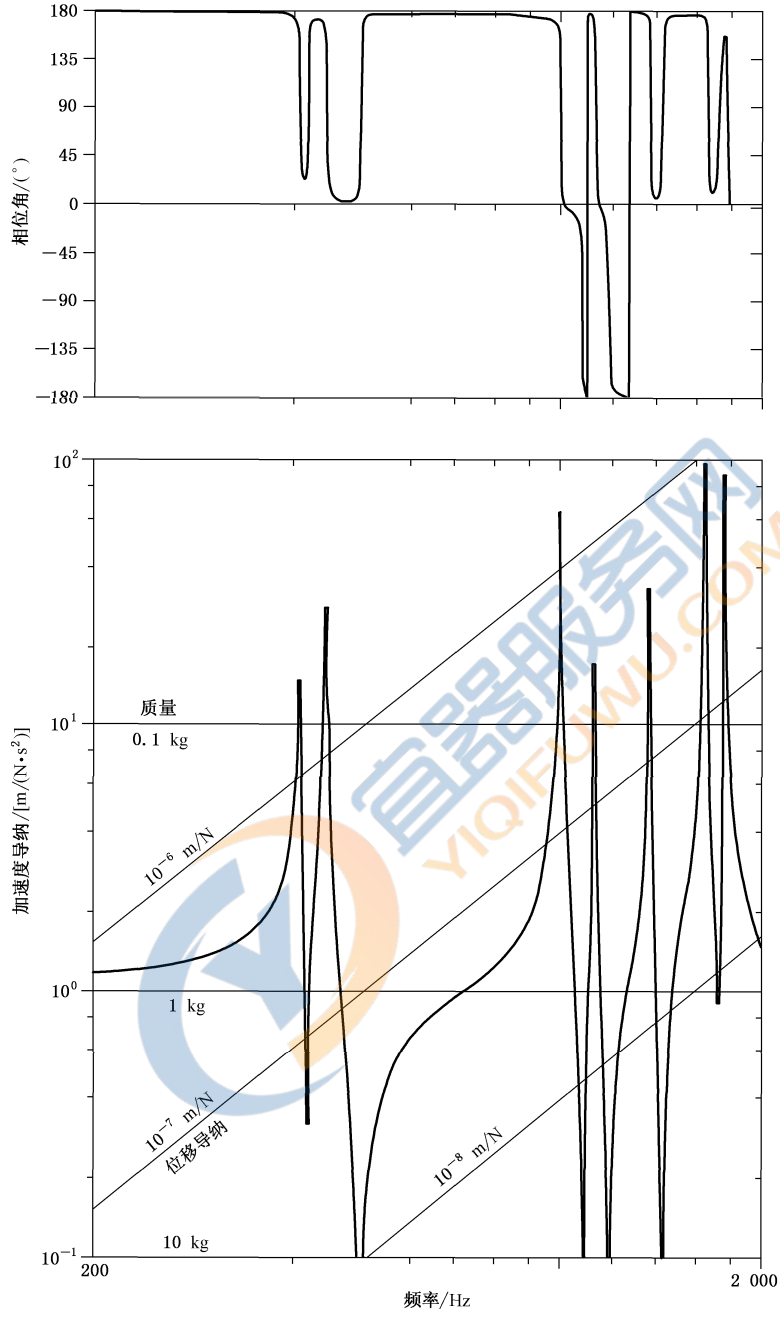


图 2 与图 1 导纳图相对应的加速度导纳图

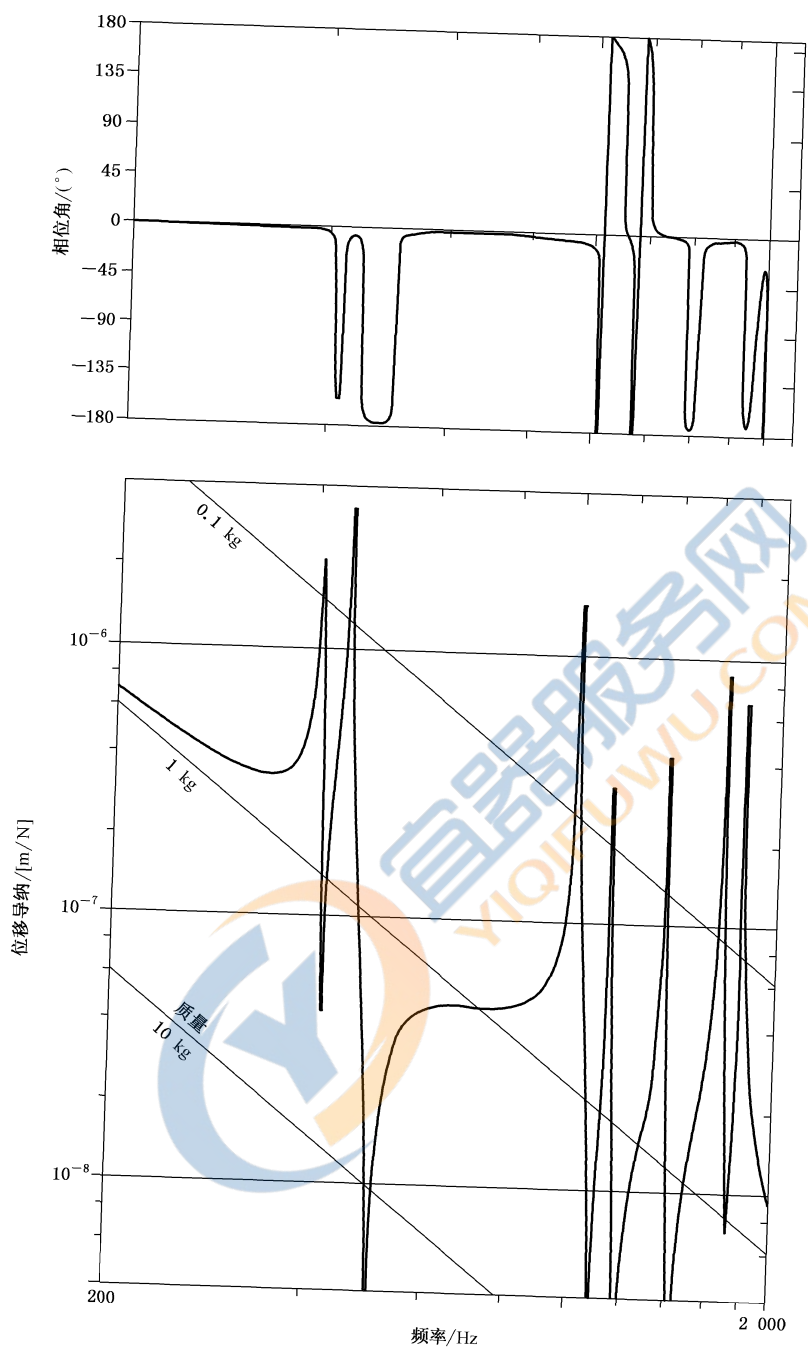


图3 与图1导纳图相对应的位移导纳(动柔度)图

3.2 符号与单位

符号	参量	SI 单位
a	加速度	m/s^2
a_i/F_j	加速度导纳	$\text{m}/(\text{N} \cdot \text{s}^2)$

U	传感器输出	V
f	频率	Hz
F	力	N
k	刚度	N/m
m	质量	kg
S	灵敏度	V/(输入变量的单位)
v	速度	m/s
x	位移	m
x_i/F_j	位移导纳(动柔度)	m/N
Y_{ij}	导纳	m/(N·s)
Z	自由阻抗	(N·s)/m
Z_{ij}	约束阻抗	(N·s)/m

4 基本原理和一般关系

结构的动态特性能够由导纳测量得到的频率函数或与导纳相关的频率响应函数,如加速度导纳和位移导纳(见表1)的测量来确定。只有在分别用加速度或位移替代速度表征运动响应时,加速度导纳和位移导纳才与导纳有区别(见3.1.2)。为了简便起见,GB/T 11349的各部分通常只使用“导纳”这一术语。GB/T 11349规定的所有试验程序和要求也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如下:

- 预测结构对已知或假定的输入激励的动态响应;
- 确定结构的模态特性(固有频率、模态振型和阻尼比);
- 预测相连结构间的动态交互作用;
- 检验结构数学模型的有效性并提高其准确度;
- 确定单一或复合材料的动态特性(即复弹性模量);

对于某些需要完整描述其动态特性的应用,可以要求对沿着三个相互垂直轴的力和平移运动,以及围绕这三个轴的力矩和旋转运动进行测量。对每个关注的位置,该组测量结果将生成一个 6×6 的导纳矩阵。对结构上的 N 个位置,系统有一个 $6N \times 6N$ 阶的完整导纳矩阵。

对于大多数的实际应用,没有必要知道完整的 $6N \times 6N$ 阶矩阵。通常只需通过单点单方向施加激振力,通过在结构关键点测量平动响应的方法,测量驱动点导纳和几个传递导纳即可。在其他应用中,可以只关注旋转导纳。

由于机械导纳被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所生成的频率响应函数,所以当用加速度计测量时,需要将加速度转换为速度以得到导纳。或者也可以用加速度导纳(即加速度与力之比)描述结构的特性。在其他情况下,也可以使用位移导纳,即位移与力之比。

注:习惯上,结构的频率响应函数通常被表示为上述动态特性之一的倒数。机械导纳的算术倒数通常被称为机械阻抗。这是一种误导,因为一般情况下导纳的算术倒数并不代表结构的阻抗矩阵中的任一元素。关于这一点附录A中有详细说明。

导纳的试验数据不能被直接用作结构阻抗模型的一部分。为了实现数据和模型的兼容,应将模型的阻抗矩阵转换为导纳,反之亦然(转换限制见A.3)。

在进行导纳测量之前,有必要对所用的力传感器和运动响应传感器的特性进行评估,以确保在所关

注的整个频率范围内可以获得准确的幅值和相位的信息。

5 力和运动测量传感器的基本要求

5.1 概述

为了获取合乎要求的导纳数据,所有测量用的传感器重要的基本特性应满足下列要求:

- a) 传感器应具有足够高的灵敏度和较低的噪声,以使测量链在结构导纳的整个动态范围内信噪比满足要求。由于与大阻尼结构相比,小阻尼结构需要有更大的动态范围,因此在对小阻尼结构进行试验时,要特别注意传感器噪声的影响。
- b) 如果测量传感器的频率响应函数未经过适当的信号处理而进行补偿,则传感器的固有频率应远低于或远高于所关注的、且未发生不可接受的相移的频率范围。
- c) 传感器灵敏度应具有长期稳定性,且直流漂移要小到可以忽略不计。
- d) 传感器应对外部环境(如温度、湿度、磁场、电场、声场、应变和横向输入)的影响不敏感。
- e) 传感器的质量和转动惯量应尽量小,以避免增加被试结构的动态载荷;或者至少要小到能够对该动态载荷进行修正。

测量系统具有较高抵抗电气接地回路和其他外部信号干扰的性能也很重要。

5.2 运动测量传感器的要求

5.2.1 虽然运动测量传感器需要具有 5.1 所描述的特性,但其中某些特性比其他特性更为重要。加速度计是机械导纳测量中最常用的运动传感器,有时也使用位移传感器或速度传感器。5.2.2~5.2.5 概述了选择传感器时宜考虑的主要特性。

5.2.2 为了使被试结构的附加载荷最小,运动传感器宜采用小质量(或非接触式)的结构设计。

5.2.3 传感器与被测试结构在传感器主测量轴方向上宜刚性连接(见 ISO 5348^[2])。

5.2.4 为了防止传感器或其安装夹具加大结构的刚度或阻尼,连接处的接触面积宜足够小。

5.2.5 当施加脉冲激励时,由于热电效应,压电加速度计可能会产生零点漂移,从而降低低频段的测量准确度。可以通过选用其他类型的运动传感器(如压阻式、电动式或某些剪切型压电加速度计)来解决此类问题。

5.3 力测量传感器的要求

5.3.1 在选用机械导纳测量用的力传感器时,5.1 中列出的某些特性比其他特性更为重要。由于设计要兼顾各个方面,5.3.2~5.3.4 所规定的条款均应重点考虑。

5.3.2 有效端部质量(传感器的力敏感元件与结构间的质量)宜足够小,以使由其相关质量产生的附加惯性信号降到最小(见 8.4)。

5.3.3 选用的力传感器及其组件的刚度宜使其在所关注的频率范围内不发生共振。作为折衷方案,宜通过采用合适的信号处理技术,对发生这类共振对力敏感元件信号产生的影响进行补偿。

5.3.4 静态预加载应与试验应用所需激振力的范围相适应。带有内置预加载功能的传感器可有效地解决这一问题。

5.4 阻抗头和被试结构连接件的要求

5.4.1 加速度计和力传感器组装成一体、用以导纳测量的装置被称为“阻抗头”。这是基于 5.2 和 5.3 所述特性的一种折衷设计。然而,5.4.2~5.4.5 给出的一些至关重要的特性也宜重点考虑。

5.4.2 结构和内装加速度计间的总柔度宜较小,因为柔度大会产生加速度测量的误差。

注:总柔度是连接件柔度与阻抗头内部柔度之和。连接件柔度包括被试结构的局部“硬模效应”柔度。总柔度可按

附录 C 所述方法测量。

5.4.3 有效端部质量(传感器的力敏感元件与结构间的质量)宜比被试结构的自由有效质量要小。

5.4.4 阻抗头相对于连接平面的轴的转动惯量宜足够小,以使其绕轴旋转所引起的结构载荷最小。

注: GB/T 11349.2 给出了避免由阻抗头连接件引入被试结构载荷的进一步指导。

5.4.5 在阻抗头设计中,要求注意避免加速度传感器在作用力下产生的横向灵敏度。

6 校准

6.1 概述

校准分为三类:

- a) 测量与分析系统组合的系统校准;
- b) 传感器的基本校准;
- c) 传感器的补充校准。

6.2 系统校准

测量和分析系统组合的系统校准应在每个测量程序的开始和结束时(以及如有需要在测量过程中)进行。有关各种类型导纳测量的详细程序在本标准相关部分中均有叙述。

组合系统校准比第 7 章中述及的基本校准更易操作并较为准确,而且应用也更广泛。在自由空间通过激振一已知的自由质量,并将加速度和力测量通道的增益按照后续测量要用的值进行设置,就可完成这类系统的校准。其输出比应与生成的导纳图上对应的质量曲线相一致。如果在进行组合系统校准时遇到困难,则应进行基本校准。

在系统校准过程中,应经常检查响应曲线图上的频率刻度或其他数据输出的准确性。

注 1: 附录 C 给出了一个显示阻抗头连接柔度影响的导纳图实例。

注 2: 如果选用的加速度计、力传感器和放大器在用于导纳测量的整个频率范围内响应近似平坦,且加速度计是小阻尼设计,通常就没必要进行相移校准。但是,比较好的操作方法是使用相位计显示力传感器和加速度计输出之间的相位角,并在系统校准时记录力传感器和加速度计输出之间相位角与固有相位角的偏差。

6.3 传感器的基本校准和补充校准

基本和补充校准(见表 2)用于确定传感器对导纳测量的适用性。最常使用的是压电传感器。如果使用其他类型的传感器,可能需要修改程序来确定传感器的适用性。

按照本部分相关条款的有关规定,如果在基本或补充校准中发现传感器特性发生了变化,且这些变化是不允许的,就不宜再使用这些传感器。

与特定的放大器或信号适调仪配用的传感器宜在预期使用的条件下进行校准。例如,与电荷放大器配用的压电式力传感器、阻抗头和加速度计,或与具有恒流驱动能力放大器配用的 IEPE(integrated electronic piezoelectrics 是一种内置电荷放大器)传感器可以一起或单独校准。不再推荐压电传感器配用高阻抗放大器。所有的传感器均宜按制造商给定的电激励模式、规定的负载阻抗等技术条件,与配用的信号适调设备一起校准。

对加速度计、力传感器和阻抗头进行校准时,宜特别注意其安装条件要与制造商规定的相符。安装面的平面度和适当的连接螺钉紧固力矩均十分重要。在高频段使用时,在传感器和安装面之间涂抹一层薄的油膜、润滑脂或蜡,可以增加传感器的耦合性和刚度。如果使用特殊夹具,宜尽量采用与测量导纳时所用的相似的机械装置进行力传感器的校准。

表 2 传感器校准和测试项目汇总表

校准或测试项目	加速度计		力传感器	
	基本项	补充项	基本项	补充项
灵敏度	7.2.1	—	7.2.2	—
频率响应	7.3.1	—	7.3.2	—
横向灵敏度	7.4	—	—	—
质量	7.5	—	7.5	—
尺寸	7.6	—	7.6	—
电阻抗	7.7	—	7.7	—
极性	7.8	—	7.8	—
线性度	—	8.2.2	—	8.2.3
有效端部质量	—	—	—	8.3
传感器柔度	—	—	—	8.4
传感器带宽的阈值	—	8.5.2	—	8.5.2
温度灵敏度	—	8.5.3	—	8.5.3
瞬变温度灵敏度	—	8.5.4	—	8.5.4
预载荷影响	—	—	—	8.5.5
基座应变灵敏度	—	8.5.6	—	—

7 压电传感器的基本校准

7.1 概述

制造商应按表 2 所列出的全部校准和检测项目对每只传感器进行基本校准和测试,并将其结果记录在传感器附带的文件中。用户宜定期重复进行所有的基本校准;如果用户没有足够的校准设备,可委托外部校准实验室进行。

推荐基本校准和检验的时间间隔为 2 年。此外,宜经常进行灵敏度的校准,尤其是传感器在可能改变其灵敏度的环境下使用后宜重新校准。

为了在两次校准期间检查传感器是否存在故障,可在试验前和试验过程中进行特殊测试,例如测试 IEPE(内置电荷放大器)传感器的偏置电压。

7.2 灵敏度

7.2.1 加速度计灵敏度

应按 ISO 5347 和 ISO 16063 的相关部分,使用比较法确定加速度计和阻抗头中加速度计的灵敏度。加速度计应安装在一个合适的激振器上进行校准,该激振器装有一个经过绝对法校准或可溯源到

绝对法的参考加速度计。校准的加速度幅值宜在实际测量导纳所使用的范围内,一般为 $1.0 \text{ m/s}^2 \sim 100 \text{ m/s}^2$ 。

至少宜在单一频率(通常为 80 Hz)下进行灵敏度校准。如果 80 Hz 超过了传感器的工作频率范围,或另一个频率对特殊设计的传感器或者传感器的试验应用范围更合适,也可以使用其他频率进行校准。

为了确保获得被试仪器的正确性能,建议进行频率响应校准。

注:通过频率响应的测量,能够检测出加速度计中的某些故障,如压电元件的损坏或预紧力的丧失。

与电荷放大器配用的加速度计的灵敏度以 $\text{pC}/(\text{m/s}^2)$ 单位表示。与电压放大器配用的加速度计、带内置电荷放大器或阻抗变换器的加速度计的灵敏度以 $\text{V}/(\text{m/s}^2)$ 单位表示。

由于与加速度计相连的电荷或电压放大器的输出信号是电压,所以合成的加速度通道的灵敏度宜以 $\text{V}/(\text{m/s}^2)$ 单位表示。通常,加速度通道的灵敏度是由加速度计和放大器的灵敏度确定。在需要精确测量导纳的情况下,宜将加速度计和与之配用的放大器一起校准,以便直接获得加速度通道的灵敏度。

7.2.2 力传感器灵敏度

应使用质量加载法对力传感器或阻抗头中的力敏感部件进行校准。相关测量技术在参考文献(如参考文献[17])中有描述。

应使用制造商推荐的额定预紧扭矩,将力传感器安装在合适的激振器上进行灵敏度校准。应在力传感器的对面位置安装一只参考加速度计,在单轴方向上以某个控制的加速度幅值 a_0 对力传感器施加振动。应测量与力传感器相连的放大器的电压输出 U_0 和施加的加速度 a_0 。然后,应将负载质量 m 安装到力传感器的对面位置,不改变力传感器放大器增益设置,调整激振器的输入使施加的加速度 a 与前面的振幅相等(即: $a = a_0$) 时,测量输出电压 U_m , 则力通道的灵敏度 S_F 按式(1)计算:

$$S_F = \frac{U_m - U_0}{(m + m_1 + m_2 + m_3)a - (m_1 + m_2 + m_3)a_0} \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

m —— 负载质量;

m_1 —— 参考加速度计的质量;

m_2 —— 螺栓的有效质量;

m_3 —— 力传感器的有效端部质量。

所有质量的单位均为千克(kg),加速度的单位为米每二次方秒(m/s^2)。由于 $a_0 = a$, 当 $(m_1 + m_2 + m_3)a_0 = (m_1 + m_2 + m_3)a$ 时,式(1)可化简为式(2):

$$S_F = \frac{U_m - U_0}{ma} \quad \dots\dots\dots (2)$$

重要提示: 由于传感器的灵敏度和灵敏度校准都与其预加载有关,因此,对于非预紧装配的力传感器宜格外谨慎,以确保每次使用时安装预加载都相同。

注:使用式(1)和式(2)的复数形式时,允许力传感器的相位响应有偏离。

式(2)给出的力通道(即传感器和放大器组合)的灵敏度单位为伏每牛(V/N)。力传感器的灵敏度能通过式(2)和所使用的放大器的灵敏度推导得出。

与电荷放大器配用的力传感器灵敏度的单位应为皮库每牛(pC/N)。与电压放大器配用的力传感器灵敏度的单位应为伏每牛(V/N)。

当需要精确测量导纳时,为了直接获得力通道的总灵敏度,应将所用的力传感器和与之配用的放大器一起校准。

上述方法仅适用于低于五分之一系统共振频率的频率点。共振频率取决于系统的有效质量和力传感器的刚度 k 。通过式(3)能估算出带负载质量的传感器的共振频率 f_m ：

$$f_m = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{(m + m_1 + m_2 + m_3)}} \dots\dots\dots (3)$$

7.2.3 阻抗头灵敏度

可按 7.2.1 和 7.2.2 给出的方法,通过对加速度计和力传感器分别进行校准来获得阻抗头的灵敏度。阻抗头的现场校准通常包括激励两个或三个不同大小的自由质量,以确保该阻抗头可以在宽量程范围内测量已知的导纳。

7.3 频率响应

7.3.1 加速度计的频率响应

应按照 ISO 5347 或 ISO 16063 的相关部分,选择输出信噪比大于 10(即大于 20 dB)的加速度幅值,在对应于加速度计使用范围的频率范围内,采用比较法对加速度计的频率响应进行校准。可以利用合适的激振器进行谐波或宽带激励来测量频率响应。宽带激励可以是随机的或瞬态的。

谐波激励可用于离散频率或连续扫描。对于第一种情况,应有足够的离散频率点,例如频率每增加 10 倍就增加 10 个频率点,以确保传感器在所关注的频率范围内没有局部或内部共振。如果是在有限的离散频率点下进行校准,那么增加频率扫描对确保相同的目标是有用的。

当使用连续扫描时,频率扫描宜缓慢进行。在整个频率范围内,通过使用参考加速度计的反馈控制系统来保持激励的加速度幅值恒定。

频率响应在所关注的频率范围内应是平坦的,其波动度应在 $\pm 5\%$ 以内。应当注意激振器的横向运动连同传感器的横向灵敏度所引起的测量误差不得超过规定量级的 $\pm 5\%$ 。

7.3.2 力传感器的频率响应

应在与上述加速度计频率响应校准的相同条件下对力传感器频率响应进行校准。但是,力传感器的频率响应校准应对力传感器施加质量负载,并在每个规定的频率点上以恒定的加速度幅值振动。应测量对应每个频率点 f 时力传感器放大器的输出电压 U_f 。频率响应偏差 δ_f 按式(4)计算,以百分比表示:

$$\delta_f = \left(\frac{U_f}{U_{ref}} - 1 \right) \times 100\% \dots\dots\dots (4)$$

式中:

U_f ——对应每个频率点 f 时力传感器放大器的输出电压,单位为伏(V);

U_{ref} ——传感器放大器在参考频率(通常为 80 Hz)下输出的参考电压,单位为伏(V)。

施加在力传感器上的惯性负载不要引起与负载质量和传感器柔度相关的系统共振很重要。使用式(3)能够进行检查。在所关注的整个频率范围内,频率响应的最大允许偏差为参考频率点响应的 $\pm 5\%$ 。

注:如果使用的是无内部预加载的力传感器,则与力传感器的灵敏度校准相同,在频率响应整个校准过程中的任何时间,都不要调整力传感器固定螺栓的紧固扭矩,以获得更好的测量准确性。

7.4 加速度计的横向灵敏度

应按 ISO 5347 或 ISO 16063 的相关部分,在低于 500 Hz 的单一频率下对传感器的横向灵敏度进行校准。传感器应安装在与传感器灵敏轴相垂直的激振器台面上。应在已知激振器在垂直于其灵敏轴

平面内的运动比其灵敏轴方向的运动至少小 100 倍的某个频率下,施加简谐激励。对横向灵敏度比远低于 1% 的测量,则对激振的要求更为苛刻。要想获得这样的横向灵敏度有效数值,需要特别细心和采用特殊技术。

安装传感器并以 45° 或更小的增量,绕其灵敏轴旋转 360°,来确定最大横向响应。如果横向灵敏度比超过轴向灵敏度的 5%,或与先前校准相比有显著变化,宜通过进行补充校准对传感器做进一步评价;或必要时,宜对其进行修理。

7.5 质量

规定的质量是传感器的总质量,不包括非传感器组成部分的安装螺栓和电缆。

7.6 尺寸规格

应给出包括长、宽、高、直径和全部安装孔或螺栓的相关尺寸,并应以外形图的形式标注。还应提供接插件,电缆规格和型号的说明。

7.7 电阻抗

7.7.1 传感器的电阻和电容

传感器接线端子间的直流电阻应由制造商用兆欧表测量,测量使用的外加电压不超过 50 V。

电容应用阻抗电桥测量,所用的激励电压频率在传感器的工作频率范围内。如果电容随频率变化,应至少在两个频率下测量,其中包括确定参考灵敏度的频率点。对电容随频率变化不明显的传感器,通常应在 1 000 Hz 下测量。

由于某些压电材料的电容随温度和电压变化,所以应当在 (23±3) °C 室温和传感器制造商推荐的激励电压下测量电容。在电容测量前或测量期间避免触摸传感器,以使温度变化带来的电容变化量最小。

对于一些内部装有电子元件的传感器,上述阻抗测量的方法可能会产生错误的结果或可能造成损害。在这种情况下,宜采用插入法。

电阻和电容的测量宜以合适的时间间隔(见 7.1)重复进行。由于这些测量通常不是很精确,因此,只有在与先前的校准结果相比出现显著变化时才应考虑。例如,如果电阻和(或)电容的变化大于 5%,宜通过进行所有基本和补充校准对传感器做进一步评价;或必要时,宜对其进行修理。

7.7.2 绝缘电阻

传感器所有接线端子和其安装面间的直流电阻应由制造商测量,并提供数据。

如果传感器不是绝缘型的,制造商应标明使用该传感器时,实现绝缘所需的安装形式。

7.8 极性

通常传感器的极性由制造商规定。当机械输入是从安装表面向传感器的另一端方向施加,并且是沿着传感器的最大灵敏度轴时,应通过比较法测定其产生的输出电压的变化是正还是负,从而确定传感器的极性。极性的定义对灵敏轴垂直于安装表面的大多数传感器是适用的。

8 补充校准

8.1 概述

制造商应对所生产的每种类型传感器的样品按表 2 所列项目进行补充校准和测试。此外,为确定

传感器特有的工作特性或性能变化,一些补充校准和测试项目宜由用户来完成。

8.2 线性度

8.2.1 概述

应采用比较法以谐波激振方式进行线性度校准(加速度计的校准见 ISO 5347 或 ISO 16063 的相关部分)。

8.2.2 加速度计的线性度

幅值线性度偏差应通过测量参考加速度计与被测加速度计输出之比来确定。制造商至少应在 90%~100%设计量程范围内的三个加速度振级上测量这个比值。这有助于用户检查自己使用范围内的线性度。每个加速度值的幅值线性度偏差应由其比值与所有加速度值的平均比值之差来确定。这个差值用平均比值的百分数表示。如果所有加速度幅值线性度偏差均在±2%之内,则该加速度计适用于导纳测量。

8.2.3 力传感器的线性度

力传感器的线性度校准通常在 80 Hz 频率点,以不同的加速度幅值激振带质量负载的力传感器,从而测出力传感器的放大器在每一激振加速度幅值 a_x (由标准加速度计测定)下的输出电压 U_x 。力传感器的线性度偏差 δ_L 应按式(5)计算,并以百分比表示:

$$\delta_L = \left[\frac{U_x/a_x}{(U_x/a_x)_{\text{avg}}} - 1 \right] \times 100\% \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中:

$$(U_x/a_x)_{\text{avg}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{U_x}{a_x} \right)_i \quad \text{——所有加速度幅值下,力传感器的放大器输出幅值与加速度幅值之比的平均值。}$$

如果 80 Hz 在传感器工作频率范围之外,或其他频率对特殊设计的传感器或实际应用更适合,也可使用不同的频率点进行线性度校准。

作用力的计算方法如下:在所施加的某一加速度下,将放大器输出电压 U_x 除以 7.2.2 中测得的力传感器通道灵敏度,即可求得该加速度下的作用力。其余校准点的作用力等于上述求得的力乘以该点的加速度与上述求力时所用的加速度之比。

如果作用力在额定力范围内,力传感器或阻抗头中的力传感器线性度偏差大于 2%,则该力传感器不适用于导纳的测量。

8.3 力传感器和阻抗头的有效端部质量

力传感器和阻抗头的有效端部质量是指传感器的力敏感元件与连接试件端部之间的质量。在制造商的产品说明书中宜给出有效端部质量,同时用户也宜知晓:有效端部质量是会随着试验和(或)传感器预加的载荷,以及连接传感器和被测结构所用附件的增加而增大。因此,有效端部总质量是制造商产品说明书中给出的有效端部质量与连接件的质量之和。

8.4 阻抗头的柔度

阻抗头的柔度是其内部加速度计和结构连接点之间的组件部分的柔度(见参考文献[13])。

除了制造商所提供的阻抗头的柔度外,在进行导纳测量时还应考虑连接件的柔度。

附录 C 给出了通过试验确定总柔度的方法。

8.5 由于环境和副效应的影响需要做的补充校准

8.5.1 概述

实际上,副效应和(或)环境条件的影响会造成传感器输出不是所直接感应的模拟量,因此必须进行某些补充校准。8.5.2~8.5.6 所述的补充校准反映了对这类影响量进行定量分析的必要性。

8.5.2 传感器带宽的参考阈值

传感器的阈值可能会影响数据的准确性,尤其是在测量范围的最低端。为了更好地进行数据比较,宜统一规定传感器的阈值。以电输出 U_{Th} 为单位的传感器阈值宜用传感器灵敏度在参考灵敏度的 $\pm 5\%$ 内变化的最低频率 f_L 和最高频率 f_U 范围内,所测得的频谱噪声密度 $u(f)$ 的积分来表示:

$$U_{Th} = \sqrt{\int_{f_L}^{f_U} u^2(f) df} \quad \dots\dots\dots (6)$$

通常,用传感器灵敏度 S 作为比例因数,以力学单位来表征传感器的阈值(如加速度计 a_{Th}):

$$a_{Th} = \frac{U_{Th}}{S} \quad \dots\dots\dots (7)$$

被测结构与多个不同传感器之间形成的多个接地回路可能会对传感器和配套放大器组成的测量链的阈值产生不良影响,宜通过将传感器设计成外壳绝缘或对地绝缘来避免。

8.5.3 传感器灵敏度随温度的变化

在整个预期使用的温度范围内,通常最好选用温度灵敏度偏差不超过 $\pm 1.0\%$ 的传感器。

8.5.4 温度变化产生的传感器输出信号的噪声(瞬变温度灵敏度)

温度变化会在可使用的压电传感器和任何内置传感器的放大器中产生因瞬变温度灵敏度导致的低频噪声。由于压电传感器使用的频率范围一般较高,这就就会发生噪声与测得的信号相互干扰,其结果会对超低频部分的导纳测量结果造成影响。ISO 5347-18^[1] 描述了一种通过将传感器浸没在液体中,导致温度跳变来获得传感器特征数据的方法。

同样,在低频测量时,温度的迅速变化能够产生足够大的噪声,使传感器的电子线路处于饱和状态,从而导致错误的测量结果。

8.5.5 力传感器预载对灵敏度的影响

对于不同的紧固扭矩对非预先组装的力传感器灵敏度的影响,可用不同的紧固扭矩多次安装力传感器,重复进行灵敏度校准的方法来确定。

8.5.6 基座应变的影响

基座应变对传感器灵敏度的影响能够用一根夹紧在刚性支承上的简易悬臂梁来测量。经合适设计的梁的第一阶固有频率约为 5 Hz。应将传感器装在悬臂梁的适当位置上,通过贴在梁上传感器安装位置附近的应变片测出应变值。有关基座应变灵敏度的测量方法见 ISO 5347 或 ISO 16063 的相关部分。

在参考文献[15]中能查阅到测定基座应变对力传感器和阻抗头灵敏度影响的详细程序。

9 数据的图示

9.1 概述

采用适当的图示对说明导纳试验数据十分有利,不同的显示格式适于不同的用途。

9.2 对数图

当频率远低于结构的最低共振频率或反共振频率时,三种结构的频率响应函数(见表 1)的幅值在对数幅值—对数频率曲线图上几乎都是直线。当频率远低于最低共振频率时,频响曲线往往渐近于恒定的位移导纳(动柔度)曲线;在频率远低于最低反共振频率时,曲线渐近于恒定的质量曲线。在导纳图中,位移导纳(动柔度)曲线按每 10 倍频程幅值增大 10 倍向上倾斜,质量曲线按每 10 倍频程幅值减小 10 倍向下倾斜(如图 1 所示)。

如果用加速度导纳或位移导纳(动柔度)数据绘图时,质量曲线和位移导纳(动柔度)曲线的斜率相应地改变,如图 2 和图 3 所示。

采用对数频率标尺绘制导纳测量结果时,幅值和频率的刻度应符合 IEC 60263。图 4 是推荐的绘制包括质量和位移导纳(动柔度)曲线的导纳数据的一种格式。此图中用户应规定所有质量和位移导纳(动柔度)的导纳指数。

注 1: 在国际单位制中,以 10 倍幅值为增量的恒定位移导纳(动柔度)曲线、恒定质量曲线与恒定导纳曲线,总是在 $1/2\pi$ 、 $10/2\pi$ 、 $100/2\pi$ 等频率点相交,频率 159 Hz($=1\ 000/2\pi$)是一个很实用的参考点,在这个频率上,质量、加速度导纳、导纳和位移导纳(动柔度)互相之间存在如下的倍数关系:

质量	0.1 kg	1 kg	10 kg
加速度导纳	$10\text{ m}/(\text{N}\cdot\text{s}^2)$	$1\text{ m}/(\text{N}\cdot\text{s}^2)$	$10^{-1}\text{ m}/(\text{N}\cdot\text{s}^2)$
导纳	$10^{-2}\text{ m}/(\text{N}\cdot\text{s})$	$10^{-3}\text{ m}/(\text{N}\cdot\text{s})$	$10^{-4}\text{ m}/(\text{N}\cdot\text{s})$
位移导纳(动柔度)	$10^{-5}\text{ m}/\text{N}$	$10^{-6}\text{ m}/\text{N}$	$10^{-7}\text{ m}/\text{N}$

注 2: 根据 IEC 60263,十进制标尺的幅值坐标和频率坐标长度之比应为 2/5,图 4 中的格式就遵循了这个原则。

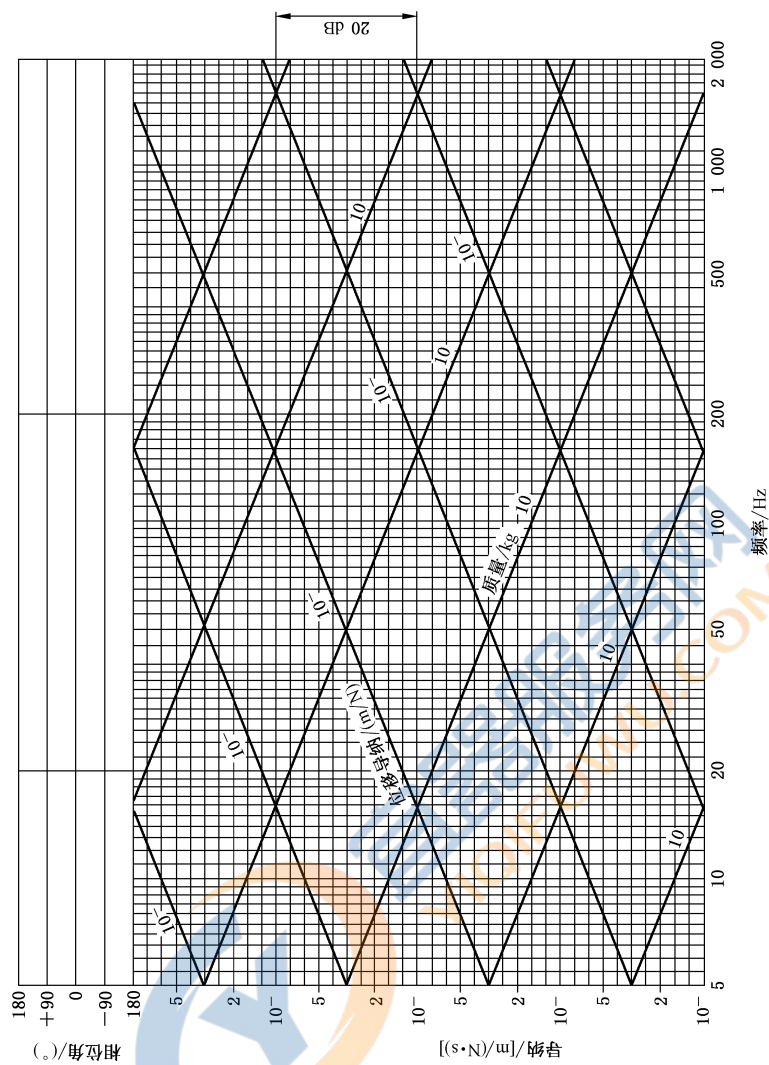
注 3: 可根据试验结果,使用合适的以 10 为幂的指数确定导纳、质量和位移导纳(动柔度),以利于绘制数据和在图中标注。

9.3 其他绘图法

除绘制导纳试验结果的幅值和相位图外,有时绘制成频率响应函数的实部图和虚部图更为有利,如图 5 所示。还可以将试验结果绘制在极坐标系中,如图 6 所示(乃奎斯特图)。极坐标图的优点是可通过绘制拟合圆来增加数据,这点对于从试验数据中提取模态阻尼系数是重要的。

注 1: 在图 6 中用直线将实测的数据点相连接,这些直线并不是实测数据,而是用来帮助区分数据点是属于结构的一个模态或属于另一个模态。

注 2: 图 6 中连接实测数据点的直线并不接近一个通过数据点的圆这一事实表明,在共振频率附近没有测得足够的、用以直接确定真实共振频率、峰值响应以及模态阻尼的数据。为了正确识别这些参数,宜测量更多的数据,或者对测得的测试数据应用合适的拟合圆程序。



注 1: 在 159 Hz, 采用下列这组数值:

导纳	位移导纳(动柔度)	质量
$10^{-3} \text{ m}/(\text{N} \cdot \text{s})$	$10^{-6} \text{ m}/\text{N}$	1.0 kg
$10^{-4} \text{ m}/(\text{N} \cdot \text{s})$	$10^{-7} \text{ m}/\text{N}$	10.0 kg

注 2: 指数范围由用户指定。

图 4 导纳曲线绘制图表

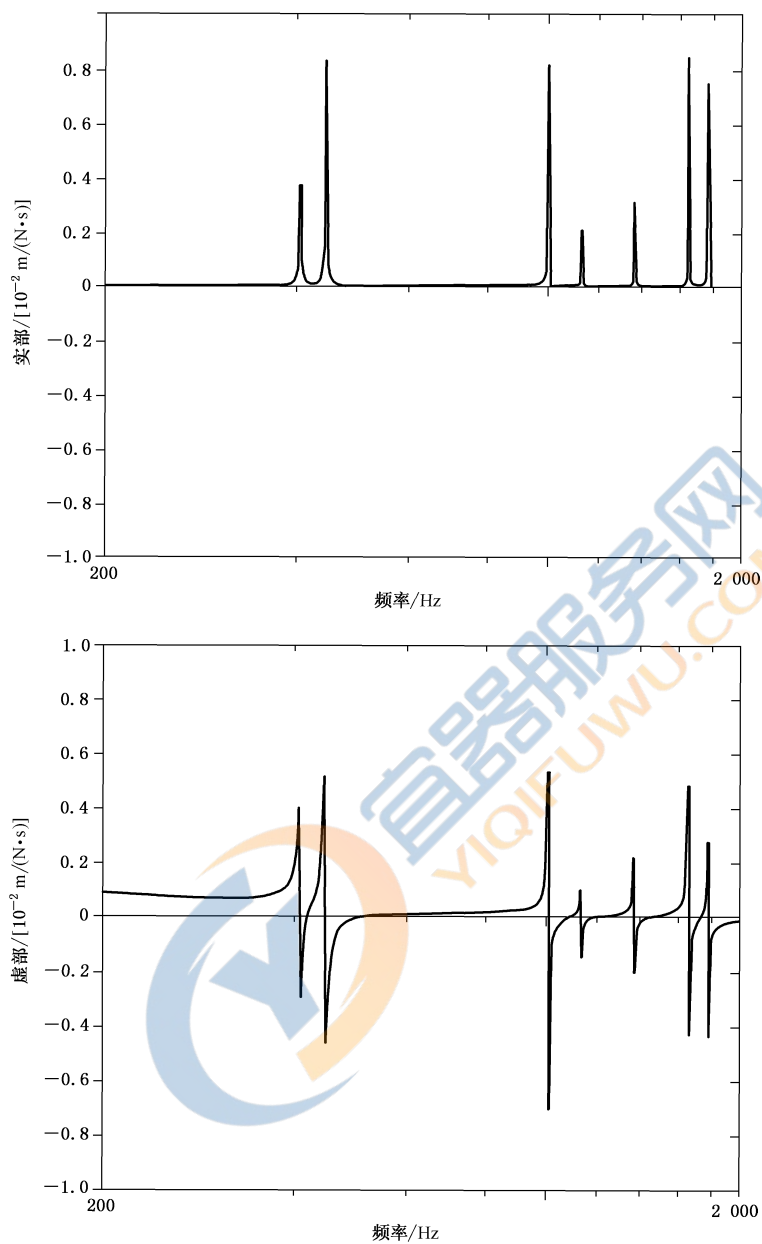


图5 与图1相对应的导纳实部图和虚部图

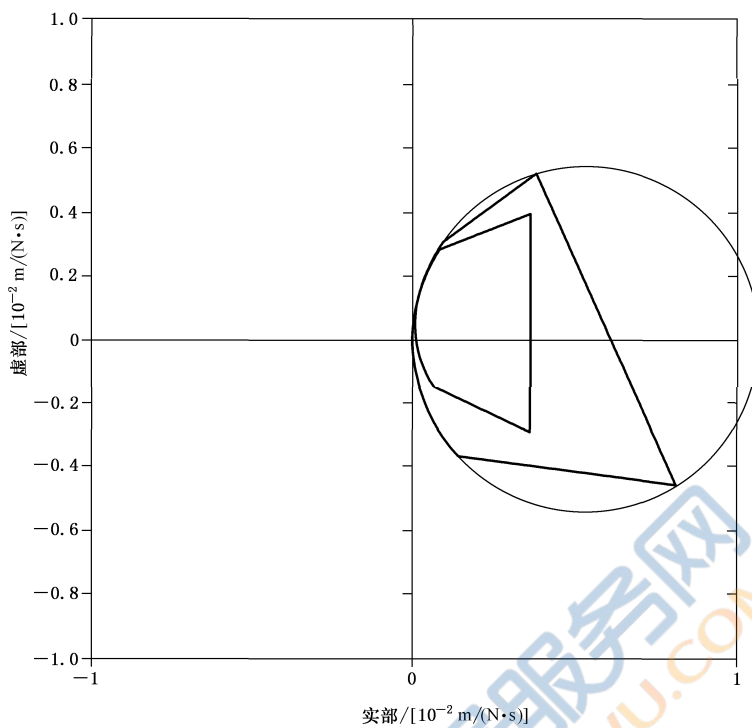


图6 图1中最低两阶模态频率的导纳结果极坐标图



附录 A
(资料性附录)
机械阻抗、导纳和模态分析之间的关系

A.1 概述

一个机械系统的动力响应主要依赖于两组参数,即激振力和系统的动态特性。如果激振力大小在系统基本上呈线性的范围内,则系统的特性可以在频域内用导纳矩阵 $[Y]$ 或阻抗矩阵 $[Z]$ 描述。由此得到激振力与响应速度之间的两个等效关系式式(A.1)和式(A.2):

$$\{v(\omega)\} = [Y]\{F(\omega)\} \quad \dots\dots\dots(A.1)$$

$$\{F(\omega)\} = [Z]\{v(\omega)\} \quad \dots\dots\dots(A.2)$$

式中:

$\{F(\omega)\}$ ——作用于系统不同点上、以频率 ω 的函数描述的外部动态力的列向量;

$\{v(\omega)\}$ ——所有关注点对应的速度响应的列向量。

注:术语“点”指的是一个位置和相应的方向。术语“坐标”也常用于表达同样的含义。

因为一般都要考虑结构上的多个点,所以式(A.1)和式(A.2)用矩阵符号表示很方便。如果 N 是所要考虑的运动响应点的数加上外力(激振力或反作用力)作用点的数,则式(A.1)和式(A.2)中的列向量为 N 阶,矩阵为 $(N \times N)$ 阶。

由式(A.1)和式(A.2)得到式(A.3)

$$[Z] = [Y]^{-1} \quad \dots\dots\dots(A.3)$$

宜注意,式(A.3)表示的矩阵求逆是指阻抗矩阵中的元素 Z_{ij} ,而不是导纳矩阵中元素 Y_{ij} 的算术倒数,反之亦然。

A.2 边界条件

导纳试验中,每次在结构上单点施加动态激振力,有:

$$F_k = 0, k \neq j \quad \dots\dots\dots(A.4)$$

式中:

j ——激振点;

k ——其他所关注的点。

式(A.4)规定了试验确定机械导纳的边界条件,这些边界条件在试验过程中容易满足(见表1)。在这些给定边界条件下,测量在 i 点的速度响应和在 j 点的激振力,得到导纳矩阵的 i 行 j 列元素,见式(A.5):

$$Y_{ij} = \frac{v_i}{F_j} \quad \dots\dots\dots(A.5)$$

其边界条件为 $F_k = 0, k \neq j$ 。这就是3.1.2中给出的导纳定义的数学表达式。

相反,式(A.3)中的阻抗矩阵 Z 的元素为式(A.6):

$$Z_{ij} = F_i / v_j \quad \dots\dots\dots(A.6)$$

边界条件为式(A.7):

$$v_k = 0; k \neq j \quad \dots\dots\dots(A.7)$$

式(A.6)和(A.7)是3.1.3中给出的约束阻抗定义的数学表达式。在实际的试验过程中,要满足式

(A.7)的边界条件是很困难的或者是不可能的(见表1)。因此,通常不可能通过试验手段确定阻抗矩阵 Z 的元素。

式(A.4)和(A.7)边界条件的差异对于正确使用导纳和阻抗数据非常重要。要注意的是,如关注的只是结构(激振点)上一个点(和方向)的特殊情形,这个差异就无关紧要。

这种特殊情形在实际中并不少见。常用的阻抗定义为激振力与速度响应之比,而不限定边界条件。只有在这种特殊情况下,阻抗矩阵和导纳矩阵仅有一项,因此阻抗是导纳的算术倒数。要注意这个特殊的阻抗是3.1.4中定义的自由阻抗,而不是一般结构的($N \times N$)阶阻抗矩阵的一个元素。

A.3 阻抗和导纳数据的比较

结构动态特性试验研究得到的是导纳类型的数据。但在数学建模中,一般更容易使用质量和刚度矩阵。在频率域内得到的是约束阻抗数据。当对导纳和约束阻抗数据进行比较时,有必要转换为另一种形式。但转换时宜特别小心,约束机械阻抗取决于所考虑的自由度数(见参考文献[4]),而不是结构不变的特性。因此,只有当两个矩阵所有的自由度(点和方向)都相同时,阻抗矩阵元素才能与逆导纳矩阵元素进行比较。如果数学模型(及其阻抗矩阵)比试验得出的导纳矩阵自由度高(实际中常有这类情况),则要将阻抗转换为导纳,以便与试验得出的导纳矩阵中相应的元素相比较,而不是反过来做。这是因为导纳不受人为约束的影响,而阻抗并非如此。

A.4 模态分析

模态分析是链接试验分析与数学建模的非常有用的工具,它对预测相连子结构的动态交互作用特别方便。

在使用试验导纳数据时,模态分析可用统计方法在所关注的频率范围内求出模态参数,包括固有频率、阻尼和模态质量(或刚度)。几种不同的方法可用来准确地识别这些参数,以及考虑所关注频率范围之外的模态的影响。

在使用数学模型时,可通过采用特征值和特征向量计算或其他矩阵降阶程序,由子结构的质量、刚度和阻尼矩阵求出模态参数。这些方法通常比整个阻抗矩阵直接求逆更为有效。

附录 B
(资料性附录)
作为频率响应函数的导纳

B.1 简谐激振

若一个时间函数可表示为式(B.1):

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi) \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

A —— 简谐波形的幅值;

ω —— 圆频率;

t —— 时间;

φ —— 初相位角。

则此函数可在复平面上表示为式(B.2):

$$\bar{x}(t) = A e^{j(\omega t + \varphi)} \quad \dots\dots\dots (B.2)$$

式中:

$$j = \sqrt{-1};$$

$x(t)$ —— $\bar{x}(t)$ 在实轴上的投影。

$\bar{x}(t)$ 可以认为是以复平面原点为中心的旋转矢量,该旋转矢量通常称为相量¹⁾。如果在给定频率求出两个相量之比,其结果是一个复数,而不是时间的函数。如果对关注的所有频率点构成一组这样的复数,其结果称为频率响应函数。如果两个相量为:

$$\bar{x}_1(\omega, t) = A_1(\omega) e^{j[\omega t + \varphi_1(\omega)]}$$

$$\bar{x}_2(\omega, t) = A_2(\omega) e^{j[\omega t + \varphi_2(\omega)]}$$

则式(B.3)成立:

$$H(\omega) = \bar{x}_1 / \bar{x}_2 = B(\omega) e^{j\theta(\omega)} \quad \dots\dots\dots (B.3)$$

式中:

$$B(\omega) = A_1(\omega) / A_2(\omega);$$

$$\theta(\omega) = \varphi_1(\omega) - \varphi_2(\omega)。$$

$B(\omega)$ 和 $\theta(\omega)$ 都是圆频率 ω 的函数,频率响应函数 $H(\omega)$ 可以以极坐标形式,用幅值 $[B(\omega)]$ 和相位 $[\theta(\omega)]$ 表示,或以直角坐标形式表示为实部和虚部分量,见式(B.4)。

$$H(\omega) = R(\omega) + jI(\omega) \quad \dots\dots\dots (B.4)$$

式中:

$$R(\omega) = B(\omega) \cos[\theta(\omega)];$$

$$I(\omega) = B(\omega) \sin[\theta(\omega)]。$$

可将导纳视为由速度相量与力相量之比给出的频率响应函数。对其他与导纳类的物理量同理。

B.2 随机激振

在平稳高斯分布的随机振动中,式(B.5)为线性可逆系统的输入与输出的基本方程为:

1) 某些作者将 $Ae^{j\varphi}$ 定义为相量。由于本部分只涉及相量的比值,故使用的“相量”术语与两种定义相一致。

$$G_{12}(\omega) = H(\omega)G_{22}(\omega) \quad \dots\dots\dots (B.5)$$

式中:

$G_{12}(\omega)$ ——系统输入和输出间的互谱密度;

$G_{22}(\omega)$ ——输入的自谱密度;

$H(\omega)$ ——输入的频率响应函数。

G_{12} 是频率的复函数, G_{22} 是频率的实函数,因此 $H(\omega)$ 是频率的复函数。导纳可视为由速度与力激励间的互谱密度与力激励(输入)的自谱密度之比给出的频率响应函数。在实际应用中,只能使用自谱与互谱的估计值,因此,只能用随机激励估计导纳,可以使估计误差小于其他测量误差,并且不必要限制测量的准确度。

B.3 瞬态激励

在瞬态振动中,式(B.6)为线性系统的输出和输入关系式:

$$X_1(\omega) = H(\omega)X_2(\omega) \quad \dots\dots\dots (B.6)$$

式中:

$X_1(\omega)$ ——输出 $x_1(t)$ 的傅里叶变换;

$X_2(\omega)$ ——输入 $x_2(t)$ 的傅里叶变换;

$H(\omega)$ ——系统的频率响应函数。

式(B.6)中所有的量都是频率的复函数。 $H(\omega)$ 的逆傅里叶变换是系统的单位脉冲响应函数 $h(t)$,即若输入一单位脉冲,系统的输出由 $h(t)$ 给出。可将导纳视为由速度响应的时程傅里叶变换与输入力的时程傅里叶变换之比给出的频率响应函数。

在实际应用时,用离散傅里叶变换(DFT)近似代替连续傅里叶变换。慎重选择采样频率和样本长度,可将近似引入的误差降至低于其他测量误差的水平。因此,使用DFT不必要限制测量的准确度。

附录 C

(资料性附录)

阻抗头连接柔度和阻尼的确定

包括激振器与被测结构连接件的导纳测试装置的整体校准和灵敏度测定,都可按下述试验方法完成。该方法还提供阻抗头的连接柔度以及结构阻尼的数据(见参考文献[13])。

试验要求将一个大的刚性块安装在一个具有足够柔性的支承上,使其固有频率小于或等于 2 Hz。为了使反共振频率(响应骤降)在关注的频率范围内,宜使用质量足够大的圆柱刚性块。其质量 m 的大小(单位为 kg)可按式(C.1)估算:

$$m = 1/[(2\pi f)^2 C] \quad \dots\dots\dots (C.1)$$

式中:

f ——在机械导纳测量频率范围内的一个较高频率,单位为赫兹(Hz);

C ——阻抗头以及传感器与被试结构之间连接件的柔度估算值,单位为米每牛(m/N)。

为设计该校准块的柔性支承,对质量为 m 的刚性块,式(C.2)给出了其支承柔度 C_s 的最低要求:

$$C_s = 1/[(2\pi f_s)^2 m] \quad \dots\dots\dots (C.2)$$

式中:

f_s ——柔性支承上刚性块的固有频率(2 Hz 或更低),单位为赫兹(Hz);

m ——试验选用的刚性块的质量,单位为千克(kg)。

阻抗头(或力传感器)应与校准块的重心共线安装,宜严格遵守传感器说明书规定的螺栓紧固扭矩。所用的安装紧固件宜尽可能与结构测量时相同。宜按导纳测量的方式连结激振器与阻抗头(或力传感器)。激振器产生的激励波形应与导纳测量时用的相同。用于带校准块的试验频率范围上限宜超出所关注的频率范围。

注 1: 这套校准试验装置的数学模型在参考文献[7]中给出。

力传感器和运动响应传感器的输出信号应采取与导纳测量相同的方法处理并记录(如在合适的坐标纸上画出导纳或加速度导纳曲线)。

导纳数据的典型曲线见图 C.1。图 C.1 所示结果是用一个 5.5 kg 的质量校准块获得,它描述了一个相当典型的、约为 8×10^{-10} m/N 的阻抗头的连接柔度。在 30 Hz 至 1 100 Hz 的频率范围内,测出的导纳曲线与校准块质量加上阻抗头力传感器以下部分质量以及连接件质量的导纳曲线十分接近。如果导纳测量结果低频部分显示的质量与整个校准系统的质量不相等,则导纳测量系统有缺陷,宜予以修正。其原因可能是灵敏度不准确、校准方法不正确或电子仪器有问题。

导纳曲线上 2 400 Hz 处的反共振点(频率骤降)表明,在该频率处校准块的导纳与阻抗头连接柔度产生的导纳幅值相同。由于这两个导纳实质上是反相的,所以总导纳幅值在反共振频率点趋近于零。残留的有限幅值是阻抗头和校准块结合面间的阻尼造成的,这也是反共振点处相角为 0° 的原因。

在 2 400 Hz 反共振点以上的频率点,导纳曲线渐近地趋近于安装紧固件柔度和阻抗头本身柔度的串联组合。如果连接件阻尼相当大,就很难检查总柔度。如果反共振下降不是很陡,导纳曲线在高频段将不会与有效柔度渐近线相趋近。

注 2: 图 C.1 中测得的导纳曲线上,在 4 600 Hz 处显示的无规律是阻抗头对连接点作横向摆动造成的结果。

如果将整体校准和灵敏度试验扩展到足够高的频率,导纳曲线就会受控于阻抗头及连接件的有效阻尼。有效阻尼的大小很少可以计算,因此,本附录介绍的试验只是确定力传感器与被试结构耦合中阻尼的一种实用方法。

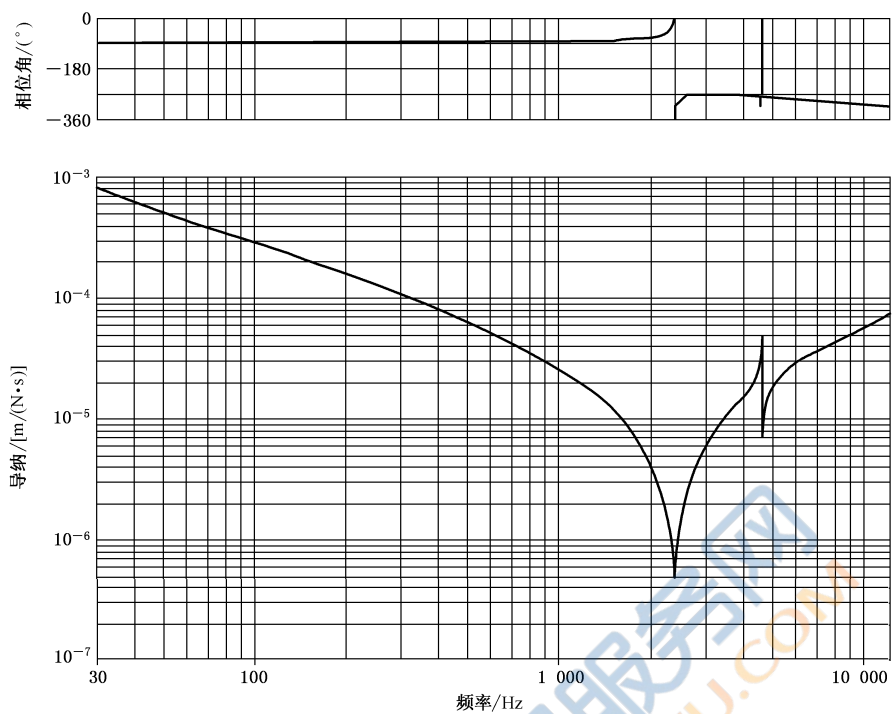


图 C.1 描述阻抗头连接柔度影响的试验结果的示例(256 次平均)

参 考 文 献

- [1] ISO 5347-18, Methods for the calibration of vibration and shock pick-ups—Part 18: Testing of transient temperature sensitivity.
- [2] ISO 5348, Mechanical vibration and shock—Mechanical mounting of accelerometers.
- [3] ISO 10846 (all parts), Acoustics and vibration—Laboratory measurement of vibro-acoustic transfer properties of resilient elements.
- [4] O'HARA, G. J. Mechanical impedance and mobility concepts. *J. Acoust. Soc. Am.* 1967, 41, pp. 1180-1184.
- [5] EWINS, D. J. Measurement and application of mechanical impedance data: Part 1—Introduction and ground rules; Part 2—Measurement techniques; Part 3—Interpretation and application of measured data. *J. Soc. Environ. Eng.* 1975, 14(3), pp. 3-13; 1976, 15(1), pp. 22-33; 1976, 15(2), pp. 7-17.
- [6] SAINSBURY, M. G., EWINS, D. J. Vibration analysis of a damped machinery foundation structure using the dynamic stiffness coupling technique. *Trans. ASME—J. Eng. Ind.* 1974, 96, pp. 1000-1005.
- [7] HIXSON, E. J. Mechanical impedance. In: PIERSOL, A. G., PAEZ, T. L., editors. *Harris' shock and vibration handbook*, 6th edition, Chapter 10. New York, NY: McGraw-Hill, 2009.
- [8] RUBIN, S. Mechanical immittance and transmission-matrix concepts, *J. Acoust. Soc. Am.* 1967, 41, pp. 1171-1179.
- [9] EWINS, D. J. Whys and wherefores of modal testing. *J. Soc. Environ. Eng.* 1979, 18(3), pp. 3-15.
- [10] EWINS, D. J., GRIFFIN, J. A state-of-the-art assessment of mobility measurement techniques—Results for the mid-range structures (30-3000 Hz). *J. Sound Vib.* 1981, 78, pp. 197-222.
- [11] EWINS, D. J. State-of-the-art assessment of mobility measurements—A summary of European results. *Shock Vib. Bull.* 1981, 51, pp. 15-35.
- [12] EWINS, D. J. State-of-the-art assessment of mobility measurement techniques (SAMM)—Summary of results. *J. Soc. Environ. Eng.* 1981, 20, pp. 3-13.
- [13] BROWNJOHN, J. M. W., STEELE, G. H., CAWLEY, P., ADAMS, R. D. Errors in mechanical impedance data obtained with impedance heads. *J. Sound Vib.* 1980, 73, pp. 461-468.
- [14] KLAASSEN, K. B. Piezoelectric accelerometers. In: REGTIEN, P. P. L., editor, *Modern electronic measuring systems*, chap. III. Delft: Delft University Press, 1978.
- [15] BOUCHE, R. K. Calibration of shock and vibration measuring transducers. *Shock and Vibration Information Center*, U.S. Department of Defense, 1979. (Monograph SVM-11.).
- [16] CANSDALE, R., GAUKROGER, D. R., SKINGLE, C. W. A technique for measuring impedances of a spinning model rotor. Farnborough: Royal Aircraft Establishment, 1971. (Technical Report TR 71092.).
- [17] KUMME, R. A new calibration facility for dynamic forces up to 10 kN. In: *Proc. 17th IMEKO World Congress*, pp. 305-308, 2003.

[18] ISO 7626-2, Vibration and shock—Experimental determination of mechanical mobility—
Part 2: Measurements using single-point translation excitation with an attached vibration exciter.





中华人民共和国
国家标准
机械振动与冲击 机械导纳的试验确定
第1部分:基本术语与定义、传感器特性
GB/T 11349.1—2018/ISO 7626-1:2011

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100029)
北京市西城区三里河北街16号(100045)
网址 www.spc.net.cn
总编室:(010)68533533 发行中心:(010)51780238
读者服务部:(010)68523946
中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

*

开本 880×1230 1/16 印张 2.25 字数 56 千字
2018年5月第一版 2018年5月第一次印刷

*

书号: 155066·1-60620 定价 33.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究
举报电话:(010)68510107



GB/T 11349.1-2018