



中华人民共和国国家标准

GB/T 11349.1—2006/ISO 7626-1:1986
代替 GB/T 11349.1—1989

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

Vibration and shock—Experimental determination of mechanical mobility—
Part 1: Basic definitions and transducers

(ISO 7626-1:1986, 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
中国国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言 ·	· I
引言 ·	· II
1 范围 ·	· 1
2 规范性引用文件 ·	· 1
3 符号与单位 ·	· 1
4 术语和定义 ·	· 1
5 对力传感器和运动传感器的基本要求 ·	· 3
6 校准 ·	· 4
7 压电传感器的基本校准 ·	· 5
8 补充校准 ·	· 7
9 数据的图示 ·	· 9
附录 A (资料性附录) 机械阻抗、导纳和模态分析之间的关系 ·	· 16
附录 B (资料性附录) 作为频率响应函数的导纳 ·	· 18
附录 C (资料性附录) 阻抗头连接柔度和阻尼的确定 ·	· 20
参考文献 ·	· 22

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 GB/T 11349 的第 1 部分。本部分等同采用 ISO 7626-1:1986《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》。

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；引言放在正文之前；
- 删去了个别不必要的注释。

本部分代替 GB/T 11349.1—1989《机械导纳的试验确定 基本定义与传感器》。

本部分与 GB/T 11349.1—1989 相比主要变化如下：

- 本部分名称改为《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》。
- 增补了“目次”和“引言”。
- 补充了“规范性引用文件”。
- 4.6 及正文中 1989 年版的“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。”
- 8.8.1 改写了“加速度传感器的线性度”中线性度的表述方式，删去 1989 年版中的公式(5)。
- 8.8.2“力传感器的线性度”中，删去 1989 年版中的公式(7)，激振力的计算改为用文字叙述。
- 8.9.5“应变的影响”一节中删去 1989 年版括号中的内容。
- 补充了“附录 A(资料性附录)机械阻抗、导纳和模态分析之间的关系”和“参考文献”。
- 增补了一些注释。

本部分的附录 A、附录 B 和附录 C 均为资料性附录。

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)。

对于某些需完整地描述动态特性的应用,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。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。通常只需要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。

GB/T 11349.2 用激振器作单点平动激励测量。

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 A.3)。

0.2 介绍 GB/T 11349 的本部分

在进行导纳测量之前,必须估计所使用的力和响应传感器的特性,以确保在整个关注的频段内能得到准确的幅值和相位信息。

GB/T 11349 的本部分用于指导传感器和仪器的选择、校准和评价,使之适用于导纳测量。

这部分的内容对大多数导纳测量是共同的。

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

1 范围

GB/T 11349 的本部分界定了带注释的基本定义,并给出了为确定测量机械导纳所使用的阻抗头、力传感器和响应传感器的适用性,规定了必需做的校准试验、环境试验和物理测量。

GB/T 11349 的本部分适用于各种类型的驱动点导纳和传递导纳、加速度导纳和位移导纳的测量。本部分不适用于约束阻抗(见 4.3)的测量。

注:在不同情况下进行导纳测量的方法将在 GB/T 11349.2 和 GB/T 11349.3 中论述。

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。

ISO 2041 振动与冲击——词汇

ISO 5347 振动与冲击——传感器的校准方法

IEC 263 绘制频率特性和极坐标图的刻度和尺寸

3 符号与单位

符 号	量	国 际 单 位
a	加速度	m/s^2
a_i/F_j	加速度导纳	$\text{m}/(\text{N} \cdot \text{s}^2)$
E	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/输入量单位
v	速度	m/s
x	位移	m
x_i/F_j	动柔度(位移导纳)	m/N
Y_{ij}	导纳	$\text{m}/(\text{N} \cdot \text{s})$
Z	自由阻抗	$\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}$
Z_{ij}	约束阻抗	$\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}$

4 术语和定义

ISO 2041 确定的以及下列术语和定义适用于 GB/T 11349 的本部分。

4.1

频率响应函数 frequency-response function

与频率有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,特别在加瞬态激励时。已知是非线性的结构(如某些铆接结构)不应采用瞬态激励试验,这些结构采用随
机激励试验时也要格外细心。

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、加速度导纳和位移导纳。

4.2

导纳, Y_{ij} mobility, Y_{ij}

除了结构在应用中支承点所具有的约束之外,其余的测点没有任何约束,允许其自由地响应。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称为导纳。典型的曲线示于图 1。

注 1: 速度响应既可以是平动,也可以是转动。激振力可以是直线力,也可以是力矩。

注 2: 如果测得的速度响应是平动,而且所加的激振力是直线力,则在国际单位制(SI)中导纳的单位是 $\text{m}/(\text{N} \cdot \text{s})$ 。

4.3

约束阻抗, Z_{ij} blocked impedance, Z_{ij}

当结构的所有其他测点被约束(即限制其速度为零)时,由 i 点的约束或激励力相量与在 j 点的速
度相量之比构成的频率响应函数。为了得到正确的约束阻抗矩阵,则完全约束的结构上所有关注的测
点的全部力和力矩都应当测量,因而,很少测量约束阻抗,而且在 GB/T 11349 的各个部分中均不涉
及它。

注 1: 测点数目或位置的任何改变都将引起所有测点的约束阻抗改变。

注 2: 约束阻抗的主要用途在于用集总质量、刚度和阻尼元件或有限元法建立结构的数学模型。当把这些数学模型
与试验导纳数据结合或比较时,需要把解析的约束阻抗矩阵转换为导纳矩阵,或者相反,在附录 A 中将加以
讨论。

4.4

自由阻抗 free impedance

当结构的所有其余连结点处于自由状态时(即约束力为零),所施加的激振力相量与所引起的速度
相量之比。自由阻抗是 4.2 中所定义的导纳矩阵的每个元素的倒数。

注 1: 过去,经常不区分约束阻抗和自由阻抗,因此在引用已发表的资料时,应当慎重。

注 2: 由试验确定的自由阻抗可以组成一个矩阵,而这个矩阵可能完全不同于由结构的数学模型得出的约束阻抗矩
阵。因此,它可能不符合在附录 A 中所讨论的用机械阻抗系统进行综合理论分析的要求。

4.5

其他与导纳有关的频率响应函数 other frequency-response function related to mobility

有时候不用机械导纳,而用另外几种结构响应比值。它们均列入表 1 中。

表 1 各种与机械导纳有关的实测频率响应函数的等价定义

	运动表示为速度	运动表示为加速度	运动表示为位移
项目	导纳	加速度导纳	位移导纳(动柔度)
符号	$Y_{ij} = V_i / F_j$	a_i / F_j	x_i / F_j
单位	$\text{m}/(\text{N} \cdot \text{s})$	$\text{m}/(\text{N} \cdot \text{s}^2) = \text{kg}^{-1}$	m/N
边界条件	$F_k = 0; k \neq j$	$F_k = 0; k \neq j$	$F_k = 0; k \neq j$
参照图	1	2	3
注释	实验时边界条件容易满足		
项目	约束阻抗	约束加速度阻抗(有效质量)	约束位移阻抗(动刚度)
符号	$Z_{ij} = F_i / V_j$	F_i / a_j	F_i / x_j
单位	$(\text{N} \cdot \text{s})/\text{m}$	$(\text{N} \cdot \text{s}^2)/\text{m} = \text{kg}$	N/m
边界条件	$v_k = 0; k \neq j$	$a_k = 0; k \neq j$	$x_k = 0; k \neq j$

表 1 (续)

	运动表示为速度	运动表示为加速度	运动表示为位移
注释	实验时边界条件很难或不可能实现		
项目	自由阻抗	自由加速度阻抗 (自由有效质量)	自由位移阻抗 (自由动刚度)
符号	$F_j/V_i=1/Y_{ij}$	F_j/a_i	F_j/x_i
单位	$(N \cdot s)/m$	$(N \cdot s^2)/m=kg$	N/m
边界条件	$F_k=0; k \neq j$	$F_k=0; k \neq j$	$F_k=0; k \neq j$
注释	边界条件容易满足,但结果用于系统建模时要极为慎重		

应特别注意,每一种比值的注释。相应于图 1 中的导纳图、典型的加速度导纳图和位移导纳图分别示于图 2 和图 3。

注 1: 有的作者称位移导纳(动柔度)为“敏感度”。

注 2: 在有些刊物中,称加速度导纳为“惯量”。这个术语是不标准的,应当避免使用。因为它与“声惯量”的普通定义相矛盾,而且与术语“惯量”的真正含义也相反。

4.6

关注的频率范围 frequency range of interest

在一组给定的实验中,要得到导纳数据的从最低频率到最高频率的区间(以 Hz 为单位)。

5 对力传感器和运动传感器的基本要求

5.1 总则

为了取得满足要求的导纳数据,对各种测量传感器的基本特性要求如下:

- 传感器应该有足够的灵敏度和较低的噪声,使测量系统的信噪比满足结构的导纳的动态范围的要求。由于小阻尼结构比具有较大阻尼的结构要求更大的动态范围,所以当试验小阻尼结构时,更应该注意传感器噪声的影响。
- 如果测量传感器的频率响应函数未经过适当的信号处理加以补偿,则传感器的固有频率应远低于或远高于关注的频率范围,以免发生不能接受的相移。
- 传感器的灵敏度应具有时间稳定性,其直流漂移要小到可以忽略的程度。
- 传感器应当对外界环境的影响(如温度、湿度、磁场、电场、声场、应变以及交叉输入)不敏感。
- 传感器的质量和转动惯量应当很小,以免给被试结构增加动载荷,至少应小到能够对该载荷进行修正。

测量系统对接地回路和其他外来信号的影响应不敏感。

5.2 对运动传感器的要求

尽管对运动传感器的要求已在 5.1 中叙述过,但其中某些特性比其他特性更重要。在机械导纳测量中最常用的运动传感器是加速度传感器,有时也用位移或速度传感器。在选择这些传感器时应考虑的主要特性如下:

- 5.2.1 运动传感器应设计得重量轻(或非接触式的),使被测结构的附加载荷最小。
- 5.2.2 传感器与结构的连接在主测量轴的方向上必须是刚性的。
- 5.2.3 为防止传感器或它的固定底座增加结构的刚度或阻尼,连接处的接触面积应足够小。
- 5.2.4 当施加脉冲激励时,由于热电效应,压电加速度传感器容易产生零点漂移,这将限制低频段的测试精度。此时,可选用其他类型的运动传感器,如压阻式、电动式或一些剪切型压电加速度传感器。

5.3 对力传感器的要求

在选择用于机械导纳测量的力传感器时,5.1 中的某些特性更重要。由于在设计中要兼顾各方面,

5.3.1 到 5.3.3 所列各条应优先考虑。

5.3.1 有效端部质量(即传感器的力敏感元件和结构之间的质量)应足够小,使得由它引起的外加惯性力信号最小(详见 8.4)。

5.3.2 在选择力传感器和它的元件的刚度时,应当使之在关注的频率范围内不发生共振。如做不到时,作为折衷方法应当用适当的信号处理来补偿这种共振对力敏感元件信号的影响。

5.3.3 静态预加载应与测试所要求的激振力的范围相适应。带有内置预加载的传感器可较好地解决这一问题。

5.4 对阻抗头及其与被测试结构连接件的要求

把加速度传感器和力传感器组装一起用来进行导纳测量的装置,习惯上叫做“阻抗头”。其设计应兼顾 5.2 和 5.3 中的特性要求外,还应满足 5.4.1~5.4.4 的要求。

5.4.1 试验结构与内部加速度传感器之间的总柔度应当很小,因为大的柔度将会引起加速度测量误差。

注:总柔度是连接件柔度和阻抗头内部柔度之和。连接件柔度包括被测结构的局部“硬模效应”柔度。总柔度可按附录 C 所述的方法测量。

5.4.2 有效端部质量(即传感器的力敏感元件与结构之间的质量)相对于被测结构的自由有效质量(加速度阻抗)应当很小。

5.4.3 阻抗头相对于连接平面内的轴惯性矩应足够小,使其绕该轴的转动引起的结构附加载荷最小。

注:为避免由于阻抗头连接件引起的被测结构的载荷的准则将在 GB/T 11349.2 中给出。

5.4.4 在阻抗头设计中,要求特别注意避免加速度传感器对作用力的交叉影响。

6 校准

校准分为 3 类:

- a) 测量和分析组合的系统校准;
- b) 传感器基本校准;
- c) 传感器补充校准。

6.1 系统校准

测量和分析组合的系统校准应该在每个测试阶段的开始和结束时(或按要求测试过程中)进行。详细的步骤将在有关不同类型的导纳测试的 GB/T 11349 的各部分(如引言 0.1 中所列的)叙述。

组合的系统校准比第 7 章中讨论的基本校准容易实现、更精确,而且应用更广泛。系统校准可在自由空间对一已知质量的自由刚体激振,同时加速度和力通道的增益要置于以后测量用的数值。输出比应该与导纳图上相应的质量线一致。如果进行系统校准遇到困难,则应进行基本校准。

在系统校准过程中应经常检验响应图上的频率刻度或其他输出数据的精度。

注 1:在附录 C 中给出了一个导纳图的例子,以说明阻抗头连接柔度的影响。

注 2:只要经过选择的加速度传感器、力传感器和放大器在导纳测量用的频段内响应近似平坦,而且加速度传感器是小阻尼的,通常不必作相移校准。可是,用相位计显示力传感器和加速度传感器输出之间的相位差,在进行系统校准时记录与这两者之间的固有的相位差的偏离是很有用的。

6.2 传感器的基本校准和补充校准

表 2 中所列的基本校准和补充校准是为了确定传感器对导纳测量的适用性。通常使用压电式传感器。如果使用其他类型的传感器,为了确定它们的适用性,这些步骤可能必须加以修改。

若在基本的或附加的校准中发现传感器性能有变化,而且按照本标准中有关章节这些变化是不允许的,就不应再使用这些传感器。

与特定的放大器或信号适配器配用的传感器应该在使用条件下校准,例如,与电荷放大器或高阻抗电压放大器配用的压电式力传感器、阻抗头和加速度传感器,应当与所用的放大器一起校准。对于这些传感器来说,连接传感器与放大器的导线的电容很重要,这些传感器应当与要用的导线一起校准。对于

其他类型的传感器,应根据制造厂对电激励、特殊的端接阻抗等的说明书,与所要用的信号适调装置一起校准。

当校准力传感器和阻抗头时,要特别注意使安装条件与制造厂规定的相符。安装面的平面度以及连接螺栓适当的紧固力矩十分重要。在传感器和固定面之间有一层薄的油膜或润滑脂或腊,在高频率时会增加传感器的耦合和刚性。若使用特殊的夹具进行力传感器的校准,应尽量安装得与进行导纳测量时相似。

表 2 传感器校准和检验项目汇总表

校准或检验项目	加速度传感器		力传感器	
	基本的	补充的	基本的	补充的
灵敏度	7.2.1		7.2.2	
电阻抗	7.3		7.3	
尺寸		8.2		8.2
质量		8.3		8.3
有效端部质量				8.4
传感器柔度				8.5
极性		8.6		8.6
频率响应		8.7.1		8.7.2
线性度		8.8.1		8.8.2
温度灵敏度		8.9.1 和 8.9.2		8.9.1 和 8.9.2
横向灵敏度		8.9.4		
应变灵敏度		8.9.5		

7 压电传感器的基本校准

7.1 总则

制造厂要根据表 2 中所列的各个基本项目对每个传感器进行校准和检验,并把所得的结果以校准证书的形式随同该传感器一起提交给用户。用户应定期重复各项基本校准(如果用户没有合适的校准设备,则可委托计量部门的校准实验室来做)。

重复校准和检验的时间间隔最好为 1 年。此外,像灵敏度之类的校准应该经常做。尤其是经常在灵敏度可能改变的场合下工作的传感器。

7.2 灵敏度

7.2.1 加速度传感器灵敏度

加速度传感器及阻抗头中的加速度传感器的灵敏度用比较法来测定。应当把加速度传感器装在一个适用的振动台上进行校准,振动台上装有一个预先已校准过的标准加速度传感器或者以绝对法校准为基准。校准幅值应在实际导纳测量中所使用的范围内,一般是 1.0 m/s^2 到 100 m/s^2 之间。

灵敏度校准应在单一频率下进行,通常为 80 Hz 。

注:如果 80 Hz 超出了需校准的传感器的工作范围或有另一个频率更适合于特殊设计的传感器或传感器的实验应用范围的话,可以使用别的频率。

与电荷放大器一起联用的加速度传感器的灵敏度单位是 $[\text{pC}/(\text{m/s}^2)]$ 。与电压放大器连用的加速度传感器、内置电荷放大器或和阻抗转换器联用的加速度传感器的灵敏度单位是 $[\text{V}/(\text{m/s}^2)]$ 。

注:因为与加速度传感器连接的电荷或电压放大器的输出信号是电压,所以,加速度通道的总灵敏度以 $[\text{V}/(\text{m/s}^2)]$ 为单位。一般,加速度通道总灵敏度可由加速度传感器和放大器各自的灵敏度来确定。当需要精确地测量导纳时,应把加速度传感器及与之联用的放大器一起校准,以便直接得到加速度通道的总灵敏度。

7.2.2 力传感器的灵敏度

力传感器及阻抗头中的力传感部件采用质量加载法来校准。

校准是这样进行的：根据制造厂推荐的额定预紧扭矩，把力传感器安装在适当的振动台上。力传感器在某一控制的加速度幅值 a_0 下振动，在力传感器上装一只标准加速度传感器。测出与力传感器相连的放大器的输出电压 E_0 和施加的加速度值 a_0 。接着，把一个负载质量 m 安装到力传感器的对面，不改变放大器的增益，调整振动台的输入使加速度值 a 与前面的值相等（即 $a_0 = a$ ）。测出放大器的输出电压 E_M ，则力通道的灵敏度 S_f 可由式(1)求得：

$$S_f = \frac{E_M - E_0}{(m + m_1 + m_2 + m_3)a - (m_1 + m_2 + m_3)a_0} \quad \dots\dots\dots(1)$$

式中：

m ——负载质量；

m_1 ——标准加速度传感器的质量；

m_2 ——螺栓的有效质量；

m_3 ——力传感器有效端部质量。

所有质量的单位均为 kg，加速度单位为 m/s^2 ，因为 $a_0 = a$ ，所以 $(m_1 + m_2 + m_3)a_0 = (m_1 + m_2 + m_3)a$ ，方程(1)变成：

$$S_f = \frac{E_M - E_0}{ma} \quad \dots\dots\dots(2)$$

注：对于非预紧装配的力传感器，必须特别细心，以保证安装预载在每次使用时都相同，因为灵敏度及其校准与传感器预载有关。

式(2)给出了力通道(传感器—放大器系统)的灵敏度单位是 V/N。力传感器的灵敏度可由式(2)和所用放大器的灵敏度推出。

与电荷放大器联用的力传感器的灵敏度的单位为 pC/N，与电压放大器联用的力传感器的灵敏度的单位是 V/N。

注：当需要精确测量导纳时，力传感器应与联用的放大器一起校准，以便直接得到力通道的总灵敏度。

上述方法仅适用于校准频率低于系统共振频率五分之一的时候，该共振频率由系统的有效质量和力传感器刚度 K 决定，可由式(3)估算出：

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{K}{(m + m_1 + m_2 + m_3)} \right]^{1/2} \quad \dots\dots\dots(3)$$

式中：

f_n ——有负载质量的传感器的共振频率，单位为赫(Hz)。

7.2.3 阻抗头的灵敏度

阻抗头的灵敏度校准可采用 7.2.1 和 7.2.2 的方法，分别校准它的加速度传感器和力传感器的灵敏度。阻抗头的现场校准通常激振两、三个不同尺寸的质量块，以确保阻抗头能在很宽的范围内测量导纳。

7.3 电阻抗

7.3.1 传感器的电阻和电容

传感器接线柱间的直流电阻由制造厂用兆欧表测量，测量时所加的电压不超过 50V。

电容用阻抗电桥来测，所用激励电压的频率在传感器的工作频率范围内。如果电容随频率改变，那么至少要在两个频率(其中应包括确定基准灵敏度时使用的那个频率)测量。对于电容随频率变化不大的传感器，通常在 1 000 Hz 测量。

因为某些压电材料的电容随温度和电压而变，所以，应该在室温(20℃~30℃)和在制造厂推荐的激励电压下测量电容。在测量开始前和测量过程中应避免触摸传感器，使由温度变化引起的电容变化量最小。

注：对于一些内部装有电子元件的传感器，上述测量电阻抗的方法得到的结果不精确或可能损坏元件，在这种情况下，应采用插入法。

电阻和电容的测量应每隔一段适当的时间(见 7.1)重复进行。由于这些测量常常不很精确,因此,在与先前的校准结果相比较时,只须考虑较为明显的变化。例如:若电阻和(或)电容的变化大于 5%,应对传感器进一步进行各项基本校准和补充校准,或者必要的话应修理传感器。

7.3.2 绝缘电阻

传感器的所有接头和其安装面间的直流电阻由制造厂测量,其测量结果作为资料提供给用户。

如果传感器不是绝缘型的,制造厂应指明使用该传感器时合适的安装方法,以达到绝缘的目的(见 5.1)。

8 补充校准

8.1 总则

制造厂对所生产的每种类型传感器的样品应进行表 2 中所列的各项补充校准和检验。为确定传感器特有的工作特性或性能的变化,有些补充校准和检验项目可由用户来做。

8.2 尺寸

包括长、宽、高、直径以及全部安装孔或螺栓的直径在内的全部尺寸均应给出,并标注在轮廓图上。同时还应提供连接件以及电缆的规格、型号等。

8.3 质量

说明书上所列的质量是传感器的总质量,不包括安装用螺栓和电缆的质量。

8.4 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试件端部之间的质量。有效端部质量应列于产品说明书中。然而,用户应该懂得,有效端部质量会随着试验或传感器预加载时,连接传感器和被测结构的附件的增加而增加。因此,有效端部总质量应为说明书上给出的有效端部质量与连接件质量之和。

8.5 阻抗头的柔度

阻抗头的柔度是其内部加速度传感器和连接点之间的组合件的柔度。

除了制造厂已提供的阻抗头的柔度值外,在导纳测量时还应考虑连接件的柔度。

本标准的附录 C 给出了实验测定总柔度的方法。

8.6 极性

传感器的极性通常由制造厂给出,当机械输入是从安装表面加到传感器的另一端,而且是沿着最大灵敏轴时,传感器的极性用比较法来测量,以便确定所产生的输出电压是正的或负的,从而确定它的极性是正或负。这种方法可用来确定灵敏轴垂直于安装表面的大多数传感器的极性。

8.7 频率响应

8.7.1 加速度传感器的频率响应

应当用比较法进行加速度传感器的频率响应校准。选取信噪比大于 10($S/N > 20$ dB)的加速度幅值,激励的频率范围应覆盖加速度传感器的使用频率范围。用一个合适的激振器进行简谐激振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。

简谐激励可以是离散频率激励或连续扫描激励。在离散频率激励中,频率点数应足够多(如频率每增加 10 倍就要增加 10 个频率点),以保证传感器在所关注的频率范围内没有局部共振或内部共振。如果在有限的频率下进行校准,那么为保证达到同样的目标,附加的频率扫描是有用的。

连续扫描时,应当缓慢地扫过整个频率范围,由一个标准加速度传感器反馈控制系统来保持激励的加速度幅值恒定。

频率响应曲线在所关注的频率范围内必须是平坦的,其波动幅度不得超过 $\pm 5\%$ 。必须注意:由激振器的横向运动以及传感器的横向灵敏度所引起的测量误差不得超过规定的 $\pm 5\%$ 的量级。

8.7.2 力传感器的频率响应

力传感器的频率响应校准条件与上述加速度传感器的相同,但力传感器应当加质量负载,而且在每

一规定的频率上以恒定的加速度幅值振动。在每个频率上测量力传感器放大器的输出电压 E_f 。频率响应偏差的百分比可由式(4)求得:

$$\text{频率响应偏差} = 100 \times \left[\frac{E_f}{E_r} - 1 \right] \dots\dots\dots (4)$$

标准电压 E_r 是传感器的放大器在参考频率(通常为 80 Hz)上的输出电压值。力传感器上质量负载不得引起由负载质量和传感器柔度所组成的系统共振,并可用式(3)来检验。在所关注的频率范围内,频率响应偏差必须小于参考频率响应的 $\pm 5\%$ 。

注:如果力传感器没有内部预载,那么与力传感器灵敏度校准时一样,为了得到较精确的结果,在频率响应的校准过程中,不应调整传感器固定螺栓的紧固力矩。

8.8 线性度

采用比较法以简谐激振方式进行线性度校准。

8.8.1 加速度传感器的线性度

幅值线性度偏差通过测量基准加速度传感器和被测加速度传感器之输出的比来确定。这个比值应由制造厂在设计量程的 90%~100%范围内的至少 3 个加速度幅值来测量。这对于用户检验在自己使用的范围内的线性度可能是有用的。每个加速度值的偏差由它与所有加速度的平均比值之差来确定。这个差用平均比值的百分数来表示。如果所有加速度值的偏差均在 $\pm 2\%$ 之内,则该加速度传感器适用于导纳测量。

8.8.2 力传感器的线性度

线性度校准通常在频率 80 Hz 时,以不同幅值的加速度激励加有质量负载的力传感器,测出力传感器的放大器在每一激励加速度 a_x 下的输出电压 E_x ,则线性度偏差表示为一个百分比,由式(5)求出:

$$\text{幅值线性度偏差} = 100 \times \left[\frac{E_x/a_x}{(E_x/a_x)_{\text{平均}}} - 1 \right] \dots\dots\dots (5)$$

式中:

E_x ——力传感器的放大器在离散的加速度幅值下的输出电压,单位为伏(V)。

a_x ——标准加速度传感器测得的离散加速度幅值,单位为米每二次方秒(m/s^2)。

$(E_x/a_x)_{\text{平均}}$ ——力传感器的放大器的所有输出幅值与加速度幅值之比的平均值,等于 $\sum_{i=1}^n (E_x/a_x)_i / n$, 单位为伏二次方秒每米 [$\text{V} \cdot \text{s}^2/\text{m}$]。

如果 80 Hz 在使用频率范围外,或有一个更适合传感器特殊设计或使用的频率,校准时也可使用别的激励频率。

激励力的计算方法:把放大器输出电压 E_x 除以 7.2.2 中得到的力通道灵敏度便可求得某一加速度下的激励力。其余校准点的激励力等于刚才求得的力乘以新点的加速度与上面求力时所用的加速度之比。

如果在额定力范围内力传感器或阻抗头中的力传感器的线性度偏差大于 2%,则该传感器不能用于导纳测量。

8.9 由于环境和次要因素的影响必须要进行的补充校准

次要因素和(或)环境条件会使传感器输出不能直接模拟所感应的量,因此必须补充进行某些校准。

8.9.1~8.9.5 描述的补充校准反映了对这类影响定量分析的必要性。

8.9.1 传感器灵敏度随温度的变化

在整个使用温度范围内,通常选用温度灵敏度偏差不超过 $\pm 1.0\%$ 的传感器。

8.9.2 温度改变在传感器输出信号中产生的噪声

温度改变会在压电传感器以及内置放大器的传感器里产生低频噪声。压电传感器使用频率范围一般较高,噪声和被测信号无关,因此不会影响导纳测量的结果。然而在低频测量时,温度的迅速变化可能会产生较大的噪声,使传感器的电子线路饱和,导致错误的测量结果。

8.9.3 力传感器预载对灵敏度的影响

不同的紧固力矩对非预紧安装的力传感器灵敏度的影响,可用不同的紧固力矩多次安装力传感器,重复进行灵敏度校准的方法来确定。

8.9.4 加速度传感器的横向灵敏度

横向灵敏度在低于 500 Hz 的某个频率上进行校准。传感器装在垂直于传感器灵敏轴的振动台上。施加简谐激励,要求振动台在垂直于灵敏轴平面内的(横向)运动应小于沿传感器灵敏方向(纵向)运动的 1%。为了测量比 1% 小得多的横向灵敏度比,对激励的要求更为苛刻,这就要求特别细心和熟练,才能获得这种横向灵敏度有效的数值。

把传感器安装好并以 45° 或更小的增量绕其灵敏轴旋转 360°,以确定最大横向响应。如果横向灵敏度超过轴向灵敏度的 5%,或者与早先的校准相比有显著改变,就应对传感器作补充校准,进一步评定。或者如必要的话,应加以修理。

8.9.5 应变的影响

应变对传感器灵敏度的影响可用一根夹在刚性支承上的悬臂梁来测定。一根设计合适的梁的第一阶固有频率约为 5 Hz。传感器装在梁的适当位置上,通过贴在梁上传感器附近的应变片测出应变值。

确定应变对力传感器和阻抗头的灵敏度的影响的详细过程可在参考文献[12]中找到。

9 数据的图示

对数据进行适当的图示有利于解释导纳实验数据,不同的格式适于不同的用途。

9.1 对数图

以对数频率为横坐标,频率响应函数的对数值为纵坐标绘对数图。

当频率远离结构的最低共振频率(有支承条件下测量)和最低反共振频率(自由悬挂测量)时,结构频率响应函数几乎都是直线。当频率远小于最低共振频率时,频响曲线往往渐近于恒定柔度线;在频率远小于最低反共振频率时,曲线渐近于恒定质量线。在导纳图中,柔度线是向上倾斜的,因此,频率每增加 10 倍,其幅度值增大 10 倍。质量线是向下倾斜的,频率每增加 10 倍,其幅值减小到 1/10(如图 1 所示)。

如用位移导纳或加速度导纳数据绘图时,质量线和柔度线的斜率相应地改变,如图 2 和图 3 所示。

采用对数频率刻度绘制导纳测试结果时,幅值和频率刻度应与国际电工委员会的出版物 IEC 263 所推荐的一致。图 4 是推荐的绘制导纳数据(包括质量线和位移导纳线)的一种格式。

注 1: 按国际单位,恒定位移导纳线、恒定质量线与恒定导纳线(均以 10 倍为增量)总是在 $1/2\pi$ 、 $10/2\pi$ 、 $100/2\pi$ 等频率处相交,频率 159 Hz ($=1\ 000/2\pi$) 是一个很方便的参考点,如图 4 所示。

注 2: 根据 IEC 263,以十进制刻度的幅值坐标和频率坐标长度之比应为 2/5。图 4 上绘制导纳数据曲线的格式遵循 2/5 的原则。

注 3: 导纳、质量和位移导纳应根据试验结果,确定合适的以 10 为底的指数,以利于绘图并将指数在图上加以注明。

9.2 其他绘图法

除幅频-相频图外,有时把导纳图分别绘成频率响应函数的实部图和虚部图更为有利,如图 5 所示。还可以在极坐标系统中绘出实验结果,如图 6 所示(乃奎斯特图)。极坐标图的优点是可通过画拟合圆来增加数据,可从实验数据中提取模态阻尼系数。

注 1: 在图 6 中实测的数据点是用直线连接的,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应当测更多的点,或者用测得的数据作拟合圆。

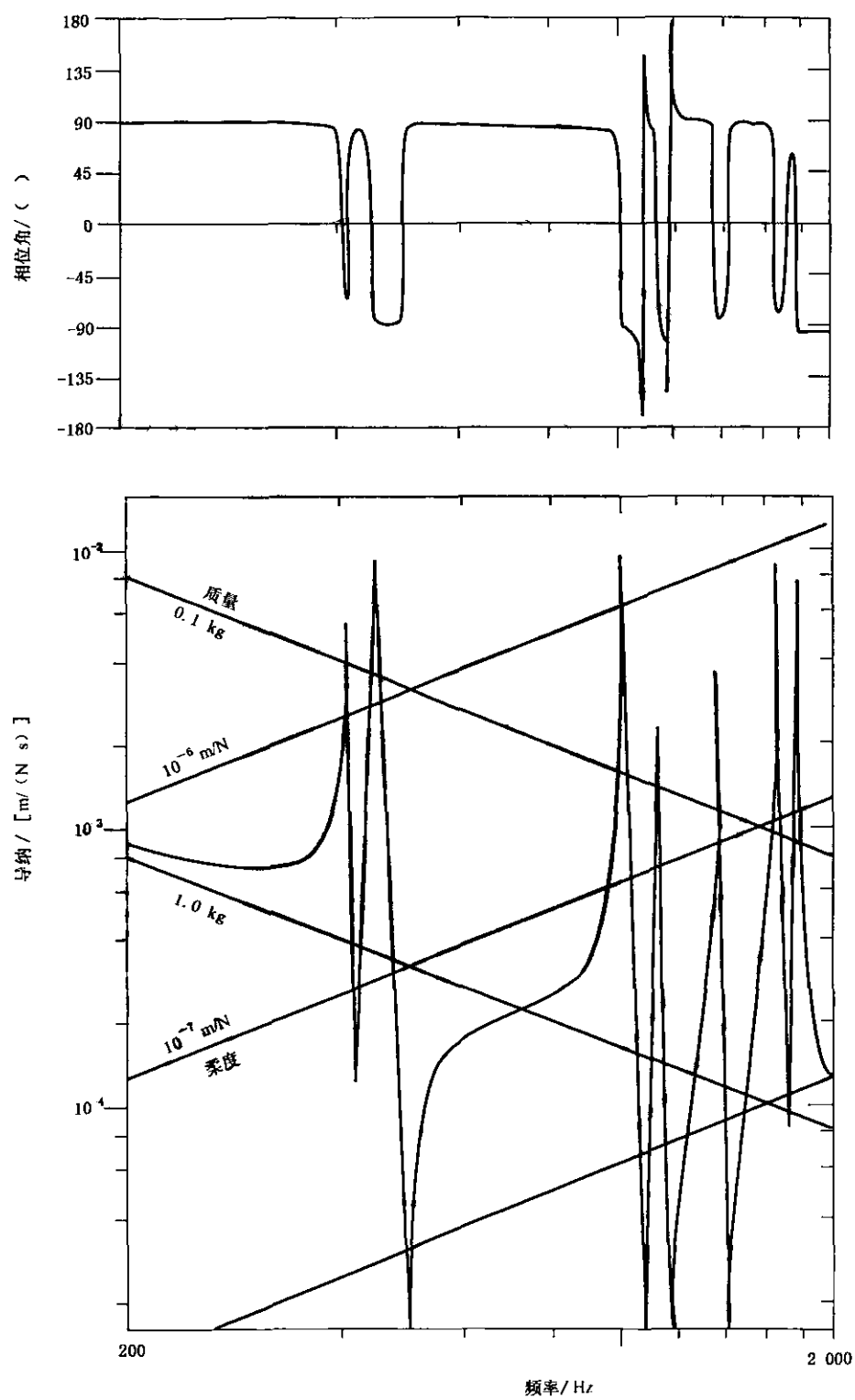


图 1 典型的导纳测试结果图

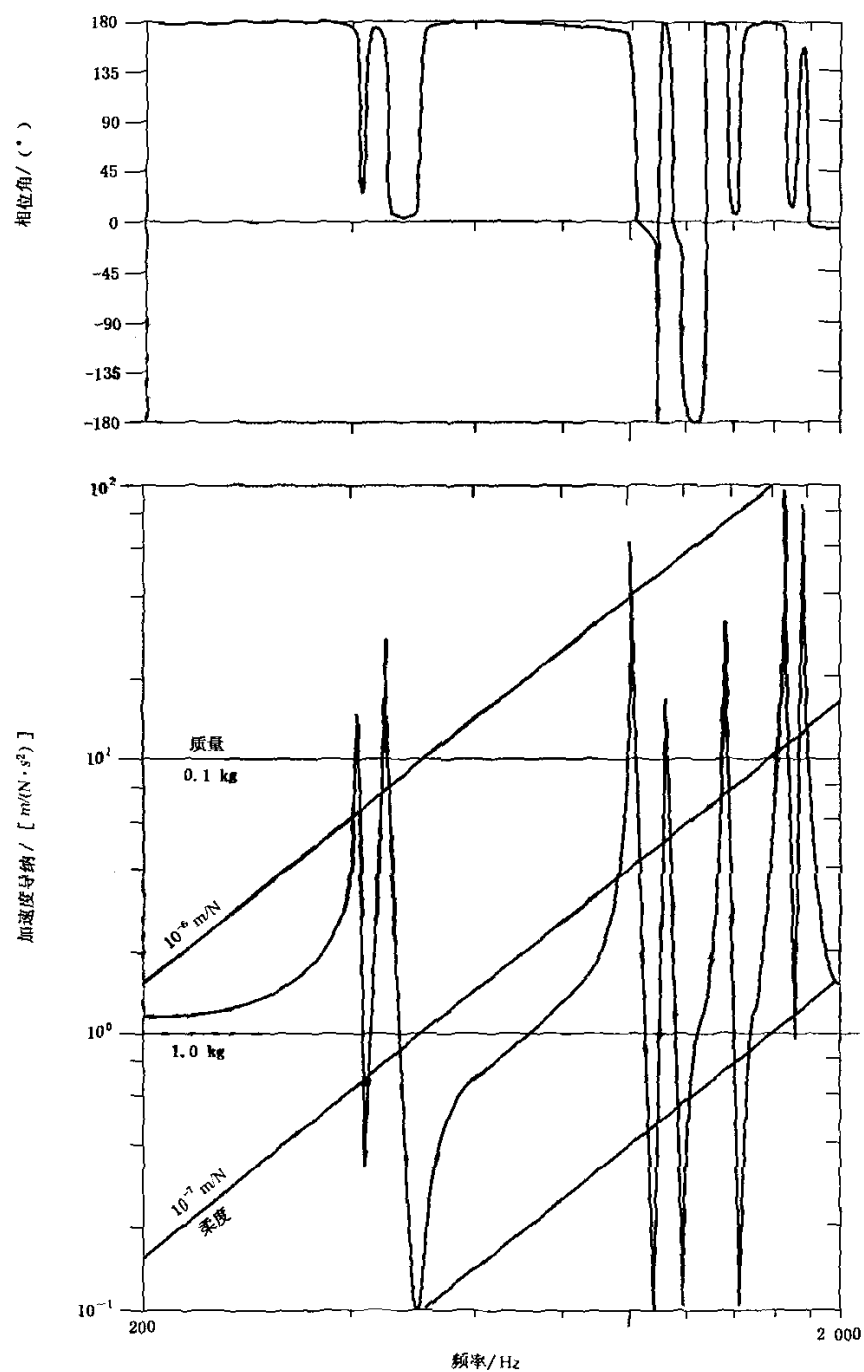


图2 与图1的导纳图相对应的加速度导纳图

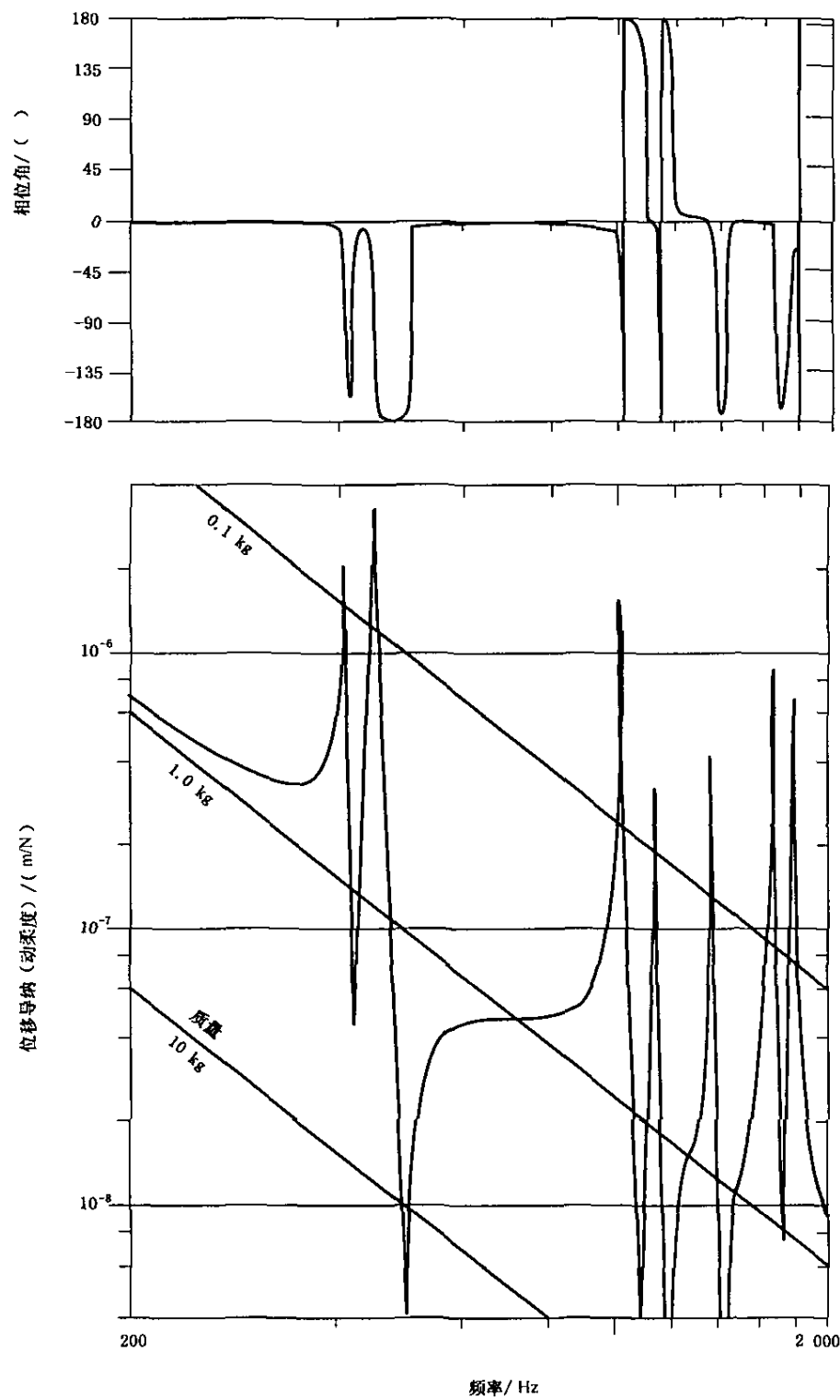
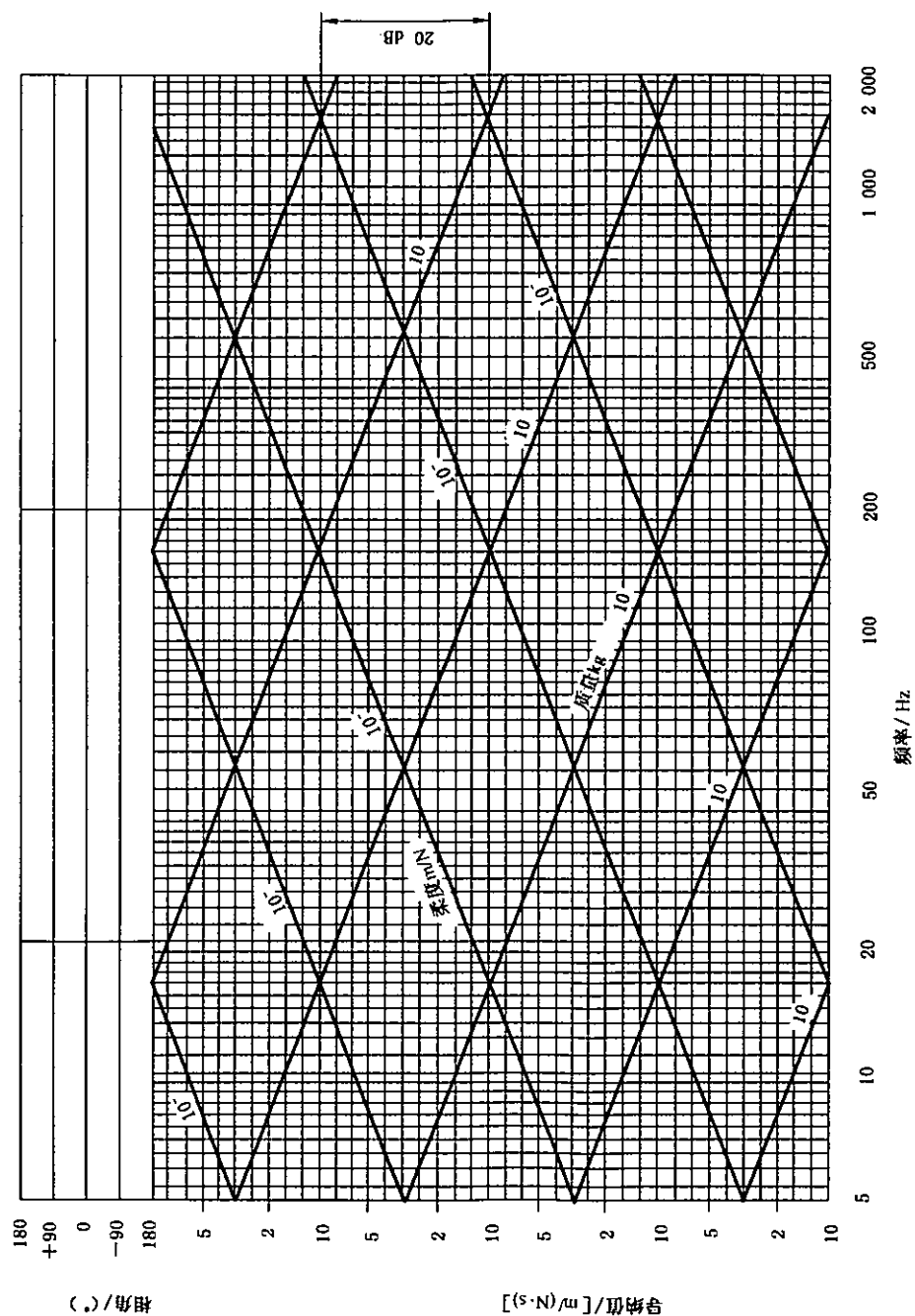


图 3 与图 1 的导纳图相对应的位移导纳图



注：在 159 Hz 采用下列这组数值：

导纳	10^{-3} m/(N s)	10^{-4} m/(N s)
1	1.0	1.0
2	1.0	1.0
3	1.0	1.0
4	1.0	1.0
5	1.0	1.0
6	1.0	1.0
7	1.0	1.0
8	1.0	1.0
9	1.0	1.0
10	1.0	1.0
11	1.0	1.0
12	1.0	1.0
13	1.0	1.0
14	1.0	1.0
15	1.0	1.0
16	1.0	1.0
17	1.0	1.0
18	1.0	1.0
19	1.0	1.0
20	1.0	1.0
21	1.0	1.0
22	1.0	1.0
23	1.0	1.0
24	1.0	1.0
25	1.0	1.0
26	1.0	1.0
27	1.0	1.0
28	1.0	1.0
29	1.0	1.0
30	1.0	1.0
31	1.0	1.0
32	1.0	1.0
33	1.0	1.0
34	1.0	1.0
35	1.0	1.0
36	1.0	1.0
37	1.0	1.0
38	1.0	1.0
39	1.0	1.0
40	1.0	1.0
41	1.0	1.0
42	1.0	1.0
43	1.0	1.0
44	1.0	1.0
45	1.0	1.0
46	1.0	1.0
47	1.0	1.0
48	1.0	1.0
49	1.0	1.0
50	1.0	1.0
51	1.0	1.0
52	1.0	1.0
53	1.0	1.0
54	1.0	1.0
55	1.0	1.0
56	1.0	1.0
57	1.0	1.0
58	1.0	1.0
59	1.0	1.0
60	1.0	1.0
61	1.0	1.0
62	1.0	1.0
63	1.0	1.0
64	1.0	1.0
65	1.0	1.0
66	1.0	1.0
67	1.0	1.0
68	1.0	1.0
69	1.0	1.0
70	1.0	1.0
71	1.0	1.0
72	1.0	1.0
73	1.0	1.0
74	1.0	1.0
75	1.0	1.0
76	1.0	1.0
77	1.0	1.0
78	1.0	1.0
79	1.0	1.0
80	1.0	1.0
81	1.0	1.0
82	1.0	1.0
83	1.0	1.0
84	1.0	1.0
85	1.0	1.0
86	1.0	1.0
87	1.0	1.0
88	1.0	1.0
89	1.0	1.0
90	1.0	1.0
91	1.0	1.0
92	1.0	1.0
93	1.0	1.0
94	1.0	1.0
95	1.0	1.0
96	1.0	1.0
97	1.0	1.0
98	1.0	1.0
99	1.0	1.0
100	1.0	1.0

柔度
 10^{-6} m/N
 10^{-7} m/N

质量
1.0 kg
11.0 kg

图 4 导线曲线绘图纸

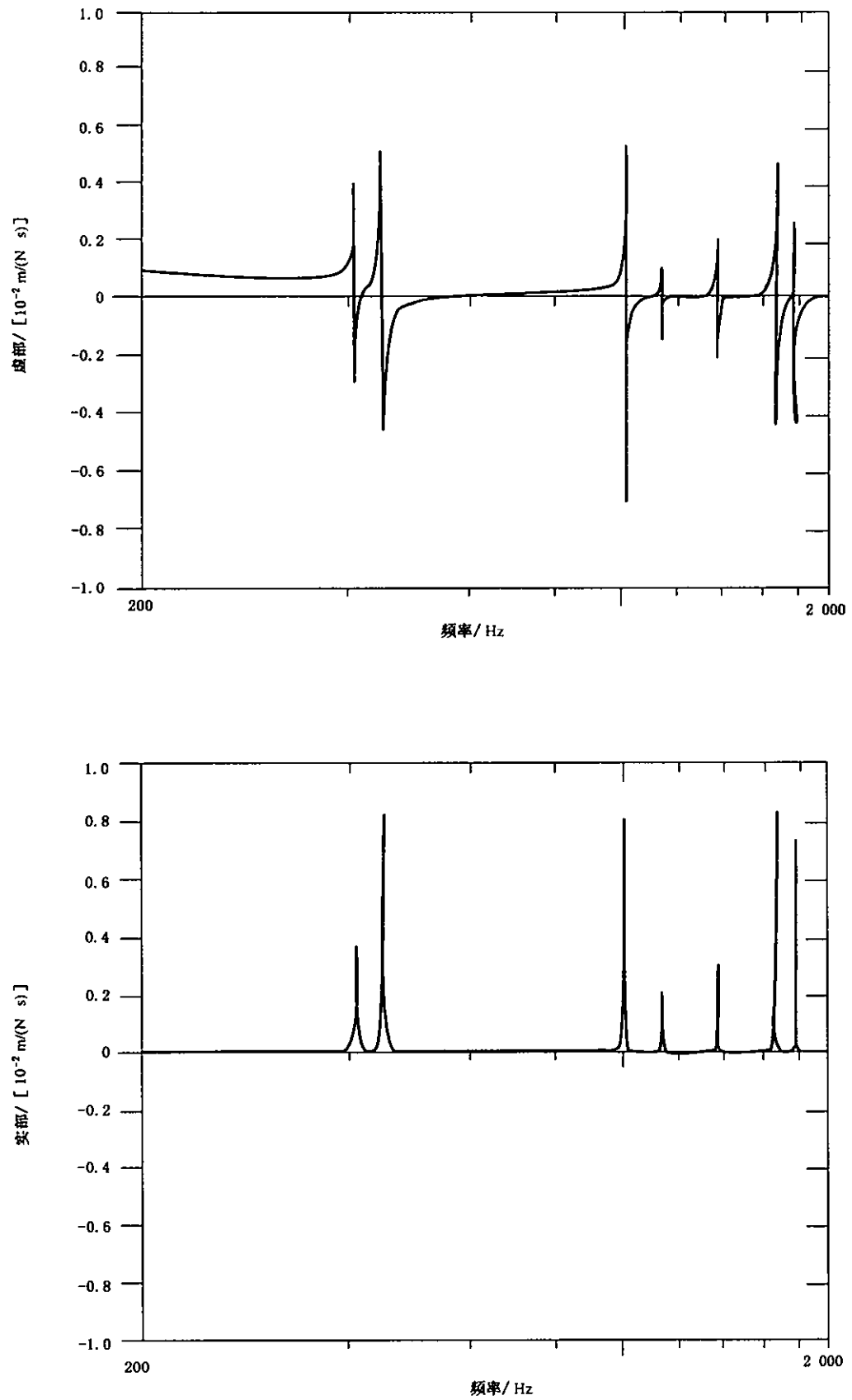


图 5 与图 1 相对应的实部导纳图和虚部导纳图

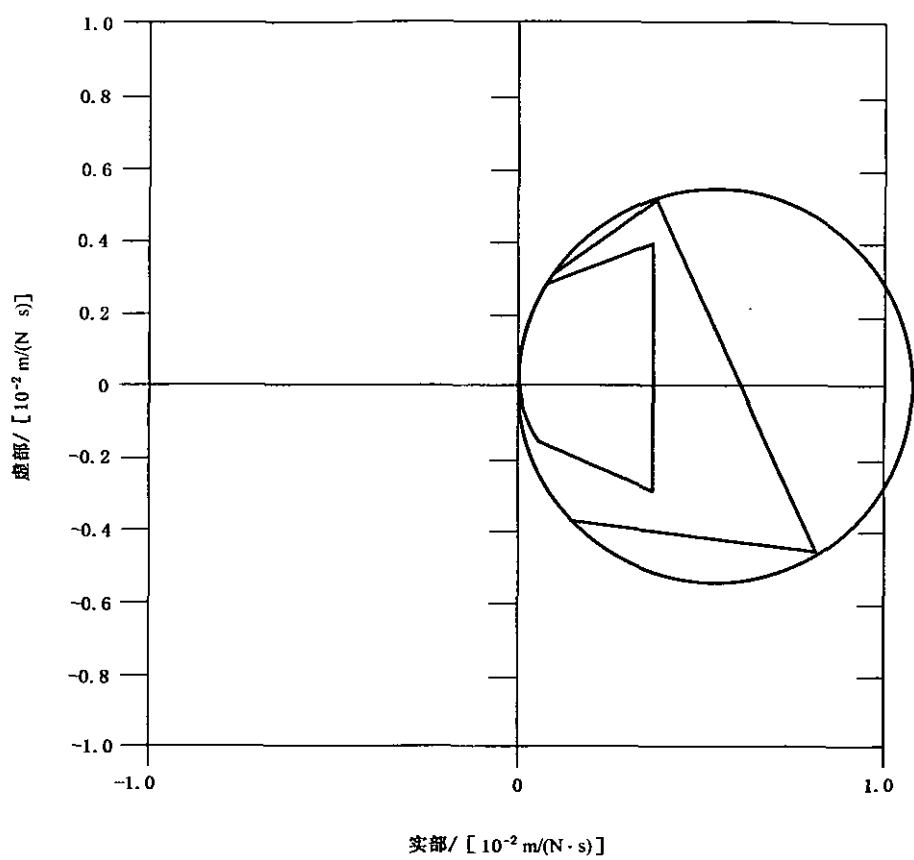


图 6 图 1 前两阶模态的极坐标导纳图

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基本上依赖于两组参数,即激振力和系统的动态特性。如果激振力水平处于使系统基本上呈线性的范围内,则系统动力特性在频域内用一个导纳矩阵 $[Y]$ 或一个阻抗矩阵 $[Z]$ 描述。由此得到两个等效的激振力和响应速度之间的关系式:

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

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

式中 $\{F(\omega)\}$ 为频率的函数,是作用于系统不同点上的外部动态力的列向量;而 $\{V(\omega)\}$ 是相应于关注的所有各点的速度响应的列向量。

注:“点”这个术语指的是一个位置以及相应的方向,与术语“坐标”的含义相同。

因为一般都要考虑结构上多个点,方程(A.1)和(A.2)的矩阵表示法是很方便的。如果 N 是考虑的运动响应点的数目加上外力(激振力或反力)作用点的数目,则方程(A.1)和(A.2)中的列向量是 N 维的,矩阵为 $(N \times N)$ 阶。

由(A.1)和(A.2)得

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

应当注意,方程(A.3)表示的矩阵求逆意味着阻抗矩阵中的元素 Z_{ij} 不是导纳矩阵中元素 Y_{ij} 的倒数,反之亦然。

A.2 边界条件

在导纳实验时,激振力只加在结构上一个点,因此

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

其中 j 为激振点, k 表示其他所有关注的点。

式(A.4)规定了实验确定机械导纳的边界条件。在这些给定边界条件下,测量在 j 点的激振力和在 i 点的速度响应,得到导纳矩阵的 i 行 j 列元素:

$$Y_{ij} = (V_i/F_j) \quad \dots\dots\dots (A.5)$$

$$F_k = 0; k \neq j$$

这就是4.2中给出的导纳定义的数学表达式。

应该注意到,上述边界条件在实验过程中容易满足。相反,阻抗矩阵 Z [式(A.2)]中的元素是:

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

边界条件为

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

方程(A.6)和(A.7)是4.3中给出的约束阻抗定义的数学表达式。方程(A.2)的边界条件在实测中要满足是很困难的或者是不可能的。因此,通过实验手段确定阻抗矩阵[式(A.2)]中的元素一般是不可能的。

边界条件(A.4)和(A.7)的差异对于正确使用阻抗和导纳数据非常重要。应当注意,如关注的只是结构上一个点和方向(即激振点)的特殊情形下,这个差异就无关紧要了。

这种特殊情形在实际中并不常见。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。在这种特殊情形中,阻抗矩阵和导纳矩阵仅有一项,因此阻抗是导纳的倒数。要注意这个特殊阻抗是

4.4 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

结构的动力特性的实验研究得到的是导纳型的数据。但在数学模型中,一般使用质量矩阵和刚度矩阵。在频率域内得到的是约束阻抗数据。当对比导纳数据和约束阻抗数据时,有必要从一种形式转换为另一种形式。但转换时必须特别小心,约束阻抗依赖于所考虑的自由度数,而不是结构的固有特性。因此,只有当两者所有自由度(点和方向)都相同时,阻抗矩阵的元素与导纳矩阵的逆矩阵的元素才能比较。如果数学模型(以及其阻抗矩阵)比实验得出的导纳矩阵自由度高(实际中常有这类情形),则必须把阻抗矩阵转换为导纳矩阵,再与实验得出的导纳矩阵中相应的元素比较,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

模态分析是连接实验分析与数学模型的非常有用的工具,它对预示相连子结构的动力相互作用特别方便。

在利用实验导纳数据时,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)。许多不同的方法可用来准确地识别出这些参数,并计及关注的频率范围之外的模态的影响。

在应用数学模型时,模态参数可由子结构的质量、刚度和阻尼矩阵,通过特征值/特征向量计算或其他矩阵凝缩过程求得。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:

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

式中:

A ——简谐波形的幅值,单位为米(m);

ω ——圆频率,单位为弧度每秒(rad/s);

t ——时间,单位为秒(s);

Φ ——初相位角,单位为弧度(rad)。

此函数可在复平面上表示为:

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

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⁾。如果在某一给定频率求出两个相量之比,其结果不再是时间的函数,而是一个复数。如果对关注的所有频率构成一系列这样的复数,其结果称为频率响应函数。例如,两个相量为:

$$\bar{x}_1(\omega, t) = A_1(\omega) e^{j[\omega t + \Phi_1(\omega)]}$$

$$\bar{x}_2(\omega, t) = A_2(\omega) e^{j[\omega t + \Phi_2(\omega)]}$$

则

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

式中:

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

$$\theta(\omega) = \Phi_1(\omega) - \Phi_2(\omega)$$

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

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

式中:

$$R(\omega) = B(\omega) \cos[\theta(\omega)] \quad \dots\dots\dots (B.5)$$

$$I(\omega) = B(\omega) \sin[\theta(\omega)] \quad \dots\dots\dots (B.6)$$

导纳可看作由速度相量与力相量之比给出的频率响应函数。对其他与导纳相似的量也可作类似的解释。

1) 某些作者定义 $Ae^{j\Phi}$ 为相量,这两个定义和在本标准中用的术语“相量”是一致的,因为本标准只涉及相量的比值。

B.2 随机激振

在平稳高斯分布的随机振动中,一个线性双向系统的输入和输出的基本方程是:

$$G_{12}(\omega) = H(\omega)G_{22}(\omega) \quad \dots\dots\dots (B.7)$$

式中:

$G_{12}(\omega)$ ——系统输入和输出的互谱密度;

$H(\omega)$ ——系统频率响应函数;

$G_{22}(\omega)$ ——输入的自谱密度。

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。导纳可看作由速度与激励的互谱密度与激励(输入)的自谱密度之比构成的频率响应函数。在实际应用中只能估算自谱与互谱,因此,用随机激励只能估计导纳,估计误差可以做到小于其他测量误差,因而不一定要限制测量精度。

B.3 瞬态激励

在瞬态振动下,线性系统的输出和输入关系如下:

$$X_1(\omega) = H(\omega)X_2(\omega) \quad \dots\dots\dots (B.8)$$

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.8)中所有的量都是频率的复函数。 $H(\omega)$ 的逆傅里叶变换就是系统的单位脉冲响应函数 $h(t)$,即若输入一单位脉冲,系统输出由 $h(t)$ 给出。导纳可看作由速度响应的傅里叶变换与输入力的傅里叶变换之比构成的频率响应函数。

在实际运用时,用离散傅里叶变换(DFT)近似连续傅里叶变换。细心地选择采样频率和样本长度,可把这一近似的误差水平减至低于其他测量误差。因此,使用 DFT 不一定要限制测量精度。

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在内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。这一方法还可提供阻抗头的连接柔度以及结构阻尼的数据。

把一个圆柱形刚性块安装在一个充分柔性的支承上,使其固有频率小于或等于 2 Hz。刚性块质量应足够大,使得反共振频率在关注的频率范围内,其质量 m 的大小(单位为 kg)可由下式估算:

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

式中:

f ——在导纳测试频率范围内一个较高的频率;

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

为设计刚性块的柔性支承,由式(C.1)可得出要求的刚性块的支承柔度 C_s :

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

式中:

f_s ——刚性块与柔性支承构成的系统的固有频率,单位为赫(Hz)(2 Hz 或更低);

m ——选作测试用的刚性块的质量,单位为千克(kg)。

阻抗头(或力传感器)应安装得与校准块的重心共线,应严格遵守传感器说明书规定的螺栓紧固力矩。安装紧固件应尽可能与结构试验时用的。激振器应按导纳实测的方式与阻抗头(或力传感器)连结。激振器产生的波形应和导纳测量时用的波形相同。校准的频率范围应超出所关注的频率范围。这套试验装置的数学模型在参考文献[4]中给出。

力传感器和运动响应传感器的输出信号应像做导纳试验一样来处理,并在适当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 所示结果是由一个质量 5.5 kg 的校准块获得的,并给出了一个约为 8×10^{-10} m/N 的相当典型的阻抗头连接柔度。在 30 Hz 至 1 100 Hz 范围内,测出的导纳曲线十分接近校准块质量加上阻抗头传感器以下部分的质量以及连接件的质量的导纳曲线。如果导纳测试结果的低频部分指示的质量不等于整个校准系统的质量,则导纳测量系统有不妥之处,应加以修正。很可能是灵敏度不适当、校准方法或电子仪器有问题。

导纳曲线上 2 400 Hz 处的反共振点(响应骤降点)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具有大致相同的幅值。因为这两个导纳基本上是反相位的,总导纳幅值在反共振频率接近零。只是因为阻抗头和校准块接合面间的阻尼才残留下一个有限值,这也是在反共振点相角为 0° 的原因。

在高于 2 400 Hz 反共振点的频率处,导纳曲线渐近地趋近安装紧固件柔度和阻抗头本身柔度的串联组合。如果连接件有一定阻尼的话,就很难检验总柔度。如果反共振下降不很陡,导纳曲线在高频段将不会趋于有效柔度的渐近线。

注:图 C.1 中测得的导纳曲线在 4 600 Hz 处的不规则是阻抗头对连接点作横向振动的结果。

如果整体校准和灵敏度检验扩展到足够高的频率,导纳曲线转而由阻抗头及连接件的有效阻尼控制。有效阻尼的大小一般算不出来,因此,本附录介绍的实验只是确定力传感器与被测结构之间连接中的阻尼的一种实用方法。

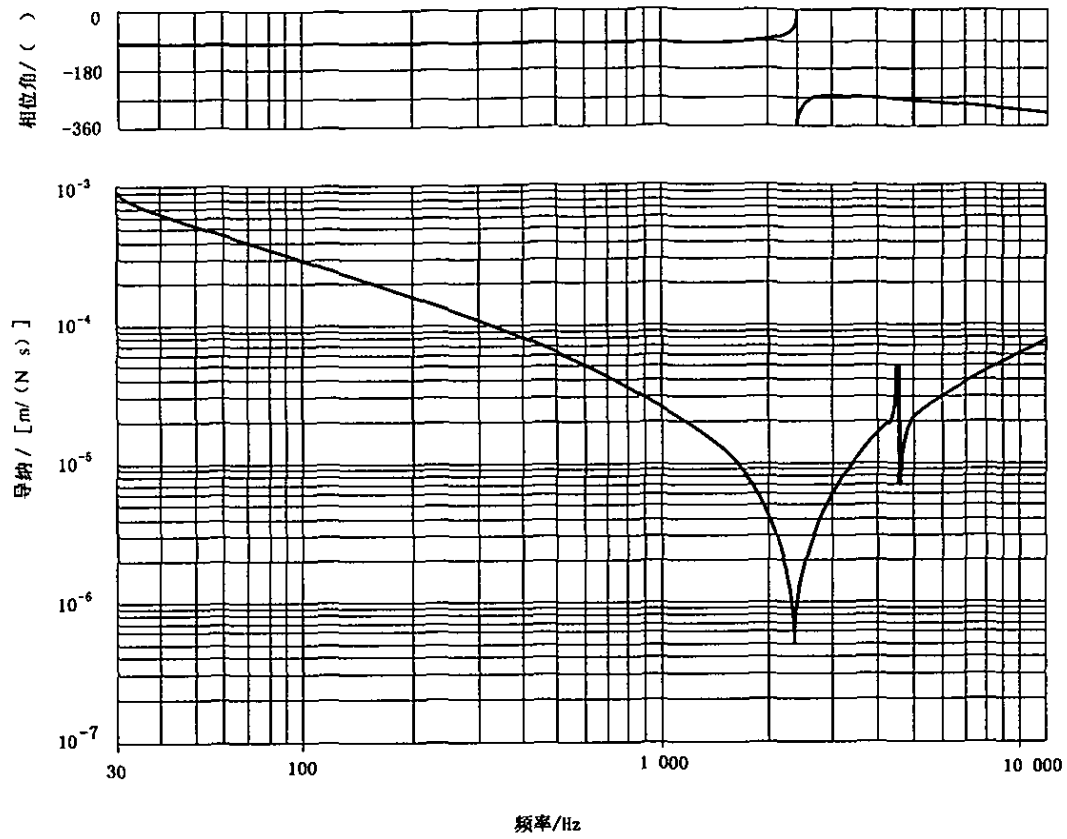


图 C.1 表明阻抗头连接柔度影响的试验结果的例子(256 次平均)

参 考 文 献

- [1] O' HARA, G. J. Mechanical Impedance and Mobility Concepts(机械阻抗与导纳的概念), *J. Acoust. Soc. Am.* 41, 1967: pp. 1180-1184.
- [2] 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.
- [3] SAINSBURY, M. G. and EWINS, D. J. Vibration Analysis of a Damped Machinery Foundation Structure Using the Dynamic Stiffness Coupling Technique(用动刚度耦合技术的有阻尼机器基础结构的振动分析) *Transactions ASME, J. Eng. Ind.* 96, Aug. 1974: pp. 1000-1005.
- [4] HIXSON, E. J. Mechanical Impedance(机械阻抗), in *Shock and Vibration Handbook* (2nd ed.), ed. HARRIS, C. M. and CREDE, McGraw-Hill, New York, 1976: chap. 10.
- [5] RUBIN, S. Mechanical Immittance- and Transmission-Matrix Concepts(机械导抗和传递矩阵概念), *J. Acoust. Soc. Am.* 41, 1967: pp. 1171-1179.
- [6] EWINS, D. J. Whys and Wherefores of Modal Testing(模态试验的理由), *J. Soc. Environ. Eng.* 18-3, 1979: pp. 3-15.
- [7] EWINS, D. J. and GRIFFIN, J. A State-of-the-Art Assessment of Mobility Measurement Techniques—Results for the Mid-Range Structures (30-3 000 Hz)(导纳测量技术的现状评估—中等结构的结果), *J. Sound and Vibration* 78(2), 1981: pp. 197-222.
- [8] EWINS, D. J. A State-of-the-Art Assessment of Mobility Measurements, A Summary of European Results(导纳测量技术的现状评估, 欧洲结果的摘要), *Shock Vib. Bull.* 51, 1981: Part 1, pp. 15-35.
- [9] EWINS, D. J. State-of-the-Art Assessment of Mobility Measurement Techniques(导纳测量技术的现状评估), *J. Soc. Environ. Eng.* 20(1), March 1981: pp. 3-13.
- [10] BROWNJOHN, J. M. W., STEELE, G. H., CAWLEY, P. and ADAMS, R. D. Errors in Mechanical Impedance Data Obtained with Impedance Heads(用阻抗头得到的机械阻抗数据的误差), *J. Sound and Vibration* 73, 1980: pp. 461-468.
- [11] KLAASSEN, K. B. Piezoelectric Accelerometers(压电加速度计) in *Modern Electronic Measuring Systems*, ed. REGTIEN, P. P. L., Delft University Press, Delft, Netherlands, 1978: chap. III.
- [12] BOUCHE, R. K. *Calibration of Shock and Vibration Measuring Transducers*(冲击与振动传感器的校准), *Monograph SVM-11*, The Shock and Vibration Information Center, U. S. Department of Defense, 1979.
- [13] CANSDALE, R., GAUKROGER, D. R. and SKINGLE, C. W. A Technique for Measuring Impedances of a Spinning Model Rotor(旋转模型转子测量阻抗的技术), *Technical Report TR 71092*, Royal Aircraft Establishment, Farnborough, United Kingdom, May 1971.