



中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—XXXX

机械振动与冲击 黏弹性材料动态力学性能 的表征 第2部分：共振法

Mechanical vibration and shock -- Characterization of dynamic mechanical properties
of visco-elastic materials --

Part 2: Resonance method

(ISO 18437-2:2005, IDT)

(征求意见稿)

(本稿完成时间：2020年05月20日)

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – XX 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 II

引言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 2

4 测试设备 3

 4.1 电动激振器 3

 4.2 加速度计 3

 4.3 电荷放大器 4

 4.4 试验台 4

 4.5 环境箱 4

 4.6 双通道频谱分析仪 5

 4.7 计算机 5

5 操作步骤 5

 5.1 试样准备和安装 5

 5.2 试样调理 6

 5.3 试样数量 6

 5.4 数据采集 6

 5.5 温度循环 7

6 结果分析 8

 6.1 模量和损耗因子 8

 6.2 时温叠加 8

 6.3 数据表示 9

 6.4 测试报告 9

附录 A（资料性附录） 回弹性材料的线性特性 11

附录 B（资料性附录） 时温叠加 12

参考文献 14

前 言

GB/T XXXXX 《机械振动与冲击 黏弹性材料动态力学性能的特征》分为6个部分：

- 第1部分：原理和指南；
- 第2部分：共振法；
- 第3部分：悬臂剪切梁法；
- 第4部分：动刚度法；
- 第5部分：基于测量和有限元分析比较的泊松比；
- 第6部分：时温叠加。

本部分为GB/T XXXXX 的第2部分。

本部分按照GB/T 1.1-2009给出的规则起草。

本部分使用翻译法等同采用国际标准ISO 18437-2:2005《机械振动与冲击 黏弹性材料动态力学性能的特征 第2部分：共振法》(英文版)，在技术内容上与国际标准完全相同。

为便于使用，本部分做了下列编辑性修改：

- “ISO 18437 的本部分”改为“本部分”；
- 删除了国际标准的前言，增加了国家标准的前言；
- 用小数点“.”代替作为小数点的逗号“,”；
- 把标准中涉及到的ISO标准改为相应的国家标准；
- 纳入了ISO 18437-2:2005 /Amd 1:2010的修正内容，这些修正内容涉及的条款已通过在其外侧页边空白位置的垂直双线(II)进行了标示。
- 纳入了ISO 18437-6:2017的相关内容。

本部分的附录A和附录B为资料性附录。

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/TC53)提出并归口。

本部分起草单位：上海材料研究所，上海交通大学，上海市质量监督检验技术研究院等。

本部分主要起草人：XXX

引 言

黏弹性材料可实现能量耗散（阻尼）或组件隔振，因而被广泛应用于降低结构系统的振动幅值，还可通过改变声能量的反射、透射和吸收而被应用于声学领域。为达到最优工作状态，结构系统通常需要材料具有特定的动态力学性能参数。黏弹性材料的能量耗散系基于分子之间的摩擦作用，可通过测量应力与应变之间的迟滞特性来衡量。大多数材料的黏弹性能（模量和损耗因子）依赖于频率、温度、应变幅值。为某一给定的设计应用选择特定的材料，是决定系统工作性能的关键所在。本部分的目的是详细介绍共振装置搭建、测量设备安装、测量及数据分析等内容；另一个目的为该方法的使用用户提供统一的规定。本部分适用于小应变幅值范围的线性力学行为。

机械振动与冲击 黏弹性材料动态力学性能的特征

第2部分：共振法

1 范围

本部分定义了一种共振法，用于实验室测量隔振器常见回弹性材料的动态力学性能。本部分适用于零点几Hz至20kHz频率范围的冲击和振动系统。

本部分适用于隔振器设计中常见的回弹性材料，以减少：

- a) 设备、结构或车辆的有害振动传递，及辐射噪声（流体辐射声、空气噪声、结构辐射声等）；
- b) 低频振动传递对人体的作用，或低频剧烈振动传递导致的结构、敏感设备损坏。

本部分及 GB/T XXXXX 的第3至第6部分详细说明了测量方法和数据采集分析方法，可用于：

- 高效隔振器的设计；
- 为设计选取最优回弹性材料；
- 隔振器振动传递率的理论计算；
- 产品研发过程中所需信息；
- 生产厂商和供应商提供的产品信息；
- 产品质量控制。

该测量方法的有效性条件是隔振器的振动特性为线性行为。该条件也包括虽然随静态载荷变化表现为非线性特征，但在特定的静态载荷条件下其动态特性表现为近似线性的隔振元件。

该测量方法在十余赫兹及一系列不同的测试温度下进行。利用时温叠加原理，可将所测得的多条数据曲线平移生成一条动态力学性能曲线，该曲线与平移前在某一给定温度下测得的原始曲线相比，具有更宽的频率范围（在某一基准温度下，典型曲线的频率范围一般为 10^{-3} Hz至 10^9 Hz）。

注：就本部分而言，术语“动态力学性能”系指基本弹性特性，比如随温度和频率变化的复数杨氏模量，如适用，还包括随静态预载荷的变化特性。

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，仅所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 2035-2008 塑料 术语及其定义（GB/T 2035-2008, ISO 472:1999, IDT）

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

GB/T 9870.1-2006 硫化橡胶或热塑性橡胶动态性能的测定 第1部分：通则（GB/T 9870.1-2006, ISO 4664-1:2005, IDT）

GB/T 33061.1-2016 塑料 动态力学性能的测定 第1部分：通则（GB/T 33061.1-2016, ISO 6721-1:2011, MOD）

GB/T 17809-1999 阻尼材料 复模量图示法（GB/T 17809-1999, ISO 10112:1991, IDT）

GB/T 22159.1-2012 声学及振动 弹性元件振动 声传递特性实验室测量方法 第1部分：原理与指南（GB/T 22159.1—2012, ISO 10846-1:2008, IDT）

GB/T 2941-2006 橡胶-物理试验方法试样制备和调节通用程序（GB/T 2941-2006, ISO 23529:2004, IDT）

3 术语和定义

GB/T 2035、GB/T 2298、GB/T 9870.1、GB/T 33061.1、GB/T 17809、GB/T 22159.1、GB/T 2941界定的以及下列术语和定义适用于本部分。

3.1

杨氏模量 Young's modulus

E^*

法向应力（拉伸或压缩）与法向应变或长度变化率的商数。

注1：单位为帕斯卡（Pa）。

注2：黏弹性材料的杨氏模量是一个复数，实部是 E' ，虚部是 E'' 。

注3：物理上，杨氏模量的实部代表弹性储能能力，虚部是能量损失的度量，见 3.2。

3.2

损耗因子 loss factor

杨氏模量的虚部与实部之比（复数杨氏模量自变量的正切）。

注：当材料中发生能量损失时，应变与应力存在相位差 δ ，损耗因子等于 $\tan \delta$ 。

3.3

时温叠加 time-temperature superposition

依据时温叠加原理，黏弹性材料在某一参考温度下的模量（或损耗因子）主曲线可通过一系列不同温度下测得的模量（或损耗因子）曲线沿频率轴平移得到，即时间和温度具有等效性。

3.4

移位因子 shift factor

在某一温度下测得的模量（或损耗因子）曲线沿频率的对数（10为底）坐标轴向另一温度下测得的曲线平移并叠加时，平移量的量度。

3.5

玻璃化转变温度 glass transition temperature

T_g

黏弹性材料从玻璃态转变为橡胶态时的温度，对应于材料比容-温度曲线斜率的拐点。

注1：单位为摄氏度（℃）。

注2：玻璃化转变温度通常由比热-温度曲线的拐点确定，是黏弹性材料的固有属性。

注3： T_g 不是黏弹性材料频域损耗因子的峰值，该峰值通常出现在高于 T_g 的温度下，且随着激励频率发生变化。

因此，损耗因子的峰值并非黏弹性材料的固有属性。

3.6

回弹性材料 resilient material

旨在减少振动、冲击或噪声传递的黏弹性材料。

注1：有时亦被称为弹性支承、隔振器、减振架、吸振器或解耦器。

注2：可通过拉伸、压缩、扭转、剪切或上述组合变形来实现振动、冲击和噪声的衰减。

3.7

线性 linearity

满足叠加原理的回弹性材料动态行为特性。

注1：叠加原理可表述为：当输入 $x_1(t)$ 的输出为 $y_1(t)$ ，输入 $x_2(t)$ 的输出为 $y_2(t)$ 时，叠加原理使输入 $\alpha x_1(t) + \beta x_2(t)$ 的输出满足 $\alpha y_1(t) + \beta y_2(t)$ 。叠加原理对任意 α 、 β 、 $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ 均成立，其中是 α 、 β 为任意常数。

注2：采用上述方法进行系统线性特性的检验实际上是难以实现的。在一定输入量级范围内，测量动态模量的方法仅是一种有限的线性特性检验方法。对一给定的预载荷，如果动态模量基本不变，则可认为该系统是线性的。该方法实际检验的是系统响应与激励之间的比例关系。

3.8

松弛时间 relaxation time

一个指数衰减量由初始值衰减至初始值的 $1/e$ ($=0.3679$) 倍所用的时间。

4 测试设备 (见图1)

4.1 电动激振器

采用电动激振器为试样提供驱动力，使其在垂直方向上产生位移。应有效控制动态应变量级以确保线性力学行为（见附录A）。电动激振器的技术要求如下：

- 频率范围：25Hz~10kHz；
- 额定力： $> 5\text{N}$ ；
- 位移峰值： $< 0.1\text{mm}$ 。

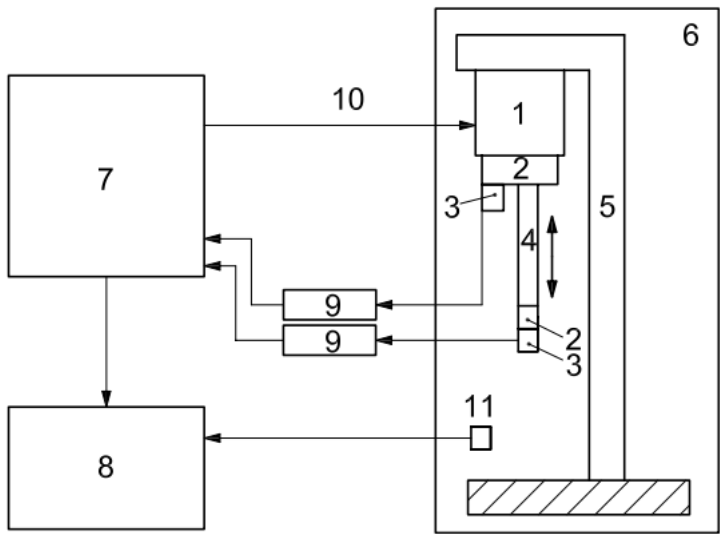
4.2 加速度计

采用一对相互匹配的或经过相对标定校准的压电式加速度计，测量试样输入和输出端的加速度值，加速度计的技术要求如下：

- 频率范围：25Hz~10kHz
- 电荷灵敏度： $> 1\text{pC/g}$ 。

加速度计与底部固定块的质量之和应尽可能小（见5.1）。

注：可使用其他类型的传感器，但应保证其具有同等功能。



- 1 ——电动激振器；
- 2 ——固定块；
- 3 ——加速度计；
- 4 ——试样；
- 5 ——试验台；
- 6 ——环境箱；
- 7 ——双通道频谱分析仪；
- 8 ——计算机；
- 9 ——电荷放大器；
- 10 ——信号源；
- 11 ——温度传感器。

图1 共振装置的原理图

4.3 电荷放大器

电荷放大器灵敏度不得低于1 mV/pC，以放大加速度计的输出信号。亦可使用具有内置放大器的压电式加速度计。

4.4 试验台

采用一试验台将激振器和试样如图1所示垂直悬挂。试样和激振器的位置应合理摆放，以消除或减小任何水平运动的发生。

注：水平运动的存在将在频谱中显示为伪峰。

4.5 环境箱

环境箱用于将试样冷却至低于室温的温度。保持该温度直至试样达到温度均匀状态，然后以5℃的温度增量递增。环境箱应可在-60℃至70℃的温度范围内工作，可控温距在0.5℃以内。温度传感器应合理校准。

注1：所需温度范围应满足玻璃化转变温度高于-45℃的黏弹性材料的测试要求。玻璃化转变温度较低的材料应采用更低的起始温度。

注2：对湿度较敏感的材料，宜对环境室内的湿度进行控制或记录。

4.6 双通道频谱分析仪

典型的双通道频谱分析仪应具备以下功能，用于驱动激振器，同时对加速度计的输出信号进行分析：

- 随机信号源；
- 双输入通道；
- 频率响应函数（FFT）和相关分析；
- 均方根信号平均；
- 频率范围：25Hz～10kHz；
- 动态范围：> 42dB；
- 选带傅里叶变换的频率分辨率：0.1 Hz。

4.7 计算机

计算机用于自动校准、数据采集和处理。

5 操作步骤

5.1 试样准备和安装

将试样模压成杆件，试件长度不小于150 mm，方形截面尺寸为6mm×6mm，精度0.1mm。采用刀片将试样切割成 100 mm±10 mm。如需要，将杆件试样两端机加工成方形。杆件两端均应能够在无支撑的情况下保持直立。杆件两端为方形，以便于试样与固定块稳固粘接。

上述试样也可采用直径为6mm～8mm的均匀圆柱形杆件。

杆件长度应在50mm～200mm之间。

注1：短试样的共振频率较高，由于高频振动易被吸收，因此可观察的共振峰较少。长试样的共振频率较低，但由于试样较长易导致弯曲。

在将样品粘接至固定块之前需测定试样的三个特征值，用于后续分析：根据 GB/T 2941，确定试样长度（单位为 m），保留四位有效数字；使用天平秤确定试样质量（单位为 kg），保留四位有效数字；通过排水量法确定试样密度（单位为 kg/m³）。

注2：可采用美国材料试验协会的 ASTM D 792^[1]等方法准备试样。

在试样的激振端（见图 1），采用粘合剂将试样和加速度计粘接至固定块上。固定块的典型尺寸为 25mm×20mm×10mm。环氧树脂和氰基丙烯酸酯均可以作为硬质粘合剂使用。

粘合剂厚度应小于 0.5mm，粘合剂的模量应大于待测材料。满足上述条件时，可认为粘合剂不影响测量^[2]。

将另一个加速度计粘接在加速度计固定块上（见图 1），再将试样粘接在固定块另一端。所用粘合剂的规定同上。加速度计固定块的横截面应有与试样一致（各边长 6 mm 的钢制立方体，或直径为相似尺寸的圆柱体）。

使用天平秤确定加速度计及其固定块的质量（单位为 kg），保留三位有效数字。

注3：使用加速度计固定块的目的是避免由于反复粘接造成的加速度计磨损和试样撕裂。根据规定，加速度计粘接至固定块一侧并**保持固定**，而每次安装新试样时只需将试样粘接至固定块另一端即可。

加速度计固定块应具有较小的尺寸和质量，以最大限度地减小试样的蠕变现象。虽然固定块应与试样具有相同的截面特征，但尺寸可稍短于试样，而不能长于试样。

5.2 试样调理

5.2.1 存放

试样成型或硫化、测试与预调理之间的时间间隔应符合GB/T 2941的规定。

5.2.2 温度

试样应在每组测试之前进行温度调节。每一个测试温度下，试样需经过足够长时间的温度调节才能达到热平衡，这一点至关重要，但为了避免老化，特别是在较高测试温度下，温度调节时间不宜过长。温度调节时间取决于试样的尺寸和测试温度。GB/T 2941给出了指导性说明。

5.2.3 力学处理

当黏弹性材料只发生单一的微小应变时，力学处理可忽略，如自由振动情况。当发生大应变时，大多数回弹性材料的动态黏弹性能对应变幅度和温度历程具有较强的依赖性。对此类材料，为保证测量结果的一致性和可重现性，建议对试样进行力学预处理，预处理可消除测量前材料的不可逆结构。处理过程应在测试温度下进行，并使被测试样达到最大应变变量，一般不少于6个循环周期。为使可逆结构达到平衡状态，力学处理和正式测量之间的静置时间不少于12小时。

5.2.4 湿度调节

湿度会对诸多弹性材料的物理性能产生影响，尤其是聚氨酯材料。为确保测试能够在可重复的测试条件下进行，测试前试样应在湿度可控的环境下存放一周。湿度调节可通过将试样存放于相对湿度控制在50%至55%的密闭容器中实现，容器内温度控制在20℃至25℃。详见ISO 483^[12]中的指导性说明。

5.3 试样数量

为了获得材料的一致性特征，建议至少测量三个试样。

5.4 数据采集

5.4.1 数据采集过程应执行以下操作。

- 采用带随机信号的频谱分析仪驱动激振器。
- 采用双通道频谱分析仪对两个加速度计信号进行傅里叶变换分析。
- 通过输出和输入信号的傅里叶变换分析，获得被测试样的频响函数及相干性。采用不少于 32 次平均处理，以提高相干性，使相干函数大于 0.95。
- 分析得到全频段内频响函数的幅值和相位信息后，测试完成。

利用所采集的数据绘制频响函数曲线，在千赫兹频率范围内的特定频率下，可观察到频响函数幅值曲线（即加速度比 A ）显示有共振峰的存在，还可观察得到相位角若干周期的变化。典型的加速度比和相位角的频域特征曲线如图2所示。加速度比与频率的特定关系可根据相位角在图中读取，相位角可由式（1）计算得到。

$$\phi = -90(2n-1) \dots\dots\dots (1)$$

式中： n 是共振阶数。

注1：须谨记，共振频率不是加速比峰值频率，而是公式（1）所示相位为 90° 的奇数倍时对应的频率。加速度比峰值取决于损耗因子，通常发生在低频范围。

注2：由于试样安装不当或激振器偏心加载，可能导致额外模态的出现。这些振动模态由预期的轴向激励的垂直分量引起。这些额外模态很易于识别，因为它们与理想的测试模态交织在一起，因而产生了不一致的动态模量值。虽然这些额外模态可以被忽略，但宜采取相应措施调整样品安装使其承受单轴激励。

5.4.2 测得共振峰的数量取决于材料的模量和损耗因子，通常为 3~6 个峰。图 2 中相位随频率降低，意味着自由端的加速度滞后于驱动端的加速度。

- 试样在每个共振模态下的待测值是共振频率和加速度比，确定方法如下：
- a) 在 25Hz 至 18kHz 全频段范围内进行频谱分析，估算共振频率，相位角的估算精度为 5°。
 - b) 依次将每个共振频率的估计值设为中心频率，频谱分析仪的带宽设置应满足较高的分辨率要求，通常约为 1Hz。当共振频率的估计值精度不高时，可在设置最高分辨率前适当采用中频段作为频谱分析范围。
 - c) 相位角的终值估算精度应小于 0.5°，共振频率小于 0.1Hz，加速度比小于 0.1dB。

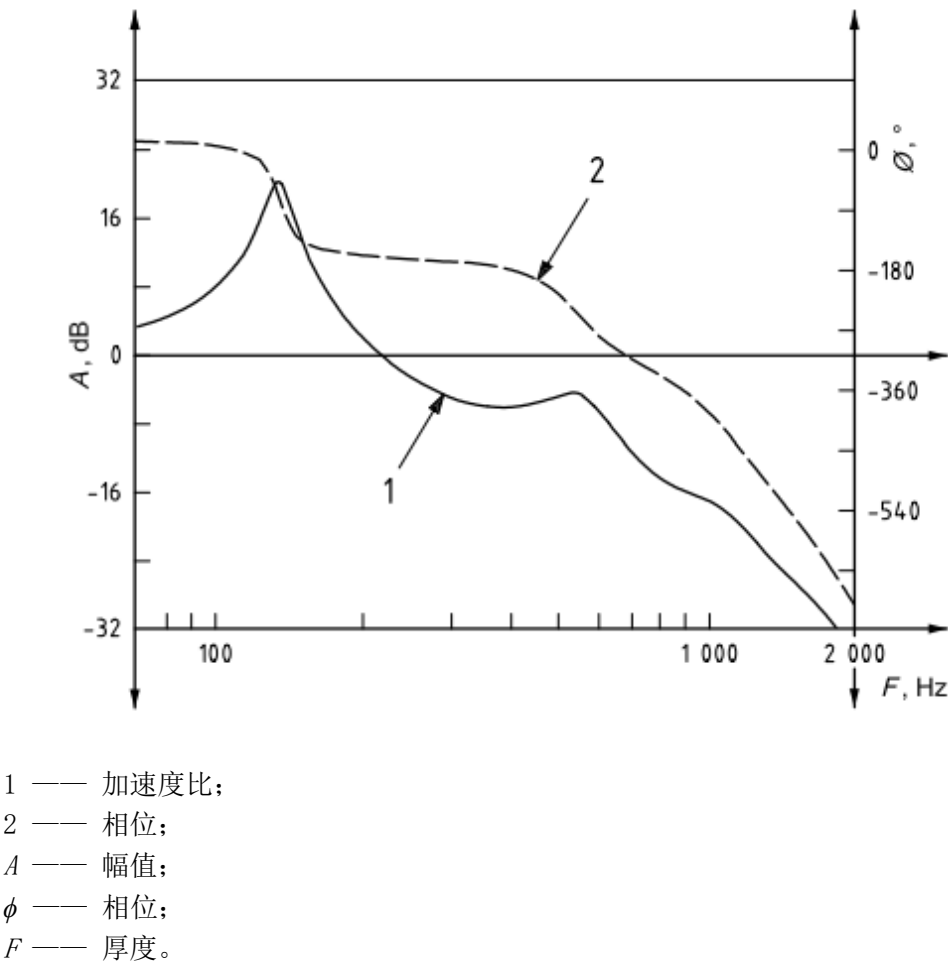


图2 典型的加速度比和相位与频率的关系曲线

5.5 温度循环

- 试样共振特性测试在-60℃至70℃的温度范围内，按如下循环步骤进行：
- 将安装在测试装置上的试样冷却至-60℃；
 - 测试前将试样在冷却温度±0.1℃的环境内放置 12h 以上，以达到温度均匀；
 - 每完成一组共振测试，将温度升高 5℃；
 - 每设置一个新的测试温度，需等候 20min 使环境温度达到平衡温度±0.1℃后，才能进行测量。

6 结果分析

6.1 模量和损耗因子

复数杨氏模量的实部和虚部通过试样长度、质量和密度，以及对波动方程在试验获取的共振频率下的数值求解信息来确定。波动方程及相应边界条件已在相关文献^[3-4]中给出介绍。波动方程的解由一组相互耦合的超越方程确定：

$$\sinh \beta (\sin \xi + R \xi \cos \xi) + R \beta \sin \xi \cosh \beta + \frac{\sin \phi}{A} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\cosh \beta (\cos \xi - R \xi \sin \xi) + R \beta \cos \xi \sinh \beta - \frac{\cos \phi}{A} = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中：

A 和 ϕ 是测得的加速度比和相位（单位为度）；

R 是自由端质量（加速度计和加速度计固定块）与试件质量之比；

ξ 和 β 是公式（2）和（3）的解。

杨氏模量的实部（单位为Pa）由下式计算得到：

$$E' = \rho \omega^2 L^2 \left\{ \xi^2 - \beta^2 \right\} / \left[(\xi^2 + \beta^2)^2 \right] \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中：

ρ 是材料密度，单位为 kg/m^3 ；

L 是杆件试样的长度，单位为 m ；

ω 是角频率 $2\pi f$ ， f 是共振频率，单位为Hz。

损耗因子 $\tan \delta$ 由公式（5）给出，其中 δ 是应变滞后于应力的相位：

$$\tan \delta = E'' / E' = 2\xi\beta / (\xi^2 + \beta^2) \quad \dots\dots\dots (5)$$

采用牛顿（Newton-Raphson）法获取公式（2）和（3）在各个共振模态下的解 ξ 和 β 。采用本方法时应对这两个参数进行初始值估计，初始值由不计入杆件末端质量的数值解确定，即 $R=0$ 。基于该假设，初始估计值可确定为：

$$\xi = (2n-1) \frac{\pi}{2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\beta = \sinh^{-1} \left(\frac{1}{A} \right) \quad \dots\dots\dots (7)$$

公式（2）和（3）的近似解由上述初始估计值开始迭代计算，直至连续迭代误差小于 10^{-5} 为止。

注1：在一些其他方法中，损耗因子是通过共振峰半宽获取的品质因子 Q 来确定的。该方法仅适用于损耗因子小于 0.1 的低耗能材料。本部分提供的方法通过求解波动方程获取损耗因子，适用于任意耗能材料。

注2：该方法适用的材料模量范围为 10^4 Pa 至 10^{12} Pa，该范围可囊括全部常见的黏弹性材料。该方法适用的材料损耗因子范围为 0.01 至 5，同样也可包含所有常见黏弹性材料。

6.2 时温叠加

模量和损耗因子的折算频谱图绘制方法如下：

- 绘制每个测试温度下复数模量的实部频谱图，以频率的对数坐标（10 为底）为横坐标。
- 选择 T_0 作为参考温度， T_0 选取模量实部-频率曲线斜率最大时的温度。
- 保持 T_0 温度下曲线不动，将其他温度下的模量实部曲线依次沿对数频率坐标轴平移，直到每条曲线的端部与目标曲线重叠。不同温度下曲线的重叠部分采用最小二乘法获得最佳重叠状态。每个温度的曲线平移量称为移位因子 a_T 。

注1：首先平移模量实部曲线，而非损耗因子，因为模量实部的测量值相对更准确，而且离散性也比损耗因子更小。

d) 平移损耗因子曲线时, 采用与模量实部曲线相同的移位因子。

注2: 满足上述时温叠加原理的材料称为**热流变简单材料**。而由于多态转变或结晶等原因导致不满足时温叠加原理的材料称为**热流变复杂材料**。

e) 复数模量实部和损耗因子通过沿对数频率坐标平移, 生成参考温度 T_0 下的曲线称为主曲线, 该条曲线与试验测得的曲线相比频率范围被有效扩展。

注3: 对于典型的回弹性材料, 平移频率范围约为 10^{-3} Hz 至 10^6 Hz。

f) 绘制自然对数下的移位因子 α_T 与温度的函数关系曲线。利用 Williams、Landel 和 Ferry (WLF) 方程^[5]拟合上述曲线:

$$\ln \alpha_T = \frac{-c_{10}(T - T_0)}{c_{20} + T - T_0} \dots\dots\dots (8)$$

式中, c_{10} 和 c_{20} 是已知聚合物的性能常数, T_0 的下标是指参考温度, 在该温度下求解方程。

g) 参考温度 T_0 下的主曲线可按如下方法变换得到其他参考温度 T_{ref} 下的主曲线。利用温度 T_{ref} 下的评估方程(8), 确定从 T_0 到 T_{ref} 温度变化对应的频率对数变化值。从参考温度 T_0 每个数据点的对数频率值中减去该对数变化值, 得到新频率范围的曲线即为参考温度 T_{ref} 下的主曲线。

注4: 参考温度的取值, 不得低于玻璃化转变温度 T_g , 且不得高于 $T_g+100^\circ\text{C}$ 。参考温度的上限取值因材料而异。所以对参考温度有限制要求, 是因为 WLF 方程仅在玻璃化转变区间适用。

6.3 数据表示

采用本部分规定的测试方法获得的数据应以三个图表的形式表示:

- 10 为底双对数坐标系下的损耗因子-模量实部曲线;
- 移位因子-温度曲线;
- 在指定参考温度 T_{ref} 下, 10 为底双对数坐标系下的频率-模量实部主曲线和频率-损耗因子主曲线。室温可选做参考温度。

注: 对数坐标下的损耗因子-复数模数实部曲线包括温度和频率以外的全部信息。该图可用于表征数据的一致性程度。曲线以外的点为**异常值**, 可忽略。因该曲线表现为倒U形, 因此也被称为倒U形图。

为便于对参考温度以外的不同测试温度下的测试数据进行统一描述和解释, 建议根据GB/T 17809绘制出模量实部、虚部和损耗因子的主曲线, 形成诺模图。

6.4 测试报告

测试报告应包括以下信息:

- 本部分的引用;
- 详细介绍有关被测材料的所有必要信息, 包括型号、来源、生产商编号、形式和预处理历史等所有已知信息;
- 试样任意的不均匀特性方向(如有);
- 测试日期;
- 试样的形状和尺寸;
- 试样的制备方法;
- 试样的调理细节;
- 试样数量;
- 包括湿度在内的测试环境细节;
- 测试装置的描述;
- 测试温度序列, 包括初始温度、最终温度、温度的线性变化率或温阶大小及持续时间;

- l) 测试结果表,包括每个测试温度下试验获取的模量实部、虚部和损耗因子以及对应的频率数据;
- m) 根据第 6.3 节的规定,绘制模量和损耗因子随频率和温度的变化曲线图。

附 录 A
(资料性附录)
回弹性材料的线性特性

一般而言, 振动-声隔离器的动态特性取决于静态预载荷、振幅、频率和温度。

线性假设意味着材料特性符合叠加原理, 且在给定频率下其动刚度与振幅无关。对于大多数隔振器而言, 因动态变形振幅小于静态预载荷作用下的静态变形幅值, 通常这个假设是近似成立的。但是值得注意的是, 线性假设是否成立取决于隔振器所用材料的力学属性, 应通过简单测试检验一定荷载范围内动刚度的变化特性。若动刚度基本不变, 则线性假设成立。

对于丁基橡胶(IIR), 文献^[6]数据表明动态剪切模量的同相分量和相位角是应变幅值和炭黑含量的函数。当动态应变幅值小于约1.0mm/m时, 同相分量和相位角几乎不随振幅变化。然而, 当动态应变幅度大于约2.0mm/m时, 动刚度会随动态应变幅值的增加显著下降, 对炭黑填充量较大的橡胶材料尤其如此。

因此, 结合材料在实际工作状态下的动态应变振幅, 提前确定适合该类橡胶隔振元件的测试条件是十分重要的。当动态应变幅值小于1.0mm/m时, 线性假设(即动刚度实部和虚部均不随动态幅值变化)可视为成立。

液压悬架的应用日益广泛, 特别是在汽车工程领域。该类隔振器一般会表现出强非线性特性, 即动刚度强烈依赖于动态变形幅度。由于此类隔振器具有双重功用(对路面不平顺引起的引擎低频振动的衰减作用, 以及对引擎振动诱发的较高频率结构辐射噪声的隔离作用), 因此应在所关注的全频范围内选取适当的动态变形幅值进行测试^[7-10]。

有时即使不满足线性假设, 仍然宜采用ISO 10846-1的相关条款。通常, 对于预载荷、信号幅值和测量量等, 应制定特殊的测试规则。

附录 B

(资料性附录)

时温叠加

假设已由规定操作步骤较好地获得了一组有效的复数模量数据。要检查数据的一致性和离散性，应绘制所有频率和温度下的双对数损耗因子——模量关系曲线。该图通常被称为倒 U 型图。如果数据表现为热流变简单材料，且无离散特征，则数据可绘制出一条平滑曲线。由于在倒 U 型图中绘制的是平移前的数据点，因此该图中任何离散部分都不能归因于平移过程。

虽然数据曲线不必一定采用倒 U 型图的绘制方法，但该方法可用作试验数据离散性的定性验证。数据带宽以及各个数据点与中心点的偏离程度可表示离散性。但该方法不能用于揭示温度和频率变化时测量结果的准确性或系统误差。时温叠加原理是基于折算频率的概念给出的。

通常，黏弹性材料的复数杨氏模量是频率和温度的函数：

$$E^* = E^*(f, T) \dots\dots\dots (B. 1)$$

对于热流变简单材料，自变量仅以频率和一个温度的函数乘积的形式出现，该温度函数称为松弛时间：

$$E^* = E^*[f\tau(T)] \dots\dots\dots (B. 2)$$

从而频率的变化相当于温度的变化。移位因子可表示为温度 T 下的松弛时间与参考温度 T_0 下的松弛时间之比：

$$\alpha_T(T) = \tau(T)/\tau(T_0) \dots\dots\dots (B. 3)$$

复数模量可表示为：

$$E^* = E^*[fa_T(T)\tau(T_0)] \dots\dots\dots (B. 4)$$

折算频率定义为：

$$f_R = fa_T(T) \dots\dots\dots (B. 5)$$

复数模量可以用两种相互等价的方式表示：

$$E^* = E^*[fa_T(T)\tau(T_0)] = E^*[f_R\tau(T_0)] \dots\dots\dots (B. 6)$$

可见，在频率 f 和温度 T 下测量的模量值与在折算频率 f_R 和温度 T 下测得的模量值是等价的。折算频率可远大于实际测量频率的 a_T 倍，因此测量值作为温度的函数与测量值作为频率（远大于实际测量频率）的函数是等价的。

移位因子始终以函数形式呈现。移位因子函数的意义及其定义可用图形描述。双对数坐标系下，将试验获取的 E' 和频率绘制成一系列不同温度下（相同频率范围）的曲线。选择一条曲线温度作为参考温度。相邻更高等温线的曲线可以沿对数频率坐标轴平移，直到该曲线与参考温度曲线首尾重叠。依次对所有等温线（高于和低于参考温度）下的曲线进行平移。最终结果即为 $\log E'$ 在宽频范围内的对数折算频率下的曲线，称为主曲线。通过曲线平移获得主曲线时，所需平移量是温度的函数，而该过程是通过平移不同温度下的试验曲线实现的，因此被称为移位因子函数。移位因子函数曲线可与 Williams-Landel-Ferry 方程^[5, 10]做比较分析。

读者若不熟悉如何通过时温叠加原理扩展测量频率范围，可参考文献ANSI S2.24^[11]。该文献详细介绍了相关理论、平移方法、移位因子函数值、解析表达式以及图形形式表达的标准材料测试结果频率-温度诺模图等。

参 考 文 献

- [1]ASTM D 792-91, Standard Test Method for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement
- [2]PRITZ, T. Transfer Function Method for Investigating the Complex Modulus of Acoustic Materials: Rod-like Specimen.J. Sound and Vibration, 81, pp. 359-376 (1982)
- [3]MADIGOSKY, W. M. and LEE, G. F. Improved resonance technique for material characterisation.J. Acoust.Soc.Am. 73, pp. 1374-1377 (1983)
- [4]BUCHANAN, J. L. Numerical solution for the dynamic moduli of a visco-elastic bar.J. Acoust. Soc. Am. 81, pp. 1775-1786 (1987)
- [5]FERRY, J. D. Visco-elastic Properties of Polymers. 3rd ed., John Wiley & Sons, New York, 1980
- [6]FREAKLEY, P. K. and PAYNE, A. R. Theory and practice of engineering with rubber: Applied Science Publishers, London, 1978
- [7]HARTEL, V. and HOFMANN, M. Latest design for engine mountings. VDI-Berichte 499. Dusseldorf: VDI- Verlag, 1983 (in German)
- [8]FLOWER, W. C. Understanding hydraulic mounts for improved vehicle noise, vibration and ride qualities. SAE paper 8509075. Soc. Autom. Eng., Inc., Warrendale, PA 15096, May 1985
- [9]CREDE, C. E. Vibration and Shock Isolation. John Wiley & Sons, New York, 1951
- [10] Shock and Vibration Handbook. 5th edition. Edited by C. M. Harris and A. G. Piersol. McGraw Hill, 2002
- [11] ANSI S2.24-2001, American National Standard Graphical Presentation of the Complex Modulus of Visco- elastic Materials
- [12] ISO 483:1988, Plastics — Small enclosures for conditioning and testing using aqueous solutions to maintain relative humidity at constant value
- [13] ISO 18437-3:2005, Mechanical vibration and shock — Characterization of the dynamic mechanical properties of visco-elastic materials — Part 3: Cantilever shear beam method