

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特性的表征 第5部分：基于测量和有限元分析比较的泊松比

Mechanical vibratin and shock --- Characterizatin of the dynamic mechanical properties of visco-elastic materials --- Part 5: Poisson ratio based on comparison between measurements and finite element analysis

ISO 18437-5:2011 IDT

^a （征求意见稿）

^b （本稿完成日期：2023 年 11 月 22 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 测量原理 3

5 单试样测量法 3

 5.1 测量方法 3

 5.2 无量纲刚度测量 3

 5.3 测量频率 5

 5.4 刚度测量 5

 5.5 数据采集 6

6 双试样测量法 6

 6.1 测量方法 6

 6.2 测量原理 7

 6.3 泊松比计算 7

 6.4 试样尺寸及频率 8

7 测试设备 8

8 试样制备 9

9 试样调理 9

10 测量的不确定性 9

11 时间-温度叠加 10

 附录 A（资料性附录） 回弹性材料的线性特性 11

 参考文献 12

前 言

GB/T ×××××《机械振动与冲击 黏弹性材料动态力学特性的表征》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×××××的第5部分。

本部分按照GB/T 1.1-2020给出的规则起草。

本部分使用翻译法等同采用国际标准ISO 18437-5：2011《机械振动与冲击 黏弹性材料动态力学性能的表征 第5部分：基于测量和有限元分析比较的泊松比》(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 18437-6：2017的相关内容。

本部分的附录A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：×××××××××××。

本部分主要起草人：×××、×××、×××、×××、×××。

引言

黏弹性材料可实现能量耗散（阻尼）或组件隔振，被广泛应用于降低结构振动，改变声能量的反射、透射和吸收、降低噪声。

该类结构系统的材料应有特定的动态力学性能参数。黏弹性材料基于分子间摩擦作用的能量耗散可通过测量应力与应变间的迟滞特性来衡量。大多数黏弹性材料的杨氏模量、损耗因子和泊松比等动态力学性依赖于频率、温度、初始应变及动应变幅值。选择特定的材料是决定系统工作性能的关键。

本部分是介绍小应变幅值范围的黏弹性材料动态力学性能的测量和有限元分析比较的泊松比方法所采用的测试方法、测试装置、测试范围及局限性。

本部分目的在于：

- a) 减少可听频段振动诱发的空气噪声和结构辐射的流体辐射声；
- b) 减少低频振动导致结构和设备的损坏及对人体的影响。

机械振动与冲击 黏弹性材料动态力学性能的特征

第5部分：测量和有限元分析比较的泊松比

1 范围

本部分规定了测量小应变幅值范围隔振器的同性回弹性试样的载荷-挠度曲线或刚度特性、各向同性黏弹性材料或多孔弹性材料随温度及频率变化的复数杨氏模量和泊松比值的线性有限元（FEM）方法、数据采集分析方法，解决复杂几何形状黏弹性结构基本弹性材料的振动或声学的线性力学参数。

本部分适用于：

- 隔振器设计；
- 回弹性材料选取；
- 隔振器振动传递率计算；
- 研发信息；
- 产品信息；
- 质量控制。

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

GB/T 2298 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 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 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 22159.1 声学 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 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 22159.1、GB/T 2941界定的及下列术语和定义适用于本部分。

3.1

动态力学性能 **dynamic mechanical properties**

黏弹性材料的弹性模量、剪切模量、体积模量和损耗因子基本弹性性能参数。

3.2

回弹性材料 **resilient material**

能减少振动、冲击或噪声传递的黏弹性材料。

3.3

杨氏模量 **Young modulus**

长条形回弹性材料试样拉伸或压缩的法向应力与法向应变或长度变化率的商。

注1：杨氏模量用帕斯卡表示。

注 2：各向同性黏弹性材料的杨氏模量是一个复数 E^* ，实部是 E' ，虚部是 E'' 。

注 3：物理上，杨氏模量的实部与储能能力有关，虚部是能量损失的度量。

3.4

损耗因子 loss factor

杨氏模量的虚部与复数杨氏模量自变量正切的实部之比。

注：材料发生能量损失时，应变与应力存在的相位差 δ 、损耗因子等于 $\tan \delta$ 。

3.5

线性 linearity

满足叠加原理的回弹性材料动态行为特性。

注 1：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：在一定输入量级范围内，测量动态模量是有限的线性特性检验方法。给定预载荷在动态模量基本不变时，其系统是线性的。该方法实际检验的是系统响应与激励之间的比例关系。

3.6

泊松比 Poisson ratio

材料比例极限内，由均匀分布的轴向应力引起的横向应变与相应的轴向应变之比。

3.7

形状因子 shape factor

压缩或拉伸试样的两个粘接末端的加载端截面面积与可自由变形面积之比。

4 测量原理

4.1 黏弹性材料的泊松比值接近 0.5，应在线性有限元计算后选择合适的泊松比值。

4.2 本部分采用圆盘试样在静态压缩载荷作用下测得的压缩刚度、杨氏模量、泊松比值和通过轴对称有限元计算得到的形状因子的准静态方法来计算黏弹性材料或多孔弹性材料的泊松比值。

4.3 测量粘接在两个刚性金属板上的圆盘试样底部和顶部承受的轴向压缩刚度，测量值与预测值间特性可解释试样沿周向的鼓胀。

4.4 测量条件如下：

a) 隔振器的振动特性应为线性；

注：隔振器的弹性元件虽能随静态载荷变化为非线性特征，但在特定的静态载荷条件下其动态特性已为近似线性。

b) 隔振器与相邻振源及受振结构的接触面载荷应是均布的；

c) 隔振器与周围的空气流体介质间应无相互作用。

注：该条件仅满足于不大于 100Hz 开孔的孔隙弹性泡沫材料制成的隔振器。

4.5 泊松比值还可以：

a) 通过测量复数体积模量、剪切模量等弹性系数得到^[7]；

b) 利用激光测振计获取试样的横向位移后，可直接测量泊松比值。

5 单试样测量法

5.1 测量方法

5.1.1 本方法目标材料的杨氏模量应按 GB/T XXXXX.2~GB/T XXXXX.4 的方法测得。

5.1.2 本方法是通过有限元计算获得圆盘试样的无量纲刚度—泊松比值关系曲线。

5.1.3 通过 GB/T XXXXX.4 规定的试验装置和测量设备测得试样的实际刚度。

5.1.4 根据测得的刚度值计算对应的泊松比值。

5.1.5 本方法不规定试样的几何尺寸，但试样应有较大的形状因子。

5.2 无量纲刚度测量

5.2.1 设黏弹性材料或多孔弹性材料的圆柱形试样的厚度为 T 、截面面积为 $A=\pi D^2/4$ 、杨氏模量为 E 。

5.2.2 试样按图1两端粘接在刚性边界上，承受轴向载荷 F ，产生变形 Δ 。

5.2.3 无量纲刚度按式（1）计算。

$$R = \frac{FT}{AE\Delta} \tag{1}$$

5.2.4 厚试样的理想值一般为1.0。

5.2.5 有相同材料属性和不同几何形状试样的泊松比和形状因子能影响无量纲刚度值 R 。

5.2.6 圆盘试样的形状因子按式（2）计算。

$$S = \frac{D}{4T} \tag{2}$$

5.2.7 图2中纵坐标为无量纲刚度的计算值 R 与理论校正因子 R_0 的比值^[9]， R_0 按式（3）计算。

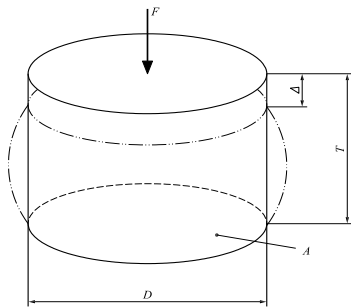
$$R_0 = 1 + 2S^2 \tag{3}$$

5.2.8 图2中较厚试样的泊松比 ν 对无量纲刚度 R 的影响可不计。

5.2.9 形状因子较大试样的泊松比 ν 对无量纲刚度 R 的影响十分显著。

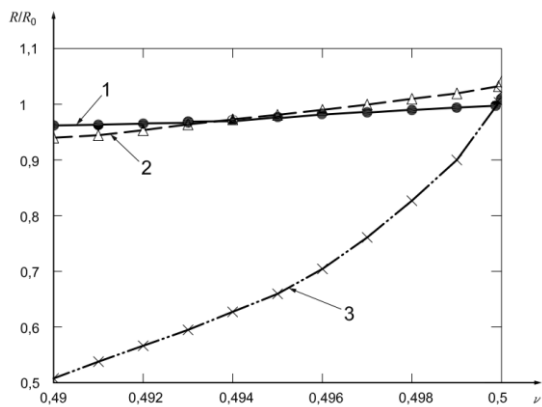
5.2.10 形状因子较大的试样应按有限元计算并绘制无量纲刚度 R 与泊松比 ν 的关系曲线。

5.2.11 按式（1）进行特定频率的动态试验，得到无量纲刚度测量值 R 和相应的泊松比值。



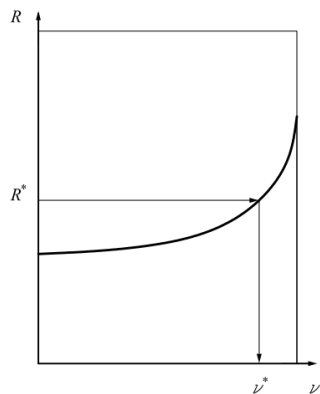
- 1 ——固定块；
- 2 ——加速度计；
- 3 ——加速度计输出；
- 4 ——试样；
- 5 ——振动方向。

图1 实体圆柱形试样



R —— 无量纲刚度计算值；
 R_0 —— 无量纲刚度理论值；
 S —— 形状因子；
 ν —— 泊松比；
1 —— $S=0.304$ ；
2 —— $S=0.770$ ；
3 —— $S=2.591$ 。

图2 R/R_0 与泊松比 ν 的关系曲线图



R —— 无量纲刚度计算值；
 ν —— 泊松比。

图3 $R(\nu)$ 对应的刚度测量值 R^* 的泊松比值 ν^*

5.3 频率测量

- 5.3.1 图2的泊松比 ν 对无量纲刚度 R 随形状因子的增加而逐渐增强，因此形状因子不宜大于2.0。
- 5.3.2 图2和图3是有限元静态力学分析的结果，无量纲刚度是泊松比的函数 $R(\nu)$ 。
- 5.3.3 无量纲刚度是激励频率的函数，有限元计算的杨氏模量可通过频率参数计算。
- 5.3.4 泊松比的频率应与杨氏模量的频率一致。
- 5.3.5 与激励频率相关的另一个因素是应测量无量纲刚度 R 试样的固有频率。
- 5.3.6 两端固定的振动沿纵向传递的无质量弹簧杆状试样的最高激励频率 f_{max} 应不大于其一阶固有频率 f_1 的五分之一， f_{max} 按式（4）计算。

$$f_{max} = 0.2f_1 = 0.2 \times \frac{1}{2T} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{4}$$

式中：
 E —— 杨氏模量；
 T —— 试样厚度；
 ρ —— 材料密度。

5.4 刚度测量

- 5.4.1 作为角频率函数 $R(\omega)$ 的无量纲刚度 R 可通过以下两种方法将测得的动刚度值除以 AE/T 得到：
- a) 按图4a) 直接测量载荷与响应之比 $F(\omega)/\Delta(\omega)$ 的动刚度；
 - b) 按图4b) 对试样和一个集中质量的装置测量振动传递率后，间接得到动刚度值。

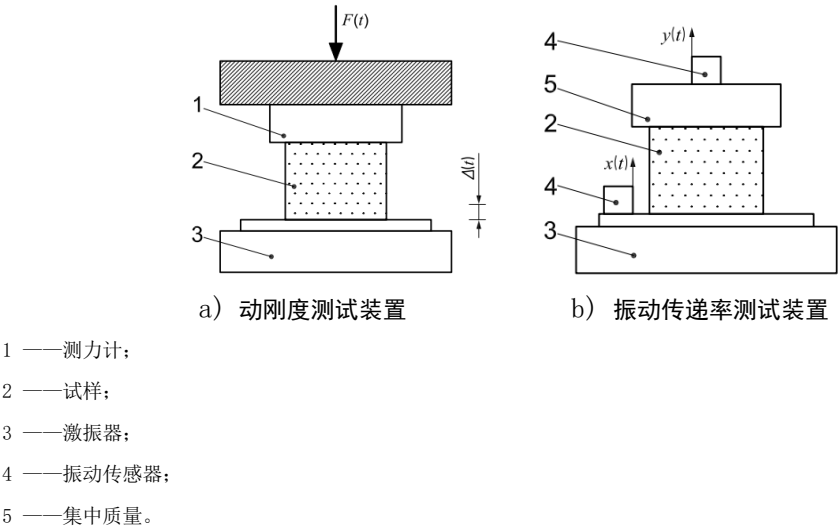


图4 动刚度的直接测量法与间接测量法

- 5.4.2 一般动刚度易受动态载荷幅值的影响^[6]。
- 5.4.3 振动传递率测量位移响应幅值应使用动刚度直接测量法。
- 5.4.4 动刚度测量装置和操作步骤应按GB/T×××××.4 动刚度法测量杨氏模量。
- 5.5 数据采集
- 5.5.1 施加激励随机信号后，通过双通道频谱分析仪采集数据，经傅立叶变换（FFT）分析并平均化。
- 5.5.2 重复做32次平均化处理，提高数据的相干性。（相干值应不小于0.95）
- 5.5.3 数据信息应包括装置的动刚度及试样的波动效应。
- 5.5.4 固定块的质量和试样尺寸应使质量弹簧系统的一阶固有频率不小于激励频率。
- 5.5.5 系数 R 宜使用图4a)的动刚度直接测量法，并按式（5）计算。

$$R_{\omega} = \frac{F(\omega)T}{\Delta(\omega)AE} \tag{5}$$

式中：
 T ——试样的厚度；
 A ——试样的截面面积；
 E ——试样杨氏模量。

6 双试样测量法

6.1 测量方法

- 6.1.1 用双试样测量法通过测量两个较大形状因子的圆盘试样得到压缩刚度值。

6.1.2 利用测得的两个压缩刚度值及已知的有限元, 计算不同形状因子试样的压缩刚度-泊松比多项式曲线和一组方程式及两个未知参量。

6.1.3 解该方程组即可得到被测材料的泊松比和杨氏模量。

6.2 测量原理

6.2.1 细长杆状试样的形状因子 S 不大于0.025时, 其静态压缩刚度几乎不受泊松比或边界条件和形状因子的影响, 杨氏模量 E 与一维静态压缩刚度 K_0 按式(6)计算。

$$E = \frac{K_0 T}{A} \quad (6)$$

式中:

A ——试样的截面面积;

T ——试样的长度或厚度。

6.2.2 较短试样的形状因子 S 不小于0.025时, 其泊松比、边界条件和形状因子对静态压缩刚度 $K_m(0)$ 的测量值有显著影响, 此时静压缩刚度为 $K_m(0)$, $\omega=0$ 。

6.2.3 较大形状因子矮而短试样的压缩模量 E_a 按式(7)计算。

$$E_a = \frac{K_m(0)T}{K_0} \quad (7)$$

6.2.4 式(6)和(7)联立, 在压缩模量、实际压缩模量与刚度比一致时的归一化刚度按式(8)计算。

$$\frac{E_a}{E} = \frac{K_m(0)}{K_0} \quad (8)$$

6.2.5 形状因子较大的试样在承受载荷产生变形时会沿周向发生膨胀, 式(8)的模量比或刚度比对材料的泊松比十分敏感。

6.2.6 模量比作为泊松比和形状因子的函数, 其有限元计算得到的随自变量变化用于归一化刚度。

6.2.7 图5是不同材料泊松比值通过有限元计算得到的刚度比随形状因子变化的函数关系曲线。

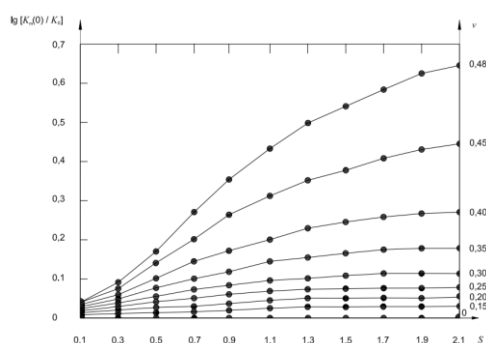


图5 归一化静态压缩刚度与形状因子和泊松比的函数关系曲线

6.2.8 图5的曲线还可转换为不同形状因子的刚度比随泊松比变化曲线, 按式(9)计算 n 阶多项式。

$$P(S, \nu) \equiv \frac{K_m(0)}{K_0} = 1 + \sum_{i=1}^n c_i(S) \nu^i \quad (9)$$

式中:

准静态近似值 $K_m(0) = K_m(\omega)$ 仅在试样频率不大于一阶固有频率时成立。

6.3 泊松比计算

6.3.1 同种材料试样的杨氏模量是相同的，式（8）、式（9）、式（10）的比例关系与形状因子、泊松比和杨氏模量均不相关。

$$\frac{E_a(S_1, \omega)}{P(S_1, \nu)} = \frac{E_a(S_2, \omega)}{P(S_2, \nu)} \quad (10)$$

6.3.2 试验得到的杨氏模量是激励频率函数的复数，是不同形状因子两个试样的杨氏模量的测量值。

6.3.3 式（10）仅是被测试样大于零的泊松比实数。

6.3.4 材料泊松比确定后， S_1 或 S_2 任一形状因子按式（11）计算杨氏模量与多项式函数之比。

$$E(\omega) = \frac{E_a(S, \omega)}{P(S, \nu)} \quad (11)$$

6.4 试样尺寸及频率

6.4.1 一般说明

6.4.1.1 本部分采用 $S_1=0.6519$ 和 $S_2=0.1946$ 两种试样的形状因子。

6.4.1.2 式（9）中 S_1 和 S_2 的系数 $C_i, i=1, 2, \dots, 8$ 已在表1中给出。

6.4.1.3 测量激励频率应不大于式（4）试样的一阶固有频率的20%。

表1 多项式系数

C_i	i							
	1	2	3	4	5	6	7	8
S_1	-0.036853	3.1874	-36.020	335.46	-1647.6	4544.6	-6551.1	3915.3
S_2	-0.0020414	0.50897	-1.8760	17.548	-82.541	220.67	-306.88	176.33

6.4.2 数据采集

6.4.2.1 除了需要同时采集两个试样的数据外，其余应与单试样测量方法一致。

6.4.2.2 施加激励随机信号后通过双通道频谱分析仪采集数据，经傅立叶变换（FFT）分析并平均化。

6.4.2.3 重复做32次平均化处理可提高数据的相干性。（相干值应不小于0.95）。

6.4.2.4 采集的数据信息应包括装置的动刚度及试样的波动效应。

6.4.2.5 固定块的质量和试样尺寸应使质量弹簧系统的一阶固有频率不小于激励频率。

6.4.2.6 用图6的直接法测得杨氏模量 E_a ，并按式（12）计算。

$$E_a(\omega) = \frac{F(\omega)T}{\Delta(\omega)A} \dots\dots\dots (12)$$

式中：

双试样测量可得到 $E_a(S_1, \omega)$ 和 $E_a(S_2, \omega)$ 。

7 测试设备

直接测量法的试样一端应为刚性固定端，见图6。

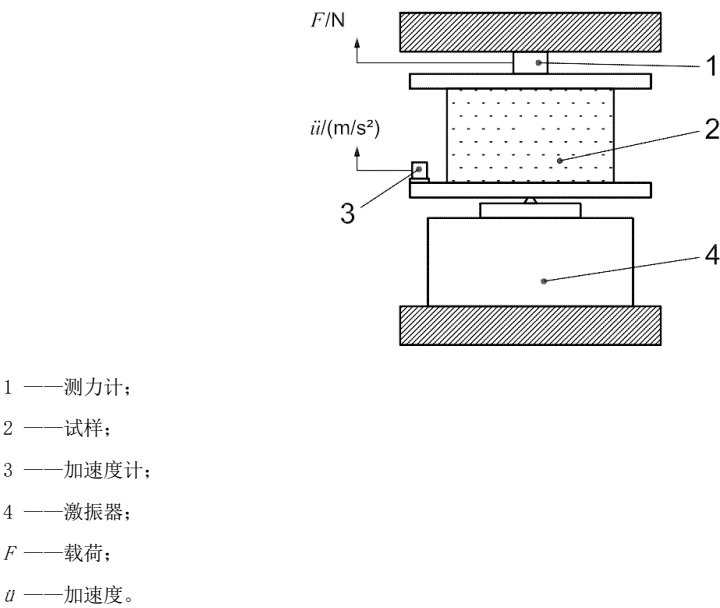


图6 测量装置示意图

8 试样制备

- 8.1 试样可通过模压成型或从板材上切割得到。
- 8.2 试样可直接模压至刚性金属端板上，也可制成后粘接在刚性金属板上。
- 8.3 试样应不少于三个。

9 试样调理

- 9.1 试样应充分成型或硫化后熟化。
- 9.2 试样测试温度应均匀。
- 9.3 湿度对材料的敏感性应能控制。
- 9.4 试样的调理、测试温度、湿度和测试次数等应符合GB/T 2941规定。

10 测量的不确定性

- 10.1 测量压缩刚度不确定性的主要原因如下：
 - a) 声学接触不当；
 - b) 试样精度不足；
 - c) 试样形状不当；
 - d) 载荷与应变响测量通道的相位差过大；
 - e) 传感器标定不准确。
- 10.2 试验装置与试件的声学接触不充分或较松时，测得的刚度值将小于实际值。
- 10.3 试样制备的不确定性会导致位移表观值与实测值不符。
- 10.4 位移的实际测量并不是应达到的指定大小的位移。
- 10.5 试样与测试装置的平行度应使试样的几何对称性能减少试样安装的对准度误差。
- 10.6 试样尺寸未达到5.3规定：
 - a) 试样刚度与测试设备的刚度可比时，设备的刚度会影响测量结果；
 - b) 试样刚度较小时，测力计的测试信号与测试设备的背景噪声可比；
 - c) 试样调理不能使试样刚度满足要求时，则试样共振会影响测试结果。

注：本测试方法的不确定性因素诸多，但参考文献^[5]已指出泊松比为0.45时标准偏差可达0.003。

11 时温叠加

按GB/T ×××××的第2部分、第3部分及第6部分，无论单试样或双试样测量方法，有限频率范围内的测量均可采用时间-温度叠加原理进行频率扩展。

附 录 A
(资料性附录)
回弹性材料的线性特性

- A.1 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。
- A.2 线性假设意味着材料特性符合叠加原理在给定频率下其动刚度与振幅无关。
- A.3 大多数隔振器因动态变形振幅小于静态预载荷作用下的静态变形幅值。
- A.4 线性假设的成立取决于隔振器材料的力学属性，动刚度不变时的线性假设可通过测试载荷动刚度的变化得到。
- A.5 丁基橡胶（IIR）的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。
- A.6 当动态应变幅值不大于 10^{-3} 时，同相分量和相位角几乎不随振幅变化。
- A.7 动态应变幅度不小于 2×10^{-3} 时，动刚度会随动态应变幅值的增加而下降，炭黑填充量较大的橡胶材料尤其是如此。
- A.8 应提前确定橡胶隔振元件在实际工作状态下的动态应变幅值的测试条件，当动态应变幅值不大于 10^{-3} 时，动刚度实部和虚部是不随动态幅值变化的。
- A.9 液压悬架隔振器的动刚度强烈依赖于动态变形幅度的非线性特性。此类隔振器有低频振动的衰减作用和振动诱发较高频率结构辐射噪声的隔离作用，应测试全频范围内的动态变形幅值。^[1, 3-4]
- A.10 即使不满足线性假设，但仍宜采用ISO 10846-2: 2008的条款^[10]，对预载荷、信号幅值和测量量等制定特殊的测试规则。

参 考 文 献

- [1] FLOWER, W.C. Understanding hydraulic mounts for improved vehicle noise, vibration and ride qualities. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 1985. (SAE paper 8509075.)
- [2] FREAKLEY, P., PAYNE, A. Theory and practice of engineering with rubber. London: Applied Science, 1978, 666 p.
- [3] PIERSOL, A.G., PAEZ, T.L. Harris' shock and vibration handbook, 6th edition. New York, NY: McGraw Hill Professional, 2010.
- [4] HÄRTEL, V., HOFMANN, M. Latest design for engine mountings [in German]. Düsseldorf: VDI, 1983. (VDI-Berichte 499.)
- [5] LANGLOIS, C., PANNETON, R., ATALLA, N., Polynomial relations for quasi-static mechanical characterization of isotropic poro-elastic materials. J. Acoust. Soc. Am. 2001, 110, pp. 3032~3040.
- [6] NASHIF, A.D., JONES, D.I.G., HENDERSON, J.P. Vibration damping. New York, NY: Wiley, 1985. 453 p.
- [7] PRITZ, T. Measurement methods of complex Poisson ratio of visco-elastic materials. Appl. Acoust. 2000, 60, pp. 279~292.
- [8] SIM, S., KIM, K.J. A method to determine the complex modulus and Poisson ratio of visco-elastic materials for FEM applications. J. Sound Vib. 1990, 141, pp. 71-82.
- [9] SNOWDON, J.C. Vibration and shock in damped mechanical systems. New York, NY: Wiley, 1968. 468 p.
- [10] ISO 10846-2: 2008, Acoustics and vibration-Laboratory measurement of vibro-acoustic transfer properties of resilient elements-Part 2: Direct method for determination of the dynamic stiffness of resilient supports for translatory motion.
- [11] ISO 1756: 2002, Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) -Test method for elastic moduli of monolithic ceramics at room temperature by sonic resonance.
-