

# 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1部分：原理和指南

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

Part 1: Principles and guidelines

(ISO 18437-1:2012, IDT)

(征求意见稿)

(本稿完成日期：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 .....	1
4 测量原理 .....	2
4.1 一般原则 .....	2
4.2 共振法 .....	3
4.3 悬臂剪切梁法 .....	4
4.4 动刚度法 .....	5
4.5 泊松比的估计 .....	7
5 时温叠加 .....	9
6 试样调理 .....	9
7 测量方法的选择 .....	9
附录 A (资料性附录) 回弹性材料的线性特性 .....	10
附录 B (资料性附录) 动态测试相关的 ISO 文件分析 .....	11
参考文献 .....	15

## 前 言

GB/T XXXXX 《机械振动与冲击 黏弹性材料动态力学性能表征》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 XXXXX 的第1部分。

本部分按照GB/T 1.1-2009给出的规则起草。

本部分使用翻译法等同采用国际标准ISO 18437-1:2012《机械振动与冲击 黏弹性材料动态力学性能表征 第1部分：原理和指南》（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，同济大学，上海交通大学等。

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、应变幅值和预应变。除了模量和损耗因子以外，泊松比有时也是黏弹性材料需要预测的关键力学属性。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。本部分的目的是概述黏弹性材料弹性模量和损耗因子的三种测量方法，以及两种测量泊松比的方法，同时介绍了每种方法所采用的测试装置、测量范围及其局限性。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表征

## 第1部分：原理和指南

### 1 范围

本部分为GB/T XXXXX 的第2至第6部分规定的隔振器常见各向同性黏弹性材料动态力学性能（即弹性模量、剪切模量、体积模量、损耗因子、泊松比）的实验室测量方法和数据采集分析方法确立基本原则。本部分同时也为各部分的合理选择提供指导。

本部分适用于隔振器设计中常见的各向同性回弹性材料，以减少：

- a) 可听频段振动向结构的传递，及其诱发的流体辐射声（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；
- c) 冲击和噪声的能量传递。

本部分概述的测量方法以及其他部分详细说明了测量方法所测得的数据，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。

### 2 规范性引用文件

下列文件对于本部分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部分。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本部分。

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 22159.2 声学 弹性元件振动 声传递特性实验室测量方法 第2部分：弹性支撑件平动刚度的直接测量方法（GB/T 22159.2-2012，ISO 10846-2:2008，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 22159.2、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 modulus

弹性模量 modulus of elasticity

$E$

法向应力与线性应变之比。

注1：杨氏模量单位为 Pa。

注2：黏弹性材料的复数杨氏模量  $E^*$  由  $E^* = E' + iE''$  表示，其中  $E'$  是杨氏模量的实部（弹性）分量， $E''$  是杨氏模量的虚部（损耗模量）分量。实部代表弹性储能能力，虚部是能量损失的度量。

## 3.2

损耗因子 loss factor

复数模量虚部与实部的比值。

注1：当材料简谐应力与应变存在相位差  $\delta$  时，损耗因子等于  $\tan \delta$ 。

## 3.3

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  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$  均成立，其中  $\alpha$ 、 $\beta$  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。

## 4 测量原理

## 4.1 一般原则

黏弹性材料的杨氏模量取决于频率和温度。各种振动模式、模量类型和常用测试装置的理论细节已在 GB/T 33061.1 和 GB/T 9870.1 中给出了充分说明，此处不再赘述。GB/T XXXXX 的第2至第4部分详细介绍了获取黏弹性材料相应动态力学性能的三种方法。由于各种测量方法优缺点互补，因此在本部分中对它们进行概述。其中，第4部分还包含了静态预载荷加载工况。第5部分介绍了一种通过对比测量值和有限元计算值确定材料泊松比的方法。上述四种方法仅限于小应变幅值线性力学行为的测量。第6部分介绍了采用上述测量方法时的最优数据采集分析方法。

上述测量方法的有效性条件是：

a) 隔振器的振动特性为线性行为；

注：所述隔振器的弹性元件，虽然可能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。

b) 隔振器与相邻振源及受振结构的接触面\*载荷是均布的；

c) 隔振器与周围的流体（通常是空气）介质之间无相互作用。

条件c) 可能不满足于开孔的孔隙弹性材料制成的隔振器，例如泡沫材料。当振动频率大于100Hz时，液固两相的相互作用足可以改变材料的刚性和能量损耗特性。

## 4.2 共振法

### 4.2.1 概述

在共振法中，试样的传递率（位移、速度或加速度）通过在隔振器输入端施加振源激励，输出端通过一质量加载而获得。振动幅值和相位信息、质量块的密度和长度是确定复数杨氏模量的必要数据。图1为该方法的测试原理。

### 4.2.2 测试设备

测试所需设备：

- a) 电动驱动器；
- b) 加速度计；
- c) 放大器；
- d) 试验台；
- e) 环境箱；
- f) 双通道频谱分析仪；
- g) 计算机。

### 4.2.3 试样制备和安装

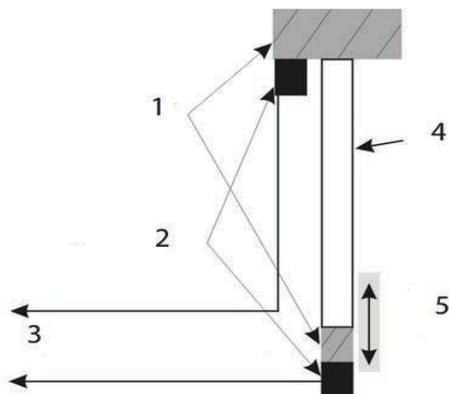
通常将试样模压成型为100mm长、横截面尺度为6mm至7mm的棒材。试样截面可为正方形或圆形。试样长度、密度和质量应在安装前予以确定。将试样粘接在固定块之间，并如图1所示安装好加速度计。粘接时可选择使用环氧树脂或氰基丙烯酸酯作为刚性粘合剂。将组装好的试样刚性安装在驱动器上，以便使试样产生纯拉伸波。

### 4.2.4 数据采集

通常情况下，驱动器施加的激励为随机信号，双通道频谱分析仪采集数据，执行快速傅立叶变换（FFT）分析并作平均。所获取数据包含试样组件中质量弹簧系统的响应特征，以及试样的波动效应。固定块的质量和试样尺寸应合理选择，以便使质量弹簧系统达到一阶共振状态。该一阶共振频率应与其高频波动效应显著区分，通常频率范围是100至5000Hz。

### 4.2.5 结果分析

复数杨氏模量的实部和虚部通过试样长度、质量和密度，以及波动方程的求解信息确定，波动方程由两个相互耦合的超越方程组成。采用牛顿-拉夫逊（Newton-Raphson）法对试验获取的共振参数（即传递函数的幅值、频率和阶数）进行数值求解。具体细节详见GB/T XXXXX的第2部分。



- 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 共振法测试原理

### 4.3 悬臂剪切梁法

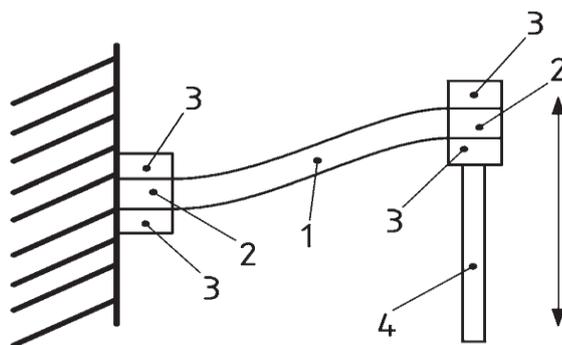
#### 4.3.1 概述

采用悬臂剪切梁法，试样一端刚性固定，在另一自由端施加激励使其发生弯曲或挠曲变形。为使试样达到特定的弯曲模式，需满足特定的边界条件和安装要求，详见GB/T XXXXX的第3部分。通过测量使试样产生位移的复数载荷，以及试样的复数位移响应，计算获取材料的复数模量。图2给出了测量原理。

#### 4.3.2 测试设备

测试所需设备：

- a) 电动驱动器；
- b) 力传感器；
- c) 位移传感器；
- d) 夹具；
- e) 环境箱；
- f) 计算机。



- 1 ——梁形试样；
- 2 ——试样固定块；
- 3 ——试样夹具；
- 4 ——驱动杆。

图2 悬臂剪切梁法示意图

#### 4.3.3 试样制备和安装

首先采用模压或浇铸方法制作一个所需厚度的整板，再用小带锯或剃刀从板上切割得到试样。根据经验，如果采用机械加工的方式从较厚的板材上制备得到试样，通常会影测试材料的力学性能。典型的试样尺寸宜为长度 $l=(12\pm 0.5)$  mm，宽度 $b=(10\pm 0.5)$  mm，厚度 $h=(3\pm 0.25)$  mm。试验中，将试样端部

粘接在钢制或铝制固定块上，便于夹紧试样。固定块尺寸通常为长度 $l=(6.4\pm 0.2)$ mm，宽度 $b=(11.0\pm 0.2)$ mm，厚度 $h=(4.0\pm 0.2)$ mm。粘接过程采用刚性粘合剂（例如环氧树脂、聚氨酯或氰基丙烯酸酯）完成。然后将试样安装在夹具中，以便使其产生如图2所示的变形。

#### 4.3.4 数据采集

安装试样前，先对激振器悬架系统的复数刚度进行测量，分别在有和没有固定块（此时固定块作为一附加质量）、低频和高频（一般采用1Hz和30Hz）激励下进行测试。确定了悬架系统的刚度后，如图2所示安装试样，对其进行测量。对试样施加载荷的频率为0.3Hz至30Hz范围内的多个离散点频率，试验温度根据测评需求选取，最大位移响应一般不超过 $64\ \mu\text{m}$ 。

#### 4.3.5 结果分析

悬臂剪切梁法测试设备的基本操作原则是，确定产生可测位移时所需施加的载荷大小。由于位移幅值取决于试样的模量，因此该值可通过动力学方程将载荷与位移进行关联计算获得，方程内包含系统刚度、粘滞阻尼系数、参振质量、试样几何尺寸和泊松比等参数。求解动力学方程可得弹性杨氏模量和损耗因子。具体细节详见GB/T XXXXX的第3部分。

### 4.4 动刚度法

#### 4.4.1 概述

动刚度是根据不同的测试装置，通过测试试样一端的输入力和同一端或另一端的动态响应位移、速度或加速度来获得的。两个测量值之间的幅值和相位关系，以及试样的几何尺寸是计算复数模量的必要数据信息。采用不同的实验室测试装置，可以测量表征材料属性的三种不同模量：杨氏（ $E$ ）、剪切（ $G$ ）和体积（ $K$ ）模量。在某些情况下，还可将材料试样放置在夹具中，通过力作动器使其产生静态预应变，在此基础上进行复数模量的测试。图3给出了动刚度法的测试原理，通过施加合理的载荷激励，同时利用测力仪和应变计，测量动态作用力和响应应变，从而计算获取上述三种模量。

#### 4.4.2 测试设备

测试所需设备：

- a) 电动驱动器；
- b) 加速度计或位移传感器；
- c) 放大器；
- d) 试验台；
- e) 环境箱；
- f) 双通道频谱分析仪；
- g) 计算机。

#### 4.4.3 试样制备和安装

将试样制成不同的特定形状，以适用于不同测试条件。试样横截面可以是正方形或圆形，安装前应确定试样的尺寸、密度和质量。试样应粘接在金属板上，以确保其产生合理的变形，可选择使用环氧树脂或氰基丙烯酸酯等刚性粘合剂。试样尺寸的选择应使其在所关注的全频范围内完全呈现出黏弹性能。上述内容基于以下假设：试样质量可忽略，即试样的一阶固有频率比测量频率上限大3到5倍。

#### 4.4.4 数据采集

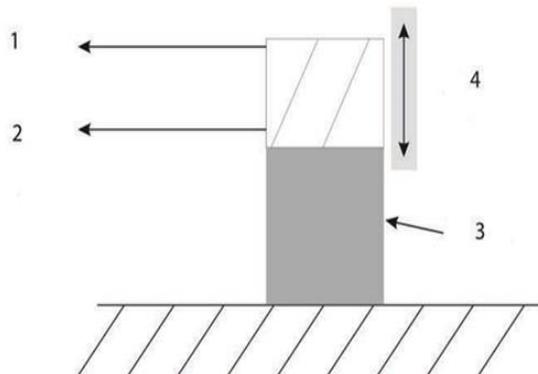
利用测力仪测量所施加的随机激励信号，应变传感器记录试样的响应数据，通过双通道频谱分析仪对测量数据进行FFT分析并作平均。每一种测试工况，均应首先校准测试设备，确定设备本身的动刚度信息，并将其影响在最终的测量结果分析中加以考虑。

#### 4.4.5 结果分析

当采用上述某种测量方法时，复数弹性模量的一般表达形式为：

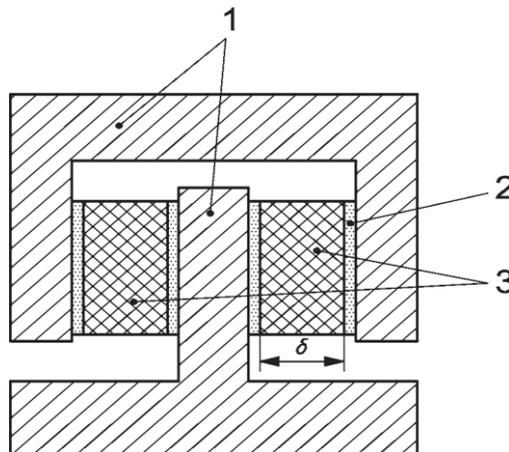
$$E^*(f), G^*(f), K^*(f) = \alpha_{E,G,K} \frac{F(f)}{\delta(f)} \dots\dots\dots (1)$$

式(1)中 $\alpha_{E,G,K}$ 是试验测得的被测材料复数模量与相应应变模式（轴向拉伸、剪切、体积压缩）下被测试样刚度的比值，该比值取决于测试装置和试样的几何尺寸，而 $F(f)/\delta(f)$ 是输出力与作动位移的复数频域比。具体细节详见GB/T XXXXX的第4部分。



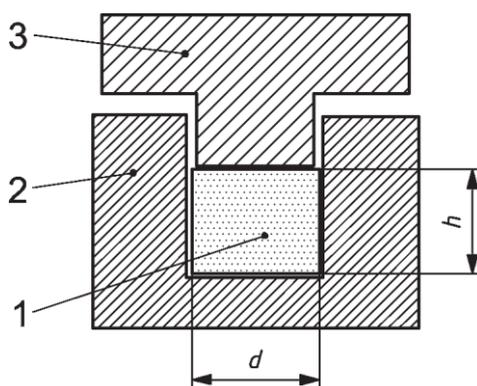
- 1 ——力输出；
- 2 ——加速度输出；
- 3 ——试样；
- 4 ——振动方向。

a) 杨氏模量



- 1 ——夹具；
- 2 ——金属板；
- 3 ——试样；
- δ ——厚度。

b) 剪切模量



- 1 ——试样；  
 2 ——支座；  
 3 ——活塞；  
 $d$  ——直径；  
 $h$  ——高度。

c) 体积模量

图3 动刚度法示意图

## 4.5 泊松比的估计

### 4.5.1 概述

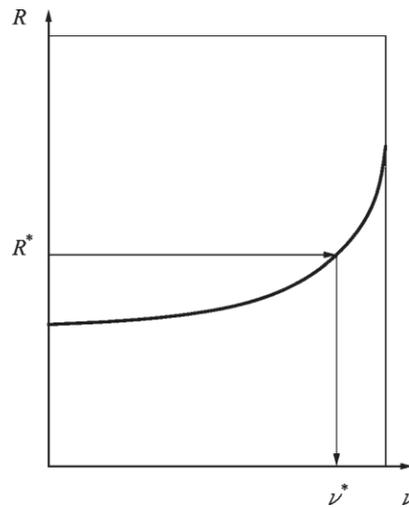
虽然精确的弹性模量和损耗因子数据已能够满足诸多声学或振动问题的研究需要,但在进行有限元数值分析时通常还需要准确的泊松比值。由于实际情况中大多数数值预测是针对复杂几何元件进行的,因此本方法的目的是通过将测得的力-变形曲线数据与数值计算得到的泊松比的函数做比较分析,从而确定泊松比值。

### 4.5.2 测量原理

GB/T XXXXX的第5部分采用一种准静态的方法对泊松比进行估算,该方法的基本原理是:圆盘试样的压缩刚度是泊松比和/或弹性模量的函数,其测量值与试样的轴对称有限元计算值相同。测量和数值预测结果均表明,当圆盘试样的底部和顶部粘接在两个刚性金属板上,且受到轴向压缩时,试样会沿周向发生鼓胀。测量过程选择单试样或双试样测量方法,取决于所测目标参数仅为泊松比一个参数,还是泊松比和弹性模量两个参数。

### 4.5.3 单试样测量方法

该方法的关键点和步骤是,首先通过有限元计算对一个具有较大形状因子的圆盘试样,绘制其无量纲刚度-泊松比曲线图,再通过激振试验测量该试样的实际刚度值,最终根据所测刚度在曲线中对应找出相应的泊松比,详见图4。

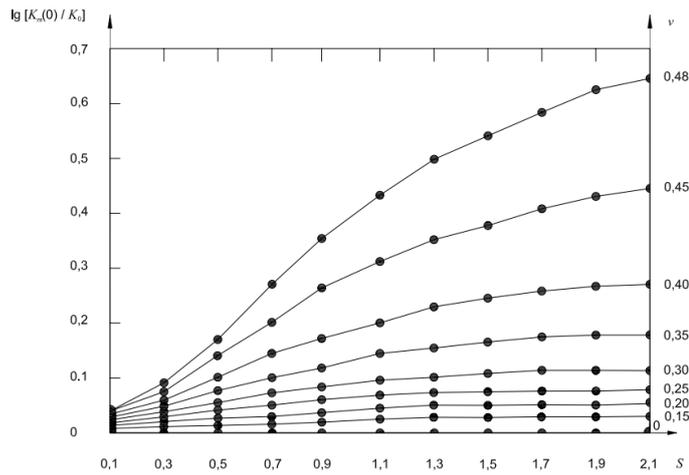


- $R$  ——刚度/无量纲；
- $R^*$  ——刚度测量值；
- $\nu$  ——泊松比；
- $\nu^*$  ——与  $R^*$  相对应的泊松比。

图4 有限元计算得到的泊松比的刚度函数  $R(\nu)$  曲线图

#### 4.5.4 双试样测量方法

该测量方法的事实依据是，表征杨氏模量与真实杨氏模量的比值等于圆盘试样的刚度与长圆柱形试样的刚度之比。该比值可表示为泊松比或形状因子的多项式函数，多项式系数由该函数所选自变量以外的另一个参数确定。图5给出了一个有限元法(FEM)算例的计算结果。只要对两个相同材料（杨氏模量和泊松比相同）但不同形状因子的试样进行测试，获取上述比值，再通过相同材料的杨氏模量相等而等化两个多项式，即可求解泊松比值。最终用试验获取的表征杨氏模量除以多项式函数值计算获得杨氏模量。具体细节详见GB/T XXXXX的第5部分。



- $\lg[K_m(0)/K_0]$  ——静态压缩刚度比；
- $S$  ——形状因子；
- $\nu$  ——泊松比。

图5 归一化静态压缩刚度比与形状因子和泊松比的有限元法(FEM)计算关系曲线

## 5 时温叠加

有限频率范围内的测量结果可通过采用时间-温度叠加原理进行频率范围扩展，详见GB/T XXXXX的第2至第3，以及第6部分。

## 6 试样调理

试样在成型或硫化后应充分熟化。在每个测试温度下使试样达到温度均匀。另外，应注意材料对湿度的敏感性。试样调理及测试温度、湿度和次数的确定参照GB/T 2941执行。

## 7 测量方法的选择

表1提供了从GB/T XXXXX的第2至第4部分中选择适当测量方法的指导意见。

泊松比可通过动刚度法测量体积模量、剪切模量或杨氏模量来确定，或参照GB/T XXXXX的第5部分所介绍的动刚度有限元（FEM）法计算得到。方法选择很大程度上取决于材料的刚度和测量中的不确定性因素。

表1 测量方法选择指南

	共振法	悬臂剪切梁法	动刚度法
频率范围 / Hz	100~5000	0.01~50	1~10000
形变模式	拉伸	挠曲	杨氏、剪切、体积
典型试样尺寸 / m <sup>3</sup>	0.006×0.006×0.1	0.003×0.01×0.012	因测试设备和模量值而异
材料种类	橡胶、塑料、聚氨酯	橡胶、塑料、聚氨酯	橡胶、塑料、聚氨酯
杨氏模量范围 / MPa	0.1~1000	0.1~1000	0.1~20000
损耗因子范围	0.01~2	0.01~2	0.01-2
蠕变敏感性	低	非常低	低
预载荷	有限	没有	某些形式适用
注：通过采用时温叠加原理，可以扩展测量的频率范围。			

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<sup>[3]</sup>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 $10^{-3}$ 时，同相分量和相位角几乎不随振幅变化。然而，但动态应变幅度大于约 $2 \times 10^{-3}$ 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 $10^{-3}$ 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。

有时即使不满足线性假设，仍然宜采用ISO 10846的相关条款<sup>[1]</sup>。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）

### 动态测试相关的 ISO 文件分析

#### B.1 文件综述

##### B.1.1 概述

有许多ISO文件给出了在特定边界条件下试样产生周期变形时的动态力学性能的测试方法。将已知几何形状的试样放置在特定测试设备中，可保证试样发生预期的振动模式。形变模式、边界条件和振动模式将共同决定确定弹性模量的动力学方程。测试设备通常包括一组夹具或固定块、用于在试样一端施加激励使其发生所需振动的驱动设备、通常在试样加载另外一端用于测量应力应变响应的测试设备，以及控制测试温度的环境箱。由于试样形状因所选择的测量方法而异，因此每种测试方法都不能满足所有的测试要求和测试条件。有的方法需要用夹具夹紧试样，因而更容易产生因边界被夹紧而导致的测量误差和操作差异性。而有的方法无法使试样产生基本的形变模式，因此计算过程中需要对弯曲、剪切应变和扭转效应进行校正。最后，振动模式可以是强迫振动、共振或自由衰减振动。以下是从橡胶和塑料材料测量方法的角度对ISO文件进行的简单梳理。

##### B.1.2 TC 45/SC 2 测试及分析

###### B.1.2.1 ISO 4664-1: 硫化橡胶或热塑性橡胶动态性能的测定 第1部分: 通则

规定了自由振动和强迫振动两种振动模式的测量方法通则，及其运动方程。考虑不同形变模式，总结概括了测量方法。

###### B.1.2.2 ISO 4664-2: 硫化橡胶或热塑性橡胶动态特性的测定 第2部分: 低频扭摆法

该方法中，具有固定横截面的长条形材料试样，一端加以固定，另一端附着质量块，自由端输入激励使试样发生扭摆运动并自由衰减。振动周期及其衰减特性用于确定剪切模量。该方法适用于在较宽的温度区间内测量材料的橡胶态转变区。测试频率为低频段，一般在0.1至10Hz范围内，测试频率应根据测试温度适当调整。ISO 4664-2规定的测量方法与ISO 6721-2 (B.1.3.5) 规定的塑料的测量方法类似。

##### B.1.3 TC 61 / SC 2 机械性能

###### B.1.3.1 ISO 458-1: 塑料 柔性材料扭曲刚度的测定 第1部分: 通用方法

规定了测定柔性塑料在各种温度下扭曲刚度的通用方法，尤其是在低于0℃的情况下。在任意固定加载时间后，通过特定的测试装置，观察被测件的扭转力矩和扭转角。

###### B.1.3.2 ISO 458-2: 塑料 柔性材料扭曲刚度的测定 第2部分: 适宜于氯乙烯的均聚物和共聚物的增塑物

这是通用方法的一种特殊情况，适用于扭转角在55°和65°之间，且扭曲刚度为300MPa、23MPa和4MPa三个特定值的情况。

###### B.1.3.3 ISO/TR 4137: 塑料 弹性模量的交替弯曲测量方法（废止）

使用萨伐尔 (Savarts) 摆测定杨氏模量。该方法适用于所测模量大于1500MPa, 可通过在1mm至5mm厚的整板上切割获得试样的材料。作为两个摆锤的支撑件, 试样的弹性性能用于将能量从一个摆锤传递至另一个摆锤。驱动摆锤的振幅逐渐减小, 直至最终停止。试样发生交变弯曲变形, 摆锤从开始振动到首次停止振动所用的时间为半个振荡周期, 该周期为试样轴向 (杨氏) 弹性模量的函数。

#### B. 1. 3. 4 ISO 6721-1: 塑料 动态力学性能的测定 第1部分: 通则

规定了各种测试方法中通用的术语, 对模量、振动模式和形变模式之间的关系进行了详细介绍, 还对常用的测试装置进行了简图介绍。ISO 6721-1与ISO 4664-1 (B. 1. 2. 1) 对橡胶的相关规定相似。

#### B. 1. 3. 5 ISO 6721-2: 塑料 动态力学性能的测定 第2部分: 扭摆法

具有固定截面的长条形材料试样, 一端予以固定, 另一自由端附着质量块, 使其发生扭转变形并做自由衰减振动。振动周期及其衰减特性将用于确定剪切模量。该方法主要用于在较宽的温度区间测量橡胶态转变区间。测试频率为低频段, 一般在0.1至10Hz范围内, 测试频率应根据测试温度适当调整。ISO 6721-2与ISO 4664-2 (B. 1. 2. 2) 对橡胶的相关规定相似。

#### B. 1. 3. 6 ISO 6721-3: 塑料 动态力学性能的测定 第3部分: 弯曲振动 共振曲线法

使试样发生弯曲变形, 通过试验获取的共振曲线确定弯曲模量。根据共振峰的频率带宽确定共振频率和试样参数, 从而确定储能模量和损耗模量。该标准介绍了两种测试装置, 以实现两种振动模式, 测试频率范围为10Hz至1000Hz。ISO 6721-3:1994的附录A给出了三种塑料的循环试验结果。

#### B. 1. 3. 7 ISO 6721-4: 塑料 动态力学性能的测定 第4部分: 拉伸振动 非共振法

试样两端用夹具夹紧, 对其中一端施加强迫非共振位移, 另一端与测力计和一固定支座相连。利用力传感器在低于试样主共振频率以下频率区间进行测量。需要对夹具引起的测量误差进行校正。由于该方法中试样两端均为刚性边界, 其自由振动受阻, 因此该方法也称为直接法, 而间接法通常试样一端可发生自由振动。

#### B. 1. 3. 8 ISO 6721-5: 塑料 动态力学性能的测定 第5部分: 弯曲振动 非共振法

试样两端为简支或采用夹具固定, 中心部位发生振动。在中心位置测量力和位移, 用于计算表征杨氏模量, 进一步通过校正获取真实模量。该方法的测试频率与典型的动态力学分析 (DMA) 试验频率范围一致, 即0.01Hz至100Hz, 尽管后者的振动模式是悬臂剪切变形, 与本方法不同。

#### B. 1. 3. 9 ISO 6721-6: 塑料 动态力学性能的测定 第6部分: 剪切振动 非共振法

同一试样的中部与一可振动的中心支架相连接, 两端固定在刚性构架上。只有当试样厚度远小于运动方向的长度尺寸时, 才能保证试样发生简单剪切变形。试验测得的力和位移数据可直接用于确定剪切模量。该部分规定的测量方法与ISO 18437-4 (动刚度法) 相似。

#### B. 1. 3. 10 ISO 6721-7: 塑料 动态力学性能的测定 第7部分: 扭转振动 非共振法

该方法不同于ISO 6721-2和ISO 4664-2规定的测量方法。对一短杆或矩形棒体进行正弦扭转加载, 扭转位移幅值将用于确定剪切复数模量。试样需采用夹具夹紧, 增加了测试难度, 但该测量方法适用的频率范围大于前文所述扭摆法, 与动态力学分析 (DMA) 试验频率范围相近。

#### B. 1. 3. 11 ISO 6721-8: 塑料 动态力学性能的测定 第8部分: 纵向剪切振动 波传导法

测量超声波脉冲的传播时间，根据声传播速度确定模量。该方法需适用于尺寸较大的试样。该方法可通过直接附着适合的传感装置获取数据，也可通过油浸法进行。为获得纵向模量，需要测试法线入射方向数据。为获取剪切模量，将试样旋转至最佳位置以观察剪切波的传播，记录传播时间和角度，从而确定模量。该方法的测试频率为超声波频率范围，一般由0.5MHz至5MHz。

#### B.1.3.12 ISO 6721-9: 塑料 动态力学性能的测定 第9部分: 拉伸振动 声速脉冲传播法

使声波脉冲沿薄膜、细纤维或长条形试样传播，所测得的脉冲到达时间作为距离的函数将用于确定杨氏模量，其中传播距离的曲线斜率决定了传播速度。该方法适用的频率范围通常为3kHz至10kHz，且该方法更适用于低阻尼材料。

#### B.1.3.13 ISO 6721-10: 塑料 动态力学性能的测定 第10部分: 使用平行平板振荡流变仪测定复数剪切黏度

规定了确定聚合物熔体剪切模量的方法。薄熔体试样在两个同心圆形平行平板之间，承受正弦扭矩，或迫使其产生角位移，模量通过扭矩和角位移确定。

#### B.1.3.14 ISO 6721-12: 塑料 动态力学性能的测定 第12部分: 压缩振动 非共振法

半刚性塑料细长试样的动态力学性能测试，可通过在显著低于基频谐振的频率区间进行非共振压缩振动试验完成。

### B.2 优缺点分析

此处总结了上述文件中所规定测量方法的优缺点：

- a) 剪切模量的最直接测量方法是使试样发生非共振剪切强迫振动。与其他形变模式相比，剪切形变可在更大的形变幅值下保持线性应力-应变关系。但是，试样必须牢固粘接在试验夹具上。
- b) 压缩试验通常需要较高负荷的试验机，并且应对试样形状因子带来的测试误差进行校正。该试验是许多实际服役加载状态的典型工况。
- c) 弯曲和扭转测试通常所需负载较小，但测得的数据范围有限，且精度不高。
- d) 大剪切形变和压缩形变试验，以及需要施加预载荷的情况，一般需要较高负载能力的测试装置。
- e) 测量材料的力学性能表征参数时，试样的形变模式最好与所需测得的模量类型保持一致。
- f) 扭转变形的自由振动测量仅限于低频范围，且通常仅能提供定性分析数据。
- g) 对细杆试件进行多共振频率测试，可获得较宽的数据范围，可用于绘制标准主曲线。
- h) 采用自动扫频和温度扫描功能进行动态力学分析（DMA），是最方便的材料测评方式。
- i) 获取泊松比的最佳方法，是同时测量材料的体积模量和剪切（或杨氏模量），或结合使用 ISO 18437-5 中规定的有限元方法（FEM）来实现。FEM 方法不适用于刚性材料。

### B.3 材料力学性能表征

此处总结了材料力学性能的表征方法：

- a) 共振法是测量杨氏模量的最佳方法；
- b) 简单剪切形变试验是测量剪切模量的最佳方法；
- c) 动态力学分析（DMA）仪可提供简单方便的自动化测试；
- d) 体积模量的测试需要测试设备具有较高的负载能力；

- e) 泊松比可以通过同时测量材料体积模量和剪切模量，或与有限元计算做比较分析（ISO 18437-5）来确定；
- f) 压缩试验可以更好地描述实际服役状态下的弹性元件的压缩特性。

参 考 文 献

- [1] ISO 10846(all parts), Acoustics and vibrations — Laboratory measurement of vibro-acoustic transfer properties of resilient elements
- [2] ISO 80000-4:2006, Quantities and units — Part 4: Mechanics
- [3] Freakley P.K., Payne A.R. Theory and practice of engineering with rubber. London: Applied Science Publishers, 1978, 666 p.
-