

中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—XXXX/ISO 18437:6-2017

机械振动与冲击 黏弹性材料动态力学特性的表征 第6部分：时温叠加

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

Part 6: Time-temperature superposition

ISO 18437-6:2017 IDT

(征求意见稿)

(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	III
引言	IV
1 范围	1
2 规范性引用部分	1
3 术语和定义	1
4 黏弹性性能全频带范围预测与数据描述	2
4.1 时温叠加原理	2
4.2 数据采集	3
4.3 移位	4
5 验证	5
6 不确定性的主要来源	5
6.1 总体	5
6.2 等温线段之间重叠的宽窄度	5
6.3 在线段中存在较大的实验误差(超过 10%)	5
6.4 低密度实验数据点的线段	5
6.5 输入数据排列不当-线段中存在“末端效应”	5
6.6 参考温度的选择	5
7 结果处理	5
7.1 数据呈现	5
7.2 测试报告	6
附录 A (资料性附录) 封闭形式移动方法	7
附录 B (资料性附录) 储能模量主曲线构造实例	11
参考文献	21

前 言

本文件按照GB/T1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件是GB/T×××××《机械振动与冲击 黏弹性材料动态力学性能的特征》的第6部分。

GB/T×××××《机械振动与冲击 黏弹性材料动态力学特性的特征》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。

本文件使用翻译法等同采用国际标准ISO 18437-6:2017《机械振动与冲击 黏弹性材料动态力学性能的特征 第6部分：时温叠加》(英文版)，在技术内容上与国际标准完全相同。

为便于使用，本文件做了下列编辑性修改：

- “本文件”代替“ISO 18437 的本部分”；
- 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；

本文件的附录A和附录B均为资料性附录。

本文件由全国机械振动、冲击与状态监测标准化技术委员会(SAC/TC53)提出并归口。

本文件起草单位：×××、×××、×××、×××、×××、×××、×××。

本文件主要起草人：×××、×××、×××、×××、×××、×××、×××。

引 言

黏弹性材料广泛用于通过耗散能量（阻尼）或隔离组件来降低结构系统中的振动幅度，以及在声学应用中需要修改能量的反射，透射或吸收的情况。此类系统的设计，建模和表征通常需要特定的动态机械性能，才能以最佳方式发挥作用。对于大多数黏弹性材料，这些属性取决于所施加激励的频率，温度和幅度。本文件的目的是提供有关后续处理的最佳数据采集方法的详细信息，并为使用时温叠加原理进行分析提供一个标准方法。本文件适用于小应变（应力）幅值范围的线性力学行为以及热流变简单的材料。

本文件提出了一种检查材料热流变简单有效性的方法，并用于识别和消除可疑数据。此方法提供了用于数学方法学中的数据采集的最低标准，该标准允许根据时温叠加（TTS）原理将在不同温度下测量的动态粘弹特性的多个数据集转换为单个主曲线。当获得足够的数据或可用数据时，则定义了一种标准方法，该方法使用封闭形式的移位算法^{[16][17]}。

TTS是加速预测材料长期黏弹性行为的最广泛的方法^[13]。在频域中，TTS可用于预测材料在实验上无法评估的频率下的行为。

机械振动和冲击 黏弹性材料动态力学性能表征

第6部分：时温叠加

1 范围

本文件及GB/T×××××的第 部分详细测量的方法和数据采集分析方法，可用于：

- 隔振器的设计；
- 最优回弹性材料的选取；
- 隔振器振动传递率的理论计算；
- 产品研发所需的信息；
- 生产商和供应商提供的产品信息；
- 产品质量控制。

注1：本文件中“动态力学性能”系指随温度和频率变化的复数杨氏模量等基本弹性特性，还包括随静态预载荷变化的特性。

2 规范性引用部分

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文件。

3.1

动态黏弹性函数 dynamic visco-elastic function

基本黏弹性性质，即在拉伸、剪切和压缩中测量的储能模量和损耗模量，以及作为频率和温度函数的损耗因子。

3.2

储能模量 storage modulus

M'

系指复数模量的实部

注1：在循环加载过程中储存和恢复能量的一种度量。

注2：拉伸、剪切和压缩的储能模量分别表示为 E' ， G' ，和 K' 。

注3：单位为帕斯卡（Pa）。

3.3

损耗模量 loss modulus

M''

系指复数模量的虚部

注1：在循环加载过程中能量损失(耗散)的度量。

注2：拉伸、剪切和压缩的损耗模量分别表示为 E'' ， G'' ，和 K'' 。

注3：单位为帕斯卡（Pa）。

3.4

损耗因子 loss factor

$\tan \delta$

系指在拉伸、剪切、压缩或纵向压缩时损耗模量(3.3)与储能模量(3.2)之比。

注1：损耗因子由 $\tan \delta = M''/M'$ 得出。

3.5

时温叠加 time-temperature superposition

TTS

系指通过不同温度下测得的模量曲线（或损耗因子）沿频率轴平移，能得到黏弹性材料在参考温度下模量（或损耗因子）的主曲线，即时间和温度的等效性。

注1：在动态测量的情况下，术语“频率-温度叠加”将更准确，但使用较少。术语“折算变量方法”也用于指代该原理。

3.6

热流变简单材料 thermorheologically simple materials

系指适用于时温叠加的材料

注1：由于多次相变或结晶的复杂的热流变材料不能叠加。

注2：在热流变学复杂体系中，在一定温度下的所有弛豫时间与在不同温度下的弛豫时间不能简单地以一个常数比联系起来。因此，如果各个位移因子（3.7）取决于时间和温度，则多相系统在热流变学上是复杂的。

3.7

移位因子 shift factor $\lg a_T$

系指模量曲线(或损耗因子)沿以10为底频率的对数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。

注1: “移位因子”通常是指水平移位因子。

3.8**垂直位移因子 vertical shift factor** $\lg b_T$

系指模量曲线沿以10为底模量的对数坐标轴移位的量度, 以考虑从参考温度到感兴趣温度的变化的影响。

3.9**主曲线 master curve**

系指由时温叠加(3.5)构成的曲线, 该曲线与在实验温度条件下较宽频率范围内发现(测量)的材料行为相同。

4 黏弹性性能全频带范围预测与数据描述**4.1 时温叠加原理**

TTS是快速预测材料完整黏弹性行为的最广泛的方法^[13]。TTS的应用如下: 在不同的恒定温度下, 在给定的短帧频率(通常称为实验窗口)下进行一系列动态力学实验。因此, 获得了一组动态黏弹性函数的等温线段。等温线段首先垂直移动以考虑温度和密度变化, 然后沿对数频率尺度水平移动到参考温度 T_R 下测得的参考线段。由TTS构造的曲线称为主曲线。TTS表明: 如果在参考温度下以宽频率范围进行测量, 得到的主曲线与材料的行为相同。将TTS应用于在合理实验频率范围内测得的等温线段是一种在宽频率范围内获得材料行为的方法。

注1: 损耗因子, 即损耗数据与储能数据之间的比率, 不需要垂直移位^[17]。

TTS的适用性有几个标准^[13]。

- a) 不同温度下的等温线的形状应在相当大的频率范围内相匹配。
- b) 所有的动黏弹性函数均应采用相同的位移因子值 a_T 。
- c) a_T 温度依赖性是温度的平滑函数, 没有明显的波动或不规则性。

注2: 位移函数 a_T 的温度依赖性通常采用时温叠加模型, 例如 Arrhenius^[14]或 Williams-Landel-Ferry (WLF)^[13]来模拟。

4.2 数据获取**4.2.1 新数据**

新数据的获取应足够详细, 有足够的温度和频率, 以便在从一个温度转移到另一个温度时提供足够的频率数据点重叠。高质量数据的一个示例是动态机械分析仪(DMA)在每5℃采集一次, 频率为0.1; 0.2; 0.3; 0.5; 1; 2; 3; 5; 10; 20; 30 Hz, 或者相邻等温线之间的动态数据在对数频率轴相差10倍。

理论上，TTS不局限于实验窗口的任何频率范围。但是，频率范围的选择应符合测量仪器的其他现有标准和能力。

温度范围应根据实验装置的性能来确定，并考虑到最高温度应限于样品仍保持其几何形状的温度，即不因其自身重量而改变几何形状。

4.2.2 现有数据

如果现有数据符合4.2.1的准则，则可采用与新数据相同的方法处理。如果数据是等时的或者没有足够的重叠，则应按照本文件的要求进行相应的实验。

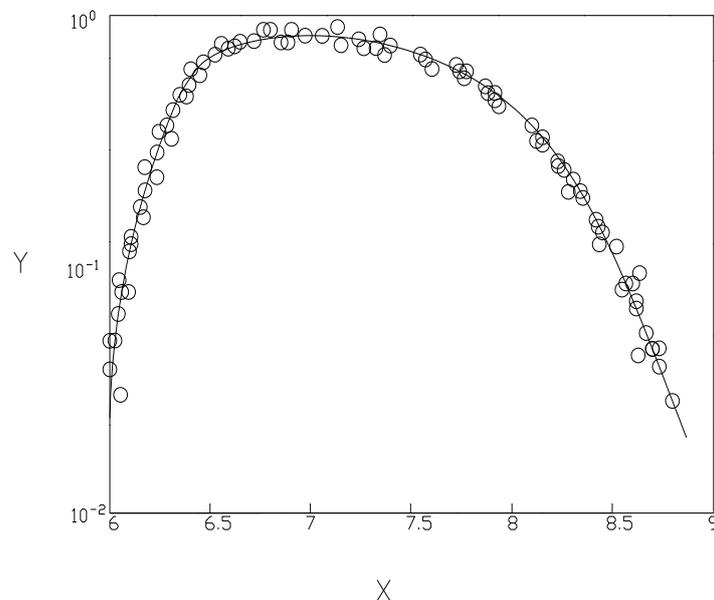
如果这无法实施，那么可以使用不属于本文件任何一部分的替代方法^[15]，但这不应解释为本文档的一部分。

4.2.3 数据分散和简单热流变性的测定

如果材料是简单热流变性的材料，则 α_T 是温度的平稳函数，没有明显的波动或不规则性，并且在整个频率和温度频谱中只有一个过渡。损耗因子与储能模量的关系图(称为wicket图)将是一个简单的平滑曲线，通常呈倒“U”形曲线。

注 1：如果聚合物中有多个温度转变，但都具有相同的位移函数 α_T ，那么所有的温度和频率数据仍然会减少到一条三柱图曲线，但这条曲线不会是一个简单的倒“U”。小柱图应使用作为实验数据散度的定量表示。数据频带的宽度，以及各个点从频带中心的偏离，表示散点。从平滑小柱图带中被充分移位的单个点应被移除，或应重复该数据以确定其有效性。关于温度和频率数据的准确性或任何系统错误，没有任何信息被披露。

图1是wicket图的示例。



X ——杨氏模量的对数，Pa

Y ——损耗因子

图1 计算机生成的高损耗材料数据的 Wicket 图，模量最大误差 10%和损耗因子最大误差 10%。

4.3 移位

4.3.1 垂直移位

储能模量和损耗因子数据要先垂直调整，然后水平移动。

通常，对于固体黏弹性材料，垂直移位很小，通过TTS形成主曲线时可能会被忽略^[14]。然而，对于某些黏弹性材料和/或某些测试条件，如较宽的温度范围，动态黏弹性函数的垂直调整可能很重要。缺乏实施垂直移位会导致在较宽频率范围内对性能的预测出现重大错误。因此，应在任何水平移动前进行垂直移动。

4.3.2 水平移位

只要有足够的数据可用于此方法，就应使用用于计算水平移位因子的封闭形式移位(CFS)算法。该方法基于以下假设：当两个相邻线段之间的重叠面积为零时可以重叠。

该方法的详细信息超出了本文件的范围，但在附录A和附录B中提供。

4.3.3 动态黏弹性函数主曲线

TTS 的适用性准则b)意味着水平移位因子由一个函数定义(见4.1)。由于储能模量的测量通常比损耗模量或损耗因子更准确，而且散度更小，因此TTS应选择储能模量。由4.3.2确定的水平移位因子适用于其他动力黏弹性函数的位移，如损耗模量和损耗因子(参见ISO 18437-2和ISO 18437-3)。需要考虑的是，损耗模量与储能模量一样，需要垂直移动。

储能模量的主曲线基于不同温度下测量的数据通过以10为底的对数坐标绘制 $b_T M'$ 与 $a_T \omega$ 获得。

注意当储能模量基本上是平的时候，损耗模量或损耗因子可以提供更准确的移动。相应的公式在参考文献^[17]中可用，但不属于本文件的一部分。

5 验证

检查数据一致性应通过绘制损耗因子与储能模量的对数量级，而不考虑温度或频率，以验证它是单一平滑的数据带。

需要移动的动黏弹性函数段应符合4.1中的TTS准则。如果由于任何原因违反了标准，则应拒绝采用4.1中所述的简单形式的TTS；如果没有对数据进行更复杂的分析的情况下不得绘制主曲线^[13]。

6 不确定性的主要来源

6.1 总体

移位过程的不确定性(不是实验技术的不确定性)主要是由于实验本身的缺陷，如试样制备或试样处理不当，样品夹持不良，实验执行不当或数据预处理不当，导致测量段出现异常。

6.2至6.6描述了不确定因素的主要来源

6.2 等温线段之间重叠的宽容度

当实验得到较窄的重叠线段时，移位可能会导致主曲线和/或移位因子精度较低不高。在这种情况下，建议重新建立能够产生令人满意的重叠段的实验程序(见4.2.1)。

6.3 在线段中存在较大的实验误差(超过10%)

由于主曲线通常由多条曲线组成，因此累积误差将是各分段移位误差的总和。在实验误差较大的情况下，得到的主曲线会比原始曲线有更大的误差。因此，建议重新建立或改变选定的实验程序，以产生可接受的片段，即较小的实验误差。

6.4 低密度实验数据点的线段

由于线段中基准点数量较少，导致线段之间重叠的近似性较差。建议重新建立或改变所选择的实验步骤，以产生足以描述单个线段的所有特性的基准点数目。

6.5 输入数据排列不当-线段中存在“末端效应”

当实验得到的线段在开始和/或结尾有某些异常(有“末端效应”的段)时，比如由于^[18]局部过热或^[19]惯性效应，有必要在应用移位程序之前消除这些异常。是排除整个部分，还是只排除有代表性的“末端效应”的部分，这是一个重要的判断问题。

6.6 参考温度的选择

当选择一个中心段作为参考段时，将获得最可靠的主曲线。当数据移动时，从一个段到另一个段的误差积累可以解释这一点。

7 结果处理

7.1 数据呈现

7.1.1 本文件中获得的数据应按照 7.1.2 至 7.1.6 的规定，以若干图表和表格的形式呈现。

7.1.2 移位前原始线段的图形，储能模量以双对数（以 10 为底）坐标系表示，损耗因子以半对数（线性-对数）坐标系表示。

7.1.3 在选定的参考温度下绘制主曲线图时，模量采用以 10 为底的双对数坐标系表示，损耗因子采用半对数（线性-对数）坐标系表示。

为了提高均匀性并易于在参考温度以外的温度下解释数据，建议将储能模量、损耗模量和损耗因子的主曲线以列线图的形式表示。

7.1.4 表中包含

- a) 每个线段以 10 为底水平位移因子的对数。
- b) 每个线段以 10 为底垂直位移因子的对数。

7.1.5 在选定的参考温度下，以 10 为底的水平位移因子的对数随温度变化的图。

7.1.6 在选定的参考温度下，以 10 为底的垂直位移因子的对数随温度变化的图。

7.2 测试报告

测试报告应包括以下信息：

- a) 本文件的引用；
- b) 被测材料的型号、来源、生产商编号、形式等必要信息，以及预处理历史等其他已知信息；
- c) 用于输入数据测量的方法、样品几何形状和准备的所有细节；
- d) 输入数据中估计的误差水平（不确定性）；

- e) 原始数据表;
- f) 有关数据处理的详细信息 (如果已执行), 例如 消除不良的输入数据;
- g) 生成主曲线的参考温度;
- h) 7.1 所描述的图与表;
- i) 实施移位程序的日期。

附 录 A
(资料性附录)
封闭形式移位方法

A.1 垂直转移

垂直位移因子 b_T 以式(A.1)所示的比值表示:

$$b_T = \frac{\rho T}{\rho_R T_R} \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

T ——目标温度(K);

T_R ——参考温度(K);

ρ ——目标温度下聚合物的密度(kg/m³);

ρ_R ——参考温度下聚合物的密度(kg/m³);

在密度比未知的情况下,垂直位移因子的定义如式(A.2)所示:

$$b_T = \frac{T}{T_R} \dots\dots\dots (A.2)$$

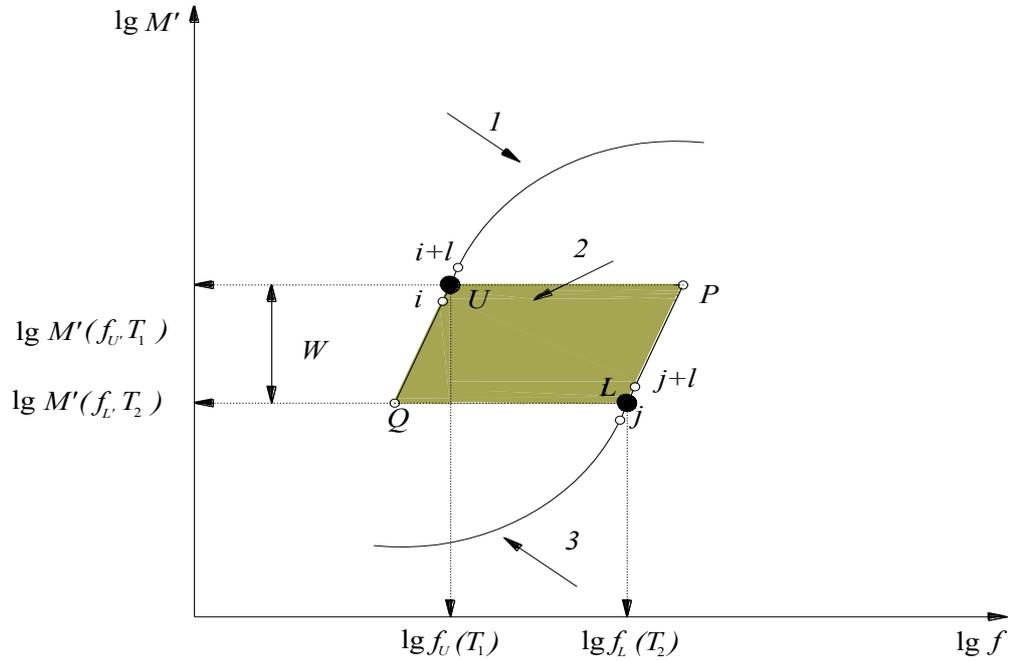
A.2 两段水平移动

计算水平位移因子的 CFS 方法是基于这样一个假设:当相邻的两个区段之间的重叠区域等于 0 时^{[16][17]}可以叠加。重叠区域是两个相邻段之间的区域,以线段的重叠部分的左右边为界,从顶部和底部以连接相邻线段重叠部分的起点和终点的水平线为界(图 A.1 中的阴影区域, $A(T_1, T_2)$)。

当储能模量线段满足 4.1 中 TTS 标准时,重叠区域的宽度 W (图 A.1)不小于 $\lg[(l + \varepsilon)/(l - \varepsilon)]$, 其中 ε 为估计实验误差^{[16][17]}。

在 T_1 和 $T_2 > T_1$ 两个相邻温度下测得的单调递增储能模量段的原理如图 A.1 所示,每段的基准点分别为 N_1 和 N_2 。

根据 TTS,为了构造参考温度 $T_R = T_1$ 下的主曲线,需要将 $T_2 > T_1$ 处测得的线段沿对数频率轴向左平移,从而得到光滑的曲线(见 4.11)。



- 1 ——参考温度下测量的储能模量段, T_1
- 2 ——段间重叠区域, $A(T_1, T_2)$
- 3 ——在温度下测量储能模量段, $T_2 > T_1$

注: 符号 $\lg f(T_i)$ 表示在温度 T_i 下测量的频率值属于该段。

图A.1 两个储能模量区段示意图

根据式(A.3), (A.4)和(A.5), 计算在 T_2 处测量的线段对应的水平位移因子, 即“个体”水平位移因子:

$$\lg \tilde{a}(T_2) = \frac{\sum_{p=L}^{P-1} F_p(T_2) - \sum_{q=Q}^{U-1} F_q(T_1)}{\lg M'(f_Q, T_1) - \lg M'(f_P, T_2)} \dots\dots\dots (A.3)$$

式中:

$$F_q(T_1) = \frac{\lg f_q(T_1) + \lg f_{q+1}(T_1)}{2} \cdot [\lg M'(f_{q+1}, T_1) - \lg M'(f_q, T_1)], q = Q, \dots, U-1 \dots\dots\dots (A.4)$$

$$F_p(T_2) = \frac{\lg f_p(T_2) + \lg f_{p+1}(T_2)}{2} \cdot [\lg M'(f_{p+1}, T_2) - \lg M'(f_p, T_2)], p = L, \dots, P-1 \dots \dots \dots (A. 5)$$

在实验误差存在的情况下，储能模量曲线可能不具有严格的单调性，它表现出波动。为了消除波动对水平移因子计算的影响，需要定义重叠区域 Q 、 P 、 U 、 L 的边界点，如步骤 a) 到步骤 d) 所示。

a) 点 Q 为 T_1 温度下线段的最小测量基准点，如式 (A. 6) 所示：

$$\lg M'(f_Q, T_1) = \min_q \{ \lg M'(f_q, T_1), q = 1, 2, \dots, N_1 \} \dots \dots \dots (A. 6)$$

b) 点 P 为温度 T_2 下线段的最大测量基准点，如式 (A. 7) 所示：

$$\lg M'(f_P, T_2) = \max_p \{ \lg M'(f_p, T_2), p = 1, 2, \dots, N_2 \} \dots \dots \dots (A. 7)$$

c) 点 U 为人工点，表示温度 T_1 下测得的线段重叠截面的上边界。为求点 U 的频率坐标，从点 P 画一条水平线指向在温度 T_1 下测量的线段，并确定其交点。若水平线与相对的线段有若干交点，则取与点 Q 在频率意义上最接近的点为上边界点 U 。点 U 的频率值如式 (A. 8) 所示：

$$\lg f_U(T_1) = \lg f_i(T_1) + \frac{\lg M'(f_U, T_1) - \lg M'(f_i, T_1)}{\lg M'(f_{i+1}, T_1) - \lg M'(f_i, T_1)} \cdot [\lg f_{i+1}(T_1) - \lg f_i(T_1)] \dots \dots \dots (A. 8)$$

其中 i 和 $i+1$ 是距离 U 点最近的基准点 (图 A. 1 中未填充的点) 在温度 T_1 下测量的线段。 U 点的储能模量值如式 (A. 9) 所示：

$$\lg M'(f_U, T_1) = \lg M'(f_p, T_2) \dots \dots \dots (A. 9)$$

d) 点 L 为人工点，描述在温度 T_2 下测得的线段重叠部分的下边界。为求点 L 的频率坐标，从点 Q 画一条水平线指向在温度 T_2 下测量的相对线段，并确定交点。若水平线与相对线段有几个点相交，则取在频率意义上与点 P 最接近的点为下边界点 L 。点 L 的频率值如式 (A. 10) 所示：

$$\lg f_L(T_2) = \lg f_j(T_2) + \frac{\lg M'(f_L, T_2) - \lg M'(f_j, T_2)}{\lg M'(f_{j+1}, T_2) - \lg M'(f_j, T_2)} \cdot [\lg f_{j+1}(T_2) - \lg f_j(T_2)] \dots \dots (A. 10)$$

其中 j 和 $j+1$ 是离 L 点最近的基准点 (图 A. 1 中的未填充点) 在温度 T_2 下测量的线段。 L 点的储能模量值如式 (A. 11) 所示：

$$\lg M'(f_L, T_2) = \lg M'(f_Q, T_1) \dots \dots \dots (A. 11)$$

A. 3 三段或更多段的主曲线

如果实验在 K 个不同温度下进行，即 $\{T_k, k = 1, 2, \dots, K\}$ ，其中 $T_1 < T_2 < \dots < T_K$ 和 $K \geq 3$ ，按照 a) 到 h) 步骤构建光滑的储能模量主曲线。

a) 选择实验范围内的参考温度 T_R 。

b) 将所有分段按 $\lg M'(f, T_k) - \lg b(T_k)$ 垂直移动， $k = 1, 2, \dots, K$ ，其中 $b(T_k)$ 由式 (A. 1) 或 (A. 2) 给出。这样，垂直调整的储能模量值将进一步表示为“减”模量。

c) 对于每对相邻线段：

1) 分别用式 (A. 6) 和式 (A. 7) 定义点 Q 和点 P 的频率值和折合模量；

2) 分别用公式 (A. 8)、(A. 9)、(A. 10)、(A. 11) 定义点 U 和点 L 的频率值和折合模量；

- 3) 根据公式(A.3)至(A.5)计算每个水平位移因子 $\lg \tilde{a}(T)$ ，使用在较低温度下测量的线段作为参考线段。
- d) 将参考段的“最终”水平位移因子设为零，即 $\lg a(T_R) = 0$ 。这意味着参考段保持在它的位置上。
- e) 计算高于参考温度的温度下测量段的最终水平位移因子， $T_m > T_R$ ，方法是将其各自的水平位移因子与参考段的最终水平位移因子相加，即如公式(A.12)所示：

$$\lg a(T_m) = \lg a(T_R) + \sum_{r=R+1}^m \lg \tilde{a}(T_r) \dots\dots\dots (A.12)$$

- f) 计算高于参考温度的温度下测量段的最终水平位移因子， $T_n < T_R$ ，从最终参考段的水平位移因子中减去单个水平位移因子，即如公式(A.13)所示：

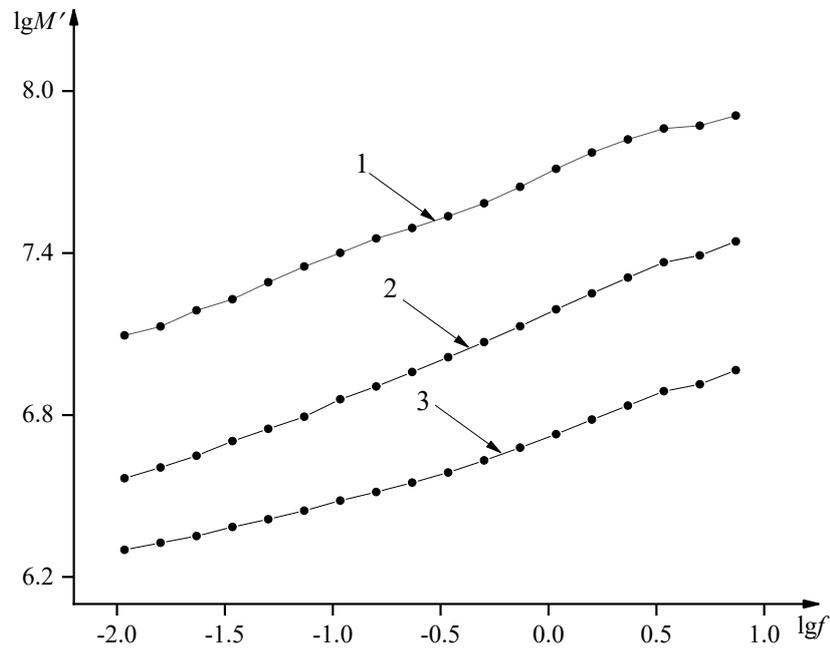
$$\lg a(T_n) = \lg a(T_R) - \sum_{r=n}^{R-1} \lg \tilde{a}(T_r) \dots\dots\dots (A.13)$$

- g) 按 $\lg f(T_k) + \lg a(T_k)$ 计算“折合”频率值， $k=1, 2, \dots, K$ 。
- h) 绘制对数坐标(以10为基数)折合模量段与相应的对数坐标(以10为基数)折合频率，图像保持一个平滑的主曲线。

附录B步骤a)到h)给出了构造主曲线的例子。

附 录 B
(资料性附录)
储能模量主曲线构造实例

本文件中介绍了应用移位方法构建主曲线的示例，研究了在温度 $T_1=0^\circ\text{C}$ ， $T_2=10^\circ\text{C}$ 和 $T_3=20^\circ\text{C}$ 下测量的三个储能模量段，如图 B.1 和表 B.1 所示。



- 1 —— 温度 $T_1=0^\circ\text{C}$ 时测得的储能模量段
- 2 —— 温度 $T_2=10^\circ\text{C}$ 时测得的储能模量段
- 3 —— 温度 $T_3=20^\circ\text{C}$ 时测得的储能模量段

图B.1 储能模量分段

图 B.1 表明，在不同温度下测得的曲线形状是相同的，即满足了 TTS 适用性的准则 a) (见 4.1)。

表B.1 储能模量的分段

		$T_1=0^\circ\text{C}$	$T_2=10^\circ\text{C}$	$T_3=20^\circ\text{C}$
#	$\lg f$ Hz	$\lg M'(f, T_1)$ Pa	$\lg M'(f, T_2)$ Pa	$\lg M'(f, T_3)$ Pa
1	-1.9648	7.0946	6.5657	6.3005
2	-1.7982	7.128	6.6055	6.3264
3	-1.6315	7.1877	6.6493	6.3518
4	-1.4648	7.2287	6.7033	6.385
5	-1.2982	7.2915	6.7486	6.4137
6	-1.1315	7.3502	6.7936	6.4454
7	-0.9649	7.4007	6.8581	6.4826
8	-0.7982	7.4537	6.9054	6.5146
9	-0.6315	7.4926	6.9591	6.5497
10	-0.4648	7.536	7.0141	6.5871
11	-0.2982	7.5844	7.0702	6.6317
12	-0.1315	7.6454	7.1284	6.6787
13	0.0352	7.7119	7.1911	6.7286
14	0.2018	7.7722	7.2502	6.7828
15	0.3685	7.8206	7.309	6.8348
16	0.5352	7.8612	7.3653	6.8879
17	0.7018	7.8716	7.3912	6.9137
18	0.8685	7.909	7.4426	6.9661

由表B.1可知,所有的储能模量分段都是在同一实验窗口内测得的, $\lg f_n(T_1) = \lg f_n(T_2) = \lg f_n(T_3)$, 对 $n = 1, 2, \dots, 18$ 和 $N_1=N_2=N_3=18$ 。

绘制光滑的主曲线, 应遵循附件A中描述的步骤a)至h)。

a) 在实验测试温度范围内选择一个参考温度 T_R 。

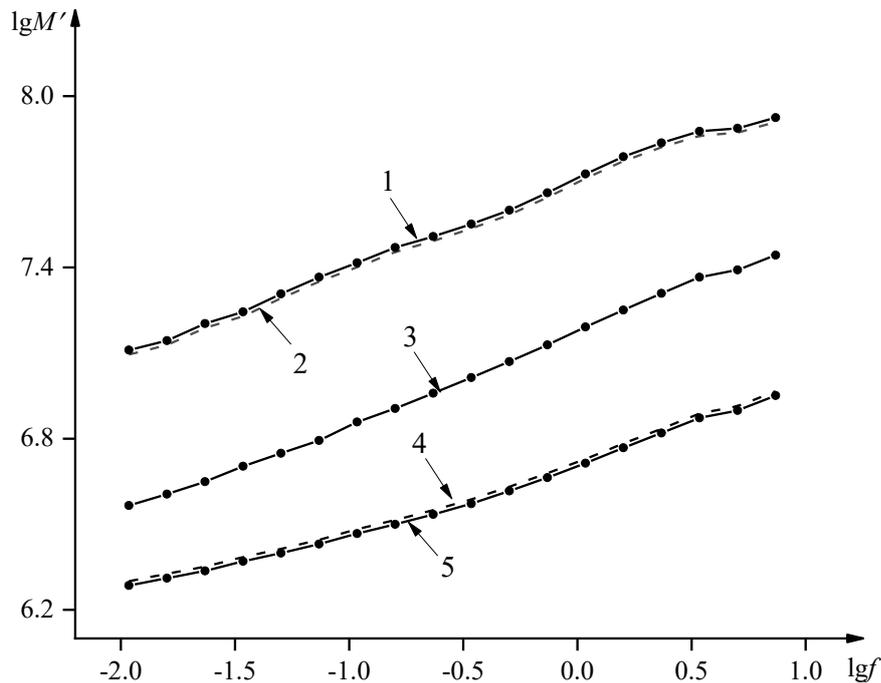
取温度 $T_2 = 10^\circ\text{C}$ 时测得的线段为参考线段, 即 $T_R=T_2$ 。

b) 将所有分段按 $\lg M'(f, T_k) - \lg b(T_k)$ 垂直移动, $k=1, 2, 3$, 其中 $b(T_k)$ 由公式 (A.1 或 A.2) 确定。

由于给定示例中不同温度下的密度未知，垂直调整应按公式(A.2)进行，即 $b(T) = T/T_R = T/T_2$ ，其中温度值以开尔文表示。因此，垂直移位因子是：

- 1) 对于在温度 T_1 时测量的等温段， $b(T_1) = (T_1 + 273.15) / (T_2 + 273.15) = 0.9647$
- 2) 对于温度为 T_2 时测量的等温段(即线段保持不变) $b(T_2) = (T_2 + 273.15) / (T_2 + 273.15) = 1$
- 3) 对于温度为 T_3 时测量的等温段， $b(T_3) = (T_3 + 273.15) / (T_2 + 273.15) = 1.0353$

从相应的储能模量(均以 10 为底对数)中减去垂直移位因子，就得到了折合储能模量，如图 B.2 和表 B.2 所示。



- 1 ——在温度 $T_1=0^\circ\text{C}$ 下测量的折合储能模量
- 2 ——在温度 $T_1=0^\circ\text{C}$ 下测量的原始储能模量
- 3 ——在(参考)温度 $T_2= 10^\circ\text{C}$ 时测量的原始储能模量
- 4 ——在温度 $T_3= 20^\circ\text{C}$ 下测量原始储能模量
- 5 ——在温度 $T_3 = 20^\circ\text{C}$ 下测量的折合储能模量

图B.2 原始的和折合的储能模量

表B.2 折合储能模量

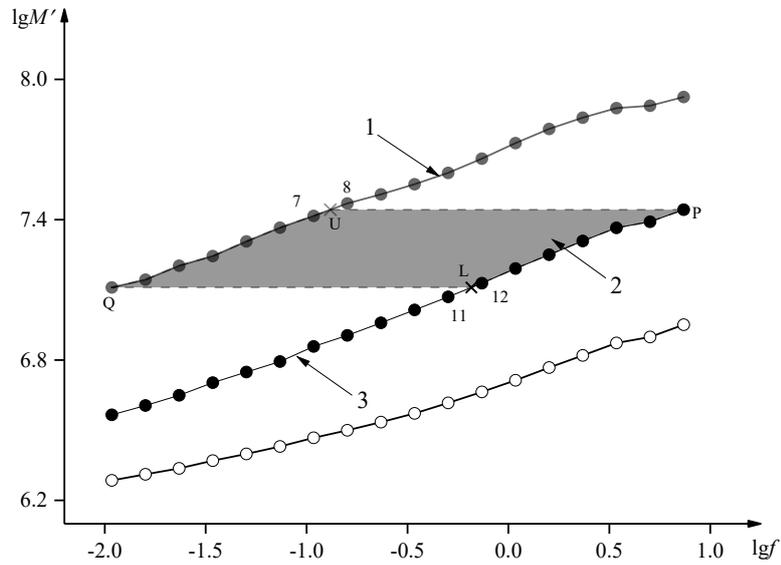
		$T_1=0^\circ\text{C}$	$T_2=10^\circ\text{C}$	$T_3=20^\circ\text{C}$
#	lgf Hz	$lgM'(f,T_1)$ Pa	$lgM'(f,T_2)$ Pa	$lgM'(f,T_3)$ Pa

1	-1.9648	7.1102	6.5657	6.2854
2	-1.7982	7.1436	6.6055	6.3113
3	-1.6315	7.2033	6.6493	6.3367
4	-1.4648	7.2443	6.7033	6.3699
5	-1.2982	7.3071	6.7486	6.3986
6	-1.1315	7.3658	6.7936	6.4303
7	-0.9649	7.4163	6.8581	6.4675
8	-0.7982	7.4693	6.9054	6.4995
9	-0.6315	7.5082	6.9591	6.5346
10	-0.4648	7.5516	7.0141	6.5720
11	-0.2982	7.6000	7.0702	6.6166
12	-0.1315	7.6610	7.1284	6.6636
13	0.0352	7.7275	7.1911	6.7135
14	0.2018	7.7878	7.2502	6.7677
15	0.3685	7.8362	7.309	6.8197
16	0.5352	7.8768	7.3653	6.8728
17	0.7018	7.8872	7.3912	6.8986
18	0.8685	7.9246	7.4426	6.9510

c) 对于每对相邻储能模量线段:

- 1) 分别使用公式(A.6)和(A.7)定义点Q和点P的频率值和折合模量值;
- 2) 分别用公式(A.8)、(A.9)、(A.10)和(A.11)定义点U和L的频率值和折合模量值;
- 3) 根据公式(A.3)到(A.5)计算单个水平位移因子 $\lg \tilde{\alpha}(T)$ 。以较低温度下测量的储能模量线段作为参考线段。

考虑第一对折合储能模量段, 在本示例中对应温度 $(T_1, T_2) = (0^\circ\text{C}, 10^\circ\text{C})$, 并在本图B.3中突出显示。



- 1 ——在温度 $T=0^{\circ}\text{C}$ 时测量的折合储能模量段
- 2 ——重叠区域 $A(T_1, T_2)$
- 3 ——在温度 $T_2=10^{\circ}\text{C}$ 下测量的原储能模量段

图B.3 0°C和10°C时测量的储能模量段重叠区域

点 Q 和 P :

根据式(A.6), 点 Q 的储能模量值为

$$\lg M'(f_Q, T_1) = \min_q \{ \lg M'(f_q, T_1), q = 1, 2, \dots, 18 \} = \lg M'(f_1, T_1) = 7.1102 \text{Pa}$$

对应的频率值为

$$\lg f_Q(T_1) = \lg f_1(T_1) = -1.9648 \text{Hz}$$

根据式(A.7), 点 P 的储能模量值为

$$\lg M'(f_P, T_2) = \max_p \{ \lg M'(f_p, T_2), p = 1, 2, \dots, 18 \} = \lg M'(f_{18}, T_2) = 7.4426 \text{Pa}$$

对应的横坐标为

$$\lg f_P(T_2) = \lg f_{18}(T_2) = 0.8685 \text{Hz}$$

点 U 和点 L :

根据式(B.3)和式(A.9), 可以得到 U 点的储能模量值

$$\lg M'(f_U, T_1) = \lg M'(f_P, T_2) = 7.4426 \text{Pa}$$

而根据式(A.8)计算的频率值为

$$\lg f_U(T_1) = \lg f_7(T_1) + \frac{\lg M'(f_U, T_1) - \lg M'(f_7, T_1)}{\lg M'(f_8, T_1) - \lg M'(f_7, T_1)} \cdot [\lg f_8(T_1) - \lg f_7(T_1)] = -0.8822 \text{Hz}$$

由式(A.11)给出的点L的储能模量值为

$$\lg M'(f_L, T_2) = \lg M'(f_Q, T_1) = 7.1102 \text{Pa}$$

而根据式(A.10)计算的频率值为

$$\lg f_L(T_2) = \lg f_{11}(T_2) + \frac{\lg M'(f_L, T_2) - \lg M'(f_{11}, T_2)}{\lg M'(f_{12}, T_2) - \lg M'(f_{11}, T_2)} \cdot [\lg f_{12}(T_2) - \lg f_{11}(T_2)] = -0.1836 \text{Hz}$$

个体水平位移因子, $\lg \tilde{\alpha}(T_2)$

式(A.3)的分子和可以改写为:

$$\sum_{q=Q}^{U-1} F_q(T_1) = \sum_{q=1}^{U-1} F_q(T_1)$$

其中

$$F_{U-1}(T_1) = \frac{\lg f_7(T_1) + \lg f_U(T_1)}{2} \cdot [\lg M'(f_U, T_1) - \lg M'(f_7, T_1)]$$

且

$$\sum_{p=L}^{P-1} F_p(T_2) = \sum_{p=L}^{17} F_p(T_2)$$

其中

$$F_L(T_2) = \frac{\lg f_L(T_2) + \lg f_{12}(T_2)}{2} \cdot [\lg M'(f_{12}, T_2) - \lg M'(f_L, T_2)]$$

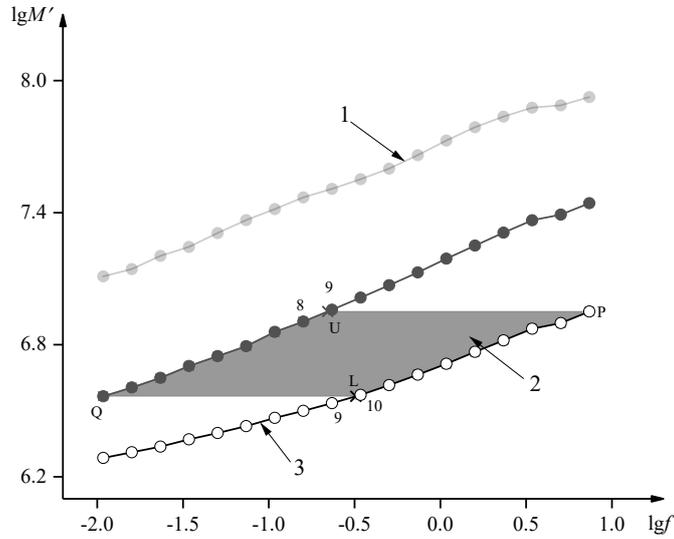
因此

$$\sum_{q=1}^{U-1} F_q(T_1) = -0.464, \sum_{p=L}^{17} F_p(T_2) = 0.0997$$

将得到的和代入公式(A.3)的分子中, 两个储能模量段之间的水平位移因子等于

$$\lg \tilde{\alpha}(T_2) = \frac{\sum_{p=L}^{P-1} F_p(T_2) - \sum_{q=Q}^{U-1} F_q(T_1)}{\lg M'(f_Q, T_1) - \lg M'(f_P, T_2)} = \frac{0.0997 - (-0.464)}{7.1102 - 7.4426} = -1.6958。$$

考虑第二对折合储能模量段, 在本例中, 对应温度 $(T_2, T_3) = (10^\circ\text{C}, 20^\circ\text{C})$, 并在图 B.4 中突出显示。



- 1 ——在温度 T₂=10°C 下测量的原始储能模量段
- 2 ——重叠区域 A(T₂,T₃)
- 3 ——在温度 T₃= 20°C 时测量的折合储能模量段

图B.4 10°C和 20°C下实测的储能模量段重叠区域

对于在 T₂ 和 T₃ 温度下测量得到的两段储能模量，其步骤与在 T₁ 和 T₂ 温度下测量的两段储能模量的步骤相同。下面给出了所有必要的值。

点 Q: 根据式 (A.6) 的储能模量值为 $\lg M'(f_Q, T_2) = \lg M'(f_1, T_2) = 6.5657\text{Pa}$ ，频率值为 $\lg f_Q(T_2) = \lg f_1(T_2) = 1.9648\text{Hz}$

点 P: 根据式 (A.7) 的储能模量值为 $\lg M'(f_P, T_3) = \lg M'(f_{18}, T_3) = 6.951\text{Pa}$ ，频率值为 $\lg f_P(T_3) = \lg f_{18}(T_3) = 0.8685\text{Hz}$

点 U: 储能模量值为 $\lg M'(f_U, T_2) = \lg M'(f_P, T_3)$ ，频率值由式 (A.8) 给出，作为储能模量段第 8-9 点的线性插值，即：

$$\lg f_U(T_2) = \lg f_8(T_2) + \frac{\lg M'(f_U, T_2) - \lg M'(f_8, T_2)}{\lg M'(f_9, T_2) - \lg M'(f_8, T_2)} \cdot [\lg f_9(T_2) - \lg f_8(T_2)] = -0.6566\text{Hz}$$

点 L: 储能模量的值是 $\lg M'(f_L, T_3) = \lg M'(f_Q, T_2)$ ，频率值由式 (A.10) 给出，作为储能模量段第 9 至第 10 点的线性插值，即：

$$\lg f_L(T_3) = \lg f_9(T_3) + \frac{\lg M'(f_L, T_3) - \lg M'(f_9, T_3)}{\lg M'(f_{10}, T_3) - \lg M'(f_9, T_3)} \cdot [\lg f_{10}(T_3) - \lg f_9(T_3)] = -0.4929\text{Hz}$$

根据公式 (A.4) 和 (A.5) 计算水平位移因子的总和为

$$\sum_{q=Q}^{U-1} F_q(T_2) = \sum_{q=1}^{U-1} F_q(T_2) = -0.4934$$

其中 $F_{U-1}(T_2) = \frac{\lg f_8(T_2) + \lg f_U(T_2)}{2} \cdot [\lg M'(f_U, T_2) - \lg M'(f_8, T_2)]$

且

$$\sum_{p=L}^{P-1} F_q(T_3) = \sum_{p=L}^{17} F_q(T_3) = 0.0698$$

其中

$$F_L(T_3) = \frac{\lg f_L(T_3) + \lg f_{10}(T_3)}{2} \cdot [\lg M'(f_{10}, T_3) - \lg M'(f_L, T_3)]$$

由式(A.3)得到的个体水平位移因子等于

$$\lg \tilde{\alpha}(T_3) = \frac{\sum_{p=L}^{P-1} F_p(T_3) - \sum_{q=Q}^{U-1} F_q(T_2)}{\lg M'(f_Q, T_2) - \lg M'(f_P, T_3)} = \frac{0,0698 - (-0,4934)}{6,5657 - 6,951} = -1.4617$$

d) 将最终参考段水平位移因子设为零，即 $\lg \alpha(T_R) = \lg \alpha(T_2) = 0$ 。这意味着参考段保持在它的位置上。

e) 使用公式(A.12)计算在高于参考温度 ($T_n > T_R$) 下其他测量段的最终水平位移因子。

在这样的情况下，只有一个线段是在高于参考温度的温度下测量的，即在 T_3 处的线段。对于这一段，最终得到水平位移因子为

$$\lg \alpha(T_3) = \lg \alpha(T_R) + \sum_{r=R+1}^3 \lg \tilde{\alpha}(T_r) = \lg \alpha(T_2) + \lg \tilde{\alpha}(T_3) = -1.4617$$

f) 在参考温度 $T_n < T_R$ 下使用公式(A.13)计算测量段的最终水平位移因子。

对于低于参考温度的温度，本例只提供了一个在温度 T_1 下测量的部分。这一段的最终于水平位移因子是

$$\lg \alpha(T_1) = \lg \alpha(T_R) - \sum_{r=1}^{R-1} \lg \tilde{\alpha}(T_r) = \lg \alpha(T_2) - \lg \tilde{\alpha}(T_1) = 1.6958$$

g) 按 $\lg f(T_k) + \lg \alpha(T_k), k = 1, 2, 3$ 计算折减频率值。

折合频率值见表 B.3。

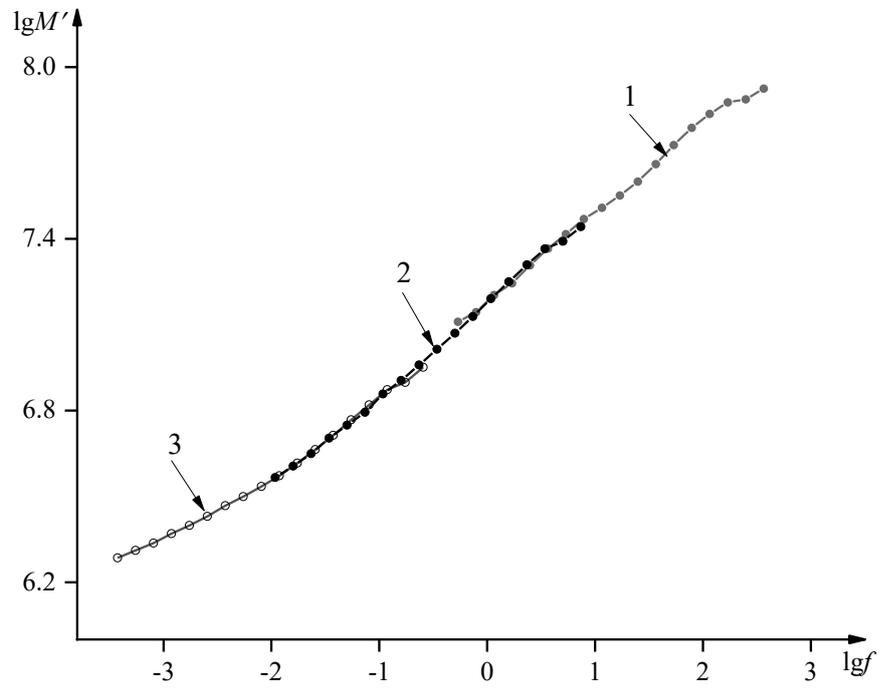
表B.3 折合频率值

#	$T_1=0^\circ\text{C}$	$T_2=10^\circ\text{C}$	$T_3=20^\circ\text{C}$
1	-0.2690	-1.9648	-3.4263
2	-0.1024	-1.7982	-3.2597
3	0.0643	-1.6315	-3.0930
4	0.2310	-1.4648	-2.9263

5	0.3976	-1.2982	-2.7597
6	0.5643	-1.1315	-2.5930
7	0.7309	-0.9649	-2.4264
8	0.8976	-0.7982	-2.2597
9	1.0643	-0.6315	-2.0930
10	1.2310	-0.4648	-1.9263
11	1.3976	-0.2982	-1.7597
12	1.5643	-0.1315	-1.5930
13	1.7310	0.0352	-1.4263
14	1.8976	0.2018	-1.2597
15	2.0643	0.3685	-1.0930
16	2.2310	0.5352	-0.9263
17	2.3976	0.7018	-0.7597
18	2.5643	0.8685	-0.5930

h) 采用以 10 为基数的对数坐标绘制折合模量段与相应的折合频率值，这将构造出一个平滑的主曲线。

主曲线图形如图 B.5 所示。



- 1 ——在温度 $T_1=0^\circ\text{C}$ 时测量的折合储能模量段，并绘制对应的折合频率
 2 ——在温度 $T_2=10^\circ\text{C}$ 下测量原始储能模量段
 3 ——在温度 $T_3=20^\circ\text{C}$ 时测量折合储能模量段，并绘制对应折合频率

图B.5 参考温度 10°C 下的储能模量主曲线

参 考 文 献

- [1] ISO 472, Plastics — Vocabulary
- [2] ISO 4664-1, Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of dynamic properties — Part 1: General guidance
- [3] ISO 6721-4, Plastics — Determination of dynamic mechanical properties — Part 4: Tensile vibration — Non-resonance method
- [4] ISO 6721-5, Plastics — Determination of dynamic mechanical properties — Part 5: Flexural vibration — Non-resonance method
- [5] ISO 6721-6, Plastics — Determination of dynamic mechanical properties — Part 6: Shear vibration — Non-resonance method
- [6] ISO 6721-7, Plastics — Determination of dynamic mechanical properties — Part 7: Torsional — vibration — Non-resonance method
- [7] ISO 6721-12, Plastics — Determination of dynamic mechanical properties — Part 12: Compressive vibration — Non-resonance method
- [8] ISO 10112, Damping materials — Graphical presentation of the complex modulus
- [9] ISO 18437-2, Mechanical vibration and shock — Characterization of the dynamic mechanical properties of visco-elastic materials — Part 2: Resonance method
- [10] ISO 18437-3, Mechanical vibration and shock — Characterization of the dynamic mechanical properties of visco-elastic materials — Part 3: Cantilever shear beam method
- [11] ISO 18437-4, Mechanical vibration and shock — Characterization of the dynamic mechanical properties of visco-elastic materials — Part 4: Dynamic stiffness method
- [12] ISO 18437-5, Mechanical vibration and shock — Characterization of the dynamic mechanical properties of visco-elastic materials — Part 5: Poisson ratio based on comparison between measurements and finite element analysis
- [13] FERRY J.D. Visco-elastic properties of polymers. John Wiley & Sons, New York, Third Edition, 1980
- [14] DEALY J. and PLAZEK D. Time-Temperature Superposition - A User Guide. Rheology Bulletin. 2009, 78 (2) pp.16-31
- [15] MADIGOSKY W. et al. A method for modelling polymer viscoelastic data and the temperature shift function. J. Acoust. Soc. Am. 2006, 119 (6) pp. 3760-3765
- [16] GERGESOVA M. et al. The closed form t-T-P shifting (CFS) algorithm. J. Rheol. (N. Y. N. Y.). 2011, 55(1) pp.1-17
- [17] GERGESOVA M. et al. Closed Form Solution for Horizontal and Vertical Shifting of Viscoelastic Material Functions in Frequency Domain. Rheologica Acta, 2016, ISSN: 0035-4511 (Print) 1435-1528 (Online)
- [18] DAO K. C. and DICKEN D. J. Fatigue failure mechanisms in polymers. Polym. Eng. Sci. 1987, 27 (4) pp.271-276
- [19] MENARD K. P. Dynamic mechanical analysis: A practical introduction. CRC Press, Florida, 1999