

团 体 标 准

T/CCTAS XXXX—XXXX

高速列车乘客座椅振动的实验室测试方法

Laboratory testing method for vibration of high speed train passenger
seat

（征求意见稿）

（本草案完成时间：2025 年）

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – XX 实施

中国交通运输协会 发 布

目 次

前 言 II

1 范围 3

2 规范性引用文件 3

3 术语和定义 3

4 试验目的 3

5 试验座椅和乘坐者 3

6 测试设备 4

7 试验方法和步骤 6

8 数据处理 9

9 试验报告 11

附 录 A （资料性） 激励产生过程示例 12

附 录 B （资料性） 使用复现激励进行座椅动力学测试 14

附 录 C （资料性） 正弦激励下的测试结果示例 15

前 言

本文件按照GB/T 1.1—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。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国交通运输协会新技术促进分会提出。

本文件由中国交通运输协会标准化技术委员会归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

高速列车乘客座椅振动的实验室测试方法

1 范围

本文件规定了高速列车乘客座椅振动的测试方法的实验要求、测试设备、试验座椅和乘坐者、试验步骤和方法、数据处理、试验报告等内容。

本文件适用于高速列车商务座椅及客室一、二等座椅的实验室测试。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；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 2298-2010 机械振动、冲击与状态监测 词汇

GB/T 13823（所有部分） 振动与冲击 传感器的校准方法

GB/T 14412-2005 机械振动与冲击 加速度计的机械安装

GB/T 18707.1-2002 机械振动 评价车辆座椅振动的实验室方法 第1部分：基本要求

GB/T 20485（所有部分） 振动与冲击传感器的校准方法

GB/T 23716-2009 人体对振动的响应 测量仪器

ISO 13090-1:1998 机械振动和冲击 真人测试和试验安全指南 第1部分：全身机械振动与反复冲击（Mechanical vibration and shock—Guidance on safety aspects of tests and experiments with people—Part 1: Exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock）

3 术语和定义

GB/T 2298-2010界定的术语和定义适用于本文件。

4 试验目的

座椅的实验室测试中，应通过同时测量座椅底部、人体与座椅坐垫交界处和人体与座椅靠背交界处在 x、y、z 三个方向上的加速度，计算频率响应函数、相干函数、振动传递率、计权振动传递率等相应的技术参数，以表征振动沿 x、y、z 方向从座椅底部到人体与座椅交界处的传递特性。

5 试验座椅和乘坐者

5.1 试验座椅

5.1.1 试验座椅应采用与现车相同的座椅。

5.1.2 当座椅具有紧固装置时，应采用与车辆上同样的方式安装在试验平台上；当座椅无紧固装置时，应使用能够将座椅牢固地固定在试验平台上的合适工装，以保证实验室测试结果包含紧固件刚度和阻尼特性的影响。

5.1.3 在正式试验前，应在实验室完成初始磨合。

磨合方法是将 (75 ± 7.5) kg 的质量块置于座椅坐垫上，对座椅施加垂向正弦激励，时长为 2 h，频率为座椅系统的最低共振频率，调整振动台的振幅直至座椅上质量块的振动加速度均方根值为 3 m/s^2 。

5.2 乘坐者

测试由两名乘坐者依次进行，两名乘坐者整体质量应分别为（50～55） kg 和（90～95） kg。如果整体质量不满足要求，可将沙袋绑在乘坐者腰部以增加整体质量，沙袋质量不超过乘坐者质量的 10%。

6 测试设备

6.1 一般要求

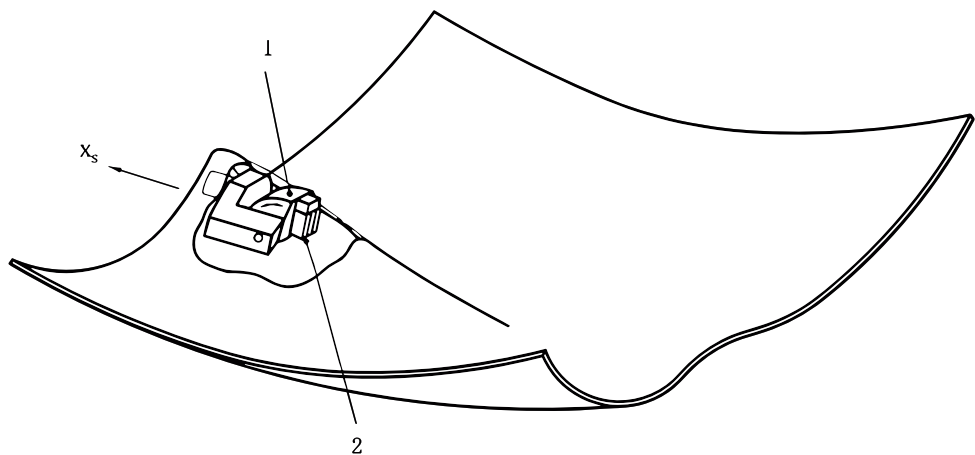
测量设备应符合 GB/T 23716-2009 关于 I 型仪器的规定。

6.2 振动台

实验室测试应使用可在待测座椅安装点处连续施加纵向（x）、横向（y）、垂向（z）方向激励的振动台，在振动台开展测试应满足 ISO 13090-1:1998 中的安全防范要求。

6.3 测量器具

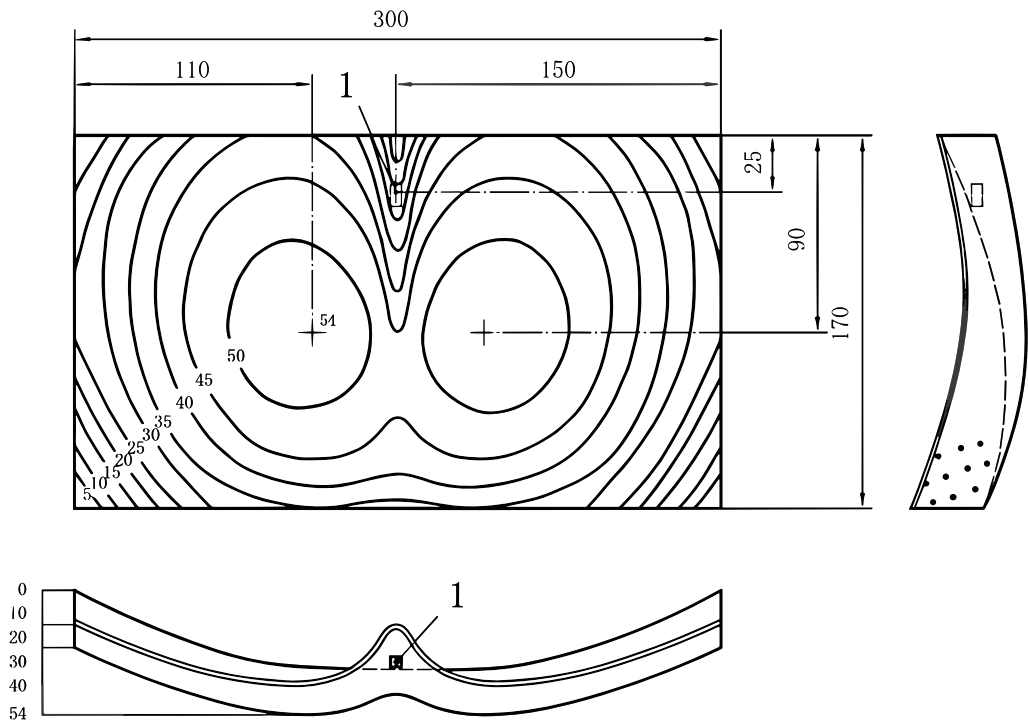
6.3.1 可使用一个半刚性材料的薄座板进行测量，其形状和尺寸应分别如图 1、图 2 所示。在 S 点处应放置一个角度调节装置，以保证能够调节加速度传感器的角度测量 x、y、z 三个方向上的加速度。



标引序号说明：
1——传感器固定装置；
2——加速度传感器。

图 1 座板外形示意图

单位为毫米



标引序号说明：

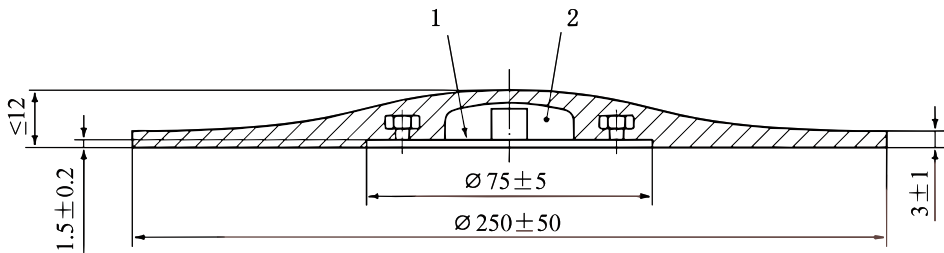
1——加速度传感器

注：座板每 1cm^2 的区域中心有一个直径为 1 mm 的穿孔。

图 2 座板尺寸示意图

6.3.2 或者使用由橡胶或塑料材料制成的硬度为 80~90 邵氏硬度单位（A 级）的圆形安装盘进行测量，其尺寸应如图 3 所示。安装盘的中心有一个空腔、腔内有一个薄金属盘用以粘贴加速度传感器。

单位为毫米



标引序号说明：

1——粘贴加速度传感器的薄金属盘

2——空腔

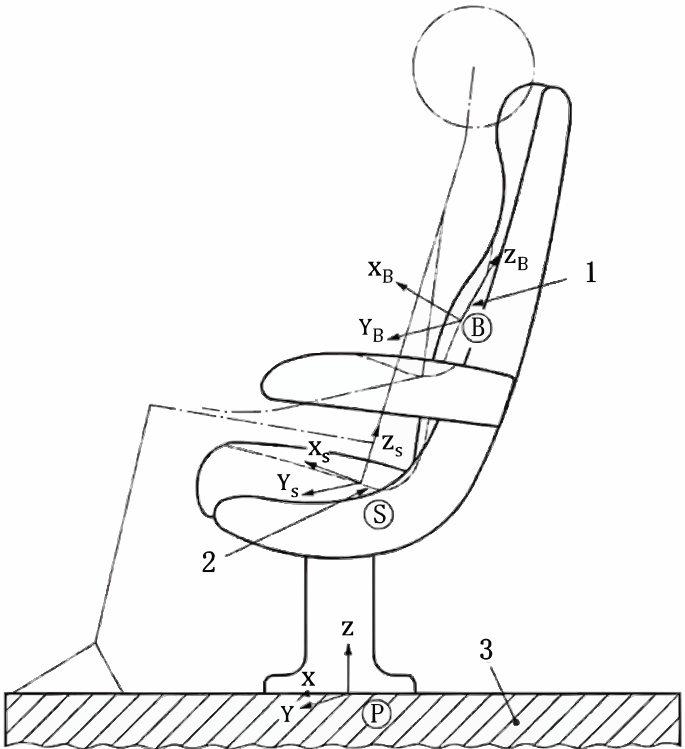
图 3 圆形安装盘尺寸示意图

6.3.3 测试开始前，座板或圆形安装盘应按照 GB/T 13823（所有部分）和 GB/T 20485（所有部分）中的规定进行校准，并应根据 GB/T 14412-2005 中的建议进行安装。

7 试验方法和步骤

7.1 坐标系的确定

图4为正交生物动力学坐标系示意图。应以乘坐者坐骨结节连线中点与座椅坐垫交界处S点为原点，以及以乘坐者背部T1和T12胸椎连线中点与座椅靠背交界处B点为原点的两个坐标系评估座椅传递至人体的振动，其坐标轴 x 、 y 、 z 方向如图4所示。应在振动台上以与S点在该台上的垂直投影之间的距离小于100 mm的P点为原点定义座椅输入振动的坐标系，其 x 轴平行于车辆坐标系的纵轴， y 轴平行于车辆坐标系的横轴， z 轴向上垂直于 x 、 y 轴平面。



标引序号说明：
1——安装盘；
2——座椅坐垫；
3——试验平台。
注：箭头指示正方向。

图4 正交生物动力学坐标系

7.2 测量位置

7.2.1 加速度测量位置

根据图4布置图测量九个加速度：
——座椅底部P点处在 x 、 y 、 z 三个方向上的输入加速度；
——座椅坐垫S点处在 x 、 y 、 z 三个方向上的输出加速度；
——座椅靠背B点处在 x 、 y 、 z 三个方向上的输出加速度。

7.2.2 测试位置布置

7.2.2.1 薄座板位置布置

使用半刚性材料的薄座板放置在乘坐者与座椅坐垫之间测量S点处的振动加速度时，底板应在S

点处包含一个角度可调节的装置，用于安装加速度传感器以测量图 4 所示的三个正交轴 x_s 、 y_s 和 z_s 的加速度。在 S 点处安装加速度传感器。如果该安装位置引起乘坐者不舒适，可以将其布置在更靠前的位置。

7.2.2.2 安装盘位置布置

使用安装盘放置在乘坐者与座椅坐垫之间测量 S 点处的振动加速度时，将安装盘放置在座椅坐垫表面，调整其位置使加速度传感器位于 S 点，并用胶带粘贴到坐垫上。

7.3 振动激励计算和生成方法

7.3.1 一般要求

应使用特定幅值的宽带伪随机振动或真实振动激励的复现作为人-椅系统的振动激励，振动激励应为三个分别包含 x 、 y 、 z 三个方向的单轴振动或一个同时包含 x 、 y 、 z 三个方向的三轴振动。使用特定幅值的宽带伪随机振动时，为监测人-椅系统可能存在的非线性特征，还应附加正弦振动激励；使用真实振动激励的复现时，振动激励应反映试验座椅未来安装环境真实激励的频谱、幅值和相位特征。

7.3.2 伪随机激励

7.3.2.1 激励信号的生成

7.3.2.1.1 振动台提供的激励信号为伪随机振动激励时，应使用随机数生成器的简化方法或者按照附录 A 的方法生成伪随机激励的控制信号。

7.3.2.1.2 激励信号应由 18 个连续的等长序列构成，每个序列时长应等于需求的最小频率间隔的倒数且至少为 5s。

7.3.2.1.3 激励信号中每个序列的时间历程应由正弦分量作和构成。每个分量的幅值应遵循公式 (2) 和 (3) 给出的功率谱密度。每个分量的相位应是一个随机变量，在 0 和 2π 之间，且具有均匀密度概率。

7.3.2.2 功率谱密度

7.3.2.2.1 加速度功率谱密度 $G_a(f)$ 由公式 (1) 计算得出：

$$G_a(f) = \frac{1}{B_e \cdot T} \int_0^T a^2(t, B_e, f) dt \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中：

$G_a(f)$ ——时间历程 $a(t)$ 的加速度功率谱密度函数，以加速度单位的平方每单位频率带宽来表示，单位为米每平方秒的平方每赫兹 ($(\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$)；

B_e ——频率分析的分辨率，单位为赫兹 (Hz)；

T ——信号测量与分析的持续时间，单位为秒 (s)；

f ——频率，单位为赫兹 (Hz)；

$a(t, B_e, f)$ ——频率在 $(f - B_e/2) \sim (f + B_e/2)$ 范围内被滤波的加速度时间历程 $a(t)$ 的瞬时值，单位为米每平方秒 (m/s^2)。

d ——单一频率下的振幅，单位为米 (m)；

t ——时间，单位为秒 (s)；

7.3.2.2.2 公式 (2) 与公式 (3) 中定义了 0.5 Hz 至 50 Hz 的频率范围（称为“测试频率范围”）内， x 、 y 和 z 方向上产生激励的加速度功率谱密度。

$$G(f) = 0.0125 f^4 \quad (f < 1 \text{ Hz}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$G(f) = 0.0125 \quad (1 \text{ Hz} \leq f \leq 50 \text{ Hz}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$G(f)$ ——产生激励的加速度功率谱密度函数，单位为米每平方秒的平方每赫兹 ($(\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$)；频率分辨率应小于或等于 0.2 Hz。

7.3.2.3 均方根加速度

7.3.2.3.1 加速度均方根值 a_{rms} 由公式 (4) 计算得出：

$$a_{rms} = \left(\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt \right)^{1/2} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

a_{rms} ——加速度均方根值，单位为米每平方秒 (m/s^2)；

$a(t)$ ——加速度时间历程的瞬时值，单位为米每平方秒 (m/s^2)；

T ——信号测量与分析的持续时间，单位为秒 (s)；

t ——时间，单位为秒 (s)；

7.3.2.3.2 测试频率范围内的均方根加速度值应为 0.8 m/s^2 。

7.3.2.4 振动台上的响应的滤波和均衡要求

为了获得7.3.2.2中描述的功率谱密度，应按照下列要求对振动台上的响应进行高、低通滤波和均衡：

- (1) 低通和高通滤波器的截止频率分别为 0.5 Hz 和 50 Hz ；
- (2) 均衡后在测试频率范围内各轴均方根加速度均为 0.8 m/s^2 ；
- (3) 在振动台P点上测量的激励的均方根加速度的容许误差应为 $\pm 0.16 \text{ m/s}^2$ ；
- (4) 功率谱密度各频率的容许误差应为规定值的 $\pm 20\%$ 。

7.3.2.5 容许误差

进行试验时，上述测试频率范围内，振动台P点测得加速度功率谱密度误差在每个频率点均小于规定值的 $\pm 20\%$ ，均方根值误差在 $\pm 0.16 \text{ m/s}^2$ 范围内。

7.3.3 正弦激励

7.3.3.1 正弦激励的要求

7.3.3.1.1 使用特定幅值的伪随机激励进行座椅测试后，应在正弦激励条件下进一步测试。

7.3.3.1.2 正弦激励使用的频率由伪随机激励试验中获得频响函数的峰值频率确定。如果未能确定座椅频响函数峰值频率，应以 1.5 Hz 和 10 Hz 的正弦信号对座椅进行激励。

7.3.3.1.3 使用加速度幅值为 $(0.5 \pm 0.1) \text{ m/s}^2$ 和 $(1 \pm 0.1) \text{ m/s}^2$ (峰-峰值) 的正弦激励进行传递率测试。

7.3.3.2 正弦激励的产生流程

正弦激励振动控制信号产生的流程见附录A。

7.3.4 复现激励

7.3.4.1 复现激励的要求

7.3.4.1.1 如需获得更接近实际工况的座椅系统响应，应使用复现激励。

7.3.4.1.2 应把在真实车辆地板上测得的或通过仿真获得的x、y、z三向振动加速度作为振动台输入，并采用截止频率分别为 0.5Hz 、 50Hz 的低、高通滤波器进行滤波。

7.3.4.2 复现激励信号的生成

为使座椅传递率测试结果具有更好的相干性，可以通过以下步骤生成复现激励信号：

- (1) 使用随机数生成器独立生成三轴随机振动信号，持续时间 90 s ；
- (2) 根据实际振动加速度信号设计滤波器，对所生成的随机信号进行滤波，方法见附录B；
- (3) 针对振动台频响特性对激励信号进行均衡，以达到期望的加速度均方根值。

7.4 试验步骤

7.4.1 初始程序

每次测试只由一名乘坐者坐于一个座位上。对于多座位型座椅，乘坐者应坐在垂向激励作用下座椅坐垫垂向加速度均方根值最大的座位，该位置应由初始测试确定。

试验开始前，乘坐者应坐在座椅上十几分钟，以保证座椅坐垫材料变形基本稳定、座椅坐垫和靠背加速度传感器的温度基本稳定。

乘坐者双脚应平放在试验平台上或与平台相连的刚性装置上。当座椅有靠背和扶手时，乘坐者背部应自然靠在座椅靠背上，肘部置于座椅扶手上，双手平放在大腿上。乘坐者应能够在测试过程中始终保持该坐姿。

选择测试设备，将其安装到位并固定。调整座椅及传感器倾斜角度使其与图4中给出的方向一致。

7.4.2 伪随机激励和复现激励试验

7.4.2.1 激励信号的要求

激励应符合7.3.2中的规定。

7.4.2.2 激励试验流程

7.4.2.2.1 第一名乘坐者坐于测试座椅上，依次施加x、y和z方向上单轴振动的激励，每个激励持续时间至少90 s；或者施加同时包含x、y和z方向三轴振动的激励，持续时间至少90 s（若振动台条件允许）。

7.4.2.2.2 应重复进行上述测试，直到连续三次测得的测试频率范围内的频响函数幅值的算术平均值与每次测量值的差别在±5%以内。

7.4.2.2.3 后续乘坐者坐于座椅上，并根据上述规范进行新的测试。

7.4.2.3 应计算的试验结果

试验以三次测试的频响函数、相干函数和振动传递率的算术平均值为最终结果，以 $H_s(f)_{aik}$ 、 $\gamma_s^2(f)_{aik}$ 和 $T_{Rs aik}$ 表示。

7.4.3 正弦激励试验

7.4.3.1 激励信号的要求

激励应符合7.3.3中规定。

7.4.3.2 激励试验流程

第一名乘坐者坐于测试座椅上，依次施加x、y和z方向上单轴激励或同时施加x、y和z方向三轴激励，测试持续时间至少90 s。每个测试应重复进行，直到连续三次测得的测试频率范围内的峰值频率处频响函数幅值的算术平均值与每次测量值的差别在±5%以内。后续乘坐者坐于座椅上，并根据上述规范进行新的测试。

7.4.3.3 应计算的试验结果

试验以三次测试的频响函数幅值的算术平均值为最终结果，以 $H_s(f_r)_{aik}$ 表示。

8 数据处理

8.1 伪随机激励和复现激励

8.1.1 概述

如果使用伪随机激励或接近实际振动环境的复现振动激励（包含单轴和多轴振动），应使用点S和B处测得的座椅频响函数、相干函数、振动传递率和计权振动传递率和座椅有效幅值传递率SEAT值等表征量来描述测试座椅的振动传递特性。

8.1.2 系统振动传递特性表征量的计算方法

8.1.2.1 座椅频响函数

8.1.2.1.1 加速度互谱密度 $G_{ab}(f)$ 用于连接两个加速度信号，一个是激励座椅的输入加速度 $a(t)$ ，另一个是人体-座椅系统在坐垫或靠背接触点的输出加速度响应 $b(t)$ 。通过公式 (5) 计算得出：

$$G_{ab}(f) = C_{ab}(f) - jQ_{ab}(f) = |G_{ab}(f)|e^{j\theta_{ab}(f)} \quad (5)$$

其中：

$$C_{ab}(f) = \frac{1}{B_e \cdot T} \int_0^T a(t, B_e, f) \cdot b(t, B_e, f) dt \quad (6)$$

$$Q_{ab}(f) = \frac{1}{B_e \cdot T} \int_0^T a(t, B_e, f) \cdot b'(t, B_e, f) dt \quad (7)$$

$$|G_{ab}(f)| = \sqrt{C_{ab}^2(f) + Q_{ab}^2(f)} \quad (8)$$

$$\theta_{ab}(f) = \arctan \frac{Q_{ab}(f)}{C_{ab}(f)} \quad (9)$$

式中：

$G_{ab}(f)$ ——两个加速度时间历程 $a(t)$ 和 $b(t)$ 的互功率谱密度函数，是一个复函数，也成为加速度互谱密度，单位为米每平方秒的平方每赫兹 $((\text{m/s}^2)^2/\text{Hz})$ ；

$C_{ab}(f)$ —— $G_{ab}(f)$ 的实部，单位为米每平方秒的平方每赫兹 $((\text{m/s}^2)^2/\text{Hz})$ ；

$Q_{ab}(f)$ —— $G_{ab}(f)$ 的虚部，单位为米每平方秒的平方每赫兹 $((\text{m/s}^2)^2/\text{Hz})$ ；

$\theta_{ab}(f)$ —— $G_{ab}(f)$ 的相位，单位为弧度 (rad)。

B_e ——频率分析的分辨率，单位为赫兹 (Hz)；

T ——信号测量与分析的持续时间，单位为秒 (s)；

f ——频率，单位为赫兹 (Hz)；

t ——时间，单位为秒 (s)；

$a(t, B_e, f)$ ——频率在 $(f - B_e/2) \sim (f + B_e/2)$ 范围内被滤波的加速度时间历程 $a(t)$ 的瞬时值，单位为米每平方秒 (m/s^2) 。

$b(t, B_e, f)$ ——频率在 $(f - B_e/2) \sim (f + B_e/2)$ 范围内被滤波的加速度时间历程 $b(t)$ 的瞬时值，单位为米每平方秒 (m/s^2) 。

$b'(t, B_e, f)$ ——频率在 $(f - B_e/2) \sim (f + B_e/2)$ 范围内被滤波的加速度时间历程 $b(t)$ 的瞬时值，相移 $\pi/2$ ，单位为米每平方秒 (m/s^2) 。

8.1.2.1.2 频率响应函数 $H(f)$ 是频率 f 的无量纲复函数。由公式 (10) 计算得出：

$$H(f) = G_{ab}(f) / G_a(f) \quad (10)$$

式中：

$H(f)$ ——频率响应函数，是无量纲量，是频率的复函数；

$G_{ab}(f)$ ——两个加速度时间历程 $a(t)$ 和 $b(t)$ 的互功率谱密度函数，是一个复函数，也成为加速度互谱密度，单位为米每平方秒的平方每赫兹 $((\text{m/s}^2)^2/\text{Hz})$ ；

$G_a(f)$ ——时间历程 $a(t)$ 的加速度功率谱密度函数，以加速度单位的平方每单位频率带宽来表示，单位为米每平方秒的平方每赫兹 $((\text{m/s}^2)^2/\text{Hz})$ ；

8.1.2.1.3 三次测试的频响函数平均值 $H(f)_{\text{avg}}$ 以幅值和相位的形式给出，频率范围 0.5 Hz~50 Hz，分辨率不大于 0.2 Hz。

8.1.2.2 相干函数

8.1.2.2.1 相干函数 $\gamma_{ab}^2(f)$ 是频率 f 的无量纲实函数。由公式 (11) 计算得出：

$$\gamma_{ab}^2(f) = \frac{|G_{ab}(f)|^2}{G_a(f) \cdot G_b(f)} \dots\dots\dots (11)$$

式中：

$\gamma_{ab}^2(f)$ ——是频率 f 的无量纲实函数；

$G_a(f)$ ——时间历程 $a(t)$ 的加速度功率谱密度函数，以加速度单位的平方每单位频率带宽来表示，单位为米每平方秒的平方每赫兹 $((\text{m/s}^2)^2/\text{Hz})$ ；

$G_b(f)$ ——时间历程 $b(t)$ 的加速度功率谱密度函数，单位为米每平方秒的平方每赫兹 $((\text{m/s}^2)^2/\text{Hz})$ ；

$G_{ab}(f)$ ——两个加速度时间历程 $a(t)$ 和 $b(t)$ 的互功率谱密度函数，是一个复函数，也成为加速度互谱密度，单位为米每平方秒的平方每赫兹 $((\text{m/s}^2)^2/\text{Hz})$ ；

8.1.2.2.2 三次测试的相干函数 $\gamma^2(f)_{aik}$ 平均值频率范围 0.5 Hz~50 Hz，分辨率不大于 0.2 Hz。当座椅响应方向不同于振动激励方向时，座椅响应幅值可能很小，出现某些频率下相干性较低的情况。当相干函数低于 0.6 时，该频率处的频响函数的幅值应当计 0，但计算得到的幅值、相位仍需在测试报告中提供。

8.1.2.3 振动传递率

振动传递率 T_{Raik} 是一个无量纲实数，等于在人体-座椅接触面处测量的加速度均方根值与在座椅安装点处测量的加速度均方根值的比。

注：对于座椅在单一（共振）频率下的传递率，本文件使用符号 T 。

8.1.2.4 计权振动传递率

计权振动传递率 T_{RW} 定义为在人体-座椅接触面处测量的加速度计权后的均方根值与在座椅安装点处测量的加速度计权后的均方根值的比，频率计权函数及计权方法应符合 GB/T 23716-2009 的规定。

8.2 正弦激励

计算在两种幅值的正弦激励下获得的两频响函数幅值 $H(f_r)_{aik}$ 之差与其中较高值的比值，以百分数形式表示。该百分数大于 30% 时，可认为座椅响应在测试涉及的频率与方向上存在明显的非线性行为。

9 试验报告

9.1 座椅

9.1.1 应准确描述记录安装座椅的装置和将其固定在试验平台上的装置，并详细说明座椅坐垫和座椅靠背上的测点。

9.1.2 当使用多座位座椅时，应报告每次测试所使用的座位，以免混淆。

9.2 乘坐者

应注明每名乘坐者的体重、身高、性别和年龄。

9.3 测量链

测量链应符合 GB/T 18707.1-2002 中的要求。

9.4 测试结果

伪随机激励下的测试结果应以数字和图表的形式表示出来，每个频率响应函数幅值、相位和相干函数应以一组值描述，以每 0.2 Hz 或更小的步长在 0.5 Hz~50 Hz 范围内记录，同时记录用于计算的传递率值和加速度均方根值。正弦激励下的测试结果示例见附录 C。

附 录 A (资料性) 激励产生过程示例

A.1 概述

激励产生过程示例使用以下两种激励：

- 伪随机激励；
- 正弦激励，仅伪随机激励测试中出现的共振频率。

A.2 伪随机激励

该激励应是相位随机的纯正弦激励的和。如果频率分辨率 B_e 为 0.2 Hz，则激励的频率范围为 0.4 Hz～50 Hz。因此，激励谱由 $(50 \text{ Hz} \sim 0.4 \text{ Hz}) / 0.2 \text{ Hz} + 1 = 249$ 条谱线构成。

激励信号通过加速度功率谱密度 $G_a(f)$ 定义，位移信号通常用于控制振动台。如果该位移的振幅谱（频率分辨率 B_e ）中，频率 f 处的位移振幅为 d ，则相应的加速度功率谱密度 $G_a(f)$ 如式（12）所示：

$$G_a(f) = d^2 \times 8\pi^4 f^4 / B_e \dots\dots\dots (12)$$

式中：

$G_a(f)$ ——时间历程 $a(t)$ 的加速度功率谱密度函数，以加速度单位的平方每单位频率带宽来表示，单位为米每平方秒的平方每赫兹 $((\text{m/s}^2)^2/\text{Hz})$ ；

d ——单一频率下的振幅，单位为米（m）；

f ——频率，单位为赫兹（Hz）；

B_e ——频率分析的分辨率，单位为赫兹（Hz）；

因此，

$$d = \frac{\sqrt{2B_e G_a(f)}}{4\pi^2 f^2} \dots\dots\dots (13)$$

式中：

d ——单一频率下的振幅，单位为米（m）；

B_e ——频率分析的分辨率，单位为赫兹（Hz）；

f ——频率，单位为赫兹（Hz）；

$G_a(f)$ ——时间历程 $a(t)$ 的加速度功率谱密度函数，以加速度单位的平方每单位频率带宽来表示，单位为米每平方秒的平方每赫兹 $((\text{m/s}^2)^2/\text{Hz})$ ；

其中 $G_a(f)$ 是由方程（2）和（3）定义。

可根据图 5 所示的流程图进行试验。

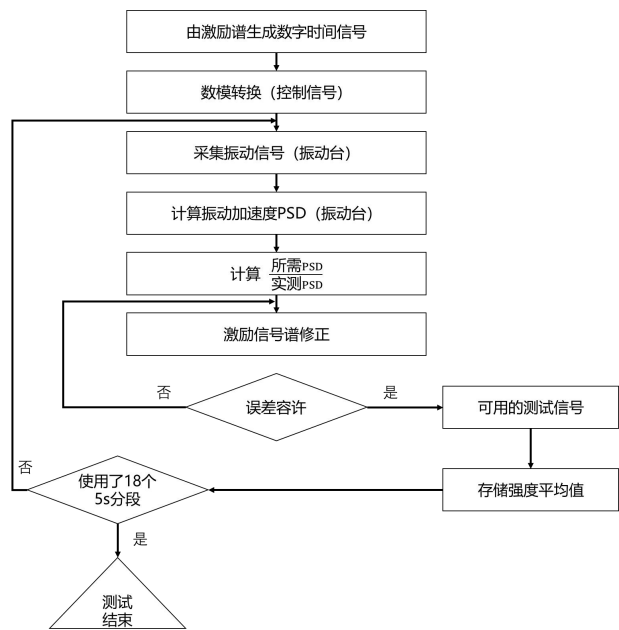


图 5 伪随机激励试验程序流程

A. 3 正弦激励

每次测试可以根据图 6 所示的流程图进行。

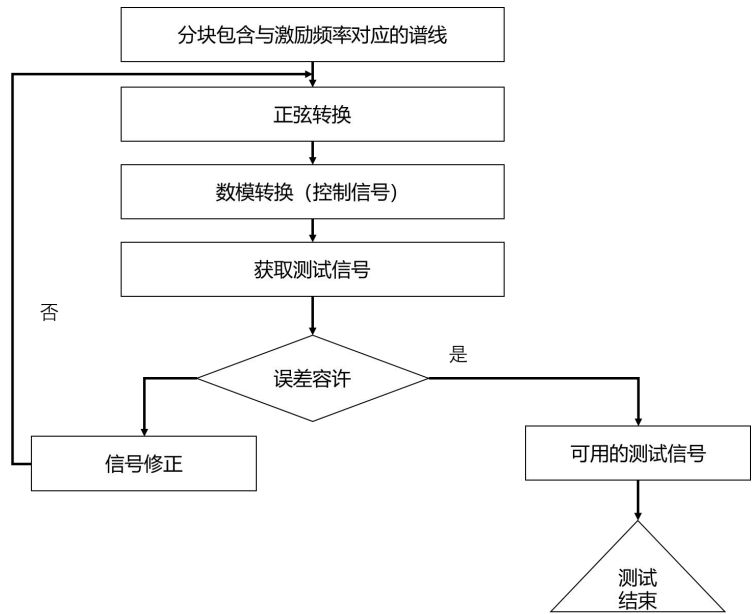


图 6 正弦激励试验程序流程图

附 录 B
(资料性)
使用复现激励进行座椅动力学测试

B.1 概述

本附录提供生成座椅动力学测试所需要的复现激励的方法。通过测量或仿真获得列车在x、y和z三个方向上地板加速度，对该加速度进行滤波，并根据振动台的频响进行校准，从而生成标准激励信号。

注：人-椅系统可能是高度非线性的，因此实验测得的座椅传递率和SEAT值可能受所使用的激励信号影响。为了获得更具代表的结果，推荐使用更贴近真实激励的复现信号进行座椅动力学测试。

B.2 设计滤波器

通过测量或仿真得到列车在x、y和z三个方向上的加速度，根据加速度频谱设计滤波器。生成随机信号并通过设计的滤波器进行滤波，从而使测试或仿真获得的加速度信号与滤波后的随机信号具有相同的频谱。

设计符合实测加速度信号的滤波器，首先应获取实测加速度的谱，使用Matlab中的pwelch函数计算。使用自回归移动平均的ARMA模型，使滤波后的随机信号与测量激励具有相似频率成分。

使用yulewalk滤波器。在Matlab中，[b,a]=yulewalk(n,f,m)返回n阶IIR滤波器的传递函数系数，其频率响应幅值与f和m中给出的值相匹配。

B.3 生成复现信号

生成复现信号需以下三步：

- 使用随机数生成器独立生成时长 90 s 的三轴振动激励；
- 使用依据实测振动信号设计的滤波器对随机信号进行滤波；
- 根据振动台频响对激励信号进行补偿，以获得所需的加速度均方根值。

附 录 C
(资料性)
正弦激励下的测试结果示例

正弦激励下的测试结果示例见表C. 1。

表C. 1 纵向正弦激励（X方向）下的测试结果示例

频率 f_r （由伪随机激励下的试验结果确定）处的响应幅值		
频率 f_r	5Hz	36Hz
纵向振动激励到坐垫 x 方向的传递率 H_{sSXx} 正弦激励振幅为 0.5m/s ² 正弦激励振幅为 1m/s ² 较高值的差异百分比， %	1.38 1.07 22	1.59 1.55 3
纵向振动激励到坐垫 y 方向的传递率 H_{sXYy} 正弦激励振幅为 0.5m/s ² 正弦激励振幅为 1m/s ² 较高值的差异百分比， %	0.24 0.23 4	0.25 0.21 16
纵向振动激励到坐垫 z 方向的传递率 H_{sXZz} 正弦激励振幅为 0.5m/s ² 正弦激励振幅为 1m/s ² 较高值的差异百分比， %	1.13 1.04 8	4.64 4.84 4
纵向振动激励到靠背 x 方向的传递率 H_{sBXx} 正弦激励振幅为 0.5m/s ² 正弦激励振幅为 1m/s ² 较高值的差异百分比， %	2.02 2.39 15	0.12 0.13 8
纵向振动激励到靠背 y 方向的传递率 H_{sBYy} 正弦激励振幅为 0.5m/s ² 正弦激励振幅为 1m/s ² 较高值的差异百分比， %	0.055 0.050 9	1.78 1.99 11
纵向振动激励到靠背 z 方向的传递率 H_{sBZz} 正弦激励振幅为 0.5m/s ² 正弦激励振幅为 1m/s ² 较高值的差异百分比， %	0.53 0.46 13	1.78 1.99 11
1 号试验人员 体重：55kg； 身高：1.66m 性别：女性； 年龄：32 岁		