

中国交通运输协会团体标准

轨道减振效果实验室评价技术规程

Technical specification for laboratory evaluation of track vibration-reduction
effect

（征求意见稿）

编制说明

2023-09

一、任务来源、起草单位、协作单位、主要起草人

根据中国交通运输协会发布的“2022 年度第三批团体标准项目立项的公告”（中交协秘字〔2023〕3 号）要求，由中国铁路设计集团有限公司、西南交通大学、北京交通大学、北京市科学技术研究院城市安全与环境科学研究所、中铁工程设计咨询集团有限公司、中铁第一勘察设计院集团有限公司、中铁上海设计院集团有限公司、中铁第二勘察设计院集团有限公司、中国铁道科学研究院集团有限公司、北京轨道交通建设管理有限公司、北京市轨道交通设计研究院有限公司、北交振安轨道科技（北京）有限公司、上海材料研究有限公司多家单位作为起草单位，负责本规程的编制工作。

主要起草人：杨宝峰为编制总负责人；韦凯为编制负责人；姜博龙、马蒙、张厚贵负责编制；孙井林、刘杰、宫寅、杨吉忠、王少林、谭大正、刘冀钊、陆云、胡文林、何宾、陈江雪、谭新宇、王平、吴琼、吴宗臻、石熠、崔日新、田琪、陈嘉梁、刘艳提供技术指导。

二、制订标准的必要性和意义

本标准的制订，是为了规范轨道交通轨道减振效果的试验方法、技术条件、评价方法。本规范适用于地铁、轻轨和市域（郊）铁路的轨道减振效果实验室评价，普速铁路、高速铁路可参照使用。从国内相关标准调研来看，尚无实验室轨道减振效果评价的相关技术规范 and 标准，导致不同科研单位实验室内的激振设备、激振方法、轨道边界条件等不同，相同减振产品在不同科研单位的实验室内采用不同方法测得的效果存在巨大差异，造成减振轨道产品在服役过程中减振效果达不到预期的情况；有必要制定实验室内测试轨道减振产品的统一方法，避免因轨道减振设计失当或产品质量问题而造成严重的次生病害及高额经济损失。

三、主要工作过程

本标准通过收集既有工程应用经验，以及相关研究成果、试验检测结果及使用单位反馈信息，确定标准编制方向。经中国交通运输协会立项和大纲审批通过，根据评审会专家意见，形成征求意见稿并征求意见，报中国交通运输协会评审。再根据评审会专家意见进行补充、修改，经中国交通运输协会同意，挂网征求意见。针对反馈意见，提出处理办法，进行补充、修改，形成送审稿。经中国交通运输协会同意，进行专家审查。根据专家审查会形成的专家意见进行修改，形成报批稿，上报审批。

标准编制过程加强组织协调，建立高效、灵活的工作机制，充分利用各参编单位在工程服务及科学研究中的技术积累和资源网络，组织一支理论知识扎实、实践经验丰富的骨干攻关队伍，为本标准的编制提供充分的人力和技术保障。

四、制订标准的原则和依据，与现行法律、法规、标准的关系

目前，我国尚无实验室轨道减振效果评价的相关技术规范 and 标准。本标准制订的基本原则是以现有研究工作为基础，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，对减振轨道产品的减振效果测试评价方法进行定义、描述和规范。

本规程编制过程中，查阅了下列规范、标准和技术规程：

- 1 《城市区域环境振动标准》（GB 10070-88）
- 2 《城市区域环境振动测量方法》（GB 10071-88）
- 3 《机械振动与冲击人体暴露于全身振动的评价 第1部分：一般要求》（GB/T 13441.1-2007）
- 4 《建筑工程容许振动标准》（GB 50868-2013）
- 5 《建筑工程容许振动标准》（GB 50868-2013）
- 6 《地铁设计规范》（GB 50157-2013）
- 7 《不锈钢冷轧钢板和钢带》（GB/T 3280-2015）
- 8 《环境影响评价技术导则 城市轨道交通》（HJ 453-2018）
- 9 《浮置板轨道技术规范》（CJJ/T 191-2012）
- 10 《城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准》（JGJ/T 170-2009）
- 11 《地铁噪声与振动控制规范》（DB11/T 838-2019）
- 12 《Acoustics—Railway applications—Measurement of noise emitted by railbound vehicles》（ISO 3095-2013）

现有行业标准《环境噪声与振动控制工程技术导则》（HJ 2034-2013）规定了噪声与振动控制工程的通用技术要求，但对铁路轨道系统并未给出实验室内振动检测的具体方法，实际过程中可能造成减振轨道产品在服役过程中减振效果达不到预期的情况，造成严重的次生病害及高额经济损失。

五、主要条款的说明，主要技术指标、参数、实验验证的论述

1 总则

本文件规定了轨道交通轨道减振效果的试验方法、技术条件、评价方法。

本文件适用于地铁、轻轨和市域（郊）铁路的轨道减振效果实验室评价，普速铁路、高速铁路可参考使用。

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 10070-88 城市区域环境振动标准

GB 10071-88 城市区域环境振动测量方法

GB/T 13441.1-2007 机械振动与冲击人体暴露于全身振动的评价 第1部分:一般要求

GB 50868-2013 建筑工程容许振动标准

GB 50157-2013 地铁设计规范

GB/T 3280-2015 不锈钢冷轧钢板和钢带

HJ 453-2018 环境影响评价技术导则 城市轨道交通

CJJ/T 191-2012 浮置板轨道技术规范

JGJ/T 170-2009 城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准

DB11/T 838-2019 地铁噪声与振动控制规范

ISO 3095-2013 Acoustics—Railway applications—Measurement of noise emitted by railbound vehicles

3 术语和定义

在现有标准规范的基础上增加了以下术语。

3.1 轨道弹性元件 track elastic element

轨道系统内可以减小振动的具有弹性的部件。

3.2 高频动刚度 high-frequency dynamic stiffness

在一定的荷载下，以设定的测试频率（10Hz -160Hz）引起周期性单位变形的作用力。

3.3 高频动模量 high-frequency bedding modulus

在一定的荷载下，以设定的测试频率（10Hz -160Hz）引起周期性单位变形的面压力。

3.4 分频振级插入损失 frequency-depended insertion loss of vibration level

在相同边界条件下，采用减振轨道前后，轨旁固定参考点处每个频带的振动加速度级之差。

3.5 Z 振级插入损失 Z-vibration level insertion loss

在相同边界条件下，采用减振轨道前后，轨旁固定参考点处Z振级之差。

3.6 车辆簧下质量 unsprung mass

在车辆一系悬挂下方，支承于钢轨上的车辆每轴的车轮、轮轴、轴箱、制动盘、齿轮箱和轴挂电机等质量的总和。

参考规范 HJ 453-2018，3.14，有修改。

3.7 空车载轨道固有频率 natural frequency of track under empty-load vehicle

空车荷载作用下的轨道固有频率。

3.8 满车载轨道固有频率 natural frequency of track under full-load vehicle

满车荷载作用下的轨道固有频率。

4 试验方法

4.1 分类与选择

根据实验室设备条件，可选冲击激振法或荷载谱激振法。

规定了两种试验方法。

4.2 冲击激振法

4.2.1 试验准备

确定落轴高度 h ，见公式 1。

$$h = (v_0^2 / 2g) \times n \times 1000 \dots\dots\dots (1)$$

式中：

h ——落轴高度，单位为毫米（mm）；

v_0 ——车轮的垂向振动速度最大值，单位为米每秒（m/s）；

g ——重力加速度，单位为米每二次方秒（m/s²）；

n ——实验室轨道长度范围内可同时作用的车轮数量。

其中，车轮垂向振动速度最大值 v_0 根据现场实测获得，如果无现场实测数据，通过车辆-轨道耦合动力学模型仿真计算获得，仿真计算参数包括轨道不平顺、车辆参数与轨道弹性元件高频动刚度，其选择原则如下：

a) 轨道不平顺

轨道不平顺根据现场实测确定；如果无现场实测数据，则输入的轨道不平顺必须包括短波不平顺谱，宜采用 ISO3095-2013 短波不平顺谱。

b) 车辆参数

应区分不同的车辆轴重（空载或满载）、运行速度、簧下质量等。

c) 轨道弹性元件高频动刚度

轨道层间采用 Kelvin-Voigt 模型，扣件系统弹性元件刚度与阻尼分别选取 80 Hz 下的高频动刚度和阻尼，轨枕弹性元件刚度与阻尼分别选取 60 Hz 下的高频动刚度和阻尼，道床弹性元件刚度与阻尼分别选取 40 Hz 下的高频动刚度和阻尼。扣件系统、轨枕、道床弹性元件高频动刚度测试方法按照附录 C 执行。

规定了计算落轴高度时各项参数的选取方法。

4.2.2 试验流程

试验流程如图 1 所示。

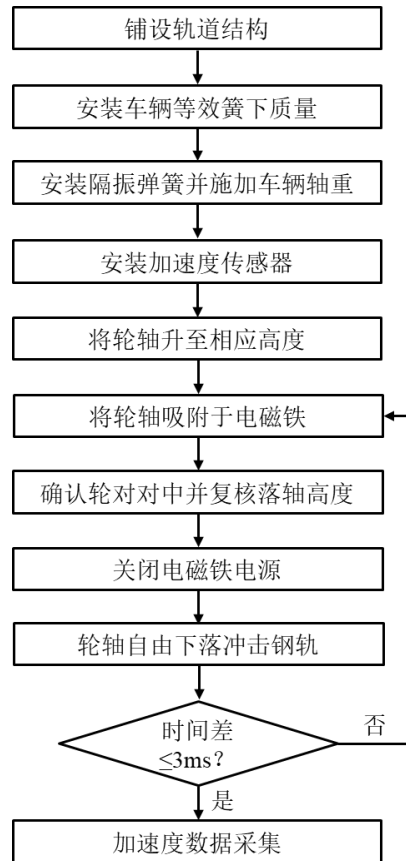


图 1 落轴冲击激振试验流程图

a) 铺设轨道结构：在基础上铺设有砟或无砟轨道，若单独测试无砟轨道减振扣件的插入损失，轨道板与基础需固结；

b) 安装车辆等效簧下质量：在钢轨上沿轨道纵向平行布置两个车辆簧下质量块，其纵向间距为车辆固定轴距；

c) 安装隔振弹簧并施加车辆轴重：将隔振弹簧放置于质量块中间，并通过静态加载设备在隔振弹簧上施加空车或满车轴重；

d) 安装加速度传感器：将加速度传感器布置在轨道中心横断面的轨旁地面 0.5-1m 处，并连接到数据采集仪进行加速度数据的采取；

e) 落轴冲击试验过程：采用减振轨道前后，分别在空车和满车轴重条件下进行 5 组落轴试验，每组试验首先利用升降装置将轮轴升至相应高度，然后接通升降装置中电磁铁电源，将轮轴吸附于电磁铁上，待轮轴静止后，确认轮对对中并复核落轴高度，最后关闭电磁铁电源，使轮轴自由下落，冲击钢轨，两轮接触钢轨的时间差控制在 3 ms 以内。落轴冲击激振装置见附录 A。

规定了进行落轴冲击试验时的操作流程。

4.3 荷载谱激振法

4.3.1 试验准备

确定钢轨垂向振动加速度的幅值谱 X ，见公式 2。

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp(-j2\pi kn/N) \quad (k = 0, 1, 2 \dots N-1) \dots\dots\dots (2)$$

式中：

X ——钢轨垂向振动加速度的幅值谱，单位为米每二次方秒 (m/s^2)；

x ——钢轨垂向振动加速度的时间序列，单位为米每二次方秒 (m/s^2)；

N ——谱线数。

确定荷载谱 P ，见公式 3。

$$P(k) = \frac{1}{N} |X(k)|^2 \quad (k = 0, 1, 2 \dots N-1) \dots\dots\dots (3)$$

式中：

P ——荷载谱，单位为米每二次方秒的平方每赫兹 ($(\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$)；

F ——钢轨垂向振动加速度的幅值谱，单位为米每二次方秒 (m/s^2)；

N ——谱线数。

其中，钢轨垂向振动加速度的时间序列 x 根据现场实测获得，如果无现场实测数据，通过车辆-轨道耦合动力学模型仿真计算获得，仿真计算参数包括轨道不平顺、车辆参数与轨道弹性元件高频动刚度，其选择原则与冲击激振法相同。

4.3.2 试验流程

试验流程如图 2 所示。

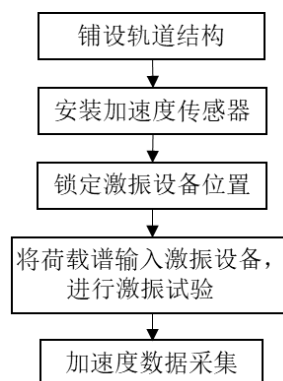


图 2 荷载谱激振试验流程图

(a) 铺设轨道结构：在基础上铺设有砟或无砟轨道，若单独测试无砟轨道减振扣件的插入损失，轨道板与基础需固结；

(b) 安装加速度传感器：将一个加速度传感器布置在轨道中心横断面的钢轨底部，将另一个加速度传感器布置在轨道中心横断面的轨旁地面 0.5-1m 处，并连接到数据采集仪进行数据的采集；

(c) 荷载谱激振试验过程：采用减振轨道前后，分别进行 5 组空车轴重荷载谱激振试验和满车轴重荷载谱激振试验，每组试验首先将激振设备移动至测试位置，使用刹车装置锁定激振设备位置，接通激振设备电源，将荷载谱输入激振设备，进行激振试验。

荷载谱激振试验装置见附录 B。

5 技术条件

5.1 场地

试验场地表面平整，地基强度不低于 1200 MPa。

提出了试验场地的条件。

5.2 车辆

5.2.1 车辆等效簧下质量

通过加工等同车辆簧下质量的横梁来模拟减振轨道上的车辆参振质量，横梁间距为车辆固定轴距。

规定了车辆簧下质量的作用和摆放要求。

5.2.2 车辆等效荷载

在横梁中间安置隔振弹簧，隔振弹簧刚度不大于车辆一系弹簧刚度的两倍，在隔振弹簧上施加空载或满载轴重。

规定了隔振弹簧的摆放位置、刚度以及等效荷载的质量。

5.3 钢轨

根据实际运营条件，选取设计钢轨类型，试验长度大于等于 4.8 m。

规定了落轴冲击试验中钢轨的类型以及尺寸。

5.4 扣件系统

按照设计轨枕间距布置扣件。

规定了扣件的布置间距。

5.5 轨枕

按照设计要求，试验长度内铺设同一类型的混凝土轨枕，混凝土强度等级不应低于 C60，混凝土 28 d 弹性模量不应低于 3.6×10^4 MPa。

规定了轨枕的铺设以及强度要求。

5.6 道床

5.6.1 无砟道床

混凝土强度等级不低于 C40，道床面低于钢轨底面不宜小于 70 mm。如果无砟道床为纵连结构形式，则试验长度大于等于 4.8 m，如果无砟轨道为单元结构形式，则试验长度为单元板实际尺寸。

规定了无砟道床的尺寸要求。

5.6.2 有砟道床

有砟道床纵向长度大于等于 4.8 m，其他参数参考相关设计文件。

规定了有砟道床的纵向尺寸要求。

5.7 弹性元件高频切线动刚度测试装置

5.7.1 高频切线动刚度测试设备

最大荷载大于等于 80 kN，最大输出频率不低于 200 Hz；位移/力传感器的采样频率不低于 5 kHz，位移精度不低于 2 μ m，荷载误差不大于 1%。

规定了高频切线动刚度测试设备的参数要求。

5.7.2 GBP 板（Geometric Ballast Plate）—几何道砟板

用于加载有砟轨道轨枕弹性元件或有砟道砟弹性元件，详见附录 D。

规定了加载有砟轨道轨枕弹性元件或有砟道砟弹性元件时的加载板。

5.8 落轴冲击激振装置

5.8.1 静态加载设备

静态液压加载装置可施加不低于 200 kN 的荷载，加载行程不小于 100 mm。

规定了静态加载设备的参数。

5.8.2 落轴冲击质量

落轴冲击质量应与设计线路车辆簧下质量一致，误差 $\pm 10\%$ 。

明确了落轴冲击质量的要求。

5.8.3 落轴冲击位置

落轴冲击位置在轨道中部钢轨上。

规定了落轴冲击的位置。

5.9 荷载谱激振设备

激振设备一般为 4 点支撑，支撑点在钢轨上，支撑点纵向距离一般与轴距相同，激振设备的输出荷载应体现实际轨道平顺性、车辆轴重和簧下等效质量的综合影响。

明确了荷载谱激振设备的要求。

6 评价方法

6.1 分频插入损失评价

对于采用减振轨道前后，分别取五组在空车和满车轴重条件下的轨道板 4~200 Hz 分频振级的平均值，并利用公式（4）分别计算两种车载条件下的分频振级插入损失值，取较小值作为减振轨道的分频插入损失。

$$\Delta VL_i = VAL_q(i) - VAL_h(i) \cdots \cdots \cdots (4)$$

式中：

ΔVL_i ——每个频带的加速度振级插入损失（分频振级插入损失），单位为分贝（dB）；

$VAL_q(i)$ ——选择没有减振轨道的地段为参照系，其轨旁 0.5-1 m 固定测点铅垂向振动加速度级在每个频带的振动级，单位为分贝（dB）；

$VAL_h(i)$ ——选择采用减振轨道的地段为参照系，其轨旁 0.5-1 m 固定测点铅垂向振动加速度级在每个频带的振动级，单位为分贝（dB）。

[来源：CJJ/T 191-2012，A1.4，有修改]

[来源：JGJ/T 170-2009，5.1，有修改]

分频插入损失值可用于4~200Hz轨道分频减振效果评价。

参考 CJJ/T 191-2012 的 A1.4，和 JGJ/T 170-2009 的 5.1，确定了分频振级插入损失的计算方法。

6.2 Z 振级插入损失评价

对于采用减振轨道前后，分别取五组在空车和满车轴重条件下的轨道板 Z 振级的平均值，并利用公式（5）分别计算两种车载条件下的 Z 振级插入损失值，取较小值作为减振轨道的 Z 振级插入损失。

$$\begin{aligned}\Delta VL_Z &= VL_{Zq} - VL_{Zh} \\ &= 10 \lg \left(\sum 10^{\frac{VL_q(i)}{10}} \right) - 10 \lg \left(\sum 10^{\frac{VL_h(i)}{10}} \right) \dots\dots\dots (5) \\ &= 10 \lg \left(\sum 10^{\frac{VAL_q(i)+a_i}{10}} \right) - 10 \lg \left(\sum 10^{\frac{VAL_h(i)+a_i}{10}} \right)\end{aligned}$$

式中：

ΔVL_Z ——Z振级插入损失，单位为分贝（dB）；

VL_{Zq} ——选择没有采用减振轨道的地段为参照系，其轨旁0.5-1 m固定测点的Z振级，单位为分贝（dB）；

VL_{Zh} ——选择采用减振轨道的地段为参照系，其轨旁0.5-1 m固定测点的Z振级，单位为分贝（dB）；

$VL_q(i)$ ——选择没有采用减振轨道的地段为参照系，其轨旁0.5-1 m固定测点铅垂向振动加速度级在每个频带的计权因子修正后的振动级，单位为分贝（dB）；

$VL_h(i)$ ——选择采用减振轨道的地段为参照系，其轨旁0.5-1 m固定测点铅垂向振动加速度级在每个频带的计权因子修正后的振动级，单位为分贝（dB）。

[来源：GB 10071-88，2.3，有修改]

[来源：CJJ/T 191-2012，A1.4，有修改]

[来源：GB 50868-2013，6.0.2，有修改]

Z 振级插入损失值可参考表 1 评价 1~80Hz 轨道减振等级。

参考 CJJ/T 191-2012 的 A1.4，和 GB 50868-2013 的 6.0.2，确定了 Z 振级插入损失的计算方法。

表 1 轨道减振等级划分

减振等级	初等减振	中等减振	高等减振	特殊减振
Z 振级 插入损失 (dB)	[3, 7]	(7, 11]	(11, 16]	>16

[来源：DB11/T 838-2019，6.2]

参考规范 DB11/T 838-2019 的 6.2，规定了轨道减振等级。

6.3 试验报告

测试报告应包括以下内容：

- a) 本文件的编号、标题和发布日期；
- b) 进行试验的实验室的名称和地址；
- c) 试验日期；
- d) 使用的试验方法和流程；
- e) 试验轨道类型、尺寸；
- f) 传感器布置位置和参数；
- g) 轨道各部件的来源；
- h) 试验温度；
- i) 地基强度；
- j) 试验结果；
- k) 试验人员。

六、重大意见分歧的处理依据及结果

本标准制订过程中尚未发生过重大意见分歧。

七、采用国际标准和国外先进标准的，说明采标程度，以及与国内外同类标准水平的对比情况

本标准未采用国际标准和国外先进标准。

八、作为推荐性标准建议及其理由

随着我国城市轨道交通的快速发展和人们环保意识的不断增强，城轨运营管理部门对轨道减振设计的精度要求也越来越高。如何在轨道铺设之前预估铺设之后的减振效果是准确评价轨道减振效果的至关重要的问题。实验室内定点激振评价（包括落锤、落轴冲击激振和扫频激振）是目前评价轨道减振效果最为广泛的方法。然而，目前我国缺乏实验室轨道减振效果评价的相关技术规范 and 标准，致使不同的科研单位实验室内的激振设备、激振方法、轨道边界条件等都存在巨大的差异，因而同样的减振产品在不同科研单位的实验室内用不同方法测得的效果存在显著不同，造成减振轨道实验室测试的减振效果与现场实际使用情况差异较大，可能引发严重的次生病害及高额经济损失。本标准的制定科学规范了实验室内测试轨道减振产品的统一方法，避免上述情况的发生。

九、贯彻标准的措施建议

（1）精心组织安排，开展宣贯培训。建议由行业主管部门统一安排，召开标准宣贯会，对涉及的轨道交通建设、减振轨道产品设计、施工等单位开展标准实施培训和宣贯普及。明确减振轨道产品的设计技术指标、材料性能要求、施工工艺、检测方法、质量验收等方面的具体要求，指导减振轨道产品的设计，有效推动贯标工作的开展及落实。

（2）组织相关人员到实验室参观学习，直观展示减振轨道产品的减振效果测试评价流程；

（3）定期组织科研、生产、检验各环节人员进行技术交流。

十、其他应说明的事项

暂无。