

团 体 标 准

T/CCTAS XX-2021

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

草案版次选择

(本草案完成时间: X)

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国交通运输协会 发布

目 次

前 言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
3.1 轨道弹性元件	1
3.2 高频动刚度	1
3.3 高频动模量	1
3.4 分频振级插入损失	1
3.5 Z 振级插入损失	2
3.6 车辆簧下质量	2
3.7 空车载轨道固有频率	2
3.8 满车载轨道固有频率	2
4 试验方法	2
4.1 分类与选择	2
4.2 冲击激振法	2
4.3 荷载谱激振法	3
5 技术条件	5
5.1 场地	5
5.2 车辆	5
5.3 钢轨	5
5.4 扣件系统	5
5.5 轨枕	5
5.6 道床	5
5.7 弹性元件高频切线动刚度测试装置	5
5.8 落轴冲击激振装置	6
5.9 荷载谱激振设备	6
6 评价方法	6
6.1 分频插入损失评价	6
6.2 Z 振级插入损失评价	6
6.3 试验报告	7
附 录 A（规范性） 落轴冲击装置	8
附 录 B（规范性） 荷载谱激振装置	9
附 录 C（规范性） 弹性元件高频动刚度测试方法	10
C.1 设备及工装	10
C.2 试验样品	10

C.3 试验准备	10
C.4 加载步骤	12
C.5 试验报告	12
附录 D (规范性) GBP—几何道砟板	14
D.1 GBP 板的设计	14
D.2 GBP 板的材料	14
参考文献	17
索引	18

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：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、上海材料研究所有限公司。

本文件主要起草人：杨宝峰、韦凯、姜博龙、马蒙、张厚贵、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。

轨道减振效果实验室评价技术规程

1 范围

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/T3280-2015 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

下列术语和定义适用于本文件。

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。

[来源：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 满载载轨道固有频率 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。

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，若无现场实测数据，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；若无现场实测数据，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。

4.2.2 试验流程

试验流程如图 1 所示。

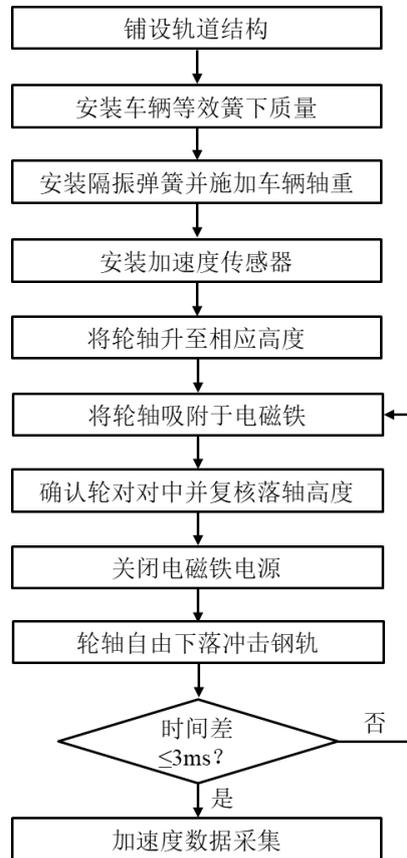


图 1 落轴冲击激振试验流程图

a) 铺设轨道结构：在基础上铺设有无砟或无砟轨道，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。

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，若无现场实测数据，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。

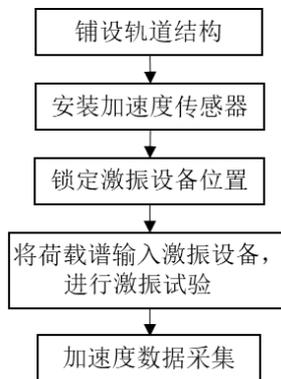


图 2 荷载谱激振试验流程图

(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。

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。

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。

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。

5.4 扣件系统

按照设计轨枕间距布置扣件。

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。

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。

[来源：GB 50157-2013，7.4.1，有修改]

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。

[来源：GB 50157-2013，7.4.2]

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 μm，荷载误差不大于 1%。

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。

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。

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±10%。

5.8.3 落轴冲击位置

落轴冲击位置在轨道中部钢轨上。

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。

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。

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

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。

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。

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]

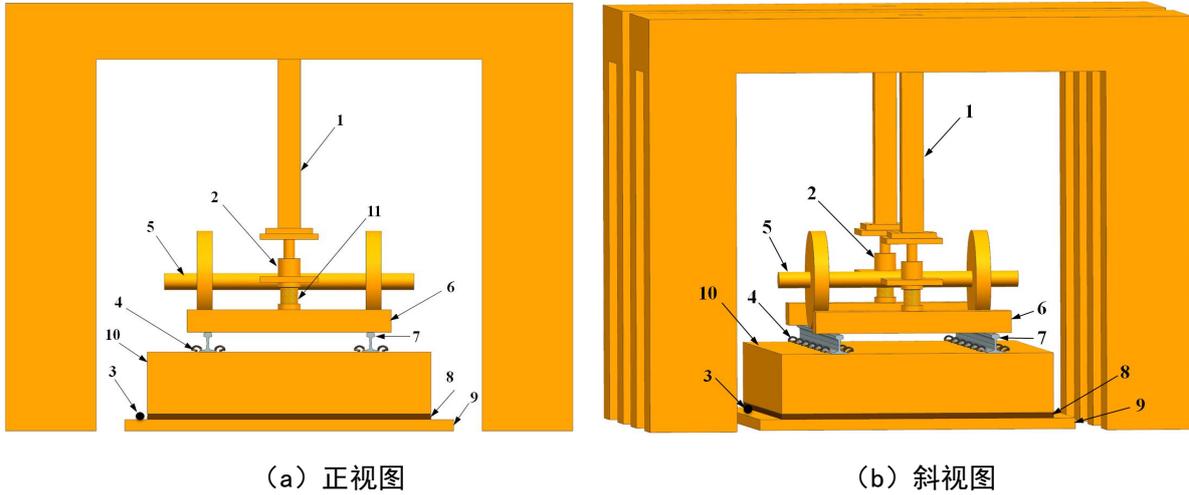
6.3 试验报告

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。

附录 A
(规范性)
落轴冲击装置

图 A.1 表示以减振垫隔离式浮置板轨道为例的落轴冲击激振装置。



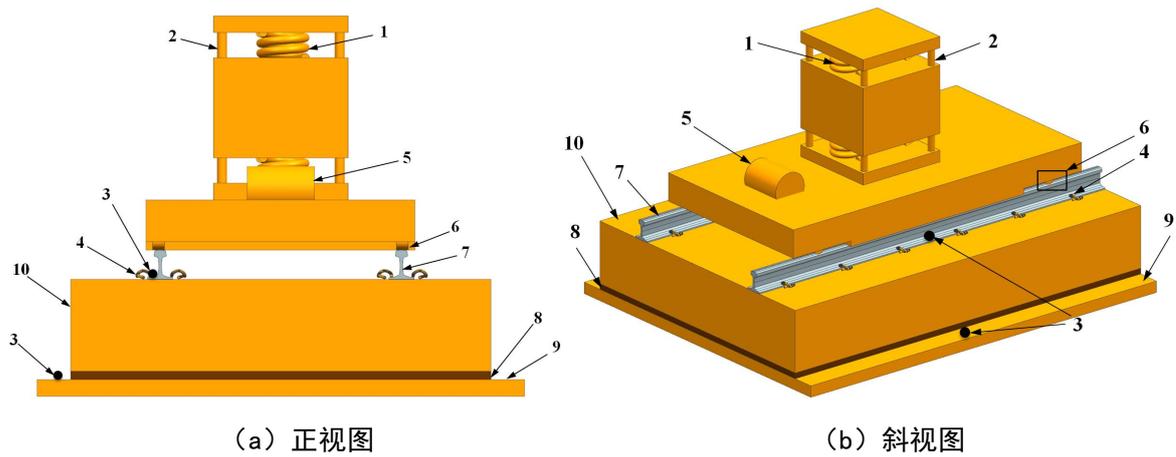
说明:

- 1 —— 加载反力架
- 2 —— 液压千斤顶
- 3 —— 加速度传感器
- 4 —— 扣件
- 5 —— 落轴轮对
- 6 —— 参振横梁
- 7 —— 钢轨
- 8 —— 减振垫
- 9 —— 基底
- 10 —— 轨道板
- 11 —— 隔振弹簧

图 A.1 落轴冲击激振试验装置示意图

附录 B
(规范性)
荷载谱激振装置

图 B.1 表示以减振垫隔离式浮置板轨道为例的荷载谱激振装置。



说明:

- 1 —— 支柱
- 2 —— 减振器
- 3 —— 加速度传感器
- 4 —— 扣件
- 5 —— 电机
- 6 —— 轮子
- 7 —— 钢轨
- 8 —— 减振垫
- 9 —— 基底
- 10 —— 轨道板

图 B.1 荷载谱激振试验示意图

附 录 C
(规范性)
弹性元件高频动刚度测试方法

C.1 设备及工装

C.1.1 试验机

施加最大荷载大于等于 80 kN，最大输出频率不低于 200 Hz。

C.1.2 支承钢板和加载钢板

长度、宽度不小于 320 mm，厚度不小于 20 mm 的平钢板。

C.1.3 GBP板

GBP 板见附录 D。

C.1.4 位移测定仪

能测定弹性元件垂向位移，精度为 2 μm 。

C.1.5 荷载测定仪

能测定弹性元件所受荷载，误差为 1%。

C.1.6 记录设备

在试验过程中能进行数字记录并画出荷载一位移曲线、采样频率不低于 5 kHz。

C.1.7 砂纸

符合 GB/T 9258.1，颗粒度为 P120 的砂纸。

C.2 试验样品

(a) 扣件系统弹性元件：(样品应为完整的结构单元)；数量 3 个。

(b) 轨枕弹性元件：250 mm×250 mm×厚度 (样品应为完整的结构单元)；数量 3 个。

(c) 道床弹性元件：300 mm×300 mm×厚度 (样品应为完整的结构单元)；数量 3 个。

C.3 试验准备

实验室环境温度 $23^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。

开始试验前，将被测样品及试验用所有部件和设备在 $23^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 的环境中至少静置 24 h。

试验台布置示意图如图 C.1 所示。其中，在被测轨道弹性元件中，无砟道床弹性元件、有砟轨枕弹性元件与道砟弹性元件又分别按照图 C.2 (a)、C.2 (b)、C.2 (c) 进行组装。

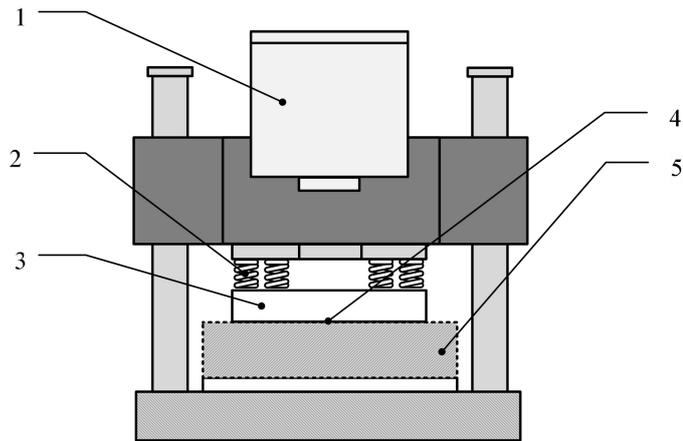
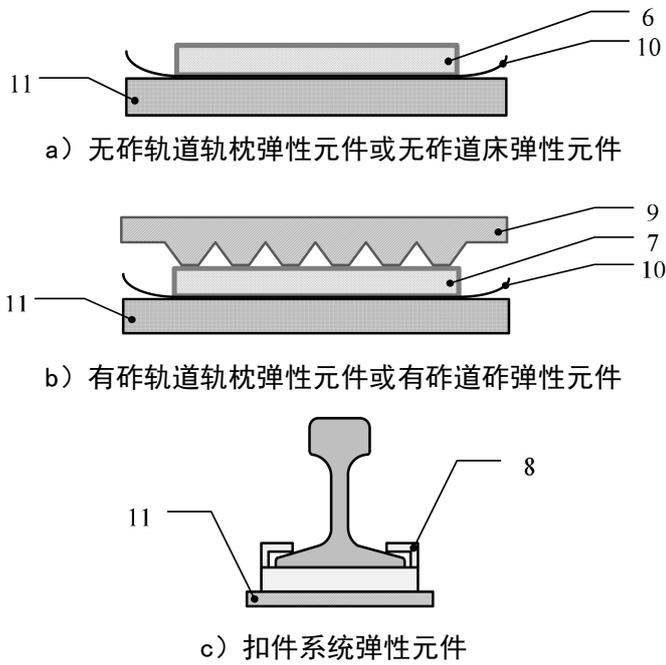


图 A.1 轨道弹性元件试验台布置示意图



说明：

- 1 —— 激振器
- 2 —— 通过弹性元件施加预载
- 3 —— 加载板
- 4 —— 轨道弹性元件与加载设备接触面
- 5 —— 被测轨道弹性元件
- 6 —— 无砟轨道轨枕弹性元件或无砟道床弹性元件
- 7 —— 有砟轨道轨枕弹性元件或有砟道砟弹性元件
- 8 —— 扣件系统弹性元件
- 9 —— GBP 板
- 10 —— 砂纸
- 11 —— 支承钢板

图 C.2 被测轨道弹性元件

C.4 加载步骤

首先施加静态预载 F_{pre} （模拟空载或满载），然后在弹性元件上施加不同频率的加载速度均方根值为 5 mm/s（或最大速度是 7 mm/s）的简谐激励（相当于以 5×10^{-8} m/s 为基准值的速度级 100 dBv）。

简谐激励循环 1000 次，在最后的 100 次循环中，记录 10 个循环的荷载 F_{1i} 、 F_{2i} 和支承钢板的位移 D_{1i} 、 D_{2i} 。计算 F_{1i} 、 F_{2i} 、 D_{1i} 、 D_{2i} 的平均值，记为 F_1 、 F_2 、 D_1 、 D_2 。分别用公式 (A.1) 和公式 (A.2) 计算得到弹性元件不同频率的高频动刚度和动模量。

$$k_{dyn}(f) = \frac{F_2 - F_1}{D_2 - D_1} \quad (C.1)$$

$$C_{dyn}(f) = \frac{k_{dyn}(f)}{A} \quad (C.2)$$

式中：

k_{dyn} ——减振弹性元件的高频动刚度，单位为牛顿每毫米 (N/mm)；

C_{dyn} ——减振弹性元件的高频动模量，单位为牛顿每立方毫米 (N/mm³)；

A ——减振弹性元件试样的面积，单位为平方毫米 (mm²)；

F_{1a} ——向被测样品施加的力的上限值，单位为牛 (N)；

F_{2a} ——向被测样品施加的力的下限值，单位为牛 (N)；

D_1 ——被测样品在加载至 F_{1a} 时的位移，单位为毫米 (mm)；

D_2 ——被测样品在加载至 F_{2a} 时的位移，单位为毫米 (mm)；

f ——加载频率，单位为赫兹 (Hz)，各弹性元件的加载频率见表 C.1。

表 C.1 弹性元件测试频率

频率 (Hz)	弹性元件		
	扣件系统	轨枕	道床
5	✓	✓	✓
10	✓	✓	✓
20	✓	✓	✓
30		✓	✓
40	✓	✓	✓
50		✓	
60	✓	✓	
80	✓		
100	✓		

注：当利用试验机自身的位移传感器测定加载钢板的位移时，应消除试验机加载时自身变形以及加载钢板自重引起的系统误差。

C.5 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) 使用的测试流程；
- e) 测试的减振元件的名称、类型和说明；
- f) 试样的来源；
- g) 试验温度；
- h) 试验结果；
- i) 试验人员。

附 录 D
(规范性)
GBP—几何道砟板

D.1 GBP板的设计

D.1.1 加载板

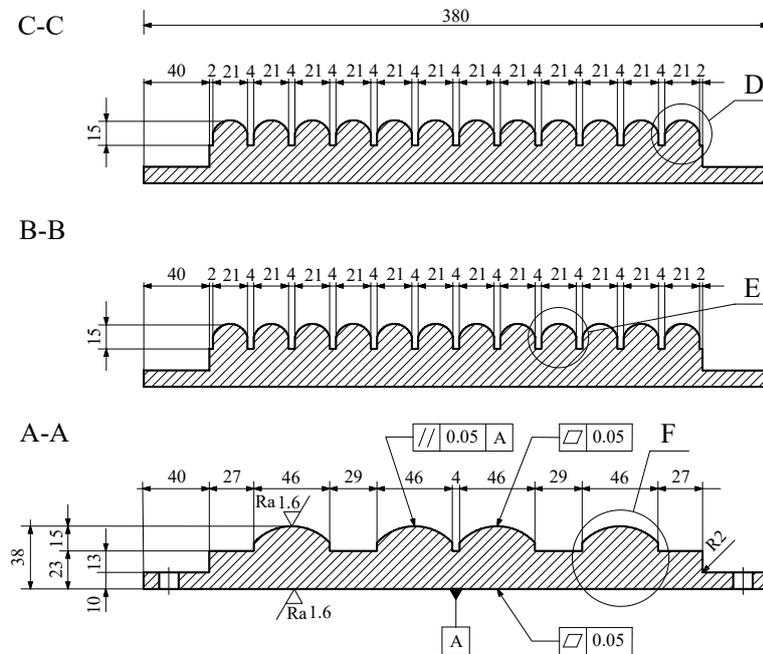
加载板的设计应符合图 D.1 和图 D.2。

D.1.2 一般公差

一般公差符合 GB/T 3280-2015 系列。

D.2 GBP板的材料

根据 GB/T 3280-2015 系列，钢材为 S30408 (06Cr19Ni10)。



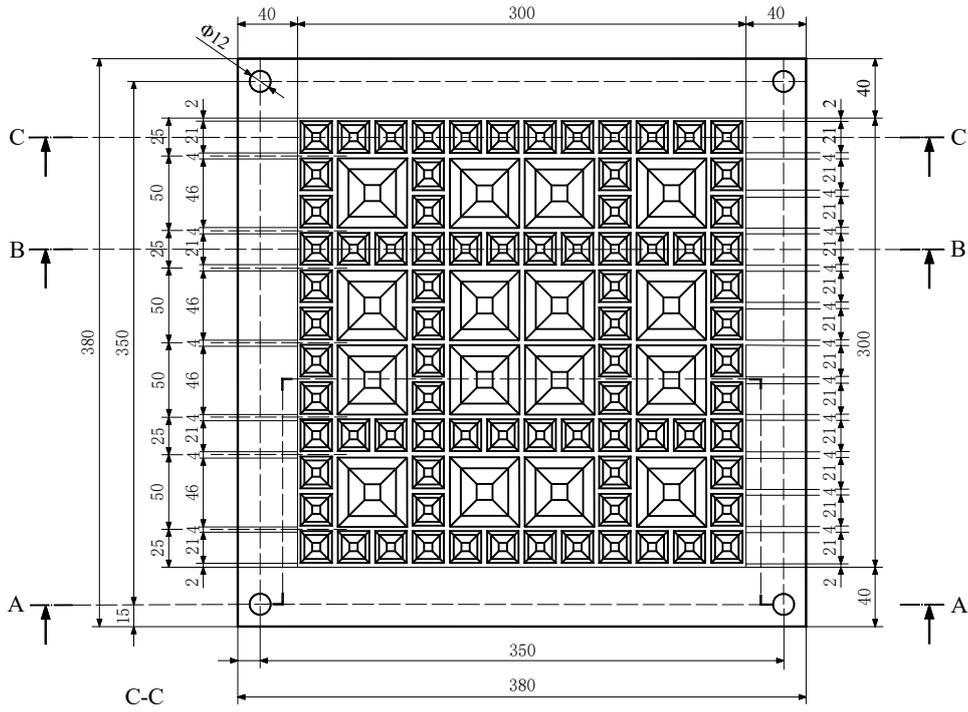
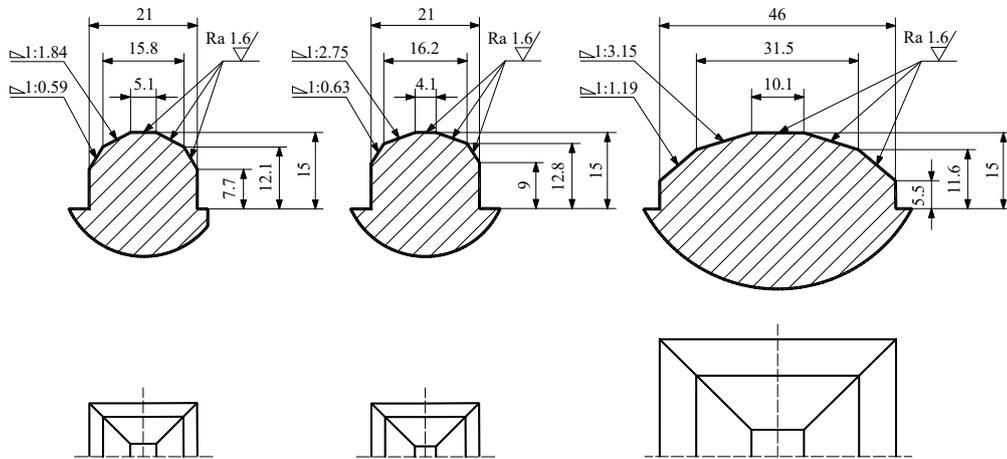


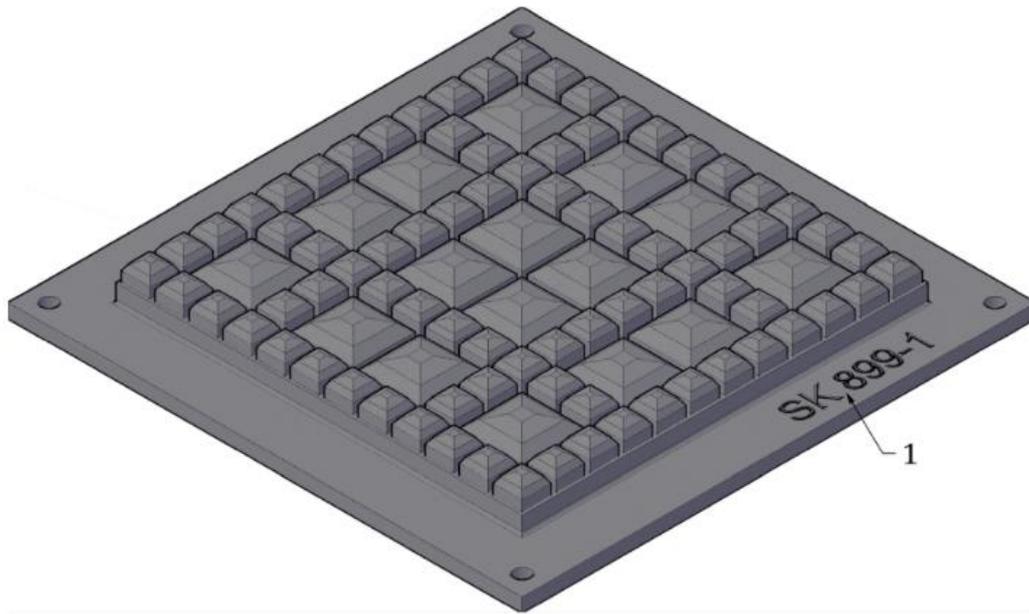
图 D.1 GBP 板外形

D M 1:1

E M 1:1

F M 1:1





说明：

D ——内部小塔尖细节

E ——在两个大塔尖之间小塔尖的细节

F ——内部大塔尖细节

1 ——原始顺序编号

图 D. 2 GBP 板细节和整体图

参 考 文 献

- [1] 西南交通大学, 北京市劳动保护科学研究所, 广州地铁设计研究院股份有限公司. 动刚度设计方法:ZL201910461423.6[P]. 2020-07-24.
- [2] 西南交通大学, 北京市科学技术研究院城市安全与环境科学研究所, 中国铁路设计集团有限公司. 一种确定落轴高度的方法、装置、电子设备和存储介质:ZL202210233239.8[P]. 2022-07-15.
- [3] 西南交通大学. 轮轨系统动力仿真的目标轮轨不平顺谱选取方法和装置:ZL202210786435.8[P]. 2022-09-30.
- [4] 北京交通大学. 一种自由落轴冲击激振装置:ZL201410748820.9[P]. 2015-05-13.

索 引
