

ICS 45.060.20
S 51

TB

中华人民共和国铁道行业标准

TB/T 3502—2018

铁道客车及动车组模态 试验方法及评定

Modal test methods and evaluation for railway
passenger car and EMU/DMU

2018-04-12 发布

2018-11-01 实施

国家铁路局 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
4 符号和缩略语	2
5 坐标系	2
6 试验主要内容	2
7 边界条件	3
8 试验系统	3
8.1 基本配置	3
8.2 激励系统	3
8.3 测量系统	3
8.4 分析系统	4
8.5 其他要求	5
9 测点布置	5
9.1 一般要求	5
9.2 车体测点	5
9.3 转向架测点	5
10 激励	6
10.1 激振器安装	6
10.2 激振力选择	6
10.3 激励点选择	6
10.4 激励方法	7
11 模态参数识别方法	10
11.1 一般要求	10
11.2 常用模态参数识别方法	10
12 试验结果验证及评定	10
12.1 一般要求	10
12.2 相干性检查	10
12.3 互易性检验	10
12.4 数据重复性检验	11
12.5 模态置信度检验	11
12.6 试验结果评定	11
13 试验报告	11
参考文献	12

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由中车青岛四方车辆研究所有限公司归口。

本标准起草单位：中车青岛四方车辆研究所有限公司、西南交通大学、国家铁路产品质量监督检验中心、中车青岛四方机车车辆股份有限公司。

本标准主要起草人：邓爱建、段合朋、刘宏友、庞伟娟、张立民、张锐、张忠凯、郭志成。

铁道客车及动车组模态试验方法及评定

1 范围

本标准规定了铁道客车及动车组整备车辆和车体结构模态试验的术语和定义、符号和缩略语、坐标系、试验主要内容、边界条件、试验系统、测点布置、激励、模态参数识别方法、试验结果验证及评定、试验报告。

本标准适用于铁道客车及动车组整备车辆和车体结构的模态试验；适用于标准轨距铁道客车及动车组整备车辆模态试验结果的评定。

2 规范性引用文件

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 2298—2010 机械振动、冲击与状态监测 词汇（ISO 2041:2009, IDT）

GB/T 4549.5—2004 铁道车辆词汇 第5部分：车体

GB/T 11349.2—2006 振动与冲击 机械导纳的试验确定 第2部分：用激振器作单点平动激励测量（ISO 7626-2:1990, IDT）

GB/T 11349.3—2006 振动与冲击 机械导纳的试验确定 第3部分：冲击激励法（ISO 7626-5:1994, IDT）

3 术语和定义

GB/T 4549.5—2004 和 GB/T 2298—2010 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。为了便于使用，以下重复列出了 GB/T 4549.5—2004 中的某些术语和定义。

3.1

车体 car body

容纳旅客、货物、整备品等。由转向架所支撑，主要起承载作用，是车辆的一个组成部分。

[GB/T 4549.5—2004, 定义 2.1]

3.2

车体结构 body structure

车体的主要承载结构。

注：由底架、侧墙、端墙和车顶等主要结构件组成。

3.3

整备车辆 car in working order

为保证编组后车辆能正常工作，完全装备好的铁道客车或动车组车辆（司乘人员除外）。

3.4

模态置信度 modal assurance criterion

用以评估模态参数识别的品质，验证所选自由度准确性的指标。

3.5

频响函数 frequency-response function

线性系统中，以频率为自变量的运动响应的傅里叶变换与激励力的傅里叶变换的比。

注：改写 GB/T 2298—2010, 定义 2.53。

4 符号和缩略语

符号和缩略语见表 1。

表 1 符号和缩略语

序 号	符号或缩略语	含 义
1	ζ	阻尼比
2	ω	圆频率
3	FFT(fast fourier transform)	快速傅里叶变换
4	MAC(modal assurance criterion)	模态置信度
5	oct(octave)	倍频程:频率比为 2 的两频率间的区间

5 坐标系

坐标系如图 1 所示,规定车辆某一运行方向为 x 轴(对应于车体纵向轴)正方向, z 轴(对应于车体垂向轴)正方向指向上, y 轴(对应于车体横向轴)位于轨面,与 x 轴和 z 轴组成一个右手坐标系。

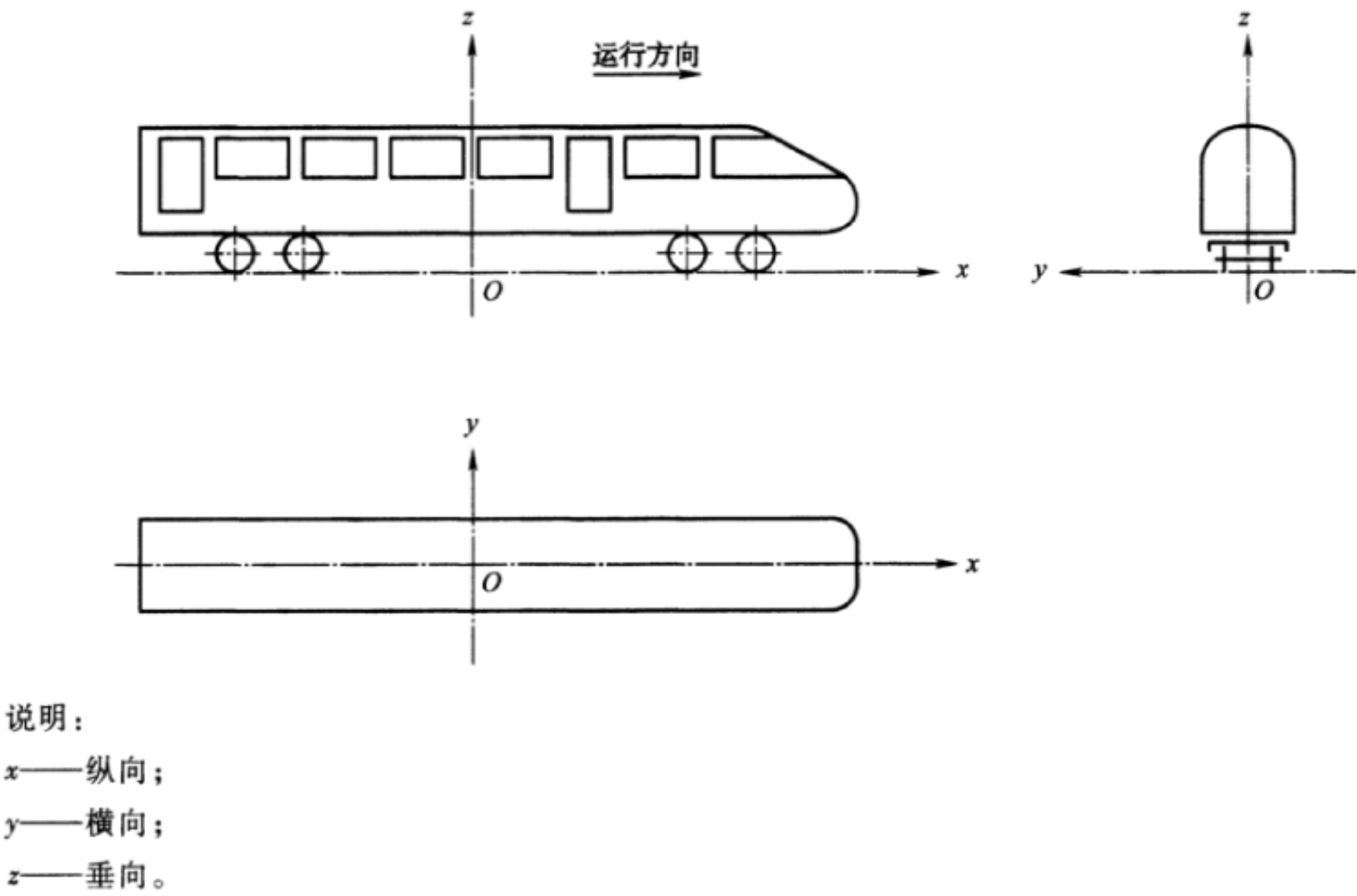


图 1 坐标系

6 试验主要内容

通过试验获取铁道客车及动车组车辆激励输入和响应输出数据,对数据进行处理、辨识,得到车辆模态参数。试验主要内容有:

- a) 试验预分析、建立试验模型;
- b) 试验实施;
- c) 模态参数有效性检验;
- d) 模态参数辨识;
- e) 试验结果评定。

7 边界条件

7.1 整备车辆应符合以下要求：

- a) 与车辆运用状态一致；
- b) 应放置在平直轨道上；
- c) 应为单车状态。

7.2 车体结构应符合以下要求：

- a) 车体结构通过弹性元件支撑。
- b) 车体结构模态试验的支撑方式应符合柔性边界。柔性边界支撑方式近似模拟自由状态，支撑系统的固有频率应小于车体结构一阶固有频率的 30%。
- c) 支撑点应选在车体结构刚度较大的节点处（如二系簧座等），避免车体结构支撑的静应力引起结构刚度变化。
- d) 车体结构的支撑方向应为车体垂向。
- e) 支撑连接件的屈服强度安全系数不应小于 4。

8 试验系统

8.1 基本配置

试验系统包括 3 部分：激励系统、测量系统和分析系统。

8.2 激励系统

8.2.1 激励方式

激励主要由激振器或力锤产生，也可由车辆振动试验台产生。

8.2.2 力锤激励系统

力锤激励系统应符合 GB/T 11349.3—2006 的规定。

8.2.3 激振器激励系统

8.2.3.1 组成

激振器激励系统一般包括激振器、功率放大器和信号发生器等。

8.2.3.2 激振器

激振器应能稳定输出预定波形的力，一般包括电动式、液压式等激振器，其要求应符合 GB/T 11349.2—2006 中 6.3 的规定。

8.2.3.3 功率放大器

功率放大器应符合以下要求：

- a) 功率放大器应与所用的激振器相匹配，具有高输出阻抗；
- b) 在试验频率范围内，频响特性为线性。

8.2.3.4 信号发生器

信号发生器有模拟式和数字式两大类，信号发生器应能产生与试验要求相适应的工作频带、激励波形及幅值。

8.3 测量系统

8.3.1 组成

测量系统一般由测量传感器、信号放大器和数据采集装置等组成。

8.3.2 测量传感器

8.3.2.1 加速度传感器

加速度传感器的使用及安装应符合以下要求：

- a) 量程及使用频率范围满足测试要求,线性度偏差不大于2%,频响偏差不大于5%;
- b) 有足够的灵敏度和较强的抗干扰能力,传感器质量和惯性特性应尽量小,以减少附加质量对被试对象的影响;
- c) 灵敏度应稳定,温度灵敏度偏差不大于1%,横向灵敏度应小于测量方向灵敏度的5%;
- d) 对使用环境条件(如湿度、温度、磁场、电场、声场等)的影响不敏感;
- e) 传感器安装可通过胶(或另加绝缘垫块)或双面胶纸(适用于频率低于400 Hz)等方法固定在被试对象上,安装应牢固,在传感器主轴方向应是刚性的,不应有松动或滑移;
- f) 传感器应与车辆绝缘,并保证测量系统单点接地;
- g) 连接传感器的低噪声电缆应安装可靠,并将电缆固定。

8.3.2.2 位移传感器

位移传感器的量程及使用频率范围应满足测试要求,非线性误差应小于2%。

8.3.2.3 应变传感器

应变传感器的量程及使用频率范围应满足测试要求,非线性误差应小于1%。

8.3.2.4 力传感器

力传感器的使用应符合以下要求:

- a) 量程及使用频率范围满足测试要求,线性度偏差不大于2%,频响偏差不大于5%;
- b) 力传感器安装时,其主轴灵敏度方向应与激振轴线方向重合。

8.3.3 信号放大器

信号放大器的功能是对信号进行放大和滤波,应符合以下要求:

- a) 频率范围应满足试验要求;
- b) 非线性度不大于1%;
- c) 动态范围大于60 dB;
- d) 幅值误差小于2%,通道间相位差小于2°。

8.3.4 数据采集装置

数据采集装置应符合以下要求:

- a) 模拟信号采样前应加模拟式抗混淆滤波器,滤波器的截止频率应大于最高分析频率且应尽量接近分析频率,频带外的衰减率应大于12 dB/oct。
- b) 采样率 f_s (Hz)应根据所处理信号的类型、最高分析频率 f_{\max} (Hz)、硬件条件等来选择。一般为:
 - 正弦信号: $f_s = (5 \sim 100)f_{\max}$, 采样点数应保证每帧信号为整周期;
 - 随机信号: $f_s = (2.5 \sim 4)f_{\max}$;
 - 瞬态信号: $f_s = (5 \sim 10)f_{\max}$ 。

8.4 分析系统

8.4.1 基本配置

分析系统应包括:

- a) 控制系统:实现激励信号控制。
- b) 数据预处理模块:实现数据预处理。
- c) 模态分析软件:几何模型的建立,模态参数识别以及振型动画显示等。

8.4.2 数据预处理

8.4.2.1 正弦信号处理

正弦信号的处理一般利用三角函数的正交特性,采用实、虚部分离计算法,即数字相关滤波法,计算出信号的实、虚部,直接计算输入输出的比值得到频响函数,加窗处理一般采用汉宁窗(Hanning Window)。

8.4.2.2 随机信号处理

随机信号首先进行加窗处理,一般选用汉宁窗,再进行FFT自谱、互谱分析,经若干次平均,最后计

算出频响函数。

8.4.2.3 瞬态信号处理

瞬态信号加力窗,响应信号加指数窗进行处理,再进行 FFT 自谱、互谱分析,经若干次平均,最后计算出频响函数。

8.5 其他要求

试验系统还应符合以下要求:

- a) 数模转换器和模数转换器字长至少 12 位;
- b) 激励系统、测量系统所用仪器设备应由具有检定、校准资质的机构检定合格,并在有效期内使用。

9 测点布置

9.1 一般要求

所测得的信号应有尽可能高的信噪比,因此,测点不应靠近节点。测点位置、数量及测量方向应考虑以下两方面要求:

- a) 能在变形后明确显示在试验频段内模态的变形特征及各模态间的区别,不遗漏所关注的模态;
- b) 保证所关注的结构点都在所选的测点之中。

9.2 车体测点

测点沿车体纵向均匀布置或选择特征部位布置 7 个(A~G)及以上截面,每个截面不应少于 8 个测点,每个测点分垂向和横向布置传感器。测点布置参见图 2。

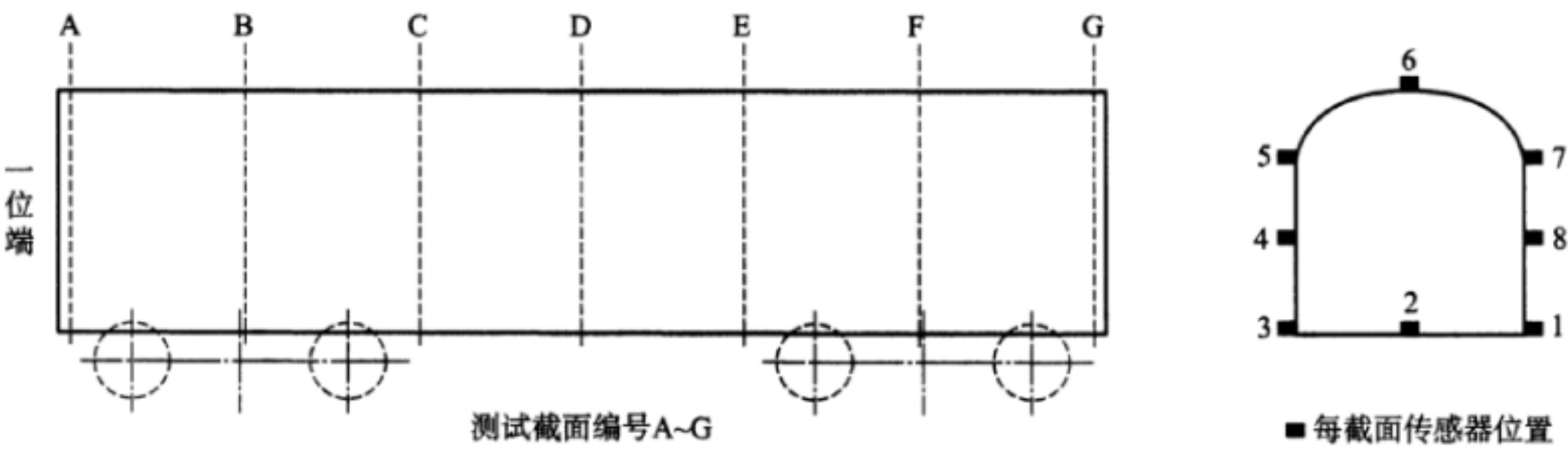


图 2 车体测点布置示意图

9.3 转向架测点

为测定转向架的浮沉和点头频率,在转向架构架的两侧梁上分别布置 5 个及以上垂向加速度传感器,测点布置参见图 3。

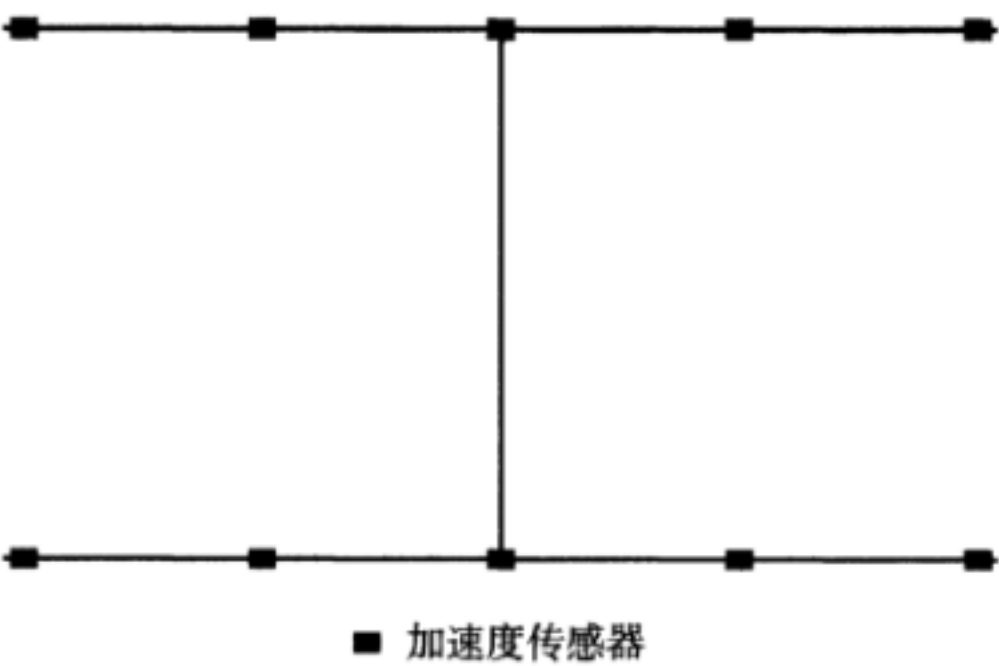


图 3 转向架测点布置示意图

10 激励

10.1 激振器安装

10.1.1 安装技术要求

激振器的安装应符合以下要求：

- 应保证有效施加预定方向的激振力,避免产生附加力矩或其他方向的力;
- 应保证激振力的有效传递和减小耦合影响;
- 加力连接件应为具有足够轴向刚度的柔性杆,确保激励力的有效传递和激振器的安全使用。

10.1.2 安装方式

激振器的安装方式如下：

- 固定式安装参见图 4,激振器安装于基座或专用支架上,其安装系统频率大于试验上限频率 2 倍;
- 弹性式安装参见图 5,用悬挂方式支撑激振器,其悬挂系统频率低于被试对象一阶固有频率的 20%。

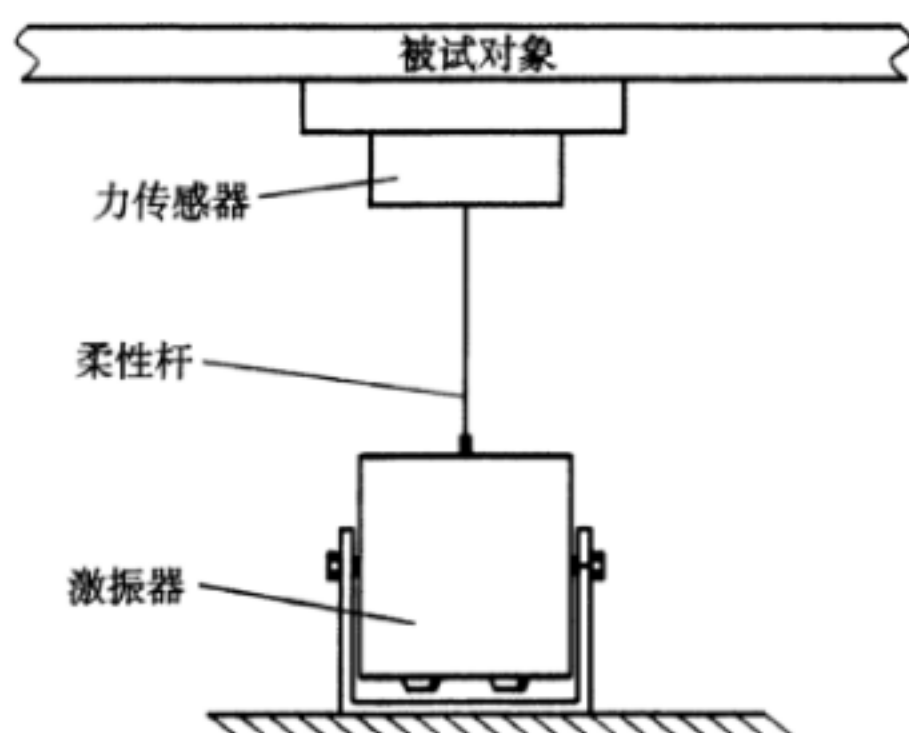


图 4 固定式安装示意图

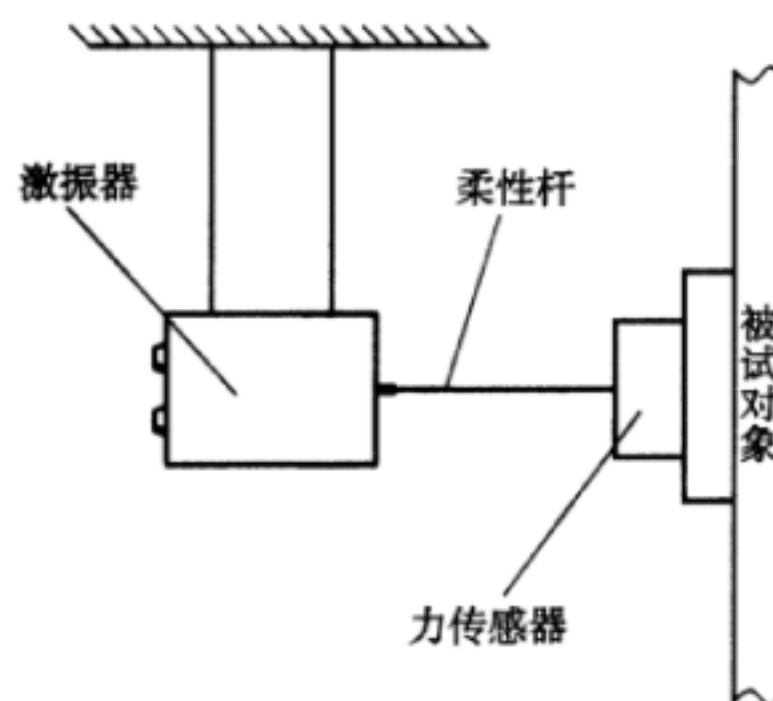


图 5 弹性式安装示意图

10.1.3 安装方向

激振器的安装方向有两种：

- 激励方向与坐标系主坐标轴一致;
- 激励方向与坐标系主坐标轴倾斜。

10.2 激振力选择

激振力的选择应符合以下要求：

- 车体和车体结构模态试验时,激振力的频率范围为 2 Hz ~ 45 Hz;整备车辆悬挂系统自振频率试验时,激振力的频率范围为 0.1 Hz ~ 20 Hz。根据试验测试要求,可分段进行试验。
- 激振力的大小能激起所关注的模态,激起的结构响应在线性范围内,测量电压值信噪比不小于 20 dB。
- 非线性系统结构(固有频率变化大于 2%),应选择固有频率变化率相对平稳的振级进行试验。

10.3 激励点选择

激励点选择应符合以下要求：

- 应根据预分析结果或预试验结果来选定;
- 避开振型节点或节线,布置在各阶模态振型幅值相对较大的位置;
- 应布置在被试对象的主要受力构件上;
- 应选择在刚性较大的连接部位;

- e) 各阶模态不能兼顾时,应对不同模态选择不同的激励点位置,分批进行试验;
- f) 宜采用多点激励;
- g) 对模态密集或耦合较强的频带应选取多点激励。

10.4 激励方法

10.4.1 单点正弦慢扫描试验法

试验时使激励信号的频率缓慢而连续变化,从低频到高频或从高频到低频扫过所关注的频率范围。测量前应进行预分析,确定扫描频段以及扫描速率,以获得稳态响应。如果以某一速率进行由低频到高频的扫描所得到的频响函数与以同一速率从高频到低频扫描所得到的曲线吻合,那么这个扫描速率就是合适的速率。在单点正弦扫描激励方式下,频响函数 $H(\omega)$ 一般按公式(1)估计。

$$H(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

$H(\omega)$ ——频响函数;

$F(\omega)$ ——输入激振力,单位为牛顿(N);

$X(\omega)$ ——输出加速度响应,单位为米每平方秒(m/s^2)。

单点正弦慢扫描试验时,频率以时间的线性函数或对数函数变化,过共振区的最大扫描速率按公式(2)、公式(3)计算。

$$S_{\max 1} = 216 f_r^2 \zeta_r^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$S_{\max 2} = 310 f_r^2 \zeta_r^2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中:

$S_{\max 1}$ ——线性最大扫描速率,单位为赫兹每分(Hz/min);

$S_{\max 2}$ ——对数最大扫描速率,单位为倍频程每分(oct/min);

f_r ——第 r 阶模态固有频率,单位为赫兹(Hz);

ζ_r ——第 r 阶模态阻尼比。

10.4.2 多点步进正弦试验法

测量中,在预先选定的频率范围内,从最低频到最高频选定足够数目离散的频率值,每次用一个频率给出足够长时间的激励信号,频率步进式增加,以获得在这一系列特定的频率激励下被试对象固有振动模态的稳态响应。

对于 i 个激励输入、 j 个响应输出的试验系统,进行 n 组不同大小和相位组合的正弦激励试验,频响函数矩阵 $[H(\omega)]$ 按公式(4)估计。

$$[H(\omega)] = [X(\omega)][F(\omega)]^T ([F(\omega)][F(\omega)]^T)^{-1} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中:

$[H(\omega)]$ ——频响函数矩阵;

$[F(\omega)]$ ——输入激振力矩阵($i \times n$);

$[X(\omega)]$ ——输出加速度响应矩阵($j \times n$)。

离散步进正弦激励时,在共振频率 90%~110% 范围内的频率步长和每一个频率的激励持续时间应符合以下要求:

- a) 最大频率步长按公式(5)计算。

$$\Delta f_{\max} = 0.64 f_r \zeta_r \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中:

Δf_{\max} ——最大频率步长,单位为赫兹(Hz)。

- b) 每一个频率的激励持续时间不小于响应稳定所需时间和测量(包括信号采集)所需时间之和。响应稳定所需的最短时间 t_{\min} 按公式(6)计算。

$$t_{\min} = 0.11 / (f_r \zeta_r) \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中:

t_{\min} ——响应稳定所需的最短时间,单位为秒(s)。

10.4.3 多点随机激励法

多点随机激励法采用多台激振器同时进行随机激励,通过频响函数的线性组合,分离各阶模态,获取模态参数。对于 i 个激励输入、 j 个响应输出的系统,频响函数矩阵 $[H(\omega)]$ 按公式(7)计算。

$$[H(\omega)] = \frac{[G_{yx}(\omega)]}{[G_{xx}(\omega)]} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中:

$[H(\omega)]$ ——频响函数矩阵;

$[G_{yx}(\omega)]$ ——激励输入与响应输出的互功率谱密度矩阵($j \times i$);

$[G_{xx}(\omega)]$ ——激励输入自功率谱密度矩阵($i \times i$)。

10.4.4 瞬态激励法

10.4.4.1 时间要求

瞬态激励法通常采用脉冲激励法、瞬态随机激励法等。瞬态激励信号通常由力锤激励或激振器激励获得。

瞬态激励时,两次力脉冲之间的最小间隔时间 τ_{\min} 不应小于瞬态响应初始幅值衰减到 5% 所需的时间。 τ_{\min} 按公式(8)计算。若测量和采样所需时间大于该时间,则由测量和采样所需时间确定 τ_{\min} 。

$$\tau_{\min} = 0.477 / (f_r \zeta_r) \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中:

τ_{\min} ——两次力脉冲之间的最小间隔时间,单位为秒(s)。

10.4.4.2 力锤激励

力锤激励应符合以下要求:

- 激励频率应选在力谱平直范围内,通过更换锤头材料和配重改变力脉冲宽度和频率范围。
- 激励方向应沿要求的施力方向,敲击时接触时间尽可能短,避免反弹冲击;连续激励时,其时间间隔应保证响应信号衰减到初始最大值的 5%。
- 力信号应加力窗,响应信号应加指数窗。
- 激励应使力和响应信号输出不超载并满足信噪比的要求。
- 应进行多组激励试验以提高试验结果的准确性。

10.4.4.3 激振器激励

瞬态随机激励信号由激振器的信号在短时间内切断产生。

瞬态激励时,按公式(7)计算频响函数。

10.4.5 车辆振动试验台强迫激振法

10.4.5.1 阶跃法

在车辆振动试验台上,根据振型的需要,对被试车辆的轮对进行阶跃激振,测定车体和转向架构架的位移响应时间历程,阶跃激振响应后的自由衰减曲线见图 6。根据响应曲线可计算出自振频率和相应的阻尼比。

阻尼比按公式(9)计算。

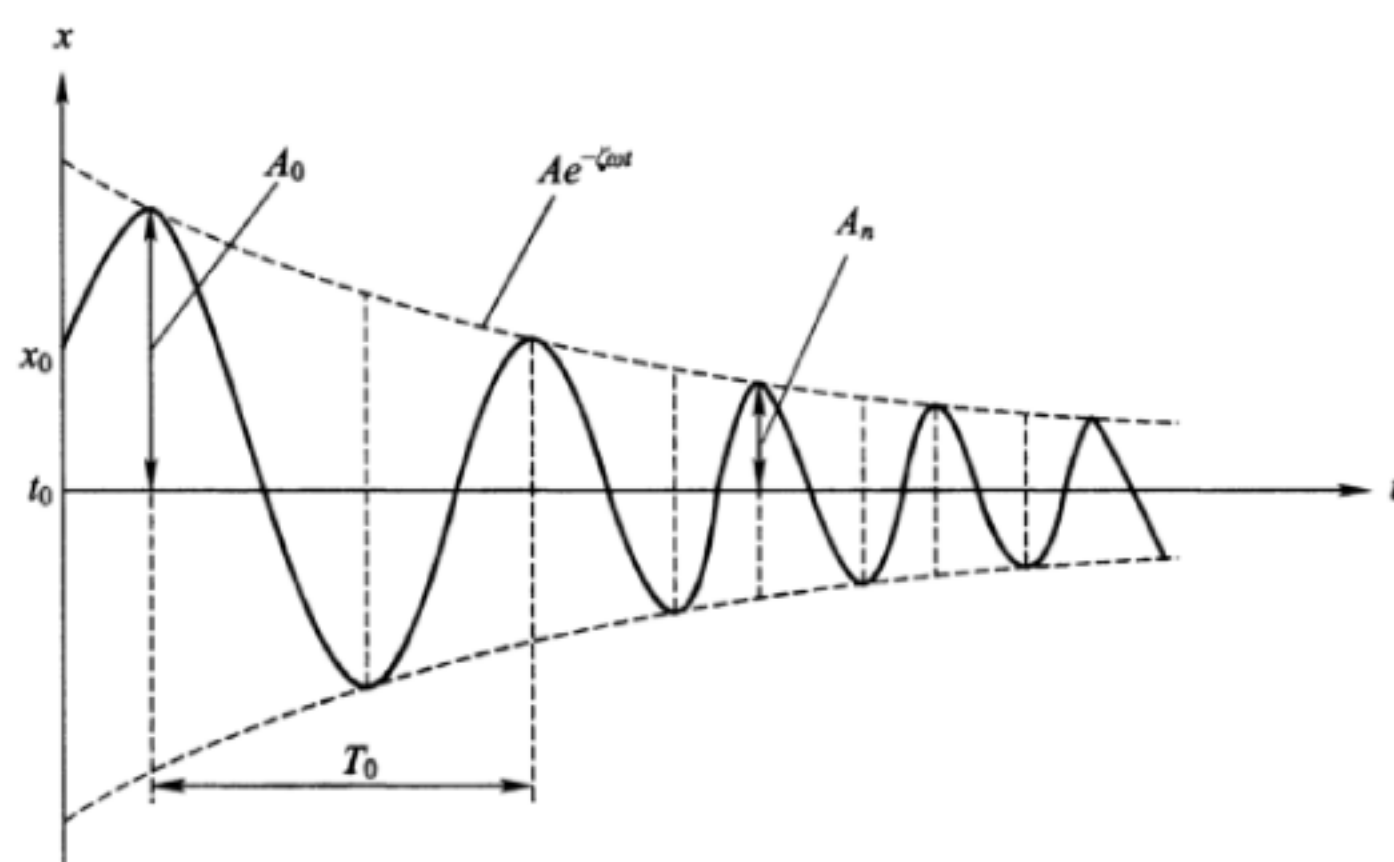
$$\zeta = \frac{1}{2\pi n} \ln \left(\frac{A_0}{A_n} \right) \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中:

ζ ——阻尼比;

n ——衰减周波数;

A_0 ——起始波振幅值,单位为毫米(mm);
 A_n ——第 n 个波振幅值,单位为毫米(mm)。



说明:

T_0 ——第 1 个波周期,单位为秒(s);

x_0 ——所选衰减曲线起始点幅值,单位为毫米(mm);

t_0 ——所选衰减曲线起始点时间,单位为秒(s)。

图 6 自由衰减曲线

10.4.5.2 变频扫描法

根据振型的需要,利用车辆振动试验台对车轮进行正弦激振,测定车体和转向架构架的位移(或加速度)响应。连续改变正弦激振的频率,扫频速度不应大于 0.05 Hz/s,记录连续变化的响应曲线,根据车体或转向架构架的最大振动响应点的振动频率,确定该振型下的自振频率。在条件限制时允许离散改变频率进行扫频,频率变化间隔不应大于 0.5 Hz,但在出现自振频率 ± 0.5 Hz 范围内,频率变化间隔不应大于 0.1 Hz。

10.4.5.3 随机法

在车辆振动试验台上用白噪声随机信号对轮对进行激振,通过测定车体和转向架构架的响应,计算出频响函数自振频率。

10.4.6 平直轨道楔块组合法

以不同的布置方式在被试车辆车轮下设置楔块,将车轮推上楔块并从最高处自由落下,使车辆产生振动,参见图 7。楔块的最高处高度为 5 mm ~ 7 mm。

单位为毫米

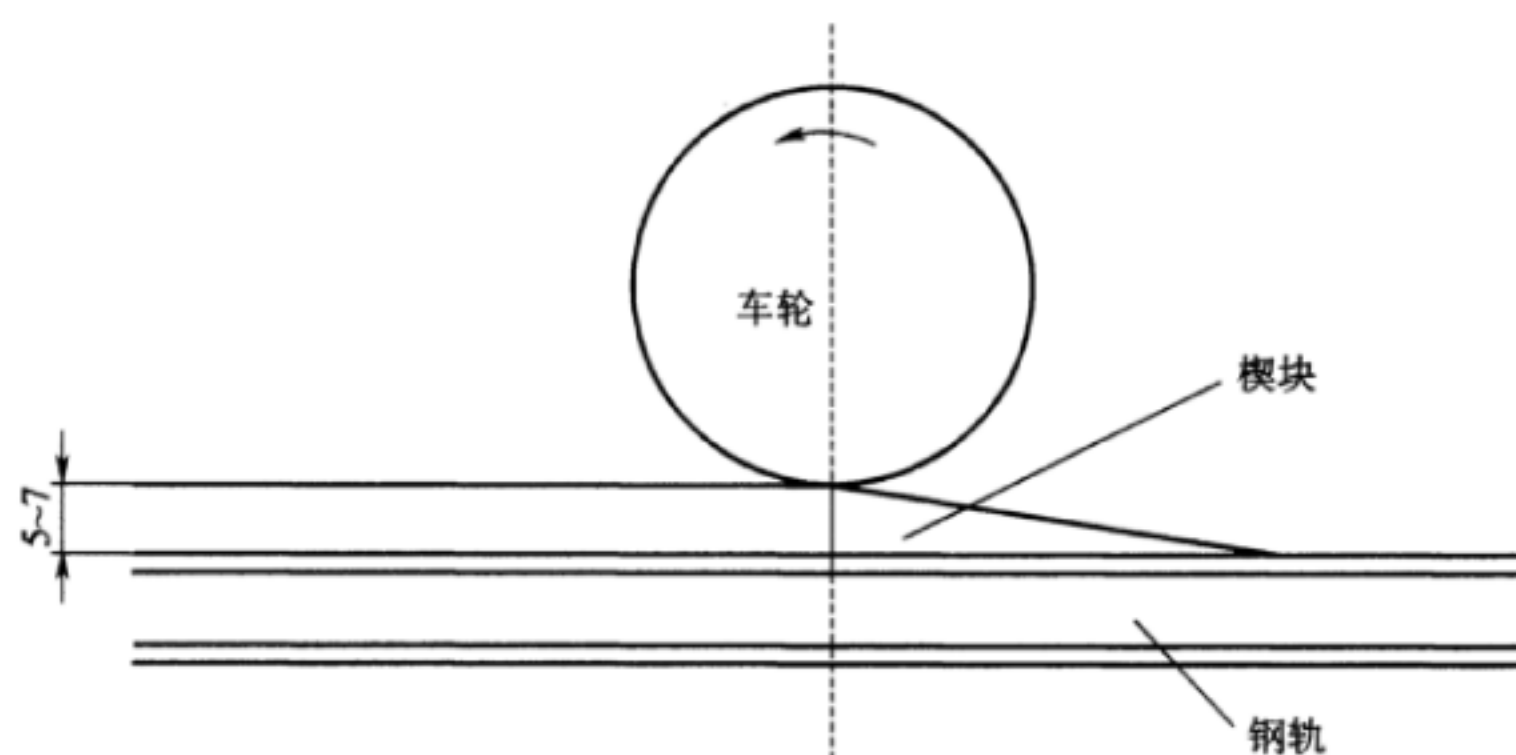


图 7 平直轨道楔块组合法激振示意图

平直轨道上楔块的布置分为 4 种,分别在每一种楔块布置下进行测量。楔块布置参见图 8。

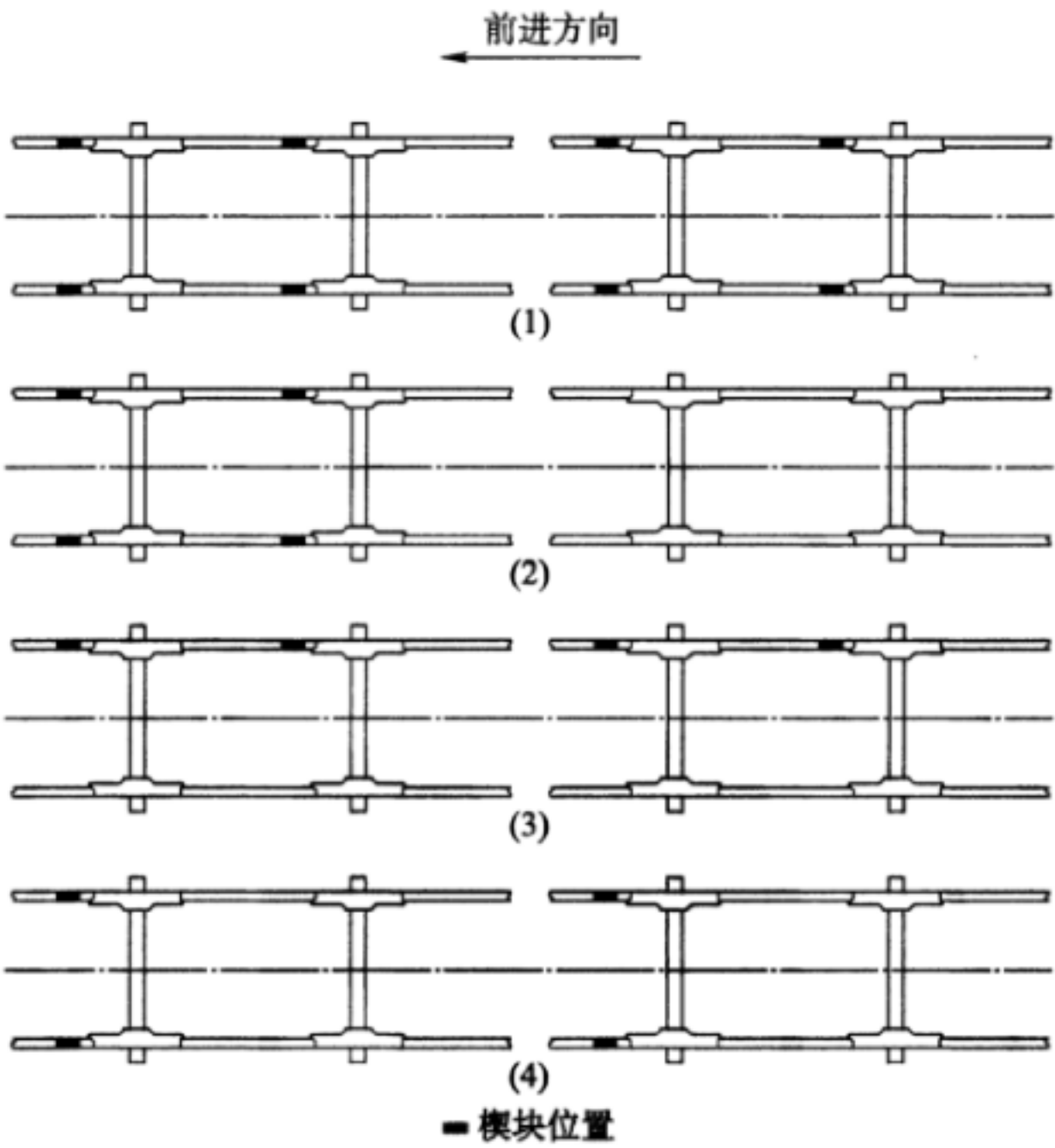


图 8 楔块布置示意图

11 模态参数识别方法

11.1 一般要求

模态参数识别方法应根据试验方法、被试对象的模态特性和试验数据的类型(时域或频域)选定。

11.2 常用模态参数识别方法

被试对象模态参数的识别宜采用但不局限于以下方法:最小二乘复指数法(LSCE 法)、频域多输入多输出(MIMO)识别法、正交多项式法和复模态指示函数法。

12 试验结果验证及评定

12.1 一般要求

用不同的激励方法和不同的模态参数识别方法对试验结果进行评定。

12.2 相干性检查

试验前,应分别检查每个激励点激励信号与响应点信号的相干性,相干函数按公式(10)计算。

$$\gamma^2(\omega) = \frac{|G_{YX}(\omega)|^2}{G_{XX}(\omega)G_{YY}(\omega)} \dots\dots\dots(10)$$

式中:

- $\gamma^2(\omega)$ ——相干函数;
- $G_{YX}(\omega)$ ——响应和激励信号的互功率谱密度估计;
- $G_{XX}(\omega)$ ——激励信号的自功率谱密度估计;
- $G_{YY}(\omega)$ ——响应信号的自功率谱密度估计。

相干函数 $\gamma^2(\omega)$ 不应小于 0.8。

12.3 互易性检验

被试对象模态试验的频响函数应满足互易性原则:

$$H_{ij}(\omega) = H_{ji}(\omega) \dots\dots\dots(11)$$

式中：

$H_{ij}(\omega)$ ——结构第 j 点激励、第 i 点响应的频响函数；

$H_{ji}(\omega)$ ——结构第 i 点激励、第 j 点响应的频响函数。

12.4 数据重复性检验

在同样的试验条件下进行多次测量,或用不同激励点激励的响应线性组合,检查试验结果的一致性。

12.5 模态置信度检验

模态置信度 MAC 值按公式(12)计算。

$$MAC(i,k) = \frac{|\{\phi_i\}^T \{\phi_k\}|^2}{(\{\phi_i\}^T \{\phi_i\})(\{\phi_k\}^T \{\phi_k\})} \dots\dots\dots (12)$$

式中：

$MAC(i,k)$ ——第 i 阶和第 k 阶模态之间的相关性；

$\{\phi_i\}$ ——第 i 阶模态振型；

$\{\phi_k\}$ ——第 k 阶模态振型。

MAC 值的范围为 $0 \sim 1$ 。对于不同阶模态的两个向量, MAC 值应小于 0.2 ;对于同阶模态的两个向量, MAC 值应大于 0.8 。

12.6 试验结果评定

整备车辆应满足以下两项要求之一：

- a) 整备车辆的车体一阶垂向弯曲模态频率不应低于 10.0 Hz ;
- b) 整备车辆的车体一阶垂向弯曲模态频率与转向架的点头、浮沉频率的比值不应小于 1.4 。

13 试验报告

试验报告应包含以下内容：

- a) 任务来源；
- b) 试验目的；
- c) 被试对象技术状态；
- d) 试验边界条件；
- e) 激励系统、测量系统配置；
- f) 激励点位置、方向、数量和激励信号；
- g) 测量传感器和测点的位置及方向；
- h) 试验方法；
- i) 试验步骤及过程；
- j) 试验结果,包括模态频率、模态阻尼比、振型图；
- k) 试验结论。

参 考 文 献

- [1] GB/T 4549.1—2004 铁道车辆词汇 第1部分:基本词汇
- [2] GB/T 11349.1—2006 振动与冲击 机械导纳的试验确定 第1部分:基本定义与传感器(ISO 7626-1:1986,IDT)
-