

# 激振和循环加载下浮置板轨道动力参数试验研究

汪杨鑫<sup>1,2</sup> 练松良<sup>1,2</sup> 朱锦泽<sup>1,2</sup> 陈高峰<sup>3</sup>

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海;

2. 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 201804, 上海;

3. 隔而固振动控制有限公司技术中心, 266108, 青岛//第一作者, 硕士研究生)

**摘要** 在浮置板轨道结构的设计、施工、使用中,需要通过试验测试其动力参数。通过对钢弹簧浮置板轨道结构进行激振测试和循环加载测试,得到了不同试验方法下浮置板轨道结构的自振频率、刚度和阻尼比等动力参数,并分析了不同试验方法的适用性。结果表明:循环加载的低频动刚度与逐级加载的静刚度一致性较好;锤击和落轴的激振荷载均可准确地测得浮置板轨道结构的自振频率;激振和循环加载均可测得浮置板阻尼比。与循环加载相比,激振测试的操作更简便,但其阻尼比受波形峰值间隔的影响较大。建议取 3~4 个相邻振动峰值时的试验结果,此时激振测试下的阻尼比与循环加载下的阻尼比一致。

**关键词** 钢弹簧浮置板轨道;激振加载;循环加载;动力参数

**中图分类号** U213.2<sup>+</sup>12;U213.2<sup>+</sup>42

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2021.07.026

## Test and Research on Dynamic Parameters of Floating Slab Track under Impact and Cyclic Loading

WANG Yangxin, LIAN Songliang, ZHU Jinze, CHEN Gaofeng

**Abstract** During the design, construction and operation of floating slab track structure, dynamic parameters need to be studied through tests. By conducting impact test and cyclic loading test to steel spring floating slab track structure, the dynamic parameters such as the natural frequency, stiffness and damping ratio of the floating slab under different test methods are obtained respectively, and the applicability of different test methods is analyzed. The results show that the low-frequency dynamic stiffness of cyclic loading is consistent with the static stiffness of progressive loading; the impact load of both hammering impact and dropping wheelset can accurately measure the natural frequency of the floating slab track structure. Both the impact and cyclic loading can measure the damping ratio of the floating slab. Compared to cyclic test, hammering impact operation is more convenient, but its damping ratio is more af-

ected by the number of waveform peak intervals. It is suggested to take test results in 3 to 4 near periods, in which condition the damping ratio of impact test is consistent with that of cyclic loading.

**Key words** steel spring floating slab track; impact loading; cyclic loading; dynamic parameters

**First-author's address** The Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Ministry of Education, Tongji University, 201804, Shanghai, China

轨道结构动力参数测试是测试轨道结构受到外界激励时轨道部件的力、位移、速度、加速度等动力学参数的试验<sup>[1]</sup>。目前对浮置板的动力测试有落轴法、落锤法、锤击法、循环荷载法等试验方法。这些方法在铁路领域研究中已有应用<sup>[2-4]</sup>。在城市轨道交通领域,文献[5]建立了浮置板有限元模型,将隔振器视为弹簧振动;文献[6]建立了车辆-浮置板耦合模型,给出了隔振器阻尼的适宜范围;文献[7]给出了隔振器阻尼比的计算方法;文献[8]验证了循环加载求解浮置板阻尼比的准确性。

试验方法的不同,试验的难度、成本、适用性也各不相同。本文分别对浮置板轨道施加激振和循环荷载,根据动力学理论对钢弹簧浮置板的刚度、自振频率和阻尼比等参数进行分析,对比研究不同试验方法的准确性和适用范围,为不同条件下选择合适的试验方法提供依据。

## 1 激振加载

落轴试验是将 1 000 kg 左右轮对吊起 10~30 mm 的高度,让其自由落体冲击钢轨。该试验一般适用于对整板轨道结构的测试,对单个隔振器的测试并不适用。在每个测试高度均需要实施落轴 5 次以上的试验,且每次落轴时 2 个轮对接触钢轨的时间差应小于 0.03 s,试验数据方可视为有效。

落锤试验是将 50 kg 质量锤以 100 ~ 500 mm 的高度冲击钢轨,使系统激振。落锤也可冲击混凝土道床或用于单个扣件的振动响应对比试验。冲击混凝土时需要在冲击点上粘 1 块钢板,以免砸碎混凝土。

锤击试验是使用 5.5 kg 的普通铁锤或测力锤进行锤击。对于整板测试,既可锤击浮置板,也可锤击钢轨。若锤击钢轨,则需要考虑钢轨扣件的弹性作用。

激振加载时,对浮置板施加激振力  $P$ ,隔振器可视为图 1 b) 所示的单自由度振动系统,其动力方程为:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0 \quad (1)$$

式中:

- $m$ ——浮置板质量;
- $u$ ——浮置板位移;
- $c$ ——隔振器阻尼;
- $k$ ——隔振器刚度。

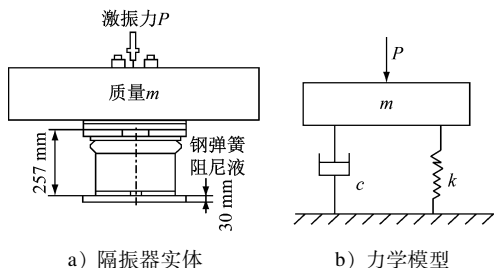


图 1 对浮置板施加激振力时的隔振器模型

设  $u(t)$  为位移函数,令:

$$u(t) = e^{st} \quad (2)$$

$$s_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm i\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} \quad (3)$$

$$\omega_D = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2} \quad (4)$$

式中:

- $t$ ——振动时间;
- $s_{1,2}$ ——解的 2 个虚根。
- $\zeta$ ——低阻尼体系阻尼比;
- $\omega_n$ ——无阻尼体系自振频率;
- $\omega_D$ ——阻尼体系自振频率。

将式(2)~(4)代入式(1),得到自由振动解:

$$u(t) = e^{-\zeta\omega_n t} \left[ u(0) \cos \omega_D t + \left( \frac{\dot{u}(0) + \zeta\omega_n u(0)}{\omega_D} \right) \sin \omega_D t \right] \quad (5)$$

由相邻振动峰值之比可得到  $\zeta$ 。为了提高精度,  $\zeta$  可由多个峰值得出:

$$\begin{cases} \zeta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{4\lambda^2}{4\pi^2 + \lambda^2}} \\ \lambda = \frac{1}{n} \ln \frac{X_i}{X_{i+n}} \end{cases} \quad (6)$$

式中:

- $\lambda$ ——单个波形对数衰减率;
- $n$ ——自由振动波形个数;
- $X_i$ ——第  $i$  个波峰的位移幅值, mm;
- $X_{i+n}$ ——第  $i+n$  个波峰的位移幅值, mm。

## 2 循环(疲劳)加载

加载频率为 3 ~ 5 Hz, 1 个车辆转向架的荷载为 320 kN, 考虑动载系数, 取最大荷载为 360 ~ 380 kN; 为防止最小荷载为零时试验装置起跳, 设最小荷载为 30 ~ 50 kN。

循环加载由于结构中存在阻尼, 使得加载和卸载的荷载位移曲线不是同一路径, 由此产生滞回曲线。由滞回曲线最高点和最低点可以得到浮置板的动刚度  $K$  的计算式为:

$$K = \frac{P_1 - P_2}{y_1 - y_2} \quad (7)$$

式中:

- $P_1$ ——滞回曲线最高点的荷载;
- $P_2$ ——滞回曲线最低点的荷载;
- $y_1$ ——滞回曲线最高点的位移;
- $y_2$ ——滞回曲线最低点的位移。

等效阻尼力在 1 个循环内所做的功等于滞回曲线所包围的面积, 其计算式为:

$$E_D = 2\pi\zeta \frac{\omega}{\omega_n} k u_0^2 \quad (8)$$

式中:

- $E_D$ ——等效阻尼力所做功, J;
  - $\omega$ ——振动频率, Hz;
  - $u_0$ ——最大位移, mm。
- 由此可求得阻尼比为:

$$\zeta = \frac{E_D \omega_n}{2\pi k u_0^2 \omega} \quad (9)$$

## 3 动力参数计算

### 3.1 刚度

工程中一般采用逐级静态加载法得到静刚度, 用循环加载法得到整板试验的低频动刚度。

逐级加载的荷载范围为 0 ~ 180 kN, 加载级差

为 30 kN,共进行 3 次实施加载试验,6 个位移测点的具体位置如图 2 所示,1#测点与 3#测点、4#测点与 6#测点以板的中线上下对称分布。

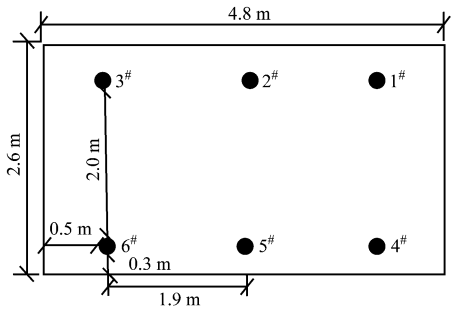


图 2 逐级加载试验的位移测点布置图

由于荷载和位移成近似线性增大的关系,因而各测点上各次加载试验产生的位移值近似,故取算术平均值用于刚度计算,得到各测点的荷载-位移曲线如图 3 所示,各测点的平均割线刚度如图 4 所示。

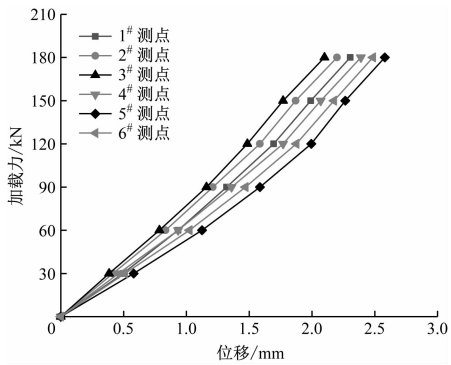


图 3 逐级加载各测点的位移-刚度曲线

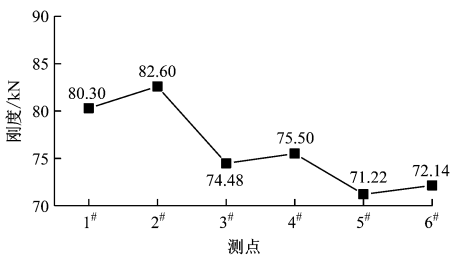


图 4 逐级加载各测点的刚度

低频加载动刚度测试中,加载次数从 0 次到第 500 万次的滞回曲线如图 5 所示。各滞回曲线的图形没有显著差异,可见循环加载产生的疲劳破坏没有对浮置板的动力性能产生显著影响。计算得到不同疲劳次数的动刚度如图 6 所示。

由上述结果可进一步得到,该浮置板整板的平均静刚度为 75.66 kN/mm,平均动刚度为 78.06 kN/mm,动静刚度比为 1.03。试验结果满足 CJJ/T

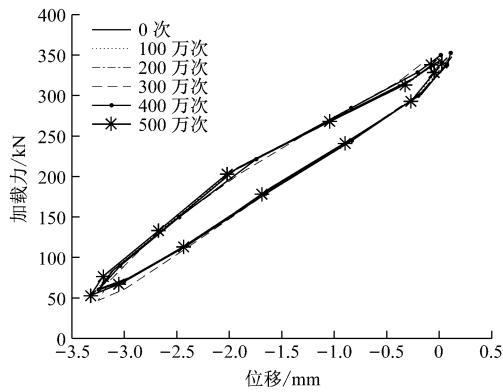


图 5 低频加载动刚度测试滞回曲线

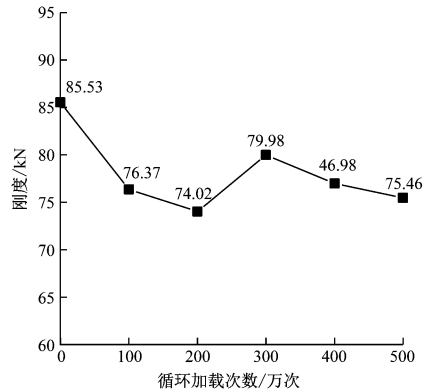


图 6 不同循环加载次数下的动刚度

191—2012《浮置板轨道技术规范》第 4.4.4 条“单个隔振器的动静刚度比小于 1.3”的要求。

### 3.2 自振频率

激振加载测得的位移-时间曲线如图 7 所示。锤击和落轴引起的浮置板位移数值变化差异较大,但 20 mm 落轴、10 mm 落轴、捶击三种情况下得到的位移-时间曲线波形类似,均较好地反映出浮置板的自由振动特征。

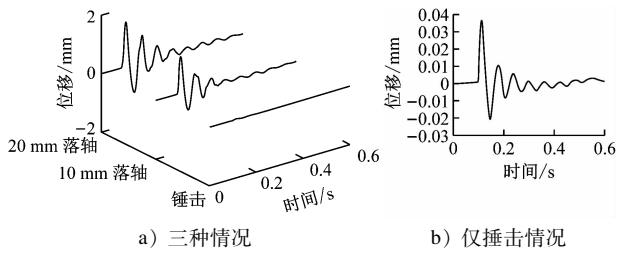


图 7 激振荷载下的位移-时间曲线

激振加载测得的振动加速度-时间曲线如图 8。落轴和捶击产生的加速度值在量级上基本一致,差别在  $\pm 20 \text{ m/s}^2$  范围内。落轴波形较捶击波形杂乱,这是由于轮轴冲击钢轨后多次起跳导致。

不同的激振荷载下浮置板的位移功率谱密度

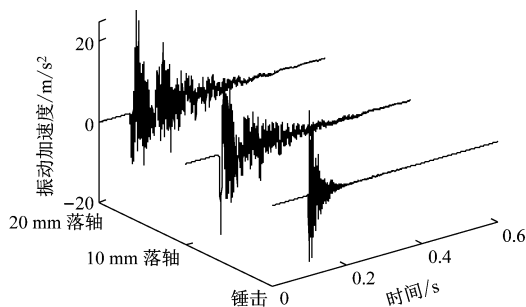


图8 激振荷载下的振动加速度-时间曲线

如图9所示,加速度功率谱密度如图10所示。由图9~10可以看出,锤击和落轴的功率谱密度函数均在15.870 Hz出现最大峰值,因而可以得到该浮置板的自振频率为15.870 Hz。

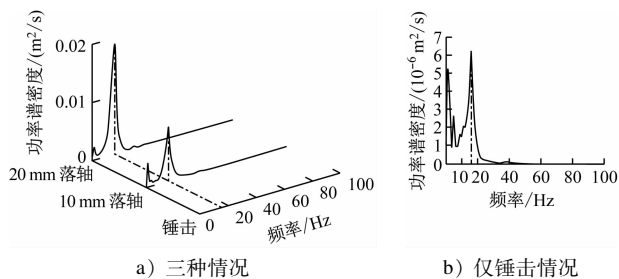


图9 位移功率谱

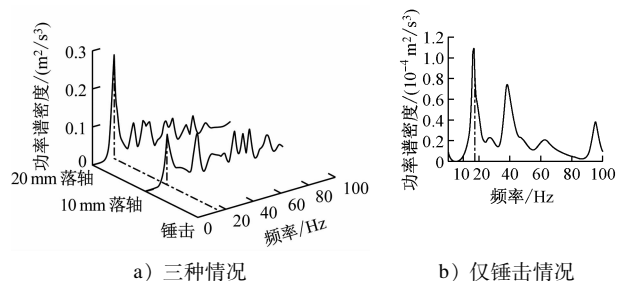


图10 加速度功率谱

如图9所示,对于位移功率谱,激振力越大,主频处的峰值越大。除去主频的15.870 Hz,锤击时在1.221 Hz、4.883 Hz处存在尖峰,落轴时在1.221 Hz处存在尖峰。1.221 Hz、4.883 Hz这些非主频处尖峰可能是由于浮置板侧倾振动和挠曲振动所致。如图10所示,对于加速度功率谱,仍可得到类似结论,但由于加速度功率谱放大了高频的成分,可以看到在大于主频的频率上还有数个尖峰出现。

该试验的浮置板质量约为10 530 kg。逐级加载测得的刚度为75.66 kN/mm,可求得此时的自振频率为13.490 Hz;低频3~5 Hz循环加载的动刚度为78.06 kN/mm,可求得此时的自振频率13.710 Hz。这2个数据与上文求出的15.870 Hz不完全一

致,其主要原因是在整板试验时冲击是高频荷载,浮置板所表现出来的刚度不是静刚度和低频动刚度,而是高频动刚度,故冲击试验时测得浮置板的整板振动主频要大于理论计算的自振频率。

### 3.3 阻尼比

浮置板阻尼比的测试采用基于激振的对数衰减率法和基于循环的滞回曲线法。为了排除浮置板其他阶振型和其他噪声信号产生的影响,试验时以浮置板的自振频率为中心频率进行带通滤波,滤波前后的波形如图11所示。

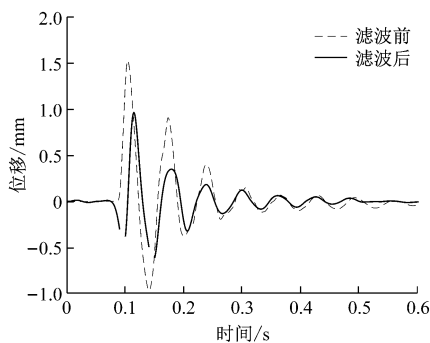


图11 滤波前后位移波形对比

分别选取10次锤击力在10~20 kN的锤击数据,以及落轴高度分别为10 mm和20 mm各5次的有效落轴数据,在式(6)计算时, $n$ 分别取1~6。锤击和落轴求得平均阻尼比随相邻振动峰值数变化的趋势如图12所示。从图12可见,不同的激振方式测得的阻尼比没有显著差别,随着相邻振动峰值数的增加,阻尼比总体呈下降趋势。这是由于位移衰减波的前几个尖峰的振动衰减率大于后几个尖峰的振动衰减率,也说明了目前的隔振器阻尼比与位移并非线性相关。当相邻振动峰值数取3或4时,阻尼比取值稳定,说明在运用激振荷载测试阻尼比时应选取相邻3~4个峰值进行计算较合理。

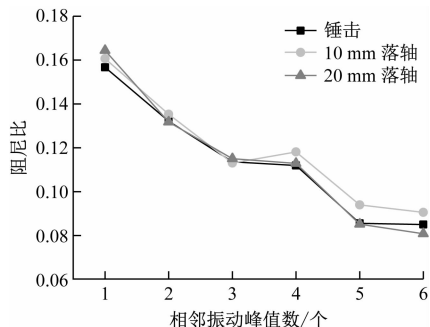


图12 激振荷载下不同相邻振动峰值数的阻尼比

对于循环加载,选取每100万次加载次数的典

型滞回曲线进行计算,得到阻尼比如图 13 所示。由图 13 可知,阻尼比最大值为加载 200 万次和 400 万次时的 0.127,最小值为 0 次时的 0.120,各阻尼比之间数值较为接近。

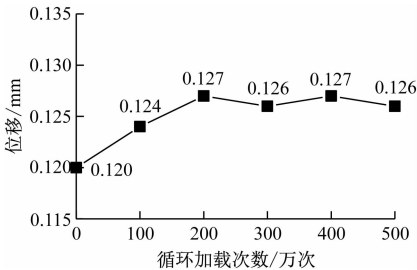


图 13 不同循环加载次数下的阻尼比

锤击、落轴试验时隔 3 个周期计算阻尼比,计算循环测试下各加载次数的平均阻尼比,其结果如图 14 所示。由图 14 可知,不同试验方法测得的阻尼比值数比较接近,最小值和最大值相差 11.9%,可以满足工程计算要求,说明激振和循环加载均能较

准确地测得钢弹簧浮置板的阻尼比。

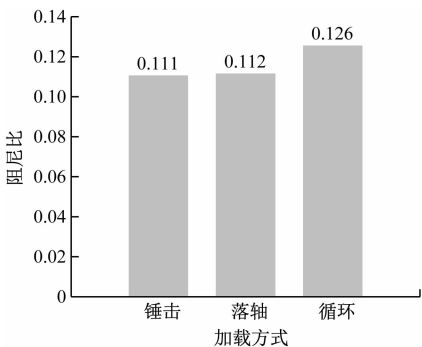


图 14 不同试验方法测得的阻尼比

4 适用性比较

综合以上对动力参数的试验研究,结合工程应用实际,整理得到不同试验的适用性,如表 1 所示。在实际测试中,应结合测试目的、测试条件等选用合适的测试方法。

表 1 激振和循环加载试验适用性

试验方法	试验内容	测试参数	试验所需时间/d	试验成本	试验难度
激振试验	锤击试验	自振频率、阻尼比	1	低	小
	落轴试验	自振频率、阻尼比	2~4	中	大
循环试验	疲劳试验	动刚度、阻尼比	15	高	大
静载试验	逐级加载试验	静刚度、强度	1	中	中

5 结论

- 1) 对于钢弹簧浮置板的刚度,逐级加载法测得的静刚度数值和循环加载利用滞回曲线测得的动刚度数值接近。在浮置板未发生疲劳破坏时,这 2 种方法测得的刚度没有显著区别。
- 2) 锤击和落轴的激振荷载作用下,可以准确地求得浮置板的自振频率。激振荷载越大,自振频率的峰值能量越集中。在现场测试时,可以用较简便的锤击试验代替落轴试验来求取自振频率,但是锤击试验各频率峰值较多,在选取时应格外注意,可结合位移功率谱和振动加速度功率谱综合考虑。
- 3) 激振加载计算阻尼比之前,需要根据钢弹簧浮置板的自振频率进行滤波处理。激振力大小对阻尼比计算结果没有显著影响。疲劳加载运用滞回曲线计算得到的阻尼比和激振加载计算得到的阻尼比没有显著区别。运用这 2 种加载方式均可以较准确地计算得到阻尼比。

参考文献

[1] 宫全美. 轨道交通线路动力学[M]. 北京:人民交通出版社, 2015:162.

[2] 刘卫星,王午生. 铁路碎石道床动刚度与阻尼的试验研究[J]. 铁道学报,2002(6):99.

[3] 练松良,杨文忠,刘扬. 不同类型轨枕轨道结构动力性能试验研究[J]. 铁道学报,2010(2):131.

[4] 闫雪,沈毓婷,耿浩,等. 弹性轨枕+道砟垫有砟轨道疲劳性能试验研究[J]. 铁道标准设计,2018(12):40.

[5] 丁德云,刘维宁,李克飞,等. 钢弹簧浮置板轨道参数研究[J]. 中国铁道科学,2011(1):30.

[6] 韦凯,豆银玲,杨麒陆,等. 钢弹簧浮置板轨道的随机振动分析及参数优化[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2017(8):115.

[7] 王金,李玉路,邵文杰,等. 基于自由振动的钢弹簧浮置板阻尼比测试分析[J]. 华东交通大学学报,2015(5):1.

[8] 宋姣姣,高志升,练松良. 钢弹簧浮置板阻尼比试验研究[J]. 华东交通大学学报,2017(4):44.

(收稿日期:2020-01-30)