

# 大体积混凝土底板微振动控制能力的测试与分析

荣慕宁<sup>1</sup>, 顾雅彬<sup>1</sup>, 郑明<sup>2</sup>, 聂鑫<sup>2</sup>, 樊健生<sup>2</sup>, 刘宇飞<sup>2</sup>

(1. 北京建工集团有限责任公司, 北京 100055; 2. 清华大学土木水利学院, 北京 100084)

**摘要:**为测试北京光源这一精密科学设施中大体积混凝土底板的微振动控制能力, 通过在建设现场进行短期测试和 24 h 长期监测的方式对底板微振动水平和微振动控制能力进行了评估。结果表明: 在 2 次短期测试过程中, 底板表面微振动位移有效值主要分布在 10~50 nm 之间, 而在 24 h 监测过程中, 底板表面微振动位移有效值主要在分布 20 nm 以下; 大体积混凝土底板对 10 Hz 以上垂直于地面方向的微振动及 5 Hz 以上水平向的微振动体现出较好的控制作用; 大体积混凝土底板最大能够将垂直地面方向微振动水平降低 24%, 水平向微振动水平降低 34%, 底板对水平向微振动控制能力略优于对竖向微振动的控制能力。建立了二维简化有限元模型, 讨论了改变混凝土层密度、刚度及厚度对底板微振动控制能力的影响, 模拟结果表明在现有激励条件下, 增大底板配筋层厚度或素混凝土层密度对底板竖向微振动控制能力无明显影响, 但对水平向微振动控制能力产生不利影响。

**关键词:**精密科学设施; 现场测试; 大体积混凝土底板; 微振动控制; 位移有效值; 二维有限元模型

**中图分类号:** TU375.2; TU476

**文献标识码:** A

## Test and analysis on the micro-vibration control ability of mass concrete slab

RONG Muning<sup>1</sup>, GU Yabin<sup>1</sup>, ZHENG Ming<sup>2</sup>, NIE Xin<sup>2</sup>, FAN Jiansheng<sup>2</sup>, LIU Yufei<sup>2</sup>

(1. Beijing Construction Engineering Group Co., Ltd., Beijing 100055, China;

2. School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In order to test the micro-vibration control ability of the mass concrete slab in the Beijing High Energy Photo Source, evaluation of the micro-vibration control ability of the mass concrete slab are conducted through two short-period tests and a 24 h long-period monitoring. Test results indicate that: most of the displacement root mean square values distribute between 10 nm and 50 nm in the two short-period tests, and most of the displacement root mean square values distribute below 20 nm in the 24 h long-period monitoring. The mass concrete slab can provide good micro vibration control performance over 10 Hz for the micro vibration in the vertical direction, and over 5 Hz for the micro vibration in the horizontal directions. Through casting the mass concrete slab, the micro vibration level in the vertical direction can be reduced by 24%, the micro vibration level in the horizontal direction can be reduced by 34%. The control ability of the slab to the horizontal micro-vibration is slightly better than that of vertical micro-vibration. Moreover, simplified two-dimensional finite element models are established to discuss the influence of changing the concrete layer's density, stiffness and thickness on the slab's micro-vibration control ability. The simulation results indicate that the increasing thickness of reinforced concrete layer or density of the plain concrete layer has no influence on the micro-vibration control ability of slab in the vertical direction, but has adverse effect on that in the horizontal direction.

收稿日期: 2023-04-25; 修回日期: 2023-08-02

基金项目: 国家自然科学基金杰出青年基金项目(52325802)

作者简介: 荣慕宁(1989—), 男, 高级工程师, 主要从事大体积混凝土施工与微振动控制研究。E-mail: rongmuningsc@126.com

**Key words:** scientific facilities with high precision; field test; mass concrete slab; micro vibration control; root mean square value of displacement; two-dimensional finite element model

## 0 引言

同步辐射装置是现代科学探索微观物质世界的重要研究设施<sup>[1-3]</sup>。此类精密科学设施在运行过程中,容易受到地面微振动的影响而使最终的研究结果出现较大误差<sup>[4-6]</sup>。因此,对此类设施中的微振动水平开展测试与分析非常重要。

目前,国内对大型精密科学设施内微振动控制的研究相对较少,且研究方法主要为现场实测。岳建勇<sup>[7]</sup>通过在上海光源和上海质子重离子医院进行现场实测与数值模拟,探究了精密装置中不同建设阶段微振动的特点与规律。王晓等<sup>[8]</sup>对上海自由电子激光工程的地基振动进行了 24 h 的长时间测试,测试结果表明周边交通干道对上海自由电子激光工程的地基振动产生明显的影响。高广运等<sup>[9]</sup>对某精密仪器厂房地面的微振动进行了现场测试,指出该厂房的桩筏基础具有明显的减振效果。谢莹松等<sup>[10]</sup>通过现场实测研究了地铁运行对某厂房地面精密检测室地面微振动水平的影响,并给出了防微振的建议。耿万里等<sup>[11]</sup>通过有限元模型模拟了地铁运行对北京大学精密科学设施的影响。郭安鑫等<sup>[12]</sup>通过理论分析模型,建议在某高科技厂房中采用混合控制方法来控制仪器工作平台的振动水平。此外,还有部分学者研究了不同类型的隔振沟对振动控制的作用<sup>[13-16]</sup>。

与世界上其他类似的大型精密科学设施采取的措施不同<sup>[17-19]</sup>,北京光源为实验大厅浇筑了 4 m 厚的环形混凝土底板。为测试北京光源混凝土底板表面的微振动水平及微振动控制能力,本文在该设施的内部设置了 11 个短期测点和 1 个长期测点,测试了该设施不同建设时期不同位置的混凝土底板及相邻土体表面的微振动水平,并通过二者的对比进一步分析混凝土底板的微振动控制能力。

## 1 现场测试概况

### 1.1 测点布置及量测设备

底板航拍示意图如图 1(a) 所示,图中底板截面由 1 m 配筋混凝土层与 3 m 素混凝土层构成,环形底板半径约 200 m。在混凝土底板表面共布置 11 处短期测点,分 2 次分别量测中午 12:00 及夜间 22:00 左右无施工活动干扰时,15 min 内的微振动信号,如图 1(b) 所示。2 次量测在图 1(b) 中“换填层及底板预留缺口处”封闭前后进行,以评估底板整体封闭前后,底板表面微振动水平的变化。在上述短期测试结束后,在 4 号测点布置 24 h 长期测点,用于监测无施工活动干扰时,该测点的微振动水平。

量测过程中,采集对应测点底板和相邻土体表面 3 个方向的速度时程数据,测点的方向按图 1(c) 中的方式进行约定,即  $z$  向为垂直地面方向, $x$  向为环形底板径向, $y$  向为环形底板的切向。

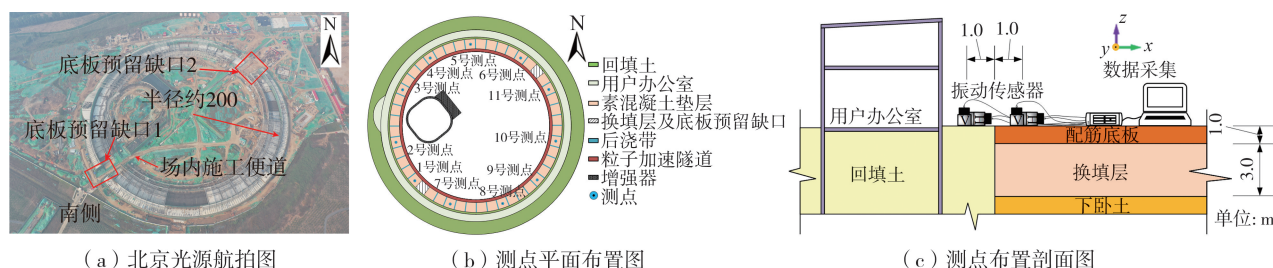


图 1 北京光源现场航拍及底板测点布置示意图

Fig. 1 Site aerial photography and slab measuring points layout in the Beijing High Energy Photo Source

在短期测试的振动量测系统中,使用 941b 型超低频测振仪作为振动传感器,将其连接至东方所 INV3062C 型数字采集仪后形成相应的振动信号采集系统;而长期监测的量测系统采用 941b 振动传感器与东方所 INV3065N 型数字采集仪,如图 2 所示。设备的相关参数见表 1。

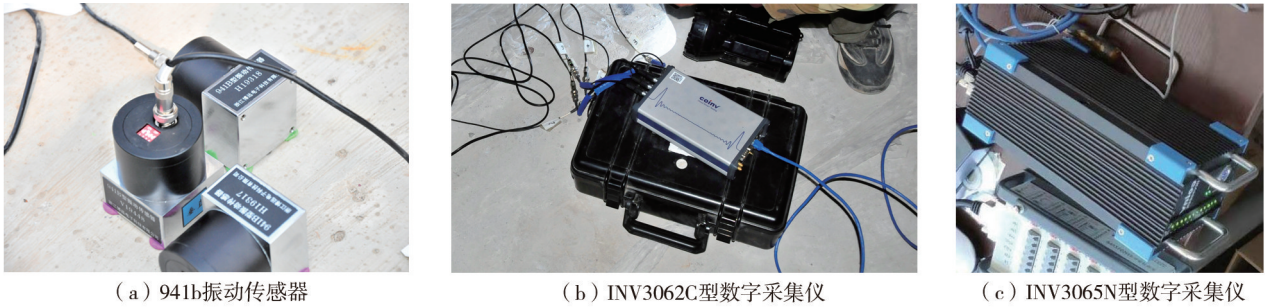


图2 量测设备

Fig.2 Data acquisition devices

表1 量测设备参数

Table 1 Details of data acquisition devices

设备名称	型号	参数
振动传感器	941b	灵敏度 23 V · s/m; 频响区间 1~100 Hz
数字采集仪	INV3062C	24 位 Delta-Sigma 采集; 120 dB 动态范围
数字采集仪	INV3065N	24 位 Delta-Sigma 采集; 120 dB 动态范围

## 1.2 数据处理方式

目前,评估微振动水平的方法有:进行 1/3 倍频程分析后,与 VC 曲线对比;计算数据的峰-峰值或有效值(root mean square, RMS);根据设备自身的需求进行评估等<sup>[20-21]</sup>。与其他光源类似,对北京光源此类大型精密科学设施而言,采用的微振动水平计算方式为:计算 1 s 内 1~100 Hz 的位移有效值。

具体计算过程:首先根据式(1)求得位移功率谱密度值,再由式(2)计算得到相应的位移有效值<sup>[22-23]</sup>,如式(1)、式(2)所示:

$$S_d(f_k) = \frac{S_v(f_k)}{4\pi^2 f_k^2} = \frac{N\Delta t^3}{2\pi^2 k^2} \left| \sum_{n=0}^{N-1} v(t_n) e^{-i\frac{2\pi kn}{N}} \right|^2 \quad (1)$$

$$d_{\text{RMS}}(f_1, f_2) = \sqrt{\frac{1}{N\Delta t} \sum_{f_i=f_1}^{f_2} S_d(f_i)} \quad (2)$$

式中:  $f_1$ 、 $f_2$  分别为关心频段的上下限频率;  $f_k = N/(N\Delta t)$  为第  $k$  阶频率,  $N$  为离散傅里叶变换的点数,  $\Delta t$  为采样间隔;  $S_v$ 、 $S_d$  分别为所测得振动信号的速度、位移功率谱密度值。

## 2 测试结果

在短期测试中,第一次测试时的采样率为 500 Hz,第二次测试时的采样率为 256 Hz。长期监测点位的测试时间从第一天晚上的 20:00 到第二天晚上的 20:00,其采样频率为 500 Hz。测试完成后,提取各个测点 15 min 中无明显干扰的 20 s 内的数据进行分析,并根据前述内容计算其 3 个方向的位移有效值。

### 2.1 短期测试结果

考虑到短期测试时测点数较多,这里选取第一次测试期间图 1(a)所示的 4 号测点夜间  $z$ 、 $x$  向测试的位移时域、位移频域及位移有效值结果作为代表,将测得信号的时域、频域区间及位移有效值时域曲线汇总于图 3,并将 2 次短期测试中各个测点的位移有效值平均值汇总于表 2 和表 3。

由图 3(a)和(b)可知, $z$  方向的微振动水平略小于水平方向的微振动水平,这表明场地内水平方向的微振动控制也需重点关注;由图 3(c)、(d)、(g)和(h)可知, $z$  方向上,底板表面与底板相邻土体表面的微振动信号在 10 Hz 以后出现较为明显的差异(频谱幅值比明显小于 1),而水平方向上,二者在 5 Hz 以后出现较为明显的差异,这表明底板对水平向和竖向微振动控制能力有所差异,且对水平向微振动产生控制效果的频率范围较大。

由表 2 和表 3 可知,2 次短期测试期间,底板表面位移有效值基本分布在 10~50 nm 之间。此外,2 次测试午间测得的微振动水平普遍高于夜间测得的微振动水平,这与周边人类活动强度白天强、夜晚弱有关。

此外,由位移有效值时域曲线图 3(e)和(f)可知,在 10~20 s,当测点周边出现冲击激励时,底板与临近

土体位移有效值的显著增大,且二者差距并不明显,表明底板对场内冲击激励产生振动的控制效果有限,在设施后续运营期间,必须严格限制场地内出现冲击激励。

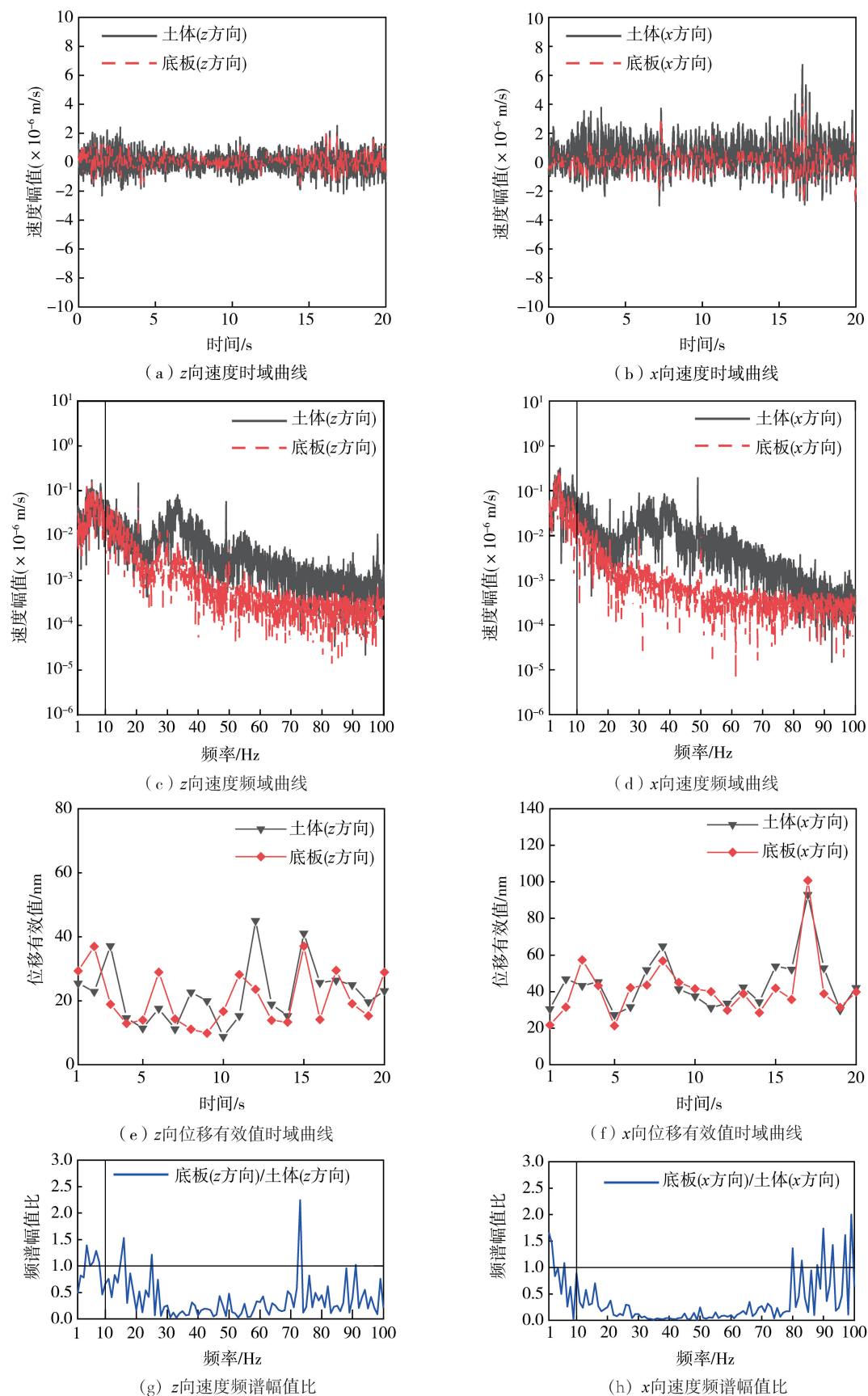


图3 第1次测试期间4号测点z、x向测试结果汇总

Fig. 3 Test results of measurement point 4 in the z and x directions during the 1st measurement

表 2 第 1 次测量中位移有效值平均值及相应比值

Table 2 Average displacement root mean square values and corresponding ratios during the 1st measurement

nm

测点 编号	第 1 次测量(午间)									第 1 次测量(夜间)								
	土体			底板			比值			土体			底板			比值		
	z 方向	z 方向	z 方向	x 方向	x 方向	x 方向	y 方向	y 方向	y 方向	z 方向	z 方向	z 方向	x 方向	x 方向	x 方向	y 方向	y 方向	y 方向
1	34	36	1.06	51	55	1.08	41	68	1.66	21	24	1.14	41	42	1.02	32	33	0.97
2	21	26	1.24	34	30	0.88	31	25	0.81	32	26	0.81	53	35	0.66	58	36	0.62
3	17	24	1.41	30	23	0.77	24	21	0.88	27	30	1.11	53	43	0.81	42	42	1.00
4	17	21	1.24	26	24	0.92	26	19	0.73	22	21	0.95	44	41	0.93	34	32	0.94
5	22	20	0.91	44	47	1.07	27	30	1.11	18	22	1.22	26	25	0.96	20	23	1.15
6	19	19	1.00	20	23	1.15	20	21	1.05	16	17	1.06	29	28	0.97	23	25	1.09
7	24	9	0.38	35	9	0.26	32	9	0.28	25	25	1.00	62	48	0.77	37	34	0.92
8	26	24	0.92	38	39	1.03	31	35	1.13	21	23	1.10	33	34	1.03	26	29	1.12
9	33	31	0.94	46	35	0.76	38	29	0.76	32	34	1.06	59	59	1.00	63	48	0.76
10	26	21	0.80	37	31	0.83	32	32	1.00	32	28	0.88	52	45	0.87	46	39	0.85
11	35	34	0.97	64	59	0.92	71	51	0.72	32	34	1.06	81	62	0.77	59	50	0.85

表 3 第 2 次测量中位移有效值平均值及相应比值

Table 3 Average displacement root mean square values and corresponding ratios during the 2nd measurement

nm

测点 编号	第 2 次测量(午间)									第 2 次测量(夜间)								
	土体			底板			比值			土体			底板			比值		
	z 方向	z 方向	z 方向	x 方向	x 方向	x 方向	y 方向	y 方向	y 方向	z 方向	z 方向	z 方向	x 方向	x 方向	x 方向	y 方向	y 方向	y 方向
1	20	19	0.95	31	26	0.84	31	27	0.87	16	19	1.19	27	19	0.70	19	18	0.95
2	21	21	1.00	22	22	1.00	25	22	0.88	17	24	1.41	22	19	0.86	24	19	0.79
3	29	26	0.90	38	36	0.95	39	28	0.72	20	19	0.95	28	28	1.00	24	23	0.96
4	26	28	1.08	42	38	0.90	28	33	1.18	20	19	0.95	23	26	1.13	20	21	1.05
5	26	23	0.88	31	27	0.87	27	25	0.93	26	24	0.92	48	45	0.94	35	37	1.06
6	53	49	0.92	104	93	0.89	80	70	0.88	18	22	1.22	26	25	0.96	20	22	1.10
7	21	27	1.29	49	45	0.92	32	30	0.94	18	22	1.22	24	24	1.00	24	20	0.83
8	18	20	1.11	29	32	1.10	24	24	1.00	20	19	0.95	25	28	1.12	19	22	1.16
9	25	22	0.88	36	35	0.97	35	31	0.89	25	19	0.76	29	26	0.90	32	33	1.03
10	18	23	1.28	31	30	0.97	25	26	1.04	19	19	1.00	23	24	1.04	25	26	1.04
11	34	30	0.88	34	34	1.00	25	23	0.92	19	23	1.21	22	26	1.18	62	21	0.34

为进一步评价底板对微振动的控制作用,将 2 次短期测试期间各测点底板与相邻土体 20 s 内的位移有效值的平均值相比,并将其结果汇总于图 4。

图 4(a)为第 1 次短期测试午间的测试结果之比。对 z 向振动,除部分测点位移有效值均值的比值大于 1(1.06~1.41),其余测点位移有效值均值的比值均小于 1(0.38,0.80~0.97);对 x 向振动,除部分测点位移有效值均值的比值大于 1(1.08~1.15),其余测点位移有效值均值的比值均小于 1(0.26,0.76~0.92);对 y 向振动,除部分测点位移有效值均值的比值大于 1(1.05~1.66),其余测点位移有效值均值的比值均小于 1(0.28,0.72~0.88)。

图 4(b)为第 2 次短期测试午间的测试结果之比。对 z 向振动,除部分测点位移有效值均值的比值大于 1(1.08~1.29),其余测点位移有效值均值的比值均小于 1(0.88~0.95);对 x 向振动,除部分测点位移有效值均值的比值大于 1(1.10),其余测点位移有效值均值的比值均小于 1(0.84~0.97);对 y 向振动,除部分测点位移有效值均值的比值大于 1(1.04~1.18),其余测点位移有效值均值的比值均小于 1(0.72~0.94)。

图 4(c)为第 1 次短期测试夜间的测试结果之比。对 z 向振动,除部分测点位移有效值均值的比值大于 1(1.06~1.14),其余测点位移有效值均值的比值均小于 1(0.81~0.95);对 x 向振动,除部分测点位移有效值均值的比值大于 1(1.02~1.03),其余测点位移有效值均值的比值均小于 1(0.66~0.97);对 y 向振动,除部分测点位移有效值均值的比值大于 1(1.09~1.15),其余测点位移有效值均值的比值均小于 1(0.62~0.97)。

图 4(d)为第 2 次短期测试夜间的测试结果之比。对 z 向振动,除部分测点位移有效值均值的比值大于 1(1.19~1.41),其余测点位移有效值均值的比值均小于 1(0.70~0.96);对 x 向振动,除部分测点位移有效值均值的比值大于 1(1.04~1.18),其余测点位移有效值均值的比值均小于 1(0.70~0.96);对 y 向振动,除部分测点位移有效值均值的比值大于 1(1.03~1.16),其余测点位移有效值均值的比值均小于 1(0.34,0.79~0.96)。

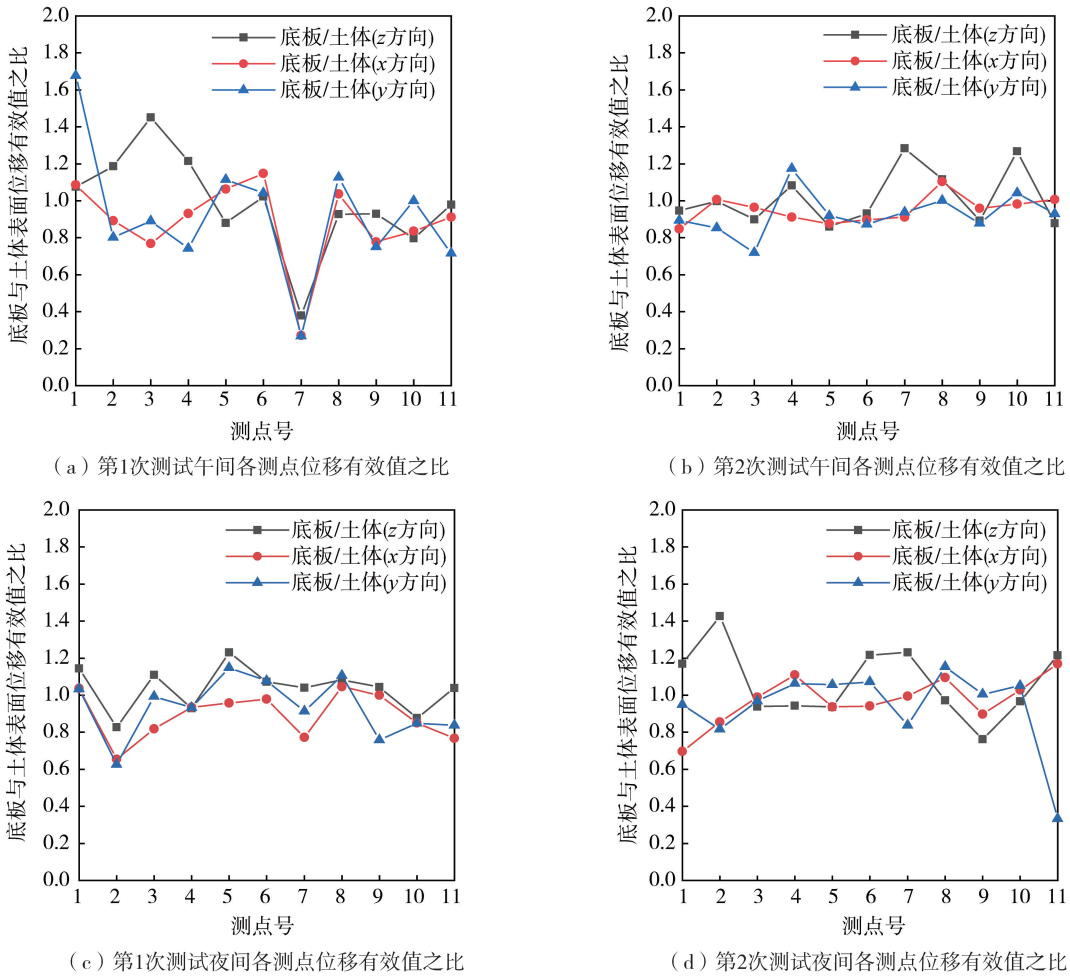
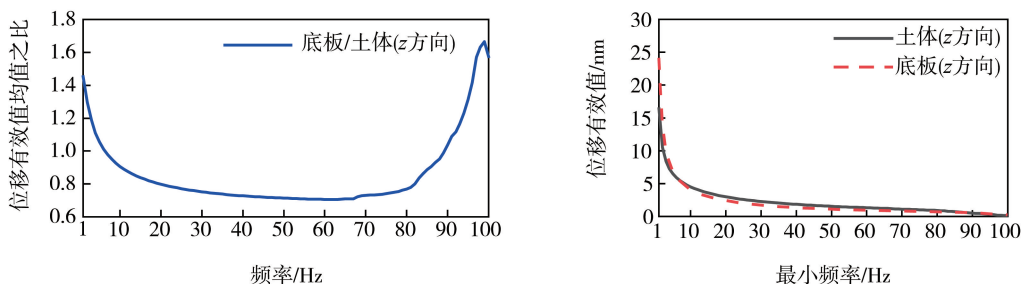


图4 两次测试各测点底板表面与底板相邻土体表面位移有效值均值之比

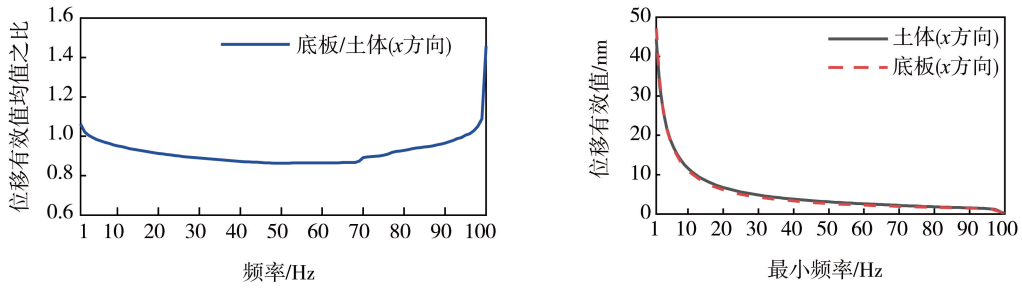
Fig. 4 Ratios of mean displacement RMS values on the slab to those on the adjacent soil in the two measurement

可以看出,底板表面位移有效值与相邻土体表面位移有效值均值的比值, $z$ 向最小为0.76, $x$ 、 $y$ 向最小为0.66(剔除部分异常数据),底板最大能够将周围 $z$ 向微振动水平降低24%,周围 $x$ 、 $y$ 向微振动水平降低34%,底板对水平向微振动控制能力略优于对竖向微振动的控制能力。

考虑到图4中部分测点底板位移有效值有所放大的情况,为进一步分析其中原因,以测点3第1次日间测试的垂直方向的结果和测点5第1次日间测试的水平方向的结果为例,基于式(1)和式(2)中的计算方法,将关心频率的最小值从1 Hz 逐渐增加至100 Hz,然后分别计算土体表面和混凝土板表面20 s内的平均位移有效值,通过上述位移有效值均值的变化情况,对比不同频率下振动信号对位移有效值的影响,并将相应曲线汇总于图5。由图5(a)和(b)可知,当将5 Hz 以内的振动信号滤除后,底板与土体位移有效值均值之比明显降低,这表明对于低频段(5 Hz)以内的振动信号是影响底板位移有效值均值的重要因素。需指出,尽管在90 Hz 以后出现位移有效值均值之比大于1的情况,此时计算得到的位移有效值均值已经很小,这一情况对位移有效值计算所产生的影响可以忽略。



(a) 第1次测试测点3日间 $z$ 向不同最小关心频率下所得位移有效值均值及其比值



(b) 第2次测试测点5午间x向不同最小关心频率下所得位移有效值均值及其比值

图 5 不同最小频率下的位移有效值均值及其比值

Fig.5 Mean displacement RMS values and the ratios from different minimum concerned frequencies

### 2.2 24 h 长期监测结果

在图 1 中 4 号测点的位置布置了长期监测测点,选择场地内及场地周边暂停施工的时期(春节期间)进行 24 h 的监测。将基于式(1)和式(2)计算得到的底板和相邻土体表面 24 h 内的位移有效值及速度频谱曲线汇总于图 6。由图可知,在 24 h 内,底板及相邻土体表面微振动位移有效值基本处于 20 nm 以下,z 方向的位移有效值的平均值约为 4.8 nm(方差 1.50),略低于水平方向的位移有效值的平均值 6.8 nm(x 方向,方差 4.23)和 4.8 nm(y 方向,方差 4.42),且 z 方向的位移有效值的最大值(54.8 nm)远小于水平方向的位移有效值的最大值 192.6 nm(x 方向)和 179.6 nm(y 方向)。此外,在 24 h 监测期间,速度频谱曲线表现出与 2 次短期测试类似的特性。

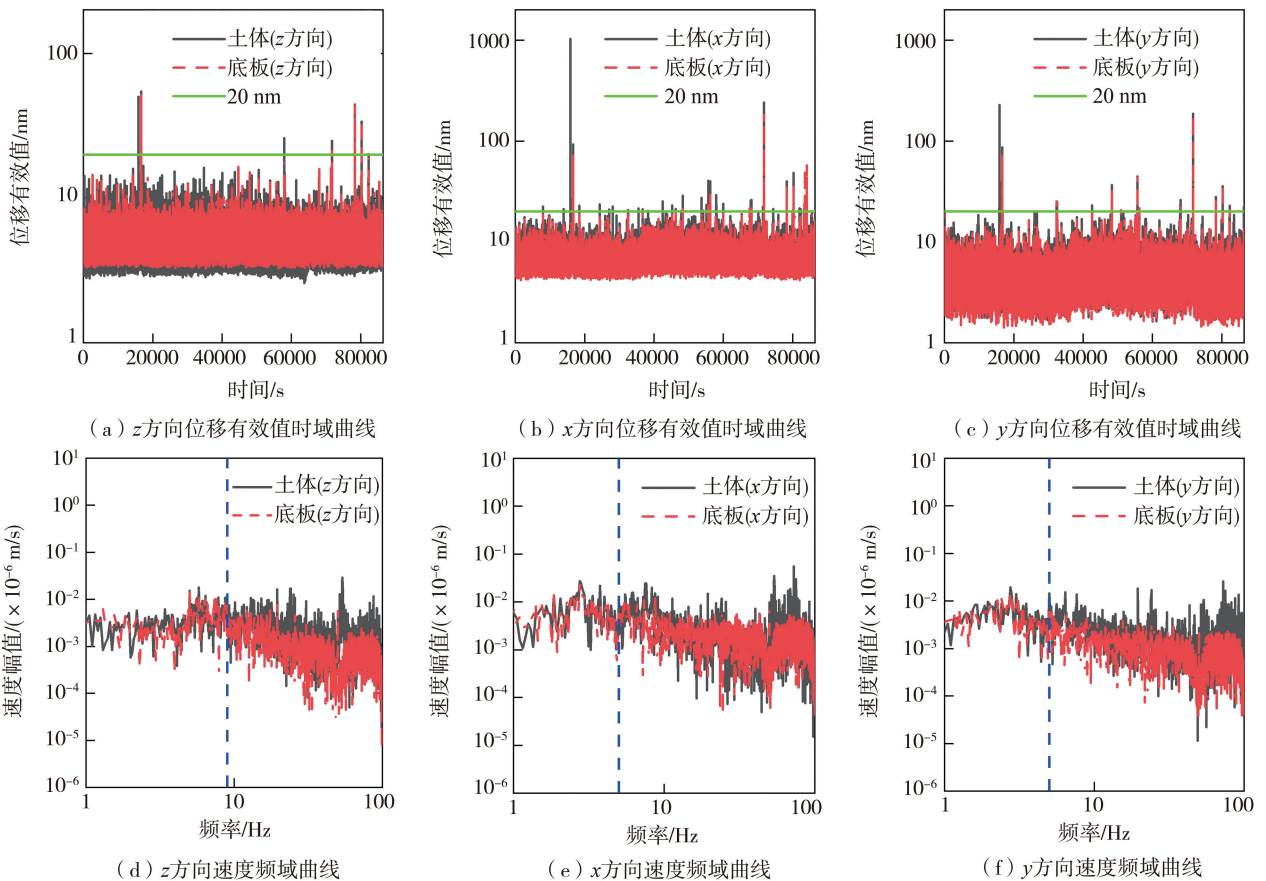


图 6 长期监测测点土体及底板各方向时域曲线与频域曲线

Fig.6 Curves in time and frequency domain for long term monitoring points on the soil and slab

## 3 底板微振动控制能力的影响因素

根据实测分析,为进一步讨论影响底板微振动控制能力的影响因素,同时考虑到底板几何尺寸及刚度较

为均匀,建立了二维平面模型,分析底板不同密度、刚度、厚度及底板不同组成(是否包含配筋混凝土层)对其微振动控制能力的影响。

### 3.1 有限元模型的建立与验证

基于项目地勘报告,在通用有限元分析软件 ABAQUS 建立  $75\text{ m}\times 20\text{ m}$  的模型(图 7),并在侧边及底边设置无限元边界<sup>[24]</sup>,单元尺寸约为  $0.2\text{ m}$ ,初始模型的材料参数如表 4 所示。取 1 号测点第一次午间测试在土体表面测得的前  $5\text{ s}$  数据作用于土层 1 的表面,并在底板表面取与实测位置相同的测点的振动速度。由图 8 可知,尽管部分频段频域幅值有所差距,但模拟得到的振动信号的频率分布曲线与实测的分布趋势吻合度较好,可用于对不同参数的底板进行分析。

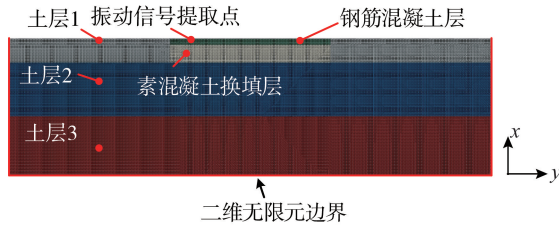


图 7 有限元模型建模示意

Fig. 7 Layout of the finite element model

表 4 初始模型材料参数

Table 4 Parameters of materials in the primary model

单元名称	密度/( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	弹性模量/( $\times 10^6\text{ Pa}$ )	泊松比
配筋底板	2500	30000	0.16
素混凝土板	2500	22000	0.16
土层 1	1925	77	0.25
土层 2	2100	684	0.43
土层 3	2225	1450	0.44

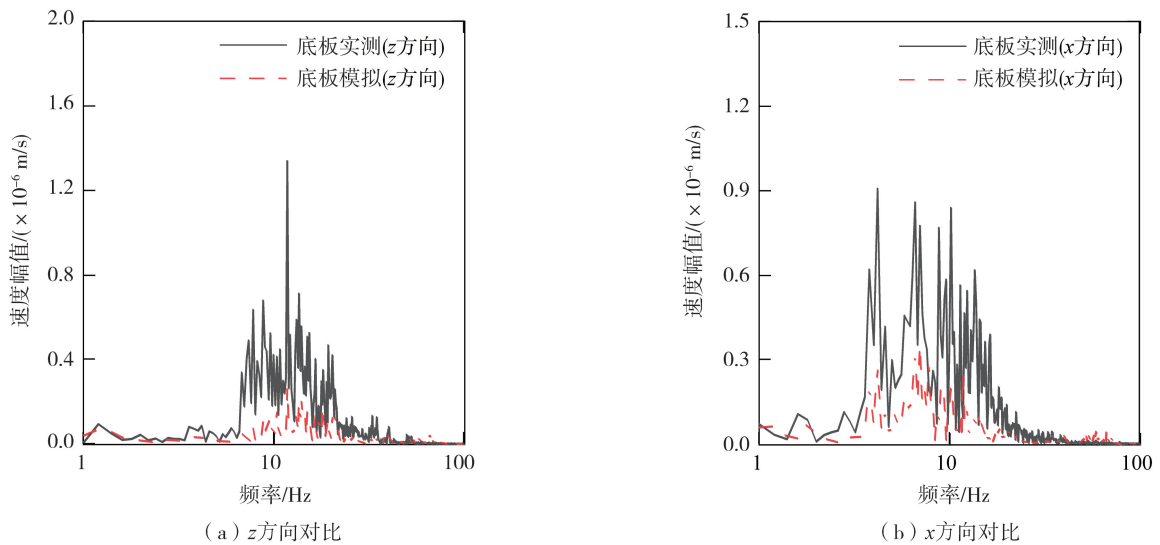


图 8 有限元模型与实测结果速度频域曲线对比

Fig. 8 Comparisons of velocity between FEA model and measured data in the frequency domain

### 3.2 不同参数下位移有效值对比

为分析底板不同密度、刚度、厚度及底板不同组成(是否包含配筋混凝土层)对其微振动控制能力的影响。将变换不同参数的模拟结果归一化的比值汇总于表 5(以初始模型为基准)。表中,PC3 为素混凝土板的厚度为  $3\text{ m}$ ,RC1 为配筋底板的厚度为  $1\text{ m}$ ,D0 为素混凝土板密度与初始模型中的密度一致,E0 为素混凝土板弹性模量与初始模型中的弹性模量一致,D1、E1、D2、E2 依次为素混凝土板对应的密度、刚度减少(D1、E1)、增加(D2、E2)初始模型的  $1/3$ 。

表5 不同参数下归一化的模拟结果对比

Table 5 Comparison of normalized simulation results under different parameters

序号	参数类型	$z$ 向平均位移有效值之比	$x$ 向平均位移有效值之比
1	PC3-RC1-D0E0(初始模型)	1.00	1.00
2	PC3-RC2-D0E0	1.00	1.03
3	PC4-RC0-D0E0	1.00	1.00
4	PC3-RC1-D1E0	1.00	0.97
5	PC3-RC1-D2E0	1.00	1.03
6	PC3-RC1-D0E1	1.00	1.00
7	PC3-RC1-D0E2	1.00	1.00

由表5可知,变换上述不同参数对 $z$ 向位移有效值均值基本无影响,但会对 $x$ 向位移有效值均值产生一定影响。增加顶部配筋混凝土板的厚度或增大素混凝土板的密度会导致 $x$ 向位移有效值均值有所放大(约3%),而减小素混凝土板的密度则使 $x$ 向位移有效值均值有所减小(约3%)。此外,改变底部素混凝土板厚度、刚度均未对 $x$ 向位移有效值均值产生影响。

## 4 结论及建议

本文通过在北京光源大体积混凝土底板进行2次短期测试和1次24 h长期监测,对大体积混凝土底板的微振动控制能力开展了测试与分析,在此基础上通过一简化的二维有限元模型讨论了不同参数对底板振动水平的影响,主要结论如下:

1)在2次短期测试过程中,底板表面微振动位移有效值主要分布在10~50 nm之间;在24 h监测过程中,底板表面微振动位移有效值主要分布在20 nm以下。引起上述差别的主要原因与周围场地施工活动相关,因此,此类设施运行期间,应避开周边环境中的施工活动干扰。

2)测试中,大体积混凝土底板对10 Hz以上垂直于地面方向的微振动体现出较好的控制作用,对5 Hz以上水平向的微振动体现出较好的控制作用,底板最大能够将 $z$ 向微振动水平降低24%, $x$ 、 $y$ 向微振动水平降低34%,表明底板对水平向微振动控制能力略优于对竖向微振动的控制能力。

3)基于二维有限元模型模拟结果,在现有激励条件下,改变底板的厚度、密度、刚度对底板表面 $z$ 向(垂直地面方向)微振动水平无影响,但将配筋层厚度增加或将素混凝土层密度增大,将导致底板表面 $x$ 向(水平方向)微振动水平有所放大。

4)冲击激励作用下,大体积混凝土底板微振动控制效果有限,设施运行期间,应避免场地内出现冲击振动。

## 参考文献:

- [1] 姜晓明,王九庆,秦庆,等.中国高能同步辐射光源及其验证装置工程[J].中国科学:物理学 力学 天文学,2014,44(10):1075-1094. JIANG Xiaoming, WANG Jiuqing, QIN Qing, et al. Chinese high energy photon source and the test facility[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2014, 44(10): 1075-1094. (in Chinese)
- [2] CYRANOSKI D. China joins world-class synchrotron club[J]. Nature, 2009, 459(7243): 16-17.
- [3] ERIKSSON M, VAN DER VEEN J F, QUITMANN C. Diffraction-limited storage rings: A window to the science of tomorrow[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2014, 21(5): 837-842.
- [4] RIVIN E I. Vibration isolation of precision equipment[J]. Precision Engineering, 1995, 17(1): 41-56.
- [5] PRADO G, ARTHUZZI J C L, OSÉS G L, et al. Synchrotron radiation in palaeontological investigations: Examples from Brazilian fossils and its potential to South American palaeontology[J]. Journal of South American Earth Sciences, 2021, 108: 102973.
- [6] COLLETTE C, JANSSENS S, ARTOOS K, et al. Active vibration isolation of high precision machines[J]. Diamond Light Source Proceedings, 2010, 1(6): e1.
- [7] 岳建勇.软土地基精密装置基础微振动控制技术与工程应用[J].建筑科学,2020,36(增刊1):57-67. YUE Jianyong. Technology of the micro-vibration control for the foundation of a special facility on soft ground with engineering applications[J]. Building Science, 2020, 36(S1): 57-67. (in Chinese)
- [8] 王晓,严中保,杜涵文.上海自由电子激光工程隔振沟减振数值分析[J].振动与冲击,2012,31(15):190-194.

- WANG Xiao, YAN Zhongbao, DU Hanwen. Numerical analysis of vibration-attenuation effect of trenches in the engineering project of Shanghai free electron laser[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(15): 190–194. (in Chinese)
- [9] 高广运, 钟雯, 孟园, 等. 精密仪器厂房微振动实测与数值模拟分析[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(5): 1076–1083.  
GAO Guangyun, ZHONG Wen, MENG Yuan, et al. Micro-vibration test and numerical simulation analysis of precision instrument workshop[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(5): 1076–1083. (in Chinese)
- [10] 谢莹松, 李莉, 汪龙兵. 地铁振动对精密仪器的影响预测和对策研究[J]. *城市轨道交通研究*, 2016, 19(3): 46–50.  
XIE Yingsong, LI Li, WANG Longbing. Prediction and countermeasure for the influence of metro vibration on precise instrument[J]. *Urban Mass Transit*, 2016, 19(3): 46–50. (in Chinese)
- [11] 耿万里, 刘敦宇, 蔡永恩, 等. 预测北京地铁16号线振动对北京大学精密仪器的影响[J]. *地震工程与工程振动*, 2014, 34(6): 19–25.  
GENG Wanli, LIU Dunyu, CAI Yongen, et al. Prediction of the influence of the proposed Beijing metro line 16 on a precise instrument of Peking University[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2014, 34(6): 19–25. (in Chinese)
- [12] 郭安薪, 徐幼麟, 李惠. 高科技厂房精密仪器工作平台的微振混合控制[J]. *地震工程与工程振动*, 2004, 24(1): 161–165.  
GUO Anxin, XU Youlin, LI Hui. Hybrid control of microvibration for high technology facilities[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2004, 24(1): 161–165. (in Chinese)
- [13] 刘晶磊, 刘鹏泉, 尚康君, 等. 层状地基环形沟隔振效果影响因素分析[J]. *地震工程学报*, 2021, 43(6): 1394–1401, 1418.  
LIU Jinglei, LIU Pengquan, SHANG Kangjun, et al. Factors influencing the vibration isolation effect of annular ditches in layered foundation[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2021, 43(6): 1394–1401, 1418. (in Chinese)
- [14] 李丹阳, 高盟, 宋永山, 等. 高速铁路填充沟隔振效果的2.5D有限元分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2021, 41(2): 228–240.  
LI Danyang, GAO Meng, SONG Yongshan, et al. 2.5D finite element analysis of vibration isolation effect of high-speed railway filled ditch[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2021, 41(2): 228–240. (in Chinese)
- [15] 陈青生, 郭冬冬, 李杨, 等. 不同排数新型空沟屏障隔振效果研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2021, 41(2): 65–75.  
CHEN Qingsheng, GUO Dongdong, LI Yang, et al. Vibration isolation efficiency of new open trenches with different cross-sectional shapes and different rows number[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2021, 41(2): 65–75. (in Chinese)
- [16] 肖慧娟, 董尘. 高速铁路运行引发场地振动的空沟隔振分析[J]. *地震工程学报*, 2021, 43(6): 1419–1428.  
XIAO Huijuan, DONG Chen. Open trench isolation of site vibration induced by high-speed railway operation[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2021, 43(6): 1419–1428. (in Chinese)
- [17] SIMOS N, AMICK H, SOUEID A, et al. SNS-II ground vibration stability studies and design implementation[J]. *Synchrotron Radiation News*, 2019, 32(5): 4–12.
- [18] STUDER J A, PANDURI R., HÖLTSCHE H P. Synchrotron facilities: Meeting stringent deformation and vibration criteria[C]// *International Conferences on Case Histories in Geotechnical Engineering*. Virginia, USA: Missouri University of Science and Technology, 2008:15.
- [19] RODRIGUES F, RODRIGUES A R D, SILVA O H V, et al. Sirius stability: From foundation to girders[J]. *Synchrotron Radiation News*, 2019, 32(5): 20–26.
- [20] GORDON C G. Generic criteria for vibration sensitive equipment[C]// *Vibration Control in Microelectronics, Optics, and Metrology*. California, USA: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1999, 3786: 23–33.
- [21] AMICK H. On generic vibration criteria for advanced technology facilities[J]. *Journal of the Institute of Environmental Sciences*, 1997, 40(5): 35–44.
- [22] BIALOWONS W, AMIRIKAS R, BERTOLINI A, et al. Measurement of ground motion in various sites: EUROTeV-Report-2006-33[R]. Hamburg: Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, 2006.
- [23] GB 51076—2015 电子工业防微振工程技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.  
GB 51076—2015 Technical code for anti-microvibration engineering of electronics industry [S]. Beijing: China Planning Press, 2015. (in Chinese)
- [24] 赵勇, 豆红强, 王鹏, 等. 基于无限元边界的输水隧洞爆破振动对周边高压输电铁塔的安全评估与优化[J]. *工业建筑*, 2023, 53(4): 22–28.  
ZHAO Yong, DOU Hongqiang, WANG Peng, et al. Safety assessment and optimization of high-voltage transmission towers affected by blasting vibration of adjacent outlet tunnel based on infinite element boundary[J]. *Industrial Construction*, 2023, 53(4): 22–28. (in Chinese)