

大型冲压车间现场环境振动测试与分析

GARAU Pere¹, 赵斌¹, 杨彪², 蔡琪锐¹

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092;
2. 上海市机电设计研究院有限公司, 上海 200040)

摘要: 大型冲压车间在其运营过程中会诱发较大的环境振动, 影响周围精密仪器的正常工作。以一大型冲压车间为例, 测试4种工况下冲压车间及周围地面的加速度反应, 对比各工况下测点加速度反应的峰值和有效值, 确定最不利工况。通过统计学的方法, 在频域中过滤掉环境噪声的干扰, 得到振动在频域中的衰减特性。通过对测试数据的拟合, 得到该车间环境振动Z振级在土体中衰减的经验公式。最后, 讨论并评价该车间所采取相关减振措施的有效性。结果表明, 采用这些减振措施可以有效地减小车间的环境振动, 保证附近精密仪器设备正常工作。

关键词: 土木建筑结构; 环境振动; 现场测试; 传播和衰减规律; 减振措施

中图分类号: TU317+2 文献标识码: A 文章编号: 1674-2850(2017)14-1621-08

On-site testing and analysis of environmental vibration induced by large scale punching machine

GARAU Pere¹, ZHAO Bin¹, YANG Biao², CAI Qirui¹

(1. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Shanghai Institute of Mechanical & Electrical Engineering Co., Ltd., Shanghai 200040, China)

Abstract: Large scale punching machine under running will induce great environmental vibration, which may interrupt the normal usage of some precision instruments around. Based on a large scale of punching workshop, the acceleration responses of test points on the workshop and surrounding ground are tested under 4 different working conditions. The most unfavorable condition is determined by comparing the peak and RMS of accelerations. The ambient noise is filtered out with statistical method and vibration damping characteristics in the frequency domain are obtained. The empirical formula of the VL_z attenuation in the field is acquired by fitting the test data. At last, the effectiveness of some measures which are taken to reduce the vibration is discussed and evaluated. The results show that these damping measures can reduce the environmental vibration effectively and make sure the instruments remaining normal work in the case of the punching machine under operation.

Key words: civil engineering structure; environmental vibration; on-site testing; transfer and attenuation laws; measure of vibration mitigation

0 引言

随着技术的发展, 一些现代化工业测试设备对振动具有极高的敏感性^[1]。大型冲压车间在其运营过程中会产生较大的冲击振动, 振动经土介质向外传播, 将影响周围一些对振动敏感的精密仪器设备的正常工作。因此, 研究冲击振动在土介质中的传播衰减规律并提出相应的减振措施, 对保证大型冲压车间

基金项目: 科技部国家重点实验室基金 (SLDRCE-B-13)

作者简介: GARAU Pere (1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 振动控制

通信联系人: 赵斌, 教授, 主要研究方向: 振动控制与抗震结构试验. E-mail: binzh@tongji.edu.cn

附近精密仪器设备的正常工作十分重要。

近年来,一些学者对冲击设备诱发的环境振动进行了相关实测研究。黄菊花等^[2]对2 t模锻锤引起的车间振动进行了实测,分析了致振原因及振动波的传播规律。朱彤等^[3]对辽阳某公司热电厂汽轮机组运行过程中引起的框架基础振动进行了实测,确定了致振原因,并结合数值分析结果,提出了相关措施以确保汽轮机组正常运行。王晶^[4]对某锻压车间的振动状况进行了实测,确定了对应场地条件下近源振幅的衰减公式,并提出了利用实测信号预测近源地面竖向振动的公式。

研究以某汽车公司大型冲压车间为例,通过现场实测,研究大型冲压车间在其运营过程中所诱发环境振动的特性及其传播衰减规律。同时,评价该车间所采取相关减振措施的有效性,讨论车间环境振动对精密仪器的影响,以确保其正常工作,也为同类冲压车间的减振设计提供参考依据。

1 现场测试

1.1 车间概况

如图1所示,仪征某汽车公司冲压车间具有2条规模分别为6 000 t(1号)和8 000 t(2号)的压机线,其下部基础为地坑基础,地坑长72 m,宽37 m,深6.45 m,其底板厚度为1.3 m。离压机线中心251 m处有一间三坐标测量机辅房,其中设有多台对振动敏感的三坐标测量机。三坐标测量机底部地坑基础长7.1 m,宽8 m,深1.85 m,底板厚0.55 m。压机线工作时,会激起车间地坑基础的振动。振动通过土体向外传播至三坐标测量机地坑,将影响三坐标测量机的正常工作。

1.2 测点布置

为研究冲击振动在场地中的传播衰减规律,在冲压车间地坑中心至三坐标测量机地坑中心沿线布置了7个测点,每个测点处放置加速度传感器用于测量振动加速度,测点布置如图2所示。其中,7号测点位于三坐标测量机地坑基础表面,其余测点皆位于车间地面。各测点距离冲压车间地坑中心的距离如表1所示。

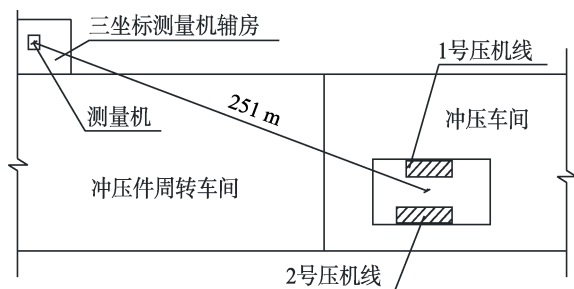


图1 车间概况图

Fig. 1 Workshop description chart

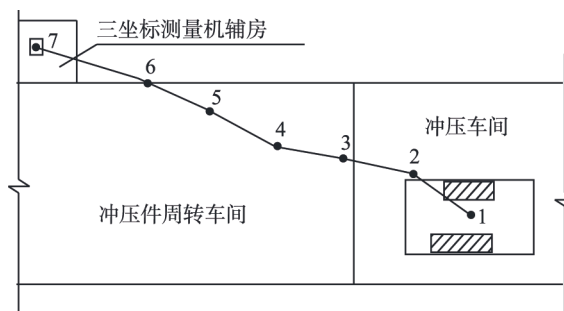


图2 测点布置图

Fig. 2 Layout of test points

该公司为防止冲压车间压机线工作时诱发的振动影响三坐标测量机的正常工作,分别对冲压车间和三坐标测量机辅房做了相应的减振设计。通过使用减振支座,减少压机线激起地坑基础的振动;通过使用减振支座和减振质量块,减少辅房地坑传递给三坐标测量机的振动。如图3所示,为研究减振

表1 各测点距地坑中心的距离表

Tab. 1 Table of distance between pit centre and test points

测点编号	距离/m	测点编号	距离/m
1	0	5	158
2	38	6	199
3	79	7	251
4	113		

措施的有效性, 测试在冲压机台座和冲压车间地坑基础处各布置一测点(如图 3a 中 A1 和 A2 所示), 以测量采用减振支座后的振动衰减情况; 在三坐标测量机地坑基础表面和减振质量块上方各布置一测点(如图 3b 中 B1 和 B2 所示), 以测量采取减振措施后振动由辅房地坑传至三坐标测量机底部时的衰减情况。

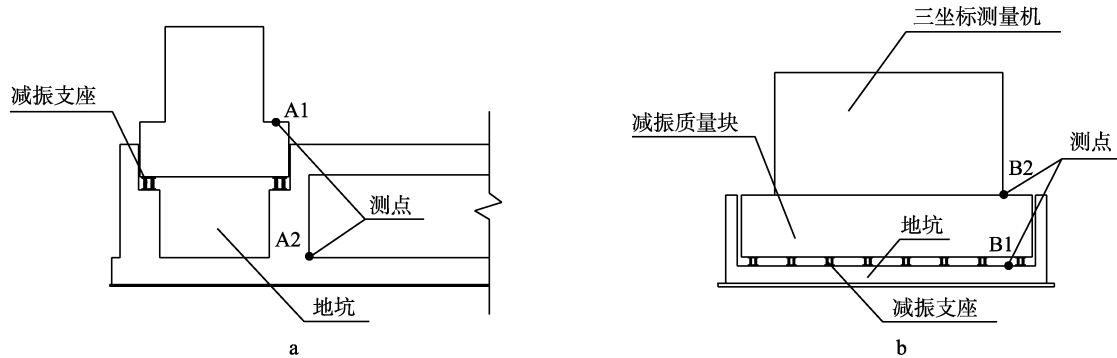


图 3 减振效果测点布置图

Fig. 3 Layout of damping effect test points

a—冲压车间地坑; b—三坐标测量机辅房地坑

a-Pit of stamping workshop; b-Auxiliary room pit of three coordinate measuring machine

1.3 测试工况

测试根据压机线的工作状态分 4 种工况进行, 如表 2 所示。其中, 工况 4 为两压机线同时停止工作, 目的为测试场地的环境噪声, 以便在后续的分析中, 排除其他 3 种工况测试中环境噪声的干扰。

表 2 测试工况表

Tab. 2 Table of working conditions

压机线	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
1 号	停止	工作	工作	停止
2 号	工作	停止	工作	停止

2 测试结果

2.1 加速度峰值与有效值

测试得到 4 种工况下 1~7 号测点加速度反应时程数据, 对其进行整理, 得到各测点加速度反应峰值和有效值, 如表 3 所示。其中, 加速度峰值与加速度有效值的定义如下^[5]:

$$a_p = \max(|a(t)|), \tag{1}$$

$$a_r = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt}, \tag{2}$$

其中, $a(t)$ 为 t 时刻测得的加速度值; a_p 为加速度峰值, a_r 为加速度有效值; T 为振动测试的总持时。

表 3 加速度峰值和有效值 (mm/s²)

Tab. 3 Peak values and effective values of accelerations (mm/s²)

测点	加速度峰值				加速度有效值			
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
1	29.37	22.35	38.98	1.08	5.45	4.21	7.51	0.34
2	11.72	25.44	26.79	2.04	2.11	3.96	3.96	1.39
3	3.63	3.54	4.23	2.08	0.92	0.78	1.40	0.65
4	2.65	1.17	2.97	2.12	0.88	0.76	0.93	0.56
5	1.78	1.40	2.40	0.89	0.57	0.45	0.80	0.24
6	0.42	0.41	0.44	0.38	0.16	0.15	0.19	0.13
7	0.40	0.38	0.41	0.36	0.13	0.10	0.14	0.09

由表3可知,前3种工况下,工况3对应的地坑中心1号测点的加速度反应最大,工况1次之,工况2最小。说明运行的压机线规模越大,激起地坑基础的振动越大。对比其余测点在前3种工况下的加速度峰值和有效值的大小可知,两条压机线同时工作对应的工况3为最不利工况。

分析各测点在工况4下的加速度数据可知,1号测点环境噪声相对较小,相比其他3种工况,可以忽略;2~5号测点环境噪声相对较大(主要由车间内的部件运输车产生),对其他工况下的测试结果有一定影响;6~7号测点环境噪声较2~5号测点大幅减小,但与其他工况下的测试结果数据较为接近,对测试结果有较大的影响。综上所述,环境噪声对其他3种工况下多数测点的测试结果有不可忽略的影响。

2.2 噪声过滤

针对环境噪声不可忽略的问题,本节给出了从频域中过滤噪声的方法,以得到较为准确的测试结果。压机线引起的振动与环境噪声经过傅里叶变换后可分别写为如下形式^[6]:

$$f_1(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega t + \varphi_n), \quad (3)$$

$$f_2(t) = B_0 + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin(n\omega t + \psi_n). \quad (4)$$

二者经叠加,即为实测所得振动数据,其表达式为

$$F(t) = f_1(t) + f_2(t) = A_0 + B_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \sin(n\omega t + \varphi_n) + B_n \sin(n\omega t + \psi_n)]. \quad (5)$$

同时,实测振动经傅里叶变换后可写为以下形式:

$$F(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin(n\omega t + \phi_n). \quad (6)$$

联立式(5)和式(6),整理计算得

$$C_0 = A_0 + B_0, \quad (7)$$

$$C_n^2 = A_n^2 + B_n^2 + 2A_n B_n \cos(\varphi_n - \psi_n). \quad (8)$$

其中, A_n 、 B_n 、 C_n 分别为压机线引起的振动、环境噪声及实测振动在频域中第 n 阶频率对应的幅值, φ_n 、 ψ_n 、 ϕ_n 为其对应的相位角。

令 $\theta_n = \varphi_n - \psi_n$,则式(8)可变换为

$$C_n^2 - B_n^2 = A_n^2 + 2A_n B_n \cos \theta_n. \quad (9)$$

由于压机线引起的振动与环境噪声相互独立,且多组数据的统计结果表明 φ_n 与 ψ_n 具有很强的随机性,因此可将其视为一组独立的随机变量。假定 φ_n 与 ψ_n 在 $[-\pi, \pi]$ 服从均匀分布,则随机变量 θ_n 在 $[-2\pi, 2\pi]$ 服从均匀分布,进而有

$$E(A_n^2 + 2A_n B_n \cos \theta_n) = E(C_n^2 - B_n^2) = A_n^2. \quad (10)$$

由统计学原理^[7]可知, A_n^2 的矩估计为

$$\hat{A}_n^2 = \hat{E}(C_n^2 - B_n^2) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (C_{ni}^2 - B_{ni}^2), \quad (11)$$

其中, B_{ni} 、 C_{ni} 分别为环境噪声与实测振动的第 i 组测试数据在频域中第 n 阶频率对应的幅值; m 为测试

数据的组数。

根据式 (11)，选取各测点每种工况下的多组数据进行环境噪声过滤，并将过滤后的结果用 1/3 倍频程谱表示。其中，工况 1 下 7 号测点在过滤前后的对比如图 4 所示。图 4 中，横坐标为 1/3 倍频程谱的中心频率，纵坐标为对应中心频率频段内的加速度有效值，其与频域幅值 A_n 的关系如下^[8]：

$$a_{ri} = \sqrt{\sum_{c=1}^M \left(\frac{A_{ni+c}}{\sqrt{2}} \right)^2}, \quad (12)$$

其中， a_{ri} 为第 i 个频段的加速度有效值； M 为第 i 个频段内频率的个数； A_{ni+c} 为第 i 个频段内第 c 个频率的幅值。

由图 4 可知，三坐标测量机地坑（7 号测点）处，环境噪声的优势频率集中在 30~60 Hz 段，经上述方法过滤后，环境噪声大部分被滤去，压机线引起振动的优势频率集中在 5~20 Hz 段。环境噪声的频域峰值为压机线工作引起振动的 7.8 倍，表明工况 1 下压机线工作引起的振动经土体向外传播至三坐标测量机地坑底部时，已小于周围其他因素引起的环境振动。

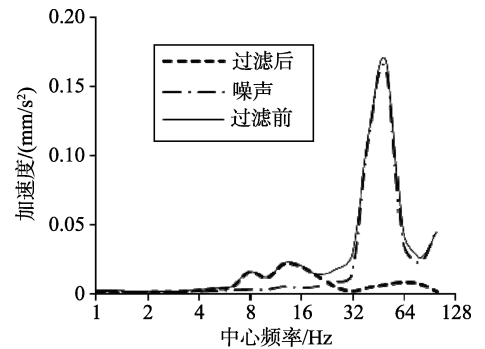


图 4 滤波前后加速度对比图

Fig. 4 Comparison chart of accelerations before and after filtering

2.3 衰减规律

为研究冲压车间运营过程中诱发的环境振动在频域中的传播衰减规律，给出前 3 种工况下测点 1 和测点 7 经噪声过滤后的 1/3 倍频程谱，如图 5 和图 6 所示。

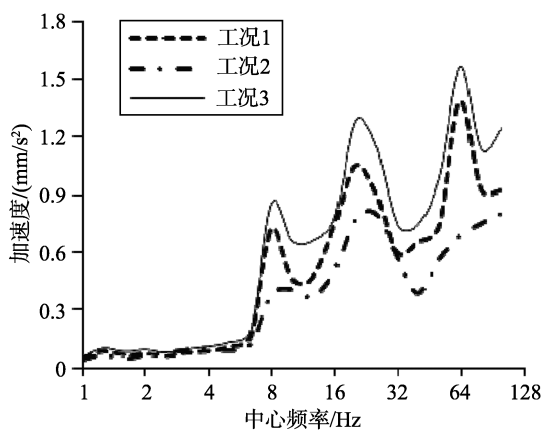


图 5 1/3 倍频程谱 (测点 1)

Fig. 5 1/3 octave spectra of test point 1

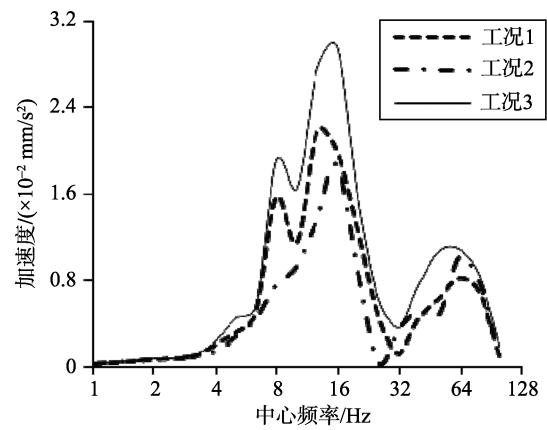


图 6 1/3 倍频程谱 (测点 7)

Fig. 6 1/3 octave spectra of test point 7

由图 5 分析可知，压机线工作时，地坑中心处振动在 8~10 Hz、20~30 Hz、60~80 Hz 段各有一波峰，其中，60~80 Hz 峰值最大，为 1.56 mm/s²，5 Hz 以下频率分量较小。随着振动传播距离的增加，振动的高频分量衰减迅速，至三坐标测量机地坑底部时，其优势频率集中在 5~20 Hz，最大峰值为 2.96×10⁻² mm/s²，5 Hz 以下及 30 Hz 以上频率分量较小，如图 6 所示。对比 3 种工况下 2 个测点的 1/3 倍频程谱可知，工况 3 下各个频段的振动分量均大于其他 2 种工况，说明工况 3 为最不利工况。

根据我国相关规范^[5,9]，通常使用 Z 振级评价环境振动，其定义如下：

$$VL_Z = 20 \log \left(\frac{a_w}{a_0} \right), \quad (13)$$

$$a_w = \sqrt{\sum_{i=1}^n a_{wi}^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_{ri} w_i)^2}, \quad (14)$$

其中, VL_Z 为 Z 振级 (dB); a_0 为基准加速度, $a_0=10^{-3} \text{ mm/s}^2$; a_w 为振动计权加速度有效值 (mm/s^2); a_{ri} 为第 i 个中心频率对应频段的振动加速度有效值 (mm/s^2); w_i 为规范规定的加速度频率计权因子。

按式 (13)、式 (14) 计算得工况 3 下冲压车间地坑基础和辅房地坑基础的 Z 振级分别为 73.3 dB 和 39.5 dB, 说明振动由冲压车间经土体传至三坐标测量机辅房, 衰减了 33.8 dB。

为进一步说明车间地坑基础在土体中的传播衰减规律, 计算并整理最不利工况 (工况 3) 下各测点的 Z 振级, 绘于同一图中, 并使用相关曲线拟合, 如图 7 所示。

由图 7 可知, 各点之间有较强的线性关系, 故拟合采用线性函数进行, 最终拟合得最不利工况下压机线工作诱发环境振动的 Z 振级随距离衰减的函数为

$$VL_Z(x) = 75.81 - 1.40x, \quad (15)$$

其中, x 为受振点距冲压车间地坑中心的距离 (m)。

值得注意的是, 式 (15) 虽是线性表达式, 但由式 (13) 可知, 加速度有效值与 Z 振级间为指数关系, 因此实际压机线工作诱发的环境振动的加速度随距离呈指数衰减。

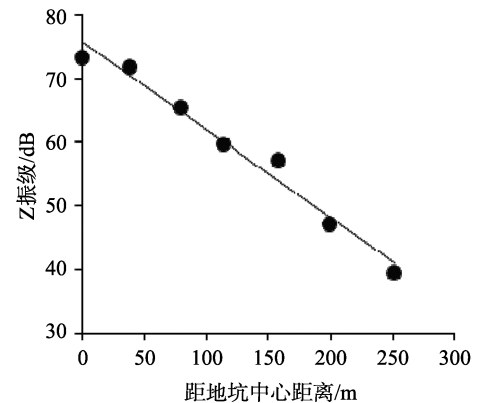


图 7 Z 振级衰减曲线
Fig. 7 Attenuation curve of VL_Z

2.4 减振措施研究

为分析减振措施的有效性, 对测试得到的 A1、A2 和 B1、B2 这 4 个测点振动加速度反应数据进行频谱分析得到对应的 1/3 倍频程谱, 如图 8 和图 9 所示。图中, 纵坐标为加速度振动级 VAL, 其定义如下^[9]:

$$VAL = 20 \log \left(\frac{a_r}{a_0} \right), \quad (16)$$

其中, a_r 为各中心频率对应的加速度有效值 (mm/s^2); a_0 为基准加速度, $a_0=10^{-3} \text{ mm/s}^2$ 。图 8、图 9 中中加速度振动级 VAL 为负值表明其中心频率对应的加速度有效值小于 10^{-3} mm/s^2 。

由图 8 可知, 台座振动频率分量分布均匀, 约为 90 dB。振动经弹簧减振支座传递至车间地坑时衰减明显, 各频率分量衰减了约 30 dB, 4 Hz 以下振动频率分量衰减更为明显。由图 9 可知, 振动由三坐标

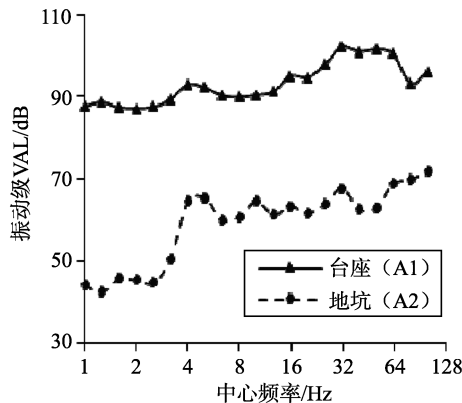


图 8 冲压车间减振效果对比图

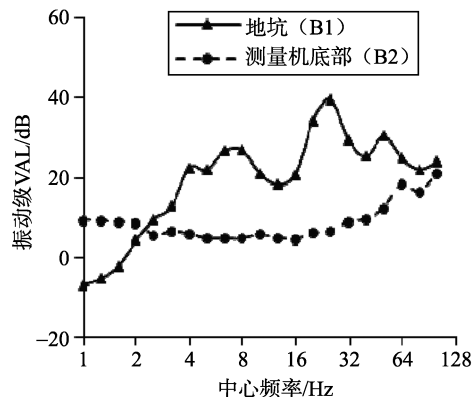


图 9 辅房减振效果对比图

Fig. 8 Comparison chart of damping effects in workshop

Fig. 9 Comparison chart of damping effects in auxiliary room

测量机辅房地坑经弹簧减振支座和减振质量块传至三坐标测量机底部时, 2~64 Hz 之间振动频率分量衰减明显, 衰减约 20 dB, 2 Hz 以下振动频率分量有所放大, 64 Hz 以上振动频率分量衰减不明显。综上所述, 该公司所采取的减振措施, 可以有效减小压机线工作时诱发的环境振动。

为进一步讨论采取减振措施后, 压机线工作时诱发环境振动向外传播对三坐标测量机正常工作的影响, 将三坐标测量机底部实测数据与振动限制绘于同一图中, 如图 10 所示。图 10 中, 纵坐标为加速度峰峰值, 其为加速度有效值的 $2\sqrt{2}$ 倍。由图 10 可知, 振动各频率分量加速度峰峰值皆在限制之下, 说明采取上述减振措施后, 该公司冲压车间压机线工作时激起的地坑基础振动经土体向外传播, 不会影响三坐标测量机的正常工作。

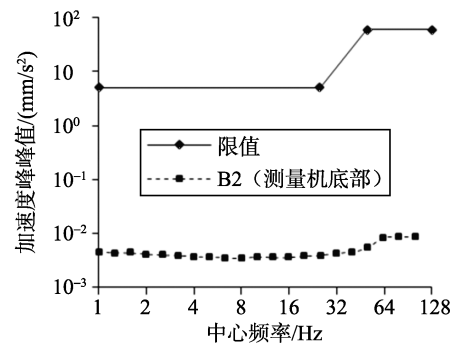


图 10 1/3 倍频程加速度峰峰值谱

Fig. 10 1/3 octave spectrum of acceleration peak values

3 结论

研究对仪征某汽车公司冲压车间压机线运行诱发的环境振动进行了现场测试, 整理和分析了多组测试数据, 得到主要结论如下:

- 1) 冲压车间压机线规模越大, 其工作时激起的地坑基础振动越大, 最不利工况为两条压机线同时工作;
- 2) 压机线工作诱发的环境振动传播至三坐标测量机辅房地坑时, 30 Hz 以上频率分量衰减迅速, 振动的优势频率集中在 5~20 Hz;
- 3) 随距离的增加, 压机线工作诱发的环境振动加速度呈指数衰减, 振动 Z 振级呈线性衰减。振动传播至三坐标测量机辅房地坑时, 衰减了 33.8 dB;
- 4) 测试结果表明, 该公司采用的弹簧减振支座和减振质量块可以有效地减小压机线工作诱发的环境振动, 保证了三坐标测量机的正常工作。

[参考文献] (References)

- [1] 唐扬, 汪崖, 刘嘉祥, 等. 超大型设备基础振动分析和微变形控制[J]. 结构工程师, 2010, 26 (3): 116-122.
TANG Y, WANG Y, LIU J X, et al. Vibration analysis and micro-deformation control in large-scale equipment foundations[J]. Structure Engineers, 2010, 26(3): 116-122. (in Chinese)
- [2] 黄菊花, 揭小平, 何成宏, 等. 2 t 模锻锤振动传播及现场实测[J]. 重型机械, 1999 (3): 24-27.
HUANG J H, JIE X P, HE C H, et al. Actual measurement of the vibration on 2 t-die forging hamper workshop[J]. Heavy Machinery, 1999(3): 24-27. (in Chinese)
- [3] 朱彤, 陈春雷. 动力机器框架基础的振动检测分析与数值验证[J]. 结构工程师, 2010, 26 (1): 103-107.
ZHU T, CHEN C L. Vibration analysis and numerical validation of a frame foundation in a power plant[J]. Structure Engineers, 2010, 26(1): 103-107. (in Chinese)
- [4] 王晶. 锻压车间近源地面竖向振动的分析及预测[J]. 结构工程师, 2007, 23 (1): 24-27.
WANG J. Analysis and calculation of near source ground vertical vibration in forging and press workshops[J]. Structural Engineers, 2007, 23(1): 24-27. (in Chinese)
- [5] 中华人民共和国环境保护部. GB 10071—88 城市区域环境振动测量方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. GB 10071—88 Measurement method of environmental vibration of urban area[S]. Beijing: Standards Press of China, 1988. (in Chinese)

-
- [6] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社, 2006.
HU Y X. Earthquake engineering[M]. Beijing: Seismological Press, 2006. (in Chinese)
- [7] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
SHENG Z, XIE S Q, PAN C Y. Probability theory and mathematical statistics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008. (in Chinese)
- [8] 李秀强. 地铁交通引发环境振动的实测分析及数值模拟[D]. 上海: 同济大学, 2012.
LI X Q. Measurement analysis and numerical simulation of environmental vibration induced by subway[D]. Shanghai: Tongji University, 2012. (in Chinese)
- [9] 中华人民共和国环境保护部. GB 10070—88 城市区域环境振动标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. GB 10070—88 Standard of environmental vibration in urban area[S]. Beijing: Standards Press of China, 1988. (in Chinese)