

引用格式:李艳娜,胡卫华,姚志东.变频设备振动作用下建筑振动响应及传播规律研究[J].工业建筑,2026,56(5):37-46. LI Yanna, HU Weihua, YAO Zhidong. Research on Building Vibration Response and Propagation Laws Under Variable-Frequency Vibration Excitations[J]. Industrial Construction, 2026, 56(5): 37-46 (in Chinese). DOI: 10. 3724/j. gyjzG26013007

变频设备振动作用下建筑振动响应及传播规律研究^{*}

李艳娜^{1,2} 胡卫华¹ 姚志东²

(1. 哈尔滨工业大学(深圳)智能土木与海洋工程学院,广东深圳 518055; 2. 中冶建筑研究总院(深圳)有限公司,广东深圳 518055)

摘 要 为揭示变频设备运行过程中振动的传播规律及其对建筑结构的影响机制,依托含变频设备的工程项目,通过现场振动测试,获取设备本体、不同传播距离及建筑不同楼层的振动响应数据,探究扰动频率、传播距离及空间方位的影响。研究表明:在不同工作频率下振动的传播特性存在差异,竖向加速度传递率随频率升高呈降低趋势;振动传播具有明显方向性特征,水平向加速度传递率较竖向高出 30%~50%;振动幅值随传播距离增加呈近似指数衰减规律,基于实测数据建立了考虑扰动频率的竖向加速度传递率与传播距离的量化关系,确定在距振源 200~220 m 处衰减至环境振动水平;建筑内部振动分布受楼层高度与结构形式的共同控制,不同方向因结构刚度差异呈现不同的楼层响应特征。

关键词 变频设备;振动传播规律;衰减特性;建筑结构;人体舒适性评估

Research on Building Vibration Response and Propagation Laws Under Variable-Frequency Vibration Excitations

LI Yanna^{1,2} HU Weihua¹ YAO Zhidong²

(1. School of Intelligent Civil and Ocean Engineering, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China; 2. Central Research Institute of Building and Construction (Shenzhen) Co., Ltd., MCC Group, Shenzhen 518055, China)

Abstract: To elucidate the propagation laws of vibrations generated during the operation of variable-frequency equipment and the influence of such vibrations on building structures, an engineering project incorporating such equipment was investigated through field vibration measurements. Vibration response data were collected at the equipment source, along multiple propagation paths, and on different floors of the building, enabling an examination of the effects of excitation frequency, propagation distance, and spatial direction. The results indicated that the vibration propagation in soil exhibited obvious frequency-dependent characteristics, with the vertical acceleration transmissibility decreasing as the operating frequency increased. Notably, the vibration propagation showed significant directional anisotropy, with the horizontal transmissibility 30% to 50% higher than the vertical one. Vibration amplitude decayed approximately exponentially as the propagation distance increased. Based on the measured data, a quantitative relationship between vertical acceleration transmissibility and propagation distance considering excitation frequency was established. The relationship revealed that vibrations attenuated to the ambient background level at a distance of approximately 200 to 220 m from the vibration source. The

^{*} 上海市工程结构安全重点实验室开放课题(2023-KF08);国家自然科学基金项目(52378296);国家重点研发计划(2023YFC3806602);深圳市高等院校稳定支持面上项目(GW XD20220811163144001)。

第一作者:李艳娜,博士研究生,工程师,主要从事结构振动分析、结构安全检测与监测、装配式结构抗震性能研究。

电子信箱:liyanna_zy@163.com

收稿日期:2026-01-30

vibration distribution inside the building was jointly governed by floor height and structural configuration, and distinct floor vibration response characteristics in different directions were observed due to differences in structural stiffness.

Keywords: variable-frequency equipment; vibration propagation laws; attenuation characteristics; building structure; human comfort evaluation

0 引言

作为现代工业生产中重要的动力系统,变频设备具有高效率、节能的特性,因而在泵类、压缩机、振动成型等设备中得到广泛应用。然而,这类设备在运行过程中不可避免地产生振动,不仅会对设备自身性能和使用寿命造成影响^[1-2],还可能通过基础及土体传播^[3],对邻近建筑物、精密仪器及人员舒适度产生不利作用^[4],而且多设备运行工况下的振动特性会呈现复杂的非线性响应,增加振动预测与控制的难度^[5]。同时,《中华人民共和国噪声污染防治法》将工业振动纳入管控范畴,进一步明确了开展针对性振动控制研究的迫切性。

现有研究已围绕定频设备^[6]、交通荷载^[7-9]及施工扰动^[10]等典型工业振源,通过现场实测、室内试验与数值模拟等手段,开展了振动传播规律与结构响应特征的大量探索,其中交通振动是早期研究的重点,地铁、铁路及公路交通荷载产生的振动传播规律和建筑响应机制已得到较为系统的分析^[8-9]。研究表明,工业振源诱发的场地振动强度总体随传播距离增大而衰减,其衰减特性受振源类型、场地土特性、地形地貌及结构耦合关系等多重因素影响,表现出复杂的非线性规律^[6,11]。振动流化床干燥机^[12]和往复式天然气压缩机橇座^[13]的运转会引发楼面及结构振动,呈现出复杂的空间分布与频率特征。冯玉龙等^[14]还针对结构-设备耦合及管道-设备耦联效应展开研究,指出设备布置、连接方式及振动频率变化均会对建筑结构振动响应产生重要影响。

随着变频驱动技术在工业生产中的广泛应用,变频设备作为新型振源具有显著的可调频特性。其运行过程中激振频率可在一定范围内连续变化,不同频率下产生的振动传播特性存在显著差异^[15-17]。与传统固定频率设备相比,变频设备在振动传播过程中的能量衰减、方向性及波型转换等现象更加复杂,对周边土体和建筑结构的响应机制尚不完全清楚。现有研究集中于变频电机或旋转机

械的设备本体振动特性及控制方法^[18],少数研究针对可调频激振台或实验模拟装置分析其振动传播特性^[17,19],而基于现场实测数据的工业设备振动场地传播及建筑响应研究仍较有限,尤其缺乏针对多楼层建筑结构振动响应规律的系统分析。

现有研究缺乏对多工况、多频率、多空间方向及不同传播距离下的系统分析,经典振动传播衰减模型对变频设备这一动态宽频激励特性适配不足。因此,本研究以某含变频设备的工程项目为研究对象,结合现场测试,系统探讨不同频率、空间方向及传播距离下的振动传播规律,分析建筑结构内部振动衰减特性,并对周边环境振动进行综合评估,为变频设备周边振动环境评价、敏感设备防护及工业厂房布局优化提供科学依据。

1 工程概况

本研究选取一项含变频设备的工程项目作为研究对象,该项目周边存在一栋办公建筑,为四层框架结构,建筑长度约28 m,宽度16.8 m,总建筑面积约1674.4 m²。建筑物距设备位置的水平直线距离约128 m,为振动传播分析提供了典型场景。项目概况和建筑结构模型如图1所示。

1.1 变频振动设备

本研究中的变频振动设备为一台真空振动压机[图2(a)],用于生产人造石板,搭载多激励源协同驱动振动系统,核心振动单元由10台振动电机构成,单台电机额定功率10 kW。单台振动电机的最大激振力约为120 kN。系统振动频率可在0~50 Hz范围内连续调节,对应电机最高转速3000 r/min,能够灵活调控激励工况,以适配不同的加工需求。

设备的三向加速度时程曲线如图2(b)所示。可知:设备的振动以竖向振动为主,加速度最大可达9.778 m/s²。第一阶段为启动过程,此阶段振动频率与响应幅值均逐渐增大;第二阶段为稳定工作阶段,并进一步细分为7个不同工作频率的稳态工况,分别对应31,33,36,39,42,44,45 Hz的定频运行,体现出

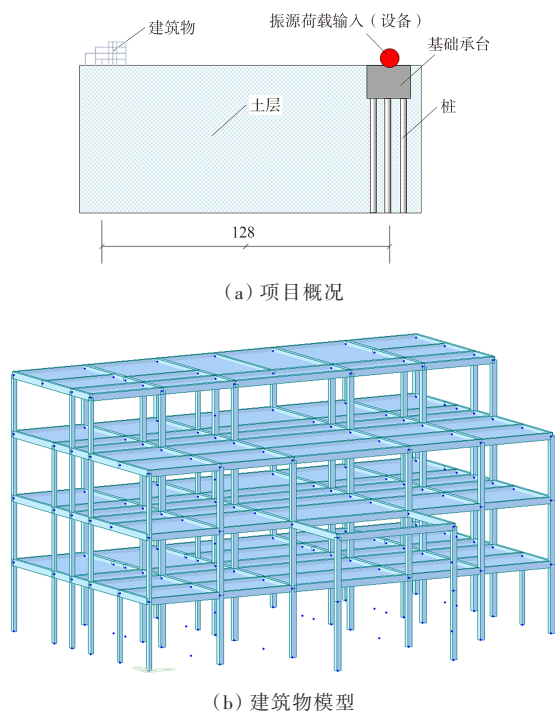


图 1 工程现场整体布局 m
Fig. 1 Overview and layout of the project

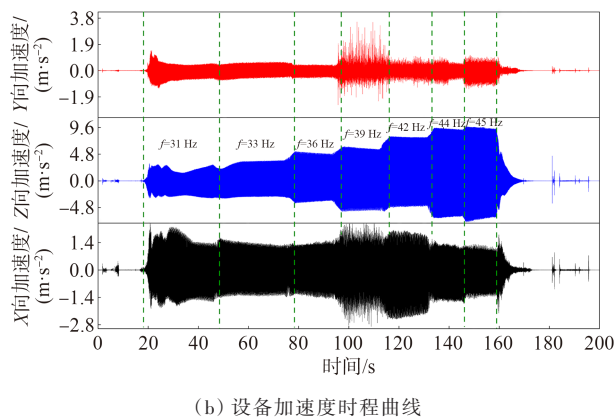
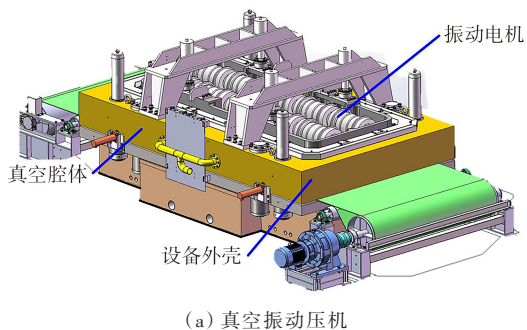
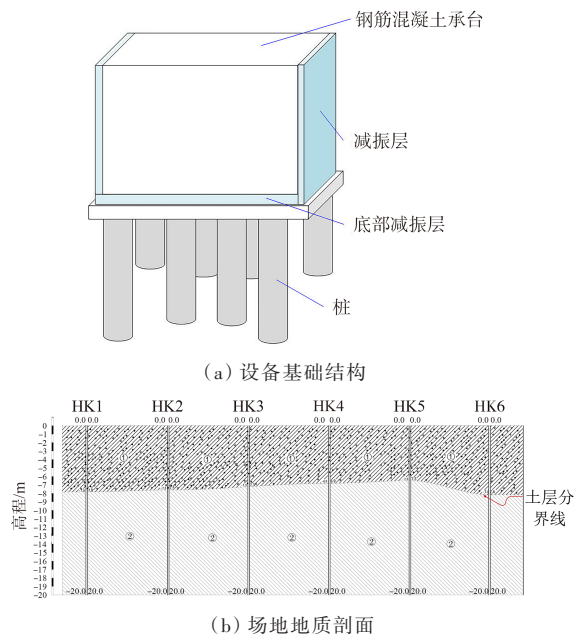


图 2 真空振动压机
Fig. 2 Vacuum vibratory press

多阶段定频的运行特征;最后一阶段为停机过程,此阶段振动频率与响应幅值均逐渐减小。

1.2 设备基础与场地地质条件

设备基础采用桩-承台基础体系,钢筋混凝土矩形承台尺寸为 $6.7\text{ m} \times 9.7\text{ m} \times 4.2\text{ m}$,既能为设备提供刚性支撑平台,又与主机架刚性连接,四周设有减振层以削弱振动传播,保障设备在动荷载作用下稳定运行。桩基础部分由 6 根钻孔灌注桩组成,桩径 600 mm、桩长 18.8 m,桩端嵌入刚度相对较高的下部土层。设备基础结构示意图如图 3(a)所示。



注:HK1~6 为钻孔编号;①号土层为红棕色黏土夹红土砾石;
②号土层为黄、蓝、灰、浅灰色黏土。

图 3 设备基础结构与场地地质示意
Fig. 3 Equipment foundation structure and geological conditions

岩土工程勘察结果表明,场地 20 m 内浅土层可划分为两个工程地质层:上部土层(0~8 m)为红棕色黏土夹红土砾石,呈软至中等硬塑状态;下部土层(8~20 m)以黄、蓝灰、浅灰色黏土为主,呈中等硬塑至硬塑状态,具备良好的承载条件。场地地质剖面如图 3(b)所示。

1.3 测试方案

为获取振动设备及周边环境的振动特性,研究振动作用下场地传播规律,在设备机身安装 1 台三轴加速度传感器,用于记录设备启动及同步运行过程中的工作振动响应;在距设备不同距离(2, 71, 87, 122, 128, 133, 164 m)处,沿多个方向布设 7 台加速度传感器[图 4(a)],以监测振动在周边环境中的传播规律。其中,71 m 和 87 m 处的监测点以及 128 m 和 133 m 处的监测点相对于设备中心大致对称分布,

从而可以对振动衰减进行方向性比较。

为进一步分析设备振动对建筑物的影响,分别在建筑物一~四层布设6个传感器,一层布设3个测点,二~四层在楼板中央分别布置1个测点,如图4(b)和(c)所示,以评估不同楼层振动衰减规律。同时测量单台设备运行和两台设备同时运行状态下的数据,为后续多台设备运行分析评估提供数据支撑。

每台加速度传感器的采样频率可在0~1024 Hz范围内配置,且每台传感器可同步记录X、Y、Z三个方向的加速度数据,如图4(a)所示。原始加速度信号以512 Hz采样,传感器集成了数据采集、4G天线数据传输、GPS及供电模块,通过GPS模块实现所有测点的时间同步,以确保不同距离处采集的振动信号可准确关联分析。

为最大限度地减少环境振动干扰的影响,所有测量均在附近无施工活动或交通非繁忙时段进行,并在真空振动压力机运行前后记录了背景振动水平,以证实环境振动显著低于压力机引起的振动。

2 结果及分析

为评估设备振动作用下的振动传播效果,本研究采用传递率 T 表征真空振动压机激振荷载的距离衰减效应,该参数的定义为测点加速度幅值与施加的激振响应幅值之比,详见式(1)。

$$T = \frac{a_i}{a_{vp}} \tag{1}$$

式中: a_i 为监测点测得的峰值加速度; a_{vp} 为真空振动压机设备本体测得的峰值加速度。

2.1 不同频率与不同方向振动传播规律

为分析单台设备不同工作频率条件下振动在传播过程中的衰减规律,选取建筑物一层布设的3个测点,并结合设备本体振动响应数据,对振动加速度峰值及其传递率进行了系统分析。建筑物距设备振源的距离约128 m。通过多测点同步对比分析,有效降低了单点测试带来的偶然性,提高了结果的稳定性与可靠性。设备运行状态下,不同频率区段、不同方向各测点的加速度传递率对比曲线如图5所示,设备运行时不同区段频段各测点的加速度峰值 a_{max} 和传递率 T 如表1所示。

为准确表征物理冲击强度,对原始信号经去趋势和去均值预处理,剔除因传感器瞬态故障产生的异常跳变点后,通过4阶零相位巴特沃斯低通滤波器(截止频率100 Hz)去除高频噪声及混叠分量。在此基础上,分别提取各频率工作区段对应时程记录的绝对值最大值。

分析结果表明,从空间分布特性来看,建筑物一层不同角部位置测点获得的传递率数值整体上接近,证明了测试结果的稳定性。振动加速度传递率随设备工作频率变化显著,表现出明显的频率依赖性特征,在X向,当工作频率为36, 44 Hz时,传递率达到相对较大值,最大传递率分别为

表1 单台设备不同频段振动下各测点的加速度峰值 a_{max} 和传递率 T
Table 1 Peak acceleration a_{max} and transmissibility p at various measuring points under vibrations of a single device at different frequency bands

测点	方向	31 Hz		33 Hz		36 Hz		39 Hz		42 Hz		44 Hz		45 Hz	
		$a_{max}/(m \cdot s^{-2})$	$T/\%$	$a_{max}/(m \cdot s^{-2})$	$T/\%$	$a_{max}/(m \cdot s^{-2})$	$T/\%$	$a_{max}/(m \cdot s^{-2})$	$T/\%$	$a_{max}/(m \cdot s^{-2})$	$T/\%$	$a_{max}/(m \cdot s^{-2})$	$T/\%$	$a_{max}/(m \cdot s^{-2})$	$T/\%$
建筑物-测点1	X	0.027	1.24	0.011	0.73	0.019	1.23	0.013	0.46	0.008	0.30	0.022	1.33	0.016	1.09
	Z	0.021	0.66	0.020	0.54	0.013	0.25	0.014	0.22	0.018	0.22	0.02	0.21	0.007	0.07
	Y	0.025	1.7	0.009	1.31	0.013	2.21	0.018	0.51	0.011	0.89	0.017	1.53	0.024	1.83
建筑物-测点2	X	0.030	1.36	0.011	0.69	0.027	1.80	0.025	0.86	0.014	0.57	0.016	0.98	0.022	1.45
	Z	0.057	1.81	0.029	0.77	0.024	0.46	0.016	0.25	0.021	0.26	0.014	0.15	0.005	0.05
	Y	0.015	1.03	0.013	1.89	0.014	2.27	0.014	0.41	0.019	1.58	0.004	0.35	0.012	0.87
建筑物-测点3	X	0.021	0.96	0.021	1.39	0.018	1.17	0.009	0.30	0.003	0.14	0.011	0.68	0.017	1.12
	Z	0.026	0.84	0.027	0.73	0.014	0.27	0.019	0.30	0.006	0.08	0.016	0.17	0.009	0.09
	Y	0.027	1.81	0.030	4.27	0.018	3.05	0.011	0.32	0.014	1.13	0.022	2.04	0.018	1.38
设备	X	2.205	—	1.536	—	1.513	—	2.892	—	2.515	—	1.667	—	1.492	—
	Z	3.134	—	3.705	—	5.285	—	6.152	—	7.977	—	9.558	—	9.778	—
	Y	1.469	—	0.698	—	0.597	—	3.534	—	1.212	—	1.100	—	1.335	—

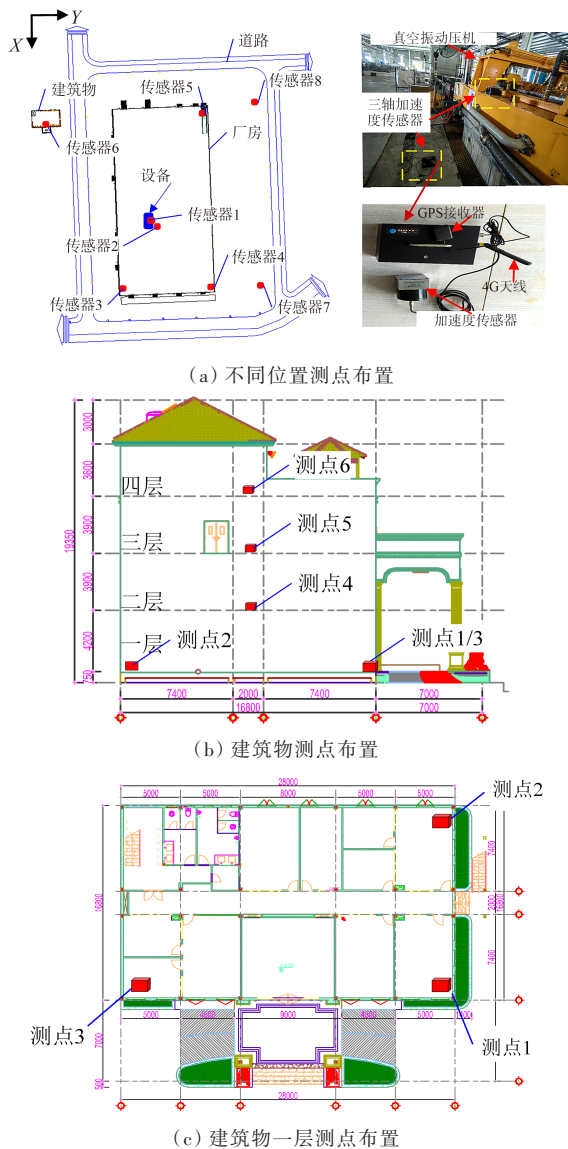


图4 测点布置示意 mm

Fig. 4 Arrangement of measuring points

1.80% 和 1.33%; 而在 39~42 Hz 频段内, 传递率明显降低, 其平均值约为 0.44%。在 Y 向, 传递率在

33~36 Hz 频段较高, 对应最大值约为 4.27%, 而在 39~44 Hz 区间内相对较低, 传递率数值范围为 0.32%~2.04%。在 Z 向, 传递率在 31 Hz 和 33 Hz 时相对较大, 分别为 1.81% 和 0.77%, 而在 39~45 Hz 范围内呈现持续降低趋势, 其平均传递率约 0.215%。上述结果表明, 振动波在向建筑物传播过程中, 其能量衰减程度与激振频率密切相关。这是因为振动波在土体中的传播受频散特性与阻尼机制共同控制, 高频短波因波长接近土体非均匀尺度, 易引发强烈散射效应, 且土骨架滞回阻尼随振动频率增加而累积, 导致高频能量急剧耗散; 反之, 低频长波受散射影响小, 穿透力更强^[20]。此外, 不同波型在传播过程中具有不同的相位特征, 其叠加效应会随频率变化呈现相长或相消现象, 进而使得振动传递率在频率维度上呈现出明显的波动规律。

尽管设备本体振动以 Z 向(竖向)响应最为显著, 但振动传播至建筑物位置后, Y 向的加速度传递率反而最大, 其平均值为 1.542%, 而 Z 向传递率最小, 平均值约为 0.4%。这一现象表明, 振动在传播过程中存在明显的方向性衰减差异。该差异可能与不同方向振动波型的传播特性有关。在振源近场, 竖向激振主要激发富含竖向分量的体波(P 波与 SV 波); 然而随着传播距离增加, 地表反射耦合激发的面波因其衰减率显著低于体波, 逐渐占据主导地位^[21]。由于面波(特别是勒夫波)富含水平能量, 而体波主要携带竖向能量, 这种差异化的衰减特性, 导致远场水平向能量占比超越竖向。此外, 建筑物基础在竖向方向通常具有较高的动力刚度, 对竖向振动具有一定的约束与耗能作用, 也进一步增强了 Z 向振动的衰减效果。

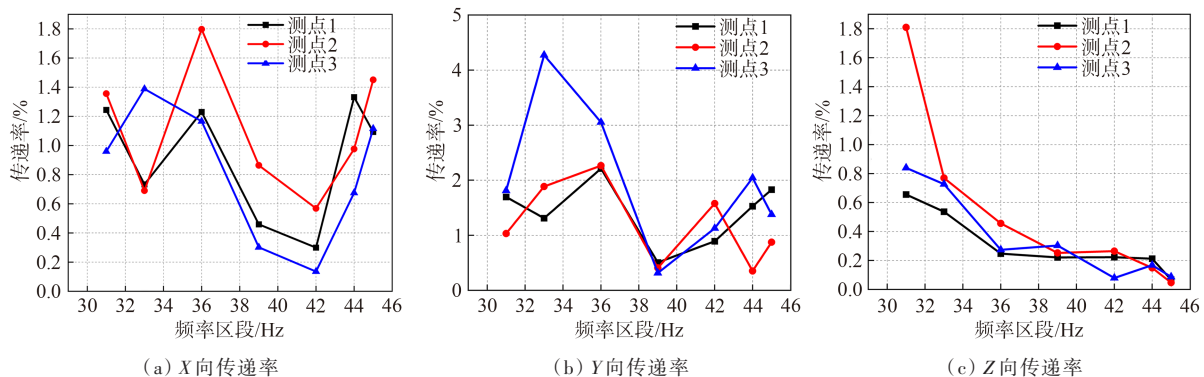


图5 不同振动频段下建筑物一层各测点的传递率

Fig. 5 Transmissibility at various measuring points on the first floor of the building under different vibration frequency bands

2.2 不同距离振动衰减规律

对距设备振源不同距离测点采集的加速度数据展开分析,图6为不同工作频率下加速度传递率随距离的变化曲线。可知,加速度随传播距离

的增大而减小,整体近似呈指数衰减趋势。对称布置的传感器观测到相似振动幅度,证实沿不同轴向测得的差异是由固有的方向性传播造成的,而非传感器布置不均匀所致。

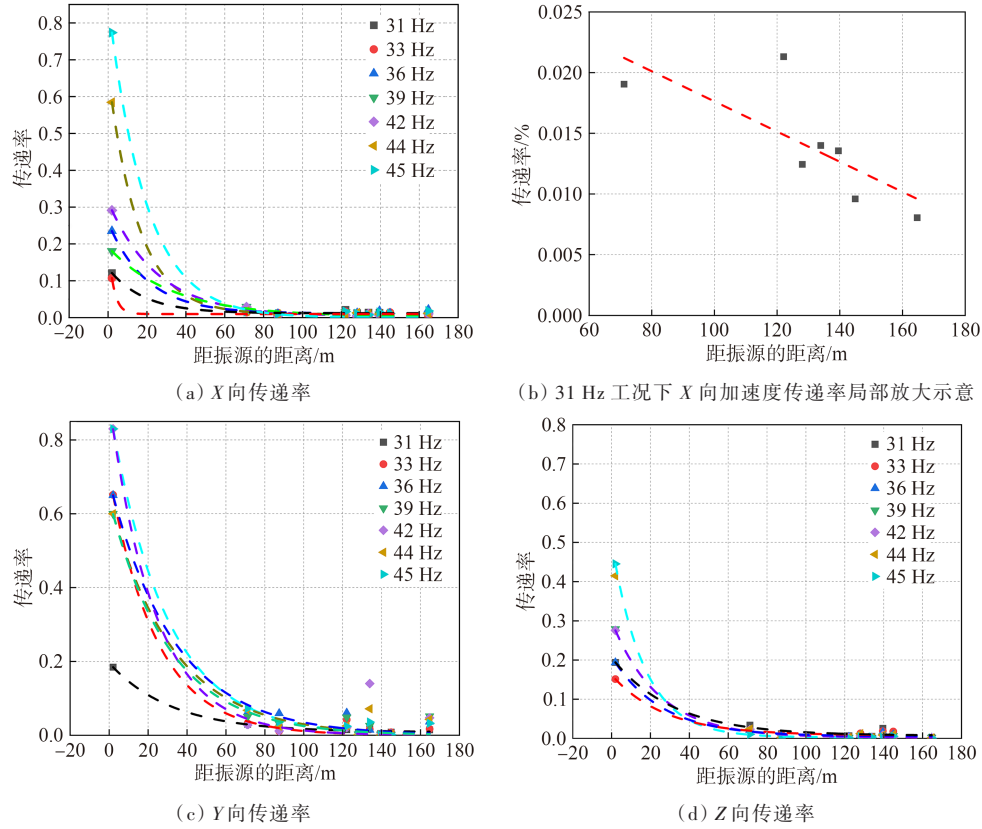


图6 传递率随距振源距离的关系曲线
Fig. 6 Acceleration transmissibility as a function of distance from the vibration source

在距设备 0~40 m 范围内,加速度衰减速度较快;超出该范围后,衰减趋势逐渐放缓。在设备近场区域,地基振动以体波为主导,导致振动能量快速衰减;而在远场区域,面波逐渐成为振动的主导成分,因此振动衰减速率有所降低。

对比不同工作频率下和不同方向的加速度传递率,结果与 2.1 节分析结果一致,说明在计算场地振动传播时需考虑波源扰动频率的影响。为定量描述竖向振动在场地中的传播衰减规律,基于现场测试数据,本研究将地面预测点至振源的水平距离定义为 d ,振源扰动频率为 f ,以 A 、 B 、 D_0 及 D_1 作为待拟合影响系数,通过非线性拟合得到真空振动压机这类变频设备竖向加速度传递率与传播距离、扰动频率的经验关系的基本表达式:

$$T_z = A + Be^{-(D_0 + D_1 f)d} \quad (2)$$

式中: T_z 为距设备水平距离为 d 、扰动频率为 f 时

的竖向加速度传递率。采用非线性最小二乘算法,通过最小化模型计算值与实测值的残差平方和,对模型参数进行迭代拟合求解,各参数取值为 $A=0.008$ 、 $B=0.497$ 、 $D_0=1.896$ 、 $D_1=-0.040$,模型拟合优度为 $R^2=0.980$,表明所建立的经验模型能够较好地反映竖向加速度传递率随传播距离及扰动频率变化的演化规律。根据式(2)计算可得,在距振源 200~220 m 处,振动加速度衰减至自然环境振动水平。

需明确的是,式(2)是依托本研究场地实测数据构建的经验关系式,其适用范畴限定在与本研究工况相近的工业设备振源及场地条件。对于地层结构或土体动力特性存在显著差异的场地,模型参数可能发生改变,因此在工程实践应用中,建议结合现场测试结果对模型参数进行针对性修正与标定。

2.3 振动在建筑中传播规律

为研究设备运行过程中振动在建筑物内的传播特性,对不同工况下设备本体及建筑物不同楼层多个测点的峰值加速度进行了对比分析,结果如图 7 和图 8 所示。

为减小单次测量的偶然性,在设备单独运行条件下共开展 9 次重复测试,绘制 9 次设备运行时各楼层测点峰值加速度变化曲线如图 7 所示。尽管图中出现了一个显著离群值,但其余测试数据同样表现出一致性与可重复性,证实了该异常点的偶发性。为确保分析结果的准确性,该离群数据点在后续处理中已被剔除,未参与任何统计分析及经验公式的拟合过程。由图 7 可知:部分加速度测试结果超过 JGJ/T 441—2019《建筑楼盖振动舒适度技术标准》的限值(0.05 m/s^2)。取各次测试的平均值,设备、建筑物二层、三层和四层的峰值加速度分别为 $8.970, 0.0484, 0.0281, 0.0447 \text{ m/s}^2$, 建筑物不同楼层的振动响应存在明显差异,沿楼层高度 Y 向和 Z 向,加速度峰值均呈先减小后增大的趋势,而 X 向则刚好相反,这是因为建筑内部振动传播规律与建筑的结构形式密切相关。本研究对象为框架结构建筑,其中, Y 向为结构强轴方向, X 向为弱轴方向。受此影响,振动在楼层高度方向的传播与放大机理在不同方向上存在显著差异。在 Y 向强轴及 Z 向竖向方向,建筑整体刚度较大,低楼层直接承受地基振动输入及设备激励作用,振动响应相对较大;随着楼层高度增加,结构梁柱体系对振动能量的分散与耗散作用逐渐增强,中部楼层形成相对明显的振动衰减区,使加速度响应出现阶段性减小。当高度进一步增加时,结构等效刚度降低,高阶振型参与增强,局部楼层可能接近激励频率,从而引起振动响应的再次放大,表现出“先减小后增大”的分布特征。

相较之下, X 向弱轴方向抗侧刚度较小,振动传播以整体侧向弯曲模式为主,其一阶振型的振幅峰值通常位于中部楼层,导致加速度响应随高度先增大;在高楼层,由于有效质量参与度降低及结构耗能作用增强,振动响应逐渐减小,呈现出与强轴方向相反的变化趋势。

综上,框架结构在不同方向上的刚度各向异性及模态特性差异,是导致楼层振动响应沿高度分布规律不同的主要原因。

进一步对比不同运行工况下建筑物的峰值加

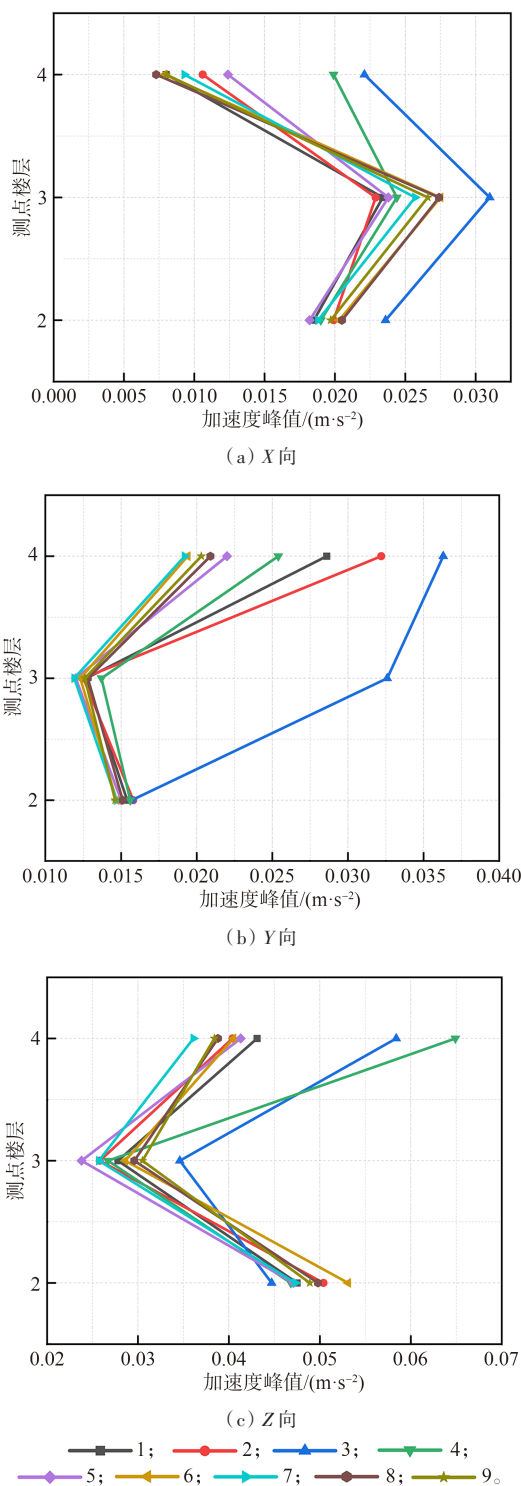


图 7 单台设备运行下不同楼层峰值加速度
Fig. 7 Peak acceleration on different floors under single-unit operation

速度,见图 8。可知:与无设备激励工况相比,设备运行引起的建筑物加速度峰值最高可放大至约 6 倍,当两台设备同时运行时,建筑物各楼层的振动响应为单台设备运行时的 1.18~1.56 倍,这表明多

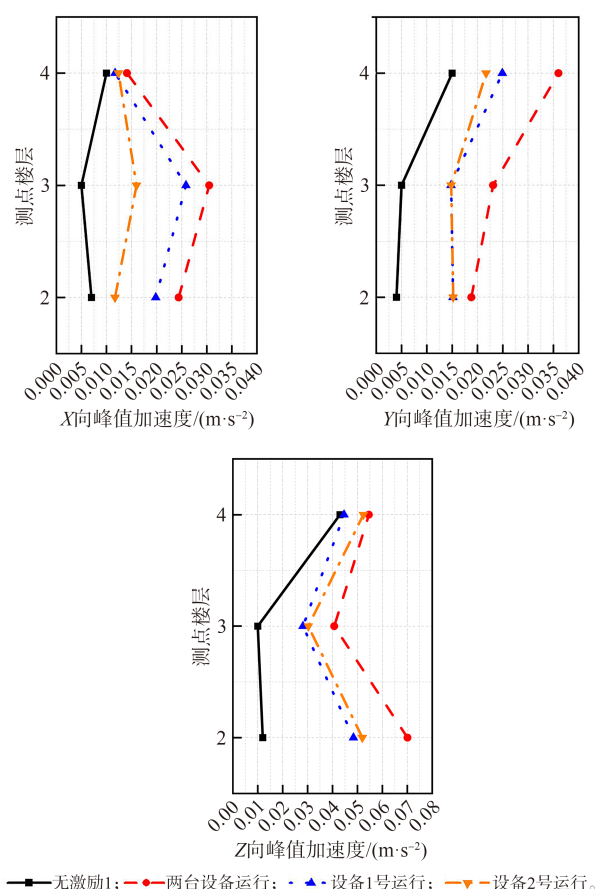


图8 不同工况下建筑物各层峰值加速度对比

Fig. 8 Comparison of peak acceleration on different floors of the building under various working conditions

源激励条件下振动存在一定程度的叠加效应,但其放大倍数并非简单线性增长。该现象可能与多源振动在传播与结构响应过程中的相互作用有关,不同振源产生的振动在传播过程中存在相位差异,加之土体传播路径及衰减特性不同,使振动波到达结构时的幅值与相位发生变化;此外,结构动力特性及阻尼对不同频率成分具有调制作用,从而使多源激励下的响应偏离简单线性叠加规律。

3 振动影响评估

依据 GB 50868—2013《建筑工程容许振动标准》^[22],采用振动计权加速度级对建筑物内人体舒适性进行评价。该指标综合考虑了振动加速度幅值、频率特性及暴露时间对人体感知的影响,通过对不同频率分量施加相应的计权因子,能够更真实地反映人体对振动的主观感受程度。振动计权加速度级 VL 的计算公式为:

$$VL = 10 \lg \sum 10^{(VAL_i + \alpha_i)/10} \quad (3a)$$

$$VAL = 20 \lg \frac{a}{a_0} \quad (3b)$$

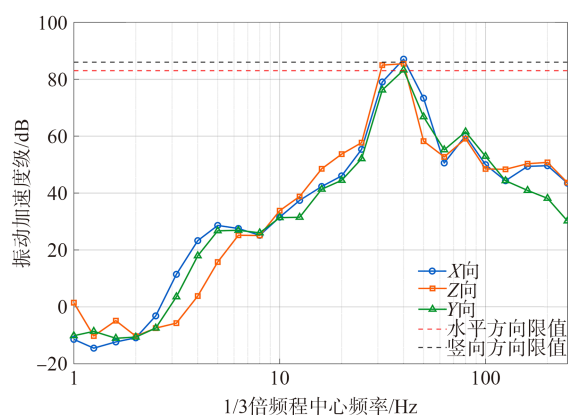
式中: VL 为振动计权加速度级, dB, 简称振动级或振级; VAL_i 为每个频带的振动加速度级, dB; α_i 为每个频带的计权因子; a 为实测或计算的振动加速度有效值, m/s^2 ; a_0 为基准加速度, 取值 $1 \times 10^{-6} m/s^2$ 。

分别计算两台设备单独运行和共同运行时的 1/3 倍频程的振动计权加速度级, 不同频段下振动加速度级曲线如图 9 所示。结果表明, 单台设备运行下建筑物一层的竖向振动加速度级范围为 80~87 dB, 二~四层的竖向振动加速度级范围为 80~84 dB, 二、三、四层振动计权加速度级依次为 75.93 dB、77.84 dB、76.97 dB, 均低于 GB 50868—2013^[22] 规定的重复性振动工况下办公室建筑人体舒适性竖向限值 86 dB。这表明在当前设备运行条件下, 其产生的振动对建筑内办公区域人员的舒适性影响处于容许范围, 但该振动水平已超过住宅建筑的振动限值标准, 因此该区域虽可满足办公使用需求, 却不适宜作为住宿用途。本次计算所得振动计权加速度级较振动加速度级偏小, 原因在于 GB 50868—2013^[22] 中振动计权因子的敏感中心频段为 5, 6.3, 8 Hz, 而本项目设备产生的振动主频集中在 31~45 Hz 区间, 该频段对应的计权因子为负值, 最终使得计权后的振动加速度级呈现降低趋势。

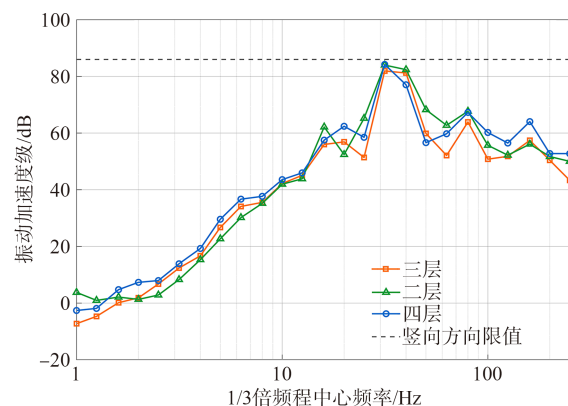
进一步对比不同运行工况发现, 在单机运行工况下, 设备 1 号引起的振动加速度级较设备 2 号增大, 说明不同设备在激励强度、安装条件或基础动力特性方面存在差异, 其振动输入能力并不完全一致。这一现象也表明在振动影响评估中, 有必要对不同设备分别进行定量分析, 而不能仅依据设备类型进行统一假设。当两台设备同时工作时, 建筑物内的振动加速度级相较于单台设备运行工况无明显变化, 这与第 2 节结果一致, 表明多振源同时运行并非简单线性叠加, 而是可能受到振动相位关系、结构动力耦合效应以及土体传播路径叠加的共同影响, 导致局部振动响应减小或增加。

4 结论

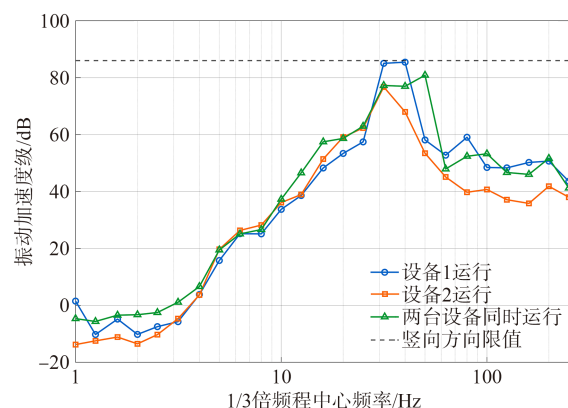
为揭示变频设备振动作用下场地传播规律及其对建筑结构的影响, 通过现场布点测试, 系统分析了不同频率、距离及方向下的振动传播规律, 以及建筑结构内部的振动传递路径与衰减特性, 并结



(a) 单台设备运行时一层不同方向的振动加速度级



(b) 单台设备运行时不同层Z向的振动加速度级



(c) 不同工况下一层Z向的振动加速度级

图9 建筑物各测点振动加速度级

Fig. 9 Vibration acceleration levels at various measuring points of the building

合衰减特性评估其对周边建筑物及环境的影响。主要结论如下:

1) 由于不同频率下振动波在土体中的传播特性存在差异, 场地振动衰减随设备工作频率变化显著不同, 呈现明显的频率依赖性特征。Z向的加速度传递率随着频率升高呈降低趋势。

2) 振动在空间传播中表现出显著方向性差异,

水平面内的振动传递率较竖向的更大, 其核心原因在于面波具备更强的传播能力与更慢的能量衰减特性, 且建筑物基础的竖向动力刚度较高, 对竖向振动的抑制作用更为显著。

3) 振动幅值随距离增加呈近似指数衰减规律, 衰减特性受土体类型、基础结构刚度及激振频率共同影响, 基于此建立了考虑激励频率的竖向加速度传递率与传播距离的量化关系, 计算得出垂直振动在传播距离约 200~220 m 时衰减至自然环境振动水平。

4) 框架结构建筑物不同楼层的振动响应存在显著差异, Y向(强轴)和Z向(竖向)加速度峰值沿楼层高度呈先减小后增大趋势, X向(弱轴)则呈先增大后减小趋势。这种分布差异的核心原因是框架结构存在刚度各向异性, 且不同方向的振动传播机理、模态特性存在明显不同。多振源同时运行时振动响应并非简单线性叠加。

参考文献

- [1] 王强, 谷祖鹏. 立式泵变频工况振动问题的分析及解决[J]. 化工设备与管道, 2021, 58(4): 55-59.
- [2] 孙霖, 谢江辉, 尚进, 等. 变频循环泵振动噪声特性试验研究[J]. 流体机械, 2014, 42(10): 6-10.
- [3] 付昱凯, 刘贺, 李同录, 等. 黄土在工程振动作用下湿陷性的试验研究[J/OL]. 工程地质学报, 2026[2026-01-14]. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2025-0155>.
- [4] JEON W H, BAEK S J, KIM C J. Analysis of the aeroacoustic characteristics of the centrifugal fan in a vacuum cleaner[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 268(5): 1025-1035.
- [5] HE D, LI H, BI J, et al. Analysis of multi-source vibration characteristics of no-tillage planter based on field operation condition[J]. Agriculture, 2025, 15(17): 1840.
- [6] 巴振宇, 朱泽宇, 符瞻远, 等. 工业振源引起场地振动传播衰减研究现状综述[J]. 工业建筑, 2025, 55(5): 248-261.
- [7] 郭力荣, 李国顺, 陈璨, 等. 高速动车组车下设备振动环境分析与应用[J]. 铁道机车车辆, 2025, 45(3): 26-32.
- [8] 肖层平, 王心宇, 杨参天, 等. 地铁振动下的钢筋混凝土剪力墙结构振动台试验研究[J/OL]. 工程力学, 2026[2026-01-14]. <https://link.cnki.net/urlid/1.2595.03.20250815.1752.014>.
- [9] 陈兆玮, 李松松, 徐鸿, 等. 大型车辆段上盖建筑振动噪声特性及人体舒适度研究[J]. 振动工程学报, 2025, 38(7): 1363-1377.
- [10] 王强恒, 杨庆义, 薄其睿, 等. 锤击沉桩作用下邻近地铁隧道地面与结构动力响应规律研究[J/OL]. 城市轨道交通研究, 2026[2026-01-14]. <https://doi.org/10.16037/j.1007-869x.20251121>.
- [11] 张绍栋, 鲁晓通, 周若洋, 等. 高层工业厂房人致振动舒适度试验及有限元分析[J]. 工业建筑, 2023, 53(增刊1):

- 344-347.
- [12] 王蕊,郭昭胜,崔娟玲. 振动流化床干燥机运转引起的楼面振动测试及分析[J]. 工业建筑,2014,44(9):62-67.
- [13] 王逢德,马云腾,葛新灿,等. 稳态激励下往复式天然气压缩机橇座的振动能量传递特性[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2025,49(3):205-213.
- [14] 冯玉龙,乔毅,蒋庆,等. 考虑结构-设备相互作用的预制设备舱结构隔震性能研究[J/OL]. 工程力学,2026[2026-01-14]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.03.20250908.1142.006>.
- [15] 赵福堂,常立君,张吾渝. 循环应力比和振动频率对盐渍土微观结构影响分析[J]. 冰川冻土,2020,42(3):854-864.
- [16] 宫树正. 考虑频率比影响的设备-结构体系研究及振动台试验[D]. 天津:天津大学,2017.
- [17] 袁豪杉. 变频多级振动荷载作用下地裂缝-隧道-地层结构动力响应试验研究[D]. 西安:长安大学,2021.
- [18] 张德满,俞健,邱浩然,等. 变频调速对离心泵振动的影响研究[J]. 舰船科学技术,2016,38(15):72-75.
- [19] 秦昌安,张国伟,宋金成,等. 大型建筑设备-结构耦合效应的振动台试验研究[J]. 实验技术与管理,2025,42(7):26-33.
- [20] TAKEMURA S, KOBAYASHI M, YOSHIMOTO K. High-frequency seismic wave propagation within the heterogeneous crust: effects of seismic scattering and intrinsic attenuation on ground motion modelling[J]. Geophysical Journal International, 2017, 210(3): 1806-1822.
- [21] FOTI S, LAI C G, RIX G J, et al. Surface wave methods for near-surface site characterization [M]. Boca Raton: CRC Press, 2014.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑工程容许振动标准:GB 50868—2013[S]. 北京:中国计划出版社,2013.