

# 交通环境振动对质子重离子设备平台影响研究

林彬<sup>1</sup>,董洪力<sup>2</sup>,董华<sup>3</sup>,黄镇<sup>1</sup>

(1. 东南大学 土木工程学院,江苏 南京 211100; 2. 徐州市产城发展集团有限公司,江苏 徐州 221018;  
3. 徐州新凯投资实业有限公司,江苏 徐州 221018)

**摘要:**质子重离子设备因其高精度治疗能力近年来得到关注和应用。医院多位于城市交通繁忙区域,道路交通环境是否对拟建项目高精度设备性能正常工作产生影响,需要对项目的建设方案进行可行性评估。文中以实际工程为研究对象,采用现场实测的方法,研究道路交通荷载引起的场地振动频率特征和峰值加速度衰减模式,并构建实际结构的三维有限元模型,分析质子重离子设备平台受交通环境影响的动力响应。研究表明,道路交通产生的振动频率主要集中在5~20 Hz区域。随距离的增加,高频振动迅速衰减。距道路中心线不同距离下的交通荷载峰值加速度表现出多级放大现象,且在某些区域峰值加速度可能超过振源本身。通过1/3倍频程分析,质子重离子中心区域主要受到的环境振动频率范围为5~20 Hz和40~60 Hz。Z振级分析表明,设备平台环境振动动力响应满足预定的动力响应标准设计要求。研究可为对高精设备平台稳定性有要求的设施考虑交通环境影响的建设方案可行性论证提供参考。

**关键词:**质子重离子医院;道路交通环境;加速度响应评价;Z振级和1/3倍频程分析;有限元方法

中图分类号:TU311.3

文献标志码:A

## Study on the influence of traffic environmental vibration on the proton and heavy ion equipment platform

LIN Bin<sup>1</sup>, DONG Hongli<sup>2</sup>, DONG Hua<sup>3</sup>, HUANG Zhen<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211100, China; 2. Xuzhou Industrial City Development Group Co., Ltd., Xuzhou 221018, China; 3. Xuzhou Xinkai Investment Industry Co., Ltd., Xuzhou 221018, China)

**Abstract:** Proton and heavy ion therapy facilities have garnered significant attention and widespread application in recent years due to their high-precision treatment capabilities. Hospitals are often located in urban areas with busy traffic, raising concerns about the potential impact of the road traffic environment on the normal operation of these planned high-precision devices. It necessitates a detailed feasibility assessment of the construction proposal for the project. This paper focuses on an actual engineering project, employing on-site real measurements to study the frequency characteristics of site vibrations induced by road traffic loads and the decay pattern of peak accelerations. A three-dimensional finite element model of the actual structure was developed to analyze the dynamic response of the proton and heavy ion therapy platform influenced by traffic conditions. The findings indicate that the vibrations generated by road traffic are primarily concentrated in the 5 Hz to 20 Hz range. High-frequency vibrations decay rapidly with distance. Peak accelerations of traffic loads at various distances from the road's centerline exhibit a multi-level amplification phenomenon, and in some areas, the peak acceleration may exceed that of the vibration source itself. Through 1/3 octave band analysis, the environmental vibration frequencies mainly affecting the central area of the proton and heavy ion facility range between 5 Hz to 20 Hz and 40 Hz to 60 Hz. Z-vibration level analysis

收稿日期:2024-03-25; 修回日期:2024-04-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51278106)

作者简介:林彬(2000—),男,硕士研究生,主要从事工程抗震、减振研究。E-mail:220221268@seu.edu.cn

通信作者:黄镇(1975—),男,副教授,博士,主要从事工程抗震、减振研究。E-mail:huangzhen@seu.edu.cn

shows that the platform's environmental vibration dynamic response meets the predefined standards for dynamic response design. This study provides a reference for the feasibility demonstration of construction plans considering the impact of traffic environments on facilities requiring high-precision equipment platform stability.

**Key words:** proton and heavy ion hospital; road traffic environment; acceleration response evaluation; Z-level and 1/3 octave analysis; finite element method

## 0 引言

自1950年以来,质子重离子治疗技术开始受到关注,目前已成为全球肿瘤治疗领域的研究前沿和热点<sup>[1]</sup>。中国也开始引入质子重离子医疗设施,上海于2017年建立我国首家质子重离子医院。随着质子重离子治疗技术的发展,进一步建设此类医疗设施已成为当务之急<sup>[2]</sup>。为保证质子重离子设备的正常使用,设备厂商对设备的工作环境有严格要求。随着精密医疗仪器对工作平台稳定性要求越来越严苛,需要考虑医院周边公路、地铁等环境工况对于设备平台的振动影响。

国内外学者通常采用现场实测和数值模拟相结合的方法研究场地动力响应。秦林等<sup>[3]</sup>对城市交通引发的振动进行实测,分析振动随距离的衰减规律,确立了振动影响范围。楼梦麟等<sup>[4]</sup>对地面交通进行三向加速度振动实测,分析了路面三向加速度峰值规律,明确竖向加速度峰值最大,并拟合出振动衰减规律公式,揭示振动传播规律。魏薇<sup>[5]</sup>基于实测数据,建立数值模型,分析了城市道路振动对邻近建筑物的影响。郑国琛等<sup>[6]</sup>选取某区域代表性II类场地,对交通荷载进行实测,通过Z振级和1/3倍频程分析,研究了环境振动主频及振动衰减规律。邢云林等<sup>[7]</sup>研究交通荷载作用下不同场地的振动响应及衰减规律。

本文通过现场测试与数值模拟分析,研究道路交通环境对高精度医疗设备平台振动响应的影响,以医院周边环境振动实测数据为基础,分析道路交通的振动特性及其衰减规律,明确道路交通振动影响的区域,构建医院结构有限元模型分析质子重离子设备平台的动力响应。

## 1 工程振动测试方案

### 1.1 工程背景

徐州质子重离子中心医院总建筑面积为135 895 m<sup>2</sup>,其中质子重离子治疗中心地上建筑面积8 960 m<sup>2</sup>,地下建筑面积8 089 m<sup>2</sup>。质子重离子设备位于结构底层,底板长49 m,宽34 m,埋深6.9 m。图1为质子重离子治疗中心现场实拍图。



图1 质子重离子治疗中心

Fig. 1 Proton and Heavy Ion Therapy Center

### 1.2 振动测试方案

#### 1.2.1 测试内容及测点布置

本研究旨在通过采集医院周边交通环境振动和质子重离子中心设备平台的Z轴加速度数据,利用数值模拟方法,分析待建医院质子重离子中心设备平台的加速度响应,评估医院周边交通环境对设备平台振动响应的影响。现场测试在振动源相对稳定的时间段内进行,以最小化施工荷载和其他环境因素的干扰<sup>[8-9]</sup>。

质子重离子医院周边为市内交通主干道,在道路至医院建筑之间共布置7个测点,编号为0~6,测点连线垂直于道路主干线,0测点距离道路中心线20 m,其余测点距0测点的水平距离分别为10、20、30、40、50、

60 m,具体位置如图 2 所示。在质子重离子中心结构底板共布置 5 个测点,编号 7~11,采集设备平台区域的加速度响应,测点布置如图 3 所示。

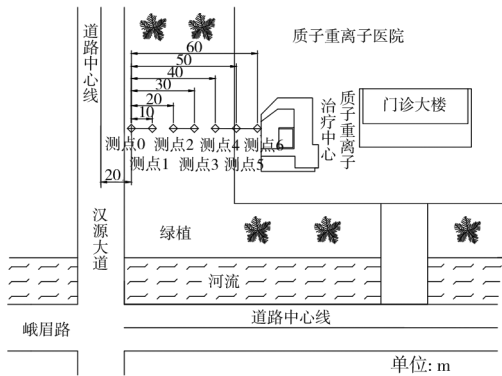


图 2 道路测点布置图

Fig. 2 Layout of road measurement points

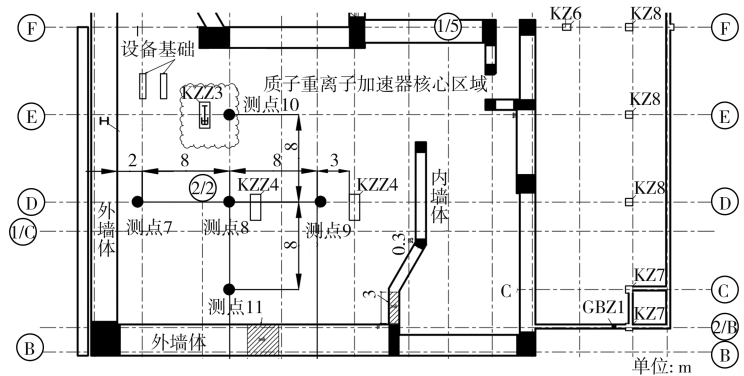


图 3 质子重离子中心设备平台测点图

Fig. 3 Measurement point diagram of Proton and Heavy Ion Center equipment platform

### 1.2.2 测量仪器及测试工况

振动测试设备信息如表 1 所示。

表 1 振动测试设备信息

Table 1 Vibration test equipment information

设备名称	型号	分辨率
数据分析采集仪	INV3062	24 位
941B 型振动传感器	ZY-VB-941B	$5 \times 10^{-6} (m/s^2)$

考虑不同时间段环境振动情况的差异,分别采集中午(11:00—12:00)、晚高峰(17:30—18:30)和凌晨(01:00—02:00)3 个时间段的医院周边道路交通振动信号,分析其频谱特性和振动衰减规律,同时为获取质子重离子设备平台区域在不同时间段振动响应的频谱特性以及加速度时程曲线,分别采集上述对应时间段环境振动引起的设备平台的加速度响应信号。测试工况如表 2 所示。

表 2 测试工况

Table 2 Testing conditions

测试地点	测试时间	测点	测试时长
汉源大道	11:00—12:00	0~6	15 min(4 组)
	17:30—18:30		15 min(4 组)
质子重离子设备底板区域	11:00—12:00	7~11	15 min(4 组)
	17:30—18:30		15 min(4 组)
	01:00—02:00		15 min(4 组)

## 2 振动实测数据分析

为避免环境振动的不确定性因素对现场实测结果的干扰,在现场实测时进行滤波处理并对测试采集的数据进行基线校准。参考 GB 10070—88《城市区域环境振动标准》<sup>[10]</sup>和 GB/T 50335—2018《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》<sup>[11]</sup>,其环境振动考虑的频率范围为 1~80 Hz,通过以往的文献研究,道路交通荷载引起的振动激励中低频成分占据主导地位,其高频振动随距离的增加衰减很快,因此本文选取 0~100 Hz 的频率范围进行振动分析。现场道路振动实测记录 84 组数据,考虑分析效率及测试的不确定性和随机性,截取包含峰值时刻在内的 200 s 的加速度时程<sup>[12]</sup>。

### 2.1 道路交通实测分析

现场共采集得到 84 组振动实测数据,考虑不同时间段交通荷载工况的不同,对 84 组波进行了分析,图 4 为其中 4 个测点包含峰值时刻的加速度时程,通过快速傅里叶变换可以得到环境振动的傅里叶幅值谱,图 5 为各测点傅里叶幅值谱,图 6 为各测点加速度振动峰值的衰减规律。

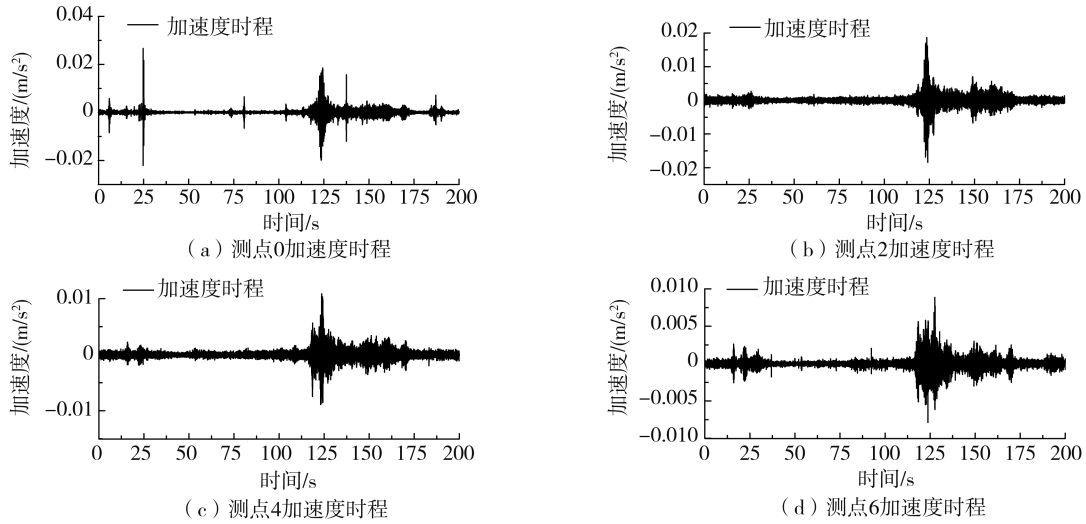


图4 各测点加速度时程

Fig. 4 Acceleration time history diagram of each measurement point

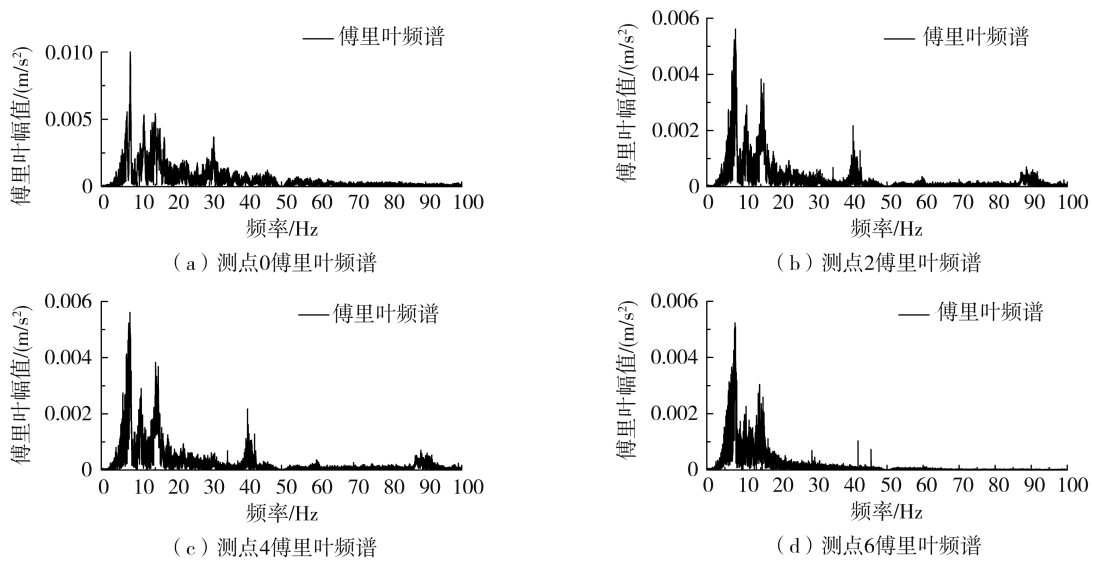


图5 各测点傅里叶幅值

Fig. 5 Fourier amplitude diagram of each measurement point

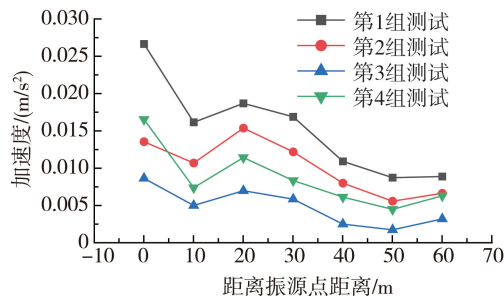


图6 各测点加速度峰值衰减规律

Fig. 6 Peak acceleration attenuation law of each measurement point

由图4~图6可知:①公路交通振动引起附近地面振动响应的加速度峰值约为  $0.0267 \text{ m/s}^2$ 。②公路交通引起环境振动的影响频率主要分布在  $5 \sim 20 \text{ Hz}$  范围内。③公路交通引起的环境振动响应以中低频为主,随着距振源距离的增加,高频部分衰减很快。振动加速度峰值变化情况较为复杂,并非简单的逐渐衰减规律,出现多级放大区的现象,而第一放大区的振动加速度峰值可能会超过振源加速度峰值,这一情况在诸多研究中也出现<sup>[13-15]</sup>,经分析认为与场地土层性质有关。

## 2.2 质子重离子中心设备平台实测分析

通过现场实测数据确定质子重离子中心设备平台的加速度响应振动强度,按照振动控制标准衡量其是

否满足设备正常使用要求。GB 10070—88《城市区域环境振动标准》<sup>[10]</sup>和 GB/T 50335—2018《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》<sup>[11]</sup>将 1/3 倍频带分析加速度振级作为振动强度的评价指标,采纳该方法时需要振动测试时间包含一个完整周期,其分析公式为

$$V_z = 20\log(a_w/a_0) \quad (1)$$

$$a_i = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a_i^2(t) dt} \quad (2)$$

$$a_w = \sqrt{\sum (W_i a_i)^2} \quad (3)$$

式中: $V_z$ 为 Z 振级(dB); $a_w$ 为频率计权均方根加速度; $a_i$ 为第  $i$  个 1/3 倍频带的计权系数; $a_i(t)$ 为第  $i$  个 1/3 倍频带对应的现场实测加速度时程; $a_0$ 为基准加速度,一般取  $10^{-6} \text{ m/s}^2$ 。考虑到振动测试的随机性,对中心设备底板的 96 组测试数据进行 1/3 倍频程分析处理,但限于文章篇幅,因此列出较为典型的一组数据。1/3 倍频程分析为评价各频率段的关系,记中心频率为  $F_c$ ,上限频率为  $F_u$ ,下限频率为  $F_l$ ,其相互间公式关系为

$$F_u = \sqrt[3]{2} F_l \quad (4)$$

$$F_c = \sqrt{F_u \times F_l} = \sqrt[6]{2} F_l \quad (5)$$

按照标准得到各项中心频率分别为 1、1.25、1.6、2、2.5、3.15、4、5、6.3、8、…、80 Hz。图 7 为质子重离子治疗中心设备平台各测点 1/3 倍频程分析图。

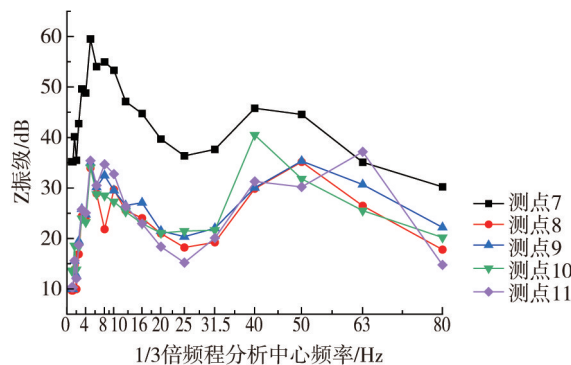


图 7 质子重离子中心设备平台各测点 1/3 倍频程分析图

Fig. 7 1/3 octave analysis diagram of each measurement point on the platform of Proton and Heavy Ion Center equipment

由图 7 可知:

1) 中心频率在 5~20 Hz 和 40~60 Hz 范围内的 Z 加速度振级振动强度最高。

2) 在对质子重离子中心进行振动加速度分析时,发现测点 7 的振动加速度振级显著高于其他测点。分析后认为此现象由以下因素引起:①设备区域结构底板的不均匀性。测点 7 位于一个结构上独立的区域,与其他测点所在的底板结构不同,这可能导致了振动特性的差异。②测点 7 区域的底板在测量时还未完全浇筑,从而影响了其对环境振动的消减能力。

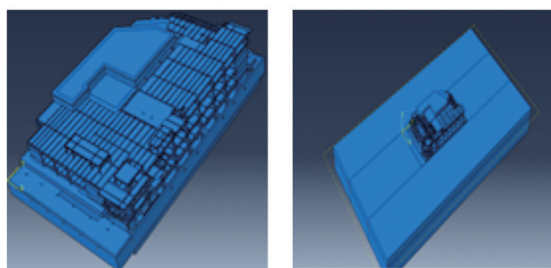
3) 高频振动对于建筑结构的影响较小,可不作特别考虑。

### 3 有限元动力响应分析

此类项目通常在规划及建筑方案阶段需要进行可行性评估。因此,为评估此类待建建筑方案的合理性,采用 ABAQUS 软件进行实体建模<sup>[16-18]</sup>,将原场地环境振动实测加速度作为外界激励输入有限元模型,分析医院建成后质子重离子中心设备平台的振动响应,评估待建项目方案的可行性<sup>[19]</sup>。

#### 3.1 模型与参数

本文假定质子重离子中心设备平台完全平整,为了较好模拟结构实际情况,模型采用 C3D8R 等参单元建立梁柱板,钢筋采用桁架单元内置设置。由于质子重离子中心位于地下 1 层,所以需要考虑土与地下结构相互作用<sup>[20]</sup>。本文在保证计算精度的前提下,为简化计算,假定场地土为均质土层,同时考虑其振动量级小,因此假定土体性质为线弹性,根据场地原址地勘报告,土的动剪切模量取 40 MPa。有限元模型如图 8 所示,模型材料物理参数如表 3 所示。



(a) 结构示意图 (b) 土-结构作用图

图8 数值模型示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the numerical model

阻尼是在研究结构动力特性的重要参数。瑞利(Rayleigh)阻尼由于计算简单而被广泛应用于结构动力分析。瑞利阻尼矩阵包含质量矩阵和刚度矩阵,其公式为

$$C = \alpha M + \beta K \quad (6)$$

式中: $C$ 为阻尼矩阵; $M$ 为质量矩阵; $K$ 为刚度矩阵; $\alpha$ 为质量阻尼系数; $\beta$ 为刚度阻尼系数。混凝土阻尼比一般取0.05,钢筋阻尼比取0.02。 $\alpha$ 、 $\beta$ 的计算公式为

$$\alpha = \frac{4\pi f_i f_j \xi}{f_i + f_j} \quad (7)$$

$$\beta = \frac{\xi}{\pi(f_i + f_j)} \quad (8)$$

式中: $f_i$ 、 $f_j$ 分别为结构计算体系的第*i*阶和第*j*阶自振频率,与各阶振型参与程度有关,通常情况下取结构振型的前2阶自振频率进行计算。通过对结构本身的模态分析,得到前2阶振型频率,通过公式计算出相应的瑞利阻尼参数,然后对模型进行修正。混凝土和钢筋阻尼参数计算结果见表4。

表4 混凝土和钢筋阻尼参数

Table 4 Damping parameters of concrete and steel bars

材料	第1阶频率( $\times 10^{-6}$ Hz)	第2阶频率( $\times 10^{-4}$ Hz)	$\alpha$	$\beta$
混凝土	6.9	8.77	$2.42 \times 10^{-4}$	10.00
钢筋	6.9	8.77	$9.7 \times 10^{-5}$	4.06

### 3.2 人工边界

在地下结构研究中,选取有限区域模拟半无限域分析土与结构相互作用。为精确模拟该无限域,主要有全局与局部2种人工边界技术。其中,局部人工边界侧重于外形波传播到无限远处的特性,并实现时空解耦,适宜于土-结构耦合问题研究。本文基于刘晶波等<sup>[21]</sup>、王振宇等<sup>[22]</sup>的工作,采用了一种三维黏弹性人工边界条件,该条件考虑边界的切向与法向响应,计算公式如式(9)~式(11)所示:

法向边界方程:

$$\sigma + \frac{R}{c_p} \dot{\sigma} = -\frac{4G}{R} \left( u + \frac{R}{c_p} \dot{u} + \frac{\rho R^2}{4G} \ddot{u} \right) \quad (9)$$

式中: $G = \mu$ 为介质剪切模量; $\rho$ 为介质密度; $c_p$ 为介质P波波速; $R$ 为径向坐标。式(9)为三维法向人工边界方程。

切向边界方程:

$$u(R, t) = \frac{1}{R} f(R - c_s t) \quad (10)$$

式中: $c_s$ 为介质剪切波波速(S波)波速。

$$\tau(R, t) = -\frac{2G}{R} u(R, t) - \rho c_s \dot{u}(R, t) \quad (11)$$

式(11)为边界剪应力表达式。

基于刘晶波等<sup>[21]</sup>提出的三维黏弹性边界理论,通过MATLAB自编程序,并使用Python代码对ABAQUS软件进行二次开发,完成三维黏弹性边界的施加,较为精确地模拟半无限域分析土与结构相互作用。

### 3.3 荷载输入

本文采用一致加速度激励方法,对有限元模型进行  $Z$  向单向输入现场实测环境振动,根据达朗贝尔原理,结构体系运动方程为

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -M\ddot{u}_g \quad (12)$$

式中: $M$ 、 $C$ 、 $K$  分别为结构在非约束自由度情况下的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\ddot{u}$  为自由场结构的相对加速度; $\dot{u}$  为自由场结构的相对速度; $u$  为自由场结构的相对位移; $\ddot{u}_g$  为地面加速度。

将原场地实测加速度记录由数值模型底板下表面竖直向上输入,分析中心设备底板上表面加速度响应,与现场实测数据对比验证数值模型的有效性。通过质子重离子中心数值分析模型可以得到中心设备平台对应的速度响应和位移响应。分析设备平台的 96 组实测数据,并选取较为典型的 12 组加速度时程作为振源荷载输入,其中一组的振动特性如图 9 所示。

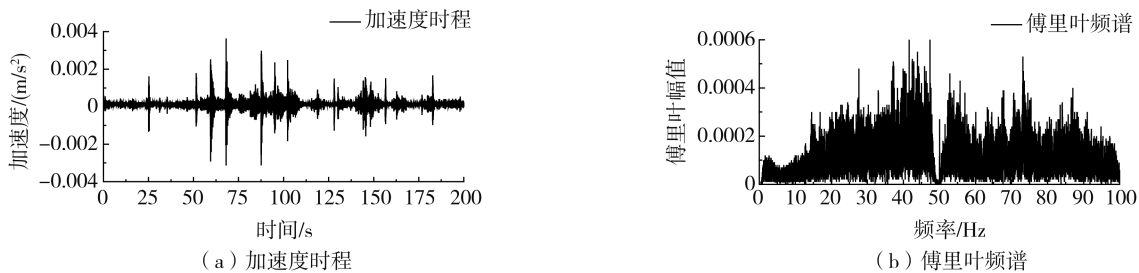


图 9 环境激励示意图

Fig. 9 Schematic diagram of environmental excitation

### 3.4 结果对比

提取有限元模型中对应实测测点的加速度响应,与实测测点振动加速度响应对比分析结果如图 10 所示。

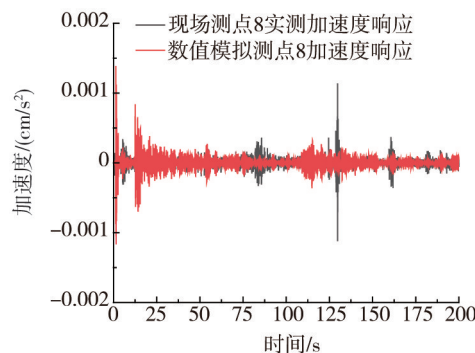


图 10 现场实测与数值模拟结果对照

Fig. 10 Comparison of on-site measurement and numerical simulation results

由图 10 可知,有限元分析结果比结构实测的加速度响应偏大,有限元模拟加速度峰值响应为  $1.39 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$ ,现场实测加速度峰值为  $1.17 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 。说明该有限元模型较为准确,可用于预测其他类似环境振动对质子重离子设备运行的影响,对指导实际工程建设具有现实意义。

## 4 结论

1) 质子重离子治疗医院附近公路交通环境振动的影响频率主要分布在  $5 \sim 20 \text{ Hz}$  范围内,其振源峰值加速度为  $0.0267 \text{ m/s}^2$ ,且随着距振源距离的增加其高频成分衰减较快,但加速度响应峰值随水平距离的增加并不是单调递减,存在多级放大区的情况,第一放大区域范围内其加速度响应峰值可能会超过振源强度峰值。

2) 质子重离子医院中心设备平台实测结果表明,结构  $Z$  振级加速度响应的主导频率范围为  $5 \sim 20 \text{ Hz}$  和  $40 \sim 60 \text{ Hz}$ ,证明道路交通环境对结构  $Z$  振级评估有较大影响,因此在之后分析中可以着重针对某一频率范围内进行详细分析。

3) 通过现场实测及数值模拟可有效分析建筑结构受到外界振动的影响,较好地预测了质子重离子中心设备平台的动力响应,为建设方案可行性论证提供有效依据,也可为此类项目评估方法提供借鉴和参考。

## 参考文献:

- [1] 刘锐锋, 张秋宇, 田金徽, 等. 重离子治疗在肿瘤治疗中的临床应用及前景展望[J]. 中国肿瘤, 2021, 30(8): 619-626.  
LIU Ruifeng, ZHANG Qiuning, TIAN Jinhui, et al. Application and prospect of heavy ion therapy in cancer treatment[J]. China Cancer, 2021, 30(8): 619-626. (in Chinese)
- [2] LI Y, LI X M, YANG J C, et al. Flourish of proton and carbon ion radiotherapy in China[J]. Frontiers in Oncology, 2022, 12: 819905.
- [3] 秦林, 宗刚. 地面交通荷载引发的场地振动实测分析[J]. 公路, 2013, 58(5): 194-198.  
QIN Lin, ZONG Gang. Measurement and analysis of site vibration caused by ground traffic load[J]. Highway, 2013, 58(5): 194-198. (in Chinese)
- [4] 楼梦麟, 谭广宝. 公路交通运行引起的振动实测及其衰减分析[J]. 力学季刊, 2013, 34(4): 663-672.  
LOU Menglin, TAN Guangbao. In situ experimental and attenuation analysis of environmental vibration by tunnel and road traffic[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2013, 34(4): 663-672. (in Chinese)
- [5] 魏薇. 城市道路交通荷载对邻近建筑物的影响与分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.  
WEI Wei. Influence and analysis of urban road traffic load on adjacent buildings[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [6] 郑国琛, 许航莉, 祁彪, 等. 地铁及地面交通环境振动实测与数值模拟研究[J]. 中国环境科学, 2020, 40(9): 4146-4154.  
ZHENG Guochen, XU Hangli, QI Ai, et al. Field measurement and numerical simulation on environmental and vibration effects induced by metro and ground traffic loads[J]. China Environmental Science, 2020, 40(9): 4146-4154. (in Chinese)
- [7] 邢云林, 孙浩诚, 张允士. 交通荷载作用下不同场地微振动响应及衰减规律分析[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(3): 182-187, 194.  
XING Yunlin, SUN Haocheng, ZHANG Yunshi. Analysis of attenuation law of micro-vibration response in variable sites under traffic loads[J]. Noise and Vibration Control, 2023, 43(3): 182-187, 194. (in Chinese)
- [8] XU R, LI X C, YANG W, et al. Field measurement and research on environmental vibration due to subway systems: A case study in Eastern China[J]. Sustainability, 2019, 11(23): 6835.
- [9] ZHOU X. Response of characteristics of subway vibration load based on finite element method[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2023, 51(1): 85-96.
- [10] GB 10070—88 城市区域环境振动标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.  
GB 10070—88 Environmental vibration standards for urban areas [S]. Beijing: Standards Press of China, 1988. (in Chinese)
- [11] GB/T 50355—2018 住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.  
GB/T 50355—2018 Standard for limits and measurement methods of vibration in the room of residential building[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018. (in Chinese)
- [12] HUANG S, CHEN Y K, ZOU C, et al. Train-induced environmental vibrations by considering different building foundations along curved track[J]. Transportation Geotechnics, 2022, 35: 100785.
- [13] 闫维明, 张祎, 任珉, 等. 地铁运营诱发振动实测及传播规律[J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(2): 149-154.  
YAN Weiming, ZHANG Yi, REN Min, et al. In-situ experiment and analysis of environmental vibration induced by urban subway transit[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2006, 32(2): 149-154. (in Chinese)
- [14] 宗刚, 张永红, 任晓崧. 地铁致地表振动局部放大现象实测与机理分析[J]. 振动与冲击, 2017, 36(9): 247-252.  
ZONG Gang, ZHANG Yonghong, REN Xiaosong. In-situ measurement and mechanism analysis for Local amplification phenomena of metro induced ground-borne vibration[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(9): 247-252. (in Chinese)
- [15] 周颖, 张君秋, 马开强, 等. 地铁致地面振动舒适度评价与放大区振动分析[J]. 地震工程与工程振动, 2023, 43(2): 24-33.  
ZHOU Ying, ZHANG Junqiu, MA Kaiqiang, et al. Comfortability evaluation of field vibration caused by subway and vibration analysis of amplification zone[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2023, 43(2): 24-33. (in Chinese)
- [16] WANG L, YANG S F, HU H Q. Stochastic dynamic response and long-term settlement performance of superstructure-underground tunnel-soil systems subjected to subway-traffic excitation[J]. Buildings, 2023, 13(3): 621.
- [17] DOS SANTOS D P, DE MIRANDA SALEME GIDRÃO G, CARRAZEDO R. A simplified numerical model for the assessment of vibration in subway lines with experimental validation[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2021, 21(11): 2150156.
- [18] 张俊, 张丽娜, 智国梁, 等. 高铁桥式站房结构的车致振动特性研究[J]. 地震工程与工程振动, 2023, 43(2): 222-231.  
ZHANG Jun, ZHANG Lina, ZHI Guoliang, et al. Research in train-induced vibration characteristics of bridge-style high speed railway station[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2023, 43(2): 222-231. (in Chinese)
- [19] SADEGHI J, VASHEGHANI M. Safety of buildings against train induced structure borne noise [J]. Building and Environment, 2021, 197: 107784.
- [20] ZHAI Y F, SONG Z Y, LIU Y, et al. A new seismic input method for layered soil and its application in dynamic response analysis of underground structure[J]. Structures, 2023, 58: 105488.
- [21] 刘晶波, 王振宇, 杜修力, 等. 波动问题中的三维时域黏弹性人工边界[J]. 工程力学, 2005, 22(6): 46-51.  
LIU Jingbo, WANG Zhenyu, DU Xiuli, et al. Three-dimensional visco-elastic artificial boundaries in time domain for wave motion problems[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(6): 46-51. (in Chinese)
- [22] 王展, 景立平, 陆新宇, 等. 粘弹性人工边界单元及地震动输入方法比较研究[J]. 世界地震工程, 2023, 39(2): 167-177.  
WANG Zhan, JING Liping, LU Xinyu, et al. Comparative study of viscous-spring boundary element and methods of seismic motion input[J]. World Earthquake Engineering, 2023, 39(2): 167-177. (in Chinese)