

文章编号:1673-2049(2018)05-0039-07

# 高层工业厂房异常振动测试与加固试验

谢开仲<sup>1,2,3</sup>, 王红伟<sup>1</sup>, 周剑希<sup>1</sup>, 岳苗<sup>1</sup>, 罗潇<sup>1</sup>

(1. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004; 2. 广西大学 工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 广西 南宁 530004; 3. 广西大学 广西工程防灾减灾与工程安全重点实验室, 广西 南宁 530004)

**摘要:**为了研究高层工业厂房的异常振动成因与加固方法,采用有限元分析和现场振动测试相结合的方法,建立了高层工业厂房三维有限元模型,进行了高层工业厂房加固前的有限元分析和现场振动测试。针对高层工业厂房作业舒适程度要求严格、采光要求高、加固空间受限等要求,为解决机器设备与高层工业厂房的共振问题,提出了采用短肢剪力墙加固的现场加固方案,并进行了加固前后有限元分析结果和现场振动测试结果的对比分析。结果表明:机器设备安装在工业厂房的高层后,机器设备与厂房共振是造成高层工业厂房异常振动的主要原因;加固后高层工业厂房的强度和刚度得到明显提高,高层工业厂房长度方向固有频率由2.45 Hz提高至5.87 Hz,高层工业厂房宽度方向固有频率由2.94 Hz提高至7.83 Hz,与机器设备沿高层工业厂房水平方向频率不在共振区间,高层工业厂房的加速度和速度振动特性得到改善,取得了良好的加固效果;振动测试结果和加固方法可为高层工业厂房的设计和加固提供借鉴和参考。

**关键词:**高层工业厂房;异常振动;短肢剪力墙;固有频率;加固

中图分类号:TU317

文献标志码:A

## Experiment on Abnormal Vibration Test and Reinforcement of High-rise Industrial Building

XIE Kai-zhong<sup>1,2,3</sup>, WANG Hong-wei<sup>1</sup>, ZHOU Jian-xi<sup>1</sup>, YUE Miao<sup>1</sup>, LUO Xiao<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China; 2. Key Laboratory of Engineering Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Engineering Disaster Prevention and Structural Safety, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China)

**Abstract:** In order to study the abnormal vibration cause and reinforcement method of high-rise industrial building, finite element analysis method and field vibration test method were adopted, a three-dimensional finite element model of high-rise industrial building was established. Finite element analysis and field vibration test was carried out before reinforcement. Based on strict comfort level, limited reinforcement space and high lighting requirement of high-rise industrial building, a field reinforcement scheme with short leg shear wall was put forward. Comparison analysis of finite element calculation results and field vibration test results before and after reinforcement were carried out. The results show that the machines and high-rise industrial building resonated after machines are installed at the high level of industrial building, and it is the

收稿日期:2018-06-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51868007,51368005,51068001);广西重点实验室系统研究项目(2102ZDX04);

广西大学科学研究基金项目(XBZ100762)

作者简介:谢开仲(1974-),男,广东河源人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:xiekaizhong@163.com。

通信作者:王红伟(1988-),男,河南郑州人,工程师,工学博士,E-mail:779348631@qq.com。

main reason for the abnormal vibration of high-rise industrial building. Strength and stiffness of reinforced high-rise industrial building are obviously improved, natural frequency of length direction of high-rise industrial building is improved from 2.45 Hz to 5.87 Hz, natural frequency of width direction of high-rise industrial building is improved from 2.94 Hz to 7.83 Hz. Vibration frequency of machines is not in the resonant interval with high-rise industrial building. Vibration characteristics of high-rise industrial building are improved and good reinforcement effects are obtained. Vibration test results and reinforcement methods can provide reference for the design and reinforcement of high-rise industrial buildings.

**Key words:** high-rise industrial building; abnormal vibration; short leg shear wall; natural frequency; reinforcement

0 引言

工业是国民经济的命脉,对经济建设的发展起着重要的推动作用。近些年来,随着土地资源的紧张和成本的控制,工业厂房的布置越来越紧凑,越来越多的机器设备被放置在工业厂房的高层之中,随之而来的便是厂房的振动问题,振动成因与加固设计也成为现有高层工业厂房加固的关注焦点和首要考虑问题。目前对于工业厂房的振动成因和减振<sup>[1-6]</sup>加固已经开展了较多的研究,加固方法和理论也比较多,例如针对振动源采用干扰力反演算法<sup>[7]</sup>得到干扰力幅值进行减振设计;针对柱子和梁采用扩大截面,外包钢筋混凝土<sup>[8]</sup>或钢板等,针对厂房楼层植入 CA 砂浆<sup>[9]</sup>达到减振效果,针对厂房结构采用增设阻尼装置<sup>[10-14]</sup>也是目前工业厂房减振研究的热点,取得的研究成果也比较多;此外还有增设立柱<sup>[15]</sup>,增设钢梁<sup>[16]</sup>或钢支撑<sup>[17]</sup>,采用预应力钢带<sup>[18]</sup>等方法。将异常振动厂房与附属建筑物相连<sup>[19]</sup>增加整体刚度达到减振效果,此种方法在无附属建筑物时,对场地的影响比较大。目前这些加固方法多应用于低层工业厂房中,高层工业厂房中应用较少。与低层工业厂房相比,高层工业厂房在受力特性方面有明显区别,尤其是振动问题,同时由于高层厂房加固空间受限、采光要求高等特点,为了保证加固效果,加固方法的选择往往受到限制,需要综合考虑,因此研究高层工业厂房的振动与加固具有重要的科研意义和工程价值。为此,以某高层工业厂房为工程背景,采用现场试验和有限元分析相结合的方法,针对其异常振动成因和加固前后开展试验研究,可为同类型高层厂房的异常振动问题解决提供借鉴和参考。

1 高层厂房结构概况

某厂房为框架结构,长 138.8 m,宽 21.8 m,高 23.5 m,整体 3 层,局部 4 层,刚度主要由框架提供,3 台机器设备位于二楼。在机器设备运行过程中,厂房内机器设备所在楼层振感明显,影响到作业工人的舒适感和生命健康,同时也威胁到厂房的结构安全性,急需找到异常振动的成因并采取相应的措施。厂房三维视图见图 1,厂房纵断面布置图见图 2。



图 1 厂房三维视图

Fig. 1 3D View of Industrial Building

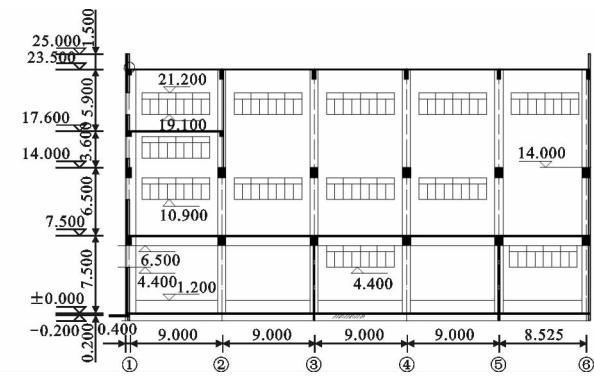


图 2 工业厂房纵断面布置图(单位:m)

Fig. 2 Vertical Section Layout of Industrial Building (Unit:m)

## 2 异常振动测试分析

### 2.1 异常振动测试

测点布置既要能反映结构的振动特性,又要尽可能的精简,根据厂房的振动特性和类似工程的经验,该厂房振动测试共计选择 5 个测点,布置在厂房二层(机器设备所在层),标高 7.500 m,测点 1 至测点 4 为双向振动传感器(厂房长度方向为 Y 方向,厂房宽度方向为 X 方向),测点 5 为三向振动传感器(厂房长度方向为 Y 方向,厂房宽度方向为 X 方向,厂房竖向为 Z 方向),测点平面布置见图 3。

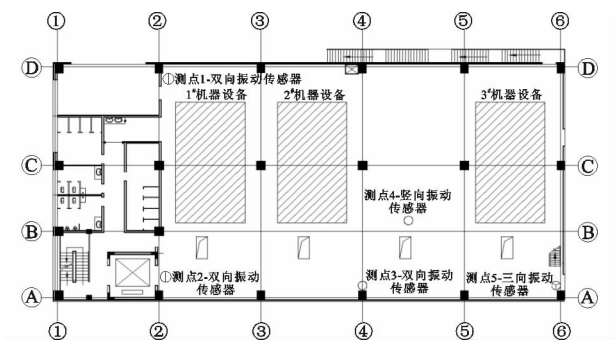


图 3 测点平面布置

Fig. 3 Plane Layout of Measuring Points

基于厂房和机器设备的振动特性,针对运营中振动最明显的工况,为了更好诊断厂房振动与机器振动的关联性,考虑到厂房持续运营的要求,工况设计如下:工况 1 为 1# 机负荷 100%,2# 机负荷 100%,3# 机负荷 0%;工况 2 为 1# 机负荷 100%,2# 机负荷 100%,3# 机负荷 50%;工况 3 为 1# 机负荷 100%,2# 机负荷 100%,3# 机负荷 100%;工况 4 为 1# 机负荷 50%,2# 机负荷 100%,3# 机负荷 100%;工况 5 为 1# 机负荷 50%,2# 机负荷 50%,3# 机负荷 100%;工况 6 为 1# 机负荷 100%,2# 机负荷 50%,3# 机负荷 50%。

### 2.2 测试结果分析与讨论

对设计工况进行振动测试,并对 5 个测点的加速度和速度数据进行统计,各工况作用下 Y 方向和 Z 方向加速度峰值见图 4,Y 方向和 Z 方向速度峰值见图 5,测点 5 的 X 方向加速度峰值与速度峰值见表 1。

由图 4、5 和表 1 可知:

(1)厂房 X 方向和 Y 方向的最大加速度峰值分别为  $0.800\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  和  $2.409\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ,均位于工况 4 的测点 5,Z 方向最大加速度峰值为  $0.717\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ,位于工况 1 的测点 4;X 方向的加速度峰值全部位

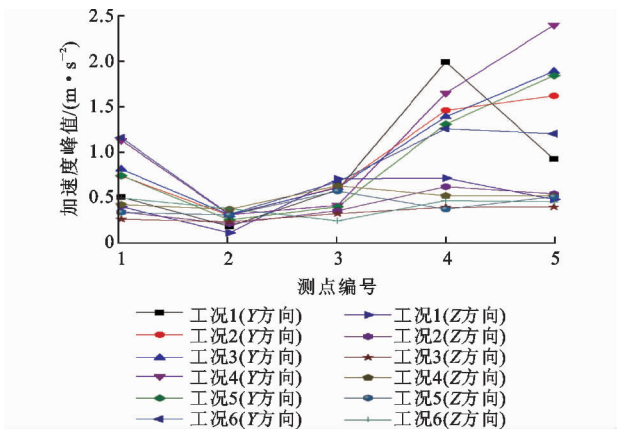


图 4 各测点 Y 和 Z 方向加速度峰值

Fig. 4 Peak Acceleration of Measuring Points in Y and Z Directions

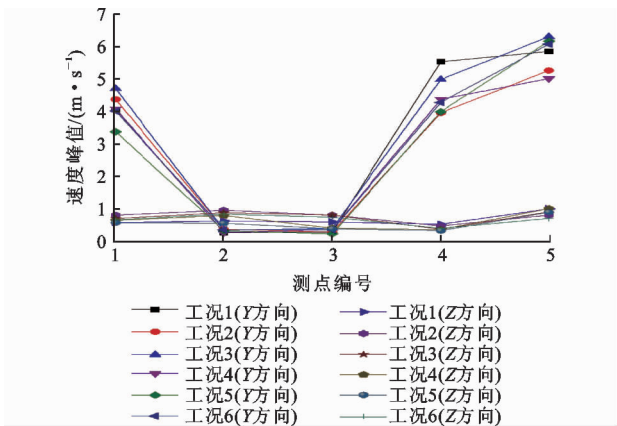


图 5 各测点 Y 和 Z 方向速度峰值

Fig. 5 Peak Velocity Values of Measuring Points in Y and Z Directions

表 1 不同工况下测点 5 的 X 方向加速度峰值与速度峰值  
Tab. 1 Peak Acceleration and Peak Velocity of Measuring Point 5 in X Direction Under Different Working Conditions

工况编号	1	2	3	4	5	6
加速度峰值/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )	0.772	0.566	0.582	0.800	0.789	0.673
速度峰值/( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	4.090	3.306	3.332	3.320	3.519	2.752

于Ⅳ级;Y 方向加速度峰值 26.67% 位于Ⅲ级,53.33% 位于Ⅳ级,20% 位于Ⅴ级;Z 方向加速度峰值 3.33% 位于Ⅱ级,66.67% 位于Ⅲ级,30.00% 位于Ⅳ级。综上所述,厂房 Y 方向 20% 达到了不能忍受的程度,应成为加固的重点方向。

(2)厂房 X、Y、Z 方向的最大速度峰值为 4.09, 6.302, 1.014  $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,分别位于工况 1、3、4 的同一点测点 5,根据规范<sup>[20]</sup>要求,3 个方向的速度值均满足规范要求,但 Y 方向测试速度值为 6.302  $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$  接近规范极限允许值 6.4  $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

与此同时对机器和厂房的振动测试曲线进行分

析, 机器和厂房自振特性见表 2, 可知 3 台机器设备和厂房在 X 方向和 Y 方向上的振动频率非常接近。

表 2 机器和厂房自振特性测试结果

Tab. 2 Test Results of Self-vibration Characteristics of Machine and Industrial Building

方向	结构自振 频率/Hz	1# 机器自振 频率/Hz	2# 机器自振 频率/Hz	3# 机器自振 频率/Hz
X	2.94	2.75	2.86	2.72
Y	2.45	2.96	2.94	2.94
Z	10.28	45.24	46.99	42.05

由结构振动感觉程度标准可知, 当振动加速度超过  $1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  时人体不能忍受。由表 2 可知, 3 台机器设备和厂房在 X 方向和 Y 方向上的振动频率非常接近, 处于共振区间。综上所述: 基于厂房和设备的加速度、速度和自振特性分析结果可知, 厂房异常振动是由于结构自振与设备振动频率比较接近引起, 应重点关注厂房 Y 方向的振动特性。

3 厂房减振加固设计

加固方案选择不仅要考虑加固效果, 还要尽可能减少对原结构的扰动, 同时也要考虑经济效果等。目前厂房常用的加固方法主要由以下几种: 增大截面法、碳纤维加固法、预应力加固法、消能减振法、外包钢法、增设支撑和卸载法等, 这几种方法从本质上都是为了提高结构的强度和刚度, 使厂房能够更好地适应振动, 避开与机器的共振区间。

针对本工程的实际情况, 由于厂房内管线布置错综复杂, 机器设备较多, 同时要考虑不能影响原结构采光的要求, 尽可能降低对原结构的影响, 综合考虑多种加固方法的优劣, 最终决定采用短肢剪力墙加固的方法进行加固。根据加固短肢剪力墙的位置, 共设计了 3 个加固方案, 加固方案均是通过短肢剪力墙的方式进行加固, 不同之处是短肢剪力墙的位置和数量不一样, 由于厂房结构复杂, 短肢剪力墙布置的数量和位置比较多, 限于篇幅, 不再列出短肢剪力墙的位置和数量。

为了更好地进行加固方案比选和加固效果验证, 采用通用有限元软件 ANSYS 建立厂房加固前后的三维有限元模型, 模型采用梁单元 Beam189 模拟框架结构, 采用 Shell63 壳单元模拟剪力墙, 采用质点单元 Mass21 模拟机器设备及附加质量。

对 3 个加固方案分别进行加固前后对比分析, 由于机器设备在厂房宽度方向上的强迫振动频率约为 2.96 Hz, 与结构自振频率的比值处于共振区间, 3 个方案加固后厂房宽度方向的模态频率分别为

4.56, 4.57, 4.36 Hz, 与机器在厂房宽度方向的振动频率不在共振区间, 均能满足加固要求, 但考虑到厂房结构改动的大小, 最终采用了对结构影响最小的短肢剪力墙布置方案。加固后有限元模型见图 6, 厂房角隅处增设短肢剪力墙, 见图 7。

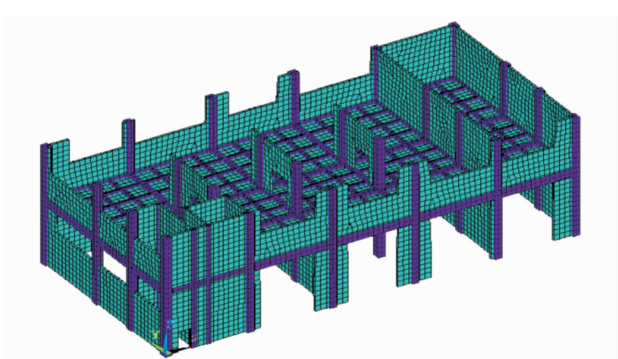


图 6 加固后厂房有限元模型

Fig. 6 Finite Element Model of Industrial Building After Reinforcement



图 7 厂房角隅处增设短肢剪力墙

Fig. 7 Short Leg Shear Wall at Corner of Industrial Building

4 减振加固后测试分析

4.1 减振加固测试结果

对厂房采用短肢剪力墙进行加固, 工况划分与加固前相同, 加固后各测点在不同工况作用下 Y 方向和 Z 方向的加速度峰值见图 8, 加固后各测点在不同工况作用下 Y 方向和 Z 方向的速度峰值见图 9, 测点 5 在不同工况下 X 方向加速度峰值和速度峰值见表 3。

对加固后试验结果进行统计分析可知:



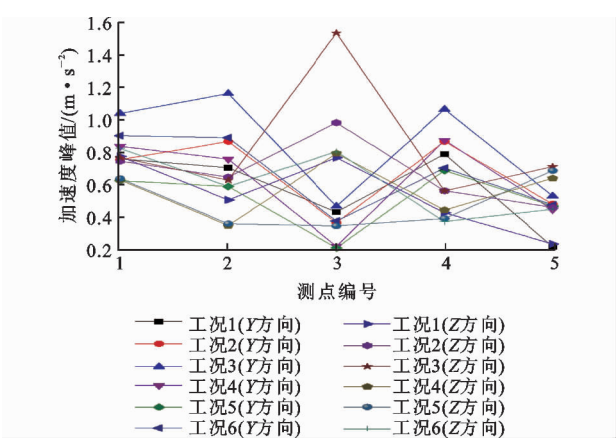


图 8 加固后测点 Y 方向和 Z 方向加速度峰值  
Fig. 8 Peak Acceleration Values of Measuring Points at Y and Z Directions After Reinforcement

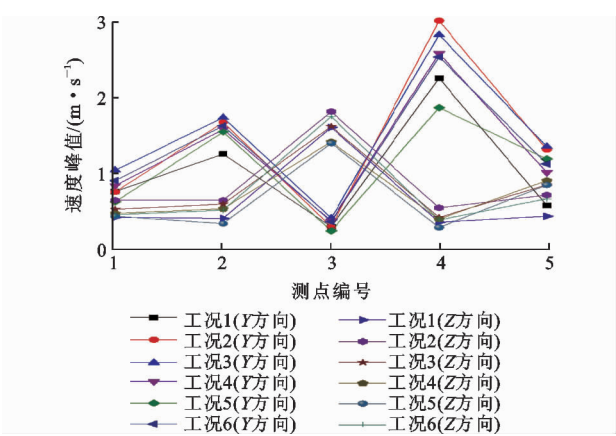


图 9 加固后测点 Y 方向和 Z 方向速度峰值  
Fig. 9 Peak Velocity Values of Measuring Points at Y and Z Directions After Reinforcement

表 3 加固后测点 5 在不同工况下 X 方向加速度峰值和速度峰值

Tab. 3 Peak Acceleration and Peak Velocity of Measuring Point 5 at X Direction Under Different Working Conditions After Reinforcement

工况编号	1	2	3	4	5	6
加速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	0.464	0.673	0.765	0.699	0.757	0.607
速度/( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	0.819	1.429	1.546	1.666	1.521	1.277

(1) 厂房 X,Y,Z 方向的最大加速度峰值分别为 0.765,1.162,1.536  $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ , 分别位于工况 3 的测点 2,3,5; 厂房 X 方向加速度峰值 16.67% 位于Ⅲ级,83.33% 位于Ⅳ级; 厂房 Y 方向加速度峰值 36.67% 位于Ⅲ级,63.33% 位于Ⅳ级; 厂房 Z 方向加速度峰值 33.33% 位于Ⅲ级,63.34% 位于Ⅳ级,3.33% 位于Ⅴ级。综上所述,采用短肢剪力墙加固后,厂房 3 个方向加速度振动特性均得到改善。

(2) 厂房 X,Y,Z 方向最大速度峰值分别为

1.666,3.012,1.813  $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 分别位于工况 4 的测点 5,工况 2 的测点 3,4,根据规范要求,厂房 3 个方向的速度振动特性均得到明显提高,满足规范要求,尤其是厂房 Y 方向的振动速度。

(3) 加固后厂房 X,Y,Z 方向的一阶固有频率分别为 7.83,5.87,10.77 Hz,与加固前 X,Y,Z 方向一阶固有频率 2.94,2.45,10.28 Hz 相比,采用短肢剪力墙可以显著提升厂房的强度和刚度,是一种有效的加固方法。

4.2 加固前后对比分析

对加固前后厂房和 3 台机器设备在 3 个方向的振动频率进行对比,见表 4。由表 4 可知,加固后厂房在 X 方向和 Y 方向的刚度均有明显提升,并且加固后结构在 X 方向和 Y 方向的自振频率与 3 台机器设备的自振频率不在共振区间,经现场测试和实地观察,加固效果良好。

表 4 加固前、后厂房自振频率对比

Tab. 4 Comparison of Self-vibration Frequency Before and After Reinforcement

方向	1# 机自振频率/Hz	2# 机自振频率/Hz	3# 机自振频率/Hz	加固前结构自振频率/Hz	加固后结构自振频率/Hz
X	2.75	2.86	2.72	2.94	7.83
Y	2.96	2.94	2.94	2.45	5.87
Z	45.24	46.99	42.05	10.28	10.77

对加固前后厂房 3 个方向的振动加速度峰值和最大振动速度峰值进行对比,见表 5,加固前后 5 号测点 X 方向的加速度峰值和速度峰值对比见表 6。加固后厂房 Y 方向的速度峰值和加速度峰值均得到改善,厂房振动特性得到明显提升。

表 5 加固前、后加速度峰值与速度峰值对比

Tab. 5 Comparison of Peak Acceleration and Peak Velocity Before and After Reinforcement

方向	加固前加速度峰值/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	加固后加速度峰值/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	加固前速度峰值/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	加固后速度峰值/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
X	0.800	0.765	4.090	1.666
Y	2.409	1.162	6.302	3.012
Z	0.717	1.536	1.014	1.813

根据加固前后的加速度峰值、速度峰值和自振特性测试结果可知,采用短肢剪力墙是科学合理的,能显著提升厂房的刚度,改善厂房的振动特性,解决机器与厂房共振的问题。

5 结 语

(1) 机器设备进入厂房高层之后,机器与厂房的

表 6 测点 5 在不同工况下 X 方向加速度峰值和速度峰值对比

Tab.6 Comparison of Peak Acceleration and Peak Velocity of Measuring Point 5 in X Direction Under Different Working Conditions

工况编号	1	2	3	4	5	6
加固前加速度峰值/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	0.464	0.673	0.765	0.699	0.757	0.607
加固后加速度峰值/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	0.464	0.673	0.765	0.699	0.757	0.607
加固前速度峰值/ ( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	0.819	1.429	1.546	1.666	1.521	1.277
加固后速度峰值/ ( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	0.819	1.429	1.546	1.666	1.521	1.277

共振是造成厂房异常振动的主要原因。在高层厂房的早期设计中,应重视机器设备进入高层厂房的问题以及机器设备与厂房的共振问题。

(2)采用短肢剪力墙对厂房进行加固是科学合理的,厂房的强度和刚度提高效果明显。厂房 Y 方向固有频率由 2.45 Hz 提高至 5.87 Hz,厂房 X 方向固有频率由 2.94 Hz 提高至 7.83 Hz,与机器沿厂房宽度方向固有频率 2.94 Hz 不在共振区间,厂房的加速度和速度振动特性得到了不同程度的改善,取得了预期的加固效果。

(3)采用短肢剪力墙对高层厂房的异常振动进行加固是科学合理的,同时具有良好的效果,可为解决同类型高层工业厂房的异常振动加固问题提供借鉴和参考。

参考文献:

References:

[1] 孙其凯,马守龙,王礼杭,等.煤气化高层工业厂房半主动控制研究[J].武汉理工大学学报,2016,38(3):48-54.  
SUN Qi-kai, MA Shou-long, WANG Li-hang, et al. Research of Coal Gasification Highrise Industry Building with Semi-active Control[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2016, 38(3): 48-54.

[2] 林 剑.设置黏滞阻尼器的连体高层结构的减振研究[J].地震工程与工程振动,2015,35(2):181-186.  
LIN Jian. Vibration Control of Connected High-rise Structure with Viscous Damper Subjected to Earthquake Excitation[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2015, 35(2): 181-186.

[3] 赵 昕,王立林,郑毅敏.超高层建筑结构组合调谐风振控制系统[J].同济大学学报:自然科学版,2016,44(4):550-558.

ZHAO Xin, WANG Li-lin, ZHENG Yi-min. Combined Tuned Damper-based Wind-induced Vibration Control for Super Tall Buildings[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2016, 44(4): 550-558.

[4] 薛启超,张井财,何 建,等.地震作用下 PTMD 对高层钢结构的减振效果[J].哈尔滨工程大学学报,2017,38(3):412-418.  
XUE Qi-chao, ZHANG Jing-cai, HE Jian, et al. Reducing Vibration Performance of Pounding TMD on High-rise Steel Structures Subject to Seismic Effects [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38(3): 412-418.

[5] 张 琪,吕西林.附加电涡流阻尼 TMD 的高层建筑结构振动台试验研究[J].结构工程师,2017,33(2):1-9.  
ZHANG Qi, LU Xi-lin. Shaking Table Test on Tall Building Using Eddy-current TMD[J]. Structural Engineers, 2017, 33(2): 1-9.

[6] 楼梦麟,韩博宇.高层建筑环境振动 TLD 控制研究[J].工程力学,2015,32(增):184-190.  
LOU Meng-lin, HAN Bo-yu. Research on TLD Control to Environmental Vibration of High-rise Buildings[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(S): 184-190.

[7] 张文颖,闫魁星,谢昌兵,等.基于干扰力反演的水电站副厂房减振分析[J].人民长江,2015,46(12):8-11,26.  
ZHANG Wen-ying, YAN Kui-xing, XIE Chang-bing, et al. Vibration Reduction Analysis of Hydropower Auxiliary House Based on Disturbance Force Inversion[J]. Yangtze River, 2015, 46(12): 8-11, 26.

[8] 李丕宁,彭文立.某厂房振动耦合分析及结构加固[J].建筑结构,2010,40(2):77-80.  
LI Pi-ning, PENG Wen-li. Analysis on Vibration Coupling Effect and Structural Strengthening of a Mill Building[J]. Building Structure, 2010, 40(2): 77-80.

[9] 李启华,项建国,刘俊龙,等.多层厂房楼板层植入 CA 砂浆减振施工技术[J].施工技术,2013,42(16):61-63,82.  
LI Qi-hua, XIANG Jian-guo, LIU Jun-long, et al. Construction of Damping Performance of CA Mortar in Multilayer Plant Floor Layer[J]. Construction Technology, 2013, 42(16): 61-63, 82.

[10] 徐家云,张 璨,陈凯文,等.粘滞阻尼器与磁流变弹性体阻尼器对高层工业厂房混合控制振动台试验研究[J].武汉理工大学学报,2016,38(8):31-36.  
XU Jia-yun, ZHANG Can, CHEN Kai-wen, et al. Shaking Table Test for the High-rise Industrial Building

- with the Hybrid Control of Viscous Damper and MRE Damper[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2016, 38(8): 31-36.
- [11] 刘瑜新, 闫安志, 李庆波, 等. 高层工业煤气厂房在多重调谐质量阻尼器与黏滞流体阻尼器共同作用下的地震控制效果分析[J]. 工业建筑, 2015, 45(4): 62-66, 97.
- LIU Yu-xin, YAN An-zhi, LI Qing-bo, et al. The Control Effect Analysis of High-rise Industrial Gas Building in the Combined Action of Multiple Tuned Mass Dampers and Flow Viscous Damper Under Earthquake Actions[J]. Industrial Construction, 2015, 45(4): 62-66, 97.
- [12] 周新蓉, 蔡元奇. 装有粘滞阻尼器框架结构厂房减振设计[J]. 武汉理工大学学报, 2015, 37(5): 90-95.
- ZHOU Xin-rong, CAI Yuan-qi. Study of Vibration Control for Frame Structure with Viscous Dampers[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2015, 37(5): 90-95.
- [13] 赵 晗, 刘文光, 钟 声, 等. 某工业厂房振动实测与减振设计研究[J]. 结构工程师, 2016, 32(1): 119-126.
- ZHAO Han, LIU Wen-guang, ZHONG Sheng, et al. Testing and Design Research of Vibration of an Industrial Factory Building[J]. Structural Engineers, 2016, 32(1): 119-126.
- [14] 覃方芳, 党 育. TMD对机器激励下多层厂房楼板的振动控制[J]. 土木工程与管理学报, 2011, 28(3): 378-381.
- QIN Fang-fang, DANG Yu. Use of TMD for Vibration Control of Multi-story Factory Floor Subjected to Machine Excitation[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2011, 28(3): 378-381.
- [15] 汪福元, 李 莎, 肖 南. 热电厂破碎楼振动分析与减振处理[J]. 工程抗震与加固改造, 2011, 33(3): 70-74.
- WANG Fu-yuan, LI Sha, XIAO Nan. Dynamic Analysis and Treatment of Vibration Reduction for a Broken Floor in Thermal Power Plant[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2011, 33(3): 70-74.
- [16] 沈朝勇, 周福霖, 谭 平, 等. 一座钢筋混凝土框架多层厂房楼面的减振加固[J]. 世界地震工程, 2005, 21(2): 7-12.
- SHEN Chao-yong, ZHOU Fu-lin, TAN Ping, et al. Vibration Reduction and Strengthening of a Multilayer Reinforced Concrete Frame Factory Building[J]. World Earthquake Engineering, 2005, 21(2): 7-12.
- [17] 邹伦海, 杨志勇, 李秋胜, 等. 多层工业厂房设备耦联振动的动力优化分析[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2008, 35(7): 25-30.
- ZHI Lun-hai, YANG Zhi-yong, LI Qiu-sheng, et al. Dynamic Optimum Analysis of a Multi-story Factory Building Coupling Vibration with Facility[J]. Journal of Hunan University: Natural Science, 2008, 35(7): 25-30.
- [18] 杨 勇, 李亚宁, 张 波. 预应力钢带加固技术在某工业厂房加固中的应用[J]. 工业建筑, 2015, 45(3): 40-43, 47.
- YANG Yong, LI Ya-ning, ZHANG Bo. Application of Prestressed Steel Strips Retrofitted Methods in Reinforcement of an Industrial Plant[J]. Industrial Construction, 2015, 45(3): 40-43, 47.
- [19] 马震岳, 沈成能, 王溢波, 等. 红石水电站厂房的机组诱发振动及抗振加固研究[J]. 水力发电学报, 2002(1): 28-36.
- MA Zhen-yue, SHEN Cheng-neng, WANG Yi-bo, et al. Studies on the Anti-vibration and Reinforcement of Powerhouse in Hongshi Hydropower Station[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2002(1): 28-36.
- [20] YBJ 55—90, 机器动荷载作用下建筑物承重结构的振动计算和隔振设计规程[S].
- YBJ 55—90, Vibration Calculation and Vibration Isolation Design Rules for Load-bearing Structures of Buildings Under Dynamic Loads[S].