

付建.随机振动下大跨度钢管混凝土柱结构抗震性能测试方法[J].地震工程学报,2018,40(2):241-245.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.02.241

FU Jian.Research on Seismic Performance Testing Method of Long-span Concrete-filled Steel Tubular Columns Under Random Vibrations[J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(2):241-245.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.02.241

## 随机振动下大跨度钢管混凝土柱结构 抗震性能测试方法<sup>①</sup>

付建

(攀枝花学院土木与建筑工程学院,四川攀枝花617000)

**摘要:**由地震等自然灾害引发的等级多变强随机振动会对大跨度钢管混凝土柱结构产生较大的破坏,造成相关建筑全结构寿命周期性衰减。提出一种随机振动下大跨度钢管混凝土柱结构的抗震性能测试方法,在等级多变强随机振动的情况下,设计测试模型,利用信号的协方差矩阵将振动信号与噪声进行分离,通过计算振动信号的强度、后验密度及权值系数等对振动信号进行预处理,获取单一寿命衰减参数;在此基础上引入粒子群算法,求解大跨度钢管混凝土柱结构寿命衰减抑制周期,判断其抗震性。实验结果表明,按照大跨度钢管混凝土柱结构寿命衰减抑制周期的判断方法,可实现对相关建筑结构在等级多变强随机振动下的抗震性测试。

**关键词:**多变强随机振动;大跨度钢管混凝土柱结构;寿命衰减;抑制周期;抗震性能

中图分类号:O55

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2018)02-0241-05

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.02.241

## Research on Seismic Performance Testing Method of Long-span Concrete-filled Steel Tubular Columns Under Random Vibrations

FU Jian

(Department of Civil Engineering and Architecture, Panzhihua University, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

**Abstract:** The variable and strong random vibration caused by natural disasters such as earthquakes can cause great damage to the large-span concrete-filled steel tube column structures, resulting in life periodic attenuation of the whole structure of related buildings. This paper proposes a seismic performance testing method for large-span concrete-filled steel tube columns under random vibrations. Under the environment of variable and strong random vibrations, a test model was established; then, the vibration signal was separated from the noise by using the signal covariance matrix. The vibration signal was then processed by calculating the intensity, posterior density, and weight coefficient, and then the single life attenuation parameter was obtained. Afterwards, the particle swarm optimization (PSO) algorithm was introduced to solve the life attenuation suppression cycle of long-span concrete-filled steel tubular columns to judge their seismic resistance. The experimental results show that the judgement method for life attenuation

① 收稿日期:2017-11-09

基金项目:四川省教育厅科技与研究生教育处批准项目(17ZB0232)

作者简介:付建(1982-),男,四川简阳人,讲师,研究方向为工程结构及工程技术教学与研究。E-mail:33107698@qq.com。

suppression cycle of long-span concrete-filled steel tubular column structures can be used in the seismic test of relevant building structures under variable and strong random vibrations.

**Key words:** variable and strong random vibration; long-span concrete-filled steel tubular column structure; life attenuation; suppression cycle; seismic performance

## 0 引言

地震等自然灾害的频发给大跨度钢管混凝土柱结构的稳定性带来了不小的冲击,因此研究混凝土结构在地震等随机振动下的抗震性成为一个重点课题。传统的抗震性测试以明确抗破坏参数为基础,容易受到不定因素的干扰<sup>[1]</sup>。当前,大跨度钢管混凝土柱结构抗震性测试在等级多变强随机振动下,由于受到外界环境中存在的复杂电磁环境的干扰,易产生大量干扰信号的噪声,影响其信号质量,导致抗震性测试结果不佳<sup>[2]</sup>。为提高大跨度钢管混凝土柱结构在振动下的信号质量,需要对其在等级多变强随机振动下的噪声进行过滤<sup>[3]</sup>,但这种过滤过程也间接加入了人为干扰<sup>[4]</sup>。

目前,大跨度钢管混凝土柱结构抗震性测试方法主要包括基于小波变换的噪声过滤方法<sup>[5-6]</sup>、基于卡尔曼滤波算法的抗震性测试方法<sup>[7]</sup>和基于协方差矩阵的测试方法<sup>[8]</sup>,其中最常用的是基于协方差矩阵的建筑抗震性能判断方法<sup>[9-10]</sup>。以上方法都会受到周围环境中存在的高强度多径效应的影响,无法避免因测试结果失真、抑制周期无法计算导致的信号滤波效果差、振动信号质量低等问题。

针对上述方法存在的问题,提出等级多变强随机振动下的大跨度钢管混凝土柱结构抗震性判断方法。

## 1 等级多变强随机振动条件下大跨度钢管混凝土柱结构抑制周期计算方法

### 1.1 抗震信号的信噪分离方法设计

大跨度钢管混凝土柱结构在等级多变强随机振动下信号中的噪声存在一定的非线性,使得干扰噪声会对信号的质量产生很大的衰减影响,需要进行抑制。抑制的过程需要将信号与噪声进行分离,计算合理的信号特征。

首先设置  $T_q$  为噪声的协方差,其计算公式为:

$$T_q = vq^2 K(q - N) \times (Q - N) \quad (1)$$

假设  $TL$  为噪声的协方差矩阵,其计算公式为:

$$TL = G \{L(q)L^J(q)\} \quad (2)$$

其次要获取信号的协方差矩阵,其计算公式为:

$$U_{aa} \approx UM + T_q \quad (3)$$

对噪声进行分解,得到两者间的关系式,对噪声与振动信号进行分离。

假设  $N$  为信号中的乘性噪声的数目,由噪声构成的集合为  $\{g_1, g_2, \dots, g_N\}$ ,此集合中全部的噪声都具有相同的特征,其对应的特征向量的集合为  $\{g_{N+1}, g_{N+2}, \dots, g_Q\}$ 。则对噪声进行分解之后,两者的关系如下<sup>[11]</sup>:

$$\begin{aligned} T_{zz} &= \sum_{q=1}^q v_q g_q g_q^J \approx \sum_{q=1}^N v_q g_q g_q^J + vQ^2 \sum_{q=N+1}^Q g_q g_q^J \\ &= W \sum_L W^J + S \sum_q S^J \end{aligned} \quad (4)$$

其中:  $\sum_L = \text{diag}\{v_1, v_2, \dots, v_N\}$  为网络的特征值。根据式(4)计算得出的关系,对噪声与信号进行分离,需要满足下列条件<sup>[12]</sup>:

$$\begin{cases} \max_{y^*e} |y^J T z w e|^2 \\ y^J y = e^J e = 1 \\ y = W \frac{1}{M} \chi \\ e = U \frac{1}{M} \delta \end{cases} \quad (5)$$

由大跨度钢管混凝土柱结构在等级多变强随机振动下的信号的时间延迟因数  $\omega(q)$  能够得到噪声的特征方差,对式(5)进行精简,得到如下公式:

$$\begin{cases} \max_{\chi, \delta} |\chi^J \sim T \delta|^2 \\ \chi^J \chi = 1 \\ \delta^J \delta = 1 \end{cases} \quad (6)$$

其中:  $T = S^J T z w U$ 。根据式(6)能够通过周期性的调节实现对噪声的抑制,计算理想值的抑制周期,实现大跨度钢管混凝土柱结构在等级多变强随机振动下的信号优化。

综上所述,先把其抗震信号与噪声进行分离,对噪声进行抑制,在计算理想值的抗震抑制周期,实现对其抗震性的评估。但由于随机振动过程本身是一种随机干扰,无法形成周期性,因此计算合理的抑制周期一直是一个数学难点。

### 1.2 等级多变强随机振动信号衰减参数计算

计算合理的抑制周期需要先对振动信号进行预处理,计算乘性噪声干扰下大跨度钢管混凝土柱结构在等级多变强随机振动下信号的衰减程度,从而

为噪声抑制周期计算提供准确的依据。

计算振动信号的强度、后验密度及权值系数等是对振动信号进行预处理的重要过程,通过这些参数的计算最终可获得衰减参数,是信号处理的最终目的。计算方法如下:

假设  $\{Y_l^k, x_l^k\}_k^P=1$  为信息中随机选取的信号波谱的宽度,  $p(Y_l | Z_{2,l})$  为后验密度,  $P$  为粒子群的初始数目,利用式(7)可计算出  $l$  时刻信号的后验密度:

$$p(Y_k | A_{2,l}) = \sum_{k=1}^P x_l^k \epsilon(Y_l - Y_l^k) \quad (7)$$

式中:  $Y_l$  为大跨度钢管混凝土柱结构在等级多变强随机振动下的状态分量;  $\epsilon(\cdot)$  为最优函数。

设置采集的大跨度钢管混凝土柱结构在等级多变强随机振动下信号的数据集合为  $A_{2,l} = \{A_j, j = 1, 2, \dots, l\}$ , 利用式(8)可计算其信号的强度:

$$p(Y_l | A_{2,l-1}) = \int_{dY_{l-1}} p(Y_l | Y_{l-1}) p(Y_{l-1} | A_{2,l-1}) \\ = \frac{p(A_l | Y_l) p(Y_{l-1} | A_{2,l-1})}{p(A_l | A_{2,l-1})} \quad (8)$$

则  $l$  时刻中振动信号的误差计算公式为:

$$F(Y_k | A_{2,l}) = \sum_{k=1}^P x_l^k Y_l^k, \quad l = 1, 2, \dots \quad (9)$$

则振动信号的权值系数可通过将式(8)、(9)合并计算出来。其计算公式为:

$$F = x_l^k \propto x_{l-1}^k \frac{p(A_l Y_l^k) p(Y_l^k Y_{l-1}^k)}{q(Y_l^k Y_{l-1}^k, A_{2,l})} \quad (10)$$

式中:  $q(\cdot)$  为信号的分布密度。对其信号进行归一化处理,为获得信号的状态模型提供依据。其归一化处理过程表达式为:

$$\sum_{k=1}^P x_l^k = 1 \quad (11)$$

在归一化处理后与式(10)结合获得单一衰减参数,其表达式为:

$$p(l) = p(Y_l^k Y_{l-1}^k) \sim P(Y_l^k, R_{l-1}) \quad (12)$$

式中:  $R_{l-1}$  为振动信号中的噪声方差。

根据上述方法,能获得大跨度钢管混凝土柱结构在等级多变强随机振动下信号的衰减参数,为抑制周期的计算提供准确的数据。

### 1.3 基于粒子群算法的大跨度钢管混凝土柱结构抑制周期计算

根据信噪分离和衰减参数的计算实现对大跨度钢管混凝土柱结构在等级多变强随机振动下带有噪声信号的滤波,提高其信号的质量,从而进一步计算抑制周期。

假设  $S_{ju}$  为  $u$  时刻的噪声信号  $j$  与信号接收设备之间的距离,其计算式为:

$$S_{ju} = \sqrt{(Y_{su} - Y_{ju})^2 + (Z_{su} - Z_{ju})^2 + (A_{su} - A_{ju})^2} \quad (13)$$

两者之间的理想距离可用式(14)计算得到:

$$\sigma_{ju} = S_{ju} + d\epsilon u_u + \lambda_u + \omega_{ju} \quad (14)$$

其中:  $\lambda_u$  为大跨度钢管混凝土柱结构在等级多变强随机振动下的误差系数。利用式(15)计算理想多普勒频移系数:

$$E_{Piu} = [(Y'_{su} - Y'_{ju})(Y'_{su} - Y'_{ju}) + (Z'_{su} - Z'_{ju}) \\ (Z'_{su} - Z'_{ju}) + (A'_{su} - A'_{ju})(A'_{su} - A'_{ju})] \\ / S_{ju} + d\epsilon' u \quad (15)$$

其中:  $Y'_{su}, Z'_{su}, A'_{su}$  分别为  $u$  时刻大跨度钢管混凝土柱结构在等级多变强随机振动下信号接收设备在不同方向的运行速度;  $Y'_{ju}, Z'_{ju}, A'_{ju}$  分别为  $u$  时刻噪声在不同方向的运行速度。

通过计算噪声信号与接收设备之间的距离,计算两者的理想距离,在此基础上,利用式(16)计算大跨度钢管混凝土柱结构在等级多变强随机振动下信号的多普勒频移:

$$E_{ju} = E_{Pju} + \epsilon S_u \quad (16)$$

其中:  $\epsilon S_u$  为式中偏转引起的传输距离差值。

然后根据粒子群算法建立模型:

$$\begin{bmatrix} d\epsilon u_{u+1} \\ d\epsilon' u_{u+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & U \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\epsilon u_u \\ d\epsilon' u_u \end{bmatrix} + d \begin{bmatrix} x_{1u} \\ x_{2u} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$R_\varphi = F \{x\epsilon u \quad x\epsilon' u\} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中:  $\epsilon u_u$  为时间参数;  $\epsilon' u_u$  为时间的变化率;  $U$  为振动信号的采样周期,  $x_{\epsilon u} = (x_{1u}, x_{2u})^U$ 。

最优周期计算结果是由多普勒频移和粒子群算法建立的模型最终确定的,则大跨度钢管混凝土柱结构抑制周期的计算结果为:

$$T = \frac{1}{3} E_{ju} + 2 \sqrt{\begin{bmatrix} d\epsilon u_{u+1} \\ d\epsilon' u_{u+1} \end{bmatrix}} - R_\varphi^2 \quad (19)$$

## 2 实验结果及分析

### 2.1 实验环境

为验证改进的大跨度钢管混凝土柱结构在等级多变强随机振动下噪声过滤方法的有效性,需要进行一次仿真实验。实验数据采集于 2015 年 8 月 7 日某大跨度钢管混凝土柱结构在等级多变强随机振动下的信号,采样周期为 20 s,噪声的移动速度为 15 km/s<sup>[13]</sup>,采集的振动信号的数目为 1 000 个。

其信号的相对固定坐标为(0.28,0.46,0,29)。利用传统噪声过滤进行噪声过滤方法的对比实验。

## 2.2 信号波形获取实验

设置大跨度钢管混凝土柱结构在等级多变强随机振动下信号接收设备的空间位置、运行速度和时钟偏转能用状态分量进行描述,即:  $Y_L = (y_L, z_L, a_L, dU_L, y'_L, z'_L, a'_L)$ , 噪声的方差矩阵为  $R_0$ , 观测噪声矩阵为  $S_0$ , 调整系数为 1。

利用图 1 描述大跨度钢管混凝土柱结构在等级多变强随机振动下的信号。利用图 2 描述存在噪声干扰时的信号。

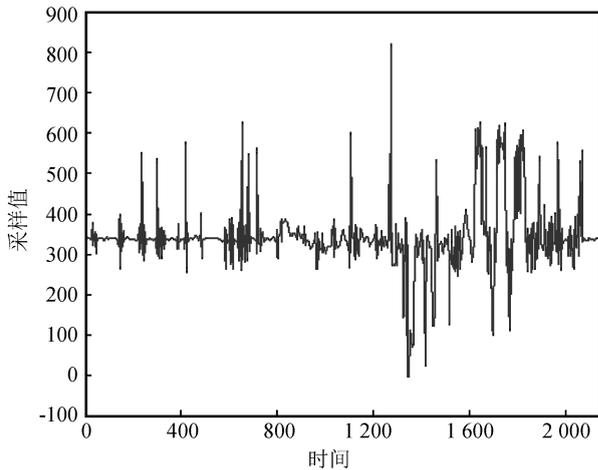


图 1 等级多变强随机振动信号的原始波形

Fig.1 The original waveform of vibration signal under varied and strong random vibration

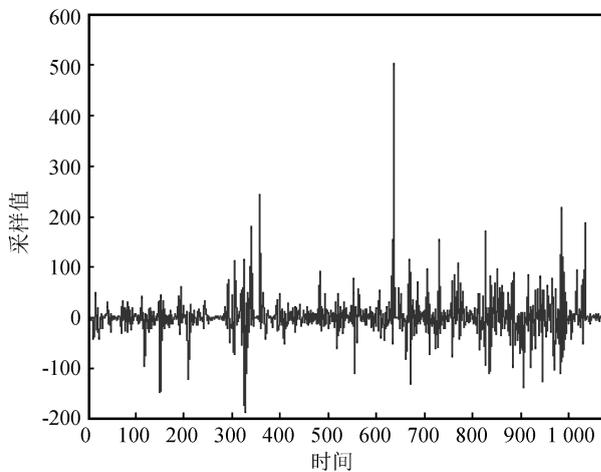


图 2 存在噪声干扰时的振动信号波形

Fig.2 Vibration signal waveform in the presence of noise interference

## 2.3 对比实验结果及分析

在实验过程中设置噪声源不断变化,以此来比较本文抑制周期下噪声过滤的性能。本实验所用滤

波器的性能指标要求和各个功能模块的参数设置如表 1 和表 2 所列。实验结果用图 3 进行描述。对比随机噪声抑制周期下的抑制结果如图 4 所示。

表 1 滤波器的性能指标要求

Table 1 Performance requirements of filters

内容	指标
信号滤波器阶数	15
数据传输宽度/bit	32
最小阻带衰减/dB	35
信号采样频率/kHz	20
系统截止频率/Hz	400

表 2 滤波器系统参数设置

Table 2 System parameters of filters

项目	数值
电平长度/ns	200
信号转换时间/ns	10
A/D 孔径/ns	20
仿真频率/MHz	2
最小带宽/MHz	5
边沿长度	15

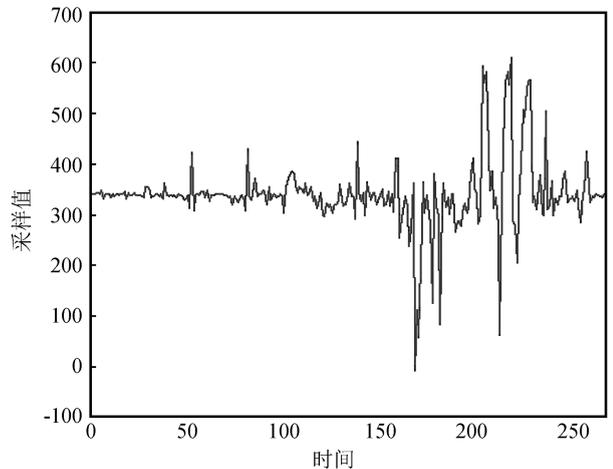


图 3 本文噪声周期下的实验结果

Fig.3 Experimental results under the noise cycle calculated in this paper

根据图 3、4 和表 3 可知,随着噪声的不断增加,利用随机周期抑制获得的目标空间位置的误差较大,利用最优计算周期获得的目标位置的误差较小。综上所述,在振动信号中进行噪声滤波时,传统算法对噪声源不断变化的噪声不能及时进行滤波处理,即使能滤波,其效果也不好。而本文方法能根据大跨度钢管混凝土柱结构在等级多变强随机振动下的优化模型与乘性噪声的观测结果相比较,最终确定并修改大跨度钢管混凝土柱结构在等级多变强随机振动下信号的衰减参数,实现其抑制周期的计算,进而衡量其抗震性能。

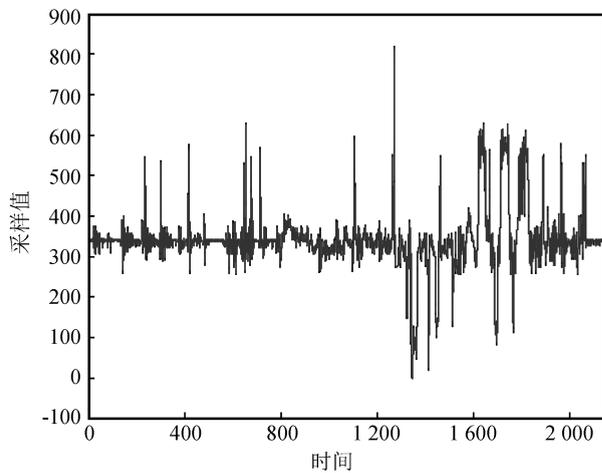


图 4 随机抑制周期下的噪声过滤试验结果

Fig.4 Test results of noise filtering under random suppression cycle

表 3 不同抑制周期下的实验数据

Table 3 Experimental data under different suppression cycles

算法	目标空间位置数据		
	X 轴	Y 轴	Z 轴
随机周期	0.28	0.56	0.32
本文方法	0.28	0.46	0.32
实际坐标	0.18	0.36	0.32

### 3 结论

针对传统混凝土结构抗震测试效果差的问题提出一种大跨度钢管混凝土柱结构在等级多变强随机振动下的抗震测试方法。将噪声与振动信号进行分离,得到噪声的特征方差,抑制噪声干扰,引入粒子滤波的方法计算噪声干扰下信号的衰减程度,获取衰减参数,实现对大跨度钢管混凝土柱结构在等级多变强随机振动下的抑制周期计算。实验结果证明,采用该方法滤波效果好,可提高大跨度钢管混凝土柱结构在等级多变强随机振动下的抗震性能测试质量。

### 参考文献(References)

[1] 朱小刚,陈大可.强震动冲击环境下的网络异常信号检测仿真[J].计算机仿真,2015,25(1):344-348.  
ZHU Xiaogang, CHEN Dake. Simulation of Network Anomaly Signal Detection under Strong Vibration and Shock Environment[J]. Computer Simulation, 2015, 25(1): 344-348.

[2] 常亮,朱先均,刘夏冰,等.四孔交叠隧道下地铁运行对周边建筑物的振动响应分析[J].南昌航空大学学报(自然科学版),2015,16(2):80-86.  
CHANG Liang, ZHU Xianjun, LIU Xiabing, et al. The Analysis about Vibration Influence on Buildings Around Overlapping Multi-tunnels under Train Loads [J]. Journal of Nanchang Hangkong University (Natural Sciences), 2015, 16(2): 80-86.

[3] 杨忠炯,高雨,周立强,等.强振动环境对液压胶管寿命的影响[J].华南理工大学学报(自然科学版),2016,34(7):15-21.  
YANG Zhongjiong, GAO Yu, ZHOU Liqiang, et al. A Probe into Life of Hydraulic Rubber Hose in Strong Vibration Environment[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2016, 34(7): 15-21.

[4] 李宏男,宋建筑,李钢.多自由度体系非线性振动控制装置失效的拟力法-多市场机制研究[J].建筑结构学报,2017,38(1):93-98.  
LI Hongnan, SONG Jianzhu, LI Gang. Study on Failure Mode of Nonlinear Vibration Device Based on FAM-MMBC for MDOF System[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(1): 93-98.

[5] 康宁.浅谈电能计量资产的全寿命周期管理[J].建筑工程技术与设计,2016,31(26):32-33.  
KANG Ning. Life Cycle Management of Electric Energy Measurement Assets[J]. Architectural Engineering Technology and Design, 2016, 31(26): 32-33.

[6] 马逊军,陆洋,陈仁良,等.直升机多频振动并联结构自适应控制方法研究[J].振动工程学报,2016,29(5):755-764.  
MA Xunjun, LU Yang, CHEN Renliang, et al. Multi-frequency Helicopter Vibration Control Method Using Parallel-form Adaptive Filters[J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, 29(5): 755-764.

[7] 全涌,涂楠坤,严志威,等.外附网架对高层建筑主体结构风荷载的影响[J].振动与冲击,2015,34(17):12-17.  
QUAN Yong, TU Nankun, YAN Zhiwei, et al. Effects of Attached Grids on Wind Loads of Main Structure of a High-rise Building[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(17): 12-17.

[8] 邓传加,李兆厂.便携式振动信号采集系统设计与实现[J].电子设计工程,2015,30(19):18-20.  
DENG Chuanjia, LI Zhaochang. Design and Implementation of Portable Vibration Signal Acquisition System [J]. Electronic Design Engineering, 2015, 30(19): 18-20.

[9] 徐浩,符向前,贾梧桐,等.基于 EMD 的核电站小支管振动研究[J].科学技术与工程,2016,16(10):135-139.  
XU Hao, FU Xiangqian, JIA Wutong, et al. Vibration Research on Little Branch of Nuclear Power Station Based on EMD[J]. Science Technology and Engineering 2016, 16(10): 135-139.

[10] 李文娟,刘海强.系统健康管理中的寿命模型仿真研究[J].计算机测量与控制,2016,23(5):279-283.  
LI Wenjuan, LIU Haiqiang. Research on Life Model Simulation of the System Health Management[J]. Computer Measurement & Control, 2016, 23(5): 279-283.

[11] SHU Z, LI S, ZHANG J, et al. Optimum Seismic Design of a Power Plant Building with Pendulum Tuned Mass Damper System by Its Heavy Suspended Buckets [J]. Engineering Structures, 2017, 136: 114-132.

[12] ZHANG C, FENG J, WANG X. Research on the Seismic Design of High-rise Steel Building Based on Security Perspective [J]. International Journal of Smart Home, 2016, 10(5): 253-262.

[13] BALAKRISHNAN B, SARKAR P. Efficacy of Code Provisions for Seismic Design of Asymmetric RC Building [J]. Journal of the Institution of Engineers, 2016, 97(2): 111-120.