

文章编号:1007-6735(2012)06-0580-04

空间网架结构随机地震动激励下的响应分析

张青雷^{1,2}, 张小兵¹, 郭井宽²

(1. 上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093; 2. 上海电气集团股份有限公司 中央研究院, 上海 200070)

摘要:以上海大众仪征五厂的车身车间网架结构为研究对象,采用随机振动法,分别对结构进行独立的 3 向正交随机地震动激励作用下的动力响应分析.结果表明:该结构具有振型密集、频率变化均匀的特点,在地震动激励作用下可能首先发生扭曲破坏;在水平方向的随机地震动激励作用下,虽然结构整体安全,但是其下弦中的几根杆件发生破坏以及上弦中 1 号截面杆件的拉压应力值较大.在 x 和 y 方向的随机地震动激励作用下,上弦和下弦中 1 号截面杆件产生的拉压应力值的差值较大,其它截面的杆件应力值的差值较小.

关键词:空间网架结构; 随机振动; 地震激励
中图分类号: TH 123; TU 311.3 **文献标志码:** A

Response Analysis of Spatial Grid Structure Under Random Seismic Excitation

ZHANG Qing-lei^{1,2}, ZHANG Xiao-bing¹, GUO Jing-kuan²

(1. College School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Central Academe, Shanghai Electric Group Co., Ltd. Shanghai 200070, China)

Abstract: Taking the grid structures of the car body workshop of Shanghai Volkswagen's Yizheng fifth factory as research object and using random vibration method, the dynamic responses of the grid structures were analysed under independent three orthogonal random seismic excitations. Analysis results indicate: the structure is characterized by high density vibration modes and uniform frequency variation, which may at first be twisted and destroyed under seismic excitation. Under horizontal random seismic excitations, a few bars at the bottom chord will fail and the draw-press stress of No. 1 cross-section bar at the upper chord will be relatively great, though the whole structure is safe. Under random seismic excitations in x and y direction, the draw-press stresses of No. 1 cross-section bars at upper bottom chord have a great difference, while the other section bars' stresses are of little diversity between each other.

Key words: spatial grid structure; random vibration; earthquake incentive

空间网架结构是由杆件按照一定的网格形式通过节点连接而成的空间杆系结构.具有空间受力、重量轻、刚度大、抗震性能好等优点.现在被广泛地应用于大跨度车间、体育场馆、车站、机场等场所,作为重要的公共设施,其地震安全性对于设施的正常运转和公众的财产安全至关重要^[1].地震发生时,从震源释放出来的能量以地震波的形式传至地面,而在地震波传输的过程中经由不同的路径、不同的地形地质条件,所以反映到地表的震动必然存在差异.这种差异主要是由于地震波以有限波速传播引起的行波效应;地震波在介质中传播时发生反射和散射,同时由于从震源不同位置传到地表不同点处地震波叠加方式的不同,导致相干性部分损失;各支承点所在场地土层性质可能存在差异,导致地震动通过不同地基土到达各支承点处输入地震动不同^[2-3].因此,研究大跨度空间网架结构在多点输入下结构的地震反应很有必要^[2,4].

目前计算结构对多点输入的反应时,主要的研究方法有:确定性动力分析法、随机振动分析法和工程实用反应谱法^[2,5].对于确定性动力分析法来讲,如果选择的地震波与场地的实际情况不同,则无法得出正确的结论^[2,5-6];对于反应谱法而言,反应谱的组合方式是基于平稳随机过程理论而得到的分析方法.事实上,地震动是强烈的非平稳随机过程^[2,5].随机振动分析方法建立在各点地面运动的统计特征基础上,在确定了地震动场的自功率和互功率谱后,可以计算出各反应量的统计规律^[2,5].而地震地面运动本身就是一个随机场,采用随机振动分析方法日益受到重视^[2].通过以上的对比,本文采用随机振动分析法,对大跨度空间网架结构进行地震响应分析.

1 运动方程

地震动多点激励下的结构运动方程

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{ss} & \mathbf{M}_{sm} \\ \mathbf{M}_{ms} & \mathbf{M}_{mm} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{X}}_s \\ \ddot{\mathbf{X}}_m \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{ss} & \mathbf{C}_{sm} \\ \mathbf{C}_{ms} & \mathbf{C}_{mm} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{X}}_s \\ \dot{\mathbf{X}}_m \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ss} & \mathbf{K}_{sm} \\ \mathbf{K}_{ms} & \mathbf{K}_{mm} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{X}_s \\ \mathbf{X}_m \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{F}_m \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{M}$ 为结构的质量矩阵; $\mathbf{C}$ 为结构的阻尼矩阵; $\mathbf{K}$ 为结构的刚度矩阵; $\mathbf{X}$ 为结构的位移矩阵; $\mathbf{F}_m$ 为随时间变化的载荷矩阵.其中,下标 m 为地面强迫位移相应的自由度; s 为结构的其它可动自由度.

由式(1)可得,网架结构的平衡方程按在支撑处指定的绝对位移为

$$\mathbf{M}_{ss}\ddot{\mathbf{X}}_s + \mathbf{C}_{ss}\dot{\mathbf{X}}_s + \mathbf{K}_{ss}\mathbf{X}_s = -\mathbf{M}_{sm}\ddot{\mathbf{X}}_m - \mathbf{C}_{sm}\dot{\mathbf{X}}_m - \mathbf{K}_{sm}\mathbf{X}_m \quad (2)$$

当忽略阻尼力的影响同时考虑质量矩阵为对角矩阵时,式(2)可以进行进一步简化为

$$\mathbf{M}_{ss}\ddot{\mathbf{X}}_s + \mathbf{C}_{ss}\dot{\mathbf{X}}_s + \mathbf{K}_{ss}\mathbf{X}_s = -\mathbf{K}_{sm}\mathbf{X}_m \quad (3)$$

绝对位移可以分解为两部分^[7],即拟静位移和动态位移

$$\mathbf{X}_s = \mathbf{Y}_s + \mathbf{Y}_r \quad (4)$$

其中拟静位移向量 $\mathbf{Y}_s$,应满足

$$\mathbf{Y}_s = -\mathbf{K}_{ss}^{-1}\mathbf{K}_{sm}\mathbf{X}_m \quad (5)$$

动态位移 $\mathbf{Y}_r$ 在用于均匀地面运动加速度激励时,为了求解式(4)能够与常规计算结果一致,假定阻尼力与相对速度成正比^[8],则动态位移应该满足

$$\mathbf{M}_{ss}\ddot{\mathbf{Y}}_r + \mathbf{C}_{ss}\dot{\mathbf{Y}}_r + \mathbf{K}_{ss}\mathbf{Y}_r = -\mathbf{M}_{ss}\ddot{\mathbf{Y}}_{ss} \quad (6)$$

其中

$$\ddot{\mathbf{Y}}_s = -\mathbf{K}_{ss}^{-1}\mathbf{K}_{sm}\mathbf{X}_m \quad (7)$$

2 随机地震动模型及其参数确定

采用修正 Clough-Penzien 谱^[5,9],计算得出加速度功率谱密度函数

$$S(\omega) = \frac{\omega_g^4 + 4\xi_g^2\omega_g^2\omega^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_g^2\omega_g^2\omega^2} \cdot \frac{\omega^4}{(\omega_f^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_f^2\omega_f^2\omega^2} S_o \quad (8)$$

式中, S_o 为谱强度因子; ξ_g 和 ω_g 分别为地基土的阻尼比和卓越频率; ξ_f 和 ω_f 为模拟地震动低频分量能量变化的参数.结构所在的场地抗震设防烈度定为8度,II类场地土,罕遇地震作用^[10].各参数根据文献[3]进行取值

$$\xi_g = 0.792, \omega_g = 16.498, \omega_f = 0.322,$$

$$\xi_f = 0.626, S_o = 277 \times 10^{-4}$$

由计算机拟合出该功率谱密度函数的曲线,如图1所示(见下页).

3 结构模型

选取上海大众仪征五厂的车身车间的网架结构作为研究对象,建立有限元模型.该网架为正放四角锥网架,共有3501个节点,14072根杆件,其中杆件的截面尺寸有17种,支撑柱有4种截面尺寸;网

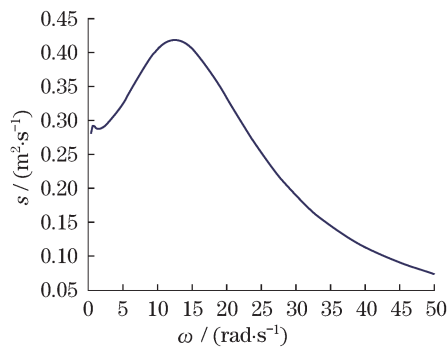


图 1 地震动加速度自功率谱密度函数曲线
Fig.1 Power spectral density function curve of earthquake acceleration

架的平面尺寸为 $216\text{ m}\times120\text{ m}$;下部采用 60 柱支承,柱高 10.3 m ,间距 24 m .该结构的有限元模型如图 2 所示.

在结构的计算分析中,钢材的弹性模量取为 210 MPa ,采用 Rayleigh 阻尼,振型阻尼比取为 0.02 .杆件与杆件之间和杆件与支撑柱之间的连接假定为铰接,支撑柱与基础的连接方式假定为钢接.

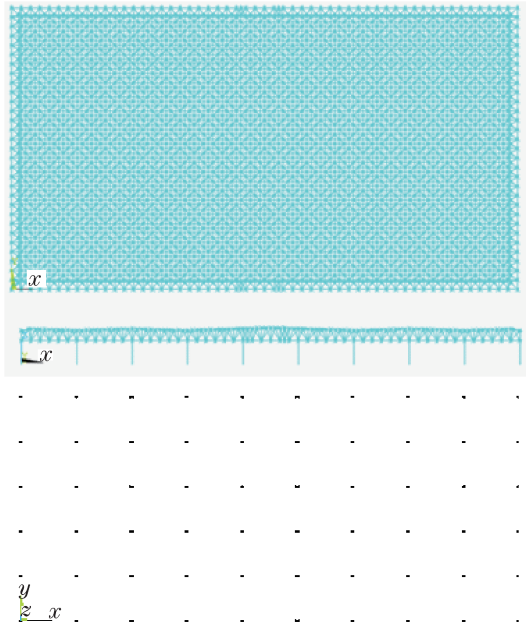


图 2 网架结构分析模型
Fig.2 Analytical model of spatial grid structure

4 模态分析

模态分析是结构的动力学分析的基础.模态分析的主要任务是计算结构的固有频率 f 和模态振型.采用 Block Lanczos 法对该模型进行模态计算,取阶数 n 为 10 阶进行分析.结果如表 1 所示.

表 1 结构振动特性
Tab.1 Structure vibration characteristics

n	f/Hz	模态振型
1	1.567 3	x 方向平动
2	1.577 0	y 方向平动
3	1.640 2	x,y 平面内扭转
4	2.272 1	x,y 平面内扭曲变形
5	2.286 0	
6	3.144 0	
7	3.575 6	
8	3.807 8	
9	4.717 9	
10	4.724 4	

从模态分析的计算结果可知,该结构自振特性具有振型密集,频率变化均匀的特点,体现了该结构动力特性的复杂性.第一阶振型为 x 方向平动,第二阶振型为 y 方向平动,而且两者的周期比较接近;第三阶振型为绕 z 轴的扭转振型,以转动为主的第一自振周期 T_3 与以平动为主的第一自振周期 T_1 的比值 $T_3/T_1=1.567\ 3/1.640\ 2=0.96>0.9$,由文献[11]可知该结构的扭转刚度小于其平动刚度,地震中容易发生扭曲破坏.

5 杆件的受力分析

随机振动分析采用功率谱密度作为输入,是一种确定响应出现特征值的概率大小的分析方法.随机振动分析时,需要设定结构的阻尼系数,对试验测得的 $0\sim100\text{ Hz}$ 频段的模态分析均按照阻尼系数为 0.02 计算.根据随机振动分析理论,得到的分析结果具有统计特性,显示的结构变形为均方根变形.图 3 为该网架结构在 x,y,z 方向的随机地震动激励作用下杆件的应力值.

由图 3(a)可知,在水平方向的随机地震动激励作用下,该空间网架结构下弦中有几根杆的应力值 σ 超出其许用应力值 210 MPa (见表 2),这些杆件发生破坏,其中最大应力值出现在 1 号杆为 713 MPa .图 3(b)和(c)上弦和腹杆的杆件应力值均在安全范围内.由文献[11-13]可知,由于该结构是正放四棱锥形式,超静定次数高,当有几根杆件破坏时,结构内部会发生内力重分布现象,使结构继续有能力承载.将发生破坏的杆件去除,然后进行地震动激励,其余杆件的应力值均小于其许用应力.因此,该结构在地震动激励下并未发生破坏.

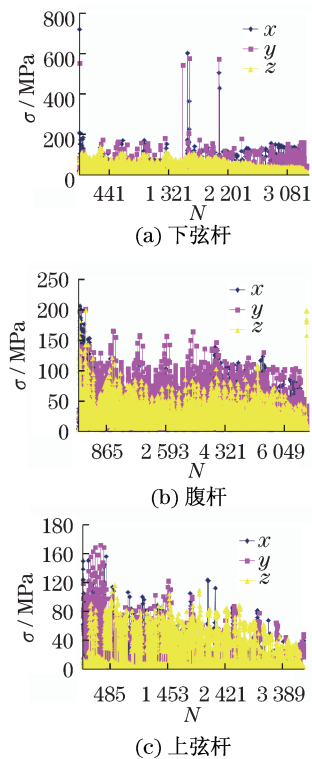


图 3 x, y 和 z 方向地震动激励作用下的杆件拉压应力值
Fig.3 Draw-press stresses in bars of spatial grid structure under x, y, z directional earthquake excitation

表 2 失效杆件表
Tab.2 Failure rods

N	σ/MPa	N	σ/MPa
3286	215	1531	535
1601	595	2	543
3285	354	3291	567
1	713		

由图 3 可知,在 x, y 和 z 3 个方向的随机地震动激励作用下,杆件的应力分布比较均匀,但是由图 3(c),在 x 和 y 方向的地震动激励作用下,上弦中采用 1 号截面尺寸的杆件的应力值明显大于其它杆件.由图 4(a)可知,在 x 和 y 方向的地震动激励下,腹杆杆件的拉压应力值变化较大.又由图 4(b)和图 4(c)可知,对于 x 和 y 方向的地震动激励作用,下弦的杆件和上弦中除 1 号截面杆件以外的其它杆件的拉压应力值变化幅度较小.总之,该结构在随机地震动激励作用下,杆件应力的整体分布表现出了良好的均匀性^[14].

6 结 论

以上海大众仪征五厂车身车间的网架为例,基

于随机振动理论对该结构进行 3 个方向的地震动激励作用下的结构随机响应分析.通过以上计算研究得出以下结论:

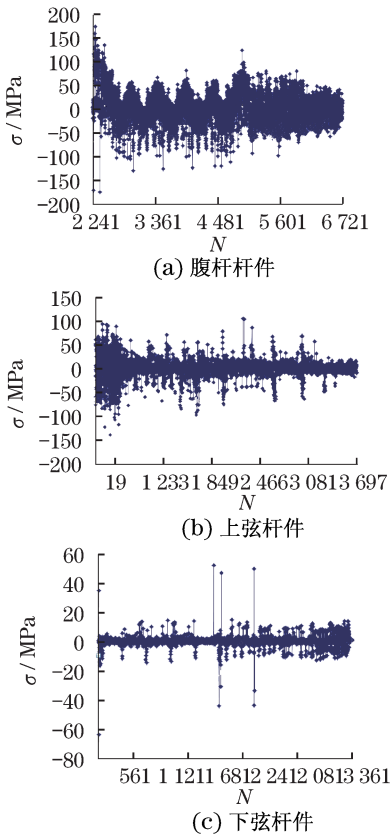


图 4 水平 x 和 y 方向地震激励下杆件产生的拉压应力的差值
Fig.4 Stress diversity generated by bars under the earthquake excitation in horizontal x and y directions

- a. 由模态分析的结果可知,该结构具有振型密集,频率变化均匀的特点,体现了该结构动力特性的复杂性;在地震动激励作用下该结构可能首先发生扭曲破坏.
- b. 该结构属于超次静定结构,在水平 x 和 y 方向的随机地震动激励作用下,虽然该结构下弦中的几根杆件发生破坏,但是结构内部发生内力重分布现象,使结构继续有能力承载.因此该结构整体安全.
- c. 在水平 x 和 y 方向的随机地震动激励作用下,上弦中采用 1 号截面尺寸的杆件应力值较大,不同激励方向对下弦的杆件和上弦中除 1 号截面杆件以外的其它杆件的应力值变化影响较小.

(下转第 588 页)