

目 次

新型膜材料与膜过程

埃洛石纳米管在膜分离领域的应用 张亚涛, 刘宗凯, 董冠英(1)

共价有机框架液体分离膜的研究进展 朱军勇, 陈田田, 韩双乔, 张亚涛(13)

智能信息

混沌时间序列的核自适应滤波预测算法 刘 强, 王世元, 黄雪微, 王代丽(24)

基于国产 PuDianNao 芯片的向量函数库优化 杨指政, 杜子东, 文渊博(31)

出行系统最优配置下共享停车选择及泊位分配 孙 超, 李世杰, 张 鹏, 尹浩为, 蔡宇航(38)

基于深度强化学习的智能路由技术研究 黄万伟, 郑向雨, 张超钦, 王苏南, 张校辉(44)

机械与动力工程

推进轴系纵向高承载准零刚度隔振器的研究 ... 任志英, 邱 涛, 刘扭扭, 白鸿柏, 尧杰程, 梁 翼(52)

悬吊式空调机组支吊架的谱分析及抗震评定 王和慧, 刘雨欣, 汤 毅, 朱进林, 潘 健(58)

ORC 系统蒸发器夹点温差的数值分析和实验研究
..... 马新灵, 王 聪, 石文琪, 孟祥睿, 张景迪, 邱宇恒, 潘佳浩(65)

18CrNiMo7-6 合金钢 J-C 损伤模型失效参数研究 吴少洋, 张建伟, 卢凤强, 李元鑫, 秦瑾鸿(70)

激光扫平仪垂直扫平误差测量方法研究 张卫东, 赵凤霞, 苏清磊, 程鹏里, 聂金玲(77)

土木与水利工程

基于神经网络算法的滚刀磨损量预测方法 丁小彬, 谢宇轩, 薛皓文, 李世佳(83)

基于改进突变评价法的黄河凌汛灾害风险评价 李宗坤, 胡义磊, 邓 宇, 葛 巍(89)

多跨连续梁-刚构桥地震易损性分析 梁 岩, 张卓航, 班亚云, 王 艳(96)

交叠车站下穿段 MJS 加固温度场变化规律研究 戴逸飞, 杨 平, 王 宁, 娄 寅, 冯俊青(103)

文章编号:1671-6833(2023)01-0058-07

悬吊式空调机组支吊架的谱分析及抗震评定

王和慧¹, 刘雨欣¹, 汤毅², 朱进林², 潘健²

(1. 华东理工大学机械与动力工程学院, 上海 200237; 2. 上海市安装工程集团有限公司, 上海 200080)

摘要: 基于反应谱分析方法, 应用 ANSYS 有限元软件及其 APDL 编程, 采用空间梁单元、3D 纵向弹簧阻尼单元和实体单元建立完整反映结构特性的三维有限元模型, 对某空调机组悬吊式安装方式下的支吊架进行抗震计算。考虑静力载荷和运行基准地震(OBE)载荷进行静力分析, 然后在此基础上进行模态分析和 OBE 载荷下的多点响应谱分析, 按照模态组合的平方和之开根号法(SRSS 法)综合静力分析和谱分析的计算结果, 依据 ASME AG-1 规范, 对支吊架的强度和刚度进行抗震评定。结果表明: 在静力载荷和 OBE 载荷的组合工况作用下, 支吊架的拉力、剪应力、弯曲应力及拉弯组合均小于应力限制值, 安全余量很大; 支吊架的位移大部分来自于弹簧阻尼减振器收缩引起的整个系统的刚性位移, 其余来自于槽钢底框的相对位移, 二者的刚度都满足要求且安全余量较大; 支吊架根部的膨胀螺栓主要受拉力的作用, 其强度满足要求且安全余量较大。经评定, 该悬吊式空调机组支吊架具备足够的抗震强度和刚度。

关键词: 悬吊式空调机组; 支吊架; 谱分析; ASME AG-1 规范; 抗震评定

中图分类号: TU311.3 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2023.01.009

为确保空调机组悬吊式安装施工方案的可行性和安全性, 避免地震发生时, 在结构未损情况下产生空调机组掉落的次生灾害, 要对空调机组起支撑作用的支吊架进行抗震分析。目前常用的抗震分析方法有 3 种: 静态系数法、反应谱分析方法和时程分析法。丁幼亮等^[1]总结了这 3 种抗震分析方法的基本原理和应用现状; 兰麒麟等^[2]采用静态系数法和反应谱分析方法对核承压设备进行抗震分析, 并对比了两种方法的计算结果。以上研究表明, 反应谱分析方法理论成熟, 又能够快速找到结构的最大响应, 在一定程度上反映结构的动态特性, 故工程上常采用反应谱分析方法^[3-5]。

在支吊架的抗震设计中多采用基于静态系数法的等效侧力法进行地震作用的计算。刘影等^[6]根据等效侧力法分析了大跨度空间钢结构支吊架的水平地震作用情况, 进而计算出每个构件的内力值, 基于此选取合适的支吊架基础单元, 组成最优支吊架; 史庆国等^[7]通过等效侧力法计算地震作用力, 以此作为主要载荷, 对抗震支吊架进行受

力分析, 根据计算结果评定支吊架的性能, 发现其可满足工程要求。但是等效侧力法属于静力等效的工程简化算法, 不够准确。也有学者将反应谱分析方法用于支吊架的抗震研究中。赵金桥等^[8]对管线抗震支吊架进行仿真计算, 应用反应谱分析方法提取出有、无抗震支吊架及不同形式支吊架等工况下管线系统的模态云图和地震位移响应云图, 并进行对比分析, 结果表明, 采用夹式管箍侧向抗震支吊架可有效缓解地震位移响应, 但该研究的重点在于地震反应谱分析的力学响应, 不涉及抗震评定。

目前, 支吊架的抗震设计和安全评定缺乏完整的计算流程。本文基于主流的反应谱分析方法, 应用 ANSYS 软件, 利用 APDL 编程, 对某空调机组悬吊式安装方式的支吊架进行抗震计算及安全评定。首先, 进行静力分析, 选择合理的吊架形式; 其次, 进行模态分析, 提供谱分析所需的结构固有频率和振型; 最后, 基于模态分析结果, 以某地区八级地震反应谱为输入载荷, 同时施加 X、Y、Z 3 个方向的激

收稿日期: 2022-08-17; 修订日期: 2022-10-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0705800)

作者简介: 王和慧(1969—), 男, 安徽安庆人, 华东理工大学教授, 博士, 主要从事机械强度与振动方向研究, E-mail: hh-wang@ecust.edu.cn。

引用本文: 王和慧, 刘雨欣, 汤毅, 等. 悬吊式空调机组支吊架的谱分析及抗震评定[J]. 郑州大学学报(工学版), 2023, 44(1): 58-64. (WANG H H, LIU Y X, TANG Y, et al. Spectrum analysis and seismic evaluation of support and hanger of suspension air conditioning unit[J]. Journal of Zhengzhou university (engineering science), 2023, 44(1): 58-64.)

励,对支吊架系统进行运行基准地震(OBE)工况下的多点响应谱分析。依据 ASME AG-1 规范^[9],对静力和 OBE 组合工况下的支吊架线型结构进行应力强度和变形刚度评定。本文基于 ANSYS 的抗震计算与评定流程可标准化,对建筑与核电的机电安装抗震设计具有参考价值。

1 地震反应谱分析方法

反应谱分析是指将模态分析的结果与一个已知的谱联系起来计算结构的位移和应力,也可以说是模态分析的扩展,用于计算结构在地震或其他随机激励作用下的响应。模态分析是谱分析前期必须完成的环节,以确定结构固有频率和振型^[10]。模态分析中不考虑阻尼影响,其自由振动主方程^[11]为

$$M\ddot{u}(t) + Ku(t) = 0. \quad (1)$$

多自由度体系在地震作用下运动微分方程的矩阵形式^[12]为

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = Ma(t). \quad (2)$$

式中: M 为质量矩阵; C 为阻尼矩阵; K 为刚度矩阵; $a(t)$ 为地面加速度; $u(t)$ 、 $\dot{u}(t)$ 、 $u(t)$ 分别表示结构的加速度向量、速度向量和位移列向量; I 为单位位移时结构各节点产生的位移列向量。

根据杜哈梅积分得第*i*阶响应的最大值^[13]为

$$u_i = \Phi_i \Gamma_i [S_a(\omega_i)] / \omega_i^2. \quad (3)$$

式中: u_i 为第*i*阶位移响应结果; Φ_i 为第*i*阶对应的特征向量; Γ_i 为第*i*阶振型参与因子; $S_a(\omega_i)$ 为地震作用下的加速度响应谱; ω_i 为第*i*阶固有频率。

2 悬吊式空调机组支吊架计算模型

2.1 有限元建模

悬吊式空调机组安装设备由槽钢底框、吊杆、吊式弹簧阻尼减振器、膨胀螺栓以及连接件组成。吊杆直径为 14 mm,每根吊杆上连接有吊式弹簧阻尼减振器,吊杆与楼板间采用槽钢连接件和膨胀螺栓固定:顶部用 2 个膨胀螺栓将槽钢连接件上部固定在楼板上,再用 1 个膨胀螺栓将吊杆固定在槽钢连接件下部,如图 1 所示。槽钢底框用 14#b 槽钢制作,吊杆通过槽钢底框上的孔进行固定,每个孔的中心距槽钢端 50 mm,具体尺寸如图 2 所示。

空调机组外形尺寸为 3 162 mm × 1 304 mm × 1 099 mm,总质量为 1 100 kg,运行质量为 1 400 kg(包含水质量以及槽钢底框质量)。整个支吊架的吊杆可考虑 4 根、6 根、8 根的情况。本文中支吊架共有 8 根吊杆,该吊杆数量是根据静力分析结果确

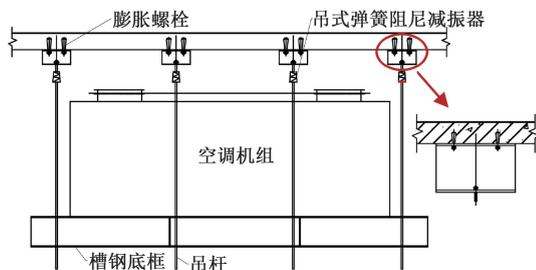


图 1 悬吊式空调机组安装设备

Figure 1 Installation equipment of suspension air conditioning unit

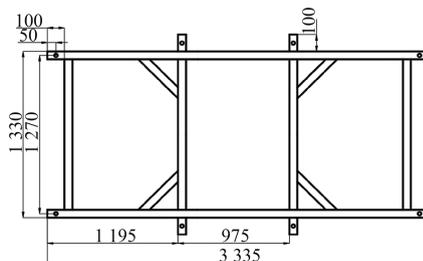


图 2 槽钢底框 (mm)

Figure 2 Channel steel bottom frame (mm)

定的最合理的数量。

在抗震分析中,需要进行模态分析和谱分析。模态分析是分析结构自由振动的动态特性,即固有频率和振型,只须对结构施加边界约束,无须施加其他任何载荷^[14]。在有限元模型中,不能将空调机组等效成均布载荷施加到槽钢底框上,是因为其本身具备一定的刚度和质量,在动力分析中有刚度和惯性力的影响,而其内部复杂构件没必要建模。因此,将其简化成密度均匀的长方体进行建模,其密度为空调机组的计算质量与体积之比。

槽钢底框和吊杆采用 Beam189 空间梁单元,空调机组采用 Solid95 单元,吊式弹簧阻尼减振器采用 3D 纵向 Combin14 弹簧阻尼单元。吊杆通过膨胀螺栓与楼板土建连接,为简化模型,忽略槽钢连接件和膨胀螺栓,在吊杆顶部的梁单元节点处施加固定约束。采用自底向上的方法建模,即先建立点,连接成线,再赋予截面属性,生成吊杆与槽钢底框,线与线之间共用关键点,最后建立体,生成空调机组。有限元模型如图 3 所示,该模型单元数为 7 384,节点数为 24 121。

2.2 材料参数

空调机组的等效密度按下式进行计算^[15]:

$$\rho = G \times P_1 \times P_2 / V. \quad (4)$$

式中: G 为空调机组的运行质量,kg; V 为空调机组的体积, m^3 ; P_1 为动载荷系数,一般取 1.1; P_2 为不平衡系数,一般取 1.1~1.25,本文取 1.2。经计算,等效密度为 408 kg/ m^3 。

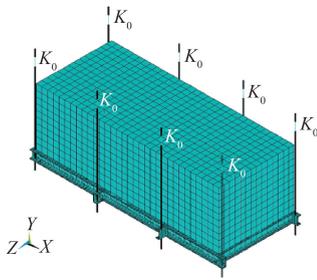


图3 三维有限元模型

Figure 3 Three-dimensional finite element model

表1 材料型号及性能参数^[13,16]Table 1 Material model and performance parameters^[13,16]

名称	材料	型号	密度/ ($10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ 10^5 MPa	泊松比	屈服强度/ MPa	许用抗拉 载荷/ 10^3 N	许用抗剪 载荷/ 10^3 N
吊杆	Q235B	$\Phi 14$	7.85	2.1	0.3	235		
槽钢底框	Q235B	14#b	7.85	2.1	0.3	235		
膨胀螺栓	Q235B	M10	—	—	—	—	4.31	3.24

表2 吊式弹簧阻尼减振器参数

Table 2 Suspension spring damper parameters

型号	承载/ kg	自振频率/ Hz	变形/ mm	竖向刚度/ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$)
ZDH-420	210~420	4.5~3.2	12~24	175

载荷如下。

(1) 静力分析:仅考虑空调机组、槽钢底框和吊杆的自重载荷,即在 ANSYS 有限元模型中定义竖直向下的重力加速度 $g=9\ 810 \text{ mm/s}^2$ 。

(2) 地震谱分析:在吊杆顶部的约束处进行槽钢横梁的横向和轴向(X 和 Z 方向)、竖向(Y 方向) OBE 反应谱的同步激励。依据 ASME AG-1 规范^[9]可知 OBE 抗震计算的阻尼比系数为 2%。某地八级多遇地震反应谱如图 4 所示,3 个方向的地震反应谱相同。

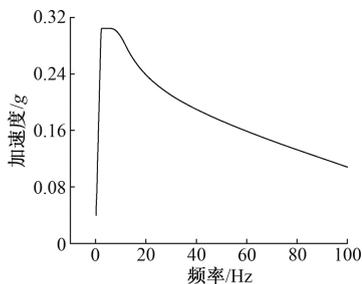


图4 某地八级多遇地震反应谱

Figure 4 Frequent earthquake response spectrum of magnitude 8 in a certain area

3 安全评定准则

抗震的强度和刚度评定依据 ASME AG-1 规范^[9]进行设计,其标准相对于民用建筑及其附属物

支吊架系统各部件材料参数见表 1 和表 2。

2.3 边界条件与载荷

边界条件如下:

(1) 由于吊杆顶端通过膨胀螺栓将其固定在楼板上,故在吊杆顶部节点处施加固定约束;

(2) 弹簧阻尼减振器仅在竖直方向存在位移,因此约束弹簧单元节点的水平方向自由度;

(3) 空调机组放置在支吊架上,二者间建立绑定约束。

而言更加严苛。

对空调机组起连接和吊装作用的支吊架属于线型框架结构,按照 ASME AG-1 规范^[9],线型框架结构的应力强度评定是按不同使用等级和限制准则分别对其拉应力、剪应力、弯曲应力及拉弯组合进行评定。使用规范中的 AA-D-3300 许用设计应力可得 A 等级设计下的线型构件评定准则,如表 3 所示。支吊架材料 Q235B 的屈服强度 S_y 为 235 MPa。

表3 线型构件应力评定准则

Table 3 Stress assessment criteria of the line components

应力类别	应力限制	应力限值/MPa
拉应力 f_t	$F_t = 0.60S_y$	141.0
剪应力 f_v	$F_v = 0.40S_y$	94.0
弯曲应力 f_b	$F_b = 0.66S_y$	155.1
拉弯组合	$f_t/F_t + f_v/F_v \leq 1$	1

该支吊架的刚度评定分为两个方面:一是弹簧阻尼减振器的刚度评定;二是槽钢底框的刚度评定。

(1) 弹簧阻尼减振器的刚度评定。弹簧的最大伸长量小于相应型号吊式弹簧阻尼减振器的最大变形量,在本文中最大变形量为 24 mm。

(2) 槽钢底框的刚度评定。槽钢底框为线型结构,按照 ASME AG-1 规范^[9]中的 DA-4215 规定,A 等级设计时,线型框架结构的变形刚度要求在任意方向上不应超过跨度 L 的 $1/360$ 或 3.175 mm 的较小者。对于本文中的槽钢底框来说,其变形刚度要求在任意方向上应小于 3.175 mm。

根据文献[16],膨胀螺栓的型号为 M10,材料为 Q235B,许用抗拉和许用抗剪载荷分别为 4 310 N 和 3 236 N。在进行校核时,螺栓所受的最大拉力与剪

力应分别小于许用抗拉和许用抗剪载荷。

4 结果分析及评定

4.1 模态分析

对悬吊式空调机组支吊架系统进行模态分析时,要保证各个方向的模态参与质量都大于 90%。本文有限元计算中取前 200 阶模态,第 200 阶模态各个方向参与质量都为 1,完全满足要求。表 4 为 X 方向部分阶数的模态参与因子计算结果,可从 ANSYS 模态分析结果文件中读取。

表 4 X 方向模态参与因子部分计算结果

Table 4 Partial calculation results of X-direction modal participation factors

模态阶数	固有频率/Hz	X 方向模态参与质量
1	0.219 64	0.009 91
2	0.220 32	0.998 56
3	0.303 03	0.998 69
198	1 362. 86	1.000 00
199	1 363. 02	1.000 00
200	1 363. 03	1.000 00

4.2 组合工况分析与评定

谱分析只能进行地震激励响应计算,不考虑其他载荷,比如自重载荷。因此需要对结果进行综合处理。组合工况包括静力和 OBE 载荷,即将静力分析结果与 OBE 反应谱分析结果采用模态组合的平方和之开根号法(SRSS 法)进行综合计算。

以 OBE 反应谱分析为例,需要分别提取支吊架

的拉应力、不同面的剪应力(X-Y 面和 X-Z 面)及弯曲应力(包括 Y、-Y、Z、-Z 方向),部分计算结果如图 5 所示。由图 5 可知,8 根吊杆的支吊架在 OBE 工况作用下各应力值都很小。支吊架的应力评定结果如表 5 所示,应力计算结果远小于应力限制值,安全余量都很大,完全满足强度要求。

支吊架的位移云图如图 6 所示,其中图 6(a)为支吊架 Y 方向的位移云图。可以看出,在地震载荷的作用下弹簧发生收缩,最大变形量为 5.5 mm,小于该弹簧阻尼减振器的位移限制值(24 mm)。整个槽钢底框的位移大部分来自于弹簧收缩引起的整个系统的刚性位移,因此需要单独提取 X 方向和 Z 方向槽钢横梁的位移来计算其挠度。以 X 方向为例,如图 6(b)所示,X 方向横梁最大挠度为 0.88 mm,同理可得 Z 方向横梁最大挠度为 0.28 mm,都小于横梁的位移限制值(3.175 mm)。

吊架位移评定结果如表 6 所示。由表 6 可知,弹簧变形量安全余量以及横梁在 X、Y 方向挠度的安全余量分别为 37.7%、34.5%、80.8%,弹簧阻尼减振器和槽钢底框的刚度都满足要求且安全余量较大。

根据文献[16]可知,采用图 1 吊架根部固定形式时,根部与吊杆的允许荷载相同,即槽钢连接件上下部分所受荷载相同,因此仅需对下部承受全部荷载的单个膨胀螺栓进行校核。根据吊杆顶部节点内力可知膨胀螺栓主要受拉力作用,强度校核结果见表 7。由表 7 可知,拉力和剪力的安全余量分别为 38.5%和 100%,满足刚度要求。

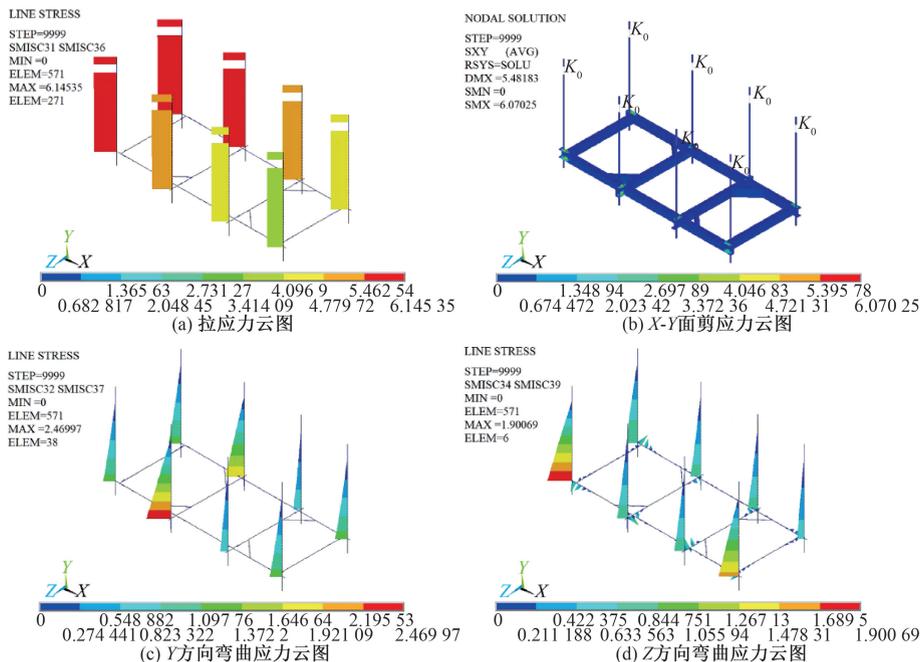


图 5 OBE 工况下支吊架应力云图(MPa)

Figure 5 Stress contour of support and hanger in OBE condition(MPa)

表5 支吊架应力评定

Table 5 Stress assessment of support and hanger

应力类别	静力/MPa	OBE/MPa	(静力+OBE)/MPa	应力限制值/MPa	评定结果	安全余量/%
拉应力 f_t	15.86	6.15	17.01	141.0	满足	87.9
剪应力 f_v	19.41	7.42	20.78	94.0	满足	77.9
弯曲应力 f_b	14.31	4.41	14.97	155.1	满足	90.3
拉弯组合 $f_t/F_t+f_b/F_b$	0.204	0.072	0.218	1	满足	78.2

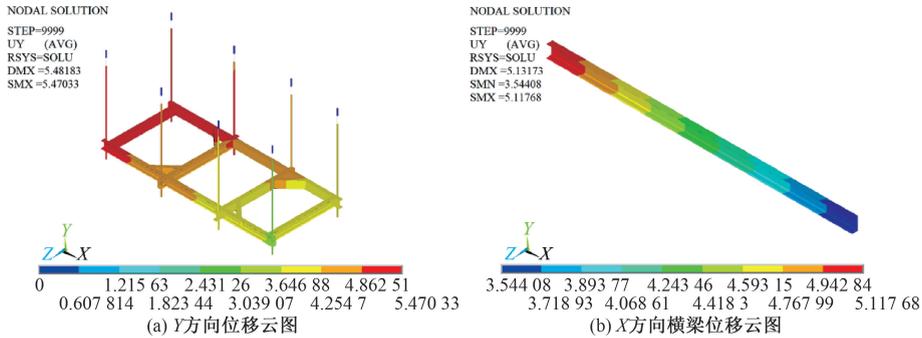


图6 OBE工况下支吊架位移云图(mm)

Figure 6 Displacement contour of support and hanger in OBE condition(mm)

表6 支吊架位移评定

Table 6 Displacement assessment of support and hanger

评定类别	弹簧变形量/ mm	横梁挠度/mm	
		X方向	Z方向
静力	13.9	1.890	0.540
OBE	5.50	0.880	0.280
静力+OBE	14.95	2.080	0.610
位移限制值	24.00	3.175	3.175
评定结果	满足要求	满足要求	满足要求
安全余量	37.7%	34.5%	80.8%

表7 膨胀螺栓强度校核

Table 7 Strength check of expansion bolts

校核类别	拉力/N	剪力/N
静力工况	2 438.4	≈0
OBE工况	945.3	≈0
静力+OBE工况	2 651.2	≈0
允许荷载	4 310	3 236
评定结果	满足要求	满足要求
安全余量	38.5%	≈100%

5 结论

(1) 本文根据静力分析得到支吊架最合理的吊架形式,即8根吊杆支吊架。对该支吊架系统进行了模态分析。为避免后续谱分析时遗漏重要模态,模态分析过程中必须检查并确保模态参与质量总和超过90%。在模态分析的基础上,利用多点响应谱方法计算了结构在横向、轴向和竖向的OBE载荷同步激励下的力学响应。由结果可知,支吊架的应力和位移都小于限制值。

(2) 谱分析只能进行地震激励响应计算,不考

虑其他载荷,比如静力载荷,故需要对结果进行组合工况的综合处理。利用平方和之开根号法,综合静力载荷和OBE载荷工况下的计算结果,对支吊架进行了强度和刚度评定,并对膨胀螺栓进行了强度校核,结果都满足要求且相对安全余量较大。

(3) 刚度评定是基于相对位移进行的,若结构没有明显的刚性位移时,可基于绝对位移进行评定,此时绝对位移和相对位移相差很小。而本文中支吊架上方有吊式弹簧阻尼减振器,槽钢底框的位移大部分来自于弹簧收缩引起的整个系统的刚性位移,因此要计算槽钢底框横梁的相对位移。

(4) 本文基于ANSYS软件的抗震计算与安全评定流程可以标准化,对建筑与核电的机电设备抗震设计具有参考价值。

参考文献:

- [1] 丁幼亮,梁启慧,朱浩樑,等. 建筑抗震支吊架地震作用计算方法评述[J]. 建筑设计管理, 2017, 34(11): 72-73, 90.
DING Y L, LIANG Q H, ZHU H L, et al. Review on calculation methods of seismic action of building anti-seismic hanger [J]. Architectural design management, 2017, 34(11): 72-73, 90.
- [2] 兰麒,胡雯婷. 等效静力法和谱分析法在设备抗震分析中的应用[J]. 核动力工程, 2014, 35(增刊1): 145-148.
LAN Q, HU W T. Application of equivalent static method and spectrum analysis method in equipment seismic analysis[J]. Nuclear power engineering, 2014, 35(S1): 145-148.

- [3] 付罗均,李艳,董昕,等. 基于防震烈度设计的设备响应谱分析方法[J]. 中国特种设备安全, 2021, 37(2): 13-17, 66.
FU L J, LI Y, DONG X, et al. Research on analysis method of equipment response spectrum based on seismic intensity design [J]. China special equipment safety, 2021, 37(2): 13-17, 66.
- [4] ZONA A, BARBATO M, CONTE J P. Nonlinear seismic response analysis of steel-concrete composite frames[J]. Journal of structural engineering, 2008, 134(6): 986-997.
- [5] 王元清,王锁军,吴杰,等. 组合节点刚度对组合框架的抗震性能影响分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2006, 27(2): 8-13.
WANG Y Q, WANG S J, WU J, et al. Analysis of influence of composite joint rigidity on seismic properties of the steel-concrete composite frame[J]. Journal of Zhengzhou university (engineering science), 2006, 27(2): 8-13.
- [6] 刘影,刘德贵. 抗震约束下大跨度空间钢结构设计中支吊架的合理选取[J]. 地震工程学报, 2019, 41(3): 631-637.
LIU Y, LIU D G. Reasonable selection of support and hanger in the design of long-span spatial steel structures under seismic constraints [J]. China earthquake engineering journal, 2019, 41(3): 631-637.
- [7] 史庆国,李新. 建筑机电工程中抗震支吊架应用及验算[J]. 建筑结构, 2019, 49(增刊2): 696-700.
SHI Q G, LI X. Application and checking calculation of seismic-restraint installation systems in building electrical and mechanical engineering [J]. Building structure, 2019, 49(S2): 696-700.
- [8] 赵金桥,刘胜,马龙. 基于ANSYS的管线抗震支架抗震特性研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2019, 36(2): 80-86.
ZHAO J Q, LIU S, MA L. Seismic analysis of seismic braces in pipelines based on ANSYS [J]. Journal of Chongqing technology and business university (natural science edition), 2019, 36(2): 80-86.
- [9] The American Society of Mechanical Engineers. Code on nuclear air and gas treatment: ASME AG-1-2019. [S]. New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2019.
- [10] 宋丹青,董利虎,陈卓,等. 基于模态分析的大型均质岩质边坡动力响应特征研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2021, 42(2): 1-6.
SONG D Q, DONG L H, CHEN Z, et al. Dynamic response characteristics of large homogeneous rock slopes based on modal analysis [J]. Journal of Zhengzhou university (engineering science), 2021, 42(2): 1-6.
- [11] 李成业,王万金,吴伟,等. 研究堆乏燃料贮存架抗震计算[J]. 机械设计与制造, 2018(1): 202-204, 208.
LI C Y, WANG W J, WU W, et al. Seismic calculation of spent fuel storage rack for research reactor [J]. Machinery design & manufacture, 2018(1): 202-204, 208.
- [12] 王艳苹,张双旺,弓振邦,等. 反应谱分析方法的刚性模态修正计算和程序开发[J]. 核动力工程, 2011, 32(增刊1): 65-68.
WANG Y P, ZHANG S W, GONG Z B, et al. Rigid mode correction and program development for spectrum analysis [J]. Nuclear power engineering, 2011, 32(S1): 65-68.
- [13] 王和慧,熊志鹏,刘超,等. 基于ASME AG-1规范的核岛主控室暖通风管隔振吊架系统的有限元谱分析及其抗震评定[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2014, 40(3): 394-401.
WANG H H, XIONG Z P, LIU C, et al. Finite element spectrum analysis and seismic evaluation of air conditioning pipe hanger system in nuclear power plant based on ASME AG-1 codes [J]. Journal of East China university of science and technology (natural science edition), 2014, 40(3): 394-401.
- [14] 刘伟,高维成,于广滨. ANSYS 12.0 宝典[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
LIU W, GAO W C, YU G B. ANSYS 12.0 bible [M]. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2010.
- [15] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 大型设备吊装工程施工工艺标准: SH/T 3515—2003[S]. 北京: 中国石化出版社, 2004.
National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Construction standard for large-size equipment hoisting engineering: SH/T 3515—2003 [S]. Beijing: China Petrochemical Press, 2004.
- [16] 中国建筑标准设计研究院有限公司. 国家建筑标准设计图集: 装配式室内管道支吊架的选用与安装: 16CK208[M]. 北京: 中国计划出版社, 2016.
China Institute of Building Standard Design & Research. Drawing collection for national building standard design: selection and installation of assembled indoor pipe support and hanger: 16CK208 [M]. Beijing: China Planning Press, 2016.

Spectrum Analysis and Seismic Evaluation of Support and Hanger of Suspension Air Conditioning Unit

WANG Hehui¹, LIU Yuxin¹, TANG Yi², ZHU Jinlin², PAN Jian²

(1. School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2. Shanghai Installation Engineering Group Co., Ltd., Shanghai 200080, China)

Abstract: Based on the response spectrum analysis method, ANSYS finite element software and its APDL programming, the three-dimensional finite element model that could fully reflect the structural characteristics was established by using the spatial beam element, 3D longitudinal spring damping element and solid element. And the seismic calculation of support and hanger of an air conditioning unit in suspension installation mode was carried out. Considering the static load and OBE seismic load, the static analysis was carried out firstly, and then the modal analysis and multi-point response spectrum analysis of OBE seismic load were carried out. Finally, according to the calculation results of static analysis and spectrum analysis by the square root of sum square method (SRSS method) of the modal combination, based on ASME AG-1 codes, the strength and stiffness of support and hanger were subjected to seismic evaluation. The results showed that with the combination of static load and OBE seismic load, the tensile stress, shear stress, bending stress and tensile-bending combination of the support and hanger were less than the stress limit, and had a wide margin of safety. Most of the displacement of the support and hanger come from the rigid displacement of the whole system caused by the shrinkage of spring dampers, and the rest came from the relative displacement of the channel steel bottom frame, both of which could meet the requirements and have a large safety margin. Expansion bolts at the root of the support and hanger were mainly affected by the tension, and their strength could meet the requirements and the safety margin was large. The evaluation showed that the support and hanger of the suspended air conditioning unit had sufficient seismic strength and stiffness.

Keywords: suspension air conditioning unit; support and hanger; spectrum analysis; ASME AG-1 codes; safety assessment

(上接第 57 页)

Research on Longitudinal High Load-bearing Quasi-zero Stiffness Isolator for Propulsion Shafting

REN Zhiying^{1,2}, QIU Tao^{1,2}, LIU Niuniu^{1,2}, BAI Hongbai^{1,2}, YAO Jiecheng^{1,2}, LIANG Yi^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China; 2. Institute of Metal Rubber, Vibration and Noise, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: Aiming at the problem of longitudinal low-frequency vibration isolation of ship propulsion shafting, a high-load quasi-zero stiffness isolator was designed based on disc spring with negative stiffness characteristics and positive-stiffness coil spring in parallel. The dynamic equation of the shafting-quasi-zero stiffness vibration isolation system was established. Through the harmonic balance method, the steady-state response of the system was solved, and the validity of the solution was verified by numerical calculation. For the problem of system response stability, firstly, the influence of nonlinear stiffness of quasi-zero stiffness isolator and external excitation force amplitude on response stability were studied, and combined with the longitudinal static deformation of the shafting, the nonlinear stiffness was determined. Then the specific structural and mechanical parameters of the disc spring and the coil spring were obtained through static analysis. Finally, the influence of damping ratio of quasi-zero stiffness isolator and external excitation force amplitude on the response stability of the system were analyzed, the damping ratio was determined. The results showed that when the nonlinear stiffness and damping ratio were taken as 1×10^{12} N/m³ and 0.05, respectively, the main resonance of the system no longer jumps, and the solution of the steady-state response of the system was stable within 200 Hz. In the meantime, even with a load of 10 000 N, the quasi-zero stiffness isolator could still effectively isolate the vibration in the range of 10 Hz to 200 Hz.

Keywords: propulsion shafting; low frequency vibration isolation; disc spring; quasi-zero stiffness; stability