

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2026.03.004

基于楼面反应谱的化工设备耦联体系中化工设备地震响应分析

代建波¹, 何绍坤¹, 王赵诚¹, 康灵果²

(1. 西安石油大学 管道工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 华陆科技有限责任公司土建室, 陕西 西安 710054)

摘要: 为研究石化生产装置中结构-设备耦联体系的地震响应特性,以某丙烷脱氢装置为背景,建立了单独设备、装置结构及耦联体系模型。基于 Abaqus 2022,选取 20 组地震动进行时程分析,提取设备支撑处楼层加速度,构建不同阻尼条件下的均值等效阻尼比楼面反应谱,并以其为输入开展设备地震响应分析。结果表明:耦联体系阻尼比越大,对设备层地震响应的放大作用越弱。时程分析所得反应器支座等效应力峰值为 56.38 MPa,剪力峰值为 28.5 kN;均值等效阻尼比楼面反应谱法所得等效应力峰值为 63.71 MPa,剪力峰值为 35.48 kN,二者结果接近。该方法能较好表征耦联体系中化工设备的地震响应特征,可为同类设备抗震设计提供参考。

关键词: 化工设备结构;耦联体系;楼面反应谱;地震响应

中图分类号: TE88

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)03-0026-09

Seismic Response Analysis of Chemical Equipment within Coupled Structural Systems: A Floor Response Spectrum Approach

DAI Jianbo¹, HE Shaokun¹, WANG Zhaocheng¹, KANG Lingguo²

(1. School of Pipeline Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China;

2. Civil Engineering Department, Hualu Engineering & Technology Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: To investigate the seismic response characteristics of chemical equipment in a structure-equipment coupled system within a petrochemical production facility, a propane dehydrogenation unit was taken as the engineering background. Separate models of the chemical equipment, the supporting structure, and the structure-equipment coupled system were established. In Abaqus 2022, time-history analyses were conducted using 20 ground-motion records. The floor acceleration responses at the equipment supports were extracted to construct mean equivalent damping ratio floor response spectra under different damping conditions. These spectra were then used as input for seismic response analysis of the chemical equipment. The results show that, for a given natural vibration period, a higher damping ratio in the coupled system results in weaker amplification of the equipment floor's seismic response. The peak equivalent stress at the reactor support, obtained from time-history analysis, is 56.38 MPa, and the peak shear force is 28.5 kN. Using the mean equivalent damping ratio floor response spectrum method, the peak equivalent stress is 63.71 MPa, and the peak shear force is 35.48 kN. The two results are in good agreement. This indicates that the mean equivalent damping ratio floor response spectrum, derived from floor accelerations at the equipment supports, can effectively characterize the seismic response of chemical equipment in the coupled system, providing a reference for the seismic analysis and design of similar equipment.

Keywords: petrochemical production plant structure; coupled system; floor response spectrum; seismic response

收稿日期:2025-12-11

修稿日期:2026-03-19

基金项目:陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目(2023KXJ-194)

作者简介:代建波(1983—),男,博士,副教授,主要从事化工装置抗震性能方面的研究工作。E-mail:xasydxjdb@163.com

近年来,随着工业建筑规模不断扩大、工艺系统日趋复杂,结构体系与设备布置的复杂性明显增加,地震作用下整体系统的抗震性能问题也日益突出。石化生产装置通常属于典型的结构-设备耦联体系,其内部动力相互作用显著,动力特性与地震响应较为复杂。因此,有必要对石化装置中重大设备的抗震性能开展合理分析与设计^[1-2]。

楼面反应谱法是评估工业建筑中非结构构件与设备地震响应的常用方法之一^[3]。该方法最初源于核电站设备特殊的抗震需求^[4],其发展大致可分为两个阶段:经典的楼面反应谱方法与基于主次结构耦联作用的楼面反应谱法^[5]。经典的楼面反应谱法理论相对成熟,计算过程直接,一般通过对主体结构进行时程分析,提取特定楼层处的地震响应并据此生成楼面反应谱;而基于主次结构耦联作用的楼面反应谱法,进一步考虑了主、次结构之间的动力相互作用,频率调谐效应与非经典阻尼等复杂特性,在理论上具有更高的精度。不少学者对楼面反应谱的理论模型进行了改进与完善,Shang等^[6]在 Vukobratović等^[7]研究的基础上,从放大因子(Amplification Factor, AMP)的定义和振型组合方式两个方面对楼面谱计算公式进行了优化。Wei等^[8]与 Bo等^[9]基于杜哈梅积分(Duhamel's integral),推导了线弹性状态下多自由度结构的楼面反应谱闭合表达式。此外,亦有研究通过引入折减系数(Reduction Factor, RF)对结构的非线性行为进行近似处理^[10]。Giammaria等^[11]通过对意大利高地震区一座建筑结构的非结构构件进行了非线性时程分析,估算了峰值楼层加速度、层间位移、绝对加速度和相对位移的楼面响应谱。王健泽等^[12]以某高架式钢储仓结构为研究对象,选择18组与设计反应谱匹配的地震动为输入,对两类模型开展弹性、弹塑性时程分析与增量动力分析,得到结构的动力响应及储仓支承楼层的线性与非线性楼面反应谱。

为研究耦联体系中非结构构件的地震响应特性,不少学者通过振动台试验对非结构构件的地震响应开展了系统性实证分析。蒋贵华等^[13]通过模拟浮放设备进行抗震性能试验,结果显示楼层越高,吊顶系统和浮放设备在地震中更易受损。滕睿等^[14]开发了一种基于楼面谱加速度波形再现的外环迭代控制器,结合振动台离线迭代控制,构建了双层离线迭代控制架构,以减小非结构构件边界模拟装置动力特性的干扰。沈望震等^[15]基于振动台试验数据,分别采用弹性模型与弹塑性模型进行对比

分析,结果表明,弹塑性模型所得的楼面反应谱更符合实际情况,体现了考虑结构非线性响应的重要性。已有文献多基于线弹性分析考虑结构与小质量比设备相互作用下的楼面反应谱,对大质量比设备的楼面反应谱鲜有讨论。

基于此,本文以某大型丙烷脱氢石化生产装置结构-设备耦联体系为对象开展研究,在此基础上,对耦联体系进行动力特性分析,选取20组地震动作为输入,提取设备支撑处楼层加速度响应,建立均值等效阻尼比楼面反应谱,并与耦联模型时程分析结果进行对比,以验证该方法用于石化耦联体系中化工设备抗震设计的合理性。

1 化工设备耦联体系动力特性分析

1.1 工程概况

以某石化生产装置丙烷脱氢化工设备框架为背景,其结构形式为上部钢框架结构下部钢筋混凝土框架结构。装置框架结构平面图与立面图如图1所示。该生产装置结构平面总体尺寸为47.5 m × 15 m,横向为6跨,纵向为2跨。钢筋混凝土框架顶标高为30 m,钢框架顶标高为49.5 m,结构层数为9层,总质量为2 483.44 t。柱截面尺寸为0.8 m × 0.8 m~0.9 m × 0.9 m,框架梁截面为0.25 m × 0.5 m~0.8 m × 1.6 m。该化工设备采用双塔设计,即装置框架结构中有两个丙烷脱氢化工设备,其中较大的化工设备高为29.798 m,直径4.3 m,质量为600 t;较小的化工设备高为29.94 m,直径3.8 m,质量为500 t。化工设备总质量占整体耦联体系结构质量的30.7%。楼层支撑处地脚螺栓到塔顶的高度为19.500 m,丙烷脱氢化工设备通过48根M56 × 5.5 mm地脚螺栓与钢筋混凝土框架顶连接,该装置所在场地地震设防烈度为8度,设计地震加速度为0.2g,场地类别为III类,地震分组为第二组。

1.2 数值模型建立

为研究结构-设备耦联体系动力特性,本文分别对化工设备、大型石化生产装置结构、大型石化生产装置结构-设备耦联系统进行建模。有限元模型如图2所示。该耦联体系由混凝土、钢筋、钢材等多种材料组成,包括矩形梁柱、箱形和工字形钢梁柱、反应器设备等多种类型的构件,其受力方式及力学特性各异。在建模过程中,采用不同单元进行模拟分析。模型单元类型选取如表1所示,材料参数如表2所示。在Abaqus中,装置结构中的钢柱、钢梁及钢支撑采用三维可变形线体进行建模,并采用

B31 梁单元模拟;钢筋混凝土(可用 RC 表示)框架柱及框架梁采用三维实体建模,混凝土部分采用 C3D8R 八节点缩减积分实体单元;梁柱内部钢筋采

用 T3D2 桁架单元进行离散模拟;反应器设备采用三维壳体建模,并采用 S4R 四节点缩减积分壳单元模拟。

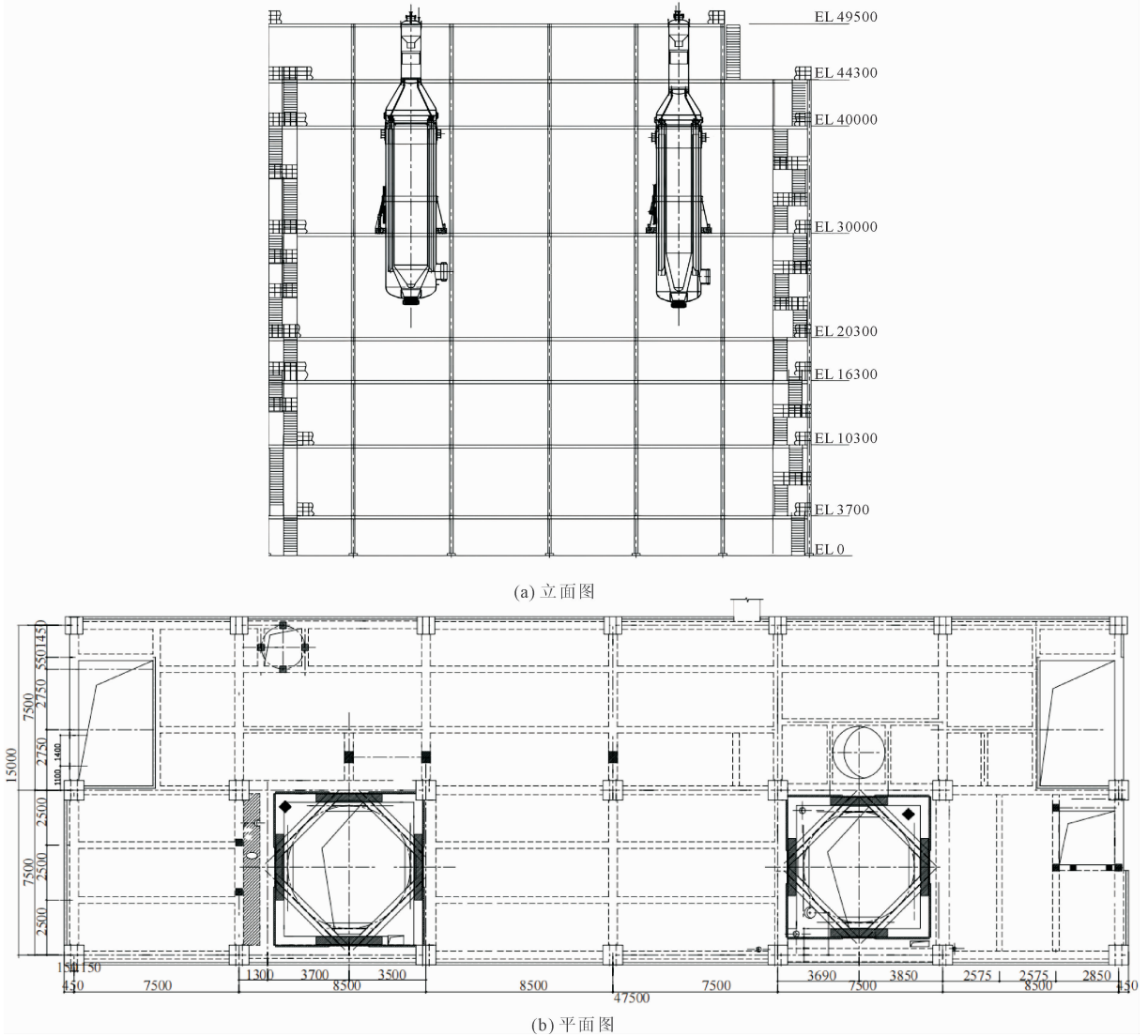


图 1 装置框架结构图

表 1 单元类型

单元序号	单元类型	模拟对象
1	Beam-B31	H 型钢
2	Soild-C3D8R	混凝土柱及梁
3	Truss-T3D2	钢筋
4	Shell-S4R	反应器

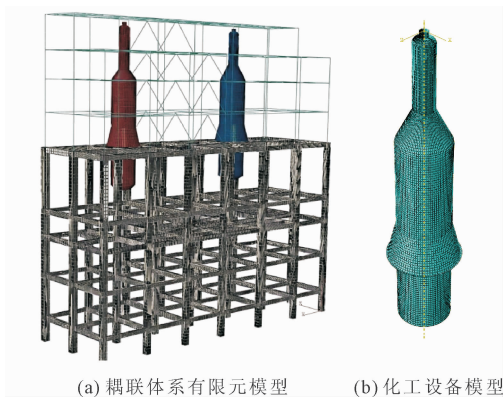


图 2 化工设备结构-设备耦合体系有限元模型

鉴于主要开展结构-设备耦合体系动力特性分析,楼面反应谱建立及地震响应对比分析,各类材料均采用线弹性本构模型。其中,混凝土采用各向同性线弹性本构,钢柱、钢梁及钢支撑采用各向同性线弹性钢材本构,钢筋采用线弹性本构,反应器设备所用 Q345B 钢材亦采用线弹性本构。

表 2 各构件材料参数

构件	材料	质量密度 / (kg · m ⁻³)	弹性模量 /MPa	泊松比	屈服强度 /MPa
框架柱、框架梁	C40	2500	3.25 × 10 ¹⁰	0.2	40
钢柱、钢梁、钢支撑	Q235B	7850	2.05 × 10 ¹¹	0.3	235
钢筋	HPB300	7800	2.00 × 10 ¹¹	0.3	300
	HPB400	7800	2.10 × 10 ¹¹	0.3	400
反应器设备	Q345B	7800	2.00 × 10 ¹¹	0.3	345

1.3 动力特性分析

通过分析化工生产装置结构-设备耦联体系的动力特性,可找到最优结构和设备组合方式。生产装置结构-设备耦联体系模型前 20 阶模态的频率与周期如表 3 所示,振型图如图 3 所示,限于篇幅仅显示 1—6、15—20 阶模态。

由表 3 可知,石化生产装置结构-设备耦联体系前 20 阶模态振型中,第 1 阶模态振型频率最小,

表 3 石化生产装置结构-设备耦联体系前 20 阶模态的频率与周期

阶数	特征值	频率/Hz	周期/s	最大位移/mm	阶数	特征值	频率/Hz	周期/s	最大位移/mm
1	42.872	1.0421	0.9596	0.942	11	355.01	2.9988	0.3335	0.068
2	67.275	1.3054	0.7660	0.077	12	381.58	3.1089	0.3217	0.028
3	75.729	1.3850	0.7220	0.114	13	396.07	3.1674	0.3157	0.024
4	151.17	1.9568	0.5110	0.417	14	459.72	3.4125	0.2930	3.171
5	202.67	2.2658	0.4413	0.074	15	484.98	3.5050	0.2853	5.978
6	238.40	2.4574	0.4069	0.080	16	526.30	3.6512	0.2739	0.615
7	255.57	2.5443	0.3930	0.107	17	543.80	3.7114	0.2694	2.661
8	268.73	2.6090	0.3833	0.969	18	560.19	3.7669	0.2655	0.704
9	297.27	2.7441	0.3644	0.457	19	576.87	3.8226	0.2616	0.063
10	311.38	2.8085	0.3561	0.680	20	588.77	3.8616	0.2590	0.444

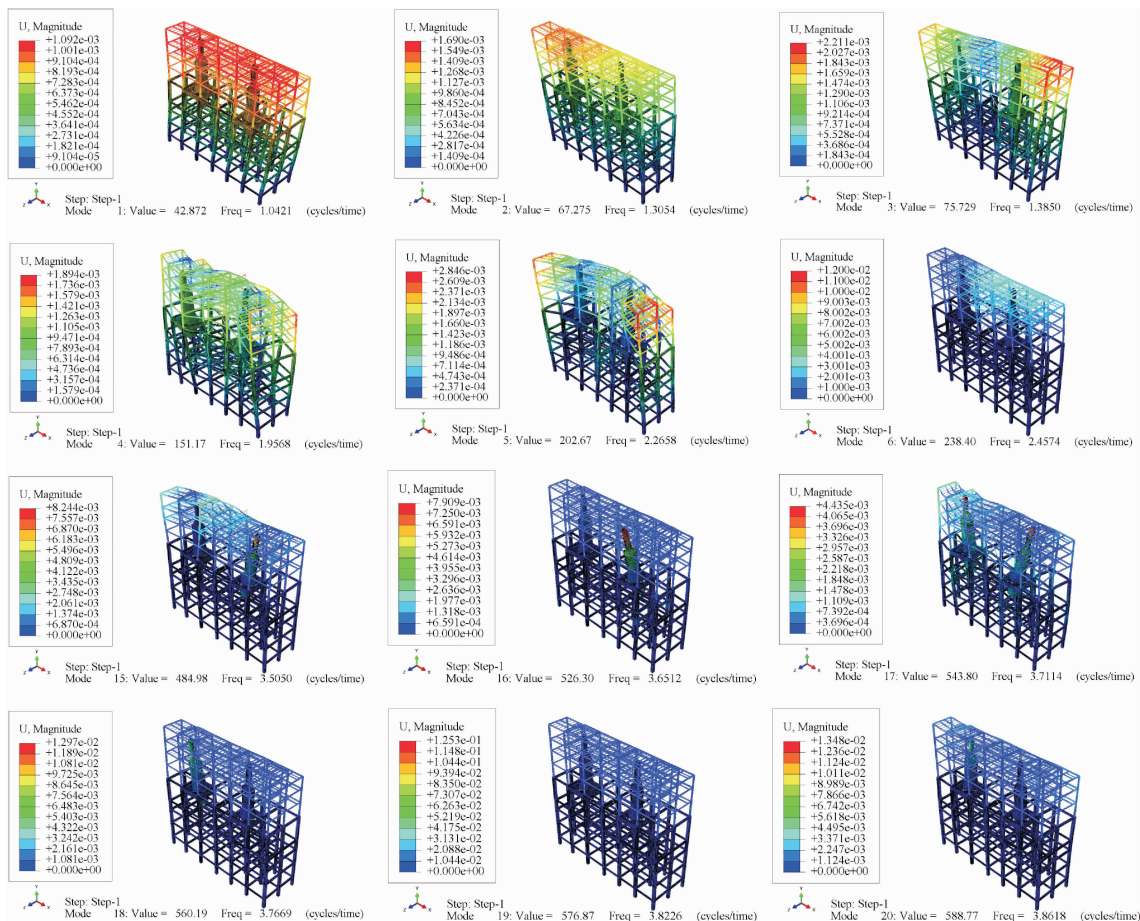


图 3 石化生产装置结构-设备耦联体系部分阶振型图

为 1.0421 Hz; 第 20 阶模态振型的频率最大, 达 3.8616 Hz。模态振型频率整体随模态阶数的增加而持续增大, 这可能是由于结构的刚度增加导致的。石化生产装置结构-设备耦联体系周期均在 0.2 ~ 1.0 s 范围内波动, 由于不同模态下结构的质量分布不同, 导致振动时间的差异。第 1 阶模态对应的周期最大, 为 0.9896 s; 第 20 阶模态对应的周期最小, 仅 0.2590 s。

形变位移特性分析表明, 第 14 ~ 15 阶模态振型的形变位移最大, 为 5.978 mm, 这一特征是由于该区间模态频率与结构固有频率相似, 导致共振现象, 使得结构形变位移显著增加; 第 13 阶模态振型形变位移最小, 为 0.024 mm。图 3 为耦联体系前 20 阶振型图, 分析可知, 第 1 阶至第 9 阶模态下耦联体系的最大位移形变位置均在结构上半部分, 是由于结构上半部分刚度较大, 导致振动能量主要集中在上半部分。第 10 阶至第 20 阶模态中耦联体系最大位移形变位置为丙烷脱氢化工设备和结构的支撑处, 其原因为结构的刚度变化较大, 振动能量优先集中在支撑处, 引发局部形变放大, 表明耦联体系中结构和设备之间具有强烈的动力相互作用, 在进行此类装置结构-设备耦联体系的抗震设计时, 不能忽略结构和设备之间的相互影响。

2 楼面反应谱建立及地震动选取

2.1 楼面反应谱建立

楼面反应谱的建立过程及原理如下, 假设在水平地震作用下, 一个单质点体系的运动方程为:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = -m\ddot{x}_g(t) \quad (1)$$

式中: m 为质点质量; c 为耦联体系的阻尼系数; k 为耦联体系的刚度系数; \ddot{x} 为质点相对加速度; \dot{x} 为质点相对速度; x 为质点相对位移; \ddot{x}_g 为地面加速度。

根据单质点体系受迫振动理论, 应用杜哈梅积分可得到质点的位移, 并对其进行两次微分, 可得到质点的绝对加速度表达式为:

$$\ddot{x}(t) + \ddot{x}_g(t) = \frac{\omega^2}{\omega_d} \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) \exp[-\xi\omega(t-\tau)] \times \sin[\omega_d(t-\tau) + 2\alpha] d\tau \quad (2)$$

式中: ω 为体系无阻尼圆频率; ω_d 为有阻尼圆频率, $\omega_d = \sqrt{1-\xi^2}\omega$; ξ 为阻尼比; $\alpha = \arctan\left(\frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}\right)$, 于是式(2)可简化为:

$$\ddot{x}(t) + \ddot{x}_g(t) = \omega \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) \exp[-\xi\omega(t-\tau)] \times \sin[\omega(t-\tau)] d\tau \quad (3)$$

加速度反应谱则定义为不同振动圆频率 ω 下质点加速度的峰值 $|\dot{x}(t) + \ddot{x}_g(t)|_{\max}$, 表达式为:

$$S_a = |\dot{x}(t) + \ddot{x}_g(t)|_{\max} = \left| \omega \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) \exp[-\xi\omega(t-\tau)] \sin[\omega(t-\tau)] d\tau \right|_{\max} \quad (4)$$

式中: S_a 为设备支撑处楼面加速度反应谱值。

同时, 质点的动力放大系数 β 为:

$$\beta = \frac{S_a}{|\ddot{x}_g(t)|_{\max}} \quad (5)$$

反应谱体现了单自由度体系在地震作用下的最大反应与体系频率和阻尼的函数关系^[16]。按照反应谱定义, 设备层楼面反应谱需将式(5)中的水平地震加速度时程 \ddot{x}_g 用楼面加速度时程 \ddot{x}_F 代替。

2.2 地震动选取

为确保时程分析所得楼面加速度响应结果可靠, 需选取足量典型地震动记录。本文将根据大型石化生产装置结构-设备耦联体系的基本参数、设防烈度、地震分组、场地类别等主要参数, 以《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010) 规定的设计反应谱为目标谱, 通过目标谱在 PEER-NGA 网站上选取 20 条地震动, 选取的 20 条地震动信息如表 4 所示。选择的地震动震级 $M_w 5.2 \sim 7.36$, 震中距 R_{rup} 为 20 ~ 60 km, 且 30 m 深剪切波速与所选工程所在场地条件相近。选取地震动与目标谱的匹配情况如图 4 所示。

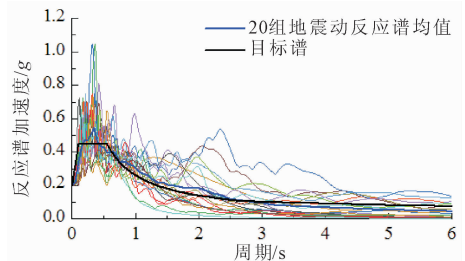


图 4 20 条地震动反应谱均值与目标谱对比

3 化工设备支撑处楼面反应谱计算

3.1 化工设备支撑处楼层加速度均值反应谱

输入 20 组选取的地震波, 进行装置结构-设备耦联体系时程分析, 在设备支撑处采集加速度时程曲线如图 5 所示。20 组时程曲线图中设备支撑处最小加速度峰值为 0.3g, 最大加速度峰值为 0.65g。结果表明化工设备结构与设备在地震作用下会产生相互影响。这种耦联效应导致反应器在地震波作用下对其支撑楼层结构的加速度响应形成明显放大效应, 易引发设备结构损伤甚至失效。

表4 地震动信息

数目	地震动名称	年份	站台名称	M _w	R _{rup} /km	V _{s30} /(m·s ⁻¹)
1	Imperial Valley-02	1940	El Centro Array #9	6.95	6.09	213.44
2	Imperial Valley-03	1951	El Centro Array #9	5.60	25.24	213.44
3	Kern County	1952	Taft Lincoln School	7.36	38.89	385.43
4	Northern Calif-02	1952	Ferndale City Hall	5.20	43.28	219.31
5	El Alamo	1956	El Centro Array #9	6.80	121.70	213.44
6	Borrego Mtn	1968	El Centro Array #9	6.63	45.66	213.44
7	Lytle Creek	1970	Wrightwood -6074 Park Dr	5.33	12.14	486.00
8	San Fernando	1971	Bakersfield -Harvey Aud	6.61	113.02	241.41
9	San Fernando	1971	Borrego Springs Fire Sta	6.61	214.32	338.54
10	San Fernando	1971	Isabella Dam (Aux Abut)	6.61	130.98	591.00
11	San Fernando	1971	Maricopa Array #1	6.61	193.91	303.79
12	San Fernando	1971	Maricopa Array #3	6.61	110.18	441.25
13	San Fernando	1971	Palmdale Fire Station	6.61	28.99	452.86
14	San Fernando	1971	Pasadena -CIT Athenaeum	6.61	25.47	415.13
15	San Fernando	1971	Port Hueneme	6.61	68.84	248.98
16	San Fernando	1971	Puddingstone Dam (Abutment)	6.61	52.64	421.44
17	San Fernando	1971	San Diego Gas & Electric	6.61	205.77	354.06
18	San Fernando	1971	San Juan Capistrano	6.61	108.01	459.37
19	San Fernando	1971	San Onofre -So Cal Edison	6.61	124.79	442.88
20	Point Mugu	1973	Port Hueneme	5.65	17.71	248.98

本文基于20组设备支撑处楼层加速度时程曲线并利用上文中楼层反应谱建立方法分别得到20组设备支撑处楼面加速度反应谱,再根据求得的20组设备支撑处楼面加速度反应谱分别拟合出阻尼比为0.02、0.05、0.07、0.10设备支撑处楼面加速度均值反应谱,如图6所示。

由于不同阻尼比下的反应谱形状和峰值存在差异,若采用不同阻尼比的反应谱进行比较,会引起误判。为比较不同结构物的抗震性能,需引入等效阻尼比的概念。等效阻尼比是指在不同阻尼比下,使得某一特定结构物在地震作用下产生相同反应的阻尼比^[17]。将不同阻尼比的反应谱转换成等效阻尼比反应谱,可实现不同阻尼比反应谱之间的比较,从而评估结构物的抗震性能。均值等效阻尼比楼面反应谱的建立过程和原理如下:

$$A_e(i) = A_a(i) \times \left(1 + \frac{2\xi_{ei}}{\omega_i} \cdot \frac{\xi_{ei} - \xi_{ai}}{\xi_{ai}} \right) \quad (6)$$

式中: $A_e(i)$ 为修正后的等效阻尼比反应谱; $A_a(i)$ 为原始楼面反应谱; ξ_{ei} 为目标等效阻尼比; ξ_{ai} 为实际结构的阻尼比; ω_i 为频率。

因此,本文采用等效阻尼比峰值法分别对阻尼比为0.02、0.05、0.07、0.10楼面加速度反应谱进行

计算并转换,分别得到等效阻尼比为0.01、0.025、0.035、0.05楼面加速度反应谱,并基于各阻尼比下楼层加速度反应谱拟合出均值等效阻尼比反应谱,如图7所示。不同等效阻尼比的楼面加速度均值反应谱曲线呈相似规律,均在0~1s内出现最大值,随着时间周期的推移,谱加速度也随之减小,且同一周期下,阻尼越小,设备支撑处的均值谱加速度值越大,这符合反应谱的一般规律。

3.2 化工设备支撑处楼层均值反应谱放大系数分析

楼面加速度反应谱放大系数 β 是指楼面绝对加速度峰值与楼面时程加速度峰值之比。该系数反映了主体结构对地震动的放大效应。不同等效阻尼比谱加速度放大系数曲线如图8所示。不同等效阻尼比设备支撑处楼层加速度均值反应谱放大系数曲线形状基本相似,各曲线峰值对应的时间周期均为1s,频率为1Hz,表明不同等效阻尼比下,结构在地震作用下的振动响应具有相似的频率和周期,且大型石化生产装置结构-设备耦联体系的阻尼比愈大,等效阻尼比谱加速度放大系数越小,其耗能作用愈强,结构振动幅度愈小,结构对设备的影响也愈小。

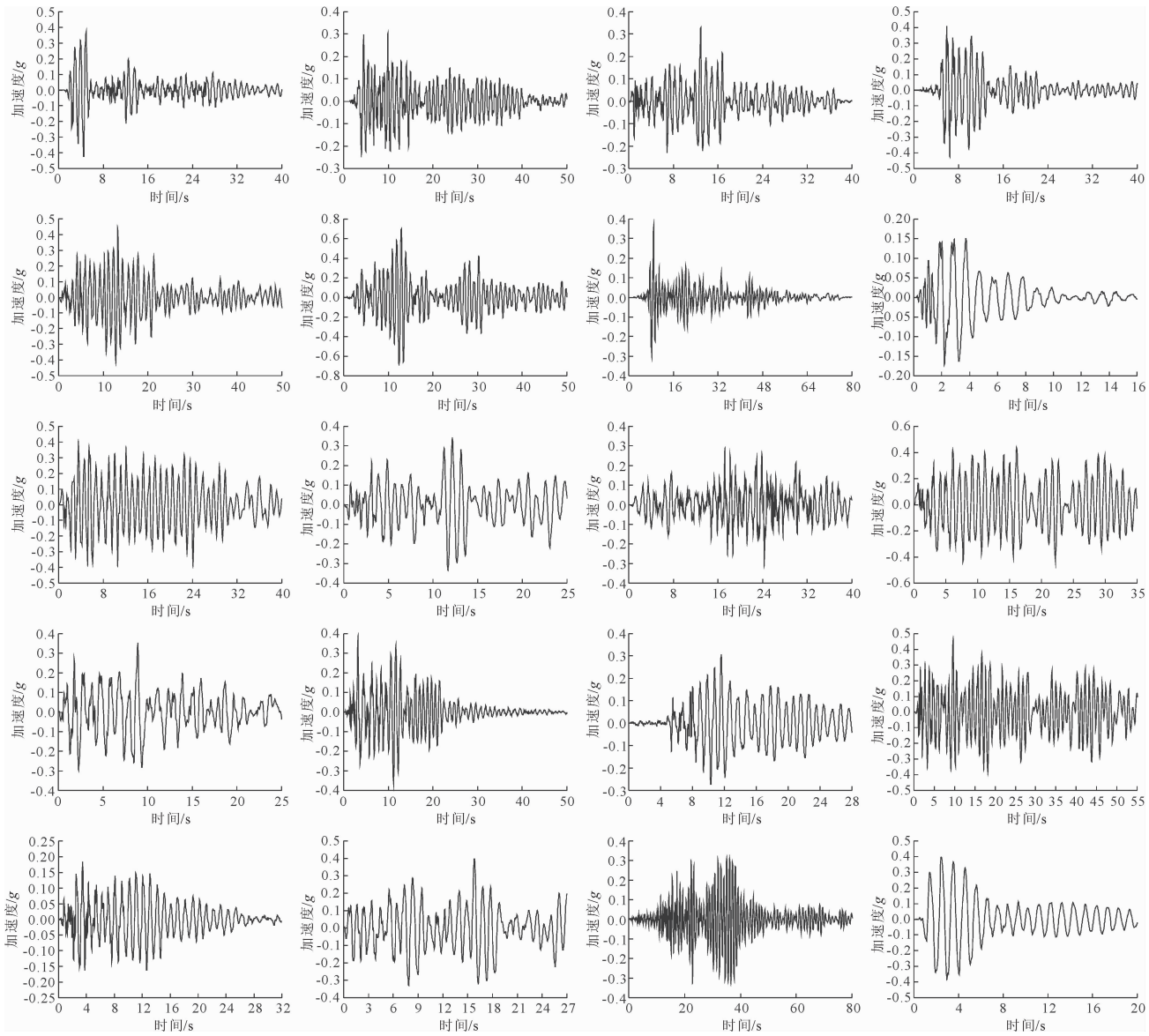


图 5 20 组地震波激励下设备支撑处加速度时程

4 化工设备地震响应验算

4.1 应力验算

耦联体系基于地震时程分析得到的装置框架及设备等效应力云图如图 9 所示,化工设备基于均值等效阻尼比楼面反应谱分析得到的等效应力云图如图 10 所示,化工设备沿竖向高度分布的壳单元应力均值如图 11 所示。监测点距反应塔底部 6 m 以下,通过均值等效阻尼比楼面反应谱分析获取的反应塔等效应力值与结构-设备耦联体系经时程分析得到的化工设备应力值差异较小,其差值范围稳定在 0~10 MPa。监测点距反应器底部 7 m 时,耦联体系中化工设备的应力值,与通过均值等效阻尼比楼面反应谱分析获取的化工设备等效应力值,二者均出现了显著的突变现象。耦联体系中化工设备的等效

应力峰值为 56.38 MPa,化工设备等效应力峰值为 63.71 MPa,其原因为距化工设备底部 7 m 处为化工设备与石化生产装置结构的连接处,地震作用下二者产生相互作用力,引发应力叠加,导致结构损伤破坏、反应塔快速进入塑性状态。随着监测点距化工设备底部距离增加,相互作用逐渐减弱,至监测点距化工设备底部的距离为 18 m 时,耦联体系中化工设备应力值和单独化工设备的等效应力值最小。当监测点的距底部高度为 21 m 时,应力值出现第二次峰值,其原因为此处反应塔壁厚发生变化,进而造成应力突变。

4.2 剪力验算

提取耦联体系中化工设备经时程分析得到的支撑处最大剪力值,并与均值等效阻尼比楼面反应谱法计算的化工设备支撑处最大剪力值进行对比,结

果如图 12 所示。耦联体系中计算得到的化工设备支座最大剪力值为 28.5 kN,均值等效阻尼比楼面反应谱计算得到的最大剪力值为 35.48 kN,两者相

差 6.98 kN,误差较小。综上,采用均值等效阻尼比楼面反应谱法进行反应塔抗震设计具备合理性。

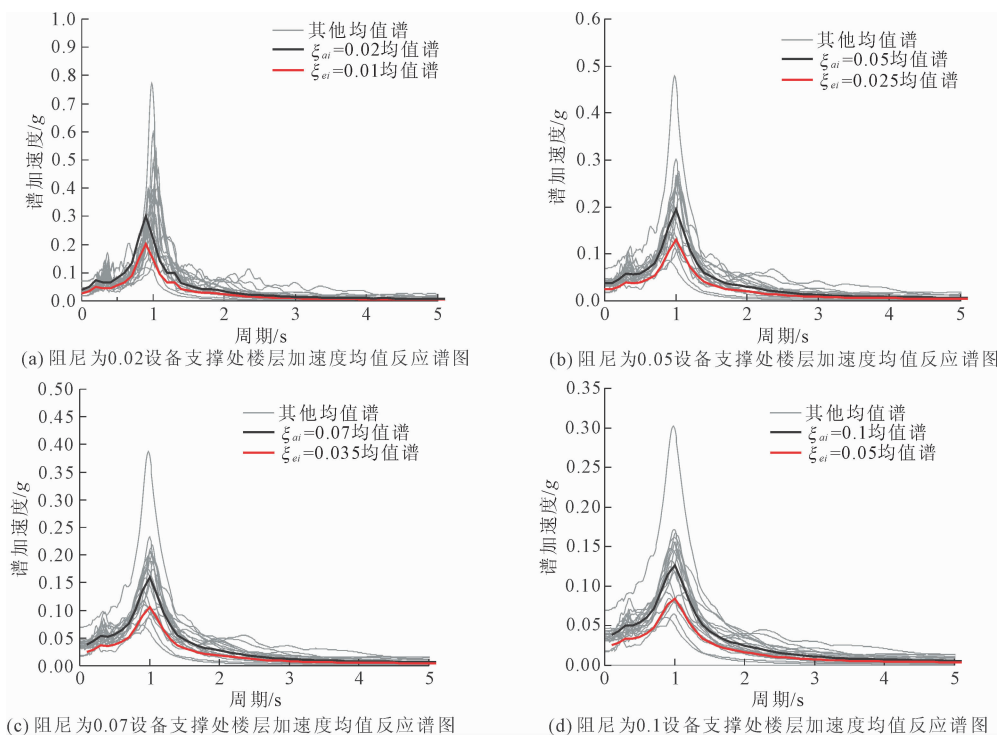


图 6 20 组地震波激励下不同阻尼、等效阻尼比设备支撑处楼层加速度均值反应谱

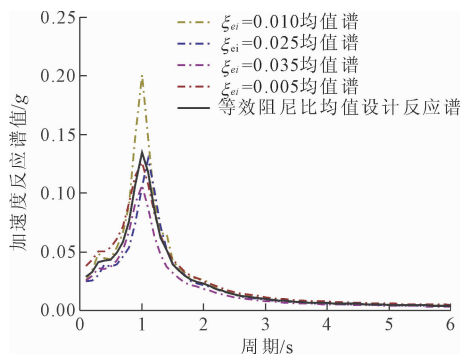


图 7 等效阻尼比设备支撑处楼层加速度均值反应谱

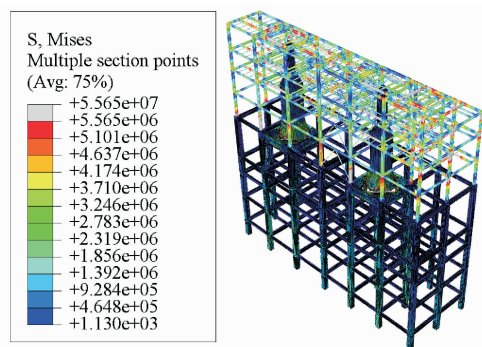


图 9 耦联体系基于地震时程分析得到的装置框架及设备的等效应力云图

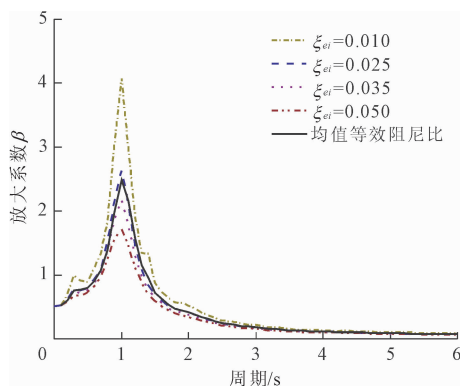


图 8 等效阻尼比谱加速度放大系数曲线图中文字简化

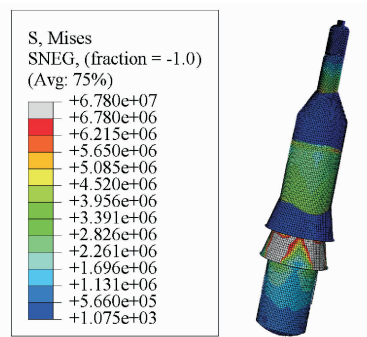


图 10 单独化工设备基于均值等效阻尼比楼面反应谱分析得到的等效应力云图

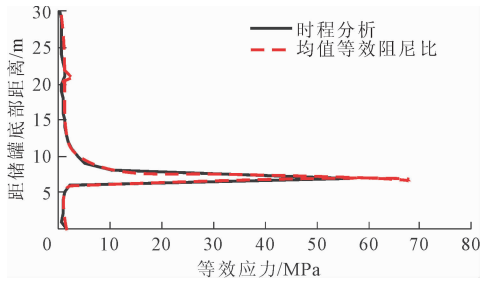


图 11 化工设备沿竖向高度应力分布

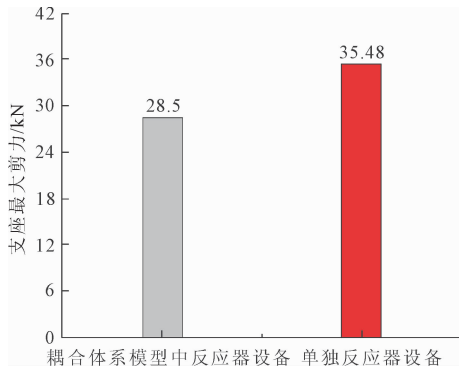


图 12 反应器支撑处最大剪力图

5 结论

(1) 大型石化生产装置结构-设备耦联体系中存在显著动力相互作用,最大位移主要出现在结构上部及设备-结构支撑连接区域。抗震设计中应考虑结构振动对设备地震响应的放大作用。

(2) 阻尼比与刚度分布对耦联体系地震响应影响显著。在相同自振周期下,阻尼比增大可降低结构振动幅值及设备支撑层响应放大效应;设备厚度或截面突变位置易产生应力集中,设计中应重视阻尼参数选取及竖向刚度均匀性控制。

(3) 均值等效阻尼比楼面反应谱与耦联体系时程分析所得设备响应规律总体一致,能够较好表征化工设备地震响应特征。

参考文献:

[1] Nguyen D D, Thusa B, Park H, et al. Efficiency of various structural modeling schemes on evaluating seismic performance and fragility of APRI400 containment building[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2021, 53(08):2696-2707.

[2] Tran T T, Cao A T, Kim D. Fragility assessment for electric cabinet in nuclear power plant using response surface methodology[J]. Nuclear Engineering and Technol-

gy, 2019, 51(03):894-903.

- [3] 韩 森,刘洋博,杜红凯,等. 非结构构件抗震性能研究进展[J]. 建筑结构,2020,50(S2):270-277.
- [4] 路立娜,朱秀云. 采用基底隔震核电站厂房的楼层反应谱分析[J]. 工程抗震与加固改造,2017,39(02):105-110.
- [5] 张建霖. 主次结构相互耦合下的楼层反应谱计算[J]. 厦门大学学报(自然科学版),2003,42(03):326-330.
- [6] Shang Qingxue, Li Jichao, Wang Tao. Floor acceleration response spectra of elastic reinforced concrete frames[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 45:103558.
- [7] Vukobratović V, Fajfar P. Code-oriented floor acceleration spectra for building structures[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2017, 15(07):3013-3026.
- [8] Jiang Wei, Li Bo, Xie Weichau, et al. Generate floor response spectra: Part 1. Direct spectra - to spectra method[J]. Nuclear Engineering and Design, 2015, 293:525-546.
- [9] Li Bo, Jiang Wei, Xie Weichau, et al. Generate floor response spectra, Part 2: Response spectra for equipment - structure resonance[J]. Nuclear Engineering and Design, 2015, 293:547-560.
- [10] Petrone C, Magliulo G, Manfredi G. Seismic demand on light acceleration-sensitive nonstructural components in European reinforced concrete buildings[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2015, 44(08):1203-1217.
- [11] Gabbianelli G, Perrone D, Brunesi E, et al. Seismic acceleration and displacement demand profiles of non-structural elements in hospital buildings[J]. Buildings, 2020, 10(12):243.
- [12] 王健泽,周裕洲,戴靠山,等. 含重型储仓设备结构的楼面反应谱分析与储仓设备的抗震设计[J]. 工业建筑,2023, 53(07):84-92,108.
- [13] 蒋贵华,李 杨,江 锁,等. 高层建筑中非结构构件的抗震性能试验[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(02):701-706.
- [14] 滕 睿,徐国贤,张锡朋,等. 非结构构件振动台试验楼面响应谱再现技术研究[J]. 结构工程师,2018, 34(S1):115-121.
- [15] 沈望霞,李忠诚. 核电站混凝土结构弹塑性地震楼面响应谱分析[J]. 工业建筑,2014,44(05):61-64.
- [16] 阙仁波. 反应谱性质及其与地震危险性分析的逻辑关联性探析[J]. 安徽建筑,2022,29(08):49-51.
- [17] 周 云,韩宇娟,商城豪,等. 消能减震结构阻尼器有效刚度及结构等效阻尼比取值方法研究[J]. 建筑结构,2022, 52(05):43-47.