文章编号:1000-1301(2018)04-0048-06 DOI:10.13197/j.eeev.2018.04.48.quz.008

结构-设备相互作用对某工业厂房地震反应的影响

曲 哲[1], 裴永忠[2], 李戚齐[1], 宋前恩[2], 王 亮[2]
(1. 中国地震局 工程力学研究所,中国地震局地震工程与工程振动重点实验室,河北 三河 065201;
2. 中国航空规划设计研究总院有限公司, 北京 100120)

摘 要:工业建筑中的设备往往体量大,重量大,可能对主体结构的动力特性产生明显的影响,从而影响结构的抗震性能。本文以某包含五组大型风管设备的屈曲约束支撑钢筋混凝土框架结构工业厂房为研究对象,分析结构-设备耦联体系在罕遇地震作用下的地震反应分析。为此,采用各向异性的壳单元模拟风管保温板,并与钢结构骨架一起形成风管的有限元模型。为考察风管对主体结构地震反应的影响,比较了仅有主体结构、将风管设备按等效质量考虑的主体结构和结构-设备耦联体系等三个模型的最大地震反应。分析结果表明,对于本文算例,在线弹性和弹塑性分析中,结构-设备相互作用都会对主体结构的最大反应产生明显的影响,但是影响规律比较复杂,尚有待进一步深入分析。

关键词:钢筋混凝土框架;风管;非结构构件;夹芯保温板;自攻钉
中图分类号:TU318; TU83 **文献标志码**:A

Effects of structure-equipment interaction on the seismic response of an industrial building

QU Zhe[1], PEI Yongzhong[2], LI Qiqi[1], SONG Qianen[2], WANG Liang[2]
1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, CEA, Sanhe 065201, China;
2. China Aviation Planning and Design Institute (Group) Co. Ltd., Beijing 100120, China)

Abstract: Large scale and heavy equipment in industrial buildings may have considerable effect on the dynamic properties of the structure, and thus may influence the seismic performance of the building. The seismic response of a buckling restrained reinforced concrete building which hosts five units of large scale air ducts is analyzed by a model that considers the structure-equipment interaction. An orthotropic elastic material is developed to use in shell elements for the simulation of the composite panels in the air ducts. Three models of different approaches in modelling the equipment are established and the corresponding results are compared to investigate the effects of structure-equipment interaction. The results show that the structure-equipment interaction has considerable effects on the peak responses of the primary structure in both linear elastic and nonlinear analyses, whereas the influence is complicated and deserves further investigation.

Key words: reinforced concrete frame; air duct; nonstructural component; sandwich panel; self-tapping screw

引言

工业建筑中经常会布置大量设备和管线以实现特定的生产功能。这些设备和管线往往占据了建筑的主

收稿日期:2018-03-06; **修订日期**:2018-05-09
基金项目:中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2016A05)
Supported by: Fundamental Research Funds of Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration(2016A05)
作者简介:曲 哲(1983-),男,研究员,博士,主要从事建筑地震损伤控制研究. E-mail:quz@iem.ac.cn

要空间,具有较大的质量且动力特性比较复杂。在动力荷载作用下,工业建筑主体结构与设备、管线之间会发生复杂的相互作用,对建筑的安全、舒适度以及设备、管线的正常工作两个方面都会产生影响。此处,动力荷载一方面可能来自于发电机、风机等设备运转时产生的振动。当设备运转产生的动力荷载的频率与结构的局部构件,如楼板的自振频率,或结构整体的自振频率相近时,可能引发结构共振,影响建筑舒适度,甚至可能带来安全隐患。另一方面可能来自风、地震等外部动力作用。特别是在地震作用下,设备、管线作为一个动力系统,受到楼面振动的激励而发生振动,其振动会与主体结构自身的振动耦合。以往关于发电机等设备的研究往往只关注主体结构的振动对设备正常运转的影响,但当设备或管线的质量较大时,其振动也会对结构的地震反应产生不可忽视影响。对于质量较大的设备、管线等非结构构件,我国抗震规范要求在结构设计时计入其重力,即将其视为附加质量参与结构的抗震设计。然而,当设备、管线较柔时,其动力反应会与主体结构的动力反应发生耦合,该耦联体系的整体的动力反应可能既不等同于主体结构自身的地震反应,也不等同于将非结构构件视为附加质量时的结构地震反应。

本文以某工业建筑为对象,建立包括其内部的大型风管在内的整体建筑的有限元模型,并对其进行弹塑性地震反应分析,重点考察弹塑性反应中主体结构与风管两部分各自的反应特征以及二者之间的动力相互作用。

1　某工业建筑概况及其主体结构的数值模型

研究对象为矩形平面的 3 层屈曲约束支撑钢筋混凝土框架结构,平面尺寸 36.8 m×64 m。建筑总高 32.2 m,其中 1 层层高 6 m;2 层为夹层,层高 5 m;3 层为单跨结构,层高 16 m;屋盖为正放四边形平面网架。本文研究由该建筑的主体结构和支承于 3 层楼板上的 5 组大型风管及其设备组成的耦联体系(图 1(a))。为便于进行参数分析,按照动力特性匹配的原则,对主体结构的整体模型进行简化,建立如图 1(b)所示的简化的 ABAQUS 模型。该模型在结构纵向截取位于原整体模型中部的一跨,在 2 层和 3 层楼面处设置刚性楼面约束,同时,网架屋盖两侧截断处平面上的节点的 y 向平动自由度均与控制点相等,并约束控制点绕 x 轴和 z 轴的转动自由度,以满足截断处的对称条件;所研究跨两侧分别各伸出半跨框架梁,约束梁端(即跨中位置)的竖向(z 向)自由度,以使所研究跨框架梁柱节点的刚度和承载力级差接近实际情况;在外伸的半跨梁端节点设置 x 向水平弹簧以近似地模拟两侧其他跨框架以及结构两端的斜撑对所研究跨在 x 方向振动的约束。通过调整弹簧刚度,使简化模型在 x 方向的主要周期与原整体结构基本一致;在所研究跨的 y 向设置具有等效截面积的屈曲约束支撑,确定等效截面积时,保持不同层处支撑截面积的比例关系与原整体结构相同,通过调整截面积使简化模型在 y 向的主要周期与原整体结构基本一致。由此得到的简化模型的 x 和 y 方向一阶平动振型的初始周期分别为 1.18 s 和 0.85 s,考虑混凝土构件在自重作用下开裂的影响后的周期分别为 1.24 s 和 0.96 s。

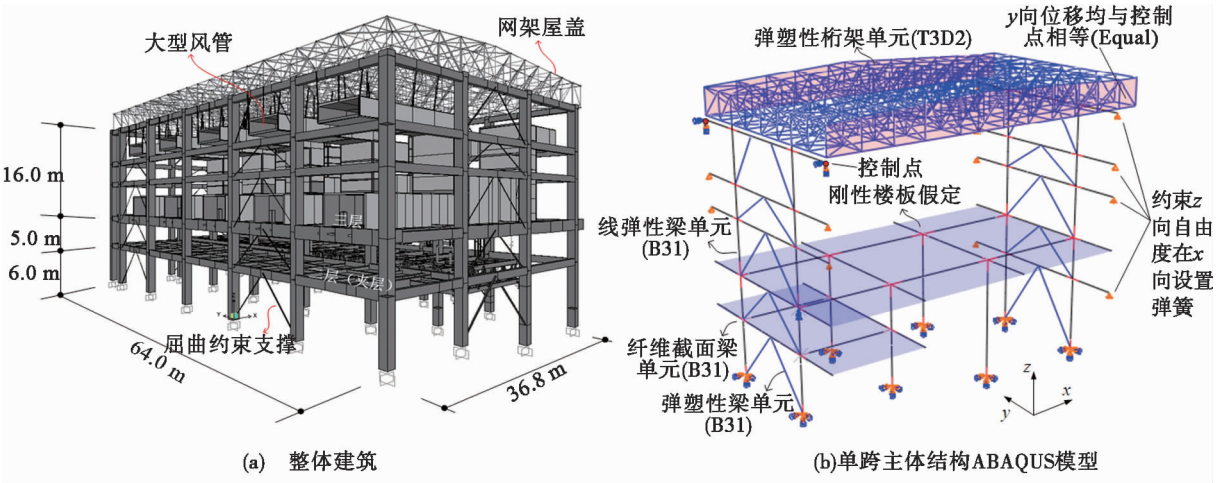

图 1　所研究建筑的整体模型和单跨主体结构简化模型

Fig. 1　Industrial building of interest and its simplified single-span numerical model

2 大型风管设备的数值模型及动力特性

附楼 3 层楼面上放置的风管由一期和二期两部分组成(图 2)。风管结构主要由厚 200 mm 的保温板和加强用的钢框架组成。风管主体通过 85 个截面为 300 mm × 800 mm 的钢筋混凝土支墩支承于三层楼板之上,一期风管悬臂段通过吊架悬吊于网架屋面;二期风管悬臂段支承于框架梁上。风管内部设有换热器、风阀、导流片等功能元件,一期和二期风管内还分别设置有风机。在有限元模型中以刚性竖杆支撑的集中质量质点模拟风机的影响。

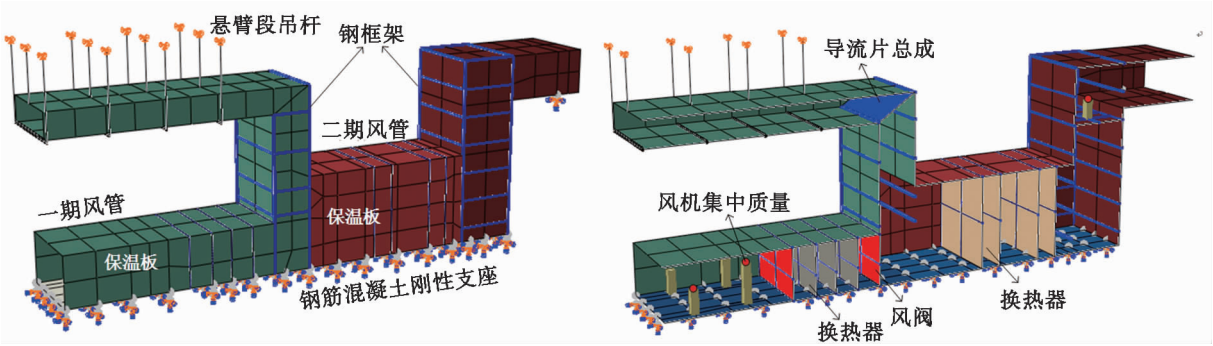

图 2 风管的外形、内部构造和边界条件

Fig. 2 Shape, inner structure and boundary condition of air duct unit

风管表皮由宽度约为 1 m 的保温板带拼接而成。由于拼接处的刚度远小于保温板本身的面内刚度,因此接缝的力学特性对风管表皮的力学性能有重要的影响。当保温板附着于钢结构骨架时,保温板形成的面层的刚度虽然远小于板体本身的面内刚度,但对钢结构骨架的刚度仍有较明显的贡献。这一效应称为“蒙皮效应”。国内外学者对钢结构外围护体系中的这一效应进行的相关研究表明[1-3],蒙皮效应可以明显提高结构的刚度和承载力。为了合理模拟风管刚度及其动力特性,根据文献[2]的建议,采用具有正交各向异性材料的壳单元近似模拟拼接保温板的面内行为。需要确定两个正交方向的弹性模量 E_1、E_2,剪切模量 G_{12} 和泊松比 v_{12} 等 4 个独立参数的取值,其中泊松比 v_{12} 的绝对值应小于 $\sqrt{E_1/E_2}$。

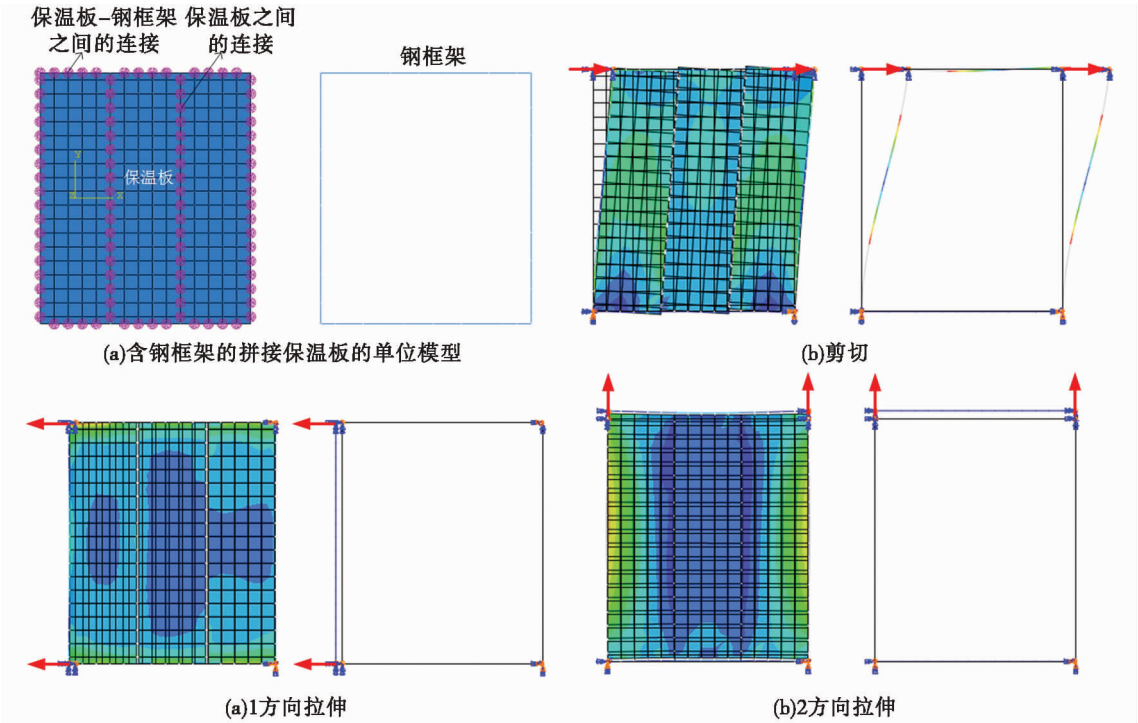

图 3 模拟风管保温板的正交各向异性材料参数的确定

Fig. 3 Determination of orthotropic elastic material properties for air duct panels

采用如图 3(a)所示的含钢框架的拼接保温板的单位模型以确定上述材料参数的取值。模型包含 3 块宽度为 1 m,长度为 3.6 m 的保温板和 200 mm 见方壁厚 10 mm 的方钢管框架。假设保温板之间以及保温板和钢框架之间通过间距 200 mm 的自攻螺丝相连。根据文献[4]的研究成果,计算得到保温板之间单个自攻螺钉的剪切刚度为 0.91 kN/mm,保温板与钢框架间单个自攻钉的剪切刚度为 2.32 kN/mm,以此作为模型中相应连接弹簧的刚度。计算单个自攻螺钉的剪切刚度,并作为模型中连接弹簧的刚度。由此得到的保温板之间自攻螺钉的剪切刚度为 0.91 kN/mm,保温板与钢框架间自攻钉的剪切刚度为 2.32 kN/mm。保温板厚 200 mm,中间为保温层,两侧为厚 0.6 mm 的钢板,等效弹性模量取为 1 300 MPa。分别对该模型施加剪力或两个正交方向的轴向力,同时对不含保温板的纯框架施加相同的荷载,得到二者的刚度。二者刚度之差即为保温板的刚度贡献,可进一步得到拼接保温板的等效材料参数。图 3(b) ~ 图 3(d)给出了确定相关材料参数时的力学分析得到的模型的 Mises 应力分布。由此得到的材料参数为:G_{12} = 27.3 MPa,E_1 = 25.7 MPa,E_2 = 132 MPa。此外,假设 v_{12} = 0.2。

采用以上模型计算得到单体风管的主要模态如图 4 所示。1 阶模态(一期悬臂段 y 向平动)的周期较长,为 1.2 s,模态参与质量约为风管总质量(279 t)的 4%;2 阶周期(整体 x 向平动)周期为 0.44 s,模态参与质量约为风管总质量的 40%。可见风管的大部分质量集中在与楼板连接位置较近的下部。

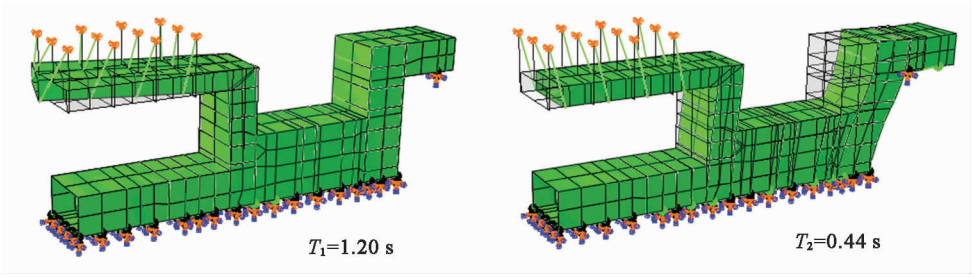

图 4　风管的前两阶振型

Fig. 4　Mode shapes of first two modes of air duct

3　主体结构-设备耦联体系的地震反应分析

本文根据文献[5]的建议,结合本文研究对象所处场地的特性,在美国太平洋地震工程中心(PEER)强震动数据库挑选如表 1 所列的 3 条地震动记录进行上述主体结构-设备耦联体系的地震反应分析。其中,B-ICC000 和 ATS000 为普通地震动,CHY036-E 为脉冲型地震动。分析时,将各个地震动记录的峰值加速度调整至 PGA = 0.4 g,对应于我国抗震规范规定的 8 度设防地区罕遇地震水平。3 条地震波的平均拟加速度反应谱与我国规范 8 度罕遇设计谱基本吻合。限于篇幅,此处略去反应谱的对比。

表 1　地震动基本信息

Table 1　Earthquake ground motion records used in analysis

年代	地震	PEER 文件名	PGA (g)	PGV (cm/s)	T_d(s)
1987	Superstation hills	B-ICC000	0.36	46.3	16.0
1999	集集地震	CHY036-E	0.29	38.9	26.4
1999	Kocaeli	ATS000	0.25	40.0	36.6

为考察设备-结构耦合效应,对如表 2 所列的 3 个模型进行上述 3 条地震波(ATS、B-ICC 和 CHY)作用下的线弹性和弹塑性地震反应分析。其中,仅主体结构模型(A)则认为管线设备的刚度趋于零,可忽略其对主体结构振动的影响;附加质量的主体结构模型(B)认为管线设备的刚度趋于无穷大,可作为质量附加在主体结构;而主体结构 + 风管(C)则介于二者之间,考虑了结构-设备振动之间的动力耦合作用。上述 3 种模型中风管所在楼层的振动最为显著的模态如图 5 所示。可见,与仅有主体结构的情况相比,将风管按等效质量考虑后,相关模态的周期增大了 5%。考虑风管本身的柔性之后,相关周期进一步增大了约 1.7%。

表 2 3 个分析模型

Table 2 Three analysis models

	模 型	x 方向 2 阶平动周期(s)	备 注
A	仅主体结构	0.57	不考虑风管设备的刚度和质量
B	附加质量的主体结构	0.60	将风管设备的质量附加于三层楼面
C	主体结构 + 风管	0.61	风管保温板按各向异性材料建模

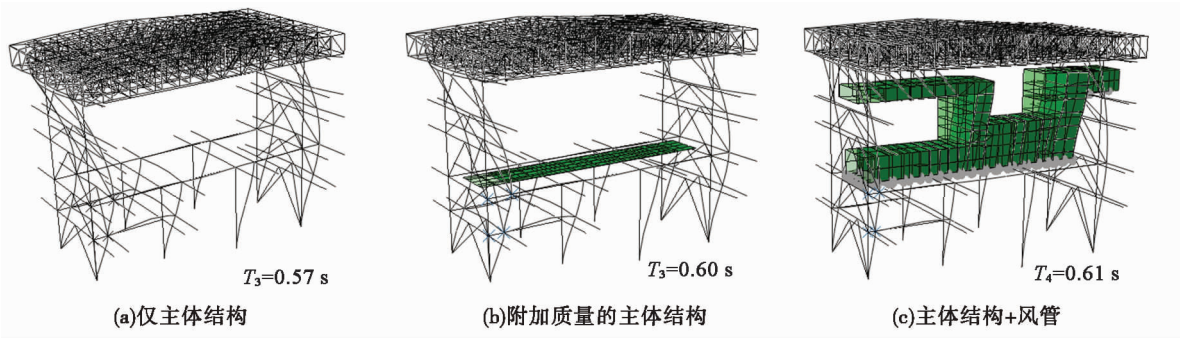

图 5 不同模型中风管所在楼层 x 方向振动显著的模态所对应的振型

Fig. 5 Vibrational shapes of modes predominated by vibration of floor with air duct in x-direction in different models

图 6 比较了上述 3 个模型在上述 3 条地震动作用下的线弹性和弹塑性最大位移、最大层间位移角和最大楼面加速度反应。对于不同模型,结构的弹塑性位移反应均明显大于线弹性位移反应;结构的弹塑性行为则会减小结构的最大楼层加速度反应。当完全忽略设备(包括其重量)时,无论在弹性还是弹塑性分析中都会低估结构的最大反应,这一低估在弹塑性分析中尤为明显。与将设备仅视为附加质量的模型(B)相比,当考虑结构与设备之间的动力相互作用时,结构的线弹性地震反应会有所增大,而结构的弹塑性地震反应则会有所减小。对于本文算例,结构-设备相互作用表现出较复杂的影响规律。

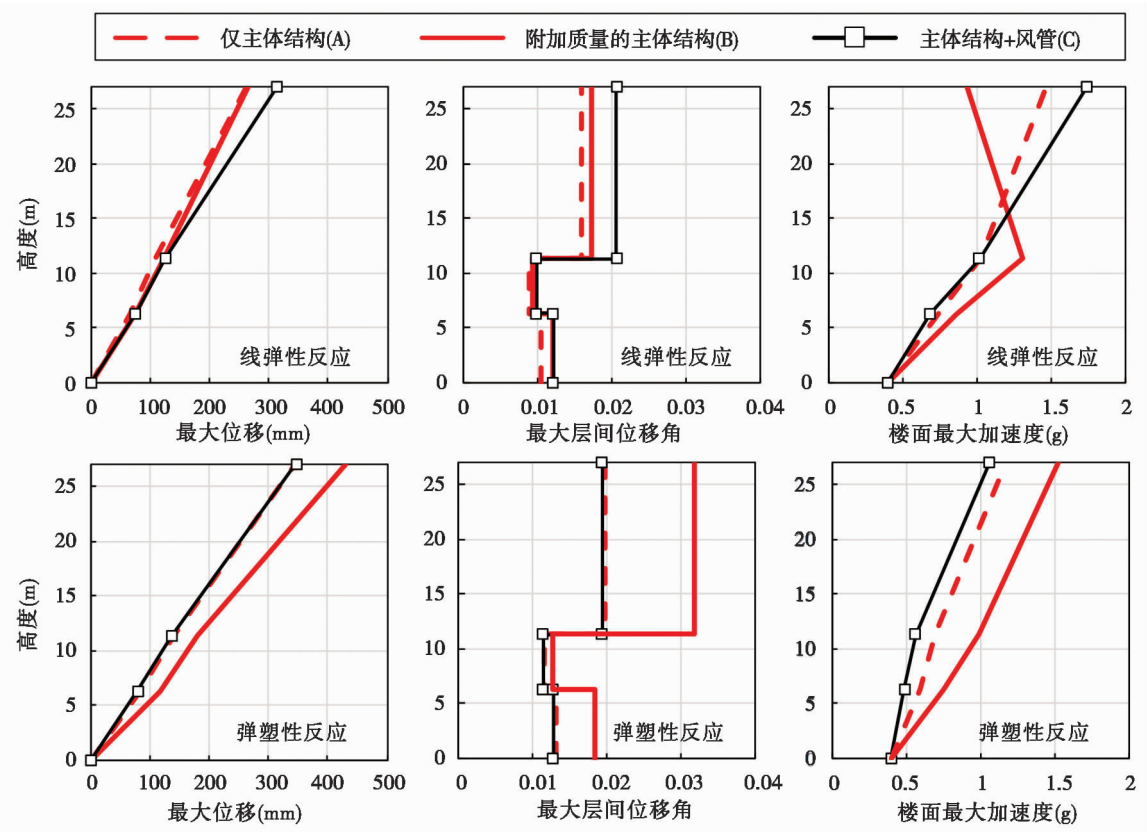

图 6 不同模型在 3 条地震波作用下的最大地震反应

Fig. 6 Maximum seismic response given by three different models under three ground motion records

4　结论

针对某包含大型风管设备的工业厂房,建立了能够考虑结构-设备相互作用的有限元分析模型。其中,采用正交各向异性壳单元模拟以自攻钉固定在钢框架上的保温板,以正确模拟风管的动力特性。建立采用不同方式考虑设备影响的数值模型,对结构进行地震作用下的动力反应分析。结果表明,结构-设备之间的动力相互作用会明显改变结构的最大地震反应。对于本文算例,考虑结构-设备相互作用会在线弹性反应中增大结构的最大地震反应,而在弹塑性分析中减小结构的最大地震反应。其影响规律尚有待更加深入的分析。

参考文献:

[1]　Matteis G D, Landolfo R. Diaphragm action of sandwich panels in pin-jointed steel structures: A seismic study[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2000, 4(3): 251 - 275.

[2]　郑　瑾. 轻钢建筑围护体系蒙皮效应的试验及理论研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
ZHENG Jin. Experimental and theoretical research on the diaphragm effects of the cladding systems of light gauge steel structures[D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)

[3]　Wrzesien A M, Lim J B P, Xu Y, et al. Effect of stressed skin action on the behavior of cold-formed steel portal frames[J]. Engineering Structures, 2015,105,123 - 136.

[4]　潘景龙. 自攻螺钉连接的抗剪性能研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报,1995, 28(6): 41 - 47.
PAN Jinglong. A study on the shear behavior of the self-tapping screw connection[J]. Journal of Harbin University of Architecture and Engineering, 1995, 28(6): 41 - 47. (in Chinese)

[5]　曲　哲, 叶列平, 潘　鹏. 建筑结构弹塑性时程分析中地震动记录选取方法的比较研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(7): 1 - 12.
QU Zhe, YE Lieping, PAN Peng. Comparative study on methods of selecting earthquake ground motions for nonlinear time history analyses of building structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(7): 1 - 12. (in Chinese)

[6]　GB50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB50011-2010 Code for Seismic Design of Buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2010. (in Chinese)