

文章编号: 1007-6069(2006)02-0007-07

楼板谱研究述评

李宏男 国巍

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:介绍了楼板谱方法的发展与研究现状。详细阐述了主附结构系统的相互作用、调谐、非经典阻尼、多点支撑等动力特性问题,分别介绍了传统楼板谱与新型楼板谱以及多维地震动下楼板谱的研究方法,给出了有待进一步研究的课题。

关键词:主附结构系统; 动力特性; 楼板谱; 多维地震动

中图分类号: P315 **文献标识码:** A

State of the art review on development of floor response spectrum

LI Hongnan GUO Wei

(State Key Lab of Coastal and Offshore Engineering Dalian University of Technology Dalian 116024 China)

Abstract A survey of the development about the floor response spectrum is presented in this paper. Dynamic properties of primary-secondary systems such as interaction between primary and secondary structures, tuning, non-classical damping and multiple-supported are given in details, and the methods of traditional and modified floor response spectra as well as floor response spectrum in the multiple earthquake are described. Some problems further to explore are proposed with engineering significance.

Key words primary-secondary systems; dynamic properties; floor response spectrum; multiple

1 引言

传统建筑抗震设计是基于承载力要求的“小震不坏,中震可修,大震不倒”的抗震设计准则^[1],这样设计的目的是为了满 足在地震作用下建筑结构主体的安全性。但是随着社会进步,经济发展,特别是现在高科技环境下电子计算机的广泛应用,人们逐渐认识到,在抗震设计中不仅要求建筑主体不发生严重的破坏倒塌,同时对于一些特殊功能建筑,如电厂,核电站,政府机关等,也要求建筑内部的设施设备和非结构构件不发生损坏或仍能正常工作。实际上,附属结构的损坏造成的损失往往远远超过社会和业主所能承受的范围。

附属结构在工程中是常见的,如带有电子仪器、机械设备、管线设备的厂房以及具有填充墙和天花板的各类建筑物等,一般将这些附属在基本建筑结构上的设备或非结构构件称为附属结构,又称二次结构(secondary system)。而把直接与地面连接的建筑物称为主体结构(primary system)。附属结构与主体结构通过支撑连接形成一个具有附属结构和主体结构的联合系统,称为具有附属结构的主附结构系统(primary-secondary systems)。

附属结构的安全性问题从 1964 年的美国阿拉斯加地震开始引起人们的关注,随后发生的 1971 年美国圣费尔南多地震,1972 年的尼加拉瓜地震,1975 年的中国海城地震以及 1976 年的中国唐山地震等多次强烈

收稿日期: 2006-02-26 修订日期: 2006-05-13

基金项目: 教育部长江学者及创新团队发展基金资助项目

作者简介: 李宏男(1957-),男,辽宁沈阳人,长江学者特聘教授,主要从事结构抗震方面研究。

地震,使人们越来越感受到附属结构的破坏可能造成重大的经济损失,甚至造成人员伤亡。因此,对于附属结构的抗震设计研究日益得到人们的重视,如何保护附属结构在地震中的安全,成为抗震设计中的又一个新课题。

附属结构在地震作用下的反应,一般来说不仅仅与自身的动力特性有关,还与支撑它的建筑物的动力特性及二者之间的相互作用有关。从二十世纪 70 年代开始,许多学者致力于该方面的研究,研究方法大致可分为三类^[2]:时程分析法,模态叠加法,楼板反应谱法。对于时程分析法,可以给出整体结构在地震作用下相对精确的反应,但是对于大型结构,计算量是十分巨大的,而且输入的地震波均为以前发生过的特定情况下的地震波,或由地震反应谱生成的人工地震波,由于地震作用的随机性,对于将来发生的未知地震可能完全不同于设计时采用的地震输入,这样时程分析失去了抗震设计的一般性;对于模态叠加法,通过耦合系统的整体动力分析消除了楼板谱方法的误差来源,同时与时程分析方法相比避免了可能遇到的数值困难,同时不必在改变附属结构时重新分析主体结构,但是对于不同的建筑物设计时都需进行重新分析;对于传统楼板谱方法,采用强制解耦分析,主体结构的反应作为设备设施附属结构的地震输入,忽略了二者之间的调谐、相互作用、非经典阻尼及空间耦合等动力特性,计算出楼板反应谱,计算出的结果过于保守。

楼板谱方法有其自身的优点,由于是解耦分析,从而相对于不论时程分析法还是模态叠加法,以及新近提出的传递函数法,它避免了复杂的运算。同时由于在多数情况下,附属结构相对主体结构而言其质量及刚度为小量,精度往往也满足一定的要求。因此,楼板谱方法有着广阔的发展空间和应用前景。

2 传统楼板谱

在传统的楼板谱方法中,把主附结构强制解耦分别独立设计。分析建筑物主体在地震作用下的反应时,不考虑附属结构对建筑物的影响,进行建筑物结构设计,得到支撑处的反应;对于附属结构,将支撑处反应作为附属结构的激励输入,得到附属结构的最大反应,与其它外力联合分析进行附属结构的设计。

对于传统的楼板谱方法,可以通过对建筑物主体结构进行时程分析得到支撑处的反应,将其作为振子的激励输入,进而得到附属结构分析要求的楼板谱。综合考虑场地条件、地震烈度、主体结构形式等多种因素,通过大量地震波输入统计分析得到设计用的楼板反应谱。除了直接时程分析外,还有一些其它的方法同样可以求得楼板谱,如对附属结构进行模态叠加等,这些方法都以与时程分析的方法求出的楼板谱近似程度作为方法可行的判断依据。20世纪 80 年代以来,很多国家都提出了抗震设计楼板谱。在我国核电站抗震设计规范中^[3],也提出了用于核电站抗震设计中设计楼层反应谱的计算和修正方法。20世纪 90 年代,我国的秦权、李瑛等人^[4]提出了用于抗震设计的楼板谱。

在计算楼板反应谱值时,通常在 $0.2 \sim 3H_z$ 频率范围内至少取 75 个间距不等的频率控制点,其中应包括结构的前两个最低阶固有频率。如果计算的楼板反应谱在 $3H_z$ 附近不收敛,则应把频率范围上限提高,直到收敛到输入运动为止。由于结构、场地参数的不确定性和计算模型方法的近似性,常将反应谱峰值处沿频率轴拓宽,在峰值点两侧用平行线给出设计楼板反应谱。频率拓宽的幅度一般可根据工程实际取值,美国核管会建议的拓宽幅度为 15% (不考虑建筑物与场地间作用)^[5]。在附属结构有多个支撑点时,各支撑点的激励往往不相同,这时应该采用各点的最大反应谱或它们的包络线作为输入楼板谱^[6],这样做使设计偏于安全。

对于附属结构质量比较小(小于建筑结构楼层质量 0.1%)的情况下,可以采用传统的楼板谱方法,一般可以达到需要的精度。但是对于主附结构质量比较大或两个结构发生调谐时,计算的结果会产生很大的误差,附属结构地震反应可达实际反应的几倍或十几倍,结果偏于保守。

3 新型楼板谱

不同于传统楼板谱,新型楼板谱是考虑了附属结构和主体结构各自的动力特性以及二者的相互作用等系统特性提出的楼板反应谱。它使得根据楼板谱求得的系统动力反应更加精确。由于传统楼板谱方法计算的结果过于保守,不满足经济性要求,从 20 世纪 80 年代开始,许多学者开始对新型楼板谱进行研究,结合主附结构系统的动力特性提出了一些方法。本文将对新型楼板谱相对于传统楼板谱的改进作一个详细的介

绍。

3.1 主附结构动力特性

主附结构系统具有以下一些动力特性。

(1) 调谐: 主体结构的频率接近附属结构的某一频率时, 在地震作用下会产生共振的情况。如果主体结构的某些频率接近附属结构的某些频率, 则将产生多级共振。这种共振特性类似于一般结构在外力作用下产生的共振。

(2) 主附结构相互作用: 对于任何一个主附结构系统而言, 主体结构和附属结构之间都存在动力相互作用, 特别是当附属结构的质量不能忽略而且又有共振产生的情况下最为突出, 其中附属结构的质量大小决定了相互作用的大小。

(3) 非经典阻尼: 附属结构与主体结构自身均为经典阻尼, 由于阻尼比不同, 使得整个组合系统的阻尼阵不再满足 $[C] = [M] \sum_b a_b \left[[M]^{-1} [K] \right]^b$ 的经典阻尼模式 ($b = 1$ 时, 为 Rayleigh 阻尼 $[C] = a_0 [M] + a_1 [K]$), 或者附属结构与主体结构本身就是非经典阻尼, 从而使主附结构系统为非经典阻尼。在系统阻尼为非经典阻尼的情况下, 与运动方程对应的特征值和特征向量在复数域内存在, 从而传统的实数模态叠加法不再适用, 需要求解复数域内的模态与正则坐标。

(4) 多点支撑: 对于多点支撑附属结构, 各个支撑点由于输入激励的不同, 会产生拟静力作用。传统楼板谱方法通过取包络线保守估计最大反应。对于多点输入情况, 若要精确计算最大反应, 应该考虑主体结构和附属结构间的振型相关性和附属结构各个支撑点之间的相关性。

(5) 非线性: 传统的楼板谱是建立在建筑物主体结构和附属结构均处于线弹性范围的基础上的, 包括反应谱基本的定义也是以线弹性为基础的。实际上, 在强烈地震动作用下, 建筑主体结构大部分构件以及附属结构均处于非线性弹塑性状态, 以线弹性假设为基础的方法过高估计了地震荷载作用下的结构反应, 会导致设计的不经济和不合理。

3.2 楼板谱的改进

3.2.1 主附结构相互耦合的影响

主附结构连接在一起形成一个整体结构, 二者之间存在动力耦合的关系, 这种耦合体现在两个方面: 一是附属结构对主体结构的反馈作用; 二是主附结构间存在动态能量交换, 这种能量交换在主附结构发生调谐时更加突出。这两个方面的耦合作用在传统的楼板谱分析中均未予以考虑, 为了使楼板反应谱在质量比较大及主附结构调谐时也可以应用, 必须对主附结构耦合作用进行反应分析。Sackman 和 Kelly^[7] 首先在主附结构系统动力特征计算中引入了相互耦合作用, 提出了新的动力反应计算方法。

考虑主体结构和附属结构相互耦合的影响, 首先建立整体系统的运动方程, 然后通过时程分析直接求解主附结构的动力反应, 如韩森等人^[8] 利用 Wilson- θ 法直接积分求解动力学方程, 对基础隔震下附属结构体系减震进行了分析, 并得到了一些有益的结论; 也可以通过解 $(n+m)$ 规模的特征值问题 (这里, n 和 m 分别为主体结构和附属结构的自由度数), 模态叠加求解出系统的动力反应。

一般地, 反应谱求解时常引入一些近似的数值解法, 在工程允许的精度范围内绕开 $(n+m)$ 阶特征值问题求得联合系统的固有特性, 进而用模态叠加法建立楼层反应谱。目前常用的方法有摄动法、非线性特征值法、随机振动法等。1983年, Kireghian 和 Sackman 等人^[9-10] 通过摄动理论研究了质量比较小的附属结构的动力反应问题。随后, Igusa 和 Kireghian^[11] 采用摄动理论和模态合成对考虑耦合作用楼板谱的求解进行了研究; Gupta 和 Jaw^[13] 通过摄动法求解考虑耦合作用时的复模态特征^[12], 并研究了主附结构耦合反应谱的求解。1987年, Suarez 和 Singh^[14] 通过主附结构独立模态叠加得到系统模态特征, 基于地面反应谱进行了楼板谱的求解。2003年, 张建霖和杨智春^[15] 采用随机振动理论推导出楼板反应谱, 并进行了一些研究, 得到了一些结论。

3.2.2 非经典阻尼的影响

非经典阻尼不再满足 $[C] = [M] \sum_b a_b \left[[M]^{-1} [K] \right]^b$ 的形式, 也不再满足与无阻尼情况下振型正交的条件, 所以非经典阻尼也称为非正交阻尼。非正交阻尼虽然不能按经典无阻尼振型分解, 但仍可将系统的动力反应按复振型分解。Suarez 和 Singh 针对在经典和非经典阻尼情况分别进行研究, 提出了求解系统模态振

型的三种方法:通过解非线性方程获得系统模态特征^[16-17];已知主附结构各自独立模态特征,采用模态综合法得到系统的模态特征^[14];对于质量比小于 1/5 的主附结构系统,可以采用摄动法获得系统模态特征^[11-18-19]。特别地,若主体结构、附属结构及主附结构系统均为非经典阻尼, Suarez和 Singh提出了一种进行两次摄动求解的方法来获得系统模态特征^[20]。

从 20 世纪 80 年代开始, Singh 和 Igusa 等人^[21~23] 分别对复数域模态叠加法进行了研究,并得到结构系统的反应。此后, Singh 和 A shtiany^[24] 进行了非经典阻尼系统动力反应的模态时间历程分析。模态时程积分求解系统的反应,可以采用无阻尼系统的实数模态对运动方程变形解耦^[25],从而降低自由度的数目;也可以通过求得的系统的特征向量解耦求解,得到不相关的解耦方程,积分得到时程反应。一般而言,模态时程分析的结果用于对楼板反应谱的各种算法方法进行优劣评判。1986 年, Gupta 和 Jaw^[26-27] 利用随机振动理论,提出了复数模态的模态合成法,同时提出了一种用位移谱表达速度谱的方法。这种方法基于相对位移反应谱与相对速度反应谱,十分简便。同年,以此为基础,进而提出了更为实际的非经典阻尼耦合分析方法^[13]。

关于系统非经典阻尼情况下的系统反应,我国也作了一些类似的研究。闫维明和刘季等人^[28] 讨论了非经典阻尼振型反应的组合问题,提出了可供工程抗震分析应用的振型组合公式;周锡元和董娣等人^[29] 研究了非经典阻尼在随机振动下的动力反应;郑兆昌和任革学^[30] 提出了大型非经典阻尼系统动力分析的动态解耦方法,完全避免了复数域的运算,计算稳定而且有效,有一定的研究前景。

3.2.3 多点支撑引发的多点输入的影响

支撑于多层楼板的附属结构存在多点激励的问题。不同于单点支撑,多点支撑必须要考虑支撑点激励之间的相互关系,振型模态的相互关系以及振子间的相互作用等。对于多点支撑的多自由度主附结构系统,每个支撑点对应一个振子,代表附属结构的一个振型模态。为了正确考虑主附组合系统的动力特性,研究者们提出了三种经典的楼板反应谱:

(1) A sfura 和 K iureghian^[31] 提出了互楼板谱的概念(图 1),互楼板谱是一个与同一振子在不同楼板上反应的协方差成正比的参量。不同于传统方法,它考虑了各支撑点激励之间的相互作用,但是没有考虑主附结构之间的相互作用和不同振子间的相关作用。

(2) Lee 和 Penzien^[32] 对随机振动下白噪声输入和过滤白噪声输入的结构概率反应进行了研究。随后, A sfura 明确提出了互-互楼板谱^[33] (cross - oscillator cross - floor response spectrum, 简称 CCFS)(图 2)的概念,它是一个与位于不同楼板的两个不同振子反应的协方差成正比的参量。相对于互楼板谱,它的改进之处在于考虑了支撑激励之间和模态间的相互作用,两个振子具有不同频率阻尼比,通过分配质量给两个振子考虑调谐,相互作用和非经典阻尼的影响。该方法忽略了振子间的相互作用,只能用于主附系统没有相近频率的情况。

此外,区别于 A sfura 采用假设的地震能量谱密度函数 PSDF, Gupta 和 Jaw^[34] 提出了基于地震反应谱的更为准确直观的方法,取得了较好的效果。

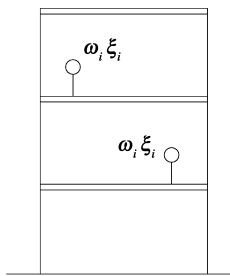


图 1 互楼板谱

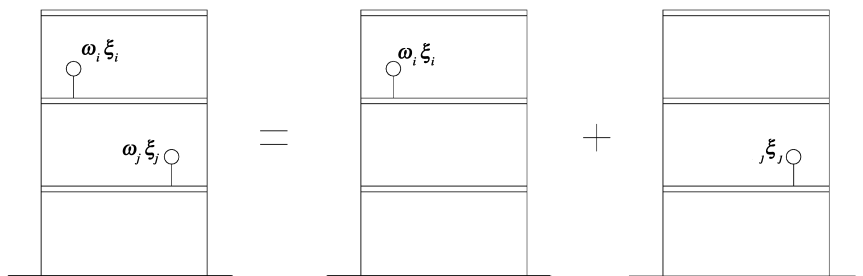


图 2 不考虑振型间相互关系的互互楼板谱

(3) Saouy 等人^[35] 提出了改进的 CCFS 法(图 3),它考虑了不同振子之间的相互作用。秦权等人^[36] 也提出了相类似的 CCFS 并开发了相应的应用程序。

此外,多点支撑附属结构地震反应分析时,通常假定主附结构之间的连接构件与附属结构具有相同的阻

尼特性, 并将其作为附属结构的一部分考虑, 这与工程实际不符, 存在一定的近似。韩森和秦丽^[37]提出将连接区独立于附属结构, 采用具有连接区的混合子结构模态综合法分析了主附结构的地震反应并对连接构件参数变化对反应的影响作了讨论。

3.2.4 非线性

根据目前建筑抗震设计中“三水准两阶段设计”的抗震设防要求, 在中震或大震作用下建筑结构处于弹塑性阶段, 相应的线弹性动力方程及以线弹性为基础的楼板谱方法不再适用。但是, 从能量的角度, 由于建筑塑性变形耗能, 可知线弹性楼板反应谱得到的附属结构反应一般比较保守, 满足安全性要求。

20世纪80年代以来, 针对结构的非线性, Kawakatsu等^[38]、Lin和Mahin^[39]、Viti等^[40]都是通过引入一个影响因子对线弹性反应谱进行了修正, 对线弹性的楼板谱进行折减来模拟非线性情况下的反应。但是在不同工程情况下, 影响因子具有很大的不确定性, 限制了该方法的广泛应用。

自Newmark等^[41]率先开展了弹塑性反应谱的研究以来, 一些学者结合弹塑性反应谱提出了小质量比附属结构非线性楼板谱的计算方法^[42], 此法简便, 主要用于初步设计时设备的反应估算。

非线性影响下的楼板谱问题有待进一步的研究。

3.2.5 建筑物与场地间的相互作用

在地震动作用下, 某场地条件下建筑结构的反应主要取决于: 地震动特性、地基土特性和结构特性三个方面。人们把建筑物与场地间的相互作用称为 Structure-Solid Interaction, 简称为 SSI效应。在楼板谱的计算中, 一般不考虑建筑物地震反应对场地的反馈作用, 简单认为场地为地表自由场运动, 建筑物处于基岩地基或硬土场地。实际上, 建筑物也有可能处于软土质场地, 建筑与地基的相互作用往往会对系统反应产生很大的影响, 即使处于硬土场地, 在一定条件下不可忽略 SSI效应, 这主要由结构本身的特性和设计要求的安全等级所决定。

到目前为止, 国内做了一些这方面的研究, 汪嘉春等^[43]和丁阳等^[44]分别研究了场地自由场和考虑 SSI效应时楼板谱的变化; 李忠献等^[45-46]研究了场地条件改变时楼板谱的敏感性问题。鉴于 SSI效应对结构地震反应的影响, 深入研究考虑 SSI效应时的楼板谱, 讨论系统参数和场地条件改变时楼板谱的敏感性是一项具有理论意义和工程实用价值的工作。

4 多维地震动作用的楼板谱

实际地震动是多维的, 地面既有水平运动, 也有竖向运动, 并且伴随着有转动^[47]。鉴于对地震转动激励研究的不足, 目前抗震设计一般只要求考虑水平平动激励和竖向激励。因此, 在多维地震动输入下, 建筑物往往会产生多方向之间的运动相互耦合。

在水平地震作用下, 建筑物的弹性运动一般可以分解为水平面上的平动和转动。对于偏心的结构要考虑转动的影响, 通过位移影响因子在运动方程里得以体现。此时的楼板谱不仅与楼层的高度有关, 也与附属结构在该楼层中所处的位置有关系。Yang等^[48]对水平地震动下偏心建筑的附属结构动力反应进行了研究。在通常的结构抗震设计中, 竖向地震动往往取水平地震动的 $2/3$ 建筑物的运动类似于平动, 不过运动方程中对应的刚度、阻尼和外力情况均有一定的变化。建筑物竖向运动与水平向运动的耦合程度远小于水平面两个垂直方向运动的耦合程度, 一般可以单独近似处理。

我国核电站规范^[3]中对于多维地震动的情况, 做如下规定: 对于质量、刚度对称的支承体系, 给定位置处每个方向的楼层反应谱可根据该方向的地震反应直接确定; 对于质量或刚度不对称的支承体系, 每个方向的楼层反应谱, 均应根据在两个水平向和一个竖向三个地震震动分量分别作用下沿该方向地板反应按平方和的平方根法组合的结果确定。

多维地震动作用下的建筑结构楼板谱的研究是楼板谱研究的一个重要方面, 目前还很缺乏。

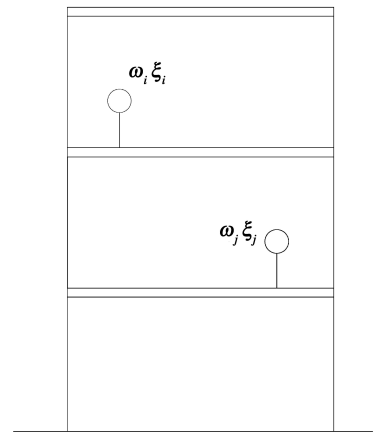


图3 改进的互层楼板谱

5 结语

通过文中传统楼板谱与新型楼板谱的研究对比,可以看出两种楼板谱都有各自的优点,同时也有相应的不足之处。传统楼板谱可以用来粗略计算附属结构的地震反应,计算简便,结果比较保守,大致符合附属结构安全性的要求。通过对传统楼板谱进行改进提出的新型楼板谱,体现了主附结构系统的动力特性,从理论上更趋合理,能较真实反映地震作用下附属结构的反应,在保证安全的同时使得反应计算结果更加精确,但是计算比较繁琐。针对不同的工程情况,可以有选择的采用前面论述的各种楼板谱方法,进而得到附属结构的地震动反应,然后结合附属结构其他受力情况进行附属结构的抗震设计和检验。

目前,楼板谱有几个方面的研究得到了共同关注:

(1)由于地震的不确定性,基于概率统计理论的随机振动分析方法对系统反应分析具有更为普遍的统计意义;

(2)许多学者开始对考虑 SSI效应的楼板谱进行研究,并得到了一些初步的成果^[44~47];

(3)实际地震动是多维的,考虑多维地震动作用下楼板谱的计算方法、主附结构系统的动力反应分析及工程实用抗震设计方法,有着广泛的应用前景和实际意义,需要广大科研人员进行深入的研究。

参考文献:

- [1] 李宏主编. 建筑抗震设计原理 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996
- [2] 韩森, 秦丽. 多点连接二次结构地震响应的研究方法 [J]. 北京建筑工程学院学报, 2003 19(4): 13-17.
- [3] GB50267-97 核电站抗震设计规范 [S]. 中国国家地震局, 1997.
- [4] 秦权, 李瑛. 抗震用楼面谱 [A]. 第五届高层建筑抗震技术交流会论文集 [C], 浙江桐庐, 1995
- [5] U. S. Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide [M], Revision 1.122 1978.
- [6] ASCE Structural analysis and design of nuclear plant facilities [R]. Manuals and Reports on Engineering Practice NO. 58 1980
- [7] Sackman J L and Kelly J M. Seismic analysis of internal equipment and components in structures [J]. Engineering Structures 1979 1(4): 179-190
- [8] 韩森, 王亮. 考虑耦联影响的二次结构体系减震分析 [J]. 世界地震工程, 2005 21(1): 42-46.
- [9] Sackman J L, Kiureghian A D and Nour-Omid B. Dynamic analysis of light equipment in structures modal properties of the combined system [J]. Journal of the Engineering Mechanics Division ASCE 1983 109(1): 73-89.
- [10] Kiureghian A D, Sackman J L and Nour-Omid B. Dynamic analysis of light equipment in structures response to stochastic input [J]. Journal of the Engineering Mechanics Division ASCE 1983 109(1): 90-110
- [11] Igusa T, Kiureghian A D. Generation of floor response spectra including oscillator-structure interaction [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 1985 13(5): 661-676
- [12] Gupta A K, Jaw J. Complex modal properties of coupled moderately light equipment-structure systems [J]. Nuclear Engineering and Design 1986 91(2): 171-178.
- [13] Gupta A K, Jaw J. Coupled response spectrum analysis of secondary systems using uncoupled modal properties [J]. Nuclear Engineering and Design 1986 92(1): 61-68
- [14] Suarez L E, Singh M P. Floor response spectra with structure-equipment interaction effects by a mode synthesis approach [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 1987 15(2): 141-158.
- [15] 张建霖, 杨智春. 随机输入条件下的楼层反应谱分析 [J]. 西北工业大学学报, 2003 21(6): 650-653
- [16] Suarez L E, Singh M P. Seismic response of equipment-structure systems [J]. Journal of the Engineering Mechanics Division ASCE 1987 113(1): 16-30.
- [17] Singh M P, Suarez L E. Seismic response of equipment-structure systems with non-classically damping effects [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 1987 15(7): 871-888
- [18] Singh M P, Suarez L E. A perturbation analysis of structure-equipment systems [J]. Nuclear Engineering and Design 1986 97(2): 167-186
- [19] Suarez L E, Singh M P. Perturbed complex eigenproperties of classically damped primary structure and equipment systems [J]. Sound Vibration 1987 116(2): 199-219.
- [20] Suarez L E, Singh M P. Eigenproperties of non-classically damped primary structure and equipment systems by a perturbation approach [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 1987 15(5): 565-583.
- [21] Singh M P. Seismic response by SRSS for nonproportionally damped [J]. Journal of the Engineering Mechanics Division ASCE 1980 106(6): 1405-1419.
- [22] Singh M P, Ghafory-Ashjani M. Structural response under multicomponent earthquakes [J]. Journal of the Engineering Mechanics Division ASCE 1994 120(6): 1115-1125.

- ASCE 1984 110(5): 761-775
- [23] Igusa T, Kiureghian A D and Sackman J L. Modal decomposition method for stationary response of nonclassically damped systems [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 1984 12(1): 121-136.
- [24] Singh M P, Ghafory-Ashjari M. Modal time history analysis of non-classically damped structures for seismic motions [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 1986 14(1): 133-146.
- [25] Clough RW, Mojtahedi S. Earthquake response analysis considering non-proportional damping [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 1976 4(5): 489-496.
- [26] Gupta A K, Jaw J. Seismic response of nonclassically damped systems [J]. Nuclear Engineering and Design 1986 91(2): 153-159.
- [27] Gupta A K, Jaw J. Response spectrum method for nonclassically damped systems [J]. Nuclear Engineering and Design 1986 91(2): 161-169.
- [28] 闫维明, 刘季, 周永程. 非经典振型反应组合及非经典反应谱 [J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1996 29(3): 6-11.
- [29] 周锡元, 董娣, 苏幼坡. 非正交阻尼非线性振动系统的复振型地震响应叠加分析方法 [J]. 土木工程学报, 2003 36(5): 30-45.
- [30] 郑兆基, 任革学. 大型非经典阻尼系统的动态解耦方法 [J]. 力学学报, 1996 28(4): 468-474.
- [31] Ashra K, Kiureghian A D. A new floor response spectrum method for seismic analysis of multiply supported secondary system [R]. Report No UBC/EERC 84/04 EERG UCB June 1984.
- [32] Lee M, Penzien J. Stochastic analysis of structures and piping systems subjected to stationary multiple support excitations [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 1983 11(1): 91-110.
- [33] Ashra K, Kiureghian A D. Floor response spectrum method for seismic analysis of multiply supported secondary systems [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 1986 14(2): 245-265.
- [34] Gupta A K, Jaw J. A new instructure response spectrum (IRS) method for multiply connected secondary systems with coupling effects [J]. Nuclear Engineering and Design 1986 96(1): 63-80.
- [35] Saady A G, Aziz T S. A modified CCFS approach for the seismic analysis of multiply supported MDOF secondary systems [J]. Nuclear Engineering and Design 1992 133(2): 183-197.
- [36] 秦权, 李瑛. 非结构构件和设备的抗震设计楼面谱 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 1997 37(6): 82-86.
- [37] 韩森, 秦丽. 连接区独立的多点支撑二次结构抗震分析 [J]. 世界地震工程, 2004 20(4): 52-58.
- [38] Kawakatsu T, Kitada K, Takemoto T, Kuwabara Y, et al. Floor response spectra considering elasto-plastic behavior of nuclear facilities [R]. Trans. 5th Int. Conf. on Struc. Mech. In Reactor Technol. [C]. K94, Berlin, Aug. 1979.
- [39] Lin J, Mahin S A. Seismic response of light subsystems on inelastic structures [J]. Journal of the Structural Engineering Division ASCE 1985 111(2): 400-417.
- [40] Viti G, Olivieri M, Traversi S. Development of nonlinear floor response spectra [J]. Nuclear Engineering and Design 1981 64(1): 33-38.
- [41] Newmark N M, Hall W J. Earthquake spectra and design [M]. Berkeley: EERI, 1982.
- [42] Vilaverde R. Simplified approach for the seismic analysis of equipment attached to elastoplastic structures [J]. Nuclear Engineering and Design 1987 103(3): 267-279.
- [43] 汪嘉春, 傅激扬, 才中来. 试验堆主厂房楼板谱计算与比较 [J]. 核动力工程, 2001 22(4): 308-312.
- [44] 荣峰, 丁阳, 李立津. 核反应堆工程地基-结构相互作用与楼层反应谱分析 [D]. 天津: 天津大学建筑工程学院, 2003.
- [45] 李忠献, 陈岩, 梁万顺, 等. 核电厂结构的楼层反应谱分析 [J]. 福州大学学报, 2005 33(增刊): 62-67.
- [46] 李忠献, 李忠诚, 沈望霞. 核反应堆厂房结构楼层反应谱的敏感性分析 [J]. 核动力工程, 2005 26(1): 44-50.
- [47] 李宏男. 结构多维抗震理论与设计方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [48] Yang Y, Huang W. Seismic response of light equipment in torsional buildings [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 1993 22(2): 113-128.