

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20241001002

调谐液体阻尼器-高层结构的实用抗震分析方法*

邹万杰¹, 梁敏容¹, 李创第¹, 葛新广², 经承贵¹

(1. 广西科技大学土木建筑工程学院, 广西柳州 545006; 2. 柳州工学院土木建筑工程学院, 广西柳州 545616)

摘要: 针对设置调谐液体阻尼器(TLD)的高层结构在随机地震动激励下的响应求解方法复杂的问题, 基于有限元动力分析技术和功率谱的二次式分解法, 研究了顶层设置TLD的高层建筑结构在胡聿贤地震激励谱下动力响应谱矩的简明封闭解法。首先, 根据TLD线性力学模型, 建立TLD-高层建筑结构耦合地震动方程, 再利用有限元分析技术获得高层建筑结构动力特性, 重构以实模态表示的TLD-高层建筑结构等效动力学方程, 解决了复杂受控结构动力特性不易获取的问题。其次, 基于复模态法和二次式分解法推导了高层建筑结构的结构绝对位移、层间位移、方差和0~2阶谱矩的简明封闭解。最后, 以一实际结构作为算例分析, 通过本文方法所得楼层和节点谱矩与虚拟激励法计算结果对比, 验证了所得响应谱矩的正确性; 并探讨了结构振型数和TLD参数对减震性能的影响。结果表明: 结构前三阶振型能保证响应结果的精度, 且适当增大TLD长度、高度和选取合适阻尼比可有效提高高层结构的抗震性能。

关键词: 调谐液体阻尼器(TLD); 胡聿贤随机激励谱; 二次式分解法; 实用分析法; 参数分析

中图分类号: TU311.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)02-0282-13

Practical Seismic Analysis Method for High-rise Structures with Tuned Liquid Dampers

ZOU Wanjie¹, LIANG Minrong¹, LI Chuangdi¹, GE Xinguang², JING Chenggui¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Liuzhou Institute of Technology, Liuzhou 545616, China)

Abstract: To address the complexity in solving responses of high-rise structures with Tuned Liquid Dampers (TLDs) under random seismic excitations, using the finite element dynamic analysis and the quadratic decomposition method of the power spectrum, this study developed a simplified closed-form solution method for the spectral moments of the dynamic responses in high-rise structures with TLDs installed on the top floors under Hu Yuxian seismic excitation spectrum. Firstly, based on the linear mechanical model of TLD, the coupled seismic equations for the TLD-high-rise building structure were established. Then, finite element analysis technology was used to obtain the dynamic characteristics of the high-rise building structure. The equivalent dynamic equations for TLD-high-rise building structures expressed in real modes were reconstructed, resolving difficulties in acquiring the dynamic

* 收稿日期:2024-10-01;修回日期:2024-12-25

基金项目:国家自然科学基金(51468005)、广西自然科学基金(2019GXNSFBA245071)、广西科技基地和人才专项(AD19245131)、广西高校防灾减灾与预应力技术重点实验室项目(GXKDTJ024)资助

作者简介:邹万杰(1974—),男,副教授,博士。主要从事建筑结构振动控制研究。E-mail: 705450818@qq.com

通信作者:葛新广(1977—),男,副教授,博士。主要从事建筑结构振动控制研究。E-mail: gxxzlr.2008@163.com

characteristics of complex controlled structures. Secondly, the simplified closed-form solutions for absolute structural displacements, inter-floor displacements, variance, and 0-2 order spectral moments of high-rise building structures were derived using the complex modal method and quadratic decomposition method. Finally, a real structure was used as a case study. The comparison between the floor and node spectral moments obtained by the proposed method and the results calculated by the virtual excitation method verified the correctness of the derived response spectral moments, and the effects of the number of structural vibration modes and the TLD parameters on vibration reduction performance were explored. The results showed that the first three orders of structural vibration modes could ensure the accuracy of the response results, and the seismic performance of high-rise structures could be effectively improved by appropriately increasing the length and height of the TLD and selecting a suitable damping ratio.

Keywords: tuned liquid dampers (TLD); Hu Yuxian random excitation spectrum; quadratic decomposition method; practical analysis method; parameter analysis

0 引言

结构被动减振控制装置包括基底隔震装置、调谐质量阻尼器(Tuned Mass Damper,简称TMD)装置、调谐液体阻尼器(Tuned Liquid Damper,简称TLD)装置等。TLD装置是把盛有液体的刚性容器刚接在结构顶层上,因有经济实用、易于安装、维护费用少、可兼用做生活或消防储水装置、无污染等高性价比的优点^[1]被广泛运用于各建筑结构减振控制^[2-5]。TLD减振原理为^[6]:在外部激励的作用下,结构振动能量可被水箱内晃动液体与内壁和底部产生的摩擦力消耗,从而抑制了结构的振动幅度以实现结构的减振控制。

各国学者对TLD结构系统在各激励下的减振效果进行了深入研究,并已取得显著成果^[7-9]。B.G. Housner^[10]对在地震激励下的TLD进行了响应分析,通过实验提出了TLD的“质量-弹簧-阻尼器”等效力学模型,并验证该模型的有效性。J.K. Vandiver等^[11]将固定在海洋平台的储液罐作为TLD,利用TLD中液体的晃动影响其支撑结构的振动特点,研究了海洋平台在波浪作用下的动力响应。研究表明,TLD对海洋平台的动力响应具有抑制作用。H.N. Li等^[12]基于流体体积方法推导了TLD矩形容器中的动态液体压力公式,该方法满足了计算精度的要求,且简化了计算过程和提高了计算效率。周惠蒙等^[13-14]利用振动台结构试验将结构模型作为数值子结构进行试验数值耦合系统仿真。结果表明,实验所获加速度响应与传统方法数值求解

结果一致,验证了TLD、TLCD能够有效地控制结构加速度响应。孙连杨等^[15]通过构建计算流体力学(CFD)和计算结构动力学(CSD)的耦合作用,对TLD-高层建筑减振控制数值算法进行了研究,并深入研究了顶部设置竖向挡板的TLD结构系统的减振性能;研究表明,设置竖向挡板的TLD系统对高层建筑结构响应的控制效果显著。上述研究在探讨TLD-高层结构响应时,响应解均为积分型表达式,在工程应用中具有一定局限性,且对TLD关键参数的取值分析研究较少。

大量文献和实测地震波^[16-18]表明,地震是一个随机过程,因此随机振动能更准确地描述地震运动过程。B.G. Housner^[19]首次提出了白噪声激励模型来模拟地震引起的地面随机振动,但假定了白噪声功率谱在整个地震中各频率强度值均为恒定,因此不能直接准确地反映地震动频谱特征。K. Kanai^[20]和H. Tajimi^[21]通过制作了接近地基震动形式的半实验式把地震地面加速度以共振方式模拟成过滤波白噪声过程,并提出了Kanai-Tajimi模型且得到广泛应用^[22-23]。但该模型无法反映基岩的动力特征且无法获得地面位移、速度、加速度导数方差^[24]。为了克服Kanai-Tajimi模型缺陷,各国学者提出了各种改进的地震激励功率谱模型,如Clough-Penzien谱^[25-26]、李鸿晶谱^[27]、胡聿贤谱^[28]等。胡聿贤模型通过设定低频截止频率,对Kanai-Tajimi模型谱中的低频成分进行了合理缩减,从而优化了其功率谱密度函数在低频区域的表现,消除了零点附近的奇异点现象,确保了地面速度及位移方差的有界性^[29]。相较于Kanai-Tajimi模型,胡聿贤模型更具地震动

模拟的合理性、准确性和可靠性。时域法和频域法^[30-31]是获得 TLD-高层建筑结构在胡聿贤地震动响应分析的主要方法。时域法在获取结构响应时,其优势在于能够通过地震激励的协方差与脉冲响应函数表示响应的协方差,因此更适用于获得简单白噪声激励的响应的封闭解^[32]。在频域法中,通过虚拟激励法构造虚拟激励,可将随机激励下的系统频率响应转化为相应的确定性外荷载表达的虚拟响应,因此简化了计算过程。虚拟激励法计算求解响应谱矩的前提是响应量的功率谱密度函数为已知,获取精确的结果需在较大积分上限且选取较小积分步长上进行积分,因此,优化计算效率是亟待解决的问题。针对上述提及的局限性,葛新广等^[32-34]根据代数定律,创新性地运用二次式分解法,获得了以圆频率和模态复特征值线性组合形式表示的响应功率谱,该方法改进了传统虚拟激励法响应谱矩的精确度受积分步长和积分区间选择的直接影响的不足,但并未对 TLD-高层结构进行动力响应研究。

上述可知,时域法或频域法均难获取 TLD-高层结构响应谱矩简明解,且对于 TLD 关键参数对结构减震影响研究甚少。因此,本文基于二次式分解法,对顶层设置 TLD 的高层建筑结构在胡聿贤地震激励下结构位移响应的简明封闭解进行研究。首先,利用有限元 MIDIS GEN 软件建立结构的动力学模型,根据实际结构的材料属性、几何尺寸和荷载情况确定结构的质量、刚度、频率和振型等动力方程所需参数。基于 TLD 力学模型,建立以实模态振动参数表示动力方程。其次,对 TLD 高层结构体系运用复模态法和虚拟激励法获得了响应的统一频域解,再利用二次式分解法获得了结构绝对位移、层间位移的 0~2 谱矩封闭解。最后,以一实际高层结构作为算例分析,通过楼层和节点谱矩对比结果验证了所提简明封闭解的正确性,给出了 TLD 高层建筑结构最优振型个数与 TLD 参数,为 TLD 结构系统的减震设计提供了新的优化思路。

1 设置 TLD 的高层建筑结构的震动方程重构

1.1 TLD 力学模型

B.G. Housner^[10]提出了 TLD 装置的“质量-弹簧-阻尼器”力学模型,如图 1 所示,则等效模型的各

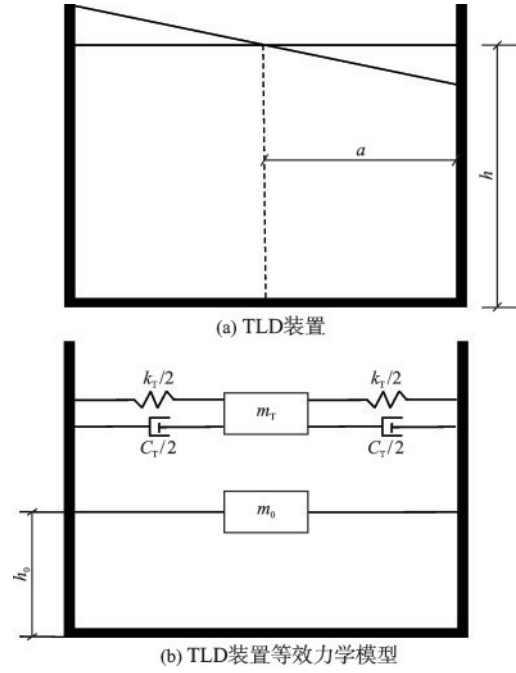


图 1 TLD 力学模型

Fig.1 Schematic diagram of TLD mechanical model

表达式可表示为:

$$m_0 = M_T \frac{\tanh(1.7a/h)}{1.7a/h} \quad (1)$$

$$m_T = 0.83M_T \frac{\tanh(1.6h/a)}{1.6h/a} \quad (2)$$

$$k_T = \frac{3ghm_T^2}{M_T a^2} \quad (3)$$

$$c_T = 2\xi_T \sqrt{m_T k_T} \quad (4)$$

式中, M_T 、 a 、 h 、 m_0 、 m_T 、 g 分别为箱内液体质量、矩形水箱最长边半长、液体高度、脉冲液体质量、晃动液体质量、重力加速度; k_T 、 c_T 、 ξ_T 分别为 TLD 等效系统的刚度、阻尼、阻尼比。

1.2 结构系统运动方程

在一栋 n 层且楼顶设置 TLD 的建筑结构,如图 2(a) 所示,可简化成等效 TLD 阻尼器耗能结构系统如图 2(b) 所示,耗能体系的运动方程可表示为:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx + I_1[c_T(\dot{x}_n - \dot{x}_T)] \cdot$$

$$I_1[k_T(x_n - x_T) + m_0\ddot{x}_n] = -M\ddot{x}_g(t) \quad (5)$$

$$m_T(\ddot{x}_T + \ddot{x}_g) + c_T(\dot{x}_T - \dot{x}_n) + k_T(x_T - x_n) = 0 \quad (6)$$

式中, M 、 C 、 K 分别是由各层质量 m_i 、阻尼 c_i 、刚度 k_i 构成结构质量矩阵、结构阻尼矩阵及结构刚度矩

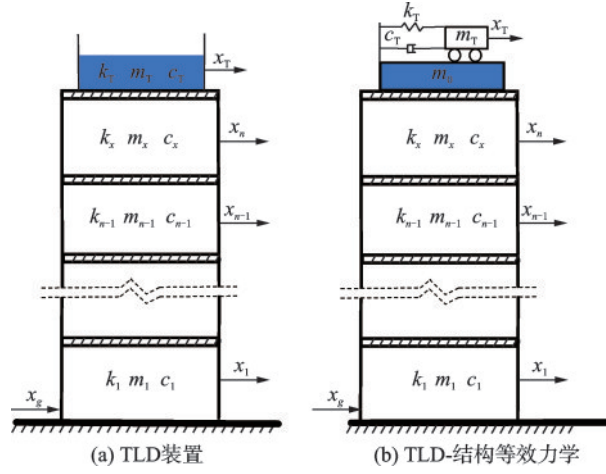


图2 结构计算简图

Fig 2 Diagram of structure calculation

阵; $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_{n-1} \ x_n]^T$ 为 $n \times 1$ 列向量; x_i 为各层相对地面位移; $\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \ddot{\mathbf{x}}$ 分别是结构楼层的位移、速度、加速度向量; I, I_1 是位置列向量, 且 $I = [1 \ 1 \ \dots \ 1]_{n \times 1}^T, I_1 = [0 \ 0 \ \dots \ 1]_{n \times 1}^T$; $\ddot{x}_g(t)$ 为地面运动绝对加速度。

仅考虑前 $N (N \leq n)$ 阶振型时, 引入广义实模态变量 \mathbf{q} , 其为 $N \times 1$ 阶向量, 则建筑结构各层位移向量表示为:

$$\mathbf{x} = \boldsymbol{\phi} \mathbf{q} \quad (7)$$

式中, $\boldsymbol{\phi}$ 为结构前 N 阶振型, 为 $n \times N$ 阶矩阵。

由式(7), 则式(5)和(6)转化为:

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{q}} + 2\xi\omega\dot{\mathbf{q}} + \omega^2\mathbf{q} + (\mathbf{M}^*)^{-1}\boldsymbol{\phi}^T I_1 \times \\ [c_T(I_1^T \boldsymbol{\phi} \dot{\mathbf{q}} - \dot{x}_T) + k_T(I_1^T \boldsymbol{\phi} \mathbf{q} - x_T) + \\ m_0 I_1^T \boldsymbol{\phi} \ddot{\mathbf{q}}] = -\mathbf{a} \ddot{x}_g \end{aligned} \quad (8)$$

$$m_T \ddot{x}_T + c_T(\dot{x}_T - I_1^T \boldsymbol{\phi} \dot{\mathbf{q}}) + k_T(x_T - I_1^T \boldsymbol{\phi} \mathbf{q}) = -m_T \ddot{x}_g \quad (9)$$

式(8)可整理为:

$$\bar{\mathbf{M}} \ddot{\mathbf{q}} + \bar{\mathbf{C}} \dot{\mathbf{q}} + \bar{\mathbf{K}} \mathbf{q} + \mathbf{C}_T \dot{x}_T + \mathbf{K}_T x_T = -\mathbf{a} \ddot{x}_g \quad (10)$$

式中, $\mathbf{q} = [q_1, q_2, \dots, q_N]^T$; $\boldsymbol{\omega} = \text{diag}[\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N]$;

ξ 为结构阻尼比; $M_j^* = \boldsymbol{\phi}_j^T \mathbf{M} \boldsymbol{\phi}_j$; $a_j = \frac{\boldsymbol{\phi}_j^T \mathbf{M} \mathbf{I}}{M_j^*}$, 其中 j 为

第 j 阶振型; $\bar{\mathbf{M}} = \mathbf{E} + m_0 (\mathbf{M}^*)^{-1} \boldsymbol{\phi}^T I_1 I_1^T \boldsymbol{\phi}$; $\bar{\mathbf{C}} = 2\xi\boldsymbol{\omega} + c_T (\mathbf{M}^*)^{-1} \boldsymbol{\phi}^T I_1 I_1^T \boldsymbol{\phi}$; $\bar{\mathbf{K}} = \boldsymbol{\omega}^2 + k_T (\mathbf{M}^*)^{-1} \boldsymbol{\phi}^T I_1 I_1^T \boldsymbol{\phi}$; $\mathbf{C}_T = -c_T (\mathbf{M}^*)^{-1} \boldsymbol{\phi}^T I_1$; $\mathbf{K}_T = -k_T (\mathbf{M}^*)^{-1} \boldsymbol{\phi}^T I_1$; \mathbf{E} 为 $N \times N$ 的单位矩阵。

联立式(9)与式(10):

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{M}} & \mathbf{o}_1 \\ \mathbf{o}_1^T & m_T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{q}} \\ \ddot{x}_T \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{C}} & \mathbf{C}_T \\ -c_T I_1^T \boldsymbol{\phi} & c_T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{q}} \\ \dot{x}_T \end{Bmatrix} + \\ \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{K}} & \mathbf{K}_T \\ -k_T I_1^T \boldsymbol{\phi} & k_T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{q} \\ x_T \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} \mathbf{a} \\ m_T \end{Bmatrix} \ddot{x}_g \end{aligned} \quad (11)$$

式中, \mathbf{o}_1 是 $N \times 1$ 的 0 向量, 把式(11)改写为矩阵形式得:

$$\mathbf{M}_1 \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}_1 \dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}_1 \mathbf{X} = \mathbf{r} \ddot{x}_g \quad (12)$$

式中, $\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{M}} & \mathbf{o}_1 \\ \mathbf{o}_1^T & m_T \end{bmatrix}$; $\mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{C}} & \mathbf{C}_T \\ -c_T I_1^T \boldsymbol{\phi} & c_T \end{bmatrix}$; $\mathbf{K}_1 =$

$$\begin{bmatrix} \bar{\mathbf{K}} & \mathbf{K}_T \\ -k_T I_1^T \boldsymbol{\phi} & k_T \end{bmatrix}; \mathbf{r} = - \begin{bmatrix} \mathbf{a} \\ m_T \end{bmatrix}; \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ x_T \end{bmatrix}。$$

引入状态变量:

$$\mathbf{y} = [\dot{\mathbf{X}} \ \mathbf{X}]^T \quad (13)$$

可得一阶微分方程:

$$\mathbf{M}_2 \dot{\mathbf{y}} + \mathbf{K}_2 \mathbf{y} = \boldsymbol{\alpha} \ddot{x}_g \quad (14)$$

式中, $\mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{o}_2 & \mathbf{M}_1 \\ \mathbf{M}_1 & \mathbf{C}_1 \end{bmatrix}$; $\mathbf{K}_2 = \begin{bmatrix} -\mathbf{M}_1 & \mathbf{o}_2 \\ \mathbf{o}_2 & \mathbf{K}_1 \end{bmatrix}$; $\boldsymbol{\alpha} = \begin{bmatrix} \mathbf{o}_3 \\ \mathbf{r} \end{bmatrix}$;

\mathbf{o}_2 是 $(N+1) \times (N+1)$ 的 0 矩阵; \mathbf{o}_3 是 $1 \times (N+1)$ 的 0 向量。

2 地震动系列响应

式(14)特征值矩阵为 $\mathbf{P} = -\frac{\mathbf{V}^T \mathbf{K}_2 \mathbf{U}}{\mathbf{V}^T \mathbf{M}_2 \mathbf{U}}$, 对应右

特征向量矩阵 \mathbf{U} 和左特征向量矩阵 \mathbf{V} 。

引入复模态变换:

$$\mathbf{y} = \mathbf{U} \mathbf{z} \quad (15)$$

方程(14)最终可化简成:

$$\dot{\mathbf{z}} - \mathbf{P} \mathbf{z} = \boldsymbol{\eta} \ddot{x}_g \quad (16)$$

式中, $\boldsymbol{\eta} = (\mathbf{V}^T \mathbf{M}_2 \mathbf{U})^{-1} \mathbf{V}^T \boldsymbol{\alpha}$ 。

式(16)分量形式为:

$$\dot{z}_k - p_k z_k = \eta_k \ddot{x}_g, \quad k = 1 \sim 2N + 2 \quad (17)$$

根据虚拟激励法^[31], 式(17)的频域解 $z_k(\omega)$ 为:

$$z_k(\omega) = \frac{\eta_k}{i\omega - p_k} \sqrt{S_{\ddot{x}_g}(\omega)} e^{i\omega t}, \quad k = 1 \sim 2N + 2 \quad (18)$$

式中, $S_{\ddot{x}_g}(\omega)$ 为地震激励加速度 \ddot{x}_g 功率谱密度函数; i 为虚数单位, 且 $i = \sqrt{-1}$ 。

通过复模态法解耦, 运用虚拟激励法, 结合式(7)、式(15)、式(17)、式(18)可得 TLD 耗能结构系统系列响应的频域解, 各表达式如下:

结构第 i 层位移频域解 $x_i(\omega)$ 与速度频域解 $\dot{x}_i(\omega)$ 为:

$$x_i(\omega) = \sum_{j=1}^N \phi_{i,j} q_j = \sum_{j=1}^N \phi_{i,j} \sum_{k=1}^{2N+2} u_{N+1+j,k} z_k(\omega) = \sum_{k=1}^{2N+2} \bar{A}_{i,k} z_k(\omega), \quad i=1 \sim n \quad (19)$$

$$x_T(\omega) = \sum_{k=1}^{2N+2} u_{2N+2,k} z_k(\omega) \quad (20)$$

$$\dot{x}_i(\omega) = \sum_{j=1}^N \phi_{i,j} \dot{q}_j = \sum_{j=1}^N \phi_{i,j} \sum_{k=1}^{2N+2} u_{j,k} z_k(\omega) = \sum_{k=1}^{2N+2} \tilde{A}_{i,k} z_k(\omega), \quad i=1 \sim n \quad (21)$$

$$\dot{x}_T(\omega) = \sum_{k=1}^{2N+2} u_{N+1,k} z_k(\omega) \quad (22)$$

式中, $\phi_{i,j}$ 是实模态前 N 振型矩阵 ϕ 的第 i 行中第 j 元素; $u_{i,k}$ 是式(14)的右特征向量矩阵 U 的第 i 行中第 k 元素; $\bar{A}_{i,k}$ 、 $\tilde{A}_{i,k}$ 均是响应模态强度系数, 分别表示为 $\bar{A}_{i,k} = \sum_{j=1}^N \phi_{i,j} u_{N+1+j,k}$, $\tilde{A}_{i,k} = \sum_{j=1}^N \phi_{i,j} u_{j,k}$ 。

结构第 i 层间位移频域解 $\Delta x_i(\omega)$ 和层间位移频域解 $\Delta \dot{x}_i(\omega)$ 为:

$$\Delta x_i(\omega) = x_i(\omega) - x_{i-1}(\omega) = \sum_{k=1}^{2N+2} \Delta \bar{A}_{i,k} z_k(\omega), \quad i=2 \sim n \quad (23)$$

$$\Delta x_1(\omega) = x_1(\omega) \quad (24)$$

$$\Delta \dot{x}_i(\omega) = \dot{x}_i(\omega) - \dot{x}_{i-1}(\omega) = \sum_{k=1}^{2N+2} \Delta \tilde{A}_{i,k} z_k(\omega), \quad i=2 \sim n \quad (25)$$

$$\Delta \dot{x}_1(\omega) = \dot{x}_1(\omega) \quad (26)$$

式中, $\Delta \bar{A} = \sum_{j=1}^N (\phi_{i,j} u_{N+1+j,k} - \phi_{i-1,j} u_{N+1+j,k})$; $\Delta \tilde{A}_{i,k} = \sum_{j=1}^N (\phi_{i,j} u_{j,k} - \phi_{i-1,j} u_{j,k})$ 。

式(19)~式(26)同是 $z_k(\omega)$ 函数, 系列响应频域内的统一表达式:

$$Y(\omega) = \sum_{k=1}^{2N+2} A_k z_k(\omega) \quad (27)$$

式中, A_k 由式(19)~(26)确定。

3 结构响应谱矩

3.1 频率响应函数二次式分解

根据虚拟激励法, 式(26)系统系列响应 $Y(\omega)$ 功率谱可表示为:

$$S_Y(\omega) = \sum_{k=1}^{2N+2} \sum_{j=1}^{2N+2} A_k A_j z_k(\omega) z_j^*(\omega) \quad (28)$$

式中, $z_j^*(\omega)$ 为 $z_j(\omega)$ 的共轭项, $z_j^*(\omega) = z_j(-\omega)$ 。

将 $z_k(\omega)$ 代入式(28)得:

$$S_Y(\omega) = \sum_{k=1}^{2N+2} \sum_{j=1}^{2N+2} \left[\frac{\eta_k A_k}{i\omega - p_k} \sqrt{S_{\bar{x}_k}(\omega)} e^{i\omega t} \times \frac{\eta_j A_j}{-i\omega - p_j} \sqrt{S_{\bar{x}_k}(\omega)} e^{-i\omega t} \right] \quad (29)$$

式中, $S_{\bar{x}_k}(\omega) = \frac{\omega_g^4 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2} \times \frac{\omega^6}{\omega^6 + \omega_c^6} S_0$, 是胡聿贤地震动加速度功率谱。

可把式(29)简化为:

$$S_Y(\omega) = S_{\bar{x}_k}(\omega) H_Y(\omega) \quad (30)$$

$$H_Y(\omega) = \sum_{k=1}^{2N+2} \sum_{j=1}^{2N+2} \frac{A_k \eta_k}{i\omega - p_k} \frac{A_j \eta_j}{-i\omega - p_j} \quad (31)$$

利用 $H_Y(\omega)$ 的对称性, 式(31)可改写为:

$$H_Y(\omega) = \sum_{j=1}^{2N+2} \frac{A_j \eta_j}{i\omega - p_j} \frac{A_j \eta_j}{-i\omega - p_j} + \sum_{k=1}^{2N+1} \sum_{j=k+1}^{2N+2} A_k \eta_k A_j \eta_j \times \left[\frac{1}{i\omega - p_k} \frac{1}{-i\omega - p_j} + \frac{1}{i\omega - p_j} \frac{1}{-i\omega - p_k} \right] \quad (32)$$

可将频率响应函数 $H_Y(\omega)$ 简化为:

$$H_Y(\omega) = \sum_{j=1}^{2N+2} \frac{(A_j \eta_j)^2}{\omega^2 + p_j^2} + 2 \sum_{k=1}^{2N+1} \sum_{j=k+1}^{2N+2} \frac{A_k \eta_k A_j \eta_j}{p_k + p_j} \left[\frac{p_j}{\omega^2 + p_j^2} + \frac{p_k}{\omega^2 + p_k^2} \right] \quad (33)$$

3.2 胡聿贤谱的二次式分解

由胡聿贤谱传统表达式^[28]可知, 表达式中频率最高阶为 ω^6 , 难以直接通过积分获得响应表达式, 故对胡聿贤功率谱通过二次式分解法进行降次。

$$S_{\bar{x}_g}(\omega) = S_0 S_f(\omega) S_g(\omega) \quad (34)$$

式中, $S_f(\omega) = \frac{\omega^6}{\omega^6 + \omega_c^6} = 1 - \frac{\omega_c^6}{\omega^6 + \omega_c^6}$; $S_g(\omega) =$

$$\frac{\omega_g^4 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2}$$

根据代数定理^[35], $S_f(\omega)$ 、 $S_g(\omega)$ 可分别改写为:

$$S_f(\omega) = 1 - \sum_{n=1}^3 \frac{c_{f,n}}{\omega^2 + \omega_{f,n}^2} \quad (35)$$

$$S_g(\omega) = \sum_{m=1}^2 \frac{c_{g,m}}{\omega^2 + \omega_{g,m}^2} \quad (36)$$

式中, $\omega_{f,n}^2 = -\bar{\omega}_{f,n}^2$; $\omega_{g,m}^2 = -\bar{\omega}_{g,m}^2$; $\bar{\omega}_{f,1}^2 = -\omega_c^2$;

$$\bar{\omega}_{f,2}^2 = \frac{(1 + \sqrt{3}i)\omega_c^2}{2}; \quad \bar{\omega}_{f,3}^2 = \frac{(1 - \sqrt{3}i)\omega_c^2}{2}; \quad c_{f,n} =$$

$$\frac{\omega_c^6}{(\omega_{f,n}^2 - \omega_{f,i}^2)(\omega_{f,n}^2 - \omega_{f,j}^2)} (n, i, j=1, 2, 3, \text{且 } n \neq i \neq j);$$

$$\bar{\omega}_{g,1}^2 = (1 - 2\xi_g^2)\omega_g^2 + 2\omega_g^2 \xi_g \sqrt{\xi_g^2 - 1}; \quad \bar{\omega}_{g,2}^2 = (1 -$$

$$2\xi_g^2 \omega_g^2 - 2\omega_g^2 \xi_g \sqrt{\xi_g^2 - 1}, c_{g,m} = \frac{\omega_g^4 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega_{g,m}^2}{\omega_{g,m}^2 - \omega_{g,i}^2} (m, i=1,2, \text{且 } m \neq i)。$$

因此胡聿贤加速度功率谱的二次式分解可表示为:

$$S_{\ddot{x}_k}(\omega) = S_0 \sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^3 \left[1 - \frac{c_{i,n}}{\omega^2 + \omega_{i,n}^2} \right] \left[\frac{c_{g,m}}{\omega^2 + \omega_{g,m}^2} \right] \quad (37)$$

3.3 响应功率谱二次式分解

式(37)、(33)代入式(30)响应功率谱可表示为:

$$S_Y(\omega) = S_0 \sum_{j=1}^{2N+2} (A_j \eta_j)^2 B_j(\omega) + 2S_0 \sum_{k=1}^{2N+1} \sum_{j=k+1}^{2N+2} \frac{A_k \eta_k A_j \eta_j}{p_k + p_j} [p_j B_j(\omega) + p_k B_k(\omega)] \quad (38)$$

式中, $s=j, k$ 。

$$B_s(\omega) = \sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^3 \left[1 - \frac{c_{i,n}}{\omega^2 + \omega_{i,n}^2} \right] \left[\frac{c_{g,m}}{\omega^2 + \omega_{g,m}^2} \right] \frac{1}{\omega^2 + p_s^2} \quad (39)$$

由式(38)、式(39)可知,频率响应函数与胡聿贤谱都是关于频域变量 ω 的二次式,为谱矩封闭解的计算奠定基础。

3.4 系列响应谱矩

由随机振动谱矩公式^[30]可知,结构响应谱矩为:

$$\lambda_{Y,i} = 2 \int_0^{\infty} \omega^i S_Y(\omega) d\omega, i=0 \sim 2 \quad (40)$$

把式(36)、式(37)代入式(38)得:

$$\lambda_{Y,i} = 2S_0 \sum_{j=1}^{2N+2} (A_j \eta_j)^2 T_{j,i} + 4S_0 \sum_{k=1}^{2N+1} \sum_{j=k+1}^{2N+2} \frac{A_k \eta_k A_j \eta_j}{p_k + p_j} (p_j T_{j,i} + p_k T_{k,i}) \quad (41)$$

式中, $T_{j,i} = \int_0^{\infty} \omega^i B_j(\omega) d\omega$, $T_{j,0}$ 、 $T_{j,1}$ 推导及表达式见附录 I。

因此结构响应0阶谱矩为:

$$\lambda_{Y,0} = 2S_0 \sum_{j=1}^{2N+2} (A_j \eta_j)^2 T_{j,0} + 4S_0 \sum_{k=1}^{2N+1} \sum_{j=k+1}^{2N+2} \frac{A_j \eta_j A_k \eta_k}{p_k + p_j} [p_j T_{j,0} + p_k T_{k,0}] \quad (42)$$

式中,

$$T_{v,0} = \sum_{m=1}^2 \frac{\pi c_{g,m}}{2(p_v^2 - \omega_{g,m}^2)} \left[\frac{1}{\omega_{g,m}} - \frac{1}{p_v} \right] - \sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^3 \frac{\pi c_{i,n} c_{g,m}}{2[\omega_{i,n}^2 - \omega_{g,m}^2]} \times \left[\frac{1}{p_v^2 - \omega_{g,m}^2} \left[\frac{1}{\omega_{g,m}} - \frac{1}{p_v} \right] - \frac{1}{p_v^2 - \omega_{i,n}^2} \left[\frac{1}{\omega_{i,n}} - \frac{1}{p_v} \right] \right], v=j, k。$$

结构响应1阶谱矩为:

$$\lambda_{Y,1} = 2S_0 \sum_{j=1}^{2N+2} (A_j \eta_j)^2 T_{j,1} + 4S_0 \sum_{k=1}^{2N+1} \sum_{j=k+1}^{2N+2} \frac{A_k \eta_k A_j \eta_j}{p_k + p_j} [p_j T_{j,1} + p_k T_{k,1}] \quad (43)$$

式中,

$$T_{v,1} = \sum_{m=1}^2 \frac{c_{g,m}}{2[p_v^2 - \omega_{g,m}^2]} [\ln p_v^2 - \ln \omega_{g,m}^2] - \sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^3 \frac{c_{i,n} c_{g,m}}{2[\omega_{i,n}^2 - \omega_{g,m}^2]} \times \left[\frac{1}{p_v^2 - \omega_{g,m}^2 \omega_{g,m}^2} [\ln p_v^2 - \ln \omega_{g,m}^2] - \frac{1}{p_v^2 - \omega_{i,n}^2} [\ln p_v^2 - \ln \omega_{i,n}^2] \right], \text{其中 } v=j, k。$$

由随机振动理论,0阶谱矩等于结构响应方差,结构系统响应2阶谱矩等于变化率0阶谱矩,因此系统响应2阶谱矩为:

$$\lambda_{Y,2} = \lambda_{\dot{Y},0} \quad (45)$$

式中, $\dot{Y} = dY/dt$ 。

4 算例

为验证本文方法求解 TLD-高层结构在胡聿贤谱地震功率谱系列响应的正确性,研究不同 TLD 参数和受控结构实模态振型个数对结构的影响。

通过有限元 MIDAS GEN 软件对一栋层高均为 3 m 的 10 层一榀框架结构建模。图 3 为框架结构图,图 4 为 MIDAS 模型图,共计 50 个节点。柱、梁混凝土等级均为 C40,截面尺寸分别取 0.7 m × 0.7 m、0.4 m × 0.9 m,梁跨为 9 m。根据现行规范集中质量由荷载组成,利用 MIDAS GEN 对结构建模,结构竖向荷载由混凝土结构自重(26 KN/m³)、楼板荷载(2.5 KN/m²)、竖向活荷载(2.0 KN/m²)、楼面铺装荷载(1.0 KN/m²)组成,其恒载系数为

1.0,活荷载系数为0.5。利用软件特征值分析获取关键结构动力特性的参数(节点集中质量、自振圆频率和结构实模态振型),本次分析选取结构前五阶振型计算。

TLD水箱为 $5\text{ m} \times 4\text{ m} \times 4\text{ m}$,水深 $h=3\text{ m}$,与结构质量比为2.6%,TLD阻尼比取 $\xi_{\tau}=0.05$ ^[36]、 $g=9.8\text{ m/s}^2$,抗震设防烈度为8度,II类场地,胡聿贤谱中低频截止频率 $\omega_c=2\text{ rad/s}$ 。根据文献[37],胡聿贤谱激励的其它参数:场地频率 $\omega_g=15.71\text{ rad/s}$,场地阻尼比 $\xi_g=0.72$,功率谱强度因子 $S_0=61.93 \times 10^{-4}\text{ m}^2/\text{s}^3$,建筑结构阻尼比 $\xi=0.05$ 。

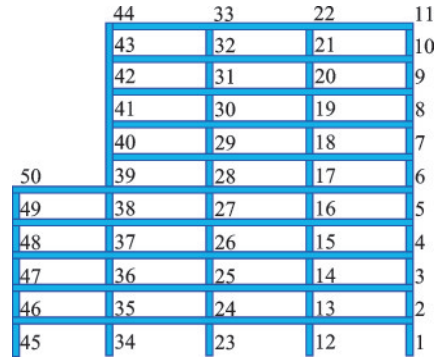


图4 结构节点编号

Fig.4 Node numbering diagram of structure

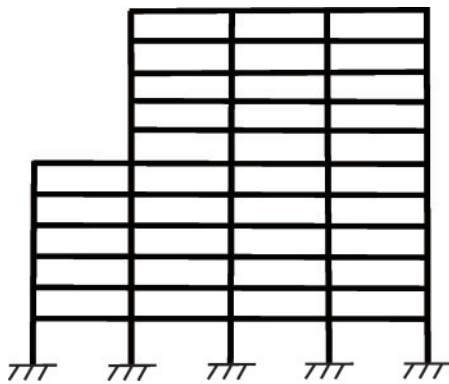


图3 框架结构

Fig.3 Framed structure

4.1 谱矩正确性验证

为了验证本文方法计算结构系统系列响应0~2阶谱矩的正确性,与运用虚拟激励法计算的响应0~2阶谱矩进行对比分析。根据附录II式(2-5)可知,求解结构响应谱矩需对响应功率谱 $S_x(\omega)$ 在 $[0, +\infty]$ 进行积分运算,因虚拟激励法求解谱矩值与积分步长、积分区间有关。通过设定区间在 $[0, 800]$ rad/s,积分步长 $\Delta\omega$ 选取三种工况分别为 $\Delta\omega=1.0\text{ rad/s}$ 、 $\Delta\omega=0.5\text{ rad/s}$ 、 $\Delta\omega=0.01\text{ rad/s}$ 。本文方法求解响应0~2阶谱矩与3种不同积分步长虚拟激励法的响应0~2阶谱矩对比如图5所示。

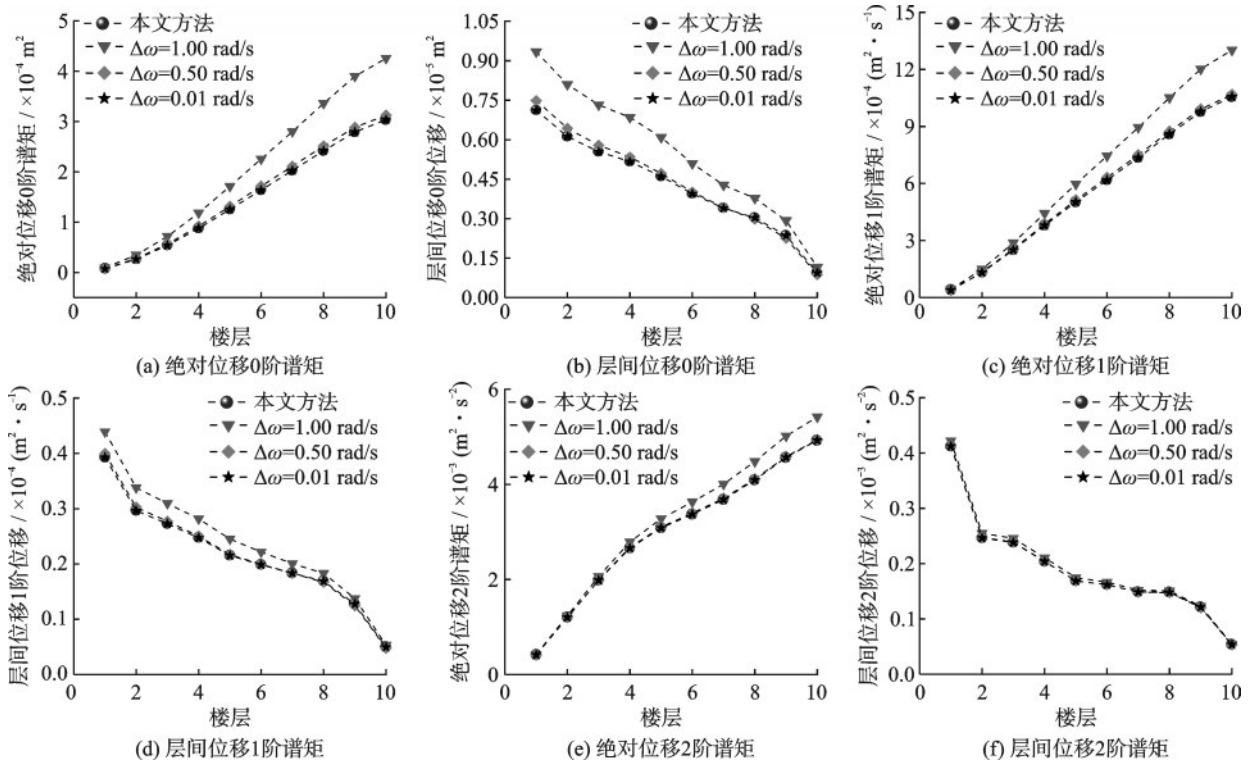


图5 结构响应谱矩

Fig.5 Response spectral moments of structure

由图5可知,频域积分步长 $\Delta\omega$ 越小,虚拟激励法所计算得到的0~2阶谱矩与本文方法所得结果之间的重合度越高,这表明本文方法获得结构系统系列谱矩结果唯一且精度高。当 $\Delta\omega \leq 0.5$ rad/s时,图5各阶谱矩均较接近本文方法所计算结果。

为进一步研究TLD耗能结构系统各节点在地震动激励下响应分析,通过MIDAS GEN软件结构节点集中质量、振型、自振频率参数。为再次验证本文方法的计算系统系列响应0~2阶谱矩正确性,对图4结构各节点响应谱矩分析,其0~2阶绝对位

移、层间位移谱矩与虚拟激励法进行对比分析。虚拟激励法计算上限1 000 rad/s,选取积分步长 $\Delta\omega = 1.50$ rad/s, $\Delta\omega = 0.50$ rad/s, $\Delta\omega = 0.01$ rad/s三种工况下响应谱矩计算结果与本文结果进行了对比,如图6所示。

由图6可知,结构节点响应0~2阶谱矩与虚拟激励法所得结果对比同结构楼层一致,频域积分步长 $\Delta\omega$ 越小,虚拟激励法所得0~2阶谱矩与本文方法所得的谱矩值重合度越高。图5、图6表明本文方法所得TLD减震结构系统系列响应谱矩封闭解具有正确性。

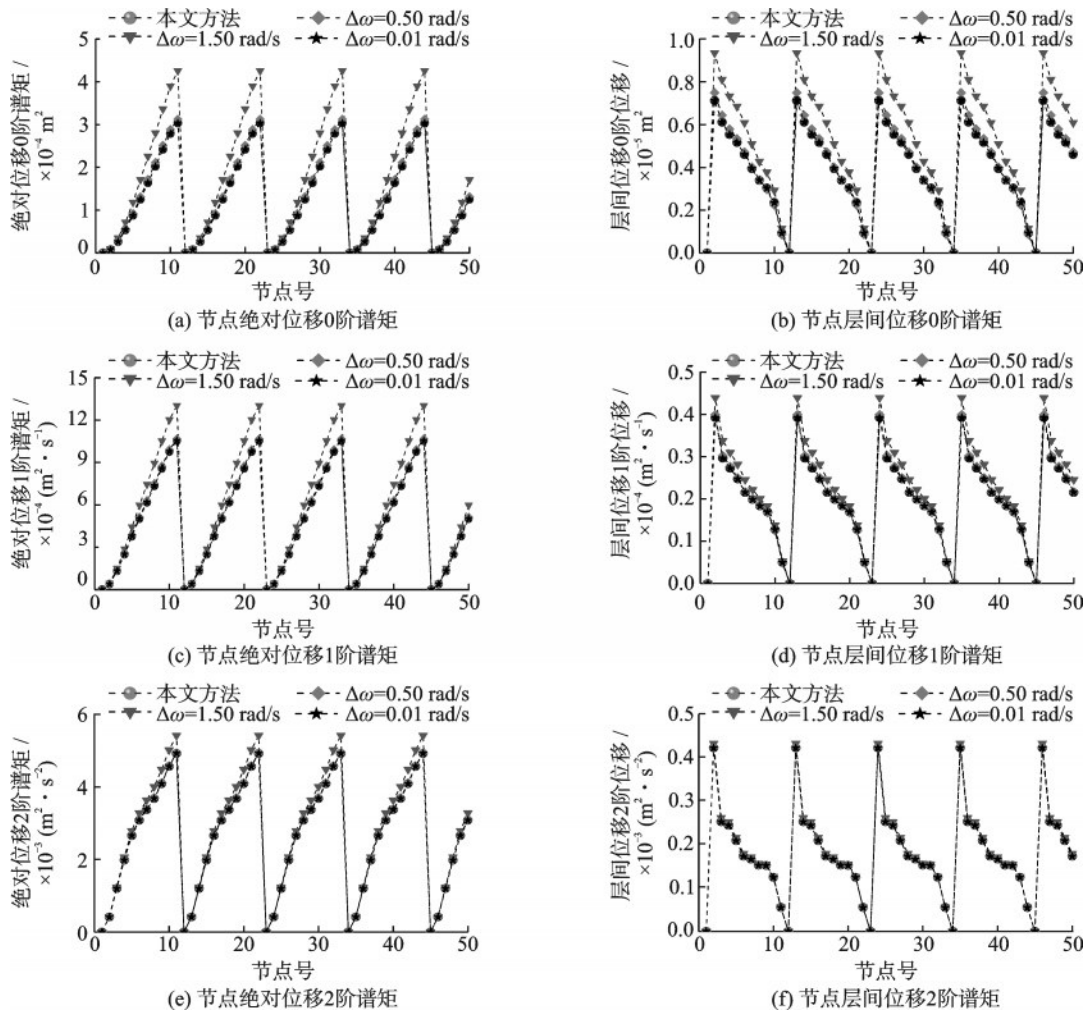


图6 结构节点层间响应谱矩

Fig.6 Inter-floor response spectral moments of structure nodes

4.2 结构振型数影响

振型叠加法是常用动力分析方法,参与计算的振型数目是影响计算结果精度与效率的重要因素。对比结构前一阶振型、前三阶振型、前七阶振型与全十阶振型下结构各响应,其他参数同算例。对比结果如图7所示。

由图7可知,只考虑第一阶振型时,其响应位移方差在第一层、第二层和第十层与其他考虑振型数重叠外,第三层至第九层位移方差均大于其他振型数。考虑结构前三阶振型、前五阶振型和全部振型的响应位移方差图像在所有楼层均重合。可见,在算例背景条件下,考虑前三阶振型响应结果精度可达全振型结构的99%。

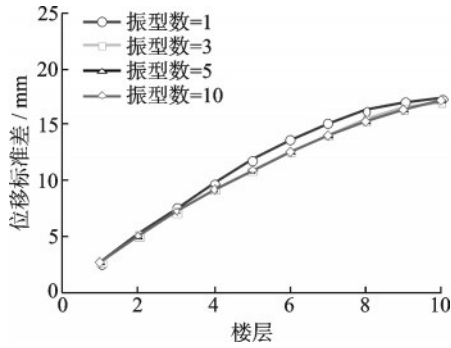


图7 不同振型数对比

Fig.7 Comparison of different number of vibration modes

4.3 TLD 参数的影响

在TLD结构体系设计中,结构位移决定了结构内力和附属结构的安全。为满足结构的抗震性能和经济要求,以减小结构的层间位移目标,分析TLD尺寸、阻尼比参数。利用谱矩方法分析结构第十层位移标准差(δ)在TLD各参数 ξ_T (TLD阻尼比)、 l (TLD最长边长)、 h (TLD高)下的影响,原算例中该层位移标准差为17.7 mm。三参数取值范围分别为:0.05~0.23、4~7.6 m、2~3.8 m,且各点间距分别为:0.01、0.2、0.1 m,其他参数同算例。图8~图10是参数 ξ_T 、 l 、 h 影响下的位移方差(δ)对比。

由图8(a)可见,当固定长度 $l=5.8$ m时,不同高度工况下响应位移标准差均随阻尼比的增大先减小而略增大,且均在阻尼比为0.15时有最优值;在阻尼比不变时,结构位移标准差随高度增大而减小。由图8(b)可见,当固定高度 $h=2.9$ m时,各长度下结构位移标准差亦随长度增大而略增大,且均在阻尼比为0.15时有最优值;阻尼比不变时,结构位移标准差随长度增大而减小。

由图9(a)可知,在固定阻尼比 $\xi_T=0.14$ 时,结构响应位移方差随着长度和高度的增加而减小。图9(b)可知,在固定高度 $h=2.9$ m时,不同阻尼比工况下位移方差均随长度的增加而减小。在同一长度下,阻尼比 $\xi_T=0.05$ 位移方差结果与其他工况相差较大,其他工况下各点相对密集,且均在各长度固定下 $\xi_T=0.15$ 时为最小值。由图10(a)和(b)可知,响应位移方差随着TLD长度和高度的增加而减小,且亦在 $\xi_T=0.15$ 时有最小值。

由图8~图10可知,TLD长度和高度越大结构响应位移方差越小,即TLD液体质量越大结构减震效果越好。在算例背景下,TLD阻尼比 $\xi_T=0.15$ 时,减震效果可达最好。

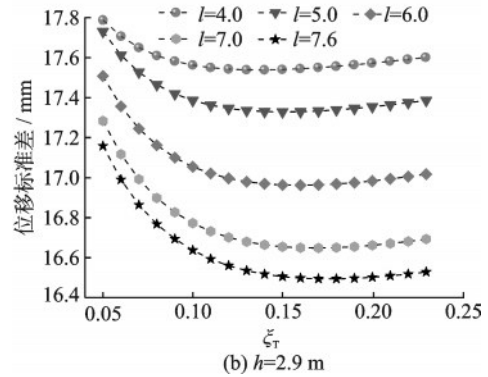
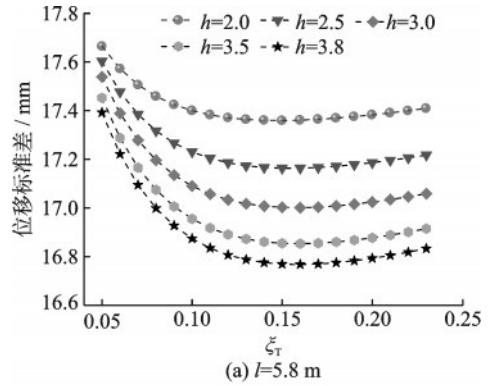


图8 TLD 阻尼比对结构位移方差的影响

Fig.8 Effect of TLD damping ratio on structural displacement variance

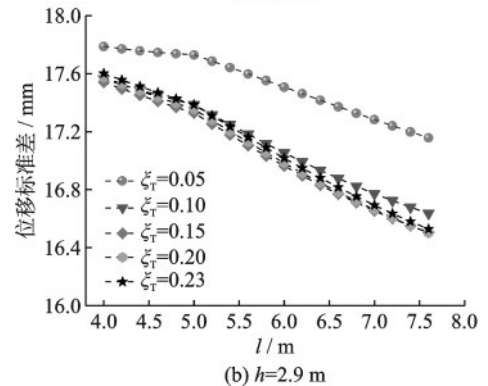
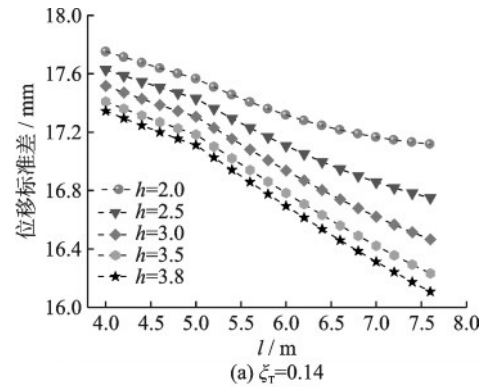


图9 TLD 长度对结构位移方差的影响

Fig.9 Effect of TLD length on structural displacement variance

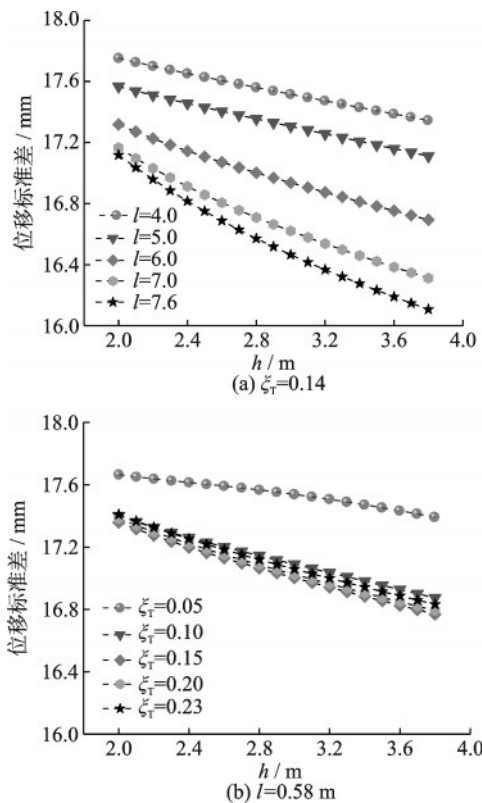


图10 TLD高度对结构位移的影响

Fig.10 Effect of TLD height on structural displacement variance

5 结 论

针对传统方法求解顶层设置TLD的高层建筑结构在胡聿贤激励谱下响应表达式复杂的问题,提出了完整求解结构响应简明解析解法,并利用有限元软件获得结构动力特性的实用分析法,主要研究结论如下:

(1) 本文建立楼顶设置TLD的高层结构体系运动方程,通过振型分解重构广义坐标表示的方程组,利用复模态法对方程组解耦;通过二次式分解法获得了非积分式的绝对位移、层间位移功率谱和0~2阶谱矩。根据算例验证,通过将本文方法所获楼层谱矩和传统方法响应结果对比,并深入研究结构各节点在地震激励下响应谱矩的变化趋势,验证了响应谱矩表达式的精确性和高效性。

(2) 利用有限元MIDAS GEN软件对实体结构建立动力模型,根据实际结构的材料属性、几何尺寸和荷载情况,通过荷载转化为集中质量进行自由振动分析确定结构的质量、刚度、固有频率和振型

等受控结构动力特性,解决了动力方程参数难获取问题并确保了参数的准确性与可靠性,为相关研究和工程实践提供了有力的支撑。

(3) 通过分析结构振型个数选取和TLD关键参数改变对结构系统减震控制的影响。可知结构前三阶振型所得的计算结果在精确度上已高达结构全振型的99%,可见一般TLD高层结构前三阶振型计算结果能保证计算精度。一定情况下选取合适TLD的阻尼比和适当增加TLD长度和高度能有效降低结构地震响应。

参考文献:

- [1] 邹万杰,覃永安,李创第,等.基础隔震耗能结构基于Kanai-Tajimi谱的随机响应简明解法研究[J].世界地震工程,2023,39(3):118-128.
Zou W J, Qin Y A, Li C D, et al. Concise analytic solution to seismic response of base isolated energy dissipating structure under Kanai-Tajimi spectrum excitation [J]. World Earthquake Engineering, 2023, 39 (3) : 118-128. (in Chinese)
- [2] 李书进,孙磊,余桓,等.滚动碰撞式调制质量阻尼器减振性能试验研究[J].振动工程学报,2020,33(5):861-868.
Li S J, Sun L, Yu H, et al. Experimental study on the vibration control performance of pounding tuned rotary mass damper [J]. Journal of Vibration Engineering, 2020, 33(5): 861-868. (in Chinese)
- [3] 窦朋,王志东,凌宏杰,等.调谐液体阻尼器对多层多模态平台结构的运动控制研究[J].振动与冲击,2023,42(14):30-39,55.
Dou P, Wang Z D, Ling H J, et al. Motion control of a multi-layer multi-modal platform structure with a tuned liquid damper [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(14): 30-39, 55. (in Chinese)
- [4] 孙瀚鼎,何浩祥,程扬,等.附加阻尼网的斜底式TLD减震控制理论与试验研究[J].建筑结构学报,2024,45(4):72-85.
Sun H D, He H X, Cheng Y, et al. Theoretical and experimental study on damping net and sloped-bottom tank tuned liquid damper with damping control [J]. Journal of Building Structures, 2024, 45 (4) : 72-85. (in Chinese)
- [5] 张蓝方,张乐乐,谢壮宁,等.内部带阻尼格栅的TLD减振性能试验研究[J].振动工程学报,2022,35

- (3): 674-680.
- Zhang L F, Zhang L L, Xie Z N, et al. Experimental study on vibration reduction performance of tuned liquid dampers with damping screens[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2022, 35(3): 674-680. (in Chinese)
- [6] 张蓝方, 谢壮宁, 周子杰, 等. 带内置可旋转隔板的调谐液体阻尼器减振性能试验研究[J]. *振动与冲击*, 2023, 42(19): 64-69, 103.
- Zhang L F, Xie Z N, Zhou Z J, et al. Test study on vibration reduction performance of tuned liquid damper with built-in rotatable baffles [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(19): 64-69, 103. (in Chinese)
- [7] Tanmoykonar, Aparnaa D G. Flow damping devices in tuned liquid damper for structural vibration control: A Review [J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2021(28): 2195-2207.
- [8] 李创第, 朱力华. 带 TLD 结构基于 Davenport 谱随机风振响应分析和风荷载取值的复模态法[J]. *应用力学学报*, 2007(2): 219-222, 338-339.
- Li C D, Zhu L H. Complex methods for random wind-induced response and equivalent wind action of structures with TLD [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2007(2): 219-222, 338-339. (in Chinese)
- [9] 许国山, 郑震云, 杨凯博, 等. 基于等效力控制方法 TLD 减振结构振动台子结构试验[J]. *地震工程与工程振动*, 2015, 35(5): 113-119.
- Xu G S, Zheng Z Y, Yang K B, et al. Application of equivalent force control method to shaking table substructure testing of structure with TLD [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamic*, 2015, 35(5): 113-119. (in Chinese)
- [10] Housner B G. The dynamic behavior of water tanks [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1963, 53(2): 381-389.
- [11] Vandiver J K, Witome S K. The effect of liquid storage tanks on the dynamic response of offshore platforms [J]. *Applied Ocean Research*, 1987, 119(3): 389-408.
- [12] Li H N, Ying J, Jing L. Simulation of dynamic liquid pressure for tuned liquid damper [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2000, 126(12): 1303-1305.
- [13] 周惠蒙, 吴斌. TLD 振动台子结构试验的数值仿真分析[J]. *震灾防御技术*, 2010, 5(1): 9-19.
- Zhou H M, Wu B. Numerical simulation of substructure shaking table test with tuned liquid damper [J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2010, 5(1): 9-19. (in Chinese)
- [14] 周惠蒙, 吴斌, 谭晓晶, 等. 调谐液体阻尼器的振动台子结构试验研究[J]. *土木工程学报*, 2014, 47(增1): 70-75.
- Zhou H M, Wu B, Tan X J, et al. Shaking table substructure test of tuned liquid damper [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2014, 47(Sup1): 70-75. (in Chinese)
- [15] 孙连杨, 吴玖荣, 钟文坤, 等. 基于 CFD/CSD 耦合分析的内置竖向挡板 TLD 高层建筑风振控制研究[J]. *振动工程学报*, 2025, 38(2): 292-301.
- Sun L Y, Wu J R, Zhong W K, et al. CFD/CSD coupling numerical simulation on wind-induced vibration control of tall building and TLD system with built-in vertical baffles [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2025, 38(2): 292-301. (in Chinese)
- [16] 潘毅, 张兰林, 林旭川, 等. 泸县 6.0 级地震城市建筑群震害模拟与震害机理分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2024, 44(5): 977-986.
- Pan Y, Zhang L L, Lin X C, et al. Simulation and mechanism analyses on damage of urban buildings Subjected to M_s 6.0 Luxian Earthquake [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2024, 44(5): 977-986. (in Chinese)
- [17] 李安琪, 李宏男, 张皓, 等. 考虑地震转动分量作用的砌体结构易损性分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2023, 43(4): 763-769.
- Li A Q, Li H N, Zhang H, et al. Vulnerability analysis of masonry structure considering the action of rotational component of ground motion [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2023, 43(4): 763-769. (in Chinese)
- [18] 闫龙, 阮鑫鑫, 刘章军. 随机地震作用下 BRB 加固既有结构的可靠度分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2023, 43(3): 444-452.
- Yan L, Ruan X X, Liu Z J. Reliability analysis of existing structures strengthened by BRB under stochastic earthquake [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2023, 43(3): 444-452. (in Chinese)
- [19] Housner B G. Characteristics of strong-motion earthquakes [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1947, 37(1): 19-31.
- [20] Kanai K. An empirical formula for the spectrum of strong earthquake motions [J]. *Bulletin of Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, 1961, 39(1): 86-95.
- [21] Tajimi H. A statistical method of determining the maxi-

- mum response of a building structureduring an earthquake[C]//Proc. Second World Conf. Tokyo: [s.n.], 1960: 781-797.
- [22] Ge X G, Li C D, Azim I, et al. Structural dynamic responses of linear structures subjected to Kanai-Tajimi excitation[J]. Structures, 2021, 34: 3958-3967.
- [23] Chodrati A G, Bagheri A, Fadavi M. New method for generation of artificial ground motion by a nonstationary Kanai-Tajimi model and wavelet transform[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2007, 26(6): 209-723.
- [24] 刘美华, 邹万杰, 葛新广, 等. 基于欧进萍谱的广义 Maxwell 耗能结构随机响应简明解法[J]. 振动与冲击, 2022, 41(4): 124-133.
- Liu M H, Zou W J, Ge X G, et al. A concise analytic solution to seismic response of structure with generalized Maxwell dampers under Ou Jinping spectrum excitation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(4): 124-133. (in Chinese)
- [25] Chen M, Liang X G, Yang Z W, et al. Analytical study on the random seismic responses of an asymmetrical suspension structure[J]. Buildings, 2023, 12: 1435.
- [26] Li C D, Wang R B, Jiang L F, et al. Dynamic analysis of damping structures considering support stiffness[J]. Structures, 2023, 57:105297.
- [27] 李创第, 王瑞勃, 江丽富, 等. 混联 I 型惯容系统基于李鸿晶谱的地震响应分析[J]. 计算力学学报, 2023, 40(6): 928-935.
- Li C D, Wang R B, Jiang L F, et al. Seismic response analysis of series-parallel-I inerter system subjected to Li Hongjing spectrum excitation [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2023, 40(6): 928-935. (in Chinese)
- [28] 邹万杰, 刘美华, 李创第, 等. 基于胡聿贤谱的带支撑广义 Maxwell 阻尼隔震结构随机响应分析[J]. 力学学报, 2022, 54(9): 2601-2615.
- Zou W J, Liu M H, Li C D, et al. Seismic response analysis of generalized Maxwell damping isolated structure with braces under HU Yuxian spectrum excitation [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2022, 54(9): 2601-2615. (in Chinese)
- [29] Zheng X W, Li H N, Lv H L, et al. Bayesian-based seismic resilience assessment for high-rise buildings with the uncertainty in various variables[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 51: 104321.
- [30] 方同. 工程随机振动[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [31] 林家浩. 随机振动的虚拟激励法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [32] 葛新广, 龚景海, 李创第. 线性结构基于 Kanai-Tajimi 谱的随机地震动响应分析的新解法[J]. 振动与冲击, 2020, 39(22): 60-66.
- Ge X G, Gong J H, Li C D. Novel method for the random seismic response analysis of linear structures subjected to Kanai-Tajimi excitation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(22): 60-66. (in Chinese)
- [33] Ge X G, Gong J H, Li C D. Novel method for the random seismic response analysis of linear structures subjected to Kanai-Tajimi excitation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(22): 60-66.
- [34] Ge X G, Li C D, Azimi, et al. Structural dynamic responses of linear structures subjected to Kanai-Tajimi excitation[J]. Structures, 2021, 34: 3958-3967.
- [35] 李创第, 王瑞勃, 江丽富, 等. 多自由度混联 I 型惯容减震系统地震响应分析[J]. 振动与冲击, 2023, 42(22): 19-28.
- Li C D, Wang R B, Jiang L F, et al. Seismic response analysis of multi-degree-of-freedom structures with a series-parallel layout I inerter system [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(22): 19-28. (in Chinese)
- [36] 欧进萍, 王永富. 设置 TMD、TLD 控制系统的高层建筑风振分析与设计方法[J]. 地震工程与工程振动, 1994, 14(2): 61-75.
- Ou J P, Wang Y F. Wind induced vibration analyses and design methods of tall buildings with tuned mass dampers or tuned liquid dampers [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 1994, 14(2): 61-75. (in Chinese)
- [37] 牛荻涛, 欧进萍. 设计用随机地震动模型与参数的改进[J]. 西安建筑科技大学学报, 1994(1): 30-35.
- Niu D T, Ou J P. Random earthquake ground motion model and its parameter modification used in aseismic design [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology, 1994(1): 30-35. (in Chinese)
- [38] 林家浩, 张亚辉, 赵岩. 虚拟激励法在国内外工程界的应用回顾与展望[J]. 应用数学和力学, 2017, 38(1): 1-32.
- Lin J H, Zhang Y H, Zhao Y. The pseudo-excitation method and its industrial applications in china and abroad [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2017, 38(1): 1-32. (in Chinese)

(本文编辑:张 艺)

附录 I TLD耗能结构虚拟激励法公式推导

$T_{j,0}$ 、 $T_{j,1}$ 推导过程

$$\begin{aligned}
 T_{j,0} &= \int_0^\infty B_j(\omega) d\omega = \sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^3 c_{g,m} \int_0^\infty \frac{1}{\omega^2 + \omega_{g,m}^2} \frac{1}{\omega^2 + p_j^2} \left(1 - \frac{c_{f,n}}{\omega^2 + \omega_{f,n}^2} \right) d\omega = \\
 & \sum_{m=1}^2 c_{g,m} \int_0^\infty \frac{1}{\omega^2 + \omega_{g,m}^2} \frac{1}{\omega^2 + p_j^2} d\omega - \sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^3 c_{f,n} c_{g,m} \int_0^\infty \frac{1}{\omega^2 + \omega_{g,m}^2} \frac{1}{\omega^2 + p_j^2} \frac{c_{f,n}}{\omega^2 + \omega_{f,n}^2} d\omega = \\
 & \sum_{m=1}^2 \frac{c_{g,m}}{p_j^2 - \omega_{g,m}^2} \int_0^\infty \left(\frac{1}{\omega^2 + \omega_{g,m}^2} - \frac{1}{\omega^2 + p_j^2} \right) d\omega - \sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^3 \frac{c_{f,n} c_{g,m}}{\omega_{f,n}^2 - \omega_{g,m}^2} \times \int_0^\infty \left(\frac{1}{\omega^2 + \omega_{g,m}^2} - \frac{1}{\omega^2 + \omega_{f,n}^2} \right) \frac{1}{\omega^2 + p_j^2} d\omega = \\
 & \sum_{m=1}^2 \frac{\pi c_{g,m}}{2(p_j^2 - \omega_{g,m}^2)} \left(\frac{1}{\omega_{g,m}} - \frac{1}{p_j} \right) - \sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^3 \frac{\pi c_{f,n} c_{g,m}}{2(\omega_{f,n}^2 - \omega_{g,m}^2)} \times \left[\frac{1}{p_j^2 - \omega_{g,m}^2} \left(\frac{1}{\omega_{g,m}} - \frac{1}{p_j} \right) - \frac{1}{p_j^2 - \omega_{f,n}^2} \left(\frac{1}{\omega_{f,n}} - \frac{1}{p_j} \right) \right] \quad (1-1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_{j,1} &= \int_0^\infty \omega B_j(\omega) d\omega = \sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^3 \frac{c_{g,m}}{2} \int_0^\infty \frac{1}{\omega^2 + \omega_{g,m}^2} \frac{1}{\omega^2 + p_j^2} \left(1 - \frac{c_{f,n}}{\omega^2 + \omega_{f,n}^2} \right) d\omega^2 = \\
 & \sum_{m=1}^2 \frac{c_{g,m}}{2} \int_0^\infty \frac{1}{\omega^2 + \omega_{g,m}^2} \frac{1}{\omega^2 + p_j^2} d\omega^2 - \sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^3 \frac{c_{f,n} c_{g,m}}{2} \int_0^\infty \frac{1}{\omega^2 + \omega_{g,m}^2} \frac{1}{\omega^2 + \omega_{f,n}^2} \frac{1}{\omega^2 + p_j^2} d\omega^2 = \\
 & \sum_{m=1}^2 \frac{c_{g,m}}{2(p_j^2 - \omega_{g,m}^2)} \int_0^\infty \left(\frac{1}{\omega^2 + \omega_{g,m}^2} - \frac{1}{\omega^2 + p_j^2} \right) d\omega^2 - \sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^3 \frac{c_{f,n} c_{g,m}}{2(\omega_{f,n}^2 - \omega_{g,m}^2)} \times \int_0^\infty \left(\frac{1}{\omega^2 + \omega_{g,m}^2} - \frac{1}{\omega^2 + \omega_{f,n}^2} \right) \frac{1}{\omega^2 + p_j^2} d\omega^2 = \\
 & \sum_{m=1}^2 \frac{c_{g,m}}{2(p_j^2 - \omega_{g,m}^2)} (\ln p_j^2 - \ln \omega_{g,m}^2) - \sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^3 \frac{c_{f,n} c_{g,m}}{2(\omega_{f,n}^2 - \omega_{g,m}^2)} \times \left[\frac{1}{p_j^2 - \omega_{g,m}^2} (\ln p_j^2 - \ln \omega_{g,m}^2) - \frac{1}{p_j^2 - \omega_{f,n}^2} (\ln p_j^2 - \ln \omega_{f,n}^2) \right] \quad (1-2)
 \end{aligned}$$

附录 II 虚拟激励法公式推导

根据文献[38]构造虚拟激励 $\ddot{x}_g(t) = \sqrt{S_{\ddot{x}_g}(\omega)} e^{i\omega t}$, 其中 i 为虚数单位。

将本文式(10)改写为:

$$(-M_1 \omega^2 + C_1 i \omega + K_1) X(\omega) = r \sqrt{S_{\ddot{x}_g}(\omega)} e^{i\omega t} \quad (2-1)$$

得向量 X 的频域解为:

$$X(\omega) = -\frac{r \sqrt{S_{\ddot{x}_g}(\omega)} e^{i\omega t}}{K_1 - M_1 \omega^2 + C_1 i \omega} \quad (2-2)$$

根据振型分解法, 第 i 层响应绝对位移响应为:

$$x_i(\omega) = \sum_{j=1}^n \phi_{i,j} X_{6+j} \quad (2-3)$$

由功率谱密度函数与响应的关系知结构的位移功率谱表达式:

$$S_x(\omega) = x(\omega) x^*(\omega) \quad (2-4)$$

位移的 0~2 阶谱矩的积分表达式如下:

$$\alpha_{x,i}(\omega) = 2 \int_0^\infty \omega^i S_x(\omega) d\omega \quad (2-5)$$