

文章编号 : 1000-4750(2003)04-0024-09

非比例阻尼隔震结构地震响应的实振型分解法

*杜永峰^{1,2}, 李 慧², B.F.Spencer, Jr. (苏磐石)³, 赵国藩¹

(1. 大连理工大学土木水利学院, 大连 116023; 2. 兰州理工大学, 兰州 730050;

3. 美国伊利诺伊大学厄巴纳校区土木与环境工程系, 伊利诺伊 61801)

摘 要: 采用子结构瑞利阻尼模型表达隔震体系的非比例阻尼矩阵, 将实振型分解法与拉普拉斯变换方法联合应用, 建立了任意多自由度非比例阻尼隔震体系时域动力响应的工程算法。以本文作者承担设计的三个实际隔震工程作为算例, 在两种不同输入地震波和三种不同隔震层阻尼水准下, 用本文算法计算地震响应, 并与复振型分解法、Wilson- 法、及 Matlab 下的 Simulink 这三种方法的峰值响应进行了对比。结果表明, 在设计阻尼水准(隔震层阻尼比为 0.21)下, 本文算法与 Wilson- 算法的精度大致相当, 所求得的位移、速度及加速度峰值的最大相对误差分别不超过 0.07%、0.19% 和 0.27%。即使在极大阻尼水准(隔震阻尼比为 0.81)下, 本文算法所求得的所有峰值响应的最大相对误差均不超过 4%。这表明, 当隔震阻尼比不是特别大时, 本文提出的算法完全可以满足工程计算要求。

关键词: 防灾减灾与防护工程; 隔震结构地震响应; 实振型分解法; 非比例阻尼; 结构控制; 动力分析
中图分类号: TU352.12, P315.9 文献标识码: A

REAL MODE SUPERPOSITION METHOD FOR ANALYSIS OF SEISMIC RESPONSE OF NON-PROPORTIONALLY DAMPED ISOLATED STRUCTURES

DU Yong-feng^{1,2}, LI Hui², Billie F. SPENCER, Jr.³, ZHAO Guo-fan¹

(1. Civil and Architectural School, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;

2. Lanzhou University of Science and Technology, Lanzhou 730050, China;

3. Dept of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana and Champaign, IL 61801, USA)

Abstract: An approximate method for analyzing seismic response of non-proportionally damped base isolated structures in time domain is derived by combining real mode superposition and Laplace transform method. The non-proportional damping matrix is expressed in the form of sub structural Rayleigh damping model. Three of the isolated buildings which were designed by the authors have been used as numerical examples, inputting two different earthquake waves under 3 different isolation damping levels. A comparison of calculated results is made with complex modal superposition, the Wilson- method coded in double precision Fortran, and the Simulink method in Matlab. It is shown that under the design damping level defined in this paper, i.e., the isolation damping ratio is 0.21, the result of the present method is basically as accurate as the Wilson- method, and the maximum relative errors of the peak displacement, velocity and acceleration are less than 0.07%, 0.19% and 0.27%, respectively, of their maximum response. Even if under an extremely heavy damping level (isolation damping ratio

收稿日期: 2002-03-10; 修改日期: 2002-11-22

基金项目: 甘肃省建设科技攻关基金(JK99-07)与美国国家自然科学基金(CMS99-00234)联合资助项目

作者简介: *杜永峰(1962), 男, 教授, 博士生, 现任中国振动工程学会结构减振控制委员会理事, 主要从事结构工程研究; (Email: dooyf@sohu.com)

李 慧(1954), 女, 教授, 硕士, 主要从事结构工程研究;

B.F. Spencer, Jr (1958), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事结构控制研究;

赵国藩(1925), 男, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 主要从事结构工程研究

0.81), the maximum relative errors of all peak responses of interest are still less than 4%, indicating that the method presented in this paper is sufficiently accurate for use in engineering analysis.

Key words: disaster prevention mitigation and protection engineering; seismic response of base isolated structure; real mode superposition; non-proportional damping; structural control; dynamic analysis

由于在隔震结构中, 隔震系统与上部结构阻尼特性截然不同, 它们所组成的是一种典型的非比例阻尼体系。非比例阻尼特性对结构动力响应有相当大的影响, 上个世纪中叶以来, 国内外学者一直将非比例阻尼结构的动力响应作为一种特殊议题加以研究, 提出了多种不同的算法^[1,2,3]。上个世纪末的十多年里, 随着结构控振技术研究的不断深入, 以基础隔震、消能减振以及半主动控振为代表的结构控振新技术逐渐在实际工程中得到应用, 给非比例阻尼体系不断赋予新的内涵。具有高阻尼隔震系统及附加阻尼消能装置的控制结构所组成的非比例阻尼体系的动力分析, 在近年来又一次受到国内外学者广泛的重视与研究^[4,5,6]。

求解非比例阻尼体系的方法大体上可以分为实数域分析和复数域分析这两大类。实数域的分析方法有两大优势: 1) 计算结果有明显的工程意义; 2) 分析方法易于为工程设计人员所接受。矩阵摄动法^[7]和拟力法^[8]便属于实域分析方法的典型代表。我国学者周锡元^[9]利用对称形式的状态空间矩阵, 将传统的复振型分解法展开, 建立了用实数表达的一般有阻尼体系的数值解。Kelly^[10]采用实振型分解方法, 针对双自由度基础隔震模型求解相对位移的近似小参数解。然而, 小参数只对极少数特殊种类的隔震结构能够成立, 并且只能估算得到较为粗糙的相对结果。文^[11]对文^[10]算法的双自由度隔震体系的分析精度作了改进, 并推导了常规几何坐标下位移时域动力响应的解析解。本文利用子结构Rayleigh 阻尼模型建立阻尼矩阵, 并将实振型分解算法推广到更一般的多自由度隔震体系。

1 振动体系运动方程及非比例阻尼矩阵处理

选取各质点相对于地面的位移作为运动描述变量, 如图 1。该体系在地震作用下的运动方程可表达为常见的形式:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -\ddot{u}_g [M]\{\mathbf{d}\} \quad (1)$$

式(1)中, $[M]$, $[K]$ 分别为体系的质量、刚度矩阵, $\{u\}$, $\{\dot{u}\}$, $\{\ddot{u}\}$ 分别为各质点相对于地面的位移、

速度和加速度向量。由于隔震结构振动系统的非比例阻尼特性, 与经典阻尼体系不同的是阻尼矩阵 $[C]$ 。这里, 引用分区瑞雷阻尼模型, 可将阻尼矩阵表达为:

$$[C] = [C_0] + [C_r] \quad (2a)$$

$$[C_0] = \mathbf{a}_s [M] + \mathbf{b}_s [K]$$

$$[C_r] = \begin{bmatrix} C_{br} & [0] \\ \{0\} & [0] \end{bmatrix} \quad (2b)$$

式(2)中, $[C_r]$ 为体现非比例阻尼的余项阻尼矩阵, $C_{br} = (\mathbf{a}_b - \mathbf{a}_s)m_b + (\mathbf{b}_b - \mathbf{b}_s)k_b$, $[C_0]$ 代表经典瑞雷阻尼矩阵, \mathbf{a}_s , \mathbf{b}_s , \mathbf{a}_b , \mathbf{b}_b 分别为上部结构和隔震系统的子结构瑞雷阻尼比例系数, 可由文^[12]中的方法求得。

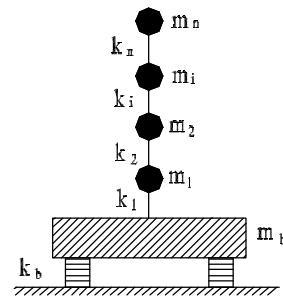


图 1 隔震体系模型示意

Fig.1 Model of isolated system

2 广义坐标运动方程的拉普拉斯变换和简化解答

2.1 运动方程的拉普拉斯变换

借助于振型向量 $[F]$ 及广义坐标向量 $\{y\}$, 并利用振型正交性, 可将式(1)转换为如下阻尼耦联方程

$$\begin{aligned} \ddot{y}_1 + 2\mathbf{w}_1 \mathbf{x}_{01} \dot{y}_1 + \mathbf{w}_1^2 y_1 + \mathbf{I}_{11} \dot{y}_1 \\ + \mathbf{I}_{12} \dot{y}_2 + \cdots + \mathbf{I}_{1n} \dot{y}_n = -\mathbf{r}_1 \ddot{u}_g \\ \ddot{y}_2 + 2\mathbf{w}_2 \mathbf{x}_{02} \dot{y}_2 + \mathbf{w}_2^2 y_2 + \mathbf{I}_{21} \dot{y}_1 \\ + \mathbf{I}_{22} \dot{y}_2 + \cdots + \mathbf{I}_{2n} \dot{y}_n = -\mathbf{r}_2 \ddot{u}_g \\ \dots \\ \ddot{y}_n + 2\mathbf{w}_n \mathbf{x}_{0n} \dot{y}_n + \mathbf{w}_n^2 y_n + \mathbf{I}_{n1} \dot{y}_1 \\ + \mathbf{I}_{n2} \dot{y}_2 + \cdots + \mathbf{I}_{nn} \dot{y}_n = -\mathbf{r}_n \ddot{u}_g \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中, x_{0i} 为常用的瑞雷阻尼比。 I_{ij} 为耦联阻尼比, 其表达式为

$$I_{ij} = \frac{C_{br} \mathbf{f}_{1i} \mathbf{f}_{1j}}{\tilde{m}_i} \quad (4)$$

式(4)中, \tilde{m}_i 为第 i 阶振型的折算质量。对以广义坐标表达的运动方程式(3)两边施行零初值拉普拉斯变换, 并定义

$$\bar{y}_i(s) = L[y_i(t)] = \int_0^\infty e^{-st} y_i(t) dt$$

$$\bar{a}(s) = L[\ddot{u}_g(t)] = \int_0^\infty e^{-st} \ddot{u}_g(t) dt$$

可导出

$$s^2 \bar{y}_1(s) + 2\mathbf{w}_1 \mathbf{x}_{01} s \bar{y}_1(s) + \mathbf{w}_1^2 \bar{y}_1(s) + \mathbf{I}_{11} s \bar{y}_1(s) + \mathbf{I}_{12} s \bar{y}_2(s) + \dots + \mathbf{I}_{1n} s \bar{y}_n(s) = -\mathbf{r}_1 \bar{a}(s)$$

$$s^2 \bar{y}_2(s) + 2\mathbf{w}_2 \mathbf{x}_{02} s \bar{y}_2(s) + \mathbf{w}_2^2 \bar{y}_2(s) + \mathbf{I}_{21} s \bar{y}_1(s) + \mathbf{I}_{22} s \bar{y}_2(s) + \dots + \mathbf{I}_{2n} s \bar{y}_n(s) = -\mathbf{r}_2 \bar{a}(s)$$

...

$$s^2 \bar{y}_n(s) + 2\mathbf{w}_n \mathbf{x}_{0n} s \bar{y}_n(s) + \mathbf{w}_n^2 \bar{y}_n(s) + \mathbf{I}_{n1} s \bar{y}_1(s) + \mathbf{I}_{n2} s \bar{y}_2(s) + \dots + \mathbf{I}_{nn} s \bar{y}_n(s) = -\mathbf{r}_n \bar{a}(s)$$

2.2 运动方程的简化和低阶广义坐标解答

非比例阻尼体系的重要特征之一, 是引起结构的主振型关于阻尼矩阵耦联。Warburton 和 Soni^[13] 提出了依据式(4)所表达的耦联阻尼比 I_{ij} 判断耦联程度的解析指标, Sinha 和 Igusa^[14] 将此指标整理为

$$e_{ij} = \frac{I_{ij} \mathbf{w}_i}{|\mathbf{w}_i^2 - \mathbf{w}_j^2|}, \quad i \neq j$$

作者^[15]采用这一指标, 并结合传递函数方法, 证明了对同一组子结构阻尼系数取值, 隔震结构的阻尼耦联度要远远地小于非隔震体系, 即隔震层的存在, 对结构体系动力响应有解耦效应。而且还证明, 在隔震结构中, 第一阶振型与第二阶振型的耦联度要远远高于第一阶振型与其它各阶振型的耦联度。这里, 将本文算例工程 1 的隔震体系和与之对应的非隔震体系的阻尼耦联度对比列在图 2 之中。同时, 文献[11]的数值结果显示, 在式(5)中, 高阶的阻尼耦合项对低阶方程动力响应的影响是更高一阶的微量。根据这些特点, 求解式(5), 可从求解前二阶振型入手, 先在第一、二个方程中忽略系数 I_{1j} 和 I_{2j} 中对应于 $j > 2$ 的项。可得二元简化方程

$$s^2 \bar{y}_1(s) + 2\mathbf{w}_1 \mathbf{x}_{01} s \bar{y}_1(s) + \mathbf{w}_1^2 \bar{y}_1(s) + \mathbf{I}_{12} s \bar{y}_2(s) = -\mathbf{r}_1 \bar{a}(s) \quad (6)$$

$$s^2 \bar{y}_2(s) + 2\mathbf{w}_2 \mathbf{x}_{02} s \bar{y}_2(s) + \mathbf{w}_2^2 \bar{y}_2(s) + \mathbf{I}_{21} s \bar{y}_1(s) = -\mathbf{r}_2 \bar{a}(s)$$

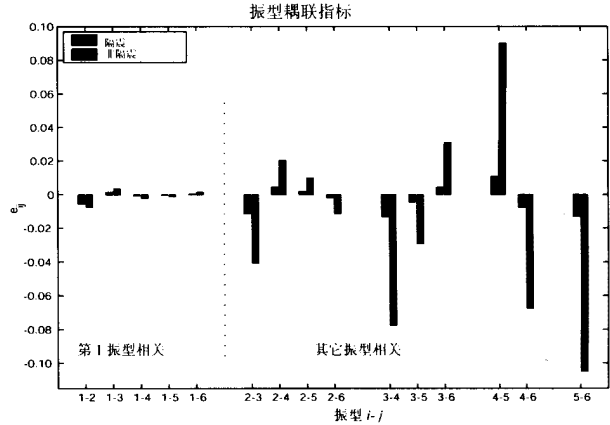


图 2 隔震与非隔震体系各振型阻尼耦联度对比^[15]

Fig.2 Damping coupling indices for isolated and fixed-base systems

仿照与文[11]相类似的方法, 联立求解式(6), 并将结果化成部分分式

$$\bar{y}_1(s) = -\frac{\mathbf{r}_1 \bar{a}(s)}{s^2 + 2\mathbf{w}_1 \mathbf{x}_1 s + \mathbf{w}_1^2} + \frac{\bar{a}(s)(\mathbf{h}_{11} s + \mathbf{q}_{11})}{s^2 + 2\mathbf{w}_1 \mathbf{x}_1 s + \mathbf{w}_1^2} + \frac{\bar{a}(s)(\mathbf{h}_{12} s + \mathbf{q}_{12})}{s^2 + 2\mathbf{w}_2 \mathbf{x}_2 s + \mathbf{w}_2^2} \quad (7a)$$

$$\bar{y}_2(s) = -\frac{\mathbf{r}_2 \bar{a}(s)}{s^2 + 2\mathbf{w}_2 \mathbf{x}_2 s + \mathbf{w}_2^2} + \frac{\bar{a}(s)(\mathbf{h}_{21} s + \mathbf{q}_{21})}{s^2 + 2\mathbf{w}_1 \mathbf{x}_1 s + \mathbf{w}_1^2} + \frac{\bar{a}(s)(\mathbf{h}_{22} s + \mathbf{q}_{22})}{s^2 + 2\mathbf{w}_2 \mathbf{x}_2 s + \mathbf{w}_2^2} \quad (7b)$$

式(7)中

$$\mathbf{h}_{11} = \mathbf{r}_2 \mathbf{I}_{12} a_{21}, \quad \mathbf{h}_{12} = \mathbf{r}_2 \mathbf{I}_{12} c_{21} \quad (8a)$$

$$\mathbf{h}_{21} = \mathbf{r}_1 \mathbf{I}_{21} a_{21}, \quad \mathbf{h}_{22} = \mathbf{r}_1 \mathbf{I}_{21} c_{21}$$

$$\mathbf{q}_{11} = \mathbf{r}_2 \mathbf{I}_{12} b_{21}, \quad \mathbf{q}_{12} = \mathbf{r}_2 \mathbf{I}_{12} d_{21} \quad (8b)$$

$$\mathbf{q}_{21} = \mathbf{r}_1 \mathbf{I}_{21} b_{21}, \quad \mathbf{q}_{22} = \mathbf{r}_1 \mathbf{I}_{21} d_{21}$$

式(8)中

$$a_{ik} = \frac{\mathbf{w}_i^2 - \mathbf{w}_k^2}{D_{ik}}, \quad b_{ik} = \frac{2\mathbf{w}_k^2 (\mathbf{w}_i \mathbf{x}_i - \mathbf{w}_k \mathbf{x}_k)}{D_{ik}} \quad (9a)$$

$$c_{ik} = -\frac{\mathbf{w}_i^2 - \mathbf{w}_k^2}{D_{ik}}, \quad d_{ik} = -\frac{2\mathbf{w}_i^2 (\mathbf{w}_i \mathbf{x}_i - \mathbf{w}_k \mathbf{x}_k)}{D_{ik}} \quad (9b)$$

$$D_{ik} = (\mathbf{w}_i^2 - \mathbf{w}_k^2)^2 + 4(\mathbf{w}_k^2 \mathbf{w}_i \mathbf{x}_i - \mathbf{w}_i^2 \mathbf{w}_k \mathbf{x}_k)(\mathbf{w}_i \mathbf{x}_i - \mathbf{w}_k \mathbf{x}_k) \quad (9c)$$

2.3 高阶广义坐标解答

对于三阶及以上的广义坐标, 可以依次将已经计算得到的低阶广义坐标解答代入式(5)中的阻尼耦合项, 再解出高阶广义坐标, 并表达成部分分式

$$\bar{y}_i(s) = -\frac{\mathbf{r}_i \bar{a}(s)}{s^2 + 2\mathbf{w}_i \mathbf{x}_i s + \mathbf{w}_i^2} + \sum_{j=1}^i \frac{\bar{a}(s)(\mathbf{h}_{ij} s + \mathbf{q}_{ij})}{s^2 + 2\mathbf{w}_j \mathbf{x}_j s + \mathbf{w}_j^2} \quad (10)$$

$i = 3, 4, \dots, n$

式(7)和式(10)中各式的第一项代表非耦联阻尼

$$\{\ddot{u}\} = -[M]^{-1}[C]\{\dot{u}\} - [M]^{-1}[K]\{u\} - \ddot{u}_g\{d\} \quad (17)$$

4 算法特点分析

与常用的 Wilson- 法、复振型分解法两种典型算法相比，本文算法具有如下优点：

1) 与复振型分解法相比，本文算法完全依赖于传统的无阻尼实振型分解法，结构的特征值以及特征向量计算方法为广大工程设计人员所熟知。而且，如果采用文[12]的子结构 Rayleigh 阻尼模型处理非比例阻尼，则只需要进行一次实振型分析；

2) 由于本文算法完全利用无阻尼振型，计算特征值及特征向量时，不必要引用状态空间模型，矩阵及向量的阶数只与结构自由度的数目成正比，而复振型分解法的相应阶数则与结构自由度数目的两倍成正比^[15]。因此，本文算法比复振型分解法更节约内存量；

3) 从本质上讲，本文所建立的实振型分解法，与复振型分解法同属于解析法。与 Wilson- 法相比，本文算法可以很方便地计算出指定时刻的结构动力响应值，不依赖于逐步长递推的模式。更重要的是，本文模型的动力响应表达式中，将由于非比例阻尼特性而产生的阻尼耦合项显式表达，而卷积表达式中只含有非耦合阻尼比，可以为地震响应的反应谱估计等工程简化算法提供解析的理论依据，这是任何一种数值方法所难以实现的。

本文算法与两种常用算法的特点对比列在表 1 之中。

表 1 本文算法与两种常用算法特点对比

Table 1 Comparison of the present method with other two common methods

算法名称	方法属性	特征值问题	特征矩阵阶数	求指定时刻动力响应	与反应谱法联合应用	计算结果精度
复振型分解	解析	复数	2n×2n	便捷	可行	很精确
Wilson-	数值	—	—	较便捷	不可行	精确
本文算法	解析	实数	n×n	便捷	可行	较精确

5 算例及精度对比

为验证本文所提出方法的正确性，选取本文作者先后承担过的实际隔震工程中的三个单体工程，按三个不同的阻尼水准和两种不同的输入地震波，组合出 18 种情形。用本文的算法在 MATLAB 下编制成直接积分程序，将所获得的计算结果与 MATLAB 软件包下的 Simulink 动力模拟、文[9]的复振型分解法，以及用 FORTRAN 语言编制的 Wilson- 法这三种方法的计算结果进行对比。

所采用算例的建筑用途及其主要振动参数如表 2 所列。选用 El Centro (1940, S00E)和 Taft(1952, S69E)两条有代表性的天然地震波，并按我国抗震规范规定的多遇地震峰值进行调幅后，作为输入地震波，见表 3。将这几个隔震结构的实际应用隔震阻尼比 $\zeta_b = 0.21$ 定义为设计阻尼水准，其它两组隔震阻尼比分别被定义作大阻尼和极大阻尼，如表 4 所列。

表 2 隔震结构参数

Table 2 Parameters of isolated structures

工程编号	工程 1		工程 2		工程 3	
建筑用途	办公楼		教室		住宅	
结构概况	五层框架		六层框架，局部七层		八层框架，局部九层	
参数	m_i / kg	$k_i / \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	m_i / kg	$k_i / \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	m_i / kg	$k_i / \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
层号						
1	883967	862021000	1125402	1614600700	746409	854381520
2	879801	729067000	1239436	1613825570	746409	921615130
3	879801	607556000	1239436	1613825570	746409	921615130
4	879801	607556000	1239436	1613825570	746409	921615130
5	685040	607556000	1239662	1613825570	742216.5	921615130
6	-	-	1454693	1371778100	742216.5	921615130
7	-	-	512669	434463600	751354.5	921615130
8	-	-	-	-	575894.3	851184360
9	-	-	-	-	140828	286652190
隔震层	50%	883514	81700000	1103057	601588	90200000
	250%			88100000		54800000

表 3 输入地震波参数

Table 3 Parameters of input earthquakes

输入波编号	1号	2号
地震名称	Imperial Valley	Kern County, CA
台站名称	El Centro	Taft
记录方位	S00E	S69E
发震时间	1940.5.18	1952.7.21
调幅后峰值	0.706 /ms ⁻²	0.706 /ms ⁻²

表 4 结构体系阻尼参数

Table 4 Parameters of damping in the structures

阻尼水准	结构部位	
	隔震层	上部结构
设计阻尼 (DD)	0.21	0.05
大阻尼 (HD)	0.61	0.05
极大阻尼 (ED)	0.81	0.05

经过计算表明,用本文方法与用其它三种方法求得的位移、速度及加速度时程曲线都分别完全重合。以 Simulink 求得的响应作为标准,进行误差分析表明,本文所提出的算法,用于非比例阻尼隔震结构动力分析,具有相当好的精度^[16]。

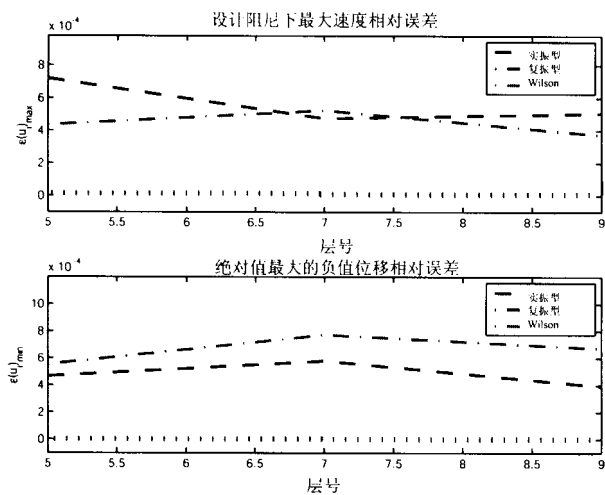


图 3a 位移峰值最大误差: 1号波, 设计阻尼

Fig.3a Max error of peak displacement: earthquake 1, design damping

如果用工程设计中最关心的峰值响应来评判误差, 2号工程在设计阻尼水准下,当输入1号地震波时,位移、速度和加速度响应的最大相对误差分别不超过0.06%、0.09%和0.23%;当输入2号地震波时,位移、速度和加速度响应的最大相对误差分别不超过0.07%、0.19%和0.27%。对其它工程的

峰值误差分析结果也与此基本相当,如图3(a)-(c)所示。

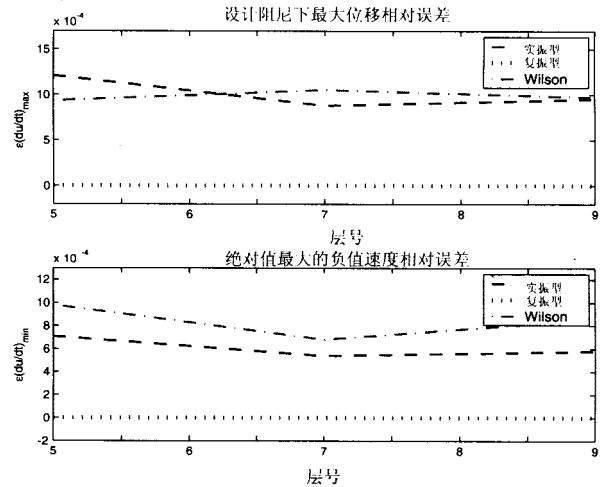


图 3b 速度峰值最大误差: 1号波, 设计阻尼

Fig.3b Max error of peak velocity: earthquake 1, design damping

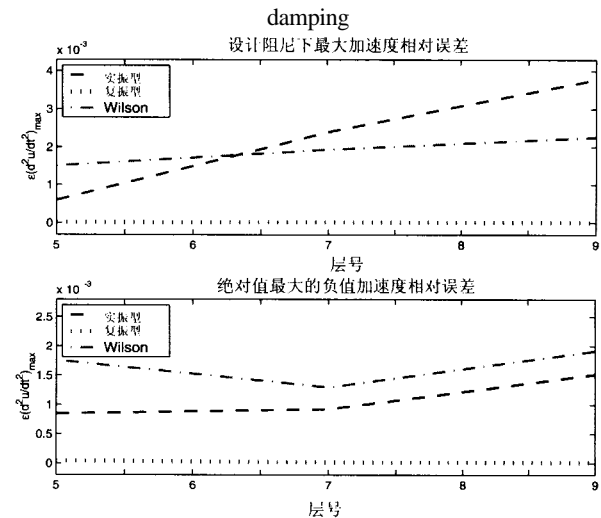


图 3c 加速度峰值最大误差: 1号波, 设计阻尼

Fig.3c Max error of peak acceleration: earthquake 1, design damping

在同一组图中,将本文算法求得的最大相对误差与文[9]的复振型分解法以及 Wilson- 法方法求得的最大相对误差进行对比可知,在设计阻尼水准下,本文算法与 Wilson- 法的最大相对误差基本处于同一数量级,两者在不同工程 and 不同响应中互有大小。这里,只列出了输入1号地震波时各工程的误差对比。其中,上图为最大(正)峰值响应在同一结构所有质点中的最大相对误差,下图为最小(负)峰值响应在同一结构所有质点中的最大相对误差。

此外,从同一组图中可见,不论哪种情形下,复振型分解法的精度是最高的,与用 Simulink 模拟

的结果相比，位移峰值响应的差异一般都在 10^{-6} 左右，加速度峰值响应的差异一般都在 10^{-5} 以下。三种方法计算结果共同点是，位移误差最小，速度误差稍大，加速度的误差最大。这也是动力系统的普遍规律之一，符合线性系统误差传递的基本规则。

随着隔震阻尼比的增大，本文算法的误差有较明显的上升，而 Wilson- 法的误差上升相对较慢，复振型分解法的误差没有明显变化，图 4 中列出了极大阻尼水准下，各种算法的位移在不同工程中的最大误差对比。其中，上图为最大(正)位移峰值响应的相对误差，下图为最小(负)位移峰值响应的相对误差。

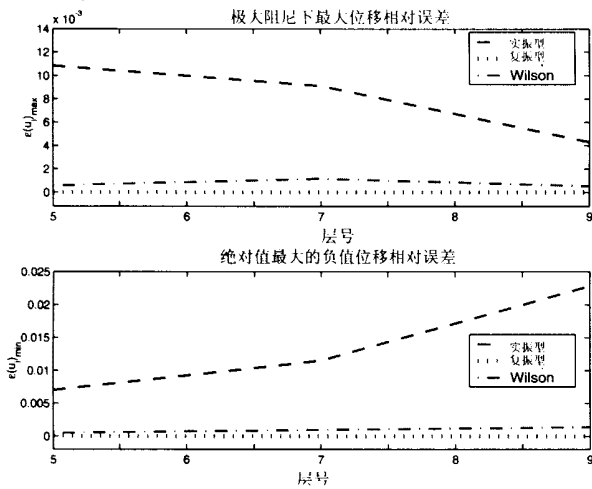


图 4 位移峰值最大误差: 2号波, 极大阻尼

Fig.4 Max error of peak displacement: earthquake 2, extremely heavy damping

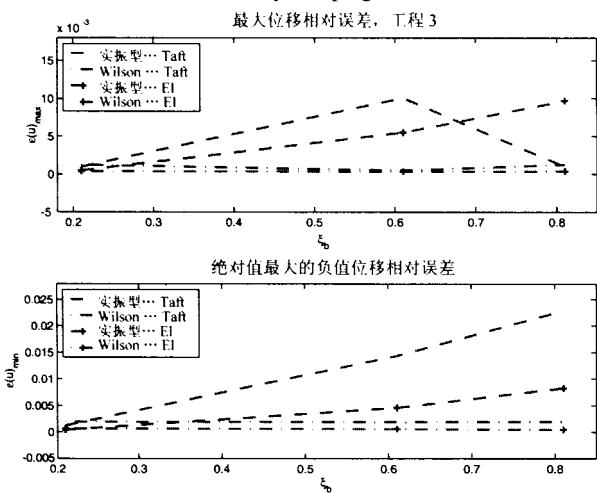


图 5a 位移误差随隔震层阻尼比的变化规律

Fig.5a Variation of error of displacement with isolation damping

图 5(a)-(b)中进一步比较了本文算法和 Wilson- 法所得到的位移和加速度的最大相对误差随隔震阻尼比增大的变化规律。当隔震层临界阻尼比为 0.61(大阻尼)时，本文算法的位移和加速度最大相对误差分别上升到其各自最大响应的 1.35%和 2.13%；当隔震层临界阻尼比为 0.81(极大阻尼)时，本文算法求得的这两个响应量最大相对误差分别为 2.24%和 3.93%，Wilson- 法求得的位移和加速度响应误差分别上升到 0.12%和 0.80%。

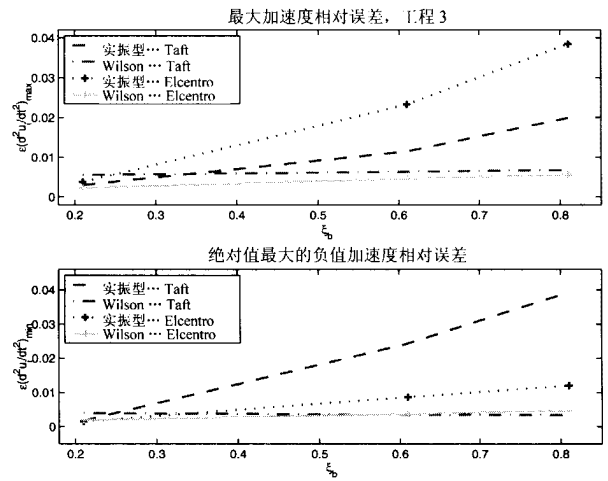


图 5b 加速度误差随隔震层阻尼比的变化规律

Fig.5b Variation of error of acceleration with isolation damping

即使在极大阻尼水准下，复振型分解法求得的位移和加速度响应最大误差仍然分别不超过 9.65×10^{-6} 和 1.96×10^{-4} ，见图 6(a)-(b)。

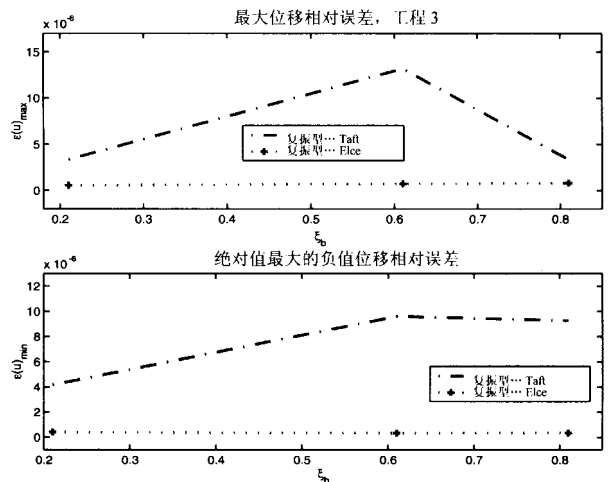


图 6a 复振型法求得的位移误差变化规律

Fig.6a Error of displacement calculated using complex mode

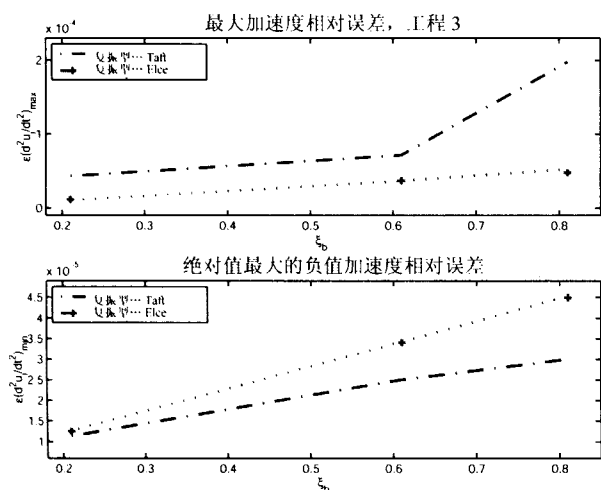


图 6b 复振型法求得的加速度误差变化规律

Fig.6b Error of acceleration calculated using complex mode

6 结论

1) 本文基于隔震层的存在对隔震体系动力响应有解耦作用的物理特性, 提出了对隔震结构这种特殊的非比例阻尼体系用实振型分解法求解其时域动力响应的工程算法。

2) 在设计阻尼水准下, 本文提出的算法与双精度 Fortran 语言所编制的 Wilson- 法结果的精度基本相当。当输入不同地震波时, 本文算法求得的位移、速度及加速度峰值的最大相对误差分别不超过 0.07%、0.19% 和 0.27%。

3) 本文算法属于解析法, 计算只依赖于传统的无阻尼特征值分析, 比复振型算法节约内存; 当采用文[12]的模型处理非比例阻尼模型时, 只需要做一次实振型分析; 本文模型的动力响应表达式中, 将由于非比例阻尼特性而产生的阻尼耦合项显式表达, 而卷积表达式中只含有非耦合阻尼比, 可以为地震响应的反应谱估计等工程简化算法提供解析的理论依据。

参考文献:

[1] Perotti F. Analytical and numerical techniques for the dynamic analysis of non-classically damped linear systems[J]. Soil Dyn. Earthq. Eng., 1994, 13: 197-212.

[2] Mau S T. A subspace modal superposition method for non-classically damped systems[J]. Earthquake Eng. Struct. Dyn., 1988, 16: 931-942.

[3] Veletsos A S and Ventura C E. Modal analysis of non-classically damped linear systems[J]. Earthquake Eng. Struct. Dyn., 1986, 14: 217-243.

[4] D'Aveni A and Muscolino G. Improved dynamic correction method in seismic analysis of both classically

and non-classically damped structures[J]. Earthq. Engrg. and Struc. Dyn., 2001, 30(4):501-517.

- [5] Spencer B F Jr, Johnson E A and Ramallo J C. "Smart" isolation for seismic control[J]. JSME International Journal, Special issue on "Frontiers of Motion and Vibration Control." 2000, Series C, 43(3): 704-711.
- [6] 秦权, 楼磊. 非经典阻尼对悬索桥地震反应的影响[J]. 土木工程学报, 1999, 32(3): 17-22.
Qin Quan, Lou Lei. Effect of non-proportional damping on seismic responses of suspension bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 1999, 32(3): 17-22.
- [7] Claret A M and Venancio-Filho F. A modal superposition pseudo-force method for dynamic analysis of structural systems with non-proportional damping[J]. Earthquake Eng. Struct. Dyn. 1991, 20: 303-315.
- [8] 郭永刚, 曲乃泗, 董毓新. 非比例阻尼对结构动力响应影响的摄动分析方法[J]. 地震工程与工程振动, 1995, 15(4): 48-54.
Guo Yonggang, Qu Naisi, Dong Yuxin. Perturbation analysis method of the non-proportional damping effect on structure dynamic response[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1995, 15(4): 48-54. (in Chinese)
- [9] 周锡元. 一般有阻尼线性体系地震反应的振型分解方法[A]. 国家地震局工程力学研究所主编. 地震工程研究进展(刘恢先 80 寿辰纪念文集)[C]. 北京: 地震出版社, 1992. 120-125.
Zhou Xiyuan. Mode superposition method for calculating seismic response of generally damped linear systems[A]. Institute of Engineering Mechanics, China Seismological Bureau (eds). Advances in Earthquake Engineering Research (Collection in honor of 80th birth day of Prof Liu, H. X.)[C]. Beijing: Seismology Press, 1992. 120-125. (in Chinese)
- [10] J M Kelly. The role of damping in seismic isolation [J]. Earthq. Engrg. and Struc. Dyn. 1999, 28(1): 3-20.
- [11] 杜永峰, 杜小妮, 赵国藩. 用拉普拉斯变换方法求解非比例阻尼隔震结构[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2000, 36(11): 40-45.
Du Yongfeng, Du Xiaoni, Zhao Guofan. Calculation of non-proportionally damped isolated structures using Laplace transform method[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Science), 2000, 36(11): 40-45.(in Chinese)
- [12] Clough R W and Penzien J. Dynamics of structures [M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1993.
- [13] Warburton G B and Soni S R. Errors in response calculations for non-classically damped structures [J]. Earthq Engrg and Struc Dyn, 1977, 5(2): 365-376.

- [14] Sinha R and Igusa T. CQC and SRSS method for non-classically damped structures[J]. Earthq Engrg and Struc Dyn, 1990, 24 (4): 615-619.
- [15] Du Yongfeng, Li Hui and Spencer Billie F Jr. Effect of Non-Proportional Damping on Seismic Isolation[J]. Journal of Structural Control, 2002, 9(3): 205-236.
- [16] 杜永峰, 李慧, Spencer B F Jr, 等. 隔震结构动力时

程响应的一种工程实用算法[J]. 甘肃工业大学学报, 2003, 29(3): 70-75.

Du Yongfeng, Li Hui, Spencer B F Jr, et al. A practical engineering method for calculating time domain response of isolated buildings[J]. Journal of Gansu University of Technology, 2003, 29(3): 70-75. (in Chinese)

(上接 77 页)

参考文献：

- [1] 李银山, 陈予恕, 薛禹胜. 非线性油膜力轴承上不平衡弹性转子的稳定裕度[J]. 机械工程学报, 2002, 38(9): 27-32.
Li Yinshan, Chen Yushu, Xue Yusheng. Stability margin of unbalance elastic rotor in short bearings under a non-linear oil-film force model [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(9): 27-32. (in Chinese)
- [2] 李银山, 孙雨明, 李欣业, 魏剑伟. 不平衡弹性转子系统非线性油膜失稳分析[J]. 太原理工大学学报, 2001, 31(6): 559-561.
Li Yinshan, Sun Yuming, Li Xinye, Wei Jianwei. Oil film whip analysis of elastic unbalance rotor system[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2001, 31(6): 559-561. (in Chinese)
- [3] 李银山, 郝黎明, 树学锋. 强非线性 Duffing 方程的摄动解[J]. 太原理工大学学报, 2000, 31(5): 516-520.
Li Yinshan, Hao Liming, Shu Xuefeng. Asymptotic solution of strong nonlinear Duffing's equation [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2000, 31(5): 516-520. (in Chinese)
- [4] 李银山, 杨宏胜, 于文芳, 孙进龙. Mises 桁架结构的全局分岔和混沌运动[J]. 工程力学, 2000, 17(6): 140-144.
Li Yinshan Yang Hongsheng, Yu Wenfang, Sun Jinlong. Global bifurcation and chaos motion of Mises truss[J]. Engineering Mechanics, 2000, 17(6): 140-144. (in Chinese)
- [5] 李银山. 二次非线性粘弹性圆板的分岔和混沌, 《固体力学的现代进展》[C]. 万国学术出版社, 2000. 105-110.
Li Yinshan. Chaotic motion of a circular plate with quadratic nonlinear viscoelasticity[C]. Advances in Solid Mechanics, World Publishing Corporation, International Academic Publishers, Chengdu, 2000. 105-110. (in Chinese)
- [6] 李银山, 陈予恕, 吴志强. 正交各向异性圆板非线性振动的亚谐分岔[J]. 机械强度, 2001, 23(2): 148-151.

Li Yinshan, Chen Yushu, Wu Zhiqiang. Subharmonic bifurcation of the nonlinear forced flexural vibration of elastic circular plates exhibiting rectilinear orthotropy[J]. Journal of Mechanical Strength, 2001, 23(2): 148-151. (in Chinese)

- [7] 李银山, 杨桂通, 张善元, 魏剑伟. 圆板受迫振动超谐波分岔和混沌运动的实验研究[J]. 实验力学, 2001, 16(4): 347-358.

Li Yinshan, Yang Guitong, Zhang Shanyuan, Wei Jianwei. Experiments on superharmonic bifurcation and chaotic motion of a circular plate oscillator [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2001, 16(4):347-358. (in Chinese)

- [8] 李银山, 陈予恕, 李伟锋. 各种板边条件下大挠度圆板的全局分岔和混沌[J]. 天津大学学报, 2001, 34(6): 718-722.

Li Yinshan, Chen Yushu, Li Weifeng. Global Bifurcation and chaos of a circular plate for various boundary conditions[J]. Journal of Tianjin University Science and Technology. 2001, 34(6): 718-722. (in Chinese)

- [9] 李银山, 高峰, 张善元, 马宏伟. 二次非线性圆板的 $1/2$ 亚谐波解[J]. 机械强度, 2002, 24(4): 505-509.

Li Yinshan, Gao Feng, Zhang Shanyuan, Ma Hongwei. $1/2$ subharmonic solution of a circular plate with quadratic nonlinearity [J]. Journal of Mechanical Strength, 2002, 24(4): 505-509. (in Chinese)

- [10] 李银山, 刘波, 龙运佳, 张伟. 二次非线性粘弹性圆板的 $\frac{2}{1} \oplus \frac{3}{1}$ 超谐波解[J]. 应用力学学报, 2002, 19(3): 20-24.

Li Yinshan, Liu Bo, Long Yunjia, Zhang Wei. $\frac{2}{1} \oplus \frac{3}{1}$ superharmonic solution of a circular plate with quadratic nonlinear viscoelastic material[J]. Journal of Applied Mechanics, 2002, 19(3): 20-24. (in Chinese)