

拟合多维能量反应谱及峰值速度的地震动调整方法

盛涛¹, 施卫星¹, 谢异同²

(1. 同济大学 结构工程与防灾研究所, 上海 200092; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 基于小波变换原理提出了一种以设计用多维能量反应谱及峰值速度为目标的实测地震动调整方法. 该方法首先依据多维能量反应谱与伪加速度谱之间的近似转换关系, 在时域内叠加小波函数实现对实测地震动记录的初步调整, 保留原始地震动的强度、频率非平稳特性; 再应用二阶基数 B-样条小波函数模拟上述调整后的多维地震动场, 通过循环调整拟合精度较低频段的小波系数和对峰值速度贡献最大的小波分量, 实现对设计用能量反应谱及各向峰值速度的同时拟合. 算例分析结果表明, 该方法具有较高的拟合精度, 对初始地震动的能量分布改变较小, 为建筑结构基于能量平衡设计时的多维动力反应分析提供了一种新的地震波合成方法.

关键词: 多维地震动场; 能量反应谱; 峰值速度; 基数 B-样条小波

中图分类号: P315.966; TU352.12

文献标识码: A

A Modification Method of Earthquake Ground Motions for Matching Multi-dimensional Energy Input Spectra and Peak Velocity

SHENG Tao¹, SHI Weixing¹, XIE Yitong²

(1. Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The paper presents a modification method for the recorded earthquake ground motions to match multi-dimensional design input energy spectra with wavelet. According to the approximate relationships between input energy spectra and pseudo acceleration response spectra, the recorded earthquake ground motions are modified to match the target response spectra preliminarily by synthesizing wavelets in time domain. In this process, the non-stationary intensity and frequency characteristics of real records have retained. Then the second cardinal B-spline wavelet is used to simulate the multi-dimensional accelerograms. By modifying the

amplitudes of special wavelets of low fitting accuracy and the wavelets affecting peak values of velocity mostly, the target input energy spectra and peak ground values of velocity can be matched by iterations. The numerical example demonstrates this method is of high-fitting precision with few changes to the original energy distribution, which is a new artificial ground motions' generating method for dynamic analysis of structures designed by energy balance.

Key words: multi-dimensional earthquake ground motions; energy input spectra; peak ground velocity; second cardinal B-spline wavelet

20 世纪 90 年代, 随着两水准速度评价法的成熟, 日本建筑界将能量分析方法与速度评价法相结合, 提出了基于能量平衡的建筑结构抗震、减震设计方法^[1-4]. 该方法给出了罕遇地震下的水平向和竖向能量反应谱以及对应的峰值速度, 同时也规定时程反应分析用的地震波应是拟合了设计用伪加速度反应谱或能量反应谱的实际地震动记录或人工波^[2].

国内外学者对上述地震波的制作方法展开了大量研究. 赵凤新等^[5]在应用三角函数模拟地震波的基础上, 实现了对伪加速度反应谱及峰值速度的拟合. Hancock 等^[6]对已有地震动记录叠加小波函数, 实现了对伪加速度反应谱及峰值加速度的拟合. Iyama^[7-8]在推导了地震动的小波系数与傅里叶幅值谱定量关系的基础上, 给出了拟合能量反应谱的人造地震动合成方法, 但实际上不具有真实地震动的频率非平稳特性^[9], 且不能同时拟合峰值速度. Yazdani^[10]基于离散小波变换原理对相近特性的实测地震动记录应用 Mallat 算法分解后进行组合, 拟合平均化的非线性反应谱及地震动的总输入能量, 但没有给出相关峰值的调整方式.

为了将能量平衡原理准确应用于建筑结构多维

收稿日期: 2011-04-12

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2007CB714202); 国家自然科学基金(50478045)

第一作者: 盛涛(1984—), 男, 博士生, 主要研究方向为地震工程及建筑结构抗震. E-mail: south_west@126.com

通讯作者: 施卫星(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为建筑结构抗震. E-mail: swxtgk@126.com

地震作用下的动力反应分析,本文首先基于时域叠加小波函数法对多维地震动记录进行初步调整,指出其存在的局限性;然后应用小波分析方法模拟上述调整后的多维地震动场,通过调整特定频段小波系数实现对多维设计用能量反应谱及各向峰值速度的同时拟合;该方法不仅保留了正确实测地震记录的强度、频率非平稳特性,且弥补了传统地震动调整方法应用于能量反应谱时的不足。

1 设计用多维能量反应谱

基于能量平衡的建筑物抗震、减震设计方法,采用单自由度体系在 10% 阻尼比条件下的相对输入能量换算值 V_E 作为设计用能量反应谱^[1-3,11-12]。

V_E 的计算表达式如下:

$$\begin{cases} E = \int_0^{t_0} \dot{x} M \ddot{z}_0 dt = \int_0^{t_0} M \dot{x} \dot{z}_0 dx \\ V_E = \sqrt{\frac{2E}{M}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: x 为结构体系相对地面运动的位移; \dot{x} 为相对速度; \ddot{z}_0 为地震动加速度时程; M 为结构体系的质量。

秋山宏根据一维波动理论提出了四类场地条件下的设计用能量反应谱^[1-3];其仍采用速度评价法中的双线型形式,且保留了罕遇地震时水平向峰值速度为 $0.50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的规定;同时通过大量统计分析指出竖向地震动的峰值速度约为水平向的 $1/2 \sim 2/3$, 本文取值为 $0.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

Benavent-Climent 则根据震级的大小分析了设计用能量反应谱 V_E 与伪速度谱 $S_V(T)$ 之间的多种近似转换关系^[11-12], 其中罕遇地震下的常用表达式如下:

$$\begin{cases} S_V(T) = \frac{V_E(T)}{1 + 3h + 1.2\sqrt{h}} \\ S_A(T) = \frac{2\pi}{T} S_V(T) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $S_A(T)$ 为结构的伪加速度反应谱, T 为结构自振周期; h 为阻尼比。

2 已有时域校正法及其局限性

时域叠加小波函数法最早由 Lilhanand 和 Tseng 提出^[13], 后来经过 Hancock 等人^[6] 的一系列改进, 使其成为了一种高效的地震动校正方法。该方法基于 Duhamel 积分原理, 在时域内直接修改原始

地震动记录, 通过循环调整使其和目标反应谱及峰值加速度兼容。

尽管应用时域叠加小波函数法拟合伪加速度谱时具有很高的精度, 但是当应用于能量反应谱时, 由于两者之间为近似转换关系, 收敛性无法控制, 且不能同时拟合峰值速度。

3 小波函数模拟多维地震动场原理

本文应用崔锦泰建立的二阶基数 B-样条小波函数模拟多维地震动场, 主要是考虑到该离散小波基的对称性、紧支撑性和线性相位特性适合处理地震动这类非平稳的能量有限信号。

首先使用二阶基数 B-样条函数 $N_2(t)$ 作为尺度函数, 构造相应的基数 B-样条小波函数 $\psi_2(t)$, 由 $\{2^{j/2} \psi_2(2^j t - k), k \in \mathbf{Z}\}$ 线性张成尺度为 j 的小波空间 W_j , 根据多分辨分析的定义, V_j 与 W_{j-1} 有如下关系:

$$V_j = V_{j-1} + W_{j-1} + \dots + W_{j-1} \quad (3)$$

式中: l 为 V_j 分解的层数。基于上述原理, j 尺度下的多维地震动加速度时程 $a_n(t)$ ($n=1, 2, 3$) 具有如下唯一分解:

$$a_n(t) = \sum_{m=1}^l g_m(t) + a_l(t) \quad (4)$$

式中: $g_m(t)$ 为第 m 层的高频成分; $a_l(t)$ 为第 l 层的低频成分, 其表达式为

$$\begin{cases} g_m(t) = \sum_k d_k^m \psi_2(2^m t - k) \\ d^m = \{d_k^m\}, k \in \mathbf{Z} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} a_l(t) = \sum_k c_k^l N_2(2^l t - k) \\ c^l = \{c_k^l\}, k \in \mathbf{Z} \end{cases} \quad (6)$$

式(5), (6)中: c^l, d^m 分别为第 l 层、第 m 层小波系数的集合; k 为在时间轴上的移动尺度。

通过上述表达式即可实现将 $a_n(t)$ ($n=1, 2, 3$) 在时域和频域同时展开的目的; 通过引入双尺度方程系数 $\{p_k\}, \{q_k\}$ 可实现上述变换的逆过程^[14], 即二阶基数 B-样条小波变换的重构算法。

4 调整方法及步骤

首先根据拟建场地, 选择一组与设计基准期内可能发生的地震震级、震中距等因素相近的两水平向及竖向实测地震动记录 $a_n(t)$ ($n=1, 2, 3$), 应用时域积分及最小二乘法得到去除趋势项后的速度时

程 $v_n(t) (n=1,2,3)$, 然后按目标峰值速度作标准化处理^[1-2].

拟合设计用多维能量反应谱及峰值速度的具体步骤如下:

(1) 应用近似转换关系式(2)将设计用多维能量反应谱 $V_E(T)$ 转换为伪加速度反应谱 $S_A(T)$ 作为目标反应谱, 水平向和垂直向的目标峰值速度分别取值为 $0.50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

(2) 应用时域叠加正、余弦小波函数法调整地震动记录 $a_n(t)$ 拟合目标反应谱, 调整过程中无需控制峰值加速度, 调整后的加速度时程记为 $\bar{a}_n(t)$; 应用式(1)求出 $\bar{a}_n(t)$ 的能量反应谱 $\bar{V}_E(T)$.

(3) 根据能量反应谱 $V_E(T)$ 的频率下限, 应用二阶基数 B-样条小波函数将 $\bar{a}_n(t)$ 根据式(4)~(6) 分解 l 层

$$\bar{a}_n(t) = \sum_{m=1}^l \tilde{g}_{m,n}(t) + \tilde{a}_{l,n}(t) \quad (7)$$

式中: $\tilde{g}_{m,n}(t)$ 为第 m 层的高频成分; $\tilde{a}_{l,n}(t)$ 为第 l 层的低频成分. 将 $\bar{a}_n(t)$ 对应的能量反应谱值 $\bar{V}_{E,n}(T)$ 与目标能量反应谱值 $V_{E,n}(T)$ 在各频率段的比值作为对应小波分量的调幅系数 $\lambda_{m,n,E}$

$$\lambda_{m,n,E} = \frac{\sum_{T=T_{m1}}^{T_{m2}} V_{E,n}(T)}{\sum_{T=T_{m1}}^{T_{m2}} \bar{V}_{E,n}(T)} \quad (m = 1 \sim l, n = 1, 2, 3) \quad (8)$$

式中: T_{m1} 和 T_{m2} 分别为第 m 层小波分量所属频带区间的初始周期值和结束周期值.

(4) 将这些小波分量乘以调幅系数 $\lambda_{m,n,E}$ 后重构, 得到拟合了能量反应谱 $V_{E,n}$ 后的加速度时程 $\bar{a}_n(t)$; 应用时域积分及最小二乘法求出 $\bar{a}_n(t)$ 的速度时程 $\bar{v}_n(t)$ 及其峰值速度, 若峰值速度与目标峰值相差较大, 则再次应用小波变换原理将 $\bar{a}_n(t)$ 分解 l 层, 且执行第 5 步; 反之, 若峰值速度的精度符合要求, 则调整过程结束.

(5) 求出 $\bar{a}_n(t)$ 各小波分量的积分速度时程, 确定对 $\bar{v}_n(t)$ 的峰值速度贡献最大的一个小或多个小波分量 $\tilde{g}_{m,n}(t) (m=j_1 \sim j_2)$, 然后乘以峰值速度调幅系数 $\lambda_{m,n,v}$.

$$\lambda_{m,n,v} = 1 - \frac{V_{PG, \bar{a}_n <t>} - V_{PG, target}}{V_{PG, \tilde{g}_{m,n} <t>}} \quad (m = j_1 \sim j_2) \quad (9)$$

式中: $V_{PG, \bar{a}_n <t>}, V_{PG, \tilde{g}_{m,n} <t>}$ 分别为 $\bar{a}_n(t)$ 及小波分量 $\tilde{g}_{m,n}(t)$ 的峰值速度; $V_{PG, target}$ 为目标峰值速度.

(6) 将乘以调幅系数后的小波分量重构, 得到具有特定速度峰值的加速度时程 $\bar{a}'_n(t)$; 由于影响地震动速度峰值的小波分量对能量反应谱具有一定程度的影响, 因此循环第 4~6 步, 直到对设计用能量反应谱及峰值速度的拟合均控制在所需精度范围内为止(例如 10%).

由于时域叠加小波函数法本身就是基于能量改变最小原则^[6], 而调整小波系数的过程对相位角也几乎不会产生影响, 因此该方法对地震波在时域上的能量分布改变也将较小.

考虑到上述方法多次用到积分及循环运算, 笔者采用了 C 语言与 MATLAB 混合编程的方式实现了程序的编制与调试工作, 极大提高了计算效率.

5 算例分析

为评估某核反应堆建筑多维地震作用下的安全性, 本文根据拟建场地的地震危险性分析及其设计地震分组等资料, 选取 1999 年台湾 7.2 级集集地震中 CHY034 台站记录到的东西向、南北向和竖向加速度时程作为范例(采样频率为 250 Hz), 拟合 II 类场地条件、罕遇地震时的设计用多维能量反应谱及峰值速度.

峰值速度标准化后的三向加速度时程如图 1 所示; 按第 3 步拟合能量反应谱 V_E 前后的速度时程如图 2 所示; 调整前后的能量反应谱如图 3, 4 所示; 峰值速度及能量反应谱的相对误差见表 1.

表 1 第 3 步调整前后的峰值速度相对误差及 V_E 相对误差
Tab.1 The relative errors of PGV and V_E after modification by step 3

地震动分量	峰值速度/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	目标峰值速度/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	峰值速度相对 误差/%	S_A 相对误差 最大值/%	V_E 相对误差 最大值/%
东西分量	61.29	50.00	22.57	5.46	27.33
南北分量	46.35	50.00	7.30	15.29	22.32
竖向分量	19.73	25.00	21.08	5.81	28.57

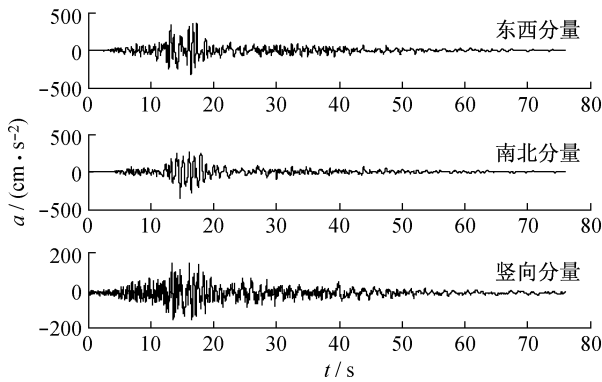
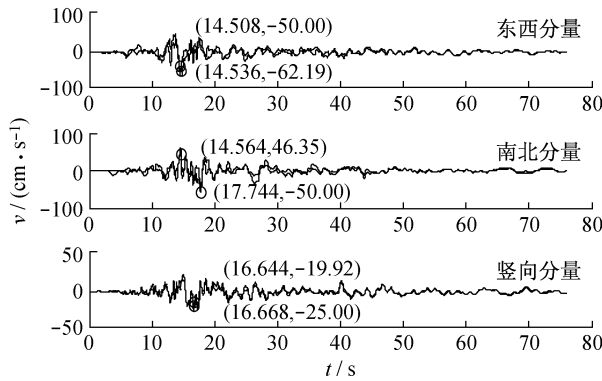


图 1 CHY034 峰值速度标准化后的三分量加速度时程
Fig.1 3-D acceleration time histories of CHY034 after PGV standard



虚线为 CHY034 的速度时程

图 2 第 2 步调整后的三分量速度时程
Fig.2 3-D velocity time histories after modification by step 2

由表 1 及图 4 可知,仅应用时域叠加小波函数法难以达到设计精度要求,且无法控制峰值速度。

应用基数 B-样条小波将 $\bar{a}_n(t)$ ($n=1,2,3$) 分解 10 次(得到 11 个小波分量),按照第 4 步调整后的加速度时程记为 $\bar{a}_n(t)$ 。东西向加速度时程 $\bar{a}_1(t)$ 去漂移后的峰值速度及其发生时刻分别为 $62.19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

表 2 东西向各小波分量所属频带范围及峰值速度、对应的时刻

Tab.2 The frequency range values of PGV and corresponding moment of different wavelets in the horizontal direction						
小波分量编号	1~6	7	8	9	10	11
频带范围/Hz	3.91~250.00	1.95~3.91	0.98~1.95	0.49~0.98	0.25~0.49	0.12~0.25
峰值速度/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	12.22	0.08	24.00	35.36	28.27	7.27
发生时刻/s	17.128	75.860	14.476	14.740	13.182	39.028

循环执行第 4~6 步两次后,能量反应谱的最大相对误差为 7.13%,峰值速度则为 $0.52 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,均控制在 10%以内。

南北向和竖向地震动能量谱的最大相对误差则分别为 7.17%及 9.36%,峰值速度则分别为 $0.52 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,均符合设计精度要求。

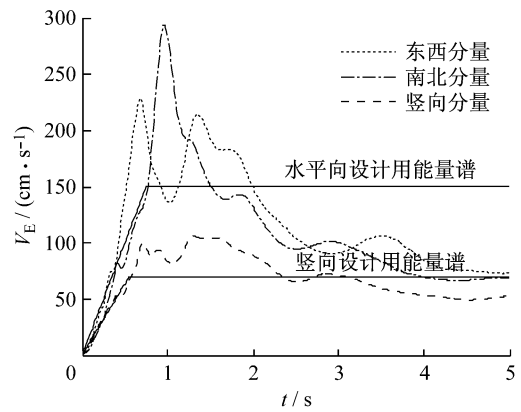


图 3 设计用能量反应谱及 CHY034 的反应谱
Fig.3 Energy input spectra of CHY034 and design spectra

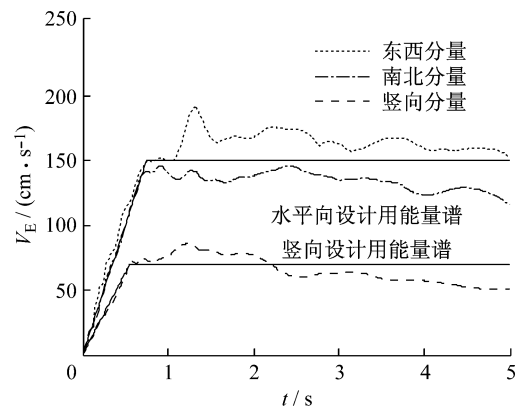


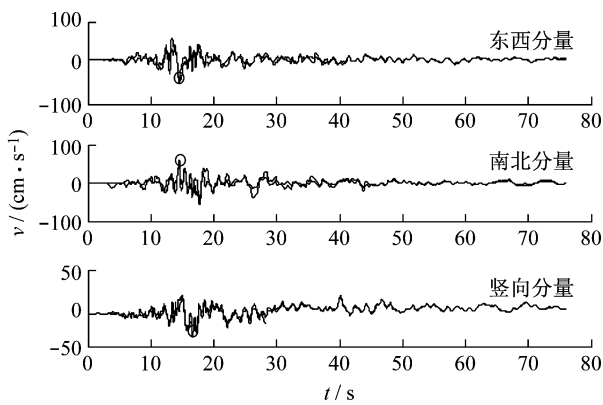
图 4 第 2 步调整后的能量反应谱
Fig.4 Energy input spectra after modification by step 2

s^{-1} 和 14.536 s,各小波分量的峰值速度如表 2 所示。分析可知第 8,9 两个小波分量与 $\bar{a}_1(t)$ 的峰值速度发生时刻最为接近,将其小波系数乘以式(12)的调整系数后重构:

$$\lambda_{8,1,E} = \lambda_{9,1,E} = 1 - (62.19 - 50.00) / (24.00 + 35.36) = 0.795 \quad (10)$$

按上述步骤调整后的速度时程、加速度时程及能量反应谱分别如图 5~7 所示。与图 1,2 比较分析可知,本文方法较好地保留了原多维地震动场的局部时频特性。

为了验证本文方法对地震动能量分布的影响,绘制调整前后的阿里亚斯强度 $I_A^{[6,10,15]}$ 分布曲线,



虚线为 CHY034 的速度时程

图 5 本文方法调整后的三分量速度时程

Fig.5 3-D velocity time histories after modification by the proposed method

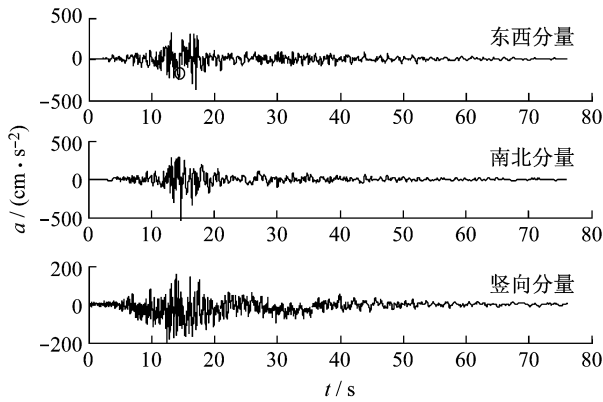


图 6 本文方法调整后的三分量加速度时程

Fig.6 3-D acceleration time histories after modification by the proposed method

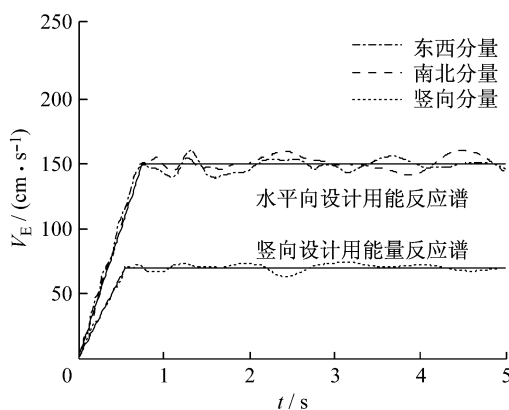


图 7 本文方法调整后的能量反应谱及设计反应谱

Fig.7 Energy input spectra after modification by the proposed method

如图 8 所示(为了便于对比,图 8 仅给出南北分量和竖向分量);由图可见竖向分量基本没有变化,而南北向在 11~13 s 及 24~26 s 之间有较大变化,其余部分与实测地震动记录符合较好;东西向的分布也

基本符合上述趋势,这与时域叠加小波函数法的能量改变最小原则相适应;但竖向地震动的调整效果要明显优于水平向,其与地震动的频谱、幅值等特性之间的经验关系还有待进一步展开研究.

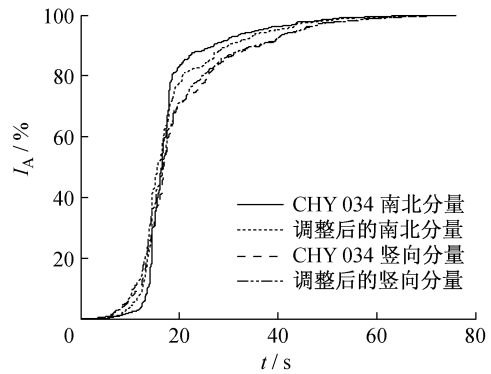


图 8 本文方法调整前后的阿里亚斯强度分布

Fig.8 The values of Arias Intensity pre-and post-modification by the proposed method

6 结论

本文基于小波变换原理提出了一种以多维能量反应谱及各向峰值速度为目标的地震动调整方法.该方法应用基数 B-样条小波函数模拟实际多维地震动场,对已有的时域叠加小波函数法作出改进,弥补了传统的地震动调整方法应用于能量反应谱时,在收敛性及拟合峰值速度方面的不足.算例分析结果表明,该方法能较好地保留原多维地震动场的局部时频特性,对原地震动记录的能量分布改变较小.

当采用其他符合场地条件的不同实测地震动记录时,按本文方法可得到多组时频特性不同,但与多维能量反应谱及各向峰值速度相兼容的地震动时程曲线.但应该看到,由于地震动各分量之间的关系较为复杂,本文方法的广泛应用还有待于多维地震动相关性理论的进一步完善.

参考文献:

[1] 北村春幸. 基于性能设计的建筑振动解析[M]. 裴星洙, 廖红建, 张立, 译. 西安: 西安交通大学出版社, 2004.
Kitamura H. Seismic response analysis methods for performance-based design [M]. Translated by PEI Xingzhu, LIAO Hongjian, ZHANG Li. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2004.

[2] 日本建筑学会. 隔震结构设计[M]. 刘文光, 译. 北京: 地震出版社, 2006.