文章编号:1674-2869(2025)04-0418-08

海底地震动过程的降维建模

赵 楠[1],姜云木[2],刘章军*[1]
1. 武汉工程大学土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430074;
2. 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:基于KIK强震台网的1 325条实测海底强震记录,运用参数识别方法验证了Clough-Penzien谱对于海底地震动的适用性,并结合降维方法,实现海底地震动的降维建模。首先,基于最佳平方逼近理论,以实测平均功率谱为目标值识别Clough-Penzien谱的场地参数,将获得的具有场地参数的Clough-Penzien谱与实测功率谱进行对比,验证了传统Clough-Penzien谱仍适用于海底地震动过程;其次,识别演变功率谱参数并确定演变功率谱参数的最优概率模型;最后,基于随机过程的谱表示-降维模拟方法,用4个基本随机变量精细化模拟海底地震动过程。算例结果表明,海底地震动过程的降维模拟方法仅需生成较少样本,便可达到较高的模拟精度,且该方法具有可重现性。此外,生成的代表性样本集具有概率完备性,可与概率密度演化理论结合,从而为海洋工程的抗震可靠性分析提供有效途径。

关键词:海底地震动;地震动参数;演变功率谱;降维模拟;参数识别
中图分类号:P315.9;TU311.3 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202311006

Dimension-reduced modeling of offshore ground motion processes

ZHAO Nan[1], *JIANG Yunmu*[2], *LIU Zhangjun*[*1]
1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;
2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

Abstract: Based on 1 325 measured offshore strong ground motion records from the KIK-net strong motion network, the applicability of the Clough-Penzien spectrum to offshore seismic motions using parameter identification methods was verified. A dimension-reduced modeling approach for offshore ground motions was subsequently developed. First, based on the best square approximation theory, the site parameters of the Clough Penzien spectrum were identified using the measured average power spectrum as the target value, and the obtained Clough Penzien spectrum with site parameters was compared with the measured power spectrum, verifying that the conventional Clough Penzien spectrum is still suitable for offshore ground processes. Second, the evolutionary power spectrum parameters were identified and the optimal probability model for the evolutionary power spectrum parameters was determined. Finally, based on the spectral representation dimension-reduced simulation method of random processes, the offshore ground motion process was finely simulated using one basic random variable. The results of the example showed that the dimension-reduced method can achieve high simulation accuracy with minimal samples, showing excellent reproducibility. At the same time, the samples generated by the dimension-reduced method have complete probability assignment, which can be combined with probability density evolution theory, thus providing an effective approach for seismic reliability analysis in marine engineering.

收稿日期:2023-11-13
基金项目:国家自然科学基金(52478557)
作者简介:赵 楠,硕士研究生。Email:landunan@126.com
***通信作者**:刘章军,博士,教授。Email:liuzhangjun73@aliyun.com
引文格式:赵楠,姜云木,刘章军. 海底地震动过程的降维建模[J]. 武汉工程大学学报,2025,47(4):418-425.

Keywords: offshore ground motion; parameters of ground motion; EPSD model; dimension-reduction modeling; parameter identification

海洋是地球上最广阔的自然资源，也是人类生存和发展的重要基础。随着人类对海洋资源的不断开发利用，海洋工程建设日益增多，如海上石油平台、海底管道、跨海桥梁、海上风电场等。这些海洋工程结构不仅要承受海水、海浪、海流等常规荷载，还要面临海底地震的威胁。海底地震动是指发生在海洋底部的地震引起的地震波传播和海底振动，它对于海洋资源开发、海底管道布设以及海洋灾害预测等具有重要影响。为此，日本科学技术厅防灾科学技术研究所于1996年布置了6个深海强震台站，用来检测海底地震和海啸，以供研究[1]。

近年来，国内外学者对于海底地震动进行了初步的研究。在国外，Boore等[2]发现海底地震动与常规地震动相比，竖直分量的高频成分更少；Sleefe[3]发现陆地地震动与海底地震动的峰值加速度具有较大的差异性；Nakamura等[4]证明了海水和海底场地条件同样对海底地震动有较大影响。在国内，李飒等[5]认为常规地震动参数并不适用于海底地震动；陈宝魁等[6-7]同样发现海底地震动与常规地震动相比，竖直分量更小，且建立了模拟海底地震传播的数值模型；胡进军等[8-9]利用数值模拟的方法，验证了海底地质构造差异是造成地震动差异的主要原因，并提出了基于Arias强度和累积绝对速度的海底地震动模型。可见，海底地震动的研究尚处于起步阶段，不同于陆地地震动，海底地震动的场地因素尚未清晰，关于海底地震动的特性仍需要进一步的研究，且目前所用地震功率谱均源于陆地地震动，亟需一套完整的海底地震动建模方法。

本研究中，首先采用K均值聚类的方法对海底实测强震记录分组（图1），按照分组结果对比实测功率谱和Clough-Penzien谱，验证了Clough-Penzien谱对于海底地震动的适用性。并依据实测数据对海底地震动的演变功率谱进行参数识别，进而引入基于谱表示的降维方法，只用1个基本随机变量便可实现全非平稳地震动过程的降维建模。并且与传统方法相比，运用降维方法[10-12]生成的代表性时程样本具有完备的概率信息，能够与概率密度演化理论相结合[13-14]，从而实现全非平稳地震动作用下海洋复杂工程结构的精细化动力反应及可靠度分析。

1　海底实测强震记录的选取

依据日本KIK强震数据库，从6个海底地震台站中选取了2000—2022年间矩震级M_{W}大于5的1 325条海底实测强震记录。表1所示为6个海底台站的具体信息以及各台站所取海底地震动数据的平均震级和平均震中距：

此外，对海底实测强震记录进行高通滤波、基线校正、5%~95%能量截取等一系列处理，以保证研究结果的准确性。海底台站缺少其场地信息，采用K均值聚类的方法，以矩震级M_{W}和震中距R为依据，可将1 325条实测记录概括为：远场大震、近场中震和近场小震，考虑到远场小震的传播距离过小，因此忽略远场小震。聚类结果如图1所示，可知聚类方法的分组结果与《建筑抗震设计规范》（GB 50011—2010）[15]的地震分组极为相似。表2中给出了不同聚类分组对应的实测强震记录数量及代表性参数的均值。

将海底实测强震记录调幅至0.2g后，图2给出了3个分组的反应谱均值对比结果由此可知，不同分组的反应谱峰值和周期成分有着显著差异，证明了聚类分组方法的有效性。

表1　海底台站信息

Table 1　Information of offshore stations

台站编号	纬度 / (°)	经度 / (°)	选波条数	平均震级	平均震中距 / km	水深 / m
KNG201	34.595 6	139.918 3	68	5.98	194.61	2 197
KNG202	34.739 6	139.839 3	57	6.05	200.42	2 339
KNG203	34.798 3	139.643 5	51	6.01	197.38	902
KNG204	34.893 1	139.571 1	293	5.91	262.67	933
KNG205	34.941 3	139.421 3	410	5.86	294.69	1 486
KNG206	35.096 6	139.377 8	446	5.83	304.90	1 130

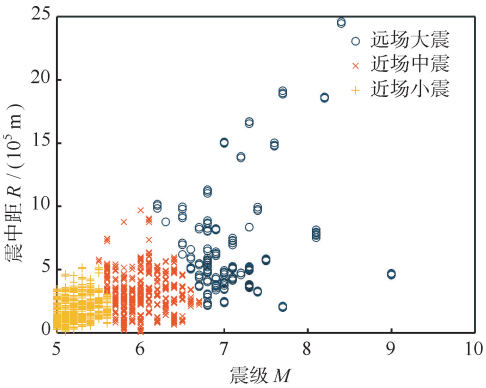

图1 海底地震动场聚类分组结果

Fig. 1 Clustering and grouping results of offshore ground motions

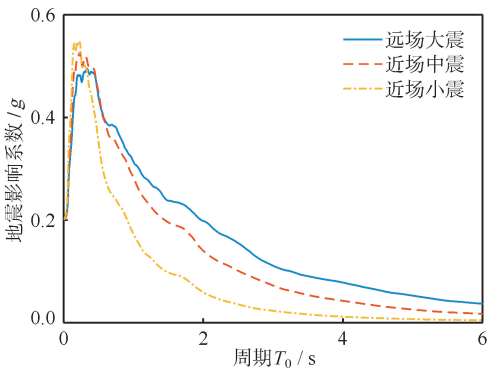

图2 不同聚类分组的反应谱均值对比

Fig. 2 Comparison of response spectrum mean values for different clustering groups

表2 聚类分组结果

Table 2 Cluster grouping results

聚类分组	数量	峰值加速度 /(cm/s²)	峰值速度 /(cm/s)	累积绝对速度 /(cm/s)	累积绝对动量 /(cm·s)	有效持时 / s
远场大震	209	24.67	2.99	287.41	134.31	66
近场中震	502	13.06	1.04	92.49	34.01	50
近场小震	614	15.50	0.82	61.54	15.03	33

2 海底地震动过程演变功率谱建模

2.1 海底地震动过程的功率谱模型适用性验证

目前非平稳地震动过程的功率谱模型主要包括白噪声模型、有限带宽白噪声模型、Kanai-Tajimi谱模型、胡聿贤-周锡元模型以及Clough-Penzien模型等。Kanai-Tajimi谱模型将有限带宽白噪声模型修正为过滤白噪声模型，物理意义明确[16]。胡聿贤-周锡元模型和Clough-Penzien模型都是在Kanai-Tajimi谱模型基础上改进的模型，胡聿贤-周锡元模型的实质是将白噪声进行二次滤波[17]。而Clough-Penzien模型将基岩和场地土均假设为二阶线性滤波器，其优势在于可以对地震动分量中的低频成分加以抑制，降低低频成分对模型准确度的影响[18]。因此对于海底地震动过程，本文选用Clough-Penzien模型，表达式为：

$$\bar{S}(\omega;\ \lambda_{\bar{S}}) = \frac{\omega_g^4 + 4\xi_g^2\omega_g^2\omega^2}{(\omega^2 - \omega_g^2)^2 + 4\xi_g^2\omega_g^2\omega^2} \cdot \frac{\omega^4}{(\omega^2 - \omega_f^2)^2 + 4\xi_f^2\omega_f^2\omega^2} \times 2S_0 \tag{1}$$

其中

$$S_0 = \frac{a_{\max}^2}{\bar{r}^2\omega_e},\ \omega_e = \frac{1}{S_0}\int_0^\infty \bar{S}(\omega;\ \lambda_{\bar{S}})\mathrm{d}\omega \tag{2}$$

式中：ω_g和ξ_g分别为场地土的卓越圆频率和阻尼比；ω_f和ξ_f分别为基岩的卓越圆频率和阻尼比。本文中取$\omega_f = 0.1\omega_g$，$\xi_f = \xi_g$。$a_{\max}^2$为地震动峰值加速度；$\bar{r}$为峰值因子，本文中$\bar{r} = 2.9$。

因此，$\bar{S}(\omega;\ \lambda_{\bar{S}})$的参数向量为：

$$\lambda_S = (\omega_g, \xi_g) \tag{3}$$

使用MATLAB工具箱中“pwelch”函数直接计算出各条海底地震动加速度时程的功率谱，对于第i条实测强震记录$a_i(t)$，其功率谱为$S_i(\omega)$，对估计出的同一场地类别下的单边功率谱求均值，得到该场地类别下的均值功率谱$\bar{S}(\omega)$。进一步，地震动能量曲线可定义为：

$$\bar{E}(\omega) = \int_0^\omega \bar{S}(\omega)\mathrm{d}\omega \tag{4}$$

对于本文采用的Clough-Penzien模型，其地震动的能量曲线可定义为：

$$E(\omega;\ \lambda_S) = \int_0^\omega S(\omega;\ \lambda_S)\mathrm{d}\omega \tag{5}$$

以实测功率谱$\bar{S}(\omega)$为功率谱$S(\omega;\ \lambda_S)$的目标值，利用最佳平方逼近准则，对功率谱参数λ_S进行识别：

$$\int_0^\infty \left| E(\omega;\ \lambda_S) - \bar{E}(\omega) \right|^2 \mathrm{d}\omega \to \min \tag{6}$$

识别结果如表3所示，可知各组地震动的场地参数有着明显差异，随着震级和震中距的变化而发生明显改变。

表3 功率谱参数识别结果

Table 3 Identification results of power spectral density functions

参数	ω_g /(rad/s)	ξ_g
远场大震	8.68	0.56
近场中震	20.64	0.39
近场小震	29.18	0.32

将参数识别结果代入式(1)，各组海底地震动功率谱归一化后的拟合结果如图3示。拟合结果良好，说明在海底地震动过程中依然可以沿用经典的Clough-Penzien谱模型。

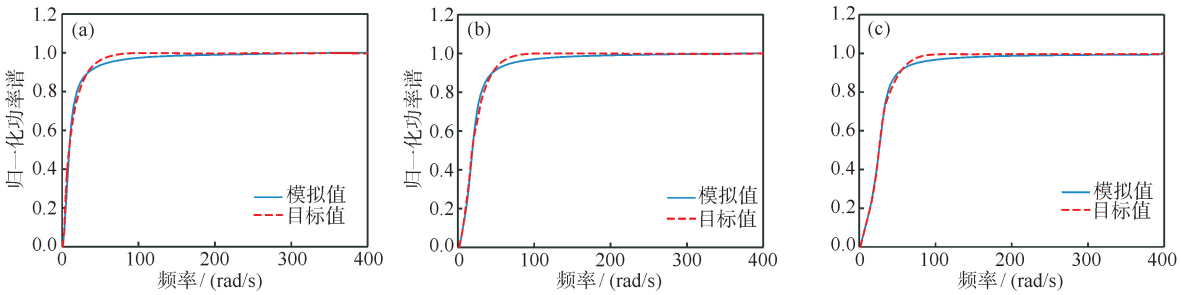

图3　归一化功率谱对比结果：(a)远场大震，(b)近场中震，(c)近场小震

Fig.3　Normalized power spectrum comparison results: (a) far field large earthquake, (b) near field medium earthquake, (c) near field small earthquake

2.2　海底非平稳地震动过程演变功率谱

本文采用强度非平稳演变功率谱，区别在于参数的取值不同[19]：

$$S(\omega,t;\ \lambda_S)=\left|q(t;\ \lambda_q)\right|^2\bar{S}(\omega;\ \lambda_{\bar{S}}) \tag{7}$$

式中，$S(\omega,t;\ \lambda_S)$、$q(t;\ \lambda_q)$和$\bar{S}(\omega;\ \lambda_{\bar{S}})$分别为海底地震动过程的单边演变功率谱、强度调制函数和单边平稳功率谱。

单边平稳功率谱即选用Clough-Penzien模型，强度调制函数则采用Bogdanoff提出的单参数模型[20]，其特点在于只含有单参数地震动峰值到达时刻b，，因为依托实测记录进行参数识别，实测记录的峰值到达时间已知，所以只需要识别平稳功率谱参数即可，不需要另外识别Bogdanoff模型中的参数，由此不仅减轻了参数识别的工作量，同时也排除了调制函数中的参数对于识别结果的干扰，能够保证识别的参数最大程度上表征海底地震动的场地特征。Bogdanoff模型表达式为：

$$q(t;\ \lambda_q)=\exp\left(1-\frac{t}{b}\right)\cdot\frac{t}{b} \tag{8}$$

其中，b为地震动峰值到达时刻，单位为s。因此，$q(t;\ \lambda_q)$的参数向量为$\lambda_q=(b)$。由此，海底地震动过程的演变功率谱$S_S(\omega,t;\ \lambda_S)$的参数向量为：

$$\lambda_S=(\lambda_q,\lambda_{\bar{S}})=(b,\omega_g,\xi_g) \tag{9}$$

2.3　演变功率谱模型参数识别

选用拟合反应谱法识别1 325条地震动的演变功率谱参数，实测记录中峰值到达时间b已知，只需要识别平稳功率谱参数即可。

反应谱和功率谱的转化公式为[21]：

$$\bar{S}_\alpha(\omega_0,\xi;\ \lambda_{S,i})=r(\omega_0;\ \lambda_{q,i})\cdot\sigma(\omega_0,\xi;\ \lambda_{\bar{S},i}) \tag{10}$$

式中：$r(\omega_0;\ \lambda_{q,i})$和$\sigma(\omega_0,\xi;\ \lambda_{\bar{S},i})$分别为等效平稳过程峰值因子的平均值和等效平稳过程的反应方差；ω_0和ξ分别为结构的固有圆频率和阻尼比，本文取$\omega_0\geqslant 1.05$ rad/s，$\xi=0.05$。

根据最佳平方逼近原则，把前6 s反应谱作为目标值，识别参数向量$\lambda_{S,i}$：

$$\int_{1.05}^{\infty}\left|\bar{S}_\alpha(\omega_0;\ \lambda_{\bar{S},i})-S_{\alpha,i}(\omega_0)\right|^2\mathrm{d}\omega_0\rightarrow\min \tag{11}$$

进一步，本文引入了R^2(决定系数)[22]作为参数识别效果的衡量标准。任意一组待拟合数据y的R^2可定义为：

$$R^2=1-\frac{\sum_{m=1}^{M}(\hat{y}_m-y_m)^2}{\sum_{m=1}^{M}(\bar{y}-y_m)^2} \tag{12}$$

式(12)中：M为待拟合数据y的总数量；$\bar{y}$和$\hat{y}$分别为待拟合数据均值和拟合数据。通常，R^2的值越贴近于1，说明拟合效果越好[23]。

选取一条实测强震记录为研究对象，其参数识别结果见表4，反应谱和调制函数的R^2值较高，证明了本文参数识别方法的有效性。

表4　典型实例参数识别结果及误差

Table 4　The parameter identification result of typical example and its error

参数	ω_g/(rad/s)	ξ_g	b/s^{-1}	反应谱 R^2	调制函数 R^2
识别结果	24.55	0.28	0.18	0.87	0.43

反应谱和调制函数的拟合结果分别如图4(a)与图4(b)。图中，实测反应谱和模型走向一致，调制函数的与实测强震记录的归一化能量外包络线一致，说明拟合结果良好，进一步验证了本文识别方法的有效性。

选取正态分布(normal distribution)、耿贝尔分布(Gumbel distribution)、广义极值分布(generalized extreme value distribution)、韦布尔分

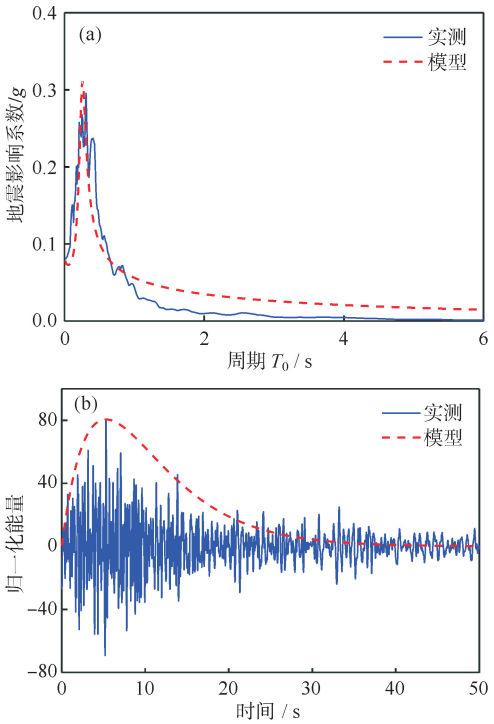

图4 典型实例反应谱识别结果:(a)反应谱,(b)调制函数

Fig. 4 Typical example response spectrum identification results:(a) response spectrum,(b) modulation function

布(Weibull distribution)和伽马分布(Gamma distribution)5种备选概率模型,分别对参数进行拟合[24],并引入BIC信息准则和*K-S*检验[25],确定每个参数的最优概率分布模型,地震动参数的最优概率分布模型如表5所示。

3 海底非平稳地震动过程的降维表达

对于一个演变功率谱密度函数为$S(\omega, t; \lambda_S)$的零均值非平稳地震过程$U_g(t)$,其源谱表达为[12]:

$$U_g(t)=\sum_{k=1}^{N}\sigma_k\left[X_k\cos(\omega_k t)+Y_k\sin(\omega_k t)\right] \tag{13a}$$

$$\sigma_k=\sqrt{2S(\omega_k, t; \lambda_S)\Delta\omega} \tag{13b}$$

式中,$\Delta\omega=\omega_u/N$,ω_u和N分别截断频率为截断项数。$\{X_k, Y_k\}$为标准正交随机变量,满足基本条件:

$$E[X_k]=E[Y_k]=0, E[X_jY_k]=0 \tag{14a}$$

$$E[X_jX_k]=E[Y_jY_k]=\delta_{jk} \tag{14b}$$

其中$E[\cdot]$为数学期望,δ_{jk}为Kronecker-delta记号。

进一步引入随机正交函数进行降维[10-12],将标准正交随机变量集$\{X_k, Y_k\}(k=1,2,\cdots,N)$定义为基本随机向量的正交函数形式:

$$\begin{aligned}X_n&=\sqrt{2}\cos(\bar{n}\Theta+\alpha)\\ Y_n&=\sqrt{2}\sin(\bar{n}\Theta+\alpha)\end{aligned} \tag{15}$$

式(15)中:$n, \bar{n}=1,2\cdots,N$;Θ为$[0,2\pi)$上均匀分布且相互独立的基本随机变量;α作为$[0, 2\pi)$上确定性常数,本文取$\alpha=\pi/4$。

式(15)中,n与$\bar{n}$存在着某种确定性的一一对应的关系,可用MATLAB软件中的rand('*state*', 0)和randperm(N)函数实现这一映射过程,即$\bar{n}$与n的对应关系为$\bar{n}=\mathrm{temp}(n)$[26]。

由此,通过将随机变量X_k和Y_k定义为随机函数的形式,可以实现海底非平稳地震动过程的降维模拟,与传统的Monte Carlo相比,由于式(15)随机函数起到了对基本随机变量数量的约束作用,可将成千上万的基本随机变量降低到仅仅几

表5 演变功率谱参数最优概率模型

Table 5 Optimal probability model of evolutionary power spectrum parameters

场地类别	参数	最优概率分布参数				
		概率分布	均值/形状参数	标准差/尺度参数	位置参数	均值
远场大震	ω_g	GAM	1.93	10.36	—	20.17
近场中震		GAM	3.15	7.46	—	23.58
近场小震		LOGN	3.40	0.48	—	33.71
远场大震	ξ_g	LOGN	−1.10	0.44	—	0.36
近场中震		GAM	5.46	0.07	—	0.39
近场小震		LOGN	−1.34	0.46	—	0.29
远场大震	b / s^{-1}	GAM	1.54	15.28	—	23.47
近场中震		WEI	14.79	1.31	—	13.32
近场小震		WEI	9.97	1.27	—	9.01

个。且传统的Monte Carlo相比本质上属于随机抽样方法，存在概率信息不完备的问题，无法与概率密度演化理论相结合，而降维方法能够很方便地采用数华罗庚、王元提出的数论方法[27]选取基本随机变量的代表性点集。由此生成的代表性点有完备的概率信息，因此降维方法能较好地应用于概率密度演化理论之中，体现出二者天然的一致性。

4　模拟步骤

采用本文方法仅用4个基本随机变量就可以模拟海底地震动过程。利用数论方法[14]选取基本随机变量的初始代表性点集 $\vartheta=\{\vartheta_{1,l},\vartheta_{2,l},\vartheta_{3,l},\vartheta_{4,l}\}_{l=1}^{n_{sel}}$。显然，每个代表性点的赋得概率均为 $P_l=1/n_{sel}$ 且 $\sum_{l=1}^{n_{sel}}P_l=1$。

对于参数 ω_g，ξ_g 和 b，利用初始代表性点集 $\vartheta_{1,l}\sim\vartheta_{3,l}$，并结合表5中给出的参数最优概率分布模型进行生成，其中运用到随机变量的反概率变化方法：

$$\theta_{1,l}=\omega_{g,l}=F_{\omega_g}^{-1}(\vartheta_{1,l}) \tag{16a}$$

$$\theta_{2,l}=\xi_{g,l}=F_{\xi_g}^{-1}(\vartheta_{2,l}) \tag{16b}$$

$$\theta_{3,l}=b_l=F_b^{-1}(\vartheta_{3,l}) \tag{16c}$$

式中，$F_{\omega_g}^{-1}$、$F_{\xi_g}^{-1}$、F_b^{-1} 分别代表 ω_g、ξ_g、b 的最优概率分布模型的反函数。

对于随机变量 $\{X_k,Y_k\}$，利用 $\vartheta_{4,l}$ 来获得。由于式(15)中的基本随机变量 Θ 服从 $[0,2\pi)$ 上的均匀分布，则有：

$$\theta_{4,l}=2\pi\vartheta_{4,l},l=1,\ldots,n_{\mathrm{sel}} \tag{17}$$

由此便可得到基本随机变量的代表性点集 $\theta=\{\theta_{1,l},\theta_{2,l},\theta_{3,l},\theta_{4,l}\}_{l=1}^{n_{\mathrm{sel}}}=\{\omega_{g,l},\xi_{g,l},b_l,\theta_{4,l}\}_{l=1}^{n_{\mathrm{sel}}}$。进一步便可得到海底地震动过程的基本随机变量集 $\Theta=\{\Theta_1,\Theta_2,\Theta_3,\Theta_4\}$，将基本随机变量 $\Theta_1\sim\Theta_3$ 依次代入式(7)从而得到演变功率谱模型 $S(\omega,t;\lambda_S)$；将基本随机变量 Θ_4 代入式(15)，得到随机变量 $\{X_k,Y_k\}$，进而根据式(13)模拟得到海底地震动代表性时程样本。

5　数值算例

以聚类分组中的近场中震为例，模拟过程中各参数取值如表6所示：

图5(a)和图5(b)为模拟的海底地震动加速度代表性时程样本，结果表明，生成的样本在持时和频谱上具有显著的随机性，符合地震动特征。

表6　算例参数取值

Table 6　Parameter values of example

参数	取值
模拟持时 / s	80
时间步长 / s	0.01
截断频率 /（rad/s）	240
频率步长 /（rad/s）	0.15
代表性时程数量	307
峰值加速度 /（cm/s²）	200
峰值因子	2.9

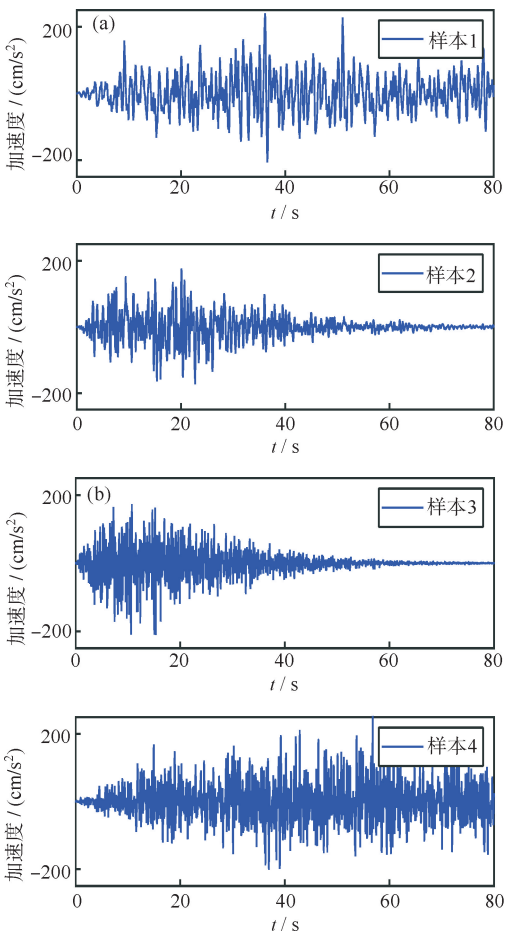

图5　近场中震海底地震动过程模拟结果：(a)代表性时程样本1，2，(b)代表性时程样本3，4

Fig. 5　Simulation results of ground motion process for site classification II: (a) representative time history samples 1, 2 (b) representative time history samples 3, 4

图6为模拟结果和目标值的均值以及标准差对比，表7分别为307条和1 019条样本的均值和标准差误差。可以看出图中模拟效果良好，误差在可接受范围，且算例样本数量越多误差越小，体现出降维方法具有较好的收敛性，能够满足工程实际需求。

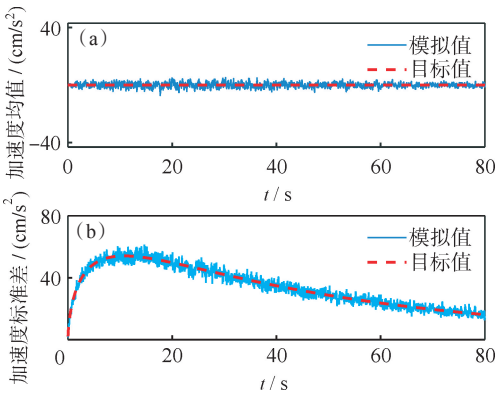

图6 均值标准差对比结果

Fig. 6 Comparison results of mean standard deviation

表7 地震动过程的模拟误差

Table 7 Simulation error of ground motion process

代表性时程数	均值误差/%	标准差误差/%
307	6.14	9.37
1 019	2.24	3.96

为进一步证明海底地震动降维模型的工程适用性，图7给出了反应谱模拟值与实测强震记录的对比结果。可以看出，反应谱模拟值与对应的实测记录拟合良好，且在±1倍标准差范围内，验证了降维模型的工程适用性。

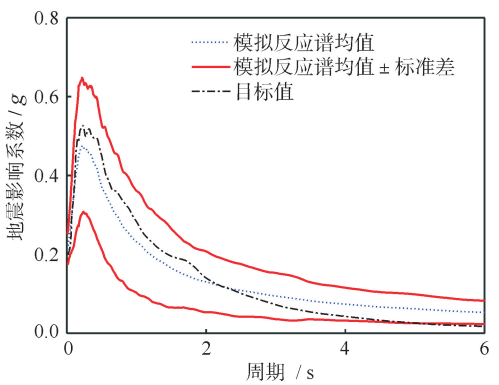

图7 反应谱模拟值与目标值比较

Fig. 7 Comparison of simulated response spectrum values with target values

6 结 论

本文根据实测强震记录，验证了Clough-Penzien谱对于海底地震动的适用性，基于谱表示-降维方法，实现了海底地震动过程的降维建模。具体研究结论如下：

（1）由于海底地震台站未给出场地信息，因此采用K均值聚类法，将实测记录按矩震级与震中距划分为3组。结果表明，划分结果与《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)的设计地震分组有着相似性。

（2）利用海底实测强震记录，以实测平均功率谱为目标识别出场地参数，对比Clough-Penzien谱与实测功率谱，结果良好。进一步，以海底地震加速度反应谱为目标，识别演变功率谱参数，进行概率建模，避免了演变功率谱参数确定性取值导致模拟样本的工程特性单一。

（3）算例表明，降维方法仅需生成数百条海底地震动代表性样本集合即可达到较高的模拟精度。且该方法生成的代表性样本集合概率信息完备，可与概率密度演化理论进行结合，为后续海洋工程抗震可靠性精细化分析提供途径。

参考文献

[1] 胡进军，刁红旗，谢礼立. 海底强地震动观测及其特征的研究进展[J]. 地震工程与工程振动，2013，33(6)：1-8.

[2] BOORE D M，SMITH C E. Analysis of earthquake recordings obtained from the seafloor earthquake measurement system（SEMS）instruments deployed off the coast of southern California [J]. Bulletin of the Seismological Society of America，1999，89(1)：260-274.

[3] SLEEFE G E. The long-term measurement of strong-motion earthquakes offshore southern California [C]// Offshore Technology Conference. Houston，Texas. OTC，1990：OTC-6336-MS.

[4] NAKAMURA T，TAKENAKA H，OKAMOTO T，et al. Seismic wavefields in the deep seafloor area from a submarine landslide source [J]. Pure and Applied Geophysics，2014，171(7)：1153-1167.

[5] 李飒，刘鑫，余建星，等. 地震作用下海底场地地震动效应研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版)，2018，51(11)：1171-1180.

[6] CHEN B K，WANG B W，MA Z Q，et al. Influence of seawater depth on offshore ground motion characteristics and seismic responses of sea-crossing cable-stayed bridges [J]. Ocean Engineering，2023，280：114853.

[7] 陈宝魁，王东升，李宏男，等. 海底地震动特性及相关谱研究[J]. 防灾减灾工程学报，2016，36(1)：38-43.

[8] HU J J，HU L，JIN C Y，et al. Offshore ground motion models for Arias intensity and cumulative absolute velocity in the Japan trench area [J]. Journal of Earthquake Engineering，2023，27(14)：4005-4023.

[9] 胡进军，郑旭，郝彦春，等. 俯冲带地震动特征及其衰减规律探讨[J]. 地球物理学报，2017，60(5)：

1773-1787.

[10] 姜云木，阮鑫鑫，刘章军. 主余震型地震动过程的降维模拟[J]. 振动与冲击，2021，40(24)：282-292.

[11] 刘章军，刘子心，阮鑫鑫，等. 地震动随机场的POD降维表达[J]. 中国科学：技术科学，2019，49(5)：589-601.

[12] LIU Z J，LIU W，PENG Y B. Random function based spectral representation of stationary and non-stationary stochastic processes [J]. Probabilistic Engineering Mechanics，2016，45：115-126.

[13] CHEN J B ，LI J. Stochastic dynamics of structures [M]. Singapore：John Wiley & Sons，2009.

[14] LI J，CHEN J B. The principle of preservation of probability and the generalized density evolution equation [J]. Structural Safety，2008，30(1)：65-77.

[15] 中华人民共和国建设部、国家质量监督检验检疫总局. 建筑抗震设计规范(2008年版)：GB 50011—2001[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2004.

[16] KANAI K. Semi-empirical formula for the seismic characteristics of the ground [J]. Bulletin of the Earthquake Institute，University of Tokyo，1957，35(2)：309-325.

[17] 胡聿贤，周锡元. 弹性体系在平稳和平稳化地面运动下的反应[C]. 地震工程研究报告集第1集. 北京：科学出版社，1962：33-50.

[18] CLOUGH R W，PENZIEN J. Dynamic of structures [M]. New York：McGraw-HILL Inc，1993.

[19] PRIESTLEY M B. Evolutionary spectra and non-stationary processes [J]. Journal of the Royal Statistical Society：Series B (Methodological)，1965，27(2)：204-237.

[20] BOGDANOFF J L，GOLDBERG J E，BERNARD M C. Response of a simple structure to a random earthquake-type disturbance [J]. Bulletin of the Seismological Society of America，1961，51(2)：293-310.

[21] VANMARCKE E H. Structural response to earthquakes [M]// Developments in Geotechnical Engineering. Amsterdam：Elsevier，1976：287-337.

[22] LEGATES D R，MCCABE JR G J. Evaluating the use of "goodness-of-fit" Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation [J]. Water Resources Research，1999，35(1)：233-241.

[23] 刘子心，姜云木，刘章军，等. 基于实测强震记录的主余震向量过程降维模拟[J]. 地震工程与工程振动，2022，42(4)：179-190.

[24] KOTZ S，NADARAJAH S. Extreme value distributions. theory and applications [M]. Upper Saddle River：Prentice Hall，2000.

[25] SCHWARZ G. Estimating the dimension of a model [J]. The Annals of Statistics，1978，6(2)：461-464.

[26] 姜云木. 主余震型地震动作用下高墩大跨刚构桥的随机动力响应与可靠度研究[D]. 武汉：武汉工程大学，2022.

[27] LI J，CHEN J B. The number theoretical method in response analysis of nonlinear stochastic structures [J]. Computational Mechanics，2007，39(6)：693-708.

本文编辑：张　瑞