DOI: 10.19701/j.jzjg.22S1589

基于目标谱匹配法的地震波选波系统研制*

崔济东[1]，戚永乐[2]

（1 广州容柏生建筑结构设计事务所（普通合伙），广州 510180；
2 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司，广州 510663）

摘要：随着结构计算分析技术的快速发展，动力时程分析在结构抗震设计中运用越来越广泛，编制能够快速提供满足规范要求的地震波的选波系统具有较大的应用价值。根据《建筑抗震设计规范》（GB50011-2010）的要求，基于目标谱匹配法，开发了地震波选波系统 GMSS。对 GMSS 的总体设计框架进行介绍，着重阐述地震动数据库模块的设计及软件提供的两种目标谱匹配方案：离散周期点匹配法及周期范围匹配法。通过某超高层实例对 GMSS 选取的地震波进行验证，结果表明离散周期点匹配法侧重于控制具体周期点的反应谱误差，周期范围匹配法侧重于控制指定周期范围内地震波反应谱与目标谱形状的吻合程度，两种方案的选波结果均可满足规范要求，GMSS 选波系统运行效率较高，可进一步用于科研和工程实践。

关键词：时程分析；地震波；选波系统；目标反应谱；反应谱匹配

中图分类号：TU398.7　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-848X(2022)S1-0885-06

Development of seismic wave selection system based on target spectrum matching method

CUI Jidong[1], QI Yongle[2]

(1 RBS Architectural Engineering Design Associates, Guangzhou 510180, China; 2 China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: With the rapid development of structural calculation and analysis technology, dynamic time history analysis is more and more widely used in structural seismic design. The development of a wave selection system that can quickly provide seismic waves that meet the requirements of the code has greater application value. Based on target spectrum matching method, the seismic wave selection system GMSS was developed according to the “Code for Seismic Design of Buildings (GB50011-2010)”. The overall design framework of GMSS is introduced, with emphasis on the design of the ground motion database module and the two target spectrum matching schemes provided by the software: discrete period point matching method and period range matching method. A super high-rise example was used to verify the seismic waves selected by GMSS. The results show that the discrete period point matching method focuses on controlling the response spectrum error of a specific period point, and the period range matching method focuses on controlling the shape matching degree of the seismic wave response spectrum and the target spectrum within the specified period range, the wave selection results of the two schemes can meet the requirements of the code. The GMSS wave selection system has a higher operating efficiency and can be further applied to the research and engineering practice.

Keywords: dynamic time history analysis; seismic wave; wave selection system; target spectrum; spectrum matching

0　概述

结构地震动力时程分析是计算结构地震时程响应的重要方法，目前已经广泛应用于结构的抗震设计及抗震性能评估。国内外相关规范均将地震动力时程分析方法作为反应谱分析方法的必要补充[1-2]。其中我国《建筑抗震设计规范》《GB50011-2010》(简称抗规)[1]第 5.1.2 条第三款规定：对于特别不规则的建筑、甲类建筑和表 5.1.2-1 所列高度范围的高层建筑，应采用时程分析法进行多遇地震下的补充计算。目前建筑结构的高度不断提高，平面及立面日趋多样化，导致复杂结构涌现，对于这些复杂结构的抗震性能评估，弹性或弹塑性动力时程分析方法将派上用场。动力时程分析必须输入地震加速度时程，因此，编制能够快速提供适用于结构动力时程分析且满足规范要求的地震波的选波系统具有较大的应用价值。

徐亚军等[3]开发了可以自动选波的地震波数

* 中国能源建设集团规划设计有限公司集中开发科研项目（GSKJ2-T11-2019）。
第一作者：崔济东，博士，工程师，主要从事复杂结构与超高层结构的设计与咨询，Email: jidong_cui@163.com。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

据库系统，支持条件选波和最不利选波。文献[4]采用 MATLAB 软件，根据《建筑抗震设计规范(GB50011-2010)》的要求，编制了 SGMS 选波系统，该选波系统通过控制离散周期点（T_1、T_2、T_3、T_g、$3T_g$、$5T_g$及 T_1+dt）地震波反应谱与规范反应谱的误差进行选波。文献[5]基于美国太平洋地震工程研究中心(PEER)提供的强震地面运动数据库 PGMD，根据《抗规》[1]的要求，采用 Access 建立地震动数据库，采用 VC++开发了地震波选波系统 SWS，其中地震波反应谱匹配方法采用“双频段控制”法。总体上，目前关于地震波选波系统研发的相关文献还比较少，相关选波系统也并未推广使用。对于地震波选波方法，则有许多学者进行了研究[6-11]，大部分采用目标谱法，即选择反应谱与目标谱有较好匹配的地震波，该类方法概念清晰，操作简便，且与现行抗震设计规范结合紧密，因此较为容易在工程上应用。

本文基于目标谱反应谱匹配法，采用 SQLite 建立地震动数据库，通过面向对象编程语言 C#.NET 建立地震波选波系统 GMSS（Ground Motion Selection System）。对 GMSS 的总体设计框架进行介绍，着重阐述地震动数据库模块的设计及软件提供的两种目标谱匹配方案：离散周期点匹配法及周期范围匹配法，最后通过具体选波实例对 GMSS 的适用性进行验证。

1 GMSS 选波系统设计

GMSS 系统主要由 5 个模块构成，包括地震动数据库、目标反应谱定义、选波控制参数、地震波绘制及输出、反应谱绘制及输出。系统总体结构框图如图 1 所示。

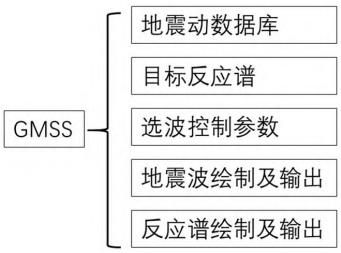


图 1 GMSS 系统总体结构框图

1.1 地震动数据库

建立选波系统必须拥有大量的天然地震波作为数据基础，因此必须首先解决地震波数据源问题。目前许多国家建立了开放式的强震数据库，如美国太平洋地震工程研究中心的 PGMD（PEER Ground Motion Database）、日本的 K-NET 和 KiK-NET、欧洲和中东的 ISESD 等[12-14]。其中，PGMD 数据库是世界上最具权威性和代表性的地震波数据库之一，所含实际地震动记录的数量共 3182 组，描述了超过 160 个地震动信息，震级范围(里氏震级)涵盖了 4.2～7.9 级。GMSS 系统以 PGMD 为数据源，收集整理了 PGMD 的 3000 多组三向地震动记录，即 9000 多条地震波，并对 PGMD 的地震波进行了二次处理，具体包括大量的数据格式转换，地震波反应谱分析等，最终转换为 SQLite 格式的地震波数据库 GML。GML 数据库包含两个表，tbl_Record_INFO 及 tbl_Record，如图 2 所示。其中表 tbl_Record_INFO 记录地震波的信息，具体包括多个字段，分别为:序号、记录编号，时间，台站名，震级、断层机制、震中距、剪切波速、等；tbl_Record 表则记录地震波的记录编号、文件名、加速度峰值、采样点数、时间间隔、实际的加速度时程及地震波反应谱等信息。bl_Record_INFO 表及 tbl_Record 表之间则通过地震波的记录编号进行关联。将地震波信息存放到数据库而不是存放在普通文本文件的目的是，提高后续对地震波增减、扩充及地震波检索等数据处理的效率。

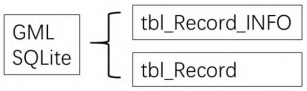


图 2 GML 数据表

1.2 目标反应谱

目标反应谱模块主要定义选取地震波时匹配的参考反应谱。目标反应谱通常为抗震设计规范的设计反应谱。软件默认提供了《抗规》[1]的反应谱参数定义界面，用户可在软件界面的下拉菜单中选择相应的设防烈度、地震水平、场地类别、地震分组、阻尼比等参数，即可快速定义相应的规范反应谱。此外，软件还提供反应谱的导入功能，支持用户通过导入文本文件的方式自定义反应谱。

1.3 反应谱匹配方法

目前时程分析选波常采用目标谱法，即选择反应谱与目标谱匹配较好的地震波。对此，我国规范也有相关要求，规定选取的多组地震波的平均地震影响系数曲线应与规范反应谱在统计意义上相符，具体要求为地震波的平均反应谱曲线与设计反应谱曲线相比，在主要周期点上的谱值相差不超过 20%。GMSS 采用反应谱与目标谱的基

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

于对数坐标的均方差 E_{MS} [15]评判地震波反应谱与目标谱间匹配程度，E_{MS} 按式（1）计算。

$$E_{MS}=\frac{\sum_{i=1} w(T_{\mathrm{i}})\left\{\ln[\mathrm{S}_a^{\mathrm{targ}}(T_{\mathrm{i}})]-\ln[\mathrm{S}_a^{\mathrm{rec}}(T_{\mathrm{i}})]\right\}^2}{\sum_{i=1} w(T_{\mathrm{i}})} \quad (1)$$

式中：T_{i} 为选取的第 i 个周期点；$w(T_{\mathrm{i}})$ 为第 i 个周期点权重系数，周期点及权重系数均人为设定；$\mathrm{S}_a^{\mathrm{targ}}(T_{\mathrm{i}})$ 为目标反应谱；$\mathrm{S}_a^{\mathrm{rec}}(T_{\mathrm{i}})$ 为地震波反应谱。E_{MS} 越小，则代表地震波的反应谱与目标反应谱匹配越好，基于 E_{MS} 的大小对所有地震波进行排序，即可获得与目标反应谱匹配最好的地震波。

结合大量实际项目的选波实践，GMSS 提供了两种具体的基于 E_{MS} 排序的选波方案：离散周期点匹配法及周期范围匹配法。

离散周期点匹配法，选取数个周期点 T_{i}（通常选取结构的主要周期点，GMSS 支持最多指定 8 个周期点）进行 E_{MS} 计算，同时设定周期点地震波反应谱与目标谱的相对误差限值，当地震波在选定的所有周期点上，地震波反应谱与目标反应谱的相对误差均小于设定的误差限值时，该地震波才参与 E_{MS} 排序。其中反应谱与目标谱的相对误差按式（2）计算。

$$E_{ref}=ABS\left(\frac{\mathrm{S}_a^{\mathrm{targ}}(T_{\mathrm{i}})-\mathrm{S}_a^{\mathrm{rec}}(T_{\mathrm{i}})}{\mathrm{S}_a^{\mathrm{targ}}(T_{\mathrm{i}})}\right) \quad (2)$$

采用离散周期点匹配法时，在结构主要周期点上，反应谱与目标反应谱的相对误差限值，通常设置为 20%，对于其他周期点可适当放宽要求。

周期范围匹配法，不控制地震波反应谱与目标反应谱的相对误差，直接选取多个周期范围[T_{i}，$T_{\mathrm{i+1}}$]，按周期间距 0.02s 对每个周期范围[T_{i}，$T_{\mathrm{i+1}}$]进行离散，获得多个周期点（T_{i}，T_{i}+0.02，T_{i}+2×0.02s，…，$T_{\mathrm{i+1}}$），然后汇总所有周期范围的周期点，按式（1）计算地震波的 E_{MS} 并对地震波进行排序。

离散周期点匹配法对具体周期点的地震波反应谱与目标谱的误差进行控制，侧重于对单条地震波进行控制，通过该方案选取多条地震波时，其平均反应谱或包络反应谱在指定周期点上自然满足指定的误差要求。周期范围匹配法不对地震波具体周期点的反应谱误差设置限值，而是选取较大周期范围计算地震波反应谱与目标谱的均方差 E_{MS}，进而寻找地震动数据库中指定周期范围内反应谱与目标谱形状吻合最好的地震波。

1.4 地震波调幅

《抗规》[1]第 5.1.2 条给出了时程分析所用地震加速度时程的最大值要求，具体如表 1 所示。

表 1　时程分析所用地震加速度时程的最大值(cm/s²)

地震影响	6 度	7 度	8 度	9 度
多遇地震	18	35(55)	70(110)	140
罕遇地震	125	220(310)	400(510)	620

注：括号内数值分别用于设计基本地震加速度为 0.15g 和 0.30g 的地区。

因此，根据我国规范进行地震波选取时，应先根据地震影响及设防烈度，查表 1 获得规定的地震波峰值加速度，并按该峰值加速度对地震波进行调幅，取调幅后的地震波的反应谱代入式（1），计算地震波反应谱与目标谱的均方差 E_{MS}。

1.5 GMSS 选波流程

总结 GMSS 系统的选波流程，如图 3 所示。

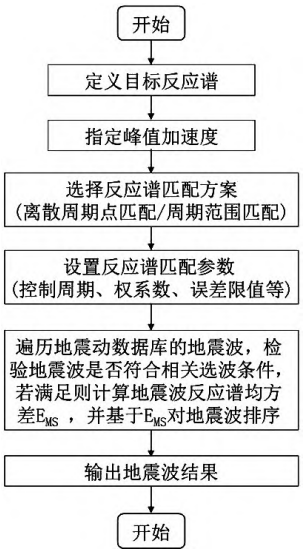


图 3　GMSS 选波流程图

1.6 GMSS 界面设计

GMSS 系统采用面向对象的开发语言 C#.NET 进行编制，界面如图 4 所示，为一个基于对话框的应用程序，界面简洁。GMSS 系统界面主要包含 6 个区域：目标谱、反应谱匹配参数、反应谱、时程曲线、初选地震波信息，选中的地震波列表。“目标谱”区域主要用于定义地震波选波匹配的参考反应谱。“反应谱匹配参数”区域用于输入反应谱与目标谱匹配的控制参数，如具体是选用周期范围匹配法还是选用离散周期点匹配法。“反应谱”区域用于显示选中地震波的反应谱曲线及其与规范反应谱在主要周期点的相对误差。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

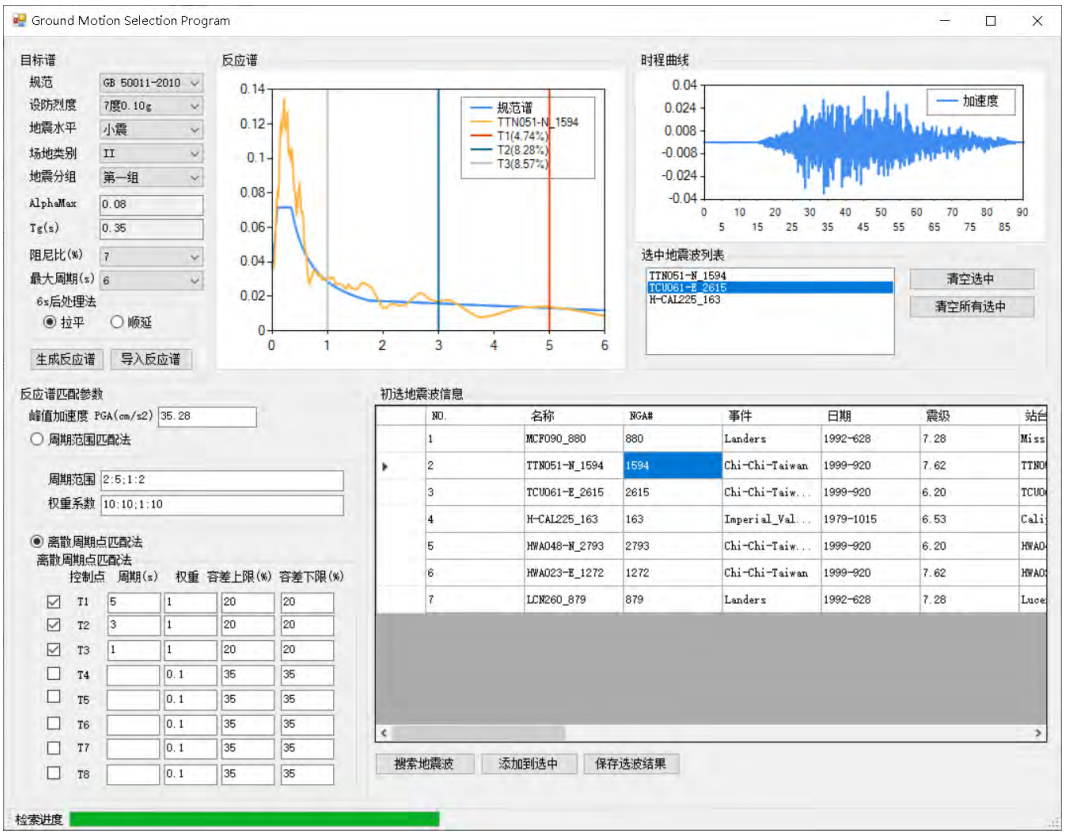


图 4 GMSS 系统界面

“时程曲线”区域用于显示选中地震波的加速度时程曲线。“选中的地震波列表”区域用于显示选中的地震波的名称。“初选地震波信息”区域用于显示初选的地震波的信息，包括地震波的名称，地震事件，震级，站台，反应谱与目标谱的均方差 E_{MS} 等。用户在“目标谱”区域及“反应谱匹配参数”区域设置参数后，可点击“搜索地震波”按钮进行地震波初选，初选的地震波会显示到“初选地震波信息”区域，用户可以通过“添加到选中”按钮，将选中的地震波添加到“选中的地震波列表”。通过点击“保存选波结果”按钮，可将选取的地震波输出为文本文件。

2 GMSS 选波实例

2.1 某超高层塔楼选波

某框架-核心筒结构，地上 37 层，主要功能为办公，1～3 层为裙房，典型层高为 4.6m，避难层设置在 9 层、19 层、29 层，层高 6m。算至地下室顶板，即结构嵌固端，结构总高度为 183.4m，结构整体模型及主要抗侧力构件如图 5 所示。建筑所在地区抗震设防烈度为 7 度，水平地震影响系数最大值为 0.05。场地类别为 II 类，设计分组为第二组，特征周期 Tg 为 0.4s。结构的前 6 周期为 4.12s、3.10s、2.43s、1.07s、0.93s、0.77s。

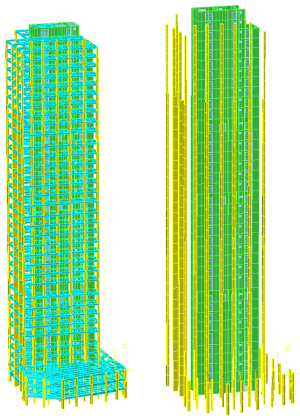


图 5 整体模型及主要抗侧力构件示意

作为 GMSS 选波测试算例，本节根据《抗规》[1]，选取 7 组天然波对结构进行小震弹性时程分析。具体要求为:地震波的平均反应谱曲线与设计反应谱曲线相比，在主要周期点（结构前三周期）上的谱值相差不超过 20%；加速度峰值按照规范要求取为 35cm/s^2，主、次水平方向地震动峰值加速度按照 1∶0.85 调整；地震动的有效持续时间为结构基本周期的 5～10 倍，本例取不小于 25s。时程分析结果在结构主方向的平均底部剪力应在振型分解反应谱法的 80%～120%之间，单条地震波的结构底部剪力应在振型分解反应谱

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

法的 65%～135%之间。

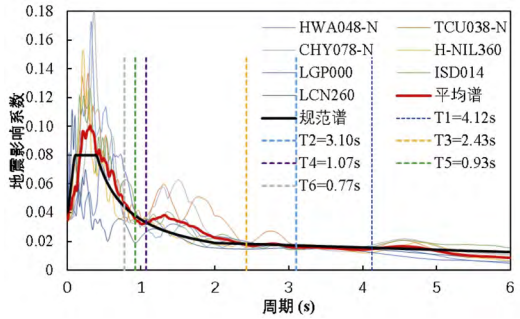
2.2 选波方案

方案 1，离散周期点匹配法：选择结构前 4 阶周期点（4.12s、3.10s、2.43s、1.07s）计算均方差 E_{MS}，其中前三阶周期点权重取 1.0，第 4 阶周期权重取 0.5，同时周期点地震波反应谱与规范反应谱的相对误差限值取为 20%。

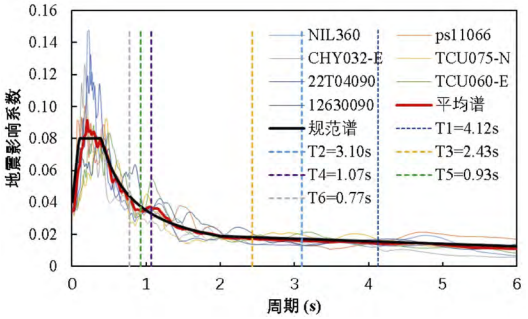
方案 2，周期范围匹配法：指定反应谱匹配的周期范围，但设置地震波反应谱与目标谱的误差限值。本例选取了两个周期范围计算均方差 E_{MS}，分别为[2，4.5]及[0.3，2]，相应的权重系数范围为[1，1]及[0.5，0.5]。其中第一个周期范围涵盖结构的主要周期，第二个周期范围涵盖目标谱平台段及结构的高频振型部分，第一个周期范围权重系数取为 1.0，第二个周期范围权重系数取 0.5。该参数设置类似文献[11]中的的双频段控制选波思路。

2.3 选波结果

按方案 1 选取的 7 组波的编号为 HWA048-N，TCU038-N，CHY078-N，H-NIL360，LGP000，ISD014，LCN260。按方案 2 选取的 7 组波的编号为 NIL360，ps11066，CHY032-E，TCU075-N，22T04090，TCU060-E，12630090。两种方案选取的地震波反应谱结果如图 6 所示，主要周期点地震波反应谱与目标反应谱的相对误差如表 2 所示，时程波作用下塔楼基底剪力与 CQC 剪力的对比如表 3 所示。



(a) 方案 1 选取的地震波反应谱结果



(b) 方案 2 选取的地震波反应谱结果

图 6　地震波反应谱

表 2　主要周期点地震波反应谱的相对误差（%）

方案	地震波	T1	T2	T3	T4	T5	T6
方案 1	HWA048-N	7.10	13.56	2.60	7.90	8.48	17.61
	TCU038-N	5.18	1.81	3.32	13.46	5.35	16.40
	CHY078-N	13.84	9.85	13.01	4.96	11.61	15.70
	H-NIL360	20.00	3.96	4.73	8.07	7.41	11.15
	LGP000	20.00	1.32	9.75	4.37	8.72	56.34
	ISD014	5.49	16.01	3.52	10.34	12.94	41.44
	LCN260	5.18	8.59	17.99	19.60	48.32	23.19
	平均谱	3.54	6.22	3.11	0.54	6.97	6.45
方案 2	NIL360	19.54	4.95	3.89	8.85	7.01	10.51
	ps11066	1.89	22.49	1.05	6.59	9.75	15.30
	CHY032-E	26.55	14.05	24.02	11.88	18.70	6.30
	TCU075-N	9.01	16.85	8.99	16.81	8.33	30.74
	22T04090	12.54	23.59	23.21	9.89	13.64	22.28
	TCU060-E	5.27	20.87	7.30	64.61	5.55	1.72
	12630090	9.94	21.26	13.88	2.89	20.76	32.56
	平均谱	6.69	5.53	5.23	12.08	6.03	5.46

注：表中的相对误差指选取的地震波的反应谱与目标反应谱的相对误差，按式（2）计算。

表 3　塔楼的基底剪力

方案	计算方法	基底剪力(kN)		与 CQC 比例(%)	
		X 向	Y 向	X 向	Y 向
方案 1	CQC	15173	17335	–	–
	HWA048-N	15620	15319	102	88
	TCU038-N	14000	20699	92	119
	CHY078-N	14899	15394	98	88
	H-NIL360	14499	21419	95	123
	LGP000	13385	17971	88	103
	ISD014	18375	19996	121	115
	LCN260	14849	15053	97	86
	平均值	15089	17979	99	103
方案 2	CQC	15173	17335	–	–
	NIL360	14561	21603	95	124
	ps11066	16587	15933	109	91
	CHY032-E	13113	14502	86	83
	TCU075-N	16893	18457	111	106
	22T04090	12624	21009	83	121
	TCU060-E	18319	19573	120	112
	12630090	14394	16462	94	94
	平均值	15213	18220	100	105

由结果可见，方案 1 及方案 2 选取的地震波的平均谱与规范谱在主要周期点的误差均不大于 20%，在主要周期点上方案 1 的反应谱误差更小，地震波的平均谱与目标谱更接近，在主要周期点之间的周期范围，方案 2 地震波的平均谱与目标谱更吻合；两个方案地震波作用下结构主方向的

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

平均底部剪力与振型分解反应谱法的剪力之比均接近 100%，单条地震波的结构底部剪力与振型分解反应谱法剪力之比在 80%～135%之间。总体上，两种选波方案均可获得满足规范要求的地震波，离散周期点匹配法侧重于控制具体周期点的反应谱误差，周期范围匹配法侧重于控制在指定周期范围内反应谱与目标谱形状的吻合程度。

经进一步将测算还发现，当控制的周期点较多，且误差限值设置较小时，离散周期点匹配法的选波条件显得较为苛刻，可能选不出满足条件的地震波。周期范围匹配法由于不对地震波具体周期点的反应谱误差设置限值，侧重于寻找地震动数据库中指定周期范围内反应谱与目标谱形状吻合最好的地震波，因此任何时候均能从数据库中检索出地震波。

3 结论

本文基于目标谱匹配法，利用 C#.NET 开发了满足抗震规范要求的地震波选波系统 GMSS，并通过一个算例对其功能进行了验证。可以得出如下主要结论：

（1）将地震波及其参数存为数据库格式（如 SQLite）有助于提高程序对地震波数据处理的效率。

（2）GMSS 提供的离散周期点匹配法及周期范围匹配法，均能获得满足规范要求的地震波。离散周期点匹配法侧重于控制单条地震波反应谱具体周期点的形状，通过该方案选取多条地震波时，其平均反应谱或包络反应谱在指定周期点上自然满足指定的误差要求。周期范围匹配法不对具体周期点地震波反应谱与目标谱的误差进行限制，侧重于寻找地震动数据库中指定周期范围内反应谱与目标谱形状吻合最好的地震波，相对更加通用。

参 考 文 献

[1] 建筑抗震设计规范: GB50011-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

[2] Minimum design loads for buildings and other structures: ASCE/SEI7-16[S]. Reston，VA: American Society of Civil Engineers/Structural Engineering Institute, 2016.

[3] 徐亚军, 王朝坤, 魏冬梅, 等. 一种支持自动化选波的地震数据库系统[J]. 计算机研究与发展, 2011, 48(S): 435-440.

[4] 付康, 赖庆文. 基于中国规范的地震波选取工具开发[J]. 建筑结构, 2020, 50(S1): 508-512.

[5] 胡晓斌, 江卫波. 基于 PGMD 数据库的地震波选波系统研制[J]. 世界地震工程, 2016, 32(3): 120-124.

[6] 吕大刚, 刘亭亭, 李思雨, 等. 目标谱与调幅方法对地震动选择的影响分析[J]. 地震工程与工程振动, 2018, 38(4): 21-28.

[7] 韩小雷, 谢灿东, 季静, 等. 长周期结构弹塑性时程分析的地震波选取[J]. 土木工程学报, 2016, 49(6): 46-50.

[8] 张锐, 王东升, 陈笑宇, 等. 考虑高阶振型影响的时程分析加权调整选波方法[J]. 土木工程学报, 2019, 52(9): 53-68, 99.

[9] KATSANOS E I, SEXTOS A G, MANOLIS G D. Selection of earthquake ground motion records: a state-of-the-art review from a structural engi-neering perspective[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, 30(4): 157-69.

[10] KALKAN E, CHOPRA A K. Practical guidelines to select and scale earthquake records for nonlinear response history analysis of structures[R]. Berkeley, U. S.: Earthquake Engineering Research Institute, 2010.

[11] 杨溥, 李英民, 赖明. 结构时程分析法输入地震波的选择控制指标[J]. 土木工程学报, 2000, 33(6): 33-37.

[12] Pacific Earthquake Engineering Research Center. PEER Ground Motion Database [DB]. https://ngawest2.berkeley.edu/, 2021.

[13] European Commission. European Strong Motion Database[DB]. http://www.isesd.hi.is//ESD_Local/frameset.htm, 2021.

[14] Strong-motion seismograph networks (K-NET, KiK-net) [EB/OL]. http://www.kik.bosai.go.jp.

[15] 王东升, 张锐, 陈笑宇,等. 目标谱选波方法在算术与对数坐标下的差异分析[J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(2): 45-55.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net