

DOI:10.11918/202408058

弹性时程分析法中地震动的双参数调选方法

任靖哲¹, 邹启令², 李治¹, 李立峰³

(1. 中信建筑设计研究总院有限公司, 武汉 430014; 2. 卡耐基梅隆大学, 宾夕法尼亚州 匹兹堡 15212;
3. 湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082)

摘要: 针对现行规范采用弹性时程分析法验算时存在的基底剪力结果离散性过大和对近场地震特性考虑不足的问题, 提出基于双参数的地震动记录调选方法。首先, 采用规范中的调幅参数对地震动记录进行第1次调选; 其次, 采用因果推断筛选出对结构基底剪力影响最大的地震动参数, 作为筛选参数; 最后, 指定筛选参数的取值范围, 对第1次调选出的地震动记录进行再次筛选。作为已有调选方法的补充, 以四川省泸定县磨西台地某博物馆为例, 采用300条天然地震动记录, 对弹性时程分析中地震动记录的规范调幅方法、双参数调选方法进行对比分析。结果表明: 对于断层距小于等于60 km的地震动记录, 加速度相关的地震动参数对结构基底剪力的影响较大, 其中, Park-Ang指标的影响最大; 双参数法在保证结构安全裕度不低于规范要求的前提下, 可以有效地控制基底剪力的离散性, 相比规范法, 经过双参数法调选时程分析得到的基底剪力标准差的降幅可达到25%以上; 由于基底剪力的离散性可以被很好地控制, 当采用双参数法时, 对于近场地震多发区特别不规则的建筑, 弹性时程补充验算中可不必采用人工地震动记录。

关键词: 时程分析法; 近场地震; 调选方法; 因果推断; XGBoost 算法

中图分类号: TU375.4

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)06-0062-08

Dual parameter modulation and selection method of ground motions in elastic time history analysis

REN Jingzhe¹, ZOU Qiling², LI Zhi¹, LI Lifeng³

(1. CITIC General Institute of Architectural Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430014, China;
2. Carnegie Mellon University, Pittsburgh 15212, Pennsylvania, USA;
3. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In response to the issues of significant dispersion in base shear results and inadequate consideration of near-field seismic characteristics when using the elastic time-history analysis method for checking calculations in current codes, a method for selecting seismic records based on dual parameters is proposed. Initially, the method employs the amplitude modulation parameters specified in the code to perform the first selection of seismic records. Subsequently, causal inference is utilized to identify the seismic ground motion parameters that have the most significant impact on structural base shear, serving as the screening parameters. Lastly, by specifying the value range for the screening parameters, a re-screening is conducted on the seismic records selected in the first stage. As a complement to existing seismic selection methods, a comparative analysis is conducted on the standard amplitude modulation method and the dual-parameter selection method for seismic records in elastic time-history analysis, using 300 natural earthquake records from a museum located on the Moxi Plateau in Luding County, Sichuan Province as a case study. The research results indicate that for seismic records with a fault distance less than or equal to 60 km, acceleration related seismic parameters have a significant impact on the base shear force of the structure, with the Park-Ang index having the greatest influence. The dual parameter method can effectively control the discreteness of the base shear force while ensuring that the structural safety margin meets or exceeds specification requirements. Compared with the specification method, the reduction in the standard deviation of the base shear force obtained through time history analysis using the dual parameter method can reach more than 25%. Due to the good control of the discreteness of the base shear force, when using the dual parameter method, for particularly irregular buildings in near-fault earthquake prone areas, artificial seismic motion records may not be necessary in the elastic time history supplementary calculation.

Keywords: time-history analysis method; near-fault earthquake; modulation and selection method; causal inference; extreme gradient boosting algorithm

收稿日期: 2024-08-28; 录用日期: 2024-09-13; 网络首发日期: 2024-10-16

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20241016.1028.002>

基金项目: 湖北省住房和城乡建设科学技术计划(JK2024061)

作者简介: 任靖哲(1990—), 男, 硕士, 工程师

通信作者: 任靖哲, renjz@citic.com

GB/T 50011—2010《建筑抗震设计标准》(以下简称《抗标》)中规定对于特别不规则的建筑、甲类建筑和高度超限的建筑需要采用时程分析法进行多遇地震下的补充验算。虽然《抗标》中规定通过放大系数考虑近场地震的不利影响,但在弹性时程分析中并未对近场地震动记录的选用作出规定。易伟建等^[1]和潘毅等^[2]对近场地震作用下的结构响应进行分析,发现近场地震的竖向分量对结构的不利影响较大;潘毅等^[3]和徐积刚等^[4]分别对铁路站房和8度区多层混凝土框架结构进行抗震恢复性评估,结果表明,近场地震对结构的破坏更加显著;李旭等^[5]对混凝土剪力墙进行抗震性能分析,结果表明,近场地震对短周期结构的影响同样不可忽视;贾俊峰等^[6]建议在未来结构抗震设计和评估中,考虑近场地震效应的影响;杨连森等^[7]对加固后的混凝土框架进行了抗震性能分析,结果表明,由于速度脉冲等特性的影响,近场地震作用下的结构响应大于远场地震。上述已有研究表明,近场地震与远场地震的特征不同,近场地震的破坏性更大,而且地震的近场效应属于地震的特性之一,不仅应在振型分解反应谱法中得到体现,时程分析法中也应予以考虑。已有研究^[8-10]和工程实践表明,规范采用有效地面峰值加速度EPA对地震动记录进行调选,虽然能够控制调选后地震动记录与设计反应谱大体处于相同的强度水平,但即便要求部分地震动记录采用人工记录,也不能很好地控制最终结构基底剪力的离散性,导致弹性时程分析计算出的结果往往远超振型分解反应谱法计算出的结果,无法用于对反应谱法计算结果的修正。此外,近场地震结构响应的波动性更大,若对近场地震多发区的建筑采用远场地震进行时程分析,会导致弹性时程分析的小样本计算结果的保证率降低,最终使得按远场地震进行时程分析得到的结果的安全裕度不足。因此,对于近场地震多发区建筑弹性时程分析中的地震动记录选取方法还需要进一步研究。

《抗标》采用有效地面峰值加速度EPA对弹性时程分析中的地震动记录进行调幅,调幅后地震动记录的平均反应谱在结构主要周期点上与设计反应谱相差不大于20%(以下简称该调选方法为规范法)。规范法中的调幅系数能够较好地调整地震动强度和时程验算结果的安全裕度,但对于剪力结果的离散性并不能很好地控制。参考已有研究^[11-13],EPA不一定是与结构基底剪力相关性最大的地震动参数,仅根据EPA对地震动进行调选,不能有效控制基底剪力的离散性。此外,传统的调幅参数不能较好地反映脉冲型近场地震造成的结构响应^[13],因此,规范法并不适用于对近场地震动记录的调选。

另一方面,已有的关于地震动强度表征参数的研究^[10-13]一般采用相关性分析方法对造成结构响应的主要地震动参数进行分析,例如,主成分分析和回归分析等。然而,相关性并不等同于因果关系,因果关系是相关性的子集。此外,由于地震动参数之间本身存在着复杂的相关性,导致分析出的与结构响应相关性大的地震动参数并不一定是引起该结构响应的直接原因,进而影响分析结果的准确性。因果推断(causal inference, CI)是根据某一结果发生的条件对变量间的因果关系进行刻画的过程。Burton等^[14]在给定地震动强度的条件下,假设结构地震需求独立于“上游”地震动参数,采用因果推断对结构抗震需求进行了评估,研究发现相比结构动力学原理,因果推断的结果具备更好的可解释性;Liu等^[15]采用因果推断估计了上车-下车行为在交通网络上产生的拥堵效应,并获得了较准确的结果。因果推断可以很好地在相关性关系中将因果关系剥离出来,并找出直接影响结构响应的地震动参数,为地震动记录调选参数的选择提供参考。

综上,对于近场地震多发区建筑的弹性时程分析验算中的地震记录调选方法,根据因果推断的分析结果提出一种基于双参数的调选方法,解决现行规范时程分析法中存在的基底剪力结果离散性过大和对近场地震特性考虑不足的问题,并根据位于泸定县磨西镇某博物馆中的一栋特别不规则多层框架结构的分析结果对提出的方法进行验证。

1 双参数调选方法的建立

《抗标》中规定对处于断裂两侧10 km以内的结构,地震动参数应计入近场影响,然而在弹性时程分析的地震动选取中并未对地震的断层距进行要求。近场地震作用下结构响应的离散性更大,采用规范法进行地震动记录的调选易得到过大的基底剪力值,在实际工程进行时程验算时,往往会规避使用近场地震动记录。本文提出基于双参数的地震动记录调选方法(以下简称双参数法),控制时程分析得到的基底剪力的离散性,使近场地震动记录适用于弹性时程验算。双参数法基于以下假定:对于给定结构或结构类型和具备某一特性的地震动记录(如断层距相似或震源深度相似等),任何给定结构和结构类型均存在一个具有主导作用,能够直接引起结构基底剪力的地震动参数。双参数法中的两个参数分别为调幅参数和筛选参数;参考规范法,调幅参数采用有效峰值加速度EPA,用来控制调选后地震动记录的强度;筛选参数采用直接引起结构基底剪力的地震动参数,作为基底剪力离散性的控制参数。双参数调幅方法具体分为以下两个步骤:1)按规范

法对地震动记录进行调选;2)在步骤 1)筛选出的地震动记录的基础上,继续筛选出与筛选参数中位数相差不大于 25% 的地震动记录,进行组合后用于弹性时程分析验算。当有效地面峰值加速度 EPA 为直接引起基底剪力的参数时,只采用步骤 1)对地震动记录进行调选。双参数法具有和规范法相同的调幅系数,且安全裕度不低于规范法,地震动调幅系数 S_F 可采用下式计算:

$$S_F = \frac{a_{EP\max}}{a_{EPi}} \quad (1)$$

式中: $a_{EP\max}$ 为有效地面峰值加速度的最大值,依据规范规定取值; a_{EPi} 为第 i 条地震动记录的有效地面峰值加速度。

双参数法通过控制筛选参数的波动范围,达到减小基底剪力离散性的目的,使得弹性时程分析验算的结果能够更好地用于对振型分解反应谱法设计结果的修正。当基底剪力离散性得到有效控制后,弹性时程分析需要采用的地震动记录数量也应作出相应调整。时程分析中采用的地震动记录的样本量可根据下式确定:

$$n = \left(\frac{Z\sigma}{E\mu} \right)^2 \quad (2)$$

式中: n 为弹性时程分析中应采用地震动记录的数量; Z 与置信水平相关,当置信水平为 95% 时, $Z = 1.96$; σ 为总体样本的标准差; E 为允许误差,根据《抗标》规定,当采用 3 条地震动记录进行时程分析时, $E = 35\%$,当采用 7 条地震动记录进行时程分析时, $E = 20\%$; μ 为总体样本的均值。

2 基于因果推断的筛选参数分析

2.1 相关性与因果性

由于地震动参数之间存在复杂的相关性,地震动参数对结构的影响存在耦合作用,采用相关性分析方法得到的结果,会随着地震动记录样本的改变而变化。为有效地控制时程分析中结构基底剪力的离散性,同时保证筛选参数不易受到地震动记录样本的影响,采用因果推断对地震动参数与基底剪力之间的因果关系进行剥离,并选用与基底剪力形成因果关系的地震动参数作为筛选参数。

相关性有以下 3 个来源:因果(causation)、混淆(confounding)和样本选择偏差(selection bias)。因果关系、混淆和样本选择偏差均为地震动参数与结构基底剪力之间相关性的来源。由因果产生的相关性为因果关系,是一种不随环境变化的稳定机制,具有良好的可解释性;混淆是指存在一个变量 X ,该变量构成了原因 T 和结果 Y 的共同原因,如果忽略 X 的影响,那么 T 和 Y 之间会产生假性因果关系,即 T

并非产生 Y 的直接原因;样本选择偏差也会产生相关性,当两个相互独立的变量 T 和 Y 产生了一个共同结果变量 S ,引入 S 会为 T 和 Y 之间打开一条通路,从而导致 T 和 Y 之间产生假性因果关系。

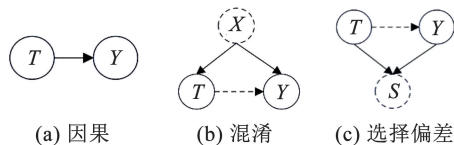


图 1 相关性来源

Fig. 1 Origin of correlation

2.2 潜在结果模型(RCM)的应用

采用潜在结果模型(rubin causal model, RCM)进行地震动参数与结构基底剪力之间的因果推断。RCM 假设除干预和潜在结果外的一切变量均为混淆变量,并通过预测干预前后潜在结果的变化来完成因果推断,引入 do 算子代表对输入地震动参数的干预。对于任意地震动记录,地震动参数对基底剪力产生的因果效应指标 θ 可写为

$$\theta = Y[do(T' = 1)] - Y[do(T' = 0)] \quad (3)$$

式中: T' 为地震动参数中的待定原因变量, $T' = 1$ 和 $T' = 0$ 分别表示对待定原因变量进行/不进行干预; $Y[do(T' = 1)]$ 表示在干预下地震动记录产生的潜在基底剪力结果; $Y[do(T' = 0)]$ 表示不进行干预下地震动记录产生的潜在基底剪力结果。

若出现图 1(b) 和图 1(c) 所示情况,说明待定原因变量 T' 是潜在基底剪力结果 Y 的假性原因变量,则有

$$P[Y|T' = t] \neq P[Y|do(T' = t)] \quad (4)$$

式中: $P[Y|T' = t]$ 为在干预 $T' = t$ 下基底剪力的条件概率,其中,基底剪力为实测值; $P[Y|do(T' = t)]$ 为在干预 $T' = t$ 下基底剪力的条件概率,其中,基底剪力为潜在结果。

2.3 因果关系的量化

传统的机器学习方法可以对高维度的数据建模,适合求解包含高维度混淆变量的地震动参数因果推断问题,但传统的机器学习方法只关注预测结果,忽略了可能出现的过拟合,导致得到的结果是有偏差的。根据已有研究^[14-16],双机器学习方法(double machine learning, DML)通过对第一次拟合结果产生的残差进行二次拟合,可以有效避免过拟合,并消除偏差,适用于因果推断。采用双机器学习方法量化分析地震动参数与基底剪力在 RCM 框架下的因果关系。在选定足量样本的情况下,假定全部地震动参数分为原因变量 T 和混淆变量 X 两类,结构基底剪力与地震动参数的因果关系可采用下式表示为

$$Y = \theta T + g(X) + \sigma \quad (5)$$

$$T = f(X) + \eta \quad (6)$$

式中: Y 为对地震动参数进行干预后产生的基底剪力, θ 为地震动参数对基底剪力产生的因果效应, $g(X)$ 和 $f(X)$ 为未知的关于混淆变量 X 的函数, σ 和 η 均为未知的均值为 0 的随机误差。

对于双机器学习方法中的第 1 步拟合, 在 XGBoost 算法 (extreme gradient boosting algorithm) 中引入正则化项, 对 Y 和 T 分别进行拟合, 降低过拟合出现的可能; 同时, 鉴于 XGBoost 算法预测准确性取决于超参数的选取, 采用贝叶斯优化技术 (Bayesian optimization technique) 搜索 XGBoost 算法最优的超参数, 具体拟合算法见文献 [16]。回归分析的原理是拟合因变量在自变量形成的特征空间上的最佳投影, 残差是垂直自变量形成的样本空间的, 因此对残差进行拟合可以最大程度消除自变量相关性所带来的影响。回归分析得到的模型可表示为

$$\hat{Y} = l(X) = E[Y|X] = \theta \hat{T} + g(X) = \theta m(X) + g(X) \quad (7)$$

$$\hat{T} = m(X) = E[T|X] \quad (8)$$

式中 $\hat{Y}$ 和 $\hat{T}$ 分别为 Y 和 T 估计值。

对于双机器学习方法中的第 2 步拟合, 本文对 XGBoost 算法拟合结果的残差进行线性回归 (linear regression), 从而消除原因变量 T 和混淆变量 X 相关性所带来的估计偏差。 Y 和 T 对应的残差可写为

$$\varepsilon_Y = Y - \hat{Y} \quad (9)$$

$$\varepsilon_T = T - \hat{T} \quad (10)$$

通过对 Y 和 T 的残差进行截距为 0 的线性回归计算因果效应指标 θ , 联立式 (5)、(7)、(9) 和式 (10) 可得

$$\varepsilon_Y = \theta \varepsilon_T + \sigma \quad (11)$$

$$\hat{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^m [Y_i - l(X_i)][T_i - m(X_i)]}{\sum_{i=1}^m [T_i - m(X_i)]} \quad (12)$$

式中: $\hat{\theta}$ 为因果效应指标 θ 的估计值, m 为指定训练数据集的数据总量。

此外, 双机器学习方法通常需要采用交叉验证 (cross validation) 的方式对数据集进行多次划分, 进而求得不同划分下计算结果的平均值, 以考虑数据的随机性。交叉验证的步骤如下: 假定整体数据集为 D , 先随机将 D 划分为 k 份子数据集, 记为 $D_j, j = 1, 2, \dots, k$, 另将 D 中 D_j 的补集记为 D_{-j} ; 同时, 为了增强训练模型的独立性, 避免过拟合, 分别使用子数据集 D_{-j} 的前半部分数据训练 XGBoost 模型 $l(X)$, 后半部分数据训练 XGBoost 模型 $m(X)$, 并且使用

子数据集 D_j 进行贝叶斯优化寻找模型最佳超参数组合; 再采用训练好的模型 $l(X)$ 和 $m(X)$ 计算子数据集 D_j 对于 Y 和 T 预测值 (式 (7) 和式 (8)) 以及残差 (式 (9) 和式 (10)), 进而根据子数据集 D_j 计算出对应因果效应指标的估计值 $\hat{\theta}_j$; 最后, 对每一个子数据集 D_j 重复上述步骤, 计算所有 $\hat{\theta}_j$ 的平均值即为最终因果效应指标的估计值 $\hat{\theta}$, 该指标数值越大, 表示该地震动参数与结构基底剪力的因果效应越强。交叉验证的流程见图 2。

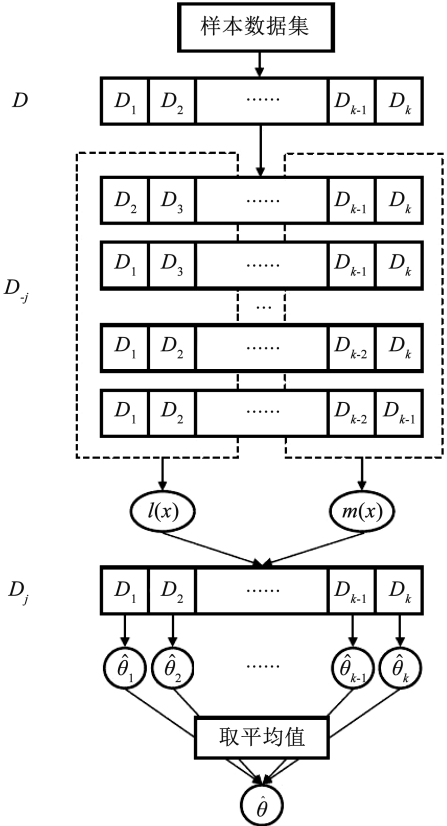


图 2 交叉验证流程

Fig. 2 Flow chart of cross validation

3 工程算例

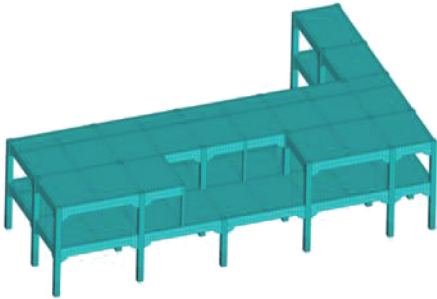
3.1 依托工程与有限元模型

选用泸定县磨西镇某博物馆的多层框架结构作为算例, 该框架坐落在摩西台地上, 在 2022 年 9 月 5 日发生的泸定 6.8 级地震中遭到严重破坏^[17]。该多层建筑为二层框架结构, 首层、二层分别为 4.8、4.2 m, 典型柱网跨度为 7.8 m。该框架的详细信息见文献 [18] 中的框架 W2, 框架 W2 俯瞰图见图 3(a)。根据中国最新的地震区划图, 博物馆所在位置属于 9 度区 (0.4g), II 类场地, 地震动分组为第 3 组, 特征周期为 0.45 s^[17]。采用通用分析软件 ANSYS 对框架 W2 进行弹性时程分析, 框架 W2 有限元模型具体的参数设定见文献 [18], 该有限元模型能够较准确地模拟框架 W2 的实际震害, 有限元

网格划分情况见图 3(b)。时程分析均在国家超级计算天津中心的“天河一号”上完成。框架 W2 的前四阶自振周期依次分别为 0.43、0.42、0.36、0.16 s。根据有限元分析结果和《抗标》规定,框架 W2 存在扭转不规则、凹凸不规则和竖向抗侧力构件不连续,共计 3 项不规则项,属于特别不规则结构,设计时需要采用弹性时程分析进行补充验算。



(a) 俯瞰图 (摄影: 潘毅)



(b) 有限元模型

图 3 框架 W2 俯瞰图与有限元模型^[18]

Fig.3 Overview and finite element model of frame W2^[18]

3.2 数据分析

根据已有研究^[10,19-21],选取常用的脉冲相关、加速度相关和速度相关参数,共计 17 个地震动参数作为备选的双参数法筛选参数。本文从 the Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) ground motion database 选取 300 条断层距小于 60 km 的地震动记录,其中包含 90 条脉冲型地震动记录^[22],选用地震动的断层距统计结果详见图 4(图中 μ 和 σ 分别代表数据的均值和标准差)。可以看出,本文选用的地震动记录中 65% 以上为断层距小于 20 km 的近断层地震动。17 种备选地震动参数及统计结果见表 1,计算方法见文献^[23]。用于因果推断的地震动参数和框架 W2 的基底剪力数据的频率分布直方图详见文献^[23]。

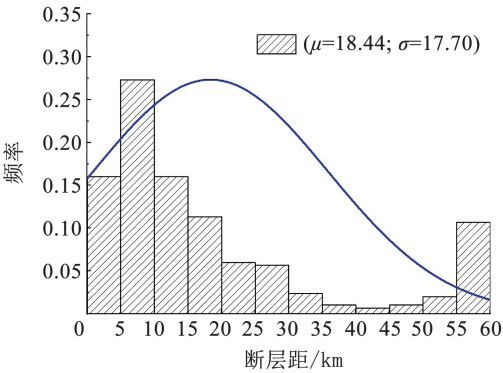


图 4 断层距频率分布直方图^[23]

Fig.4 Histogram of fault distance frequency distribution^[23]

表 1 地震动多元参数及统计结果

Tab.1 Multi-parameters of ground motion and the statistics results

参数	编号	名称	符号	均值		标准差	
				X 方向	Y 方向	X 方向	Y 方向
脉冲相关参数	1	脉冲周期/s	T_P	2.8	2.42	2.63	2.23
	2	脉冲因子	I_P	0.12	0.10	0.25	0.23
	3	脉冲幅值/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	A_P	49.70	45.36	29.07	27.19
加速度相关参数	1	地震动峰值加速度/ g	a_{PG}	0.35	0.34	0.24	0.23
	2	第一阶周期谱加速度/ g	$S_a(T_1)$	0.69	0.68	0.46	0.48
	3	加速度反应谱峰值/ g	$S_{a,max}$	1.08	1.04	0.71	0.70
	4	有效峰值加速度/ g	a_{EP}	0.27	0.27	0.18	0.18
	5	Riddell 指标	I_a	1.28	1.22	0.86	0.79
	6	Housner 强度/ g^2	P_a	0.002	0.002	0.003	0.003
	7	Arias 强度/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	I_A	1.90	1.74	2.51	2.06
	8	Park-Ang 指标	I_C	0.07	0.07	0.06	0.06
速度相关参数	1	最大正负速度峰值差/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	v_{PP}	85.60	79.84	47.94	45.41
	2	速度反应谱峰值/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	$S_{v,max}$	123.85	119.67	72.26	70.09
	3	Housner 强度/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$)	P_v	62.37	52.19	82.12	74.54
	4	修正的 Arias 强度/($\text{cm}\cdot\text{s}$)	I_{mia}	0.04	0.04	0.07	0.07
	5	Riddell 指标	I_v	49.98	46.91	22.48	21.07
	6	Faifar 指标	I_F	135.67	123.73	85.55	79.42

注:框架 W2 的长轴方向为 X 方向,短轴方向为 Y 方向。

4 结果分析

4.1 因果效应分析结果

根据框架 W2 的 300 组基底剪力数据, 对表 1 中的地震动参数进行因果推断。将地震动参数水平两方向的因果效应指标的代数平均值作为该地震动参数的因果效应指标 θ , 并将 θ 进行归一化处理, 最终分析结果见图 5。对于框架 W2, Park-Ang 指标 I_c 和 Housner 强度 P_a 是引起结构基底剪力的主要原因变量, 两个原因变量均为加速度相关参数。如上文所述, 框架 W2 的基本自振周期小于场地特征周期, 地震响应处于加速度控制区段, 因果推断分析结果与工程经验一致。由因果推断分析过程可知, 对于本文中断层距小于等于 60 km 的地震动记录, 图 5 中的结果具有一定的代表性, 但对于不同结构类型和不同特性的地震动记录, 其因果效应还需要进一步分析。对于框架 W2, 因果效应指标较高的地震动参数频率分布直方图见图 6。

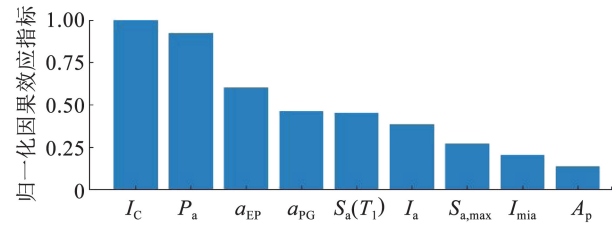
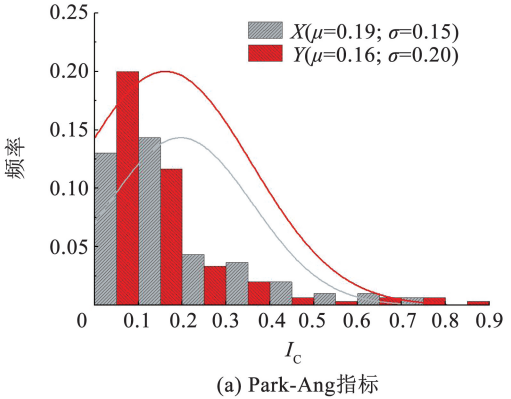
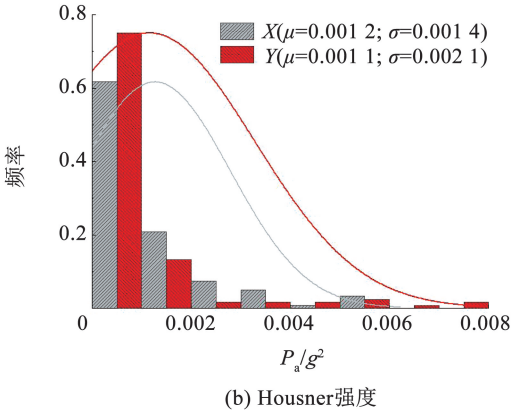


图 5 地震动参数因果推断分析结果

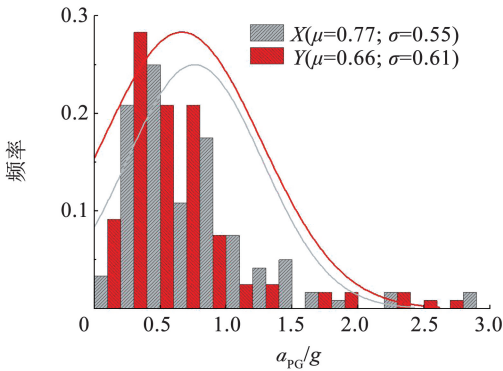
Fig. 5 Causal inference results of ground motion parameters



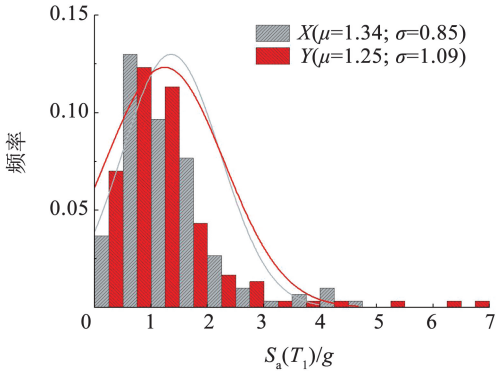
(a) Park-Ang 指标



(b) Housner 强度



(c) 地震动峰值加速度



(d) 第一周期谱加速度

图 6 原因变量频率分布直方图

Fig. 6 Histogram of frequency distribution of causal parameters

4.2 地震动记录调选和时程分析结果

根据双参数法对地震动记录进行调选: 按规范法对地震动记录进行调选, 并控制调幅系数 $S_F \leq 3^{[7]}$; 根据所采用地震动样本的离散水平, 在规范法调选出的地震动记录的基础上, 将筛选参数数值处于 25% ~ 75% 分位数的数据作为最终的地震动记录样本。根据规范法和双参数法分别得到 120 条和 60 条满足要求的地震动记录。依据规范法和双参数法(将 Park-Ang 指标 I_c 作为筛选参数)调选出的地震动记录的反应谱和 9 度区设计反应谱见图 7。

将调选后的地震动记录导入框架 W2 的有限元模型进行时程分析, 并分别按允许误差为 35% 和 20%, 统计弹性时程分析结果和需要采用地震动记录数量, 结果见表 2。可以看出, 当双参数法中的筛选参数采用主要原因变量时, 弹性时程分析得到的基底剪力的离散性均能够有效控制; 相反, 当筛选参数选用因果效应指标较小的或非因果变量的地震动参数时, 基底剪力的离散性大于预期水平。当筛选参数选用 Park-Ang 指标 I_c 和 Housner 强度 P_a 时, 时程分析得到的基底剪力的标准差较规范法分别降低了 26%、25%。值得注意的是, 地震动参数本身的离散性会对最终基底剪力结果的离散性产生影响, 由于选用地震动记录得到的 Park-Ang 指标 I_c 和 Housner 强度 P_a 数据本身的离散性较大(见图 6),

根据两个指标调选出的地震动记录统计出的基底剪力标准差存在被高估的可能。对于框架 W2, 根据筛选参数对地震动记录进行二次筛选后, 弹性时程分析时可以不使用人工地震动记录。相反地, 当不采用双参数法或筛选参数不采用主要原因变量时, 大部分基底剪力样本的离散性较大, 需要采用更多的地震动记录或一定量的人工记录来减小结果的离散性。

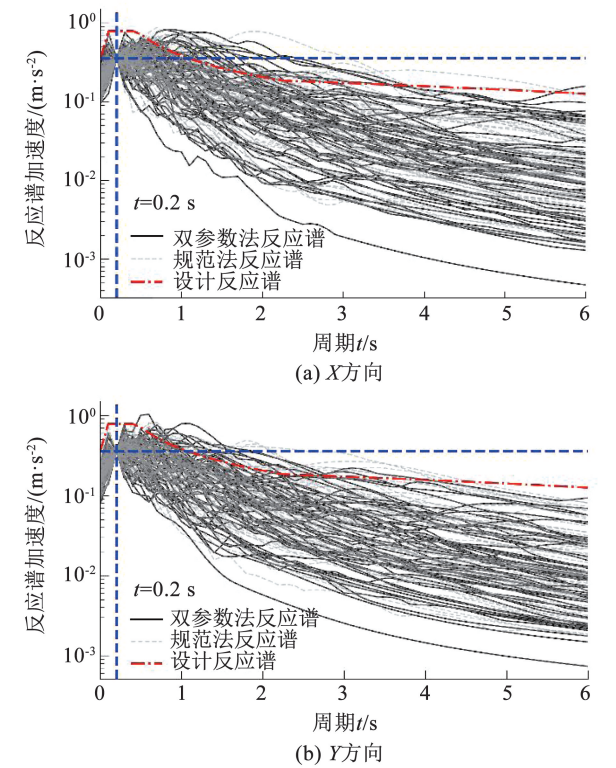


图 7 调选后的地震动记录反应谱

Fig. 7 Response spectra of selected seismic motion records

表 2 调选后地震动记录的弹性时程分析结果统计					
Tab. 2 Statistics of elastic time-history analysis results					
调选方法	参数	基底剪力统计结果		地震记录数量 n	
		均值/kN	标准差/kN	$E=35\%$	$E=20\%$
规范法	a_{EP}	10 499	2 976	3	8
筛选参数为 主要原因变量	$a_{EP} + I_c$	10 383	2 208	2	5
	$a_{EP} + P_a$	10 290	2 225	2	5
	$a_{EP} + a_{PG}$	10 272	2 046	2	4
	$a_{EP} + S_a(T_1)$	10 261	2 512	2	6
	$a_{EP} + I_a$	10 469	2 501	2	6
	$a_{EP} + S_{a,max}$	10 515	3 079	3	9
	$a_{EP} + I_{mia}$	10 664	3 019	3	8
	$a_{EP} + A_p$	10 661	2 562	2	6
	$a_{EP} + T_p$	10 694	2 836	3	7
	$a_{EP} + I_A$	10 483	3 202	3	9
筛选参数为其 他地震动参数	$a_{EP} + I_P$	10 575	3 042	3	8
	$a_{EP} + v_{PP}$	10 545	2 788	3	7
	$a_{EP} + S_{v,max}$	10 634	2 810	3	7
	$a_{EP} + P_v$	10 257	3 105	3	9
	$a_{EP} + I_v$	10 484	2 823	3	7
	$a_{EP} + I_F$	10 215	2 749	3	7

注: 双参数法中的筛选参数数据采用结构主方向数据。

根据因果推断结果和调选后的地震动记录弹性时程分析结果, 对于泸定县磨西镇某博物馆中框架 W2 的弹性时程进行验算, 本文建议分别采用有效峰值加速度 EPA 和 Park-Ang 指标 I_c 作为地震动记录的调幅参数和筛选参数。如上文所述, 因果效应分析结果取决于地震动记录和具体结构的形式, 建议未来的研究针对不同结构类型和不同特性的地震动记录进行因果推断, 从而根据具体情况规定筛选参数的选取。

5 结 论

对现行规范中的弹性时程分析补充验算方法中地震动记录的调选方法, 提出了一种基于双参数的调选方法, 并根据位于泸定县磨西镇的某博物馆中一栋特别不规则多层框架结构的分析结果对提出的方法进行了验证。得到以下结论:

- 1) 对于断层距小于等于 60 km 的地震动记录, 加速度相关的地震动参数对框架 W2 基底剪力的影响较大, 其中, Park-Ang 指标的影响最大。
- 2) 相比规范法, 双参数法时程分析得到的基底剪力标准差的降幅可达到 25% 以上。
- 3) 由于基底剪力的离散性可以被很好地控制, 当采用双参数法时, 对于近场地震多发区特别不规则的建筑, 弹性时程补充验算中可不必采用人工地震动记录。

参考文献

[1] 易伟建, 王维一. 近场区竖向地震动对钢筋混凝土框架结构抗震性能的影响[J]. 土木工程学报, 2012, 45(10): 81
YI Weijian, WANG Wei-yi. Effect of vertical ground motion on seismic behavior of RC frame in near-fault region[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(10): 81. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2012.10.014

[2] 潘毅, 包韵雷, 刘永鑫, 等. 基于中国规范的近断层区竖向抗震设计谱研究[J]. 工程力学, 2021, 38(12): 183
PAN Yi, BAO Yunlei, LIU Yongxin, et al. Study on vertical seismic design spectra of near fault area based on Chinese code[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(12): 183

[3] 潘毅, 宋佳雨, 包韵雷, 等. 考虑近断层强震影响的铁路站房抗震韧性评估[J]. 中国铁道科学, 2022, 43(6): 9
PAN Yi, SONG Jiayu, BAO Yunlei, et al. Seismic resilience evaluation of railway station building considering strong seismic influence of nearfault[J]. China Railway Science, 2022, 43(6): 9

[4] 徐积刚, 吴刚, 汤昱川, 等. 近场地震下混凝土框架考虑不确定性的抗震风险与恢复性评估[J]. 土木工程学报, 2019, 52(10): 46
XU Jigang, WUGang, TANG Yuchuan, et al. Seismic risk and resilience assessment of reinforced concrete frame structures under near fault earthquake considering uncertainties[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(10): 46. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2019.10.004

[5]李旭, VENTURA C E, 何敏娟. 近断层地震动对高层建筑结构抗震性能的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(1): 14
LI Xu, VENTURA C E, HE Minjuan. Seismic performance assessment of high-rise buildings subjected to near-fault ground motion with fling effect[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40(1): 14

[6]贾俊峰, 杜修力, 韩强. 近断层地震动特征及其对工程结构影响的研究进展[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(1): 1
JIA Junfeng, DU Xiuli, HAN Qiang. A state-of-the-art review of near-fault earthquake ground motion characteristics and effects on engineering structures[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(1): 1. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2015.01.001

[7]杨连森, 陈鑫, 谈丽华, 等. 地震动参数与既有 RC 框架校舍加固前后抗震性能指标相关性分析[J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42(4): 250
YANG Liansen, CHEN Xin, TAN Lihua, et al. Correlation analysis between ground motion parameters and the seismic performance indices of an existing RC frame school building before and after strengthening [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2022, 42(4): 250. DOI:10.13197/j.eeed.2022.0427

[8]张锐, 成虎, 吴浩, 等. 时程分析考虑高阶振型影响的多频段地震波选择方法研究[J]. 工程力学, 2018, 35(6): 162
ZHANG Rui, CHENG Hu, WU Hao, et al. Multi-band matching method for selection of ground motions in time-history analysis considering higher modes effects[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(6): 162

[9]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(6): 33
YANG Pu, LI Yingmin, LAI Ming. Selection control indicators for seismic wave input in structural time history analysis method[J]. China Civil Engineering Journal, 2000(6): 33. DOI:10.15951/j.tmgxb.2000.06.005

[10]杨志勇, 黄吉锋, 邵弘. 弹性与弹塑性动力时程分析方法中若干问题探讨[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(增刊1): 213
YANG Zhiyong, HUANG Jifeng, SHAO Hong. Discussion on linear and nonlinear time history analysis method[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(Sup. 1): 213. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2009.s1.039

[11]刘亭亭, 于晓辉, 吕大刚. 地震动多元强度参数主成分与结构损伤的相关性分析[J]. 工程力学, 2018, 35(8): 122
LIU Tingting, YU Xiaohui, LV Dagang. Analysis of correlation between principal components of multivariate earthquake intensity measures and structural damage [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(8): 122

[12]殷京科, 李典庆, 杜文琪. 主余震序列作用下边坡位移响应及地震动参数相关性分析[J]. 工程力学, 2023, 40(3): 44
YIN Jingke, LI Dianqing, DU Wenqi. Correlation analysis of slope displacement response and seismic parameters due to main-aftershock sequences[J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(3): 44

[13]来庆辉, 胡进军, 谢礼立, 等. 脉冲型地震动潜在破坏势参数的相关性分析[J]. 世界地震工程, 2020, 36(1): 35
LAI Qinghui, HU Jinjun, XIE Lili, et al. Correlation analysis on potential damage parameters of pulse-like ground motion[J]. World Earthquake Engineering, 2020, 36(1): 35

[14]BURTON H, BAKER J W. Evaluating the effectiveness of ground motion intensity measures through the lens of causal inference[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2023, 52(15): 4842. DOI:10.1002/eqe.3983

[15]LIU Xiaohui, QIAN S, TEO H H, et al. Estimating and mitigating the congestion effect of curbside pick-ups and drop-offs: a causal inference approach [J]. Transportation Science, 2023, 58(2): 355. DOI:10.48550/arXiv.2206.02164

[16]LEI X, FENG R, DONG Y, et al. Bayesian-optimized interpretable surrogate model for seismic demand prediction of urban highway bridges[J]. Engineering Structures, 2024, 15(4): 1

[17]潘毅, 高海旺, 熊耀清, 等. 泸定 6.8 级地震减隔震建筑震害调查与分析[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(12): 122
PAN Yi, GAO Haiwang, XIONG Yaoqing, et al. Seismic damage investigation and analysis of energy-dissipated and seismically isolated building in Ms 6.8 Luding earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(12): 122. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2022.0850

[18]潘毅, 任靖哲, 任宇, 等. 考虑台地效应的泸定 6.8 级地震某框架结构震害调查与分析[J]. 土木工程学报, 2024, 57(6): 136
PAN Yi, REN Jingzhe, REN Yu, et al. Seismic damage investigation and analysis of a frame structure in the Luding Ms 6.8 earthquake with platform effect [J]. China Civil Engineering Journal, 2024, 57(6): 136. DOI:10.15951/j.tmgxb.23050358

[19]赵晓芬, 温增平, 陈波, 等. 适用于全周期结构的速度脉冲型地震动强度表征参数研究[J]. 地震学报, 2019, 41(4): 536
ZHAO Xiaofen, WEN Zengping, CHEN Bo, et al. Intensity measures of pulse-like ground motions in the full periods[J]. Acta Seismologica Sinica, 2019, 41(4): 536

[20]叶列平, 马千里, 缪志伟. 结构抗震分析用地震动强度指标的研究[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(4): 9
YE Lieping, MA Qianli, MIAO Zhiwei. Study on earthquake intensities for seismic analysis of structures [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(4): 9. DOI: 10.13197/j.eeev.2009.04.019

[21]刘巴黎, 胡进军, 谢礼立. 基于弹性网络回归的地震动参数排序与比选[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2024, 56(1): 54
LIU Bali, HU Jinjun, XIE Lili. Ranking and comparison of ground motion parameters based on elastic net regression[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(1): 54

[22]BAKER J W. Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2007, 97(5): 1486

[23]任靖哲, 邹启令, 任宇, 等. 基于 Kriging 模型的结构震害预估方法研究[J/OL]. 工程力学, [2024-06-12]
REN Jingzhe, ZOU Qiling, REN Yu, et al. Study on the method of structural seismic damage prediction based on Kriging surrogate model[J/OL]. Engineering Mechanics, [2024-06-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.03.20240612.1010.009.html>

(编辑 刘 彤)