张潇男,袁小祥,明小娜,等.近断层速度脉冲记录多阻尼比的加速度反应谱标定研究[J].地震工程学报,2026,48(6):1458-1467.DOI:10.20000/j.1000-0844.20250718001

Zhang Xiaonan, Yuan Xiaoxiang, Ming Xiaona, et al. Calibration of acceleration response spectra at multiple damping ratios for near-fault velocity pulse records[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2026, 48(6): 1458-1467. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20250718001

# 近断层速度脉冲记录多阻尼比的加速度反应谱标定研究

张潇男[1,2], 袁小祥[3,4], 明小娜[5], 余思汗[6], 陈文凯[7], 薄 涛[8]

(1.防灾科技学院 地震工程与建筑安全学院,河北 三河 065200;
2.中国地震局建筑物破坏机理与防御重点实验室,河北 三河 065200;
3.中国地震局地震预测研究所 地震预测与风险评估应急管理部重点实验室,北京 100036;
4.中国地震局工程力学研究所,黑龙江 哈尔滨 150080;
5.云南省地震局,云南 昆明 650000;
6.宁夏回族自治区地震局,宁夏 银川 750001;
7.甘肃省地震局,甘肃 兰州 730000;
8.北京市地震局,北京 100000)

**摘要:** 近断层速度脉冲地震动记录具有幅值大、脉冲周期长的特点,易对工程结构造成严重危害。选择16个地震事件,共计107个近断层台站的水平向速度脉冲记录,并将其分为6类,采用差分进化算法标定多阻尼比加速度反应谱,对比分析原始记录与残余记录标定谱的差异及标定谱特征参数随阻尼比的变化规律。结果表明:在短周期区间,原始记录与残余记录标定谱形态相近;在长周期区间,原始记录标定谱值明显大于残余记录。不同断层类型及速度脉冲类型的$\beta_{max}$和$\gamma$均随阻尼比增大呈递减趋势。速度脉冲导致记录特征周期$T_g$普遍增大,且原始记录$T_g$大于对应的残余记录;原始记录和残余记录的$\beta_{max}$取值相近;残余记录的$\gamma$值普遍大于原始记录。

**关键词:** 近断层;速度脉冲记录;阻尼比;反应谱标定;差分进化算法

**中图分类号:** P315.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0844(2026)06-1458-10

DOI:10.20000/j.1000-0844.20250718001

**收稿日期:**2025-07-18

**基金项目:**应急管理部重点科技计划项目(2024EMST050503);宁夏重点研发计划重点项目(2024BEG02033);中国地震局地震预测研究所地震业务科技支撑项目(CEAIEF20250508);地震科技星火计划项目(XH24038YB);中央高校基本科研业务费(ZY20260212)

**第一作者简介:**张潇男(1994-),男,山东济宁人,博士,讲师,主要从事地震工程研究。E-mail: zhangxn19941005@163.com。

**通信作者:**袁小祥(1983-),男,江苏泰州人,博士,副研究员,主要从事地震灾害评估、遥感技术研究。E-mail: yuanxx@ief.iac.cn。

# Calibration of acceleration response spectra at multiple damping ratios for near-fault velocity pulse records

Zhang Xiaonan[1,2], Yuan Xiaoxiang[3,4], Ming Xiaona[5], Yu Sihan[6], Chen Wenkai[7], Bo Tao[8]

(*1. School of Earthquake Engineering and Building Safety, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065200, Hebei, China;*
*2. Key Laboratory of Building Collapse Mechanism and Disaster Prevention, CEA, Sanhe 065200, Hebei, China;*
*3. Key Laboratory of Earthquake Forecasting and Risk Assessment, Ministry of Emergency Management, Institute of Earthquake Forecasting, CEA, Beijing 100036, China;*
*4. Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150080, Heilongjiang, China;*
*5. Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650000, Yunnan, China;*
*6. Earthquake Agency of Ningxia Hui Autonomous Region, Yingchuan 750001, Ningxia, China;*
*7. Gansu Earthquake Agency, Lanzhou 730000, Gansu, China;*
*8. Beijing Earthquake Agency, Beijing 100000, China*)

**Abstract**: Near-fault velocity pulse ground-motion records exhibit large amplitudes and long pulse periods and can easily and severely damage engineering structures. In this study, 107 horizontal velocity pulse records from near-fault stations during 16 earthquake events were selected and categorized into six types. The differential evolution algorithm was applied to calibrate the acceleration response spectra at multiple damping ratios. A comparative analysis was conducted of differences between the calibrated spectra of the original and residual records, as well as variation in the calibrated spectral characteristic parameters with the damping ratio. The results show that in the short-period range, the original and residual records have similar calibrated spectral shapes. In the long-period range, the original records have considerably larger calibrated spectral ordinates than the residual records. $\beta_{max}$ and $\gamma$ for different fault types and velocity pulse categories decrease as the damping ratio increases. Velocity pulses generally increase the characteristic period $T_g$, with the $T_g$ of the original records being greater than that of the corresponding residual records. The original and residual records have similar $\beta_{max}$ values, while the residual records generally have larger $\gamma$ than the original records.

**Keywords**: near-fault; velocity pulse records; damping ratio; response spectrum calibration; differential evolution algorithm

## 0　引言

近断层速度脉冲型地震动记录具有幅值大、脉冲周期长的特点，是造成结构破坏的重要因素之一。《建筑抗震设计规范(GB 50011—2010)》[1](以下简称《规范》)虽规定了近断层设计反应谱调整系数以提升该区域结构的抗震设防能力，但未考虑近断层设计谱形状的修正。速度脉冲记录的特点是在反应谱特定周期段产生突出放大效应，并非整体放大[2-7]，这与非脉冲记录在本质上存在较大差异。

反应谱标定是指基于目标设计谱形式，对地震记录反应谱进行拟合以确定相应特征参数的过程，其拟合精度直接决定了地震作用的真实性。Newmark 等[8]最早提出采用地面峰值加速度(Peak Ground Acceleration, PGA)、峰值速度(Peak Ground Velocity, PGV)和峰值位移(Peak Ground Displacement, PGD)三个参数分别标定设计地震反应谱，该方法被称为三参数标定法。针对我国建筑周期特点，廖振鹏[9]提出了基于 PGA 和 PGV 的双参数标定法，简化了反应谱标定的计算流程。Malhotra[10-11]基于 PGA 与 PGD 之比计算反应谱中心周期，并以此作为分段点进行标定，改善了三参数标定法在分段点附近的不连续性问题。徐龙军[12]引入双规准反应谱概念，消除了卓越周期对反应谱形状的影响。陈国兴等[13]考虑远场大地震效应，依据特征周期段谱面积相等原则对标定反应谱平台值

进行了修正。李爽等[14]和潘毅等[15]分别对具有速度脉冲特征的地震动水平向和竖向记录的设计谱进行研究，并与规范对比，提出了设计谱参数改进建议。遗传算法、最小二乘法、差分进化算法、模拟退火算法及粒子群优化算法等智能算法[16-20]被广泛应用于反应谱标定，极大提升了拟合效果。差分进化算法由Storn等[21]在求解切比雪夫多项式问题时提出，因其适用于多参数、多段式函数的直接全局寻优，具有高拟合优度和强稳定性的优势，已成为反应谱标定的常用算法[22-23]。

阻尼比是影响结构地震响应的重要参数，不同阻尼比下的反应谱有很大差别[24]，因此，在反应谱标定过程中必须予以考虑。现有多数研究通常仅根据0.05的阻尼比进行标定。然而，并非所有结构的阻尼比都是0.05，例如：钢结构建筑的阻尼比明显小于0.05，而隔震结构和附加阻尼器结构的阻尼比则远高于0.05。单一的0.05阻尼比标定结果难以适用于不同阻尼比的结构体系。为此，本研究使用Shahi等[25]提出的方法对合成记录进行脉冲识别与提取，从原始记录中分离出速度脉冲成分和残余记录；选取0.01～0.30范围内共14个阻尼比，利用差分进化算法分别对原始记录和残余记录的加速度反应谱进行标定，分析标定的设计反应谱（以下简称标定谱）特征参数随阻尼比的变化规律，旨在为不同阻尼比结构的抗震设计提供参考。

## 1 强震数据

在挑选脉冲记录的过程中，为了减少人工干预，Shahi等[25]提出基于小波的脉冲指标识别方法，该方法因识别精度高而得到广泛应用[26]。

本研究选取1980—2023年间发生的16次地震事件，共计107组近断层水平向速度脉冲强震记录（图1），数据源自美国太平洋地震研究中心（Pacific Earthquake Engineering Research Center，PEER）、日本KiK-net和K-NET台站，以及中国国家强震动台网中心等权威数据库，详细记录信息列于表1。所有记录按照震源机制划分为走滑断层、逆断层和未知断层，并按脉冲类型分为单向速度脉冲和双向速度脉冲。数据选择标准为：(1)记录波形完整，避免因数据缺失引入误差；(2)台站的断层距在100 km以内，且绝大多数记录所在台站断层距在30 km之内，确保记录受断层破裂直接影响并保留明显脉冲特征；(3)每条记录的信噪比大于5，以降低噪声干扰；(4)对各台站两水平向记录进行旋转合成，选择PGV最大方向的合成记录作为研究对象，且合成后记录PGV大于30 cm/s。

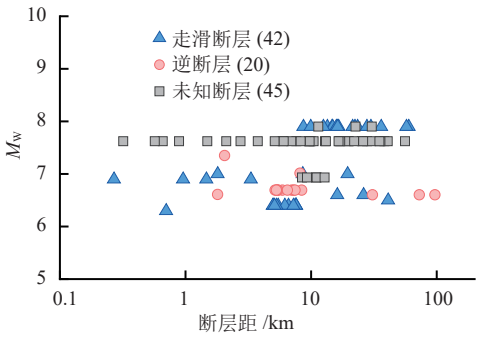



图1 强震数据随断层距与震级的分布

Fig. 1 Distribution of strong-motion data with fault distance and magnitude

表1 近断层速度脉冲型地震动记录基本信息

Table 1 Basic information of near-fault pulse-like ground motions

| 地震名称 | 日期 | 震级($M_W$) | 断层类型 | 记录所在台站 | 断层距/km | $v_{S30}$/(m/s) | 脉冲类型 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tabas, Iran | 1978-09-16 | 7.4 | 2 | Tabas | 2.05 | 766.77 | 2 |
| Loma Prieta, US | 1989-10-18 | 6.9 | 3 | Gilroy-Historic Bldg | 10.97 | 308.55 | 2 |
| Loma Prieta, US | 1989-10-18 | 6.9 | 3 | Gilroy Array #2 | 11.07 | 270.84 | 2 |
| | | | | Gilroy Array #3 | 12.82 | 349.85 | 2 |
| | | | | Saratoga-Aloha Ave | 8.5 | 380.89 | 2 |
| | | | | Saratoga-W Valley Coll. | 9.31 | 347.9 | 2 |
| Cape Mendocino, US | 1992-04-25 | 7.0 | 2 | Petrolia | 8.18 | 422.17 | 2 |
| Northridge, US | 1994-01-17 | 6.7 | 2 | Jensen Filter Plant Administrative Building | 5.43 | 373.07 | 2 |
| | | | | Jensen Filter Plant Generator Building | 5.43 | 525.79 | 2 |
| | | | | LA-Sepulveda VA Hospital | 8.44 | 380.06 | 2 |
| | | | | LA Dam | 5.92 | 628.99 | 2 |
| | | | | Newhall-ire Sta | 5.92 | 269.14 | 1 |

续表1

| 地震名称 | 日期 | 震级($M_W$) | 断层类型 | 记录所在台站 | 断层距/km | $v_{S30}$/(m/s) | 脉冲类型 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Newhall-W Pico Canyon Rd. | 5.48 | 285.93 | 1 |
| | | | | Pacoima Dam (downstr) | 7.01 | 2 016.13 | 2 |
| | | | | Pacoima Dam (upper left) | 7.01 | 2 016.13 | 2 |
| | | | | Pacoima Kagel Canyon | 7.26 | 508.08 | 2 |
| | | | | Pardee-SCE | 7.46 | 325.67 | 2 |
| | | | | Rinaldi Receiving Sta | 6.5 | 282.25 | 2 |
| | | | | Sylmar"Converter Sta | 5.35 | 251.24 | 1 |
| | | | | Sylmar"Converter Sta East | 5.19 | 370.52 | 1 |
| | | | | Sylmar"Olive View Med FF | 5.3 | 440.54 | 1 |
| Kobe, Japan | 1995-01-16 | 6.9 | 0 | KJMA | 0.96 | 312 | 2 |
| | | | | Port Island | 3.31 | 198 | 2 |
| | | | | Takarazuka | 0.27 | 312 | 2 |
| | | | | Takaori | 1.47 | 256 | 2 |
| Chi-Chi, China | 1999-09-20 | 7.6 | 3 | CHY006 | 9.76 | 438.19 | 2 |
| | | | | CHY024 | 9.62 | 427.73 | 2 |
| | | | | CHY101 | 9.94 | 258.89 | 2 |
| | | | | NST | 38.42 | 491.08 | 2 |
| | | | | TCU026 | 56.12 | 569.98 | 1 |
| | | | | TCU029 | 28.04 | 406.53 | 2 |
| | | | | TCU031 | 30.17 | 489.22 | 2 |
| | | | | TCU033 | 40.88 | 423.4 | 2 |
| | | | | TCU034 | 35.68 | 393.77 | 2 |
| | | | | TCU036 | 19.83 | 478.07 | 2 |
| | | | | TCU038 | 25.42 | 297.86 | 2 |
| | | | | TCU039 | 19.89 | 540.00 | 2 |
| | | | | TCU040 | 22.06 | 362.00 | 2 |
| | | | | TCU045 | 26 | 704.00 | 1 |
| | | | | TCU046 | 16.74 | 465.55 | 2 |
| | | | | TCU047 | 35 | 520.37 | 2 |
| | | | | TCU049 | 3.76 | 487.27 | 2 |
| | | | | TCU051 | 7.64 | 350.06 | 2 |
| | | | | TCU052 | 0.66 | 579.1 | 1 |
| | | | | TCU053 | 5.95 | 454.55 | 2 |
| | | | | TCU056 | 10.48 | 403.2 | 2 |
| | | | | TCU059 | 17.11 | 272.67 | 2 |
| | | | | TCU063 | 9.78 | 476.14 | 2 |
| | | | | TCU064 | 16.59 | 645.72 | 2 |
| | | | | TCU065 | 0.57 | 305.85 | 2 |
| | | | | TCU068 | 0.32 | 487.34 | 1 |
| | | | | TCU075 | 0.89 | 573.02 | 2 |
| | | | | TCU076 | 2.74 | 614.98 | 2 |
| | | | | TCU082 | 5.16 | 472.81 | 2 |
| | | | | TCU087 | 6.98 | 538.69 | 2 |
| | | | | TCU101 | 2.11 | 389.41 | 1 |
| | | | | TCU102 | 1.49 | 714.27 | 1 |
| | | | | TCU103 | 6.08 | 494.1 | 2 |
| | | | | TCU104 | 12.87 | 410.45 | 2 |
| | | | | TCU128 | 13.13 | 599.64 | 2 |

续表1

| 地震名称 | 日期 | 震级($M_W$) | 断层类型 | 记录所在台站 | 断层距/km | $v_{S30}$/(m/s) | 脉冲类型 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | TCU136 | 8.27 | 462.1 | 2 |
| Wenchuan, China | 2008-05-12 | 7.9 | 3 | 51JYH | 11 | 322 | 2 |
| | | | | 51JYD | 23 | 476 | 2 |
| | | | | 51AXT | 0 | 376 | 2 |
| | | | | 51DYB | 31 | 418 | 2 |
| Lushan, China | 2013-04-20 | 6.6 | 2 | 51QLY | 30.86 | 486 | 1 |
| | | | | 51TQL | 72.869 | 529 | 2 |
| | | | | 51HYY | 96.865 | 414 | 2 |
| Ludian, China | 2014-08-03 | 6.3 | 0 | 053LLT | 0.7 | - | 2 |
| Kumamoto, Japan | 2016-04-16 | 7.0 | 0 | KMM001 | 19.50 | 431.00 | 2 |
| | | | | KMM004 | 1.80 | 286.00 | 2 |
| | | | | KMM007 | 8.60 | 341.00 | 2 |
| Jiuzhaigou, China | 2017-08-08 | 6.5 | 0 | 51JZW | 40.947 | 428 | 2 |
| | | | | 51JZY | 41.171 | 321 | 2 |
| Hualien, China | 2018-02-06 | 6.4 | 0 | HWA007 | 5.02 | 379 | 2 |
| | | | | HWA008 | 6.62 | 297 | 2 |
| | | | | HWA009 | 5.48 | 461 | 2 |
| | | | | HWA010 | 6.18 | 250 | 2 |
| | | | | HWA011 | 7.58 | 361 | 2 |
| | | | | HWA012 | 4.96 | 410 | 1 |
| | | | | HWA019 | 5.29 | 504 | 1 |
| | | | | HWA028 | 7.56 | 405 | 1 |
| | | | | HWA050 | 7.46 | 343 | 2 |
| | | | | HWA062 | 5.11 | 606 | 1 |
| | | | | HWA063 | 7.6 | 289 | 2 |
| | | | | TRB042 | 7.23 | 379 | 2 |
| Luding, China | 2022-09-05 | 6.6 | 0 | 51LDJ | 16.195 | 313 | 1 |
| | | | | 51LDL | 26.118 | 308 | 2 |
| Nurdagi, Turkey | 2023-02-06 | 7.9 | 0 | 2708 | 8.7 | 523.00 | 2 |
| | | | | 2712 | 13.46 | - | 2 |
| | | | | 2715 | 14.68 | - | 2 |
| | | | | 2717 | 14.89 | - | 2 |
| | | | | 2718 | 0 | - | 2 |
| | | | | 3123 | 59.95 | 470 | 2 |
| | | | | 3124 | 57.37 | 283 | 2 |
| | | | | 3137 | 22.29 | 688 | 2 |
| | | | | 3138 | 12.5 | 618 | 1 |
| | | | | 3139 | 29.83 | 272 | 2 |
| | | | | 3142 | 36.19 | 539 | 2 |
| | | | | 3143 | 9.91 | 444 | 2 |
| | | | | 3144 | 15.91 | 485 | 2 |
| | | | | 3145 | 23.47 | 533 | 2 |
| | | | | 4615 | 16.53 | 484 | 2 |
| | | | | 4616 | 27.84 | 390 | 1 |
| | | | | 8002 | 21.35 | 430 | 2 |
| | | | | NAR | 16.24 | - | 1 |

注:断层类型:“0”代表走滑断层,“1”代表正断层(本研究未选用该类型记录),“2”代表逆断层,“3”代表未知型断层;脉冲类型:“1”代表单向速度脉冲,“2”代表双向速度脉冲

## 2　研究方法

根据不同断层机制和脉冲类型，本研究将记录分为6类：走滑断层单向速度脉冲记录（简称走滑-单）、走滑断层双向速度脉冲记录（简称走滑-双）、逆断层单向速度脉冲记录（简称逆-单）、逆断层双向速度脉冲记录（简称逆-双）、未知断层单向速度脉冲记录（简称未知-单），以及未知断层双向速度脉冲记录（简称未知-双）。

### 2.1　标定谱形式

为了便于分析和比较，将设计反应谱转化为规准化$\beta$谱（反应谱谱值与PGA之比）。转化后的设计谱形式为：

$$\beta(T,\xi)=\begin{cases}1+\dfrac{\beta_{\max}^{\xi}-1}{T_0^{\xi}}T, & 0\leqslant T<T_0^{\xi}\\ \beta_{\max}^{\xi}, & T_0^{\xi}\leqslant T<T_{\mathrm{g}}^{\xi}\\ \beta_{\max}^{\xi}\left(\dfrac{T_{\mathrm{g}}^{\xi}}{T}\right)^{\gamma^{\xi}}, & T_{\mathrm{g}}^{\xi}\leqslant T<10\end{cases}\quad(1)$$

式中：$\xi$为阻尼比；$T$为周期；$\beta(T,\xi)$是阻尼比$\xi$、周期$T$时的标定谱；$T_0^{\xi}$、$T_{\mathrm{g}}^{\xi}$分别为阻尼比$\xi$对应的第一、第二拐点周期；$T_{\mathrm{g}}$为特征周期；$\beta_{\max}$为平台高度；$\gamma$为衰减指数。

### 2.2　差分进化算法参数设置

使用差分进化算法将反应谱的标定转化为求$T_0$、$T_{\mathrm{g}}$、$\beta_{\max}$、$\gamma$四个参数的最优解问题。为评价所求参数是否最优解，构造适应度函数以衡量标定谱与实际记录反应谱的偏差，选取均方根误差（Root-Mean-Square Error，RMSE）作为适应度函数，形式如下：

$$RMSE=\left\{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}[\beta(i)-\tilde{\beta}(i)]^2\right\}^{\frac{1}{2}}\quad(2)$$

式中：$N$表示谱周期个数；$\beta(i)$、$\tilde{\beta}(i)$分别表示第$i$个谱周期的实际记录反应谱值及标定反应谱值。

差分进化算法的主要控制参数包括种群大小（Population size，$NP$）、变异算子（mutation Factor，$F$）、杂交概率（Crossover Rate，$CR$）和进化代数（Generation，$G$）。参考Neri等[27]的建议并结合本研究参数取值范围，设定种群$NP=100$；$F$取值范围为0～2，取值过小易陷入局部最优，过大则收敛缓慢，一般取0.4～1，本研究取0.5；$CR$取值范围为0～1，$CR$越大，发生交叉的可能性就越大，本研究取0.5；$G$取100（表2）。

**表2　计算参数取值**

**Table 2　Values of calculation parameters**

| $NP$ | $F$ | $CR$ | $G$ |
|---|---|---|---|
| 100 | 0.5 | 0.5 | 100 |

使用差分进化算法标定反应谱的流程如下：（1）初始化种群，生成$NP$组随机向量，每组包含$T_0$、$T_{\mathrm{g}}$、$\beta_{\max}$、$\gamma$四个待标定参数；（2）种群变异，从$NP$中随机选取两个个体的差向量作为第3个个体的随机变化源，将差向量加权后按照一定规则与第3个个体求和而产生变异个体，变异个体应当满足规定的边界条件，超出边界应当设置为边界值；（3）种群交叉，原向量与变异向量进行交叉操作，产生交叉向量；（4）种群选择，对比交叉向量和原向量，将RMSE值更小的向量作为保留种群；（5）终止判据：判断RMSE是否达到阈值（0.001）或$G$达到最大，若是，则终止计算，将得到的最佳种群作为最优计算结果，若否，继续重复步骤（2）～（4）。

## 3　结果分析

### 3.1　不同阻尼比的标定谱对比

图2以Northridge地震LA-Sepulveda VA Hospital台站的水平向记录为例，展示了不同阻尼比下的记录反应谱与标定谱。图中仅展示阻尼比为0.01、0.05、0.10和0.30的结果，其余阻尼比可通过插值获得；考虑到近断层效应对长周期段的影响，将标定谱的周期范围取为0～10 s。由图可知：不同阻尼比的标定谱与记录谱整体变化趋势基本一致；在0.5～2.0 s周期区间，标定谱值随阻尼比增大而逐渐降低；在2.0～10 s周期区间，不同阻尼比的标定谱与记录谱取值较为接近。

为进一步分析原始记录标定谱与残余记录标

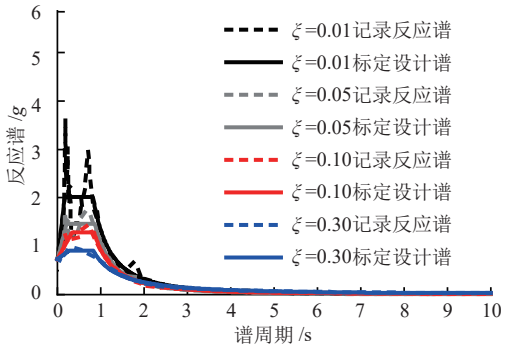



图2　多阻尼比记录反应谱与标定谱的对比

Fig. 2　Comparison between recorded response spectra and calibrated spectra at multiple damping ratios

定谱之间的差异，按断层类型分别对两类标定谱展开对比研究。

图3给出了不同速度脉冲记录在阻尼比为0.01、0.05、0.10和0.30时的原始记录标定谱和残余记录标定谱。由图可知：在0.1～1.0 s周期区间，二者差异较小；在1.0～4.0 s周期区间，原始记录标定谱明显大于残余记录标定谱，该区间正是受速度脉冲影响显著的频段；在6～10 s周期区间，单向速度脉冲记录的标定谱与残余记录较为接近，而双向脉冲记录的标定谱明显偏大，表明双向速度脉冲对长周期段标定谱的影响不可忽略。此外，随着阻尼比增大，原始记录标定谱和残余记录的平台值均呈下降趋势，而特征周期则基本保持稳定。在长周期段，未知断层原始记录标定谱仍明显大于残余记录标定谱。

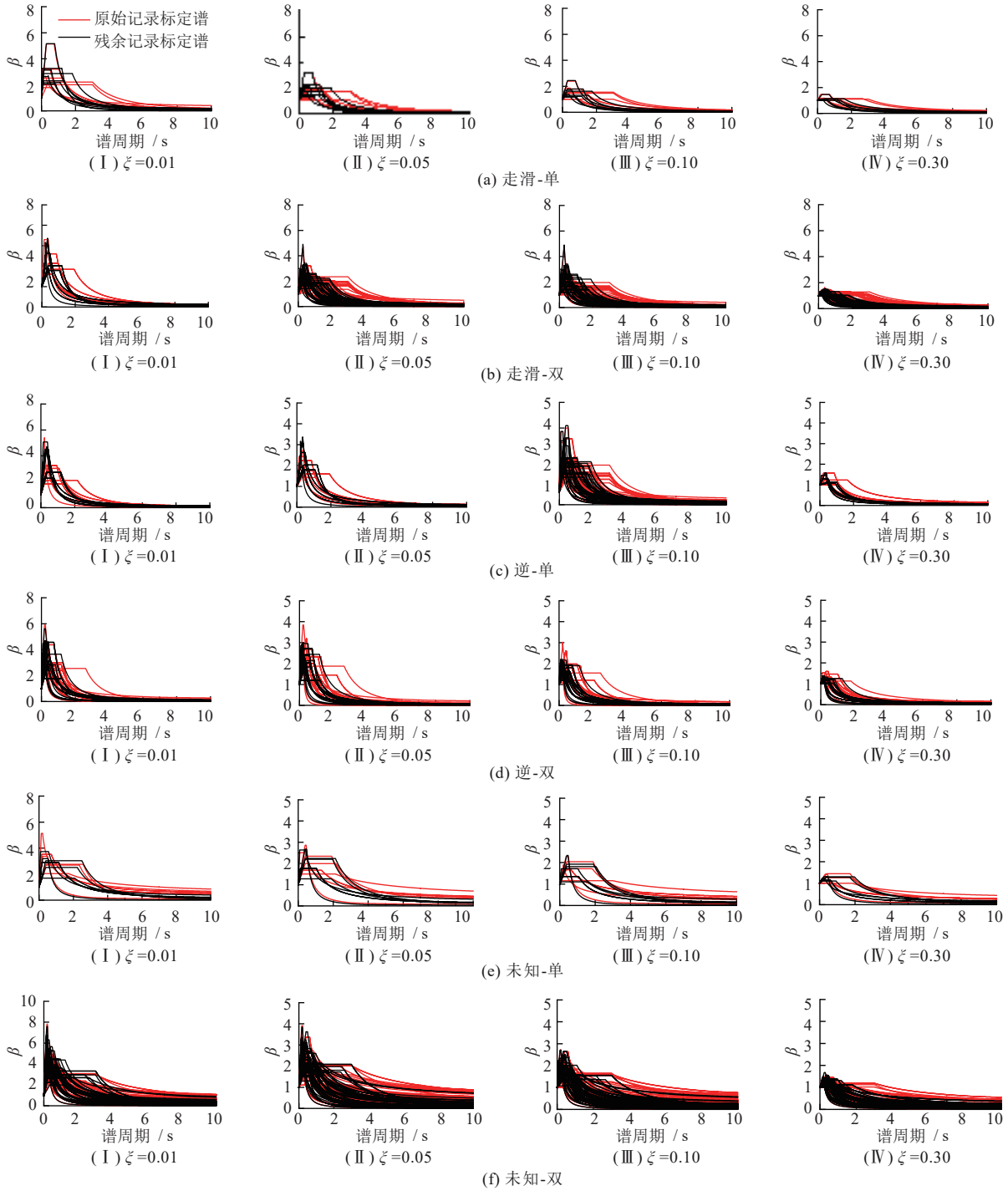



图3 原始记录与残余记录标定谱对比

Fig. 3 Comparison between calibrated spectra of original records and residual records

### 3.2　标定谱参数分析

本研究选取 0.01、0.02、0.03、0.04、0.05、0.06、0.07、0.08、0.09、0.10、0.15、0.20、0.25 和 0.30 共 14 个阻尼比，分别计算各类记录标定谱参数（$T_g$、$\beta_{max}$、$\gamma$）的平均值，并分析其随阻尼比的变化趋势。

图 4 展示了不同断层类型、脉冲特性下，原始记录与残余记录标定谱 $T_g$ 均值随阻尼比的变化规律。总体而言，不同类型的 $T_g$ 随阻尼比的变化趋势存在显著差异，其中走滑断层、逆断层记录的 $T_g$ 随阻尼比增大基本保持稳定，而未知断层记录的 $T_g$ 则随阻尼比增大呈下降趋势。各类记录的 $T_g$ 取值范围为 0.8～1.4 s，其中未知断层单向脉冲记录 $T_g$ 取值范围为 1.2～1.4 s。具体来看，(1)走滑断层：在阻尼比增大时，$T_g$ 先保持稳定后缓慢下降，其单向、双向速度脉冲记录的标定谱 $T_g$ 相近，且均大于残余记录。(2)逆断层：单向、双向速度脉冲原始记录的 $T_g$ 均大于残余记录；当阻尼比＜0.15 时，两者 $T_g$ 接近，而当阻尼比＞0.20 时，单向脉冲记录的 $T_g$ 明显大于双向脉冲记录的平均值。(3)未知型断层：当阻尼比＜0.10 时，原始与残余记录的 $T_g$ 较为接近；当阻尼比＞0.10 时，原始记录 $T_g$ 更大，且两者差距随阻尼比增大而逐渐扩大。

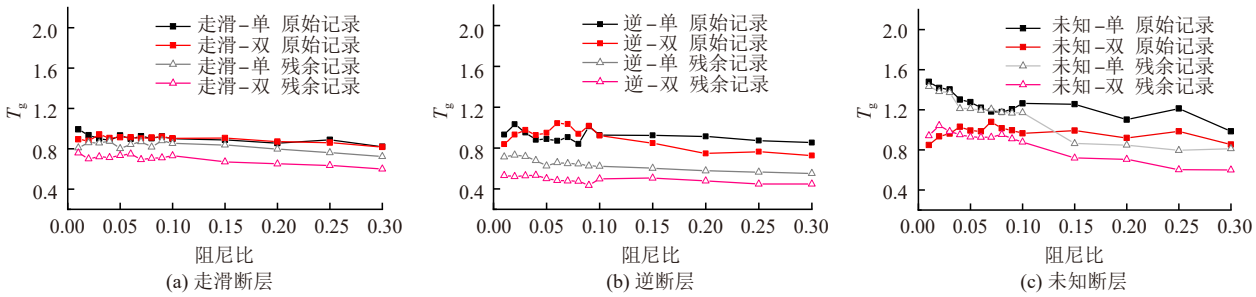



图 4　不同类型标定谱的 $T_g$ 均值随阻尼比变化趋势

Fig. 4　Variation trend of mean $T_g$ values of different types of calibrated spectra with damping ratio

图 5 展示了不同断层类型、脉冲特性下，原始记录与残余记录标定谱 $\beta_{max}$ 均值随阻尼比的变化规律。总体而言，各类记录的 $\beta_{max}$ 随阻尼比增大均呈单调递减趋势，并逐渐收敛于 1.5 左右；其中，双向速度脉冲记录的原始与残余 $\beta_{max}$ 取值较单向速度脉冲更为接近。具体来看，(1)走滑断层：残余记录 $\beta_{max}$ 略大于原始记录，且双向速度脉冲残余记录的 $\beta_{max}$ 最大，单向速度脉冲原始记录的 $\beta_{max}$ 最小。(2)逆断层：单向速度脉冲残余记录的 $\beta_{max}$ 最大，单向速度脉冲原始记录的 $\beta_{max}$ 最小，而双向速度脉冲原始和残余记录的 $\beta_{max}$ 较为接近。(3)未知断层：当阻尼比小于 0.05 时，双向脉冲的 $\beta_{max}$ 大于单向脉冲记录；当阻尼比大于 0.05 时，各类型记录的 $\beta_{max}$ 趋近一致。

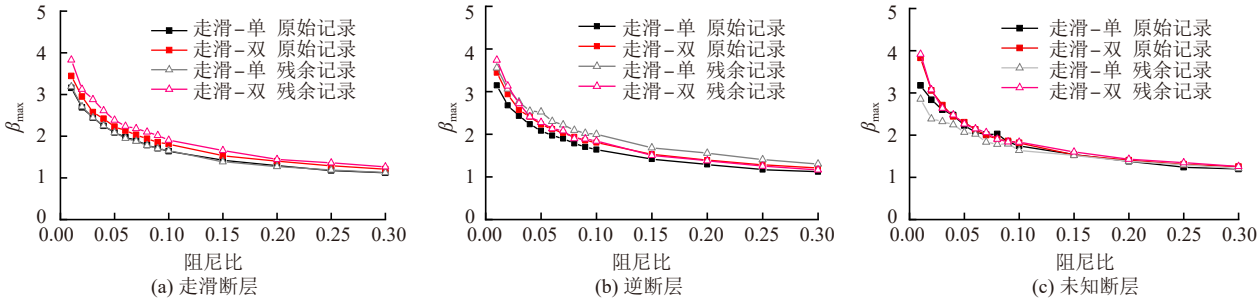
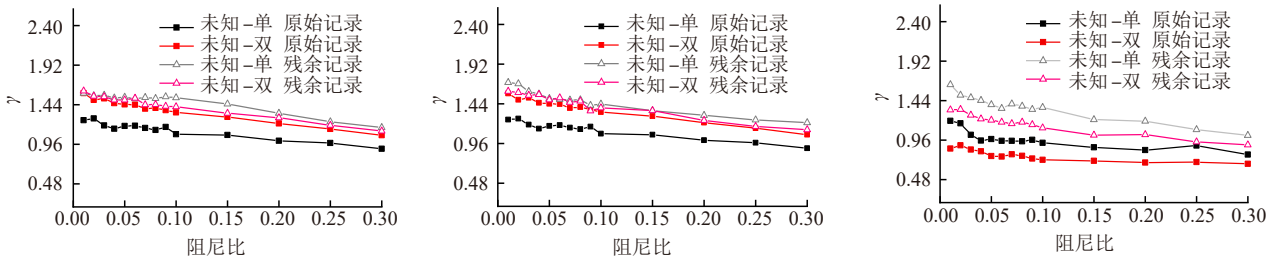



图 5　不同类型标定谱的 $\beta_{max}$ 均值随阻尼比变化趋势

Fig. 5　Variation trend of mean $\beta_{max}$ values of different types of calibrated spectra with damping ratio

图 6 展示了不同断层类型及脉冲特性下，原始记录与残余记录标定谱 $\gamma$ 均值随阻尼比的变化规律。总体而言，各类原始记录与残余记录的 $\gamma$ 值均随阻尼比增大呈递减趋势，且残余记录的 $\gamma$ 值普遍大于同类型原始记录。具体数值范围方面，原始记录 $\gamma$ 取值介于 0.7～1.5 之间，残余记录 $\gamma$ 取值在 1.0～1.7 之间。具体来看，(1)走滑断层：单向速度脉冲残余记录的 $\gamma$ 值最大，单向速度脉冲原始记录

的γ值最小，双向速度脉冲的残余记录与原始记录γ值较为接近。(2)逆断层：单向速度脉冲残余记录的γ值最大，单向速度脉冲原始记录的γ值最小，双向速度脉冲的残余与原始记录γ值较为接近。(3)未知断层：单向速度脉冲残余记录γ值最大，双向速度脉冲原始记录的γ值最小。

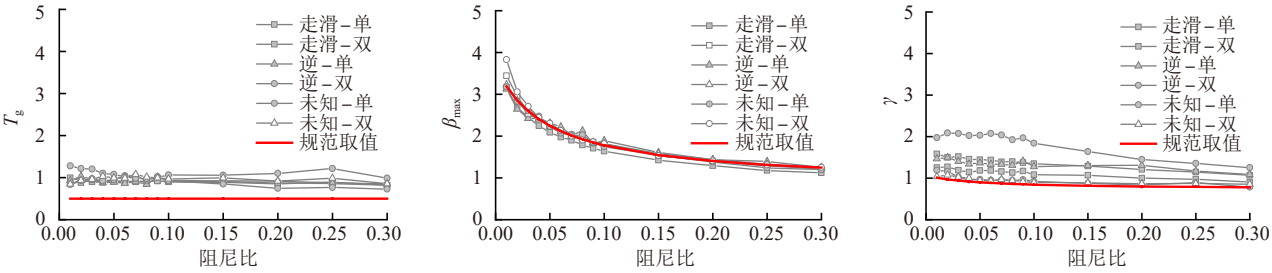



(a) 走滑断层 (b) 逆断层 (c) 未知断层

图6 不同类型标定谱的γ均值随阻尼比变化趋势

Fig. 6 Variation trend of mean γ values of different types of calibrated spectra with damping ratio

图7对比了原始记录标定谱参数均值与规范取值。考虑到本研究选取的地震记录多为近场土层记录，参照规范场地分类，将$T_g$取值为Ⅱ类场地第一组。结果显示：各类记录的标定谱$T_g$均显著大于规范取值，表明速度脉冲成分导致反应谱特征周期普遍延长，建议近断层区域设计谱特征周期整体增加0.3 s，以提升抗震设防水平；标定谱$\beta_{max}$取值与规范接近，表明规范平台高度取值合理，无需调整；除未知断层双向脉冲外，其余各类记录的标定谱γ均大于规范取值，建议在近断层设计中适当提高规范γ值，以更好地适应脉冲型地震动的反应谱特征。




(a) $T_g$均值与规范对比 (b) $\beta_{max}$均值与规范对比 (c) γ均值与规范对比

图7 标定谱参数平均值与规范设计谱参数值对比

Fig. 7 Comparison between mean values of calibrated spectral parameters and code design spectral parameters

## 4 结论

本研究选取多个地区的16次强地震动事件、共计107个近断层台站的水平向速度脉冲记录，采用差分进化算法分别标定原始记录和残余记录的多阻尼比加速度反应谱，分析标定谱参数随阻尼比的变化规律，得出如下结论：

(1) 在短周期区间，原始记录与残余记录的标定谱形态相似；在长周期区间，原始记录标定谱值明显大于残余记录。随着阻尼比增大，两者差异逐渐减小，表明速度脉冲成分对低阻尼比反应谱的影响更为显著。

(2) 不同断层类型的$T_g$变化趋势存在较大差别；而不同断层、速度脉冲类型的$\beta_{max}$变化趋势则较为一致；原始记录和残余记录的$\beta_{max}$取值相近，均随阻尼比增大呈递减趋势，并收敛于1.5左右；不同断层、速度脉冲类型的γ变化趋势相似，亦随阻尼比增大而减小，但残余记录的γ值普遍大于原始记录。

(3) 速度脉冲导致标定谱$T_g$普遍增大且明显大于规范取值，建议近断层区域设计谱特征周期整体增加0.3 s，以提升抗震设防水平；标定谱$\beta_{max}$与规范取值随阻尼比变化规律相似且数值接近；标定谱γ值普遍大于规范取值，建议在近断层设计中适当提高规范γ值，以更好地适应脉冲型地震动的反应谱特征。

**数据来源与致谢**：感谢中国地震局工程力学研

究所强震动观测中心、工程强震动数据中心（官网：https://www.strongmotioncenter.org）、太平洋地震工程研究中心（https://ngawest2.berkeley.edu），以及日本国立地球科学与防灾研究所（https://www.kyoshin.bosai.go.jp）为本研究提供数据支持。

## 参考文献（References）

[1] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S].
GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings[S].

[2] 韦韬，赵凤新，张郁山. 近断层速度脉冲的地震动特性研究[J]. 地震学报，2006，28(6)：629-637.
Wei Tao，Zhao Fengxin，Zhang Yushan. Characteristics of near-fault ground motion containing velocity pulses[J]. Acta Seismologica Sinica，2006，28(6)：629-637.

[3] 冀昆，温瑞智，崔建文，等. 鲁甸$M_S$6.5级地震强震动记录及震害分析[J]. 震灾防御技术，2014，9(3)：325-339.
Ji Kun，Wen Ruizhi，Cui Jianwen，et al. Observation of strong motion and damage investigation for $M_S$6.5 Ludian earthquake[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention，2014，9(3)：325-339.

[4] 曲哲，师骁. 汶川地震和鲁甸地震的脉冲型地震动比较研究[J]. 工程力学，2016，33(8)：150-157.
Qu Zhe，Shi Xiao. Comparative study on the pulse-like ground motions in the Wenchuan and the Ludian earthquakes[J]. Engineering Mechanics，2016，33(8)：150-157.

[5] 谢俊举，李小军，温增平. 近断层速度大脉冲对反应谱的放大作用[J]. 工程力学，2017，34(8)：194-211.
Xie Junju，Li Xiaojun，Wen Zengping. The amplification effects of near-fault distinct velocity pulses on response spectra[J]. Engineering Mechanics，2017，34(8)：194-211.

[6] 赵晓芬，温增平，谢俊举，等. 考虑近断层方向性效应的速度脉冲放大作用预测模型[J]. 振动与冲击，2023，42(8)：305-318.
Zhao Xiaofen，Wen Zengping，Xie Junju，et al. An empirical approach of accounting for the pulse amplification effects induced by near-fault directivity[J]. Journal of Vibration and Shock，2023，42(8)：305-318.

[7] 颜宏毅，赵晓彦，沈旭，等. 近、远场地震动界定及分类方法研究[J]. 地震工程学报，2025，47(5)：1189-1200.
Yan Hongyi，Zhao Xiaoyan，Shen Xu，et al. Definition and classification methods for near-field and far-field ground motions[J]. China Earthquake Engineering Journal，2025，47(5)：1189-1200.

[8] Newmark N M，Hall W J. Seismic design criteria for nuclear reactor facilities[C]//Proceedings of the 4th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago：World Conference on Earthquake Engineering，1969.

[9] 廖振鹏. 地震小区划：理论与实践[M]. 北京：地震出版社，1989.
Liao Zhenpeng. Seismic microzoning：theory and practice[M]. Beijing：Seismological Press，1989.

[10] Malhotra P K. Response spectrum of incompatible acceleration，velocity and displacement histories[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics，2001，30(2)：279-286.

[11] Malhotra P K. Smooth spectra of horizontal and vertical ground motions[J]. Bulletin of the Seismological Society of America，2006，96(2)：506-518.

[12] 徐龙军. 统一抗震设计谱理论及其应用[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2006.
Xu Longjun. Theory and applications of uniform seismic design spectrum[D]. Harbin：Harbin Institute of Technology，2006.

[13] 陈国兴，战吉艳，刘建达，等. 远场大地震作用下深软场地设计地震动参数研究[J]. 岩土工程学报，2013，35(9)：1591-1599.
Chen Guoxing，Zhan Jiyan，Liu Jianda，et al. Parameter study on ground motion design of deep soft site under far-field large earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2013，35(9)：1591-1599.

[14] 李爽，周洪圆，刘向阳，等. 基于中国规范的近断层区抗震设计谱研究[J]. 建筑结构学报，2020，41(2)：7-12.
Li Shuang，Zhou Hongyuan，Liu Xiangyang，et al. Study on near-fault seismic design spectra based on Chinese code for seismic design of buildings[J]. Journal of Building Structures，2020，41(2)：7-12.

[15] 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)：183-190.
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)：183-190.

[16] 刘红帅. 基于小生境遗传算法的设计地震动反应谱标定方法[J]. 岩土工程学报，2009，31(6)：975-979.
Liu Hongshuai. Calibrating method for seismic response spectra based on niche genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2009，31(6)：975-979.

[17] 郭晓云，薄景山，巴文辉，等. 最小二乘法分段拟合标定反应谱方法[J]. 世界地震工程，2012，28(3)：29-33.
Guo Xiaoyun，Bo Jingshan，Ba Wenhui，et al. Sectional least square fitting method for calibrating seismic design response spectrum[J]. World Earthquake Engineering，2012，28(3)：29-33.

[18] 李雪玉，薄景山，王福昌，等. 基于带压缩因子粒子群算法标定设计反应谱[J]. 地震工程与工程振动，2021，41(2)：175-180.
Li Xueyu，Bo Jingshan，Wang Fuchang，et al. A response spectrum calibration method based on particle swarm optimization with compression factor[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration，2021，41(2)：175-180.

[19] 赵培培. 设计反应谱拟合方法研究及特征参数统计[D]. 哈尔滨：中国地震局工程力学研究所，2017：30-33.

（下转第 1500 页）