

doi:10.3969/j.issn.1674-4764.2012.05.002

多维标度法在震动空间特性分析中的应用

李英民¹, 吴哲骞¹, 陈辉国^{1,2}

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 后勤工程学院 军事建筑工程系, 重庆 401311)

摘要:为寻找适于工程应用的空间地震动输入合理性的判定工具,提出了一种将多维标度法(MDS)和动态时间弯曲距离(DTW)相结合揭示空间地震动相关结构的方法。该方法可将多点地震动数据的差异转化在一个低维空间内,从而通过各点地震动在该空间内对应的位置反映空间地震动台阵数据之间的差异。较传统的方法,该方法具有较好的直观性且有利于挖掘地震动数据间的潜在关联,利用该方法在对某次地震的台阵记录以及相应合成人工波的分析中取得了较好的效果。

关键词: 多点地震动; 空间相关性; 动态时间弯曲距离; 多维标度法; 台阵记录

中图分类号: TU318 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2012)05-0006-06

Application of Multidimensional Scaling in the Analysis of Spatial Ground Motion

LI Yingmin¹, WU Zheqian¹, CHEN Huiguo^{1,2}

(1. College of Civil engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;

2. Department of Architecture & Civil engineering, Logistical Engineering University, Chongqing 401311, P. R. China)

Abstract: In order to search for a tool to test whether the earthquakes is reasonable for the design, a method based on multidimensional scaling (MDS) and the dynamic time warping distance (DTW) was proposed, which represents the dissimilarities of earthquake in a low dimensional space in a visualized way and uncovers hidden structure of earthquake. The analysis of record from the seismic array shows that the proposed method can be a powerful tool in detecting the correlation structure of spatial ground motion as well as verifying whether the algorithm is producing properly correlated motions in space.

Key words: earthquakes; spatial correlation; dynamic time warping distance; multidimensional scaling; seismograph array

合理的地震动输入是结构抗震分析与设计的基础,实际地震台站所记录的地震动往往是地震波穿过复杂介质后的结果,由于波的频散效应、几何扩散以及介质的非弹性吸收、非均匀性导致的波速的随机涨落,都会使得任意2个相邻地震台站测点所记录的地震动不仅仅是时间延迟上的复制,而是随着台站距离的增大、其差别也随之增大。为此,对空间人工合成地震动而言,其模拟地震动的分布特性是否能准确反映实际地震动随空间和时间的变化特

性,并与实际的台站记录具有良好的相关性,对研究合成地震动尤其是空间多点合成地震动的合理性、准确性是一个非常重要的问题。

目前,对于人工多点地震动合成结果可靠性判定而言,尚没有统一的标准,当前的研究大多只是简单的比较生成地震动与指定反应谱及相关(或相干)函数的差异,结论不具有直观性,而且无法较好的反应出地震动在一定空间尺度内的相关结构。为此,笔者提出了一种基于相关性理论的数据统计方法

收稿日期:2012-04-11

基金项目:国家自然科学基金(90815011);教育部新世纪人才计划(06-0765)

作者简介:李英民(1968-),男,教授,主要从事地震工程与结构抗震研究,(E-mail)liyimingmin@cqu.edu.cn。

$f(\delta_{ij})$; 并通过往复迭代求出最终的 d_{ij} 以及根据需求数据的优化单调变换 \hat{d}_{ij} 使低压力系数 S 的值尽可能降低^[3-4]。其中压力系数的计算式如式(1)所示。

$$S = \left[\frac{\sum \sum (\hat{d}_{ij}^2 - d_{ij}^2)^2}{\sum \sum d_{ij}^4} \right]^{1/2} \quad (1)$$

根据前文给出的相关系数 r_{ij} , 定义一个广义距离作为度量标准: $\delta_{ij} = (r_{ii} + r_{jj} - r_{ij})^{1/2}$ 及其对应的矩阵 $\mathbf{\Delta} = [\delta_{ij}]$; 之后利用 NMDS 法求出具有维度 p 的构图中 i 点坐标 $(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{pi})$, 计算可简述过程如下:

1) 选取构图中点的初始坐标 $(x_{1i}^0, x_{2i}^0, \dots, x_{pi}^0)$ 。

2) 由选定的初始坐标计算其对应的初始距离矩阵 $\mathbf{D}_k = [d_{ij}^0]$, 其中 $d_{ij}^0 = x_i, x_j$ 选取欧拉距离。

3) 由前面定义的台阵记录相似度矩阵 $\mathbf{\Delta} = [\delta_{ij}]$ 和初始距离矩阵 $\mathbf{D}_k = [d_{ij}^0]_m$ 经过单调 PAV 算法 (Pool-Adjacent Violators)^[5] 逐步单调回归确定 $\hat{\mathbf{D}}_k = [\hat{d}_{ij}^k]$ 。

4) 对任意的 i, j, m, n 如 $d_{ij}^k < d_{mn}^k$ 时 $\hat{d}_{ij}^k < \hat{d}_{mn}^k$ 总成立, 则 $d_{ij}^k = \hat{d}_{ij}^k$, 否则 $\hat{d}_{ij}^k = \hat{d}_{mn}^k = (d_{ij}^k + d_{mn}^k)/2$ 。

5) 计算新的节点坐标 $(x_{i_1}^{k+1}, \dots, x_{i_q}^{k+1}, \dots, x_{p_1}^{k+1})$, 其中 $q (q = 1, 2, \dots, p)$ 轴上的对应坐标点表示为: $x_q^{k+1} = x_q^k + \frac{\theta}{n-1} \sum_{j \neq i} (1 - \frac{\hat{d}_{ij}^k}{d_{ij}^k}) (x_j^k - x_i^k)$; n, θ 分别表示节点数和迭代的步长。

6) 根据步骤 5) 计算节点坐标, 重新计算步骤 2) 的欧式距离 d_{ij} 。

7) 由式(1)计算压力系数 S 的大小。

8) 如果 S 小于预先设定残差 ϵ , 计算结束, 否则返回步骤(3)。

对 1.1 节中的 9 测点台阵数据进行计算, 计算中取维度 $p = 3$, 步长 θ 选取只会对计算速度而通常不会对结果产生影响, 可人为设定一般初选较大值, 之后取较小值。得到如表 2 所示的各地震动在低维空间构图中的坐标和图 2 所示的地震动在空间构图中的位置。

表 2 基于相关系数计算构图中点的坐标

坐标	维度 1	维度 2	维度 3
C00	0.268 9	0.034 5	0.264 8
I01	0.499 7	-0.330 3	0.576 9
I07	0.298 4	0.057 3	0.564 1
M01	0.771 5	-0.580 6	-0.431 7

续表 2

坐标	维度 1	维度 2	维度 3
M07	1.067 9	0.443 0	-0.238 5
O01	0.237 2	0.469 5	-1.025 3
O07	1.358 6	0.087 9	0.037 3
EL	-2.361 6	2.113 6	0.385 9
CD	-2.140 6	-2.294 8	-0.133 4

图 3(a)、(b) 分别为加入奇异波的前后通过 MDS 计算出的构图。CD 波为 C00 记录人为的经过

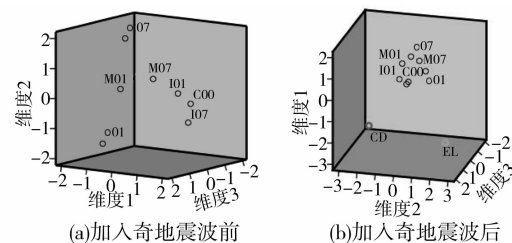


图 3 基于相关系数计算的台阵记录对应构图中的坐标

部分时间轴上收缩和变形生成而保存了 C00 台站记录原有的形状, 其与 C00 记录应该是具有一定相关性, 而用相关系数计算的结果。如表 2 和图 3(b) 蓝点所示的 CD 点, 表现出和 EL 一样的和原台站记录不相关的特性。这是由相关系数计算本身所造成的, 如图 4(b) 所示, 相关系数或相干系数作为地震动相似度的一种传统度量标准^[6-7], 其计算要求 2 个地震序列等长, 且 2 个序列中的值必须是一一对应, 并无法对具有振幅平移、伸缩等情况的复杂序列进行准确度量。而实际地震动记录在传播过程中由于各种不确定因素的影响, 比如波传播中通过不均匀介质导致的波速随机涨落以及波的散射或是仪器的误差都可能导致地震动记录不能满足上述要求, 相关系数就无法再作为地震记录的一个有效的衡量标准, 最为明显的表现是小尺度空间内相关性较大的变异^[7-9]; 如 Kiureghian 等^[9] 发现, 当剪切波速大于 250 m/s 时, 距离 65 m 两点在频率 1 Hz 处的相关系数为 0.5, 在 2 Hz 变为 0.07。而在较大的距离, 这种相关性的丢失更为显著。因此一种更为合理的相似度度量标准的提出是有必要的, 为此, 可采用由 Berndt 等^[10] 所提出动态时间弯曲距离 (DTW) 来进行相似性度量, 该距离通过计算两序列之间的最小距离来刻画序列间的最大相似性, 作为一种把时间规划与距离测度结合起来的非线性技术, 较之相关系数 (或欧拉距离) 方法能够支持时间序列的时间轴伸缩和弯曲, 并且不要求数值一一对应^[11], 且不需要对延迟进行估计, 另外相比欧氏距离的适用场合

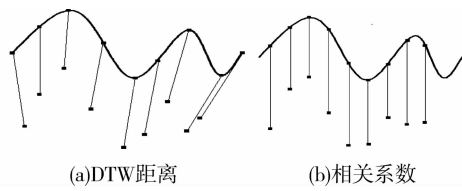


图 4 DTW 距离算法与传统算法的比较

为 2 个序列长度一致,而动态时间弯曲距离则可以用于任意长度的序列比较。因为动态时间距离定义

了 2 时间序列之间的最佳对齐匹配关系,所以对具有相似复杂度较高的序列可进行有效识别。另一方面,在反应序列特性上,与相关函数仅仅反映数据间相位的变化相比,动态弯曲距离可以体现出幅值的变化。

因此,利用该动态时间弯曲距离取代广义距离重新定义相似度矩阵 $\Delta = [\delta_{ij}] = [DTW(i, j)]$, 计算结果如表 3 所示,根据本文给出的算法重新计算各地震动在低维空间构图中的坐标和位置,可得到表 4 和图 5 的结果。

表 3 台阵记录之间所对应的动态时间距离

DTW	C00	I01	I07	M01	M07	O01	O07	EL	CD
C00	0	6.945 4	7.510 2	10.816 2	9.824 9	12.068 4	11.457 1	7.642 5	12.051 6
I01		0	7.483 0	9.253 2	9.836 1	10.099 1	10.643 1	7.018 9	11.054 0
I07			0	9.883 1	10.529 4	9.751 3	10.806 2	8.413 8	11.431 6
M01				0	8.496 2	7.798 5	7.204 3	6.853 1	9.941 9
M07					0	9.128 9	9.251 6	5.962 9	11.371 9
O01						0	9.057 7	6.140 5	10.471 4
O07							0	5.720 7	9.001 5
EL								0	3.852 5
CD									0

表 4 基于动态时间距离构图坐标

坐标	维度 1	维度 2	维度 3
C00	1.135 1	1.265 7	0.995 2
I01	1.393 1	-0.180 7	0.245 0
I07	1.012 5	0.755 5	-0.556 0
M01	1.590 6	0.139 5	-0.524 6
M07	0.175 8	-1.360 5	-0.290 9
O01	0.739 1	-0.704 1	0.959 4
O07	-0.265 7	-0.682 0	-1.204 1
CD	-1.005 4	-1.058 9	0.782 6
EL	-0.604 3	0.475 4	0.065 5

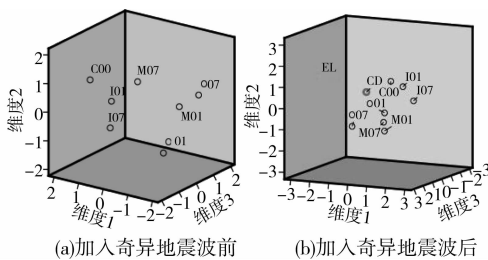


图 5 台阵记录对应构图中的坐标

比较图 3 及图 5 可以看出,无论是基于动态时间距离或是广义距离,得出的计算结果都均有一个共同的特性,即台阵记录点 C00 与 I01、I07 较为接近,而相对而言 O07、O01 在构图中的距离较远,如

图 5(a)所示,处于构图中的最外圈,而在真实的地理位置上 O01 和 O07 也位于 Smart-1 台阵的最外圈(半径 $R = 2\ 000$ 处),计算的结果体现出随着地理距离的增大台阵间的相关性有下降的趋势,这与实际的情况是相吻合的。而 EL 作为与实际台阵记录差异较大奇异点,在构图中表现出孤立于台阵记录的点(构图中用红点表示)。CD 记录由于是 C00 时程记录在时间轴上的伸缩和弯曲,比起 EL 来 CD 波至少应该在某种程度上与原始的 C00 存在某种相关关系,相关系数无法反映出这种相关性,表现为一旦出现这种波形的弯曲,就像 EL 那样和 C00 等地震波完全不相关的特性,如表 1 和图 3(b)所示,这是与实际情况不符的。而 DTW 能分辨出 CS 和 CD 和原 C00 记录的相关性,这体现出 DTW 较之相关系数有更强的适用范围的。

从本质上来说,相关系数是 2 个序列在向量空间内的夹角,其反应的是时间序列间的一种相位特征。这种特征与序列本身的幅值无关。而动态弯曲时间距离首先作为一种距离度量,不仅能反应出相位的变化、而且能体现的幅值的特性。然而 DTW 不同于像欧拉距离等静态点距离为基础的描述方法,后者对以“变化趋势”时间序列匹配存在本质的缺陷,因为点距离是一种静态的度量,无法有效体现时间序列的动态特性。相对而言 DTW 可以克服

了点距模式下可能出现误匹配以及物理概念不明确等缺陷。

2 多维标度法在人工合成地震动结果合理性的判定中的应用

国内多点地震动合成方法大多是基于 Hao^[12]的思想,并在屈铁军方法^[13]基础上改进的,但事实证明屈铁军给出的多点地震动合成方法不具备很好的收敛性,特别是当两点距离较为接近时其地震动往往不一致^[14],即不具备良好的空间相关结构。为避免以上合成方法的不足,笔者采用 Vanmarcke 等^[15]及 Zavoni 等^[16]提出的基于 Fenton 的 Krings 算法基础上改进的方法,该方法借助于最佳线性无偏估计,能更好的保持地震地面运动原有相关结构特征^[16,20]。其主要计算流程如图 6,采用的空间时滞相关函数是 Harichandran 等^[17]提出的模型,计算中,采用了时程记录分段模拟再加窗叠加办法反映地震动时间非平稳特性,其中窗函数的选取参考文献^[18-19]。

为便于比较,文中记录地震动与模拟地震动所在位置均在一条直线上。以 Smart1 台阵第 40 次地震记录台阵点 C00、I01、M01、O01 已知记录,生成

A、B、C、D、E、F、G 点位置人工波,位置如图 7 所示。图 8 为模拟的多点地震动结果,为方便比较,各人工地震动已用文中计算出的延迟对所有地震动台阵记录与模拟记录进行平移。

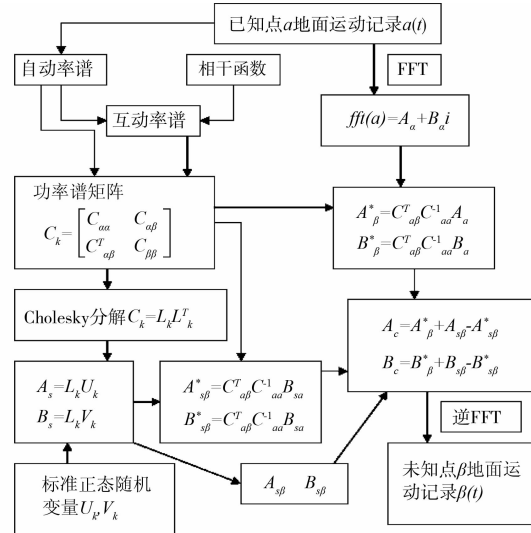


图 6 计算流程

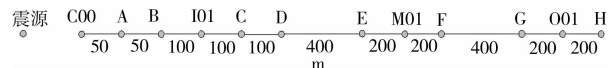


图 7 台阵记录点和人造波各点平面位置

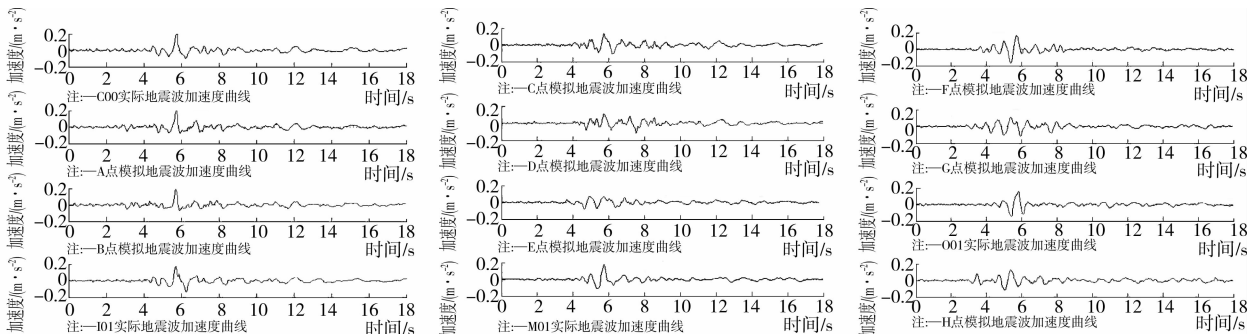


图 8 台阵时程以及人造波时程

对上述模拟人工多点地震时程,利用 1.2 节所给出的多维构图法可以计算其基于动态时间弯曲距离计算出的构图,其结果如图 9 所示。

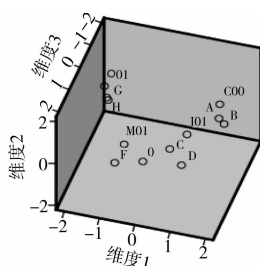


图 9 人造波和台阵记录对应的构图

从图 9 可以看出,随着与已知台阵记录点 C00

的距离增大,无论是已知记录点还是模拟点,其相关性表现出 1 种逐渐递减的趋势,而距离 C00 最远的点 O01(2 000 m)、H(2 200 m)、G(1 800 m),距离最大。在地理空间内位置相近点,比如 A、B、I01 点,或是 M01、F 等点在构图中距离都较为接近,在构图即在地理空间内接近的点如其在构图中的位置趋于一致,说明该合成方法具有较好的收敛性。若以 C00 为参考,可以看出随着台阵或是模拟点地理位置距离 C00 的增大,在构图阵中的位置(图 9)表现为以台阵 C00 为球心,半径逐渐扩大的球面上的分布。即体现出一种随着地理距离增大,相关性降低的趋势,这与理想的结果也是符合的。分析表明,文中所采用的方法模拟出的人工多点地震动记录,表

现出于原台站记录一致的空间内相关结构。

3 结 语

指出了相关系数作为判定震动记录相似度的缺陷,介绍了1种更为合适的震动记录相似程度的度量标准(DTW),同时应用于MDS方法进一步挖掘地震台阵波数据内在结构。第1个算例借助于Smart-1第40次地震的7条台阵记录和EL Centro(1940,NS)以及1条基于C00发生弯曲和伸缩的奇异波,说明了DTW较相关系数能更好的识别较为复杂的地震动变化,并验证了所提出相关构图法的合理性,结果表明相关构图法具有较为明确的物理意义和直观性。第2个算例为笔者提出的相关构图法在震动合成结果的判定中的应用,采用Smart-1台阵的3个真实台站记录和7条人工波记录进行比较,计算结果反映出生成的震动之间不仅互相间具有良好的相关性,更与实际的台阵记录相吻合,说明合成的人工波具有较好的空间相关结构和收敛性。

参考文献:

- [1] Boissières H P, Vanmarcke E H. Estimation of lags for a seismograph array: wave propagation and composite correlation [J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 1994, 14: 5-22.
- [2] Johnson D E. Applied multivariate methods for data analysts [M]. Belmont, C A: Duxbury Press, 1998: 7-11.
- [3] Shepard R N. The analysis of proximities: multidimensional scaling with an unknown distance function I [J]. Psychometrica, 1962, 27(2): 125-140.
- [4] Kruskal J B. Nonmetric multidimensional scaling: a numerical method [J]. Psychometrika, 1964, 29(2): 115-129.
- [5] Ayer M. An empirical distribution function for sampling with incomplete information [J]. Annals of Mathematical Statistics, 1955, 26: 641-647.
- [6] Boissières H P, Vanmarcke E H. Spatial correlation of earthquake ground motion: non-parametric estimation [J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 1995, 14(1): 23-31.
- [7] Smith S W, Ehrenberg J E, Hernandez E N. Analysis of the El Centro differential array for the 1979 Imperial Valley earthquake [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1982, 72: 237-58.
- [8] Todorovska M I, Trifunac M D. Amplitudes, polarity and time of peaks of strong ground motion during the 1994 Northridge, California Earthquake [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1997, 16(4): 235-258.
- [9] der Kmregian A, Neuenhofer A. Response spectrum method for multi support seismic excitation [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1992, 21: 713-714.
- [10] Berndt D J, Cliffrd J. Finding patterns in time series: a dynamic programming approach [M]. Advances in Knowledge Discovery and Data Mining, AAAI/MIT Press, 1996: 229-248.
- [11] Li Y M, Chen H G, Wu Z Q. Dynamic time warping distance method for similarity test of multipoint ground motion field [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2010, 1: 1-12.
- [12] Hao H, Oloveria C S, Penzien J. Multiple-station ground motion processing and simulation based on SMART-1 array data [J]. Nuclear Engineering and Design, 1989, 111: 293-310.
- [13] 屈铁军, 王前信. 空间相关的多点震动合成(I)——基本公式[J]. 地震工程与工程振动, 1998, 18(1): 8-15. QU Tiejun, WANG Qianxin. Simulation of spatial correlative time histories of multi-point ground motion, Part I: Fundamental formulas [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1998, 18(1): 8-15.
- [14] 董汝博, 周晶, 冯新. 非平稳空间相关多点震动合成方法研究[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(3): 11-14. DONG Rubo, ZHOU Jing, FENG Xin. Simulation of non-stationary spatial correlative time histories of multi-point ground motion [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, 27(3): 11-14.
- [15] Vanmarcke E, Fenton G. Conditioned simulation of local fields of earthquake ground motion [J]. Structural Safety, 1991, 10: 247-264.
- [16] Heredia Z E. On the response of multi-support MDOF systems to spatially varying earthquake ground motion [D]. Princeton: Princeton University, 1993.
- [17] Harichandran R, Vanmarcke E. Stochastic variation of earthquake ground motion in space and time [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1986, 112: 154-174.
- [18] Saragoni G R, Hart G C. Simulation of artificial earthquake [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1974, 2(3): 249-267.
- [19] 屈铁军, 王前信. 空间相关的多点震动合成(II)——合成实例[J]. 地震工程与工程振动, 1998, 18(2): 25-32. QU Tiejun, WANG Qianxin. Simulation of spatial correlative time histories of multi-point ground motion, Part II: Example of simulation [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1998, 18(2): 25-32.
- [20] Vanmarcke E H, Heredia Z E, Fenton G A. Conditional simulation of spatially correlated earthquake ground motion [J]. Journal of Engineering Mechanics (ASCE), 1993, 119(11): 2333-2352.