

奇异谱分析在土舱压力数据序列处理中的应用^①

赵 炯, 刘思江, 盛 凡, 凌从高

(同济大学 机械电子工程, 上海 201804)

摘 要: 根据土压平衡盾构机施工过程中土舱压力监测数据, 利用奇异谱分析方法对土舱压力时间序列进行奇异值分解和分组重构处理, 并在此基础上利用线性递归关系对其进行数值预测. 结果表明奇异谱分析方法能够有效分离出土舱压力时间序列中的主要影响因素, 尤其是在微弱周期性成分提取方面效果显著, 并能够明显降低土舱压力信号中的噪声干扰作用, 提高土舱压力预测的精度和稳定性. 将奇异谱分析方法应用于土舱压力序列分析将有助于实现土舱压力的预测性控制.

关键词: 土压平衡; 时间序列分解; 奇异谱分析; 周期成分; 噪声干扰; 线性递归关系

Application of Singular Spectrum Analysis in Processing of Chamber Earth Pressure Data Sequence

ZHAO Jiong, LIU Si-Jiang, SHEN Fan, LING Cong-Gao

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Based on the observed data of chamber earth pressure from on-site construction of earth pressure balance shield, a time series of chamber earth pressure is created and handled by singular spectrum analysis method, including singular spectrum decomposition and reconstruction, and a subsequent forecasting of the time series is performed based on the linear recurrence relations model. It is turned out that singular spectrum analysis can effectively separate principal components from time series of chamber earth pressure, especially in the extraction of weak periodic components. In addition, it is available for singular spectrum analysis method to reduce noise jamming by filtering out a part of the original time series that is supposed to be noise rather than signal. Consequently, it is reasonable to make the forecasting more accurate and smooth by applying singular spectrum analysis method to the analysis of chamber earth pressure values, which would be helpful to the future predictive control of chamber earth pressure in earth pressure balance shield.

Key words: earth pressure balance; time series decomposition; singular spectrum analysis; periodic component; noise jamming; linear recurrence relation

盾构挖掘法因其具有自动化程度高、一次成洞、不受气候影响、对地面环境影响小等诸多优点而在城市地铁隧道建设中得到广泛应用. 土压平衡式盾构机是地下隧道施工的专用设备之一, 其主要特点是在盾构机中部增设一道密封隔板从而形成密封土舱. 盾构施工过程中, 合理调节和控制土舱压力对减少地表变形量和保证施工安全具有重要意义.

当前土舱压力控制多采用滞后纠正的方式. 土舱压力控制研究则主要集中在对土舱压力建立机制的分析和对现有控制模型的优化配置方面^[1-5]. 理论上, 土舱压力不仅受螺旋输送机转速、推进速度、刀盘转速等盾构机施工参量的影响, 还受隧道埋深、土层分布等非施工参量的影响, 因而难以建立准确的土压平衡控制模型.

^① 收稿时间:2014-03-07;收到修改稿时间:2014-04-04

文中根据现场施工过程中采集到的土舱压力监测数据建立土舱压力时间序列,采用奇异谱分析方法(Singular Spectrum Analysis, SSA)对土舱压力序列进行分解及重构处理,分离出趋势成分、周期成分及噪声成分,并在此基础上对土舱压力进行数值预测,以期能够提取出影响土舱压力变化的主要因素,并获得较好的数值预测结果,从而有助于实现土舱压力的预测性控制,提高土舱压力控制的实时性和鲁棒性。

1 奇异谱分析方法

作为一种数据驱动的时间序列分析方法,奇异谱分析的主要特点是在原始序列结构未知的情况下可通过嵌入、奇异值分解和分组重构等过程分离得到相互独立的成分序列^[6]。近年来,奇异谱分析在机械设备监测信号分析中的应用逐渐受到重视^[7-8]。

奇异谱分析主要包含分解和重构两个基本过程。当用于数值预测时,奇异谱分析预测需建立在线性递归关系(Linear Recurrence Relations, LRRs)的基础上^[6]。奇异谱分析预测过程适用于具有指数特性、多项式特性及谐波特性的时间序列。

1.1 奇异谱分析理论

奇异谱分析包含嵌入、奇异值分解、分组聚合、对角平均等基本流程^[6]。

对于长度为 N 的时间序列 $x = (x_1, x_2, \dots, x_N)$, 假设 $N > 2$, 且 x 为非零序列。取整数 $L (1 < L < N)$ 作为窗口长度。利用嵌入可将序列 x 变换成 $L \times K$ 阶轨迹矩阵:

$$\mathbf{X} = [X_1 \ X_2 \ \dots \ X_K] \quad (1)$$

其中, $X_i = (x_1, x_2, \dots, x_{i+L-1})^T (1 \leq i \leq K)$ 称为滞后向量, $K = N - L + 1$ 。若原始序列 x 中没有噪声或是具有较高的信噪比,则轨迹矩阵 \mathbf{X} 是奇异矩阵,反之为非奇异矩阵。

令 $\mathbf{C}_X = \mathbf{X} \cdot \mathbf{X}^T$, 其特征值设为 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_L$, 且相应特征向量分别是 U_1, U_2, \dots, U_L 。则轨迹矩阵 \mathbf{X} 经奇异值分解后可写成

$$\mathbf{X} = X_1 + X_2 + \dots + X_d \quad (2)$$

其中, $X_i = \sqrt{\lambda_i} \cdot U_i \cdot V_i^T (i = 1, 2, \dots, d)$, $\sqrt{\lambda_i}$ 为矩阵的特征值, U_i 和 V_i 为矩阵 \mathbf{X} 的奇异向量, d 为矩阵 \mathbf{X} 的秩。组合 $(\sqrt{\lambda_i}, U_i, V_i) (i = 1, 2, \dots, d)$ 称为奇异值分解的特征三元组(Eigentriple, ET)。

表达式 $\sqrt{\lambda_i} / \|\mathbf{X}\|$ 表示分量 X_i 在 \mathbf{X} 中的所占能量的

相对关系。一般而言,较大的 λ_i 对应着原始序列中的特征成分,而较小的 λ_i 则主要对应噪声成分。

1.2 奇异谱分析递归预测

递归预测主要利用数据序列的线性递归关系。对于长度为 N 的数据序列 $Y_N = (y_1, y_2, \dots, y_N)$, 其递归预测表达式为^[6]:

$$y_{N+i} = \sum_{j=1}^{L-1} a_j \cdot y_{N+i-j}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

其中, $a_j (j = 1, 2, \dots, L-1)$ 为线性递归系数^[6]。

2 土舱压力时间序列分析

根据奇异谱分析及预测流程,选取一段时间内的土舱压力监测信号,对其进行分解和重构处理,并提取其主要成分进行预测分析。

2.1 数据来源

上海市轨道交通 12 号线浦江南浦站至龙华路下行线区间隧道长度约为 1.043 公里,隧道顶埋深约 8.55~15.12m。该区段隧道采用直径为 6.34m 的铰接式土压平衡盾构机施工,刀盘转速约为 0.78~0.79r/min,推进速度约为 55mm/min,螺旋输送机转速范围为 0~14.3r/min。在盾构施工过程中,刀盘转速保持稳定,主要是通过调节螺旋输送机转速和推进速度来平衡土舱压力大小。现从该工程第 82 环施工测量数据中选取长度为 419 且采样周期 $T_s=3s$ 的土舱压力原始数据序列,构建土舱压力时间序列。其中,该原始数据序列片段如图 1 所示。由图可知,该序列片段呈现出明显的谐波特性,同时夹杂着较多的随机噪声。

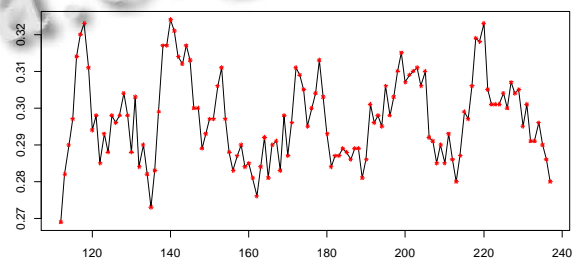


图 1 土舱压力数据序列

为便于分析评价,将该原始序列分割成两部分,分别是长度为 400 的测试序列和长度为 19 的验证序列。其中,前一部分数据主要用于奇异谱分析处理,以降低信号中的噪声,提取主要趋势成分和周期成分等;后一部分数据则用于对奇异谱分析预测效果的验证和评估。

2.2 R_{SSA} 包

作为 SSA 算法的一种计算机实现, R_{SSA} 包不仅对 SSA 算法进行了优化处理, 还封装了多种快速绘图方法, 便于直观判断出 SSA 参数选择的合理性^[9]. 此外, R_{SSA} 包还包含多种方法以评估奇异谱分析和预测结果^[10]. 本文主要采用 R_{SSA} 包内的基本奇异谱分析方法对土舱压力数据序列进行分析和预测.

2.3 奇异谱分析结果

首先选取前 400 个数据点进行奇异谱分析. 对原始数据进行初步处理后, 取 SSA 窗口长度 $L=200$, 进行奇异谱分析处理.

通过对原始序列进行奇异值分解, 可得长度为 200 的特征值序列. 其中, 前 20 个特征值的对数序列趋势如图 2 所示.

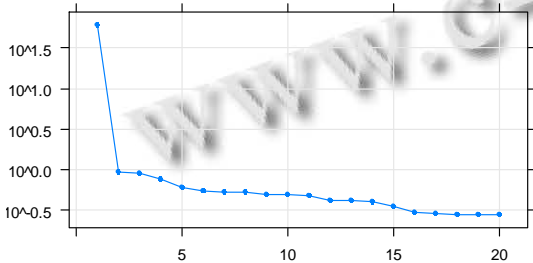


图 2 奇异值分解后的前 20 个特征值

图 3 所示为与前 8 个特征值对应的特征向量. 由图可知, 特征三元组 $ET1$ 在原始序列中占据 99.81% 的比重, 对应于原始序列中的趋势特性; 其他特征三元组则多对应周期或噪声特性, 且所占比重较低.

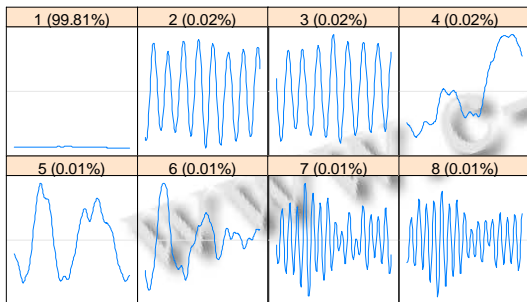


图 3 奇异值分解后的前 8 个特征向量

对前 8 个特征三元组分别进行重构, 可得重构成分序列(Reconstructed Components, RC) $F1, \dots, F8$, 如图 4 所示. 图中, $F1$ 呈现出缓慢变化趋势; 而其他重构成分则呈现出一定的周期性或季节性.

图 5 所示为奇异谱分解后的特征向量对. 由图 5 可看出 $ET2-ET3$ 对应的特征向量对表现出明显的周期性, 此外 $ET7-ET8$ 之间也具有一定的周期性. 进一步

分析, 可得 $ET2-ET3$ 的周期值为 25.824.

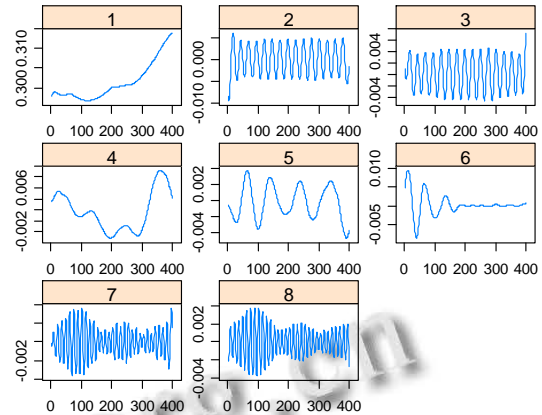


图 4 由 $ET1, \dots, ET8$ 重构生成的序列 $F1, \dots, F8$

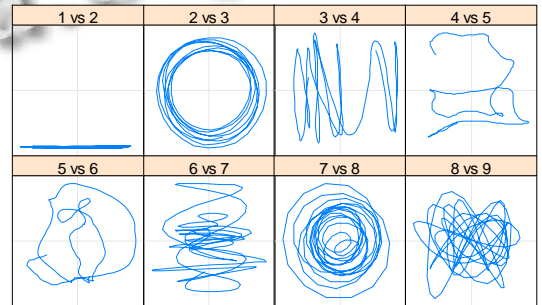


图 5 奇异值分解后的特征向量对

为评估不同特征三元组之间的独立性, 可绘制前 15 个重构成分之间的权相关(w-correlation)矩阵图, 见图 6. 图中, 白色表示权相关系数为 0, 黑色表示权相关系数为 1. 由图 6 可知, 重构成分序列 $F1$ 与其他序列之间的权相关系数均为 0, 故序列 $F1$ 完全独立; 而序列 $F2$ 和 $F3$ 之间具有较高的权相关性, 属于周期性成分; $F4-F6$ 之间的权相关性较弱, 并且二者均未与其他成分完全分离; $F7-F8$ 和 $F9-F10$ 之间具有较高的权相关系数, 属于周期成分, 但夹杂噪声较多. 因此, 可选择 $ET1-6$ 进行序列重构, 并在此基础上进行预测分析.

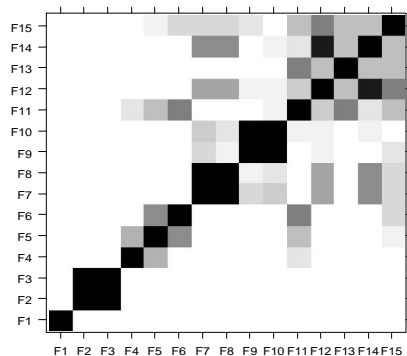


图 6 权相关矩阵

图 7、图 8 和图 9 均为经奇异值分解后的重构序列与原始序列。其中，图 7 表示根据 *ETI* 从原始序列中提取出的趋势成分；图 8 表示由 *ETI-3* 提取出的趋势成分与周期成分；图 9 表示根据 *ETI-6* 重构后的序列图。由三者之间的对比可知，根据 *ETI-6* 重构后的序列可以更准确地反映出原始序列的细微变化。

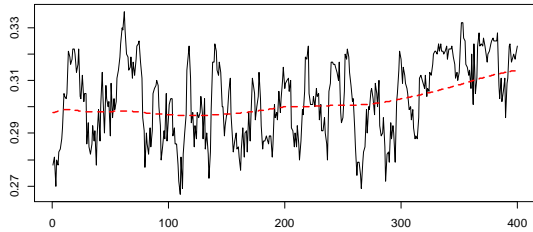


图 7 *ETI* 重构序列(虚线)与原始序列(实线)

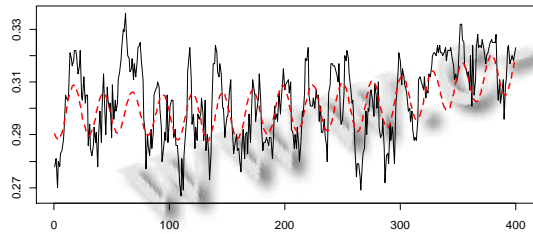


图 8 *ETI-3* 重构序列(虚线)与原始序列(实线)

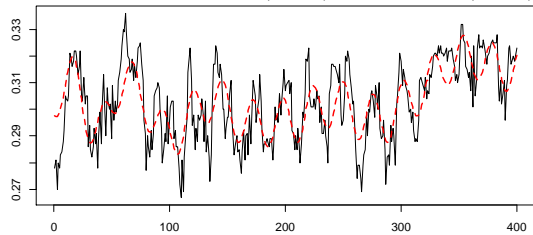


图 9 *ETI-6* 重构序列(虚线)与原始序列(实线)

原始时间序列经 *ETI-6* 重构提取后，可得到残差序列。通过对残差序列的自相关函数和偏相关函数进行分析，可看出该残差序列的自相关函数具有明显拖尾特性，而偏相关函数具有一阶截尾特性，因而可认为残差序列符合红噪声过程，即 *AR(1)* 过程。所以，由 *ETI-6* 重构后的序列包含了影响原始序列的变化趋势成分及主要周期成分，能够较好的反映出原始序列的变化趋势。残差序列的自相关函数和偏相关函数见图 10 和图 11。

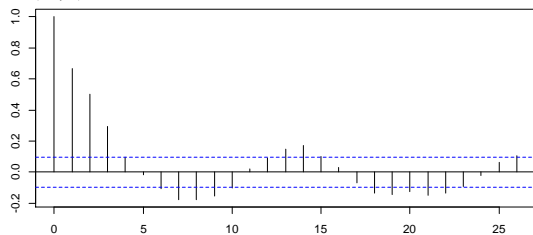


图 10 残差序列自相关函数

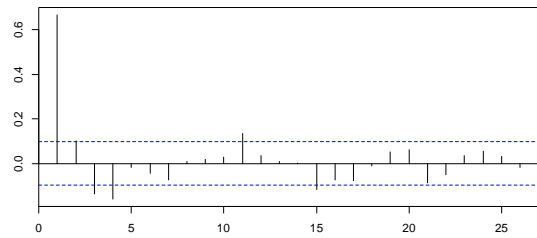


图 11 残差序列偏相关函数

2.4 奇异谱分析预测

经奇异谱分析，选择 *ETI-6* 重构序列，并使用线性递归公式对后 19 个观测点进行预测。预测结果见图 12。由图可知，奇异谱分析预测结果的变化趋势与实测数据序列的变化趋势基本保持一致，并且预测曲线更加平滑，预测结果所受干扰较小。进一步地，可得到预测结果的平均绝对百分比误差和最大百分比误差分别为 2.068% 和 4.347%。因而，奇异谱分析预测方法既能够保证土舱压力预测值的精度，同时又具有较好的预测稳定性。

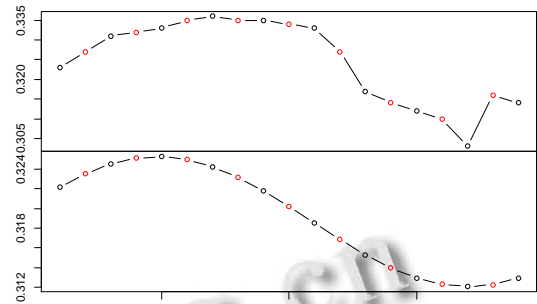


图 12 预测结果对比图(上图：原始数据；下图：预测数据)

3 结论

文中将奇异谱分析方法应用于土压平衡盾构机土舱压力时间序列。通过对实际观测的土舱压力数据进行分析 and 预测，结果表明该方法能够有效地从土舱压力时间序列中分离出趋势成分、季节和周期成分及噪声成分等，尤其是在周期成分提取方面效果显著。采用这种方法简化了对包含多重影响因素的复杂土舱压力数据序列的处理，同时可以有效过滤掉信号中的干扰噪声，有助于实现土舱压力的预测性控制。从实际分析结果可看出，奇异谱分析方法在土舱压力数据序列分析处理方面主要有以下两方面的优点。

1) 奇异谱分析能够有效提取出微弱周期信号。通过对奇异谱分析中的主要周期性成分 *ET2-ET3* 的周期

性进一步分析,可知 $ET2-ET3$ 的周期为 $T_e=25.824$ 。根据采样周期 $T_s=3s$,可知原始信号中存在周期 $T=77.472s$ 的影响因素,而这一周期因素恰与盾构机刀盘转速 $V_e=0.78\sim 0.79r/min$ 的周期值保持一致。因而,可认为土舱压力数据中的周期成分主要是刀盘旋转所致。

2) 奇异谱分析方法通过对特征三元组的选择性重构,可以有针对性对测量信号中具有某一共同特性的成分进行聚合,能够有效地滤掉原始信号中的噪声成分,反映出信号的真实状态,在数值预测的准确度和稳定性方面具有较大优势。

参考文献

- 1 上官子昌,李守巨,栾茂田,孙伟.土压平衡盾构机密封舱土压力优化设置问题.建筑技术,2009,40(12):1086-1090.
- 2 胡绍华.土压平衡式盾构机土舱压力控制技术研究[硕士学位论文].南昌:华东交通大学,2009.
- 3 李守巨,屈福政,曹丽娟,孙伟,刘博.土压平衡盾构机密封舱压力控制实验研究.煤炭学报,2011,36(6):934-937.
- 4 侯永茂,杨国祥,葛修润,郑宜枫,顾沉颖.土压平衡盾构土舱压力建立机制及设定准则研究.岩土力学与工程学报,2012,31(3):625-631.
- 5 侯永茂,杨国祥,葛修润,郑宜枫,顾沉颖.超大直径土压平衡盾构机土舱压力和开挖面水土压力分布特性研究.岩土力学,2012,33(9):2713-2718.
- 6 Golyandina N, Zhigljavsky A. Singular Spectrum Analysis for Time Series. Springer Briefs in Statistics, 2013.
- 7 Rocco SCM. Singular spectrum analysis and forecasting of failure time series. Reliability Engineering & Systems Safety, 2013, 114: 126-136.
- 8 Muruganatham B, Sanjith MA, Krishnakumar B, Satya Murty SAV. Roller element bearing fault diagnosis using singular spectrum analysis. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 35(1-2): 150-160.
- 9 Korobeynikov A. Computation and space-efficient implementation of SSA. Statistics and its Interface, 2010, 3(3): 357-368.
- 10 Golyandina N, Korobeynikov A. Basic singular spectrum analysis and forecasting with R. Computational Statistics & Data Analysis, 2014, 71: 934-954.