

变形监测数据的混沌现象分析

袁昌茂¹, 文鸿雁²

(1. 博罗县国土资源局, 广东 惠州 516100; 2. 桂林理工大学 测绘学院, 广西 桂林 541004)



摘要: 简要介绍了识别变形数据混沌现象的 Lyapunov 指数方法和关联维数方法; 讨论了变形监测数据的 Lyapunov 指数和关联维数的计算方法; 最后结合大坝观测变形观测数据给出了实际算例。

关键词: 变形监测; 混沌; Lyapunov 指数; 关联维数; 相空间重构

中图分类号: P258

文献标志码: B

文章编号: 1672-4623 (2012) 01-0142-04

变形监测数据既是变形体系统发展的客观描述,也是研究变形体系统的最重要的依据,因而通过变形监测数据的分析进而熟知变形体的各个特征是相当重要的。混沌理论的引入,可以丰富变形监测数据处理与分析研究的内容,推动变形监测研究的发展。变形体变形系统是一个开放的、复杂的系统,同时又是一个动态的非线性复合系统^[1]。长期以来,人们一直用传统的确定性方法或随机性方法,或两者结合研究变形的确定性规律和随机性规律^[2]。而混沌理论为我们探索变形现象的提供一种新的方法,通过应用混沌理论中 Lyapunov 稳定性研究,揭示出变形动力系统复杂运动特征,这样就可能从复杂变形系统中发现其内在的、有序的、确定性规律。因此,利用混沌理论分析的方法对形变展开研究,具有重要的现实意义和科学意义。

1 变形数据中混沌现象的识别方法

1.1 Lyapunov 指数法

变形监测数据一般是以时间作为变量的单变量演化过程,因而利用单变量时间序列计算最大 Lyapunov 指数的步骤为:

- 1) 合理选取时间延迟 τ , 重构 m 维相空间。
- 2) 以点 $A(t_0) = \{x(t_0), x(t_0 + \tau), \dots, x(t_0 + (m-1)\tau)\}$ 为参考点, 根据

$$L_{nbi} = \min_{i \neq j} \|X_i - X_j\| \quad (1)$$

求出 $A(t_0) = X_i$ 的最近邻点 $B(t_0)$ 其距离为 $L(t_0) = L_{nbi}$, 如图 1 所示。

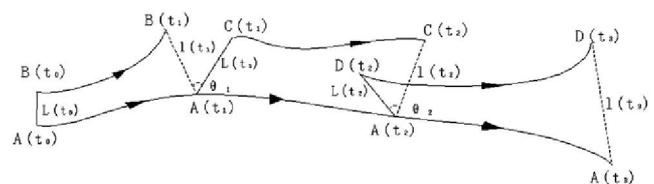


图 1 相轨线示意图

- 3) 经过时间 $k\Delta t$, 初始点 $A(t_0)$ 点演化到 $A(t_1)$, 同时 $B(t_0)$ 演化到 $B(t_1)$ 点, 距离为 $l(t_1) = \overline{A(t_1)B(t_1)}$, 有

$$\lambda_1 = \frac{1}{k\Delta t} \ln \frac{l(t_1)}{L(t_0)} \quad (2)$$

- 4) 在 $A(t_1)$ 的最近邻点中找一个夹角 θ_i 很小的最近邻点 $C(t_1)$ 。经过时间 $k\Delta t$, $A(t_1)$ 发展到 $A(t_2)$, $C(t_1)$ 发展到 $C(t_2)$, 且 $l(t_2) = \overline{A(t_2)C(t_2)}$, 有

$$\lambda_2 = \frac{1}{k\Delta t} \ln \frac{l(t_2)}{L(t_1)} \quad (3)$$

上述过程是从起始点 $\{X_0\}$ 到终点 $\{X_j\}$ 的, 最大 Lyapunov 指数由式 (4) 估算得到:

$$LE_1(m) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \lambda_i \quad (4)$$

式中, k 为步长; N 为迭代步数。

- 5) 增大嵌入维数 m , 按前面 1) ~ 4) 步骤重复计算 $LE_1(m)$, 直到 $m=m_0$ 时, 其不再随 m 的增大而发生较大的变化, 此时得到的 $LE_1 = LE_1(m_0)$ 为最大的 Lyapunov 指数。

1.2 关联维数法

目前计算关联维数的算法主要是 G-P 算法。G-P 算法是 Grassberger 和 Procaccia 在重构相空间思想和嵌入理论的基础上提出的^[3]。

在 m 维相空间中的任一对相点:

$$\begin{aligned} \overline{X_m(t_i)} &= \{x(t_i), x(t_i + \tau), \dots, x(t_i + (m-1)\tau)\} \\ \overline{X_m(t_j)} &= \{x(t_j), x(t_j + \tau), \dots, x(t_j + (m-1)\tau)\} \end{aligned} \quad (5)$$

$i, j = 0, 1, 2, \dots, n - (m-1)\tau$

它们的欧氏距离为:

$$r_{ij} = \|\overline{X_m(t_i)} - \overline{X_m(t_j)}\| = \left[\sum_{l=1}^{m-1} (x(t_i + l\tau) - x(t_j + l\tau))^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

确定临界距离 r , 则其关联函数为:

$$C_m(r) = \frac{1}{N^2} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^N H(r - r_{ij}) \quad (7)$$

收稿日期: 2011-05-24

项目来源: 国家自然科学基金资助项目 (41071294); 广西科学基金资助项目 (桂科基 0991023)。

式中, $N = n - (m - 1)\tau$ 是总相点数; H 是 Heaviside 函数

$$H(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

对不同的 r 作出 $\ln C_m(r) - \ln r$ 曲线, 关联维数的估计值为其直线部分的斜率, 即

$$D_1(m) = \left| \frac{d \ln C_m(r)}{d \ln r} \right| \quad (9)$$

增加嵌入维数 m , 重复上述计算, 直到 m 达到某一阈值 m_c 时, 关联维数 $D_1(m)$ 的值趋于稳定, 这时得到 D_1 值就是序列吸引子的关联维数:

$$D_1 = D_1(m_c) \quad (10)$$

式中, m_c 称为饱和维数, 若存在 m_c 使得 D_1 为分数, 那么系统处于混沌状态; 若 m_c 不存在, 表示吸引子可能不存在, 我们要分析的监测序列可能来自一个随机系统。

2 变形监测数据的混沌分析

2.1 变形监测数据的动力学特征

我们对变形监测序列动力学的分析, 主要是根据测量得到的数据, 反演变形系统的各个动力学特征, 进而建模分析预测变形系统的变化。根据观测数据对系统动力学特征分析主要有以下几个方面:

1) 相空间重构, 它是分析变形系统的最重要的部分, 对于单变量的监测数据序列, 它仅仅描述了整个变形系统的部分发展过程, 系统发展在大多数情况下具有关联性, 因而我们可通过已得到的监测序列重构具有“拓扑等价”的相空间, 进而研究变形系统的动力学特征。

2) 计算关联维数。关联维数作为变形系统的一个重要动力学特征, 它是判别系统是否处于混沌态的一个重要参数。

3) 计算最大 Lyapunov 指数。根据稳定性理论我们可以知道 Lyapunov 指数是描述系统稳定与否的重要特征, 它的大小和相空间发展的轨道有直接的关系, 因而我们可以通过计算最大 Lyapunov 指数确定系统的发展状态。

2.2 相空间重构

相空间重构理论是分析混沌时间序列基础, 通过对相空间的重构, 我们可以对混沌时序的特征进行分析和预测, 下面我们就介绍有关相空间重构的理论。

假设动力学系统 H 的状态由 n 维的向量 $x(t) = (x^1(t), x^2(t), \dots, x^n(t))$ 完全表征, 那么该系统的输出 $y(t)$ 可表示为:

$$y(t) = F(x(t)) \quad (11)$$

式中, $y(t) = (y^1(t), y^2(t), \dots, y^m(t)), F(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x))$,

$y(t)$ 是对系统 H 进行测量得到的观测值, 并用其来描述该系统。当 m 取得足够大时, $F: R^n \rightarrow R^m$ 为一对一的函数, 即对于映射 $y=F(x)$ 有任意给定的 y 总有唯一的 x 对应。由此我们可以由观测值 $y(t)$ 确定系统的相空间。定义 A 表示系统 H 在 R^n 空间中的吸引子, A 是紧集, 由观测值 $y(t)$ 去构造某个 F 使得 $F(A)$ 和 A 拓扑同胚, 形成一一对应的连续映射, 这样我们就可以通过分析 $F(A)$ 来获取 A 的性质。构造 F 的过程称作由 A 到 R^m 的拓扑嵌入。拓扑嵌入常用的方法是延迟坐标方法。假设我们 1 次只能同时观测 1 个值 $y^1(t) = f_1(x(t))$, 令 $\tau > 0$, 我们有:

$$\begin{aligned} y(t) &= (y^1x(t-\tau), y^1x(t-2\tau), \dots, y^1x(t-m\tau)) \\ &= (f_1^1(x(t-\tau)), f_1^1(x(t-2\tau)), \dots, f_1^1(x(t-m\tau))) \\ &= (g_1(x(t)), g_2(x(t)), \dots, g_m(x(t))) = G(x(t)) \end{aligned} \quad (12)$$

式中, $g_i(x(t)) = f_i^1(x(t-i\tau)), i=1, 2, \dots, m$, 由 $y=F(x)$ 一一对应的关系得出: 系统在 t 时刻的状态 $x(t)$ 唯一地决定了在 $t-i\tau$ 时刻的状态 $x(t-i\tau)$, 从而 $G(x(t))$ 为 $y(t)$ 关于 $x(t)$ 的函数。Takens 证明了在一定条件下 G 是构成了一个由 A 到 $G-G(A)$ 的一个拓扑嵌入。由式 (12) 得出, $G = G(A)$ 就是

$$\{(y^1x(t-\tau), y^1x(t-2\tau), \dots, y^1x(t-m\tau)) | t \in R\},$$

这就叫做延迟坐标重构法, 这个方法要求嵌入维数 m 大于 2 倍的原吸引子的容量维数。

在利用延迟坐标重构法进行混沌时间序列的重构时, 我们需要确定嵌入维数 m 、时间延迟 τ 、原吸引子的容量维数 d 这 3 个量。

2.3 嵌入维数的选择

嵌入维数 m 的选择时, 如果维数太低, 会出现吸引子的自交性, 这样 y_k 的邻近点中就会出现假邻近点; 如果维数太高, 使点间距离太远, 本是邻近点的却排除掉了。于是在增加 m 时, 寻找一个 m 的阈值就很重要。将这种思想转化为算法实现的是 Kennel, 他还考虑了噪声影响, 指出噪声会增加嵌入维数的估计。一个较优的估计的方法是由 Grassberger 和 Procaccia 提出的 G-P 算法^[4-5]。

2.4 时间延迟的选择

如果 τ 太小, 重构吸引子相邻点的相关性太强, 吸引子的分析很容易被噪声干扰; 如果 τ 太大, 本来较近的点 (向量) 也会拉远, 而导致不确定的系统状态。所以选择 τ 应使最多的向量间相互独立, 的选择常是用自相关函数, 当自相关函数下降到初始值的 $1-1/e$ 时, 所得的时间就是重构相空间的时间延迟。 τ 的选择更精细的方法是 Fraser 和 Swinney 提出的互信息法^[6] 或者 C-

C 法。

2.5 吸引子的维数

吸引子的维数 d 可以由 Grassberger 和 Procaccia 提出的 G-P 算法求出。由 Takens 定理^[7]知 $m > INT(2d+1)$ 。

3 实例计算

大坝变形观测是获得大坝运行状态信息的一种手段，通过对变形观测数据的科学分析和解释，才能对大坝运行起指导性作用。所以，对大坝的变形观测数据及资料的分析具有重要意义。图 2 为某大坝变形监测得到的数据，观测精度足够，利用插值得到 788 期数据。

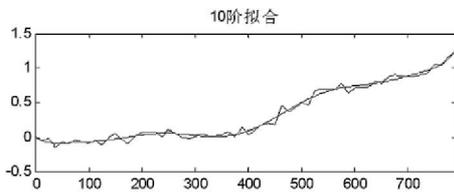


图 2 变形实测数据和多项式拟合



图 3 残差图

1) 关联维数的计算。

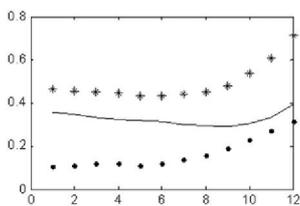


图 4 实测值时间延迟选取

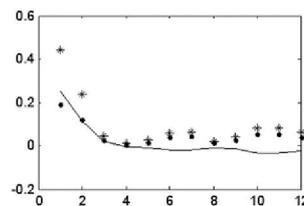


图 5 残差时间延迟的选取

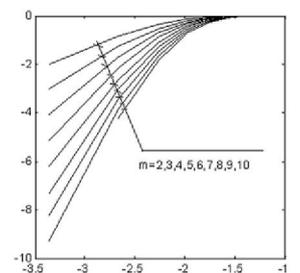


图 6 实测值 $\ln_m C - \ln r$ 变化曲线

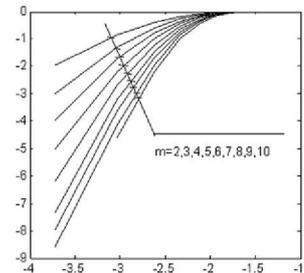


图 7 残差 $\ln_m C - \ln r$ 变化曲线

从图 4 中可以看出，我们选取实测值时间延迟为 $\tau = 5\Delta t$ 比较合理，从图 6 中可以看出，实测值中关联维数我们选取 $m=7$ 时，曲线的直线部分斜率变化不再随 m 增大发生较大的变化，此时估计的关联维数为 3.02。

从图 5 中可以得出我们选取的残差的时间延迟为 $\tau = 4\Delta t$ 合适，那么根据时间延迟计算得出的关联维数图 7 中我们可以看出，当 $m=7$ 时，曲线中直线部分不再随 m 的值增长而增大，所以我们选取的嵌入维数为 7，那么其关联维数为 3.76。

2) 最大 Lyapunov 指数的计算。

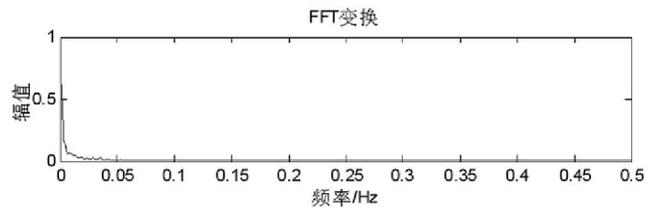


图 8 实测值的傅立叶变换

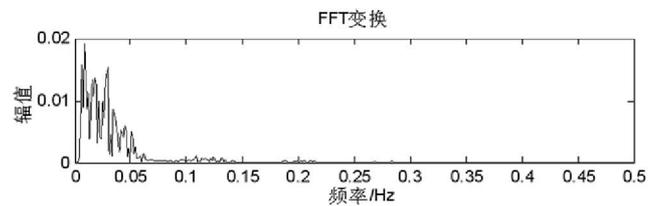


图 9 残差值的傅立叶变换

从实测数据的傅立叶变换中我们可以提取监测数据的变化周期，也就是混沌数据的“伪周期”，从图 8 中，我们可以看出，混沌数据不存在严格意思上的周期，因而在进行周期提取过程中，存在不少的问题，如何正确地提取变形周期进行最大 Lyapunov 指数的计算是相当重要的。在这里我们运用小波多时间尺度进行变形周期的提取。

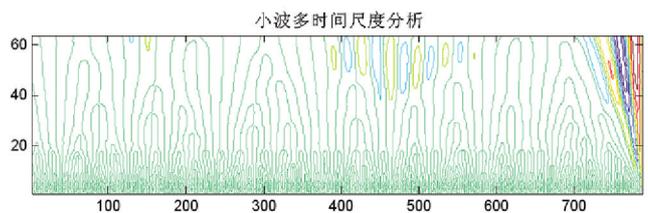


图 10 实测值小波多尺度分析的周期提取

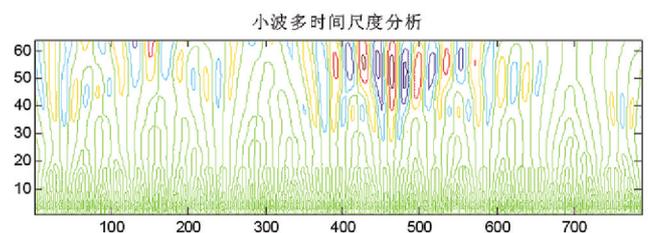


图 11 残差值小波多尺度分析的周期提取

从图 10 中我们可以看出，实测值周期分布在 40 到 60 之间，在这里我们认为 50 期是它的周期，从图 11 中残差周期图中可以看出，残差的主周期在 52 期左右。

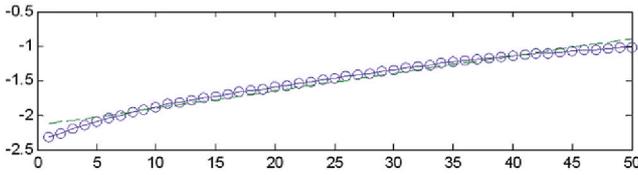


图 12 WOLF 方法计算实测值最大 Lyapunov 指数

此时拟合斜率就是最大 Lyapunov 指数,为 0.0251。

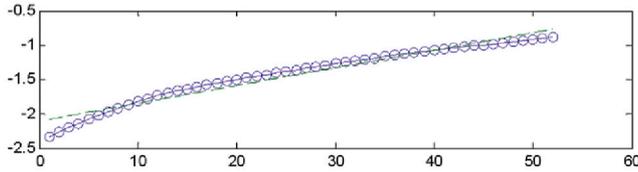


图 13 WOLF 方法计算残差的最大 Lyapunov 指数

此时残差值的最大 Lyapunov 指数为 0.0257。

从上面计算的大坝监测数据的实测值和残差的关联维数和最大 Lyapunov 指数来看,该变形监测数据的存在混沌现象,即关联维数为分数维,最大 Lyapunov 指数为正数。

4 结 语

从关联维和最大 Lyapunov 指数的数值上看,我们判定边坡的变形监测数据中含有混沌特性的可能,或者说我们可以运用这些混沌参数对边坡变形进行分析和预测,以达到我们对边坡安全监测的目的。

变形体系统的复杂结构和多变的运动行为,使得监测数据保留有复杂的变化过程,但整体而言,它还是表现为非线性动力学行为。通过对系统非线性特征的分析研究,验证变形系统的混沌特性,本文介绍了关联维数和最大 Lyapunov 指数的混沌判别,计算了大坝观测变形观测数据的关联维数和最大 Lyapunov 指数,并确定变形系统中存在混沌现象。

参考文献

- [1] 张安兵.动态变形监测数据混沌特性分析及预测模型研究[D].徐州:中国矿业大学,2009
- [2] 张正禄,黄全义,文鸿雁,等.工程的变形监测分析与预报[M].北京:测绘出版社,2007
- [3] 唐巍,李殿璞,陈学允.混沌理论及其应用研究[J].电力系统自动化,2000(04):67-70
- [4] Grassberg P,Procaccia I. Characterization of Strange Attractors[J]. Physical Review letters,1983(189): 45-51
- [5] Grassberg P, Procaccia I. Measuring the Strangeness of Attractors[J]. Physical D,1983(9): 121-123
- [6] Henry D. I. Abarbanel, Reggie Brown and John J. Sidorowich, et al. The Analysis of Observed Chaotic Data in Physical Systems[J]. Reviews of Modern Physics, 1993,10(4): 1331-1392
- [7] 金虎,陆君安,陈士华.混沌时间序列分析及其应用[M].武汉:武汉大学出版社,2002

第一作者简介:袁昌茂,硕士,研究方向为变形分析。

(上接第 138 页)

表 1 116-120 期观测变化曲线预测结果

期数	实测数据	最大 Lyapunov		移动平均法	
		预测值	误差	预测值	误差
116	-0.326 2	-0.468 2	0.142 0	-0.111 7	-0.214 5
117	0.403 5	0.019 8	0.383 7	-0.126 6	0.530 1
118	0.541 2	0.543 2	-0.002 0	0.034 0	0.507 2
119	-1.651 2	-0.877 6	-0.773 6	-0.183 9	-1.467 3
120	0.665 3	0.871 7	-0.206 4	-0.052 5	0.717 8

注:最大 Lyapunov 预测的残差和为-0.3563,中误差为 0.45,残差平方和均值为 0.1617;移动平均法预测的残差和为 0.0733,中误差为 0.902,残差平方和均值为 0.6505。

3 结 语

本文将混沌理论引入变形监测实验数据的处理中发现:变形监测实验数据存在着混沌现象,引用混沌时间序列的其中一种预测方法, Lyapunov 预测方法对后 5 期数据进行预测发现,实验结果较之传统预测方法精度有较大的提高。但是比之文献 [4] 中的预测精度稍差,原因为文献 [4] 对数据进行了放大,因此相

对误差精度较高。可以得出,混沌时间序列预测方法在变形分析与预测领域有一定的发展空间。

参考文献

- [1] 吕金虎,陆君安,陈士华.混沌时间序列分析及应用[M].武汉:武汉大学出版社,2002
- [2] 顾圣士,王志谦,程极泰.太阳黑子数时间序列的分形研究及预测[J].应用数学和力学,1999,20(1):81-86
- [3] 谢应齐,曹杰.非线性动力学数学方法[M].北京:气象出版社,2001
- [4] 陈益峰,吕金虎,周创兵.基于 Lyapunov 指数改进算法的边坡位移预测[M].岩石力学与工程学报,2001,20(5):671-675
- [5] 黄志全,樊敬亮,王思敬.混沌时间序列预测的局域法在边坡变形分析中的应用[J].工程地质学报,2005,13(2):252-255
- [6] 文鸿雁,唐诗华,林文介,等.基于小波变形分析模型[J].桂林工学院学报,1999(4):339-343
- [7] 温晓通,孟丽艳,朱劲松,等.一种非线性时间序列的关联维快速算法[J].北京师范大学学报:自然科学版,2005,41(4):358-361
- [8] 熊淑贞,杨向锋,孙瑜.相空间重构方法研究[J].微机处理,2006(5):61-63

第一作者简介:鲁金金,硕士,研究方向为变形分析与预报。

other two methods .

Key words remote sensing image fusion, ALOS, land cover, classification (Page:116)

Application of ArcGIS Vector Data Spatial Analysis in Urban Apartment Selection by YANG Jing

Abstract This study introduced the buffer analysis and overlay analysis in the spatial analysis of ArcGIS vector data. The two spatial analytic capabilities could be utilized to help potential buyers narrow down suitable zones by classify different zones and analyzing the practical situation in choosing apartments in the urban areas.

Key words spatial analysis, buffer analysis, overlay analysis, zone classification (Page:119)

Issues of MapGIS to ArcGIS Data Conversion Process

by YANG Xiaochao

Abstract Spatial data conversion is an effective way to increase utilization and reduce duplicate collection of spatial data . Studying the spatial data format conversion can help to significantly improve work efficiency. This paper analyzed the characteristics of MapGIS, ArcGIS software, and explored the problems encountered during the conversion process. It especially analyzed the file corresponding conversion relationship between changes in properties of the field, Figure contour points, and found solutions . It made full use of two complementary advantages of software, so that to maximize sharing of data resources.

Key words MapGIS , ArcGIS , data format conversion (Page:121)

Topographic Map Scanning Digitization and Precision Analysis Based on CASS7.0 by CHEN Nan

Abstract The topographic map scanning digitization is an important acquisition method for GIS data, which has become the mainstream of the map digitization. This article introduced the scanning digitization's basic principle and the implementation process and with 1:500 existing topographic map for data sources, using professional software CASS7.0 realized the whole production process of the map scanning digitization. It discussed the scanning digital mapping the main error sources and analysed the calibration accuracy and precision of vector in the process of scanning and digitizing.

Key words scanning digitization , gamma correction , precision analysis , CASS7.0 (Page:124)

MapX-based Mine Hydrogeology Information Management System by LONG Yang

Abstract This paper expounded the overall design of MapX-based Mine Hydrogeology Information Management System, realized the mine hydrogeology data management, maintenance, share and thematic map drawing by using re-development on MapInfo GIS software, the software offered help to hydrogeology information management work.

Key words MapX, GIS, hydrogeology (Page:127)

Quality Testing Methods of Underground Pipeline Detection Results by XIE Zhiqiang

Abstract In the large area underground pipeline detection data checking process , it fully considered the hidden nature of its detection outcomes. We used scientific procedures, standards, sample control, GIS aids scientific and rational means to improve the efficiency of the inspection and ensure the quality of the outcome.

Key words urban underground pipeline detection, quality characteristics, quality assessment, data quality control (Page:129)

Design and Data Analysis of Settlement Observation Based on a New Home Construction in Chengdu by LI Yong

Abstract This paper summarized the new project of Jinniu district,

Hou B group (a section of building no. 4) settlement observation engineering basic situation, including the benchmarks laid and detailed discussion of benchmark nets stability, through monitoring data analysis of the building deformation and made corresponding conclusions.

Key words settlement benchmark , data analysis (Page:132)

Development of Data Processing Systems for Total Station Memory Records Observations by LIU Jiankai

Abstract In the process of traverse field observations, using the electronic record book for total station memory mode, against its data logging functions, we made the extraction of lead observations, the secondary development of computing, and data processing corresponding. Full using of its code measurements function, we developed the data processing module, the extraction of data automatically and converted them to the standard adjustment file that adjustment software could recognize , reduce labor intensity and the workload of outside the inside.

Key words Traverse observations , memory record , data processing (Page:134)

Application of Chaotic Theory in Deformation Analysis and prediction by LU Jinjin

Abstract Due to environmental factors and instruments impact the deformation monitor can be seen as a complex system, and the parameters are uncertain and random, to show the complexity of the nonlinear behavior. The paper used the modern chaotic theory to solve the time series of monitor deformation, and discussed the chaotic theory and prediction method. The example showed that chaotic time series method can get a better accuracy.

Key words deformation monitoring , chaotic time series prediction (Page:137)

Application Experiment of SmartStation to Cadastral Inventory Based on the Second Investigation of National land

by MEI Xiaodan

Abstract Taking the cadastral inventory of the Sanchahe town in Fuyou county as an example, this paper discussed the application of Leica's SmartStation in cadastral inventory based on the second investigation of national land. By compared the model of Leica's SmartStation without control points with the normal mapping model in accuracy and efficiency, it came to a conclusion that the former was a best way to improve the operational efficiency measurement in field survey . At the same time, this experiment was general and portable , which had a certain importance to make further promotion in the field and space of super-station instruments.

Key words the second investigation of national land , SmartStation , cadastral inventory , accuracy assessment , the mode of location and measurement (Page:139)

Analyze Chaos of Deformation Monitoring Data

by YUAN Changmao

Abstract This paper described the Lyapunov index method and the correlation dimension method of deformation data, and discussed the calculation of deformation monitoring data Lyapunov exponent and correlation dimension. Finally, it showed a practical example with dam observation data.

Key words deformation monitoring, chaos, Lyapunov exponent, correlation dimension, phase space reconstruction (Page:142)

Design and Data Analysis of Settlement Observation of Construction by YANG Jianrong

Abstract This paper summarized basic situation of settlement observational engineering which located in longquanyi district south road of