

# 钢结构施工过程监测数据缺失机理与处理方法

罗永峰, 叶智武, 郭小农

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 分析并总结了钢结构施工过程监测中缺失数据的成因及特征, 依据缺失数据形成机制将缺失数据分为三类. 根据不同类型和特征的缺失数据, 提出了基于最小二乘原理以回归分析理论为基础的数据补偿方法. 通过对大同美术馆屋盖钢结构和“生命之环”钢结构施工过程监测数据的分析处理与比较, 验证了该方法的有效性, 说明了该方法的实用价值.

**关键词:** 钢结构施工过程监测; 缺失数据; 分析与补偿; 初始值

**中图分类号:** TU393.3; TU745.2

**文献标志码:** A

## Data Missing Mechanism in Construction Monitoring and Its Treatment

LUO Yongfeng, YE Zhiwu, GUO Xiaonong

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** This paper categorizes the missing data into three kinds by their generating mechanism and characteristics. Data processing and compensation methods are proposed on the basis of the regression analysis by least square method. A comparative study of the monitoring data about the steel structure of Datong Art Gallery in Shanxi Province and “the ring of life” in Shenyang City of Liaoning Province confirms that the proposed methods for missing data treatment are effective and practical.

**Key words:** construction monitoring of steel structure; data missing; data processing and compensation methods; initial value

现代钢结构体量庞大、体系复杂, 给钢结构施工技术发展带来了动力<sup>[1]</sup>. 目前, 在大型复杂钢结构施工过程中, 为了保证施工过程安全顺畅, 通常需要对结构关键部位的受力、变形乃至运动状态进行实时

监测, 以便为施工过程即时控制提供数据或依据. 然而, 在大型复杂钢结构施工过程中, 由于施工周期长, 施工过程监测数据量大, 如何快速高效地从海量甚至不完整的数据中获取少量而有效的数据用于即时的施工过程控制, 是目前钢结构施工过程监测尚需深入研究的问题之一. 另外, 由于各种难以避免的因素存在, 可能导致施工过程监测数据链中部分数据的遗失或数据链中断, 而这些数据缺失将直接影响结构施工过程的即时控制甚至结构施工过程的安全评估. 因而, 为了确保监测数据的完整性及有效性, 需要对缺失数据进行及时补偿.

目前, 缺失数据处理技术主要应用于社会统计学、信息工程、管理科学等领域, 因而, 关于缺失数据处理技术及其研究也仅是针对这些领域的数据特点. 在这些领域的缺失数据处理方法研究中, Kline<sup>[2]</sup>将缺失数据处理法分为三类, 即删除法、插补法、最大似然模型预测法. Kim 和 Raaijmakers<sup>[3-4]</sup>认为直接删除法会带来较大的信息量丢失, 仅适用于缺失的数据不太重要且数据量较小的情况, 而插补法的变量之间不应有太大的相关性<sup>[5-7]</sup>, 插补法不适用于现场监测, 最大似然模型预测法基于已有的确定性数据建立监测数据中关键参数(如时间或温度等)的数学模型, 依据一定的统计准则, 对缺失数据进行有效的估计, 该方法对数据的评估较为精确, 适用性广, 但需要预先确定合理的数学预测模型<sup>[8]</sup>.

然而, 在建筑结构尤其是钢结构施工过程监测领域, 国内外尚缺乏对施工过程监测数据链缺失数据处理方法的研究, 没有可供实际工程应用的成果, 而现有的相关文献或报告, 均为具体工程施工过程监测结果的陈述, 缺乏有效的数据分析与处理方法. 本文根据建筑结构施工过程监测数据分析与处理的研究现状, 针对大型复杂钢结构施工过程监测参数

收稿日期: 2013-09-05

基金项目: 国家自然科学基金(51078289)

第一作者: 罗永峰(1957—), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为大跨度结构施工监测、检测与鉴定以及抗震性能与稳定理论. E-mail: yfluo93@tongji.edu.cn

通讯作者: 郭小农(1977—), 男, 工学博士, 讲师, 主要研究方向为施工分析以及铝合金结构. E-mail: guo-xiao-nong@tongji.edu.cn

的特点,基于不同缺失数据类型和缺失机制,提出合理有效的施工过程监测数据链补偿方法,并通过实际钢结构施工过程监测数据链的分析,验证本文方法的有效性,期望为钢结构施工过程监测及钢结构数据库建立提供有效的方法。

## 1 施工过程监测缺失数据的成因及分类

### 1.1 数据缺失的成因与特征

钢结构施工过程监测现场作业环境通常复杂恶劣,导致监测数据缺失的现象较为常见,实际工程监测经验统计表明,造成监测数据缺失的主要原因有三种:①数据传输障碍;②电源故障;③监测元件或仪器故障。

现有的施工过程监测数据统计结果表明,当缺失数据产生的原因不同时,相应的缺失数据可能表现出不同的特点,具体可归纳为以下两种特征:

特征一:当由上述第①、②种原因引起的缺失数据属于数据链中的小段数据时,由于监测仪器正常,排除故障后监测数据的初始读数仍有效。

特征二:当由上述第③种原因引起监测数据缺失时,在更换新元件或仪器后,初始读数不正确,监测数据需要进行合理修正。

### 1.2 缺失数据的类别

在施工过程监测中,监测数据链中的每一个数据段,无论其数据完整与否,每个数据采集的时刻均是已知和确定的。因此,如果有数据缺失,则缺失时段  $\Delta t$  也是确定的。然而,由于钢结构施工的阶段性变化特点,缺失时段  $\Delta t$  长短的不同,可能导致缺失数据质的不同,因此,为了寻找合理有效的缺失数据补偿方法,本文根据数据缺失时段  $\Delta t$  的特点,将施工过程监测的缺失数据分为以下三类:

第一类:数据缺失时段  $\Delta t$  足够短(一般在 12 h 以内),该时段内结构几何形态未发生变化,且风荷载、温度变化均不大,即对应的结构受力状态基本未变。

第二类:数据缺失时段  $\Delta t$  适中(超过 12 h),该时段内结构几何形态未发生变化,但风荷载、温度均变化较大,即对应的结构受力状态有较明显的变化。

第三类:数据缺失时段  $\Delta t$  足够长,该时段内结构经历了  $n(n \geq 1)$  个施工步,结构几何形态及荷载均已发生显著变化,即结构的受力状态发生显著变化。

## 2 缺失数据的处理方法

每类缺失数据均可能具有 1.1 节所述的两种特

征,即监测数据采集恢复正常时的两种初始值,然而,特征二缺失数据的初始值需要修正。本节根据缺失数据的特征一,研究不同类别缺失数据的处理与补偿方法,进而提出具有特征二的缺失数据初始值的确定方法。

### 2.1 第一类缺失数据处理方法

第一类缺失数据缺失时段短,由于结构内力状态基本未变,因此,缺失数据与其相邻的有效数据应服从相同的分布规律,为此,可采用线性回归分析方法对缺失数据进行补偿。图 1 为第一类缺失数据处理方法示意图。

定义  $t$  为时间,  $y$  为有效监测数据,将与缺失数据相邻的部分有效数据进行线性拟合,可得拟合直线方程:

$$y = \hat{a}t + \hat{b} \quad (1)$$

式中,  $\hat{a}$ 、 $\hat{b}$  均为拟合直线的回归系数。

在求得  $\hat{a}$ 、 $\hat{b}$  后,采用式(1)即可求得第一类缺失数据。为了得到  $\hat{a}$ 、 $\hat{b}$ ,令每个有效监测数据与拟合直线间的偏差为

$$e = y_i - (\hat{a}t + \hat{b}) \quad (2)$$

设参与拟合的有效数据有  $n$  个,则总的偏差平方和  $W$  可表示为

$$W = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (\hat{a}t_i + \hat{b})]^2 \quad (3)$$

为了使回归直线与有效数据间的总偏差  $W$  最小,令  $\frac{\partial W}{\partial \hat{a}} = 0$ ,  $\frac{\partial W}{\partial \hat{b}} = 0$ ,可求得参数  $\hat{a}$ 、 $\hat{b}$ 。

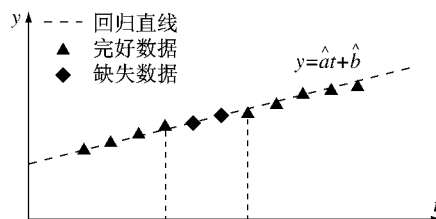


图 1 第一类缺失数据处理示意图

Fig.1 Processing method of the 1st kind of missing data

### 2.2 第二类缺失数据处理方法

第二类缺失数据表示在同一个施工步内缺失了部分监测数据(如应力、位移、速度等),且这部分数据相对于相邻时段有效监测数据的变化主要受风荷载及温度变化影响。由于温度和风荷载的随机变化,导致该部分监测数据变化也是随机的,因此,为了得到在此缺失时段内的数据变化,需要根据其他数据在此时段监测结果的变化规律来估算此类缺失数

据。

构件受力特点不同,施工过程监测测点布置通常也不同,同时缺失数据的处理方法也不尽相同。为此,本节将钢构件分为轴力构件和弯曲构件,分别研究其第二类缺失数据的补偿方法。

### 2.2.1 轴力构件

轴力构件即构件仅承受轴向力。当构件仅受轴向力时,理论上构件仅发生轴向变形,即构件各点变形相等。因此,监测时,每根构件上布置一个应变计即可,因而,这类构件应变监测数据分析只需考虑构件上任一点的轴向应变。

设由温度变化作用和风荷载引起的构件应变变化如下所示:

$$\Delta y = \Delta y_w + \Delta y_T \quad (4)$$

式中: $\Delta y$  为构件应变总变化; $\Delta y_w$ 、 $\Delta y_T$  分别为风荷载、温度变化引起的构件应变变化。

在一定时间内,风荷载随时间  $t$  变化,本文根据统计规律假定风荷载对构件应变的影响为时间  $t$  的二次曲线,即

$$\Delta y_w = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 \quad (5)$$

而温度变化引起构件应变变化与温差  $\Delta T$  呈线性关系,即

$$\Delta y_T = \beta_3 \cdot \Delta T \quad (6)$$

则,综合式(4)~(6),可得到构件因温度变化和风荷载作用产生的应变变化  $\Delta y$  为

$$\Delta y = \beta_0 + \beta_1 \bar{t} + \beta_2 \bar{t}^2 + \beta_3 \Delta T \quad (7)$$

式中: $\Delta T$  为构件表面温度变化; $\beta_0$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$  均为偏回归系数; $\bar{t}$  为归一化的时间参数,将 1 d 划分为 24 个刻度,则归一化时间参数为  $\bar{t} = t/24$ 。

需要注意的是,回归分析前,需要定义一个“基准状态”, $\Delta y$  和  $\Delta T$  分别为相对于“基准状态”监测数据值的应变变化和温差。

### 2.2.2 弯曲构件

弯曲构件以承受弯矩为主。当构件发生弯曲时,构件同一个截面各点的变形可能不同。监测时,为了有效监测构件受力状态,每根构件至少应布置 3 个应变计,即弯曲轴线上 1 个,正负最大应变点各 1 个。但在监测时,为了了解对称性及偏差,常在弯曲轴线上增加 1 个,即总数为 4 个,如图 2 所示。

图 2 所示钢管构件截面均匀对称布置的 1、2、3、4 号 4 个应变计的应变读数分别为  $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$ 、 $\epsilon_3$ 、 $\epsilon_4$ ,该 4 个应变反映了构件截面的真实受力状态。

与式(4)类似,构件截面任一点的应变变化可表示为

$$\Delta y_i = \Delta y_{wi} + \Delta y_{Ti} \quad (8)$$

式中: $i$  为应变计编号; $\Delta y_i$  为构件该点应变总变化,即  $\Delta \epsilon_i$  ( $i=1\sim 4$ ); $\Delta y_{wi}$ 、 $\Delta y_{Ti}$  分别为第  $i$  个应变计由风荷载、温度变化引起的应变变化。

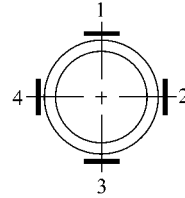


图 2 均匀布置 4 个应变计的钢管

Fig. 2 The layout of four strain gauges in a pipe section

一般情况下,可认为构件同一截面的温度变化相同,即上述各应变计由温度引起的应变变化相同。另外,当 4 个应变计相对于弯曲轴(图 2 中 1-3)对称布置时,由风荷载引起的 4 个应变计的应变变化之和为 0,则由温度变化引起的平均应变  $\Delta \bar{y}_T$  为

$$\Delta \bar{y}_T = (\Delta \epsilon_1 + \Delta \epsilon_2 + \Delta \epsilon_3 + \Delta \epsilon_4)/4 \quad (9)$$

现假定该测点有一个应变计的数据缺失,例如 4 号应变计  $\Delta y_4$  (即  $\Delta \epsilon_4$ ) 缺失。由于 2 号应变计与 4 号应变计位置对称,在风荷载作用下,两应变计处轴向变形数值相等,但方向相反,故 4 号应变计由风荷载引起的应变为

$$\Delta y_{w4} = (\Delta \epsilon_4 - \Delta \epsilon_2)/2 \quad (10)$$

将式(9)~(10)代入式(8),可得到 4 号应变计的应变变化为

$$\Delta \epsilon_4 = \Delta \epsilon_1 - \Delta \epsilon_2 + \Delta \epsilon_3 \quad (11)$$

式(11)表示,在构件同一截面布置 4 个应变计,若其中有 1 个应变计数据缺失,可通过其他 3 个应变计的数据进行补偿,即弯曲构件的第二类缺失数据可采用式(11)进行补偿。

### 2.3 第三类缺失数据处理方法

该类数据采用分阶段补偿方法,其数据处理方法如图 3 所示。假设在缺失时段  $\Delta t$  内已经历了  $n$  ( $n \geq 1$ ) 个施工步,对应的起始时刻分别为  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $\dots$ 、 $t_n$ ,相应的监测数据应为  $N(t_1)$ 、 $N(t_2)$ 、 $\dots$ 、 $N(t_n)$ ,但均已缺失。

为了补偿各施工步的缺失数据,首先需要确定各施工步起始时刻对应的数据  $N(t_1)$ 、 $N(t_2)$ 、 $\dots$ 、 $N(t_n)$ 。对结构进行精确的施工过程分析,可得到  $t_0$ 、 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $\dots$ 、 $t_n$  时刻监测参数的理论计算值  $N'(t_0)$ 、 $N'(t_1)$ 、 $N'(t_2)$ 、 $\dots$ 、 $N'(t_n)$ 。假定两相邻施工步间监测参数理论值的差为  $\Delta N'(t_i)$  ( $= N'(t_i) - N'(t_{i-1})$ ),与实际监测数据差  $\Delta N(t_i)$  ( $= N(t_i) -$

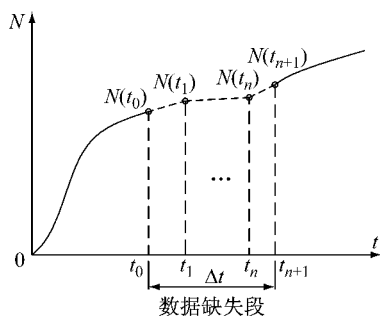


图3 第三类缺失数据处理方法示意图

Fig.3 Processing method of the 3rd kind of missing data

$N(t_{i-1})$ 相等,即  $\Delta N'(t_i) = \Delta N(t_i)$ ,则进而可得到各施工步起始时刻的缺失数据  $N(t_1)$ 、 $N(t_2)$ 、 $\dots$ 、 $N(t_n)$ 为

$$N(t_1) = N(t_0) + \Delta N'(t_1) \quad (12)$$

$$N(t_i) = N(t_{i-1}) + \Delta N'(t_i) \quad (13)$$

式中:  $t_0$  为最先出现缺失数据的施工步对应的起始时刻;  $N(t_0)$  为该时刻已监测得到的有效数据。

由此,可进一步分别补偿各施工步的其他缺失数据. 由于上述施工步整段监测数据缺失,通过式(12)–(13)仅可补偿施工步起始和结束时刻(下一施工步起始时刻)的缺失数据,因此,在每个施工步内,仅两个数据是已知的,为此,本节采用线性插值方法补偿该类缺失数据. 设缺失数据处在第  $i$  个施工步内,则该补偿数据  $N(t)$  为

$$N(t) = \frac{N(t_{i+1}) - N(t_i)}{t_{i+1} - t_i}(t - t_i) \quad (14)$$

## 2.4 具有特征二的缺失数据初始值的确定

监测元件或仪器在开始监测之初,有一个确定的初始状态即初值,而在监测过程中,每一时刻监测参数值随施工状态变化,反映构件的即时状态,且通常不同于其初始值. 对于本文上述具有特征二的缺失数据,由于元件或仪器的更换,其初始读数为仪器初始值而非对应构件真实状态的数据,因此,该初始状态数据不能反映构件的即时受力状态,应寻求合理方法对该初始读数进行修正。

### 2.4.1 第一类缺失数据

由于该类数据变化不大,可采用回归分析法估算新换仪器初始状态对应的监测参数数值即缺失数据. 取仪器未损坏前监测时段接近于缺失时段的一组监测数据为基本数据,对该基本数据进行线性回归分析,得到一个回归方程,然后,将新仪器更换时间代入回归方程,可求得本类缺失数据的值,也即新仪器初始状态对应的监测参数实际值。

### 2.4.2 第二类缺失数据

由于第二类缺失数据发生在结构同一施工步,仅风荷载和温度变化,为了较为准确估算缺失数据,本节采用三折线模型模拟监测数据分布规律,如图4所示。

令  $t_1$  为数据缺失时刻,  $N(t_1)$  为数据缺失前的最后一个有效监测数据,  $t_0$  为数据缺失前某时刻 ( $t_0 = t_1 - \Delta t$ ),  $N(t_0)$  为  $t_0$  时刻的有效监测数据,  $t_2$  为仪器修复时刻,  $N(t_2)$  为修复后仪器的初始读数,  $t_3$  为仪器修复后某时刻 ( $t_3 = t_2 + \Delta t$ ),  $N(t_3)$  为  $t_3$  时刻的仪器读数,  $k_1$  为数据缺失前  $\Delta t$  时段内监测数据变化率,  $k_2$  为仪器修复后  $\Delta t$  时段内监测数据变化率,  $k_t$  为数据缺失中  $\Delta t$  时段内仪器读数变化率,则有

$$k_1 = \frac{N(t_1) - N(t_0)}{t_1 - t_0} = \frac{N(t_1) - N(t_0)}{\Delta t} \quad (15)$$

$$k_2 = \frac{N(t_3) - N(t_2)}{t_3 - t_2} = \frac{N(t_3) - N(t_2)}{\Delta t} \quad (16)$$

在三折线模型中,假定监测数据在  $(t_0, t_1)$ 、 $(t_1, t_2)$ 、 $(t_2, t_3)$  内均分别为线性变化,但斜率可能不同,则缺失段监测数据的斜率  $k_t$  可按式(17)估算:

$$k_t = \frac{1}{2}(k_1 + k_2) = \frac{N(t_3) - N(t_2) + N(t_1) - N(t_0)}{2\Delta t} \quad (17)$$

进而可得该类缺失数据在仪器恢复时刻的初始值  $N'(t_2)$  为

$$N'(t_2) = N(t_1) + k_t \Delta t \quad (18)$$

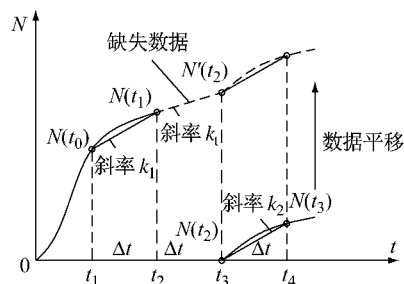


图4 第二类缺失数据初始值的确定

Fig.4 Determination of initial value of the 2nd kind of missing data

### 2.4.3 第三类缺失数据

首先,进行结构施工过程模拟分析,得到仪器损坏时刻和新仪器开始监测时刻构件的受力状态. 然后,根据缺失时段内构件受力状态的变化来确定第三类缺失数据的初始值。

假定仪器损坏时刻的有效监测数据为  $N(t_1)$ , 新仪器的初始读数为  $N(t_2)$ , 理论分析得到仪器损坏时刻监测参数值为  $N'(t_1)$ , 新仪器开始监测时参数值为  $N'(t_2)$ , 则理论计算参数值变化为  $\Delta N =$

$N'(t_2) - N'(t_1)$ . 在缺失时段内,理论计算参数变化与实际状况的参数变化应相等,则该类缺失数据的初始值为

$$N(t_2) = N(t_1) + \Delta N = N(t_1) + N'(t_2) - N'(t_1) \quad (19)$$

### 3 实际工程数例分析

本节以大同美术馆屋盖和沈抚新城“生命之环”结构施工过程监测数据为例,验证缺失数据补偿处理方法的有效性.

表1 某测点数据

Tab.1 Data collected from a measuring point

编号	监测时间	温度/℃	应变/ $10^{-6}$	归一化时间 $\bar{t}$	温差 $\Delta T/^\circ\text{C}$	应变变化 $\Delta y/10^{-6}$
1	2012-12-04,14:54:40	-3.1	123.96	0.62	0	0
2	2012-12-04,16:29:17	-4.6	128.97	0.69	-1.5	5.01
3	2012-12-04,16:44:32	-5.6	128.92	0.70	-2.5	4.96
4	2012-12-04,17:05:12	-6.2	126.00	0.71	-3.1	2.04
5	2012-12-04,17:19:14	-6.5	123.66	0.72	-3.4	-0.30
6	2012-12-04,17:35:15	-7.2	123.13	0.73	-4.1	-0.83
7	2012-12-04,17:50:57	-7.9	120.02	0.74	-4.8	-3.94
8	2012-12-04,18:06:26	-8.2	118.91	0.75	-5.1	-5.05
9	2012-12-04,18:12:22	-8.3	119.94	0.76	-5.2	-4.02
10	2012-12-05,15:19:11	-1.0	(133.03)	0.64	2.1	9.07
11	2012-12-05,15:31:05	-0.8	(134.19)	0.65	2.3	9.07
12	2012-12-05,16:01:06	-1.6	(136.26)	0.67	1.5	9.07
13	2012-12-05,16:34:04	-2.8	(134.68)	0.69	0.3	10.72
14	2012-12-05,16:58:03	-3.5	(137.28)	0.71	-0.4	13.32
15	2012-12-05,17:32:11	-4.8	(137.09)	0.73	-1.7	13.13
16	2012-12-05,18:07:56	-2.1	(136.73)	0.76	1.0	9.07

选取编号为1、2、4、6、9的有效监测数据作为基本数据,采用图1所示线性回归法对表1中的数据进行回归,得到的回归方程为

$$y = -28.09\bar{t} + 144.13 \quad (20)$$

采用式(20)估算3、5、7、8号的缺失数据,理论估算值及其与真实值间的误差列于表2,估算值与真实值随时间变化曲线如图5所示.

表2 应变估算值及误差

Tab.2 The imputed values of strains and the errors

编号	时间 $\bar{t}$	应变/ $10^{-6}$		误差/%
		估算值	真实值	
3	0.70	124.53	128.92	3.40
5	0.72	123.86	123.66	0.16
7	0.74	123.24	120.02	2.68
8	0.75	122.94	118.91	3.39

表2和图5结果表明,采用线性回归法处理第一类缺失数据时,估算值与真实值间虽有偏差但误差较小,最大误差约为3.40%.该方法适用的主要原因是数据缺失时间短暂、杆件应力变化较小.

#### 3.2 第二类缺失数据处理

##### 3.2.1 轴力构件

#### 3.1 第一类缺失数据处理

大同美术馆屋盖钢结构为空间桁架体系,杆件为轴力杆,施工过程监测时,一根杆布置一个应变计,表1为美术馆某测点在2012年12月4~5日间的监测数据.表中的括号是为下面第3.2.1节作引用而设.

假定在16:44:32~18:06:26时段内,3、5、7、8号数据由于某种原因造成数据缺失,缺失时间近1.5 h,根据1.2节定义,可判定该段缺失数据为第一类缺失数据.

以表1中数据为例,假定12月5日的构件应变监测数据缺失(表1括号中数据),但尚有相应的温度、时间监测数据.由于缺失时间超过12h,杆件的温度作用和风荷载均有变化,则该段缺失数据为第二类.

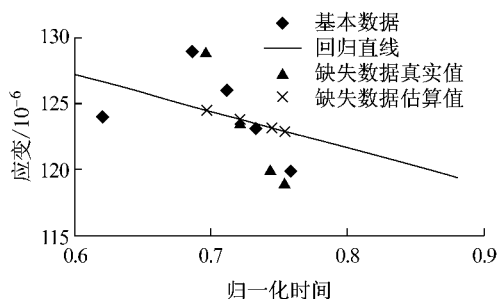


图5 真实值与估算值随时间变化图(第一类缺失数据)

Fig.5 Variation of true values and the imputed values with time (the 1st kind of missing data)

为了补偿该段应变缺失数据,选取12月4日的应变监测数据作为基本数据组,采用基于最小二乘法的多元回归分析进行数据补偿.12月4日的应变变化 $\Delta y$ 可回归为

$$\Delta y = -545.9 + 1\,549.6 \bar{t} - 1\,079.3 \bar{t}^2 + 2.64 \cdot \Delta T \quad (21)$$

将 12 月 5 日缺失数据对应的时间和温差代入式(21),可得到相对应的缺失数据. 表 3 为采用式(21)计算得到的缺失数据估算值及其与真实值间的误差,图 6 为估算值与真实值随时间变化曲线.

表 3 应变估算值与误差

Tab.3 The imputed values and errors of strains

编号	时间 $\bar{t}$	温差 $\Delta T/^{\circ}\text{C}$	估算应变差 $\Delta y/10^{-6}$	应变估算 值/ $10^{-6}$	应变真实 值/ $10^{-6}$	误差 /%
10	0.64	2.1	8.95	132.91	133.03	0.09
11	0.65	2.3	10.82	134.78	134.19	0.44
12	0.67	1.5	11.45	135.41	136.26	0.63
13	0.69	0.3	10.21	134.17	134.68	0.38
14	0.71	-0.4	9.05	133.01	137.28	3.21
15	0.73	-1.7	5.56	129.52	137.09	5.84
16	0.76	1.0	11.34	135.30	136.73	1.06

表 3 和图 6 结果表明,估算值与真实值趋势大致相同,但局部数据有误差,最大误差约为 5.84%,产生误差的原因是 4 日与 5 日的相同时刻,现场温度相差较大. 总体而言,该缺失数据估算值误差较小.

3.2.2 弯曲构件

沈抚新城“生命之环”结构外形为圆环状,构件主要受弯. 现场监测时,在被测构件截面上均匀布置

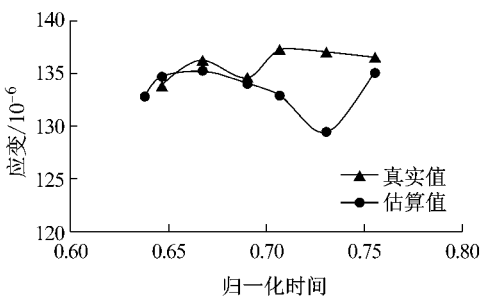


图 6 真实值与估算值随时间变化图(第二类缺失数据轴力构件)

Fig.6 The graph of true values and the imputed values by time (axial member with the 2nd kind of missing data)

了图 2 所示的 4 个应变计,表 4 为某构件测点在 2011 年 12 月 7 日~9 日的应变监测数据.

假定 3 号应变计在该段时间内数据缺失(表 4 括号中数据),以 1 号数据为“基准状态”监测值,令  $\Delta \epsilon$  为任意时刻的监测数据与基准数据值间的差,则可得  $\Delta \epsilon_1$ 、 $\Delta \epsilon_2$ 、 $\Delta \epsilon_4$ ,通过式(11)即可补偿 3 号应变计的缺失数据.

由式(11)可知, $\Delta \epsilon_3 = \Delta \epsilon_2 - \Delta \epsilon_1 + \Delta \epsilon_4$ ,从而得到  $\Delta \epsilon_3$ ,则估算值  $\epsilon' = \Delta \epsilon_3 + \epsilon_0$ ,其中  $\epsilon_0$  为基准数据. 计算得到的估算值及其与真实值间的误差列于表 4,图 7 为真实值与估算值的应变曲线比较.

表 4 测点中 4 个应变计的监测数据及应变估算值和误差统计

Tab.4 The monitoring data of four strain gauges at a measuring point, the imputed values and errors of strains

编号	监测时间	应变传感器编号				应变变化量/ $10^{-6}$			应变估算值 / $10^{-6}$	估算值 $\epsilon'/10^{-6}$	估算误差/%
		1	2	3	4	$\Delta \epsilon_1$	$\Delta \epsilon_2$	$\Delta \epsilon_4$	$\Delta \epsilon_3$		
1	2011-12-07,15:36:33	-36.71	-116.26	(-136.04)	-61.49	0	0	0	0	-136.04	0
2	2011-12-07,15:40:26	-37.34	-116.74	(-136.27)	-61.93	-0.63	-0.48	-0.44	-0.29	-136.33	0.04
3	2011-12-07,15:51:11	-36.62	-117.47	(-136.08)	-62.38	0.09	-1.21	-0.89	-2.19	-138.23	1.55
4	2011-12-07,16:20:14	-36.62	-119.55	(-137.67)	-62.32	0.09	-3.29	-0.83	-4.21	-140.25	1.82
5	2011-12-07,16:27:38	-37.92	-120.7	(-138.15)	-61.20	-1.21	-4.44	0.29	-2.94	-138.98	0.59
6	2011-12-07,16:36:16	-37.72	-119.72	(-137.66)	-59.83	-1.01	-3.46	1.66	-0.79	-136.83	0.60
7	2011-12-07,17:16:26	-37.69	-121.6	(-138.71)	-60.10	-0.98	-5.34	1.39	-2.97	-139.01	0.21
8	2011-12-08,08:56:17	-40.72	-127.41	(-146.84)	-58.76	-4.01	-11.15	2.73	-4.41	-140.45	4.22
9	2011-12-08,09:51:38	-43.39	-132.46	(-148.53)	-59.87	-6.68	-16.20	1.62	-7.90	-143.94	2.93
10	2011-12-08,11:43:40	-46.88	-118.68	(-143.10)	-63.50	-10.17	-2.42	-2.01	5.74	-130.30	9.32
11	2011-12-08,12:43:42	-42.19	-119.64	(-145.30)	-70.22	-5.48	-3.38	-8.73	-6.63	-142.67	1.73
12	2011-12-08,13:43:47	-41.05	-118.24	(-146.16)	-70.78	-4.34	-1.98	-9.29	-6.93	-142.97	2.08
13	2011-12-08,14:44:02	-39.71	-118.26	(-144.24)	-62.51	-3.00	-2.00	-1.02	-0.02	-136.06	5.67
14	2011-12-09,10:23:49	-49.66	-132.51	(-147.94)	-63.84	-12.95	-16.25	-2.35	-5.65	-141.69	4.07
15	2011-12-09,10:24:55	-50.27	-132.52	(-149.62)	-63.43	-13.56	-16.26	-1.94	-4.64	-140.68	5.80
16	2011-12-09,10:25:32	-49.91	-132.47	(-150.27)	-63.40	-13.20	-16.21	-1.91	-4.92	-140.96	6.00
17	2011-12-09,10:26:48	-49.39	-132.09	(-151.34)	-63.12	-12.68	-15.83	-1.63	-4.78	-140.82	6.74
18	2011-12-09,10:27:58	-49.35	-132.30	(-152.80)	-63.23	-12.64	-16.04	-1.74	-5.14	-141.18	7.36
19	2011-12-09,10:28:32	-49.33	-132.33	(-153.29)	-63.17	-12.62	-16.07	-1.68	-5.13	-141.17	7.65
20	2011-12-09,10:29:08	-49.38	-132.47	(-154.00)	-63.41	-12.67	-16.21	-1.92	-5.46	-141.50	7.84
21	2011-12-09,10:29:42	-49.43	-132.84	(-154.95)	-64.10	-12.72	-16.58	-2.61	-6.47	-142.51	7.71
22	2011-12-09,10:39:01	-51.62	-133.12	(-155.32)	-67.27	-14.91	-16.86	-5.78	-7.73	-143.77	7.08
23	2011-12-09,11:04:50	-53.47	-128.98	(-146.28)	-68.44	-16.76	-12.72	-6.95	-2.91	-138.95	4.91
24	2011-12-09,11:24:52	-55.09	-126.27	(-143.94)	-70.48	-18.38	-10.01	-8.99	-0.62	-136.66	5.04
25	2011-12-09,11:44:56	-53.67	-122.52	(-144.87)	-73.09	-16.96	-6.26	-11.60	-0.90	-136.94	5.44
26	2011-12-10,10:47:25	-44.94	-125.05	(-142.99)	-63.16	-8.23	-8.79	-1.67	-2.23	-138.27	3.25

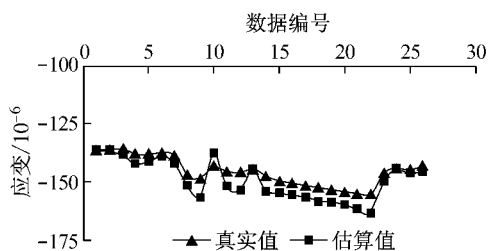


图 7 真实值与估算值的应变曲线图(第二类缺失数据弯曲构件)

Fig.7 The graph of true values and the imputed values (bending member with the 2nd kind of missing data)

表 4 和图 7 的结果表明,应变估算值与真实值变化趋势相同,估算值与真实值差异很小,最大误差约 9.32%,表明本文方法具有较高的精确性。

### 3.3 第三类缺失数据处理

以“生命之环”施工监测中的某一测点数据为例,表 5 为该构件测点中一个应变计在 2011 年 12 月 1 日~11 日的应变监测数据。

表 5 中编号为 1、6、9、14、24 的数据分别为施工步起始时刻对应的数据,假定 6~24 号数据缺失(表 5 括号中的数据),缺失时段为 12 月 3 日~11 日,已经历了 4 个施工步,故判定该缺失数据为第三类缺

表 5 某测点中一个应变计的监测数据

Tab.5 The monitoring data of a strain gauge at a measuring point

编号	监测时间	真实值/ $10^{-6}$	理论值 $N'(t)/10^{-6}$	估算值 $N(t)/10^{-6}$	误差 /%
1	2011-12-01,15:13:05	-106.36	-64.55		
2	2011-12-01,15:55:53	-105.51			
3	2011-12-01,15:59:24	-105.07			
4	2011-12-01,16:05:03	-104.36			
5	2011-12-02,08:48:45	-112.19			
6	2011-12-03,10:08:26	(-119.75)	-72.23	-114.04	4.77
7	2011-12-03,10:11:29	(-120.70)		-114.04	5.52
8	2011-12-03,14:13:17	(-115.61)		-114.49	0.96
9	2011-12-04,14:02:05	(-117.34)	-73.76	-115.57	1.22
10	2011-12-04,14:24:16	(-116.50)		-115.57	0.80
11	2011-12-06,16:02:32	(-115.10)		-115.54	0.39
12	2011-12-07,14:51:19	(-113.86)		-115.22	1.20
13	2011-12-07,14:59:54	(-114.02)		-115.22	1.06
14	2011-12-07,15:36:33	(-112.34)	-72.72	-114.54	1.95
15	2011-12-07,15:51:11	(-110.57)		-114.56	3.61
16	2011-12-07,16:20:14	(-110.15)		-114.61	4.05
17	2011-12-07,16:36:16	(-109.92)		-114.64	4.30
18	2011-12-08,13:43:47	(-118.25)		-116.90	1.14
19	2011-12-08,14:44:02	(-117.60)		-117.01	0.50
20	2011-12-09,10:23:49	(-118.29)		-119.11	0.70
21	2011-12-09,11:04:50	(-119.67)		-119.19	0.40
22	2011-12-09,11:44:56	(-119.58)		-119.26	0.27
23	2011-12-10,10:47:25	(-119.54)		-121.80	1.89
24	2011-12-11,10:34:51	(-123.74)	-82.37	-124.19	0.36

失数据。

采用 2.3 节的方法,补偿的估算值及其与真实值之间的误差见表 5。图 8 为真实值与估算值的应变曲线比较。

表 5 和图 8 的结果表明,估算值的应变曲线较平缓,且估算值与真实值差异很小,最大误差为 5.52%,表明本文方法具有较高的精确性。

## 4 结论

本文总结现场监测工作经验,首先,将造成监测

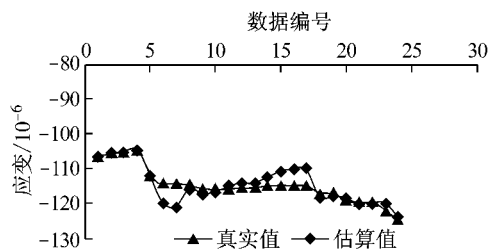


图 8 真实值与估算值的应变曲线图(第三类缺失数据)

Fig.8 The graph of true values and the imputed values (the 3rd kind of missing data)

数据缺失的主要原因归纳为三种,依据数据缺失时  
(下转第 923 页)