

网架结构变形的灰色预测

吕彩忠,廖小辉,胡云世

(衢州学院 建筑工程学院,浙江 衢州 324000)

摘要: 对网架结构特征点进行等时刻观测,利用灰色理论建立网架结构变形的预测模型,对网架结构的变形发展趋势进行预测分析,将预测结果与实际观测结果进行比对,确定灰色理论预测模型适用于网架结构的变形观测。在预测的精度分析中,采用残差检验的方法,通过对预测变形数据的绝对误差和相对误差进行系统分析,认为灰色理论的预测模型对网架结构的变形发展趋势具有较可靠的预见作用。

关键词: 网架结构;变形观测;灰色理论;残差分析

中图分类号: TU356

文献标志码: A

文章编号: 1671-8798(2012)03-0241-07

Forecast about deformation of grid structure by using grey system theory

LÜ Cai-zhong, LIAO Xiao-hui, HU Yun-shi

(Department of Construction Engineering, Quzhou College, Quzhou 324000, China)

Abstract: By observing the feature points of grid structure at the same time interval, The grey system was used to set up the deformation model of grid structure, and then the development trend of the grid structure was forecasted and analyzed. By comparing the results of the forecast and the practical observation, it believed that the gray theory prediction model was suitable for the grid structure of the deformation observation. The forecast accuracy was analyzed by using residual inspection method. The grey system theory prediction model was considered to be reliable and predictable role for the deformation trend of grid structure by analyzing the absolute error and relative error of the deformation prediction data.

Key words: grid structure; deformation observation; grey system theory; residual analysis

网架结构受到风载荷、温度和湿度变化、挤压等因素影响时,都会产生变形。为了可靠判定网架结构的变形是否安全,对网架结构进行变形观测是非常有必要的。笔者以衢州学院图书馆结构为例,在对网

收稿日期: 2012-03-01

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(Y110020);衢州市科技计划项目(20111103)

作者简介: 吕彩忠(1964—),男,浙江省兰溪人,副教授,硕士,主要从事工程测量、建筑设备研究。

架结构进行大量观测的前提下,采用理论分析与实践相结合的方法,研究采用灰色理论对观测数据进行分析和预测的可靠性。

衢州学院图书馆由 2 座主楼构成(图 1),而连接 2 座主楼的结构为网架结构(图 2),设计为焊接球网架,用相贯法^[1-3]焊接施工成形。该建筑物处于衢州学院校园的南北主轴线上,建筑物高度约为 40.5 m,总建筑面积约为 25 275.9 m²。建筑顶面采用 L 形板面结构,板跨度为 65 m,宽为 15 m,板顶标高为 39.1 m。平面布置如图 2 所示,网架结构为 L 形,跨度 65 m,网架高度 1.8~2.0 m,网架侧面设计为干挂花岗岩,底板为纯铝板吊顶,屋顶使用彩钢瓦防水。因此,结构的自重较大,为确保结构的稳定性,对建筑物结构进行变形观测显得尤为重要。



图 1 图书馆外立面
Fig. 1 Library facades

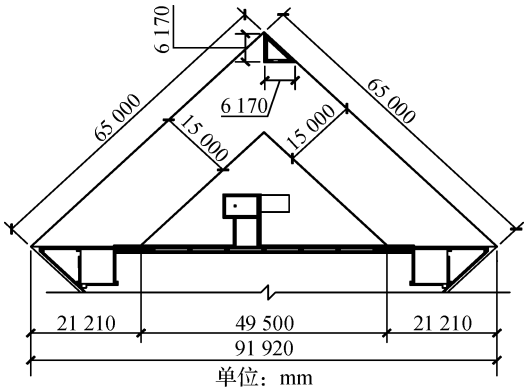


图 2 网架平面布置图
Fig. 2 Flat layout of grid structure

1 变形观测

网架施工完成后,为确保工程质量,必须从拆除施工脚手架开始,对网架进行相应的变形观测。为了对网架结构的变形规律有较好的预测,对该网架结构的变形观测点作了如图 3 的布置,即将监测点均选择为上弦支托顶,测量时基准点位置选在女儿墙顶,并假定基准点标高为±0.000。

采用 NLDI-AL332-1 型自动安平水准仪,对各点进行为期一周的施工监测,为确保数据准确性和可靠性,每次观测均采用三等闭合水准测量。监测时间为每天上午 9:00 与下午 4:00 分别测量 2 次,测量数据见表 1。

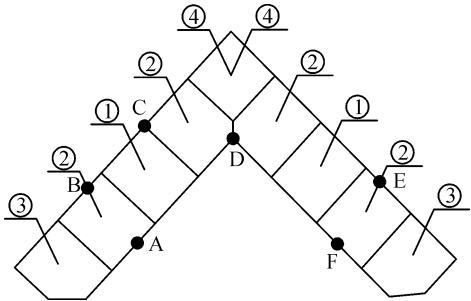


图 3 变形观测点布置
Fig. 3 Arrangement of deformation observation points

2 变形预测

2.1 预测模型的建立

对网架结构的变形观测数据进行分析,可以发现,对结构观测点进行有限次的观测数据,各数据间没有明显的规律,具有不确定性,但其数据变化与时间有关;而灰色理论可以实现对既含有已知信息,又含有不确定信息的系统进行预测,就是对在一定范围内变化的、与时间有关的灰色过程进行预测。由此,建立两者之间的关系,建立 GM(1,1)^[4-7]模型:

设时间序列:

$$X^{(0)} = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n)\}$$

(1)

表 1 施工拆架观测数据汇总表

Table 1 Summary of observational data about stent removalmm

观测时间	A 测点变形	B 测点变形	C 测点变形	D 测点变形	E 测点变形	F 测点变形
9 月 15 日下午	98	170	174	123	201	179
9 月 16 日上午	105	172	165	126	170	206
9 月 16 日下午	108	170	179	131	182	198
9 月 17 日上午	105	182	186	134	186	207
9 月 17 日下午	105	185	188	138	189	206
9 月 18 日上午	107	182	187	140	181	209
9 月 18 日下午	104	180	186	138	181	207
9 月 19 日上午	105	181	185	138	181	206
9 月 19 日下午	104	181	185	138	182	206
9 月 20 日上午	106	180	184	136	181	207
9 月 20 日下午	106	180	184	135	181	206
9 月 21 日上午	105	180	183	136	180	206
9 月 21 日下午	106	181	184	136	181	207
9 月 22 日上午	104	182	181	137	181	207
最大值	108	185	188	140	201	209
平均值	104.86	179.00	182.21	134.71	182.64	204.07

有 n 个观测值。

通过累加生成新的序列为：

$$X^{(1)} = \{X^{(1)}(1), X^{(1)}(2), \cdots, X^{(1)}(n)\}$$

(2)

则 GM(1,1) 模型相应的微分方程为：

$$\frac{dX^{(1)}}{dt} + aX^{(1)} = \mu$$

(3)

式(3)中, α — 发展灰数; μ — 内生控制灰数。

设 $\hat{\alpha}$ 为待估参数向量：

$$\hat{\alpha} = \begin{pmatrix} \alpha \\ \mu \end{pmatrix}$$

(4)

利用最小二乘法求解得：

$$\hat{\alpha} = (B^T B)^{-1} B^T Y_n$$

(5)

式(5)中：

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(X^{(1)}(1) + X^{(1)}(2)) & -\frac{1}{2}(X^{(1)}(2) + X^{(1)}(3)) & \cdots & -\frac{1}{2}(X^{(1)}(n-1) + X^{(1)}(n)) \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}^T$$

$$Y_n = [X^{(0)}(2) \quad X^{(0)}(3) \quad \cdots]^T$$

求解微分方程(3),即可得预测模型：

$$\hat{X}^{(1)}(k+1) = \left[X^{(0)}(1) - \frac{\mu}{a}\right]e^{-ak} + \frac{\mu}{a} \quad k = 0,1,2,\cdots,n$$

(6)

2.2 预测过程

2.2.1 确定原始观测数据序列

$$X^{(0)} = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \cdots, X^{(0)}(n)\}$$

该网架结构的各观测点的允许值为 325 mm,当变形量超过 325 mm时,结构不安全,由此建立各观测点的观测数据序列,如观测点 A 的原始序列为：

$$X_A^{(0)} = \{98,105,108,105,105,107,104,105,104,106,106,105,106,104\}$$

其余观测点数据见表 1。

2.2.2 确定原始观测数据序列对应的时刻序列

对网架结构的实际观测时间如表 1 所示,每次监测的间隔时间为 17 h,为等时刻监测,因此,将监测时间转变成时间序列,并将各观测点数据累加生成新的序列,如表 2 所示。

表 2 监测时间与时间序列转化表

Table 2 Transformation about monitoring time and time sequence								mm
监测时间	时间序列	A 点	B 点	C 点	D 点	E 点	F 点	
9 月 15 日下午	1	98	170	174	123	201	179	
9 月 16 日上午	2	203	342	339	249	371	385	
9 月 16 日下午	3	311	512	518	380	553	583	
9 月 17 日上午	4	416	694	704	514	739	790	
9 月 17 日下午	5	521	879	892	652	928	996	
9 月 18 日上午	6	628	1 061	1 079	792	1 109	1 205	
9 月 18 日下午	7	732	1 241	1 265	930	1 290	1 412	
9 月 19 日上午	8	837	1 422	1 450	1 068	1 471	1 618	
9 月 19 日下午	9	941	1 603	1 635	1 206	1 653	1 824	
9 月 20 日上午	10	1 047	1 783	1 819	1 342	1 834	2 031	
9 月 20 日下午	11	1 153	1 963	2 003	1 477	2 015	2 237	
9 月 21 日上午	12	1 258	2 143	2 186	1 613	2 195	2 443	
9 月 21 日下午	13	1 364	2 324	2 370	1 749	2 376	2 650	
9 月 22 日上午	14	1 468	2 506	2 551	1 886	2 557	2 857	

2.2.3 建立 GM(1,1)模型

对观测点 A:

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(X^{(1)}(1) + X^{(1)}(2)) & -\frac{1}{2}(X^{(1)}(2) + X^{(1)}(3)) & \cdots & -\frac{1}{2}(X^{(1)}(n-1) + X^{(1)}(n)) \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}^T =$$
$$\begin{bmatrix} -150.5 & -257 & -363.5 & -468.5 & -574.5 & -680 & -784.5 & -889 & -994 & 1\,100 & -1\,205.5 & -1\,311 & -1\,416 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^T$$
$$Y_n = [X^{(0)}(2) \quad X^{(0)}(3) \quad \cdots \quad X^{(0)}(n)]^T =$$
$$[105 \quad 108 \quad 105 \quad 105 \quad 107 \quad 104 \quad 105 \quad 104 \quad 106 \quad 106 \quad 105 \quad 106 \quad 104]^T$$
$$\hat{\alpha} = (B^T B)^{-1} B^T Y_n = \begin{bmatrix} 0.000\,8 \\ 105.998\,3 \end{bmatrix}$$

同理,求得其他各点的 $\hat{\alpha}$ 值,见表 3。

表 3 各观测点 $\hat{\alpha}$ 值

Table 3 $\hat{\alpha}$ value of each observation point

监测点	α	μ	监测点	α	μ
A	0.000 8	105.998 3	D	-0.003 3	132.350 0
B	-0.002 7	176.102 7	E	-0.000 4	180.650 8
C	-0.002 7	179.249 6	F	-0.001 1	204.307 9

2.2.4 预测未来某一时刻的变形值

由式(6)得各观测点的预测模型如下:

$$\hat{X}_A^{(1)}(k+1) = \left[98 - \frac{105.998\,3}{0.000\,8} \right] e^{-0.000\,8k} + \frac{105.998\,3}{0.000\,8} \tag{7}$$

$$\hat{X}_B^{(1)}(k+1) = \left[170 - \frac{176.102\,7}{-0.002\,7} \right] e^{0.002\,7k} + \frac{176.102\,7}{-0.002\,7} \tag{8}$$

$$\hat{X}_C^{(1)}(k+1) = \left[174 - \frac{179.246\,9}{-0.002\,7} \right] e^{0.002\,7k} + \frac{179.246\,9}{-0.002\,7} \tag{9}$$

$$\hat{X}_D^{(1)}(k+1) = \left[123 - \frac{132.350\,0}{-0.003\,3} \right] e^{0.003\,3k} + \frac{132.350\,0}{-0.003\,3} \tag{10}$$

$$\hat{X}_E^{(1)}(k+1)=\left[201-\frac{180.650\ 8}{-0.000\ 4}\right]e^{0.000\ 4k}+\frac{180.650\ 8}{-0.000\ 4}$$

(11)

$$\hat{X}_F^{(1)}(k+1)=\left[179-\frac{204.307\ 9}{-0.001\ 1}\right]e^{0.001\ 14k}+\frac{204.307\ 9}{-0.001\ 1}$$

(12)

由式(7)~(12)对 A~F 观测点的变形进行预测,结果见表 4。将表 4 累减运算,得到实际变形预测值,见表 5。

表 4 灰色模型预测结果

Table 4 Prediction results by grey modelmm

监测时间	时间序列	A 点	B 点	C 点	D 点	E 点	F 点
9 月 16 日上午	2	203.877 5	346.800 3	353.959 5	255.975 2	381.767 4	383.617 3
9 月 16 日下午	3	309.670 4	524.078 6	534.405 6	389.389 9	562.607 0	588.459 8
9 月 17 日上午	4	415.378 7	701.836 1	715.339 6	523.245 6	743.519 0	793.527 8
9 月 17 日下午	5	521.002 4	880.074 3	896.762 7	657.543 8	924.503 4	998.821 5
9 月 18 日上午	6	626.541 7	1 058.794 0	1 078.676 0	792.285 9	1 105.560 0	1 204.341 0
9 月 18 日下午	7	731.996 6	1 237.998 0	1 261.082 0	927.473 4	1 286.690 0	1 410.087 0
9 月 19 日上午	8	837.367 1	1 417.685 0	1 443.980 0	1 063.108 0	1 467.891 0	1 616.059 0
9 月 19 日下午	9	942.653 4	1 597.859 0	1 627.374 0	1 199.190 0	1 649.165 0	1 822.258 0
9 月 20 日上午	10	1 047.856 0	1 778.520 0	1 811.262 0	1 335.723 0	1 830.512 0	2 028.684 0
9 月 20 日下午	11	1 152.973 0	1 959.669 0	1 995.649 0	1 472.707 0	2 011.931 0	2 235.337 0
9 月 21 日上午	12	1 258.007 0	2 141.308 0	2 180.533 0	1 610.143 0	2 193.423 0	2 442.218 0
9 月 21 日下午	13	1 362.957 0	2 323.438 0	2 365.918 0	1 748.034 0	2 374.988 0	2 649.326 0
9 月 22 日上午	14	1 467.823 0	2 506.060 0	2 551.803 0	1 886.381 0	2 556.625 0	2 856.662 0

表 5 实际变形预测结果

Table 5 Prediction results of actual deformationmm

监测时间	时间序列	A 点	B 点	C 点	D 点	E 点	F 点
9 月 16 日上午	2	105.877 5	176.800 3	179.959 5	132.975 2	180.767 4	204.617 3
9 月 16 日下午	3	105.792 9	177.278 3	180.446 1	133.414 7	180.839 7	204.842 5
9 月 17 日上午	4	105.708 3	177.757 6	180.933 9	133.855 7	180.912 0	205.068 0
9 月 17 日下午	5	105.623 7	178.238 2	181.423 1	134.298 2	180.984 4	205.293 7
9 月 18 日上午	6	105.539 3	178.720 1	181.913 6	134.742 1	181.056 8	205.519 6
9 月 18 日下午	7	105.454 9	179.203 3	182.405 5	135.187 5	181.129 2	205.745 8
9 月 19 日上午	8	105.370 5	179.687 8	182.898 6	135.634 3	181.201 7	205.972 3
9 月 19 日下午	9	105.286 3	180.173 6	183.393 1	136.082 7	181.274 2	206.199 0
9 月 20 日上午	10	105.202 1	180.660 7	183.888 9	136.532 5	181.346 7	206.425 9
9 月 20 日下午	11	105.118 0	181.149 1	184.386 1	136.983 8	181.419 3	206.653 1
9 月 21 日上午	12	105.033 9	181.638 9	184.884 6	137.436 6	181.491 9	206.880 5
9 月 21 日下午	13	104.949 9	182.130 0	185.384 5	137.890 9	181.564 5	207.108 2
9 月 22 日上午	14	104.866 0	182.622 4	185.885 7	138.346 7	181.637 1	207.336 2

2.3 预测精度检验

为了评价灰色预测理论在网架结构变形观测上的精度,可以采用残差检验^[8-10]来校验预测的精度,即按式(7)~(12)计算出 $\hat{X}^{(1)}(i)$,如表 4 所示,并按式(13)将 $\hat{X}^{(1)}(i)$ 累减生成了 $\hat{X}^{(0)}(i)$,如表 5 所示,由式(14)求得绝对误差序列,见表 6。

$$\hat{X}^{(0)}(i)=\hat{X}^{(1)}(i)-\hat{X}^{(1)}(i-1)$$

(13)

$$\Delta^{(0)}(i)=|X^{(0)}(i)-\hat{X}^{(0)}(i)|\quad i=1,2,\cdots,n$$

(14)

$$\varphi(i)=\frac{\Delta^{(0)}(i)}{X^{(0)}(i)}\times 100\%\quad i=1,2,\cdots,n$$

(15)

按式(15)可以求得预测结果的相对误差序列,见表 6。

表 6 预测结果的误差序列

Table 6 Error sequence of prediction results

mm

监测时间	时间 序列	A 点		B 点		C 点		D 点		E 点		F 点	
		绝对 误差	相对 误差	绝对 误差	相对 误差	绝对 误差	相对 误差	绝对 误差	相对 误差	绝对 误差	相对 误差	绝对 误差	相对 误差
9.16 上午	2	0.878	0.84	4.800	2.791	14.960	9.07	6.98	5.54	10.770	6.334	1.383	0.671
9.16 下午	3	2.207	2.04	7.278	4.281	1.446	0.81	2.41	1.84	1.160	0.638	6.843	3.456
9.17 上午	4	0.708	0.67	4.242	2.331	5.066	2.72	0.14	0.11	5.088	2.735	1.932	0.933
9.17 下午	5	0.624	0.59	6.762	3.655	6.577	3.50	3.70	2.68	8.016	4.241	0.706	0.343
9.18 上午	6	1.461	1.37	3.280	1.802	5.086	2.72	5.26	3.76	0.057	0.031	3.480	1.665
9.18 下午	7	1.455	1.40	0.797	0.443	3.595	1.93	2.81	2.04	0.129	0.071	1.254	0.606
9.19 上午	8	0.371	0.35	1.312	0.725	2.101	1.14	2.37	1.71	0.202	0.111	0.028	0.013
9.19 下午	9	1.286	1.24	0.826	0.457	1.607	0.87	1.92	1.39	0.726	0.399	0.199	0.097
9.20 上午	10	0.798	0.75	0.661	0.367	0.111	0.06	0.53	0.39	0.347	0.192	0.574	0.277
9.20 下午	11	0.882	0.83	1.149	0.638	0.386	0.21	1.98	1.47	0.419	0.232	0.653	0.317
9.21 上午	12	0.034	0.03	1.639	0.911	1.885	1.03	1.44	1.06	1.492	0.829	0.881	0.427
9.21 下午	13	1.050	0.99	1.130	0.624	1.384	0.75	1.89	1.39	0.564	0.312	0.108	0.052
9.22 上午	14	0.866	0.83	0.622	0.342	4.886	2.70	1.35	0.98	0.637	0.352	0.336	0.162

预测数据与实际观测数据对比如图 4 所示。

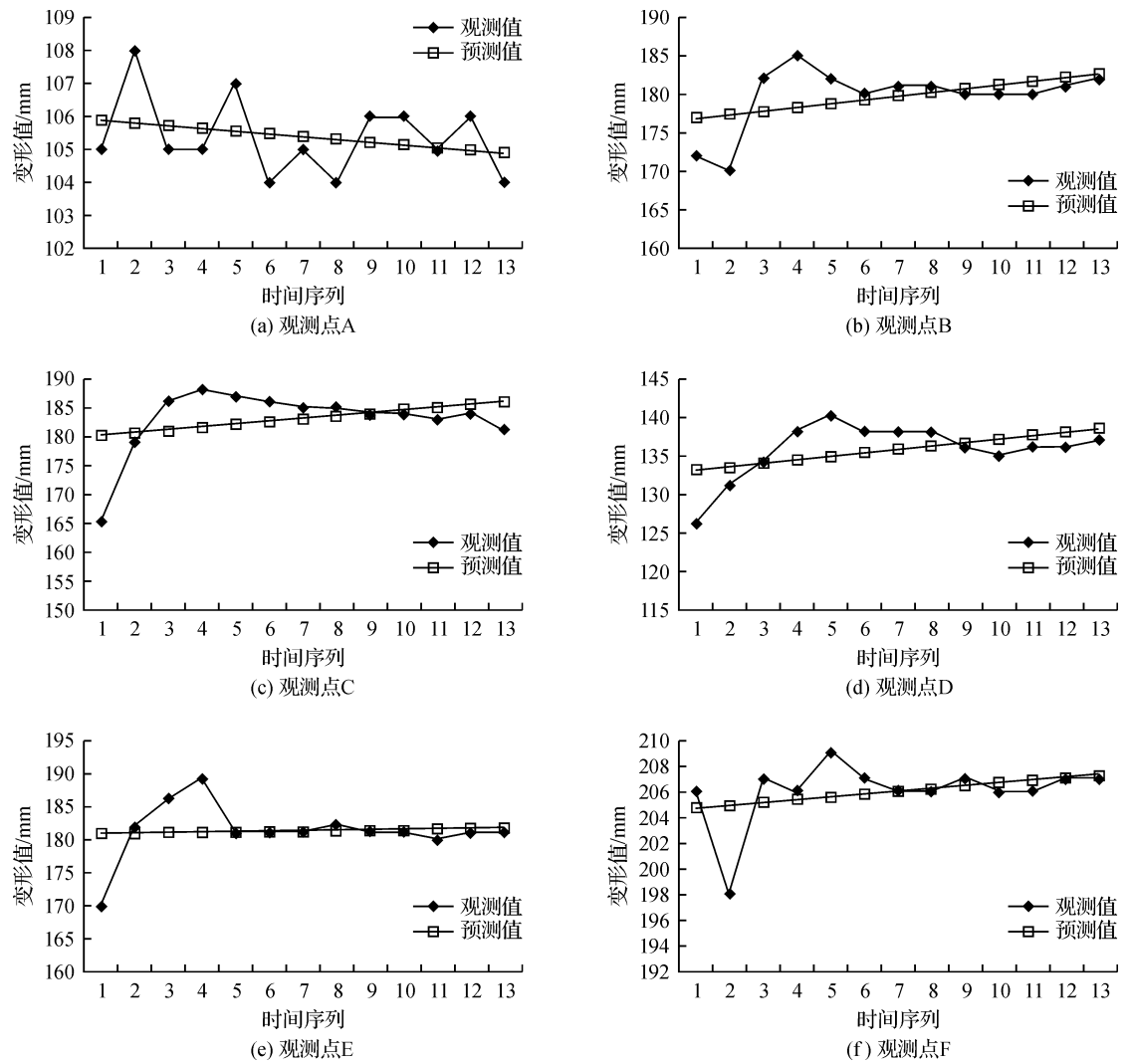


图 4 观测数据与预测数据对比

Fig. 4 Comparison of observational data and prediction data

分析表 6 与图 4 可以看出,用灰色理论预测的变形结果与实际观测的变形结果基本吻合,其中 9 月 16 日上午观测点 C 的观测值与预测值相差最大,达到 9.07 mm,平均相对误差最大值在观测点 C 处,达到 2.1 mm。由此可见,灰色理论预测模型适用于网架结构的变形观测。

3 结 语

通过采用灰色理论,对衢州学院图书馆网架结构建立变形预测模型,通过对预测数据的分析,验证了该方法对网架结构变形趋势具有较好的控制作用;利用残差分析来评价网架结构预测模型的精度等级,从理论上证明了灰色理论预测模型在网架结构上的适用性;预测模型采用的原始观测数据为等间隔观测数据,即两次观测间隔时间为 17 h,网架结构的变形预测模型同样适用于非等时刻观测。该观测方法可以作为一般网架结构变形的灰色预测分析的参考。

参考文献:

[1] 柳会红,王济川,王海波. 组合网架结构的加固分析与处理对策[C]//柳炳康,吴胜兴,周安. 工程结构鉴定与加固改造. 长沙:湖南大学出版社,2002:399-402.

[2] 尹德钰,赵红华. 网架质量事故实例及原因分析[J]. 建筑结构学报,1998,19(1):15-23.

[3] 牛书静,郭海针. 螺栓球节点网架加工与安装质量问题的加固处理[J]. 河南机电高等专科学校学报,2004,12(4):31-32.

[4] 傅立. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京:科学技术文献出版社,1992.

[5] 易德生,郭萍. 灰色理论与方法:提要、题解、程序、应用[M]. 北京:石油工业出版社,1992.

[6] 袁嘉祖. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,1991.

[7] 高翥. 基于灰色系统的桥梁长期变形预测研究[J]. 公路交通技术,2011(4):84-87.

[8] 杨瑞波,陈建宏,郑海力,等. 残差修正 GM(1,1)模型在煤矿事故预测中的应用[J]. 矿业研究与开发,2011,31(1):73-76.

[9] 李博峰,沈云中. 基于等效残差积探测粗差的方差-协方差分量估计[J]. 测绘学报,2011,40(1):10-14,32.

[10] 牛连强,冯海文,吴澎. 利用残差控制的快速圆弧生成与反走样算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2011,23(2):232-239.