

新陈代谢模型在特大桥施工监控中的应用研究^{*}

陈睿¹, 李旭², 何卫东¹, 薛旭涛¹, 徐杰¹, 阙正义¹, 冯晓²

(1. 中建四局第一建筑工程公司, 广东 广州 510900; 2. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074)

摘要: 运用灰色模型中的新陈代谢 GM(1,1) 模型对连续梁桥施工挠度进行预测, 以广东汕头莲阳河特大桥施工为例, 采用该模型预测施工中悬臂梁段的高程变化。结果表明, 与传统 GM(1,1) 模型相比, 新陈代谢 GM(1,1) 模型预测结果的平均相对误差更小, 预测精度更高, 可用于桥梁施工挠度预测。

关键词: 桥梁; 施工监控; 线形预测; 灰色理论; 新陈代谢 GM(1,1) 模型

中图分类号: U446.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)01-0144-04

连续梁桥建设过程中, 挠度和平面位置是需重点监控的内容, 主要采用 Kalman 滤波法、灰色控制理论、神经网络等方法^[1-3]。连续梁桥大多采用悬臂现浇法施工, 施工步骤较多, 各结构受力较复杂, 且节段与节段之间互相影响。灰色系统理论以部分信息已知、部分信息未知的贫信息不确定性系统为研究对象, 通过对部分已知信息的挖掘提取有价值的信息, 实现对系统运行行为、演化规律的正确描述和有效监控^[4]。GM 系列模型是灰色预测理论的基本模型, 其中 GM(1,1) 模型以其适用范围广、拓展性强等优点得到广泛应用^[5]。灰色系统理论在桥梁施工控制中主要用于状态预测, 如王辉等分析了灰色系统理论应用于大跨度 T 形刚构桥施工中的适用性和可行性^[6]; 王赞芝等应用灰色系统理论确定了高速铁路斜交连续梁桥的施工预拱度^[7]; 包仪军等对原始序列进行优化, 采用改进灰色 GM(1,1) 模型进行大跨度桥梁施工控制^[8]; 程霄翔等将灰色理论应用于连续梁桥悬臂施工中应力预测控制^[9]; 刘来君等将传统 GM(1,1) 模型中平均相对误差最小准则下的参数估计问题转化为线性规划问题, 对桥梁施工挠度进行了预测^[10]; 包龙生等将 GM(1,1) 模型与累积法相结合进行桥梁施工监控^[11]。传统 GM(1,1) 模型通常是利用全部数据进行建模预测, 连续梁桥施工中, 施工梁段会对已完成梁段产生影响, 最初的梁段数据的可靠性降低。本文将新陈代谢 GM(1,1) 模型应用于连续梁桥悬臂施工控制中, 随着工程施工进度实时更新, 以提高施工挠度预测精度。

1 新陈代谢模型

1.1 GM(1,1) 模型

设序列 $X^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n))$, 其中 $x^{(0)}(k) \geq 0, k = 1, 2, \dots, n (n \geq 4)$, 并定义 $X^{(1)}$ 为 $X^{(0)}$ 的一次累加生成序列 (1-AGO), 即 $X^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n))$, 其中 $x^{(1)}(k)$ 按式(1)计算, 则 $Z^{(1)} = (z^{(1)}(2), z^{(1)}(3), \dots, z^{(1)}(n))$, 其中 $Z^{(1)}(k)$ 按式(2)计算。

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i) \quad (1)$$

$$Z^{(1)}(k) = 0.5x^{(1)}(k) + 0.5x^{(1)}(k-1) \quad (2)$$

称 $x^{(0)}(k) + ax^{(1)}(k) = b$ 为 GM(1,1) 模型的均值形式。其中: 模型参数 a 为发展系数; b 为灰色作用量, 其实质是一个差分方程。对均值形式运用最小二乘法进行估计, 得参数向量:

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (3)$$

式中:

$$B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix} \quad (4)$$

定义:

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b \quad (5)$$

式(5)即为 GM(1,1) 的均值形式 $x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b$ 的白化微分方程, 也叫影子方程。均值 GM(1,1) 模型的时间响应式为:

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(42074004)

$$\hat{x}^{(1)}(k) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right) e^{-a(k-1)} + \frac{b}{a} \quad (6)$$

式(6)的累减还原式为:

$$\hat{x}^{(0)}(k) = \hat{x}^{(1)}(k) - \hat{x}^{(1)}(k-1) \quad (7)$$

对应 $X^{(0)}$ 的时间响应式为:

$$\hat{x}^{(0)}(k) = (1 - e^a) \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right) e^{-a(k-1)} \quad (8)$$

式中: $k=1, 2, \dots, n$; $x^{(0)}(1)$ 为初始值; a, b 为最小二乘法估计得到的参数。

1.2 新陈代谢 GM(1,1) 模型

传统 GM(1,1) 模型采用的是某时刻或某序列前的全部数据,随着时间的推移,系统的发展会受到随机扰动因素的影响,精度较高的仅是最近的几期数据,模型预测精度受到影响。新陈代谢 GM(1,1) 模型在纳入新数据的同时,剔除距离新数据最远的最陈旧的数据,有效提高预测精度。

设原始数据序列为:

$$X^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)) \quad (9)$$

新陈代谢 GM(1,1) 随着数据序列的更新纳入新的数据 $x^{(0)}(n+1)$, 同时去掉数据序列 $x^{(0)}(1)$ 即最陈旧的信息。如此反复,依次递补。其中数据序列 n 的取值同传统 GM(1,1) 模型,不少于 4。

1.3 模型检验

以相对误差为指标检验灰色预测模型的精度。原始数据序列即式(9)的预测模型序列为:

$$\hat{X}^{(0)} = (\hat{x}^{(0)}(1), \hat{x}^{(0)}(2), \dots, \hat{x}^{(0)}(n)) \quad (10)$$

残差序列为:

$$\begin{aligned} \epsilon(0) &= (\epsilon(1), \epsilon(2), \dots, \epsilon(n)) = (x^{(0)}(1) - \\ &\quad \hat{x}^{(0)}(1), x^{(0)}(2) - \hat{x}^{(0)}(2), \dots, \\ &\quad x^{(0)}(n) - \hat{x}^{(0)}(n)) \end{aligned} \quad (11)$$

相对误差序列为:

$$\Delta = \left(\left| \frac{\epsilon(1)}{x^{(0)}(1)} \right|, \left| \frac{\epsilon(2)}{x^{(0)}(2)} \right|, \dots, \left| \frac{\epsilon(n)}{x^{(0)}(n)} \right| \right) = \{\Delta_k\}_1^n \quad (12)$$

平均相对误差为:

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \Delta_k \quad (13)$$

取相对误差限值为 $\alpha=0.01$, 若 $\bar{\Delta} < \alpha$ 且 $\Delta_n < \alpha$, 称模型为残差合格模型。

2 应用实例

2.1 工程概况

广东省汕头市莲阳河特大桥全长 1 459.6 m, 按

上下行分离的两幅桥设计, 左右幅单幅标准宽度 13.75 m, 跨河部分因设置人行道加宽至 17.75 m, 两幅桥净距 1.5 m。上部结构形式多样, 分别为 25 m 跨径桥面连续的预应力混凝土小箱梁、31.1~45.0 m 跨径桥面连续的预应力 T 梁、25.0~37.3 m 跨径现浇箱梁及 125 m 主跨变截面连续箱梁。桥梁设计荷载为公路—I 级。上部结构左幅为 (70.6+125.0+68.7) m、右幅为 (71.4+125.0+69.0) m 预应力混凝土连续箱梁, 采用挂篮悬臂现浇法施工。悬臂梁段见图 1。

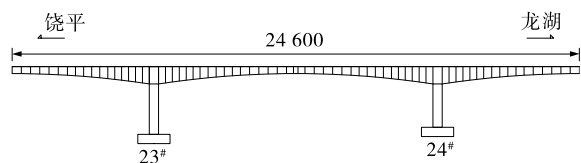


图 1 莲阳河特大桥悬臂梁段简图(单位:cm)

主桥桥墩共计 8 个, 其中 22#、25# 过渡墩为采用桩基承台基础的 7.1 m×1.8 m 板式墩, 23#、24# 主墩为采用桩基承台基础的 $\phi 6.0$ m 变截面柱式空心薄壁墩。该桥 0# 梁段长度为 4.0 m, 1#~17# 现浇梁段长度分别为 3.0 m、3.5 m、4.0 m, 中跨合龙段梁段长度为 2.0 m。最大悬臂浇筑梁块重 2 157.7 kN。梁高按二次抛物线变化。

2.2 施工监控

悬臂梁桥施工过程中, 线形控制非常重要, 需分析每一施工阶段、每一施工步骤的结构挠度变化状态, 确定逐步完成的挠度曲线。在该桥各梁段桥面 3 个点和箱梁底部 2 个点埋设钢筋作为高程观测点, 根据工况进行实时监控。

悬臂梁施工中影响挠度的主要因素有梁段混凝土自重、挂篮及梁上其他施工荷载作用、张拉悬臂预应力筋的作用等, 另外, 混凝土弹性压缩、收缩、徐变、预应力筋松弛、孔道摩擦预应力损失等也会引起挠曲变形。为保证施工安全及成桥后精度, 对 23#、24# 墩悬臂现浇段进行施工监控。

2.3 建立模型

23# 墩左幅小里程悬臂节段划分见图 2。主要利用 23# 墩左幅小里程 2 号点 3#~14# 梁段的数据进行分析。分别以传统 GM(1,1) 和新陈代谢 GM(1,1) 建立模型, 考虑到施工过程中梁段之间的互相影响, 初始值选择序列的第一个值。由于传统 GM(1,1) 没有剔除数据, 初始值选择建模序列的第一个值, 即固定不变。

新陈代谢 GM(1,1)模型初始值为剔除旧数据后的第一个值,其值不再固定。建模过程如下:以 3[#]~6[#] 梁段数据建立模型,预测 7[#] 梁段;随着施工

的进行,剔除 3[#] 梁段的数据,引入 7[#] 梁段的实测数据,建立模型预测 8[#] 梁段;以此类推,进行新陈代谢 GM(1,1)建模预测。

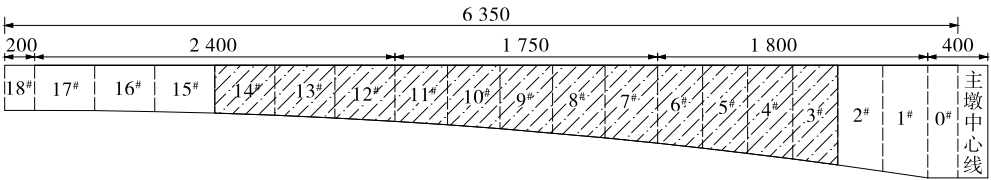


图 2 23[#]墩左幅小里程悬臂节段划分(单位:cm)

首先按照建模过程进行累加和构造背景值,按最小二乘法估计得到新陈代谢 GM(1,1)模型参数(见表 1)。

表 1 新陈代谢模型参数

模型	发展系数 a_i	灰色作用量 b_i
模型 I	0.001 142	23.713 26
模型 II	0.000 762	23.662 38
模型 III	0.000 212	23.624 84
模型 IV	0.000 487	23.623 09
模型 V	0.000 848	23.638 03
模型 VI	0.000 763	23.606 37
模型 VII	0.001 657	23.634 27
模型 VIII	0.002 469	23.629 95

模型 I 为利用 3[#]~6[#] 梁段数据建立的模型,预测 7[#] 梁段;模型 II 为剔除 3[#] 梁段数据、纳入 7[#] 梁段数据建立的模型,预测 8[#] 梁段;以此类推。最后将表 1 中参数 a_i 、 b_i 值代入式(14),得到对应梁

段的预测值。

$$\hat{x}_i^{(0)}(4) = (1 - e^{a_{i-6}}) \left(x^{(0)}(i-4) - \frac{b_{i-6}}{a_{i-6}} \right) e^{-4a_{i-6}} \quad (14)$$

式中: $\hat{x}_i^{(0)}$ 为预测值; i 为梁段号。

传统 GM(1,1)采用式(8)进行预测。两模型的预测结果见图 3、表 2。从图 3、表 2 可看出:相对于传统 GM(1,1)模型,新陈代谢 GM(1,1)模型的预测值整体上更接近于实测值,预测效果更好。

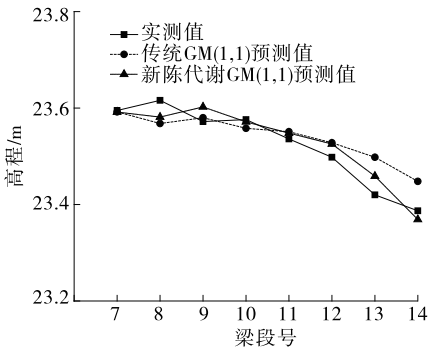


图 3 模型预测值与实测值对比

表 2 23[#]墩左幅小里程 7[#]~14[#] 梁段 2 号点预测值与实测值对比

梁段号	实测值/m	GM(1,1)模型预测结果			新陈代谢 GM(1,1)模型预测结果		
		预测值/m	差值/m	相对误差	预测值/m	差值/m	相对误差
7	23.595	23.592	0.003	0.000 139	23.592	0.003	0.000 139
8	23.616	23.568	0.048	0.002 028	23.581	0.035	0.001 467
9	23.572	23.580	-0.008	0.000 361	23.602	-0.030	0.001 286
10	23.576	23.558	0.018	0.000 740	23.571	0.005	0.000 196
11	23.536	23.551	-0.015	0.000 641	23.548	-0.012	0.000 511
12	23.498	23.528	-0.030	0.001 273	23.525	-0.027	0.001 168
13	23.420	23.498	-0.078	0.003 326	23.459	-0.039	0.001 655
14	23.387	23.448	-0.061	0.002 621	23.369	0.018	0.000 773

根据预测结果对 2 种模型进行检验,新陈代谢 GM(1,1)、传统 GM(1,1)模型的平均相对误差分别为 0.000 899、0.001 391。新陈代谢 GM(1,1)模型的平均相对误差远小于传统 GM(1,1)模型的平均

相对误差,且远小于 0.01,精度达到一级。相对于传统 GM(1,1)模型,新陈代谢 GM(1,1)模型的预测精度更高。新陈代谢 GM(1,1)模型的残差最小为 3 mm,虽然部分残差达到 3 cm,但从实际应用的角

度来看能为施工提供一定参考,可根据预测结果分析哪些梁段误差较大。对于差值较大的梁端通过二次测量消除测量误差并进一步建立模型进行预测,提高模型预测精度。

3 结论与讨论

本文采用新陈代谢 GM(1,1)模型对莲阳河特大桥悬臂梁段进行施工监控,考虑到施工梁段对已完成梁段的影响,选择模型第一个值为初始值,充分利用灰色系统贫信息的优势,结合悬臂施工特点,完成 4 个梁段后即可进行建模,并对各梁段张拉后的标高进行控制和预测。结果显示,传统 GM(1,1)模型和新陈代谢 GM(1,1)模型在桥梁施工控制初期对梁段标高的预测精度较高,新陈代谢 GM(1,1)的整体精度比传统模型高,预测效果更好。

若要进一步提高模型预测精度,不能忽略未施工梁段对已施工梁段的影响,完成一个梁段后需要重新测量已施工梁段的高程变化,工作量大,实现较困难。可对模型进行优化,并引入结构理论,考虑材料、受力等的影响进一步提高预测精度。

参考文献:

- [1] 包龙生,宋涛,于玲,等.基于 Kalman 滤波法与正装分析法对桥梁施工控制研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2015,31(4):653—660.
- [2] 张熙胤,陈兴冲,王常峰.多变量 GM(1, n)模型在桥梁

施工挠度控制中的应用[J].世界桥梁,2013,41(5):76—80.

- [3] 刘胜春,张开银,沈成武,等.神经网络方法在大跨度桥梁施工预拱度控制中的应用[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2001,25(3):270—272.
- [4] 邓聚龙.灰理论基础[M].武汉:华中科技大学出版社,2002:361—369.
- [5] 刘思峰.灰色系统理论及其应用[M].9 版.北京:科学出版社,2021.
- [6] 王辉,林基础.灰色系统理论在大跨度 T 型刚构桥施工中的应用研究[J].公路工程,2018,43(3):141—145.
- [7] 王赞芝,张锴,王森.用灰色系统理论确定高速铁路桥梁施工预拱度[J].铁道科学与工程学报,2015,12(3):482—488.
- [8] 包仪军,王常峰,赵继康.基于改进灰色预测 GM(1,1)模型的大跨度桥梁施工控制[J].铁道建筑,2016,56(2):18—22.
- [9] 程霄翔,韩晓林,缪长青,等.基于灰色理论悬臂施工中连续梁桥的应力预测与控制[J].世界桥梁,2009,37(4):46—49.
- [10] 刘来君,沈艺宁,张智举,等.基于线性规划的灰色模型在桥梁监控中的应用[J].公路,2021,66(11):101—106.
- [11] 包龙生,周子博,于玲.基于累积法的 GM(1,1)模型在桥梁施工监控上的应用[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2018,34(2):239—246.

收稿日期:2022-01-08

(上接第 143 页)

(2) 部分吊杆索力变化较大,建议定期检测,并在适当时机进行索力调整。

(3) 根据桥梁检测结果,建议更换部分吊杆锚头保护罩,对混凝土裂缝进行封闭处理,对混凝土锈胀露筋及破损进行修复。

参考文献:

- [1] 程晓东.异形拱桥病害分析及吊杆更换方法研究[J].公路与汽运,2021(5):128—132.
- [2] 杨吉新,梁亚兰,余越,等.横撑对大跨度钢管砼拱桥稳定性的影响分析[J].公路与汽运,2018(5):118—120.
- [3] 解威威,杨绿峰,王建军,等.钢管混凝土桁式拱桥稳定承载力的参数分析[J].中外公路,2018,38(6):83—86.
- [4] 周海成.某下承式砼系杆拱桥静动力试验研究[J].公路与汽运,2021(5):142—148.
- [5] 龚江烈,周阳帆.既有桥梁承载能力评定方法的探讨

[J].公路工程,2015,40(1):201—204.

- [6] 陈俊,张宇胜,苏永华.基于静载试验的既有石拱桥技术状态评定[J].铁道建筑,2015(2):16—20.
- [7] 张召金,王伟笔,鲍雅军.某双曲拱桥加固案例分析[J].公路,2015,60(8):107—109.
- [8] 孟闻远,孟枫林.中承式系杆拱桥承载力评定与加固技术研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2015,36(1):33—37.
- [9] 王勤征,张华刚,陈红鸟,等.钢筋混凝土桁架拱桥承载力加固的力学性能对比分析[J].贵州大学学报(自然科学版),2021,38(5):74—80.
- [10] 杨若斌,黄雨忠.哑铃形钢管混凝土拱桥承载力分析及对策[J].公路,2018,63(7):49—54.
- [11] 江京翼,周志祥,王邵锐.特大跨钢箱桁架拱桥极限承载力的数值模拟[J].兰州理工大学学报,2016,42(5):128—132.

收稿日期:2021-11-23