

# 基于灰色系统理论的铁路混合梁斜拉桥施工控制研究

孟盼,冯仲仁,陈百奔

(武汉理工大学 土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430070)

**摘要:**为提高铁路混合梁斜拉桥施工控制精度,减小施工控制误差,该文以主跨 260 m 的湖北岳口汉江特大桥为研究背景,基于灰色系统理论构建 GM(1,1)灰色预测模型,采用 Midas/Civil 模拟全桥施工全过程,对主梁立模标高和斜拉索初张索力进行预测修正。通过对比分析主梁标高、斜拉索索力的理论值、实测值及灰色系统理论预测值,得出以下结论:①该桥灰色模型预测标高与实测标高吻合度较好,最大偏差仅 24 mm;灰色模型标高预测值介于理论值和实测值之间,利用灰色模型对立模标高进行修正可以减小实际标高与理论标高之间的偏差;②中跨斜拉索索力的理论值、实测值和灰色系统理论预测值三者差值较小,最大偏差为 4.91%;采用灰色系统理论对主塔附近的索力进行预测时精度较高。

**关键词:**混合梁斜拉桥;灰色系统理论;施工控制;标高;索力

由于大跨径斜拉桥结构柔度大、跨径长,施工精度要求高,施工过程易受温度、临时荷载等因素的影响,为保证桥梁成桥状态下结构线形与内力符合设计要求,桥梁施工控制有着重要的意义。特别是针对大跨径铁路混合梁斜拉桥,为了保证列车通行安全,结构成桥线形控制要求尤为严格。当前,常用的施工控制方法主要包括:最小二乘法、灰色系统理论、Kalman 滤波法、人工神经网络法。由于大跨径铁路混合梁斜拉桥施工影响参数如梁段自重、斜拉索索力、混凝土收缩徐变、材料弹性模量等都具有一定随机变化性,而灰色系统理论对随机不确定性事物发展的预测描述精度较高,因而该方法在大跨径斜拉桥施工控制中广泛应用。

20 世纪 80 年代,邓聚龙、刘思峰等首先提出灰色理论,并指出灰色预测模型 GM(1,1)的适用范围;姚荣研究了样本大小和模型阶数对灰色系统预测模型的精度影响;章继树以三岸邕江特大桥为工程实例,对比分析了有限元模型理论计算值、灰色系统预测值以及现场实测数据,结果表明灰色理论预测结果与现场实际结果吻合较好;于天来等将灰色系统理论应用于连续刚构桥施工监控中,并取得了良好的施工控制效果;谭国金等基于斜拉桥索力状态灰色系统模型,以灰色关联度为评价指标,研究了温差对斜拉索索力的影响程度;刘庆昌等应用马尔科夫链对预测误差的残差序列进行再预测,修正了灰色预测模型并考虑了设计参

数的敏感性;王辉等以大跨度 T 形刚构桥为工程背景,建立了多个灰色预测模型,研究了施工过程中的主要变形;QS Sun 应用灰色系统理论,对大跨度预应力混凝土连续刚构桥灰色模型 GM(1,1)进行了残差修正。综上所述,灰色理论在桥梁施工控制中的应用日益广泛,但对大跨径铁路混合梁斜拉桥的应用研究较为欠缺,并且混合梁斜拉桥边跨和中跨材料特性完全不同,施工控制更为复杂,因此研究灰色理论系统应用于混合梁斜拉桥中具有重要意义。

该文以湖北岳口汉江特大斜拉桥为工程背景,采用 Midas/Civil 有限元建立全桥模型,利用灰色系统建立 GM(1,1)预测模型,对施工过程中斜拉桥主梁立模标高以及斜拉索初张索力进行预测。

## 1 基于灰色系统理论的斜拉桥施工监控系统

假设第  $k$  施工阶段施工完成,结构状态已知,利用灰色模型对  $k+1$  施工阶段的立模标高和斜拉索初张索力进行预测。

### 1.1 GM(1,1)灰色模型建立

设结构原始数据序列为:  $\{x(i)\} = \{x(1), x(2), \dots, x(k)\}$ , 对  $\{x(i)\}$  进行累加生成,可得:

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

对  $\{X^{(1)}\}$  建立 GM(1,1) 灰色预测模型:

$$\frac{dX^{(1)}}{dt} + aX^{(1)} = u \quad (2)$$

上式为一阶一个变量的微分方程模型。设参数列

为  $\hat{\alpha}, \hat{\alpha} = \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix}$ , 根据最小二乘法求解  $\hat{\alpha}$ , 其中:

$$\hat{\alpha} = (B^T B)^{-1} B^T y_N \quad (3)$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}[X^{(1)}(1) + X^{(1)}(2)] & 1 \\ -\frac{1}{2}[X^{(1)}(2) + X^{(1)}(3)] & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}[X^{(1)}(k-1) + X^{(1)}(k)] & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$y_N = [x(2), x(3), \dots, x(k)]^T \quad (5)$$

由 GM(1,1) 模型参数识别公式可知, 确定模型参数  $a, u$  后, 可得  $\{X^{(1)}\}$  的预测模型:

$$X^{(1)}(k+1) = \left[ x(1) - \frac{u}{a} \right] e^{-ak} + \frac{u}{a} \quad (6)$$

相对应的还原数列为:

$$X(k+1) = X^{(1)}(k+1) - X^{(1)}(k) \quad (7)$$

## 1.2 灰色模型预测斜拉索初张力

由于施工过程中外界因素会对斜拉桥的实际状态产生影响, 所以实际值与设计值一般有一定的偏差, 通过调整斜拉索的索力, 可以使结构受力处于可控的最优状态。调整索力的原则是: 通过灰色模型计算分析得到下一施工阶段斜拉索索力预测值  $T_r(k+1)$ , 确保实际张拉索力后, 主梁悬臂端部以及相邻节点实际挠度变化与理论计算值相接近。

根据相邻节段已知数据序列建立 GM(1,1) 模型,  $k$  号钢箱梁拼装和张拉  $k$  号斜拉索时位移变化量之比的灰色模型预测值为:

$$F_m(k) = \frac{T_r(k)}{T_d(k)} \cdot \frac{\Delta_d(k)}{\Delta'_d(k)} \cdot \frac{x(k)}{y(k)} \quad (8)$$

式中:  $T_d(k)$  为  $k$  阶段斜拉索索力理论值;  $\Delta_d(k)$ 、 $\Delta'_d(k)$  分别为  $k$  阶段拼装钢箱梁、张拉斜拉索时悬臂端部位移变化理论值。

根据闭环预测原理, 有以下关系:

$$F(k+1) = F_m(k+1) + [F(k) - F_m(k)] \quad (9)$$

式中:  $F(k)$  为  $k$  阶段钢箱梁拼装和斜拉索张拉时悬臂端部位移实测变化值之比。

定义:  $G_r(k+1) = \alpha G(k) + (1-\alpha)C$ , 则  $k+1$  号

索张拉力的调整系数为:

$$\beta(k+1) = G_r(k+1) - \frac{F(k) - F_m(k)}{D(k+1)} \quad (10)$$

式中:  $D(k+1)$  为  $k+1$  阶段拼装钢箱梁和张拉斜拉索时悬臂端部位移理论变化值之比。

$k+1$  阶段斜拉索索力预测值为:

$$T_r(k+1) = \beta(k+1) \cdot T_d(k+1) \quad (11)$$

## 1.3 灰色模型预测立模标高

$k+1$  阶段, 斜拉索初张索力灰色模型预测值为  $T_r(k+1)$ , 初张索力理论值为  $T_d(k+1)$ , 对  $k+1$  根斜拉索张拉后, 主梁悬臂端竖向位移的理论变化量为  $\Delta_d(k+1)$ , 则悬臂端灰色预测变化值  $\Delta_m(k+1)$  为:

$$\Delta_m(k+1) = T_r(k+1) \cdot \frac{\Delta_d(k+1)}{T_d(k+1)} X(k+1) \quad (12)$$

若  $k+1$  施工阶段主梁的立模标高理论值为  $H(k+1)$ , 则该阶段施工完成时主梁悬臂端标高的模型预测值  $H_r(k+1)$  满足下式:

$$H_r(k+1) = H(k+1) + \Delta_m(k+1) \quad (13)$$

根据闭环预测, 当  $k+1$  施工阶段完成时, 有如下关系:

$$H(k+1) = H_m(k+1) + [H(k) - H_m(k)] \quad (14)$$

$k+1$  阶段立模标高预测值为:

$$H_r(k+1) = H_m(k+1) + \Delta_m(k+1) + [H(k) - H_m(k)] \quad (15)$$

由以上推导可知, 当  $k+1$  施工阶段斜拉索的初张力  $T_r(k+1)$  确定时, 可以根据已知信息计算求出  $\Delta_m(k+1)$ , 从而确定主梁立模标高的模型预测值  $H_r(k+1)$ 。

## 2 工程概况及有限元模型

岳口汉江特大桥位于湖北天门市岳口镇长垵垸至新场河段内。该桥为铁路混合梁斜拉桥, 主桥跨径布置为: (32+50+93+260+38) m, 桥梁全长 474.2 m。全桥主梁由两部分组成, 其中边跨为混凝土箱梁, 中跨为部分混凝土箱梁和钢箱梁, 钢混结合点位于距主塔 23 m 处的中跨侧。混凝土箱梁和钢箱梁均为单箱三室截面。全桥由 42 对斜拉索组成空间双索面体系, 全桥桥型布置如图 1 所示。

采用 Midas/Civil 有限元软件建立全桥施工控制仿真分析模型, 共计 2 062 个节点和 1 346 个单元。斜拉索采用只受拉桁架单元进行模拟, 主梁和主塔则采用空间梁单元模拟。

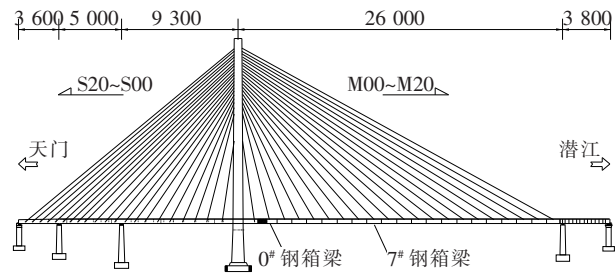


图 1 岳口汉江特大桥桥型布置图(单位:cm)

3 基于灰色系统理论的施工控制预测

3.1 施工阶段立模标高和索力预测

岳口汉江特大桥为混合梁斜拉桥,由于中跨为钢箱梁,自重轻,施工过程中结构柔度和位移变化均较大。该文以中跨 7# 钢箱梁施工阶段为例,阐述灰色系统理论的施工控制预测。

当前施工阶段时,中跨 M7 号斜拉索张拉完成,需对 7# 钢箱梁立模标高以及 M8 斜拉索的初张力进行预测。选取 M4、M5、M6、M7 号索力以及所对应的 3#、4#、5#、6# 钢箱梁悬臂端部位移的实测值和理论值作为原始数据序列。

(1)  $\hat{x}_i^{(0)}$  的确定:7# 钢箱梁拼装时悬臂端部位移变化量预测

$\hat{x}_i^{(0)}$  系列的实测值及预测值如表 1 所示。

表 1  $\hat{x}_i^{(0)}$  的实测值及预测值

序号	拼装梁段号	实测位移/mm	理论位移/mm	$\hat{x}_i^{(0)}$
1	3# 钢箱梁	37	46	0.804 3
2	4# 钢箱梁	49	51	0.960 8
3	5# 钢箱梁	63	72	0.875 0
4	6# 钢箱梁	74	91	0.813 2
5(预测)	7# 钢箱梁		116	(0.744 6)

根据 Midas/Civil 计算结果,选取原始序列数据为:

$$\{x_i^{(0)}\}^T = \{0.804\ 3, 0.960\ 8, 0.875\ 0, 0.813\ 2\}^T$$

对  $\{x_i^{(0)}\}$  作累加生成,可得:

$$\{X_1^{(1)}, X_2^{(1)}, X_3^{(1)}, X_4^{(1)}\}^T = \{0.804\ 3, 1.765\ 1, 2.640\ 1, 3.453\ 3\}^T$$

由灰色理论模型 GM(1,1),可得响应函数为:

$$\hat{X}_{i+1}^{(1)} = -11.900\ 1e^{-0.083\ 9i} + 12.704\ 4$$

利用残差检验模型精度,具体见表 2。

表 2 误差分析表

序号	实测数据 $\hat{x}_i^{(0)}$	还原数据 $\hat{X}_i^{(0)}$	残差 $\delta(k) =$ $\hat{x}_i^{(0)} - \hat{X}_i^{(0)}$	相对误差 $[e(i) =$ $ \delta(k)  / \hat{x}_i^{(0)}] / \%$
2	0.960 8	0.957 7	0.003 1	0.32
3	0.875 0	0.880 6	-0.005 6	0.64
4	0.813 2	0.809 7	0.003 5	0.43

由表 2 可知:通过 GM(1,1)模型计算得到的预测数据与实测数据的差值很小,最大相对误差仅为 0.64%。

(2)  $\hat{y}_i^{(0)}$  的确定:M8 号斜拉索张拉时悬臂端部位移变化量预测

$\hat{y}_i^{(0)}$  系列的实测值及预测值见表 3。

表 3  $\hat{y}_i^{(0)}$  实测值及其预测值

序号	张拉索号	实测位移/mm	实测索力/kN	理论位移/mm	理论初张拉索力/kN	$\hat{y}_i^{(0)}$
1	M4	37	844	46	857	0.817
2	M5	55	1 016	59	996	0.914
3	M6	68	996	80	962	0.821
4	M7	83	1 002	103	994	0.799
5(预测)	M8			121	800	(0.735)

根据 Midas/Civil 计算结果,选取原始序列数据为:

$$\{y_i^{(0)}\}^T = \{0.817, 0.914, 0.821, 0.799\}^T$$

对  $\{y_i^{(0)}\}$  作累加生成,可得:

$$\{Y_1^{(1)}, Y_2^{(1)}, Y_3^{(1)}, Y_4^{(1)}\}^T = \{0.817, 1.731, 2.552, 3.351\}^T$$

由灰色理论模型推导计算过程,可得响应函数为:

$$\hat{Y}_{i+1}^{(1)} = -13.568e^{-0.068\ 9i} + 14.384\ 6$$

利用残差检验模型精度,具体见表 4。

由表 4 可知:通过 GM(1,1)模型计算得到的预测数据与实测数据的差值很小,最大相对误差仅为 2.70%。

(3) M8 号斜拉索初张索力灰色模型预测

根据  $\hat{x}_5^{(0)}$ 、 $\hat{y}_5^{(0)}$  的预测值,M8 号斜拉索初张力的调整系数  $\beta(5) = 0.988$ 。因此,M8 号索初张力灰色模型预测值为:

$T_r(5)=0.988\times T_d(5)=790.4\text{ kN}$

(4) 7# 钢箱梁立模标高粱灰色模型预测

7# 钢箱梁拼装完成时悬臂端位移变化量预测:

$\Delta'_m(5)=\hat{X}_5^{(0)}\cdot\Delta'_d(5)=76\text{ mm}$

M8 号斜拉索张拉完成时悬臂端位移变化量预测:

$\Delta_m(5)=T_r(5)\cdot\frac{\Delta_d(5)}{T_d(5)}\cdot\hat{Y}_5^{(0)}=97\text{ mm}$

M8 号斜拉索初张拉完成后悬臂端的理论标高为 52.375 m,由式(15)可知:7# 钢箱梁拼装时立模标高的灰色模型预测值为:

$H_r(k+1)=H_m(k+1)+\Delta_m(k+1)+[H(k)-H_m(k)]=52.344\text{ m}$  (16)

表 4 误差分析表

序号	实测数据 $\hat{y}_i^{(0)}$	还原数据 $\hat{Y}_i^{(0)}$	残差 $\delta(k)=$ $\hat{y}_i^{(0)}-\hat{Y}_i^{(0)}$	相对误差 $[e(i)=$ $ \delta(k) / \hat{y}_i^{(0)} /\%$
2	0.914	0.903 4	0.010 6	1.16
3	0.821	0.843 2	-0.022 0	2.70
4	0.799	0.787 0	0.012 0	1.50

3.2 灰色模型预测结果分析

岳口汉江特大桥在施工监控过程中,应用灰色系统理论对主梁立模标高和斜拉索索力进行控制调整,并取得了良好效果。中跨标高控制结果如图 2 所示。

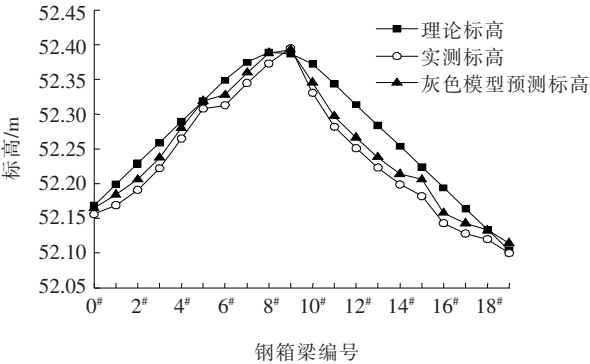


图 2 岳口汉江特大桥中跨标高施工控制图

由图 2 可知:理论标高、实测标高以及灰色模型预测标高的整体变化趋势基本相同。灰色模型预测标高介于理论标高和实测标高之间,并且灰色模型预测标高与实测标高的吻合度较高,最大偏差出现在 15# 钢箱梁处,仅为 24 mm,表明通过灰色理论对主梁施工完成后的实际标高进行预测,精度较高。在施工过程中通过灰色系统理论对立模标高进行修正可以有效减

小实测标高与理论标高之间的偏差,从而提高施工控制精度。

中跨索力控制结果如图 3 所示。

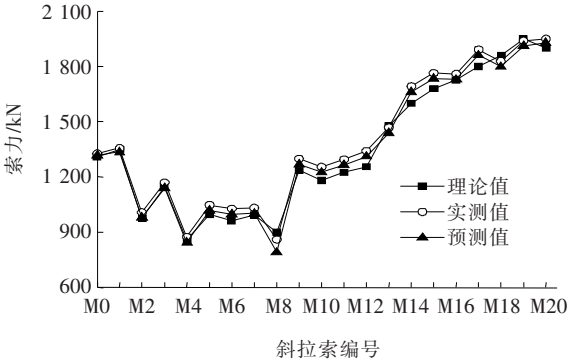


图 3 岳口汉江特大桥中跨索力施工控制图

由图 3 可知:中跨理论索力、实测索力和预测索力三者之间的差值较小,尤其是在靠近主塔附近,吻合度很高。M14 号斜拉索的理论值和实测值偏差最大,为 81 kN,约占理论值的 4.91%,满足索力控制误差要求。由上述分析可知,采用灰色模型预测斜拉索索力,能够有效地减少预测误差,具有较好的预测精度。

4 结论

以岳口汉江特大桥为工程背景,基于 Midas/Civil 有限元分析软件,应用灰色系统理论对主梁立模标高和斜拉索索力进行预测分析,得到如下结论:

(1) 该桥施工过程中标高的理论值、实测值以及预测值的变化趋势基本相同;灰色模型预测标高与实测标高吻合度很高,最大偏差仅为 24 mm;灰色模型标高的预测值介于理论值和实测值之间,利用灰色模型对立模标高进行修正可以减小实际标高与理论标高之间的偏差。

(2) 中跨索力的理论值、实测值和预测值之间的差值很小,最大偏差为 4.91%;灰色系统理论对主塔附近的索力进行预测时,精度较高;索力的施工控制结果表明,应用灰色系统理论可以有效地控制索力,使实际索力接近理论索力。

参考文献:

[1] 汪娟娟. 灰色系统理论在大跨径桥梁施工控制中的应用[D]. 武汉理工大学硕士学位论文,2006.  
[2] 刘思峰,邓聚龙. GM(1,1)模型的适用范围[J]. 系统工程理论与实践,2000(5).



# 快速施工钢桁—混凝土组合连续刚构桥 装配工序优化分析

吴昊<sup>1</sup>, 高燕梅<sup>1\*</sup>, 周志祥<sup>1,2</sup>

(1. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆市 400074; 2. 深圳大学 土木与交通工程学院)

**摘要:** 为了实现钢桁—混凝土组合连续刚构桥的快速建造, 提出一种基于装配式 PCSS 剪力连接件的组合梁桥全装配式施工方法。该文针对 3 种桥面板安装和组配方案, 建立了精细化有限元模型, 进行了施工阶段优化分析。结果表明: 预制桥面板一次性焊接方案使得桥面板内获得预应力最高, 但结构挠度较大, 钢桁梁受力最大, 且 PCSS 剪力键焊接难度较大; 桥面板每一批次焊接方案使得钢桁梁受力和跨中挠度较小, PCSS 剪力键焊接难度较小, 但工期较长; 桥面板每两批次焊接方案中桥梁受力性能、变形和工期介于上述两种方案之间。因此, 在综合考虑结构受力、施工难易和工期的基础上, 桥面板每两批次焊接方案成为依托工程的推荐施工方案。

**关键词:** 桥梁工程; 快速建造; 组合连续刚构桥; 装配式施工; 优化分析

钢—混凝土组合桥梁充分利用了钢结构良好的抗拉特性和混凝土良好的受压特性, 具有自重轻、施工快捷、刚度大等特点, 并具有较好的经济效应。组合桥梁结构的施工也朝着预制化装配化方向发展, 目前装配式组合梁施工, 大多采用部分预制桥面板拼装后通过湿接缝连接的施工工艺, 降低了现浇桥面板的收缩徐变引起的附加内力, 运输安装方便快捷, 但也存在预制桥面板和后浇混凝土之间的接缝开裂以及现场混凝土施工问题。港珠澳大桥非通航孔组合连续梁桥采用单孔整跨预制, 整体吊装的施工方法, 实现了装配式施工

理念, 极大降低了现场环境对桥梁质量的影响, 提高了施工速度和施工质量。但是对于不同的桥梁结构体系和普通的中小型组合梁工程, 整跨吊装受成本和施工场地等条件的限制较难实现。因此, 针对目前组合梁施工存在的限制和问题, 该文提出一种基于全装配式施工的组合梁桥及与之配套的装配式剪力连接件, 桥面板分块预制且无需现浇混凝土湿接缝, 可保证桥面板的施工质量, 降低现浇混凝土收缩开裂问题, 缩短施工工期, 有效减少混凝土收缩徐变影响。但是该方法应用到钢桁—混凝土连续刚构桥施工中时, 由于桥面

\*\*\*\*\*

- [3] 姚荣. 桥梁施工监控技术中的灰色系统预测模型对比分析[J]. 中外公路, 2011(5).
- [4] 章继树. 基于灰色系统理论的钢桁拱桥施工控制研究[J]. 世界桥梁, 2016(4).
- [5] 于天来, 陈武权. 灰色系统理论在预应力混凝土连续刚构桥高程监测中的应用[J]. 中外公路, 2008(3).
- [6] 谭国金, 王龙林, 程永春. 基于灰色系统理论的寒冷地区斜拉桥索力状态预测方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2011(s2).

- [7] 刘庆昌, 王有志, 安俊江, 等. 马尔科夫残差修正灰色理论模型在连续梁桥施工监控中的应用[J]. 中外公路, 2017(5).
- [8] 张永水, 顾安邦. 灰色系统理论在连续刚构桥施工控制中的应用[J]. 公路, 2001(6).
- [9] Sun Q S, Wen—Tao P. Research on the Construction Monitoring for Long—Span Prestressed Concrete Bridge Based on Gray Prediction Model[J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(11): 164—168.

收稿日期: 2020—04—20(修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51778094); 重庆市自然科学基金资助项目(编号: cstc2018jcyjAX0509); 云南省交通运输厅科技项目(编号: 云交科(2018)28号)

作者简介: 吴昊, 男, 硕士研究生. E-mail: 18753364511@163.com

\* 通信作者: 高燕梅, 女, 博士, 副教授. E-mail: lg2346@163.com