

# 基于响应面法的斜拉桥施工过程参数识别

蒋超, 许红胜, 颜东煌, 王晟

(长沙理工大学, 湖南 长沙 410004)

**摘要:** 针对北盘江大桥施工过程中第 15<sup>#</sup> 梁段斜拉索张拉到位后主梁实际标高和有限元模型计算理论标高存在偏差的问题, 采用响应面法识别对主梁标高产生误差的主要参数, 结果表明, 15<sup>#</sup> 梁段索力减少 24.2 kN、梁段重量增加 33.3 kN; 将修正后的参数代入原计算模型进行分析, 得到理论标高与实测标高的相对误差在  $\pm 2$  mm 以内。

**关键词:** 桥梁; 斜拉桥; 参数识别; 响应面法

中图分类号: U445.4

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)03-0137-03

桥梁施工过程中, 由于多种不确定因素的影响, 施工误差难以避免, 实际参数与设计理想值会产生偏差。如何有效把握和分析施工过程中的受力状况并及时调整控制参数, 保证结构受力接近理想状态, 最终达到合理的成桥状态, 是施工控制的关键内容之一。斜拉桥施工控制系统中参数识别常用方法有卡尔曼滤波法、人工神经网络法、灰色理论法和最小二乘法。文献[5]建立递进的识别算法对主梁节段自重进行识别, 并用于崖门大桥实际施工过程中, 有效控制了索力和主梁线形。文献[6]融合灰色理论和人工神经网络两种识别方法的优势, 在小样本、数据不完备的条件下得到了满足要求的参数。文献[7]采用带有加权矩阵的最小二乘法对苏通长江公路大桥索力和主梁自重参数进行识别, 控制理论标高与实测标高的误差。文献[8]采用二分法对广州番禺沙湾特大桥钢筋砼容重参数进行识别, 通过多次迭代计算, 得到了满足精度的容重参数。该文以北盘江大桥为背景, 选取二阶响应面模型, 结合有限元软件 MIDAS/Civil 进行分析, 得到待识别参数。

## 1 施工过程中的参数识别

在主梁施工过程中, 能否有效控制主梁线形关系到主梁受力是否理想及是否能顺利实现成桥目标。通过参数敏感性分析, 主梁节段自重和斜拉索索力是影响钢桁梁主梁线形的敏感参数。在钢桁梁斜拉桥施工中, 为把握当前结构状态并控制合龙精度, 索力和主梁自重识别尤为重要。针对北盘江大桥施工的具体情况, 根据已知数据, 采用响应面法对索力和主梁自重进行识别。其基本思想:

(1) 桥梁中跨施工正装计算第  $N$  号节段的索

力参数  $x_1$  和当前梁段自重参数  $x_2$  的改变会引起前面  $i$  号节段标高  $y_i$  的变化, 通过试验设计, 得到试验需要的样本点, 然后将样本点代入有限元模型进行计算, 得到试验样本空间内参数样本值和输出的响应值。

(2) 根据实际结构参数和响应的关系, 选择合适的函数形式拟合得到响应面函数:

$$y_i = f(x_1, x_2) \quad (1)$$

(3) 通过模型计算得到第  $N$  号梁段施工完毕后前几个节段的理论标高  $\{h_i^S\}$ , 与现场实测标高  $\{h_i^T\}$  对比, 获得偏差量  $\{\Delta h_i\}$ :

$$\{\Delta h_i\} = \{h_i^T\} - \{h_i^S\} \quad (2)$$

(4) 根据误差平方和最小的原则, 得到待识别索力和梁段自重的误差值:

$$\sigma = \sum_{i=1}^n (\Delta h_i - y_i)^2 \rightarrow \min \quad (3)$$

(5) 将识别得到的当前索力与梁段自重代入模型, 得到识别后理论值并与实测值进行比较分析。

## 2 响应面法函数拟合

### 2.1 响应面函数形式的选取

响应面法利用函数近似模拟输入与输出的关系, 根据多次试验模拟出的函数在三维空间是一个曲面。应考虑实际模拟背景, 根据实际情况选择符合要求的响应面函数形式。函数表达式必须能准确描述输入参数与响应之间的关系且表达式中待定系数尽可能少, 以减少试验次数。

在施工控制上, 参数识别的响应面函数一般为多项式模型, 其中应用较多的是一阶和二阶多项式模型。一阶多项式模型如下:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i \quad (4)$$

二阶多项式模型如下:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \beta_{ij} x_i x_j \quad (5)$$

式中:  $\beta_0$ 、 $\beta_i$ 、 $\beta_{ij}$  为待定系数;  $x_i$ 、 $x_j$  为待识别参数。

考虑到索力及主梁自重参数对各节段标高影响不是线性变化,采用二阶多项式响应面模型拟合函数,其表达式如下:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_1 x_2 + \beta_4 x_1^2 + \beta_5 x_2^2 \quad (6)$$

## 2.2 试验设计

以数理统计和概率论为基础,在系统参数变量空间中选择合适的试验点,要求既能尽量减少试验点数量,又能获得满足精度的响应面模型。根据不同响应面形式,试验设计方法有多种,常用的有全因子设计(FFD)、中心复合设计(CCD)、正交设计(OA)和均匀设计(UN)等。其中中心复合设计融合了旋转性、正交性等优良特性,故采用该方法进行试验设计。

CCD法的试验点包括3种类型(见图1):1) 根据每个因素增加或减少一个单位,用正交概念构造试验点,这类试验点有  $2^n$  个,需进行  $n_c$  次试验。2) 在试验空间的基准点  $(0, 0, \dots, 0)$  进行  $n_0$  次重复试验,检验模型是否稳定。对于不同的试验模型,重复试验次数各不相同,北盘江大桥采用 MIDAS/Civil 进行计算分析,考虑到有限元模型是稳定的,只在中心点进行2次对比试验。3) 在每个因素的坐标轴上选取2个样本点进行  $n_r$  次试验,这2个点关于原点对称,与坐标原点的距离为  $a$ 。 $a$  的大小与参数数量有关,按下式取值:

$$a = \sqrt[4]{2^n} \quad (7)$$

综上,CCD共包括3种试验设计方案,样本点  $N = n_c + n_0 + n_r$  个。

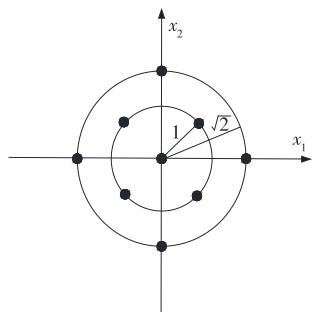


图1 两个因素的 CCD 试验点分布

## 2.3 精度检验

实际运用中,由于系统试验点选择有限,响应面模型可能出现错误,不能很好地反映参数与响应的关系。为此,采用方差( $R^2$ )判定模型的拟合程度,其表达式如下:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (8)$$

式中:  $\hat{y}_i$  为响应面模型的计算值;  $y_i$  为对应有有限元计算值;  $\bar{y}$  为有限元计算值的平均值。

$R^2$  评价指标的取值区间为  $(0, 1)$ , 其大小反映响应面模型计算值与有限元分析计算值之间的差异程度,其值越趋向于1,则两种计算值的差异程度越小;反之,则差异程度越大。若  $R^2$  的值小于精度限制的最小值,则需重新拟合函数。

## 3 北盘江大桥施工过程参数识别

北盘江大桥主桥为七跨连续钢桁梁斜拉桥,桥跨布置为  $(80 + 2 \times 88 + 720 + 2 \times 88 + 80)$  m, 总长 1 232 m。贵州和云南侧分别采用节段桁架拼装法、整节段纵移悬拼法施工。采用 MIDAS/Civil 软件模拟实桥进行计算分析,全桥共计 4 230 个梁单元、224 个索单元、960 个板单元。有限元模型见图2。

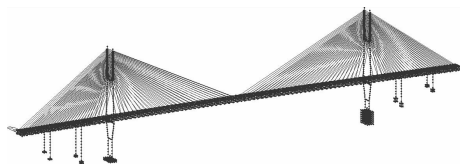


图2 有限元分析模型

### 3.1 试验设计

选取云南侧中跨 15# 节段斜拉索二次张拉到位作为中心复合设计的原点  $(0, 0)$ , 斜拉索索力和梁段自重的  $\pm 1$  两个水平分别表示 2 个参数增加或减少 100 kN。试验方案见表1。

表1 中心复合设计方案

工况编号	索力	梁段自重	工况编号	索力	梁段自重
1	0.00	0.00	6	0.00	-1.41
2	1.00	1.00	7	0.00	1.41
3	1.00	-1.00	8	-1.41	0.00
4	-1.00	1.00	9	1.41	0.00
5	-1.00	-1.00	10	0.00	0.00

3.2 响应面拟合

运用 Design Expert 软件对试验样本数据进行函数拟合,得到响应面完全二阶多项式显式表达式[见式(9)~(12)].图 3 为拟合的响应面三维图。

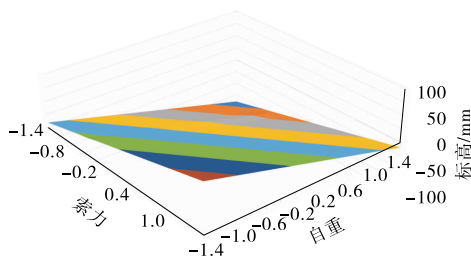
$$y_1=28.848\ 7x_1-35.729\ 9x_2-0.062\ 8x_1x_2+0.058\ 3x_1^2-0.026\ 3x_2^2\tag{9}$$

$$y_2=22.533\ 7x_1-29.293\ 6x_2-0.053\ 1x_1x_2+0.049\ 4x_1^2-0.022\ 5x_2^2\tag{10}$$

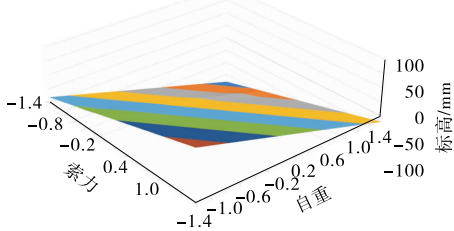
$$y_3=17.036x_1-23.485\ 7x_2-0.043\ 3x_1x_2+0.040\ 4x_1^2-0.018\ 7x_2^2\tag{11}$$

$$y_4=12.433\ 5x_1-18.381\ 3x_2-0.034x_1x_2+0.031\ 82x_1^2-0.015x_2^2\tag{12}$$

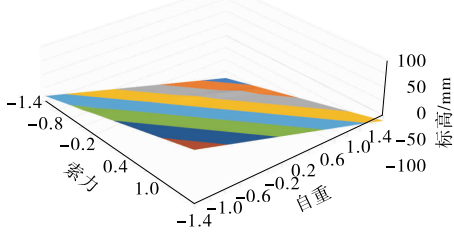
式中: $y_1\sim y_4$  分别代表 14<sup>#</sup>~11<sup>#</sup> 梁段标高变化。



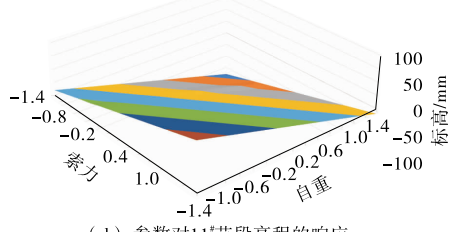
(a) 参数对14<sup>#</sup>节段高程的响应



(b) 参数对13<sup>#</sup>节段高程的响应



(c) 参数对12<sup>#</sup>节段高程的响应



(d) 参数对11<sup>#</sup>节段高程的响应

图 3 参数对各节段高程的响应面

由拟合函数表达式和图 3 可知:1) 拟合函数的一次项的系数远大于二次项的系数;2) 响应面模

型三维图的曲面特征不明显,比较接近平面。说明索力和主梁自重对标高线性影响的比重远大于非线性影响,若需识别的参数精度要求不高,可选取一阶线性表达式来模拟。

3.3 响应面函数精度检验

由已知各节段标高与参数的显式,依据式(8)判断拟合精度,检验值见表 2。

表 2  $R^2$  检验值

梁端位置	$R^2$	梁端位置	$R^2$
14 <sup>#</sup>	0.999 996	12 <sup>#</sup>	0.999 996
13 <sup>#</sup>	0.999 995	11 <sup>#</sup>	0.999 996

由表 2 可知: $R^2$  值非常接近于 1,表明响应面模拟的计算值和结构实际值之间误差很小,响应面模型准确可靠,可用来模拟实际结构的复杂关系。

3.4 参数识别

根据北盘江大桥参数敏感性分析结果,对梁段标高影响较大的参数为索力和梁段自重,温度等其他参数也有一定影响。为消除温度对标高的影响,15<sup>#</sup> 斜拉索二次张拉完毕后,在夜间没有阳光照射且环境温度与模型温度相同的时间点进行测量,得到实测标高  $\{h_i^T\}$ ,其与有限元模型计算理论标高  $\{h_i^S\}$  的偏差  $\{\Delta h_i\}$  见表 3。

表 3 参数识别前理论标高与实测标高对比

测点	$\{h_i^S\}/\text{mm}$	$\{h_i^T\}/\text{mm}$	$\{\Delta h_i\}/\text{mm}$	相对误差/%
14 <sup>#</sup>	369.8	351.7	-18.1	-5.15
13 <sup>#</sup>	311.1	294.2	-16.9	-5.74
12 <sup>#</sup>	247.9	236.6	-11.3	-4.78
11 <sup>#</sup>	180.3	171.1	-8.9	-5.19

根据式(3),在  $\sigma$  取最小值时, $x_1=-0.242$ , $x_2=0.333$ 。

根据上述计算结果,15<sup>#</sup> 节段的斜拉索索力减少 24.2 kN,当前梁段的重量增加 33.3 kN。将识别后的参数代入有限元模型进行计算,并与实测值进行对比,结果见表 4。

表 4 参数识别后理论标高与实测标高对比

测点	$\{h_i^S\}/\text{mm}$	$\{h_i^T\}/\text{mm}$	$\{\Delta h_i\}/\text{mm}$	相对误差/%
14 <sup>#</sup>	351.2	351.7	0.5	0.14
13 <sup>#</sup>	295.5	294.2	-1.3	-0.44
12 <sup>#</sup>	236.2	236.6	0.4	0.17
11 <sup>#</sup>	171.2	171.4	0.2	0.12

序9既可满足施工过程中结构安全要求,又可满足简化施工流程的要求。

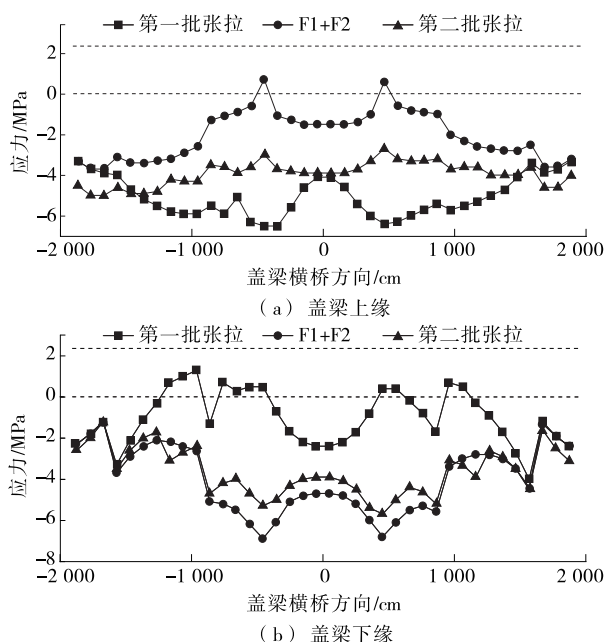


图7 最优张拉程序下各施工阶段盖梁应力分布及变形情况

## 4 结论

(1) 大悬臂盖梁结构特殊,在施加荷载后,比普通盖梁存在更大的开裂风险,对大悬臂盖梁施工进行监控至关重要。

(2) 预应力张拉顺序很大程度上影响施工过程中大悬臂盖梁的结构安全。

(3) 在预应力张拉过程中,拉应力控制截面的位置不断变化,应力监控重点区域需随着施工进度的推进而不断改变。

(4) 大悬臂盖梁的施工需兼顾施工方便性和结构安全性。

## 参考文献:

- [1] 赵艳峰.大悬臂盖梁施工阶段受力监测与分析研究[D].西安:长安大学,2013.
- [2] 鲁华明.预应力后张法张拉控制技术研究[J].施工技术,2016(增刊1).
- [3] 周伟.预应力张拉计算及现场张拉控制[J].公路与汽运,2004(5).
- [4] 王国华.大悬臂盖梁钢支撑施工技术的应用[J].中国市政工程,2013(4).
- [5] 钟庆荣,杨贵龙,胡洪波,等.烂泥湖高架桥水中门式墩长悬臂盖梁施工技术[J].桥梁建设,2012(增刊1).
- [6] 徐海军,常江.长悬臂无梁板桥梁结构分析与设计优化[J].桥梁建设,2010(6).
- [7] 刘继梅,李纯国,刘志英,等.超长悬臂盖梁裂缝控制施工技术[J].四川建筑,2017(2).

收稿日期:2017-11-27

(上接第139页)

## 4 结语

该文选取二阶多项式响应面模型,依据中心复合设计得到的样本数据模拟北盘江大桥14#~11#梁段标高与索力和梁段重量的关系,得到响应与待识别参数的显式函数,直观表现了参数与响应的关系。 $R^2$ 检验结果表明拟合的响应面模型准确可靠。将识别后的参数代入模型进行计算,各节段最大相对误差由识别前的-5.74%减小到-0.44%,理论标高与实际标高差值控制在 $\pm 2$  mm以内。响应面法是一种精度较高的参数识别方法。

## 参考文献:

- [1] 颜东煌.斜拉桥合理设计状态确定与施工控制[D].长沙:湖南大学,2001.
- [2] 林元培.卡尔曼滤波法在斜拉桥施工中的应用[J].土木工程学报,1983,15(3).

- [3] 贾小勇,徐传胜,白欣.最小二乘法的创立及其思想方法[J].西北大学学报:自然科学版,2006,36(3).
- [4] 张劲文.斜拉桥施工控制中的参数识别[J].广东公路交通,2002(增刊1).
- [5] 陈太聪,韩大建.大跨度斜拉桥施工过程中的主梁节段自重识别[J].土木工程学报,2005,38(2).
- [6] 孟庆成,齐欣,李乔,等.基于灰色-神经网络的大跨度斜拉桥参数识别[J].西南交通大学学报,2009,44(5).
- [7] 吴国胜,卜一之.基于最小二乘法的参数识别方法在斜拉桥施工控制中的应用[J].中外公路,2008,28(6).
- [8] 郭木华.基于二分法的斜拉桥施工控制过程参数识别[J].公路工程,2010,35(3).
- [9] Gao Yuan, Jinyu Xu, Xin Luo, et al. Experiment research on mix design and early mechanical performance of activated slag using response surface methodology (RSM)[J]. Ceramics International, 2016, 42(10).
- [10] 邓勃.试验设计与优化方法[J].分析科学学报,1996,12(2).

收稿日期:2017-05-16