

基于响应面法的大跨径砼斜拉桥主梁重量 不对称线形修正研究^{*}

王达, 周旺, 李茂侬

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为研究各设计参数对大跨径砼斜拉桥主梁线形的影响, 并通过参数调整修正主梁线形, 采用响应面法构建边跨最大悬臂端挠度与设计参数之间的显式响应方程, 以某大跨径砼斜拉桥为例, 采用有限元程序建立分析模型, 模型中考虑主梁容重、索力及配重 3 个主要设计参数, 通过 MATLAB 进行中心复合设计, 拟合得到模拟响应与设计参数函数关系的二阶响应面模型。结果表明, 在主梁线形出现偏差时, 可通过调整参数来修正线形偏差且修正精度能满足工程要求。

关键词: 桥梁; 大跨径砼斜拉桥; 主梁; 线形修正; 响应面法

中图分类号: U442.5

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2022)02-0094-03

桥梁设计分析阶段, 结构参数取值均采用规范设计值。在桥梁施工过程中, 结构构件的实际参数值会受到生产制造精度和施工环境等因素的影响, 计算模型中结构自重、截面抗弯刚度等设计参数与实际施工过程中并不一致, 从而导致结构受力与理想设计受力产生一定误差。为减少这种偏差, 可利用响应面法得到显式的响应面模型用于替代复杂的有限元模型进行优化修正, 使实际施工过程中的主梁线形与设计线形之间的差别最小。

分析参数的方法较多, 其中最小二乘法是最传统且使用广泛的识别方法。这种方法将参数对结构的响应视为线形关系, 但实际上参数对结构的影响通常是非线性的, 且最小二乘法仅将每个参数的作用当成独立个体, 忽略了参数之间的相互作用, 存在一定局限性。因此, 该文采用响应面法构建结构响应与各设计参数之间的显式函数关系, 通过调整索力和中跨配重修正边跨最大悬臂段的挠度, 使桥梁顺利合龙。

1 响应面法简介

1.1 基本原理

响应面法的本质是以显式的响应面模型得到简化的结构模型, 并利用模型求解由参数误差造成的实际施工中响应值与理论响应值之间的偏差, 通过调整参数值进行迭代来修正实际桥梁线形状态。

1.2 试验设计

试验设计以数理统计和概率论为基础, 选择系统参数变量空间中合适的试验点能提高响应面法模拟结构响应曲面的精度。中心复合设计具有计算精度高且计算量较小的特点, 适用于一阶、二阶或更高阶模型。图 1 为设计参数为 3 个时中心复合设计试验样本点分布。

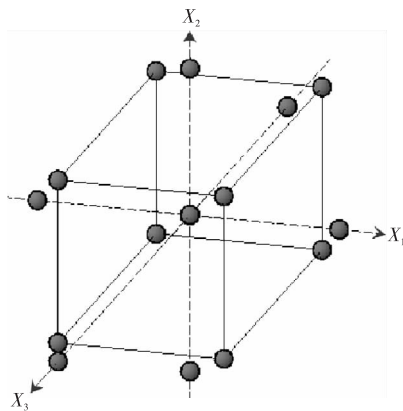


图 1 中心复合设计试验样本点分布

1.3 响应方程

采用响应面法构造的响应面方程主要有:

(1) Wong F. S. 提出的包含交叉项的二次多项式响应面方程:

$$Z = g(X) = a + \sum_{i=1}^n (b_i X_i) + \sum_{i=1}^n (c_i X_i)^2 + \sum_{1 \leq i < j \leq n} (d_{ij} X_i X_j) \quad (1)$$

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878072)

式中: a 、 b_i 、 c_i 、 d_{ij} 为待定系数; X_i 、 X_j ($i, j=1, 2, \dots, n$)为设计变量。

(2) Bourgund U.和 Bucher C. G.提出的忽略交叉乘积项的非完全二次多项式:

$$Z = g(X) = a + \sum_{i=1}^n (b_i X_i) + \sum_{i=1}^n (c_i X_i)^2 \quad (2)$$

式(2)不包含交叉乘积项,待定系数数量减少为 $2n+1$ 个,迭代次数减小,计算效率提高。

得到响应面函数方程后,对拟合函数精度进行检验。采用 R^2 检验和相对均方根误差(RMSE)进行检验,表达式如下:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^N (\hat{y}_j - y_j)^2}{\sum_{j=1}^N (\hat{y}_j - \bar{y}_j)^2} \quad (3)$$

$$RMSE = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{j=1}^N (y_j - \hat{y}_j)^2} \quad (4)$$

式中: N 为试验样本点数量; \hat{y}_j 为响应面模型计算值; y_j 为有限元软件计算值; \bar{y}_j 为有限元软件计算值的平均值。

R^2 越趋近于1,响应面模型拟合程度越接近实际; $RMSE$ 值越趋近于零,响应面模型精度越高。

建立响应面模型后,根据待识别响应的实际响应值对误差进行修正,其基本原理是修正后参数引起的偏差与实际偏差的差值平方和最小。借助多目标函数优化实现误差修正,表达式为:

$$\sigma = [F(A)]^2 \rightarrow \min, F(A) = \{f_{\text{exp}}\} - \{f_{\text{RSM}}\} \quad (5)$$

式中: σ 为特征量的残差; A 为待识别设计参数; f_{exp} 为实际偏差; f_{RSM} 为响应面模型计算偏差。

2 算例分析

2.1 工程概况及计算模型

某大跨径砼斜拉桥全长 648 m,分为东西两跨,采用悬臂浇筑施工。主桥为(150+328+150) m 砼斜拉桥,加劲梁为预应力砼箱梁,标准节段长 7 m,主梁标准断面桥面宽 35.2 m,设双向 2%“人”字横坡。该桥边跨合龙前最大悬臂工况,因设计主梁重量边中跨两侧不平衡,设计时考虑在中跨 16# 梁段配重 80 t 砣板。

采用 MIDAS/Civil2019 建立全桥有限元模型(见图 2)。

2.2 基于响应面法的斜拉桥线形修正

按照中心复合设计试验方案,分别将主梁容重、

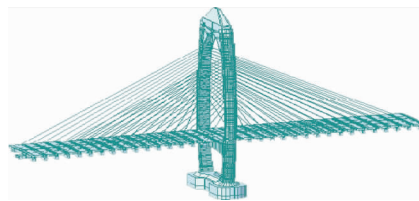


图 2 全桥有限元模型

索力和配重设计值上下变动 10%,试验中各参数取值见表 1。

表 1 中心复合设计试验参数取值

试 验 号	主梁容 重/(kN· m ⁻³)	索 力/ kN	配 重/ t	试 验 号	主梁容 重/(kN· m ⁻³)	索 力/ kN	配 重/ t
1	22.50	6 401	72	10	29.21	7 113	80
2	27.50	6 401	72	11	25.00	5 917	80
3	22.50	7 824	72	12	25.00	8 309	80
4	27.50	7 824	72	13	25.00	7 113	67
5	22.50	6 401	88	14	25.00	7 113	93
6	27.50	6 401	88	15	25.00	7 113	80
7	22.50	7 824	88	16	25.00	7 113	80
8	27.50	7 824	88	17	25.00	7 113	80
9	20.79	7 113	80	18	25.00	7 113	80

采用二阶多项式响应面模型拟合函数:

$$g(x) = a_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + c_1 x_1^2 + c_2 x_2^2 + c_3 x_3^2 + d_{12} x_1 x_2 + d_{13} x_1 x_3 + d_{23} x_2 x_3 \quad (6)$$

根据相关研究,变量交叉项的影响可忽略不计,式(6)简化为:

$$g(x) = a_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + c_1 x_1^2 + c_2 x_2^2 + c_3 x_3^2 \quad (7)$$

按照中心复合设计方案拟合得到的响应面模型如下:

$$g(x_1) = 0.045 - 0.085 x_1 + 0.014 x_2 + 0.000 81 x_3 + 0.000 91 x_1^2 - 0.000 98 x_2^2 + 0.000 39 x_3^2 \quad (8)$$

$$g(x_2) = -0.088 - 0.11 x_1 + 0.04 x_2 + 0.012 x_3 + 0.000 47 x_1^2 - 0.000 02 x_2^2 - 0.000 02 x_3^2 \quad (9)$$

$$g(x_3) = -0.073 - 0.12 x_1 + 0.032 x_2 + 0.011 x_3 + 0.000 05 x_1^2 + 0.000 05 x_2^2 - 0.000 44 x_3^2 \quad (10)$$

$$g(x_4) = -0.045 - 0.13 x_1 + 0.025 x_2 +$$

$$0.01x_3 + 0.000\ 4x_1^2 + 0.000\ 4x_2^2 + 0.000\ 39x_3^2 \quad (11)$$

按式(3)、式(4)进行精度检验,结果见表2。

表2 响应面模型精确检验结果

梁段号	R^2	RMSE
16 [#]	0.999 8	0.004 51
15 [#]	0.999 6	0.005 75
14 [#]	0.999 8	0.006 30
13 [#]	0.999 5	0.004 90

由表2可知: R^2 均趋近于1, RMSE均趋近于零,响应面模型的精度满足要求。

为避免温差的影响,在夜间温度稳定且与模型温度相同的时间点进行现场挠度测量。初始模型计算值与挠度实测值的对比见表3。

表3 挠度实测值与初始模型计算值对比

梁段号	模型计算值/cm	实测值/cm			相对误差/%
		西侧	东侧	平均值	
16 [#]	4.5	4.1	3.7	3.9	15.4
15 [#]	-8.8	-9.8	-9.6	-9.7	-9.3
14 [#]	-7.3	-8.2	-8.5	-8.4	-13.1
13 [#]	-4.5	-4.9	-5.3	-5.1	-11.8

根据参数识别结果和式(5), σ 取最小值时,东侧16[#]梁段索力减少105 kN,主梁容积增加0.9 kN/m³,配重减少8 t。将识别后参数代入有限元模型,计算结果见表4。

表4 参数识别后理论标高与挠度实测值对比

梁段号	模型计算值/cm	实测值/cm	相对误差/%
16 [#]	3.8	3.9	-2.5
15 [#]	-9.5	-9.7	-2.1
14 [#]	-8.3	-8.4	-1.2
13 [#]	-4.9	-5.1	-3.9

响应面法通过显式函数模拟桥梁内部关系,在主梁线形出现偏差时,可通过调整参数修正线形偏差。上述响应面法识别的参数为梁重、索力和配重,其中主梁重量不可调节,其引起的线形偏差可通过调整索力和配重来抵消。将识别的梁重代入式(8)~(11),根据式(5),得到索力增加273 kN,配重增加4 t。修正前后理论挠度对比见表5。

表5 参数修正前后理论挠度对比

梁段号	修正前挠度/cm	修正后挠度/cm	相对误差/%
16 [#]	4.5	4.6	2.2
15 [#]	-8.8	-9.1	3.4
14 [#]	-7.3	-7.2	-1.4
13 [#]	-4.5	-4.7	4.4

3 结论

针对某大跨径砼斜拉桥边跨合龙前桥梁线形的理论值与实际值之间的误差,采用响应面法对其主梁容重、索力和配重进行识别,主要得到如下结论:1) 16[#]梁段索力减少105 kN,主梁容重增加0.9 kN/m³,配重减少8 t,相对误差明显减小,修正参数线形误差控制在±2 mm以内。2) 在主梁容重不可改变的情况下,将索力增加273 kN,修正后理论线形与原线形最大误差为3 mm。基于响应面的线形修正可显著提高模型修正效率和准确性,具有实际施工监控指导意义。

参考文献:

- [1] 任伟新,陈华斌.基于响应面的桥梁有限元模型修正[J].土木工程学报,2008,41(12):73-78.
- [2] 王达,李龙阁,刘旺.风荷载作用下斜拉桥悬臂施工力学性能分析[J].公路与汽运,2020(4):97-100.
- [3] 杨国帆.大跨径斜拉桥施工监控技术分析研究[D].西安:西安建筑科技大学,2019.
- [4] 蒋超.大跨度钢桁梁斜拉桥施工过程参数识别及敏感性分析[D].长沙:长沙理工大学,2017.
- [5] 刘剑,王达.基于响应面法的大跨径斜拉桥静力参数敏感性分析[J].公路交通科技,2015,32(8):100-106.
- [6] 王达,唐浩.基于响应面法的斜拉桥静力体系可靠度[J].交通科学与工程,2014,30(2):34-39.
- [7] 代汉超,石雪飞.基于静力响应面的混凝土梁桥有限元模型修正[J].交通科学与工程,2013,29(2):41-45.
- [8] 殷新锋.汽车荷载作用下梁式桥与斜拉桥的动态响应分析[D].长沙:湖南大学,2010.
- [9] 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):108-110.
- [10] 邓苗毅,任伟新,王复明.基于静力响应面的结构有限元模型修正方法[J].实验力学,2008,23(2):103-109.
- [11] 朱小刚.几何控制法在大跨度斜拉桥施工误差调整中的应用[J].公路与汽运,2020(6):119-121+148.

收稿日期:2020-10-20