

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.03.013

大跨度钢箱梁斜拉桥主梁制造误差分析与优化调整

涂光亚,周郅哲

(长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114)

摘要:为研究规范允许范围内的主梁随机制造误差对大跨度钢箱梁斜拉桥成桥线形的影响,以自适应无应力构形施工控制理论为指导,以大跨度双塔斜拉桥——石首长江公路大桥为例,分析和研究主梁构件随机误差效应对斜拉桥主体结构的影响和传播特性,研究主梁随机制造误差对斜拉桥结构的不利影响。结果表明:施工过程中和成桥时的主梁线形会因为主梁在制造时微小的几何随机误差而发生改变,梁长随机误差对成桥线形的影响并不明显,相邻梁段间的随机转角误差对成桥线形影响相对较大,随机制造误差引起的成桥线形误差过大时,通过安装索力的优化调整可有效降低成桥线形误差。

关键词:斜拉桥;施工控制;随机性;制造角度误差;制造长度误差;误差传播规律

中图分类号:U448.27

文献标志码:A

0 引言

近年来,大跨度斜拉桥的发展给桥梁施工带来了构件数量大、施工周期长、施工过程复杂等一系列的挑战^[1-3]。大跨度斜拉桥主梁往往使用预制钢箱梁,为了减小成桥线形与理论值的偏差和限制误差在施工过程中的积累,施工过程中对误差的预测和调整变得尤为重要^[4-5]。

主梁线形误差^[6-7]包括原始误差和衍生误差两大类。原始误差是指构件的物理参数误差和拼装过程中的构件几何误差,衍生误差是由原始误差衍生而来。由于施工误差、制作水平和安装时温度等因素的影响,预制钢箱梁不可避免地存在制造误差。常见的误差形态有3类:①白噪声形态分布误差;②连续单向分布形态误差;③大峰值误差。由于在预制厂中存在一系列严格的制造和检验流程,所以预制钢梁的长度和角度误差量值通常在规范允许范围内,但成桥状态对制造误差参数的敏感性^[8-9]较强,主梁制造误差对成桥线形仍有不可忽略的影响。

形成成桥状态线形误差的过程实质上是整个施工过程由多种不同因素引起并连续传播的过程^[10-11],

因此控制线形误差的最佳办法是建立结构误差与制造误差的关系方程,控制误差的传播,并且针对施工过程中的误差传播进行有效、科学的调整。本文探讨在限制通过调整相邻节段宽度来消除制造误差的前提下,以主梁节段长度和相邻节段夹角为例,说明主梁构件的随机制造误差对成桥线形的影响特征及优化调整。

1 研究对象

1.1 工程背景

石首长江公路大桥为半漂浮结构体系的单侧混合梁斜拉桥,主桥主跨820 m,钢箱梁主梁采用正交异性板流线形扁平钢箱梁,材料为Q345,主梁标准节段长度15 m,梁高3.8 m,共分为74个梁段。斜拉索为空间扇形双索面布置,共有104对低松弛、高强度平行钢丝绳。

1.2 有限元模型

采用BDCMS软件进行仿真计算,计算模型单元总数670个,节点总数552个;主梁单元数277个,1~104号单元为混凝土主梁,105~277号为钢主梁;塔单元数100个,278~327号单元为南塔,328~377号

收稿日期:2021-06-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51878073)

作者简介:涂光亚,男,博士,副教授.E-mail:runner_mail@126.com

单元为北塔;索单元数104个。石首长江公路大桥计算网格图见图1。

将施工过程分为31个大工况,其中工况1为塔

柱施工、北塔第1~9号梁段拼装和南塔0[#]块施工;工况2~26为吊梁;工况27为合龙;工况28为调索并上桥面系重量;工况29~31为收缩徐变影响。

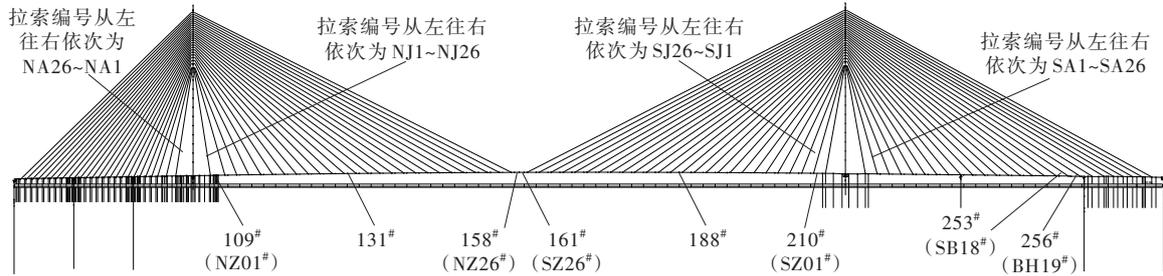


图1 石首长江公路大桥计算网格图

2 影响矩阵法

影响矩阵法^[12]为高等数学中的一种计算方法,采用该方法计算需要分别确定影响矩阵向量、施调向量和受调向量。

(1) 受调向量。由结构中的应力、内力和位移等独立元素组成,并能通过其他方式对这些元素进行调整,从而达到某些目标,记为:

$$\{X\}_m = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T \quad (1)$$

式中: x_m 为主梁第 m 个梁段成桥线形与设计线形之间的差值。

(2) 施调向量。结构中实施调整用来改变受调向量的独立元素,记为:

$$\{D\}_n = (d_1, d_2, \dots, d_n)^T \quad (2)$$

式中: d_n 为 n 号结果索力与原索力之间的差值。

(3) 目标向量。当各影响参数数值发生改变时,经过施工过程正装计算可以得到任意第 j 个影响参数 D_j 对第 i 个目标向量 X_i 的影响量 a_{ij} 。

(4) 影响矩阵。将各影响量按照顺序排列组成矩阵形式,得到所有影响参数对所有目标变量的影响矩阵 $[A_P^S]_{m \times n}$,记为:

$$[A_P^S]_{m \times n} = [a_{11}, a_{12}, \dots, a_{mn}]^T \quad (3)$$

式中: a_{mn} 为 m 号索张拉单位力后对 n 号索的影响系数。

在斜拉索索力调整时使用影响矩阵法,将制造误差输入正装计算模型得到主梁成桥线形记为 $\{X_R\}_m$,主梁设计成桥线形记为 $\{X_L\}_m$,目标变量的差值为:

$$\{\Delta X\}_m = \{X_R\}_m - \{X_L\}_m \quad (4)$$

设待求参数调整量为 $\{\Delta D\}_n$,则:

$$[A_P^S]_{m \times n} \{\Delta D\}_n = \{\Delta X\}_m \quad (5)$$

式(5)为一个线性方程组。其中 m 为独立索力元素组成的列向量个数,当 $m=n$ 时可以直接求解该线性方程组,得到施调向量的调整量 $\{\Delta D\}_n$,若 $m>n$ 则会导致未知数大于方程数,为一个矛盾方程组,这时可用最小二乘法进行求解。

3 误差影响

3.1 主梁制造长度随机误差影响

主梁的无应力构形^[13]主要体现在两个方面:①主梁制造长度;②相邻梁段夹角。当其中一个发生变化时,主梁无应力构形就会发生变化。为了探讨主梁制造长度出现的随机误差对主梁成桥线形的影响,根据《公路桥钢箱梁制造规范》(DB32/T 947—2006),钢箱梁的长度允许偏差为 ± 2 mm,将石首长江公路大桥1[#]~26[#]主梁的制造长度随机添加 -2 ~ 2 mm的误差^[14],在满足规范中的最大累积误差不超过 ± 20 mm且全桥预拼装长度累积误差不超过 ± 6 mm的基础上进行计算分析。

假设主梁制造线形中1[#]梁段的前、后 endpoint 坐标分别为 (x_0, y_0) 和 (x_1, y_1) ,则2[#]梁段的前、后 endpoint 坐标分别为 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) ,1[#]、2[#]梁段的中轴线与水平方向夹角分别为 α_1, α_2 ;当梁段制造长度出现变化时,1[#]梁段的前、后 endpoint 坐标也会随之发生改变,分别为 (x'_0, y'_0) 和 (x'_1, y'_1) 。1[#]梁段的中轴线与水平方向夹角不会发生改变,仍为 α_1 ,后续梁段坐标和夹角同理进行类推。

假设各个梁段变化的制造长度为 Δl_n (n 为各个梁段的标号),由此可以推得各个梁段发生变化后的坐标:

$$(x'_0, y'_0) = (x_0, y_0) \tag{6}$$

$$(x'_1, y'_1) = (x_1 + \Delta l_1 \cos \alpha_1, y_1 + \Delta l_1 \sin \alpha_1) \tag{7}$$

$$(x'_2, y'_2) = (x_1 + \Delta l_1 \cos \alpha_1 + \Delta l_2 \cos \alpha_2, y_1 + \Delta l_1 \sin \alpha_1 + \Delta l_2 \sin \alpha_2) \tag{8}$$

.....

$$(x'_n, y'_n) = (x_1 + \Delta l_1 \cos \alpha_1 + \Delta l_2 \cos \alpha_2 + \dots + \Delta l_n \cos \alpha_n, y_1 + \Delta l_1 \sin \alpha_1 + \Delta l_2 \sin \alpha_2 + \dots + \Delta l_n \sin \alpha_n) \tag{9}$$

为了模拟主梁的制造误差,采用随机函数对石首长江公路大桥主梁每个梁段的梁长生成一个在-2~2 mm之间的误差数据,所有主梁梁段梁长误差数据为1组。先使用 Matlab 随机生成 100 组随机数(置信水平为 90%),选取其中满足最大累积误差小于±20 mm,且全桥预拼装长度累积误差小于±6 mm 共 40 组,从这 40 组数据中再选取最大值、最小值和中值共 3 组数据(表 1),由式(6)~(9)可以得到主梁的无应力线形误差结果如图 1、2 所示。

表 1 长度误差随机输入变量

随机变量	分布类型	均值	标准差	变异系数/%
随机误差组 A	正态分布	0.000 169 0	0.001 071	6.337 278
随机误差组 B	正态分布	-0.000 089 3	0.000 516	5.778 275
随机误差组 C	正态分布	0.000 403 0	0.005 14 0	12.754 340

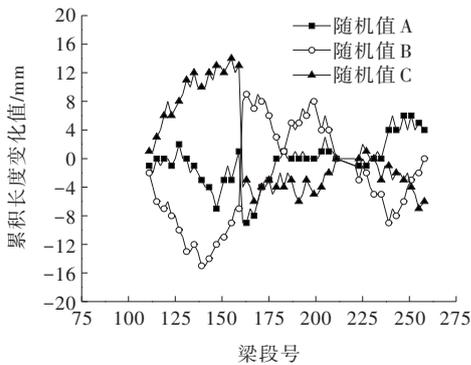


图 2 无应力状态长度累积误差

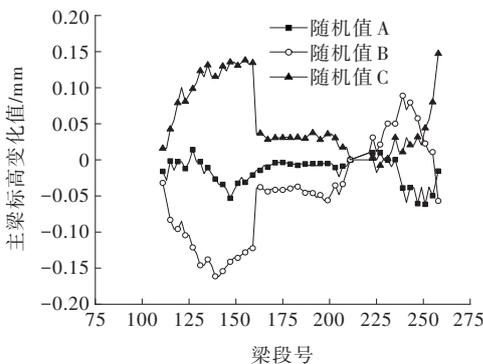


图 3 无应力状态高程累积误差

由图 2、3 可知:主梁长度随机误差对主梁无应力制造构形拼装长度误差的影响较大,最大值为 13 mm,最小值为-14.9 mm,均出现于跨中合龙处。从 0#块到合龙段之前的累积误差较为平顺,但在合龙口梁段处(NZ26#和 SZ26#梁段)发生突变,差值达到最大,需要对合龙段的长度做出相应的调整。主梁高程随机误差对无应力高程累积误差的影响较小,最大值为 0.138 mm,最小值为-0.161 mm,其他数值在最大值与最小值之间随机分布,且合龙高差满足合龙段施工要求。

将图 2、3 的无应力制造构形拼装线形结果输入原始正装计算模型,保持斜拉索初张力不变,得出长度随机误差对主梁成桥状态线形影响见图 4。

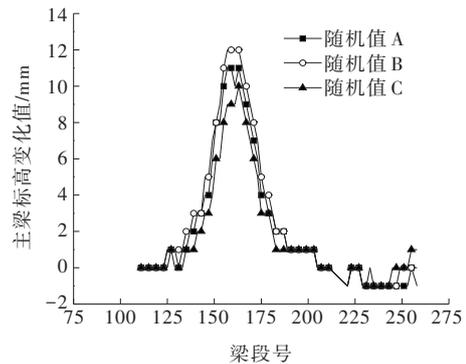


图 4 成桥状态主梁线形误差

由图 4 可知:主梁的制造长度随机增加-2~2 mm 时,主梁成桥线形误差最大值和最小值出现在中跨合龙段和边跨合龙段分别为 12 mm 和-1 mm,其余梁段线形误差为-1~12 mm。由于成桥线形最大误差为 12 mm,合龙后同跨对称点的高程差最大值为 3 mm,符合《公路工程质量检测评定标准》(JTGF80/1—2017),所以主梁制造长度的随机误差对成桥线形的影响不太明显。

3.2 主梁制造角度随机误差影响

无应力构形的另一个重要影响因素是主梁的无应力曲率,无应力曲率是指无应力状态下相邻梁段的夹角,又称为梁段的制造角度。将梁段的底板在制造阶段相对于顶板做长或做短都能达到相邻梁段形成夹角的效果。为讨论随机制造角度误差对成桥主梁线形的影响,根据《大型公路桥钢箱梁制造验收规范》,下翼缘长度的允许偏差为±1 mm,将主梁的底板长度随机增加-1~1 mm 进行主梁制造角度误差随机影响的计算和分析。

假设主梁无应力线形中有梁段 N 和 $N+1$, 梁段高为 H , 梁段的底板制造长度为 n 。同时假设 $N+1$ 梁段端点的坐标分别为 (x_i, y_i) 和 (x_j, y_j) , 则变化后的端点位置为 (x'_i, y'_i) 和 (x'_j, y'_j) 。

假设 N 梁段的原始角度为 α_1 , N 梁段与 $N+1$ 梁段之间的制造角度为 α_2 , 则 $N+1$ 梁段与主桥轴线之间的夹角为 α , 则计入误差后的角度计算表达式^[13]为:

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 = \arctan\left(\frac{y_j - y_i}{x_j - x_i}\right) + \arcsin\left(\frac{n}{H}\right) \quad (10)$$

则计入误差后的端点坐标为:

$$x'_j = x_j + \Delta x_j = x_i + \sqrt{(y_j - y_i)^2 + (x_j - x_i)^2} \cos \alpha \quad (11)$$

$$y'_j = y_j + \Delta y_j = y_j + \sqrt{(y_j - y_i)^2 + (x_j - x_i)^2} \sin \alpha \quad (12)$$

为了模拟主梁的角度误差, 采用随机函数对石首长江公路大桥主梁每个梁段的底板梁长生成一个 $-1 \sim 1$ mm 之间的误差数据, 所有主梁底板梁长误差数据称为 1 组。同样使用 Matlab 随机函数共生成 100 组数据(置信水平为 90%), 从 100 组数据中选取最大值、最小值和中值共 3 组数据(表 2), 由式(10)~(12)可以得到主梁的无应力线形误差结果如图 5、6 所示。

表 2 角度误差随机输入变量

随机变量	分布类型	均值	标准差	变异系数/%
随机误差组 A	正态分布	0.000 243 411	0.000 581 434	2.388 692 376
随机误差组 B	正态分布	0.000 175 427	0.000 763 592	4.352 762 118
随机误差组 C	正态分布	-0.000 019 800	0.000 285 143	14.401 161 620

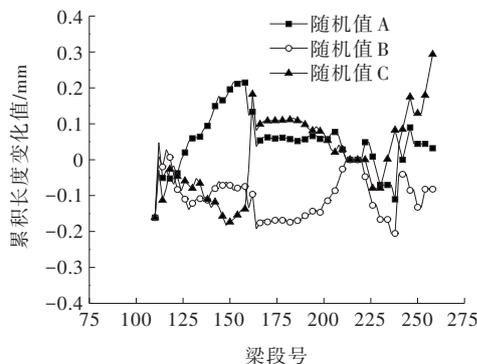


图 5 无应力状态长度累积误差

由图 5、6 可知: 主梁长度对主梁角度随机误差的敏感性较小, 最大值为 0.32 mm, 最小值为 -0.21

mm。主梁角度随机误差对高程的影响较为明显, 其中最大值和最小值分别为 34.5 mm 和 -35 mm, 出现在合龙段处, 从 0 块到合龙段之前的误差较为平顺, 但在合龙口梁段 ($NZ26$ 与 $SZ26$ 梁段) 发生突变, 差值达到最大, 最大差值为 60 mm, 因此需要对合龙口两侧的高程做出相应调整。

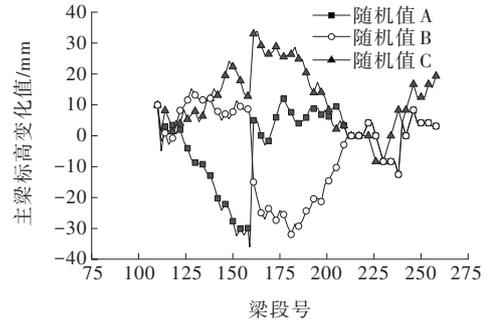


图 6 无应力状态高程累积误差

将图 5、6 的无应力制造构形拼装线形结果输入原始正装计算模型, 保持斜拉索初张力不变, 计算出主梁角度随机误差对主梁成桥状态线形影响结果如图 7 所示。

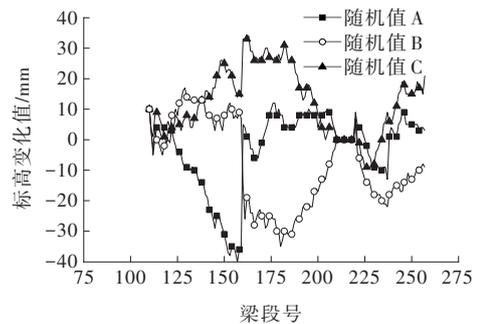


图 7 成桥标高变化值

由图 7 可知: 主梁成桥线形误差为 $-40.2 \sim 34.5$ mm, 最大值都发生在跨中位置, 表明主梁相邻节段之间制造角度误差参数会对主梁成桥线形造成较大不利影响。

在 3 组成桥线形中选取中跨合龙高差最大为 45.8 mm, 主梁各节段误差为 $-40.2 \sim 5.6$ mm 的一组, 以南、北塔中跨侧 10 索的初张力为施调向量, 以各梁段的成桥线形误差为受调量, 构建影响矩阵 $[A]\{X\}=\{D\}$ 。通过 Matlab 对线性方程组进行求解, 得到北塔、南塔中跨侧 10 索的初张力调整量如表 3 所示。

将调整后的索力代入模型中进行计算, 得到成桥状态下的主梁线形误差如图 8 所示。

表 3 北塔、南塔中跨侧索力调整

索号	索力/kN		索号	索力/kN	
	北塔	南塔		北塔	南塔
10 [#]	-76.0	20.0	19 [#]	107.0	25.0
11 [#]	61.0	20.0	20 [#]	-47.0	-18.0
12 [#]	-27.0	-15.0	21 [#]	-143.0	56.5
13 [#]	-150.0	7.0	22 [#]	80.0	-33.3
14 [#]	-68.0	-8.0	23 [#]	137.0	21.5
15 [#]	-120.0	10.0	24 [#]	55.0	50.0
16 [#]	10.0	-78.4	25 [#]	-133.0	-36.5
17 [#]	168.0	144.0	26 [#]	256.0	-83.5
18 [#]	-150.0	-96.5			

注:北塔、南塔对应索号分别为 NJ10[#]~NJ26[#]、SJ10[#]~SJ26[#]。

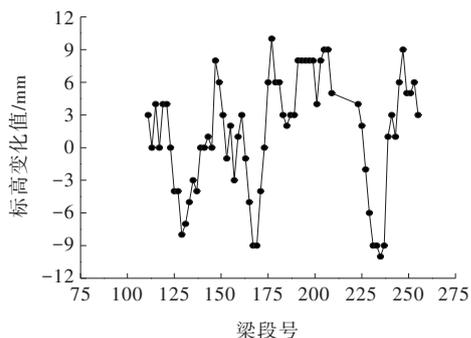


图 8 调整后的成桥标高变化值

从图 8 可以看出:通过对斜拉索初张力进行优化调整后,该桥的主梁线形误差从 $-40.2\sim 5.6$ mm 变为 $-10\sim 10$ mm,跨中的高程与目标数据的差值左侧合龙口(NZ26[#]梁段)为 1 mm,右侧合龙口(SZ26[#]梁段)为 3 mm,相对误差仅为 2 mm。通过优化调整后的主梁线形误差大大减小,符合相应规范要求。

4 结论

(1) 对于大跨度斜拉桥,主梁随机制造误差对主梁无应力制造线形和成桥线形敏感性较强,规范允许范围内的主梁随机制造误差也可能导致主梁成桥线形误差偏大,虽然现行斜拉桥相关技术规范明确给出了斜拉桥制造误差的允许范围,但是为了使结构模型更加接近实际施工情况,应当考虑主梁制造误差等参数的随机误差,以降低桥梁施工风险,提高结构的可靠度。

(2) 主梁制造时的相对角度随机误差比主梁长度随机误差对无应力制造线形和成桥线形误差的影响更为明显。

(3) 在大跨度斜拉桥施工控制时应将主梁制造误差输入正装计算模型分析其对成桥线形的影响,当主梁制造误差引起成桥线形误差过大时,可采用影响矩阵法对斜拉索初张力进行优化调整,可大大降低主梁制造误差对成桥线形的影响,确保成桥线形满足相关规范要求。

本文在计算过程中仅考虑和分析了主梁制造随机误差带来的影响,未考虑斜拉索索力、主梁自重和材料特性等因素的误差影响,可能会导致误差计算结果相比于实际结果偏小。

参考文献:

- [1] 苟敬川,刘吉诚,彭晶蓉,等.斜拉索张拉与主梁浇筑误差对无背索斜拉桥的影响研究[J].中外公路,2020,40(1):75-79.
- [2] 李忠三,雷俊卿,颜东煌.大跨度混合梁斜拉桥参数敏感性分析[J].北京交通大学学报,2012,36(1):6-11.
- [3] 王学伟,祝兵,卜一之,等.基于几何控制法的斜拉桥主梁制造夹角误差变化及传播规律研究[J].四川建筑科学研究,2016,42(3):124-129.
- [4] 蔡荣文,颜东煌,许红胜,等.钢桁梁斜拉桥杆件制造长度误差传递规律研究[J].交通科学与工程,2017,33(3):37-42.
- [5] 颜东煌,陈常松,董道福,等.大跨度钢主梁斜拉桥的自适应无应力构形控制[J].中国公路学报,2012,25(1):55-58,82.
- [6] 李乔,卜一之,张清华.基于几何控制的全过程自适应施工控制系统研究[J].土木工程学报,2009,42(7):69-77.
- [7] 蔡禄荣.大跨度钢桁架拱桥预拱度设置及拼装误差理论研究[D].广州:华南理工大学,2012.
- [8] 黄灿.基于几何控制法的大跨度斜拉桥自适应施工控制体系研究[D].成都:西南交通大学,2011.
- [9] 庄值政,谢明,王晓雷,等.山区大跨斜拉桥钢桁梁施工控制技术[J].公路交通科技,2020,16(4):199-201.
- [10] 张亚海,朱斌,郭宝圣,等.大跨钢箱梁斜拉桥施工期结构参数敏感性分析[J].中外公路,2020,40(5):70-75.
- [11] 张清华,黄灿,卜一之,等.大跨度钢斜拉桥制造误差的传播及其效应特性[J].西南交通大学学报,2015,50(5):830-837.
- [12] 涂光亚,孙盛,颜东煌,等.钢管混凝土拱桥最大悬臂合理施工状态确定方法[J].公路,2019,64(9):159-163.
- [13] 坎彬.基于改进粒子群算法的斜拉桥成桥索力优化[J].中外公路,2021,41(1):133-137.
- [14] 向绪霞,金恩,陈德伟.斜拉索的施工随机误差对斜拉桥的影响[J].结构工程师,2011,27(1):154-160.