

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.03.017

大跨度缆索吊装拱桥拱肋安装线形计算

熊邵辉^{1,2}, 郭鑫³, 游佐巧⁴

(1.重庆交通大学,重庆市 400067;2.招商局重庆交通科研设计院有限公司,重庆市 400067;3.长沙理工大公路工程试验检测中心,湖南长沙 410076;4.重庆天华建筑设计有限公司,重庆市 400043)

摘要:缆索吊装法是大跨度拱桥最主要的施工方法。在拱肋吊装过程中节段接头由于采用螺栓临时连接而导致的非完全固结、主缆临时施工荷载引起的塔架偏位以及锚索和扣索由温度变化引起的自由伸缩都会对拱肋安装线形产生较大影响。该文采用考虑刚度损失的双单元模型计算方法,可在考虑拱肋节段接头非完全固结情况下较精确计算出拱肋安装线形的修正值;利用缆索和塔架的几何关系,推导出塔架偏位和锚索、扣索由温度变化引起的自由伸缩对安装线形的修正计算公式,计算出塔架偏位和锚索、扣索温度变化对拱肋安装线形的修正值;最后根据提出的考虑各项影响因素的大跨度缆索吊装拱桥拱肋安装线形计算公式计算得到拱肋安装线形。以云南澜沧江特大桥为实例进行验证,成拱线形误差满足规范要求。

关键词:大跨度拱桥;缆索吊装;安装线形;主塔偏位;锚索;扣索

中图分类号:U448.22

文献标志码:A

0 引言

近年来中国有80%以上的大跨度拱桥拱肋安装采用缆索吊装法。此法采用主缆运输和吊装拱肋,到位后利用扣索将其扣挂在塔架上进行安装。设置锚索平衡塔架,并与扣索一起将拱肋自重荷载传递给塔架。拱肋的安装标高和轴线通过调整索力实现。缆索吊装法由于跨越能力大、水平与竖直运输机动灵活、施工方法安全等诸多优点成为大跨度拱桥最主要的施工方法^[1]。

在拱肋吊装阶段,节段间连接状态、主塔偏位以及温度对拱肋安装线形和成拱内力有不同程度的影响。李成^[2]和彭诗文^[3]分别以拱肋节段间固结和铰接的方式进行了劲性骨架吊装施工模拟,得出相应的安装线形。节段之间采用螺栓临时连接,使得相邻节段接头之间还能发生微小的转动,因此这种连接方式既不是严格意义上的固结,也不是严格意义上的铰接,所以采用固结或者铰接都不能完全真实模拟节段间实际的连接状态。刘书杰^[4]推导出了塔架偏位和温度对单个拱肋节段标高的影响公式,但

并未给出多节段拱肋吊装时各节段控制点产生的竖向总位移的计算公式。

本文将采用考虑刚度损失的双单元模型计算方法来模拟节段间实际的连接状态,并通过公式推导出多节段拱肋吊装时各节段控制点产生的竖向总位移的计算公式,在此基础上给出拱肋安装线形计算公式。

1 拱肋安装线形计算公式

在不考虑活载挠度情况下拱肋无应力制造线形计算公式为:

$$H_w = H_s + \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4 \quad (1)$$

式中: H_w 为无应力制造线形; H_s 为设计线形; δ_1 为拱肋合龙后在自重作用下产生的竖向变形值(取正值); δ_2 为外包或内灌混凝土荷载作用下产生的竖向变形值(取正值); δ_3 为拱上建筑荷载作用下产生的竖向变形值(取正值); δ_4 为二期恒载作用下产生的竖向变形值(取正值)。

因此拱肋合龙后在自重作用下的目标线形(图1)计算公式为:

$$H_m = H_s + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4 \quad (2)$$

收稿日期:2021-04-06

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2019YFB1310405)

作者简介:熊邵辉,男,硕士.E-mail:381234694@qq.com

式中: H_m 为目标线形。

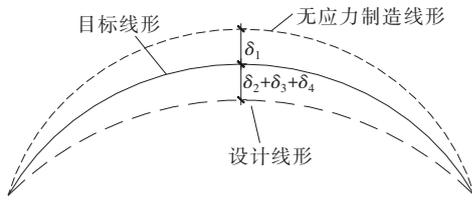


图1 拱肋设计线形、目标线形和无应力制造线形示意图

拱肋节段标高在吊装过程中是一个动态变化的过程,即下一节段的吊装会引起已吊装节段标高的变化。因此在拱肋节段吊装施工中,为了使成拱后的线形达到或接近目标线形,需要在每个拱肋节段拼装时设置预抬值,此线形即为拱肋安装线形,计算公式为:

$$H_a = H_m + \Delta h \quad (3)$$

式中: H_a 为拱肋安装线形; Δh 为节段安装预抬值^[5-6]。

2 安装线形影响因素分析及计算

2.1 接头刚度损失对安装线形的影响分析

2.1.1 接头刚度损失

在拱肋节段吊装施工过程中,各节段接头之间常采取螺栓临时连接,以方便吊装过程中对拱肋线形的调整,待拱肋合龙线形完全调整到位后再进行焊接,因此可以看作在固结的基础上其节段接头抗弯刚度有所损失。孟凡强^[7]首先讨论了拱肋节段预制误差、连接钢板的焊接误差、连接螺栓的松紧程度等因素均会造成节段接头抗弯刚度损失,然后利用Matlab软件工具箱中的神经网络法进行了节段接头抗弯刚度损失的识别计算,得出节段接头抗弯刚度降低了88%。

2.1.2 考虑接头刚度损失的正装模拟计算

为了分析拱肋节段吊装施工过程中接头刚度损失对成拱线形的影响,本文采用双单元模型模拟吊装施工过程(接头临时栓接有刚度损失)和合龙后施工过程(接头焊接完成无刚度损失)。具体做法是:在相邻节段接头处设置两个共节点的单元,单元长度和截面尺寸与节段连接板一致。其中一个单元材料的弹性模量 E 取实际弹性模量模拟没有损失的抗弯刚度,另一个单元材料的弹性模量 E' 取实际弹性模量的12%模拟有损失的抗弯刚度。在吊装施工阶段钝化无刚度损失单元,激活有刚度损失的单元模拟接头处的刚度损失。在焊接完成后钝化有刚度损失单元,激活无刚度损失的单元模拟接头固结状态。

2.2 塔架偏位对安装线形的影响分析

2.2.1 基本假定

采用考虑刚度损失的双单元模型进行模拟,可在考虑拱肋节段接头非完全固结情况下较精确计算出拱肋安装线形的修正值,得到不考虑主缆临时施工荷载情况下拱肋的安装线形。但大多数缆索吊装系统采用主塔和扣塔合一的构造形式,因此不能忽略主缆临时施工荷载引起的塔架偏位对安装线形的影响。为分析主缆临时施工荷载引起的塔架偏位对拱肋安装线形的影响作以下假设^[4]:①忽略锚索和扣索的弹性伸长变化(在有限元正装模拟计算时已经考虑了锚索和扣索的弹性伸长);②假设拱肋节段为刚体,在节段吊装施工过程中只发生刚体位移;③忽略塔架在主索、扣索和锚索的竖向分力作用下产生的弹性压缩变形和螺栓接头压缩变形,只考虑扣塔在水平分力作用下的偏位对节段标高的影响。

2.2.2 塔架偏位对安装线形的影响分析

根据上述假设以及图2推导塔架偏位对拱肋节段标高的影响公式^[8-9]。假设在拱肋节段吊装中,塔架产生的水平偏位为 Δx ,拱肋节段在控制点 D 产生的竖向位移为 Δy ,拱脚 C 到节段控制点 D 的距离为 L ,塔架的高度为 h ,由假设条件可知, $L=L'$, $h=h'$ 。根据三角形几何关系得:

$$\Delta y = L \cdot \sin \beta - L' \cdot \sin(\beta - \Delta \beta) \quad (4)$$

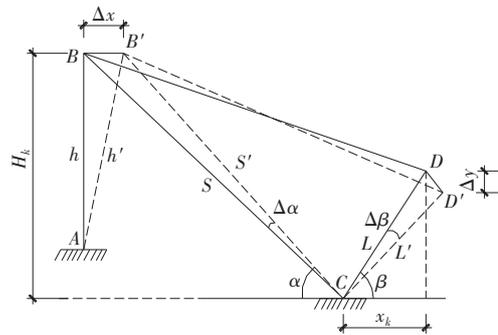


图2 塔架偏位对拱肋节段标高的影响示意图

利用三角函数的和差角公式以及 $L=L'$ 将式(4)展开后得:

$$\Delta y = L \cdot (\sin \beta - \sin \beta \cdot \cos \Delta \beta + \cos \beta \cdot \sin \Delta \beta) \quad (5)$$

拱肋节段的转角 $\Delta \beta$ 比较小,有 $\cos \Delta \beta \approx 1$, $\sin \Delta \beta \approx \Delta \beta$,则

$$\Delta y = L \cdot \Delta \beta \cdot \cos \beta \quad (6)$$

塔架上扣点 B 到拱脚 C 的距离 S 比较远,且塔架产生的水平偏位 Δx 对 S' 的影响可以忽略,则 $S \approx S'$ 。

按照上述求 Δy 的方法可以得出:

$$\Delta x = S \cdot \Delta \alpha \cdot \sin \alpha \quad (7)$$

因为 $\Delta \alpha \approx \Delta \beta$,那么根据式(6)、(7)可以求得:

$$\Delta y = \frac{L \cdot \cos \beta}{S \cdot \sin \beta} \cdot \Delta x = \frac{x_k}{H_k} \cdot \Delta x = \lambda_k \cdot \Delta x \quad (8)$$

式中: x_k 为 k 节段控制点到拱脚的水平距离; H_k 为扣塔上 k 节段扣点的位置到拱脚的垂直距离; λ_k 为塔架偏位对 k 节段控制点标高的影响系数, $\lambda_k = x_k / H_k$ 。

对于总共有 k 个节段拱肋吊装情况,则各节段控制点 D 产生的竖向位移计算公式为:

$$\Delta y_1 = \lambda_1 (\Delta x_1 + \Delta x_2 + \dots + \Delta x_k), \Delta y_2 = \lambda_2 (\Delta x_2 + \Delta x_3 + \dots + \Delta x_k), \dots, \Delta y_k = \lambda_k \Delta x_k \quad (9)$$

式中: Δx_k 为吊装第 k 节段拱肋时主缆临时施工荷载引起的塔架偏位,可在当前节段吊装时测量得到; Δy_k 为在第 k 节段控制点 D 产生的竖向位移。

2.3 温度变化对安装线形的影响分析

2.3.1 基本假定

在拱肋节段吊装施工中,温度的变化会使扣索和锚索自由伸缩,引起拱肋节段的标高变化,进而影响拱肋的安装线形^[10]。为分析温度变化对拱肋安装线形的影响作以下假设:①假设在温度变化的影响下,扣索和锚索只发生自由伸缩,索力不发生变化;②假设拱肋节段为刚体,在节段吊装施工过程中只发生刚体位移;③忽略塔架在主索、扣索和锚索的竖向分力作用下产生的弹性压缩变形和螺栓接头压缩变形,只考虑扣塔因扣索和锚索自由伸缩引起的偏位对节段标高的影响。

2.3.2 锚索温度变化对安装线形的影响分析

设锚索的原始长度为 L_m ,在温度作用下自由伸缩的长度为 L_{mT} ,其变形量记为 $\Delta L_{mT} = L_{mT} - L_m$ 。根据基本假定和图3的几何关系,可列出塔架水平偏位等式^[11]:

$$\Delta x = L_{mT} \cdot \cos(\theta - \Delta \theta) - L_m \cdot \cos \theta \quad (10)$$

利用三角函数的和差角公式将式(10)展开后得:

$$\Delta x = L_{mT} \cdot \cos \theta \cdot \cos \Delta \theta + L_{mT} \cdot \sin \theta \cdot \sin \Delta \theta - L_m \cdot \cos \theta \quad (11)$$

根据 $\Delta L_{mT} = L_{mT} - L_m$ 和 $\Delta \theta$ 转角的角度比较小,有 $\cos \Delta \theta \approx 1$, $\sin \Delta \theta \approx \Delta \theta$,则有:

$$\Delta x = \Delta L_{mT} \cdot \cos \theta + \Delta \theta \cdot (L_m + \Delta L_{mT}) \cdot \sin \theta \quad (12)$$

根据假设③,忽略塔架在竖向力作用下发生的弹性压缩变形,则塔架高 $h \approx h'$,根据三角形的余弦定理有:

$$h^2 = b^2 + L_{mT}^2 - 2b \cdot L_{mT} \cdot \cos \theta \quad (13)$$

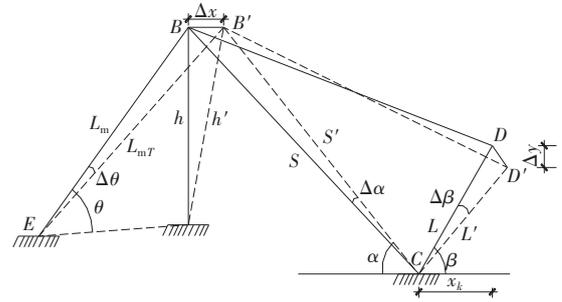


图3 锚索温度变化对拱肋节段标高的影响示意图

$$h'^2 = b^2 + L_{mT}^2 - 2b \cdot L_{mT} \cdot \cos(\theta - \Delta \theta) \quad (14)$$

利用式(13)和式(14)的相等关系以及 $L_{mT} = L_m + \Delta L_{mT}$,可求得:

$$\Delta \theta = \frac{2L_m + \Delta L_{mT} - 2b \cos \theta}{2b(L_m + \Delta L_{mT})} \times \frac{\Delta L_{mT}}{\sin \theta} \quad (15)$$

将式(15)代入式(12)可得:

$$\Delta x = \frac{(2L_m + \Delta L_{mT}) \Delta L_{mT}}{2b} \quad (16)$$

根据 $\Delta \epsilon = \Delta L_{mT} / L_m$ 和 $\Delta \epsilon = \mu \cdot \Delta T$, $\Delta \epsilon$ 为锚索长度的应变增量,可得:

$$\Delta L_{mT} = \mu \cdot \Delta T \cdot L_m \quad (17)$$

将式(16)、(17)代入式(8),可以得到由温度变化引起的锚索自由伸缩,从而拱肋节段标高变化的计算公式为:

$$\Delta y = \frac{\lambda \cdot (2 + \mu \cdot \Delta T) \cdot \mu \cdot \Delta T \cdot L_m^2}{2b} \quad (18)$$

式中: λ 为塔架偏位对拱肋节段控制点标高的影响系数, $\lambda = x_k / H_k$; μ 为锚索的线膨胀系数,本文取 $\mu = 1 \times 10^{-5} \text{ m}/\text{C}$; ΔT 为拱肋节段施工过程中的温度变化量; b 为塔底到锚索锚点的距离。

2.3.3 扣索温度变化对安装线形的影响分析^[12]

设扣索的原始长度为 L_k ,在温度作用下自由伸缩的长度为 L_{kT} ,其变形量记为 $\Delta L_{kT} = L_{kT} - L_k$ 。根据前文的基本假设以及图4的几何关系有:

$$\Delta y = \cos(\alpha - \theta) \cdot \Delta L_{kT} \quad (19)$$

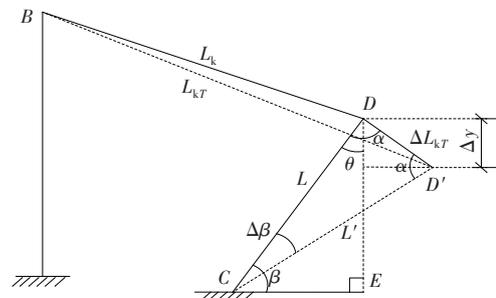


图4 扣索温度变化对拱肋节段标高的影响示意图

由三角形 CDD' 的余弦定理有：

$$(\Delta L_{kT})^2 = L^2 + L'^2 - 2L \cdot L' \cdot \cos \Delta\beta \quad (20)$$

根据假设②有 $L=L'$ ，那么，由式(20)可以计算出：

$$\Delta\beta = \arccos \left[\frac{2L^2 - (\Delta L_{kT})^2}{2L^2} \right] \quad (21)$$

三角形 CDD' 为等腰三角形，则有：

$$\alpha = \frac{\pi - \Delta\beta}{2} = \frac{\pi - \arccos \left[\frac{2L^2 - (\Delta L_{kT})^2}{2L^2} \right]}{2} \quad (22)$$

三角形 CED 为直角三角形，则有：

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \beta \quad (23)$$

根据 $\Delta\epsilon = L_{kT}/L_k$ 和 $\Delta\epsilon = \mu \cdot \Delta T$ ， $\Delta\epsilon$ 为扣索长度的应变增量，可得：

$$\Delta L_{kT} = \mu \cdot \Delta T \cdot L_k \quad (24)$$

将式(22)~(24)代入式(19)可以计算出，当扣索温度变化为 ΔT 后，其伸缩变形对拱肋节段控制点标高的影响为：

$$\Delta y = \mu \cdot \Delta T \cdot L_k \cdot \cos \left\{ \beta - \arccos \left[\frac{2L^2 - (\mu \cdot \Delta T \cdot L_k)^2}{2L^2} \right] \right\} \quad (25)$$

式中： μ 为扣索的线膨胀系数，本文取 $\mu = 1 \times 10^{-5} \text{ m}/^\circ\text{C}$ ； ΔT 为拱肋节段施工过程中的温度变化量； L_k 为扣索的原始长度； β 为控制点与拱脚的水平夹角； L 为控制点到拱脚的长度。

2.4 安装线形计算公式

通过以上分析可以得到安装预抬值计算公式：

$$\Delta h = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 \quad (26)$$

式中： Δh 为修正后的节段预抬值； h_1 为考虑接头刚度损失正装模拟计算得到的标高修正值； h_2 、 h_3 、 h_4 分别为实际施工中塔偏、锚索温度变化、扣索温度变化引起的节段标高修正值。

将式(26)代入式(3)即可得到安装线形公式：

$$H_a = H_m + h_1 + h_2 + h_3 + h_4 \quad (27)$$

3 工程实例

3.1 工程概况

云南澜沧江特大桥为上承式钢筋混凝土箱形拱桥，主跨 155 m，净矢高 39.3 m，矢跨比 1/3.944，拱轴系数 $m=1.99$ 。拱肋采用钢管桁架结构，先采用缆索吊装斜拉扣挂法完成拱肋安装施工，然后再进行外包混凝土的施工。拱肋分为 11 个吊装节段，两岸分别为 G1 段、G2 段、G3 段、G4 段、G5 段以及合龙段。澜沧江特大桥拱肋节段吊装示意如图 5 所示。

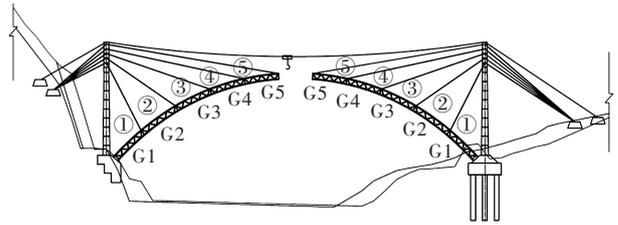


图 5 澜沧江特大桥拱肋节段吊装示意图

3.2 各种安装预抬值影响参数计算

根据澜沧江特大桥缆索吊装系统和拱肋结构的实际参数，可计算得到塔架偏位、温度对拱肋各节段控制点标高的影响参数，具体见表 1。

表 1 塔架偏位、温度对拱肋各节段控制点标高的影响参数

位置	控制点	x_k/m	H_k/m	λ_k	L_m/m	b/m	β/rad	L/m	L_k/m
思茅岸	G1	11.811	59.589	0.198	42.379	40.200	0.800	16.945	50.266
	G2	26.265	61.589	0.426	44.011	41.195	0.728	35.180	49.229
	G3	40.677	63.589	0.640	45.695	42.190	0.656	51.320	55.785
	G4	55.055	65.589	0.839	47.424	43.186	0.583	65.950	66.639
	G5	69.415	67.589	1.027	49.193	44.181	0.509	79.513	79.617
澜沧岸	G1	11.811	56.299	0.210	96.007	89.887	0.800	16.945	64.351
	G2	26.265	58.299	0.451	97.769	90.856	0.728	35.180	70.511
	G3	40.677	60.299	0.675	99.550	91.825	0.656	51.320	81.053
	G4	55.055	62.299	0.884	101.349	92.794	0.583	65.950	93.737
	G5	69.415	64.299	1.080	103.165	93.764	0.509	79.513	107.495

3.3 各节段安装预抬值计算

考虑接头刚度损失正装模拟计算可得到各节段

标高的修正值 h_1 。由于设计合龙温度为 15°C ，本桥拱肋吊装时正处夏季，所以锚索、扣索按升温 20°C 进

行计算,根据表1各参数,利用式(9)、(18)、(25)可计算得到各节段标高的修正值 h_2 、 h_3 、 h_4 。利用式(26)计算得到各节段安装预抬值见表2。

表2 澜沧江特大桥各节段安装预抬值计算结果 cm

位置	控制点	h_1	h_2	$h_3(20^\circ\text{C})$	$h_4(20^\circ\text{C})$	Δh
思茅岸	G1	0.2	0.9	1.1	1.5	3.7
	G2	1.4	2.1	2.3	2.5	8.3
	G3	2.5	3.2	3.4	3.6	12.7
	G4	3.7	4.2	4.6	4.8	17.3
	G5	4.9	5.1	5.8	5.0	20.8
澜沧岸	G1	0.3	1.7	1.3	1.6	4.9
	G2	1.4	3.7	2.7	2.7	10.5
	G3	2.5	5.6	3.0	3.9	15.0
	G4	3.7	7.3	4.4	4.1	19.5
	G5	4.9	8.9	5.8	5.4	25.0

3.4 实测成拱线形误差

将计算得到的安装预抬值用于指导澜沧江特大桥拱肋节段的吊装施工,拱肋合龙成拱后的实测线形与目标线形对比见表3。

表3 澜沧江特大桥拱肋成拱实测线形与目标线形

位置	控制点	X轴坐标/m	目标线形/m	实测线形/m	差值/m
思茅岸	G1	12.718	630.832	630.823	-0.009
	G2	27.172	642.224	642.211	-0.013
	G3	41.584	649.964	649.975	0.011
	G4	55.962	655.122	655.139	0.017
	G5	70.322	657.232	657.241	0.009
澜沧岸	G1	84.678	630.858	630.853	-0.005
	G2	99.038	642.238	642.228	-0.010
	G3	113.416	649.971	649.975	0.004
	G4	127.828	655.136	655.151	0.015
	G5	142.282	657.218	657.236	0.018

由表3可知:实测线形和目标线形变化误差都控制在2 cm以内,说明本文方法计算的安装线形精度较高,满足施工规范的精度要求。

4 结论

(1) 在拱肋吊装过程中节段接头由于采取螺栓临时连接而导致的非完全固结对安装线形的影响较大,采用考虑刚度损失双单元模型方法进行计算,可在考虑拱肋节段接头非完全固结情况下精确计算得

到拱肋安装线形的修正值。

(2) 在拱肋吊装过程中由主缆临时施工荷载引起的塔架偏位对安装线形影响较大,利用本文推导的塔架偏位对安装线形的修正计算公式可以得到精度较高的塔架偏位修正值。

(3) 在拱肋吊装过程中温度变化会使锚索和扣索长度发生自由伸缩,进而导致对安装线形产生较大影响,利用本文推导的锚索、扣索温度变化对安装线形的修正计算公式可以得到精度较高的温度修正值。

(4) 本文提出的考虑各项影响因素的拱肋安装线形计算公式计算精度较高,可直接用于大跨度缆索吊装拱桥钢拱肋安装线形计算。通过调整接头刚度损失参数,本方法同样适用于大跨度缆索吊装拱桥混凝土拱肋安装线形计算。

参考文献:

- [1] 常星.大跨钢筋混凝土箱形拱桥悬臂浇筑技术[J].中外公路,2019,39(6):130-132.
- [2] 李成.大跨度劲性骨架拱桥拱圈施工技术优化设计[D].重庆:重庆交通大学,2017.
- [3] 彭诗文.大跨度劲性骨架混凝土拱桥节段施工受力过程分析[D].成都:西南交通大学,2018.
- [4] 刘书杰.外倾式钢箱拱桥扣索吊装拱肋线形控制[D].上海:同济大学,2008.
- [5] 田仲初,陈得良,颜东煌,等.大跨度拱桥拱圈拼装过程中扣索索力和标高预抬量的确定[J].铁道学报,2004,26(3):81-87.
- [6] 陈得良,缪莉,田仲初,等.大跨度桥梁拱肋悬拼时扣索索力和预抬量计算[J].工程力学,2007,24(5):132-137.
- [7] 孟凡强.拱段吊装过程中的索力优化及拱肋稳定性研究[D].武汉:武汉理工大学,2008.
- [8] 邓亨长,卢伟,李清培,等.缆索吊装系统索塔偏位准确计算方法研究[J].公路,2020,65(8):226-232.
- [9] 吴平琴,潘荣斌,郭吉平.混凝土拱桥悬臂浇筑法施工扣塔偏位对拱肋高程的影响研究[J].中外公路,2020,40(4):154-157.
- [10] 蒋玮,李莘哲.钢管拱桥缆索吊装施工中主索结构状态高精度计算[J].中外公路,2020,40(2):123-126.
- [11] 李清,张基进,郭吉平.混凝土拱桥悬臂浇筑施工温度效应影响研究[J].中外公路,2020,40(3):196-199.
- [12] 游佐巧.大跨度劲性骨架拱桥拱圈施工技术研究及优化[D].重庆:重庆交通大学,2020.