

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20240122002

文章编号: 1672-9331(2024)04-0131-09

引用格式: 吴学伟, 周倩, 刘睿, 等. 钢管混凝土拱桥斜拉扣挂施工的无应力状态控制法[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2024, 21(4): 131-139.

Citation: WU Xuewei, ZHOU Qian, LIU Rui, et al. Unstressed state control method for cable-stayed construction of concrete-filled steel tube arch bridges[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2024, 21(4): 131-139.

# 钢管混凝土拱桥斜拉扣挂施工的无应力状态控制法

吴学伟<sup>1</sup>, 周倩<sup>2</sup>, 刘睿<sup>3</sup>, 杜春林<sup>4</sup>

(1. 湖北交通投资集团有限公司, 湖北 武汉 430050; 2. 重庆建筑工程职业学院, 重庆 400072; 3. 重庆市住房和城乡建设行政审批服务中心, 重庆 400014; 4. 重庆设计集团有限公司市政设计研究院分公司, 重庆 401120)

**摘要:**【目的】避免钢管混凝土拱桥施工过程中温度、临时荷载等因素变化对索力的影响, 实现大跨拱桥拱肋斜拉扣挂节段拼装施工的精准高效调控。【方法】提出以扣索无应力长度代替索力调整拱桥过程状态的控制方法, 推导考虑垂度效应和扣塔偏位的扣索无应力长度计算公式, 研究索力增量与扣索无应力长度变化的关系。【结果】工程算例结果表明, 基于无应力状态法的索力最大误差为5%左右, 高程最大偏差3.7 cm, 计算精度满足要求, 实现了精准高效的施工调控。【结论】该方法可消除温度和临时荷载变化对索力的影响, 减小施工中间状态的计算工作量, 可为大跨度钢管混凝土拱桥节段拼装提供技术支持。

**关键词:** 钢管混凝土拱桥; 无应力状态法; 无应力长度; 扣塔偏位; 垂度效应;

中图分类号: U448.22+2

文献标志码: A

## Unstressed state control method for cable-stayed construction of concrete-filled steel tube arch bridges

WU Xuewei<sup>1</sup>, ZHOU Qian<sup>2</sup>, LIU Rui<sup>3</sup>, DU Chunlin<sup>4</sup>

(1. Hubei Communications Investment Group Co., Ltd., Wuhan 430050, China;

2. Chongqing Jianzhu College, Chongqing 400072, China;

3. Chongqing Housing and Urban Rural Construction Administrative Approval Service Center, Chongqing 400014, China;

4. Chongqing Design Group Co., Ltd. Municipal Design Research Institute branch company, Chongqing 401120, China)

**Abstract:** [Purposes] This article aims to avoid the influence of temperature, temporary loads, and other factors on the cable force during the construction process of concrete-filled steel tube arch bridges and achieve precise and efficient control of the large-span arch bridges constructed by assembling cable-stayed buckles and hanging segments. [Methods] A control method is proposed to adjust the process state of arch bridges by replacing the the cable force with the unstressed length of the cable. The calculation formula for the unstressed length of the cable considering the sag effect and the tower deviation is derived, and the relationship between the increment of the cable force and the change of the unstressed length of the cable is studied. [Findings] The

收稿日期: 2024-01-22; 修回日期: 2024-04-03; 接受日期: 2024-04-03

基金项目: 重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2022NSCQ-MSX0661); 重庆市建设科技计划项目(城科字2023第1-10号); 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202304301)

通信作者: 周倩(1987—)(ORCID: 0000-0003-3962-8578), 女, 高级工程师, 主要从事大跨拱桥建设理论方面的研究。

E-mail: 673413658@qq.com

engineering calculation results show that the maximum error of cable force based on the unstressed state method is about 5%, and the maximum elevation deviation is 3.7 cm. The calculation accuracy meets the requirements, achieving precise and efficient construction control.

[Conclusions] This method can eliminate the influence of temperature and temporary load changes on cable force, reduce the calculation workload of intermediate state of construction, and provide technical support for the assembly of large-span concrete-filled steel tube arch rib segments.

**Key words:** concrete-filled steel tube arch bridge; unstressed state; unstressed length; tower deviation; sag effect

**Foundation items:** Project (CSTB2022NSCQ-MSX0661) supported by Chongqing Natural Science Foundation Project; Project (Chengkezi 2023 No.1-10) supported by Chongqing Construction Science and Technology Plan Project; Project (KJQN202304301) supported by Chongqing Municipal Education Commission Science and Technology Research Project

**Corresponding author:** ZHOU Qian (1987—) (ORCID: 0000-0003-3962-8578), female, senior engineer, research interest: theory of large span arch bridge construction. E-mail: 673413658@qq.com

## 0 引言

大跨度钢管混凝土拱桥钢拱肋往往采用缆索吊装分段架设方法施工<sup>[1]</sup>。其结构体系、自重、温度及临时荷载状态随着拱肋节段的安装不断变化,导致拱肋线形控制极为困难。为确保钢拱肋合龙时结构线形和内力满足设计要求<sup>[2]</sup>,必须考虑各种影响因素,以精确的计算结果对节段拼装过程进行精准控制<sup>[3]</sup>。因此有必要探求一种科学有效、精准适用的方法求解合理索力及预抬值,并以此控制成拱线形。

目前大跨度钢管混凝土拱桥钢拱肋分段安装索力计算方法主要分为力学法<sup>[4]</sup>和优化分析法<sup>[5]</sup>。力学法思路相对清晰,但精度不高,多适用于中小跨径拱桥。对大跨拱桥,为了避免拱肋出现马鞍形变形,采用此类力学法调索时,施工中需要不断调整已张拉扣索的索力,使得施工难度加大,存在由于调索次数过多而引起锚具滑丝等隐患问题。优化分析方法在理论上可以实现扣索一次张拉,但计算量较大。且力学法和优化分析法都无法解决温度和临时荷载变化对施工过程中结构内力和线形的影响问题,局限性较大。随着拱桥跨径增大、施工复杂程度增加,运用上述方法控制合理施工状态的难度也将加大。

为弥补上述拱肋分段拼装计算方法的不足,

借鉴斜拉桥中较为成熟的无应力状态法<sup>[6]</sup>,余玉洁等<sup>[7]</sup>提出可规避施工过程中影响的钢管混凝土拱桥拱肋分段施工无应力状态法。无应力状态控制法主要思路是利用桥梁各构件在分阶段安装过程中无应力状态量稳定这一特点,依据一次成桥目标状态直接求解施工过程中状态<sup>[8]</sup>。目前无应力状态法在斜拉桥施工控制中的研究已经较为成熟,且成功应用于数十座实际工程<sup>[9-11]</sup>。在拱桥中,利用无应力状态法确定系杆长度的文献较多,有关其在拱肋分段安装施工控制中的应用研究相对较少。谭军指出以合理成拱状态作为目标状态,无应力状态控制法可以方便地解决拱肋分节段形成过程中扣索力和线形优化问题<sup>[12]</sup>。李开心等<sup>[13]</sup>在忽略扣塔偏位对扣索伸长量影响的前提下,应用无应力状态法对某跨径90 m的钢筋混凝土拱桥缆索吊装过程进行控制,克服了吊装过程温度和临时荷载变化对索力和线形的影响的问题。上述文献初步表明了无应力状态法应用于拱桥施工中的可行性,但均以索力作为过程调整量,计算量较大,且无法考虑扣塔偏位的影响。随着拱桥跨度的增加,采用上述方法进行调控的难度将显著增加。因此有必要探寻一种精准、高效的大跨拱肋无应力状态控制方法。

本文在分析钢管混凝土拱桥扣塔偏位对扣索无应力长度影响的基础上,推导了考虑垂度效应和扣塔偏位的扣索无应力长度计算公式和索力增

量与扣索无应力长度变化的关系,提出了以扣索无应力长度代替索力调整拱桥过程状态的控制方法,将修正拱肋线形偏差转换为修正扣索无应力长度偏差。该方法通过初张拉无应力长度和目标无应力长度,以锚具的拔出或者收回进行扣索伸长量控制,不受中间状态影响,避免了常规索力计算方法应用于扣索数量较多的大跨度桥梁时扣索力迭代计算量大、收敛困难问题。可以精准、高效地实现大跨拱肋的施工控制,可为同类型拱桥施工提供参考。

### 1 考虑扣塔偏位及垂度效应的扣索无应力索长

#### 1.1 无应力索长

基于最小势能原理,文献[11]推导了桥梁分段施工几何线性平衡微分方程,如式(1)所示:

$$K(\Delta_2 - \Delta_1) = (p_2 - p_1) + (S_2 - S_1) \quad (1)$$

式中:  $K$  代表刚度;  $\Delta_1$  和  $\Delta_2$  代表位移;  $p_1$  和  $p_2$  代表外荷载;  $S_1$  和  $S_2$  代表无应力状态量。

由式(1)可知,桥梁结构内力和位移状态只和外荷载和无应力状态量有关,与调索次数和顺序无关。当外荷载一定时,结构内力和位移只由无应力状态变化量决定。

对索拱结构,结构内力和线形会随着体系转换、荷载变化、拉索张拉变化而改变,但无应力长度只有受到人为调整才会改变,如图 1 所示。图中的  $l_r$  为 1# 扣索水平投影长度,  $h_r$  为 1# 扣索垂直投影长度,  $T_r$  为 1# 扣索索力,  $L_r$  为 1# 扣索索长。一旦荷载和结构体系固定,单元无应力长度变化与单元轴力变化唯一对应。对施工中需要多次调索的体系,只要保证最后一次扣索无应力长度与一次成桥目标无应力长度一致,则索力必然和一次成桥目标状态一致。

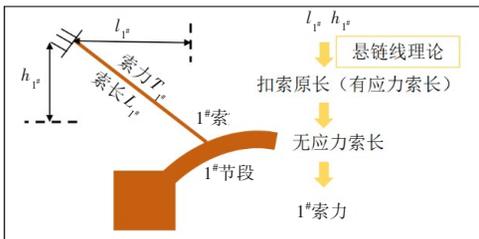


图 1 拱桥结构无应力索长示意图

Fig. 1 Unstressed cable length of arch bridge structure

#### 1.2 扣索无应力索长计算

扣索长度计算如图 2 所示。设扣索有应力索长为  $l$ , 索力为  $T$ , 忽略材料参数误差对扣索变形的影响, 有

$$\begin{cases} l = l_0 + \Delta l_{塔} + \Delta l_{拱} + \Delta l_{张} + \Delta l_t \\ \Delta l_{张} = \frac{Tl_0}{EA} \\ \Delta l_t = \alpha l_0 \Delta t = \alpha l_0 (t_1 - t') \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $l_0$  为扣索无应力长度;  $\Delta l_{张}$  为张拉索力引起的扣索伸长值;  $\Delta l_{塔}$ 、 $\Delta l_{拱}$  分别为扣塔和拱肋偏位引起的扣索伸长值, 可通过有限元法计算得到;  $\Delta l_t$  为温差变化引起的扣索伸长值;  $E$ 、 $A$  分别为扣索弹模和面积;  $\alpha$  为扣索线膨胀系数;  $t_1$ 、 $t'$  分别为计算工况对应的现场环境温度和扣索加工时刻环境温度。

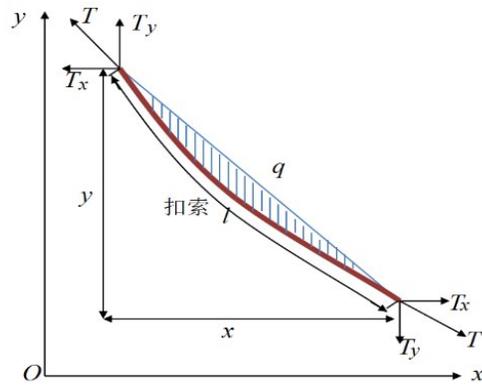


图 2 扣索长度计算图示

Fig. 2 The diagrammatic sketch of cable length

设单根扣索自重均布荷载集度为  $q$ , 两锚固端点水平距离为  $x$ , 竖直距离为  $y$ , 扣索弦线同水平线夹角为  $\theta$ , 参考文献[13], 令  $k = qx/2T$ , 按悬链线理论, 考虑垂度效应的扣索有应力索长  $l$  可按式(3)计算。

$$l = \sqrt{y^2 + \left[ \frac{x \sinh(k)}{k} \right]^2} \quad (3)$$

将式(2)代入式(3), 整理得

$$l_0 = \frac{\sqrt{y^2 + \left[ \frac{x \sinh(k)}{k} \right]^2} - \Delta l_{塔} - \Delta l_{拱}}{1 + \frac{T}{EA} + \alpha(t_1 - t')} \quad (4)$$

式(4)即为计入扣索自重垂度效应和扣塔偏位影响的扣索无应力索长计算公式。

### 1.3 扣索索力与无应力索长变化关系

调整前后扣索和拱肋状态简图如图3所示,索力和索长变化关系如图4所示。调整前:扣索有应力长度为 $l_1$ ,无应力长度为 $l_{10}$ ,扣索力为 $T_1$ ,温度为 $t$ 。调整后:扣索有应力长度为 $l_2$ ,无应力长度为 $l_{20}$ ,扣索力为 $T_2$ ,温度为 $t$ 。 $t'$ 指扣索加工时的环境温度。

调整前状态:索力 $T_1$ 引起扣索伸长量为 $T_1 l_{10} / EA$ ,温差引起的扣索伸长量为 $\alpha l_{10} (t - t')$ ,扣塔偏位引起的扣索伸长量为 $\Delta l_{塔}$ 。调整后状态:索力引起扣索伸长量为 $T_2 l_{20} / EA$ 。

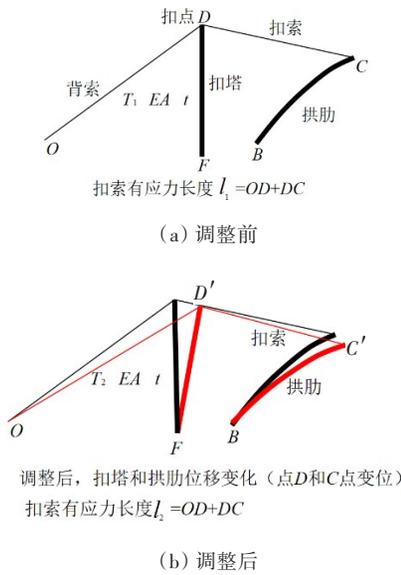


图3 扣索和拱肋状态图示  
Fig. 3 Cable and arch rib state

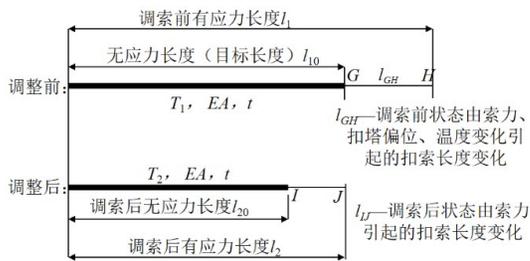


图4 索长和索力变化关系图解

Fig. 4 Relationship between cable length and cable force

由初始状态到调整前状态,由式(2)可推得

$$T_1 = \frac{[l_1 - l_{10} - \alpha l_{10} (t - t') - \Delta l_{塔}] EA}{l_{10}} \quad (5)$$

由于各种施工及设计误差的影响,拱肋合龙

前实际线形同理论线形可能存在较大差异,此时必须在最终合龙前对结构线形进行调整,可将拱肋高程调整量转为扣索无应力长度调整量,为减小操作误差,可根据式(4)将扣索长度改变量换算为索力变化量,通过千斤顶读数进行控制。

由调整前状态到调整后状态有

$$l_2 = l_{20} + \frac{T_2 l_{20}}{EA} \quad (6)$$

$$T_2 = \frac{[l_2 - l_{20}] EA}{l_{20}} \quad (7)$$

式中: $t'$ 为扣索加工时刻环境温度。由式(7)减去式(5)并整理可得:

$$\Delta T = T_2 - T_1 = \frac{EA(l_2 l_{10} - l_1 l_{20}) + EA l_{20} \alpha (t - t') + EA \Delta l_{塔}}{l_{20} l_{10}} \quad (8)$$

## 2 大跨拱肋无应力状态施工控制方法

### 2.1 实施步骤

1) 目标状态确定:首先以最大悬臂阶段为目标状态,根据此时扣索两 endpoint 坐标和索力值,按式(4)计算目标状态下各根扣索无应力长度 $l_0$ 。

2) 节段安装初张拉:节段安装分为两个步骤,先进行初张拉,确保缆索吊安全脱钩,计算此时扣索无应力长度为 $l_1$ 。

3) 以目标无应力长度为控制指标,通过拔出(或者放回)扣索方式进行终调。

### 2.2 算法流程

基于无应力状态控制法基本原理,可把拱肋分阶段成拱状态作为目标状态,通过控制扣索无应力长度优化拱肋线形。使用ANSYS有限元软件编制专门的程序<sup>[14-15]</sup>,基于无应力状态控制法的拱桥施工控制流程见图5。

拱肋合龙前,若实际线形和理论线形差异较大,应进行调整<sup>[16-17]</sup>。具体方法是对当前状态的拱肋线形进行调整,得到新的无应力长度,再根据新的无应力长度进行拔索或者放索。此时,为便于施工操作和控制,也可将扣索无应力长度改变量转化为扣索索力变化量,通过千斤顶进行控制。合龙前拱肋线形调整方法见图6。

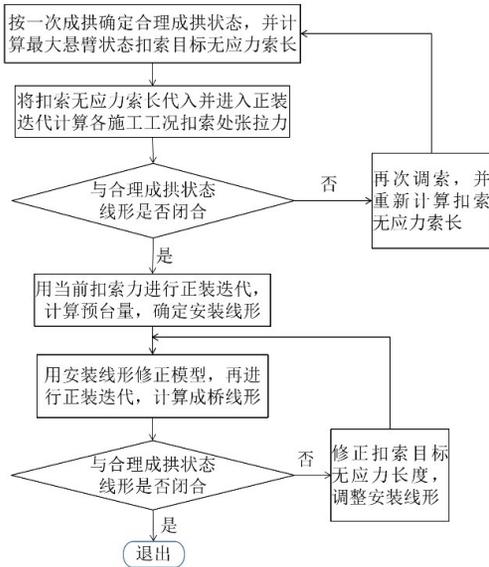


图 5 基于无应力状态法的拱桥施工监控流程

Fig. 5 Construction monitoring process of arch bridges based on unstressed state method

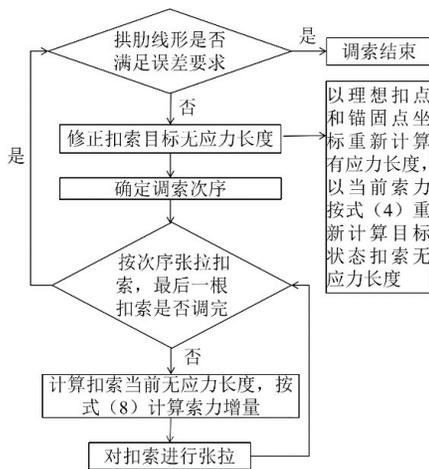


图 6 拱肋线形调整流程

Fig. 6 Process of arch rib alignment adjustment

### 2.3 温度和临时荷载影响的消除

钢管混凝土拱桥在斜拉扣挂架设过程中,监控指令发出的索力和钢拱肋预抬量结果是在设计温度下算得的。事实上,施工现场温度和设计温度通常存在差异,扣索伸长量会随温度变化而改变,从而影响拱肋高程。由式(4)可知,扣索无应力长度计算时,已经考虑了温度变化的影响,施工中很容易测出现场温度,代入公式即可消除温度变化对扣索伸长量的影响。除此之外,扣索索力受施工临时荷载影响,当实际临时荷载与设计值不同时,实际索力值与设计值存在差异,选择两状

态之间的扣索无应力长度作为控制依据,实际索力值修正到设计值时,索力变化必然和理论计算一致,间接消除了临时荷载的影响。

## 3 工程应用

### 3.1 工程概况

某大桥主桥长度 510 m,主桥上部结构采用 3×30 m 先简支后连续 T 梁+300 m 上承式钢管混凝土变截面桁架拱桥+4×30 m 先简支后连续 T 梁。主桥桥宽为 33.5 m,采用上承式钢管混凝土变截面桁架拱桥,拱轴线采用悬链线,跨径为 300 m,矢高为 54.545 m,矢跨比  $f=1/5.5$ ,拱轴系数  $m=1.543$ ,拱脚高度为 9.0 m,拱顶高度为 5.0 m。主拱圈采用等宽度变高度空间桁架结构,断面高度从拱顶 5 m 变化到拱脚 9 m(中到中)。单片拱肋宽度为 2×5 m(中到中),横桥向两片拱肋的中心距离为 17 m,拱肋间设置横联和米撑。在拱脚处与铰连接处的两斜腹杆采用内法兰盘栓接、管外焊接的形式进行连接。管内灌注 C55 自密实微膨胀混凝土。

扣锚系统由扣塔、扣索索及锚固系统组成。在拱肋节段上设置扣点,在 3、4 号交界墩上设置扣索锚座。为平衡扣索张拉产生的水平力,在靠交界墩引桥侧对应拱肋扣索布置后锚索,设置岩锚锚固。前扣索与后锚索张拉端均设置在过渡墩上。半跨拱肋设置扣索 12 组。2<sup>#</sup>~12<sup>#</sup>扣索由 4 根扣索组成,13<sup>#</sup>由 6 根扣索组成。1 号节段采用型钢支撑,两岸 2~13 号扣索锚在交界墩上。张拉端采用自锚式夹片锚,锚固端采用群锚夹片工作锚,并以 P 型挤压锚作保险。扣索由 Φ15.24(抗拉强度为 1 760 MPa)低松弛高强度钢绞线束组成。

### 3.2 扣塔偏位影响分析

为分析扣塔偏位对扣索无应力长度影响规律,本节有限元模型中暂时不建立扣塔单元,见图 7,模拟扣点固结和水平偏位 0.02 m 两种工况,计算对应的扣索无应力长度,计算结果见表 1。

从表 1 可以看出,扣塔偏位对无应力索长影响较大,且扣索长度越大,扣塔偏位引起的无应力索长修正值越大。

表1 扣塔偏位对扣索无应力长度影响

Table 1 Influence of tower deviation on unstressed cable length

索编号	建模长度/m	扣点固结时无应力索长/m	对应扣点水平偏位0.02 m无应力索长/m	扣塔水平偏位0.02 m索长修正值/m
2 <sup>#</sup>	44.0	43.83	43.85	0.02
8 <sup>#</sup>	91.4	91.05	91.11	0.06
13 <sup>#</sup>	157.0	156.35	156.45	0.10

3.3 目标无应力长度确定

综上所述,扣塔偏位对扣索无应力长度影响较大,应予以考虑。本节建立考虑扣塔及扣锚索系统的有限元模型,见图8。以最大悬臂状态为目标状态,获取考虑扣塔偏位后的扣点坐标并计算扣索有应力长度。再根据式(4)计算无应力索长。为减小工作量,本文假定施工温度和扣索加工温度相同,即 $t_1=t'$ 。计算结果见表2。

表2 目标状态扣索无应力索长

Table 2 Unstressed cable length under target state

扣索	有应力长度/m	索力/kN	面积/m <sup>2</sup>	目标无应力长度/m
2 <sup>#</sup>	44.27	421	0.000 973	44.10
3 <sup>#</sup>	48.57	468	0.000 973	48.69
4 <sup>#</sup>	55.46	397	0.000 834	55.60
5 <sup>#</sup>	63.25	613	0.000 834	63.49
6 <sup>#</sup>	72.38	571	0.000 973	72.60
7 <sup>#</sup>	81.08	581	0.000 973	81.33
8 <sup>#</sup>	91.37	581	0.000 834	91.73
9 <sup>#</sup>	100.65	812	0.001 112	101.03
10 <sup>#</sup>	116.42	1 128	0.001 807	116.79
11 <sup>#</sup>	131.79	1 371	0.002 085	132.23
12 <sup>#</sup>	146.90	1 324	0.002 780	147.26
13 <sup>#</sup>	156.94	1 280	0.002 363	157.44

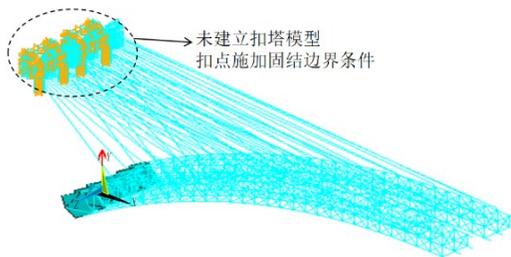


图7 扣点固结有限元模型

Fig. 7 Finite element model of buckle consolidation

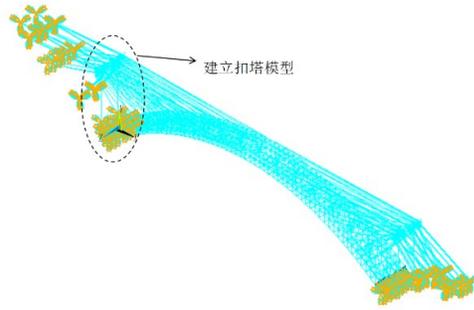


图8 考虑扣塔的有限元模型

Fig. 8 Finite element model considering tower deviation

3.4 无应力状态控制法施工步骤

拱肋节段安装到位后应立即设置一个初张拉力,此时拱肋和扣塔会发生一定的位移,通过有限元计算得到初张拉状态扣索的无应力长度,在最后一次张拉时可通过锚固拔出量控制扣索无应力长度达到目标无应力长度。

表3 拱桥分段施工过程

Table 3 Segmented construction process of arch bridge

阶段	说明
1	安装扣塔和节段1
2	吊装节段2, 2 <sup>#</sup> 扣索初张拉300 kN, 计算2 <sup>#</sup> 扣索此时的无应力长度
3	吊装节段3, 3 <sup>#</sup> 扣索初张拉300 kN, 计算3 <sup>#</sup> 扣索此时的无应力长度
4	2 <sup>#</sup> 扣索按照表2的无应力长度张拉到位
5	吊装节段4, 4 <sup>#</sup> 扣索初张拉400 kN, 计算4 <sup>#</sup> 扣索此时的无应力长度
6	3 <sup>#</sup> 扣索按照表2的无应力长度张拉到位
7	吊装节段5, 5 <sup>#</sup> 扣索初张拉400 kN, 计算5 <sup>#</sup> 扣索此时的无应力长度
8	4 <sup>#</sup> 扣索按照表2的无应力长度张拉到位
9	吊装节段6, 6 <sup>#</sup> 扣索初张拉450 kN, 计算6 <sup>#</sup> 扣索此时的无应力长度
10	5 <sup>#</sup> 扣索按照表2的无应力长度张拉到位
11	吊装节段7, 7 <sup>#</sup> 扣索初张拉450 kN, 计算7 <sup>#</sup> 扣索此时的无应力长度
12	6 <sup>#</sup> 扣索按照表2的无应力长度张拉到位
13	吊装节段8, 8 <sup>#</sup> 扣索初张拉500 kN, 计算8 <sup>#</sup> 扣索此时的无应力长度
14	7 <sup>#</sup> 扣索按照表2的无应力长度张拉到位
15	吊装节段9, 9 <sup>#</sup> 扣索初张拉500 kN, 计算9 <sup>#</sup> 扣索此时的无应力长度
16	8 <sup>#</sup> 扣索按照表2的无应力长度张拉到位
17	吊装节段10, 10 <sup>#</sup> 扣索初张拉650 kN, 计算10 <sup>#</sup> 扣索此时的无应力长度
18	9 <sup>#</sup> 扣索按照表2的无应力长度张拉到位

表3 (续)  
Table 3 (Continued)

阶段	说明
19	吊装节段11, 11 <sup>#</sup> 扣索初张拉650 kN, 计算11 <sup>#</sup> 扣索此时的无应力长度
20	10 <sup>#</sup> 扣索按照表2的无应力长度张拉到位
21	吊装节段12, 12 <sup>#</sup> 扣索初张拉700 kN, 计算12 <sup>#</sup> 扣索此时的无应力长度
22	11 <sup>#</sup> 扣索按照表2的无应力长度张拉到位
23	吊装节段13, 13 <sup>#</sup> 扣索初张拉700 kN, 计算13 <sup>#</sup> 扣索此时的无应力长度
24	吊装合龙段
25	13 <sup>#</sup> 扣索按照表2的无应力长度张拉到位,
26	测量全桥状态, 调整局部扣索

### 3.5 分析结果

按照表3的施工步骤进行正装迭代, 得到各根扣索初张拉后的无应力长度, 如表4所示。通过初张拉无应力长度和目标无应力长度, 以锚具的拔出或者收回进行扣索伸长量控制, 可完全避开中间状态的计算, 大大减小计算工作量。

表4 初张拉无应力长度

Table 4 Unstressed length under initial tensioning

扣索	初张拉无应力长度/m	目标无应力长度/m	终调值/m
2 <sup>#</sup>	43.02	44.10	1.08
3 <sup>#</sup>	45.98	48.69	2.71
4 <sup>#</sup>	52.54	55.60	3.06
5 <sup>#</sup>	59.92	63.49	3.57
6 <sup>#</sup>	68.58	72.60	4.02
7 <sup>#</sup>	76.82	81.33	4.51
8 <sup>#</sup>	86.56	91.73	5.17
9 <sup>#</sup>	95.38	101.03	5.65
10 <sup>#</sup>	110.37	116.79	6.42
11 <sup>#</sup>	124.96	132.23	7.27
12 <sup>#</sup>	139.32	147.26	7.94
13 <sup>#</sup>	148.88	157.44	8.56

该桥采用无应力状态控制法施工的最终索力计算值与实际张拉值对比见表5。最大误差为5%左右, 具有较高的控制精度。

无应力状态控制法各节段计算高程和实测高程对比见表6。该桥采用无应力状态法控制钢管混凝土拱肋吊装施工, 各节段高程误差最大3.7 cm, 满足要求。

表5 扣索索力对比  
Table 5 Comparison of cable force

扣索	实际张拉索力/kN	无应力状态法计算索力/kN	相对误差
2 <sup>#</sup>	430	409	4.88%
3 <sup>#</sup>	478	454	5.02%
4 <sup>#</sup>	405	385	4.94%
5 <sup>#</sup>	626	595	4.95%
6 <sup>#</sup>	583	554	4.97%
7 <sup>#</sup>	593	563	5.06%
8 <sup>#</sup>	593	578	2.53%
9 <sup>#</sup>	829	788	4.95%
10 <sup>#</sup>	1 151	1 093	5.04%
11 <sup>#</sup>	1 399	1 329	5.00%
12 <sup>#</sup>	1 351	1 283	5.03%
13 <sup>#</sup>	1 306	1 241	4.98%

表6 节段高程对比

Table 6 Comparison of segmental elevation

扣索	无应力状态法设计高程	实测高程/m	绝对误差/m	相对误差
2 <sup>#</sup>	1 062.999	1 062.962	-0.037	-0.003 5%
3 <sup>#</sup>	1 069.393	1 069.362	-0.031	-0.002 9%
4 <sup>#</sup>	1 075.150	1 075.185	0.035	0.003 3%
5 <sup>#</sup>	1 080.467	1 080.447	-0.020	-0.001 9%
6 <sup>#</sup>	1 085.184	1 085.169	-0.015	-0.001 4%
7 <sup>#</sup>	1 089.399	1 089.388	-0.011	-0.001 0%
8 <sup>#</sup>	1 093.118	1 093.101	-0.017	-0.001 6%
9 <sup>#</sup>	1 102.474	1 102.486	0.012	0.001 1%
10 <sup>#</sup>	1 104.825	1 104.840	0.015	0.001 4%
11 <sup>#</sup>	1 106.173	1 106.189	0.016	0.001 4%
12 <sup>#</sup>	1 106.543	1 106.560	0.017	0.001 5%
13 <sup>#</sup>	1 106.236	1 106.212	-0.024	-0.002 2%

### 3.6 与传统扣索力计算方法的对比

采用本文无应力状态法和ANSYS优化算法确定的最终节段高程与实测值的偏差对比见图9。

分析表明: 采用无应力状态法确定的最终节段高程与实测值的偏差较优化分析法小。采用无应力状态法, 各节段高程误差最大0.037 m, 采用ANSYS优化算法, 各节段高程误差最大0.056 m。究其原因, 是由于在应用优化分析法时, 未考虑温度变化对扣索力的影响。

采用ANSYS优化算法进行索力优化分析时, 迭代次数高达26次, 计算量大, 耗时长。采用以扣

索无应力长度作为过程控制目标的无应力状态法可省略繁琐的迭代过程,工作效率较高。

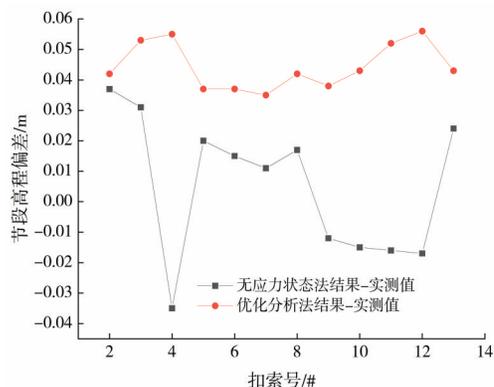


图9 无应力状态法和ANSYS优化算法结果对比

Fig 9 Result comparison between unstressed state method and ANSYS optimization algorithm

## 4 结论

本文将无应力状态控制法的原理应用于钢管混凝土拱桥钢管拱肋吊装,同时考虑扣塔偏位及垂度效应影响,实现了大跨拱桥拱肋节段拼装的精准控制,主要结论如下:

1) 首次推导了考虑扣塔偏位和垂度效应的扣索无应力长度计算公式,施工控制效果较好。

2) 推导了扣索索力与无应力索长的变化关系,提出将拱肋线形的偏差转换为扣索无应力长度偏差进行调整。

3) 相较于优化分析法,以扣索无应力长度为过程目标的无应力状态法误差更小,工作效率更高,便于实际工程的应用。

### [参考文献]

- [1] 尹涛,周陈,刘志鹏,等.山区千米级大跨径拱桥缆索吊装系统结构设计[J].公路,2023,68(12):107-117.  
YIN Tao, ZHOU Chen, LIU Zhipeng, et al. Structural design of cable hoisting system for bridge with main span exceeding 1000 m in mountainous areas [J]. Highway, 2023, 68(12): 107-117.
- [2] 叶李斌.基于长期健康监测的大跨空间结构使用阶段的状态分析[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2023,20(1):86-94. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220427010.

- YE Libin. State analysis of long-span space structure in service stage based on long-term health monitoring [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2023, 20(1): 86-94. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220427010.
- [3] 周锋,高向宇,程刚杰,等.钢吊箱围堰三维模拟分析及结构改进[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2020,17(4):47-54. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2020.04.007.  
ZHOU Feng, GAO Xiangyu, CHENG Gangjie, et al. 3D simulation analysis and structural improvement of steel box cofferdam [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2020, 17(4): 47-54. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2020.04.007.
- [4] 周水兴,周琳淇,刘增武.钢管拱切线拼装坐标修正在ANSYS中的实现方法[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2023,42(6):18-23. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2023.06.03.  
ZHOU Shuixing, ZHOU Linqi, LIU Zengwu. Implement method of coordinate correction of tangent assembly of steel tubular arch in ANSYS [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2023, 42(6): 18-23. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2023.06.03.
- [5] 赫中营,龙一鸣,王根会.自锚式悬索桥索力优化的双矩阵法[J].长安大学学报(自然科学版),2023,43(5):51-60. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2023.05.006.  
HE Zhongying, LONG Yiming, WANG Genhui. Double matrix method for optimizing cable force of self-anchored suspension bridge [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2023, 43(5): 51-60. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2023.05.006.
- [6] 张朝晖,史姣.分阶段成形结构无应力状态控制法基本静力平衡方程研究[J].武汉大学学报(工学版),2019,52(10):885-890. DOI: 10.14188/j.1671-8844.2019-10-006.  
ZHANG Zhaohui, SHI Jiao. Study of basic static equilibrium equation of unstressed state control method in phased forming structure [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2019, 52(10): 885-890. DOI: 10.14188/j.1671-8844.2019-10-006.
- [7] 余玉洁,罗永琪,周文,等.基于零位移与无应力状态控制的斜拉扣挂施工扣索力确定方法[J].工程科学与技术,2024,56(3):83-89. DOI: 10.15961/j.jsuese.202300186.

- YU Yujie, LUO Yongqi, ZHOU Wen, et al. Combined algorithm for the fastening stay force determinations in cantilever construction by synthesizing the zero-displacement and zero-stress state control methods[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2024, 56(3): 83-89. DOI: 10.15961/j.jsuese.202300186.
- [8] 高玉峰, 杨永清, 蒲黔辉, 等. 桥梁施工监测控制理论及工程应用2019年度研究进展[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2020, 42(5): 98-105. DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.119.
- GAO Yufeng, YANG Yongqing, PU Qianhui, et al. State-of-the-art review of the theory of bridge construction monitoring and control and its application in 2019 [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2020, 42(5): 98-105. DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.119.
- [9] 李国平, 黎金星. 基于无应力长度目标的平行钢绞线斜拉索张拉方法[J]. *中国公路学报*, 2017, 30(2): 48-56. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.02.007.
- LI Guoping, LI Jinxing. Tension strategy derived by non-stress length of parallel steel strand stay cables[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(2): 48-56. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.02.007.
- [10] 刘晓宝. 大跨混合梁斜拉桥钢箱梁段悬臂拼装线形计算研究[J]. *施工技术*, 2017, 46(11): 29-31. DOI: 10.7672/sjgs2017110029.
- LIU Xiaobao. Study on the linear calculation of cantilever assembly of steel box girder of cable-stayed bridge with long span hybrid girder [J]. *Construction Technology*, 2017, 46(11): 29-31. DOI: 10.7672/sjgs2017110029.
- [11] 杜仕朝, 刘仲洋, 康春霞, 等. 基于无应力状态法的斜拉桥大范围调索技术研究[J]. *公路*, 2017, 62(12): 128-133.
- DU Shizhao, LIU Zhongyang, KANG Chunxia, et al. Research on the technology of large scale cable adjustment of cable-stayed bridge based on unstressed state control method [J]. *Highway*, 2017, 62(12): 128-133.
- [12] 谭俊. 无应力状态控制法在桥梁施工控制中的应用[J]. *公路*, 2016, 61(4): 122-126.
- TAN Jun. Application of stress-free state control method in bridge construction control [J]. *Highway*, 2016, 61(4): 122-126.
- [13] 李开心, 龚清盛, 田维锋, 等. 拱桥缆索吊装施工的无应力状态控制法[J]. *中外公路*, 2012, 32(6): 203-207. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2012.06.077.
- LI Kaixin, GONG Qingsheng, TIAN Weifeng, et al. Stress-free state control method for cable hoisting construction of arch bridge [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2012, 32(6): 203-207. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2012.06.077.
- [14] 唐必刚, 赵怡彬. 基于ANSYS接触分析的拱座台阶基础计算[J]. *公路工程*, 2017, 42(3): 170-174, 191. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0610.2017.03.034.
- TANG Bigang, ZHAO Yibin. Computation of stress on the step-shaped foundation of arch seat according to contact analysis by ANSYS [J]. *Highway Engineering*, 2017, 42(3): 170-174, 191. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0610.2017.03.034.
- [15] 周倩, 周建庭, 马虎, 等. 钢管拱肋分段吊装扣索一次张拉索力改进算法[J]. *交通运输工程学报*, 2020, 20(1): 92-101. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2020.01.007.
- ZHOU Qian, ZHOU Jianting, MA Hu, et al. Improved algorithm of cable force for one-time cable tensioning on steel tube arch ribs with segmental hoisting [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2020, 20(1): 92-101. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2020.01.007.
- [16] 周倩, 周建庭, 张嘉诚, 等. 大跨钢管混凝土拱桥混凝土自调载灌注方法[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(3): 82-89. DOI: 10.11918/201810177.
- ZHOU Qian, ZHOU Jianting, ZHANG Jiacheng, et al. Self-regulating loading pouring method of long span CFST arch bridge [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2020, 52(3): 82-89. DOI: 10.11918/201810177.
- [17] ZHOU Q, ZHOU J T, FENG P C, et al. Full-scale experimental study on temperature field of large-diameter CFST arch bridges under strong radiation and large daily ambient temperature difference [J]. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2022, 12(5): 1247-1263. DOI: 10.1007/s13349-022-00604-1.

(责任编辑:毛娜;校对:赵冰)