

# 大跨拱桥施工阶段索—拱组合结构的自振特性分析

刘小飞

(贵州路桥集团有限公司, 贵州 贵阳 550001)

**摘要:** 缆索吊装法是大跨拱桥施工的一种重要施工方法, 施工阶段由支撑扣索与拱节段形成的临时索—拱组合结构在复杂环境下的动力问题值得关注。该文以贵州大小井大桥节段吊装过程为工程依托, 分析归纳索—拱结构模态以及对应频率的分布特征。分析了拉索抗拉刚度、主拱抗弯刚度和边界条件对结构模态分布的影响。结果表明: 索—拱结构同时存在索的局部振动模态和结构的整体振动模态; 随着吊装节段的增加, 结构将更容易出现整体振动; 主拱抗弯刚度和边界条件对结构整体振动模态分布具有重要影响, 拉索抗拉刚度对结构整体振动模态没有影响。

**关键词:** 大跨拱桥; 缆索吊装; 索—拱组合结构; 局部/整体模态; 自振特性

## 1 前言

缆索吊装法是大跨度拱桥重要的施工方法之一, 施工过程中拉索与主拱通过斜拉扣挂方式形成了临时的索—拱组合结构。随着施工进程的推进, 拱节段、索从前端依次安装, 构件数目增多、结构体系变柔、刚度减小。由于施工阶段未形成最终的结构体系, 索—拱结构的刚度、稳定性与安全性远低于成桥状态, 成为控制拱桥设计的关键因素之一。近年来, 国内外学者对索—拱结构进行了广泛的关注, 相关的研究涉及索力简化计算方法、优化及索—拱结构的施工控制技术, 索—拱结构的静力稳定性、经济性能等。值得特别关注的是, 研究者在进行索—拱结构的主共振、亚谐共振、参数共振及非线性响应时发现, 一定的参数组合条件下结构可能发生大幅振动并导致结构破坏。这充分说明了对大跨拱桥缆索吊装阶段的临时索—拱组合结构进行动力分析的重要性, 同时频率、模态是各类共振及大幅振动分析的基础。

基于上述背景, 该文以贵州省大小井特大桥施工过程中形成的索—拱结构体系为依托, 进行简化抽象并建立多索—拱模型, 研究索—拱结构的面内自振特性, 分析归纳模态以及对应频率的分布特征。

## 2 施工阶段索—拱组合结构自振特性

### 2.1 工程背景与有限元模型

大小井特大桥主桥为上承式钢管混凝土桁架拱, 计算跨径为 450 m, 矢高  $h=100$  m, 矢跨比为 1/4.5, 拱轴线为拱轴系数  $m=1.55$  的悬链线。主桥采用无支架斜拉扣挂缆索吊装系统施工, 缆索吊装系统由起吊安装缆索吊机、斜拉扣挂系统和平衡稳定系统三部分组成。主拱圈节段划分按构件运输长度和吊装重量控制, 从拱脚至拱顶共划分为多个节段。

为分析结构的振动特性, 将主拱节段和扣索结构分别简化为梁和索, 可得到如图 1 所示的索—拱系统, 其中  $n$  表示拉索的数目。该文选取  $n=3$  根拉索支撑主拱的典型吊装节段, 采用 Midas/Civil 有限元软件建立三索—拱模型, 其中每根索和每段梁采用 100 个

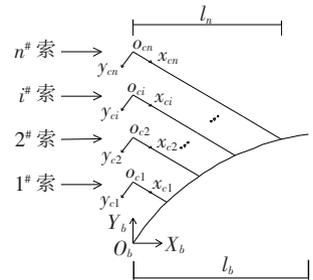


图 1 吊装过程索—拱结构坐标系统示意图

单元模拟,充分考虑结构的局部振动特性,主要参数如表1、2所示,其中 $m_c$ 和 $m_g$ 为单位长度的质量, $E_c A_c$ 和 $E_g A_g$ 为轴向刚度, $l_n$ 和 $l_b$ 为水平方向的长度, $\theta_c$ 和 $\theta_g$ 为沿水平方向的倾角, $H$ 为索的张力, $E_g I_g$ 为拱的抗弯刚度。

表1 扣索主要计算参数

扣索 编号	$m_c /$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$ )	$E_c A_c /$ kN	$H /$ kN	$l_n /$ m	$\theta_c /$ ( $^\circ$ )
1 <sup>#</sup>	5.49	$1.36 \times 10^5$	361.6	34.841	43.100
2 <sup>#</sup>	5.49	$1.36 \times 10^5$	451.9	43.966	14.325
3 <sup>#</sup>	5.49	$1.36 \times 10^5$	466.7	65.313	27.268

表2 主拱主要计算参数

主拱 编号	$m_g /$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$ )	$E_g A_g /$ kN	$l_b /$ m	$\theta_g /$ ( $^\circ$ )	$E_g I_g /$ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$ )
1 <sup>#</sup>	2 361.953	$7.37 \times 10^7$	26.55	40.81	$1.981 \times 10^7$
2 <sup>#</sup>	1 993.562	$5.42 \times 10^7$	19.88	38.02	$8.710 \times 10^6$
3 <sup>#</sup>	1 993.562	$5.42 \times 10^7$	19.59	35.37	$8.710 \times 10^6$

## 2.2 索-拱结构的频率与模态分析

对典型的三索-拱结构进行分析发现,结构的振动模态以索的局部振动为主,即只有某一根索发生某一阶次的振动,这就是结构的局部振动模态,除此之外,结构还有索与拱共同参与的整体振动模态。图2中第5阶振动模态(对应频率11.812 Hz)为整体振动模态,该阶模态前后的模态均为索的局部振动模态。在拱节段的吊装施工过程中,当主拱为空钢管时随着节段的增加,索-拱结构变柔,易出现整体振动。

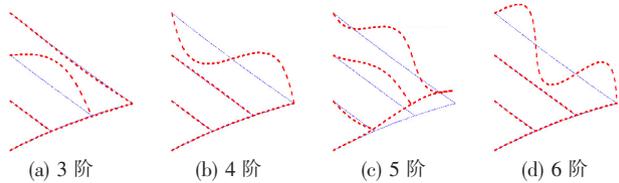


图2 三索-拱组合结构典型的模态分布图

### 2.2.1 拉索抗拉刚度(EA)的影响分析

为了分析拉索刚度对结构模态及对应频率的影响。在三索-拱模型的基础上,拉索刚度取1、1.5、2倍原抗拉刚度分别建立模型:模型1-1(抗拉刚度为EA)、模型1-2(抗拉刚度为1.5EA)和模型1-3(抗拉刚度为2EA),进行动力特性计算,前10阶振动频率及对应模态分布见表3。

表3 不同拉索抗拉刚度时索-拱模型振动特性

模态 阶次 /阶	EA		1.5EA		2EA	
	频率/ Hz	振动 形式	频率/ Hz	振动 形式	频率/ Hz	振动 形式
1	1.545	转动	1.914	转动	2.174	索
2	3.062	索	2.486	索	2.198	转动
3	6.126	索	4.975	索	4.356	索
4	9.195	索	7.474	索	6.551	索
5	11.812	索、拱	9.985	索	8.765	索
6	12.270	索	11.814	索、拱	11.006	索
7	15.354	索	12.514	索	11.816	索、拱
8	18.448	索	15.063	索	13.279	索
9	21.555	索	17.638	索	15.590	索
10	24.676	索	20.241	索	17.944	索

对比表3中3个模型计算的结果可以发现:随着拉索抗拉刚度的增加,拱绕拱脚转动的频率增加,说明扣索抗拉刚度增加将会改善主拱边界受力的情况。此外,由于拉索抗拉刚度的增加,除了第1阶频率外,结构的各阶振动频率随着拉索抗拉刚度的增加而减小。对比整体振动时的模态频率,不同抗拉刚度时模态频率相差小,扣索抗拉刚度对索-拱结构整体振动模态影响很小。

### 2.2.2 主拱刚度(EI)的影响分析

为了分析主拱刚度对结构模态及对应频率的影响。在三索-拱模型的基础上,主拱刚度取1.0、1.5、2.0倍原主拱刚度(EI)分别建立模型:模型2-1(刚度为EI)、模型2-2(刚度为1.5EI)和模型2-3(刚度为2EI),进行动力特性计算,前10阶振动频率及对应模态分布见表4。

表4 不同主拱刚度时索-拱模型振动特性

模态 阶次 /阶	EI		1.5EI		2EI	
	频率/ Hz	振动 形式	频率/ Hz	振动 形式	频率/ Hz	振动 形式
1	1.545	转动	1.547	转动	1.548	转动
2	3.062	索	3.062	索	3.062	索
3	6.126	索	6.125	索	6.125	索
4	9.195	索	9.194	索	9.194	索
5	11.812	索、拱	12.271	索	12.271	索
6	12.270	索	14.762	索、拱	15.355	索
7	15.354	索	15.354	索	17.912	索、拱
8	18.448	索	18.448	索	18.448	索
9	21.555	索	21.554	索	21.553	索
10	24.676	索	24.677	索	24.677	索

对比表 4 中 3 个不同主拱刚度模型的结果可发现:不同主拱刚度( $EI$ )对应的各阶振动频率基本没有改变,主拱刚度( $EI$ )的改变对拉索的振动频率影响可以忽略。此外,随着主拱刚度( $EI$ )的增加,结构发生整体振动的模态频率增加,这表明主拱振动频率由于刚度的增加而增加,同时结构发生整体振动的频率阶次跟着后移,说明主拱刚度的变化对索—拱结构整体振动的模态分布起重要作用。

### 2.2.3 边界条件的影响分析

为分析边界条件对结构模态及频率的影响。在三索—拱模型的基础上,考虑铰接、固结两种边界条件分别建立模型:模型 3—1(铰接)和模型 3—2(固结),进行动力特性计算,前 10 阶振动频率及模态见表 5。

表 5 不同边界条件时索—拱模型振动特性

模态阶次/阶	铰接模型		固结模型	
	频率/Hz	振动形式	频率/Hz	振动形式
1	1.545	转动	2.306	索
2	3.062	索	3.476	索
3	6.126	索	4.617	索
4	9.195	索	6.939	索
5	11.812	索、拱	9.278	索
6	12.270	索	11.638	索
7	15.354	索	14.026	索
8	18.448	索	16.296	索、拱
9	21.555	索	16.445	索
10	24.676	索	18.900	索

对比表 5 中两个模型可以发现:当拱脚由铰接转化为固结后,索的各阶频率变小,频率的出现更加密集,同时主拱不再出现转动,拱的自振频率有所提高。当边界条件改变后,结构的整体振动模态频率明显增大,说明当拱脚由铰接转化为固结后,发生整体振动需要更多的能量。

## 3 结论

(1) 在大跨拱桥缆索吊装施工过程中,随着施工的推进索—拱组合结构将出现整体振动。

(2) 拉索抗拉刚度的增加对索—拱结构的整体振动模态分布没有影响。

(3) 随着主拱刚度的增加,结构整体振动模态频

率增加,主拱刚度对索—拱结构整体振动模态分布起重要作用。

(4) 主拱端部由铰接变为固结时,出现整体振动模态需要更多能量,边界条件对整体振动模态分布有较大影响。

### 参考文献:

- [1] 涂光亚,袁航.大跨度钢管混凝土拱桥成桥状态钢管应力优化研究[J].中外公路,2019(2).
- [2] 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,2019(2).
- [3] 成凯,叶锡钧,梁伟.大跨度异形拱桥动力特性分析[J].中外公路,2019(4).
- [4] 罗亭.拱桥缆索吊装施工索力简化计算方法[J].公路工程,2016(3).
- [5] 胡常福,郑恒,任伟新,等.考虑几何非线性的新型索拱桥拱轴线优化[J].土木建筑与环境工程,2014(4).
- [6] 卓小丽.悬拼钢筋混凝土箱拱合理施工索力与拱轴线的优化研究[D].长沙理工大学硕士学位论文,2015.
- [7] 张昕.索拱组合体系张弦拱桥结构分析与施工控制[J].上海公路,2014(2).
- [8] 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(6).
- [9] 卢郁霖,郝志鹏,毛明超.索拱结构布索方式研究与静力特性分析[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2017(2).
- [10] 魏强,李龙龙,魏晔,等.下部支承刚度对索拱结构力学性能的影响分析[J].建筑结构,2015(2).
- [11] Nakamura S., Tanaka H., Kato K. Static Analysis of Cable-Stayed Bridge with CFT Arch Ribs[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(4): 776—783.
- [12] 郝志鹏,卢郁霖,毛明超.弦撑式索拱结构平面内稳定性研究[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2017(1).
- [13] 杨大彬,张毅刚,吴金志.新型落地索拱结构及其力学性能分析[J].建筑结构学报,2011(8).
- [14] Cheng K. Study on an Arch Bridge Cable Technology and the Stability of the Main Arch Construction[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 608—609: 732—736.
- [15] 吕建根,赵跃宇,王荣辉.索拱组合结构的动力建模及其内共振分析[J].中南大学学报(自然科学版),2010(1).
- [16] Kang H., Zhu H., Zhao Y. In-Plane Non-Linear Dynamics of the Stay Cables[J]. Nonlinear Dynamics, 2013, 73(3): 1 385—1 398.