

# 基于迭代分析的多塔悬索桥合理成桥状态确定方法

周云岗<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 基于传统悬索桥成桥状态计算方法, 应用有限元法, 提出了一种基于 ANSYS 有限元分析的确定多塔悬索桥主缆成桥线形的迭代算法. 在此基础上, 进行了 3~6 塔悬索桥试设计, 针对试设计方案的合理成桥状态进行了算例分析, 并与重力刚度理论计算结果进行了对比. 算例表明, 利用该方法可以准确地得到多塔悬索桥的成桥线形和内力. 该方法不仅可以应用于平面缆索体系的成桥状态分析, 同样也适用于空间缆索体系.

**关键词:** 桥梁工程; 多塔悬索桥; 合理成桥状态; 主缆线形; 有限元法; 几何非线性分析

**中图分类号:** U448.225 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.01.023

## 0 引言

悬索桥合理恒载状态的求解不仅是悬索桥设计时的一项重要内容, 也是施工控制计算的核心<sup>[1-2]</sup>.

在分析悬索桥这种柔性结构时, 一种方法是采用能考虑结构大位移和初应力影响的非线性有限元法<sup>[3]</sup>, 另一种方法是根据主缆自身的平衡条件自动考虑各种非线性影响因素的数值解析法<sup>[4-5]</sup>, 或者将两种方法结合起来<sup>[6]</sup>. 数值解析法的优点是可以比较简单地处理有限元难以处理的诸如主缆与鞍室的接触问题和鞍室顶推问题等, 且输入数据少, 计算速度快, 但是只有吊索力确定时, 其解答才是精确的. 有限元法的优点是具有通用性, 可考虑加劲梁的影响, 且能采用多个梁单元或杆单元来模拟鞍室及其顶推, 但是计算比较复杂.

与传统悬索桥相比, 多塔悬索桥结构柔度更大, 几何非线性效应更加显著, 特别是中塔处于自由状态, 成桥状态的计算精度要求更高. 进行悬索桥设计时, 吊索力无法精确确定, 数值分析法不可避免产生误差, 由于多塔悬索桥跨数较多, 误差累积效应<sup>[7]</sup>会更加显著, 而传统有限元分析法多将缆索与梁塔分开考虑, 忽略了系统之间的相互影响.

笔者基于传统悬索桥成桥状态计算方法, 以全桥模型为对象, 以几何控制参数为目标, 提出了一种基于 ANSYS 有限元分析的确定多塔悬索桥主缆成桥线形的迭代算法.

## 1 计算模型

### 1.1 结构计算模型

笔者以主跨为 1 400 m 的三塔悬索桥试设计方案为对象, 如图 1 所示, 详细介绍多塔悬索桥合理成桥状态的确定思路及优化算法.

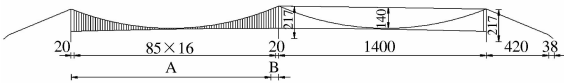


图 1 三塔悬索桥立面布置

Fig. 1 Elevation of three-town suspension bridge

试设计方案采用(420 m + 1 400 m + 1 400 m + 420 m)的两跨连续结构. 主梁为封闭式流线型扁平钢箱梁, 箱梁中心线处高 3.5 m, 桥塔为门式, 边塔为混凝土塔, 中塔为钢塔, 全高为 217 m, 桥面以上高度为 147 m. 中塔横向等宽. 主缆垂度为 140 m, 矢跨比为 1/10. 采用竖直吊索, 全桥共有 344(86 × 4)根.

结构的材料参考已有工程实例确定.

采用单主梁模式建立 ANSYS 分析模型, 如图 2 所示. 主梁和索塔采用空间梁单元(Beam44)模

收稿日期:2013-09-17;修订日期:2013-11-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51008223)

作者简介:周云岗(1980-),男,江苏淮安人,工程师,博士,主要从事大跨度桥梁设计理论研究,E-mail:0710020026

@tongji.edu.cn.

拟,吊索与主梁之间通过刚性杆相连,吊索采用只受拉杆多段杆单元(link10)模拟.塔、梁之间耦合横向自由度.



图2 三塔悬索桥计算模型

Fig. 2 Analysis model of three-town suspension bridge

进行成桥状态计算时,结构荷载设计值参照苏通长江大桥、泰州长江大桥和舟山连岛工程等大型桥梁的设计条件确定.

## 1.2 几何非线性效应

《公路悬索桥设计规范》(报批稿)中建议尽量采用有限位移理论进行设计计算分析,《特大跨径钢箱梁悬索桥设计指南》(报批稿)中明确指出“总体计算应采用有限位移理论”,本质上均是要求计入结构的非线性影响.悬索桥的几何非线性影响来源于:结构的大位移效应、主缆的恒载初始内力效应及缆索的自重垂度效应.

### 1.2.1 结构的大位移效应

多塔悬索桥呈超柔度结构特征,外荷载作用下结构变形大,结构在变形后的状态下实现平衡.因此,平衡方程必须建立在变形后的位置上.可以用基于 TL 列式(总体坐标法)、UL 列式(拖动坐标法)和 CR 列式法的有限位移理论来考虑. ANSYS 中采用大位移刚度矩阵考虑结构的大位移效应.

### 1.2.2 主缆恒载初始内力效应

主缆恒载初始内力效应是指结构初始内力引起的结构刚度变化对后期荷载响应的影响问题.该效应本质上与梁柱效应的性质是相同的.前者为轴拉力,使结构刚度增大;后者为轴压力,使结构刚度减小.经典计算方法为稳定函数法<sup>[8]</sup>. ANSYS 中采用初应力刚度矩阵考虑  $P-\Delta$  效应.

### 1.2.3 缆索的自重垂度效应

缆索的垂度效应分析普遍采用有限元法.当前主要有 4 种模拟方法:等效模量法、多段杆单元法、多节点曲线索单元法、悬链线索单元法.数值解析法和有限元法<sup>[9]</sup>是分析悬索桥力学状态的两种重要方法.应用数值解析法计算时,一般采用悬链线索单元法模拟;建立有限元模型进行总体分析时,可采用多段杆单元法模拟.

## 2 确定方法

### 2.1 基本方法

针对多塔悬索桥结构柔度大,非线性效应显

著的特点,提出了一种基于 ANSYS 有限元分析的确定多塔悬索桥主缆成桥线形的迭代算法,称为有限单元迭代法.该方法根据拟定的理想状态,建立有限元分析模型,其中主缆线形根据几何控制参数初拟为抛物线,其内力按挠度理论估算,索塔和主梁线形按设计线形确定,通过非线性迭代获得理想线形.

### 2.2 确定目标

#### 2.2.1 合理成桥状态的确定准则

桥梁的合理成桥状态必须包括内力状态和线形状态.对于悬索桥来说,内力状态应包括主梁、索塔和吊索的受力状态;线形状态主要是主梁的成桥线形、索塔的纵向变形和主缆的几何线形.理想成桥状态下,悬索桥的内力和线形应满足以下各要求.

(1) 索塔弯矩:索塔轴心受压,塔根弯矩为零.

(2) 吊索轴力:索力分布均匀,且基本相等.由于索塔附近自由梁段较长,允许塔区索力有突变.

(3) 主梁弯矩:主梁弯矩呈刚性支承连续梁分布.

(4) 主缆线形:几何控制点满足设计要求,包括 IP 点、垂度点等.

(5) 塔梁线形:主梁竖向线形位于设计位置,索塔纵向变形为零.

#### 2.2.2 目标状态

结构的目标状态就是指采用有限元方法迭代计算多塔悬索成桥状态时,判定结构内力和变形达到理想状态的收敛条件.根据合理成桥状态的确定准则和有限元迭代法的特点,可确定结构内力和线形的收敛条件为:(1)主缆、主梁、索塔的变形趋于零;(2)主梁弯矩分别均匀,呈刚性支承连续梁分布;(3)索塔的弯矩趋于零;(4)吊索索力分布均匀.

### 2.3 计算流程

有限单元迭代法的基本思想是先以设计线形为初态建立有限元模型,初步估算主缆内力,然后迭代修正结构的初始状态,直至结构的恒载线形与理想线形之间的误差满足容许误差.

采用有限元法进行非线性迭代计算的步骤如图 3 所示.图中,  $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_4$  为容许误差,可按期望精度设定.该方法的本质是通过迭代计算,不断修正结构的初始状态,最终使其与理想状态一致.可见,该方法的核心是修正结构初始状态,包括主缆

的线形和内力、吊索的内力、主梁的线形和索塔的变位.主缆线形和内力修正的目标是在恒载作用下主缆所有节点的位移为零.其中,主缆垂度点通过修正主缆内力来实现.若主缆垂度误差为 $\Delta f$ ,则主缆初始张力调整值为

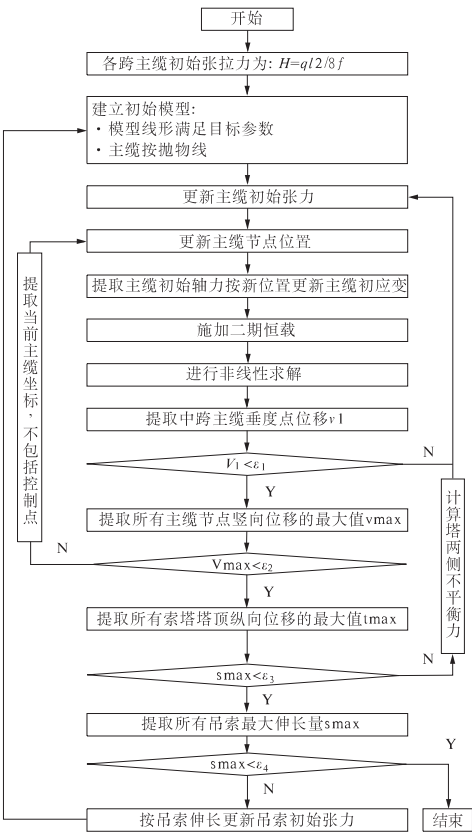


图 3 有限单元迭代法计算流程

Fig. 3 Iteration process of the finite element analysis

$$\Delta H = -\Delta f \cdot Q_q \cdot L^2/8f^2.$$

式中: $Q_q$  为恒载集度; $L$  为主跨跨径; $f$  为主缆垂度.其他节点通过更新初始位置来修正.吊索内力修正的目标是在恒载作用下主梁的挠度为零,保证主梁的线形满足设计要求.索塔变位修正的目标是索塔纵向变形为零,保证在恒载作用下塔根不出现弯矩.

3 计算成果

应用 ANSYS 二次开发功能,编制有限单元迭代的计算程序,计算前节拟定的三塔悬索桥试设计方案的合理成桥状态,如图 4 所示.

恒载作用下,单根主缆轴力 306 MN,应用重力刚度理论,可得主缆轴力为 308 MN,两者误差为 0.6%,表明文中所提方法的计算结果准确可靠.成桥状态下,缆索系统及加劲梁竖向位移在 $-6 \sim 2$  mm 之间;主梁弯矩分布均匀且弯矩最大

值仅为 33 MN,呈刚性支承连续梁状态;吊索力基本相等,中塔两侧第一根吊索力突变与主梁布置有关.该位置主梁连续通过中跨,自由段很长,故吊索承担的梁段荷载也较大,这也是主梁弯矩突变的原因.边塔塔根弯矩为 32 MN,对应的弯曲应力为 0.2 MPa,十分微小;中塔弯矩最大值不超过 0.2 MN,基本可以忽略.

上述分析表明,结构内力状态及线形满足既定的合理成桥状态指标.

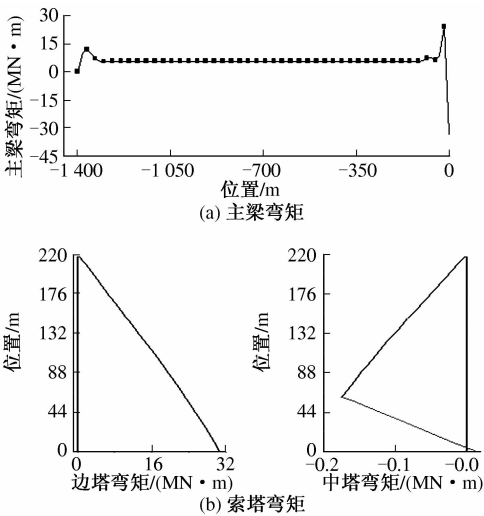


图 4 三塔悬索桥合理成桥状态内力

Fig. 4 Internal force under reasonable design state

4 多塔算例

下面应用文中方法确定 3~6 塔悬索桥的合理成桥状态,进一步论证所提方法的有效性和适应性.多塔悬索桥各方案立面布置如图 5 所示.

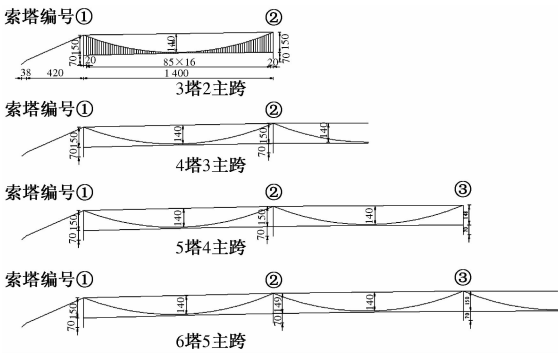


图 5 多塔悬索桥立面布置

Fig. 5 Elevation of multi-town suspension bridge

考虑到结构对称性,图中仅示出左半桥.结构参数同 1.1 节.各方案桥面纵坡统一取为 1.5%,所有索塔总高度及桥面以上高度相同.索塔编号由左向右依次为①、②、③...,主跨跨径编号为该

跨左侧索塔编号. 结构约束条件:主缆在锚碇处固结,在塔顶处与索鞍耦合平动自由度;索塔底部固结;在边塔处,主梁与索塔下横梁耦合竖向、横向和扭转自由度,而在中塔处,主梁与索塔下横梁耦合横向和扭转自由度.

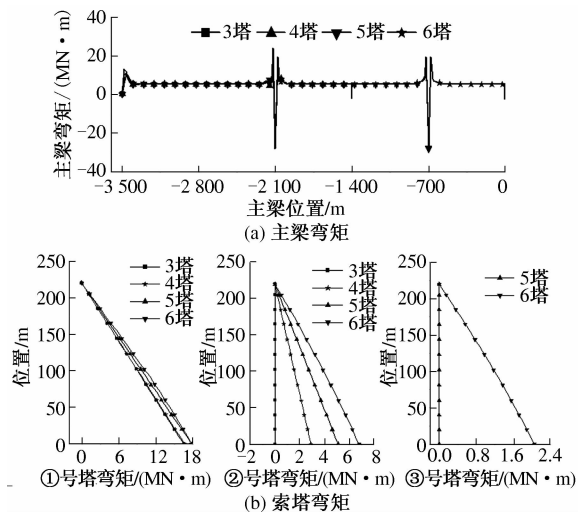


图 6 多塔悬索桥合理成桥状态内力  
Fig.6 Internal force under reasonable design state of multi-town suspension bridge

应用文中方法确定各方案的合理成桥状态,计算结果如图 6 所示,主梁弯矩仅示出左半桥,坐标原点为 6 塔悬索桥的对称中心,其他方案对位绘制. 由图可知,主梁弯矩分布均匀,基本呈刚性支承连续梁分布;①号塔塔根弯矩小于 18 MN·m,②号塔塔根小于 7 MN·m,③号塔塔根小于 3 MN·m.

在恒载作用下,各方案主梁和吊索的最不利内力和变形如表 1 所示,索塔的最不利内力和变形如表 2 所示,表中应力均为弯矩产生的弯曲应力.

由表中数据可知,各方案的主梁最大挠度约为 0.04 m,塔顶纵向位移最大约为 0.01 m;主梁弯矩最大约为 -28.2 MN·m,弯曲应力最大约为 11.4 MPa;吊索轴力最大约为 4 MN,吊索应力约为 357 MPa;塔根弯曲应力均小于 0.1 MPa. 分析表明,结构内力状态及线形满足既定的合理成桥状态指标.

表 1 主梁和吊索的恒载受力状态  
Tab.1 Internal force of hangle and beam

方案	构件 项目	主梁				吊索	
		挠度/ m	弯矩/ (MN·m)	上缘应力/ MPa	下缘应力/ MPa	轴力/ MN	应力/ MPa
3 塔	极大值	0.001	20.4	8.2	13.3	3.9	357.3
	极小值	-0.036	-26.0	-10.5	-17.0	1.5	145.8
	普遍值	±0.003	5.0	2.0	3.3	1.9	282.9
4 塔	极大值	0.004	23.6	9.6	15.4	4.1	355.9
	极小值	-0.036	-27.3	-11.0	-17.8	1.5	131.9
	普遍值	±0.004	5.1	2.1	3.3	1.9	281.9
5 塔	极大值	0.009	18.3	7.4	11.9	3.7	336.2
	极小值	0.040	-28.2	-11.4	-18.4	1.7	139.3
	普遍值	±0.008	5.1	2.1	3.3	1.9	281.5
6 塔	极大值	0.001	19.1	7.7	12.5	3.8	321.3
	极小值	-0.039	-27.5	-11.1	-17.9	1.6	141.7
	普遍值	±0.003	5.1	2.1	3.3	1.9	281.1

表 2 索塔的恒载受力状态  
Tab.2 Internal force of town

方案	①号塔塔根			②号塔塔根			③号塔塔根		
	弯矩/ (MN·M)	应力/ MPa	位移/ m	弯矩/ (MN·M)	应力/ MPa	位移/ m	弯矩/ (MN·M)	应力/ MPa	位移/ m
3 塔	16.5	0.1	0.009	0.0	0.0	0.000	—	—	—
4 塔	16.6	0.1	0.009	2.9	0.1	0.002	—	—	—
5 塔	17.8	0.1	0.004	5.1	0.2	0.002	0.0	0.0	0.000
6 塔	17.7	0.1	0.010	6.8	0.3	0.004	2.1	0.1	0.001

5 结论

- (1)有限单元迭代法容错性强,考虑了结构的几何非线性效应,可以最大限度地接近理想目标.
- (2)有限单元迭代法将结构作为整体进行分析,考虑了主缆、索塔、加劲梁及吊索之间的相互影响.
- (3)有限单元迭代法可借助 ANSYS 软件予以实施,具有较好的计算精度和分析效率.

参考文献:

[1] 张志国,邹振祝,赵玉成. 确定悬索桥主缆成桥线形的参数方程法[J]. 计算力学学报, 2005, 22(3): 305-309.

[2] 罗喜恒,肖汝诚,项海帆. 悬索桥理想恒载状态的计算方法研究[J]. 桥梁建设, 2008(4): 31-35.

[3] 景天虎,李青宁. 悬索桥主缆成桥线形确定的有限

元新算法[J]. 世界桥梁. 2012, 40(1): 42-46.

[4] 周勇,张峰,李术才.等. 悬索桥空间主缆恒载线形分析[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版, 2010, 34(5): 1036-1039.

[5] 彭苗,卢哲安,文建华. 悬索桥空间主缆找形分析的一种迭代算法[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(2): 87-89,100.

[6] 罗喜恒. 悬索桥缆索系统的数值分析法[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2004(04): 441-446.

[7] 景天虎,李桅,李青宁,等. 悬索桥主缆线形确定的常用精确解析算法比较及电算高效实现方法研究[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2011, 43(6): 821-830.

[8] FLEMING J F. Nonlinear Static analysis of cable-stayed bridge structures[J]. Computers and Structures, 1979, 10(4): 621-635.

[9] 罗喜恒,肖汝诚,项海帆. 悬索桥施工过程精细化分析研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(10): 76-80.

Determination Method of Reasonable Finished Dead State Of Multi-Town Suspension Bridges Based on Iterative Analysis

ZHOU Yun-gang<sup>1,2</sup>

(1. Tongji Architectural Design (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In order to calculate the cable shape of multi-span suspension bridge under dead load, a 3-diomen-tional analysis model is used and an iterative analysis method based on the finite element theory is proposed on the basis of analysis method for classical suspension bridge. It is simple to realize by using the finite element analysis soft ANSYS. Based on this, some trial designs, including three-town, four-town, five-town and six-town suspension bridge, are carried out. Taking these bridges as examples, the proposed method is verified, and the results are compared with gravity stiff theory. By comparison, it is shown that the proposed method can achieve the cable shape and internal force under dead load and be shown of high accuracy, efficiency and convenience. This method can be used to calculate the cable shape with plan cable and spatial cable.

**Key words:** bridge engineering; multi-span suspension; reasonable design state; cable shape; finite element method; geometrical nonlinearity analysis