

基于 ANSYS 的悬索桥分析方法研究

谢雪峰¹, 罗喜恒²

(1. 同济大学桥梁工程系, 上海 200092; 2. 同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海 200092)

[摘要] 用于悬索桥分析的专用程序和通用程序均有其局限性。基于 ANSYS 平台进行二次开发, 主要着眼于鞍座的模拟、顶推的实现、主缆和吊索的无应力长度确定、无应力长度保持不变的方法, 并给出润扬大桥算例予以验证, 使得用 ANSYS 分析悬索桥具有了专用程序的精度和通用程序前后处理方便的特性。

[关键词] 悬索桥; ANSYS 二次开发; 鞍座; 顶推; 无应力长度; 迭代

[中图分类号] TU 311 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2012)05-0101-05

1 前言

悬索桥分析程序可以分为专用程序和通用程序。专用程序如平面缆索悬索桥数值分析程序 SBP、CAP (construction analysis program for suspension bridge)^[1] 和悬索桥分析系列程序^[2] 以及悬索桥主缆设计与施工计算专用软件 SGK2000、桥梁结构空间几何非线性静动力分析软件 BCAS2000^[3] 等。通用程序主要有桥梁博士、Midas/Civil、ANSYS、SAP2000 等。专用程序和通用程序在悬索桥分析方面各有优缺点, 如专用程序具有能考虑悬索桥的特殊构造、加载方便等优点, 计算速度较快, 计算精度较高, 但前后处理一般配合不好, 有些程序还有些缺陷; 而通用程序前后处理方便, 但一般没有专门的鞍座单元、顶推单元, 并需要人为给出主缆和吊索的无应力长度。

笔者在 ANSYS 平台基础上进行二次开发, 结合悬索桥的特点构造了鞍座单元和模拟鞍座顶推的算法, 编写了主缆和吊索无应力长度的迭代求解 APDL 程序, 使得 ANSYS 在悬索桥分析方面具有了专用程序的结构模拟精度和计算精度, 并且具有良好的前后处理功能。

2 分析方法

2.1 鞍座的模拟

鞍座是使主缆平顺转向的构件, 计算时一般认为主缆应总是与鞍座相切的, 然而在施工阶段和活载作用过程中, 塔顶会有比较大的位移, 主缆与鞍座的切点位置也有比较大的变动, 因此, 正确模拟鞍座及切点的变化, 是很有必要的。

以塔顶鞍座为例, 如图 1 所示, 鞍座单元的构造如下: A 为鞍座标识线(成桥时与主塔中心线重合)上的主缆点, 为主缆与鞍座的固定点; B 为鞍座标识点, 成桥时与塔顶中心点重合; C 、 D 为主缆与鞍座的切点; E 、 F 为主缆上的节点。单元 AB 、 AC 、 AD 为刚臂单元, 采用 mpc184 单元。 CE 、 DF 为索单元, 采用 link10 单元。 BHG 为顶推刚臂单元。

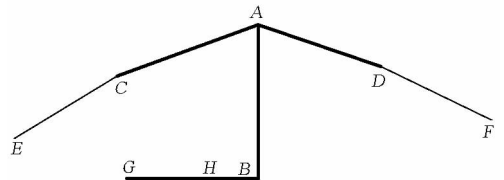


图 1 鞍座单元构造形式

Fig. 1 Saddle element form

在鞍座顶推或活载作用下, 鞍座两侧圆弧段的

[收稿日期] 2012-03-12

[基金项目] 国家科技支撑计划资助项目(2009BAG15B01); 交通行业联合科技攻关项目(2008-353-332-190)

[作者简介] 罗喜恒(1969—), 男, 福建上杭县人, 高级工程师, 工学博士, 研究方向为桥梁结构设计理论; E-mail: luoxiheng@tongji.edu.cn

圆心相对于 AB 是不变的,也就是说,可以根据 AB 的转角和索单元 CE 、 DF 在 C 、 D 点的切线角更新切点 C 、 D 的位置,直至前后两次索单元 CE 、 DF 在 C 、 D 点的切线角相差小于给定的限值,则认为相切。一般只需更新两到三次就能达到较高精度。

以下以 D 点为例给出其原理。假设圆弧 AD 的圆心为 $O(O_x, O_y)$, 半径为 R , 设 AB 长为 l , 且逆时针摆动 α 角, 主缆在 D 点的切线与水平向夹角此时为 β , 则更新 $D(x_d, y_d)$ 点位置如下:

$$x_d = O_x + R\sin(\alpha + \beta)$$

$$y_d = O_y + R\cos(\alpha + \beta)$$

散索鞍的构造同上,只是摆动式散索鞍没有顶推刚臂 BHG 。

2.2 顶推的实现

在施工过程分析时,需要模拟顶推鞍座这一悬索桥特有的工况。如图 2 和图 3 所示,顶推过程的模拟采用以下单元构造形式: BGI 为 mpc184 滑块单元, B 为滑块; HGI 为 mpc184 滑块单元, H 为滑块; BH 、 GH 、 $B'I$ 、 $B'G$ 为 mpc184 刚臂单元, $B'J$ 为塔顶梁单元。赋予单元 GH 一个合适的线膨胀系数,通过改变 GH 的温度即可实现鞍座顶推的模拟。如单元 GH 的长为 2 m, 线膨胀系数设为 1, 以当前工况为基准, 降温该单元 $0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 则顶推 1 m。在施工阶段分析时可以通过杀死 GH 单元来实现鞍座能随施工过程自由滑动的情况, 从而获得滑动量和塔顶水平力随施工过程的变化曲线, 进而合理设计顶推次数和顶推量。

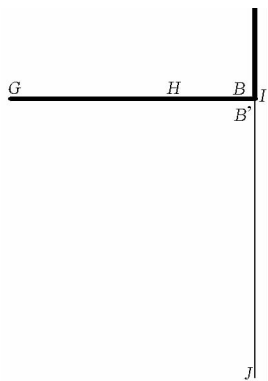


图 2 顶推单元构造形式

Fig. 2 Incremental launching element form schematic diagram

2.3 主缆和吊索无应力长度的确定

主缆和吊索无应力长度求解,一般采用文献 [1] 中公式 (2.1) 和 (2.2) 进行迭代求解。然而,在利用 ANSYS 进行悬索桥分析时候,如果可以用 AP-

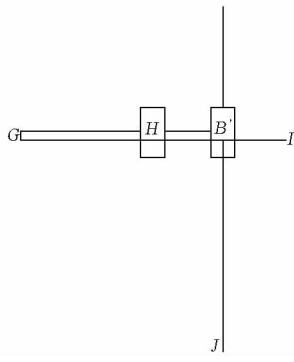


图 3 顶推单元示意图

Fig. 3 Incremental launching element

DL(ANSYS parametric design language) 语言进行迭代求解出无应力长度,则模型一气呵成,修改起来也很方便,提高了工作效率。以下是迭代过程的基本原理和流程图。

2.3.1 基本原理^[4]

1) 原理 1: 非线性方程求解的 Newton-Raphson 方法。采用 Newton-Raphson 方法, 每步迭代都要计算导数值。在该问题中, 是无法计算出导数值的, 因此采用两点割线法, 以差商代替导数, 见图 4。迭代公式如下:

$$x_{k+1} = \frac{x_{k-1}f(x_k) - x_k f(x_{k-1})}{f(x_k) - f(x_{k-1})}$$

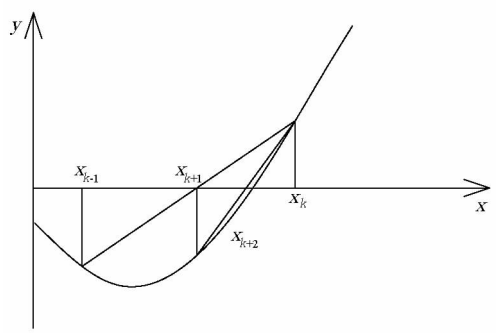


图 4 牛顿-辛普森法

Fig. 4 Newton-Raphson method

2) 原理 2: 非线性方程组求解的迭代法。 $F: D \subset R^n \rightarrow R^n$ 是 n 元实向量函数, 把非线性方程组 $F(x) = 0$ 改写成不动点迭代 $x = G(x)$, 则有如下定理:

设 $G: D \subset R^n \rightarrow R^n$ 在区域 $D_0 \subseteq D$ 上满足 G 把 D_0 映入它自身, 即 $G(D_0) \subseteq D_0$; G 在 D_0 上是压缩映射, 压缩因子为 $L < 1$, 即对任意 $x, y \in D_0$ 有

$$\| G(x) - G(y) \| \leq \| x - y \|$$

则下列结论成立: a. G 在 D_0 上存在唯一的不动点 x^* ; b. 对于任意的 $x^{(0)} \in D_0$, 不动点迭代 $x^{(k+1)} = G(x^{(k)})$ 产生的迭代序列 $\{x^{(k)}\} \subset D_0$ 且收敛于唯一的不动点 x^* 。

2.3.2 基本原理的应用

2.3.2.1 原理 1 的应用

以中间跨为例, 定义函数

$$f_1(ny_m) = ny_m + uy_m(ny_m) - f_0$$

即跨中节点在恒载作用下竖向位置与设计竖向位置的差值为跨中节点竖向坐标的函数。式中, ny_m 为跨中节点的竖向坐标; uy_m 为跨中节点在恒载作用下的竖向位移; f_0 为跨中节点的设计竖向位置。

以边跨为例, 定义函数

$$f_2(istn) = H(istn) - H_0$$

即边跨主缆在恒载作用下水平力与中间跨的成桥状态水平力的差值为边跨主缆单元初应变的函数。锚跨和边跨相同。式中, H 为边跨主缆在自重和索夹重等作用下的水平力; H_0 为中间跨的成桥状态水平力; $istn$ 为边跨主缆单元的初应变。

2.3.2.2 原理 2 的应用

一般情况下, 按照设计的成桥位置建立缆索系统的初始模型。在恒载的作用下, 上下吊点会发生水平位移和竖向位移。为了使成桥时各吊点位于设计位置, 在迭代过程当中, 需要修改上吊点的水平坐标和下吊点的竖向坐标。

以上吊点水平坐标为例, 设其个数为 n 组成向量 $x(x_1, x_2, \dots, x_m, \dots, x_n)$ 。向量 nx_0 表示吊杆上节点的成桥状态在恒载力作用下的水平位置, 即目标位置。构造向量 $nx = nx_0 - ux$, ux 表示上吊点的水平位移。 nx 满足原理 2 的条件, 在迭代过程当中, 逐次更新吊杆上节点的水平坐标为 nx , 直至收敛。

2.3.3 迭代流程

以控制点为依据建立成桥状态初始模型, 先假定各个切点的位置, 中间跨以两切点和跨中点为依据, 按照抛物线来确定其他节点坐标; 锚跨和边跨以两切点间连直线段为依据, 确定其他节点坐标。初始的缆索单元初应变设为 $1.0E-8$ 。以中间跨迭代求无应力长度为例, 迭代流程如图 5 所示, 其中 Y_0, Y_1 为跨中节点竖向坐标, 函数 f 即 2.3.2 节中的函数 f_1 。根据 2.3.2 可知, 缆索系统的未知量: 缆索单元的无应力长度, 其个数与迭代方程个数相等^[1,3], 可迭代求解出缆索系统的线形和无应力长度。

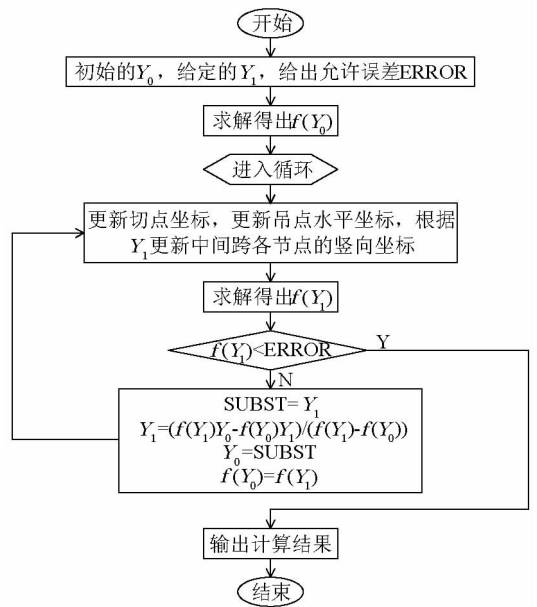


图 5 中间跨迭代流程

Fig. 5 Main span iterative process

2.4 无应力长度保持不变的方法

按照上述方法迭代出缆索系统的无应力长度之后, 在鞍座顶推或活载作用下, 更新切点位置时, 只要保证鞍座顶与紧邻的吊杆之间主缆无应力长度不变, 则整个主缆的无应力长度不变。以图 1 所示鞍座为例, 圆弧 AC, AD 上主缆的无应力长度按照文献 [1] 中鞍座内主缆内力分布的模式二进行计算, 即文献 [1] 中式 (2.14)、式 (2.15)。施工计算或活载加载过程当中, 进行迭代求解, 逐次更新切点坐标, 并计算新的圆弧段上的主缆无应力长度, 然后修改主缆单元 CE, DF 的初应变, 以保证 ACE, ADF 这两段的无应力长度不变, 直至鞍座与两边的主缆重新相切。在初应变较小的情况下, 这种做法精度是很高的。

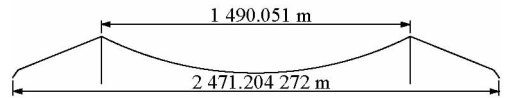


图 6 索塔结构的计算图示

Fig. 6 Cable-tower structure schematic diagram

3 验证性算例^[1]

以润扬大桥为例, 按照上述方法建立 ANSYS 计算模型, 原始数据文献 [1] 中算例 Z5 一致。不考虑主塔自重的影响, 计算时未考虑桩的影响。考虑以下 3 个工况, 比较 CAP 与 ANSYS 的计算结果。

- 1) 工况 1:塔顶鞍座的相对偏移量取 1.787 5 m;
- 2) 工况 2:在工况 1 的基础上顶推鞍座,使塔顶鞍座的相对偏移量为 1.0 m;
- 3) 工况 3:相当于成桥状态,在工况 2 基础上顶推鞍座,使塔顶鞍座的相对偏移量为 0,并将全部荷载作用在结构上。

表 1、表 2、表 3 给出了二者控制点位置、主缆水

平力和塔顶内力及无应力长度的比较。从结果来看,两者非常吻合,印证了上述方法的正确性。从塔顶内力的情况来看,两者剪力随塔顶鞍座的相对偏移量的加大而差异变大,是因为 ANSYS 中梁单元考虑了剪切刚度的影响,所以比 CAP 中梁单元柔一些。

表 1 控制点位置对比
Table 1 Comparison of the location of control points

工况	计算方法	散索鞍 偏移量/rad	右塔顶鞍座不动点坐标		右塔顶位移		中跨跨中 y 坐标/m
			x/m	y/m	x/m	y/m	
工况 1	CAP	0.011 3	746.987 1	218.175 1	0.169 3	-0.012 4	83.231 7
	ANSYS	0.011 3	746.988 6	218.175 1	0.170 9	-0.012 4	83.231 4
	CAP - ANSYS	7E - 08	-1.58E - 03	2.39E - 05	-1.55E - 03	6.68E - 06	3.32E - 04
工况 2	CAP	0.011 1	746.867 0	218.169 3	0.824 5	-0.014 7	82.739 2
	ANSYS	0.011 1	746.868 6	218.169 2	0.826 1	-0.014 7	82.739 0
	CAP - ANSYS	2E - 07	-1.64E - 03	2.08E - 05	-1.61E - 03	9.90E - 06	1.61E - 04
工况 3	CAP	9.10E - 06	745.012 2	218.153 1	-0.013 0	-0.038 0	69.214 1
	ANSYS	9.12E - 06	745.012 2	218.153 1	-0.013 3	-0.038 0	69.214 1
	CAP - ANSYS	-2.41E - 08	-2.62E - 06	-1.65E - 05	2.67E - 04	-1.10E - 05	-2.95E - 05

表 2 主塔和主缆内力对比
Table 2 Comparison of the tower and main cable's internal force

工况	计算方法	主缆水平力/kN			塔顶内力		
		锚跨	边跨	中跨	N/kN	Q/kN	M/(kN·m)
工况 1	CAP	68 853.21	83 910.01	84 119.58	-73 051.00	-209.10	133 320.00
	ANSYS	68 862.16	83 920.33	84 119.92	-73 052.55	-199.57	135 503.38
	CAP - ANSYS	-8.95	-10.32	-0.34	-3.63	-0.08	-2 183.38
工况 2	CAP	72 392.88	88 209.72	83 785.29	-74 664.00	4 428.10	1 086 300.00
	ANSYS	72 402.25	88 220.58	83 785.75	-74 666.88	4 434.85	1 088 544.48
	CAP - ANSYS	-9.37	-10.86	0.46	2.88	-6.74	-2244.48
工况 3	CAP	226 767.95	274 936.03	274 991.45	-225 020.00	-55.60	-16 416.00
	ANSYS	226 768.20	274 936.21	274 991.61	-225 016.37	-55.52	-16 408.90
	CAP - ANSYS	-0.25	-0.18	-0.15	-3.69	0.08	-7.10

表 3 无应力长度对比
Table 3 Comparison of unstressed length

项目	无应力长度/m	
	CAP	ANSYS
成桥状态/空缆状态	锚跨	26.408
	边跨	501.020
	中跨	1 524.738

4 结语

1) 该方法精度较高,能充分满足工程及科研精度要求。

2) 该方法不需要借助于其他程序迭代出缆索无应力长或者切线角,整体性强,能够提高工作效率。

3) 该方法可复制性强,参数修改也很方便,对

于确定悬索桥合适的结构参数十分有利。

参考文献

- [1] 罗喜恒. 复杂悬索桥施工过程精细化分析研究[D]. 上海:同济大学博士学位论文,2004.
- [2] 潘永仁. 悬索桥的几何非线性静力分析及工程控制[D]. 上

海:同济大学博士学位论文,1996.

- [3] 唐茂林. 大跨度悬索桥空间几何非线性分析与软件开发[D]. 成都:西南交通大学博士学位论文,2003.
- [4] 同济大学计算数学教研室. 现代数值数学和计算[M]. 上海:同济大学出版社,2004.

Research on analysis method of suspension bridge based on ANSYS

Xie Xuefeng¹, Luo Xiheng²

- (1. Bridge Engineering Department, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Architectural Design & Research Institute of Tongji University (Group) Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

[**Abstract**] Special programs and general programs applied to suspension bridge analysis have their limitations. This paper focuses on ANSYS-secondary-development and makes it possible to analyze suspension bridges both with accuracy of special programs and convenience of general programs. This paper is dedicated to saddle simulation, incremental launching realization and how to obtain unstressed length of main cable and slings and how to keep it unchanged. In the end, the method is verified through finite element model in Runyang Yangtze River Bridge.

[**Key words**] suspension bridge; ANSYS-secondary-development; saddle; incremental launching; unstressed length; iteration