

[文章编号] 1003—4684(2021)04-0069-05

# 钢桁拱桥吊索塔架主体结构的力学性能分析

易程杰<sup>1</sup>, 石峻峰<sup>1</sup>, 刘生奇<sup>2</sup>, 周凌杰<sup>2</sup>

(1 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068; 2 中铁大桥局第七工程有限公司, 湖北 武汉 430051)

[摘 要] 钢桁拱桥吊索塔架系统的受力在施工过程中非常重要。以江汉七桥为例, 对该桥吊索塔架在不同施工阶段的力学性能进行有限元分析, 利用 Rhino+Grasshopper 参数化建模建立钢桁拱桥和吊索塔架模型, 基于 Midas Civil 有限元软件, 在三种施工工况下, 对吊索塔架整体结构的刚度、强度及稳定性进行计算分析。结果表明: 相较于 Midas Civil 软件传统建模方式, 利用参数化建模提升建模效率, 减少了 Midas 建模前处理时间, 利用 Midas Civil 分析得出相应的计算结果, 为实际施工提供理论数据, 具有一定的指导意义。

[关键词] 钢桁拱桥; 吊索塔架; 有限元分析; 力学性能; 参数化建模

[中图分类号] U448.22 [文献标识码] A

目前, 对于大跨度钢桁拱桥, 吊索塔架施工是整个桥梁施工过程中施工难度最大、风险最大的施工过程<sup>[1]</sup>。江汉七桥钢桁拱架设边跨采用支架法安装, 中跨采用悬臂安装法, 吊索塔架在钢桁拱的悬臂架设施工中起着举足轻重的作用<sup>[2]</sup>, 因此在钢桁拱架设关键施工阶段对吊索塔架进行计算分析非常有必要。本文利用 Rhino+Grasshopper 参数化建模建立钢桁拱桥和吊索塔架模型<sup>[3]</sup>, 结合 Midas Civil 有限元软件在三个不同的施工阶段对吊索塔架整体结构的刚度、强度及稳定性进行计算分析。

## 1 工程概况

江汉七桥是武汉市规划的第七座跨汉江通道。主桥为(132+408+132) m 中承式钢桁拱桥, 矢高 90 m, 拱肋中跨跨中桁高 10 m, 中支点桁高 40.97 m, 边支点桁高 14 m, 标准节间长度 12 m; 钢桁拱边跨 11 个节间, 中跨 34 个节间, 边跨与中跨之比为 0.32; 横桥向采用两片主桁, 桁间距 34 m; 拱肋上弦、下弦、纵梁及腹杆均为箱型截面。

钢梁架设总体方案为钢桁拱边跨采用临时墩辅助施工, 中跨采用吊索塔架辅助悬臂安装, 利用中墩钢梁纵移、顶落梁和临时系杆措施, 最后跨中合龙的施工方法。本文主要研究内容是对吊索塔架在三个施工阶段的受力性能进行分析, 由于两座吊索塔架对称, 因此选取一侧吊索塔架进行分析。

## 2 吊索塔架结构布置说明

吊索塔架设置在主墩上弦, 横桥向两肢, 每肢塔柱采用栓接组装式格构钢管柱, 纵桥向 3 根间距 3.5 m、横桥向 2 根间距 3 m, 上、下游塔肢横向中心间距与主桁一致, 为 34 m。塔柱与主桁上弦铰接, 底座提前在工厂焊接到上弦杆上, 铰轴直径 600 mm, 塔柱顶部设置锚箱结构, 铰轴中心距离主桁中心 2.1 m, 塔柱铰轴中心至塔吊高度 89.6 m, 塔柱顶距离承台 147.3 m。吊索塔架布置见图 1、图 2。

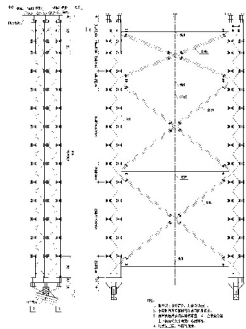


图 1 吊索塔架侧、立面布置图

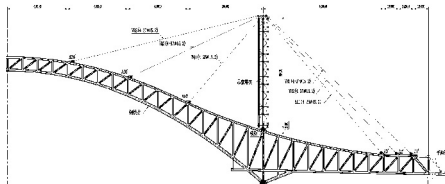


图 2 吊索塔架整体布置图

[收稿日期] 2020—10—20

[第一作者] 易程杰(1996—), 男, 湖北荆州人, 湖北工业大学硕士研究生, 研究方向为结构工程

[通信作者] 石峻峰(1974—), 男, 吉林辽源人, 工学博士, 湖北工业大学讲师, 研究方向为混凝土材料损伤断裂研究, 结构工程

3 计算模型

利用 Rhino+Grasshopper 参数化建模建立钢桁拱桥、吊索塔架单元模型和各构件的截面样式,从 Rhino 中导出 dxf 格式,再导入 Midas Civil 中进行前处理,相较于传统建模方式,极大的提升了建模效率。参数化模型及构件截面如图 3、图 4 所示。

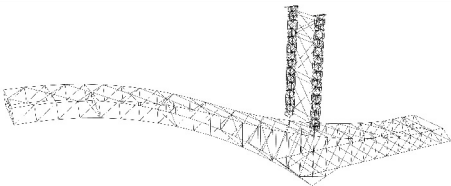


图 3 钢桁拱桥及吊索塔架模型

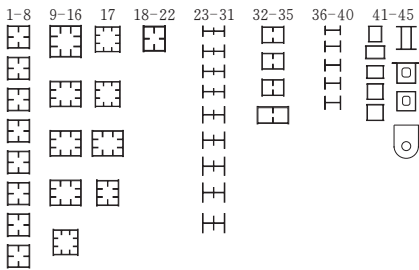


图 4 各构件截面形状

本次计算是利用 Midas Civil 有限元分析软件对吊索塔架在三个施工阶段进行计算,并对计算结果进行力学性能分析。计算模型为全桥空间模型,模型中拱肋和吊索塔架采用梁单元,桥面采用板单元,吊索塔架中的立柱、横撑、斜撑、连接系、柱底分配梁和柱顶分配梁均采用梁单元,梁截面参数根据设计图纸取值,吊索塔架前索、后索采用只受拉索单元模拟。吊索塔架与主体结构铰接该模型中各项材料弹性模量、强度及荷载等参数均严格按照相关设计图纸和规范取值。计算模型如图 5—7 所示,共有 724 个节点,1811 个单元。

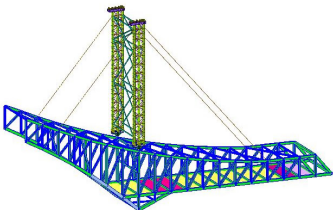


图 5 工况 1

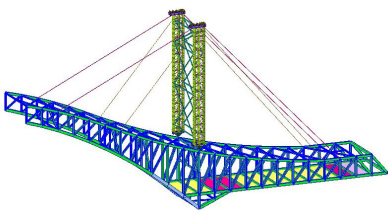


图 6 工况 2



图 7 工况 3

4 荷载计算

4.1 各施工阶段荷载添加说明

工况 1:在钢桁拱上从 A14 节点至 A18 节点四个节间施加架梁吊机轨道荷载,荷载类型采用均布荷载;在 A17、A18 节点施加架梁吊机荷载,荷载类型采用节点荷载;对边跨钢梁 A1 节点至 A5 节点四个节间和平衡梁进行第一次压重,荷载类型采用均布荷载;第一对前、后吊索分 2 批张拉至设计值。

工况 2:在钢桁拱上从 A18 节点至 A22 节点四个节间施加架梁吊机轨道荷载,荷载类型采用均布荷载;在 A21、A22 节点施加架梁吊机荷载,荷载类型采用节点荷载;对边跨钢梁 A1 节点至 A5 节点四个节间和平衡梁进行第二次压重,荷载类型采用均布荷载;第二对前、后吊索分 2 批张拉至设计值。

工况 3:在钢桁拱上从 A22 节点至 A26 节点四个节间施加架梁吊机轨道荷载,荷载类型采用均布荷载;在 A25、A26 节点施加架梁吊机荷载,荷载类型采用节点荷载;对边跨钢梁 A1 节点至 A5 节点四个节间和平衡梁进行第三次压重,荷载类型采用均布荷载;第三对前、后吊索分 2 批张拉至设计值。

4.2 计算荷载

1)自重:结构自重由程序自动加载,钢梁总重与设计图纸重量一致。

2)架梁吊机重量(表 1)。

表 1 架梁吊机荷载表			t
位置	前支点	后支点	
左	-136	-65	
右	-136	-65	

3)架梁吊机轨道重量:上弦每前四节间 0.7 t/m,下弦 0.3 t/m。

4)压重荷载。

表 2 压重荷载表				t/m
时间	位置			
	边支点向中跨 48 m	平衡梁 12 m	安全系数	
第一次压重	6.8	20	1.90	
第二次压重	15	23	1.54	
第三次压重	8.5	17	1.47	
合计总压重	30.3	60	1.36	

5)吊索塔架索初拉力。

表 3 吊索塔架索初拉力表				t
项目		前吊索	后吊索	
上游	拉索 3	845	1110	
	拉索 2	610	770	
	拉索 1	650	645	
下游	拉索 1	650	645	
	拉索 2	610	770	
	拉索 3	845	1110	

说明:吊索塔架中跨方向的吊索为前吊索,边跨方向的吊索为后吊索,前后吊索位置从低处到最高的塔顶处,分别为吊索 1、吊索 2、吊索 3

5 结构计算结果与分析

考虑到该吊索塔架的高度较高,受力较大,所以吊索塔架在施工过程中容易产生变形和失稳。因此,需要提前进行吊索塔架刚度、稳定性及强度的计算,通过计算得出吊索塔架在三个施工阶段出现的变形、位移、应力,为后续在该三个施工阶段提供理论依据和帮助。

1)整体变形情况(图 8—10)

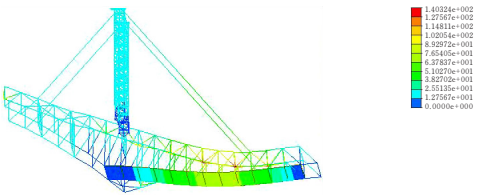


图 8 工况 1 整体变形

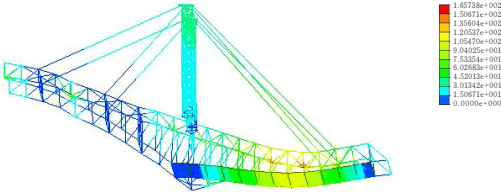


图 9 工况 2 整体变形

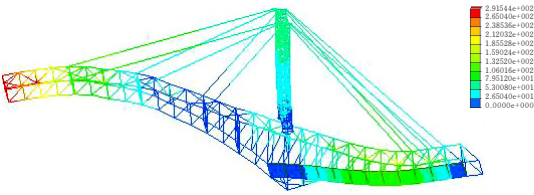


图 10 工况 3 整体变形

2)变形结果统计及分析

吊索塔架一共有 15 层横向连接系节段,每层有六个节点,选取这些节点为特征点,求得各特征点的位移,由于吊索塔架受力均匀,每层特征点位移相近,因此取每层特征点位移平均值为吊索塔架在该层的位移,连接系及节点位置如图 11、图 12 所示。计算吊索塔架在三种工况下的位移,吊索塔架上下游两侧对称,取一侧塔架计算结果分析。

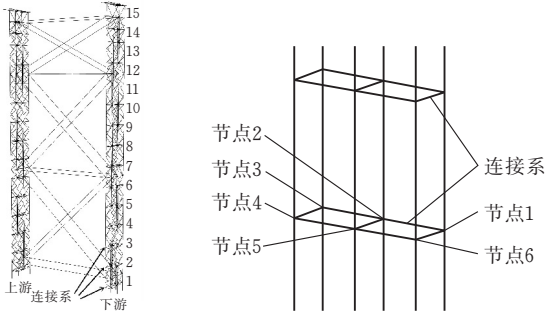


图 11 横向连接系位置 图 12 连接系及节点详图

吊索塔架主要是在水平方向和竖直方向发生位移,三种工况下,吊索塔架在 X 方向位移、Z 方向位移和整体位移如图 13 所示(01、02、03 分别指工况 1、工况 2、工况 3)。

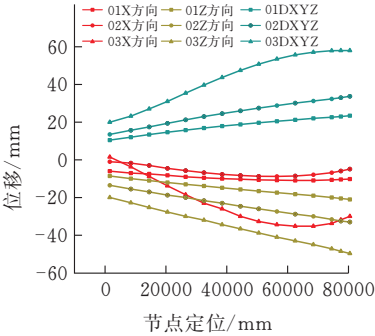


图 13 吊索塔架特征点位移

吊索塔架在工况 1 下的整体位移最大值为 23.4 mm,X 方向的最大位移为-11 mm,Z 轴方向的最大位移为-21 mm;在工况 2 下的整体位移最大值为 33.7 mm,X 方向的最大位移为-8.6 mm,Z 轴方向的最大位移为-33 mm;在工况 3 下的整体位移最大值为 58 mm,X 方向的最大位移为-35.2 mm,Z 轴方向的最大位移为-49.7 mm。计算结果表明,吊索塔架在三个工况下的位移均满足刚度要求<sup>[4]</sup>,由于吊索塔架底部与钢桁拱连接部位的边界条件是刚性连接,因此在各施工阶段吊索进行张拉后,吊索塔架底部产生的水平位移较小,中上部产生较大的水平位移,工况 3 相较于工况 1、2 在 X 方向的水平位移发生较大的变化,在吊索塔架中上部水平位移值增大,因此施工时,在工况 3 阶段要注意控制跨中段钢桁拱架设及边跨和平衡梁的第三次压重,虽然计算结果均满足要求,但是很小的平衡水平力也会引起较大的变形,所以要严格控制水平力。

3)应力结果统计及分析<sup>[5]</sup>

如表 4 所示,在三种工况下,吊索塔架各处最大组合应力和最小组合应力均小于吊索塔架主材 Q345 钢材容许组合应力 210 MPa,所以吊索塔架在各工况下的强度符合稳定性要求<sup>[4]</sup>。

表 4 吊索塔架整体应力计算结果汇总表 MPa

工况	最大组合应力	最小组合应力	极值应力
工况 1	-51.8~56.8	-63.4~35.3	-63.4/56.8
工况 2	-71.5~80.3	-97.2~54.6	-97.2/80.3
工况 3	-107.3~114.8	-147.5~66.6	-147.5/114.8

对吊索塔架内部结构上锚梁、柱顶分配梁、柱底分配梁和钢管柱进行强度分析,数值均取内部构件在三个工况下的最大应力值,结果如表 5 所示,选取应力较大的内部构件上锚梁、钢管柱应力分布如图 14、图 15 所示。由计算结果可知,上锚梁、柱顶分配梁、柱底分配梁和钢管柱在工况三施工阶段受力最大,由于上锚梁、柱顶分配梁和柱底分配梁构造复杂,存在应力集中点,因此在应力分布图中存在应力分布值,上锚梁、柱顶分配梁、柱底分配梁和钢管柱最大应力均小于 Q345 钢材屈服强度 345 MPa,强度满足要求。

表 5 吊索塔架内部构件应力计算结果汇总表

内部构件	最大应力	屈服强度
上锚梁	208.7	345
柱顶分配梁	138.8	345
柱底分配梁	101.5	345
钢管柱	149.8	345

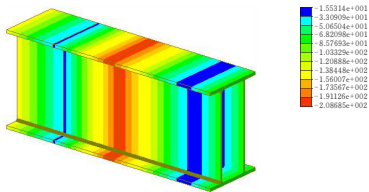


图 14 上锚梁应力

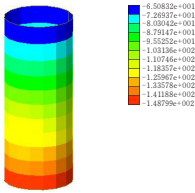


图 15 柱顶分配梁应力

6 吊索塔架稳定性分析

在三个工况下,根据计算结果分析,选取最不利工况 3,对吊索塔架整体桁架结构进行稳定性分析,分析结果如下。

6.1 长细比

根据《钢结构设计标准》GB50017—2017 表 7.4.1—2 确定计算长度: $l_{0x}=l_{0y}=l=89600\text{ mm}$ ( $l$  为钢管立柱长度);毛截面回转半径: $r_x=r_y=1800\text{ mm}$ ;根据《钢结构设计标准》GB50017—2017 第 7.2.2—1 条及 7.2.2—2 条得到吊索塔架整体钢柱构

件长细比:

$$\lambda_x=\lambda_y=\frac{l_{0x}}{r_x}=\frac{l_{0y}}{r_y}=49.8$$

根据《钢结构设计标准》GB50017—2017 表 7.4.6 受压构件的长细比容许值,轴心受压柱、桁架和天窗架中的压杆 $[\lambda]=150$ ,吊索塔架桁架为主要受压构件,长细比 $\lambda_x=\lambda_y=49.8<150$ ;长细比满足要求。

6.2 稳定系数及参数

根据《钢结构设计标准》GB50017—2017 表 7.2.1—1 确定桁架的界面类型对  $x$  轴、 $y$  轴均为 b 类。桁架钢材型号为 Q345,即屈服点为 345 MPa,抗拉强度为 490~620 MPa,根据《钢结构设计标准》GB50017—2017 附录 D 表 D.0.2,得到该桁架 b 类截面轴心受压构件的稳定系数  $\varphi$ :  $\varphi=0.856$ 。

根据《钢结构设计标准》GB50017—2017 第 8.2.1—2 条得出弯矩作用平面内轴心受压构件参数: $N'_{Ex}=\frac{\pi^2 EA}{1.1 \lambda_x^2}=140\ 267\text{ kN}$ ;其中弹性模量  $E=206\text{ GPa}$ ,截面面积  $A=0.1884$ (6 根钢管毛面积总和)。

6.3 抗弯模量

毛截面惯性矩: $I_x=I_y=\frac{\pi D^4(1-\alpha^4)}{64}=0.029$ , $\alpha=\frac{d}{D}$  外圆直径  $D=1000\text{ mm}$ ,内圆直径  $d=800\text{ mm}$ ;

$$\text{抗弯模量 } W_x=W_y=\frac{\pi D^3(1-\alpha^4)}{32}=0.059.$$

6.4 等效弯矩系数

吊索塔架桁架系统为无侧移框架柱和两端支承的构件,且无横向荷载作用,根据《钢结构设计标准》GB50017—2017 第 8.2.1—5 条得出等效弯矩系数, $\beta_{mx}=0.6+0.4\frac{M_2}{M_1}=0.97$ ;其中  $M_1$ 、 $M_2$  为两端弯矩,根据分析计算结果得  $M_1=4500$ , $M_2=4200$ 。

6.5 整体稳定性分析

吊索塔架整体桁架结构,不会发生外面失稳,采用实腹式压弯构件面内稳定性计算公式<sup>[6]</sup>,根据《钢结构设计标准》GB50017—2017 第 8.2.1—1 条得到其压弯构件的整体稳定性,根据分析计算结果,取桁架构件范围内轴心压力设计值  $N=12000\text{ kN}$ ;最大弯矩设计值  $M_x=4500\text{ kN}\cdot\text{m}$ ;根据《钢结构设计标准》GB50017—2017 第 8.1.1 条,截面塑性发展系数  $\gamma_x$  取 1。根据前几节分析计算结果知: $\varphi=0.856$ ;  $A=0.1884$ ;  $\beta_{mx}=0.97$ ;  $W_x=0.059$ ;  $N'_{Ex}=140\ 267$  即整体稳定性为
$$\frac{N}{\varphi_x A}+\frac{\beta_{mx} M_x}{\gamma_x W_x(1-0.8N/N'_{Ex})}$$



=156.2 MPa < [σ] = 210 MPa, 整体稳定性满足要求。

6.6 局部稳定性分析

对吊索塔架内部构件各连接系进行局部稳定性分析,根据计算结果统计选取连接系其中一个轴心受压最大的桁架单元构件进行局部稳定性验算,该单元参数:截面面积  $A=0.07$ ;长细比  $\lambda_x = \frac{l_{0x}}{r_x} = 24.3$ ,根据《钢结构设计标准》GB50017—2017 附录 D 表 D.0.2 得到稳定系数  $\varphi=0.957$ ;最大轴力  $N=1255$  kN;因此根据《钢结构设计标准》GB50017—2017 第 7.2.3 条说明,轴心受压构件的稳定性计算公式为:  $\frac{N}{\varphi A} = 18.7$  MPa,远小于许用应力 210 MPa,局部稳定性满足要求。

7 结束语

- 1)利用参数化 Rhino+Grasshopper 建模建立钢桁拱及吊索塔架三维模型,极大减少了有限元软件的建模时间,对参数化建模与有限元分析软件的结合运用提供一定的参考价值。
- 2)利用 Midas civil 有限元分析软件,在考虑了自重、压重及初拉力等荷载作用的情况下,对吊索塔架在三个不同施工阶段的静力强度、刚度、稳定性进行结构计算分析,吊索塔架的整体稳定性及安全性均满足规范要求,保证了整个吊索塔架体系的安全。
- 3)针对不同工况下的刚度分析发现,整体结构

的位移会随着钢桁拱桥的架设及压重荷载的添加发生较大的变化,极应力值的大小及位置会随吊索张拉的张弛发生变化,在施工过程中要注意压重荷载的添加及吊索张拉的变化。

- 4)本文各工况的计算结果是在吊索张拉后的情况下计算得到的,因此在各工况施工的情况下要特别关注扣索、锚杆的紧密性。
- 5)该桥施工正处在全桥合龙阶段,实际工程中吊索塔架的变形及位移都满足实际工程需求。本文分析结果也可以为其他类似的吊索塔架在不同施工阶段进行力学性能分析提供一定的参考依据。

[参 考 文 献]

[1] 龙小湖.大跨度钢箱拱桥施工过程缆、扣塔体系的受力性能分析[D].长沙:中南大学,2012.

[2] 贺海飞,赫腾飞.钢桁拱架设之吊索塔架挂索施工技术[J].科技创业月刊,2012,25(3):153-154.

[3] 张慎,尹鹏飞.基于 Rhino+Grasshopper 的异形曲面结构参数化建模研究[J].土木建筑工程信息技术,2015,7(5):102-106.

[4] 中华人民共和国住房和城乡建设部.钢结构设计标准:GB 50017—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2018.

[5] 刘翠,胡宗军.某特大桥吊装扣塔系统主体结构的力学分析[J].工程与建设,2013,27(2):159-161.

[6] 靳国胜.大跨度钢桁拱桥扣塔系统受力性能分析[J].北方交通,2018(3):16-20.

Analysis of Mechanical Properties of Sling Tower Main Structure of Steel Truss Arch Bridge

YI Chengjie<sup>1</sup>, SHI Junfeng<sup>1</sup>, LIU Shengqi<sup>2</sup>, ZHOU Lingjie<sup>2</sup>

(1 School of Civil Engin., Architecture and Environment, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China ;  
2 China Railway Bridge Bureau No.7 Engineering Co. LTD, Wuhan 430051, China)

**Abstract:** The stress of suspension tower system of steel truss arch bridge is very important in the construction process. This paper takes Jiangnan Qiqiao as an example. The mechanical properties of the suspender tower in different construction stages were analyzed by finite element method. Rhino+Grasshopper parameterized modeling was used to establish the model units of steel truss arch bridge and sling tower. Based on Midas Civil finite element software, the stiffness, strength and stability of the overall structure of the sling tower were calculated and analyzed under three construction conditions. The results show that compared with the traditional modeling method of Midas Civil software, parametric modeling can improve the modeling efficiency and reduce the pre-processing time of Midas modeling, and Midas Civil analysis is used to obtain the corresponding calculation results, providing theoretical data for the actual construction, which has certain guiding significance.

**Keywords:** steel truss arch bridge; sling pylons; finite element analysis; mechanical properties; parametric modelling