

# 基于 Workbench 的斜拉门式启闭机门架结构动力学分析

周任伟<sup>1,2</sup>, 李琴<sup>1</sup>, 李欣欣<sup>2</sup>, 杨芳<sup>2</sup>

(1. 西南石油大学 机电工程学院, 四川 成都 610500;  
2. 中国水利水电夹江水工机械有限公司, 四川 乐山 614100)

**摘要:**以在建的全球最大启闭容量的白鹤滩水电站坝顶 10 000 kN/500 kN 双向斜拉门式启闭机为例,运用 Inventor 软件建立门架结构模型,运用 Workbench 软件完成门架结构在斜拉载荷作用下的预应力模态分析,得到门架结构前 12 阶固有频率和对应的振型结果。研究结果表明:门架结构的动刚度满足要求,且启闭小车起升电动机和卷筒产生的外部激励力不易使门架结构产生共振现象,动力学设计合理。

**关键词:**斜拉门式启闭机;门架结构;Workbench;预应力模态分析;固有频率

**中图分类号:**TH122;TH218 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)05-0103-04

## Dynamic Analysis for Frame Structure of Oblique Pull Gantry Hoist under Load Based on Workbench

ZHOU Renwei<sup>1,2</sup>, LI Qin<sup>1</sup>, LI Xinxin<sup>2</sup>, YANG Fang<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;  
2. Sinohydro Jiajiang Hydraulic Machinery Co., Ltd., Leshan 614100, China)

**Abstract:** With the 10 000 kN/500 kN oblique pull gantry hoist installed on the dam crest of Baihetan Hydropower Station, the world largest gantry hoist under construction installed, as an example, Inventor was used to build frame structure model, and by Workbench, the pre-stressed modal analysis of the frame structure under cable-stayed load was completed to obtain the first 12 order natural frequencies and corresponding mode shapes of the gantry structure. The results show that the dynamic stiffness of the portal structure meets the requirements, the external excitation force generated by the lifting motor and the reel of the hoisting trolley is not easy to cause the resonance phenomenon of the portal structure, and the dynamic design is reasonable.

**Keywords:** oblique pull gantry hoist; frame structure; Workbench; pre-stressed modal analysis; natural frequency

## 0 引言

门式启闭机主要应用于水利水电工程,属于专用的起重设备。在实际工程中,斜拉门式启闭机属于比较少见的类型,斜拉门式启闭机在受载时,会使门架结构承受一定的水平载荷。门架结构是门式启闭机的关键受力构件,其动力学特性对启闭机的性能、安全至关重要。对门架结构进行动力学特性的研究有着非常重要的意义。

查阅公开文献,唐松智等<sup>[1-2]</sup>对三门峡水利枢纽 4 500 kN斜拉双向门机、小湾水电站坝顶 6 600 kN斜拉双向门式启闭机主要部件的设计及布置形式进行了较为详细的论述;温焕翎等<sup>[3]</sup>采用 ANSYS 计算出启闭机门架结构的固有频率和振型结果,为动态响应分析、振动稳定性分析奠定了基础;刘玉峰等<sup>[4]</sup>用 ANSYS 得出门式起重机整体有限元模型的固有频率和振型,分析后得出了提高固有频率的措施。通过现有研究,可以得出以下结论:

1) 对斜拉门式启闭机的研究主要为机构设计等方

面,对其门架等结构力学分析方面的研究较少;

2) 启闭机结构动力学方面的研究大多针对常规启闭机和门式起重机等,对门架结构斜拉载荷下的受力分析研究相对较少;

3) 现有对启闭机或者起重机门架结构模态分析方面的研究多针对于自由模态或约束模态,且主要约束方式为对大车行走车轮与运行轨道的接触位置施加位移约束;

4) 对门架结构受力状态下模态分析方面的研究相对较少,对门架结构受斜拉载荷状态下模态分析方面的研究则更为缺失。

本文以白鹤滩水电站坝顶 10 000 kN/500 kN 斜拉门式启闭机为例,进行门架结构在斜拉载荷作用下的动力学特性分析。该门式启闭机是在建全球最大启闭容量的坝顶门式启闭机。采用 Workbench 软件的预应力模态分析技术,对门架结构的前 12 阶固有频率和对应的振型进行分析计算,并对计算结果进行评估,从而判断门架结构的动力学设计合理性。

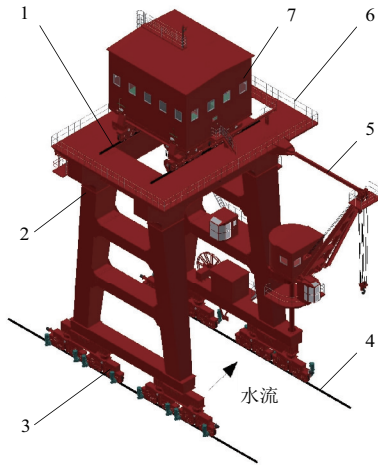
**基金项目:**四川省省级工业发展资金产业发展和创新平台建设项目(2020LS06290);中国电力建设股份有限公司科技合同(DJ-ZDXM-2019-11)

**第一作者简介:**周任伟(1990—),男,四川乐山人,硕士研究生,从事机械工程/机械设计工作。

# 1 斜拉门式启闭机基本参数

## 1.1 启闭机介绍

斜拉门式启闭机主要由门架结构、启闭小车、大车行走机构、回转吊、梯子平台栏杆等结构组成。启闭小车安装在门架结构顶部,在小车行走轨道上完成行走动作;大车行走机构与门架连接为整体结构,并安装在大车行走轨道上;回转吊安装在门架结构的侧面;梯子平台栏杆等安装在门架规定位置。总体三维示意图见图 1。



1—小车行走轨道;2—门架结构;3—大车行走机构;  
4—大车行走轨道;5—回转吊;6—梯子平台栏杆;7—启闭小车。

图 1 斜拉门式启闭机三维示意图

## 1.2 主要参数

斜拉门式启闭机的主要参数包括额定启闭载荷、斜拉角度、门机跨度、大车行走基距、小车行走轨距、小车行走基距及各部件的质量等。主要参数见表 1。

表 1 斜拉门式启闭机主要参数

参数名称	量/单位	数值	参数名称	量/单位	数值
额定启闭载荷	$P/\text{kN}$	10 000	启闭小车轨距	$S/\text{m}$	7.6
斜拉角度	$\alpha/(\text{°})$	7	启闭小车质量	$G_q/\text{t}$	320
启闭机跨度	$B/\text{m}$	13.2	回转吊质量	$G_h/\text{t}$	50

## 1.3 材料确定

门架结构的钢板材料均为低合金高强度结构钢,牌号为 Q355B,钢材的力学特性见表 2。

表 2 门架结构钢材的力学特性

特性名称	量/单位	数值	特性名称	量/单位	数值
上屈服强度	$\sigma_s/\text{MPa}$	355	弹性模量	$E/\text{GPa}$	206
泊松比	$\mu$	0.3	密度	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	7 850

## 1.4 载荷计算

斜拉门式启闭机作业时,斜拉载荷会在竖直方向和水平方向进行分解,其中竖直方向载荷通过小车行走机构的 4 组车轮组传递给小车行走轨道、门架结构,水平方向载荷通过小车行走油缸作用在门架结构顶部的 2 组油缸支座上。作用在门架上的水平方向载荷和竖直方向载荷如式 (1) 所示。

$$\begin{cases} P_{\text{水平}} = \frac{P \sin \alpha}{2} = \frac{10\,000 \sin 7^\circ}{2} = 609.35 \text{ (kN)} \\ P_{\text{竖直}} = \frac{P \cos \alpha}{4} = \frac{10\,000 \cos 7^\circ}{4} = 2\,481.37 \text{ (kN)} \end{cases} \quad (1)$$

计算时考虑到门架结构上的小车、回转吊等质量较大的部件对计算结果的影响,忽略小车行走轨道、梯子平台栏杆等质量较小的部件。

# 2 预应力模态分析理论

## 2.1 模态分析介绍

模态是振动系统的固有振动特性。模态又分为自由模态和约束模态,两种类型的模态在固有频率及对应的振型上都存在一定差异,在实际工程应用中大部分振动系统都处于约束的状态,所以进行模态分析时,按实际情况对振动系统施加约束。

预应力模态分析是约束模态的子集,实质是考虑应力刚化作用的模态分析。由于应力刚化效应,会一定程度地改变振动系统固有振动频率和振型,因此,启闭机门架结构的动力学分析需要考虑约束和载荷等外部作用,进行预应力模态分析。

## 2.2 系统动力学方程

在实际工程中,振动系统的动力学问题大多具有高度复杂性,因此大多采用多自由度系统的振动理论来分析。启闭机门架结构是一个典型的多自由度系统,动力学有限元分析的一般方程为

$$m \{\ddot{x}\} + c \{\dot{x}\} + k \{x\} = \{F(t)\} \quad (2)$$

当仅考虑结构自身特性,忽略外部作用和阻尼,式(2)可变为式(3),即为模态分析的动力学方程:

$$m \{\ddot{x}\} + k \{x\} = 0 \quad (3)$$

对式(3)进行推导变形后得到齐次线性方程组即结构频率特征值方程:

$$\{k - \omega^2 m\} \{u\} = 0 \quad (4)$$

式中: $m$ 、 $c$ 、 $k$  分别是总体质量矩阵、总体阻尼矩阵和总体刚度矩阵; $\{\ddot{x}\}$ 、 $\{\dot{x}\}$ 、 $\{x\}$  分别是节点加速度向量、速度向量、位移向量; $\{F(t)\}$  是结构的节点载荷向量; $\omega$  为系统频率; $\{u\}$  为系统的模态向量和振型向量。

# 3 门架结构的预应力模态分析

预应力模态分析的基本流程为:三维建模及处理,网

格划分与边界条件处理,预应力模态分析。

### 3.1 三维建模及处理

门架结构由薄钢板拼焊而成,为提高计算效率,可简化为板壳单元模型。采用 Inventor 软件进行模型建立及简化,得到面模型。将模型导入 Workbench 软件中,完成厚度添加、接触关系设置操作等。

### 3.2 网格划分及边界条件处理

完成三维建模及处理后,结合门架结构的特点及钢板厚度,初步定义网格尺寸为 100 mm,完成网格划分后,得到节点数量为 268 963,网格数量为 275 431,网格 average 项的值为 0.908,结合工程经验,网格质量满足计算要求。

按照式(1)中的载荷值加载到作用点,将启闭小车、回转吊等转换为质量点并按照表 1 赋予质量。在门架下部安装大车行走机构的耳板上,以销轴孔为基准分别建立 4 个远程点,模拟门架结构在受载荷状态下的边界情况,对 4 个远程点设置  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的位移自由度为 0 且转动自由度释放的约束。门架结构有限元模型及网格示意图见图 2。

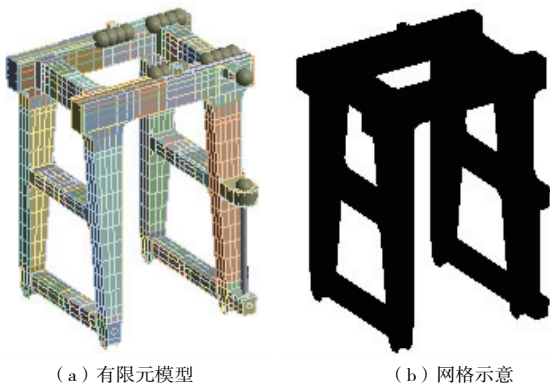


图 2 门架结构有限元模型及网格示意

### 3.3 预应力模态分析

在 Workbench 软件中首先进行材料赋予、网格划分、载荷加载、约束处理等一系列操作后,完成静力学分析,再将结果作为模态分析的输入参数,将计算参数中模态阶数的提取值设置为 12,执行计算。

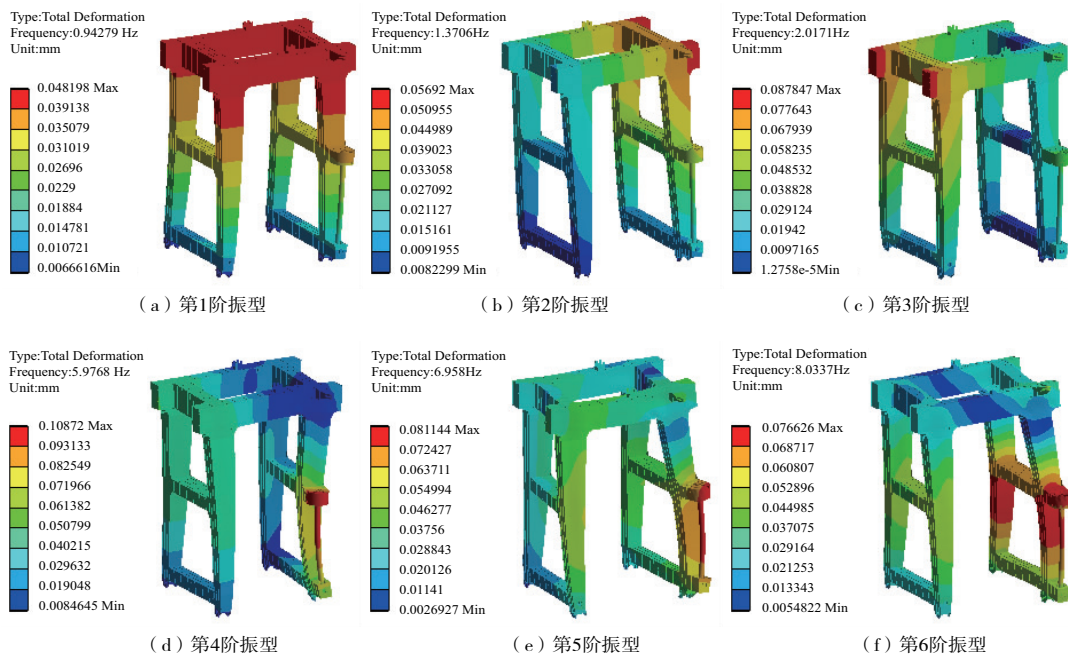
## 4 预应力模态分析结果

完成预应力模态分析后,得到了门架结构前 12 阶的固有频率和对应的振型。由固有频率统计结果可以得到:第 1 阶和第 2 阶的振动频率 < 2 Hz,第 3 阶的频率 ≈ 2 Hz,第 4 阶及以上阶数的频率均 > 5 Hz。各阶频率统计见表 3。

表 3 门架结构斜拉载荷下各阶频率统计 单位:Hz

阶数	固有频率	阶数	固有频率
第 1 阶	0.942 8	第 7 阶	9.874 2
第 2 阶	1.370 6	第 8 阶	11.004 0
第 3 阶	2.017 1	第 9 阶	11.335 0
第 4 阶	5.976 8	第 10 阶	11.614 0
第 5 阶	6.958 0	第 11 阶	12.466 0
第 6 阶	8.033 7	第 12 阶	13.293 0

由振型示意图可以看出,第 1 阶振型方向为上部结构部分在垂直大车行走方向(上下游方向)的来回摆动,见图 3(a);第 2 阶振型方向为上部结构的下游侧部分在大车行走方向的来回摆动,见图 3(b);第 3 阶振型方向为上部结构的上游侧部分在大车行走方向的来回摆动,见图 3(c);第 4-9 阶、第 11-12 阶振型方向均为门腿部分或者回转吊安装支撑平台部分在各个方向的摆动,见图 3(d)-图 3(i)、图 3(k)-图 3(l);第 10 阶振型方向为上部结构的主梁中部在大车行走方向的来回摆动,见图 3(j)。



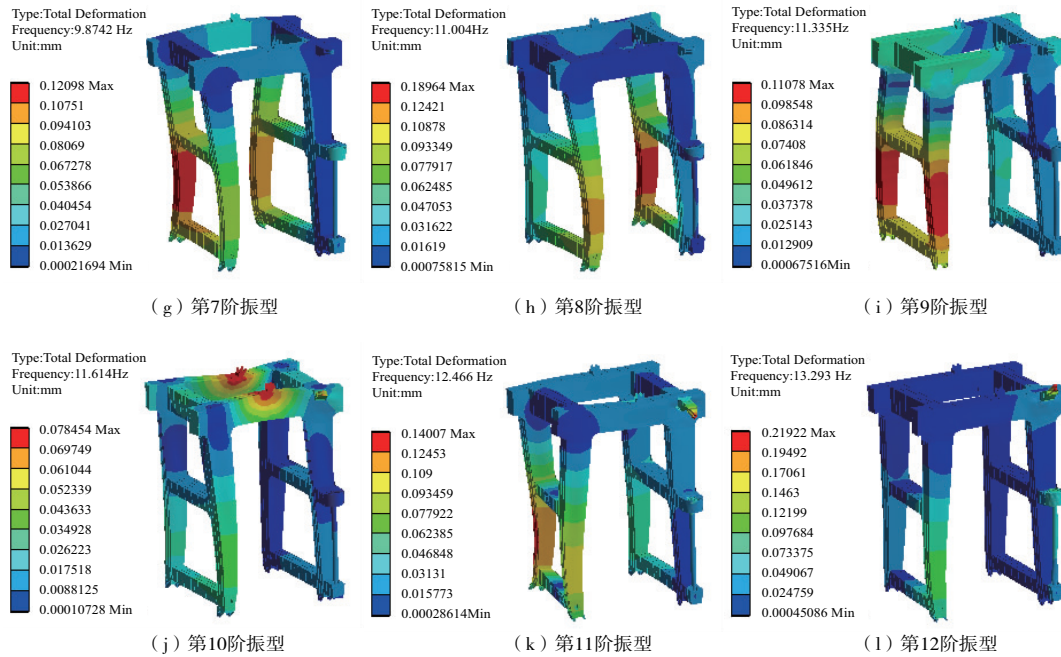


图3 门架结构各阶振型示意

## 5 预应力模态分析结果评价

动态刚性以满载情况下门架结构在竖直方向的最低阶固有频率来表征,必要时还可以以水平方向的满载自振频率来表征<sup>[5]</sup>。

### 5.1 规范及设计手册要求

《起重机设计规范》<sup>[5]</sup>对起重机的动态刚性一般不作要求,其指标由设计者与用户确定。《起重机设计手册》<sup>[6]</sup>对电动桥式类型起重机(包括门式起重机和装卸桥)竖直方向满载自振频率 $f$ 的建议为 $\geq 2$  Hz且 $< 4$  Hz。主要考虑作业过程中对司机生理、心理影响,结合该斜拉门式启闭机的使用特点,确定其竖直方向的自振频率为 $\geq 2$  Hz。

根据计算出的前12阶固有频率统计可以看出,仅前3阶的固有频率低于2 Hz或处于临界值,通过观察前3阶振型图,门架结构的振动方向均不是竖直方向,由此可以说明启闭机门架结构在斜拉载荷下竖直方向振型对应的固有频率 $> 2$  Hz,可以得出结论:动态刚性满足要求。

### 5.2 外部激励力分析

启闭机额定载荷作业时,对门架结构的外部激励来源主要为启闭小车的起升电动机运转和卷筒转动。电动机额定转速为740 r/min,产生的激励力频率为12.33 Hz;卷筒转速为2.32 r/min,产生的激励力频率为0.038 7 Hz。由于电动机和卷筒的轴向与斜拉门式启闭机的大车行走方向一致,电动机运转和卷筒转动时,形成绕轴线的圆周方向振动,因此会在门架的上部结构形成垂直于大车行走的水平方向和竖直方向的振动激励。结合预应力模态分析结果,可以得出电动机运转形成的激励力频率与门架结

构第11阶的固有频率接近,但是振型不一致,也不易产生共振现象;卷筒转动形成的激励力频率与门架结构的固有频率差异较大,也不易产生共振现象。门架结构设计满足动态刚性要求。

## 6 结语

以白鹤滩水电站坝顶10 000 kN/500 kN斜拉门式启闭机为例,对门架结构进行斜拉载荷下的动力学特性分析(预应力模态分析),得到了前12阶固有频率和对应的振型结果。按照规范的要求进行门架动刚度评估,得到满足规范要求的结论;同时对启闭小车的起升电动机和卷筒的激励频率进行分析,并与门架结构的固有频率和振型进行对比分析,得出起升小车产生的外部激励力不易使门架结构产生共振现象的结论。本文对门架结构采用的动力学特性分析方法可以为类似结构的设计提供参考。

### 参考文献:

- [1] 唐松智,赵中营,朱君学. 三门峡水利枢纽4 500 kN斜拉双向门机设计[J]. 华电技术,2012,34(12):12-14,79.
- [2] 唐松智,赵中营,朱军学. 小湾水电站6 600 kN斜拉双向门机创新设计[J]. 四川水力发电,2012,31(6):112-114.
- [3] 温焕翊,张虎. 门式启闭机的有限元模态分析[J]. 科技信息,2010(28):105-106.
- [4] 刘玉峰,张晓钟. 门式起重机的模态分析[J]. 机械设计,2012,29(3):18-22.
- [5] GB/T 3811—2008 起重机设计规范[S].
- [6] 张质文,王金诺,程文明,等. 起重机设计手册[M]. 2版. 北京:中国铁道出版社,2013.

收稿日期:2021-05-19