

Calculation and Research on the Strength of Load-Bearing Frame of Francis Turbine

Chunguang Hu¹ Hanzhen Li² Chongshi Li²

1. China Power International Development Co., Ltd. (Zhuhai Office), Zhuhai, Guangdong, 519031, China
2. Hunan Wuling Power Technology Co., Ltd., Changsha, Hunan, 410004, China

Abstract

Taking the load-bearing frame of the francis turbine as the research object, using the hypermesh finite element analysis software, the static stiffness and strength analysis and the vibration stress analysis under working conditions are carried out. From the calculation results, it can be seen that its structure is reliable and can fully guarantee the reliability and life of the entire turbine.

Keywords

load-bearing frame; finite element method; vibration stress analysis

混流式水轮机承重机架的强度计算与研究

胡春光¹ 李汉臻² 李崇仕²

1. 中国电力国际发展有限公司（珠海办公区），中国·广东 珠海 519031
2. 湖南五凌电力科技有限公司，中国·湖南 长沙 410004

摘要

以混流式水轮机承重机架为研究对象，应用 Hypermesh 有限元分析软件，对其进行静态刚度分析和工作状态下的振动应力分析。从计算结果可知，其结构设计可靠，能充分保证整个水轮机的可靠性和寿命。

关键词

承重机架；有限元法；振动应力分析

1 引言

承重机架作为混流式水轮发电机组的关键部件，其结构的刚度设计关乎水轮发电机组的安全运行。工程上基于有限元法，利用传统的刚度分析理论，即结构应力不许超过材料的许用应力，属于静力学的范畴。对承重机架而言，目前分析多偏重于静力学分析，往往忽略水轮机工作过程中主轴对轴承座机承重机架的动态影响，轴承处要承受交变的径向载荷，承重机架结构不合理会产生很大的径向位移，引起导轴承发生摆动，从而引起整个机组的振动，严重时会带来安全隐患。因此，对其进行工作状态下振动应力分析是十分必要的，只有这样才能真实反映承重机架振动情况，从而判断其是否符合疲劳强度要求。

论文以中国贵州省某混流式水轮机承重机架为例，对结构进行传统的静力学刚度分析。对其机组进行现场振动测试，提取承重机架处于极限工况下的最大幅值，以最大幅值

为加载，对其进行振动应力分析校核疲劳强度。

2 承重机架静态强度分析

2.1 建立三维建模

发电机承重机架采用推力轴承与下导轴承分开布置的结构，同时制动风闸立于承重机架之上。承重机架主要由中心体和 6 条支臂组成，支臂高度 1740mm，机坑直径 $\phi 10550\text{mm}$ 。采用 Solidworks 软件建立实体模型，对附着在承重机架上的推力轴承及油箱、导轴承和制动风闸按照质量点的方式等效处理^[1]。

2.2 承重机架材料属性

| 属性 | 单位 | 值 |
|------|-----|-----|
| 抗拉强度 | MPa | 455 |
| 屈服强度 | MPa | 235 |
| 弹性模量 | GPa | 200 |
| 泊松比 | | 0.3 |

2.3 模型网格划分和约束

在 Solidworks 环境下, 将所建模型转换成 Step 格式文件并导入到 Hypermesh 中, 采用适应性非常强的非结构化四面体网格进行模型网格划分。有限元网格划分结果见图, 网格节点数共计 453582 个, 网格单元数共计 1807138 个。

2.4 承重机架计算工况及载荷计算

承重机架在运行过程中, 载荷状况复杂。其主要承受自身结构及附件重力以及轴向水推力作用。在重力方面, 转动部件重量包括转子重量、主轴重量、推力轴承重量、转轮重量等全部轴向负荷, 具体结构及自身附件重量如表 1 所示。水推力包括作用在转轮上的冲击力和水的浮力合力, 按经验公式进行计算得到其轴向水推力为 1100 吨, 如图 1 所示。

在有限元分析过程中, 不同的运行状况其有限元模型的加载方式都是不同的, 因此选取合适的运行工况对有限元分析来说至关重要^[2]。结合承重机架实际运行参数和刚度分析理论, 选取机组处于额定工况进行刚强度的分析。在此工况下承重机架除受自身结构及附件重力之外, 还承受轴向水推力作用。

表 1 承重机架及附件重量

| 结构自重 | 制动风闸 | 推力轴承 | 镜板荷重 | 下导轴承 | 轴向水推力 |
|------|--------|---------|--------|--------|--------|
| 70 吨 | 9.86 吨 | 66.33 吨 | 1470 吨 | 4.53 吨 | 1100 吨 |

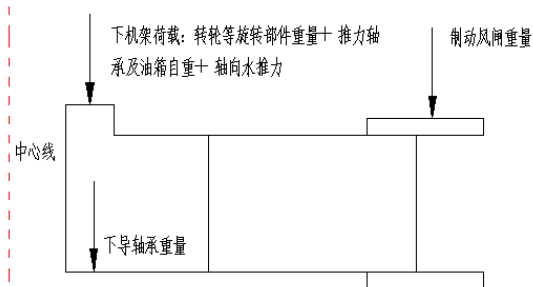


图 1 承重机架载荷示意图

轴向水推力计算:

$$F_w = 250\pi\lambda D_1^2 \frac{n\sqrt{Q}}{H^{0.25}}$$

$$F_w = 250\pi \times 0.75 \times 5.05 \times 5.05 \times \frac{166.67\sqrt{217.81}}{128^{0.25}} = 10997133 \text{ N} = 1100 \text{ 吨}$$

在正常运行工况下, λ 随机组出力和流量的增大而增大, 取值范围为 0.7~0.8。机组发额定出力时建议取值 0.75 ± 0.01 , 机组超额定出力运行时建议取值 0.77 ± 0.01 。在甩负荷工况

下, λ 基本保持不变, 可取固定值 1 ± 0.01 。n 为具体工况下的转轮转速, 为 166.67 rpm; Q 为具体工况下的转轮过流量, $217.81 \text{ m}^3/\text{s}$; H 为具体工况下的工作水头, 额定水头 128 m。D1 为转轮名义直径: 5.05 m。

按照承重机架实际受力情况, 施加重力加速度 $g=9.8 \text{ m/s}^2$ 将水推力施加到承重机架中心位置的刚性单元上, 然后基于 Hypermesh 软件进行静态求解, 求解完成后可进入后处理查看结果, 截取顶盖和承重机架的典型工况应力云图, 如图 2 所示。

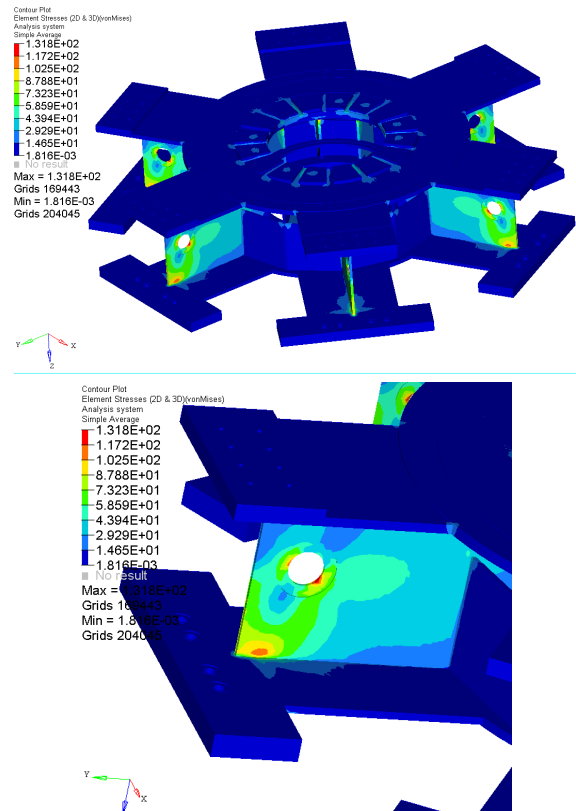


图 2 顶盖和承重机架的典型工况应力云图

承重机架应力分布, 最大应力 132Mpa。承重机架均满足强度要求, 承重机架额定工况最大应力为 132MPa, 安全系数分别为 1.8。

3 承重机架振动测试

(1) 试验目的

测试各个典型工况下承重机架的振动频率和振幅。

(2) 试验方法

根据规程规范要求, 在试验机组上布置相应的振动传感器, 记录试验工况下各测点的输出变化情况, 分析机组的运行特性。

(3) 测试工况 (变转速、变励磁、变负荷)

(4) 振幅结果

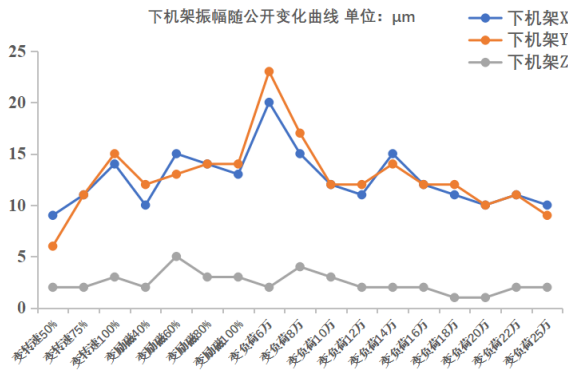


图3 某厂承重机架振幅随工况变化图

某厂承重机架通过对时域波形中的振幅进行统计, 得到各工况下 X、Y、Z 三方向的振动幅值如图 3 和表 2 所示。

(5) 测试时域结果

某厂测试完成后, 变转速、变励磁和变负荷各工况的具体时域波形图如图 4 所示。

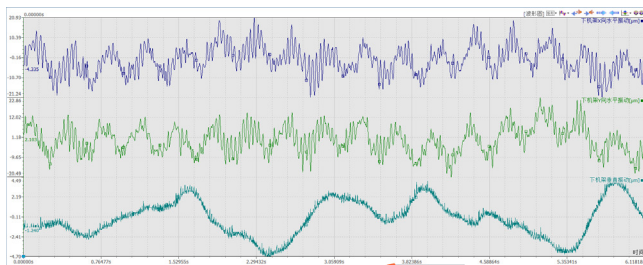


图4 变负荷6万波形图

表2 承重机架振动最大的工况

| | X 向振幅 | Y 向振幅 | Z 向振幅 | 振动频率 |
|---------|----------|----------|--------|-----------|
| 变负荷 6 万 | -20~20μm | -19~23μm | -4~5μm | 0.7、2.7HZ |

(6) 测试频域结果

某厂承重机架具体各工况时域的 FFT 变换之后的频率如图 5 所示。

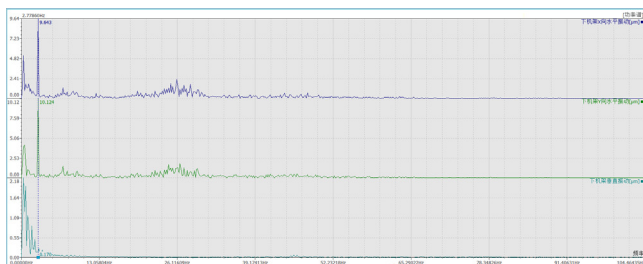


图5 某厂变负荷6万频域图

承重机架振幅最大的工况为变负荷 6 万工况, 径向振幅达到 23μm 轴向振幅 5μm。远小于国家标准规定的允许限值(水平 ≤ 110μm, 垂直 ≤ 80μm), 这说明承重机架推力轴承处的轴

向刚度 and 下导轴承处的径向刚度满足机组正常运行的要求^[3]。

另外, 承重机架表现出的优势频率主要为 0.7HZ 和 2.7HZ。其中, 稳定振动频率 2.7HZ 为激励频率来源。

4 承重机架振动应力分析

4.1 振动应力分析定义

振动应力分析又称为谐响应分析 (Harmonic Response Analysis), 是用于确定线性结构在承受一个或多个随时间按正弦 (简谐) 规律变化的载荷时稳态响应的一种技术。分析的目的是计算出结构在几种频率下的响应并得到一些响应值 (通常是位移) 对应频率的曲线。从这些曲线上可以找到“峰值”响应, 并进一步考察频率对应的应力。谐响应分析技术只计算结构的稳态受迫振动, 发生在激励开始时的瞬态振动不在谐响应分析中考虑^[4]。谐响应分析是一种线性分析, 任何非线性特性, 如塑性和接触 (间隙) 单元, 即使被定义了也将被忽略, 但在分析中可以包含非对称系统矩阵。其具体分析流程如下。

(1) 前处理和边界条件。

(2) 前处理进行模型处理、材料设置、网格划分、施加约束, 这里不再赘述。

(3) 在 Analysis Settings 中设置频率范围和步长, 比如设置频率范围为 50-1000Hz, 步长为 50Hz。

(4) 设置求解选项

在 Frequency Response 下拉菜单中选择添加求解选项。可添加的求解选项有 Stress、Strain、Deformation 和 Acceleration。通过添加求解选项, 可以求解相应几何元素的对应结果。

(5) 求解

添加完求解选项后, 即可点击 Solve 按钮进行求解。求解结束后, 点击相应的选项即可查看求解结果。比如可查看应力-频率响应曲线 (Frequency Response-Stress)。

(6) 拓展求解

在求解完基础的频率响应项目后, 即可在工具栏中添加 Stress、Strain、Deformation 等力学求解项目。添加力学求解项目时需要指定对应的频率, 即力学求解是求解对应频率下的应力、应变、位移等结果, 并以云图的形式展现出来。

4.2 振动应力计算

取整个承重机架为计算模型, 模型中推力轴承及油箱、水导轴承及油箱以及制动风闸等以质量单元等效的方式, 无需考虑轴向水推力荷载, 约束承重机架 6 个支腿与机坑实际

连接的部位节点的自由度^[5]。将变负荷6万工况中的振幅作为激励位移源施加到动力学模型中,进行振动响应分析,单独分析振动引起的附加应力。激励函数为:

$$F = A_0 \sin(\omega t)$$

A_0 为承重机架6万负荷工况中承重机架X、Y、Z三个方向的幅值; $f=2.7\text{Hz}$; $\omega = 2\pi f$ 。采用模态叠加法进行谐响应分析,同时需定义载荷步选项,包括谐响应分析的频率范围,载荷子步数。本例设置频率范围为0-100Hz,步长为1Hz。点击Solution进行求解,并在Frequency Response下拉菜单中选择添加求解选项。可添加的求解选项有Stress、Deformation和Acceleration。计算完成后,查看各工况下的计算结果,本例查看振动应力云图,具体如图6所示。

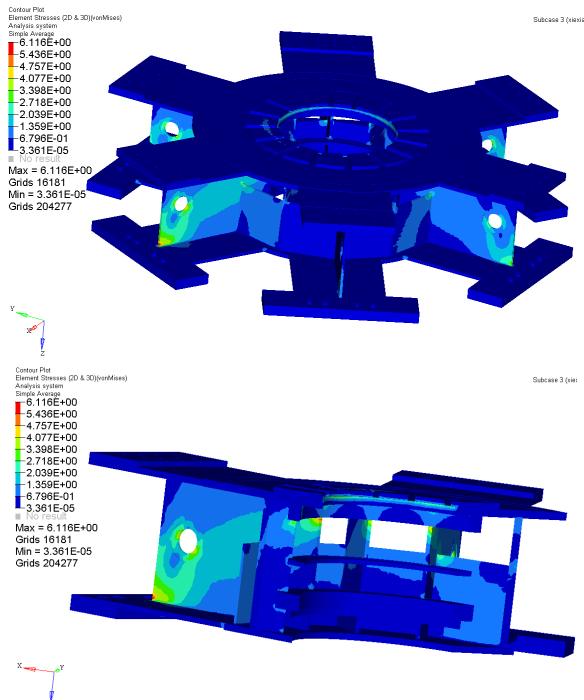


图6 振动应力云图

等效应力分布,最大应力6.1Mpa。变负荷6万工况下的振动应力为6.1MPa,最大应力部位在机墩底板、内圈筋板与顶板交汇开口处,在极限振幅对承重机架造成的附加振动应力较小,且分布均匀,说明承重机架设计是合理的。

5 结语

论文以混流式水电站水轮机承重机架的设计与强度计算为研究对象,应用Solidworks以及Hypermesh有限元分析等软件,对其受力进行了分析,并建立了结构三维模型。从传统静强度和工作状态下的振动应力的角度并结合现场实际振动测试进行了承重机架的应力与应变计算,结果表明承重机架强度都满足要求,充分说明了该电站水轮机承重机架的结构设计是可靠的,能充分保证整个水轮机的可靠性并延长寿命。

参考文献

- [1] 哈尔滨大电机研究所. 水轮机设计手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1976.
- [2] 赵玺, 赖喜德, 苟秋琴. 混流式水轮发电机组上机架疲劳寿命分析 [J]. 水电能源科学, 2015 (08):140-143.
- [3] 苏梅, 童昕, 刘强, 等. 振动筛筛箱的动应力分析及结构改进 [J]. 建筑机械, 2010 (07):59-64.
- [4] 吕桂萍. 水轮发电机组大部件刚强度及动态特性研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2004.
- [5] 王燕. 水轮机顶盖的动态谐响应分析 [C]. 第十九次中国水电设备学术讨论会论文集, 2013.