

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.11.011

中小型燃气轮机试验台主设备基架的有限元分析

赵雄飞¹, 胡龙兵², 刘 飞²

(1. 海军装备部驻沈阳地区 军事代表局, 辽宁 沈阳 110031;

2. 中国船舶重工集团公司第七〇三研究所 无锡分部, 江苏 无锡 214151)

摘要:针对中小型燃气轮机试验台主设备基架结构设计可行性和螺栓连接结合面钢化模型适用范围等问题,对不带箱装体燃气轮机机组、带箱装体燃气轮机机组以及水力测功器机组载重状态下基架结构动力学特性等方面进行了有限元分析,对机组载重状态以及螺栓连接结合面的处理方法进行了归纳,提出了将质量单元法应用到机组载重状态的模拟中以及将弹簧单元法和钢化模型技术应用到螺栓连接结合面的模拟中。研究表明,两种螺栓连接结合面处理方法下,不带/带箱装体燃气轮机基架的模式计算结果最大偏差为 2.85%,水力测功器基架的结果最小偏差为 19.2%;同时,主设备基架的结构动力学分析结果验证了其结构设计满足使用要求,进而为试验的安全运行提供保障。

关键词:燃气轮机;试验台;水力测功器;基架;动态性能

中图分类号:TH122;TK477

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)11-1448-05

Finite element analysis of the main equipment frame of small and medium-sized gas turbine test rig

ZHAO Xiong-fei¹, HU Long-bing², LIU Fei²

(1. The Military Representative Office, The Naval Armaments Department in Shenyang Area,

Shenyang 110031, China; 2. Wuxi Division CSIC No. 703 Research Institute, Wuxi 214151, China)

Abstract: In order to solve the problems of the main equipment frame design feasible assessment of small and medium-sized gas turbine test rig and the range of toughened model, the structure dynamic characteristics under load status of the main equipment frame was analyzed basing on FEM, not only for the untake/take belt box body gas turbine, but also for the dynamometer. The method of bolted surface were generalized, where the mass element method was used for solving load state, the spring element method and toughened model were used for treating bolted surface. The results indicate that as for the method of bolted surface treatment, the maximum of gas turbine base frame is 2.85%, while the minimum of the dynamometer is 19.2%. And the analysis verifies structure design to meet the requirements, and then provides the guarantee for the safe operation of the test section.

Key words: gas turbine; test rig; dynamometer; frame; dynamic; characteristics

0 引言

目前,国内中小型燃气轮机产业蓬勃发展,为了测试和验证燃气轮机的性能,同时,也为了加强对燃气轮机质量的保证,必须在相应试验台上对其进行规范性的考核试验。试验台系统主要包括:燃气轮机、高速水

力测功器及其它保障系统,燃气轮机与水力测功器均安装在相应基架上,发动机产生的推进功率由弹性轴传递到水力测功器进行吸收并测量。试验过程中,燃气轮机机组在运转过程中由于转子等部分存在不平衡将会产生离心力,进而使机组及其基架产生强迫振动,同时,由于转子腔中的湍流迫使水力测功器

承受巨大的水力激振力,其频率范围宽广,为保障燃气轮机和水力测功器等主设备的安全,试验过程中不允许出现有害振动,这就对试验台主设备基架结构设计提出了一定的固有特性要求。因此,试验台主设备基架结构设计必须经过静、动力学分析,以保证其具有足够的刚度与强度,避免基架与其相应设备产生共振。

国内外学者围绕机组基架计算分析模型的研究主要集中在设备载重的处理、机组基架中螺栓连接的处理以及机组基架系统动力学建模等方面^[1-5]。本研究对于设备载重的处理则通过在相应主设备重心处创建质量单元来模拟^[6],质量单元点与基架上面板的连接则通过在螺栓安装孔中心建立 MPC 约束。螺栓钢化模型在大型设备基架有限元分析过程中可以明显提高计算效率,但螺栓钢化模型难以反映螺栓连接的刚性、阻尼以及预紧力等对其动态特性的影响,因此,上、下层基架之间的螺栓连接结合面分别采用弹簧单元法和钢化模型进行比较处理。

基于 ANSYS14.0,本研究对中小型燃气轮机试验台主设备基架进行考虑预应力状态下的模态计算以及动态响应特性计算,完成基架结构动力学特性的有限元分析,不仅可确立螺栓连接钢化模型处理方法的适用范围,而且还可验证试验台基架的结构设计满足使用要求,为试验的安全运行提供保障。

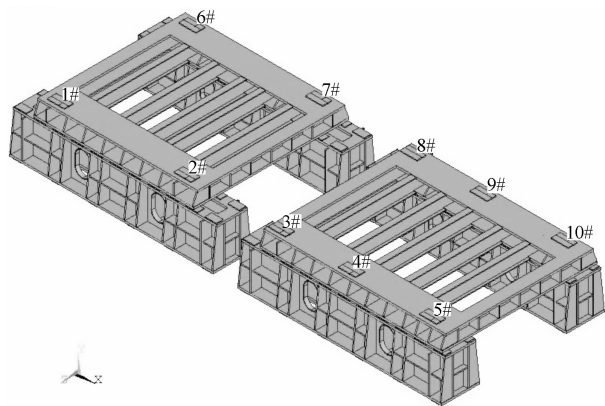
1 基架的结构设计

考虑到场地导轨布置方式、机组安装与运行要求、设备布置要求以及操作空间要求等因素,主设备基架都采用双层焊接型结构,并通过角撑板和加强肋进行加强,以便在各向上满足要求。其中,水力测功器基架上层是一整体结构,下层是两个镜像布置的下基架,上、下基架之间用螺栓连接,下基架通过地脚螺栓与试车平台固定;而燃气轮机基架上层由两个结构类似的基架组成,下层则有 4 个结构相同的基架阵列布置组成。主设备均通过螺栓与其相应上层基架直接相连。

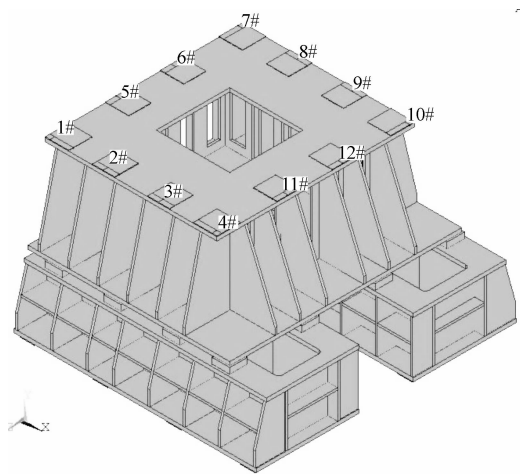
所有基架均由材料为 Q235B 的钢板焊接而成。基架上下面板厚度为 50 mm,立板与筋板厚 30 mm,各基架几何模型如图 1 所示。其中,基架与设备连接处用数字进行了标记,如:1#、2#等。

2 基架计算模型

本研究采用如下坐标系统(X 、 Y 、 Z)建立计算模



(a) 燃气轮机整体基架几何模型图



(b) 测功器上层基架几何模型图

图 1 各基架几何模型图

型:取机组轴线方向为 X 轴方向(轴向),与轴线垂直的水平方向为 Z 轴方向(横向),竖直方向为 Y 轴方向(垂向)。

本研究采用 10 节点 Solid187 单元进行模拟,地脚螺栓进行固支约束,上、下基架螺栓结合面分别采用弹簧单元法和钢化模型,为避免螺栓结合面出现较多的局部模态,弹簧单元法建模示意图如图 2 所示。即:相应螺栓孔处分别创建 A 、 B 两点, A 点与 B 点进行自由度耦合,在 B 点位置处创建 C 点, B 点与 C 点建立弹簧单元。笔者采用 Spring-damper14 模拟弹簧单元,依据螺栓的拧紧力矩添加各向刚度值。考虑到螺栓质量的影响,在点 A 和点 B (C)之间须创建质量点。

为充分考虑到机组载重状态对于基架振动模态的影响,本研究依据机组设备的质量与重心,通过采用 3D Mass21 单元对机组载重状态进行模拟。质量单元与上层基架各支点间建立 MPC 约束。燃气轮机基架整体计算模型总计单元数 1 028 735,测功器基架整体计算模型总计单元数 462 246。

计算步骤:本研究针对各整体基架,首先进行结构

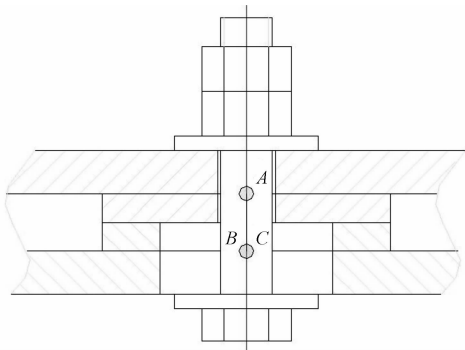


图2 弹簧单元法建模示意图

静力学计算,以查看基架的整体刚度;其次,进行预应力作用下的模态计算,以确定整体基架的基频与振型;最后,完成基架的动态响应特性计算。

表1 不同螺栓结合面处理方法下不带箱装体燃气轮机基架的模态特性

模态序号	弹簧单元法下模态频率/Hz	钢化模型下模态频率/Hz	振型特征
1	38.87	38.92	绕垂直轴扭转振动,并辅以轻微横向摆动
2	113.60	116.84	横向摆动
3	121.37	121.68	后端基架绕垂直轴扭动,并辅以横向摆动

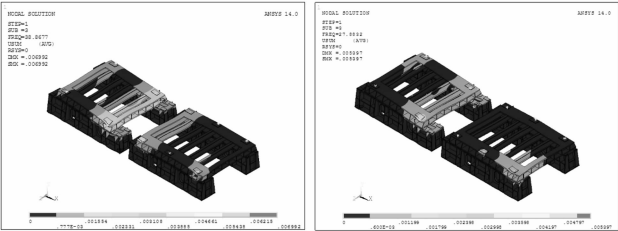
表2 不同螺栓结合面处理方法下带箱装体燃气轮机基架的模态特性

模态序号	弹簧单元法下模态频率/Hz	钢化模型下模态频率/Hz	振型特征
1	27.58	27.88	绕垂直轴扭转振动,并辅以轻微横向摆动
2	114.68	117.80	横向摆动
3	121.21	121.44	横向摆动,并辅以绕垂直轴扭动

表4 不同螺栓结合面处理方法下水力测功器基架的模态特性

模态序号	弹簧单元法下模态频率/Hz	钢化模型下模态频率/Hz	振型特征
1	62.16	74.10	横向抖动
2	70.53	109.06	横向与轴向耦合抖动
3	92.58	121.96	绕竖直方向的扭动、上层基架中心垂向运动

弹簧单元法下不带/带箱装体载重状态下燃气轮机基架前三阶模态振型图如图(3~5)所示。其中,不带箱装体载重状态下的燃气轮机基架振型图如图3(a)、4(a)、5(a)所示,带箱装体载重状态下的燃气轮机基架振型图如图3(b)、4(b)、5(b)所示。从图中可以看出,带箱装体后,燃气轮机基架二、三阶振型特征区别较大,即:横向摆动幅度明显增大,绕垂直轴扭动幅度变大。



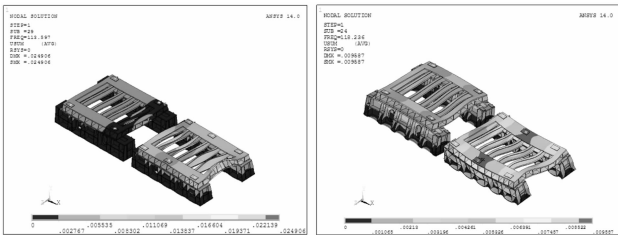
(a) 不带箱装体燃气轮机基架一阶振型 (b) 带箱装体燃气轮机基架一阶振型

图3 弹簧单元法下燃气轮机基架第1阶模态振型图

3 基架有限元计算结果

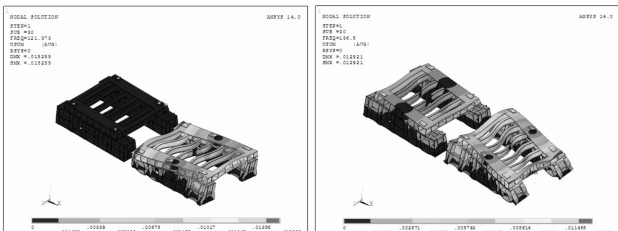
3.1 模态计算结果

本研究对整体基架进行预应力作用下的模态计算,计算结果如表(1~3)所示。从表中可以看出,不同螺栓处理方法对于燃气轮机整体基架模态计算结果的影响可以忽略;带箱装体后,燃气轮机整体基架的振型特征有所不同,主要表现在第三阶上,其原因在于带箱装体基架整体载重状态发生了相对变化。对于测功器整体基架的模态结果来说,不同螺栓处理方法处理得到的频率值相差较大,而振型较接近,其原因则是由测功器上、下层基架的连接刚度造成的。



(a) 不带箱装体燃气轮机基架一阶振型 (b) 带箱装体燃气轮机基架一阶振型

图4 弹簧单元法下燃气轮机基架第2阶模态振型图



(a) 不带箱装体燃气轮机基架一阶振型 (b) 带箱装体燃气轮机基架一阶振型

图5 弹簧单元法下燃气轮机基架第3阶模态振型图

不同螺栓处理方法下水力测功器载重状态下基架前三阶振型图如图 6、图 7 所示。从图中可以看出,采用钢化模型后,上、下层基架连接刚度很大,基架振型

主要体现在上层基架下面板以上部分,而实际安装中,考虑到多种因素的影响,上、下层基架之间的连接刚度与弹簧单元法处理条件下较接近。

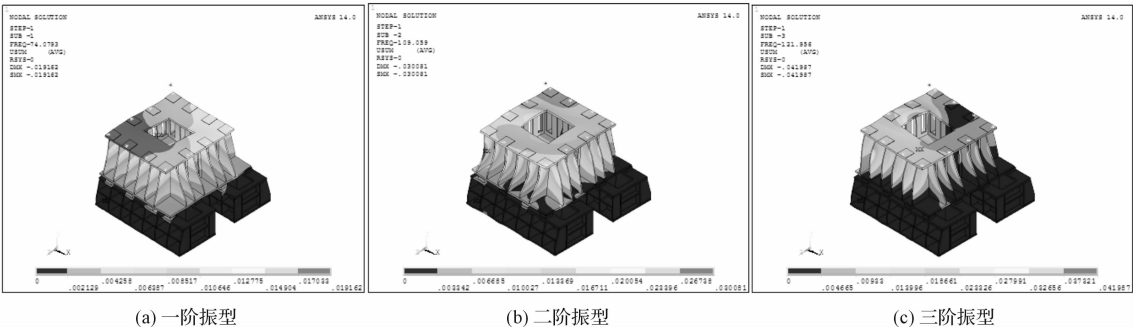


图 6 钢化模型下水力测功器基架前三阶模态振型图

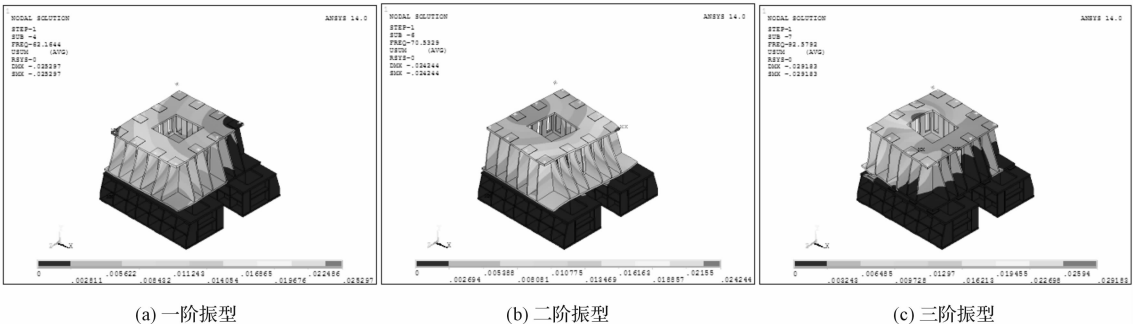


图 7 弹簧单元法下水力测功器基架前三阶模态振型图

3.2 动态响应计算结果

基架在给定动载荷激励下所产生的动态响应是评价其动态性能优劣的重要指标,在设计阶段,本研究综合各种因素的限制,采用有限元法揭示基座的动态性能很有必要。计算基座在激振力作用下的振动响应时,涉及到激振力大小、加载方式和阻尼等问题,其中,激振力方面,即,动态载荷:由主设备转子的动不平衡力产生,一般不超过转子重量的十分之一,本研究中燃气轮机动态载荷大小取其设备重量的 20%,水力测功器动态载荷大小取 10%^[7];基架动态响应的阻尼主要由结构阻尼构成,有限元建模完成后,结构阻尼与其他参数无关,结构阻尼系数取 0.05^[8]。激振力作用下的系统运动方程如下式:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

式中:[C]—阻尼矩阵; $\{x\}$ —位移向量; $\{F(t)\}$ —载荷向量,位移和载荷是简谐的,频率为 w 。将位移和载荷的附属表达式代入上式,得到谐响应分析运动方程^[9],如下式:

$$(-\omega^2[M] + i\omega[C] + [K])(\{x_1\} + i\{x_2\})e^{i\omega t} = (\{F_1\} + i\{F_2\})e^{i\omega t} \quad (2)$$

笔者在燃气轮机机组设备与基架的安装孔水平中

心处施加垂向载荷,其频率变化范围为 10 Hz ~ 200 Hz,计算该节点的位移响应,得到各安装孔处幅频响应曲线如图 8 所示。从图 8 中可以看出,各安装孔处幅频特性呈横向对称性,即,螺栓 1#—5#与螺栓 6#—10#一一对应,同时,4#、9#螺栓响应值最大,其次是 5#和 10#螺栓。

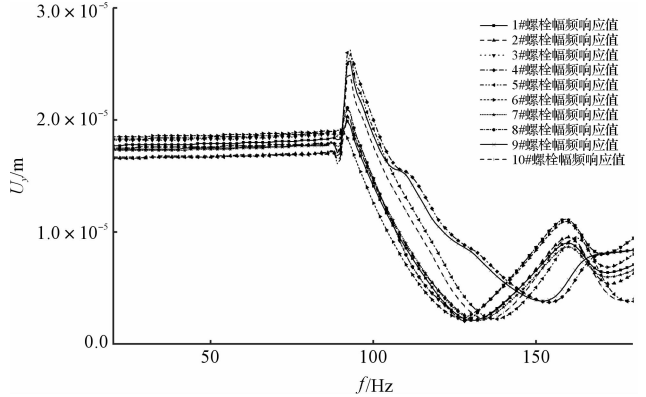


图 8 燃气轮机机组基架不同安装孔处幅频响应特性

同样,本研究在水力测功器上层基架上安装孔处施加垂向载荷,计算得到各安装孔处幅频响应曲线,水力测功器基架不同安装孔处幅频响应特性如图 9 所示。从图 9 中可以看出,各螺栓幅频响应特征沿横向

呈对称性,其中,5#、6#螺栓处响应值最大,随后依次是1#、7#以及2#、8#,这是由水力测功器上、下层基架中与5#、6#螺栓对应区域无连接件引起的。

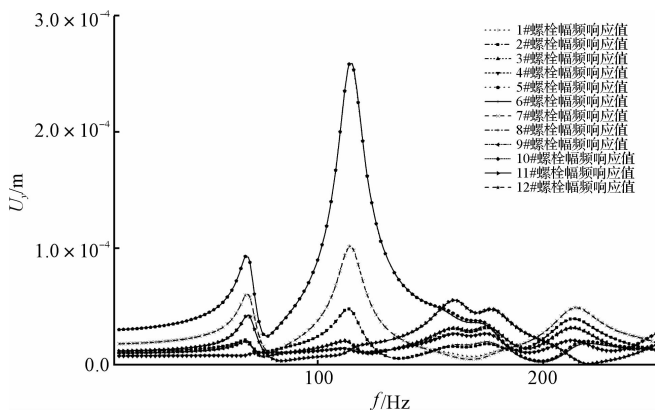


图9 水力测功器基架不同安装孔处幅频响应特性

4 结束语

本研究对燃气轮机试验台主设备基架进行了考虑预应力状态下的模态计算以及动态响应特性计算,完成了基架结构动静力学特性的有限元分析,验证了试验台基架的结构设计满足使用要求,为试验的安全运行提供了保障。结论如下:

(1)通过对螺栓连接结合面的不同处理方法结果可以看出,由于燃气轮机机组上、下层基架之间的螺栓数量众多,弹簧单元法与钢化模型的计算结果比较接近;而水力测功器上、下层基架之间由于螺栓数量较少,其两种方法的计算结果差别较明显。理论上来说,钢化模型难以有效反映螺栓连接结构中的刚性连接、阻尼连接以及预紧力对其动力学参数的影响,而基于

试验库确定的弹簧刚度则可以有效计算出基架的固有特性,因此,在数量众多的螺栓连接结构中,为了提高计算的效率,可以采用钢化模型;

(2)通过基架的计算结果可以看出,燃气轮机试验台主设备基架的模态频率可以避开相关设备的转频,动态性能良好,因而,试验台主设备基架的结构设计满足要求。

参考文献 (References):

- [1] 施劲宇. 基于接触有限元的预紧组合机架力能分析[J]. 机电工程, 2014, 31(3): 354-357.
- [2] 姜 静. 液压阻尼器综合性能试验台架动静特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学机械科学与工程学院, 2007.
- [3] 王洪坤, 张 敏, 钱雪松. 节流式和溢流式液压耗能阻尼器性能比较[J]. 液压气动与密封, 2013(7): 27-30.
- [4] 高 雷. 汽轮发电机组共用机架力学特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学机电工程学院, 2013.
- [5] KIM S M, HA J H, JEONG S H, et al. Effect of joint conditions on the dynamic behavior of a grinding wheel spindle[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2001, 41(1): 1749-1761.
- [6] 鲁寨军. 机车车体模态分析中用质量单元模拟设备重量的方法探讨[J]. 电力机车与城轨车辆, 2003, 26(1): 25-27.
- [7] 尤国英. 某燃气轮机试验台的动态特性研究[J]. 燃气轮机技术, 2000, 13(3): 37-41.
- [8] 杨旭东, 张世联. 有限元分析结构瞬态响应中的结构阻尼问题[J]. 中国海洋平台, 2004, 19(2): 30-34.
- [9] 马立峰, 胡文莉, 楚志兵, 等. 矿井应急救援舱爆炸冲击波作用下的结构瞬态响应分析及参数化设计[J]. 应用力学学报, 2013, 30(2): 184-189.

[编辑: 李 辉]

本文引用格式:

赵雄飞, 胡龙兵, 刘 飞. 中小型燃气轮机试验台主设备基架的有限元分析[J]. 机电工程, 2015, 32(11): 1448-1452.

ZHAO Xiong-fei, HU Long-bing, LIU Fei. Finite element analysis of the main equipment frame of small and medium-sized gas turbine test rig[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(11): 1448-1452.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>