

DOI: 10.7672/sjgs2026030008

# 大容量透平机基础动力特性研究\*

黄小玲,葛小丰,武广繁,朱磊

(中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司,江苏 南京 211102)

**[摘要]** 透平机基础动力特性对其运行至关重要,基础振幅须得到严格控制。基于 ABAQUS 软件建立大容量透平机基础有限元模型,通过模态分析提取 70Hz 内基础固有频率与振型,并使用振型叠加法计算得到扰力作用下基础顶面控制点振幅。研究表明,基础在 0~70Hz 范围内振型以顶板振动为主,其中主导模态频率(4.77~24.56Hz)低于机组额定频率(50Hz),有效避免了共振风险;基础顶面振幅最大值( $x$  向 11.5 $\mu\text{m}$ , $y$  向 16.0 $\mu\text{m}$ , $z$  向 12.6 $\mu\text{m}$ )均小于相关标准规定的限值,且在 50Hz $\pm$ 5% 频率范围内振幅均 $<$ 8 $\mu\text{m}$ ,安全储备率达 60%,该框架式钢筋混凝土基础结构设计合理。

**[关键词]** 电力工程;动力机器;透平机;基础;压缩空气;储能

**[中图分类号]** TU854

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 2097-0897(2026)03-0008-06

## Study on Dynamic Characteristics of a Large-capacity Turbine Foundation

HUANG Xiaoling, GE Xiaofeng, WU Guangfan, ZHU Lei

(China Energy Engineering Group Jiangsu Power Design Institute Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 211102, China)

**Abstract:** The dynamic characteristics of turbine foundations are critical to operational stability, necessitating strict control of foundation vibration amplitudes. A finite element model of a large-capacity turbine foundation is established using ABAQUS software. Modal analysis is conducted to extract the foundation's natural frequencies and modal shapes within a 0~70Hz range, while the mode superposition method is applied to calculate the amplitude response at control points on the foundation's top surface under disturbance forces. The research results show that the foundation's vibration modes within a 0~70Hz range are predominantly characterized by top-plate vibrations. The dominant modal frequencies (4.77~24.56Hz) are significantly lower than the machine's rated frequency (50Hz), effectively avoiding resonance risks. The maximum vibration amplitudes on the foundation's top surface (11.5 $\mu\text{m}$  in  $x$  direction, 16.0 $\mu\text{m}$  in  $y$  direction, and 12.6 $\mu\text{m}$  in  $z$  direction) are all below the limits specified in the relevant standards, and amplitudes remain below 8 $\mu\text{m}$  within the 50Hz $\pm$ 5% frequency range, achieving a safety margin of 60%. The design of the frame-type reinforced concrete foundation structure is reasonable.

**Keywords:** power engineering; power machine; turbine; foundation; compressed air; energy storage

### 0 引言

“双碳”目标的实现迫切需要我国能源结构向低碳化、清洁化转型。随着风电、光伏等绿色可再生能源渗透率的提升,其固有的间歇性与波动性导致电网调峰压力剧增,亟需通过大规模长时储能技

术实现电力供需平衡。在此背景下,压缩空气储能(compressed air energy storage, CAES)凭借其储能容量大、寿命长、全生命周期碳排放低<sup>[1]</sup>、基建成本低、对自然条件依赖小、规模大、灵活性强等优势,成为了支撑新型电力系统的核心储能方案之一<sup>[2-3]</sup>。

先进 CAES 系统运行分为储能(压缩、储热)与释能(膨胀、发电)阶段<sup>[4]</sup>,在用电低谷时通过电力驱动压缩机将空气压缩储存于地下盐穴或人工储

\* 中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司重点科技项目(SW-2024-372)

[作者简介] 黄小玲,正高级工程师, E-mail: huangxiaoling@jspdi.com.cn

[收稿日期] 2025-10-02

气库中,在用电高峰时利用高压空气推动透平机发电。作为 CAES 能量转换的核心设备,透平机运行稳定性直接决定整个系统的效率与经济性。而透平机基础作为支撑透平机的关键结构,其不仅是连接透平机与地面的支撑结构,还承担着传递荷载、吸收和隔离振动的功能。由基础动力特性(如固有频率、阻尼和振型)决定的动力响应对置于其上的透平机正常运行具有直接且重要的影响,须严格控制。GB 50868—2013《建筑工程容许振动标准》对额定转速为 3 000r/min 的汽轮发电机组普通基础顶面控制点容许振动位移峰值进行了规定。

因此,研究透平机基础动力特性对透平机乃至整个 CAES 系统稳定运行具有重要意义。目前主要的研究方法为数值模拟和物理模型试验。物理模型试验通常需使用钢筋、混凝土等材料建立基础缩尺模型,与数值模拟相比,物理模型试验周期更长,成本更高。对基础进行设计时,一般首先通过数值模拟形成初步方案并优化,然后通过物理模型试验对数值模型进行修正<sup>[5-6]</sup>。阮大为<sup>[6]</sup>分别使用 SAP2000 软件梁单元模型和 ABAQUS 软件三维弹性体模型计算了高频透平机基础动力特性,研究结果表明后者因能够考虑剪切及扭转效应使计算结果更精确。刘国强等<sup>[7]</sup>利用 ABAQUS 软件对 300MW 级 F 级重型燃气轮发电机墙式基础动力特性进行了数值模拟,数值模型中的附加质量以面荷载的形式分布在模型表面,利用弹簧单元模拟边界条件,竖向扰力按照支点静荷载大小分配,水平扰力引起的剪切效应按照静荷载大小分配,弯矩效应由静荷载支点的竖向拉压作用力等效。

目前动力机器基础特性数值模拟研究成果较多,但由于存在多种不确定或难以确定的因素,使多数研究具有一定的随意性或经验性。本文基于 ABAQUS 软件开展了相似研究,详细介绍了研究中的关键性假设和处理方法,并对关键问题进行了讨论。

## 1 基础概况

本文以某大容量 CAES 透平机组为例,基础作为关键支撑结构,其施工质量直接关系到机组长期运行稳定性与安全性。基础采用框架式钢筋混凝土结构(见图 1),运转层基础台板混凝土强度等级为 C40,钢筋保护层厚度为 50mm,以满足耐久性 & 抗裂性要求。鉴于台板体量大(平面尺寸约 13.5m×28m,厚度达 12.5m),属于典型的大体积混凝土结构,施工全过程需严格控制温度裂缝、差异沉降,保证结构整体性<sup>[8]</sup>。

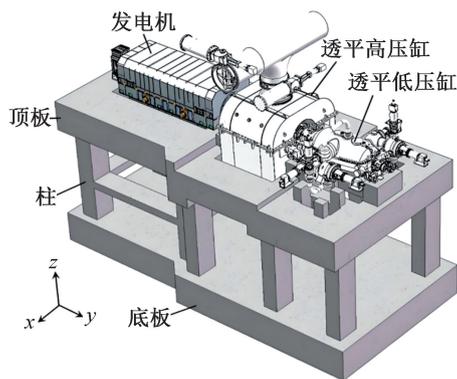


图 1 机组及基础三维模型

Fig. 1 3D model of the turbine unit and its foundation

基础台板施工主要按以下工序进行:首先搭设运转层满堂支撑架,采用盘扣式脚手架系统,确保模板支撑稳定;然后完成底模支设与钢筋绑扎,钢筋采用机械连接,分层布设并通过马凳筋控制层距,重点区域如地脚螺栓周边加强定位与加固,侧模采用对拉螺栓与钢管背楞体系安装,并设置止水措施;最后采用斜面分层、整体推移式一次连续浇筑工艺浇筑混凝土,由多台泵车协同作业,控制每层厚度为 400~500mm,避免出现冷缝,混凝土配合比经专项优化,掺加粉煤灰与矿粉以降低水化热,入模温度控制在 30℃ 以内,混凝土浇筑完成后立即进行温控养护,预埋测温元件实时监测内外温差,布设冷却水管调控芯部温度,并覆盖保温保湿材料(如双层土工布+塑料薄膜),养护时间 ≥ 14d,确保内外温差 ≤ 25℃,有效防控温度裂缝,保障结构整体性与长期服役可靠性。

## 2 数值模拟

### 2.1 模型建立

采用 ABAQUS 软件建立基础有限元模型,如图 2 所示,混凝土强度等级按设计值取 C40,根据 GB 50040—2020《动力机器基础设计标准》确定基础动弹性模量按静弹性模量取值,材料本构模型为线弹性各向同性,密度为  $2.5 \times 10^{-9} \text{t/mm}^3$ ,弹性模量为  $3.25 \times 10^4 \text{MPa}$ ,泊松比为 0.24。

依据《动力机器基础设计标准》的规定,将基础地基按刚性计算,因此边界条件为约束底板整个底面所有自由度。在经过网格敏感性分析且考虑计算精度与效率后,将全局单元尺寸设为 0.2m,单元类型设为八节点六面体缩减积分单元 C3D8R 和十节点四面体二次单元 C3D10,共划分 352 621 个节点、293 722 个单元。

### 2.2 设备质量

质量是影响固有频率的重要因素,基础质量包

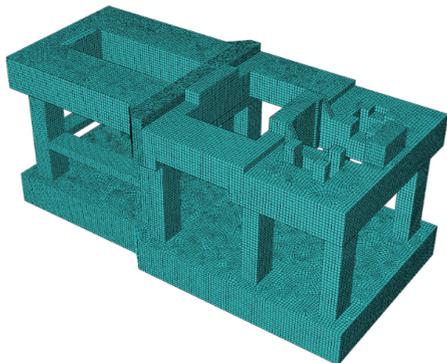


图 2 基础有限元模型

Fig. 2 Finite element model of the foundation

括结构自重和其上的设备质量。结构自重由软件根据设置的材料密度及几何模型自动计算,设备质量需手动施加在基础上。设备质量约占基础总重的 19%,施加设备质量时须谨慎对待。模型中设备质量分布及大小如图 3 所示,图中绿色标记表示集中质量点,粉紫色区域表示耦合面域。根据厂家提供的资料,将各耦合面域范围内的设备质量分别施加在对应的集中质量点上,通过运动耦合约束将质量分布在耦合面域上。

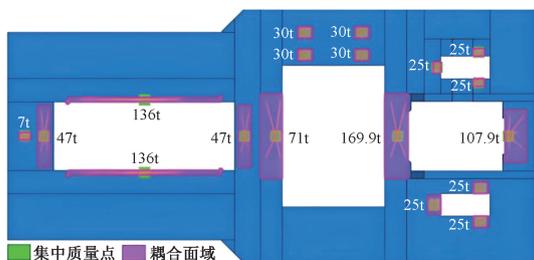


图 3 基础上的设备质量

Fig. 3 Equipment mass on the foundation

### 2.3 荷载及其效应组合方式

计算时荷载仅指扰力,即透平机和发电机转子在做回转运动时因残余不平衡量产生的离心力,该离心力通过轴承油膜作用在机器轴承上,再由轴承通过轴承体与轴承座传递至基础顶板上<sup>[9]</sup>,进而使基础产生振动。基础扰力分布如图 4 所示,共有 5 个扰力点(W1~W5),均位于基础顶面。不同转速下扰力大小依据 GB/T 51228—2017《建筑振动荷载标准》计算,经最大值归一化处理后额定转速下扰力点 W1~W5 横向、竖向扰力均分别为 0.23, 0.96, 0.65, 1.00, 0.97, 纵向扰力为横向、竖向扰力的 1/2。

计算动力响应时,不同扰力点不同方向的扰力以简谐荷载的形式单独施加在扰力点上,共 15 个扰力。《动力机器基础设计标准》规定当基础受多扰

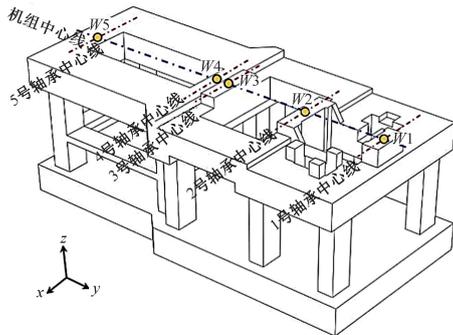


图 4 基础扰力分布

Fig. 4 Distribution of disturbance force on the foundation

力作用时,需先分别求出各扰力单独作用下的振动响应,再求其平方和开方。由于《动力机器基础设计标准》中未对组合方式进行详细说明,因此不同学者理解有异,本文对该问题进行了讨论。依据式(1)对不同扰力作用产生的  $x$  向振动线位移进行组合,以得到基础最终振动线位移, $y, z$  向最终振动线位移可同理求得。

$$u_x^K = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left( \sum_{j=1}^3 u_{ij}^K \right)^2} \quad (1)$$

式中: $u_x^K$  为扰力点  $K$  沿  $x$  向的总振动线位移; $u_{ij}^K$  为第  $i$  个扰力点沿  $j$  向的扰力在扰力点  $K$  处产生的沿  $x$  向振动线位移; $m$  为扰力点数量; $j$  取值为 1, 2, 3 时分别表示  $x, y, z$  向。

### 2.4 求解与数据后处理

ABAQUS 软件在进行稳态动力学分析时可选择直接积分法、振型叠加法或子空间迭代法。由于仅考虑基础的线性行为,同时兼顾解的稳定性和计算效率,本文使用振型叠加法求解基础动力响应。振型叠加法要求首先进行频率分析,求解结构自振特性(固有频率和振型),《动力机器基础设计标准》规定的扫频范围为 0~1.4 倍机组额定频率(50Hz),即 0~70Hz。在频率分析步中,使用 Lanczos 法求解特征值;在稳态动力学分析步中,所有模态的阻尼比依据《动力机器基础设计标准》规定设为 0.062 5。

求解完成后可在可视化模块绘制单个扰力作用下不同扰力点的位移-频率曲线并导出数据,使用其他数据处理软件按式(1)计算得到最终结果。上述过程重复且耗时,本研究通过编写 Python 脚本实现了自动访问结果数据库文件、导出数据及后处理,减少了约 80% 的数据处理时间。

## 3 结果分析与讨论

### 3.1 自振特性

在 0~70Hz 范围内对基础进行了频率分析,共提取了 51 阶模态,其中固有频率分布如图 5 所示。

由图 5 可知,基础固有频率分布总体上并不密集,但在机组额定频率(50Hz,红色虚线)附近存在较多固有频率,需重点关注这些频率对应的振型,以分析其对机组正常运行的影响。

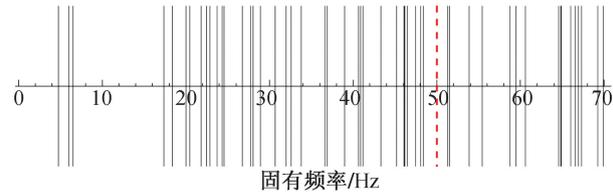


图 5 基础固有频率分布

Fig. 5 Distribution of natural frequencies of the foundation

模态有效质量是衡量模态对振动系统动力响应贡献的重要指标,通常认为当所有模态的有效质量之和占模型总质量的 85% 以上时,使用振型叠加法得到的结果具有较高的可靠性<sup>[10]</sup>。51 阶模态中较大的有效平动质量(在某一特定平移方向上,参与该方向振动的模态等效质量)和转动惯量如表 1 所示, $x, y, z$  向所有模态有效平动质量分别为 2 905.70, 2 932.40, 2 912.90t, 减去底板后模型总质量均为 3 011.33t。绕  $x, y, z$  轴所有模态有效转动惯量分别为  $8.85 \times 10^{11}$ ,  $1.85 \times 10^{11}$ ,  $7.84 \times 10^{11} \text{ t} \cdot \text{mm}^2$ , 减去底板后模型总转动惯量分别为  $9.14 \times 10^{11}$ ,  $1.87 \times 10^{11}$ ,  $8.09 \times 10^{11} \text{ t} \cdot \text{mm}^2$ 。

表 1 模态有效平动质量和转动惯量

Table 1 Modal effective translational mass and rotational inertia

| 阶次 | 有效平动质量/t |         |        | 有效转动惯量/( $10^{11} \text{ t} \cdot \text{mm}^2$ ) |         |         |
|----|----------|---------|--------|--------------------------------------------------|---------|---------|
|    | $x$ 向    | $y$ 向   | $z$ 向  | 绕 $x$ 轴                                          | 绕 $y$ 轴 | 绕 $z$ 轴 |
| 1  | 0.02     | 2 842.8 | 0      | 1.47                                             | 0       | 0.01    |
| 2  | 2 656.3  | 0.25    | 0.02   | 0                                                | 1.40    | 6.77    |
| 3  | 182.99   | 1.66    | 0.01   | 0                                                | 0.09    | 0.76    |
| 8  | 0.15     | 0.01    | 225.52 | 0.19                                             | 0       | 0       |
| 9  | 0.36     | 0.02    | 341.37 | 0.36                                             | 0       | 0       |
| 10 | 0.28     | 1.38    | 295.67 | 0.07                                             | 0       | 0       |
| 11 | 0.01     | 0.16    | 861.48 | 4.52                                             | 0       | 0       |
| 13 | 0        | 0       | 151.03 | 0.74                                             | 0       | 0       |

由表 1 可知,所有模态  $x, y, z$  向有效平动质量之和/减去底板后模型总平动质量分别为 96.5%, 97.4%, 96.7%, 所有模态绕  $x, y, z$  轴有效转动惯量之和减去底板后总转动惯量分别为 96.8%, 98.9%, 96.9%, 均 > 95%, 说明提取的模态数量足够。表 1 所示 8 阶模态  $x, y, z$  向有效平动质量之和/所有模态有效平动质量之和分别为 97.7%, 97.1%, 64.4%, 8 阶模态绕  $x, y, z$  轴有效转动惯量之和/所有模态有效转动惯量之和分别为 82.9%, 80.5%, 96.1%, 说明基础动力响应主要由上述 8 阶模态

贡献。

需说明的是,计算所有模态有效平动质量(转动惯量)之和/减去底板后模型总平动质量(转动惯量)时未用模型总质量,这是由于底板底面被完全约束且其刚度远大于顶板和柱,导致其在所提取的 51 阶模态中参与振动程度低。

1, 2, 3, 8, 9, 10, 11, 13 阶主导模态频率分别为 4.77, 6.00, 6.49, 21.82, 22.47, 22.87, 23.73, 24.56Hz, 对应的振型如图 6 所示。由图 6 可知, 8 个主导模态振型以顶板振动为主, 1 阶振型为纵向平动, 2, 3 阶振型为面内转动, 其余 5 阶振型主要为竖向弯曲。8 个主导模态最大的固有频率为 24.56Hz, 小于机组额定频率(50Hz), 可有效避免共振对机组正常运行产生的影响。

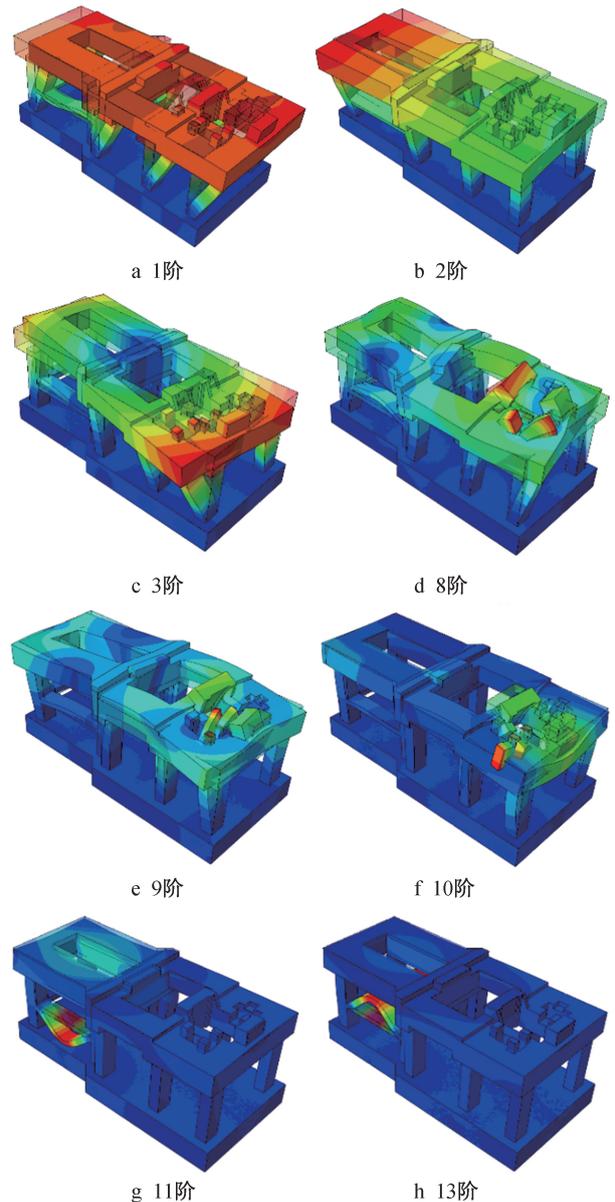


图 6 基础主导模态振型

Fig. 6 Dominant modal shapes of the foundation

除上述主导模态外,还需关注机组正常运行频率附近的振型。50Hz±5%范围内共有4阶模态,包括34~37阶,对应的频率分别为48.06,48.40,51.30,51.51Hz,对应的振型如图7所示。由图7可知,在机组额定频率50Hz±5%范围内基础振型基本为柱或梁的振动,不会对顶板及机组产生明显影响。

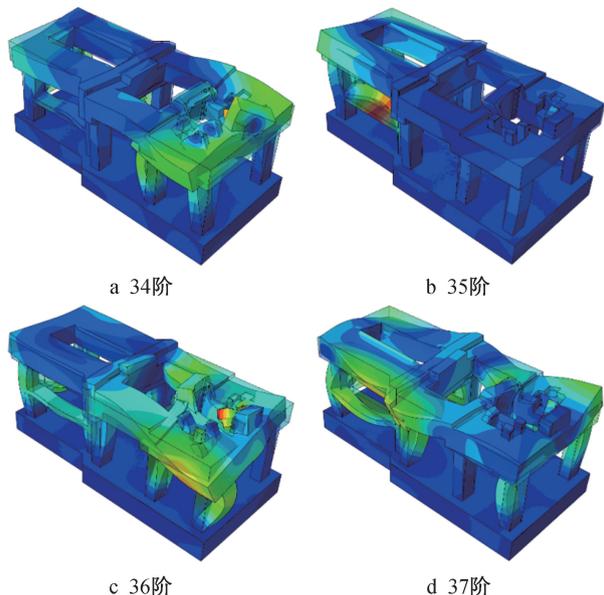


图7 基础50Hz±5%范围内的模态振型

Fig.7 Modal shapes of the foundation within the 50Hz±5% frequency range

### 3.2 动力响应

基础所有扰力点0~70Hz振幅如图8所示。由图8可知,所有扰力点 $x$ 向最大振幅为11.5 $\mu\text{m}$ ,出现在频率为31.13Hz时的W1点;所有扰力点 $y$ 向最大振幅为16.0 $\mu\text{m}$ ,出现在频率为22.47Hz时的W2点;所有扰力点 $z$ 向最大振幅为12.6 $\mu\text{m}$ ,出现在频率为33.16Hz时的W3点。所有扰力点3个方向的最大振幅均小于《建筑工程容许振动标准》规定的容许值,所有扰力点3个方向50Hz±5%范围内的最大振幅均<8 $\mu\text{m}$ ,相比容许值约有60%的余量。

综上所述,该基础设计整体上较合理,但在机组额定频率附近的振幅仍有较大的安全储备,可对基础进行一定优化。

### 4 关键问题讨论

#### 1) 设备质量的附加

本文在设备质量附加到基础模型上时,使用了运动耦合约束。除运动耦合约束外,ABAQUS软件还提供了连续分布耦合和结构分布耦合约束方式。运动耦合约束将被约束区域视为刚性,而连续分布耦合约束允许被约束区域以某种方式发生变形。此外,耦合约束区域过大会影响刚度,过小会导致局部变形过大

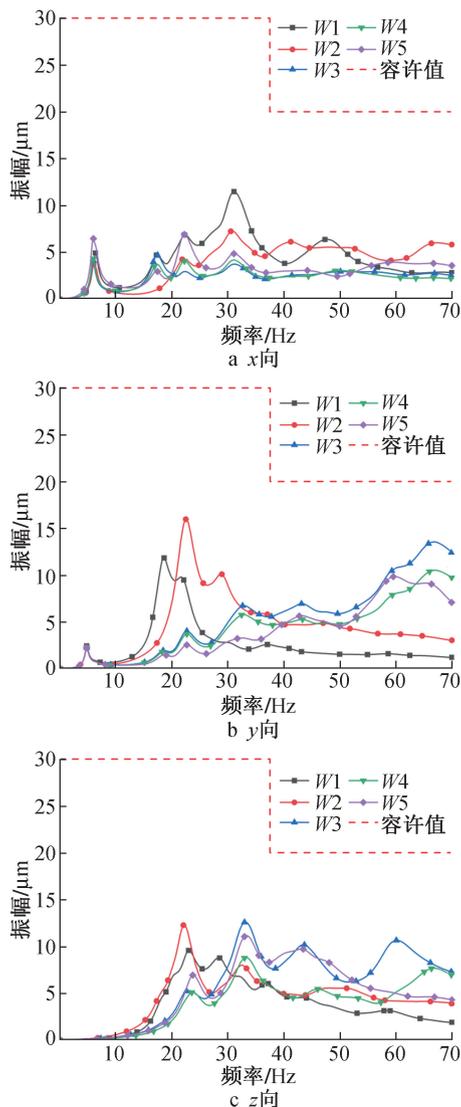


图8 扰力点振幅-频率曲线

Fig.8 Amplitude-frequency curves at disturbance force points

使计算不收敛,特别是该区域同时存在扰力的情况。由于在设计阶段设备与基础连接情况并不完全明确,因此根据实际情况采用何种耦合约束方式及耦合约束区域面积设定有待进一步研究。

#### 2) 扰力的施加

扰力是转子在旋转时因其不平衡性而产生的,其通过轴承体和轴承座传递至下方基础。此外,多数透平机低、中、高压缸使用同根轴。基于以上两点,部分学者认为扰力应施加在转子中心线所在高度处而非基础顶面,轴承座与扰力点及相邻扰力点之间应进行刚性或用弹簧-阻尼单元连接<sup>[11]</sup>,且所有同向扰力应同步施加在各扰力点上,这虽更接近实际情况,但会增加基础刚度。

#### 3) 荷载效应组合方式的确定

《动力机器基础设计标准》对荷载效应组合方

式的说明并不十分明确,由此产生了不同的组合方式。除本文式(1)所述的组合方式外,普遍使用的还有以下方式:

$$u_x^K = \sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i u_x^K)^2} \quad (2)$$

$$u_x^K = \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^3 (j_i u_x^K)^2} \quad (3)$$

式(2)和式(3)变量含义与式(1)相同,式(2)表示在计算某一方向振动线位移时仅考虑同向扰力作用,式(3)是在式(2)的基础上同时考虑了另外2个方向扰力的作用。式(1)与式(3)的区别在于对于同一扰力点3个方向扰力作用是先求和再平方,还是先平方再求和。显然,式(1)计算结果最大,式(3)计算结果次之,式(2)计算结果最小,目前业内对于采用哪种荷载效应组合方式最合适未达成共识。

## 5 结语

1) 基础结构横向、纵向和竖向振幅均小于《建筑工程容许振动标准》规定的容许值,其整体设计较合理。

2) 基础结构 10Hz 以下固有频率较少,振型主要为顶板纵向平动和面内转动,振幅较小,机组启动阶段较安全。

3) 基础结构 15~35Hz 频率区间振型以竖向弯曲为主,振幅相对较大,建议机组运行中快速通过该频率区间。

4) 基础结构 50Hz 附近的固有频率虽较密集,但振型多为柱或层间梁的振动。因此,这些振型不会因共振影响透平机正常运行,且各扰力点振幅均有较大的安全储备。

设备的复杂性、设备与基础连接的不确定性及《动力机器基础设计标准》表述的不明确性等因素使对透平机等动力机器基础数值模拟存在一定经验性。可靠的原位测试在一定程度上可验证有限元分析结果的准确性,但无法通过多因素共同作用结果验证某单一因素的影响。因此,将来可进一步开展关于单一因素影响的研究。

## 参考文献:

- [1] 耿晓倩,徐玉杰,黄景坚,等. 先进压缩空气储能系统全生命周期能耗及二氧化碳排放[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(9):2971-2979.  
GENG X Q, XU Y J, HUANG J J, et al. Life cycle energy consumption and carbon emissions of advanced adiabatic compressed air energy storage[J]. Energy storage science and technology, 2022, 11(9):2971-2979.
- [2] 徐皓鹏. 我国压缩空气储能技术发展现状及未来展望[J]. 能源与环境, 2024(5):69-71, 126.

- XU H P. Current development status and future prospects of compressed air energy storage technology in China[J]. Energy and environment, 2024(5):69-71, 126.
- [3] 陈海生,李泓,徐玉杰,等. 2023 年中国储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(5):1359-1397.  
CHEN H S, LI H, XU Y J, et al. Research progress on energy storage technologies of China in 2023[J]. Energy storage science and technology, 2024, 13(5):1359-1397.
- [4] 文贤馥,刘石,李翔,等. 先进压缩空气储能系统模拟与效率分析[J]. 动力工程学报, 2021, 41(9):802-808.  
WEN X K, LIU S, LI X, et al. Simulation and efficiency analysis of advanced compressed air energy storage system[J]. Journal of Chinese society of power engineering, 2021, 41(9):802-808.
- [5] 朱文清. 火力发电厂汽轮机基础结构形式优化与动力响应分析[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2023.  
ZHU W Q. Research on the optimization and dynamic response analysis of turbine-generator foundation in thermal power plant[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2023.
- [6] 阮大为. 高频透平压缩机动力基础设计研究[D]. 北京:北方工业大学, 2022.  
RUAN D W. Researches on design of the dynamic foundation of hi-frequency turbo compressor[D]. Beijing: North China University of Technology, 2022.
- [7] 刘国强,黄君宇,孙晓红,等. 300MW 级 F 级重型燃气轮机发电机基座的振动试验研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2022, 55(S1):16-21.  
LIU G Q, HUANG J N, SUN X H, et al. Research on the vibration test of a 300MW and F-class heavy-duty gas turbine generator foundation[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2022, 55(S1):16-21.
- [8] 邹兴林,王庆华. 大跨度悬索桥锚碇结构大体积混凝土温度效应及温控措施研究[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(10):106-112.  
ZOU X L, WANG Q H. Research on temperature effect and temperature control measures of mass concrete in anchorage structure of long-span suspension bridge[J]. Construction technology, 2025, 54(10):106-112.
- [9] 尹学军,王伟强,沙曾焱. 转子动平衡等级、扰力与基础台板振动标准[J]. 电力建设, 2003, 24(9):44-47.  
YIN X J, WANG W Q, SHA Z X. Standards for dynamic balance grade of rotors, excitation and foundation deck vibration[J]. Electric power construction, 2003, 24(9):44-47.
- [10] 周炬,苏金英. ANSYS Workbench 有限元分析实例详解[M]. 北京:人民邮电出版社, 2020.  
ZHOU J, SU J Y. Detailed examples of finite element analysis using ANSYS Workbench[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2020.
- [11] 顾天雄. 汽轮机发电机框架式基础减振分析[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2019.  
GU T X. Vibration analysis of turbine-generator frame foundation[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019.