

大型汽轮发电机组轴系扭振预应力模态分析

杨俊杰 李娟 乔迪

(北京信息科技大学自动化学院, 北京 100192)

摘要 模态分析是研究大型汽轮发电机组轴系扭振特性的基础, 当前研究主要集中于轴系常规约束下的模态分析或轴系关键部位在某些实际工况下的特性分析, 关于实际运行条件对机组轴系模态特性影响的研究不足。本文以某 600 MW 汽轮发电机组轴系为研究对象, 首先, 使用 Creo 建模软件的族表参数化功能建立轴系三维模型; 然后, 对机组轴系进行常规固有模态、转速预应力模态、温度预应力模态、转速和温度预应力共同作用下模态的理论分析和有限元仿真。仿真结果表明, 转速和温度预应力单独作用时, 轴系固有频率随转速或温度预应力的增大而降低; 转速和温度预应力共同作用时, 轴系的固有频率低于无预应力下的固有频率, 与仅有温度预应力作用的情况相比, 在工频转速和温度耦合作用下, 系统的固有频率随温度升高呈现出增大的趋势。研究结果可为考虑实际工况的轴系设计提供参考。

关键词: 汽轮发电机组; 扭振; 模态分析; 转速预应力; 温度预应力

Pre-stress modal analysis of shaft system torsional vibration for a large steam turbine generator set

YANG Junjie LI Juan QIAO Di

(College of Automation, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192)

Abstract Modal analysis is the basis for studying the torsional vibration characteristics of the generator set shaft system. Current researches mainly focus on modal analysis under conventional shaft system constraints or the characteristic analysis of key parts of the shaft system under certain operating conditions. However, there is insufficient research on the impact of actual operating conditions on the modal characteristics of the shaft system. Taking the shaft system of a 600 MW steam turbine generator set as the research object, firstly, a three-dimensional model of the shaft system is established using the family table parameterization function of Creo modeling software. Then, theoretical analysis and finite element simulation are performed on the conventional natural modes, rotational speed pre-stress modes, thermal pre-stress modes, and modes under the combined effect of rotational speed and thermal pre-stress. The simulation results show that when rotational speed or thermal pre-stress acts separately, the natural frequencies of the shaft system decrease. When both rotational speed and thermal pre-stress act together, the natural frequencies of the shaft system are lower than those under no pre-stress conditions. However, under the premise that the rotational speed is at the nominal operating speed, a phenomenon is observed where the natural frequencies increase gradually with the rise in temperature, compared with the case where only temperature pre-stress is applied. This provides a reference for the design of the shaft system considering actual operating conditions.

Keywords: steam turbine generator set; torsional vibration; modal analysis; rotational speed pre-stress; thermal pre-stress

0 引言

随着我国电力行业的快速发展,作为发电核心设备的汽轮发电机组,其单机容量不断增大。大容量机组轴系结构向轻质柔性、多支撑、大跨度方向发展,轴系扭转刚度下降,固有频谱趋于密集,扭振发生需要的能量降低^[1]。此外,大量新型技术逐渐应用,导致电力系统结构趋于复杂化、负荷趋于多元化。这些因素加剧了机网耦合中汽轮发电机组轴系发生扭振故障的风险^[2-3]。扭振会导致转子结构发生形变,轴系旋转稳定性下降,严重情况下甚至造成转子断裂和相关设备损毁^[4]。

扭振模态的计算是研究发电机组轴系扭振的基础,目前关于无预应力的轴系扭振固有特性的研究已较为全面。文献[5]采用简单集中质量模型和有限元模型分别对某 1 000 MW 汽轮发电机组的扭振固有频率和振型进行计算,发现有限元计算得到的扭振固有频率相比前者更加准确可靠,振型相比前者更加连续光滑。文献[6]在对汽轮发电机轴系建模的基础上,对轴系分别使用 Riccati 传递矩阵法和有限元法展开计算,得到固有频率及振型,并对两种方法的计算结果和对计算机资源的占用量进行对比,结果表明两种方法得到的计算结果基本一致,但传递矩阵法对算力要求更低。文献[7]以某 10 MW 空气透平转子为研究对象,借鉴以往汽轮机轴系设计经验并结合美国石油学会(American petroleum institute, API)标准对转子进行分段建模,利用行业广泛应用的 DyRoBeS 转子动力学计算软件对 10 MW 空气透平转子的临界转速、固有频率、扭应力进行分析,证明了该转子设计方案可行。文献[8]以某 600 MW 汽轮发电机组轴系为研究对象,分别用圆轴受扭理论计算方法和有限元仿真分析法计算机组轴系扭振特性,得出机组轴系扭振危险截面的位置。

大型汽轮发电机组的实际工作环境复杂,旋转产生的离心力和蒸汽热交换产生的温度变化都会对轴系扭振特性产生一定影响。文献[9]采用 Ansys 有限元软件建立某 12.8 m 长转子的有限元模型,求解出该转子扭振固有频率,分析温度变化和转子运转疲劳积累对扭振固有频率的影响,为转轴设计阶段计算扭转频率提供了参考。文献[10]建立某 600 MW 级机组低压转子和发电机转子间的联轴器的有限元模型,在额定工况及典型电气故障下基于有限元法

分析得到联轴器的应力分布,确定危险部位并开展强度校核,研究发现不同工况下,联轴器的危险部位有所变化,可视情况合理优化应力集中部位结构,以保障联轴器安全性。文献[11]以汽轮发电机组组合转子系统为研究对象,深入分析组合转子系统在运行过程中界面接触应力、接触刚度和扭振固有频率的变化规律,解释了组合转子的固有频率随工作条件变化的本质原因是接触界面特性随工作转速的变化而变化。文献[12]建立了实际机组的等尺寸三维模型,将使用连续质量模型的 Riccati 传递矩阵法,与考虑转子实际工况下扭应力刚化及旋转软化效应下 Block Lanczos 稀疏矩阵法求得的扭振固有频率进行对比,Block Lanczos 法求得的前两阶扭振固有频率略低于二维 Riccati 传递矩阵法,对高阶扭振固有频率影响较小。

目前,在分析预应力模态的扭振特性时,大多数研究仅考虑单一预应力荷载对扭振特性的影响,或者对轴系某一部分进行一定实际工况下的扭振特性分析,对多种预应力综合作用下的汽轮发电机轴系扭振特性的分析不足。因此,本文首先使用 Creo 建模软件的族表参数化功能建立轴系三维模型,然后分别进行转速预应力作用、温度预应力作用及转速与温度预应力共同作用下的扭振模态分析,将结果与无预应力模态分析结果对比,得出转速和温度对轴系固有频率和振型的影响规律。

1 基于 Creo 的汽轮发电机组轴系建模

汽轮发电机轴系是个复杂的结构体系,包括发电机转子、高压缸转子、中低压缸转子、联轴器、叶轮叶栅等结构,按实际结构建模会增加有限元计算的复杂度。由于轴系扭振特性主要受轴长度、扭转刚度和转动惯量 3 个参数的影响,所以在保证这 3 个参数精度的前提下,可将某 600 MW 汽轮发电机机组轴系简化为由 176 段实心圆柱轴和 17 段空心圆柱组成的连续质量模型。

首先,建立实心轴,在 Creo 软件中通过草绘和拉伸功能创建一个实心轴作为父项轴,对父项轴的参数进行定义,直径为 d_0 、长度为 d_1 。然后,以父项轴为参考模型建立族表,将 d_0 和 d_1 两个参数添加到族表中,单击工具栏中的“插入新的实例”选项,将采集的汽轮发电机轴系尺寸参数通过 Excel 导入族表,实心轴族表见表 1,表中的父项轴即为建模时的第一个轴段,为了使轴段与编号对应,选择从

编号 prt0002 导入剩下数据,校验完成后按顺序自动生成 176 段以父子关系为依据的实心轴段。

表 1 实心轴族表

类型	结构名称	d_i/mm	d_o/mm
父项轴	SHIXINZHOU	74.00	70.00
子项轴	SHIXINZHOU-INST1	57.50	75.00
子项轴	SHIXINZHOU-INST2	67.50	184.00
子项轴	SHIXINZHOU-INST3	90.00	45.00
子项轴	SHIXINZHOU-INST4	120.00	75.00
子项轴	SHIXINZHOU-INST5	84.00	45.00
⋮	⋮	⋮	⋮
子项轴	SHIXINZHOU-INST175	437.50	590.00

用类似的方法生成 17 个空心轴段模型。之后进入装配环节,对前一段轴的端面及后一段轴的端面部分选择“重合”参照方式,前一段轴的中心线与后一段轴的中心线选择“对齐”参照方式,使相邻的两个轴段被完全约束,再按照上述轴段模型操作的方法将后面的轴段按照顺序一一导入并装配。最终得到装配好的汽轮发电机轴系模型如图 1 所示。

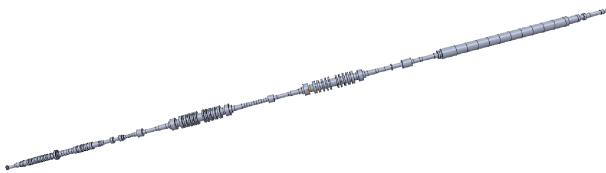


图 1 汽轮发电机轴系模型

2 基于有限元法的扭振特性分析

2.1 固有模态分析原理

有限元分析方法的原理是根据模型结构的几何特征和材料特性,将连续的实体模型离散化为有限个不重叠又无缝隙的微小单元,通过分析单元的组合,并结合边界条件和载荷等因素,求解特征值。模态分析是一种计算结构振动特性的数值技术,是动力学分析的基础^[13]。

结构在随时间变化的载荷作用下的响应分析称为结构动力学分析,系统的通用动力方程式为

$$\mathbf{M}\ddot{\boldsymbol{\mu}} + \mathbf{C}\dot{\boldsymbol{\mu}} + \mathbf{K}\boldsymbol{\mu} = \mathbf{F}(t) \quad (1)$$

式中: \mathbf{M} 为系统质量矩阵; \mathbf{C} 为系统阻尼矩阵; \mathbf{K} 为轴系的刚度矩阵; $\boldsymbol{\mu}$ 为 t 时刻的位移; $\mathbf{F}(t)$ 为外部激励力; $\dot{\boldsymbol{\mu}}$ 为 t 时刻速度; $\ddot{\boldsymbol{\mu}}$ 为 t 时刻加速度。

进行固有模态分析时,没有外部激励,故 $\mathbf{F}(t) = \mathbf{0}$,结构的阻尼可以忽略不计,所以动力学方

程可由式(1)简化为

$$\mathbf{M}\ddot{\boldsymbol{\mu}} + \mathbf{K}\boldsymbol{\mu} = \mathbf{0} \quad (2)$$

由于自由振动是简谐运动,即 $\boldsymbol{\mu} = \boldsymbol{\varphi}_i \cos(\omega_i t)$,式(2)变化为

$$(\mathbf{K} - \omega_i^2 \mathbf{M})\boldsymbol{\varphi}_i = \mathbf{0} \quad (3)$$

式中: $\boldsymbol{\varphi}_i$ 为特征向量,表示第 i 阶自振频率的振型; ω_i 为特征值,表示 i 阶自振角频率 (rad/s), i 阶模态的固有频率为 $f_i = \omega_i/2\pi$ 。

求解特征方程会得到多个特征值,第 i 阶固有角频率为

$$\omega_i = \sqrt{\frac{k_i}{m_i}} \quad (4)$$

式中: k_i 为 i 阶模态下 \mathbf{K} 的特征值; m_i 为 i 阶模态下 \mathbf{M} 的特征值。

2.2 转速预应力模态分析

1) 转速预应力模态分析原理

汽轮发电机组轴系在实际工况下旋转会产生离心力,离心力引起轴的径向变形和应力分布变化,这些变化会影响轴的扭转刚度,使在考虑离心力影响时转子的扭振固有频率改变,所以需要汽轮发电机组轴系进行转速预应力模态分析,从而研究转速对轴系模态特性的影响规律。

对于预应力模态分析, $\mathbf{F}(t) \neq \mathbf{0}$,结构的阻尼可以忽略,由式(2)和式(3)得其动力方程式为

$$\mathbf{M}\ddot{\boldsymbol{\mu}} + \mathbf{K}\boldsymbol{\mu} = \mathbf{F}(t) \quad (5)$$

$$(\mathbf{K} - \omega_i^2 \mathbf{M})\boldsymbol{\varphi}_i = \mathbf{F}(t) \quad (6)$$

存在预应力时,刚度矩阵受到预应力的影响,修正后的刚度矩阵通常写为

$$\mathbf{K}_{\text{eff}} = \mathbf{K} + \mathbf{K}_{\text{pre}} \quad (7)$$

式中: \mathbf{K}_{eff} 为修正后的有效刚度矩阵; \mathbf{K}_{pre} 为预应力引起的刚度变化量矩阵。

所以存在预应力时,第 i 阶固有角频率为

$$\omega_i = \sqrt{\frac{k_{\text{eff}-i}}{m_i}} \quad (8)$$

式中, $k_{\text{eff}-i}$ 为 i 阶模态下刚度矩阵 \mathbf{K}_{eff} 的特征值。

离心力的作用主要通过引起轴的变形和应力分布的变化,进而影响扭转刚度。扭转刚度是衡量物

体抗扭转变形能力的指标,通常表示为扭矩与角位移之比,即

$$k = \frac{T}{\theta} \quad (9)$$

式中: k 为扭转刚度; T 为施加的扭矩; θ 为轴的角位移。

在材料力学中,剪应力与剪应变之间的关系为

$$\tau = G\gamma = G \frac{r\theta}{L} \quad (10)$$

式中: τ 为剪应力; G 为剪切模量; γ 为剪应变,在纯扭转变形中,圆形截面上任一点的剪应变 γ 与该点到轴心的距离 r 和单位长度的转角 θ/L 成正比。

在截面上任意点产生的微元扭矩为

$$dT = \tau r dA \quad (11)$$

式中, dA 为微元面积。

将剪应力表达式式(10)代入式(11)得

$$dT = G \frac{r^2 \theta}{L} dA \quad (12)$$

对整个截面积分得到总扭矩为

$$T = \frac{G\theta}{L} \int r^2 dA \quad (13)$$

式中, $\int r^2 dA$ 为截面的极惯性矩 J 。故式(13)可化简为

$$T = \frac{GJ\theta}{L} \quad (14)$$

整理得到扭转刚度公式为

$$k = \frac{T}{\theta} = \frac{GJ}{L} \quad (15)$$

为了量化离心力对扭转刚度的影响,通过修正原有的扭转刚度公式来考虑离心力的作用。假设在高转速下,离心力导致的变形和应力变化引起轴的刚度下降,可以得到修正公式为

$$k' = \frac{GJ'}{L} \quad (16)$$

式中: k' 为考虑离心力作用后的修正扭转刚度; J' 为考虑离心力导致的径向变形后的有效极惯性矩。

离心力通常通过改变轴的几何形状和应力分布来影响 J' , 可以得到修正的极惯性矩为

$$J' = J(1 - \eta\omega^2) \quad (17)$$

式中: η 为一个系数,表示离心力对轴几何形状和

变形的影响程度; ω 为角速度。

因此,修正后的扭转刚度公式为

$$k' = \frac{GJ}{L} (1 - \eta\omega^2) \quad (18)$$

由式(18)可知,离心力一般会使扭转刚度降低,随着转速的提升,扭转刚度逐渐下降,从而使轴系的固有频率降低。

2) 转速预应力模态分析

与无预应力模态相比,在使用 Ansys Workbench 进行预应力模态分析时,需要先进行一次静力学分析,得到在预应力影响下轴系所受的应力,然后将静力学模块求解出的应力数据导入模态分析模块作为预应力荷载,从而求解应力作用下轴系各阶的固有频率及振型。

模态分析主要包含前处理、求解和后处理 3 个关键环节。静力学分析的前处理过程与模态分析类似,前处理包括模型的建立或导入、模型参数材料属性的定义和有限元网格划分 3 部分,将搭建的大型汽轮发电机轴系装配模型导入分析软件中,然后编辑材料属性,其中弹性模量 $E=210\,000$ MPa,密度 $\rho=7\,850$ kg/m³,泊松比为 0.3,采用四面体结构单元,自动划分网格,得到节点个数为 128 392 个,单元个数为 21 474。

求解主要涉及 3 个环节:位移边界条件加载、荷载边界条件加载及模态分析参数设置。静力学分析的边界条件加载方式如下:根据轴系的扭转特性,创建一个圆柱坐标系作为参考坐标系,并对整个轴系模型施加表面位移约束,设置 X 轴和 Z 轴位移约束为 0, Y 轴方向保留旋转自由度;对轴系整体施加旋转方向为切向的旋转荷载,本文转速荷载选取在 3 000 r/min 附近,从 2 800 r/min 到 3 200 r/min 每隔 100 r/min 取一个工况;求解后分析各个转速下的模态结果,取无转速预应力和有转速预应力下的前三阶模态频率结果对比。不同转速下的模态频率见表 2。

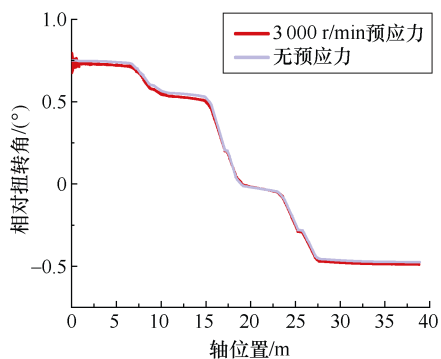
表 2 不同转速下的模态频率

转速/(r/min)	一阶/Hz	二阶/Hz	三阶/Hz
0	17.81	34.01	40.89
2 800	17.25	32.79	39.39
2 900	17.21	32.76	39.37
3 000	17.17	32.72	39.34
3 100	17.10	32.66	39.29
3 200	17.07	32.64	39.27

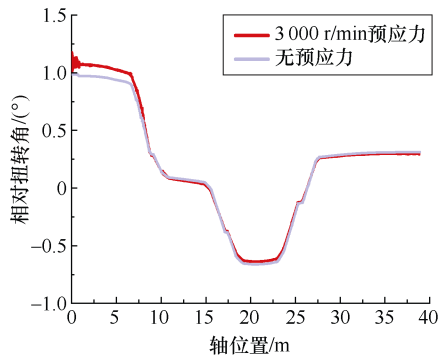
由表 2 可知, 加入转速预应力后轴系扭振的前三阶固有频率均有所降低, 与理论分析结果一致。随着转速从 2 800 r/min 增加到 3 200 r/min, 一阶模态的固有频率从 17.25 Hz 降低到 17.07 Hz, 二阶模态的固有频率从 32.79 Hz 降低到 32.64 Hz, 三阶模态的固有频率从 39.39 Hz 降低到 39.27 Hz。

利用有限元软件的自定义云图功能, 输出轴系模型前三阶模态的振型云图, 选择“求解”选项右键插入“用户定义结果”。在“定义”中对自定义的云图进行设置: 将参考坐标系设置为圆柱坐标系, 将扭转轴设置为 Y 轴, 输出变量选择角度。得到扭角位移后, 导出轴系表面各点扭角数据, 将数据导入 Origin 软件绘制浮点图, 以轴的位置为横坐标, 相对扭转角为纵坐标, 可以得到扭振模态振型曲线。经分析发现, 不同转速下的振型图差别很小, 故取 3 000 r/min 为例进行分析。转速预应力前三阶模态振型与无预应力模态振型对比如图 2 所示。

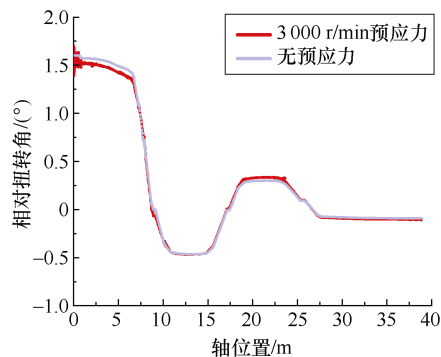
对比转速预应力下的振型曲线和无预应力模态振型曲线可知, 转速使相对扭转角改变, 但是改变幅度不大; 前三阶振型曲线在汽轮机侧 0~2.5 m 出现了明显的毛刺现象, 由此可见转速使轴的端部产生振荡。



(a) 一阶模态振型曲线



(b) 二阶模态振型曲线



(c) 三阶模态振型曲线

图 2 转速预应力前三阶模态振型与无预应力模态振型对比

2.3 温度预应力模态分析

1) 温度预应力模态分析原理

温度变化会导致材料的弹性模量发生变化, 从而影响力学性能, 而材料的刚度与材料的弹性模量正相关。弹性模量与温度的关系通常可以表示为

$$E(T_{th}) = E_0(1 + \alpha \Delta T_{th}) \quad (19)$$

式中: $E(T_{th})$ 为温度 T_{th} 下的弹性模量; E_0 为材料在参考温度下的弹性模量; α 为材料的温度系数; ΔT_{th} 为温度变化量。

不同材料的弹性模量温度系数 α 和热膨胀系数 β 不同, 本次仿真所选取的材料为 30Cr2Ni4MoV, 根据文献[14]和钢材结构手册可知, 其弹性模量的温度系数 α 通常在 $-0.06 \sim -0.03 \text{ GPa}/^\circ\text{C}$, 热膨胀系数 β 通常在 $15 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 左右。理论上, 弹性模量会随温度升高而减小, 刚度随之变小, 导致轴系的固有频率也随温度的升高而减小; 而当热膨胀系数 β 为正时, 表示温度升高时材料会膨胀, 导致刚度降低, 从而固有频率降低。

2) 温度预应力模态分析

温度预应力模态分析的过程与转速预应力模态分析的过程基本一致, 在材料属性定义时添加热膨胀系数一项, 大小为 $15 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, 并且按照温度小于 200°C 和温度大于 200°C 分别定义材料的弹性模量值。然后添加一个温度荷载, 由文献[15]可知, 汽轮发电机组额定工况时的轴系温度在 $70 \sim 500^\circ\text{C}$, 所以本文选取温度最高为 500°C , 每隔 100°C 取一个工况, 分别求解温度预应力下的静力学模块和模态模块, 与不添加温度荷载 (温度为 22°C) 的仿真结果对比。不同温度下的模态频率见表 3。

由表 3 可知, 加入温度预应力后, 轴系扭振的

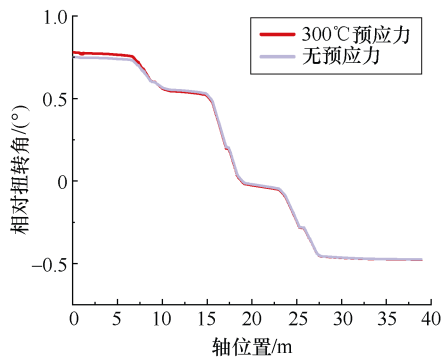
表3 不同温度下的模态频率

温度/℃	一阶/Hz	二阶/Hz	三阶/Hz
22	17.81	34.01	40.89
100	17.42	33.65	40.53
200	16.78	33.01	39.78
300	15.89	31.88	38.44
400	14.91	30.55	36.87
500	14.01	29.37	35.49

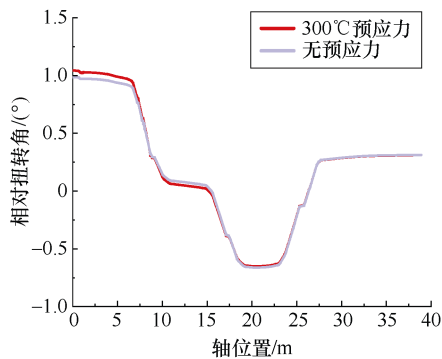
前三阶固有频率有所降低,符合前文理论分析结果。随着温度从 22℃ 增加到 500℃,一阶模态的固有频率从 17.81 Hz 降低到 14.01 Hz,二阶模态的固有频率从 34.01 Hz 降低到 29.37 Hz,三阶模态的固有频率从 40.89 Hz 降低到 35.49 Hz。

导出温度预应力下的振型曲线,分析发现在施加温度荷载时振型曲线差别也很小,故取 300℃ 为例进行分析。温度预应力前三阶模态振型与无预应力模态振型对比如图 3 所示。

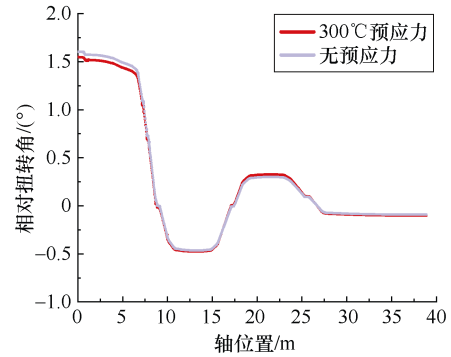
对比轴系在温度作用下的振型曲线和无预应力模态下的振型曲线可知,温度使相对扭转角改变,特别在轴的 0~5m 位置有无温度预应力的振型存在明显差异,这是因为高压转子部分结构复杂,该模型在高压转子部分使用了 57 个轴段,轴径的频繁变



(a) 一阶模态振型曲线



(b) 二阶模态振型曲线



(c) 三阶模态振型曲线

图3 温度预应力前三阶模态振型与无预应力模态振型对比

化导致该部分在受到温度影响时容易发生热应力集中现象,导致该部分振型受温度影响较大。

2.4 温度和转速预应力共同作用下模态分析

汽轮发电机组实际工况下的转速会在极短时间内达到额定转速 3 000 r/min。为了得到更接近实际工况的固有频率,在给轴系保持施加 3 000 r/min 额定转速荷载的情况下,对其在不同温度下的模态进行分析,得到温度和转速耦合作用对汽轮发电机轴系固有频率的影响。额定转速时不同温度下的模态频率见表 4。

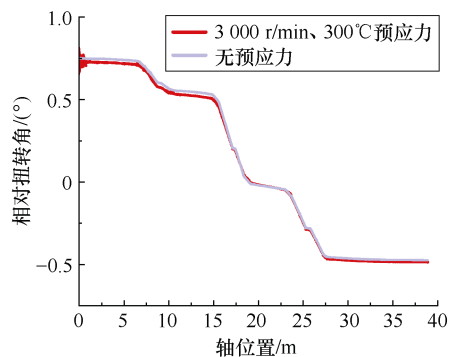
表4 额定转速时不同温度下的模态频率

转速/(r/min)	温度/℃	一阶/Hz	二阶/Hz	三阶/Hz
3 000	22	17.81	34.01	40.89
	22	17.17	32.72	39.34
	100	17.06	32.53	39.12
	200	16.88	32.18	38.76
	300	16.46	31.42	37.91
	400	15.92	30.44	36.83
	500	15.45	29.58	35.87

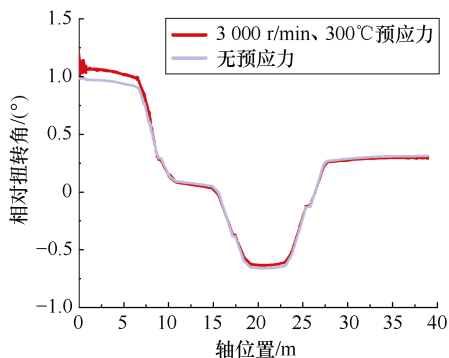
由表 4 可知,在额定转速和温度耦合预应力作用下,轴系固有频率仍然是随温度的增加而降低。随着温度从 22℃ 增加到 500℃,一阶模态的固有频率从 17.17 Hz 降低到 15.45 Hz,二阶模态的固有频率从 32.72 Hz 降低到 29.58 Hz,三阶模态的固有频率从 39.34 Hz 降低到 35.87 Hz。按照 2.2 节的理论分析,转速预应力会使轴系的刚度减小,从而导致系统固有频率降低。但是,对比有、无额定转速时的固有频率发现,随着温度升高,仅温度预应力作用和转速与温度预应力耦合作用下的固有频率下降的差值逐渐减小。当温度到达 500℃ 时,转速与温

度预应力耦合作用下的前三阶固有频率均大于温度预应力单独作用下的固有频率。此结果与 2.2 节和 2.3 节阐述的离心力和温度对轴系模态的影响规律有所冲突。文献[16]发现,高速电主轴在离心力和温度荷载的作用下,随着温升的逐渐增加,主轴系统的一阶固有频率呈先下降后上升的趋势。温升较低时一阶固有频率下降的幅度比较缓慢,随温升逐渐增加,一阶固有频率增加幅度加大。文献[17]发现,某典型壁板结构在压力预荷载和热荷载的作用下,无压力预荷载时,温度升高,固有频率明显下降;有压力预荷载时,温度升高,前几个低阶模态的固有频率基本不变甚至略有上升。因此,在热力耦合的荷载作用下,系统模态会发生非常规变化,在汽轮发电机轴系扭振系统中,可能因为温度荷载带来的热膨胀作用和离心力作用导致轴系外层形状更紧凑,二者的耦合作用产生应力刚化现象,造成刚度变大,固有频率随之变大。

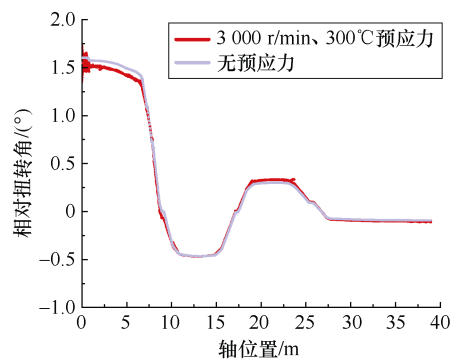
导出温度和转速共同作用下轴系的振型曲线进行分析,发现同单一预应力作用时的结论相似,额定转速时 100~500℃ 下的振型曲线区别不大,故取 300℃ 时额定转速为 3 000 r/min 情况下的振型曲线进行分析。温度和转速共同作用前三阶模态振型与无预应力模态振型对比如图 4 所示。



(a) 一阶模态振型曲线



(b) 二阶模态振型曲线



(c) 三阶模态振型曲线

图 4 温度和转速共同作用前三阶模态振型与无预应力模态振型对比

对比温度和转速共同作用下的振型曲线和无预应力的振型曲线,发现耦合作用对振型的影响与单个预应力单独作用时相差不大。预应力的存在会改变相对扭转角的绝对值,而转速预应力会引起轴系汽轮机侧端部出现不稳定振荡。

2.5 坎贝尔图校核及临界转速

经过模态分析后,处理并输出机组轴系各个模态频率随转速的变化曲线,即坎贝尔图,300℃ 预应力下的坎贝尔图如图 5 所示。图 5 中,水平的直线表示轴系的固有频率,从原点出发的直线表示激振力频率。当激振力频率线与固有频率线相交时,交点的横坐标就是轴系的临界转速。

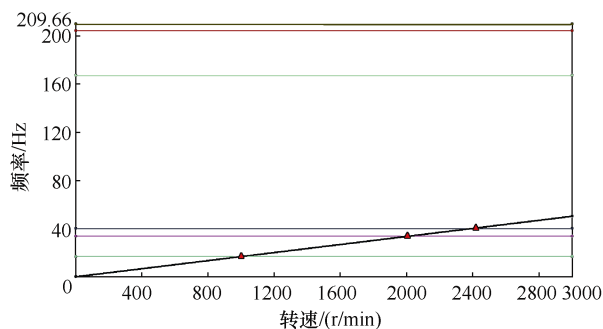


图 5 300℃ 预应力下坎贝尔图

以相同方法导出无预应力、3 000 r/min 预应力、3 000 r/min 和 300℃ 预应力情况下的坎贝尔图,得到对应的临界转速和固有频率见表 5。

分析表 5 可知,预应力的加载对轴系的临界转速和固有频率都有影响。计算得出的临界转速范围在 900~2 500 r/min,而汽轮发电机的额定转速为 3 000 r/min,汽轮发电机从起动到达到额定转速过程中会经过临界转速。当机组转速接近临界转速时,系统会产生共振现象,导致振幅急剧增大;振动引

表5 不同工况下的临界转速和固有频率

阶次	转速/(r/min)	温度/℃	临界转速/(r/min)	固有频率/Hz
一阶模态	0	22	1 068.6	17.81
	3 000	22	1 030.2	17.17
	0	300	953.4	15.89
	3 000	300	987.6	16.46
二阶模态	0	22	2 040.6	34.01
	3 000	22	1 963.2	32.72
	0	300	1 912.8	31.88
	3 000	300	1 885.2	31.42
三阶模态	0	22	2 453.4	40.89
	3 000	22	2 360.4	39.34
	0	300	2 306.4	38.44
	3 000	300	2 274.6	37.91

起的交变应力会显著加速轴系材料的疲劳积累，大幅缩短轴系使用寿命；已有的微小裂纹在扭振作用下可能迅速扩展，最终导致灾难性的轴断裂事故。因此，在实际工程实践中，需要在机组启动过程中控制升速率，尽可能快速通过临界转速区域，减少共振时间。

3 结论

在使用 Creo 族表参数化建模快速建立汽轮发电机轴系模型的基础上，分别进行轴系转速预应力、温度预应力、转速和温度耦合预应力的模态分析，研究了贴合实际工况的扭振特性，得到以下结论。

1) 转速预应力单独作用时，固有频率随转速的升高而减小；温度预应力单独作用时，固有频率随温度的升高而减小。对轴系固有频率进行研究时考虑转速和温度等环境条件是必要的。

2) 转速预应力和温度预应力共同作用时，固有频率与无预应力情况相比减小；但与仅有温度预应力作用的情况相比，在工频转速和温度耦合作用的条件下，系统的固有频率呈现出随温度升高而增大的趋势，说明在热膨胀和离心力作用下会产生应力刚化现象，导致刚度变大。该现象为考虑实际工况下的轴系设计提供了参考。

3) 预应力的加载会影响轴系振型相对扭转角的绝对值，但是改变幅度不大；单个预应力作用时和转速与温度共同作用时振型的差别不大；转速预应力会引起轴系汽轮机侧端部出现不稳定振荡，实际

中要加强对该部位的监控。

由于特高压输电及串补技术、电力电子技术等的应用，扭振事故发生概率变大。鉴于扭振监测在发电机组中的应用日益广泛，后续研究将结合实际工程案例及扭振监测数据，构建扭振模拟模型，探索扭振故障预测方法，为发电机组的安全运行提供技术支撑。

参考文献

- [1] 郑庆帅. 汽轮发电机组扭振在线监测系统的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
- [2] 高本锋, 刘培鑫, 刘王锋, 等. 直驱风电场并网对火电机次同步谐振影响[J]. 电工技术学报, 2024, 39(11): 3308-3322.
- [3] 张路, 陈军, 赵启, 等. 新疆电网次同步振荡控制系统及其测试方法研究[J]. 电气技术, 2022, 23(12): 31-37.
- [4] 张建军, 岳啸鸣, 赵克斌, 等. 一起 330 MW 汽轮发电机转子绕组短路故障分析及处理[J]. 电气技术, 2023, 24(3): 69-72.
- [5] HE Xi, GU Yujiong. Analysis on torsional vibration characteristics of turbo-generator units based on finite element method[J]. Advanced Materials Research, 2014, 915/916: 22-25.
- [6] 程胜杰, 李娟, 焦邵华. 传递矩阵法验证发电机轴系扭振特性[J]. 电气技术, 2019, 20(10): 19-24.
- [7] 郭庆丰, 翟彦恺, 魏红阳, 等. 10 MW 空气透平转子动力学特性研究[J]. 汽轮机技术, 2023, 65(5): 371-372, 396.
- [8] 乔迪, 李娟, 杨俊杰. 汽轮发电机组轴系扭振危险截面分析[J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版), 2024, 39(5): 32-39.
- [9] 应光耀, 刘淑莲, 蔡文方, 等. 汽轮机转子扭振频率影响因素分析[J]. 汽轮机技术, 2020, 62(6): 421-423.
- [10] 李汪繁, 徐佳敏. 600 MW 级汽轮发电机组联轴器强度分析[J]. 发电设备, 2021, 35(5): 309-312, 318.
- [11] LI Yuan, LIU Yi, LIU Heng, et al. Analysis of torsional dynamic characteristics of turbo-generator rotor based on cross scale modeling method[J]. Journal of Vibration Engineering & Technologies, 2022, 10(3): 1055-1072.
- [12] 庞智元. 1000 MW 机组轴系扭转振动特性仿真分析[D]. 沈阳: 沈阳工程学院, 2021.

参考文献

- [1] SARMAH S B, KALITA P, GARG A, et al. A review of state of health estimation of energy storage systems: challenges and possible solutions for futuristic applications of Li-ion battery packs in electric vehicles[J]. *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage*, 2019, 16(4): 040801.
- [2] ZHANG Qichao, LI Xue, ZHOU Chun, et al. State-of-health estimation of batteries in an energy storage system based on the actual operating parameters[J]. *Journal of Power Sources*, 2021, 506: 230162.
- [3] 关燕鹏, 刘成刚, 相洪涛, 等. 基于概率化稀疏自注意力 LSTM 的锂离子电池健康状态预测[J]. *控制工程*, 2024, 31(10): 1833-1840.
- [4] MIRZAEI H, KAMRAVA S. Estimation of internal states in a Li-ion battery using BiLSTM with Bayesian hyperparameter optimization[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 74: 109522.
- [5] 赵靖英, 胡劲, 张雪辉, 等. 基于锂电池模型和分数阶理论的 SOC-SOH 联合估计[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(17): 4551-4563.
- [6] 梁杨, 周永军, 蒋淑霞, 等. 基于改进 GWO-SVR 的锂电池 SOH 估计[J]. *电子测量技术*, 2023, 46(7): 13-18.
- [7] GUHA A, PATRA A. State of health estimation of lithium-ion batteries using capacity fade and internal resistance growth models[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2018, 4(1): 135-146.
- [8] 马君, 万俊杰. 基于健康特征筛选与 GWO-LSSVM 的锂电池健康状态预测[J]. *电气技术*, 2024, 25(2): 37-44.
- [9] 丁同, 傅晓锦. 基于改进粒子群优化算法和极限学习机的锂离子电池健康状态预测[J]. *国外电子测量技术*, 2023, 42(5): 163-173.
- [10] 余佩雯, 郁亚娟, 常泽宇, 等. 相关向量机预测锂离子电池剩余有效寿命[J]. *电气技术*, 2023, 24(2): 1-5.
- [11] KIM J, CHUN Huiyong, KIM M, et al. Effective and practical parameters of electrochemical Li-ion battery models for degradation diagnosis[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 42: 103077.
- [12] 吴铁洲, 朱俊超, 成雄帆, 等. 基于充电阶段数据与 GWO-BiLSTM 模型的锂电池 SOH 估计方法[J]. *电源技术*, 2024, 48(11): 2184-2194.
- [13] MAO Ling, HU Huizhong, CHEN Jiajun, et al. Online state-of-health estimation method for lithium-ion battery based on CEEMDAN for feature analysis and RBF neural network[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2023, 11(1): 187-200.
- [14] 于沛, 王常乐. 基于局部均值分解和极限学习机的锂电池剩余寿命预测[J]. *电气技术*, 2023, 24(1): 23-28.
- [15] 王渴心, 周军, 王岩. 基于鸚鵡优化和极限学习机的锂离子电池健康状态估计[J]. *电气应用*, 2023, 42(11): 16-25.
- [16] 毛玲, 温佳林, 赵晋斌, 等. 基于集成 ELM 的锂离子电池充电截止电压下的 SOC 和 SOH 联合估计[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(11): 86-95.
- [17] 顾天宇. 基于神经网络的锂离子电池 SOC 和 SOH 估计方法[D]. 青岛: 青岛大学, 2023.
- [13] LIU Yichang, TIAN Chunlin, LIU Tao, et al. Modal analysis of worm and worm gear based on ANSYS Workbench[J]. *MATEC Web of Conferences*, 2015, 34: 02014.
- [14] 潘东煦, 顾剑锋, 陈睿恺, 等. 30Cr2Ni4MoV 低压转子钢不同微观组织下的力学性能[J]. *金属热处理*, 2011, 36(5): 1-4.
- [15] 刘峻华. 大型汽轮发电机组轴系扭振研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [16] 常雷. 高速电主轴动态特性及多工况条件对其影响的研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2021.
- [17] 党蒲妮, 吕锦锋, 刘江华, 等. 预载荷及热环境下典型壁板结构的模态分析[C]//第十五届全国结构振动与动力学学术研讨会暨第三届全国冲击及防护工程学术研讨会, 厦门, 2023.

(上接第 39 页)

收稿日期: 2025-02-28

修回日期: 2025-03-16

作者简介

靳 灿(1992—), 女, 山东省济宁市人, 本科, 工程师, 主要从事电力企业项目管理工作。

收稿日期: 2025-01-20

修回日期: 2025-02-28

作者简介

杨俊杰(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为大型汽轮发电机组的扭振特性仿真分析。