

响水涧抽水蓄能电站转子支架模态与稳定性分析

强 杰¹, 韩卫辉², 姚 尧¹, 邢红超¹, 任 威¹, 王考考¹

(1.安徽响水涧抽水蓄能有限公司,安徽 芜湖 241083;2.上海上电电力工程有限公司,上海 200090)

摘 要:国内外众多抽蓄电站的转子支架在运行过程中,均发生过因共振导致的振动过大与噪声问题,严重影响机组安全运行。针对此现象,利用有限元软件 ANSYS 对响水涧抽蓄电站转子支架进行模态分析,得到转子支架的模态频率与振型,并将典型故障工况激振力特点与转子支架模态结果进行对比分析。结果表明:转子支架前六阶模态频率在 14.079~49.988 Hz 范围内,其中四阶模态频率 41.75 Hz 与推力瓦不平整故障特征频率接近,但因所有推力瓦不平整很难出现,因此,该电站的转子支架不会产生常见的共振故障。

关键词:转子支架;模态分析;有限元分析;结果分析

中图分类号:TV743;U464.331+.1;S605+.2

文献标识码: B

文章编号:1001-2184(2019)02-0100-03

1 概 述

响水涧抽水蓄能电站为国内第一台拥有自主知识产权的大型可逆式水泵水轮发电机组。电站总装机容量 1 000 MW,安装 4 台单机容量 250 MW 的可逆式水泵水轮发电机组。机组额定转速 250 rpm,发电功率 250 MW,抽水功率 270 MW。其转子支架为斜支臂结构,支臂倾斜布置的作用是将转子支架结构的径向力转化为切向力,同时保证转子支架具有足够的刚度和强度。本文研究讨论的仿真转子支架三维模型,其主体结构由斜筋、中心体、上下腹板、三角筋与立筋组成。斜筋中部用三角筋加固,上下各与一块腹板连接,斜筋外侧与轴向立筋连接,内侧沿伸至中心体。转子中心体上部与上端轴相连,下部与发电机轴相连,均为法兰连接,磁轭通过键与转子支架连接。转子支架最大外围直径 5 690 mm,高度 2 685 mm,中心体直径 2 180 mm。

国内外众多抽蓄电站的转子支架在运行过程中均发生过不同程度的裂纹或结构破坏,严重影响机组安全运行^[1-3]。其一方面由于转子支架强度未达到运行要求,但经校核强度后这种情况极少发生,另一方面是在运行过程中因结构共振引起的动载荷作用。其中故障工况,例如转动部件静不平衡、主轴密封偏磨、轴承间隙大、推力头松动、推力瓦不平整、发电机磁拉力不平衡、发电机极频振动与迷宫环间隙不均匀等均会产生激振

力,若其激振力与结构固有频率接近,将导致结构发生剧烈振动,加剧故障,严重影响机组运行安全。因此,除需对转子支架进行强度校核外,模态特性的研究对机组的稳定运行也很有必要。

本文应用 ANSYS Workbench 平台 Modal 模块对响水涧抽蓄转子支架进行模态分析得到各阶固有频率及振型。将水轮机常见故障频率与各阶模态频率进行对比,分析了转子支架振动的稳定性。

2 模态分析理论

模态分析通过试验或计算的方法获得机械结构的固有振动特性,分析结构在某一频率范围内各阶主要模态的特性,进而预测结构在内部或外部振源耦合作用下的实际振动响应。一般来说,可通过有限元离散的动力学矩阵方程来描述多自由度系统的运动情况。多自由度弹性结构无阻尼自由振动的动力学方程为^[4]:

$$[M]\{\ddot{u}\}+[K]\{u\}=0 \quad (1)$$

式中 $[M]$ 为结构整体质量矩阵; $[K]$ 为结构整体刚度矩阵; $\{\ddot{u}\}$ 、 $\{u\}$ 分别为结构整体各节点的位移向量和加速度向量。

3 转子支架有限元分析

3.1 有限元模型网格划分与模型简化

采用智能划分的方法对计算模型进行网格划分,智能网格划分是自动化程度最高且最成熟、最常用的网格划分技术^[5]。计算机依据几何模型对应部位的特性,分别采用映射或扫略等技术混合

本项目为国家电网公司科技项目(52572916000A)
收稿日期:2019-01-02

在一起后进行网格划分,同时对网格尺寸进行约束。支架体网格尺寸最终确定为 0.01 m,网格数量为 105.3 万,图 1 给出了有限元网格模型。由于研究对象为转子支架,此处将磁轭磁极计算模型密度设置为零并在重心处附上均布质量对其进行简化。磁轭磁极重心半径分别为 3 045 mm 与 3 515 mm。

3.2 转子支架材料设置

转子支架材料均为 Q345,其弹性模量为 2.06e11Pa,泊松比为 0.28,密度为 7 850 kg/m³,屈服极限为 σ_s 345 MPa,极限抗拉强度为 475 MPa。

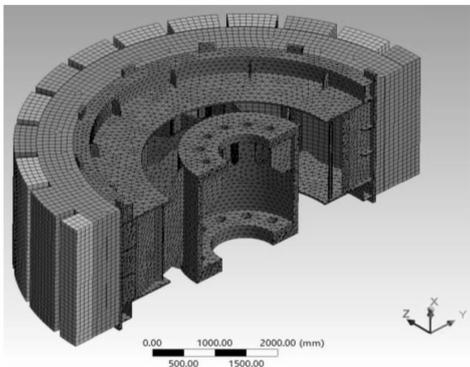


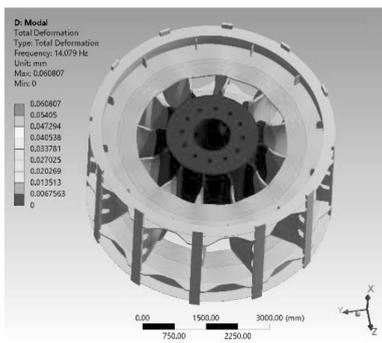
图 1 有限元网格模型

4 计算结果分析

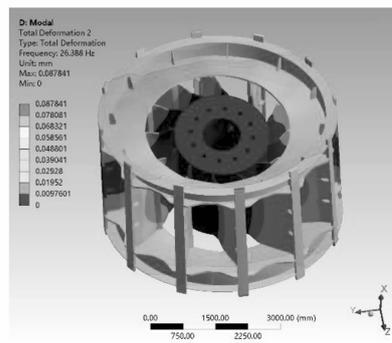
运用 ANSYS 中 Modal 模块分析得到转子支架前六阶模态频率与相应的振形图,图 2 给出了转子支架前六阶模态频率与振型示意图。由于转子支架结构周向对称性,导致二、三阶、五、六阶模态频率与振型相近。结构一阶模态频率为 14.079 Hz,其振型为绕中心体轴向扭振。二、三阶模态频率分别为 26.388 Hz 与 28.391 Hz,振型均为绕中心体两侧上下摆振。四阶模态频率为 43.469 Hz,振型为整体结构(除中心体)轴向振动变形。五阶与六阶模态频率分别为 49.978 Hz 与 49.988 Hz,其振型均为整体结构(除中心体)的径向偏移变形。

表 1 给出了水轮机常见故障特征,根据机组结构参数转速为 250 rpm,转频为 4.17 Hz,推力轴承数量 m 为 10,活动导叶 Z0 数量为 24,计算可得机组故障频率为:4.17 Hz、41.75 Hz、100.02 Hz、1.15 Hz。卡门涡列的特征频率通常在 100~500 Hz,且很少出现。

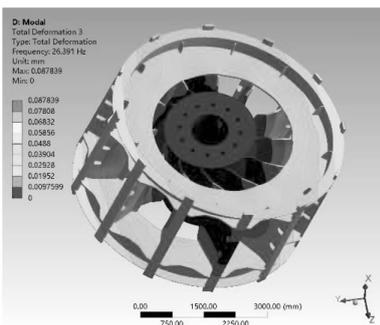
从表 1 计算可知,只有推力瓦不平整的特征频率 41.75 Hz 与四阶理论模态频率接近。推力瓦不平整的主要原因是推力头和轴颈间有间隙,



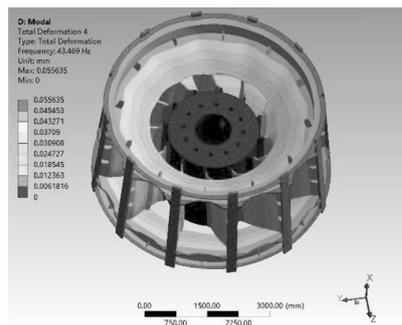
(a)一阶模态频率 14.079 Hz



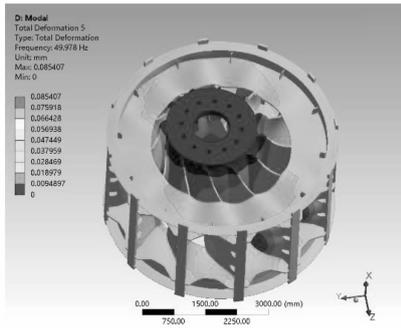
(b)二阶模态频率 26.388 Hz



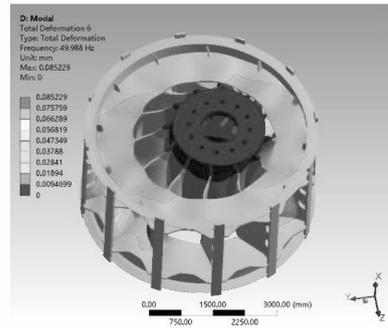
(c)三阶模态频率 26.391 Hz



(b)四阶模态频率 43.469 Hz



(e) 五阶模态频率 49.978 Hz



(f) 六阶模态频率 49.988 Hz

图 2 转子支架模态分析结果

表 1 水轮机常见故障特征表

振动原因	频率特征	其他特征	备注
转动部件静不平衡	f_n	水平振动较大,且振幅与转速的平方成正比	
主轴密封偏磨	f_n	振动强烈,伴有撞击声响	
导轴承间隙大	f_n		
主轴刚度不够	f_n	振幅随机组负荷变化明显	
推力头松动	f_n	振动忽大忽小,且距推力轴承较远的转动部分摆度较大	
推力瓦不平整	$m \times f_n$	推力轴承支架垂直振动较大	
发电机磁拉力不平衡	f_n	振幅随励磁电流增大而增大	
发电机电频振动	100K Hz		$K=1,2,3 \dots$
迷宫环间隙不均匀	f_n		
导叶开口不均匀	$Z_0 \times f_n$	振幅随机组负荷增减而增减,调相运行时振幅大幅度减小	
尾水管空腔涡带	$f_n/3.6$	机组振动较强烈的工况补气前后,振动变化明显	
轮叶尾部卡门涡列	StW_2/d		

注:表中 f_n 为机组转频, m 为推力轴承瓦数量, Z_0 为活动导叶数量, St 为斯特罗哈数,约为 0.18—0.22, W_2 为转轮叶片相对速度, d 为叶片出口边缘的厚度。

轴和推力头之间有相对运动现象,这种现象极为少见。由分析可知,转子支架结构稳定,不会产生常见共振故障,可以保证机组安全稳定运行。

5 结论

基于模态分析理论,在适当简化结构的基础上,建立了响水涧抽蓄电站斜切式转子支架有限元模型,采用 ANSYS 中 Modal 模块分析其前六阶模态振型和频率,响水涧抽蓄转子支架前六阶模态频率分别为 14.079 Hz、26.388 Hz、28.391 Hz、43.469 Hz、49.978 Hz、49.988 Hz。分析该机组常见故障频率与转子支架前六阶模态,只有推力瓦不平整的特征频率 41.75Hz 与四阶理论模态频率接近。但因所有推力瓦不平整很难出现,可知该斜切式转子支架结构稳定,不会产生常见的共振故障,可以保证机组的安全稳定运行。采用 ANSYS 有限元软件对转子支架模态进行分析,并与其常见故障频率比较的方法,完全可应用到所有水轮发电机组中,帮助水电企业准确掌握

机组转子支架的特性,防止常见共振现象的发生。

参考文献:

- [1] 黄道锦,汪小芳.灯泡贯流式机组转子支架疲劳分析研究[J].西北水电,2012(S1):135—138.
- [2] 汪涛,贾爱青,林雪成.锦屏一级水轮发电转子支架的刚度计算分析[J].机械工程师,2009(05):110—111.
- [3] 李正贵.水轮发电机斜支臂结构转子支架裂纹分析[J].水力发电学报,2013(02):271—276.
- [4] 张学玲,唐毅,满佳.基于有限元分析的发电机转子支架结构优化设计[J].组合机床与自动化加工技术,2009(12):103—106.
- [5] 温洁明,陈家权,沈炜良.水轮发电机转子支架有限元分析及应力试验[J].机械工程师,2007(03):61—63.

作者简介:

强杰(1985-),男,山西娄烦人,工程师,工学学士,现供职于安徽响水涧抽水蓄能有限公司,主要从事抽水蓄能机组运行和管理;
韩卫辉(1972-),男,江苏盐城人,工程师,工学学士,现供职于上海上电电力工程有限公司,主要从事发电设备检修和管理;

(下转第 106 页)

区):以公路内侧边沿为基点,按1:1的坡比进行放坡,每20 m设置宽3 m的马道。从上到下每开挖完成一级后进行系统挂网喷锚支护,锚杆采用 $\varphi 25$ 自进式中空锚杆,间排距 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$,梅花形布置,锚杆长度为4.5 m,挂钢筋网 $\varphi 6.5@20\text{ cm}\times 20\text{ cm}$,喷C25混凝土厚12 cm。完成支护后才能进行下一级施工。

(2)复建公路K9+270—K9+370段(Ⅱ区):在高程约1 335 m处设置施工开口线,在开口线附近先设置6 m长 $\varphi 25$ 自进式中空锚杆进行锁口,完成后再按1:1的坡比进行放坡,第一级设置为高差15 m、马道宽3 m的边坡,以下则每30 m设置宽3 m的马道至公路,支护参数及要求同Ⅰ区。

(3)对其他存在掉块和垮塌风险的公路边坡进行支护处理,支护参数同Ⅰ区。

3 应急处置的成效

(1)在郑家坪变形体应急处置中,由于相关单位反应迅速、应对科学和处置妥当,避免了省道S217线石棉至泸定段的中断,保证了过往车辆和人员的安全,实现了重大地灾下长时间零伤害。据不完全统计,在GNSS监测数据的实时指导及所建应急机制的果断、有效响应下,应急处置的过程中成功实现紧急避险5次,估计避免因人员伤亡和车辆损毁造成的直接经济损失超过2 000万元,有力地维护了地方社会的稳定。

(2)郑家坪变形体工程临时处置措施于2016年年底实施完毕。变形体在经过减载后,变形监测数据趋于收敛,相关部位也在开挖支护后,再未发生过垮塌,目前,复建公路通行正常。

(3)在对郑家坪变形体发展趋势及危害的正确研判下,大岗山水电站避免了不必要的低水位运行,初略估算避免的间接经济损失超过1.2亿元。

4 结语

(1)郑家坪变形体总变形规模大,严重影响了S217省道淹没复建公路石棉至泸定段的安全、顺

姚尧(1987-),男,安徽芜湖人,工程师,工学学士,现供职于安徽响水涧抽水蓄能有限公司,主要从事抽水蓄能机组运行和管理;

邢红超(1984-),男,河南安阳人,工程师,工学学士,现供职于安徽响水涧抽水蓄能有限公司,主要从事抽水蓄能机组运行

畅通行,但在相关单位的迅速反应、科学应对和妥当处置下,保持了省道的通畅,实现了重大地质灾害下长时间零伤害,避免了不必要的损失,经济和社会效益显著。

(2)中国地质环境监测院刘传正曾指出,高效有序地应对重大突发地质灾害的应急行动可概括为“6快”,即“快调查、快监测、快定性(会商)、快论证、快决策(应对)和快实施”^[6]。对郑家坪变形体的成功应急处置,十分吻合这一经验。

(3)郑家坪变形体的应急处置,是企业联合地方政府智慧应对重大地质灾害的一次成功协作,对国内地质灾害的应急响应具有巨大的参考和借鉴意义。

(4)针对郑家坪变形体的永久根治,在遵循“有利于变形体的根治,有利于保通期的安全,有利于造价控制,有利于快速实施,有利于后续移交”的原则下正在积极研究中。

参考文献:

- [1] 文良友,蔡频.溪洛渡水电站水库影响区地质灾害的预测预防[J].水力发电,2018,44(1):94-97.
- [2] 赵明华,朱信波,赵雄.金沙水电站花石崖危岩体稳定性分析与治理[J].四川水力发电,2018,37(2):45-47.
- [3] 刘勇,倪迎峰,郑江.锦屏水电站地质灾害防治治理与启示[J].人民长江,2017,48(2):44-48.
- [4] 童广勤,王翔俊,石纲.三峡水库地质灾害防治措施分析与建议[J].人民长江,2011,42(22):20-22+41.
- [5] 刘传正.重大突发地质灾害应急处置的基本问题[J].自然灾害学报,2006,15(3):24-30.
- [6] 曹廷,王丽君,何鑫.郑家坪变形体变形机制与稳定性分析[J].岩土工程技术,2018,32(5):242-246.

作者简介:

陈兴泽(1986-),男,云南蒙自人,工程师,硕士,主要从事水电建设工程管理,以及安全生产与环境保护相关工作;

赵连锐(1975-),男,云南腾冲人,高级工程师,学士,主要从事水电建设工程管理,以及安全生产相关工作;

廖勇(1976-),男,四川中江人,高级工程师,硕士,主要从事水电建设工程管理,以及安全生产与环境保护相关工作;

曾露(1987-),女,湖北仙桃人,工程师,硕士,主要从事水电建设工程管理相关工作。

(责任编辑:卓政昌)

和管理;

任威(1990-),男,河南中牟人,助理工程师,工学学士,现供职于安徽响水涧抽水蓄能有限公司,主要从事抽水蓄能机组运行和管理;

王考考(1986-),男,江苏沛县人,助理工程师,工学学士,现供职于安徽响水涧抽水蓄能有限公司,主要从事抽水蓄能机组运行和管理。

(责任编辑:卓政昌)