

广蓄二期工程抽水蓄能机组的振动评估

魏炳漳

(广东蓄能发电有限公司,广东广州 510630)

关键词 抽水蓄能机组 振动 监测 广州抽水蓄能电站

摘要 抽水蓄能机组的运行工况复杂,其振动问题较之常规水轮发电机组更引起人们的关注。为了解广蓄二期抽水蓄能机组的振动特性以保障其安全运行,在机组上配置了振动监测系统,它包括机组振动保护和振动分析两大系统。该系统可以监测顶盖、各部轴承、上机架等处的振动速度与大轴摆度。根据广蓄二期机组的实测数据,参照国际标准化组织 ISO 提出的水轮机振动限制曲线和评估标准,评估其运行稳定性和振动特性,均达到 ISO 相关标准的 A 区好水平。

中图分类号:TV743(265);TK734 文献标识码:B

1 关于水轮发电机组振动评估的标准

抽水蓄能机组由于运行工况复杂,其振动问题较之普通水轮发电机组更引起人们关注。特别是我国近年已建和在建一批高水头大容量抽水蓄能电站,在订货时如何向制造商提出明确的振动限制值要求,如何正确配置有效的振动监测装置,如何评估已建蓄能电站机组的振动性能,都是电站建设者关心的问题。

直到不久前,国际上还没有一个可供使用的水轮发电机组振动评估的标准(已有的 VDI—2056 和 VDI—2059 并不直接针对水轮发电机)。由于国际上对水轮发电机组振动评估的要求日益明显,ISO 于 1993 年对代表不同类型水轮机(培尔顿、卡普兰、法兰西斯……)的 1000 多台机器的振动数据进行回归统计分析,随后提出了以 A、B、C、D 分区的水轮机振动限制值曲线和评估标准。这就是 ISO—7919 第 5 部分(用于轴振动)和 ISO—10816 第 5 部分(用于轴承座振动)。

上述标准涉及以下的描述:使用的定义和范围(如仅适用于稳定运行状态);振动测量的技术方法;确定测量平面;测量装置和使用方法分析;水轮机运行工况的描述(也涉及水泵水轮机的各种稳定工况,但统计数据太少,尚未制定蓄能机组的振动标准值);A、B、C、D 区的描述;附件 A 描述了测量值如 S_{\max} (最大振动位移单峰值)或 S_{p-p} (最大振动位移峰-峰值)及 V_{eff} (振动速度有效值)或 V_{rms} (振动速度均方根值),在评定时也给出了 S_{\max} 和 V_{rms} 限定值或限定曲线。

上述两个标准尚不推荐直接适用于抽水蓄能机组,该标准也特别强调列入区域界限的振动数值不应作为验收值,设备验收值仍要由设备制造商与买方协商,对于特殊的机器特性,只要制造商能确保安全运行,较高的振动值也是允许的。但对不同转速抽水蓄能机组来说,总算有了一个可供比较和

借鉴的振动评估标准。其中有关水轮机组轴承座振动的最主要和最有用的描述已作为 ISO 委员会草案——ISO/CD1086—5(ISO/108/2/6N110)提出,这个草案发表于 1998 年 2 月。

为了更深入地了解广蓄二期工程抽水蓄能机组的振动特性和保证机组安全的运行,我们为电站配备了完整的振动监测装置并在机组调试阶段进行了大量的振动数据测量。这些测量比在广蓄一期工程中委托清华大学研制机组振动监测系统时所做的测量工作更进了一步。相信这些测量数据以及将这些数据与 ISO 最新标准所作的对比分析,对我们了解高水头竖轴可逆式抽水蓄能机组的振动特性是十分有益的。

2 ISO/CD 10816—5(ISO 108/2/6 N110)的主要观点

2.1 范围

该草案对转速为 60 r/min 至 1 800 r/min 的竖轴或卧轴常规水轮发电机组或抽水蓄能机组,在轴承或轴承座上进行振动测量的评估提供了指导。草案强调轴承座振动不是评价机组振动的唯一标准,因为通常机组振动是由轴承座振动以及相连的大轴振动共同形成的。

2.2 测量

一般测量程序列在 ISO10816—1 及 IEC60994 中,该草案只提出建议。

(1)对于低速机组(低于 300 r/min)最好测量振动位移 S_{p-p} (μm);对于中高速机组最好测量振动速度 V_{rms} (mm/s)。

(2)测量典型方向是轴承座的两个径向垂直方向,对于立式机组最佳测量方向是上游和与上游 90°处。

收稿日期:2001-08-02

作者简介:魏炳漳(1942—),男,福建福州人,电气高级工程师,广东蓄能发电有限公司总工程师。

(3)用单个传感器来评估振动应格外慎重,因为单个传感器不能对最大振动值进行合理定位。

(4)所用测量设备必须是宽带,且频率曲线平稳。其频率范围对于测量振动位移 S_{p-p} 至少从 1/4 转频到 3 倍转频乘以叶片数;如果测量振动速度 V_{rms} 应从 2 Hz 到 1 000 Hz。

2.3 评估

ISO10816—1 对不同类型机组振动严密性提供两种评估标准:一种是采用宽带测量观察振动值;另一种是观察振动值的变化,不管变大还是变小。

(1)振动值、评估区划分。A 区,新调试的机组的振动通常出现在该区内;B 区,在该区振动的机组通常可以进行无限制的长期运行;C 区,在该区内振动的机组通常不适合长期连续运行。D 区,在该区内的振动通常足以对机组造成损害。对于低负荷、过负荷和暂态运行条件,目前还没有足够数据和经验建立限制曲线。

(2)振动值的变化。宽带振动值可能会出现一个很大的变化,这时即使还没有达到报警区 C 区的程度,也必须采取措施,当振动值的变化超过 B 区上极限值的 25% 时就应视为大变化,尤其是它们突然出现的时候,这时必须进行诊断调查。

(3)由于转轮设计要兼顾水轮机和水泵,水泵水轮机可能出现轴承座振动增大的现象,但目前尚无足够数据来制定水泵机组的标准。

(4)报警值设定。建议报警值不应超过 B 区上限的 1.25 倍,如果稳态振动基线值发生了变化(如机组大修后),报警值也应相应修改,如果基线低,报警值可以低于 C 区。

(5)跳机值设定。跳机值与机组机械整体性有关,因此所有类似机组跳机值都一样,通常与设定报警值的基线无关,建议跳机值不要超过 C 区上限的 1.25 倍。

(6)本草案的评估方法限于宽带振动,没有参考频率或相位,在大多数情况下对于验收试验及运行监控都是适用的。

2.4 振动原因

该草案附件 B 明确指出有关 ISO10816 所描述的轴承座振动的机械原理是建立在宽带理论以及对横轴机组的研究经验的基础上,目前对水力机组中更普遍的竖轴机组始终还没有给予足够的重视,而水力机组其轴承座振动的频率范围似乎更宽,振动原因涉及机械不平衡、磁拉力不均匀、水力原因以及正常暂态过程(如开、停机)中由于附加励磁力与转轮相互作用所导致的更宽的频率范围和振动幅度。其中尾水管流量不稳定性(混流式水轮机在最佳效率范围外进行稳态运行时出现)产生的振动频率经常低到转频的 1/3 至 1/4,而空蚀产生的振动频率通常为高频且是突发的;叶片、导叶成型不好导致的流体弹性振动预计频率为 100 Hz 至几千 Hz;密封、转轮迷宫间隙处的自激振动频率一般略高于转频,而与旋转系统的弯曲固有频率相接近(因此混流式抽水蓄能机组要特别注意校核轴系在弯曲和扭转力矩时的临界转速)。

此外,附件 B 也特别指出,对于抽水蓄能设备,由于暂态运行状况频繁发生,因此增加振动的时间间隔总和超过整个

运行时间的 1/1000,这些频繁发生的暂态运行状况对轴承造成的附加应力和材料疲劳应单独进行评估。

该草案的附件 A 给出了建议的评估区边界,其中适用于立式水轮发电机组的见表 1。表 1 为立式机组其轴承全部固定在基础上,运行速度为 60~1 800 r/min

表 1 立式机组主要轴承评估边界值

区域边界	位移峰-峰值/ μm	速度均方根/(mm/s)
A/B	30	1.6
B/C	50	2.5
C/D	80	4.0

为后面评估需要,也顺便列出 ISO7919—5 推荐的大轴摆度 S_{\max} 限定曲线见图 1。

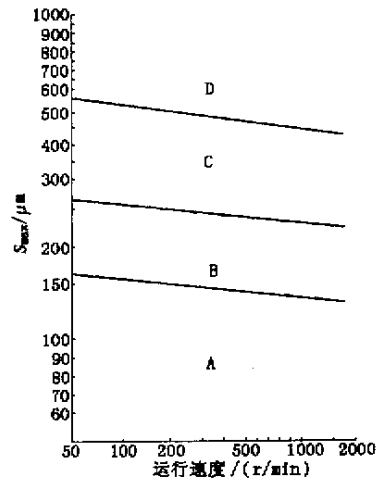


图 1 ISO7919—5“ S_{\max} ”限定曲线”

3 广蓄二期机组振动监测系统配置

广蓄二期机组振动监测系统可分为机组振动保护和振动分析两大系统。所有用于测量振动速度和振动位移的振动传感器被预先装在水轮机顶盖、发电机上架、水导轴承、发电机下导轴承、上导轴承和推力轴承上,另外还设置了测量水轮机转轮水推力振动的附加测量点(见表 2)。所有这些原始振动信号被送往装在机旁盘柜的 MMS(机组振动监测装置单元)模块上。MMS 模块作为人机界面由一个电平探测模块 PLD772 和前端采集卡构成(见表 3)。探测模块 PLD 可在机旁盘柜上直观地显示振动速度和振动位移量并在这些量超过限定值时由現地报警或跳机起到保护机组的作用。振动传感器及 MMS 模块由瑞士 Vibro-meter 公司供货,可视为振动监测系统的常规配置。

为了进行振动数据的存储、打印、频谱分析、趋势分析、故障原因判断,在设计联络会议阶段又专门向西门子公司订购了 1 套振动分析系统。在出厂试验和现场安装调试中,上述两系统已合成 1 套完整的振动监测系统,并且可以分别向每台机的远程终端控制单元 RTU(TRUI 2,3,4)发出数字振动报警信号,和由全厂公用 RTU(RTU10)上获取任何与振动

有关的数据。总体配置如图2所示。

表2 每台机振动传感器配置

传感器 + 调节 + 安装盒	安装位置
TQ402 + IQS452 + ABA105	上导轴承键相器(1×) 水导轴承大轴相对振动(2×)
TQ407 + IQS451 + ABA105	上导轴承大轴相对振动(2×) 下导轴承大轴相对振动(2×)
CE310 + 无调节器 + JB105 + 镀锌分隔单元 GSI130	水轮机顶盖绝对振动(1×)
CE680 + 无调节器 + JB105	上导绝对振动(2×) 下导绝对振动(2×) 水导绝对振动(2×) 上机架绝对振动(1×)

表3 机旁盘(CFA01)内MMS模块的电平探测模块和前端采集卡的构成

MMS 模块配置	振动采集对象
UVL68X(1×)	机组旋转速度
UVV699 + PLD77X(1×)	转轮水推力振动
UVV697 + PLD772(3×)	大轴上导轴承的相对振动 大轴与下导轴的相对振动 大轴与水导轴承的相对振动
UVC 752 + PLD77X(4×)	上导绝对振动 下导绝对振动 水导绝对振动 上机架绝对振动

有特性值 ⑦瀑布图,以3维方式显示过去20h的时间信号样本 ⑧自由形式图形,许可数据以不同的形式和图示进入。

在本监测系统中,用于分析振动的最主要5项数据为:①转频振动值;②2倍转频振动值;③9倍转频振动值;④最大混频综合振幅;⑤最大大轴摆度。监测范围:高频为4~25倍转频,低频为0.125~0.875倍转频。

4 振动实际测量结果

测量结果显示,在任何正常运行工况下,发电机上导、下导、上机架的振动速度都非常小,上导、下导、水导3处的大轴摆度也较小,但水轮机顶盖和水导轴承呈现较大的振动速度,有待评议。振动汇总评估见表4。

表4 振动汇总评估

工况	项目	振动值	评估
发电机 工况 (170~320 MW)	上、下导径向或轴向及上机架振速/(mm/s)	< 0.9	ISO10816—5 A区
	水导径向振速/(mm/s)	10.6~12.1	(见评议1)
	顶盖轴向振速/(mm/s)	5.6~6.4	(见评议2)
	上、下导大轴摆度/ μm	17~70	ISO07919—5 A区
	水导大轴摆度/ μm	< 140	ISO07919—5 A区
水泵 工况	上、下导径向及上机架轴向振速/(mm/s)	< 1.2	ISO10816—5 A区
	水导径向振速/(mm/s)	< 4.0	
	顶盖轴向振速/(mm/s)	< 4.0	
	上、下导大轴摆度/ μm	20~85	
	水导大轴摆度/ μm	43~60	ISO07919—5 A区

5 评议

5.1 评议1

机旁MMS显示水导的振动速度超过合同规定的4.5 mm/s的要求,为确认振动速度值的正确性并为频谱分析做准备,1999年6月17日对水导和顶盖的振动速度采用便携设备进行额外测量。测量使用1个Scheck Vibro-prot 30测量装置,2个AS020加速度传感器和1个VS080速度传感器。这些传感器的安装位置和型号与DIGEST振动分析系统所用传感器不同,主要装在上游方向。水导振速测试结果,发电工况约为11~12 mm/s,水泵工况约为3.5~5.5 mm/s,顶盖最大振动为4.7~6.4 mm/s,与DIGEST的测量结果极为接近。频谱分析显示优势频率为150 Hz,即为叶片过流频率的2倍。对水泵水轮机来说,典型的过流频率为以下3种:① $1 \times 8.33 \times 9 = 75 \text{ Hz}$;② $2 \times 8.33 \times 9 = 150 \text{ Hz}$;③ $3 \times 8.33 \times 9 = 225 \text{ Hz}$ 。本工程为150 Hz,对DIGEST系统从0.125至25倍频之间所测得的全部综合曲线也显示了同样的优势频谱。

在150 Hz,11.2 mm/s条件下,水导轴承的径向位移振幅可以算出仅为 $31 \mu\text{m}$ (p-p值),相当于ISO10816—5 A/B区推荐值。应该注意,虽然ISO标准推荐对中、高速机组最好是测量振动速度,但作为振动评价必须采用振动位移值才是正确的,因此ISO标准给出了振动速度的同时也给出了振动位移值。我国《水轮发电机组机械振动的评价》(征求意见稿)

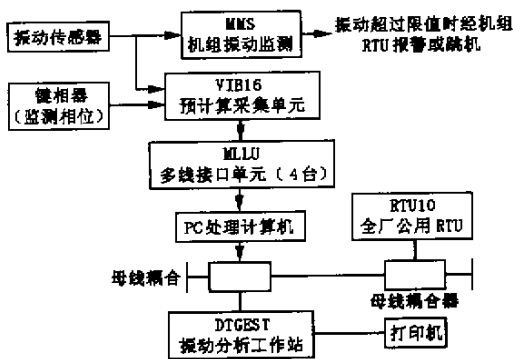


图2 广蓄二期振动监测系统示意

分析工作站共有两个耦合数据库,一个用于与PC计算机耦合,另一个与RTU10耦合。每一个振动信号会放置在耦合数据库的指定表格位置,离散段存储显示5 min平均值,短时存储器为2~3 h平均值。DIGEST分析软件可以使振动呈现不同的视觉效果并通过其所附的打印机打印出来,主要包括:①趋势分析图,可显示振动特性数据在未来1h内的趋势数量图;②极座标图,可显示大轴与轴承相对振动的第1次、第2次及第9次转频谐波振动的概况;③时间信号图和轨道图,时间信号每隔0.5 h获得1次,轨道图显示大轴相对振动和轴承绝对振动所获得的数据;④频谱图,对应每0.5 h从各测量点获得1次的时间信号显示出频谱;⑤条形图,用条形显示各测量点所挑选的一个特性振动值概况;⑥特性值和关联值表格,可用不同表格形式显示 S_{max} 值、关联值及所

也强调用振动位移进行评价的观点。

合同规定的 4.5 mm/s,引自以卧式机组为研究基础的德国 VDI2056 标准,在该标准中,对于转频 8.33 Hz(500 r/min)而言,主频振速高达 9.25 mm/s(振动位移峰峰值 $S_{p-p} = 250 \mu\text{m}$)仍认为可以接受。可见对于水泵水轮机,笼统规定 4.5 mm/s 振速是不妥的,应以优势频率为评价频率,规定其振动位移值低于多少 μm 为妥。

5.2 评议 2

机旁 MMS 显示顶盖振动速度超过了 4.5 mm/s,频谱分析其优势频率也是 150 Hz。同评议 1 所述一样,应用振动位移进行评价。合同规定内顶盖的最大双幅振动值为 0.19 mm。计算表明,在 150 Hz,6.4 mm/s 振速时,振动位移仅为 18 μm ,远小于 0.19 mm。当 2 倍叶片过流频率为 150 Hz 时相应的振速与位移换算公式为:

$$S_{p-p} = \sqrt{2} V_{\text{rms}} \times 1.85 \times \frac{1}{2\pi \times 150}$$

机组转速为 500 r/min 时,转频振速位移换算公式为:

$$S_{p-p} = \sqrt{2} V_{\text{rms}} \times 1.85 \times \frac{1}{2\pi \times 8.33}$$

6 振动报警和跳机值整定

为了确定机组振动的报警值和跳机值,打印了每台机组在各种工况启动时从 0 到稳态的振动变化曲线,其中水导轴承座在发电工况启动的暂态高振动约维持 6~15 s,因此对现地 MMS PLD772 的水导轴承座振动报警延时设定为 20 s,

水导轴承座振动报警值定为 15 mm/s,跳机振动值定为 20 mm/s,这两个数值看似很高,但因其特性频率为 150 Hz,换算成位移的报警值远未达到 ISO 标准 B 区上限的 1.25 倍。

7 结论

(1) 一个设计良好的高水头竖轴可逆式机组,当机组处于稳态运行工况并在 50% 负荷以上运行或作水泵工况运行时,机组振动水平与常规混流机组没有重大差别,可以参照使用目前 ISO7919-5 及 ISO10816-5 提出的振动评估标准。

(2) 暂态运行工况下的抽水蓄能机组振动幅值明显加大,不确定因素很多,目前还没有适用的评估标准。累计暂态工况对轴承造成材料疲劳应单独评估。现场应特别注意振动值的变化。

(3) 广蓄二期机组由于重视研究降低模型转轮的压力脉动,优化真机结构设计,机组运行稳定性和振动特性非常好,稳态运行工况下大轴摆度及轴承座绝对振动均达到 ISO 相关标准 A 区好水平。

(4) 推荐对中高速度抽水蓄能机组进行轴承座、支架、顶盖等部位的径向和轴向振动速度测量,但应以优势频率作为评价频率,并以换算后的振动位移值进行绝对振动值评估。

(5) ISO 相关标准对振动均指宽带综合最大值(混频值),这对工程来说十分简便好用。实际工程不需要对所有特征单频值均规定振动标准,但必要时应进行频谱分析,判断振动的特征,对于宽频振动速度测量值尤应如此。

(上接第 44 页) 围岩 喷层厚 17 cm,单层网筋,径向系统锚杆 $\phi 22 \text{ mm} @ 100 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}$,长 $L = 350 \text{ cm}$ 。根据不稳定岩块情况布置随机锚杆。在 0+095~0+068 m 洞段,于顶拱部位布置超前锚杆, $\phi 32 \text{ mm} @ 50 \text{ cm}$,长 $L = 400 \text{ cm}$,与顶拱夹角 30°。所有的锚杆均为树脂锚杆。

手风钻钻孔爆破,人工喷混凝土,挖掘机配合侧向装载机渣,自卸汽车运渣。该洞段开挖、喷锚支护结束后,挖除前段(0+022.8~0+050)中间 V 区,再浇筑底板垫层混凝土。

2.5 混凝土衬砌施工

采用针梁模板从 0+055 到 0+095 桩号全断面浇筑衬砌混凝土。渐变段 0+050~0+055 采用小模板人工立模。搅拌运输车运送混凝土,泵送入仓,人工振捣。

3 变形监测

在地质条件较差的洞段 0+054、0+068 两处,各布置一个收敛变位观测断面。观测点布置在边墙中部距洞底 4.4 m 处。观测历时 35 d,变形量很小,最大累积收敛变形量 0.74 mm,且很快趋向收敛(见图 3)。0+050 断面收敛变形量很微小,是因为受到 0+050 混凝土衬砌约束的影响。

在 0+050~0+060 桩号上方有一条公路,交通频繁,经常有载重车(40 t)和重型设备通过。在洞顶公路上布置了沉降观测点。观测结果没有发现沉降,其微小的数值在测量仪器自身误差以内。

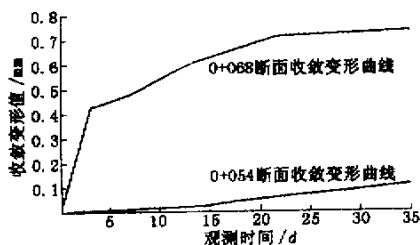


图 3 收敛变形曲线

4 结语

对于不良地质地段的大断面、浅埋水底隧洞的施工难度较大,能否顺利施工的关键是针对地质情况采用相应的工程和施工措施。预先灌浆形成了阻水屏障,地下水渗流量由灌浆前的 50 m³/h 减小到 10 m³/h,使地下施工得以进行,并有利于围岩的稳定,预先锚固薄覆盖层,大幅度地提高了围岩的自稳能力,洞口浅埋段布置管棚超前支护,进一步增加了洞口的稳定;根据不同的地质条件采用不同的分部开挖方法,先墙后拱混凝土衬砌支护、喷锚支护时跟进掌子面等工程和施工措施是积极和稳妥的,确保了工程安全。在整个施工过程中,经过业主、施工、监理及设计等单位人员同心协力地不断修改完善工程和施工措施,使工程能安全顺利完成,未发生任何塌方事故。