

水轮机气蚀的在线监测和相对测试

王广成¹ 尉青连¹ 刘守茹¹ 林海波²

(1. 白山发电厂 吉林桦甸 132400; 2. 深圳市众大成集团公司 广东深圳 518026)

【摘要】 结合白山水电厂机组状态监测系统自动化改造,详细阐述了水轮机气蚀在线监测系统及其系统标定,同时也列举了水轮机气蚀监测系统在机组状态检修的分析、诊断中的巨大作用,以及能为机组的状态检修提供科学依据。

【关键词】 水轮机 气蚀强度 调制解调 气蚀频谱 检修

【数据库分类号】 SZ07

随着水电厂计算机监控系统日益完善,电力企业改革的不断深入,实施竞价上网、厂网分开、降低成本,机组的在线监测和状态检修也被提到议事日程。水轮机气蚀监测一直是很难解决的问题。从测试的方法来看基本上采用声学法、电阻法、加速度法,无论哪一种方法都不能对水轮机气蚀进行定量的精确测量,都只是定性的相对测量,目前国内水电厂的水轮机气蚀监测还没有比较成熟的经验。所以结合白山电厂的自动化改造,介绍一种国际比较先进的水轮机气蚀在线监测方法。

白山电站机组单机容量 300 MW,在系统中担任调峰、调频、事故备用的作用,开停机及调节比较频繁。使机组经常处于非最优工况下运行,白山站水头较高,使得白山站机组的气蚀破坏非常严重,而又没有任何监测手段,严重影响机组效率,降低了水能利用率。由于水轮机叶片气蚀破坏严重,再加上有时检修工期不够,往往修复后的叶片达不到原设计的光洁度和翼型要求,造成恶性循环。大修处理时间过长,降低了机组可利用小时数。为了能够准确地监测水轮机的气蚀强度,使机组能够在高效率区运行,减少水轮机叶片的气蚀破坏,通过对气蚀量历史数据的累积测量,可以标定水轮机的气蚀破坏程度,准确决策机组的检修间隔,为机组由计划检修向状态检修过渡奠定基础。

气蚀是指由于加速流动的水(液体)内部压力降低到汽化压力以下后,水(液体)汽化而产生气泡或气穴,随后在压力较高的地方气泡或气穴又重新凝聚的过程。当气泡或气穴随着水流一起进入高压区而凝聚时,由于时间非常短促,造成频率极高的爆炸,产生压力很大的微观水击,使固体壁面遭受疲劳破坏。气蚀现象常常在间隙中和过流表面不平整处产生。如转轮叶片外缘端面与转轮室的耦合间隙、转轮叶片根部与转轮体之间、转轮叶片的吊孔附近、转轮叶片的背面等地方。但是转轮叶片上产生的气蚀才是导致机组效率降低和较大经济损失的主要原因。

水轮机气蚀破坏一直是棘手的问题,水轮机气蚀破坏缩短了机组的大修周期,严重影响机组的安全运行。由于水轮机气蚀破坏修复时机的选择缺乏技术依据,目前仍实行传统的计划检修方式。美国 O. R. E 公司 7915 气蚀监测系统(CMS),可以提供水轮机转轮气蚀程度的在线监测。该系统使用 DSP(数字信号处理)技术来监测气蚀噪声,并实时显示气蚀的开始和相应的气蚀强度,不断测量并累计气蚀的损害程度。根据测量结果,可以对机组运行工况进行优化,如果将 CMS 数据和转轮实际维护的历史数据相互对照,则该系统可对检修提供技术参考依据。本文列举了几种气蚀现

收稿日期:2001-04-09。

象和成因,分析了在线气蚀检测的原理,并结合现场实际对气蚀的检查和评定做了进一步的讨论。

反击式水轮机在其运行时,在转轮出口和尾水管进口处往往形成负压,当压力降低到小于气化压力时,水就汽化,在水流中产生许多气泡,气泡随着水流移动到压力较高处,便骤然消失。在此瞬间,水流质点以高速度向气泡中心撞击,水流质点这种高速度的碰撞会引起水压力的增高(有时达几十到几百个大气压),然后被强烈碰撞而压缩的水流质点,又向相反的方向扩散,从而造成气泡处的压力急骤降低。这样就形成气泡中心的压力,在一段时间内周期性的波动。

这种由气泡的产生和消失过程中引起的一系列现象称为气蚀现象。根据现代对气蚀的研究,虽说还不够充分,但比较成熟和一致的解释,除上述周期性的压力波动外,还有下列现象:

当压力降低到饱和蒸气压时,水流不仅产生气泡,溶解在水中的气体也以气泡形式逸出,这种空气泡会随着水流排出。

当气泡的产生和消失发生在固体表面时,水流质点高速度的周期性冲击象锐利的刀尖一样剧烈地打击着固体表面,造成固体表面的机械破坏,称为剥蚀。如果固体表面粗糙,则剥蚀更严重。

此外,气泡受压缩时,由于体积缩小而温度升高,再加上水流质点相互高速度的撞击和对固体的撞击也产生热量,实验证明,当气泡凝结时,所引起的局部温升可达 300℃ 左右,使得冷热固体形成了热电偶,彼此间产生了电流,这是固体表面遭受侵蚀的电化学原因。

根据气蚀发生的条件,水轮机中的气蚀一般可分为 3 类:

翼型(叶型)气蚀这是反击式水轮机普遍具有的气蚀现象。水流流经叶片时,在叶片表面形成压力差,使转轮旋转作功。通常叶片的正面是正压力,而背面是负压力,这种负压是转轮作功所必须的,但它又造成了气蚀条件。从理论上讲,这个气蚀条件可从水轮机安装高度上加以解决,所以叶型气蚀的产生的主要原因是由于转轮叶片制造中不符合模型要求而引起的。在运行中由于运行工况不良也会引起叶型气蚀。

当水轮机运行在低水头(低于设计水头,特别是在转轮允许的最小工作水头附近)和低负荷运行时,水流经过叶片就会产生脱流和旋涡,转轮出口处每一个叶片形成一个旋涡,在加上整个转轮出口的旋转水流,就在转轮和尾水管进口处形成一个大旋涡(或大涡带)。其旋涡中心产生很大的真空,形成空腔气蚀,这种旋涡以一定的频率在尾水管内旋转,而其中的真空带周期性的扫射在尾水管的四周壁上,结果是一方面造成尾水管壁的气蚀破坏,另一方面产生周期性的压力波,形成强烈噪音,严重时可引起整个机组振动。

在导叶下端间隙处,导叶关闭时导叶与导叶立面间隙处,以及转轮止漏装置间隙处,当水流通过这些较小的间隙时,流速产生局部增高和压力降低因而产生气蚀,这种现象称为间隙气蚀。当机组在低负荷运行时,导叶开度较小,局部流速增高,压力降低,很容易产生间隙气蚀。

以上 3 种气蚀,最普遍、危害最大的是翼型气蚀,它造成电站的经常检修,空腔气蚀危害也很大,但不象叶型气蚀那样普遍。

水轮机产生气蚀时,破坏转轮,使水轮机效率降低和出力不稳。因此在水轮机运行时应尽量设法减轻气蚀。

采用全波整流频谱分析的方法进行气蚀监测的原理

采用全波整流频谱分析的方法,分析有关水轮机气蚀的辐射波,可确定产生气蚀的机组运行工况。

水轮机中的水流状态是不稳定的,但由于转轮旋转而形成的决定气泡的产生和爆裂的条件是周期性重复的。这种重复的汽泡爆裂过程,在转轮叶片或其它现场部件的金属表面造成极大的疲

劳破坏和腐蚀,同时也产生了可以测量的声音压力波,并引发振动噪声。该高频振动噪声信号被导叶通过频率(BPF)和转频(1X)调制。全波整流频谱分析的方法就是根据引起气蚀水流状况周期性变化的实际特点,检测被以叶片通过频率(BPF)或主轴通频(1X)调制的宽带气蚀噪声信号(random high frequency vibration),监测由气泡爆裂形成的压力波在水轮机部件上引发的振动。实际证明,全波整流频谱分析是一种分析水轮机气蚀声谱的重要技术。气蚀噪声振动信号的数学模型可表达为:

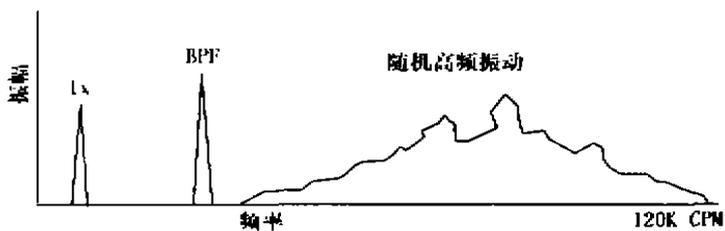


图1 气蚀信号频谱图

$$x(t) = [1 + \sum_{i=1}^{\infty} C_i \gamma_i] \sum_{j=1}^{\infty} \eta_j(t)$$

其中 $X(t)$ 为被测振动噪声信号;

$\eta_j(t)$ 为被调制的简谐高频气蚀信号;

$\gamma_j(t)$ 为低频简谐(转频、导叶通过频率等低频信号)调制信号。

气蚀监测采用加速度传感器,它记录振动噪声并将信号按比例放大输出(dB/g)。加速度传感器的典型安装位置是导叶连杆,同时传感器电源和放大器也就近安装。

由于振动加速度信号会出现调制特性,故解调处理是气蚀诊断的基本处理手段,全波整流频谱分析可定义如下:

设有调幅信号 $x(t) = \gamma_j(t) \eta_j \cos(\omega_c t)$, 令 $a(t) = \gamma_j(t) \eta_j$ 为随时间变化的幅值, $a(t)$ 中包含了气蚀振动噪声信号的幅值信息,且 $a(t) \geq 0$, 其最高频率为 ω_a , ω_c 为气蚀噪声频率,有 $\omega_c \gg \omega_a$ 。那么:

(1) $x(t)$ 的绝对值算子运算为:

$$A(x(t)) = a(t) \cos(\omega_c t) = a(t) \left(\frac{2}{\pi} + \frac{4}{3\pi} \cos(2\omega_c t) - \frac{4}{15\pi} \cos(4\omega_c t) \right) L \quad \text{LPF}$$

对式(1)的绝对值算子运算结果进行低通滤波有:

$$(2) A_{\text{LPF}}(x(t)) \approx \frac{2}{\pi} a(t)$$

其中 LPF: 低通滤波。

由此可知,通过低通滤波器滤除高频成分,再经过窄带(100 Hz)的高分辨率的频谱分析就可以解析出气蚀信号被转频和导叶通过频率调制的幅值信息,而无须针对高频信号采用高速的采样速率。这一过程也称为包络解调。

在实际的气蚀监测系统中,原始的传感器信号经过放大器放大后接入系统,信号经过 10~20Hz 的滤波后,再进行全波整流,最后通过傅立叶变换生成声强级 dB/g-频率曲线(Hz)。

系统还可以同时对流量、导叶开度、机组负荷以及水头数据录波,显示频谱和数据存盘。

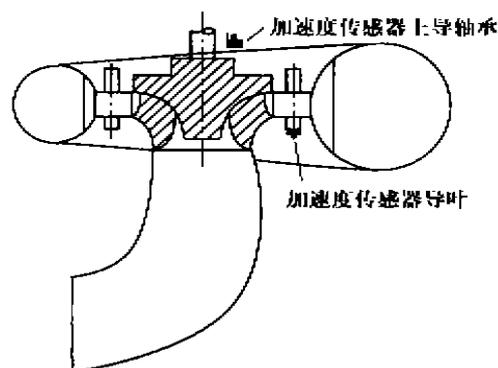


图2 气蚀监测用加速度传感器安装示意图

以叶片通过频率调制的噪声谱线的振幅用叶片通过调制电平(BPML)来定义。频率为叶片通过频率(BPF)的谱线上的一个尖峰代表了在转轮或叶片上产生了气蚀;而为主轴通频(SPF)或稍低频率的谱线上的一个尖峰往往代表翼形气蚀。叶片通过调制电平(BPML)信号出现高于宽带振动噪声 3~5 dB 的点时,我们就可以说气蚀发生了。BPML 与噪声辐射能量成对数关系。

$$\text{即: BPML} = 10 \lg(W/W_0) \left(10^{\frac{\text{BPML}}{10}} \propto \pi_{\text{rad}} \right)$$

其中 W: 声功率(声源在单位时间内发出的总功率)

W_0 : 基准声功率 = 10^{-12} W

这样, BPML 每增加 10 dB 就会引起噪声辐射能量的 10 倍增加(可以认为造成了相当量级气蚀破坏),例如, BPML 增加了 20 dB, 则相应的能量增加 100 倍。

水轮机气蚀监测在线系统(CMS)通过水轮机的声波辐射来监测腐蚀情况, 确定转轮上所产生的腐蚀程度。当采用永久(在线)监测模式时, 系统不断测量并累计气蚀的损害程度。如果将 CMS 数据和转轮实际维护的历史数据相互参照, 则该系统可被用来预测检修维护计划(包括停机大修)。

实际证明, 全波整流频谱分析是一种分析水轮机气蚀声谱的重要技术。7915 型 CMS 使用的全波整流频谱分析正是利用了引起气蚀水流状况的周期性变化的特点, 检测以叶片通道频率或主轴通频被调制的宽带信号。7915 CMS 系统配置如图 3。加速度传感器安装如图 4。

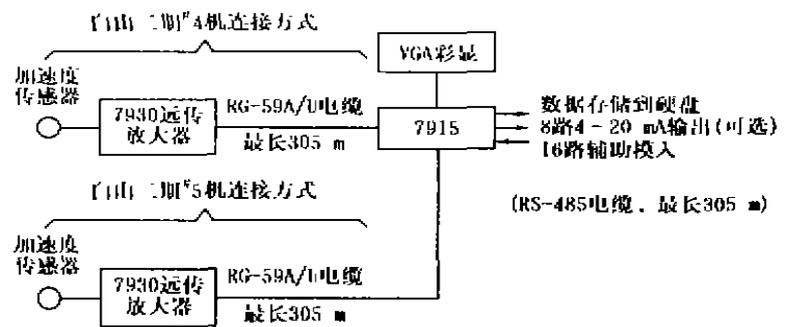


图3 7915 CMS 系统配置图

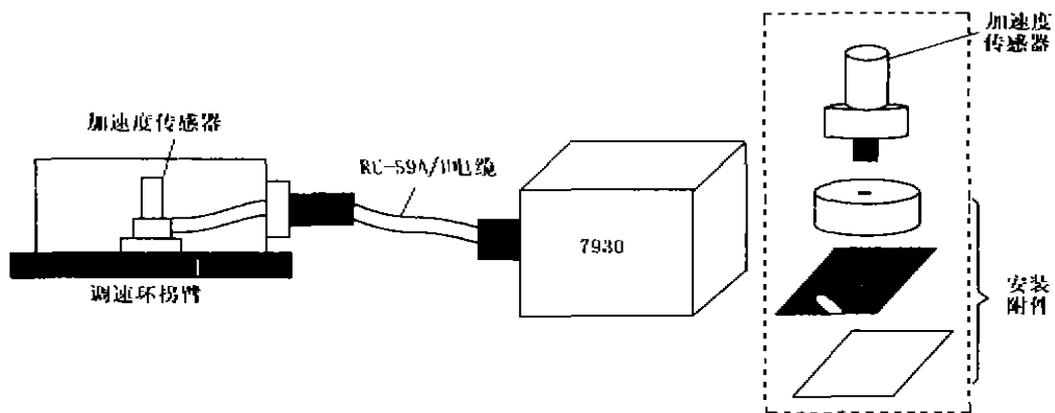


图4 加速度传感器安装连接图

下面通过白山发电厂实际试验数据说明水轮机气蚀 7915(CMS)监测系统功能:

- (1) 可以测试水轮机气蚀强度, 设置报警门限, 并用棒图显示。图 5a 为白山站二期#4 机 302 MW 负荷下的气蚀强度 -32.1 dB, 达到了报警门限(黄色区出现); 图 5b 为白山站二期#5 机 160

MW 负荷下的气蚀强度 -44.5 dB,未达到报警门限(黄色区未出现)。

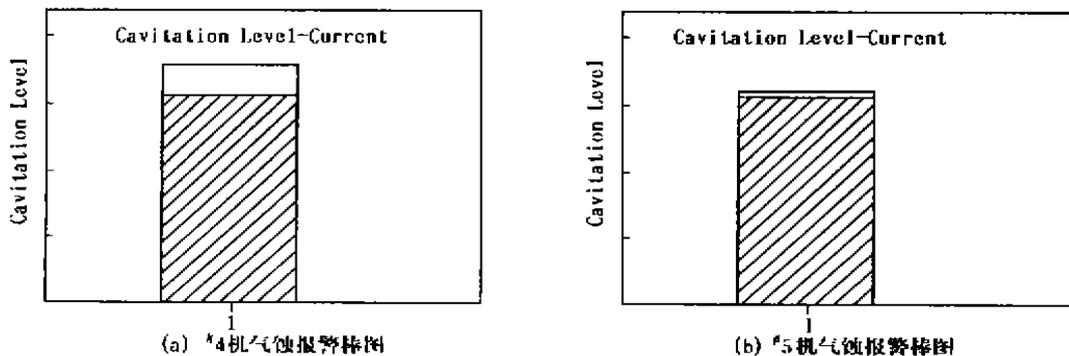


图5 气蚀报警棒图

(2) 可以测试水轮机气蚀强度频谱图(如图6),进行频谱分析。白山站水轮机叶片通频为 $f_3 = \frac{\pi r}{60} \times Z_3 = \frac{125}{60} \times 14 = 29.1 \text{ Hz}$,从下面白山#4机 290.7 MW、276.7 MW、253 MW、194 MW 负荷下的频谱图可以很清楚看出发生在叶片通频气蚀强度信号。机组负荷在 290.7 MW、276.7 MW 叶片通频气蚀强度较大,并且突出,运行工况不好,发生严重气蚀;在 253 MW、194 MW 叶片通频气蚀强度很小,运行工况好,发生气蚀较轻。

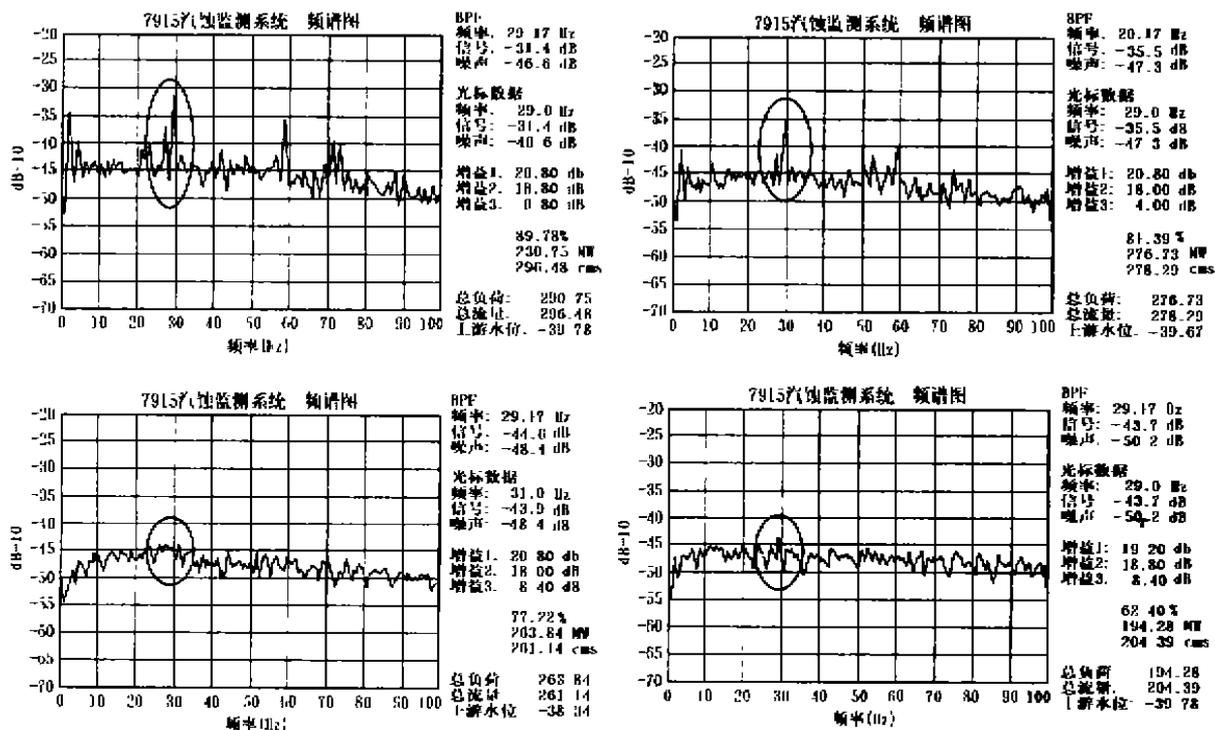


图6 白山#4机在 290.7 MW、276.7 MW、253 MW、194 MW、负荷下的气蚀频谱图

(3) 测试试验后可以自动绘制水轮机气蚀映射曲线图,进行工况分析。图7、8为白山站#4机7915气蚀监测系统安装后试验映射曲线,图7为按负荷变化由320 MW降到空载的气蚀映射图,图8为按导叶开度变化由空载升到320 MW的气蚀映射图。图7机组在100 MW~130 MW、280 MW~320 MW水轮机进入气蚀区,属非优工况;150 MW~270 MW气蚀较小,属最优工况。图8导叶开度在大于78%水轮机进入气蚀区,属非优工况;其它开度均气蚀较小。在做升负荷试验时,机组运行台数增加,下游尾水位抬高,Hs绝对值增大,比降负荷的气蚀特性好,曲线除开度大于78%以外,均在气蚀非严重区以下。

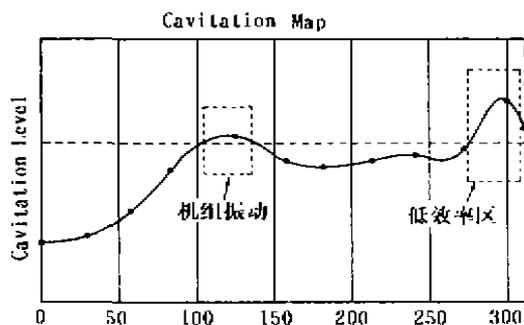


图7 #4机320 MW降到空载的气蚀映射曲线

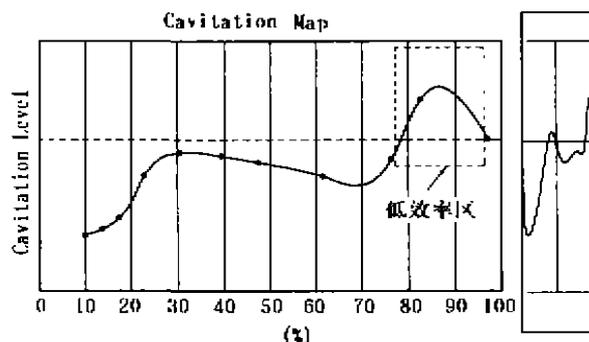


图8 导叶开度由空载升到320 MW的气蚀映射曲线

图9、10为白山站#5机7915气蚀监测系统安装后试验映射曲线,很容易找出气蚀区,非优工况;可以提醒调度使机组在气蚀特性好的区域运行,减轻气蚀对水轮机的破坏。

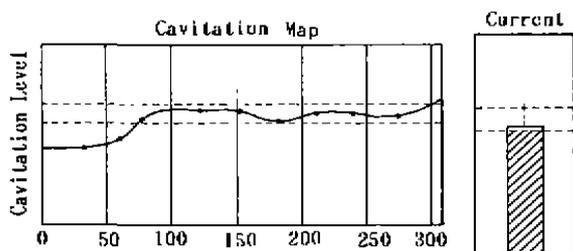


图9 #5机降负荷气蚀映射曲线

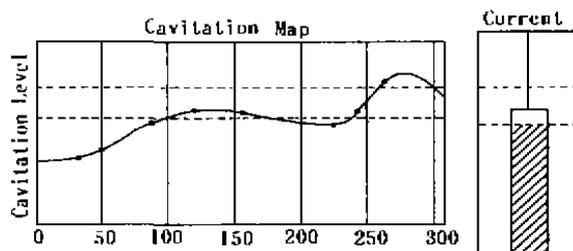


图10 #5机升负荷气蚀映射曲线

(4) 可以自动存储水轮机气蚀历史趋势曲线图,进行历史资料的积累及运行分析。图11为采集#4机2000年10月份1个月的历史趋势曲线,图12为采集#5机2000年9月份一个月历史趋势曲线。通过趋势曲线可以查到机组备用状态、运行状态在各种水头下的气蚀情况。

(5) 以自动存储水轮机转轮气蚀累积量,并以棒图形式显示,进行水轮机转轮气蚀情况标定,预测转轮的检修间隔。图13为白山#5机从1999年11月16日~2000年10月3日和白山#4机从1999年6月11日~2000年10月3日的气蚀累积量,#4机为2.23,#5机为1.54。待两台机组下次大修前记录气蚀累积量、机组运行天数、各种工况运行小时数。计算水轮机转轮的实际气蚀损失量 $V = \frac{\sum 1}{2h_{\max} A_i}$, 侵蚀指数 $K = \frac{V}{FT}$, 就可以人为标定出每台机组转轮的检修区,就象图14的红色区域,大修结束后气蚀从零开始累积,当气蚀累积量到达红色区域,系统自动提醒该机组转轮应该进行检修。

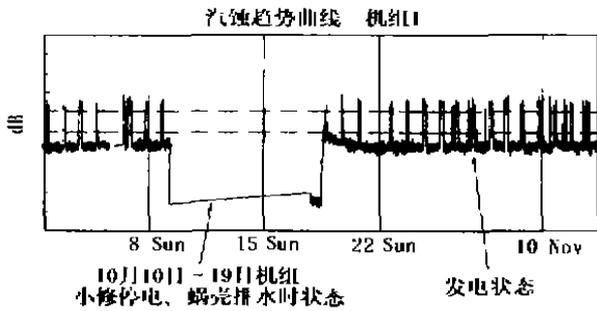


图 11 #4机 2000年10份一个月的历史趋势曲线

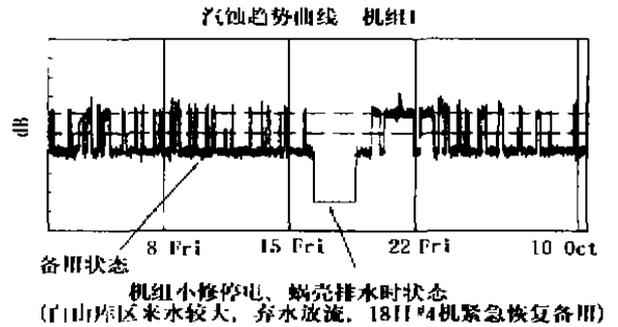


图 12 #5机 2000年9月份一个月的历史趋势曲线

(6) 7915CMS水轮机气蚀监测系统可以输出4~20 mA模拟量气蚀强度,通过现地控制单元LCU与计算机监控通讯,在线监测水轮机的气蚀情况,测量范围为-70~-20 dB,当水轮机气蚀强度超过-39 dB监控系统自动报警,提醒运行调度机组进入气蚀严重区,这样可以根据实际情况调整运行工况,减轻转轮的气蚀破坏,提高机组效率。

另外,在进行水轮机气蚀测试试验时,工况点采集要密一些,这样在试验得到的映射曲线不丢点,准确反映水轮机转轮的实际气蚀规律。同时必须准确记录以下数据:机组出力、上下游水位、蜗壳压力、导叶开度、尾水管压力脉动等数据,便于试验后的分析。

7915气蚀监测系统(CMS)主要用于检测水轮机转轮叶片表面气蚀情况。该系统的功能在于降低气蚀影响、减少腐蚀损害、标识最佳运行区域、指示累计损害、提高机组性能。该系统不断地测量气蚀程度,以使用户优化机组运行、记录相应机组的气蚀数据,为转轮的检修提供科学依据。使机组能够在高效率区运行,减轻水轮机叶片的气蚀破坏。同时通过对气蚀量历史数据的累积测量,可以标定水轮机的气蚀破坏程度,准确决策机组的检修间隔,为机组由计划检修向状态检修过渡奠定基础。

负荷	28.88	流量	39.20	上游水位	34.03
	56.3		50.1		气蚀强度
	2.23		1.34		气蚀累计

气蚀强度棒图 强度累计

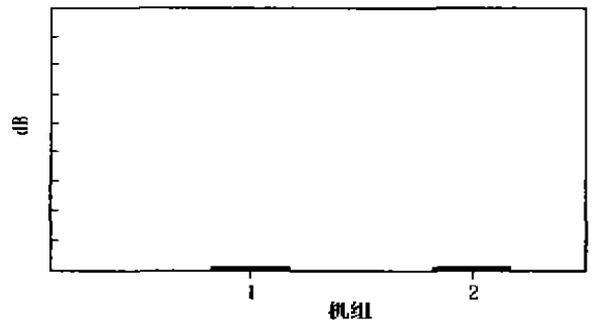


图 13 #4机#5机气蚀累计量棒图

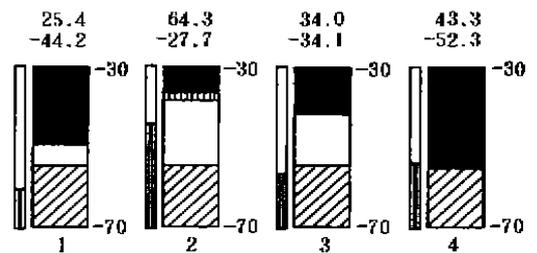


图 14 水轮机气蚀累计报警棒图

王广成 男,硕士,白山发电厂生产副厂长,高级工程师,从事电厂的生产管理工作。

尉青连 男,工程师,白山发电厂自动化专责,从事水电厂自动化改造及机组状态检修工作。

刘守茹 男,白山发电厂自动化处处长,高级工程师,从事水电厂自动化改造及机组状态检修工作。