



灯泡贯流式水轮机水力振动的形成及其影响

文◎ 刘宇华 (哈尔滨电机厂有限责任公司)

摘要: 灯泡贯流式机组, 具有适用水头低、过机流量大以及效率高特点, 广泛用于开发低水头水力资源。但由于机组转动惯量小, 使得 T_w/T_a 值较大, 相应水轮机水力振动对其影响也较大, 文章就水力振动的形成以及对机组的影响进行了分析, 供同行们参考。

关键词: 灯泡贯流式水轮机; 水力振动; 影响

一、灯泡贯流式水轮机的结构特点

(一) 支撑方式

整个灯泡是一个大型薄壳外压力容器, 除承受机组本身的自重外, 还要承受水压力、浮力、正向水推力、反向水推力、振动力矩、电磁力矩等荷载, 因此灯泡机组的支撑体起着举足轻重的作用。主支撑由管型座 (俗称座环) 承担。

在灯泡头的低部设有一个球型支撑 (为奥地利 ELIN 公司的专利), 其特点是允许灯泡头 (即轴向和径向) 有微小的变形, 并可减少振动。另外的灯泡头的两侧还装有两个横向支撑, 它与管型座、球支撑共同对灯泡形成一个稳定的支撑结构。

(二) 轴承

机组转动部分为二支点双悬臂结构, 设有发电组合轴承和水导轴承, 两套轴承共用一套轴承润滑油装置。组合轴承位于发电机的下游侧, 由正推力轴承、反推力轴承和发导轴承组成; 水导轴承在水轮机大轴密封的上游侧。该电站设计要求正推可承受 4500KN 的连续荷载, 反推力轴承可承受 5400KN 的瞬时负荷; 发导和水导轴承作为支撑发电机转子、水轮机以及大轴等重量, 可承受 1180KN 的连续荷载。

二、运行现象

灯泡贯流式机组由于其结构的特殊性, 它靠管型座、灯泡头底部的主支撑以及两根斜支撑固定整个机组, 机组稳定性有其先天不足, 故相对其它形式的机组而言, 振动对其质量的影响更为严重, 在某发电厂就多次出现齿盘测速探头被磨损, 造成其更换频繁, 备品消耗严重; 由于振动, 多次出现导叶、轮叶位置传感器电气连接插把松动脱落而引起机组停机或甩负荷; 另外, 在水轮机室的噪音也特别大 (有时高达 110db), 对运行人员身心健康不利。下面就灯泡贯流式水轮机水力振动的形成、危害、运行注意事项进行简单分析, 为机组运行和维护提供依据。

三、灯泡贯流式水轮机水力振动

水力振动是机组振动的重要干扰源, 就灯泡贯流式水轮机而言, 水力振动主要由以下原因引起, 即: 涡带振动、卡门涡列、狭缝射流、协联关系不正确等。

(一) 涡带振动

根据速度三角形可以知道, 由转轮流出的水流方向, 在最优工况时, 大致为轴向, 但是, 机组负荷不可能总是在设计工况运行, 当负荷大于最优工况时, 水流就具有与转轮旋转方向相反的旋转分量; 而负荷比最优工况小时, 就具有与旋转方向同向的旋转分量, 这样, 在尾水管中心附近就产生具有某个边界层的旋转涡带。涡带中心压力较低, 在尾水位低时, 其中心部分压力更低, 形成汽蚀, 这就是一般称

为的“空腔汽蚀”。在高负荷运行时 (水轮机额定出力周围), 涡带往往比较稳定; 而在低负荷运行时, 涡带成为龙卷状, 在尾水管内旋转摆动, 从而在尾水管内引起压

力脉动, 在水轮机运行层可以听到“空空”的声响。其压力脉动频率为:

$$f = n / (60Z)$$

式中 f 压力脉动频率 (Hz)
 n 水轮机转速 (r/min)

Z 经验值, 一般取 3~4 (有时也接近于 1~5)

压力脉动的频率和幅值是随机组工况的变化而变化的。假若与过水系统水压脉动频率共振时, 就造成水轮机整个过流系统的强烈水压脉动; 即尾水管、管型座和电站水工建筑物等的振动。并且会引起机组转速不稳定, 造成并网困难, 这在电站已经出现过。另外, 当电站机组处于“飘逸”泄水工况时, 尾水管进出口的压力脉动值更大, 有时达到净水头的 14% 左右; 此时机组的振动增大, 引起的噪音也随之增加 (高达 110 分贝左右)。

(二) 由卡门涡引起的振动

卡门涡是一种涡列, 当流体流过一圆柱体或板 (包括一般不绕流体) 时, 在物体后面就会沿着两条互相平行的直线产生一系列相隔一定距离的单涡 (见图 1)。这一系列单涡称之为卡门涡列。各个单涡以相反的旋转的形式交替在物体两后侧释放出来, 与此同时, 物体就受到与来流方向垂直的很强的交变力。这种交变力与旋涡频率相同。其振动频率为:

$$f = St \times V / \delta$$

式中 f 振动频率 (Hz)
 St 斯特雷哈系数 (一般取 0.15~0.2)

$$V \text{ 绕流流速 (m/s)}$$

$$\delta \text{ 圆柱体直径或板厚 (m)}$$

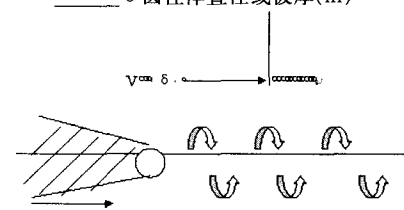


图 1 卡门单涡示意图

这种涡列在水轮机运行中也经常出现, 导叶和轮叶在具有钝尾时, 就会在叶片后面出现卡门涡列, 产生作用在叶片尾部的交变力。假若交变力的频率与叶片固有频率相等时, 就会产生共振, 发出叶片振动的啸叫声, 使叶片与转轮轮毂连接处 (或导叶与外配、内配连接处) 产生疲劳裂纹, 因此, 在机组检修过程中, 应特别注意疲劳裂纹的检查。

这种涡的发生与否, 与水流中物体的形状有关, 其频率受水流流速的影响。因此, 流速达到某一值, 共振条件一成立, 就会发生强烈的振动。所以实际水轮机在运转时, 卡门涡列引起的振动是在一定的工

况下发生。下面列出卡门涡列与涡带的区别 (见表 1), 以供运行人员在水轮机实际运行中参考。

表 1 涡带与卡门涡列的区别

项目类别	数学模型	形成部位	与水轮机工况的关系	引起的后果	作用在物体上的力	声音
涡带	$f = n / (60Z)$	尾水管中部附近	压力脉动的频率和幅值随工况而变化	引起机组转速不稳, 难以并网	压力脉动	“空空”的声音
卡门涡列	$f = st \cdot v / \delta$	导叶、叶片处	一定工况下	产生疲劳裂纹	交变力	啸叫声

(三) 狭缝射流

在灯泡贯流式水轮机中, 由于转轮叶片的工作面和背面存在着压力差, 在轮叶外缘和转轮室之间的狭窄缝隙 (电站叶片与转轮室的间隙是 7mm) 中, 形成一股射流, 其速度很高而压力非常低。在转轮旋转过程中, 转轮室壁的某一部分在叶片达到的瞬间处于低压; 而在轮叶离去后又处于高压, 如此循环, 形成了对转轮室壁的周期性压力脉动, 从而产生振动, 导致疲劳破坏。这种振动的频率为:

$$f = (Z1n) / 60$$

式中 f 压力脉动频率 (Hz)

n 水轮机转速 (r/min)

$Z1$ 叶片数目 (4片)

(四) 协联关系不正确引起的振动

根据运行经验, 当转桨式水轮机中协联关系不正确时, 一方面会引起调速器系统持续振荡过程变长, 机组出力、转速发生振荡, 转动部分扭矩就会引起大轴变形, 而使转子产生扭转振动; 另一方面, 由于水流情况恶化, 在水导轴承、组合轴承处引起轴向振动, 对于该电站 (转轮直径 7000mm) 而言, 这种情况表现更为强烈。

同时, 协联关系不正确时, 转轮叶片不再具有无撞击进口, 水流对叶片就会产生冲击, 在不断的调节过程中, 由于冲角随时在变化, 作用在叶片上的负荷及由此而产生的叶片扭矩、变形等也相应变化, 这些变化过程就反映了振动的进程。

(五) 其它原因引起的振动

当水轮机汽蚀严重时, 同时产生机械振动和噪音, 特别是在低水头低负荷时, 转轮叶片冲角变化较大, 使叶片产生强烈的脱流旋涡, 一方面恶化汽蚀现象, 另一方面引起转动部分和尾水管的振动, 这种振动频率没有一定规律。这种振动称之为由汽蚀引起的振动。另外, 在停机或甩负荷导叶快关时的反水锤, 也会引起机组振动。

四、结束语

我国国土辽阔, 低水头资源相当丰富, 灯泡贯流式机组作为开发低水头资源的既经济又适用的主导机型, 已在国内外广泛应用, 但其水力振动和噪音普遍偏大, 如何减少机组振动和噪音, 是设计人员、科研工作者以及现场运行人员应当综合考虑的问题。

参考文献:

[1] 李盛林, 刘国柱 主编《水轮机》第二版 1985。