

# 某大型泵站机组振动原因分析及防振临时工程措施试验研究

邱静 黄东 练伟航 赖冠文 黄本胜 张政 赖翼峰 张魏 袁世娟 张嘉勋 陈穗  
(广东省水利水电科学研究院, 广州, 510610)

**摘要:** 水泵的机组振动会引起泵站抽水效率的降低, 并可能导致机组的零部件寿命缩短等一系列问题。而引起泵站振动的原因较为复杂, 可能是电力、机械方面的原因, 也可能是水力方面的原因。某大型泵站试运行后出现不规则的机组振动, 泵站业主曾邀请各方专家进行会诊, 都未能找出振动的原因。本文通过对泵站运行及振动的资料的深入分析, 并对进水前池及流道的流速流态进行了观测, 结合防振工程措施的现场试验, 最终弄清了机组振动的原因, 提出了有效的防振临时工程措施。

**关键词:** 流道 前池 振动 漩涡 气囊 回流

## 1 前言

某大型抽水泵站设计抽水流量为  $90\text{m}^3/\text{s}$ , 安装了 8 台斜流泵, 其中 6 台为工作泵, 2 台为备用泵, 水泵的单机设计流量为  $15\text{m}^3/\text{s}$ , 设计扬程为 26.6m。泵站开始试运行后, 部分机组出现了不规则的机组振动, 机组振动带来了泵站抽水效率降低并可能导致机组的零部件寿命缩短。为了分析机组振动原因, 研究防振工程措施, 我们通过对泵站运行及振动的资料的深入分析, 并对进水前池及流道的流速流态进行了观测, 认为泵站机组振动的内因是泵体结构设计上存在排不掉的气腔(见图 1), 在一定的因作用下, 如动水压力的变化压缩气囊, 诱发机组振动。而引起机组振动的外因有二: 一是流道进流不均匀, 流道进口绕流生涡和流道内水流受剪切生涡, 在吸头周围形成吸气漏斗涡, 空气被吸入泵体后形成大大小小的气囊, 随压力的变化被压缩迅速爆裂, 引起机组振动, 甚至造成汽蚀; 二是流道进流不均匀, 也在一定程度上影响吸头进流不均匀, 又进一步加强漩涡的影响(尽管可能未形成吸气涡, 但由于漩涡的生成、运动至消失的过程中, 吸头周围的静、动水压力都随之变化, 吸头进流也受到扰动而变化), 吸头进流及压力受扰动而变化, 引起泵体内部动水压力变化, 空腔气囊受压缩膨胀, 引起机组振动。

根据现场调查和观测的资料分析认为流道漩涡的存在可能是引起振动的主要原因, 可通过寻求改善进水流道流态的工程方案, 在消除漩涡的同时看能否消除振动, 从而进一步探明机组振动的原因。

## 2 研究方法及技术路线

如前所述, 引起本泵站机组振动可能有三方面的原因: 流道漩涡的存在; 水泵吸水头部进流不均匀; 水泵在排气设计上存在缺陷。要消除这三方面的隐患, 进一步确诊机组振动的原因, 可以进行下列现场试验: 在流道设置胸墙、漂浮式消涡栅, 消除流道内漩涡; 设导流锥或流线形阻涡板等, 改善吸水头部的进水流态, 但由于现场试验水泵的吸水头部流速无法测量, 现场试验难以实现; 水泵排气设计上的缺陷, 可通过在空腔顶部打排气孔, 将空气排走。

受泵站运行和现场条件限制, 试验难以进行, 而初步分析认为流道内漩涡的存在可能是引起机组振动的主要原因, 因此, 本研究主要是通过现场流道试验, 进一步探明机组振动的原因, 研究改善流道流态从而消除机组振动的工程措施。

具体的技术路线是, 在流道内设胸墙或漂浮式消涡栅, 对表层水流的结构进行调整, 改变表层水流偏流及因而引起的剪切生涡的流态, 从而抑制流道内吸气漩涡的生成。在设计运行工况及

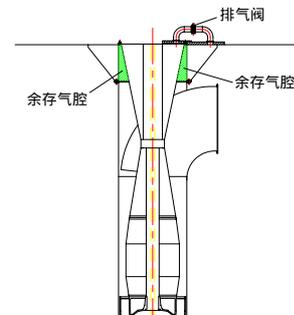


图 1 泵体结构示意图

相应的水力条件下，通过对工程前后现场水流流态的观测，典型断面流速、水位的测量以及机组瞬时振动值的监测，并经理论分析得出研究结果，提出最大限度消除机组振动的临时工程措施方案和机组运行调控的建议，以及下一步研究永久工程措施的有关工作的建议。

### 3 不同工况下的流态观察及振动原因分析

#### 3.1 不同工况下的流态观察

对机组运行组合分别为 1 台、3 台、4 台、5 台机(流量  $Q=15 \sim 75\text{m}^3/\text{s}$ )，进水前池水位  $Z=9.7 \sim 10.6\text{m}$  的不同工况组合进行的现场测试和观测表明：机组振动的频率、幅度与流道的流态有直接的关系：流道内流态越紊乱，直径较大（40~60cm）的漩涡越多，漩涡的强度越强，机组振动的频率越高、振幅越大；单机运行时，流道内的流态较平稳，进口流速分布均匀，尽管吸水头部后侧存在直径较小的漏斗涡，也不足以使机组产生明显的振动；而在多台机（4 台机以上）运行，水位较低的工况下；流道进口流速出现较大的偏流，吸水头部出现外环流，流道内存在较大范围的回流区，流速较大的水体与回流区的水体产生剪切，使流道内不断出现直径较大的漩涡，漩涡随水流在回流区游动，并在游动的过程中不断加强，直至碰到流道边壁或障碍物才破坏、消失。这时泵站机组发生的振动频率及幅度都远远超出了安全运行的要求，是设计所不允许的。泵站运行人员为了降低机组的振动频率，将水泵顶部的排水阀长期打开，使进入泵体内部的气体排走的同时，与气体同时排出的水体跌落流道内，也在一定程度上破坏了流道内的回流及漩涡流态，明显地降低振动的频率，但水体的排出也降低了水泵的抽水效率，而且，水体的跌落也对水泵附近的建筑物造成一定破坏。

流道的流态与前池的流态直接相关，前池的流态平稳，流道的进口前水流平顺，进口流速分布均匀，吸水室内的水流平稳，吸水管外不会形成外环流，流道内也无回流和较大直径的漩涡；反之，前池的流态恶劣，流道进口前流态紊乱，横向流速、漩涡等都对流道进口及流道内的水流流态产生直接的影响。

单机运行时，上游来流的流速小，进水前池的流态平稳，流道进口前的水流平顺，进口流速分布均匀，流道内无回流和漩涡。多台机（4 台机以上）运行，前池水位较低的工况，引水明渠出口的流速较大，在进水前池未得到较好的调整，在前池产生局部回流，并在流道进口产生漩涡和不利于水流平顺进入流道的横向流速，导致流道进口流速分布不均匀，产生偏流现象，偏流存在促使吸水头部出现外环流，外环流导致吸水头部的一侧出现局部回流区，回流存在产生漩涡，从而引起机组振动。因此要彻底地调整流道内的流态，必须从前池入手，通过整体模型试验，寻找调整前

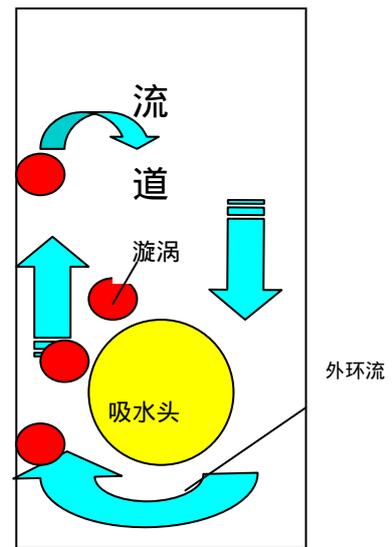


图 2 无工程措施多台机 (>4 台) 联合运行流道水位低于 10m 时的典型流道流态

池流态的工程措施，最终达到改善流道内流态的目的。

#### 4.2 机组振动原因初步分析

如前所述，本泵站的机组振动与流道流态密切相关，根据现场观测，流道内直径较大（40~60cm）的漩涡可能是引起机组振动的主要原因。那么，漩涡是怎样引起机组的振动呢？可从现有的资料做一个初步的分析。

现场的流态观察表明：流道内随机出现系列较大直径的漩涡（40~60cm），漩涡的中间出现明显的凹陷面，由于水面存在漂浮物（泡沫等），无法清晰观察到漩涡是否吸气，但有漩涡就有可能吸气，漩涡的发展是动态的，与其周围的流态密切相关。即便漩涡没有吸气，它的存在也会造成吸水头部附近的水流结构的改变。因此，漩涡的存在可能会引起：

水泵吸入空气，在泵体内部形成气囊，随着局部压力的迅速变化，气囊爆裂（或溃灭）引起振动，甚至汽蚀；

吸水头部进流不均匀,造成水泵内部水动压力的变化,引起水泵局部空腔中的空气囊压缩和膨胀,引起振动;

吸水头部的压力不均匀,造成水泵叶片荷载不均匀,引起水泵机组的振动。

漩涡的存在对机组运行的安全是一个严重的威胁,因此,国家技术监督局和建设部颁发的《泵站设计规范》(GB/T 50265-97)规定:在任何工况下,流道内不应产生涡带。而国家电力公司电力规划设计总院颁发的《火力发电厂循环水泵房进水流道及其布置设计技术规定》(DLGJ150-1999)里规定:进水流道的布置应该具有良好的水流流态,使吸水池内水流顺直、稳定、均匀,具体技术要求:无论是垂直或水平布置的吸水管,接近吸水喇叭口处的水流在宽度和深度方向上应是均匀的;吸水池中不应出现射流、脱流、高速水流、漩流、自由跌落流体及严重的水面波动等水流条件,水面波高不宜超过 0.30m;前池内的平均流速宜小于 0.60m/s,吸水喇叭口附近的平均流速不应大于 0.30m/s。

## 5 防振临时工程措施试验方案

如前所述要消除漩涡,需要对进水流道的流态进行调整,使泵站机组在运行时,进水流道的流态特别是吸水管附近流道面层水流流态均匀平稳,遏制流道内表面漩涡的产生,从而防止表面漩涡吸气。为此,本研究拟定了两个试验研究方案:

### 5.1 胸墙方案

胸墙消涡的机理:在流道进口设置挡水胸墙,拦截前池表面漩涡进入进水流道,并改变胸墙后流道内面层水流的流态及流速分布,迫使进入流道水流从胸墙底部通过,在胸墙后的一段距离在中下部向上溢出,再向四周扩散,从而破坏原流道进口偏流而在流道吸水室内产生的回流区,遏制面层水流产生剪切,从而防止表面漩涡的产生。鉴于现场试验条件的局限性,胸墙方案利用现有的检修闸门和 PVC 板来形成流道胸墙,并根据试验的实际情况调整胸墙的底缘高程:

方案 1 胸墙在检修闸门位置,底缘高程为 9.0~8.0m,见图 3;

方案 2 胸墙在拦污栅位置,底缘高程为 8.6m。

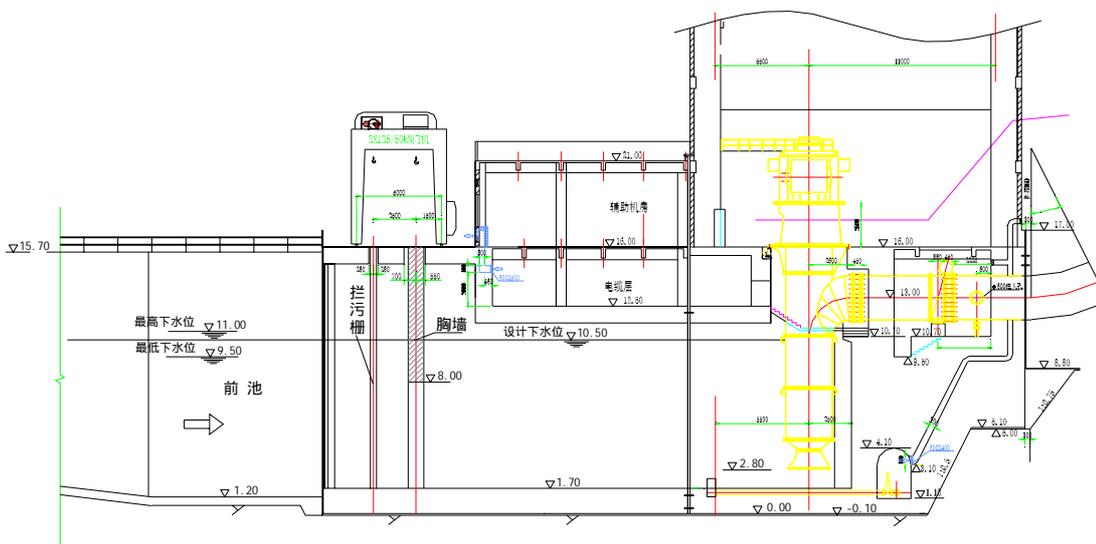


图 3 方案 1 胸墙位置示意图

## 5.2 漂浮式消涡栅方案

漂浮式消涡栅的消涡机理：由于泵站流道的水位有一定的运行范围，为了适应不同的水位情况，在流道内吸水室设置漂浮式消涡栅，阻止表层水流流动，阻止表层水流产生剪切，从而抑制表面漩涡的发生。漂浮式消涡栅用木方和竹子加工成网格，放置在流道吸水室内吸水头部的周围，本试验设计了两个不同长度的漂浮式消涡栅，方案 2-1 消涡栅总为 7m 长，栅宽 0.06m，栅间净距 0.10m；方案 2-2 在方案 2-1 的基础上，将消涡栅总长加长到 13.4m，加长部分用平均直径 0.08m 的竹子，扎成栅间净距 0.4m 的栅网。

## 6 防振临时工程措施试验成果分析

### 6.1 胸墙方案

#### 6.1.1 工程前后流道进口流速分布比较

工程前流道进口现场流速测量表明：单机运行时，即使是多台机运行时振动最严重的流道（如 3#）进口流速分布也都基本均匀、对称，不会引起流道的局部回流和漩涡。8#机组运行情况最好，振动发生的频率最低。多台机（特别是 4 台机以上）联合运用时，3#机组的进口流速出现偏流，流道内出现回流和漩涡；4#机组的进口流速也出现偏流。水位越低，偏流越严重。5 台机联合运用，进水前池水位为 10.30m 时，4#流道左侧流速为右侧流速的 3~4 倍；进水前池水位降至 9.70m 时，4#流道右侧流速为左侧流速的 4~6 倍。（水流偏流位置与开机组合及水位高程有关）

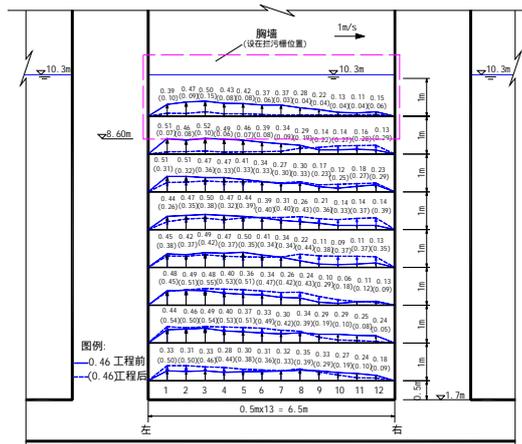


图 4 4#机组流道检修闸门位置各层流速分布  
(1#、3#、4#、5#、6#机组联合运行,  $Q=75\text{m}^3/\text{s}$ , 进水池水位为 10.3m)

加设胸墙后，胸墙后面层水流结构发生了较大的变化，面层水流流速分布均匀，且流速减小许多，见图 4。

由此可见，机组运行情况良好、振动发生频率较低的工况（如单机运行）或机组（如 8#机组），其流道进口的流速分布均匀、对称；而多机联合运用工况，振动频率较高、振幅较大的机组（如 3#、4#机组），其流道进口都存在偏流，水位越低，振动愈剧烈，进口偏流也愈严重。加设胸墙后，胸墙后的面层水流结构发生了改变，面层流速减小、并分布均匀，振动也大大减弱。由此可以判定：流道进流分布的均匀性直接影响流道流态，与机组振动直接相关。

#### 6.1.2 工程前后流态比较

工程前，流道进口水流出现偏流，流道内出现回流及漩涡。加设胸墙后，胸墙改变面层水流结构，胸墙后面层流速分布均匀。胸墙在闸门槽位置（用检修闸门形成胸墙）时，水流从前池进入流道进口段，在胸墙前经过一段距离（约 5m 长）的调整，穿过胸墙底部再进入进水流道，而闸门有一定厚度（约 1m 厚），水流穿过胸墙底部时流速加

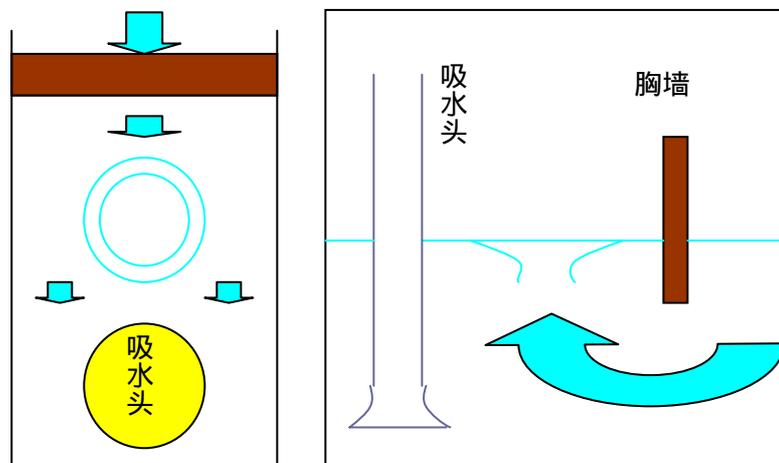


图 5 胸墙方案工程后流态（胸墙在闸门槽位置）

大，在流道内胸墙与吸水头部之间中间位置从底下往上翻，到水面再往四周呈沸腾状扩散，因此，流道内胸墙后一定范围内的水面平稳；胸墙与吸水头部之间的中部位置出现沸腾状水面波动，但波高不超过 10cm；吸水头部附近的水流平稳，未见出现吸水管周围的外环流，吸水头部附近无回流和漩涡。

胸墙在拦污栅位置时（用 1cm 厚的 PVC 板固定在拦污栅上形成胸墙），由于胸墙厚度较薄（0.01m），胸墙的位置离流道进口较近，水流从前池进入流道没有足够的调整距离（只有 2m 多）就碰到胸墙，前池的流态对胸墙后的流态产生一定影响，故胸墙后的水流流态比胸墙在闸门槽位置差，水流穿过胸墙后在胸墙后方不远处（约 2~3m）就从底下往上翻。在流道水位较高时，胸墙后水面还较平稳，当流道水位较低（低于 10m 水位）时，胸墙后出现较强的水面翻滚，也可见到中部出现回流和漩流，流态紊乱，与此同时，机组发生强烈振动。可见，在拦污栅处设置胸墙的效果明显劣于闸门位置。另外，胸墙的厚度对减振效果也有较大影响，具有一定厚度的胸墙对改善胸墙后流道面层的流态有较明显的作用。

### 6.1.3 胸墙方案试验效果分析（振动强度比较）

胸墙在闸门槽位置方案不同开机组组合、不同水位工况的对比试验，见图 6、7。

从中可见：胸墙方案明显改变了流道内面层水流的流态及流速分布，抑制了表面漩涡的生成，达到了明显减少机组振动的效果。

高水位时（前池水位 >10m）效果明显，机组振动的频率大为降低，振幅有所减小，与开排气阀的效果相当。低水位时，虽然振动的频率大大减少，但仍存在一定频率的振动，且振幅仍较大，同时胸墙的底高程在试验的范围内（9.0~7.5m），底高程低效果较好，有限的的数据表明不同的胸墙底高程、机组运行水位与胸墙的消涡效果之间存在着一定的相关关系和规律。

胸墙设置的不同位置和厚度对防止机组振动的效果是有差别的，拦污栅

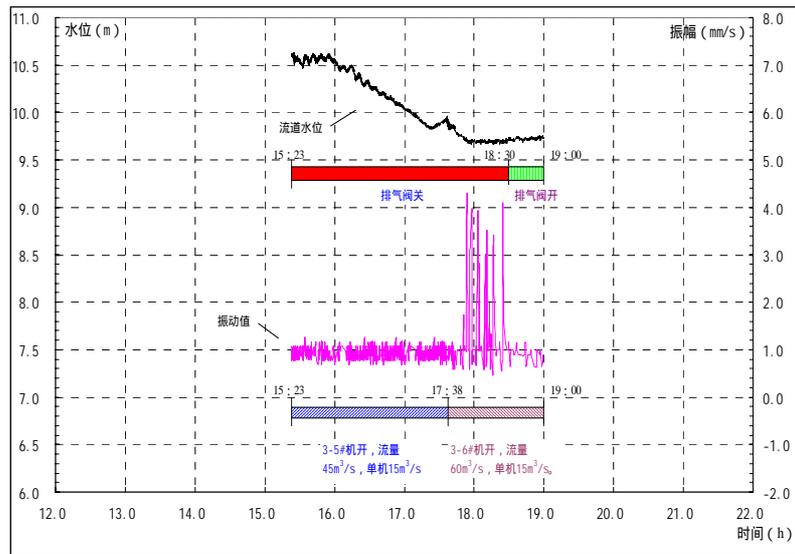


图 6 #4 机组流道水位与泵体振动值变化过程（无工程措施）

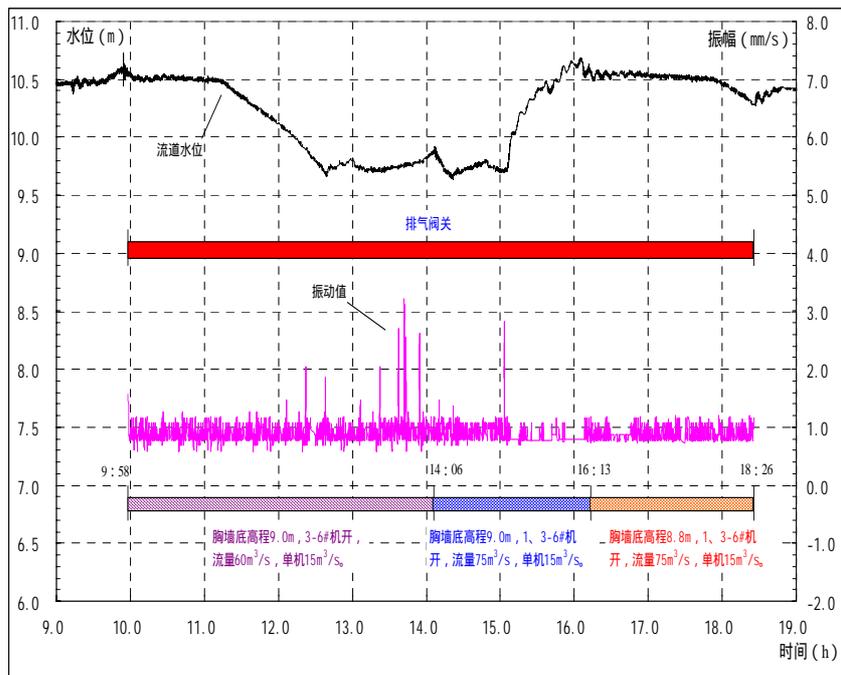


图 7 #4 机组流道水位与泵体振动值变化过程（胸墙在闸门位置）

处设置胸墙的效果就明显劣于闸门位置，这除了与水流进入流道遇到胸墙前调整的范围有限的原因有关外，还可能与胸墙的厚度有关。

此外，现场测试表明：实施胸墙后流道内的水位升高，前池和流道（胸墙后）最大的水位差为 0.05m；而无工程措施的流道，前池和流道最大的水位差为 0.10m，可见，胸墙的实施不会增大水泵的抽水扬程。

从上面的试验成果分析可知，胸墙作为改善流道流态，从而防止机组振动的临时工程措施是可行和有效果的。

## 6.2 漂浮式消涡栅

### 6.2.1 工程后的消涡效果及流态比较

试验显示：漂浮式消涡栅方案 2-1，由于消涡栅的长度较短，尽管在消涡栅覆盖的范围里能抑制表面漩涡的形成，但在消涡栅前仍可见局部回流区，消涡栅的前方也出现了直径较大的漩涡，由于产生漩涡的位置离吸水头部较近，漩涡对水泵仍产生较大的影响，因此，方案 2-1 的效果较差，未能达到很好的消涡减振的效果。漂浮式消涡栅方案 2-2 是在方案 2-1 的基础上加长至 13.4m。加长后的消涡栅，经过一段时间的水流稳定，达到了较好的消涡效果，在消涡栅覆盖的范围，未见明显的漩涡，消涡栅前产生的漩涡，由于离吸水头部较远，对水泵的影响大大减弱，达到了一定的消涡减振的效果。

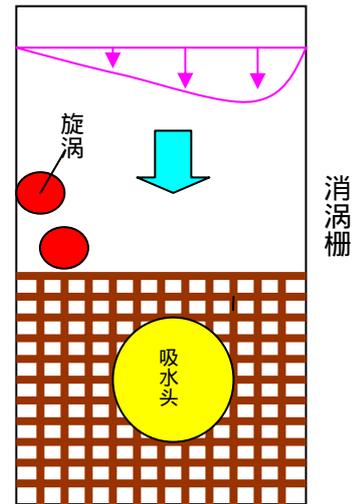


图 7 漂浮式消涡栅方案工程后流态 (方案 2-1 消涡栅长 7m)

### 6.2.2 消涡栅试验效果分析（振动强度比较）

在 3#机组流道进行的漂浮式消涡栅方案试验，不同的开机组组合，不同的进水前池水位下，漂浮式消涡栅减振效果，见图 9、10。可见，消涡栅的长度较短时，未能很好地抑制流道表面漩涡的产生，在消涡栅前仍产生直径较大（40~60cm）的漩涡，由于漩涡发生的位置离吸水头部较近，对吸水头部附近的水流结构仍有一定程度的影响，不能达到较好的减振效果，特别是在前池水位较低（低于 9.88m）时发生频率较高的振动，最大振幅接近 4mm。消涡栅加长至 13.4m 后，消涡栅覆盖的范围未见出现明显的漩涡，而消涡栅前产生的漩涡对水泵的影响大为减弱，较远的距离也不会对吸水头部的水流结构造成直接的影响，通过一段时间的稳定，达到了较好的消涡减振效果。

综上所述，一定长度消涡栅的设置，可以破坏和抑制流道表面漩涡的生成，从而达到减小机组振动的效果，试验表明，本试验设置的消涡栅方案（长 13.4m），在高或低水位时，也能达到一定的效果。

## 7 结论及建议

7.1 胸墙的设置可以明显改变流道面层水流的流态及流速分布，抑制表面漩涡的生成，从而达到明显减少机组振动的效果。

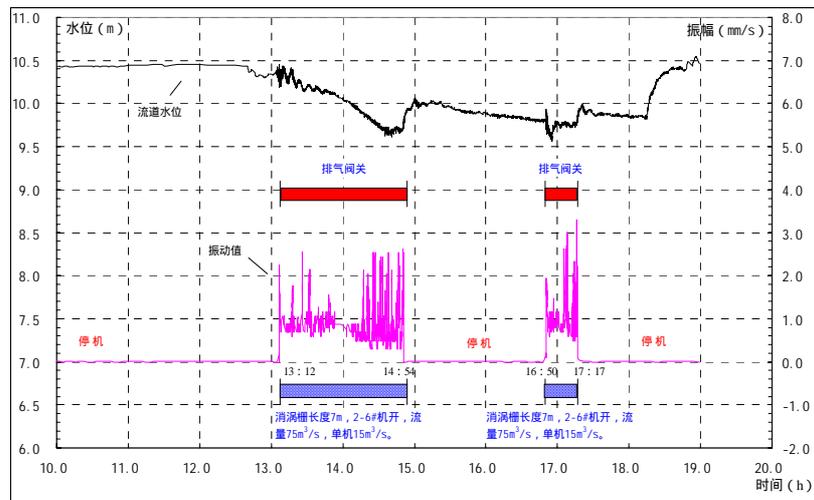


图 9 #3 机组流道水位与泵体振动值变化过程（消涡栅方案）

高水位时（流道水位>10m）

设置胸墙的效果明显，机组振动的频率大为降低，振幅有所减少，与开排气阀的效果相当。低水位时，虽然振动的频率大大减少，但仍存在一定频率的振动，且振幅仍较大，同时胸墙的底高程在试验的范围内（9.0~7.5m），底高程低效果较好，有限的试验表明不同的胸墙底高程、机组运行水位与胸墙的消涡效果存在着一定的相关关系和规律。

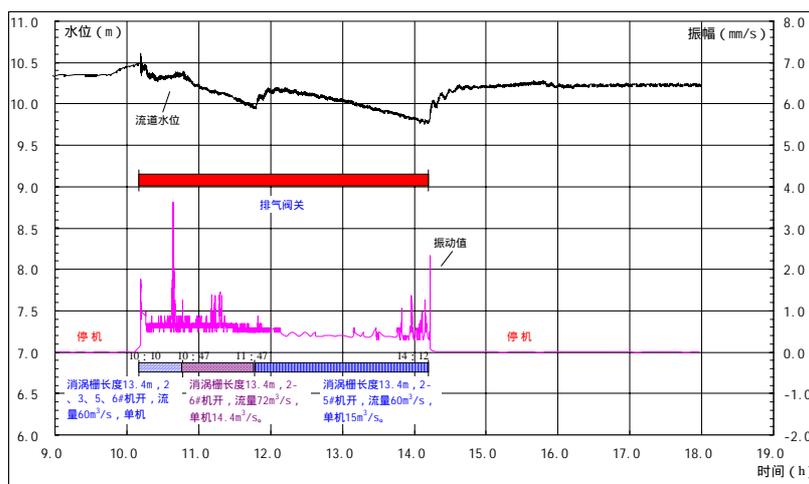


图 10 #3 机组流道水位与泵体振动值变化过程（消涡栅方案）

有限的试验成果表明：胸墙

设置的不同位置和厚度对改善机组振动的效果是有差别的，拦污栅处设置胸墙的效果就明显劣于检修闸门位置，这除了与水流进入流道遇到胸墙前调整的范围有限的原因有关外，还可能与胸墙的厚度有关。

7.2 从试验成果分析可知，胸墙作为改善流道流态，从而改善机组振动的临时工程措施是可行和有效的。建议胸墙设置于检修闸门后 0.5m 左右，底缘高程定为 8.0m 为宜，顶高程与最高水位相近，定为 11.0m，厚度为 1.0m。

7.3 一定长度消涡栅的设置，也可以破坏和抑制流道表面漩涡的生成，从而达到减小机组振动的效果，试验表明，本试验设置的消涡栅方案（长 13.4m），在高或低水位时，也能达到一定的效果。

7.4 运行的实际情况和本次试验的结果都显示，同样的机组开启组合方式，高水位时机组振动的频率和振幅明显低于低水位，因此，可在运行中通过控制前池水位来减小机组发生振动的机率。

7.5 从胸墙和消涡栅的设置都可明显改善机组振动的效果推断，机组振动的主因是流道漩涡的存在。所进行有限的现场测验结果显示，胸墙和消涡栅（长度可能不够）并没能完全解决机组振动的问题，因此目前也不能完全排除可能引起机组振动的其他因素，如吸头进流不均，机组排气设计存在排不走的气囊等。

7.6 试验结果分析也发现，机组运行过程中，某台机组在启闭过程中可能会引起其他机组较大的振动，在分析机组振动的原因和工程措施的效果时应注意。

7.7 流道进流不均匀是漩涡产生的主要根源，而流道进流不均匀又是由于前池流态的不均匀引起的。因此，应进一步研究改善前池流态的工程措施。

### 参考文献

- [1] 邱静，杜涓，黄本胜，赖冠文．台山发电厂一期工程循环水泵进水流道水力性能试验研究报告，广东省水利水电科学研究院，2002。
- [2] 常近时、寿梅华、于希哲．水轮机运行．水利电力出版社，1982。
- [3] 国家技术监督局、中华人民共和国建设部．泵站设计规范，1997。
- [4] 国家电力公司电力规划设计总院．火力发电厂循环水泵房进水流道及其布置设计技术规范．1999。