

第一机械工业部
水力机组生产考察团

赴苏考察专业报告

(二)

水轮机的水力模型试验部分

1958年5月

目 录

一 水力模型試驗各裝置的設計的一些原則問題 (1)

§ 1、反击式水輪机的能量試驗裝置

§ 2、反击式水輪机的汽蝕試驗裝置

§ 3、冲击式水輪机試驗裝置及用以試驗蝴蝶閥、空放閥、迷宫环等的試驗裝置

§ 4、反击式水輪机的空气能量試驗裝置

§ 5、水洞裝置

§ 6、风洞裝置

二 水力模型試驗各裝置的試驗研究方法 (16)

§ 1、能量裝置上的試驗研究方法

§ 2、汽蝕裝置上的試驗研究方法

§ 3、冲击式水輪机模型裝置上的試驗研究方法

§ 4、空气能量試驗裝置上的試驗研究方法

水輪機的水力模型試驗考察專業總結

一 水力模型試驗各裝置的設計的一些原則問題

§ 1、反击式水輪機的能量試驗裝置

一、裝置的任務

1、進行單個水輪機或并聯機組中某一水輪機的能量特性試驗（即效率試驗）；

2、進行水輪機某些部件的力特性試驗（如軸向水力推力， Π 式葉片上所受的 水力扭轉力矩，導水機構 葉片上所受的 水壓力及 轉動力矩等）；

3、進行水輪機如過流部分的液流結構的測量（如蝸殼中，導水機構前後，轉子前後，尾水管各斷面的速度分布，轉子葉片的壓力分布等）

4、轉子的強度（應力）試驗

在此裝置上要求有可能試驗一切類型及一切結構形式的 反击式 水輪機，具體的說，應能試驗：

1、豎軸FO式及 Π 式蝸殼式的 帶各種不同高度的彎尾管及直尾管的；

2、豎軸FO式及 Π 式水輪機明槽進水 帶直尾管的；

3、貫流及半貫流式的豎軸模型試驗（最好能作成橫軸）；

4、水輪一系（可逆式水輪機）的試驗

二、模型裝置設計所應遵循的力學相似準則

1、不穩定流動的慣性力相似

$$\text{即 } Sh = \frac{l}{vt} = \text{const}$$

$$\text{或化成 } nf = \frac{ND}{\sqrt{H\eta}} = \text{const}$$

這一相似，在模實的換算中是加以滿足的

2、壓力相似

$$\text{即 } Eu = \frac{P}{\rho v^2} = \text{const}$$

$$\text{或 } Qf = \frac{Q}{D^2 \sqrt{H\eta}} = \text{const}$$

這一點，在模實的換算中也是滿足的

3、粘性力相似

$$\text{即 } Re = \frac{VL}{\nu} = \text{const}$$

這一相似，要達到滿足非常困難，它要求模型的水頭和直徑都趨近或等於實際的。因此一般要求達到“自模區”，即模型的 Re 值超過 10 萬。（按水洞中的翼型研究，自模區的 $Re = 200$ 萬）

4、重力相似

$$\text{即 } Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}} = \text{const}$$

一般可忽略不滿足，但當模擬上下游水流情況時則必須滿足這一相似

5、邊界條件相似

到目前為止，蘇聯 $\Pi M 3$ 及 $В И Г М$ 等的試驗裝置，只是保證了水輪機進出水口（上下游）的均勻平穩的液流，而未模擬實際水輪機的進出口（上下游）的情況。有不少蘇聯同志建議，應該在模型試驗時模擬這一條件。

三、裝置的基本參數的選擇：

I、直徑選擇

蘇聯現有的裝置中，有下列幾種直徑：

直徑 D_1	裝置所屬單位
1000mm	水工設計院的實驗電站
460	ЛМЗ, В И Г М, 水工設計院
350	Л П И, М В Т У, Х П И.
289	В И Г М
250	ЛМЗ, В Н И И Г, Л П И, А Н. С С С Р,
180	М И С И
100	В Н И И Г, М И С И.

直径 $D_1 < 250$ ，苏联的经验证明，由于其本身的制造不易准确，测量的相对误差较大，用来进行水轮机本身的试验研究已被认为是不合适了（水工研究部门用以研究电站水工建筑与水轮机的相互影响等则仍有用的）。

从满足相似的条件来看，直径越大越近于实际，对研究模实比例因素的校正是有其意义的，苏联的 $D_1 = 1000 \text{ MM}$ ， $H = 34 \text{ M}$ ，的实验电站便是根据这个研究目的而建立的。但这样的模型装置实际上已是真正电站的水轮机，带来了新的问题：

1、各部件都很笨重，光是换装一次尾水管即须一周时间；如整个装换一个模型则从设计、制造到安装起要一年的时间。

2、由于装置的流量很大，已不能用堰，而用文吐里，但又不能用容积法来校正，而只能用畢托管和流速仪法校正，误差很大。

3、测功发电机和重量很大，各支承点受力很大，功率测不准；

4、价值很贵：非但建造费用大，而且是经常耗资 $N = 2000$ 瓩的能量。

所以他们的现状是利用率不高。

按照ЛМЗ及ВИГМ的工作经验，认为在实验室的条件下，建立 $D_1 = 460 \text{ MM}$ 的能量装置是可以满足前述的研究项目并保证一定的精度，而又具有安装拆卸的灵活性，经常的运转费用也不致过大。

西兹兰（Сбизран）工厂过去曾准备建 $D = 700$ 的能量装置，ЛМЗ和ВИГМ都提出意见，认为这除了带来 Q ， N ，测量的不准确，因而 η 也是不易准确外，还使设备加大了，安装困难了，没有什么好处。

但即使是 $D_1 = 460$ 的，其建设和运转费仍然很可观，因此对作初步比较性的试验，而目的不在于求得准确的效率的绝对值时来说，建议采用 $D_1 = 250$ 的装置这种装置占地小，安装拆卸方便，经常运转费用省。在这个试验装置上，只进行单个水轮机的能量特性试验。在多种方案的试验结果中加以比较，取其较好者再放到大量装置上去作详细的和较准确的试验。

以上所说 $D_1 = 460$ 和 $D_1 = 250$ 是针对大多数转子型号的模型直径而说的，实际对PO式比速（ ns ）特低的转子，其模型直径可用到分别为

$D_1 = 800$ ，及 $D_1 = 350$ 。

II 模型水头选择

对每种型号的模型转子，都要求有对其合适的试验水头，所谓合适，即

- 1、不致使水泵的功率过大
- 2、保证必要的测量精度
- 3、便于采用简单的便宜的设备

因为：
$$n\dot{f} = \frac{nD}{\sqrt{H}}$$

$$Q\dot{f} = \frac{Q}{D^2 \sqrt{H}}$$

$n\dot{f}$ ， $Q\dot{f}$ 的变化范围是根据各类型的转子的已有的万能特性曲线来决定的，是固定值； D 值根据前述理由也已选定，因此如选用不同的水头 H ，则按上式会得出相应的所需要的 n 与 Q ， H 越大，则 n ， Q ，因而 N 也越大；反之亦然。

每种类型转子的 $n\dot{f}$ ， $Q\dot{f}$ ，变化范围不同，因此不同的转子模型，也应选择不同的 H ，以使，1、制动功率 $N_{\text{тормоз}} = 2 - 25$ 瓩。小于 $N_{\text{торм}} = 2$ 瓩，会使测量精度变差，大于25瓩则使机械制动的煞车工作困难。

2、转速 n 不致过大，最好 $n < 1000$ 转/分因为 n 太大，则轴承易磨坏，另引起机组震动，同时机械制动闸也易过热烧坏。

3、流量 Q 不致太大，太小。太大，太小，都会使堰的测量精度降低（指矩形堰而言）。至于堰的合适的流量范围，应视每个堰的具体参数而定，以ЛМЗ大量装置矩形无侧收缩堰的情况为例 Q 的范围最好在 $120 < Q < 1000$ 立方公升/秒范围内。

据此，模型装置的试验水头，应分别对各类型转子，采用不同的水头，按ЛМЗ的经验，对

$D = 460$ 者 $H = 2 - 6 \text{ M}$

$D = 250$ 者 $H = 0.5 - 5 \text{ M}$

而装置应作成在上述水头变化范围内，能进行每隔 0.5 M 的水头的调节

四 设备选择

1、水泵选择：

Q ， H 对各类型的变化范围既定，即可据此选择水泵。由于 Q 的变化范围很大，单纯依靠闸门来调节是不经济的，因此：

- 1、使离心泵可以调节转速，或
- 2、使用轴流式水泵，可以转动其叶片。

而微小流量的調節尚須有輔助電動閘門。或有側路管其上，再加電動閘門，在調整台上控制。

究選用何種水泵，須視具體情況而定。

II、測功裝置

有二種：一種是機械煞車式的，一種是發電機式的。前者便宜，簡單，故蘇聯的絕大多數能量裝置均使用機械煞車式測功器。但此種測功器不能用于功率過大處，最好 $N_{\text{тoпм}} < 25$ 瓩。

另外這種煞車，應作到可在操縱台上遠距離調整控制，以保證在測讀各值時，工况不會改變。

III、測流量的設備：

能量裝置的測流量法一般都用堰，堰有二種：一為三角堰，一為矩形堰，其優缺點的比較如下：

1、三角堰在大小流量時都能有較高的精確度，而矩形堰在小 Q 和很大 Q 時測不準；

2、三角堰公式 $Q = ChS/2$ ，其中 C 為常數故進行校正時得二、三點即可，而矩形堰的流量系數 $M \approx \text{Const}$ ，須校正十幾點。

3、三角堰有側收縮，故在同樣的測量範圍內堰槽寬，占地大；而矩形堰可作成無側收縮，占地面積小。

4、三角堰的 O 點標高很難找準，而矩形堰可利用擺水平尺辦法易於找準

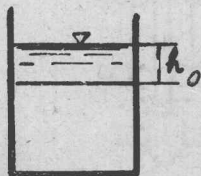
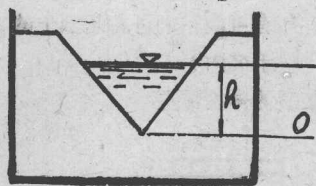


圖 1

5、三角堰的堰板是呈三角狀，其刀口（見圖 2）較難加工；而堰形堰板是直綫形的，刀

口易于加工。而刀口加工的好壞，會影響測量結果的

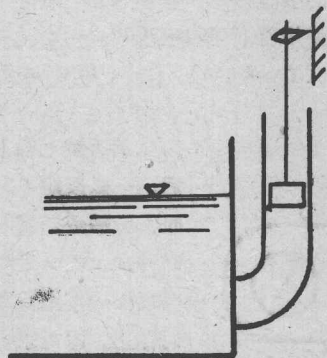
堰上水位，在蘇聯普遍使用浮標法測量，而不用測針法測量，其優點是：

圖 2



1、讀數準確，不像測針法，難於判斷接觸點；

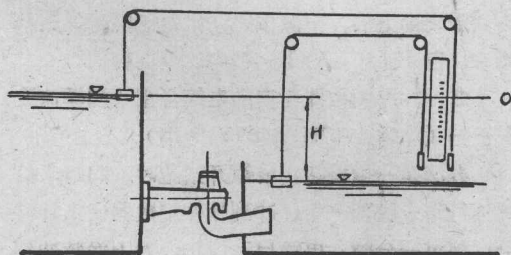
2、節省人力，不必每次去調節測針（指測



針法），當 Q 改變時可直接在刻度上看出水面是否已穩定和讀數。至於堰的基本尺寸選定，可查“水力学手冊”

堰必須使用容積法加以校正，因此須有校正水庫，ЛМЗ 無此水庫，是其弱點：

IV、測水頭裝置



水頭 H ，在對某一定型號的水輪機來說，在整個試驗過程中是保持不變的（這可以簡化測讀，也可以簡化計算）。因此上下游溢流板頂間的垂直距離即為 H ，故在裝置的調整時，應準確地定出這一距離（如 0.5M, 1.0M, 1.5M, 2.0M, 2.5M, 3.0M……8.0M）而在實驗過程中，只要設法保證上下游水面準確地等於二溢流板頂間的距離即可。

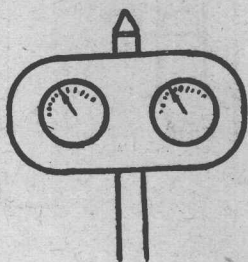
辦法是在上下游水面加浮標，同時用鉛絲引到刻度板上去，在試驗開始前使上下游水位差正

好等于H时,令二綫上的指針同时指向“O”,以后在試驗的过程中即始終使此二指針向“O”,因而保証 $H=\text{const}$,如指針发生变化,即表示水面有波动,H有改变,这时应分別視如系上游水位变动,則撇水泵电动閘門的按钮,控制来水流量,使指針仍指向“O”,如系下游水面变动,則撇下游出水渠上的閘門的按钮,控制出水流量,使指針仍指向“O”

V、測轉速的裝置

在苏联各地使用着不同的轉速計:

1, 轉速計 (Тахоскоп) —— (Вигммэи 等用的)



用手撥于軸上后,一揷按钮,記时、記轉数二表同时轉动,經一定時間后松掉按钮,同时停止,即可求得在此時間內的平均轉速。优点是較准,缺点是: 1)

要每次用手去測, 2) 容易坏, 3) 要算平均值,

2, 三秒鐘內自动停止記数的轉速計—— (ВИГМ用的)

插到軸上后,一揷按钮,指針記数,过三秒鐘后,自动停止,得出三秒內的平均轉速。

3, 脉冲記数器与自动电鐘合用的測轉速設備—— (ЛМЗ, ЛПИ, МВТУ 等用)

办法是一揷按钮,电鐘开始記时,同时水輪机軸每轉一轉即一个脉冲到脉冲記数器使指針轉动;經過一分鐘,电鐘自动停止,軸上送脉冲到記数器的电路也断,于是記数器上的讀数便准确的是一分轉內的轉数即轉速。

此法就是: 1) 准, 2) 完全自动化,不須人操作,

但此法的缺点是要求時間長 (一分鐘),因此必須設法保証在此一分鐘內水輪机的工况沒有改变。这就要求制動煞車能远距离控制和調节,使在測讀过程中軸力矩 (Мвал) 保持不变。

这要求使用 (Сэльсин—Мотор) (詳見原始資料)

應該指出,用脉冲記数器的办法是較先进

的,特別是在實驗室內有多台裝置須要測轉速时,更有其优越性。

五、裝置的精度要求及誤差計算

根据苏联的經驗,应对裝置的測量精度提出下述要求:

1、对D=460大能量裝置:

效率 η 的相对平方平均誤差 $\delta\eta \leq$ 百分之0.5

2、对D=250小能量裝置:

效率 η 的相对平方平均誤差 $\delta\eta \leq$ 百分之0.7。計算方法:

$$\eta = K \frac{P \cdot L \cdot n}{Q \cdot H}$$

$$\therefore \delta\eta = \frac{\Delta\eta}{\eta} = \sqrt{\left(\frac{\Delta Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{H}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P}{P}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta n}{n}\right)^2}$$

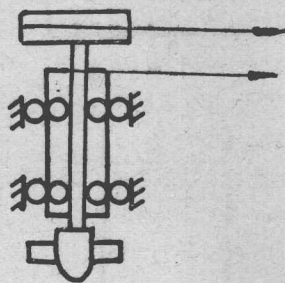
六、裝置的布置形式及各部尺寸

應該說明,苏联 ЛМЗ和ВИГМ 等的能量試驗裝置,由于建的年代較早,当时缺乏經驗,所以現在看来缺点很多,不能作为新設計試驗裝置的标准了。过去新斯兰工厂及哈尔科夫厂及目前 ЛМЗ为新試驗室所作的技術設計,是考虑和吸取了苏联現有各裝置的經驗教訓而进行了改进,故其布置形式及各部尺寸可作为我們的准繩。

关于苏联的一些老裝置的布置形式見古里耶夫“水力机械試驗”一書;关于新的布置形式請見其技術設計图紙。

(注:如有可能,則可将图紙上的布置总图拍成照片,附于文內)

七、裝置的結構特点



1、为能測量水力效率,模型水輪机的軸承应作成是双軸套的,即把摩擦力矩也能測量出来。

ВИГМ 为了提高精度，作成三軸套的，即將第二軸套以高頻率振動器加以往復振動，以消除摩擦力的影响。

2、裝置应有較好的自动化和远距离操縱的水平以减少運轉人員，因此：

①煞車的調節应是远距离控制

②上下游水位的保持应是远距离控制

③煞車力臂上所加的力是整数，而且按等間隔（如每隔二公斤）加減

④轉速器的啓閉是用按钮控制的

这样，一台裝置上只須二个人即可，一为調整員，在操縱台上調節上述各項；一为實驗員专作紀錄，并立时給出曲綫。

§ 2、反击式水輪机的汽蝕試驗裝置

一、裝置的任务及能量与汽蝕裝置的关系。

从原則上看，除机組的并联試驗以外，其余的在能量裝置上的試驗項目亦可在汽蝕裝置上进行，此外在此裝置上要进行汽蝕性能試驗及在非計算工况下的不稳定現象的試驗研究工作。这就产生一个问题：能量与汽蝕裝置可否合并？到目前为止，苏联現有的汽蝕裝置是与能量裝置分开的，其負担的任务主要是：

1、进行各种結構形式的反击式水輪机的汽蝕性能試驗（即測定临界汽蝕系数）。

2、进行反击式水輪机在非計算工况下的不稳定現象的試驗（如压力脉动值的測量，轉子后旋渦的觉察，汽蝕对压力脉动的影响，补气效果的研究等）

其余的試驗項目完全在能量裝置上进行，只是ВИГМ已开始在汽蝕裝置上进行能量試驗（求淨水力效率 η_r ）及力能特性試驗（求軸向推力，求Пл式叶片上所受的水力扭矩）并証明所得結果良好。（詳見ВИГМ关于三分力裝置上对Пл式水輪机的模型試驗研究報告）

此外，近几年来，世界上有些国家也有将能量与汽蝕裝置合并的傾向。

关于能量与汽蝕裝置的合并或分开問題在苏联也有不同的观点，ЛМЗ的同志們主張二者分开，并按前所述划分所負担的任务。他們的理由是：

1、在能量試驗上汽蝕裝置不能給出像能量裝置那样精確的結果，这是因为：①能量裝置的上下游条件接近于实际电站，液流稳定，而汽蝕裝置的进出口条件則較差；②汽蝕裝置是封閉

系統，易引起液流脉动，因此文吐里流量計的讀数跳动，不如能量裝置上用堰測的准确；③同前理水头在汽蝕裝置上也不易測得准。綜上原因就使得效率在汽蝕裝置上不如在能量裝置上測得准。

2、在力能試驗及液流結構的測量上，在能量裝置上进行方便，而汽蝕裝置由于所用水头較高及裝置要求密閉，故进行此类測量不方便。

3、汽蝕裝置因系封閉系統，消耗功率大，運轉費用貴，因此除汽蝕以外的試驗在能量裝置上进行較為节省。

4、認为能量、汽蝕合并是一个新的方向，如能証明确不影响能量試驗精度則可合并，新試驗室設計的D=460的汽蝕裝置便帶有这种嘗試性質。

在莫斯科考察时，有两种看法，一种主張二者合并（ВИГМ的研究員ВОЙТАШЕВСКИЙ ИМВТУ副教授Ваубаков）理由是：

1、作汽蝕試驗时反正必須經過能量試驗的步驟，已可一举两得。同时一次模型試驗只在一个裝置上进行，可避免分別在能量与汽蝕裝置上进行由于裝置条件的不完全一致而引起的結果不一致。

2、認为能量試驗在汽蝕裝置上进行不会不准确，由于压力脉动所造成的文吐里計和水头計讀数的脉动可用在示差測压計上加稳定室的办法来消除。試驗証明此脉动并不厉害。

3、認为力能試驗在能量裝置上（即无汽蝕工况下）进行，不能完全代表实际情况，因实际水輪机是有汽蝕的，而在汽蝕时的力能特性，与非汽蝕时有显著的差别，應該考虑这种实际条件。

認为大能量可与大汽蝕裝置合并，小能量可与小汽蝕裝置合并；后者作比較性試驗，前者作最后的檢查性的試驗及力能特性和液流結構試驗。

另一部分同志（ВИГМ水輪机實驗室主任ИВАНОВ）則有較折衷的意見：

1、小能量与小汽蝕裝置从用途上来看可以考慮合并，因为小能量裝置是进行初步比較性的試驗的，精度問題无甚意义。

2、建單獨的大能量裝置，而不主張建大汽蝕裝置（認为小汽蝕裝置已可），因大汽蝕裝置

耗功很大，除可測叶片上压力分布及試驗轉子强度外，没有什么其他好处。

綜上所述，关于能量与汽蝕装置的合并或分开問題，可做如下的分析：

1、小能量装置从用途上来看（作比較性能量試驗）完全可以合并于小汽蝕装置。这里唯一值得考慮的問題是工作量問題：如工作量不大（即装置的負荷不大），則合并是正确的；如工作量很大，一台小汽蝕装置不能滿足需要，則小能量装置仍有存在的必要，因为当作一系列的模型的比較性能量試驗时，如发现某些模型的效率根本不好，則不必要再进行汽蝕的比較試驗，就被淘汰了。如都放在汽蝕装置上进行能量与汽蝕的比較試驗，就多浪費了時間和精力；如在汽蝕装置上先只作能量試驗，則因汽蝕装置的运轉費总比能量装置要貴，这也花不来。

根据以上分析：1 如对高等学校來說，其裝置的科学研究負荷量不很大，則有一台汽蝕装置就可以了；而对工厂來說，单独的小能量装置仍是有必要的。

2、单独的大能量装置对工厂來說也是必要的，因为在此装置上可以：1、进行机組并联的試驗研究，模拟上下游的条件，而这在汽蝕装置上不可能进行；2、就效率試驗的角度來說，在能量装置上的試驗結果看起来总是較可靠一些，3、轉子的强度試驗，水輪机內液流結構測量（如压力分布，速度場分布等），在大能量装置上总是比汽蝕装置上方便一些；4、在当前 $D=460$ 的大汽蝕装置，尚有很多爭論的問題，在苏联至今亦未建成，而只有 $D=230$ 的小汽蝕装置的情况下，大能量装置的存在更是必要了。因此这一問題又牽涉到大汽蝕装置有无必要建立的爭論，这将在下节詳述。

二、模型装置的相似条件及基本参数选择

在相似条件方面，除需遵守能量装置所应滿足的相似律外，还有很多附加的要求，茲逐条分析如后：

1 不稳定流动的慣性力相似必須滿足

$$\text{或 } nI = \text{const}$$

2 压力相似必須滿足

$$\text{或 } Qf = \text{const}$$

3 粘性力相似

$$\text{或 } Re = \text{const} \quad \text{这一点要滿足不}$$

可能，但只少要求达到自模区，即 $Re > 10$ 万，而按照水洞中对叶柵試驗，自模区 $Re > 200$ 万。 Re 数对汽蝕系数值是有影响的。

4、重力相似

$$\text{即 } F\pi = \text{const}$$

这在汽蝕系数决定中是有影响的，但其影响程度不易估算。一般不考慮。

5、水中溶解空气量的相似

这是近来发现而在目前仍是有爭論的問題，ЛМЗ及ХПИ認為空气含量对 $\sigma_{кр}$ 有很大影响（最多差百分之十五至二十），水中空气含量越多，則汽蝕发生越早，因而临界汽蝕系数也越大，并根据試驗結果，得出一模型与实际相似的条件为：

$$\frac{H_m}{H_H} = \sqrt{\frac{\delta_m}{\delta_H}} \text{ 或 } \frac{H}{\sqrt{\delta}} = \text{const}$$

δ_m, δ_H ——分别为模型与实际水輪机中水流中的空气，以容积的百分比計。

并将此結論已用于新汽蝕装置的設計中去。

在ВИГМ有不同的看法，也曾經过試驗証明，認為水中空气含量只有在試驗水头 $H_m < 5M$ 时才有較大影响，而当 $H_m > 5M$ 时，則影响很小，不足重視同时認為上列相似律公式之提出，未免为时太早，尚須作进一步研究。

但是不論如何空气含量的影响还是存在的，并且日益引起研究界的重視，故在苏联的新水洞装置及新汽蝕装置的設計中，都考慮了在装置中有可能調节（改变）水中空气含量，并采取措施使其在試驗的过程中始終保持不变。

关于汽蝕装置的直径选择

到目前为止苏联各地汽蝕装置的直径如下

直径 D_1	装置所屬單位
350 мм	ХПИ, МВТУ, ВИГМ (正在造)
289	ВИГМ, МЭИ
250	ЛМЗ, ЛПИ, АН, УССР

由于制造精度及測量精度的理由， $D < 250$ 的汽蝕装置已不合适用来作試驗研究工作。 $D=350$ 的装置是比較新的。但近来更有加大直径至 $D=460$ 的趋势，ЛМЗ为新試驗室拟建 $D=460$ 的汽蝕装置即为第一个嘗試。根据滿足相似准則的条件來說，当然直径越大越接近于实际，这是好的。但这也有不同观点的爭論，ВИГМ水輪机試驗室

主任即不主張在工厂建立D=460的大汽蝕裝置，他認為加大直徑当然会改善相似条件的滿足，但这种改善的程度是极有限的，然而却使裝置的水泵功率达到700瓩，經濟上的耗費是很大的，将来容易形成不經濟使用而时常空閑着。

据上所說，D=460的汽蝕裝置本身是帶有科学研究性質的，目前在世界各国的汽蝕裝置中也只有个别的建立了D=400(加拿大的)和D=500(法国的)。这种裝置的效果和必要性，要待进一步的實踐証实

关于汽蝕裝置的水头选择

到目前为止，苏联已有各裝置的水头都是根据对各式反击式水輪机能求出临界汽蝕系数所必須的水头来决定的，即

$$\sigma = \frac{H_b - H_s - H_{np}}{H}$$

H_b ——大气压力以公尺水柱計

H_s ——吸出高度以公尺水柱計

H_{np} ——已給温度下水的汽化压力以公尺水柱計

$H_b \approx 10.33$, $H_{np} = 0.24$ (20°C时) 几为定值， H_s 要依靠真空泵来抽真空，但真空泵的抽真空度一望只达到真空高度 $H_b = 9.7$ 米水柱左右，对某种类型的水輪机，其最小极限汽蝕系数值也是固定的(如对ns特低的pо式，最小 $\sigma \approx 0.01$)因此在上述各值固定的情况下，必須有一定的H值来满足上列等式。

按照上述要求，一般 $H \approx 2-25$ 米左右ВИГМ實驗室主任建議用30米(低限对特高ns水輪机，高限对特低ns水輪机)

但目前世界上各国的汽蝕裝置很多都是采用高水头 $H_{max} = 70-100$ 米，个别有高达 $H_{max} = 275$ 米的(英国的)，并有文章发表，認為水头H对临界汽蝕系数 $\sigma_{кр}$ 是有影响的即水头越高，則 $\sigma_{кр}$ 越小。至于水头对 σ 影响的原因在苏联亦未进行研究，据文献所載及苏联一部分同志的看法，約有下列几点：

1、高水头接近或等于实际水輪机的水头，因此其汽蝕的形成是依靠于符合于实际情况的动力真空而不是像一般裝置依靠靜力真空来形成，而这却不符合于实际条件。

2、高水头时則水中空气含量对汽蝕系数的影响即不显著。这可能是因水头高速度大，因此

在低压区的可允許的空气含量值增大，临界汽蝕系数即减低。

由上述可見，高水头汽蝕裝置在苏联也是沒有經驗的，而在其們各国高水头裝置($H > 50$)几已占全部汽蝕裝置的40%，这是值得我們重視的。正是因为如此，故ЛМЗ的新實驗室拟建的D=460的汽蝕裝置，其水头 $H_{max} = 60-70$ 米。

但是，可以注意到的是：※外国的各高水头汽蝕裝置其模型直徑一般为D=250—350(对特低比速pо水輪机，可用到D≈500)，因而其水泵功率一般为 $N = 300-500$ Л,С，个别的达到 $N = 800$ Л,С，而如采用D=460(对低比速pо可达D=600) $H = 60$ 米的裝置，則所需水泵功率将达 $N = 800$ 瓩以上。因此这一裝置将是世界上最大的汽蝕裝置。(※詳見“Water Power”. 1957. November)

綜上所述，对汽蝕裝置的直徑和水头选择可归納如下：①到目前为止，苏联的汽蝕裝置都是D=250—350 $H_{max} = 25$ 的低水头小直徑汽蝕裝置；②按照各国趋势，凡新建的汽蝕裝置其絕大多數均采用高水头。

③直徑加大到D=460以上，目前只有个别国家作了，它对尺寸校正的意义如何，这本身是一个带有研究性質的問題。

④ $H \approx 60$ 米，D=460的裝置功率达=800瓩左右，消耗能量是較大的，

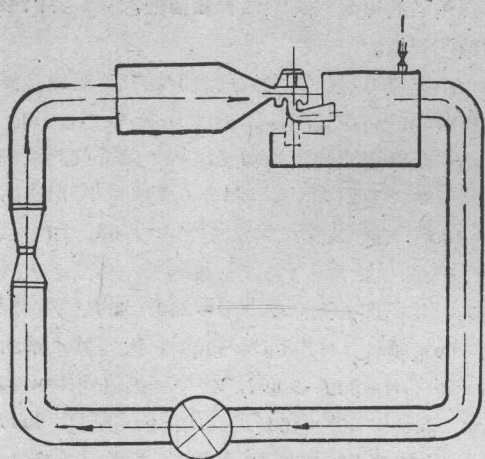
⑤苏联ЛМЗ的 $H \approx 60$ 米，D=460汽蝕裝置，目前尚未开始作技术設計。对建这种裝置的必要性，在苏联也是爭論的問題。如ВИГМ的水輪机實驗室主任不贊成建这种大裝置)。

三、裝置的布置形式

一般有开式，(或半开式)閉式二种。开式者在苏联現只有ЛПИ有此裝置，(布置图請見“水力机械試驗”一書)，其优点是：水不会发热，在实验过程中空气含量为自然状态保持不变，无须另外的空气溶解器。但其根本缺点是：无法改变空气含量，占地面积大，亦多用一台吸水泵，因此近代各国的汽蝕裝置絕大多數都采用閉式，ЛПИ也准备将其改装为閉式的。

閉式裝置也有不同的布置形式，目前苏联的所有的汽蝕裝置布置如下图：

这种裝置克服了开式的缺点，但本身仍有缺点：



1 在試驗过程中不能保持空气含量不变

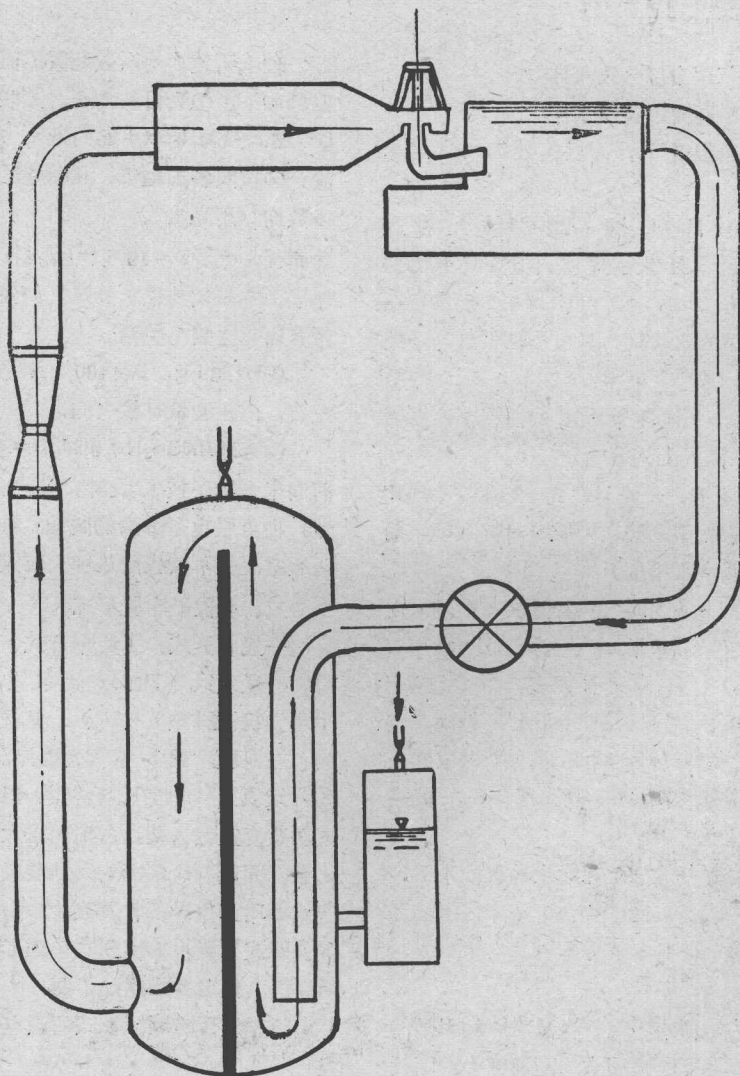
2 系統中易有由汽蝕而产生的汽泡并逐漸增大,影响水輪机內汽蝕的发生和汽蝕系数的决定。

故目前世界各国的新的汽蝕裝置(包括苏联拟新建的)都改进了布置,添加了空气溶解器及压力調节器等设备,以克服上述缺点,其布置簡图如下:

四、过流部分的基本尺寸和結構特点:

应该說明在各部尺寸及結構形式上,都是根据經驗或按照文献上类似的液流情况加以推算,而且各方面的經驗也有不一致的地方,因此这兒只拟談一些决定尺寸的原則;具体数据和結構,請參見原始資料。

1、穩定箱——起穩定进入水輪机前的水流的作用,使速度減慢并在水輪机前有均匀的流速



場，因此往往作成橫放的大圓筒或大圓管狀。

2、真空箱——模拟电站下游的情况并借它形成下游的不同的吸出高度 H_s ，因此須有一定的长度和寬度。

3、空气溶解箱——目的是将从水中分解出来的汽泡重新溶解到水中去。其容积系按水从进去到出来共經過45——60秒的計算。这是經驗的数字，此外箱应作成堅式的，中間加以隔板，以利于空气在水中的溶解（見前节草图）。

4、压力調节器——用以改变整个系統的水压力，并造成下游的真空，因而改变水輪机的汽蚀工况，用这个方法來代替真空泵在真空箱上抽气的方法，其优点是可保持系統中的空气含量不变。至于压力調节器的安放位置，最好是放在整个系統的下部，以求在調压器中只借助于压缩空气不需任何真空泵即可滿足調节压力的要求。

这里須要提到的是，压力調节器目前在苏联的各水輪机汽蚀裝置上还没有采用，在 ВИГМ 的水洞裝置上采用了。

5、管路——管路的粗細应根据在其中的水力損失和管路的建筑費的技术經濟計算确定，一般在汽蚀裝置上管路不长，因而水力損失即經常的能量損失起决定的作用，故管路应作得粗些。此外管徑較大也可使得水流的脉动减少，系統发热的情况也可得到改善。

6 水輪机与水泵間的 垂直 距离——一般希望 $>10M$ ，即保証在最不利的情况下水泵不致发生汽蚀。

整个系統的结构特点要求：

1、密封性——系統的任何部分必須密封，不得有空气被吸进去

2、剛度性——汽蚀裝置是在高度真空下工作，因此部件的設計应保証必要的强度，而某些接近水輪机的部件則应考虑到当压力改变时不致引起变形因而影响到水輪机的正常工作。

31、整个系統要求布置得很平順，尽可能避免不必要的轉弯及在管路中的一些破坏液流平順的設備（如不必要的閘門）。使系統中尽可能少的产生旋渦和脉动。

五、設備选择：

I、水泵——根据对各式水輪机的水头及流量的要求来选择，因此苏联現有的各汽蚀裝置都已逐漸使用可变轉速的水泵，以保証水头的調

节。而用閘門調节的方法因其①損失能量，②造成系統的旋渦和脉动，③使系統易发热，④易吸进空气等缺点而逐漸被淘汰。虽然它本身較便宜而簡單。

在必要的时候可使用二台水泵，利用并联和串联的方法来保証所要求的水头和流量的变化范围。

I、測功裝置：

对 $D=250$ 及 $D=350$ 的小汽蚀裝置可用机械制动測功器亦可用发电机式的測功器，苏联目前亦是二者都用。一般說前者簡單、便宜、但不及后者可靠，后者則設備較貴。

但如功率很大，如 $D=460$ 高水头汽蚀裝置，則必須用发电机式制动閘了。

II、測水头裝置

一般用水銀示差測压計，二端如接于水輪机进口前的稳定箱及出口后的真空箱上，在試驗的过程中应調节水泵轉速使水头保持不变。

IV、測流量裝置

用文吐里流量計，文吐里管須用容积法來校正。示差測压計在 ЛМ 3 是用 CCL_4 液体的，以求在大小流量时都可在一个計上測讀；在其他單位都是水的及水銀的并用，前者为測小流量，后者为測大流量。示差測压計上最好要加稳定室以消除讀数的跳动。

V、測轉速裝置

請見能量裝置設計中关于轉速計选择一节。

VI、系統的冷却器裝置

系統应进行热交換的計算，如由于連續工作，温升很高，而經過休班以后水温仍不能降至正常温度者，則須加冷却裝置，在苏联現尚无任何裝置采用冷却設備，即对 $D=250$ ， $D=350$ 低水头裝置來說温升不大；但是用 $D=460$ 高水头裝置，据 ЛМ 3 初步計算，在連續两班（16小时）工作后温升达 $14^{\circ}C$ ，而經八小时冷却只能降低 $2^{\circ}C$ ，因此必須采用冷却裝置。

VII、加工水使其减少空气含量的裝置

这是关于研究水中空气含量对汽蚀的影响并加以模拟而提出的新裝置，即通过这一裝置可将系統中的水加工到任意的空气含量。原則上說通过在真空箱上抽气的办法亦可使水中空气析出，按 ЛМ 3 在 $D=250$ 裝置上的經驗，須空運轉一小时才能使空气含量达到 $\delta=0.4-0.5\%$ 左右，如

要使空气含量更小,則須时也越长。如为更快的加工水到要求的空气含量,最好另有设备,根据ВИГМ为莫斯科大学設計的水洞上所用的此种设备来看,估計在20分鐘內即可将水中所溶解的空气全部赶掉。

Ⅶ、测量水中空气含量的仪器

有多种。最近ВИГМ作出了一个新的这种仪器,已要到全套加工图紙及使用說明,这兒不詳述。这种仪器是必要的。

六、对水輪机设备本身的要求

1、要能测量純水力效率 η_r ,即須作成双軸套或三軸套。

2、尾管的錐管部分应全用有机玻璃作成,肘管部分也应有玻璃窗,以便观察和拍照。对ПЛ式水輪机,轉子室也应是透明材料的。

3、应有进行补气的实验研究的设备。

4、应有可测量軸向推力。

5、应可测量 ПЛ式叶片上所受的水力矩。

后二項(4·5項)現只在ВИГМ作成了,直接用秤测量的装置已索取了全套装配图紙,但目前还处在調整試驗阶段。而ЛМЗ关于此兩項的測定系在大能量装置上用应变仪法进行。前者精度較高(誤差7%)但很复杂,后者精度低(誤差20%)且不能代表汽蝕工况,但方法較簡單。关于此問題請詳見ВИГМ的研究报告和图紙。

在小汽蝕装置($D=250$)上的精度为:

水力效率的平方平均相对誤差 $\delta\eta_r \approx 0.7\%$

汽蝕系数的平方平均相对誤差 $\delta\sigma \approx 2\%$

§ 3, 冲击式水輪机試驗装置及用以試驗蝴蝶閥、空放閥迷宫环等的試驗装置

一、冲击式水輪机試驗装置的任务

对各式冲击式水輪机(如勺斗式,斜射式等)进行能量特性、力能特性的試驗研究,以求得出适合电站条件的具有高能量指标的水輪机,并提供必要的力能特性曲綫和数据作为設計的依据。此外还应可进行高压射流的結構及其特性的研究,現分述如下:

I、能量特性的研究:

1)、轉子的能量特性的研究(各种方案的叶片数目,叶片形状,叶片布置,……等)。

2)、带折向器的各种导水机构的能量特性研究。

3)、不同方案的外壳的能量特性研究。

4)、各种引水管(коллектор)布置形式的能量特性研究。

5)、水輪机内部及引水管,导水机构中的液流結構的观察和测量(如速度分布)。

6)、下游水位涌高对水輪机能量特性的影响。

I、力特性的研究

1)、轉子的强度研究

2)、带折向器的导水机构的力特性研究(如折向器上所受的力,噴針上所受的力等)

3)、軸承摩擦及风損的研究

4)、噴嘴的保护板的研究

II、高压射流的研究

1)、射流内部結構的研究(如用快速电影机法拍攝射流过程,测量各断面的压力分布等)

2)、射流各断面的直径测量

3)、引水管,水头,噴嘴直径对射流能量特性及結構的影响

4)、在有折向器作用下的射流研究

5)、折向器及噴針的力能特性研究

6)、射流对固定叶片的冲击的研究

二、装置的模拟准则及基本参数选择

关于满足相似准则問題,一般提出以下要求:

1, $Eu = \text{const}$ 即 $n'_g = \text{const}$ 必須滿足

2, $Sh = \text{const}$ 即 $Q_1 = \text{const}$ 必須滿足。

3, $Re = \text{const}$ 最好能滿足,事实不可能,要求达到自模区。

4, $F_l = \text{const}$

当試驗外壳形状对效率的影响时,此时重力起主要作用,希望能滿足 $F_l = \text{const}$ 。(到目前為止苏联的各冲击式装置中未考虑滿足 $F_l = \text{const}$ 只在ЛМЗ新試驗室的高水头橫式橫型装置中考虑了模拟 F_l 数問題。)

关于装置模型的直径选择

冲击式水輪机模型直径的选择,一方面考虑到不使装置产生过大的功率,带来了运轉工作中的不方便,另一方面直径也不能过小,使得制造不准确和某些部件工作条件的变坏。

对水斗式水輪机,有下列关系式:

$$ns \approx 240 \frac{d_0}{D}$$

d_0 ——射流直径

D——工作輪直徑

按水斗式水輪機的特性，其最优的 $\frac{dc}{D}$ 值在 $\frac{1}{8} \sim \frac{1}{22}$ 之間，而可应用的允許值 $\frac{dc}{D} = \frac{1}{8} \sim \frac{1}{40}$ 故相应的最佳的 $ns \cong 10-20$ 而可允許的 $ns \cong 5-30$ 。

按照 ВИГМ 的經驗，模型的 $dc \geq 40mm$ 才不致使模型的效率降低（在 ЛМЗ 時未曾聽說此點）。如从这一要求出发，則按最通用的 $\frac{dc}{D} = \frac{1}{8} \sim \frac{1}{22}$ 来看，須模型直徑 $D = 320 \sim 880mm$ 。

由此可見模型直徑是随不同 ns 的水輪機而变化的。按在 ЛМЗ 的了解，他們并未提到必須 $dc \geq 40mm$ 的条件，因此他們用来作为設計試驗裝置的代表直徑为 $D = 310, 400, 450$ 。

根据以上分析，可知在模型直徑的低限方面是一致的，高限則有差別。

裝置水头選擇。

冲击式水輪機用于高水头，故为使 Re 数接近于实际情况来看，希望采用高水头，从模拟 Re 数和研究高压射流的结构来看亦希望采用高水头（ $H \geq 100-150M$ ），但高水头带来了裝置功率的大大增加，价值很貴，測功裝置难作，轉速太大等一系列的困难。

水头的低限是 $H \cong 40M$ （ЛМЗ 現裝置 $H = 20-$

40M）因为 $H < 40M$ ，則不可能模拟含 Fl 数了：

$$\frac{H_H}{H_M} = \frac{D_H}{D_M}, \text{ 一般, } \frac{D_H}{D_M} \cong 5-10,$$

按 $H_H(ср) = 400M$ 計，則要求

$H_M = 40-80M$ 。（如 $H_H = 800$ ，則 $H_M = 80-160M$ ）故知 $H < 40M$ 則模拟 Fl 数便不可能了。

綜上所述，对低 ns （即高水头）的水輪機为满足 Fl 数相似，要求 $H_M \cong 150M$ ；从研究射流的角度來說亦要求 $H_M \cong 150M$

对非低 ns 者，則取 $H \cong 60-70M$ 即可，这对大多数模型水輪機的能量試驗來說已可满足需要。

要在一台裝置上满足 $H = 40-150M$ ，而流量又满足相应的改变，是难以实现的，因为选择不到这样的水泵。因此如果試驗負荷量較大者，可考虑作两台裝置，一台高水头一台低水头，满足不同类型的水輪機試驗（如 ЛМЗ 的新試驗室）。如負荷量不大，从經濟上看只拟作一台裝置者則以取 $H = 60-70M$ 者为宜。

三、設備選擇：

1. 水泵選擇

可根据下列表格进行裝置所需 Q ， N 的計算并据此来考虑裝置的划分（如果作二台的話）及水泵的選擇：

要求的按佛汝德数律所須流量單嘴双嘴四嘴六嘴所須功率單双四六轉速

ns	$\frac{do}{D_1}$	要求的 D_1	按佛汝德 数律所須 H	所需流量 Q				所需功率 N				轉速 n
				單咀	双咀	4 咀	6 咀	單咀	双咀	4 咀	6 咀	

計算公式为：

$$n = \frac{ni\sqrt{H}}{D}$$

$$ni = 84, 6K_n = 35, 5 \sim 40, 5$$

$$Q = Q_1 D^2 \sqrt{H}$$

$$Q_1 = 3, 4Z_0 \left(\frac{do}{D_1} \right)^2$$

$$N = \frac{\gamma \cdot Q_1 D_1^2 \sqrt{H} \cdot H \cdot n}{102}$$

水泵最好能采用直流电机带动，以便調節試驗水头。

I. 測功器選擇：

用发电機式及机械煞車式的均可，如軸功率較大，則以用发电機較好。目前 ЛМЗ 及 ВИГМ 用的測功器均为机械煞車式的，因其簡單便宜效果也不坏。

II. 測流量設備

ВИГМ 用文吐里，ЛМЗ 用堰，文吐里 占地小校正方便，价格便宜。ЛМЗ 冲击式裝置用堰測量流量，認為比用文吐里法准确，ВИГМ 認為这可能是他們習慣于用堰的緣故。

IV. 測水头設備

用精度較高的精密彈簧压力計測量

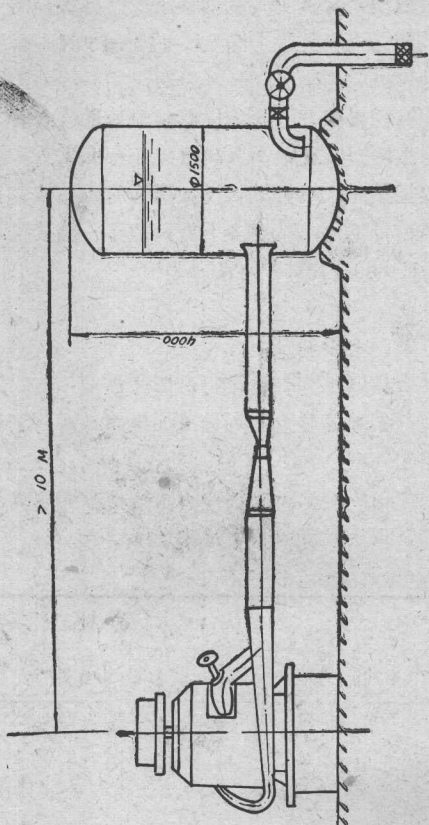
V. 測轉速設備

同前。

VI. 穩定設備

是一 $\phi 500\text{mm}$ 左右，高3—4m的大桶，其中的上半部為壓縮空氣室以起穩定水流的作用，避免水泵來水的直接影響。空氣室可借助空氣壓縮機造成。

四，布置形式。——示意图如下。詳見圖紙。



五，對裝置的結構上的要求：

- 1，試驗各部件要易于拆卸安裝。
- 2，裝置的通流部分應保持在同一條直線上，以保證有均勻的流速場，
- 3，文吐里或堰必須有校正水庫
- 4，水頭的改變借助於變轉速及泵後閘門
- 5，水泵須有側路管，以調節Q的小量改變
- 6，水泵起動前的充水須有真空泵
- 7，為穩定水流須加穩定箱
- 8，模型外殼應有玻璃窗以供觀察拍照

9，裝置的操縱應在操作台上（除調整行程以外）

10，應用雙軸套，直接測水力效率 η_r

裝置的誤差：按ЛМЗ及ВИГМ經驗，效率的

$$\text{平均平方誤差} \frac{\Delta\eta}{\eta} \approx 0.8 - 1\%$$

六，關於試驗蝴蝶閥空放閥迷宮環等的裝置

此裝置除試驗模型以外其他各部分均與沖擊式水輪機裝置基本相同。如工作量不大，則沖擊式裝置亦可兼作上述試驗（哈爾科夫廠便是）。如考慮作二台沖擊式裝置，則可考慮其中的一台或二台分別兼作上述試驗。

§ 4，反擊式水輪機的空氣能量試驗裝置。

一，裝置的任務

主要為水輪機及其過流部分個別部件的初步試驗研究用。着重在研究過流部分的液流結構，從而找出改進水輪機各過流部件的合理形狀以提高水輪機的性能。

1，初步試驗新設計的水輪機的能量特性（即畫萬能特性曲線）。

2，決定 $\Pi\Pi$ 式及 PO 式等水輪機轉子葉片上的壓力分布及壓力脈動。

3，決定水輪機各過流部分的速度分布。

4，決定過流部分的水頭損失，找到最好的過流部分形狀（如尾水管等）。

5，在改善和創造新類型的水輪機中的一系列的專門問題的研究。

總之，由於空氣動力裝置系用低速空氣來代替水作試驗，大部結構均可用木料和鋁製造，故造價便宜，試驗運轉費用省，安裝拆卸方便，試驗及測量方法也簡單而迅速，故所有新計算出的過流部件和新構思的新型水輪機，都應首先在空氣能量裝置上試驗，以分析其液流結構，判斷部件形狀的合理性，然後才進一步拿到水中去試驗。

空氣動力裝置的缺點是不能給出能量特性的較準確的結果，它所畫出的萬能特性曲線是不夠可靠的。

二，模擬準則和基本參數選擇

在滿足相似準則方面，對 $Sh = \text{const}$ 及 $Eu = \text{const}$ 是加以滿足的；對 $Fr = \text{const}$ 因空氣重量很輕，故忽略不計；對 $Re = \text{const}$ 實際上在低壓低速的氣流下達不到這一條件，如要模擬這

一条件,則須作成封閉式高压高速模型裝置,但这費用很貴,到目前为止苏联未曾建立这种裝置。然而这种裝置却能提供对模、实水輪机 Re 数不等的尺寸因素的校正的研究。列宁格勒工业大学教授ПОВХ曾希望建立这种裝置,但限于經費未能建立。

关于模型的直径选择。到目前为止苏联各地的空气能量裝置,其直径为:

直径 D_1	裝置所屬單位
$D_1=460\text{MM}$	ЛПИ.ВНИИГ.МЭИ.
$D_1=350\text{MM}$	МВТУ.

根据在上述各地的了解,他們認為 $D_1=460$ 公厘的模型裝置已能满足对轉子上压力分布,过流部分液流結構测量的需要。ЛМЗ拟在新實驗室建立一台 $D_1=700$ 公厘的空气能量裝置,認為費錢不多,而可使测量更方便。

关于裝置的水头选择,也和水力能量裝置的水头选择的原則相同,即对不同类型的水輪机,选择不同的試驗水头,使满足以下条件:

1,使水輪机內流速大于7米/秒小于70м/сек。因 $V<7$ 米/秒則微压計精度較差, $V>70$ 米/秒則气体将被压缩了。

2,使水輪机的轉速 n 不太高不超过300轉/分),流量 Q ,功率 N 都較适中,使得有很好的测量精度。这与流量計,測功器等本身的性能有关。

按照上述原則,一般选择的水头 $H=50$ ——300MM水柱左右,前者对高比速 $ПЛ$ 式水輪机,后者对低比速 $Рс$ 式水輪机用。

三、设备选择

I、通风机选择

根据前述原則所确定的流量 Q 和水头 H 的变化范围来选择通风机,一般常用者为軸流式,也有用离心式的。前者使得裝置布置較紧凑,但通风机却須自己制造或特殊訂做;后者布置較費地方,但有标准型号可买。通风机應該是可变速的,以满足在不同的 Q 、 H 要求下的稳定工作。

II、測流量設備——一般有多种方法

1、在通风机进气管口收集器(коллектор)处加測速管(毕托管),根据測速管讀数查用速度場法求得的流量关系曲綫,(此曲綫叫作校正曲綫)即可求得 Q 。校正时的 Q 系在压力箱出口加一收斂管,用測定速度場法求得。此法的缺点

是須要自己进行校正,工作量很大。必要时还要加射針,有时也要用二个收集器。

2、采用标准的收集器,根据收缩断面处的压力降直接求出流量。但这为了保证流量的测量精度,須有二、三个大小不同的收集器輪換使用。

ЛМЗ为新實驗室設計所用为后者;原新斯兰工厂,哈尔科夫厂所用如前者。

为測速度和压力,須用測速管、測压管和微压計等仪器。

III、測水头設備

如測水头,将微压計的一端連在压力室上,一端直接通大气即可

IV、測功設備

按照列宁格勒工业大学的經驗,如模型軸功率小于八瓩,則可用自制的电磁式制动器。如功率再大,即須选用发电机式的平衡机。目前列宁格勒工业大学及包曼工学院系用电磁測功器,莫斯科动力学院用的是机械煞車式測功器

V、測轉速設備——以用脉冲轉速計法較准确方便。

四、布置形式及各部件的技术要求

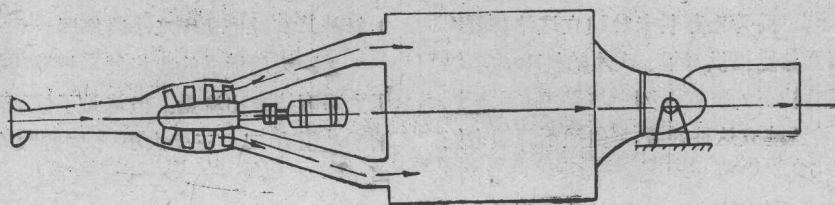
在苏联有二种布置形式,一种为吸气式,一种为压气式。前者为全苏水工研究院的布置形式,其余各地均采用压气式。关于二种布置形式的簡图及优缺点比較,請見ПОВХ著“空气中的水輪机模型試驗”一書。一般說由于吸气式有很多缺点,現在已不被采用。

至于各部件的作用及尺寸分述于下(參見下頁草图)

1、吸气扩散管——作用为引气入通风机,并利用它測量流量。进口处收集器的断面面积取决于流量的大小,入通风机处的断面应与通风机进口断面相符,这就形成一个扩散管,扩散角度应越小越好,但如不使管变得太长,扩散角也不能太小。但根据扩散管工作正常的要求,扩散角应小于 $8^\circ-10^\circ$

2、压气扩散管——作用为引通风机出来的气并将于减速送至压力室。为达到减速的目的故用扩散管。不論是环状(为中間放电动机)或管状,其扩散的角度均应按最有利的空气动力特性計算即 $8^\circ-10^\circ$

3、压力室——稳定气流,使水輪机进口



有极均匀的流速場。断面或为圆形（鋼板作）或为方形（混凝土作），其断面积的选定应能使在測量水头H时，其压力室中的速度头忽略不計而不致影响到測量的精度。至于压力室的长短，当然越长越好。不过如压力室中已加隔栏，則也不須太长

4、連接室——在压力箱和水輪机进口之間以連接室相連，連接室应是喇叭口狀的逐縮管，并保証有流綫型的形状。

§ 5、水洞装置

一、水洞的用途

就整个說来，水洞可有下列用途：

- 1、船只及軍艦的螺旋槳的研究；
- 2、水力机械中翼型及业片柵的研究；
- 3、某些軸对称物体，水力机械及水工建筑中某些部件的研究；

4、关于汽蝕現象的某些物理本質的研究。

按照不同的研究目的，要求設計具有不同的参数和布置形式的水洞。近代水洞的发展是不是作一个万能的水洞，而是根据不同的研究目的設計不同的水洞。要想在一个水洞上研究各种問題是不可能的。例如对螺旋槳的研究，要求工作断面为圆形，最高速度为 25M/cek 左右。对翼型及叶柵的研究，要求有扁平的矩形工作断面，速度到 15M/cek 已够；水工建筑中某些部件的研究則又要求例如是方形的断面；而对于汽蝕本質的某些力学研究則又要求有很小的工作断面和很高的速度。

在苏联，水洞也是根据不同的研究目的而建立的。现将所了解到的水洞的基本参数和研究目的列表于后。有些部門的水洞因属于保密的范围，未曾了解到。

所屬單位	工作断面	速度范围	压力范围	水泵功率	研究目的
全苏水力机械研究院	80 × 800 × 1300MM	0—14M/cek	0—14kr/cm ²		翼型及叶片柵
哈尔科夫工业大学	80 × 400 × 1000MM	0 — 9		72KBT	翼型及叶片柵
科学院力学研究所	1) 12 × 50MM 2) 6 × 25	0—25 0—25	0—6 0—6	30KBT 5KBT	汽蝕的物理本質及其流体动力学特性的研究
莫斯科大学	120 × 1000 × 2000MM Φ400MM	0—25 0—25	0—7 0—7	400KBT	翼型及叶片柵的研究螺旋槳，軸对称物体的研究

注：其中莫斯科大学的水洞系全苏水力机械研究所帮助設計，工作断面有上、下二个，借助閘門分流以輪換使用。該水洞正在建造，具有空气溶解器，水的空气溶解量加工器等设备。

由上表可見，不同的研究目的，要求有各自的設計参数。

以下将仅就对水力机械的翼型及叶片柵的研究而言，叙述水洞的設計原則。

二、工作段的速度和压力选择

1、速度选择

从相似律要求来看，应使工作断面对翼型或业片柵繞流的Re数等于实际的Re数，这一般很困难达到。对水力机械中翼型和业片柵的使用范围来说，Re ≤ 200万已达到自模区了。因此可根据这一条件来确定最大速度。

取翼型弦长 L = 150MM（見后分析）而水的

粘性系数 $\nu = 10^{-6}$

$$\text{按公式 } Re = \frac{VL}{\nu}$$

则求得的速度为 $V \approx 14 \text{ м/сек}$

至于速度的低限，只在个别时候作 Re 数的影响时才用 $V = 3 \sim 5 \text{ м/сек}$ ，平时均用高速度作试验工作。

2、压力选择

压力的低限，应保证能获得接近于 0 的汽触系数 λ ($\lambda = 0.005$)

$$\lambda = \frac{P_{cm}}{\gamma} - \frac{P_n}{\gamma} - \frac{V^2}{2g}$$

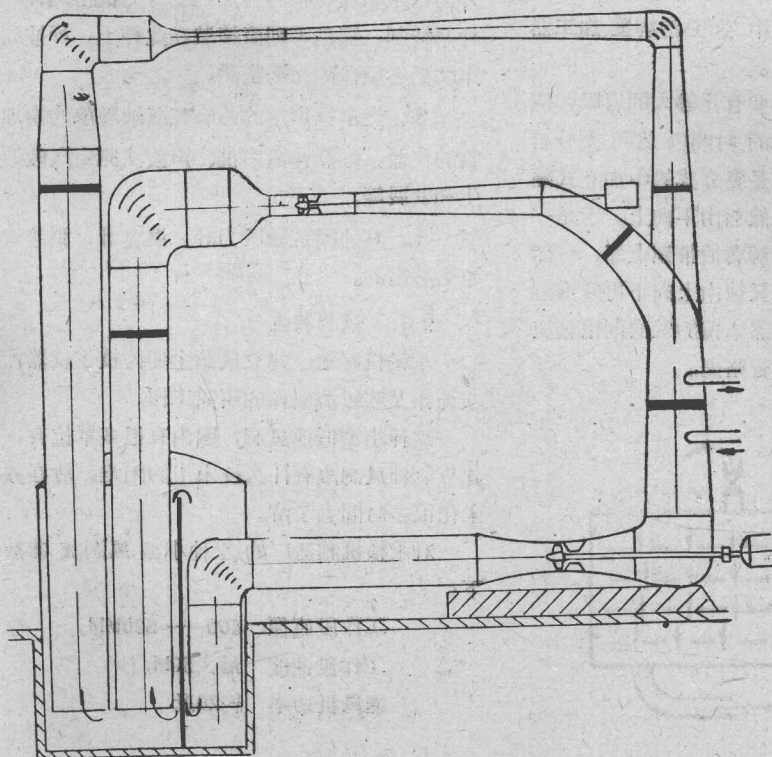
$\frac{P_{cm}}{\gamma}$ 工作段的静压力

$\frac{P_n}{\gamma}$ 已知温度下的汽化压力

$\frac{V^2}{2g}$ 工作段的速度水头。

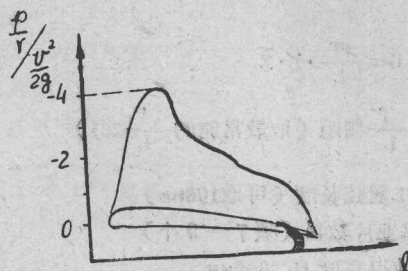
为此压力调节器应放在足够低的位置，以便在余压力（压缩空气）的作用下，便可达到所须的真空度。

压力的上限系根据翼型上的可能的压力分布



来考虑，对水力机械翼型其

$$\frac{\frac{P}{\gamma}}{\frac{V^2}{2g}} \text{ 值可达 } (-4) \quad (-4)$$



因此如欲在这种条件下作非汽触工况的特性

研究，则 $\frac{P}{\gamma} = (-4) \frac{V^2}{2g} = 4 \times 10 = 40 \text{ М 水柱}$

即对工作断面处的最高压力要求达到四个大气压。

对某些特薄的翼型，也要求达到六或七个大气压者。

三、工作段尺寸的选择

1、工作断面高度 H 的上限是挠度，即当试验薄翼型时不能引起变形和振动（因翼型是悬臂放置的），低限是不要使沿垂直断面流速和压力不均匀。根据 ВИГМ 经验 $H = 80 - 120 \text{ мм}$ 较好。

2、翼型弦长 L 应保证在其长度上能钻几排小眼进行压力分布的测量，为此弦 $L = 150 \text{ мм} - 200 \text{ мм}$ 较合适。如对叶片栅只少 $L = 100 \text{ мм}$