

## 前 言

近几十年来，国外水泵技术和泵类产品的技术经济指标都有一定的进展和提高。究其原因，整个技术发展对水泵制造业提出了要求固然是必要的前提，但不断加强试验研究工作和不断改善试验研究设备是取得这些进展的物质基础。

在国内出版的文献资料中，报导国外对离心泵试验研究分析结论方面的材料屡有所见，而对国外试验研究设备和试验研究方法方面的报导却寥若晨星，编辑出版本译文集的目的，在于介绍国外离心泵试验研究设备和方法方面的情况，做到“知己知彼”、“洋为中用”，为在本世纪内使我国水泵制造行业走在世界的前列而添砖加瓦。

本译文集共收选十篇文献，概要地介绍国外离心泵试验设备概况、制造厂和研究所的试验研究设备、封闭回路水洞和高速摄影设备、材料抗汽蚀性能的试验设备、泵的现场试验、用热力学方法确定泵的效率、关于泵的可靠性的试验方法等。当然，“试验研究设备”还涉及更广泛的内容，如：测量流道内液体的压力和速度；液体和过流部件相互作用的力，泵零件的应力以及其他特定项目的测量等。

本译文集所收选的文献均经我所校对，修改和节删，由于编校者水平低，再加之外语和时间的限制，译名欠妥，内容费解甚至谬误之处定然不少，恳切希望读者加以指正。

由于篇幅的限制，所征集的稿件没有全部刊登。在此，对支持我所工作，为本译文集提供稿件的单位和个人致以深切的谢意。

沈阳水泵研究所

## 目 录

|                                       |         |
|---------------------------------------|---------|
| 近年来国外在试验装置、测试仪表及测试方法<br>方面的发展概况 ..... | ( 1 )   |
| 伏依特公司水力研究室模型试验的新设备.....               | ( 14 )  |
| 泵—水轮机模型试验站 .....                      | ( 18 )  |
| 英国国立工程实验室的试验设备 .....                  | ( 37 )  |
| 研究汽蚀的方法 .....                         | ( 51 )  |
| 试验汽蚀性能的设备.....                        | ( 64 )  |
| 衡量材料抗汽蚀破坏的能力.....                     | ( 87 )  |
| 法国电气公司火力发电站泵现场试验概况.....               | ( 105 ) |
| 用热力学方法测量锅炉给水泵的效率 .....                | ( 123 ) |
| 泵可靠性的加速试验法 .....                      | ( 133 ) |
| 附录：简要单位换算表 .....                      | ( 137 ) |

# 近年来国外在试验装置、测试仪表及 测试方法方面的发展概况

随着整个科学技术的发展,近年来,国外水泵技术也取得了一些进展,不但产量和品种迅速增加,而且泵的各方面性能(如流量、扬程、转速和功率的范围,以及效率,抗汽蚀性能,寿命,可靠性,起动特性等)都有较大的提高。无论是为了精确而迅速地测定和改进已有产品的性能,或是为了揭示流体在泵内的流动规律和情况,都需要不断地改进泵的试验装置和试验方法,采用新型高精度仪表,并不断提高试验工作的自动化程度。另外,随着制造技术的发展,正确地掌握压力波的分析计算问题,材料选择和零件应力分析计算以及在各种零件上作用力的瞬时变化等因素的影响也日趋重要。近年来,虽然对各种流体的流动情况和零件应力的分析和计算技术飞速发展,使上述很多问题可以用数学分析方法来解决,但在工程上目前仍然还主要依靠大量的试验来解决问题。

## 一、国外的新型试验装置

为了在较短的时间内,以较小的误差测定泵的各项性能,或是为了真实而全面地认识和观察流体在泵内的流动状况,国外各水泵制造厂的试验室和专业研究所的试验室的试验装备都在不断改进,而且取得了显著的进展。

随着整个科学技术的发展,不断要求水泵行业发展高速、高温、高压、高效率、超低温、大容量等特殊产品,同时不断提高现有产品的水平。为此,就要求更确切地掌握液体在泵内的流动情况;而液体在泵内的流动情况可以说是瞬间万变的,例如,汽蚀气泡从发生到破灭的时间可以短到 $10^{-8}$ 秒以上,要认识和观察这种现象必需有专门的设备。自从1895年第一个封闭回路水洞建成后,以水洞来作为试验、观察和拍摄液体的流动情况和测量叶片和液体间的能量交换的工具也日益普遍,1954年美国加利福尼亚州理工学院流体动力学实验室中的14吋高速水洞的建成更为现代水洞的发展奠定了基础。

近年来,国外水泵专业研究所,实验室和水泵制造厂的试验设备也得到了较大的发展,一般都在原有开式试验台的基础上进一步发展了闭式回路试验台,这样就可以在同一试验装置上进行性能试验和汽蚀试验。此外,为了了解汽蚀发生情况和液体在泵内的流动情况,有些制造厂的试验装置还采用透明壳体进行可见性试验,并将运转过程中的汽蚀气泡和流体流动情况,用高速摄影机拍录。

国外制造厂的试验台在试验过程中的控制及各项参数的测录方面,自动化程度也在不断提高,整个试验过程可由多种电子自动控制仪表和监视仪表来控制。数字计算机和程序计算机已用于泵的试验过程。因此,完全可以由一个人或少数几个人在控制台上操作。各项试验数据通过各种检测仪表和传感器装置直接反映到控制台上,或在控制台上定期自动查询各种自记仪器以获得被测量的量,并能自动计算、记录和打印出来。这样的控制和操作系统,不仅

节省了时间,减轻了试验人员的劳动强度,使试验人员能把精力集中于试验工作,同时,试验的准确度也提高了。据瑞士 Escher-Wyss 公司介绍,由于他们正确地使用了各种控制和测量仪表,压力测量精度达 $\pm 1\%$ ;流量测量精度达 $\pm 2\%$ ;扭矩测量精度可在 $\pm 1\%$ ;转速波动可保持在 $1\%$ 的范围内。而英国国立工程实验室对模型试验的特性曲线的总精确度达到 $\pm 2\%$ 之内,将这种情况与系统误差的95%置信极限结合起来考虑,估计总精确度在 $\pm 3\%$ 范围内。

随着制造技术的发展,泵在流量、扬程和功率方面的记录不断被刷新,为了试验这些大型泵,或在误差可以接受的范围内试验大型泵模型,制造厂不断扩大其试验能力。英国 Weir 泵公司在厂内试验50万千瓦发电机组给水泵时用10500马力的滑环式感应电动机通过圆弧齿轮箱驱动,转速为3750转/分;而泵的额定转速和功率分别为4575转/分和16000马力。瑞士苏尔寿公司的温得秋工程工厂有一个试泵车间,其试验装置参数为:功率7500千瓦;流量16000吨/时,压头4000米;水池容量1500米<sup>3</sup>。另,瑞士苏尔寿公司与西德 KSB 公司联合建立的 Sulzer-KSB 核电站泵有限公司,为了进行出厂前的试验,正在建立一个试验车间,其参数为:流量45000米<sup>3</sup>/时;运行压力180公斤/厘米<sup>2</sup>;运行温度300°C;功率12000千瓦;厂房高21米,跨度28米,长约70米,有20吨和80吨吊车各一台,建成后每年可试大泵24台~30台,每台试验500小时。

但是,也有迹象表明,随着产品的大型化,在制造厂进行全速、全性能试验也越来越困难,其主要原因是在电力或蒸汽等动力源的供应;模拟工作条件;流量和功率测量等方面存在着越来越大的困难。而且有些泵需要在现场进行组装,超过工厂试验台正常运行允许的负荷。因此,近年来国外增强了泵的现场试验的研究,而且取得了显著的进展,特别是以热力学方法来进行现场测量已进入探索性的实用阶段。

在这里,选择瑞士 Escher-Wyss 公司的试验台作为重点来概要地介绍国外制造厂试验装置的情况:

### 1. 试验装置及运转

据介绍,Escher-Wyss 公司原有四台泵和泵—水轮机的试验装置,这些装置都是开式的,容量在240~300瓩范围内,最大转速为2000转/分,最大流量约为0.5米<sup>3</sup>/秒,模型转子直径 $D_1 = 344$ 毫米,最佳效率的单级扬程达25~70米。采用开式装置的优点是空气分离和冷却易于控制。但是,对于汽蚀试验,为了产生吸入水头,必须在低压侧进行节流,同时,为了模拟灌注高度,必须使用增压泵。另一方面,在测量应力与振动时,由于速度与扬程的限制,在大多数情况下所得到的结论与实际情况并不相符合。因此,开式试验台就有进一步改进的必要,所以,Escher-Wyss 公司在原有装置的基础上发展了一套新的闭式试验台,这个装置基本上能满足下列要求:

(1) 采用大功率的闭式循环,使大型单级和两级的原型可以在比较高的单级扬程和实际尾水情况下进行试验;

(2) 模型验收试验符合国际电力技术委员会(IEC,该机构属于ISO)的规范;

(3) 在不改变管道布置的情况下,可在正扬程下对水力机械的全部四个工作象限进行试验;

(4) 具有合理的装置和良好的模型相似性;

- (5) 可以对参数进行快速的、系统的测定;
- (6) 不存在空气分离问题, 特别是当水泵在明显节流和严重汽蚀情况下工作时;
- (7) 能安全运转。

图1-1和图1-2是瑞士 Escher-Wyss 公司新发展的用于径向泵试验的第五号试验装置, 这是一个用来测定泵、泵—水轮机、水轮机的模型特性与汽蚀情况的闭式回路装置。图1-1为该装置作为水泵试验时的系统布置图, 图1-2为该装置作为水轮机试验时的系统布置图。这个装置可以在水泵工况下在原型泵的真实单级扬程下对模型泵和泵—水轮机进行研究。装置的最大扬程为500米; 最大水轮机落差为140米; 两种工况下的最大流量为1.10米<sup>3</sup>/秒。

Escher-Wyss 公司的装置, 占地面积约为 6 × 24米, 最高点高出地板 5 米, 最低点低于试验室地板5.4米。根据在水泵工况时模型的 Q-H 性能, 循环水泵的 Q-H 性能和系统的管路特性, 整个系统可分为三个压力区, 这些压力区在图1-1和图1-2中用不同的颜色表示。

试验装置的参数:

| 泵 工 况  |                                     | 水 轮 机 工 况 |                                     |
|--------|-------------------------------------|-----------|-------------------------------------|
| 最大输入功率 | $P_{\max} = 1230$ 瓩                 | 最大落差      | $H_{\max} = 140$ 米水柱                |
| 最高转速   | $N_{\max} = 5200$ 转/分               | 最大流量      | $Q_{\max} = 1.10$ 米 <sup>3</sup> /秒 |
| 最大流量   | $Q_{\max} = 1.10$ 米 <sup>3</sup> /秒 | 最大输出功率    | $P_{\max} = 500$ 瓩                  |
| 最大扬程   | $H_{\max} = 500$ 米水柱                |           |                                     |
| 转轮直径   | $D_1 =$ 可变                          |           |                                     |

当试验台在泵工况下运转时, 水从尾水箱15流至模型1, 随后经过圆筒状调压阀6进入第一个稳压箱7, 圆筒状调压阀的作用是对扬程进行粗调, 它仅在压力管路中的压头高于180米或在流量极低时发挥作用。然后水又流经文吐里管9进入第二个稳压箱7, 从这里再下到立管并进入能量转换器10。能量转换器是一个四级膨胀装置用以对泵的扬程进行细调。最终水再从能量转换器回到尾水箱15。

当试验台在水轮机工况下运转时, 用使了二个循环泵13。这二个循环泵可按所试验的模型的比转数分别用串联、并联或单独使用的方式联接。此时使用蝶形阀12来切换水流方向。水从尾水箱15流经循环泵13和蝶形阀11进入第二个稳压箱, 再流经文吐里管9进入第一个稳压箱7, 然后又经过圆筒形调压阀6而进入模型机器, 这时圆筒形调压阀6保持全开, 最终水经过尾水管回到尾水箱15。在这个过程中用蝶形阀11对扬程进行粗调节, 而能量转换器10作为旁通回路对扬程进行细调。

这个试验台所用的驱动装置被固定在一块普通的底板5上。为了使驱动装置可以与各种不同的试验模型相配, 底板可以在试验台的两支承梁的全长范围内滑动, 并使用压缩空气轴承, 以消除摩擦。整个驱动装置包括两台异步电机4、两台液力耦合器以及一台直角传动装置2。异步电机的单机容量是600瓩, 双向转速2950转/分, 它们亦可在超同步转速下重新励磁而作为发电机来使用。两台液力耦合器的最大转速为3600转/分, 在最大扭矩下其最小滑差是50转/分。当松开电机和耦合器的连接时, 耦合器就可作为制动器来使用。液力耦合器的转速是电子控制的, 它的转速波动小于1%。直角传动装置2可以在90°范围内旋转, 这样它

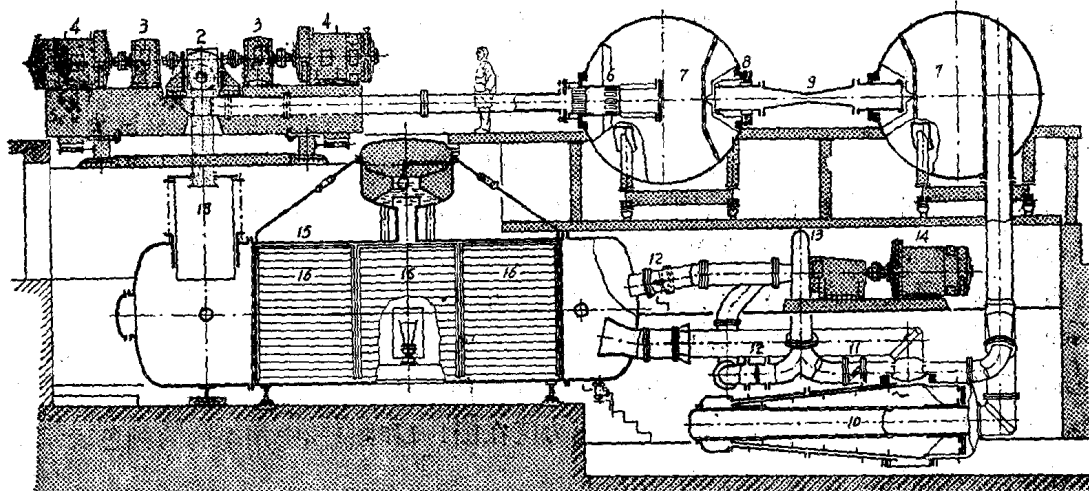


图 1-1

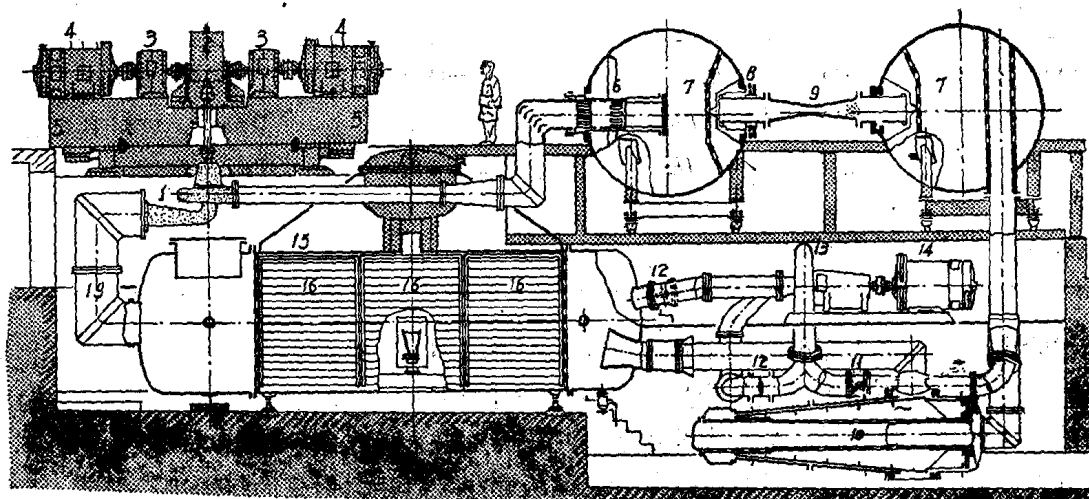


图 1-2

1—模型；2—直角传动装置；3—液力偶合器，也可作为制动器；4—单机功率为600瓩的异步电动机；5—可移动底板，用以固定2、3、4；6—圆筒形调压阀，用作扬程的粗调；7—稳压箱（每个容量为17米<sup>3</sup>）；8—压力补偿填料函；9—文吐里流量计，流量变更时可以更换；10—用来进行细调的能量转换器，它是一个只有最小空气分离的四级膨胀装置；11—对水轮机落差进行细调的蝶形阀；12—将循环泵以串联，并联或单独运转方式连接起来的蝶形阀；13—两个可用串联、并联或单独运转方法连接的循环泵；14—用以驱动13的异步电机，单机功率为400瓩；15—尾水箱（容量约60米<sup>3</sup>）；16—捕捉大的未溶气泡的角盘（Angled Plates）；17—尾水箱圆筒，为了使压力在-8~+52米范围内变化，它可与空气压缩机或真空泵相连，并配有浮子阀以调节水面；18—适应于各种吸入管的轴向调节管；19—与吸入管相连并对变形可以补偿的连接管。

既可适用于立式的模型又可适用于卧式的模型。为了在较大的转速范围内充分利用电机的输出功率，直角传动装置内有五对变速齿轮，这样就有10种不同的速度。

为了使试验装置适合于模型在水轮机工况试验时的各种要求，使用了两台独立的循环泵。循环泵转速为980转/分，用功率为400瓩的异步电机驱动，在流量为0.3米<sup>3</sup>/秒时的扬程为71米水柱；当流量为0.6米<sup>3</sup>/秒时扬程为48米水柱。循环泵可以串联，并联或单独运转。从一种运转方式变为另一种方式是用图2所示的蝶形阀12来控制的。用蝶形阀11来对扬程进行粗调，它是直接由操纵台用电子控制的。

在设计闭式回路装置时, 必须注意空气分离问题。在试验装置充水以后, 水中往往掺杂有空气。因此, 在起动以后, 系统中所有低于大气压力的地方都会有空气分离出来, 例如在转子的汽蚀带、尾水管中的涡带、循环泵和节流装置中的脱流区等等。在容量较小且没有空气分离器的回路中未溶解的空气就以气泡的形式留在水中, 这样, 水很快就变成了牛奶状, 并妨碍观察。在大容量回路中, 一部分空气可在高压下再被溶解, 而其余部分就形成了直径大于1毫米的大气泡, 可用适当的方法将气泡从水中除去, 这样, 水就被部分地除气, 尤其是在充水以后的初始工作时期。过了一段时间以后, 在整个回路中的除气及再溶解就达到平衡。因而在系统中就含有体积不少于1%的气体, 如此就确保了汽蚀现象所必需的汽蚀核的含量。

用避免或减少节流装置中汽蚀的方法, 可以使这些装置中的空气分离保持恒定。如此, 必须使  $\sigma = \frac{\Delta P}{P_A}$  保持较小的数值 (其中  $\Delta P$  = 节流压降,  $P_A$  = 节流出口压力), 也就是说在节流装置中的压力降与节流出口压力相比, 其值必须是较小的。这种结果可以通过在能量转换装置中的多级节流来获得, 这个能量转换装置应在最高的可能压力下运转。为了达到上述目的, 在整个装置中将能量转换器10的中心轴处于卧式模型机轴以下7.2米的地方, 也就是说, 实际上能量转换器是在正压力下运转的。

在进入4级能量转换装置的中心管后, 水流经连续可变的穿孔装置而进入外室, 从外室再流经更多的穿孔而回到中心管, 又从中心管经过可变的穿孔向外流, 最终水经过由两个表面粗糙的锥形体所构成的可变间隙而离去。间隙的调节是通过移动里面的锥形体来实现的, 通过这种调节可同时改变第一和第三级中的穿孔数和改变间隙的宽度。

从能量转换器中分离出来的空气是在大容量尾水箱15中逸出的 (尾水箱容积约为60米<sup>3</sup>), 平板16按一定的角度布置在6.2米长的范围内, 因而它们能捕捉未溶解的汽泡并将它们引入气包17。当最大流量为1.13米<sup>3</sup>/秒时, 水在尾水箱中的最大流速达20厘米/秒, 也就是说水要流经这些按一定角度布置的平板就需要31秒钟。所以平板布置的原则是使水的流动速度能允许空气以一定大小的气泡逸出。

尾水箱的气包有三个作用。首先是将尾水箱中未溶解的空气气泡收集起来并使它们逸出。其次是在这个气包中调节尾水箱的压力, 也就是调节模型的吸入水头。气包与真空泵和压缩空气系统间的联接是通过阀门和气力操纵器来实现的。用这种方法可使模型的吸入水头保持在-8~+52米范围中, 并可自动地保持恒定。第三个作用是利用浮子阀来保持气包中的水面, 并使整个系统的水量保持恒定。因为在运转过程中, 用经常供应新鲜水的方法来冷却试验设备, 这样, 为了确保汽蚀试验所必需的恒定水量, 就有相当量的水要通过浮阀排出, 因此, 浮阀是必须的。浮针通过气力继电器控制与回路两端相联接的阀门开度, 以使回路中在所有运转条件下均有足够的压力。

用以冷却液力耦合器和直角传动装置中的油的冷却水是用两台齿轮泵供应的, 每一台齿轮泵的流量为10升/秒, 它们可以单独或并联使用。水的供应量几乎是恒定的, 与回路中的压力无关。

在闭式回路中如果不进行冷却, 那么循环水温就将上升 (每小时约上升13°C), 这样在运转一段时间以后就必须停机。当供给模型泵的全部能量都转换成热的时候, 整个试验回路的温度就将迅速上升。

为了得到最大的强度, 将容量为17米<sup>3</sup>的稳压箱做成球形的。因为水要在高压下在稳压

停留一些时间，此时一部分已分离的空气将在其中再被溶解，因此这球形的稳压箱也就被视为《空气溶解器》。而稳压箱的真正作用是确保进入文吐里管的水流的稳定性。为了达到这一目的，在稳压箱中装有导板与稳流孔板。

除了进行模型的性能测定和汽蚀试验外，还可以在这种试验台上进行可见性汽蚀试验，利用透明的壳体或观测窗口分别对模型在泵工况与水轮机工况下的汽蚀情况进行照相。

## 2. 文吐里流量计的标定装置

近年来，国外专业研究所、试验室和水力机械制造厂的试验装置本身都带有流量计的标定装置，一般均可在不必要大量变动试验管路和模型的情况下，对流量计进行标定，Escher-Wyss 公司的试验台也是如此。Escher-Wyss 公司试验台使用三种对称式文吐里管，最大流速

分别为：1.13/0.6/0.3米/秒，可根据流量范围的不同而更换。而这些文吐里管是用安德生网板法 (Anderson Screen Method) 来标定的。如图 1-3 所示，尾水箱与圆筒状调压阀之间的回路被折开了，吸入管 30 装在透平机座 21 与尾水箱接头 18 之间，水靠循环泵 13 循环。此时能量转换器是关闭的。如果以旁通管 29 来代替立管 20，就可以在水泵方向来标定流量。压力管 28 或与圆筒状调压阀 6 联接（水轮机方向）或与立管 20 联接（水泵方向），水经由压力管 28 流回到流量标定区域的尾水槽 27。水从尾水槽流经堰 25，这个堰是用以标定流量的，从堰再流经可调的轴流泵而进入测量槽，在这个槽中用网板 23 进行流量标定。实践证明，圆筒状调压阀对流量测定没有影响。

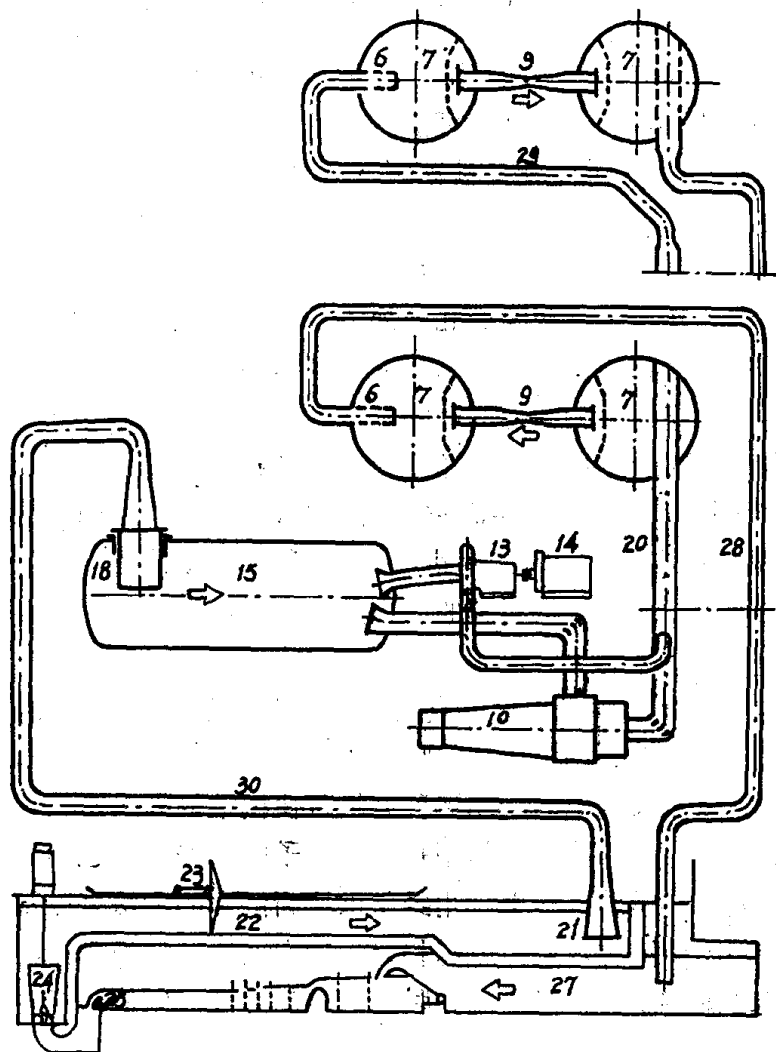


图 1-3

6 至 20，试验装置

6—筒状调压阀；7—稳压箱；9—对称的文吐里管；10—能量转换器；13—循环泵；14—驱动 13 的电机；15—尾水箱；18—尾水箱联接管；20—立管；

21 至 27 在水轮机实验中的低压试验装置；

21—透平座；22—网板的测量槽；23—测量网板；24—可调轴流泵；

25—标定堰；26—稳流孔板；27—尾水槽；

28 至 30，标定用联接管路

28—压力管；29—进行泵方向标定的旁通管；30—吸入管。

## 3. 控制台和测试仪表

国外试验台的自动化程度一般都很高，通常都将所有的测试和显示仪表全部集中在控制台上，这样就可以使整个试验装置精确而又迅速地由一个人来操作。Escher-Wyss 公司的试验系



统也是如此，所有监视仪表负责整个试验装置运转的安全性，当发生故障时，监视仪器即使装置停运，并能在控制台上报告故障所在。被监视的参数有：回路中各点的压力，压缩空气的供应情况，液力偶合器冷却水以及直角传动装置的供油情况，节流装置的开度，所有容器的充水情况等。在模型机器和主电机上连有超速切断器。主电机起动器中的油温也须定期进行检查。

在 Escher-Wyss 公司第五号试验台上所使用的测试和显示仪器的测量精确度较高。用改进了的旋转活塞测压计来测量工作扬程和吸上水头，其误差小于 1‰；流量用经标定的文吐里管来测定，压差用贝兹 (Betz) 差压计测量，差压计用的 U 型管，可使水银柱差为 1 米高，水银面上浮子指针位置可投影到屏幕上，然后进行读数，这样的一套测定仪器可使流量测量误差保持在  $\pm 2\%$  以内；扭矩用光学扭矩仪来测定，其读数用电视录像机反映到控制台上，扭矩仪可以用特制的扭矩臂进行静重标定，因而可以使测量误差小于 1‰；转速是由电脉冲计数器和 60 齿的齿轮来测定的，直接给出每分钟的转数；除此而外，还使用各种温度计以测定水温，周围环境温度以及测试仪器的温度。

## 二 国外在测试仪表方面的进展

随着泵向高速化、大型化方向发展以及计算控制技术的发展和自动化程度的提高，在泵的试验过程中对于检测仪表的精度、灵敏度和可靠性的要求越来越高了。为适应这一系列的要求，近年来国外在压力、流量、温度、扭矩、转速等测量方面都有一些新的发展。总的趋势是向线性化（所谓“线性化”是指将不同讯号转换成标准的、便于信息处理和直接显示的数字量）和数字化方向发展。例如 1969 年在匈牙利布达佩斯展览会上首次展出了线性化仪表“AKURATOR”，这是一种高精度流量计，这种流量计可作为其他流量变送器的二次仪器，又可作为高精度一次检测仪，又如“NOMATRON”线性化数字电压表，可把多种模拟量（温度、压力、流量等）直接换成数字形式，它经过前置放大，数字和最后的线性化，其极限误差为量程的  $\pm 0.1\%$ 。另外，数字式仪表与电子计算机组合的趋势亦日益显著。

除了使用各种通用仪表外，一些实验室还自行设计制造了专用的测量仪表。例如英国国立工程实验室所设计的简单坚固的单度盘水中水银压力计，可广泛地应用于水泵试验，并能提供高度的准确性。这种压力计所测量的压力可高至 200 磅/吋<sup>2</sup>（约 14 公斤/厘米<sup>2</sup>）。西德 Voith 公司自己设计了旋转活塞压力计。

### 1. 压力测量

压力与压差的测量一般仍广泛使用弹簧式压力计，水银压力计，毕托管，贝兹 (Betz) 差压计以及波登 (Bourdon) 压力计等。英国国立工程实验室除了使用专门设计的单度盘水中水银压力计外，在压力较高时则使用活塞式压力计。目前，国外高精度自动化程度较高的水力机械实验室使用旋转活塞式压力计较多，这种压力计可以用高精度自重压力计或在静态下进行标定，这样可使测量误差小于 1‰，比一般压力计精密。

### 2. 流量测量

近年来，流量测量技术的发展是比较快的，除了常用的水堰、容积法和孔板，文吐里、

喷嘴等节流式流量计外,还发展了涡轮式流量计、电磁流量计、卡曼涡列式流量计、靶式流量计、核磁共振流量计、激光流量计等多种结构形式。一般来说,这些新发展的流量计主要用于流程上的液体计量和对特殊介质进行计量。在水力机械的试验中也有采用涡轮流量计和电磁流量计的,但还是采用节流式流量计的较多,这主要是由于节流式流量计的节流装置结构简单,并已标准化了,对各种系数均已积累了相当丰富而且可靠的实验数据,而且精度比较高,如果在试验系统中附有流量计标定系统,更能保持持久精度。所以,在中小型水泵试验中,节流式流量计仍占主导地位。国外有些试验装置还将节流式流量计与涡轮式流量计或电磁流量计串联使用。近年来,在节流式流量计的压差测量方面改进还是很大的,如上述 Escher-Wyss 公司文吐里管的差压测量是将U型管水银面上浮子指针位置投影到屏幕上,然后进行读数;也有一些流量计的压差可以通过变送器将测量值变为数字或其他信号,并作远距离传送。

在大泵实验室试验和现场试验中,采用插入式流量计的较多,所谓插入式流量计就是将一个小型测量元件插入大管道中,测量一点(或一个很小截面)或一条线上各点的流速。插入式流量计的共同特点是结构轻便,拆卸方便、压力损失小,但要求直管段长,测量精度低。插入式流量计的种类很多,如毕托管、均速管(阿牛巴管)、插入式涡轮流量计、涡列流量计及靶式流量计等。

### 3. 转速测量

测量转速除了使用各种转速表外,目前广泛使用的是电脉冲式转数计,即用电脉冲发生器组合电子脉冲计数器来测定转速。近年来又发展了数字式转速计和电磁式转速检测器。这种数字式转速计与检测器配用后,可以用数字计算并指示出脉冲信号,在准确度及测量范围方面比普通仪器优良。

据介绍日本小野测器制作所生产的 HM-210 型数字式转速计其一般测速范围为 10~15000 转/分,但在配上一定的检测器后,可在 0.01~150,000 转/分范围内测定转速。

### 4. 扭矩的测定

关于扭矩的测定,除了常用的以测定电动机输入功率和电动机效率为基础从而确定泵的输入功率外,国外水力机械实验室采用直流电驱动的测功计较多,这种测功计一般均可在一定的转速范围内作无级调速,并可保持转速的精确度在  $\pm 2\%$  以上,而且可在静态用精密砝码进行标定。目前,光学扭矩仪和数字式扭矩仪在水力机械的试验中也日益推广,其简单结构如下:

#### (1) 光学扭矩仪:

光学扭矩仪已经使用20多年了,由于使用方便,测量精度较高(测量误差可小于 1%),并随着控制系统的发展,现在还可通过电视录像的方法直接把读数反映到控制台上,实现了远距离操纵,因而这种扭矩仪仍被视为是测量精度较高的设备。

光学扭矩仪的结构如图1-4所示,扭矩是通过扭转轴传递的,扭转轴在传递扭矩时会产生一个与负荷成正比的扭转角,因此,在扭转轴的一端必然会相对于无应力的传递轴产生一个位移,用望远镜可以通过反射镜系统在准直仪上读出这一位移的大小,传递的扭矩  $M$  可直接由总的扭转位移求得,即:

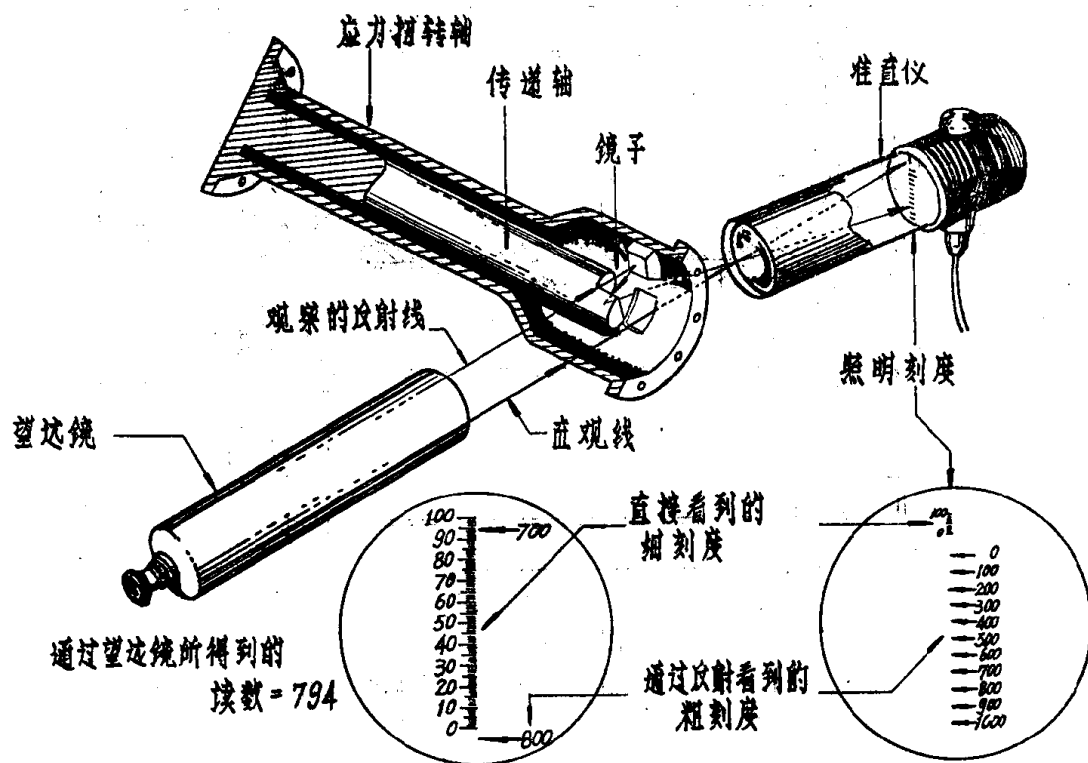


图 1-4

$$M = K \cdot K_t (Y_b - Y_u)$$

式中  $K$  —— 标定常数;

$K_t$  —— 标定常数的温度修正系数;

$Y_b$  —— 在负荷情况下扭矩仪的读数;

$Y_u$  —— 在无负荷情况下扭矩仪的读数;

所传递的功率可由下式求得

$$P = M \cdot 2\pi \cdot n$$

式中  $n$  为泵的转速, 可用脉冲计数计测出。

光学扭矩仪配有挠性联轴器, 图 1-5 为光学扭矩仪的装置图。在连续运转时还需配有固定轴, 在不作扭矩测定时, 将固定轴装上运转。

瑞士 Escher-Wyss 公司的泵试验台上使用了这种扭矩仪来测定功率, 并用电视录像机直接将读数传达到控制台上。

## (2) 数字式扭矩计

数字式扭矩计是一种比较新颖的测量扭矩的设备。数字式扭矩计的检测器并不直接与传动轴接触, 而是测定装在扭矩计内的两个电磁检测器所发生的脉冲信号的相位差, 这一相位差与扭转角度成正比, 并可将这个电信号用数字测录器测录。图 1-6 为日本小野测器制作所制造的 DTM-407 型数字式扭矩计的结构和工作程序, 图 1-7 为日本生产的 DSTB 型扭矩检测器的外形。

据报导, 日本日立制作所在进行模型泵的试验过程中早在 1970 年前后即已开始用数字式扭矩计来测定泵的效率。

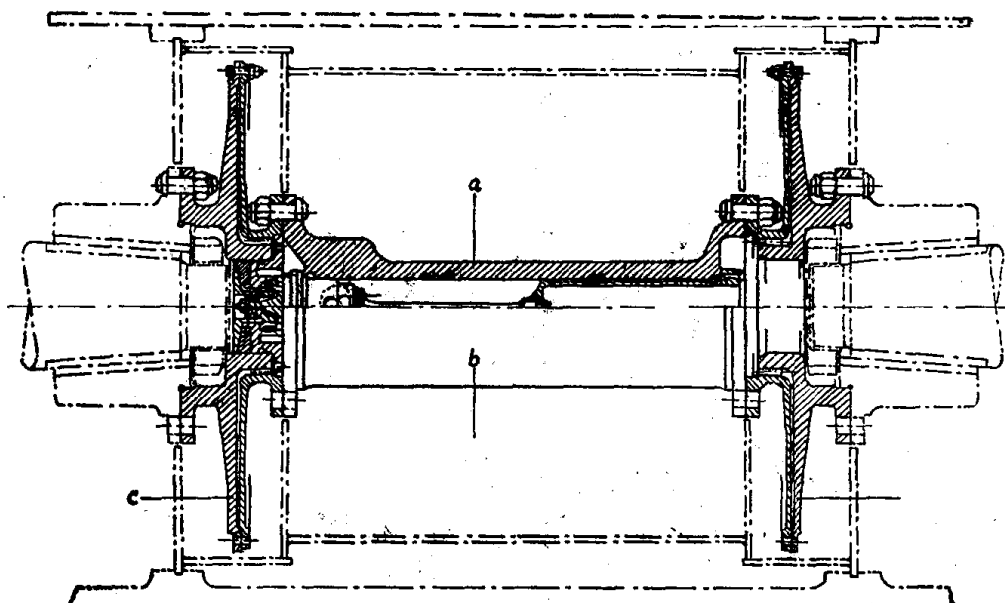


图 1-5

a—扭转轴；b—无应力轴；c—补偿轴向膨胀的联轴器。

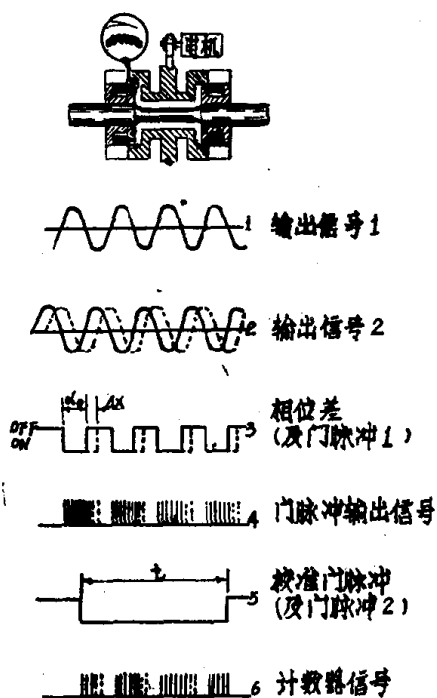


图 1-6

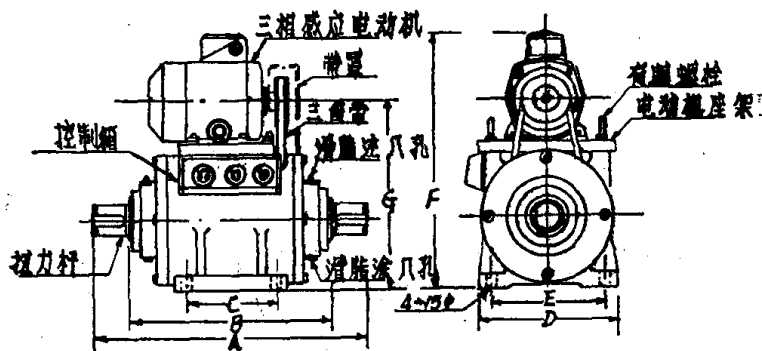


图 1-7

## 5. 温度测量

温度测量在使用常规的方法（即通过测定扬程、流量、转速和功率）来决定泵的效率的过程中并不显得十分重要，但随着用测定温差来决定泵效率的方法的出现，精确地测定温度也就显得越来越重要了。温度的测量除了使用水银温度计、酒精温度计、热敏电阻温度计、

热电偶温度计外，近年来又发展了半导体热敏电阻温度计以及应用谐振技术的石英温度计。

附表列出了热敏电阻温度计与热电偶、热电阻以及玻璃温度计的比较。从表中可看出，热敏电阻温度计的特点是电阻值大，比较容易实现小型化，可以进行点测量，有最小分度值和最高测量精度，非常适合于测量微小的温差（包括两点间的微小温差和一点的温度变化），此外，就整个温度计来说，它的价格也比较低。目前，国外用测量泵入口和出口的温差来确定泵效率时，一般均采用热敏电阻温度计。

石英温度计是一种声学测温仪器，据介绍，美国 Hewlett-Packard 公司的 HP2801A 型

石英温度计，其测量范围是 $-112\sim 482^{\circ}\text{F}$  ( $-44.4\sim 250^{\circ}\text{C}$ )，分辨能力为 $0.001^{\circ}\text{F}$ ，可用来测量温度和温差。

附表 热敏电阻温度计与热电偶、热电阻及玻璃温度计的比较

| 比较项目                         | 热敏电阻温度计                | 热电偶温度计          | 热电阻温度计          | 玻璃温度计                 |
|------------------------------|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------------|
| 形状 (指感温部份)                   | 小                      | 中               | 大               | 大                     |
| 点测量                          | 可                      | 略可              | 不可              | 不可                    |
| 电阻值 (指感温部份)                  | 大                      | 小               | 小               | —                     |
| 远距离测量                        | 可                      | 略可              | 略可              | 不可                    |
| 基准温度接点                       | 不需要                    | 需要              | 不需要             | 不需要                   |
| 最小分度值 ( $^{\circ}\text{C}$ ) | 0.02                   | 0.1             | 1               | 0.1                   |
| 时间常数 (指感温部份) 秒               | 0.05~10                | 50~200          | 3~60            | 80 (空气中)              |
| 互换性                          | 略有困难                   | 可               | 可               | 可                     |
| 测温范围 ( $^{\circ}\text{C}$ )  | $-50\sim +300$         | $-200\sim 1600$ | $-200\sim +500$ | $-100\sim +600$       |
| 精度                           | $0.05^{\circ}\text{C}$ | 1~2% 温度数值       | 0.5~2% / 标尺量程   | $0.1^{\circ}\text{C}$ |

### 三 国外的一些测试方法

近年来，在泵类产品的测试方面，除了用传统的方法测定流量  $Q$ 、扬程  $H$ 、功率  $N$ 、转速  $n$  和汽蚀余量  $\Delta h$  从而确定泵的性能外，为解决某一特定问题 (例如作用在泵零件上的力、材料应力、振动、噪音等) 而提出的测试方法和测试设备也日新月异，不胜枚举。现将用电阻应变仪来测定泵的经向力和用测温差的方法来确定泵的效率的方法简要介绍如下：

#### 1. 用电阻应变仪来测定泵的经向力

为了使泵不至于因受轴向或经向力的作用而遭到破坏，在泵的模型上预先测得推力分布情况是极为重要的。

国外广泛地使用电阻应变仪来测定受力部位的应力变化，由此进一步分析轴向力和经向力的分布情况。

日本日立制作所曾对巴西 Santa Ines 泵站所用的离心泵模型的经向力进行了比较详细的试验，在这一试验中，分别在水泵和水轮机工况下测定作用在叶轮上的经向力。其测定装置如图1-8所示。在这一装置中经向力由球面滚柱轴承 1 与滚柱轴承 2 来承受。作用在滚柱轴承 2 上的经向力被传送到图1-8中 A-A 剖面所示的 4 根梁 (Beam) 上。八个电阻应变仪分别成对地按放在梁上。电阻应变片  $U \times 1$ 、 $U \times 2$ 、 $U \times 3$ 、 $U \times 4$  与  $UY_1$ 、 $UY_2$ 、 $UY_3$ 、 $UY_4$  用电缆连至两个威斯頓电桥，以分别测定经向力的水平与垂直分量。经向力的大小与方向由两个分量的矢量和来决定。

在测定过程中不允许在梁上产生弯曲应力，这时可以通过威斯頓电桥来消除弯曲应力的影响。

在进行测定之前，用将重量 (相当于经向力) 作用于叶轮中心线的方法预先进行标定。

#### 2. 用温度测量法确定泵的效率

在一般情况下，通过测量泵的吸入及吐出扬程，泵的流量以及输入功率 (为了确定功率，

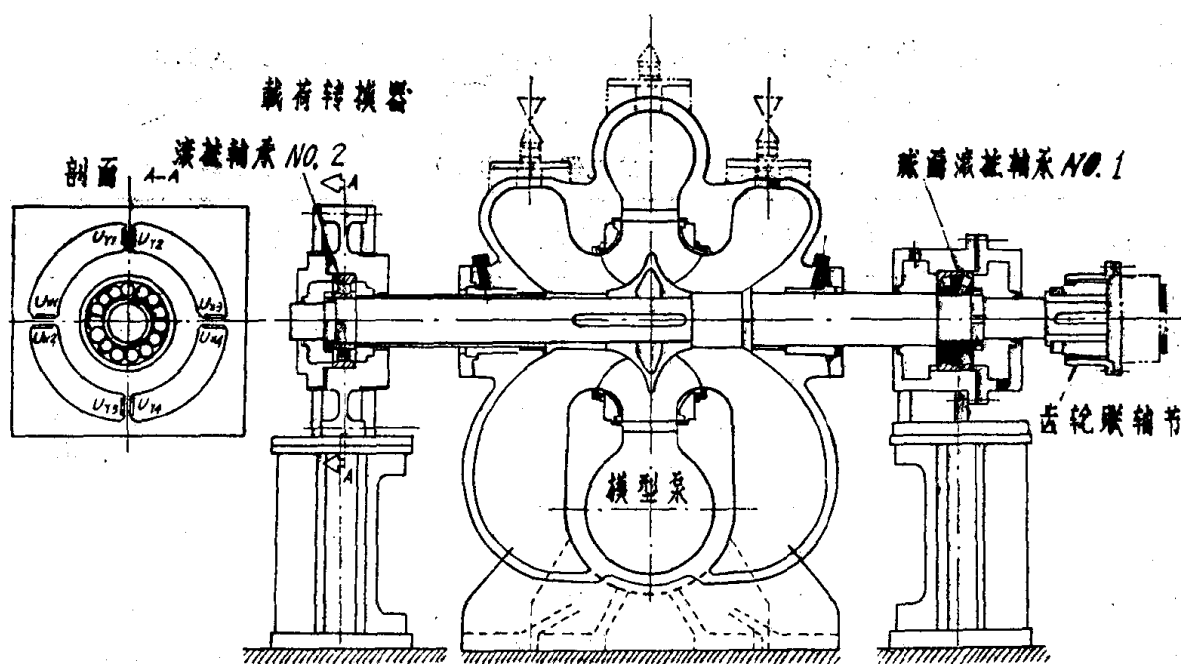


图 1-8

往往需要测量转速), 经过计算即可得出泵的效率。但是对大流量的泵, 要精确地测定流量和功率是有困难的, 因此, 用这种方法来确定大型泵的效率是不很现实的。据报导, 国外用测量泵的进、出口温度来决定泵效率的方法已进入探索性实用阶段。这种方法的基本依据是: 将水流经泵的过程视为绝热过程, 根据热力学原理, 在水泵工作过程中, 功率的损失将起对水的加热作用, 从而使水的温度升高。因而就可以用测定温升的方法来决定泵的效率。用这种方法就不需测量流量和轴功率。据报导, 使用常用的压力表及水银温度计, 用测量温度的方法可以使矿井用泵的效率测定精确到  $\pm 1\%$ , 如果进一步使用灵敏的温度感应件, 如热电偶、热电阻或石英温度计, 则测量精度可提高至  $\pm 0.3\%$ 。据介绍, 法国已于1967年开始, 将这种方法应用于测定锅炉给水泵的效率, 试验证明, 如果测定泵进、出口温度差的精度能在  $0.01^\circ\text{C}$  范围内的话, 这种测定的方法就将比常规的方法精确得多。

用热力学方法测定泵效率的理论基础为:

当泵将质量为  $m$  的流体从进口压力  $P_1$  增加到出口压力  $P_2$  时, 假定这一过程中泵的输入功率为  $P$ , 则泵的效率为:

$$\eta = \frac{P_i}{P}$$

式中  $P_i$  为理想泵所需要的等熵功率, 表达式如下:

$$P_i = m \bar{v} \Delta P$$

$$P_i = m F v_1 \Delta P$$

式中  $m$ ——水的质量流量;

$\Delta P$ ——经过泵后的压力升高值;

$\bar{v}$ ——在压力  $P_1$  与  $P_2$  之间的水的平均比容;

$v_1$ ——在进口温度为  $T_1$  进口压力为  $P_1$  时的比容;

$F$ —— $\bar{v}$  与  $v_1$  的比值;

可以这样认为：在理想系（效率为100%）中，对水的压缩过程将引起水温的少量上升。因为泵与周围空气间的热交换相对于其他的消耗来说是很小的，故可以把它看成是一个绝热系统。因此，在理想系中的压缩过程即为一等熵过程，在这一过程中的温升可以用热力学的基本原理来计算。

在任何一台真实泵中，其输入功率总是大于在相同的吐出压力下输送等量水的理想泵所需的功率。在真实泵中的这些附加功率（等于  $P - P_i$ ）消耗于各种损失从而使水的温度升高，其结果是引起附加温升  $\Delta T'$ ，因而，在真实泵中，水的总的温升将等于等熵温升  $\Delta T_i$  与附加温升  $\Delta T'$  的总和，即：

$$\Delta T = \Delta T_i + \Delta T'$$

使附加功率与水流经泵以后的附加焓值相等，则得：

$$P - P_i = m C_p \Delta T'$$

式中  $C_p$  —— 水在压力  $P_2$  时的比热

将上列各式简化整理后即可得泵效率的表达式：

$$\eta = \frac{1}{1 + (C_p \Delta T') / \bar{v} \Delta P}$$

或

$$\eta = \frac{1}{1 + C(\Delta T - \Delta T_i) / \Delta P}$$

式中  $C$  ——  $C_p$  与  $\bar{v}$  的比值。

在实际计算时还需考虑各种因素的影响（例如泵进出口流速不等，泵的散热损失、平衡装置的泄漏损失等）并对计算结果进行修正。

实际经验证明，在使用温度法时，即使在测定过程中每一单项的测量误差都较大，但是对效率的影响却不会很大。这主要是因为温度测量法所测的是泵的损失。假定损失的总量为 33%，并假定测量精度为  $\pm 3\%$ （也就是说在每 33% 中的误差为  $\pm 1\%$ ），则效率即为  $1 - (0.33 \pm 1) = 0.67 \pm 1$ 。第二个原因是温度测量法只需测压力和温度两个量，而不是三个，但在常规法中除了测量压力外还需测量流量与功率。因此，所得的结论是：用温升法决定泵的效率比常规法要精确得多。事实证明，如果对于计算所需的多量的测量精度都相等的话，温度法将比常规法精确四倍。

“国外泵类产品科研技术发展概况”编写组

## 伏依特(Voith)公司水力研究室模型试验的新设备

摘要：在最近几年内，伏依特公司的“Brunnenmühle”试验室水力机械和其他设备的模型试验装置有了较大的扩展。新的试验装置从1972年初起已顺利地运行，本文简要地介绍在此期间所取得的经验。

为了容纳新的试验设备，将已有的宽度为19米的试验厂房接长了22米，使全长达73米。

对安装的新装置来说，采用自动获得数据和程序系统是采用先进试验技术的重要的一步。为此目的而采用的电子数据处理中心以及适当的测量设备和传感器能保证在范围明确的周期内自动查询不同的自记仪器并获得被测量的量。然后，能计算出所需要的值，并在试验设备上打印出来。

这个设备的容量能使几个试验装置同时使用。因此，试验所需要的时间大为减少，并可以避免计算和分析的错误。试验工作者可以摆脱所有日常的工作而专心于其他必需进行的工作或进行观察。

### 要求

新的试验设备由两个单独的封闭回路组成，高压回路的最大水头为100米，用来试验混流式水轮机，泵—水轮机、泵和高扬程轴流式水轮机。它包括两个装置(图2-1)。

低压回路最大水头为30米，试验轴流式水轮机，贯流式水轮，泵—水轮机，和高速泵(图2-2)。

获得数据和程序系统被连接到这两个回路上去并连接到现有的试验泵和泵—水轮机的1500千瓦的装置上去。

新试验装置的作用可概括如下：

- a) 在可以把模型试验结论精确地换算到实际泵的扬程下，对各种型号的反应式水轮机、泵—水轮机和泵的大小适中的模型进行试验；
- b) 同时测量效率和汽蚀性能，能测量机器性能的全工况\* (All quadrants of machine characteristics) (包括速度从零到飞逸速度) 而不需要重新调整试验设备的时间；
- c) 由于采用了最快的操作，最少的试验人员，高度的连续测量精度及简单而又精确的标定设备而使试验很经济；
- d) 能适应大小和结构不同的各种机器模型；
- e) 很容易达到机器模型以观察流动现象，并使安装工作迅速而简单；
- f) 符合包括模型验收试验在内的所有 IEC\*\* 验收规范，并能指出这些仪表及其所要求的标定设备的读数。特别要指出的是，在任何情况下，标定流量测量试验设备时可以不

---

\* 全工况指水力机械在四个象限内的性能——译注

\*\* IEC系国际电气工程委员会——译注



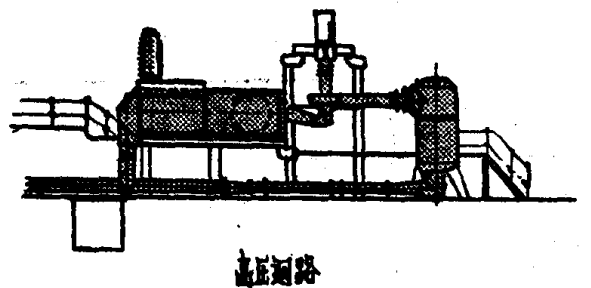


图2-1 表示高压回路试验装置的上游水箱，卧式和立式模型和下游水箱位置的顶视图和正视图

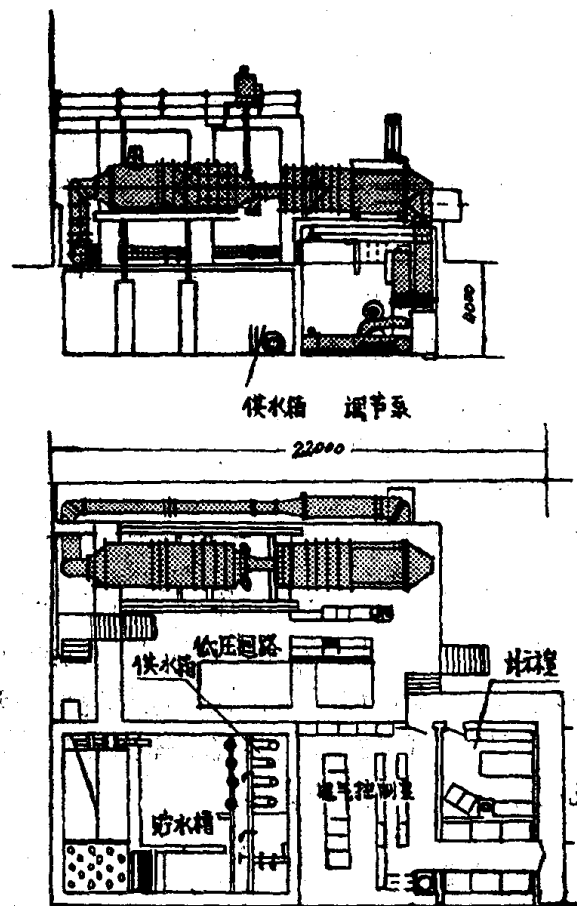


图2-2 表示低压回路试验装置的上游水箱，连接在电动机——发电机上的模型和下游水箱位置的顶视图和正视图

验设备进行大量的重新调整，也不需要将水轮机模型从试验现场移走。

### 机械设备

两个回路试验装置中的水力机械模型被连接到既可作发电机运行，又可作电动机运行的电机上去。所以，对各种工作型式（无论是吸收流量或吸收功率）都易于进行研究工作。

为了更好地适应所要求的功率和旋转速度的工作范围，采用通过半导体开关稳压整流器（Thyristor regulating rectifiers）把直流并激绕组设备连接到电源系统，用这种方法可以使速度精确地保持为常数。

高压回路中的卧式试验装置和立式试验装置中的电机，在转速为 1207~1700 转/分时， $P_{\max} = 260$  千瓦到 420 千瓦；而低压回路中的设备在转速为 1000~1700 转/分时，额定功率为  $P_{\max} = 220$  千瓦。

与已有试验厂房相比，扩展部分有 4 米深的地下室，地下室主要是为安装循环泵用的，在水轮机工作时循环泵为模型设备提供水头。

为了在试验时给模型提供更宽广的扬程和流量范围，采用下列办法：

每个回路有两台同样的泵，每台泵由安装在两台泵之间的电机驱动。采用直流电动机，这种电动机通过半导体开关稳压整流器连接到电源栅极上去，并可以在 300~750 转/分之间作无级调速。