

# 日本水轮机技术的进展

佟文敏 编译

(水电部成都勘测设计院)

## 一、前言

水力资源是用之不尽的循环能源，而且具有成本低、供电质量稳定、以及能适应电力系统负荷变动等优点。自1980年石油危机之后，重新引起日本对水力发电的重视。据日本第五次水力资源调查，尚未开发的水力资源还约有13000MW，相当于已开发的70%。其中大部分属于经济性稍差的引水式中小型水电点子。为此改进水电设备性能是促进开发剩余水力资源的重要课题。

## 二、大中型水轮机的设计与研制

### 1. 利用激光流速计测定水轮机过机流量

制作和试验模型水轮机用试凑法，研制开发水轮机需要较长时间和较多费用。自70年代后期以来，日本开发了用电子计算机研究水轮机内部流态的数值解析程序，这样可以在短时间内得出优化的水轮机设计。为更加提高该流态解析程序的精度，需要将解析程序结果与实际水轮机流态进行对照。以高精度测定模型水轮机试验装置的流速为目的，富士电机公司于1985年引进了双焦点的激光流速计。该流速计是向水流中射进2根激光束，检测水流中粒子横切焦点时所产生的散乱光，靠测定粒子通过2根激光束的时间求得流量的装置。将其中一根光束向另一方向回转，不仅能测定水轮机内的水流速度，还可测定水流方向。因皮托管测速装置是将皮托管插入被测水流之中而产生紊流，不具有良好的测定精度。与此相反，激光流速计不扰乱流态，不会使被测水流产生紊流，同时在测定导叶与转轮叶片之间的狭窄流道上也具有高精度测定的优点。

图1为激光流速计测定转浆式水轮机转轮入口流态与流态解析程序计算结果的相对比较。借大量测定模型装置的流态，将更加提高计算机流态解析程序的精度。

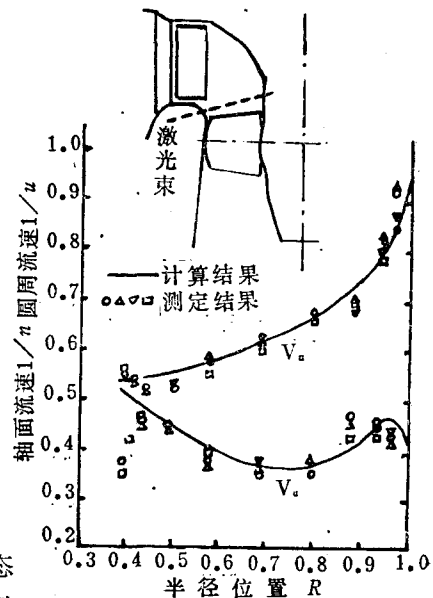


图1 转浆式水轮机模型转轮叶片入口流速的比较

## 2. 水轮机设计领域中计算机辅助设计

计算机辅助设计 (CAD) 和计算机辅助制造 (CAM) 的开发促进了设计合理化。以中小型水力机组为中心实现结构标准化, 可以借CAD进行自动设计, 对非标准部件可相应进行对话式的编集设计。

CAD不仅能绘制设计和制造加工图, 还可用于钣金加工的材料展开、嵌套、水轮机转轮叶片的数控加工等。因为利用电子计算机, 能进行三元计算, 所以能验证将一些复杂的部件装进某个部件之中的工作状态。

图2表示转浆式转轮轮毂内, 校核转轮叶片从全关到全开过程中, 各操作杆机构是否相互干扰的一例。

今后CAD还将充实到油压系统、给排水系统及预装配等的相互配管系统的程序中, 并大为提高设计制图的生产效率。

## 3. 水轮机设计制造

(1) 混流式水轮机 富士电机为加拿大里维尔斯托克水电站设计制造的水轮机, 单机出力 495MW, 水头 130.15M, 额定转速 113 r/min, 1984年5月到12月有四台相继投入运行。转轮外径 7m, 重约160t。由于运输重量限制分为二瓣制造, 转轮上冠用螺钉组合, 下环在现场焊接。现场焊接成为整体转轮后用特殊切削机床加工焊接部分的外圆, 然后在现场进行动平衡试验。水轮机效率试验是用多声道超声波法进行的。

澳大利亚塔斯玛尼亚电力厅所属的不少水电站担负调相运行任务, 有的电站每年调相运行时间达3000小时。为此要求在设计上给予特殊考虑。为解决长时间调相压水需要, 富士电机设计制造了用压力钢管的压力水 (该公司专利) 射流泵方式压水, 满足了长时间的调相工况运行。

(2) 转浆式水轮机 为美国拉奇必克水电站制造了最大出力 46MW, 有效水头 72.2m 的转浆式水轮机属高水头转浆式水轮机。因该水电站是利用原有的压力钢管安装新机组进行技术改造的水电站, 压力钢管的设计水压小 (水压上升值约为 7%), 为使水压上升率小, 导叶关闭时间设计为 90 秒, 因而转速上升就要在接近飞逸转速状态下连续运行 1 分钟以上。

转浆式水轮机根据转轮叶片开度和导叶开度的协配合关系, 飞逸转速有较大变化。为此用电子计算机对该水轮机的导叶和转轮叶片的关闭方式进行了模拟计算, 取转速上升率为 85%。在设计时不仅考虑了在这样长时间的高转速情况下不使产生较大机械振动的主轴轴系, 而且对水轮机本体周围的固有振动值进行了解析, 以至采用略加补强的措施而不使其产生共振。

(3) 水斗式水轮机 水斗式水轮机可借切换喷嘴数使部分负荷工况时在高效率区运行; 借缓慢关闭喷嘴降低引水系统的水压上升率; 借快速关闭折流器可减小机组的转

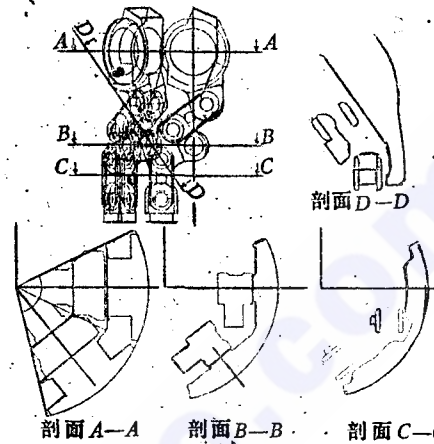


图2 转浆式水轮机转轮轮毂内部操作机构

速上升率；同时借关闭折流器可向下游进行空载泄流，满足下游用水需要；这都是其他型式水轮机所不具有的最大特征。日本在改善射流干扰的高比速6喷嘴水斗式水轮机转轮方面受到世界同行的重视。

向水斗式水轮机机壳内部送压缩空气，压下机壳内部水面的反压运行，在日本水轮机制造上也得到应用。富士电机首次为美国沙尔滩水电站(最大出力57MW，2台)进行设计制造，该水电站于1984年5月投入运行。反压运行要求尾水室不应有空气泄漏。为回收混合在水流中的空气，在尾水室出口附近设置遮流帷幕，遮流帷幕所在位置对向机壳内的给气量有较大影响。沙尔滩水电站是根据模型试验确定的最优位置，减少了给气的压缩空气机的容量。反压运行也应用于美国阿拉斯加州德拉雷克水电站(最大出力13.7MW，1984年12月开始运行)。水斗式水轮机反压运行方式的实现，解决了由于尾水位过高而减少水斗式水轮机有效水头利用的缺点。

利用全开喷嘴、全关折流器向下游进行空载泄流运行在美国裴拉米德水电站(单机出力43.3MW)、桑夫郎西斯奇水电站(单机出力25MW)得到运行实践。桑夫郎西斯奇水电站自1983年运行以来已进行了1500小时的空载泄流运行。因在空载泄流时具有能量很大的喷流冲刷地点，在该处用不锈钢堆焊和补强，可以防止喷流而造成的损坏。实践证明，即使长时间进行空载泄流也不会给折流器带来不良影响。

(4)灯泡式水轮机 目前日本最大灯泡式水轮机安装在新乡二级水电站，单机出力40.6MW，最大有效水头22.5m。就水头而言，在灯泡式水轮机中也算是高水头。在设计时特别对作用在发电机上的各种荷载如何传递给水工建筑基础的问题进行了充分研究。因灯泡式水轮发电机组的 $GD^2$ 小，尾水渠较长，在甩负荷时尾水管的水压变动较大，所以，事前用电子计算机对所有工况下的甩负荷特性进行了模拟计算，确定最优导叶关闭方式。

富士电机最近为美国俄亥俄河上新马丁斯维里水电站设计制造了发电机最大功率19540kW，最大有效水头6m，最大流量 $396\text{ m}^3/\text{s}$ ，额定转速 $64\text{ r}/\text{min}$ ，水轮机转轮直径7.3m，发电机机座外径8.4m的大型灯泡式水轮发电机组二台，目前正在安装中。该机组的主要参数：

①水轮机

型式：灯泡转浆式；

出力：7230/18710/9370kW，最大20040kW；

有效水头：6.4/5.4/3.3m；

流量：127.1/396.2/353.4 $\text{ m}^3/\text{ s}$ ；

额定转速：64r/min；

比速：1074 $\text{ m}\cdot\text{ kW}$ ；

最大水压：18.3m；

最大转速上升率：60%

②发电机

注：水斗式水轮机在反压条件下运行详见《水力机械技术》1984年5期

型 式：三相交流同步发电机

功 率：21 620(最大)/18 800(额定)kVA

额定频率：60Hz

功率因数：0.9（滞后）

励磁方式：静止可控硅

该水轮机一年内约有 5%的时间在有效水头 3.3m 情况下运行，并要求在水头 2m 情况下运行 1 小时。为满足超低水头而且水头变幅大的要求，相对取用大的单位流量 ( $Q_1' = 3\ 300\ l/s$ )，转轮叶片采用 3 片，得到良好效率和汽蚀特性。

目前世界上转轮直径大于 7 m 的大型灯泡式水轮机列于表 1。

表1 世界大型灯泡式水轮机

( $D_1 \geq 7\ m$ )

电 站 名 称	河 流 名 (国别)	台 数	出 力 (MW)	有效水头 (m)	转轮直径 (m)	投入时间 (年)
Murray L and D	阿康沙斯(美)	2	19.5	5.6	8.4	制造中
Sydney A, Murray	密西西比(美)	8	24.0	4.5	8.2	未定
Racine	俄亥俄(美)	2	24.6	7.0	7.7	1983
萨拉托夫	伏尔加(苏)	2	47.3	15.0	7.5	1972
Jenpeg	卡南(加拿大)	6	28.0	4.9	7.5	1976
Rock Island	哥伦比亚(美)	8	53.0	12.1	7.4	1977
New Martinsville	俄亥俄(美)	2	19.8	6.4	7.3	安装中
St. Mary's	中美阿里(加拿大)	3	18.0	5.7	7.1	1983

### 三、中小型水轮机的设计和研制

#### 1. 部份负荷的水轮机

混流式水轮机不具有如转浆式水轮机那样可转动转轮叶片的机构，在偏离设计工况下，水流不能追随翼形流动，因而产生汽蚀以及在尾水管内部产生水压脉动，而引起振动和噪声，所以有一个限制运行的允许范围。引水式水电站在一年中的流量变幅较大，以往不重视在枯水小流量季节如何提高水轮机效率增加发电量的问题。为了改善在小流量部分负荷期提高水轮机效率，日本近年来研制了部分负荷的水轮机转轮。新转轮是以改善在部分负荷区较大幅度提高效率以及降低汽蚀和水压脉动引起的振动和噪声，扩大水轮机的允许运行范围为目的。

日本山梨县奈良田三级是年内有一半时间的流量，使水轮机处于 50% 以下负荷运行的引水式水电站；九州电力公司大河内水电站也是一座年间流量变幅大的引水式水电站。这些水电站都要求水轮机改善在部分负荷下的运行状态。大河内水电站混流式水轮机的有效水头 282.6m，最大流量  $5.2\ m^3/s$ ，水轮机最大出力 12 400kW，额定转速 900 r/min。下面介绍一下大河内水电站新转轮的研制概况。

以往研制新转轮是靠经验设计和反复进行模型试验后认可。近年来已借电子计算机

的高速化、大容量化进行模拟转轮内部流态。内部流态的解析最初是以准三元解法，最近研制出了以有限元法全面解析三元流态的方法。

水轮机产生的损失大致分为水力损失、摩擦损失和漏泄损失。在小流量部分负荷区由于流向偏离设计工况，因水力损失而使效率降低。因此在确定部分负荷新转轮的流道形状时采用如下基本方针。

- (1) 抑制转轮叶片之间的脱流，为减小汽蚀和叶片之间的涡流而增加翼长。
- (2) 为降低在偏离设计工况很广运行范围内叶片入口的冲击损失，尽量缩小导叶的工作范围，同时为能对应大流量时的运行工况，增加导叶高度。
- (3) 减小转轮出口直径，减小转轮出口水流的切向分速。据此，可减少在部分负荷时尾水管内的水力损失。
- (4) 部分负荷工况转轮内部的水流偏向下环侧，在上冠产生二次流和涡流，这是造成振动、噪声和效率降低的原因。为此，与既有转轮相比，增大上冠侧的转轮叶片出口开度，减小下环侧的转轮叶片出口开度，以减少水流的偏转。

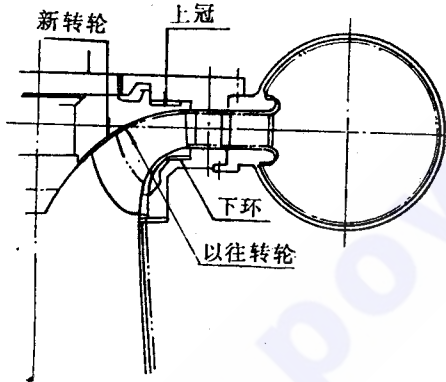


图3 水轮机过流通道形状比较

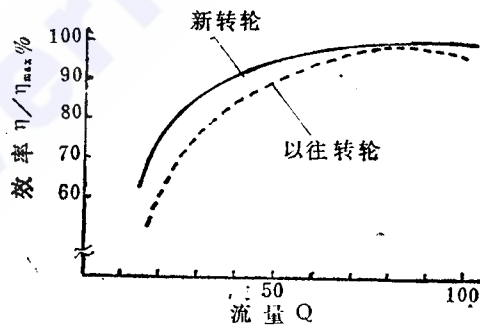


图4 模型水轮机效率曲线

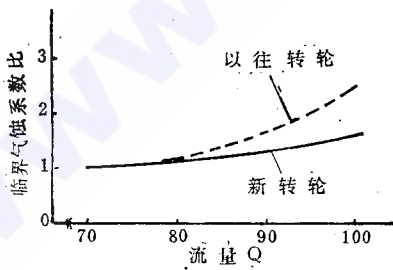


图5 模型水轮机汽蚀系数性能曲线

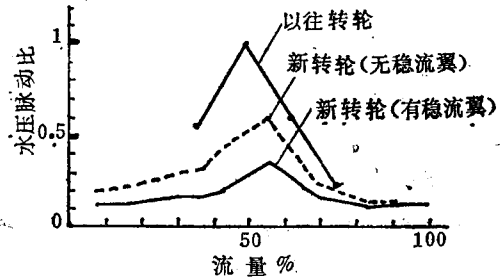


图6 模型水轮机尾水管内水压脉动性能曲线

基于上述方针确定了流道形状进行模拟，将所得的新转轮形状与旧转轮形状的比较示于图3。

新转轮的模型试验结果与旧转轮的比较示于图4、5、6。

图4是以新转轮最大效率（ $\eta_{max}$ ）为100%的相对效率。自图4看出，新转轮在全流量范围内的效率均有提高，特别在部分负荷时效率得到大幅度的改善，尤其在20%流量附近的效率提高尤为可观。

图5是以新转轮的最小临界汽蚀系数( $\sigma_c$ )为1。自图中看出新转轮在大流量范围的汽蚀系数比旧转轮有所改善,初生汽蚀系数也同样随临界汽蚀系数的降低而降低。

图6中新转轮的最大水压脉动值为1。自图中看出,新转轮的水压脉动值与旧转轮同样在50%流量附近最大,但其值却下降约50%,其它范围也都有所下降。在真机上,于尾水管壁装置了三角稳流翼,水压脉动值又有所下降,没有影响水轮机效率。

对奈良田三级水电站新转轮通过模型试验证实, $n_s=150m \cdot kW$ 的新转轮在全负荷流量的28%左右仍能稳定运行(原转轮限制在全负荷流量的40%); $n_s=200m \cdot kW$ 的新转轮由原来限制在全负荷流量60%改善到40%左右仍能安全稳定运行。奈良田水电站水轮机参数:横轴混流式,出力2620kW,有效水头155.9m,转速1000r/min,比速92.9m·kW。

## 2. 水润滑导轴承及水毅水轮机

水轮机导轴承常规使用油润滑,从不需维修观点出发,自1980年开始研制了水润滑导轴承,迄今已运行于10余台机组上。

水润滑导轴承是以水作为润滑剂,轴瓦是在棉织布强化苯酚树脂上按层缠绕玻璃丝布强化苯酚树脂的构造。因为采用动压轴承方式,所以靠轴与轴瓦之间的相对滑动和水的粘性形成楔状水膜。由于靠在负载面上产生水膜压力支承轴承荷载,所以不要如静压轴承方式支承压力的给水系统而作成内藏式。图7为主轴转浆式水轮机水润滑轴承的装配图。

转浆式水轮机的转轮、轮毂内部的转轮叶片轴承、操作机构的轴承及各滑动部分的润滑,常规都是把润滑油灌封于轮毂内部。这种方式为了防止从转轮叶片轴密封处漏水和漏油而作成复杂的机构,对维护工作不甚方便,是其缺点。于是研制了在轮毂内部各轴承利用水作为润滑剂而使转浆式水轮机转轮无油化(水毅水轮机)并进入实用化。这种方式是以不需维修为目的而研制开发的。

## 3. 电动操作数字调速器

操作调节水轮机流量的导叶,很早以来就是用油压进行的。油压方式要由很多部件

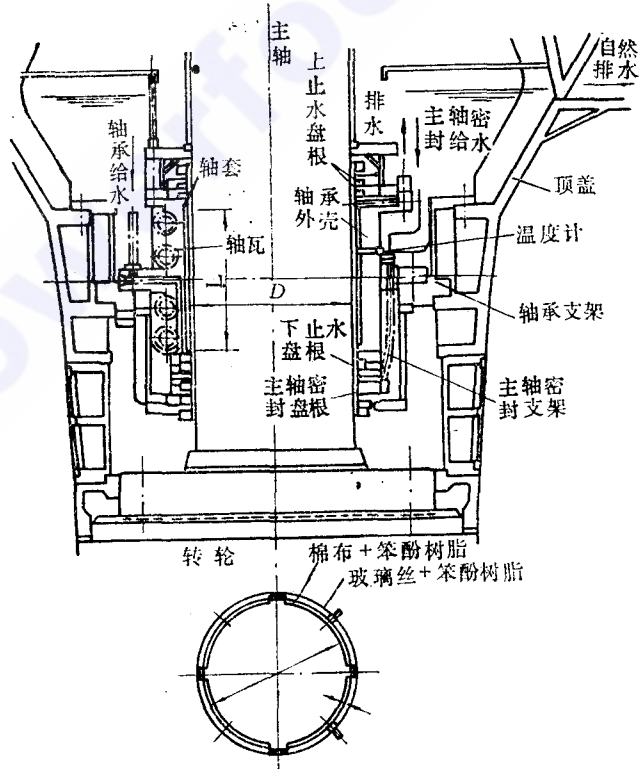


图7 水润滑导轴承装配图

组成压力油以及空气压缩装置，并且由于用油而使维护复杂化。为使辅机简单化，自1978年以来研制了不要维护的电动操作数字调速器（电动接力器）。该辅机设备迄今已应用于20余台中小型水轮发电机组上。

电动操作数字调速器采用了最新的电子技术和机电一体技术，是一种提高功能可靠性和速动性都好的调速器。有以下特点：

- (1) 有与电液调速器的同样性能。
- (2) 因不需油压设备而大为简化了水轮机有关的辅助设备。
- (3) 由于装置小型化，能有效地利用厂房内部的布置场地。

电动操作数字调速器除由可编程序控制的数字调速器外，是由测频齿盘、邻近开关、导叶开度检测器、控制电动机的变速驱动机构、将回转运动变换为直线运动的电动操作机构（电动接力器）等所组成。

转速是用齿盘和邻近开关的数字检测方式，能高精度测出自零到过速范围的转速变化。导叶开度是按静电容量变化的电气检测方式，分别作为数字调速器的输入信号。

变速驱动机构是靠自数字调速器来的输出信号进行控制无刷电动机；根据检测的转子位置信号控制通过定子线圈的电流值驱动无刷电动机。为此响应性高，直到超低速都能稳定运行。采用无刷电动机有如下优点：

- (1) 由于无刷大为减轻维护工作。
- (2) 在水轮机运行中能靠电动机转矩使导叶定位，因而不需要制动定位装置。
- (3) 能根据导叶要求改变所需转矩，具有良好速动性和速度控制性。

电动操作机构（电动接力器）是将电动机的回转力改变成直线运动的机械结构。该机械结构是借减速齿轮、经球面螺栓转换为直线运动后，经接于调速环进行开关导叶。球面螺栓的螺栓和螺帽具有传递效率高、摩擦小、寿命长、润滑简单等优点。最初使用交

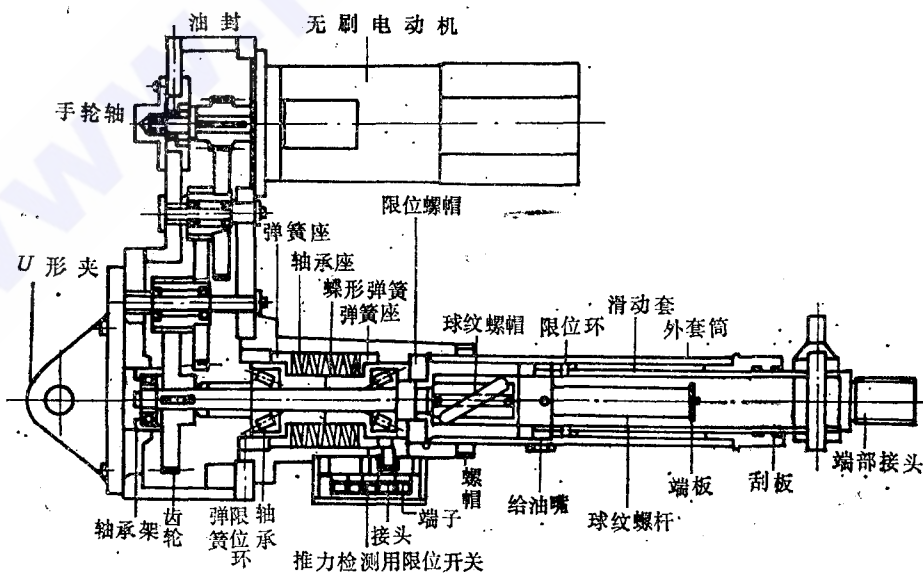


图8 电动操作机构的构造

流电动机，设直流电动机作事故备用，目前只用以直流为电源的无刷电动机进行操作，在无进口阀的情况下设置了事故机械闭锁装置系统，并将此作为标准形式。图8为电动机操作机构的构造图。

#### 4. 预防性维护

随近年水电设备可靠度的提高和自动化技术的发展，控制系统变得复杂起来。依靠熟练的运行人员进行巡视检查比较困难。为了改变依靠人进行巡视检查，在中小型机组上已开始采用靠机械定量状态监视方式，替代以往用人进行巡视检查的预防性维护工作。

在水轮机方面的监视项目有轴承温度、水压、振动、液位、漏油、漏水、给水、排水、噪声、压差等。

### 四、设备的技术更新

对陈旧的水轮发电机组进行全部更新；为提高已运行水轮机的效率采用最新技术只对同一部件进行更新。近年来不仅用新转轮更新旧转轮，而且有的则更新了水轮机型式、规格和运行方式。因在原有通流部件（蜗壳、导叶、尾水管）基础上更新转轮，所以要求必须改进转轮的水力性能。此时依靠流态解析程序进行性能预测，就不必制作模型转轮进行试验。

日本今后的水电将以中小型为主，水电站装机规模越小，发电成本相对越高，因此就要研制提高整个机组经济效益的新技术。

### 五、结 语

上面概括介绍了日本近几年在水轮机技术方面的发展情况，这些情况有助于我国水轮机科研、设计、制造新技术的开发。近年来世界各水轮机制造厂广泛应用有限元法进行结构设计，从上述情况可看出，应用流态解析程序研制新水轮机转轮是成功的，并已进入实用阶段。关于对旧水轮机设备进行技术更新改造是取得经济效益的有效途径。尤其我国中小型水电站多系引水式，河历年间流量变幅都大，亟待研制开发适于流量变幅大、效率高的新水轮机转轮，充分发挥小水电的经济效益，只要通过对流态解析，相信是能作到的。这对充分利用引水式中小型水电站的水力资源增加发电经济效益无疑是大有好处的。