

⑨  
40-48

水力发电站, 水轮机, 水泵水轮机, 混流式水轮机

# 水电站的水轮机与水泵水轮机

(日) 北 英三

TKT33107  
彭泽元

A

**摘要** 从用户观点出发论述了从 50 年代至今日本在开发水电技术方面存在的问题, 最后展望二十一世纪, 预测了今后水电发展的动态。

**关键词** 水轮机 水泵水轮机

## 1 前言

日本水电发展已有百余年历史, 可大致分为引进期、进口向国产化转换期、稳定增长期。每一发展期均受到不同经济社会形势的影响。总之水电机组一直向大容量化方向发展, 其间曾因受 1973 年石油危机的冲击, 使日本重新重

视水力发电。而且由于大容量核电站的建设促进了抽水蓄能发电技术的发展。由于日本经济性较好的水力资源已开发殆尽, 因此着手开发低水头电站, 选用新型水轮机, 提高已运行水轮机的效率。此外, 通过最近解析技术的发展正在进一步提高机组性能。图 1 为日本水电设备技术的开发历程。

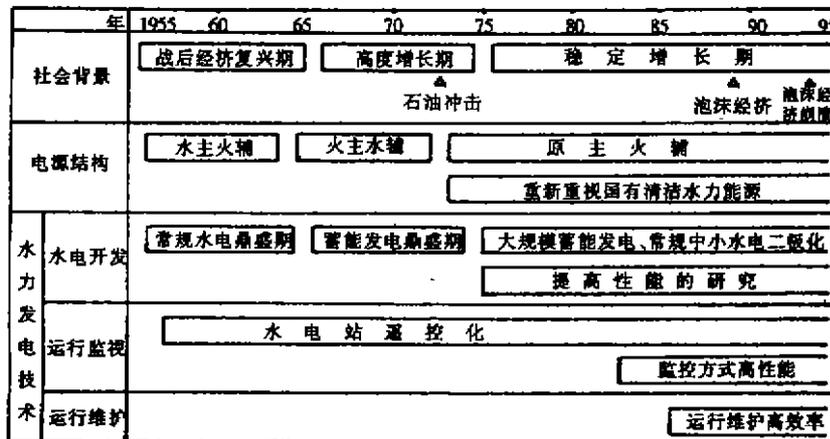


图 1 日本水电站电气设备技术开发历程

作者站在用户立场上叙述了日本 1955 年以后的水电发展状况。

## 2 水轮机技术的发展

### 2.1 混流式水轮机

图 2、图 3 分别为混流式水轮机单机容量和比转速的变化。

1954 年, 日本丸山发电站的混流式水轮机投入运行, 容量为 70 MW, 这是当时日本的大容

量机组。该机组省略了进水阀, 导叶采用自关闭, 转轮采用不锈钢制造。1956 年建成的佐久间水电站, 单机出力为 96 MW, 可使用 50/60 Hz 两种频率。为获得最佳效率, 通过模型试验选取了最优方案。1959 年, 田子仓电站 108 MW 机组投运, 使日本单机容量首次超过 100 MW, 考虑到运输的方便, 有的部件采用现场焊接。1960 年建成的奥只見电站单机容量达 137 MW。1973 年单机容量为 146 MW 的小鸟电站投入运

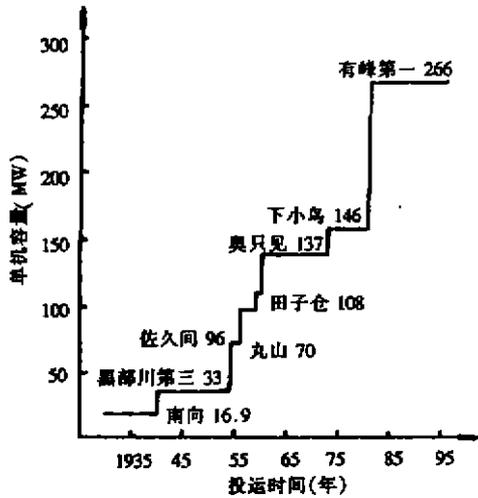


图2 混流式水轮机单机容量的发展

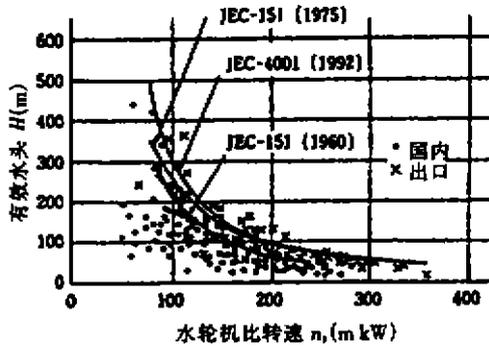


图3 混流式水轮机比转速的发展

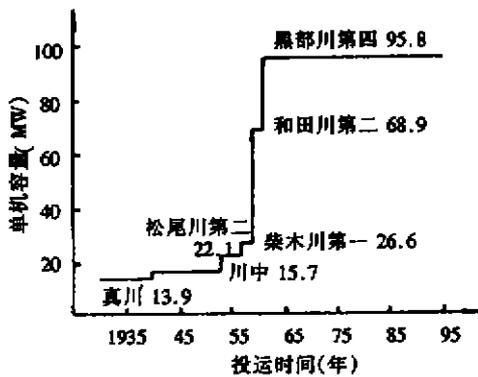


图4 水斗式水轮机单机容量的发展

行。1981年投运的有峰第I发电站为适应尖峰负荷的需要,采用了单机容量为266 MW的大容量机组,即使现在也仍居日本第一位。

### 2.2 水斗式水轮机

图4为水斗式水轮机单机容量的发展。

50年代初,日本卧式水斗式水轮机单机容量就已达26 MW。1954年投运的白根发电站(单机容量12 MW)首次采用了立轴4喷嘴水斗式水轮机。1959年投运的和田川第II发电站单机出力为68.9 MW。1961年投运的黑部川第IV发电站采用了单机95.8 MW 6喷嘴水斗式水轮机,当时居世界第三位,现在也仍居日本首位。该电站使用的比转速已临近极限值,并对转速优化和射流干扰等进行过认真研究。

### 2.3 轴流转桨式水轮机

图5为该型水轮机单机容量的发展。

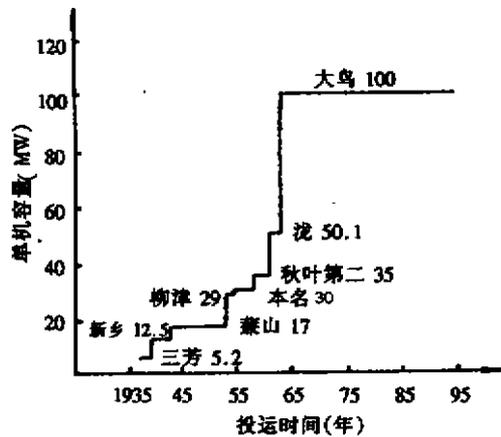


图5 轴流转桨式水轮机单机容量的发展

1954年建成的本名电站(单机30 MW)装有当时日本最大的轴流转桨式机组,世界上也属创纪录产品,在厂内设置日本第一台真机水头试验装置。1963年投运的大鸟发电站单机为100 MW,是迄今为止的日本最大单机容量。转轮外径超过6 m,为使各部分与之相适应进行了全新的设计。

### 2.4 斜流式水轮机

斜流式水轮机是日本战后才开发的机型,

是把常规水轮机作为水泵水轮机进行开发的。1961年建成的名倾发电站(单机1.36 MW)是世界上第一台常规斜流式水轮机,水头变幅为有效水头的50%,故运行时需改变极数来切换转速。1964年日本与EE公司合作为天濑川电站

生产了50 MW大容量斜流式机组。目前日本国内单机容量最大的是1971年投运的松原发电站54.6 MW机组。

## 2.5 灯泡贯流式水轮机

日本采用的典型灯泡式水轮机见表1。

表1 日本典型的灯泡贯流式水轮机(出力>10 MW)

电站	所属电力公司	单机出力 (MW)	最高水头 (m)	转速 (r/min)	最大流量 (m <sup>3</sup> /s)	制造厂	投运时间 (年)
只见	电源开发	65.8	20.70	100	367.00	日立	1989
第二新乡	东北电力	40.6	22.45	136	200.00	富士	1984
赤尾	关西电力	34.0	17.40	129	220.00	富士	1978
美浓川合	关西电力	24.2	12.36	100	220.00	富士	1995
第二山乡	东北电力	23.7	15.93	125	170.00	富士	1992
佐久间第II	电源开发	16.6	15.50	125/150	153.00	富士	1982

表2 日本典型的S型轴伸贯流式水轮机(出力>2000 kW)

电站	所属电力公司	单机出力 (kW)	最高水头 (m)	转速 (r/min)	最大流量 (m <sup>3</sup> /s)	制造厂	投运时间 (年)
船津	关西电力	2650	8.80	180	35.00	日立	1993
黑西第III	北陆电力	2370	20.80	400	13.00	富士	1992
胎内第II	新潟县	2150	14.01	300	17.50	富士	1984

表3 日本典型的双击式水轮机(出力>700 kW)

电站	所属电力公司	单机出力 (kW)	最高水头 (m)	转速 (r/min)	最大流量 (m <sup>3</sup> /s)	制造厂	投运时间 (年)
大长谷第V	富山县	1270	62.90	400	2.60	日立	1991
小平坝	北海道	900	19.27	182	6.00	明电	1991
鹿子坝	北海道开发局	792	29.26	279	3.50	明电	1984
南小田第II	关西电力	770	64.46	514	1.53	明电	1992
新日野上	鸟取县日野町	717	23.01	200	4.00	明电	1989
仓见	岗山县	710	77.50	730	1.20	富士	1983
津轻	津轻广域水道	705	59.50	385	1.54	富士	1988

1959年日本在野村发电站采用了在低水头区域比轴流转桨式水轮机效率更好的灯泡式水轮机。当时日本还没有先例。此后的常愿寺川第II~第IV发电站单机容量增大到5.3 MW。1973年因受石油冲击的影响,日本又重新开始重视开发剩余的水力能源。1978年建成的赤尾发电站单机容量增大到34 MW,约为原来的6倍。1984年第二新乡发电站建成,出力上升到40.6 MW。1989年只见电站灯泡机组顺利投运,单机容量达65.8 MW,是迄今为止世界上最

大的灯泡式机组。

## 2.6 S型轴伸贯流式水轮机和双击式水轮机

表2、表3分别列出了典型的S型轴伸贯流式水轮机和双击式水轮机的实例。

此类型水轮机是受石油冲击影响后为开发日本剩余水力资源而研究完成的。S型轴伸贯流式水轮机用于比灯泡式流量更小的电站。发电机设置在灯泡外部,具有体型小、维护方便等优点。双击式水轮机适用于100 m以下的中水头小流量电站,70年代问世。若从经济性方面

考虑,这类水轮机的良好运行效果证明仍有一定的潜在市场。

## 2.8 水泵水轮机

水泵水轮机的单机容量和比转速发展见图6、图7。

1959年日本在大森川电站首次采用了水泵

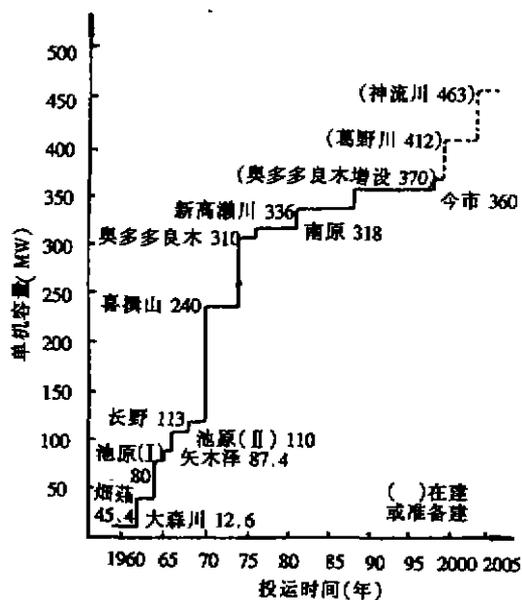


图6 水泵水轮机机容量的发展

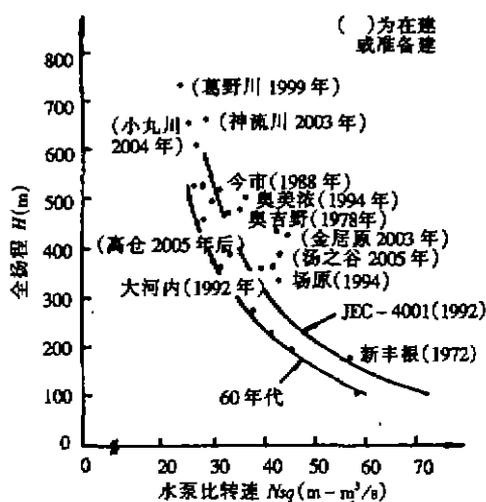


图7 水泵水轮机比转速的发展

水轮机。把水轮机反转充作水泵运行,这在日本还无先例,即使国外也不多见。通过与厂家共同进行研究使该型机组达到了实用化。1966年建成的池原电站单机出力为110 MW,采用进口机组。而首次使用的国产大容量机组是喜撰山电站的240 MW机组。目前的最大容量为360 MW,安装在1988年兴建的今市发电站。现正在兴建的葛野川电站将安装单机容量为412 MW的机组,预计1999年投入运行。就水头而言,60年代为400~500 m。1973年建成的沼源电站安装了世界上第一台水头达500 m的水泵水轮机。以后又采用了最高扬程超过600 m的机组,葛野川电站有效水头已达到714 m。

## 3 水轮机和水泵水轮机的主要技术课题

### 3.1 提高机组性能

#### 3.1.1 改善混流式水轮机低负荷时的效率

这项试验始于1970年,是基于对河流的综合开发,并有利于农田水利建设而设想的。过去开发这种河流要使用两种不同的转轮,但进入60年代后期,由于理论水平和解析技术的提高,尽可能地保证了最大出力附近的运行性能,尽管发电量并不大,但由于选择的地点多,同时根据用户要求开发了合适的转轮。转轮的设计采取了三项措施:

(1)为减少尾水管涡流损失,降低从转轮流出的水流的旋转速度,要减小转轮出口直径;

(2)选定导叶高度小、增大导叶开度的高度设计,降低导叶尾流涡旋的影响;

(3)尽量保持大流量区域良好的空化性能,选取最佳转轮叶片数,降低小流量电站的单位造价<sup>[3]</sup>。

10年时间内有17个电站采用了这种转轮。图8为低负荷转轮与惯用转轮效率特性的比较。

#### 3.1.2 提高水斗式水轮机效率和比转速

1973年,尾添电站采用了单喷嘴运行方式。单喷嘴运行时,由于主轴受力不均衡,会产生柔性变形,担心轴承接触面发生变化。用户通过

真机试验证实,除轴承温度稍有升高外,其他均无问题,最后应用于真机。以后又在4喷嘴以上的水斗式水轮机上得到应用。

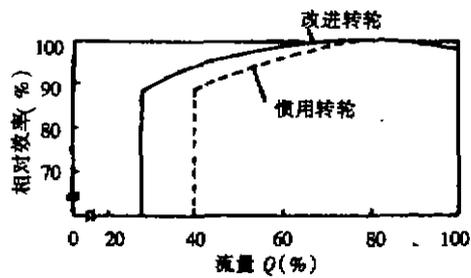


图8 低负荷混流式水轮机的效率特性

此外,水斗式水轮机与混流式水轮机相比,比转速极限小,因此包括发电机在内,设备体积较大。随着有利于经济开发站址的减少,最近寻求到了用于高水头、小流量地点的高转速水斗式水轮机。为了提高转速,最好的措施是增加喷嘴数和增大比转速,但目前喷嘴数最多只有6个,只有提高比转速。若比转速过高,又恐怕产生剧振的射流干扰,故采取以下措施:

(1)增加水斗数;

(2)对同一转轮直径选择尺寸相对较大的水斗;

(3)设置折向器和保护罩。

经上述改进后,开发了北又渡电站机组,出力为24.9 MW,比转速为22.6 mkW,喷嘴数为6<sup>[4]</sup>。

### 3.2 转轮振动问题

在开发高水头蓄能电站中,某电站曾发生过转轮事故,这也是日本开发水泵水轮机以来最严重的一次事故。研究结果证明:位于水中的转轮因受到与振动加速度成正比的流体反作用力影响,产生了负荷质量效应,从而使固有频率降到只有空气中的一半。由于受水中固有频率与导叶和转轮叶片的水压干扰,导致与转轮直径节振动频率发生共振<sup>[6,7]</sup>。图9为转轮直径节振动的例子。

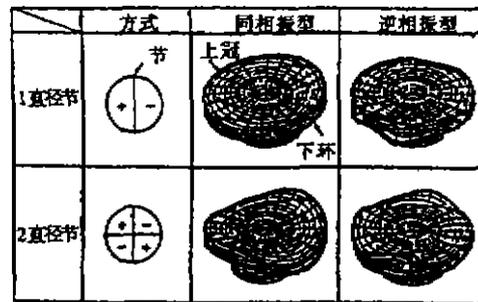


图9 转轮直径节振动例

转轮振动的分析及数据取证由日本厂家密切配合,采用有限元法分析,并通过模型激振试验和真机水头试验来进行验证的。这些研究成果确立了可以预测水泵水轮机转轮的固有频率和避免共振的技术。之后将水泵水轮机水头提高到700 m。

### 3.3 新的蓄能发电方式

#### 3.3.1 变速蓄能发电

变速蓄能发电方式是伴随核电比例的增加、深夜火电机组停机、电网频率调节需要而产生的新技术。如果通过超同步谢菲尔毕斯控制方式可以改变发电电动机转速的话,那么就可以方便地且大幅度地改变水泵水轮机的泵的输入功率,由于电子技术的发展,日本开发出了变速蓄能发电系统。为使机组正常运行,采取了以下相应措施:

(1)解决伴随转速变化而产生的疲劳问题;

(2)平时使用最大单位流量区和最小单位流量区导致的空化问题;

(3)保证无调速器的稳定运行;

(4)保证良好的速度控制功能。

目前日本已有4座这样的抽水蓄能电站正在顺利地运行着。

#### 3.3.2 海水蓄能发电

海水蓄能电站具有节省下游水库建设费、下游水库水位不变、靠近用电区选择站址、输电损失小等优点。电源开发公司在冲绳兴建海水蓄能电站。建设海水蓄能电站需要解决以下问题:

- (1) 金属材料的腐蚀;
- (2) 粘附海洋生物;
- (3) 海水渗透等。

但可以采取以下措施预防,即:设备上安装防蚀电极,选择耐腐蚀优质材料,采用封闭冷却系统,上池表面采用合成橡胶隔层防渗等。设备概况如表4所示。

表4 冲绳海水蓄能电站概况

水泵水轮机型式	立轴混流式
最高有效水头	141.0 m
最高全扬程	160.0 m
使用流量	发电时最大:26.0 m <sup>3</sup> /s 抽水时最大:20.2 m <sup>3</sup> /s
水轮机出力	31400 kW
水泵出力	31800 kW
转速	423~477 r/min
台数	1

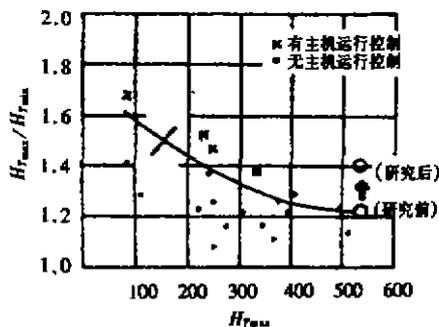


图10 水泵水轮机水头变化范围的进展

### 3.3.4 扩大蓄能电站调节池利用水深的研究

若从用户角度考虑,尽量利用抽水蓄能电站调节池水位深度,改善水泵水轮机的初始空化性能<sup>[8,9,10]</sup>。混流式水泵水轮机水头变动范围如图10所示。

该公司金居原站址的水头为500 m,  $H_{pmax}/H_{tmin}$ 为1.2~1.25,但与厂家共同研究后的结果为1.4,证明改善效果十分突出。

## 4 今后水轮机和水泵水轮机的技术动态

图11为笔者根据现状所考虑的决定工业开发计划的重要因素。

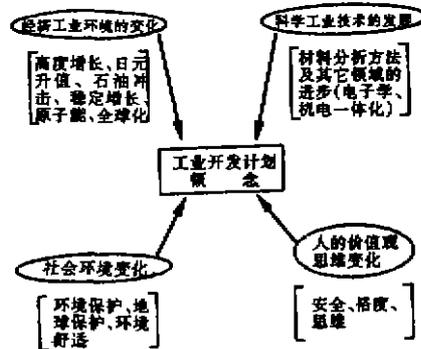
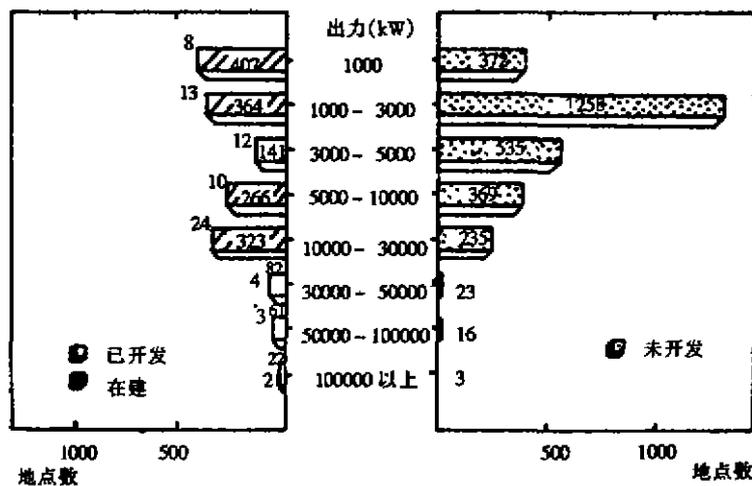


图11 决定工业开发计划概念的主要因素

表5 日本第五次水电调查概况



随着科学技术的发展,尤其是计算机解析技术、电子技术和机电一体化方面的发展为提高水电设备性能带来了希望。社会环境的变化、人们对价值观思维方式的变化都对工业开发计划产生了极大影响,即使进入二十一世纪,来自这方面的影响也会日益增强,当然经济环境的变化也不可忽视。就是一般开发计划的概念也应由包含当时经济技术在内的整个社会形势来决定。

#### 4.1 日本的开发(含改造)地点和对技术开发的设想

关于日本站址开发的第五次水力发电调查<sup>[11]</sup>概况如表5所示。

由此可知,日本尚未开发的地点(0~5000 kW)

占总数的77%。各公司今后的抽水蓄能开发计划<sup>[12]</sup>如表6所示:常规水电新站址经济性好的地点极少,这是日本开发的重点。历经多年运行后的水电设备已经逐渐老化,迫切需要更新设备。到80年代有的设备已运行几十年以上,水电机组及厂房等已全部老化,若进行部分改造恐不能满足要求,需要进行综合性的设备改造。

进行上述改造,可通过增大流量和提高转轮设计技术使效率得到提高,增加出力和发电量。本公司已从1988年开始对21个电站进行全面改造,预计增加出力的有3个,增加出力约13200 kW。今后还将实施部分或全面性的改造。

表6 今后开发抽水蓄能电站的计划

电站	所属公司	电站出力(MW)	台数	有效水头(m)	最大流量(m <sup>3</sup> /s)	转速(r/min)	投运时间(I <sup>#</sup> 机)
奥多多良木(增设)	关西电力	720	2	387.5	218.0	360	1998年5月
葛野川	东京电力	1600	4	714.0	280.0	500	1999年7月
金居原	关西电力	2280	6	513.7	531.0	450	2003年3月
神流川	东京电力	2700	6	653.0	510.0	500	2003年7月
小丸川	九州电力	1200	4	652.0	222.0	600	2004年10月
汤之谷	电源开发	1800	4	402.0	539.0	375	2005年6月
高仓	电发北陆	2100	6	448.0	567.0	450	2005年以后

表7 改造常规水电设备采用的新技术

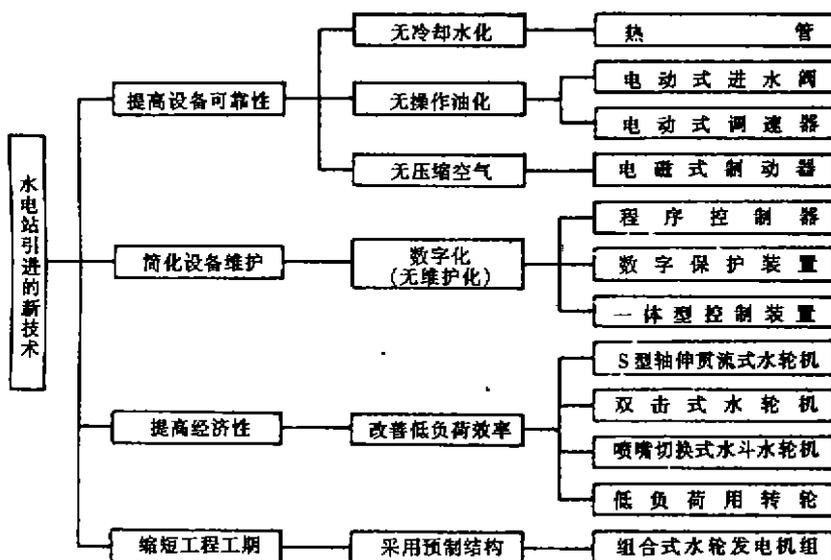
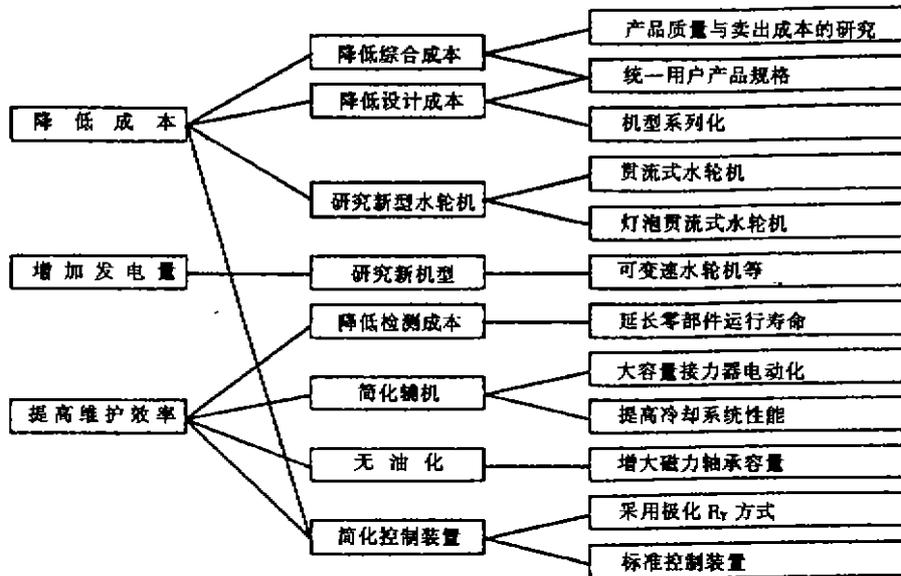


表 8 今后常规水电的用户与采取的措施



#### 4.2 常规水电站的水轮机技术动态

对今后常规水电的要求和采取的措施如表 8 所示。

目前,当务之急是降低常规水电的成本。经济性问题并非最近才出现,过去乃至将来都将是需要研究的课题。日本电力公司正在把斜击式水轮机<sup>[13]</sup>、端面进水式水轮机作为新型水轮机加以采用。电源开发公司与厂家一道把贯流式水轮机也作为 1985 ~ 1987 年日本工业技术院的一项辅助事业予以研究。此外还有高效水轮机等新技术。同时期待把抽水蓄能电站中已实用化的可变速水轮机应用于常规水轮机,通过改变低水头区域水轮机的转速来提高效率。笔者认为这种水轮机也许可靠性有所降低,但日本电力公司采用了降低新型水轮机成本的措施并正在向前发展,厂家也积极地对新型水轮机进行开发。关于降低检测成本,可从提高部件使用寿命着手,延长检修周期,尤其是延长转轮、导叶及其周围的里衬、顶盖、密封件等的使用寿命和提高维修技术是今后研究的课题。简化辅机,进一步增大电动接器容量,开发高性能管,以及考虑环境影响而采用的封闭循环方式也许是从根本上提高机组容量必不可

少的措施。无油化方面,因小容量磁力轴承运行性能良好,故可期待进一步增大容量。

#### 4.3 抽水蓄能电站水泵水轮机技术动态

目前已经计划或设计单机 400 MW 水泵水轮机。就今后出力增大的预测,500 m 级机组受日本运输条件严格限制,若转轮分瓣技术没有明显提高,那么就不可能考虑增大出力。500 m 级以上 400 MW 级的机器比转速要求相当严格,必须事前对效率降低、吸出高度、振动、逆流特性以及强度等问题进行充分研究。今后蓄能电站对提高维护效率的要求及笔者印象中的水力学概念如图 12 所示。提高维护工作效率与常规电站相同,延长主要部件检测时间,缩短维修期,主要部件电动化(包括提高压力来缩小尺寸)及提高老化诊断技术等。提高监视测量功能,包括提高振动压力的测量和轴承周围的各种测量等。水泵水轮机运行条件比较恶劣,检修时常发现转轮拆卸后周围的里衬、顶盖、密封件等出现异常。如 3.2 节中所述,当转轮叶片出现事故时,发现发电机下部轴承也出现温度异常。随着微机技术的发展,也许有必要直接监视水轮机周围部件的各种异常情况。可以认为提高水泵水轮机控制技术的相应措施

⑩  
48-53

水轮机, 水弹性模型, 固定导叶, 振动

# 用水弹性模型研究固定导叶的振动

(法) Jean-Loup DENLAU

谷朝红 JK730.33

本文介绍了通过力学计算完成的利用固定导叶水弹性模型进行研究的一种方法。与真机实测应力进行了比较, 给出了用不同翼型获得的一些成果。

是检查旋涡脱流频率, 使其低于导叶的第一阶固有频率。脱流频率是脱流点附近边界层特性的函数。已基于脱流流线之间的距离  $h$  和沿流线的速度  $V$  推导出一个通用的 Strouhal 数。

## 1 引言

避免水轮机固定导叶产生裂纹的常用方法

$$f_k = Sh \times \frac{V}{h} \quad (1)$$

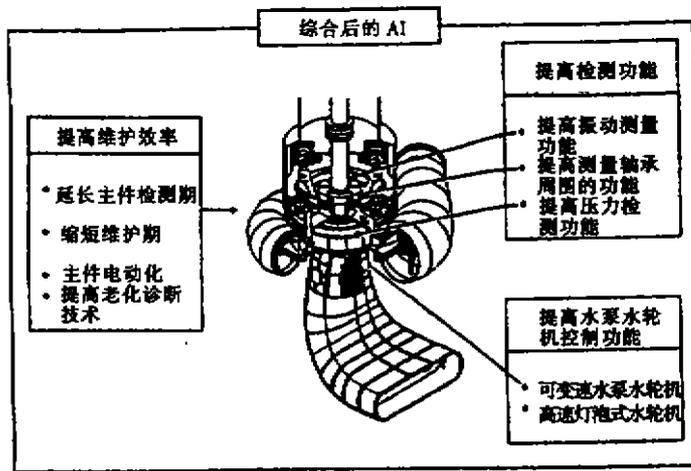


图 12 抽水蓄能电站提高维护工作的要求和水力学概念

是: 进一步完善可变速水泵水轮机, 提高阀门控制速度, 降低水压力等。把现有监视设备与各种新功能、新技术综合起来, 给运行维护人员提供一元化的信息。上述综合后的人工智能(AI)便是笔者给予的定义。

自社会环境、人类价值观念及思维方式变化等方面的严重影响。最后希望同行业技术人员进一步努力为已临近技术饱和的水电技术作出创造类似“水泵水轮机”和“变速抽水蓄能发电”一样的卓越贡献。

## 5 结语

以上叙述了水电站的水力机械, 主要介绍了水电设备的发展, 目前存在的问题, 并对今后发展作了预测。今后水电技术领域仍然受到来

## 参考文献 13 种(略)

彭泽元 摘译自《透平机械》1996, No1  
栾锡广 校