

水泵水轮机的特性

水利电力出版社

水泵水轮机的特性

[日]深栖俊一 著

徐树斌 译 沈祝平 校
 庞 堉

水利电力出版社

内 容 提 要

作者简要叙述了抽水蓄能技术的发展情况，介绍了水泵水轮机的应用、性能、结构及运行等方面的基本知识。书中着重讨论了混流式和斜流水泵水轮机特性及起动方式；此外还扼要地介绍了相似换算和设计中应考虑的主要问题等。

本书可供从事水电建设的有关专业人员和有关院校的师生阅读，亦可供从事水轮机、水泵设计制造的有关人员参考。

ポンプ水車の特性

深栖俊一 著

工学図書株式会社 昭和45年10月 初版

水泵水轮机的特性

[日]深栖俊一 著

徐树斌 译 沈祝平 校
 庞 增

水利电力出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

1977年11月北京第一版

1977年11月北京第一次印刷

印数 00001—13740 册 每册 0.50 元

书号 15143·3287

译 者 的 话

在毛主席革命路线指引下，经过无产阶级文化大革命，我国电力工业有了很大的发展。随着工农业生产的发展，将对电力工业提出更高的要求。不但要求有足够的发电量和较高的电能质量，而且也要求系统运行经济、可靠。为了适应电力系统调峰、调频的需要，近十几年来各国兴建了一些抽水蓄能电站，抽水蓄能机组也取得了显著的进展。为向我国广大电力工作者介绍有关技术情况，遵照毛主席关于“洋为中用”的教导，翻译了《水泵水轮机的特性》一书，供大家参考。

在本书的翻译过程中，对原书中的某些错误或不妥之处作了改正；同时原书中某些符号也改用我国常用代号，对原书的附录和索引也作了必要的删节。

对本书翻译过程中，曾给予支持帮助以及进行审校的同志们在此一并表示感谢。

由于本人水平有限，难免还存在着不妥甚至错误之处，望广大读者批评指正。

译 者

作者原序

自从人们利用水能以来，各种形式的水力机械日臻完善。与此同时，有关的科学技术也取得了进展，目前已经达到制造大容量机组的水平。随着工业和文化事业的高度发展，电网负荷不断增加，负荷的变化亦日趋剧烈。建设抽水蓄能电站，作为调节电网尖峰负荷，是一种合理的途径。

抽水蓄能电站的机组可以采用分置式、直联式和可逆式等。其中可逆式机组亦即水泵水轮机，目前已经广泛采用高水头大容量机组。在规划设计水泵水轮机时，由于其设计、试制以及试验研究非常繁复，所以要研究如何在各种运行条件下都能取得最好的效果，使各种转轮的特性有更显著的改善。最初几年，由于各种复杂管路条件的关系，也曾出现未能预料的异常现象。但是，由于多次积累了所有这些研究成果和经验，这些问题完全有可能事先发现并加以防止。

近年来，由于种种原因，水电投资有逐渐增高的趋向。要降低投资须通过多方面不断的努力。然而，抽水蓄能发电，从它的目的和构成来看，对降低建设投资和运行管理方面的费用的作用已经十分清楚。混流式或者斜流式水泵水轮机，无论在设计制造和实际运行方面都已取得相当大的成绩。但是，为了适应今后发展的需要，必须进一步提高使用水头。同时，为高比速、大容量发展作更充分的准备。

针对这种发展趋势，本书着重在分析说明水泵和水泵水轮机特性及其它有关的一些主要问题作一尝试。这些内容如

果能对国内外抽水蓄能电站的日益发展有所助益，本人甚感荣幸。

最后，对以往各电力公司、研究所、大学等有关各位的赐教，以及本公司、日立工厂和日立研究所等各方面的大力协助，在本书发行之际，本人在此一并表示深切的谢意。

作 者

1970年8月

目 录

译者的话

作者原序

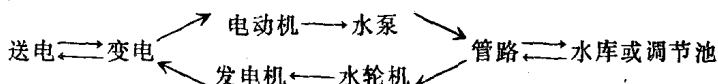
第一章 抽水蓄能电站	1
第一节 抽水蓄能电站的目的与分类	1
第二节 抽水蓄能发电的经济性	4
第二章 水泵的分置式与直联式	7
第一节 分置式抽水蓄能设备	7
第二节 直联式抽水蓄能设备	9
一、型式	9
二、特性	10
三、水泵的起动方式	11
第三章 水泵	22
第一节 比转速与主要尺寸	22
第二节 水泵的特性与吸入高度	28
第三节 水锤作用与全工况特性	33
一、采用出口阀控制及全工况特性	33
第四节 模型试验与换算公式	38
第四章 水泵水轮机	41
第一节 型式与适用范围	41
第二节 水泵水轮机的规划设计	42
一、特性	43
二、引排水系统与厂房结构	44
三、水泵的起动方式	60
四、电动机的起动方式	62

第五章 混流式水泵水轮机	70
第一节 理论	70
第二节 比转速与吸出高度	78
第三节 特性	84
一、一般特性	84
二、水泵起动方式	94
三、过渡过程特性	98
四、过渡过程理论	108
第四节 模型试验	120
第五节 结构	127
第六章 斜流式水泵水轮机	132
第一节 理论	132
第二节 特性	142
一、比转速与吸出高度	142
二、一般特性	144
三、运行方式	158
四、过渡过程特性	160
第三节 结构	163
附录	169
本书采用的符号	184
参考文献	185

第一章 抽水蓄能电站

第一节 抽水蓄能电站的目的与分类

人们常常看到用水力机械从河流或蓄水池抽水到渠道的情况，例如抽上的是10米，然后流到别处放水，假如利用水头是100米，那就非常有利了。这种方法也是抽水蓄能的一个例子。但通常所谓抽水蓄能，是利用丰水期或夜间等的剩余电力开动水泵，把水抽到高处的水库或调节池，待枯水期、白天、傍晚尖峰负荷时再用来发电。其过程大致如下：



考虑上述整个系统的损失，可以回收的能量为输入功率的75~80%。

最早，以水电为主的瑞士和奥地利等国家大多建设季节调节的高水头抽水蓄能电站；在西德及其相邻的国家，多以中水头电站作为日调节的抽水蓄能电站运行。美国最初也为河川流量调节建设了抽水蓄能电站，而近年来陆续兴建周调节和日调节的大容量抽水蓄能电站。

按地理情况和建设的不同，抽水蓄能电站大致分为下列几种形式：

- | | |
|---------------|--------------|
| (1) 季调节； | (1) 混合抽水蓄能式； |
| (2) 周调节或多日调节； | (2) 纯抽水蓄能式。 |
| (3) 日调节。 | |

混合抽水蓄能式电站，就是在河道上修建水库，除了径

流部分用来发电外，在夜间或白天休息时进行抽水蓄能，以增加尖峰负荷时的发电量。根据地区和运行情况的不同，径流部分与抽水部分的比率也不相同。以目前的实例来看，有150米以下的中水头电站，如池原、矢木泽、长野、高根第一和希瓦塞（Hiwassee）等；也有300米以上的高水头电站，如卡斯泰克（Castaic）等；还有，在径流部分发电量大的情况下，除安装抽水蓄能机组外，还安装普通机组，如新成羽川、安县、水殿等电站。

纯抽水蓄能式电站，除了能承担增加的尖峰负荷外，当系统万一发生事故还可作为紧急备用，它与混合式抽水蓄能电站起同样重要的作用。其使用水头多为150米以上。在日本，除沼泽沼、城山、喜撰山等抽水蓄能电站外，正在着手兴建新的高水头和大容量电站，如沼原、新丰根等。在国外，继汤姆·萨克（Taum Sauk）、克拉琴（Cruchan）等电站之后，又开始建设布莱亨·吉尔博（Blenheim Gilboa）、路丁顿（Ludington）等大容量电站。

由于各种原因，今后水电站的造价将渐趋增高^①。为此，提高或改善有关机械、电气设备或者土木建筑等整个技术水平，对降低造价越发重要。同时，提高利用效率或运行维护的可靠性等等也更有必要。抽水蓄能电站，从其目的与构成来看，提高建设和运行管理的经济性以及增加利用效率的作用是显而易见的。但是，在日本，一年四季河流流量变化很大，而且地形复杂，在大城市或工业区附近很难找到合适的高水头地点，所以也将给抽水蓄能电站的建设带来困难。为提高抽水蓄能电站的经济性，更有必要对土木、建筑、机械

① 指日本等国家的情况而言，以下同。——译注

和电气等方面的技术作全面的改进。尤其今后容量越来越大，特别需要进行涉及许多方面的模型试验和应用复杂的计算技术等等。

抽水蓄能电站所用的机组有多种形式，实际常用的有下列几种：

1. 分置式

水轮发电机组与用电动机带动的水泵机组分开布置，如池尻川、小口川第三、格里姆塞尔（Grimsel）等电站。

2. 直联式

水泵安装在水轮机和发电机的同一轴上。抽水时把发电机作为电动机带动水泵运行，如沼泽沼、诸冢、豪森（Hausen）、威兹诺（Witznau）等电站。

3. 可逆式——水泵水轮机

安装水轮机和水泵两用机组（水泵水轮机），抽水时作水泵运行，并使发电电动机作反向旋转，如大森川、三尾、畑薮、池原、弗拉第朗（Flatiron）、希瓦塞电站。

其中，对于分置式，可以完全任意决定水轮机和水泵的参数，这样能分别发挥其高效率，同时可以在任意工况下运行。但是因为设备价格较高，除上述介绍的几个电站外，其它实例极少。

最初，各国抽水蓄能电站普遍采用卧轴和立轴的直联式机组，如附录7的表7-1所列。但近来逐步扩大了水泵水轮机的应用范围，完全有可能达到500米甚至600米的水头。但是，在直联式机组中，水泵和水轮机相互间受到转速的限制，须分别按任意参数给出特性。从结构来看，具有发电与抽水相互迅速切换的特点。澳大利亚图穆特第三（Tumut No. 3）电站大容量机组就采用这种型式。

水泵水轮机立轴机组适用于大容量机器，如附录7表7-2~7-5所列混流式、斜流式已被广泛采用。以前，机组在运行中多少产生一些水力振动及其他问题，但目前差不多都已清楚。因而最近单机容量为30万千瓦以上的混流式水泵水轮机陆续在各处应用，还有相当多的电站正在建设中。

第二节 抽水蓄能发电的经济性

随着电力需要的增长，通常，如图1-1所示的尖峰负荷也有逐年增长的趋势。以前，用火电担负基荷，用具有调节库容的引水式、调节池式或拦河坝式水电承担尖峰负荷。

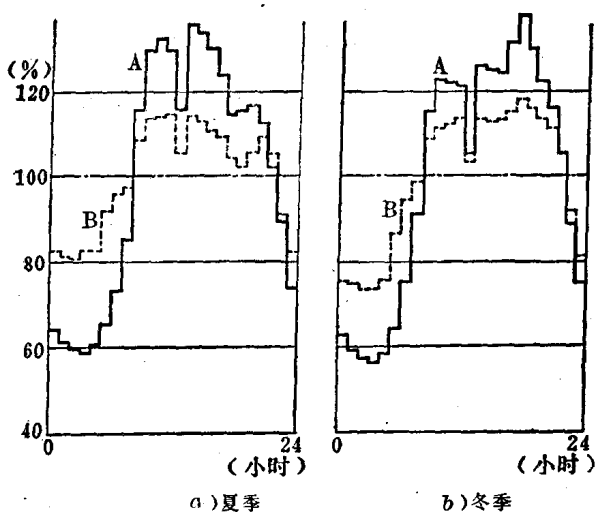


图 1-1 日负荷曲线实例

A—大城市的电力公司，B—有大量工业和消费的电力公司

近年来，水电建设的造价一般趋向增高。特别在日本，根据电站建设地点的情况而造价亦不同，每千瓦造价大致在

10~15万日元之间。这样，在经济上逐渐增加了对水电资源开发的困难。为此，必须考虑综合利用或其它途径以保证经济性。另外，抽水蓄能电站投资费用，混合式的另当别论，若单就高水头大容量的纯抽水蓄能式电站而言，每千瓦造价可以只要4~6万日元。以往常用剩余水电作为抽水蓄能的电源，但今后几乎无法实现。近年来代之以大容量的火电或原子能发电与抽水蓄能发电相配合的系统，或者再加上燃气轮机发电和潮汐发电等能源。总之要合理地规划设计，以提高经济效益。

抽水蓄能电站的造价受地理条件、容量、输电系统或补偿费用等影响，所以，重要的问题是尽量提高各个环节的经济性。当然，由于向更高的水头和大容量发展以及技术的改进等等，造价必然还会降低。在日本，随着运输条件的改善、建筑和土建施工的机械化等，也会使土建造价和补偿费用有大幅度降低的余地。

纯抽水蓄能式电站的造价，在很大程度上还受到运行时间的影响，需要研究每千瓦造价和每度电造价之间的关系。图1-2为其两者关系的概算例。若运行时间短可以把出力增大，所以每千瓦造价就便宜，而每度电造价就变高了。

通常，纯抽水蓄能电站的发电运行时间为每天5~6小时，一年为1500~2000小时。如图1-2所示，每千瓦造价为6万日元、年运行时间为2000小时的抽水蓄能电站，每度电造价是30日元。假定年费用占造价的10%，则电站本身每度电的发电成本为3日元，加上抽水所需电费如每度按2.5日元考虑（重油火电），则总的发电成本为：

$$3.00 + 2.50 = 5.50 \text{ (日元/度)}$$

当然，总发电成本越便宜越有利。若运行时间短，每度

电的成本就高。然而，应预计到今后这样短时间的峰荷还将增长。但是，用火电和原子能发电直接承担这种峰荷是不经济的。所以，将来在采用大容量火力发电和原子能发电组成的系统中，抽水蓄能发电是可以考虑的。

抽水蓄能电站还有其它许多优点，可以列举如下几点：

(1) 起动迅速。可配合峰荷需要，随时起动；电力系统发生事故时，也能即时起动。在电力系统中不必象火电机组那样空载备用。

(2) 系统运行操作灵活。负荷急剧变化时也能充分适应，以使火电或原子能发电稳定运行。

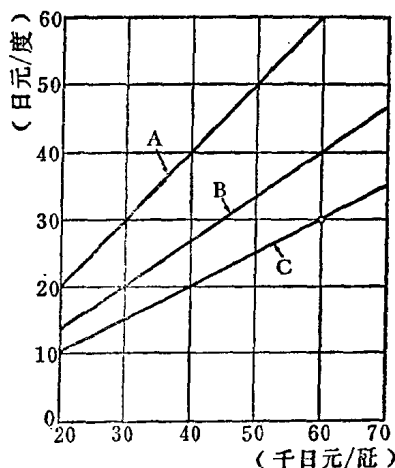


图 1-2 抽水蓄能电站的每千瓦与每度电的造价关系

A—运行时间1000小时(年利用率11.4%)，

B—运行时间1500小时(年利用率17.1%)，

C—运行时间2000小时(年利用率22.8%)

第二章 水泵的分置式与直联式

第一节 分置式抽水蓄能设备

水轮机和发电机组与水泵和电动机组完全分开设置，而管路系统与输变电设备常为共用。或者，如果发电站和单独设置的抽水站，也是互有联系地运行，广义理解统称为分置式抽水蓄能电站。

在这种抽水蓄能电站中，水轮机和水泵两者完全可以采用任意的型式、参数和台数，所以能根据各自的情况发挥其最高效率。同时，水轮机与水泵之间可以随时进行转换。也可分别进行检查或维修，因而维护也方便。

但是，与直联式或可逆式比较，不但机组重量增加而且厂房也要扩大，因而造价相当高。表 2-1 例举的瑞士格里姆塞尔电站就是一例。如图 2-1 所示，该电站有 31200 千瓦的卧轴双转轮双喷嘴双轴承的冲击式水轮机^①和 25100 马力的立轴两级双吸水泵各一台，设在同一地下式厂房内，作为季调节运行。因为该电站水泵的转轮常在尾水位以下，起动时待转速上升后才开启出口阀，控制方式也简单，易于实现遥控操作。小口川第三和池尻川电站，都在同一厂房内设有小容量分置式水泵机组。

在外国有许多抽水站，作为水库或调节池补充用而与发电站分开布置。这些抽水站除容量大的以外，多采用遥控操

① 应理解为单转轮单喷嘴两组的形式，日本称为两柱式。——译注

作。由于这种抽水站的设备简单，预期会有相当的效益，所以日本将来也要考虑研究。

表 2-1 分置式抽水蓄能电站的机组实例
(瑞士格里姆塞尔电站)

	水 轮 机	发 电 机	水 泵	电 动 机
参 数	31200千瓦	45000千伏安	18500千瓦	23000千伏安
	490米	13500伏	400米	13500伏
	7.25米 ³ /秒	50赫芝	4.0米 ³ /秒	50赫芝
	375转/分	375转/分	1000转/分	1000转/分
型 号	2P ₁ N ₁ -H		立轴两级双吸泵	
台 数	1		1	
开始运行年	1954		1954	

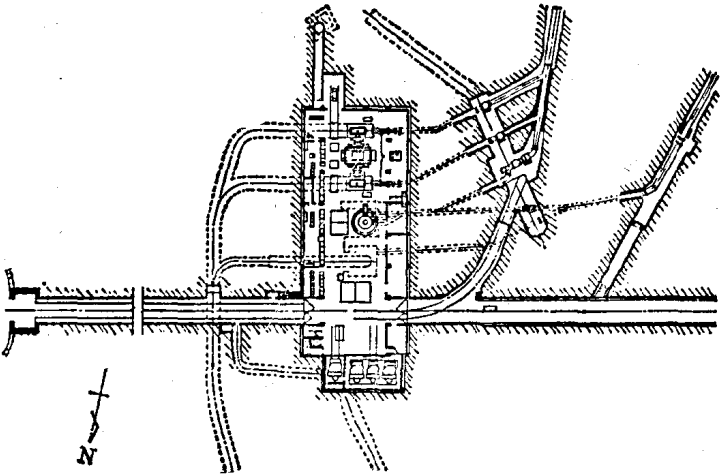


图 2-1 格里姆塞尔电站平面图

第二节 直联式抽水蓄能设备

一、型 式

所谓直联式，就是把水泵安装在水轮机和发电机的同一轴上，用发电机作为电动机来带动水泵的一种型式。其结构分卧轴和立轴两类。卧轴机组的发电电动机，布置在水轮机与水泵之间，而立轴机组的水泵则安装在最下部。

为比较两者利弊，表 2-2 列举了日本制造的二个电站机组的主要参数。从安装和维护方面来看，一般卧轴机组较为方便。但是，从厂房建筑面积和综合效益方面来看，则立轴机组有利。因而，对于容量为6000~100000千瓦的机组，总的看来两者不相上下，大多由安装地点或者地理条件来决定。

对直联式机组，一般因为与水泵直接连接，所以转速大

表 2-2 沼泽沼与诸冢电站参数比较表

主机		沼 泽 沼	诸 冢
水 轮 机	型 式	卧轴复流混流式水轮机	立轴混流式水轮机
	最大出力(千瓦)	23000	54000
	有效水头(米)	215.5~183.5	234~222
	最大流量(米 ³ /秒)	12.8	27.06
	转 速(转/分)	500/600	300
	主 阀	φ 1300毫米闸阀	φ 1800毫米球阀
发 电 电 动 机	型 式	卧轴三相交流同步发电机	立轴三相交流同步发电机
	容 量(千伏安)	23000(发电机)	58000(发电机)
	功 率(千瓦)	21000(电动机)	56500(电动机)
	电 压(伏)	11000	11000
	电 流(安)	1207	3045
	频 率(赫芝)	50/60	60