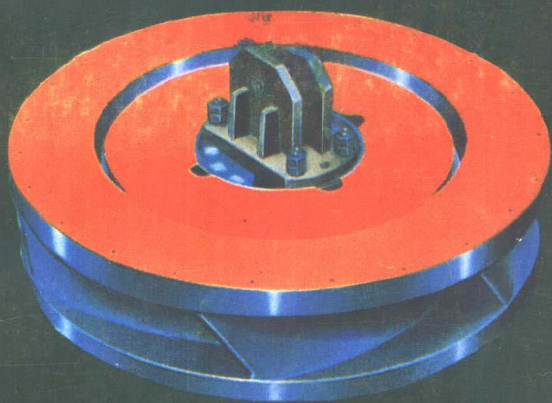


ОБРАТИМЫЕ ГИДРОМАШИНЫ

可逆式水力机械

[苏] Л. П. 格连柯 Н. И. 祖巴列夫 В. А. 乌莫夫 С. А. 苏米林

刘宝第 译 周文通 校



水利电力出版社

Л.П.Гряню, Н.И.Зубарев
В.А.Умов, С.А.Шумилин
ОБРАТИМЫЕ ГИДРОМАШИНЫ
Ленинград «Машиностроение» 1981.

可逆式水力机械

Л.П.格连柯 Н.И.祖巴列夫
В.А.乌莫夫 С.А.苏米林
刘宝第 译 周文通 校

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

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

*

787×1092毫米 32开本 11.25印张 243千字

1987年3月第一版 1987年3月北京第一次印刷

印数0001—1770册 定价2.65元

书号 15143·6243

内 容 提 要

本书研究可逆式水力机械(水泵水轮机)的理论和计算问题。书中阐述了模型机的理论和试验研究结果。提出了可逆式水力机械主要流体动力学参数和几何参数的选择,以及叶片系统、引水和排水部件的设计建议。并且例举出水力机械的特性曲线,阐明过渡过程的特点和确定水力机械工作机构上动水荷载的计算及试验方法。

本书适用于从事可逆式水力机械研究、设计和运行的科学工作者与工程技术人员。也适用于有关专业的高等院校师生。

序 言

由于热电站和原子能电站机组单机容量进一步增加、电能消耗不平衡，以及在燃料——动力平衡中逐渐向核燃料方面转变，所以苏联多数地区电力系统的峰荷补偿和夜间负荷不足的问题日趋尖锐。

在这种条件下，极大地提高电力系统的机动性，即装备运行效率高和性能可靠的动力设备就势在必行。电力系统中，利用抽水蓄能电站（ГАЭС）是解决该项任务的经济方法之一。

抽水蓄能电站优于其它峰荷电站，不仅在于填补负荷图的夜间低谷，而且在于机组还具有辅助功能，如调频、提供无功功率，确保功率的旋转备用等。当抽水蓄能电站组成动力联合体（热电站—抽水蓄能电站，原子能电站—抽水蓄能电站，水电站—抽水蓄能电站）时，用途还可扩大。

作为抽水蓄能电站的动力设备，能正、反向运转的两机可逆式水力机械应用最广。在国外，负荷图的畸变问题比苏联出现早得多，他们也积累了可逆式水力机械计算、设计和运行的实践经验。

然而，发表在国外刊物上的大量有关这方面资料都带有广告色彩，实际使用困难，或者根本不能使用。因而，需要开展国内研究。目前，列宁格勒金属工厂设计科（ПО ЛМЗ）和哈尔科夫水轮机制造厂设计科（ПО ХТЗ），全苏水力机械科学研究院（ВНИИгидромаш），全苏水利工程科学研究所（ВНИИГе）和中央锅炉透平科学研究院（ЦКТИ），

莫斯科动力学院(МЭИ), 莫斯科建筑工程学院(МИСИ), 哈尔科夫工学院(ХПИ), 列宁格勒工学院(ЛПИ)以及苏联科学院机械研究所(ИПИМаш АН СССР)都在进行这方面的研究。近年来刊登有国内、外两类文献。国内文献^[6]研究结构特点和可逆式水力机械在抽水蓄能电站上的应用, 以及过渡过程的计算问题。

国外抽水蓄能电站的设计和运行经验表明, 近十年中, 可逆式水力机械的单机容量和比转速保持着稳定增长的趋势。这就使模型试验中所要解决的课题范围急剧扩大。从而, 为保证真机可靠运行, 必须提高模型试验的作用。

本书是在列宁格勒工学院水力机械实验室中进行可逆式水力机械理论和模型试验研究的基础上写成的, 研究着重以下两方面:

- (1) 工作过程的研究和高效率通流部件的研制;
- (2) 过渡过程的研究和通流部件作用荷载的确定。

书中反映的某些学术著作是在不同时期由列宁格勒工学院水力机械制造教研室的 В.П. 古里耶夫(В.П.Гурьев), А.А. 洛马金(А.А.Ломакин)教授, Т.А. 阿列克赛德洛娃(Т.А.Александрова), А.Н. 巴比尔(А.Н.Папир), В.Г. 斯塔里茨基(В.Г.Старицки)副教授完成的。此外, 书中还利用了全苏水利工程科学研究所的 Ю.Г. 格奥尔基也夫(Ю.Г.Георгиев)工程师和 Л.Л. 多列尼柯夫(Л.Л.Дольников)科学技术候补博士掌握的资料。

因为计划把苏联北部河流的部分径流调到南部, 解决这个问题, 就需要建设装有可逆式水力机械的低水头电站, 所以, 书中除了讨论混流式和斜流式水力机械外, 还讨论了轴流式水力机械。

(略)

主要规定符号

α_0 ——导水叶开度;	v ——绝对速度;
b ——子午截面内的流道宽度;	v_m ——绝对速度的轴面分量;
C ——汽蚀比转速;	v_u ——绝对速度的圆周分量;
C_M ——叶型力矩系数;	w ——相对速度;
C_x ——叶型阻力系数;	w_∞ ——混流式转轮中, 当 $z = \infty$ 时的相对速度; 轴流式转轮中的相对平均速度向量;
C_y ——叶型升力系数;	z ——元件数;
D ——直径;	α ——绝对坐标系中的角度; 导水叶, 固定导叶的几何安放角;
F ——面积;	$\alpha_{\text{нот}}$ ——液流角;
g ——重力加速度;	$\alpha_{\text{сп}}$ ——蜗壳角;
H ——水头(或扬程);	σ_l ——导水叶叶栅叶型的安放角;
K_H ——水头系数(或扬程系数);	α_∞ ——绝对平均速度向量角;
K_Q ——流量系数(或抽水量系数);	β ——相对坐标系中的角度; 转轮叶片的几何安放角;
k_{u2}, k_u ——圆周速度系数;	$\beta_{\text{нот}}$ ——相对系统中的液流角;
l/t ——叶栅稠密度;	β_l ——转轮叶栅叶型的安放角;
l ——叶型叶弦长度;	β_∞ ——相对平均速度向量角;
M ——力矩;	Γ ——环量;
N ——功率;	γ ——漩涡强度;
n ——转速;	δ ——叶型厚度;
n_1 ——单位转速;	$\delta_{\text{кп}}$ ——叶型边的厚度;
n_r ——比转速;	
Q ——流量(或抽水量);	
Q_1 ——单位流量;	
r ——半径;	
t ——栅距, 时间;	
u ——圆周速度(牵连速度);	

ξ —— 损失系数;
 η —— 效率;
 η_F —— 水力效率;
 η_{BH-Mex} —— 内部机械效率;
 $\eta_{об}$ —— 容积效率;
 θ —— 中心角;
 θ_{en} —— 蜗壳包角;

κ —— 液流排挤系数($\kappa \sim 1$);
 λ —— 反量角;
 σ —— 汽蚀系数;
 ρ —— 密度; 反作用系数;
 φ —— 转轮叶片的转角; 动力真空的安全系数;
 ω —— 角速度; 圆频率。

标 脚 符 号

a —— 导水叶;
 a —— 大气压条件;
 BC —— 吸入侧;
 BT —— 轮毂;
 Bx —— 进口条件;
 Byx —— 出口条件;
 κ —— 转轮;
 κp —— 临界值;
 $мод$ —— 模型机;
 $н$ —— 水泵工况;
 $нан$ —— 压力侧;
 $нат$ —— 原型机组;
 $онт$ —— 最优值;
 $нep$ —— 外缘;

$n p e \partial$ —— 极限值;
 p —— 计算工况;
 CK —— 速度的;
 cp —— 平均值;
 CT —— 固定叶;
 T —— 水轮机工况;
 m —— 理论值;
 z —— 水力的;
 u —— 圆周的;
 $нот$ —— 液流的;
 en —— 蜗壳的;
 en —— 内侧的;
 $нар$ —— 外侧的。

目 录

序 言

第一章 抽水蓄能和水力机械的类型	(1)
1.1 电力系统的日负荷图及其抵偿方法	(1)
1.2 抽水蓄能和抽水蓄能电站的类型	(5)
1.3 抽水蓄能电站的水力设备	(9)
第二章 可逆式水力机械的理论基础	(19)
2.1 可逆式水力机械的特性	(19)
2.2 可逆式水力机械与参数相同常规水轮机的工作 差别	(29)
2.3 可逆式水力机械在水轮机和水泵工况运行时最优 动能参数的关系	(35)
2.4 轴流式水泵在水轮机工况运行时动能指标的近似 估算	(41)
第三章 轴流可逆式水力机械	(44)
3.1 转轮主要尺寸和转速的选择	(44)
3.2 转轮叶片系统的参数确定	(48)
3.3 叶片式导水机构	(60)
3.4 转轮叶片和导水叶的计算	(64)
3.5 轴流式水力机组通流部件的结构	(66)
第四章 混流可逆式水力机械	(76)
4.1 计算参数的确定	(76)
4.2 转轮的主要尺寸	(91)
4.3 转轮叶片设计	(102)
4.4 通流部件的压力段和尾水管	(111)
4.5 可逆式水力机械的模型试验	(126)

4.6	可逆式水力机械通流部件的模型研制	(133)
4.7	研究结果在可逆式水力机械设计上的应用	(135)
第五章	斜流转桨可逆式水力机械	(141)
5.1	转桨式转轮的子午截面	(141)
5.2	斜流转桨可逆式水力机械的工作过程	(148)
5.3	转轮叶片计算和设计的特点	(159)
5.4	通流部件压力段和吸入段的设计特点	(173)
5.5	斜流转桨可逆式水力机械的模型	(177)
5.6	运转特性曲线	(179)
第六章	可逆式水力机械稳定工况和过渡过程的研究	(183)
6.1	抽水蓄能电站可逆式水力机组的运行工况和过渡过程类型	(183)
6.2	静态全特性曲线	(185)
6.3	过渡过程的计算方法	(205)
6.4	过渡过程的模型试验	(225)
6.5	稳定工况压力脉动的试验研究	(231)
6.6	水轮机工况甩负荷后的过渡过程模型研究	(236)
6.7	水泵工况断电后的过渡过程模型试验	(244)
第七章	可逆式水力机械的力和力矩特性(计算基础)	(251)
7.1	作用在转轮和导水叶上的力系, 稳定和脉动荷载	(251)
7.2	导水叶作用力和力矩特性的计算确定方法	(258)
7.3	转轮叶片上作用的离心力主向量和离心力矩分量的计算	(266)
7.4	按所给 v_r 分布规律计算动水压力力矩	(273)
7.5	转轮轴向力的确定	(274)
7.6	转轮上作用的径向力计算	(279)

第八章 可逆式水力机械动水荷载的试验研究·····	(287)
8.1 动水荷载的模型试验及其测量方法 ·····	(287)
8.2 动水荷载测量设备的结构 ·····	(293)
8.3 恒定的力和力矩特性 ·····	(301)
8.4 动水作用力和力矩的特性 ·····	(311)
8.5 可逆式水力机械不利的运行工况 ·····	(317)
参考文献 ·····	(326)

第一章 抽水蓄能和水力机械的类型

1.1 电力系统的日负荷图及其抵偿方法

目前,随着电能消耗的无限增长,同时,昼夜间电能消耗的不平衡也在日益增加。电力系统典型日负图的特征是,夜间低谷负荷很小,而早、晚尖峰负荷很大(图 1.1)。日负荷图不平衡程度的两个指标为最小系数 β 和填充系数 δ 。前者等于夜间最小负荷与最大负荷之比,后者等于昼夜平均负荷与最大负荷之比。文献[48]中指出,苏联欧洲部分的联合电力系统(ОЭС),自六十年代起,持续出现日负荷图的两极分化,1970年12月的系数 β 已达到下列数值:

联合电力系统	西北	中央	中伏尔加	南方	乌拉尔
β	0.56	0.6	0.65	0.71	0.75

根据文献[48]作者的预测,到1980年,上述多数联合电力系统的系数 β 比1970年预计还要减少0.04~0.05。在远景规划中,希望稳定电能消耗的不平衡性。

发达资本主义国家电力系统的日负荷图具有更大的不平衡性。例如,1970年冬季,昼夜最小负荷与最大负荷之比值,英国为0.35,意大利为0.45,法国为0.48,瑞士为0.50,而美国,根据不同电力系统从0.47到0.57^[48]。

应该注意,除电能消耗的昼夜不平衡性以外,一周的电能消耗也是不平衡的:工休日的电能消耗和最大负荷要比工作日的低25~30%。

电能消耗的不平衡性大，电力系统中要求的机动容量必然大。由于消耗的绝对值在不断增长，所以对机动容量的需要量也在增加，如果电能消耗的不平衡性持久地发生，那末这种机动容量还将增加。

显然，为使原子能电站和热电站（АЭС和ТЭЦ），甚至凝汽式电站（КЭС）能占有日负荷图的基荷部分，在理想情况下，应把 $1-\beta$ 的设备容量加到机动性高的那部分电站上。众所周知，水电站（ГЭС）具有最高的机动性。水电站机组从静止状态到带满负荷的时间不大于 $1.5\sim 2\text{min}$ ，而从旋转备用状态到带满负荷的时间只需 $40\sim 50\text{s}$ 。

水力机组在日负荷图的变动部分工作还具有经济效益高的优点。譬如，PO-115型混流式水轮机在50%额定出力的效率仅比100%额定出力的效率低3%。轴流转桨式水轮机在30%额定出力的效率与额定出力的效率一样，仅比最高效率低2~3%，一般是在 $70\sim 80\%N_{max}$ 处取得最高效率。由于水力机组的这种特性，所以无论是阶梯式的负荷变化（改变运行机组的台数），还是平滑的负荷变化（机组间的负荷重

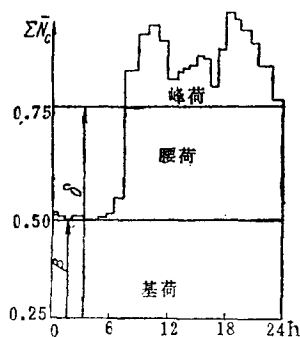


图 1.1 电力系统负荷图($\Sigma \bar{N}_c$ —系统总的相对容量)

新分配)，水电站都能接受并在运行中保持有很高的经济效益。

然而，水电站在总的动力平衡中满足不了以系数 β 表征的尖峰电能的需要。苏联1975年的水电站装机容量为40500MW，仅占总装机容量的19.6%。这就迫使凝汽式电站参加日负荷图变动部分的工作。这类电站装有横向联络设备，以及亚临界蒸汽参数的K-150-130和K-200-130型机组。从1973年起，在西北联合电力系统中开始暂时停止容量为300MW凝汽式机组的运行。

目前已认识到，最好用单机容量分别为500，800和1200MW的K-500，K-800和K-1200型高效率机组装备建设中的热电站。这种设备的最大特点是机动性小，按能源部规定，此类机组的最小允许负荷为额定值的80%，容量小于200MW的机组允许降低到额定容量的50~70%。

在建造机组机动性小的凝汽式电站的同时，预计只能在日负荷图基荷部分工作的原子能电站的建设会急剧增长。

至于水电站，根据水利设计院的资料，在第十个五年计划末，水电装机容量约为55000MW，即水电站部分达到投产容量的20%左右。在联合电力系统的欧洲部分，水电站在整个装机容量构成中的比重不断下降。如果1970年水电站部分占整个容量的15.7%。那么，到1975年约为13.6%，而在不远的将来预计将下降到13.2%^[115]。

上述情况提出一个迫切的问题，就是需要装备一些能在日负荷图尖峰部分工作的机动性高的电力设备。

目前，采用各种相互弥补的方法来补偿日负荷图的变动部分，当水电站装机容量不足时，或者增加汽轮机的调节深度，或者利用机动性高的装有燃气轮机的电站或者采用抽水

蓄能电站。当机组在夜间和工休日大量减负荷乃至停机，其余时间以功率波动不大的方式运行时，第一种方法可用来补偿日负荷图的腰荷部分。凝汽式电站涡轮机的工况变换将增加燃料的无益消耗（例如，每次停机后的机组预热），而这种周期性的热负荷对涡轮机和涡轮发电机的零件材料也是不利的。

为了补偿日负荷图的峰荷部分，广泛采用燃气轮机（ГТУ）和抽水蓄能电站（ГАЭС）。国外，尖峰出力的不足比苏联出现的早，到目前更为紧张，所以燃气轮机和抽水蓄能电站的装机容量占有很大比重。譬如，美国到1976年初，燃气轮机的总装机容量已达到43500MW^[84]。1974年，抽水蓄能电站的装机容量为8120MW，正在建设的总容量有6250MW。到1983年，美国设计好的抽水蓄能电站将达到13100MW，而到1993年，装机容量将达到41200MW^[132]。

在西欧一些国家，燃气轮机和抽水蓄能电站之间也存在着类似的容量关系。1976年，西欧燃气轮机的总装机容量大于15000MW；据不完全统计，这些国家已投产和正在建设中的抽水蓄能电站已超过12000MW。

燃气轮机的主要优点是投资低和电站施工快。开始施工后1.5~2年即可带尖峰出力。此外，燃气轮机电站不需要大量耗水，占地面积也不大。

燃气轮机的缺点是需要消耗优质燃料，燃料贮存将会很快耗尽，带负荷速度比较慢，效率低，特别在部分负荷时，对应的单位燃料消耗高，以及高温电动机所特有的寿命限制。

燃气轮机从冷状态到带满额定出力不少于40~50min，而抽水蓄能电站在发电工况下，1.5~2min内即可带到满

负荷，这方面丝毫也不比常规水轮机逊色。频繁启动和变换负荷会使燃气轮机的燃料平均消耗比正常运行增多。

抽水蓄能电站的单位投资比燃气轮机电站高。考虑水头、地形和地质条件后，抽水蓄能电站每千瓦装机的造价约为110~200卢布或更高些。在苏联欧洲部分100~200m的特征水头范围内，抽水蓄能电站的每千瓦装机估计为150~170卢布^[78]。抽水蓄能电站的经济效益主要是考虑由单位燃料消耗低的基荷电站向抽水蓄能电站受电取得的。没有抽水蓄能电站，部分热电站必须卸荷，而以较高的燃料消耗远离最优工况运行。由于抽水蓄能电站的投入，降低了夜间单位燃料消耗，以至于向抽水蓄能电站受电时的燃料消耗比正常情况还要低。

建造抽水蓄能电站和燃气轮机电站的单位投资差值与燃料效益的对比决定着抽水蓄能电站的经济效益。

经简单分析可见，取得尖峰出力的两方案经济效益的对比取决于许多因素：系统中装机容量的构成方式，抽水蓄能电站和燃气轮机的效率，抽水蓄能电站的水头，以及建设地点的地形和地质条件，距离尖峰负荷中心的距离等等。

这些因素很多，其中许多因素变化范围又大，加上把许多附加因素归纳成货币表达式而带来的困难，加大了经济计算的误差。正因为如此，不能无条件偏重于任何一类尖峰电站。显然，建立既有燃气轮机又有抽水蓄能电站的电力系统结构是完全合理的，而两者容量间的最佳比值应取决于更精确的经济计算。

1.2 抽水蓄能和抽水蓄能电站的类型

抽水蓄能的实质在于：当一昼夜的某些时刻和一周内的

某几天，功率消耗很小时，利用电网剩余功率增加水的位能，水力机组以水泵工况运行，将水抽到上游水库。在功率消耗最大的时间，水力机组以水轮机工况运行，将贮存的位能发电，来补偿系统负荷的不足。

抽水蓄能电站开始于十九世纪，当前它的应用相当广泛，特别在美国、日本、法国、意大利、英国和其它西欧国家^[118]。

抽水蓄能电站的广泛推广是由于对负荷图变动部分的补偿，它比其它方法优越。就是说，只有抽水蓄能电站才能使电网顺利渡过日负荷图的夜间低谷，而无须在夜间停止热电站的大型机组。由于在系统中可以装设单位燃料消耗低的基荷机组代替腰荷汽轮机组，从而抽水蓄能电站的燃料效益提高。文献[48]给出了这种辅助效益的估算方法。

除节省燃料外，因为汽轮机组每昼夜的停机和起动会缩短它的寿命，所以利用抽水蓄能电站填补日负荷图的夜间低谷还可以提高电力设备的可靠性。

当水库库容足够大时，抽水蓄能电站不仅可以平衡日负荷图，还可以在工休日以水泵工况运行来平衡周负荷图。

由于电力系统有抽水蓄能电站，因此可以使水电站转移到负荷图的基荷或腰荷部分工作，为抽水蓄能电站供电，减少水电站在洪水期间的弃水。

抽水蓄能机组有很高的机动性能，不仅使它便于功率备用，还便于负荷备用。由于原子能电站的广泛建设，后者有着特殊的意义。当出现负荷从原子能电站跳开的事故时，原子能电站附近的抽水蓄能电站可立即投入，并在几分钟内转为水泵工况。如果在原子能电站甩掉负荷前，抽水蓄能机组正以水泵旋转方向的同期调相工况运行，那末这种转换将

会更快。

正因为抽水蓄能电站有这些优点，所以建立由原子能电站、抽水蓄能电站和泵站组成的动力联合体是适宜的。在联合体中，抽水蓄能电站的水库可以降低从原子能电站排出的水温，省去专用的冷却设备，节省投资。从这些观点看，上述建设方式最为有利。

抽水蓄能电站可以用在既作供电，又供灌溉及防洪等用途的综合水利枢纽中。譬如，计划把北方和西伯利亚河流的部分水量输送到苏联南部地区的泵站机组，最好考虑能作水轮机工况运行，这是因为在丰水年或一年某些时间，南部地区对水量的需要可能显著减小，从而水流应按天然流向流动。

潮汐电站（ПЭС）也属于抽水蓄能电站的范畴，自七十年代爆发能源危机后，西欧已对潮汐电站的建设引起了关注。苏联也进行了设计研究。研究表明：近期内，潮汐电站工程认为是合理的。由于水库面积很大的潮汐电站的利用，从而有可能使潮汐电站的水轮机和水泵工况与负荷图的峰和谷相吻合，而与涨、退潮的方向无关^[10]。

根据工作特点，抽水蓄能电站可分为循环式（纯抽水蓄能电站）和混合式（水电站—抽水蓄能电站）。

纯抽水蓄能电站的特点是电站上库没有天然径流。在受电—供电的整个循环（一昼夜或一周）内，抽到上库的水量等于水轮机运行排放出的水量。

混合式抽水蓄能电站由于利用了流入上库的径流，所以水轮机工况排出的水量要比水泵工况抽上的水量大。混合式抽水蓄能电站可以在建设常规水电站经济上认为不合理的河流上，利用河流的水力资源，因此这种电站得到了广泛推