

水 轮 机 运 行

常近时 寿梅华 于希哲

水 利 电 力 出 版 社

内 容 提 要

本书比较系统地、全面地阐述了水轮机的汽蚀、泥沙磨损、过渡过程、抽水蓄能、振动、原型现场试验、经济运行与运行可靠性等水轮机运行中的主要问题；详细叙述了运行中各类问题的基本理论与计算方法；介绍了与此有关的国内外近期研究成果以及提高水轮机运行的稳定性、灵活性、可靠性与经济性等技术经济水平的有效措施。

本书主要读者对象为：从事水电站水轮机运行、科研、设计、制造等的技术人员和科研人员；大、中型水电站的运行管理人员；高等院校水电与水力机械各类专业的师生。

水 轮 机 运 行

常近时 寿梅华 于希哲

*

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

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 27.5印张 627千字

1983年9月第一版 1983年9月北京第一次印刷

印数0001—5130册 定价 2.80元

书号 15143·5132

前 言

建国三十余年来，在中国共产党的领导下，我国水电事业已经取得了很大成就。依靠自己的力量，已能修建几百万千瓦的大型水电站，生产单机二、三十万千瓦的大型水力机组。数以百计的大、中型水电站和数以千计的小型水电站，投入了运转。我国水力资源丰富，水电开发前景广阔。在本世纪末实现四个现代化的宏伟目标中，水电必将有更大规模的发展。

水轮机是电能生产过程的原动机，是水电站的主机设备。为了加速水电事业的发展，保证水电站稳定、灵活、可靠和经济地生产电能，首先就必须提高已建成水电站的水轮机运行水平，改进正在研制的水轮机的性能。为此，就必须对水轮机运行领域的各种技术问题，进行广泛、深入地理论与试验研究。本书比较系统地、全面地论述了水轮机的汽蚀、泥砂磨损、过渡过程、抽水蓄能、振动、原型的现场试验、经济运行以及运行可靠性等水轮机的诸主要运行课题；引述了国内外有关这些课题的理论分析与试验研究的近期成果，这是想能为提高我国水电站水轮机的运行水平和科学研究工作的进展，起到一点积极的作用。

本书由常近时同志担任主编。全书共分九章，其中第三、八、九章与第七章的§7-2、§7-3节等，是由寿梅华同志撰写的；第六章是由于希哲同志撰写的；常近时同志完成了其余各章节的撰写工作，并对全书进行了修改和统稿。

本书的部分章节主要介绍了作者在多年的科学研究中所获得的某些理论与试验研究成果。在另一些章节中，则根据作者教学与科研实践中所获得的经验，引述了国内外大量的文献资料。这些文献资料对于本书的撰写至为重要，在此对各文献的作者表示谢意。

本书的各章曾分别请清华大学的梅祖彦，华中工学院的张勇传，水利水电科学研究院机电所的吴培豪、刘尚智、单鹰、刘嘉麟，北京勘测设计院的胡修谱，北京电机工程学会的杨莉亚等同志审阅过，并提出过许多宝贵意见，在此一并表示衷心地感谢。

由于作者水平有限，又兼本书所论涉及内容甚广，书中不妥甚至错误之处，切望读者指正。

作 者

1982年11月

目 录

前 言

第一章 概论	1
§ 1-1 提高水轮机运行水平的技术经济意义	1
§ 1-2 水轮机运行领域的主要课题	2
§ 1-3 水轮机的工作过程	7
本章主要参考文献	19
第二章 水轮机的汽蚀	20
§ 2-1 汽蚀和汽蚀破坏的发生机理	20
§ 2-2 汽蚀的模拟理论	30
§ 2-3 水轮机汽蚀的概述和分类	40
§ 2-4 水轮机汽蚀系数及吸出高度	47
§ 2-5 水轮机汽蚀的实验室研究	53
§ 2-6 水轮机汽蚀的比尺效应	67
§ 2-7 汽蚀破坏强度及其度量	72
§ 2-8 运行条件对水轮机汽蚀破坏的影响	77
§ 2-9 水轮机材料的抗汽蚀稳定性	84
§ 2-10 改善水轮机汽蚀性能的途径	87
§ 2-11 超汽蚀和超汽蚀的水轮机	98
附录 球形气泡力学的某些理论	102
本章主要参考文献	110
第三章 水轮机的泥砂磨损	113
§ 3-1 水轮机泥砂磨损概述	113
§ 3-2 水轮机泥砂磨损形态及其机制	115
§ 3-3 水轮机泥砂磨损的基本因素及其规律	121
§ 3-4 水轮机材料抗磨稳定性分析	132
§ 3-5 水轮机防磨技术措施	142
本章主要参考文献	148
第四章 水轮机装置的过渡过程	149
§ 4-1 水轮机装置的过渡过程概述	149
§ 4-2 叶片式水力机械的全特性	150
§ 4-3 水轮机装置引水系统不稳定流动的基本方程式	156
§ 4-4 水轮机组转动部分运动方程式	164
§ 4-5 水轮机的起动过渡过程	168
§ 4-6 水轮机甩负荷过渡过程	172
§ 4-7 水轮机甩负荷过渡过程的解析计算	178

§ 4-8 水轮机甩负荷过渡过程的数值计算	191
§ 4-9 水轮机过渡过程的以特性解析为基础的数值计算方法	199
§ 4-10 机组转动部分的上抬事故	206
§ 4-11 退出飞逸工况的过渡过程和防飞逸的保护措施	209
本章主要参考文献	216
第五章 可逆式水轮机的运行	218
§ 5-1 抽水蓄能式水电站和水泵水轮机	218
§ 5-2 水泵水轮机的特性	224
§ 5-3 水泵水轮机组的起动方式	236
§ 5-4 水泵水轮机为改善水泵工况起动特性的技术措施	242
§ 5-5 水泵水轮机水泵工况的起动过渡过程	246
§ 5-6 水泵水轮机的过渡过程概述	253
本章主要参考文献	256
第六章 水轮机的振动	258
§ 6-1 水轮机振动的概况	258
§ 6-2 涡列所激起的振动	264
§ 6-3 转轮或叶片的颤振与急振	270
§ 6-4 转轮的动力稳定性	277
§ 6-5 尾水管中水流的低频压力脉动	280
§ 6-6 电磁力引起的机组振动	293
本章主要参考文献	297
第七章 原型水轮机的试验	300
§ 7-1 概述	300
§ 7-2 原型水轮机的能量试验	303
§ 7-3 水轮机投入运行前的试验工作	312
§ 7-4 水轮机装置过渡过程现场试验	315
§ 7-5 原型水轮机汽蚀的现场观测	325
§ 7-6 原型水轮机力特性与转轮应力的现场实测	330
§ 7-7 水轮机模型与原型间特性的换算	336
本章主要参考文献	347
第八章 水轮机的经济运行	349
§ 8-1 基本概念	349
§ 8-2 用微增率法解求厂内机组间有功功率经济分配	353
§ 8-3 应用动态规划法解算厂内机组间负荷合理分配	360
§ 8-4 关于水轮机经济运行的分支界限法	363
§ 8-5 水、火电站联合经济运行	371
§ 8-6 用数学规划法解水、火电系统的经济运行	381
本章主要参考文献	389
第九章 水轮机的运行可靠性	390
§ 9-1 研究水轮机运行可靠性的重要意义	390

§ 9-2 水轮机运行可靠性的基础概念	392
§ 9-3 水轮机可靠性的分布函数及其参数	395
§ 9-4 水轮机可靠性指标与特征	401
§ 9-5 水力机组运行可靠性的附加参数	418
§ 9-6 运行基本技术指标与水轮机零、部件故障率	422
附录 有关参数表	427
本章主要参考文献	433

第一章 概 论

§ 1-1 提高水轮机运行水平的技术经济意义

水能是目前公认的最经济的一种一次能源，水力发电则是最经济的电能转换方式。它与火力发电和原子能发电相比，具有独特的优越性。例如，它比火力发电运行成本低，比原子能发电投资省而技术安全；水力机组运转灵活，速动性高，使它成为电力系统最可靠的负荷备用和事故备用；由于水力机组在偏离设计工况运行时也具有较高的运行效率，它可以经济及灵活地担负起电力系统尖峰负荷的任务；抽水蓄能式水电站可以用来调节电力系统发电与用电的平衡关系，改善供电质量，提高整个电力系统的运行经济性。因此，水力发电在参予电力系统运行时，它占据一种十分独特的地位，特别是随着电力系统容量的扩大，水力发电的这种独特地位就愈加显著。

水轮机是水电站生产电能的水力原动机，是水电站最重要的动力设备之一。水能经水轮机转换成旋转的机械能，再由发电机将机械能转换成电能。水轮机的运行性能好坏，直接影响水电站乃至电力系统运行的技术经济水平。

水轮机运行性能的好坏，除与水轮机和水电站的运行方式和经营管理水平有关外，还与水轮机的设计、制造、安装、检修等多方面的质量和技术水平有关。因此，要提高水轮机的运行质量，实际上并不仅取决于水轮机运行方式的改善，还必须从多方面入手，提高水轮机产品的设计和制造水平，采用新工艺、新结构，从流体动力学方面改善水轮机的能量和汽蚀特性；在机组的安装、检修过程中，各零、部件以及水轮机整体的最终状态应充分满足规范的技术要求；此外，对水轮机运行中存在的各类重大技术问题，必须开展广泛的理论和试验研究，寻找切实可行的解决方法。

运行性能良好的水轮机，应具备较高的运行经济性、可靠性、灵活性和稳定性。为此，最重要的是水轮机必须具有较高的运行效率和宽广的高效率运行区域；具有良好的汽蚀性能和抗泥砂磨损性能；运行过程中机组的振动和噪音小，为消除不稳定状态所采取的技术措施行之有效；水轮机具有良好的过渡过程品质和改善水轮机过渡过程特性的有效措施；此外，水轮机还应具备一整套经济合理的运营方式和设备检修方式相配合。

一台单机50万千瓦的水轮机，运行效率平均提高1%，每年可多生产近2000万度的电能，当然，由于某些制造或运行中的缺陷而使水轮机效率下降所带来的经济损失也是相当可观的。汽蚀性能良好的水轮机，或某些水轮机在运行中可以采取有效的汽蚀防护措施，不仅使水电站在初建时厂房水下开挖量和投资减少，而且也可以减少因汽蚀破坏引起水轮机效率下降所带来的电能损失；延长检修周期、缩短检修时间，从而降低检修费用和因停机检修所带来的电能损失。

水轮机由于各种原因引起的振动，不仅影响水轮机及其零、部件的使用寿命，而且还影响机组的安全和整个电力系统的供电质量。严重的振动将使机组无法正常运转；当引起

电力系统的电力共振时，电力系统也无法正常工作。在国内外均曾发生过因水轮机甩负荷反水锤或水轮机进入向心式水泵工况，而使机组转动部分上抬的事故，其中有的事故所造成的设备损坏是无法修复的。这说明合理的调节方式对保证水轮机在过渡工况下安全运转的重要性。此外，缩短水轮机工况下机组的起动时间，可逆式水泵水轮机水泵工况起动方式的合理选择等，都具有重要的经济意义。只有当电力系统要求水力机组投运而后者能立即以最短的时间起动、并列时，它才能真正起到电力系统的负荷备用和事故备用的作用，延迟起动几分钟所造成的综合损失也是很大的。

对于工作在多泥沙河流水电站的水轮机，通流部件常遭到强烈的泥沙磨损而破坏，所以，泥沙磨损常是决定机组大修周期的主要因素。除遭到严重损坏的零、部件的修复需要消耗大量的工时和材料外，由于停机检修所带来的电能损失和运行中通流零件损坏使水轮机效率下降所带来的电能损失，都是非常可观的。因此，改善多泥沙河流水电站水轮机的抗泥沙磨损性能，在我国具有很重要的实际意义。

综上所述，在水电站所有的动力设备中，水轮机的工作条件最严酷，它不仅转换的能量巨大，受力零件的应力很高，而且伴随高速水流所形成的特有的汽蚀破坏、泥沙磨损、压力脉动等，对水轮机通流零件，特别是对转轮构成了严重的威胁；此外，当负荷变动时，要求在很短的时间内准确、安全的改变水轮机的运行工况。因此，改善水轮机的运行性能，是提高水电站运行水平的关键之一。

§ 1-2 水轮机运行领域的主要课题

随着水电事业的发展，水电站水轮机的一些特殊运行问题显得日益重要。要使水电站在电力系统中经济、可靠地参与联合运行，就必须成功地解决一系列水轮机的特殊运行问题，其中包括：水轮机的汽蚀、水轮机泥沙磨损、水轮机过渡过程、水轮机振动、水泵水轮机的运行、水轮机的原型试验和水轮机的经济运行等。这些问题也是我国水轮机专业领域和水电站运行领域面临的最重要的一些研究课题。这一系列课题的研究结果，将有可能大大改善水轮机的运行性能，提高水轮机运行的技术经济水平，因而有着重要的实际意义。考虑到有关水轮机的正常运行与检修方面的一般技术问题在很多专门的书籍中已有大量论述，本书均不再予以讨论。

下面将就水轮机运行领域里的一些主要课题，做一简要的介绍。

一、水轮机汽蚀

根据我国运行的水电站的现场调查证明，通流部件，特别是转轮的汽蚀破坏，是当前水轮机运行中最为突出的问题。当然，从水轮机的整个发展历史看，汽蚀是水轮机发展的重大障碍之一。

以水做为工质的反击式水轮机的通流零件，特别是转轮中水流速度很高，叶片背面压力很低，这给翼型汽蚀的发生提供了先决条件。在转轮与之偶合的静止零件的间隙中，高速水流能引起间隙汽蚀。因设计和制造缺陷引起的过流表面的不平整，能诱发局部脱流的

旋涡汽蚀。汽泡或汽穴在通流零件表面崩解时，由于频率很高、强度很大的微水击，使结构材料发生破坏，造成大量的金属流失；水轮机通流零件的表面丧失原有的流线形形状，因而导致效率下降。遭到严重汽蚀破坏的转轮与其它通流元件不得不停机进行修复。水轮机汽蚀破坏的修复工作量是相当大的，它往往构成机组检修的主要作业内容。

汽蚀性能好坏是水轮机性能好坏的重要标志之一。通常，希望水轮机具有较小的汽蚀系数，以便降低水电厂厂房的水下开挖深度，并在运行中不易发生汽蚀破坏。为此，就必须研究水轮机各类汽蚀和汽蚀破坏的发生机制和规律，特别要研究与水流参数的基本关系。除理论分析外，还必须从事大量的模型试验与水轮机现场观测，因而还必须提供汽蚀的模拟理论和评价比尺效应的理论，提供研究汽蚀和汽蚀破坏的各种试验方法和试验设备；在水电站现场对水轮机汽蚀破坏同水轮机运行工况的关系，进行长期、细致的观测。在汽蚀的理论研究方面，对于叶片式水力机械来说，最有意义的是局限汽蚀和超汽蚀翼栅绕流正、反命题解法的研究。随着该方面研究工作的进展，将可能提供出成熟的叶片式水力机械转轮汽蚀绕流的计算方法。

当前，汽蚀和汽蚀破坏的发生机制虽已基本揭晓，但由于这一微观过程的影响因素很多，在观察和试验手段不甚完备的情况下，仍有许多未知领域有待进一步研究。在水轮机汽蚀方面，距离完全掌握汽蚀和汽蚀破坏的规律，并从中找出工程上完全有效的，从根本上消除汽蚀对水轮机运行的危害的技术措施这一目标，还相当遥远，还必须进行大量的工作。

二、水轮机泥砂磨损

自然界的水中完全不含有固相介质的是没有的。但是，只有工作水流中含砂量达到一定数量时，水轮机通流部件才遭到泥砂磨损而破坏。地处我国华北和西北的广大地区，大多数河流的流域包括了黄土高原和黄土丘陵地区。在这些地区的汛期，暴雨频繁且强度大，在水土保持工作尚未完全奏效的情况下，大量的泥砂被汛期的地表径流带走，汇入河流，造成这些河流中含有大量的泥砂。以黄河为例，三门峡上游陕县水文站实测的多年平均输砂量竟高达1.3亿吨。水库建成初期，泥砂大部沉积，水轮机的工作水中含有数量不大、粒径较小的泥砂，水轮机泥砂磨损并不严重。随着库区的逐渐淤积，数量多而粒径较大的泥砂被带入水轮机，从而使水轮机遭到严重的泥砂磨损。

泥砂磨损是一种强烈的破坏形式。水轮机通流部件均可遭到不同程度的破坏，而尤以水轮机的转轮、导叶、转轮室等流速较高的零、部件中为甚。破坏非常严重的水轮机甚至无法修复，因此，多泥砂河流水电站机组大修周期差不多完全由水轮机泥砂磨损的破坏程度来决定，而检修的工作量是很大的。例如，黄河上某水电站HL123-LH-410型水轮机，大修周期为两年左右，工期30~40天，转轮一次修复补焊耗用电焊条约1吨，磨损破坏部位的处理占大修总工作量的80%。修复后的转轮经一个汛期的运行，效率显著下降，电能损失巨大。

泥砂磨损的破坏强度与含砂水流的特性、水轮机通流元件的材料特性、水轮机工作条件和运行工况等有关。具有很高运动速度的水流夹砂，撞击固体壁面，有时，一次撞击产

生的应力可能超过材料的屈服极限而使材料发生塑性变形。即使产生较小的冲击应力，由于作用频繁，也会使材料疲劳破坏。有时，泥沙磨损和汽蚀同时发生，导致一种更为复杂的联合破坏过程。

近些年来，国内外曾对泥沙磨损的机制，各种金属与非金属抗磨材料的抗磨稳定性，防止水轮机泥沙磨损的各种技术措施等进行了大量的实验室和现场的试验研究，取得了很多的成果。我国黄河上的一些水电站也积累了诸如转轮的补焊修复，转轮叶片抗泥沙磨损的非金属材料复涂等方面的成功经验。但是，水轮机泥沙磨损领域存在的问题仍很多，有待进一步的研究。特别是要根除泥沙磨损给水轮机运行带来的严重危害，必须从水库和水电站沉砂设备的合理设计和运用，改善在含砂水流中工作的水轮机抗磨性能，研制抗泥沙磨损稳定性高的金属与非金属材料等多方面入手，采取综合技术措施才能达到这一目的。

三、水轮机过渡过程

随着水电站、水泵站和抽水蓄能式水电站水力机组运行经验的不断积累，以及水力机械不稳定水流流体动力学和调节理论不断发展，在水轮机运行领域中，逐渐形成一个新的分支—水轮机过渡过程问题。

严格的说，水力机组在运行过程中由于外负荷的变动，随时都处于工况过渡的状态下工作，但是，这种工况过渡问题纯属水轮机调节系统小波动稳定性的研究对象。而水轮机过渡过程是指水轮机由一种工作状态向另一种工况性质完全不同的工作状态过渡的瞬变过程。在过渡过程中，水轮机的工作参数，如水头 H 、流量 Q 、转数 n 、水轮机轴端力矩 M 、轴向力 P_z 、轴功率 N 等不仅数值发生变化，而且符号也可能改变。虽然过渡过程所经历的时间很短，但是，工况的性质却可能发生多次的根本变化。例如，水轮机甩负荷事故停机过渡过程是从向心式水轮机工作状态开始，经由瞬时飞逸工作状态、向心式制动器和水泵工作状态，到停机状态为止。因此，过渡过程中必然伴随产生一系列复杂的现象，这对水轮机组、水电站乃至电力系统工作的安全可靠性和运行质量，均有很大影响。

普通水电站的水轮机，由于运行过程中不可能发生逆转和逆流，因此，各种类型的过渡过程仅限于以流量 Q 、转数 n 为直角坐标系的第三象限内，而抽水蓄能水电站水泵水轮机的过渡过程，则在整个四象限内均可能发生。

研究水轮机过渡过程的目的，在于揭示各种过渡过程中水轮机内部水流特性和外部机械特性的变化规律，以及对水轮机工作性能的影响；并以此为基础，合理地控制这些过程，以保证水轮机在过渡过程不稳定工作状态下的安全，改善过渡过程中水轮机及其零、部件的工作条件，提高机组的运行质量。

经过大量的理论分析和模型与原型的试验研究，水轮机过渡过程的基本理论和计算方法已趋成熟。特别是随着电子计算机的应用，给过渡过程的求解提供了很大方便，使水轮机过渡过程这一学科分支有了更进一步的发展。但是，过渡过程基本理论所涉及的范围甚广，目前尚有许多基本理论问题有待进一步研究。虽然电子计算机的引用给水轮机过渡过程的计算提供了不少方便，但许多计算结果仍不能令人满意，其根本原因还在于没有正确的基本理论做指导和缺乏合乎实际的计算边界条件。因此，过渡过程基本理论的研究和广

泛的原型现场试验，今后仍然是水轮机过渡过程研究的两个重点。

四、可逆式水轮机的运行

抽水蓄能式水电站的水泵水轮机虽然在国外早已出现，但在我国仅在近些年来才开始投入使用，并相应进行了一些研究工作，但总的来说，尚未积累很多的实际运行经验。随着我国电力工业的发展，电网容量不断扩大，大容量火电机组投运增多，抽水蓄能电站将会有一定的发展。而可逆机组远比分置型机组经济，它将是抽水蓄能电站今后采用的主要机型。

可逆式水泵水轮机做水轮机运转时，与普通的水轮机大体相同。当它做水泵运转时，由于单机功率很大，直接自行起动会对电力系统产生很大的冲击扰动，这是不能允许的。所以，研究水泵工况的起动过渡过程，寻求合理的电气与机械起动方式，不仅是水泵水轮机运行领域的主要问题，而且也是抽水蓄能水电站和机组设计所必须着重解决的问题。

水泵水轮机在水泵工况运行时，汽蚀与水流压力脉动均较水轮机工况严重，因此，改善水泵工况下的吸上性能，减小压力脉动引起的机组振动，常是运行中较为突出的问题。

机组在抽水工况下运行，当动力突然切断，导水机构失灵拒不动作时，将发生水泵倒流倒转，从而发生由水泵工况进入向心式水轮机工况和飞逸工况的过渡过程。如果动力切断，而导水机构能快速关闭，则只发生倒流而不发生倒转。这两种情况均有可能在压力管道中形成高度真空。如果管道布置方式不良，将有可能使管道被大气压破，酿成严重事故。

水泵水轮机运行中经常要由发电工况转抽水工况，或者相反，进行工况的切换。工况切换的时间愈短，机组运行的灵活性与速动性愈高。

五、水轮机振动

水力机组在运行中常由于机械、水力和电气等方面的原因引起机组和某些部件的振动。强烈的振动影响水轮机组的正常运行，降低机组和某些零、部件的使用寿命；当引起厂房、压力管道和电力系统的共振时，机组则无法运转。强烈的振动是水力机组运行中最常见的一种故障现象。

引起机组振动的具体原因很多，最常见的有：由于机组转动部分静平衡不良，水力机组轴线曲折，转动部分与静止部分相撞，导轴承间隙过大或润滑不良，轴的工作转数与临界转数相重合等机械原因引起的振动；由于强烈汽蚀的发生，蜗壳供水不均匀，旋转的转轮叶片对水流的干扰，尾水管的水流低频压力脉动，转轮出口卡门涡列的形成等水力原因引起的振动；由于发电机转子线圈短路，转子与定子间气隙异常等电气原因引起的振动等。振动特性常是水轮机工况的函数，特别是由水力原因引起的振动往往与水轮机工况有着密切关系。例如，混流式水轮机在偏离最优工况的低水头与低负荷运行时，由于尾水管中旋转水流与空腔涡带的形成，引起尾水管水流的低频压力脉动与尾水管的振动，甚至导致机组强烈的纵向振动和功率摆动。当运行于最优工况时，低频压力脉动引起的振动则大大减弱或消失。

在实际运行的水电站水轮机组上,产生振动的原因往往不易判断。有时,各种频率特性的振动混杂在一起,这也给寻找振动原因的工作增加不少困难。即使查明引起水轮机振动的原因,欲将其消除,在某些情况下也并不容易。因此,大力开展有关水轮机振动的研究工作,寻找有效的消振措施,在当前是十分必要的。

六、水轮机原型的现场试验

水轮机原型的现场试验是了解和改善水轮机运行性能,完善水轮机基本理论和设计方法的重要途径之一。

为了全面改善水轮机的运行性能,必须不断地总结实际水轮机的各种运行经验,观测各种为改善运行性能而采取的技术措施的实际效果,就必须在原型水轮机上开展诸如水轮机效率实测,水轮机过渡过程特性,水轮机振动,汽蚀与泥沙磨损,水轮机的力特性和水轮机零、部件结构性能等一系列内容广泛的现场试验。

水轮机原型试验,根据其内容和所要达到的目的,而采用不同的手段和实验设备。即使同一现场试验,所采用的方法、测量手段和设备也可能有很大不同。所以,水轮机现场试验的种类、测试手段等是多种多样的,在水轮机专业领域,构成了一个专门的学科分支。

水轮机的试验研究大体上分为两类:模型试验与原型试验。它们有时进行内容相近的试验。但在大多数情况下,却有着不同的试验目的和试验内容。由于比尺效应和实验室条件的局限性,水轮机模型试验结果不可能与原型的真实特性完全符合,有时甚至会有较大的差别。而原型水轮机的工况参数,如水头、转数等不可能在实际运行中大幅度地加以改变,原型试验需消耗大量的水能,所以,不可能做如同模型水轮机能量和汽蚀试验那种工况变动广泛的原型试验。因此,模型与原型试验是研究水轮机性能的两种相辅相成的手段。这两种试验手段,至少在目前,是缺一不可的。

在水轮机原型现场试验中,最重要的是要有正确的试验方法,并保证足够的测试精度,否则就失去了试验的意义。试验方法的选择除要参照国际电工委员会的有关规定外,还要考虑水电站和水轮机组的具体条件。而测试精度除与测试的具体方法有关外,还与使用的仪器仪表的精度等级有关。目前,国内通用的一些测试方法均较原始,测试的误差较大。要想使各种水轮机原型试验均能获得令人满意的结果,还需要大力改进测试技术,研制先进的测量设备。

七、水轮机的经济运行

要提高整个电力系统的动能经济效益,在很大程度上取决于系统中各类电厂的运行工况的最优化。对于水电厂来说,水轮机的经济运行问题,实际上就是水电厂的经济运行问题。

到目前为止,经济运行的准则仍以水轮机运行效率最高,发电量最多和耗水量最少等来表示。换句话说,水轮机经济运行水平,是由上述三个准则中的任意一个来评价的。

水轮机经济运行问题比较复杂。对于孤立运行的水电厂,经济运行问题主要是机组之间进行经济负荷分配的问题。对于水电厂群并列运行的情况,则有电站之间和各电站机组

之间进行经济负荷分配的问题。对于水电站与火电站联合运行的情况，水电站则按日负荷图给定的负荷而要求用水量最少，或者按给定的总用水量，要求水电站发出最大的功率，同时又使火电厂即能满足电力用户的需求，而又使燃料的消耗最少。

水电厂内机组间有功功率的经济分配，以前常用微增率法进行计算，近些年来，国外广泛采用动态规划法来求解。

贝尔曼动态规划法应用广泛，它不仅可使连续过程求得最优化，而且也能使不连续的多级判别过程最优化。这种方法可用来研究确定性和随机性两种过程。厂内机组之间负荷的合理分配过程，就是一个既有确定性又有随机性的多级判别过程的最优化问题。

在研究联合电力系统中的水电厂水轮机经济运行问题时，必然要涉及到水、火电厂联合运行的经济性问题，而数学规划法则是求解这一问题的常用方法。

八、水轮机的运行可靠性

可靠性技术在六十年代中期被引入电力工程。所谓可靠性就是产品在运行条件下，在规定的时间内，能够满足全部工作要求的能力。机器的可靠性只在运行中才能表现出来，但它却与设计、制造、安装以及运行等四方面的因素有关。

水轮机运行过程中的故障是随机量，所以可靠性要用概率来表示。在机械系统可靠性理论中，常采用正态、指数或威布尔分布规律，来确定设备无故障工作概率、故障概率、故障频率、故障率、平均无故障时间等可靠性基本参数值。

为了提高水电厂动力设备运行可靠性，应建立一整套可以施行的具体方法，诸如对新设备进行关键性试验；编制运行规程与设备指示书；建立科学合理的运行组织；建立评价机组运行质量的技术指标与持续考查机组运行质量的具体制度等。

上述列举的八个方面的问题，基本上概括了现代水轮机运行领域中的一些主要问题。本书在以后的八章中，将分别对这些课题予以专门的论述。

§ 1-3 水轮机的工作过程

一、叶片式水力机械的特点

水轮机是一种将水能转换成旋转机械能的叶片式水力机械。将旋转的机械能转换成液体能量的机械，则称为泵。可见，水轮机与泵工作过程相反。

叶片式水力机械的工质一般是含有极少数量的固体与气体的单相液体介质，最常用的工质是水。叶片式水力机械中水流能量的变化与热机（汽轮机、燃气轮机、压气机等）中的蒸汽的气体能量变化相近似，描述工质流动过程的定律有类似的地方，所以，这些设备的通流元件的几何形状也基本类似。但是，这两类机械在结构上相差很大，其主要原因是它们各自所利用的工质的物理性质有着很大差别。一般的说，气体的密度比水小一千倍，因此，水力机械的功率强度比汽轮机要高。为了得到60万千瓦的轴功率，在汽轮机中工质需要连续通过60个级，且初始压力为250公斤/厘米²；而对于水轮机，则只需初始压力为10~30公斤/厘米²的工质，经过一级能量转换便可获得相同的功率^[1]。

叶片式水力机械的工作机构，特别是转轮叶片上作用着很大的流体动力荷载，叶片根部截面承受很大的弯曲应力。所以，叶片式水力机械的结构与工作参数，往往不得不根据强度条件来选取。

水力机械的额定转数比热机要低得多，以避免在通道中由于工质密度较大而使圆盘摩擦损失和翼型阻力损失急剧增大。此外，水力机械的转数还要受汽蚀条件的限制。

由于水比气体的密度大得多而压缩性甚小，所以，当水力机械处于不稳定工作状态时，工质流动速度的改变能引起很大的压力变化，因而给强度和调节方面带来一系列问题，这是热机中所没有的问题。由于工作过程中水的温度变化甚小，水力机械中不考虑材料的热稳定性以及热交换等热过程的影响。

水力机械在工作过程中工质可能发生相变过程，这是它的重要特点之一。这一特有的相变过程又称为汽蚀，它能引起通流零、部件的汽蚀破坏。

二、叶片式水力机械的基本方程式^[5]

不稳定工况下混流式与轴流式水轮机转轮中瞬时的水流流动情况见图 1-1 所示。假设流体是理想的，不可压缩的，且相邻流层间互不干扰。根据动量矩定理，转轮区域某一流层中的某一微元流体体积 dW 上所受的外力矩 δM_t ，等于该流体微团动量矩对时间的导数。即有如下关系：

$$\rho dW \frac{dv_u r}{dt} = \delta M_t \quad (1-1)$$

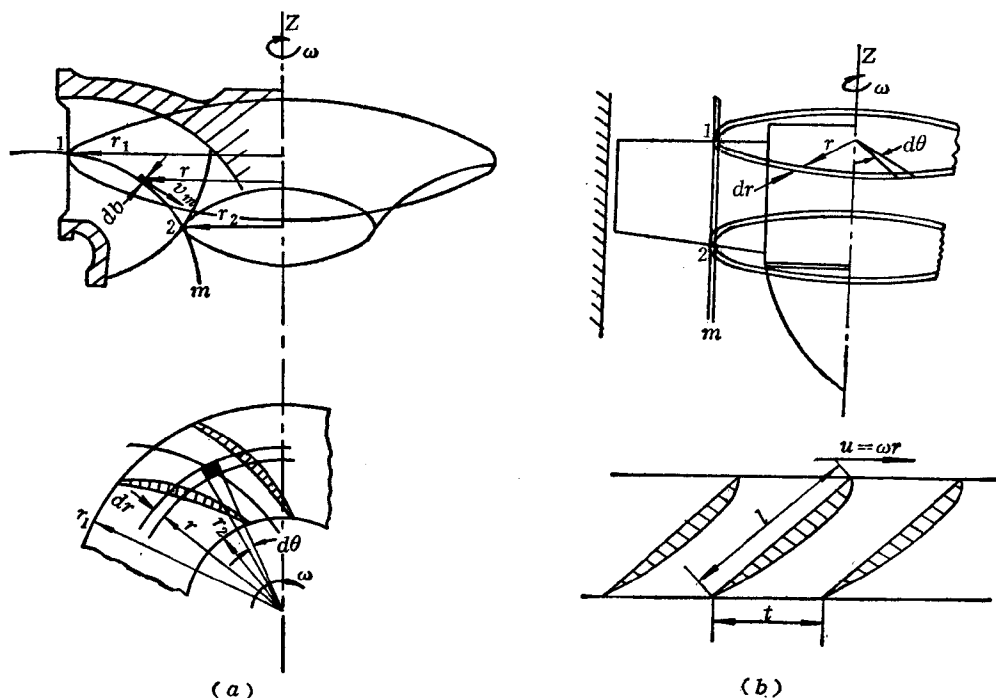


图 1-1 不稳定工况下水轮机转轮中瞬时的水流流动情况
(a)混流式水轮机；(b)轴流式水轮机

上式中 ρ 为流体密度, v_u 为流体微团绝对速度的圆周分量, r 为流体微团相对水轮机转轴的半径。 $v_u r$ 称为速度矩, 对于混流式转轮, 在某一流面上它是时间 t , 轴面流线座标 m 和幅角 θ 的函数, 即 $v_u r = v_u r(t, m, \theta)$ 。如果假设转轮中的流动为轴对称的, 则有 $v_u r = v_u r(t, m)$ 的关系。速度矩对时间的导数:

$$\frac{dv_u r}{dt} = \frac{\partial v_u r}{\partial t} + \frac{\partial v_u r}{\partial m} v_m \quad (1-2)$$

式中 v_m ——轴面速度。

对于轴流式水轮机, 转轮区域流面为圆柱面, 在同一圆柱层流面内流体微团所处的半径 $r = \text{常数}$ 。轴面流线座标 m 与 Z 轴平行, 则有 $v_m = v_z$ 。所以, 对于轴流式转轮, (1-2) 式可写成:

$$\frac{dv_u r}{dt} = r \left(\frac{\partial v_u}{\partial t} + \frac{\partial v_u}{\partial z} v_z \right) \quad (1-3)$$

对于径向式转轮, 流面为与转轴相垂直的平面, 在同一流面上, $v_m = v_r$, 座标 m 与座标 r 相平行。所以, 对于径向式转轮, (1-2) 式可写成:

$$\frac{dv_u r}{dt} = \frac{\partial v_u r}{\partial t} + \frac{\partial v_u r}{\partial r} v_r \quad (1-4)$$

将 (1-2) 式代入 (1-1) 式并进行积分, 可以求出某一流面 W_i 上的流体所受的外力矩表达式:

$$\begin{aligned} M_i &= \iiint_{W_i} \rho \left(\frac{\partial v_u r}{\partial t} + v_m \frac{\partial v_u r}{\partial m} \right) dW \\ &= \rho \iiint_{W_i} \frac{\partial v_u r}{\partial t} dW + \rho \iiint_{W_i} v_m \frac{\partial v_u r}{\partial m} dW \end{aligned} \quad (1-5)$$

流体微元体积:

$$dW = r d\theta dm db \quad (1-6)$$

式中 db ——微元过水断面宽度。

轴面速度:

$$v_m = \frac{Q_i}{2\pi r db} \quad (1-7)$$

式中 Q_i ——流面内的流量。

将 (1-6)、(1-7) 两式分别代入 (1-5) 式的第二项积分表达式中, 对转轮区域内某一流面的流体薄层体域 W_i 进行积分, 便得该流体域上流体所受的外力矩表达式:

$$M_i = \rho \iiint_{W_i} \frac{\partial v_u r}{\partial t} dW + \rho Q_i \left[(v_u r)_2 - (v_u r)_1 \right] \quad (1-8)$$

式中脚标 1、2 分别表示转轮的进口与出口。

由于整个转轮的流体体域 Ω 可以看做由若干个厚度为 db 的回转曲面流层组成, 且每个流层均有 (1-8) 式所确定的关系; 又由于流体所受的外力矩与流体施于转轮的水力矩大小相等方向相反, 因此, 整个转轮体域的流体施加给转轮的动态水力矩为:

$$M_H = \rho Q_H (v_{uH1} r_1 - v_{uH2} r_2) - \rho \iiint_D \frac{\partial v_{uH} r}{\partial t} dW \quad (1-9)$$

显然, 对于轴流式水轮机, 将(1-3)式代入(1-1)式, 对于径向式水轮机, 将(1-4)式代入(1-1)式, 并按上述相同的步骤进行积分和处理, 均可得出与(1-9)式完全相同的结果。(1-9)式即为水轮机动态力矩的一般表达式。脚注 H 表示动态值。

水轮机的动态水头:

$$H_H = \frac{M_H \omega_H}{Q_H \gamma \eta_H} \quad (1-10)$$

式中 ω_H 、 Q_H 、 η_H 分别为水轮机动态转角速度、流量和水力效率, γ 为水的重度。

将(1-9)式代入(1-10)式得:

$$H_{eH} = \eta_H H_H = \frac{u_{H1} v_{uH1} - u_{H2} v_{uH2}}{g} - \frac{\omega_H}{g Q_H} \iiint_D \frac{\partial v_{uH} r}{\partial t} dW \quad (1-11)$$

该式为水轮机动态有效水头的一般表达式, 同样, 它适用于混流、轴流、径向流等所有反击式水轮机的所有工况。动态有效水头 H_{eH} 由两项组成: 第一项, 以某瞬时转轮进、出口水流动态参数表示的水轮机有效静水头; 第二项, 考虑不稳定工况下转轮区域水流惯性的附加水头。

当水轮机在稳定工况下运转时, 水轮机的工况参数和转轮区域水流的流动参数与时间 t 无关, 因而(1-9)与(1-11)两式中的 $\frac{\partial v_{uH} r}{\partial t} = 0$ 。由此可以得出水轮机的静态力矩和静态有效水头的表达式:

$$M = \rho Q (v_{u1} r_1 - v_{u2} r_2) \quad (1-12)$$

和

$$H_e = \eta_h H = \frac{v_{u1} u_1 - v_{u2} u_2}{g} \quad (1-13)$$

式(1-13)即为熟知的水轮机基本方程式, 又称为欧拉方程式。式中 v_{u1} 、 v_{u2} 为转轮进、出口水流绝对速度的圆周分量; u_1 、 u_2 为转轮进、出口水流的圆周速度, $u_1 = \omega r_1$, $u_2 = \omega r_2$; η_h 为转轮水力效率。

欧拉方程建立了水轮机稳定工作状态下能量转换同转轮进、出口流体运动学参数的关系, 即建立了能量转换过程中水流动力学与运动学之间的联系。从上述推导不难看出, 水轮机水头即为转轮进、出口水流的比能差。

应当强调指出, 欧拉方程只适用于水轮机的稳定工况, 而水轮机在运行过程中负荷经常变动, 水轮机的流量和转数也随时间变化, 特别是当水轮机在过渡过程中运转时, 这些工况参数往往随时间发生大幅度的变化, 此时, 欧拉方程不再适用, 而必须采用(1-9)与(1-11)两式所给定的水轮机动态力矩和动态有效水头的关系式。方程(1-9)与(1-11)既适用水轮机稳定工况, 也适用于不稳定工况, 因此这两个方程又可称为水轮机广义基本方程式。方程(1-9)称为水轮机广义基本方程式的动态力矩表达式; 方程(1-11)则称为水轮机广义基本方程式的动态有效水头表达式。显然, 欧拉方程是广义基本方程式

在稳定工况下的特例。

水轮机与水泵是彼此互为逆工作过程的叶片式水力机械，所以，只要在(1-9)与(1-12)两式等号的右侧均乘以-1，便可得出水泵动态与静态水力矩的表达式；在(1-11)与(1-13)两式等号的右侧乘以-1，便可得出水泵动态与静态理论扬程的表达式。因此，(1-9)与(1-11)两式又可以称做是叶片式水力机械的广义基本方程式。

三、水轮机转轮的翼栅绕流

叶片式水力机械的转轮和导水机构，均是由若干个叶片相互间接等距离呈周期性排列组成的叶栅。当流体对转轮绕流时，叶片之间产生相互影响，致使绕流情况与单翼型绕流有很大不同，这种影响叫做翼栅影响。所有叶片式水力机械的工作过程，当然，水轮机也不例外，都基于绕流工质与翼栅的相互作用。

通常，水轮机转轮的绕流被视为轴对称的空间流动，转轮区域任一流面均可近似地认为是由某一母线（轴面流线）绕水轮机转轴轴线而成的空间回转曲面。转轮区域的整个流动可以看做是由若干个彼此相互没有影响的流面组成。分别研究由这些流面所截的翼栅中的流动，综合起来便得到整个转轮区域的流动。水轮机转轮的性能同它的各翼栅中的流动情况关系十分密切。

如果母线为一平行于水轮机转轴的直线，例如轴流式水轮机转轮中的轴面流线即为平行于转轴的直线，则流面为圆柱面，它可以展开成平面，而由流面所截的翼栅则是直列的移动翼栅。对于斜流式和混流式水轮机转轮，轴面流线不与转轴平行，后者为曲线，所以流面不能简单地展开成平面，而必须采用保角变换的数学方法将空间翼栅变换成平面环列的转动翼栅，来分析翼栅中的流动。因此，不管水轮机转轮的型式如何，平面翼栅的绕流理论至今仍是分析和研究转轮区域流动的基础。

在水轮机运行领域里，最常遇到的问题是转轮区域流动的分析，即分析转轮区域翼栅绕流与水轮机运行工况的关系。按其性质来说，它属于翼栅绕流正命题的求解范围。

图 1-2 上示出了轴流式水轮机转轮某一无穷直列移动的翼

栅。如果流经翼栅的相对水流是稳定的，有势的，且速度切于翼型的表面，则其特征方程为：

$$\Gamma_2 = K\Gamma_1 + (1-K)\tau_0 q + (1-K)2\pi r^2 \omega \quad (1-14)$$

式中 Γ_1 、 Γ_2 ——翼栅进、出口速度环量；

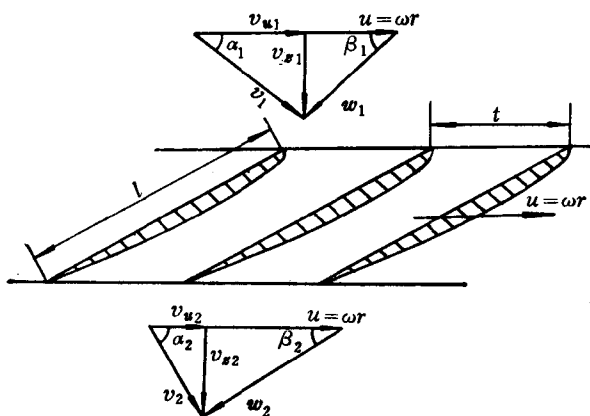


图 1-2 轴流式转轮的直列翼栅