

中国机械工程学会 第一届全国动力机械(透平锅炉)年会 论文选集

(水轮机部分)

中国机械工程学会透平锅炉学会筹备委员会编

内部资料 注意保存

中国工业出版社

10501

55K6

**中国机械工程学会
第一届全国动力机械(透平鍋炉)年会
論 文 选 集**

(水 輪 机 部 分)

中国机械工程学会透平鍋炉学会筹备委员会編

中 国 工 业 出 版 社

本文集分为汽輪机和燃气輪机，鍋炉，水輪机三个部分出版。

本分册为水輪机部分，包括論文 16 篇。

本分册的論文是根据下列中心議題选編的：1) 提高水輪机技术經濟指标的途徑；2) 我国水輪机的发展方向；3) 解决当前农村水力动力問題与发展方向。这些論文不但反映了我国科学技术工作者几年来的科研成果，而且对于进一步发展我国科学技术工作亦具有一定的参考价值。

中国 机械 工程 学会
第一届全国动力机械(透平鍋炉)年会論文选集
(水輪机部分)

中国机械工程学会透平鍋炉学会筹备委员会編

*

机械工业图书編輯部編輯(北京苏州胡同 141 号)

中国工业出版社出版(北京佟麟閣路丙 10 号)

(北京市书刊出版事业許可証出字第 110 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印張 11 · 字數 258,000

1964 年 5 月北京第一版 · 1964 年 5 月北京第一次印刷

印数 0,001—1,260 · 定价(科七)1.60 元

*

統一书号: 15165 · 2359(一机-599)

前 言

第一届全国动力机械（透平、鍋炉）年会于 1962 年 12 月在杭州召开，参加这次會議的有：第一机械工业部、水利电力部、中国科学院和黑龙江、浙江、北京、上海、陝西、辽宁、湖北、江苏、河北、吉林、四川等地区的生产、科研、教学部門的代表，以及杭州地区的透平、鍋炉科学技术工作者共二百余人，會議历时六天。在年会期間宣讀了 38 篇論文，同时又按汽輪机与燃气輪机、水輪机、鍋炉专业分为三个組，进行了討論，取得了一定的成績。

这次年会，除筹备期間收到各地报送来的論文 176 篇外，在年会期間还收到有关論文 18 篇，共計 194 篇。其中汽輪机、燃气輪机部分 73 篇；水輪机部分 41 篇；鍋炉部分 55 篇；其它部分 25 篇。在这些論文中，絕大部分都反映了我国近年来透平、鍋炉科学技术工作者，通过辛勤劳动所获得的研究成果。

为了广泛地进行学术交流，年会中成立了“論文选集”选編小組分別选編了一批符合中心議題，而又具有較高水平的或是有一定推广价值的論文全文刊印。考虑到不同专业的需要，决定分汽輪机、燃气輪机部分；水輪机部分与鍋炉部分三个分冊出版。

水輪机部分这个分冊共选用了 16 篇論文全文刊印。前 12 篇文主要是属于“提高水輪机技术經濟指标”和“我国水輪机发展方向”两个中心議題的，后四篇是属于“农村水力动力問題与发展方向”中心議題的。其它有关論文，虽然其中有許多是具有較高水平，或是有一定推广价值，但因“論文选集”的篇幅有限，未能一一全文发表，只是按論文收到先后排印目录，特向作者表示歉意。

由于汇編者水平有限，这次年会論文选集無論在論文选用方面，編排方面，难免有欠妥之处，尚望論文作者、讀者及有关方面給予指正。

中国机械工程学会透平鍋炉学会筹委会

一九六三年三月

目 次

前言

专业組討論小結.....	(1)
当前我国水輪机的若干技术問題.....	水电总局 于开泉(5)
提高水輪机技术經濟指标的一种途徑.....	大电机研究所 俞炳元(16)
如何降低各型冲击式水輪机的飞逸轉速.....	东北重型机械学院 杜同(23)
論适应于水头变化幅度大的斜流式水輪机.....	哈尔滨工业大学 賈宗謨(34)
提高中小型水輪机系列型譜水力性能的研究方向.....	天津电气傳动研究所 郑 熊(48)
新型水輪机——双轉輪混流式水輪机的某些研究.....	
.....	天津电气傳动研究所 郑 熊、宋盛义(56)
水輪机調节保証計算問題.....	北京水利水电学院 寿梅华(65)
机組甩滿負荷后速率上升影响因素与近似公式的分析.....	
.....	水利水电科学研究院水力机电研究所 吳培豪(83)
双列叶柵的流体动力学分析.....	北京水利水电学院 刘大愷(97)
中比轉速混流式水輪机几种改变轉輪外型对水力特性影响的一些分析.....	
.....	大电机研究所 吳新潤(107)
混流式水輪机轉輪泥砂磨損的水力分析及提高其耐磨性能的水力措施.....	
.....	大电机研究所 陈荣南(116)
导叶的强度計算問題.....	大电机研究所 張麟悟(126)
混流式水輪机空腔汽蝕及补气效果、补气法問題的探討.....	丰满发电厂(134)
微型水电站的发展情况及其在我国的应用.....	
.....	水利水电科学研究院水力机电研究所 李玉壁等(138)
浙江部分地区农村小型水电站及水力資源的調查报告.....	蕭山电机厂(159)
关于农村水电站中几种新型式水輪机設計的初步探討.....	东北重型机械学院 陈秉二(164)
年会收到的其它有关水輪机方面的論文目次.....	(172)

专业組討論小結

——透平鍋炉学会筹备委员会——

参加本組討論的有正式与列席代表 30 人，包括設計制造部門，使用部門，高等院校，科研机关等 20 个单位。年会收到了各地学会推荐和选送的有关水輪机方面的学术論文、技术报告和調查报告共 41 篇。会上圍繞“农村水力动力問題与发展方向”、“提高水輪机技术經濟指标的途徑”和“我国水輪机发展方向”等三个中心議題，宣讀了 14 篇論文，并認真貫徹了“百花齐放，百家爭鳴”的方針，以理論联系实际的的精神和辯証唯物主义的观点展开了热烈討論。

一、提高水輪机技术經濟指标的途徑

水輪机的技术經濟指标，不仅涉及水輪机本身，而且影响到水輪发电機組的造价，影响到水电站有关建筑物的投資，还影响到水电站的安全运行，大檢修周期等方面。因此提高水輪机技术經濟指标，对水利水电建設有重大意义。

提高水輪机技术經濟指标，可从能量指标、汽蝕性能、单位出力的金屬消耗量、机組外形尺寸、飞逸轉数大小、檢修維護的方便、使用年限等各方面来衡量，但最終必須建立在運轉安全可靠的基础之上。因此提高水輪机技术經濟指标的途徑主要应包括以下几个方面：

(1) 提高水輪机的能量、汽蝕性能等設計参数。

在水力研究方面，适当的提高現有混流式型号轉輪的导水叶高度、采用平頂型上冠、增大下环錐角、切割叶片进出口边等改型办法，都是增大水輪机轉輪单位流量的途徑。其中尤以提高轉輪的导水叶高度的效果更为显著。水力方面的措施应与强度試驗研究工作相結合，并根据强度試驗的結果进行新型高强度鋼的研究，这样把水力、强度、材料三者結合起来的新概念，就有可能改变現在的水头与比轉数，水头与单位出力的金屬消耗量之間的关系。討論时，大家认为要解决这个問題，首先在于提高强度和水力的試驗技术，摸清应力分布情况，进行实测，研究模型和实物間水力与强度换算的正确关系。

會議认为降低水輪机飞逸轉数有很重大意义，世界各国也正在探索，但目前还未能得到很好的解决。会上提出利用射流在轉速升高时的固有特性，降低冲击式水輪机的飞逸轉速的建議。很多同志认为这是一項值得繼續研究的措施。

(2) 迅速发展适应国民經济发展需要的新品种。

我国已經生产了許多水輪发电機組，但主要品种只有十几种，还跟不上国民經济发展的需要。有些同志提出由于品种太少，产生了将一些机組不合理的套用現象，如何結合我国具体条件来发展新品种以适应国民經济发展需要的問題就显得十分迫切和重要。

(3) 提高水輪机的使用寿命和确保安全运行，提高水輪机組质量，减少运行事故，提高电站安全运行，提高机組使用寿命，在現阶段有着很重要的意义。当前还有很多关键技术問題沒有过关，主要有抗泥沙磨損、抗汽蝕、自动化元件质量、鑄件质量及其它一些

水輪機結構問題等課題，大家認為尤以提高水輪機的抗泥沙磨損及抗汽蝕性能問題更為突出。會議探討了提高水輪機轉輪耐磨性能的水力措施問題。一些論文對六郎洞水電站水輪機損壞原因提出了不同的看法，由於時間關係，會上未能深入討論。也有人例舉了新安江型機組的一些汽蝕破壞現象，但原因還沒有完全搞清楚。泥沙磨損或汽蝕破壞均使機組的檢修期縮短，年運轉費用提高，因此會議認為需要對提高抗泥沙磨損性能及新安江型水輪機的汽蝕原因作進一步的研究。

(4) 會議還討論了一些新型式水輪機的優缺點，並與基本型式的水輪機作了比較，認為研究適用於我國水力資源開發特點的水頭變化幅度大的新型式水輪機，如3~15米的貫流式水輪機，40~80米的轉槳式水輪機，60~100米的斜流式水輪機，80~160米的双轉輪型水輪機組等也是在適合我國具體條件下，提高水輪機技術經濟指標的途徑。大家認為必須對新型式水輪機的試驗研究工作適當安排，同時考慮到我們對基本型式的水輪機的性能了解和掌握尚不夠，目前生產必須立足於基本型式，因此當前仍應以基本型式為重點研究對象，新型式與基本型式之間的關係是目前的生產需要與長遠科學研究相結合的關係。

二、我國水輪機的發展方向

在今後十年計劃興建的水電站中，中水頭水輪機的需要量約占90%（特別是100米左右水頭範圍），所以應集中力量進行重點研究。大家認為由於我國電站開發大都與防洪灌溉相結合，因此應研究水頭變化幅度大的綜合性能好的水輪機。斜流式水輪機是一種比較合適的型式，可以用在水頭與負荷變化幅度大的範圍，具有較高的能量指標，但目前汽蝕性能還不夠理想，結構工藝上也較複雜。而國外對這種型式的試驗研究工作已經開始了很多年，我們的試驗研究工作也應該很快趕上去。會議認為，開發平原河流需要的低水頭水輪機，開發西北、西南等地區豐富水力資源需要高水頭水輪機，在這方面的領域里，目前我國掌握的技术還不多，應該給予必要的重視。

大家認為，在水輪機發展中，應該注意到大、中、小型相結合，必須着手建立水輪機的暫行型譜，以滿足國民經濟發展，特別是農村動力設備發展的需要。大、中、小型與農村機組的型譜應有所不同，在編制型譜時，既應考慮到每個大、中型水電站的具體情況，裝置合適的水輪機，還應考慮到充分發揮工廠的作用，提高勞動生產率，降低成本，提高產品質量和縮短生產周期。因此應該採用各種不同辦法，盡量減少型譜梯度。會議間也提出了一些減少型譜梯度的具體辦法，如葉片的切割，以便合理地滿足需要。

在大量泥沙的河流上開發水電站，是我國的特殊問題，目前世界上還缺乏足夠有效的措施。但是我國已經在黃河和其它多泥沙河流上興建了許多電站，為了使這些水電站能夠順利運行，提高水輪機使用壽命，應該在電站規劃布置、水工結構、泥沙性質、水輪機設計、抗磨損汽蝕材料、運行方式等各方面進行研究。

三、解決當前農村水力動力問題與發展方向

我國幅員廣大，不能光靠中型或大型電站來滿足廣大農村用電的需要。據調查，國外農村水力資源約占全部水力資源的10%，因此發展農村水力資源有很重要的意義，特別是農業進行技術改造，農村用电量必然會猛烈的增長，農業對此有迫切的要求。

大家認為在目前農村小型水電站的發展中，主要存在以下問題：1) 機組質量不好，

不能正常运行。据陕西省典型調查資料，476个电站中巩固的只有170个。四川省今年对1000多个小型电站进行了調查，能够投入运行的約占10%，能正常运行的就更少了。2）配套不合理。往往发电机小，水輪机大，調速器更大，或者完全缺乏調速設備，零部件损坏后不能配換。3）品种少。往往只将接近的机型相互湊用。4）机组效率低，运行和管理水平低，安全問題严重，設備人身事故多。會議对发展当前农村水力动力提出如下建議：

（1）农村小型水电設備應該滿足下面几个要求：

- ①可靠坚固耐用，便于在各种条件下运行；
- ②結構簡便，便于檢修管理，便于在地方厂制造；
- ③整体性强，便于安装；
- ④根据当前农村实际情况，需要成套供应；
- ⑤要輕小，便于运输和节省单位耗材量；
- ⑥要保証出力，效率水平容許略低；
- ⑦特別要注意調速器的配套，要能自动調速。

（2）关于农村的水力动力型式問題，大家认为建議把水动力站与农村水电站結合起来，先搞水力动力装置（包括水輪泵），它具有造价低，收效快，易于积累資金的优点，同时可以解决目前銅、鋁和硅鋼片不足問題。大家还认为，对于現在农村使用的傳統的水动力型式，应予以足够的重視，只要稍加改造，可以提高很多，潜力很大。至于新型式的农村水电設備（如貫流式），以及我国目前尚未取得經驗的一些型式，如单导叶渦壳式、高水头冲击式、双击式等建議，应积极試点，取得經驗后推广。

（3）品种問題。大家认为問題不在先搞系列設計，而是应先从搞典型設計入手，待試点运行成熟后再逐步搞系列設計，并根据不同的条件，建議建立不同型式的系列設計。

（4）加强技术性服务工作，目前制造部門提出了“四包”，即包設計（包括水工厂房設計）、包配套（包括机电配套）、包安装、包使用，及农村电站服务站等一些組織形式，都是为广大农民所欢迎的。但光靠制造部門的力量是不够的，应把有關部門的力量很好的組織起来。

（5）举办訓練班，培养农村水电站的运行人員，对农民普及用电知識。

当前我国水輪机的若干技術問題

水电总局 于开泉

摘 要

本論文系根据多年来水电站建設中有关水輪机的設計、安装、运行方面的經驗,結合調整、巩固、充实、提高的方針提出当前水輪机若干关键性的技術問題。文内分別闡述我国水輪机制造的成就和当前的水平,关键性的技術問題和水輪机的发展方向,指出在多快好省地发展我国的水輪机事业,不但要从現有产品的性能质量的基础上进一步的巩固提高,配套齐全,还要掌握生产关键性的大型水輪机,創造出适应我国水电建設,符合水庫的綜合利用,分阶段貯水,水头变化幅度大等特点的新型水輪机组,以建成我国独特的水輪机系列。

一、水輪机制造的成就和当前的水平

我国水輪机及其附屬设备的設計和制造方面发展很快,目前已生产了大、中型容量共有 160 万千瓦和十几种类型的水輪机,并能成套供应。从 1951 年生产了 800 千瓦水輪机开始,到 1959 年就已生产出 PO662 BM-410,轉速 150 轉/分,容量 72500 千瓦的大型混流式水輪机; 1958 年开始生产出 ILI587 BB-330,轉速 214 轉/分,容量 16000 千瓦的中型軸流式水輪机; 1959 年开始生产出 356 米高水头橫軸,容量 12500 千瓦的中型冲击式水輪机。可以說我們已經掌握了大型混流式水輪机的生产技术,并初步掌握了中型低水头和高水头水輪机的生产。

1958 年以前,調速器还要由国外进口。但自 1958 年以后,我国即能制出大、中型混流式水輪用的 T-100 型調速器,1960 年又制出中、小型混流式水輪机用的 PO-40 型調速器,1961 年制成中型軸流式水輪机用的 ST-100 型調速器。具有先进技术性能的电气液压調速器也于 1960 年試制成功。

在进水閘門方面,我国已制造出可供中水头使用的直徑 4 米和 4 米以下的蝴蝶閘,供高水头使用的直徑 1 米的球型閘。

在水輪机結構方面,过去一般采用鑄鉄或鑄鋼件。在 1960 年生产了全部鑄焊(座环、轉輪、頂盖)結構 44000 千瓦的水輪机,証明它不但能縮短生产周期,同时对鑄造质量也有所提高。

在設計和生产中的水輪机有 PO662 BM-550,轉速 125 轉/分,容量 225000 千瓦的巨型混流式水輪机,并有 ILI661 BB-550,轉速 107 轉/分,容量为 36000 千瓦的中型低水头軸流式水輪机。

总的說来,十年来我国的水輪机设备的发展是十分迅速的,基本滿足了我国目前水电建設上的要求。全国水輪机的年生产能力現已达到了一个相当的水平,这为进一步发展水电事业打下了良好的基础。

二、关键性的技術問題

近几年来我国自行設計和生产的水輪机及其有关附屬设备,虽然有飞跃的发展,取得

了很大的成就。但我国水輪机工业毕竟是年輕的工业，無論在科学研究、設計、材料以及加工工艺等方面都还缺少經驗，与世界先进的技术水平比較，也还有某些落后的环节，因此必須繼續加强这方面的工作。現就有关水輪机技术方面的几个关键問題，提出几点意見，供各地参考并和同志們商榷。

1. 关于独立設計水輪机品种問題

过去一个阶段，我国水輪机的設計和制造主要是参照苏联和其它国外的資料进行的。从发展上看，这是一个必經的过程，但我們也必須看到套用外国資料使我們很难全面地掌握水輪机的特性，难以預見水輪机运行中出現的問題。同时我国修建的水电站一般高、中水头比較多，河谷比較窄；多数的水庫要在防洪、灌溉、航运、发电綜合利用条件下运行，水头变化幅度大，必須自己独立設計，才能适应我国这些具体条件。

近几年来从水电站运行的經驗中，我們看到下列一些比較突出的矛盾：水庫淹没与农业生产間的矛盾，水庫初期分阶段蓄水，使水輪机較长期地处于低水头、低負荷条件下运行，从而发生机組性能显著降低的矛盾；地形經濟条件要求机組的单机容量大，但初期的电力系统运行要求单机容量小的矛盾等等。为了解决上述矛盾，我們需要积极研究在水头幅度变化大和长时期处于低水头运行条件下仍能保持效率高，綜合性能好，并在各种負荷下运行比較稳定的水輪机。

独立設計出适合我国具体情况的水輪机品种在国内尚未大規模进行。但国外已設計的新型水輪机中，有水头变化范围60~120米斜流式和40~80米軸流式水輪机，它們适用于水头幅度变化大或水头先期低而后期高的水电站，并具有一定良好的性能。至于貫流式水輪机，虽然目前还是在低水头，中、小容量范围内試驗使用，但就其向大容量发展，以及节约鋼材和减小厂房面积来看，特别是对于农村电站，是一个很有前途的品种。

要解决我国水輪机品种問題，首先要从科学研究，試驗室工作着手，应作好水輪机通流部分（包括尾水管在內）的理論研究工作，在設計中应作好新型材料，新型結構和零部件等的研究相配合，并經過小型試制、試用，鉴定成功之后再行推广。要完成上述一系列工作，是需要較長時間的，目前必須抓紧时机，早作准备，尽快的設計并制造出适合我国水电建設需要的各种水輪机品种。

2. 关于保証和提高水輪机的安全运行和使用寿命問題

从現有水电站水輪机的运行情况看，有些电站的水輪机发生了严重的汽蝕現象；有的机組受泥沙严重的磨損；也有发生劇烈的振动和水輪机轉輪叶片、下环等处发生裂隙等等。这就致使水輪机的檢修次数加多，停机時間加长，不能充分發揮水电站的效益；降低了水輪机的效率和正常出力，影响水电站的安全运行。更值得重視的是，由于这些現象的产生，使水輪机的轉輪、导叶、頂盖、底环、水潤滑的导軸承等重要部件使用寿命由30~40年縮短为2~3年，这不但是經濟上的損失，而且严重影响我国新的水輪机生产。因此，对产生这些現象的原因及其防止措施都急待研究和解决。

（1）防止水輪机的泥沙磨損

水輪机最易遭到泥沙磨損的部件是轉輪叶片、迷宫环，这些部件的状况好坏也是影响水輪机效率的主要因素，水輪机的导叶和与导叶上、下接触的頂盖、底环等部件，也是很容易磨損的，磨損之后将直接影响水輪机停机时的漏水量，且由于这些部件的磨損，使水輪机正常运行中难于停机。

最近作者从某地几个水电站实际运行情况的調查看出，泥沙磨損对水輪机的危害性是相当严重的。这几个电站所在的河流平时水流很清，在設計中沒有考虑到有磨損問題，但是由于这些水庫庫容很小，河流坡度大，一到洪水季节，水中含有大量的棱角性强的泥沙，造成对水輪机过水部件的磨損，并且磨損得很快。这些电站水輪机一般是用 30 号鋼造的，鑄件疏松，砂眼很多，光洁度也不好，这种部件极易磨損，如有的水輪机轉輪叶片被磨損脫落，上、下迷宫环間隙由 1 毫米分別扩大到 3~6 毫米到 40 毫米；頂盖和底环在导叶部分，一般被磨成深沟十几毫米；导叶尖端和上、下豎面全都被磨成犬牙形，沟深达 10 余毫米。此外有水潤滑导軸承的軸瓦和軸領也被磨伤。致使这些水輪机一般只运行 2~3 年便不能使用。

分析这些部件的磨損到如此程度，除了与通过水輪机水流流速，含沙量，泥沙顆粒大小及其形状有关外，更重要的是与制造水輪机所用鋼材硬度有关。一般鋼材的硬度約为 4.5 度（莫氏），而泥沙里的磷灰石、长石、石英石的硬度是在 5~7 之間，这类泥沙对水輪机过流部件的磨損十分严重。

根据試驗和电站实际运行經驗說明，磨損的程度和流速的立方成正比，泥沙的顆粒大小，濃度和磨損也約为成正比的关系，至于顆粒的形状对磨損一般尖棱角的要比圓形的大几倍。

水輪机的磨損在時間上是不均匀的，磨損主要是在水輪机通过坚硬顆粒里含量多的时候，也就是在洪水季节。

高流速的水輪机比低流速的容易引起磨損，同时泥沙磨損与汽蝕破坏也起着相互促进的关系。

如何加强水輪机的抗磨損性能，提高水輪机的使用寿命，是大家所关心的一个問題，国内外均曾进行一些試驗研究。最近在苏联的文献中曾提出用 1X18H3Г3Д2Л 合金鋼材鑄造的水輪机轉輪和作为抗磨材料，但这项措施，在实物焊接和大体积生产加工时，还存有技术性的問題沒有解决；用加厚水輪机轉輪叶片出水边缘以增长磨損的寿命的措施，可由一般的理論厚度 2~3 毫米加厚到 8 毫米，这样加厚了的轉輪，在实际的初期运行时一般要降低水輪机效率为 0.3~0.4%，而且經過一段時間的運轉，轉輪叶片仍会被磨薄，以致遭到損坏，仍需要修补，不能根本解决問題；增加尾水管衬砌鋼板的厚度，一般由 10 毫米增加到 15 毫米。由于泥沙对尾水管的磨損一般并不突出，因此采取这一措施是会增加尾水管寿命的；采用渗碳的导叶和用 $\Theta\Phi-13$ 型焊条堆焊的导叶。据悉这两种导叶都很耐用。此外在轉輪下环的里面利用 $\Theta\Phi-13$ 型焊条堆焊也能减少其磨損。在其它国外資料里，还看到用 18-8 鉻鎳不銹鋼，13 鉻鋼和加入 2% 的鎳或錳銅鈦等合金鋼作抗磨損、抗汽蝕的材料，但在焊接工艺方面需要一定的条件，如在焊接前需将构件預热到 100~200°C，采用自动焊接技术，焊接之后构件要回火等要求較高。还有采用 24% 鉻鋼作抗磨損、抗汽蝕材料的，性能也較好。

在国内，中国科学院金屬研究所曾在七里营小水輪机叶片上采取了堆焊“抗磨 1 号”电焊条的試驗，初步成果証明在較薄的鋼板上堆焊的性能尚屬良好，在較厚鋼板上堆焊时，其表面还有裂紋現象发生。这种表面裂紋也曾某电站水輪机叶片的堆焊层上发生过，經過三年来的实际考驗，堆焊层仅有小块脫落，至于这种表面裂紋是否会影响到母材的損伤，尚待进一步驗證。

关于水輪机的抗磨損問題，还是缺少經驗的，特别是对水輪机抗磨損所采用的材料和工艺措施。由于我国目前还缺少鉻、鎳等金屬，因此要从节约鉻、鎳金屬着手来研究抗磨措施。如采用鎳、鉻高碳焊条堆焊，鎳、鉻合金鋼薄板敷面，表面渗碳，用塑料等耐磨材料作护面等等，这些都是能适应我国当前情况的研究方向的。高級合金鋼的鑄焊結構，自动焊接技术和高級合金鋼分瓣轉輪焊接工艺也必须掌握。

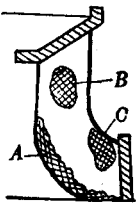
除了对耐磨損材料研究之外，对于泥沙磨損理論，水輪机各项参数对磨損过程的影响也要研究。至于对几个有严重泥沙磨損的电站，进行原型观测和試驗，积累經驗以便找出各种更合适的合金或其它抗磨材料；在多泥沙河流水电站水工建筑物上，研究和作出沉沙池，排泥沙的有效設備，控制泥沙通过水輪机的通流部分也是必须考虑的問題。

(2) 防止水輪机的汽蝕

有关最近各电站的汽蝕情况調查見于表 1。有以下几点情况值得研究。

表 1

机 组	运行后 到第一 次檢修 共运行 的时间	其中負荷小 于40MW的 运行時間			其中負荷大 于40MW的 运行時間			檢查时 测量的 每叶平 均蝕損 面积	其 中						水 头	最 大 H_s
									叶背面出水边 (A)		叶背面中部 (B)		叶背面进水 边下部(C)			
									平均 面积	平均 深度	平均 面积	平均 深度	平均 面积	平均 深度		
		小时	小时	%	小时	%	米 ²		米 ²	毫米	米 ²	毫米	米 ²	毫米		
C ₁	2699	2699	100	0	0	叶片正面出水边及上冠近处油漆脱落，金屬表面呈烏黑色其它部分油漆仍完整						45~56	-1.6			
B ₁	10700	4165	38.9	6585	61.1	0.378	(4叶) 0.015	0.5	(8叶) 0.104	3	(12叶) 0.259	7	65.8~78.2	+1.16		
A ₃	7650	1278	16.7	6372	83.3	0.284	0.061	4	0.093	5	0.130	6	65.5~72.8	+0.95		
A ₄	4916	1778	36.2	3138	63.8	0.424	(13叶) 0.047	2.5	0.180	3	0.197	5	68.8~69.4	+0.95		
A ₅	8038	258	3.2	7780	96.8	0.168	有气蝕，未 测量		0.027	4.5	0.141	12	63.1~72.8	+0.95		
F ₁	59000					0.1594							40~68	-0.1		



注：1) A, B, C 型水輪机均为 PO662BM-410 型的水輪机，但 C 是在低水头下运行；

2) F 为国外设备，輪叶背面預先作了抗汽蝕的堆焊层。补气閥先按 1.5~2 公斤/厘米² 真空时补气，四年間无汽蝕现象，以后补气按 3.5 公斤/厘米² 时补气，运行 1 年之后才发现汽蝕；

3) 汽蝕部位 A、B、C 見附图。

1) 各水輪机叶片背面都产生了不同程度的蝕損现象。但 F₁ 水輪机的单位流量略小，并預先在輪叶背面做了一块抗汽蝕的堆焊层，最初四年該机組常期間在低水头、低負荷下运行时，未产生蝕損。它的蝕損开始是在提高了它的补气真空度到 3.5 公斤/厘米² 之后，汽蝕的位置也是在堆焊抗汽蝕层以外的地方。

2) A, B, C 为同一类型、容量的水輪机，輪叶背面未預先堆焊抗汽蝕层，在叶片上一般都有砂眼，个别叶片还发现有长达 280 毫米的裂紋。运行半年或一年之后，檢查时就都发现有較严重的蝕損现象。这里可以看出：高負荷运行時間較长的机組，比低負荷运行時間較长的机組，叶片在 A 部位蝕損較重如 A₃ 机；水头較高，低負荷运行時間較长的机組在 C 部位蝕損較重如 B₁ 机；經常处在超低水头，超低負荷下运行的机組，在异常部位，即

叶片正常出水边和上冠附近发生油漆脱落现象如 C_1 机。

3) 由于鑄造质量差, 轉輪叶片变形的关系, 在同一台的轉輪各叶片之間, 它的蝕損部位面积及深度相差較大。同一部位有的仅 4 个叶片, 也有 8 个叶片有蝕損, 最大面积相差, 长 180~730 毫米, 寬 120~460 毫米, 深度 4~40 毫米。

初步分析引起蝕損的因素很多, 在这里有: 水輪机的安装高程 (尾水 H_t 值), 单位过流量大小, 制做叶片的正确性, 叶片表面光洁程度, 补气閥的开放压力, 有无抗汽蝕层等有关。更重要的是轉輪的鋼材质量, 有許多蝕損是在鑄鋼的砂眼和疏松的上面开始的。

关于汽蝕的物理成因, 迄今未有定論。一般认为, 汽蝕首先发生在水輪机水流的最大流速处, 其絕對压力达到汽化压力 P_n 的地方, 絕對压力降低就是在低温下也会产生汽化现象 (見表 2)。当其絕對压力达到汽化压力时, 便从水中析出与水融在一起的气体和蒸

表 2

汽化压力 P_n (米水柱高)	0.06	0.12	0.24	0.75	2.03	4.83	10.33
溫度 (°C)	0	10	20	40	60	80	100

汽, 在叶片低压区形成小泡, 从而破坏了水流的連續性, 同时这些小气泡随水流进入压力区时就会突然的收縮而消失, 以致在小泡的四周介质中发生巨大的水錘作用。据列列亚 (Релля) 认为, 此时最大压力可按下式計算:

$$P \cong 0.163 \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 P_0$$

式中 R_0 ——小气泡原始半徑;

R ——驟然收縮后半徑;

P_0 ——水的靜水压力。

当 P_0 采用 1 公斤/厘米², 一般可以采用 $\frac{R_0}{R} = 20$ 时, 則水錘压力可达 1250 公斤/厘米², 即为当时水压的 1250 倍。这样巨大的水錘压力, 經過水力的彈性傳播, 就使叶片受到了汽蝕損坏。

水輪机轉輪叶片的汽蝕, 与它的叶片形状关系很大; 汽蝕系数随着水輪机的比轉速提高而增加; 它又与水輪机实际工作过程, 水中含气量, 酸性程度, 含泥沙多少等因素有关。

由于实际轉輪叶片与模型之間無論是工整或光洁程度都存在一定的偏差, 考慮到目前我国水輪机制造水平, 在設計理論的水輪机安装高程上加深 0.5~1 米左右, 以求得水輪机在汽蝕方面的稳定。但也給水电站建設工程的开挖量和造价带来增加和不利的方面。因此在这两者之間要有很合理的选择。同时, 对水輪机叶片作出抗汽蝕的保护和研究使用較低的尾水管, 也是减少这方面矛盾的办法。

为了提高水輪机的效率和增大水輪机的单位过流量, 对水輪机的轉子一般是允許有一些輕微的气蝕, 但必須采用抗汽蝕材料来保护。我們在某些电站里的水輪机轉輪蝕損的地方, 錘平后用不銹鋼或抗磨 1 号焊条进行修补, 取得了一定的效果。但在电站里进行檢修, 無論是技术条件和時間都受一定的限制; 如在堆焊这种高級合金鋼时, 对工艺上所要求的焊前預热和焊后退火以消除內应力都无法作到, 大量堆焊之后所能影响水輪机轉輪靜平衡的程度也无法校正。为了减少停机檢查汽蝕情况, 不降低水輪机的工作效率和避免在水輪机內部进行艰苦的补焊工作, 建議在水輪机轉輪出厂前, 就作好抗汽蝕的保护措施。

最近苏联为三门峡制造的水轮机，在轮叶背面就预先堆焊了 LJ133 的合金钢材做了抗汽蚀的保护面。

(3) 防止水轮机的振动

最近在有些电站对同一类型、容量的机组所做的振动情况调查（见表 3）说明 PO662 型水轮机在低负荷时产生振动，振动区域是随着水头的升高而向大出力方向移动，导叶的开度逐渐减小，另外通过补气的方法，可以使最大振幅有所减小。

表 3

机 组	水 头 (米)	导叶开度 (%)	振动或脉动最大出力范围 (兆瓦)	尾水管最大振动 (毫米水银柱)	上机架最大轴向振幅 (丝)		H_s (米)
					补 气	不补气	
C ₁	46	68~78	15~20	尾水管真空值不稳定 约58.5	3.5	5	-5.4
	50	64~74	20~22				
	54	60~70	22~25				
B ₁	66		35~40			12	
A ₃	58		22~27			11	
	70	55~65	32~41			7	0.3
A ₄	65	50~60	28~37	尾水管真空值不稳定 约58.5	5	8	0.4
A ₅	67	60~70	35~45				0.2
							0.8

注：A、B、C 机组均为 PO662BM-410 型。

水轮机振动过大，不仅会损坏厂房基础，尾水管护面钢板脱落，和机组结构上的破坏等，水压钢管的水压也随之发生共振。在国外有因水压钢管共振使金属疲劳，发展到水压钢管爆破的实例；有的在较小的送电系统里，系统电压也随之波动。最后不得不在这种振动负荷区域定出限制运行范围，影响电站在电力系统中的合理调度。

一般水轮机的振动，多发生在尾水管入口的地方，这是因为流经转轮的水流还残留着的分速度使流至尾水管的水流形成旋流，以致在尾水管的中部产生真空现象，由于真空程度不断变化，因而引起振动。消除这种振动的措施，一般是采取向尾水管中心部送入空气的办法。根据运行经验，送入空气量的多少不但与负荷大小有关，同时也受水头高低的影响，过多的送入空气会降低尾水管的吸出效率，这对运行是不利的。因此送入空气必须适时，送入的空气量要在运行上能允许的轻微振动程度和不降低水轮机效率为准。具体的要求是：

1) 送入空气的途径，一定要便于送到尾水管产生真空的部位。目前看来，由水轮机顶盖通过泄水孔从转轮上冠向尾水管中心送入空气是最理想的途径。但水轮机转轮的上迷宫环要采用凸凹式的迷宫环，以减少漏水量，并要求顶盖下部和尾水管的真空部位相沟通，使补入的空气畅通无阻。瑞士 E. W. 厂设计的水轮机在这方面是相当成功的。

其它由发电机轴中心补气，虽然也可以达到同样的目的，但对补气阀的位置和调整均没有装在水轮机室的方便。

2) 空气阀门的开闭控制是自动的，应符合尾水管真空度的要求。

3) 空气阀门的开度变化，需根据水轮机的效率损失和允许的轻微振动程度来决定，在运行中便于调整。

4) 空气阀门的设计，要考虑避免在吸入空气时产生过大的噪音，吐出空气时不向外

噴气或噴水，不影响水电站运行安全和安靜的环境。

目前我国各个电站的水輪机上装有各种空气閥。国外设备比较好的有：瑞士 E. W 厂設在水輪机頂盖上的空气閥，但有些輕微的嘯音；列宁格勒金屬工厂和烏拉尔电器工厂共同考虑設在发电机頂端的电动式空气閥，但尚未經长时间的运行考驗，仅从估計中认为还能滿足以上条件。国内设备有設在发电机軸上口用鋼絲绳拉动的空气閥和設在軸下口装橡皮球式的空气閥，在运行的考驗下，认为用鋼絲绳拉动的空气閥，拉动結構不灵活，容易断绳，影响励磁机整流子运行的安全，也不便于調整；认为用橡皮球装在水輪机軸下口的方法，长期浸在水里，不利于調整，容易损坏，檢修困难，起不到应有的作用。

另外为了补救水輪机补气在制造設計上的不足，有采用在尾水管中用十字架管向尾水管中心送入空气的办法，效果尚好，也可以滿足以上要求，但設計計算如果过細时，管架容易被水冲断，管架太粗时又妨碍尾水管的效率，因此应该从測定尾水管的效率和改进管架材料上进一步研究。

(4) 发展鑄鋼品种和提高鑄鋼质量

发展鑄鋼品种和提高鑄鋼质量，对于水輪机的安全运行，保持长期不要大修和延长水輪机的使用寿命有着重要意义。

由于当前水輪机轉輪的鑄造工业还落后于水輪机生产上的需要，使水輪机的生产能力和生产周期受到一定的限制。特别是目前因轉輪鑄造质量包括鑄造工艺、叶片精确度和光洁度的影响，降低了轉輪的使用寿命，对于已投入运行的水輪机不得不多訂备用轉輪，因而更加重了水輪机制造上的負担。

最近据調查某电站装有四台 7500 千瓦的水輪机，由于制造轉輪所用的鑄鋼质量疏松，含有砂眼和气孔，并且补焊过。仅运行了 2~3 年就逐渐发现在下环产生长达半米的环状裂隙，叶片与上冠、下环連結的地方也普遍发生裂隙，长达 1.5 米。为防止轉輪叶片断裂，前后共进行了 36 次檢修补焊工作，造成了少发电 250 万度。机组的叶片設計，根据制造厂初步檢查，认为是能胜任在該电站的水头、負荷下运行，因此初步认为是鑄鋼质量与强度有问题。鉴于在水輪机内部补焊效果不大，断裂的机会更多，現在决定更换新轉輪，并要求按新的鑄鋼品种进行澆鑄。

在国外为保证鑄鋼质量，采用了氧气炼鋼和真空模鑄鋼等工艺措施。三門峽的水輪机轉輪，为了使其有良好的可焊性，采用了 20FC 低合金鋼，其它国家采用鉻鋼鑄造水輪机轉輪也很普遍，对有泥沙磨損的地方，采用 18-8 鉻鎳鋼材等。

目前我国要在巩固和提高普通碳素鋼的冶炼技术基础上，进行低合金鋼的冶炼，并掌握目前世界各国已經掌握的各种不銹鋼的冶炼技术，研究适于我国資源情况的合金鋼材，为发展水輪机新品种和延长水輪机使用寿命創造条件。与此同时，还应研究和提高鑄造工艺，对轉輪和座环等重量大、形状复杂的主要部件，如何保证其表面光洁度与外形尺寸要求，也是当前迫切需要解决的問題。

水輪机主要部件采用鑄焊結構，已成为水輪机生产发展的主要方向之一。用各种合金鋼鑄鍛件根据設計要求进行焊接，不但能節約合金鋼材，而且其外形尺寸和表面光洁度都可以达到最好的程度。

3. 改进調速系統和自动化元件，提高自动化水平

目前我国采用的調速器还是外国品种，根据近年运行情况也发现了不少缺陷，如 T-

100 型油路排气系統考虑不充分，造成机組开机时的猛烈振动，W-900 型不能自动操作，操作电源取自发电机，当机組发生事故停电时有可能造成相反方向操作事故。

自动化方案的設計以及运行维护方面也还存在一些問題。自动化元件上普遍存在着漏水、漏气、卡涩、失灵、怕潮湿等現象，这些問題急待研究解决。

目前我国的水电站自动化水平还不高，经济运行工作仅处于試点阶段。由于机組本身的操作自动化沒有巩固的实现，进一步高度自动化的新技术也就跟不上去，因此現有水电站的劳动生产率都很低。据 1961 年 9 月底統計，全国主要大、中型水电站每兆瓦設備容量占用的运行人員平均为 3.5 人，最少为 1.7 人，高者达 9.9 人。据 1959 年資料統計，苏联为 0.05~0.1 人/兆瓦，法国有 5 个水电站总容量 550 兆瓦，平均为 0.118 人/兆瓦。

在过去几年里，我們把生产重点放在机組的年生产量方面，把改进調速系統、自动化方案和自动化元件等放在次要地位，这在发展过程中是必然的，也是允許的現象。但从当前国家建設的“調整、巩固、充实、提高”的方針来看，有必要在改进調速系統，自动化方案和自动化元件等方面作更多的努力。对于調速系統以及自动化方案，从理論到設計，均講求各元件的精密加工，并且都要进一步提高制造材料的质量，有关这方面的試驗、調整以及运行水平都必須有很好的配合。只有对上述各方面都能熟练掌握之后，才能根本改变水电站运行的經济技术指标，提高供电质量和供电可靠性，提高劳动生产率，降低发电成本和建設投資，使我国各水电站的运行水平达到世界先进水电站的运行水平。

当前国外已經把电子数学計算机利用在水电站的流量自动控制，自动对洪水調节和水、火电站系統經济負荷分配等方面，它将促使水电站出現一个新的局面。

4. 用水輪发电机作尖峰和調相运行及导叶漏水問題

有大型調节水庫的水电站，其特点就是具有作尖峰和作調相运行的有利条件，但从一些电站的运行經驗告訴我們，除少数水輪机尾水位較低或者有蝴蝶閥門的水輪发电机能順利的达到此目的外，对于沒有这种条件的水輪机还有一定的困难。

这里的主要問題是水輪机导叶漏水問題，当水輪发电机作尖峰或調相运行时，如果导叶漏水很多，不仅会損失电能（特別是在水头較高的电站里，流量是很重要的），而且很快就將压下尾水管水位的压缩空气帶走，使水位上升，轉輪在水中旋轉，使系統有功功率消耗增加。此外，也会多消耗压缩空气，甚至形成供不应求。

由于导叶尖端口部漏水，在运行一段時間后，导水叶尖端口部还要受到泥沙的磨損和汽蝕的作用，并且逐漸加大，增加漏水量。因此應該堆焊耐磨鋼材作保护，才能减少运行中的漏水和檢修工作。

現在采用的浮子继电器很不耐用，常因內部銹蝕而动作不灵，目前，电极式继电器和压差式继电器則比較可靠。

根据运行上的要求，有必要把导叶的漏水量减到最小，过去制造厂在这方面作了一些努力，如在相邻的导叶豎口和导叶的上、下間隙都采用了橡胶水封，这是一个很好的办法。只是由于設計中所采用的固定方法采取了不恰当的工艺措施和橡胶的质量等，使橡胶水封在运行中一再脫落，不能發揮应有的作用，因此还有必要进一步研究解决这些問題。

减小导叶上、下間隙，这与工厂的加工精度有很大关系，如各导叶的高度不能限制在很小的誤差范圍內，安装时就很难于調整导叶的上下間隙达到一致和作到最小。还應該注意的是，如果水輪机頂盖的剛度不够，在运行中有很大变形时，也不得不把导叶的上、下