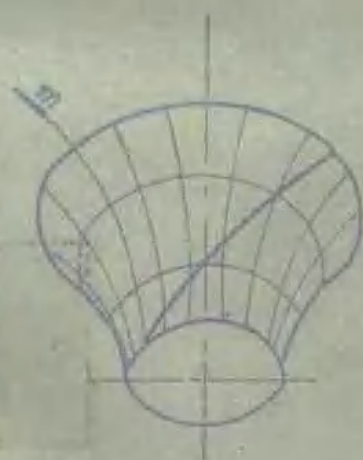


叶片式水力机械 水动力学计算基础

常近时



水利电力出版社

329199

叶片式水力机械 水动力学计算基础

常 近 时



水利电力出版社

**叶片式水力机械水动力学
计算基础**
常近时

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

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 12.75印张 279千字

1989年5月第一版 1989年5月北京第一次印刷

印数0001—1940册 定价5.00元

ISBN 7-120-00575-8/TV·187

D439/21

内 容 提 要

本书主要讲述叶片式水力机械,即水轮机、水泵转轮水动力学计算的基础理论与某些现代方法。全书共分五章,内容包括:叶片式水力机械水动力学计算的某些基本问题,翼型绕流的某些基础知识,转轮中准三元流动的分析方法,汽蚀流动解析的理论以及转轮翼栅的设计等。

本书读者对象为:水力机械、水电站动力设备、水泵站动力设备等专业的科研人员、设计人员、高等学校教师、研究生与大学生;也可做为这些专业的一般技术人员及相邻专业科研人员的参考。



前 言

解放后的30余年,我国叶片式水力机械制造业有了很大的发展;产品的数量与单机容量已达相当的规模。但是,产品的能量与汽蚀指标同世界先进水平相比,尚有明显的差距,由此相应带来许多的经济损失。

要研制出性能优异的水轮机与水泵,首先必须引用新的比较完善的水动力学计算方法。而国内水力机械行业目前主要仍延用50年代以前的老计算方法。这些方法的应用前提与通流元件,特别是转轮中的实际流动状况相差较大,从而导致计算结果的不准确。这种情况应当迅速加以改变。

目前,国外有关叶片式水力机械转轮空间三元流动与翼栅二元汽蚀绕流的计算理论与计算方法已趋成熟。我国以吴仲华教授为代表的叶轮机械三元流动计算理论的研究与应用水平,在世界上则处于领先地位。叶轮机械气动力学计算理论的发展,给叶片式水力机械水动力学计算方法的更新提供了重要的条件。随着电子计算机的普及应用与计算技术的进步,许多过去认为比较复杂的水动力学问题,现在可以通过计算机的辅助分析与辅助设计予以解决;许多原来认为比较复杂的计算方法,现在已为工程所实用,并显示出明显的优越性。

提供一本具有实际应用价值的,反映当前国内外叶片式水力机械比较先进的水动力学计算理论与方法的科技书籍,将有助于提高国内水力机械设计与分析计算的水平,改善产品的性能,提高能量转化过程的经济效益,这便是本书的撰

写目的。

本书是在研究生教材《叶片式水力机械流体动力学计算与分析》的基础上经修改、补充写成的。编写过程中参考并引用了大量的国内外文献，在这里向这些文献的作者表示谢意。

本书由清华大学林汝长、高建铭两位同志审阅，并提出了许多宝贵的意见，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，又兼书中涉及的计算理论与方法的内容广泛，可能有错误之处，切望读者指正。

编 者

1985年4月于北京

目 录

前 言

第一章 叶片式水力机械水动力学计算的某些基本

问题 1

第一节 叶片式水力机械通流元件水动力学计算的基本 任务与课题 1

第二节 研究叶片式水力机械中流体运动的曲线坐标系 与基本方程 8

第三节 叶片式水力机械中流场的简化 23

第四节 叶片式水力机械的基本方程式 32

第五节 叶片式水力机械中的汽蚀 37

第六节 叶片式水力机械转轮中的水力损失 45

第七节 转轮的有限叶片数影响 52

第二章 翼型与翼栅绕流 60

第一节 二元翼的绕流 60

第二节 升力与升力系数的表达式 70

第三节 儒可夫斯基翼型 74

第四节 翼栅绕流概述 79

第五节 直列翼栅绕流的动力特性 84

第六节 直列平板翼栅的绕流与翼栅干涉系数 86

第七节 实际流体对直列翼栅的绕流与翼栅效率 93

第八节 圆列翼栅绕流的保角变换解法 98

第九节 无限薄直列翼栅绕流的分布旋涡算法 (Лесохин-Симонов法) 103

第十节 奇点法解无穷薄圆列翼栅的绕流 112

第三章 叶片式水力机械转轮中空间流动的解析	119
第一节 转轮中三元流动问题的解法概述	119
第二节 转轮中准三元流动解析的流线分析法	128
第三节 任意回转流面 (S_1) 上无穷薄叶片叶间流动解析的奇点法	152
第四节 S_1 流面的奇点法解析与 S_2 流面解析的迭代计算	171
第五节 转轮中准三元流动解析的任意准正交面法	184
第六节 转轮中准三元流动解析的有限元法	196
第四章 汽蚀绕流的理论与计算	218
第一节 平面汽蚀绕流的概述	221
第二节 基于射流理论的平板翼型汽蚀绕流的保角变换解法	230
第三节 汽蚀绕流的线性理论解法	251
第四节 无重力液体平面汽蚀绕流的积分方程解法	255
第五节 翼型汽蚀绕流的积分方程解法	267
第六节 翼型局限汽蚀绕流对升力的影响	271
第七节 求解任意翼型局限汽蚀绕流的积分方程法	277
第八节 任意平面直列翼栅局限汽蚀绕流的奇点分布计算法	294
第九节 翼栅局限汽蚀绕流的一种近似计算方法	315
第十节 离心泵转轮中汽蚀流动的一种近似计算方法	322
第五章 叶片式水力机械转轮叶片水力设计的某些新方法	329
第一节 叶片式水力机械转轮叶片设计方法的概述	329
第二节 转轮叶片系中理想流体的轴对称平均流动方程	334
第三节 利用准正交曲线解混流式水轮机转轮叶片绘形的轴对称流反命题	340
第四节 混流式水轮机转轮中为有旋流的叶片绘形	348

第五节	考虑有限叶片数影响的水轮机转轮有旋流的叶片设计方法	362
第六节	直列厚翼栅绕流反命题的一种数值解法	370
第七节	一种利用翼栅数据设计斜流泵的准三元方法	378
主要参考文献		389

第一章 叶片式水力机械水动力学计算的某些基本问题

第一节 叶片式水力机械通流元件水动力学计算的基本任务与课题

叶片式水力机械有时又称为水力涡轮机械，是一种将液体能量转换成旋转的机械能，或者将旋转的机械能转换成液体能量的机械。前者称为水轮机，后者称为泵。

叶片式水力机械的工质，除特殊情况外，一般均为含有少量固相与气相介质的单相液体介质；其中，最常见的是清水。因此，本书今后要讨论的问题所涉及的介质对象，均系清水。由于水与气体的物理性质不同，决定了叶片式水力机械具有一些与叶片式热力机械很不相同的特点^{[1]，[48]}。

叶片式水力机械实现能量转换的基本原理是液体同工作轮，又称叶轮或转轮之间的相互作用。因此，转轮是叶片式水力机械实现能量转换的主要通流元件；它自然应是本书所要研究的主要对象。除此之外，转轮还必须有相应的水力性能良好的引、排水室和导水机构等其它通流元件与之相配合，从而构成一个统一的高效能的机器整体。

叶片式水力机械由于转轮转换的能量巨大，因而叶片上承受很大的水动力载荷，特别是在叶片的根部，可能引起很高的弯曲应力。由于这一原因，转轮的结构和几何参数往往不能仅只考虑水动力学条件，还不得不考虑强度条件来选取。

叶片式水力机械的额定转数一方面主要受能量损失不能太大的限制，另一方面还受汽蚀条件的限制。由于水可能发生相变，即由液相向汽相或作相反的改变，从而使通流元件，特别是在相对流速较高的转轮中，发生汽蚀与汽蚀破坏。汽蚀不仅是叶片式水力机械工作参数选择的重要约束条件，同时也是转轮水动力学计算中必须加以考虑的基本问题。

由于水的压缩性很小，所以，叶片式水力机械中由于水力因素引起的各种不稳定工作状态十分常见，这是其它机械中少有的特殊问题；它往往成为障碍正常运行的主要原因之一。

叶片式水力机械水动力学计算的基本任务是：在给定的计算条件下，采用相应的水动力学计算方法，给出通流元件，其中主要是转轮的符合实际、符合预定目标的计算结果。预定目标可能是对已知的叶片式水力机械通流元件中的流场做出正确的分析，也可能是设计出性能良好的水轮机或水泵。当然，这两种目标实际上又是统一的，即最终要创造出性能更为优异的叶片式水力机械。

由于现代水轮机与水泵的容量、工作参数、性能指标、技术经济指标以及在其工作系统中的地位，较之过去均有了显著提高，所以对其通流元件水动力学计算的最终成果，提出了更高的要求^[3,4]，下面对这些要求做一简要说明。

一、应保证叶片式水力机械具有较高的效率和宽广的高效率运行区域，以提高能量转换过程的经济效益

做为能源动力机械的水轮机，它的单机功率很大；做为通用机械的水泵，它在国民经济各部门中应用甚广，提高它们的效率，具有重要的经济意义。

通流元件水力计算过程中，无论是流场分析还是确定通流元件合理的几何形状，都还没有很成熟的考虑流动损失影响的计算方法。

水轮机或水泵做为机器整体的水力损失，是各通流元件中水力损失相叠加的结果。因此，在同一组计算参数下，对各通流元件进行连续的、彼此相关的水力计算与水力损失计算，有可能获得较为真实、合理的计算结果。而为了确保高效率区宽广，应针对若干非设计工况进行必要的校核计算。

二、应保证在一定的工作水头或扬程下具有较高的比转数

在能头一定的情况下，叶片式水力机械比转数的提高意味着在相同的转轮直径下转数或流量，或者它们两者同时有所增大，从而提高单机的工作容量；或者在相同的工作容量下，机器的尺寸与重量减小。无疑，这具有非常重要的经济意义。例如，提高水轮机的比转数，意味着水轮机的单位流量 Q_1 与单位转数 n_1 增大。前者将使水轮机，后者将使发电机的尺寸与重量减小。

提高叶片式水力机械比转数，除与改善水力计算方法有关外，经验表明，重要的是合理地选取转轮通道的几何参数。

三、应保证叶片式水力机械具有良好的汽蚀性能

叶片式水力机械通流元件，特别是流速较高的转轮中，叶片背面出现很大负压，这给翼型汽蚀的发生提供了必要条件；在转轮与静止零件的间隙中，高速水流能引起间隙汽蚀；因设计与制造上的缺陷引起的通流元件表面的不平顺，能诱发局部脱流旋涡汽蚀。气泡或汽穴在通流元件表面崩解时，产生高频高压的微冲击，从而导致材料的汽蚀破坏。叶

片式水力机械因汽蚀破坏引起的效率下降和修复费用的增加，从而带来的经济损失是十分可观的。因此，必须保证叶片式水力机械具有良好的汽蚀性能。

良好的汽蚀性能的重要标志往往是具有较小的初生汽蚀系数与临界汽蚀系数。为此，从理论上讲，水力计算时必须保证转轮叶片背面具有平坦的压力分布规律。但这样做未必能保证具有较高的水力效率和比转数。

现今，在选用较高的工作参数的情况下，叶片式水力机械在其正常运行时转轮叶片背面就经常发生汽蚀。因此，应当把汽蚀绕流计算，做为叶片式水力机械水动力学计算的重要组成部分来加以研究，创造出更加符合实际流态的计算方法^[22]。

单物体与组合体平面汽蚀绕流的水动力学计算理论与计算方法，在国外已处在实用阶段。这给创造出适用于汽蚀工况的完善的水力计算方法，设计出具有良好的能量指标与汽蚀指标的叶片式水力机械，提供了重要条件。

四、应保证具有良好的工作稳定性

由于通流元件中发生强烈汽蚀、脱流、转动部分对固定通流元件中水流的干扰、供水与排水的不均匀，以及各种类型的压力脉动等水力原因，常引起水轮机与水泵零、部件或整体的振动；有时振动能严重干扰甚至破坏所在系统的正常工作。振动的特性常是工况的函数；有些由水力原因引起的振动又同转轮的几何参数有关。例如，混流式水轮机转轮叶片出口由卡门涡列引起的叶片共振，同时出口边的厚度与形状有关；在低水头与低负荷运行时由尾水管中空腔涡带引起的低频压力脉动，则与转轮叶片的型线设计有关。

为了保证工作稳定，应当对通流元件，特别是转轮的水

力计算结果进行水力稳定性校核。可惜，直至目前，在叶片式水力机械水动力学计算中，有关水力稳定性校核计算的理论与方法，还十分缺乏。但是，应当看到，对于单机数十万千瓦乃至百万千瓦的大型水轮机，保证其水力稳定性将成为突出的设计要求之一，因为难以采用目前工程上实用的，如补气等方法来消除这一水力不稳定性^[1]。

五、应保证具有很高的运行可靠性

现代的各种机器设备均有可靠性方面的要求。在动力系统工作的水轮机与水泵，必须具有很高的满足可靠性指标的运行可靠性。所谓可靠性，是指机器设备在规定的负载或条件下持续、无故障工作的能力。影响叶片式水力机械运行可靠性的因素很多，其中也有水力因素。例如，发生严重的汽蚀与水力振动、达不到名牌出力、过渡过程中发生事故等，往往都与通流元件特别是转轮的水力性能有关。

实践表明，在过渡过程的不稳定工况下，水轮机与水泵的故障相对较多。而叶片式水力机械过渡过程品质，直接与通流元件的基本几何参数、过渡过程初始条件和调节元件运动规律等有关。目前，已有可能在水力计算阶段，根据这三方面的数据，利用过渡过程内特性解析的数值计算方法^[3,4]，预测出叶片式水力机械的某些过渡过程品质，从动态特性的一个侧面来评价它的好坏。

水力计算的最终结果，实际上难以同时满足上述五个方面的要求，因为有些要求彼此之间就是矛盾的：有些则难以兼顾；有些则受现有计算水准的限制而难以达到。例如，致力于提高比转数的同时，转轮通道中水流相对速度不可避免要有所增大，很可能导致汽蚀性能与效率均要下降。但是，随着水动力学计算理论与计算方法的充实与完善，叶片式水

力机械综合的技术经济水平将会进一步提高，这却是肯定无疑的。

长期以来，水轮机的蜗壳引水室、座环、导水机构、尾水管，水泵的吸水室、压水室与导叶等固定通流元件，所采用的计算方法均比较简单，且没有重大的改进与变化。有关这一部分的内容，在许多技术书籍中均有论述，本书将不再讨论，而把重点放在介绍水轮机与水泵转轮水力计算的新理论与新方法方面；同时还将介绍与此有关的某些流体动力学基本理论与计算问题。

叶片式水力机械转轮水力计算的理论基础，是翼栅流体动力学理论与相应命题的解法。

翼栅流体动力学问题有各种不同的提法，以适应实际工程的不同需要。每种提法都有其相应的基本方程式和边界条件。根据翼栅理论与应用的现状和发展，可将翼栅流体动力学问题的提法概括为四类，即正命题，反命题，混合型命题与最优化命题。据此，叶片式水力机械水动力学计算问题，也有这四种相应的提法。

转轮水动力学计算的正命题是：已知转轮全部的几何参数及进口条件，要求确定所讨论的区域内，特别是叶片表面的流速与压力分布以及转轮的某些动力特性。正命题的求解主要用于对已知转轮的水动力学性能做分析，其中包括各种变工况下的性能分析。

反命题的基本内容是：已知转轮轴面流道的几何形状，进、出口水流的方向，叶片表面应具有流速分布或压力分布等足可以求解命题的数据，要求确定相应的转轮叶片的几何形状。反命题的求解主要用于转轮的叶片设计。

混合型命题可以有各种不同的提法，它们的共同特征

是：给定转轮叶片部分的几何参数与流动参数，求其余部分的几何参数与流动参数。实际上混合型命题具有很大的概括性，上述的正、反命题可视为它的两个特例。混合型命题的一个例子是：在转轮某个流面所截的翼型围线的某一部分给定了流速分布，另一部分则给定翼型形状，求该翼型及其上的流速分布情况。这在求解翼栅的汽蚀绕流问题时常常会遇到。

转轮水动力学计算的最优化命题在于寻求转轮的最优化设计。在转轮设计时，不仅应选取良好的沿翼型围线的流速分布规律，同时还应使设计的转轮能满足其它方面，例如强度、振动、工艺等工程实际的需要。但要同时做到这两点是很困难的。实际上真正可行的转轮水力计算最优化命题，是在一定的设计约束条件下对某一个性能指标，例如效率、汽蚀系数，求条件极值的问题。此时，翼型的几何形状和流动参数均不给定，而只给定一些不等式约束，做为某个变分问题或最优控制论问题来解算。

上述这四种提法在叶片式水力机械转轮水动力学计算中均可能遇到。鉴于有关水轮机与水泵转轮水力设计，即解反命题的传统方法，设计过程中通道几何参数的合理选择以及叶片绘形的具体方法等，在文献[6]、[7]中均有详细的论述，所以本书不再重述。由于水力机械转轮最优化设计问题的研究成果尚不多见，所以本书也不予论及。本书将主要介绍转轮无汽蚀工况的正、反命题的现代解法和翼栅平面汽蚀绕流的解法。

第二节 研究叶片式水力机械中流体运动的曲线坐标系与基本方程

通常，在叶片式水力机械中普遍采用曲线坐标系进行流体的运动学与动力学计算，因为这样做比较方便。视所研究的问题与所采用的方法不同，常用的曲线坐标系有：正交曲线坐标系、准正交曲线坐标系与非正交曲线坐标系等。

考虑到本书以后所涉及的内容，这里仅只对前两种曲线坐标系及相应的描述流体运动的微分方程式，做一简单的介绍。

一、正交曲线坐标系

图1-1示出了一正交曲线坐标系。图中点 P 在直角坐标系 $OXYZ$ 中可用关于坐标原点的向径 $\bar{R}$ 表示；点 P 也可以用通过该点的三个彼此正交的曲面

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= q_1(X, Y, Z) = \text{常数} \\ q_2 &= q_2(X, Y, Z) = \text{常数} \\ q_3 &= q_3(X, Y, Z) = \text{常数} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

来表示。假设函数 q_1, q_2, q_3 均为单值连续函数，只要给定某一参数 q_1 值，则必有一 q_1 族的特定曲面相对应；而对于参数 $q_1 + dq_1 = \text{常数}$ ，则可得同族的一个相邻曲面，且这两个相邻的同族曲面是不可能相交的。三族曲面两两正交构成三条曲线，它们被称为坐标曲线或坐标轴。显然， P 点即是这三条坐标曲线正交的交点，该点可以由坐标 q_1, q_2, q_3 来定位。这样，在直角坐标系中的不同向径 $\bar{R}$ 将对应不同的坐标 q_1, q_2, q_3 值，因而笛卡尔直角坐标 X, Y, Z 必然是曲线坐标 q_1, q_2, q_3 的函数：