А·Ю·柯尔东　И·Э·爱津贝尔格著

水轮机原理与流体动力学计算基础

中国工业出版社

水輪机原理与流体动力学計算基础

А·Ю·柯尔东　И·Э·爱津貝尔格著

郑熊譯

中国工业出版社

本书討論了反击式水輪机通流部分流体动力学諸問題，并叙述了各种型式水輪机的基本原理及流体动力学計算的現代方法。

本书的讀者对象是水力机械制造业的設計师及研究工作者，同时可供动力机械专业的师生参考。

А. Ю. Колтон И. Э. Этинберг

ОСНОВЫ ТЕОРИИ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО

РАСЧЕТА ВОДЯНЫХ ТУРБИН

Машгиз 1958

* * *

水輪机原理与流体动力学

計算基础

郑[illegible]譯

*

机械工业图书編輯部編輯（北京蘇州胡同141号）

中国工业出版社出版（北京佟麟阁路丙10号）

（北京市書刊出版事业許可証出字第110号）

中国工业出版社第三印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 · 各地新华书店經售

*

开本 $850\times1168\ ^{1}/_{32}$ · 印张11[illegible] · 插页1 · 字数307,000

1963年10月北京第一版 · 1963年10月北京第一次印刷

印数0001—2212 · 定价（10-7）2.00元

統一书号：15165 · 2325（一机-485）

前　言

本书論述水輪机通流部分的流体动力学。

苏联的学者——И.Н.沃兹湼先斯基(И.Н.Вознесенский)、В.С.克維亚特科夫斯基(В.С.Квятковский)、И.И.庫科列夫斯基(И.И.Куколевский)、А.Ф.列索兴(А.Ф.Лесохин)、Г.Ф.普罗斯庫拉(Г.Ф.Проскура)、Л.А.西蒙諾夫(Л.А.Симонов)、Н.М.沙波夫(Н.М.Щапов)等及其他学者，对水輪机的許多理論問題都曾有过研究并加以发展。他們在这方面有着一系列的著作〔5，16，17，24，33，35，36，39〕。

在这些著作中，对水輪机通流部分的工作过程及其計算方面的許多个别問題、以及对水輪机理論的主要方向，都有所叙述。

但是，实质上还沒有系統地叙述在現代水輪机制造中所采用的各种型式水輪机通流部分的理論及流体动力学計算方法的技术书籍，作者力图弥补上述的空白点。

本书討論了水輪机通流部分各部件的工作过程，并叙述了各种型式反击式水輪机通流部分各部件流体动力学的現代計算方法。

书中指出了水輪机通流部分設計的主要方向，并提出了必要的建議。

作者在本书中主要是以И.Н.沃兹湼先斯基、А.Ф.列索兴及Л.А.西蒙諾夫所創建的方向为依据，并利用了列宁格勒金属工厂(ЛМЗ)的丰富經驗。

为証实提出的各原理，尽可能地引用了实驗資料。这些資料主要是从列宁格勒金属工厂水輪机实驗室中获得的。另外也利用了全苏水力机械研究所(ВИГМ)、列宁格勒加里宁工学院(ЛПИ)及莫斯科鲍曼高等工业学校(МВТУ)的某些研究成果。

第一、五、六、八章由И.Э.爱津貝尔格写成，而第二、三、四、七、九章則由A.Ю.柯尔东写成。

作者对列宁格勒金属工厂設計处及实驗室的全体人員及其領导人苏联科学院通訊院士H.H.科瓦廖夫（H.H.Ковалев）在本书写作时的宝貴帮助，致以深切的謝意。

作　　者

目录

第一章　水輪机流体动力学計算的任务及模拟原理

1. 总　论

水輪机流体动力学計算的基本任务在于正确地和合理地設計它的通流部分，首先使它能够在給定的条件下保証需求的功率。同时通流部分的各部件如工作輪、引水及尾水裝置都应設計成这样：使水輪机在各种工作工况下的能量損失僁可能小。

水輪机工作时的能量損失按其性质可分为两种基本形式：外部的和內部的。因摩擦（在导軸承、推力軸承及其他部分）引起的机械能的外部損失和因止水裝置及間隙部分漏水引起的損失，都与水輪机通流部分无关，因此本书不予討論。

內部損失是因水流摩擦水輪机通流部分的各表面及不同流速的水流层之間的摩擦引起的。这些損失（亦称为水力損失）与外部損失不同，它能引起水流状况的改变，因而減低作用于工作輪的水头。水力損失的大小基本上决定于通流部分的完善程度，而水輪机流体动力学計算的最重要任务之一，就是設計出能够保証水輪机在不同工作工况下都有最小水力損失的通流部分。

水輪机流体动力学計算的任务不仅是設計通流部分。在設計出滿足水輪机的需求功率及最小損失的通流部分各部件（工作輪叶片、渦壳、固定导叶、导叶、尾水管等）的型綫及尺寸以后，尙須求得水輪机結构設計及运轉必需的所有水力性能数据。例如，为了計算工作輪及导水机构各零件的强度以及选定調速器的工作能力，必須預先定出在水輪机工作时作用于工作輪叶片及导叶上的水动力値及力矩値。为了水电站运轉人員的需要，必須計算及制作出水輪机的运轉特性曲綫；为了設計机組的推力軸承的結构，必須求得作用于工作輪的軸向水推力，等等。

为了解决上述的所有問題，必須对水輪机工作过程，即对通流部分各部件中发生的所有水力現象的总和进行研究。通过这些研究就能建立水輪机的理論，并在理論基础上制定水輪机的流体

动力学計算方法。

水輪机的理論及流体动力学計算問題是非常复杂的。这些問題的复杂性是因为水輪机通流部分是由涡壳、导水机构、工作輪、尾水管这样順序排列着的部件組成的。液体在每一个上述部件內的流动都按照自己特定的規律，而揭露这些規律性是非常困难的課題，現阶段还不能用数学分析及实驗方法完全予以解决。

因此在設計通流部分各部件时只得引入一系列的簡化的假定，它們虽使所提的复杂課題簡化，但以后必須进行相应的实驗驗証。

在否定不用实驗驗証的純理論探討的同时，也不能选择經驗主义的道路，即試图用經驗的方法改变通流部分的个别部件以求得最优的答案。这样的方法須做非常大量的实驗工作，因而效果不高。与此相反，需要的是要将水輪机的理論及其通流部分各部件的計算方法不断加以完善。这就可能指出解决所提任务的正确方向，并使所需实驗驗証的模型数趋于最少数目。因此，通流部分設計的基本方法是在于計算与实驗的紧密結合。

水輪机通流部分的实驗研究可以直接在水电站的水輪机（即眞机）上进行試驗，亦可在实驗室的条件下、在模拟眞机的水輪机模型上进行試驗。眞机試驗因限于現实的可能性，在大多数情况下是鑑定性的試驗。而通流部分流体动力学計算的实驗校正，以及对給定条件选择最优答案的研究，通常是在实驗室里用模型水輪机进行。В.П. 古列夫（В.П.Гурьев）的著作〔11〕闡述了水輪机实驗研究的各种現代化方法。

水輪机的模拟如同其他水力机械的模拟一样，是以液体流动的力学过程的相似理論为基础的。

2. 水轮机模拟原理

在水力过程模拟时，必須遵守几何相似、运动学相似及动力学相似的原則。

如果各水力系統的被繞流表面的綫尺寸成比例，則这些系統（例如：水輪机、带有局部阻抗的水管、离心水泵，等等）就称为几

何相似。同时认定，在数个几何相似的水輪机中，其調节机构(即导叶，对于轉桨式水輪机还有工作輪叶片）的位置亦应相似。

各系統的运动学相似，是要求它們通流部分內的水流流动图象相似，亦即在遵守运动学相似时，各几何相似系統的相应点的速度应大小成比例，方向相同。在水輪机中，运动学相似的条件归納为通流部分相应点的速度三角形的相似。具有运动学相似的水輪机的工作工况，称为对称工况。

动力相似要求作用于两系統相应部件的力成比例。

水力学过程的模拟原理的基本問題是：寻求在什么条件下可以仅通过对一个几何相似的模型（例如尺寸縮小的）試驗，能求得一个水力系統的規律。

在系統的通流部分繞流表面間有完全几何相似的情况下，由于可能存在两种极端不同的流动工况——层流及紊流，使得几何相似不能成为各現象力学相似的充分条件。因此，相似理論的任务是定出几何相似水流在什么条件下也是力学相似。亦即，如涉及速度分布图象时，在什么条件下运动学相似；而涉及水流繞流表面所产生的作用力时，什么条件保証动力学相似。

根据粘性不可压縮液体的动力学方程式（諾維埃-斯托克斯方程式）

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{\partial c_x}{\partial t}+c_x\frac{\partial c_x}{\partial x}+c_y\frac{\partial c_x}{\partial y}+c_z\frac{\partial c_x}{\partial z}=\\
&\qquad=X-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+\nu\nabla^2 c_x;\\
&\frac{\partial c_y}{\partial t}+c_x\frac{\partial c_y}{\partial x}+c_y\frac{\partial c_y}{\partial y}+c_z\frac{\partial c_y}{\partial z}=\\
&\qquad=Y-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}+\nu\nabla^2 c_y;\\
&\frac{\partial c_z}{\partial t}+c_x\frac{\partial c_z}{\partial x}+c_y\frac{\partial c_z}{\partial y}+c_z\frac{\partial c_z}{\partial z}=\\
&\qquad=Z-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}+\nu\nabla^2 c_z;
\end{aligned}\right\}\quad(1\cdot1)$$

在相似理論中証明了：两几何相似系統为保証力学(即运动学及动力学）相似，必要和充分条件是它們的下列无量綱的力学相似准数值守恒：雷諾数 $\mathrm{Re}=\frac{cl}{\nu}$； 弗魯特数 $\mathrm{Fr}=\frac{c^2}{gl}$ 及斯脫魯哈数 $\mathrm{Sh}=\frac{c}{nl}$。

当保証两个相比系統的第一准数Re守恒时，則粘性力和慣性力成比例。

在研究带有自由表面的水流时，例如，在研究水輪机中的汽蝕現象問題及船舶制造上的波浪阻抗問題时，須保証表征重力及慣性力比例关系的弗魯特数守恒。

斯脫魯哈数的守恒表明慣性力的定点組成部分与其定时組成部分的比例相同。在系統中有不稳定周期运动时，例如探討叶片机械中的流动（在水輪机、离心及軸流泵中），或探討螺旋桨工作时，必須引入斯特魯哈数。此时該数表示水流速度（c或 w）与圓周速度 u 之比。

这样，两几何相似的水輪机的运动学及动力学相似，在无汽蝕工况时的必要和充分条件为保証雷諾数Re 及斯脫魯哈数 Sh 的守恒。

可以証明，在除去体积力一項后，在两几何相似的水流中 Re 及Sh 数守恒的条件可以导致另一无量綱值——即所謂欧勒数

$$\mathrm{Eu}=\frac{p}{\rho c^2}$$

的守恒。

从此式的組成形式可見，欧勒数表示压力与慣性力的关系。为了証明Eu数与 Re及Sh 数的关系，我們列出对两个水流的諾維埃-斯托克斯方程式（1·1），但写成符号形式

$$\left.\begin{aligned} \text{Л}_1+K_1&=-\text{Д}_1+B_1,\\ \text{Л}_2+K_2&=-\text{Д}_2+B_2, \end{aligned}\right\} \qquad (1\cdot 2)$$

式中　$Л$——比例于慣性力的定点組成部分之各值

$$\left(\frac{\partial c_x}{\partial t},\ \frac{\partial c_y}{\partial t}\cdots\cdots\text{等等}\right);$$

K——比例于慣性力的定时組成部分之各值

$$\left(c_x\frac{\partial c_x}{\partial x},\quad c_y\frac{\partial c_x}{\partial y}\cdots\cdots\text{等等}\right);$$

$Д$——比例于压力之各值$\left(\frac{1}{\rho}\ \frac{\partial p}{\partial x},\ \frac{1}{\rho}\right.$

$$\left.\frac{\partial p}{\partial y}\cdots\cdots\text{等等}\right);$$

B——比例于粘滞力之各值 ($\nu\nabla^2 c_x$, $\nu\nabla^2 c_y$ ……等等)。

現設定

$$\frac{Л_1}{Л_2}=\alpha_Л;\quad \frac{K_1}{K_2}=\alpha_K;\quad \frac{Д_1}{Д_2}=\alpha_Д;\quad \frac{B_1}{B_2}=\alpha_B。\quad (1\cdot 3)$$

因为两水流間存在等式 $\mathrm{Re}_1=\mathrm{Re}_2$ 及 $\mathrm{Sh}_1=\mathrm{Sh}_2$，由此可得

$\frac{K_1}{B_1}=\frac{K_2}{B_2}$及$\frac{K_1}{Л_1}=\frac{K_2}{Л_2}$，或即$\frac{K_1}{K_2}=\frac{B_1}{B_2}$及$\frac{K_1}{K_2}=\frac{Л_1}{Л_2}$。

因此，$$\alpha_K=\alpha_B=\alpha_Л=\alpha。\quad (1\cdot 4)$$

将(1·3)式中的 $Л_1$, K_1, $Д_1$, B_1值代入 (1·2)式，并考虑到 (1·4) 的等式，可得:

$$\alpha(Л_2+K_2)=-\alpha_Д Д_2+\alpha B_2;$$
$$Л_2+K_2=-Д_2+B_2。$$

比較此二等式，可得

$$\alpha_Д=\alpha=\alpha_K$$

或

$$\frac{Д_1}{Д_2}=\frac{K_1}{K_2},\ \text{或}\frac{Д_1}{K_1}=\frac{Д_2}{K_2}。$$

后一等式表示二水流的压力与惯性力比值相等，即欧勒数 $\mathrm{Eu}=\frac{p}{\rho c^2}$ 守恒。

但这里必須指出，因为在上述的討論中沒有考慮到体积力（具体說来，如重力），因此上述 Eu 数守恒的結論仅对由压力差而不是絕对压力計算的欧勒数才是正确的。

这样我們就証明了，对二个几何相似的水輪机在存有雷諾及斯脫魯哈数守恒的条件下，必然遵守由压力差計算而得的欧勒数守恒。因此在这种情况下欧勒数应认为不是相似条件，而是相似存在的結果。

在討論水輪机模拟問題时，通常不是直接利用斯脫魯哈及欧勒数，而是利用这些数綜合組成的其他有量綱的参数：单位轉数（即化引轉数）n'_{I}及单位流量（即化引流量）Q'_{I}。

我們可将欧勒数中的压力差以水头代之，則得水流在所探討的某点的速度值为

$$c=\frac{1}{\sqrt{\mathrm{Eu}}}\sqrt{gH}\text{。}\qquad(1\cdot5)$$

如果 c 是水輪机通道上某特征断面 F 上的平均流速，則通过水輪机的流量为:

$$Q=cF=\frac{F}{\sqrt{\mathrm{Eu}}}\sqrt{gH}=\frac{F}{D_1^2}\sqrt{\frac{g}{\mathrm{Eu}}}\,D_1^2\sqrt{H}\text{，}\qquad(1\cdot6)$$

式中 D_1——水輪机工作輪直径。

对于二个几何相似的水輪机，比值 $\frac{F}{D_1^2}$ 显然是相等的。在 Re 及 Sh 数守恒时，Eu 数亦不变，这就使我們有根据认定

$$Q'_{\mathrm{I}}=\frac{F}{D_1^2}\sqrt{\frac{g}{\mathrm{Eu}}}\qquad(1\cdot7)$$

对所有几何相似的水輪机系列为常数。因为此值在数值上等于通过工作輪直径 $D_1=1$ 米及当水头 $H=1$ 米时的水輪机的流量，因此公认地被命名为化引成 1 米工作輪直径及 1 米水头条件下的流

量，或簡称“单位流量”，并用符号 Q'_{I} 表示。由(1·7)式可見，Q'_{I} 不同于Eu 数，而为有量綱值。但是在实践中此值的眞正量綱〔Q'_{I}〕＝米$^{1/2}$秒$^{-1}$ 通常是不用的，而給它以米^3/秒或升/秒的量綱。

給单位流量以量綱米^3/秒的理由如下：对二几何相似水輪机在 Re与Sh数守恒时，从（1·6）式引出的下列比例式亦成立：

$$\frac{Q}{Q_1}=\left(\frac{D_1}{D_{1_1}}\right)^2\sqrt{\frac{H}{H_1}}。$$

設第二个水輪机具有工作輪直径$D_{1_1}=1$米及水头等于$H_1=1$米，此时通过此水輪机的流量在数值上等于单位流量$Q_1=Q'_{\mathrm{I}}$。代入这些数据到上式中，可得：

$$\frac{Q}{Q'_{\mathrm{I}}}=\left(\frac{D_1}{1}\right)^2\sqrt{\frac{H}{1}}。$$

因为此式的右端为无量綱之值，則可見单位流量Q'_{I}具有与通过第一个水輪机流量的相同的量綱，即〔米^3/秒〕或〔升/秒〕。

为了将单位轉数与相似准数联系起来，我們将轉数用斯脫魯哈数表示，并将速度値以欧勒数及水头代入，而特征长度以工作輪直径代入，得：

$$n=\frac{c}{l\mathrm{Sh}}=\frac{\sqrt{g}}{\mathrm{Sh}\sqrt{\mathrm{Eu}}}\frac{\sqrt{H}}{D_1}。\qquad (1\cdot8)$$

很显然，数值

$$n'_{\mathrm{I}}=\frac{\sqrt{g}}{\mathrm{Sh}\sqrt{\mathrm{Eu}}}$$

在二几何相似的水輪机中，当 Re及 Sh 数都守恒时是相同的。此值在数值上等于工作輪直径$D_1=1$米及工作水头$H=1$米的水輪机的轉数，因此称为“单位轉数”，并以符号n'_{I}表示。虽然它的眞正的量綱是〔n'_{I}〕＝米$^{1/2}$秒$^{-1}$（与 Q'_{I}一样），但实践中采用〔n'_{I}〕＝轉/分，采用的依据和上述单位流量的論証类似。

这样，对各几何相似的水輪机，Re 及 Sh 数都守恒就也保証了单位流量 Q'_{I}及单位轉数 n'_{I}的守恒。从另一面說来，Q'_{I} 及n'_{I}的

守恒表示各几何相似水輪机存在力学（运动学及动力学）相似，因为它們的相似准数 Re 及Sh 均守恒。

在两个水力系統动力相似的情况下，非常明显，能保証所有力的成比例性，其中也包括阻抗力。因此当在两水輪机中水流保持动力相似时，损失水头与全水头的比值在两水輪机中将是一致的，因而水力效率值亦将相同。

实际上在水輪机模拟中不能保証动力相似，因为眞机的雷諾数比模型要大30～50倍。Re数会有这样大的差别，可作以下的解释：因为模型水輪机的尺寸常常比眞机小10～40倍，而且模型試驗时的工作水头也低得多。另外，很难保証在模型及眞机中水流流过的表面有相同的相对糙度，因而不能实现完全的几何相似。这些原因导致了模型及眞机具有不同的水头损失及不同的水力效率值。实践証明，眞机的水力效率常超过本身的模型达3～7%。

为了避开因缺少水輪机中水流动力相似而引起的模型及眞机不能相比的困难，实践上常常在不需涉及效率修正的情况时消去眞机及模型中的水头损失，而采用通过水輪机的水头的有效部分$H_t=\eta_t H$。在这样来研究問題时，可使諾維埃-斯托克斯方程式中含有液体粘滞性的各項消除，此时力学相似（已仅为运动学相似）的唯一准数仅剩下斯脫魯哈数或在水輪机中仅为单位轉数。从以前的叙述中明显地可見，此时单位流量守恒是单位轉数守恒的結果。

根据对問題的上述提法，单位轉数及单位流量应該是对有效利用水头說的，而不是对全水头說的。

$$n'_I=\frac{nD_1}{\sqrt{\eta_t H}};\qquad(1\cdot9)$$

$$Q'_I=\frac{Q}{D_1^2\sqrt{\eta_t H}}。\qquad(1\cdot10)$$

这样，对各几何相似的水輪机（調节机构具有相似位置）在相同的单位轉数时单位流量亦必相等。此时各水輪机的工作工况存在有运动相似，即它們处于对称工况。由于这些按式（1·9）

（1·10）算出的化引值在几何相似水輪机的全部系列中及在对称工况下均不改变，A.A.薩巴聶也夫（A.A.Сабанеев）建議称它們为系列化引值，并以符号$Q'_{\mathrm{I}}*$及$n'_{\mathrm{I}}*$表示。

所有几何相似水輪机全部系列的对称工况在平面座标$Q'_{\mathrm{I}}-n'_{\mathrm{I}}$中表为一点。所有对称工况的总体在上述座标中表为曲綫$Q'_{\mathrm{I}}=f(n'_{\mathrm{I}})$。因为对几何相似水輪机系列一样的$Q'_{\mathrm{I}}$值相应于一样的$n'_{\mathrm{I}}$值，因此$Q'_{\mathrm{I}}=f(n'_{\mathrm{I}})$的关系对所有的系列也都是一样的。这一状况成为实驗室条件下在試驗装置中作水輪机模拟的基础。

在模型机組中求得某一轉数的流量值后，按(1·9)及（1·10）式可算得相应于此工况的Q'_{I}及n'_{I}值（按已知模型的D_1及H）。然后在已知眞机直径及水电站水头后，并考慮到Q'_{I}值对模型及眞机一致（在調节机构相似位置及n'_{I}守恒时），即可按公式算出眞机的流量及轉数。

根据模型試驗的数据可作出通用特性曲綫。通用特性曲綫是在座标平面$Q'_{\mathrm{I}}-n'_{\mathrm{I}}$上的对导水机构各位置的曲綫系$Q'_{\mathrm{I}}=f(n'_{\mathrm{I}})$，或称为“开度綫”系。在此座标平面上还画上模型水輪机的效率等值綫系。这样的特性曲綫被称为“通用”，是因为它对与試驗模型几何相似的水輪机系列全是正确的（对“开度綫”系是直接相同，而对效率值則是通过换算修正）。

虽然只有在包括水力效率算出的Q'_{I}及n'_{I}值守恒时才能保証各工况的运动相似，但現阶段的实驗室研究实践中还很少利用(1·9)（1·10）式。基本原因是因为各实驗室中的現有模型装置的許多結构还不可能从測量得的全效率值中分出水力效率值来。因此通常单位轉数及单位流量仍是关于全水头的：

$$n'_{\mathrm{I}}=\frac{nD_1}{\sqrt{H}}; \qquad (1 \cdot 11)$$

$$Q'_{\mathrm{I}}=\frac{Q}{D_1^2\sqrt{H}}。 \qquad (1 \cdot 12)$$

为了与系列化引值区别，称为近似化引值（原文为一級近似化引值，为簡便計，簡称近似化引值——譯注）。