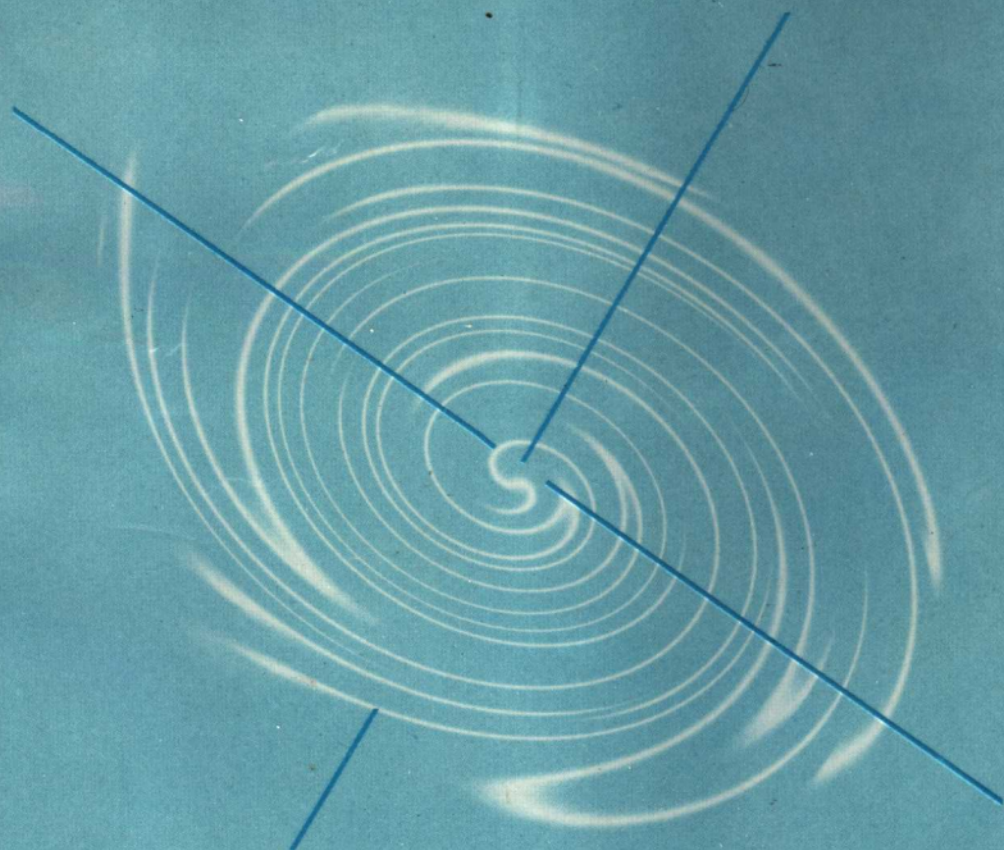


水力机械 转轮现代设计理论 及应用

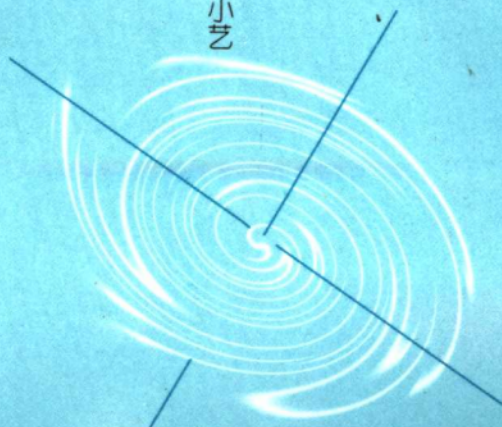
罗兴琦 著



西安交通大学出版社

□责任编辑／谭小艺

□封面设计／伍胜



ISBN 7-5605-0953-3



9 787560 509532 >

ISBN7-5605-0953-3 / TH·46

定价:24.00 元

水力机械 转轮现代设计理论 及应用

罗兴琦 著
西安交通大学出版社

内容简介

本书首次全面系统地介绍了水力机械转轮的现代设计理论、方法及其应用。主要包括水力机械转轮设计方法的研究现状,准三维、全三维反问题计算方法及其应用,水力机械转轮的性能预估,最优化方法在水力机械转轮设计中的应用。各种理论方法均配有应用实例。

本书可作为高等院校水力机械专业本科高年级学生和研究生的教材,也可供从事水轮机、水泵等相关专业的研究人员和工程技术人员参考。

(陕)新登字 007 号

水力机械转轮现代设计理论及应用

罗兴琦 著

责任编辑 谭小艺

*

西安交通大学出版社出版

(西安市咸宁西路 28 号 邮政编码:710049 电话:(029)3268316)

西安向阳印刷厂印装

各地新华书店经销

*

开本:850×1168 1/32 印张:7.75 字数:192 千字

1997 年 9 月第 1 版 1997 年 9 月第 1 次印刷

印数:1—800

ISBN7-5605-0953-3/TH·46 定价:24.00 元

若发现本社图书有倒页、白页、少页及影响阅读的质量问题,请去当地销售部门调换或与我社发行科联系调换。发行科电话:(029)3268357,3267874

前 言

近年来,随着计算流体力学和计算机技术的迅猛发展以及计算机的广泛应用,水力机械通流部件的水力设计、流动分析及性能预估都已取得巨大进步。水力机械通流部件的正问题研究较为成熟,国内外学者对各种型式的叶片式水力机械的各个通流件的三维湍流流动的有限元法和有限体积法的数值计算都有研究,只是湍流模型尚待进一步完善。可是,通流部件的设计仍是建立在传统的通流理论基础上的二维和二维方法。三维的反问题计算及转轮的优化设计研究才刚刚起步。为减少转轮设计中的不确定因素,提高设计过程对转轮综合性能的可控性,缩短转轮研制的周期,采用全三维的反问题计算设计转轮是发展的趋势。

众所周知,转轮内部的流动和转轮的几何形状是十分复杂的,其内在联系和机理尚不十分清楚。即使采用全三维的反问题计算,在设计中设计变量、几何参数及流动规律仍有许多可变因素,它们之间可以有许多不同的组合,可成立的设计方案很多,逐个进行分析或试验来优选方案是不可能的。优化设计是一种现代的设计方法,它建立在最优化数学理论和现代计算技术的基础上,运用计算机自动确定设计的最优方案。因此,在流体机械通流部件的设计中,采用全三维的反问题计算与最优化数学理论相结合的优化设计是当前及今后的发展方向。

可见,研究水力机械转轮三维设计理论和方法以及最优化方法在转轮设计中的应用,对提高转轮的综合性能、完善水力设计理论和方法、提高设计水平;对缩短转轮的研制周期、减少研究费用、提高我国厂家在水力机械制造中的竞争力都具有重要的意义。

本书共分7章。第1章为导论,以反问题为主较为系统地介绍了流体机械转轮设计的准三维、全三维和优化方法三个方面的研究状况和存在的主要问题。第2章为水力机械转轮内的三维无粘流动计算,为后面介绍三维设计方法打下基础。第3章建立了 S_{2m} 流面反问题计算的叶片设计方法;提出了一种十分简单实用的基于 S_1 流面反问题计算的准三维设计和流动分析模型。第4章在前人无旋流反问题研究思想的基础上,提出了一种全三维有旋流动的反问题计算模型。第5章为损失分析,它是优化设计中的关键问题。第6章为优化设计,本书建立了较为完整的水轮机转轮的优化设计模型,与全三维的反问题及损失空化预估相结合进行了全三维的反问题优化设计。第7章为总结,对本书的工作进行了全面的总结和评价,并对水力机械转轮设计的进一步研究与发展提出了一些设想和建议。

本书是在作者博士论文、硕士论文及近十年应用研究的基础上写成的。在作者十多年的学习和研究过程中,得到了清华大学林汝长教授,中国水利水电科学研究院许协庆高级工程师,清华大学

梅祖彦教授、吴玉林教授、陈乃祥教授,西安理工大学李建中教授、袁清阁教授的指导、鼓励和关怀,许多学者、专家、同行和同事也给予了许多指导、鼓励和帮助,特别在此一并表示衷心感谢。

在本书的出版过程中,得到西安交通大学出版社谭小艺编辑的热情帮助和大力支持,她为本书的出版付出了巨大的劳动,在此表示衷心感谢。

由于作者水平有限,书中错误在所难免,敬请读者指正。

作者

1997年5月于西安理工大学

目 录

第 1 章 导论

1.1 转轮内部流动计算研究概况	2
1.1.1 理想流动计算	3
1.1.2 粘性流动与湍流流动计算	7
1.2 流体机械转轮设计的研究与发展	11
1.2.1 叶片设计问题的提法	11
1.2.2 基于两类流面的准三维反问题计算	13
1.2.3 全三维反问题计算	20
1.2.4 转轮内粘性流动的反问题	27
1.2.5 优化设计	29
1.2.6 转轮设计研究存在的问题	33

第 2 章 水力机械转轮内三维流动计算的有限元法

2.1 S_2 流面流动的计算	37
-------------------------	----

2.1.1 S_2 流面的基本方程	37
2.1.2 S_2 流面的有限元方程组	41
2.2 S_1 流面的流动计算	50
2.2.1 S_1 相动流面的流动方程	50
2.2.2 S_1 流面的有限元方程组	58
2.3 水力机械转轮内三维有势流动的有限元法	62
2.3.1 基本方程和边界条件	62
2.3.2 有限元方程组的建立	66
2.4 有限元代数方程组的求解	71
2.4.1 边界条件的处理	72
2.4.2 波前法	75
2.5 三维流动计算实例	77
2.5.1 轴面流动计算	77
2.5.2 叶栅流动计算	79
2.5.3 准三维流动计算	80
2.5.4 三维有势流动计算	84

第 3 章 准三维反问题模型及其应用

3.1 准三维流动方程	87
3.1.1 平均 S_{2m} 流面的流动方程	87
3.1.2 S_1 流面流动的基本方程	91
3.2 S_{2m} 流面的反问题计算	94
3.2.1 S_{2m} 流面的反问题计算模型	94
3.2.2 设计算例与分析	96
3.3 基于 S_1 流面反问题计算的准三维设计	109
3.3.1 S_1 流面上叶片设计方程	109
3.3.2 准三维设计模型和步骤	110
3.3.3 算例	111
3.4 准三维设计的工程应用	118

3.4.1	前言	118
3.4.2	已建电站的改型问题	118
3.4.3	改型设计模型	119
3.4.4	改型设计实例与分析	122
3.5	水轮机的计算机辅助设计	126
3.5.1	水轮机轴面流道的一种设计方法	126
3.5.2	叶片的 B 样条曲面拟合	129

第 4 章 全三维反问题计算

4.1	全三维有势流动的数学模型	133
4.1.1	基本定义	133
4.1.2	旋度和速度的表达式	134
4.1.3	平均流动方程	137
4.1.4	三维周期性脉动流动方程	138
4.1.5	全三维流动的速度表达式	142
4.2	全三维有旋流动的数学模型	142
4.2.1	转轮内部流动的描述	142
4.2.2	周向平均流动方程	144
4.2.3	三维周期性脉动流动方程	146
4.2.4	全三维流动的速度表达式	149
4.3	全三维叶片设计的数学模型	149
4.3.1	叶片中面方程	149
4.3.2	Kutta 条件	150
4.3.3	叶片端壁边界条件处理	151
4.3.4	数值计算方法	153
4.4	全三维反问题计算算例	155
4.4.1	设计参数的确定	155
4.4.2	计算实例	158
4.4.3	与准三维方法的结果比较	161

4.4.4 模型参数研究	164
--------------------	-----

第5章 水轮机转轮的损失分析

5.1 S_1 流面叶栅的损失计算	171
5.1.1 回转面上叶栅边界层的动量积分方程	171
5.1.2 边界层的动量积分方程的求解	175
5.1.3 叶栅损失的近似计算	177
5.2 三维边界层积分计算	179
5.2.1 基本方程	180
5.2.2 动量积分方程	182
5.2.3 边界层的输运积分方程	185
5.2.4 湍流边界层积分方程的求解	185
5.3 水力机械转轮三维边界层的计算	189
5.3.1 转轮内三维边界层求解方法	189
5.3.2 计算网格及其有关参数	190
5.4 水轮机转轮内的损失计算	191
5.4.1 转轮进口撞击损失	191
5.4.2 转轮出流损失	192
5.4.3 粘性摩擦损失	192
5.4.4 间隙损失	193
5.4.5 转轮的能量损失	195
5.4.6 损失计算算例	195

第6章 水轮机转轮的优化设计

6.1 转轮流道内速度矩的分布	202
6.1.1 转轮出口速度矩	203
6.1.2 转轮进口速度矩	204
6.1.3 速度矩沿轴面流线的分布	205
6.2 优化设计的数学模型	206

6.2.1 优化参量	207
6.2.2 目标函数	209
6.2.3 约束条件	210
6.3 优化问题的数值解法简介	212
6.3.1 多目标的线性加权和方法	212
6.3.2 SWIFT 算法	213
6.4 优化算例	215
6.4.1 计算条件	215
6.4.2 单目标优化计算	216
6.4.3 多目标优化计算	223

第 7 章 结束语

参考文献

第 1 章

导 论

水力机械通流部件中的流体运动是非常复杂的三维不定常的可压缩的粘性流体运动。近年来,由于计算流体力学和计算技术的迅速发展,使水力机械通流部件的流动分析取得了巨大的进展,各种形式叶片式水力机械通流部件的三维 Euler 方程和三维 Navier-Stokes 方程(简称 N-S 方程)的数值解已成为可能,一些公司已开始将它们作为分析工具应用于通流部件的设计。但是,直接应用反问题计算来设计通流部件还不多。

在计算机还不发达的五六十年代,混流式转轮的设计基础仍是本世纪初 Lorentz 提出的通流理论,即假定转轮中的叶片数无穷多,无限薄,这样将三维流动简化成轴对称流动。根据对轴面流动规律的不同假设而有一维、二维理论方法。现阶段我国工程设计中较多采用的仍是这些方法。由圆柱层无关假设,轴流式转轮的设计是转换成平面直列叶栅进行设计的。70 年代以后,随着计算机技术的迅猛发展,吴仲华^[1]1952 年提出的两类流面理论逐步在水力机械转轮设计中得到应用,目前国内外水力机械转轮的设计方

法绝大多数是以该理论为基础发展起来的。80年代中期以来,随着计算流体力学的迅速发展,水力机械通流部件的三维流动分析有了长足的发展,它已成为通流部件水力设计的重要辅助工具。随着技术的不断进步,对水力机械的综合性能提出了越来越高的要求,传统的设计方法已满足不了发展的需要,优化设计和三维反问题计算也愈来愈受到重视。

本章将对流体机械转轮内部流动正反问题的研究现状和工业应用作全面介绍,就各种设计计算方法进行评述。结合作者对转轮设计方法的研究与实践,对现代水力机械转轮设计的发展方向提出一些新的建议。

1.1 转轮内部流动计算研究概况

转轮中的流动是流体动力学中最为复杂的流动。即使对水力机械中的不可压缩流体也是如此。首先流动是三维的,故其应力和应变率是很复杂的。不同方向上有不同的压力梯度,同时还有旋转、表面曲率等作用,形成复杂的粘性和湍流流动区域。此外,伴随着二次流、间隙流、尾迹及流道中的马蹄涡和削状涡,流动还有强烈的旋涡性。水力机械内部流动的数值研究经历了二维→准三维→全三维,无粘流→粘性流的发展过程。应用的数值方法包括:奇点分布法、有限元法、有限差分法、有限体积法以及流线迭代法等。计算机和计算流体动力学的发展,有力地促进了水力机械内部流动数值研究的进步。特别是N-S方程和Euler方程直接解法在水力机械研究中的应用,为分析复杂的三维流动提供了有效的方法。Lakshminarayana^[2]和吴玉林^[3]总结了转轮中流动分析计算方法的研究和发展。

转轮中的流动计算基本上可分为两大类:理想流动和粘性流动计算。

1.1.1 理想流动计算

水力机械内部流动的雷诺数都比较大(一般大于 10^6), 对设计工况和设计工况附近的加速或弱减速非分离流动、水流粘性的影响仅限于非常薄的边界层之内, 若不分析通流部件的损失特性时, 可忽略水流的粘性作用, 这样转轮内部的流动遵循理想流体的连续方程和运动方程。在绝对坐标系中它表示为

$$\left. \begin{aligned} \nabla \cdot \vec{V} &= 0 \\ \frac{D\vec{V}}{Dt} &= \vec{f} - \frac{1}{\rho} \nabla p \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式中 $\vec{V}$ ——绝对速度矢;

$\vec{f}$ ——质量力矢;

ρ ——液体的密度;

p ——压力。

若选择与转轮一起旋转的相对坐标系, 则水力机械转轮内的无粘性流体的相对运动方程为

$$\nabla \cdot \vec{W} = 0 \quad (1-2a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{W}}{\partial t} + \nabla \frac{W^2}{2} + \vec{W} \times (\nabla \times \vec{W}) - \omega^2 \vec{r} + 2\vec{\omega} \times \vec{W} \\ = \vec{f} - \frac{\nabla p}{\rho} \end{aligned} \quad (1-2b)$$

式中 $\vec{W}$ ——相对速度矢;

$\vec{\omega}$ ——角速度矢。

方程(1-1)和(1-2)又称 Euler 方程, 它是水力机械通流部件内部理想流动的计算基础。

转轮中理想流动计算方法可分以下四类:

1. 二维和三维的势流流动

在流体无粘的基础上, 进一步假定其内部流动是无旋的。这样流动控制方程为

$$\vec{V} = \nabla \Phi \quad (1-3)$$

$$\nabla^2 \Phi = 0 \quad (1-4)$$

式中 Φ ——速度势函数。

转轮的三维势流计算可以用有限元法^[4,5,6],也可用边界元法^[7]和差分法。从80年代初发展起来的三维势流的解法,既可用有限元法也可用边界元法和差分法。由于它能充分反映转轮中的三维性,所以比二维和准三维计算更充分地描述流动的状态,特别是在水轮机的流动分析中,在设计工况附近,除一些特殊区域外(如翼型头部和尾部区域),其三维势流计算结果与实际流动还是很吻合的。但是它不能反映转轮中的旋涡特性和损失特性。

奇点法可以说是求解势流的一种经典的计算方法,目前工程上仍广泛应用该方法进行二维叶栅绕流计算。

2. 转轮中的准三维流动

1952年吴仲华教授提出了著名的三维流动通用理论,转轮内的三维流动问题可以转化为多个两类相对流面上的二维流动问题进行迭代求解。两类相对流面的定义,如图1-1所示。第一类为跨

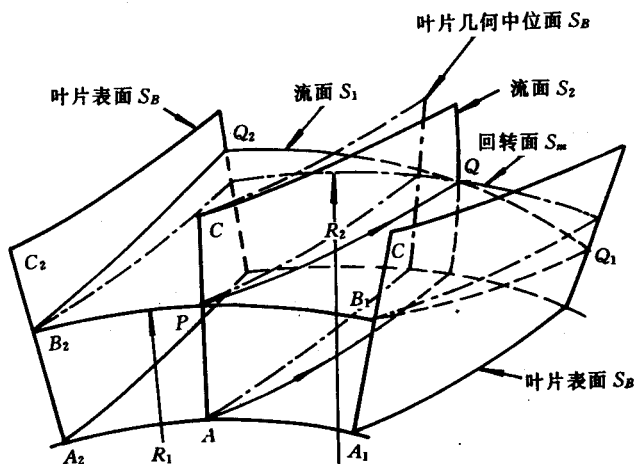


图 1-1 两类相对流面定义图

叶片面的 S_1 相对流面, 即流面由过叶栅中或叶栅前圆周线上的所有相对运动流线组成。第二类为跨盘盖(轮毂到轮缘) S_2 相对流面, 即流面由过叶栅前半径线上的所有相对运动流线组成。通过 S_1 流面和 S_2 流面的流动计算及相互间的迭代而完成转轮中的三维流动计算。

在图 1-2 所示的正交曲线坐标系 $(q_1, q_2, q_3 = \theta)$ 中, 引入沿流面的偏导数, 则由三维 Euler 方程可导出 $q_3 = q_3(q_1, q_2)$ 的 S_2 流面理想流动的流函数方程^[8]

$$\frac{\partial}{\partial q_1} \left(\frac{H_2}{H_3 B_2} \frac{\partial \Psi}{\partial q_1} \right) + \frac{\partial}{\partial q_2} \left(\frac{H_1}{H_3 B_2} \frac{\partial \Psi}{\partial q_2} \right) = \Omega_3 \quad (1-5)$$

及 $q_2(q_1, q_3)$ 的 S_1 流面理想流动的流函数方程

$$\frac{\partial}{H_1 \partial q_1} \left(\frac{1}{H_2 B_1} \frac{\partial \Psi}{H_1 \partial q_1} \right) + \frac{\partial}{H_3 \partial q_3} \left(\frac{1}{H_2 B_1} \frac{\partial \Psi}{H_3 \partial q_3} \right) = \Omega_2 \quad (1-6)$$

式中 Ψ ——流函数;

B_1, B_2 ——分别为 S_1 流面和 S_2 流面的流层厚度;

H_1, H_2, H_3 ——拉梅系数;

Ω_2, Ω_3 ——涡量 $\vec{\Omega}$ 在 q_2, q_3 坐标上的分量。

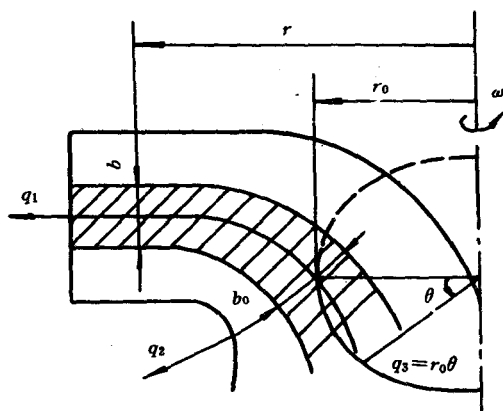


图 1-2 正交曲线坐标系