

BENGZHAN SHUILIU YUNDONG TEXING

JI SHUILI XINGNENG

泵站水流运动特性 及水力性能

成立 刘超 颜红勤 蒋红樱 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

泵站水流运动特性 及水力性能

成立 刘超 颜红勤 蒋红樱 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

泵站的过流部件包括前池、进水池、进水流道、叶轮、出水流道等，其内部流动是较为复杂的三维流动。本书以三维湍流流动为基础，辅以实验验证，较为系统地对泵站各部分的流动进行计算分析，揭示其水力特性规律，建立各部分的水力性能优化设计准则。

本书可供水利工程及市政工程勘测设计研究、泵站工程建设管理及试验研究等有关工程技术人员参考，也可供高等学校水利水电工程、农业土木工程、热能与动力工程、市政工程等有关专业的师生阅读。

图书在版编目（C I P）数据

泵站水流运动特性及水力性能 / 成立等著. -- 北京：
中国水利水电出版社，2016.3
ISBN 978-7-5170-4235-8

I. ①泵… II. ①成… III. ①泵站—水力学—研究
IV. ①TV675

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第077973号

书 名	泵站水流运动特性及水力性能
作 者	成 立 刘 超 颜红勤 蒋红樱 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京时代澄宇科技有限公司
印 刷	北京博图彩色印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 9.75印张 231千字
版 次	2016年3月第1版 2016年3月第1次印刷
定 价	78.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

序

Foreword

中国有着广袤的平原、河网、圩区，为抗御洪涝、干旱等灾害建造了 10 多万座固定泵站，每年为农业的灌溉、排涝，抗灾夺丰收，为区域调水、城镇供水、排污、排洪、保障工业生产和居民生活用水发挥了重大作用，作出了重要贡献。我国泵站装机总功率近 8000 万 kW，规模位居世界第一，消耗的能源占农用总能耗的 25%。2011 年中央 1 号文件要求全面建成防洪减灾体系，泵站作为防洪减灾体系的重要组成部分，承担着排洪排涝、供水调水的重大任务；泵站建设改造是亟需加强的水利基础设施重点建设环节。随着国家南水北调、淮河治理、太湖流域治理等重大工程的实施，对泵站水力性能和运行可靠性提出了更高的要求。虽然我国在大型泵站的建设、管理和运行方面积累了丰富的经验，但由于研究手段等方面的问题，对影响机组性能的技术基础问题还没有完全掌握，尤其在泵站内部三维流动特性、水力优化设计、性能预测等研究方面技术储备不能满足工程建设与改造的要求。

本书紧跟泵站水力特性研究的最新成果，在作者近二十余年的教学、科研和设计经验的基础上，通过局部优化方法与整体优化方法相结合的途径，对泵站前池、进水池、进水流道、泵装置以及出水流道进行了深入、系统的研究。作者以三维黏性紊流数值模拟为主要研究手段，辅以实验验证，探索泵站内部流动机理、预测水力性能，阐明外特性与内特性的联系。其成果已在南水北调东线工程得到了成功应用。本书理论浅显易懂，分析细致透彻，并与实际工程相结合，适合不同读者的需求，同时该书研究内容对其他大中型泵站更新改造有重要参考价值。

我国流域水资源分布不均，兴建更多流域调水工程是顺应未来水利事业发展的必然趋势，因此泵站工程今后还将有更大的发展。本书的出版对泵站工程的水力优化设计理论更深入的研究和应用将发挥十分重要的促进作用。

成立 刘超 颜红勤 蒋红樱
2015 年 12 月

在我国广袤的平原、河网、圩区上，分布着 10 多万座固定泵站，为抗御洪涝、干旱等灾害发挥着巨大的作用。此外，在跨流域调水、市政供排水、城市水环境治理等方面也有大量低扬程泵站在运行。每年为农业的灌溉、排涝，抗灾夺丰收，为区域调水、城镇供水、排污、排洪、保障工业生产和居民生活用水发挥着巨大作用，做出了重要贡献。我国在大型泵站的建设、管理和运行方面积累了丰富的经验，但由于研究手段等方面的问题，对影响机组性能的技术基础问题还没有完全掌握，尤其在泵站内部三维流动特性、水力优化设计、性能预测等研究方面的技术储备不能满足南水北调工程要建成 21 世纪世界一流工程的目标。本书研究正是以该工程为研究背景，同时研究成果对其他泵站更新改造有重要参考价值。

南水北调东线工程泵站具有扬程低、流量大、年运行时间长的特点，通过本项研究，揭示泵站内部流动规律、预测水力性能。研制性能优越的水泵装置形式，可有效提高泵站的可靠性、减少维修费用，最大限度地减少泵站土建工程投资。研究低扬程泵站水流流动特性和水力性能对保证泵站的安全、高效运行具有重要的理论指导意义。本书以流动分析为重点，以三维黏性紊流数值模拟为主要研究手段，辅以实验验证，按照先部分后整体，逐步深入的研究思路，探索泵站内部流动机理、预测水力性能，阐明外特性与内特性的联系。本书的主要结论和创新点如下：

(1) 基于紊流数值模拟，全面系统地研究了泵站前池、进水池、进水流道、出水流道及整体泵装置内部流动规律和水力性能。通过与已有实验成果比较，表明计算结果是可信的，采用本书研究方法并与实验研究相结合，可充实、补充实验数据，甚至减少实验工作量。

(2) 采用能适应强旋流的 RNG $k-\epsilon$ 紊流模型对进水池流场和水力性能进行数值模拟研究，提出了根据不同工况下流态情况选取不同的强旋流修正因子。根据开敞式进水池计算的固壁边界等条件，建立了考虑粗糙度的固壁边界简化处理方法。提出了从外特性和内特性两方面进行进水池水力性能优化方法，建立了基于质量加权的流速均匀度目标函数，更科学地判断断面的流速均匀性。通过计算，描述了进水池流场的基本特征。系统总结了不同流量下的进水池内流态、压力分布规律和水力性能。通过紊流计算，分析了池内产生漩涡的位置及其机理。运用数值计算方法，采用了单因素比较的方法系统研究进水池各参数对水力性能及

流态的影响。通过对进水池吸水管中各断面轴向流速分布的研究,发现一味增加断面至进水管喇叭口的距离,断面流速分布将发生改变,影响水力性能,纠正了传统认识上的误区。根据对断面各参数的分析研究,确定了水泵名义高度取值。

(3) 提出了喇叭管进水流道演化理论,运用数值分析手段进行验证。研究显示各种有压的喇叭管进水流道是在开敞式进水池形式基础上演化而成的,只要控制流道的基本尺寸,就可将各种喇叭管进水的流道统一起来。该理论为泵站进水流道优化设计提供新的思路。全面分析了各种流量下的肘形进水流道流动规律,通过数值模拟,对叶轮名义高度的取值进行了深入研究。提出了优化肘形进水流道应遵循的基本原则:主要结构参数控制在一定的范围,可保证流道良好的水力性能;流道过渡按照各断面平均流速光滑变化进行控制,就能达到肘形进水流道优化的目标。

(4) 依据泵站出水流道的水力设计基本要求,建立了出水流道水力性能优化目标:①出水流道效率最高目标,首次引入出水流道效率概念;②出水流道压能回收系数最大目标,首次引入压能回收系数作为出水流道水力性能的重要指标;③出水流道水力损失绝对值最小目标;④出水流道均匀扩散目标,均匀扩散的断面是保证流道内不发生漩涡(涡带)的基本条件。依据上述目标,采用重整化群紊流模型,对双向泵站出水室形式进行了优选。对采用曲线型出水结构的箱涵式出水流道内部流动进行分析,全面分析了出水流道内的流态。

(5) 开展泵装置整体数值模拟,采用动静耦合技术处理动静交界面数据传递难题,对包括进水流道、泵段、出水流道在内的复杂泵装置进行三维数值计算,获得了贯流泵、双向泵装置和立式泵装置等3种典型泵装置内部三维流动特性,预测了水力性能,并与实验结果进行了比较,计算结果与实验结果吻合。在整体泵装置计算的基础上,分析了泵装置条件下外特性与内特性的联系。建立了基于泵装置整体黏性计算的性能预测模型。提出了新的低扬程轴流泵装置水力损失分析方法,将泵装置的水力损失分解为转轮导叶损失和进、出水流道损失,给出了新的计算公式。结合某排涝泵站竖井贯流泵进、出水流道优化计算工程实例,采用基于整体泵装置模拟技术分别对出水流道型线,进水流道高度、宽度及型线等多参数进行了优化,提出了综合考虑土建投资和水力性能的进、出流道设计方案。

本书由成立、刘超负责撰写大纲以及全书的统稿和最终定稿工作,颜红勤负责撰写第1章,蒋红樱负责第2章2.6、2.7,第3章和第6章的相关工作。本书相关研究成果得到了“十二五”国家科技支撑计划子课题(2015BAD20B01-02)、“十二五”农村领域国家科技计划子课题(2012BAD08B03-2)、国家自然科学基金(51179167)、江苏省高校自然科学重大项目(12KJA570001)、江苏省高校优势序列学科建设工程、江苏省青蓝工程中青年学术带头人项目、江苏省六大人才高峰计划(2015-JXQC-007)、江苏省产学研前瞻性联合项目(BY2015061-12)、扬州市校企合作项目(2014-14)、江苏省水利重点项目(2014-46)、江苏省双创计划(科技)副总类、盐城515领军人才计划、扬州大学拔尖人才计划资助。本书也得到扬州大学出版基金资助。

在本书研究工作中,得到了汤方平、周济人、鄢碧鹏、杨华、金燕、杨帆等领导

老师的关心和帮助，并提出了许多中肯意见，对著者启发很大。罗灿协助完成第2章部分研究工作，崔阳、夏臣智、焦伟轩等协助书稿整理校对工作，在此一并表示衷心感谢。

作者
2015年11月

符号表

A	控制体表面的面积	L_C	漩长
A_m	进水流道进口面积	m_i	计算单元质量
A_{kout}	出水流道进口面积 (或导叶出口面积)	$\dot{m}$	质量流速
$\vec{A}_i$	计算单元面积矢量	$\overline{m}$	计算断面质量面平均值
B	进水流道进口宽度或矩形进水池宽度	n	计算断面单元数
B_1	断面宽度	p	静压力
ΔB	常数, 与表面粗糙度和剪应力有关	$\overline{p}$	时均压力
C_x	翼型阻力系数	p'	脉动压力
C_{XK}	与叶片形状和升力系数值有关的半经验系数	p_{cu}	压力均匀度
D_P	压能回收系数	p_1, p_2	进、出口断面静压
E	糙率常数	p_b	叶轮表面压力
F_i	外部源项	$\overline{p}_1$	叶轮进口平均压力
$\vec{f}$	单位质量力	P	派克里特数
g_i	重力加速度	Q	流量
G_k	由于速度梯度引起的应力生成项	$\vec{r}$	旋转坐标系中的位置向量
h_p	坎高	R	体积率
h_s	淹没深度	R_1	进水流道内侧半径
h_c	喇叭管悬空高度	R_2	进水流道外侧半径
h_w	水力损失	R_d	导叶出口各点半径
h/H	相对水深	Re	雷诺数
H	转轮名义高度	$s1, s2$	出水流道进、出口断面
H_{in}	流道进口高度	ΔS	迎风单元中心到表面中心的位移矢量
H_{net}	泵装置净扬程	S_ϕ	源项
H_{i-i}	断面至流道底部距离	t	时间
k	单位质量流体紊动能	T	后壁距
k_p	P 点的紊动动能	T_p	扭矩
K	非设计工况损失修正系数	u, v, w	笛卡尔坐标系速度三分量
l_i	沿过水方向断面中心的间距	u^0, v^0, w^0	速度分量初始值
L	进水池池长或流道长度	u_t	断面各点流速法向分量
L/t	叶栅稠密度	u_i	沿 i 方向的速度分量
		u_{xi}	计算单元轴向流速分量
		$\vec{u}$	速度矢量

$\vec{u}_i$	计算单元流速矢量	β_{sy}	进水边无撞击情况下的相应水流角
$\bar{u}$	时均流速	β_{∞}	相对运动中平均水流角
$\bar{u}_z$	断面质量加权平均轴向流速	β_d	导叶出口各点水流角
$\bar{u}_{mi}$	断面质量平均流速	ε	紊动能耗散率
u'	脉动流速	ξ_{in}	进水流道阻力系数
U	坎前流速	ξ_{out}	出水流道阻力系数
$\bar{U}_{in}$	进口断面平均流速	η_{out}	出水流道效率
U_{τ}	阻力速度	κ	卡门常数
U_P	P 点的流体的平均流速	μ	流动动力黏性系数
$v^* = \sqrt{\tau_w/\rho}$	摩擦速度	μ_t	紊流黏性系数
V	叶轮进口绝对速度	μ_{eff}	有效黏性系数
V_d	出水流道进口绝对速度	ρ	密度项
V_m	轴面速度分量	τ_w	壁面剪切应力
V_{au}	进水池喇叭口进口平均流速	τ_{ij}	应力张量
V_{zu}	流速均匀度	ϕ	迎风单元的单元中心值
$\bar{w}_1$	叶轮进口相对平均速度	$\nabla\phi$	迎风单元的梯度值
W_{∞}	相对运动中平均矢量速度	Φ	待求的因变量
x_i	坐标系坐标	Φ_{old}	前次迭代值
$\vec{x}$	笛卡尔坐标的位置向量	$\bar{\psi} = \psi/\psi_{max}$	平均流动的相对函数
$\vec{x}_0$	计算区域旋转轴的初始位置	ω	叶轮角速度
y_P	P 点到壁面的距离	ω_d	导叶出口各点角速度
Y	节点到壁面的距离	Ω	有旋特征数
z	断面的高程	$\bar{\Omega}_{ij}$	以角速度 ω_k 旋转的相对坐标系下的平均旋度张量
z_0	壁面粗糙度	Γ	广义输运系数
α	松弛因子	Γ_{ϕ}	扩散系数
$\alpha_k, \alpha_{\varepsilon}$	有效普朗特数	$\vec{\Omega}$	旋转坐标系的角速度分量
β_{out}	叶栅出口水流角	$2\vec{\Omega} \times \vec{v}_r$	哥氏加速度
β_{Br}	平均流动的不同流面上研究工况下进水边的相对水流角	$\vec{\Omega} \times \vec{\Omega} \times \vec{r}$	离心加速度

目录

Contents

序

前言

符号表

第 1 章 绪论 1

1.1 概述 1

1.2 泵站研究现状及进展 2

1.3 本书的研究思路和研究内容 12

第 2 章 泵站前池流态改善整流机理分析 14

2.1 概述 14

2.2 侧向进水泵站流态基本特征 14

2.3 流态改善主要措施 15

2.4 前池流态改善底坎整流机理 15

2.5 前池流态改善 Y 型导流墩整流机理 22

2.6 其他措施整流机理 26

2.7 整流措施在工程中综合应用 28

2.8 本章小结 32

第 3 章 泵站开敞式进水池流动机理与水力性能 33

3.1 引言 33

3.2 开敞式进水池主要参数 33

3.3 数值计算方法与边界条件 34

3.4 数值模拟方案 40

3.5 水力性能优化目标函数 40

3.6 计算结果与分析 42

3.7 PIV 实验验证 56

3.8 讨论 58

3.9 本章小结 59

第 4 章 立式泵站进水流道演化与水力性能 60

4.1 引言 60

4.2	进水流道演化	60
4.3	喇叭管进水流道流动特性及水力性能	62
4.4	肘形进水流道流动特性与水力性能	70
4.5	本章小结	81
第5章	立式双向泵站出水流道流动特性与水力性能	83
5.1	引言	83
5.2	双向泵站出水流道内部流动特性及水力性能	83
5.3	本章小结	89
第6章	低扬程泵装置内部流动与水力性能预测	90
6.1	引言	90
6.2	数值计算方法	90
6.3	贯流泵装置内部流动与水力性能	93
6.4	对称翼型叶轮双向泵装置流动特性与水力性能	100
6.5	低扬程立式泵装置内部流动与水力性能预测	103
6.6	整体泵装置流态与外特性的关系	109
6.7	低扬程轴流泵装置水力损失分析	112
6.8	基于整体泵装置计算的流道优化水力设计算例	115
6.9	本章小结	128
第7章	结论与展望	129
7.1	结论和创新点	129
7.2	有待进一步研究的问题和展望	130
参考文献		132
作者简介		140

第 1 章

绪论

1.1 概述

在中国广袤的平原、河网、圩区上，分布着 10 多万座固定泵站（总装机容量 8000 多万 kW），为抗御洪涝、干旱等灾害发挥着巨大的作用。此外，在跨流域调水、市政供排水、城市水环境治理等方面也有大量低扬程泵站在运行。每年泵站为农业的灌溉、排涝，抗灾减灾，为区域调水、城镇供水、排污、保障工业生产和居民生活用水发挥着巨大作用，作出了重要贡献。进入 21 世纪，我国正在兴建南水北调工程，它是一项造福子孙万代的工程，其中的东线工程是从长江下游引水，沿京杭大运河通过十三级泵站逐级提水北送，向京津地区供水，改善和解决北方地区日益恶化的生态环境和水资源危机。

南水北调工程对国民经济影响巨大，其中核心工程之一——泵站的运行既要高效节能，又要安全可靠。我国在大型泵站的建设、管理和运行方面积累了丰富的经验，但由于研究方法和手段等方面的问题，对影响机组水力性能的基础理论问题还没有完全掌握，尤其在泵站内部三维流动特性、水力优化设计、水力性能预测等研究方面技术储备不能适应南水北调工程要建成 21 世纪世界一流工程的宏伟目标。南水北调东线工程泵站具有扬程低、流量大、年运行时间特长（5000~8000h/a）的特点，要研制性能优越的泵站（装置）形式，提高泵站的水力效率、增强安全性、减少维修费用和减少工程投资，有必要对泵站内部流动和水力性能进行深入研究。

研究泵站内部流动和水力性能的方法主要有理论分析、模型实验和数值模拟等方法。大型泵站建设的前期通常要进行选型和试验比选，模型试验成为目前主要的研究手段，但模型试验主要获取的是泵站（装置）的外部特性，具有一定的局限性。研究者要根据经验和大量的实验方案进行研究，研究周期长，成本高。近年来，随着计算机技术的发展和计算流体力学理论的日益完善，泵站内部流动数值模拟正逐步成为泵站研究人员的工具，数值模拟方法可获得泵站内部详细信息、预测性能，形象直观，能进一步深入研究其流动机理。当然，数值方法的可信性和数值模拟结果的准确与否

必须得到内流场和外特性实验的验证。

本书研究以南水北调东线工程及大中型泵站技术改造为背景,运用三维紊流模拟技术,辅以实验测试,按照先部分后整体逐步深入的研究思路,对涉及影响泵站水力性能的过流结构(前池、进水池、进水流道、出水流道、整体泵装置)进行全面系统的研究,揭示泵站内部流动规律、预测水力性能,指导泵站设计和技术改造。研究成果将对保证泵站的安全、高效运行具有重要的理论指导和现实意义。

1.2 泵站研究现状及进展

泵站(装置)包括进水结构、叶轮、出水结构(典型立式轴流泵站结构见图1.1)^[1]。进水结构包括前池、进水池及进水流道,其合理的水力设计可以为水泵提供良好的进水条件,对改善水泵装置的能量性能和汽蚀性能有很大影响。为保证轴流泵安全经济运行,进水结构除需满足一般水工设计的要求及尽可能节省土建投资外,还应满足保证进水能力、水流平顺稳定、水力损失小、避免回流及漩涡等水力设计的要求。出水结构包括导叶、出水流道,其主要功能是有效地扩散水流、回收动能。出水结构水力损失占泵站净扬程的比重较进水结构大,因此出水结构的流动状况将直接影响泵站总体效率的发挥。

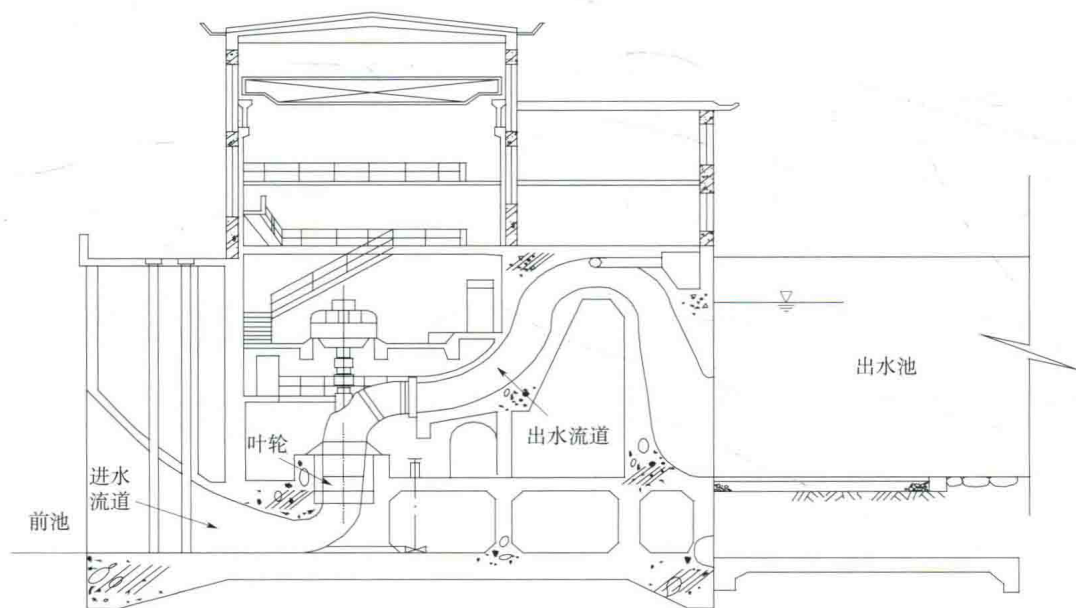


图 1.1 典型立式轴流泵站示意图

从工程应用效果来看,不仅要求水泵处于高效率区安全可靠运行,而且要求包括水泵在内的泵站(装置)整体性能较好^[2]。为了提高泵站的性能,国内外学者开展了大量的研究,取得了许多可供工程应用的研究成果。从泵站研究的现状和发展趋势来看,主要集中在以下几大研究方向。

1.2.1 泵站前池和进水池研究

前池作为引渠与进水池的衔接段,它的作用是将水流平顺均匀地输送给进水池,为水泵提供良好的吸水条件。泵站布置形式按照进水方式不同可分为正向进水和侧向进水两种。正向进水如设计不当,会引起前池内产生回流等不良水流流态。侧向进水时,易引起主流脱壁、漩涡及螺旋流动等现象,甚至引起流道进口产生漩涡。由于不良的水力设计引起的泵站前池内出现漩涡和回流等不良流态,直接影响水泵正常运行,降低其装置效率。现场实测和模型试验研究均表明,泵站前池的流态直接影响水泵的正常运行,不良流态可降低泵站效率的3%~7%,因而研究泵站前池流态对于提高泵站效率有重要意义^[3]。

国内外研究人员开展了大量的泵站进水流态试验研究工作^[4-7]。根据泵站进水流态整流机理,大致分为四大类。第一类是增加前池长度,减少前池扩散角,这种方法往往受工程投资的限制,目前很少采用。第二类是设导流板、导流墙、导流栅、组合式导流墩等导流措施^[8,9]。导流措施改善了泵站前池进水流速分布,消除了大面积的回流区,提高流速分布均匀度,但仍存在一些明显不足,主要表现在:不利于施工;如导流体设计不当,导流体后的脱流区易产生卡门涡列进入泵站进口,直接导致漩涡进入泵体,引起机组振动。第三类是设置底坎和立柱^[10,11],这类措施是利用漩涡原理改善流态。20世纪70年代,罗马尼亚夫拉明达灌区泵站首次采用底坎整流措施有效地改善了泵站前池流态;田家山等^[12]在泵站整体模型试验的基础上系统地研究了前池水流运动,成功地在国内大中型泵站前池中设置底坎改善了流态,并提出了设计底坎的经验公式。成立等^[13]数值模拟了正向进水前池中无任何措施和增设底坎整流措施的流态,研究成果对正向扩散前池流态改善有借鉴价值和实际意义。周济人、冯旭松等^[14-16]针对侧向进水和多站联合运行的复杂进水前池流态,通过试验,研究出组合底坎、底坎结合立柱等多种形式的整流形式,取得了显著效果,并在江苏省大中型泵站技术改造中得到推广应用。第四类为压水板^[17],该措施既可改善流态,又能部分解决城市污水前池淤积问题。高传昌等^[18]采用非连续底坎、非连续挑流坎与压水板3种整流措施相结合的方案后,整个前池与进水池内的流态得到较好的改善。

开敞式进水池在中小型泵站中应用较广。影响水泵安全运行的主要是进水池内的漩涡,漩涡主要有附底涡、附壁涡和水面涡^[19-21]。Akalan^[22]通过大量实验提出了漩涡含气量对水泵的水力性能影响关系,指出当吸气涡含气量达到1%,水泵效率下降明显,当超过10%以上,水泵将不能工作。涡带的强度和产生位置影响因素较多,Anwar^[23]分析了涡的产生机理并提出了初步消涡措施。Charles^[24]提出了池宽设计的池内平均流速保持在0.3m/s左右的设计经验。为避免水泵汽蚀问题,Iversen^[25]首次给出了高比转速水泵的淹没深度取值范围。Fraser^[26]最早研究雨水泵站进水池内漩涡问题,提出了解决方案。Matihel Ansar^[27]详细分析了矩形进水池进口有切向回流和无切向回流条件下的水泵进水池内流态情况。进水池的设计参数选取影响水泵水力性能的发挥,日本农业工程协会^[7]、Paterson^[28]、美国陆军工程兵团^[29]、潘咸昂^[30]、钱义达^[31]、刘超^[32]以及教材^[1]等根据大量的实验对进水池悬空高、淹没深度、后壁距、池宽、池长等重要尺寸给出了参考取值范围,但这些设计参数有较大出入,分析其原因,可能是实验研究条件、实验标准等存在差

异。Padmanabhan^[33]对进水池流态实验中的模型比尺效应进行了分析。

从研究手段和方法来看,对泵站前池(进水池)进水流态的研究主要是通过试验观测了解流场分布和宏观水流现象。随着 PIV、LDV、PDA 等现代测试技术的出现,利用现代测量手段实现泵站前池(进水池)流场的可视化成为试验研究发展的方向。随着计算机硬件的发展和数值计算方法的不断改进,流场模拟开始应用于研究水流流动。赵毅山等^[34,35]应用混合有限分析法与交错网格,模拟了污水泵站高位井的平面定常和非定常流场,数值模拟流态与实测数据基本吻合。高秋生^[36]率先在国内采用三维 $k-\epsilon$ 紊流模型对典型的正向扩散泵站前池进行了数值模拟,成功地解决了既有自由水面又有压水流的流动计算问题,给出了前池完整的三维空间流场。成立^[37,38]采用三维紊流模型系统研究了侧向进水泵站前池内的弯道水流运动,并提出一种新型组合底坎形式,通过数值模拟技术探讨了底坎二维、三维整流机理。史志鹏等^[39]针对开敞式进水池水流流态问题建立了相应的概化模型,从水力学角度提出了泵站开敞式进水池的优化体型和最佳工作水位的概念。吉庆丰^[40]应用水平方向上是正交贴体坐标系、垂直方向上是笛卡尔坐标系的混合数值网格系统和三维紊流数值模拟的方法,模拟了泵站前池水流流态。Jose Matos Silva^[41]、Songheng Li^[42]采用美国 Iowa 大学研制的计算流体力学通用软件(U2RANS)^[43,44]计算一个实际水泵吸水池内流场,并与 Nakato^[45]的实验结果进行了比较,研究显示,虽然在泵喇叭口处流速分布与实验相同,但在吸水管内同心圆流速分布有较大误差,通过对不同进水流速分布条件进行数值实验,发现流速分布与进水条件关系不明显,进水条件影响吸水管内漩涡强度,计算误差主要是由于紊流计算中壁面函数设置与实际壁面不一致造成的。H wang^[46]等对一圆形进水池进行了流场模拟并与实验进行了比较,获得了特殊形式进水池的流动特性。Constantinescu^[47]采用 Sotiropoulos^[48]提出的修正的双方程 $k-\epsilon$ 紊流模型成功地对长矩形进水池进行了模拟,预测了水面涡和附壁涡的位置和长度,并对复杂涡的结构进行了深入分析。流场测试方面,Rajendran^[49,50]采用包括两个双脉冲激光器、单 CCD、图像转换器等二维 PIV 对进水池附近流场进行测试,拍摄区域 $70\text{mm} \times 70\text{mm}$,获得了不同位置瞬时和时均流速场和涡量场,对文献[47]的计算结果进行了验证,两者吻合较好;张波涛^[51]应用 2D-PIV 技术测量封闭式水泵吸水池内部流场。李大亮^[52]应用 3D-PIV 技术测量开敞式进水池吸水喇叭口下方的流场。

1.2.2 泵站进、出水流道研究

泵站进水流道的作用是将泵站前池内的水流引入水泵叶轮室,因此进水流道内的水流运动状况直接影响水泵的进水工作条件,对水泵能否高效可靠运行有直接的影响。出水流道的主要作用是将导叶出口的较高流速进行扩散,回收旋转动能。因此出水流道内流态和动能回收情况直接影响整个泵站效率的高低。常用的泵站进水流道包括肘形、簸箕形、钟形、双向蜗壳等形式,出水流道则包括直管式、虹吸式、低驼峰、蜗壳式、箱涵式等^[1]。

早期泵站进水流道的设计主要依据工程经验,采用的方法为基于一维流动理论的设计方法,即流道内各过水断面平均流速均匀变化^[53,54]。这种方法虽然便于工程设计中使用,但缺点是未考虑流道各断面的流速分布对装置水力性能的影响。随着紊流数值模拟技术的发展,人们认识到应采用基于流动分析基础上的三维流道水力优化方法。陆林广^[55]

在数值计算基础上,提出进水流道水力设计的进口流速均匀度和速度加权平均角度两个优化目标函数。刘超^[56]给出了流道设计的控制参数,为流道优化提供了新的思路。王业明^[57,58]、郭娟^[59]等相继开展了大型轴流泵站实体造型及CAD研究,研制了工程实用的CAD软件平台。

流场测试是研究进出水流道最直接、最有效的方法。目前流场测试的手段主要有毕托球、五孔探针、激光流速仪(LDV)和粒子成像速度仪(PIV)。20世纪70年代,北村升^[60]研究了水泵吸水管路内水流运动,给出了吸水管内较为完整的流速场;Krishna^[61]研究了轴流泵进水口处的回流现象。80年代,吴君安^[62]探讨了离心泵吸水管内的流动,姚志民^[63]采用五孔探针测试了混流泵内部流速场,刘超^[64]首次运用微型五孔测球、微型毕托球对大型立式轴流泵站3种形式(肘形、钟形、双向蜗壳)进水流道内部流场进行了全面测试,获得了进水流道内较全面的流场特性。90年代以后,汤方平^[65]率先采用PIV技术获得立式轴流泵装置条件下吸水喇叭口和叶轮叶槽之间的全流场。

模型试验是研究进出水流道水力性能的重要研究手段,在高精度的试验台上,通过测试不同方案的泵站(装置)外特性如能量、汽蚀、进口淹没深度等,比选进出水流道和水泵水力模型,这是国内外最终验证水泵站(装置)优化设计成果的有效方法^[66,67]。目前国外的试验台的功能主要是开展水轮机模型试验,著名的试验台有奥地利的Adelize国家独立实验室等。国内试验台较多,如哈尔滨东方电机厂、中国水利水电科学研究院、天津水利勘测设计研究院、河海大学、江苏大学、扬州大学等研究机构 and 高校,他们均具备开展高精度试验的能力,进行了大量的研究工作。如张庆范^[68]以两种贯流泵装置和立式轴流泵装置在同样测试条件下进行模型试验研究,论证了在5m以下采用贯流泵装置的优点。陈松山等^[69]为探求大型泵站竖井流道的标准化水力设计方法,对基于规则化设计的竖井进水流道进行了三维湍流数值模拟,揭示不同水平截面和纵向截面的流速分布,分析水泵入口断面的速度分布均匀度、加权平均入流角以及流道水力损失随流量变化规律。陈毓陵^[70]开展双向泵站进水室防涡措施的研究。刘超^[71]通过研究双向开敞轴流泵装置,提出了独特的曲线喇叭管出水结构,取得了在低扬程泵装置流道研究的突破。陆林广等^[72]为了定量研究大型泵装置导叶出口水流的速度环量对出水流道水力性能的影响,提出了泵装置导叶出口断面水流的速度环量定量表示方法和平均角速度的测量方法。周济人^[73]研究了箱涵式双向进水流道内的涡带发生规律及有效的消涡防涡措施,对影响工程投资及装置性能的主要尺寸如悬空高、流道宽度及吸水喇叭管进行了试验研究,指出流道尺寸在常规取值范围内对装置效率的影响较小,进水流道的主要问题是涡带。汤方平^[74]通过对一组带泵和不带泵的装置的水力损失进行测试,指出了进水流道损失与流量基本成二次方关系,而出水流道则不满足这一关系,提出了出水流道损失与导叶出口环量有密切关系的重要观点。汤方平^[75]给出了泵装置条件下的利用泵段性能预测泵装置扬程的计算公式。

采用数值模拟的方法研究进出水流道内部流动状况已成为趋势。阎超^[76]应用计算流体力学来研究泵站进水流道,针对贯流泵站装置特点将三维流道简化成二维轴对称问题求解。欧鸣雄等^[77]对考虑叶轮影响和不考虑叶轮影响下的进水流道内部流场进行计算和分析,研究发现不考虑叶轮影响下的进水流道内部流场特征几乎不受流量变化的影响,而考虑叶轮影响的进水流道情况则比较复杂。陈红勋^[78]对大型泵站进水流道内部流动进行分

析后,提出了势流假定下的大型泵站进水流道内部流动的全三维直接边界元的解析方法,并针对某 30° 斜轴泵站进水流道设计方案进行了计算。陆林广^[79]开展了进水流道的三维紊流计算,对进水流道和出水流道内流态进行了分类。成立^[80]将三维数值计算用于肘形进水流道设计方案比选。杨帆等^[81]分析了钟形进水流道的流动特性,归纳了不同工况喇叭管进出口断面的速度分布规律,预测了流道的水力损失并揭示了水力损失规律。

1.2.3 低扬程泵站水泵叶轮研究

泵站的核心是水泵,水泵叶轮水力性能的高低直接影响泵站设计的成败。南水北调东线工程泵站扬程多处于 $3\sim 7\text{m}$,水泵泵型在选择时宜采用轴流泵形式。轴流泵的特点是流量大、扬程低和比转数高($500\sim 1500$),已大量应用于农田排灌、城市防洪、远距离调水等工程,发挥了巨大的社会效益。低扬程泵站水泵叶轮的研究成果集中在以下几个方面。

1. 水力模型设计理论

水泵水力模型的设计可看作水力机械反问题研究^[82],即根据设定的流动条件,计算出流动边界。目前,轴流式水力机械设计方法主要有二维、准三维和全三维方法。

二维设计方法主要有升力法、圆弧法和奇点分布法^[83-85]。前两种方法是最常用的设计方法,Wislicenns^[86]给出了用于轴流和混流泵水力设计的理论。升力法是一种半理论半经验的设计方法,是一种应用单个翼型绕流特性并进行修正的叶轮设计方法。圆弧法是利用绕圆弧薄翼型叶栅流动的特性设计叶轮的方法。升力法是最早应用于轴流泵设计的方法,目前仍广泛应用于水泵设计。赵锦屏^[87]、金平仲^[88]根据设计经验相继提出了变环量设计方法,汤方平^[89]利用平面叶栅试验数据结合叶片变环量分布设计高比转数轴流泵,并提出了平面叶栅设计法。上述设计方法可看作升力法的改进。奇点分布法是解决理想流体平面有势流动的常用方法之一,首先被用来求解单翼型和直列翼栅绕流,后来用于平面环列翼栅绕流计算。对于求解平面环列叶栅绕流的奇点分布法,最常用的方法是采用级数表达环量分布密度。李芬花^[90]提出了一种适用于奇点法解水力机械内部流动的进口边界条件给定方法,建立了直接求解离散点涡方法计算薄翼平面环列翼栅的数学模型和算法。奇点分布法虽然能较好地反映泵内 S_1 流面流动情况,但由于计算较为复杂,不便于设计人员掌握,因而应用较少。

水力机械中的流动是非定常的三维黏性流动^[91],设计中还不可能充分考虑各种因素。目前大多数新的水力机械的设计方法是以吴仲华^[92]在50年代提出的两类相对流面理论(S_1 流面和 S_{2m} 流面)为基础发展起来的。准三维反问题计算以 S_1 流面和 S_{2m} 流面计算为基础。由于轴流式叶轮内流动的周向不均匀性,通常采用基于 S_1 流面的准三维设计方法^[93]。 S_1 流面通过 S_{2m} 流面计算给定。 S_{2m} 流面计算时,通常根据经验给定叶轮进、出口来流条件,这种方法忽略了导叶和叶轮间流动的相互影响。 S_1 流面上的叶型设计方法主要有奇点法、当量源法、流线迭代法、变域变分法以及求解关于势函数或流函数的二阶偏微分方程的有限元法和有限差分法等方法。彭国义^[94]采用基于 S_1 流面的准三维有旋流动设计方法,使得轴流式水轮机叶轮设计计算更为合理。罗兴琦^[95]基于 S_{2m}/S_1 流面流动迭代计算的准三维正问题分析,提出了一种简单实用 S_1 流面上的叶片迭代修正的准三维设计方法,并在水轮机和混流泵叶轮设计中得到了应用。