

大中型灌排泵站 节能运行技术研究

主 编 许建中
副主编 肖若富



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

大中型灌排泵站 节能运行技术研究

主 编 许建中

副主编 肖若富



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书在“大中型排灌泵站改造与高效运行关键技术及设备”课题研究的基础上,分析研究了我国大中型排灌泵站更新改造与安全高效运行技术,重点研究内容包括离心泵三维数字化水力优化设计、宽运行范围轴流泵水力模型开发与应用、低扬程泵站进水流道数字化设计、轴(混)流泵机组工况调节、大型低扬程水泵的优化选型、大型灌排泵站多目标优化选型技术、泵站(群)优化调度理论及应用、泵站改造与运行标准体系研究以及大中型灌排泵站节能技术综合示范应用等。

本书可供相关专业院校师生及科研人员在教学、科研、生产工作中使用,亦可供从事泵站工程规划、设计和管理工作者参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

大中型灌排泵站节能运行技术研究 / 许建中主编

— 北京: 中国水利水电出版社, 2017.2

ISBN 978-7-5170-5205-0

I. ①大… II. ①许… III. ①排灌工程—泵站—节能—研究 IV. ①S277.9

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第036558号

书 名	大中型灌排泵站节能运行技术研究
作 者	DAZHONGXING GUANPAI BENGZHAN JIENENG YUNXING JISHU YANJIU
出版发行	主编 许建中 副主编 肖若富 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 (营销中心)
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	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 14印张 332千字
版 次	2017年2月第1版 2017年2月第1次印刷
定 价	48.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

《大中型灌排泵站节能运行技术研究》

编写单位及人员

编写单位：中国灌溉排水发展中心

中国农业大学

武汉大学

扬州大学

河海大学

主 编：许建中（中国灌溉排水发展中心）

副 主 编：肖若富（中国农业大学）

编写人员：（按姓氏笔画排序）

于永海（河海大学）

王福军（中国农业大学）

许建中（中国灌溉排水发展中心）

汤方平（扬州大学）

李 娜（中国灌溉排水发展中心）

李端明（中国灌溉排水发展中心）

成 立（扬州大学）

肖若富（中国农业大学）

周龙才（武汉大学）

周济人（扬州大学）

杨 魏（中国农业大学）

钱忠东（武汉大学）

胡大明（河海大学）

姚志峰（中国农业大学）

程 千（武汉大学）

梁金栋（扬州大学）

前 言

灌排泵站是保障农业稳产高产的关键性基础设施，但是，我国的灌排泵站大多建于20世纪80年代及以前，限于当时的经济、技术等条件，设备选型不配套、施工质量不可靠等，建设之初就形成了“先天不足”，重建轻管又引起“后天失调”，导致工程整体效益长期得不到有效发挥。2005年以来，中央一号文件连续9年提及“灌溉排水泵站更新改造问题”，2006年国家启动实施了“中部四省大型排涝泵站更新改造”项目，以此项目作为试点，为将来全面启动大中型灌溉排水泵站更新改造项目奠定基础。同时，为支撑此项目的顺利实施，解决项目实施中的技术难题，科技部和水利部将“灌区大型泵站改造关键技术研究”课题列入“十一五”国家科技支撑计划进行研究。课题在分析我国大型灌排泵站更新改造技术现状和技术需求的基础上，重点研究了泵站技术经济指标体系及其综合评价方法、泵站工程老化及设备故障诊断方法、泵站系统模拟仿真及测试技术、泵站系统优化配套与运行管理技术和泵站相关标准等内容。

“中部四省大型排涝泵站更新改造”项目取得了圆满成功，成效显著，2009年国家又启动实施了“全国大型灌溉排水泵站更新改造”项目。同时，“灌区大型泵站改造关键技术研究”课题取得的成果在试点泵站应用后，提高泵站装置效率10%以上，降低能源单耗 $1.0\text{kW}\cdot\text{h}/(\text{kt}\cdot\text{m})$ 以上，为中部地区大型排涝泵站更新改造项目顺利实施提供了强有力的技术支撑。为了支撑全国大型灌溉排水泵站更新改造工作，科技部和水利部又将“大中型排灌泵站改造与高效运行关键技术及设备”课题列入“十二五”国家科技支撑计划进行研究。课题由中国灌溉排水发展中心主持，中国农业大学、武汉大学、扬州大学、河海大学等单位共同参与完成。课题经过近五年的研究，重点研究了离心泵及泵装置系统的数字化设计，轴流泵及泵装置系统的数字化设计，泵站运行调控与节能技术，高性能水泵模型系列型谱，泵站标准化技术以及灌排泵站改造与高效运行工程技术应用。

本书共分9章，主要内容包括离心泵三维数字化水力优化设计、宽运行范围轴流泵水力模型开发与应用、低扬程泵站进水流道数字化设计、轴（混）流泵机组工况调节、大型低扬程水泵的优化选型、大型灌排泵站多目标优化

选型技术、泵站（群）优化调度理论及应用、泵站改造与运行标准体系研究以及大中型灌排泵站节能技术综合示范应用等，可供相关专业院校师生及科研人员在教学、科研、生产工作中使用，亦可供从事泵站工程规划、设计和管理工作者参考使用。

本书由“大中型排灌泵站改造与高效运行关键技术及设备”课题组编著，各章节主要参编人员：第1章由王福军、姚志峰编写；第2章由汤方平、周济人、成立编写；第3章由周济人、成立、梁金栋编写；第4章由钱忠东、程千、周龙才编写；第5章由于永海、胡大明编写；第6章由肖若富、杨魏编写；第7章由周龙才、李娜编写；第8章由许建中、李端明编写；第9章由肖若富、李端明、许建中编写。本书由许建中任主编，肖若富任副主编。

“大中型排灌泵站改造与高效运行关键技术及设备”课题研究过程中，得到了山西省运城市尊村引黄灌溉管理局、安徽省水利水电勘测设计院等单位及相关专家的大力支持，在此一并表示衷心的感谢。由于编者水平所限，书中缺点和疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

2016年8月

目 录

前言

第 1 章 离心泵三维数字化水力优化设计	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究进展	1
1.3 离心泵叶轮三维优化设计平台	3
1.3.1 叶片形状参数化	3
1.3.2 求解软件的集成	4
1.3.3 优化算法的组合策略	6
1.3.4 离心泵自动优化设计平台	8
1.4 离心泵叶轮三维数字化优化设计	9
1.4.1 计算模型	9
1.4.2 数值模拟设定	10
1.4.3 目标函数和约束条件	11
1.4.4 优化过程运行	12
1.4.5 优化结果分析	15
第 2 章 宽运行范围轴流泵水力模型开发与应用	19
2.1 工程应用需求	19
2.2 轴流泵水力模型多工况设计理论与方法	20
2.2.1 叶片的参数化造型方法	20
2.2.2 用户界面的组成	23
2.2.3 优化方法	24
2.2.4 轴流泵叶轮自动优化设计平台的架构	25
2.2.5 软件集成的关键技术	26
2.3 ZM55 轴流泵水力模型开发	27
2.3.1 凌城泵站主水泵选型分析	27
2.3.2 叶轮优化设计	29
2.3.3 导叶优化设计	31
2.3.4 泵段模型试验	36
第 3 章 低扬程泵站进水流道数字化设计	41
3.1 进水流道数字化多目标优化模型	41
3.1.1 进水流道优化水力设计的目标函数	41

3.1.2 进水流道数字化多目标优化模型	42
3.2 进水流道几何参数对流道水力性能的影响	43
3.2.1 肘形进水流道	43
3.2.2 钟形进水流道	52
3.3 进水流道数字化设计软件的研发	64
3.3.1 基于 iSIGHT 的进水流道多目标自动优化平台	64
3.3.2 进水流道数字化设计软件的开发	65
3.4 本章小结	70
第 4 章 轴(混)流泵机组工况调节	71
4.1 轴流泵可调式后置导叶优化调节研究	72
4.1.1 泵内水力损失	72
4.1.2 导叶调节原理	73
4.1.3 实例分析	74
4.2 轴流泵可调式前置导叶优化调节研究	79
4.2.1 研究方法及数学模型	80
4.2.2 前置导叶水力设计	80
4.2.3 前置导叶调角改善泵能量特性	82
4.2.4 前置导叶调角对轴流泵汽蚀特性的影响	88
4.3 轴(混)流泵“双调”技术研究	89
4.3.1 “双调”机组配置及选型	89
4.3.2 “双调”机组特性	91
4.3.3 “双调”机组运行优化计算软件	95
第 5 章 大型低扬程水泵的优化选型	99
5.1 轴流泵水力模型系列	100
5.2 轴流泵模型性能试验数据拟合方法	100
5.2.1 B 样条曲线的定义	101
5.2.2 二次 B 样条曲线	102
5.2.3 三次 B 样条曲线	102
5.2.4 三次 B 样条曲线的反算法	103
5.2.5 B 样条曲线反算法的优化	104
5.2.6 曲线中尖点的处理	105
5.3 “等扬程加大流量”轴流泵选型步骤	105
5.4 轴流泵水力模型系列及选型应用软件开发	106
5.4.1 软件开发思想与实现技术	106
5.4.2 软件各部分组成及设计流程	108
第 6 章 大型灌排泵站多目标优化选型技术	115
6.1 现行泵站选型方法存在的问题	115

6.2	以节能和提高运行稳定性为目标的泵站优化选型技术	116
6.2.1	泵站流道的参数化表示	116
6.2.2	优化目标函数	118
6.2.3	水泵与泵站进出水系统的耦合作用的目标函数计算	119
6.2.4	泵站节能和稳定运行的优化策略	121
第7章	泵站(群)优化调度理论及应用	123
7.1	“双调”轴(混)流泵站站内运行优化	123
7.1.1	分解协调模型	123
7.1.2	协调层的动态规划模型分解协调模型	123
7.1.3	区间分割法求水泵的最优转速	126
7.1.4	“双调”轴流泵站运行优化计算软件	127
7.2	灌区梯级泵站运行优化调度	128
7.2.1	梯级泵站级间流量平衡	128
7.2.2	灌区长渠道梯级泵站变频调速的优化计算	129
7.2.3	基于水力学仿真的灌区梯级泵站优化调度	136
7.3	圩区排涝泵站群优化运行模型	139
7.3.1	圩区排涝泵站群预报排水模型	140
7.3.2	日常排水模型	142
7.3.3	某排涝区泵站群运行优化	144
第8章	泵站改造与运行标准体系研究	152
8.1	研究背景和意义	152
8.2	现有泵站技术标准	153
8.2.1	我国泵站技术标准发展历程	153
8.2.2	国内泵站现行技术标准	154
8.2.3	国外泵站相关标准	156
8.3	我国现有泵站技术标准体系	160
8.3.1	标准体系定义及要求	160
8.3.2	现有泵站技术标准体系基本情况	160
8.3.3	现有泵站技术标准体系存在的问题	172
8.4	泵站改造与安全运行技术标准体系	174
8.4.1	泵站改造与安全运行技术标准体系表	174
8.4.2	体系中需要制修订的技术标准及制修订时间	174
第9章	大中型灌排泵站节能技术综合示范应用	177
9.1	某泵站二级站节能改造综合示范应用	177
9.1.1	二级站进水系统改造方案	178
9.1.2	二级站水泵改造方案	186
9.1.3	二级站现场测试	186

9.2 梯级泵站优化调度示范应用 188

9.2.1 泵站基本资料 188

9.2.2 站内优化 188

9.2.3 基于仿真的运行优化 190

9.3 大型立式轴（混）流泵机组运行工况“双调”技术应用 194

9.3.1 应用泵站的基本情况 194

9.3.2 泵站“双调技术”改造 195

9.3.3 改造后运行效果及效益分析 198

9.4 泵站水泵装置多目标优化选型技术应用 202

9.4.1 应用泵站概况及优化目标 202

9.4.2 优化策略 202

9.4.3 水泵选型优化 203

9.4.4 进水池优化 206

9.4.5 实施效果 210

第 1 章 离心泵三维数字化水力优化设计

1.1 研究背景及意义

离心泵被广泛应用于电力、化工、航空、水利、航海、运输等工业领域，担负着维持流程、泵送液体、提供能量的重要任务，在国民经济中占有非常重要的地位，是工农业的心脏设备。然而，离心泵也是最主要的能源消耗设备之一。因此，叶轮作为离心泵中重要的能量转换部件，对其进行结构优化、提高其性能对节约能源、降低生产经济成本有着重要的现实意义。

离心泵叶轮的优化设计是通过一定的优化方法，获得叶轮的最佳几何参数组合，其优化结果可以为离心泵进一步的科学研究提供必要依据；此外，叶轮的优化设计研究也是计算机辅助设计、制造、虚拟设计等系统仿真等方面的重要组成部分。通过对离心泵叶轮的三维优化设计，对其内部流动进行合理而准确的性能预测；通过对叶轮进行优化设计后得到的优化结果分析，可以获得离心泵叶轮内在的流动特性及流动规律。

因此，离心泵叶轮的三维优化设计研究对离心泵性能预测、改善内部流体的流态及性能、探讨新的叶轮设计规律、指导实际生产等均有重要的意义。

1.2 国内外研究进展

在水力机械的优化设计研究中，早期只对叶片的翼型、叶栅等优化，而对于离心泵的零部件的研究往往则通过实验手段。20 世纪 50 年代，由于计算流体力学的发展，人们开始从流体计算入手，结合经验修正，进行叶栅的优化。20 世纪 60 年代至 80 年代，人们开始运用计算机技术和最优控制理论求出叶片的最优速度分布来进行叶栅设计。自 20 世纪 80 年代以来，离心泵的优化设计方法主要进行了以下几方面的研究：

(1) 速度系数法。速度系数法是泵设计中常用的方法，通过对已有的优秀水力模型进行归纳统计得到。已经有了一批经过优化的优秀水力模型，如 IB 型、IS 型、WB 型和 BP 型等。随着计算机技术的不断发展和应用，人们建立了优秀的水力模型库，可随时吸收先进的优秀模型，及时优化各种速度系数，紧跟当前的水泵先进水平。其中，20 世纪 90 年代初，张俊达和何希杰等人对优秀的水力模型的主要参数进行了较详细的研究，对参数的规律性进行了分析和讨论，指出了离心泵设计的总趋势，同时给出了许多有价值的水泵设计经验公式，对离心泵的水力设计和性能分析将具有指导意义；陈次昌教授曾用多元回归分析法对离心泵叶轮的几何参数进行统计，得到了一些有

效的计算公式；张俊达曾经统计了166种离心泵和混流泵的各种系数，得到了有价值的结果。速度系数法应用广泛，但是这种方法所设计的泵的性能很难超过现有的水平。

(2) 损失极值法。提高泵的效率是水泵研究者们的重要课题，而效率是与损失相对应的，最小的损失往往对应着最大的效率。所以，损失极值法就是建立各种损失与泵的几何参数之间的关系。该方法是在保证设计工况要求的扬程和流量的条件下，通过几何参数的不同组合，得到总损失为最小值。该方法严格按照数学理论，应用最为普遍，也较易实现，但是就每项损失来说是难以准确得到的；另外，除设计变量外，其他的参数都要靠经验来赋值，这又增大了优化设计的局限性；再则，在优化过程中只注重损失与几何参数的关系，而忽略了叶轮流道形状、前后盖板形状和叶片形状等对离心泵性能的影响，因而也有其局限性。

(3) 反问题设计方法。反问题优化设计方法是根据给定的一个理想压力或速度分布来求解叶型形状，得到一个合理的叶型，但反命题方法设计最大的难点在于难以给定一个理想的初始压力或速度分布。

离心泵叶片的全三维反问题方法从原理上可分为两大类。第一类是从反问题出发直接考虑叶轮的设计，根据叶片表面的相对流速得到叶片的方程。第二类是从正问题的方法出发，把正问题的解作为叶片反问题设计的参考和依据。常见的反问题优化设计方法主要有复特征线法、虚拟气体法和势流函数有限差分法，它们的共同之处就是采用给定叶片表面的速度分布进行叶型设计，使叶型表面速度分布与表面气流参数能有机地结合起来，设计者可以在较宽广的范围内选择所需要的速度分布，然后设计出相对应的叶型。

Zangeneh 教授于20世纪90年代提出了基于叶片载荷理论的反问题设计方法，并与日本荏原公司 Goto 等合作，将叶片载荷理论用于离心泵叶轮的水力设计，形成了离心泵叶轮的三维反问题设计方法。同时国内外学者还有很多学者结合反问题设计方法和优化方法针对旋转机械的应用上做出相应的研究。反问题设计方法是一种非常有前景的设计方法，其难点在于如何给定合理的叶片载荷。

(4) 基于CFD的优化设计。近年来随着计算流体动力学(CFD)技术和现代优化技术的发展，一种新的叶轮机械优化设计方法，即将某种现代优化算法，如遗传算法、神经网络算法、模拟退火算法等，与流体动力学解法结合起来，以实现给定的目标函数，在叶轮机械的设计研究中被广泛应用。总体来说，叶轮机械优化设计的方法都是在叶片建模参数化和CFD技术应用的基础上进行的，利用逼近方法通过大量的计算样本算例得到目标函数的仿真解，继而用优化算法以该仿真解作为适应度函数进行迭代优化计算以找出最优的几何参数。其关键技术在于样本生成的普适性，以要求能够生成覆盖各个参数变化范围的样本数据库，充分表现各个参数在不同变化区间对目标函数的影响方向和大小；仿真环节的准确性，能够通过对样本数据库的学习，准确地预测出输入量和输出量之间的非线性关系；优化算法的全局收敛性和鲁棒性，优化算法应能够以仿真解为适应度函数进行快速收敛到最优解，同时还能够跳出局部最优解，达到全局最优解。

1.3 离心泵叶轮三维优化设计平台

1.3.1 叶片形状参数化

叶轮是离心泵内能量转化的核心部件,因此对离心泵的设计及其性能的研究必须提高叶轮的水力性能。近年来,随着流动模拟技术的发展,离心泵内流动的数值计算研究发展迅速,但离心泵的设计方法几乎仍采用传统一维半经验的设计方法,设计步骤繁琐、周期较长,设计出叶轮的性能对设计者的经验有很大依赖性。由于叶轮内流道边界形状复杂,几何特征参数的维数较大,加上流动约束方程极其复杂,从而导致叶轮的优化设计难以实现。本节将提出一种离心叶轮的参数化方法,用较少的参数来控制叶轮叶片形状,使得利用该方法生成的叶轮设计方便、快捷且叶型易于控制。

(1) 叶片轴面型线的参数化控制。泵叶轮轴面的传统设计方法中多采用直线段和圆弧组合来设计叶轮前后盖板轴面流线,在现有的研究报道中,也有学者提出采用样条曲线、2次或3次的Bezier曲线来设计叶轮前后盖板的轴面流线。采用Bezier曲线来控制叶轮前、后盖板轴面流线,阶数越高,控制点数越多,控制参数的自由度越大,虽然可以更方便地拟合复杂的曲线,但同时也增大了控制参数的数量,使优化设计的难度增加,因此用Bezier曲线来控制时参数不宜过多。

本研究项目以Bezier曲线对离心泵叶轮轴面型线进行表示,如图1-1所示。离心泵叶轮前盖板由5个控制点Bezier曲线表示、后盖板型线由4个控制点Bezier曲线表示,进口边由3个控制点Bezier曲线表示。通过改变控制点 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_7 、 P_8 和 P_{10} 就可以实现叶轮轴面型线的形状变化。为了减少优化设计参数变量,6个控制点的移动方向限制为Z方向的移动。因此只需要将 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_7 、 P_8 、 P_{10} 的Z坐标值作为设计变量,就可以实现叶片轴面型线上的优化设计。

由该方法进行叶轮轴面型线的控制具有既能方便地控制轴面,又能保证叶轮具有较好的水力性能的优点,在优化问题的迭代过程中修改叶轮轴面非常方便。利用Bezier曲线对叶轮轴面型线进行控制,曲线的起点和终点分布通过其首、末控制点;可以使得叶轮轮内进出口处的流动更稳定、减弱二次流的强度,同时减少了控制参数的自由度,使得离心泵叶轮轴面型线的参数化控制更加容易实现。

(2) 叶片流面型线的参数控制。离心泵叶片的空间造型可以用S2流面上的空间流线族来形成叶片型面,并按照一定的加厚方式对叶片进行加厚即可生成叶片的实体造型,只需确定轴面流线的平面投影就可生成各空间流线。但在实际工程设计中很难对S2流面上

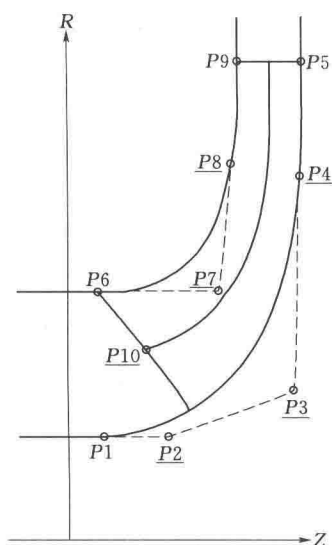


图1-1 叶轮轴面型线
参数控制图

的空间流线族进行控制使各空间流线能够连续光滑过渡, 因此本研究项目采用偏微分曲面造型方法对离心泵的叶片流面型线进行控制, 从而达到控制叶片空间形状的目的。

空间流线可用轴面流线长度 s 和轴面角 θ 直接的关系式确定, 即 $s=f(\theta)$ 。如图 1-2 所示, 将轴面流线微元段 ds 用圆锥母线上的相应微元段 dR 代替并展开。流体质点沿轴面流线移动 ds , 相应地在锥面上移动的角度为 $d\psi$ 。设空间流线段实际长度为 dL , 周向投影长度为 du , 在平面图上相应转过的轴面角为 $d\theta$, 则有:

$$\tan\beta = \frac{ds}{du} = \frac{ds}{r d\theta} \quad (1-1)$$

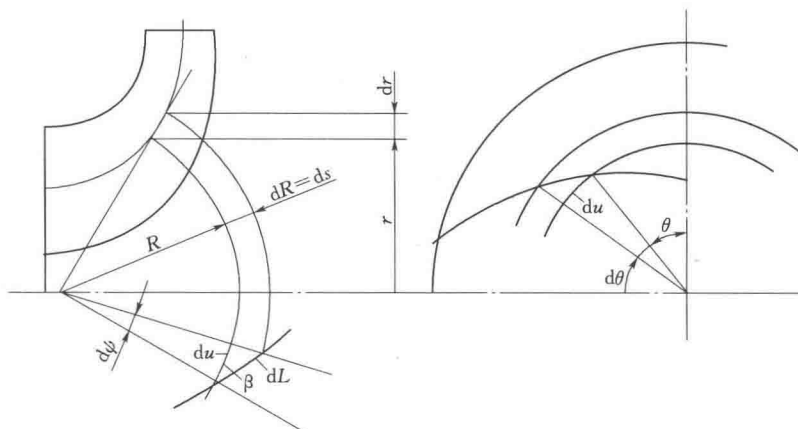


图 1-2 空间流线在轴面和平面内的投影图

对此方程进行积分, 可得到流体质点在叶轮中运动轨迹的空间形状, 从而确定叶片的形状。叶片的轴面投影确定后, 采用 Bezier 曲线分别控制叶片前、后盖板流线及中间流线的平面投影图, 对叶片平面投影图的流面型线的 θ 角进行控制, 其型线控制方法与叶轮轴面型线的控制方法一致。由于 Bezier 曲线起点和终点的特性一致, 因此确定曲线起点 $L1\theta_{1}$ 和终点 $L1\theta_{4}$, 可控制曲线起点及终点切矢; 再由控制点 $L1\theta_{2}$ 、 $L1\theta_{3}$ 的数值变化, 可得到不同的叶片流面型线, 如图 1-3 所示。其中 $L1$ 、 $L2$ 、 $L3$ 分别表示后盖板流面、中间流面和前盖板流面, θ_{1} 、 θ_{2} 、 θ_{3} 、 θ_{4} 分别表示每一流面上的四个控制点。

1.3.2 求解软件的集成

本研究项目采用 iSIGHT 软件对整个水力设计和 CFD 过程进行集成和优化。iSIGHT 是美国 Engineous 公司出品的过程集成、优化设计和稳健性设计的一款综合软件, 可以将数字技术、推理技术和优化设计探索技术有效融合, 并把大量的需要人工完成的工作由软件替代, 实现自动化处理。iSIGHT 软件可以集成仿真代码, 从而对多个设计可选方案进行评估、研究、分析, 大大缩短了产品的设计周期, 优化效率显著提高。

软件集成就是对 iSIGHT 集成软件的代码进行设置, 指定所集成软件的输入、输出文件, 并指定 iSIGHT 要修改或读取输入、输出文件的位置、格式和内容。在集成优化之前的准备工作主要包括数值分析软件选择、初始计算以及熟悉相关调用文件等。根据优化问

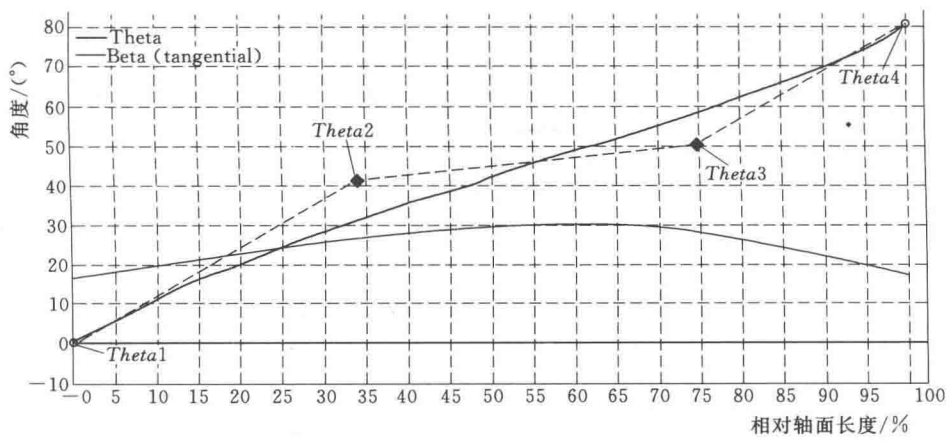


图 1-3 叶轮流面型线参数控制图

题所要求的计算分析与求解任务，选择合适的数值分析软件进行优化设计计算。在选择集成软件时应该考虑以下几个原则：

- (1) 软件的功能实现。应透彻了解所选软件是否具备计算所需要的功能，并满足 iSIGHT 集成软件的要求。
- (2) 软件的前、后处理功能。前、后处理的易操作性关系到输入、输出文件的可读、可写性，在一定程度上是计算成功与否的重要决定因素。
- (3) 软件所要求的环境及计算机配置，良好的硬件配置使优化计算具有可行性。

在选择好数值分析软件后，需要在所要集成的数值分析软件里边进行一次初始模型计算，以便生成下一步软件集成所需要的输入、输出文件。在进行下一步软件集成之前，要熟悉所集成软件求解的调用命令，输入、输出文件的格式，要明确设计变量参数、目标函数值在输入、输出文件中的位置及其数据格式等。

(1) CFX BladeGen 的集成。CFX - BladeGen 是一个专业设计三维旋转机械部件的工具，该软件主要由 BladeGen 和 BladeGenPlus 两大模块组成。BladeGen 实现叶轮叶片的三维交互式设计，BladeGenPlus 实现网格划分和 CFD 的三维分析求解。

在 BladeGen 中生成的 bgi 程序文件，通过修改设计参数，生成新叶片 bgi 的数据文件。利用 iSIGHT 的文件解析功能，在 iSIGHT 中能够读取和写入 bgi 文件中离心泵叶轮的形状和尺寸等相关数据，完成输入文件 bgi 的编辑和更新。在 BladePlus 中读入更新后的叶片数据文件，通过网格划分程序完成叶片网格的生成工作。

BladeGen 提供批处理运行模式和自动记录命令流的功能。在 iSIGHT 中需要重复调用运行 BladeGen，自动完成读入叶片数据文件 bgi，更新叶轮

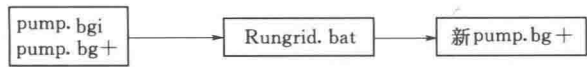


图 1-4 BladeGen 在 iSIGHT 中的集成示意图

模型，套用网格模板进行网格划分、输出网格文件等操作。该工作是依靠 BladeGen 的命令流文件 pump. bgi、pump. bg+ 和 BladeGen 的批处理文件 rungrid. bat 来实现的。通过命令流文件 pump. bgi 发出命令，按照之前录制好的步骤，更新叶轮模型，套用固定的网

格拓扑模板进行网格划分,并输出相应的 pump.bg+ 网格文件。如此反复循环使 Blade-Gen 自动重复执行所需要的操作。集成过程如图 1-4 所示。

(2) ANSYS-CFX 的集成。CFX 提供了批处理运行模式,能够自动执行命令流文件,同时还提供了自动记录命令流的功能,可以利用 CFX 的 session 命令录制操作过程中的每一步命令,将命令流保存到相应的文件中。iSIGHT 通过这些文件自动运行 CFX 相应的操作。对离心泵叶轮进行数值模拟分析时,iSIGHT 首先运行前处理器 CFX-Pre 的批处理文件 cfxpre.bat,通过命令流文件 pump.pre 发出命令,将 CFX-BladeGen 生成的网格文件 pump.bg+ 读入进行前处理,设置好进出口边界条件以及求解控制参数后,输出求解文件 pump.def,作为下一步求解的输入文件。接着 iSIGHT 自动运行求解器 CFX-Solve 的批处理文件 cfxsolve.bat,通过命令流文件 pump.def 发出命令,对紊流模型进行求解,并输出计算结果 pump001.res。最后 iSIGHT 自动运行后处理器 CFX-Post 的批处理文件 cfxpost.bat,通过命令流文件 pump.cse 发出命令,对计算结果进行后处理,计算提取目标函数效率值和相应的约束条件,将结果保存到 iSIGHT 的结果文件中,集成过程如图 1-5 所示。

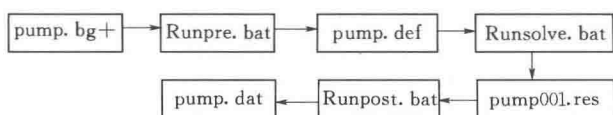


图 1-5 CFX 在 iSIGHT 中的集成示意图

最后 iSIGHT 自动运行后处理器 CFX-Post 的批处理文件 cfxpost.bat,通过命令流文件 pump.cse 发出命令,对计算结果进行后处理,计算提取目标函数效率值和相应的约束条件,将结果保存到 iSIGHT 的结果文件中,集成过程如图 1-5 所示。

1.3.3 优化算法的组合策略

对于水力机械内部流场这种复杂性和高度非线性物理现象,采用传统优化算法或单一的现代优化算法均难以获得全局的最优解。因此本文采用正交试验方法、遗传算法全局搜索、二序列规划方法局部寻优的二阶组合优化策略来进行离心泵叶片形状的优化设计,达到把流场计算、优化算法以及叶片的几何表示结合起来的叶片自动化设计。

(1) 正交试验设计优化变量。试验设计和分析是数理统计的一个分支,其内容包括两部分:①对试验进行周密而审慎的统计、实施而得到数据;②对数据进行数理统计分析,得到客观而合宜的结论。

试验设计包括试验因素、试验指标和试验方案三部分。确定输入因素对响应有重要影响,是处理设计中首要解决的问题。本研究项目试验采用多因子试验,离心泵叶轮轴面型线控制变量 6 个,叶片型线为 $4 \times 3 = 12$ 个,因此总计试验因素 18 个。其中, $L1\theta_1$ 、 $L1\theta_2$ 、 $L1\theta_3$ 、 $L1\theta_4$ 分别表示离心泵后盖板的叶片包角的变化量, $L2$ 、 $L3$ 表示叶片中间流面和前盖板流面;点 P_{10} 表示叶片进口边中间处点在 Z 方向变化量,点 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_7 、 P_8 表示轴面型线的控制点在 Z 方向上的变化值。

试验指标是根据试验目的而选定的用来考察、衡量试验效果的特性值。本次试验分别采用单指标试验设计和多指标试验设计,主要考察以下指标:①在设计工况点泵的扬程、效率;②在多工况点泵的扬程、效率。

试验方案选择正交矩阵试验设计方法。正交矩阵是进行一个分式析因实验,实验完全析因组的一个指定的分式子集 ($1/2$ 、 $1/4$ 、 $1/8$ 等),每一试验因素都被仔细地选择,用来保持各个不同因素和某些相互作用之间的正交性,因此能够从整个试验结果中对因素和

相互作用进行独立评估。在分式析因设计中，设计矩阵的列数要少于能代表每一个因素以及这些因素所有交互作用所需的数量。本次试验每一试验因素选取两水平，选择因素水平表见表 1-1。

表 1-1 因素水平表 (18 因素 2 水平)

水 平	因 素							
	L1	L1	L1	L1	L2	L2	L2	L2
	Theta1 /(°)	Theta2 /(°)	Theta3 /(°)	Theta4 /(°)	Theta1 /(°)	Theta2 /(°)	Theta3 /(°)	Theta4 /(°)
1	0.0	36.0	67.5	123.9	0.3	45.0	82.8	124.2
2	0.0	44.0	82.5	151.5	0.4	55.0	101.2	151.8

水 平	因 素									
	L3	L3	L3	L3	P2	P3	P4	P7	P8	P10
	Theta1 /(°)	Theta2 /(°)	Theta3 /(°)	Theta4 /(°)	/mm	/mm	/mm	/mm	/mm	/mm
1	0.48	54.0	93.6	124.4	41.8	172.3	176.4	122.9	128.3	31.9
2	0.59	66.0	114.4	152.1	77.6	92.8	94.9	66.2	69.1	39.0

(2) 遗传算法全局搜索。遗传算法是近年来发展起来的智能型优化方法，它模拟生物进化过程，形成一套计算机数值计算方法。遗传算法以统计的概率结果为依据进行最优化选择，不要求解敏度；作为基本设计变量为离散值，尤其对多峰值目标函数以及多目标值优化这类组合优化问题求全局最优解有独到之处。

遗传算法的基本流程如下：

- 1) 个体编码。采用实数编码，使得遗传操作更直接，速度更快。
- 2) 约束的处理和适应度函数的选择。采用罚函数法将约束的优化转化为无约束的优化问题：

$$\varphi(X_i^t) = \sum |\min\{0, g_k(X)\}|^{0.5} \tag{1-2}$$

其中：
$$g_k(X) = \frac{p_k - y_k}{y_k}, k = 1, 2, \dots, s$$

适应度计算：

$$F(X_i^t) = \frac{1}{R_i^t + \lambda \cdot \varphi(X_i^t)} \tag{1-3}$$

式中：λ 为罚函数的放大因子。

只有满足约束的非支配个体，才具有最大的适应度。

- 3) 选择和交叉。采用适应度比例选择算法从当代种群中选取两个父代个体，当满足交叉概率时进行交叉操作，产生两个新的子个体。

- 4) 变异操作。为了改善解的均匀分布，操作中加入了均匀性分布指标 ω，对于密集的个体，变异的范围就大，而稀疏的个体，则只进行小范围的变异。

- 5) 根据要解决的数学模型，确定算法终止运行的准则。

(3) 序列二次规划法局部寻优。在优化问题中，序列二次规划算法是解决小规模非线