



离心泵叶轮设计理论及分析
设计方法学及其在水泵产品模型设计中的应用
原理方案设计模型及其在水泵设计中的应用
工程数据库建模及其二次开发
叶片三维设计模型的研究与开发
复变函数理论在水泵水力设计中的应用研究
水泵叶轮叶片三维参数化造型系统研究
水泵性能综合预测
离心泵叶轮内部流场的数值模拟

李春
编著

水泵

现代设计方法

SHUIBENG

XIANDAI SHEJI FANGFA

上海科学技术出版社



水泵现代设计方法



李 春 编著

上海科学技术出版社

内容提要

本书是关于水泵设计理论、技术及应用的学术专著。

在水力设计方面侧重于将现代设计方法学中的原理方案设计模型、计算机图形学中的曲线曲面理论、复变函数理论中的保角变换和工程数据库技术等应用于水力设计,为实现泵的优化设计和计算机辅助设计提供理论和技术基础。在水泵优化设计中重点是将 CAD 与 CFD 技术相结合,强调基于图形支撑平台下的二次开发技术,以实现泵各通流部件的三维建模及参数化设计。

书中提出的许多设计思路、方法和技术均是首次在水泵设计中应用,是作者多年来在该领域科研成果的系统总结,所提理论和技术方法不仅可直接用于泵产品的设计,而且对其他旋转式叶轮机械的设计也具有较高的参考价值。

本书可作为高等院校能源动力类、机械类等专业的研究生教材和相关行业的技术人员参考。

出版说明

科学技术是第一生产力。21 世纪,科学技术和生产力必将发生新的革命性突破。

为贯彻落实“科教兴国”和“科教兴市”战略,上海市科学技术委员会和上海市新闻出版局于 2000 年设立“上海科技专著出版资金”,资助优秀科技著作在上海出版。

本书出版受“上海科技专著出版资金”资助。

上海科技专著出版资金管理委员会

前 言

泵是应用非常广泛的通用机械,同时又是耗能“大户”,凡有液体流动之处,几乎都有泵在工作。此外,尚存在着应当用泵而没有用泵的地方,因此,新领域用泵也不断出现。“十一五”期间,大量核电、火电、三大化工、南水北调、西气东输、煤化工和海水淡化等项目的实施,需要大量高技术含量的高性能泵。

作者自 20 世纪 90 年代初从上海理工大学(原上海机械学院)动力工程及工程热物理博士后流动站出站以来,一直从事水泵优化设计方面的研究工作。本书是作者对这方面研究成果的总结,较为系统地展现了在水泵设计研究领域的最新进展和取得的成果。本书的完成得益于同行专家多次成果鉴定会及研究生答辩时给予的不断鼓励,他们希望尽快将研究工作系统地整理出来,一则是对前期工作的总结;二则通过系统的梳理进一步确定今后的研究重点;最后可与同行专家相互交流、学习。作为学术著作,作者在整理时尽量突出①专一性:与教材相比,本书着重于设计本身,是将其他学科发展的最新技术成果应用到水泵设计中,有别于教材,侧重于完整性,面面俱到;②系统性:不同于学术期刊发表的研究论文,只针对某一问题,它将相关学科领域的技术应用于水泵整个设计,从初始设计、性能预测、流场数值模拟到优化设计的全过程;③先进性:现代最新的设计理论和相关学科技术成果的应用;④普适性:虽着重于水泵设计,但所提理论和方法完全可应用于其他旋转叶轮机械的设计。

计算机科学技术的快速发展,极大地推动了基于此技术的数值方法(NM)、计算机图形学(CG)、计算机辅助设计(CAD)和计算流体力学(CFD)的发展与应用。如何将这些新方法、新技术应用到水泵设计中、将 CAD 与 CFD 有机结合,是作者在水泵设计研究伊始所关心的问题,也是研究的重点所在。这不仅涉及到成熟技术的应用,同时也是设计理

念和设计方法的突破创新。历史经验表明,某一领域的成熟技术应用到另一领域时往往会带动这一领域的突破性进展从而形成新的设计理论,但是,技术的应用和发展是一个长期探索与实践的过程。

我国水泵设计与国外先进水平相比在设计理论和观念上尚存在着一定的差距。新理论、技术和方法的应用多是基于传统设计,实质上是原有“传统设计方法的计算机化”,故设计时还无法摆脱对设计人员的经验和主观判断的依赖。此外,传统方法(一般为手工设计)中十分方便的描述方法却不一定适用于计算机的实现。实践证明,当传统方法与流程无法借助于计算机实现或非常难以实现时,问题并不在于计算机水平的高低和应用程度,而往往是传统方法存在弊端。

CAD 和 CFD 的结合已成为包括流体机械和动力机械等叶轮机械设计发展的必然趋势和要求,不论是正问题还是反问题设计,如果缺乏对几何模型的建模、修改等技术,则任何的优化设计均难以真正实现。现代设计已从原有点、线的一、二维发展到现在的面、体三维设计时代,曲面生成与实体造型不仅是设计本身的需要,更成为计算流体力学、结构强度、流体噪声分析的重要前处理。

因此,本书针对这些问题对传统设计理论进行再研究,从产品 Top-Down 设计建模理论的高度着手,将复变函数理论、工程数据库、计算机图形学中的参数化曲线曲面生成技术和三维实体造型引入到水泵设计中,将设计提升到模型化、数值化和公式化,通过 CAD 和 CFD 的有机结合,将设计与优化切实融为一体,改进、完善、优化传统的水泵设计,为新产品的开发、设计和推广应用提供技术支持。本书所提出的一些设计理念、具体的理论和方法均可直接用于泵产品的工程设计,对其他叶轮式流体机械,如风机、风力机、压气机等旋转透平机械的设计也具有一定的参考价值,许多理论和技术层面的创新设计理念甚至可推广至其他通用

机械产品的设计。

上海科技专著出版资金资助了本书的出版,特此致谢。感谢上海交通大学饶柱石教授、上海电力学院姚秀平教授对本书给予的热情支持与鼓励。作者的同事周樊华、蒋志同志对本书的排版和图表付出了辛勤的工作,在此表示由衷的感谢。还要特别感谢上海科学技术出版社责任编辑楼玲玲、王磊同志,本书是在他们的鼓励和帮助下才得以出版的。

限于作者水平,书中疏漏和不当之处在所难免,恳请读者及同行批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 绪论

1

1.1	计算机辅助设计技术发展概况	1
1.1.1	计算机辅助设计技术发展的时代背景	1
1.1.2	计算机辅助设计技术发展的过程	4
1.1.3	CAD 技术的发展趋势及国内机械产品 CAD 技术的 现状	5
1.2	CAD 技术在泵产品设计中的应用	7
1.2.1	国内外泵产品 CAD 技术的发展及现状	8
1.2.2	泵产品 CAD 技术存在的主要问题	11
1.3	离心泵水力设计的现状及发展趋势	14
1.3.1	现代水力设计的基本要求	14
1.3.2	离心泵水力设计方法	15
1.3.3	离心泵优化设计方法	15
1.4	离心泵性能预测的现状及发展趋势	17
1.4.1	离心泵性能预测的现状	17
1.4.2	离心泵性能预测的国内外动态和发展趋势	18
1.5	工程数据库技术在泵产品 CAD 技术中的应用	19
1.5.1	工程数据库技术	20
1.5.2	工程数据库设计方法	22
1.5.3	工程数据库技术在泵产品 CAD 技术中的应用	23
1.6	叶轮机械内部流动的研究	24
1.6.1	CFD 技术的应用现状及关键技术	25

1.6.2 离心泵内流数值模拟方法	27
1.7 研究内容及背景	33
1.7.1 研究背景和意义	33
1.7.2 主要内容与创新	37
1.8 本章小结	40
参考文献	41

第 2 章 离心泵叶轮设计理论及分析

44

2.1 离心泵水力设计的任务及要求	44
2.1.1 离心泵水力设计的任务	44
2.1.2 现代离心泵水力设计的要求	46
2.2 离心泵基本控制方程	47
2.2.1 叶轮基本控制方程	47
2.2.2 基本控制方程的意义	49
2.2.3 叶片数对理论扬程的影响	50
2.3 叶轮几何参数对泵外特性的影响	52
2.4 离心泵蜗壳的基本方程	53
2.4.1 蜗壳	53
2.4.2 扩压导叶	54
2.5 离心泵内损失与效率	55
2.5.1 离心泵内损失	56
2.5.2 轴功率损失计算	58
2.5.3 叶轮做功	60
2.5.4 总损失及效率	60
2.6 离心泵叶轮基本参数的确定	60
2.7 速度系数法的分析与应用	61
2.7.1 Z 和 β_2 的计算	62
2.7.2 R_2 的计算	63
2.7.3 B_2 的计算	65
2.7.4 D_2 的计算	66
2.8 理论计算法	67
2.9 本章小结	68

参考文献	69
------------	----

第 3 章 设计方法学及其在水泵产品 模型设计中的应用

70

3.1 设计方法学在产品模型设计中的应用	70
3.1.1 设计方法学概述	70
3.1.2 设计方法学在水泵产品模型设计中的应用	72
3.2 系统设计思想	77
3.3 系统结构及模块功能	78
3.3.1 系统功能结构的设计	78
3.3.2 系统模块功能分析	78
3.4 本章小结	80
参考文献	80

第 4 章 原理方案设计模型及其 在水泵设计中的应用

81

4.1 模型设计方法	82
4.1.1 设计方法	83
4.1.2 水泵设计领域的专业知识(水泵设计的特点)	84
4.2 原理方案设计模型	85
4.3 水泵原理方案设计应用实例	88
4.4 本章小结	91
参考文献	91

第 5 章 工程数据库建模及其二次开发

93

5.1 基于面向对象技术的 CAD 系统开发	93
5.1.1 AutoCAD 二次开发语言及工具	93
5.1.2 面向对象技术在工程数据库中的应用	98
5.1.3 基于面向对象技术工程数据库的实现	102
5.2 水泵 CAD 系统中工程数据库建模	105

5.2.1	工程数据库技术概论	105
5.2.2	水泵 CAD 系统中工程数据库建模	110
5.2.3	水泵 CAD 系统工程数据库实现	113
5.2.4	水泵 CAD 系统工程数据库处理	116
5.3	本章小结	119
	参考文献	119

第 6 章 叶片三维设计模型的研究与开发

120

6.1	引言	120
6.1.1	三维 CAD 技术的重要意义	120
6.1.2	建立全参数驱动三维模型的必要与可行	121
6.2	水泵叶轮设计中轴面流道及流线的确定	122
6.2.1	应用网格生成技术确定轴面流道	122
6.2.2	轴面流道的校核及修正	125
6.2.3	应用实例及分析	126
6.3	水泵叶片设计中参数曲线的应用研究	129
6.3.1	问题的提出	129
6.3.2	参数曲线理论	129
6.3.3	参数曲线在水泵叶片设计中的应用	131
6.4	水泵叶片三维设计模型的开发	136
6.4.1	基于保角变换法的空间流线求取算法	137
6.4.2	叶片三维曲面造型	139
6.5	基于势-流函数水泵叶轮轴面流道设计	140
6.5.1	流函数和势函数方程的求解	140
6.5.2	势流函数的数值求解	142
6.5.3	正交网格的生成	147
6.5.4	计算分析	149
6.6	本章小结	150
	参考文献	151

第7章 复变函数理论在水泵水力设计中的应用研究

153

7.1	网格生成理论及技术	154
7.2	数值保角变换	155
7.2.1	Theodorsen 变换法	156
7.2.2	Symm 变换法	156
7.2.3	Wegmann 变换法	157
7.3	水泵轴面流道保角变换设计的正变换及计算技术	157
7.3.1	第一次正变换	158
7.3.2	第二次正变换	158
7.3.3	第三次正变换	159
7.3.4	第四次正变换	169
7.3.5	第五次正变换	171
7.4	水泵轴面流道保角变换设计的反变换及计算技术	175
7.4.1	第一次反变换	176
7.4.2	第二次反变换	178
7.4.3	第三次反变换	179
7.4.4	第四次反变换	179
7.4.5	第五次反变换	180
7.5	算法及程序实现	181
7.5.1	语言的选择	181
7.5.2	矩阵运算	182
7.5.3	注意的细节	182
7.5.4	数据文件的处理	182
7.5.5	程序的优化	183
7.6	本章小结	183
	参考文献	185

第8章 水泵叶轮叶片三维参数化造型系统研究

186

8.1	引言	186
------------	----------	-----

8.1.1	参数化设计技术	187
8.1.2	图形支撑平台的选择	189
8.2	Pro/E 软件的二次开发	191
8.2.1	图形支撑平台的二次开发	191
8.2.2	Pro/E 软件系统	194
8.2.3	Pro/TOOLKIT 二次开发工具	195
8.2.4	同步模式与异步模式	196
8.2.5	基于参数化的二次开发步骤	200
8.3	设计思想与系统结构	202
8.3.1	设计思想	202
8.3.2	功能结构	202
8.4	系统的关键技术及其实现	204
8.4.1	轴面流道生成	204
8.4.2	轴面流道过流断面面积检查	212
8.4.3	叶片进口边及进口安放角确定	213
8.5	叶片绘制	219
8.5.1	平面投影图的绘制	219
8.5.2	叶片三维造型	220
8.6	离心泵实体造型研究	221
8.6.1	叶轮三维模型设计及研究	221
8.6.2	蜗壳三维模型设计及研究	224
8.6.3	CFD 计算模型三维造型	225
8.7	本章小结	226
	参考文献	227

第 9 章 水泵性能综合预测

229

9.1	最佳进口直径的选择	229
9.1.1	进口相对速度与最佳进口直径	229
9.1.2	必需汽蚀余量与最佳进口直径	232
9.1.3	计算实例	235
9.2	进口预旋及分析	236
9.3	进口冲击损失	238

9.4	水泵性能综合预测方法	241
9.4.1	平均流线法	241
9.4.2	损失模型法	241
9.4.3	计算结果分析	242
9.5	离心泵内水力损失分析	244
9.6	进口回流的控制	247
9.7	本章小结	248
	参考文献	249

第 10 章 离心泵叶轮内部流场的数值模拟

250

10.1	引言	250
10.1.1	水泵内流场研究的意义	250
10.1.2	基于 CFD 的离心泵设计系统	252
10.2	计算模型	252
10.2.1	网格生成及控制方程	252
10.2.2	旋转叶轮和静止蜗壳间耦合模型	253
10.2.3	湍流模型、计算方法及边界条件	254
10.3	离心泵内部流场计算结果及分析	256
10.3.1	离心泵内定常流动分析	256
10.3.2	蜗壳对离心泵内部流动影响分析	264
10.3.3	叶轮对离心泵内部流动影响分析	267
10.3.4	叶片对离心泵内部流动影响分析	268
10.4	本章小结	269
	参考文献	270

第 1 章

绪 论

1.1 计算机辅助设计技术发展概况

1.1.1 计算机辅助设计技术发展的时代背景

在科学技术成为技术进步、生产力提高决定性前提的今天,以信息技术为主要标志的高新技术革命来势迅猛,高科技向现实生产力的转化越来越快,高新技术产业在整个经济中的比重不断增加;与科技的结合日益紧密,国际间科技、经济交流合作不断扩大,产业技术升级加快,经济结构加速重组,科技、经济越来越趋于全球化;科技革命创造了新的技术经济体系,产生了新的生产管理和组织形式,推动着世界经济的快速增长。正是在这种国际发展趋势和背景下,我国于 1999 年实行了创新工程,并提出“创新是一个民族进步的灵魂,是一个国家兴旺发达的不竭动力”。作为一个国家工业发展水平最主要标志之一的制造业发展正面临持续多变和不可完全预测的全球化市场竞争,其竞争的核心是以知识为基础的新产品的竞争,也就是创新能力的竞争^[1]。

随着科学技术的进步,微电子技术、光电子技术和计算机技术等业已得到广泛的应用,当前制造技术已进入了一个巨大的变革时期,对设计与制造提出了更高的要求,其主要表现为^[2]:

1. 制造业的产品结构和生产过程急剧改变

先进技术的出现正快速改变着制造业的产品结构和生产过程。产品结构正朝着功能先进、实用、高效、节能、体积小、质量好、生命周期短和环保型等方向发展;生产过程则朝着高速、精密、自动化、节能、环境保护、少切削和非传统加工方法等方面发展。

2. 传统市场转变成动态多变市场

传统的相对稳定市场变成动态多变的市場,产品生命周期不断缩短,产品更新日益加快。产品质量、成本(价格)和时间(交货期)已成为增加企业竞争力的三个决定性因素。生产模式正朝着多品种、小批量、单件化、柔性化和生产周期大幅度缩短等方面发展。

3. 逐渐形成全球性的大市场

制造业的进步和发展,使更多的国家参与到世界经济发展中,从而形成全球性的大市场。传统的管理、生产方式、组织结构和决策准则都在经历新的变化。生产能力在世界范围内迅速提高和扩散并形成全球性的激烈竞争格局,市场经济化正在将越来越多的国家带进世界经济范围,随着生产力的国际扩散,产业之间和产业内部国际分工已成为一股不可阻挡的发展趋势。

4. 制造业面临强大压力

供货方面的压力:由于新兴国家和地区,特别是环太平洋国家和地区经济的迅速发展并加入到竞争行列,使得原来的世界市场份额分配格局难以维持,因而出现了重新分配国家市场份额的激烈竞争。

用户方面的压力:随着社会的进步,人们对产品多样化的需求,导致产品的批量越来越小。用户对产品的要求越来越高,如多变的型号、低的价格、高的质量、按期交货和良好的服务等。

社会方面的压力:人类要求一个更加安全和舒适的生存环境,因此对无污染和无公害的绿色产品和清洁制造的呼声日益高涨。

技术进步方面的压力:由于新技术的迅速出现,使得产品技术越来越复杂,产品的开发周期越来越长,而产品的生命周期则越来越短。

为适应社会的发展需要和提高产品的竞争力,现代的各类制造企业必须以最快的上市速度(Time to Market, T)、最好的质量(Quality, Q)、最低的成本(Cost, C)、最优的服务(Service, S)及最清洁的环境(Environment, E)来满足不同顾客对产品的需求和社会可持续发展的要求^[3]。这些需求深刻地影响了工程设计的发展。

工程设计作为人们运用科技知识的方法,是有目标地创造工程产品的构思和计划的过程。工程设计几乎涉及到人类活动的全部领域,工程设计的费用虽然只占最终产品成本的一小部分,但它却对产品的先进性和竞争能力起决定作用,并往往决定着 70%~80%的制造成本和行销服务成本^[1]。现代工程设计是现代工业文明的最重要支柱,是工业创新的

核心环节。因此,工程设计水平是一个国家和地区的工业创新能力和竞争能力的决定性因素。

为适应时代对工程设计提出的要求,同时也因为计算机和信息技术的迅猛发展,设计过程的数字化是工程设计的必然趋势,并已成为现代工程设计的基本特征,从而导致一门崭新的技术在世界范围内兴起,这就是计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD)。

计算机辅助设计技术的含义是使用计算机辅助人们进行产品和工程设计,将计算机高速而精确的运算功能、大容量存储和处理数据的能力,与设计者的综合分析和逻辑判断能力以及创造性思维结合起来,从而大大加快设计进程、缩短设计周期和提高设计质量等。

计算机辅助设计推动了几乎一切领域的设计革命,CAD技术的发展和水平已成为衡量一个国家科技现代化和工业现代化的重要标志之一。据美国国家工程科学院对人类1964~1989年25年间的工程成就进行的评选,CAD技术的开发与应用名列十项最杰出工程成就中的第四位。1991年3月20日,美国政府发表了跨世纪的国家关键技术的发展战略,列举了6大技术领域中的22项关键项目,认为这些项目对美国的长期国家安全和经济繁荣至关重要。CAD技术与其中的两大领域11个项目紧密相关,这就是制造与信息、通信^[4]。制造技术为工业界一系列创新的、成本上有竞争能力和高质量的产品投入市场打下基础,而信息和通讯技术则以惊人的速度不断发展,改变着社会的通信、教育和制造方法。人们将制造技术与飞速发展着的信息技术、自动化技术、现代管理技术与系统技术有机融合,逐渐形成了新一代先进制造技术(Advanced Manufacturing Technology, AMT)。今天,它已成为改善企业产品的T、Q、C、S、E,提高企业敏捷性、柔性和健壮性的关键手段。它正推动着制造业进入信息化、集成化、自动化、智能化和敏捷化的新的历史时期。CAD技术正是先进制造技术及其关键技术的组成部分,同时,在信息产业中,CAD技术也是最具发展潜力的应用领域之一。

由于CAD技术是随着电子技术和计算机技术的发展而逐步发展起来的,因此它具有工程及产品的分析计算、几何建模、仿真与试验、图形绘制、工程数据库管理、设计文件生成等功能。CAD技术的广泛应用已引起了工程设计领域中的技术革命,特别是由于计算机硬件性能的不提高,CAD技术已经逐渐发挥出其强大的影响力,美国科学研究院工程技术委员会1986年的统计分析表明:由于CAD技术的应用,使工程设