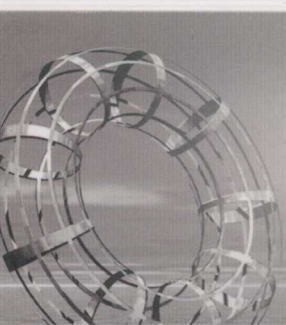




普通高等教育“十二五”规划教材

叶片泵的 计算机辅助 设计与分析



康灿 高波 李忠 刘栋 ◎ 编著

YEPIANBENG DE JISUANJI FUZHU
SHEJI YU FENXI



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

TH31
19

叶片泵的计算机辅助设计与分析

康 灿 高 波
李 忠 刘 栋 编 著

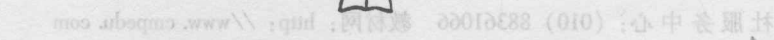
CFD、FEA 等设计与分析 曹建群 机械工业出版社 2006 年 10 月 161 页 16.00 元

北京航空航天大学

计算机辅助设计与分析看似是一门计算机操作, 其实不然。该学问

图书馆

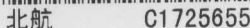
援强。尽管如此, 计算机辅助设计与力学涉及多学科知识, 对从事人员掌握需要耐力学



地址: 上海南京路 100 号 10 楼 1001 室 邮编: 200001 电话: (010) 68326294 传真: (010) 68326294 网址: <http://www.cmpbook.com>

机械工业出版社 (010) 68259302

010 天然井礦水質



TH 31
19

01032264

本书根据计算机辅助设计 (CAD)、计算流体动力学 (CFD) 和计算机辅助工程分析 (CAE) 技术在流体机械行业的应用现状,从基本软件入手,逐步阐述计算机技术与流体机械性能分析和设计相关的内容。对于相关的问题给出详细的操作与说明,并附有计算实例。主要包括 CAD 软件及其应用、离心泵过流部件的计算机辅助设计、轴流泵过流部件的 CAD 实现、计算流体动力学方法、叶片泵内部流场的数值模拟和叶片泵部件的有限元分析。

本书为热能与动力工程、水利水电工程等专业的本科生教材,也可供其他专业师生以及从事流体机械研究、设计和生产的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

叶片泵的计算机辅助设计与分析/康灿、高波、李忠、刘栋编著.
—北京:机械工业出版社,2013.12
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-44731-3

I. ①叶… II. ①康… III. ①叶片泵—计算机辅助设计—高等学校—教材②叶片泵—计算机辅助分析—高等学校—教材
IV. ①TH310.2-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 267753 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:蔡开颖 责任编辑:蔡开颖 孙 阳 任正一

版式设计:常天培 责任校对:张玉琴

封面设计:张 静 责任印制:李 洋

三河市国英印务有限公司印刷

2014 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·9.75 印张·236 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-44731-3

定价:22.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销 售 一 部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销 售 二 部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

作为一种通用机械,叶片泵在核电、化工、水利、航海等领域内发挥着关键的作用。近年来,叶片泵过流部件的设计过程由传统的一元设计逐步转向了有计算机参与的二元和准三元设计过程。借助商用软件,叶片泵的设计、内流场分析、部件强度校核、振动性能预测、结构优化、关键部件的模拟数控加工等环节都可以被生动地展现在计算机屏幕上,这不但缩短了设计的过程,提高了设计的准确度,更有助于实现工程人员和科研工作者的创新性设计方案。

本书的编写正值教育部“卓越工程师教育培养计划”实施的关键阶段,江苏大学的能源与动力工程专业是全国首批实施该计划的专业之一。本书的主旨之一就是以叶片泵为对象,突出实践能力和创新能力的培养,辅助“卓越工程师教育培养计划”的实施。本书的内容涉及目前在叶片泵中应用的主流计算机辅助设计与分析软件,由浅入深地阐述了CAD、CFD、FEA等设计与分析过程,内容力求简洁易懂。书中多处采用实例,以帮助读者理解。读者在阅读和尝试性实践操作的基础上,可进一步选择阅读一些相关的资料,以巩固对知识点的理解。

计算机辅助设计与分析看似是一门实践性的学问,侧重计算机操作,其实不然。该学问的重要性在于其是连通理论知识与工程问题的桥梁,因此实践该学问更需要叶片泵基本理论的支撑。书中在涉及关键知识点的地方,均进行了相关内容的拓展解释,所以本书的系统性较强。尽管如此,计算机辅助设计与分析涉及多学科的知识,对其深入的掌握需要对力学、机械等基础知识有较为扎实的掌握。本书更注重内容的引导作用,请广大读者结合自身的知识基础与兴趣,对特定的内容进行深入的了解。

本书由江苏大学康灿副教授、高波副教授、李忠博士、刘栋副教授共同编写。其中,前言、第1、2、3、4章由康灿编写,第5章由李忠编写,第6章由刘栋编写,第7章由高波编写,全书由康灿进行统稿。

感谢江苏省动力工程及工程热物理优势学科建设项目和江苏省高等教育改革重中之重课题对本书编写工作的支持。本书中引用了一些资料和网络资源中的图片,部分出处已附注,在此对所有被引用资料的作者一并表示谢意。由于作者水平有限,书中的错误在所难免,请广大读者批评指正。

作 者

第1章 符号表

过流断面宽度 b (mm)	圆柱层流面半径 r (mm)
叶轮出口宽度 b_2 (mm)	过流断面面积 S (cm ²)
蜗壳进口宽度 b_3 (mm)	应力硬化矩阵 S
轴面速度 c_m (m/s)	静矩 S_{st} (mm ³)
绝对速度的圆周速度分量 c_u (m/s)	栅距 t (mm)
叶片进口半径 d_1 (mm)	时间 t (s)
叶轮外径 d_2 (mm)	温度 T (K)
蜗壳基圆直径 d_3 (mm)	翼型的最大厚度 t_{max} (mm)
径向导叶入口直径 d_4 (mm)	周向速度 u_r (m/s)
叶轮轮毂直径 d_h (mm)	流体速度 v (m/s)
叶轮吸入入口直径 d_s (mm)	中弧线最高点的弦向位置 x_h (mm)
轮毂比 $\bar{d}$	速度分量 u, v, w (m/s)
弹性模量 E (Pa)	位移分量 u, v, w (m)
载荷 F (N)	叶片数 z
中弧线最高点的纵坐标 f (mm)	叶片进口安放角 β_1 (°)
体积力分量 f_x, f_y, f_z (N)	叶片出口安放角 β_2 (°)
切变模量 G (Pa)	叶片出口液流角 β_{2B} (°)
泵扬程 H (m)	翼弦安放角 β_1 (°)
湍流强度 I	圆周角度 φ (°)
湍动能 k (m ² /s ²)	角速度 ω (rad/s)
翼型弦长 l	冲角 $\Delta\alpha$ (°)
流线长度 l_m (cm)	翼型厚度 δ (mm)
扭矩 M_n (N·m)	流体密度 ρ (kg/m ³)
比转速 n_s (m ^{3/4} /s ^{3/2})	湍动能耗散率 ε (m ² /s ³)
汽蚀余量 $NPSH$ (m)	湍流粘度 μ_t (Pa·s)
转速 n (r/min)	应力张量 σ_{ij} (Pa)
功率 P (W)	应变分量 $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yx}, \gamma_{xz}$
总压 p_0 (Pa)	泊松比 μ
流量 q (m ³ /s)	等效应力 $\bar{\sigma}$ (Pa)
雷诺数 Re	

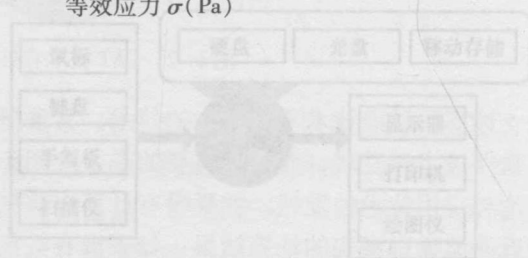


图 1-1 计算机的主要构成

目 录

前言	
符号表	
第1章 概论	1
1.1 计算机辅助技术及其实现过程	1
1.2 CAD 技术及其发展历程	3
1.3 计算流体动力学的发展	5
1.4 CAE 技术的发展	7
1.5 CAM 技术的发展	8
1.6 计算机辅助技术在叶片泵中的应用背景	8
第2章 CAD 软件及其应用	15
2.1 AutoCAD 软件介绍及应用	15
2.2 AutoCAD 二次开发技术	24
2.3 CAXA 软件及应用	24
2.4 三维 CAD 软件的发展及应用	29
2.5 CAD 软件间的数据传递	35
第3章 离心泵过流部件的计算机辅助设计	37
3.1 离心泵叶轮设计	37
3.2 蜗壳设计	43
3.3 反问题设计	46
第4章 轴流泵过流部件的 CAD 实现	48
4.1 设计背景	48
4.2 轴流泵叶轮的主要设计参数	49
4.3 翼型	50
4.4 轴向导叶设计	56
4.5 轴流泵过流部件的三维模型	58
第5章 计算流体动力学方法	61
5.1 CFD 技术基础	61
5.2 网格生成技术	65
5.3 初始条件和边界条件	70
5.4 常用求解软件	77
5.5 滑移网格与多重坐标系方法	79
5.6 离心泵数值模拟的步骤	82
5.7 后处理技术	87
第6章 叶片泵内部流场的数值模拟	90
6.1 叶片泵内的典型流体力学特征	90
6.2 离心泵内部流场模拟实例	94
6.3 泵内空化流动模拟	112
第7章 叶片泵部件的有限元分析	122
7.1 有限元基本理论	122
7.2 常用有限元软件介绍	124
7.3 泵过流部件的分析方法	136
7.4 泵轴的有限元分析	139
7.5 叶片泵振动性能分析的实现	147
参考文献	148

第 1 章 概 论

1.1 计算机辅助技术及其实现过程

计算机辅助技术 (Computer Aided Technologies, CAT) 是利用计算机来辅助工业产品的设计、性能分析、制造、测试等过程的技术, 该技术的有效运用将提高工程人员在特定的应用领域内完成任务的效率和准确度。近年来, 随着高性能计算工作站和刀片式服务器的迅速发展, 计算机辅助技术已经成为诸多工程应用领域内不可或缺的一部分。计算机辅助技术在不同的行业领域有不同的特点, 该技术的发展与行业的发展密不可分、相辅相成。

工业产品及其应用为计算机辅助技术提供了发挥作用的平台, 以本书重点论述的流体机械产品为例, 目前常用的计算机辅助技术主要包括计算机辅助设计 (Computer Aided Design, CAD)、计算流体动力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 分析、计算机辅助制造 (Computer Aided Manufacturing, CAM)、计算机辅助工程 (Computer Aided Engineering, CAE) 分析、计算机辅助测试系统 (Computer Aided Testing System, CATS)、计算机辅助工艺设计 (Computer Aided Process Planning, CAPP) 等。对于这些计算机辅助技术的定义并没有绝对的约束条件, 比如在一些教材和网络资源中就将 CFD 归入到 CAE 的范围。在计算机辅助技术的实施过程中, 操作计算机的工程人员是决定计算机辅助技术实施效果的关键。工程人员利用其知识基础、判断能力、思维能力与创新能力, 综合运用自编程序与商用软件, 以计算机的数据处理和图像显示功能作为辅助, 达到预期的效果。在此过程中, 人与计算机构成一个交互、和谐的整体。

更为具体地说, 本书所讨论的计算机辅助技术是以叶片泵产品为主要设计与分析对象, 而相似的设计和分析方法可被引申到其他如风力机、风机、水轮机等产品领域。结合近年来本行业的发展与计算机辅助技术的应用情况, 本书主要涉及 CAD、CFD、CAE 和 CAM 四个方面的内容, 其他内容如 CATS、CAPP 等不做详细讨论。在本书所涉及的几种计算机辅助技术中, CAD 技术是关键和前提, 其起步最早, 且作为其基础的计算机图形学同时也是其他几种计算机辅助技术实施的基础。

众所周知, 计算机是根据指令对数据进行处理的机器。我们不需要去追溯计算机的发展历程, 多数工程人员也并不关心计算机内部的程序存储结构。对于绝大部分计算机用户来说, 计算机就像一个“黑匣子”, 直接感知到的就是计算机的“输入”与“输出”。图 1-1 所示的计算机的主要构成中, 输入设备、输出设备、中央处理器 (主机) 和存储设备是构成现代计算机的四大组成部分。以扫描仪这种输入设备为例, 目前不仅仅是文

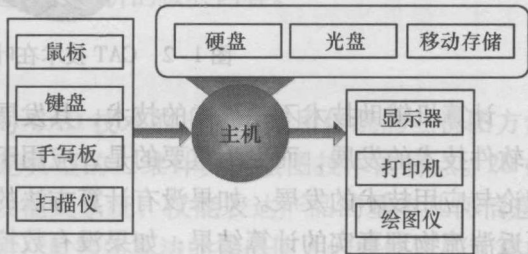


图 1-1 计算机的主要构成

字经扫描后可以被计算机识别 [该技术被称做光学字符识别技术 (Optical Character Recognition, OCR)], 纸质工程图样经过扫描后也可以被识别, 即工程图样上的图元可以被转化为计算机绘图软件中可编辑的图元。目前该技术的研发还在继续, 这是一个具有挑战性的研究方向。

流体机械领域内的计算机辅助技术的应用具有一定的相似性。下面以一个关系图说明计算机辅助技术在叶片泵领域内的综合应用。

图 1-2 直观表达了近年来计算机辅助技术在叶片泵领域内的综合应用。计算机程序将计算机与叶片泵产品紧密地连接在一起。作为工科学生和工程技术人员, 应了解计算机可以输出二维图样, 以用于工艺校核与产品加工; 作为叶片泵研发人员, 应了解计算机可以展现流场中的压力分布和部件内等效应力分布等信息, 用户可以借助这些信息对叶片泵的能量性能和安全性能进行评价; 作为数控加工人员, 应了解在计算机上可以模拟产品加工的过程, 并且可以把加工工件的指令以数控 (Numerical Control, NC) 代码的形式输出, 在数控加工机床上执行该指令可将毛坯件加工成产品。由此, 计算机辅助技术的综合应用是一门综合性的学问, 在其应用的过程中, 需要多学科的知识结构, 甚至需要一个团队共同努力去完成这一系统性的任务。



图 1-2 CAT 技术在叶片泵产品中的综合应用

计算机辅助技术不是孤立的技术, 其发展离不开计算机图形学、计算机程序语言、计算机软件技术的发展, 而更为重要的是, 应用于特定行业的计算机辅助技术离不开该行业内的理论与应用技术的发展。如果没有计算方法的发展, 运算速度再快的超级计算机也无法得到逼近湍流物理真实的计算结果; 如果没有数控加工机床的问世, 计算机的模拟加工就无从谈起; 如果没有有限元分析 (Finite Element Analysis, FEA) 技术的进步, 运用计算机进行叶

片泵转子的强度分析和动力学分析也就不可能实现。

计算机辅助技术的应用有力地推动了叶片泵行业的技术进步。经过多年的发展,一些国际知名的泵生产企业如苏尔寿(Sulzer)、凯士比(KSB)等公司已经将计算机辅助技术运用得较为成熟,有效地助推了其产品的性能和可靠性的提升,产品的市场竞争力也不断增强。从发展趋势来看,计算机辅助技术正向着集成化的方向发展,典型的代表为总部设在美国佛蒙特州(Vermont)的Concepts NREC公司。该公司开发的系列软件的功能涵盖了CAD、CFD、CAE到CAM,软件能够设计和分析的对象包含了压缩机、水轮机、泵、风扇等,该公司还综合利用其技术力量、开发的软件和实验设备开展流体机械产品的设计、分析、快速成型(Rapid Prototyping, RP)、测试等服务。值得注意的是,国外公司的软件多由研究团队进行研发,且软件的改进与升级工作一直未间断,这也是体现软件生命力的重要因素之一。另外,随着叶片泵产品的丰富,市场上还出现了一些采用数据库技术开发的叶片泵选型软件,一般为各个泵产品制造企业结合自己的产品参数、结构与性能特点自行开发,该类软件也被成功地运用于叶片泵行业。这些软件尽管不被归入计算机辅助设计与分析的范围,其出现也很好地体现了计算机技术在本行业的多元化应用。

1.2 CAD 技术及其发展历程

CAD是指计算机辅助设计,不同的发展阶段对CAD的定义不同。当前阶段可以将CAD定义为:以计算机为辅助工具对产品的工程信息进行数字化表达的过程,体现在产品的工程绘图、建模和技术资料编写等设计活动。需要特别指出的是,CAD是工程技术人员的活动。CAD技术在叶片泵领域内的应用相对较早,从目前的观点来看,最初的CAD应用程序和其输出的图形是粗糙的,这从另外一个角度恰恰体现了该技术的迅猛发展。具体来说,在CAD软件发展初期,CAD的含义仅仅是图板的替代品,也被称为计算机辅助绘图(Computer Aided Drawing)。早期的CAD技术缺乏对设计知识、设计约束、功能条件的表达和处理,仅局限于产品详细设计阶段(即将产品的全部草图信息“移动”到计算机上的软件绘图空间),并不支持产品设计的完整流程。从人类认识事物的角度出发,工程技术人员具备工程产品的基本知识,在设计产品的过程中,其思维活动是三维的、形象的,该思维与产品的颜色、材料、形状、尺寸、结构、制造工艺等密切关联,因此二维图形表达的信息是不完整的。

20世纪50年代在美国诞生了第一台计算机绘图系统,CAD技术在其半个多世纪的发展过程中,经历了5次转折性的变化。作为CAD技术的应用者、CAD软件的使用者及CAD技术发展趋势的追踪者,有必要简单地了解一下这5次转折的核心内容。

1.2.1 第一次转折

CAD技术起步于20世纪50年代后期。当时CAD技术的出发点是用传统的三视图方法来表达零件,以图样为媒介进行技术交流,这是典型的二维计算机绘图技术的特点。20世纪60年代出现的三维CAD系统是极为简单的线框式系统,仅能表达产品的基本几何信息,无法有效表达几何数据间的拓扑关系。在此期间,贝塞尔算法的提出使人们能够使用计算机处理曲线及曲面问题,同时也使法国的达索飞机制造公司(Dassault Aviation)的开发者能

够在二维绘图系统 CADAM (该软件现在名为 CATIA CADAM Drafting) 的基础上, 开发出以表面模型为特点的自由曲面建模法, 由此推出了著名的三维曲面造型系统 CATIA。CATIA 的出现标志着 CAD 技术从单纯模仿工程图样的三视图模式中解放出来, 首次使采用计算机完整描述产品零件的主要信息成为现实, 同时也为 CAM 技术提供了基础。CATIA 的出现是 CAD 发展过程中的第一次转折。

此时的 CAD 软件的开发者多为 CAD 软件的大型用户, 如美国麦道 (McDonnell Douglas) 公司、美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA)、美国通用电气公司 (General Electrics, GE) 等。

1.2.2 第二次转折

20 世纪 80 年代末到 90 年代初, 由于计算机技术的大步前进, CAE 和 CAM 技术也有了较大发展。表面模型技术只能表达形体的表面信息, 难以准确地表达零件的其他特性如质量、重心、惯性矩等, 这使得 CAE 技术的实施十分困难。基于对 CAD/CAE 一体化技术的探索, 由几个工程师创建的 SDRC (Structural Dynamics Research Corporation) 公司于 1979 年发布了世界上第一个完全基于实体造型技术的大型 CAD/CAE 软件——I-DEAS。由于实体造型技术能够精确表达零件的全部属性, 在理论上有助于统一 CAD、CAE、CAM 的模型表达方式, 大大方便了设计过程。实体造型技术代表着当时一段时期内 CAD 技术的发展方向, 其应用和普及标志着 CAD 发展史上的第二次技术转折。

实体造型技术既带来了算法的改进和 CAD 技术发展的希望, 也带来了数据运算量的大幅度增加。在当时的硬件条件下, 实体模型的构建及显示速度很慢, 设计过程不流畅。后来, 随着硬件性能的提高, 实体造型技术又逐渐为众多 CAD 系统所采用。

1.2.3 第三次转折

20 世纪 80 年代中期, CV (Computer Vision) 公司提出了一种参数化实体造型方法, 它的主要特点是: 基于特征、全尺寸约束、全数据相关、尺寸驱动设计修改。但 CV 公司却没能将这一参数化技术方案付诸实施。其主要原因是创新性地提出参数化实体造型方法的人员在新思路无法实现时, 集体离开了 CV 公司。1985 年, 以 Samuel Peisakhovich Geisberg 为首成立了参数技术公司 (Parametric Technology Corporation, PTC), 开始研发名为 Pro/ENGINEER 的参数化造型软件。1988 年该软件进入市场, 全球著名的农业机械制造商 John Deere 成为 Pro/ENGINEER 软件的第 1 个用户。参数化技术的应用成为 CAD 发展史上的第三次技术转折。

1.2.4 第四次转折

参数化技术在 20 世纪 90 年代前后几乎成为 CAD 业界的标准, 但是, 此时的众多 CAD 软件都在原来的非参数化模型基础上开发或集成了许多其他应用功能, 重新开发一套完全参数化的造型系统就意味着将原来的软件全部重新改写。SDRC 公司的开发人员以参数化技术为蓝本, 提出了一种比参数化技术更为先进的实体造型技术——变量化技术。该技术保留了参数化造型设计的基于特征、尺寸驱动设计修改、全数据相关的特点, 而在全尺寸约束方面做了重大修改, 将形状约束与尺寸约束分开来单独考虑, 让设计者对实体上的任意特征实时

地进行编辑修改,更好地表达设计者的创作意图。SDRC 公司从 1990 年开始,历经 3 年时间,将软件全部重新改写,于 1993 年正式推出全新体系结构的 I-DEAS Master Series 软件。此后,SDRC 每年的市场排名逐年上升。变量化技术成为 CAD 技术发展的第四次转折。

20 世纪 90 年代以后,随着计算机硬件的快速发展以及 Windows 操作系统的普及,在 Windows 操作系统上开发的 CAD 软件不断涌现。此时的 Solid Edge、Solid Works 等三维 CAD 软件基本上全盘继承变量化技术。

1.2.5 第五次转折

同步建模技术可以看做是 CAD 技术的第 5 次转折。2008 年, Siemens PLM Software 公司推出了创新性的同步建模技术。该技术在参数化、基于历史记录建模的基础上前进了一大步。

同步建模技术能够快速地实现设计人员的创意,大幅度提高设计速度。有了这些技术,设计人员能够有效地进行尺寸驱动的直接建模,而不用像先前一样必须考虑相关性及约束等。该技术允许用户重用来自其他 CAD 系统的数据,无须重新建模。用户通过一个快速、灵活的系统,能够以比原始系统更快的速度编辑其他 CAD 系统的数据,并且编辑方法与采用的设计方法无关。因此,用户可以在一个多 CAD 的环境中进行操作。该技术可以简化 CAD 的使用过程,将独立的二维设计和三维设计环境结合在一起,它兼具三维建模平台的稳定耐用性以及二维设计平台的易操作性。

利用同步建模技术可以实时地检查产品模型当前的几何条件,并且将它们与设计人员添加的参数和几何约束合并在一起,以便评估、构建新的几何模型并且进行编辑,无须重复全部历史记录。而且,设计人员不必再分析复杂的约束关系以了解如何进行模型编辑。经过这些技术上的突破,CAD 技术形成了曲面造型、实体造型、参数化设计及变量化设计等系统。目前,CAD 软件已经能实现设计、分析与制造过程的集成,不仅可进行产品的设计计算与绘图,且能实现自由曲面设计和工程造型,并为有限元分析、机构仿真、模具设计与制造等过程提供前提。

1.3 计算流体动力学的发展

计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)是现代流体力学的一个分支,其实施过程可被描述为:将待求解流动区域离散为连续的小尺度空间和时间,在这些小尺度的空间和时间间隔内,将控制流体流动的微分方程近似地用一系列的代数方程表示,而这些代数方程可以在计算机上进行求解。CFD 也可以看做是一种“模拟实验”。近年来,CFD 算法和商用软件的发展非常迅速,在挑战科学研究人员的智慧的同时,更为工程技术人员提供了对实际工况进行模拟的良好环境。CFD 的价值在一些流动测量和实验无法开展的条件(如高温、有毒、易燃、易爆等)下得到了充分的体现。

1.3.1 计算流体动力学的起源

CFD 产生于第二次世界大战前后,在 20 世纪 60 年代左右逐渐形成了一门相对独立的学科。结合计算机技术及计算方法的发展,我们可以将 CFD 技术的发展划分为三个阶段。

第一阶段：初始阶段（1965 ~ 1974 年）。这一阶段的主要内容是解决 CFD 的一些基本问题，如模型方程（湍流、流变、传热、辐射、气体 - 颗粒作用、化学反应、燃烧等）、数值方法、网格划分、程序编写与实现方法等，并就数值计算的结果与大量的流体力学实验结果及精确解进行比较，以确定数值预测方法的可靠性和精确性。为了解决工程上具有复杂几何边界的流动问题，人们开始研究网格的变换问题，典型的成果如采用微分方程来根据流动区域的形状生成适体坐标体系。

第二阶段：工程应用阶段（1975 ~ 1984 年）。该阶段的主要内容是探讨 CFD 技术在解决实际工程问题时的可行性、可靠性及工业化推广应用。同时，CFD 技术开始向解决各种以流动为基础的工程问题方向发展。由于不同的团队所开发的程序之间没有交流、也没有公开的程序代码，软件的新用户在进一步改进软件前，需要花费大量的精力去理解先前的程序代码。1981 年，CHAM 公司将包装后的计算软件 PHOENICS 正式投放市场，开创了 CFD 商业软件的先河。在 20 世纪 80 年代初期，我国的一些高校和研究机构开始研究 CFD 技术与程序。

第三阶段：快速发展阶段（1984 ~ ）。CFD 技术在工程中的应用效果得到了学术界的充分认可。CHAM 公司在发达国家的工业界进行了大量的 CFD 应用推广工作，CFD 领域内的知名学者 Suhas V. Patankar 也在美国工程师协会的协助下，以培训的方式推广 CFD 技术。然而，工业界并没有表现出太多的热情。作为当时著名的 CFD 技术开拓者，Dudley Brian Spalding 指出，工业界对 CFD 不感兴趣的原因之一是软件的通用性能不好。后来，大量的应用基础研究方面的工作被投向 CFD 软件之间的通信、CFD 软件的界面设计、CFD 软件的通用性等方面。该阶段见证了 CFD 求解器、前处理软件和后处理软件的迅猛发展。

1.3.2 计算流体动力学的基本原理

任何流体运动的规律都以质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律三大定律为基础。这些基本定律可由数学方程组来描述，而 CFD 的根基便是支配流动的基本方程。以叶片泵内部流动为例，通过 CFD 技术的实施，可以得到泵内过流通道内各个空间位置上的基本流动物理量如速度、静压强等的分布及这些物理量随时间变化的情况；可以统计相关的物理量，从而得到叶片泵能量性能在不同流量工况条件下的差别；还可以获得典型的泵内流动结构形态，如轴向旋涡、二次流等。

以最早应用的有限差分法来描述 CFD 的主要思想——有限差分法的出发点是微分形式的守恒方程。把求解区域划分为适当数量、大小和形状的网格，求解未知函数在网格节点上的近似值，在节点上用差商近似地代替偏导数，把偏微分方程及其定解条件转化为未知函数在节点上的近似值为未知量的代数方程，从而偏微分方程被节点处的代数方程所代替，我们称该代数方程为差分方程，然后求解差分方程，得到微分方程解在节点上的近似值。读者可以结合高等数学中 Taylor 级数展开的思想来理解有限差分法的实现过程。

1.3.3 计算流体动力学的应用

目前，CFD 技术应用的介质范围涵盖了气体、液体、气 - 液两相流、固 - 液两相流、气 - 固 - 液多相流等；另外，还包括像空化（Cavitation）这样的复杂多相流动。CFD 技术已经在航天工程、能源工程、海洋工程、化学工程、农业工程、冶金工程等领域内得到成功

的应用。

CFD 最突出的优势体现在其实施周期短、节省研发费用。助推 CFD 技术发展的动力是不断增长的工业需求。以欧美发达国家为例,20 世纪 60 年代,在飞行器的研发过程中,需要试验环节来佐证设计结果,试验过程昂贵、耗费时间,而所获得的信息有限。这就迫使人们采用先进的计算机辅助手段来指导设计工作,大量减少原型机试验,缩短研发周期,节约研究经费。50 年来,CFD 技术的飞速发展给工业界带来了革命性的变化。目前,在航空、航天、汽车等多个工业领域内,利用 CFD 技术进行产品的设计、分析和优化已经成为常规步骤。

计算流体动力学进入我国的时间较短,但其已在我国的多个重要工程领域如航空、航海、核能利用和车辆工程中得到了广泛应用。在水力机械领域内,目前采用成熟的商用 CFD 软件进行过流部件的设计与分析工作已成为众多水力机械制造企业中不可或缺的一部分。例如,在水轮机和叶片泵过流部件设计中采用 CFD 技术进行性能分析、采用 CFD 技术对泵内空化现象及可能产生的部件破坏进行分析、采用 CFD 技术与有限元分析相结合对流体载荷作用下的过流部件进行受力与振动分析等。CFD 技术在推动我国水力机械行业技术进步方面发挥着越来越重要的作用。

1.4 CAE 技术的发展

CAE 是以工程力学和计算力学为基础,借助计算机这一辅助工具,实现产品结构的评价与参数优化,其主要体现在刚度分析、强度分析、振动分析、机构运动分析等环节。

如前所述,有的教材和网络资源将 CFD 归入 CAE 的范围。由于 CFD 技术在叶片泵行业内的重要性与其特殊性,本书中将 CFD 技术和 CAE 技术进行分别定义与阐述。

CAE 技术起源于 20 世纪 70 年代,是现代制造业必需的手段之一。利用 CAE 技术可以预测产品的性能和设计缺陷,比如产品的强度、产品的服役期等。通过 CAE 技术的运用,产品的开发周期大大缩短,产品的设计成本和实验成本显著降低。

CAE 技术在汽车行业内的应用比较广泛,在很多汽车组成模块的研发过程中都可以看到 CAE 技术的身影。运用 CAE 技术可以进行汽车轮毂的结构强度分析、车身钣金件的结构强度分析、轴承和风扇叶片等运动部件的疲劳寿命计算、运动机构的多体动力学分析等。值得注意的是,汽车行业的一些 CAE 技术的应用过程可以为叶片泵产品的分析所参照。

国际上早在 20 世纪 60 年代初就开始投入大量的人力和物力开发有限元分析程序,但真正的 CAE 软件产生于 20 世纪 70 年代初期。在 CAE 软件的发展过程中,软件开发商为满足市场需求和适应计算机硬件和软件技术的迅速发展,对软件的功能、运行界面和前、后处理功能,都进行了显著的改进与提升。目前市场上的 CAE 软件在一定程度上满足了工业用户的需求。这些软件在帮助工业用户解决大量工程实际问题的同时,也为科学技术的发展作出了突出的贡献。目前流行的 CAE 软件主要有 Ansys、Msc - Nastran、Abaqus、Adina、Cosmos 等。

1.5 CAM 技术的发展

CAM 是利用计算机辅助完成从生产准备到产品制造整个过程的技术,它主要体现在数控加工编程、加工过程设计、加工过程控制、加工质量控制等环节。CAM 作为计算机辅助技术的重要组成部分,向上与 CAD 技术实现无缝集成,向下智能、高效地为数控加工过程提供服务。

CAM 与 CAD 技术的集成是一门新的应用技术,该技术改变了工程人员在产品设计和制造过程中的常规思路,大大减轻了工程人员的脑力劳动和体力劳动,而且有利于发挥工程人员的创造性。设计与制造过程的集成也明显地促进了生产管理和质量管理的集成。

美国麻省理工学院(MIT)是数控加工机床的开拓者。早在 1952 年 9 月,该学院公开报道了一台可以进行高精度复杂形状加工的机器,尽管该系统非常复杂(以今天的观点来看),且价格昂贵,但它是数控加工机床发展历程中的重要标志。在 CAM 技术的发展过程中,无论是在硬件平台,还是在系统结构上,CAM 的功能和特点都发生了显著的变化。在 CAM 的整个发展历程中,从基本处理方式与目标对象两个方面可将 CAM 的发展过程分为两个阶段:

第一阶段是 20 世纪 60 年代,APT (Automatically Programmed Tool, 自动编程工具,源自于 MIT) 阶段。该阶段的 CAM 技术以在大型机上的运用为主,在专业系统上开发的编程机及部分编程软件,如 FANUC、Semems 编程机;基本的处理方式是以人工或计算机辅助的方式直接计算走刀路径为主。其缺点是功能相对比较差、操作困难、专机专用。

第二阶段是在第一阶段的基础上,人们又创造出了曲面 CAM 系统。系统结构一般是 CAD/CAM 混合系统,同时较好地利用了 CAD 模型,以几何信息作为最终的结果,自动生成走刀路径。在此基础上,自动化和智能化程度得到了大幅度的提高,具有代表性的软件是 UG、Cimatron、MasterCAM 等,其基本特点是面向局部曲面的加工方式,编程的难易程度与零件的复杂程度直接相关,而与产品的工艺特征、工艺复杂程度等没有直接的关联。

CAM 技术在不断发展,其自动化和智能化水平也在不断地提高。经过了两个发展阶段,人们正在酝酿新一代的 CAM 技术。新一代的 CAM 技术不仅可以继承并智能化判断工艺特征,而且具有模型对比、残余模型分析与判断功能,使刀具路径更优化,效率更高。同时,面向整体模型的方式也可以提高操作的安全性,更符合高速加工的工艺要求;还将开放与工艺相关联的工艺库、知识库、材料库和刀具库,有利于工艺知识的积累、学习和运用。

1.6 计算机辅助技术在叶片泵中的应用背景

1.6.1 CAT 技术的应用思路

在概括性地介绍了各项计算机辅助技术的基础上,结合叶片泵的专业知识,我们详细介绍一下具体技术的实施。各项计算机辅助技术看似是在独立地运行,其间却存在着必然的关联。我们以一个流程图来具体说明计算机辅助技术在叶片泵中的应用。

图 1-3 所示的流程图体现了目前叶片泵行业较为常用的设计、分析、加工和测试的思路。泵是工业流程的关键设备，泵的运行要满足所在工业流程的要求。结合工业流程的具体参数要求，给出泵的设计参数（即设计要求），该设计要求是泵能满足整个流程正常运行的重要标志。对于泵的设计人员来说，拿到设计参数后，有两种选择，一种是借助于相似换算法，即在现有的优秀水力模型库中选择一个泵水力模型，该水力模型的比转速与所要求的泵的比转速相同或相近。可以借鉴的水力模型资料可能是纸质图样、可能是计算机图形文件、也可能是以一定数据方式存储的几何参数数据库。设计人员在现有水力模型的基础上，经过计算得到所要求的泵叶轮的水力参数，直接进入计算机绘图阶段。第二种方法是速度系数法，即根据设计参数，参照叶片泵的水力计算步骤，逐步计算出叶轮的关键几何参数。

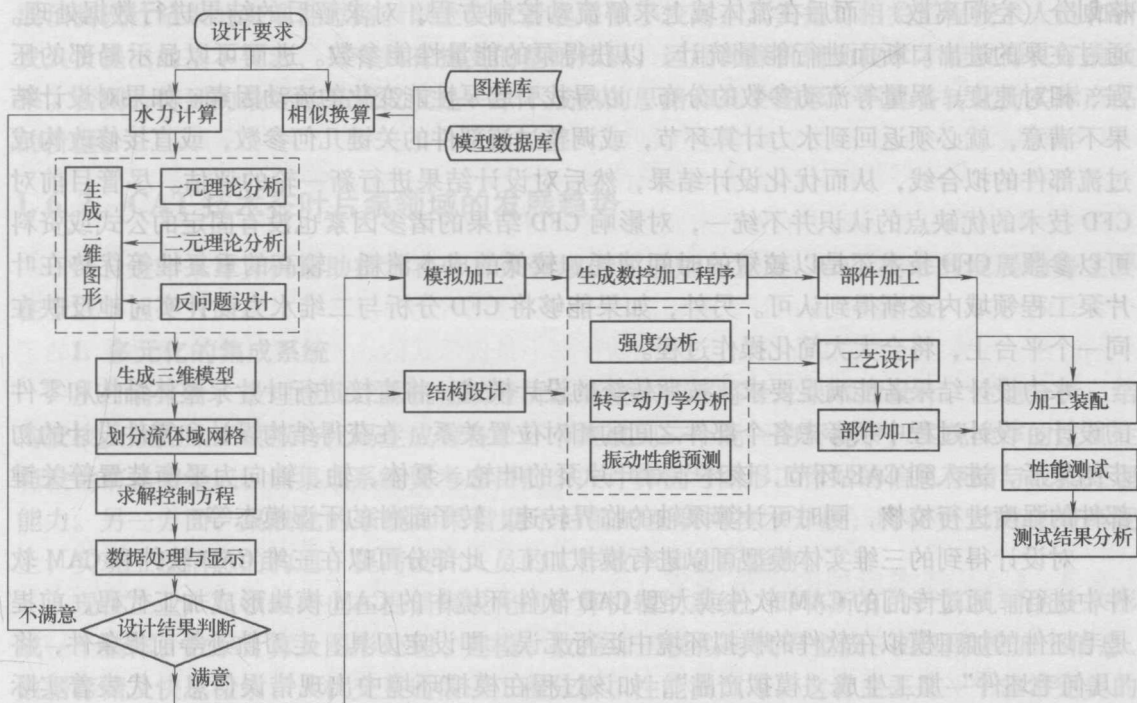


图 1-3 叶片泵计算机辅助技术的实施过程

设计者形成的水力设计概念首先转化为二维图形（由于目前我国常用的产品设计方法仍然是“自底向上”的方法，即先有二维，再转化为三维，所以本书中遵循这一思路。但应提醒读者，如果能够先获得三维模型，再生成二维图形，将会大大提高计算机辅助技术实施的效果，在后续章节可以看出这一理念实施的必要性），该二维图形在 CAD 软件平台上可进行编辑、存储和输出。值得注意的是，水力设计部分二维绘图过程的实现目前有两种常用的方式，一是将设计者根据几何参数形成的草图（draft）绘制在 CAD 软件界面上，该过程中设计者将独立确定取点的精度、关键拟合线的形状等，该过程得到的图形准确、规范、人为操控性强，但耗费时间；二是借助水力设计软件，采用用户输入设计参数、计算机程序完成一部分的参数计算与曲线拟合、用户部分参与绘图过程的控制的方式，该方式大大简化了设计的过程，提高了设计的效率。有一些叶片泵水力设计作为商用 CAD 软件的二次开发程序，所输出的结果直接与商用 CAD 软件环境相融合；另外一些应用软件不借助于商用 CAD

软件而独立运行,其最后的输出结果也可以通过输出接口转化为常用 CAD 软件可以读入的图形格式。

在二维设计软件中常采用的设计方法有两种,一种为正问题设计方法,另一种为反问题设计方法。这两种方法是叶轮机械设计中的常用方法,在本书的第 3 章中也会对这两种方法进行介绍。二维水力设计的任务是生成所有过流部件的水力图。在获得二维水力设计的初步结果后,设计人员对流体在叶片泵内的连续流动状况就有了大致的了解。至于如何判断设计结果是否能够满足设计要求,原来的方法是将模型泵加工完毕后,根据实际测量的结果进行判断。该方法的优点是可靠性强;缺点是时间长、成本高。目前多采用 CFD 技术进行设计结果的评价,即在二维水力图的基础上,生成全流道的水体三维模型,对三维求解域进行网格划分(空间离散),而后在流体域上求解流动控制方程,对求解后的结果进行数据处理。通过在泵的进出口断面进行能量统计,以获得泵的能量性能参数。进而可以显示局部的压强、相对速度、涡量等流动参数的分布,以寻找引起泵性能变化的流动因素。如果对设计结果不满意,就必须返回到水力计算环节,或调整过流部件的关键几何参数,或直接修改构成过流部件的拟合线,从而优化设计结果,然后对设计结果进行新一轮的评估。尽管目前对 CFD 技术的优缺点的认识并不统一,对影响 CFD 结果的诸多因素也没有固定的公式或资料可以参照,CFD 技术还是以较短的时间消耗、较低的成本消耗、较高的重复性等优势在叶片泵工程领域内逐渐得到认可。另外,如果能够将 CFD 分析与二维水力设计实时地反映在同一个平台上,将会大大简化操作过程。

水力设计结果若能满足要求,按照传统的设计模式,将直接进行叶片泵整体结构和零件的设计,设计过程中须考虑各个部件之间的相对位置关系。在获得结构设计和零件设计的初步结果后,进入到 CAE 环节,该环节对叶片泵的叶轮、泵体、轴、轴向力平衡装置等关键部件的强度进行校核,同时可计算泵轴的临界转速、转子部件的干湿模态等。

对设计得到的三维实体模型可以进行模拟加工。此部分可以在三维 CAD 软件和 CAM 软件中进行。通过专门的 CAM 软件或大型 CAD 软件环境中的 CAM 模块形成加工代码,前提是毛坯件的加工模拟在软件的模拟环境中运行无误,即设定刀具、走刀轨迹等前提条件,将“几何毛坯件”加工生成“模拟产品”,如该过程在模拟环境中出现错误信息,代表着实际加工过程可能出现错误。经过校验无误后,生成的加工代码将被输入到数控加工中心,进行实际加工。从目前的技术水平来看,叶片泵部件中最为复杂的扭曲叶片已实现了 5 轴联动加工,其加工精度已经大大超过了传统的模具加工。

在所有的设计分析环节完成后,如果可能,将所有的泵零件的三维模型进行模拟装配,以检查部件之间的装配干涉,同时为泵产品提供更为详细的信息和技术资料。所有的图形资料完成、转入加工环节后,应设计工艺过程,而后进行部件加工。当所有的部件加工完毕后,进行实物装配,装配完成的泵在符合测试标准的试验台上进行试验,根据试验要求开展外特性、汽蚀、振动、噪声、稳定性等试验项目。在试验过程中,传统的人工读取数据的方式已经被现代测控与数据采集、分析、处理系统所代替。不但测试过程的操作大大简化、减少了人为误差、提高了数据采集精度,而且可以实时地监测和分析所测量的参数,对测量数据可进行存储操作。当在试验台上开展叶片泵性能测试时,试验系统的流量、叶片泵转速等的调节可以由 CAT 实现,而介质温度、泵进出口的压差、汽蚀罐内的真空度、流量、转速等参数可以借助 CAT 进行实时监控。CAT 的构建在很大程度上需要自动控制、PLC 编程等

方面的知识,更需要流体机械基础知识的支撑。CAT 的程序一般是自行开发的应用程序,该程序将根据不同的试验台、不同的测量仪器、不同的数据采集要求等有针对性地进行开发。

计算机辅助技术是一种有效的手段,但计算机辅助技术应用的过程绝不是傻瓜式的过程,对于计算机辅助技术得到的结果也绝不像记录实验数据那样简单。如果对流体机械专业的理论与应用知识一知半解,即使具备所有实施计算机辅助技术的硬件和软件条件,计算机辅助技术也发挥不出相应的作用。应用计算机辅助技术的人员要具备叶片泵的设计知识,即具备叶片泵设计所需的流体力学、材料力学、弹性力学、设计理论、结构原理等基础知识,掌握水力设计和结构设计的过程,这样才能针对给定的设计参数,构思设计方案,并且要形成预测设计结果的宏观性思路。以上要求看起来似乎较高,其实是对相关工程技术人员和研发人员提出的基本要求,只有具有扎实的基础知识,运用计算机辅助技术才能取得良好的效果。否则,得到的最终结果就仅仅是一个不成熟的思路和几个图形,不具备转化为实际产品的价值。

1.6.2 CAT 技术在叶片泵领域的发展趋势

结合近年来计算机辅助技术在叶片泵领域内的应用与发展,CAT 技术的发展趋势主要在于以下五个方面。

1. 多元化的集成系统

从目前来看,最理想的计算机辅助分析系统应该能够将叶片泵水力设计、性能分析、结构校核及数控加工模拟与代码生成等各个环节集成到一个统一的环境中,实现操作的连贯性与设计信息的集成。该集成系统要考虑目前个人计算机与图形工作站的信息存储与数据处理能力。另一方面,集成化的系统如果借助于目前的互联网技术开展,将在更大的空间跨度上,实现工程信息的沟通,提高设计人员的工作效率和创新能力。

现在工业产品领域内也在提倡集成化的计算机辅助系统,即将所有的计算机辅助技术形成一个整体:数字计算及图形处理、建模、数控加工模拟与代码生成、处理数控加工信息、数据存储及快速检索、人机交互通信、工程分析、性能测试等。这看上去是一个非常完美的构想,然而在叶片泵领域内,由于存在着与其他工业产品相区别的特点,从目前来看,该集成化的计算机辅助系统构建的难度较大。

2. 软件系统的智能化水平

智能化是计算机辅助技术发展的必然趋势,其主要特点是不仅能处理数据,而且能处理知识,功能远远超过了计算机范畴,它能进行推理、优化、选择、判断并做出决策。这样的系统并不是一个单纯的低层次的处理系统,而应具备一定的智能水平。同时,软件系统的容错能力要好,该系统要能够适用于不同知识层次的用户。

3. 处理技术并行化

并行计算(Parallel Computing)技术可使处理速度提高几个数量级。近年来,随着小型计算机工作站的硬件发展,在单一工作站上也可以实施并行计算。许多计算机辅助设计软件都开发了相应的并行计算模块,即在并行计算过程中,将一个计算任务分解为多个子任务,分配给不同的处理器,各个处理器之间相互协同、并行地执行子任务,从而达到加速求解速度,或者提高所求解问题规模的目的。为成功实施并行计算,处理器之间必须可以相互通