

YELI BIANJUQI DE XINXING SHEJI
LILUN YU FANGFA

液力变矩器的 新型设计理论与方法

YELI BIANJUQI DE XINXING SHEJI LILUN YU FANGFA

刘仕平 著

2
中国环境出版社

液力变矩器的新型设计 理论与方法

刘仕平 著

中国环境出版社·北京

图书在版编目(CIP)数据

液力变矩器的新型设计理论与方法/刘仕平著. —北京: 中国环境出版社, 2015.5

ISBN 978-7-5111-2351-0

I. ①液… II. ①刘… III. ①液力变扭器—机械设计 IV. ①TH137.332

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 074101 号

出版人 王新程
责任编辑 连 斌 赵楠婕
责任校对 尹 芳
封面设计 宋 瑞

出版发行 中国环境出版社
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 编辑管理部
010-67110763 生态(水利水电)图书出版中心
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京市联华印刷厂
经 销 各地新华书店
版 次 2015 年 7 月第 1 版
印 次 2015 年 7 月第 1 次印刷
开 本 787×960 1/16
印 张 10.5
字 数 201 千字
定 价 31.00 元

【版权所有。未经许可, 请勿翻印、转载, 违者必究。】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

序 言

液力变矩器是广泛应用的叶片式机械，虽然其独特的优点非常突出，但效率不够高的缺点也是非常明显的。因此，深入开展液力变矩器的研究，进一步改善其性能也是非常迫切的。正是在这种背景下，出版这本《液力变矩器的新型设计理论与方法》是十分必要的。

该书内容新颖、特色鲜明，在液力变矩器的设计理论和设计方法上有多项重大创新，包括液力变矩器的流线设计理论、流线弯曲能量损失理论、环面流线设计法、双圆弧设计法、平面流线设计法、自动建模技术等。

液力变矩器的流线设计理论建立在流体质点螺旋运动的基础之上，与流体在液力变矩器流道内的运动情况比较相符。广义环坐标系的提出解决了液力变矩器流动难以描述的难题，开辟了液力变矩器解析研究与解析设计的新领域。轴面流线方程、环面流线微分方程、环面流线方程、叶片表面方程和三维流线方程的建立，构成了液力变矩器流线设计理论体系。

液力变矩器的流线弯曲损失理论的建立对于液力变矩器能量损失的认识有了新的飞跃，具有重要的理论意义。首先，流线弯曲惯性力理论论证了圆形循环圆的合理性；其次，科学地解释了Ejiri E和Kubo M的研究结果；再次，为多年实践的统计规律——“近似圆形的循环圆形腔的效率比其他形状的形腔高”提供了理论支持；最后，给人们提出了一个指导思想：流场设计应当遵循曲率半径最大的原则。

环面流线设计法是液力变矩器设计方法上的重大创新，可以克服传

统设计方法——保角变换法的三个弊端：（1）不同区段变换的线性比例不同；（2）不能反映叶片真实的线性尺寸；（3）计算工作量大。环面流线设计法不仅简化了设计程序，大大缩短了设计周期，而且使设计对象的物理概念更加明确。环面流线设计法是一种普适的设计方法，可以用于泵轮设计、涡轮设计和导轮设计。因此，有了环面流线设计法可以淘汰传统的设计方法，从而刷新了液力变矩器设计的百年历史。

双圆弧设计法和平面流线设计法是在环面流线设计法的基础上，再考虑流线弯曲损失理论，是对环面流线设计法的优化。在一定的设计条件下，可以进一步改善液力变矩器的性能。

平面流线法将流场的三维流线布置在一个倾斜的平面之内，为制造平面叶片打开了方便之门。

等曲率三维中心流线设计法不仅将液力变矩器的流场设计成准二维的流场，还将三维中心流线设计成一条半径较大的空间圆弧，可以大大降低流线弯曲造成的能量损失，有利于液力变矩器效率的提高。

自动建模技术的提出给人们建立了一个新的观念，它可以给流场计算提供精确的模型，自动建模技术的优势是不言而喻的。

总之，本书是一本比较有理论价值和应用价值的著作，希望本书对于液力变矩器的研究、设计和教学工作有所帮助，并希望对开展液力变矩器的研究起到一定的推动作用。

权龙

2014年12月

前 言

由于液力变矩器能够柔性地传递大功率的独特性能,因而被广泛用于汽车、工程机械、军用车辆的主传动上,大大改善了这些车辆的牵引性能。然而液力变矩器一个明显的缺点是效率不够高,影响车辆的燃料经济性。由于液力变矩器流场异常的复杂性,仍有许多问题没有搞清楚。因此,深入开展液力变矩器设计理论和设计方法的研究具有重要意义。作者将博士学位论文的研究成果写成这本《液力变矩器的新型设计理论与方法》,希望对于液力变矩器的研究、设计或者教学工作有所帮助和启发。

全书共分 10 章,第 1 章绪论部分论述了国内外液力变矩器研究、设计和应用现状。第 2 章介绍了液力变矩器的基本知识。第 3 章系统地介绍了液力变矩器的流线设计理论,包括液力变矩器的流线设计理论基本假设、适合液力变矩器流场描述的坐标系、流体质点复杂的运动分解方法、轴面流线方程、环面流动微分方程等。第 4 章详细介绍了液力变矩器的环面流线设计法,包括液力变矩器循环圆的确定、轴面流线方程的近似简化、叶片与内外环之间夹角的校核、中心流面的参数方程、叶片厚度对流线的影响、叶片表面方程、三维流线方程等。第 5 章介绍了液力变矩器流线弯曲损失理论和双圆弧设计法,包括流线弯曲惯性力对路径累计效应的推演分析和圆弧环面流线方程的推导过程。第 6 章介绍了平面流线设计法的思想和设计过程。第 7 章介绍了等曲率三维中心流线设计法。第 8 章介绍了自动建模技术。第 9 章介绍了液力变矩器流道网格的划分、边界条件的设置与计算。第 10 章介绍了液力变矩器流场

的仿真过程。

本书的特色在于“新”，包括流线设计理论、流线弯曲能量损失理论、环面流线设计法、双圆弧设计法、平面流线设计法、等曲率三维中心流线设计法、自动建模技术等均为作者近期的研究成果。

本书综合利用了微积分、流体力学、矢量代数、数值分析等基础理论和程序设计、ADS、CFD 等技术，公式较多，旨在建立液力变矩器的解析研究与设计体系。在语言表述方面尽量通俗详细、前后连贯，力求不要给读者抽象的感觉。

由于作者水平有限，加之时间仓促，书中可能有错误之处，敬请各位专家和读者批评指正。

刘仕平

2014 年 12 月

符号说明

- D ——液力变矩器的有效直径 (mm)。
- D_0 ——液力变矩器的最小直径 (mm)。
- m ——液力变矩器的直径比。
- h ——极点到旋转轴的距离 (mm)。
- R ——设计流线的几何半径 (mm)。
- r ——流场中某一点的旋转半径 (mm)。
- t_p ——叶片周向厚度 (mm)。
- t_n ——叶片法向厚度 (mm)。
- x 、 y 、 z ——直角坐标 (mm)。
- θ ——广义环坐标系的极角坐标 (rad)。
- ρ ——广义环坐标系的极半径坐标 (mm)。
- s ——广义环坐标系的偏移弧长坐标 (mm)。
- ϕ ——偏移弧长坐标对应的偏转角 (rad)。
- ω ——工作轮的旋转角速度 (rad/s)。
- β ——工作轮的叶片角 (rad)。
- γ ——叶片和内外环之间的夹角 (rad)。
- ψ ——叶片的流道角 (rad)。
- ξ 、 ε 、 η ——参数。
- δ 、 σ ——常数。
- α 、 λ ——角度。
- τ ——过流面积为有效直径圆面积的比值。

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 液力变矩器的性能特点	1
1.2 液力变矩器的发展和应用概况	2
1.3 液力变矩器流动理论研究进展	4
1.4 液力变矩器设计方法研究进展	5
1.5 液力变矩器流场数值模拟研究进展	6
1.6 液力变矩器流场测量研究进展	7
1.7 液力变矩器动态特性研究进展	8
1.8 液力变矩器的发展前景	9
第 2 章 液力变矩器的工作原理和特性曲线	11
2.1 液力变矩器的工作原理	11
2.2 作用在工作轮上的力矩	15
2.3 液力变矩器的特性曲线	20
2.4 液力变矩器的分类	23
2.5 液力变矩器的基本性能及其评价	26
第 3 章 液力变矩器的流线设计理论	31
3.1 概述	31
3.2 坐标系的确定	32
3.3 轴面流线方程	33
3.4 进出口边的确定	37
3.5 环面流线的数学描述	42
第 4 章 液力变矩器的环面流线法设计	47
4.1 环面流线法设计的基本思想	47

4.2	轴面流线方程的近似简化.....	47
4.3	叶片设计	52
4.4	中心流面的参数方程.....	57
4.5	三维流线的曲率半径.....	58
4.6	叶片与内外环之间夹角的校核.....	60
4.7	叶片厚度对流线的影响.....	66
4.8	叶片表面坐标点的数值计算.....	67
4.9	叶片周向厚度的计算.....	81
4.10	叶片轴面面积和排挤系数的计算.....	83
4.11	三维流线方程.....	85
4.12	自动化设计和自动化绘图.....	86
4.13	环面流线设计法的特点.....	86
第5章	流线弯曲损失理论和双圆弧设计法.....	88
5.1	流线弯曲损失理论.....	88
5.2	液力变矩器循环圆的确定.....	89
5.3	叶片进出口弧长偏移量和切线斜率的计算.....	90
5.4	环面流线设计	90
第6章	液力变矩器的平面流线法设计.....	96
6.1	相对速度平面的确定.....	96
6.2	相对速度流线的参数方程.....	99
6.3	铸造叶片表面的参数方程.....	101
6.4	冲压叶片表面的方程.....	101
第7章	等曲率三维中心流线设计法.....	104
7.1	三维中心流线半径和圆心的计算.....	104
7.2	设计流线的数学方程式.....	107
7.3	任意轴面流线的数值计算.....	109
7.4	从轴面流线求三维流线.....	112
7.5	内外环轴面流线的拟合.....	114

第 8 章 自动建模技术.....	116
8.1 内外环轴面流线的圆弧逼近.....	117
8.2 平面叶片分割成的流道建模.....	121
8.3 曲面叶片分割成的流道建模.....	128
第 9 章 网格划分与边界条件设置.....	134
9.1 网格的划分	134
9.2 网格质量的检查	134
9.3 边界条件的设置	136
9.4 边界常数的计算	137
第 10 章 液力变矩器流场计算.....	143
10.1 概述	143
10.2 数值计算方法	143
10.3 Fluent 仿真	144
10.4 仿真结果	148
10.5 运行结果分析	150
参考文献	151

第1章 绪论

液力变矩器(hydrodynamic torque converter)是以液体作为工作介质、利用液体的动能进行能量传递的装置。由德国工程师费丁格尔(Hermann Föttinger) 1905 年发明的这种叶片式流体机械,第一次实现了无磨损传动(wear-free transmission)、无级变速(stepless variable speed)和无级改变扭矩,是传动技术上的一次革命,标志着一种新型传动原理——液力传动原理(hydrodynamic transmission principle)的诞生。液力变矩器最早用于船舶上,以解决动力性能不匹配的问题。液力变矩器大量用于车辆并取得成功,从而使液力变矩器得到了极大地发展。

1.1 液力变矩器的性能特点

液力变矩器的主要优点如下:

(1) 使车辆具有良好的自动适应性

当外载荷增大时,液力变矩器能使车辆自动增大牵引力,同时使车辆自动减低速度,用以克服增大的外载荷。反之,当外载荷减小时,液力变矩器又能使车辆自动地减小牵引力,提高车辆的行驶速度。因此,液力变矩器极大地改善了车辆的牵引特性。

(2) 使发动机具有良好的过载保护性

液力变矩器将发动机的工作点限定在一定的工作范围之内,无论外载荷多大,而施加在发动机上的最大力矩是固定值,这就避免了发动机因外载荷突然增加而出现熄火现象。

(3) 提高车辆的使用寿命

由于液力变矩器的工作介质能够吸收并减少来自发动机的振动与冲击,同时也能够吸收并减少来自路面外载荷的振动与冲击(这就是液力传动的滤波作用),因而可以提高车辆零部件的使用寿命。以重型载重汽车为例,在使用了液力传动之后,发动机的寿命可以增加 47%,变速箱的寿命可以增加 400%,后桥差速器

的寿命可以增加 93%。这对于经常处于恶劣环境下工作的工程机械尤其具有重要意义。

(4) 提高车辆的通过性

在使用了液力传动之后,可以使车辆以爬行的速度行驶,这样可以不破坏路面,不使附着力降低,这对于军用车辆、农业机械等越野车辆尤为重要。

(5) 提高车辆的舒适性

采用液力传动后,车辆的起步平稳,加速均匀,并在较大的范围内无级变速,可以吸收和减少振动与冲击,从而可以提高车辆的舒适性。

(6) 简化了车辆的操作

液力变矩器本身就是一个自动无级变速器,使用了液力变矩器之后,发动机的动力范围得到了扩大,故变速器的档位数可以减小,从而简化了车辆的操作。而且不必担心发动机的过载熄火问题,从而大大降低了司机的劳动强度。

(7) 能容量大

液力变矩器传递功率的大小和转速的三次方成正比,和直径的 5 次方成正比,能容量比较大,可以传递较大的功率。例如德国 VOITH 公司液力变矩器产品传递的功率可达 26 000 kW。相比之下,其他传动形式(机械传动、电力传动、液压传动、气压传动)要传递如此之大的功率要困难得多。

液力变矩器的主要缺点是传动效率不够高,且结构较为复杂,制造成本相对也比较高。

液力变矩器一般应用在机器的主传动系统中,与原动机联合工作,借以达到保护和改善机器性能的目的。

1.2 液力变矩器的发展和应用概况

液力变矩器的优点非常突出,液力变矩器大功率柔性传动的特性一直是非常诱人的性能,而且是其他传动无法相比的。正因如此,液力变矩器被广泛应用于汽车、火车、轮船、工程机械、军用车辆的主传动上。

国外已普遍将液力传动用于轿车、公共汽车、豪华型大客车、重型汽车、牵引车辆、工程机械和军用车辆等。美国自 20 世纪 70 年代起,每年液力变矩器在轿车上的装备率都在 90%以上,液力变矩器的产量在 800 万台以上。在市区的公共汽车上,液力变矩器的装备率近于 100%。在重型汽车方面,载货量 30~80 t 的重型矿用自卸车几乎全部采用了液力传动。迄今为止,在功率超过 735 kW,载货量超过 100 t 的重型汽车上液力传动也得到了应用。如阿里森(Allison)的

CLBT9680 系列液力机械变速器就应用于功率为 882.6 kW、装载量为 108 t 的矿用自卸车上。在某些非公路车辆上以及大部分坦克及军用车辆上也装备了液力传动。在欧洲和日本,近几年来装备液力传动的车辆也有显著增加。国外较大吨位的装载机、推土机等工程机械多数都采用了液力传动,甚至在航空航天机械中也得到成功应用。例如在美国的 B-1 型战略轰炸机上燃气轮机的启动也采用了液力传动。

我国在 20 世纪 50 年代就将液力变矩器应用到红旗牌高级轿车上,70 年代又将液力变矩器应用于重型矿用汽车上。目前,我国车辆液力变矩器主要应用于机车、工程机械和新一代的主战坦克及步兵战车等车辆上。液力传动在国内工程机械上的应用始于 60 年代,由天津工程机械研究所和厦门工程机械厂共同研制的 ZL435 装载机上的液力传动开始的。80 年代由天津工程机械研究所研制开发了“YJ 单级向心涡轮液力变矩器叶栅系统”和“YJSW 双涡轮液力变矩器系列”。两大系列目前已成为我国国内工程机械企业液力变矩器的主要产品,其产品的主要性能指标已达到国外同类产品的先进水平。80 年代北京理工大学为军用车辆研制开发了 Ch300、Ch400、Ch700、Ch1 000 系列液力变矩器,突破大功率、高能容、高转速液力变矩器的设计与制造关键技术,达到国际先进水平,满足了军用车辆的使用要求。一些合资企业生产的轿车和重型载重车等也应用了进口的液力变矩器。同国外相比,我国车辆应用液力变矩器虽然有了一定基础,但应用范围还不宽,应用数量还比较小,在中型载货汽车、公共汽车、越野汽车等车辆上没有应用或应用极少,所以液力变矩器的发展存在着广阔的空间。

目前广泛使用的液力变矩器主要有以下几种形式:

(1) 普通三元件闭锁式液力变矩器。这种液力变矩器结构简单,车辆起步和低速行驶时,主要利用变矩器的增矩性能,换挡时利用变矩器的缓冲性能,高速时将变矩器闭锁,充分利用机械传动的高效性能。

(2) 多工作轮液力变矩器。这类液力变矩器主要用于需要起动转矩大的工程机械、运输车辆和需要液力变矩器多工况工作的机械上。

(3) 可调(导叶)式液力变矩器。当对动力性能具有恒速或恒力等特殊牵引特性要求时,液力变矩器必须具有可调节反馈控制的功能,并在动态指标方面满足一定的要求。主要应用领域是具有特种牵引要求的各种军、民用机械,如空中加油软管曳绕卷盘机械、主被动双向运动恒力加载试验机械、大型固定式提升机械、陆基或船基水下物件曳绕机械等。

(4) 牵引-制动型液力变矩器。在保证牵引能力的同时,还充分利用液力变矩器的减速制动性能。

1.3 液力变矩器流动理论研究进展

液体在液力变矩器工作轮流道中的流动是黏性、不可压缩的三维湍流流动。由于液力变矩器的流场非常复杂,长期以来在液力变矩器的工程设计中普遍采用的是一维束流设计理论^[1-2]。由于它的简便性和一定的合理性,因而在工程上具有实用价值,目前仍是液力变矩器的主流设计理论。一维束流设计理论的优点是物理概念明确、设计计算简单、易于掌握等优点。但由于一维束流设计理论所作的假设较多以至于与变矩器内部实际流场有较大差别,所以用一维束流理论设计出来的变矩器往往不能达到预期的性能指标,而要经过反复的试验和改进,这就大大地增加了试验量和研制周期。随着车辆、工程机械等行业对液力变矩器性能要求和研制周期要求的不断提高,给液力变矩器的研究提出了新的课题。不少学者在液力变矩器流动理论的研究上付出了很多努力,取得了一定进展。

在一维束流理论的基础上发展了二维流动理论^[3]。这种理论认为,工作轮中的流动只在一组轴面内进行,且其中每一平面的速度分布和压力分布都是相同的,即流动参数是两个空间坐标的函数。在给定了叶片的边界形态和流量后,即可用数学方程求出该平面上任一点的流动参数。在二维流动理论基础上建立起来的二维或准二维性能预测和叶栅设计方法,把原来由平均流线所代表的进、出口速度和叶片参数改为沿进出口边或沿内外环具有某种变化规律的分布。应用二维流动理论,人们对液力变矩器的性能预测、叶片设计及绘制方法等进行了大量研究,取得了较好的效果。

二维流动理论描述纯离心式或轴流式工作轮中的流动情况与实际较为接近,而描述常用的向心式或一般混流式工作轮,则与实际差别较大。液力变矩器内部流体计算方法的发展方向是三维流动理论,描述黏性流体三维流动的方程是纳维-斯托克斯(Navier-Stokes)方程,简称N-S方程。由于N-S方程的复杂性,直接求解非常困难,近十多年来,人们多用有限元法、有限差分法或有限体积法求三维流动的微分方程或积分方程。

尽管人们对液力变矩器内部流场的研究已经取得了一定的进展,但是由于液力变矩器内部流场的特殊性和复杂性,完全抛开一维束流理论来进行液力变矩器设计计算的条件还不成熟,能准确反映液力变矩器内部流场状况的理论尚未形成,液力变矩器的研究设计方法并没有从根本上得到改善,对液力变矩器还不可能进行一步到位的设计,往往要有多次反复,需要做大量的实验。

1.4 液力变矩器设计方法研究进展

液力变矩器的设计内容主要有叶栅进、出口参数设计,液流流道设计,特性计算,整体结构设计及供油系统设计^[4]。叶栅进、出口参数设计是指根据给定的性能指标确定最佳的叶栅进、出口参数,包括流道的进、出口宽度和半径以及叶片的进、出口角度和厚度。目前最常采用的设计方法有三种:基型设计法、统计设计法和基于流场理论的设计法。基型设计法选择性能与设计要求的液力变矩器作为设计基型,循环圆的形状,叶轮的布置,叶片的形状,叶片的数目,各种计算系数均参考基型选择,几何尺寸按相似原理进行确定。统计设计法根据现有液力变矩器的种类和性能指标,有针对性地进行综合分析,统计出液力变矩器的性能、叶轮尺寸及叶片角度的关系,制定出图表或解析式作为设计的参考。设计时根据性能要求选定一些参数作为设计计算的初始点,根据统计图表或解析式确定所设计的液力变矩器的各项参数。基于流场理论的设计法根据流束理论及守恒定律建立叶栅进、出口参数设计计算的基本数学关系式,根据设计性能要求及制造工艺条件建立约束方程,然后通过选择合适的优化目标函数、优化计算方法及初始参数进行设计计算。

液流流道是由循环圆内、外环曲面及叶片曲面组成的,其设计包括循环圆设计和叶片设计。循环圆设计是确定循环圆的外环形状,内环形状,设计流线形状及叶片的进、出口边的轴面位置和形状。叶片设计是在循环圆设计和叶栅进、出口参数设计基础上进行的,叶片的形状直接影响液流流道的形状及叶轮的制造^[5]。叶片设计的方法可分为二维设计、准三维设计和三维设计。由于流场理论研究的制约,直接进行叶片的准三维设计和三维曲面设计困难较大,而且优势不是很明显。目前广泛应用的叶片设计方法仍是环量分配法^[6]和投影于单柱面或多圆柱面的保角射影原理。王健等探讨了液力变矩器叶片三维成型方法,提出了叶片三维成型方法的基本设计流程。通过对不同参数变化规律生成的泵轮、涡轮、导轮的叶形进行对比分析,总结出液力变矩器叶片角变化对液力变矩器性能影响的基本规律,通过 CAD/CFD 技术完成叶片的设计和相应变矩器性能的设计计算^[7-8]。才委等对液力变矩器的现代设计方法作了细致深入地研究,基于 W305 液力变矩器进行了流场数值模拟以及流场特性分析,探讨了叶形的三维设计方法,并且建立了液力变矩器的现代设计方法体系^[9]。何仁等探讨了液力变矩器特性参数的优化方法^[10]。魏巍等为实现液力变矩器叶栅的完全三维设计及其优化开发了一套包含流束初值搜索、循环圆与叶形的参数化设计、网格划分、流场分析、试验设计和

优化算法在内的三维优化设计系统,并为各环节开发了相应设计工具^[11]。张锡杰等介绍了液力变矩器复杂叶栅测绘和反求的具体过程,通过硅橡胶制模、光栅扫描测绘、三坐标测量等方法获得流道的形状和位置,使用 Imageware 处理点云数据,用 UG 完成最终的叶轮造型^[12]。赵罡等采用光电非接触三坐标扫描测量仪对液力变矩器叶轮和叶片进行了反求,解决了流道和叶片难以测量的问题;通过实验对液力变矩器外特性进行反求,并与理论计算结果进行对比分析,为内特性反求提供了条件。在此基础上进行了流量特性、能头特性、损失特性的反求^[13]。闫清东等提出变矩器叶栅的反向设计方法,对测绘数据进行曲面重构,并利用 UG/open API 对该方法进行软件的二次开发^[14]。李有义等研究了液力变矩器叶栅绘形的计算机辅助设计方法,提出了叶栅绘形的三维模型设计方法^[15-16]。王健等探讨了液力变矩器的 CAD/CFD/CAM 一体化设计^[17]。这些研究成果表明:我国在液力变矩器设计方法和设计手段方面取得了较大进步。

1.5 液力变矩器流场数值模拟研究进展

计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)作为流体力学的第三研究方法^[18],近几年得到了迅速的发展。目前已经出现一大批用于 CFD 计算的商业及非商业软件。这些软件主要运用的数值计算方法是有限体积法、有限元法和有限差分法等。而商业软件凭借其广泛的适用性受到了各个层次研究人员的欢迎,其中主要有 FLUENT、STAR-CD、ANSYS 等计算流体动力学软件。这些软件作为流场计算的有力工具,可用于分析二维及三维流场,可以处理的问题包括:层流或湍流、传热或绝热、可压缩或不可压缩、牛顿流或非牛顿流、多组分传输等,同时提供了多种湍流模式进行湍流计算,一般采用在工程中应用比较成熟的二方程湍流 $k-\varepsilon$ 模型及其改进模型如 RNG 模型和 NKE 模型等。它们不仅能对常规流动问题进行较为准确的求解,同时还可以进行网格局部细分,分析流体-固体耦合场流场等。显然,这些软件也可以作为液力变矩器流场分析的有力工具。计算机技术的进步和流场计算软件的涌现为液力变矩器的流场研究奠定了良好的基础,不少学者已经开展了这方面的研究工作。Yamada 等用边界元法对导轮流场进行了数值分析^[19]。Kunz 等对泵轮流场进行了数值模拟^[20]。Chang 等对泵轮求解 Navier-Stokes 方程,采用了混合平面法和标准 $k-\varepsilon$ 紊流模型^[21]。Attibele 等对原型液力变矩器和改型后的液力变矩器进行了数值模拟^[22]。Cigarini 和 Jonnavithula 用商用 STAR-CD 软件对液力变矩器的流场进行了数值计算,并将数值计算结果和测量结果进行了比较^[23]。Lim 等用商用 CFD 软件对液力变矩器的流场进行了数