



基于多物理场耦合的 插装型锥阀可视化研究

©郑淑娟 / 著

非
外
借



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

河南省高等学校重点科研项目计划资助 (16A460020)

华北水利水电大学高层次人才科研启动项目资助 (201531)

基于多物理场耦合的 插装型锥阀可视化研究

◎郑淑娟 / 著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

液压阀相关的科学问题,各类型液压阀的流量特性,作用在阀芯上液动力的大小和方向,液动力对阀工作可靠性、操作灵活性和动静态特性的影响,内部流场的可视化计算等,一直是流体传动与控制技术领域中的基础研究问题,也是发展高性能液压控制阀必须解决的关键问题。本书主要采用数值模拟技术对插装型锥阀的特性进行分析研究,实用性强,通用性高,实例丰富,是基于作者多年来的研究与应用成果编写而成。

本书适用于机械类专业从业人员,特别是液压元件的研发、制造人员,也可供高等院校有关专业的师生参考阅读,对其他相关专业的工程技术人员也有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

基于多物理场耦合的插装型锥阀可视化研究 / 郑淑娟著. --北京:中国水利水电出版社,2018.8

ISBN 978-7-5170-6801-3

I. ①基… II. ①郑… III. ①插装式阀-液压控制阀-研究 IV. ①TH137.52

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第202143号

责任编辑:陈洁

封面设计:王伟

书 名	基于多物理场耦合的插装型锥阀可视化研究 JIYU DUOWULICHANG OUHE DE CHAZHUANGXING ZHUIFA KESHIHUA YANJIU
作 者	郑淑娟 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: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)、82562819 (万水)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	三河市兴国印务有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 12.25印张 219千字
版 次	2018年11月第1版 2018年11月第1次印刷
印 数	0001-2000册
定 价	49.00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

前 言

社会需求是推动技术发展的强大动力。液压技术飞速发展，要求液压系统满足高压、大流量，但体积小、重量轻，且高精度、高效率，液压插装阀技术在此形势下应运而生，二通插装阀的出现将液压技术的发展提高到了一个崭新的阶段。在某些应用场合，插装阀是提高生产力和竞争力的唯一选择。

液压阀相关的科学问题，各类型液压阀的流量特性，作用在阀芯上液动力的大小和方向，液动力对阀工作可靠性、操作灵活性和动静态特性的影响，内部流场的可视化计算等，一直是流体传动与控制技术领域中的基础研究问题，也是发展高性能液压控制阀必须解决的关键问题。

本书主要采用数值模拟技术对插装型锥阀的特性进行分析研究，共分五章。第1章，系统地回顾了液压阀的研究进展。第2章将数值模拟计算中的计算模型进行了概述。第3章是针对锥阀过流断面的计算。阀芯带锥但锥面不完整的锥台形锥阀和阀座带锥锥阀在计算流量时采用按完整锥面锥阀导出的过流面积计算公式会造成计算误差。从过流断面的定义出发，利用CFD流场可视化技术对锥阀的流场进行深入细致地研究分析，找出了其在整个大行程范围内不同开口度时的过流断面位置，并给出了理论计算公式。第4章是对锥阀液动力计算公式的修正。阀芯开口度大时，锥台形锥阀和阀座带锥锥阀过流断面的位置和计算发生变化，传统的理论公式对其液动力的计算也不再适用。液动力本质上是由流体运动所造成的阀芯壁面压力分布发生变化而产生的，故从流场分析入手，获得阀芯底部压力分布值，将压力相对作用面积积分，得到其液动力值，并细化

流场信息得知液动力产生的机理。为了便于工程实际使用，对于不同阀口形式锥阀，内外流工况不同时，选取不同的控制体积。根据动量定理推导出的相应的计算公式，最终给出了不同流动方向下阀口全行程时的液动力特性。锥阀进出口压差相同，进出口压力值低时，阀内流动状态变为两相流，与单相流的流动特征不同。但传统的液动力计算公式中，液动力与进出口压力差值成正比，与进出口压力值的大小无关，故不再适用。根据对阀内流场进行的两相流模拟仿真，对传统公式进行修正，推导出了适用于两相流状态下液动力的计算公式。第5章进行了插装阀液固热耦合分析，分析阀套和阀芯变形对于节流口过流面积及阀套阀芯间配合间隙的影响。首先根据液压阀流体流动过程的传热特点，对液流流动过程流场、温度场进行数值模拟，得到整个锥阀固体、液体区域内详细的温度场分布规律，最后给出热应力和液压力共同作用下的阀套阀芯变形量。在一定程度上可科学估算变形量对阀套阀芯配合间隙及阀口特性的影响，从而为阀套阀芯设计提供可供参考的依据。

由于作者水平有限，本书不足之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

作者

2018年4月

目 录

前言

第 1 章 引言	1
1.1 二通插装阀发展历程	1
1.2 二通插装型锥阀研究的关键技术	4
1.3 液压阀特性研究概述	8
1.4 液压阀液动力研究概述	20
1.5 液压阀多物理场耦合研究概述	22
第 2 章 理论基础	29
2.1 计算流体力学概述	29
2.2 湍流模型	31
2.2.1 RNG k - ε 湍流模式	34
2.2.2 湍流传热模型	35
2.3 两相流数学模型	36
2.3.1 Mixture 两相流模型	37
2.3.2 完整空化模型	39
2.4 多物理场耦合模型	42
2.4.1 多物理场耦合概述	43
2.4.2 多物理场耦合理论	45
第 3 章 锥阀过流断面的确定和计算	50
3.1 引言	50
3.2 阀芯带锥锥阀	54

3.2.1	计算模型的确立和计算条件·····	54
3.2.2	过流断面的可视化分析·····	55
3.2.3	过流断面的解析计算·····	70
3.2.4	内外流不同工况时过流断面的比较·····	79
3.3	阀座带锥锥阀·····	81
3.3.1	计算模型的确立和计算条件·····	81
3.3.2	过流断面的可视化分析·····	82
3.3.3	过流断面的解析计算·····	92
3.3.4	内外流不同工况时过流断面的比较·····	95
3.4	阀口过流特性研究·····	97
3.4.1	通流能力·····	97
3.4.2	抗汽蚀能力·····	103
3.4.3	阀套的影响·····	105
3.5	小结·····	107
第4章	液动力特性研究·····	108
4.1	引言·····	108
4.2	液动力的可视化分析·····	109
4.2.1	内流流动工况·····	109
4.2.2	外流流动工况·····	112
4.3	液动力的理论计算·····	114
4.3.1	内流流动工况·····	115
4.3.2	外流流动工况·····	124
4.4	两相流情况·····	125
4.4.1	阀内流场分析·····	126

4.4.2	液动力的理论计算	133
4.4.3	公式的验证	136
4.5	小结	138
第5章	插装型锥阀多物理场耦合分析	139
5.1	引言	139
5.2	计算模型	141
5.3	仿真结果分析	142
5.3.1	流场及温度场	142
5.3.2	阀套和阀芯变形量	155
5.4	小结	166
参考文献	167

第 1 章 引言

1.1 二通插装阀发展历程

液压阀作为流体传动与控制技术领域中最核心的控制元件，其性能的好坏直接影响整个系统性能的优劣和主机技术的先进性。社会需求永远是推动技术发展的强大动力，在大力发展装备制造业、发展先进制造技术的大背景下，在液压技术飞速发展，压力、流量不断提高，而要求体积、重量不断减小，提高精度，提高效率，降低噪声等形势下，液压阀在其功能品种与连接形式上不断更新换代，应运而生的液压插装阀技术在新的世纪仍将有着不可替代的优势，有着广阔的发展空间。

二通插装阀控制技术中主要采用座阀结构，其源自古老的水压传动。20 世纪 60 年代座阀技术最先应用于现代油压控制，并迅速发展，由于其领先的技术，逐步在全世界居于主导地位。1970 年液压元件为顺应时代要求，向标准化、集成化、国际化、小型化、模块化方向发展。为满足大功率高效率的要求，同时加上爆发的二次能源危机对节能的迫切需求，使得液压介质向高水基或合成液介质方向发展，二通插装阀在西德闪亮登场。1970 年开始，符合企业各自标准的二通插装阀发展起来，现代二通插装阀技术的早期产品系列在欧洲一些具有座阀技术背景的公司先后形成。但是二通插装阀安装连接尺寸各公司要求不同，各配件不能互换，阻碍了二通插装阀技术的迅速发展。直到 1979 年才由各大公司联合制定出被世界各国采用的事实上的

国际标准，即二通插装阀安装孔的连接尺寸标准。同年，全系列的二通插装阀由 Rexroth 和 Vickers 率先推出。到 1980 年，各大公司争相推出了 DIN 系列二通插装阀。从此，欧洲各大公司持续保持原有的竞争优势，一直引领了二通插装阀控制技术的发展。后来日本及时从欧洲引进插装阀技术伴随其液压工业迅速崛起，在欧洲设有基地的一些美国的跨国公司也开始发展插装阀技术。与此同时，二通插装阀的 DIN 系列的控制技术全面引入电液比例控制技术，将液压控制系统设计产生了概念性的变革。此时插装阀控制技术使得液压技术的发展提高到了一个崭新的高度，在主级上采用座阀结构，回路设计原则体现液压阻力控制系统学。电液比例控制技术作为当时液压技术研究发展的热点之一，对插装阀的广泛推广有极大的促进作用。二通插装阀产品持续改进和不断革新并逐渐走向成熟。美国流体动力教育基金会 John J. Pippenger 特别推崇插装阀技术，称“未来的历史会把插装阀技术的广泛应用作为液压技术的重要转折点”。

在二通插装阀和比例控制技术的发展进程中，1974 年 Backe 教授的《液压阻力回路系统学》提出的液阻理论奠定了插装阀集成控制的理论基础。液阻理论将采用管式或板式连接的压力、流量和方向三大类控制阀的分立元件称为“单个元件”。将二通插装阀称为“单个控制液阻”。明显地区分了传统控制和二通插装控制这两种控制方案本质上的不同，二通插装阀不再是一种完全独立的元件，而是一种可插装于控制块中的一个独立可控的液阻单元。由于插装阀基本控制元件事实上都表现为一种独立可控的“单个液阻”，通过灵活的组合完成对全部“受控腔”的控制，在设计和成本上都优于传统滑阀方案，更能体现未来新型液压控制的特征。1988 年，路甬祥教授的著作《电液比例控制技术》著作进一步丰富了液压控制的经典理论，同时引领了插装阀及其比例控制技术的研究与开发，称为现代液压控制技术中的突出成就之一。

在我国改革开放初期，二通插装阀技术蓬勃发展，以路甬祥教授为代表的中国学者，在路甬祥教授的带动下，形成了强有力的比例控制技术和二通插装阀技术领域的产学研联合体，强有力地推动了二通插装阀和比例控制技术的进步。黄人豪研究员提出并确认了二通插装阀技术在小流量、小功率、精密控制的液压系统中也存在很大潜力和发展空间。其对二通插装阀系统进行了重组和结构创新，提出了MINISO型二通插装阀，包括小型化和小规格的先导控制阀、组合式法兰控制盖板、小型化主级及其模块化组件，为将二通插装阀产品技术延伸至整个液压控制领域奠定了较好的基础。同时基于在德国机床联合会支持下斯图加特大学制造技术研究所提出的新型控制器件需具有的可组配、模块化和开放式的设计原则，提出在现有标准化基础上，通过控制组件的组合配置结构体现模块化设计实现大规模定制的思想。基于此思想，浙江大学的唐建中、陈同庆提出了以二通插装阀技术为基础，定义系列化、标准化的标准零件、部件序列，然后在软件技术的支撑下，制定以零件为基础的计算机辅助的系统设计、优化和仿真分析的大规模定制的液压系统元件制造、系统设计方案。

二通插装阀控制技术的工业化进程堪称产学研结合的成功典型。有人称1950年Moog研制成功电液伺服阀为现代液压技术发展的第一个关键里程碑和重要转折点；在1970—1980年间二通插装阀和比例控制技术的发展是又一个重要的里程碑和转折点。当前，二通插装阀集成控制技术已广泛应用于工业和移动液压之中，尤其在中大功率的液压系统控制和集成中已成为现代液压集成控制的主流技术之一。

二通插装阀与传统液压控制技术相比，结构紧凑、通流量大、流动阻力小、密封性好、对油液污染敏感度低，故其工作可靠、寿命长，且在控制特性上响应快速，容易实现多机能控制。由于其集成化程度较高，易于实现标准化、系列化、通用化。这些优点很大程度上正适应于现代液压技术发展的需要。

因此,自二通插装阀问世以来,受到了世界各国研究者的普遍关注,世界主要工业化国家都迅速推广二通插装阀技术,我国在20世纪70年代中期开始进行二通插装阀的研究和开发设计。这使液压技术的发展提高到一个崭新的阶段,使得液压技术在大功率市场的优势更加明显,传统工业液压阀在对重量和空间有苛刻要求和限制的场合无能为力时,插装阀仍可游刃有余。在某些应用场合,插装阀是提高生产力和竞争力的唯一选择。文献[1-15]对二通插装阀的发展历程进行了详细的阐述和分析。

1.2 二通插装型锥阀研究的关键技术

随着科学技术的发展和进步,为满足节约资源、环保友好和可持续发展的要求,对液压阀的技术含量提出了越来越高的要求,液压阀不仅要满足系统动静态特性的要求,还要具有大的通流能力、小的压力损失、高的可靠性、低的控制功率。液压阀相关的科学问题,如各类型液压阀的流量特性、作用在阀芯上液动力的大小和方向、液动力对阀工作的可靠性、操作灵活性和动静态特性的影响、内部流场的可视化计算等,一直是流体传动与控制技术领域中的基础研究问题,也是发展高性能液压控制阀必须解决的关键问题。

锥阀是插装阀的主要结构形式之一,在实际应用中,通常是阀芯带锥但锥面不完整的锥台形锥阀或阀座带锥的锥阀,尤其在用作主阀的情况时。通过研究发现,现有理论中有关此类锥阀的流量特性和液动力特性研究等在一些方面需进一步研究、解决完善。详述如下。

阀口过流断面面积直接影响阀过流特性的计算,但关于锥阀过流断面计算公式的现有理论尚存在问题。对于阀芯带锥的锥阀,传统锥阀过流断面面积计算公式是按全锥锥阀情况推导得出的,是以阀体底部通孔作为基圆,以阀体直角顶点到阀芯

锥部的垂线为母线的圆台的侧表面面积。但是对于锥台形锥阀（将全锥锥阀阀芯底部截去一段得到的锥台）大行程时阀体直角顶点到阀芯锥部做垂线时垂足不能落在阀芯锥部上，此圆台是不存在的。锥台形锥阀在计算流量时采用按完整锥面锥阀导出的过流面积计算公式，会造成非常大的计算误差，不能准确指导设计及计算。同理，对于阀座带锥的锥阀，现有理论是以阀芯直角顶点到阀座锥面的垂线为母线的圆台的侧表面面积。但是在开口度较大时，阀芯直角顶点到阀座锥面的垂线的垂足是在阀座锥边的延长线上，也即传统理论公式中的过流断面是不存在的。现有的锥阀过流断面计算公式只适用于阀芯小行程范围，在大行程时需要进一步完善。

液动力对阀的动、静态特性关系甚大，是设计液压阀需考虑的重要因素。液动力方程是液压系统特性建模重要的基本方程之一，对液压系统的特性有很大影响。对液动力的研究一直是液压技术中的热点问题。对于传统液动力计算公式，有两个方面需要对其进行修正或完善。第一，传统的液动力计算公式中，液动力与进出口压力差值成正比，与进出口压力值的大小无关。但锥阀进出口压差相同，不同进出口压力值，阀内液流流动特征会出现不同。若进出口压差一定，出口压力高时，阀内流动状态为单向流；进出口压力值低时可能会使得阀内最低压力值降低到液体的空气分离压或饱和蒸汽压，变成了两相流，此时流场的流动特征与单相流相比发生了显著变化。可见，进出口压力差值相同，进出口压力值不同时阀芯所受到的液动力值是有区别的。故需要对液动力公式进行修正，考虑进出口压力值的影响。第二，传统锥阀液动力公式的推导是以全锥锥阀为基础，利用节流面作为分界面，选取高压或低压部分作为控制体积进行研究的。锥台形锥阀和阀座带锥锥阀在大开口时过流断面位置发生变化，其流量特性与全锥锥阀不同，所以采用传统液动力计算公式进行其液动力计算的准确性有待考证。

液压阀内阀口处的节流温升会使得阀口附近阀芯阀套的温

度升高, 阀芯阀套由于温度升高产生热变形, 同时由于液压力的作用产生机械变形, 两种变形的组合会改变两者之间的配合间隙。如果间隙过大, 则泄漏量大, 能量损失增加。若间隙过小, 操作力增大, 严重时会出现液压卡紧现象。轻度卡紧使得阀芯阀套之间的摩擦加大, 阀芯运动迟缓, 影响系统的稳定性。如果情况严重, 直接造成阀芯卡死, 系统瘫痪不能运动。可见, 阀芯和阀套的间隙直接影响阀的工作性能, 影响系统的整体性能。另外, 阀芯阀套的变形可能会影响插装锥阀的节流口过流断面。液压技术遍布整个工业控制领域, 包括一些高科技领域, 为了达到更加精准的控制, 对控制元件的特性要求将更加苛刻。因此在阀的设计中能够考虑阀套和阀芯变形对于节流口过流面积及阀套阀芯间配合间隙的影响, 考虑阀内流道和阀腔的影响, 将是液压元件设计理论不断完善化所必须的。建立插装型锥阀流固热耦合模型, 探讨阀芯阀套变形规律, 对锥阀的设计和分析有着重要的意义。

针对目前尚未解决和新发现的问题开展研究工作, 对推动这一领域持续创新、技术进步和向前发展具有重要的理论和实际意义。给出能准确描述锥形插装型主阀阀芯在大行程范围内运动时阀芯所受液动力的计算公式、过流断面积的计算公式, 为建立液压阀准确的数学模型进行非线性数字仿真研究奠定了理论基础, 有助于进一步完善有关液压阀流体力学的基本理论。

本书主要针对现有理论中需解决完善的方面进行了研究。对于液压阀内流场的数值模拟已经相当成熟, 大量文献已经证明数值模拟的正确性和可行性。本书主要采用数值模拟的方法, 充分发挥采用计算流体力学进行模拟时改变边界条件、模型几何参数方便灵活、数据完善等优势, 针对提出的过流断面和液动力计算时遇到的问题, 深入挖掘内部流场数据, 找寻流动规律和特点, 推导出相关计算公式, 对已有理论进行了完善或修正。以期为插装型锥阀的设计、性能优化提供更加全面的理论基础并获得具有实用价值的结论和成果。主要内容如下:

(1) 从过流断面的定义出发, 利用 CFD (Computational Fluid Dynamics) 流场可视化技术对两种锥阀的流场进行深入细致的研究分析, 确定阀芯带锥但锥面不完整的锥台形锥阀和阀座带锥的锥阀在整个大行程范围内不同开口度时的过流断面位置。通过理论计算, 推导阀芯在大开口度时的过流断面面积计算公式。

(2) 设计新型的阀口形式, 要求其满足在不同开度范围有差异较大的阀口面积增益, 可实现对流量多级节流控制。阀口的空化汽蚀特性也是阀口节流性能好坏的一个重要指标, 但判断空化初生的标准目前尚未统一。通过分析液压阀内液流流动过程, 追溯空化产生根源, 提出表征阀抗汽蚀能力的系数。

(3) 锥台形锥阀和阀座带锥锥阀在阀芯开口度大时, 过流断面的位置和计算发生变化, 需对其在阀芯大开口度时液动力进行研究。液动力本质上是流体运动所造成的阀芯壁面压力分布发生变化而产生的, 故从流场信息入手, 获得阀芯底部压力分布值, 将压力相对作用面积积分, 得到其液动力值。这也是计算液动力最直接的计算方法。从压力场、速度场等流场角度, 细化得出阀芯不同径向位置其所受液动力的量值, 为采用动量定理计算液动力时进行控制体积的选取提供依据。为了便于工程实际使用, 根据流场分析得出的液动力产生的主要因素, 结合控制体积的选取原则, 对于不同阀口形式锥阀, 内外流工况不同时, 选取不同的控制体积。根据动量定理推导相应的计算公式, 完善不同流动方向下阀口全行程时的液动力计算公式。

(4) 传统的液动力计算公式中, 液动力与进出口压力差值成正比, 与进出口压力值的大小无关。但锥阀进出口压差相同, 进出口压力值低时, 阀内流动状态若变为两相流, 则与单相流的流动特征不同。可见进出口压力差值相同, 进出口压力值不同时阀芯所受到的液动力值是有区别的, 所以需对液动力计算公式进行修正。利用全空穴模型和 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型对阀内流场进行两相流数值模拟, 分析阀内流场压力分布, 研究液动力产

生机理,明确不同流动特征时液动力区别的真正原因,对传统公式进行修正,推导出适用于两相流状态下液动力的计算公式。

(5) 研究插装阀流量特性时,考虑阀套和阀芯变形对于节流口过流面积及阀套阀芯间配合间隙的影响是液压元件设计理论不断完善化所必需的。建立实际使用的插装阀整体三维模型,包括阀芯阀体阀套,进行液固热耦合分析,根据液压阀流体流动过程的传热特点,对液流流动过程流场、温度场进行数值模拟,得出整个锥阀流场,锥阀固体、液体区域内详细的温度场分布规律。对阀芯阀套的热应力场机械应力场的综合应力作用进行分析计算,得到热效应和液压力共同作用下的阀套阀芯变形,在一定程度上可科学估算变形量对阀套阀芯配合间隙及阀口特性的影响,从而为阀套阀芯设计参考依据。

1.3 液压阀特性研究概述

液压阀作为控制元件,通过驱使阀芯相对阀体产生位移,改变阀口过流断面面积,来控制液流的流动。阀口过流断面面积直接影响阀过流特性的计算。阀口过流特性体现阀的通流性能,结构繁多的不同类型阀口和一些组合节流槽的过流特性一直是研究热点,尤其是在进行流量控制时,过流特性直接决定执行元件在起动、工作及停止等不同工况对流量控制的性能。随着计算机技术和计算流体力学(CFD)的发展,人们开始用流场可视化的方法对这一问题开展更深入的研究。国内外学者对液压阀进行了大量的研究,用各种不同的数值方法(有限元法、涡函数-涡量法、边界元法、流线法、代数应力法等)分析了液压控制阀内部流道流场,进而定性分析了阀内部流道流场(速度分布、流动的分散与再附壁、漩涡的产生与消失等)与流体噪声、能量损失机理的关系,从而确定影响液压控制阀性能的主要因素。液流通过节流阀,由于过流断面突变小,压力急

剧下降, 极易产生气穴的现象, 很多文献对于阀内液流的两相流动也进行了大量研究。

Hailing An、Jungsoo Suh^[16]对三种不同的阀芯结构进行了数值模拟和试验研究, 并给出了可视化结果, 包括流场的压力场、流线和湍动能分布图。

Linda Tweedy Till^[17]针对一种英式阀在不同工况下的流动状况进行了 CFD 仿真, 结合给出的速度分布和压力分布, 对阀的结构进行了改进优化。

Himadri Chattopadhyay^[18]等使用 CFD 软件对一种滑阀阀芯结构的压力调节阀的流场进行了分析, 并比较了两种紊流模型的分析结果。

Chern M. J. 等^[19]对球阀的流量特性进行了可视化分析和实验研究。

Matthew J. Stevenson^[20]对一种高压均化阀的流场使用 CFD 软件进行了可视化分析研究, 并将实验结果与理论分析进行了对比, 结果吻合。

Song Xueguan^[21]等利用 SDM 对溢流阀的动态特性进行了仿真, 将 CFD 仿真结果参数作为阀的特征参数带入 SDM 中, 结果表明 CFD 与 SDM 的结合可有效预测阀的动态特性。

Priyatosh Barman^[22]使用 STAR - 3D 仿真软件, 针对滑阀在高压大流量时, 阀内部的流动区域可能会出现气穴, 甚至产生汽蚀的危害的问题, 对三维滑阀模型进行了两相流仿真, 并给出阀内流场的压力分布, 速度分布和气体体积分布图。

Moholkar V. S.^[23]对通过对文丘管内气穴现象的研究, 指出下游恢复压力, 管径比、初始气泡含量和初始气泡大小都对流动现象有一定的影响。

Weixing Yuan^[24]等对喷嘴进行了非稳态气穴流的建模计算, 采用 $k-\varepsilon$ 紊流模型和 VOF 两相流模型进行仿真计算, 并对不同气核浓度时气泡的体积含量进行了比较。

Paolo Casoli^[25]针对四种不同的液流模型对轴向柱塞泵内的