

鄂加强 李志鹏 张长宗 滕达 著

新型双向硬密封大口径旋球阀 现代设计方法与技术



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



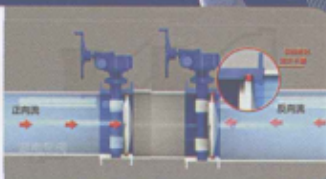
湖南省高新技术企业

湖南泵阀制造有限公司

新一代泵站节能安全控制阀专家 ——湖南泵阀

GWXDF[®]系列双向流硬碰硬密封旋球阀 (专利产品 实用新型)

产品特点:
既能正向压力时密封良好,在反向压力或反向压力大于正向压力时也能保持密封。



BFDG[®]系列管阀 (专利产品 实用新型)

产品特点:
新一代泵站出口控制阀采用膜片式与活塞式两种形式,通过管内介质驱动,拥有轻载启闭、截流止回、消除水锤等功能,具有结构简单、性能可靠、阻力系数小等诸多优势。
(专利号: ZL 2006 2005 1914.1)



GWXJF[®]系列渣浆旋截阀 (专利产品 实用新型)

产品特点:
主要应用于渣浆泵、浆液泵、污水泵出口,具有轻载启闭、截流止回和消除水锤的功能,耐冲刷、耐磨损、使用寿命长。液控系统通过电气与水泵联锁,实现自动控制。



BF[®]DS101系列多功能阀门(套筒式消能调压阀) (专利产品 实用新型)

产品特点:
该阀适用于各行业输送水系统,维护管网压力稳定,运行无振动、噪声低,特别适合作为高压差减压阀和旁通排放阀。



"BF"标志, "GWXDF", "GWXCF", "GWXZF", "GWXJF", "GWXDF", "GWXSF", "BFDG", "管力", "旋闭", "旋开", "旋截", "旋推"系本公司注册商标,特此公示,仿冒必究。



地址:长沙市韶山路210号三一星城国际12D楼
电话:86-0731-84159779 (市场部)
网址: www.hnpv.com

邮编: 410011
传真: 86-0731-84141488 (市场部)
电子邮箱: hnpv@hnpv.com

诚招全国代理商

责任编辑: 武丽丽 刘媛媛

销售分类: 水利水电工程

ISBN 978-7-5084-8374-0



9 787508 483740 >

定价: 20.00 元

新型双向硬密封大口径旋球阀 现代设计方法与技术

鄂加强 李志鹏 张长宗 滕达 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本专著采用数值仿真与实验验证相结合的方法,重点对新型双向硬密封大口径旋球阀进行设计计算、静力学仿真分析、动力学仿真分析、多学科设计优化和性能分析等方面的现代设计方法与技术研究。

本专著的读者以流体机械、机械设计及理论、化工过程机械以及机电液一体化等领域的科研工作者与工程技术人员为主;也可供各高等院校以上相关领域的教师、研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

新型双向硬密封大口径旋球阀现代设计方法与技术 / 鄂加强等著. — 北京:中国水利水电出版社, 2011.1
ISBN 978-7-5084-8374-0

I. ①新… II. ①鄂… III. ①球阀—设计 IV. ①TH134

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第012959号

书 名	新型双向硬密封大口径旋球阀现代设计方法与技术
作 者	鄂加强 李志鹏 张长宗 滕达 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: 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 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
刷 厂	北京市天竺颖华印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 7.25印张 172千字
版 次	2011年1月第1版 2011年1月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	20.00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



经济全球化必然会促使中国阀门市场全面融入国际市场，而世界市场的变化及发展也必然会对中国阀门生产企业产生巨大影响。因此，中国阀门生产企业将面临前所未有的严峻挑战。在节能减排已成为全球发展必然趋势的今天，如何对流体管道中的能耗大户——大口径阀门实施节能及高性能优化设计，已成为大口径阀门设计技术研究的热点。

由于现有的大口径阀门存在能耗较高、耗材量大、压力损失较大、密封性能较差等问题，因此，探索一种能耗低、耗材量小、压力损失小、密封性能好的大口径阀门优化设计理论方法，这在市场高速发展和能源紧张的时代显得十分紧迫。静力学仿真分析、动力学仿真分析、多学科设计优化和性能分析技术在内的现代设计方法与技术为解决上述问题时具有独特的优越性，并可望为上述问题的解决提供一条新途径。

本专著的研究以湖南泵阀制造有限公司博士后科研课题——双向流实体硬密封旋球阀关键技术研究以及湖南省高等学校科学研究项目 [09C594] 为依托，重点讨论了新型双向硬密封大口径旋球阀的初步设计、静力学仿真分析、动力学仿真分析、多学科设计优化和性能分析等现代设计方法与技术问题。

应该指出，大口径阀门设计方法与技术涉及流体机械、机械设计及理论、化工过程机械以及机电液一体化等领域，还涉及到计算机工程、材料工程以及检测科学与技术等学科领域，许多问题尚有待于进一步研究和探索，对其进行完整和系统的研究是一项艰巨而又困难的工作。因此，本专著仅仅在某种程度上起到抛砖引玉的作用。尤其希望有更多的科技工作者参加到大口径阀门设计方法与技术的研究和开发行列中来，以推动它的进一步发展。

著者

2010年8月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 阀门技术概述	1
1.1.1 阀门发展历史	1
1.1.2 国内外阀门研究现状、水平和发展趋势	2
1.2 阀门水锤控制技术	3
1.3 现代设计方法与技术的发展现状与趋势	4
1.3.1 现代设计方法与技术 and 传统设计方法与技术的关系	4
1.3.2 现代设计方法与技术的特点	5
1.3.3 几种常见现代设计方法及应用	6
1.3.4 现代设计方法与技术的发展趋势	10
1.4 虚拟样机技术理论基础概述	11
1.4.1 多体系统动力学概述	11
1.4.2 多体系统动力学的发展及研究方法	11
1.4.3 多柔体系统动力学基本原理、研究方法及其工程应用	13
1.5 多学科设计优化技术概述	14
1.5.1 多学科设计优化技术国内外研究现状	14
1.5.2 多学科设计优化的方法与策略	15
1.5.3 多学科设计优化技术在工程上的应用	16
1.6 选题背景和研究意义	16
1.6.1 选题背景	16
1.6.2 研究意义	17
参考文献	17
第 2 章 新型双向硬密封大口径旋球阀设计与投入风险评价	23
2.1 新型双向硬密封大口径旋球阀结构	23
2.1.1 新型双向流硬密封旋球阀工作原理	23
2.1.2 预置偏心量的确定	24
2.2 新型双向流硬密封旋球阀密封设计	25
2.2.1 密封结构特点	25
2.2.2 密封副材料选择	25
2.2.3 新型双向流硬密封旋球阀密封关键参数的计算	25
2.2.4 硬密封面宽度确定	30
2.3 新型双向流硬密封旋球阀阀体设计	33

2.3.1	新型双向流硬密封旋球阀阀体材料选择	33
2.3.2	新型双向流硬密封旋球阀阀体壁厚确定	33
2.4	新型双向流硬密封旋球阀阀轴最大力矩分析	34
2.5	新型双向硬密封大口径旋球阀投入风险评价	36
2.5.1	新型双向流硬密封旋球阀开发投入风险评价模型建立	36
2.5.2	新型双向流硬密封旋球阀开发投入项目的风险评估值	38
2.5.3	新型双向流硬密封旋球阀开发投入风险评估应用实例	38
	参考文献	41
第3章	新型双向硬密封大口径旋球阀静力学仿真分析	43
3.1	管道水锤波产生机理分析	43
3.1.1	水锤现象	43
3.1.2	管道水锤波叠加原理	43
3.1.3	管道水锤波的干涉	44
3.1.4	管道水锤波动过程	45
3.2	流体管道中冲击信号传播的机理分析	46
3.2.1	流体管道冲击信号的流体动力方程	46
3.2.2	流体管道中两种波的传播和衰减规律	49
3.3	新型双向硬密封大口径旋球阀强度与刚度有限元分析	51
3.3.1	强度与刚度有限元分析理论基础	51
3.3.2	反向压力作用时强度与刚度有限元分析	54
3.3.3	正向压力作用时强度与刚度有限元分析	56
3.4	新型双向硬密封大口径旋球阀密封性能有限元分析	58
3.4.1	接触数值计算方法	59
3.4.2	新型双向硬密封大口径旋球阀密封机理	62
3.4.3	基于有限元分析的新型双向硬密封大口径旋球阀密封比压分析	63
	参考文献	65
第4章	新型双向硬密封大口径旋球阀动力学仿真分析	67
4.1	新型双向硬密封大口径旋球阀虚拟样机设计优越性分析	67
4.2	ADAMS 动态仿真分析理论基础	67
4.3	新型双向硬密封大口径旋球阀动力学仿真	70
4.3.1	新型双向硬密封大口径旋球阀动力学方程	70
4.3.2	新型双向硬密封大口径旋球阀的动力学仿真算法	71
4.3.3	新型双向硬密封大口径旋球阀工作过程动力学模型	73
4.3.4	虚拟样机与 ADAMS/control 模块的数据交换	74
4.3.5	新型双向硬密封大口径旋球阀动力学仿真分析	74
	参考文献	77

第 5 章 新型双向硬密封大口径旋球阀多学科设计优化	78
5.1 新型双向流硬密封旋球阀多学科设计优化概述	78
5.1.1 新型双向流硬密封旋球阀多学科设计优化的必要性	78
5.1.2 新型双向流硬密封旋球阀多学科设计优化的特点	79
5.2 新型双向流硬密封旋球阀多学科设计优化的要素组成	80
5.2.1 多学科设计优化技术的近似概念	80
5.2.2 多学科设计优化数学建模	82
5.2.3 多学科设计优化的面向设计分析	82
5.2.4 多学科设计优化技术系统分解	83
5.2.5 多学科设计优化的系统敏感性分析	83
5.2.6 多学科设计优化技术的优化算法	84
5.2.7 多学科设计优化的人机接口	85
5.2.8 多学科设计优化的优化过程	85
5.3 新型双向流硬密封旋球阀多学科设计协作优化策略	86
5.4 新型双向流硬密封旋球阀多学科设计优化	87
5.4.1 新型双向流硬密封旋球阀多学科设计优化思路	87
5.4.2 新型双向流硬密封旋球阀多学科设计优化模型	88
5.4.3 自适应变尺度混沌优化算法	89
5.5 新型双向流硬密封旋球阀多学科设计优化实现	90
5.5.1 新型双向流硬密封旋球阀多目标函数设计	91
5.5.2 新型双向流硬密封旋球阀设计优化仿真流程	92
5.5.3 新型双向流硬密封旋球阀多学科设计优化结果	92
参考文献	95
第 6 章 新型双向硬密封大口径旋球阀性能分析研究	96
6.1 新型双向硬密封大口径旋球阀球密封面特性分析	96
6.1.1 双层辉光离子渗金属技术特点	96
6.1.2 新型双向硬密封大口径旋球阀球密封面硬化	99
6.1.3 新型双向硬密封大口径旋球阀球密封面硬化性能实验	99
6.2 新型双向硬密封大口径旋球阀球密封面静压寿命分析	101
6.2.1 新型双向硬密封大口径旋球阀球密封面静压寿命实验	101
6.2.2 新型双向硬密封大口径旋球阀球密封面静压寿命实验结果讨论	103
6.3 新型双向硬密封大口径旋球阀其他性能特点	103
参考文献	104
第 7 章 结论与展望	106
7.1 结论	106
7.2 展望	107
参考文献	107

第 1 章 绪 论

作为“管路的咽喉”的阀门具有应用广泛、数量巨大、创造价值高等特点，是电力、石油、石化、煤化工、航天、航空、交通运输、城建、农业和人民生活等领域所用流体管道的重要流体机械，也是流体管道的能耗大户。在经济全球化的今天，中国阀门市场随着中国入世而全面融入国际市场，世界阀门市场的变化及发展对中国阀门生产企业有着巨大影响，因此，中国阀门生产企业将面临前所未有的十分严峻的挑战。在节能减排已成为全球发展趋势的今天，如何对流体管道中的能耗大户——大口径阀门实施节能及高性能优化设计，已成为大口径阀门技术研究的焦点之一。但现有的大口径阀门仍存在能耗较高、压力损失较大、密封性能较差等缺点，因此，探索一种能耗低、压力损失小、密封性能好的大口径阀门优化设计理论方法，这在市场高速发展和能源紧张的时代显得十分紧迫。

1.1 阀门技术概述

阀门是管道流体输送系统中应用最广泛、最重要的执行机构或者控制元件^[1-3]，具有接通或截断流体通路、调节与节流、防止倒流、调节压力或释放过剩的压力等五大功能，可以控制空气、水、各种腐蚀性化学介质，泥浆、液态金属和放射性物质等各种类型的流体的流动，在国民经济各个部门中有着广泛的应用^[4-8]。在陆地石油、天然气、煤炭和矿石的开采、提炼加工和管道输送系统中，在化工产品、医药和食品生产系统工程中，在水电、火电电力生产系统中，在船舶、车辆、飞机和各种运动机械的流体系统中，在工作条件恶劣对人体危害性十分严重的核电站管道流体系统中，在海洋采掘机械对海洋矿藏的采掘过程中，以及高端的导弹、先进飞机、超音速实验装置以及宇宙飞船的设计与研制等国防生产系统中航天等新技术领域中，管道流体系统的控制都是一个需要解决的主要问题，而作为执行机构或者控制元件的阀门在管道流体输送与控制系统中的作用决定了整个管道流体系统的功能。

1.1.1 阀门发展历史

阀门发展历史悠久^[7,8]，据考古发现，4000年前尼罗河古埃及人使用明渠木制闸门，有文字记载的公元前2000年以前，中国人就在输水管道上使用了竹管和木塞阀，以后又在灌溉渠道上使用水闸，在冶炼用的风箱上使用板式止回阀，在井盐开采方面使用竹管和板式止回阀提取盐水。随着冶炼技术和水力机械的发展，在欧洲出现了铜制和铅制旋塞阀。随着锅炉的使用，1681年又出现了杠杆重锤式安全阀。1769年瓦特蒸汽机出现以前，旋塞阀和止回阀一直是最主要的阀门。蒸汽机的发明使阀门进入了机械工业领域。在瓦特的蒸汽机上除了使用旋塞阀、安全阀和止回阀外，还使用了蝶阀，用以调节流量。随着蒸汽流量和压力的增大，使用旋塞阀控制蒸汽机的进汽和排汽已不能满足需要，于是出现了滑阀。1840年前后，相继出现带螺纹阀轴的截止阀和带梯形螺纹阀轴的楔式闸阀，这是阀门发展中的一次重大突破。这两类阀的出现，不仅满足了当时各种工业对压力、温度不



断提高的要求，而且初步满足了对流量调节的要求。此后，随着电力工业、石油工业、化学工业和造船工业的发展，各种高中压阀门都得到了迅速发展^[20-23]。

第二次世界大战后，由于聚合材料、润滑材料、不锈钢和钴基硬质合金的发展，古老的旋塞阀和蝶阀获得了新的应用，球阀和隔膜阀得到迅速发展。截止阀、闸阀和其他阀门品种增加，质量提高。阀门制造业逐渐成为机械工业的一个重要部门。阀门按使用功能可分为截断阀、调节阀、止回阀、分流阀、安全阀、多用阀六类。

随着现代核工业、石油化学工业、电子工业和航天工业的发展，以及流程工艺自动控制和远距离流体输送的发展，促进了现代低温阀、真空阀、核工业用阀和各种调节阀的发展。用于远距离控制和程序控制的阀门驱动装置的应用越来越多^[24-28]。

未来阀门的发展将向扩大产品参数，发展节能、省力和自控阀门，改进结构、采用新材料和新工艺，提高阀门的使用寿命，以及发展专用阀门系列等方面发展，如用于液氧、液氢和液化天然气等的低温阀、真空阀、核工业用阀、安全阀、调节阀、疏水阀和阀门驱动装置等^[28-40]。

1.1.2 国内外阀门研究现状、水平和发展趋势

蝶阀最早以风量调节挡板形式应用于烟道、烟囱、通风或供气等低压系统^[30-32]。1960年德国 Karl 在动力学仿真中提出蝶阀同时具有切断、调节和止回 3 种功能，并于 1966 年以“斜置锥形阀座密封系统”为名注册了专利，这是蝶阀技术的一次重大进展。1967 年在法兰克福举办的“国际化工展览 (CHEMA)”上展出了新型的三偏心设计蝶阀，这种新型蝶阀的密封性能大为提高，很快用于中、高压系统。

20 世纪 80 年代后，这种新型蝶阀被称为“高性能蝶阀”并与成套设备一起引进中国。高性能蝶阀的主要特点如下。

(1) 密封性能好，可以达到气泡级密封，许多产品都标明“零泄漏”。具有高防火性能，以及过火后的密封性能。

(2) 密封副之间的摩擦小，有些产品提出“无摩擦”、“无磨损”和高循环寿命。

(3) 结构简单，便于维护和检修，其产品的零件可以现场更换。阀体高度和连接长度比传统阀门小得多，呈“紧凑设计”。

(4) 低开闭力矩。

正是因为这些特点，使高性能蝶阀的应用范围不断扩大。据国外资料介绍，最高压力可达 400MPa，温度为 $-96\sim 950^{\circ}\text{C}$ 。蝶阀开闭时阀轴转动 90° ，比截止阀和闸阀的多旋转开闭力矩要大得多。因此使用蜗杆、气动、液压和电动等传动装置操纵阀门。

按照三偏心设计，蝶板与阀座在开闭时理论上无摩擦。实际上由于蝶板和阀座的弹性变形，在其接触和脱离的瞬间，存在着摩擦。与传统的截止阀和闸阀相比，由于它是部分旋转，接触范围小，摩擦和磨损程度也小。另外，高性能蝶阀在设计上还有两个难点。

(1) 高密封性能和低开闭力矩的矛盾。要求密封性能好，就必须提高密封面比压，这必然要增加摩擦力，使开阀力矩也相应增大。由于存在着正流和逆流两种不同的工作状态，密封性能与开闭力矩之间呈现更复杂的关系。

(2) 正流和逆流的不同密封性能。以蝶板为界，介质流动方向的上游和下游情况不



同。正流状态，蝶板转动方向与介质流动方向相同，上游密封条件较好，容易达到零泄漏。逆流状态时介质流动方向与蝶板转动方向相反，上游密封条件不好，一般要求外部施加留驻力矩，才能保持密封面的比压，要达到零泄漏比较困难^[16-19]。

简单地讲，蝶阀在正流状态下，关阀容易开阀难。逆流状态下，开阀容易关阀难。为解决这一矛盾，使蝶阀的上下游都能达到零泄漏，设计者采取了很多办法。一般都要增加传动机构，这就使阀门结构复杂化，结果是降低了可靠性，提高了成本。

Orbit 阀门公司 1988 年推出一种对称阀轴导向 (Dual Stem Guide, 简称 DSG) 技术的新型球阀，具有先脱开，再旋转的技术特征，较好地解决了一般阀门密封性能良好而开关力矩过大的矛盾。这种技术把阀门的开关过程分解为“旋转”和“压紧”两个步骤。关闭阀门时，阀瓣在完全脱离阀座的情况下旋转，到达关闭位置后再将阀瓣压向阀座，以达到完全的密封。开启阀门时，阀瓣先脱离阀座，然后再旋转到完全打开。该阀门的阀轴上有螺旋状凹槽，借助固定螺钉的导向作用使阀瓣从开启位置旋转 90°，再由阀轴末端的斜面施力，使阀瓣绕底部的耳轴摆动，最终压向阀座，达到密封。阀瓣在转动时与阀座脱离，完全是无摩擦的。这种阀门适用于工作条件苛刻，如高温、高压和强腐蚀等场合。在解决密封与力矩的矛盾方面，DSG 技术是目前最好的技术方案之一。按照改进的对称阀轴导向技术原，改进后的蝶阀只有轴向偏心距，即“单偏心”。使用对称阀轴导向技术，保证蝶阀在正流和逆流时具有同样的密封性能，同时又能降低阀门的开关力矩，改善蝶阀的操作性能，目前这还是个设想。只有在蝶阀设计普遍采用改进的对称阀轴导向 (Advanced Dual Stem Guide, ADSG) 技术，并达到同类型球阀的使用效果时，才能说蝶阀技术又一次出现了新的进展。

芬兰 NELES 和美国 JAMESBURY 合并，成功研制了 800 系列双向蝶阀，在上海建立耐莱斯·詹姆斯伯雷阀门有限公司进行生产，其主要结构是球形密封表面的双偏心蝶板，配以单片挠性唇式密封座，号称是双向硬密封，但其阀座是滚压而成的弯曲弹性不锈钢片，弯曲弹性不锈钢片阀座必须是弹性的，但不锈钢片弹性有限，且容易失去弹性、易变形、不能堆焊高硬材料而不能称之为硬密封，启闭时完全靠阀板摩擦进入或退出阀座，使用寿命很短，为保持其弹性时间更长，全部用进口镍铬系合金材料，成本增加较大。该公司后来改称该阀门为 800 系列高性能蝶阀。

郑州市蝶阀有限公司在此基础上研制了双向金属密封蝶阀，其主要结构是球形密封表面的双偏心蝶板，配以不锈钢单片圆锥面密封座，并为上街蝶阀、武汉亚美等厂家所仿制，其缺点依然如上所述，带来新的缺点是加工更为复杂、工序多、合格率低、大规模生产制造困难，加工成本较高。

由于目前双向流阀门存在的泄漏大、寿命低和抗水锤性能差等缺点，本课题所研究的双向零泄漏大口径电磁驱动阀门是一种新型实体硬密封阀座的双向流硬碰硬密封旋球阀。

1.2 阀门水锤控制技术

瞬变流的阀调节是从 20 世纪 30 年代才开始的，落后传统的水锤防护近 100 多年，先驱者诸如克纳普 (Knapp)、波格龙、克尔 (Kerr)、芦斯 (Ruls) 和斯垂特 (Streeter) 等^[36-39]。



1963 年芦斯和斯特瑞特首先提出了 Valve Storking 的概念；1970 年普洛普生 (Propson) 深入研究了上述“VS”和“同步限时阀调节”的理论和方法；1974 年屈拉尔斯 (Driels) 提出两阶段关阀的调节模式；1975 年池尾茂和小掘威继而进行了多阀调节的研究并指出，多阀调节的控制手段是能够收到预期的水锤防护效果的；1983 年康催克特 (Contractor) 应用动态规划理论解决限时阀调节的最优化问题。从目前的研究情况来看，阀调节是瞬变流过程控制的一种有效方法，也是水锤防护的理论研究和技术应用领域的主要发展方向之一。

阀门是一种通用机械，是流体输送系统中必不可少的控制元件，它也是系统过渡过程中最为常见的水锤发生源。因此，阀调节必然会关注工程中既有阀门的动作过程，优化其动作序律。然而，近年来人们已经开始研究主动设置（个数、位置等）阀进行阀调节的最优控制问题。目前的研究结果表明^[41-44]：控制阀的科学设置及其协调动作是阀调节水锤防护的两个关键要素。控制阀的设置取决于系统的布置形式和工程特点，常见上游阀调节、下游阀调节和中间阀调节等。而阀调节的序律不仅取决于其控制对象的工程特点和要求，阀门本身的相关特性，更要与控制阀的设置相协调。上游阀调节的关阀动作将在其下游首先形成降压波，下游阀调节的关阀动作将在其上游首先形成升压波，中间阀调节对于其上游管道系统相当于下游阀调节，对于其下游管道系统则相当于上游阀调节。优化泵系统中泵出口阀在非正常意外停机时的关阀序律长期以来一直使人们关注的焦点，已有研究成果所提出阀调节动作程序的主要有匀速、两阶段双速、非线性变速等几种模式。

总之，从计算机的广泛应用至今，水锤及其防护问题的理论研究和实际应用两方面都获得了相当程度的进展^[46-53]，整个水锤研究体系日趋完善，研究范围也日益扩大。近年来，由于管道系统中因出现水柱分离及其再弥合现象而造成的水锤事故时有发生，目前国内有关流体瞬变流的研究已深入到液气两相瞬变流水锤问题和管路中两相瞬变流的固液耦合问题，同时如何更加经济、有效地防止水锤事故，根据实际情况，寻找最优的防护对策也是一项长期的研究课题。

1.3 现代设计方法与技术的发展现状与趋势

1.3.1 现代设计方法与技术 and 传统设计方法与技术的关系

在经历直觉设计、经验设计、半经验半理论设计等阶段后的 20 世纪 50 年代后期，传统设计方法与技术（经典的设计方法与技术）开始形成，至今仍被广泛地采用。传统设计方法与技术基本上是凭借直接或间接的经验，通过类比法来确定设计方案，然后以机械零件的强度和刚度理论对确定的形状和尺寸进行必要的计算和验算，以满足产品或工程限定的约束条件的。但近 20 年来，这种传统设计方法与技术已越来越不能满足产品或工程设计与开发过程的功能和市场需求。

而现代设计方法与技术则是以电子计算机为设计手段，以互联网技术为基础，建立在现代管理方法与技术之上，运用产品或工程设计的新理论和新方法，实现产品或工程设计过程最优化、高效化和自动化的设计方法与技术。因此，现代设计方法与技术是传统设计方法与技术的延伸与发展，是现代科学与技术综合应用于产品或工程设计领域的产物。现代设计方法与技术 and 传统设计方法与技术的关系可描述如下。



1. 结构分析的定量化

传统设计方法与技术对复杂产品或工程结构的零部件或整机只能进行定性或类比的估算,而现代设计方法与技术由于引入了有限元法、边界元法以及计算流体力学法、计算传热学法和计算燃烧学等方法,可对任何复杂产品或工程结构实现定量化分析。

2. 工况分析的动态化

传统设计方法与技术对复杂产品或工程的工作状况仅限于静态计算和动态估算,而现代设计方法与技术中的动态设计方法可以同时利用理论和测试数据建造与实际工况相符的数学模型,通过数值模拟分析,对复杂产品或工程的动态性能和改进效果进行有效预测。

3. 质量分析的可靠性化

传统设计方法与技术中采用的安全系数法仅仅依靠经验,不能给出复杂产品或工程质量的定量可靠性预测。而现代设计方法与技术中的可靠性设计法则把零部件或整机的各种具有离散性的性能参数均视为随机变量,基于概率论建造模型并进行分析计算,从而定量地对复杂产品或工程质量进行可靠性预测。

4. 设计结果的最优化

传统设计方法与技术通过经验公式、近似系数或类比等方法进行设计、校核,比较依赖设计者的经验和主观判断。而现代设计方法与技术中的优化设计法是根据复杂产品或工程的设计目标和性能要求构建数学模型,应用数学规划理论和数值计算方法,借助于计算机实现其最优化过程。

5. 设计过程的高效化和自动化

传统设计方法与技术在设计过程中重复性高,其设计方案却不一定最优。而现代设计方法与技术在整个设计过程中均借助于计算机实现设计过程的高效化和自动化,并且为实现制造的自动化做好准备。

1.3.2 现代设计方法与技术的特点

现代设计方法与技术的特点主要包括以下方面。

(1) 系统性。现代设计方法与技术是逻辑系统的设计技术,强调用系统工程处理技术系统问题。同时考虑技术系统与外界的联系,即人一机—环境的大系统关系。

(2) 创造性。突出人的创造性,发挥集体智慧,力求探寻更多突破性方案,开发创新产品。

(3) 社会性。现代设计方法与技术开发新产品或工程的整个过程,从新产品或工程的概念形成到报废处理的全生命周期的所有问题,都要以面向社会、面向市场为指导思想全面考虑解决。

(4) 最优化。现代设计方法与技术重视综合集成,在性能、技术、经济、制造工艺、使用、环境等各种约束条件下,通过计算机以高效率寻求最优方案和参数。

(5) 动态化。现代设计方法与技术静态分析的基础上,考虑载荷谱、负载率等随机变量,根据概率论和统计学方法,进行动态多变量最优化设计。

(6) 宜人性。现代设计方法与技术强调产品内在质量的实用性,外观质量的美观性、艺术性、时代性,在保证产品功能的前提下,要求对用户产生新颖、舒畅等精神功能。



(7) 智能化。现代设计方法与技术坚持“以人为本”的指导思想,充分发挥人的主观能动性。同时通过计算机模仿人的智能活动,从而力求设计出高智能化的产品。

(8) 计算机自动化。现代设计方法与技术广泛使用计算机,应用各种功能强大的软件,使设计—计算—绘图—制造—改进一体化,从而提高了设计的精度、稳定性和效率。

1.3.3 几种常见现代设计方法及应用

1. 优化设计

针对解析法等方法难以解决的复杂问题的实际情况,优化设计(Optimal Design,简称 OD)基于数学规划理论和计算机程序设计技术,采用计算机数值计算手段寻求最优方案,使期望的指标达到最优化。在复杂产品或工程设计领域中,根据机械设计理论、方法、标准和规范等建立反映工程设计问题和符合数学规划要求的数学模型,然后采用数学规划方法和计算机计算技术自动找出设计问题的最优方案。

为此,优化设计的基本思路如下。

(1) 根据设计要求确定设计变量 $X=[x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 。

(2) 针对实际工程,根据设计变量所受的各种限制确定约束条件,主要包括不等式约束 $g_u(X)=g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0 (i=1, 2, \dots, m)$ 和等式约束 $h_j(X)=h_j(x_1, x_2, \dots, x_n)=0 (j=1, 2, \dots, p < n)$ 。

(3) 建立设计变量关系的数学表达式即目标函数 $f[X=f(x_1, x_2, \dots, x_n)]$ 设计过程就是求目标函数的最小值 $f(X) \rightarrow \min$ 。

(4) 应用一维搜索法、梯度法、牛顿法、共轭方向法和惩罚函数法等寻优方法确定设计变量的最优值。

虽然优化设计技术发展时间较短,但已在机械产品中的机构设计、机械零部件设计以及各种专用机械设计和工艺设计方面中得到成功的广泛应用。随着最优设计数学模型的不断完善和数学力学理论、计算技术和计算机的不断发展,优化设计在复杂产品或工程设计领域中具有更广阔的发展前景。

2. 可靠性设计

20 世纪 60 年代以来,可靠性设计(Reliability Design,简称 RD)作为一门新兴学科逐渐进入复杂产品或工程设计领域。例如,产品零部件的可靠性设计是指在规定的时间内,规定的条件下,完成规定功能的能力。可靠性设计的主要特征是将常规设计方法中所涉及的设计变量如材料强度、疲劳寿命、尺寸、应力等参数视为服从某种分布的随机变量,并根据可靠性指标要求采用概率统计的方法得到复杂产品或工程的主要结构参数和尺寸。

为此,可靠性设计的基本思路为:将引起复杂产品或工程失效的因素统称为“应力”,用 $S=f(s_1, s_2, \dots, s_n)$ 表示,即 S 为各种失效因素 $s_i (i=1, \dots, n)$ 的函数。将复杂产品或工程抵抗失效的因素称为“强度”,用 $R=g(r_1, r_2, \dots, r_n)$ 表示,即 R 为各种影响强度的因素 $r_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的函数。应力 S 和强度 R 都是随机变量,复杂产品或工程安全可靠与否,是以 R 大于 S 所发生的概率来表示的,即 $R(t)=P(R>S) \geq [R]$ 。 $R(t)$ 表示复杂产品或工程在运行中的安全概率,即可靠度,它是指复杂产品或工程在工作时间 t 内的一种能力。 $[R]$ 为复杂产品或工程的许用可靠度,它表示复杂产品或工程在



规定时间内和规定条件下实现设计要求的一种能力，即许用安全概率。

当前各种机械产品竞争十分激烈，机械产品好的可靠性、维修性、安全性将确保机械产品具有很强的竞争力。因此，作为现代设计方法与技术的重要组成部分的可靠性设计技术必然会在复杂产品或工程设计领域中具有十分广阔的工程前景和优势。

3. 有限元设计

20 世纪 60 年代发展起来的有限元设计 (Finite Element Design, 简称 FED) 技术是工程分析最重要的新数值计算方法之一。随着计算机技术的发展，有限元设计在各个工程领域中不断得到深入的应用。有限元法的基本思想是将结构离散化，用有限个容易分析的单元来表示，单元之间通过有限个节点相互连接，然后根据变形协调条件综合求解。由于单元的数目有限，节点的数目也有限，所以称为有限元法。这种方法灵活性很大，只要改变单元的数目，就可以使解的精确度改变，得到与真实情况无限接近的解。有限元法的基本理论要用到工程数学，力学等方面的知识。它不仅能用于工程中复杂的非线性问题、非稳态问题的求解，而且还可用在工程设计中进行复杂结构的静态和动力分析。

对于一个应用工程师来讲，应用有限元法去求解各种工程问题，国内外已研制了许多成熟的大型有限元分析软件，如 SAP、ADINA、ANSYS、I-DEAS 等。这些软件使用极其方便，不需要对有限元法进行很深入的了解，便可求解实际工程问题。有限元法在机械产品结构中的应用，使产品设计产生革命性的变化，理论设计代替了经验类比设计。

4. CAE 设计

计算机辅助工程 (Computer Aided Engineering, 简称 CAE) 被广泛应用在包括国防、航空、航天、机械制造、汽车、船舶、兵器、电子、铁道、石化、土木工程、能源、材料工程、科学研究及教育等各个领域当中，分为结构分析 (Structure Analysis, SA)，计算流体动力学 (Computational Fluid Dynamics, 简称 CFD) 分析，振动、噪声和舒适性 (Noise, Vibration & Harshness Analysis, 简称 NVH) 分析，多体动力学分析、材料成型性能分析、热传导分析及岩土力学分析等。其中结构分析又包括刚度、强度分析、碰撞分析、疲劳分析和优化分析等。NVH 分析又包括模态分析、频响分析、振动分析及噪声分析等。

目前主流 CAE 软件主要包括 Hypermesh、NASTRAN、ABAQUS、LS-DYNA、ADAMS、Star-CD、Phoenics、CFX 和 Fluent 等，其主要应用特点如下。

(1) Hypermesh 软件。Hypermesh 是一个高性能的有限元前后处理器，它能让 CAE 分析工程师在高度交互及可视化的环境下进行仿真分析工作。与其他的有限元前后处理器比较，Hypermesh 的图形用户界面易于学习，特别是它支持直接输入已有的三维 CAD 几何模型 (Pro/E、CATIA 等) 已有的有限元模型，并且导入的效率和模型质量都很高，可以大大减少很多重复性的工作，使得 CAE 分析工程师能够投入更多的精力和时间到分析计算工作上去。在处理几何模型和有限元网络的效率和质量方面，Hypermesh 具有很好的速度，适应性和可定制性，并且模型规模没有软件限制。高速度、高质量的自动网格划分极大地简化复杂几何的有限元建模过程。同样，Hypermesh 也具有先进的后处理功能，可以保证形象地表现各种各样的复杂的仿真结果，如云图、曲线标和动画等。

(2) NASTRAN。NASTRAN 是一具有高度可靠性的结构有限元分析软件，它的分析功能覆盖了绝大多数工程应用领域，并为用户提供了方便的模块化功能选项，主要功能模块有基本分析模块（含静力、模态、屈曲、热应力、流固耦合等）、动力学分析模块、热传导模块、非线性分析模块、设计灵敏度分析及优化模块、超单元分析模块、气动弹性分析模块等。

(3) ABAQUS。ABAQUS 是一套功能强大的模拟工程的有限元软件，可以解决从相对简单的线形分析到许多复杂的线形问题。它包括一个十分丰富的、可模拟任意实际形状的单元库。并与之对应拥有各种类型的材料模型库，可以模拟大多数典型工程材料的性能，其中包括金属、橡胶、高分子材料、复合材料、钢筋混凝土、可压缩有弹性的泡沫材料以及类似于土和岩石等地质材料。

(4) LS-DYNA。LS-DYNA 作为通用非线性有限元软件，其分布存储显示解算器提供了最快的计算速度，主要用来分析三非弹性结构的非线性动态响应。其全自动接触分析能力和错误校验功能可以帮助用户解决复杂的碰撞和成型问题。

(5) ADAMS。ADAMS 软件是机械体统动力学仿真软件，它使用交互试图形环境和零件库、约束库、力库等创建完全参数化的几何模型，求解器采用多刚体系统动力学理论中的拉格朗日方程方法，建立系统动力学方程，对虚拟机械系统进行静力学、运动学和动力学分析，输出位移、速度、加速度和反作用力等曲线。ADAMS 软件的仿真可用于预测机械系统的性能、运动范围、碰撞检测、峰值载荷以及计算有限元的输入载荷等。ADAMS 软件还有针对不同行业开发的专业模块，其中汽车行业模块包括 ADASM/Car（轿车模块）、ADAMS/Chassis（底盘模块）、ADAMS/Driver（驾驶员模块）、ADAMS/3D Road（三维路面模块）、ADAMS/Tire（轮胎模块）、ADAMS/Engine powered by FEV（发动机设计模块）；还包括与有限元分析软件及 CAD 软件的接口模块等。

(6) Star-CD。Star-CD 是流体分析软件，它采用基于完全非结构化网格和有限体积方法的核心解算器，具有丰富的物理模型、内存占用较小、具有易用性、收敛性和二次开发接口。用于汽车、航空航天、兵器、核动力、家电等行业的流体分析。

(7) Phoenix。Phoenix 是英国 CHAM 公司开发的模拟传热、流动、反应、燃烧过程的通用 CFD 软件，有 30 多年的历史。网格系统包括：直角、圆柱、曲面（包括非正交和运动网格，但在其 VR 环境不可以）、多重网格、精密网格。可以对三维稳态或非稳态的可压缩流或不可压缩流进行模拟，包括非牛顿流、多孔介质中的流动，并且可以考虑黏度、密度、温度变化的影响。在流体模型上面，Phoenix 内置适合于多种 Re 数场合的湍流模型，包括雷诺应力模型、多流体湍流模型和通量模型及 $k-\epsilon$ 模型的各种变异，共计 21 个湍流模型，8 个多相流模型，10 多个差分格式。Phoenix 的 VR（虚拟现实）彩色图形界面菜单系统是这几个 CFD 软件里前处理最方便的一个，可以直接读入 Pro/E 建立的模型（需转换成 STL 格式），复杂几何体的生成更为方便，在边界条件的定义方面也极为简单，并且网格自动生成，但其缺点则是网格比较单一粗糙，针对复杂曲面或曲率小的地方的网格不能细分，也即是说不能在 VR 环境里采用贴体网格。另外 VR 的后处理也不是很好。要进行更高级的分析则要采用命令格式进行，但这在易用性上比其他软件就要差了。另外，Phoenix 自带了 1000 多个例题与验证题，附有完整的可读可改的输入文件。



其中就有 CHAM 公司做的一个 PDC 钻头的流场分析。Phoenics 的开放性很好，提供对软件现有模型进行修改、增加新模型的功能和接口，可以用 FORTRAN 语言进行二次开发。PHOENICS (Parabolic Hyperbolic Or Elliptic Numerical Integration Code Series) 软件拥有自己独特的开放性功能，可最大限度地向用户开放程序，用户可以根据需要任意修改添加用户程序、用户模型。

(8) CFX。针对工业过程实际问题，采用全隐式多网格耦合求解技术的可运行于 UNIX、LINUX 和 WINDOWS 平台的 CFX 具有计算结果精确、物理模型丰富、用户扩展性强大等优良特性，并已广泛应用于航空航天、旋转机械、能源、石油化工、机械制造、汽车、生物技术、水处理、火灾安全、冶金、环保等领域。CFX 包括前处理系统 CFX-BUILD、求解器 CFX-SOLVER 和后处理系统 (CFX-Analyse、CFX-Visualise 和 CFX-TASCflow) 等 3 部分。和大多数 CFD 软件不同，CFX 还采用基于有限元的有限体积法。基于有限元的有限体积法可保证在有限体积法的守恒特性的基础上，吸收了有限元法的数值精确性。在 CFX 中，基于有限元的有限体积法，对六面体网格单元采用 24 点插值，而单纯的有限体积法仅仅采用 6 点插值；对四面体网格单元采用 60 点插值，而单纯的有限体积法仅仅采用 4 点插值。在湍流模型的应用上，除了常用的湍流模型外，CFX 最先使用了大涡模拟 (Large Eddy Simulation, 简称 LES) 和分离涡模拟 (Detached Eddy Simulation, 简称 DES) 等高级涡流模型。CFX 的全隐式多网格耦合求解技术避免了传统算法需要“假设压力项—求解—修正压力项”的反复迭代过程，可同时求解动量方程和连续方程，加上其多网格技术，其计算速度和稳定性得到很大的提高，且在并行环境下的 CFX 求解器可扩展性极好。CFX 除了拥有诸如气蚀、凝固、沸腾、多孔介质、相间传质、非牛顿流、喷雾干燥、动静干涉、真实气体和湍流模型 (包括 $k-\epsilon$ 模型、低 Reynolds 数 $k-\epsilon$ 模型、低 Reynolds 数 Wilcox 模型、代数 Reynolds 应力模型、微分 Reynolds 应力模型、微分 Reynolds 通量模型、SST 模型和大涡模型) 等模型，还可为用户提供表达式语言 (CEL) 及用户子程序等不同层次的用户接口，允许用户加入自己的特殊物理模型，其可计算的物理问题包括可压与不可压流体、耦合传热、热辐射、多相流、粒子输送过程、化学反应和燃烧等问题。例如，交互式涡轮机械叶片设计工具 CFX-BladeGen 可以设计各种旋转和静止叶片元件，用户通过修改已有设计或完全依靠 CFX-BladeGen 中的工具设计新型叶片，适用于广泛的轴向流和径向流叶型，如导流轮、泵、压缩机、涡轮机、扩压机、涡轮增压机、风扇、鼓风机等，可使参数设计到 CFD 分析和 CAD 设计之间的转移在数分钟即可完成。

(9) Fluent。Fluent 主要应用于流体、热传递及化学反应等领域，具有丰富的物理模型、先进的数值方法以及强大的前后处理功能，在航空航天、汽车设计、石油天然气、涡轮机设计等方面都有着广泛的应用。基于 CFD 软件群思想，Fluent 的软件设计从用户需求角度出发，针对各种复杂流动的物理现象，采用不同的离散格式和数值方法，以期在特定的领域内使计算速度、稳定性和精度等方面达到最佳组合，从而高效率地模拟流体流动、传热传质、化学反应和其他复杂的物理现象，解决各个领域的复杂流动计算问题。

近年来随着计算机技术的普及和计算速度的不断提高，CAE 分析在工程设计和分析中得到了越来越广泛的重视，已经成为解决复杂的工程分析计算问题的有效途径，现在从