

制 · 造 · 业 · 高 · 端 · 技 · 术 · 系 · 列

多级 自吸喷灌泵



王川 施卫东 蒋小平 周岭 著

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



制造业高端技术系列

多级自吸喷灌泵

王 川 施卫东 蒋小平 周 岭 著



机械工业出版社

本书共分为8章,系统总结了自吸喷灌泵的研究背景及研究现状,提出了一种多级自吸喷灌泵的新型结构设计方法,并设计了一种正交试验组合灰关联分析法;进行了泵自吸过程中气液两相流数值计算及自吸摄影试验,进而获取了泵内部三大能量损失之间的影响关系;深入研究了泵内部压力脉动波的振幅、频率及相位的变化规律及内在影响因素;最后进行了多级自吸喷灌泵的转子动力学特性及水力噪声研究。

本书可供从事流体机械及工程和泵设计研究工作的工程技术人员及高等院校相关专业的师生学习与参考。

图书在版编目(CIP)数据

多级自吸喷灌泵/王川等著. —北京:机械工业出版社, 2016. 12
ISBN 978-7-111-55436-3

I. ①多… II. ①王… III. ①喷灌-多级泵-自吸泵 IV. ①TH317

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第282927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:沈红 责任编辑:沈红 责任校对:佟瑞鑫

封面设计:马精明 责任印制:李飞

北京汇林印务有限公司印刷

2016年12月第1版第1次印刷

169mm×239mm·14.25印张·2插页·270千字

标准书号:ISBN 978-7-111-55436-3

定价:98.00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

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

前 言

水资源是基础性的自然资源，也是重要的战略资源。我国是水资源严重短缺的国家，水资源供需矛盾的突出是可持续发展的主要瓶颈。农业是用水大户且用水效率不高，大力发展农业节水和节水灌溉，是促进水资源可持续利用、保障国家粮食安全、加快转变经济发展方式的重要举措，自 2004 年以来，连续多个中央 1 号文件，都把节水灌溉及大规模推进农田水利建设作为一项重大战略任务。在这种背景下，作为一种先进高效的节水灌溉技术，喷灌技术成为了发展节水农业的重要组成部分。

在传统的喷灌系统中，自吸喷灌泵能够实现自吸，因此应用广泛。特别是在现代农业中实现自动化控制的节水灌溉方面，自吸喷灌泵是其核心设备，而多级自吸喷灌泵是在单级自吸喷灌泵基础上发展起来的一种提供高扬程、高压液体的关键设备。传统的自吸喷灌泵通常采用箱体蜗壳式结构，结构复杂、体积笨重、成本高、扬程低、能耗大。同时，随着当前对高扬程自吸喷灌泵的需求不断增多，国内外学者绝大部分都是设计较大叶轮的单级自吸喷灌泵来代替，很少对轻巧的多级自吸喷灌泵展开研究。鉴于此，在国内外关于多级自吸喷灌泵文献稀缺的前提下，本书的相关研究工作显得尤为重要。

本书是作者及所在课题组近年来在自吸喷灌泵研究方向的总结与提炼，也汇集了国家自然科学基金（51279069 及 51609105）、国家科技支撑计划（2015BAB07B06）、江苏省自然科学基金（BK20150508）及江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室开放基金（NZ201604）等科研成果，并得到了江苏高校优势学科建设工程项目（PDPA）的资助。

本书共分为 8 章，系统总结了自吸喷灌泵的研究背景及研究现状，提出了一种多级自吸喷灌泵的新型结构设计方法，并设计了一种正交试验组合灰关联分析法；进行了泵自吸过程中气液两相流数值计算及自吸摄影试验，进而获取了泵内部三大能量损失之间的影响关系；深入研究了泵内部压力脉动波的振幅、频率及相位的变化规律及内在影响因素；最后进行了多级自吸喷灌泵的转子动力学特性及水力噪声研究。

本书由江苏大学王川、施卫东、蒋小平、周岭撰写，并由施卫东负责统稿。本书的撰写得到了江苏大学袁寿其研究员、袁建平研究员、李红研究员的指导与帮助，也得到了江苏大学流体机械工程技术研究中心领导和同事的大力支持；与此同时，非常感谢课题组的刘建瑞研究员、李伟副研究员、张德胜研究员、曹卫

东副研究员及司乔瑞助理研究员给予的热心帮助。此外，本书部分内容提炼自课题组冯琦与王伟的硕士学位论文。在此一并致以衷心的感谢。

本书可供从事流体机械及工程和泵设计研究工作的工程技术人员及高等院校相关专业的师生学习与参考。

限于作者水平和研究条件，书中难免存在不妥之处，恳请读者批评指正，不吝赐教。

著 者

2016.06

本书中的部分研究内容荣获 2015 年中国机械工业联合会科技进步一等奖及 2016 年中国商业联合会科技进步一等奖。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 自吸泵的研究现状	2
1.2.1 自吸泵产品的发展概述	2
1.2.2 自吸泵结构的研究现状	3
1.2.3 泵内部气液两相流动的研究现状	4
1.2.4 自吸泵自吸过程的气液两相流数值计算研究现状	5
1.3 本书的主要研究内容	5
参考文献	7
第 2 章 多级自吸喷灌泵的多目标模糊设计	11
2.1 自吸泵的分类及工作原理	11
2.2 多级自吸喷灌泵的结构设计	12
2.2.1 泵整体结构	12
2.2.2 气液分离室	13
2.2.3 外壳体	13
2.2.4 自吸盖板	13
2.2.5 气液混合室	14
2.3 多级自吸喷灌泵的工艺设计	15
2.4 多级自吸喷灌泵关键水力部件的多目标模糊设计	16
2.4.1 方法概述	16
2.4.2 模糊解法	17
2.4.3 泵设计参数	18
2.4.4 目标函数的建立	18
2.4.5 约束条件的建立	19
2.4.6 优化求解	21
2.4.7 叶轮及导叶的水力设计	22
2.5 多级自吸喷灌泵的外特性试验结果	23
2.6 本章小结	24
参考文献	25
第 3 章 多级自吸喷灌泵自吸时间的影响因素研究	26
3.1 多级自吸喷灌泵自吸时间的正交试验	26

3.1.1	试验概念	26
3.1.2	试验目的	26
3.1.3	试验指标	26
3.1.4	试验因素	26
3.1.5	选择因素水平	27
3.1.6	试验方案	28
3.1.7	正交试验结果分析	29
3.2	多级自吸喷灌泵自吸时间的灰色关联度分析	32
3.2.1	灰色关联度分析法的计算步骤	32
3.2.2	自吸时间的灰关联计算	34
3.3	本章小结	37
	参考文献	38
第4章	自吸喷灌泵自吸过程的非定常数值计算及试验	39
4.1	三维建模及网格划分	39
4.1.1	主要过流部件的三维造型	39
4.1.2	计算区域	40
4.1.3	网格划分	40
4.2	两相流模型及初始边界条件	41
4.2.1	两相流模型	41
4.2.2	初始边界条件	41
4.3	单级自吸喷灌泵计算结果分析	43
4.3.1	单级自吸泵进、出口段中截面气水两相分布	43
4.3.2	单级自吸泵整体中截面流线、气水两相及压力分布	46
4.3.3	单级自吸泵回流腔中截面速度及压力分布	49
4.3.4	单级自吸泵叶轮及正导叶中截面流线、气水两相及压力分布	50
4.3.5	单级自吸泵反导叶中截面流线、气水两相及压力分布	53
4.3.6	单级自吸泵非定常计算数据分析	55
4.4	多级自吸喷灌泵计算结果分析	62
4.4.1	多级自吸泵出口段的自吸摄影试验	62
4.4.2	多级自吸泵出口段中截面的气水两相分布	66
4.4.3	多级自吸泵中截面流线、气水两相及压力分布	70
4.4.4	多级自吸泵叶轮及正导叶中截面流线、气水两相及涡量分布	73
4.4.5	多级自吸泵反导叶中截面流线、气水两相及涡量分布	77
4.4.6	自吸泵气液混合室中截面速度及气水两相分布	80
4.4.7	自吸泵气液分离室中截面速度及气水两相分布	81
4.4.8	多级自吸泵非定常计算数据分析	83
4.5	本章小结	87
	参考文献	88

第 5 章 多级自吸喷灌泵的能量损失研究	90
5.1 数值计算方法的研究	90
5.1.1 计算模型的建立	90
5.1.2 计算区域的确定	91
5.1.3 湍流模型的选择	93
5.1.4 收敛精度的选择	94
5.1.5 边界条件的设置	95
5.1.6 表面粗糙度对泵性能的影响	95
5.1.7 数值计算与试验结果对比分析	103
5.2 基于数值计算的泵能量损失研究	104
5.3 模型泵效率优化的方法	115
5.4 本章小结	117
参考文献	119
第 6 章 多级自吸喷灌泵的非定常流动研究	120
6.1 非定常数值计算的设置及监测点的布置	120
6.2 基于数值计算的压力脉动分析	121
6.2.1 叶轮的压力脉动分析	122
6.2.2 导叶的压力脉动分析	126
6.2.3 泵腔的压力脉动分析	129
6.2.4 整泵的压力脉动分析	133
6.3 基于数值计算的非定常流动分析	137
6.4 本章小结	142
参考文献	144
第 7 章 多级自吸喷灌泵的转子动力学特性研究	146
7.1 概述	146
7.2 多级自吸喷灌泵的转子临界转速分析	146
7.2.1 研究对象临界转速的基本理论	147
7.2.2 轴承动力特性系数的求解	148
7.2.3 环压密封的动力特性系数求解	149
7.2.4 SAMCEF Rotor 有限元软件介绍	152
7.2.5 三种计算模型的一阶临界转速分析	153
7.2.6 轴承刚度对临界转速的影响	157
7.2.7 基于 Samcef Rotor 的“湿态”临界转速分析	158
7.3 多级自吸喷灌泵的瞬态响应分析	160
7.3.1 转子允许不平衡量的计算	160
7.3.2 考虑不平衡质量的瞬态响应分析	161
7.3.3 起动过程中瞬态响应分析	164
7.3.4 “湿态”下瞬态响应分析	166

7.4 多级自吸喷灌泵的谐响应分析	169
7.4.1 谐响应分析的使用条件	169
7.4.2 谐响应求解设置	170
7.4.3 “干态”下的谐响应分析	170
7.4.4 “湿态”下的谐响应分析	171
7.5 多级自吸喷灌泵的转子动力学试验分析	173
7.5.1 故障诊断的基本图谱	173
7.5.2 振动传感器的选择	174
7.5.3 本特利 408 型振动故障测试仪参数选择	174
7.5.4 多级自吸喷灌泵的振动试验分析	175
7.5.5 多级自吸喷灌泵的轴心轨迹试验分析	179
7.6 本章小结	183
参考文献	185
第 8 章 多级自吸喷灌泵的水动力噪声研究	186
8.1 概述	186
8.2 水动力噪声理论及求解	187
8.2.1 水动力噪声声源	187
8.2.2 水动力噪声基本方程	187
8.2.3 水动力噪声的求解方法	188
8.3 多级自吸喷灌泵的模态分析	189
8.3.1 实体建模	189
8.3.2 实叶轮模态分析	189
8.3.3 多级自吸喷灌泵的壳体模态分析	191
8.4 多级自吸喷灌泵的内声场计算及分析	193
8.4.1 叶片偶极子声源内声场计算及分析	193
8.4.2 导叶偶极子声源内声场计算及分析	196
8.4.3 多级自吸喷灌泵的内声场频率响应分析	201
8.5 多级自吸喷灌泵的外声场计算及分析	202
8.5.1 外辐射声场计算	202
8.5.2 声场指向性分布分析	203
8.5.3 球面场点声压级分布	205
8.5.4 平面场点声压级分布	208
8.5.5 外辐射声场频率响应分析	212
8.5.6 叶轮几何参数对多级自吸喷灌泵性能及噪声影响的试验研究	216
8.6 本章小结	218
参考文献	218

第1章 绪 论

1.1 概述

水资源是基础性的自然资源和重要的战略资源。我国人均水资源量约为 2100m^3 ，仅为世界平均值的 $1/4$ ，居世界第 109 位。此外，我国国内水资源分布极不均匀，呈现着南多北少、沿海多内陆少的规律。因此，我国是一个水资源严重短缺的国家，水资源供需矛盾突出仍然是可持续发展的主要瓶颈^[1]。农业是用水大户，近年来农业用水量约占经济社会用水总量的 62%，部分地区高达 90% 以上，农业用水效率不高，节水潜力很大。大力发展农业节水，是促进水资源可持续利用、保障国家粮食安全、加快转变经济发展方式的重要举措。自 2004 年以来，连续 11 个中央 1 号文件，都把节水灌溉及推广农业机械作为经济社会可持续发展的一项重大战略任务。2012 年，《国务院关于实行最严格水资源管理制度的意见》及《国家农业节水纲要（2012-2020 年）》明确要求新增高效节水灌溉工程面积 1.5 亿亩（1 亩 = 666.7m^2 ）以上，农田灌溉水有效利用系数达到 0.55 以上。尽管如此，与欧美发达国家相比，目前我国农田灌溉水有效利用系数为 0.52，远低于 0.7 ~ 0.8 的世界先进水平。节水灌溉尚处在加快发展阶段，且高性能节水灌溉装备产品还主要依靠进口，同时高效节水灌溉技术发展瓶颈也严重制约了我国现代农业和生态环境的健康发展。

喷灌技术是先进的现代节水灌溉技术，是发展节水农业的重要组成部分。喷灌的灌溉水利用系数比传统的地面灌溉节水 30% ~ 40% 左右，可提高耕地利用率 7% ~ 15%，并且机械化程度较高，能提高农业生产力。因此，大力发展喷灌技术是实现农业现代化的必然要求。用于喷灌系统中的离心泵称之为喷灌泵，由于自吸离心泵“一次引流，终生自吸”，大大简化了管路系统，因此应用广泛^[2-6]。特别是在实现自动化控制的节水灌溉方面，自吸喷灌泵是其核心设备。传统的单级自吸喷灌泵通常采用蜗壳式箱体结构，而且结构复杂、成本高、自吸性能差、扬程低、能耗大。同时，笨重的体积也给从业人员在搬运及工作中带来较大的劳动强度。特别是随着当前对高扬程自吸喷灌泵的需求不断增多，传统的单级自吸喷灌泵已不能很好地满足实时连续供水的需要。而多级自吸喷灌泵是在单级自吸喷灌泵基础上发展起来的一种提供高扬程、高压液体的关键设备^[7-11]，它综合了自吸泵与多级泵的特征，其设计方法具有新的特点。

多级自吸喷灌泵有三个关键技术指标：自吸性能、运行效率、运行可靠性（低振动低噪声）。第一指标决定自吸泵能否正常运行，第二指标决定整个泵机组的能耗，第三指标决定着泵产品是否具有高成长性。本书介绍的专项研究目的立足于以下三点。第一，建立一种适合多级自吸喷灌泵在自吸过程中的气液两相流数值计算方法，并结合多级自吸泵的自吸试验，获取多级自吸泵在自吸过程中气液两相流内部流动规律，以此来为大幅提高多级自吸喷灌泵的自吸性能提供理论基础。第二，建立一种多级自吸喷灌泵正常运行后的完全意义上的全流场数值计算方法，包括考虑叶轮、导叶及泵腔水力损失、圆盘摩擦损失、口环泄漏损失及级间泄漏损失在内的各种损失，并把各种损失全部计算出来，从而获得各种损失之间的相互关系，为低比速多级自吸喷灌泵的性能优化提供一定的指导依据。第三，基于非定常数值计算及振动噪声试验，深入分析定转子的动静干涉现象与泵内压力脉动及振动噪声的关系，为实现多级自吸喷灌泵的低振动低噪声设计提供一定的理论依据。

1.2 自吸泵的研究现状

1.2.1 自吸泵产品的发展概述

从国外发展看，德国是世界上最早研究自吸泵的国家，德国西门子公司早在1917年就研制出内混式自吸泵。日本自1930年开始研制自吸泵，但是到20世纪50年代初才形成批量生产^[12]。国外自吸泵多采用内、外混双层蜗壳结构，以卧式为主，在结构中大多数没有采用关闭回流孔结构，气水分离室较大，叶轮以半开式居多，进口大多数装有止回阀，轴封采用机械密封。国外的大多数小型自吸泵，在强度因素足够的情况下，大多采用聚丙烯等有机材料注塑及模压而形成（有机材料比较轻盈，便于移动），同时由于是采用注塑工艺，外形美观、表面光洁。目前国外发达国家自吸泵在自吸时间、自吸高度和可靠性方面独有见长，如国外自吸泵的最大自吸高度可达9m，最高扬程可达150m，最大口径可达600mm，而自吸时间可控制在60s以内。

国内自吸泵的研究起步较晚，主要经历了三个阶段。20世纪60年代开始研制，该阶段研制的自吸泵主要以外混式自吸离心泵为主，其自吸性能差。另外，由于自吸泵正常工作时不堵回流孔，导致泵效率偏低^[13]。20世纪80年代，农业机械部下达了研制BPZ系列自吸离心泵的任务，该系列泵均为内混式自吸泵，并采用球阀自动关闭回流孔，自吸性能和泵效率等性能都得到提升^[14]。20世纪90年代，自吸泵又得到了进一步发展和完善。一是在内混式的基础上增加了射流装置，进一步提高了自吸性能。二是配套功率由原来的3~11kW扩展到1.8~15kW，配套动力机的类型除了电动机和柴油机外，还增加了汽油机和拖拉机。

三是规格增多,进口直径由原来的 50 ~ 80mm 扩展至 40 ~ 100mm,流量最大可达 $100\text{m}^3/\text{h}$ 。进入 21 世纪后,自吸泵主要朝着小型化、智能化及高扬程方向发展。

目前,市场上的自吸离心泵产品,主要以单级自吸泵为主,很少有多级自吸泵,而多级自吸泵是保证在有限的径向空间内提供高扬程给水的重要设备。

1.2.2 自吸泵结构的研究现状

国内外学者对自吸离心泵进行了大量的研究,并取得了很多研究成果。国外学者主要对自吸泵的结构设计及应用前景进行了研究,如 J. Henke^[15]在 TP 自吸泵的入口处增加了一个诱导轮,不仅降低了自吸泵的能耗,还在一定程度上减轻了泵运行的噪声污染;T. Dolzan 等^[16]设计了一款微型压电泵,通过把泵进气口放置在泵腔的正中间位置,大幅度提升了泵的排气及自吸能力;D. Meister^[17]通过判断自吸泵首次运行时是否需要灌水而把自吸泵分为干式自吸泵与湿式自吸泵,而干式自吸泵通过在普通离心泵的进口处安装辅助设备(真空泵或空气压缩机)抽真空实现,用户应该根据泵的使用场合及用途选择合适的自吸泵;B. Hubbard^[18]研究了一台带扭曲叶轮的自吸泵,它不仅可以防止进口管道“气塞”,还可以抽送含气率较高的流体,其优点远超它本身所具有的自吸能力;J. Kanute^[12]从基本原理到具体操作对自吸离心泵做了全面的概述,并重点分析了蜗壳式自吸泵与导叶式自吸泵的优点;J. Shepard^[19]回顾了自吸泵的发展历史,并详细分析了半自动自吸泵及全自动自吸泵的工作原理及发展过程。

国内学者的研究主要集中在自吸泵结构的改进、自吸时间的计算、储液室容积、回流孔的面积和位置、隔舌间隙等几个方面。如刘建瑞等^[20]对射流式自吸喷灌泵进行了改进,设计了一种新型泵腔并在正导叶的基础上增设反导叶,新的泵腔不仅改变了流体的流动方向,减少了流体对泵壳的冲击损失,还可以有效地消除泵腔的速度环量并加快气水分离速度,从而使泵的自吸性能得到提高;仪群等^[21]统计了自吸泵的自吸时间及比转速,发现随着比转速的增大自吸时间亦增大,尤其在中高比速泵中表现得更为明显;赵学华等^[22]在立式自吸离心泵研究的基础上,利用流体力学、热力学、气体动力学方程和能量不变方程推导了自吸时间的计算公式;范宗霖等^[23]通过分析自吸时吸水管内气体运动的物理过程,利用理想气体的热力学方程和可压缩理想一元不定常流动方程,推导出外混式自吸离心泵不含水平管段的自吸时间计算公式;颜和平^[24]通过试验分析了气液分离室容积对自吸性能的影响,发现内混式自吸泵应尽量加大气液分离室的容积,可以有效提高自吸泵的自吸性能;仪群等^[25]统计了 29 台自吸离心泵,并结合理论分析得出了不同比转速的自吸离心泵储液室容积与泵的设计流量之间的关系;陈茂庆、钟明、张兴、仪群等^[26-29]都不同程度地对回流孔进行了大量研究,如回流孔面积及位置对自吸时间及最大自吸高度的影响等;颜和平等^[30]认为内混式自吸离心泵的汽水混合作用是在叶轮流道内完成的,故对隔舌间隙的要求不像

外混式那样严格,隔舌间隙在 0.5 ~ 2m 范围内,对自吸性能没有影响;陈茂庆等^[31]指出叶轮与泵体隔舌间隙的大小对自吸性能影响极大,从自吸性能而言,叶轮与泵体隔舌间隙越小越好,叶轮与泵体隔舌间隙大,则影响自吸性能,甚至无法自吸,通常叶轮与泵体隔舌的间隙取 0.5 ~ 1mm 为佳。

可以发现,已有的自吸泵的公开文献资料大部分是侧重于研究自吸泵的结构对自吸性能的影响,并没有深入展开对自吸泵的自吸机理的研究;同时,由于市场上较少见到多级自吸泵,导致泵级数对泵自吸性能的研究基本未见相关报道。国外关于自吸泵的文献更侧重于新产品的展示,由于知识产权保护及技术封锁,基本未见学术研究方面的公开报道。

1.2.3 泵内部气液两相流动的研究现状

国内外相关学者对泵内部气液两相流动进行了大量的研究,发现自吸过程中的气泡分为停滞气泡与移动气泡,而移动气泡是自吸完成的主要媒介。国外学者的研究主要以数值计算为主,如 K. Minemura 等^[32]最早采用均相流气泡流动模型对离心泵内部的气液两相流进行三维定常数值计算,得到流场内部的气相速度分布及体积分数,与试验结果对比误差相差不大;J. Caridad 等^[33]通过采用数值计算方法对潜水泵抽送气水混合物的内部流场进行了分析,发现叶轮的扬程及相对液流角取决于流体的流量及叶轮内部的气相分布;T. Andres 等^[34]采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型对轴流泵内部的气液两相流动进行了数值计算,且预测了泵内部的流体动力学特性并优化了叶轮设计。

国内学者关于泵内部气液两相流动的研究主要体现在理论分析、试验测量及数值计算三个方面,如李文广^[35]提出了一种可以算出气泡在外混式自吸泵内运动轨迹的计算模型,并发现气泡的初始直径对其运动轨迹的影响十分显著,转速的提高增大了气泡分离的频率;李红等^[36,37]对喷灌泵的自吸过程进行了试验测量,得到了在不同安装高度下泵自吸过程中关键监测点的参数变化;胡四兵等^[38]对离心式两相流泵进行试验,发现设计及制造含气率高达 30% ~ 50% 的气液两相流泵是可行的;余志毅等^[39]建立针对叶片泵内气液两相三维湍流流动的数学模型和数值计算方法,计算了叶片式气液混输泵在进口含气率分别为 5%、15% 及 25% 的系列工况下叶轮的内部两相流场,并做了扬程特性预测;黄思等^[40]利用 Fluent 软件对多级轴流式混输泵内的气液两相流进行了数值计算,探讨了气液两相介质在泵内的流动规律;潘兵辉等^[41]基于 Fluent 软件,采用 Mixture 模型计算了离心泵在不同气相浓度、不同气相颗粒直径在内部流场的液相分布,发现增大气相浓度及气相颗粒直径都会降低泵的扬程及效率。

综上所述,已有的关于泵内部气液两相流动的理论分析主要处于理论假设层面,且试验研究侧重于研究泵外特性的变化规律,数值计算则侧重于分析气液两相流泵的内部流场,而涉及自吸泵微观自吸机理的研究极少。

1.2.4 自吸泵自吸过程的气液两相流数值计算研究现状

通过查阅资料,国外还没有关于自吸泵自吸过程的气液两相流数值计算的公开报道,但国内的相关研究较多。如刘建瑞等^[42-44]基于 Fluent 软件,采用 Mixture 模型对内混式自吸泵自吸过程的气液两相流进行了数值计算,得到不同假设含气率条件下的流场的压力、速度及气相分布,发现进口含气率较低时,自吸泵内部没有出现气相聚集现象;王春林等^[45, 46]基于 Fluent 软件,对旋流自吸泵自吸过程的气液两相流进行了数值计算(进口含气率 15%),发现自吸时液相通过相间作用带动气相的流动,液相速度略大于气相速度;李红等^[47-50]运用 VOF 多相流模型结合滑移网格技术,加载试验所获得启动过程中叶轮的转速变化曲线及泵出口压力变化曲线,模拟了启动过程中气液混合现象及气液分离现象,获得了气液分离室进口、回流孔、蜗壳各断面及叶轮内监测点的含气率变化曲线;王涛等^[51]采用减小含气率的准稳态法,逐渐减小进口含气率至零,得到了扬程随含气率的变化曲线,模拟了自吸过程的初期、中期及末期等不同时刻的泵内部气液两相状态。

可见,在进行自吸泵的自吸数值计算时,要么假设泵的入口含气率是几个固定的数值(5%、10%、15%),并设置为速度进口(泵的额定流量除以进口面积);要么假设泵的入口全是气体,并设定气体的进口速度为一个平均值(自吸高度除以自吸时间)。前者的假设完全不是在进行自吸泵的自吸数值计算,而是在进行一般气液两相流泵的数值模拟;后者的假设已经接近自吸真实情况,但是假设速度进口为一个平均值,这与自吸过程中自吸速度先快后慢的试验现象明显相悖。通过查阅国内外相关资料,发现目前黄思等^[52-54]的研究最为接近真实模拟单级自吸泵的自吸过程,主要是因为他们模拟过程中没有设定速度进口或质量出流。然而,他们的模型仅仅假定自吸泵的进口管道为一段水平放置长度为 0.5m 的弯管(自吸高度约为 0.25m),与真实自吸过程中 3m 或 5m 的竖直自吸高度不符,故无法完全展现整个自吸过程的流动规律。

1.3 本书的主要研究内容

本书提出了一种多级自吸喷灌泵的新型结构设计,它是基于多目标模糊优化法进行过流部件的水力设计,并在此基础上采用正交试验组合灰关联分析法,研究主要影响因素对泵自吸时间的影响规律及获得最优组合。采用 ANSYS CFX 软件进行泵自吸过程中气液两相流数值计算,并利用摄影技术观测自吸过程中气液逸出现象;建立一种多级自吸喷灌泵正常运行后完全意义上的全流场数值计算方法,获取三大能量损失之间的影响关系;采用非定常数值计算,深入研究泵内部压力脉动波的振幅、频率及相位的变化规律及内在影响因素,并获取叶轮出口处

的非定常速度场,以及基于 ANSYS 及有限元 SAMCEF Rotor 软件对悬臂式多级离心泵进行泵主轴的动、静态特性进行研究;最后研究了多级自吸喷灌泵模态及内外声场特性,并进行了叶轮参数对多级自吸喷灌泵性能及噪声影响的试验研究。

(1) 新型自吸结构设计及多目标模糊优化水力模型

基于一台多级自吸喷灌泵,提出了一种具有高自吸性能的新型自吸结构设计。基于多目标模糊优化设计,确定追求关死点扬程极大值、最大轴功率极小值的多目标优化模型;结合设计经验及工艺需求建立相关约束条件,并进行非线性极值求解;最后以最优解初步完成过流部件的水力设计。

(2) 正交试验组合灰色关联度分析法优化自吸性能

将正交试验与灰色关联度分析法及自吸时间试验相结合,进行缩短多级自吸喷灌泵自吸时间的研究。试验选择叶轮叶片出口宽度 b_2 、叶轮和导叶之间的径向间隙 δ 、回流孔的面积 S 及多级泵级数 i_s 等 4 个几何参数作为试验因素,每因素取 3 个水平,按 $L_9(4^3)$ 正交试验设计 9 组方案,并进行自吸高度为 5m 的自吸时间试验,通过正交分析法得到各因素对自吸时间的影响规律。同时采用灰关联分析法,深入研究各主要因素影响多级自吸泵自吸时间的主次顺序。

(3) 泵自吸过程中气液两相流数值计算及摄影试验

采用 ANSYS CFX 软件,分别进行真正意义上仿真单级自吸泵与多级自吸泵(4 级)自吸过程的气液两相流数值计算,研究自吸过程中气液混合、气液分离及气液逸出现象,分析自吸过程中内部的速度、压力及含气率的变化规律,了解自吸过程的气液两相流特点。同时,在多级自吸泵出口处安装透明塑料管,采用摄影技术观测多级自吸喷灌泵自吸过程中的气液逸出现象,并与数值计算结果进行对比分析。

(4) 多级自吸喷灌泵的能量损失研究

针对一款多级自吸喷灌泵,采用不同的网格数、湍流模型、收敛精度及表面粗糙度对泵模型进行数值计算及一些数值计算设置方法的研究。在此基础上,建立一种基于数值计算的损失模型法,包括考虑进口段、出口段、叶轮、导叶及泵腔水力损失、圆盘摩擦损失、口环泄漏损失及级间泄漏损失在内的各种损失,并把各种损失全部计算出来,从而获得各种损失之间的相互影响关系及所占比例关系,为多级自吸喷灌泵的性能优化提供一定的指导。

(5) 多级自吸喷灌泵的非定常流动研究

采用非定常数值计算,深入研究泵内部压力脉动波的振幅、频率及相位的变化规律及内在影响因素,获取叶轮出口处的非定常速度场并对五级自吸泵进行振动及外部噪声试验。

(6) 多级自吸喷灌泵的转子动力学特性研究

采用有限元软件计算转子系统在“干态”和“湿态”下的临界转速,并对

比分析叶轮前后口环密封间隙力、轴承的支承刚度对临界转速的影响。基于瞬态响应分析研究转子系统在“干态”和“湿态”下不平衡质量大小、响应时间、流体激振力对振动幅值及轴心轨迹的影响,并采用谐响应分析研究转子系统在“干态”下不平衡质量及不平衡质量相位对转子部件位移幅值的影响。最后利用本特利 408 型振动故障测试仪对该悬臂式多级自吸喷灌泵进行振动频谱及轴心轨迹分析。

(7) 多级自吸喷灌泵的水动力噪声研究

首先确定偶极子声源及声学边界元网格,应用 LMS Virtual. Lab 软件对多级自吸喷灌泵进行内声场的数值模拟,并对结果进行分析;其次进行外辐射声场的计算,并进行相关分析,寻找与多级自吸泵内部流动及结构之间的联系;最后对多级自吸喷灌进行噪声性能试验研究,为多级自吸喷灌泵的降噪抑噪提供参考依据。

参 考 文 献

- [1] 王建华. 21 世纪中国水资源预测与出路 [J]. 预测, 1998, 17 (4): 5-8.
- [2] 李世英. 节水灌溉设备在我国的应用与发展 [J]. 农村机械化, 1998, 10 (7): 8-9.
- [3] 郭晓梅, 杨敏官, 王春林. 喷灌泵现状分析 [J]. 水泵技术, 2002, 47 (1): 27-29.
- [4] 吕智君, 兰才有, 王福军. 自吸泵研究现状及发展趋势 [J]. 排灌机械, 2005, 23 (3): 1-5.
- [5] 王护桥. 自吸泵的发展史及发展趋势探讨 [J]. 中国科技纵横, 2014, 13 (196): 288-289.
- [6] 江浩, 谢元华, 王超, 等. 自吸式离心泵的现状研究 [J]. 节能, 2014, 33 (11): 70-74.
- [7] 范宗霖, 孙兆宁. 多级自吸离心泵的研制 [J]. 水泵技术, 1993, 38 (3): 5-7.
- [8] 施卫东, 王洪亮, 余学军, 等. 深井泵的研究现状与发展趋势 [J]. 排灌机械, 2009, 27 (1): 64-68.
- [9] 马新华, 冯琦, 蒋小平, 等. 多级离心泵内部非定常压力脉动的数值模拟 [J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34 (1): 26-31.
- [10] 袁丹青, 韩锦涛, 丛小青, 等. 多级离心泵新型空间导叶设计及优化分析 [J]. 排灌机械工程学报, 2015, 33 (10): 853-858.
- [11] 周邵萍, 胡良波, 张浩. 多级离心泵级间导叶性能优化 [J]. 农业机械学报, 2015, 46 (4): 33-39.
- [12] Kanute J. Self-priming centrifugal pumps: a primer [J]. World Pumps, 2004 (456): 30-32.
- [13] 潘中永, 曹卫东, 刘建瑞, 等. 自吸喷灌泵的结构及改进 [J]. 水泵技术, 2003, 48

- (3): 19-21.
- [14] 江苏工学院排灌机械研究所, 湖南省农机研究所. BP 型系列喷灌泵科研鉴定技术文件 [R]. 1984 (5).
- [15] Henke J. The hygienic self-priming GEA TDS® -VARIFLOW centrifugal pump of the TPS series [J]. Trends in Food Science & Technology, 2009 (20): 85-87.
- [16] Dolžan T, Pečar B, Možek M, et al. Self-priming bubble tolerant microcylinder pump [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2015 (233): 548-556.
- [17] Meister D. Getting the best out of your wet prime pump [J]. World Pumps, 2004 (456): 18-22.
- [18] Hubbard B. Self-priming characteristics of flexible impeller pumps [J]. World Pumps, 2000 (405): 19-21.
- [19] Shepard J. Self-priming pumps: an overview [J]. World Pumps, 2003 (444): 21-22.
- [20] 刘建瑞, 周英环, 袁寿其, 等. 50PG-28 型射流式自吸喷灌泵的改进与试验 [J]. 排灌机械, 2008, 26 (1): 26.
- [21] 仪群. 自吸泵自吸性能与比转数关系的分析 [J]. 流体工程, 1992, 20 (9): 31-35.
- [22] 赵雪华, 徐语, 雷桥, 等. 立式自吸离心泵设计影响因素研究 [J]. 流体机械, 1996, 24 (4): 3-6.
- [23] 范宗霖, 薛建欣. 立式自吸泵的研究 [J]. 甘肃工业大学学报, 1998, 24 (1): 52-55.
- [24] 颜和平. 自吸泵气水分离室容积对自吸性能影响的试验 [J]. 流体机械, 1996, 24 (11): 39-40.
- [25] 仪群, 刘一声. 自吸式离心泵气液分离室容积的分析研究 [J]. 排灌机械, 1994, 12 (2): 9-12.
- [26] 陈茂庆, 吴卫东. 回流孔对自吸离心泵自吸性能影响的研究 [J]. 水泵技术, 1998, 43 (1): 26-30.
- [27] 张兴. 回流孔对自吸泵的影响 [J]. 通用机械, 2004, 3 (6): 41-46.
- [28] 钟明, 王凯. 影响自吸泵自吸时间因素的关联度分析 [J]. 齐齐哈尔大学学报: 自然科学版, 1998, 14 (1): 47-50.
- [29] 仪群, 刘一声, 楼文尧. 外混式双级自吸离心泵的设计研究 [J]. 排灌机械, 1991, 9 (3): 1-5.
- [30] 颜和平. 高比转数自吸离心泵的试验研究 [J]. 排灌机械, 1991, 9 (4): 5-7.
- [31] 陈茂庆. 高扬程自吸离心泵的设计与试验研究 [J]. 流体机械, 1998, 26 (10): 7-11.
- [32] Minemura K, Uchiyama T. Three-dimension calculation of air-water two-phase flow in centrifugal pump impeller based on a bubbly flow model [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 1993, 115 (4): 766-771.
- [33] Caridad J, Asuaje M, Kenyery F, et al. Characterization of a centrifugal pump impeller un-