

液环真空泵内部流场仿真与性能试验

孟凡瑞¹ 赵 勇² 赵国勇^{2*} 荆延波¹ 侯启金¹ 齐晓明¹

(1. 淄博水环真空泵厂有限公司 淄博 255200. 2. 山东理工大学机械工程学院 淄博 255049)

Flow Fields in Liquid Ring Vacuum Pump: A Simulation and Experimental Study

Meng Fanrui¹, Zhao Yong², Zhao Guoyong^{2*}, Jing Yanbo¹, Hou Qijin¹, Qi Xiaoming¹

(1. Zibo Water Ring Vacuum Pump Factory Co., Ltd., Zibo 255200, China;

2. School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract The gas-liquid two-phase flow fields, in liquid ring vacuum pump, were empirically approximated, mathematically modeled, numerically simulated with ANSYS software and experimentally evaluated for design optimization. The influence of the impeller blade number, blade profile and rotation speed on the properties of the flow fields, including, but not limited to the distributions of air and water, dynamic distributions of the velocity and pressure of air and water, pumping speed in operation mode, was investigated via simulation. The prototyped liquid ring vacuum pump, designed on the basis of structural optimization via simulation, was constructed and tested. The preliminary results show that the newly-developed liquid ring vacuum pump meets all the technical requirements. We suggest that the self-developed simulation scheme be of some technological interest in design of novel liquid ring vacuum pump because of lower cost, shorter development cycle, higher success-rate and greater economic impact.

Keywords Liquid ring vacuum pump, ANSYS, Flow field simulation, Test

摘要 液环真空泵研发周期长、资金投入大、研发失败率高。为解决以上问题,本文用 ANSYS 对工作过程中的液环真空泵内部流场进行仿真,通过对液环真空泵工作过程中泵体内的工作液和空气动态分布、流体速度动态变化、压力分布动态变化进行计算分析,验证液环真空泵的设计是否合理。根据仿真结果确定设计方案后,对液环真空泵各部件进行机加工生产,并在组装成型后进行液环真空泵关键性能测试。经测试,液环真空泵工作正常且各设计指标均达到预定要求。在实际生产中证明,经流场仿真分析后液环真空泵设计成功率高,并且能缩短其研发周期,节约资金,为企业带来了较大的经济效益。

关键词 液环真空泵 ANSYS 流场仿真 试验测试

中图分类号: TB752⁺. 22

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjovst.2019.10.07

液环真空泵的工作性能与其液环形状紧密相关,因液环真空泵内部流体由气体与液体混合组成,所以难以实现其液环形状的检测^[1]。当前,企业在研发新型液环真空泵时,采用先加工后试验的研发方式。这种研发方式会造成很多问题,例如研发周期长、研发产品废品率高、资金投入大等。因此,加工前的仿真显得尤为重要,仿真有助于设计者直观了解液环真空泵内部流体流动情况,对液环真空泵

的研发有重大意义。

在流体仿真方面已有较多研究,张沙等^[2]基于VOF模型与动网格技术对两相流体进行了数值模拟。张人会等^[3]用欧拉气液两相流动模型对液环真空泵内部流动情况进行了模拟。郭君^[4]利用FLUENT软件模拟了液环真空泵的工作过程,描述了泵内部气液两相流动规律。此外,还有很多学者对气液两相流体进行了模拟,但是现有研究对液环

收稿日期: 2019-06-06

* 联系人: Tel: 13853390545; E-mail: m13853390545@163.com

真空泵的内部流动特性研究较少,且仿真几乎不与液环真空泵研发生产相结合^[5-8]。

因液环真空泵企业缺少对设计产品的预先流体仿真,所以经常会导致产品设计失败。本文针对液环真空泵研发现存的问题,提出了“设计—仿真—改进—验证”的研发思路。本文在设计了 2BEA-403A-0 型液环真空泵的基础上,用 ANSYS 对其内部工作液与空气的动态分布进行了仿真,并分析了压力与速度的动态变化。经仿真确定研发方案后,进行产品生产,并测试其主要性能指标。结果表明,经仿真后研发出的液环真空泵各项性能指标均达标。后续设计生产经验得出,通过仿真能提高液环真空泵的研发成功率,且为液环真空泵的优化提供了理论依据,有利于液环真空泵的研发。

1 2BEA-403A-0 型液环真空泵设计

液环真空泵的主要组成部分有叶轮、泵体、泵盖、分配板、泵轴等。叶轮偏心安装在泵体上,工作时由电动机带动叶轮旋转形成液环,液环与叶轮形成密闭空间,利用空间容积的改变来达到吸排气目的。设计的 2BEA-403A-0 型液环真空泵如图 1 所示。

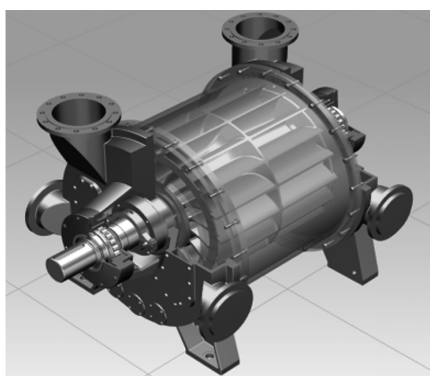


图1 2BEA-403A-0型液环真空泵立体图
Fig.1 Photo of a liquid ring vacuum pump

2 液环真空泵流体计算域模型的建立

2.1 液环真空泵流体计算域几何模型建立

因计算过程中只对流体部分进行计算,且模拟叶片转动过程中泵体内工作液和空气的动态分布时需要采用移动网格技术,因此建立几何模型时将泵体内流体部分的空气和液体分别建立初始几何模型,并在此基础上进行网格划分。

由于该液环真空泵的几何对称性,可以只对泵

体的一半建立几何模型。因原型的排气孔较为复杂,所以本文对其进行了简化。同时为了避免边界条件对内部流场造成干扰,这里对进、排气口做了一定的延伸,泵体内流体区域模型如图 2 所示。

建立好流体区域模型后,需要对上图 2 流体区域几何模型进行网格划分,经网格划分后的网格模型如图 3 所示。

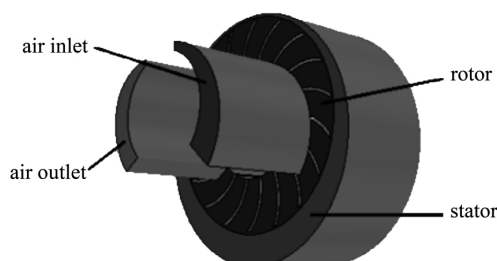


图2 泵体内流体区域模型图

Fig.2 Mesh model of the gas-liquid two-phase flow fields in the simulation

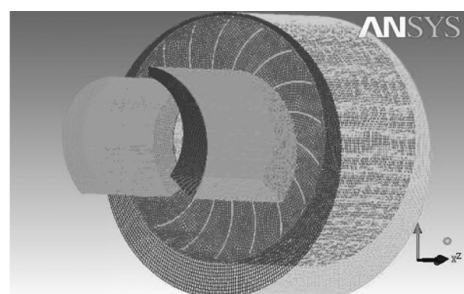


图3 整体网格模型图

Fig.3 Mesh model of the vacuum pump

2.2 液环真空泵流体计算域物理模型建立

2.2.1 物理参数设定

考虑实际计算条件,在计算时选取 CFD 软件中的 VOF 两相流模型,本仿真中液环真空泵的工作液类型选择水,因此两相分别为水和空气,其中水为不可压缩流体,空气为理想气体,空气和水的物理参数见表 1。

2.2.2 边界条件设定

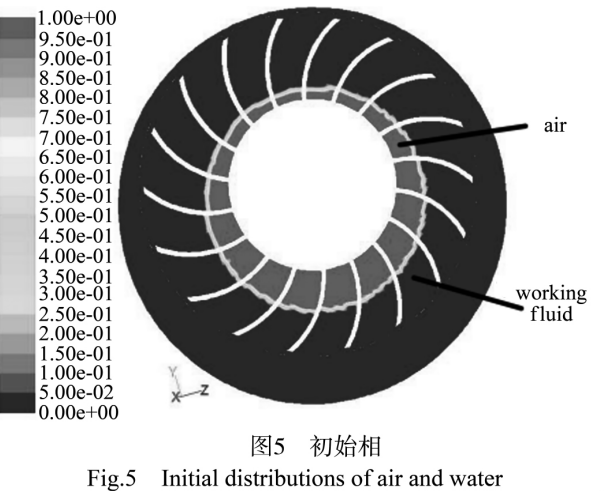
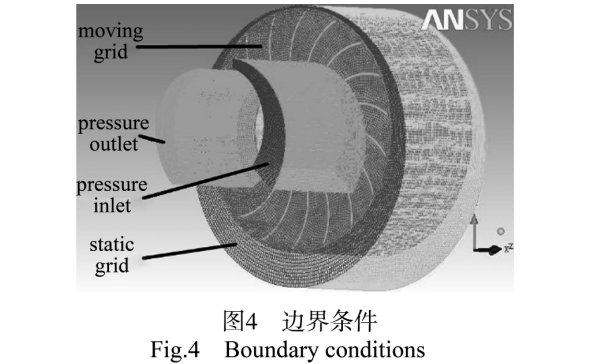
根据该液环真空泵的实际运转条件,将液环真空泵的吸、排气口均设为压力边界条件,其中吸气口压力设置为 7 kPa,排气口压力设置为 101.325 kPa;将泵体和叶轮的初始网格界面边界都设为滑移边界,以方便网格的连接和移动网格的实现;将叶轮的网格设置成移动网格,并将转速设置为 475 r/min;将叶片设为薄壁边界,同样将转速设置为 475 r/min;入口与出口流体的界面设为滑移边界。具体的边界条件设定如图 4 所示。

为简化计算,在理论指导下,设置初始相为理想状态下的气相液相分布,开始阶段将气相与液相的分界面设置为与理论相界相近的圆滑圆柱面,初始相如图 5 所示。

表 1 空气和水的物理参数

Tab. 1 Operation conditions and properties of air and water

边界	参数	水	空气
边界条件	流量/ m^3/h	30	6000
	进气压力/ Pa	/	30000
	排气压力/ Pa	/	101325
介质	温度/ K	300	300
	密度/ kg/m^3	998	理想气体
	粘度/ $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$	1.003×10^{-3}	1.789×10^{-5}
	比热容/ $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	4182	1006.4
	热传导系数/ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	0.6	0.0242



3 计算结果及分析

每个叶片旋转周期中泵体内流场的变化为周期性,因叶轮有 18 个叶片,所以在计算稳定后取一个循环周期作为分析对象。根据叶轮的转速计算出旋转整周时间为 0.126 s,因此一个循环周期的时间为

0.007 s。

3.1 工作过程中泵体内水和空气动态分布

通过计算,得到液环真空泵工作过程中泵体内水和空气的分布情况如图 6 所示。

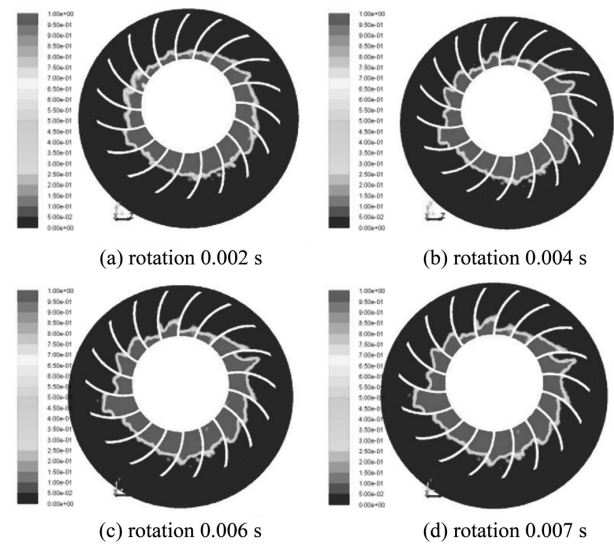


图6 工作过程中泵体内水和空气的动态分布

Fig.6 Time evolution of the water and air distributions in operation mode

其中内圈部分代表全为空气的部分,外圈部分代表全为水的部分。由图 6 可以看出,因离心力作用,液体被甩至泵体附近,空气被压缩在叶轮轮毂周围。泵体内液体与气体分界良好,但受到叶片以及密闭腔体积变化的影响,气体与液体的分界面形状并不像理论一样光滑规则。这是因为在工作过程中,液环会受叶片扰动和压力变化影响,导致排气口一侧液环被带到排气口,随空气一起排出泵体。此外,空气(内圈)在底部并未与叶轮外缘相切,导致吸气段的月牙空间未达到最大值,使得液环真空泵未达到最大气量,还有提升空间。

3.2 工作过程中泵体内流体速度动态变化

通过仿真计算,得出液环泵工作过程中泵体内流体的流动方向和速度大小随叶轮旋转进行周期性变化,泵体内流体速度动态分布如图 7 所示。

图 7 中,图中颜色越深,速度越大。由上图得出结论,液环真空泵在工作时,由于进气口压力随着密闭容积的增大而减小,导致流体速度向外,水被甩向紧贴外侧壳体的一侧,液环不被破坏;而在排气口一侧,由于密闭容积的减小,液体和气体被挤出泵腔,水环受叶片扰动和压力变化的影响,改变了原来的形态。这也进一步验证了图 6 工作过程中泵体内水

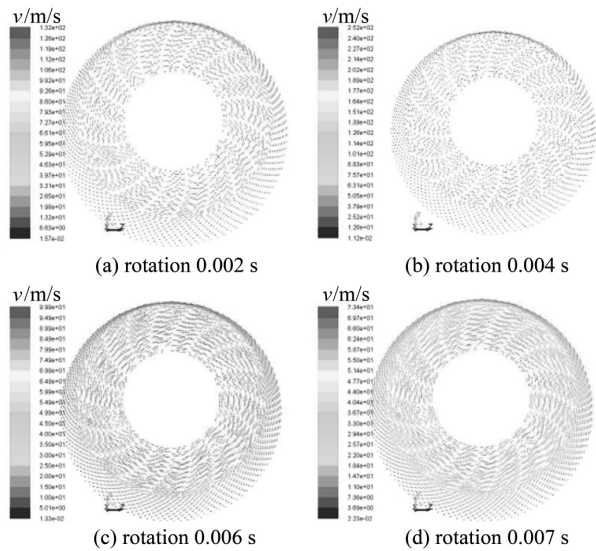


图7 工作过程中泵体内流体速度的动态分布
Fig.7 Time-dependent distribution of the fluids velocity

和空气分布变化的正确性。

3.3 工作过程中泵体内流体压力动态变化

通过计算后得到该液环真空泵工作过程中泵体内流体压力分布随叶轮转动变化情况如图 8 所示。

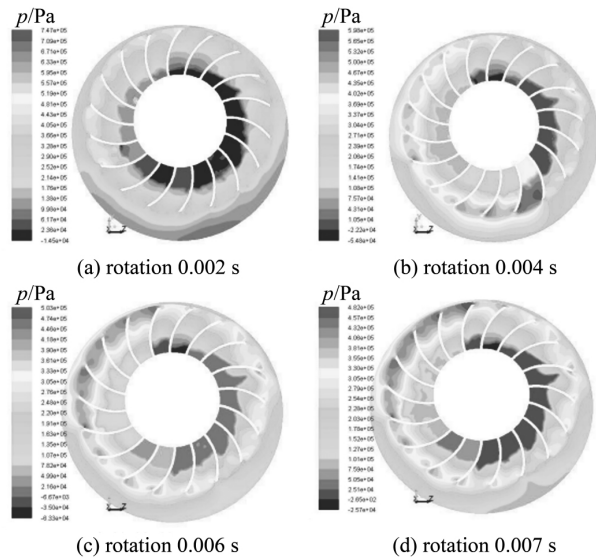


图8 工作过程中泵体内压力的动态变化
Fig.8 Time evolution of the distributions of air and water pressure

图 8 中,其中负值表示进气口形成低于大气压的低压区,正值表示排气口形成高于大气压的高压区。内圈颜色越深代表压力越小,外圈颜色越浅代表压力越大。由图 8 得出结论,随着叶轮的旋转,泵体内的流体压力在不断发生变化。在高低压区过渡阶段,压力变化最为明显,这一点主要体现在叶轮和液环形成的密闭空间与吸气口、排气口接通或脱离

的瞬间。虽然压力分布随叶轮转动会有所变化,但低压区一直存在于液环真空泵的吸气区(右侧),高压区则一直出现在叶轮的排气区(左侧),这是因为吸气区水从叶轮向泵体甩出,密闭容积逐渐变大,造成压力变小;而排气区因水的碰撞,动能转化为压能,所以压力变大,该结果与传统理论结果完全吻合。

3.4 仿真分析结论

通过以上流场分析和计算可知,该型号液环真空泵能在给定条件下可靠运转。压力分布和速度分布表明,液环真空泵内部液环具有较好的流体动力学性能,压力和速度也能够按照理想趋势分布,能够确保液环的形成。叶轮运动过程中,进气口一侧压力整体较小,确保气体能够被吸入泵内,排气口一侧整体压力较大,确保气体能够被排出,保证液环真空泵能够正常工作。由速度矢量图可以看出,在液环真空泵工作过程中,液体和气体的速度方向大体能够按照理想方向运动,没有漩涡形成,能量损耗小,说明该液环真空泵的设计合理,可在设计定型后进行下一步加工和测试。

4 试验验证

在设计完成,经仿真确保设计合理后,在淄博水环真空泵厂试验中心进行相关测试试验。除外观检测外还需要必要的性能及其他检测,通过一定的检测流程,按照相关国家标准,采用合适的相关仪器来检测液环真空泵的工作性能,检测项目及数据如表 2 所示。

表 2 液环真空泵检测报告

Tab.2 Liquid ring vacuum pump testreport

序号	检验项目	技术要求	试验结果	结论
1	极限真空度/Pa	3300	2400	合格
2	30000 Pa 点气量/ m^3/h	6000	6150	合格
3	最大轴功率/kW	165.0	162.192	合格
4	震动/mm	≤ 0.03	0.024	合格
5	噪声/dB	≤ 85	84.33	合格

经检验,液环真空泵机组运转平稳无异常,各项性能指标均达到设计要求,设计合格。

5 结论

本文通过对设计的液环真空泵进行流场仿真,得出了液环真空泵工作过程中的工作液与空气的动

态分布规律以及压力、速度动态变化规律。通过对设计的液环真空泵的内部流场进行预先仿真,达到要求的液环真空泵进行加工生产,达不到要求的重新设计;还可以根据分析结果对液环真空泵结构进行优化。经实际生产证明,对液环真空泵内部流场仿真可以大大缩短研发周期,对液环真空泵的改造也有较大借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] 管 俊,黄 思. 基于 CFD 的液环真空泵两相流动性能分析 [J]. 化工机械,2010,37(06): 755-757
- [2] 张 沙,谷正气,赵敬凯,等. 基于 VOF 模型与动网格技术的油气悬架气液两相流数值模拟 [J]. 中国机械工程,2016,27(15): 2091-2099
- [3] 张人会,严龙钢,杨军虎,等. 径向间隙及叶片型线对液环泵性能影响的分析 [J]. 流体机械,2015,43(08): 21-25
- [4] 郭 君. 水环真空泵工作特性数值模拟研究 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东),2016: 1-75
- [5] 张一文,高宏力,毛 润,等. 水环真空泵临界转速的计算和有限元分析 [J]. 流体机械,2016,44(01): 34-37
- [6] 黄苗苗,李国君,匡晓峰. 水环真空泵内部气液两相流动的数值分析 [J]. 船舶力学,2011,15(07): 722-729
- [7] 张人会,郭广强,杨军虎,等. 液环泵内部气液两相流动及其性能分析 [J]. 农业机械学报,2014,45(12): 99-103
- [8] 黄 思,郭晨光,危逸枫,等. 基于 Flowmaster 液环真空泵系统运行性能的研究 [J]. 真空科学与技术学报,2018,38(12): 1044-1047