

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0058

查智力,刘超,严天序,等.井筒式泵装置水力特性数值模拟[J].南水北调与水利科技,2018,16(2):189-195.ZHA Z L, LIU C, YAN T X, et al. Numerical simulation of hydraulic characteristics of wellbore pump installation[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(2): 189-195. (in Chinese)

井筒式泵装置水力特性数值模拟

查智力,刘超,严天序,黄佳卫

(扬州大学水利与能源动力工程学院,江苏扬州225009)

摘要:基于 $k-\epsilon$ 紊流模型和雷诺时均N-S方程,运用商用CFD软件,对井筒式泵装置进行了三维流动数值仿真计算。通过对性能曲线的分析,发现设计工况下,进水管直径较大时效率较高。对比进出水损失发现,进水损失随着流量增大而增大,出水损失随着流量增大先减后增。通过分析 V_x 云图和流线图,发现进口管直径较小时,流速较大,形成的漩涡也较大,漩涡区域涡量为大管径时的2倍以上。对叶轮进口断面轴向流速分布均匀度的分析,得到进水管较大时,叶轮进口的流速均匀度较高,但在流量超过330 L/s的工况下差异不明显。从喇叭管进口断面平均涡量的计算分析中,得到喇叭管进口断面平均涡量随着流量增大而增大,且进水管直径较大时,平均涡量小,减小超过20%。

关键词:井筒式泵装置;水力特性;数值模拟;水力损失;涡量

中图分类号:TV131.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1683(2018)02-0189-07

Numerical simulation of hydraulic characteristics of wellbore pump installation

ZHA Zhili, LIU Chao, YAN Tianxu, HUANG Jiawei

(School of Hydraulic, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: Based on the $k-\epsilon$ turbulent flow model and the Reynolds averaged N-S equation, we performed three dimensional flow numerical simulation on the wellbore pump installation using commercial CFD software. Through the analysis of the performance curve, we found that the pump was more efficient when the diameter of the inlet pipe was larger. By comparing the loss of inlet water and outlet water, we found that the inlet water loss would increase with the flow rate, and the outlet water loss would first decrease and then increase with the increase of flow rate. By analyzing the V_x cloud and flow graph, we found that when the diameter of the inlet pipe was relatively small, the flow velocity was relatively large, and the vortex was also large. The vorticity of the vortex was more than twice of that when the pipe diameter was large. Analysis on the distribution uniformity of axial flow velocity at the impeller inlet section revealed that the flow velocity uniformity of the impeller inlet was relatively high when the inlet pipe was large, but the difference was not obvious when the flow rate exceeded 330 L/s. From the calculation of the average vorticity at the inlet section of the bell tube, we found that the average vorticity at the bell tube inlet section would increase with the flow rate, and it would decrease by more than 20% when the inlet pipe diameter was large.

Key words: wellbore pump installation; hydraulic characteristics; numerical simulation; hydraulic loss; vorticity

随着国家城镇化进程的加快,以及全国各种基础设施建 设,越来越多的区域里的废水不能排出,这

收稿日期:2017-10-26 修回日期:2017-11-28 网络出版时间:2018-02-06

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180206.0956.008.html>

基金项目:国家自然科学基金项目(51279173;51609210);“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2015BAD20B01);江苏高效优势学科建设工程资助项目(PAPD)

Funds: National Natural Science Foundation of China (51279173; 51609210); National Science & Technology Pillar Program during the Twelfth Five year Plan Period (2015BAD20B01); Construction Project of High Efficiency and Superior Disciplines in Jiangsu (PAPD)

作者简介:查智力(1994),男,浙江海宁人,主要从事水泵及水泵站工程理论与应用方面研究。E-mail: yzdxzll@163.com

通讯作者:刘超(1950),男,江苏盐城人,教授,博士生导师,主要从事水泵及水泵站工程理论与应用方面研究。E-mail: liuchao@yzu.edu.cn

就需要泵站去提升和输送^[1-3]。一体化泵站应运而生,尤其在市政工程领域得到了较广泛的应用。一体化泵站包含了泵站的所有要素,由水泵、管路、阀门、仪表、控制设备等组成^[4]。主体为复合缠绕玻璃钢筒体,抗腐蚀能力较好。一体化泵站采用的进水形式是井筒式的进水形式,但这种进水形式,水流在从进水管进入井内的过程中,往往会比较紊乱,容易形成漩涡,从而导致叶轮进水条件差。因此,使井内水流更加平顺,尽可能避免漩涡的产生,提高水流的均匀性,从而提高叶轮入口的流速均匀度,是提高装置效率的重要途径。

目前,国内外学者做了一些对于一体化泵站应用的研究,但是对于一体化泵站性能方面的研究较少。Levey, Tom 和 Jeffus, Stephen^[5]介绍了一体化泵站在设计和制造方面的发展,王东进^[6]对一体化泵站进行了介绍,就一体化泵站和传统混凝土泵站的各方面做了详细的对比,体现出了一体化泵站的优点。王卓颖^[7]等进行了预制泵站在中小型泵站中的优化研究。胡凯^[8]等以传统泵站有效容积的计算方法为基础,分析出一体化预制泵站的优化后的有效容积。

上述研究中,主要还是对于应用方面的介绍,对于具体的水力特性进行详细分析的较少。本文结合相关研究^[9-11],提出了在常规的进水管直径的基础上进行改变,加大进水管直径的方法,期望能改善泵装置的水力特性。对井筒式泵装置的水力特性进行数值模拟^[12-15],分析其内部流动特性,以及两种不同进水管尺寸的泵装置水力特性区别。

1 计算模型和网格

1.1 几何建模及数学模型

井筒式泵装置主要由进水管、井筒、喇叭管、叶轮、导叶、出水管组成。其中,井筒直径1 500 mm,进水管直径400 mm,叶轮名义直径300 mm,叶片数为四片。出水管由直管1、90°弯管、直管2三段组成,出水管直径350 mm。该泵装置物理模型示意图见图1。

1.2 计算方法和边界条件

水泵在正常情况下运行时,可以假定为不可压缩黏性的流动,采用雷诺平均 N-S 方程。 $k-\varepsilon$ 湍流模型^[16-18]是迄今为止在工程中应用最为广泛、积累经验也最多的模型,在一般的定常计算中效果较好,因此本文采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型。整个计算域的进口设置在进水管入口,边界条件按照流量给定:从 220 L/s 到 420 L/s,每隔 20 L/s 为一个计算工况,

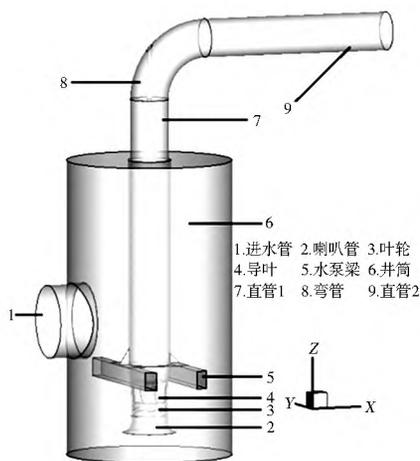


图1 泵装置模型示意图

Fig. 1 The model of pump installation

高效区加密为 10 L/s 一个计算工况。出口设置在直管 2 的出口,边界条件按照压力条件给定:总压力为一个标准大气压。固体壁面设置为无滑移的边界条件^[19]。井筒内水位假定在与进水管上缘同高度,自由水面根据刚盖假定^[20]设置为对称面。叶轮为旋转域,其他设置为静止域,叶轮转速为 1 450 r/min。喇叭管出口与叶轮进口以及叶轮出口与导叶进口为动静交界面,采用 stage 模型^[21],其余交界面都是一般连接。

1.3 网格划分

根据现有的研究^[22],一般推荐生成的叶轮单通道网格在 7 万~9 万左右,导叶单通道网格在 5 万~9 万左右为宜。本文叶轮和导叶采用 TurboGrid 软件进行网格剖分,其中叶轮网格单元数 434 528,导叶网格单元数 557 277,基本符合推荐的范围。管道的网格采用 ICEM 六面体结构化网格,其中直管的网格质量在 0.65 以上,弯管和喇叭管的网格质量在 0.55 以上。井筒部分的网格采用 ANSYS mesh 软件剖分,网格数量 1 529 441,控制最小角度大于 18°。各部件的网格划分见图 2。各部分的网格质量见图 3,90% 以上都是好网格,还有一些可接受的网格,存疑的网格数量少于 1%,根据参考教程^[23],网格质量能够满足计算要求。

2 计算结果及分析

常见的井筒式泵站的进水管一般较小,尺寸和出水管接近。这可能使得进水流速较大,水力损失较大,从而性能较低。根据泵站设计规范,进水管内水流速度以 1 m/s 左右为宜,得到进水管直径为 660 mm 左右,与 400 mm 的常规方案进行对比分析。在实际的泵装置布置时,进水管前有较长的管路,较大的管径会导致初期建设投资成本较高,因此

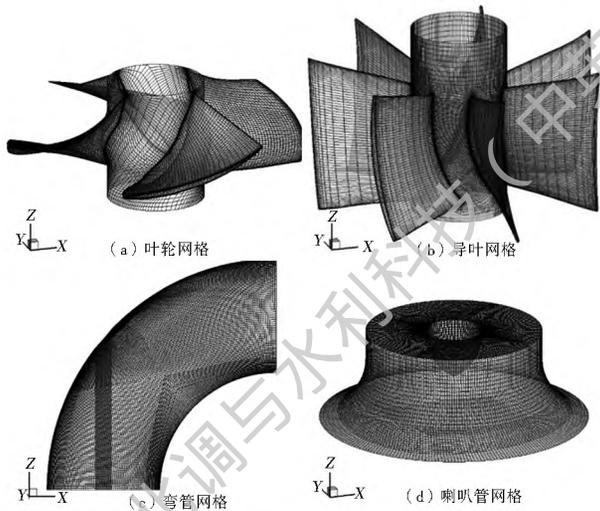


图2 网格划分
Fig.2 Meshes generated

	ξ_1	ξ_{OK}	ξ_{OK}	ξ_1	ξ_{OK}	ξ_{OK}	ξ_1	ξ_{OK}	ξ_{OK}
chushui	0	0	100	0	0	100	0	0	100
daoye	0	<1	100	0	<1	100	0	1	99
jinsui	<1	6	94	5	11	84	0	0	100
laba	0	8	92	0	1	99	0	0	100
wanguan	<1	7	93	<1	<1	100	0	0	100
yelun	0	7	93	<1	3	97	<1	25	75
zhi	0	0	100	0	0	100	0	0	100
zhuti	<1	8	92	5	11	84	0	0	100
Global	<1	5	95	1	3	96	<1	2	98

图3 网格质量
Fig.3 Mesh quality

一般采用的管径为较小的400 mm左右。若本文研究表明,增大进水管直径对于性能的提升较明显,则推荐采用沿程管径不变,而在进入泵装置前的一段管,采用渐变的方式扩大进水管直径的方式。本文选取这两种尺寸的进水管,保持出水管尺寸和井筒内其他的各尺寸不变,进行数值模拟研究。从而对泵装置内部水流流动特性进行分析。方案划分见表1。

表1 方案划分情况
Tab.1 Conceptual design

方案	直径/mm	
	进水管	出水管
方案1	400	350
方案2	660	350

2.1 性能预测和水力损失

两种方案的性能预测如图4所示。在不同的流量工况下,方案2的扬程和效率始终高于方案1,并且随着流量的增大,方案2与方案1的水力性能差值越来越大。其中,在设计工况下,即流量在330 L/s附近时,方案2的效率比方案1高5.9个百分点左右,扬程高0.35 m左右。在小流量工况下,这个差值较小;而在大流量工况下,差值更加明显。

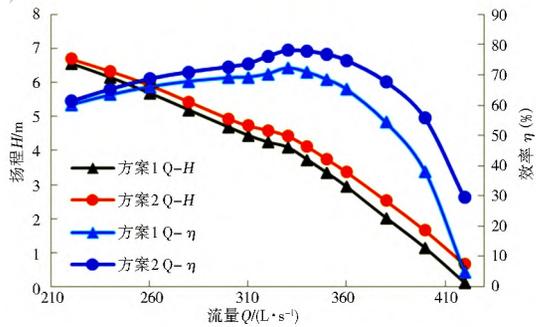


图4 水力性能曲线
Fig.4 Hydraulic performance curve

轴流泵装置的特点是扬程低,这就导致井筒内的水头损失和出水管的损失占装置扬程比值较大,对水泵装置效率的影响明显,所以装置的水头损失直接影响到实际经济效益^[24]。由于井筒内部流态较为复杂,目前没有此类水头损失的系数数据可供使用,计算其水头损失理论难度较大。因为其内部速度和压力分布不规律,难以通过实验的方法测得水头损失。本文通过数值模拟得到流速场、压力场,根据任意两个截面的流速、压力的平均值,运用伯努利方程可以求出两个截面间的水头损失大小。计算得到的两个方案的进水损失和出水损失见图5。

根据图5给出的曲线,进水损失随着流量的增大而增大,出水损失随着流量的增大先减后增。小流量工况下两个方案的出水损失,以及大流量工况下方案1的进水损失都超过0.5 m,这对此时泵装置运行的效率造成较大影响。总体来说,小流量工况下进水损失是小于出水损失的,但在流量较大时,方案1的进水损失大于出水损失。对比方案1和方案2,方案1的进水损失比方案2大0.15 m到0.65 m左右。而方案2的出水损失与方案1相差较小,说明进水管的改变对出水损失影响不大,主要影响进水损失。

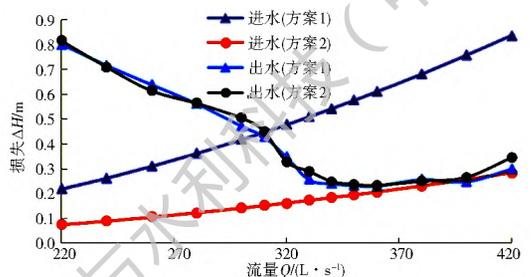


图5 进出水损失对比
Fig.5 Comparison of inlet and outlet water loss

计算了三种工况:小流量工况260 L/s,设计工况330 L/s,大流量工况400 L/s,截取三个工况下的进水管中心高度的XY平面截面进行分析,X方向(即进水管轴向)速度 V_x 分布以及流线情况见图

6. 由图6可知,相同工况下,由于方案1的进水管直径比方案2小,所以进水的 V_x 比方案2大得多,甚至超过了两倍。由于进水管正对着出水管的直管1的外壁,方案1流速较大,对管壁的冲击会比较明显,这也说明了方案1进水损失大的原因。此外,从

流线分布情况中又可以看出,进水管中的水流入井筒后会形成一对漩涡,而且流量越大时漩涡越大,方案1大流量工况下漩涡中心附近平均涡量为小流量工况的4倍。对比方案1和方案2,则是流速较大的方案1形成的漩涡明显大于方案2的漩涡。

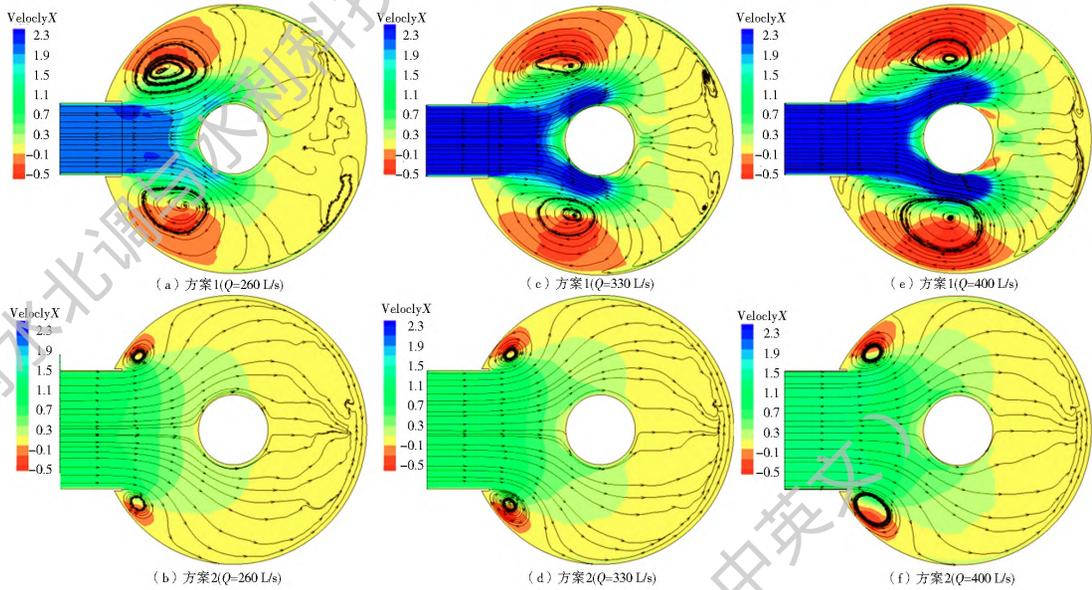


图6 各截面的 V_x 云图及流线

Fig. 6 The V_x cloud and flow graph of each section

为了得到两个方案的漩涡大小的具体差值,取小流量工况、设计工况和大流量工况下该断面的涡量图见图7。所截断面位置,可以观察到,水流从进水管进入后,按照顺水流方向看分成左右两侧,形成一对漩涡,左侧的漩涡为逆时针,右侧漩涡为顺时针,左右并不完全对称。除了小流量工况下,右侧漩涡中心附近平均涡量略大于左侧。方案2的该断面涡量很小,除了一对小漩涡的区域以及部分边壁区

域,涡量都不超过 10 s^{-1} 。方案1在井筒内形成较大的一对漩涡,且该断面上整体的涡量明显大于方案2。方案1漩涡区域较大,漩涡区域的涡量大于方案2的2倍。主要体现在进水管边壁、直管1的边壁以及水流进入井筒后形成的一对较大漩涡的附近。取漩涡核心区域计算图示工况下的平均涡量,得到随着流量的增大,涡量基本上是呈增大趋势,右侧漩涡基本略大于左侧。

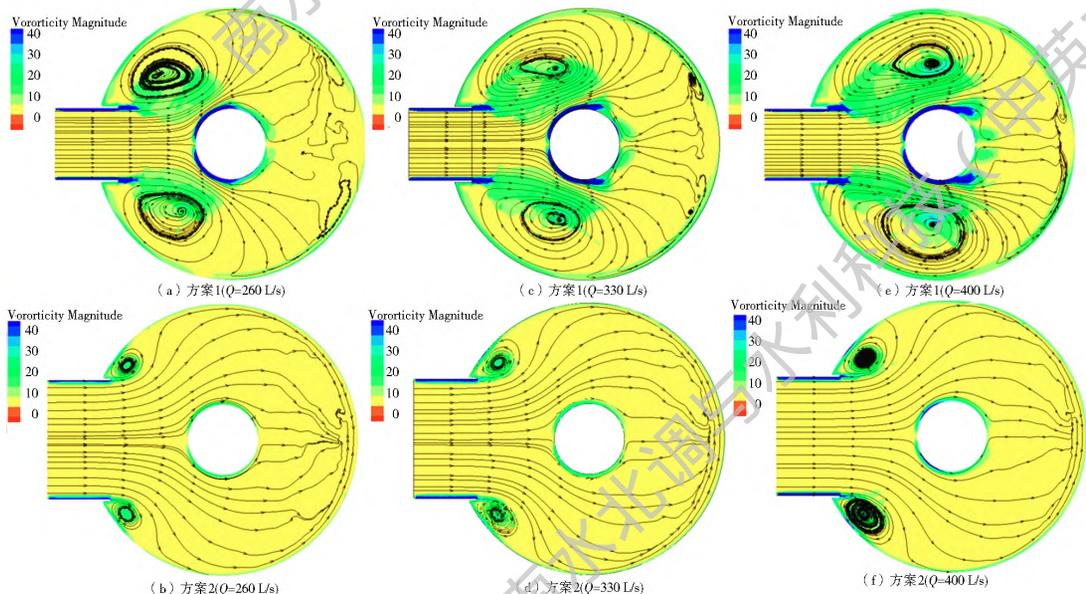


图7 涡量云图及流线

Fig. 7 Vorticity cloud chart and flow diagram

2.2 叶轮进口断面流速均匀度

为了分析水泵叶轮进水流态,引入水力性能指标参数:轴向速度分布均匀度^[1]对叶轮进口断面的水力性能进行分析,用面积加权的流速分布均匀度^[25]的计算公式如下。

$$V_{ina} = \left[1 - \frac{1}{V_a} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{ai} - V_a)^2 \cdot \Delta A_i}{A}} \right] \times 100\%$$

式中: V_a 为叶轮室进口断面的平均轴向速度 (m/s); V_{ai} 为叶轮室进口断面各单元的轴向速度 (m/s); A 为断面总面积。

泵装置的叶轮进口断面的轴向流速分布均匀度 V_{ina} 见图 8。随着流量的增大,两个方案的轴向流速分布均匀度都是提高的,但流量达到 400 L/s 后又趋于平缓,两个方案之间均匀度差值也减小。该模型叶轮进口断面的轴向流速分布均匀度总体都在 93.5% 以上,进水条件较好。与方案 1 相比,方案 2 的叶轮进口断面的流速均匀度有所提高。但是在流量大于 330 L/s 的工况下提高的幅度较小,差距并不明显。

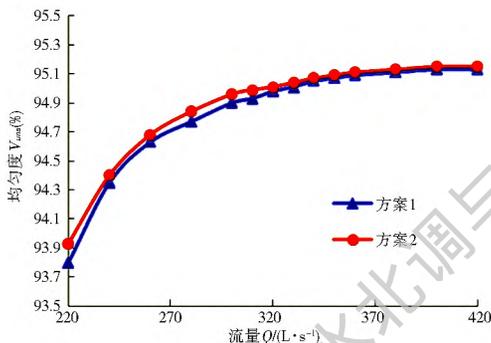


图 8 叶轮进口流速均匀度

Fig. 8 Velocity uniformity at impeller inlet

2.3 喇叭管进口断面涡量

涡量是描写旋涡运动重要的物理量之一,定义为流体速度矢量的旋度,漩涡通常用涡量来量度其强度和方向,涡量对水头损失影响较大。由 2.1 中的断面流线图可知,方案 1 的井筒内部漩涡明显大于方案 2,喇叭管进口的漩涡已经减小,但还是可能对水泵造成一定影响。因此有必要进一步对喇叭管进口断面平均涡量进行分析。计算了两个方案各流量下的喇叭管进口断面的平均涡量见图 9。由图中曲线可知,随着流量增大,喇叭管进口断面平均涡量呈增大趋势。方案 2 的喇叭管进口断面的平均涡量比方案 1 的该断面平均涡量小,减小了超过 20%。这也和进水损失的情况相类似,说明进口尺寸较小

的方案 1, 涡量较大, 损失也较大。

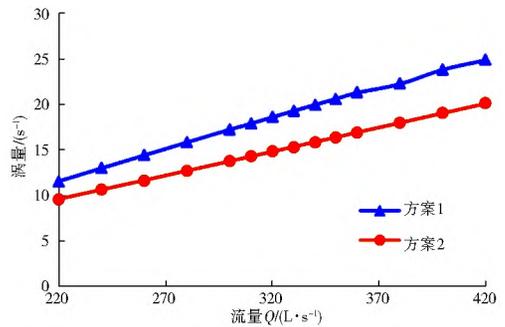


图 9 喇叭管进口断面的平均涡量

Fig. 9 Average vorticity at bell tube inlet section

小流量工况、设计工况和大流量工况下喇叭管进口断面的涡量云图及流线图如图 10 所示。由图可知,在喇叭管进口断面,两个方案都有一对漩涡,尺寸较小,漩涡中心的位置位于靠近出水方向一侧,其中沿着顺水流方向看,左侧的漩涡为逆时针方向,右侧的水流为逆时针方向。方案 1 的漩涡方案偏离中心的位置的偏移距离大于方案 2,且漩涡更为明显。根据图 9,已经算得该断面的平均涡量方案 2 比方案 1 减小了 20%。在图 10 读取具体数值,得到两个方案该断面最小涡量比较接近。方案 2 在设计工况下的最大涡量比方案 1 小 40% 左右,但是在在大流量工况下,最大涡量基本一致。

3 结论

通过对两种不同进口尺寸的方案进行数值模拟,分析其水流流动规律和水力特性,得到了如下结论。

(1) 泵装置的水力性能和进水损失随着流量的增大而增大,方案 1 的进水损失是方案 2 的进水损失的 2 到 3 倍。各流量下方案 2 的效率、扬程均高于方案 1,其中在设计工况下,方案 2 的效率比方案 1 高 5.9 个百分点左右。

(2) 进水管中的水流入井筒后形成一对漩涡,方案 1 大流量工况下漩涡中心附近平均涡量为小流量工况的 4 倍,进水管出口流速较大的方案 1 形成的漩涡明显大于方案 2 的漩涡,涡量为方案 2 的 2 倍以上。进水管直径对叶轮进口断面的轴向流速分布均匀度有一定影响,方案 2 比方案 1 略高,但在流量大于 330 L/s 的工况下差距并不明显。

(3) 喇叭管进口断面平均涡量随着流量增大而增大,且方案 2 的平均涡量比方案 1 减少了 20% 以上,有助于水泵性能的改善。

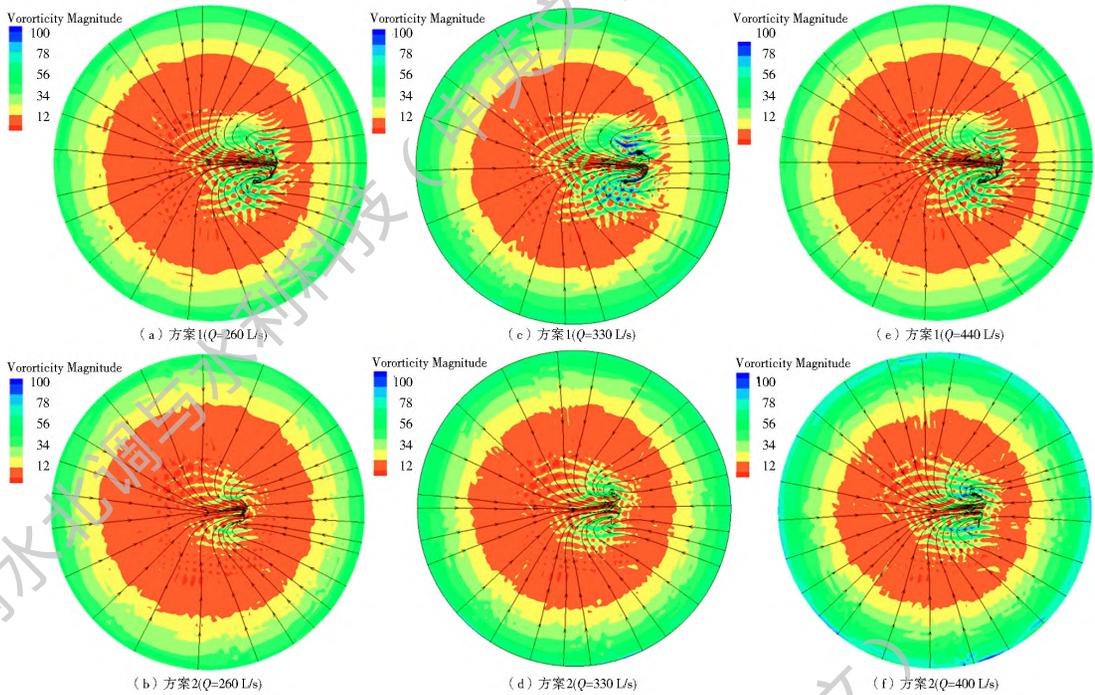


图10 喇叭管进口断面的涡量云图

Fig. 10 Vorticity cloud chart at belt tube inlet section

参考文献(References):

- [1] 刘超. 水泵及水泵站[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 177. (LIU C. Pump and pumping station[M]. Beijing: Publishing House of Chinese hydropower, 2009: 177. (in Chinese))
- [2] 泵站设计规范(GB/T 50265-97)[S]. (Design code for pumping station(GB/T 50265-97)[S]. (in Chinese))
- [3] 孟祥岩. 一体化预制泵站的应用[J]. 给水排水动态, 2014(1): 18-19. (MENG X Y. Application of integrated precast pumping stations[J]. Water & Wastewater Information, 2014(1): 18-19. (in Chinese))
- [4] 周佳. 一体化污水提升泵站的应用探讨[J]. 山西建筑, 2015(10): 130-131. (ZHOU J. Discussion of the application of sewage pumping station[J]. Shanxi Architecture, 2015(10): 130-131 (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1009-6825. 2015. 10. 070.
- [5] LEVEY T, JEFFUS S. Prefabricated pumping systems: Sizing up the possibilities[J]. Water Engineering and Management, 2003, 150(2): 23-25.
- [6] 王东进. 一体化预制泵站设计开发研究及应用[J]. 通用机械, 2014(7): 77-79. (WANG D J. Design, research and application of integration prefabricated pumping station[J]. General Machinery, 2014(7): 77-79 (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1677-7139. 2014. 07. 024.
- [7] 王卓颖. 预制泵站在中小型泵站应用中的优化研究[J]. 中国给水排水, 2010, 26(22): J3. (WANG Z Y. Optimization study of prefabricated pump station application in small and medium pump station[J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(22): J3. (in Chinese))
- [8] 胡凯, 周跃, 陈晶晶. 一体化预制泵站有效容积的优化设计[J]. 通用机械, 2016(3): 77-79. (HU K, ZHOU Y, CHEN J J. Integration prefabricated pump station optimization design of effective volume[J]. General Machinery, 2016(3): 77-79. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1677-7139. 2016. 03. 021.
- [9] 王默. 一体化泵站水力性能CFD研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2016. (WANG M. Research on Hydraulic performance of the prefabricated pumping station by CFD[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2016. (in Chinese))
- [10] 冯俊豪. 一体化泵站泵坑设计及流动数值分析[J]. 中国给水排水, 2016, 32(21): 108-110. (FENG J H. Design of pump sump and numerical analysis of flow at integrated pump station[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(21): 108-110. (in Chinese))
- [11] 王芃也, 刘超, 徐磊, 等. 基于全模拟的水泵装置模型虹吸出水水道水力特性分析[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(6): 128-134. (WANG P Y, LIU C, XU L, et al. Simulation analysis of the pump device model hydraulic performance of siphon discharge conduit[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(6): 128-134. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nbsdqk. 2016. 06. 022.
- [12] 刘超, 成立, 周济人, 等. 水泵站开敞进水池三维紊流数值模拟[J]. 农业机械学报, 2002, 33(6): 53-55. (LIU C, CHENG L, ZHOU J R, et al. Numerical simulation of three dimensional turbulent flow for opening pump sump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(6): 53-55. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1298. 2002. 06. 016.
- [13] 杨帆. 带可调进口导叶轴流泵装置水力性能数值分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 54-58. (YANG F. Numerical simulation on hydraulic performance of axial flow pumping system with adjustable inlet guide vanes[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 54-58. (in Chinese)) DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2014. 05.

- 008.
- [14] 钱钧,周庆连,刘超,等.双向立式潜水轴流泵装置特性研究[J].中国农村水利水电,2016(2):101-105&108.(QIAN J,ZHOU Q L,LIU C,et al.A numerical simulation and model of two way submersible axial flow pumping system[J].China Rural Water and Hydropower,2016(2):101-105,108.(in Chinese) DOI:10.3969/j.issn.1007-2284.2016.02.026.
- [15] 朱红耕,袁寿其,刘厚林.肘形进水流道对立式轴流泵水力性能影响的数值模拟[J].农业工程学报,2006,22(2):6-9.(ZHU H G,YUAN S Q,LIU H L.Numerical simulation of the influence of elbow inlet passages on the hydraulic characteristics of vertical axial flow pumps[J].Transactions of the CSAE,2006,22(2):6-9.(in Chinese) DOI:10.3321/j.issn:1002-6819.2006.02.002.
- [16] BLAZEK J. Computational fluid dynamics: principles and applications[M]. 2nd ed. Netherlands: Elsevier Ltd, 2005: 227-270.
- [17] LAUNDER B E, SPALDING D B. Lectures in mathematical models of turbulence[M]. London: Academic Press, 1972.
- [18] LAUNDER B E, SPALDING D B. The numerical computation of turbulent flows[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1974, 3(2): 269-289.
- [19] 成立.泵站水流运动特性及水力性能数值模拟研究[D].南京:河海大学,2006.(CHENG L.Numerical simulation for flow pattern and hydraulic performance of pumping systems[D].Nanjing:HoHai University,2006.(in Chinese))
- [20] 肖惠民.基于计算流体力学的水轮机及水电站尾水系统数值研究[D].武汉:武汉大学,2005.(XIAO H M.Numerical simulation for flow pattern and hydraulic performance of pumping systems[D].Wuhan:Wuhan University,2005.(in Chinese))
- [21] RODI W. Turbulence models and their application in hydraulics experimental and mathematical fluid dynamics[M]. Delft: IAHR Section on Fundamentals of Division 0, 1980: 44-46.
- [22] 杨帆.低扬程泵装置水力特性及多目标优化关键技术研究[D].扬州:扬州大学,2013.(YANG F.Research on hydraulic performance and multi objective optimization design of low lift pump system[D].Yangzhou:Yangzhou University,2013.(in Chinese))
- [23] 谢龙汉,赵新宇.ANSYS CFX 流体分析及仿真(第二版)[M].北京:电子工业出版社,2013.(XIE L H,ZHAO X Y.ANSYS CFX flow analysis& simulation(second edition)[M].Beijing:Publishing House of Electronics Industry,2013.(in Chinese))
- [24] 李彦军,颜红勤,葛强,等.大型低扬程泵装置优化设计与试验[J].农业工程学报,2010,26(9):144-148.(LI Y J,YAN H Q,GE Q,et al.Optimum hydraulic design and model test of large scale low lift pump devices[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2010,26(9):144-148.(in Chinese) DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2010.09.024.
- [25] 刘超.立式轴流泵进水流场 PIV 测量[J].农业机械学报,2015,46(8):33-41.(LIU Chao.PIV measurements of intake flow field in axial flow pump[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(8):33-41.(in Chinese) DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.08.006.

(上接第 170 页)

- [20] 翟晓丽.关中盆地降水变化趋势研究[D].西安:西安科技大学,2012.(ZHAI X L.The study of precipitation trend in the Guanzhong Basin[D].Xi'an:Xi'an University of Science and Technology,2012.(in Chinese) DOI:10.7666/d.d223800.
- [21] 赵嘉阳,王文辉,郭福涛,等.福建省 2000—2013 年气象因子的变化趋势[J].福建农林大学学报(自然科学版),2016,45(5):567-575.(ZHAO J Y,WANG W H,GUO F T,et al.Analysis on the changes of meteorological factors of Fujian Province during 2000-2013[J].Journal of Fujian Agriculture and Forestry University(Natural Science Edition),2016,45(5):567-575.(in Chinese) DOI:10.13323/j.cnki.j.fafu(nat.sci.).2016.05.015.
- [22] 赵卓文,张连蓬,李行,等.基于 MOD13Q1 数据的宁夏生长季植被动态监测[J].地理科学进展,2017,36(6):741-752.(ZHAO Z W,ZHANG L P,LI X,et al.Monitoring vegetation dynamics during the growing season in Ningxia based on MOD13Q1 data[J].Progress in Geography,2017,36(6):741-752.(in Chinese) DOI:10.18306/dlxxjz.2017.06.009.
- [23] 黄强,孔波,樊晶晶,等.水文要素变异综合诊断[J].人民黄河,2016,38(10):18-23.(HUANG Q,KONG B,FAN J J,et al.Hydrological elements comprehensive detecting variation[J].Yellow River,2016,38(10):18-23.(in Chinese) DOI:10.3969/j.issn.1000-1379.2016.10.004.
- [24] 张展羽,梁振华,冯宝平,等.基于主成分-时间序列模型的地下水位预测[J].水科学进展,2017,(03):415-420.(ZHANG Z Y,LIANG Z H,FENG B P,et al.Groundwater level forecast based on principal component analysis and multivariate time series model[J].Advances in Water Science,2017,(03):415-420.(in Chinese). DOI:10.14042/j.cnki.32.1309.2017.03.012.
- [25] 杨怀德,冯起,郭小燕.1999—2013 年民勤绿洲地下水埋深年际变化动态及影响因素[J].中国沙漠,2017,(03):562-570.(YANG H D,FENG Q,GUO X Y.Variation of groundwater depth and its influence factors in Minqin Oasis in 1999-2013[J].Journal of Desert Research,2017,(03):562-570). DOI:10.7522/j.issn.1000-694X.2016.00077.