

补料长度对井筒式出水流道水力性能的影响

施 伟^{1,2}, 冯旭松^{1,2}

(1. 南水北调东线江苏水源有限责任公司, 江苏 南京 210029;
2. 江苏省泵站工程技术研究中心, 江苏 南京 210029)

摘要:为研究补料长度 L 对立式潜水轴流泵装置中井筒式出水流道水力性能的影响, 设置 $L = 0\text{ mm}$ 、 $L = 60\text{ mm}$ 及 $L = 120\text{ mm}$ 的 3 种补料长度方案, 并基于 RNG $k-\varepsilon$ 模型对泵装置进行定常 CFD 数值模拟。研究不同补料长度下井筒式出水流道特征断面内部流动特性、水力损失及泵装置扬程效率, 结构表明: 补料长度越大, 出水管内部的流态越平顺、静压分布越均匀, 出水流道的水力损失越小, 泵装置不同流量下的扬程效率也越高。综合来看, 在井筒及出水管的连接段增设一定长度的补料能够有效地平缓出水管进口的流态, 但过长的补料区域会带来加工上的不便, 不能很好的体现立式潜水轴流泵装置的经济实用性, 因此, 在实际工程中, 应该结合实际成本综合考虑。

关键词:井筒式出水流道; 补料长度; 数值模拟; 水力性能

中图分类号: TV675 文献标识码: B 文章编号: 1007-7839(2019)08-0042-05

Effect of feeding length on hydraulic performance of wellbore outflow conduit

SHI Wei^{1,2}, FENG Xusong^{1,2}

(1. Jiangsu water source limited liability Company of South to North Water Transfer East line, Nanjing 210029, Jiangsu; 2. Jiangsu Pump Station Engineering Research Center, Nanjing 210029, Jiangsu)

Abstract: In order to study the influence of feeding length L on the hydraulic performance of wellbore outflow conduit in vertical submersible axial flow pump device, three feeding length schemes ($L = 0\text{ mm}$, $L = 60\text{ mm}$ and $L = 120\text{ mm}$) were set up, and steady CFD numerical simulation of pump device was carried out based on RNG $k-\varepsilon$ model. By studying the flow characteristics, hydraulic loss and pump lift efficiency in the characteristic section of the wellbore outlet channel with different feeding length, it was found that the longer the feeding length was, the smoother the flow pattern in the outlet pipe was, the more uniform the static pressure distribution was, the smaller the hydraulic loss of the outlet channel was, and the higher the lift efficiency of the pump device with different flow rate was. Generally speaking, adding a certain feeding length to the connecting section of wellbore and outlet pipe could effectively smooth the flow pattern of outlet pipe, but too long feeding area would bring processing inconvenience and could not well reflect the economic practicability of vertical submersible axial flow pump device. Therefore, in practical engineering, comprehensive consideration should be given to actual cost.

Key words: wellbore outflow conduit; feeding length; numerical simulation; hydraulic performance

收稿日期: 2019-04-23

基金项目: 江苏省水利科技项目(2017031)

作者简介: 施伟(1980—), 博士, 高级工程师, 主要从事水利工程建设与管理工作。

0 引言

立式潜水轴流泵装置主要由开敞式进水池、喇叭管、叶轮、扩散导叶以及井筒式出水流道5个部分组成。与常见的轴流泵装置形式相比,立式潜水轴流泵装置的叶轮、扩散导叶与后方的潜水电机井相连紧密,结构相对紧凑,在进行检修时,只需将整个机组吊起进行维修,大大减少了维修费用和时间;而且泵房形式简单,节省投资。因此,立式潜水轴流泵在农田灌溉、城市排涝领域的应用越来越广泛^[1-3]。

葛强等^[4]运用模型试验的手段,对一立式潜水轴流泵装置进行能量特性和空化特性的试验,发现其最高效率仅在55%左右,并且高效区运行范围也较窄。蒋文军等^[5]以一名称为350QZ70-30型的潜水轴流泵进行试验,经分析发现出水三通竖管与相贯的横管尖角处水流流态最为紊乱,并通过对尖角处进行补料,发现用带45°补料的井筒式出水流道可以改善流态,将效率由原来的44%提高到47%,并在大流量下有着更为明显的改善。目前国内对立式潜水轴流泵装置的研究还处于起步阶段,对潜水轴流泵出水流道的优化设计相关研究较少,但是出水流道的水力损失严重制约着立式潜水轴流泵性能的进一步提高。因此,本文以一常见的立式潜水轴流泵装置为例,通过数值模拟分析其出水流道转弯尖角处的流态,并提出不同补料方案对其进行优化分析。

1 泵装置基本参数

本文以模型泵装置为例,各项参数均以模型试验尺寸为参照,其中叶轮直径 $D=300\text{ mm}$,轮毂比为0.35,叶轮叶顶间隙处设置为 0.2 mm ,叶轮叶片数为4张,叶片安放角为 0° ,导叶叶片数为7张,泵装置设计流量 $Q_d=340\text{ L/s}$,设计扬程 $H_d=4.2\text{ m}$ 。

2 三维建模及网格划分

2.1 计算模型

本文的研究对象采用模型泵,计算模型分为进水池、喇叭管、叶轮、扩散导叶以及井筒式出水流道5个部分,其中进水池、喇叭管和井筒式出水流道采用Siemens NX进行三维建模,叶轮和扩散导叶则采用旋转机械专业建模软件Turbogrid对其进行三维建模,并且最终将各个部分的模型在ANSYS CFX中进行拼接,其整体装置模型图如图1所示。

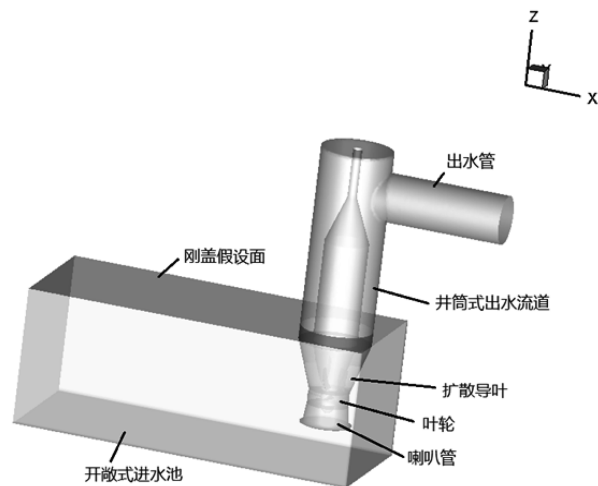


图1 立式潜水轴流泵整体装置图

2.2 网格划分

计算模型网格的划分对数值模拟计算尤为重要,开敞式进水池和喇叭管由于结构相对简单,采用ICEM对其进行六面体结构化网格划分,并确保整体网格质量在0.5以上。叶轮与导叶为泵装置的计算核心,借助专业划分软件Turbogrid对其进行网格剖分,保证其网格面角在 $15^\circ \sim 165^\circ$ 之间。而井筒式出水流道由于其结构复杂,为了能够在计算软件中精确表示其三维特征,因此采用适应性较强的非结构化网格对其划分,网格整体质量在0.35以上,并在关键计算部位对其进行网格加密保证计算需求。泵装置模型总网格数在350万左右,能够保证数值模拟计算的精度要求。各部分网格如图2所示。

2.3 边界条件与控制方程

将计算模型各部分网格导入CFX-Pre中进行拼接,组装成模型泵装置;并对各项边界条件进行设置。其中,控制方程采用雷诺时均N-S方程,紊流模型采用RNG $k-\varepsilon$ 模型^[6];进口边界条件设置为质量流量进口,流量值大小由计算工况决定,出口边界条件采用总压出口,设置出口的压力值为 101325 Pa ,开敞式进水池水面设置为自由水面,叶轮设置为旋转域,并设置转速为 1450 r/min ,其余的流道壁面、叶轮的轮毂、轮缘及导叶体内部均设置为静止壁面,采用边壁无滑移条件。

3 出水流道优化

3.1 优化方案的选取

井筒式出水流道是一种结构简单、维修方便的出水流道形式,广泛的应用于潜水轴流泵装置中,主要由井筒、电机井以及出水管3个部分组成。由

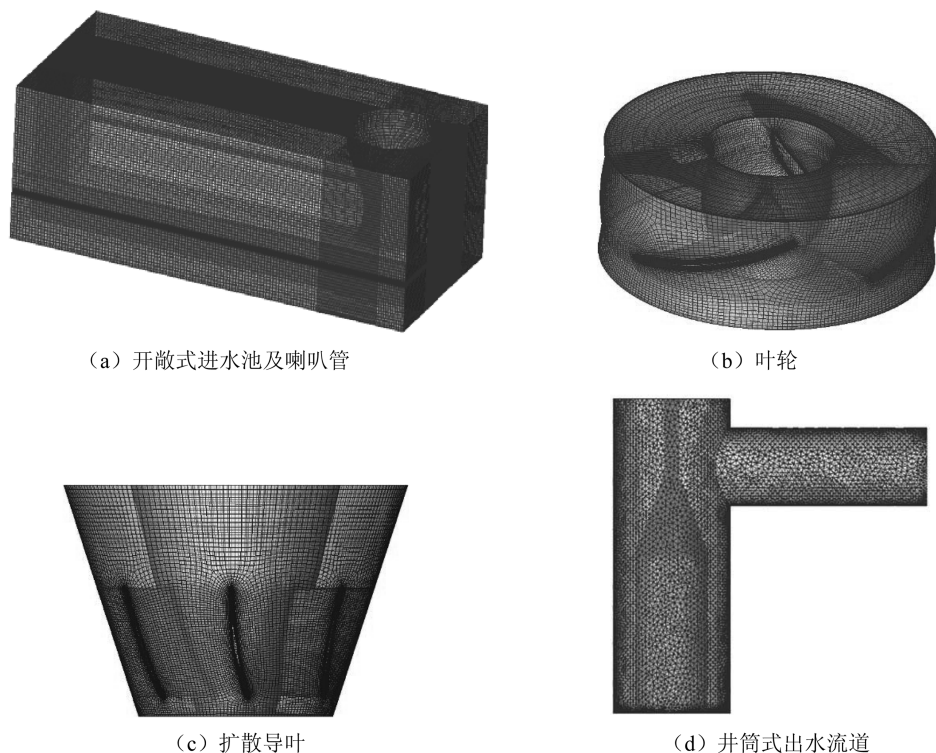


图2 各部位网格划分图

于在原始方案的计算过程中发现:在井筒与出水管相贯的转弯处后方,出水管上部边壁处容易产生脱流,而靠近出水管下部边壁处则有回流区域的存在。因此,为了改善尖角后的不良流态,降低出水流道的水力损失,提出了3种不同补料长度的方案,补料长度分别为0 mm、60 mm、120 mm,对应的方案号为方案一、方案二和方案三,并选取不同的截面对其水力性能进行分析,具体截面的选取见图3。

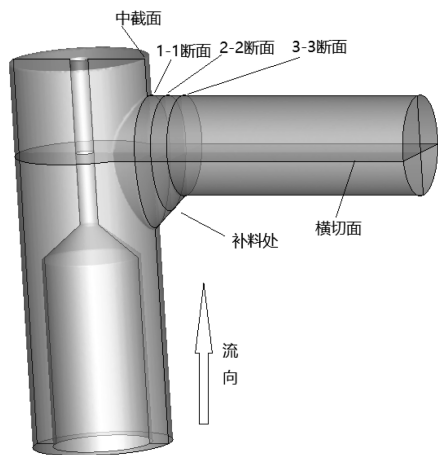


图3 井筒式出水流道特征断面示意图

3.2 出水流道流场分析

选取井筒式出水流道的中截面作为特征断面进行分析,根据图4可以看出,在设计流量 $Q =$

340 L/s时,3个方案均在井筒内的左上角部位和电机井左侧产生了回流区域,但是并未对主流产生明显的影响。方案一在转弯后形成了明显的大范围低压区,迫使主流只能在靠近边壁或两股低压区中间的位置行进,产生了明显的回流区,导致出口流线产生了明显的偏转,由于补料长度的增加,水流在经过转弯处时,有了一个较好的过渡,避免了方案一在转弯后,流线呈现出向右上方的运动趋势,因此,方案二和方案三在转弯后并未产生明显的低压区和回流区,并且随着补料长度的加大,方案三的压力分布相比方案二更为均匀,出口流线分布没有明显的向上偏转。

图5为出水管内特征横切面上的速度分布图,由图5可见:方案一在转弯后存在着明显的高速区域,范围几乎占满整个出水管通道,影响水流的正常行进并且容易诱发漩涡的产生;而方案三内的速度分布较为均匀,主要是因为增加补料长度使断面面积均匀扩散,转弯补料处由原来的90°直角转弯变为分段过渡,给水流一个适当的缓冲区域,帮助其在进入出水管前实现更加平缓的转弯,并且补料长度越长,其转弯后的出水管出口速度分布越均匀。

3.3 补料区特征断面流态分析

为了进一步阐明补料长度对出水管内的水力

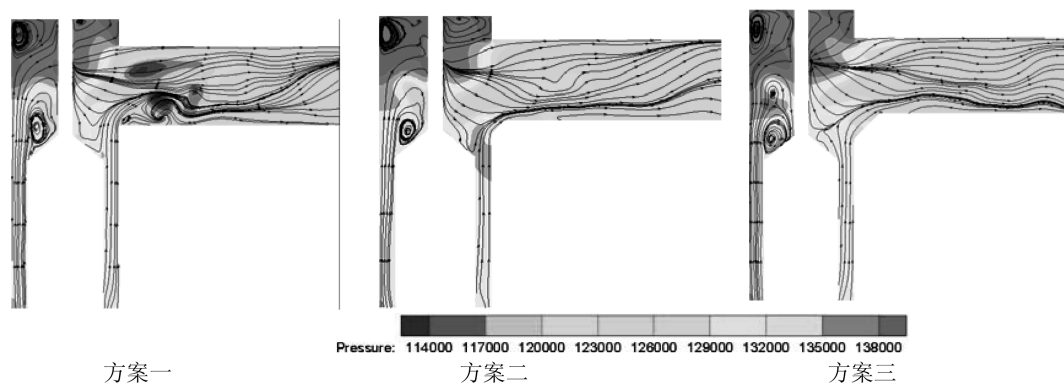


图4 设计流量工况下的静压与流线分布

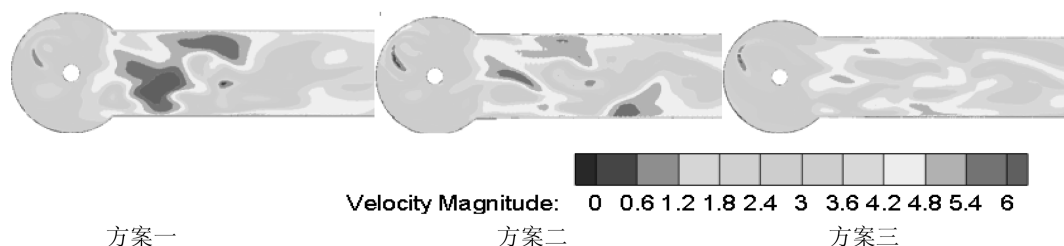


图5 出水管横切面速度分布

特性影响,以补料处的进口、中间以及出口断面位置作为特征断面,分别对应图3中的断面1-1、2-2和3-3,取出不同特征断面上的速度分布进行对比。从图6中可以明显看出:方案一中的特征断面1-1处的高速区域聚集在出水管中心,并且占据了大部分面积,水流在断面上呈现出靠近下方边壁处具有相对较高的速度,方案一中出水管内的不良流态,也是主要由转弯后水流速度的不均匀分布引起;添加了补料之后的出水流道,特征断面1-1下半部分形状由原来的圆变为椭圆,过流面积增大,断面的平均流速相比原来更小,分布更加均匀,为出水管内水流均匀运动、消除不良流态提供了初始条件。当水流流经特征断面2-2时,方案一中不均匀的大范围高速区向出水管中间移动;方案二中相对较少的高速区则呈现出向下部边壁聚集的趋势,主要是断面下半部分形状由椭圆变回了原来的圆,断面向上收缩过急,速度分布还没能及时的调整均匀,导致两边的高速区域被迫向下部中间边壁聚集;而方案三所取的补料长度则较好的解决了方案二中的问题,根据图6中所示,方案三在特征断面2-2处下半部分仍是椭圆面,在断面上没有明显的高速区存在,断面流速分布相对均匀。在特征断面3-3处,方案一在断面2-2中心区域存在的高速区域向上半部分转移,结合前两个断面的高速中心移动趋势,方案一势必在出水管内引起水流向上运动,这一趋势也正好对应图4中的流线分布规

律;方案二相比前1个断面,高速区域进一步往下边壁的中心靠拢,但是高速区范围相对减少;方案三则在特征断面3-3位置下半部分边壁处产生了小范围的高速区域,结合图4中的流线可以发现,相比原始方案,方案三已经基本达到消除回流,平稳流态的作用。

3.4 水力损失性能对比

将不同方案的立式潜水轴流泵的出水流道水力损失整理成如图7所示,计算结果表明,3种方案的出水流道最小水力损失均在设计流量下,其中方案一的水力损失为1.01 m,而优化后的方案三为0.82 m;在小流量工况下,水力损失主要由导叶出来的大环量水流造成,而在大流量工况下,速度是引起出水流道水力损失的主要原因,所以在大流量工况下,速度分布均匀的方案三与方案一相比,水力损失下降了0.47 m,在扬程仅为1 m左右的大流量工况下,优化效果明显。

3.5 泵装置外特性对比

将不同方案的泵装置外特性性能曲线整理成如图8所示,发现优化后的方案在小流量、设计流量以及大流量工况下均比基础方案要优秀,高效区得到了明显的拓宽,最高运行效率也有了明显的提升,优化结果明显。由于立式潜水轴流泵本身扬程偏低,所以3个方案均在低扬程的大流量工况下装置效率下降较快,在流量为400 L/s时,方案一的扬程仅为1.02 m,泵装置效率只有30.2%,方案三的

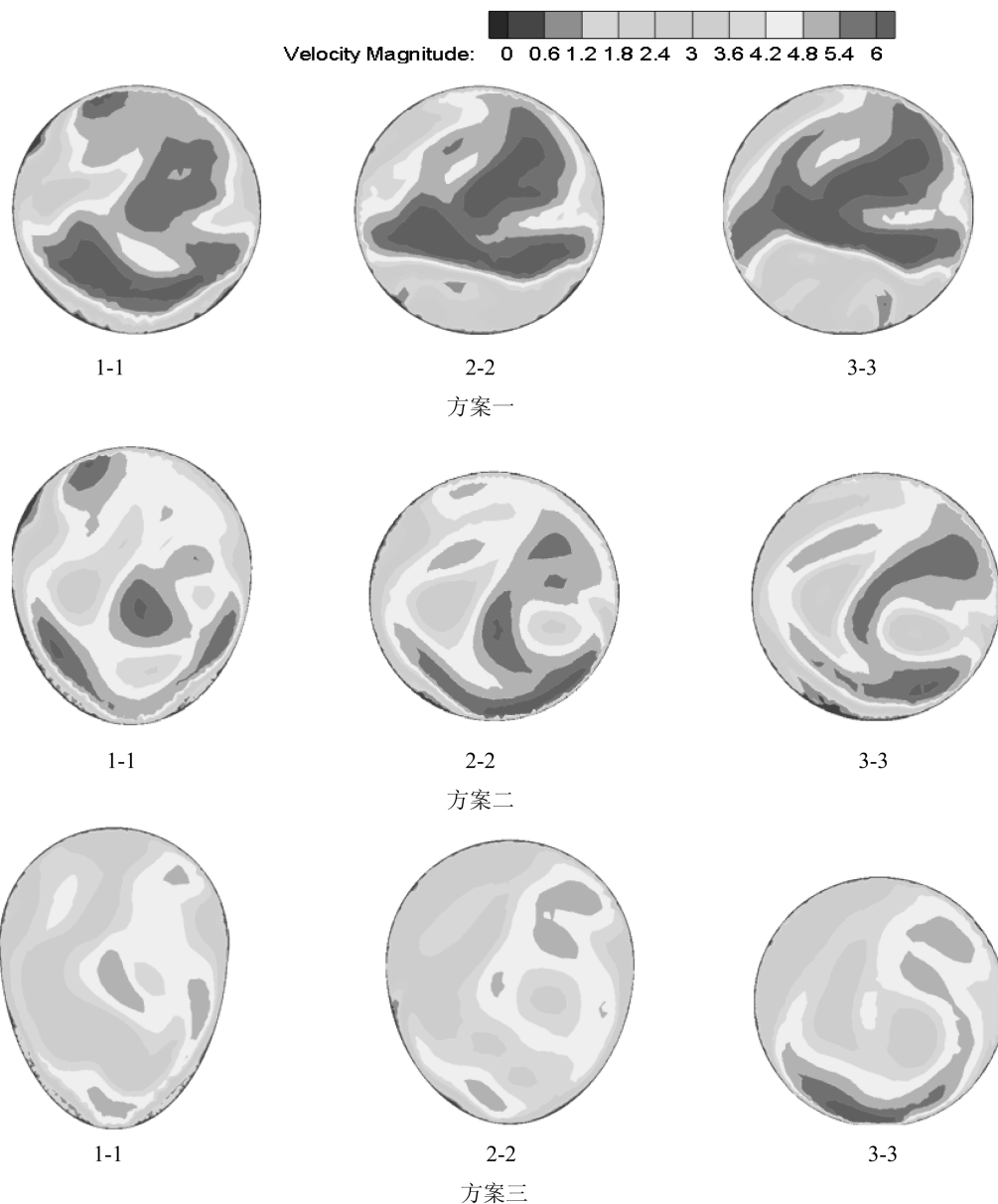


图 6 不同方案的特征断面速度分布云图

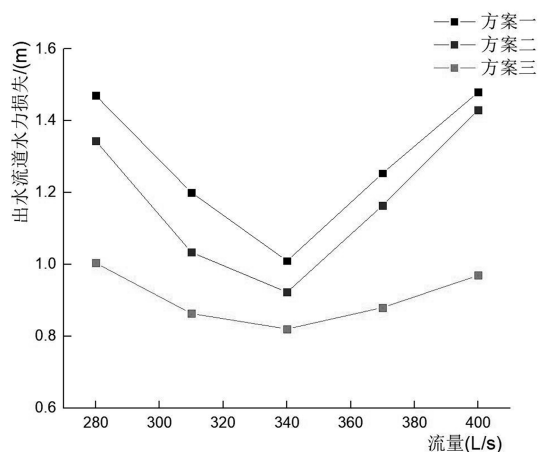


图 7 不同方案水力损失对比

扬程则是 1.41 m, 泵装置效率则达到了 43.4%, 主要原因是大流量工况下, 水流速度是引起水力损失

的主要原因, 而增加补料长度, 明显可以降低出水管内高速区范围, 减少水力损失, 使泵装置在大流量工况下运行有一定的保障。

4 结论

(1) 方案三相比于其他方案, 特征断面速度分布均匀, 并且在内部流线和速度分布上明显优于其他方案, 消除了作为基础方案的方案一中的低压区和回流等不良流态, 但是方案三在出水管内下部边壁处仍存在着小范围的高速区存在, 可能需要进一步增加少许补料长度, 但是过长的补料长度会带来加工上的不便, 不能很好的体现立式潜水轴流泵的经济实用性。因此, 在实际工程中, 应该结合实际成本综合考虑。

(下转第 50 页)

(上接第 46 页)

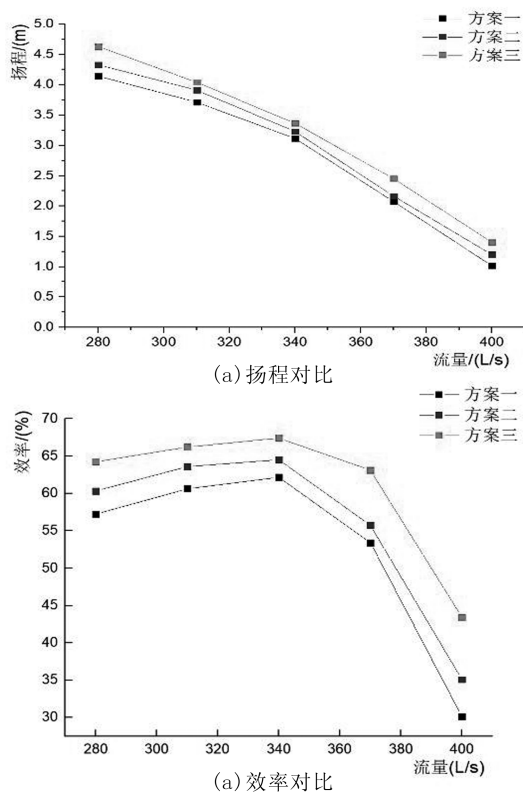


图 8 不同方案外特性对比

(2) 泵装置计算结果表明: 在同一流量工况下, 方案三的扬程和效率性能整体优于其他方案, 高效

区范围得到了拓宽, 尤其在大流量工况下, 方案三优化效果明显, 扬程由原来的 1.02 m 提升到 1.41 m, 水力损失下降了 0.47 m, 效率由原来的 30.2% 上升到 43.4%, 保证了立式潜水轴流泵装置在大流量下的稳定高效运行。

参考文献:

- [1] 刘超, 周庆连, 钱均, 等. 双向流道立轴潜水泵系统流动特性研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(10): 59-65+58.
- [2] 夏臣智, 成立, 蒋红樱, 等. 潜水贯流泵装置过流部件水力性能分析与优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(07): 45-51+301.
- [3] 杨帆, 金燕, 刘超, 等. 双向潜水贯流泵装置性能试验与数值分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 60-67.
- [4] 葛强, 陈松山, 王林锁, 等. 潜水轴流泵装置特性模型试验[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(5): 34-40.
- [5] 蒋文军. 一种提高井筒式潜水轴流泵装置效率的方法[J]. 排灌机械, 1999(01): 30.
- [6] 张德胜, 施卫东, 张华, 等. 不同湍流模型在轴流泵性能预测中的应用[J]. 农业工程学报, 2012, 28(01): 66-71+296.