

澡港河泵站扩容工程 双向立式泵装置模型试验分析

王铁力¹, 孙云儒², 吕玉婷³, 丁 浩^{1,3}, 杨 帆³

(1. 江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225127; 2. 河海大学大禹学院, 江苏 南京 210098;
3. 扬州大学水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009)

摘要:为检验澡港河泵站扩容工程的双向立式泵装置的水力性能,确保泵站安全可靠运行并高效地发挥经济与社会效益,采用物理模型试验的方法对澡港河泵站扩容工程泵装置性能进行定量分析,研究了澡港河泵站双向立式泵装置能量性能、空化性能与飞逸特性。试验结果表明:澡港河泵站扩容工程双向立式轴流泵装置运行平稳,无不良噪音和振动,水力性能较好。在叶片安放角 -4° 、扬程 2.51 m 时,泵装置最高效率为 70.1%。在叶片安放角 $+1^\circ$,设计扬程 1.82 m 时,泵装置原机组流量为 $20.56 \text{ m}^3/\text{s}$,必需汽蚀余量为 4.06 m,满足泵站设计参数要求。在叶片安放角为 -4° 、最大扬程 3.31 m 时,飞逸转速为水泵机组额定转速的 1.49 倍。

关键词:澡港河泵站; 双向立式泵装置; 能量性能; 空化性能; 模型试验

中图分类号:TV136 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-7839(2022)04-0029-0005

Model test analysis of bidirectional vertical pump device in the expansion project of Zaoganghe Pumping Station

WANG Tiel¹, SUN Yunru², LYU Yuting³, DING Hao^{1,3}, YANG Fan³

(1. Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Yangzhou 225127, China;

2. Dayu College, Hohai University, Nanjing 210024, China;

3. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: In order to test the hydraulic performance of the bidirectional vertical pump device of the expansion project of the Zaoganghe Pumping Station, to ensure the safe and reliable operation of the pumping station, and effectively play the economic and social benefits, the physical model test method was used to quantitatively analyze the performance of the pump device, and the energy performance, cavitation performance and flow characteristics of the bidirectional pump device of the Zaoganghe Pumping Station were studied. The test results show that the bidirectional vertical pump device of the expansion project of the Zaoganghe Pumping Station runs stably, without adverse noise and vibration, and has good hydraulic performance. When the blade setting angle is -4° and the head is 2.51 m, the maximum efficiency of the pump device is 70.1%. When the blade setting angle is $+1^\circ$ and the design head is 1.82 m, the flow rate of the original pump device is $20.56 \text{ m}^3/\text{s}$ and the necessary cavitation amount is 4.06 m, which meets the design parameters of the pump station. When the blade setting angle is -4° and the maximum head is 3.31 m, the runaway speed is 1.49 times of the rated speed of the pump.

收稿日期:2021-10-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51609210),江苏省高校自然科学研究重大项目(20KJA570001),江苏省水利科技计划项目(2020029)

作者简介:王铁力(1985—),男,高级工程师,主要从事水工建筑物的设计等方面研究。E-mail:451096828@qq.com

通信作者:杨帆(1985—),男,副教授,硕士生导师,主要从事泵站工程科研与教学工作。E-mail:fanyang@yzu.edu.cn

Key words: Zaoganghe Pumping Station; bidirectional vertical pump device; energy performance; cavitation performance; model test

双向立式泵装置具有排涝、引水、自排及自灌的4种功能,具有工程投资小、结构简单、施工安装检修方便等优点,被广泛应用于我国沿江滨湖地区。因双向立式泵装置的优化设计理论和匹配方法仍不够成熟,部分已建的双向立式泵站因流道型线设计不合理,造成泵机组振动、汽蚀^[1],为此,不少学者针对双向立式泵装置的内流及水力特性开展了相关的工作并取得了不少的研究成果;刘超^[2-3]等通过CFD软件对双向立式泵装置的内部流动进行数值模拟,明晰了双向立式泵装置的内部流动规律并预测了泵装置的能量性能;金海银^[4]等以江苏省江边枢纽泵站的箱涵式双向立式轴流泵装置为研究对象,采用物理模型试验方法对箱涵式双向立式轴流泵装置模型开展了能量性能、汽蚀性能及飞逸性能试验;张后文^[5]等对枞阳泵站双向流道进行了参数化建模,并基于Isight多学科优化平台对双向流道的型线进行了优化;杨帆^[6-7]等利用CFD技术和物理模型试验分析了双向立式泵装置内流场及水力性能,给出了不同叶片安放角时能量性能试验与空化性能试验的泵装置内流脉动变化规律,提出了扩散导叶体应用于双向立式泵装置的思路。随着CFD技术的发展,更多学者选择应用数值模拟的方法预测泵装置各项性能^[8-13],当前对泵装置水力性能的研究主要采用数值模拟技术,泵装置物理模型试验具有费用高、周期长等缺点,在泵站性能研究方面采用较少,但泵装置物理模型试验具有数值模拟无法取代的重要作用。

为了更切实地明确澡港河泵站扩容工程的双向立式泵装置的能量性能、空化性能及飞逸特性,依据国家标准《泵站设计规范(GB50265—2010)》的要求,对新建泵站的泵装置进行物理模型试验研究,确保新建泵站的安全可靠运行并高效地发挥经济效益和社会效益。

1 工况概况

常州市澡港河泵站扩容工程是新沟河延伸拓浚工程影响处理工程之一,也是太湖流域武澄锡虞区重要引排骨干工程澡港河水利枢纽的重要组成部分。澡港河泵站扩容工程的泵站采用堤身式结构,具有排涝与引水双重功能,以排涝为主,该泵站设计引水、排涝流量60 m³/s,安装3台立式轴流泵,

总装机容量3 000 kW,澡港河泵站运行水位组合如表1所示,在考虑拦污栅水力损失0.15 m时,排涝设计总扬程1.82 m,引水设计总扬程1.63 m。

表1 澡港河泵站水位组合

类别		内河水位/m	长江水位/m	净扬程/m
正向 (排涝)	设计	3.63	5.30	1.67
	校核	3.57	6.73	3.16
反向 (引水)	设计	3.89	2.41	1.48
	校核	4.20	1.89	2.31

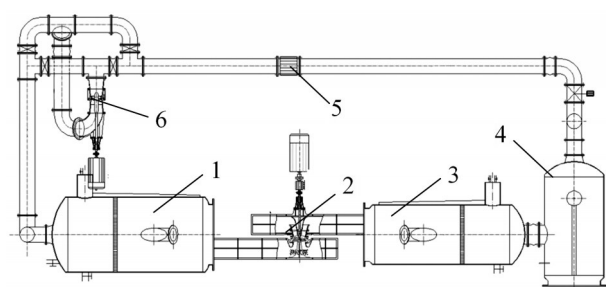
澡港河泵站扩容工程属于典型的特低扬程大流量泵站,为了确保该泵站的高效安全可靠运行,根据国家标准《泵站设计规范(GB50265—2010)》的9.2节要求,对澡港河泵站扩容工程的泵装置进行物理模型试验。澡港河泵站扩容工程泵装置采用箱涵式双向流道结构,箱涵式双向进水流道的净高为1.48 D,长为9.4 D,净宽为3.0 D;箱涵式双向出水流道的净高为1.44 D,长为7.42 D,净宽为3.0 D。

2 试验内容与方法

2.1 试验对象及测试系统

泵装置物理模型试验按欧拉准则进行,设计工况时模型泵装置雷诺数 Re 大于 1×10^6 。根据 nD 值相等的原则,澡港河扩建工程泵站的原型叶轮转速为150 r/min,原型叶轮直径为2 500 mm,模型泵装置的叶轮直径为300 mm,叶轮的转速为1 250 r/min,叶轮的叶片数为3片,导叶体的叶片数为5片。原模型过流几何相似,原模型进、出水流道的几何比尺均为8.33,模型泵装置的流道均采用钢板焊接制作,模型泵及流道的几何偏差均满足《水泵模型及装置模型验收试验规程(SL140—2006)》规定的允许偏差值要求。

双向立式轴流泵装置物理模型试验在扬州大学流体动力工程实验室的高精度泵站试验台进行,高精度泵站试验台为平面封闭循环系统,如图1所示,试验台由水力循环系统、动力系统、控制系统和测量系统组成。转矩转速采用JC1A型转速转矩传感器,扬程采用差压变送器EJA110A测取,流量采用E-mag型DN400电磁流量计测取,空化试验采用绝对压力变送器EJA310A测取。



1. 进水压力罐 2. 受测泵装置 3. 出水压力罐 4. 稳压罐
5. 电磁流量计 6. 辅助泵

图1 高精度泵站试验台示意

2.2 测试内容及综合不确定度分析

根据相似理论,原模型的泵装置动力特性参数的比尺分别为:扬程比尺为1.0,流量比尺为69.44,功率比尺为69.44。澡港河扩建工程泵装置的物理模型试验包括:能量性能试验、空化性能试验和飞逸特性试验。5个叶片安放角度(-4° 、 -2° 、 0° 、 $+2^\circ$ 、 $+4^\circ$)时泵装置的能量性能试验,能量性能试验覆盖澡港河泵站整个运行扬程及流量范围,每个叶片安放角度的泵装置能量性能试验点数不少于15个。对每个叶片安放角的泵装置3个流量工况点进行空化性能试验,每个流量工况的试验采样点数不少于10个。空化性能试验保持流量不变,通过对封闭循环系统抽真空,逐步减小系统压力的方法,使泵内发生空化,按效率下降1%确定必需汽蚀余量 $NPSH_r$ (以水泵叶轮中心为基准);测试叶片安放角 -4° 和 $+4^\circ$ 两个角度时泵装置的飞逸特性,飞逸特性试验的反向水头由辅助泵提供,通过调节辅助泵的转速来改变反作用水头,利用测功扭矩仪和电磁流量计测量不同水头下水泵稳定反转的转速和倒泄流量。泵装置物理模型各项性能试验均按照中华人民共和国水利行业标准《水泵模型及装置模型验收试验规程(SL140—2006)》的要求进行。

泵装置能量性能试验的综合不确定度 E_η 包括系统不确定度 $(E_\eta)_s$ 和随机不确定度 $(E_\eta)_r$,系统不确定度为各单项系统不确定度的方和根^[13-14],即

$$(E_\eta)_s = \pm \sqrt{E_Q^2 + E_H^2 + E_M^2 + E_n^2} = \pm 0.316\% \quad (1)$$

式中: E_Q 为流量测量的系统不确定度,为 $\pm 0.2\%$; E_H 为净扬程测量的系统不确定度,为 $\pm 0.1\%$; E_M 为转矩测量的系统不确定度,为 $\pm 0.2\%$; E_n 为转速测量的系统不确定度,为 $\pm 0.1\%$ 。选取叶片安放角 0° 时,对设计扬程时泵装置能量性能进行重复性试验,共测取20个数据点,计算随机不确定度,随机不确定度的计算式参照文献^[13]中所示,泵装置能量试验随机不

确定度为

$$(E_\eta)_r = \pm \frac{t_{0.95(N-1)} S_{\bar{\eta}}}{\bar{\eta} \sqrt{N}} \times 100\% = \pm 0.070\% \quad (2)$$

式中: $t_{0.95(N-1)}$ 为对应于0.95置信度和 $(N-1)$ 个自由度的置信系数,在该试验中, $t_{0.95(N-1)}$ 为1.7291; N 为测量次数; $S_{\bar{\eta}}$ 为效率平均值的标准偏差; $\bar{\eta}$ 为效率平均值。

泵装置物理模型能量性能试验的综合不确定度为

$$E_\eta = \sqrt{(E_\eta)_s^2 + (E_\eta)_r^2} = \pm 0.323\% \quad (3)$$

澡港河泵站扩容工程的泵装置性能试验的综合不确定度满足《水泵模型及装置模型验收试验规程(SL140—2006)》的精度要求。

3 试验结果与分析

3.1 能量性能试验

澡港河泵站扩容工程的双向立式泵装置物理模型能量性能试验的扬程在0~4 m范围内,5个叶片安放角时双向立式轴流泵装置最优工况的能量性能参数如表2所示,泵装置物理模型的综合特性曲线如图2所示。澡港河泵站扩容工程的泵装置最高效率达70.1%,此时泵装置扬程为2.51 m,流量为211 L/s,叶片安放角度为 -4° ,对应原型泵装置机组的流量为15.75 m³/s,表明在特低扬程澡港河泵站扩容工程的机组具有较高的效率。在泵装置扬程1.7~3.5 m范围内,叶片安放角在 $-4^\circ \sim 0^\circ$ 之间泵装置的效率均超过66%,在叶片安放角 -4° 时,泵装置扬程被高效区覆盖的范围最大。在相同扬程时,随着叶片安放角的增大,泵装置的最高效率逐渐降低。在相同叶片安放角时,随着泵装置流量的减小,扬程呈逐渐下降的趋势。根据水泵相似律换算,澡港河泵站扩容工程原型泵机组在叶片安放角 0° 、设计扬程1.82 m时,流量为19.67 m³/s,装置效率为62.33%,流量略小于设计流量;在叶片安放角 $+2^\circ$ 、设计扬程1.82 m时,流量为21.49 m³/s,效率为58.38%,流量满足设计流量20 m³/s的要求,但装置效率偏低,综合考虑,澡港河泵站扩容工程的原型机组的叶片安放角应设置为 $+1^\circ$,则在设计扬程1.82 m时,流量为20.56 m³/s,效率为60.55%,此时在最高扬程3.31 m时,流量为16.42 m³/s,泵装置效率为64.6%,原型机组各项能量性能参数均满足泵站设计要求和《泵站设计规范(GB50265—2010)》中对泵装置效率的技术要求。

表2 双向立式轴流泵装置最优工况参数

叶片角度/(°)	流量/(L·s ⁻¹)	扬程/m	效率/%
-4	211.0	2.51	70.10
-2	228.0	2.65	69.87
0	245.0	2.68	67.38
+2	270.0	2.70	65.34
+4	288.0	2.73	64.76

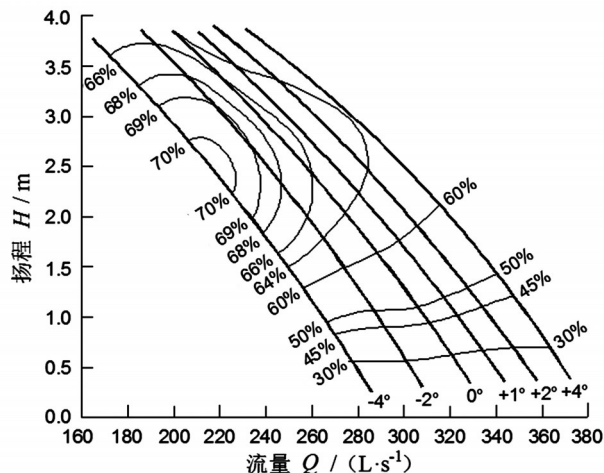


图2 澡港河泵站扩容工程双向立式泵装置模型综合性能曲线

3.2 空化性能试验

不同叶片安放角时模型泵装置的必需汽蚀余量曲线如图5所示,不同特征扬程时模型泵装置必需汽蚀余量如图6所示。在空化试验的扬程范围内,相同叶片安放角时,随着扬程的增加,必需汽蚀余量逐渐增大;在相同扬程时,随着叶片安放角度的增大,必需汽蚀余量逐渐增大,在设计扬程1.82 m时,叶片安放角-2°增加了4°,必需汽蚀余量相比增加了8.53%,效率降低了5.79%;在最大扬程3.31 m时,叶片安放角-2°增加了4°,必需汽蚀余量相比增加了12.8%,效率降低了4.8%。在叶片安放角+1°,设计扬程1.82 m时,必需汽蚀余量为4.06 m,在最高扬程3.31 m时,必需汽蚀余量为5.06 m。

根据水泵的安装高程计算式

$$H_{SZ} = \left(\frac{P_a}{\rho g} - \frac{P_v}{\rho g} \right) - k \cdot N_{PSH,rc} \quad (4)$$

式中: P_a 、 P_v 分别为当地大气压和水的汽化压力; k 为安全系数, $k=1.1\sim 1.2$; $N_{PSH,rc}$ 为必需汽蚀余量。经计算可知,澡港河泵站扩容工程在运行的扬程范围内水泵安装高程均大于零,表明水泵可安装于水面之上,水泵的汽蚀性能较好,但对于该泵站采用的轴流泵而言,为便于启动,叶轮仍需淹没于水面之下,

则澡港河泵站扩容工程的双向立式泵装置在运行扬程范围内,必需汽蚀余量均可满足最低淹没深度的要求,泵装置空化性能良好。

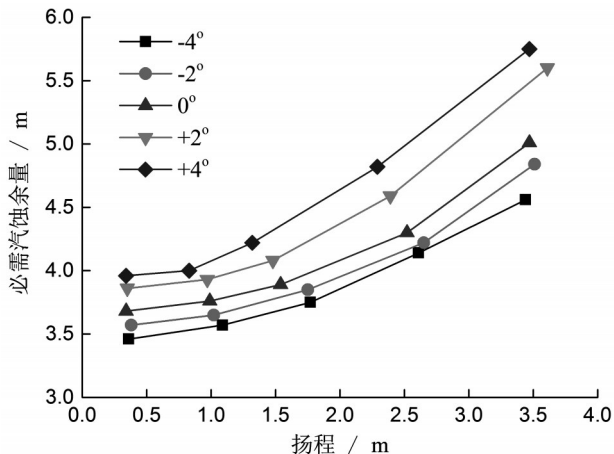


图3 不同叶片安放角时模型泵装置必需汽蚀余量

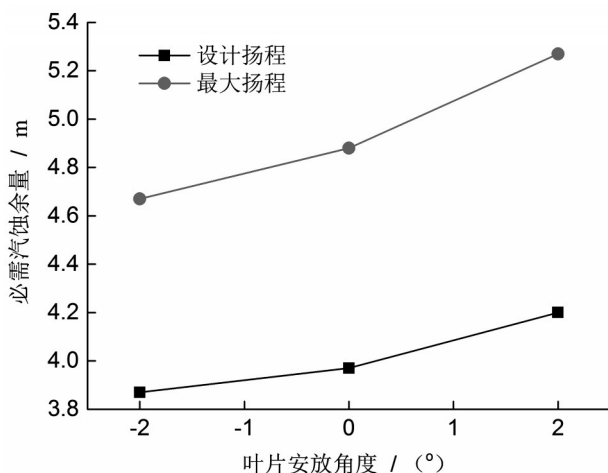


图4 不同特征扬程时模型泵装置必需汽蚀余量

3.3 飞逸特性试验

叶片安放角+4°和-4°时,反向水头与模型泵装置飞逸转速的曲线如图5所示。在相同叶片安放角时,飞逸转速随着反向水头的增大而增大,但达到某一反向水头时飞逸转速趋于定值。根据泵装置飞逸性能试验得到的单位飞逸转速可换算得到不同扬程时原型泵的飞逸转速。原型泵飞逸转速的计算式如下:

$$n_{R,P} = n_{1,R} \frac{\sqrt{H_P}}{D_P} \quad (5)$$

式中: $n_{R,P}$ 为原型泵的飞逸转速; $n_{1,R}$ 为单位飞逸转速; H_P 为原型泵扬程; D_P 为原型泵叶轮直径,原型泵叶轮直径为2.5 m。

泵装置的单位飞逸转速随叶片安放角的减小

而增大,经换算到原型不同反向水头时的水泵飞逸转速如表3所示,经换算后获得的原型泵飞逸转速,是确定水泵零部件强度的重要依据,在叶片安放角 -4° ,最大扬程3.31 m时,飞逸转速为223.6 r/min,为水泵机组额定转速150 r/min的1.49倍,建议电机制造厂家按1.5倍额定转速校验机组的安全性。

表3 原型的澡港河泵站扩容工程原型泵的飞逸转速

叶片安放角 -4°		叶片安放角 $+4^{\circ}$	
反向水头/m	飞逸转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	反向水头/m	飞逸转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)
0.5	86.3	0.5	76.6
1.0	122.1	1.0	108.3
1.5	149.6	1.5	132.6
2.0	172.7	2.0	153.1
2.5	193.1	2.5	171.2
3.0	211.5	3.0	187.6
3.5	228.5	3.5	202.6
4.0	244.2	4.0	216.6

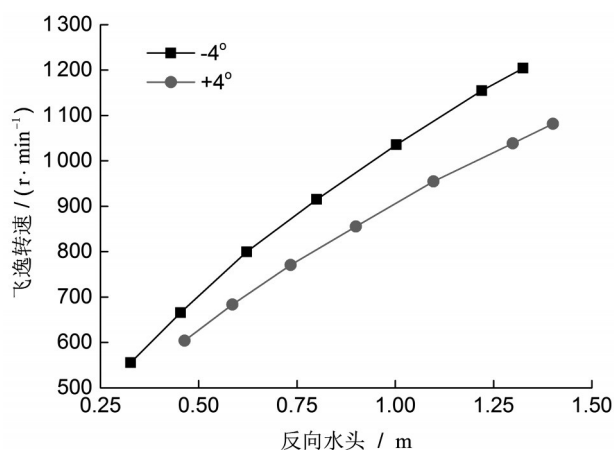


图5 模型泵装置飞逸转速性能曲线

4 结 论

(1)澡港河泵站扩容工程的双向立式轴流泵装置最高效率为70.1%,此时泵装置流量为211 L/s,扬程为2.51 m。在叶片安放角 $+1^{\circ}$,设计扬程1.82 m时,泵装置原机组流量为20.56 m^3/s ,必需汽蚀余量为4.06 m,在最高扬程3.31 m时,泵装置原机组流量为16.42 m^3/s ,必需汽蚀余量为5.06 m。泵装置原型

机组各项参数均满足设计要求。

(2)泵装置的单位飞逸转速随叶片安放角的减小而增大。在叶片安放角 -4° ,最大扬程3.31 m时,飞逸转速为223.6 r/min,为水泵机组额定转速150 r/min的1.49倍,建议电机制造厂家按1.5倍额定转速校验机组的安全性,飞逸性能满足要求。双向立式轴流泵装置结构在灌排双向运行泵站中应用具有良好的水力性能,澡港河泵站扩容工程自2020年5月9日运行至今,机组无异常振动和噪声产生,为常州市主城区河道畅流活水再添动力。

参考文献:

- [1] 黄良勇,吴忠,张啸,等. 大型双向流道泵装置优化匹配与试验研究[J]. 排灌机械工程学报,2016,34(7):602-607.
- [2] 刘超,金燕. 双向流道泵装置内三维流动数值模拟[J]. 农业机械学报,2011,42(9):74-78.
- [3] 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):60-65.
- [4] 金海银,张一祁,袁尧,等. 箱涵式双向立式泵装置性能试验与流场分析[J]. 灌溉排水学报,2021,40(6):94-99.
- [5] 张后文,李彦军,朱泉荣,等. 大型双向流道泵装置优化与试验研究[J]. 水泵技术,2021(2):24-28
- [6] 杨帆,刘超,汤方平. 基于CFX的双向立式轴流泵装置水力性能分析[J]. 应用基础与工程科学学报,2012,20(3):403-412.
- [7] 杨帆,刘超,汤方平,等. 灌排双向立式泵装置内部水流压力脉动特性[J]. 排灌机械工程学报,2011,29(4):316-321.
- [8] 王朝飞,汤方平,石丽建,等. 箱涵式轴流泵装置进出水流道优化设计[J]. 中国农村水利水电,2019(7):182-188.
- [9] 王麦琪,李彦军,袁寿其,等. 双向流道轴流泵装置的飞逸特性[J]. 排灌机械工程学报,2018,36(5):384-390.
- [10] 赵振江,石磊,蒋红樱,等. 箱涵式双层流道后壁结构优化分析[J]. 中国农村水利水电,2021(6):102-113.
- [11] 王本宏,王福军,谢丽华,等. 斜式轴流泵装置出水流动偏流特性研究[J]. 水利学报,2021,52(7):829-840.
- [12] 孙丹丹,高慧,王刚,等. 立式轴流泵装置进出水流道多方案优选[J]. 江苏水利,2018(11):35-40.
- [13] YANG F, ZHANG YQ, YUAN Y, et al. Numerical and experimental analysis of flow and pulsation in hump section of siphon outlet conduit of axial flow pump device [J]. Applied Science, 2021, 11(11):4941.
- [14] 卓长青,邵春雷,吉雨翔. 离心泵吸室内气液两相流动试验及数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(4):380-386.