doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.014

不同空化数下水泵水轮机相关特性数值计算与分析

李琪飞[1,2]　陈祥玉[1]　孟　庆[1]　蔡　婷[1]　周　峰[1]　魏显著[3]

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730050; 2. 甘肃省流体机械及系统重点实验室, 兰州 730050;
3. 哈尔滨大电机研究所, 哈尔滨 150040)

摘要: 为了研究不同空化数下的空化特性,以某抽水蓄能电站水泵水轮机作为研究对象,采用 SST $k-\omega$ 湍流模型和 Zwart 空化模型对不同空化数下的全流道进行了非定常数值计算,并且结合实验结果进行了对比验证。分析了不同空化数下中间流面的湍动能分布和空泡在叶片上的分布规律,探讨了空泡分布区域与转轮内叶道涡之间的相互关联。研究结果显示:水泵水轮机在泵工况下运行时,其无叶区有较明显的湍动能存在,并且湍动能分布比较明显,呈现出不规则的环状分布;叶片的空泡分布主要在叶片的吸力面,且叶片吸力面的湍动能高于压力面;转轮内部的叶道涡主要产生在靠近叶片吸力面且靠近转轮出口处,叶道涡的大小和数量与叶片上的空泡分布存在一定的相关关系,空泡的产生导致了流道的不畅,加剧了涡的产生。

关键词: 水泵水轮机; 空化; 叶道涡; 数值计算

中图分类号: TK734　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)01-0130-09　　**OSID**:

Analysis of Correlation Characteristics of Pump-turbine under Different Cavitation Numbers

LI Qifei[1,2]　CHEN Xiangyu[1]　MENG Qing[1]　CAI Ting[1]　ZHOU Feng[1]　WEI Xianzhu[3]

(1. *School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou* 730050, *China*
2. *Key Laboratory of Fluid Machinery and Systems, Gansu Province, Lanzhou* 730050, *China*
3. *Harbin Institute of Large Electric Machinery, Harbin* 150040, *China*)

Abstract: Aiming to study the cavitation characteristics under different cavitation numbers based on the pump-turbine of a pumped-storage power station, the SST $k-\omega$ turbulence model and the Zwart cavitation model were used to calculate the full flow path under different cavitation numbers. The unsteady numerical calculations were carried out and compared with the experimental results. The turbulent kinetic energy distribution of the intermediate flow surface and the distribution of cavitation on the blades under different cavitation numbers were analyzed. The correlation between cavitation distribution area and the runner inner channel vortices were discussed. The results showed that when the pump-turbine was operated under pump conditions, its vaneless had obvious turbulent kinetic energy, and the turbulent energy distribution was obvious, showing an irregular ring shape distributed. The bubble distribution of the blade was mainly on the suction surface of the blade, and the turbulent energy of the suction surface of the blade was higher than that of the pressure surface. The vortex inside the runner was mainly generated near the exit of the runner, and close to the suction surface of the blade. The size and number of vortices had a certain relationship with the distribution of bubble on the blades. The generation of bubble led to the poor flow path and exacerbated the generation of vortices.

Key words: pump-turbine; cavitation; channel vortices; numerical simulation

0　引言

水泵水轮机的运行非常复杂,它包含水轮机工况和水泵工况,并且在两者之间频繁转换。所以水泵水轮机的空化包括水轮机的空化、水泵的空化和工况转换之间的空化。在这 3 种空化之中,水泵的

收稿日期: 2019-07-01　修回日期: 2019-07-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51566009)

作者简介: 李琪飞(1975—),男,副教授,主要从事流体机械流动理论研究,E-mail: lqfy@lut.cn

空化起决定性作用，所以对于水泵水轮机只要满足水泵工况的空化要求，就能保证水轮机的空化要求[1-6]。近年来，随着计算机性能和 CFD 技术的飞速发展，空化流动的数值模拟取得了非常明显的进展[7-15]。

但是，有关水泵水轮机在泵工况下小开度运行时的空化特性与内流特性的研究相对较少。本文采用气液两相流的方法对某电站水泵水轮机模型机进行全流道数值模拟，以预测水泵水轮机的空化和内部流态的变化。并对比分析不同空化数下水泵水轮机的内部流态以及转轮叶片空泡分布的相关规律，并以此为依据，对空化特性以及诱发原因进行研究。

1　研究对象及数值计算方法

1.1　研究对象

研究对象为国内某抽水蓄能电站的模型机，结构如图 1 所示。

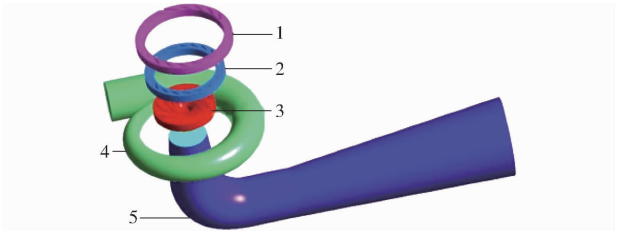

图 1　模型水泵水轮机计算区域

Fig. 1　Computational domains of model pump-turbine

1. 固定导叶　2. 活动导叶　3. 转轮　4. 蜗壳　5. 尾水管

模型机转轮叶片数为 9 个，活动导叶数为 20 个，导叶高度 66.72 mm，转轮高压侧直径 473.6 mm，转轮低压侧直径 300 mm，蜗壳进口直径 315 mm，尾水管出口直径 660 mm，导叶分布圆直径 564 mm，导叶高度 66.72 mm，蜗壳包角 343°。

采用 ANSYS 软件中的 ICEM 模块进行计算域网格的划分。由于偏离最优工况，转轮进口的来流不是对称的，因此需要进行全流道模拟[16-19]。网格质量对计算结果有很大的影响，本文为了得到比较好的网格质量以及节约计算资源，对整个计算域进行了六面体网格的划分。经过网格无关性检验以后，最终选择总网格单元数为 4 523 556，对最小网格质量为 0.32 的网格进行计算，其网格如图 2 所示。

1.2　边界条件

本模拟实验的水头 $H=30$ m，尾水管的进口采用总压进口，蜗壳出口给定静压值。交接面设置为 interface 面，动静干涉之间传递数据采用滑移网格（Sliding mesh）。首先用 SST $k-\omega$ 湍流模型作清水的单相流计算，用定常计算的结果作为初始条件再进行非定常计算。饱和蒸气压设为 3 540 Pa，进口处液体相的体积分数为 1，空泡相的体积分数设为 0。在求解的过程中采用 SIMPLEC 算法和二阶迎风格式。非定常计算的时间步长 $\Delta t=4.673\times10^{-4}$ s，以残差 10^{-6} 作为迭代计算的收敛依据。

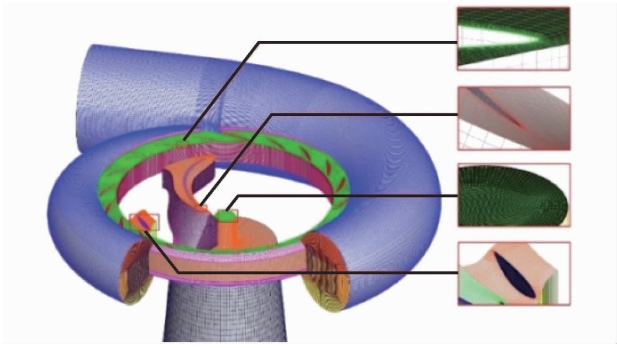

图 2　局部网格示意图

Fig. 2　Sketch of local mesh

1.3　数值计算方法

结合水泵水轮机的运行特性，本文中采用 Zwart 空化模型和 SST $k-\omega$ 湍流模型[20-21]。

Zwart 空化模型的控制方程为

$$m=\begin{cases}F_e\dfrac{3\alpha_{nuc}(1-\alpha_v)\rho_v}{R_B}\sqrt{\dfrac{2}{3}\dfrac{p_v-p}{\rho}} & (p\leqslant p_v)\\ F_e\dfrac{3\alpha_v\rho_v}{R_B}\sqrt{\dfrac{2}{3}\dfrac{p-p_v}{\rho}} & (p>p_v)\end{cases} \tag{1}$$

式中　m——水相和蒸汽相的质量传输率

α_{nuc}——成核位置初始气相体积分数

α_v——空泡体积分数

R_B——空泡半径

F_e——蒸发过程的经验系数

p——进口压力

p_v——饱和蒸汽压力

ρ_v——气泡密度　　ρ——流体密度

SST $k-\omega$ 模型的方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_k\frac{\partial k}{\partial x_j}\right)+G_k-Y_k+S_k \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\omega u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_\omega\frac{\partial\omega}{\partial x_j}\right)+G_\omega-Y_\omega+D_\omega+S_\omega \tag{3}$$

式中　t——时间　　k——湍动能

ω——单位耗散率

u_i——平均速度分量

Γ_k、Γ_ω——k 与 ω 的有效扩散项

D_ω——正交发散项

S_k、S_ω——自定义项

Y_k、Y_ω——k 与 ω 的耗散项

G_k——平均速度梯度引起湍动能 k 的产生项

G_ω——ω 方程

2 数值计算结果与分析

2.1 水泵水轮机空化性能实验

水泵水轮机的测试系统原理图如图 3 所示，实验平台如图 4 所示。此实验台由哈尔滨大电机研究所设计，依托此实验台对水泵水轮机模型进行相关研究。此实验台采用的是循环封闭的双向运行系统。实验台的验收实验遵循 IEC60193、IEC609 等相关的规定[22]。

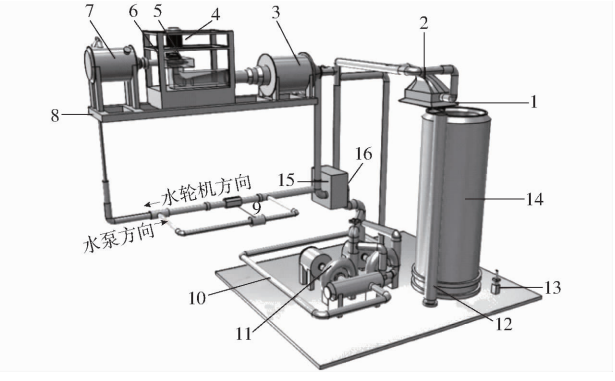

图 3 测试系统原理图

Fig. 3 Test system schematic

1. 偏流器 2. 喷嘴 3. 低压箱 4. 测功电机 5. 扭矩测量系统 6. 水泵水轮机 7. 高压箱 8. 支架 9. 流量计 10. 封闭系统回路管 11. 水泵 12. 敞开系统回水管 13. 称量传感器 14. 称量筒 15. 水冷系统 16. 换向管路

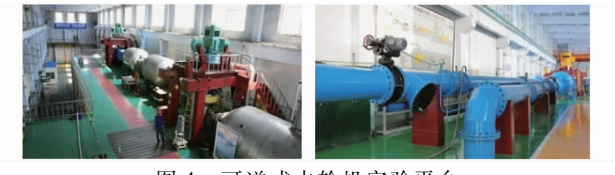

图 4 可逆式水轮机实验平台

Fig. 4 Test platform of pump-turbine

本次实验最高实验水头 190 m，工作最大流量 2.0 m^3/s，转轮标称直径为 300 ~ 500 mm，测功机功率 500 kW，测功机转速为 0 ~ 2 500 r/min，供水泵对应的电机功率 600 kW，测量校正筒对应容积 750 m^3。

此实验是按照 GB/T 3216—2005 执行，在实验过程中保持流量不变，通过降低尾水管的进口压力，来提高尾水管的进口真空度，使机组发生空化。在进口压力不断降低的过程中，机组内的空化程度也在不断地加大，叶片上的空化面积更加明显，导致泵的效率迅速下降。为了方便处理实验数据和数值计算，定义空化数 σ 为

$$\sigma = \frac{p_{in} - p_v}{0.5\rho u_2^2} \tag{4}$$

式中 p_{in}——转轮进口压力

u_2——叶轮出口圆周速度

本实验以导叶开度 a_0 = 25 mm 的水泵水轮机作为研究对象，通过改变尾水管进口压力，来改变尾水管的进口真空度，从而获得相应的实验数据如图 5 所示。图中 $\sigma_{0.2}$ 表示临界空化系数，σ_p 表示装置空化系数，σ_i 表示初生空化系数，A_0 表示活动导叶开度，N_{11} 表示转速。通过数值计算与实验数据对比得出：它们的变化趋势基本一致并且通过计算分析误差在允许范围之内，从而验证了数值计算在不同空化数下预测水泵水轮机空化性能的可靠性。其不同空化数下的空化特性曲线如图 6 所示。

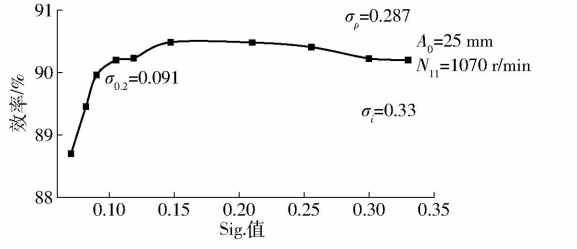

图 5 A999 模型初步验收实验运行区水泵工况空化实验结果

Fig. 5 A999 model preliminary acceptance test area pumping condition cavitation test results

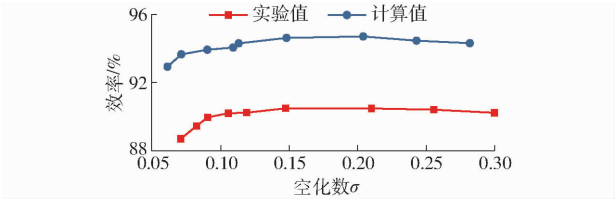

图 6 不同空化数下的空化性能曲线

Fig. 6 Cavitation performance curves at different cavitation numbers

2.2 不同空化数下的湍动能分析

水泵水轮机在泵工况下运行时，很难保证较高的圆周水力对称性，来自各个方向的不平衡力作用在转轮之上。由于力的不平衡导致转轮外液流轴对称流动被破坏，造成一定的能量损失。湍动能能够准确地反映湍流的复杂程度和流体的能量损失特性，所以对不同空化数下的湍动能分析是很有必要的[23-24]。用 CFD - Post 后处理软件对转轮和活动导叶部位进行周向处理，选取上冠和下环之间的中间位置来得到流面上的湍动能分布图，用流动理论的知识来分析转轮和活动导叶内流体流动产生的能量损失和空化之间的关系。

通过图 7 可以看出，湍动能集中分布在转轮出口和活动导叶进口之间，且看起来呈现环状分布，并且表现出明显的不对称性。随着空化数的不断减小湍动能的分布从转轮出口处往活动导叶这一侧不断

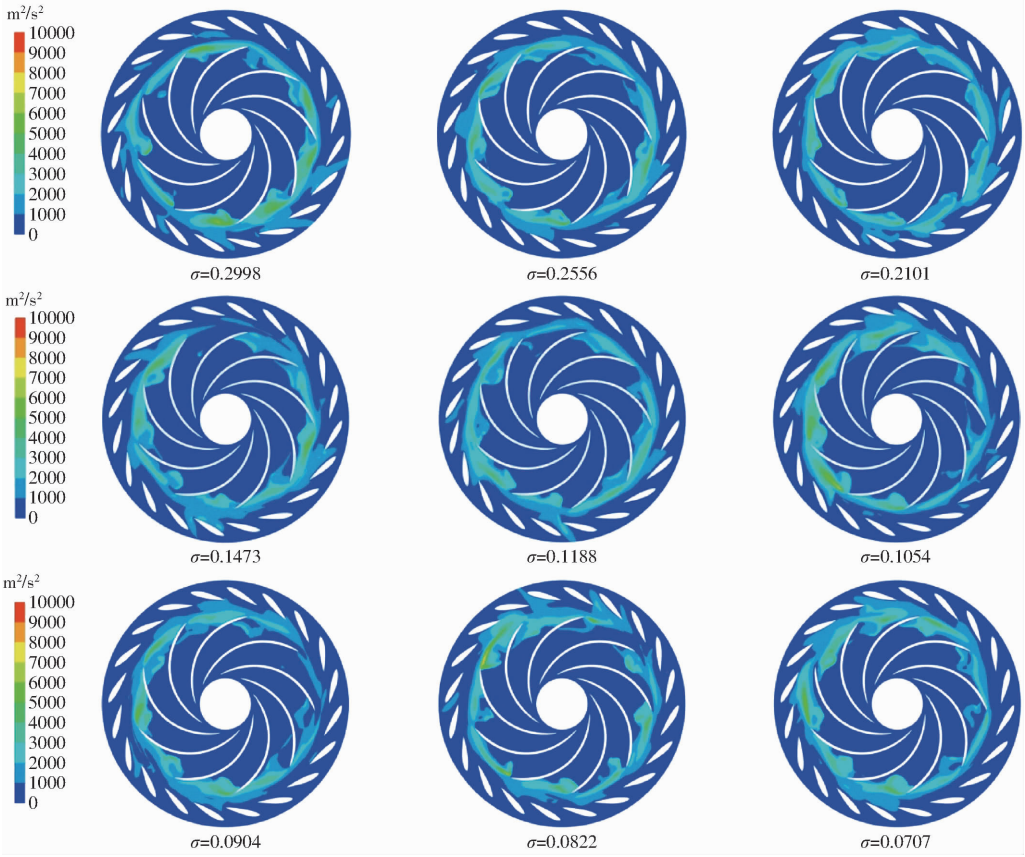

图 7　中间 S1 流面湍动能分布

Fig. 7　Turbulent kinetic energy distribution on middle S1 stream surface

扩张，当空化数为 0.299 8、0.147 3 和 0.105 4 时，在形成的近似于环状的湍动能区域与其他空化数下的湍动能区域有明显的不同。

湍动能主要集中在转轮和活动导叶之间的区域，主要是因为本次研究的水泵水轮机是在相对较小开度下进行的，由于活动导叶的开度相对较小，流体从转轮部位流出进入活动导叶时会导致一些能量的损失。转轮出口处的流体沿周向的流动表现出明显的不对称性，是由于受到转轮和活动导叶的动静干涉作用。无叶区的湍动能分布随着空化数的降低在不断扩大，而活动导叶部分却不明显，这是由于大部分流体在无叶区这个部位，活动导叶部位还未受到空化的影响，流体快速进入导叶区，流体与导叶攻角较大，在该区域有旋转失速现象的产生，该区域的不稳定导致了强湍动能的产生。随着空化数的降低，无叶区有较明显的局部湍动能产生，且靠近叶片吸力面的湍动能高于压力面，这是由于空化过程中产生了大量的气泡，导致部分流道堵塞，增大了转轮内流体的相对速度，在导叶入口增加了排挤现象，从而产生了绕流，这样会导致流入导叶的流体速度减小，导叶处的湍动能减弱。

2.3　叶片上的气体体积分布

从图 8 可以看到，当 $\sigma = 0.299\ 8$ 时叶片吸力面在转轮进口处就已经产生了空化，整体而言随着空化数的递减，在转轮的进口处空化现象越来越严重。空化从转轮进口不断向内部延伸，靠近下环部位的叶片边随着空化数的不断降低空化越来越明显，并且向上冠部位不断扩散。进口处出现空化现象的原因是进口处的圆周速度大于其他地方，相应的进口压力损失及进口的扰流引起较大的压降。随着空化数的不断降低，除了 $\sigma = 0.082\ 2$ 以外，其他空化数下叶片进口处的空化区域在不断向前扩展，空泡分布不断增加。相应压力面的区域也在不断增加，比较大的气泡区域和一些气泡会把转轮流道堵塞，这种现象就会加大流量的损失，进一步影响叶轮内能量的传递和转换，导致整个泵工况水力效率的降低。

2.4　不同空化数下叶片上的空泡面积分析

根据不同空化数下叶片空泡分布来判定叶片所产生空化的严重程度。前面分析叶片空泡的情况得出，叶片的空化主要发生在叶片的根部和靠近下环的部位，但是每个叶片上的空化程度没有具体的分析。再次利用后处理软件 CFD－Post 把不同空化数下叶片工作面上的气泡分布面积求解出来，然后利用软件 Origin 绘制出每个叶片在不同空化数下空泡所占的面积曲线，如图 9 所示。

从图 9 可以看出，除了 3 号叶片以外，其他的变

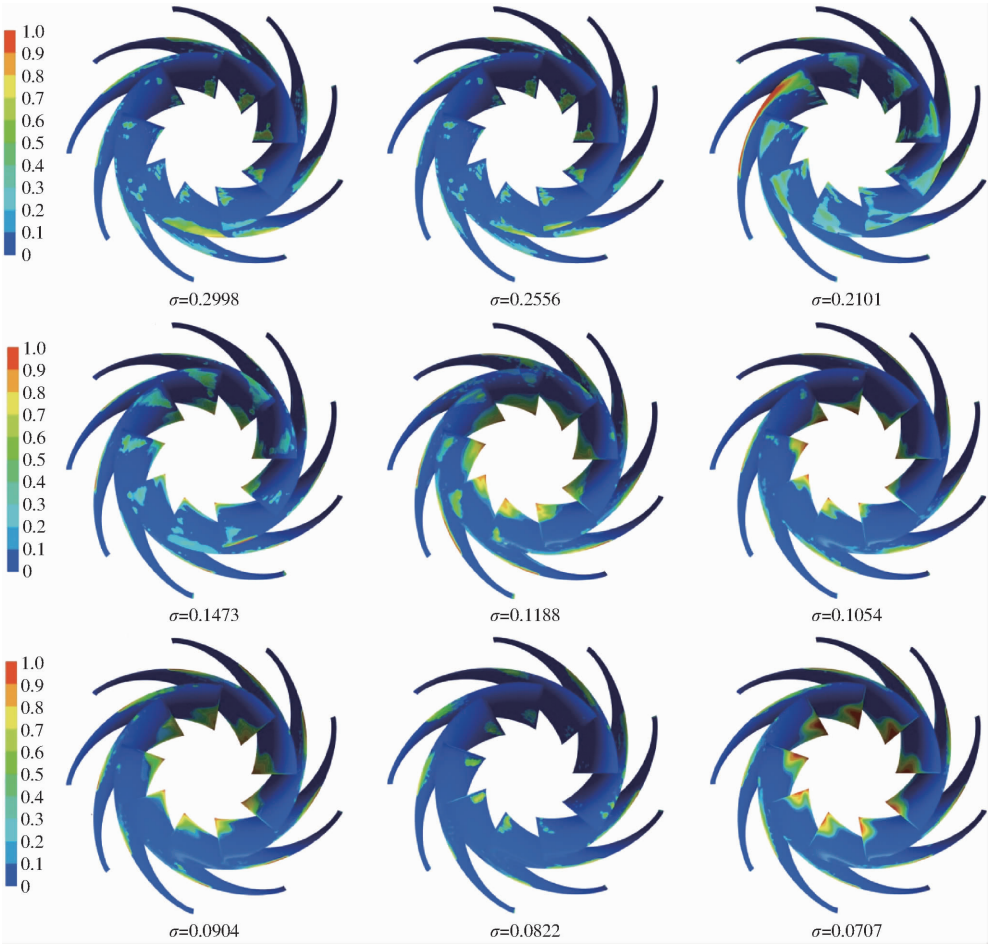

图 8 叶片吸力面空泡体积分数分布

Fig. 8 Bubble fraction distribution of suction surface of blade

化趋势基本保持一致。1 号叶片上当空化数 σ = 0.105 4 时出现峰值,为 0.126 746 mm^2,当空化数 σ = 0.210 1 时出现了最小值,为 0.046 376 4 mm^2。2 号叶片上当空化数 σ = 0.105 4 时也出现了峰值,为 0.079 977 1 mm^2,空化数为 σ = 0.210 1 时出现了最小值,为 0.001 214 1 mm^2。3 号叶片上当空化数 σ = 0.210 1 时出现了最大值,为 0.182 408 1 mm^2,空化数 σ = 0.255 6 时出现最小值,为 0.021 248 mm^2。4 ~9 号叶片都在空化数 σ = 0.118 8 附近出现了最大值,且分别为 0.093 860 2、0.120 256 1、0.123 396 0、0.139 852 0、0.137 918 1、0.111 013 0 mm^2。4 号叶片和 7 号叶片在 σ = 0.255 6 时出现最小值,分别为 0.037 666 1 mm^{2}和 0.050 583 5 mm^2。5、6、9 号叶片在 σ = 0.210 1 出现最小值,分别为 0.022 968 2、0.011 271 9、0.058 967 2 mm^2。

根据分析可知叶片上发生空化的大小和空化数有很明显的关系,而且每个叶片上发生空化的程度也大不相同。从图 9 可以看出,总体而言随着空化数增大到一定程度空化有一定的下降趋势。在空化数大于 0.210 1 时空化程度有增加的趋势。空化数与进口压力和叶轮出口圆周速度有关,当转轮速度一定的情况下,随着进口压力的增加,空化数会增大,相应的空化会降低。所以在空化数增大的过程中叶片上的空化会出现明显的下降趋势。

2.5 叶片的空泡分布与叶道涡之间的关系分析

本研究选取 1、2、9 号叶片为研究分析对象,其所选叶片如图 10 所示,对其对应的 3 个叶片的流道进行涡量与叶片空泡分布之间的关系分析。

涡是流体运动特有的存在形式,局部涡动力学的诊断方法可以对产生不良流动的根源进行放大和捕捉,并且可以将新的诊断参数作为控制目标引入到可逆转轮的优化设计中,用来提高水力机械转轮的设计性能[25-26]。选取转轮和活动导叶的中间流面即 S1 流面作为研究对象,做出 S1 流面的流线图,再根据流线图来分析涡的大小和出现的位置[27]。由于此次研究的是空化对内流特性的影响,所以选取空化数 0.255 6、0.118 8、0.105 4 为研究对象。做出相应空化数下 S1 流面的流线图,然后选取出 1、2、9 号叶片对应的流道为研究对象,进行涡的分析。把不同空化数下对应的 1、2、9 号叶片如图 11 所示从下往上划分了 12 个区域,用来更加确切地描述空化发生的位置。

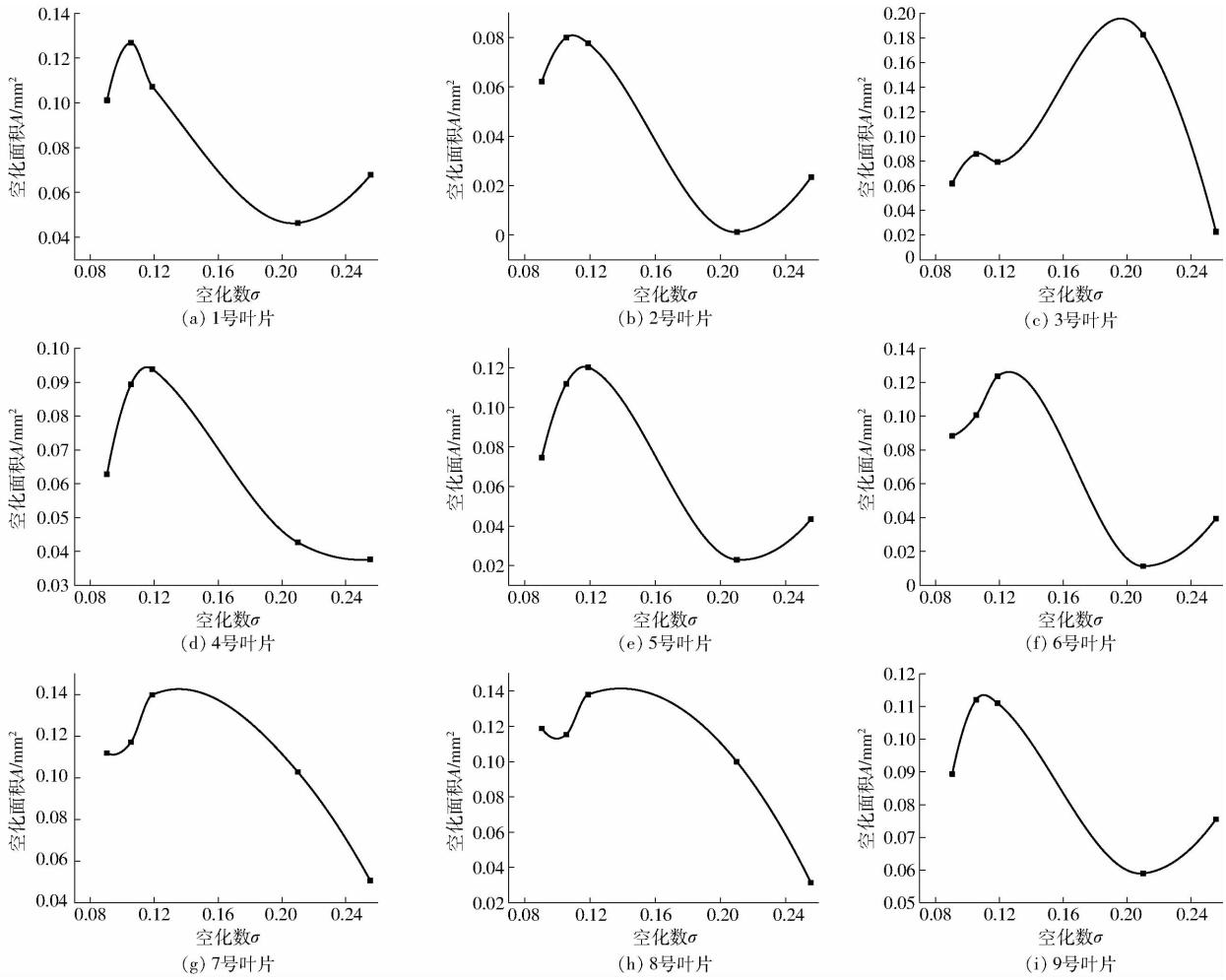

图 9　不同叶片上所含空化面积曲线

Fig. 9　Line charts of cavitation area contained on different blades

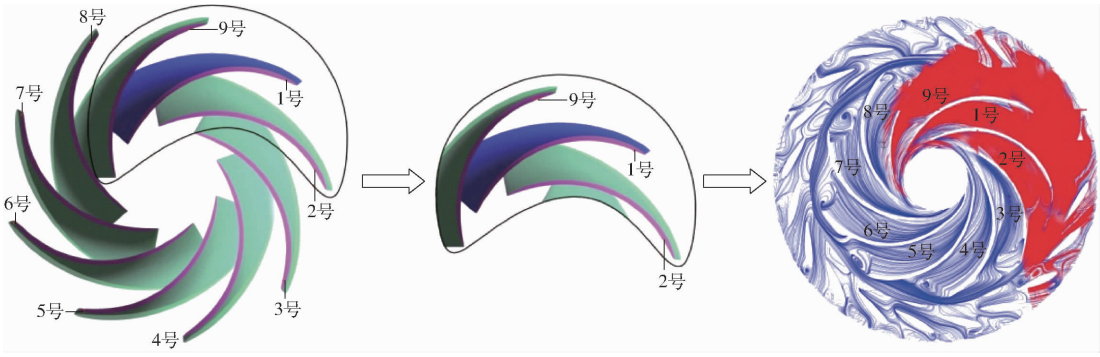

图 10　叶片和叶道示意图

Fig. 10　Schematic of blade and channel

空化数 $\sigma=0.2556$ 时，靠近 9 号叶片处有一个很明显的涡存在，涡核位置靠近叶片的出口边，在 1 号叶片和 2 号叶片之间也有两个涡存在，但是不明显，它们的涡核位置也是靠近叶片出口边，离无叶区比较近。观察相对应的 1、2、9 号叶片的空化分布情况可以看出，1 号叶片空化主要集中在 1 号区域到 9 号区域之间，并且都是靠近叶轮的上冠边缘部位，靠近上冠位置和叶片进口边比较多。空化数 $\sigma=0.1188$ 时，在 9 号叶片和 1 号叶片，1 号叶片和 2 号叶片之间可以很明显地看到有两个比较大的涡存在，在 2 号叶片到 3 号叶片之间位置有 3 个比较小的涡，涡核位置都是靠近叶片头部，离无叶区比较近的位置，叶道的其他位置基本上看不到涡的存在。在 $\sigma=0.1188$ 时，观察对应的 1、2、9 号叶片的空化分布情况可以看出，1 号叶片的空化分布情况和空化数为 $\sigma=0.2556$ 时的类似，只是空化数 $\sigma=0.1188$ 时看起来空化更加明显，2 号叶片的空化发生区域主要在 1 号区域和 2 号区域以及 8 号和

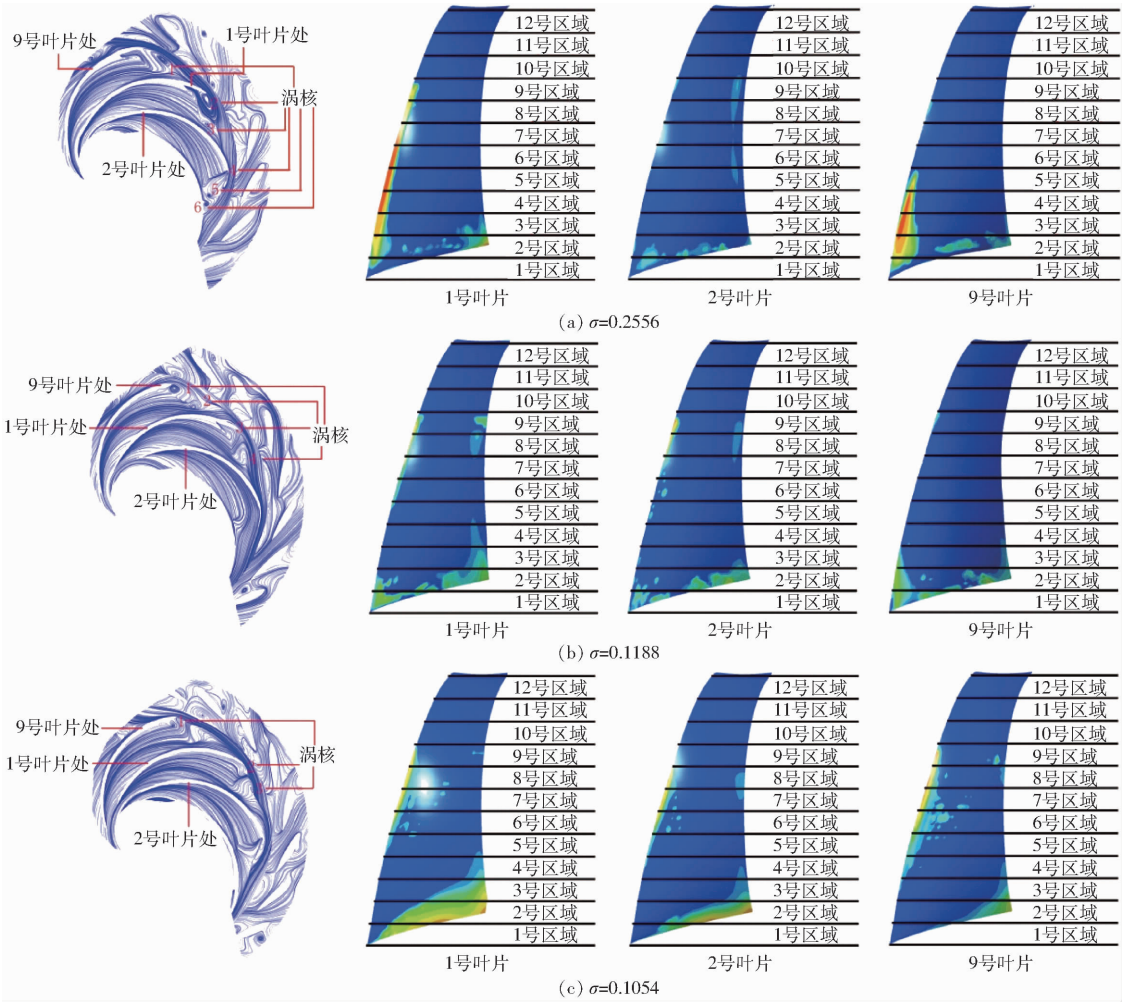

图 11 不同空化数下叶道涡与叶片空泡分布关系图

Fig. 11 Relationship diagrams between channel vortices and blade vacuole distribution under different cavitation numbers

9 号区域之间,9 号叶片的空化区域主要集中 1 号区域与 5 号区域之间,并且它们的分布区域都是靠近上冠部位和叶片进口边。σ = 0.105 4 时,9 号叶片、1 号叶片与 2 号叶片之间都有涡的存在,且涡都比较大,涡核位置不明显,在叶道的其他部位流动都比较顺畅。σ = 0.105 4 时,观察对应的 1、2、9 号叶片的空化分布情况可以看出,1 号叶片空化主要发生在 1 号和 4 号区域之间靠近叶片入口边,在 5 号区域和 8 号区域之间靠近上冠部位也有空化的发生,但是不明显,2 号叶片的空化部位发生在 1 号区域到 5 号区域以及 7 号区域到 9 号区域之间,发生空化的位置与 1 号叶片相似。9 号叶片相对于 1 号叶片和 2 号叶片而言,空化不严重,但是在 2 号区域和 4 号区域之间也有很明显的空化产生。

非理想流体的流动在一定程度上都会有涡的产生。涡的存在必然会造成能量的损失,导致机组效率下降。根据上文空化和液道涡的分布分析叶片上的空化与叶道内部的涡存在着一定的相关关系,因为空泡的产生会导致流道不畅,加剧涡的产生。

3 结论

(1)水泵水轮机在开度 25 mm 下运行时,无叶区有很明显的湍动能产生,并且呈不规则的环状分布,且靠近叶片吸力面的湍动能高于压力面。

(2)随着空化数的不断降低,在转轮进口处空化现象越来越严重,并且在叶片边缘靠近下环部位空化区域不断向上冠方向移动。

(3)随着空化数的增大,从转轮 9 个叶片的空化程度来看,其表现出先增、后减的趋势。整体而言,随着空化数的增大,叶片上的空化程度降低。即在转轮出口速度一定的情况下,压力相对大时,空化比较小。

(4)转轮叶片上的空化主要产生在叶片的进口边和靠近上冠的部位,根据空化和叶道涡的分布情况分析,叶片上的空化和叶道涡存在一定的相关关系,空泡的产生导致流道不畅,加剧了涡的产生。

参 考 文 献

[1] 刘德民，赵永智. 抽水蓄能机组空化特性研究[J]. 水电站机电技术，2015(2)：37－40.
LIU Demin，ZHAO Yongzhi. Cavitation characteristic research on pumped storage unit [J]. Hydropower Station Electromechanical Technology，2015(2)：37－40. (in Chinese)

[2] 李琪飞，刘超，王源凯. 部分负荷工况下水泵水轮机的空化特性[J]. 排灌机械工程学报，2017，35(8)：680－684.
LI Qifei，LIU Chao，WANG Yuankai. Cavitation characteristics research of pump turbine under partial load condition[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering，2017，35(8)：680－684. (in Chinese)

[3] 张建勋. 泵工况下水泵水轮机空化流动特性研究[D]. 兰州：兰州理工大学，2017.
ZHANG Jianxun. Study on cavitation characteristics of the pump-turbine under partial load condition[D]. Lanzhou：Lanzhou University of Technology，2017. (in Chinese)

[4] 李琪飞，张正杰，李仁年，等. 水泵水轮机泵工况空化特性与转轮受力分析[J/OL]. 农业机械学报，2018，49(1)：137－142.
LI Qifei，ZHANG Zhengjie，LI Rennian，et al. Analysis of cavitation performance and force on runner of pump-turbine in pump mode[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(1)：137－142. http：//www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180117&journal_id=jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.017. (in Chinese)

[5] TAO R，XIAO Ruofu，WANG Fujun，et al. Cavitation behavior study in the pump mode of a reversible pump-turbine[J]. Renewable Energy，2018，125：655－667.

[6] VEREMEENKO I S，KUZMIN I D，RYBALKA V A. Universal power and cavitation stand for testing hydraulic turbines and reversible pump-turbine motor-generator units[J]. Hydrotechnical Construction，1983，17(5)：197－208.

[7] 刘超. 部分负荷工况下水泵水轮机空化流动特性研究[D]. 兰州：兰州理工大学，2016.
LIU Chao. Study on cavitation characteristics of the pump-turbine under partial load condition[D]. Lanzhou：Lanzhou University of Technology，2016. (in Chinese)

[8] 杨敏官，姬凯，李忠. 轴流泵叶轮内空化流动的数值计算[J]. 农业机械学报，2010，41(增刊)：10－14.
YANG Minguan，JI Kai，LI Zhong. Numerical calculation of cavitation flow in axial flow pump impeller [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2010，41(Supp.)：10－14. (in Chinese)

[9] 刘厚林，刘东喜，王勇，等. 三种空化模型在离心泵空化流计算中的应用评价[J]. 农业工程学报，2012，28(16)：54－59.
LIU Houlin，LIU Dongxi，WANG Yong，et al. Applicative evaluation of three cavitating models on cavitating flow calculation in centrifugal pump[J]. Transactions of the CSAE，2012，28(16)：54－59. (in Chinese)

[10] 张乐福，张亮，张梁，等. 混流式水轮机的三维空化湍流计算[J]. 水力发电学报，2008，27(1)：137－140.
ZHANG Lefu，ZHANG Liang，ZHANG Liang，et al. 3D cavitation turbulent flow simulation of Francis turbine[J]. Journal of Hydroelectric Engineering，2008，27(1)：137－140. (in Chinese)

[11] WANG J，YANG D，XU J W，et al. Cavitation study of a pump-turbine at turbine mode with critical cavitation coefficient condition[J]. IOP Conference Series：Materials Science and Engineering，2016，129：012037.

[12] 陈阿龙. 水泵水轮机尾水管涡带特性及改善方法研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2017.
CHEN Along. Study on characteristics and improvement methods of draft tube vortex rope in a pump turbine[D]. Harbin：Harbin Institute of Technology，2017. (in Chinese)

[13] ROMEO S R，SEBASTIAN M，IOAN A . Numerical analysis of cavitation inception in Francis turbine [C] // Lausanne：21st IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems，2002.

[14] LIU Demin，LIU Shuhong，WU Yulin，et al. Analysis on cavitation characteristics of flow in a Francis turbine with different content of non-condensable gas [J]. International Journal of Turbo & Jet-engines，2011，28(1)：71－77.

[15] LLIESCU M S，CIOCAN G D，AVELLAN F. Analysis of thecavitating draft tube vortex in a Francis turbine using particleimage velocimetry measurements in two-phase flow [J]. Joutnal of Fluids Engineering，2008，130(1)：1－10.

[16] 石清华，许巍巍，龚莉. 低水头混流式水轮机叶道涡引起的噪声及其消除[C]//第十六次中国水电设备学术讨论会，2007：1－8.
SHI Qinghua，XU Weiwei，GONG Li. Noise and its elimination caused by blade vortex in Francis low head Francis turbine[C]//Sixteenth China Symposium on Hydroelectric Equipment，2007：1－8. (in Chinese)

[17] 杨琳，陈乃祥，樊红刚. 水泵水轮机全流道双向流动三维数值模拟与性能预估[J]. 工程力学，2006，23(5)：157－162.
YANG Lin，CHEN Naixiang，FAN Honggang. Three-dimensional numerical simulation and performance prediction of two-way flow in full channel of water pump turbine[J]. Engineering Mechanics，2006，23(5)：157－162. (in Chinese)

[18] 逯鹏. 基于全流道模拟的混流式水轮机尾水管内部流动研究[D]. 西安：西安理工大学，2007.
LU Peng. Study of internal flow in draft tube of Francis turbine based on full flow simulation [D]. Xi'an：Xi'an University of Technology，2007. (in Chinese)

[19] 陈庆光，吴玉林，刘树红，等. 轴流式水轮机全流道非定常空化湍流的数值模拟[J]. 机械工程学报，2006，42(6)：211－216.
CHEN Qingguang，WU Yulin，LIU Shuhong，et al. Numerical simulation of unsteady cavitation turbulence in full channel of

axial flow turbine[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2006,42(6):211 - 216. (in Chinese)
[20] 郝宗睿, 刘锦涛, 王乐勤. 水泵水轮机临界空化系数的数值预测[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(9):774 - 777.
HAO Zongrui,LIU Jintao,WANG Leqin. Numerical prediction of critical cavitation number in pump-turbine[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(9):774 - 777. (in Chinese)
[21] 黄剑峰, 张立翔, 王文全,等. 基于大涡模拟的水轮机内瞬态湍流场特性分析[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(6): 502 - 505.
HUANG Jianfeng,ZHANG Lixiang,WANG Wenquan, et al. Analysis of transient turbulent flow field characteristics in hydraulic turbine based on large eddy simulation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(6):502 - 505. (in Chinese)
[22] 梅祖彦. 抽水蓄能发电技术 [M]. 北京:机械工业出版社,2000.
[23] 刘锦涛, 李永, 胡齐,等. 基于湍动能的水泵水轮机无叶区流动分析[J]. 工程热物理学报, 2015, 36(9):1933 - 1936.
LIU Jintao,LI Yong, HU Qi, et al. Analysis on flow in vaneless space of a pump-turbine base on kinetic energy[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(9):1933 - 1936. (in Chinese)
[24] 杨琳, 樊红刚, 陈乃祥. 基于涡动力学的可逆转轮双向流动诊断及优化设计[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(5):686 - 690.
YANG Lin,FAN Honggang,CHEN Naixiang. Bidirectional flow diagnosis to optimize the design of a pump-turbine runner using vorticity dynamics theory[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2007, 47(5):686 - 690. (in Chinese)
[25] 李威. 水泵水轮机“S”区的瞬态特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2016.
LI Wei. Dynamic characteristics analysis of pump-turbine in “S” operating zone[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
[26] 胡秀成, 张立翔. 水泵水轮机增减负荷过程三维流动特性大涡模拟分析[J]. 水利学报, 2018, 49(4):492 - 500.
HU Xiucheng,ZHANG Lixiang. Numerical simulation of unsteady flow for a pump-turbine in transition cases with large-eddy simulation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(4):492 - 500. (in Chinese)
[27] 黄剑峰,张立翔,杨松,等. 水轮机槽道内导叶动态绕流水力特性大涡模拟分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(4): 125 - 130.
HUANG Jianfeng, ZHANG Lixiang, YANG Song, et al. Analysis on hydraulic characteristics of dynamic flow around vane in hydro-turbine channel using large eddy simulation[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(4): 125 - 130. (in Chinese)

(上接第 102 页)

[15] 袁俊杰,王锦涛,郭无极. 基于 ADAMS 宏命令的物料输送机械建模研究[J]. 装备制造技术,2018(10):140 - 144.
YUAN Junjie,WANG Jintao, GUO Wuji. Study on modeling of material conveying machinery based on ADAMS macro programs [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2018(10):140 - 144. (in Chinese)
[16] 赵朝闻,段杰,李辉. 对射光电传感器模拟海洋环境下作用距离试验研究[J]. 水下无人系统学报,2017, 25(3): 262 - 266.
ZHAO Zhaowen, DUAN Jie,LI Hui. Experimental study on operating range of correlation type photoelectric sensor in simulative ocean environment[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2017, 25(3): 262 - 266. (in Chinese)
[17] JIN Xin, ZHAO Kaixuan, JI Jiangtao, et al. Design and implementation of intelligent transplanting system based on photoelectric sensor and PLC [J]. Future Generation Computer Systems,2018,88: 127 - 139.
[18] 周晓玲,刘俊峰,李建平. 免耕穴播播种机播种过程监测系统的研究[J]. 农机化研究,2008,30(5):81 - 83.
ZHOU Xiaoling, LIU Junfeng, LI Jianping. Research on monitoring system of seeding process for no-tillage hill-drop planter [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2008,30(5):81 - 83. (in Chinese)
[19] 龚丽农,戴玉华,蒋金琳. 具有自动补种功能的机械式精密排种系统[J]. 农业机械学报,2008,39(7):60 - 63
GONG Linong, DAI Yuhua, JIANG Jinlin. Experimental investigation of a new mechanical precision metering device with automatic compensative [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(7): 60 - 63. (in Chinese)
[20] 毛欣,衣淑娟,杨立,等. 玉米植质钵育秧盘芽播装置囊种过程的试验研究[J]. 农机化研究,2016,38(12):168 - 172,178.
MAO Xin,YI Shujuan,YANG Li,et al. Study on the seed-filling performance of maize bowl-tray precision seeder[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2016,38(12):168 - 172,178. (in Chinese)
[21] 赵立军,颜珊珊,王宇杰,等. 气吸式单、双排精密通用排种器的设计与试验[J]. 农机化研究,2019,41(7):136 - 141.
ZHAO Lijun, YAN Shanshan, WANG Yujie, et al. Experiment and design on air suction single and double row precision universal metering device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019,41(7):136 - 141. (in Chinese)