

# 航天液体火箭液氢泵叶片积叠线空化性能优化仿真研究

吴不鸣,夏晨

(南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016)

**摘要:**参照现有液体火箭液氢涡轮泵设计一组诱导轮-离心轮构型。通过数值模拟方法探索液氢涡轮泵中离心轮叶片前缘积叠线的影响规律,验证相应的优化方法。结果表明:泵体流量工况的变化会影响泵体的流场,并对空化现象产生影响;而进行积叠线倾斜优化能调整沿叶高的攻角,进而改善泵体空化性能;积叠线倾斜角 $\theta$ 的取值范围在 $55^\circ\sim 80^\circ$ 时叶片具有较好的防空化气蚀性能。

**关键词:**液体火箭;涡轮泵;高速泵;空化;液氢;叶轮

**中图分类号:**TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)04-0140-04

## Simulation Study on Blade Stacking Line Optimization on Cavitation Performance of Space Liquid Hydrogen Pump in Liquid-propellant Rocket

WU Buming, XIA Chen

(College of Energy and Power, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** A set of inducer-impeller is designed based on an existing liquid hydrogen turbopump. The influence law of the stacking line of the impeller's blade leading edge is explored through numerical simulation, and the corresponding optimization method is discussed. The results show that the change of flow rate affects the flow field of the pump and the cavitation phenomenon. And an appropriate stacking line can adjust the angle of attack along the blade leading edge, thus preventing cavitation and improving the performance of centrifugal pumps. The impeller will obtain a good anti-cavitation performance when the stacking line incline angle  $\theta$  ranges from  $55^\circ$  to  $80^\circ$ .

**Keywords:** liquid-propellant rocket; turbopump; high-speed pump; cavitation; liquid hydrogen; impeller

## 0 引言

目前国内众多高校都在进行火箭相关实验建设<sup>[1]</sup>。涡轮泵液体火箭是推进系统的燃料供给部件。由于工质的低沸点及叶轮的高转速特性,低温泵内流易发生空化等不稳定流动现象。空化是流场液态工质的气液相变现象,该现象会使机械效率下降<sup>[2]</sup>。空化与流场的温度、转速、工件构型等因素存在着很强的相关性联系<sup>[3-4]</sup>。

很多学者进行了离心泵空化现象的相关研究,发现叶轮入口和叶片前缘附近的局部流动情况对空化现象有着决定性作用<sup>[5]</sup>。而积叠线影响着叶片的构造,很多学者进行了基于该因素的叶型优化。ZHOU F M等<sup>[6]</sup>对核冷却剂泵进行仿真,发现正积叠线倾斜角有利于提高效率并减少压力脉动;而负倾斜角有利于增加扬程和减小轴向力,并减少压力脉动。YAN P等<sup>[7]</sup>则发现负积叠线可以提高较低流速下的流动稳定性和效率。

在以上学者的研究中,泵的离心轮叶片前缘积叠线型及其对空化影响方面的研究仍有所欠缺,而该处是空化发生的起点。为了详细了解液氢泵的工作状况受叶片前缘

积叠线的影响,以便在实际工程应用中得到理论基础的支撑,故本文采用数值模拟的方法,对涡轮泵进行流场仿真,探究液氢泵离心轮叶片前缘积叠线对流场的影响规律,并尝试给出优化建议。

## 1 数值计算方法

### 1.1 计算模型与网格划分

本文选取NASA的马克46-F液氢涡轮泵作为参考<sup>[8]</sup>,以液氢泵的进口-诱导轮-离心轮流段作为研究对象,建立了一组CFD仿真模型,部分参考构型参数如表1所示。

表1 部分参考构型参数

参数名	参数值	参数名	参数值
离心轮进口直径/mm	48.26	离心轮出口直径/mm	103.50
离心轮进口宽度/mm	3.81	离心轮出口宽度/mm	3.81
诱导轮叶片数	4	流量/(kg/s)	2.74
离心轮长/短叶片数	6/6	转速/(r/min)	95 000

**第一作者简介:**吴不鸣(1997—),男,安徽池州人,硕士研究生,研究方向为推进系统内流气动力学,catbridge@foxmail.com。

**通信作者简介:**夏晨(1981—),男,江苏江阴人,博士,研究方向为航空宇航科学与技术。

文中采用 ICEM 与 TurboGrid 进行六面体网格绘制。采用周期性网格进行仿真并对近叶片和近壁面处网格进行加密。图 1 给出了整体算例模型的三维视图和计算网格。

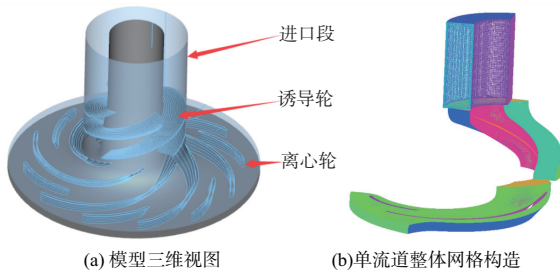


图 1 模型的三维视图和计算网格

## 1.2 边界条件

仿真基于商业软件 ANSYS CFX, 选用  $\kappa-\omega$  SST 湍流模型。边界条件如表 2 及图 2 所示(本刊黑白印刷, 相关疑问咨询作者)。应用流量进口与压力出口, 采用无滑移绝热壁面。

表 2 边界条件

参数名	参数值
进口流量/(kg/s)	0.685(单流道)
进口静压/kPa	100
进口静温/K	25
出口总温/K	24
出口静压/kPa	13 790
周期性面	Frozen-Rotor

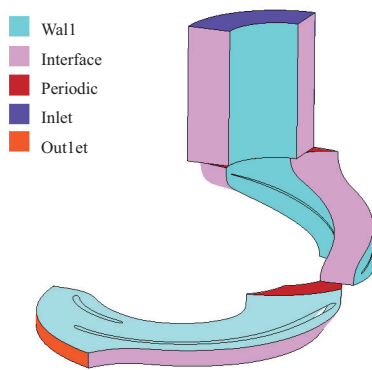


图 2 边界条件设置图

## 1.3 网格无关性校验

表 3 中列出了不同网格量的部分仿真结果, 为保证仿真具有可信度, 以马克 46-F 涡轮泵的实验结果<sup>[8]</sup>作为参考。虽然采用的涡轮泵构型有所改动, 但结果表明各网格量的仿真结果均与实验较为接近, 且网格量越高时数值波动越小, 可认为结果具有可信度(实际试验数据为压头 15 647 m, 离心轮进口压力 6.502 MPa)。

表 3 仿真得到的不同网格量的部分计算结果

网格量/万	流场最低压力 $\times 10^6$ /Pa	压头/m	离心轮进口压力/MPa	离心轮进口流速/(m/s)
169	2.899	16 349	6.783	117.9
336	1.867	16 663	6.676	118.4
623	2.241	16 824	6.623	118.4
899	2.334	16 891	6.600	118.1
1 155	2.305	16 735	6.651	118.4

网格量为 600 万以上时计算结果较为相近, 可以认为该网格量时的结果为理想值, 为保证计算的精确程度并减小计算量, 此后的计算中将网格量控制在 600 万左右。

## 2 离心轮叶片前缘积叠线优化研究

### 2.1 叶片前缘积叠线优化方法

进口前缘通常是空化现象发生的起点, 其构型会对进口前缘的流场造成极大的影响。本节尝试探究离心轮叶片进口前缘的积叠线对空化的影响。如图 3 所示, 保持其他参数不变, 对叶片的前缘积叠线进行线性调整, 并以前缘积叠线与机匣进口横截面型线所成的夹角  $\theta$  衡量积叠线的倾斜度。叶片的冲角是其入口角与来流角度之差, 在  $3^\circ \sim 10^\circ$  的较小正冲角能使上游来流冲击在叶片的压力面上, 提供较好的空化性能, 但负冲角会促使空化现象发生<sup>[9]</sup>。因此积叠线的线型变化会影响叶片前缘的冲角分布, 通常随着  $\theta$  值的减小, 冲角将随叶高减小, 从而影响叶轮的空化性能。进行仿真分析时取 6 种不同  $\theta$  值的叠线构型作为研究对象。

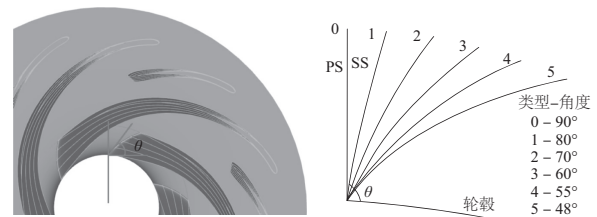


图 3 离心轮叶片积叠线示意图

### 2.2 离心轮前缘积叠线形的性能影响仿真分析

仿真时将参考压强取为 0.496 MPa, 出口反压设置为 13.790 MPa, 并对进口流量进行调整: 以设计工况流量为  $Q$ , 则大流量为  $2Q$ , 小流量为  $(1/3)Q$ 。通过仿真得到的特性曲线如图 4 所示。其中标准与小流量工况的压头分别较大流量工况增大了 74% 与 120%, 而效率则分别减小了 4% 与 28%。在大流量工况下, 进口平均压力随积叠线的倾斜而下降, 而其他工况则未呈现这种趋势; 在小流量工况下, 压力则会上升。因在大流量工况下压力较高, 发生空化的可能性较小, 故对积叠线进行倾斜能提升整体空化性能。此外, 压头和效率在大流量工况下随倾斜度而上

升,而在小流量工况下则随倾斜度而下降。这是因为上游来流的入流角在不同的流量下存在差异,使大流量工况下

的冲角过小,而小流量工况下的冲角过大,对积叠线的倾斜调整使冲角沿叶高减小,改善空化性能。

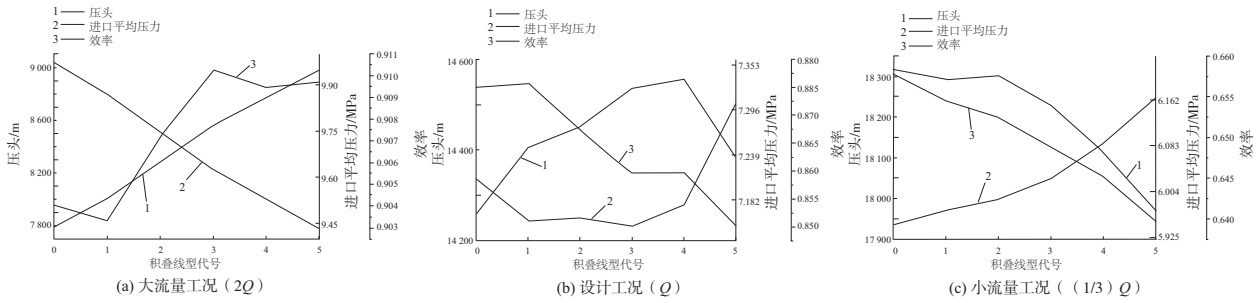


图4 不同积叠线型的流场仿真结果

将空化现象纳入考虑后再次进行仿真,将液氢在 25 K 下的饱和蒸气压 2463.8 Pa 作为相变压强,选用的参考压强为 0.496 MPa,出口反压为 7.584 MPa,此时空化数  $C_a = 0.058$ ,得到的仿真结果如表 4 所示。此时在大流量工况下空泡的体积为 0,并未发生空化现象;在小流量工况下,空泡体积在  $4.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3$  左右浮动;而在标准流量工况下,随着  $\theta$  值的减小,空泡的体积呈现出先减小再增大的趋势,在  $\theta$  处于  $80^\circ \sim 55^\circ$  范围内时,空泡的体积较小,且 3 号构型对应的空泡体积最小,较 0 号减小了 67.9%。而  $\theta$  值过小时,空泡则会扩大,对性能造成不利影响,如 5 号构型的流场。可以认为在标准流量工况下进行前缘积叠线的倾斜调整能够对空化起抑制作用。空化现象的具体细节仍需要进一步观察以加深理解。

表 4 仿真得到的各积叠线型的空泡体积 单位:  $\text{m}^3$

积叠线型号	空泡体积 $\times 10^{-6}$		
	大流量	标准流量	小流量
0	0	1.273 51	45.527 4
1	0	0.686 73	46.057 9
2	0	0.576 82	47.548 9
3	0	0.408 49	45.287 2
4	0	0.927 23	44.042 5
5	0	4.455 46	45.274 1

### 2.3 离心轮前缘积叠线形对空化影响的细节分析

图 5 中展示了标准流量下几种叶片前缘空泡分布。发现当  $\theta$  接近  $90^\circ$  时,空泡集中在叶根处。随着  $\theta$  逐渐减小,叶根的空泡会不断向叶尖移动,最终集中于叶尖。在此过程中,可以明显观察到空泡的体积与构造都有所变化,且当空泡靠近叶片前缘的中心时,空泡的范围较小,根据前文可知此时的空化体积也为最小值。因空化现象与压力的关系较为紧密,故需要观察叶片表面压力分布细节以详细了解该部分流动的机理。

图 6 展示了  $\theta = 55^\circ$  积叠线型离心轮的长叶片进口前缘附近的吸力面压力分布,为区分空泡与流场中的高压部分,此处将空泡标为黑色。空化因流场中的压力低于工质

的汽化压强而发生,图中的空泡与叶片表面的低压区同样具有一致性。调整积叠线实际上改变了前缘各处入流的冲角,使沿叶高各处的进口条件发生了改变,从而对通道中的压力分布产生了影响,最终使空泡的分布发生变化。在白圈处可以观察到,空泡结束之后存在着小范围的高压区。这可能是由于紧贴叶片表面的附体空泡影响了该处的叶片表面构型,使得此处发生回流涡,回流工质流向叶片表面并在此处转向流往下游,使该处压力升高。

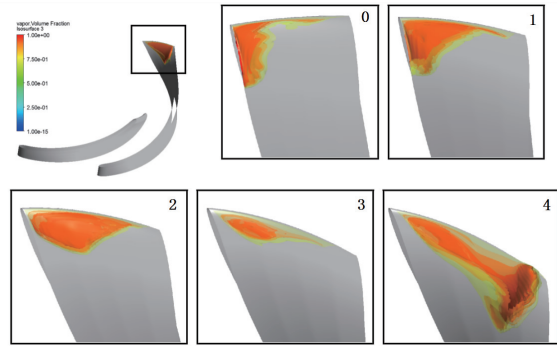


图 5 不同积叠线对应的前缘吸力面空泡

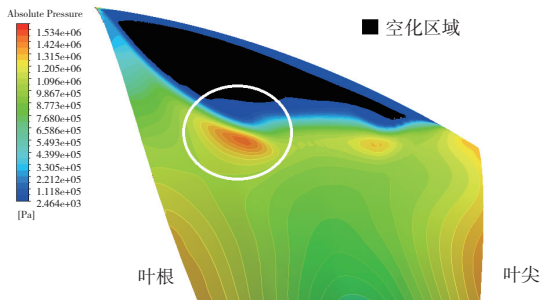


图 6  $\theta = 55^\circ$  积叠线型离心轮的叶尖表面压力云图

以上仿真分析表明,空化现象在特定工况下受积叠线构型影响较为明显。选择合适的积叠线可以对空化起到抑制作用,从而改善离心泵的空化性能。数值分析表明在该泵体构型中, $\theta$  的取值范围在  $80^\circ \sim 55^\circ$  内时,叶片的冲角在叶根与叶尖较小而在叶中较大,且沿叶高的变化梯度较为缓和,此时积叠线形对应叶片的防气蚀性能较好。若继续减小  $\theta$  角,使得积叠线的倾斜度上升则会促使空化发生。

### 3 结语

本文运用数值模拟方法进行了液氢涡轮泵的仿真,探究了叶片前缘积叠线构型在不同流量工况下对离心叶轮性能的影响,得到了以下结论。

1) 未考虑空化时,标准与小流量工况的压头分别较大流量工况增大 74% 及 120%, 而效率则减小了 4% 及 28%。较低的流量会导致更严峻的工作条件。

2) 压头和效率在大流量工况下随积叠线倾斜度上升,而在小流量工况下则随之下降。对积叠线的倾斜调整能使冲角沿叶高减小,改善小流量工况下的空化性能。

3) 标准流量下,倾斜角  $\theta$  的取值在  $55^\circ \sim 80^\circ$  时该泵体具有较好的抑制空化能力。此时冲角在叶根与叶尖较小,最高可使空泡体积减小 67.9%, 但继续增大  $\theta$  则会促使空化发生。

#### 参考文献:

- [1] 朱一骁,王申,白雪蕊. 国内高校重点实验室火箭发动机发展现状[J]. 机械制造与自动化,2021,50(5):206-207,225.
- [2] 季斌,程怀玉,黄彪,等. 空化水动力学非正常特性研究进展

及展望[J]. 力学进展,2019,49(0):428-479.

- [3] 陈尧. 基于 CFD 的低比转速离心泵叶轮多目标优化设计与实验[D]. 杭州:浙江大学,2020.
- [4] 项乐,陈晖,谭永华,等. 液体火箭发动机诱导轮空化热力学效应研究[J]. 推进技术,2020,41(4):812-819.
- [5] KIM J, SONG S J. Visualization of rotating cavitation oscillation mechanism in a turbopump inducer [J]. Journal of Fluids Engineering, 2019, 141(9):091103.
- [6] ZHOU F M, WANG X F. The effects of blade stacking lean angle to 1400 MW canned nuclear coolant pump hydraulic performance[J]. Nuclear Engineering and Design, 2017, 325:232-244.
- [7] YAN P, LI S Y, YANG S, et al. Effect of stacking conditions on performance of a centrifugal pump [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2017, 31(2):689-696.
- [8] CSOMOR A, WARREN D. Small, high pressure liquid hydrogen turbopump [M]. Washington: NASA-Lewis Research Center, 1977.
- [9] 张亚太,陈晖,项乐,等. 基于正交优化设计的诱导轮空化性能研究[J]. 推进技术,2020,41(2):343-352.

收稿日期:2022-01-19

(上接第 131 页)

ANSYS 计算出的坎贝尔图与自编软件计算出的坎贝尔图如图 14 所示。可以看出,坎贝尔图的正负进动计算结果一致。

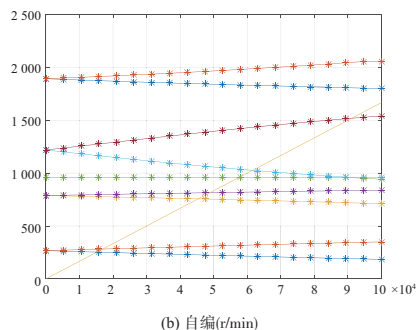
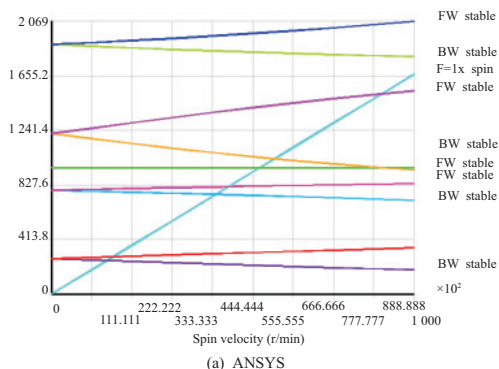


图 14 ANSYS 软件与自编软件计算出的二维模型的 Campbell 图

### 4 结语

本文基于一维梁单元和二维轴对称单元构建了转子

系统的有限元求解平台,并验证了其计算的正确性。

1) 构建了转子系统的动力学模型,实现了临界转速、振型等动力学特性的求解。并通过与 ANSYS 软件计算结果对比,验证了固有特性的正确性。自编软件计算出的 Nelson 转子一维转子系统前三阶临界转速误差在  $-1.04\%$  以内,二维转子系统前三阶临界转速误差在  $-1.22\%$  以内。

2) 基于 Qt+VTK 框架实现了较为完善的软件前处理功能。构建了材料属性定义模块。完成了模型组件的建模、拾取、装配等功能开发。针对二维模型,实现了网格划分、ANS 网格读取等功能。

3) 实现了较为强大的后处理功能。针对后处理需求,实现了曲线图、柱状图、渲染图等多种后处理功能开发。后处理模块结果显示直观清晰,显示效果美观。

#### 参考文献:

- [1] 廖明夫. 航空发动机转子动力学[M]. 西安:西北工业大学出版社,2015.
- [2] THOMPSON M, THOMPSON J M. ANSYS mechanical APDL for finite element analysis[M]. [S.l.]:s.n.: 2017.
- [3] 于晓凯,徐俊,谢鹏飞,等. 基于 Samcef Rotor 和 Cobra 的某滚动轴承-转子系统固有频率分析[J]. 智能制造,2017(8):38-41.
- [4] 周建君,许俊海,范青山,等. ABAQUS 二次开发在自冲铆接模拟中的研究[J]. 机械制造与自动化,2021,50(5):146-148.
- [5] 申超群,高静. 基于 VTK 的 SRM 断面图像三维重建系统构建[J]. 计算机仿真,2016,33(3):90-94.
- [6] ZORZI E S, NELSON H D. The dynamics of rotor-bearing systems with axial torque—a finite element approach[J]. Journal of Mechanical Design, 1980, 102(1):158-161.

收稿日期:2022-02-10