

# 半开式离心泵叶顶间隙对 泵性能稳定性的影响

毋 杰, 徐 楠, 杨大昱, 刘军年  
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 为提高火箭发动机涡轮泵性能稳定性, 应用边界层理论进行了半开式离心泵叶顶间隙流动特性研究, 利用边界层动量积分方程对叶顶间隙内边界层厚度进行求解, 并开展了不同叶顶间隙泵性能试验及流场数值模拟研究。结果表明, 当叶顶间隙值等于间隙内边界层厚度值时, 间隙泄漏涡不再增强, 可获得稳定的泵性能; 当叶顶间隙过大, 会使泵容积效率降低, 导致泵性能急剧下降。该理论方法可作为设计过程确定半开式离心泵叶顶间隙的重要参考。

**关键词:** 半开式离心泵; 叶顶间隙; 边界层; 泄漏涡; 数值模拟

**中图分类号:** V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2014) 04-0029-06

## Influence of tip clearance of semi-open centrifugal pump on performance stability

WU Jie, XU Nan, YANG Da-yu, LIU Jun-nian  
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** In order to improve the performance stability of liquid rocket engine turbopump, the flow characteristics of semi-open centrifugal pump tip clearance are studied by means of the boundary layer theory. The thickness of the boundary layer in tip clearance is calculated with the boundary layer momentum integral equation. The pump performance test and numerical simulation study are carried out with different tip clearances. The results show that, when the tip clearance is equal to the thickness of boundary layer, the tip clearance leakage vortex will no longer be enhanced and the pump performance is stable. The volumetric efficiency of the pump is low when the tip clearance is too large and the pump performance drops off precipitously. The theoretical method can be used as an important reference to determine the semi-open centrifugal pump tip clearance.

**Keywords:** semi-open centrifugal pump; tip clearance; boundary layer; leakage vortex; numerical simulation

收稿日期: 2014-04-16; 修回日期: 2014-05-20

作者简介: 毋杰 (1981—), 男, 硕士, 研究领域为流体机械与工程

## 0 引言

上面级火箭发动机涡轮泵设计结构紧凑, 工作中涡轮高温会使与之相临的泵壳体受热变形, 同时轴承有轴向游隙, 在轴向力作用下, 转子会有一定的轴向位移, 这都使工作中叶轮叶顶间隙发生变化。该间隙变化会导致泵性能不稳定, 影响发动机性能可靠性。因此, 开展叶顶间隙对半开式离心泵性能影响研究具有重要意义。

随着计算机和计算流体力学的发展, 国内外许多学者对叶顶间隙内流动开展了大量研究<sup>[1-6]</sup>。研究结果均表明, 叶顶间隙内存在多种流动损失, 叶顶间隙的增大会使泵扬程和效率都有所降低。但此类研究都处于理论摸索阶段, 缺乏工程应用背景。

本文以某上面级发动机用半开式低比转速离心泵为研究对象, 应用边界层理论对叶顶间隙内流动进行分析, 开展了泵性能试验及流场数值模拟研究, 给出了适用于上面级发动机的半开式离心泵的叶顶间隙确定方法, 既保证泵的高性能, 又保证泵性能的稳定。

## 1 半开式离心泵结构特点

研究的半开式叶轮无前盖板, 叶片采用单圆弧直叶片, 叶片与后盖板为一体结构, 叶片顶部与壳体端面组成叶轮叶顶间隙。为提高泵汽蚀性能, 在离心轮前设置诱导轮 (见图 1)。泵额定转速为 50 000 r/min, 设计比转速为 30。

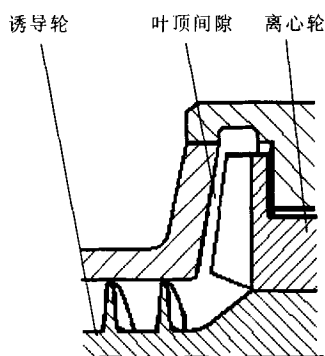


图 1 半开式离心泵结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of semi-open centrifugal pump

## 2 叶顶间隙流动理论分析

### 2.1 叶顶间隙内速度三角形

对叶顶间隙内的液体流动特点进行分析, 工作中叶轮叶顶以线速度  $U$  转动, 在液体粘性作用下, 间隙层内叶顶附近流体以速度  $u$  跟随叶顶旋转, 但间隙内液流相对滞后, 因此在叶顶间隙内会形成与叶轮旋转方向相反的相对流动, 相对速度为  $w$ 。叶顶间隙内液体流动速度三角形见图 2。

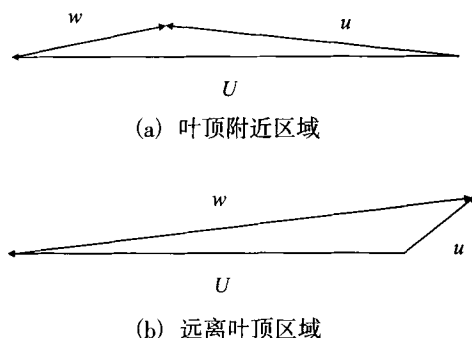


图 2 叶顶间隙内液体流动速度三角形

Fig. 2 Triangle of liquid flow velocity in tip clearance

间隙层内远离叶顶区域, 液体粘性作用力较弱, 在压力面、吸力面压差作用下, 液体速度  $u$  与叶轮旋转方向相反。

### 2.2 边界层理论应用

近似认为叶顶端面为一平面圆盘, 根据边界层理论<sup>[7]</sup>, 当间隙内相对流动雷诺数  $Re > 3 \times 10^5$ , 间隙内叶顶附近区域形成紊流边界层 (粘性区), 边界层内液流与通道内主流相互作用, 这是形成叶轮通道内泄漏涡的主要原因, 且边界层越厚, 通道内泄漏涡越强; 距离叶轮叶顶较远的区域, 受叶轮的影响小, 形成外部势流区, 在叶片压力面与吸力面压差、叶轮出口与叶轮入口压差作用下, 液体回流至叶片入口, 形成泵前回流, 使泵的容积效率降低。

叶顶间隙内流动示意图 3。

可将叶轮叶顶间隙变化对性能影响分以下情况:

1) 当叶顶间隙小于边界层厚度  $\delta$  时, 泄漏涡为间隙损失的主要来源, 且随着间隙的增大边界层逐步发展, 泄漏涡不断增强, 泵性能迅速降低。

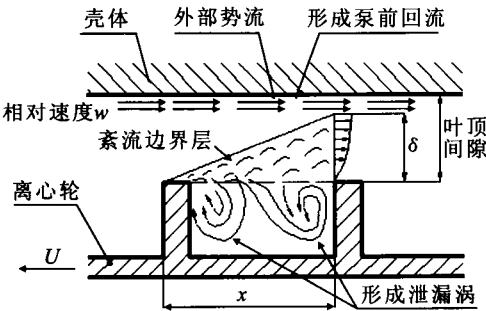


图 3 叶顶间隙内流动示意图

Fig. 3 Schematic diagram of flow in tip clearance

2) 当叶顶间隙等于或略大于边界层厚度  $\delta$  时, 叶轮通道内泄漏涡不再增强, 流动基本稳定, 泵性能也相对稳定。但如果进一步增大叶顶间隙, 外部势流区逐渐形成, 此时泵前回流量

增大, 泵的容积效率降低。

由此可见, 边界层厚度  $\delta$  是确定合理叶顶间隙和保证泵性能稳定的重要参数, 可根据边界层动量积分方程进行近似求解。

紊流边界层厚度分布方程见式 1:

$$\delta=0.37 \cdot\left(R e_x\right)^{-1 / 5} \cdot x$$
, 其中  $R e_x=U \cdot x / \nu$  (1)

式中:  $\delta$  为紊流边界层厚度, m;  $R e_x$  为流动雷诺数;  $x$  为特征长度, m;  $U$  为边界层外势流速度, m/s;  $\nu$  为介质运动粘性系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ 。

本文所研究半开式叶轮为 6 个叶片, 取计算半径处 (叶片入口处、中径处、出口处) 叶轮周长的 1/6 作为特征长度; 边界层外势流速度  $U$  可取计算半径处叶轮旋转线速度。叶片入口、叶片中径及叶片出口处叶顶间隙内边界层厚度计算结果见表 1。

表 1 边界层厚度计算结果

Tab. 1 Calculated thickness of boundary layer

位置	特征长度相对值 $x/D$	雷诺数 $R e_x$	边界层厚度相对值 $\delta/D$
叶片入口	0.18	$3.3 \times 10^5$	0.005
叶片中径	0.35	$1.2 \times 10^6$	0.008
叶片出口	0.51	$2.5 \times 10^6$	0.01

注:  $D$  为叶轮外径

计算结果分析:

- 1) 边界层厚度  $\delta$  与通道宽度  $x^{4/5}$  成正比, 沿径向方向, 由叶片入口至出口, 间隙内边界层厚度近似为线性增大趋势。叶片入口处边界层最薄, 说明叶片入口叶顶对间隙内液体的控制力相对较弱, 在叶片压力面与吸力面压差作用下, 叶片入口叶顶附近会首先出现跨叶顶泄漏, 而类似流动在叶片出口附近出现较晚。
- 2) 对于本文中半开式叶轮, 叶片出口边界层厚度 ( $\delta/D=0.01$ ) 为整个叶顶间隙内紊流边界层与势流区的分界线, 当叶顶间隙值等于该值时, 则叶片通道内泄漏涡损失不再增加, 流动趋于稳定。

3 泵流场数值模拟分析

3.1 数值计算方法

为研究叶顶间隙内流动现象及不同间隙对离心轮性能的影响, 采用数值模拟方法对不同叶顶间隙下整个泵机组流场进行了数值计算。诱导轮、离心轮计算域采用结构化网格、单通道域划分的方式, 蜗壳采用了非结构化网格。湍流模型采用标准  $k-\varepsilon$  两方程模型。数值计算采用有限体积法进行离散, 动量项等采用二项迎风格式。计算中采用旋转坐标系, 进口条件为入口总压, 出口条件为流量出口, 固壁面采用无滑移边界条件。

### 3.2 数值计算结果分析

图 4 所示为叶轮子午道内的总压分布, 相对叶顶间隙为叶顶实际间隙与叶轮外径比值。

由图 4 可知, 沿径向从叶轮入口至出口, 总压逐渐增大, 等压线在叶轮出口处分布不太均匀。随着叶顶间隙的增加外侧总压逐渐降低; 相

对叶顶间隙为 0.002 时, 叶轮出口处有明显的高压区, 而当相对叶顶间隙为 0.018 时, 叶轮出口高压区明显减少, 且等压线分布更不均匀。说明随着叶顶间隙的增大, 泵性能不断降低。

图 5 所示为叶轮通道内的速度流线随叶顶间隙的分布情况。

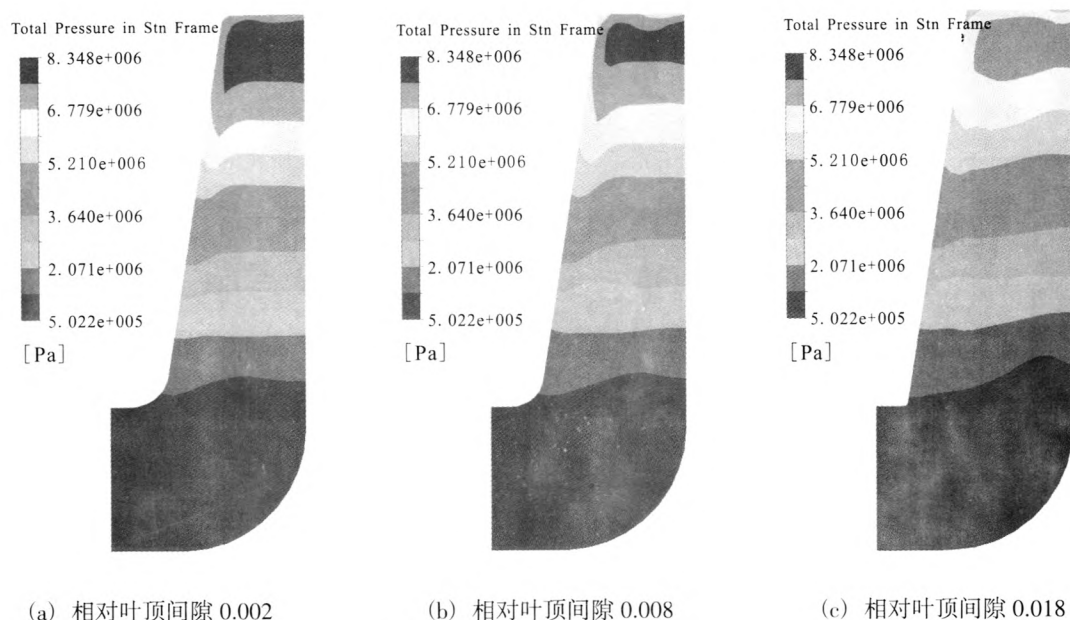


图 4 叶轮子午流道总压分布图

Fig. 4 Distribution of total pressure of impeller meridional passageway

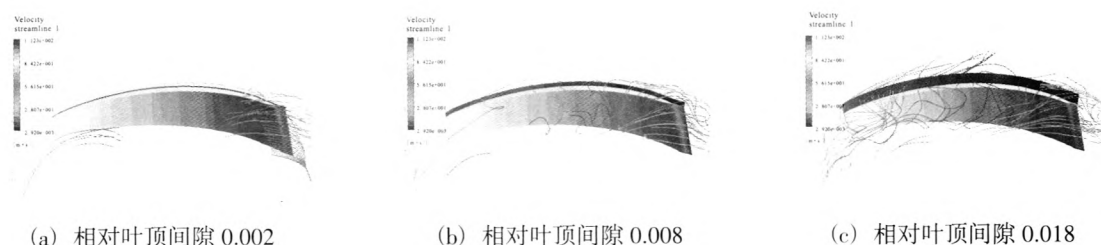


图 5 叶顶间隙内流线图

Fig. 5 Streamline diagram in tip clearance

由图 5 可知: 不同叶顶间隙下, 均存在跨叶顶间隙泄漏, 叶顶间隙越大, 间隙泄漏越严重。当相对叶顶间隙为 0.002 时, 跨叶顶流线只在叶片进口叶顶附近出现; 相对叶顶间隙为 0.008 时, 叶片进口、叶片中部均出现间隙泄漏; 当相对叶顶间隙为 0.018 时, 包括叶片进口、中部及尾部, 整个叶片均出现了明显的叶顶间隙泄漏。该计算结果也印证了前文分析的由于叶片进口间隙内边

界层厚度小, 会首先出现间隙泄漏, 而在叶片出口附近出现较晚。

叶轮子午流道内速度矢量分布见图 6。

由图 6 可知, 叶顶间隙层内存在从叶轮出口至叶轮入口的泵前回。该回流与主流相互作用, 在叶轮入口靠近前盖板附近形成旋涡; 受涡壳内高压影响, 在叶片出口靠近前盖板附近也会形成旋涡, 且随着叶顶间隙的增大, 泵前回流量

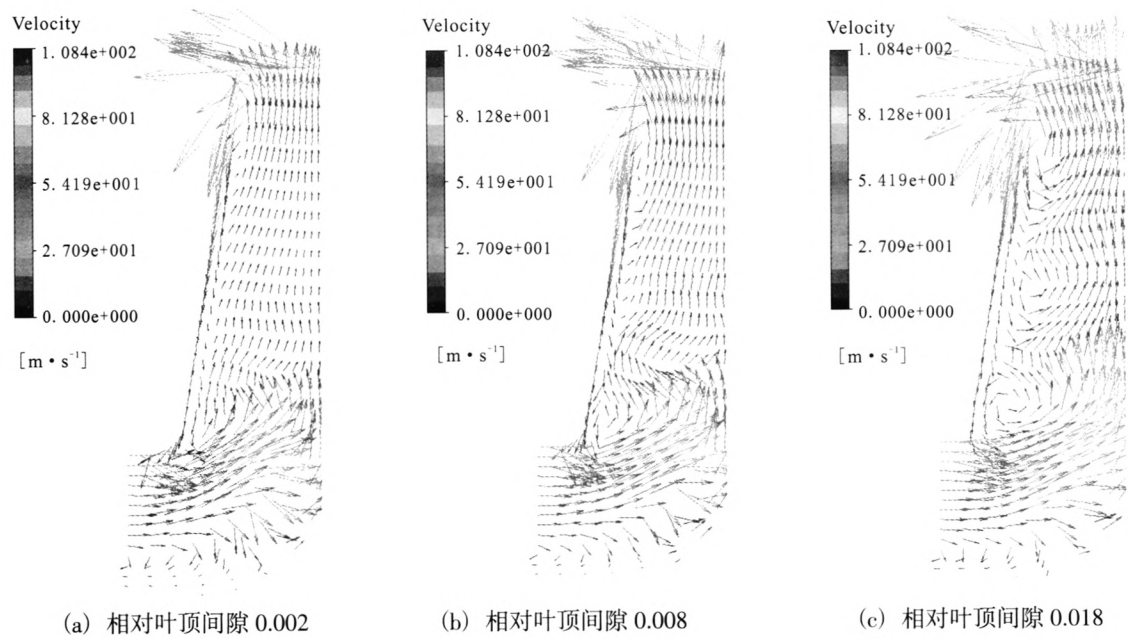


图 6 叶轮子午流道速度矢量图

Fig. 6 Diagram for velocity vector of impeller meridional passageway

量增大, 这两个旋涡不断增强; 当相对叶顶间隙为 0.018 时, 可以明显观测到叶片入口及出口的两处涡流, 且在两个旋涡相互作用下, 导致叶片中部也出现了涡流。

该现象说明, 叶顶间隙进一步增大, 泵前回流量增大, 不但会增加容积损失, 降低泵容积效率, 同时受回流影响, 沿叶轮子午流道会形成不同程度的涡流, 还带来更多的流动损失。

4 泵外特性试验研究

为分析叶顶间隙对泵性能的影响, 在 0~0.025 相对叶顶间隙范围, 进行了泵性能试验, 获得了不同间隙下泵外特性曲线, 并与数值计算结果进行了对比。

图 7 示出设计流量点下, 泵扬程、效率随叶顶间隙变化曲线。

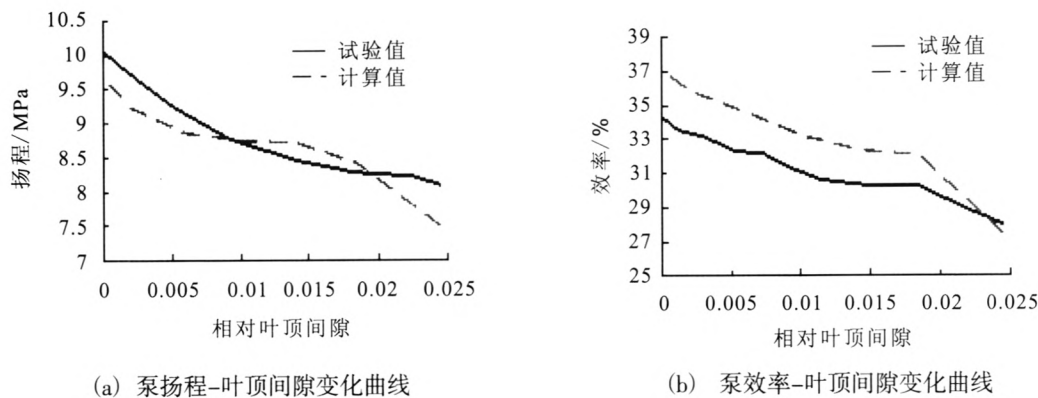


图 7 设计流量点泵扬程、效率随叶顶间隙变化曲线

Fig. 7 Variation of pump head and efficiency with tip clearance at design flow point

从图7可知,计算扬程变化与试验结果较一致,计算效率值高于试验值约2%。这是因为数值计算未考虑到密封、轴承等机械功率损失,对于小功率泵,机械损失对泵效率有显著影响。

叶顶间隙较小时,泵性能较高;随叶顶间隙增大,泵扬程、效率逐渐降低。相对叶顶间隙在0.012~0.018范围内,泵效率下降趋势不明显,几乎不随间隙变化,性能相对稳定,但相对叶顶间隙大于0.018时,泵效率再次迅速降低。扬程变化也呈现类似趋势。

试验及数值模拟结果均印证了边界层理论的分析结果。对于本文研究对象,其叶顶间隙内实际紊流边界层相对厚度在0.012左右,与计算值0.01接近;当叶顶间隙大于该值,则间隙内紊流边界层不再发展,泵性能较稳定;但如果进一步增大间隙,间隙内的回流损失以及由回流带来的沿流道涡流损失会迅速增大,导致泵性能的急剧下降。因此,保证泵性能稳定的最佳相对叶顶间隙范围为0.012~0.018。

## 5 结论

1) 对于液体火箭发动机用半开式离心泵,为保证泵性能稳定,推荐叶顶间隙值在其间隙内紊流边界层厚度值附近选取。

2) 对于本文研究对象,计算叶顶间隙内紊流边界层相对厚度为0.01,根据泵外特性试验,

该边界层实际厚度在0.012左右,与理论计算值较接近。本文介绍的边界层理论方法可作为设计过程确定叶顶间隙的重要参考。

### 参考文献:

- [1] ZHU zu-chao, CHEN Ying. Experimental study on high-speed centrifugal pumps with different impellers [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 15 (4): 372-375.
- [2] 张剑慈, 崔宝玲. 开式离心叶轮内部流道的数值模拟[J]. 机械工程学报, 2006, 42(4): 37-41
- [3] ENGIN Tahsin, GUR Mesut, SCHOLZ Reinhard. Effects of tip clearance and impeller geometry on the performance of semi-open ceramic centrifugal fan impellers at elevated temperatures[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2006, 30: 565-577.
- [4] TAMM Alberto, STOFFEL Bernd. The influences of gap clearance and surface roughness on leakage loss and disc friction of centrifugal pumps [C]// Proceedings of ASME 2002 Fluids Engineering Division Summer Meeting. Montreal, Quebec, Canada: ASME, 2002: 14-18.
- [5] 毛佳妮, 曹紫胤. 抑制叶顶间隙泄漏的叶轮机械叶片的流场模拟[J]. 热能动力工程, 2009, 24(2): 154-262.
- [6] 朱祖超. 小流量切线泵设计与应用[J]. 水泵技术, 1996(1): 9-12.
- [7] 景思睿, 张鸣远. 流体力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.

(编辑: 王建喜)