

# 高速复合叶轮离心泵多相位定常流动数值模拟

严俊峰, 陈 炜

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 对一高速复合叶轮离心泵在设计工况进行了多相位定常流动数值模拟, 分析了由于叶轮与蜗壳相对位置的变化引起的离心泵的速度场、压力场、扬程系数和效率的变化规律。计算表明, 高速复合叶轮离心泵内流场非常复杂, 叶轮流道在不同位置的流动情况差别较大, 而扬程系数呈周期性变化。该计算为进一步提高高速复合叶轮离心泵的性能、减少水力损失提供了一定的理论依据。

**关键词:** 高速离心泵; 复合叶轮; 多相位; 数值模拟

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2007) 01-0028-04

## Numerical analysis of flow features of a high-speed centrifugal pump with a complex impeller with multi-phase position

Yan Junfeng, Chen Wei,

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** The numerical analysis of the inner flow field is presented at the design point for a high-speed centrifugal pump with a complex impeller with multi-phase position. The changes of the velocity and the pressure fields, the total head rise coefficient and the efficiency due to the positions of impeller passage with respect to volute have been investigated in detail. It can be concluded that the flow field in the high-speed centrifugal pump with a complex impeller is very complicated, and there exists an obvious difference of flow features at various positions of passages, the total head rise coefficient changes periodically. All results show the analysis is very important and available for improving the performance, reducing the hydraulic loss, and others.

**Key words:** high-speed centrifugal pump; complex impeller; multi-phase position; numerical simulation

收稿日期: 2006-08-29; 修回日期: 2006-10-12。

作者简介: 严俊峰 (1980—), 男, 硕士, 研究领域为涡轮泵技术。

## 1 引言

高速复合叶轮离心泵具有扬程高、结构紧凑、重量轻等优点,在中、大推力液体火箭发动机中得到了广泛应用。研究表明,利用 FLUENT 进行整机定常流动数值模拟,能够很好地预测高速复合叶轮离心泵的性能<sup>[1,2]</sup>。针对含有运动固体边界的流动问题,FLUENT 提供了多重参考坐标系 (MRF)。它的基本思想是将离心泵流场简化为旋转叶轮固定在某一位置时的瞬时流场,其计算结果仅代表当前叶轮与泵体所处相对位置时的流动状况<sup>[5]</sup>。研究还表明,离心泵整机流场的流动具有不对称性<sup>[2]</sup>。叶轮流道与蜗壳相对位置不同,离心泵的性能就有差异。因此,对某高速复合叶轮离心泵在设计工况下进行了多相位定常流动数值模拟,试图分析相位变化引起的性能变化规律。

文中的多相位是指叶轮流道与蜗壳隔舌的相对位置。首先选定叶轮一流道,将该流道中长叶片出口边置于蜗壳  $0^\circ$  截面位置,并定为计算起始位置,如图 1 所示。然后将蜗壳绕旋转轴线逆时针旋转  $2^\circ$ ,依此类推。由于叶轮共有 6 个长叶片,12 个短叶片,相邻长叶片间的角度为  $60^\circ$ ,所以需要在上述 30 个位置进行复合叶轮离心泵整机多相位定常流动数值模拟,得到流场周期性变化的全部信息。

## 2 网格生成及计算方法

高速复合叶轮离心泵由进口管、诱导轮、过渡段、叶轮及蜗壳等组成。使用 FLUENT 软件中的前处理程序 Gambit,采用适应性强的非结构化四面体网格划分技术,把整个流场划分为节点数为 125,713,单元数为 582,717 的网格区域,如图 2 所示,其中流道各部分节点及单元数见表 1。

具体计算时将诱导轮及叶轮网格区域设为多重参考坐标系;其余网格区域设为固定坐标系。计算时进口边界条件按入口质量流量给定,具体

数值由泵设计工况给出;泵入口湍流取值按水力直径大小及湍流强度给定 (5%)。出口边界条件为流动充分发展条件。壁面条件采用无滑移固壁边界条件,并使用标准壁面函数法确定固壁附近流动。在差分格式中,压力项采用了二阶中心差分格式,速度项、紊动能项和紊粘系数项采用二阶迎风差分格式。采用 SIMPLEC 算法,实现压力和速度的耦合求解。

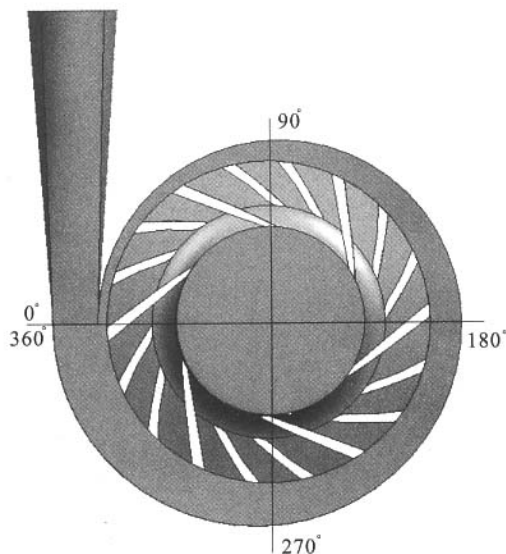


图 1 相位位置

Fig.1 Multi-phase position

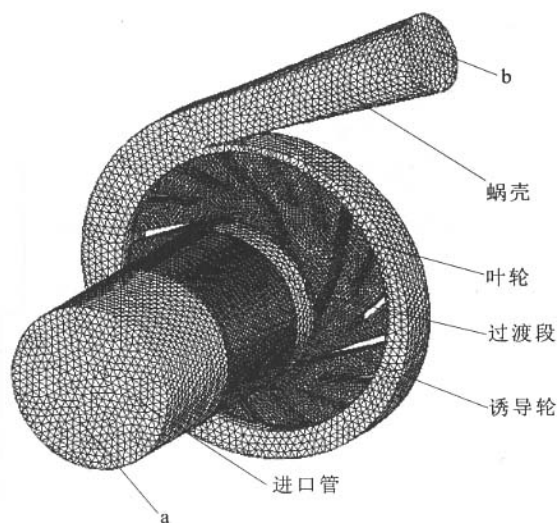


图 2 网格区域

Fig.2 Mesh region

表 1 各计算单元的网格数

Tab.1 Mesh quantity of various computational cells

	进口管	诱导轮	过渡段	叶轮	蜗壳	合计
节点数	7171	58038	2374	49276	8854	125713
单元数	33484	283764	8935	22296	35238	582717

3 计算结果及分析

3.1 离心泵内流场

通过流场计算得知，当相位角为 38°时，蜗壳隔舌附近液流的相对速度分布较为紊乱，而当相位角为 30°时，相对速度的分布则较为规则。除此以外，在其它位置未见明显流动差异。

图 3 (a)、(b) 分别为 30°和 38°位置流道内的静压分布图。可以看出，除叶轮进口部分的静压分布有所不同外，在其它位置未见明显流动差异。由高速高压离心泵的特性可知，叶轮进口压力的变化对汽蚀性能的影响较大，而对扬程系数及效率等的影响却很小。

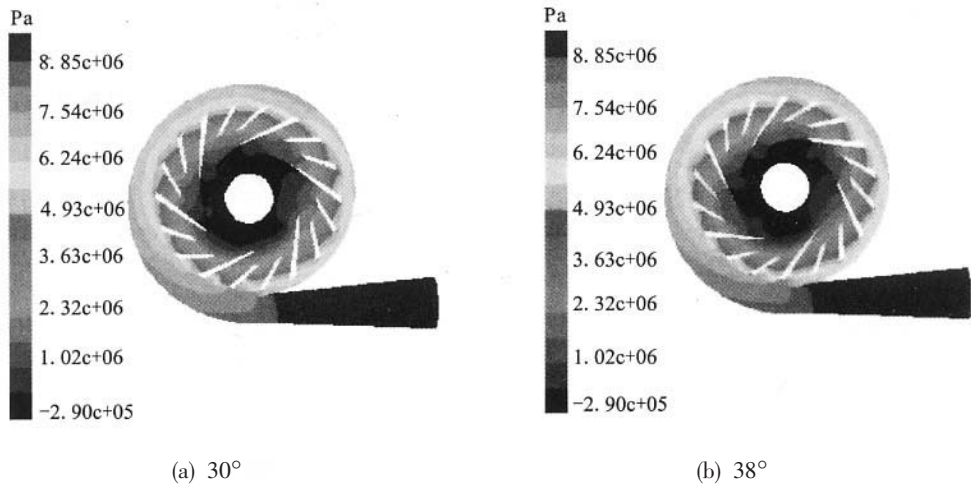


图 3 流道内静压的分布

Fig.3 Static pressure distributions in passages

3.2 扬程系数

为验证计算结果的有效性，由流场模拟结果可算出图 2 中离心泵出口位置  $b$  到入口位置  $a$  的总压差，即为离心泵的扬程  $H$ ，从而可得出离心泵的扬程系数  $\psi$ 。

$$H=\frac{1}{A_b}\int_{A_b}\left(\frac{p}{\rho g}+\frac{V^2}{2g}\right)dA-\frac{1}{A_a}\int_{A_a}\left(\frac{p}{\rho g}+\frac{V^2}{2g}\right)dA$$

图 4 即为该高速复合叶轮离心泵多相位计算所得到的扬程系数  $\psi$  与相位  $\Phi$  的关系。从图 4 中可以看出，扬程系数随相位变化较大。由于叶轮叶片数较多，转速又很高，因此离心泵扬程系数的变化频率很高，图中的实测扬程系数应为实际试验得到的平均值。多相位计算后的平均扬程

系数比实测扬程系数  $\psi_l$  高出约 5%。

从图 4 中还可以看出，当相位角为 10°、30°及 50°时，计算的扬程系数为局部最大值；而当相位角为 18°、38°及 58°时，计算的扬程系数为局部最小值。扬程系数随相位变化呈现出规律性，这与长叶片及短叶片与蜗壳隔舌的相对位置密切相关。其中，最大扬程系数比  $\psi_{\max}/\psi_l$  与最小扬程系数比  $\psi_{\min}/\psi_l$  的差值约为 2%。对高速高压复合叶轮离心泵而言，其扬程高达上千米，而采用多相位计算后，其最大扬程与最小扬程的差值不过 20m，从工程角度看，多相位计算的优势并不明显，可以在任一相位下计算高速复合叶轮离心泵的扬程，其计算误差约为 2%。

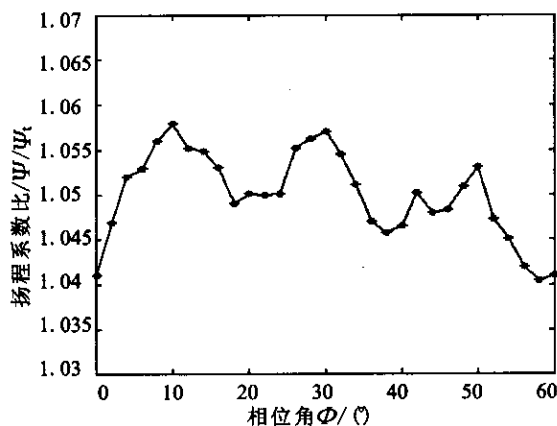


图4 扬程系数与相位的关系

Fig.4 Total head rise coefficient vs multi-phase position

### 3.3 效率

由流场模拟结果可算出诱导轮及叶轮转动壁面相对于旋转轴线的力矩  $M$ ；而对于同一工况的离心泵，其机械损失及容积损失等为一常数  $\Delta P$ ，由此可计算出离心泵的效率  $\eta$ 。

图5即为该高速复合叶轮离心泵多相位计算所得到的效率  $\eta$  与相位  $\Phi$  的关系。从图5中可以看出，效率随相位变化较大。多相位计算后的平均效率比实测效率  $\eta_t$  高出约2%。

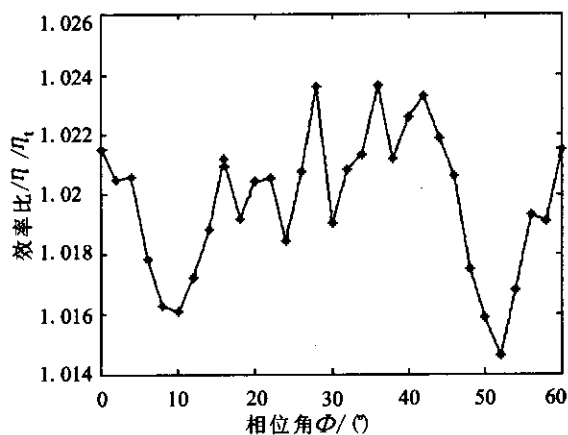


图5 效率与相位的关系

Fig.5 Efficiency vs multi-phase position

从图5中还可以看出，效率随相位的变化与扬程系数随相位的变化不同步，呈现出无规则性。其中，最大效率比  $\eta_{\max}/\eta_t$  与最小效率比  $\eta_{\min}/\eta_t$  的差值约为1%，由此可见，多相位计算的优势并不明显。从工程角度看，可以在任一相位下计算高速复合叶轮离心泵的效率，其计算误差约为1%。

## 4 结论

(1) 本文的计算方法及结果对模拟高速复合叶轮离心泵的流场是现实可行的。离心泵的扬程系数和效率随相位的变化而变化。

(2) 高速复合叶轮离心泵的扬程系数随相位变化呈现出规律性，而效率随相位的变化与扬程系数随相位的变化不同步，呈现出无规则性。

(3) 在实际工程计算中，可以在任一相位下计算高速复合叶轮离心泵的扬程和效率，其对应的计算误差约为2%和1%。

## 参考文献:

- [1] 徐朝晖, 吴玉珍, 吴玉林, 陈乃兴. 高速离心泵内部流动数值计算结果研究[J]. 水泵技术, 2003, 1
- [2] 严俊峰. 基于遗传算法的低比转速高速泵优化设计[D]. 西安航天动力研究所硕士学位论文. 2004.
- [3] 李新宏, 黄淑娟. 切线泵整机多相位定常流动数值模拟[J]. 工程热物理学报. 2003, 7.
- [4] 张翠儒, 白东安, 郭维. 液体火箭上面级发动机用超低比转速泵研究[J]. 火箭推进. 2005, 2.
- [5] FLUENT 5 users' Guide Volume 2 [M]. FLUENT INCORPORATED, 2000, 11.

(编辑: 王建喜)