

文章编号:1000-8055(2013)03-0583-08

# 基于相对流面理论的液体火箭发动机泵 内部流动计算

马冬英, 雷宗琪, 梁国柱

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

**摘 要:** 应用相对流面理论对某液体火箭发动机离心泵内叶轮机械部件的内部流动进行计算和分析. 流面的求解采用流线曲率法. 根据不同部件内的流动数值模拟编制了模块化计算程序, 使各部件的计算相对独立. 不同部件之间采用混合平面法进行处理, 将非定常问题转化为定常问题, 简化计算. 黏性的影响通过几种损失系数进行修正. 数值计算的结果显示诱导轮和离心叶轮增加了液体的压强, 而导流通道主要改变了液体的流动方向, 这与理论分析一致

**关 键 词:** 液体火箭发动机; 离心泵; 相对流面理论; 流线曲率法; 混合平面法

中图分类号: V434; V212

文献标志码: A

## Calculation of internal flow in pump of liquid rocket engine based on theory of relative stream surface

MA Dong-ying, LEI Zong-qi, LIANG Guo-zhu

(School of Astronautics,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract:** The theory of relative stream surface was applied to calculate and analyze the internal flow in a centrifugal pump of a liquid rocket engine. Streamline curvature method was used for calculation. Modularized calculation programs were developed to simulate the flow process in different parts of the pump, which allowed the calculation of every part to be conducted independently. The interaction between different parts was dealt with by the idea of mixing plane to convert the unsteady problem to steady problem. The effect of viscosity was corrected by several loss coefficients. The result shows that the inducer and the centrifugal impellers increase the pressure while the guide vane remains only changes the direction of the velocity, which consist with theoretical analysis.

**Key words:** liquid rocket engine; centrifugal pump; relative stream surface theory; streamline curvature method; mixing plane

$S_1$ ,  $S_2$  流面理论<sup>[1-3]</sup>是叶轮机械内部流动计算的一种基本理论, 与直接求解三维 Euler 方程组或 N-S 方程组相比, 计算大为简化, 计算速度较快. 这一理论既可以用于流场计算, 也可以用于

叶形设计, 从 1952 年提出至今, 国内外应用  $S_1$ ,  $S_2$  流面理论在民用和航空叶轮机械的设计计算方面做了很多研究工作<sup>[4-11]</sup>. 然而, 应用流面理论对于液体火箭发动机涡轮泵的计算, 尤其是对于

收稿日期: 2012-03-21

网络出版地址: [http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130326.1743.201303.583\\_016.html](http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130326.1743.201303.583_016.html)

作者简介: 马冬英(1981-), 女, 河南洛阳人, 硕士生, 研究领域为液体火箭发动机涡轮泵流动过程的数值仿真.

E-mail: mdying@sa.buaa.edu.cn

多部件离心泵的计算,目前所见到的相关报道还很少.文献[12]对液体火箭发动机涡轮内部流场进行了计算分析,表明该方法的适用性和有效性.本文以某液体火箭发动机离心泵为算例,采用  $S_1, S_2$  流面理论对其内部流动进行计算,并对结果进行了分析.

### 1 基本理论

泵内部的三维流动非常复杂,为了简化求解过程,将泵内部的三维流场分解为  $S_1$  和  $S_2$  两组二维流面进行求解.两组流面的关系如图1所示.在实际流动过程中  $S_1$  流面是挠曲的近似旋成面,但在工程计算中一般将其简化为旋成面.在  $S_2$  流面中等分整个流道中的流量的流面称为中心  $S_{2m}$  流面,用  $S_{2m}$  流面表示.采用流面理论可以仅进行单个流面的计算得到流场的准三维解,也可以进行多个流面的迭代计算从而得到流场的全三维解.

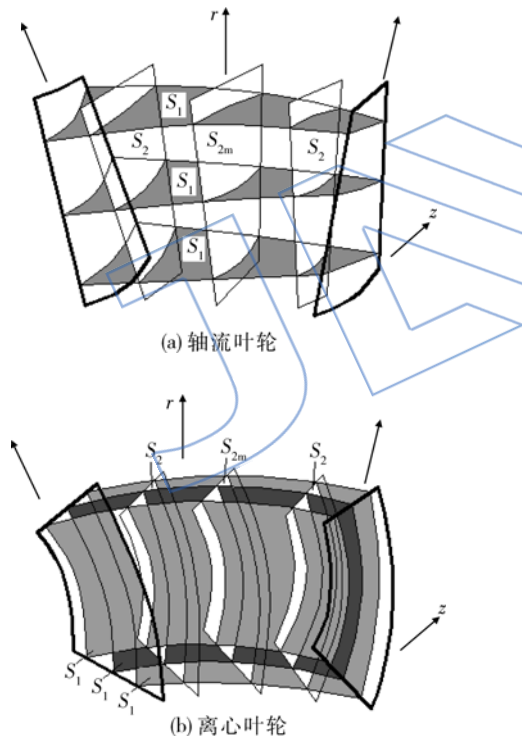


图1  $S_1$  和  $S_2$  流面

Fig.1  $S_1$  and  $S_2$  stream surfaces

本文在已知叶轮几何形状的条件下,对  $S_{2m}$  流面和多个  $S_1$  流面进行流场计算.为简化计算,作了以下假设:

- 1) 流动过程绝热,相对定常,泵内液体为不可压流;
- 2) 流场入口参数沿周向均匀,  $S_1$  流面视为旋成面,  $S_{2m}$  流面在轴对称条件下计算;

3) 动量方程忽略黏性力,黏性的影响通过各个损失系数进行修正.

求解流面的基本方程是连续方程、动量方程、能量方程和几何关系方程.在叶轮通道内,叶轮对液体做功,通过叶轮的转动将旋转叶轮的机械能转化为液体的动能和压能.计算中引入相对滞止转压的概念,如果不考虑损失,则同一部件的叶片通道内相对滞止转压不变.圆柱坐标系  $(r, \theta, z)$  中相对滞止转压  $\tilde{p}_w^*$  表示为

$$\tilde{p}_w^* = p + \rho \frac{\omega^2 - \omega'^2 r^2}{2} = p^* - \rho \omega r c_\theta \quad (1)$$

式中  $p^*$  是总压,  $p$  是压力,  $\rho$  是密度,  $\omega$  是相对速度,  $\omega'$  是泵旋转的角速度,  $r$  是半径,  $c$  是绝对速度,  $c_\theta$  是绝对速度在  $\theta$  方向的分量.

在采用流线曲率法求解流场时,一般采用由各基本方程推导得到的速度梯度方程和流量方程.速度梯度方程如下:

1)  $S_1$  流面速度梯度方程

$$\frac{\partial \tau_\theta}{\partial \theta} = \tau_\theta \sin \beta \cos \beta \sin \varphi + r \cos \beta \left\{ \frac{d\tau_\theta}{dm} + 2\omega \sin \varphi \right\} \quad (2)$$

式中  $\theta$  是  $S_1$  流面沿周向的计算站方向,  $\beta$  是相对速度与子午流线的夹角,  $\varphi$  是  $z$  轴与子午流线的夹角,  $m$  是子午流线,  $\tau_\theta$  是相对速度在  $\theta$  方向的分量.

2)  $S_{2m}$  流面速度梯度方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tau_m}{\partial n} = & \left\{ -\tau_m \sin(\varphi - \psi) \left[ \frac{\sin \varphi}{r} + \frac{1}{\cos(\varphi - \psi)} \frac{\partial \varphi}{\partial n} - \right. \right. \\ & \left. \left. \tan(\varphi - \psi) \frac{\partial \varphi}{\partial m} \right] + \tau_m \cos(\varphi - \psi) \frac{\partial \varphi}{\partial m} - \right. \\ & \left. \frac{\tau_m \tan \beta}{r} \frac{\partial(r \tan \beta)}{\partial n} - 2\omega \tan \beta \cos \psi + \right. \\ & \left. \frac{1}{\tau_m \rho} \frac{\partial \tilde{p}_w^*}{\partial n} \right\} / (1 + \tan^2 \beta) \quad (3) \end{aligned}$$

式中  $\tau_m$  是子午面上的相对速度,  $n$  是  $S_2$  流面沿流面展向的计算站,  $\psi$  是计算站方向和  $r$  轴的夹角.

流量方程表示为积分形式如下:

1)  $S_1$  流面流量方程

$$\dot{m} = \mu \int_{\theta_0}^{\theta} \rho \omega \cos \beta \tau r d\theta \quad (4)$$

式中  $\mu$  是流量系数,  $\rho$  是密度,  $\tau$  是  $S_1$  流面的厚度.

2)  $S_{2m}$  流面流量方程

$$\dot{m} = \mu \int_{n_0}^n 2\pi r \rho \tau \omega_m \cos(\varphi - \psi) dn \quad (5)$$

### 2 计算方法

流线曲率法具有方程体系简单,物理概念清

晰等优点,所以本文采用流线曲率法求解  $S_1$  流面和  $S_2$  流面,通过划分计算站的方法将流面的二维问题转化为计算站上的一维问题,计算时首先给出假定的初始流线位置,逐个计算站计算流动参数,之后按照流量反差确定新流线的位置,直到计算收敛为止。

本文按照离心泵各部件的结构将泵的叶轮机械部分划分成诱导轮计算模块、导流通道计算模块和离心叶轮计算模块,根据实际的结构形式,可以进行单个模块的计算,也可以选择相应的模块组合进行计算.各模块的计算原理和方法基本相同,它们之间相对独立,通过各自的程序完成计算。

当对多个模块进行组合计算时,相邻两模块之间存在参数的传递关系,通常诱导轮模块和离心叶轮模块具有相同的转速,导流通道模块没有转速.泵内实际的流动情况是非定常流动,各部件的叶片之间存在着相互干扰,但是非定常流动的计算难度较大且非常耗时,目前流线曲率法尚不能够直接应用于计算非定常流动.为了简化计算,采用“混合平面”法<sup>[13-15]</sup>的基本思想对非定常问题进行定常处理,

本文将“混合平面”法的思想用于流线曲率法的求解过程中,认为各模块之间有一个相互重合的边界面,液体在这一边界面上掺混,在不考虑损失的情况下,这种方法可以保证各模块“混合平面”前后流量、总能量守恒,而由于液流角的限制,“混合平面”前后的流动方向不一定相同,因此在“混合平面”前后的速度和压力可能会有所变化.由于各部件沿周向流动参数的分布规律有所差别,所以作为定常处理,计算过程中在“混合平面”上只考虑叶片径向流场的不均匀性变化,对周向的流动参数进行平均处理,即“混合平面”后的  $S_1$  流面入口各条流线的总压取前一模块所有流线出口总压的平均值,而“混合平面”后的  $S_2$  流面入口各条流线的总压取前一模块对应各条流线的出口总压。

在泵的实际工作过程中,液体黏性的影响非常大.但考虑黏性力的动量方程求解困难,方程中忽略黏性项,黏性的影响以损失系数的方式进行修正,具体数值根据经验确定.损失系数有以下两类:

1) 总压损失系数

该系数用于修正叶片通道内由于黏性引起的总压损失。

2) 流量系数

由于黏性的影响,在贴近固体壁面的区域内

的实际流速将会低于理论计算得出的流速,计算流量会大于实际流量,因此引入流量系数作修正。

计算时需要给定泵的转速、流量、进口压力、液体物性参数、流面的形状以及各个损失系数,然后计算出流面内各条流线上流动参数的分布,从而得到泵内部的准三维流场.具体的计算步骤与涡轮内部流场的计算类似,参见文献[12].

### 3 计算示例和结果分析

本文的算例参照某液氢/液氧火箭发动机氧泵的几何结构,如图 2 所示,其中诱导轮属于变螺距诱导轮,诱导轮和离心叶轮之间有一个带有叶片的导流支座,离心叶轮属于只有长叶片的常规离心叶轮,该算例的数值模拟通过诱导轮计算模块、导流通道计算模块和离心叶轮计算模块这 3 个模块完成.对各模块的中心  $S_2$  流面和多个  $S_1$  流面进行计算.计算工况见表 1 所示,计算的基本结果见表 2 所示。

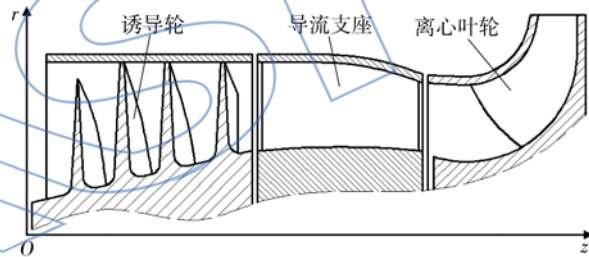


图 2 泵结构图

Fig. 2 Structure of the pump

表 1 工作参数

Table 1 Working parameters

质量流量/ (kg/s)	转速/ (r/min)	入口压强/ MPa	平均密度/ (kg/m <sup>3</sup> )
141.84	18000	0.4	1138.45

表 2 计算结果

Table 2 Computed results

位置	总压头/ m	静压头/ m	总压 增量/ MPa	压强 增量/ MPa	输出 功率/ kW
诱导轮	317.4	216.87	3.54	2.42	441.23
离心叶轮	1082.54	645.43	12.08	7.20	1504.86

#### 3.1 诱导轮的计算结果分析

图 3~图 5 是诱导轮计算结果的流场分布

图,其中,每个图中的图(a)是  $S_1$  流面的计算结果图,每个图中的图(b)是  $S_{2m}$  流面的计算结果图.

稍有减小,压力面的相对速度小于吸力面的相对速度,沿径向方向随着半径的增大,相对速度增大.

由图 3 可见,从诱导轮进口到出口,相对速度

由图 4 和图 5 可见,从诱导轮进口到出口,压

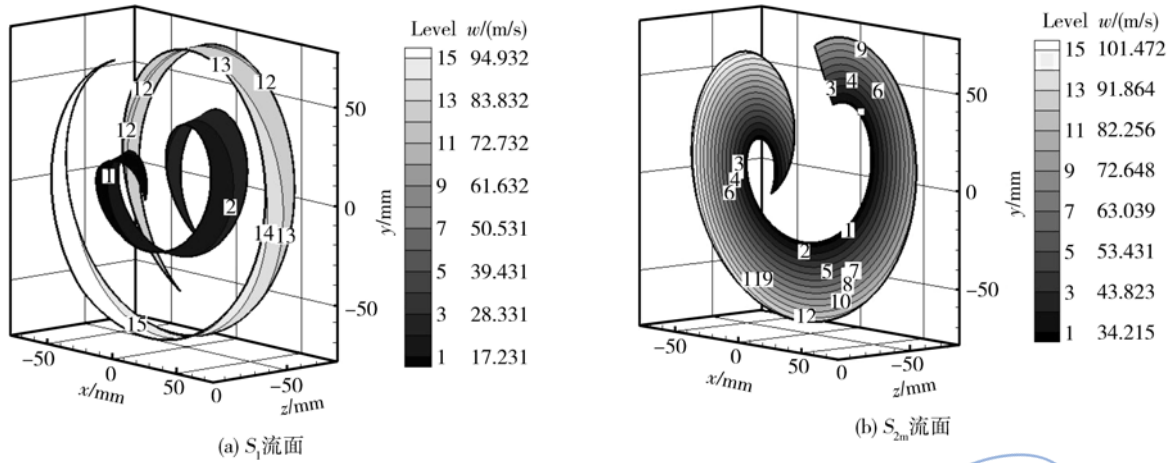


图 3 诱导轮相对流速分布

Fig. 3 Relative velocity distribution in inducer

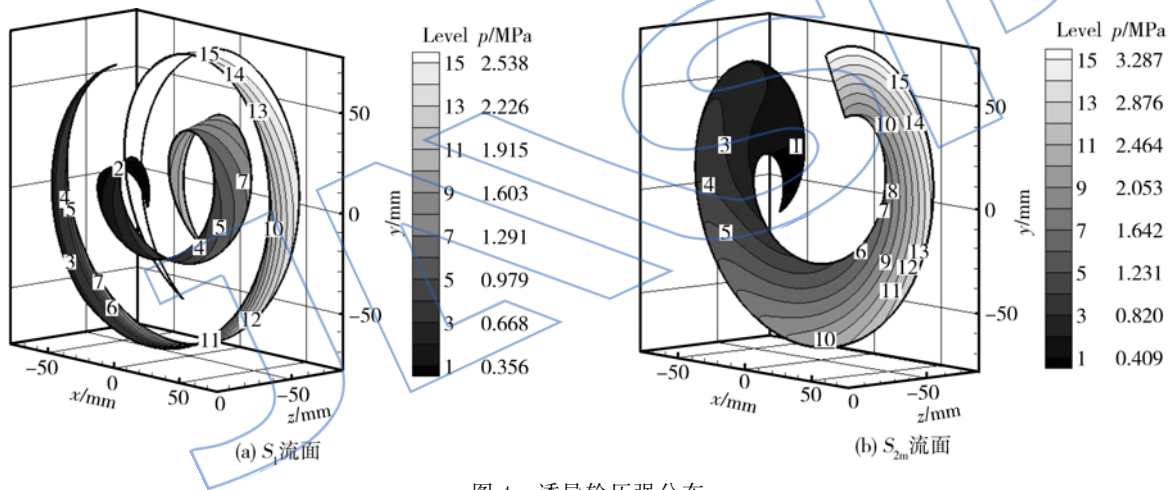


图 4 诱导轮压强分布

Fig. 4 Pressure distribution in inducer

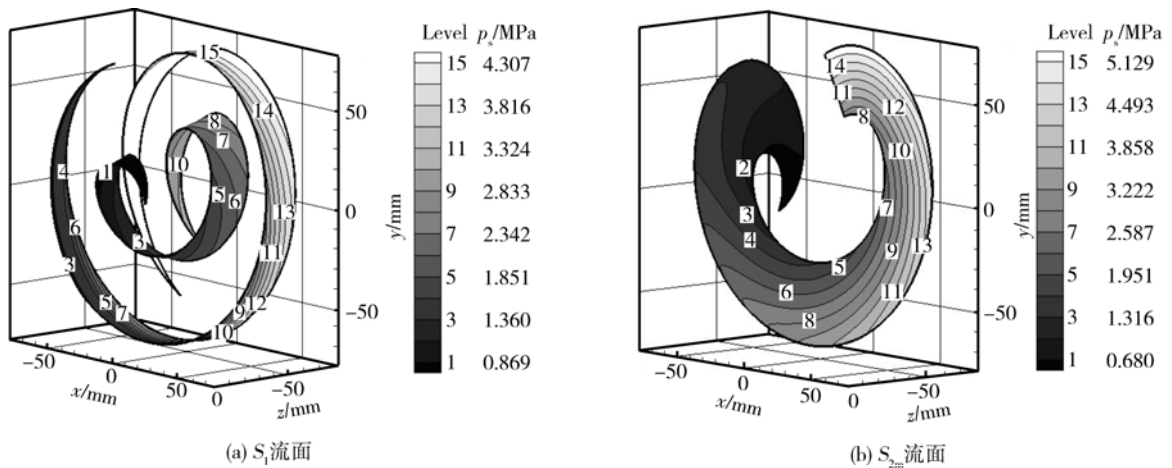


图 5 诱导轮总压分布

Fig. 5 Total pressure distribution in inducer

强和总压逐渐增大;压力面的压强和总压大于吸力面上相应点的压强和总压,沿径向方向随着半径的增大,压强和总压增大。

### 3.2 导流通道的计算结果分析

图 6~图 8 是导流通道计算结果的流场分布图,其中,每个图中的图(a)是  $S_1$  流面的计算结果图,每个图中的图(b)是  $S_{2m}$  流面的计算结果图在子午面的投影。

导流通道部分包括诱导轮后无旋转叶片部分、导流支座部分和离心叶轮前无旋转叶片部分。因为导流通道没有转速,所以绝对速度和相对速度相等。

由图 6 可见,从导流通道进口到出口,受到导流支座和流道截面积的影响,液体速度变化不规则,在导流支座的叶片进出口区域,速度波动较大。

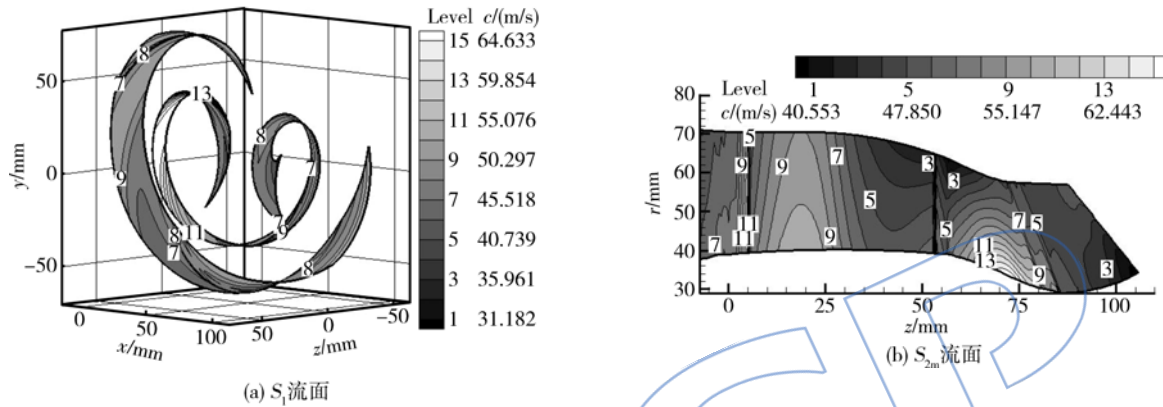


图 6 导流通道流速分布  
Fig. 6 Velocity distribution in guide vane

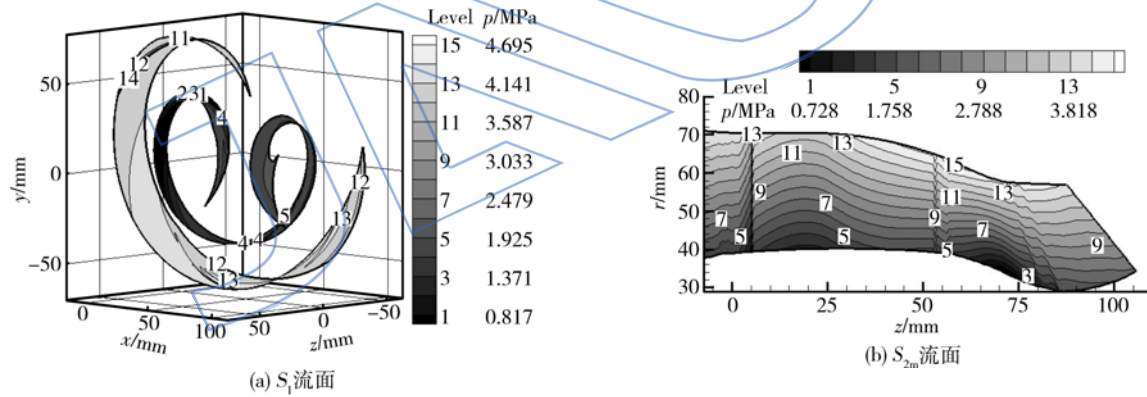


图 7 导流通道压强分布  
Fig. 7 Pressure distribution in guide vane

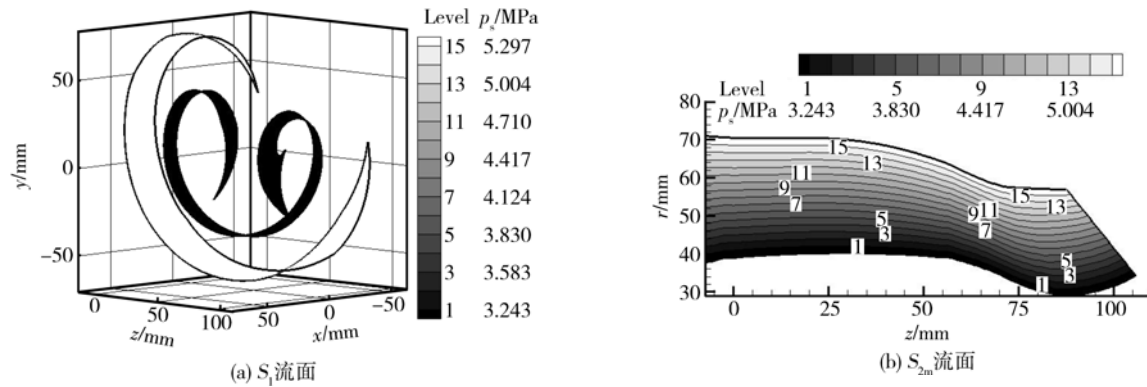


图 8 导流通道总压分布  
Fig. 8 Total pressure distribution in guide vane

由图7和图8可见,从导流支座进口到出口,压强和总压沿流动方向变化不大,只是在导流支座叶片进出口区域波动较大。

### 3.3 离心叶轮的计算结果分析

图9~图11是离心叶轮计算结果的流场分布图,其中,每个图中的图(a)是 $S_1$ 流面的计算结果沿轴向的投影,图(a)中的上下两图分别对应前盖板和后盖板处的 $S_1$ 流面,每个图中的图(b)是 $S_{2m}$ 流面的计算结果图在子午面的投影。

由图9可见,从叶轮进口到出口,相对速度逐渐增大;压力面的相对速度小于吸力面相应点的相对速度;从后盖板到前盖板的各个 $S_1$ 流面上,

相对速度增大,相对速度梯度减小。

由图10和图11可见,从叶轮进口到出口,压强和总压逐渐增大,靠近前盖板的叶轮进口部分压强最小;压力面的压强和总压大于吸力面相应点压强和总压,且吸力面上的压强梯度增大较平缓;从后盖板到前盖板的各个 $S_1$ 流面上,总压梯度明显减小。

由理论分析可知,在绝热无黏的假设条件下,在诱导轮和离心叶轮中,叶片对液体做功,液体的总能量增大,表现为总压增大,在导流通道中,外界不对液体做功,液体的总能量守恒,表现为总压不变。如果考虑黏性的影响,则相应的液体总压比

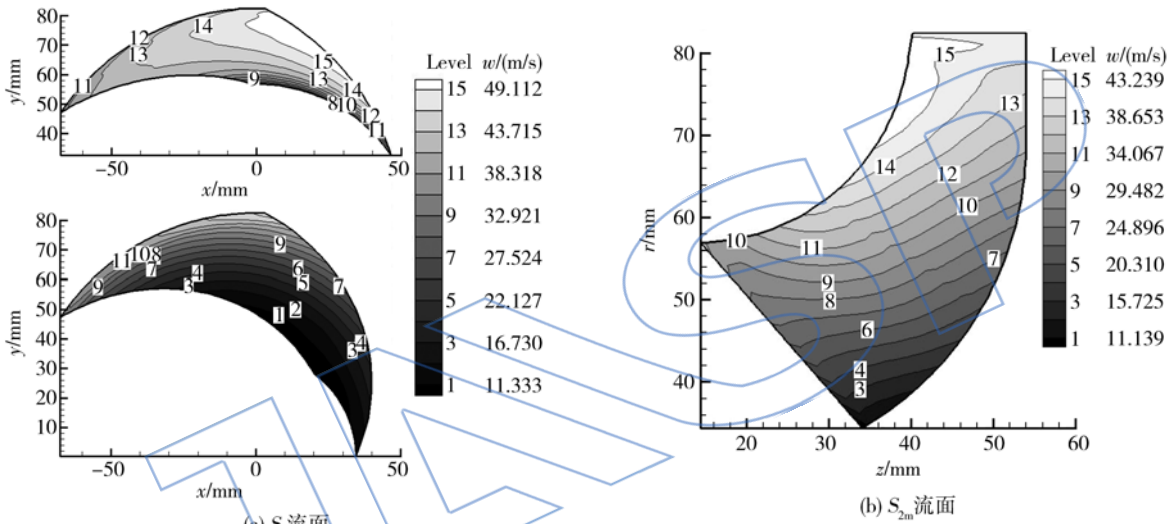


图9 离心叶轮相对流速分布

Fig.9 Relative velocity distribution in centrifugal impeller

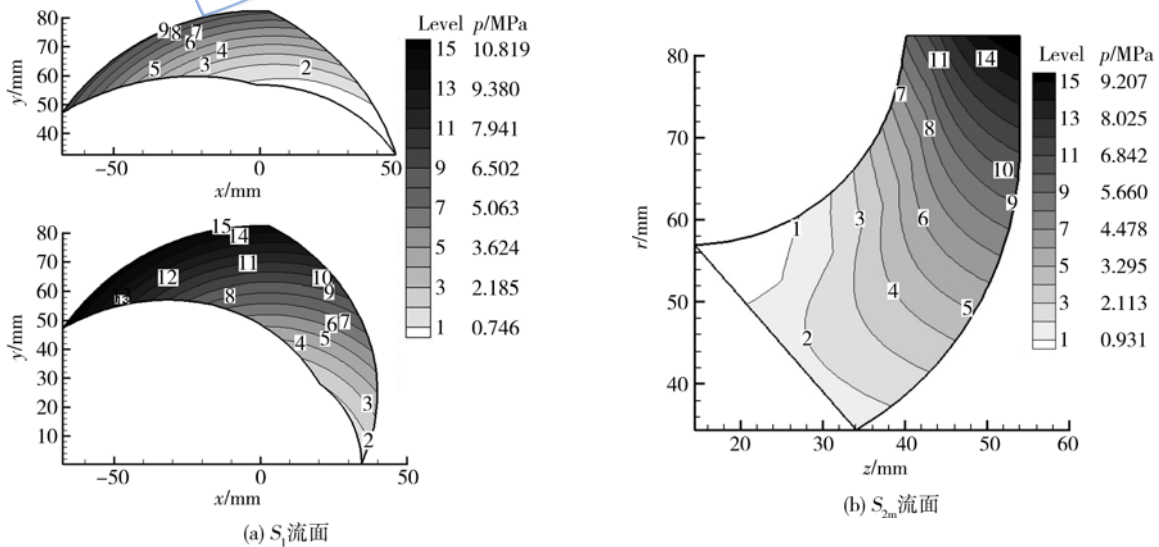


图10 离心叶轮压强分布

Fig.10 Pressure distribution in centrifugal impeller

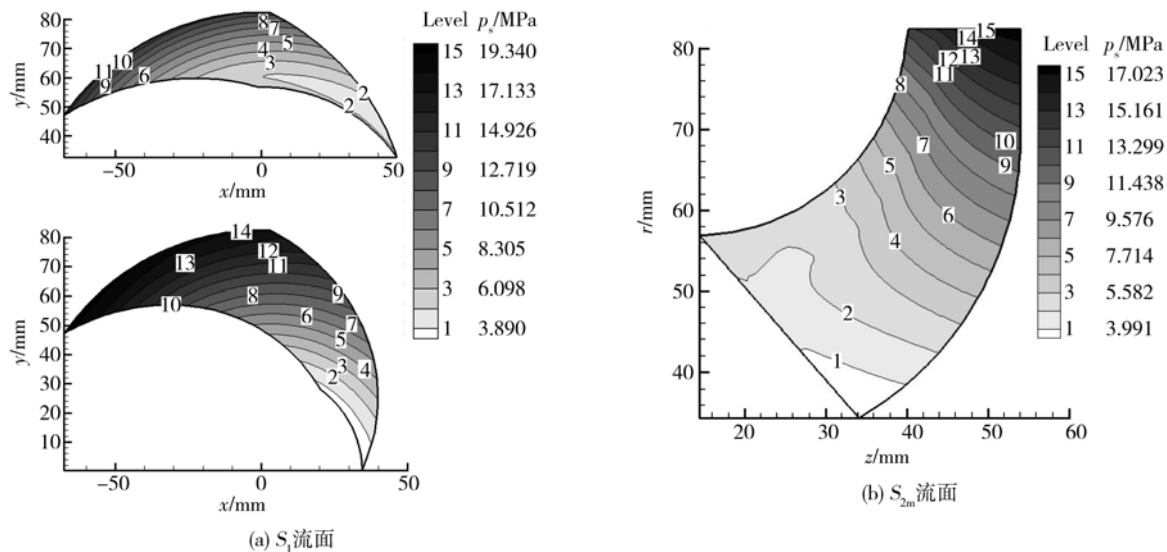


图 11 离心叶轮总压分布

Fig. 11 Total pressure distribution in centrifugal impeller

不考虑黏性时有所减小。

分析以上计算结果可以看出,在诱导轮中,液体压力增大;在导流通道中,压强变化很小,而流速改变,导流通道主要起到改变流动方向的作用;在离心叶轮中,液体进一步加速增压.液体获得的能量靠诱导轮和离心叶轮的旋转叶片对液体做功产生,诱导轮和离心叶轮均产生一定的扬程和功率.因为黏性的影响,总压有所损失,使整个通道内的总压比不考虑黏性时小,所以考虑黏性影响时,由计算结果可知,导流通道中的总压略微下降。

综上所述,以上计算结果和理论分析一致,较好地描述了泵内部的流动情况.计算结果中各个流动参数的变化规律合理,符合离心泵工作过程的基本原理,计算结果可为工程实际提供参考。

### 4 结论

$S_1, S_2$  流面理论对于液体火箭发动机泵内部轴流和离心部件的计算都适用。

流面的求解采用流线曲率法,计算速度较快,计算结果可以较好地描述离心泵各部件内部的流动情况。

根据泵各部件的结构特点采用模块化计算,使计算程序能够应用于多种结构形式的离心泵。

黏性会对泵内部的流动造成不可忽略的影响,黏性损失模型还需要进一步研究。

本文的研究采用了准三维方法,一些流面几何参数采用初次估值,必然与实际值有所偏差,这一问题需要通过进一步流面迭代的全三维计算予以解决。

### 参考文献:

[1] Wu C H. A general theory of three-dimensional flow in subsonic and supersonic turbomachines of axial-, radial-, and mixed-flow types[R]. NASA TN2604, 1952.

[2] 刘高联,王甲升. 叶轮机械气体动力学基础[M]. 北京:机械工业出版社,1980.

[3] 舒士甄,朱力,柯玄龄,等. 叶轮机械原理[M]. 北京:清华大学出版社,1991.

[4] Katsanis T. Use of arbitrary quasi-orthogonals for calculating flow distribution in the meridional plane of a turbomachine[R]. NACA TND-2546, 1964.

[5] Katsanis T. Use of arbitrary quasi-orthogonals for calculating flow distribution on a blade-to-blade surface in a turbomachine[R]. NACA TND-2809, 1965.

[6] Katsanis T. Use of arbitrary quasi-orthogonals for calculating flow distribution in a turbomachine[R]. NACA TM X-52094, 1965.

[7] 王平治,黄兰洁. 轴流燃气轮机机械气动设计程序[J]. 电子计算机动态,1975(8):34-52.  
WANG Pingqia, HUANG Lanjie. An aerodynamic design program for axial turbomachinery[J]. Journal of Computer Research and Development, 1975(8):34-52. (in Chinese)

[8] 赵晓路. 离心压气机转子内部流场  $S_1/S_2$  全三元迭代解[J]. 工程热物理学报, 1994, 15(3):257-263.  
ZHAO Xiaolu. A full-3d  $S_1/S_2$  iterative solution in a centrifugal compressor impeller [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1994, 15(3):257-263. (in Chinese)

[9] 黄虹宾,李惠珍,陆孝宽. 利用两类相对流面理论设计内燃机冷却风扇[J]. 内燃机学报, 1996, 14(2):205-210.  
HUANG Hongbin, LI Huizhen, LU Xiaokuan. Designing the cooling fan of internal combustion engine employing the  $S_1, S_2$  relative flow surface theory[J]. Transactions of CSICE, 1996, 14(2):205-210. (in Chinese)

- [10] 雷向阳,曹淑珍,刘建平. 流线曲率法三元流离心压缩机的设计[J]. 风机技术,2004(4):15-17.  
LEI Xiangyang, CAO Shuzhen, LIU Jianping. Design of centrifugal compressor of three-dimensional flow by streamline method of curvature[J]. Compressor Blower & Fan Technology, 2004(4):15-17. (in Chinese)
- [11] Casey M, Robinson C. A new streamline curvature throughflow method for radial turbomachinery[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2010, 132 (3): 031021. 1-031021. 10.
- [12] 马冬英,梁国柱. 基于  $S_1, S_2$  流面理论的液体火箭发动机涡轮内部流场计算[J]. 推进技术,2008,29(4):401-406.  
MA Dongying, LIANG Guozhu. Calculation of the internal flow for turbine of liquid rocket engine based on the theory of  $S_1, S_2$  stream surface[J]. Journal of Propulsion Technology, 2008, 29(4):401-406. (in Chinese)
- [13] Giles M B. Nonreflecting boundary condition for Euler equation calculation [J]. AIAA Journal, 1990, 28 (12): 2050-2058.
- [14] 孟庆国,季路成,周盛. 关于叶轮机多级流动模拟的模型讨论[J]. 工程热物理学报,1996.17(增刊):56-59.  
MENG Qingguo, JI Lucheng, ZHOU Sheng. On the model discussion of multistage turbomachine flow simulation[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1996, 17 (Sup. ): 56-59. (in Chinese)
- [15] 袁宁,张振家,王松涛,等. 某型两级涡轮变比热容三维定常流场的数值模拟[J]. 推进技术,1999,20(1):57-61.  
YUAN Ning, ZHANG Zhenjia, WANG Songtao, et al. Numerical simulation of three dimensional steady flow field with varying specific heat in a two stage turbine[J]. Journal of Propulsion Technology, 1999, 20 (1): 57-61. (in Chinese)

JALS SP