

超低比转速离心泵内流场计算及分析

郭维, 白东安

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘要: 运用 FLUENT 流体计算软件及 GAMBIT 前处理软件, 采用三维 $k-\varepsilon$ 双模型方程计算了一台高速超低比转速离心泵的内部流场。计算区域为从诱导轮进口到蜗壳出口的整个流场, 通过计算得到了泵内流场的流动规律, 并结合传统的泵水力估算方法, 估算了泵的扬程、轴功率及效率, 最后对该高速超低比转速离心泵进行了水力验证试验。验证结果表明所采用的计算方法可行。

关键词: FLUENT; 离心泵; 内流场

中图分类号: V434.21

文献标识码: A

文章编号: (2007) 02-0026-06

Inner flow field computation and analysis of super low-specific-speed centrifugal pump

Guo Wei, Bai Dong'an

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

Abstract: In this paper, the whole inner flow fields of a high-speed super low-specific-speed centrifugal pump with high performances is computed and analyzed by using the FLUENT software. And combined with the conventional hydraulic estimated method, the delivery lift and efficiency of the pump are also predicted. Then the hydraulic tests of the centrifugal pump were carried out and experiment results indicated that the test data were in agreement with the theoretical prediction.

Key words: FLUENT; centrifugal pump; inner flow fields

1 引言

由于试验方法及试验设备所限, 目前离心泵

设计研制中的偏重点仍然限于泵的扬程、效率及功率等外特性, 而对泵内流场的研究都比较少。在传统的离心泵设计中, 常采用经验系数法设计结构参数、进行水力计算, 这种方法只能估算流

收稿日期: 2006-02-21; 修回日期: 2006-05-15。

作者简介: 郭维 (1978—), 女, 硕士, 研究领域为涡轮泵技术。

道内的沿程摩擦损失和撞击损失,而不能计算出流体本身由于流道结构形状而引起的旋涡损失及二次回流损失等,更不能直观地反映出这些旋涡及回流发生的位置及形状、大小等。而对于高速超低比转速离心泵来说,由于转速高流量小且流道窄而长等原因,旋涡损失及二次回流损失都是不可忽略的。本文利用 FLUENT 流体计算软件,采用三维 $k-\varepsilon$ 双模型方程计算高速超低比转速离心泵的内部流场,不仅可以计算流体在诱导轮、离心轮、蜗壳及扩散管流道内的旋涡损失及回流损失,更可以直观地观察到流体在整个流场中的运动情况。因而,在传统设计计算过程中,结合运用这种内流场计算、分析方法,将会使设计计算结果更加接近离心泵实际工作状态。

2 计算模型的建立及网格划分

本文的计算模型是一台带前置诱导轮,比转速 $n_s=22$, 转速 35000r/min 的高速超低比转速离心泵,其离心轮为长短叶片相间的复合型离心轮。计算区域为从诱导轮进口到蜗壳出口整个流场。

建模及划分网格运用了 FLUENT 的前处理软件——GAMBIT。对于实体简单而网格精度要求高的模型一般直接使用 GAMBIT 软件建立实体模型并划分网格。但带诱导轮的离心泵内流场结构非常复杂,在 GAMBIT 中直接建模比较麻烦且又费时,故本文建模时利用了 GAMBIT 软件与 UG 软件的输出/输入接口功能,先在 UG 中绘制了泵内流场的三维模型,然后以 Parasolid 格式输入到 GAMBIT 中进行网格划分操作。

GAMBIT 包含功能强大的网格划分工具,可以划分包含边界层等 CFD 特殊要求的高质量网格。GAMBIT 软件所生成的网格可以是非结构化的,也可以是多种类型组成的混合网格。考虑到泵内流道结构非常复杂,这里采用适应性非常强的四面体非结构化体网格。

网格数量的多少将影响计算结果精度和计算规模大小。一般来讲,网格数量增加,计算精度会有所提高,同时计算规模也会增加,所以确定

网格数量时应权衡这两个因素综合考虑。由于计算域空间结构复杂,本文针对诱导轮、离心轮及蜗壳三大过流部件结构、尺寸及复杂程度不同,网格尺寸不便于统一的情况,分别对其单独划分网格。划分网格时,均采用均匀的网格密度。计算网格模型图如图 1 所示。

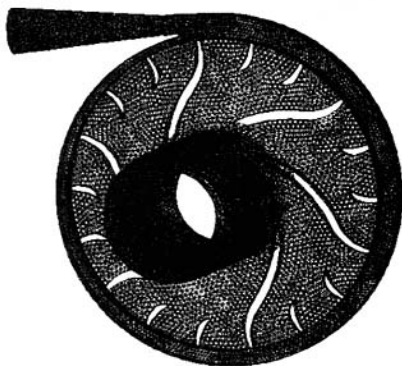


图 1 计算网格模型图

Fig.1 Computational domain and grid

3 运用 FLUENT 软件计算泵内流场

3.1 模拟模型

泵内流体以湍流流动为主,对泵内流场的模拟方法有雷诺时均法和大涡模拟等几种方法。雷诺时均法在目前应用最为广泛,技术最为成熟。雷诺时均法是将非平衡态的 N-S 方程进行时间平均,然后进行数值求解。在现阶段,使用最为成熟的技术就是 $k-\varepsilon$ 模型。

3.2 计算方法

本文在运用 FLUENT 计算时选择 Segregated solution 计算法则。Segregated solution 采用逐步插值的方法逼近控制方程,在计算程序收敛之前,反复顺序迭代各个控制方程,各控制方程的增量是连续相关的。假设泵内流动为三维定常、粘性不可压缩的湍流流动。计算过程中,选择单精度的隐式耦合法进行压力修正计算。采用绝对坐标系和诱导轮及离心轮转动的条件,模拟离心泵整个内流场。差分时间,压力项采用二阶中心差分格式,速度项、紊动能项和紊动系数项均采用二阶

迎风差分格式。

3.3 插值方法的选择

压力插值方法：采用 second-order，即二阶中心差分格式。

能量方程数值插值方法：本文计算域空间复杂，划分网格时采用了适应性强的非结构化四面体网格，因而选择了二阶迎风差分格式。

压力-速度耦合方法：连续性方程也是一个非常重要的控制方程，为使计算结果满足连续性方程，必须对压力值进行修正，使之与速度耦合，满足连续性方程。本文采用 SIMPLEC 方式对压力进行修正。

3.4 松弛因子的设置

对于 Segregated solver，计算过程的控制依靠对松弛因子的设置。计算中，由于方程的非线性，上游单元的流量 Φ 在到达下游单元时会发生变化，为了控制（降低）这种变化，采用松弛因子 α ，使得：

$$\Phi = \Phi_{old} + \alpha \Delta \Phi$$

本文采用 FLUENT 软件 $k-\epsilon$ 计算模型中的亚松弛迭代，求解时压力项松弛系数为 0.3，速度项松弛系数为 0.7，紊动项松弛系数为 0.8，紊动能耗散率项松弛系数也为 0.8。

3.5 边界条件

本文用到的边界条件有：出入口边界条件、内流场单元区域连通条件、固体壁面边界条件、压力边界条件、内部表面边界、内部连通边界等。边界条件的具体选择如下：

(1) 进口边界条件

采用质量流量进口条件，给定诱导轮进口面质量流量值 q ，设定速度方向垂直于诱导轮进口截面，同时，给出诱导轮进口入口面上的静/总压力。

(2) 出口边界条件

计算时选用压力出口边界条件，假设蜗壳出口面压力为 10MPa，其余变量给定第二类外推边界条件。

$$\frac{\partial u_i}{\partial n} = 0 (i=1,2,\dots,n)$$

(3) 内流场单元区域的流动条件设置

泵内流场单元体选择 fluid 形式，当泵运转时，流体与泵实体间存在相对运动。计算时，fluid 选择移动参考结构 (MRF) 作为坐标系。

(4) 壁面边界条件

泵流场存在三类壁面边界条件：轴和叶片以相同速度转动；诱导轮及蜗壳的外壁在绝对坐标中静止不动；离心轮的外边界条件即离心轮的前后盖板的运动状态，在绝对坐标系中与叶片、轴以相同速度旋转，而相对于 fluid 流体坐标系则保持静止。叶片表面、轮毂等固体壁面上，速度采用无滑移边界条件，临近固体壁面的区域采用速度分布对数律的壁面函数。

(5) 压力边界条件

计算区域内，为保证计算的稳定性，设某一点的压力值为参考压力，边界上压力法向导数为零。

(6) 内部表面边界条件

选择 FLUENT 系统默认值——内部 (interior)。

(7) 内部连通边界条件

相邻子区域之间连通部分，采用 Grid Interface 方式连接。

4 计算结果分析

利用 FLUENT 计算得出了离心泵各部分压力分布、速度分布、粒子轨迹及性能特性等。需要说明的是，FLUENT 是用于分析流场内部特性的应用软件，运用它对离心泵内流场计算分析时，只分析离心泵的水力特性，不考虑容积损失、轮盘摩擦损失和轴、轴承、密封等机械损失。

4.1 压力及速度分析

4.1.1 诱导轮压力及速度分析

观察诱导轮进出口面的总压分布和绝对速度分布图可知，诱导轮进口面上的总压分布非常均匀而且明显比出口面上的总压低，出口面总压分布呈由轮毂向轮缘逐渐递增的规律，轮毂圆周面上有一明显低压区，反映在出口面绝对速度分布图中，则在相应的部位存在少量回流。诱导轮进口面上的绝对速度较小且分布均匀，方向均垂直于进口面，而出口面流体的绝对速度不仅大小明

量增加而且不再纯粹地垂直于出口面,而且还具有了强制旋转速度。

4.1.2 离心轮压力及速度分析

离心轮是泵的核心部件,也是对流体做功的关键部件。因此,分析流体流经离心轮流道时的流动特性非常重要。本文通过计算得到了超低比转速离心泵离心轮流道内长、短叶片表面上的流动特征。

叶片表面的总压分布从进口到出口逐渐增加且比较均匀,只有叶片出口分布不太均匀,一侧总压较高。另外,同一半径面上长叶片工作面总压明显高于背面总压,这是因为液体随离心轮的旋转而作同向旋转,靠近叶片工作面的液体受叶片的作用力大于远离工作面的液体所受的力。因此叶片背面附近的液体容易产生脱流现象。

从长叶片背面流体相对速度和绝对速度的侧视图可以看出,叶片背面附近流体速度以圆周方向为主偏向进口边,而且速度分布比较有规律,从叶片进口边向出口边逐渐递增,与离心轮内部流动规律相吻合。而且可以看到,长叶片背面出口边有一小股反向速度,表明长叶片背面出口边存在少量二次回流和涡流。相比之下,长叶片工作面流体速度的分布则更均匀、规律,这表明长叶片工作面上不存在回流和涡流。

短叶片背面和工作面上流体的速度在大小上差异不大,方向均和长叶片表面流体一致。叶片工作面上速度分布很均匀,很有规律,而背面上流体的速度则有些变化,从短叶片背面相对速度侧视图及绝对速度侧视图中,均可明显观察到有少部分流体的速度方向发生了变化,说明短叶片背面出现了少量的回流和涡流现象。

为了观察流体经过离心轮流道时的整体特征,研究其流面上的回流和涡流,本文还通过计算给出了离心轮流面上离子轨迹分布情况。从中可看出出现回流的部位主要是位于蜗壳隔舌附近的长叶片工作面及背面周围,其背面向右附近有一股相当大的回流,从叶片出口冲向叶片进口,其工作面上也有一股回流,但没有到达进口边,而是向左旋成了几个比较明显的封闭涡流。此处的回流和涡流,主要是由于流体在隔舌附近流动

不平衡造成的。此外,在此长叶片右侧的叶间流面上,两短叶片之间的流道上存在有较明显的脱流现象,而且其它两短叶片间面上也有少量脱流现象存在。造成这种现象的原因可能是长叶片前弯过晚或短叶片数不够多,致使叶片对叶间流道的控制力度不够强。

4.1.3 蜗壳速度分析

从蜗壳流面粒子轨迹图中可以看到,蜗壳进口面隔舌附近存在较多的粒子回流和涡流,前面已经分析过,这种现象是由于蜗壳附近流动不平衡造成的。另外,在出口管的出口边外上侧存在脱流和回流,导致此处出现脱流和回流的原因是,从蜗道里以旋转方式流到出口管里的流体,由于惯性的作用,仍要保持旋转的流动态势。

4.2 性能分析

利用 FLUENT 软件计算离心泵内流场不仅能够计算流体在离心泵内流场运动的特性,还可以结合传统的泵水力估算方法,考虑容积损失、轮盘摩擦损失以及轴、轴承和密封等部件消耗的机械损失等,估算泵的外特性。而试验不仅是检验离心泵结构设计能否满足要求的手段,也是验证计算分析方法是否可行的依据。根据需要,对所研究高速超低比转速离心泵做水力试验,测得了泵的扬程、轴功率及效率随流量变化的数据。将试验结果与计算结果进行比较,扬程、轴功率及效率比较曲线图如图2、图3、图4所示。

在比较试验结果与计算结果之前,先来介绍试验状态与计算状态之间的差别。在模拟计算时,计算模型包括诱导轮、离心轮和蜗壳。将诱导轮进口面作为介质的进口,假设介质垂直进入诱导轮进口面,进口静压及总压均为0.3MPa。而实际试验时泵的主要组件包括:垂直于轴的90度进口管、诱导轮、离心轮和蜗壳共四部分。试验泵工作时,介质以体积流量垂直进入进口管,进口静压及总压均为0.3MPa。这样,由于进口管是垂直于诱导轮进口面安置的,而且,介质经过进口管后直接打在高速旋转的轴的圆柱面上,在进入诱导轮之前,水已经受到轴的高速旋转作用而被强制旋转,所以进入诱导轮进口时,水流方向已不完全垂直于诱导轮进口面。而且,由于进

口管的摩擦损失以及 90 度转角和高速绕轴造成的冲击损失，水在进入诱导轮进口时，静压及总压均已低于 0.3MPa，尤其是静压变化较大。

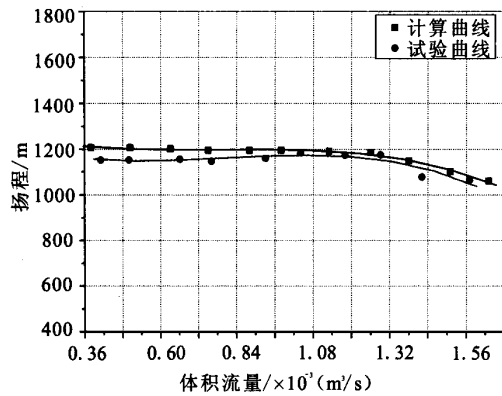


图 2 扬程-流量比较曲线

Fig.2 Comparison of head-flux curves

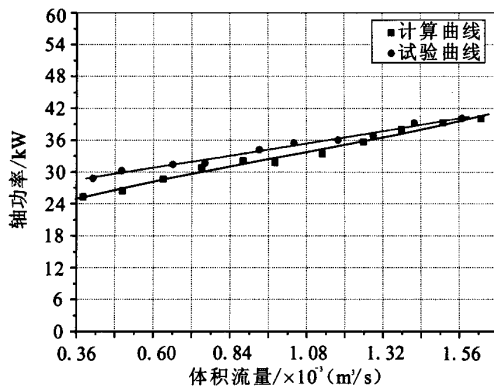


图 3 轴功率-流量比较曲线

Fig.3 Comparison of power-flux curves

从三幅比较曲线图可看出，无论是扬程、轴功、效率，计算曲线和试验曲线在趋势上比较一致。而且，三对曲线均在大流量时更趋向一致。

比较图 2 中试验所得扬程-流量曲线与计算曲线可知，计算扬程略高于试验扬程，两条扬程-流量曲线的误差基本在 0.08MPa~0.4MPa。小流量时的误差较大，基本上计算扬程高于试验扬程 5%左右，而流量较大时，计算扬程误差较小，误差为 1%。

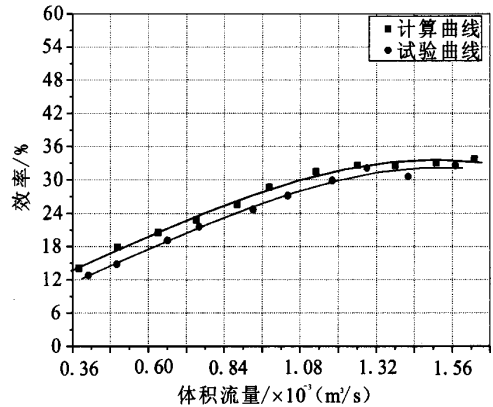


图 4 效率-流量比较曲线

Fig.4 Comparison of efficiency-flux curves

图 3 是试验轴功率曲线与计算轴功率曲线的比较图。可知，各流量点上，试验轴功率均大于计算轴功率。但总体来说，试验曲线比较满意，试验轴功率随着流量的增大上升趋势比较缓慢，不易发生电机过载现象，而计算轴功率曲线则稍陡，以至于在小流量时，轴功率低于试验轴功率较多，而随着流量的增加计算轴功率上升较快，计算轴功率很接近于试验轴功率。这是因为超低比转速离心泵，转速高而流量小，轴、轴承及密封等消耗功率较一般离心泵中轴、轴承、密封消耗大。而计算时，采用的经验系数多数仍是按照一般的中、高比转速离心泵的经验系数选取的，故计算有偏差。

从图 4 中可以看出，计算效率-流量曲线与试验曲线趋势一致。在数值上计算效率整体上略高于试验效率，和扬程曲线及轴功率曲线一样，在大流量时两条曲线比在小流量时更加接近。在小流量点出现最大偏差时，计算效率值大约比试验效率高出 3.1%，随着流量的增大，偏差逐渐减小，计算效率基本上只比试验效率高不到 1%，两条曲线比较吻合。

泵外特性的试验曲线和计算曲线比较分析的结果表明，采用 FLUENT 软件模拟分析超低比转速离心泵内流场并计算泵的扬程，并结合传统泵水力计算方法，计算离心泵外特性的方法可行。

(下转第 62 页)

采集系统处一点接地以有效地抑制干扰。

4.5 利用软件技术抑制干扰

利用软件技术抑制干扰也是测量系统常用手段之一。如数字滤波技术、信号检测技术及“看门狗”技术等等在软件中的应用同样起到抑制干扰的作用。

5 结论

通过对火箭发动机试验缓变测量系统中干扰的来源、干扰的方式及抑制方法的介绍,为缓变参数测量系统中的干扰提供了一些解决的方案。

正确的电缆铺设和接地也是消除和减少噪声源的重要因素,针对不同的干扰源利用信调器和软件技术等不同方式均达到了良好地有效抑制干扰的作用。

参考文献:

- [1] 邱宗明,等.精密仪器电路[M].西安:西安理工大学出版社,1999,12.
- [2] 赵万明.液氧/煤油发动机试车主要参数测量方法研究[J].火箭推进,2006,32(5).

(编辑:陈红霞)

(上接第 30 页)

5 结论

(1) 运用 FLUENT 计算泵整个内流场,通过计算得到了高速超低比转数离心泵内部流动的主要特征,为了解其内部流动规律提供了依据。

(2) 运用 FLUENT 计算泵内流场,并结合传统水力计算方法估算泵外特性的分析方法可行,试验曲线和计算曲线吻合。

(3) 在泵设计过程中结合运用 FLUENT 计算泵内流场流动规律,可以减少反复次数,缩短设计周期,节约成本。

参考文献:

- [1] 袁寿其.低比速离心泵理论与设计[M].北京:机械工业出版社,2001.
- [2] 关醒凡编.现代泵技术手册[M].北京:宇航出版社,1995.
- [3] 朱祖超.超低比转速离心泵设计方法[D].博士学位论文.浙江大学,1997.
- [4] 陈次昌,杨昌明.轴流泵端壁区域流动三维粘性数值计算[J].工程热物理学报,2003,24(4).
- [5] 刘成胜,李仁年.螺旋离心泵的外特性试验与流场数值分析[J].火箭推进,2005,31(5).

(编辑:陈红霞)