

基于 CFD 的离心泵相似定律研究在农业中的应用

孟凡英,李春芳

(辽宁工程技术大学 机械工程学院,辽宁 阜新 123000)

摘要:离心泵是应用十分广泛的流体输送设备,广泛用于农业中的输送水及灌溉之中,在农业生产中的地位更是毋庸置疑。由于流体在机内的运动情况十分复杂,利用已有泵的数据作为设计的依据,相似定律的合理应用问题应运而生。基于 CFD 方法,对离心泵内部流场进行了数值模拟,分析了离心泵内部流动现象和规律,同时对变工况情况也进行了数值模拟,分析得出相似定律的适用条件,并得出一些相似的理论公式,对离心泵的设计起到指导作用,对农业生产起到事半功倍的作用。

关键词:CFD;离心泵;相似定律;农业应用

中图分类号:TH311

文献标识码:A

文章编号:1002-2767(2011)10-0126-04

相似定律是叶片泵理论及设计应用中的一个十分重要的定律,但由于在相似定律中存在着大量的经验和假设公式,在实际应用中有一定的局限性,国内外很多学者已经通过对叶片泵的大量实验,得出当转速在 60%~100% 内变化时,在农业中应用相似定律进行换算泵性能时产生的误差在 5% 以内的结论^[1]。该文则是应用 CFD 方法,通过模拟在转速变化时,离心泵内部流场的变化,得出相似定律的应用范围,并以相似定律为基础,简要介绍了离心泵的相似条件,得出了相似离心泵的流量、扬程和比转速间的关系,为农业中泵的生产与调节提供了依据,并为农业生产提供一些理论指导。

1 相似定律的基本理论

相似原理有三点表述:相似性质、相似准则之间的关系和判断相似的条件。

1.1 相似性质

彼此相似的现象,它们的同名相似准则数必定相等。其中,主要的相似准则数有:

努谢尔特准则: $Nu = \frac{hl}{\lambda}$; 表征壁面法向无量纲过余温度梯度的大小,反映对流换热的强弱。

雷诺数: $Re = \frac{ul}{\nu} = \frac{\rho ul}{\mu}$; 表征了流体流动时惯性力与粘滞力的相对比值。其大小反映了流态对换热的影响。

普朗特准则 $Pr = \frac{v}{a}$ 。普朗特准则又叫做物性准则, Pr 值的大小反映了流体的动量传递能力和热量传递能力的相对大小。

格拉晓夫准则: $Gr = \frac{g\Delta t al^3}{\nu^2}$ 。表征了流体

自然对流流动时惯性力与粘滞力的相对比值。其大小反映了自然对流流态对换热的影响。

1.2 相似准则间的关系

相似准则数一般表示成 Nu 数的函数形式,并根据实际情况进行表示:

无相变受迫稳态对流换热,且当自然对流不可忽略时,准则关联式为:

$$Nu = f(Re, Pr, Gr)$$

无相变受迫稳态对流换热,若自然对流可以忽略不计,准则关联式为:

$$Nu = f(Re, Pr)$$

对于空气, Pr 可以作为常数,无相变受迫稳态对流换热,准则关联式为

$$Nu = f(Re)$$

自然对流换热,其准则关联式为:

$$Nu = f(Gr, Pr)$$

按照上述关联式的内容整理实验数据,就能得到反映现象变化规律的实用关联式,也就解决了实验数据整理的问题。

1.3 判断相似的条件

判断现象相似的条件有:同类现象,单值性条件相似,同名的特征准则相等。其中单值性条件包括:几何条件、物理条件、边界条件、时间条件。

几何相似:存在几何相似倍数;速度场相似:对应速度成比例;稳态温度场相似(空间对应点上过余温度成比例);非稳态温度场相似(时间对应瞬间、空间对应点上过余温度成比例)。

物理相似:同类的物理现象之中,影响物理现象的所有物理量场分别相似,就构成了物理相似。物理量场的相似倍数间有特定的制约关系,体现这种制约关系,是相似原理的核心。但同时要注意物理量的时间性和空间性。

收稿日期:2011-05-15

第一作者简介:孟凡英(1961-),女,辽宁省本溪市人,学士,教授,从事流体机械工程和热能动力工程的性能分析及节能改造研究。E-mail:chunfanglee@163.com。

1.4 利用相似定律时实验数据的整理方法

首先在实验时测定相似准则中包含的全部物理量(其中的物性由实验系统中定性温度确定);其次,将实验结果整理成准则关联式;最后,就可以将实验结果推广应用到相似的现象。

在安排模型实验时,为了保证实验设备中的现象(模型)与实际设备中的现象(模型)相似,必须保证模型与原型现象单值性条件相似,而且同名的已定准则数值上相等。

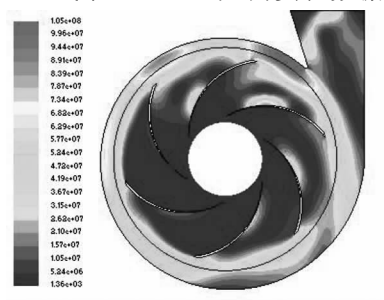
在整理数据时,通常习惯于将准则函数整理成幂函数的形式:

$$Nu = CRe^n$$

$$Nu = CRe^n Pr^m$$

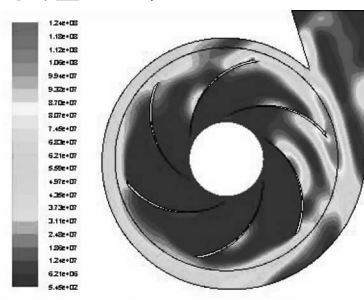
$$Nu = C(GrPr)^n$$

式中, C, n, m 是由实验数据确定的量。通常



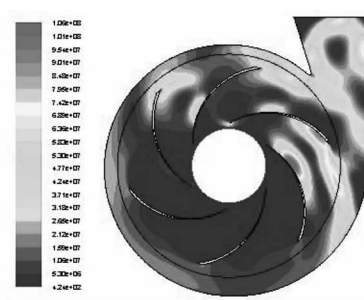
Contours of Dynamic Pressure (pascal)

图 1 2 900 r·min⁻¹时的动压



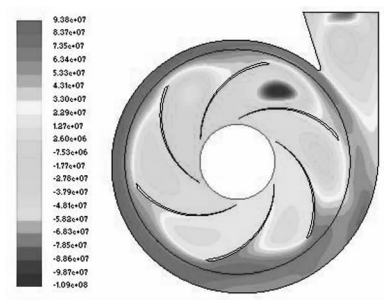
Contours of Dynamic Pressure (pascal)

图 2 2 500 r·min⁻¹时的动压



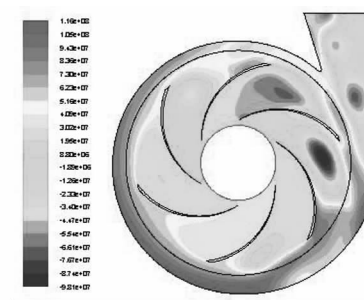
Contours of Dynamic Pressure (pascal)

图 3 1 500 r·min⁻¹时的动压



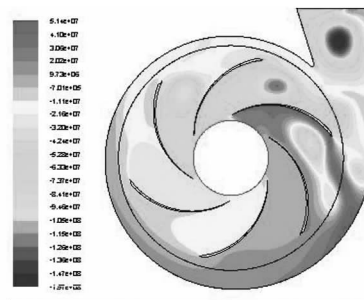
Contours of Total Pressure (pascal)

图 4 2 900 r·min⁻¹时的全压



Contours of Total Pressure (pascal)

图 5 2 500 r·min⁻¹时的全压



Contours of Total Pressure (pascal)

图 6 1 500 r·min⁻¹时的全压

此处只截取部分图说明转速变化时对离心泵内部流场的影响(见图 1~图 6),给出了不同转速下离心泵内部流场的动压和全压分布。可以看出,不同转速下叶轮内的动压分布基本相同,包括各叶片进口背面的低压区和叶片工作面上高压区的形状和面积大小。二者压力均由吸入口到排出口逐渐上升,其中最小压力出现在叶轮进口附近,最大压力出现在蜗壳出口附近,相同半径时工作面的压力大于叶片背面的压力。蜗壳的动压分布则有些不同,总要是设计流量是动压分布比较均匀,动压梯度较小。同样,各转速下叶轮内的总压分布比较相似。而蜗壳内的总压分布则存在着

将实验结果以对数坐标的形式表现出来,直观而又形象,便于实验数据的整理及后续的相关运算。

2 数值模拟结果与分析

该文采用 FLUENT 软件,在双参考坐标系下,利用有限体积法对雷诺时均 Navier-Stokes 方程进行数值离散,选用标准 k-s 湍流模型,SIMPLEC 方法求解,对离心泵内部流场进行了数值模拟。

首先模拟的是离心泵模型设计工况下的内部流场,设计工况下流量为 $Q_0 = 50 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,转速为 $2900 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,并以降 20% 为限,在其内和其外各选一个进行模拟。该研究就 2500 和 1500 r·min⁻¹进行模拟,并将结果与设计工况进行比较,得出相似定律的使用范围。

一些差异。随着转速的减小,蜗壳内的总压分布越来越不均匀且总压梯度也越来越大。整体来看,各模型间的流场非常相似,没有特别大的差异,这说明该研究的流场计算是基本正确的,因为叶片泵的相似定律是建立在泵的几何相似和运动相似的基础上的^[2]。

由图 3 和图 6 可知,无论动压还是全压图与前两个均有所不同。动压图,由于转速的降低,整个流场动压均较低,且在叶片末端的背面没有出现较大的动压,以偏离理论,蜗壳处压力分布不均匀。全压图中,蜗壳处又出现较小压力回流,同时压力在整个叶片中分布及其不均匀,说明此次极

低转速模拟失败,这也说明比例定律的相似理论

只能在降速 20% 的范围内应用。

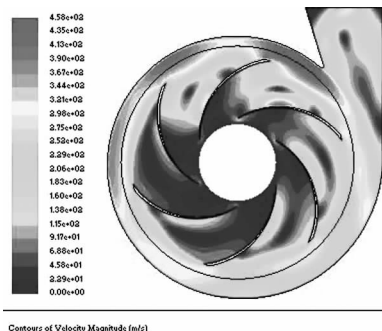


图 7 2 900 r·min⁻¹时的速度

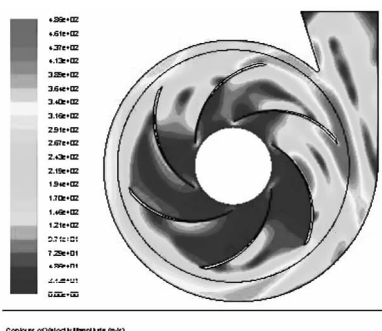


图 8 2 500 r·min⁻¹时的速度

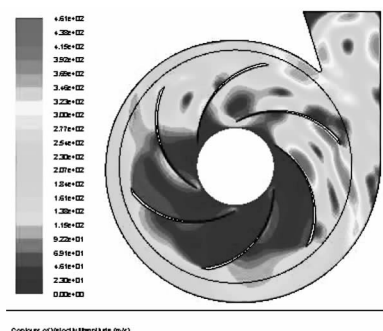


图 9 1 500 r·min⁻¹时的速度

从图 7 和图 8 可以看出,这两个模型叶轮和蜗壳处速度分布很相似,叶轮进口到出口的速度逐渐增大,进口的速度梯度相对较小,出口的速度梯度相对较大。蜗壳中的流速变化不大,但都出现了低速流的扰动,且形状相似,说明了比例定律的成立。由于叶片之间的相对流动存在轴向旋涡,叶片工作面的相对速度比背面的相对速度小,实际结果与理论分析结果一致。离心泵叶轮的作用就是把机械能转化为流体的动能,而蜗壳的功能就是收集从叶轮出来的高速液体,将动能转化为压能。结合泵内部流场的压力和速度分布图来看,模拟的结果符合叶轮和蜗壳的设计原理。

而图 9 则出现了些不同,部分叶道内流动速度大,而部分叶道内流动速度又很低,分布不均匀速度梯度变化太大,流体流动不稳定。而且在叶片末端的背面没有出现较大的速度,与理论情况不符。蜗壳处速度分布不均匀,与前两个模型有较大区别。

由此看出,在额定工况下流体的流动最为稳定,随着转速的增大或减小,流体的流动往往会出现各种不利情况,会造成能量的损失,不利于泵的工作,所以应尽量采取各种措施保证泵在靠近额定工况下运行。

3 相似定律在农业中的应用

我国是一个农业生产大国,靠农业养活着十几亿的人口,因此农业生产中的节能环保早已被提上日程。而水泵无论在灌溉、输送水等方面均发挥着不可忽略的作用。水泵由于内部流场的复杂性,模拟及设计均有一定的困难。而人们为了解决这些实际问题,也采取了很多方法,例如数学方法或实验方法。但是,在许多情况下,用数学方法去解决实际问题,只能停留在问题的表面阶段,不能解决一个个的具体实际的问题。但是实验方法也有它自身的缺点,虽然通过实验所得到的结果很具体,但是应用起来有一定的局限性,只能应用于跟实验条件完全相同的情况,实验结果的应用受到了很大的限制。

此时,如果为得到比较全面的实验数据而盲目进行实验,不仅浪费人力、物力,也很难把实验数据整理出来。在此基础之上,运用相似理论来研究和使用的数据,用较少的实验得出在比较广阔的范围空间中推广使用的结果。所谓的相似理论就是研究现象之间彼此相似的条件及彼此相似的现象的性质的理论,在相似理论中,把实验方法和数学方法结合起来,取长补短,以弥补数学方法所得方程式过于广泛而限于空洞,实验方法所得的结果过于狭窄而使用价值不大的缺点。

现在运用相似定律可以很容易解决这个问题,并用相似理论来设计离心泵,为农业生产服务。

离心泵一般的设计要求是:在满足其额定流量、扬程、转速、功率、效率和汽蚀余量等要求的基础上设计出各部件的几何形状和尺寸参数,并进行投产前的性能试验以便为泵的改进和完善提供准确而可靠的试验数据。若直接进行投产,可能会产生一些意想不到的缺陷,相似设计为这类问题提供了行之有效的方法。选用性能好且与所设计的泵相似的模型泵,对其过流部分的全部尺寸进行放大或缩小的设计。

相似定律的应用条件不但要同一系列的离心泵的各过流部件相应的线性尺寸间的比值相等,相应的角度也要相等;此外相似机之间的运动及动力也要相似。通过以上得出在相似工况下,原型与模型之间的扬程、流量及功率满足相似定律:

流量关系:相似工况点之间的流量关系,可由公式得出:

$$\begin{aligned} \frac{Q_n}{Q_m} &= \frac{\eta_{in} \epsilon_n \pi D_{2n} b_{2n} V_{\gamma 2n}}{\eta_{im} \epsilon_m \pi D_{2m} b_{2m} V_{\gamma 2m}} \\ &= \frac{n_n}{n_m} (D_{2n}/D_{2m}) = \lambda_i^3 (n_n/n_m) \end{aligned}$$

此式成立的条件是两机通过同一流体介质,且尺寸相差不太悬殊,此时容积效率及排挤系数相等即 $\eta_{in} = \eta_{im}$ 及 $\epsilon_n = \epsilon_m$ 并且 $\frac{b_{2n}}{b_{2m}} = \frac{D_{2n}}{D_{2m}}$;

扬程关系:相似工况点之间的扬程关系,可由下式计算:

$$\frac{g_n H_n}{g_m H_m} = \frac{\eta_{hn} u_{2n} v_{u2n}}{\eta_{hm} u_{2m} v_{u2m}} = (n_n/n_m)^2 (D_{2n}/D_{2m})^2$$

$$= \lambda_l^2 (n_n/n_m)^2$$

式中诸项也作出了类似的考虑。

功率关系满足:

$$\frac{N_n}{N_m} = \frac{N_n}{N_m} = \frac{N_n}{N_m} = \frac{N_n}{N_m}$$

一般可认为 $\eta_n = \eta_m$ 予以消去

于是可以得出:

$$\frac{N_n}{N_m} = \frac{\rho_n}{\rho_m} (n_n/n_m)^3 (D_{2n}/D_{2m})^5$$

其中离心泵主要参数为:

实际扬程:扬程是指单位重量流量的流体通过泵所获得的有效能量,是衡量泵的工作能力的重要性能参数。

$$H = \frac{p_{out} - p_{in}}{\rho g}$$

式中 p_{out} 为蜗壳出口总压; p_{in} 为叶轮进口总压。

$$\text{水力效率: } \eta_h = \frac{H}{H_t}$$

式中 H_t 为理论扬程,其计算公式见文献[3]。

$$\text{容积效率: } \eta_v = \frac{1}{1 + 0.68 n_s^{-2/3}}$$

总效率:

$$\eta = \frac{1}{\frac{1}{\eta_h \eta_v} + \frac{\Delta P_d}{P_e} + 0.03}$$

其中 P_e 为输出功率, $P_e = \rho g Q H$; ΔP_d 为圆盘摩擦损失,计算方法见文献[4]。

通过这些公式,可以在不用耗费大量人力、物

力的情况下按照相似条件设计出农用水泵的模型,并进行实验校核,符合要求后即可进行制造安装,对农业生产起到事半功倍的作用。

4 结论

该文主要基于 CFD 方法,采用 FLUENT 软件,在双参考坐标系下,利用有限体积法对雷诺时均 Navier-Stokes 方程进行数值离散,选用标准 k-s 湍流模型,SIMPLEC 方法求解,对离心泵内部流场进行了数值模拟,得出结论:

以 FLUENT 软件为仿真计算平台,利用计算流体动力学方法对某一离心泵进行额定工况和变工况的数值模拟。通过计算结果分析和比较,揭示了离心泵内部流场的流动现象和规律,从而证明了利用 CFD 方法验证离心泵内部流动状态实用、方便和快捷。

进行变转速模拟时,转速下降在 20% 以内时,离心泵内部流场是非常相似的,比例定律成立。但当降速超过 20% 时,压力和速度分布极其不均匀,内部流动偏离理论。即泵只允许在降速 20% 以内使用比例定律进行换算。

在农业生产中利用相似定律可以合理而方便地设计离心泵,也可以作为运行、调节和选用型号等的理论依据和使用工具,并为我国的农业生产提供一定的指导作用,因此相似定律在农业中具有不可忽视的作用,应用十分广泛。

参考文献:

- [1] 杨金杯,李微.同一型号离心泵流量与转速关系的实验研究[J].福建化工,2004(4):18-20.
- [2] 杨晓珍.不同转速对离心泵性能影响的实验研究[D].长沙:湖南农业大学,2004.
- [3] 王福军.计算流体动力学分析[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [4] 蔡增基,龙天渝.流体力学泵与风机[M].北京:中国建筑工业出版社,1999.

CFD-based Similarity Law of Centrifugal Pump Application in Agriculture

MENG Fan-ying, LI Chun-fang

(Mechanical Engineering College of Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000)

Abstract: Centrifugal pump is the application of a very wide range of fluid transfer equipment, widely used as irrigation and water being transported in agriculture, the position in agricultural production is no doubt. Since the movement of fluid in the machine is very complex, and used of existing data as a pump design basis, the rational application of similarity laws had came into being. In this paper, simulated the flow field of centrifugal pump based CFD, the flow phenomena and laws of centrifugal pump were analyzed, meanwhile the variable condition was simulated situation, the applicable conditions of similarity law were obtained and concluded the theoretical formula of similarity law, played a guiding role for the design of agricultural pumps and a multiplier role on agricultural production.

Key words: CFD; centrifugal pump; similarity law; agricultural applications