

径向柱塞泵流场仿真中UDF的分析与实现

李少年^{1,2}, 魏晓鹏^{1,2}, 魏列江^{1,2}

(1.兰州理工大学 能源与动力工程学院,甘肃 兰州 730050;

2.甘肃省液压气动工程技术研究中心,甘肃 兰州 730050)

摘要:CFD方法在产品问题分析与研究方面具有一定的优越性,在通过CFD方法对径向柱塞泵进行流场分析与优化过程中发现,由于径向柱塞泵工作原理及其刚体运动关系的独特性,流场仿真分析需要借助CFD动网格技术和用户自定义函数(UDF)才能进行。该文着重推导了径向柱塞泵柱塞相对于转子做往复运动的速度表达式,并对其进行正交分解处理,编写柱塞相对于转子运动的UDF程序,结果显示UDF程序编写方法及程序是合理的、正确的,研究结果对径向柱塞泵内部流场的分析奠定基础。

关键词:径向柱塞泵;运动;速度;UDF程序

中图分类号:TH137.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1008-0813(2017)05-0019-04

Analysis and Implementation of UDF in Flow Field Simulation for Radial Piston Pump

LI Shao-nian^{1,2}, WEI Xiao-peng^{1,2}, WEI Lie-jiang^{1,2}

(1.School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050,China;

2. Research Center for Hydraulic and Pneumatic Engineering, Gansu Province, Lanzhou 730050,China)

Abstract:The CFD analysis method has certain superiority in product analysis and research. It was found that the uniqueness of the radial piston pump in the working principle and rigid body motion, the flow field of simulation and analysis needed the CFD dynamic grid technology and user-defined function (UDF) when analyzing and optimizing the flow field of radial piston pump by CFD method. In this paper, the velocity expression of the piston relative to the rotor is deduced and orthogonally decomposed, and the UDF program of the piston relative to the rotor is programmed. The results of simulation show that the method and UDF program is reasonable and correct, which will lay the foundation for analyzing the internal flow field of the radial piston pump.

Key words:radial piston pump; motion; velocity; UDF program

0 引言

径向柱塞泵具有排量大、工作压力高等特点,泵内

收稿日期:2017-03-02

基金项目:国家自然科学基金项目(51565026);甘肃省高等学校科研项目(2015A-044)

作者简介:李少年(1977-),男,安徽泗县人,副教授,硕士,主要从事流体传动与控制方面的科研与教学工作。

部流场较复杂,且特征参数难以测量。CFD分析方法能够得到流场中任意位置上任意物理量的值,使得所求问题简化便于分析^[1]。在实际应用中,CFD分析方法能够减少实验次数,进而降低实验成本。在径向柱塞泵的流场分析中,若要真实反映内部流场特征,则既要定义柱塞和轴套孔相对配流窗口做绕配流轴的旋转运动,也要定义柱塞在转子转动过程中相对于转子做径

(5)对于提升起重类的设备,如系统是开式系统控制方式,设备在满载全速下降过冲中整个系统的发热量往往最大的;

(6)对于散热器的选择,水冷和风冷的区别在于前者冷却效果好,噪声低,但需要额外的水资源;后者风机运行的噪声比较高,同时受环境温度的制约,散热器的尺寸规格较大。具体项目要根据实际设备的布置情况综合考虑权衡。

4 结论

本文对液压驱动设备发热和散热情况进行了归纳和分析,并作出了可执行的方法上的探讨。在十几年

的从业过程中,据此方法进行的散热系统设计,在实践中也都得到很好的验证,系统稳定。

参考文献

- [1] 官忠范. 液压传动系统[M]. 北京:机械工业出版社,1997.
- [2] 雷天觉. 液压工程手册[M].北京:机械工业出版社,1990.
- [3] 陈栋. 铺管船用 Davit 吊的液压控制系统[J]. 液压与气动, 2013,(8).
- [4] 徐灏. 机械设计手册第5卷[J].北京:机械工业出版社,2000.
- [5] Parker. Air Oil Cooler Water Oil Cooler Pump and Accessories [Z].Paker, 2017.
- [6] 李壮元. 液压元件与系统[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [7] 章宏甲. 液压传动[M].北京:机械工业出版社,2000.

向往复运动的速度函数^[2],这在CFD中就需要同时运用到滑移网格和动网格技术,目前在径向柱塞泵流场分析研究中,对UDF中柱塞速度的分析与编程描述较少。本文以排量为1000mL/r,自摆角式变量径向柱塞泵为研究对象,就如何在UDF中定义柱塞的往复运动及函数的建立及UDF程序编写等进行了研究。

1 单个柱塞相对于转子的运动分析

在径向柱塞泵中,柱塞与转子一起做旋转运动,同时柱塞相对于转子做径向往复运动^[3-4]。由于偏心距的存在,柱塞往复运动的速度不是匀速变化的,本文首先对单个柱塞与滑靴的组合相对于配流轴和转子的运动过程进行分析,简化后单个柱塞机械结构如图1所示。

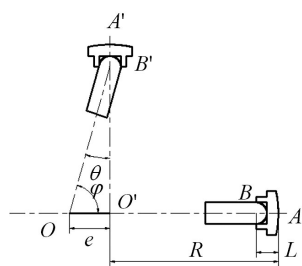


图1 径向柱塞泵单个柱塞结构示意图

图1中,A为径向柱塞泵柱塞上死点位置,A'为排油区任一位置,O'、O分别为定子环和转子的旋转中心,B、B'为滑靴与柱塞在两个位置的铰接点,R为柱塞泵定子半径,L为连杆长度,e为偏心距,φ为柱塞滑靴组从A运动到A'时转子的转角。为了清晰看出柱塞滑靴组运动过程,图中转子与定子没有画出。

当柱塞滑靴组位于A点时, $OB = e + R - L$

当柱塞滑靴组位于A'点时,

$$OB' = e \cos \phi + O'B' \cos \theta$$

$$O'B = O'B' = R - L$$

即 $OB' = e \cos \phi + (R - L) \cos \theta$

所以柱塞走过的径向位移可以表示为:

$$s = OB - OB'$$

即 $s = e + R - L - e \cos \phi - (R - L) \cos \theta$ (1)

在 $\triangle OO'B'$ 中,根据正弦定理得出

$$\sin \theta = \frac{e}{R - L} \sin \phi$$

由此得到

$$\cos \theta = \sqrt{1 - \sin^2 \theta} = \sqrt{1 - \left(\frac{e}{R - L} \sin \phi\right)^2}$$
 (2)

将(2)式按牛顿公式展开,因 $e/(R - L) \ll 1$,所以在牛顿展开式中略去高次项,则柱塞相对于缸体的径向

速度可以通过 $V_r = \frac{ds}{dt}$ 计算得到^[5],即:

$$V_r = \frac{d}{dt} \left[e + R - L - e \cos \phi - (R - L) \left(1 - \frac{1}{2} \frac{e^2}{(R - L)^2} \sin^2 \phi \right) \right]$$

将上式化简,最终得出单个柱塞相对转子的径向速度表达式:

$$V_r = e\omega \sin \phi \left[1 + \frac{e}{R - L} \cos \phi \right]$$
 (3)

式中 ω —— 转子角速度,单位为rad/s。

2 任一柱塞相对于转子的运动分析

本文研究的径向柱塞泵有11个柱塞,它们沿转子圆周均匀分布,使用上面的推导方法可以得到剩余10个柱塞相对于转子的径向运动速度表达式。

由于其余柱塞与第一个柱塞所在初始位置存在一定夹角,也可看作第一个柱塞旋转一定转角后与其余柱塞的原始位置重合,因此只需在第一个柱塞径向速度表达式中加入任一柱塞在初始状态时相对于第一个柱塞初始位置所在坐标轴的初始夹角,则得到其余柱塞的径向速度表达式如下:

$$V_r = e\omega \sin(\phi + \beta) \left[1 + \frac{e}{R - L} \cos(\phi + \beta) \right]$$
 (4)

式中 β —— 任一柱塞在运动前相对于第一个柱塞初始坐标轴的初始夹角。

3 径向柱塞泵流场仿真中流道模型的建立

根据本文研究对象径向柱塞泵的工作原理、机械结构以及相关几何尺寸,利用三维建模软件UG绘制该径向柱塞泵的内部流道模型,如图2所示。

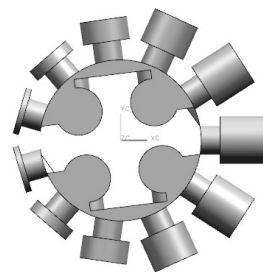


图2 径向柱塞泵内部流道模型

该径向柱塞泵内部流道模型由进油口、吸油窗口,排油口、排油窗口,1个三角升压槽,1个三角泄压槽和11个柱塞所在的空间组成。

在流场仿真软件Fluent中分析内部流道时,进、排油口,吸、排油窗口以及三角槽相对泵体是固定的,所有柱塞绕坐标原点做逆时针旋转。由于柱塞腔中油液与配流窗口中油液是时时连通的,柱塞腔底面与配流窗口轴面之间存在数据交换,因此将柱塞与配流窗口

设置为滑移网格。

当做旋转运动的柱塞位于排油区时,柱塞腔是不断压缩的,即柱塞做压缩运动,压缩速度的大小用本文推导的速度公式表示,速度方向垂直柱塞端面并且指向坐标原点;当柱塞越过排油区,进入吸油区,这时柱塞向外拉伸,柱塞腔容积是增大的,所以速度方向由坐标原点指向柱塞端面。

综上所述,若要对径向柱塞泵进行流场仿真分析,就需要同时运用滑移网格和CFD动网格技术,在动网格中定义柱塞的变形区域以及网格重构方法,并通过编写UDF程序来实现柱塞的往复伸缩运动。

4 柱塞相对于转子的运动在UDF中的实现

本文UDF程序将通过C语言和动网格中的宏定义来编写。根据图1和图2分析知道,柱塞往复运动的速度方向不是沿某一恒定坐标轴做变速运动,而是柱塞在 x - y 平面内一边做旋转运动,一边相对于转子做往复直线运动,因此在编写UDF程序时不能直接使用本文的柱塞速度公式,需要对柱塞的速度表达式进行速度正交分解。结合径向柱塞泵工作原理及其吸排油口分布,其正交分解过程如图3所示,将每一时刻的速度表达式都分解为沿 x 轴和沿 y 轴的速度分量,图上速度分量分别表示为 V_x, V_y 。

在UDF中,分别用 $vel[0]$ 、 $vel[1]$ 、 $vel[2]$ 来表示沿 x 轴、 y 轴、 z 轴方向的速度分量。因为柱塞在 z 轴方向没有运动,所以分解后 z 轴上的速度分量为0,即 $vel[2]=0$ 。

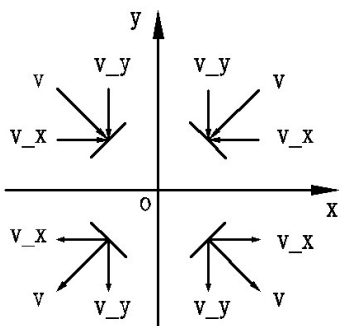


图3 径向柱塞泵柱塞速度正交分解示意图

柱塞在转子旋转一个周期运动过程中,既有压缩又有拉伸过程,因此将速度正交分解过程划在为四个象限,每个象限分别定义速度分量的大小和方向。这里定义速度分量沿 x 轴和 y 轴正方向为正,反方向为负。

由图3可知,公式(4)的余弦分量为 x 轴方向速度分量,正弦分量为 y 轴方向速度分量,先不考虑正负值,

以绝对值的形式写出来,则其分量表达式的基本形式如下式所示:

$$vol[0] = \left| e\omega \sin(\phi + \beta) \left[1 + \frac{e}{R-L} \cos(\phi + \beta) \right] \cos(\phi + \beta) \right| \quad (5)$$

$$vol[1] = \left| e\omega \sin(\phi + \beta) \left[1 + \frac{e}{R-L} \cos(\phi + \beta) \right] \sin(\phi + \beta) \right| \quad (6)$$

根据径向柱塞泵柱塞在不同区域实际速度的符号,结合 $\phi + \beta$ 角的正弦、余弦值的符号,可以在式(5)、式(6)上冠以正负号,写出每一象限的实际速度分解表达式。

第一象限中,柱塞腔处于压缩状态, x 轴和 y 轴方向上速度分量均应为负,并且有 $0^\circ \leq \phi + \beta \leq 90^\circ$,由于角 $(\phi + \beta)$ 的正、余弦函数值在第一象限均为正,所以在 x 、 y 坐标轴上的速度分量表示为:

$$vol[0] = -e\omega \sin(\phi + \beta) \left[1 + \frac{e}{R-L} \cos(\phi + \beta) \right] \cos(\phi + \beta) \quad (7)$$

$$vol[1] = -e\omega \sin(\phi + \beta) \left[1 + \frac{e}{R-L} \cos(\phi + \beta) \right] \sin(\phi + \beta) \quad (8)$$

第二象限中,柱塞腔仍处于压缩状态, y 轴方向上速度分量为负,但 x 轴方向上速度分量为正,并且有 $90^\circ \leq \phi + \beta \leq 180^\circ$,由于角 $(\phi + \beta)$ 的正弦函数值在第二象限为正,余弦值为负,所以在 x 、 y 坐标轴上的速度分量表示为:

$$vol[0] = -e\omega \sin(\phi + \beta) \left[1 + \frac{e}{R-L} \cos(\phi + \beta) \right] \cos(\phi + \beta)$$

$$vol[1] = -e\omega \sin(\phi + \beta) \left[1 + \frac{e}{R-L} \cos(\phi + \beta) \right] \sin(\phi + \beta)$$

从上述两式可以看出,第二象限的速度分量表达式与第一象限的表达式即式(7)、式(8)完全相同。

第三象限中,柱塞腔将处于拉伸状态, x 轴和 y 轴方向上速度分量均为负,并且有 $180^\circ \leq \phi + \beta \leq 270^\circ$,角 $(\phi + \beta)$ 的正、余弦函数值在第三象限均为负。

第四象限中,柱塞腔仍处于拉伸状态, y 轴方向上速度分量为负,但 x 轴方向上速度分量为正,并且有 $270^\circ \leq \phi + \beta \leq 360^\circ$,角 $(\phi + \beta)$ 的正弦函数值在第四象限为负,余弦值为正。

所以按照上述方法,第三象限、第四象限也可以写出柱塞速度分量表达式,经过分析知道,其表达式与式(7)、式(8)完全相同,在此不再列出。

由上面的分析过程可知,无论柱塞处于哪个象限,在 x 、 y 坐标轴上的速度分量表达式分别是一致的,这将简化了UDF程序的逻辑结构。

在Fluent流场仿真软件中,可以使用宏定义DEFINE_CG_MOTION来指定随时间变化的刚体运动的线速度和角速度。至此,可以实现所有柱塞做刚体运动

的UDF程序,下面以第二个柱塞为例,其UDF程序编写如下。

```
#include "udf.h"
DEFINE_CG_MOTION(piston2,dt,vel,omega,time,
dtime)
{
real e=偏心距;
real n=转子转速;
real R=柱塞泵定子半径与连杆长度差值;
real phi=柱塞相对于坐标轴的初始角度值;
phi=phi*M_PI/180;
vel[0]=-e*n*sin(n*time+phi)*(1+e*cos(n*time+phi)/
R)*cos(n*time+phi);
vel[1]=-e*n*sin(n*time+phi)*(1+e*cos(n*time+phi)/
R)*sin(n*time+phi);
vel[2]=0.0;
NV_S(omega,=,0.0);
}
```

柱塞做旋转运动的速度在边界条件中单独定义,在Fluent中编译并加载所有UDF程序,得到径向柱塞泵柱塞分别在0ms,1.5ms,3ms和4.5ms时的运动状态,如图4、图5、图6和图7所示,结合该径向柱塞泵工作原理,分析知道仿真过程中柱塞泵的运动状态是合理的、正确的,说明上述对于柱塞运动的速度分析、分解及UDF程序编写的是合理、正确的。

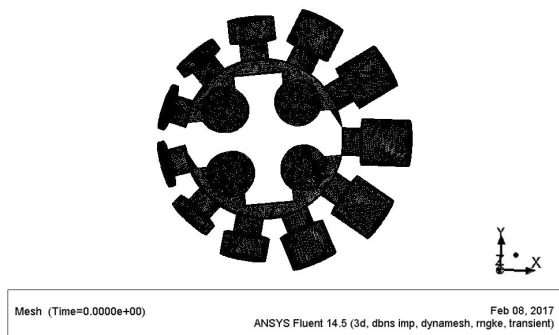


图4 径向柱塞泵柱塞在0ms时的运动状态

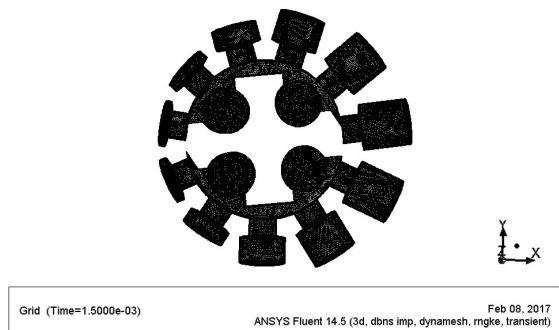


图5 径向柱塞泵柱塞在1.5ms时的运动状态

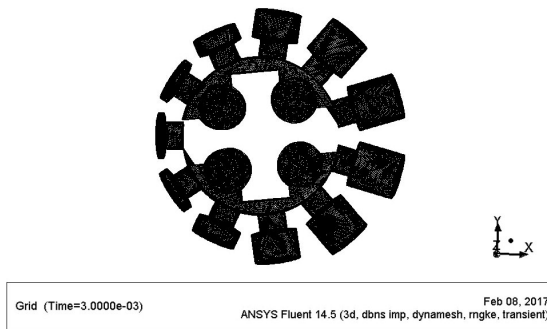


图6 径向柱塞泵柱塞在3ms时的运动状态

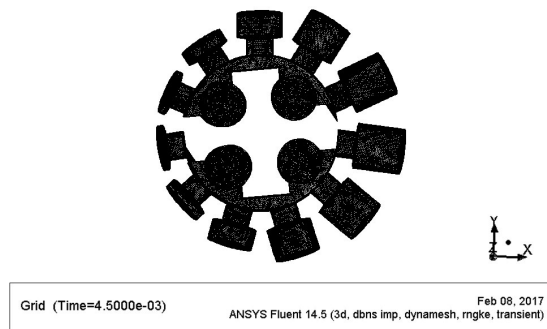


图7 径向柱塞泵柱塞4.5ms时的运动状态

5 结论

通过上述对于径向柱塞泵流场仿真分析中CFD应用的研究,得到结论如下:

(1)径向柱塞泵任一柱塞相对于转子做往复伸缩运动的速度公式可以通过在第一个柱塞径向运动速度公式中加入夹角形式得到。

(2)建立径向柱塞泵流场仿真流道模型,通过柱塞运动分析知道,在进行流场仿真分析时,需要同时运用滑移网格和CFD动网格技术,在动网格中定义柱塞的变形区域以及网格重构方法,并通过编写UDF程序来实现柱塞的往复伸缩运动。

(3)UDF中对速度进行正交分解,在四个象限中、 x 、 y 坐标轴上的速度分量是一致的,编写任一个柱塞的UDF程序运行知道,这种处理方法编写的程序是合理、正确的,这在Fluent软件中做径向柱塞泵流场分析奠定了基础。

参考文献

- [1] 隋洪涛,李鹏飞,等.精通CFD动网格工程仿真与案例实战[M].北京:人民邮电出版社,2013.
- [2] 易金玲,贾跃虎,等.基于Fluent的径向柱塞泵内流道流场分析[J].流体传动与控制,2012,(2):28-30.
- [3] 李壮云.液压元件与系统[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [4] 贾跃虎,王荣哲,安高成.新型径向柱塞泵[M].北京:国防工业出版社,2012.
- [5] 杨国来,田丽红,张有亮,等.大排量径向柱塞泵主要结构参数及流量脉动研究[J].液压气动与密封,2015,(2):13-15.