

基于 Fluent 的径向柱塞泵流场模拟仿真研究

高佳星

(中海石油(中国)有限公司湛江分公司)

摘要: 径向柱塞泵具有压力高、流量大、效率高等特点,在海上油田液压系统中多有应用,针对径向柱塞泵工作时会有振动、噪音和泄漏等问题,本文采用理论分析与模拟仿真相结合的办法,对径向柱塞泵滑靴副进行了研究。论文详细介绍了径向柱塞泵的原理及应用,以理论分析和数值模拟为研究方法,借助 Fluent 软件对靴副内流场进行仿真分析,得出滑靴副中心油腔存在的压力突变和低压漩涡现象是引起滑靴副在工作时产生振动和噪音原因的结论。

关键词: 径向柱塞泵;滑靴副;Fluent;

一、引言

海上油田生产中介质传输、压力传递多需要用到泵类,而液压泵因其具有高压、大流量、高效率、结构紧凑等优点^[1],是液压系统动力原件的首选。然而在油田生产运行中发现,尽管径向柱塞泵发展趋于成熟,但其仍然存在着噪声、振动以及泄漏的情况,对使用场地周围环境带来了一定的影响^[2]。

滑靴副作为径向柱塞泵三大摩擦副之一,由于设计原理以及本身结构的因素,在滑靴副实际工作过程中,在工作中也存在着振动与噪音以及泄漏的现象。

近年来,国内外学者对径向柱塞泵做了一些列研究,英国教授虎克对柱塞泵滑靴的侧倾原因研究发现,影响滑靴侧倾的因数主要有两个,一是离心负载,二是球铰链摩擦^[3]。潘杜卫等人对滑靴副的侧倾动态建立模型,利用计算机的仿真能力,对滑靴副的侧倾状态进行了动态研究,结果表明,球铰摩擦副是影响滑靴副动性能的因素之一^[4]。然而目前对径向柱塞泵噪声研究还比较匮乏。

因此,本文运用流体分析软件 FLUENT 对滑靴副进行仿真,研究其不同压力下,滑靴副内部流场的压力特性,并结合速度矢量图,对滑靴副振动以及噪音的产生原因进行探究。

二、径向柱塞泵的原理

柱塞泵按柱塞的排列和运动方向不同,可分为径向柱塞泵和轴向柱塞泵。由于其原理均是通过改变密闭容积的体积来实现液压油的吸、排动作^[5]。而径向柱塞泵由于其参数高、效率高、寿命长、单位功率重量轻等特点,被广泛应用于高压、大流量、大功率的系统中流量需要调节的场合^[6]。

径向柱塞泵在工作过程中,柱塞头部与定子内表面之间存在高速的相对滑动,其速度大小通常在 5m/s 到 10m/s 之间,导致滑靴副之间具有很高的 pv 值,因此需要采取一定的措施对柱塞泵头部进行保护。目前径向柱塞泵滑靴的类型是将柱塞的头部加工成圆球状,滑靴通过开设球槽与柱塞的圆

球状相连接。该类型滑靴的特点是在工作过程中可以摆动角度范围较大,对空间的要求比较小,但在高速运转时容易发生翻转,因此,在工作时需要与其他限位部件配合使用。

三、滑靴副数学模型建立

建立滑靴副物理模型的关键问题之一就是对滑靴副油膜厚度的确定,为了能够最真实的贴近实际问题,在物理建模前首先要对油膜厚度进行计算。图 1 为滑靴副缝隙流动示意图,径向柱塞泵滑靴副油膜可以看作是油液在两平行圆盘缝隙中流动,油液由中心油腔向缝隙四周流动,建立圆柱坐标。其中 r_1 为滑靴中心油腔半径, r_2 为封油环外半径, r 为支承封油面油环中任意半径, P_s 为中心腔压力。

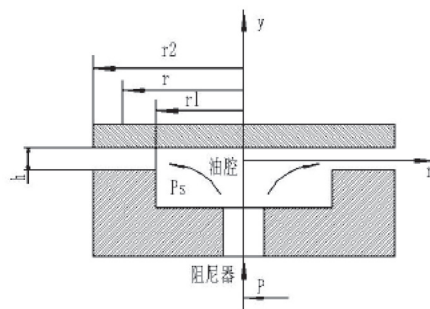


图 1 滑靴副缝隙流动示意图

根据平板缝隙理论计算间隙泄漏量;通过阻尼器的压力—流量特性确定支撑油膜的最大液阻 R_h ;根据流体力学长阻尼孔缝隙流动的相关原理^[7],确定阻尼孔液阻 R_O ,可以得到滑靴对钉子的液压反力 F_{st} :

$$F_{st} = \frac{a_1}{a_2 + a_3 h^3} P \quad (1)$$

其中:

$$a_1 = 3\pi(r_2^2 - r_1^2)d_o^4, \quad a_2 = 6(\ln r_2 - \ln r_1)d_o^4 \\ a_3 = 128l_o \quad (2)$$

根据牛顿第二运动定律,我们可以得到柱塞滑靴组件的动力学方程:

$$\frac{\pi d^2 P}{4 \cos \theta} - \frac{a_1}{a_2 + a_3 h^3} P = m \left(R + \frac{L}{2} \right) \omega^2 \quad (3)$$

其中:

F_t 为液压油对滑靴的压力, d 为柱塞直径, θ 为滑靴与柱塞轴线的夹角, R 为转子的半径, L 为滑靴的长度。

具体到本次研究的滑靴尺寸中 $r_1 = 22\text{mm}$, $r_2 = 36\text{mm}$, $d_0 = 0.8\text{mm}$, $l_0 = 15.6\text{mm}$ 。计算得到 $h=h_0=0.068\text{mm}$

四、滑靴副的建立模型及仿真分析

(一) 滑靴副模型的建立

本次研究对象为某液压厂生产的排量为 160ml/r 的径向柱塞泵, 其主要参数见表 1:

表 1 主要参数

额定压力 (Mpa)	额定转速 (r/min)	额定 功率 (Kw)	排量 (ml/r)	使用寿命 (h)
31.5	1450	83	160	1000

运用三维建模软件 solidworks 对径向柱塞泵滑靴及滑靴副流道模型进行物理建模, 如图 2 所示

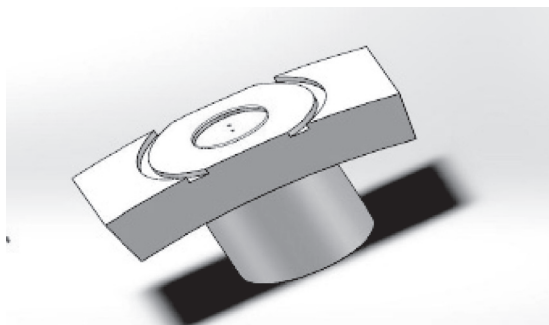


图 2 径向柱塞泵滑靴物理建模

此次仿真的对象为滑靴副内流场流道模型, 将滑靴副流道模型由滑靴副中抽出, 如图 3 为滑靴副内流场模型。

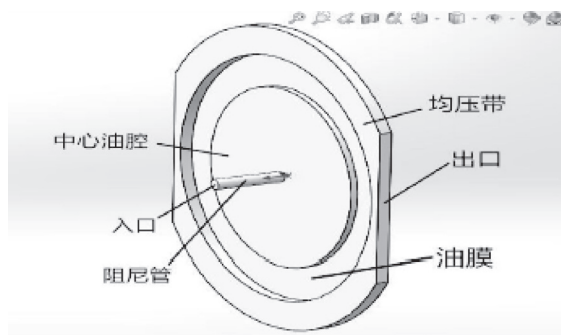


图 3 滑靴副内流场模型

(二) 网格划分及边界条件设置

滑靴副在实际工作中内部液压油的流动状况是十分复杂的, 而仿真研究受到计算机硬件的局限性, 无法将全部实际运动状况进行模拟, 因此对其它因素进行简化来计算。

(1) 假设流体是由连续分布的流体质点所组成, 符合连

续介质模型;

(2) 仿真时不考虑工作过程中滑靴及定子的热变形;

(3) 将滑靴副内流场液压油看作是是不可压缩的;

(4) 由于本次研究不考虑温度变化所带来的影响, 因此将液压油设定为动力粘度为常数的牛顿流体;

(5) 考虑到滑靴副本身结构不大, 因此液压油自身重力对整体影响不大, 将其忽略不计。

本次径向柱塞泵划分网格的总体思路为自下而上、逐步关联的方法, 为了保证整体网格质量, 在 ICEM 中采用六面体结构手动划分网格, 网格质量如图 4 所示。

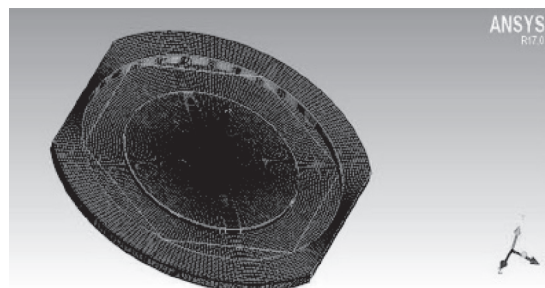


图 3.4 滑靴副网格模型

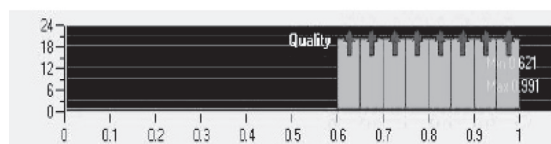
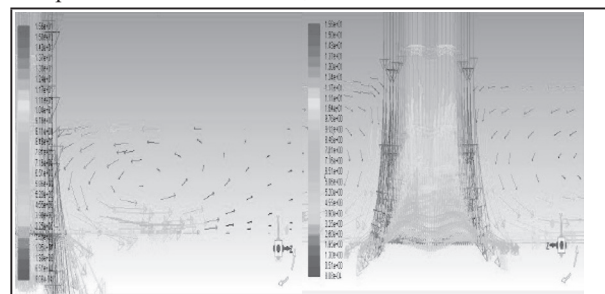


图 4 网格质量图

选择压力入口作为入口边界条件, 其大小为径向柱塞泵的入口压力; 选择压力出口作为边界条件, 由于出口与大气相同, 其值选标准大气压数值作为出口压力大小。滑靴副流道的其它表面设置为墙边界, 采用墙函数处理。在滑靴副内流道中同时存在着层流与紊流两种状态, 故在 FLUENT 物理模型中选择标准 k-ε 湍流模型。材料为液压油, 其密度为 870 kg/m³, 动力粘度 $\mu=0.0261$ 。

五、滑靴副仿真结果分析

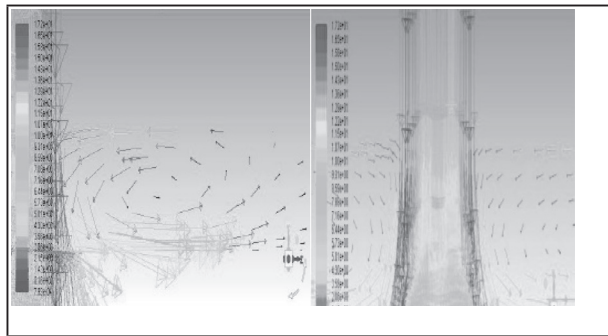
为了探究滑靴副产生振动和噪音的原因对滑靴副中心油腔几何中心进行仿真分析, 得出入口压力为 21Mpa、23Mpa、26Mpa 下的速度矢量截面图, 如图 5、图 6、图 7 所示。



(a) 漩涡处速度矢量

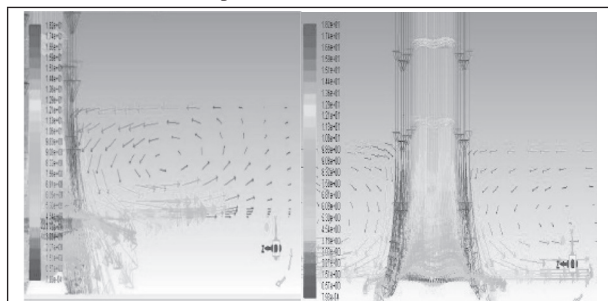
(b) 交汇处速度矢量图

图 5 压力为 21Mpa 中心油腔速度矢量图 (单位: m/s)



(a) 漩涡处速度矢量 (b) 交汇处速度矢量图

图6 压力为23Mpa中心油腔速度矢量图(单位: m/s)



(a) 漩涡处速度矢量 (b) 交汇处速度矢量图

图7 压力为26Mpa中心油腔速度矢量图(单位: m/s)

由速度矢量图中可以看出, 液压油流动到达中心油腔顶部时(定子内表面), 在流动方向上出现了断面, 沿阻尼管方向的速度突然降至零, 将液压油流动的动能转化为了液压油的挤压能, 从而导致压力的急剧升高, 形成液压冲击, 因此引起了滑靴副产生振动和噪音; 同时而由于中心油腔顶部速度方向产生大角度变化, 大量的液压油会沿着定子内表面向四周流动, 势必就会造成中心油腔滑靴表面液压油流动的相对减少, 这样就会产生液压油在中心油腔内部, 由紧贴定子内表面向滑靴表面流动进行补充, 进而导致低压漩涡的产

生。低压漩涡的产生, 势必会引起径向柱塞泵在运行过程中的声响与振动, 这也是滑靴副产生振动与噪音的另一个原因。

六、结论

通过对径向柱塞泵进行模拟仿真分析, 得到了以下结论:

液压油在滑靴副中心油腔有高压冲击现象和低压漩涡现象, 这两种现象的存在就是滑靴副产生振动和噪音的主要原因, 且随着外负载的增加, 入口压力增大, 高压冲击和低压漩涡现象会越来越明显, 这将导致工作中振动和噪音更加剧烈。

参考文献:

- [1] 路甬祥. 流体传动与控制技术的史进展与展望 [J]. 机械工程, 2001, 37 (10): 1-9
- [2] 汤何胜, 李晶, 闫耀保. 轴向柱塞泵滑靴副功率损失特性 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2017 (2): 361-368.
- [3] Iboshi Naohiro, Yamauchi Atsushi. Characteristics of a slipper bearing for swash plate type axial piston pumps and motors [J]. Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, Hen, 1985, 51 (472): 4306-4312.
- [4] 潘社卫, 金朝铭, 陈卓如, 张守礼. 液压马达摩擦副的计算机辅助设计 [J]. 液压与气动, 1997 (6): 13-14.
- [5] 郭桐, 赵升吨, 刘辰, 张晨阳. 径向柱塞泵结构发展综述 [J]. 机床与液压, 2015, 43 (13): 156-162.
- [6] 沈兴全, 吴秀玲. 液压传动与控制 [M]. 北京国防工业出版社, 2005.
- [7] 周小军. 基于 AMESim 液压系统泄漏仿真与故障诊断研究 [D]. 国防科学技术大学, 2012.

