

# 位移-电反馈型插装式比例节流阀主阀 流场数值模拟分析\*

俞 滨, 孔祥东\*, 李亚星, 姚 静, 刘莉华  
(燕山大学 机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:**为掌握位移-电反馈型插装式比例节流阀主阀腔内流体流动区域的流场分布情况等基础问题,将 CFD 技术应用到该阀主阀内部三维流场分析中。应用数值模拟技术进行了三维网格划分,得到了位移-电反馈型插装式比例节流阀在两种不同开口度下流体的压力、流速及流线情况,对流场仿真结果进行了对比分析。研究结果揭示了该阀主阀腔内的流场分布情况,给出了其能量耗散的具体位置,为其后续优化研究奠定了理论基础。

**关键词:**位移-电反馈;插装式比例节流阀;流场分析

中图分类号:TH137.52\*2;TH122

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)11-1291-04

## Numerical simulation analysis of main valve of displacement-electricity feedback cartridge proportional throttle valve

YU Bin, KONG Xiang-dong, LI Ya-xing, YAO Jing, LIU Li-hua

(College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** In order to master the basic problems of the flow field distributions of main valve of displacement-electricity feedback cartridge proportional throttle valve, the CFD method was used in the simulation of the three dimensional flow field of main valve of proportion cartridge valve. After the analysis of simulation, the pressure, velocity and streamline distributions were established in different openings of the valve. The flow field distributions were obtained and the energy dissipation location was gotten. The research results provide theoretical basis for the structure optimization.

**Key words:** displacement-electricity feedback; cartridge proportional throttle valve; flow field analysis

### 0 引 言

随着工业技术的发展,锻压机、注塑机、压铸机等大型液压机在国内的应用越来越多,这类机械具有空载时速度快、重载时速度低的特点,因此对于调速系统的控制元件要求很高。插装结构的比例节流阀具有几倍于普通比例调速阀的通流能力,且结构简单、成本低、动静特性好和可靠性高<sup>[1-3]</sup>,对实现系统的平稳性和无级调速具有重要的意义。

现有的插装式比例节流阀工作原理主要有位移-力反馈、位移-流量反馈、三级控制型和位移-电反馈四种。位移-力反馈型利用自调节液压设计实现流量控制,其结构简单、可靠、成本低,但其控制精度受放大器和比例电磁铁的非线性、阀芯和弹簧的制造误差、摩擦力、液动力等因素的影响较大,且动态响应较低<sup>[4]</sup>;位移-流量反馈型采用液压反馈控制阀芯位置,成本低,但其特性受油温、稳态液动力、配合间隙的泄漏等因素的影响较大,一般只应用于低压<sup>[5]</sup>;三级控制型也是基

收稿日期:2011-06-09

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2009ZX04005-031);河北省自然科学基金资助项目(E2009000409)

作者简介:俞 滨(1985-),男,浙江宁波人,博士研究生,主要从事重型机械流体传输与控制方面的研究。E-mail:yb@ysu.edu.cn

通信联系人:孔祥东,男,教授,博士生导师。E-mail:xdkong@ysu.edu.cn

于位移-力反馈控制原理,增加一个放大级保证了较高的响应速度和大流量要求,但稳态特性同样受比例电磁铁位移力特性、摩擦力、液动力等因素的影响,且结构复杂。位移-电反馈型引入了电反馈闭环控制,只要位移传感器的精度足够高,阀的稳态精度就可以达到相当高的水平,相比于以上类型的插装式比例节流阀,控制精度和响应速度均较好,因此在连轧机、液压机、坦克、军舰等方面都得到了广泛的应用<sup>[6-8]</sup>。

目前,位移-电反馈型插装式比例节流阀国外已比较成熟,德国 Rexroth、意大利 Atos 等液压元件公司已将其批量生产并投入使用。国内浙江大学对位移-电反馈型插装式比例节流阀进行了一定的基础研究,山东泰丰液压股份有限公司完成了该阀的国产化设计、加工及相应测试工作,并已申请一项发明专利,但其产品性能仍不稳定,不能广泛应用于工业生产,其很大一部分原因在于对这种阀的理论研究工作不多,很多基础问题有待突破。

本研究通过研究位移-电反馈型插装式比例节流阀主阀腔内流体流动区域的压力场、速度场分布情况等基础问题,为该阀的进一步改进设计提供一定的理论参考基础。

## 1 位移-电反馈型插装式比例节流阀的工作原理

位移-电反馈型插装式比例节流阀的工作原理图如图 1 所示。该阀采用了比例阀(先导阀)控制双作用活塞缸(主阀)的结构,即通过控制活塞缸两腔的压力,实现对活塞(主阀芯)位移的直接控制。

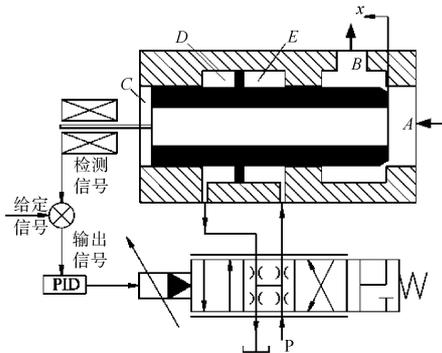


图 1 位移-电反馈型插装式比例节流阀工作原理图

位移-电反馈型插装式比例节流阀的主油路对主阀芯的作用力基本平衡,主阀芯的位移由先导阀控制 D、E 两腔的压力来控制,与主油路的流量和压力无关。通过对主阀芯位置的精确定位,控制了节流口的开度,从而实现控制流量的目的。主阀芯带有缓冲头,可以避免阀口开启和关闭时的冲击。

## 2 仿真模型的建立

### 2.1 主阀实体模型的建立

根据  $\Phi 80$  mm 通径位移-电反馈型插装式比例节流阀的实际结构尺寸,本研究用三维实体建模软件 Solidworks 建立了该阀的结构简图,如图 2 所示。该阀主要由阀套 1、阀芯 2(阀芯下端部有节流槽)、盖板 3、阀盖 4、位移传感器 5 和先导阀 6 组成。阀套 1、阀芯 2 和阀块 8 共同构成了主阀阀腔的流体流动区域 7。

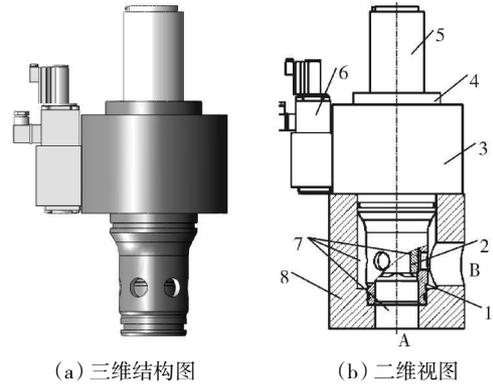


图 2 位移-电反馈型插装式比例节流阀结构图

1—阀套;2—阀芯;3—盖板;4—阀盖;5—位置传感器;6—先导阀;7—流体流动区域;8—阀块

### 2.2 流场区域模型的建立

本研究在数值分析中所要计算分析的是主阀阀腔的流体流动区域。根据流动区域的几何尺寸,本研究建立该区域三维流场模型,如图 3 所示。

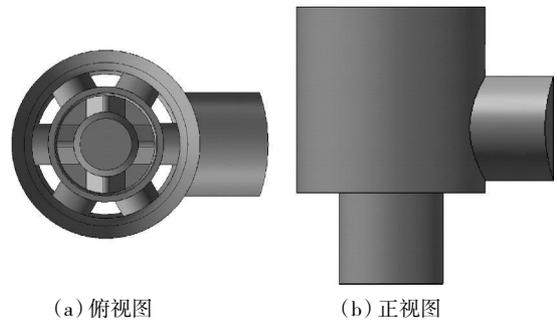


图 3 三维流场区域模型

## 3 网格划分及边界条件的设置

### 3.1 网格的划分

网格是 CFD 模型的几何表达形式,也是模拟与分析的载体。FLUENT 公司开发的配套网格划分软件 GAMBIT,可实现与 Solidworks 模型的数据交换,支持 STEP 格式文件的导入和导出,能很好地解决模型在转换时的失真问题。

本研究将主阀阀腔三维流场区域模型通过格式转换导入 GAMBIT。由于几何模型比较复杂,本研究采

用非结构化的混合网格单元 Tet / Hybrid(网格主要由四面体组成,个别位置可以有六面体、椎体或楔形体)进行网格划分,如图 4 所示。相对于结构化网格,非结构化网格计算过程复杂,但具有优越的几何灵活性,不但可以拟合任意的复杂边界外型,其随机的数据结构还有利于进行网格自适应。

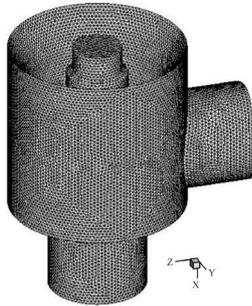


图 4 三维模型网格划分示意图

### 3.2 边界条件

(1) 计算模型: 流动状态为紊流, 流体为牛顿流体, 不可压缩, 笔者采用 RNG  $k-\epsilon$  紊流模型, 考虑热交换过程。

(2) 材料特性: 本研究选用介质为 ISOVG46 矿物油, 密度为  $890 \text{ kg/m}^3$ , 粘度为  $0.04 \text{ 094 kg/(m}\cdot\text{s)}$ 。

(3) 边界条件: 流体与壁面接触的边界为静止壁面。进出口边界条件取为压力入口和压力出口, 压差取  $0.5 \text{ MPa}$ , 出口边界处静压设为  $0$ , 回流方向垂直于边界。

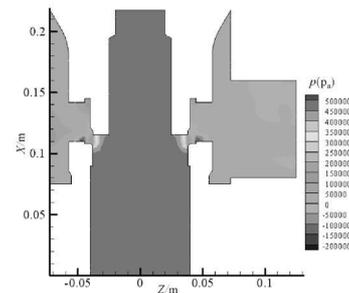
## 4 流场的仿真分析

本研究分别对开口为  $12 \text{ mm}$  和  $24 \text{ mm}$  两种情

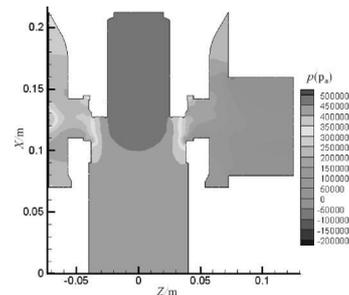
况时位移-电反馈型插装式比例节流阀三维流场进行仿真。

主阀阀腔三维流场压力分布如图 5~图 7 所示。在图 5 中, 以主阀阀腔的底面中心处为坐标原点 (以下同)。不同开口不同截面处压力分布图如图 7 所示。其中,  $Y=0$  位置处的截面图如图 7(a)、图 7(b)所示,  $X=126 \text{ mm}$  位置处 (即阀套六个通孔轴心处) 的截面图如图 7(c)、图 7(d)所示。开口为  $24 \text{ mm}$  时, 阀芯下端部的节流槽被剖到, 形成了图 7(d)中部的十字连通区域。

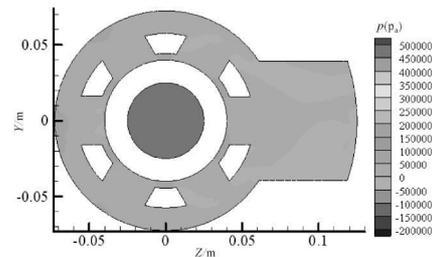
从仿真结果可以看出, 除了节流口处的压力突变, 阀套上 6 个通孔处的压力以及阀套与流道相接处, 压力变化也比较明显。节流口处的局部压降随着



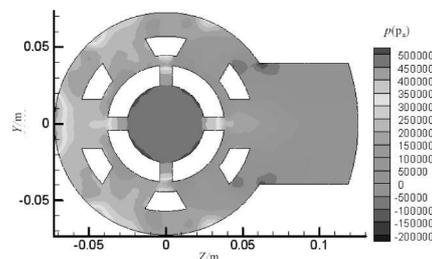
(a) 12 mm 纵截面( $Y=0$ )



(b) 24 mm 纵截面( $Y=0$ )



(c) 12 mm 横截面( $X=126 \text{ mm}$ )



(d) 24 mm 横截面( $X=126 \text{ mm}$ )

图 7 不同开口不同截面处压力分布图

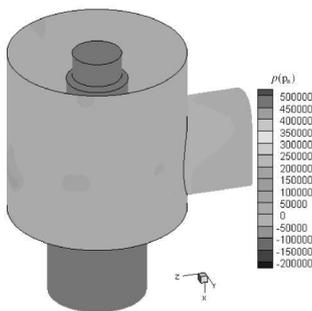


图 5 三维模型 12 mm 开口流场压力分布图

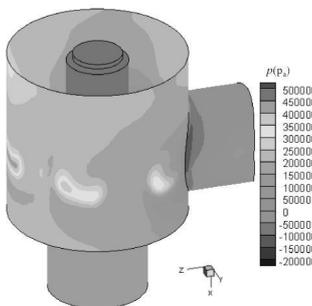


图 6 三维模型 24 mm 开口流场压力分布图

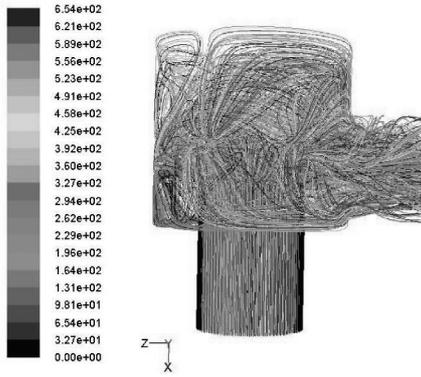


图 8 三维模型 12 mm 开口流场内部流线图

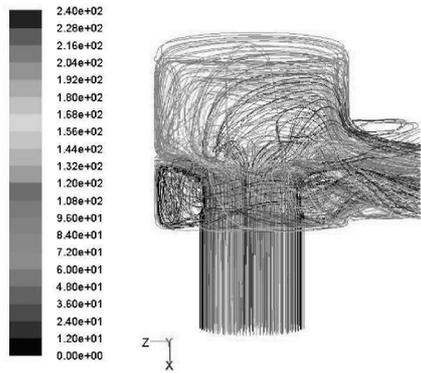


图 9 三维模型 24 mm 开口流场内部流线图

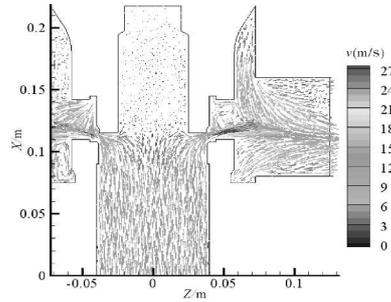
开口的增大而减小。阀套 6 个通孔对应的壁面压力明显较高,且距离流道越远,压力越高。

主阀阀腔三维流场内部流线图和速度矢量图如图 8~图 10 所示,从图 8、图 9、图 10(a)、图 10(b)的仿真结果可以看出,阀腔内部流体通过节流口,经阀套的 6 个通孔流入外围阀腔,在外围阀腔形成上下 2 个漩涡区;并且在与出口流道相对的区域内,流场漩涡区的强度更大。与阀腔其他区域流体速度相比,阀芯内腔的流体流动非常缓慢,而且形成很大的漩涡区。出口流道上方出现回流漩涡区,且随着开口增大,漩涡区域变小,能量损耗减小。

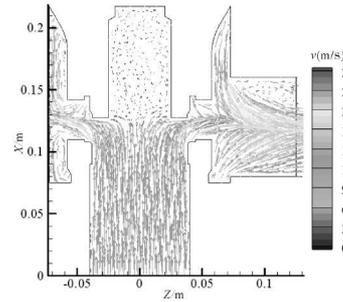
从图 10(c)、图 10(d)的仿真结果可以看出,流体在阀腔水平方向通过节流口,经阀套的 6 个通孔流入外围阀腔,碰到壁面后分别按顺时针和逆时针的方向流动,而相邻通孔流出的液流方向是相反的,这样在外围阀腔就形成了多个漩涡区。三维流场模型的搭建过程中,考虑到了阀腔中横截面上的流动、阀腔的形状和出口流道等因素对流动特性的影响,能够比较真实地反应流场内的流动情况。从仿真结果可以看出,阀腔流场的压力及速度分布不是简单的轴对称流动。

### 5 结束语

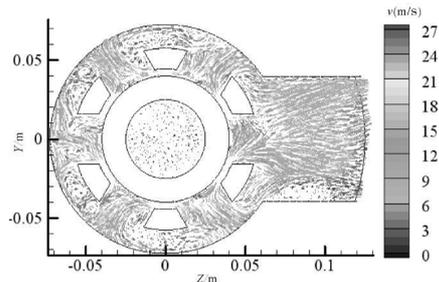
本研究通过对位移-电反馈型插装式比例节流阀主阀腔内流体流动区域进行数值模拟分析,得出 12 mm



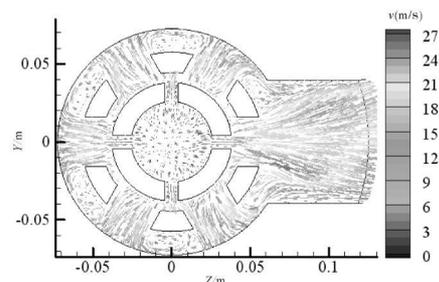
(a) 12 mm 纵截面(Y=0)



(b) 24 mm 纵截面(Y=0)



(c) 12 mm 横截面(X=126 mm)



(d) 24 mm 横截面(X=126 mm)

图 10 不同开口不同截面处速度矢量图

和 24 mm 两种不同开口度下其内部流体压力分布情况和流动特性,给出了其压力突变、速度突变所产生能量耗散的具体位置。

上述研究结果可为位移-电反馈型插装式比例节流阀结构的进一步优化设计奠定理论参考基础,后续将通过阀口形式优化、流道合理设计、先导阀和主阀匹配等方面,进一步研究减小该阀压力和流量冲击的具体方法,从而减小能量耗散,提高使用性能,为该阀的国产化研究奠定理论基础。

(下转第 1299 页)

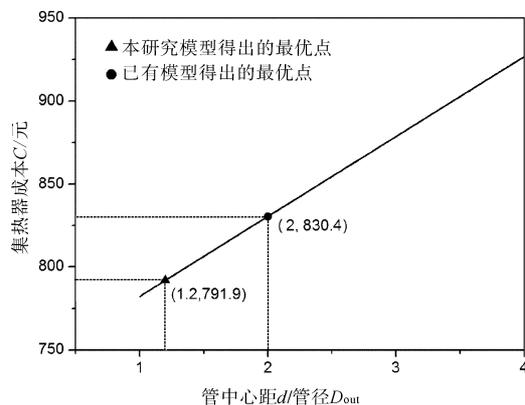


图 7 集热器总成本随管中心距比的变化

中,同时给出了已有模型得出的最优点( $d=2D_{out}$ ),对比结果表明,采用本研究模型优化管中心距后,集热器单位集热量的成本降低了 1.5%,制造成本降低了 4.6%。

## 4 结束语

(1) 本研究建立了综合考虑集热器集热性能和成本的管中心距优化模型,采用该模型对常见的真空管管外径为 58 mm 的太阳能集热器进行优化,得出的最优管中心距为  $1.2 D_{out}$ ;

(2) 与已有模型优化后的管中心距为  $2 D_{out}$  的集热器相比,利用本研究模型优化后的集热器单位集热量成本降低了 1.5%,制造成本降低了 4.6%。

## 参考文献(References):

[1] SHAH L J, FURBO S. Theoretical flow investigations of an all glass evacuated tubular collector [J]. *Solar Energy*, 2007, 81(6): 822-828.

- [2] KIM Y, SEO T. Thermal performances comparisons of the glass evacuated tube solar collectors with shapes of absorber tube [J]. *Renewable Energy*, 2007, 32(5): 775-778.
- [3] TANG R S, LI Z M, ZHONG H, et al. Assessment of uncertainty in mean heat loss coefficient of all glass evacuated solar collector tube testing [J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47(1): 60-67.
- [4] 翟辉, 代彦军, 吴静怡, 等. 大型平板型 / 真空管太阳集热器阵列排布问题研究 [J]. *太阳能学报*, 2008, 29(5): 564-568.
- [5] 何海霞, 张三明, 陈湛. 杭州地区太阳能集热器最佳倾角研究 [C]. 2010 年建筑环境科学与技术国际学术会议论文集, 2010: 80-84.
- [6] 葛洪川, 李炜, 闵子建. 储热式真空管集热器管中心距与能量收益关系的研究 [J]. *太阳能学报*, 1997, 18(3): 262-268.
- [7] 张纪波. 南宁晴天太阳辐射模型与全玻璃真空管太阳集热器最佳管间距(B/D)分析 [D]. 南宁: 广西大学物理科学与工程技术学院, 2007.
- [8] DUFFIE J A, BECKMAN W A. *Solar Engineering of Thermal Processes* [M]. John Wiley & Sons, Inc., 1980.
- [9] 宋爱国. 真空管式太阳集热器管间遮阴分析(二) [J]. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2005, 26(2): 19-22.
- [10] 宋爱国. 真空管式太阳集热器管间遮阴分析(一) [J]. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2003, 24(3): 36-39.
- [11] 宋爱国. 真空太阳集热器的入射乘积因子 [J]. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2003, 24(2): 37-40.
- [12] American Society of Heating, Refrigeration, and Air-Conditioning Engineers. *Hand Book of Fundamentals* [M]. New York, ASHARE, 1978.
- [13] 宋爱国, 贾加顺. 真空管式太阳热水器热性能研究(二) [J]. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2001, 22(2): 43-48.

[编辑: 李 辉]

(上接第 1294 页)

## 参考文献(References):

[1] 吴根茂. 新编实用电液比例技术 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006: 159-166.

[2] LIU Song, YAO Bin. Automated modelling of cartridge valve flow mapping [C] // IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. AIM, 2005: 789-794.

[3] XIE Ling, PREMACHANDRAN C S, MICHELLE C. Optimization of a microfluidic cartridge for Lab-on-a-chip (LOC) application and bio-testing for DNA/RNA extraction [C] // Proceedings-Electronic Components and Technology Conference, 2008: 1310-1316.

[4] WANG Xin-hua, CHANG Jia-qing. Analysis and emula-

tion of steady-state characteristic for water hydraulic proportional throttle valve [C] // Proceeding 2009 IEEE 10th International Conference on Computer-Aided Industrial Design and Conceptual Design, 2009: 1090-1095.

- [5] 陈柏金. 锻造液压机组液控系统研究 [D]. 武汉: 华中理工大学材料科学与工程学院, 2000: 3-4, 72-74.
- [6] 唐香珺. 锻造液压机插装类元件动态特性理论与实验研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学机械工程学院, 2008: 62-63.
- [7] 陈 绍. 阀控液压转向系统的传真与分析 [J]. *现代制造技术与装备*, 2009(2): 77-78.
- [8] 黄人豪, 濮凤根. 二通插装阀和电液比例技术在中国重大工程和装备中应用 [J]. *流体传动与控制*, 2004(1): 23-31.

[编辑: 张 翔]