

矿用潜水电动液压控制闸阀设计及应用

陈 威^{1,2} 李军霞^{1,2}

(1. 太原理工大学 机械工程学院, 山西 太原 030024; 2. 山西省矿山流体控制工程技术研究中心, 山西 太原 030024)

摘 要: 针对煤矿排水用电动阀门控制复杂、遇突水时易失灵等缺陷,设计了一种能在水下工作的矿用潜水电动液压控制闸阀,介绍了该闸阀的机械结构组成和工作原理;利用功率键合图理论和 MATLAB 软件对矿用潜水电动液压控制闸阀液压缸开启过程的动态性能进行仿真分析,结果显示液压缸开启过程中产生的速度波动值为基准值的 4% 左右,此速度波动对潜水电动液压控制闸阀的液压系统影响不大。利用 Pro/Engineer 和 FLUENT 研究了潜水电动液压控制闸阀在水中全开时阀管路内流场的变化规律,从仿真结果看该闸阀内流场运行参数基本稳定,能满足煤矿井下应急排水的要求。

关键词: 电动液压控制闸阀; 功率键合图; 动态性能; 流场; 煤矿

中图分类号: TD82 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2013)04-0089-04

Design and Application of Mine Submersible Electric and Hydraulic Controlled Gate Valve

CHEN Wei^{1,2}, LI Jun-Xia^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Shanxi Provincial Research Center of Mine Fluid Control Engineering Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: According to the complicated control of a mine electric valve applied to the mine water drainage and the ineffective when was in water and other defects, a mine submersible electric and hydraulic controlled valve was designed and the mechanical structure composition and working principle of the valve was introduced. A power bond graph theory and MATLAB software was applied to the simulation analysis on the dynamic features of the open process of the hydraulic cylinder applied in the mine submersible electric and hydraulic control valve. The results showed that the speed fluctuation value occurred in the open process of the hydraulic cylinder was about 4% of the base value and the speed fluctuation would have less influence to the hydraulic system of the mine submersible electric and hydraulic control valve. The Pro/Engineer and FLUENT was applied to study the variation law of the flow field within the valve and pipeline when the mine submersible electric and hydraulic control valve was in water. The simulation results showed that the parameters operated in the flow field of the valve were basically stable, could meet the requirements of the emergency water drainage in underground mine.

Key words: submersible electric and hydraulic controlled gate valve; power bond graph; dynamic features; flow field; coal mine

0 引 言

随着我国煤炭工业的发展,煤炭开采深度逐渐加大,矿井巷道距奥陶纪灰岩含水层逐渐接近,深藏地下的奥灰水突水概率也随之增加^[1]。煤矿排水用电动闸阀存在以下缺陷:①控制较复杂,需配备有电气驱动、动力传动及位置传感等装置^[2],出现故障的概率也较大;②遇到突水或水淹没排水设备时,极易引起电动闸阀故障,从而造成电动闸阀打不开,

导致排水系统瘫痪,给煤矿企业造成重大危害。针对以上缺陷,笔者设计出了一种能够完成在水下开启和关闭操作的矿用潜水电动液压控制闸阀^[3],且对该闸阀的开启过程和内部流场进行了特性分析。

1 潜水电动液压控制闸阀工作原理

1.1 机械部分设计

矿用潜水电动液压控制闸阀的机械部分与电动闸阀相比减少了传动装置,由液压缸、闸阀契板、丝

收稿日期:2012-12-09;责任编辑:赵 瑞

作者简介:陈 威(1979—),男,河南周口人,硕士研究生。Tel:18734131805, E-mail: tybst0139@163.com

引用格式:陈 威,李军霞. 矿用潜水电动液压控制闸阀设计及应用[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(4): 89-92.

杠和传动螺母等组合而成,机械部分结构如图1所示,传动螺母为传力机构,将启闭阀门的螺旋运动转为直线运动;液压油缸为执行元件,其液压控制系统控制防爆电动机的转向带动液压油缸的伸缩,从而实现潜水闸阀启闭功能。丝杠和接近开关使潜水电液控制闸阀具有双重限位功能,可有效避免阀门发生契死现象^[4]。

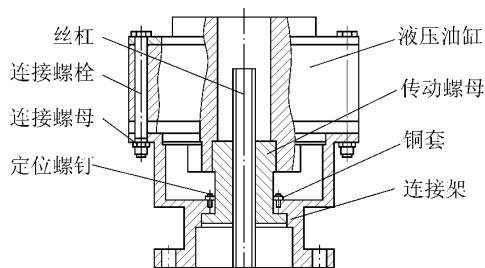


图1 潜水电液控制闸阀机械部分结构

1.2 液压控制系统原理

液压控制系统采用对称分布结构,由双向定量泵、溢流阀、液压控制单向阀等组成。液压控制原理如图2所示。该液压控制系统以防爆潜水电机为动力驱动双向泵,再经过相应的阀块带动双液压油缸,防水型接近开关通过限定液压油缸伸缩的长短位置达到控制闸阀开度大小的目的。

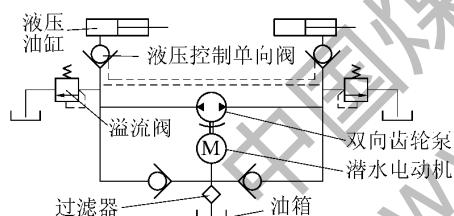


图2 液压控制原理

液压系统中溢流阀能调整液压泵的出口压力,即控制闸阀启、闭力的大小,从而控制开启和关闭闸阀契板速度避免发生水锤现象^[5]。气囊置于液压执行元件一侧通过管路与液压控制系统的油箱连接,有效地将液压油与水或空气隔离。潜水电液控制闸阀置于水下时,驱动油缸动作使油箱中的油液减少,气囊在水压的作用下体积扩大,填补由于油箱中油液的减少而形成的真空,从而保证潜水电液控制闸阀能长时间置于水下工作。

2 液压控制系统的动态性能分析

2.1 液压油缸伸出时的功率键合图

根据潜水闸阀液压控制系统的工作原理,利用功率键合图理论^[6-7],建立如图3所示的液压油缸

伸出过程的功率键合图模型。在此模型中影响液压控制系统性能的因素为:溢流阀的预紧力 S_e ; 溢流阀阀芯质量 I_1 和液压油缸杆、活塞的质量 I_2 ; 溢流阀阀芯有效作用面积 A_1 、液压油缸无杆腔有效作用面积 A_2 、液压油缸有杆腔的有效作用面积 A_3 ; 泵的泄漏液阻 R_x ; 溢流阀的溢流液阻 R_f ; 溢流阀阻尼孔液阻 R_k ; 液压控制单向阀的液阻 R_{d1} ; 背压阀的液阻 R_{d2} ; 能量转换器 TF; 溢流阀的调节系数 $1/s$; 液压油缸作用力 F ; 直动式溢流阀阀芯调压弹簧等效柔度 C_1 ; 液压泵出口至直动溢流阀阀口的液容 C_1 、液压油缸无杆腔及其管路的液容 C_2 、液压油缸有杆腔及其管路的液容 C_3 ; 液压泵的流量 S_f 。图3中“0”为0结点,“1”为1结点,指示线上1—22为22个因果关系。

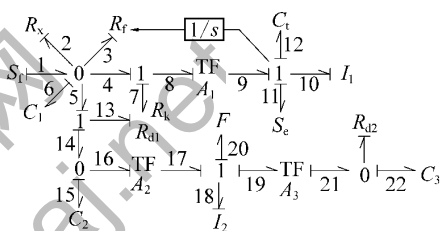


图3 液压油缸伸出时的功率键合图模型

以上各影响元素的取值如下。

1) 容性元。液容 $C_i = V/E$ ($i = 1, 2, 3$); 其中: V 为液压容腔的体积; E 为液压油的体积弹性模量。液压系统中管直径 10 mm, 长 2 m, 液压油的弹性模量 700 MPa, 故得 C_1 、 C_2 、 C_3 分别为 1.61×10^{-13} 、 1.56×10^{-12} 、 $1.24 \times 10^{-12} \text{ m}^5/\text{N}$; $C_1 = 1.83 \times 10^{-3} \text{ m/N}$ 。

2) 感性元。 $I_1 = 0.6 \times 10^{-2} \text{ kg}$, $I_2 = 15 \text{ kg}$ 。

3) 阻性元。 R_x 、 R_f 、 R_k 分别取 7.5×10^9 、 6.3×10^9 、 $2 \times 10^9 \text{ kg}/(\text{m}^4 \cdot \text{s})$, 由于液压系统对称性, 则 $R_{d1} = R_{d2} = 1.5 \times 10^{10} \text{ kg}/(\text{m}^4 \cdot \text{s})$ 。

4) $S_f = 7 \text{ L/min}$, 溢流阀阀芯的预紧力为 120 N, 采用的液压油缸内径为 80 mm, 活塞杆外径为 40 mm。 $F = 80430 \text{ N}$, $A_1 = 1.1 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, $A_2 = 5.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, $A_3 = 3.8 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 。

2.2 液压油缸伸出时的状态方程

根据图3所建立的潜水电液控制闸阀液压控制系统液压油缸伸出时的功率键合图模型, 结合功率键合图的有关理论^[8-9], 可判定该液压控制系统是一个6阶系统, 确定的6个状态变量物理意义如下: 溢流阀的阀芯位移 x_1 ; 从液压定量泵出口到直动溢流阀阀口这一腔内补偿油液压缩量和管道变形量的液压油总容积 x_2 ; 溢流阀阀芯动量 x_3 ; 液压油

无杆腔及其管路腔中用来补偿油液压缩量的液压油总容积 x_4 ; 活塞及液压杠杆的动量 x_5 ; 液压缸有杆腔及其管路腔中用来补偿油液压缩量的液压油总容积 x_6 。液压缸伸出过程的状态方程经化简并整理如下, 方程里变量上面的点表示该变量对时间求导。

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_3/I_1 \\ \dot{x}_2 &= Q - (1/R_x + 1/R_l) x_2/C_1 - A_1 x_3/I_1 - (x_2/C_1 - x_4/C_2)/R_{d1} \\ \dot{x}_3 &= A_1 x_4/C_2 - x_1/C_1 - A_1^2 R_k x_3/I_2 - S_e \\ \dot{x}_4 &= (x_2/C_1 - x_4/C_2)/R_{d1} - A_1 x_5/I_2 \\ \dot{x}_5 &= A_1 x_4/C_2 - A_3 x_6/C_3 - F \\ \dot{x}_6 &= A_3 x_5/I_2 - x_6/(C_3 R_{d2})\end{aligned}$$

2.3 MATLAB 仿真分析

将液压系统液压缸伸出过程的状态方程模型转化为可以在计算机上进行的仿真模型。利用 MATLAB 数学计算软件编写 M 函数来表达系统的仿真模型, 对于非线性液阻和一部分约束条件, 采用条件转移结构语句来处理。对于编写的 M 函数设置仿真参数如下: 初始条件、仿真起始和终止时间, 微分方程采用四阶/五阶龙格-库塔变步长算法。运行仿真程序, 得到图 4 所示的液压缸开启时的阶跃响应曲线, 由图 4 可以看出液压缸在开启过程中会产生速度波动, 此速度波动值为基准值的 4% 左右, 所以对系统影响不大。

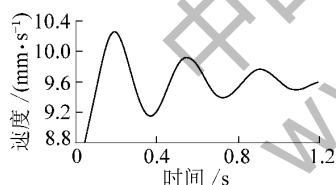


图4 液压缸开启时阶跃响应曲线

3 潜水电液控制闸阀建模及仿真分析

3.1 潜水电液控制闸阀的模型

以公称通径 200 mm, 耐压等级 6.0 MPa 的潜水电液控制闸阀为例, 利用三维建模软件 Pro/Engineer 建立潜水电液控制闸阀全部开启时流体的流道简化模型。如图 5a 所示, 为了确保阀门进口水流较平稳, 能较准确地模拟阀门出口管路流场变化^[10], 阀门入口管道长度取 200 mm, 出口管道长度取 600 mm。

3.2 网格划分

将简化后的流道模型保存成网格处理软件

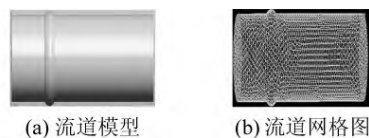


图5 潜水电液控制闸阀流道

Gambit 可识别的格式, 打开 Gambit 将流道简化模型导入, 采用体网格划分方式, 分别做单元选择和类型选择, 划分单元格设置尺寸为 15 mm, 划分网格如图 5b 所示。使用 Gambit 检测网格品质功能选项来检测所划分的网格质量。设置进口、出口边界类型分别为速度入口、自由出流, 其余各面采用默认设置, 连续体类型设置为流体, 设置好后输出网格文件。

3.3 仿真计算

采用 FLUENT 软件进行 3D 模拟计算, 并将生成的网格导入软件, 检查网格质量, 对网格进行光滑交换处理, 修改网格单位。

由于采用的是等截面积的直圆管^[11-12], 所以雷诺数 $Re = U_m d / \nu$, 其中: U_m 为流体平均速度; d 为管路直径; ν 为水的运动黏性系数。按照常温水运动黏性系数将 $\nu = 1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $d = 200 \text{ mm}$, $U_m = 4.5 \text{ m/s}$ 带入 Re 的计算公式^[8], 经计算可得 $Re = 8.9 \times 10^5$ 。因雷诺数大于临界值, 所以本流动模型为湍流状态。模型设置时, 选择非耦合隐式算法, 定常流动, 湍流模型选择 $k-\varepsilon$ 标准模型, 其余设置采用系统默认的参数。在边界条件设置时, 速度入口设为 4.5 m/s。Turbulence Specification Method 选择湍流强度和水利直径, 分别输入参数为 8.9% 和 0.2 m, Fluid 选择 Water—liquid, 出口和墙边界条件采用默认, 然后设置求解方法, 使用流动方程和湍流方程, 亚松弛因子采用默认值, 初始化从入口开始计算, 并进行迭代求解^[13]。为了能更好地展现三维实体内部流场的规律^[13], 在 FLUENT 中建立如下观测面和观测线, 通过 (0, 0, 0)、(860, 0, 0)、(0, 110, 0) 三点建立一个观测平面, 用 $z=0$ 表示。在 $z=0$ 观测平面上的速度和压力云图如图 6 所示。

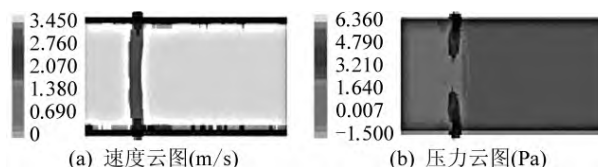


图6 在 $z=0$ 观测平面上的速度和压力云图

从图 6 可以看出, 除了阀板附近受阀板底座的影响速度和压力有小突变之外, 流过潜水电液压

控制闸阀以及管路内部的水流速度和压力都很平稳。通过空间2点(0,10,0)和(860,-10,0)建立的一条通过管路中心的观测直线,用FLUENT软件仿真观测直线的压力、速度曲线(图7)。从图7可知:通过阀板位置时压力先略微增加之后迅速减小;除阀板附近速度短暂下降外,其他位置的速度一直很稳定,约为4.5 m/s。说明在阀板附近有一个明显的能量损失过程,这一现象和仿真结果相吻合,在通过阀板时受阀板底座的影响出现了涡流现象。

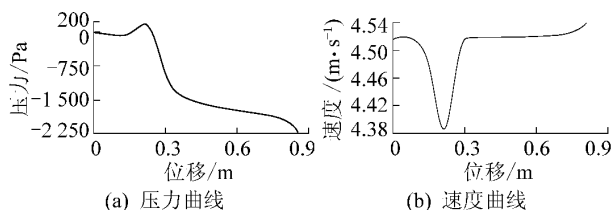


图7 观测直线的压力和速度曲线

4 试验验证

在以上理论分析及液压系统仿真的基础上,按仿真尺寸制造了矿用潜水电液控制闸阀的样机(图8),并进行了工业性试验。试验模拟千米深井现场,电源和控制信号分别用1 000 m动力电缆和控制电缆传送,闸阀的样机置于盛水的水箱。



图8 潜水电液控制闸阀的试验照片

试验测试了样机的开启和关闭操作,且测量了信号衰减情况。试验结果表明,该潜水电液控制闸阀能在水中完成相应的操作,且信号衰减不影响控制操作及反馈信号,气囊式全封闭液压系统在试验过程中无泄漏无进水现象发生。从试验情况看,潜水电液控制闸阀为解决突水状况下开阀排水提供了新的设计方案。

5 结 语

设计的矿用潜水电液控制闸阀结构紧凑、集成度高且能调整启、闭力,其液压控制系统动态性能较稳定。潜水电液控制闸阀流道模型模拟实际工况仿真分析,闸阀全开时模型内流场压力、流速等参数基本稳定,因此该闸阀投入使用在理论上可行。设计生产的潜水电液控制闸阀样机能在试

验条件下工作稳定,为解决应急情况下排水使用闸阀问题提供了新的设计方案。

参考文献:

- [1] 李惠平. 矿井应急排水系统设计[J]. 煤矿机电, 2011(6): 30-31.
- [2] 金亚颀. 浅议阀门电动装置选型时须注意的要点[J]. 西南给排水, 2008, 30(3): 40-41.
- [3] GB 50215—2005 煤炭工业矿井设计规范[S].
- [4] 吴娟, 寇子明. 井下自动排水用液压可控闸阀仿真研究[J]. 煤矿机械, 2009, 30(1): 59-60.
- [5] 高奇峰, 杨兆建, 李泽松. 矿井自动排水系统液压闸阀动态特性分析[J]. 矿山机械, 2009, 37(9): 70-73.
- [6] 李晓豁, 徐辰丁, 焦丽. SIMULINK和功率键合图在液压系统建模仿真中的应用[J]. 矿山机械, 2004, 32(3): 69-70.
- [7] 胡勇, 周建军, 贾方. 利用功率键合图和SIMULINK实现溢流阀的动态仿真[J]. 河南科技大学学报: 自然科学版, 2009, 30(4): 20-23.
- [8] Boruszky W. Bond Graph Model - Based Fault Detection Using Residual sinks[J]. Systems and Control Engineering, 2009, 223(1): 38-40.
- [9] Li P Y, Ngwompo R F. Power Scaling Bond Graph Approach to the Passification of Mechatronic Systems with Application to Electro-hydraulic Valves[J]. Transactions of the ASME, 2005, 127(12): 633-638.
- [10] 郑阿奇. Pro/ENGINEER实用教程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 50-95.
- [11] 朱立明. 流体力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2009: 35-59.
- [12] 黄鹏, 江帆. FLUENT高级应用与实例分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 135-169.
- [13] 孙勇, 王伟. 基于Fluent的掘进工作面通风热环境数值模拟[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(7): 32-33.

(上接第70页)

- [4] 王正辉, 刘国忠. 采用地面测氡法探测井下火区分布实践[J]. 矿业安全与环保, 2010, 37(6): 3-4.
- [5] 李韧杰. 氡析出率的测定及其影响因素的探讨[J]. 铀矿冶, 2000, 19(1): 56-59.
- [6] 邓军, 徐精彩, 阮国强. 国内外煤炭自然发火预测预报技术综述[J]. 西安科技大学学报, 1999, 19(4): 293-295.
- [7] 张建明. 中国地下煤火研究与应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2008: 123-134.
- [8] 赵耀江, 郭剑明. 测氡探火机理的研究[J]. 煤炭学报, 2003, 28(3): 34-35.
- [9] 金永飞, 邓军. 测氡法探测地下煤火技术研究与运用[J]. 西安科技大学学报, 2010, 30(6): 273-274.
- [10] 刘华军, 李天斌, 沈军辉, 等. 氡(RaA)测试技术在某岩质边坡卸荷深裂缝带研究中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(1): 35-37.