

# 水压缸活塞环密封运动阻力研究

秦本科, 薄涵亮, 郑文祥

(清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

**摘要:** 针对控制棒水压驱动机构单缸步进动态过程, 根据水压缸活塞环密封机构的特点, 分析水压缸单缸步进过程中运动阻力的来源, 建立运动过程的动态理论模型。利用控制棒水压驱动机构单缸性能实验的结果, 推导出水压缸单缸步进过程中运动阻力的变化过程。通过对运动阻力参数和步进过程中缸内压力以及步升速度动态参数的分析, 得到了水压缸单缸步进过程中运动阻力的计算模型。由该模型计算所得步进动态位移曲线与控制棒水压驱动机构单缸步进实验位移曲线吻合得很好。本研究结果为控制棒水压驱动机构单缸步进过程的动态模拟以及控制棒水压驱动机构在步进过程中各部件的应力分析奠定了理论基础。

**关键词:** 控制棒水压驱动机构; 水压缸; 活塞环; 运动阻力

**中图分类号:** TL351.5      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-6931(2006)02-0235-05

## Kinetic Resistance of Hydraulic Cylinder Piston Ring Seal Structure

QIN Ben-ke, BO Han-liang, ZHENG Wen-xiang

(*Institute of Nuclear and New Energy Technology,  
Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

**Abstract:** According to the step motion of single cylinder for Control Rod Hydraulic Drive Mechanism (CRHDM) and the characteristics of the hydraulic cylinder piston ring seal structure, the source of kinetic resistance during step motion process was analyzed, the theoretical model of the dynamic step motion process was built and the value of kinetic resistance based on the results of the control rod hydraulic drive mechanism single cylinder experiment was deduced. By analyzing the relationship between kinetic resistance and the dynamic parameters of the step motion process including the pressure and the velocity of the inner cylinder, calculation model of the kinetic resistance during the step motion process was obtained. The displacement curve inferred from this model agrees with the experimental data. This model would be helpful for the dynamic simulation of the step motion process and the stress analysis of the control rod hydraulic drive mechanism.

**Key words:** control rod hydraulic drive mechanism; hydraulic cylinder; piston ring; kinetic resistance

控制棒水压驱动机构<sup>[1]</sup>是一种新型的内置式控制棒驱动技术,在对水力驱动控制棒系统<sup>[2]</sup>深入研究的基础上,结合商用压水堆磁力提升器<sup>[3]</sup>的优点发展而来。控制棒水压驱动系统利用3个水压缸的充卸压带动两个销爪机构动作实现控制棒的步升、步降、夹持以及落棒功能。

水压缸是水压驱动机构的核心部件,控制棒水压驱动机构中3个水压缸的步进机理相同,水压缸步升过程中的运动阻力主要来自水压缸活塞环密封机构与缸壁相互作用产生的力。水压缸活塞环的外周滑动面与水压缸壁是平行的两个面,理想的环面润滑为两滑动面间有一层均匀的液膜。这种理想的润滑状态事实上并不存在。由于水的粘度太低,很难保持,再加上环的运动受水的压力、惯性力、侧压力等各种因素的影响<sup>[4]</sup>,使活塞环滑动面可能与缸壁直接接触,因此,水压缸步升过程中的运动阻力主要为摩擦力<sup>[5]</sup>,接触面间的摩擦状态应包括干摩擦和流体摩擦<sup>[6]</sup>。该运动阻力的确定是进行水压缸步升动态建模的基础,它对于控制棒水压驱动机构动态性能的研究以及提棒时间的确定均有重要意义。

## 1 水压驱动机构单缸步进动态实验

结合控制棒水压驱动机构中提升水压缸、传递水压缸、夹持水压缸的结构特点和动作原理,设计和加工了实验本体(图1)。图2所示为实验系统图。该系统主要由储水罐、循环泵、

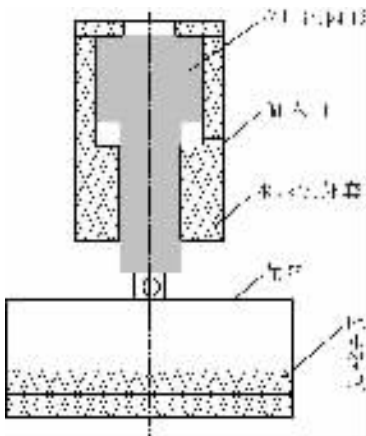


图1 水压缸结构示意图

Fig.1 Scheme of hydraulic cylinder structure

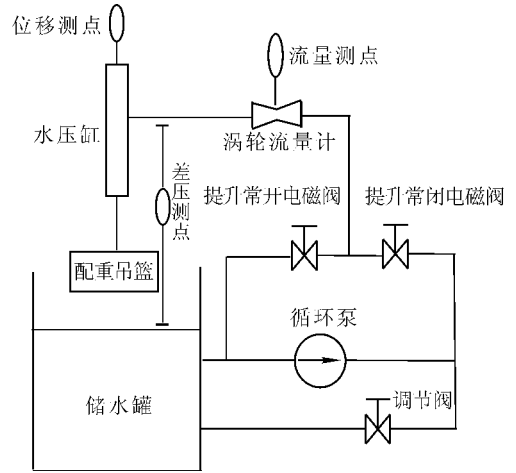


图2 水压缸步进实验装置示意图

Fig.2 Scheme of equipment for hydraulic cylinder step motion experiment

调节阀、电磁阀、流量传感器、差压传感器、光尺、水压缸以及数据采集系统组成。储水罐中的水经由循环泵抽出后,一部分经由旁路回储水罐,另一部分经过流量计进入水压缸后流回储水罐,从而完成一个循环。通过打开提升常闭电磁阀同时关闭提升常开电磁阀向水压缸内注水完成提重动作,关闭提升常闭电磁阀同时打开提升常开电磁阀完成落重动作。通过向实验本体水压缸下吊篮中添加不同质量的铅块模拟不同配重的提棒工况。

## 2 水压缸步升过程机理分析

### 2.1 受力分析

图3为水压缸内套在步升过程中的受力分析图。其中: $p_c$ 为水压缸内外差压, $F_r$ 为复位弹簧力, $G$ 为水压缸内套以及吊篮和配重铅块的总重, $F_f$ 为水压缸内套步升过程中来自缸壁的运动阻力。

### 2.2 步升过程模型

水压缸内套步升过程中的动力平衡方程为:

$$ma_i = p_{ci}(t)A_c - F_{ri}(t) - G - F_{fi}(t) \quad (1)$$

假设在微小时间间隔 $\Delta t$ 内,水压缸内套运动的速度和位移的变化可用匀加速运动方程计算,则水压缸内套步升过程中的运动方程为:

$$v_i = v_{i-1} + a_i \Delta t, v_0 = 0 \quad (2)$$

$$s_i = s_{i-1} + v_i \Delta t + \frac{1}{2} a_i \Delta t^2, s_0 = 0 \quad (3)$$

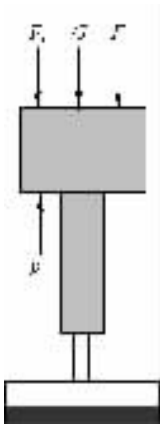


图3 水压缸内套运动受力图

Fig. 3 Force analysis of hydraulic cylinder inside wall during motion process

其中:  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ , 基于水压缸内套在  $(0.002n)$  s 的步升过程中, 系统动态测量分为  $n$  个采样点, 采样频率为 500 Hz;  $p_c(t)$  为水压缸内外差压;  $A_c$  为水压缸内上表面承压面积;  $F_{ri}(t) = k \times s_i$ , 为复位弹簧力;  $k$  为复位弹簧的弹性系数;  $F_f(t)$  为水压缸内套步升运动过程中的阻力;  $m$  为水压缸内套以及吊篮和配重铅块的总质量;  $a$  为水压缸内套步升运动加速度;  $s$ 、 $v$  分别为步升运动过程中的位移和速度。

### 3 步升加速度分析

步升实验的配重从 0 kg 到 200 kg, 以步长 5 kg 变化。通过实验结果的分析 and 比较, 在不同配重下步升过程中缸内外差压、水压缸内套位移等参数的变化规律大体一致。以 60 kg 配重为例来分析水压缸内套的步升过程。

图 4 所示为 60 kg 配重下水压缸的步升位移曲线, 其中,  $t$  为时间。利用式(2)和(3)变形可得速度的求解公式为:

$$v_i = (s_i - s_{i-1}) / \Delta t \quad (4)$$

利用式(4), 结合实验结果可求得水压缸步升过程中的速度变化曲线(图 5)。从该图可看出, 水压缸步升过程中的速度呈现周期性变化, 且周期性变化的振幅在不断地衰减, 采用如下函数对速度曲线进行拟合:

$$v = m + n_0 e^{-n_1 t} \sin(\omega t + \alpha) \quad (5)$$

其中:  $m$ 、 $n$  皆为常数。

拟合结果示于图 5。该拟合曲线与实验结

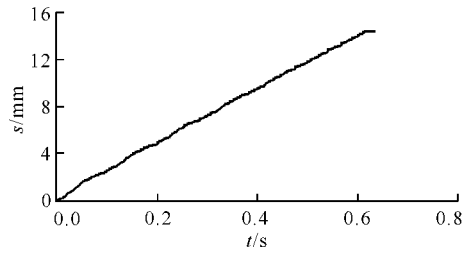


图4 60 kg 配重步升位移曲线

Fig. 4 Step up displacement curve for 60 kg load

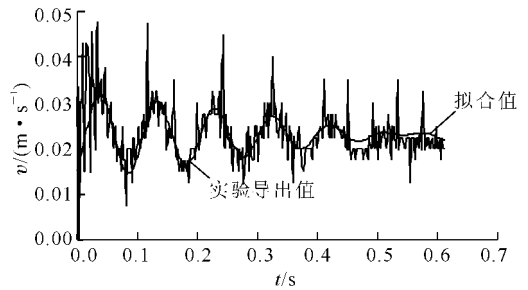


图5 60 kg 配重步升速度对比曲线

Fig. 5 Comparison curves of step up velocity for 60 kg load

果所推出曲线的变化规律符合得很好。

对式(5)两端取微分, 可得水压缸内套步升过程中加速度的变化函数:

$$a = \frac{dv}{dt} = n_0 e^{-n_1 t} \sqrt{\omega^2 + n_1^2} \sin(\omega t + \beta)$$

$$\beta = \arctan\left(-\frac{\omega}{n_1}\right) \quad (6)$$

由该函数可看出, 水压缸内套步升过程中加速度也呈现周期性变化的规律。如图 6 所示, 加速度变化的周期  $T = \frac{2\pi}{\omega}$  与步升过程中速度变化的周期相同, 二者相差  $\beta - \alpha$  的相位角。加速度变化的幅值在不断地衰减, 最大步升加速度为  $0.628 \text{ m/s}^2$ , 它出现在第一个周期, 这为步升过程中最大提升力的计算提供了理论依据。水压缸内套步升过程中加速度变化的周期性是由于水的可压缩性引起的。

### 4 步升过程运动阻力

采用数值求解的方法, 利用式(6)可求得步升过程中不同时刻的加速度。结合相应时刻水压缸内外差压、内套位移以及复位弹簧力等参数, 代入式(1)即可求得水压缸内套步升过程中

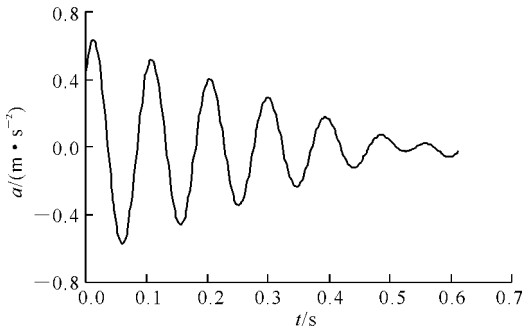


图6 60 kg 配重步升加速度理论曲线

Fig. 6 Theoretical curve

of step up acceleration for 60 kg load

运动阻力的变化曲线(图7)。从图7可看出,水压缸内套步升过程中的运动阻力随步升位移的增加而增大。图7还显示了水压缸内套步升过程中缸内外差压的变化曲线。对比两条曲线可看出,两者的变化趋势相似。

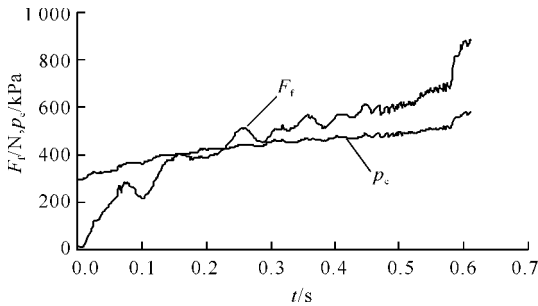


图7 步升过程运动阻力与缸内外差压对比图

Fig. 7 Comparison curves of kinetic resistance and differential pressure between inside and outside of cylinder during step up motion process

采用一次多项式近似拟合水压缸步升过程中运动阻力与缸内外差压的变化关系,得到形如式(7)的函数,其中, $b_0$ 、 $b_1$ 为拟合所得多项式的系数。

$$F_f = b_1 p_c + b_0 \quad (7)$$

式(7)为运动阻力与缸内外差压关系的近似式,误差较大,为了得到两者关系的较为准确的结果,引入余量系数 $R$ 。定义该余量系数为:

$$R = (F_f - b_0) / p_c \quad (8)$$

采用数值计算的方法,利用对应时刻的运动阻力 $F_f$ 和缸内外差压 $p_c$ ,可计算出不同时

刻的余量系数 $R$ 。该余量系数随时间的变化曲线如图8所示。由该图可看出,余量系数 $R$ 随时间周期性地衰减,呈现出很强的规律性。采用形如式(9)的周期性衰减函数对余量系数 $R$ 进行拟合,可求得余量系数 $R$ 的拟合结果,有:

$$R = l + c_0 e^{-\alpha t} \sin(\omega t + \gamma) \quad (9)$$

由式(9)可看出,余量系数 $R$ 的拟合函数与水压缸内套步升过程中步升速度 $v$ 的拟合函数形式一致,且通过拟合结果可看出,两个拟合函数的变化周期 $T = \frac{2\pi}{\omega}$ 相同,相差 $\gamma - \alpha$ 的相位角。

综合式(8)和(9),可求得水压缸内套步升运动过程中运动阻力的变化函数,为:

$$F_f = b_0 + p_c (l + c_0 e^{-\alpha t} \sin(\omega t + \gamma)) \quad (10)$$

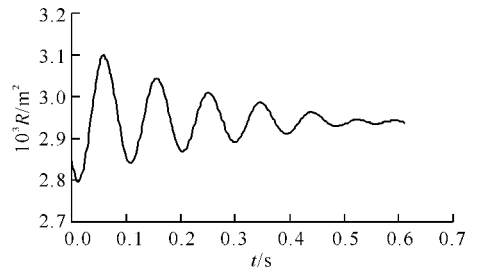


图8 余量系数 $R$ 变化曲线

Fig. 8 Curve of residual coefficient  $R$

## 5 实验验证

利用式(10)求出水压缸内套步升过程中的运动阻力,将运动阻力计算结果代入步升过程计算模型式(1)~(3),即求得60 kg配重步升理论位移曲线。该理论曲线与实验测得位移曲线对比如图9所示。由图9可看出,理论计算与实验所测结果吻合得很好。

## 6 结束语

依据水压缸步升过程中的受力分析,建立了步升过程的理论模型。由步升实验所测步升位移和缸内外差压等动态参数,结合步升理论模型,得到了步升速度和加速度的理论拟合结果,揭示了二者呈周期性衰减变化的特点。并由加速度进而求得了步升过程中的运动阻力值,通过对比该运动阻力与步升过程中缸内外差压的变化趋势特点,找到了运动阻力与缸内

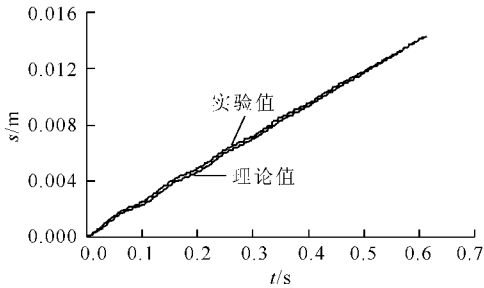


图9 步升过程理论与实验位移对比图

Fig. 9 Comparison curves of theoretical and experimental step up displacement

外差压的理论关系式,该关系式中引入的余量系数是一个与步升速度具有相同周期和函数原型的函数。通过该理论关系式,结合步升理论模型计算所得的步升位移曲线同步升实验所测位移曲线吻合得很好。

从步升过程运动阻力理论关系式可看出,运动阻力与步升过程中的缸内外差压以及步升速度有关,从而为水压缸步升过程的动态模拟以及控制棒水压驱动机构各个部件的力学分析和设计奠定了理论基础。

### 参考文献:

- [1] 薄涵亮. 控制棒水压驱动系统[R]. 北京:清华大学核能与新能源技术研究院, 2003.  
BO Hanliang. The control rod hydraulic driving system [R]. Beijing: Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, 2003 (in Chinese).
- [2] 迟宗波, 吴元强, 陈云霞, 等. 控制棒水力驱动系统的设计和研究[J]. 核动力工程, 1999, 20(1): 58-62.  
CHI Zongbo, WU Yuanqiang, CHEN Yunxia, et al. Study and design of hydraulic driving system of control rod[J]. Nuclear Power Engineering, 1999, 20(1): 58-62 (in Chinese).
- [3] 秋德正, 郭玉君, 苏光辉. 核反应堆结构与动力设备[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1998:49-52.
- [4] 邬伯翔. 活塞环[M]. 北京:中国铁道出版社, 1987:17-34.
- [5] HALLING J. Principles of tribology[M]. London: The Macmillan Press LTD, 1975:40-67.
- [6] 顾永泉. 流体动密封[M]. 北京:石油大学出版社, 1990:61-152.