

# 控制棒水压驱动机构液压缸步降过程研究

秦本科, 薄涵亮, 郑文祥, 王大中

(清华大学核能与新能源技术研究院, 先进反应堆工程与安全教育部重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 液压缸是控制棒水压驱动机构的关键部件, 根据液压缸步降运动过程特点, 将液压缸步降过程缸内压力变化划分为步降前卸压过程和步降降压过程两个阶段, 分别建立了两个阶段压力变化理论模型。其中, 步降降压过程理论模型结合液压缸步降运动学模型, 又得到了液压缸步降过程动力学模型。理论模型计算结果与控制棒水压驱动机构单缸步进性能实验结果进行了对比, 结果表明, 在实验配重载荷工况下, 理论压力变化和位移曲线很好地符合了实验曲线, 从而为液压缸步降压力变化过程影响因素的确定及控制棒水压驱动系统步进时间的获得提供了理论基础。

**关键词:** 控制棒水压驱动机构; 液压缸; 步降过程

中图分类号: TL351.5; TH137.51

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2009)04-0345-05

## Study on Step-Down Dynamic Process of Hydraulic Cylinder for Control Rod Hydraulic Drive Mechanism

QIN Ben-ke, BO Han-liang, ZHENG Wen-xiang, WANG Da-zhong

(Key Laboratory of Advanced Reactor Engineering and Safety of Ministry of Education, Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Hydraulic cylinder (HC) is the key component of the control rod hydraulic drive mechanism (CRHDM). According to the characteristics of HC step-down process, the pressure transients in the HC during step-down process can be divided into two processes, that is, the pressure transients before step-down motion and the pressure transients during step-down motion. Theoretical dynamic pressure models of these two processes were built. And among them, the theoretical dynamic pressure model during HC step-down motion can be combined with the HC step-down kinematics model to establish a complete HC step-down dynamic model. The comparison between the theoretical results and the CRHDM single cylinder experiment shows that, under the experimental loadings, the theoretical dynamic pressure transients during the HC step-down process and the HC step-down displacements agree with the experimental results. The research results have laid the theoretical foundation for the acquisition of the key factors affecting the pressure transients of the HC during step-down process and the

step motion time of the CRHDM.

**Key words:** control rod hydraulic drive mechanism; hydraulic cylinder; step-down process

控制棒水压驱动系统<sup>[1]</sup>是一种新型的内置式控制棒驱动技术,它是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>的优点发展而来的。该系统利用3个水压缸的充卸压带动2套销爪机构动作从而实现控制棒的步升、步降、夹持及落棒功能。水压缸是整个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,因而水压缸单缸步进过程机理的研究就成了整个驱动机构性能研究的基础。

水压缸步进运动过程包括缸内套的步升运动过程和步降运动过程<sup>[4]</sup>,对应于水压缸的充压过程和卸压过程。其中,水压缸卸压过程又可分为步降前卸压过程和步降降压过程。水压缸步降动态过程研究是水压缸步进过程机理研究的重要组成部分,它对于控制棒水压驱动系统动态性能的获得和推广及驱动机构步进时间的确定均有重要意义。

## 1 水压驱动机构单缸步进性能实验

结合控制棒水压驱动机构中水压缸的结构特点和动作原理,设计和加工了实验本体<sup>[5]</sup>(图1)。图2所示为实验系统图。该系统主要由储水罐、循环泵、调节阀、电磁阀、流量传感器、差压传感器、光尺、水压缸及数据采集系统组成。储水罐的水经由循环泵抽出后,一部分经由旁路流回储水罐,另一部分经过流量计进入水压缸后流回储水罐,从而完成1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重量的铅块模拟不同配重的提棒工况。

如图2所示,提升常开电磁阀打开,同时提升常闭电磁阀关闭,水压缸进入步降阶段。由于电磁阀动作结束后,缸内压力需一定时间后才能达到下落的压力<sup>[5]</sup>,因此,将水压缸步降压力变化过程分为步降前卸压和步降降压过程两个阶段。

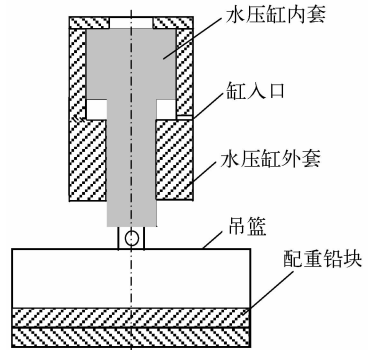


图1 水压缸结构示意图

Fig. 1 Scheme of hydraulic cylinder structure

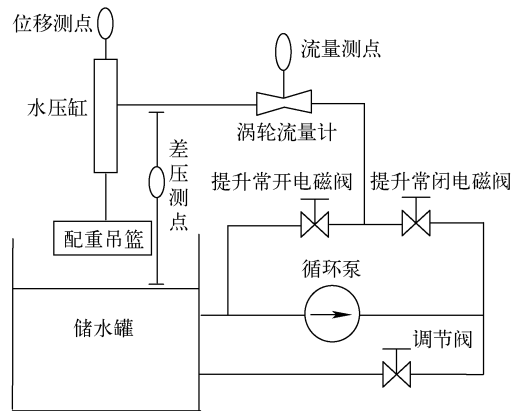


图2 水压缸步进实验装置示意图

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

## 2 理论模型

### 2.1 步降前卸压过程

从电磁阀动作到水压缸内套开始下落之间的降压过程定义为步降前卸压过程。在这一过程中,由于失去泵的压头作用,水压缸内套上与上封头之间将出现泄漏缝隙,即水压缸的泄漏通道将由单端泄漏变为双端泄漏<sup>[5]</sup>,水压缸的总流动阻力将减少;同时,在提升常闭电磁阀关闭的瞬间,入缸流体仍有一定的流速,即具有一定的惯性水头,这部分流体不会立即改变流向,从提升常开电磁阀中流出,而是继续向水压缸流动,由于此时水压缸的流阻减少,因此,会

出现一个入缸流量增大的过程。将该过程中的缸内压力代入水压缸双端泄漏流阻公式,可计算得到对应每一个压力的泄漏流量。将该泄漏流量与实验测得的步降前降压过程流量变化过程进行对比,结果如图3所示。经过对实验和理论计算结果的分析 and 比较,其他配重工况下的流量变化过程与图3所示15 kg配重工况下的情况相仿。可看出,在整个过程中,实验入缸流量均小于双端泄漏工况下的平衡泄漏流量,因此,该流量将完全有能力从水压缸活塞环密封处流出。

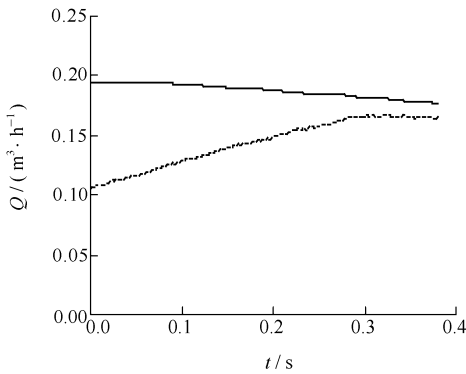


图3 15 kg配重步降前卸压过程流量对比

Fig. 3 Comparison of volume flow in pressure discharge process

before step-down motion under 15 kg load  
实线——理论泄漏流量;虚线——实验流量

将该过程中的水压缸内外压差  $p$  与入缸流量  $Q_v$  的比值定义为步降前卸压过程动态变化流阻。该流阻与步降过程中的压力存在如下关系,即  $p/Q_v = b_0 + b_1 p$ ,其中,  $b_0$ 、 $b_1$  为系数项。

定义步降前卸压过程中推动入缸流量的惯性水头为  $H_{inertia}$ ,取步降前降压过程中的入缸流体为控制体,控制体内非恒定流体能量方程则为:

$$H_{inertia} = \frac{\beta L}{gA} \cdot \frac{dQ_v}{dt} + \frac{b_0 Q_v}{\rho g (1 - b_1 Q_v)} \quad (1)$$

式中:  $g$  为重力加速度;  $A$  为流道截面积,此处取阀后入缸管道截面积;  $Q_v$  为入缸水的体积流量;  $t$  为时间;  $L$  为流道长度;  $\rho$  为水的密度;  $\beta$  为流道尺寸的修正因子。

取初始条件为  $t = 0$  时,  $Q_v = Q_c$ ,  $Q_c$  为步降

前入缸平衡流量。采用有限差分法求解,采用等时间步长  $\Delta t = 0.002$  s,差分方程为:

$$Q_v(t_{i+1}) = Q_v(t_i) + \frac{gA\Delta t}{\beta L} \left( H_{inertia} - \frac{b_0 Q_v(t_i)}{\rho g (1 - b_1 Q_v(t_i))} \right) \quad (2)$$

利用式(2)可得到步降前卸压过程入缸流量  $Q_v$  的变化过程。将计算所得  $Q_v$  代入步降前卸压过程动态变化流动阻力公式,即  $p/Q_v = b_0 + b_1 p$ ,  $p = b_0 Q_v / (1 - b_1 Q_v)$ ,即可得到步降前卸压过程理论压力曲线。

## 2.2 步降降压过程

当水压缸内压力降低到无法支撑配重和内套的总重时,水压缸内套开始步降过程。在步降过程中,由于水压缸内容积的减少将形成一股附加出缸流量,该流量和惯性入缸流量一起从水压缸活塞环密封处流出,其间伴随着缸内外差压的不断降低。通过对实验数据的分析和比较,可得到步降过程中入缸动态流量与水压缸内外压差的关系:

$$p/Q_v = n_0 + n_1 p \quad (3)$$

其中:  $p$  为步降过程中缸内外压差;  $Q_v$  为入缸流量;  $n_0$  和  $n_1$  为系数项。

由式(3)变形可得:

$$p = n_0 Q_v / (1 - n_1 Q_v) \quad (4)$$

取步降过程中的入缸流量为控制体,内套和配重在步降过程中对控制体作负功,定义该项为步降过程能量方程中的配重压头,  $H_G = G/A_c \rho g$ 。步降过程中水压缸内套的步降速度为围绕一恒定速度的波动过程,在分析中,不考虑波动因素的影响,即假定水压缸内套步降速度为定值。惯性水头项中流道尺寸是一随时间逐渐减少的量,结合步降过程水压缸内套以恒定速度下降的假设,可认为能量方程中流道尺寸是步降时间的线性函数,即  $L = L_0 - \frac{A_c}{A} vt$ ,结合流道尺寸的修正因子  $\beta$ ,可得到  $\beta L = c_0 - c_1 t$ ,其中,  $c_0$  和  $c_1$  为系数项。

对控制体列出如下步降过程能量方程:

$$H_G + \frac{\beta L}{gA} \cdot \frac{dQ_v}{dt} + \frac{n_0 Q_v}{\rho g (1 - n_1 Q_v)} = 0 \quad (5)$$

即:

$$H_G + \frac{c_0 - c_1 t}{gA} \cdot \frac{dQ_v}{dt} +$$

$$\frac{n_0 Q_v}{\rho g (1 - n_1 Q_v)} = 0 \quad (6)$$

取初始条件为  $t=0$  时,  $Q_v = Q_p$ ,  $Q_p$  为步降前卸压过程结束时的峰值入缸流量, 采用有限差分法求解, 采用等时间步长  $\Delta t = 0.002 \text{ s}$ , 差分方程为:

$$Q_v(t_{i+1}) = Q_v(t_i) - \frac{gA\Delta t}{c_0 - c_1 t} \left( H_G + \frac{n_0 Q_v(t_i)}{\rho g (1 - n_1 Q_v(t_i))} \right) \quad (7)$$

利用式(7)可得到步降过程入缸流量  $Q_v$  的变化过程。将计算所得  $Q_v$  代入式(4), 可得到步降压力变化动态过程。

将水压缸步降压力模型与缸内套步降运动学模型结合, 可组成一完整的水压缸步降过程动力学模型。该理论模型汇总如下:

$$Q_v(t_i) = Q_v(t_{i-1}) -$$

$$\frac{gA\Delta t}{\beta L(t_{i-1})} \left( H_G + \frac{n_0 Q_v(t_{i-1})}{\rho g (1 - n_1 Q_v(t_{i-1}))} \right) \quad (8)$$

$$p(t_i) = \frac{n_0 Q_v(t_i)}{1 - n_1 Q_v(t_i)} \quad (9)$$

$$ma(t_i) = G + F_f(t_i) - p(t_i)A_c - F_f(t_i) \quad (10)$$

$$F_f(t_i) = k(s_0 - s(t_i)) \quad (11)$$

$$F_f(t_i) = v(t_i)(b_0 + b_1 p(t_i)) \quad (12)$$

$$v(t_i) = v(t_{i-1}) + a(t_i)\Delta t \quad (13)$$

$$s(t_i) = s(t_{i-1}) + v(t_i)\Delta t + \frac{1}{2}a(t_i)\Delta t^2 \quad (14)$$

$$\beta L(t_i) = d_0 + d_1 s(t_i) \quad (15)$$

其中,  $s_0$  为水压缸步降位移行程。

以上方程组中共有 8 个未知数, 8 个方程。

至此, 得到了 1 套完整的水压缸步降过程动力学模型, 仅需已知配重参数, 即可计算得到水压缸内套步降过程位移曲线。

### 3 结果分析

不同配重工况下的步降前卸压动态过程并不相同, 随着配重载荷的减少, 该过程持续的时间及所经历的压力变化范围均逐渐增加。15 kg 配重下的步降前卸压和步降降压过程的理论计算结果与实验结果的对比示于图 4。由图 4 可看出, 理论步降前卸压动态过程和步降降压过程曲线无论从数值上还是从趋势上都很好地符合了实验过程曲线, 从而

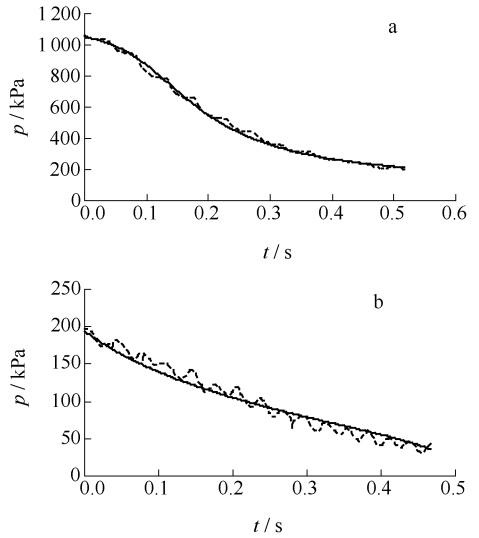


图 4 15 kg 配重步降前卸压(a)和步降降压(b)过程压力对比

Fig. 4 Comparison of pressure transients in pressure discharge process before step-down (a) and during step-down (b) motion under 15 kg load  
实线——理论值; 虚线——实验值

验证了步降压力变化过程理论模型的正确性。

根据水压缸步降过程动力学模型计算所得的 15 kg 配重步降过程位移曲线与实验结果的对比示于图 5。由图 5 可看出, 理论位移曲线与实验位移曲线除初始阶段外几乎完全重合, 初始阶段的偏差主要是由于步降运动阻力模型的线性化假定在步降运动开始时误差较大所引起的, 这说明该模型进一步完善了水压缸步降运动的理论模型, 为控制棒水压驱动系统步降时间的确定及系统设计参数的优化提供了理论依据。

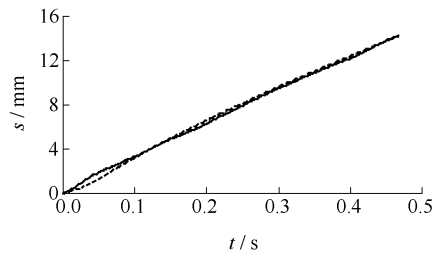


图 5 15 kg 配重步降位移曲线对比  
Fig. 5 Comparison of displacement during step-down motion under 15 kg load  
实线——实验值; 虚线——理论值

## 4 结语

通过对水压缸单缸步降压力变化过程的实验和理论分析,建立了以入缸流体为研究对象的流体能量方程,结合水压缸活塞环密封流动阻力模型,得到了水压缸理论步降压力动态过程,该过程曲线与实验压力变化曲线吻合得很好。

利用理论步降压力动态模型,结合水压缸步降过程运动学模型,得到了完整的水压缸步降动力学模型,仅需已知配重参数,即可计算得到水压缸内套步降位移时程曲线。在实验配重工况下,理论位移曲线很好地符合了实验位移曲线,从而为水压缸步降压力动态过程影响因素的确定、水压缸步进动态过程的理论分析和推广以及控制棒水压驱动系统步进时间的获得提供了理论基础。

### 参考文献:

- [1] 薄涵亮,郑文祥,王大中,等. 核反应堆控制棒水压驱动技术[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2005,45(3):424-427.  
BO Hanliang, ZHENG Wenxiang, WANG Dazhong, et al. Hydraulic control rod drive tech-

nology for nuclear reactors[J]. Journal of Tsinghua University: Sci & Tech, 2005, 45(3): 424-427(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] 秋穗正,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] 秦本科. 核反应堆控制棒水压驱动技术研究[D]. 北京:清华大学核能与新能源技术研究院,2005.
- [5] 秦本科,薄涵亮,郑文祥. 控制棒水压驱动机构单缸步进动态过程[J]. 清华大学学报:自然科学版,2005,45(3):428-431.  
QIN Benke, BO Hanliang, ZHENG Wenxiang. Single cylinder stepping motion for the control rod hydraulic drive mechanism[J]. Journal of Tsinghua University: Sci & Tech, 2005, 45(3): 428-431(in Chinese).