

## 水力驱动装置冲击实验研究

李笑天<sup>1</sup>, 何树延<sup>1</sup>, 吴元强<sup>1</sup>, 戴诗亮<sup>2</sup>, 陆秋海<sup>2</sup>

(1. 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084;

2. 清华大学工程力学系, 北京 100084)

**摘要:**水力驱动装置是利用流体动压原理设计的一种新型控制棒驱动机构。本工作实验研究水力驱动装置在冲击载荷下的动力学响应。在半正弦脉冲冲击加速度  $\pm 30$  g、作用时间 11 ms 实验条件下, 水力步进缸的外套响应速度低、位移小, 在冲击过后, 水力驱动装置未出现跳步或降步现象, 表明它在实验冲击载荷下是稳定的。

**关键词:**半正弦脉冲; 冲击; 水力驱动装置; 动力学响应

**中图分类号:** TL351.5      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-6931(2005)05-0419-05

### Study on Shocking Experiment of Hydraulic Driving System

LI Xiao-tian<sup>1</sup>, HE Shu-yan<sup>1</sup>, WU Yuan-qiang<sup>1</sup>, DAI Shi-liang<sup>2</sup>, LU Qiu-hai<sup>2</sup>

(1. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Hydraulic driving system is a new type driving system of control rod based on hydrodynamic pressure. The dynamic response of hydraulic driving system subjected to impacting load is studied. The velocity and displacement of hydraulic driving system are low under the condition of acceleration half-sine shock pulse  $\pm 30$  g for 11 ms. It concludes that hydraulic driving system is stable, which did not move up or down one step after impacting.

**Key words:** half-sin pulse; shock; hydraulic drive system; dynamic response

控制棒驱动机构是控制、调节反应堆反应性的重要安全部件, 它的安全可靠运行直接关系到反应堆的安全。控制棒在冲击、振动环境下的保持能力是检验控制棒驱动机构可靠性的一重要依据。

水力驱动控制棒是清华大学核能与新能源

技术研究院自行设计研究的一种新型控制棒, 它已成功应用于 5 MW 低温核供热堆。该棒的结构简单、成本低廉<sup>[1]</sup>, 尽管已在 5 MW 供热堆上成功使用, 但还有一些动力学问题尚未从理论上得以完全解决。深入研究水力驱动棒在各种冲击振动条件下的动力学特性, 将为它

收稿日期: 2004-02-26; 修回日期: 2004-04-29

基金项目: 清华大学基础研究基金资助项目(JC2002053)

作者简介: 李笑天(1970—), 女, 河南开封人, 副研究员, 硕士, 反应堆结构设计与分析专业

在反应堆上的应用提供理论基础。

## 1 工作原理

水力步进式驱动装置采用反应堆冷却剂作为工作介质,经泵加压,通过控制单元后,注入装在反应堆压力壳内的步进缸,步进缸与中子吸收元件相连。通过控制单元产生的脉冲流量,控制步进缸做步进式运动,步进缸拖动吸收元件亦做步进式运动,从而达到控制反应堆的目的。

图1为水力驱动系统示意图。对孔式水力步进缸是驱动系统的执行部件,它由内套、外套组成,内套固定,外套可活动。内套为一中空圆管,外柱面上开有多排与管中心相通的孔,相邻排孔之间的距离为步长。外套上开有一排孔,外形结构呈板状的吸收体与外套固结。水从下方进口通入内套,经内套和外套上的节流孔、内外套之间的迷宫缝隙和外套顶端的排气孔喷入压力壳内。在一定流量下,外套内的压力形成的推力与其重量平衡,外套会被水托起,并静止在给定的位置,即内套的某一排孔位上。在来自控制单元的脉冲流量作用下,步进式地完成向上和向下运动,需要快速停堆时,只须切断水力步进缸的供水,控制棒即会迅速插入堆芯。

本文将研究这种靠流体压力自平衡的装置在冲击载荷下的棒位保持能力,检验控制棒在

冲击过程中和冲击后是否会出现突然上升、下降1步或几步现象。

## 2 实验内容和方法

冲击是指由力、位置、速度和加速度等参量急剧变化而激起的系统的瞬态运动<sup>[2]</sup>。实验采用脉冲冲击方法测试水力驱动装置在冲击载荷下的动力学响应。

实验系统设备框图示于图2。振动控制模块中的美国UD公司SA160-H560B/ST电磁振动台是闭环控制多功能振动冲击实验台,能模拟随机振动、正弦冲击波、冲击响应谱等。

水力驱动装置模块包括筒体、内套、外套、进出水管、调节阀、压力表、水泵。整个水力驱动装置的筒体通过螺栓固联在电磁振动台上,保证驱动装置和振动台一起运动。驱动缸内套内径 $\phi 15.5\text{ mm}$ ,外径 $\phi 22.5\text{ mm}$ 。内套上部每隔 $20\text{ mm}$ 沿圆周均匀开有4个 $\phi 3\text{ mm}$ 圆孔,每排以圆孔为中心的高度方向 $10\text{ mm}$ 处为 $2.5\text{ mm}$ 深的槽;共开有4排,即内套步长 $20\text{ mm}$ 。外套重 $11.6\text{ kg}$ ,内径与内套间有 $1\text{ mm}$ 的间隙。外套上开有一排4个 $\phi 4\text{ mm}$ 圆孔。内套下部开有 $\phi 15\text{ mm}$ 孔,与进水管相连。整个步进缸高度为 $520\text{ mm}$ 。在实验中,外套停留在内套的第3排孔位上。

位移测量模块包括电涡流位移传感器、前置放大器、HP35665A动态信号分析仪。电涡

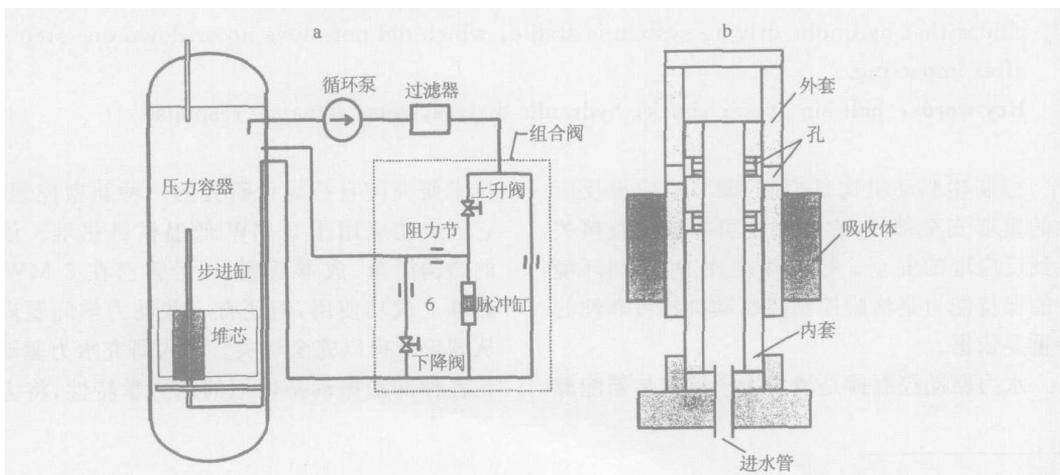


图1 水力驱动系统示意图

Fig. 1 Scheme of hydraulic driving system

a——水力驱动系统流程;b——水力步进缸结构

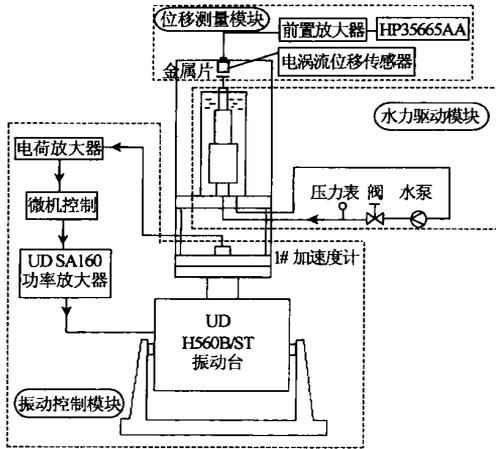


图2 实验系统示意图  
Fig. 2 Scheme of test system

流位移传感器利用激磁线圈与涡流体之间距离的变化引起涡流强度变化的原理来测量位移。这种测量方法的特点是非接触测量,灵敏度高、结构简单、抗干扰能力强。所选用的电涡流位移传感器量程为0~5 V。

### 3 实验步骤

首先调节水的流量至保持流量,使外套稳定在中间孔位。调整外套上部金属片与电涡流传感器间的距离,保证其在有效测量范围内运动。然后通过振动台控制系统设定冲击参考曲线。图3所示为分别进行竖直向上和竖直向下两个不同方向的冲击时的半正弦冲击加速度波形,峰值30 g,作用时间11 ms。图中所示时间是完成脉冲冲击振动台必须经历的运动,有效冲击段在242~262 ms之间。实线是参考曲线,虚线是1#加速度传感器反馈的实际冲击曲线。振动台运动时间约0.1 s,实验记录了从冲击开始到冲击结束后控制棒稳定在平衡位置的全过程,约0.25 s。

### 4 实验结果分析

实验通过电涡流位移传感器测得的是电压值,经过标定,0 V电压对应2 mm距离,5 V电压对应30 mm距离,电压和位移在量程范围内呈线性关系<sup>[3]</sup>。由于电涡流传感器处在外套上部,因此,测得的位移需反号后方为内套和外套之间的相对位移。内外套的相对位移代表了控

制棒相对于堆芯的升降位置,而控制棒升降行为直接影响反应堆的安全运行。

#### 4.1 承受向下冲击加速度的作用

图4是水力驱动装置在图3a所示向下冲击加速度作用下的实验结果。在实验中,向下的冲击加速度以图4a形式的冲击位移作用在驱动缸内套上,冲击段是一向上的冲击位移。图4b所示为在图4a冲击位移作用下内外套之间的相对位移。

图4b中位移为零的时刻表示内外套间没有相对位移;位移值小于零时,表示内外套间距离减小,相对而言,外套向下运动,即控制棒有插棒趋势;位移值大于零,表示内外套间距离加大,相对而言,外套向上运动,即控制棒有提棒趋势。

从图4可知,内套在振动台推动下运动的时间段内,两曲线是非常接近的。在冲击段内,内套在振动台推动下在11 ms内迅速向上运动7 mm(虚线);实验测得,这时的内外套之间的相对位移最大值为6 mm。由此表明,在冲击段内,外套在内套向上运动引起的压力波作用下,微微向上跟随运动了1 mm。这样,冲击过程中外套相对内套下降了6 mm,未超过一步步长20 mm。在冲击前后的辅助段,外套基本浮在原位置处,运动幅值很小。当内套停止运动后,水力驱动缸内存在一定的压力波动,导致外套产生小幅振荡,最后稳定在初始位置。

#### 4.2 承受向上冲击加速度的作用

图5为水力驱动装置在图3b所示向上冲击加速度作用下的实验结果。在实验中,向上的冲击加速度以图5a形式的冲击位移作用在驱动缸内套上,冲击段是一个向下的冲击位移。图5b所示为在图5a冲击位移作用下内外套之间的相对位移。

从图5可知,内套和外套间的相对位移随内套位移变化的趋势与图4所示的变化趋势类似,内套向上运动时,内外套相对位移减少;内套向下运动时,内外套相对位移增加。不同的是,在这种形式的冲击下,内外套间响应的相对位移比图4所示冲击形式下的大。在图5中,当冲击段在短时间(11 ms)内,内套迅速向下运动时,实验测得内外套间相对位移为12 mm,大于内套的冲击输入位移7 mm。而且,内套

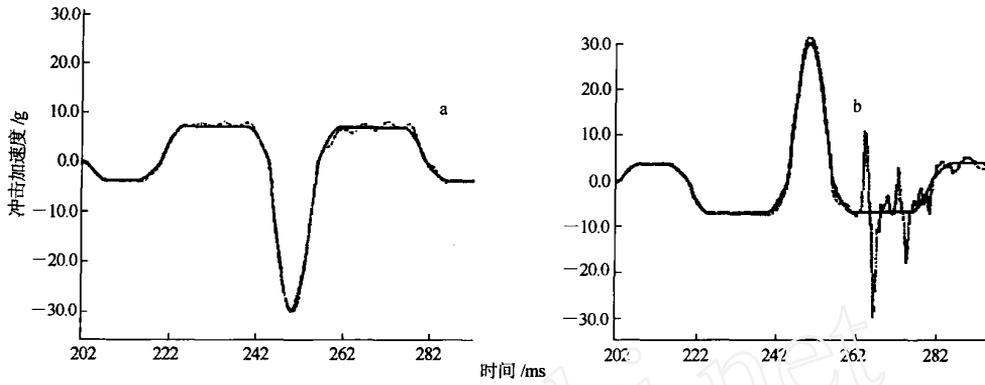


图3 半正弦冲击加速度参考曲线

Fig. 3 Half-sin shocking acceleration curves

冲击加速度:a —— - 30 g;b ——30 g

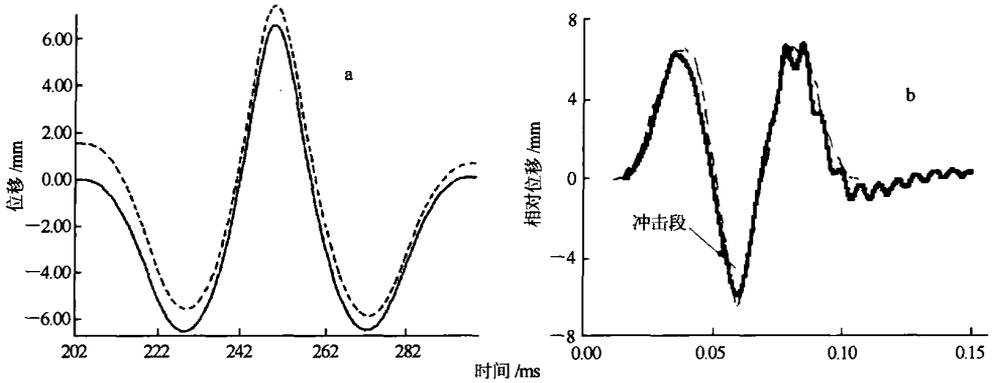


图4 在图3a所示冲击作用下的实验结果

Fig. 4 Experiment data under impacting load of Fig. 3a

a ——与图3a相对应的冲击位移曲线;b ——在图4a作用下,内套和外套之间的相对位移

实线 ——实验数据;虚线 ——冲击输入

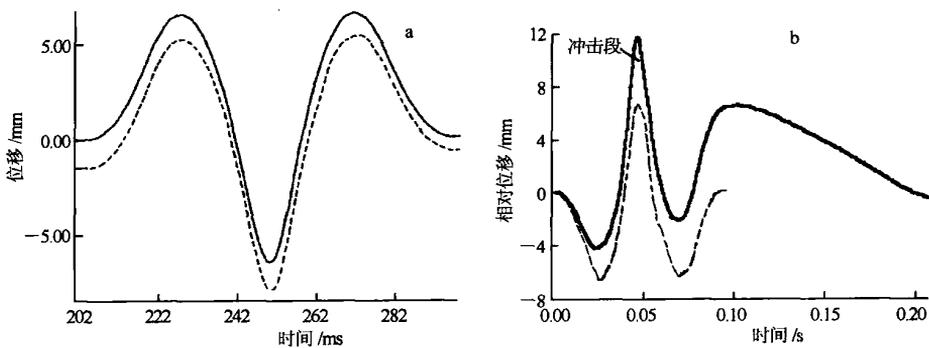


图5 在图3b所示冲击作用下的实验结果

Fig. 5 Experiment data under impacting load of Fig. 3b

a ——与图3b相对应的冲击位移曲线;b ——在图5a作用下,内套和外套之间的相对位移

实线 ——实验数据;虚线 ——冲击输入

停止运动后,外套需经历更长时间(与图4相比)才能达到平衡。

当内套受到向下冲击位移时,内外套间的距离拉大了5 mm,这表明外套未跟随向下运动。内套向下运动时,缸内压力处于减少状态,无使外套向上运动的作用力,因此,外套不可能向上运动。由于内套快速下降,外套难以迅速跟随,在驱动缸内产生了真空柱,从而加大了内外套间的相对位移。这时,内外套最大相对位移12 mm,表示外套相对内套向上运动了12 mm,即控制棒从平衡位置向上运动12 mm。这一最大位移未超过步长20 mm。最后,经过一段时间振荡,外套稳定在初始位置。

## 5 结论

水力驱动装置在冲击载荷下的动力学特性关系到反应堆的安全运行。实验输入振动台可提供的最大作用时间11 ms、冲击加速度 $\pm 30$  g的半正弦脉冲。在这样的条件下,水力驱动装

置对不同的冲击方向的响应幅值是不同的。内套受向下冲击位移时的响应幅值大于受向上冲击位移的响应。不论受哪种方向的冲击,驱动装置均未出现上升一步或下降一步的现象,且冲击过后皆稳定在平衡位置。因此,在这样的冲击载荷下,水力驱动装置是稳定的。如果冲击载荷的作用时间加长,水力驱动装置的响应如何,受实验设备的限制,无法进行实验研究,可结合数值分析进行深入研究。

## 参考文献:

- [1] 迟宗波,吴元强,陈云霞. 控制棒水力驱动系统的设计和研 究[J]. 核动力工程,1999,20(1): 52~55.
- [2] 中国大百科全书总编辑委员会. 中国百科全书力学卷[M]. 北京:中国大百科全书出版社,1985. 57~58.
- [3] 王素红. 利用电涡流传感器测量位移[J]. 大学物理实验,2000,13(1):18~19.