

中国先进研究堆控制棒驱动线通道 流动阻力特性实验研究

薄涵亮, 贾海军, 姜胜耀, 赵玉静, 盛 闯, 曹 丽

(清华大学 核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

摘要:可移动线圈电磁驱动机构是一种新型的控制棒驱动机构,应用于中国先进研究堆。控制棒、跟随组件等在控制棒驱动线通道内上下移动,冷却剂同时冲刷控制棒和跟随组件,因此,控制棒驱动线通道内的流体阻力特性直接关系到整个堆芯的流量分配和控制棒与跟随组件的冷却。对控制棒驱动线通道的阻力特性进行了实验研究,获得了多种运行工况下驱动线通道流动阻力与流量、棒位等参数的关系。实验结果表明,影响驱动线阻力特性的主要因素是冷却剂的流速,控制棒的移动对堆芯流量分布不会造成有意义的改变。

关键词:可移动线圈电磁驱动机构;阻力特性;控制棒驱动线通道

中图分类号:TL41 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-6931(2007)S0-0089-04

Experimental Study on Coolant Flow Resistance of Control Rod Channel in China Advanced Research Reactor

BO Han-liang, JIA Hai-jun, JIANG Sheng-yao, ZHAO Yu-jing, SHENG Chuan, CAO Li
(Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Electromagnetic movable coil control rod drive mechanism used in China Advanced Research Reactor is a new type one. For this drive mechanism, control rods, the following discreteness, and some other components are moved and scoured by coolant in the control rod channel. So the flow resistance in the channel directly determines the flux distribution in the core of the reactor and whether the following discreteness can be adequately cooled. The flow resistance experiment on this control rod channel was carried out and the relationships of the flow resistance and many parameters such as the flux, the position of the control rod were obtained. The result shows that the main effect factors is the flowing rate of coolant, and the moving control rod is no significative of change for the flux distribution in the core of the reactor.

Key words: electromagnetic movable coil control rod drive mechanism; flow resistance; control rod channel

收稿日期:2007-05-08;修回日期:2007-07-23

作者简介:薄涵亮(1964—),男,陕西西安人,研究员,博士,反应堆热工水力专业

控制棒可移动线圈电磁驱动机构是一种新型的控制棒驱动机构^[1],其驱动线由驱动机构、莲蓬头、跟随组件、控制棒等组成。其中,控制棒、跟随组件、莲蓬头、驱动杆等位于控制棒通道,即控制棒导向管内^[2]。在驱动机构的驱动下,控制棒和跟随组件在控制棒通道内上下移动,以控制研究堆的反应性。控制棒通道与堆芯内的标准组件并联安装于堆芯的下支板上。所以,冲刷标准组件的冷却剂同时冲刷着控制棒和跟随组件,使其得到冷却。这样,标准组件流道与控制棒通道间存在着流量匹配的问题,即冷却剂在控制棒通道内的流动阻力特性与冲刷标准燃料组件的冷却剂流动阻力特性必须相匹配,否则,会改变整个堆芯的流量分配,可能导致燃料组件得不到足够冷却。另外,控制棒通道内的冷却剂流动阻力特性决定于加载在控制棒上的流体力。流体力的存在,使可移动线圈电磁驱动机构的驱动力需求增加。因此,研究控制棒通道冷却剂流动阻力特性对中国先进研究堆(CARR)的安全运行有着特别重要的意义。

可移动线圈电磁驱动机构属于全封闭电磁传动,它靠电磁铁线圈的连续移动,使位于密封筒内被外面的电磁线圈所吸引的衔铁以及与其相连的驱动对象随之移动,其驱动机构完全处于密封筒外。驱动线圈采用步进电机-滚珠丝杠机构,使传动线大为简化,去掉了保持位置的锁紧机构,具有很高的运行可靠性。步进电机直接驱动滚珠丝杠是至今数控机床常用的成熟技术,采用步进电机可使数字控制技术用以代替传统的模拟量控制。步进电机本身具有自锁能力^[3],当步进电机通电但停止转动时,电磁铁将稳定地保持在给定位置。

1 实验装置及实验方法

1.1 实验装置

可移动线圈电磁驱动机构控制棒驱动线通道冷却剂流动阻力特性实验台架如图1所示。其中,可移动线圈电磁驱动机构由步进电机、滚珠丝杠、电磁铁、衔铁、缓冲器、上限位指示器和下限位指示器等组成。控制棒通道(即导向管内)有控制棒、跟随组件、莲蓬头、连杆等。水池内的水经泵加压后进入控制棒驱动线通道,冲刷控制棒和跟随组件,然后通过导向管上的排

孔流入水池。整个回路装入去离子水,以确保水质和pH值符合要求。图1中的箭头方向为水流方向,水泵控制回路流量,由编码器读取棒位值。另有一离子净化回路,用以保证水质。实验测得的数据通过数据采集板输入电脑,可在线显示各主要参数数值。图中上面的差压计测量控制棒差压,下面的差压计测量循环泵差压,流量计记录回路流量,编码器记录棒位。另有电导率测定仪测量水质,用pH试纸测量回路水的pH值。

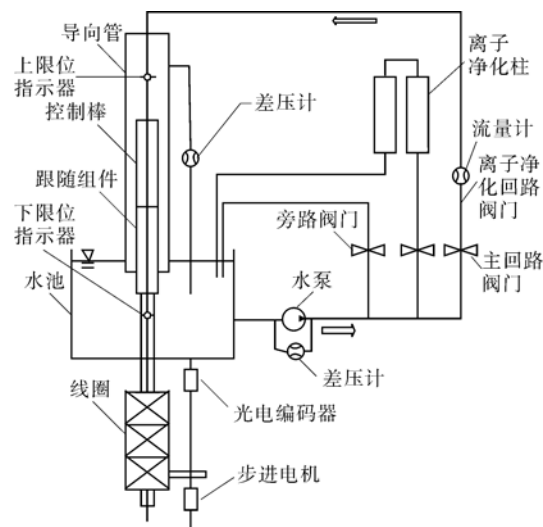


图1 实验装置简图

Fig. 1 Scheme of experimental apparatus

1.2 控制与测量系统

1.2.1 控制系统 试验台架的控制系统(图2)包括手动控制和自动控制两部分。用以实现以下功能:1)控制循环泵电源通断;2)控制步进电机电源通断;3)控制电磁线圈电源通断;4)控制步进电机的正转、反转;5)控制步进电机速度档切换,速度1为慢速,速度2为快速;6)控制到达限位开关时的状态切换;7)控制其他设备、仪表的电源。

1.2.2 测量系统及误差分析 实验测量的物理量包括线圈电流、线圈两端电压、控制棒位置、流动阻力和回路流量等。实验中使用的电压传感器为霍尔电压传感器,量程为 $-220 \sim 220$ V,精度为0.2%,输出电压为 $-5 \sim 5$ V,分辨精度为 $10 \text{ V} \times 0.2\% = 20 \text{ mV}$,该值大于数据采集板的分辨精度2.44 mV,则电压采集值

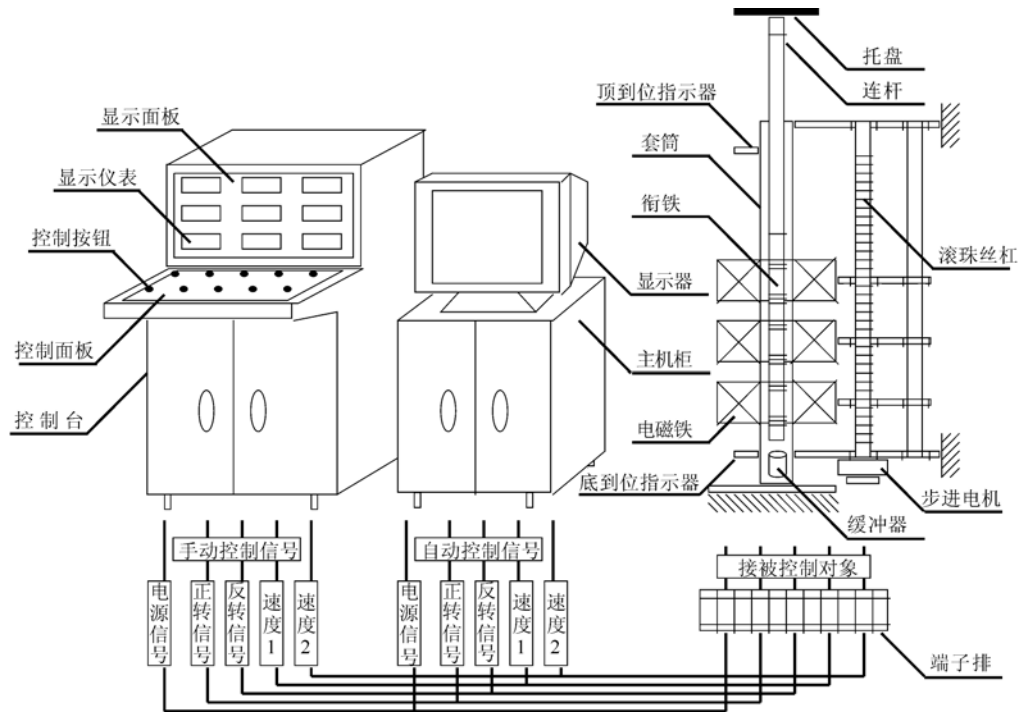


图2 控制系统示意图

Fig.2 Scheme of experimental control system

的误差为0.2%。实验中使用的电流传感器为霍尔电流传感器,量程为0~10 A,精度为1%,输出电压为0~5 V,分辨精度为 $5 \times 1\% = 50 \text{ mV}$,该值大于数据采集板的分辨精度2.44 mV,则电压采集值的误差为1%。棒位测量用编码器^[4]。实验中使用的编码器为德国P+F公司的产品,型号为SCM30,分辨率为4 096 ppr,即每旋转一圈的采集数据点为4 096个,它的分辨精度为 $2/4 096 = 0.001 53$ 弧度。该数据量的采集不通过数据采集板,而是直接进入计算机,因此它没有采集误差。所以,它的误差为 $1/4 096 = 0.024 4\%$ 。流动阻力和回路流量的测量采用普通的1151压差变送器,输出信号4~20 mA,精度为0.2级,误差为0.2%。

1.3 实验方法

实验时,调节阀门,将回路流量调节到实验要求的流量。将控制棒恢复到零位,将测量控制棒位置的编码器初始化,而后开启步进电机提升控制棒,分别提升到指定位置(0、100、200、300、400、500、600、700、800 mm)时停止,在一个位置测量30 s后,移动控制棒到下一个测量位置,一直到800 mm为止,以测量不同棒位下的阻力特性。在此过程中,数据采集系统

将把各种测量数值记录并保存。

使控制棒停在一固定的位置,如200 mm处,改变流量,测量此时的阻力特性。分别测量30、35、40、45、50、55、60、65、70、75 m^3/h 下的阻力特性。

还可实验测量在不同流速、不同棒位下驱动机构快速落棒时的阻力特性,即测量驱动机构此时的线圈参数,如线圈电压、线圈温度、线圈电流等,并得到不同流速下驱动机构的阻力特性曲线。

2 实验结果分析

2.1 不同流速下的阻力特性

不同流速下控制棒通道冷却剂流动阻力的实验测量结果列于表1。从表1可看出,随着冲刷流量增加,流动阻力不断增大,在实验参数范围内,流动阻力未达到自模化区^[5]。控制棒通道内的设计流量为74 m^3/h ,对应的阻力为0.300 MPa。上述结果说明,在CARR工作参数范围内,冲刷控制棒和跟随组件的流动阻力未达到自模化区,冷却剂在不同流速下冲刷控制棒和跟随组件的流动阻力随着冲刷流量的变化与设计吻合,满足设计要求。

表 1 控制棒通道冷却剂流动阻力

Table 1 Coolant flow resistance of control rod channel

流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	流动阻力平均值/MPa
29.93	0.086
33.69	0.101
37.78	0.120
43.76	0.141
49.39	0.165
55.55	0.198
60.57	0.227
64.17	0.242
68.44	0.276
77.47	0.315

2.2 棒位对压降的影响

在冷却流量为 68.44 和 77.47 m^3/h 下流动阻力随控制棒位的变化曲线示于图 3。从图 3 可看出,随着棒位增加,控制棒驱动线通道内的冷却剂流动阻力呈微小增大趋势,但上下波动在 0.01 MPa 左右。约 0.01 MPa 的流动阻力波动对整个堆芯流量的影响属于正常设计可接受范围,即棒位对流动阻力的影响较小。这就是说,在 CARR 启动、功率调节等工况下,控制棒的移动不会对整个堆芯流量分配造成有意义的改变,即标准组件和跟随组件间的流量分配基本保持恒定。

3 结论

1) 控制棒通道内的冷却剂流动阻力随着流量的增加而增大,但仍处在 CARR 工作参数范围内,未到达自模化区。这一结果与设计吻合,满足设计要求。

2) 棒位对控制棒驱动线通道内冷却剂流动阻力的影响较小,棒位变化所引起的流动阻力变化处于正常设计可接受范围内,控制棒的移动对堆芯流量分配不会造成有意义的改变。

参考文献:

[1] 张继革, 吴元强, 王敏稚. 控制棒新型电磁驱动

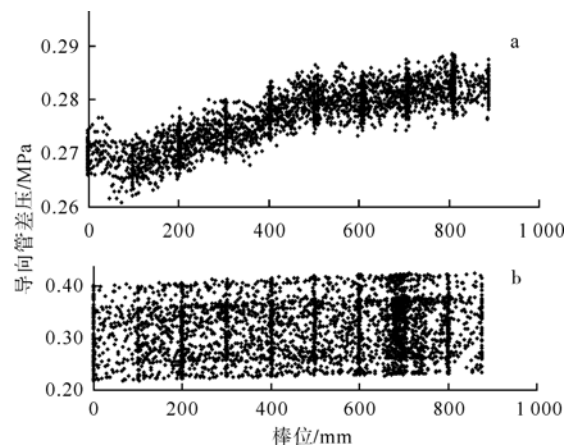


图 3 控制棒棒位阻力曲线

Fig. 3 Control rod position-resistance curves

冷却流量, m^3/h : a—68.44; b—77.47

机构性能实验研究[J]. 核动力工程, 2001, 22(4):365-369.

ZHANG Jige, WU Yuanqiang, WANG Minzhi. Experimental study on property of a new electromagnet drive for reactor control rod[J]. Nucl Power Eng, 2001, 22(4):365-369(in Chinese).

[2] 张继革, 吴元强, 盛选禹, 等. 控制棒新型电磁驱动机构动态特性实验研究[J]. 核科学与工程, 2003, 23(2):123-126.

ZHANG Jige, WU Yuanqiang, SHENG Xuan-yu, et al. Experiment study on dynamic property of a new electromagnet for reactor control rod[J]. Chi J Nucl Sci Eng, 2003, 23(2):123-126(in Chinese).

[3] 刘宝廷, 程树康. 步进电动机及其驱动控制系统[M]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学出版社, 1997.

[4] 孙常龙, 薄涵亮, 姜胜耀, 等. 可移动线圈电磁驱动控制棒快速落棒实验研究[J]. 核动力工程, 2006, 27(1):73-75.

SUN Changlong, Bo Hanliang, JIANG Sheng-yao, et al. Experimental study on the scream of electromagnetic movable coil control rod drive mechanism[J]. Nucl Power Eng, 2006, 27(1):73-75(in Chinese).

[5] 潘文全. 工程流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.