

FFR 实验快堆控制棒驱动机构样机设计(I型)

邓培坤 金耀庆 秦静之 尤吉璽 杨志伸

(中国原子能科学研究院, 北京)

文章叙述了 FFR 实验快堆控制棒驱动机构样机的主要功能、设计准则和要求、主要技术参数, 介绍了控制棒驱动机构的 8 个主要部件的结构和基本数据。主要部件是主驱动系统、快速释放系统、缓冲系统、抓手系统、密封系统、位置指示系统、弹性补偿装置和锁紧装置。最后叙述了整机的结构特点和设计背景。

关键词 FFR 实验快堆, 控制棒驱动机构。

一、引言

控制棒驱动机构是反应堆安全保护系统的主要机械部件之一, 其可靠程度直接关系到反应堆的安全运行。无论哪种类型的反应堆, 建堆各国都把控制棒驱动机构作为一个重要的研制项目, 而建快堆的各国都建造了专门的驱动机构试验台架作长期研究, 以期达到万无一失的可靠程度。为了发展自己的快堆技术, 我们对快堆控制棒驱动机构某些关键部件进行了多年研究, 并在此基础上, 设计出一台兼有安全、调节、补偿功能的控制棒驱动机构样机, 以便在堆外做工程验证性试验。通过试验, 获取经验, 改进设计, 达到正式投入堆用的目的。

二、设计要求和主要技术参数

1. 按照反应堆的控制要求移动控制棒。
2. 能使控制棒保持在行程范围内任何位置。
3. 在紧急情况下, 在棒行程内任何位置, 都能快速将棒插入堆芯。
4. 在吸取国外快堆驱动机构经验基础上, 尽量简化结构, 便于安装和维修。
5. 立足于国内工艺水平, 尽量采用国内技术, 选用标准设计和标准件。

主要技术参数列于表 1。

表 1 主要技术参数
Table 1 main technical parameters

| 系 统 | 项 目 | 参 数 |
|---------|------------------------------|------------------------|
| 主驱动系统 | 驱动重量(包括控制棒)/kg | 250 |
| | 最大行程/mm | 550 |
| | 提升速度/mm·s ⁻¹ | 5~100 |
| | 交流异步电机功率/W | 750 |
| | 滚珠丝杠付标准 | GC 50×10-B/N1×3 |
| | 滚珠丝杠孔径/mm | φ25 |
| | 滚珠丝杠制动器的最大制动力矩/kg·m | 6 |
| 快速释放系统 | 电磁铁吸力/kg | 300 |
| | 释放时间/s | 0.02 |
| | 落棒时间(行程 400 mm)/s | ≤0.5 |
| | 无故障连续落棒次数 | 1000 |
| 缓冲系统 | 缓冲行程/mm | 100 |
| | 缓冲器最大减加速度/g | ≤8 |
| | 后备减震器最大减加速度/g | ≤40 |
| | 缓冲重量/kg | 150 |
| 抓手系统 | 抓爪直线垂直移动行程/mm | 50 |
| | 抓爪径向开合的轴向行程/mm | 10 |
| | 抓爪总行程/mm | 60 |
| | 拉压力传感器分辨率/kg | 1 |
| 位置指示系统 | 位置指示总误差/mm | ≤1 |
| | 位置指示器最小读数/mm | 0.1 |
| | 位置重复误差/mm | ≤0.1 |
| 密封系统 | 金属风箱外径×内径/mm | φ120×φ60 |
| | 金属风箱碟片厚度/mm | 0.15 |
| | 金属风箱最大压缩比/% | 60 |
| | 金属风箱泄漏率/Pa·l·s ⁻¹ | <1.33×10 ⁻⁹ |
| 外形总尺寸量及 | 密封套外径/mm | φ205 |
| | 驱动机构总高/mm | 10 849 |
| | 驱动机构总重量/kg | 525 |

三、控制棒驱动机构结构简介

驱动机构由主驱动系统、抓手系统、快速释放系统、缓冲系统、位置指示系统、密封系统、弹性补偿和机械锁紧装置等组成(见图 1), 详述如下。

(一) 主驱动系统

主驱动系统是驱动控制棒上下移动的动力和传动部件, 它由电机、两级减速齿轮、滑块自锁器、滚珠丝杠付、螺母升降台、拉压力传感器、主驱动轴等组成。当电机旋转时, 通过两对减速齿轮和滑块自锁器, 带动滚珠丝杠旋转, 内循环滚珠螺母带动螺母升降台垂

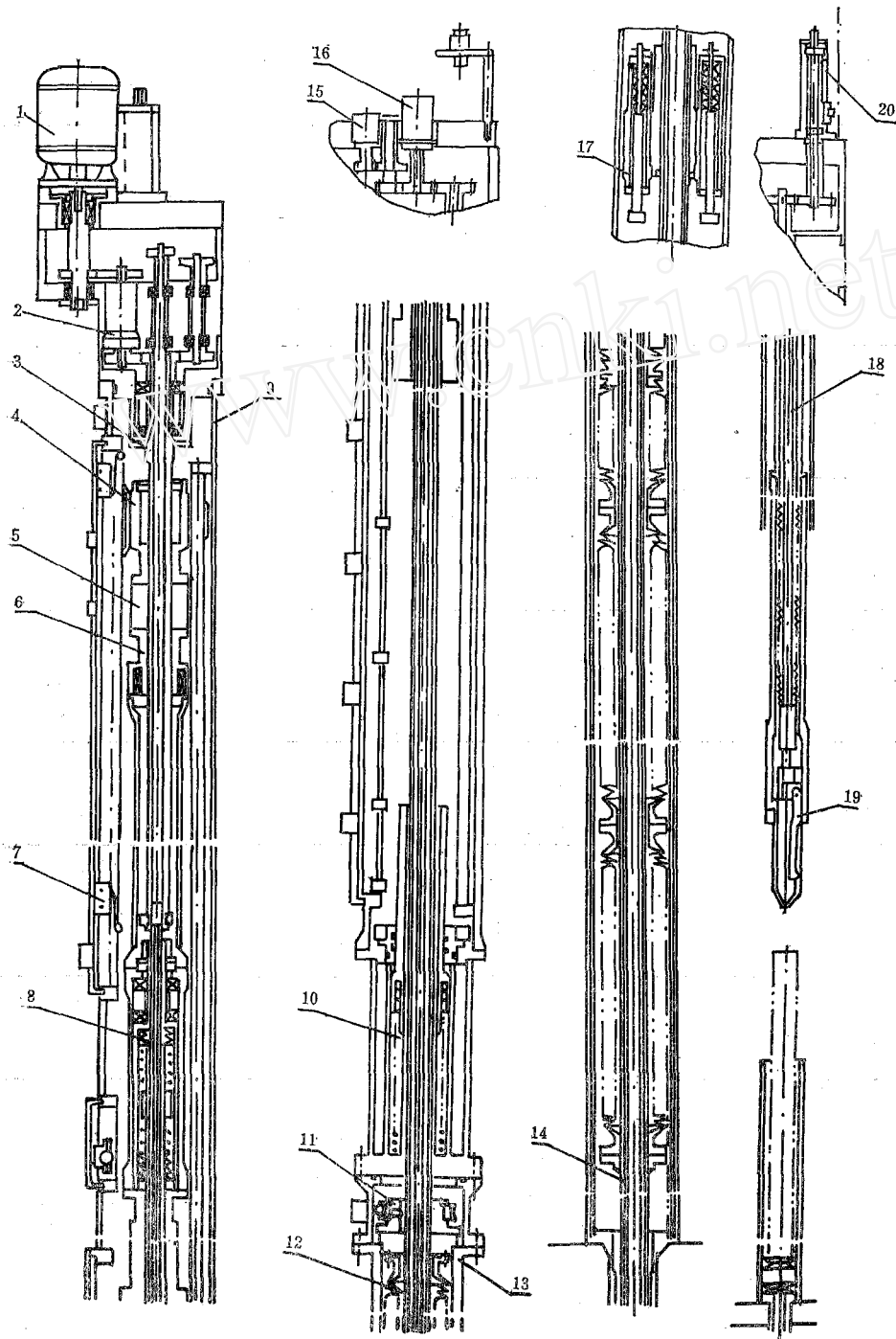


图 1 控制棒驱动机构

Fig. 1 Control rod drive mechanism

1—电机；2—滑块自锁器；3—滚珠丝杆；4—升降台；5—拉压力传感器；6—电磁铁；7—微型开关；8—弹性补偿装置；9—密封套筒；10—落棒缓冲器；11—锁紧装置；12—金属风箱；13—固定套管；14—主传动轴；15—自整角机；16—螺旋电位计；17—后备减震器；18—抓爪操纵杆；19—抓爪；20—指针和刻度尺。

直往复运动,升降台通过拉压力传感器和盘式直流电磁铁与主驱动轴连成一体,带动控制棒上升或下降。调试和维修时,主驱动系统也可手动。

1. 电机 电机是主驱动系统传动的动力源,选用微型三相异步电动机,功率为750 W,额定转速为1400 r/min。电机采用交流电动机变频调速器进行无级调速。

2. 两级齿轮减速 两级总减速比为2.24,通过电机调速,整个控制棒的移动速度范围可在5~100 mm/s之间任意调节。

3. 滑块自锁器 用于制止滚珠丝杠的逆转,滑块自锁器的主动轴与电机通过一对齿轮相联,其从动轴通过另一对齿轮与滚珠丝杠相联。主动轴双向转动灵活,从动轴双向均能自锁,自锁扭矩不低于6 kg·m,足够制止滚珠丝杠的逆转。

4. 滚珠丝杠螺母付 它是主驱动系统中的主要部件,它把电机的旋转运动变成控制棒的直线运动。由于滚珠丝杠付为垂直转动状态,单向受力,所以选用了非调节的内循环滚珠螺母,结构简单、径向尺寸小。滚珠丝杠付螺纹部份选用了标准设计,其余部份为非标设计。滚珠丝杠为一空心件,抓手操作杆穿越其中。丝杠旋转,螺母移动。

5. 螺母升降台 它主要是限制滚珠螺母的转动,并通过拉压力传感器、电磁铁组件与主驱动轴连接,引导主驱动轴上下移动。螺母升降台与滚珠螺母采用键连接,它的外圆表面焊有两个对称的、衬有耐磨套的导向支架,由两滑轨进行导向,并限制其转动。

6. 空心拉压力传感器 它不仅作为载荷监督装置,还作为主驱动系统和抓手系统的敏感元件。利用拉压力传感器对控制棒重力的“感觉”来显示控制棒“脱离”或“连接”状态,以及电磁铁是否吸住主驱动轴。传感器设计成空心的,目的是让滚珠丝杠中间穿过,以便缩小驱动机构的径向尺寸,增加密封外罩内空间利用率,便于走线。拉压力传感器上端与螺母升降台连接,下端与电磁铁组件相连。

7. 主驱动轴 主驱动轴由法兰和螺钉联结数段管子而成,其上端通过电磁铁组件与主驱动系统的传动部件联在一起,下端与抓手焊在一起,当抓手与控制棒连接成一体时,可带动控制棒上下移动。

(二) 快速释放系统

样机兼有安全棒驱动机构的功能,传动部件滚珠丝杠付不能达到快速落棒所要求的下降速度,所以以盘式直流电磁铁组件作为快速释放机构。反应堆正常运行时,电磁铁线圈通电,升降台吸合主驱动轴成一体。发生事故时,电磁铁线圈断电,两部份脱离,主驱动轴与抓手系统一起带着控制棒组件(150 kg)依靠自身重力快速串联插入堆芯。当驱动升降台到达最低行程位置时,电磁铁与衔铁吸合,可重新提升控制棒。

为了使电磁铁与衔铁之间吸合更加吻合,不产生过大气隙、减弱吸力,在衔铁装置中设计了球形关节和主驱动轴连接,以便适应轻度偏心。

(三) 抓手系统

抓手系统用于执行主驱动轴与控制棒之间的连接与脱离,不具备快速释放功能,仅在反应堆换料或更换驱动机构时,使控制棒在下终端位置脱离或连接。

抓手系统采用手动操作。主要由手动操作机构、齿轮付、传动轴、旋转套筒、抓手驱动螺母付、抓手操作杆、抓具头、销轴、抓爪等部份组成。为了适应偏心,抓手具有两球

铰,最大偏心距为 15 mm。

换料或更换驱动机构时,把主驱动轴驱动到最低位置(行程 550 mm),然后用抓手操作系统释放控制棒,即用手动操作抓手操作杆,让抓手带着控制棒继续向下行程 40 mm,直到控制棒接头支撑在控制棒导管顶部,此时控制棒下端距离导管底部的距离 >40 mm,最后操作抓手行程 20 mm,抓爪体中的内外凸轮使抓爪绕销轴转动,使抓爪收缩或张开释放和抓取控制棒,抓手总行程 60 mm。抓手行程有刻度指示,上下终端位置有行程开关控制。

(四) 缓冲系统

快速落棒时,为了保护堆芯构件与控制棒组件免受损坏,设有缓冲系统,它包括落棒缓冲和后备减震器。

1. **落棒缓冲** 它是一种环形活塞——小孔节流式油缓冲器。主要由环形活塞、主油缸、副油缸、油标杆等部份组成。快速落棒时,主驱动轴上的冲击套冲击环形活塞,主油缸中的油通过油缸套上的小孔被压入副油缸,将下落部件的动能转换成流体动能,以高速流体摩擦发热消耗掉,达到减速目的。为了达到等减加速度运动的目的,排油小孔面积是按一定函数关系排列的。落棒缓冲器置于旋塞顶部,在正常落棒行程的最后 100 mm,可使落棒时的最大负加速度达 5 g,小于 8 g 的设计要求。落棒缓冲的复位由微动开关监督,油位由油标杆监督。

2. **后备减震器** 它是驱动机构的后备缓冲器。当落棒缓冲器万一失效时,由它来降低下落部件的冲击力,防止相关部件产生残余变形。后备减震器按最大负加速度不超过 40g 设计,它由降落器支套、碟簧、降落杆、变形薄套组成,固定在主驱动轴上的冲击套上。正常落棒时,落棒行程到末端,降落杆着陆在落棒缓冲器上端法兰面上,此时只起支撑作用,不起减震作用。当落棒缓冲器失灵时,降落杆落在落棒缓冲器法兰上后,就冲击薄壁套,使它拉伸变形,这样依靠材料的塑性变形来吸收落棒的冲击能量,达到减震目的。

(五) 位置指示系统

位置指示系统用于监督和指示控制棒在任何状态下的位置,它包括控制棒行程位置指示和抓手行程指示。

控制棒行程位置指示采用自整角机系统和与之相连的机械指示器来连续指示控制棒的精确位置,并用一只多转螺旋电位计来传送控制棒移动速度的信息。自整角机发送器输出轴与滚珠丝杠采用同步转动。另外,控制棒行程的上、下终端位置装有行程开关,当控制棒驱动机构运动到达上下终端位置时,可以发出指示信号,切断电机电源。

由于抓手系统活动不频繁,所以采用手动操作,其行程指示采用目测装置。主要由螺杆、螺母、支板、刻度尺组成。抓手行程上下位置装有微动开关,以便向操作台发出抓爪开合信息。

(六) 密封系统

密封系统采用双重密封结构来防止放射性气体和钠蒸汽进入反应堆大厅。

堆内放射性气体泄漏通道主要是主驱动轴移动环隙和抓手操作杆移动环隙。由于主驱动轴行程长达 550 mm, 且堆内复盖气体压力低, 所以主驱动轴的通道采用了大压缩比焊接式的金属风箱作密封件。金属风箱上端在机械锁紧装置的底座上固定, 下端固定在驱动轴上, 主驱动轴穿过其中央, 固定处均采用静密封。当驱动机构处于上行程位置时, 金属风箱处于压缩状态。

抓手操作杆的密封, 由于行程短、直径小, 采用普通标准的不锈钢整体式波纹管密封其通道, 上端与主驱动轴焊接, 下端与抓手操作杆焊接。

二次密封是驱动机构上部的密封套筒, 套筒装有快速接头与气体循环管路相接, 筒内充入氩气, 压力稍高于堆内压力, 就可达到二次密封的目的。此密封还可监督金属风箱的泄漏。

(七) 弹性补偿装置

弹性补偿装置的主要作用: 1. 为了防止抓手操作杆和主驱动轴之间由于膨胀差而引起过大的应力, 可作为两个细长杆的伸缩补偿节; 2. 限制抓手组件在快速落棒时受到过大的冲击力, 特别是落棒缓冲器失效、后备减震器工作时。它由两组弹簧组成: 圆柱弹簧和碟簧。圆柱弹簧主要是作为两组长杆件伸缩补偿, 同时也能减小抓手组件因快速落棒所受到的冲击。而碟簧主要是为防止抓手组件在后备减震器作用时受到过大冲击而损坏。碟簧是按接受 40 g 的冲击力设计的。

(八) 机械锁紧装置

机械锁紧装置是为停堆换料或检修时, 主驱动轴提到上终端位置以上 10 mm 进行锁紧, 防止主驱动轴突然下落(电磁铁组件突然断电)。所设置的锁紧装置为手动, 主要有蜗轮套、蜗杆、轴套、钢球、位置指示盘、手柄等组成。

四、结构特点

FFR 实验快堆控制棒驱动机构样机设计主要有以下几个特点。

1. 它是一种多功能的控制棒驱动机构, 既可作补偿、调节棒驱动机构, 也可作紧急停堆的安全棒驱动机构。
2. 采用了普通的三相异步电动机作动力源, 以交流电动机变频调速器进行无级调速, 既经济又不需要特殊电源供电。
3. 采用同轴布置的滚珠丝杠作为主驱动部件, 抓手操作杆穿过其中, 既减小了驱动机构的径向尺寸, 又提高了传动系统的传动效率和精度。
4. 采用了滑块自锁器防止滚珠丝杠逆转, 这种自锁器主动轴双向转动灵活, 从动轴双向自锁, 它锁紧可靠、传动灵活、体积小。
5. 采用大压缩比的焊接型金属风箱作为主驱动往复运动的密封件, 完全隔离了堆内复盖气体和钠蒸汽进入驱动机构的上部空间。
6. 采用空心拉压力传感器作为负载保护元件与感觉元件, 用它来称重指示和监督控制棒组件与驱动机构抓手的脱离或连接状态。

7. 采用置于堆外的线性油缓冲器作为紧急落棒的缓冲装置, 有利于检修、更换和监督。
8. 对于控制棒的状态, 采用了多重指示监督系统, 有利于互相校正核对。
9. 落棒缓冲器预装有加速度计, 可及时监督缓冲器的缓冲效果。
10. 主驱动系统既能电动, 又可手动, 便于驱动机构的调试和检修。
11. 为了适应控制棒导管与主驱动轴之间的偏心, 抓手系统设计有球型活动关节。

五、结束语

由于快堆驱动机构工作在高温钠介质中, 与其他堆型的驱动机构截然不同, 国内没有任何经验和资料可以借鉴。经过长期的努力, 总结了国外已建和在建的多座快堆驱动机构的经验, 综合分析了各种结构型式和发展趋向, 比较了驱动机构各主要系统的各种设计方案, 进行了全面的选型论证和主要部件的研制, 并结合我国最先进的工艺, 完成了我国第一台实验快堆控制棒驱动机构样机施工设计。

参 考 文 献

- [1] 邓培坤等, 钠冷实验快堆安全棒驱动机构的设计与研制, 中国原子能科学研究院成果报告, 1982年。
- [2] Proceedings of the meeting on FAST REACTOR CONTROL MECHANISMS, 1964, WASH-1054 (pt.1)
- [3] 三上隆夫, 高速增殖炉用制御棒驱动机构の開発, 东芝レビュー, 30(1), (1975).
- [4] 法国工业展览技术资料(CEA Exposition de Beijing), The control rod mechanisms in the reactor Phenix (Réacteurs à Neutrons Rapides mecanisme de B. D. C.), 1978.
- [5] 肖助泽, PEC堆控制棒驱动机构的设计与试验研究, 赴意大利进修专题总结, 1980。

(编辑部收到日期: 1991年3月30日)

DESIGN OF THE CONTROL ROD DRIVE MECHANISM PROTOTYPE FOR THE FFR (I TYPE)

DENG PEIKUN JIN YAOQING QIN JINGZHI
YOU JIKUN YANG ZHISHEN

(China Institute of Atomic Energy, P.O. Box 275, Beijing)

ABSTRACT

The paper describes main function design criteria and requirement, main technical parameters of the control rod drive mechanism prototype for the FFR at first. Then describes in detail the structure and parameters of eight basic components, i.e. the main drive system, the fast release system, the damping system, the gripper system, the seal system, position indication system, the spring compensation device and the mechanical lock device. Finally, the structure features and the design backgroundes are described.

Key words FFR Experimental fast reactor, Control rod drive mechanism.