

文章编号：0258-0926(2017)01-0135-04; doi: 10.13832/j.jnpe.2017.01.0135

浮动式核电站装卸料平台高精度定位技术研究

安彦波, 罗 英, 刘 聪, 谭 越, 黄 辉, 陈书华

中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都, 610213

摘要: 针对浮动式核电站装卸料过程, 对浮动式核电站装卸料平台的定位精度进行数学建模, 对影响定位精度的各个环节进行详细的分析。在此基础上, 提出一种开环结合闭环式修整高精度定位技术, 以大大提高装卸料平台的定位精度, 满足浮动式核电站装卸料平台高精度定位要求。

关键词: 浮动式核电站; 装卸料平台; 定位精度

中图分类号: TL351 文献标志码: A

Research of High Positional Accuracy of Manipulator Crane for Floating Nuclear Power Plants

An Yanbo, Luo Ying, Liu Cong, Tan Yue, Huang Hui, Chen Shuhua

Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

Abstract: This paper builds a mathematics model of the positioning accuracy of the manipulator crane for floating nuclear power plants according to the manipulating process, and particularly analyzes every part relevant to positioning accuracy. On that basis, a kind of high positioning accuracy technology is provided: the technology to combine the open-loop and the close-loop compensating. This technology can increase the positioning accuracy of floating nuclear power plant manipulator evidently, and satisfies the high positioning accuracy of floating nuclear power plant manipulator crane.

Key words: Floating nuclear power plant, Manipulator crane, Positioning accuracy

0 引 言

在核反应堆装卸料过程中, 因堆芯相邻燃料组件间隙较小, 为成功完成装卸料, 对装卸料平台相对堆芯的定位精度要求较高^[1]。在核电厂中, 一个装卸料平台对应一个核反应堆, 装卸料平台安装在换料轨道上之后, 不再卸出; 而在浮动式核电站中, 没有固定的换料轨道, 与普通核电厂有较大不同, 需对其装卸料平台的高精度定位技术进行研究。

1 定位技术数学模型的建立及分析

1.1 模型的建立

在浮动式核电站装卸料过程中, 首先需将装卸料平台安装到到压力容器上, 然后装卸料平台上的装卸料容器运动到堆芯指定位置的上方进行

一组燃料组件的装卸。待所有组件装卸完成后, 再将装卸料平台卸载。由此可见, 装卸料定位精度由以下 4 个部分决定:

- (1) 装卸料平台上装卸料容器的运动定位精度 Δ_1 。
- (2) 装卸料平台的制造精度 Δ_2 。
- (3) 装卸料平台相对反应堆的安装定位精度 Δ_3 。
- (4) 反应堆本身的制造安装精度 Δ_4 。

装卸料平台的定位精度按均方根法可表示为:

$$\Delta = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \Delta_4^2} \quad (1)$$

按极值法可表示为:

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4 \quad (2)$$

因极值法计算的结果大于均值法, 因此, 为

便于简化计算,以下的分析均采用极值法。

参考一般核电站中装卸料定位精度要求为:

$$\Delta \leq 0.6 \text{ mm}^{[2]}.$$

1.2 定位精度的分析

1.2.1 装卸料容器的运动定位精度 装卸料容器的运动定位精度指装卸料容器每次运动到同一理论位置时,装卸料容器的实际位置最大偏差,即装卸料容器的重复定位精度。

纯机械式的运动平台误差较大,为毫米级;机电式次之;磁电式、光电式误差最小,可做到微米级别。某装卸料平台采用磁电式反馈系统, $\Delta_1 = 0.025 \text{ mm}$ 。

1.2.2 装卸料平台的制造精度 装卸料平台的制造精度指装卸料平台上的装卸料容器相对平台安装组件的偏差,不同结构的装卸料平台差别较大。浮动式核电站装卸料平台直径,参考反应堆压力容器尺寸取为 3~4 m,按 IT7 级精度选取,则其精度为: $\Delta_2 = 0.21 \text{ mm}$ 。

1.2.3 装卸料平台相对反应堆的安装定位精度 装卸料平台相对反应堆的安装方式有 2 种: 通过自身的导向定位键和反应堆压力容器的 2 个导向定位栓孔配合定位; 通过自身的 4 个键槽与反应堆压力容器的 4 个导向定位键配合定位。

1.2.3.1 装卸料平台通过导向定位栓孔进行定位

(1) 装卸料平台通过自身的 2 个导向定位销与压力容器的 2 个导向定位栓孔配合而实现相对压力容器的定位。在二维平面上,两对轴孔配合限制 4 个自由度,而装卸料平台在二维平面上有 3 个自由度,故 2 对轴孔配合使装卸料平台相对压力容器过定位,易造成装拆困难,需对此种定位方式进行修整。

为避免过定位情况,设想一种情况:将其中 1 个销子削薄,则轴孔配合变为如图 1 所示的销孔配合。装卸料平台运动在 Y 方向上限制,而在

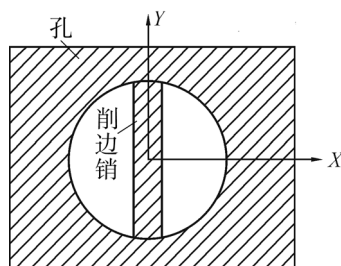


图 1 削薄的销孔配合

Fig. 1 Thin Pin Hole Matching

X 方向上可移动有限距离。设想另一种极端情况,销子厚度无穷小,则装卸料平台运动在 Y 方向上限制,而在 X 轴上可自由移动,即此厚度不计的销子只限制装卸料平台的一个自由度,与另外一个销子配合,限制了装卸料平台的 3 个自由度,过自由度情况解除。而实际工况中销子厚度不可能做到无限小,过定位情况也无法解除,因此,销子厚度越小,过定位程度越小,2 个销子越容易装配。

然而实际工况中,首先,销子厚度无法做到无穷小;其次,另外一个销子为便于装配,在与压力容器主螺栓孔的配合中有一定的间隙;因此一定厚度的销子即可一定程度上解除装卸料平台相对压力容器的过定位,又可消除因另一个轴孔配合的间隙而导致的在 X 轴上装卸料平台相对压力容器的定位误差。因此,销子厚度的大小既影响到装配的难易程度,又影响到装卸料平台相对压力容器的定位精度。

(2) 销子厚度与定位精度的关系。假设销孔半径为定值 A ,销子半径为 R ,定位面宽度为 $2b$,分析销子中心与销孔中心重合及销子处于销孔极限位置 2 种工况下,销子中心的距离 z 。由图 2 知:

$$z = \sqrt{A^2 - (\sqrt{R^2 - b^2})^2} - b \quad (3)$$

求 z 的全微分:

$$\begin{aligned} dz &= z'(R, b)dR + z''(R, b)db \\ &= -\frac{R}{\sqrt{A^2 - R^2 + b^2}}dR + \left(\frac{b}{\sqrt{A^2 - R^2 + b^2}} - 1\right)db \quad (4) \end{aligned}$$

实际工况中, $A \approx R$, 故式 (4) 可化简为:

$$dz = -\frac{R}{b}dR \quad (5)$$

由式 (5) 可知:削薄的销孔配合下,定位精度与销子的半径/宽度比成线性关系,与销子半径

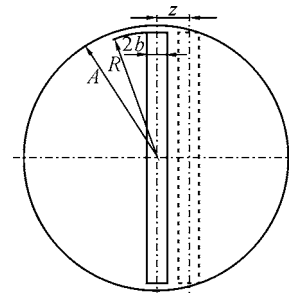


图 2 销孔定位精度

Fig. 2 Tolerance of Pin Hole Matching

的公差成线性关系。销子厚度 b 越大，定位精度越高。

1.2.3.2 装卸料平台通过导向定位键进行定位

若装卸料平台通过压力容器的 4 个导向定位键定位，则其安装定位精度取决于 4 个键的精度。此种情况下，参考一般反应堆设计要求，安装定位精度为： $\Delta_3 = 0.2 \text{ mm}$ 。

1.2.4 反应堆的制造安装精度 在本模型中，反应堆的制造安装精度指反应堆压力容器导向定位栓孔或者导向定位键相对堆芯中心的误差。

(1) 若装卸料平台通过压力容器的 2 个导向定位栓孔定位，反应堆的制造安装精度为 2 个导向定位栓孔相对堆芯的偏差。参考一般反应堆设计要求，制造安装精度为： $\Delta_4 = 0.9 \text{ mm}$ 。

(2) 若装卸料平台通过压力容器的 4 个导向定位键定位，反应堆的制造安装精度为 4 个导向定位键相对堆芯的偏差，定位精度较高。参考一般反应堆设计要求，堆芯安装定位精度为： $\Delta_4 = 0.017 \text{ mm}$ 。

2 高精度定位技术

由上面分析知，在不同安装定位方式及制造工艺下，装卸料定位精度有较大差别。为顺利完成装卸料操作，必须确保在何种安装方式及制造工艺下，装卸料定位精度必须满足使用要求。提高装卸料定位精度有 2 种方法：开环式修整；闭环式修整。

2.1 开环式修整

通过提高各个环节的精度最终提高装卸料的定位精度。

(1) 装卸料平台采用磁电式运动反馈系统，则装卸料容器的运动定位精度为： $\Delta_1 = 0.025 \text{ mm}$ 。

(2) 假定装卸料平台的外形尺寸为 3.5 m，制造精度按 IT7 级选取，则 $\Delta_2 = 0.21 \text{ mm}$ 。

(3) 参考 1.2.3 和 1.2.4 节可知，在开环式定位方式下，若装卸料平台通过 2 个导向定位销与压力容器的 2 个导向定位栓孔配合定位，则无论采取何种措施，均无法满足装卸料定位精度要求 ($\Delta_4 = 0.9 \text{ mm} > 0.6 \text{ mm}$)。因此，在开环定位方式下，只能通过装卸料平台的导向定位键槽与压力容器的 4 个导向定位键配合定位。此种情况下：

$\Delta_3 = 0.2 \text{ mm}$ ， $\Delta_4 = 0.017 \text{ mm}$ ，则：

$$\begin{aligned} \Delta &= \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4 \\ &= 0.452 \text{ mm} < 0.6 \text{ mm} \end{aligned} \quad (6)$$

综合以上分析，通过装卸料平台的导向定位键槽与压力容器的 4 个导向定位键配合定位的方式可大大提高装卸料平台的定位精度，满足装卸料定位精度要求。

2.2 闭环式修整

闭环式修整指分别将装卸料平台与堆芯视为二维平面上的刚体，省略定位模型中的中间环节，直接建立装卸料平台所在二维平面与堆芯所在平面的数学关系，再将堆芯平面上的点通过此数学关系映射到装卸料平台所在的平面中。

闭环式修整需要 2 个步骤：建立装卸料平台二维刚体平面与堆芯二维刚体平面的变换公式；将所需装卸的堆芯中燃料组件位置通过变换公式映射到装卸料平台中装卸料容器的位置。

2.2.1 变换公式的建立 为便于分析，假定固连于装卸料平台上的笛卡尔坐标系为 $X_1-O_1-Y_1$ ，固连于堆芯的坐标系为 $X-O-Y$ 。

(1) 对中使装卸料平台坐标系的原点 O_1 与堆芯坐标系的原点 O 重合（此处重合指相对于装卸料平台的制造及安装等误差，此重合误差可忽略不计；实际上，通过光学对中等手段此误差可不超过 0.02 mm ）。

(2) 使装卸料平台上的装卸料容器运动到待装卸料燃料组件位置上方；此时燃料组件中心 A 在 $X-O-Y$ 中的坐标为 (X_A, Y_A) 。利用对中装置观测，可测得 A 在 $X_1-O_1-Y_1$ 的坐标为 (X_{1A}, Y_{1A}) ，坐标关系满足：

$$\begin{bmatrix} x_A \\ y_A \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} x_{1A} \\ y_{1A} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中， T 为堆芯坐标系到装卸料平台坐标系的变换矩阵。

由矩阵变换的相关知识可知， T 为：

$$T = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中， θ 为堆芯坐标系 $X-O-Y$ 相对装卸料平台上的坐标系 $X_1-O_1-Y_1$ 转过的角度。

将式 (8) 代入式 (7)，可求得变换矩阵 T 。则在已知 $X-O-Y$ 坐标系中坐标 (x, y) 时，可求得 $X_1-O_1-Y_1$ 中坐标 (x_1, y_1) ：

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \mathbf{T}^{-1} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (9)$$

2.2.2 位置映射 当需要装卸堆芯中某处其坐标为 (x, y) 燃料组件时, 由于堆芯坐标系与装卸料平台坐标系不完全重合, 其在装卸料平台坐标系中坐标为 (x_1, y_1) 。由上节分析知, 两者坐标满足以下关系:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \mathbf{T}^{-1} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (10)$$

即当需要装卸堆芯中 (x, y) 处燃料组件时, 装卸料平台上装卸料容器需运动到 (x_1, y_1) 位置。

由以上分析可知, 通过建立堆芯坐标系与装卸料平台坐标系的变换矩阵, 可找到堆芯中任意一点坐标在装卸料平台坐标系的位置。实际装卸料中, 当需装卸堆芯中某处燃料组件时, 装卸料容器可运动到对应的装卸料平台位置, 实现装卸料的精确定位。

此方式, 装卸料平台的定位精度可简化为:

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_5 \quad (11)$$

式中, Δ_5 为对中精度。

Δ_5 可达到 0.02 mm (即光学对中精度), 故采用闭环式修整技术下, 装卸料平台的定位精度可达到: $\Delta = \Delta_1 + \Delta_5 = 0.045$ mm, 远远大于使用要求。

闭环修整方式建立了装卸料平台相对堆芯的位置映射关系。这种映射关系可以修整装卸料平台自身的固有制造精度 Δ_2 、安装定位精度 Δ_3 及反应堆的制造安装精度 Δ_4 , 既可大大提高装卸料精度又可减小对设备的精度要求, 减小了设备的制造难度。

2.3 开闭环结合的定位技术

无论是开环式修整还是闭环式修整均解决的是装卸料平台相对特定反应堆压力容器的定位精度问题, 即装卸料平台相对压力容器为一一对应关系; 而在浮动式核电站中, 多个反应堆可能共用一个装卸料平台, 而多个装卸料平台也可完成同一个反应堆的装卸料, 装卸料平台与反应堆不再是固定关系, 而是随机配对关系。单一的开环或者闭环修整技术均较难满足浮动式核电站装卸料精度要求。因此, 即要采用开环修整的方式提高装卸料过程各个环节的定位精度, 又要采用闭

环的修整方式直接建立装卸料平台所在二维平面与堆芯平面的数学关系, 以消除装卸料过程某个环节对最终定位精度的影响。

使用同一个装卸料平台给同一系列不同反应堆多次装卸料过程中, 装卸料平台自身的实际制造精度 Δ_2 已固定, 可通过闭环修整方式消除; 而装卸料平台的实际安装定位精度 Δ_3 在每次装卸料时会有不同, 不同反应堆压力容器的实际制造安装精度 Δ_4 也会不同, 在一次闭环修整后, 无法消除。故装卸料的定位精度可简化为:

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_3 + \Delta_4 + \Delta_5 \quad (12)$$

代入参考数值, 可得装卸料平台的定位精度为:

$$\begin{aligned} \Delta &= \Delta_1 + \Delta_3 + \Delta_4 + \Delta_5 \\ &= 0.262 \text{ mm} < 0.6 \text{ mm} \end{aligned} \quad (13)$$

通过此种方法, 在同一系列不同反应堆装卸料的过程中, 只需对某一个反应堆首次装卸料时闭环修整后, 将修整数据应用到后续装卸料过程即可满足所有反应堆多次装卸料的高精度定位要求。

从简化后的模型可得知, 装卸料平台自身的制造精度不再影响装卸料平台的定位精度, 因此该方法还可大大减小装卸料平台的制造难度。

3 结束语

对浮动式核电站装卸料平台的定位精度进行了分析, 提出了开闭环结合的定位技术, 可大大提高浮动式核电站装卸料平台的定位精度, 满足浮动式核电站装卸料高精度定位要求; 同时该技术无需在每次装卸料前都进行对中, 对装卸料平台自身的制造精度要求大大降低, 工程上易行而可靠。

参考文献:

- [1] 刘义清, 马雷, 颜廷宇. 压水堆装卸料机堆芯定位试验方法的比较分析[J]. 核动力工程, 2015, 36(4): 111-114.
- [2] 陆秀生, 王君. 大亚湾核电站反应堆堆芯定位系统改进研究[J]. 电力设备, 2008, 12(9): 60-62.

(责任编辑: 张明军)