

Development and application of lifting guide device for reactor core equipment in CPR nuclear power plant

Xin Xu

CGN Nuclear Power Operation Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518038, China

Abstract

During the refueling overhaul of CPR-type nuclear power plants, the lifting and lowering of reactor internals, top covers, and other core equipment require centering and guiding through 3 guide columns, each with a length of 5465mm. Due to the insufficient guiding length of the existing guide columns, there is no mechanical guiding limit for a height of approximately 4 meters after the guide ring of the lower component exits the guide column. Positioning can only rely on theodolites using positioning points set during the engineering installation phase and plumb lines on the lifting tools, resulting in high risks of human error and equipment damage. Against this background, the main goal is to provide precise guidance for the hoisting process of reactor internals and top covers by lengthening the existing guide columns, thereby reducing the risk of equipment collision and improving the economic efficiency of the power plant.

Keywords

nuclear power plant; reactor internals; long guide column

CPR 核电厂反应堆堆芯设备吊装导向装置开发与应用

徐鑫

中广核核电运营有限公司, 中国 · 广东 深圳 518038

摘 要

在CPR机型核电厂换料大修期间,反应堆堆内构件、顶盖等堆芯设备吊出/吊入时需要通过3根导向柱进行对中导向,导向柱长度为5465mm。由于现有导向柱导向长度不足,下部构件导向环出导向柱后约4m高度无机机械导向限位,只能依靠经纬仪通过工程安装阶段设置的定位点和吊具上铅垂线进行定位,人因失误和设备损伤风险较高。在此背景下主要想通过加长现有导向柱为反应堆堆内构件、顶盖吊装程提供精确导向,降低设备磕碰风险,提高电厂经济性。

关键词

核电厂; 堆内构件; 长导向柱

1 引言

反应堆堆内构件在反应堆压力容器(以下简称“压力容器”)内主要起承受堆芯重量、支承和固定堆芯组件作用,分为堆芯下部堆内构件(以下简称“下部构件”)和堆芯上部堆内构件(以下简称“上部构件”)两大部分[1]。其中下部构件高度为10m,吊装过程中与反应堆压力容器内壁最小间隙约2.4mm(见图1),为避免与压力容器内壁磕碰,大约有9m高度需要导向装置,目前使用导向柱和经纬仪定位的吊装方案。

现有的导向柱长度为5465mm(以下简称“短导向柱”)。非导向柱导向高度依靠经纬仪通过工程安装阶段设置的定位点和吊具上方铅垂线进行定位。在依靠经纬仪定位阶段的

吊装,历史上多次出现下部堆内构件与压力容器内部磕碰的情况。随着堆芯异物查找的次数增多,下部构件吊装已成为大修常态化工作。为降低压力容器和堆内构件损伤风险,因此需一种能实现下部构件吊装全过程定位导向的装置。最简单的方式就是将短导向柱延长,进而实现下部构件吊装全过程由导向柱提供机械限位导向,提升吊装的安全性。

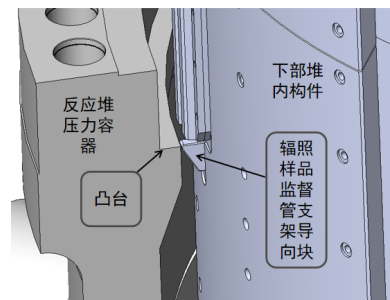


图1 下部构件与压力容器内壁最小间隙示意位置

【作者简介】徐鑫(1989-),男,中国四川巴中人,本科,工程师,从事核电维修研究。

2 国内外研究现状

为能同时兼顾顶盖和上部构件的吊装，加长导向柱都考虑保留短导向柱功能，主要研究如下：

可伸缩导向柱装置，在顶盖和上部构件吊装过程中收缩，下部构件吊装时候伸长使用，可满足全过程定位导向，在因在水下使用需要使用气源控制伸缩，存在保养和维护不便的缺点；

拼接式导向柱装置，原有的短导向柱基础上增加可拼接部分实现下部堆内构件吊装全过程导向。因需要远程加装，加装工作难度较大，且用时较长 [2]。以上两种类型的导向柱没有大范围应用。

3 长导向柱设计

3.1 长导向柱技术路线

本次长导向柱的研究不再考虑保留短导向柱，直接使用长导向柱替换现有短导向柱，长导向柱需同时满足上部构件和顶盖吊装导向，要实现此目的，需进行如下几个方面的研究。

分析下部构件吊装所需最短导向长度，以此来设计长导向柱的长度，同时分析此长度的导向柱运输路径是否满足要求，是否影响其他设备如压力容器顶盖、上部堆内构件的吊装。

考虑和短导向柱的使用场景一致，长导向柱的加工精度、表面处理等要求和短导向柱保持一致。由于长度改变，需进行长导向柱碰撞力学分析

考虑后续直接存放在核岛厂房，需分析核电厂现有存放架是否满足长导向柱长期存放及机组日常运行期间的抗震要求。

3.2 长导向柱的尺寸设计

直径设计：长导向柱两端及导向段尺寸沿用短导向柱的设计。导向段直径要求为 $\phi 155.4\text{mm} \pm 0.25\text{mm}$ 。

长度设计：在下部构件吊入压力容器内第一个磕碰高风险点为径向支承键进入压力容器筒体（如图 2 所示），经过计算长导向柱长度达到 8900mm（不含吊环）才可为此高度提供导向。

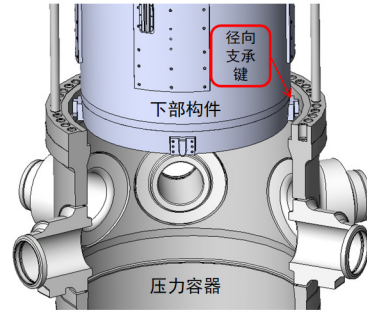


图 2 径向支承键进入压力容器筒体

接下来分析 8900mm 长度的长导向柱是否满足运输条件，分析长导向柱从龙门架到核岛内的运输路径，经过实地测量满足长导向柱的运输要求。最后分析长导向柱对其他设备吊装的影响，结果见表 1，满足其他设备吊装要求。

表 1 长导向柱是否满足堆芯设备吊装

设备名称	所需导向高度	长导向柱高度	是否满足吊装
上部构件	4905mm	8900mm	满足
下部构件	8900mm	8900mm	满足
反应堆顶盖	4696mm-9128mm	8900mm	满足
反应堆假封头	4696mm	8900mm	满足

3.3 长导向柱其他技术要求

长导向柱总重量不超过 1000KG；采用 3 段接杆拼装焊接而成，内部为密封腔室结构。长导向柱两端的设计及其他尺寸，沿用短导向柱的设计要求。材料选用 20Mn 优质碳素结构钢，直线度 $\leq 0.60\text{mm}$ ，同轴度 $\leq 0.05\text{mm}$ ，粗糙度 $\leq 0.8\mu\text{m}$ 。加工完成后表面需镀铬处理（螺孔及 27mm 通孔除外），镀铬和镀铬后的检验应按照 RCC-M F5100 的规定进行，镀铬层厚度为 0.025mm-0.05mm。

4 长导向柱的制造验收和性能验证

4.1 制造验收

长度测量，使用高精度卷尺等工具测量，长导向柱总长 8900mm。

直径测量，导向段直径要求为 $\phi 155.4\text{mm} \pm 0.25\text{mm}$ ，使用千分尺和游标卡尺对长导向柱上中下 3 个位置分别取 2 点进行测量，测量结果均满足标准要求。

重量检测，长导向柱整体重量根据理论计算加电子秤复核得出数据，总重量不超过 1000KG，实际测量结果均合格为 985KG。

镀层厚度检测，镀铬和镀后的检验应按照 RCC-M F5100 的规定进行，镀铬层厚度为 0.025mm ~ 0.05mm，使用铬层厚度检测仪对导向柱上中下部分别取 2 点进行检测，测量结果均超出标准上限 0.01-0.02mm，考虑到镀铬层厚度增加可提升导向柱的耐磨性，同时增加的镀铬层厚度并未导致长导向柱外径尺寸超标，此数据偏差可接受，无需进一步处理。

粗糙度检测，导向柱表面粗糙度要求 $\leq 0.8\mu\text{m}$ ，使用粗糙度检测仪对长导向柱上中下部分别取 2 点进行检测，测量结果均满足规范要求。

直线度检测，长导向柱整体直线度要求 $\leq 0.60\text{mm}$ ，水平测量：将导向柱装夹在 CW61100D-10 米车床上，通过三点支撑方式测量一半长度的直线度（ $\leq 0.30\text{mm}$ ），测量结果

均满足要求。竖直测量：使用吊车将导向柱竖直吊起，使用全站仪每间隔约 1m 取点测量垂直度，将测量结果进行线性拟合，结果证明 3 根导向柱从 6 个方向测量直线度均较好，不会由于吊点中心偏差而引起自身弯曲变形。

同轴度检测，导向柱装夹在 CW61100D-10 米车床上旋转，百分表打跳动检测，同轴度要求 $\leq 0.05\text{mm}$ ，测量导向柱上中下段的同轴度均满足要求。

4.2 长导向柱力学性能分析

长导向柱在使用过程中可能受到的意外碰撞来源于吊装过程中吊装构件碰触到长导向柱产生，吊装构件的最大质量约为 80 吨，接触碰撞时行车的移动速度为 0.2 m/min，考虑导向柱未进入吊具导向块，且吊装构件下端齐平长导向柱顶端时，吊装构件在水平方向处于相对自由状态，本次分析针对此种状态，计算允许的最大水平晃动量。采用有限元分析方法 [3]，利用 ANSYS 程序，进行静力分析方法计算长导向柱在碰撞载荷下的应力，并根据 RCCM 规范进行评定，结果表明，当吊装构件水平晃动量不超过 90mm 时，该长导向柱强度设计满足规范的要求。该长导向柱能保证结构完整性。

4.3 长导向柱存放抗震分析

长导向柱需要替换原短导向柱，在现场使用及存放，根据规范需要对原来存放架进行抗震分析，长导向柱为安全 2 级，抗震 I 类。对该长导向柱在存放状态进行抗震分析存放状态时，三根长导向柱采用一套存放架进行存放，该存放架分为上部支撑和下部支撑两部分，每套存放架总重量约 103 kg。其中上部支撑与壁面、下部支撑与地面之间分别采用 6 个 M24 螺栓连接，存放架与连接螺栓材料均为 0Cr18Ni10Ti。采用有限元分析方法，利用 ANSYS 程序计算了长导向柱存放状态整体结构的固有频率，然后采用谱分析与静力分析相结合的方法计算了该装置在自重以及地震载荷共同作用下的应力，并根据 RCCM 规范进行评定，结果表明该长导向柱及其支承结构结构强度设计、主要连接螺栓设计满足规范的要求，即在各工况载荷作用下，该长导向柱在存放状态能保证结构完整性。

综上，本次长导向柱的制造验收和性能验证的各项数据均满足规范要求，满足现场应用条件。

5 应用情况

长导向柱加工验收后首先在大亚湾核电基地技能中心的压力容器模拟体上进行了验证，满足各项设计要求，后在阳江核电厂 2 号机大修现场应用。此次下部构件吊出后对压力容器内部检查无磕碰痕迹，达到长导向柱设计要求。通过现场验证长导向柱能够实现对压力容器顶盖、上部构件、下部构件、压力容器假封头的吊装导向功能。

根据现场应用情况，将长导向柱吊装下部构件的方案（以下简称“方案一”）和原来短导向柱 + 经纬仪的方案（以下简称“方案二”）就堆芯设备的人员操作方法、占用大修主线时间、操作人员受到的辐射剂量做对比，对比结果如下。

5.1 操作方法对比

方案二对比方案一增加的操作步骤如下：（1）大修前借用、检查两部经纬仪；（2）下部工作吊架开工前 1 小时，到达现场安装、调试经纬仪；（3）根据现场下部构件吊装定位点调试验证经纬仪；（4）吊装过程中，导向环即将进出短导向柱期间，使用两个经纬仪检查吊具重锤线是否在两个经纬仪十字标靶中心。如不在中心需要调整环吊将重锤线对准经纬仪十字标靶中心；（5）在出短导向柱到达横移高度前（或回装时横移后进入导向柱上方后），持续用经纬仪监视重锤线，必要时调整环吊，在此过程中还需通过定位点验证经纬仪位置没有移动。

对比两种方案，方案一工作较为简单，花费的时间和人力都较少；方案二工作步骤多，在方案一的人员要求上需要至少增加 2 名使用经纬仪的人员，同时使用经纬仪人员精力要高度集中，如视力疲劳则需要停止吊装工作，延长吊装时间。且吊装难度和磕碰风险都相对较大。

5.2 占用大修主线时间对比

下部构件的吊装占用大修主线时间，根据历史信息使用短导向柱 + 经纬仪的方案吊入吊出平均总共用时 10 小时。本次使用长导向柱吊入吊出下部构件总共用时 8 小时，因为是首次使用后续随着人员熟练程度，还有可能用时更少，其余工作吊装压力容器顶盖、上部构件、压力容器假封头吊装时间相当，省主线时间 2 小时，因此长导向柱具有一定的经济性。

5.3 操作人员受到的辐射剂量对比

长导向柱和短导向柱拆装的工艺、操作人员数量和操作时间都相近，所以在导向柱拆装方面人员受到的辐射剂量相当，主要在于上、下部构件吊具导向环进入导向柱期间，上、下部构件出水高度较高，导致环境剂量率高于短导向柱方案，经过对比总辐射剂量高出约 1.2mSv。人员辐照剂量方面短导向柱 + 经纬仪方案更优。

6 结论

长导向柱作为一种堆芯设备吊装对中导向装置是可行的。其结构特点导向环与导向柱左右间隙为 2.3mm，能大幅度降低下部构件与压力容器内部磕碰的风险。同时对比现在应用的短导向柱 + 经纬仪方案，在操作方法、占用大修直线时间有明显的优势。在 CPR 机型的核电厂具有一定推广价值。后续使用长导向柱还需考虑如何降低操作人员的辐射剂量，如开发远程视频导向环与导向柱对中装置，无需人员靠近设备对中。

参考文献

- [1] 周涛. 压水堆核电厂系统与设备[J]. 北京市, 华北电力大学, 2012-12-01.
- [2] 叶荣山. 三门核电反应堆压力容器导向柱优化[J]. 中国高新技术, 2015, (23):27-29.
- [3] 张向宇, 熊计, 郝铨, 等. 基于 Ansys 的立柱有限元分析与结构优化设计[J]. 机械科学与技术, 2008, 27(12):1602-1605.