

紧凑型小型堆一回路中温度测量方案研究

郑文强 李翔 杨彬 宋亚梅 黄勇

中广核研究院有限公司

DOI:10.12238/pe.v3i2.12472

[摘要] 压水反应堆一回路温度信号是参与反应堆控制以及保护的重要信号之一,这篇文章对紧凑型压水反应堆冷却剂温度的测量方案进行了研究,通过采用层次分析法(AHP)对方案进行了决策,并对测量响应时间可能不满足安全准则的关键问题进行了流体力学建模分析,该论证过程为紧凑型反应堆旁路测温的工程应用奠定基础。

[关键词] 紧凑型小型堆; 一回路; 旁路测温; AHP

中图分类号: TH811 **文献标识码:** A

Study on the temperature measurement scheme in the primary circuit of the compact small reactor

Wenqiang Zheng Xiang Li Bin Yang Yamei Song Yong Huang

CGN Research Institute Co.,LTD.

[Abstract] The primary loop temperature signal of a pressurized water reactor is a crucial parameter for reactor control and protection. This paper examines a measurement scheme for the coolant temperature in a compact pressurized water reactor. The Analytic Hierarchy Process (AHP) is used for decision-making, and fluid dynamics modeling is applied to address key issues where the measurement response time may not meet safety standards. The findings provide a foundation for the engineering application of bypass temperature measurement in compact reactors.

[Key words] Compact Small Reactor; Primary loop; Bypass temperature measurement; Analytic Hierarchy Process

引言

20世纪70年代以来,国际上推进了中小型反应堆的研发。中小型反应堆的应用范围较广,除了为偏远地区提供供热或供电外,还可为海洋岛屿提供电力供应和海水淡化。小型堆不仅在其功率上是大型堆的缩小版,其一回路系统在设计上也与传统大型堆有很大区别。

小型堆一回路系统设计中,热段和冷段温度信号参与堆芯功率、平均温度控制及保护、稳压器水位控制,是一回路最重要的测量信号之一。传统压水堆通常采用热管段及冷管段设置旁路的方式将冷却剂引出,并在旁路管道上设置测温探头。也有通过直插式测温探头直接测量主管道内介质的温度并取平均值。本文介绍了国内某紧凑型小型堆一回路系统热段、冷段温度测点位置的论证过程,通过运用AHP分析并决策出适合紧凑型小型堆的方案,然后应用FLOWMASTER流场一维数值模型,计算到温度探头处介质的流动时间,评价其是否满足反应堆控制和保护的要求。

1 不同堆型一回路冷热段温度测量方案

1.1 KLT-40S一回路温度测量方案(方案一)

俄罗斯KLT-40S一回路的主设备布置紧凑,采用内外套管连接,无法通过主管道设置温度监测信号,其代替了对堆芯进出口温度的监测,堆芯出入口温度测量管线均从压力壳顶盖上引出,方便检修。堆芯出口温度位于堆内冷却剂出口附近。堆芯入口温度测量位于从压力容器下封头向上引出一股冷水,测量探头从压力容器上封头伸向此处,由此测得堆芯入口温度。

1.2 EPR一回路冷热段温度直插式测量方案(方案二)

EPR机组一回路的热段和冷段温度测量方案采用直插式测量方案,其取消了反应堆冷却剂系统测温旁路,由装在套管内的电阻温度计监测,套管直接伸入主管道^[1]。

直插式测温方案相对于旁路式主要优点为:①系统简化,可靠性提高;②核1级阀门、管道等减少,建造成本降低;③机组的剂量率降低,运行人员的辐照剂量减少;④定期试验、在役检查等的工作量减少,运行成本降低。

1.3 CPR1000旁路式测温方案(方案三)

CPR1000反应堆冷却剂系统采用旁路式测温方案,该方案在

热段及冷段管道上分别引出旁路管线,并在旁路管线上安装温度传感器,测量冷却剂温度。测得的温度信号用于计算TAVG及堆芯出、入口温差,供控制和保护系统使用。

测温旁路热段入口由3条出口混合组成,使引入流体能反映主管道内各处的温差,经混合后更真实地反映准确温度,但冷端不需要,因为通过主泵搅混后已起到混合作用。在汇流管线上设置流量计,以指示测温旁路中的冷却剂正常流动,从而可测量冷端端的真实温度^[2]。

2 紧凑型小型堆一回路温度测量方案研究

2.1 方案可行性分析

国内某小型堆一回路主设备布置紧凑,采用内外套管连接,取消了主管道设计。在方案论证与比选过程中,分别考虑了上述3种堆型的设计特点,论证出具备可行性、经济型、可靠性的方案。

经分析发现该堆型的压力容器上部腔室至内套管的流动过程中,冷却剂在上腔室轴向及内套管水平方向上均存在较为恶劣的热分层现象,若参考KLT-40S从堆顶盖直插入温度探头测量热段温度的方案(方案一),需布置较多测点才能测得平均温度,但由于从压力容器上腔室到蒸发器入口采用内套管连接,需要在冷却剂进入内套管前布置3~4个测量仪表,而顶盖上方的空间大部分被控制棒导向筒占满,实际布置空间非常有限,这种热段测温的方案难度较大。冷段测温的方案若采用从压力容器下封头向上引一股冷水再设置测温探头,但这股冷水可能会被堆芯加热导致温度不符合实际情况,而且从压力容器下封头向上设置引压管的布置空间也非常有限,而且管道的支撑点设置也是一个难题。

若参考EPR在主管道直插式的测量方案(方案二),因该堆型一回路无主管道设计,采用内外套管连接主设备,因此需要考虑测点布置位置与EPR有所不同,如果在主管道上布置测点,那么直插式温度传感器需要穿过外套管插至内套管,从结构上实现难度非常大,即便结构能够实现仪表布置,穿过外套管的仪表管也会扰乱原本稳定的冷却剂流场,增加流动不稳定性以及局部流动阻力,仪表管由于伸入位置过长,管道支撑点选择存在难题,因此通过热段套管设置温度测点方案基本不可行。主泵出口至压力容器之间采用内套管连接,仪表需要穿过外套管,因此通过直插式测量冷段温度与上述描述一样,基本不可行。

若参考CPR1000一回路旁路测温方案(方案三),与CPR1000不同的是可以考虑在蒸汽发生器的上升段环腔设置若干个对称布置的引出点,将上升段环腔的冷却剂引出并在母管内混合均匀以便测量其平均温度,冷段的引出点设置在压力容器上,直达主泵出口,经主泵搅混后再测量冷却剂温度,可很好的表征其平均值。两股冷却剂汇流后经蒸汽发生器下环腔回到一回路。这种方案避免了在内外套管上设置测点的难题,但也存在一定的缺点,旁路系统设计相对较为复杂,增加了很多核一级阀门、管道等设备,扩大了一回路承压边界的范围,增加了后期运行检修的成本。

2.2 通过层次分析法为方案决策提供依据

为了对上述三种方案的技术决策提供更定量化的数据支撑,文中引用了层次分析法,层次分析法(AHP)是一种用于处理决策问题的定量分析方法。AHP通过分层次地分析复杂问题,提供了一种系统的决策支持工具。其核心步骤包括建立层次结构、构建成对比较矩阵、计算权重和一致性检验,最后根据权重和评分计算每个方案的总得分,进而做出最佳选择^[3]。

2.2.1 建立方案决策的层次结构

目标层: 决策测温方案;

准则层: 测点位置难易程度、信号表征准确性、测量响应时间、技术成熟性、经济性、安全性

方案层: 方案一、方案二、方案三;

2.2.2 构建成对比较矩阵

对于每个准则或方案,构建成对比较矩阵A,矩阵元素 a_{ij} 表示第i个准则(或方案)与第j个准则(或方案)的相对重要性。矩阵A的对角线元素为1,即 $a_{ii}=1$,并且 $a_{ij}=\frac{1}{a_{ji}}$ 。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & a_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \cdots & 1 \\ a_{ij} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.2.3 矩阵归一化

需要对矩阵的每列求和,然后将矩阵中的每个元素除以该列的和,以得到归一化矩阵A' :

$$A'_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (2)$$

2.2.4 计算权重向量

权重向量w是归一化矩阵每行的平均值,其中wi是第i个准则的权重,n是准则的数量。

$$w_i = \frac{\sum_{i=1}^n A'_{ij}}{n} \quad (3)$$

2.2.5 一致性检验

为了确保成对比较矩阵的逻辑一致性,需要计算一致性比率(CR)。首先,计算一致性指标(CI):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

然后,计算一致性比率(CR):

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (5)$$

其中RI是随机一致性指数,与矩阵的维度n相关。一般认为,当 $CR < 0.1$ 时,矩阵具有良好的一致性。

2.2.6 综合得分计算

对每个方案的评分矩阵应用权重向量w,计算每个方案的最终得分S:

$$S = \sum_{i=1}^n w_i * r_{ij} \quad (6)$$

其中 r_{ij} 是方案j在准则i下的评分。

2.2.7专家评分结果输入

该选择总共涉及6个评价因素(即准则层为6项),以及3种方案(即方案层为3项),邀请若干位紧凑型小型堆系统设计以及仪控设计领域的专家进行打分,采用1-9分标度法,最终得分取平均值,并构建比较矩阵。

2.2.8一致性检验结果

对准则层比较结果的矩阵进行一致性检验,计算结果如下,CR值为 $0.054 < 0.1$,意味着本次判断矩阵满足一致性检验,计算所得权重具有一致性。

2.2.9综合得分结果输入

经计算得知,方案三的最终得分 $S_3=0.4583$,方案二的最终得分 $S_2=0.1471$,方案一的最终得分 $S_1=0.4007$ 。因此可以得知方案三的评价最高。

3 对旁路测温方案进行初步设计

根据上述AHP决策分析过程可知,方案三的在五个准则层面中,只有经济性以及测量响应时间两个维度上评分相比其他两个方案较差,而这两个维度中,测量响应时间的权重占比为6.78%,经济性为3.48%,因测量响应时间涉及到反应堆控制和保护系统的灵敏度,是决定方案是否成立的关键,需要开展进一步的论证分析,下文介绍了通过Flowmaster一维流体分析软件对该方案测量响应时间进行分析的过程和结果。

3.1测温旁路建模和设计边界参数确定

测温方案参考CPR1000分别在每个冷却剂环路流道的热段、冷段、过渡段设置引压以及回流点,其中热段的引压点设置在蒸发器一次侧筒体,周向对称布置6个,冷段引压点设置在压力容器筒体,过渡段引压点设置在蒸发器一次侧过渡段筒体。旁路上的阀门,温度计,流量计的设计参数和CPR1000基本保持一致,只有管道的布置已根据该堆的实际情况进行了调整。

根据测温旁路系统设计情况,建立了Flowmaster一维流体分析模型,搭建该模型的目的是为了分析冷却剂的流动时间是否能满足安全要求。系统中的压力源、管道、阀门、三通、孔板等元件直接选取Flowmaster元件库中的标准元件^[4]。压力源的确定是依据反应堆冷却剂系统主循环回路各段流道的压降计算结果。

3.2各段引出点到探头处流动时间计算结果

在模型建立及数据输入的情况下,计算两台蒸汽发生器热段和冷段测温旁路流体流动的时间,结果见表1。计算结果显示,两台蒸汽发生器热段各引出点到最后一个测温探头的流动时间

均小于安全准则2s的要求,压力容器冷段流动时间为0.01s,也能满足到最后一个测温探头的流动时间小于安全准则2s的要求。

表1 1号蒸汽发生器热段流动时间计算结果

引出点位置	引出点到最后一个探头的管道长度/mm	引出点到最后一个探头的流动时间/s
引出点1	2 112	1.027
引出点2	1 545	0.768
引出点3	2 861	1.349
引出点4	2 849	1.354
引出点5	1 531	0.77
引出点6	2 123	1.04

备注:1号蒸发器的计算结果与2号较为接近。

4 结束语

本文介绍了以CPR1000、EPR、KLT-40S直插式及旁路式一回路测温方案,通过分析这3种方案的优缺点,通过AHP的分析方法得出更适合用在紧凑型小型堆的方案,并在分析过程中发现准则层之一的测量响应时间为该方案是否可行的决定因素,之后在建立Flowmaster一维流体模型与数值计算后,计算出了该方案下测温探头处介质的流动时间,证明能满足平均温度控制及保护功能的基本要求。

事实表明,旁路测温方案理论上更适合应用在紧凑型小型堆,因旁路测温方案在M310在役核电厂一回路中已得到过大量的成熟应用,故从技术成熟度、可靠性及安全性角度来说,都具备在未来紧凑型小型反应堆中工程应用的可能。

[参考文献]

- [1]程超,田骏,宋磊.核电站一回路主管道直接测温方案研究[J].自动化仪表,2023,44(S1):357-360.
- [2]李永华,蒲亮,周思远.压水堆核电机组(火用)成本分析的矩阵算法[J].电力建设,2014,35(6):137-141.
- [3]汪应洛.系统工程(第5版)[M].机械工业出版社,2019.9.
- [4]任云.测温旁路稳态仿真计算分析[J].核动力工程,2015,36(S2):60-63.

作者简介:

郑文强(1987--),男,汉族,湖北省襄阳市人,工程师,硕士研究生,研究方向:核工程与核技术。