

Numerical Research of CAP1400 IHP Cooling System

Xingliang Zhang, Hao Yu, Wei Zhang, Yinbiao He

Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute, Shanghai
Email: zhangxingliang@snerdi.com.cn, yuhao@snerdi.com.cn

Received: Jul. 7th, 2017; accepted: Jul. 23rd, 2017; published: Jul. 26th, 2017

Abstract

One of the main functions of the Integrated Head Package (IHP) in the reactor is to provide cooling for the Control Rod Drive Mechanism (CRDM) magnetic coils. This is realized by the four axial fans connected to the ventilation tubes of the CRDM cooling shroud. Under normal operation condition, only two of the four fans work. It is required that the IHP cooling system should keep the magnetic coil temperature below 200°C in the design specification. This is achieved by ensuring that the average flow velocity around the CRDM coil assembly is above 15 m/s and that the minimum flow velocity at any location on the outer surface of the coil assembly is not less than 9 m/s. The main purpose of this paper is to study the flow characteristics of the IHP cooling system under various operating conditions. The CFD method is used to obtain the flow field and temperature field in the IHP and to support the rationality of the IHP design.

Keywords

The Integrated Head Package, Control Rod Drive Mechanism, CFD

CAP1400一体化堆顶组件冷却系统通风数值研究

张星亮, 于浩, 张伟, 贺寅彪

上海核工程研究设计院, 上海
Email: zhangxingliang@snerdi.com.cn, yuhao@snerdi.com.cn

收稿日期: 2017年7月7日; 录用日期: 2017年7月23日; 发布日期: 2017年7月26日

摘要

反应堆一体化堆顶组件(IHP)的主要功能之一是为控制棒驱动机构(CRDM)的磁轭线圈提供冷却, 冷却风

源是连接在一体化堆顶组件围筒的通风管上的轴流风机,在正常运行工况下,4个风机中的2个处于工作状态。为了保证CRDM的正常运行,规范书要求磁轭线圈温度应当低于200°C。这一要求通过保证CRDM磁轭线圈部件外的平均流速在15 m/s以上、磁轭线圈部件外表面任何位置的最小风速不小于9 m/s来实现。本文的目的是研究IHP冷却系统在各种风机运行条件下的流动特性,采用CFD方法计算得到IHP内的流场和温度场,为验证IHP设计合理性提供支持。

关键词

一体化堆顶组件, 控制棒驱动机构, CFD

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

控制棒驱动机构(CRDM)承担着正常运行工况下反应性控制以及事故工况下快速停堆的重任,因此控制棒驱动机构的可靠性和完整性直接关系到整个核电站的安全运行。当控制棒驱动机构正常运行时,磁轭线圈会通以较大电流,导致磁轭线圈温度升高。为了确保控制棒驱动机构的操作可靠性,对磁轭线圈组件的最大工作温度有严格的限制,因此需要对CRDM磁轭线圈进行适当的冷却[1]。

反应堆中一体化堆顶组件(IHP)的主要功能之一就是为CRDM磁轭线圈提供冷却作用。IHP的结构如图1所示。从图中可以看出,IHP冷却系统利用连接在通风围筒的风管上的轴流风机对CRDM进行冷却。一体化堆顶组件预置了4台风机,但是根据规范书要求,正常运行的工况下,4个风机中只有两个处于工作状态[2]。冷却风的流动路径是从通风围筒下部的风门进入,向上流过CRDM区,进入两个正在工作的风机的风管,最后通过风机排入安全壳内。

由于一体化堆顶组件在设计上与我国传统压水堆核电站采用的控制棒驱动机构冷却方式相比变动较大,因此相关的文献较为缺乏。其中于浩等[3]对CAP1000堆型的一体化堆顶组件的不同风机工况进行了研究,CFD计算得出,在各个工况下,CRDM外的风速均能满足规范书中的要求,可以有效冷却磁轭线圈。郑茂溪等[4]对CPR1000堆型的CRDM群的通风散热情况进行了试验及CFD研究,得出了线圈温度、散热量以及流-固接触面传热系数与通风量的关系,并且通过CFD计算结果与试验结果的对比,验证了数值计算方法分析控制棒驱动机构通风散热具有一定的可靠性和准确性。与这些研究相比,本文没有直接计算完整的IHP内所有的CRDM模型,而是采用了能反应线圈外轮廓的简化流道模型来代替CRDM,在不降低计算准确性的前提下,大大降低了前处理的难度,也减少了计算量。

本文针对CAP1400的一体化堆顶设计,采用CFD数值模拟方法计算了CRDM及其周围区域的流场和温度场,并且得到了CRDM磁轭线圈外的流动通道中的平均流速和最小流速,以及磁轭壳体表面的温度分布,说明了IHP风机冷却可以有效移除磁轭线圈的热量,验证了设计的合理性。

2. 计算模型

本文使用IHP整体模型得到IHP内的流场,由于结构较为复杂,因此模型需要一定的简化。首先保留IHP空气流道上的主要结构,如风门、CRDM通风围板、IHP围筒、DRPI板、风管等结构。由于CRDM

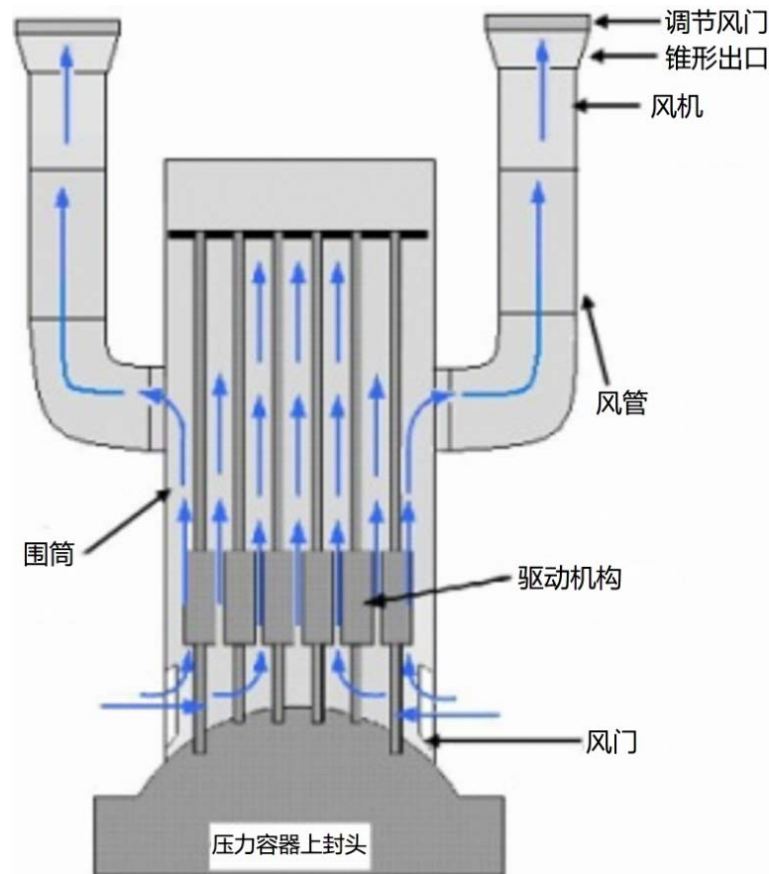


Figure 1. IHP cooling system schematic
图 1. 一体化堆顶组件冷却系统示意图

磁轭线圈部分结构非常复杂，总数达 89 根，因此要在完整的 IHP 模型中详细模拟这一结构很困难。本文主要关注的是 CRDM 磁轭线圈组件周围的平均流速和最低流速，而 CRDM 其它部分则并不关注。因此，对于 CRDM 的磁轭线圈区域的简化，本文采用了能反应磁轭线圈组件外轮廓的简化流道模型来代替，而 CRDM 其余部分则直接用圆柱模拟体来代替，并且保持 CRDM 群的空气通风截面积不变。这样既捕捉了对计算结果有重要影响的结构特征，又避免了模型太过复杂，计算量过大的问题。

入口边界为了如实模拟反应堆安全壳内的大空间环境，在入口风门以外建立了足够大的空间，并将空间外界面设为压力入口边界；风管出口设为压力出口边界，压力值根据风机的性能设定。当某台风机关闭时，设定其对应的风管出口为壁面边界条件。

本文采用商业软件 ANSYS FLUENT 12.0 计算 IHP 整体模型的流场。湍流模型使用 *realizable k-e* 模型，进气温度设定为 49°C [5]。根据设计规范，每个 CRDM 的发热量为 12kW ，采用均布热载荷施加在 CRDM 边界上。

IHP 整体模型以及简化流道模型如图 2 所示，为了便于进行网格划分，计算模型中简化了对流场影响较小的螺栓等结构，经过网格无关性分析，计算模型采用的网格单元数为 1300 万。

3. 计算结果

3.1. IHP 整体模型的计算结果

为 IHP 四台风机编号分别为 A、B、C、D，如图 3 所示。由于正常运行时 IHP 风机为两台工作、两台

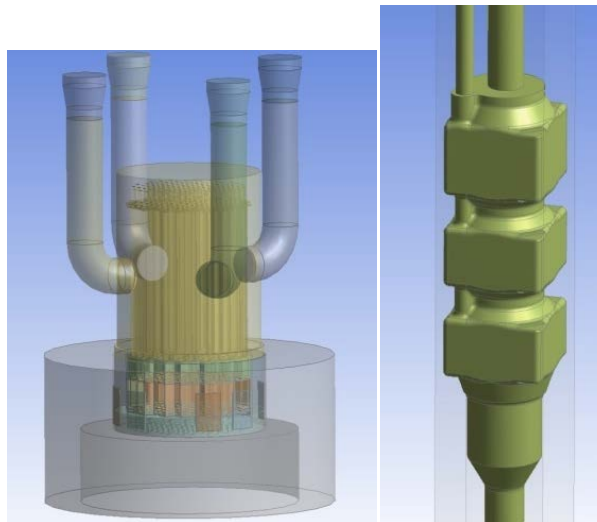


Figure 2. The overall IHP model and the simplified CRDM model
图 2. IHP 整体模型以及简化流道模型

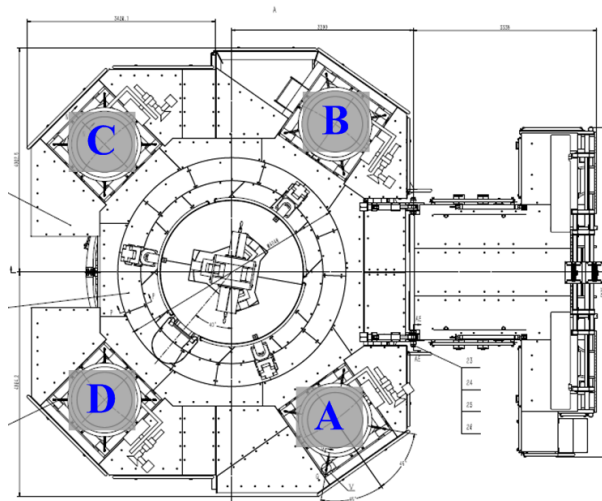


Figure 3. IHP fan position configuration
图 3. IHP 风机位置示意图

备用，因此分别计算四台风机两两组合的工况，得到不同工况下 IHP 系统的流动特性。风机全压均取风机设计全压 1.50 kPa，并且运行风机组合为风机 A、B 组合、风机 A、C 组合、风机 A、D 组合、风机 C、D 组合。

各种风机组合工况下，冷却空气在控制棒驱动机构磁轭线圈区的最低流速、平均流速和最高流速情况如表 1 所示。其中平均流速为 CRDM 磁轭线圈入口截面处的质量加权平均流速，最低流速取磁轭线圈区各子通道平均流速的最小值。

从表 1 中可以看出，CRDM 磁轭线圈组件周围的平均流速明显高于 15 m/s，最低流速略低于平均流速，但仍高于 9 m/s。风机 A、C 组合的平均流速为四种风机组合中最小的，因此本文主要关注风机 A、C 组合，也就是风机位置为对称分布的组合。此工况下 IHP 内流场的流线图如图 4 所示。

3.2. 不同风机全压的计算结果

为了探究风机性能对流速分布的影响，为风机选型提供参考，本文也计算了风机运行全压在 0.50~2.50 kPa

范围、风机组合为 A、C 时的流场，得到了模型中 CRDM 磁轭线圈区的平均流速和最低流速，如图 5 所示。计算结果表明，风机的运行全压应至少大于 1 kPa，以确保 CRDM 磁轭线圈组件周围的平均流速高于 15 m/s，最小流速高于 9 m/s。

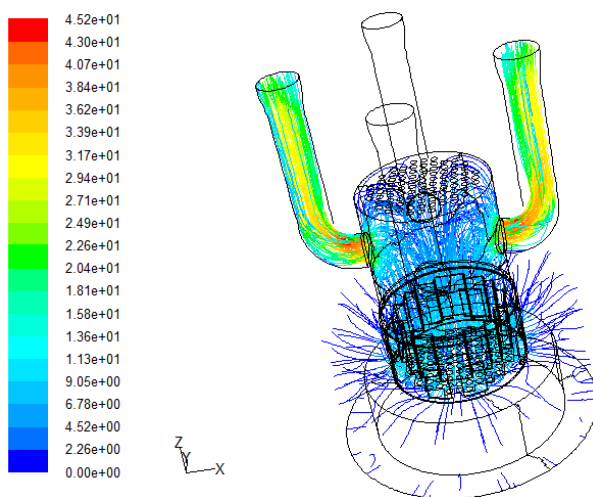
3.3. 磁轭区传热计算结果

为了验证在流速满足上文要求的情况下，磁轭线圈温度可以满足低于 200℃ 的要求，本文也计算了

Table 1. Velocity results for various fan conditions

表 1. 不同风机组合工况下的流速结果

| | 风机 A、B 组合 | 风机 A、C 组合 | 风机 A、D 组合 | 风机 C、D 组合 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 最低流速(m/s) | 16.74 | 16.47 | 16.60 | 16.56 |
| 最高流速(m/s) | 20.19 | 19.40 | 19.90 | 19.55 |
| 平均流速(m/s) | 18.70 | 18.20 | 18.64 | 18.49 |



Pathlines Colored by Velocity Magnitude (m/s)

Figure 4. Flow streamlines of the air flow field inside the IHP

图 4. IHP 内流场的流线图

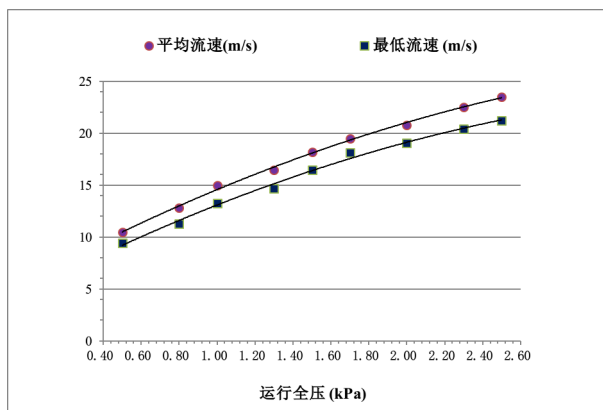


Figure 5. Operating total pressure and flow velocity of CRDM coil area

图 5. CRDM 磁轭线圈区的流速与运行全压的关系曲线

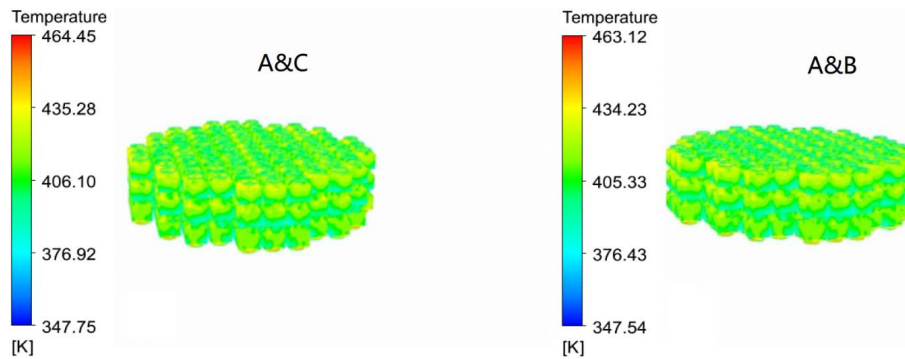


Figure 6. Temperature contour on the surface of the coil assembly

图 6. CRDM 线圈组件壁面的温度云图

磁轭线圈区域的温度场。运行风机组合为风机 A、C 组合和 A、B 组合，风机全压取风机设计全压 1.50 kPa。CRDM 线圈组件壁面的温度云图如图 6 所示，温度分布基本是均匀的，并且均低于 200℃。

运行风机组合为风机 A、C 组合时，线圈组件壁面的平均壁温为 147℃，并且在 CRDM 区域的顶部和底部产生了局部最高温度，达到了 191℃，这是由于冷却空间受限，空气流速低，因此这些位置在结构设计过程中需要特别注意。当运行风机组合从 A、C 转换为 A、B 组合时，CRDM 线圈组件外壁的平均壁温为 145℃，最高温度为 190℃，略低于风机 A、C 组合的值，结合 3.1. 中的数据，风机 A、B 组合的空气流速最大，说明得到的温度结果是合理的。

4. 总结

本文采用 CFD 方法分析 CAP1400 堆型 IHP 冷却系统的流场和温度场，获得了各种风机组合和不同风机运行压力下 CRDM 磁轭线圈组件的平均流速和最低流速，也获得了线圈组件壁面的温度分布和平均温度。可以得出以下结论：

- 在所有风机组合中，当风机运行全压设定为设计全压 1.5 kPa 时，CRDM 线圈组件周围的平均流速明显高于 15 m/s。最小流速略低于平均流速，但仍明显高于 9 m/s。
- 当风机运行全压从 0.50 kPa 到 2.50 kPa 之间变化时，空气流速也相应增大。为了提供足够的冷却风速，风机运行全压应至少大于 1 kPa。
- 空气冷却后，CRDM 线圈组件外壁的平均壁温约为 147℃，远远低于磁轭线圈的温度限值 200℃。但壁温在 CRDM 区域的顶部和底部可达到局部最大值 191℃，这在设计过程中可能需要特别注意。

参考文献 (References)

- [1] 孙汉虹, 等. 第三代核电技术 AP1000[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [2] 闵鹏, 等. 一体化堆顶组件设计规范书[R]. 上海: 上海核工程研究设计院, 2011: 25-28.
- [3] 于浩, 翁羽, 冯少东, 等. CAP1000 一体化堆顶组件风冷系统流场分析[J]. 核技术, 2013, 36(4): 040624.
- [4] 郑茂溪, 李跃忠, 冉小兵, 等. 控制棒驱动机构通风散热数值分析[J]. 核动力工程, 2014, 35(3): 69-72.
- [5] Ansys Inc. (2011) ANSYS 14.0 FLUENT User's Guide. Pennsylvania USA, Vol. 10, 725-726.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：nst@hanspub.org