

基于计算流体动力学 CFD 的电力工程仿真设计

宋 阳¹ 王 翀² 王艳鹏¹ 王文生¹ 孙 伟¹ 袁德权¹

(1. 华电电力科学研究院有限公司 110000; 2. 河北华电石家庄热电有限公司)

摘要: 电能是当今社会发展中应用的最重要的能源类型之一, 而现阶段社会发展中, 火力发电是电能获取的最主要形式。在火力发电厂电力工程设计中, 发电机组中锅炉机组中排气管道内部的蒸汽流动、传热问题是其中的关键技术环节, 对于整个发电机组的工作效率有着根本性的影响。对此, 本次研究中根据流体动力学 CFD 基本原理与电力工程仿真特性以及仿真计算方法, 创建更适用于火力发电电力工程建设使用的仿真模型。在模型提出的基础上结合电力工程实例, 对电力工程仿真计算设计的流程进行更深入的探索, 更进一步了解电力工程模型的网格划分与各个网格模型计算的独立解、计算中具体参数的设置、结果分析以及 CFD 验证在电力工程实际的应用等。力图通过本次研究, 为活力发电电力工程设计的进一步优化提供一定的支持。

关键词: 计算流体动力学; CFD; 电力工程; 仿真设计

电力工程的设计与建设涉及到能源应用、环境管理与保护等诸多领域的研究。电能的应用极大程度上推动了人类社会的发展, 当今时代人们的生产生活已经无法脱离电能的支持。社会发展中电能的应用, 火力发电是现阶段电力制备、供应的最主要形式, 我们使用的电能大部分都是通过火力发电的技术方法制备获得的。目前的电力工程设计开发中, 火力发电技术与火力发电技术流程中需要应用的锅炉、管道设备是其中的主要基础, 因而在火力发电电力工程的设计开发中, 要重点关注发电锅炉蒸汽管道的流体动力学设计方面的问题, 在减少能源消耗的同时提升机组发电效率。随着社会和技术发展越来越快, 在工业生产过程中也出现了很多问题。例如温室效应带来的大气污染以及酸雨等, 还有就是由于人们对生活质量要求提高而产生出来一系列不规范操作造成资源浪费现象等。这就要求在电力工程设计中, 要真正从可持续发展的角度出发, 建设更高效、更环保的电力工程。

1 计算流体动力学 CFD 应用简介

计算流体动力学 (CFD) 指的是使用计算机设备, 通过对工程数据的模拟, 研究液体流动与热能传导方面问题的技术类型。从 20 世纪 90 年代开始, 计算机技术与流体动力学都有长足的发展, CFD 技术也借此有利条件进一步发展成熟, 真正投入到实际应用当中。截至目前, CFD 技术在航空航天、能源开发, 石油化工以及汽车制造等多个高新技术产业中投入应用, 并在实际应用中展现出突出的应用效果。现阶段的 CFD 技术发展中, CFD 模拟已经成为流体动力学研究的主流研究方法之一, 未来必将在高新技术产业中得到更加广泛的应用^[1]。

而在最近几年, CFD 技术在指导电力工程设计, 优化发电设备结构, 分析系统运行及改善发电设备的安全性和可靠性等方面的应用也逐渐推广开来, 与之相关的研究成果也在不断的涌现。一些学者在研究张红, 通过 CFD 软件对火电机组直接空冷系统内部的蒸汽排放管道液体流动特性进行模拟分析, 根据模拟分析的结果提出了在火力发电机组中调节管道内液体流量, 降低管道内部压力的建议, 以提升管道内液体流动性。另外有一些学者也同样通过 CFD 模拟的方式对火力发电机组管道的内部液体流动进行了分析, 根据分析结果提出在液体流动性提升上面, 要从倒流装置设置, 以及空冷平台间距调整等角度着手。从现有的研究成果来看, CFD 在电力工程设计中的应用, 主要围绕发电机组管道内部的流体动力学分析, 此项技术应用, 是推进我国电力工程建设进一步发展的重要保证^[2]。

2 以 CFD 为基础的电力工程仿真

2.1 电力工程仿真模型与计算

以 CFD 为技术基础, 电力工程设计中的仿真计算模型中主要的组成部分有质量守恒方程、动量守恒方程以及 k-ε 方程。

首先是质量守恒方程。该方程以质量守恒定律作为方程式提出的根本基础。所谓的质量守恒定律, 具体指某一个物体对另外的物体的质量产生共同的作用力时, 物体能够为另外的物体提供二者相互作用的各项信息, 当二者之间的相互作用力超过一定的阈值时, 物体本身的作用力就会消失^[3]。在电力工程设计中, 对发电机组中的各个器件进行质量层面的仿真分析计算极为重要。目前我国电力工程建设中, 火力发电为工程建设中应用最广泛的发电技术形式之一, 根据火力发电技术特性, 电力工程设计中需要使用的质量守恒方程具体如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0$$

其次是电力工程设计仿真模型中的动量守恒方程。这一方程的提出以动量守恒定律为基础, 动量守恒定律中指出, 在一个共同的物理系统内部, 当系统中没有一个器件出现运行故障, 都会直接影响到其他器件的运行^[4]。同一个系统中的不同器件, 事实上构成了一个统一的整体。根据这一原理, 在电力工程设计中, 要从电力工程整体的系统架构分析发电机组运行中的能量导入与输出, 而根据此构建的方程式具体如下:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i$$

最后, 在仿真模型创建与计算中还需要使用 k-ε 方程。这一方程能够在实际应用中根据实际情况灵活调整参数设置。在大多数情况下, 对数据的处理通过 U 型结构或是 c/s 节点模型来进行, 达到实际要求的精度条件后再应用 k-ε 方程方法^[5]。如果应用的计算机设备能够直接生成函数图像, 则可以通过数据的迭代以及其他更加灵活的方式获取模型参数, 采用网格划分的形式进行计算, 具体使用的方程如下:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \epsilon$$

2.2 电力工程仿真模型中的网格划分与各自网格独立解

为便于对电力工程内部的管道流体流动进行计算, 在完成电力工程仿真模型的创建之后, 需要将模型切分成不同的网格, 让复杂的问题尽可能简单化, 便于之后的计算分析。在电力工程仿真模型创建中, 需要充分明确模型中的各项参数与边界条件, 与此同时, 还要进一步考虑到发电机组在实际运行中可能受到的各种干扰。关于模型的网格划分, 具体采用非结构化的网格划分技术, 对模型进

行分区划分,并在此基础上对模型中的各项数值进行了离散化的处理与计算。在完成上述步骤之后,再使用插值法具体完成工程模型的仿真^[6]。

3 CFD 电力工程仿真实例分析

3.1 案例分析简介

本次研究中选取的实际案例为某 300MW 工程的 2120×12 小型锅炉内部的排汽管道。根据 CFD 技术应用方法,对管道内部的流体流动进行模拟分析可以得到该管道内部的蒸汽流场分布、管道系统整体的压降以及管道各个局部位置的压降。

根据以上所得到的各项内容,进行工程模型仿真中的计算参数设置。在计算参数的设置上,具体包含两方面的内容,分别为数值模型与 CFD 软件。在仿真模型系统的建立过程中,需要具体考虑到系统实际运行中的各个潜在变量^[7]。本次研究中选取的电力工程实例结构比较复杂,无法使用一种参数对工程实际运行的过程进行充分的仿真模拟分析,需要根据各项参数内容构建仿真模型。各项参数的选取具体如下:

首先是系统中入口边界处的参数设置。根据火力发电机组运行中的技术要求,系统入口温度为入口位置压力对应的饱和状态下的温度,紊流的强度设定为 10%,粘性比取值为 10,设定的紊流介质为充分饱和状态的水蒸气。另外,在系统出口边界处的参数设置中,具体选用 outflow 为系统中的边界位置条件,而后再根据这一选定的条件进行求解,得到系统出口位置的具体设置参数依据。出口边界位置设置对电力工程的整体安全稳定运行有着很大程度的影响,为了避免出口边界位置在模型中显示的不完善,在模型网络划分中需要在相关的部分提前将网格划分充分,便于出口边界在模型中的显示。最后,系统中的各个其他边界位置的参数设置中,发电机组中各个器件的各个壁面都需要选择墙面作为边界条件,具体选择应用无滑移边界条件,并且要让各个器件的热能传导与外部的热能传导相互隔绝。各个器件的阀门通过多孔跳跃模型具体给定,而在器件运行中实际所受阻力的取值具体取 $\xi = 8 \lambda$ ^[8]。

3.2 案例计算结果分析

根据上一点中所示的工程模拟计算中的各项参数设置要求,构建管道的三维立体模型,并对管道模型进行网格划分。管道的模型与模型网格划分具体如下所示:



图 1.案例电力工程中管道三维模型

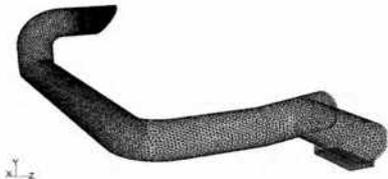


图 2.案例电力工程中管道三维模型的网格划分示意

根据以上图片中所示内容。在本次案例研究中,具体以流固耦合 CFD 方法作为技术基础,根据管道的各项参数设置创建高度仿真的管道三维立体模型,对管道内部的液体流动进行研究分析。在管道三维模型建立完成之后,根据 CFD 技术原则,对模型进行网格划分。借由对模型的网格划分,让管道中的流体动力学设计方面的问题与缺陷更明显的表现出来,并在具体的网格单元中进行解决。在

具体的计算过程中,同时应用到 CAD 模型,模型中的各项参数设置的调节需要借助 CAD 模型来具体完成^[9]。在计算的流程上,首先要根据电力工程中火力发电机组的运行特点,将机组中的锅炉装置以及机组中的其他器件与管道进行关联性分析,将其视为一个整体的基础上提供模型中的基础控制方程,而后明确模型中的初始条件与各项边界条件,并创建进一步的离散方程,将系统中的初始条件与边界条件作进一步的离散处理,确定系统中的各项参数设置,完成离散方程的求解。之后,对求解结果的收敛性进行检验,得到肯定结果的情况下直接将结果输出即可,如果结果为否定结果,则需要重复上述的整个计算过程,直到得到能够收敛的结果为止^[10]。

根据以上的计算流程,所得计算结果经分析后与系统各种工况对于的总压降具体如下:

表 1.计算结果分析后与系统各种工况对应的总压降

压力/KPa	管道内液体的流量/(kg.s ⁻¹)	管道内总压降/Pa
3.165	4.16	194
6	9.848	585
12.33	11.62	413

根据上表中所示计算结果与发电机组实际运行中各种工况条件下的对应总压降,对管道内部的流体动力学设计进行更进一步的分析能够发现,该排气管道中的细节缺陷较多,管道本身的坚固性有待提升。另外,管道在实际使用的过程中很容易出现漏气的问题,导致锅炉产生热能的不必要流失,影响机组的实际发电效率。

结束语:综上所述,本次研究中,在论述 CFD 技术的具体内容基础上,选择应用实际案例对 CFD 技术在电力工程设计中的应用进行了更进一步的论证。在实例论证中能够看到,CFD 技术能够更有效、充分的显示电力工程管理流体动力学以及其他方面的问题,在电力工程设计中有着极为突出的作用。在今后的电力工程设计中,此项技术有着极为广阔的应用前景。在此项技术的实际应用中,工程师们需要充分考虑火力发电机组运行的根本原理,真正从机组整体运行的角度出发,通过 CFD 仿真模型开展研究,完善电力工程设计。

参考文献:

- [1]李少杰,刘继连,景山.利用 CFD 模拟辅助设计泵轮式扁平混合澄清槽防漩涡结构研究[J/OL].湿法冶金: 1-13[2023-09-25].
- [2]赵志勇,陈向辉,陈鑫等.基于达西方程与 CFD 远距离供液系统的理论分析与数值模拟[J/OL].中北大学学报(自然科学版),2023(05): 527-535[2023-09-25].
- [3]任嘉祺.电力工程设计中数字化技术运用研究[J].工程建设与设计,2022(19): 161-163.
- [4]贾建强.电力工程设计中电力系统规划设计的运用分析[J].城市建设理论研究(电子版),2022(24): 7-9.
- [5]徐卫.数字化技术在电力工程设计中的应用[J].数字技术与应用,2021,39(11): 112-114.
- [6]朱志勇,璩志锋,方涛.数字化技术在电力工程设计中的运用[J].光源与照明,2021(05): 131-132.
- [7]罗宋艺,罗松财.新时期 BIM 在电力工程设计中的运用和创新[J].江西建材,2019(11): 80+82.
- [8]马致远,孙凯丰,侯金锁等.基于优化 CFD 模型的风电场风速数值模拟[J].可再生能源,2018,36(03): 446-452.
- [9]孙见波,李颖,徐伟.CFD 技术在水电站中的仿真应用与实践[J].小水电,2018(01): 23-28.
- [10]李诚.CFD 流场数值模拟在火电厂超低排放改造工程中的应用[D].清华大学,2017.