

# 直接空冷枝状排汽管道系统内导流装置的优化设计

石 磊<sup>1</sup>, 王 锦<sup>1</sup>, 石 诚<sup>2</sup>, 刘国银<sup>3</sup>

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044 2 中国电力工程顾问集团公司, 北京 100014

3 江苏双良空调设备股份有限公司, 江苏 江阴 214444)

**摘 要:** 对德国基伊埃 (GEA) 公司发明专利——枝状直接空冷排汽管道系统进行研究。建立某 2×600 MW 机组直接空冷排汽管道内湿蒸气两相流动和传热的数学模型; 利用数值传热学软件 Fluent 对典型汽轮机工况下的排汽状况进行了数值模拟; 对二维管道内湿蒸气速度场、温度场和两相场的模拟、分析和研究。模拟结果表明: 专利提出的简单几何原则分流方法, 无法实现排汽的均匀分配。针对不同形式的直接空冷枝状排汽管道系统应进行详细的优化设计, 并提出了枝状排汽管道系统导流装置的基本设计原则。

**关 键 词:** 直接空冷系统; 数值模拟; 枝状; 排汽管道; 优化设计

中图分类号: TK263.5 TK172 文献标识码: A

## 引 言

直接空冷排汽管道系统设计的优劣, 关系到直接空冷凝汽器的冷却效果和直接空冷系统的安全、经济运行。汽轮机排汽分配均匀与否, 关系到直接空冷凝汽器冬季防冻和安全运行以及汽轮机背压运行的经济性。直接空冷排汽管道系统优化设计的关键是在排汽管道的特殊部位, 平衡各蒸汽分配管的流量与降低压降; 保证系统在实现水蒸气流量的均匀分配的同时, 防止水蒸气压损过高, 过冷面积过大, 造成换热量减少, 降低了电厂的热效率。

2004 年, 德国 GEA 能源技术有限公司在直接空冷排汽管道的优化设计上进行了革新, 提出了直接空冷排汽管道的枝状布置, 并在中国申请了“蒸汽动力设备的排汽排放管”专利, 该专利于 2007 年 10 月 3 日起生效, 有效期 20 年。至此, 直接空冷排汽管道的布置方式经历了低位布置、高位布置和枝状布置。GEA 公司认为枝状排汽管道系统布置方案具有诸多优点<sup>[1]</sup>。对于排汽管道内部水蒸气流动而言, 具有更低的蒸汽侧压力损失, 发电机组的整体性能有所提高。

本研究工作是利用计算传热学 (NHT numerical heat transfer) 软件 Fluent 对 GEA 设计某 2×600 MW 枝状排汽管道专利系统进行数值模拟、分析和研究; 提出枝状排汽管道系统导流装置的优化方案及基本设计原则, 探索直接空冷排汽管道系统优化和设计的国产化。

## 1 模型的建立

某 2×600 MW 直接空冷机组工程由德国 GEA 公司负责系统总体设计和性能保证, 排汽管道系统设计采用 GEA 专利技术。根据技术协议<sup>[2]</sup>, 直接空冷系统性能的考核点 (汽机能力工况, 即 IRL 工况) 和典型运行工况及运行参数, 如表 1 所示。该地区的冬季极端最低气温为 -28 °C, 此时, 汽轮机按阻塞背压工况运行, 直接空冷排汽系统内水蒸气的压力较低, 质量流量大, 密度小、比容大和流速高。水蒸气在排汽管道内流动过程中, 还通过管壁与外界环境进行能量交换, 一部分水蒸气凝结为水; 同时, 由于流动过程中的局部压力升高, 也可能会造成水蒸气的凝结。因此, 实际直接空冷排汽管道内湿蒸气的流动是与外界有传热的、复杂的三维湍流汽液两相流动。

单台 600 MW 亚临界直接空冷机组采用 3 缸 4 排汽结构, 有两个低压缸, 每个低压缸的排汽由 1 根直径为 6.0 m 的主排汽管道引出, 主排汽管道间通过平衡管相互连接。根据竣工图纸, 直接空冷排汽管道采用枝状布置方式, 排汽管道各部分尺寸, 如图 1 所示。直径为 6.0 m 的主排汽管道, 分支为直径为 4.2 m 的两个支管, 再进入 4 个直径为 3.0 m 蒸汽分配管; 各蒸汽分配管的间距为 11.31 m, 从左至右分别为出口 1、出口 2、出口 3 和出口 4。排汽管道外壁和导流叶片的厚度均为 16 mm。

收稿日期: 2009-02-23 修订日期: 2009-06-25

作者简介: 石 磊 (1973-) 河南信阳人, 北京交通大学工学博士, 高级工程师。

表 1 直接空冷汽轮机典型运行工况参数

	考核工况 (TRL)	设计工况 (THA)	冬季极端 温度工况
空气干球温度/℃	30.5	20.5	-28
汽轮机背压/kPa	28.2	15	8.2
排汽焓/(kJ kg <sup>-1</sup> )	2540.3	2435.7	2397.5
饱和蒸汽温度/℃	67.7	54.0	42.0
饱和蒸汽的密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	0.18	0.10	0.057
水蒸气动力粘性系数/(kg·m <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )	1.118×10 <sup>-5</sup>	1.074×10 <sup>-5</sup>	1.037×10 <sup>-5</sup>
排汽量/(kg·s <sup>-1</sup> )	184.7	169.1	177.0
水蒸气流速/(m·s <sup>-1</sup> )	36.29	59.82	109.83

注: 本表介质为饱和水蒸气, 与实际情况略有差异。水蒸气流速为排汽管道直径为 60 mm 时的平均值。

湿蒸气是两相流的混合物, 主相为水蒸气, 液相为凝结水滴。采用合理假设, 建立直接空冷枝状排汽管道系统内湿蒸气流动和相变模型, 如文献 [3] 或文献 [5] 所示, 在此不再赘述。在对湿蒸气的迭代求解过程中, 要采用耦合计算方法, 同时对十几个方程联立求解, 计算速度慢, 收敛十分困难。因此, 将实际三维问题简化为二维问题进行研究, 并假定各蒸汽分配管出口具有相同的静压。

对图 1 所示的 600 MW 直接空冷枝状排汽管道系统, 首先采用 GEA 专利技术方案 (方案 A) 进行数值模拟、分析和研究。结果表明: 方案 A 的分流效果不佳。然后, 不断地调整导流叶片的位置、尺寸、数量和间距, 最终确定了 1 个优化设计方案 (方案 B)。最后, 通过方案比较和分析, 得出了直接空冷枝状排汽管道系统导流装置的基本设计原则。

## 2 模拟结果与分析

排汽管道系统采用的四边形结构化网格进行区域离散。通过采用不同的网格数目进行模拟计算, 保证计算结果不受网格质量和疏密程度的影响, 检验计算结果的网格无关性。控制微分方程的离散化采用有限容积法。流动采用二阶迎风格式, 湍动能、湍流耗散率和湿蒸气均采用一阶迎风格式。入口采用质量入口, 出口采用压力出口边界条件, 壁面与管外空间进行对流换热, 即采用第三类边界条件。数值模拟计算机为 HP 工作站 XW8200 3.6 GHz 主频, 8 G 内存。

### 2.1 模拟结果

对表 1 的汽轮机 THA 工况下, GEA 专利技术方

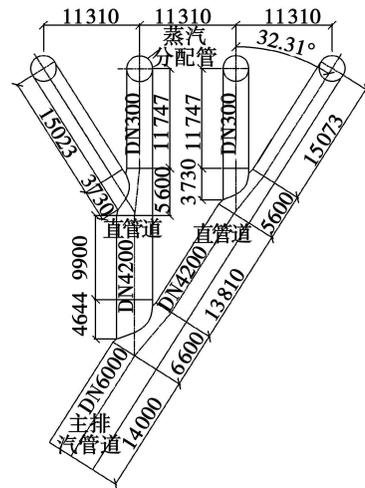


图 1 直接空冷排汽管道的几何模型 (mm)

案和优化设计技术方案进行数值模拟。分别确定了 THA 工况下, 流经各蒸汽分配管的流量和压降, 模拟结果如表 2 所示。由表可见, GEA 专利技术方案的蒸汽流量分配不均。根据 GEA 专利技术中对于枝状排汽管道系统内部导流装置的权利要求, 其导流装置的设计原则是蒸汽流通面积等分法。即根据简单的几何原则, 采用流通截面面积等分法, 进行流量均分。然而, 采用该原则进行设计的前提是来流速度分布均匀或基本对称, 且下游流动情况基本相同。为此, 应保证每个三通分流前后, 各支流在流动截面上的流速均匀分布或对称分布, 防止局部构件间的相互影响。一般地, 局部阻力构件之间应至少保持 3 倍管径以上的距离<sup>[4]</sup>, 且各支流的下游流动阻力基本相同。根据模拟结果, 由于 4 个蒸汽分配管的流动情况各不相同, 简单几何分流原则效果不佳。

为了均分蒸汽, 同时尽量降低水蒸气的流动阻力, 通过不断调整导流叶片的位置、尺寸、数量和间距, 最终确定了直接空冷排汽管道系统的某一优化设计方案。在该优化设计技术方案下, 各蒸汽分配管出口流量分配均匀。在 THA 工况下, 从入口至出口, 湿蒸气在排汽管道内流动的平均阻力约为 108 Pa。与大同二电厂首台 2×600 MW 机组高位布置的直接空冷排汽管道系统相比<sup>[5]</sup>, 枝状排汽管道系统的平均压降降低约 300 Pa。枝状排汽管道系统的流动阻力与经优化设计的高位布置排汽管道系统的平均压降大致相同<sup>[3]</sup>。THA 工况下, 方案 A 和方案 B 排汽管道内湿蒸气的速度云图和静温云图如图 2 和图 3 所示。由图可见, 采用不等面积的导流叶片

布置方案,很好地解决了排汽管道系统的流量分配问题。

表 2 THA工况下不同方案排汽管道系统的模拟结果对比表

	(A) GEA专利技术方案		(B) 优化设计技术方案	
	质量流量 / kg·s <sup>-1</sup>	通道压降 / Pa	质量流量 / kg·s <sup>-1</sup>	通道压降 / Pa
入口	35.89	—	35.89	—
出口 1	3.78	140.63	8.76	111.60
出口 2	11.74	51.67	8.84	111.52
出口 3	8.58	93.00	9.46	100.84
出口 4	11.79	51.20	8.82	108.10

注:通道压降指水蒸气从入口流至相应出口处的流动阻力损失(全压降)。

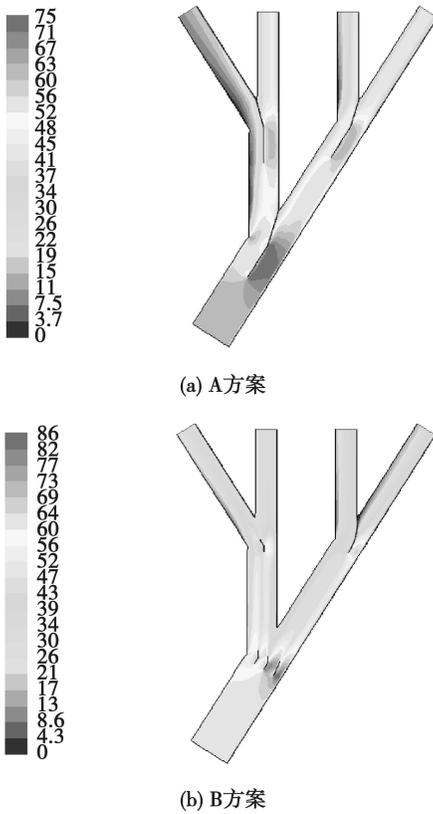


图 2 直接空冷枝状排汽管道系统内湿蒸气的速度云图 (m/s)

根据运行经验,实际直接空冷凝汽器各蒸汽分配管之间的流量分配的不均匀性一般小于对直接空冷排汽管道系统的模拟值。究其原因,这是因为湿蒸气在直接空冷凝汽器(包括顺流管束和逆流管束)内部流动阻力一般大于其在直接空冷排汽管道系统内的流动阻力。如果从整个系统流程上考虑,湿蒸气的流动阻力是上述两个部分流动阻力之和。如果考虑到空冷凝汽器的阻力,蒸汽在整个管路系统中的阻力不平衡率相应地减少。因此,整个系统

中各蒸汽分配管之间的流量在模拟值的基础上发生了“自平衡”现象,各蒸汽分配管之间的流量差相应减少。

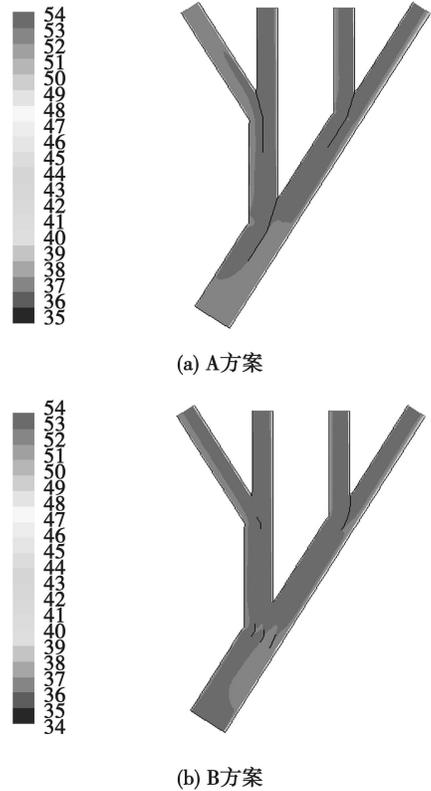


图 3 直接空冷枝状排汽管道系统内湿蒸气的静温云图 (°C)

虽然枝状排汽管道具有诸多优点,但管道的设计和布置应避开发电机出线 and 汽机房的检修通道,并保证空冷平台下主变压器及出线、高压厂用变压器、启动/备用变压器、空冷配电室等设备的检修方便和安全运行。

### 2.2 结果分析

对模拟结果进行了分析,得出如下结论:

(1) 枝状排汽管道系统三通处必须设置导流装置,才能保证水蒸气的均匀分配。直接空冷排汽管道系统设计的关键是排汽管道系统上的三通设计。

(2) 枝状排汽管道系统各三通的优化设计相互关联,设计中应统一考虑。直接空冷排汽管道系统各三通之间是相互联系、密切配合的。每个三通的设计不仅影响自身阻力和系统总阻力,而且影响其它三通的导流效果以及系统总体流量分配。

(3) GEA专利技术方案所提出的面积等分原则,不能解决枝状排汽管道系统蒸汽流量均匀分配的问题。简单几何分流原则的前提是来流流速分布

均匀或流动对称, 以及下游流动情况大致相同。因此, 针对不同直接空冷枝状排汽管道系统, 必须进行详细的优化设计。

(4) 要实现蒸汽流量的均匀分配, 分流断面的面积分配取决于两个分支管段的阻力。高阻力的分支管应得到更大的分流面积。

(5) 导流叶片的导流方向沿管道的敷设方向。导流叶片沿导流方向逐渐弯曲延伸, 导流叶片沿导流方向的长度是变化的。

(6) 导流叶片可采用平直或圆弧形, 导流叶片整体焊接在三通内部的管壁上。

(7) 不同形式的枝状排汽管道系统应进行详细的优化设计。

(8) 枝状排汽管道系统内导流叶片的优化设计方案并不是唯一的, 不同的导流叶片位置、个数、尺寸、结构等能够实现相同的工程目的。

(9) 如果考虑整个湿蒸气流动系统, 如湿蒸气在直接空冷凝汽器内的流动阻力, 直接空冷排汽管道系统各蒸汽分配管之间的流量将在模拟值的基础上发生了“自平衡”现象, 各蒸汽分配管之间的流量差值将相应减少。

下, GEA 专利技术方案和优化设计方案直接空冷排汽管道内湿蒸气的流动和传热进行了模拟计算, 并对结果进行了分析、比较和研究。结果表明: GEA 发明专利所提出的简单几何分流原则, 无法实现汽轮机排汽在各蒸汽分配管之间的均匀分配。通过方案比较和分析, 得出了直接空冷枝状排汽管道系统导流装置的基本设计原则。针对不同外形的枝状排汽管道系统, 应进行详细的优化设计。数值模拟结果还需实测数据的验证。

#### 参考文献:

- [1] 马库斯·施密特. 蒸汽动力设备的排汽排放管 [J]. 中国专利, 200410000929.0 2005-02-09.
- [2] 华电宁夏灵武发电有限公司. 一期 2×600 MW 机组工程直接空冷凝汽器设备技术协议 [R]. 西安: 西北电力设计院, 2006.
- [3] 石磊, 刘海锋, 石彬彬, 等. 直接空冷排汽管道系统湿蒸气的数值模拟 [J]. 热力发电, 2007(12): 23-26.
- [4] 徐济盛. 沸腾传热和气液两相流 [M]. 北京: 原子能出版社, 1993.
- [5] 石磊, 张东黎, 陈俊丽, 等. 600 MW 机组排汽管道内湿蒸气的数值研究 [J]. 动力工程, 2008(2): 68-70.

(本文责任编辑 何静芳)

### 3 结 论

利用 NHT 软件 Fluent 对空冷汽轮机 THA 工况

新技术、新工艺

## 新概念传动装置

据《Marine Engineers Review》2008 年 11 月号报道, 英国 Nexxt Drive 公司已经针对船舶传动装置开发出一种新途径, 它将常用的机械驱动系统的最佳性能与电力推进装置的许多优点相结合。新概念也增加了所有船舶的设计自由度并为在双螺旋桨船舶结构中产生的精确的机动性能提供高效的控制。

与串联的混合电力推进系统比较, 由于发动机大部分功率经由组合的行星齿轮箱通过机械的途径直接传递到螺旋桨, 被称作 HydrHybrid 的新系统具有更高的效率。最多只有 15% 功率通过电力途径传递, 以便改变螺旋桨的速度和方向, 并在需要时允许做全电力运行。

HydrHybrid 设计的核心是一个取得专利的传动系统, 它使用行星齿轮箱使两台高效率电动机/发电机与一个紧凑的机械传动装置相结合。

由于采用了机械驱动和电力驱动的结合, HydrHybrid 装置可以无缝地 (不使用离合器) 转换到更高的传动比下运行或 100% 机械驱动, 以便允许船舶在最大效率下航行。燃料节省可以超过 5%。

螺旋桨速度全电子控制使 HydrHybrid 系统在船舶控制中具有一些主要的优点。不需要离合器或机械倒车装置, 螺旋桨便可以在全速正车和全速倒车的整个工作范围内运行。

(吉桂明 摘译)

suspension to serve as a heat transfer working medium. Key words: phase change microcapsule, nano-particle, nano fluid, Newtonian fluid, latent heat

汽水分离器分离效率的冷态实验研究 = Cold-state Experimental Study of the Separation Efficiency of a Steam-water Separator [刊, 汉] / XIAO Li-chun, DING Zhi-jiang (College of Environment and Chemical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, China, Post Code: 066004), LI Qiang, YANG Jing-fei (College of Material Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, China, Post Code: 050018) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(2). — 177 ~ 179

Studied was a novel high efficiency steam-water separation device destined for nuclear power stations. In the light of the complexity of the two-phase flow in a wave-shaped plate type steam-water separator, a cold-state experiment was performed under the condition of changing structural parameters and working states. The separation efficiency was measured by using a glass fiber filtration method. It has been found that the efficiency of a wave-shaped plate steam-water separator with water collection hooks is far higher than that of a separator without the hooks. To lengthen the pleated edge has little influence on efficiency. To enhance the separation efficiency, the inflexion angle should be set at 54 degrees, and the plate spacing at 20 mm. The critical value of the gas flow velocity is 5 m/s. When the flow speed is in excess of the critical value, the water film will rupture, a secondary entrainment or carryover will increase significantly and the dewatering efficiency will drop. The optimum structural parameters obtained from an analysis of the test data can be used for guiding the design of the device under discussion. Key words: steam-water separator, separation efficiency, wavy plate, structural parameter, critical wind speed

直接空冷枝状排汽管道系统内导流装置的优化设计 = Optimized Design of the Flow Guiding Device for a Direct Air-cooled Branch-shaped Exhaust Steam Piping System [刊, 汉] / SHI Lei, WANG Jin (College of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing, China, Post Code: 100044), SHI Cheng (China Electric Power Engineering Consultant Group Corporation, Beijing, China, Post Code: 100011), LIU Guo-yin (Jiangsu Shuangliang Air Conditioning Equipment Co., Ltd., Jiangyin, China, 214444) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(2). — 180 ~ 183

Studied was an invention patent of German GEA Energytechnik GmbH—a direct air-cooled branch-shaped exhaust steam piping system, and established was a mathematical model for the wet steam two-phase flow and heat transfer in a direct air-cooled exhaust steam pipeline of a 2×600 MW unit. By employing the numerical heat transfer software Fluent, the authors have conducted a numerical simulation of the exhaust steam situation under typical steam turbine operating conditions. Through a simulation, they have also analyzed and studied the wet steam velocity field, temperature field and two-phase field in a two-dimensional pipeline. The simulation results show that the flow division method according to the simple geometrical principles proposed in the invention patent is incapable of realizing a uniform distribution of the exhaust steam. In view of this, depending on the direct air-cooled branch-shaped piping system in different forms, a detailed optimized design should be conducted. Moreover, the basic design principles of the flow guiding device for the system in question were also given. Key words: direct air-cooled system, numerical simulation, branch shape, exhaust steam pipe, optimized design

增压锅炉汽包低周疲劳寿命计算方法研究 = Study of the Methods for Calculating the Low-cycle Fatigue Life of a Supercharged Boiler Drum [刊, 汉] / ZHENG Xinwei (College of Power and Energy Source Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001), SUN Yu (Offshore Oil Engineering