

主机真空保证优化方案及系统配置研究

史良宵¹ 贺冬强¹ 马宏飞²

(1 中核能源科技有限公司 北京 100080; 2 内蒙古电力勘测设计院有限责任公司 内蒙古 呼和浩特 010091)

摘要: 真空泵将凝汽器及汽机低压缸蒸汽空间中的空气和其他不凝结的气体抽出, 以便在机组启动和运行时在凝汽器中形成所需的真空。为保证某新建百万火电机组的运行背压, 提高机组运行经济性, 本文从保证真空系统的严密性、维持真空度着手, 通过对水环真空泵及罗茨-水环真空泵进行技术经济比较, 推荐每台机组设置3台50%容量水环真空泵。并且计算水环真空泵选型参数, 根据工程经验反馈, 优化真空泵系统设置, 为机组安全经济运行提供了基础。

关键词: 发电厂; 水环真空泵; 罗茨泵; 凝汽器; 抽真空系统

0 引言

某新建2×1000MW火力发电机组配高效超超临界凝汽式汽机, 机组配置九级回热系统, 四缸四排汽, 汽泵的小汽轮机排汽也排入大机凝汽器。

众所周知, 尽最大程度地降低机组的运行背压是提高空冷发电机组经济性的有效方法之一^[1,2]。汽轮发电机组背压除循环水系统的影响外, 不凝结气体也是其重要影响因素。在机组运转期间, 汽轮机排气大部分在凝汽器中凝结, 但也含有一些不凝结气体, 主要包括: 漏入汽机真空系统的空气、化学补充水和低压加热器疏水在凝汽器内逸出的气体及低压加热器汽侧排汽排入凝汽器的气体等。不凝结气体不停地被浓缩并流向凝汽器的空气冷却区, 如果不能及时排出, 不凝结气体不仅占用凝汽器的汽侧空间, 影响排汽中蒸汽的正常凝结; 而且其中的氧气等气体会对换热管束产生腐蚀, 并增加凝结水的过冷度; 除此之外, 氧气等气体溶入凝结水, 还会影响凝结水的品质; 严重情况下, 还会使汽轮机背压不断升高, 当背压超过一定数值, 甚至会引起汽轮机跳机的情况发生。

1000MW等级的间冷机组在启动与正常运行时, 需抽真空的容积约3000m³, 体积庞大, 因此保证机组真空系统的严密性及真空度是机组成功运行的关键因素。不凝结气体会使凝汽器内的传热恶化, 造成凝汽器出口凝结水含氧量增加及机组背压升高等不利影响, 潜在危害机组长期安全稳定运行, 同时也降低了电厂运行经济性。

因此本文研究的重点是如何采取合理的措施来保证真空系统的严密性及维持真空度, 选取合理经济的抽真空系统, 保证机组安全经济运行。

1 保证凝汽器系统真空措施

保证机组真空严密性、维持机组真空度可采取如下

措施:

(1) 现场焊接质量控制。凝汽器系统在现场安装时, 有大量的焊口, 在某些布置紧凑位置, 由于操作不便, 焊接质量难以保证。因此需要加强现场焊接工艺及质量管控, 保证焊口100%检验合格。

(2) 保证与机组的真空系统相接部件的严密性。所有与汽轮发电机组的真空系统存在连接关系的部件均存在泄漏可能, 尤其是设备及管道上的阀门和连接件、取样口、仪表管、补偿器和人孔等。因此在设计时可采取以下措施: 与真空系统相关阀门尽量采用焊接真空阀, 避免法兰连接及阀杆导致的漏真空; 真空破坏阀系统设置水封; 辅助蒸汽系统的冷凝水通过疏水母管直接和疏水扩容器相连, 避免设置大气式管道疏水扩容器导致的漏真空。

(3) 设置在线抽真空系统。凝汽器抽真空系统的功能为: ①在汽轮发电机组启动时, 抽真空系统将凝汽器壳侧和汽机低压缸等部分空间内的空气抽出, 建立机组启动所需的真空; ②在汽轮发电机组正常运行期间, 抽真空系统持续抽出凝汽器内不凝结气体, 维持机组背压。真空泵系统处于汽轮机的核心位置, 对汽轮机安全、稳定运行有着重要影响, 因此对其经济、合理的选型显得十分必要。

2 抽真空系统配置和设备选型

2.1 真空泵选型

目前主机常采用的抽真空设备主要有罗茨-水环真空泵和水环真空泵^[3-5], 两种真空泵各有特点。

2.1.1 罗茨真空泵

罗茨真空泵工作原理如图1所示。

在真空泵腔室内平行布置两个轴承, 上面分别安装一个“8”字状的转子, 在齿轮带动下同步反向旋转。如图1所示, 气体自吸气口进入真空泵, 随着转子旋转

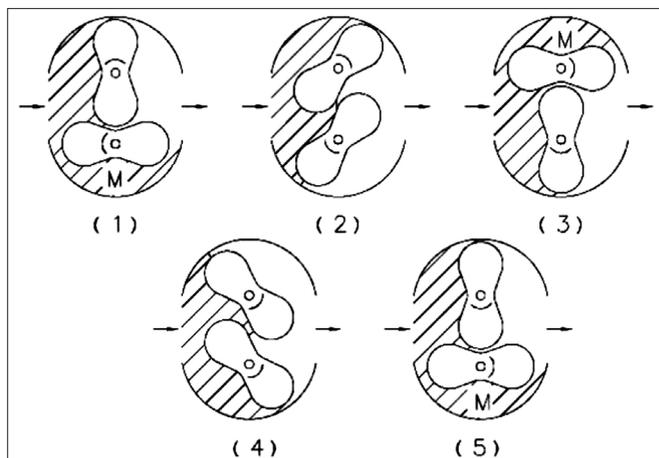


图1 罗茨真空泵工作原理图

由排气口排出。气体刚进入真空泵壳内的全封闭 M 空间后并没有膨胀或压缩过程，但随着“8”字状转子顶部旋转至真空泵排气口边缘时，M 空间内的气体将与排气口侧气氛连通，会有部分排气口侧较高气压的气体返至 M 空间，使此空间内的气压升高，随着转子继续旋转自吸气口进入的气体将排出真空泵外。

罗茨真空泵适合在需要大抽速的低入口压力的真空系统中使用。除罗茨泵自身结构与制造精度等因素外，其极限真空还与前级泵的极限真空相关，因此罗茨真空泵一般需与其他类型真空泵配合使用。

2.1.2 水环真空泵

水环真空泵内叶轮偏离泵的中心位置安装，其工作原理如图 2 所示。在真空泵启动前将部分水注入真空泵腔室内，随着泵叶轮转动，注入的水在离心力作用下形成液环。叶轮旋转的前半转，两叶片间的水环空腔容积逐渐变大而形成真空，气体会自吸气口进入水环真空泵内；在叶轮转动后半转，两叶片间密封容积逐渐缩小，吸入的气体被压缩并自排气口排出泵外。

2.1.3 水环真空泵的系统流程

水环真空泵的系统流程如图 3 所示。

从图 3 可看出，水环真空泵系统流程分为液体流程和气体流程。其中液体流程是指补水流经自动补水阀进入热交换器中冷却，冷却后的水送至真空泵内，在泵运转过程中随不凝结气体进入气液分离器，分离后的水再返回热交换器与冷却水换热，冷却后重新送入真空泵内，从而形成一个封闭循环。气体流程是指凝汽器

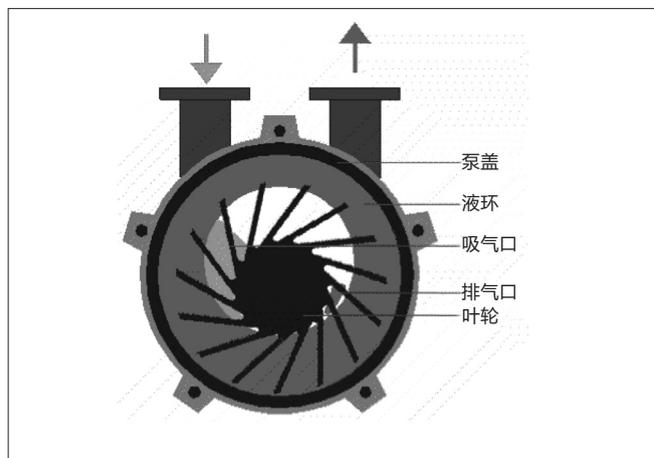


图2 水环真空泵工作原理图

中的不凝结气体通过进气管吸入真空泵，经水环压缩后排至气液分离器中，气液分离后由气侧排出。气液分离器中的水位通过 DCS 信号控制自动补水阀和排水阀来调整。

2.1.4 罗茨-水环真空泵的系统流程

罗茨-水环真空泵组通过控制柜实现罗茨真空泵、水环真空泵的自启停及过载保护。罗茨-水环真空泵工作流程简图如图 4 所示，凝汽器内的不凝结气体自吸入入口进入罗茨真空泵压缩并冷却后，再通过大气喷射器开始进入水环式真空泵的工作流程，同上文所述。

2.1.5 真空泵设备选择

罗茨-水环真空泵具有效率高、启动快的特点，但根据发电厂运行经验反馈，罗茨-水环真空泵在使用中还存在以下问题：

(1) 凝汽器抽出的介质中有大量的水蒸气，罗茨泵

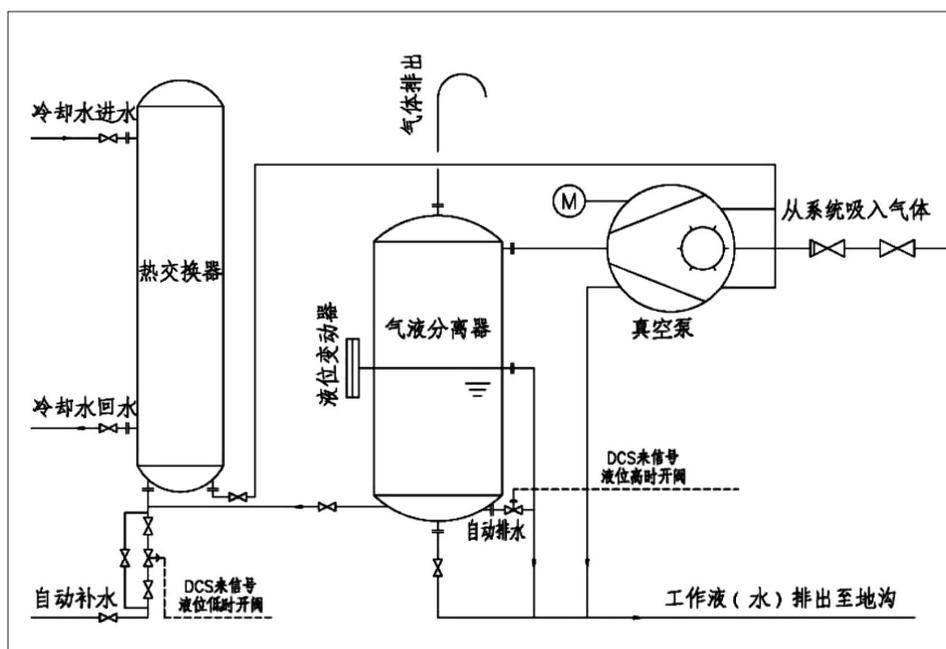


图3 水环真空泵的系统流程简图

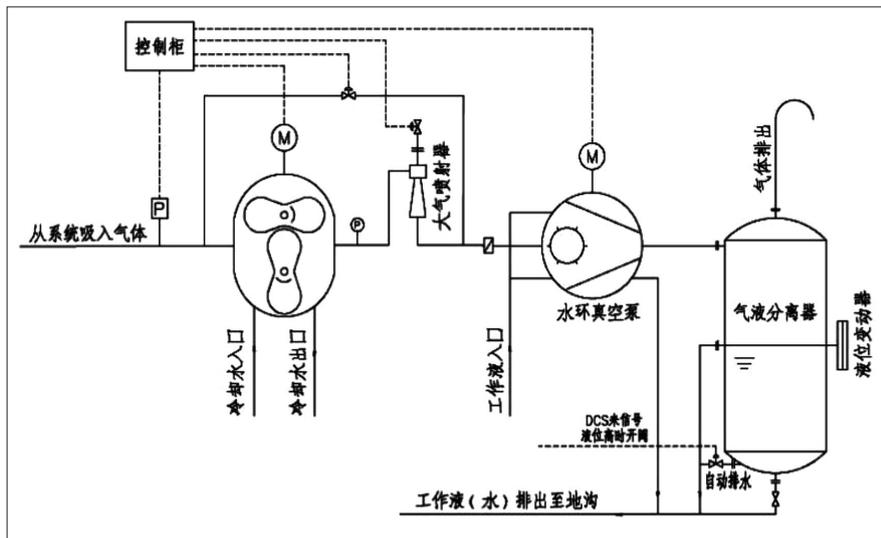


图4 罗茨-水环真空泵的系统流程简图

润滑油在遇到水后会乳化，尽管罗茨泵使用了机械密封，但还是不能完全避免，且密封一旦损坏，现场更换非常麻烦，工作量大；

(2) 罗茨泵两个“8”字形的铸件转子中的间隙非常小，如所抽气体介质中有小颗粒物或冷凝物粘合，重新启动如不注意可能会对真空泵造成损害；

(3) 罗茨泵的转速高，运行振动大，噪声大；

(4) 罗茨泵需按期维修，更换润滑油，维护量大；

(5) 罗茨水环泵机组系统复杂，设备阀门仪表较多，造成故障点多；

(6) 罗茨泵组适应凝汽器泄漏量变化的能力差。

虽然在本工程背压工况下罗茨-水环真空泵效率较高，但系统复杂，设备购置费用高，设备检修频繁。而水环真空泵设备购置费用低，结构相对简单并且维修方便。通过上述对比和分析，结合已有的工程设计经验，综合考虑节能、设备投资、运行维护等因素，推荐选用水环真空泵配置。

2.2 真空泵设计参数

2.2.1 过冷度

真空泵过冷度是指真空泵吸入口处的设计温度与机组设计背压所对应得饱和温度差值。

按 HEI 标准，真空泵过冷度选取 25% ITD 或 4.2℃ 中的较大值，其中 ITD（初始温差）为设计条件下凝汽器内蒸汽凝结时的饱和温度与凝汽器循环冷却水入口温度之差。

汽轮机滞止背压工况对真空泵运行的要求最严格，因此本工程真空泵选型按汽轮机滞止背压工况，过冷度取 25% ITD，即 5.1℃。

2.2.2 设计吸入压力的确定

按 HEI 标准，间接空冷机组设计吸入压力^[6]取凝汽器的最低运行压力 6.36kPa。

2.2.3 设计吸入温度的确定

设计吸入温度即抽吸的汽气混合物温度，应为抽气设备设计压力相对应的饱和蒸汽温度减去真空泵过冷度，即本工程真空泵设计吸入温度为： $37.23-5.1=32.13$ （℃）。

2.2.4 真空泵的抽吸能力的确定

真空系统的漏空气量按 HEI 标准设计，机组真空度越高时，漏空气量越大，所以真空系统的漏空气量不会大于最低运行压力工况的泄漏量。按照本工程的主机及主要系统配置情况，查 HEI 附表得到真空泵抽干空气量为：102.2kg/h。

2.3 抽真空系统配置

按照《大中型火力发电厂设计规范》规定，600MW 级及以上规模的间冷或湿冷机组宜配置 3 台真空泵，其单台泵选型应满足正常运行工况下凝汽器抽干空气量 50% 的需要^[7]。因此本工程抽真空系统拟定配置 3 台并联真空泵，如图 5 所示。机组启动过程中，为尽快建立起真空条件，3 台水环真空泵均处于运行状态；机组正常工况下，由 2 台 50% 容量泵维持主机真空。设计参数下单台真空泵的抽干空气量不小于 51.1kg/h。

3 经验反馈

某电厂 2 台凝汽器抽真空管道汇集至 1 根母管，3 台真空泵入口管分别接自母管下部，经过 1 个手动隔离阀（常开）和 1 个气动隔离阀（泵停运时关闭）后进入真空泵。真空泵在抽出不凝结气体的同时也会抽出部分蒸汽，蒸汽在管道中遇冷后冷凝，冷凝水在重力作用下流入母管，由于各真空泵入口管接自母管下部，继而冷凝水流入各真空泵入口管。备用真空泵的吸入口处的气动隔离阀处于关闭状态，故冷凝水积聚在入口管内，达到一定水量后就会导致泵入口气动隔离阀前压力开关高报警出现，备用泵便会自动启动。

为解决上述问题，采取下列措施：在各真空泵入口管道气动隔离阀前直管段下部开孔，增加一支管线，使备用真空泵入口管与运行真空泵入口管连通，备用真空泵入口凝结水可在运行真空泵抽吸作用下通过运行真空泵排出，有效避免管道内冷凝水聚集引起的压力开关误动作进而导致备用水环真空泵自启动。

4 结语

主机真空是保证机组安全稳定运行的重要因素。在设计和施工期间采取有效措施是保证主机真空系统严密性的先决条件，设置合适的凝汽器抽真空系统是维持汽轮发电机组背压的保证。本文对水环真空泵系统和罗茨

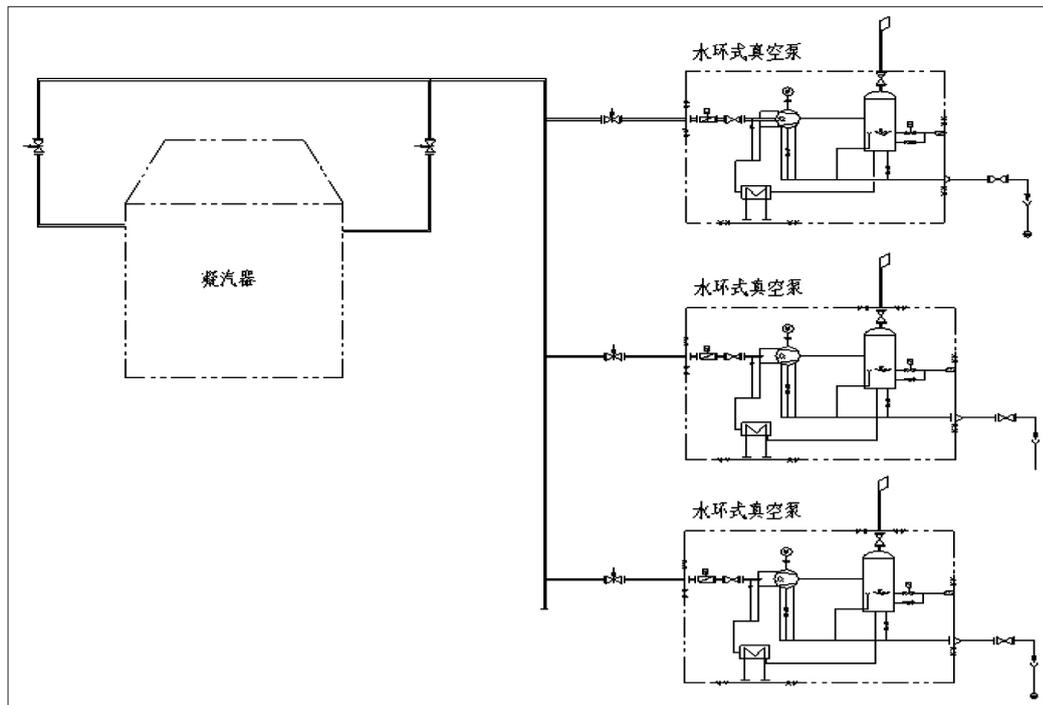


图5 抽真空系统流程图

—水环真空泵系统中两种真空泵在结构、性能、系统构成和经济性等方面进行比较分析,选择更适合本项目的抽真空系统,并计算本工程的真空泵选型参数,推荐本工程每台机组设置3台50%容量水环真空泵。并且根据以往工程设计经验及真空系统的特点,对抽真空系统进行优化,避免现场压力开关误动作,保证机组运行安全。

参考文献:

[1] 李斌,李晓辉,陈荣轩.火电厂真空系统的改造

与运行[J].电站辅机,2021,42(02):14-16.

[2] 张彦飞,牛佳.1000MW机组真空系统节能技术研究与应用[J].能源科技,2022,20(03):60-62.

[3] 高峰.机械抽真空技术在蒸馏装置上的应用[J].中国机械,2020(08):67-68.

[4] 杨作梁,杨森,马洪源,等.水环真空泵夏季工况性能下降应对措施对比研究[J].汽轮机技术,2020,62(01):53-56+60.

[5] 洪小江,曾名劭.高效气冷罗茨

真空泵组在汽轮发电机组的节能应用[J].江西电力,2021,45(08):48-50.

[6] 张进治.真空泵系统工艺设计计算及选型[J].中国石油和化工标准与质量,2013,33(18):228+269.

[7] 中国电力企业联合会.大中型火力发电厂设计规范:GB 50660-2011[S].北京:中国计划出版社,2011.

作者简介:史良宵(1991.05-),男,汉族,河北衡水人,硕士研究生,工程师,研究方向:热机专业设计。

(上接第67页)

4 结语

本文针对无人矿卡作业场景下的传感器融合问题,提出了激光雷达-相机的联合标定方法。采用多距离、多方位的标定点布局,利用黑白棋盘格标定板获取相机相对传感器平台的姿态外参数,实现远景、中景和近景的图像和点云配准。实验结果显示本方法获得了小于4像素的重投影误差,有较高的标定精度。

参考文献:

[1] 王琰.基于多传感器融合的室内定位技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.

[2] 余荣杰,田野,孙剑.高等级自动驾驶汽车虚拟测试:研究进展与前沿[J].中国公路学报,2020,33(11):125-138.

[3] 陈唯实,黄毅峰,卢贤锋.多传感器融合的无人机探测技术应用综述[J].现代雷达,2020,42(6):15-29.

[4] 刘博,于洋,姜朔.激光雷达探测及三维成像研究进展[J].光电工程,2019,46(7):15-27.

[5] 朱冰,张培兴,赵健,等.基于场景的自动驾驶汽车虚拟测试研究进展[J].中国公路学报,2019,32(6):1-19.

[6] 王国璋,钱克矛.线阵相机标定方法综述[J].光学学报,2020,40(1):175-187.

[7] 刘青松,谢晓方,张烜喆,等.用于聚焦型光场相机标定的棋盘角点检测算法[J].光学学报,2020,40(14):147-154.

作者简介:杨国云(1981.07-),男,汉族,湖南湘潭人,大专,工程师,研究方向:水泥、骨料露天矿山工程机械管理。