

水环式真空泵出力不足的原因与对策分析

黄慧敏 翁云峰 陈年时 施雪峰 杜岩松

(中核核电运行管理有限公司维修二处 浙江 嘉兴 314000)

摘要: 本文以秦山核电方家山生产单元凝汽器真空泵为例, 结合运行期间发生的多次真空泵出力不足的故障, 通过对泵结构、原理和工作系统的全面分析, 得出造成真空泵出力不足主要有机械故障和工作液两类原因, 并针对性地提出了改进措施, 改进后泵的运行状态有较大改善。

关键词: 真空泵; 出力不足; 机械故障; 工作液

0 引言

秦山核电方家山生产单元凝汽器真空泵属于水环式真空泵, 它主要有两个的作用, 一是在汽轮机启动阶段, 真空泵为凝汽器快速建立真空, 二是在正常工作期间, 真空泵用于维持凝汽器真空, 抽出凝汽器中泄漏进去的空气和其它不凝性气体。

方家山单元 2 台 100 万千瓦机组凝汽器各设有 3 台真空泵, 正常运行期间 1 台运行, 2 台备用。在前几次循环期间发生多次由于真空泵出力不足, 导致凝汽器真空度下降, 真空无法维持的情况。频繁发生真空泵出力不足对于核电站的稳定运行造成了一定影响。本文针对真空泵本身的结构、原理等特点, 分析不同情况下真空泵出力不足的原因, 并拟定相对应的处理措施, 解决造成真空度出力不足的故障。

1 真空泵概述

1.1 泵的结构和工作原理

水环式真空泵泵体结构简图(见图 1), 由叶轮、泵体、分配板、吸气口、排气口、柔性阀板等部件组成。在真空泵体中装有适量的水作为工作液, 当电机通过联轴器带动叶轮和轴旋转, 泵体内的水受到离心作用影响, 水被叶轮抛向四周, 形成了一个近似于等厚度的封闭圆环。水环的上部分内表面恰好与叶轮轮毂相切, 水环的下部内表面刚好与叶片顶端接触(实际上叶片在水环内有一定的插入深度)。此时叶轮轮毂与水环之间形成一个月牙形空间, 而这一空间又被叶轮分成和叶片数目相等的若干个小腔。如果以叶轮的上部 0° 为起点, 那么叶轮在旋转前 180° 时小腔的容积由小变大, 且与端面上的吸气口相通, 此时气体被吸入, 当吸气终了时小腔则与吸气口隔绝; 当叶轮继续旋转时, 小腔由大变小, 使气体被压缩; 当小腔与排气口相通时, 气体便被排出泵外。同时, 为了避免真空泵产生过压缩现象, 在泵排气口安装柔性阀板, 根据吸入真空自动调节不同的开度。

单级水环式真空泵是所能达到的极限真空并不满足方家山凝汽器的运行要求, 故在真空泵入口加装大气喷射器, 同时喷射器配备加热器(用于低温工况下运行), 启动后的水环式真空泵达到最大出力时, 入口切换到喷射器一路运行, 提高整个真空泵的抽真空性能, 确保真空达到凝汽器运行要求。喷射器工作原理是抽气过程中喷嘴进气口和排气口之间形成压力差(见图 2), 气体从喷嘴进入泵体, 空气介

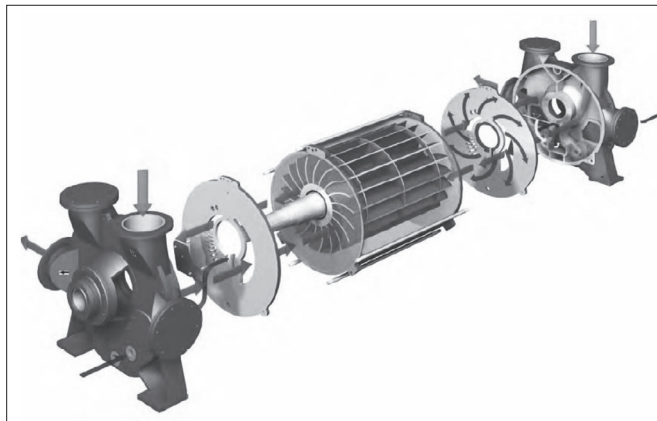


图 1 真空泵结构图

质经喷嘴收缩段得到加速, 到喉部时可达声速, 到扩张段可进一步加速, 射向扩散器形成高速射流, 并造成吸气室内的压力比入口管段内压力低, 因此被抽气体吸入室内, 由于两股气流在吸气室内混合, 动量交换产生的损失使气流速率逐渐减慢, 当进入扩散器喉部则降到声速以下, 经扩散器扩张段进一步降低, 压力不断升高, 最后达到大气喷射器的排气压力, 即水环真空泵的吸气压力, 而后真空泵把气体吸入再排出泵外, 即完成整个吸气、排气过程。

1.2 系统工作流程

真空泵(以真空 101PO 泵组为例)工作流程主要包含以下部件组成: 一台真空泵(101PO)一个分离器(101ZE)、一个换热器(101RE)、一个喷射器(101BL)、过滤器(101FI)和管道及其附属设备。真空泵工作时, 凝汽器内的气体被抽出, 经由入口阀门进入泵体, 气体被压缩到常压后排进分离器。在分离器内, 气体中冷凝的水蒸汽落到分离器底部, 混合后作为工作液进入冷却回路(工作液同时也承担着密封的作用), 被分离的空气流经分离器出口和一个手动蝶阀进入

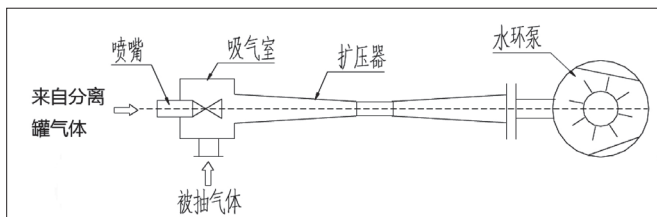


图 2 喷嘴工作原理图

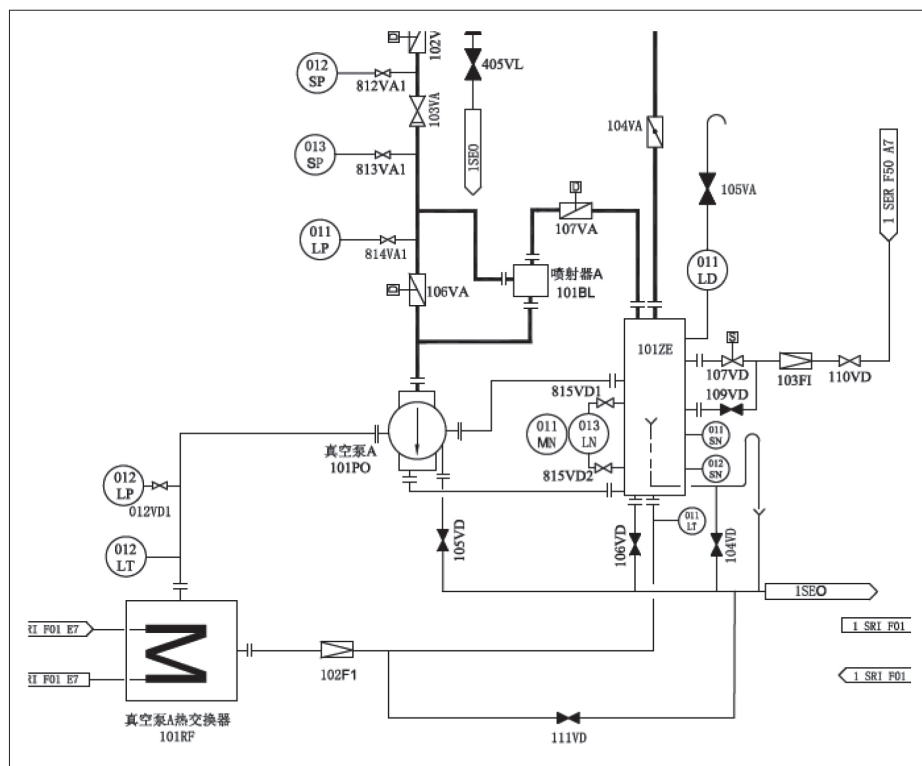


图 3 真空泵流程图

大气。工作液经冷却回路流经换热器进行热交换,工作液温度得到降低,进而流过泵头内的通道进入泵体,对真空泵进行冷却和密封。真空泵组包括工作液循环流程简图(见图3)。

2 原因分析

通过结构、工作原理、系统流程等多个方面分析,可以得出真空泵出力不足主要由机械故障和工作液故障两个方面的原因,下面对两种故障原因进行展开分析。

2.1 机械故障

2.1.1 柔性阀板故障

真空泵阀板部件由防水板和柔性阀板（见图 4）组成，安装在分配板的排气口，其作用是防止真空泵排气过压缩，保证真空泵组的工作效率。泵运行期间柔性阀板下端与分配板无间隙贴合，而上端因排气压力打开（见图 5）。柔性阀

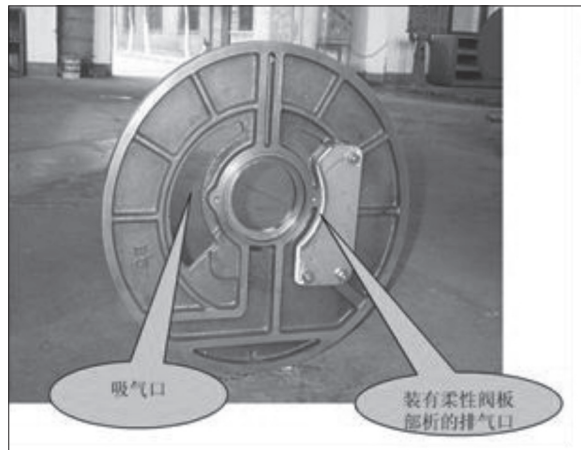


图 4 分配板

板材料通常采用聚四氟乙烯，长期运行会产生应力集中，造成阀板的变形或断裂，降低真空泵的出力。

2.1.2 叶轮与分配板间隙

分配板作为真空泵进排气的通道,真空泵叶轮与分配板(见图5)之间的间隙过大时,影响真空出力。间隙过小,容易造成碰磨,磨损叶轮,进而降低真空泵的出力。故检修过程中必须控制好转子总窜间隙。

2.1.3 喷射器

真空泵长时间运行会导致喷射器喷嘴磨损变大,影响真空泵出力。故需要对喷嘴制定合理的检修周期。在冬季低温环境下运行,有必要将喷射器的电加热器投入使用,防止喷射器温度过低造成冰堵而降低泵组的出力。

2.1.4 泵入口管线堵塞

运行期间当真空泵处于备用状态时,泵的入口容易积累冷凝水,一旦备用泵投入使用,冷凝水瞬间被吸入真空泵体内,产生水锤现象,电机负

2.2 工作液原因

2.2.1 工作液液位高度

汽水分离器设置有溢流管线和补水管线,用来保证液位在一定范围内。真空泵正常运行时,被抽气体发生凝结现象,液位上升,当液位超过溢流管线高度时,工作液自动从溢流管线排出。如果液位持续上升,将造成水环厚度增加,降低抽气效率。此时就需要检查溢流管线是否有堵塞的情况。当液位过低时,将导致真空泵水环厚度减小,相邻两个叶片间的空间遭到破坏,无法保证压缩和吸气的正常工作。

2.2.2 工作液温度

工作液在某一温度下都有对应的饱和蒸汽压力，当吸入区域的绝对压力越接近液体的饱和蒸汽压力时，液体越接近沸腾状态，这时在吸入区域的工作液表面会产生大量的汽泡，由于液体在工作腔内产生的工作液蒸汽会占据部分工作腔空间，泵对外的吸气能力会有所下降。工作液温度越高，对应的饱和蒸汽压力越大。当吸入区域的压力达到工作液的饱和蒸汽压力时，真空泵将导致出力不足。

因此真空泵密封水温度必须低于吸汽压力对应的饱和温度,严重时还会导致真空泵叶

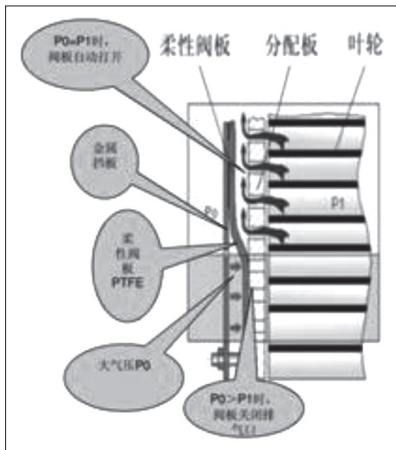


图 5 柔性阀板工作原理图

轮的汽蚀损坏,造成叶片及内表面损坏。换句话说,工作液越冷,泵工作效率越高。

不同温度下液体有不同的蒸汽压,根据克劳佩斯-克劳修斯方程:

$$\frac{d \ln p}{dT} = \frac{\Delta_{vap} H_m}{RT^2}$$

式中:

$\Delta_{vap} H_m$ ——为蒸发焓;

p——液体的饱和蒸汽压,单位:MPa;

T——为温度,单位:℃;

R——为常数。

液体温度对应的饱和蒸汽压力曲线图(见图6),正常运行期间(吸气压力在4~5kPa)之间,故工作液温度低于33℃可以保证真空泵的工作效率。

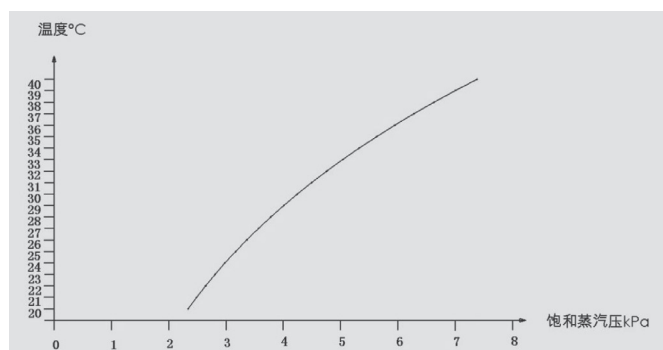


图6 饱和蒸汽压力对应的温度曲线图

一般而言,工作液温度升高主要来自以下几个原因:

(1) 冷却管线堵塞

冷却管线堵塞时将直接影响工作液的流量,进而降低了真空泵的工作液冷却效率,工作液温度上升,真空泵出力下降。真空泵分离罐的水由常规岛除盐水分配系统提供和补充,本身水质干净,但凝汽器及其系统管线在检修期间,内部有很多的打磨和开口等工作,灰尘、铁屑等残留在系统中。当真空泵开启时,凝汽器内部的空气被抽出,残留物带到真空泵内,进而压缩到工作液中,在循环过程中大部分残留物被滤网挡住,引起滤网堵塞,降低了工作液循环流量。当工作液流量低于真空泵正常运行所需的冷却量时,真空泵工作液温度上升,导致其出力降低。

(2) 热交换器故障

热交换器用于冷却真空泵工作液,方家山换热器的形式为板式热交换器(也有厂家采用管壳式),换热效率降低将会影响工作液的水温,进而影响真空泵出力。当排除真空泵冷却管路堵塞,工作液温度仍然高于设计温度时,就需要对热交换器

换热器冷却水流量降低;二是热交换器堵塞或有外漏。

3 改进措施

针对真空泵出力不足的原因分析,建议采取以下措施,提高设备的可靠性,减少真空泵因出力不足而产生的故障。

3.1 机械泵体方面改进

3.1.1 定期更换柔性阀板

柔性阀板的功能和材料性质决定了其容易老化和变形,是易损件,需根据老化变形程度安排合理的更换周期,设置PM项目,在合适的检修窗口进行检修更换,确保了阀板在运行期间功能的完好性。目前,方家山机组,每次大修解体检修必换。

3.1.2 严格制定检修标准

解体检修期间必须严格控制叶轮和分配板之间的总窜(0.65~0.75mm)。具体操作是:当总窜间隙过大时,车薄外筒体的厚度;总窜间隙过小,则需要在分配板与筒体结合面加适量的垫片。当检修发现叶轮和分配板磨损严重时,则必须更换相应部件。

3.1.3 合理安排喷射器的检修周期

喷射器喷嘴易磨损,建议增加PM项目,根据磨损程度安排合理的更换周期,在合适的窗口进行检修更换。另外,在冬季低温环境下运行时,有必要将喷射器的电加热器投入使用,防止喷射器温度过低造成冰堵而降低泵组的出力。

3.1.4 定期排空备用真空泵入口管线的冷凝水

优化真空泵切换操作规程,定期对备用泵入口管线的冷凝水进行排放。方家山已通过变更(EC0446),将各真空泵入口阀前直管段下部开孔,增加一路DN32疏水管线,三个真空泵支管连通,增加了入口的排水管线,彻底解决了各真空泵入口管积水问题。如图7:

3.2 工作液方面改进

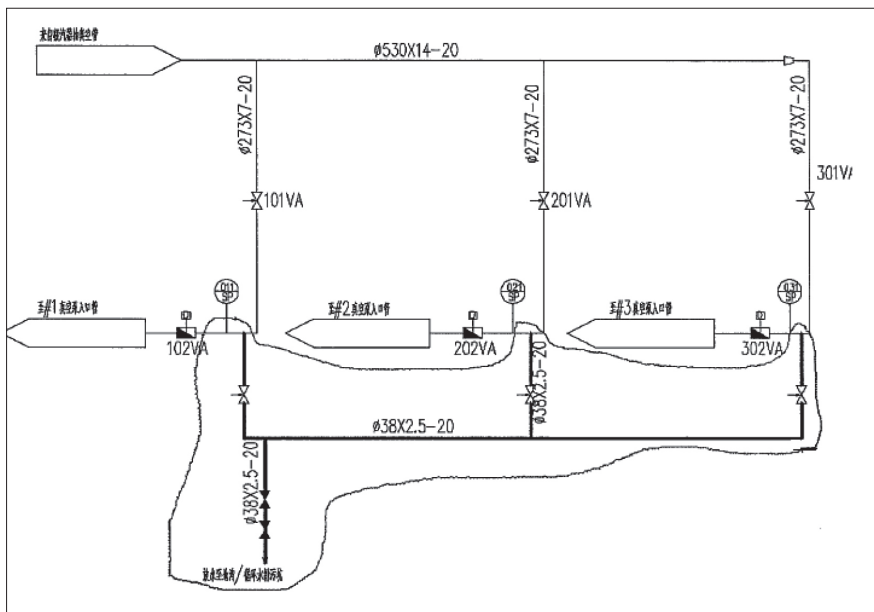


图7 真空泵入口管道增加排水管线变更图

(下转第80页)

真正的 YCB 物体的三维模型之间的 Hausdorff 距离来计算误差。结果是, 10 个物体的综合 Hausdorff 距离误差: 算法是 6.5mm, 不旋转的方法是 14mm, 旋转最终关节的方法是 13mm。除了在布丁盒、棒球和金枪鱼罐头上, 重建感知轨迹比将 Baxter 的最终关节旋转 180° 更好。与其他两种方法相比, 这些目标重构误差较大的原因是物体的尺寸小, 而且 RGB-D 传感器的分辨率不够高, 无法生成清晰的点云。这给融合算法重建目标带来了困难。对于玩具钻头, 由于缺乏丰富的颜色特征, 融合算法并没有比旋转 180° 轨迹更好地重构感知轨迹对应的物体网格。这有可能通过使用更丰富的基于外观的线索来跟踪对象而得到改进。

5 结语

本文提出了一种基于高斯过程隐式曲面模型的联合抓

取和重建未知目标的新框架。实验表明, 与简单地将最终关节旋转 180° 或规划一个不考虑视角的运动规划相比, 使用实验方法生成的取放轨迹生成的对象模型质量更高。

参考文献:

- [1] M. Seeger, "Gaussian processes for machine learning," Int. journal of neural systems, vol. 14, no. 02, pp. 69–106, 2004.
 - [2] M. Kobilarov, "Cross-entropy motion planning," Int. Journal of Robotics Research, vol. 31, no. 7, pp. 855–871, 2012.
 - [3] 杨惠. 自动驾驶系统中局部路径规划改进算法研究 [J]. 自动化应用, 2021(02):4-6.
- 作者简介: 黄侃润 (1990.03–), 男, 汉族, 浙江桐乡人, 硕士, 工程师, 研究方向: 计算机视觉。

(上接第 76 页)

3.2.1 控制液位高度

根据运行手册, 要求分离器液位控制在 180 ~ 250mm, 低于 180mm, 补水阀自动打开进行补水。所以要加强了对补水电磁阀、过滤器、分离罐进行检查。液位过低时, 首先要检查补水阀能否正常工作, 包括阀门机械卡涩检查和仪控信号检查; 其次补水管路过滤器堵塞, 也会导致补水不足的情况, 必要时打开过滤器, 进行清洗检查; 最后, 打开分离罐, 检查溢流管线是否破损, 是否存在液位无法保持的情况。

3.2.2 控制工作液温度

真空泵正常运行期间出力保持在 4 ~ 5kPa 之间, 故工作液温度低于 33℃ 可以保证真空泵的工作效率。滤网堵塞、补水阀故障、热交换器故障都会导致工作液温度上升。所以, 要定期对热交换器入口 Y 型滤网金属滤芯进行清洗。如发现工作液水质异常差, 杂质过多时, 有必要对分离罐及管线一并进行清洗; 定期对补水阀进行检查, 若补水阀故障也会造成工作液温度上升; 定期检查热交换器冷却水流量是否正常, 热交换器冷却水流量降低, 则需要对冷却水系统进行检查; 若热交换器堵塞或有外漏, 则需要对其进行解体检查, 清洁板片或更换密封胶条。

3.3 新增变更

根据秦二厂 3、4 号机组运行经验, 热交换器出口压力在低于 -0.06MPa 时, 表示过滤器堵塞比较严重, 需要清洗。后续新增变更申请, 在热交换器出口增加压力表。加强对热交换器的巡检, 根据压力表压力的变化反应热交换器的堵塞

程度, 从而评估真空泵的出力情况。

4 结语

导致水环式真空出力不足的原因主要来自于机械故障和工作液两大因素, 针对不同现象采取不同的处理措施, 就可解决真空泵出力不足的故障, 保证凝汽器的真空度满足运行要求。

本文以理论分析与实践论证相结合的方式, 根据真空泵的特点进行分析, 确认了泵出力不足的情况, 为后续改进措施提供了充分的理论依据。多项针对性的措施实施后, 真空泵出力不足现象大幅降低, 整体运行状况良好。该泵的缺陷分析及处理过程, 为设备的正常运行提供了强有力的支持, 也为类似问题的分析解决提供一个较好的案例, 具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 李琼, 卢胜阳, 郑清瀚等. 工作水温度对真空泵影响的分析及试验研究 Analysis and Test Study of Working Water Temperature Affecting Vacuum Pump [J]. 电站系统工程, 2012.
- [2] 陈鑫水. 真空泵出力不足原因分析及处理 Cause Analysis and Treatment on Low Output of Vacuum Pump [J]. 广东电力, 2013.
- [3] 宗绪东. 火力发电厂水环真空泵存在的问题及优化改造 Problems and Optimization of water ring Vacuum Pump in Thermal Power Plant [J]. 华电国际技术服务中心 (济南), 第 40 卷第 2 期, 2018.