

核电汽轮机真空系统检漏方法及实例分析

穆春林

(江苏核电有限公司, 连云港市海棠中路 28 号 222042)

摘 要: 汽轮机真空系统泄漏是电厂运行中的一类常见缺陷, 如何判断真空系统存在泄露并准确的找出泄露点的位置, 是及时发现和有效处理缺陷的关键。本文从真空度降低的原因分析入手, 针对性地提出相应的检漏方法, 尝试给出检测汽轮机真空系统严密性的判断标准, 并推导出验证真空泄漏率的可行的经验公式。文章的最后结合田湾核电站一期调试期间真空系统泄露消缺实例, 验证了上述检测方法的可行性和经验公式的正确性, 并进一步分析了真空度降低对汽轮机效率的影响程度, 得出提高真空度与提高汽轮机效率之间的对应关系。

关键词: 汽轮机; 真空度; 泄露; 密封性检查; 汽轮机效率

0 引言

汽轮机真空度是汽轮发电机组运行的一项重要考核指标, 其性能的好坏对机组运行的经济性和安全性有着重要的影响。如果真空严密性不好, 漏气的进入会使凝汽器内的压力值逐渐升高, 真空度下降, 导致蒸汽的排气焓值上升, 有效焓降降低, 汽轮机蒸汽循环效率下降^[1]。实践证明, 真空每降低 1kPa 发电机煤耗大约增加 0.13%, 同时空气的漏入会使凝结水中的溶氧量升高, 腐蚀设备, 增加机组运行风险。因此, 在机组运行的过程中应密切关注真空值, 当真空度较低时, 要及时分析下降的原因、确定泄漏的部位, 并选择合理的解决方案。

1 真空系统检漏方法

1.1 凝汽器真空下降的原因

凝汽器真空度偏低时会引起排气温度的升高, 凝结水含氧量上升, 严重时机组会出现震动。导致汽轮机真空度下降的原因有设计因素和运行因素。设计因素多表现为凝汽器真空严密性不足, 凝汽器设计不合理; 运行因素有凝集器铜管结垢、射水抽气器的工作能力和效率降低、一些法兰和焊缝泄漏等^[2]。

1.2 真空系统查漏方法

在机组的运行过程中, 真空系统的泄漏是避免不了的。真空系统检漏的目的是使系统中的漏气量减少至工艺要求所允许的范围内。经过多年的发展和实践, 系统检漏的方法日趋成熟。本文给出了几

种常见的检漏方法, 分析每种方法的优劣(见表 1)。

表 1 真空系统查漏方法

方法名称	方法流程	优点	缺点
真空灌水 试验法	1、汽轮机停运; 2、将水注满凝汽器 空间直至低压缸汽 封处; 3、检查漏水地点。	方法简单 实用, 准确 性高, 检漏 效果好。	灌水高度只能达到气 缸最低轴封注窝处, 因 而不能覆盖全部的凝 汽器系统, 特别是与汽 轮机汽缸相连接的管 道系统。
氦质谱仪 查漏法	1、用软管将氦质谱 仪与真空泵入口相 连; 2、在泄漏点处喷入 氦气; 3、记录检验结果。	在机组运 行时也可 以使用, 且 具有较高 精度。	不能做到对漏点的定 点定位, 查漏工作量大, 还要消耗大量的氦 气。
蜡烛检查 法	1、在凝汽器内点燃 蜡烛; 2、观察蜡烛火焰是 否有偏移。	方法简单, 经济性高。	很难发现轻微漏点, 效 果不好。
超声波查 漏法	1、在凝汽器内调节 灵敏度旋钮, 使声音 指示值为零; 2、选取标准对管板 进行扫描; 3、发现有声音超级 准时, 对该位置进行 排查。	检测效果 好, 经济性 高。	现场的噪音会对查漏 造成很大的影响。

2 汽轮机真空系统严密性检测标准

汽轮机在一定负荷下, 关闭抽气器的空气阀门, 使凝汽器处于切除抽气器的工况下, 用真空下降速度来表征漏入空气量。经验表明, 进入凝汽器的蒸汽流量为常数和冷却水温度为常数时, 真空下降的速度与漏入空气量成线性关系。对于大容量汽轮机, 每分钟真空下降速度的判断标准为: 1~2mm Hg/min 为严密性良好; 3~4mm Hg/min 为严密性合格。当存在很大的真空下降速度时, 则表示真空系统的严

密性不合格。除了这些按真空下降速度来评价真空的严密性，还可采用下面计算公式：

$$H \leq k \frac{dk}{Fk} \left(\frac{Dk}{100} + 1 \right) \quad (1)$$

式中：△H—切除抽气器时真空的下降速度，mmHg/min；

dk—校核空气严密性时凝汽器的蒸汽负荷率， $dk = \frac{Dk}{Fk} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ；

Dk—进入凝汽器的设计额定蒸汽流量，t/h；

k—系数，当真空系统严密性评定为优良、良好、合格时，相应的系数分别为 25、50、100。

当切除抽气器用试验的方法测量每单位蒸汽负荷 dk 的真空下降速度△H，并从小值开始将不同的 k 值代入公式后，即可取得设备真空系统严密性质量的评价。这种评价的确定，是与满足计算式的条件有关的。

更为可靠的检查空气严密性的方法，是直接测量从凝汽器抽出来的空气量。因此，与射水抽气器同时装设空气流量表，安装在抽气器排气管上，来测定抽气器排出的空气和少量蒸汽混合物的流量。这样，进行检查空气严密性可按下式估算：

$$Ga \leq k1 \left(\frac{Dk}{100} + 1 \right) \quad (2)$$

式中：Ga—凝汽器的设计进气量，t/h；

k1—系数，当真空系统严密性评定为优、良和合格时，相应的系数分别为 1.0\2.0\3.5。

3 田湾核电站一期汽轮机真空系统泄漏消缺实例分析

3.1 机组现状

江苏核电有限公司田湾核电站 1#、2#汽轮机组是列宁格勒金属工厂生产的 K-1000/60-3000 型机组，该型号汽轮机组是生产厂家在长期设计、生产和运行的 800-1200MW 高速汽轮机的经验基础上改进的核电配套机组，转速为 3000rpm，一个高压缸、四个低压缸，七级抽气。1#、2#机组调试期间，发现存在真空度低，严密性试验时有不合格的现象。甚至出现过真空系统密封性试验做不了的情况，严重威胁着机组能否按期投入商运。

1#号机组的真空严密性试验结果为后 5min 时间内真空下降速度为 500Pa/min，2#号机组的真空

严密性试验结果为后 5 分钟时间内真空下降速度为 1333Pa/min。真空下降速度超出常规值很多，依据经验表明，真空系统密封不合格，存在漏气。为了查找漏气部位，对机组进行了查漏试验，使用的方法为氦质普检漏仪查漏法。

3.2 查漏过程和数据

氦质普检漏仪连接图如图 1 所示。对电厂主机高、低压缸本体、低加疏水系统、高加疏水系统、凝结水系统、给水系统、抽气系统、凝汽器、高低压缸轴封系统进行氦质普检漏仪查漏，具体的结果如表 2、表 3 所示，其中表 2 为 1#机的漏气分布，表 3 所示为 2#机的漏气分布。

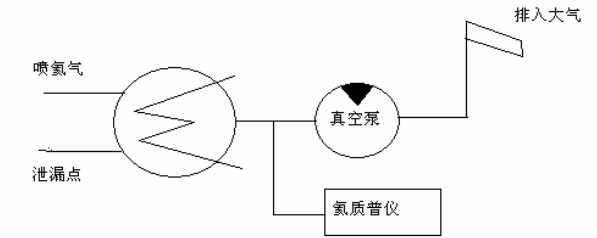


图 1 氦质普检漏仪连接图

由表中数据可以看出，1#机组高压缸前后轴封漏气最为严重，2#机组 3#低压缸轴封漏气最为严重。整个机组来看 A 主给水泵盘根密封水漏气最为严重，达到了 $5.1 \times 10^{-3} \text{ mbar} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

结合现场运行经验，对检测结果进行分析，共发现以下泄漏部位：凝结水再循环调节门前管路砂眼，轴封系统主凝汽器输水手动门盘根、主机低压缸调端安全门螺栓松动等。

表 2 1#机的漏气分布

位置	空气吸入量情况	漏气率/ $\text{MBAR} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$
低压缸 1#防暴膜（机侧）	有空气吸入凝汽器	5.8×10^{-5}
低压缸 2#防暴膜（电侧）	有空气吸入凝汽器	1.7×10^{-5}
高压缸轴封	有大量空气吸入凝汽器	5.5×10^{-5}
低压缸轴封	有空气吸入凝汽器	6.2×10^{-6}
B 凝结水泵后轴封	有微量空气吸入凝汽器	6.9×10^{-6}
A 主给水泵盘根密封水	有特大量空气吸入凝汽器	5.1×10^{-3}

表 3 2#机的漏气分布

位置	空气吸入量情况	漏气率/ $\text{mbar} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$
低压缸 1#防暴膜（机侧）	有空气吸入凝汽器	2.0×10^{-6}
低压缸 2#防暴膜（电侧）	有空气吸入凝汽器	4.0×10^{-5}
高压缸轴封	有大量空气吸入凝汽器	9.7×10^{-5}
3#低压缸前轴封	有大量空气吸入凝汽器	3.1×10^{-5}
3#低压缸后轴封	有大量空气吸入凝汽器	5.5×10^{-5}
高压缸排气管道蒸汽支撑波纹管	有大量空气吸入凝汽器	8.3×10^{-5}
4#低压缸后轴封	有空气吸入凝汽器	7.3×10^{-5}

其中给水泵漏气主要是密封水回水 U 型管密封效果不佳, 导致空气漏入凝汽器所致。1#、2#机组给水泵密封水二次回水 U 型管基建布置标高为 10m, 但实际仅为 8m 左右。因为不能形成足够的水封, 导致空气漏入凝汽器, 使真空度降低。1#机的漏气原因为主机端部汽封间隙超标。2#机的漏气原因是 3#、4#轴承端部汽封与油挡之间洼窝排污管存在裂纹。该排污管因受机组基架布置影响, 只能从低压缸通过, 从 8m 低压缸机侧引出至 -4m 凝汽器地坑。

3.3 堵漏处理

针对查漏过程中查出的漏点, 对机组进行了堵漏处理。对低压缸防爆膜进行了封堵, 对高压缸轴封、低压缸轴封和高、中主汽门及调门进行了系统调整, 对低压缸前、后轴封, 进行了系统调整, 对轴加汽测法兰进行了封堵。由于给水泵的漏气较为严重, 将密封回水 U 型管的高度提升到 10m。堵漏前后真空下降速度及标准值对比如图 2 所示。

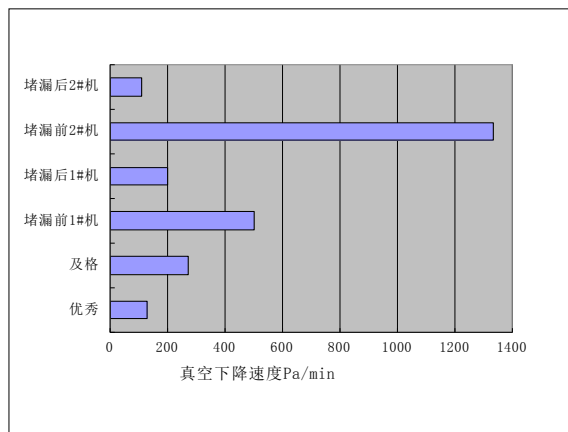


图2 堵漏前后真空下降速度及标准值对比

3.4 结果检验

采用式 (1) 中的右式先计算出在真空系统严密性良好的情况下, 每分钟真空下降速度应达值。分别选定真空系统严密性等级为优秀和合格进行计算可得, 在优秀的条件下真空下降速度应为 130Pa/min, 在合格的条件下真空下降速度应为 270Pa/min。

对进行堵漏处理后的机组进行严密性检测及漏气检测所得的数据显示系统的真空性能得到很大的改善, 1#机真空严密性试验压降 0.04kPa/min, 2#机真空严密性试验压降 0.12 kPa/min, 均为优秀等级。

4 真空度对机组效率的影响分析

当不计排气缸的损失和凝汽器喉部的阻力损失时, 可以认为凝汽器压力等于汽轮机的背压, 在正常运行时, 则可认为凝汽器压力变化对机组运行功率的影响等同于汽轮机背压变化对机组功率的影响。凝汽器压力变化, 使汽轮机低压缸末级焓降发生变化, 在进汽量不变的条件下, 引起末级功率变化; 而在凝汽器压力变化时, 凝结水温度发生变化, 于是进入靠近凝汽器的第一个低压加热器的抽气量变化, 末级压力变化。因此, 凝汽器压力变化引起汽轮机功率的变化主要由两部分组成^[3]。

新蒸汽做功的减少量 ΔH_{01} 为:

$$\Delta H_{01} = a_n (h_c' - h_c) \quad (3)$$

式中: a_n —汽轮机的排气量;

h_c' , h_c —分别为真空值变化前后排气的焓值; 由于末级加热器的出口水温不变, 凝结水焓降 ΔH_{02} 为:

$$\Delta H_{02} = a_{nn} \cdot \Delta \zeta_n \cdot \eta_1'$$

(4)

式中: η_1' —排汽压力后的末级加热器的抽汽效率,

$$\eta_1' = (1 - \frac{\Delta h_c}{H_1});$$

a_{nn} —通过末级加热器的凝结水的流量;

ζ_n —凝结水的焓值。

因此, 排汽压力的降低引起的新蒸汽等效热降变化 ΔH 为:

$$\Delta H = \Delta H_{02} - \Delta H_{01} \quad (5)$$

在本文中通过对机组进行堵漏处理, 使机组真空值提高了 0.2%, 通过计算可得装置效率的相对变化为 0.105%。

5 结论

汽轮机组真空度低是一个综合性问题, 影响因素较多, 彻底解决真空系统的泄露是一个系统工程, 必须从细处入手, 对影响因素逐一消除并要做好长期保持。提高汽轮机组的真空度既是机组安全稳定运行需要, 更是提高机组效率, 提高运行经济性的可靠保证。

参考文献:

- [1] 周维国. 汽轮机真空系统严密性试验的比较与分析[J]. 电力学报, 2011(5): 436-440.
- [2] 付文峰, 白中华, 李富云, 等. 凝汽器内空气积聚对真空的影响[J]. 电力学报, 2011(5): 436-440.

- 响[J].电力学报,2008(3):67-69.
- [3] 李秀云,严俊杰,林万超.用等效热降法确定排汽压力变化对可以机组经济性的影响[J].热能动力工程,1999,14(5):353-355.
- [4] 阎顺林,郝智元,李永华,等.背压变化对机组热经济性影响的计算模型[J].华东电力,2008(9):102-104.
- [5] 种稻彤,刘继平,严俊杰,等.漏空气对凝汽器传热性能影响的试验研究[J].中国电机工程学报, 2005(4):153-157.
- [6] 陈洁.真空严密性对凝汽器改造试验结果的影响[J].汽轮机技术,2009(2):151-152.
- [7] 李勇,董玉亮,杨善让,等.汽轮机真空系统严密性试验结果的修正方法研究[J].汽轮机技术,2002(1):70-73.
-

作者简介:

穆春林（1971-），男，江苏连云港人，高级工程师，现从事核电站设备管理工作，E-mail: mucl@jnpc.com.cn。