

# Analysis and Solutions for Poor Vacuum System Sealing in Steam Turbines by

Yongfeng Huang

State Grid Energy Xinjiang Zhundong Coal Power Co., Ltd., Zhundong, Xinjiang, 831100, China

## Abstract

The vacuum sealing performance of thermal power plant units significantly impacts the safety and economic efficiency of steam turbines. Low vacuum levels during operation are a common issue in power generation facilities. The adverse effects of insufficient vacuum on unit safety and economic performance are threefold: Firstly, reduced vacuum decreases the final-stage enthalpy drop of the steam turbine, increases backlash, and consequently raises axial thrust. Elevated exhaust steam temperatures cause low-pressure cylinder deformation and bearing misalignment, potentially leading to excessive vibration in severe cases. Secondly, low vacuum directly increases energy consumption and reduces economic efficiency. A 1% decrease in condenser vacuum results in 1%-2% higher steam consumption and 1.79 ~ 3.09g/kWh in coal consumption, ultimately diminishing overall cycle efficiency. Thirdly, air leakage into condensate increases oxygen content, corroding thermal system pipelines and equipment, compromising safe operation and increasing maintenance costs.

## Keywords

Vacuum tightness; Leak detection; System modification

# 汽轮机真空系统严密性差的原因分析及处理

黄永丰

国网能源新疆准东煤电有限公司, 中国·新疆 准东 831100

## 摘要

火力发电厂机组真空严密性的好坏对汽轮机的安全性和经济性有很大的影响, 机组运行中真空偏低是发电企业常见的问题。真空偏低对机组的安全性和经济性影响很大, 其一: 低真空使汽轮机末级焓降减少、反动度增大, 从而引起轴向推力增大; 汽轮机排汽温度的升高引起低压缸变形、汽轮机轴承中心偏移, 严重时导致汽轮机的振动超标; 其二: 真空偏低直接增加机组的能耗, 经济性降低。凝汽器真空度每降低1%, 会使汽轮机汽耗增加1%~2%, 发电煤耗增加1.79~3.09g/kWh, 使机组整体循环效率下降; 其三: 空气漏入凝结水中, 会使凝结水中的含氧量升高, 腐蚀热力系统管道和设备, 影响机组的安全运行, 增加日常维护成本。

## 关键词

真空严密性; 查漏; 系统改造

## 1 引言

本文针对上海汽轮机 660MW 超超临界机组真空系统严密性不合格问题, 进行真空系统全面分析、查漏, 找出漏点, 进行系统改造, 彻底消除真空漏点, 提高了机组安全性和经济性, 对同类型机组有很好的借鉴作用。

要彻底解决机组真空系统严密性不合格的问题, 首先必须清楚机组真空降低的原因。汽轮机真空降低的因素比较复杂, 其中包括真空系统严密性、凝汽器传热特性、凝汽器热负荷及循环水出水管顶部集有空气或虹吸中断、清洁系数、真空泵的出力不足、高/中/低压疏水系统阀门内漏、冷却

水量、循环水流量和进口水温、冷却水系统的特性等, 但影响汽轮机真空偏低最主要的原因之一就是真空系统泄漏, 真空严密性差。所以, 在机组运行过程中, 真空是一项非常重要的参数, 根据每月机组真空严密性试验情况, 定期对真空系统查漏堵漏, 尽可能提高机组真空, 已成为日常改善机组运行状况、降低发电能耗的一项重要工作。

## 2 我厂汽轮机介绍

我厂汽轮机是上海电气集团股份有限公司上海汽轮机厂生产的 NJK660-27/600/610 型超超临界、一次中间再热、三缸两排汽、间接空冷凝汽式汽轮机。汽轮机高、中压主汽门门杆漏汽管道与凝汽器直接相连, 未设置隔离门; 高、中压调阀及补汽阀阀杆漏汽管道左、右侧分别合并成一根母管后, 分三路汇入轴封溢流调阀管道前, 然后进入凝汽器。

【作者简介】黄永丰(1984-), 男, 中国山东潍坊人, 本科, 工程师, 从事火力发电厂研究。

### 3 机组真空严密性差问题

两台机组自2023年投产半年以后,机组真空严密性试验数值逐渐变差, #1 机组真空严密性试验下降值最大 1350Pa/min、#2 机组真空严密性试验下降值最大 936Pa/min,严重影响机组的安全经济运行。

## 4 问题分析和查找

### 4.1 真空漏点排查

针对机组真空系统涉及的范围大、点多面广问题,公司成立以运行专工为组长的真空查漏攻关小组,首先结合图纸和现场系统布置,对机组整个真空系统进行全面深入分析,采用灌水查漏、涂抹肥皂泡、鸡毛毯子、氦气检漏等方式,有重点、分区域、分系统开展细致排查,主要排查区域:

#### 4.1.1 低压缸本体

低压缸缸体及结合面,低压缸安全门、人孔门,中、低压缸连通管。包括汽缸法兰、螺栓、温度测点等,进行全面、细致地查漏。

#### 4.1.2 疏水系统

排空管道、疏水管道至凝汽器,包括各系统管道焊缝、法兰、螺栓、温度测点、压力测点、压力温度、变送器测点、各容器水位计、门座、门杆及门体等,进行全面、细致地查漏。

#### 4.1.3 凝结水系统

凝结水泵盘根、密封水,凝汽器热井至凝结水泵入口管道,凝结水系统至低旁及疏水扩容减温水系统,凝汽器水位计,包括系统管道焊缝、法兰、温度测点、压力测点、压力温度、变送器测点、滤网法兰、系统阀门以及阀门本体座和阀门螺杆活动缝隙等,进行全面、细致地查漏。

#### 4.1.4 汽轮机抽汽系统

抽空气管道,包括系统管道焊缝、法兰、压力测点、压力温度、变送器测点、系统阀门以及阀门本体座和阀门螺杆活动缝隙等,进行全面、细致地查漏。

#### 4.1.5 高、中、低压缸的轴封系统

高、中、低压缸的轴封供回汽管道,高中低压缸轴端汽封,轴封加热器本体及疏水,法兰、螺栓、液位计、温度测点等,进行全面、细致地查漏。

#### 4.1.6 给水泵汽轮机系统

给水泵汽轮机缸体及结合面,低压缸安全门、人孔门、轴封、排汽管道。包括汽缸法兰、螺栓、温度测点等,进行全面、细致地查漏。

#### 4.1.7 真空泵系统

真空泵及入口管道,包括系统管道焊缝、法兰、压力测点、压力温度、变送器测点、阀门,真空泵分离器液位、真空破坏门密封水等,进行全面、细致地查漏。

#### 4.1.8 其他部位

与真空系统相连的管接头、法兰和阀门接合处及预留口,低加本体及其管道、阀门、表计、测点等一切可能存在

的泄漏部位,进行分析查漏。

另外,利用机组调峰停备机会,进行凝汽器高位灌水查漏。同时,调研同类型机组,咨询设备厂家,分析真空系统可能漏点。

## 4.2 真空查漏的方法

### 4.2.1 灌水查漏法

灌水范围

凝汽器、低压缸、扩容器及与凝汽器相连的低加、高加事故疏水、正常疏水、排汽管道、#7 低压加热器等有关设备与系统,所有真空系统。

### 4.2.2 应具备的条件及准备工作

检查参与灌水系统的设备及管道的支吊架完整,在凝汽器低部和四周加装可靠的支撑,必要时可用专用千斤顶进行硬支撑,防止凝汽器受力过大产生变形。

凝汽器本体汽侧及附件内部清理干净,底部支撑完好。

从凝汽器底部至 15.5m 层接一透明塑料管临时水位计。

凝汽器坑内二台排污泵检查试运完,具备排水能力,检修准备好临时排污泵一台。

检查凝汽器人孔封闭完好,与凝汽器连接管道的法兰的紧固完好。

A、B 小机排气管道二个人孔门封闭完好,内部清扫干净无杂物。联系检修人员检查 A、B 小机排汽管道支撑螺栓具备灌水查漏条件。

与凝汽器疏水扩容器连接的疏水门没有检修工作或不影响凝汽器灌水。

关闭下列阀门:凝汽器热水井放水门;真空泵入口手动门;凝结水泵入口滤网排污门;主再热蒸汽及旁路系统相关疏水手动门;汽轮机本体相关疏水手动门;一段抽汽逆止门前疏水手动门;二段抽汽逆止门前疏水手动门;三段抽汽逆止门前疏水手动门;四段抽汽逆止门前、后疏水手动门;三级减温水门、疏扩减温水门、水幕喷水门、低压缸减温水门;凝结水再循环门;与灌水有关系统(凝结水、轴封、高低加疏放水、抽汽等)的放水门;小机排汽蝶阀。

下列阀门在灌水后根据凝汽器内水位情况及检修情况开启:凝结水泵入口电动门;凝结水泵排空气门;疏水集管上的所有疏水门;各低加正常、危急疏水至凝汽器疏水门;凝结水再循环门;汽封加热器疏水门;# 1、2、3 高加危急疏水;除氧器放水门;疏水扩容器减温水阀门。

### 4.2.3 检漏步骤

按凝结水系统投入检查卡恢复系统,关闭所有放水门、排空门。

开启除盐水至凝汽器补水门,向凝汽器注水并监视好水位。

注水高度至 7.5 米左右停止注水,进行第一阶段检漏。

第一阶段检漏结束后,继续灌水。

第二阶段继续向凝汽器注水,待凝汽器水位至凝汽器

颈部 300mm，关闭凝汽器注水门，维持凝汽器灌水水位，静置 24 小时期间，机组长派人就地连续监视水位变化，检查凝汽器及相连接管道无渗漏。

检漏完毕，凝汽器放水至可见水位。

#### 4.4 氦气检漏法

机组运行中真空系统的查漏最为有效的方法就是进行氦气检漏，但必须先判断出可能泄漏的区域或部位，进行重点排查，具体方法是：在运行真空泵分离器顶部排气管道出口固定氦气检漏仪的探头及设备，利用氦气专用的喷枪，在怀疑泄漏的负压系统的阀门、法兰、管道焊缝等部位喷氦气，然后观察 2 ~ 3 分钟，如果喷氦气区域有漏点，吸入真空系统的氦气将会部分通过运行真空泵排出，氦气检漏仪的探头检测出有氦气时就会报警，漏点越大，运行真空泵分离器顶部排气管道出口的氦气浓度将会越大，仪器报警值也就越大。

氦气查漏法，漏点大小的评判标准：

漏率值大于  $1.0 \times 10^{-6} \text{mbar} \cdot \text{L/s}$ ，大漏点，对真空系统严密性试验指标影响较大。

漏率值大于  $1.0 \times 10^{-7} \text{mbar} \cdot \text{L/s}$ ，小于  $1.0 \times 10^{-6} \text{mbar} \cdot \text{L/s}$  为中漏点，对真空系统严密性试验指标有影响。

漏率值大于  $1.0 \times 10^{-8} \text{mbar} \cdot \text{L/s}$ ，小于  $1.0 \times 10^{-7} \text{mbar} \cdot \text{L/s}$  为小漏点，对真空系统严密性试验指标影响较小。

漏率值小于  $1.0 \times 10^{-8} \text{mbar} \cdot \text{L/s}$ ，对真空系统严密性试验指标无影响。

真空查漏的方法很多，如鸡毛毯子、超声波查漏、灌水查漏、火烛法、涂抹肥皂泡法、卤素检测法、氦气查漏等，首先采取灌水查漏、涂抹肥皂泡、鸡毛毯子等常规方式排查，逐一排除可能影响真空严密性的因素，找出可能泄漏的部位采用氦气检漏法排查，最终确定汽轮机高中压主汽门、调门阀杆处漏真空。

查出真空系统具体漏点如下：

编号	真空泄漏点部位描述	最大漏率值	真空泄漏点部位描述	最大漏率值
#1 机组			#2 机组	
1	左侧高压主汽门阀杆处	$1.0 \times 10^{-6}$ (大漏点)	左侧高压主汽门阀杆处	$1.2 \times 10^{-6}$ (大漏点)
2	右侧高压主汽门阀杆处	$2.1 \times 10^{-6}$ (大漏点)	右侧高压主汽门阀杆处	$2.3 \times 10^{-6}$ (大漏点)
3	左侧中压主汽门阀杆处	$5.2 \times 10^{-7}$ (中漏点)	左侧中压主汽门阀杆处	$5.6 \times 10^{-7}$ (中漏点)
4	右侧中压主汽门阀杆处	$4.3 \times 10^{-7}$ (中漏点)	右侧中压主汽门阀杆处	$3.3 \times 10^{-7}$ (中漏点)
5	左侧中压调门阀杆处	$3.6 \times 10^{-7}$ (中漏点)	左侧中压调门阀杆处	$4.6 \times 10^{-7}$ (中漏点)
6	右侧中压调门阀杆处	$3.2 \times 10^{-7}$ (中漏点)	右侧中压调门阀杆处	$3.2 \times 10^{-7}$ (中漏点)
7	左侧高压调门阀杆处	$4.1 \times 10^{-7}$ (中漏点)	左侧高压调门阀杆处	$5.1 \times 10^{-6}$ (中漏点)
8	右侧高压调门阀杆处	$5.2 \times 10^{-7}$ (中漏点)	右侧高压调门阀杆处	$6.2 \times 10^{-7}$ (中漏点)

## 5 原因分析及解决方法

### 5.1 汽轮机高中压主汽门、调门阀杆处漏真空原因及分析

汽轮机高、中压主汽门门杆漏汽管道与凝汽器直接相连，未设置隔离门。

汽轮机高、中压调门及补汽阀阀杆漏汽管道左、右侧分别合并成一根母管后，分三路汇入轴封溢流调门管道前（原设计），然后进入凝汽器。但是，现场门杆漏汽管道错接至轴封溢流调门管道后直接进入凝汽器。

由于阀门与门杆间采用盘根密封，汽轮机高中压主汽门、调门频繁开关导致阀杆动静密封磨损不严，盘根与门杆间产生间隙漏空气，凝汽器内又是负压，空气沿阀杆漏汽管道反向流动，漏入凝汽器而影响机组真空，导致机组真空系统严密性不合格。

### 5.2 解决方案

高、中压主汽阀阀杆漏汽管道技术改造方案：

方案一：将高、中压主汽门阀杆漏汽至凝汽器本体疏水扩容器管路加装手动门，并增加一路管道至轴加风机出口排汽管道，并加装手动阀。机组正常运行时，开启门杆漏汽至轴加风机出口管道手动门、关闭门杆漏汽至凝汽器疏水扩

容器管道手动门；机组启停时，开启门杆漏汽至凝汽器疏水扩容器管道手动门、关闭门杆漏汽至轴加风机出口管道手动门。实现机组启、停与正常运行阶段的不同切换，确保凝汽器内不会抽入空气。

方案二：将阀杆漏汽接入汽封冷却器，需对汽封冷却器进行改造。新型汽封冷却器：轴封漏汽 / 气冷凝冷却区，用于轴封泄漏蒸汽的冷凝回收和轴封泄漏空气的冷却及排除；汽封加热区，利用阀杆漏汽加热冷却水并回收工质。上海汽轮机厂目前超超临界、二次再热机型的优先推荐方案，投资较大。

结合我厂实际情况，决定采用第一种方案进行改造，该方案最简单且投资最小。

改造前高、中压主汽阀阀杆漏汽管道系统图见图 1：

改造后高、中压主汽阀阀杆漏汽系统图见图 2：

改造后说明：开机启动时将 1、2 阀门关闭，3、4 阀门开启，待机组负荷稳定后，将 3、4 阀门关闭，1、2 阀门开启。这样，既可完成机组启动过程对高、中压主汽阀杆充分预暖膨胀，又可防止负荷稳定后，空气通过高、中压主汽阀阀杆处盘根密封间隙漏入凝汽器，造成机组真空严密性不合格。

综上所述，最终确定高中压主汽阀、调门阀杆漏汽管

道整体改造技术方案如下：

整改接错至轴封溢流调阀后的高、中压调阀、补汽阀门杆漏汽管道，将其分三路接至轴封溢流调阀前。

将高、中压主汽阀门杆漏汽至本体疏水扩容器管路加装手动门，并增加一路管道至轴加风机出口排汽管道，并加装手动阀。

汽机本体门杆漏汽系统图

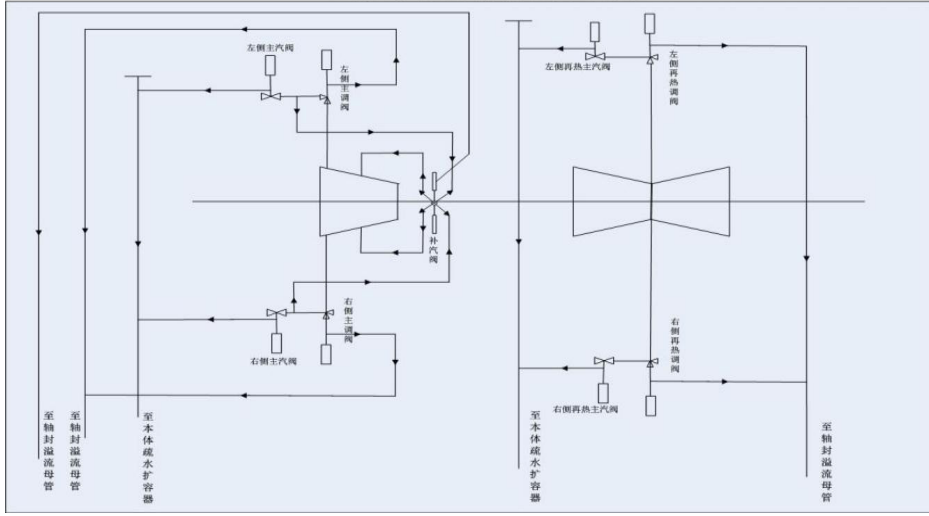


图 1

汽机本体门杆漏汽系统图

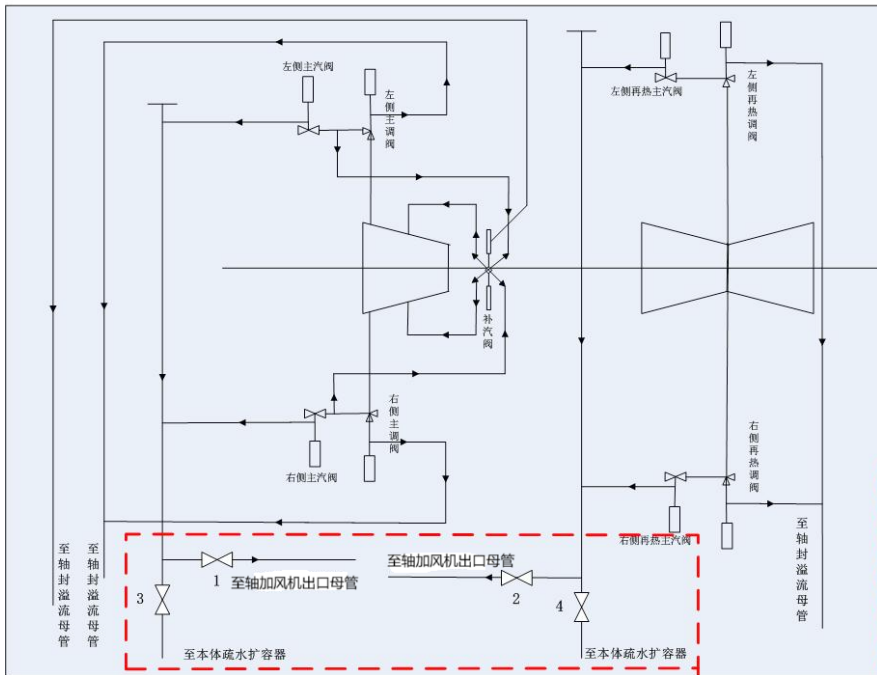


图 2

## 6 结语

准东电厂#1、2机组利用停备检修机会完成汽阀门杆漏汽管道改造，将高、中压调门、补汽阀门杆漏汽改接至轴封母管溢流调门前；将高、中压主汽阀门杆漏汽至凝汽器本体疏水扩容器管路加装手动门，并增加一路管道引至轴加风机出口排汽管道且加装手动阀。实现机组启、停与正常运行阶段的不同切换，确保凝汽器内不会抽入空气，大大提高了

凝汽器的真空度。改造后，机组真空严密性试验下降值降至60Pa/min，合格。

## 参考文献

- [1] 准东电厂2×660MW机组集控运行规程（2023版），2023.12.25
- [2] 准东电厂2×660MW机组汽机系统图（2023版），2023.12.25
- [3] 准东电厂2×660MW机组汽轮机说明书，2021.09.10