冷凝器

让冷凝器效率最大化

发电厂的冷凝器可以成就或者毁掉效率和功率输出目标，但有时它的影响会被低估或忽视，了解冷凝器的重要角色是了解热效率的重要一步。

文 | Una Nowling,PE

Una Nowling,PE 教授向学生展示了一个美国电能储存系统能源流向 Sankey 图，这是他在大学发电系统课程中的一部分。每幅 Sankey 图都是一幅杰作，很容易就能看清系统的复杂输入和输出，以及它们的相对影响。当你看到美国能源信息管理局（EIA）绘制的 Sankey 图时，你会立即被图上标记的“转换损失”吓一跳。

不幸的是，许多蒸汽动力工程师觉得他们无法提高工厂效率。来自排放法规、预算削减以及与燃气轮机和可再生能源的竞争，这重重压力使郎肯循环动力工程师甚至感觉，人人皆知效率改进并不是最重要的，目前这方面已经无人关注，很难重新引起重视。

这种态度导致机会错失，这就是为什么本文作者主要关注发电系统中会导致重大能源损失的一个部分——冷凝器。通过这篇文章，您将了解冷凝器性能和运行的改进方法，它们有助于郎肯循环电厂重新定位，在绝大多数人面临的这个动荡的电力环境中提高竞争力。

冷凝器的基本原理

在一个典型的蒸汽动力装置中，蒸汽被送到涡轮机的不同阶段进行发电。在蒸汽退出汽轮机的最后阶段后，再也没有能源能经济地转化成电能。这时蒸汽必须重新凝聚成液体形态，抽入给水加热器，随后进入锅炉。

在基本操作中，冷凝器属于一种相对简单的设备，它能够使低能蒸汽或饱和蒸汽进入一间布满成排的换热器储管的蒸汽室；冷却水通过换热器储管，然后蒸汽将热量转移到冷却水；蒸汽冷凝，随后进入冷凝器底部的热井；冷却水要么全部排入环境（在一个“开环”系统中），要么经过循环流程进入冷却塔，得到重新使用（在“闭环”系统中）。

一些发电厂利用不同的传热方法，低能蒸汽经过暴露在空气中的换热器内管，强制通风风扇将管上部的空气吹走，以提取热量和使蒸汽凝结。这些整体风冷冷凝器效率较低，但是对于位于水价很高的地区的发电厂来说是必要的。公用事业企业一般不使用风冷式冷凝器，因此这篇文章仅关注水冷式冷凝器。

冷凝器的性能

对于一个给定的汽轮机系统来说，冷凝器的性能在很大程度上是有效热量从蒸汽转移到冷却水的一个影响因素。热量转移越快，汽轮机排放的蒸汽形成冷凝水的速度也越快。

凝结效率的一个指标就是冷凝器压力，经常通过真空测量得到数据。一个能提高真空度的冷凝器不仅能带来较高的循环效率，而且还能提高潜在输出功率。例如，如果一座电厂的给水流量为 250 万 lb/h(1 lb/h = $1.259\,98 \times 10^{-4}$ kg/s)，冷凝器压力为 3 inHg(1 inHg = 3386.39 Pa)，如果工程师能将冷凝器压力减少 1 inHg，那么热效率将提高近 6%。这个改进有助于实现环境保护署（EPA）提出的绝大多数燃煤发电厂耗热率改进目标，而这些目标此前倍受争议。

污垢使冷凝器传热效率大受影响。此外，因为腐蚀性化学反应，长期污垢沉积会加剧管道腐蚀，从而“隐藏”更多污垢沉积。

水垢很少会在冷凝器管接触蒸汽一面形成，大多数情况下污垢出现在接触水的那一面。污垢可以进一步细分为无机物和有机物污垢。无机污染通常由碳酸钙和磷酸钙组成，但有时也含有锰垢、黏土、岩石和细粉砂。某些情况下，冷却塔中腐烂或变质的成片材料会积在冷凝器管内

或管板表面。

在循环水系统使用海水或河水的发电厂，污染形式包括泥浆、有机黏液、海洋植物和动物。例如，在印度马德拉斯原子能电站发现至少 48 种不同类型的海洋生物生活在电站的冷却水系统中，从藤壶和蜗牛，直到管状蠕虫和海葵。没准有人在想，经营者应该考虑在他们的冷凝器水管中装上玻璃窗，把那里变成一座水族馆，然后收门票钱。

淡水冷却系统一般生物淤积会少得多。在一个闭环系统中，生物淤积通常通过常规氯化得到控制。当每小时氯水平高于 0.5 ~ 1.0 ppm（1 ppm = 1 mg/L）时，大多数分泌黏液的细菌都会被杀死，但是浓度水平较高的氯也会对冷却塔的木制组件和结构造成损害。

冷凝器污垢造成的影响十分严重，举例说明，有一座发电厂由于冷凝器管中形成一层生物膜，损失了 50% 的发电能力。

许多动力工程师认为，对于冷凝器污垢来说预防是良药。化学处理是一种常见做法，例如通过添加少量的硫酸降低循环水的 PH 值。但是一旦污染已经形成，就要进行某些物理清洗。几种在线或离线的冷凝器清洗方法。使用塑料或金属刷子来清洁管道能使真空环境压力减少约 0.1 inHg，再加上其他机械清洁措施，还能使冷凝器压力减少约 0.6 inHg。一般来说，0.35 inHg 的凝汽器真空管在改进后会提高 30 ~ 70 Btu/kW · h 的耗热率，对于一个 500 MW 发电厂来说，在燃料、运行和维护方面每年能节省 6 万美元。

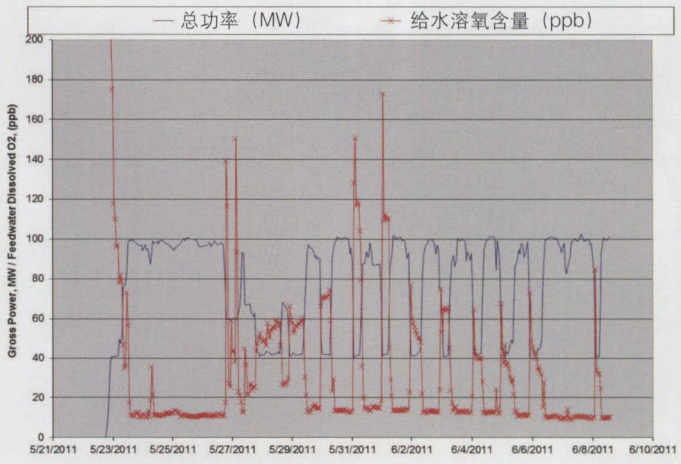

图 2 凝汽器泄漏可以体现为溶解氧水平提高，在这种情况下，泄漏主要发生在低负荷运行期间

冷凝器系统需要循环水泵向它提供冷却水或需要风扇向气冷式管道提供新鲜空气。因为大多数风冷冷凝器都是相对较新的设备，他们往往已经具备相当先进的发动机和控制系统，因此节约潜力更小。

不要孤立地分析冷凝器

虽然在评估改进细节时为冷凝器划出一个范围看起来不错，但必须记住，冷凝器和循环水系统实际上属于同一个功能单元。因为冷却水温度和质量对冷凝器的性能有很大的影响，因此必须要考虑在改进冷凝器的同时改善循环水系统。降低冷却水温度是提高冷凝器性能的一个好办法，冷却水温度降低 10°F 可以从整体上将电厂的热效率提高 1%。

一些人已经发现，这些冷凝器问题会对发电厂的其他系统产生严重而异常的影响。举例来说，有一个电厂的锅炉管内部出现严重的铜沉积现象。根本原因调查显示，给水中溶氧水平过高，然而在检查给水系统的过程中没有发现明显泄漏。通过仔细监测和诊断，工程师发现，在高负载而不是低负载条件下，冷凝器的真空水平居然下降。此外，溶解氧水平在低负载条件下急剧上升。根据成本效用计算，这种影响导致每月效率和发电量损失达 3.8 万美元左右。问题调查显示，冷凝器发生泄漏，而且只发生在高真空度条件下。

图 1“它看上去就像我吃了很多甜甜圈后的动脉。”电厂的一位工程师在看到这张照片时开玩笑地说。不幸的是，为了这张照片，发电厂每年在增加的燃料消耗方面耗费了 115 Btu/kWh 的效率和 74.5 万美元的成本

抓住冷凝器领域的良机

由于它对涡轮和给水系统总体性能的重大影响，冷凝器有效地突破了发电厂的效率记录。近年来许多发电厂为了提高热率，都在强调燃烧控制、锅炉调优、燃料开关和涡轮升级。尽管冷凝器很少受到关注，但经常清洗和维护，以及投资改进冷凝器和循环水系统也有可能显著提高电厂热效率。MM