

# 联合循环汽轮机的热力设计研究

张恩

(上海能源科技发展有限公司 上海 201100)

摘要:随着燃气联合循环电站的快速发展,其快速启动等优越性被越来越多的用于承担调峰运行,因此,对联合循环中汽轮机提出许多新的要求。接下来,围绕天然气-蒸气联合系统的热工设计开展研究,围绕工况分析、系统选型、余热利用与汽轮机匹配优化、冷却系统与环境保护等几个关键问题开展研究。该研究成果将有助于提升联合循环发电的综合效能与经济性能,减少对环境的污染,为实现新型清洁能源的高效开发与应用奠定基础。

关键词:汽轮机;热力设计;概述;措施

面对日益严峻的能源需求和环保问题,高效低排放汽轮机在发电领域的地位越来越突出。热工设计是影响汽轮机运行质量的关键,它涉及到从燃气涡轮到汽轮机全流程的最优控制。项目以联合循环汽轮机的热工设计为核心,以优化设计和模拟验证为手段,以提高机组效率和降低能耗为目的。

## 一、联合循环汽轮机概述

联合循环汽轮机作为一种新型的能源转化方式,在发电方面表现出了明显的优越性。该汽轮机将燃气涡轮和蒸汽涡轮的工作原理相融合,使燃油在燃烧过程中所生成的高热量尾气能够有效地转化为二次能源<sup>[1]</sup>。最初,燃气涡轮以天然气或其它气态能源为能源,同时排放高热量的尾气;然后排出的气体又被送入废热锅炉,把水分转换成高温、高压的水蒸气,使蒸汽轮机持续工作。通过实施联合循环,既可提升系统的总发电效率,又可降低对环境的污染,达到低污染、高效率、低能耗的目的。为了满足各级别对蒸汽的要求,联合循环汽轮机一般采用多级压缩、脉冲-反动联合方式。其中,高压液体缸可以通过闭缸来降低其内部损耗,而压力大的液体缸通过反作用叶片来获得更高的能量转换效率。在此基础上,结合先进材料和智能调控手段,实现汽轮机在恶劣环境下的长时间、高可靠性、柔性响应能力。

## 二、联合循环汽轮机的热力设计研究举措

### (一)工作条件的适应性和系统集成优化

联合的运行条件适应和集成优化是汽轮机热工设计研究的重要环节。本项目的主要目的是保证机组能够在不同的工况下保持最优的性能,并且能够对不断变化的电网负载做出快速和灵活的响应。首先,对装备在各种工作条件下的工作特性进行了充分的研究。例如,天然气-水蒸气组合循环需要承受基本负载(连续稳定供电)、峰荷(峰值用电)和可变负载(发电侧出力变化导致出力频率变化)等各种复杂条件下的稳定、高效运行<sup>[2]</sup>。比如,联合循环要求在基本负荷工况下保持高效、低排放

量;在峰值负荷期,需要快速提高出力,以满足实时负荷的需要。通过精细化仿真与预报全工作状态下燃气轮机排气温度、压力、流量等参数的动态演化特征,准确掌握各种工况下燃气轮机排气参数的分布及演变过程。在此基础上,根据燃烧技术、可变几何外形等创新性设计方案,实现涡轮适应多变的燃油特点与负载要求。在此基础上,将燃气涡轮、废热利用锅炉及其后续的蒸汽涡轮进行密切的联动,构成一套完整的、协调的全热循环,实现整个系统的优化运行。例如,在综合设计阶段,针对燃机在不同负载条件下的运行特性,对各个阶段的热电联供结构及控制进行优化,以实现机组在负载调整时能够快速自适应其排放特性,确保过热蒸气质量的平稳,满足后续机组的要求。在此基础上,通过对汽轮机的优化设计,达到汽轮机参数的动态匹配,提升汽轮机整体的适应性和反应能力。通过对汽轮机运行条件的适应和一体化的研究,实现其整体性能的大幅提高,同时提高机组在复杂负载条件下的运行稳定性和可靠性,为我国电网提供更加绿色高效的能源。

### (二)提高余热利用效率的方案

在联合循环汽轮机的热工设计中,高效利用废热锅炉是一个十分关键的问题。燃机在工作时会排放出大量的高温烟气,这些烟气具有很大的潜在能源价值。基于此,本项目提出了一种新型高效的烟气热再生方法,即通过高效地将烟气中的热能转化为水蒸汽,进而推动蒸汽轮机的发电,达到二次资源的二次开发,提高整个系统的能效。在废热回收炉的设计与优化中,首先要解决的问题是在各个层次上对其进行合理改造。常规高温余热锅炉一般由预热器、蒸发器、过热器、再热器等多个传热组件构成,采用分级降温方式实现余热排出<sup>[3]</sup>。而新的设计思想强调了流体的全局特性和强化换热特性,比如使用紧凑肋片和螺旋形管道等,增大换热区域,减小气流阻力,使得烟气和水热交换的充分和有效。另外,采用新的材料也是提高其综合性能的重要原因。采用耐

高温、耐腐蚀和高热导率的金属,既可以提升换热器的最高工作温度,又可以保证其在严酷环境下的导热特性。此外,轻质的设计也成为了一个重要的发展方向,例如在换热器外壳和支承上引入高强度、轻质的材料,可以有效地减少换热器的尺寸和质量,进而简化装配工艺,减少搬运费用,提升整体的经济效益。在工程实践中,一些高端余热锅炉已经将以上方法运用到了工程实践中,比如研制出了模块化结构的余热锅炉,其部件可按需要进行灵活组合,既提高了传热效率,又方便了就地安装和维修,提高了机组的整体柔性。再例如,在一个大规模的天然气-蒸气组合电站中,对其进行了整体设计和材质的综合优化,使其热效率超过5%,运营和维修费用大幅下降,达到了经济和环境两方面的共赢。

### (三) 汽轮机通流段的最优设计

在蒸汽轮机的热工设计中,通流段的深度优化是一个非常关键的问题。在此基础上,结合朗肯循环、再热循环和回热循环等典型蒸汽工况,结合数值仿真方法,开展多工况下的精细化仿真研究。基于此,本项目拟采用先进的计算机辅助设计方法,实现对汽轮机叶栅流道中蒸气速度场、温度场、涡系结构的生灭规律的准确计算,进而实现对不同级别叶栅构型、叶栅排布、通流面积等重要参数的准确计算。以某一蒸汽轮机为例,其设计小组将先改进其低压段。针对低压段大进汽量、低压比等特点,提出了宽弦叶型,增大叶根直径,降低过渡段断面的波动速率,以降低二次流的冲击损耗,提升其气动性能。在此基础上,通过对不同工作条件下的叶型进行优化,实现与最优迎角、扭转角相匹配,保证水蒸气向机械能有效转化。针对中压、高压叶轮,在保持原有结构尺寸的基础上,进一步研究多阶段的匹配问题,例如:在不同阶段,通过调整不同阶段的余速因子,实现不同阶段间的能量转化,消除由于转速、压力突然变化而导致的气动特性下降等问题。在此基础上,采用三元扭转叶片的方法,实现周向结构的连续性改变,从而更好地与气流相匹配,减小了流阻。再热循环是提高机组效率的一种主要方法,通过将高温大缸内的过功蒸汽重新引入到锅炉内进行再热,再将其输送到再热器后面的中压缸进行工作<sup>[4]</sup>。在此类型的环流系统中,对过流元件的选择以及过流元件的选择应给予足够的重视。通过对再热管的内部和导流叶的优化,实现再热水的流态、降低热损耗,进而提高机组的综合能效。

### (四) 制冷系统及环境保护措施的改善

提高制冷效率和环境保护能力是汽轮机热工设计的重点。为保证涡轮的高效率、减少对环境的污染,国内

外科研工作者正不断地进行一系列创新性研究。对制冷方式进行优化,提出了一种新型的空调制冷方案。为此,拟开展涡轮内部重要构件的流场优化研究,采用高效风机导入外界气体,并借助特殊的散热通路对其进行高效降温。在此基础上,采用低阻力、大流量的风机叶片,降低风机的能量消耗,并通过智能化的调控技术实现降温效果的在线调整,实现节能减排。同时,对全封闭循环冷却水的研究和改造也有了长足的发展。该方法采用全封闭式回路,可有效降低用水量,且可避开常规开放式冷却塔造成的高蒸发量。例如,研制出一种新的、高效率的换热器,以增加传热面积并提高传热系数,以达到同样容积的冷却水量输送更多的热能。在此基础上,采用具有良好耐腐蚀和良好传热性能的新型热交换器关键零件,以达到提高其服役寿命和减少维修费用的目的。从环境特性上看,该汽轮机注重对废气的控制。NO<sub>x</sub>的产生源于高温燃烧,而分级燃烧和预混合燃烧是降低NO<sub>x</sub>排放的有效途径。SO<sub>x</sub>(含硫)的排放量则可以通过燃油或烟气脱硫来实现。控制微粒的主要措施是使用高效率的空气净化设备,提高燃烧室内部的湍动和掺混状况,降低残余碳粒子的生成。更重要的是,二氧化碳的捕获和储存将使其成为真正的绿色、低碳操作。通过对燃煤发电过程中产生的二氧化碳进行化学吸附或物理吸收,并将其安全地注入到地下结构中进行长时间的埋存,不仅可以缓解我国的温室效应,而且可以促进我国能源工业的可持续发展。

### 三、总结语

综上所述,联合循环汽轮机从工况适应性、余热回收锅炉优化、蒸汽通流段改造、制冷系统和环境保护四个层面开展研究,以期实现汽轮机节能增效和可持续发展。为适应日趋苛刻的能效及环境要求,未来将不断深入开展该方面的研究,以推动世界上洁净能源的普及和发展。

### 参考文献:

- [1]李杨,金光勋.新一代F级联合循环汽轮机通流设计特点[J].热力透平,2017,46(01):33-36+59.
- [2]郑赞.F级改进型联合循环主蒸汽系统压损研究及优化[J].南方能源建设,2015,2(01):46-50.
- [3]黄柱,康支霞.“二拖一”燃气-蒸汽联合循环机组主汽系统研究与应用[J].华北电力技术,2014,(12):42-46.
- [4]姚兰香,张云燕.联合循环汽轮机的热力设计探讨[J].东方电气评论,2003,(04):197-201.