

汽轮机燃气发电系统的热力性能研究

王禹

辽宁清河发电有限责任公司, 辽宁 铁岭 112003

摘要 : 作为动力系统的核心部件, 涡轮的好坏对机组的经济性、可靠性和安全性都有很大的影响。本文拟以 300 MW 燃气轮机机组为研究对象, 基于 Epsilon 有限元分析平台, 针对燃气轮机机组在不同运行条件下的热工特性开展深入研究, 获得燃气轮机机组各个参数对其热力特性的影响规律。随着环境保护的不断加强, 天然气这一洁净能源的使用日益广泛。当前, 我国燃煤电厂采用的是“气-汽”组合循环发电方式, 其热工特性研究对于电厂节能减排具有十分重要的意义。为此, 本文对其热工特性做了较为深入的研究。

关键词 : 汽轮机燃气; 发电系统; 热力性能

Study On The Thermal Performance Of Steam Turbine Gas Power Generation System

Wang Yu

Liaoning Qinghe Power Generation Co., LTD., Liaoning, Tieling 112003

Abstract : As the core component of the power system, the quality of the turbine has a great impact on the economy, reliability and safety of the unit. This paper intends to take the 300 MW gas turbine unit as the research object, based on the Epsilon finite element analysis platform, to carry out in-depth research on the thermal characteristics of the gas turbine unit under different operating conditions, and to obtain the influence law of each parameter of the gas turbine unit on its thermal characteristics. With the continuous strengthening of environmental protection, natural gas, as a clean energy source, is increasingly widely used. At present, China's coal-fired power plants adopt the "gas-steam" combined cycle power generation mode, and the thermal characteristics are of great significance for the energy conservation and emission reduction of power plants. Therefore, the thermal characteristics are studied deeply.

Keywords : steam turbine gas; power generation system; thermal performance

引言

天然气-水蒸气组合循环发电技术是当前国际上最为先进的一种发电模式, 已被大量采用。它是一种将热力循环、蒸汽动力循环与透平结合在一起的系统, 利用燃气轮机将燃油燃烧产生的热能传输到蒸汽涡轮, 使其运转, 最终驱动发电机发电。组合循环机组的机组是机组的核心部件, 机组的热工特性对机组整体运行状态有很大的影响。该机组可在设计条件下平稳工作; 但是, 一旦系统失效, 机组将发生严重故障, 使机组不能正常运转。为此, 对机组的热工特性进行了深入的研究, 并对其进行了分析。本文从汽轮机组热力性能出发, 研究燃气轮机组各参数对联合循环热力性能的影响。

一、燃气轮机组工况参数的确定

在查阅有关资料的基础上, 得出涡轮工作压力、膨胀比、效率、涡轮效率和推力等主要参数。文中选择了最大压力比 (V_{max})、最大推力 (F_{max}) 作为燃气涡轮机组的工作参数。在不同的工作条件下, 其热效率也是不同的。通过查阅有关资料, 发现压缩机的效率随增压比、增压比的增加而增加, 但太大或太小都不利于其热效率的提高。在其他参数不变的情况下, 当负载

增大时, 压缩空气压缩机的压比、膨胀比都会提高, 从而提高了机组的热效率; 但当负荷超过某一值后, 机组热效率将会降低。

在目前的涡轮及透平中, 主要采取如下几种方法来提高其效率: 多点进汽法, 增大透平压力比; 提高废气反压力, 改善涡轮效率; 利用高压、高压缸排出气体进行循环利用, 以提高燃气轮机的效率; 使用高温、高压蒸汽, 以改善涡轮效能; 为了改善燃烧效果, 向燃烧室内添加了高温、高压水蒸气。然而, 与其它传统电力系统相同, 涡轮燃气发电机组也存在两大基本循环: 一

* 作者简介: 王禹, 1983.6.11, 男, 汉, 辽宁开原, 本科, 职称是助理工程师、技师, 研究方向: 汽轮机本体检修。

是热循环，二是非热循环。^[1]

（一）燃烧过程

在燃烧过程中，燃油在燃烧室中充分燃烧是需要热量的，其生成方式分为三种：一是在燃烧过程中将化学反应能转换成热能，另一种是在燃烧过程中进行扩散。三是将化学反应能转换成热能，从而实现对燃油的有效利用。但在实际生产中，其化学能损失的主要是热能而非热能。为此，在燃烧室中添加高温、高压蒸气，以改善燃烧效率。

（二）膨胀过程

在进汽阀之前，水蒸气与高压燃气发生膨胀，产生膨胀功，带动发电机转子旋转。随着温度的提高，工作体积的尺寸逐渐减少，而与之对应的蒸气压也随之下降。循环初期，压力随温度的增加而降低，但随着时间的推移，压力增加，并在一定程度上出现峰值。从图2可以看出，在一定的操作体积中，随着温度的增加，气体压力降低。

（三）蒸发过程

燃气轮机是一种在1350℃废气中由燃气喷射而成的高温、高压气体，在进入燃烧室后，与燃气发生点火反应，形成一种高热、高压的气体，推动燃气轮机工作。高温、高压蒸气（以下简称“饱和蒸汽”）在燃烧过程中与气体发生反应，生成高温、高压气体，其中一部分在燃烧室中以分子形态赋存，另一部分则以水蒸气的形态赋存于汽轮机内部。蒸发是指在热动力循环中，蒸汽发生的一种过程，也就是将蒸气从汽轮机排出，使其处于饱和状态。

（四）膨胀功与燃气的比功

在燃气轮机的运作过程中，当燃气被压缩后，它所产生的额外能量便转化为了一种动能。这种由燃气膨胀而生成的能量，由于其未被传统热力系统中热能转换的方式所吸收和利用，因此我们将其定义为非热力循环中的膨胀功。膨胀功是一个关键的概念，因为它揭示了燃气轮机在运行时的一些独特特征和效率提升的潜力。通过理解和计算膨胀功，工程师可以更好地优化燃气轮机的设计，从而提高能源使用效率，减少燃料消耗，并确保设备以最经济的方式运行。^[2]

（五）汽轮机的效率

作为动力装置的核心部件，涡轮的效率就是某一特定工作条件下的效率。在汽轮机各项参数中，效率是最为关键的一个，它的数值的大小对机组的整体经济性能有很大的影响。试验结果表明，该机组在设计工作状态下的效率为85.29%，其效率随涡轮转速的提高而下降。在各种运行条件下，燃气轮机组的热效率几乎没有变化，这说明了燃气轮机在设计条件下的热效率是很高的。当燃气轮机转速达到2000r/min时，热效率最低；当燃气轮机转速达到3000r/min时，热效率最低。因此在实际运行过程中，应根据具体情况优化控制，使燃气发电系统能够在设计工况下正常运行。

二、汽轮机燃气发电系统

（一）燃料

该系统以天然气为燃料。天然气是一种低碳、清洁、高效的

能源，其主要特点是将天然气的燃烧过程转化为高温、高压的气体，并通过热辐射、对流等方式释放到大气中，从而形成一种新型的热能。另外，也可以通过燃烧反应产生水，二氧化碳，一氧化碳，氢气等。天然气作为一种新型的绿色能源，具有较高的能量密度、较高的燃烧热值和较高的热效率。但是，天然气中存在大量的甲烷、氨气等杂质，如果不进行有效治理，就会造成严重的环境污染。^[3]因此，必须对燃气进行净化处理。燃气净化技术包括：预处理、过滤和精加工。

（二）热交换器

煤气发生器的换热器必须有足够大的流速，以便在小负载情况下仍能提供充足的流量。对于燃气轮机的换热器，其设计要求是：在额定工作条件下，不发生过热、过冷^[4]。在此基础上，提出了一种具有较强的自适应调节功能的新方法。气体发生器的换热器可以被设计为如下各种形式，这取决于不同的条件：

（1）常规板式热交换器：因为燃气轮机的高速旋转，板管式换热器对气流产生了很大的阻力。

（2）多层板式换热器：采用多层板式换热器，可以减小流体的阻力，使其具有更大的流量。

（3）多层不锈钢板式换热器：它可以应用在燃气轮机上，因为它的流阻很低。

（三）透平机

汽轮机是天然气动力装置中的核心装置，其主要作用是将气体和水蒸气进行热量交换，并将两种能量相互分离。涡轮为二级或三级压气机，为适应不同的工作条件，在不同的工作条件下工作。汽轮机通常有单转子、双转子和复转子等多种形式。单、双转涡轮各有其应用领域，但都有各自的优势和不足。目前，火力发电厂普遍采用复转子涡轮代替单转子涡轮。复转子涡轮与单转涡轮的结构相似，但无低压转子，也不受限于增压比。复转子透平机也有其缺点：不能用于高、低压联合循环；只能用于中低压循环；只能用于定压运行。^[4]

（四）燃气轮机

燃气轮机包括压缩机，燃烧室和涡轮机。压气机是利用高速转动的叶轮，把空气压缩为高压燃气，然后在压气机入口附近加入一定的压缩空气，然后再进行膨胀。气体在经过压缩机后，与气体混合燃烧，形成了一种高温、高压的气体，再经过涡轮增压，带动发动机工作^[5]。通常，燃气轮机的效率在60%—70%之间，最高的80%。燃气轮机的出力直接关系到压气机和透平等设备的设计。另外，为了避免在掺气过程中在压气机进气道与透平口之间产生混合气，造成堵塞，透平采用了多种措施。另外，燃气轮机通常所使用的燃油是天然气，LPG等。

三、汽轮机燃气发电系统的热力性能

汽轮机燃气发电系统的热力性能，是指该系统在运行过程中所表现出来的各种能量转换效率和热力学特性。这包括了它对输入能源（如蒸汽、天然气等）进行有效利用和转换为电能的能力，同时也涉及系统内部的热能管理以及热损失的控制。这些性

能指标直接影响着整个系统的经济效益、环境友好程度以及长期稳定性^[9]。通过精确测量和分析汽轮机发电系统的热力性能,可以优化其设计和操作,提高能效,减少能源浪费,并确保长期稳定的电力供应。

(一) 燃气轮机的效率和热效率

在实际工作中,汽轮机的效率、燃气轮机机组的泄漏、系统其它部分的泄漏等都会影响到燃气轮机的效率和热效率。燃气轮机是一种非常复杂的热力系统,要想改善其运行特性,就必须采取相应的措施,减少损失,提高其运行效率。一般来说,为了减少损失,可以采取下列措施:减少操作时的燃油、煤气的发热量;调整汽轮机各个部分间的漏损;改善燃油机组的工作性能;改进汽轮发电机组和其他部件的结构,以提高燃烧效率。^[7]

(二) 燃气蒸汽联合循环

燃气轮机联合循环是一种利用燃气和水蒸气共同工作来推动汽轮机工作的技术。燃气轮机将高温燃气转化为高温、高压的过热蒸汽,推动汽轮机工作,是燃气轮机的核心部件。该联合循环是利用汽轮机工作后的高温、高压蒸汽,推动涡轮作功,透平再驱动发电机发电,从而实现机组的动力输出^[9]。该联合循环由燃气轮机、汽轮机、发电机组三部分构成。涡轮与蒸汽发动机产生的高温、高压过热蒸汽,分别带动涡轮发电机与发电机,使之转换成电能。

燃气轮机、蒸汽机、汽轮发电机组是燃气轮机联合循环发电系统中的主要组成部分,它们之间的合理匹配关系对于整个系统的性能有很大的影响。下面我们将从几个方面来分析燃气蒸汽联合循环。

(三) 压气机的效率

压气机在燃气轮机系统中扮演着至关重要的角色,它是将外部气体转化为高温高压燃气的核心设备。由于其工作效率直接影响到燃气轮机的整体热力性能,包括动力输出、热效率以及可靠性等方面,因此,优化和提高压气机的性能对于确保整个系统稳定运行至关重要^[9]。通过不断改进设计和工艺,可以显著提升压气机的性能,从而保证燃气轮机能够高效地提供所需的动力,满足各种严苛的工作条件,实现能源的有效利用和环境保护的双重目

标。在计算中,由于压气机是一个封闭流动系统,为了减少压气机内部的流动损失,采用了等压循环的方法。该方法是在压气机入口与出口之间加入一个环形回路,使得入口、出口之间存在一个压力差,从而降低了压气机内的流动损失。

(四) 发电机的效率

机组的效率波动对机组的效率有很大的影响,机组在不同的工作状态下,机组的效率会随着机组载荷、负载比的变化而改变。燃气-蒸气组合循环机组在不同工作状态下,其工作模式及燃料种类均有差异,从而使机组的效率也随之改变,从而对机组的发电效率产生一定的影响。^[10]

以一台300 MW 机组为例,计算结果表明,在各种载荷条件下,机组的最佳转速为1620 r/min;在低载率条件下,机组的最佳转速为1440 r/min;当燃气轮机组的负荷率较高时,燃气轮机组的最优转速为1520r/min。

结语

本文以300 MW 机组为背景,利用 Ebsilon 有限元软件,对其进行了热力特性分析。主要结果是:涡轮在30%的工作条件下,随着涡轮入口温度的增加,系统的热效率、压强比逐渐减小,而在同样的入口温度下,随着涡轮压力的增加,其热效率、压强都有所下降。涡轮在50%工作状态下,其热效率、压缩比随涡轮压强、涡轮转速增加而先增加后降低。

从以上分析可以看出,汽轮机燃气发电系统的效率受到许多因素的影响,在本文中,深入探讨了提升燃气轮机效率的关键途径。通过细致的分析,着重讨论和比较了多种技术手段,旨在发现并实施那些能够显著增强能效的方法。此外,文章还对汽轮机在燃气发电系统中的核心组成部分——热力循环进行了详尽的研究与阐述。这些循环涉及燃料的燃烧、热能的转换以及机械能的输出等复杂过程,对整个系统效率的提高起到了至关重要的作用。通过这样全面的分析和研究,不仅为现有的燃气轮机改进提供了理论支持,同时也为未来的设计和开发指明了方向。

参考文献:

- [1] 夏小勇,刘浩磊,谢为良,等. 汽轮机冷态预暖在燃气-蒸汽联合循环发电机组中的应用[J]. 燃气轮机技术, 2023,36(03):69-72.
- [2] 吴静. 大型燃气-蒸汽联合循环机组主机选型及配置探讨[J]. 发电设备, 2023,37(03):166-170.
- [3] 王攀. 燃气-蒸汽联合循环机组第二台循环水泵运行方式优化[J]. 新型工业化, 2022,12(08):51-54.
- [4] 王庆国,毛文江. 海上平台燃气轮机发电机组滑动轴承异常磨损故障分析[J]. 机电工程技术, 2022,51(04):251-254.
- [5] 吴光明. 燃气-蒸汽联合循环机组协调控制策略设计[J]. 仪器仪表用户, 2021,28(12):97-100.
- [6] 郭珊. 燃气发电抽气回热给水及煤气系统热参数优化[D]. 河北省:华北理工大学, 2021.DOI:10.27108/d.cnki.ghelu.2021.000900.
- [7] 曾勇,张凤阳,徐灿君,等. 50MW 光热电站汽轮机热力系统分析[J]. 汽轮机技术, 2021,63(05):343-345+396.
- [8] 徐灿君,张岗,曾勇,等. 光热发电系统蓄热及汽轮机运行特性研究[J]. 化工机械, 2022,49(01):103-109.
- [9] 丁建博,张宇,冯松,等. IGCC 汽轮机旁路系统性能优化[J]. 广东电力, 2023,36(04):124-130.DOI:10.3969/j.issn.1007-290X.2023.04.014.
- [10] 郭亮. 火力发电厂汽轮机抽真空系统设计优化研究[J]. 电力设备管理, 2023,(21):74-76.