

能源行业燃气轮机发展途径思考

郭华璋

中铁国际集团有限公司, 北京 100036

摘要:燃气轮机为涡轮航空发动机的工业化改型,属工业高端技术。由于国际燃气轮机市场仍被欧美日垄断并技术屏蔽,而中国燃气轮机自主研发滞后成为天然气发电的瓶颈。为了清楚认识燃气轮机的发展方向,阐述了燃气轮机的工作原理、关键技术,对燃气轮机进行了技术分类,并分析了国内外燃气轮机的发展历史和发展趋势。分析认为,随着天然气、页岩气和煤层气产量不断提升,中国已形成多元化(常规天然气、页岩气、煤层气、进口天然气、LNG)的燃料供应渠道,建成了覆盖全国范围的五横两纵天然气管道超过 14.4×10^4 km,天然气发电具备稳定的燃料供应保障。结合中国燃气轮机发展的制约因素,对研发燃气轮机和扩展应用提出了建议:1)联合科研院校、厂家和用户,攻克关键技术,重点研发中、低热值燃烧技术和燃烧室技术;2)建立长期运行的试验基地,采用适当的鼓励政策,推动燃气轮机设备和热通道部件维修的国产化;3)制定燃气轮机的操作和维修规范,对易损部件提前做好预案计划;4)对燃气轮机的火焰筒、燃烧室等进行随时检查,对燃烧室、过渡段、一级喷嘴、轴承、转子等进行定期计划检修;5)对分布式燃气轮机进行集中调度,统一管理,降低维保成本,提高维保技术,提升燃气轮机利用效益;6)气电定价应考虑燃气轮机对调峰和减排所付出的成本,实行清洁电力优先上网,保证气电机组利用小时数;7)拓展分布式天然气发电在油气井钻采工程中的应用,以气打气,气电结合,支持燃气轮机推广应用和技术发展。燃气轮机天然气发电在中国有着广阔的商业化应用前景。

关键词:燃气轮机;工作原理;关键技术;发展现状;存在问题;发展方向

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2022.02.017

Thoughts on gas turbine development in energy industry

GUO Huazhang

China Railway International Group, Beijing, 100036, China

Abstract: Gas turbine is an industry derivative of jet engine, which is a high-end industrial cutting-edge technology. As China's independent research and development of gas turbine is lagging behind, the current international gas turbine market is dominated by European, US and Japanese manufacturers. The technology blockage by these countries has become a bottleneck in the development of gas-fired power generation in China. In order to clearly understand the development trend of gas turbines, this paper explains the working principles and key technologies of gas turbines, and carries out the technical classification of gas turbines; reviews the development history and analyzes development trends of gas turbines domestically and internationally. It is believed that as the production of natural gas, shale gas

收稿日期:2021-09-06

基金项目:国家能源局“第一批燃气轮机创新发展示范项目”(国能综通科技[2018]121号)

作者简介:郭华璋(1987-),男,四川成都人,工程师,硕士,主要从事燃气轮机技术推广与应用工作。E-mail:guohuazhang@outlook.com

and coal-bed methane continue to increase, China has formed diversified fuel supply infrastructures (conventional natural gas, shale gas, coal-bed methane, imported natural gas, LNG), and built more than 144,000 kilometers of pipelines, forming a network of five horizontal and two vertical natural gas pipeline grids covering the whole country. Thus, natural gas power generation is provided with a stable fuel supply. The paper analyzes the restrictive factors of the development of gas turbines in China, and puts forward suggestions for research and promoting the application of gas turbine generators: 1) Joint scientific research between institutions, manufacturers, and end-users to overcome key technologies development challenges and focus on the research and development of medium and low calorific value fuel combustion technology and combustion chamber technology; 2) Establish a long-term operation test base, adopt appropriate incentives, and promote the localization of supply of gas turbine equipment and hot section component maintenance; 3) Formulate specifications for gas turbine operation and maintenance, and make maintenance plans for vulnerable parts in advance; 4) Perform routine inspections on the flame tube, combustion chamber, etc., and routine maintenance plan for the combustion chamber, transition piece, first-stage nozzle, bearing, rotor, etc.; 5) Centralized dispatching and unified management of distributed gas turbines, reducing maintenance costs, developing maintenance technology, and improving gas turbine utilization efficiency; 6) Gas fired electricity pricing should consider the cost of gas turbines for peak-shaving and emission reduction, implement priority access to the grid for clean power, and guarantee the utilization hours of gas turbine power generators; 7) Expand the application of distributed gas-fired power generation in oil and gas drilling and production, to produce gas with gas, and combine gas with electricity to support the application and development of gas turbines technology. Gas turbine power generation embraces broad prospect for commercial application in China.

Keywords: Gas turbine; Working principle; Key technology; Development status; Existing problems; Development trend

0 前言

天然气发电具有清洁、高效、低碳、灵活的突出优势,发展气电对于改善大气环境质量、积极应对气候变化、实现“碳达峰”“碳中和”,促进天然气能源有效利用和发展、保障电力系统能源平稳供应,具有重要的意义。中国的燃气轮机制造技术起步较晚,发展曲折,由于关键技术仍被国外企业垄断,因此实现燃气轮机国产化是发展气电行业的首要关键^[1-6]。

1 燃气轮机的工作原理和关键技术

燃气轮机作为涡轮航空发动机的工业化改型,广泛应用于天然气发电、船用动力、天然气管道增压等领域,是关系军事安全以及能源安全的重要高科技机电装备。虽然燃气轮机机械结构相较于往复式机械结构简单,但对材料、加工工艺、机电一体化程度、自控水平有着极高的要求,代表了一个企业乃至国家的工业化程度水平,所以被誉为工业“皇冠上的明珠”。

1.1 燃气轮机的工作原理

燃气轮机是一种将化学能通过燃烧转换为机械能的旋转式机械,主要工作原理是通过压气机将外部空气进行压缩,其中压气机分为轴流式压气机和离心式压气

机。一般微型燃气轮机采用离心式压气机较多,主要功率在 1.5 MW 以下。中型、大型燃气轮机采用轴流式压气机,由多级压气叶片完成空气的压缩。以索拉透平公司生产的 Titan 130 燃气轮机为例,在通过 13 级叶片压缩后,将空气压力从大气压提高约 14 倍,通过轴流式压气机出口导流片和扩散器降低空气流速,进一步提高空气压力,进入燃烧室。同时燃料(气体或液体燃料)也通过燃料喷嘴喷入燃烧室,与高压空气进行混合后燃烧。燃烧生成的高温、高压烟气受热后膨胀,经过导流后与一级叶片接触,气体在接触过程中逐渐膨胀,推动透平叶片带动主轴旋转。从一级透平叶片流出后,气体继续膨胀,分别与第二级和第三级透平叶片接触做功,最后从出气口排出大气或者进入后续换热器进行循环利用。通常双轴型燃气轮机的一级透平叶片与压气机轴连接,与压气机同速旋转,用以带动压气机工作。二级透平叶片与三级透平叶片同属动力透平轴,与后端被驱动设备(压缩机、发电机等)通过联轴器以及齿轮变速箱相连,可以独立于压气机轴进行旋转,从而实现自由调速以及轻便启动的功能。通常燃气轮机用于驱动压气机的压缩气体功率占总功率的 40%。随着高温材料的研发和单晶透平叶片的性能提高,以及中空叶片制造工艺的不断升级,动力透平叶片的耐受温度不断提升,燃气轮机

主要控制温度之一的动力透平进口温度不断提升,带来燃气轮机功率以及燃烧效率的提高。在安全运行的前提下,动力透平进口温度的提升意味着必须寻找研发更耐高温的合金材料、更强悍的叶片涂层(主流为陶瓷材质),以及更高效的空气冷却方案。燃气轮机与传统的往复式发动机、蒸汽轮机相比,具有结构简单、可靠性高、占地少、启动迅速等特点,故大量用于调峰发电、海上发电,以及带动泵、压缩机等设备。燃气轮机发电机(索拉透平)见图 1。

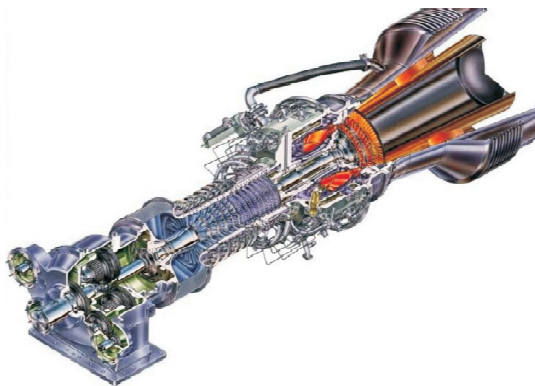


图 1 燃气轮机发电机图(索拉透平)

Fig. 1 Gas turbine generator(Solar Turbines)

1.2 燃气轮机的关键技术

燃气轮机实际上是航空发动机在工业上的应用与拓展,属高科技范畴,其关键技术几乎涉及了所有工业技术的难点。

1) 压气机方面:压气机气动高负荷、高效率、高转速设计技术,气动性能高稳定性设计技术,整机气动性能模拟与实验技术,转子强度与振动设计技术等。

2) 燃烧室方面:燃料燃烧模拟设计与验证技术,火焰筒壁涂层与多层结构设计技术,气体燃料与液体燃料喷嘴设计与测试技术,高温零部件气体冷却、陶瓷涂层防护、抗旋转与振动强度设计技术,富氧燃烧低排放燃烧设计与试验技术,宽范围燃料组分稳定燃烧设计与试验技术等。

3) 透平方面:动叶片、静叶片、轮盘冷却设计与试验技术,叶片单晶制造技术,叶片中空铸造及冷却技术。

4) 材料方面:强抗热腐蚀定向和单晶高温合金体系,高温合金材料体系,陶瓷涂层材料技术等。

5) 系统设计方面:叶片冷却空气系统设计、性能分析和调试技术,控制系统自动控制,可调静叶片自动控制,起动系统技术,轴承和滑油系统技术。

6) 系统工艺技术方面:复杂中空结构铸造技术,高强抗热冲击陶瓷涂层壳制造技术,大尺寸定向结晶、单晶叶片定向凝固技术,高温透平叶片加工、焊接、热处理、检测等工艺,叶片涂层技术,燃气轮机叶片的工程化

研究,燃气轮机叶片制造规范和验收标准,大型涡轮盘的设计制造技术,高强钢拉杆制造工艺,燃烧器设计制造技术等。

1.3 燃气轮机的类型

燃气轮机和航空发动机的工作原理基本相同,将化学能通过燃烧转化为机械能,最终通过被驱动设备转化为动力或者是电能。无论是轻型或重型燃气轮机,均与航空发动机技术有关:1) 轻型航改机,由成熟的航空发动机进行工业化改型,功率主要在 50 MW 以下,用于调峰发电、分布式能源、海上动力、天然气压缩等场景;2) 重型燃气轮机则完全利用原型机平台重新设计,为满足城市电网电力需求,功率在 50 MW 以上。由于具有功率密度大、启动快、带负荷能力强、污染小、噪音小、安全可靠等技术特点,随着能源结构以及环保要求的逐渐提升,燃气轮机的应用和制造技术也得到不断发展。

燃气轮机按燃烧温度分级(100℃为一级别),其中 E 级、F 级、G 级燃气轮机的透平转子进口温度分别在 1 200℃、1 300℃、1 400℃。按功率大小,又可分为 4 个类别,其中微型、小型、中型燃气轮机属轻型燃气轮机,大型燃气轮机属重型燃气轮机,见表 1。

表 1 燃气轮机的类型与应用表

Tab. 1 Classification and application of gas turbine

类型	功率 /MW	用途
大型燃气轮机 (重型)	> 50.00	城市公用电网
中型燃气轮机 (轻型)	20.00 ~ 50.00	发电、分布式能源、海上动力、油气输送
小型燃气轮机 (轻型)	0.30 ~ 20.00	海上动力、分布式能源、油气输送、军事
微型燃气轮机 (轻型)	0.03 ~ 0.30 或 更小	海上动力、分布式能源、油气输送、军事

1.4 燃气轮机的应用

1.4.1 军用船舶、坦克和装甲车

燃气轮机具有功率密度大、启停灵活、噪音低频分量低的优势,符合军用舰船对动力系统的性能要求。欧美国家和日本的水上舰艇早已将其作为装备动力;美国和俄罗斯还将燃气轮机用于装备军用坦克、装甲车的动力(表 1 中小型、微型燃气轮机)。

1.4.2 发电

在发电行业,负荷发电基本以大功率(大型)燃气轮机为主,调峰发电则以航改燃(中型、小型、微型)燃气轮机为主。天然气发电稳定可靠、经济性能高,可节省土地和水资源。它具有效率高、污染少、启动快、清洁环保等特点,是可再生能源的有效补充,具有调峰调频的灵活能力。例如,2007 年以来,美国发展气电和可再生能

源,使碳排放量下降了三分之一(表 1 中大型、中型、小型燃气轮机均可应用)。

1.4.3 油气输送

石油、天然气通常采用管道输送,设立增压站是保证石油、天然气连续输送的必要措施。对于外电供应受限场合,中、小型输气增压站一般常用天然气发动机,而大型输气增压站采用燃气轮机驱动压缩机是最佳选择,尤其是当功率大于 6 MW 时,采用燃气轮机驱动离心压缩机可以发挥最佳的工作效能(表 1 中小型燃气轮机)。

2 燃气轮机的发展

2.1 世界燃气轮机的发展成果

由于燃气轮机可用于军事用途,欧美国家和日本用了 50~60 年的时间,用大量的资金支持燃气轮机发展。如今燃气轮机已广泛应用于发电、舰船动力、机械驱动等重要领域。目前先进的燃气轮机简单效率已超过 40%,联合循环效率已超过 60%,燃气蒸汽联合循环逐步成为所有热循环效率最高的大规模商业化发电方式。2018 年全球气电装机达 180×10^4 MW,占全球发电总装机量的四分之一,其中北美地区气电装机占比 41.2%,欧洲地区气电装机占比 27.9%,中东地区气电装机占比 66.4%^[7](中国无统计数据)。2021 年中国气电装机占比仅为 4.5%^[8]。2018 年全球燃气轮机市场竞争格局^[9]见图 2。

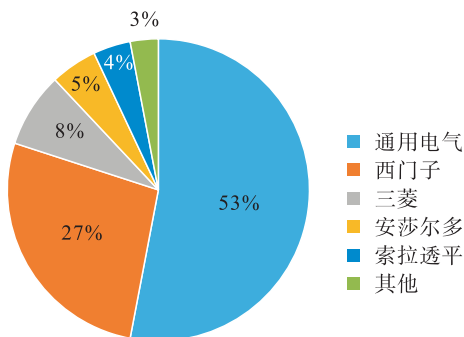


图 2 2018 年全球燃气轮机市场竞争格局图

Fig. 2 Global competitive landscape of gas turbines in 2018

2.2 中国燃气轮机的发展情况

2.2.1 燃气轮机发展初期

中国燃气轮机设计制造起步于 20 世纪 60 年代,曾生产透平进气初温为 700℃ 等级的燃气轮机,有 1 MW、1.5 MW、3 MW、6 MW 等型号。70 年代后期中国成功完成透平进气初温 999℃ 等级的 23 MW 燃气轮机的研制和生产,并设计了 17.8 MW 驱动用燃气轮机。此后由于国家能源政策调整,中国燃气轮机工业陷于停滞,直至 2001 年该工业几乎无明显的发展。

2.2.2 燃气轮机发展中期

2002—2011 年,中国调整战略决策,为促进燃气轮

机技术及燃气轮机产业的发展,陆续通过三批集中招标和附加后续项目,引进先进燃气轮机联合循环发电机组。希望通过购买换技术的模式,获得部分燃气轮机的设计制造技术,从合作制造开始,逐步增加本地化和自主化比例,直至自己拥有完全独立制造燃气轮机的能力。中国制造商与国外制造商合作制造的 F 级燃气轮机有:哈尔滨电气集团 & 通用电气(HEC & GE)、东方电气集团 & 三菱重工(DEC & MISUBISHI)、上海电气集团 & 西门子(SEC & SIEMENS)等。另外,哈尔滨电气集团与阿尔斯通有限公司签署了《E 级(GT13 E2)燃气轮机技术转让协议》,期间中国用于大中型燃气轮机制造的大型、特种、专用加工装备均已达到世界同类企业的水平,形成以南京汽轮电机集团公司为核心的燃气轮机制造产业群,具备了年产约 40 套 F 级和 E 级燃气轮机联合循环成套设备的能力。2012 年 11 月 6 日,中国第一套煤气化联合循环发电系统(Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC)示范电站整套机组成功运行,至 2012 年底,发电装机容量达到 $114\,491 \times 10^4$ kW,其中天然气发电 $3\,827 \times 10^4$ kW,约占全部装机容量的 3.3%^[10]。

2.2.3 燃气轮机发展现状

2011 年后,随着中国天然气产业的持续发展,天然气储量和生产能力不断提高,西气东输、北气南调、进口天然气量和进口 LNG 逐步增加,环境保护对综合碳排放量的要求不断提升,国家开始调整战略决策和优化电力工业结构,将发展燃气发电和燃气—蒸汽联合循环发电作为战略调整的重要组成部分,相继出台了一系列扶持政策,加大了气电发展的资金投入。

2012 年后,国家和地方能源公司分别涉入气电产业,气电装机量逐年上升。其中中国华能集团有限公司(以下简称华能)、中国华电集团有限公司(以下简称华电)、中国大唐集团有限公司(以下简称大唐)、国家电投集团公司(以下简称电投)和中国能源有限公司(以下简称国家能源)约占全国气电装机量的 50%。2019 年底,华电和华能的气电装机量分别达到 $1\,509 \times 10^4$ kW 和 $1\,042 \times 10^4$ kW,占全国气电装机量的 16.7% 和 11.5%;中国海洋石油集团有限公司依托海上天然气资源优势,拥有 846×10^4 kW 的气电装机容量;北京京能集团、广东粤电集团、浙江能源集团和深圳能源集团等地方发电企业气电装机量也分别达到了 506×10^4 kW、 465×10^4 kW、 403×10^4 kW 和 225×10^4 kW^[11]。

2021 年 1 月 18 日,中国气电装机量突破 1×10^8 kW(“十三五”规划完成 1.1×10^8 kW),进入了一个新的里程碑,约占总装机量的 4.5%^[12]。中国的气电装机量主要集中在珠三角、长三角和京津地区,装机量最大的是

广东省。

3 中国能源行业燃气轮机市场发展条件

目前,中国的天然气资源供应稳定,天然气输配基础设施建设完善,为燃气轮机未来市场发展提供了坚实的保障。

3.1 天然气资源供应保障

2020年,中国天然气消费量 $3\,259.1 \times 10^8 \text{ m}^3$,同比增加7.5%;天然气年产量 $1\,925.00 \times 10^8 \text{ m}^3$,同比增长9.8%;进口LNG量 $6\,713 \times 10^4 \text{ t}$,同比增长11.5%;进口气态天然气量 $3\,453 \times 10^4 \text{ t}$,同比下降4.9%;天然气对外依存度接近41.2%^[8]。

根据国家统计局公布数据^[13],截至2019年底,天然气探明储量达 $59\,666 \times 10^8 \text{ m}^3$,新增探明地质储量 $8\,091 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

中国的煤层气和页岩气十分丰富,页岩气储量在世界排名前列。据自然资源部统计,2019年中国煤层气产量 $244.78 \times 10^8 \text{ m}^3$,新增探明地质储量 $64.08 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[14];页岩气累计探明地质储量 $1.805\,9 \times 10^{12} \text{ m}^3$,可采资源量 $31.6 \times 10^8 \text{ m}^3$,探明率5.72%,仍然处于勘探开发初期,上升空间很大^[15]。

3.2 天然气输配基础设施建设

截至2020年底,中国建设天然气管道约 $14.4 \times 10^4 \text{ km}$,构建了覆盖全国的五横两纵天然气基干管网,形成西气东输、北气南下、就近外供、海气登陆的供气大格局。天然气进口管道、LNG接收站、跨区域骨干输气网和配气管网的建设,已基本形成资源多元、调度灵活、供应稳定的管网体系。

3.3 天然气产业发展规划

当前,常规天然气、煤层气和页岩气的快速开发,以及一定规模的进口天然气和LNG燃料的补充,为燃气轮机发电行业在中国形成规模市场提供了原料保障。预计到2025年,中国天然气产量将达到 $2\,500 \times 10^8 \text{ m}^3$,页岩气年产量 $65 \times 10^8 \text{ m}^3$,为满足 $4\,500 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的天然气市场需求量,还需进口 $2\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 天然气,对外依存度接近45%。预计到2023年,中国煤层气年产量将达到 $127.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。预计到2035年左右,中国天然气消费量达到峰值 $6\,500 \times 10^8 \text{ m}^3$,之后有5~10年的平台期,2050年下降至约 $5\,500 \times 10^8 \text{ m}^3$,2060年仍有约 $4\,300 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的消费空间^[16]。

3.4 燃气轮机发展的制约因素

当前,中国的制造产业群已具备年产约40台燃用天然气F、E级重型燃气轮机联合循环配套发电设备的能力,中国的研发也初见成效(中国东方电气集团有限公

司自主研发出F级50 MW F级燃气轮机,中国联合重型燃气轮机技术有限公司完成300 MW F级燃气轮机的初步设计)。但对燃气轮机部件的一些核心设计技术,特别是热端部分的设计制造技术以及燃气轮机的控制技术还有待于进一步完善和提升。目前遇到的难题如下。

1)国内在重型燃气轮机的设计能力、制造能力、试验能力、维修技术等方面均还有欠缺。在热通部件与其它重要备品备件损坏或寿命到期时,依赖国外制造商维修更换,费用昂贵。

2)少数现役燃气轮机在设计、加工制造上存在缺陷,仍需付高额的维修费用给国外商家。

3)热通道部件的维修和更换周期、维修与更换评定标准和工艺、维修技术和其它专业技术服务(如燃烧调整、控制系统及参数设定、维修指标等)均由国外制造商控制。

4 中国发展燃气轮机的建议

中国未来一段时间仍会继续装机IGCC以及基于IGCC的多联产系统,对天然气发电设备有着巨大的技术和设备需求。为尽快打破国外的技术垄断,确保国家二次能源的安全,研发具有自主知识产权的先进燃气轮机及装备已刻不容缓,为此提出如下建议。

1)为克服中国燃气轮机制造技术发展的瓶颈,结合现有的基础和实力,建议在政府的主导下,建立燃气轮机研发和制造示范项目,整合国内各大燃气轮机制造商、冶金材料厂、发电行业及相关的科研院所与高校技术力量,重点突破关键技术瓶颈。

2)重点攻克高温材料、高温部件技术、热障涂层技术、透平叶片冷却技术、大流量高压比高效压气机设计技术、高适应性低污染燃烧室设计技术、燃气轮机技术及系统、热通道部件维修技术等方面的课题。在研发制造具有自主知识产权的重型燃气轮机时,要特别加强中、低热值燃烧技术和燃烧室的开发。

3)通过政策导向、政策扶持,加快重型燃气轮机及其相关核心技术的研发。根据国际上燃气轮机开发的成功经验,建议依托用户,建立长期运行的试验验证平台和示范试验基地,以便在长期示范及验证试验中不断改进完善相关技术。

4)考虑适当的鼓励政策,比如在安全考核和调度措施上作出一定的倾斜,鼓励中国天然气发电行业逐步采用国产燃气轮机部件,以推动燃气轮机设备国产化及热通道部件维修国产化的进展。燃气轮机易损部件的国产化选择要准确,切实保证质量。

5)打破国外公司对国内市场的垄断,统一采购燃气轮机设备,集中存储,调配备品备件,吸纳技术人才,研究设备运维、检修的核心技术,开展优化运行,自主检

修,以降低运行成本。

6) 提倡燃气轮机用户参与技术研究,把燃气轮机的运用经验及时反馈到研发部门。燃气轮机最易损部件是燃烧室、一级喷嘴,其次是辅助设备(油泵、风机)轴承等,因此工艺操作相对稳定、严格执行工艺指标是延长部件寿命的关键。要提高对故障的测试能力,加强对火焰温度波动的监测,以及各部件状态的监测,避免突发事件。建立运行与事故档案,对部件的剩余寿命进行评估,制定损坏部件的修复、更换计划,掌握燃气轮机的运行规律。

7) 定期检修是提高燃气轮机经济效益的保证。燃气轮机的工况变化和负荷波动对高温零部件的运行影响很大。燃气轮机需要定期检修:小修周期一般为20 000~25 000 h,主要检查火焰筒、燃烧室等(也可以根据生产需要和设备的实际情况临时检查);中修周期一般为24 000~32 000 h,主要是检查燃烧室、过渡段和一级喷嘴;大修周期一般为32 000~36 000 h,主要检查轴承、转子等全部零部件。另外,为提高压气机叶片和涡轮的寿命,选择适合运行条件的进气过滤系统很关键^[17]。

8) 对分布式燃气轮机进行集约化管理。充分发挥分布式燃气轮机规模小、布局灵活、运营高效的特点,实现区域集群式管理、集中式调度、集约化运营,最大限度降低维保成本,逐步提高维保技术,提升项目综合效益贡献度。

9) 燃料成本、上网电价、利用小时数是决定燃气轮机组运行和盈利能力的关键参数。当前中国多数地区的气电上网电价尚不能对气电市场化形成激励机制。建议国家对气电实行多元化的定价措施,充分考虑气电运行成本,以及对减少碳排放的贡献、对调峰的贡献所付出的生产成本。将气电纳入中央或地方财政环保专项资金补贴范围。实行清洁电力优先上网的政策,保障气电机组利用小时数,以降低气电成本。探讨辅助服务市场和碳市场运行新模式^[18-22]。

10) 继续推广国家主张的“自发自用、余量上网、电网调节”的运营模式。鼓励有条件的工业园区、商场、机场、交通枢纽、数据存储中心和医院推广建设分布式能源项目。支持工业企业加快建设余热、余压、余气和瓦斯等发电项目。

11) 拓展分布式燃气发电站在油气井钻采工程中的应用。美国开发页岩气的经验是“以气打气,气电结合,流水作业,工厂化生产”。将分布式燃气发电站以模块的形式安装在拖车上,利用其灵活移动、噪声低、振动小、启动快、耗水低、低排放、功率调幅宽和功率输出稳定等特点,对钻机作业、压裂作业、混砂作业和废水处理等实行电驱化,可大幅降低钻采综合成本。例如,根据压裂对电力功率的设计要求,配置相应规模的燃气轮机机组,可以为油气井压裂提供集中爆发式灵活持续电力服务,使油气井

压裂达到最佳技术效果,大幅提升油气井产量。

5 结论

中国的能源结构、电力结构改革以及环保要求,多元化的天然气供应以及未来发电技术的发展趋势,均预示着燃气轮机有着广阔的应用市场。发展气电有利于能源结构调整和节能减排,有利于可再生能源发展和电网安全。而气电行业的发展,关键是要完善燃气轮机制造技术和维修技术,形成工业化产品,增加燃气轮机的装机容量,减少运营成本,提高工作效率,清除影响发展的障碍。政府应出台相应的扶持政策,支持燃气轮机制造技术和维修技术的研发与国产化,支持对国外技术的吸纳和攻关。燃气轮机发展任重而道远,但前途一片光明。

参考文献:

- [1] 陈蕊,朱博骐,段天宇.天然气发电在中国能源转型中的作用及发展建议[J].天然气工业,2020,40(7):120-128.
CHEN Rui, ZHU Boqi, DUAN Tianyu. The role of natural gas power in Chinese energy transition and suggestions of development [J]. Natural Gas Industry, 2020, 40 (7): 120-128.
- [2] 单彤文.天然气发电在中国能源转型期的定位与发展路径建议[J].中国海上油气,2021,33(2):205-214.
SHAN Tongwen. Positioning and development suggestions for natural gas power in chinese energy transition period [J]. China Offshore Oil and Gas, 2021, 33 (2): 205-214.
- [3] 李洪言,赵朔,林傲丹,等.2019年全球能源供需分析——基于《BP世界能源统计年鉴(2020)》[J].天然气与石油,2020,38(6):122-130.
LI Hongyan, ZHAO Shuo, LIN Aodan, et al. Analysis on world energy supply & demand in 2019—based on BP Statistical Review of World Energy (2020) [J]. Natural Gas and Oil, 2020, 38 (6): 122-130.
- [4] 李侠祥,张学珍,王芳,等.中国2030年碳排放达峰研究进展[J].地理科学研究,2017,6(1):26-34.
LI Xiaxiang, ZHANG Xuezheng, WANG Fang, et al. Research progress of carbon emission peaking in China in 2030 [J]. Geographical Sciences Research, 2017, 6 (1): 26-34.
- [5] 中宏国研信息技术研究院.电力“十三五”规划完成情况[EB/OL].(2020-08-18)[2021-09-01].<http://www.china-cer.com.cn/shisiwuguihua/202008187549.html>.
Zhong Hong Research Institute of Information Technology. The completion of electric power planning in the “13 th Five-Year Plan” [EB/OL]. (2020-08-18) [2021-09-01]. <http://www.china-cer.com.cn/shisiwuguihua/202008187549.html>.
- [6] 国家发展改革委员会,国家能源局.电力发展“十三五”规划(2016~2020)[R].北京:国家发展改革委员会,国家能源局,2016-11-07.
National Development and Reform Commission, National

- Energy Administration. The 13th Five-Year Plan for electric power development (2016 ~ 2020) [R]. Beijing: National Development and Reform Commission, National Energy Administration, 2016 - 11 - 07.
- [7] 杨永明. 全球天然气发电现状与展望[J]. 电力决策与舆情参考, 2020(37): 10-16.
- YANG Yongming. Current status and prospects of global natural gas power generation [J]. Power Decision and Public Opinion Reference, 2020 (37): 10-16.
- [8] 杨永明. 中国能源大数据报告(2021)——天然气篇[R]. 北京: 能源情报研究中心, 2021.
- YANG Yongming. China energy big data report (2021)—natural gas [R]. Beijing: Energy Information Research Center, 2021.
- [9] 管小红. 2018 年中国燃气轮机市场竞争格局分析及行业发展前景预测[EB/OL]. (2018 - 06 - 19) [2021 - 09 - 01]. <https://www.chyxx.com/industry/201806/650281.html>.
- GUAN Xiaohong. 2018 China Gas Turbine Market Competition Pattern Analysis and Industry Development Prospect Forecast [EB/OL]. (2018 - 06 - 19) [2021 - 09 - 01]. <https://www.chyxx.com/industry/201806/650281.html>.
- [10] 国家能源局. 我国中长期发电能力及电力需求发展预测[EB/OL]. (2013 - 02 - 20) [2021 - 09 - 01]. http://www.nea.gov.cn/2013-02/22/c_132185515.htm.
- National Energy Administration. China's medium and long-term power generation capacity and power demand development forecast [EB/OL]. (2013 - 02 - 20) [2021 - 09 - 01]. http://www.nea.gov.cn/2013-02/22/c_132185515.htm.
- [11] 刘志坦. 我国电气产业“十四五”发展之思考[J]. 电力决策与舆情参考, 2020(37): 40-45.
- LIU Zhitan. Thoughts on development of China electric industry in the “14th Five-Year Plan” [J]. Electric Power Decision and Public Opinion Reference, 2020 (37): 40-45.
- [12] 王 怡. 全国天然气发电装机容量突破 1 亿千瓦[EB/OL]. (2021 - 02 - 03) [2021 - 09 - 01]. http://www.cpn.com.cn/shouye/yaowen/202102/t20210202_1341199.html.
- WANG Yi. The installed capacity of natural gas power generation in China exceeds 100 million kilowatts [EB/OL]. (2021 - 02 - 03) [2021 - 09 - 01]. http://www.cpn.com.cn/shouye/yaowen/202102/t20210202_1341199.html.
- [13] 国家统计局, 智研咨询. 2020 年中国石油天然气探明储量及石油和天然气开采行业发展分析[EB/OL]. (2021 - 03 - 12) [2021 - 09 - 01]. <https://www.chyxx.com/industry/202103/937635.html>.
- National Bureau of Statistics, Zhiyan Consulting. Analysis of China's proven oil and natural gas reserves and development of oil and natural gas exploration industry in 2020 [EB/OL]. (2021 - 03 - 12) [2021 - 09 - 01]. <https://www.chyxx.com/industry/202103/937635.html>.
- [14] 自然资源部. 全国石油天然气资源勘查开采通报(2019 年度)[R]. 北京: 自然资源部, 2020.
- Ministry of Natural Resources. National petroleum and natural gas resources exploration and exploitation bulletin (2019) [R]. Beijing: Ministry of Natural Resources, 2020.
- [15] 李永昌. “十四五”我国页岩气发展展望[N]. 石油商报, 2020 - 9 - 30(4).
- LI Yongchang. Prospects for my country's shale gas development during the 14th Five-Year Plan [N]. Petroleum Business News, 2020 - 9 - 30 (4).
- [16] 周淑慧, 王 军, 梁 严. 碳中和背景下中国“十四五”天然气行业发展[J]. 天然气工业, 2021, 41(2): 171-182.
- ZHOU Shuhui, WANG Jun, LIANG Yan. Development of China's natural gas industry during the 14th Five-Year Plan in the background of carbon neutrality [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41 (2): 171-182.
- [17] 秦亚迪, 郑大雷, 徐立昊, 等. 燃气轮机进气过滤系统常见问题分析及应对[J]. 天然气与石油, 2021, 39(2): 107-111.
- QIN Yadi, ZHENG Dalei, XU Lihao, et al. Analysis and rectification of common issues in gas turbine air intake filtration system [J]. Natural Gas and Oil, 2021, 39 (2): 107-111.
- [18] 刘志坦, 叶 春, 王文飞. 产业链视角下天然气发电产业发展路径[J]. 天然气工业, 2020, 40(7): 129-137.
- LIU Zhitan, YE Chun, WANG Wenfei. The development of natural gas power industry from the perspective of industrial chain [J]. Natural Gas Industry, 2020, 40 (7): 129-137.
- [19] 朱兴珊. 气电发展的决定性因素是国家环保政策[EB/OL]. (2020 - 07 - 03) [2021 - 09 - 01]. https://m.thepaper.cn/baijiahao_8447713.
- ZHU Xingshan. The decisive factor in gas power development is national environmental protection policy [EB/OL]. (2020 - 07 - 03) [2021 - 09 - 01]. https://m.thepaper.cn/baijiahao_8447713.
- [20] 中国环境保护部与国家质量监督检验检疫总局. 火电厂大气污染物排放标准: GB 13223—2011[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- Ministry of Environmental Protection of China and General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. Emission standard of air pollutants for thermal power plants: GB 13223—2011 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2011.
- [21] 张 超. 解读“十四五”价格改革与电价机制关键点[EB/OL]. (2021 - 06 - 08) [2021 - 09 - 01]. <https://shoudian.bjx.com.cn/html/20210608/1157109.shtml>.
- ZHANG Chao. Interpretation on price reform and key points of electricity price mechanism for “14 th Five-Year Plan” [EB/OL]. (2021 - 06 - 08) [2021 - 09 - 01]. <https://shoudian.bjx.com.cn/html/20210608/1157109.shtml>.
- [22] 郭华璋, 罗歆尧, 张红梅. 我国气电产业发展的潜力、挑战与推进措施[J]. 天然气技术与经济, 2021, 15(5): 75-82.
- GUO Huazhang, LUO Xinyao, ZHANG Hongmei. Development potential, challenges, and promotion measures of gas power generation industry in China [J]. Natural Gas Technology and Economy, 2021, 15 (5): 75-82.