

世界重型燃气轮机产品系列发展史及其启示

清华大学教授 中国工程院院士 蒋洪德

前言

重型燃气轮机是发电设备的高端装备,其技术含量和设计制造难度居所有机械设备之首,是机械制造业的金字塔顶端,在国民经济和能源电力工业中有重要的战略地位。目前燃气轮机联合循环发电已经达到全球发电总量的五分之一(欧美国家已超过三分之一),最先进的H/J级燃气轮机单循环和联合循环效率已经达到40%—41%和60%—61%,为所有发电方式之冠。燃用天然气的燃机电站污染排放极低,二氧化碳比排放量是超临界燃煤电站的一半,大力发展天然气发电是包括我国在内的世界各国保护环境和落实《巴黎协定》减少温室气体排放的主要措施之一。

我国党和政府高度重视燃气轮机产品,高度重视航空发动机与燃气轮机国家科技重大专项(简称两机专项)从今年开始进入实施阶段,已经列为“十三五”发展计划中我国要实施的100项重点任务之首。

从1939年世界第一台发电用重型燃气轮机诞生以来,经过半个多世纪技术进步和企业重组,GE、西门子和三菱公司各自形成了完整的技术体系和产品系列并垄断了全球市场。重型燃气轮机的研发是一项复杂的系统工程,技术难度很高、研发投入巨大、实施周期很长,一旦决策失误,轻则造成不同程度的经济和社会损失,重则可能使公司陷入危机甚至导致公司破产(被兼并)。这三家公司技术上成功的基本经验和教训是什么?这些经验和教训对我国燃气轮机行业自主创新有什么启示?什么是我国燃气轮机行业自主创新应当遵循的科学合理的技术路线?这是我国燃气轮机全行业共同面临的问题。

世界重型燃气轮机发展历程综述

1939年在瑞士BBC公司诞生了世界第一台发电用重型燃气轮机,标志着发电行业由汽轮机进入了燃气轮机时代。七十多年来世界重型燃气轮机的发展大致可分为五个阶段:

诞生阶段(1939—1950年代末期):重型燃气轮机刚刚诞生,仅BBC公司进行研发,产品功率小(不超过4MW),燃气温度低(不超过800℃),热效率低于20%。二战期间发展停滞。

早期阶段(1950年代—1970年代末期):二战结束后美国GE公司、德国西门子公司先后开始研制重型燃气轮机,走的是原始创新的技术路线。三菱公司从1960年代开始研制重型燃气轮机,走的是引进技术消化吸收再创新的路线。三家公司在1970年代后期都完成了原型机(功率25MW以下)的研制,燃气温度达

到1000℃,效率约26%。研制原型机的主要目的是突破并掌握核心技术、选定燃机主机基本结构特别是转子结构,建立试验设备和培养人才。

全球市场第一阶段(1980年代—1990年代中期):E级技术发展和成熟期。1980年代初推出的E级基本型号单机功率为31—105MW(50Hz,下同),燃气温度达到1100℃,效率约30%;到1990年代中期单机功率增加到37—130MW,燃气温度达到1200℃,效率约32%,成为全球重型燃气轮机市场主流产品。从1978—1995年,全球1MW级以上发电燃气轮机(注:25MW以下是航空型燃机和小功率燃机,25MW以上是重型燃机为主)共销售近九万台,总功率为7.3亿千瓦,世界燃气轮机市场开始形成。

全球市场第二阶段(1990年代中期—2010年):F级技术发展和成熟期。1990年代中期推出的基本型号单机功率225—235MW,燃气温度为1320—1350℃,效率约34%;到2010年单机功率增加到285—300MW,效率36%—37%,F级燃机取代E级成为全球市场主流产品。在1996—2010年间全球1MW以上发电燃气轮机共销售近1.3万台,总容量突破10亿千瓦。2010年燃气轮机发电接近全球发电总量的20%,成为全球发电行业不可或缺的重要组成部分。

全球市场第三阶段(2010年至今):H/J级技术出现并在发展中。目前市场上H/J级燃机单机功率达到400—520MW,燃气温度达到1550—1600℃,热效率达到40%—41%。2015年H/J级燃机在北美市场占有率接近一半,全球H/J级时代正在到来。天然气发电占全球发电总量超过20%而且稳步上升,世界能源组织预测到2030年这一比例将达到25%以上。

三大外国燃机公司技术路线的共性规律和工程应用实例

三大外国公司技术路线的共性规律

尽管GE、西门子和三菱公司的技术路线不相同,各家燃机系列产品的结构和技术特征也有很大差别,但是在系列产品研发的技术路线上却遵循着共同的原则:

(1)从研制小功率的原型燃气轮机(也称为母型机、技术验证机)入手,突破并掌握产品设计和制造核心技术,然后采用模块化放大或缩小的方法,在较短时期内形成同一温度等级的不同功率的系列化产品的基本型号。之所以从小功率的原型机起步原因非常简单:节省研发投入、缩短研发周期、降低公司风险。同一参数等级的50Hz(3000转/分)和60Hz(3600转/分)燃机是模块化设计理论应用的典型例子。60Hz燃机按比例放大1.2倍就得到50Hz燃机,50Hz燃机按比例

缩小0.8倍就得到60Hz燃机,两者热效率、主机结构、材料和加工工艺相同,只是功率相差1.44倍。任何一家公司研发成功了50Hz的燃机,就等于有了60Hz燃机,反之亦然。

在模块化放大系数为2时,原型机与放大机型功率比为1:4,转子重量之比为1:8。从核心技术研发、产品设计、关键部件性能试验验证、样机制造、建设试验电站完成带负荷发电全过程的总投资大体也是1:4,这意味着直接研制300MW等级大功率燃机需要多投资数亿、十几亿美元甚至更多。事实上,世界燃气轮机发展历史上没有一家成功的企业是直接研制大功率燃机起家。

(2)某个产品基本型号一旦进入市场,就要持续研发新技术提高其热效率、增加功率、降低污染和提高可靠性,不断推出升级版形成系列产品。这个改进升级过程贯穿该型号的整个生命周期,可以长达几十年。技术升级的原则是渐进式改良,以确保每一个升级版在市场上获得成功,公司持续盈利,逐步形成有市场竞争力的、完整的系列化产品。

2.模块化设计方法工程应用实例

GE公司F级燃机产品系列开发开始于1980年初期,在1970年代成功研发E级技术和产品的基础上,对压气机、燃烧室和透平三大部件进行了升级改进,首先研发的60Hz(3600转/分)基本型号7FA,首台样机于1988年完成总装并开始带负荷试验,燃机功率147MW,热效率34.2%;三年后(1991年)把7FA燃机放大1.2倍就推出9FA(50Hz)的基本型,燃机功率226MW,热效率35.6%。根据市场需要1996年把7FA缩小0.69倍就得到6FA的基本型(70MW,效率34.2%)。过去三十年间GE公司不断推出6FA、7FA和9FA的升级版,组成了GE公司F系列燃机主打产品,仅9FA系列产品就在全世界销售了1100台,累计运行超过了5000万点火小时。

西门子公司F级燃机产品研制也始于1980年代,原型燃机V64.3A于1989年研发成功投入运行,燃机功率53MW,热效率34%;两年后(1991年)把V64.3A模块化放大1.5倍就推出V84.3A(60Hz)的基本型,燃机功率128MW,热效率35.4%;三年后(1992年)把V64.3A燃机模块化放大1.8倍就推出V94.3A(50Hz)的基本型,燃机功率184MW,热效率35.4%。

3.产品的持续升级和改进

重型燃气轮机研发投入资金多、周期长,但一旦研发成功后产品的生命周期很长,保持产品竞争力的关键是不断推出该产品的升级版。升级的目标是不断提高热效率(主要措施是提高燃气温度并相应提高

压气机压比)、增加机组出力(主要措施是增大压气机进口流量)、降低污染物排放和提高运行可靠性。这就需要不断研发新技术,并且逐步把经过试验验证的新技术运用到升级版产品上。这是风险很大的创新过程,稍有不慎就会带来巨大经济损失并丢失市场。

GE公司1975—2015三十年中E和F级燃机性能不断提升,1975年6B燃机基本型号功率为31MW、效率30%,三十年间推出8个升级版,功率增加到43MW、效率提高到34%;1975年9E基本型号功率105MW、效率32%,三十年间推出7个升级版型号,功率增加到145MW,效率提高到37%;1989年9FA基本型号功率为226MW,热效率35.6%,二十多年间推出5个升级版型号,最新版功率达到342MW,热效率41%。

三菱公司M701F、西门子公司V94.3A也完成了类似的升级过程。这两家公司经过二十多年持续不断的改进,把燃机的功率从最初基本型的234—240MW增加到了310—340MW,热效率由36%提高到40—41%,与GE公司基本相当。

世界重型燃气轮机发展历史上的主要教训

世界重型燃气轮机发展的历史中也不乏决策失误造成不同程度的经济和市场份损失,严重的则使公司陷入危机。本文仅举3例:

原Alstom公司GT24/26燃机高压透平叶片冷却设计事故

原Alstom公司在1990年代与GE、西门子和三菱公司基本同时推出F级燃机GT24(60Hz)和GT26(50Hz)并进入市场,成为当时国际上四家具有F级产品的公司之一。但是2000年前后所有投运机组的高压透平第一级静叶上端壁严重变形导致高温燃气泄漏,迫使机组停机不能正常发电,经分析是设计缺陷。于是所有用户都向Alstom公司索赔,总金额接近10亿欧元,公司陷入严重危机,迫使当时法国政府出手相救,公司才勉强度过危机。当时正值我国启动打捆招标,Alstom公司原本是邀请参与投标外国公司之一,因为这个事故被我国招标机构取消了投标资格,失去了进入我国市场的机会。尽管Alstom公司改进了设计几年后推出了GT24A和GT26A,但是世界F级燃机市场已经被GE、西门子和三菱公司基本瓜分完毕,从此Alstom公司燃机业务一蹶不振,最终在去年被GE公司收购。

透平叶片蒸汽冷却技术退出市场

1990年代GE公司提出透平叶片闭式循环蒸汽冷却新概念,即用蒸汽替代空气对透平静叶片进行冷却,并且回收重复使用。按照GE公司公布的宣传材料,在相同燃烧室出口温度的条件下闭式蒸汽冷却可以提高透平第一级动叶片进口温度200(110℃),这意味着燃气轮

机冷却技术的革命性创新。在美国政府支持下GE公司进行了长达十年的应用基础研究以及核心技术研发和试验验证,2003年率先推出了采用闭式循环蒸汽冷却透平静叶和动叶片的H级燃机产品,并且在英国建立了首个示范电站。但是运行实践证明,由于闭式蒸汽冷却系统结构过于复杂、蒸汽系统启动慢影响燃机调峰性能等原因,十年后的2013年GE公司最终宣布放弃闭式蒸汽冷却。与此同时,另外两家竞争对手并没有盲目跟进,西门子公司在其H级燃机中坚持采用开式空气冷却系统,并于2007年率先推出了世界首台H级重型燃气轮机STG5—8000H(50Hz);三菱公司只在G级(1500℃)燃机的燃烧室过渡段尝试过闭式蒸汽冷却技术,经过十年的研发和工程实践最终宣布放弃了;而三菱公司在J级燃机中仍然采用开式空气冷却系统,并且在2011年推出了M501J(60Hz),其燃气温度高达1600℃,为世界之最。虽然GE公司凭借其雄厚实力近年推出了空气冷却技术的9HA.01(429MW)和9HA.02(519MW)系列产品,但长期蒸汽冷却技术研发和产品研制浪费了大量的人力物力财力特别是多年的宝贵时光,被竞争对手“弯道超车”,教训是深刻的。

西门子公司三代燃机三代不同燃烧室

西门子公司燃气轮机的燃烧室继承了欧洲传统,最早是一个置于主机上方的大尺寸单筒结构,后来在E级燃机(V84.2和V94.2)中发展为对称布置在主机两侧的两个燃烧室。当燃气温度升高到F级时发现无法解决两个燃烧室导致透平全周温度的不均匀,于是研发了环形燃烧室并获得成功(V64.3A、V84.3A和V94.3A)。当温度升高到H级时,发现环形燃烧室无法解决燃烧稳定性(热声振荡)问题,又研发了多管型燃烧室,形成了目前E、F、H三代燃机三代结构完全不同的燃烧室的局面。这个问题是原型燃机燃烧室的技术升级空间不足造成的,在当时条件下预测燃烧室的技术升级空间是极其困难的。但是这一教训提醒我们,在选择原型燃机燃烧室(包括其他主要部件)结构时,必须充分考虑其继续升级的技术可行性。

启示

按照党中央国务院的部署,两机专项经过多年论证从今年开始进入实施阶段。燃机专项的战略目标是建立我国燃气轮机自主创新的技术体系和有市场竞争力的产业体系,从根本上改变我国燃气轮机行业大大落后于世界先进水平的被动局面,实现我国燃气轮机行业六十年来一直追求的梦想。

燃气轮机专项的奋斗目标已经明确,即2020年实现F级300MW燃机自主研制,2030年实现H级400MW燃机自主研制,为实现这一奋斗目标我国燃气轮机制造企业和科技企业已经行动起来,但是技术路线各不相同。我国是燃气轮机行业的后来者,我们希望用较短的时间、较少的代价走完前人花了半个多世纪才走完的历程,因此学习前人成功的经验、避免重犯前人的错误非常重要。燃气轮机技术进步有科学客观的规律,按照科学规律进行自主创新,可事半功倍;违反科学规律办事,或事倍功半、或一事无成。

北京夏季缘何「臭氧超标」

据新华社北京5月28日电(记者倪元锦 王迪迦)北京市环保监测中心28日发布当日空气质量预报称,当天,受高压后部影响,北京市扩散条件一般,大部分地区PM2.5浓度为“2级良”,但下午时段空气质量将变为“3级轻度”至“4级中度”污染,首要污染物是午后浓度升高的“臭氧”。

自2013年全国执行新《环境空气质量标准》,监测6种污染物以来,臭氧便成为一些城市夏季空气质量“超标日”的首要污染物。

什么是“臭氧超标”?

臭氧,在常温下,是一种有特殊味道的淡蓝色气体,具有强氧化性。聚集在平流层,它是“地球卫士”,可吸收太阳光中的紫外线;在近地面,极高浓度的臭氧会刺激和损害人的黏膜组织,如眼睛、呼吸系统等。

进入夏季,臭氧有时会成为首要污染物。北京市臭氧超标主要发生在气温较高、光照强烈的5至9月。

北京市环保监测中心大气室主任李云婷接受采访时,臭氧有明显的时间规律特征,超标时段集中于高温强日晒的午后至傍晚。“与PM2.5不同,臭氧不稳定、易分解,减少或避免午后至傍晚时段的出行和户外活动,可有效降低臭氧的健康影响。”李云婷说。

臭氧为何会超标?

除少量由平流层传输外,地面臭氧大部分由人为排放的“氮氧化物”和“挥发性有机物”,在高温、日照充足、空气干燥条件下转化形成。氮氧化物主要来自机动车、发电厂、燃煤锅炉和水泥窑炉等排放;挥发性有机物来自机动车、石化工业排放和有机溶剂的挥发等。

北京市环境科学院大气污染防治研究所副所长黄玉虎说,挥发性有机物可与氮氧化物,在紫外光照射的条件下,发生一系列光化学链式反应,提高大气的氧化性,引起地表臭氧浓度的增加,又加速二次颗粒物的生成。这也是夏天更容易臭氧超标的原因。

减少臭氧原料在行动

针对形成臭氧污染的前体物氮氧化物和挥发性有机物,“十二五”时期,我国已通过对钢铁、水泥等行业进行“脱硝”末端处理,并对重型柴油车加装尾气处理装置,提高排放标准,减少氮氧化物排放及硝酸盐对大气环境的污染。北京、上海等城市率先将挥发性有机物纳入减排控制对象。

据介绍,北京市环保局2015年6月发布涉及火葬场、锅炉、炼油与石油化工、印刷、家具制造等行业领域的五项大气污染物排放地方标准,重点控制挥发性有机物和氮氧化物,体现“源头控制、过程监管、末端治理”的综合管控理念。



湖南欲打造3D打印生物医学产业基地

科技日报讯(林均红 俞慧友)近日,在长沙举行的“精准医学·中国智造——3D打印技术医学应用高峰论坛”上,湖南省副省长张剑飞表示,湖南将以应用为导向,借助机制创新与市场培育两种手段,加快3D打印和生物医疗等领域的应用推进工作,加快打造世界级3D打印生物医学产业基地。

本次大会正式成立了“3D打印医学应用专家委员会”,开启国家级3D打印医学应用领域高端人才规划建设。会上,湖南华翔增量制造股份有限公司与中科院金属研究所、华南理工大学等签署了《3D打印抗菌钛合金植入器械产品开发》等科研合作协议。未来,湖南将在新型材料开发、3D打印装备研发、软件设计、产品研发、临床前研究、植入器械表面活性与功能化、临床转化研究等领域进行战略规划部署。

湖南华翔增量制造股份有限公司的3D打印团队,目前已在医疗领域,如骨科、颌面外科、心内(外)科、头颈外科等科室临床应用细分方向开展了多个“首次”探索,累计服务500多例病例,取得了大量一线研究分析数据。公司董事长侯兴旺表示,公司正全力打造一支覆盖3D打印医疗应用全产业链的研究团队,实现产、学、研、医一体的创新机制。

5月29日,扬州市梅岭小学学生展示在“跳蚤书市”中挑选的图书。“六一”儿童节即将来临,江苏省扬州市梅岭小学西区校举办以“分享阅读,快乐六一”为主题的“跳蚤书市”,学生们交换图书,分享阅读感悟。新华社发(孟德龙摄)

简讯

中船重工拉开内部资源整合序幕

科技日报讯(记者付毅飞)记者日前从中船重工集团获悉,该集团公司近日将青岛北海船舶重工有限责任公司(简称北船重工)资产划入武昌船舶重工集团有限公司(简称武船重工),标志着中船重工拉开了内部造船资源整合优化的序幕。

据介绍,武船重工在海洋防务装备、军贸市场以及海洋工程、公务船、工程船、桥梁钢结构等领域制造能力和新产品研发设计能力较强,但大型军民两用船舶、特别是大型海洋运输船舶建造能力不足,正谋求拓展建造大型军用舰船能力;北船重工大型散货船建造能力较强,大型船舶生产能力强,但船舶类产品结构较为单一。因此,两厂在军民品船舶研发设计、海洋防务装备建造、大型民用船舶生产运用等方面,存在较强互补性。

据悉,新的武船重工将建设武汉双柳和青岛海西湾两个军民融合产业基地,形成水面水下一体、

船舶与海工兼具、建造与修理并举、集大船小船于一身、军民深度融合发展的船舶海工企业,更好实现规模化、集约化发展,到2020年预计实现营业收入350亿元。

我首个知识产权质押融资产品发布

科技日报讯(记者付丽丽)5月27日,由北京知识产权运营管理有限公司(下称“北京IP”)与建设银行中关村分行携手打造的“智融宝”在京发布。这是国内首个不附带其他条件、真正意义、可复制的“纯”知识产权质押贷款创新产品,旨在为企业创新发展提供“知识产权运营+投资联动”全方位的金融服务。

据北京IP总经理邵顺昌介绍,“智融宝”具有以下特色:一是知识产权质押为唯一担保方式,不捆绑企业其他资产和信用;二是500万元以内的融资项目进入快速批贷通道,15天批贷;三是海淀区企业可获得融资成本50%的补贴,最高可达100万元。

北京市知识产权局副局长李钟指出,“智融宝”是北京市知识产权金融服务工作的一次积极探索,将破

解科技型中小微企业融资难、融资成本高等问题。未来,将通过完全市场化的运作,切切实实为轻资产、科技型小微企业融资拓宽渠道。

兵商联盟打造“战友”创新创业平台

科技日报北京5月29日电(记者谈琳)“我们要努力让‘战场上最可爱的人’变成‘商场上最可敬的人’。”29日,在中国生产力促进中心协会兵商创新创业联盟(简称兵商联盟)成立大会上,该联盟理事长方文秀说。

中国生产力促进中心协会理事长刘玉兰介绍,兵商联盟于去年12月获准成立,是由众多优秀兵商企业组成的专业化组织。联盟的宗旨是贯彻落实国家关于“大众创业、万众创新”的要求,充分发挥退役军人的示范带头作用,倡导以商报国,整合优化资源,搭建服务平台,推动产业创新,打造知名品牌,为实现中华民族伟大复兴的中国梦贡献力量。

据介绍,有关部门统计,改革开放以来,进入市场创业的退役军人有1900多万人。目前,我国每个企

业家中就有一个有军人背景。民营500强企业的领导人中,退役军人占60%。

中关村创新论坛探讨创新驱动

科技日报讯(记者左常睿)“中关村创新论坛”日前在京举行,论坛探讨推动科技创新以及创新创业生态体系建设、产业转型升级等议题。

由中国科技体制改革研究会、中国贸促会北京分会与中关村杂志社联合主办的中关村创新论坛主题为“创新驱动:今天的课题”。在主题报告会上,专家学者共同研讨中国的创业生态系统、产业结构调整、推动京津保率先联动发展、科技与文化协同发展、众创空间如何筑巢引凤等议题。

在“中关村·保定协同创新发展论坛”上,清华大学副校长尤政围绕国家战略助力京津冀协同发展建言献策,中国农业大学副校长李召虎带来了围绕农业科技创新和涿州国家级农业科技园区建设等建议,中关村科技企业协会会长姜黎明对生态环境建设产业的京保合作发展提出建议。