

# 航改型燃机分布式能源系统的蒸汽系统优化

**摘要:** 随着我国经济持续快速发展, 高能耗、高投入增长方式产生了一系列不可持续的环境和资源问题, 工业转型升级、转变发展方式和能源结构调整日益紧迫。作为工业转型升级重要载体的各类产业集聚区冷热负荷大且集中, 环境评价要求高。本文采用以航改型燃机为核心的分布式能源系统来满足高能量密度的冷热电负荷需求, 研究了蒸汽系统优化对分布式能源系统性能和经济性的影响, 指出了配套设备的标准化、系列化对中国航改型燃机分布式能源系统节能环保效益提升的重要意义。

**关键词:** 航改型燃机; 分布式能源; 蒸汽系统优化

中图分类号: T K 14; T K 262 文献标识码: A

文章编号:

## Optimization on steam system for aero-derivative gas turbine distributed energy system

**Abstract:** China's growth mode of high energy consumption and high investment leads to a series of unsustainable environmental and resource issues, with her rapid economic growth. Industrial transition and upgrading, transformation of economic development mode and adjustment of energy structure become increasingly urgent. As important means of industrial transition and upgrading, various industrial agglomeration zones require large and concentrated heating, cooling & power supply and high-quality environmental protection. This paper adopts aero-derivative gas turbine (Aero-GT) distributed energy system (DES) to meet the high-energy-density heating, cooling & power loads and studies the impact of steam parameter optimization on the performance and economy of Aero-GT DES. It is shown that the equipment standardization and serialization is significant for Aero-GT DES to demonstrate its environmental and energy-saving benefits to China.

**Key words:** Aero-derivative Gas Turbine; Distributed Energy System; Steam Parameter Optimization

改革开放三十多年来, 我国在经济高速增长的同时, 能源消费总量不断攀升, 2010 年超过 32.5 亿吨标准煤<sup>[1]</sup>, 占世界总量的 20%, 但国内生产总值(GDP)不足世界的 10%。我国 GDP 总量和日本大体相当, 能源消费总量是日本的 4.7 倍<sup>[2]</sup>。高能耗、高污染产生了一系列不可持续的环境和资源问题, 工业转型升级、转变发展方式和能源结构调整迫在眉睫。作为工业转型升级重要载体的各类工业园、科技园、商贸物流城等由于规模效益集中、科技含量高, 在东中西部蓬勃兴起, 有效带动了地区产业升级和经济发展。这些产业集聚区建筑规模往往在百万平方米以上、电力负荷达到上百兆瓦规模, 同时对工作生活环境的热舒适性要求高, 不仅冷热负荷大且集中, 而且在环保和城市规划方面也有严格要求, 限制建设大型热电厂。分布式能源系统在美国、日本等发达国家蓬勃发展, 推动能源高效利用和减少环境影响<sup>[3,4,5,6]</sup>。中国华电集团与通用电气(GE)签订协议, 成立航改型燃机合资企业和联合应用中心, 凭借陕气进京、西气东输、川气东送、引进 LNG 和煤制天然气等大型气源工程将清洁能源输送各大城市高压燃气管网的有利条件, 推动航改型燃机在中国分布式能源领域的应用和发展。本文通过研究以航改型燃机为核心的典型分布式能源供应系统(见图 1)的技术特点, 优化蒸汽系统的最大供汽能力和主蒸汽参数, 以更好地满足各种产业集聚区的冷热电负荷特点, 提高能源综合利用率。

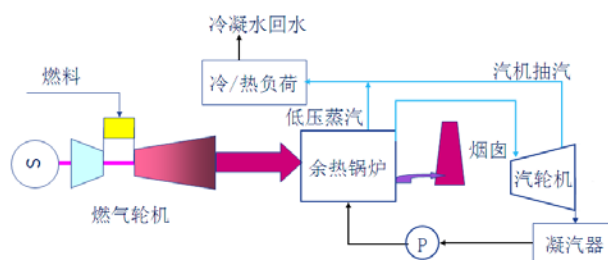


图 1 燃气轮机分布式能源供应系统

## 1 分析与讨论

以航改型燃机为核心的分布式能源系统与传统的燃煤热电厂在系统运行方式上存在明显差异。燃煤热电厂可以通过调整锅炉供煤量的方法主动调控锅炉供汽量和汽轮机负荷，达到所需的主蒸汽流量，满足外界所需热电厂的发电功率和热网的供汽量<sup>[7]</sup>。燃气轮机联合循环的蒸汽系统则依赖于燃气轮机排出余热，其满足外界冷热负荷能力受燃气轮机运行状况的控制，而燃气轮机性能(功率和效率)、空气进气量、燃气消耗量以及排气温度、流量随大气温湿度、海拔、燃气成分等条件变化而改变<sup>[8]</sup>。燃煤机组排烟温度一般超过160℃，需要从汽机抽汽用于锅炉给水加热和除氧用热。分布式能源采用天然气等清洁能源作为燃料，燃烧产物不含硫化物，余热锅炉可直接降低至80℃，烟气余热中可以利用的低品位能量较多，不仅能够满足余热锅炉给水加热和除氧的需要，多余部分还可通过尾部换热器提供热水，用于区域供热和吸收式制冷。由于不再需要从汽轮机抽汽供应给水回热器和除氧器，联合循环机组汽轮机比同等容量的燃煤机组汽轮机拥有更大的抽汽潜力，能够满足更多供冷供热蒸汽需求。

适用于分布式能源系统的燃机单机容量小于50MW，其蒸汽系统为非再热单压或双压朗肯循环系统，配套的联合循环汽轮机等设备在国外已形成标准化和系列化<sup>[9]</sup>。由于进口汽轮机价格明显高于中国同容量产品，国内分布式能源项目倾向于选择国产汽轮机。中国燃煤机组汽轮机技术先进，产品已经实现了标准化和系列化，仅匹配燃煤中小型热电厂的汽轮机标准化型号就达到近两百个<sup>[10]</sup>。与成熟的燃煤机组汽轮机技术相比，分布式能源项目适用的中小型联合循环汽轮机在国内尚处于起步阶段，不仅产品型号数量少，而且进汽参数选择范围很小<sup>[11]</sup>，无论在型号种类上，还是在选择范围上，都不能和燃煤机组汽轮机相提并论，甚至明显少于中小型燃机种类及其排气参数的选择范围。国产中小型联合循环汽轮机标准化缺失，产品也没有实现系列化，这使分布式能源项目的汽轮机选型和蒸汽系统参数选取受限，无法完全遵循“温度对口、梯级利用”原则，不得不采取降低汽轮机进汽温度或选择非优化汽机进汽参数的方案，例如国内某些小容量重型燃气轮机项目的燃机排气温度在528~540℃，采用进汽温度在435℃的中压汽轮机，导致余热锅炉过热器的烟气进口温度与过热蒸汽出口温度之间的热端温差超过90℃<sup>[12]</sup>，不仅降低了主蒸汽的能量品质，而且浪费了燃机排气余热中相当一部分高品质的可用能。

由于目前国产中小型联合循环汽轮机没有实现产品标准化和系列化，为了满足既定的冷热负荷，分布式能源项目的蒸汽系统参数的选择以及抽汽流量的计算不够恰当和理想，这会直接导致燃机容量选择过大和整个分布式能源项目初始投资显著增加。燃机容量选择偏大会导致在冷热负荷发生变化时燃机被迫降负荷运行，使燃机和联合循环效率明显降低<sup>[13,14]</sup>；燃机容量选择过大甚至会使厂内部分燃机经常停机<sup>[15]</sup>，增加了燃机、余热锅炉和汽机的维护频率和维护成本，影响机组适用寿命，同时设备年利用小时数大大降低，导致项目运行收益减少和投资回收期延长。

综上所述，冷热电多联供蒸汽系统对整个分布式能源系统的功率、效率和经济性的影响不可小觑。以航改型燃机为核心的分布式能源系统的实现和优化关键是围绕着航改型燃机运行的固有特性而进行的，其蒸汽系统的热力性能与燃气轮机排气温度和流量变化规律密切相关。

## 2 计算方法与方案比较

本文采用APPS和GTPro两个商业软件，以LM2500+G4为例，研究中国分布式能源的蒸汽系统参数选取，定量分析蒸汽系统参数选取对燃气-蒸汽联合循环机组效率和功率的影响。

APPS是GE公司专门为航改型燃机开发的性能计算工具，根据输入的项目海拔、气温等环境条件和采用的燃料成分、温度等条件，可以计算出GE航改型燃机的效率、功率、排气温度和流量，以及污染物排放控制指标等。GTPro是国际通行的燃机电厂全厂性能分析商业化软件，可以连接APPS计算结果，选择软件内置数据库中各种类型的余热锅炉模型、汽轮机模型、冷却系统模型等，利用软件成熟的流程快速设计合理的联合循环电站流程方案，自动计算出能量平衡和质量平衡、系统性能以及各部件尺寸和参数等，为优化配置及设计参数提供有效支持。

LM2500系列航改型燃机由装配美国C5大型运输机的CF6航空发动机发展而来，截至2005年2月已有超过两千台广泛应用于陆地发电和舰船等工业用途，总计运行经验3.29亿小时。得益于航空发动机研发基金和航空

新技术应用，该型航改型燃机技术水平和容量不断提升，ISO工况简单循环最大发电功率及效率达到34.3MW和41.3%<sup>[16]</sup>。LM2500型航改型燃机采用燃气-蒸汽联合循环可进一步提高发电功率和效率，并对外提供各种品质的蒸汽和热水，非常适合分布式能源和冷热电多联供。

LM2500系列航改型燃机见图2<sup>[16]</sup>，可采用干式低排放燃烧技术(DLE)，不需向燃烧器中注入水或蒸汽，直接将烟气中污染物排放控制在25ppm以下。

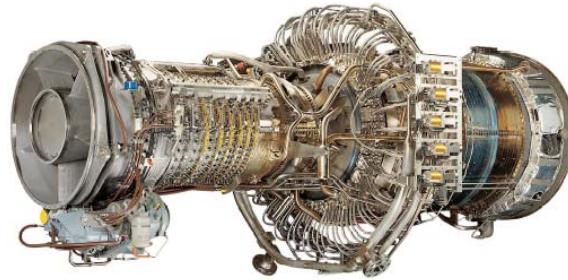


图2 LM2500系列航改型燃机<sup>[16]</sup>

使用APPS计算不同环境温度下LM2500+G4 DLE燃机的性能(功率、效率)、排气温度和流量，变化曲线见图3和图4。

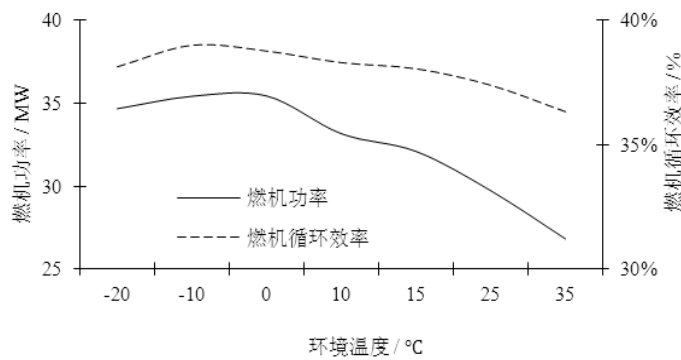


图3 环境温度与LM2500+G4性能

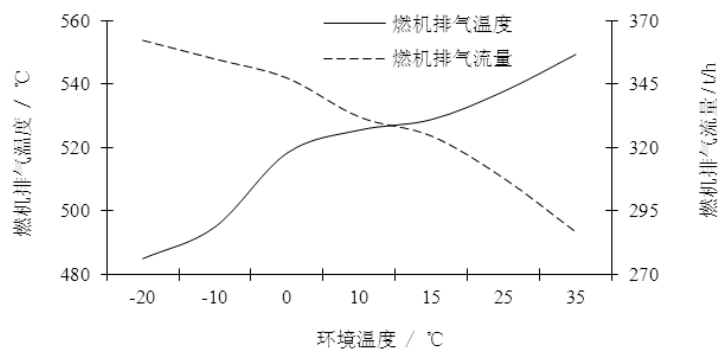


图4 环境温度与LM2500+G4排气参数

计算条件：环境温度15℃，相对湿度60%，0.7MPa(a)、210℃、117/t/h蒸汽需求和热水供回水温度105℃/70℃。根据该工况下LM2500+G4的排气参数，配备双压余热锅炉和抽凝汽轮机，冷却系统采用机力冷却塔；余热锅炉及其整体式除氧器承担锅炉给水加热和除氧用蒸汽，不需从汽机抽汽提供，并在余热锅炉尾部布置热水锅炉，热水可用于供热和吸收式制冷；低压蒸汽压力、温度达到外送蒸汽条件，与汽机抽汽一起满足外送蒸汽负荷；主蒸汽参数采用以下三种方案选取，余热锅炉节点温差和接近点温差采用相同的典型值，分别进行性能分析，计算结果见表1。方案1参考燃机排气温度相近的某小容量重型燃机项目，联合循环汽轮机进汽参数为3.43MPa、435℃的中压汽轮机，方案2选用汽轮机进汽参数为6.7MPa、465℃的国产次高压联合循环

汽轮机<sup>[11]</sup>。方案3按照燃气-蒸汽联合循环蒸汽参数选用方法<sup>[8]</sup>选择5.5MPa、505℃作为汽轮机进汽参数，根据燃气排气参数确定主蒸汽参数，将主蒸汽热端温差控制在22℃。

表 1. LM2500+G4 联合循环机组的性能计算结果

	单位	方案1	方案2	方案3
燃机排气温度	℃	529	529	529
燃机排气流量	t/h	324.7	324.7	324.7
汽机进汽压力	MPa (a)	3.43	6.7	5.5
汽机进汽温度	℃	435	465	505
汽机进汽流量	t/h	43.6	40.6	39.5
低压蒸汽温度	℃	258	258	258
低压蒸汽压力	MPa (a)	0.8	0.8	0.8
低压蒸汽流量	t/h	5	8.2	7.7
外送蒸汽温度	℃	210	210	210
外送蒸汽压力	MPa (a)	0.7	0.7	0.7
外送蒸汽流量	t/h	39	39	39
HRSG尾部热水	t/h	70	70	70
燃机发电功率	MW	32.1	32.1	32.1
汽机发电功率	MW	5.49	5.72	5.91
机组净发电功率	MW	36.9	37.1	37.3
机组净发电效率	%	43.8	43.99	44.24
机组总效率	%	81.35	81.54	81.79

根据性能计算结果，每种方案各采用三套LM2500+G4双压联合循环机组均可满足117t/h蒸汽需求和130MW电力负荷，并每小时提供210吨105℃的热水，机组净发电效率和总效率分别超过43%和81%。

和方案1相比较，方案2的抽凝汽机发电功率提高4.2%，机组净发电效率和总效率上升了0.19%。机组净发电功率增加了0.42%，方案2汽机进汽压力提高近一倍，导致给水泵等厂用电增加较多，对机组净发电功率提高有一定影响。

方案3比方案1的抽凝汽机发电功率提高7.6%，机组净发电效率和总效率上升了0.44%，机组净发电功率增加了1%，按年运行6000小时计算，每台机组在不增加燃气消耗的条件下每年净增发电224.4万度，每年净增约130万元直接经济效益，相当于该汽轮机本体价格的25-30%。三种方案使用汽轮机主蒸汽均在10MPa, 510℃的正常进汽参数范围内，对应相同的本体结构材料适用范围。经过经济性分析，方案3比方案1提前2.5个月收回项目全部投资。所以上述方案中方案3在性能参数、经济效益等方面最佳，目前国产中小型联合循环汽轮机尚没有方案3的汽机进汽参数，需要在航改型燃机配套设备标准化、系列化的系统工程中具体实现。

### 结论：

经过系统分析和方案比较，方案3发挥汽轮机等设备配套潜力，优化选择主蒸汽参数，能够使LM2500+G4双压联合循环机组在供汽39t/h的工况下净发电效率提高至44%以上，技术经济指标提升明显。以航改型燃机为核心的分布式能源系统应当遵循燃气-蒸汽联合循环技术特点设计优化蒸汽系统，确定分布式能源系统承担冷热负荷的能力和装机容量。分布式能源系统中余热锅炉、汽轮机、吸收式制冷系统等重要设备需按照各

主要航改型燃机运行工况与排气参数的固有特性配套优化，这些设备的标准化和系列化能够有效提升中国新兴产业集聚区的能源综合利用效率，促进节能减排等战略性目标的实现，推动经济发展方式向集约型、内涵型、效益型转变。

- 
- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中华人民共和国 2010 年国民经济和社会发展统计公报[R/OL]. 2011.02.28.
- [2] 能源局局长：我国能源消费总量已占世界总量 20%. <http://www.ccchina.gov.cn/cn/NewsInfo.asp?NewsId=28830>. 2011-09-15.
- [3] Thornton A, Monroy RC. Distributed power generation in the United States[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews (2011), doi:10.1016/j.rser.2011.07.070.
- [4] Carreras-Sospedraa M, Vutukurub S, Brouwer J, et al. Central power generation versus distributed generation – An air quality assessment in the South Coast Air Basin of California[J]. Atmospheric Environment, 2010, 44: 3215-3223.
- [5] 毕庆生, 宋之平, 杨勇平. 分布式能量系统在我国未来 20 年能源发展战略中的机遇、方式和地位[J]. 可再生能源, 2005 (3):1-5.
- [6] Wee J. Molten carbonate fuel cell and gas turbine hybrid systems as distributed energy resources[J]. Applied Energy, 2011, 88: 4252-4263.
- [7] 高鲁锋, 田贯三. 小型热电联产蒸汽供热系统的能耗分析[J]. 可再生能源, 2009, 27(4):88-92.
- [8] Chase DL., Kehoe PT. GE Combined Cycle Product Line and Performance, GER-3574G[R]. Schenectady, NY: GE Power Systems, 2000.
- [9] GE Non-reheat Steam Turbines for small to mid-size gas turbines.  
[http://site.ge-energy.com/prod\\_serv/products/steam\\_turbines/en/non\\_reheat.htm](http://site.ge-energy.com/prod_serv/products/steam_turbines/en/non_reheat.htm). 2011-09-15.
- [10] 洪向道. 中小型热电联产工程设计手册[M]. 北京：中国电力出版社，2006:152-161.
- [11] 张建业. 电力设备选型手册[M]. 北京：中国水利水电出版社，2007:27.
- [12] 王克勤, 金晓刚. S106B燃气—蒸汽联合循环机组热力性能试验分析[J]. 浙江电力, 2002年第5期:5-8.
- [13] Haglind F, Elmegaard B. Methodologies for predicting the part-load performance of aero-derivative gas turbines[J]. Energy, 2009, 34:1484-1492.
- [14] Haglind F. Variable geometry gas turbines for improving the part-load performance of marine combined cycles– Combined cycle performance [J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31:467 -476.
- [15] Rovira A, Sánchez C, Muñoz M, et.al. Thermo-economic optimisation of heat recovery steam generators of combined cycle gas turbine power plants considering off-design operation [J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52:1840-1849.
- [16] Badeer GH. GE's LM2500+G4 Aero-derivative Gas Turbine for Marine and Industrial Applications, GER-4250 [R]. Huston: GE Industrial AeroDerivative Gas Turbines, , 2005.