

分布式能源用 SGT-800 工业型燃气轮机与 LM6000 航改型燃气轮机对比分析研究

谢大幸¹, 郝建刚¹, 刘志敏², 朱亚迪¹

(1. 华电电力科学研究院有限公司, 杭州 310030;
2. 上海华电闵行能源有限公司, 上海 201108)

摘要:为推进天然气分布式能源项目开发,开展 50 MW 等级分布式能源用燃气轮机主机选型研究,针对同等级发电功率的两个燃气轮机流派,选取 SIEMENS 公司典型工业型燃气轮机 SGT-800 和 GE 公司典型航改型燃气轮机 LM6000 为研究对象,综合分析两种机型的结构特点、热力性能、污染物排放特性、燃料适应性、启动及运行特性、供热(冷)能力、检修维护等方面优缺点,为 50 MW 等级分布式能源用燃气轮机主机选型提供参考。

关键词:工业型燃气轮机;航改型燃气轮机;50 MW 等级;分布式能源;对比分析

中图分类号:TK479

文献标志码:A

文章编号:1009-2889(2021)02-0009-06

目前 30 MW 和 50 MW 等级燃气轮机在国内现有的分布式能源装机结构中较常见,应用最多的燃气轮机主要有工业型燃气轮机和航改型燃气轮机两个流派,具有各自的特点^[1]。针对 30 MW 等级分布式能源用燃气轮机,选用 SGT-700 工业型燃气轮机与 LM2500+G4 航改型燃气轮机开展了对比分析^[2],本次针对 50 MW 等级分布式能源用燃气轮机,分别选取 SIEMENS 公司的 SGT-800 工业型燃气轮机和 GE 公司 LM6000 航改型燃气轮机为研究对象,综合分析两种机型的结构特点、热力性能、污染物排放特性、燃料适应性、启动及运行特性、供热(冷)能力、检修维护等方面优缺点,为 50 MW 等级分布式能源用燃气轮机主机选型提供参考。

1 发展历程

SGT-800 是西门子工业透平机械公司制造的功率最大的工业型燃气轮机。该系列燃气轮机首台型号为 GTX-100,于 1997 年发布,1998 年被瑞典的赫尔辛堡项目订购,1999 年投入商业运行并对燃气轮机核心机、辅助系统、控制设备以及机组性能、

排放指标进行了全面测试。2003 年经设计优化后功率提升至 45 MW^[3]。2007 年进一步升级,增加流量,优化热部件,功率提升至 47.5 MW,燃气轮机热效率提升至 37.7%,成功完成了平台 A 的演化^[4]。2011 年 SIEMENS 公司基于既往成功经验和已获得认可的设计方案,引入平台 B,重新设计了燃气轮机三大部件:改进 15 级压气机叶片叶型以提升压气机的空气动力性能,改进燃烧室压降和冷却系统,重新设计 1 级透平和 3 级透平,功率提升至 50.5 MW^[5]。2014 年机组功率进一步提升至 54 MW。2017 年基于系统设计及制造工艺上的持续改进,发布 57 MW 版本。

1965 年,GE 公司开始为美军开发 TF39 新型发动机,后基于此机型开发了航空用的 CF6-80C2 和陆用/船用的 CF6-6。CF6-80C2 型商用航空发动机作为波音 747-400 的主发动机,于 1985 年首次进入航空服务。基于 CF6-80C2 平台研制的 LM6000 航改型燃气轮机,保留核心机、移除前端风扇、增加进气导叶、改型支承框架、增加输出轴、改型轴承结构、改进燃料系统,功率输出达 40 MW,于

收稿日期:2020-12-03 改稿日期:2021-01-13

作者简介:谢大幸(1984—),男,浙江宁海人,硕士,高级工程师,从事天然气发电技术研究工作,E-mail: daxing-xie@chder.com。

1992 年首次投入商业运营,是世界首例热效率超过 40% 的燃气轮机。GE 公司从 1995 年开始着手 LM6000 的升级工作,于 1997 年研制成功 LM6000 PC 和 LM6000 PD 两个型号,功率输出超过 43 MW,燃气轮机热效率达 41%。LM6000 PC 使用单环形燃烧器,LM6000 PD 使用双燃料干式低排放燃烧器。1998 年,LM6000 SPRINT 系统开始商业运行,以提升燃气轮机出力。2007 年,GE 公司发布 LM6000 PF,输出功率 47 MW,燃气轮机热效率达 41%。2010 年 LM6000 PG 完成了可靠性测试,该机型安装单环形燃烧室,功率 59 MW,燃气轮机热效率为 39.8%。2011 年 GE 发布专门针对缺水地区的 LM6000 PH,燃气轮机功率 50 MW。2014 年,中国华电集团公司与 GE 公司合作推出了热效率高达 42% 的 LM6000 PF,联合循环效率 54.9%。2015 年 POWER-GEN 亚洲会议上,GE 公司发布 LM6000 PF 的升级版 LM6000 PF+,燃气轮机热效率 41.4%,联合循环发电效率达 55.9%。

2 结构特点

SGT-800 燃气轮机结构简单、灵活、高效、可靠,整体模块化设计便于维护。压气机为 15 级轴流压气机,前 3 级为可调导叶,透平为 3 级透平。压气机转子和三级螺栓连接的透平为单轴结构,由两个可倾瓦式滑动轴承支撑,配备 3 台 70% 交直流润滑油泵,起动电机变频起动,甩负荷能力出色,性能衰减低。燃烧系统有 30 个双燃料第三代干式低排放燃烧器安装在环形燃烧室中,燃料适应性强,运行灵活,无需注水或蒸汽即可有效控制排放,采用脉动隔

离技术降低燃烧室燃烧压力脉动,并配备有压力脉动监测装置^[6-7]。

国内常用的 LM6000 PF 为双轴燃气轮机,由一个 5 级低压压气机、一个 14 级高压压气机、一个 2 级高压透平、一个 5 级低压透平组成。低压压气机入口配置可调导叶,高压压气机前 5 级静叶也可调,保证燃气轮机在部分负荷下的高效并防止压气机发生喘振。LM6000 PF 的两根轴(高速轴和低速轴)同心套轴布置,高速轴由高压压气机及驱动它的高压透平组成,低速轴由低压压气机及驱动它的低压透平组成。发电机由低速轴驱动,两者通过减速齿轮和联轴器连接。LM6000 PF 燃气轮机采用耐高温合金材料制作的滚动轴承,用于支撑转子和平衡轴向推力,轴承需要特殊的合成油冷却和润滑。LM6000 PF 燃用天然气,采用干式低排放燃烧技术,配置 75 个预混燃烧的喷嘴,在全功率范围内减少 NO_x 排放^[8]。

LM6000 燃气轮机可根据需求配备 SPRINT® 系统,采用中间喷水冷却设计,在压缩过程中冷却空气,增加质量流量,提升燃气轮机出力^[9]。此外,还可以通过进气冷却功能,大幅提升在较高环境温度下的性能。

SGT-800 和 LM6000 两个机型的结构特点对比见表 1。从结构上看,SGT-800 工业型燃气轮机体积和质量较大,标准型尺寸为 20.8 m×7.3 m×6.6 m,质量 285 t,但其结构相对简单;LM6000 PF 航改型燃气轮机体积小,质量轻,尺寸约 19.67 m×4.11 m×4.40 m,质量 206 t,但其轴系、油系统、燃烧系统、辅助系统等设计较复杂,较难维护。

表 1 结构特点对比

机型	排气方向	功率输出方式	质量/t	轴系			压气机			
				转子	轴承数量/个	润滑油	形式	级数	可调导叶级数	压比
SGT-800	轴向排气	冷端	285	单转子	2	矿物油和发电机共用	轴流式	15	3	21.4
LM6000 PF	轴向排气	冷端	206	双转子	8	合成油和发电机共用	轴流式	5+14	1+5	28.8

机型	燃烧室			透平		
	燃烧室结构	燃烧器类型	燃烧器数量	透平级数	透平叶片材料	涂层
SGT-800	环形燃烧室	干式低排放燃烧器	30	3 级	镍基合金	热障涂层
LM6000 PF	环形燃烧室	干式低排放燃烧器	75	2 级压气机透平,5 级动力透平	多为高温合金及特殊合金	高温防护涂层

3 联合循环配置情况

3.1 典型布置方式

SGT-800 和 LM6000 PF 燃气轮机配套的燃气-蒸汽联合循环冷热电三联供机组多数采用“一拖一”多轴布置方式,也有“二拖一”多轴布置方式。

SGT-800 燃气轮机是典型的“一拖一”布置方式:核心燃气轮机部件为单点起吊式成套配置方案,占地小,燃气轮机和配套发电机室外布置,上部进气、轴向排气;汽轮机和配套发电机室内布置,布置在汽机房内;余热锅炉为双压、非再热锅炉,室外布置。江苏某厂两套“一拖一”分轴联合循环机组主厂房长约 140 m,宽约 100 m。

LM6000 PF 燃气轮机是典型“一拖一”多轴布

置方式:LM6000 PF 航改型燃气轮机和发电机室外布置,燃气轮机上部进气、轴向排气;汽轮机和发电机室内布置;余热锅炉为双压、非再热锅炉,室外布置。广东某厂三套“一拖一”分轴联合循环机组主厂房长约 100 m,宽约 80 m。

LM6000 PF 航改型燃气轮机因其质量轻、结构紧凑的特点,在占地面积上有一定优势。

3.2 联合循环性能

以目前 SIEMENS 公司主推的 54 MW 级 SGT-800 型“一拖一”燃气-蒸汽联合循环机组和 GE 公司主推的 47 MW 级 LM6000 PF 型“一拖一”燃气-蒸汽联合循环机组作为对比对象,假设环境参数和天然气成分相同,建模分析两者配置的联合循环机组性能,见表 2。

表 2 “一拖一”联合循环参数对比

机型	设计条件				燃气轮机性能				汽轮机参数	
	环境温度/ ℃	大气压/ MPa	相对湿度/ %	燃料温度/ ℃	燃气轮机 功率/kW	燃气轮机 效率/%	排烟流量/ (t·h ⁻¹)	排烟温度/ ℃	汽轮机 功率/kW	背压/ Pa
SGT-800	16	0.101 3	60	30	54 536	38.88	488.6	571.2	23 464	5.9
LM6000 PF	16	0.101 3	60	30	47 422	41.04	476.0	457.8	14 594	5.9

机型	汽轮机参数				联合循环参数				
	高压蒸汽 压力/MPa	高压蒸汽 温度/℃	高压蒸汽 流量/(t·h ⁻¹)	低压蒸汽 压力/MPa	低压蒸汽 温度/℃	低压蒸汽 流量/(t·h ⁻¹)	联合循环 功率/kW	机组热耗率/ (kJ·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	机组热 效率/%
SGT-800	8	540	65.88	0.6	258.3	12.97	78 001	6 474	55.61
LM6000 PF	4	425	45.67	0.6	258.3	12.73	62 016	6 707	53.67

由表 2 可知,LM6000 PF 燃气轮机热效率比 SGT-800 燃气轮机高,但 SGT-800 燃气轮机排烟温度更高,其联合循环底循环能量利用效率更高,出力更大,在供热量及供热参数上具有更大的选择余地,更适合于分布式供能系统。

4 运行特性分析

4.1 低负荷及高温环境下燃气轮机性能

SGT-800 燃气轮机和 LM6000 PF 燃气轮机部分负荷下的性能曲线见图 1,两者在 80%~100% 负荷均能维持良好的性能,当负荷低于 80% 后,机组性能快速下降。

SGT-800 和 LM6000 PF 燃气轮机出力随温度变化曲线见图 2。当环境温度由 15℃ 升高到 35℃ 时,54 MW 等级 SGT-800 燃气轮机出力下降约 6.5 MW。LM6000 PF 燃气轮机可通过 SPRINT 湿压缩技术提高出力,在高温环境下相比不带 SPRINT 系统的机组可提高约 20% 的出力。当环境温度由 15℃

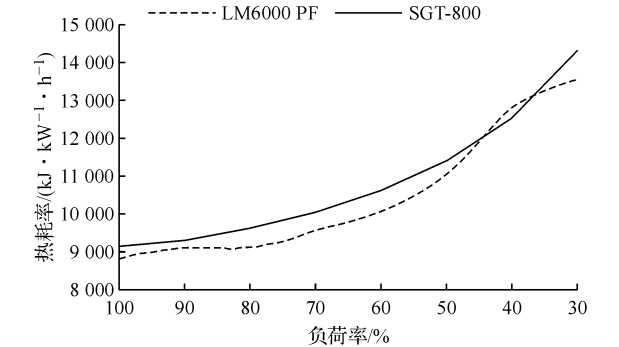


图 1 两种燃气轮机部分负荷下的性能曲线

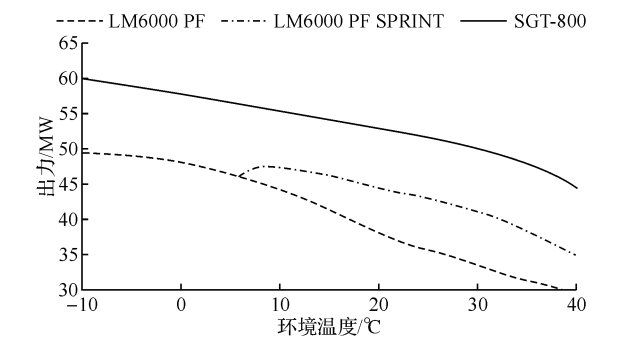


图 2 SGT-800 和 LM6000 燃气轮机出力随温度变化曲线

升高到 35 ℃ 时,LM6000 PF SPRINT(带 SPRINT 湿压缩技术)燃气轮机出力下降约 8 MW。

总体而言,SGT-800 和 LM6000 PF 燃气轮机在部分负荷下的性能相差不大。LM6000 PF 燃气轮机对环境温度变化更敏感,在高温环境下 LM6000 PF 燃气轮机出力衰减比 SGT-800 燃气轮机稍大,但 LM6000 PF 燃气轮机可以增加 SPRINT 系统提高高

温环境下的性能。

4.2 污染物排放特性

SGT-800 和 LM6000 PF 燃气轮机均采用干式低排放燃烧技术,燃用天然气时两者满足氮氧化物(NO_x)排放的负荷均为 50%~100% 负荷。两种机型的污染物排放特性见表 3,SGT-800 燃气轮机在控制一氧化碳(CO)排放方面具有优势。

表 3 两种类型燃气轮机污染物排放特性对比

机型	$\omega(\text{NO}_x, 15\% \text{ O}_2, \text{干})/(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\omega(\text{CO}, 15\% \text{ O}_2, \text{干})/(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$
SGT-800	≤ 30	≤ 10
LM6000 PF	≤ 30 (LM6000 PF)	≤ 50 (LM6000 PF)
	≤ 30 (LM6000 PF+)	≤ 50 (LM6000 PF+)

4.3 燃料适应性

SGT-800 和 LM6000 燃气轮机燃料适应性对比见表 4,两种机型均支持双燃料(气体/液体燃料)燃烧。SGT-800 燃气轮机燃用液体燃料时需安装液体燃料模块;气体燃料适应性方面 SGT-800 燃气轮机具有明显优势,甲烷、氢气等成分摩尔百分比适应范围、气体燃料华白指数要求均更宽泛。

LM6000 燃气轮机对燃料组分更敏感,气体燃料供气压力要求高。当机组处于天然气管网下游、管道天然气压力较低时,SGT-800 燃气轮机无需加装天然气增压设备即可满足进气压力要求^[10]。当天然气管道压力较低时,LM6000 燃气轮机一般需加装天然气增压设备,从而增加了系统复杂程度和后期运行维护成本。

表 4 两种类型燃气轮机燃料适应性对比

机型	气体燃料成分摩尔百分比要求		气体燃料压力要求/MPa	增压需求	华白指数/ ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$)
	甲烷	乙烷			
SGT-800	$\leq 100\%$	$\leq 100\%$ (部分条件要求 $> 30\%$)	2.7~3.0	管道天然气基本满足需求,无需增压	22~75
LM6000	50%~100%	0~24%	4.654 ± 0.138	一般需设置增压系统	40~60

4.4 机组启动特性及灵活性

SGT-800 燃气轮机正常模式启动到满负荷需 26 min,其配备 EconoFlexTM 技术可以实现燃气轮机 10 min 快速启动,以适应快速启停及快速加载负荷。LM6000 PF 燃气轮机能在基本负荷和频繁启停时均保持高效稳定运行,可在 10 min 实现标准启

动,5 min 内完成快速启动,具有较高的运行灵活性。总体而言,LM6000 PF 燃气轮机在启动速度上要优于 SGT-800 燃气轮机。

4.5 供热(冷)性能

按照供热蒸汽参数 1.3 MPa、220 ℃ 进行建模分析,两种机型抽凝工况经济指标核算结果见表 5。

表 5 不同联合循环配置方案参数对比

机型	蒸汽压力/MPa	蒸汽温度/℃	供热抽汽量/($\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$)	热电比/%	热电联产效率/%
SGT-800	1.3	220	61.4	75.40	82.24
LM6000 PF	1.3	220	38.2	70.77	73.04

综合表 2 和表 5 可知,SGT-800 联合循环机组具有更高的供热能力,受燃气轮机排烟温度的限制。LM6000 PF 航改型燃气轮机排烟温度低,配套的联合循环底循环能量利用率低,容量配置小,供热能力较低^[11]。两种燃气-蒸汽联合循环机组供热在供热参数相同的情况下,SGT-800 燃气-蒸汽联合循环机组供热量更高,热电比更高,发电气耗率更低,热电联产效率更高。

5 检修维护情况

两种燃气轮机目前主要执行的长协服务模式对比如表 6 所示。SGT-800 燃气轮机基于工业型的设计,具有全生命周期性能衰退少、除热端部件外其他部件均可实现现场检修、大修间隔长等特点,且无需燃烧调整,维护成本较航改型燃气轮机低。SIEMENS 公司在宜兴设立了燃气轮机热部件生产

基地、现场服务基地、战略备件库、检修工具库和培训中心等,为中小型工业燃气轮机(SGT-100 到 SGT-800)提供境内服务和备件支持,可以对燃气轮机燃烧系统的核心部件——透平叶片进行检修。

GE 公司针对 LM6000 燃气轮机,通过无损检测、振动分析和油样分析三种监控方法给出基于状态的维护策略,制定详细的定期“体检计划”。华电通用是 GE 认证的电站航改型燃气轮机成套的技术转让方,公司配备有专业的本地化服务团队,向中国

客户提供航改型燃气轮机电厂的现场安装调试、一级维护、二级维护。GE 公司未下放三级维护、四级维护的权限,机组大修需返厂开展,所更替的检修工厂也较多,折算的度电维护费用相对较高。该型燃气轮机多数零部件为高级特殊合金,与飞机发动机通用,价格昂贵,加上备机协调、服务响应不够及时,对项目公司的生产经营产生较大影响。若燃气轮机发生事故,返回美国检修周期较长,备机费用较高。

表 6 两种机型长协服务内容对比

项目	SGT-800	LM6000
大修间隔周期	60 000 EOH(等效运行小时数)	50 000 EOH
备件	在本地及自贸区提供热部件及常规备件支持	计划检修执行前允许部分交货,适时提供更换件
小修	热通道内窥镜检查,每隔 10 000 EOH,4 次	4 000 EOH 定检,孔探检查热通道,6 次;8 000 EOH 定检,孔探、辅机目视检查及仪表校验,5 次;12 500 EOH 更换 VSV(压气机多级可调静叶)衬套,3 次
中修	热通道检修,每隔 30 000 EOH,1 次	25 000 EOH,更换高压透平转子及一、二级喷嘴组件,1 次
大修	机组大修,无损检测、更换热通道部件等,每隔 60 000 EOH,1 次	一般为 50 000 EOH,返厂彻底检修,1 次
检修场地	燃气轮机检查、开缸、部件更换等均在现场进行,不需返厂	热部件在现场更换,由 GE 授权的修理厂执行;大修需返厂进行
度电成本	0.018 5~0.020 元/(kW·h)	0.021 元/(kW·h)

6 结论

作为 50 MW 等级分布式能源用燃气轮机,LM6000 和 SGT-800 各有优缺点。从结构特点及检修维护便利性来看,LM6000 航改型燃气轮机具有质量轻,体系小,启动快速灵活等优点,对于调峰具有较大优势。但其系统结构、轴系、燃烧系统等设计复杂,燃料进气压力高,热性能衰减大,叶片应力大,对环境变化及污垢较敏感,大修需要返厂进行,对维护要求较高。SGT-800 工业型燃气轮机质量较大,占地面积大,但其结构相对简单,零部件的更换和大中修相对简单,所需专用工具少,可以在现场实现,维护费用相对较低。

从机组性能方面来看,LM6000 航改型燃气轮机热效率高,但排烟温度低,联合循环底循环能量利用潜力小;SGT-800 工业型燃气轮机热效率低,但排烟温度高,联合循环底循环能量利用潜力大,因此整体联合循环效率更高。得益于 SGT-800 燃气轮机较高的排气能量利用率,其在供热(冷)性能上优于 LM6000,因此 SGT-800 燃气轮机更适用于蒸汽需求量大的用户。

参考文献:

[1] 秦渊,陈昕,王华超. 分布式能源站燃气轮机的选择[J]. 燃气轮机技术,2013,26(2):34-38.

[2] 刘志敏,谢大幸,石永锋. 分布式能源用 SGT-700 工业型燃气轮机与 LM2500+G4 航改型燃气轮机对比分析[J]. 燃气轮机技术,2020,33(03):8-13.

[3] OL'KHOVSKII G G, TRETYAKOVA O Y, TUZ N E, et al. Thermal tests of the 45 MW SGT-800 gas-turbine equipment[J]. Power Technology and Engineering, 2011, 45(4):285-291.

[4] SHUKIN S, ANNERFELDT M, BJORKMAN M. Siemens SGT-800 industrial gas turbine enhanced to 47 MW design modifications and operation experience [C]//ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea, and Air. [S. l.: s. n.],2008.

[5] 王列科, LÖRSTAD D, AXELSSON S, 等. 50 MW 级 SGT-800 型西门子燃气轮机的性能验证[J]. 燃气轮机技术,2014,27(4):1-6.

[6] SIEMENS. Siemens gas turbines overview[EB/OL]. [2020-11-25]. <https://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-generation/gas-turbines/downloads/gas-turbines-siemens.pdf>.

[7] 魏佳明,周靈敏,余沛垌,等. SGT800 工业燃气轮机技术及市场分析[J]. 航空动力,2019(05):29-32.

[8] GE 中国发电事业部. GE 发电集团航改型燃气轮机产品及服务解决方案[EB/OL]. [2020-11-25]. <http://pgchina.ge.com.cn/manuals>.

[9] 董 斌,林 枫,马正军,等. 三轴燃气轮机喷水冷循环研究[J].

热能动力工程, 2013, 28(3): 234-240, 321.

Combustion, 2016, 96(4): 987-1003.

[10] MOELL D, LÖRSTAD D, BAI X S. Numerical investigation of methane/hydrogen/air partially premixed flames in the SGT-800 burner fitted to a combustion rig [J]. Flow, Turbulence and

[11] 杨承, 王平, 刘换新, 等. 分布式燃气-蒸汽联合循环供能系统热经济性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(18): 5424-5432, 5590.

Comparative Analysis of SGT-800 Industrial Gas Turbine and LM6000 Aeroderivative Gas Turbine Used in Distributed Energy

Xie Daxing¹, Hao Jiangang¹, Liu Zhimin², Zhu Yadi¹

(1. Huadian Electric Power Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 310030, China;

2. Shanghai Huadian Minhang Energy Co., Ltd., Shanghai 201108, China)

Abstract: In order to promote the development of natural gas distributed energy projects, researched on the selection of 50 MW class gas turbine for distributed energy, and selected the typical industrial gas turbine SGT-800 from SIEMENS and the LM6000 gas turbine from GE as the research objects aiming at two gas turbine schools of the same level of power generation, comprehensively analysed the advantages and disadvantages of their structural characteristics, thermal performance, pollutant emission characteristics, fuel adaptability, start-up and operation characteristics, ability to supply hot steam (cold), maintenance and other aspects, provided the reference for the selection of 50 MW class gas turbine that used in distributed energy.

Key words: industrial gas turbine; aeroderivative gas turbine; 50 MW class; distributed energy; comparative analysis

(上接第 8 页)

Numerical Simulation on the Off-design Fan Blade Deformation and Aerodynamic Impact

Yang Xiaohe, Cao Bo, Liu Shiwen

(AECC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 200241, China)

Abstract: When the actual operating state of the engine deviates from the design state, due to the difference of centrifugal force and aerodynamic force, the fan's true hot blade profile will deviate from the designed hot blade profile. Accordingly, based on the fan blades of a civil turbofan engine with high bypass ratio, this article analyzes the hot blade profile differences between the corrected operating conditions and the physical operating conditions, as well as the deviations of the hot blade profile at partial rotating speeds from the designed rotating speed. In addition, the numerical simulation analysis of the characteristic changes caused by the deviation is carried out to quantify the influence of the deviation on the performance of the fan blade, and then provide basis for the correction of the numerical simulation result of the fan blades.

Key words: civil-aircraft; engine; high bypass ratio; fan blade; hot-to-cold convert