

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2019.08.002

DLN1.0 + 与 LEC - NextGen 燃烧系统对比

Comparison of DLN1.0 + and LEC - NextGen combustion system

丁阳, 刘志敏, 徐婷婷
DING Yang, LIU Zhimin, XU Tingting

(华电电力科学研究院有限公司, 杭州 310030)
(Huadian Electric Power Research Institute Company Limited, Hangzhou 310030, China)

摘 要:对比了 GE 公司与 PSM 公司最新开发的应用于燃气轮机的 DLN1.0 + 与 LEC - NextGen 燃烧系统的设计特点,分析了 2 种燃烧系统在提高燃料预混均匀度、降低火焰温度、提高冷却效率、降低流动损失、减小接触面磨损等方面采取的设计方法。2 种燃烧系统 NO_x 排放质量浓度均不到 DLN1.0 燃烧系统的一半,检修间隔延长了 1~2 倍,LEC - NextGen 燃烧系统 CO 排放质量浓度可低于 1.25 mg/m³。
关键词:燃气轮机;燃烧系统;DLN1.0 + ;LEC - NextGen;检修间隔
中图分类号:X 511 **文献标志码:**A **文章编号:**1674 - 1951(2019)08 - 0006 - 05
Abstract:The design features of DLN1.0 + and LEC - NextGen combustion systems for gas turbines newly developed by GE and PSM are compared. The design methods of the two combustion systems in improving fuel premixing uniformity, reducing flame temperature, improving cooling efficiency, reducing flow loss and reducing contact surface wear were analyzed. NO_x mass concentration discharged by either combustor above is less than half of that discharged by DLN1.0 combustor, and the maintenance interval is doubled or tripled. The CO mass concentration discharged by LEC - NextGen combustor is lower than 1.25 mg/m³.
Keywords:gas turbine;combustion system;DLN1.0 + ;LEC - NextGen;maintenance interval

0 引言

20 世纪 70 年代,为满足美国环境保护机构提出的新源性能标准(NO_x 排放质量浓度低于 150 mg/m³),ABB 公司设计制造了 EV 燃烧系统。随着环保指标的日益严苛,20 世纪 80 年代后期,GE 公司研制了 DLN1.0 燃烧系统^[1-2],Alston 公司研制了可替换 DLN1.0 的 LEC - III 燃烧系统^[3],可用于 GE 公司的 B 级和 E 级燃气轮机,2 种燃烧系统均达到了 30 mg/m³ 的 NO_x 排放水平。为了适应更严格的排放标准,GE 公司与 PSM 公司分别推出了 DLN1.0 + 燃烧系统与 LEC - NextGen 燃烧系统,在原有的设计基础上进行了改进,增加了自动燃烧调整系统^[4],NO_x 排放质量浓度降至 20 mg/m³ 以下,检修时间间隔延长了 1~2 倍。本文对 2 种新型燃烧系统结构进行对比分析,为新一代超低排放燃烧系统的设计提供参考。

1 DLN1.0 燃烧系统

1.1 结构设计

DLN1.0 燃烧系统采用同心径向分级模式(如图 1 所示),系统由燃烧器外壳、火焰筒、过渡段、导流套筒、旋流器、一级燃料喷嘴及燃烧器端盖组合件、二级燃料喷嘴、点火机构、火焰探测器、联焰管等元件组成。

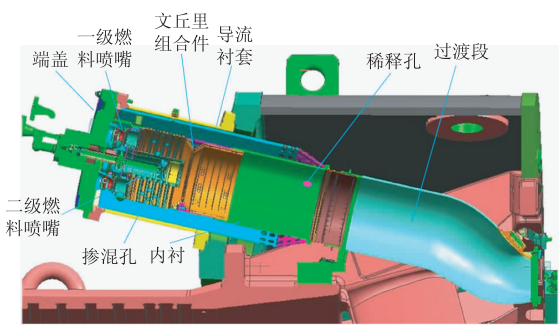


图 1 DLN1.0 燃烧系统

Fig.1 DLN1.0 combustion system

火焰筒是燃烧系统的核心部件,火焰筒壁面上设置一次空气射流孔、冷却孔和二次空气掺混孔。

文丘里组合件是燃烧系统中一级燃烧区和二级燃烧区的分界面,在预混状态下,文丘里组合件下游回流区有稳定火焰的作用^[5]。

一级燃烧区由 6 个彼此分隔的燃烧空间组成,每个燃烧空间都装设有各自的旋流器和一级燃料喷嘴(如图 2 所示)。二级燃烧区的燃料喷嘴组合件和旋流器装设在中心部位(如图 3 所示)。



图 2 一级燃料喷嘴
Fig.2 Primary fuel nozzles

1.2 控制方式

分配到每个燃烧器燃料喷嘴的燃料流量与燃烧温度基准(TTRF1)以及进口导叶(IGV)温控模式为函数关系。燃烧天然气时,依据机组负荷的不同,通过 MARK VI 的 Speedtronic TM 控制软件控制各个

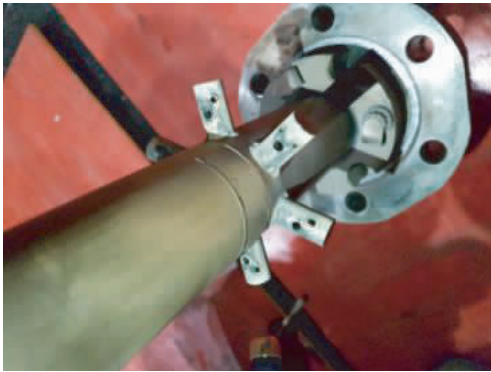


图 3 二级燃料喷嘴
Fig.3 Secondary fuel nozzles

燃料喷嘴的流量和火焰所在位置,使这种燃烧系统有一级燃烧模式、贫-贫燃烧模式、二级燃烧模式和预混燃烧模式等 4 种不同的运行模式(如图 4 所示)。

2 DLN1.0 + 燃烧系统

DLN1.0 + 燃烧系统是 GE 公司为了应对更严苛的排放标准和提高系统使用寿命而推出的 DLN1.0 改进型系统。在保证燃料输送系统不变的前提下,通过替换火焰筒、过渡段、支架、一级燃料喷嘴、二级燃料喷嘴、端盖、导流衬套、联焰管组件,增加参数修正控制系统(CPC)、燃烧器动态监测系统(CDM)。DLN1.0 燃烧系统可升级为 DLN1.0 + 燃

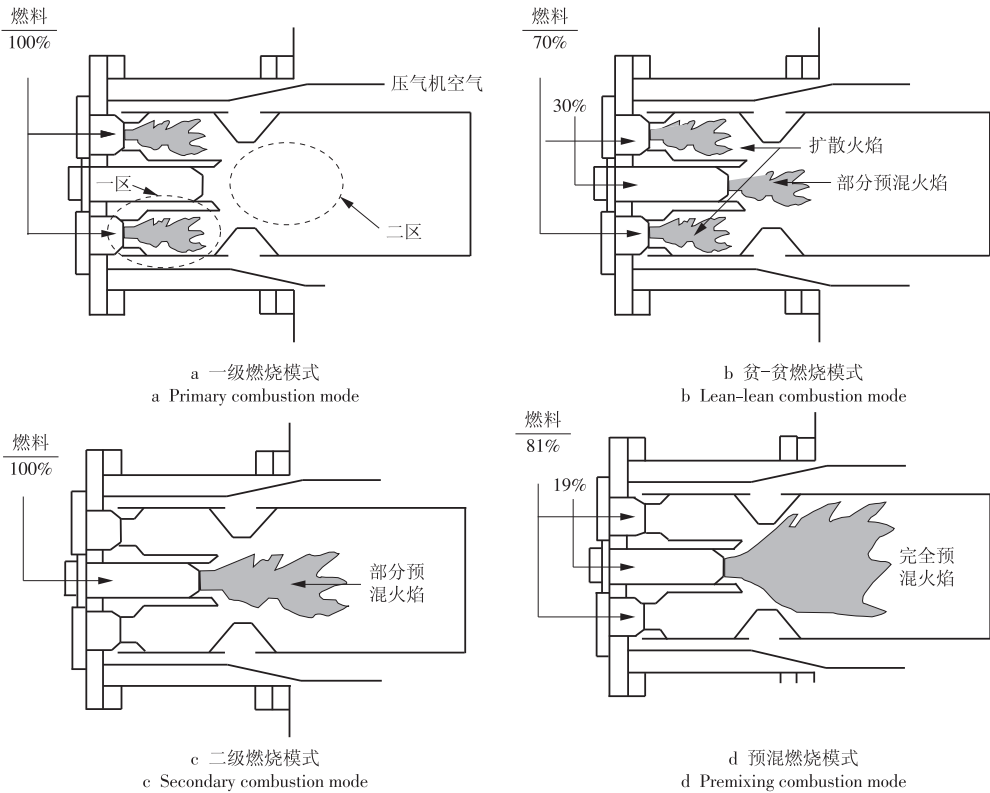


图 4 DLN1.0 燃烧系统的 4 种燃烧模式
Fig.4 Four combustion modes of DLN1.0 combustion system

烧系统。相比 DLN1.0 系统, DLN1.0 + 系统从预混、材料、冷却、涂层以及值班火焰比例调整几个方面改进了设计。

2.1 喷嘴的改进

DLN1.0 + 系统改变了一级喷嘴旋流器孔型(如图 5 所示),由长圆孔改为椭圆孔,并加大了一级喷嘴的直径,这种设计可减小旋流器孔内的流速,减小掺混损失;一级喷嘴头部由 DLN1.0 的螺纹链接改为螺纹-法兰连接,并加入了 L605 涂层,可延长喷嘴使用寿命。

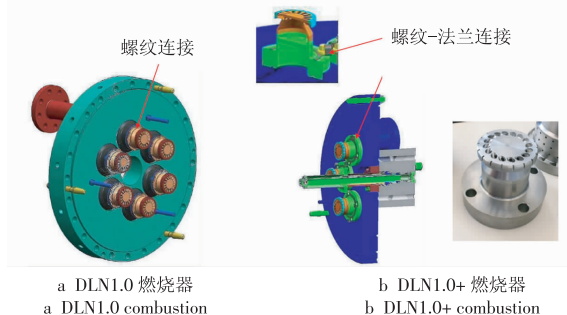


图 5 一级喷嘴结构对比

Fig. 5 Comparison of primary nozzle structure

DLN1.0 + 取消了二级喷嘴和吹扫空气的法兰连接段,二级喷嘴整体造型更简洁。为了维持火焰稳定, DLN1.0 二级喷嘴头部开设了 3 个直径约 1 mm 的小孔,流向二级喷嘴旋流器的一部分燃料被分配到这 3 个小孔喷出,在二级喷嘴头部形成值班火焰,由于温度较高,二级喷嘴头部经常出现烧蚀现象。针对这个问题,在 DLN1.0 + 头部增加了直径 1 mm 左右的环形冷却空气槽,切换喷嘴的一部分冷却空气被分流至环形冷却空气槽喷出,用以冷却二级喷嘴头部,极大地改善了高温烧蚀现象。除此之外, DLN1.0 + 还改进了二级喷嘴的密封,减小了燃气泄漏的概率。另外, DLN1.0 + 二级喷嘴旋流器和值班火焰虽也共用一路燃料管路,但在流向各自喷口的路径中设置有节流孔板,可以分别调节 2 个喷嘴的燃料流量,有利于控制 NO_x 生成。二级喷嘴结构对比如图 6 所示。

2.2 火焰筒及过渡段的改进

DLN1.0 + 改进了火焰筒定位块,由弹簧片式改为带涂层的固定式定位块,减小了高频振动下的金属疲劳发生概率。掺混孔由 2 排改为 3 排,增加了轴向孔间距并减小了孔径,降低了掺混流速,使掺混射流分布更均匀,减小了掺混损失。文丘里喷嘴喉部由近似直角改为弧形并增加了涂层,有利于减小流动损失,增强文丘里段的耐热水平。二级喷嘴旋流器由直叶片调整为弧形叶片,在出口角度不变的情况下,减小了进口角度,减小了流经旋流器的压力损失。火焰

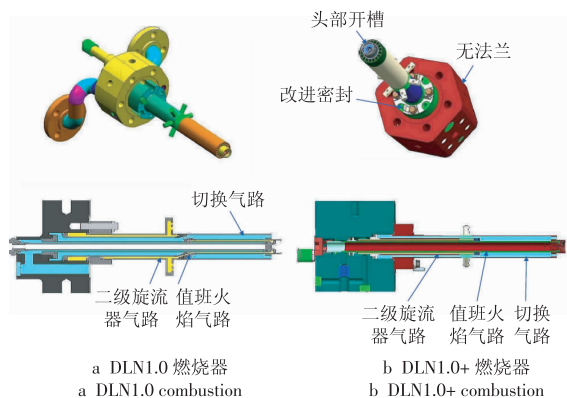


图 6 二级喷嘴结构对比

Fig. 6 Comparison of secondary nozzle structure

筒中段的稀释孔取消,材质改为 Nimonic - 263 合金,增加了强度和耐热能力。DLN1.0 火焰筒和过渡段之间的密封圈很容易因为高频振动而断裂失效, DLN1.0 + 将单片式 Hula 密封改为双片式 Hula 密封,增加了强度,减小了失效概率,如图 7 所示。

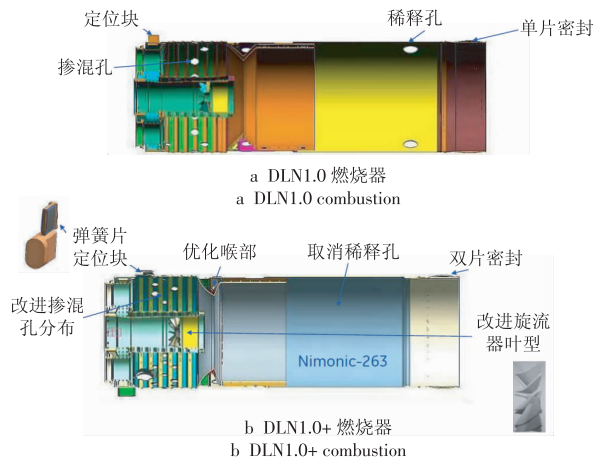


图 7 DLN1.0 + 火焰筒结构对比

Fig. 7 Comparison of DLN1.0 + flame tube structure

在过渡段组件上, DLN1.0 + 由插状结构改为榫槽结构,托架由 H 型改为蝠翼型结构,减小了与过渡段之间的磨损,提高了寿命。过渡段内表面的涂层由 B 级改为 C 级, C 级涂层较厚,热阻更高,降低了过渡段的温度。用来连接过渡段与一级喷嘴透平的安装架由分体式改为整体式,减轻了高频振动下的磨损。DLN1.0 + 取消了火焰筒中段的掺混孔,将掺混孔全部布置在过渡段,过渡段靠近进口附近周向布置 3 个掺混孔,孔径与原 DLN1.0 火焰筒中段开孔相同。过渡段出口附近布置 4 个掺混孔,孔径略小,交错排列,边缘加工锥形导流槽,提升冷气入射深度,使出口温度更均匀,如图 8 所示。

3 LEC - NextGen 燃烧系统

3.1 文丘里段以及燃烧一区冷却设计改进

LEC - NextGen 是 LEC - III 的改进型号, LEC -

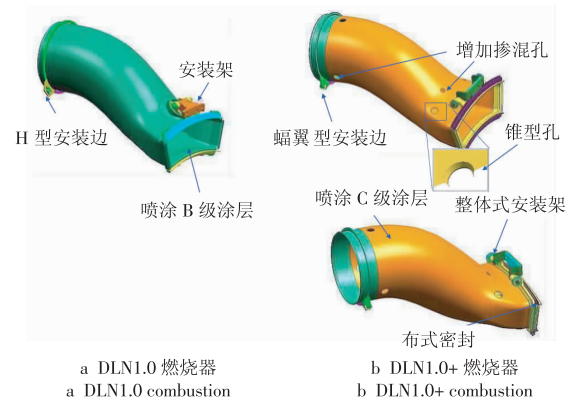


图 8 过渡段结构对比

Fig.8 Comparison of transition segment structure

Ⅲ 燃烧系统可替换 DLN1.0 燃烧系统,燃料控制策略以及燃烧方式并未做大的改变。LEC - Ⅲ 主要对火焰筒接触面表面重新做了硬化处理以及结构优化。文丘里段以及一级燃烧区壁面冷却方式做了较大改进: DLN1.0 燃烧系统的文丘里管采用冷却空气顺流火焰筒轴向方向冷却方式,冷却空气先进入文丘里管入口侧外壁冷却,然后沿着文丘里管轴向向外侧冷却,最后直接排入燃烧器二区出口处,这种冷却方式容易产生较高的 CO。LEC - Ⅲ 燃烧系统的文丘里段采用冷却空气逆流火焰筒轴向方向冷却方式(如图 9 所示),在一次燃烧模式和贫 - 贫燃烧模式下,文丘里段前端冷却效果没有 DLN1.0 好,而在预混燃烧模式下文丘里管后端冷却比 DLN1.0 要好,并且冷却后的空气直接流入文丘里管入口侧,加速后进入预混燃烧区,由于不存在淬熄效应,因此 LEC - Ⅲ 燃烧系统 CO 排放要低于 DLN1.0。

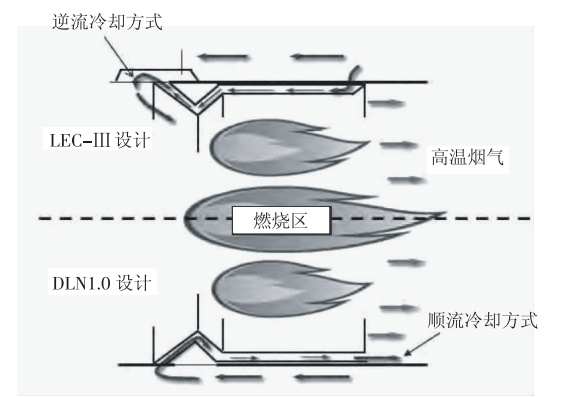


图 9 文丘里段冷却结构对比

Fig.9 Comparison of Venturi cooling structure

DLN1.0 火焰筒采用圆形气膜冷却直孔,在火焰筒一区壁面有 7 排圆形气膜冷却直孔,空气形成的气膜沿筒内壁流动。LEC - Ⅲ 火焰筒采用发散冷却气膜,在火焰筒端头部有 5 000 个带倾角的发散冷却孔,总的冷却孔较多,冷却气膜分布更均匀。火焰筒冷却结构对比如图 10 所示。

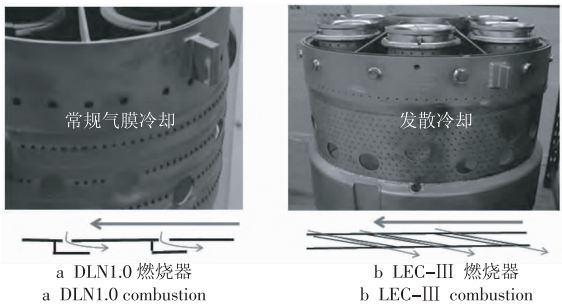


图 10 燃烧一区壁面冷却结构对比

Fig.10 Comparison of No.1 combustion zone wall cooling structure

3.2 二级喷嘴结构改进

相比于 DLN1.0, LEC 系列最大的改动在于二级喷嘴喷嘴口结构(如图 11 所示)。DLN1.0 的二级旋流器喷嘴位于中部的轴向 6 个圆柱上,每个圆柱设置有 3 个喷口,共计 18 个喷口;头部的值班火焰喷嘴为 3 个具有切向速度的喷口。LEC - Ⅲ 将二级旋流器喷嘴改为位于圆环上的 49 个喷口结构,由于喷口数量增加,提高了二级旋流器下游燃料分布的均匀度,降低了中心区火焰温度,并把一部分吹扫空气引入值班火焰喷嘴之前,值班火焰由扩散燃烧变为预混燃烧,局部当量比降低,温度随之降低,降低了 NO_x 排放质量浓度。

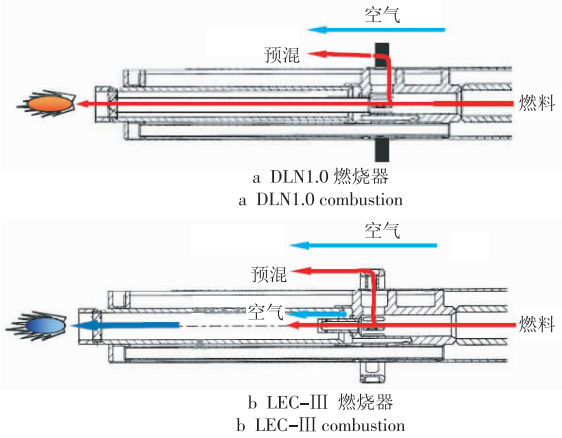


图 11 二级喷嘴结构对比

Fig.11 Comparison of secondary nozzle structure

LEC - NextGen 进一步将二级旋流器喷嘴口数量增至 88 个,值班火焰喷嘴口数量增至 25 个,进一步降低了 NO_x 排放质量浓度(如图 12 所示)。

4 排放和检修间隔对比

表 1 是 3 种燃烧系统排放值及检修间隔对比($\omega(O_2) = 15\%$),相比于 DLN1.0, DLN1.0 + 与 LEC - NextGen 大幅度降低了 NO_x 排放质量浓度。3 种燃烧系统技术路线各有侧重:DLN1.0 + 对一级喷嘴旋流器进行了结构优化,对二级喷嘴的值班火

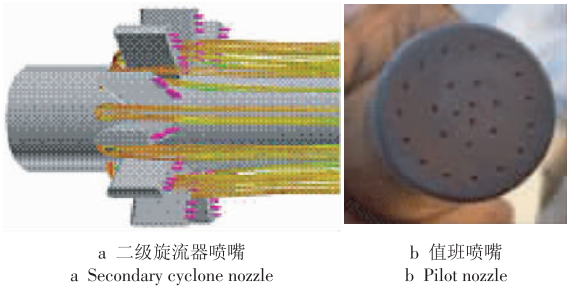


图 12 LEC - NextGen 的二级旋流器喷嘴与值班喷嘴
Fig. 12 LEC - NextGen secondary cyclone nozzle and pilot nozzle

焰喷口进行了局部修改,使其变为预混燃烧;LEC - NextGen 则大幅修改了二级喷嘴结构,包括二级喷嘴旋流器喷嘴和值班火焰喷嘴,提高了预混均匀度,实现了 NO_x 的超低排放。CO 排放方面 DLN1.0 + 改善不大,这可能与文丘里段的冷却方式有关,DLN1.0 + 的冷却空气直接排入反应区产生的淬熄效应增加了 CO 产生量。LEC - NextGen 采用的逆流冷却方式不存在上述问题,CO 排放质量浓度低于 1.25 mg/m³。从厂家给出的检修间隔来看,2 种改进型燃烧系统均可以达到比 DLN1.0 长 1 ~ 2 倍的检修时间间隔。

表 1 3 种燃烧系统排放值及检修间隔对比

Tab. 1 Comparison of emission figures and maintenance intervals between 3 combustion systems

燃烧系统	NO _x 质量浓度/ (mg · m ⁻³)	CO 质量浓度/ (mg · m ⁻³)	检修间隔 (折算值)
DLN1.0	30.00	31.00	运行 8 000 ~ 12 000 h/启停 450 次
DLN1.0 +	10.00 ~ 14.00	31.00	运行 24 000 h/启停 1 300 次
LEC - Next- Gen	<10.00	<1.25	运行 32 000 h/启停 1 250 次

5 结论

相比于 DLN1.0 燃烧系统,DLN1.0 + 和 LEC - NextGen 均采用了多点燃料喷射,将扩散燃烧值班喷嘴改为预混燃烧的方式,降低了局部燃烧温度,配合自动燃烧调整,进一步降低了 NO_x 质量浓度。

DLN1.0 + 优化了燃烧器内流场结构,减小了流动损失。LEC - NextGen 采用的一区发散冷却和文丘里段逆流冷却方式对 CO 产生有较好的抑制效果。

2 种燃烧系统均修改了固定端接触面的结构,增强了抗振动力。

采用上述改进设计后,DLN1.0 + 和 LEC - NextGen 的 NO_x 排放质量浓度不到 DLN1.0 燃烧系统的一半,检修间隔延长了 1 ~ 2 倍。

参考文献:

[1]周国兴,黄红艳,周晖. PG9171E 燃气轮机低氮燃烧系统改造[J]. 发电设备,2013,27(5):338 - 342.
[2]岳建华,萨仁高娃. DLN - 1 燃烧系统分析[J]. 内蒙古电力技术,2006,24(1):7 - 9.
[3]殷华明. 9E 燃气轮机 DLN1.0 与 LEC - III 低氮燃烧系统改造[J]. 技术与市场,2017,24(10):13 - 16.
[4]黄雪成. 9E 燃气轮机 CPC 软件包 Auto Tuning 功能优缺点的探讨[J]. 发电设备,2016,30(2):92 - 94.
[5]SOGHE R D, BIANCHINI C, ANDREINI A, et al. Metal temperature prediction of a DLN1 class flame tube by CFD CHT approach [C]//International Gas Turbine Institute. ASME Turbo Expo 2015;Turbine Technical Conference and Exposition,2015.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

丁阳(1984—),男,河北衡水人,工程师,工学博士,从事燃气轮机气动热力学及燃烧学研究(E-mail: dy02jx006@163.com)。

广 告 索 引

山东华建仓储装备科技有限公司 (封面)
上海大田阀门管道工程有限公司 (封二)
郑州科润机电工程有限公司 (封三)
南通高欣耐磨科技股份有限公司 (封底)
西派特(北京)科技有限公司 (前插 1)
湖南三德科技股份有限公司 (前插 2,3)
博纳斯威阀门股份有限公司 (前插 4)
天津市洪浩保温管有限公司 (前插 5)
秦皇岛华电测控设备有限公司 (前插 6)

杭州云众电力科技有限公司 (前插 7)
华电郑州机械设计研究院有限公司(跨版) ... (前插 8,9)
郑州科源耐磨防腐工程有限公司(跨版) (前插 10,11)
华电重工股份有限公司(跨版) (前插 12,13)
华电重工股份有限公司 (目次页右)
北京中电联发科技有限公司 (中插 1)
华电水务控股有限公司(跨版) (中插 2,3)
华电环保系统工程有限公司(跨版) (中插 4,5)
华电青岛环保技术有限公司 (中插 6)