

汽轮机级组特征通流面积的应用

王运民¹, 张伦柱¹, 徐大懋², 马海龙¹

(1. 长沙理工大学 能源与动力工程学院 湖南 长沙 410076; 2. 中国广东核电集团有限公司 广东 深圳 518031)

摘 要: 介绍了汽轮机级组特征通流面积在工程实际应用中的相关表达式, 以某火电厂 310MW 机组为例, 对汽轮机级组特征通流面积进行分析。通过计算级组特征通流面积的偏差率和级组的相对内效率, 判断汽轮机通流部分的运行状况, 得出汽轮机第 I 级组通流面积减小、其它级组工作正常、第 7 段和第 8 段抽汽压力测量值不准确、以及第 5 段和第 6 段抽汽口可能有热蒸汽漏入的结论, 并提出在机组大修中对重点部位进行检查和处理建议。实践证明, 利用级组特征通流面积进行理论分析的结果与实际相吻合。

关 键 词: 火电厂; 汽轮机; 级组; 通流能力; 特征通流面积; 应用

中图分类号: TK261 文献标识码: B

引 言

汽轮机级组的通流能力是影响汽轮机运行经济性和安全性的重要因素, 在生产实际中常因汽轮机通流能力不够造成很大损失。目前, 通常是靠改变通流部分的形状或采用先进的汽轮机通流部分改造技术, 来增加通流能力, 以增加出力, 降低能耗^[1~4]。体现汽轮机通流部分热力性能的两个重要指标是效率和通流能力。汽轮机的效率早有明确的表达式, 而汽轮机的通流能力, 近年来经过国内学者的努力, 也找到了一个能代表通流能力的特征参数, 那就是汽轮机级组特征通流面积^[5]。现在关键是如何应用这一概念分析和解决汽轮机通流部分的实际问题。

1 汽轮机级组特征通流面积的概述

根据参考文献 [5], 汽轮机级组特征通流面积有两种定义式:

$$F_T = \frac{G \sqrt{T_0}}{P_0 \sqrt{1 - \pi^2}} \quad (1)$$

$$F_v = G \sqrt{\frac{v_0}{p_0(1 - \pi^2)}} \quad (2)$$

式中: G —通过级组的流量, t/h ; p_0 —一级组前的压力, MPa; T_0 —一级组前的温度, K; v_0 —一级组前的比容, m^3/kg ; π —级组的压力比, 即级组后的压力与级组前的压力之比。

级组特征通流面积的变化用其偏差率来定义:

$$f_i = \frac{\Delta F_i}{F_{ji}} = \frac{F_{bi} - F_{ji}}{F_{ji}} \quad (3)$$

式中: j —基准工况; b —变动工况; i —汽轮机的第 i 个级组。

参考文献 [5] 证实, 以 F_v 进行计算的精度要明显高于以 F_T 进行计算的精度, 所以后面的实例分析中, 均以 F_v 为基础。

虽然特征通流面积可成为通流性能分析的重要工具, 可用于分析汽轮机级组的通流能力及出力等情况, 但要准确判断汽轮机通流部分是否存在问题, 仅有级组的特征通流面积及其偏差率还不够, 实用中还必须结合级组的相对内效率的变化来分析。例如, 在测量参数准确的情况下, 若特征通流面积变化, 则有可能是通流部分结垢、叶片变形、冲蚀或断叶片等所造成, 再结合级组相对内效率的变化, 就可进一步确定故障的原因和部位; 因为与设计工况相比, 通流部分几何尺寸的改变 (不论变大或变小), 都必然会引起级组相对内效率的降低。

级组相对内效率为:

$$\eta_p = \frac{h_0 - h_1}{h_0 - h_{1t}} \quad (4)$$

式中: h_0 —一级组前实际焓, kJ/kg ; h_1, h_{1t} —一级组后实际焓和理想焓, kJ/kg 。

2 汽轮机级组特征通流面积的应用

某电厂 310 MW 机组, 其型号为 N310-16.7/

收稿日期: 2011-03-01; 修订日期: 2011-06-07

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 基金资助项目 (2009CB219803-03)

作者简介: 王运民 (1960-), 男, 安徽宿州人, 长沙理工大学教授。

537/537, 该机组原则性热力系统如图 1 所示。

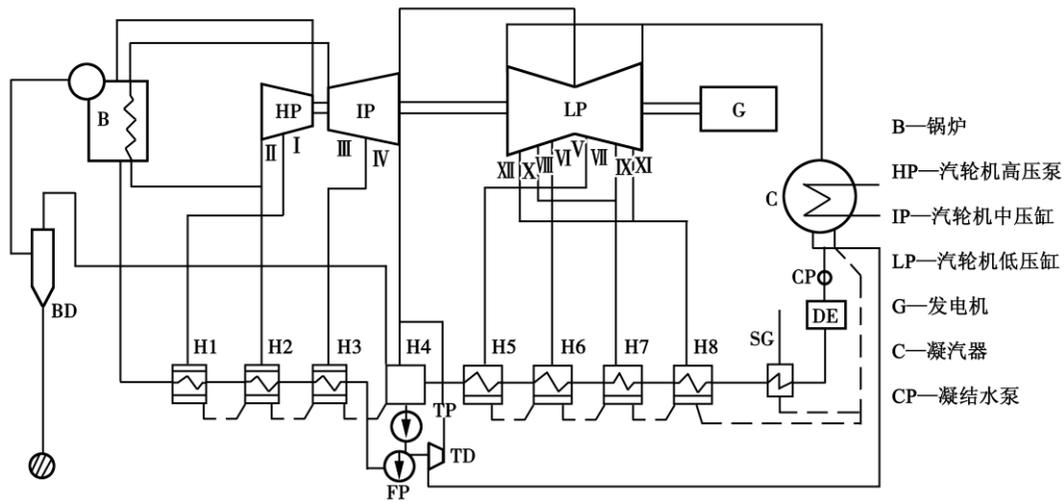


图 1 N310-16.7/537/537 型汽轮机原则性热力系统

Fig. 1 Model N310-16.7/537/537 steam turbine principle-based thermal system

2.1 汽轮机各级组的划分

该汽轮机共有 36 级, 其中, 高压缸 13 级(1 个调节级和 12 个压力级), 中压缸 9 级, 低压缸 14 级(对称分流布置, 每边 7 级)。划分汽轮机各级组的主要依据是各段抽汽口。如图 1 所示, 各汽缸下的罗马字母表示汽轮机各级组的编号。

第 I 级组(共 8 级): 调节级后第 1 压力级 ~ 第 1 段抽汽口;

第 II 级组(共 4 级): 第 1 段抽汽口 ~ 第 2 段抽汽口(高压缸排汽);

第 III 级组(共 5 级): 中压缸进汽 ~ 第 3 段抽汽口;

第 IV 级组(共 4 级): 第 3 段抽汽口 ~ 第 4 段抽汽口(中压缸排汽);

第 V 级组(共 2 级): 低压缸进汽(右) ~ 第 5 段抽汽口;

第 VI 级组(共 4 级): 低压缸进汽(左) ~ 第 6 段抽汽口;

第 VII 级组(共 3 级): 第 5 段抽汽口 ~ 第 7 段抽

汽口(右);

第 VIII 级组(共 1 级): 第 6 段抽汽口 ~ 第 7 段抽汽口(左);

第 IX 级组(共 1 级): 第 7 段抽汽口(右) ~ 第 8 段抽汽口(右);

第 X 级组(共 1 级): 第 7 段抽汽口(左) ~ 第 8 段抽汽口(左);

第 XI 级组(共 1 级): 第 8 段抽汽口(右) ~ 汽轮机排汽口(右);

第 XII 级组(共 1 级): 第 8 段抽汽口(左) ~ 汽轮机排汽口(左)。

2.2 汽轮机设计时级组特征通流面积偏差率的计算

依据制造厂给定的热平衡图, 先利用式(2)计算出各工况下各级组的特征通流面积, 然后再利用式(3)计算出相对 5 阀全开工况下的各级组的特征通流面积偏差率。各级组的特征通流面积偏差率计算结果如表 1 和图 2 所示。

表 1 各设计工况下级组的特征通流面积偏差率 \bar{f}_i (%)

Tab. 1 Deviation rates of the characteristic flow path areas of stages at various design operating conditions \bar{f}_i (%)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
THA 工况	0.002	-0.0054	0.0074	-0.024	0.025	-0.011	-0.0022	0.32	0.083	0.044	0.23	0.18
75% THA 工况	0.01	0.0054	0.017	-0.028	0.14	-0.068	0.051	1.07	0.57	0.13	2.03	1.50
50% THA 工况	-0.66	0.061	-0.15	-0.32	0.14	-0.25	-0.23	0.83	0.38	-0.33	6.5	5.53
30% THA 工况	0.1	0.14	-0.48	-0.69	0.0053	-0.52	-0.43	0.16	1.11	0.031	20.7	19.1

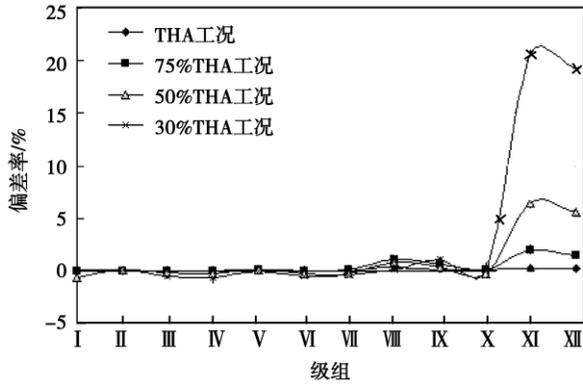


图2 各设计工况下级组的特征通流面积偏差率
Fig.2 Deviation rates of the characteristic flow path areas of stages at various design operating conditions

由表1和图2可看出:

(1) 除第XI级组和第XII级组外,变工况下,各级组的特征通流面积偏差率均在1.11%以下,这也验证了在通流部分几何尺寸不变时,汽轮机级组特征

通流面积在任何工况下应为常数的结论。

(2) 第XI级组和第XII级组偏差较大,主要是因为这两个级组均属最末级,处在湿蒸汽区,偏离理想气体,而且制造厂给定的热平衡图中,各工况下的汽轮机背压均0.005 39 MPa,这才造成了计算结果出现较大的误差。

(3) 总的来讲,各级组特征通流面积的偏差率随负荷的降低而变大。但即使工况降到30% THA 工况,除最末两个级组(XI级组和第XII级组)外,其它各级组的特征通流面积也几乎不变。

2.3 汽轮机实际运行时级组特征通流面积分析

2.3.1 级组特征通流面积的偏差率

为了评价该机组的运行状况,我们进行了现场热力试验。依据热力试验数据,同样利用式(2)和式(3)计算出相对5阀全开设计工况下的各级组的特征通流面积偏差率,计算结果如表2和图3所示。由于试验中,第7段抽汽和第8段抽汽仅测出压力值,没有测出温度值,所以表2和图3中的结果仅能反映了8个级组。

表2 汽轮机实际运行中级组的特征通流面积偏差率 \bar{f}_v (%)

Tab.2 Deviation rates of the characteristic flow path areas of stages during the practical operation of the steam turbine

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
97%THA 工况	-4.66	1.20	-0.18	1.38	0.54	-0.22	-6.14	-22.45
78%THA 工况	-5.89	-0.62	-0.71	0.96	-0.67	-1.53	-7.64	-25.36
70%THA 工况	-5.85	0.54	-1.08	0.90	-1.04	-1.88	-8.34	-27.14
59%THA 工况	-7.04	0.059	-2.00	0.55	-1.64	-2.86	-11.02	-31.34

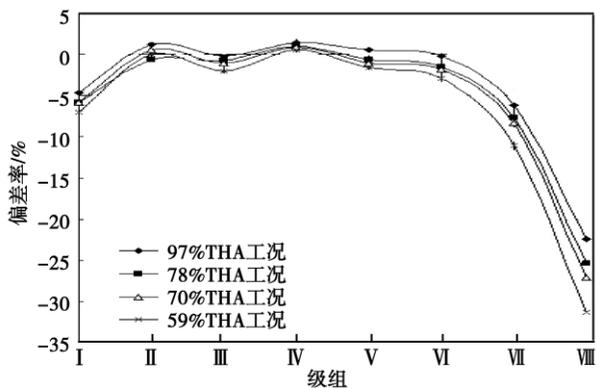


图3 各运行工况下级组的特征通流面积偏差率
Fig.3 Deviation rates of the characteristic flow path areas of stages at various design operating conditions

(1) 各变工况下,第II~VI级组的特征通流面积偏差率较小,说明特征通流面积的试验值和设计值吻合较好。又根据式(4)计算各级组的相对内效率,发现与设计参数下的相对内效率接近。所以可断定实际运行时这些级组的通流部分工作状况良好。

(2) 第I级组的特征通流面积偏差率较大,且为负值,说明通流部分通流面积有所减小,即第I级组有可能结垢或叶片变形。通过式(4)计算第I级组的相对内效率:设计值0.915,实验计算值0.849,所以可以断定是叶片结垢或变形等因素而导致这个级组的特征通流面积减少。

(3) 第VII级组和第VIII级组的特征通流面积偏差率很大,且为负值。因试验中第7段抽汽和第8段抽汽没有测出温度值,所以无法计算出运行时这两个级组的相对内效率作进一步判断。第VII级组和第VIII级组的特征通流面积偏差率很大并不足以说明通

2.3.2 级组特征通流面积分析

由表2和图3可看出:

流部分通流面积减少很多,也即并不能说明该级组结垢或叶片变形很严重。因为这两个级组位于低压缸的中后部位,有的级甚至处于湿蒸汽区。而处湿蒸汽区的级,由于湿蒸汽的冲刷,通常最不容易结垢^[6];另外,低压缸内可能出现断叶片事故,但出现叶片变形使通流面积减少的例子却很少见。所以,这种情况可能是试验时参数测量不准或其它原因所

造成的。具体情况分析如下:

对照现场热力试验数据和设计数据,发现各工况下第5段、第6段抽汽温度比设计值明显偏高,第7段、第8段抽汽压力比设计值却明显偏低。以310 MW工况为例,低压缸进汽及各段抽汽参数比较如表3所示。

表3 310 MW工况下汽轮机低压缸进汽及各段抽汽参数

Tab. 3 Parameters of the inlet steam and the steam at various steam extraction sections of the LP cylinder of the steam turbine at 310 MW

	设计值			试验值		
	压力/MPa	温度/°C	流量/t·h ⁻¹	压力/MPa	温度/°C	流量/t·h ⁻¹
低压缸进汽	0.8893	345.4	694.80	0.891	346.9	732.20
第5段抽汽	0.3784	240.7	37.76	0.415	259.8	41.0
第6段抽汽	0.1415	141.0	23.39	0.179	184.8	19.89
第7段抽汽	0.0686	89.4	25.51	0.0340	—	—
第8段抽汽	0.02705	66.8	30.53	0.0182	—	—

由表3可看出:低压缸进汽参数除流量外,压力和温度均变化不大;第5段抽汽温度比设计值高19.1°C,第6段抽汽温度比设计值高43.8°C;而第7段、第8段抽汽压力却明显低于设计值。正是由于相关参数测量值偏差较大,才造成了第Ⅶ级组和第Ⅷ级组的特征通流面积偏差率较大。

现场测量值与设计值不符,归纳起来可能来自两个方面:一是表计测量不准,二是表计测量正确,但测量点的参数确实变化了。根据汽轮机变工况原理,凝汽式汽轮机各抽汽口压力(级组前压力)均与流量成正比^[6~8],而实验工况下通过第Ⅶ级组和第Ⅷ级组的流量比设计工况大,应该是第7段抽汽压力和第8段抽汽压力比设计工况高才对,所以可断定这两段抽汽压力偏低是表计测量不准所造成的。至于第5段、第6段抽汽温度比设计值高的问题,除有可能是表计测量不准外,还有可能是热蒸汽漏入第5段、第6段抽汽口所造成的。因为该机组的低压缸为三层缸,而试验工况下低压缸进汽温度仅比设计工况高1.5°C,所以第5段、第6段抽汽温度比设计值明显偏高更有可能是漏汽原因所造成的。

2.3.3 建议与对策

机组大修时,应对重点部位进行详细检查,发现问题及时解决。

(1) 对第Ⅰ级组(调节级后第1压力级~第1段抽汽口)进行检查,必要时时行测量,确认其通流面积是否减少。

(2) 对第7段、第8段抽汽压力表和第5段、第6段抽汽温度表进行校核,确保其指示正常。

(3) 详细检查低压缸各部件及连接件,确认是否有热蒸汽漏入第5段、第6段抽汽口。

3 结论

(1) 汽轮机级组特征通流面积是表示汽轮机通流能力的重要特征参数,汽轮机级组特征通流面积具有明确的概念和较高的应用价值。通过计算汽轮机级组特征通流面积的偏差率和级组的相对内效率,可以判断汽轮机通流的部分的完善情况,并且可将故障点定位至某一级组内。

本机组热力试验后大修揭缸时发现:调节后第一压力级叶片有不同的变形现象,而低压缸的各级叶片并没有发现变形和明显的盐垢;低压缸第5段、第6段抽汽口处因密封装置损坏造成夹层中蒸汽进入第5段、第6段抽汽口。所有这些也验证了上述理论分析结果的正确性。

(2) 汽轮机级组特征通流面积偏差率具有很高的精度。根据级组特征通流面积偏差率的变化情况,还可以用来校核蒸汽参数测量值是否准确。例如,本机组运行中第7段抽汽压力和第8段抽汽压力测量值比设计值高的问题,经表计检验也得到了验证。

(3) 汽轮机级组特征通流面积的变化不仅影响

机组运行的安全性,也影响着机组运行的经济性。因而,可将汽轮机级组特征通流面积的偏差率和级组相对内效率作为汽轮机运行中的两个综合监控指标,用于汽轮机组运行中通流部分的性能诊断和实时监控。这也是需要进一步研究的重要方向。

参考文献:

[1] 谢诞梅,武云鹏,刘占辉,等. 300 MW 汽轮机通流部分改造经济性及其敏感性分析 [J]. 汽轮机技术 2006, 48(5): 369-375.
XIE Dan-mei, WU Yun-peng, LIU Zhan-hui, et al. Analysis of the cost-effectiveness and sensitivity of the modification to the flow path of a 300 MW steam turbine [J]. Steam Turbine Technology 2006, 48(5): 369-375.

[2] 苏猛业. 平圩 600 MW 汽轮机通流改造实施方案 [J]. 电力设备 2006, 7(6): 69-73.
SU Meng-ye. Implementation scheme for modifying the flow path of a 600MW steam turbine in Pingwei [J]. Electric Power Equipment 2006, 7(6): 69-73.

[3] 林四成,叶永松,王莉琳. 襄樊电厂汽轮机通流部改造方案探究 [J]. 华中电力 2005, 18(6): 39-41.
LIN Si-cheng, YE Yong-song, WANG Li-lin. Exploratory study of the scheme for reconstructing the flow path of a steam turbine in

Xiangfan Power Plant [J]. Central China Electric Power 2005, 18(6): 39-41.

[4] 邓世敏,迟全虎,金红光. 汽轮机通流改造后机组回热系统优化 [J]. 动力工程 2004, 24(2): 195-198.
DENG Shi-min, CHI Quan-hu, JIN Hong-guang. Optimization of the recuperator system of a steam turbine after a reconstruction of its flow path [J]. Power Engineering 2004, 24(2): 195-198.

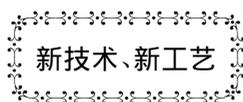
[5] 徐大懋,邓德兵,王世勇,等. 汽轮机的特征通面积及弗留格尔公式改进 [J]. 动力工程学报 2010, 30(7): 473-477.
XU Da-mao, DENG De-bing, WANG Shi-yong, et al. Characteristic flow path area of a steam turbine and improvement of Flugel formulae [J]. Journal of Power Engineering 2010, 30(7): 473-477.

[6] 孙奉仲. 大型汽轮机运行 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
SUN Feng-zhong. Operation of large-sized steam turbines [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.

[7] 靳智平. 电厂汽轮机原理及系统 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
JIN Zhi-ping. Principle and system of steam turbines in power plants [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.

[8] 沈士一. 汽轮机原理 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1992.
SHEN Shi-yi. Fundamental of steam turbines [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1992.

(丛敏编辑)



节水型煤热解气化技术

该技术的特点是通过可控制燃烧,将气化炉内极少部分(约5%)的煤燃烧发热,为炉内剩余的大量煤的热解提供热源。这种煤的气化技术基本上是一种物理反应,煤在大量吸热(高分子键被打断)和缺氧(无法燃烧)的条件下从高分子的固体状态转化为低分子气体状态。整个反应没有水的参与,气化温度在700°左右,后续的冷却可以采用空气冷却,不消耗水资源。煤气产生后需要水洗净化,但该水可以循环使用。

由于该工艺要求煤在进入气化炉前的含水量要低于20%,当使用高含水的褐煤为原料时(如内蒙胜利东二号褐煤全水分为34.1%),煤的脱水预处理工艺过程中将产出饮用水等级的水来。

节水型煤热解气化技术适合我国国情,值得研究推广。

(有意了解该技术可与编辑部联系)

heat exchange capacity while the cooling effectiveness will depend on the flow status of the air film relative to the blade profile and the mixing and dilution capacity with the main stream. **Key words:** air-film cooling ,discrete hole , curvature ,air blow ratio ,heat transfer coefficient

镁基水反应金属燃料冲压发动机的工作特性 = **Operating Characteristics of a Magnesium-based Hydroreactive Metal Fuel Ramjet** [刊,汉] YANG Ya-jing(National Key Laboratory on Mechanical Structural Strength and Vibration ,College of Astronautics and Aeronautics ,Xi'an Jiaotong University ,Xi'an ,China ,Post Code: 710049) , HE Mao-gang(College of Energy Source and Power Engineering ,Xi'an Jiaotong University ,Xi'an ,China ,Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27(2) . - 154 ~ 159

For a underwater high speed aircraft-purposed magnesium-based hydroreactive metal fuel ramjet ,set were fuels mixed in three component mass proportions and in conjunction with the thermal calculation and two-dimensional axis-symmetrical numerical simulation ,studied were its operating characteristics. In this connection ,the vortexes observed at both inlets foreshow that during the fuel combustion process ,it is possible to result in a thermoacoustic oscillation. Within the effective ranges of water/fuel ratio specific to the ramjet burning three kinds of fuel respectively ,the numerical simulation results show that the distribution of water/fuel ratios in two times will directly influence the combustion stability inside the engine. To increase the total water/fuel ratio will produce a maximal specific impulse and in the meantime ,the thermal efficiency and the propulsion efficiency will increase and decrease respectively in a monotonous way. In addition ,both numerical simulation and thermal calculation result indicate that to increase the magnesium content in the fuel will help increase the specific impulse and thermal efficiency of the engine. The law and characteristics governing the change of such operating characteristics of the engine as combustion characteristics ,specific impulse and efficiency etc. can offer guide for optimizing overall structure and performance of an engine and at the same time ,predict the intrinsic thermoacoustic oscillation characteristics of an engine so as to design corresponding control tactics. **Key words:** magnesium-based hydroreactive metal fuel ,ramjet ,water/fuel ratio ,numerical simulation

汽轮机级组特征通流面积的应用 = **Application of the Steam Turbine Stage Characteristic Flow Path Area** [刊,汉] WANG Yun-min ,ZHANG Lun-zhu ,MA Hai-long(College of Energy Source and Power Engineering ,Changsha University of Science and Technology ,Changsha ,China ,Post Code: 410076) ,XU Da-mao(China Guangdong Nuclear Power Group Co. Ltd. ,Shenzhen ,China ,Post Code: 518031) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27 (2) . - 160 ~ 164

Described were relevant expressions of steam turbine stage characteristic flow path areas in practical engineering ap-

plications. With a 310 MW unit in a thermal power plant serving as an example, an analysis of the steam turbine stage characteristic flow path area was conducted. Through a calculation of the deviation rate of the stage characteristic flow path area and the relative internal efficiency, the operating state of the steam turbine flow path was judged, arriving at a conclusion that the flow path area of No. 1 stage group of the steam turbine decreases, other stage groups are in normal work, the steam extraction pressure measurements of No. 7 and 8 section are not correct and it is possible that a certain amount of hot steam is leaked into the steam turbine from steam extraction ports of No. 5 and 6 section. On these basis, the authors have offered proposals to conduct an inspection and treatment during the overhaul of the steam turbine unit. It has been proven by the practice that the theoretical analytic results by using stage group characteristic flow path areas are in good agreement with the practical ones. **Key words:** thermal power plant, steam turbine, stage, flow path capacity, characteristic flow path area, application

应用甲烷自热重整技术的燃气轮机循环焓分析 = **Exergy Analysis of a Gas Turbine Cycle by Using the Methane Self-heat Reforming Technology** [刊, 汉] TANG Qiang, ZHANG Xiao-qin, HOU Shi-feng, YANG Xu-dong (Education Ministry Key Laboratory on Low Quality Energy Source Utilization Technologies and Systems, College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27(2). - 165 ~ 169

Presented was a new gas turbine cycle by using the methane reforming technology. Firstly, according to the working process of the system, the heat balance of the reaction inside the combustor was analyzed by using the thermodynamic balance method. Secondly, based on the second law of the thermodynamics, the variation tendency of the exergy efficiency of the new gas turbine cycle was studied. The research results show that the amount of methane consumed in the combustion in the new cycle is smaller than that supplied, depending on the variation tendency of the amount of methane consumed in reforming of CO_2 and H_2O and the reaction equilibrium constant. Under the condition of a same fuel consumption rate, compared with a simple cycle, the exergy efficiency of the new cycle increases greatly, up by 5.05% - 15.57%. **Key words:** gas-turbine cycle, methane reforming, exergy analysis

IGCC 气化炉控制方案的仿真研究 = **Simulation Study of IGCC Gasifier Control Versions** [刊, 汉] WEI Jing, LIU Xiao-ling, ZHANG Li (Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co. Ltd., Jinan, China, Post Code: 250013), WU Ke (Guodian Nanjing Automation Stock Co. Ltd., Nanjing, China, Post Code: 210003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27(2). - 170 ~ 175

In the light of such dynamic characteristics of Alstom gasifiers as non-linear and multi-variable, two multi-variable control versions based on conventional PID controllers were proposed, which adopted different manipulation varia-