

应用遗传算法优化设计微型燃气轮机原表面换热器

梁红侠¹, 王秋旺², 索建秦¹

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072 2 西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

摘 要: 提出将热力性能设计与遗传算法搜索过程相结合的方法, 对适用于 100 kW 微型燃气轮机的人字形交错波纹板式原表面换热器进行结构优化, 分别以重量最轻和换热紧凑度/重量最大作为目标函数, 把换热器芯体外形尺寸和换热表面结构尺寸作为待寻求最佳值的优化变量进行优化。遗传算法程序采用二进制编码, 锦标赛选择, 均匀交叉和单点变异, 并采用基于小生境下的共享技术和择优策略。优化结果表明: 与原始数据比较, 两种目标函数下重量和换热紧凑度都有不同程度的减轻和增加, 两侧总压降均比原来略有下降。对比两种目标函数下的优化结果发现, 以紧凑度/重量最大为目标函数的优化方法比以重量最轻为目标函数优化方法效果更好。

关 键 词: 微型燃气轮机; 人字形交错波纹表面换热器; 遗传算法; 优化设计; 热力性能计算

中图分类号: TK124 文献标识码: A

引 言

换热器是能源与动力领域不可缺少的关键设备, 高效紧凑型换热器凭借结构紧凑、体积小、重量轻、效率高等优点广泛应用于化工、制冷、电力、动力、航空等领域。如在分布式供电系统的微型燃气轮机发电装置中, 采用紧凑型换热器, 使微型燃气轮机效率提高到 30% 以上^[1], 其换热器体积却只占整机的 1/3 成本约占整机目标成本的 1/4^[2]。为了充分利用能源, 节省投资, 将全部热、冷源在最大可能范围内合理匹配, 设计好换热器结构尺寸的最优组合问题具有十分重要的应用价值。

微型燃气轮机换热器作为一种利用废燃气加热压缩空气以实现余热利用并提高系统效率的换热设备, 首先应具备压损小, 换热效率高, 结构紧凑等特点, 因此目前换热器的优化问题, 集中在换热和流动性以及紧凑性的优化。基于这一目的, 设计者们尝试了不同的方法对换热器进行优化^[3~6]。作为一

种智能优化算法, 遗传算法 (Genetic Algorithm, 简称 GA) 解决多目标优化问题已被证明是一种行之有效的方法^[7~11]。它不受搜索空间限制型假设的约束, 也不要求目标函数的连续、可微和单峰等条件, 它着眼于个体的集合, 可以一次性获得大量最优解, 具有更强的实用性和灵活性^[12], 避免了传统优化技术很大可能会陷入局部优化的结果。文献 [13] 采用遗传算法对板式换热器进行优化设计, 以投资费用总现值为目标函数优化, 得出遗传算法优于传统枚举优化方法, 能够得到更准确、更有效的优化结果。文献 [14] 将遗传算法应用于管箱式翅片管换热器的优化设计中, 以传热面积与换热器体积之比为目标函数进行优化, 进一步说明了遗传算法极适合求解大规模组合优化问题。文献 [15] 对 50 kW 微型燃气轮机用原表面换热器进行了优化, 采用数值模拟方法对原表面结构单元进行建模, 并利用周期性边界条件进行流动和换热数值模拟, 然后在计算结果基础上, 以换热效果最好, 流动阻力和换热面积最小为目标, 对原表面结构进行了多目标优化。文献 [16~17] 着重研究了在不同适应度函数下优化换热器性能的方法。

本研究适用于 100 kW 微型燃气轮机系统的换热器, 采用人字形交错波纹板 (Cross-Corrugated, 简称 CC) 作为换热表面, 提出将热力性能设计与遗传算法搜索过程相结合的方法, 优化设计换热器几何结构尺寸, 分别以重量最轻和紧凑度/重量最大作为两个目标函数进行了优化, 为同类原表面换热器的优化提供参考。

1 物理模型与计算方法

1.1 优化设计模型

如图 1 所示, CC 原表面设计参数包括交错角

θ 、节距 P 、通道内部高度 H 和通道波纹半径 R 等, 通常, 随着两侧换热板交错角 θ 的增大, 换热器换热性能增强, 流动摩擦阻力随之增大。本研究对交错角 θ 分别取 45° 、 60° 、 75° 时对 P 、 H 、 R 3 个参数进行优化。

芯体的外形尺寸参数: 长 B_1 、宽 B_2 、高 B_3 , 如图 2 所示。CC 原表面换热器芯体是由若干具有不同方向波纹表面板交错一定角度叠放组装而成。换热板的厚度参数视为不变量, 不进行优化, 因为如果把板的厚度也作为设计变量, 可能进一步减轻换热器的重量, 但此时必须考虑换热器的强度, 也就是把换热器的强度也作为约束条件, 还涉及工艺问题及设计经验。

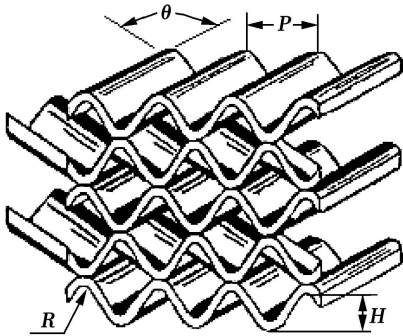


图 1 CC原表面

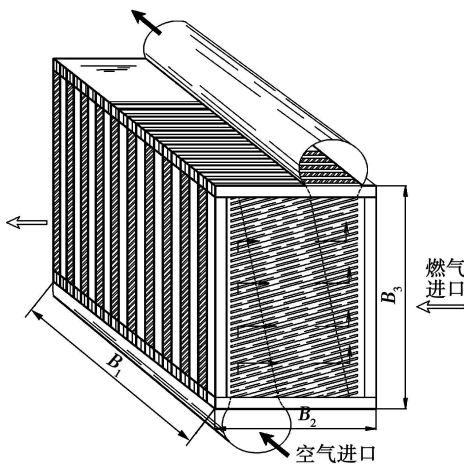


图 2 换热器芯体结构

1.2 热力数据和原始参数

表 1 为换热器两侧的主要设计参数。优化范围是设定的上下限: 节距 P 在 $2.4 \sim 5.0 \text{ mm}$; 通道内部高度 H 在 $0.6 \sim 1.4 \text{ mm}$; 通道波纹半径 R 在 $0.25 \sim 0.6 \text{ mm}$ 。

表 1 换热器关键设计参数

	数 值
输出功率 / kW	100
空气流量 / $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	0.998
燃气流量 / $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	1.014
压比	3.8
热效率 / %	88
空气进口温度 / K	463
燃气进口温度 / K	927
燃气出口温度 / K	873
$\Delta P_{\text{tot}} / (R\%)$	3

2 热力性能设计与遗传算法搜索过程结合

2.1 热力性能设计与遗传算法搜索过程结合

换热器热力设计是一个需要来回调试参数的过程, 通过不断的调试迭代参数从而设计出满足实际要求的换热器。这里存在两方面可考虑的问题: 一是在调试过程中, 尺寸调整的方向没有一定的指导准则, 得通过多次的调试总结出尺寸影响的规律, 再根据此规律去进一步调整及搭配参数, 多参数匹配导致计算量很大; 二是即使通过多次的调试, 在某套尺寸参数下换热器性能满足工作要求, 但是该结果很有可能不是最优或者接近最优的。如何在一定程度上协调解决好这两个问题, 本研究提出将热力设计过程与遗传算法搜索过程结合的方法来进行操作。

遗传算法是一个强大的、有效的概率性搜索算法。在遗传算法运作流程中, 遗传操作确保个体保持多样性, 进化搜索使得每代的种群中个体表现出不同的实际值。搜索的方向虽然没有按照一定的指导准则, 但是总是向达到目标 (搜索到最大适应值) 的方向不断地搜索。遗传算法在迭代进化中是以适应度函数值为依据的, 因此适应度函数的选择至关重要, 直接影响到遗传算法的收敛速度以及能否得到最优解。一般适应度函数是通过目标函数变换得到的。所以把热力性能设计和遗传算法结合起来, 如图 3 所示, 每进化一代后产生新的一个种群, 种群中的个体解码成实数, 在进行适应度评价之前, 先进行换热器热力设计, 设计得到的换热器性能如体积、重量, 通过一定关系转为适应度函数, 从而返回到遗传算法中进行评价, 当满足收敛条件时, 所有过程都停止, 输出所需要的参数。

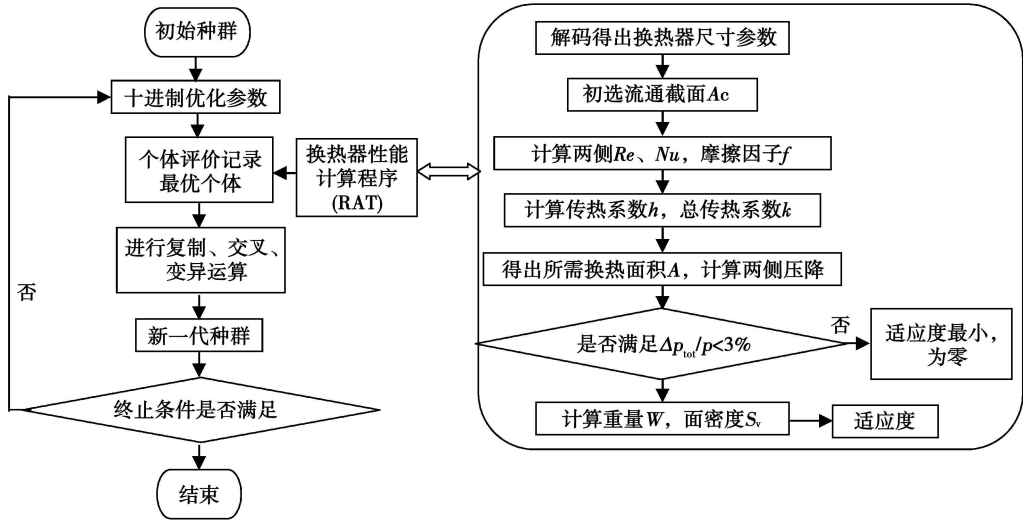


图 3 热力性能设计与遗传算法结合流程

2.2 适应度函数的确定

结合微型燃气轮机系统对换热器体积重量以及紧凑度的严格要求, 优化设计结构几何尺寸, 分别采用重量最轻和紧凑度/重量最大两个目标函数进行了优化。

2.2.1 重量最轻为目标函数

在换热器设计中性能要求首先是压降要求, 所以, 设计出来的换热器必须在给定的原始参数下, 满足性能要求, 也即优化的约束条件。对于换热器在满足换热性能的前提下, 换热器的重量或体积越小越好, 所以采用换热器的重量作为优化设计的目标函数。

$$fitness = F \cdot \exp(-W) \tag{1}$$

$$W = \rho \cdot \delta \int_0^P \sqrt{1 + \frac{\pi \cdot H}{P \cdot R} \cos\left(\frac{\pi}{P}\right) x} dx \cdot \frac{R}{H + \delta} \cdot \frac{B}{P} \cdot B \tag{2}$$

式中: ρ 、 δ —换热器材料的密度和厚度; 将目标函数转换为适应度函数的方法:

$$F = \begin{cases} 1 & \Delta P_{tot} / P < 3 \\ 0 & \Delta P_{tot} / P \geq 3 \end{cases} \tag{3}$$

式中: ΔP_{tot} —两侧的总压降, 适应度函数反映个体对生存环境适应能力的强弱, 表明个体之间竞争的能力, 决定个体的生存机会。遗传运算后, 适应度函数值最大的个体就是最好的个体, 它的目标函数值最小。

2.2.2 紧凑度/重量最大为目标函数

对于微型燃气轮机换热器, 不仅要考虑换热器的结构重量, 还应该考虑单位体积的换热面积, 即紧

凑度, 定义如下:

$$S = S_v / V \tag{4}$$

优化设计结构几何尺寸, 此时的目标函数为:

$$fitness = F \cdot \frac{S_v}{W} \tag{5}$$

遗传算法程序采用锦标赛 (tournament) 选择, 均匀 (uniform) 交叉, 单点 (one-point) 变异。种群大小 P_n 为 50, 最大遗传代数 G 为 1 000, 交叉概率 P_c 为 0.5, 变异概率 P_m 为 0.02。为了能够找到全局的最优解, 本研究对遗传算法进行了改进, 即采用基于小生境 (niches) 下的共享技术, 以及择优策略即最优父代强制复制到下一代中去。

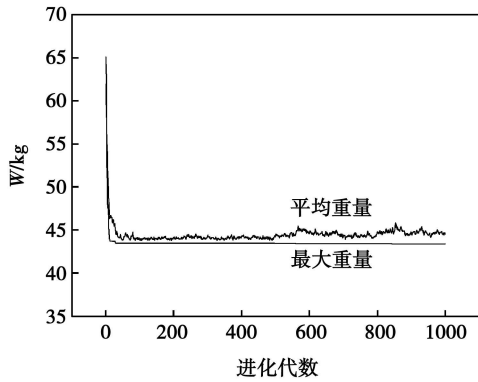
3 结果分析与讨论

图 4(a)~(f) 为 CC 原表面在波纹交错角分别为 45°、60°、75° 时换热器重量最轻和紧凑度/重量最大的遗传算法优化过程。其中图 (a)、(c)、(e) 为 3 种 CC 原表面换热器重量最轻的遗传算法优化过程, 图 (b)、(d)、(f) 为 3 种 CC 原表面换热器紧凑度/重量最大的遗传算法优化过程。从图中的优化过程很容易看出, 在进化初始阶段, 个体差异较大, 较差个体很快被淘汰, 较优个体迅速繁殖, 进化在不到 100 代时群体渐渐趋于一致, 到达一个稳定值。

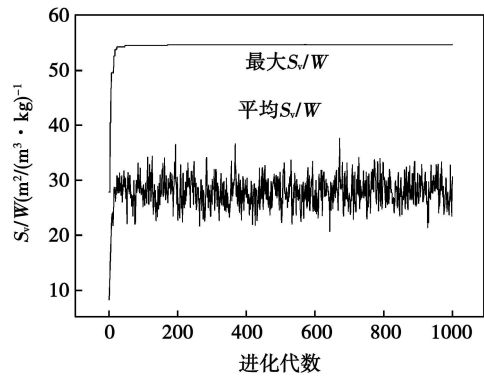
表 2 为 CC 原表面换热器在重量最轻为目标 (GA_1) 和紧凑度/重量最大为目标 (GA_2) 下优化结果与原始数据的比较, 从表中可以看出, 对传热表面来说, 优化表面参数后, 节距 R 通道内部高度 H 分

别从 3.48和 0.87 mm降低到 2.8和 0.6 mm,这使得波纹板通道变窄,从而提高换热器的紧凑度,换热器的紧凑度增加了 70%左右。在 GA1 和 GA2 两种目标优化后,换热器重量有了很大程度上的减轻,重量减轻了约 30% ~ 38%,随着交错角增大,重量减轻越明显,两侧总压降比原来略有降低。不同交错角引发流动结构的明显改变,从而使换热能力产生

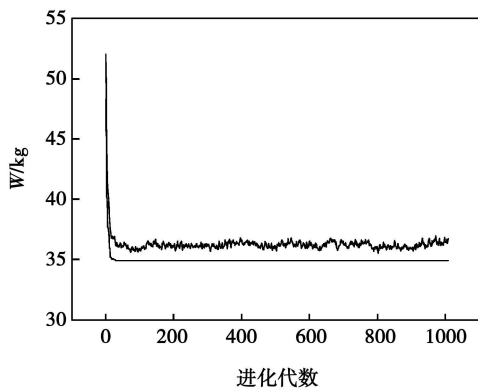
较大的变化。平均 Nu(努谢尔特数)与摩擦因子 f 随着 θ 的增大而增大,由此可见,换热的增强要以阻力损失的增大为代价。比较 GA1 和 GA2 两种目标函数下的优化结果发现,紧凑度提高相同、压降相差不大的情况下,GA2 优化后的重量明显比 GA1 优化后的轻约 3%。



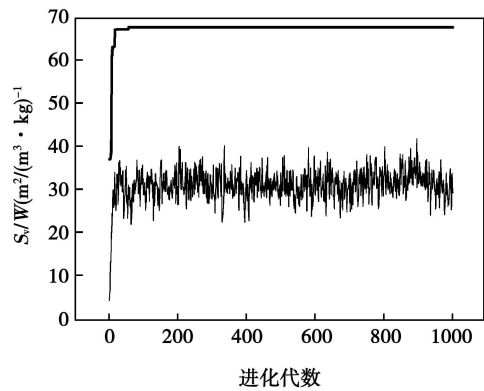
(a) CC 45-GA1进化过程



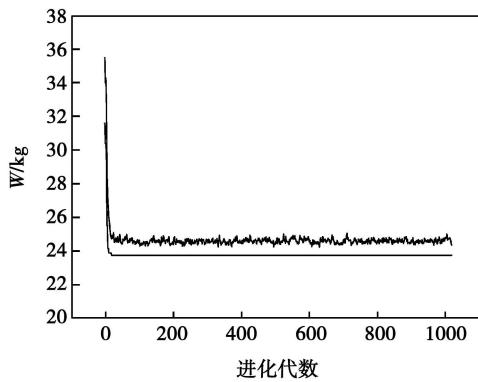
(b) CC45-GA2进化过程



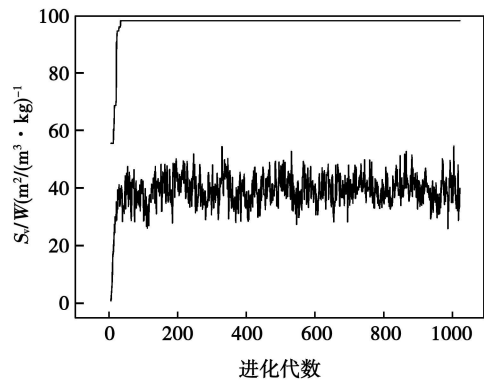
(c) CC60-GA1进化过程



(d) CC60-GA2进化过程



(e) CC75-GA1进化过程



(f) CC75-GA2进化过程

图 (a)、(c)、(e)是以重量最轻为目标函数下优化过程 (GA1)

图 (b)、(d)、(f)是以紧凑度/重量最大为目标函数下优化过程 (GA2)

图 4 波纹交错角分别为 45°、60°和 75°时换热器遗传算法优化过程

由 CC 原表面换热器的优化结果可以看出, 根据微型燃气轮机系统对换热器体积重量以及紧凑度的严格要求, 采用紧凑度/重量最大为目标函数比采

用重量最轻为目标函数进行优化效果更好, 换热器重量减轻更多。

表 2 原始数据与优化结果对比

CC 原表面		几何参数					性能参数			
$\theta/(\circ)$		P/mm	H/mm	R/mm	B_1/m	B_2/m	B_3/m	$\Delta P_{\text{tot}}/P(\times 10^2)$	$S_v/\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$	W/kg
	原始参数	3.48	0.87	0.45	0.58	0.21	0.46	3.39	1.308	62.16
45	GA1	2.8	0.6	0.32	0.75	0.13	0.42	2.989	2.258	43.40
	GA2	2.8	0.6	0.32	0.61	0.13	0.52	2.994	2.258	41.54
	原始参数	3.48	0.87	0.45	0.82	0.16	0.42	3.166	1.308	52.58
60	GA1	2.8	0.6	0.32	0.9	0.10	0.43	2.987	2.258	34.88
	GA2	2.8	0.6	0.32	0.75	0.12	0.52	2.996	2.258	33.39
	原始参数	3.48	0.87	0.45	0.86	0.12	0.46	3.373	1.308	36.73
75	GA1	2.8	0.6	0.32	0.82	0.07	0.55	2.995	2.258	23.76
	GA2	2.8	0.6	0.32	0.8	0.07	0.57	2.938	2.258	22.81

4 结 论

采用遗传算法与换热器热力性能设计程序相结合的方法, 对 100 kW 微型燃气轮机换热器人字形交错波纹换热表面进行优化设计, 分别以重量最轻和紧凑度/重量最大为目标, 得出如下结论:

(1) 在给定设计参数的条件下, 波纹板尺寸以及换热器芯体参数都作为优化变量时, 波纹节距 P 通道内部高度 H 和通道波纹半径 R 尺寸都相应减小, 这使得波纹板通道变窄, 从而提高换热器的紧凑度, 换热器的紧凑度增加了 70% 左右。换热器重量有了很大程度上的减轻, 随着交错角增大, 重量减轻了约 30% ~ 38%, 两侧总压降比原来略有降低。

(2) 结合微型燃气轮机系统对换热器体积重量以及紧凑度的严格要求, 考虑单位体积的换热面积, 采用紧凑度/重量最大为目标函数比采用重量最轻为目标函数进行优化更加合理, 优化设计效果更好。

(3) 本研究优化设计方法具有通用性, 可推广到其它类型的紧凑式换热器, 针对不同结构的换热器尺寸在不同目标下进行优化。

参考文献:

[1] MCDONALD C F. Low cost compact primary surface recuperator concept for microturbines [J]. Applied Thermal Engineering, 2000, 20(5): 471-497.

[2] MCDONALD C F, WILSON D G. The utilization of recuperated and regenerated engine cycles for high efficiency gas turbines in the 21st century [J]. Applied Thermal Engineering, 1996, 16(8-9): 635-653.

[3] TRAVERSO A, MASSARDO A F. Optimized design of compact recuperators for microturbine application [J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25: 2054-2071.

[4] MURALIKRISHNA K, SHENOY U V. Heat exchanger design targets for minimum area and cost [J]. Trans Therm, 2000, 78: 161-167.

[5] MISHRA M, DAS P K, SARANGI S. Optimum design of crossflow plate fin heat exchangers through genetic algorithm [J]. International Journal of Heat Exchangers, 2004, 5: 379-401.

[6] UNUVAR A, KARGICIS A. An approach for the optimum design of heat exchangers [J]. International Journal of Energy Research, 2004, 28: 1379-1392.

[7] 余小章, 俞勤芳. 紧凑热交换器优化设计 [J]. 南京航空航天大学学报, 1994, 26(4): 489-493.

[8] 席兵, 杨春信. 遗传算法在离心压气机叶轮结构优化中的应用 [J]. 热能动力工程, 2001, 16(2): 182-185.

[9] 梁红侠, 索建秦, 王秋旺. 基于遗传算法的交错波纹板换热器表面传热系数分离 [J]. 动力工程, 2009, 29(11): 1027-1030.

[10] 张勤, 崔国民, 张磊磊, 等. 隔代强制进化遗传算法在换热网络优化中应用 [J]. 热能动力工程, 2006, 21(6): 608-611.

[11] OZKOL, I, KOMURGOZ G. Determination of the optimum geometry of the heat exchanger body via a genetic algorithm [J]. Numerical Heat Transfer Part A, 2005, 48: 283-296.

[12] TAYAL M C, FU Y, DWEKARUM. Optimal design of heat ex

changes a genetic algorithm framework [J]. Industrial Engineering and Chemical Research, 1999, 38(2): 456-467

[13] 商建平, 俞树荣. 板式换热器遗传算法优化设计 [J]. 石油化工设备, 2002, 31(5): 16-18

[14] 刘云, 徐伟福, 赵伟, 等. 遗传算法在管箱式翅片管换热器优化设计中的应用 [J]. 北京化工大学学报, 2003, 30(6): 87-90

[15] MICHELID, PEDRODA V, PIERI S. Multi objective optimization of a microturbine compact recuperator // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2007 - Power for Land, Sea, and Air [C]. Montreal, American Society of Mechanical Engineers, 2007, 939-949.

[16] 谢公南, 王秋旺. 遗传算法在板翅式换热器结构优化中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(7): 53-57

[17] 张丽娜, 杨春信, 王安良. 应用遗传算法优化设计板翅式换热器 [J]. 航空动力学报, 2004, 19(4): 530-535

[18] DAVIS L. Handbook of genetic algorithms [M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991

(编辑 伟)

新技术、新工艺

汽轮机轮盘和轴的湿蒸气浸蚀

据《Электрические станции》2010年8月号报道,俄罗斯“中央锅炉涡轮机研究所”的专家对火力发电站和核电站汽轮机轮盘轮毂或转子轴的湿蒸气浸蚀进行了深入的研究,结论如下:

(1)在火力发电站和核电站汽轮机的湿蒸气级内,除了叶片以外,转子的下列部件也受到浸蚀:

面对进汽装置组件的第一级轮盘的轮幅;

面对隔板密封的其余各级轮盘的轮幅;

隔板密封下面的转子表面。

(2)上述部件的浸蚀磨损不是由隔板的湿度引起的,而是由在进汽装置内表面上,在隔板进汽侧以及隔板密封环下面的凹槽内凝结的水分引起的。

(3)由于轮盘内没有通过密封隔板疏水孔的水分引起了轮组内的浸蚀,并具有下列特点:

随着进入隔板密封水量的增加而加大;

在其它条件相同时,侵蚀随着蒸汽密度增加而加大,随着影响水滴速度的压力降的增加而加大;

在高压缸内,从第一级到末级逐级增加;而在低压缸内则相反,从第一级到末级逐级减小;

随着蒸汽在最后间隙内漏泄量和速度的增加而增加,因此,迷宫式密封比直流式密封浸蚀更小。

(4)第一级轮盘的浸蚀由凝结水量决定,并且与进汽装置内分隔湿蒸汽的压力腔室的部件表面大小有关,也与这些部件的连接结构和密封性有关。

(5)取决于蒸汽和冷却水的纯度而冷凝器管系密封的浸蚀过程将影响浸蚀的强度。

(6)减少浸蚀的有效方式是从聚集处排出凝结的水分。

(吉桂明 摘译)

燃驱压缩机组 泵组技术和应用的现状及展望 = Status Quo and Prospects of Gas Turbine-driven Compressor Set/Pump Group Technologies and Their Applications [刊, 汉] JIGuim ing WUQiong WANG Chong et al (CSC Harbin No. 703 Research Institute Harbin China Post Code 150078) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2011, 26(3). — 259 ~ 264

Analyzed was the current status concerning applications of gas turbines in natural gas pump units (GPU). It is noted that gas turbines constitute the key equipment items for realizing applications of long distance gas and oil transmission technologies. Around such applications, some imaginations and suggestions were given for China to develop and apply them in gas turbines and establish China's own gas turbine industry. It is also pointed out that industrial marine gas turbines should be developed by tightly focusing on the demands of China, the principles of starting from a high start point, one machine for multiple purposes and wide applications followed, and a proper power grade for the unit under development for applications, carefully chosen. The adoption of a generalization design can achieve multiple purposes. The use of an "Aquarius" device together with a COGAS one in a gas turbine-driven compressor set/pump group can attain the aim of enhancing both the power output and efficiency. Key words: natural gas pump unit, gas turbine, compressor set/pump group, gas/oil transmission pipeline

应用遗传算法优化设计微型燃气轮机原表面换热器 = Optimized Design of the Original Surface Heat Exchanger of a Micro Gas Turbine by Using the Genetic Algorithm [刊, 汉] LIANG Hong-xia SUO Jian-qin (College of Power and Energy Source, Northwest Polytechnic University, Xi'an, China, Post Code 710072), WANG Qiu-wang (College of Energy Source and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2011, 26(3). — 265 ~ 270

A method combining the thermal performance design with the genetic algorithm-based searching process was presented for optimizing in structure the herringbone staggered corrugated plate type original surface heat exchanger of a 100 kW micro gas turbine. With the lightest weight and the maximum heat exchange compactness degree/weight serving as the target functions respectively, the overall dimensions of the core and the structural dimensions of the heat exchange surfaces of the heat exchanger in question, employed as the optimization variables of which the optimum values were to be sought, were optimized. The genetic algorithm-based program adopted the binary coding, championship choice, uniform crossover, single point variation, share technology and best choice strategy in a niche. The optimization results show that compared with the original data, the weights and heat exchange compactness degrees under the two target functions decrease and increase respectively to various extents, and the total pressure drops at both sides somewhat decrease compared with the original ones. It has been found through a comparison of the optimization results obtained by using the two target functions that the optimization method with the maximum compactness degree/weight serving as the target function can achieve an effectiveness better than that with the lightest weight serving as the target function. Key words: micro gas turbine, herringbone staggered corrugated sur-

face heat exchanger genetic algorithm optimized design thermal performance calculation

回流式冷却叶片流热耦合数值分析 = Numerical Simulation of the Fluid/heat Coupling in Return Flow Type Cooling Blades [刊, 汉] YU Kua-hai (College of Planning and Architectural Engineering Henan University of Science and Technology Luoyang China Post Code 471003), WANG Jin-sheng (Beijing Mechanical Equipment Research Institute Beijing China Post Code 100854), YANG Xi YUE Zhu-feng (Department of Engineering Mechanics Northwest Polytechnic University Xi'an China Post Code 710072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2011, 26(3). —271~274

Established was a model for analyzing the fluid/heat coupling in the cooling blades of a return flow type turbine. The P-1 radiation model was used to add the radiant heat flow to the equation as the source item. An analysis was performed of the fluid/heat coupling of the cooling blades having no heat barrier coating with radiations being taken into account and not respectively. It has been found that the cooling air which accounts for 3.76% of the total gas mass flow rate can cause a temperature drop of 200 K to the blades by using the return flow type cooling structures. When the highest inlet temperature is 1 655 and 1 555 K respectively a comparison of the temperature distributions on the blades obtained by using the two calculation models shows that the influence of radiations on the temperature of the blade surfaces is remarkable and this makes it relatively easy to form a highest temperature point at the tip of the trailing edge of return flow type cooling blades. Key words: gas turbine; return flow type cooling structure; fluid/heat coupling; radiation; cooling blade

基于聚类分析与加权模糊逻辑的汽轮机组振动故障诊断方法研究 = Study of the Methods for Diagnosing Vibration Faults of Steam Turbine Units Based on the Clustering Analysis and Weighted Fuzzy Logic [刊, 汉] DONG Xiao-feng GU Yu-jiong YANG Kun (Education Ministry Key Laboratory on Power Plant Equipment Condition Monitoring and Control North China University of Electric Power Beijing China Post Code 102206), QU Ying (CSC Harbin No. 703 Research Institute Harbin China Post Code 150078) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2011, 26(3). —275~279

In the light of the problems in using fault signs to diagnose faults of a steam turbine unit presented was a method for diagnosing faults by a combination of the clustering analysis and the weighted fuzzy logic. The frequency spectrum characteristics of various vibrations were employed to classify commonly seen fault modes and form various categories of the fault modes, thus differentiating the fault modes in various natures according to their categories, solving the problem in identifying their categories and thereby narrowing the scope for identification of fault modes. For the fault modes in a same category the fault signs in various types were collected to establish a fault diagnosis and decision-making table by employing the rough set theory and formulate rules for fault diagnosis by extracting the fault signs contributive to the fault identification. With the degree of dependence on knowledge serving as the pre-