

船用燃气轮机回热器设计的数值研究

郑春兵

海军驻青岛造船厂军事代表室, 山东 青岛 266002

摘 要: 回热器是提高船用燃气轮机效率的关键部件,其性能的优劣直接影响燃气轮机的特性。以往的文献在介绍回热器设计时,没有考虑冷热两侧气体(分别为空气和燃气)不同的热力性质。考虑这一实际情况,以某型船用三轴简单循环燃气轮机为母型进行回热改造,采用迭代计算的方法,编制计算程序,进行回热器的数值设计,并分析其对燃气轮机的性能的影响。结果表明,随着回热器回热度的增大,燃气轮机的效率不断提高;但当回热度超过一定值时,效率不仅不再提高,反而有所降低。

关键词: 燃气轮机; 回热器; 设计; 仿真

中图分类号: U664.13

文献标志码: A

文章编号: 1673-3185(2012)05-79-04

Numerical Study on the Design of a Regenerator for Marine Gas Turbines

ZHENG Chun-bing

Naval Representative Office in Qingdao Shipyard, Qingdao 266002, China

Abstract: The regenerator is a key component in a marine gas turbine and determines the performance of the gas turbine directly. However, in most open literatures related to regenerators, the different thermal characteristics of air and gas on the hot- and cold-side were not considered. In this paper, a marine triple-shaft simple cycle gas turbine was adopted as the prototype, and an improved marine regenerator was designed using the iterative approach. Then, the exact effects induced by the regenerator on the gas turbine were analyzed. The results show that the gas turbine's working efficiency increases along with the regenerator effectiveness, and decreases considerably when the regenerator effectiveness exceeds a critical value.

Key words: gas turbine; regenerator; design; simulation

0 引言

船用燃气轮机回热器通常是一种间壁式换热器,其功能是回收动力涡轮出口燃气的部分热量,预热压气机出口的空气,从而提高燃气轮机的热效率。与船用燃气轮机的设计要求相同,人们总是希望设计的回热器在满足主要热力性能指标的前提下质量尽可能轻、结构尽可能紧凑和换热效果尽可能佳^[1-6]。以往开展该项研究时,往往侧重于单纯的回热器设计,没有考虑回热器换热器两侧气体(一侧为空气,一侧为燃气)的不同热力性质,且气体在回热器通道中流动时产生的压力损

失通常也被视为定值,这些简化计算措施明显会造成计算结果的误差,并不能完全反映工程实际。本文将回热器作为船用燃气轮机的一个关键部件,在考虑回热器冷热两侧的实际工质热力性质和气体在回热器通道中的压力损失变化的基础上,进行了船用回热器的设计并分析了其对燃气轮机性能的影响。

1 回热器的选型

回热器主要有3种设计方案^[7]:固定管板式、螺旋板式和板翅式。通常,采用传热效率、流体阻力、结构紧凑程度以及制造成本等特征量指标来

收稿日期: 2012-02-20

作者简介: 郑春兵(1971-),男,工程师。

通信作者: 郑春兵。

描述回热器设计方案的优劣程度。每个设计方案中特征值的权重(权重表示在评价过程中是被评价对象的不同侧面的重要程度的定量分配,对各评价因子在总体评价中的作用进行区别对待)和隶属度(每个方案的所有指标分别隶属于优等方案中的程度,即隶属度,在区间 $[0, 1]$ 内)如表1所示。

表1 回热器设计方案中特征值的权重和隶属度
Tab.1 The weight and membership degree of the eigenvalues in the design project of the regenerator

指标	权重	隶属度		
		固定管板式	螺旋板式	板翅式
传热效率	0.30	0.071	0.318	0.964
阻力损失	0.20	0.853	0.628	0.289
结构紧凑	0.10	0.184	0.804	0.934
制造费用	0.20	0.933	0.869	0.533
维修方便	0.05	0.750	0.500	1.000
选材范围	0.05	1.000	0.667	1.000
密封性能	0.10	1.000	0.778	0.625

由表1可知,板翅式回热器的效率最高。鉴于船用燃气轮机中工质(空气和燃气)结垢性不强、腐蚀性不大的特点,回热器采用板翅式设计方案是最佳选择。

板翅式换热器的结构形式很多,但其结构单元基本相同,通道的排列有单叠式、复叠式2种,如图1所示。图中, L , L_1 和 L_2 分别为各对应通道的翅片尺寸。

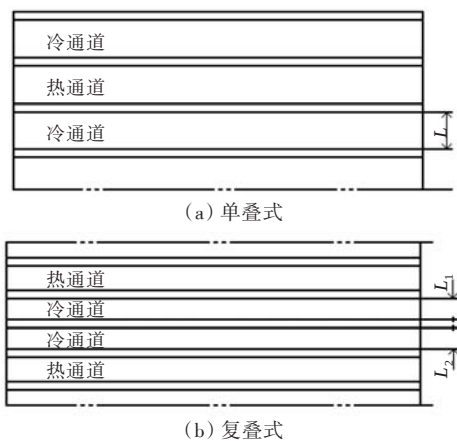


图1 回热器通道

Fig.1 The regenerator's channels

由于单叠布置的翅片效率高于复叠布置,且对于多股流体的板翅式回热器而言,当通道排列偏离理想位置时,局部的热负荷将引起很大的不平衡,加剧温差传热损失,降低回热器效率,因此,在设计船用燃气轮机回热器时选择单叠式排列方式。

若对各个通道进行不同方式的叠置和排列,

钎焊成整体,可得到最常用的逆流、并流、错流、错逆流板翅式换热器板束。相关资料表明,在同样的条件下,逆流时的平均温差总是大于并流时的平均温差,而平均温差相同时逆流所需换热面积最小。所以,船用燃气轮机回热器设计成逆流式时体积最小。

翅片式、板翅式回热器为最基本的元件,传热主要通过翅片来实现,其余过程直接通过隔板完成。翅片与隔板的联结均为完善的钎焊,因此,大部分热量经翅片通过隔板传到了冷流体。翅片除承担主要的传热任务外,还承担着两隔板之间的加强作用。翅片的型式主要有平直式、锯齿式、多孔型和波纹型等3种。因为回热器燃气侧热容量大,传热系数较高,有一定的污染性,因此燃气侧采用平直型翅片。回热器空气侧由于空气较为干净,压力较高,相对压损小,传热系数较低,因此应在空气侧进行强化传热措施,提高空气侧的传热系数,从而提高整个回热器的传热效果。同时,舰船生命力方面的要求对噪音和振动有所限制,所以空气侧采用锯齿型翅片。

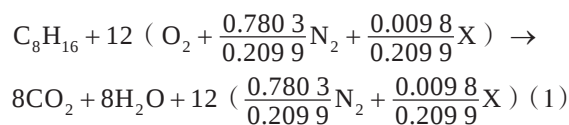
综上所述,船用燃气轮机回热器的设计应为逆流板翅式,其通道采用单叠式排列,燃气侧为平直型翅片,空气侧为锯齿型翅片,翅片材料必须适应海洋工作环境。

2 回热器的设计

2.1 工质热力参数的确定

在回热器的设计中,需要利用空气和燃气的热力性质数据。当燃气温度不超过 $1\ 500\ ^\circ\text{C}$ 时,气体的裂解现象一般可以忽略。空气和燃气的状态参数,如焓、比热、相对压力、普朗特数、密度、导热系数及粘度等都可视为温度的函数,而与压力无关。由于空气和燃气是2种成分不同的工质,其热力参数迥异,在以往计算中,并没有着重区分这一点。显然,这会带来一定程度的误差。为了进一步提高运算精度,使得计算结果在工程应用上更有价值,在计算这些参数的过程中,采用了吴仲华教授给出的热力性质表^[8]。为便于计算机计算,采用数学公式表示工质状态参数。

燃气轮机所用的燃料是 C_8H_{16} ,它与空气的化学反应式为:



式中,X为空气中非氮、非氧成分。由该反应式可

知, 1 mol 的 C_8H_{16} 和 57.17 mol 的空气完全燃烧后生成 61.17 mol 的燃气。对纯燃气, 燃料系数 $\beta=1$; 对空气, $\beta=0$; 对一般燃气, β 介于 0 与 1 之间。因此, β mol 的燃料与 57.17 mol 空气的反应可表示为:

$$\beta C_8H_{16} + 57.17\beta \text{空气} + 57.17(1-\beta) \text{空气} = 61.17\beta (\text{燃气})_{\beta=1} + 57.17(1-\beta) \text{空气} \quad (2)$$

由式(2)可知, 在燃料系数为 β 的燃气中, 空气的摩尔成分 $A=57.17(1-\beta)/(57.17+4\beta)$; 纯燃气的摩尔成分 $B=61.17\beta/(57.17+4\beta)$ 。因此, 燃料系数为 β 的燃气热力性质, 如焓、比热、相对压力等可分别为:

$$I = AI_{\beta=0} + BI_{\beta=1}, c_p = A(c_p)_{\beta=0} + B(c_p)_{\beta=1} \\ \lg \pi_{\beta}^{\circ} = A \lg \pi_{\beta=0}^{\circ} + B \lg \pi_{\beta=1}^{\circ} \quad (3)$$

为避免繁琐的查表计算, 可以采用最小二乘法^[9]将燃气热力性质表中有关的曲线和图表拟合成多项式的形式, 即:

$$I = \sum_{i=0}^5 a_i T^i, c_p = \sum_{i=0}^5 b_i T^i, \lg \pi^{\circ} = \sum_{i=0}^5 c_i T^i \quad (4)$$

式中, a_i , b_i 和 c_i 分别为系数。

在回热器设计过程中, 还涉及一些原始曲线的读取, 如雷诺数 Re 随传热因子 j 和摩擦因子 f 的变化特性图, 收缩阻力系数 Kc 和扩大阻力系数 Ke 随板束通道截面积与集气管最大截面积之比 σ 的变化特性图。同样都采用最小二乘法将曲线和图表拟合成多项式, 并编制成方便调用的子程序。

2.2 回热器的设计步骤

已知某船用三轴简单循环燃气轮机设计参数: 低压压气机进口空气流率 $G_a = 85 \text{ kg/s}$; 进入回热器空气和燃气的温度 $T_{ai} = 251.8^\circ\text{C}$, $T_{gi} = 515.6^\circ\text{C}$; 空气侧允许压降为 1%, 燃气侧允许压降为 3%; 排气口直径为 2.430 m。

在设计回热器的过程中, 先初步选定回热器的总体尺寸, 再通过迭代法来进行回热器设计。本文计算编程(借助通用工程软件 Matlab7.0)的具体步骤如下:

1) 初选回热器的尺寸。

2) 初步假定回热器的回热度 $\varepsilon_1 = 0.85$, 算出回热器空气和燃气的出口温度 T_{ao} 和 T_{go} :

$$T_{ao} = \varepsilon_1(T_{gi} - T_{ai}) + T_{ai}, T_{go} = T_{gi} - \varepsilon_1(T_{gi} - T_{ai}) \quad (5)$$

3) 计算流体空气和燃气的雷诺数 Re ^[10]:

$$Re = GD / (\mu g) \quad (6)$$

式中, G 为质量流率; D 为直径; μ 为流体动力的粘度; g 为重力加速度。

4) 计算空气和燃气的传热系数 α_g, α_a :

$$St = j/Pr^{2/3}, \alpha = St \cdot cp \cdot G \quad (7)$$

式中, j 为摩擦系数, 由所拟合曲线 $j=f(Re)$ 算出; St 为斯坦登准数。

5) 计算总表面效率 η_g, η_a :

$$P = \sqrt{2a/(\lambda\delta)} \\ b = L/2 \\ \eta = \tan(Pb)/(Pb) \quad (8)$$

式中, λ 为材料的导热系数; δ 为翅片的厚度; L 为翅片的高度。

6) 计算总传热系数 K :

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\eta_a \alpha_a} + \frac{F_a}{F_g \eta_g \alpha_g} \quad (9)$$

式中, F_a 为空气侧的总传热面积; F_g 为燃气侧的总传热面积。

7) 计算回热器传热单元数 NTU 及有效度:

$$NTU = \frac{KF_a}{c_{pa}} \quad (10)$$

式中, c_{pa} 为空气的比热。

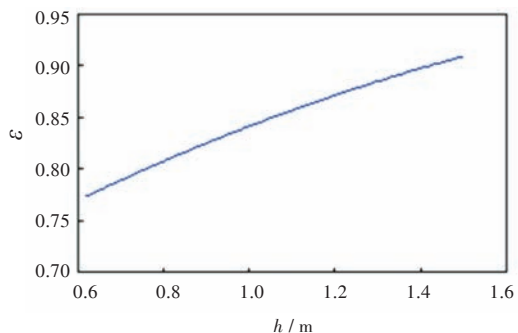
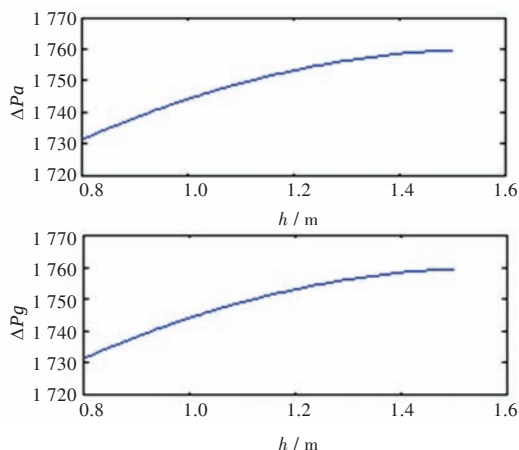
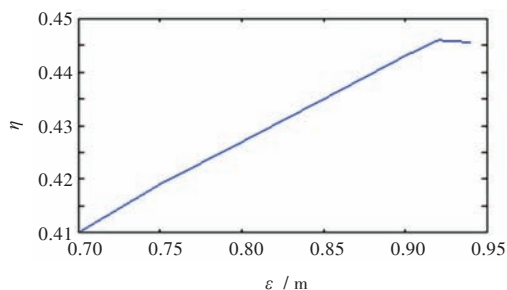
然后, 通过所拟合的曲线方程 $\varepsilon=f(NTU)$ 计算得到回热器有效度 ε 。如果 $|\varepsilon - \varepsilon_1| > 0.001$, 则取 $\varepsilon_1 = \varepsilon$, 然后回到 2) 重新开始计算直到 $|\varepsilon - \varepsilon_1| < 0.001$, 最后取 $\varepsilon = \varepsilon_1$, 并由此算出回热器中空气和燃气的出口温度。

8) 回热器空气和燃气侧压力损失的计算^[11]:

$$\sigma_{Ra} = 1 - \frac{\varepsilon - 0.15}{50}, \sigma_{Rg} = 1 - \frac{\varepsilon - 0.23}{16.6} \quad (11)$$

如果 σ_{Ra} 和 σ_{Rg} 均不小于规定值, 则需要重新选择回热器的尺寸, 再继续重复上述过程进行计算, 直至 σ_{Ra} 和 σ_{Rg} 均小于规定值为止, 即此时所选的回热器是符合要求的。在文献[1-7]中, 气体在回热器通道中的压力损失一般取为定值。实际上, 压力损失并不是固定的。

图 2 所示为回热度 ε 随回热器高度 h 的变化关系。图 3 所示为空气和燃气侧的压力损失 $\Delta Pa, \Delta Pg$ 随回热器高度 h 的变化关系。由图可见, 随回热器高度的增大, 回热度不断增大, 空气和燃气侧的压力损失也增大。图 4 所示为循环效率随回热度的变化。由图可见, 随回热度的增大, 效率首先不断增大, 但最后仍然呈略微下降趋势, 这是由于过大的回热度导致了过大的回热器两侧的压力损失系数, 造成效率降低的程度略微超过了回热过程带来的益处。

图2 回热度 ε 随回热器高度 h 的变化关系Fig.2 Variation of the effectiveness of the regenerator ε with respect to the height of the regenerator h 图3 空气和燃气侧压力损失随回热器高度 h 的变化关系
Fig.3 Variation of the air-side and gas-side pressure loss with respect to the height of the regenerator h 图4 效率 η 随回热度 ε 的变化关系Fig.4 Variation of the efficiency with respect to the effectiveness of the regenerator ε

3 结 论

本文以某船用简单循环燃气轮机为母型进行研究,与以往文献不同的是,在考虑了回热器冷热两侧空气和燃气的热力性质不同以及气体在回热器通道中流动时产生的压力损失并不为常数的因素的基础上,进行了回热器的设计并分析了其对燃气轮机的性能的影响。计算结果表明:

1) 随着回热器回热度的增大,燃气轮机的效率越来越高;但当回热度超过一定值时,效率却不再提高,反而有所降低。

2) 优化改装后的回热器会使燃气轮机具有

更高的效率。效率的提高,意味着舰艇续航力的提高;加装回热器,回收了排气中的部分热量,降低排气温度,这就意味着降低了舰艇的红外辐射强度,从而增强了舰艇的隐身能力,提高了其生命力。研究中,因无法进行实验,故没有考虑回热器内因温度分布不均匀而产生的热消耗。

参考文献:

- [1] 钟芳源. 燃气轮机设计基础[M]. 北京:机械工业出版社,1987.
- [2] 刘光宇. 船舶燃气轮机装置原理与设计[M]. 哈尔滨:哈尔滨船舶工程学院出版社,1992.
- [3] 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):489-494.
YU X Z, YU Q F. Optimal design of compact heat exchanger[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1994, 26(4):489-494.
- [4] 谢公南,王秋旺. 遗传算法在板式换热器尺寸优化中的应用[J]. 中国电机工程学报,2006,26(7):53-57.
XIE G N, WANG Q W. Geometrical optimization design of plate-fin heat exchanger using genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(7):53-57.
- [5] 敖铁强,余建祖,高红霞. 基于遗传算法的板式换热器优化设计[J]. 低温工程,2007(4):60-64.
AO T Q, YU J Z, GAO H X. Optimum design of plate-fin heat exchanger based on genetic algorithm[J]. Cryogenics, 2007(4):60-64.
- [6] 崔永正,任禾盛,郝桂梅. 应用遗传算法优化设计紧凑式换热器[J]. 动力工程,2008,28(5):739-743.
CUI Y Z, REN H S, HAO G M. Optimization design of compact heat exchanger based on genetic algorithm[J]. Power Engineering, 2008, 28(5):739-743.
- [7] 施林德尔 E U. 换热器设计手册[M]. 马庆芳,马重芳,译. 北京:机械工业出版社,1987.
- [8] 吴仲华. 燃气的热力性质表[M]. 北京:科学出版社,1957.
- [9] 张侃,刘宝平,丛琳. 基于加权最小二乘法的武器装备批量生产成本费用研究[J]. 中国舰船研究,2009,4(2):78-80.
ZHANG K, LIU B P, CONG L. On the batch manufacturing of weaponry using weighted least squares method[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2009, 4(2):78-80.
- [10] 俞佐平. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社,1998.
- [11] 姚寿广. 船舶热力系统分析[M]. 北京:科学出版社,2003.

[责任编辑:张智鹏]