

文章编号:1000-8055(2012)01-0118-06

CRGT 循环燃气轮机性能仿真

郑洪涛¹, 张玉龙^{1,2}, 杨 仁¹

(1. 哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院, 哈尔滨 150001;

2. 中国人民解放军 海军装备部驻沈阳地区军事代表局, 沈阳 110035)

摘 要: 采用 VC 和 MATLAB 混合编程方法, 进行了不同循环燃气轮机的变工况性能分析. 其中, 采用修正工程算法编制了工质热力性质计算程序, 采用反向传播(BP)神经网络法建立了压气机和涡轮部件特性计算模型, 采用模块化建模方法建立了简单循环、蒸汽回注(STIG)循环和化学回热(CRGT)循环性能仿真模型. 仿真结果表明: 在保持燃机几何结构和设计功率不变的条件下, STIG 循环和 CRGT 循环均能降低燃气初温和提高循环热效率. 其中, 简单循环的热效率为 35.16%, STIG 循环的热效率可达到 45%, CRGT 循环的热效率可达到 52.8%; 为了进一步提高该型燃机的应用潜力和使用范围, 可以将该型 CRGT 循环燃气轮机用于海水淡化应用中.

关 键 词: 化学回热(CRGT)循环; 混合编程; 反向传播(BP)神经网络法; 模块化建模; 性能仿真
中图分类号: V231.3 **文献标志码:** A

Simulation research of the CRGT cycle gas turbine performance

ZHENG Hong-tao¹, ZHANG Yu-long^{1,2}, YANG Ren¹

(1. College of Power and Energy Engineering,

Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Shenyang Bureau of Navy Equipment Department, The Chinese People's Liberation Army,
Shenyang 110035, China)

Abstract: Design and off-design performance of the different cycle in one certain three-spool gas turbine, with the combination programming method of VC and MATLAB was analyzed. Among it, used the modification engineering algorithm method to program the computation procedure of the working medium's thermodynamic properties, used the BP (back propagation) neural network method to build the calculation models of the compressor and turbine component characteristics; used the modular modeling method to build the dynamic simulation models of the simple cycle, the STIG (steam injection gas turbine) cycle and the CRGT (chemically recuperated gas turbine) cycle. The calculation results show that the STIG cycle and CRGT cycle can both reduce the combustor exit temperature and improve total thermal efficiency, in which the simple cycle's efficiency was 35.16%, the STIG cycle was 45% and the CRGT cycle was 52.8%; and in order to ensure the efficiency and the application areas, this CRGT cycle units can be used in the seawater desalination systems, under the safe operation areas and without the redesign of the components.

Key words: chemically recuperated gas turbine(CRGT) cycle; hybrid programming; BP(back propagation) neural network; modular modeling; performance simulation

收稿日期:2011-01-18; 修订日期:2011-06-03

作者简介:郑洪涛(1962—),男,教授,博士,主要从事先进循环燃气轮机性能仿真分析.

现阶段,世界能源需求正在持续稳定增长,环境污染问题日益严重。国际能源机构预测:到 2030 年,能源需求量将要增加 2000 年总需求量(9179 百万吨油当量)的 2/3。其中,化石燃料仍然占据主导地位。因此,寻找高效率 and 低污染物排放量的先进化石燃料能源技术非常重要^[1]。

近年来,很多国家都在技术成熟的简单循环燃气轮机基础上,大力研究和发 展先进循环的燃机技术。譬如中冷回热(ICR)循环、蒸汽回注(STIG)循环、湿空气透平(HAT)循环、化学回热(CRGT)循环和整体煤气化-燃蒸联合(IGCC)循环和燃料电池-燃气轮机联合循环等。其中,通用(GE)公司以航改型燃机 LM2500 为基础,分别开发了使用常规液体燃料、天然气燃料、生物质汽化燃料和低热值燃料的程式循环、STIG 循环和联合循环,并且部分循环装置已经进入商业化运行状态^[2-4]。

CRGT 循环是特殊回热循环和蒸汽回注循环的综合应用。其充分利用燃机排气余热,使液体燃料在催化剂作用下与由余热二次利用生成的蒸汽一起发生催化重整反应,生成高热值的可燃气体燃料混合物。研究表明:该循环不仅能够提高热效率(热效率可达 50% 以上),还能够有效地减少环境污染(NO_x 排放量降到 10^{-6} 以下)^[5-6]。

本文以某型三轴燃气轮机为基础,研究了在不改变燃机部件结构(包括压气机和涡轮的部件特性和抽气冷却量)情况下,采用 STIG 循环和 CRGT 循环时对该原型机的变工况性能的影响。

1 数学模型

本文主要考察在增加化学回热器后,注蒸汽量对三轴燃气轮机变工况性能的影响。

1.1 工质物性数学模型

工质热力性质是系统性能分析的基础。它不仅关系到计算结果的准确性,还直接影响动态仿真的快速性。因此,建立快速、准确和完善的 CRGT 循环工质物性的数学模型是性能分析的关键。

在 STIG 循环和 CRGT 循环中,工质主要包括燃气轮机中空气-湿燃气系统和蒸汽发生器中补给水-水蒸气系统。其中,湿燃气中含有大量的高温、高压过热蒸汽(温度范围为 800~1350 K,压力范围为 0.1~16 MPa,质量分数为 1%~10%)。

目前,湿燃气热力性质处理方法主要包括工程计算法和余函数计算法等。本文采用修正工程算法进行计算。求解思路为:假定 1 kg 空气、 f kg 燃料和 d kg 蒸汽注入燃烧室中进行燃烧,生成 $f(1+L)$ kg 纯燃气、 $(1-fL)$ kg 纯空气和 d kg 蒸汽的混合物。湿燃气热力性质如图 1 所示。

其中,空气和燃气热力性质采用高阶拟合多项式进行计算^[7],水和蒸汽热力性质采用 IAP-WS-IF97 标准公式进行计算^[8]。

$$A_{\text{wetgas}} = \frac{(1+L)f \cdot A_g + (1-fL) \cdot A_a + d \cdot A_s}{1+f+d} \quad (1)$$

$$(h, s) = F(C_x H_y O_z N_u S_v, p, T, f, d) \quad (2)$$

式中 f 为油气比, d 为水气比(亦称含湿量), L 为燃料理论耗气量, A 为相关工质的比焓值或比熵值。

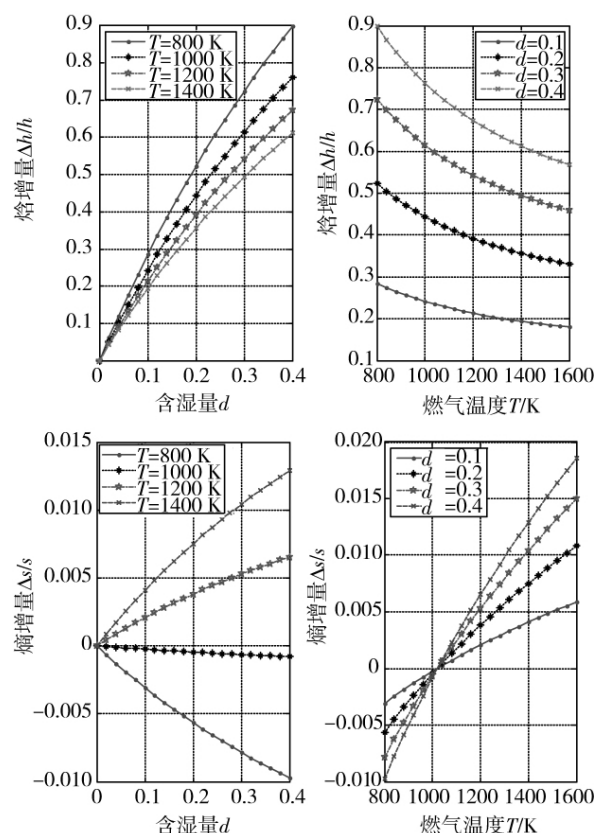


图 1 湿燃气热力性质变化图

(C_8H_{16} , $f=0.02$, $p=2\text{ MPa}$)

Fig. 1 Thermodynamic properties of wet gas

(C_8H_{16} , $f=0.02$, $p=2\text{ MPa}$)

由上图可以看出,当燃料、油气比和压力给定

时,温度和水气比对湿燃气比焓值的影响很大,而对比焓值的影响较小.

1.2 部件特性数学模型

完善的部件特性计算模型,是燃气轮机变工况性能分析的基础.目前,特性线的处理方法主要包括通用解析法和数据拟合法^[9-10].基于某型三轴燃气轮机技术资料及相关文献^[11],本文采用反向传播(BP)神经网络法分别对某型燃机核心部件特性(包括低压和高压压气机,高压、低压和动力涡轮)以及某型螺旋桨特性进行拟合.图2为低压压气机特性曲线图.

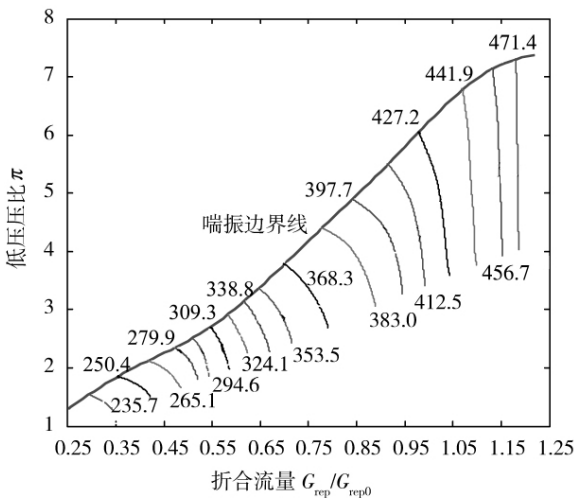


图2 低压压气机特性曲线图

Fig.2 Component characteristics of low compressor

神经网络是一种基于模仿大脑神经网络结构和功能而建立的数据处理系统.其中,多层误差BP网络法广泛应用于函数逼近和压气机部件特性计算中^[12-14].在压气机、涡轮和螺旋桨特性曲线中,压气机特性最为复杂,因此下面将重点介绍压气机特性线的处理方法.

研究表明:在神经网络训练过程中,可能会出现“过适配”问题,即对于训练样本数据误差很小,而对非训练样本数据误差很大.因此需要选择合理的训练方法以提高泛化能力.

在BP神经网络训练过程中,本文同时采用贝叶斯归一化算法和网络规模调节法来提高泛化能力.主要步骤为:首先通过网络训练,泛化出相邻转速中间的数据;然后将新泛化出的数据加入样本空间中进行下一次训练,得出更多的特性数据;以此类推直到满足要求为止,训练过程中计算精度为 3×10^{-5} .其中,在每次泛化相邻转速中间

的数据之前,均多次改变网络神经元数进行训练,并且验证训练后的泛化能力,以确定最佳网络神经元数.泛化能力的验证方法为:对已知的等转速线(包括资料提供和前次泛化出的中间等转速线),均取一部分数据作为训练样本,取不相同的另一部分数据作为验证样本;对未知的等转速线,则根据经验来判断变化趋势是否合理.

$$[\pi_c, \eta_c] = f(G_{rep}/G_{rep0}, n_{rep}) \tag{3}$$

式中 π_c, η_c 为压气机的压比和效率; G_{rep}, n_{rep} 为折合流量和折合转速.

1.3 热力计算数学模型

CRGT 循环系统主要由压气机、燃烧室、涡轮、螺旋桨、化学回热器和蒸汽发生器等部件组成,如图3所示.其中,压气机和涡轮模型采用变比热容方法进行计算,燃烧室和化学回热器模型由质量守恒方程和能量守恒方程联立求解^[15].下面主要介绍化学回热器的数学模型.

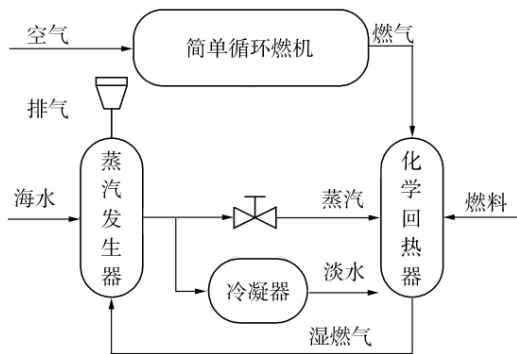


图3 CRGT 循环系统图

Fig.3 CRGT cycle diagram

在化学回热器中,燃料和过热蒸汽在镍基催化剂作用下发生重整裂解反应,吸收燃机排气余热,生成高热值气体燃料;气体燃料和过量蒸汽混合物被继续加热后注入燃烧室参与燃烧.分析表明:该重整反应由一系列复杂的化学反应组成.为了简化计算,本文假定燃料和蒸汽完全转化为甲烷,随后甲烷和蒸汽在催化剂作用下发生蒸汽催化重整反应.反应热和产物组分主要由化学反应总方程式决定.

$$\begin{aligned} CH_m + RH_2O &= aCO + bCO_2 + \\ (1 - a - b)CH_4 + (R - a - 2b)H_2O + \\ &\left(3a + 4b - \frac{4-m}{2}\right)H_2 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\Delta Q = \sum_i v_i \Delta H_{Li} - \sum_j v_j \Delta H_{Rj} \tag{5}$$

式中 R 为水碳比、 m 为燃料碳氢比、 ΔQ 为反应

热、 ΔH_{Li} 为反应物 i 生成焓、 ΔH_{Rj} 为生成物 j 生成焓。 a, b 和 v 为核心组分化学计量数。

化学动力学分析表明:组分化学计量数与水碳比、反应温度和压力等有关。本文以化学回热器设计参数为基准,联立关键反应的平衡常数式进行简化计算^[5,6,14]。

$$K_1 = \frac{p^2 y_{H_2}^3 y_{CO}}{y_{CH_4} y_{H_2O}} = \frac{p^2 n_{H_2}^3 n_{CO}}{n_T^2 n_{CH_4} n_{H_2O}} \quad (6)$$

$$K_2 = \frac{y_{CO_2} y_{H_2}}{y_{CO} y_{H_2O}} = \frac{n_{CO_2} n_{H_2}}{n_{CO} n_{H_2O}} \quad (7)$$

化学回热器的进出口混合物成分复杂,不易计算。本文假定该进出口燃料的比热容不变,进出口蒸汽的流量不变,催化重整反应集中表现为回收废气余热。基于上述假定,催化重整反应回收热量的计算公式为

$$\begin{cases} Q_H = G_f Q_f; & G_f/G_s \leq 0.1914 \\ Q_H = G_s Q_s; & G_f/G_s > 0.1914 \end{cases} \quad (8)$$

1.4 动态仿真数学模型

本文以某型简单循环三轴燃气轮机为母型机,重点研究了向燃烧室注蒸汽(STIG 循环)和催化裂解气(CRGT 循环)时该型燃机的性能。

对于该型燃机,本文主要考虑了 4 处容积惯性环节,即高-低压压气机间、高压压气机-燃烧室-高压涡轮间、高-低压涡轮间和低压-动力涡轮间的容积惯性;同时,主要考虑了高压压气机-高压涡轮和低压压气机-低压涡轮的转动惯性。动力涡轮转速根据动力涡轮-螺旋桨特性曲线查询求得。

$$\frac{dp_{out}}{dt} = \frac{R_g \bar{T}}{V} (G_{in} - G_{out}) \quad (9)$$

式中 R_g 为气体常数; V 为容积(m^3); $\bar{T}$ 为控制温度(K); G_{in}, G_{out} 为流量(kg/s)。

$$\frac{dn}{dt} = \frac{900}{J\pi^2 \cdot n} (N_t - N_c) \quad (10)$$

式中 J 为转子转动惯量($kg \cdot m \cdot s^2$); n 为转子转速(r/min); N_t, N_c 分别为涡轮和压气机功率(kW)。

联立上式,便得到 STIG 循环和 CRGT 循环的控制方程组

$$f(p_s, T_s, G_s, G_f) = 0 \quad (11)$$

式中 p_s, T_s, G_s 分别为回注蒸汽的压力,温度和质量流量; G_f 为耗油量。

2 仿真分析

基于上述数学模型,本文在 MATLAB 软件平台上搭建三轴燃气轮机动态仿真模型。为了在

确保计算精度的同时,提高计算速度,本文采用 MATLAB 和 VC 混合编程方法进行模块化建模^[15-16]。具体步骤为:首先采用 C 语言编写工质热力性质的计算程序,并且采用 MEX 接口实现 VC6.0 和 MATLAB 平台函数调用;然后采用 M 语言编写部件特性和热力计算程序;最后应用 S 函数建立相关部件的 SIMULINK 仿真模块库。

基于上述模块库,本文建立了该型三轴燃气轮机的动态仿真模型。并且基于该模型,研究了 STIG 循环和 CRGT 循环对该型燃机变工况性能的影响关系。

2.1 简单循环校核

为了确保 CRGT 循环变工况性能分析的可靠性,首先对简单循环燃机仿真模型进行校核。简单循环的结构如图 4 所示,校核结果如表 1 所示。其中,C 表示燃烧室。在简单循环校核和先进循环变工况性能分析过程中,均充分考虑了进排气道阻力损失、压气机抽气量和涡轮冷却量对燃气轮机性能的影响。

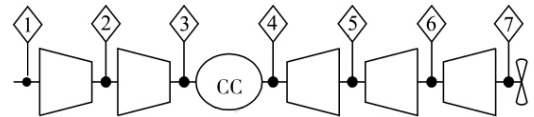


图 4 简单循环的结构图

Fig. 4 Chart of the three-spool simple cycle

表 1 简单循环燃机设计工况校核表

Table 1 Check values of the design performance in simple cycle gas turbine

参数	参考值	计算值	误差值/%
T_2/K	486.1	486.5	0.08
T_3/K	769.9	771.7	0.23
T_4/K	1542.8	1542.8	
T_5/K	1241.0	1240.4	0.05
T_6/K	1056.2	1055.8	0.04
T_7/K	794.7	795.30	0.07
η	34.94%	35.16%	0.63

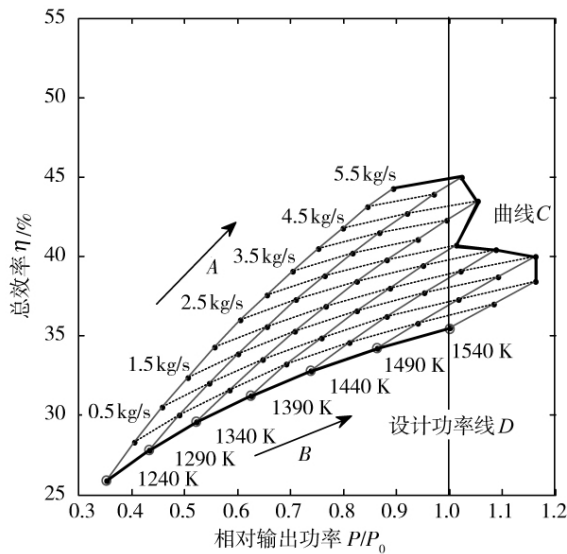
上表数据表明:该仿真模型能够满足性能分析的准确性要求。其中参考值源于技术资料。

2.2 对比性能分析

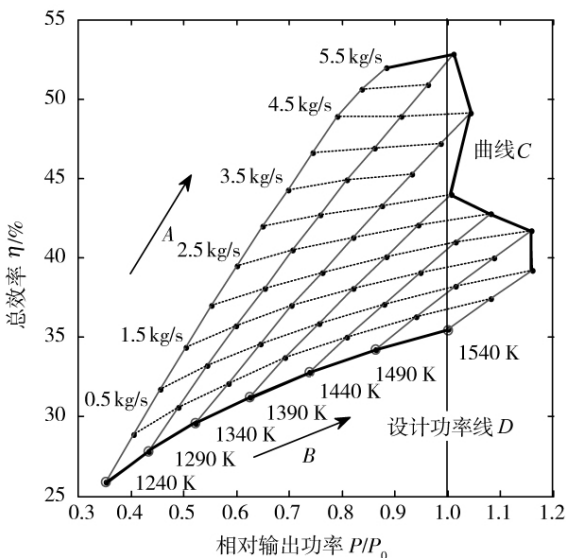
理论分析表明:化学回热器和蒸汽发生器的加入,必定会改变燃机部件间的匹配关系。本文先

进循环性能分析的基本原则为:在确机组保安全运行条件(主要确保转子转速不超转)下,向化学回热器中注入蒸汽,以提高系统总热效率和降低燃烧室出口温度.

下面对比研究注蒸汽量对 STIG 循环和 CRGT 循环性能的影响关系.在图 5 中,虚线 A 表示等注蒸汽量线,实线 B 表示等燃气初温线,实心点表示相应工况的仿真数据.



(a) STIG 循环



(b) CRGT 循环

图 5 STIG 循环和 CRGT 循环的变工况性能关系图

Fig. 5 Dynamic performance graphs of the STIG cycle and the CRGT cycle

对比分析图 5 可得到如下结论:

1) 无论是 STIG 循环还是 CRGT 循环,当注蒸汽量越多、燃气温度越高时,循环系统的热效率越高;并且 CRGT 循环的总效率-输出功率变化

率恒大于 STIG 循环.

2) 在相同注蒸汽量和燃气温度条件下,CRGT 循环的热效率大于 STIG 循环的热效率,而输出功率相差不大;并且注蒸汽量对总效率的影响程度大于燃气温度对总效率的影响程度.

3) 当输出功率相同时,注蒸汽量越多,则燃气温度越低;当输出功率等于设计功率且注蒸汽量约为 5.5 kg/s,燃气温度相对于简单循环降低了 250 °C,此时 CRGT 循环的热效率约为 52.8%,STIG 循环的热效率约为 45%.

4) 曲线 C 为机组安全运行限制线.仿真研究表明:对于该型燃机,高压转子对注蒸汽量的敏感度高于低压转子,因此限制因素主要为高压转子转速限制.该曲线表明:对于该型简单循环燃机,无论是进行 STIG 循环改型还是 CRGT 循环改型,当输出功率一定时,均存在最大的注蒸汽量和热效率,当注蒸汽量超出时,燃机运行将变得不安全;并且随着输出功率的增加,最大的注蒸汽量和热效率先增加后减小.

5) 直线 D 为该机组等设计功率线.分析研究表明:当在保持燃机几何结构和额定功率不变的条件下,对其进行 CRGT 循环改造时,注蒸汽量和燃气初温存在反比例关系,即注蒸汽量越多时燃气初温越低、燃机排气温度越低;而当蒸汽发生器的结构参数不变时,排气温度越低则过热蒸汽产量越低.因此,为了进一步提高对该燃机性能的利用能力,可将 CRGT 循环用于海水淡化应用中,即通过适当减少注蒸汽量来提高燃机排气温度,从而产生更多过量蒸汽.

3 结 论

本文采用 VC 和 MATLAB 混合编程方法,对某型三轴燃气轮机进行了 STIG 循环和 CRGT 循环的变工况性能分析.仿真结果表明:当保持燃机几何结构和额定功率不变时,STIG 循环和 CRGT 循环均能降低燃气初温和提高循环热效率,此时简单循环热效率为 35.16%,STIG 循环热效率为 45%,CRGT 循环热效率为 52.8%;为了进一步提高对该燃机性能的利用能力和应用范围,可以在确保机组安全运行条件下将该型 CRGT 循环燃气轮机用于海水淡化应用中.

参考文献:

[1] Jonsson M, Yan J Y. Humidified gas turbines a review of proposed and implemented cycles[J]. Energy, 2005, 30

- (7):1013-1078.
- [2] Poullikka S A. An overview of current and future sustainable gas turbine technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2005, 9(5): 409-443.
- [3] Saad M A, Cheng D Y. The new LM2500 cheng cycle for power generation and cogeneration[J]. Energy Conversion and Management, 1997, 38(15): 1637-1646.
- [4] Camporeale S M, Fortunato B. Performance of a mixed gassteam cycle power plant obtained upgrading an aeroderivative gas turbine[J]. Energy Conversion and Management, 1998, 39(16): 1683-1692.
- [5] Kesser K F, Hoffman M A, Baughn J W. Analysis of a basic chemically recuperated gas turbine power plant[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1994, 116(2): 277-284.
- [6] Abdallah H, Harvey S. Thermodynamic analysis of chemically recuperated gas turbines[J]. International Journal of Thermodynamics, 2001, 4(4): 372-384.
- [7] 刘志刚. 工质热物理性质计算程序的编制及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [8] 瓦格纳, 克魯澤. 水和蒸汽的性质[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [9] Tirnovan R, Giurgea S, Miraoui A, et al. Modeling the characteristics of turbo-compressors for fuel-cell systems using hybrid method based on moving-least squares[J]. Applied Energy, 2009, 86(7): 1283-1289.
- [10] Ghorbanian K, Gholamrezaei M. An artificial neural network approach to compressor performance prediction[J]. Applied Energy, 2009, 86(7): 1210-1221.
- [11] 冯凤珍, 孙允标, 余又红. 基于神经网络的压气机特性计算新方法[J]. 计算机与数字工程, 2004, 32(6): 45-47. FENG Fengzhen, SUN Yunbiao, YU Youhong. A new approach of characteristic map calculating of compressor based on neural network[J]. Computer & Digital Engineering, 2004, 32(6): 45-47. (in Chinese).
- [12] Cortes O, Urquiza G, Hernandez J. Optimization of operating conditions for compressor performance by means of neural network inverse[J]. Applied Energy, 2009, 86(11): 2487-2493.
- [13] González J A, Sala J M, López L M, et al. Modelling and dynamic simulation of processes with 'MATLAB': an application of a natural gas installation in a power plant[J]. Energy, 2007, 32(7): 1271-1282.
- [14] Carapellucci R, Milazzo A. Thermodynamic optimization of a reheat chemically recuperated gas turbine[J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46(18): 2936-2953.
- [15] 肖琳. 气垫船用三轴燃气轮机推进系统动态性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007. XIAO Lin. Research on systemic performance of hovercraft gas turbine propulsion[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.
- [16] 李传军. C 语言与 MATLAB 接口编程与实例[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2004.