

变几何燃气轮机性能的计算分析

邱 超, 宋华芬

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘 要: 为了分析不同涡轮变几何时的机组性能, 基于小偏差方程提出了一种研究变几何燃气轮机性能的新方法。应用该方法计算了不同涡轮通流面积的相对变化量在 ±5% 时的机组性能, 并从理论上进行了分析。分析表明: 在简单循环机组中, 无论是高压涡轮、低压涡轮还是动力涡轮变几何, 对系统经济性的影响都不大, 但会影响压气机平衡运行线, 其中低压涡轮变几何对低压压气机平衡运行线的影响较大, 高压涡轮和低压涡轮变几何对高压压气机平衡运行线的影响较大。

关 键 词: 小偏差方程; 变几何燃气轮机; 性能研究

中图分类号: TK472 TK39 文献标识码: A

引 言

燃气轮机的变工况性能计算, 大多都是依赖部件特性进行的, 但是采用此方法研究变几何燃气轮机的性能, 就显得非常困难, 这是因为要研究变几何燃气轮机的性能, 就必须知道变几何涡轮特性。但目前来说, 准确求解变几何涡轮特性还是比较困难的^[1~4]。为此, 这里基于小偏差方程提出一种研究变几何燃气轮机性能的新方法。采用该方法研究变几何燃气轮机的性能, 计算速度快, 工作量大大减小^[5~7], 尤其适用于机组的改型设计、方案论证阶段。

1 三轴燃气轮机的小偏差方程

根据文献 [8] 的推导, 可以得到三轴燃气轮机的小偏差方程。由于篇幅限制, 这里仅给出主要的小偏差方程, 式子中各系数定义请参考文献 [8], 即:

$$\delta I_{LC} = \delta I_1 + k_1 \alpha_{LC} - \eta_{LC}$$

$$\delta I_2 = k_2 k_3 \alpha_{LC} - k_2 \eta_{LC}$$

$$\delta I_{HC} = \delta I_2 + k_3 \alpha_{HC} - \eta_{HC}$$

$$\delta I_3 = k_4 k_5 \alpha_{HC} - k_4 \eta_{HC} + \delta I_2$$

$$\delta I_4 = \delta I_3 - k_5 k_6 \alpha_{HT} - k_5 \eta_{HT}$$

$$\delta G_{HT} = \alpha_{PT} + \alpha_{LT} + \frac{\pi_{HT}^2}{\pi_{HT}^2 - 1} \alpha_{HT} - \frac{1}{2} \delta I_4 + \delta F_1$$

$$\delta I_5 = \delta I_4 - k_6 k_7 \alpha_{LT} - k_6 \eta_{LT}$$

$$\delta G_{LT} = \alpha_{PT} + \frac{\pi_{LT}^2}{\pi_{LT}^2 - 1} \alpha_{LT} - \frac{1}{2} \delta I_5 + \delta F_2$$

$$\delta I_6 = \delta I_5 - k_7 k_8 \alpha_{PT} - k_7 \eta_{PT}$$

$$\delta G_{PT} = \frac{\pi_{PT}^2}{\pi_{PT}^2 - 1} \alpha_{PT} - \frac{1}{2} \delta I_6 + \delta F_3$$

...

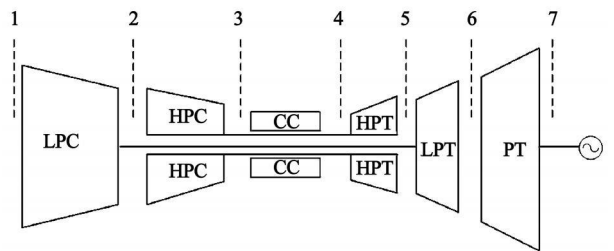


图 1 三轴燃气轮机示意图

2 计算实例

这里实例是某一型号的三轴燃气轮机, 其主要设计参数为:

大气温度: 300 K

大气压力: 0.101 3 MPa

燃烧室出口温度: 1 542 K

低压压气机效率: 0.866

高压压气机效率: 0.867

高压涡轮效率: 0.866

低压涡轮效率: 0.878

动力涡轮效率: 0.918
 空气流量: 82.11 kg/s
 燃料量: 1.6254 kg/s
 低压压气机压比: 4.57
 高压压气机压比: 4.53
 高压涡轮膨胀比: 2.62
 低压涡轮膨胀比: 1.97
 动力涡轮膨胀比: 3.43
 燃烧室效率: 0.99
 机械效率: 0.995

根据设计点参数,通过求解小偏差方程组,就能够得到机组的变几何性能。需要说明的是,在用小偏差方法进行计算时,涡轮效率的变化量仍然是按照不变几何时的效率曲线来进行修正,这虽然是一种近似处理,但并不会带来较大的误差。这是因为涡轮变几何主要影响的是涡轮的通流能力,涡轮效率的改变量相对来说较小,尤其是当涡轮通流面积的相对变化量较小时。所以,在进行变工况计算时,涡轮通流面积的相对变化量都取在 $\pm 5\%$ 范围内。

根据符号 δ 的定义: $\delta F = (F - F_0) / F_0$ 可知, $\delta F = 0$ 表示涡轮不转角时的情况; $\delta F = -5\%$ 表示相应的涡轮通流面积减小了 4.76%; $\delta F = 5\%$ 表示相应的涡轮通流面积增大了 5.26%。

2.1 高压涡轮采用变几何涡轮

要计算高压涡轮变几何时的变工况性能,首先要知道高压涡轮变几何时的设计工况点参数。这里采用文献 [8] 中的方法来求解高压涡轮变几何时的设计点参数。具体求解过程为:当高压涡轮变几何时,可以假定变几何前后的涡轮入口温度保持不变,即 $\delta T_4 = 0$ 就可以得到各变量随高压涡轮通流面积 δF_1 的变化规律(如 $\alpha_{LC} / \delta F_1$, $\alpha_{HC} / \delta F_1 \dots$)。给定一个高压涡轮通流面积的相对变化量(如 $\delta F_1 = \pm 5\%$)就能够求出各个变量的相对变化量,以此得到高压涡轮变几何时的设计工况点参数。

图 2~图 4 是高压涡轮变几何时的计算结果。从图 2 和图 3 中可以看出:高压涡轮变几何对低压压气机的平衡工作线影响不大,但对高压压气机平衡工作线的影响较大。随着高压涡轮通流面积的增大,低压压气机的平衡运行线逐渐向喘振线靠拢,而高压压气机的平衡运行线逐渐远离喘振线,并且高压轴转速下降。当高压涡轮通流面积减小时,变化趋势则相反。图 4 表明,高压涡轮变几何对机组经济性的影响很小。

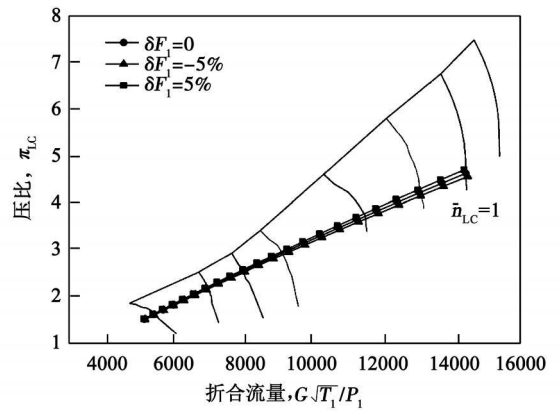


图 2 高压涡轮变几何时的低压运行线

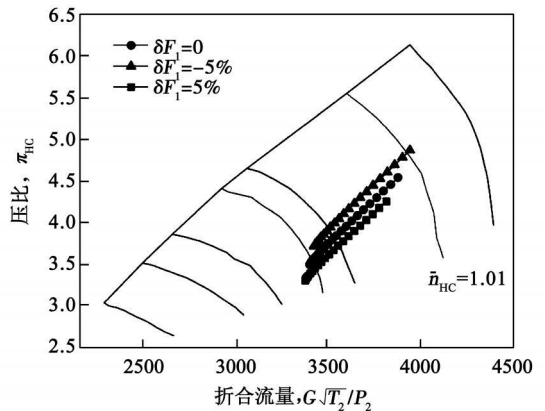


图 3 高压涡轮变几何时的高压运行线

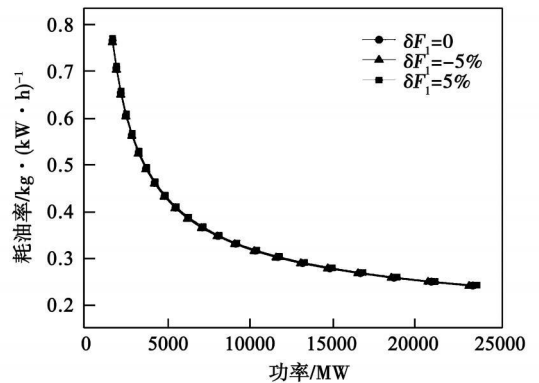


图 4 高压涡轮变几何时的油耗曲线

2.2 低压涡轮采用变几何涡轮

图 5~图 7 为低压涡轮变几何前后的计算结果。从图 5 和图 6 中可以看出:低压涡轮变几何对低压压气机平衡工作线和高压压气机平衡工作线的影响都较大,随着涡轮通流面积的增大,低压压气机的平衡线和高压压气机的平衡运行线逐渐远离喘振线,并且会导致高压轴转速增加。图 7 表明,低压涡轮

轮变几何对机组经济性的影响很小。

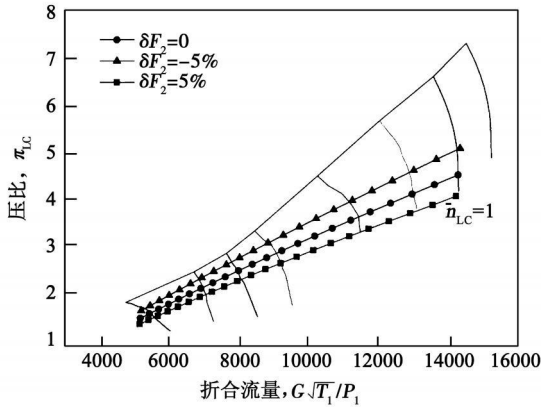


图 5 低压涡轮变几何时的低压运行线

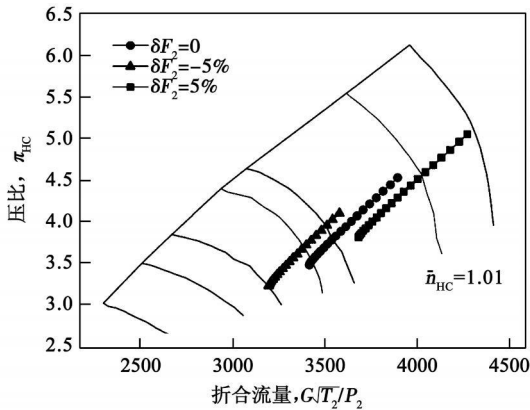


图 6 低压涡轮变几何时的高压运行线

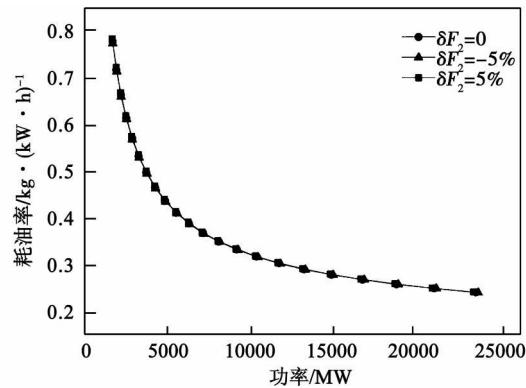


图 7 低压涡轮变几何时的油耗曲线

轴转速增加。图 10 则表明,动力涡轮变几何对机组经济性的影响很小。

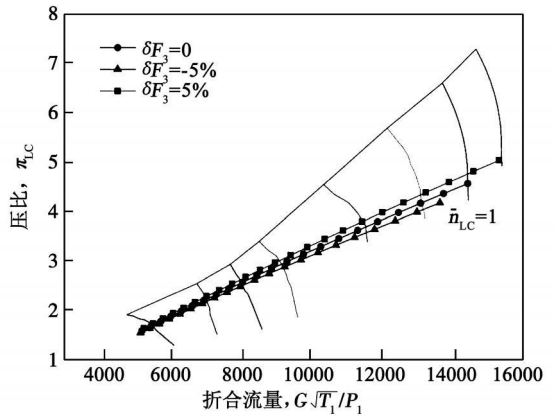


图 8 动力涡轮变几何时的低压运行线

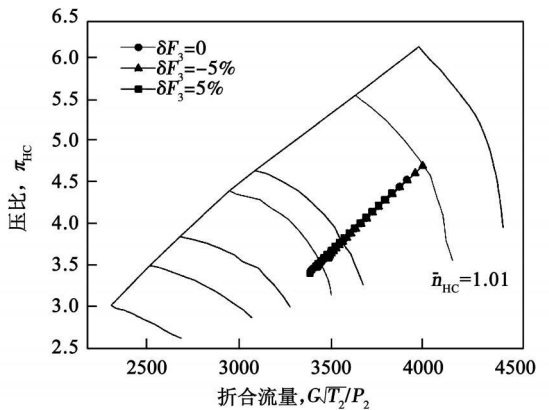


图 9 动力涡轮变几何时的高压运行线

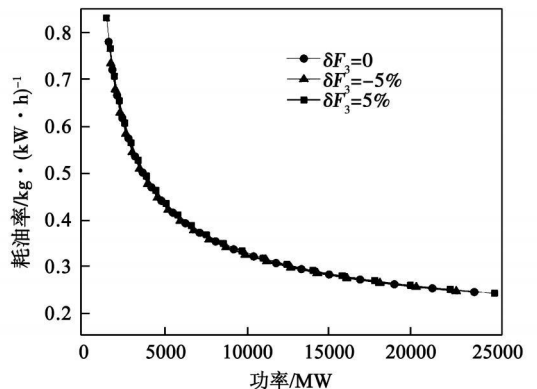


图 10 动力涡轮变几何时的油耗曲线

2.3 动力涡轮采用变几何涡轮

图 8~图 10 是动力涡轮变几何前后的计算结果。可以看出:动力涡轮变几何对低压压气机的平衡工作线有一定的影响,但对高压压气机平衡工作线的影响不大。随着涡轮通流面积的减小,低压压气机的平衡运行线逐渐远离喘振线,并会导致高压

2.4 计算结果分析

为了从理论上分析小偏差方法计算结果的正确性,这里以图 11 和图 12 来进行说明。图中,虚线代表涡轮变几何时的流量特性曲线,点线代表不变几何时的情况,点画线代表相应的涡轮变几何时的情况。

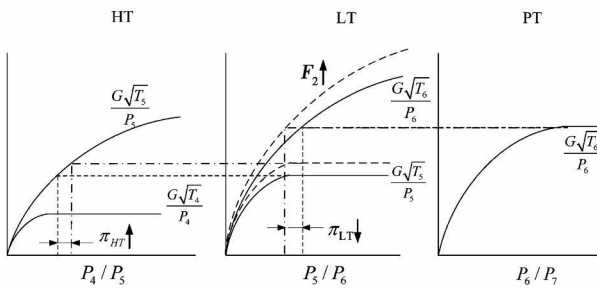


图 11 低压涡轮变几何时,不同涡轮之间变化关系示意图

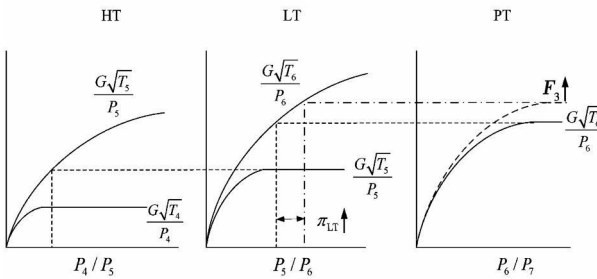


图 12 动力涡轮变几何时,不同涡轮之间变化关系示意图

因为高压涡轮带动高压压气机,所以高压涡轮变几何直接影响到高压运行线,对低压运行线的影响比较小。当低压涡轮变几何时,从图 11 中可以看出,增加低压涡轮的通流面积,会引起膨胀比在高压涡轮和低压涡轮之间的重新分配,最终导致高压涡轮膨胀比增加,低压涡轮膨胀比减小,相应地影响到低压压气机和高压压气机的工作点。而当动力涡轮变几何时,从图 12 中可以看出,只要低压涡轮工作在临界状态下,动力涡轮变几何就不会影响到高压涡轮的工作状态。但是由于动力涡轮变几何影响到低压涡轮的工作点,从而影响到低压压气机的工作点,虽然高压涡轮的工作点保持不变,高压运行线仍然会受到影响。

另外,从图 4 图 7 和图 10 的计算结果可以看出,简单循环机组中使用变几何涡轮并不能改善机组的经济性,所以变几何涡轮一般要联合回热器使用。

3 结论

(1) 三轴燃气轮机变几何时,低压涡轮变几何对低压压气机平衡运行线的影响最大,动力涡轮其次,高压涡轮最小。

(2) 高压涡轮和低压涡轮变几何对高压压气机

平衡运行线的影响较大,动力涡轮变几何的影响较小。

(3) 在简单循环机组中,无论是高压涡轮、低压涡轮还是动力涡轮变几何对系统经济性的影响都不大。

(4) 小偏差方法虽然是一种近似方法,但在变几何燃气轮机性能中体现很好的优越性,为变几何涡轮在燃气轮机中的应用奠定了很好的基础,也为燃气轮机的改造提供了很好的途径。但小偏差方法毕竟是一种近似方法,想要准确知道机组的变几何性能,还需通过变几何部件特性来求解。

参考文献:

- [1] BRINGHENTI C BARBUSA J R Methodology for gas turbine performance improvement using variable geometry compressor and turbines J. Journal of Power and Energy 2004 218 541-549
- [2] WEN XUE YOU XIAO DONG MING Feasibility study of an intercooled cycle marine gas turbine J. Journal of Engineering for Gas Turbine and Power 2008 130 1-6
- [3] BHARGAVA R BIANCHI M PERETTO A A feasibility study of gas turbines for recuperated intercooled and reheat cycle J. Journal of Engineering for Gas Turbine and Power 2004 126 531-544
- [4] KARSIENSEN K W WIGGINS J Q A variable geometry power turbine for marine gas turbines J. Journal of Turbomachinery 1990 112 165-174
- [5] 郑群,刘顺隆. 间冷回热燃气轮机特性计算[J]. 哈尔滨工程大学学报, 1995 16(3): 42-49
- [6] 柯特略尔. 燃气轮机装置的变动工况[M]. 樊介生,高椿译. 上海:上海科学技术出版社, 1965
- [7] 方钢,蔡睿贤,林汝谋. 二阶偏差法求解燃气轮机特性[J]. 工程热物理学报, 1992 13(1): 12-16
- [8] 邱超,宋华芬. 小偏差方法在变几何燃气轮机性能研究中的应用[J]. 热能动力工程, 2010 25(3): 259-264

(编辑 辉)

· 书 讯 ·

《我汉汽轮机燃气轮机词汇》

本书收集了汽轮机燃气轮机及其辅助设备的设计、结构、制造工艺、材料、检验技术、安装、运行、维修等方面的专业词汇和常用词两万余条。为了方便读者使用,书后还附有汉俄汽轮机燃气轮机基本词汇、常用科技缩略语及常用单位符号对照表等。

读者对象: 汽轮机和燃气轮机从业人员、翻译及相关大专院校师生。

2010年1月出版

tion that our country currently has not yet made available necessary conditions for producing any light type gas turbines, such type of turbines should not be chosen as far as possible. Each station shall be provided with at least three gas turbines and can be built in phases or stages with space being reserved for the extension project. This not only relates to the safe and smooth operation of the long distance transmission pipeline but also has an extremely big influence on its operation cost. On the basis of an analysis of theoretical and actual operation effectiveness, the authors have studied and explored in depth the foregoing two major technical problems. Key words: long distance transmission pipeline; gas turbine/compressor unit machine type configuration

变几何燃气轮机性能的计算分析 = Calculation and Analysis of the Performance of a Variable Geometry Gas Turbine [刊, 汉] / QIU Cha, SONG Hua-fen (College of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(4). — 377 ~ 380

To analyze the performance of a unit when its turbine is being geometrically changed, proposed was a new method for studying the performance of variable geometry gas turbines based on a small deviation equation. By using the method, the unit performance was calculated when the relative change of different turbine flow path areas is within $\pm 5\%$ and a theoretical analysis has been performed. The analytic results show that in simple cycle units, whether a HP turbine, LP turbine or geometrically changed power turbine is used, it will have little influence on the cost effectiveness of the system but will affect the equilibrium operating lines of the compressor. Among others, the variable geometry of the LP turbine will have a relatively big influence on the equilibrium operating lines of the LP compressor while that of both HP and LP turbine will also exercise a relatively big effect on the same operating lines of the HP compressor. Key words: small deviation equation; variable geometry gas turbine; performance study

燃气轮机控制室中央空调自控系统的设计与应用 = Design and Application of a Central Air Conditioning Automatic Control System in a Gas Turbine Control Room [刊, 汉] / WANG Qi-xiang, XIE Xian-gang, SONG Chun-hua, et al (School of Maritime Affairs and Harbor Navigation, Guangdong Traffic Vocational Technical College, Guangzhou, China, Post Code: 510800) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(4). — 381 ~ 384

Designed was a configuration software based automatic control system for the central air conditioning in a gas turbine control room. With PLC (Programmable Logic Controllers) and configuration software serving as a core, the system employed distributed remote modules to accomplish data acquisition and transmission of control signals. The operation results show that depending on the correlation among the transducers, transmitters, PLC and actuators in the automatic control system, the authors have employed a man-machine friendly interface to set and reflect the control parameters of the system, facilitating the setting operation and management of relevant parameters, thus optimizing the distributed control system of central air conditioners. Key words: gas turbine control room; PLC (Programmable Logic Controllers); central air conditioning automatic control; configuration software

高温升蒸发型燃烧室的设计 = Design of a High-temperature Rise Evaporation Type Combustor [刊, 汉] / LI Ming, WU Er-ping, TANG Ming (College of Power and Energy Source, Northwest Polytechnic University, Xi'an, China, Post Code: 710072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(4). — 385 ~ 388

To meet the requirement of a combustor in a ground surface test facility for a high temperature rise, designed was an evaporation type combustor with a temperature rise of 1350 K. According to the overall structure of the combustor, its main components were designed. Through the aerodynamic and thermodynamic calculation of the combustor, the