

用残量法预估注蒸汽燃气轮机变工况性能

臧述升 (哈尔滨船舶工程学院)

〔摘要〕 本文利用残量法对注蒸汽燃气轮机变工况性能进行了计算,给出了计算的数学模型及残量方程组。详细地论述了方程的简化及求解的方法,并与单步迭代计算进行了比较。计算结果表明,利用残量法可以大大地减少迭代过程,并且具有良好的收敛性和收敛速度,同时又使计算过程更为合理。

关键词 燃气轮机 计算方法 计算机模拟 程氏循环

一、引言

注蒸汽燃气轮机(STIG)又称程氏循环燃气轮机,是近年来引人注目的新型热机。目前,美国、日本正在将该种热机向实用化阶段发展,并已有多种装置投入运行。STIG由于采用两种工质并使过热蒸汽回注燃烧室中,从而使可变参量增多。这样,在何种参数组合下STIG的设计及运行性能最佳则显得十分重要了。STIG变工况性能预估即是上述工作的一部分。文献[1]针对几种不同的复合循环方式与STIG性能进行了对比,文献[2]对现有燃气轮机在不作任何大的改动下进行STIG改装后的性能进行了模拟,上述这些计算中均采用了较多的单步迭代过程,使计算较为烦杂。

本文在文献[2]的基础上利用残量法对STIG变工况性能进行了计算,给出了稳态方程组、残量方程和详细的求解过程,克服了上述缺点。

二、STIG稳态数学模型及残量方程组

本文以用于发电的单轴定转数STIG为

例给出了其稳态数学模型。图1是该装置的简图及各截面符号。

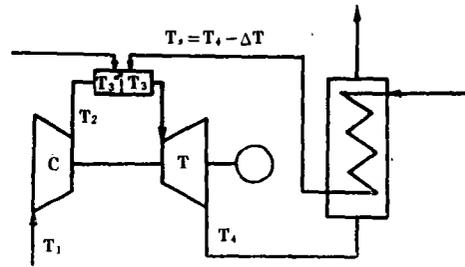


图1 STIG装置简图

所谓STIG变工况性能预估,即为求解它的热力参数不随时间变化的稳定工况,它是由燃气轮机各种部件特性及蒸汽、燃气特性和STIG的平衡方程组合而定的。

下面诸式即为本文的STIG稳态方程。

1. 平衡方程

$$N_t - N_c - N_g = 0 \quad (1)$$

$$G_t - (1 + f)G_c - G_s = 0 \quad (2)$$

2. 参数联系方程

$$p^*_3 = p_1 \cdot \pi_c \cdot \sigma_b \quad (3)$$

$$T_3^* = f_1(T_2, \beta, \eta_b) \quad (4)$$

$$T_3^* = f_2(T_3^*, \beta, T_s, SG) \quad (5)$$

$$T_4 = \Delta T + T_s \quad (6)$$

3. 部件特性方程组

$$\tau_c = \frac{T_2^*}{T_1^*} = f_3 \left(\frac{G_c \sqrt{T_1^*}}{p_1^*}, \frac{n}{\sqrt{T_1^*}} \right) \quad (7)$$

$$\pi_c = \frac{p_2^*}{p_1^*} = f_4 \left(\frac{G_c \sqrt{T_1^*}}{p_1^*}, \frac{n}{\sqrt{T_1^*}} \right) \quad (8)$$

$$G_c = \frac{G_c \sqrt{T_1^*}}{p_1^*} \cdot p_1^* \cdot \frac{1}{\sqrt{T_1^*}} \quad (9)$$

$$N_c = f_5 \left(\frac{G_c \sqrt{T_1^*}}{p_1^*}, \frac{n}{\sqrt{T_1^*}}, p_1^*, T_1^* \right) \quad (10)$$

$$\tau_t = \frac{T_3^*}{T_4^*} = f_6 \left(\frac{G_t \sqrt{T_3^*}}{p_3^*}, \frac{n}{\sqrt{T_3^*}} \right) \quad (11)$$

$$\pi_t = \frac{p_3^*}{p_4^*} = f_7 \left(\frac{G_t \sqrt{T_3^*}}{p_3^*}, \frac{n}{\sqrt{T_3^*}} \right) \quad (12)$$

$$N_t = f_8 \left(\frac{G_t \sqrt{T_3^*}}{p_3^*}, \frac{n}{\sqrt{T_3^*}}, p_3^*, T_3^*, \beta \right) \quad (13)$$

$$G_t = \frac{G_t \sqrt{T_3^*}}{p_3^*} \cdot p_3^* \cdot \frac{1}{\sqrt{T_3^*}} \quad (14)$$

在上述方程中，式(5)、(6)是STIG中特有的，式(5)是文献[2]计算模型中的燃烧室附加平衡方程，即假设无蒸汽注入燃烧室主燃区而只是在二次掺混区内与燃气进行理想混合。故有：

$$(1 + SG) \cdot T_3^* \cdot C_p(T) = T_5 \cdot C_p(\overline{T_5}) \cdot SG + T_3^{*'} \cdot C_{pg}(T) \quad (15)$$

其中 $C_{pg}(T) = H(T)/T$;

$$T = (T_3^* + T_3^{*}')/2$$

$$C_p(T) = (C_{pg}(T) + C_{ps}(\overline{T_5}) \cdot SG) / (1 + SG)$$

$$\overline{T_5} = (T_3^* + T_5)/2$$

方程(6)则是在考虑实际运行下，STIG保持任意端差(燃气排温与注蒸汽温度之差) ΔT 下的温度平衡方程。同时，因蒸汽压力较低故略去其影响。

方程的简化 将上述部件特性方程带入(1)~(6)方程中，这样，在前六个方程中包括有11个变量。即 p_1^* 、 T_1^* 、 $\frac{G_c \sqrt{T_1^*}}{p_1^*}$ 、

$$\frac{G_t \sqrt{T_3^*}}{p_3^*}, T_3^*, N_c, T_3^{*'}, T_5, G_s, \beta,$$

ΔT ，如给定大气条件 p_1^* 、 T_1^* 下，且 $p_4^* = p_1^*$ ，则只要再选择三个变量作为自由选择参量其余六个变量由前六个方程即可解出定解。这也说明了在单轴定转注蒸汽燃气轮机中要由三个独立变量来决定其工况。这里将自由选择变量选为 T_3^* 、 ΔT 、 SG 。

残量方程组的选择 在一般的燃气轮机变工况性能计算中往往选择平衡方程(功率、流量)作为残量方程[3]，本文根据单步迭代计算中的实际情况选择了压力平衡方程(3)作为 E_1 并将式(4)、(5)合并为 E_2 ，以方程(6)作为 E_3 ，这样三个残量方程即：

$$E_1 = p_3^* - p_1^* \cdot \pi_c \cdot \sigma_b = p_4^* \cdot f(\overline{G_t}, \overline{n}) - p_1^* \cdot f_4(\overline{G_c}, \overline{n})$$

$$E_2 = (4) - (5) = f_1(T_2, \beta, \eta_b) - f_2(T_3^*, \beta, T_5, SG)$$

$$E_3 = T_4 - \Delta T - T_5$$

将因变量取为 T_3^* 、 G_c 、 T_5 ，而其余3个变量 N_c 、 C_t 、 β 则可由方程(1)、(2)、(3)中的显式得出，因而将STIG变工况性能计算归结为上述三个残量方程问题，只要使残量方程为零，即

$$E = f(X) = 0$$

其中 $X = (x_1, x_2, x_3) = (T_3^{*'}, G_c, T_5)$

就可确定一个稳态工况。上述残量方程的选择完全消除了逐步计算中的单步迭代，从而使计算更为合理。

三、方程组的求解及实例

为了求解上述残量方程组，使 $E = f(X) = 0$ 。这里利用了求解非残量方程的牛顿——拉弗森法[4]。

首先选择初始值 $x_1 = T_{03}^{*}'$ 、 $x_2 = T_{05}$ 、 $x_3 = G_{0c}$ 则有残量

$$\begin{cases} E_1 = E_1(x_1, x_2, x_3) = F_{01} \\ E_2 = E_2(x_1, x_2, x_3) = F_{02} \\ E_3 = E_3(x_1, x_2, x_3) = F_{03} \end{cases}$$

即 $E = f(X_0) = F_0$

在一微小增量 ΔX 下有

$$\begin{cases} \Delta E_1 = \frac{\partial E_1}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial E_1}{\partial x_2} \Delta x_2 + \frac{\partial E_1}{\partial x_3} \Delta x_3 \\ \Delta E_2 = \frac{\partial E_2}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial E_2}{\partial x_2} \Delta x_2 + \frac{\partial E_2}{\partial x_3} \Delta x_3 \\ \Delta E_3 = \frac{\partial E_3}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial E_3}{\partial x_2} \Delta x_2 + \frac{\partial E_3}{\partial x_3} \Delta x_3 \end{cases}$$

同时希望在这样的增量下使新的残量

$$E(X_1) = E(X_0) + \Delta E = 0$$

即 $\Delta E = -E(X_0) = -F_0$

亦可写成

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial E_1}{\partial x_1} & \frac{\partial E_1}{\partial x_2} & \frac{\partial E_1}{\partial x_3} \\ \frac{\partial E_2}{\partial x_1} & \frac{\partial E_2}{\partial x_2} & \frac{\partial E_2}{\partial x_3} \\ \frac{\partial E_3}{\partial x_1} & \frac{\partial E_3}{\partial x_2} & \frac{\partial E_3}{\partial x_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -F_{01} \\ -F_{02} \\ -F_{03} \end{bmatrix}$$

也就是 $J[E, X] [x_1 - x_0] = -F_0, J[E, X]$ 为雅可比矩阵。从而可以得出新的迭代点

$$X_{k+1} = X_k - J^{-1}[E, X] \cdot E(X_k)$$

将此点从新进行残量方程计算如图2(a)样,直至使残量和平均值满足要求。本文取

$$\sum_{i=1}^3 E_i(X) < 0.001, \text{图2(b)是利用单步迭}$$

代法计算的框图,从中可见,利用残量法减少了迭代过程,并且具有较好的程序结构。同时该法具有较好的收敛性和收敛速度,并对初始点的要求也较宽。这些从表1可看出,此表是对针S1A-02小型燃气轮机进行计算的。从中可见即使初值偏离平衡点很远亦有良好的收敛性,并只经几步牛顿迭代即可达到平衡点。

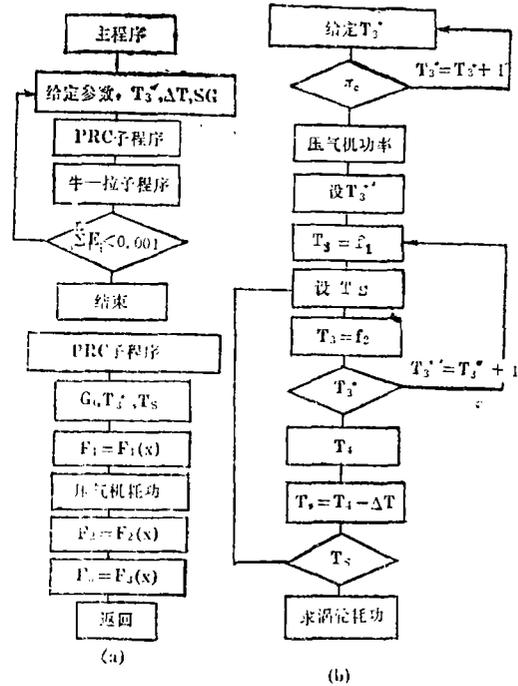


图2 残量法与单步迭代法计算框图

表1 残量法的收敛性和收敛速度

迭代次数	Ts	Gc	T3''	平均残量
1	600.0	1.730	1190.0	68.00
2	600.0	1.729	1199.7	43.67
3	626.7	1.728	1210.3	16.87
4	767.7	1.727	1216.8	0.0541
5	767.7	1.727	1216.7	0.0006

图3为利用本文方法计算的结果。从中可以看出,因为蒸汽的注入使燃机的功率及效率均有显著提高,同时初温亦下降,并因STIG中诸多参数影响,对其进行性能的优化设计及运行是十分必要的。

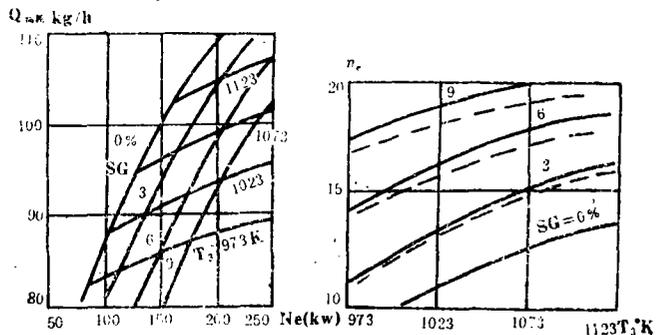


图3 STIG变工况性能曲线

四、结 论

本文利用残量法计算了STIG的变工况性能,从计算的结果可以看出文中所给的数学模型及残量方程是合理的,通过和单步迭代法比较减少了许多迭代步骤,使计算更为合理,同时利用该法计算STIG变工况性能具有良好的收敛性和收敛速度。

本文中的方程(5)、(6)亦可用于分轴、多轴STIG的计算中,其简化方法及残量方程组构成方法对上述两种燃机亦适用。

残量法计算STIG变工况性能为进一步进行最优化设计和运行提供了有用的途径。

该文仅对注蒸汽燃气轮机的变工况进行了计算,对STIG整个装置的性能计算将另文讨论。

符 号

- N ——功率
- τ ——温比
- P ——压力
- T ——温度
- ΔT ——端差
- β ——过量空气系数
- σ_b ——燃烧室总压恢复系数
- n ——转速

- G ——质量流量
- $C_p(T)$ ——定压比热
- $H(T)$ ——焓
- f ——燃空比
- π ——压比
- SG ——汽气比

角 标

- t ——涡轮
- b ——燃烧室
- s ——蒸汽
- c ——压气机
- g ——燃气
- e ——装置

参 考 文 献

- [1] Fraize W E, Kinney C. Effects of Steam Injection on the performance of Gas Turbine Power Cycles. ASME, Journal of Eng. for Power, 1979, 101
- [2] 臧述升, 孙聿峰, 刘光宇. 注蒸汽燃气轮机性能模拟分析, 哈尔滨船舶工程学院学报, 1989, (2)
- [3] 翁史烈. 燃气轮机性能分析. 上海交大出版社, 1987年
- [4] Münzker H G, Kurzne J. Gasturbinen-Betriebsverhalten und Optimierung. 1977

Evaluation of Steam Injection Gas Turbine Off-design Performance by Use of a Residual Quantity Method

Zhuang Shusheng

(Harbin Shipbuilding Engineering Institute)

Abstract

This paper deals with the calculation of off-design performance of a steam injection gas turbine by use of residual quantity method. A mathematical model for such a calculation and residual quantity equations are given with a detailed descri-

ption of the equation simplification and solution method being presented. A comparison is made with respect to the single step iteration calculation method. The results of calculation have shown that with the use of the residual quantity method a substantial reduction in iteration procedures is possible with a satisfactory convergence and converging speed being readily attained. In addition, a more rational calculation process has been achieved.

Key Words: *gas turbine, calculation method, computer simulation, Cheng's cycle*

(上接第6页)

Calculation and Analysis of Cheng's Cycle Power Plant Design and Off-design Performance

Zou Jiguo, Fu Zheng

(*Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute*)

Abstract

Based on the current engineering practice this paper describes a method for calculating Cheng's cycle power plant design and off-design performance and other related problems. It discusses the determination of design point in case of changing a single cycle gas turbine plant into a Cheng's cycle power plant as well as the calculation of off-design performance of a waste heat boiler. Also given are some examples of performance calculations for the first home-designed Cheng's cycle power plant.

Key Words: *Cheng's cycle, gas turbine, off-design performance, calculation*

