

# 两级TFE—TUR复合地热发电系统热力学分析及能量利用率优势

王维 (天津城建学院)

〔摘要〕 本文在单级复合系统基础上,进一步提出两级TFE—TUR复合地热发电系统,并对其进行了热力学分析,给出了一、二级最佳中间匹配温度计算式。同时,还将该系统与单级复合系统、全流系统及常规闪蒸系统作了比较,表明该系统可望成为效率最高的地热发电系统。

关键词 全流 闪蒸 复合系统 两级系统 地热发电

## 1 两级TFE—TUR复合系统及其热力学分析

对于热水型地热资源,为大幅度提高地热发电系统效率,充分利用全流机的两相膨胀特性,可将单级TFE—TUR复合系统发展一步,使成为如图1所示的二级复合系统,工质在系统中的状态变化见图2。

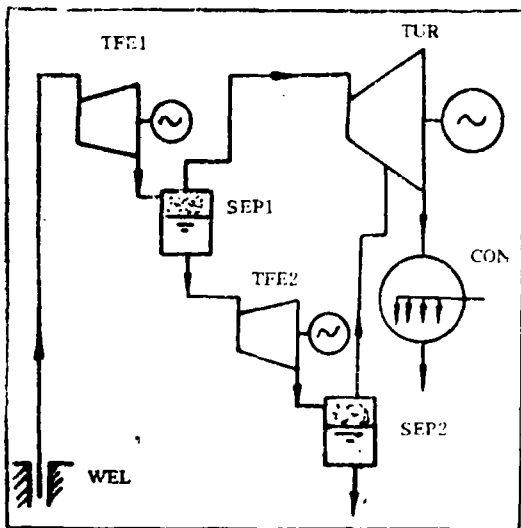


图1 二级复合系统

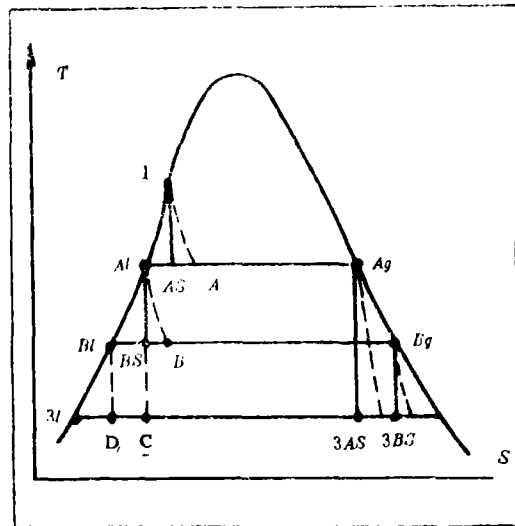


图2 工质状态变化

为分析方便起见,认为汽轮机TUR、全流机TFE的相对内效率 $\eta_T$ 、 $\eta_E$ 均为常数,且一、二级全流机TFE1、TFE2的相对内效率相同。二级复合系统的比功由下式计算

$$\begin{aligned}
 W = & C_V \eta_E \left( T_1 - T_A - T_A \ln \frac{T_1}{T_A} \right) + C_V \eta_T X_A \\
 & \times \left[ \frac{R_A}{C_P} \left( 1 - \frac{T_3}{T_A} \right) + \left( T_A - T_3 - T_3 \ln \frac{T_A}{T_3} \right) \right] \\
 & + (1 - X_A) \left\{ C_V \eta_E \left( T_A - T_B - T_B \ln \frac{T_A}{T_B} \right) \right.
 \end{aligned}$$

$$+ C_P \eta_T X_B \left[ \frac{R_B}{C_P} \left( 1 - \frac{T_3}{T_B} \right) + (T_B - T_3 - T_3 \times \ln \frac{T_B}{T_3}) \right] \quad (1)$$

式中  $T_1$  为热源温度,  $T_3$  为冷凝温度,  $T_A$ 、 $T_B$  为系统中间匹配温度,  $R_A$ 、 $R_B$  为  $T_A$ 、 $T_B$  所对应的汽化热,  $X_A$ 、 $X_B$  为一、二级 TFE 膨胀出口干度, 分别由下两式确定

$$X_A = C_P \left[ (1 - \eta_F)(T_1 - T_A) + \eta_E T_A \times \ln \frac{T_1}{T_A} \right] / R_A \quad (2)$$

$$X_B = C_P \left[ (1 - \eta_E)(T_A - T_B) + \eta_C T_B \times \ln \frac{T_A}{T_B} \right] / R_B \quad (3)$$

显然, 对不同的  $T_A$ 、 $T_B$ , 系统比功是不同的。为求得最佳中间匹配温度, 下面对比功计算式 (1) 作适当简化。

**1.1 分析水蒸汽数表可知, 对于相同的温降, 饱和水经定熵膨胀与经定焓膨胀的终了干度相差很小。例如,  $T_1 + 230^\circ\text{C}$ ,  $X_1 = 0.0$ , 当温降  $\Delta T = 70^\circ\text{C}$ , 即膨胀至  $T_2 = 160^\circ\text{C}$  时, 定焓过程的终了干度  $X_{2h} = 16.8$ , 定熵为  $X_{2s} = 15.2$ 。全流机的膨胀介于定熵、定焓之间, 且为两级膨胀 (即膨胀温降不大), 所以可认为图 2 中  $X_A \approx X_{As}$ ,  $X_B \approx X_{Bs}$ 。这样近似后, 由于汽机进汽量小于实际值, 故使系统作功量减少。**

**1.2 将循环  $A_g - 3As - 3l - A_l - A_g$  简化为  $A_g - 3As - C - A_l - A_g$ , 将循环  $B_g - 3Bs - 3l - B_l - B_g$  简化为  $B_g - 3Bs - D - B_l - B_g$ 。简化的实质是舍弃了两个三角形,  $A_l - C - 3l - A_l$  和  $B_l - D - 3l - B_l$  所围面积对应的功量。所以简化后系统作功量小于实际功量, 且热源温度愈高, 误差愈大。**

**1.3 认为第二级全流机 TFE2 的工质流量与第一级相同, 即忽略了 TEF1 出口工质中有一小部分去汽机作功而引起的流经**

TFE2 工质量的减少。简化的结果是使系统作功量大于系统实际作功量。

值得指出的是, 上述简化, 除第一个简化外, 第二、三个简化单独看起来都不太合理。但实际的计算表明, 第一、二简化所造成的系统比功“缩小”, 恰恰为第三个简化所造成的系统比功“放大”所补偿, 而且补偿的效果很好。经过以上简化, 可得到计算两级复合系统比功的近似计算式

$$W = C_P \eta_F \left[ T_1 - T_A \ln \frac{T_1}{T_A} - T_B \times \left( 1 + \ln \frac{T_A}{T_B} \right) \right] + C_P \eta_T \left[ (T_A - T_3) \ln \frac{T_1}{T_A} + (T_B - T_3) \ln \frac{T_A}{T_B} \right] \quad (4)$$

为求最佳中间温度, 将 (4) 中  $W$  分别对  $T_A$ 、 $T_B$  求导

$$\frac{\partial W}{\partial T_A} = C_P (\eta_T - \eta_E) \left( \ln \frac{T_1}{T_A} + \frac{T_B}{T_A} - 1 \right) \quad (5)$$

$$-\frac{\partial W}{\partial T_B} = C_P (\eta_T - \eta_E) \ln \frac{T_A}{T_B} - C_P \eta_T \times \left( 1 - \frac{T_3}{T_B} \right) \quad (6)$$

令上两式为零, 并将  $\ln \frac{T_1}{T_B} \approx 1 - \frac{T_1}{T_B}$ ,

$\ln \frac{T_A}{T_B} \approx \frac{T_A}{T_B} - 1$  代入并整理有

$$T_A^2 + T_1 T_B \quad (7)$$

$$T_B = a T_A + b T_3 \quad (8)$$

式 (8) 中

$$a = 1 / [1 + \eta_T / (\eta_T - \eta_E)] \quad (9)$$

$$b = 1 / [1 + (\eta_T - \eta_E) / \eta_T] \quad (10)$$

将 (8) 代入 (7) 及由 (7) 可得

$$T_A^2 - a T_1 T_A - b T_1 T_3 = 0 \quad (11)$$

$$T_B = T_A^2 / T_1 \quad (12)$$

式 (11)、(12) 即两级复合系统最佳中间匹配温度计算式。表 1 给出了由式 (11)、(12) 计算的最佳中间温度  $T_{Ac}$ 、 $T_{Bc}$  及

实际最佳温度 $T_A$ 、 $T_B$ 。表中 $T_A$ 、 $T_B$ 是利用水蒸汽数据库经计算机运算得到的。易见，当热源温度不是很高时（不大于 $200\text{ }^\circ\text{C}$ ），计算公式具有较好的精度。

表 1

热源温度 $T_1\text{ }^\circ\text{C}$	TFE 内效率 $\eta_B$	最佳中间温度		公式计算最佳中间温度最	
		$T_A$	$T_B$	$T_{Ac}$	$T_{Bc}$
100	0.3	71	42	70	42
	0.6	62	31	63	31
150	0.3	100	52	99	52
	0.6	88	36	88	36
200	0.3	128	63	126	63
	0.6	112	41	111	40

计算条件, TUR相对内效率 $\eta_T = 0.75$  冷凝温度 $T_3 = 250\text{ }^\circ\text{C}$

## 2 两级复合系统能量利用率优势

图 3 为两级复合系统与单级复合系统、全流系统及闪蒸系统比较时的比功相对增率  $PW$  [ $PW = (\text{两级复合系统比功} - \text{其它系统比功}) / \text{其它系统比功}$ ], 比较时全流机或汽轮机的相对内效率均与二级复合系统相同, 图中数据是利用水蒸汽数据库经计算机运算得到的。易见, 在目前全流机内效率的平均水平下, 二级复合系统具有最高的焓效率。例如, 在图中计算条件下, 与一级复

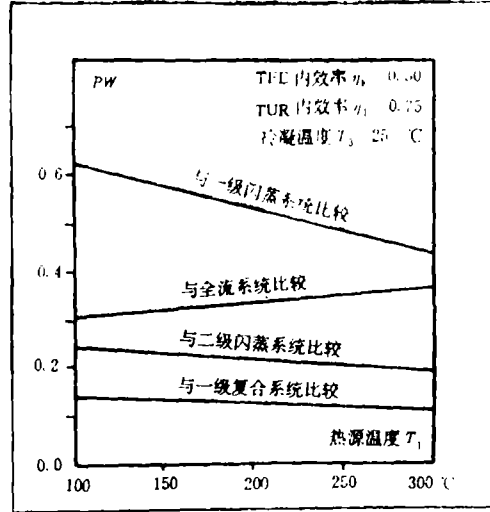


图 3 二级复合系统与其它系统比较

合系统、二级闪蒸系统、全流系统及一级闪蒸系统相比, 当热源温度  $T_1 = 150\text{ }^\circ\text{C}$  时, 比功相对增率  $PW$  分别为 13%、24%、33%、59%。因此, 二级复合系统可望成为能量利用率最高的地热发电系统。另外, 这一系统在利用工业余热发电方面同样是大有可为的。

## 参 考 文 献

- 1 王维, 范文伯. TFE-TUR 复合地热发电系统热力学分析. 热能动力工程, 1991 (4)
- 2 王维. 全流螺杆膨胀机—汽轮机复合地热发电系统研究. 天津大学研究生论文, 1988
- 3 斯米特 E, 格里古尔 U. 国际单位制的水和水蒸汽性质. 水利电力出版社, 1983

# Thermodynamic Analysis of a Two-Stage TFE-TUR Hybrid Geothermal Power Generating System and Energy Utilization Factor Advantage

Wang Wei

(Tianjin Urban Construction Institute)

## Abstract

On the basis of a single-stage hybrid system the author has further proposed a two-stage TFE-TUR hybrid geothermal power generating system and performed its thermodynamic analysis with a formula for calculating the first and second stage optimum intermediate matching temperature being given. In addition, a comparison is made of the present system with the single-stage hybrid system, total flow system and the conventional flash steam system, which shows that the two-stage TFE-TUR hybrid system may well be expected to be a geothermal power generating system with the highest exergy efficiency.

**Key words:** *total flow, flash steam, hybrid system, two-stage system geothermal power generation*

## 应用船用燃气轮机的新领域



据“Gas Turbine World”1991年5—6月号报道,美国国防部提出今后十年要建造或购买多达25艘大型快速货船,以便使军队海上补给能力现代化。

在1991年的海湾战争中暴露出美国海军快速海上补给能力的不足,从而导致了美国国防部的上述建议。

这一提议目前仍在草拟阶段,尚有待接受各种修改和补充。工业发言人把这一计划看作是功率等级为22到37MW,包括LM2500、LM5000和FT8,船用燃气轮机最好的销售机会。

根据最近的报告,美国海军只有8艘快速货船可用来装运坦克、枪炮、汽车、装备和备件。

(吉桂明 供稿)