

# 基于 REFPROP 的超临界 CO<sub>2</sub> 闭式循环设计点性能快速计算方法研究

杜涛 韦海 龚爱东

(中国航发湖南动力机械研究所 湖南 株洲 412002)

**摘要:** 文章对基于 REFPROP 的超临界 CO<sub>2</sub> 闭式循环设计点性能快速计算方法进行研究。首先阐述了使用 REFPROP 进行超临界流体的物性参数的一般计算方法, 然后在此基础上建立了超临界 CO<sub>2</sub> 闭式循环设计点计算模型。该方法可用于超临界闭式循环设计点性能的快速计算。

**关键词:** REFPROP; 超临界; CO<sub>2</sub>; 闭式循环; 设计点性能

## 0 引言

当温度和压力提高到某一个数值以上, 此时流体可以称为超临界流体。超临界流体具有以下特点: 密度是液体的量级, 而粘度是气体的量级。此特点使得超临界流体应用在布雷顿循环上具有巨大的潜力。简单来说, 同等尺寸超临界流体闭式布雷顿循环发动机所能发出的功率, 可以是普通空气介质燃气轮机的几百倍以上。目前, 超临界流体闭式循环已经成为国际上研究的前沿热点, 国内也已经开始进行该领域的研究。

超临界流体不符合理想气体状态方程, 其压缩因子与 1 相差很远, 不能用理想气体状态方程计算其热力性质。当前燃气轮机性能仿真软件 Gasturb、NLR GSP 等都不能用来计算超临界流体闭式循环, 必须要进行改进。

本文阐述了一种基于 REFPROP 和 Excel 的超临界闭式循环设计点性能快速计算的方法和原理。

## 1 闭式布雷顿循环特点

简单闭式布雷顿循环原理图如图 1 所示, 该循环主要由压气机、涡轮、加热器、回热器、冷却器以及相互之间的管道组成。工质经过压气机进行压缩后, 经过回热器、加热器, 然后推动涡轮发出轴功率, 一部分轴功率通过轴传输给压气机, 用于工质压缩, 另一部分向外输出轴功率。涡轮流出的尾气进入回热器向压气机出来的工质传热, 然后进入冷却器进行冷却, 进入压气机进口。

如果去掉冷却器, 直接从大气吸气和排气, 此时和简单开式回热燃气轮机循环没有区别。由于工质采用如超临界 CO<sub>2</sub>、超临界 He 等超临界流体, 不再是完全气体, 不符合完全气体状态方程, 内能、焓不是温度的单值函数, 而是温度和压力的函数, 热力学性能计算与完全气

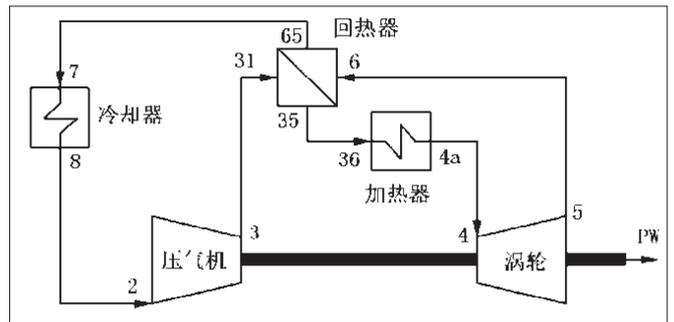


图 1 简单闭式循环原理图

体存在明显差异。

## 2 超临界 CO<sub>2</sub> 简介

当前研究和应用的超临界流体有 He、CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub> 等。He 具有很好的稳定性、化学相容性及热传导性, 已经在当前的高温气冷核反应堆得到了应用。但超临界 He 闭式循环需要较高的温度, 并且难于压缩, 给动力装置的实现带来很多困难。CO<sub>2</sub> 在稳定性、热传导性方面比 He 稍差, 但 CO<sub>2</sub> 有合适的临界参数, 不需要很高的循环温度就可以达到满意的效率, 且压缩性好、储量丰富。

以 CO<sub>2</sub> 为例, 临界点的临界压力和临界温度分别为 7.337MPa 和 31℃。当温度和压力超过临界温度和临界压力时, CO<sub>2</sub> 处于超临界状态。表 1 所列是 CO<sub>2</sub> 温度为 35℃ 时, 7.5MPa 和 0.1MPa 的物性比较。从表 1 中可以看出, CO<sub>2</sub> 超临界态密度是气态的百倍以上, CO<sub>2</sub> 超临界态的压缩因子远小于 1。

表 1 35℃ 时 CO<sub>2</sub> 物性

介质	T/℃	P/MPa	P / (kg·m <sup>-3</sup> )	z
CO <sub>2</sub>	35	7.5	277.6	0.463
	35	0.1	1.95	0.879

### 3 超临界流体模型

#### 3.1 REFPROP 简介

当前燃气轮机及航空发动机总体性能仿真软件，如 GasTurb 和 NLR GSP 等使用热完全气体模型描述空气和燃气。热完全气体的温度、压力和密度符合理想气体状态方程，但是焓和内能是温度的单值函数。

超临界流体由于其较高的压力，导致其不再符合理想气体状态方程，压缩因子与 1 的偏离量很大。内能、焓不再是温度的单值函数，而是温度和压力的函数，热力学性能计算与完全气体存在明显差异。

REFPROP (REference Fluid PROPERTIES) 软件由美国国家标准技术研究所 (NIST) 研制开发，是一款国际权威工质物性计算软件。从检索到的文献来看，REFPROP 被很多研究项目用作物性数据源，或作为计算结果准确性的参考数据源。通过 REFPROP，知道流体的组成，给出压力 P、温度 T、密度 ρ、内能 e、焓 h、熵 s 中的任两个参数，即可计算出其他参数，可以满足超临界流体计算的需要。

另外 REFPROP 提供了 C 语言、Fortran 语言、mathlab 语言、excel 等调用的接口和方法，可以在自编的程序中直接调用，而不用重新编写物性计算模块。虽然计算速度可能比文献 [1][2][3] 慢了 1 ~ 2 个数量级，但是当前计算机的飞跃发展，采用更快的计算机，完全可以满足计算需要。

#### 3.2 超临界流体参数计算

已知超临界流体的温度 T、压力 P、密度 ρ 中的任两个，通过调用 REFPROP 相关函数，可以计算另一个参数。为方便理解，上述过程抽象为下列函数：

$$P=P(\rho, T) \tag{1}$$

$$\rho = \rho(P, T) \tag{2}$$

$$T=T(P, \rho) \tag{3}$$

已知超临界流体的温度 T 和压力 P，通过调用 REFPROP 相关函数，可以计算超临界流体的焓 h、熵 s。为方便理解，上述过程抽象为下列函数：

$$h=h(P, T) \tag{4}$$

$$s=s(P, T) \tag{5}$$

已知超临界流体的压力 P 或焓 h、熵 s 中的任一个，通过调用 REFPROP 相关函数，可以计算流体的温度。为方便理解，上述过程抽象为下列函数：

$$T=T(P, h) \tag{6}$$

$$T=T(P, s) \tag{7}$$

超临界流体气流的声速采用下面公式计算：

$$c = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_s} \tag{8}$$

REFPROP 提供了计算超临界流体声速的公式，可

以直接调用。

超临界流体的滞止参数计算和完全气体存在明显差异。例如：已知超临界流体的静压  $P_s$ 、静温  $T_s$ 、速度 V，计算滞止状态下的总压 P、总温 T。

滞止态是一种假想状态，是气流经过等熵绝热过程，气流速度变为 0 的一种状态，满足能量守恒和熵守恒，因此滞止态的总焓 h 和总熵 s 可用下列公式计算：

$$h = h(P, T) = h(P_s, T_s) + \frac{V^2}{2} \tag{9}$$

$$s = s(P, T) = s(P_s, T_s) \tag{10}$$

得到了总焓 h 和总熵 s，可以通过式 (4)、式 (5) 迭代求解滞止压力 P 和滞止温度 T。首先给定一个压力，然后根据滞止焓和滞止熵计算出两个温度，这两个温度应相等。如果不等，重新给定压力，重复此过程，直到温度相等，求解过程结束。

REFPROP 提供了已知焓和熵求解气体压力、温度的函数，可以直接调用，可抽象为下面公式：

$$[P, T]=f(h, s) \tag{11}$$

采用能量守恒与熵守恒，可方便地完成：已知超临界流体的总压 P、总温 T、速度 V，计算滞止状态下的静压  $P_s$ 、静温  $T_s$  的求解。不再赘述。

#### 3.3 在 Excel 中嵌入 REFPROP

可以将 REFPROP 嵌入到 Excel 中，然后在 Excel 中调用 REFPROP。具体配置过程可参考 REFPROP 帮助手册。

### 4 简单循环设计点计算模型

#### 4.1 总体性能计算模型

在 Excel 中建立了图 1 所示简单循环的设点计算程序 (表格)。已知的输出参数包括：压气机效率  $\eta_c$ 、加热器效率  $\eta_b$ 、加热器总压恢复系数  $\sigma_b$ 、涡轮效率  $\eta_t$ ；回热器低温端温差  $\Delta T_{cold}$ 、回热器热量吸收效率  $\eta_x$ 、回热器高压侧总压恢复系数  $P_{35}/P_{31}$ ，回热器低压侧总压恢复系数  $P_{65}/P_6$ ；压气机进口总压  $P_2$ 、总温  $T_2$ 、空气流量  $W_2$ 、压气机压比  $\pi_c$ 、涡轮进口温度  $T_4$ 、其他管道的总压恢复系数等。

参考文献 [11] ~ [18]，建立的设计点计算模型如下：

压气机出口截面 3：

$$P_3 = \pi_c \times P_2 \tag{12}$$

$$s_{3i} = s(P_3, T_{3i}) = s(P_2, T_2) \tag{13}$$

$$T_{3i} = T(P_3, s_{3i}) \tag{14}$$

$$\therefore \eta_c = \frac{h_{3i} - h_2}{h_3 - h_2} = \frac{h(P_3, T_{3i}) - h(P_2, T_2)}{h(P_3, T_3) - h(P_2, T_2)}$$

$$h_3 = h(P_2, T_2) + [h(P_3, T_{3i}) - h(P_2, T_2)]/\eta_c \tag{15}$$

$$T_3 = T(P_3, h_3) \tag{16}$$

压气机单位功率：

$$l_c = h(P_3, T_3) - h(P_2, T_2) \tag{17}$$

涡轮进口截面 4 :

$$P_4 = P_3 \times P_4 / P_3 \tag{18}$$

$P_4/P_3$  为 3 截面到 4 截面流路的总压恢复系数, 是所有管道的总压恢复系数、加热器总压恢复系数  $\sigma_b$  和回热器高压侧总压恢复系数  $P35/P31$  的乘积。

涡轮出口截面 5 :

$$P_5 = P_2 / (P_2/P_7 \times P_7/P_6 \times P_6/P_5) \tag{19}$$

$$\pi_t = P_4 / P_5 \tag{20}$$

$$s_{5i} = s(P_5, T_{5i}) = s(P_4, T_4) \tag{21}$$

$$T_{5i} = T(P_5, s_{5i}) \tag{22}$$

$$\eta_t = \frac{h_4 - h_5}{h_4 - h_{5i}} = \frac{h(P_4, T_4) - h(P_5, T_5)}{h(P_4, T_4) - h(P_5, T_{5i})}$$

$$h_5 = h(P_4, T_4) - \eta_t [h(P_4, T_4) - h(P_5, T_{5i})] \tag{23}$$

$$T_5 = T(P_5, h_5) \tag{24}$$

涡轮单位功率:

$$l_t = h(P_4, T_4) - h(P_5, T_5) \tag{25}$$

回热器低压侧进口截面 6 :

$$P_6 = P_5 \times P_6 / P_5 \tag{26}$$

$$T_6 = T(P_6, h(P_5, T_5)) \tag{27}$$

截面 35、7 :

$$P_{35} = P_3 \times P_{35} / P_3 \tag{28}$$

$$P_7 = P_6 \times P_7 / P_6 \tag{29}$$

$$T_7 = T_3 + \Delta T_{cold} \tag{30}$$

$$(h_6 - h_7) \eta_x = h_{35} - h_3 \tag{31}$$

$$h_{35} = h_3 + (h_6 - h_7) \eta_x \tag{32}$$

$$T_{35} = T(P_{35}, h_{35}) \tag{33}$$

$$\epsilon = (h_{35} - h_3) / (h_6 - h(P_6, T_3)) \tag{34}$$

回热器回热单位功率:

$$l_\epsilon = h_6 - h_7 \tag{35}$$

冷却器输出冷却功率:

$$l_{co} = h_7 - h_2 \tag{36}$$

输出轴功率:

$$PW = W_2 \times (l_t - l_c / \eta_m) \tag{37}$$

输出电功率:

$$PW_e = PW \times \eta_e \tag{38}$$

输入循环的加热功率:

$$Q_{in} = W_2 (h_4 - h_{35}) / \eta_b \tag{39}$$

输出循环的冷却功率:

$$Q_{out} = W_2 l_{co} \tag{40}$$

系统热效率:

$$\eta = PWSD / Q_{in} \tag{41}$$

系统电能效率:

$$\eta_e = PW_e / Q_{in} \tag{42}$$

### 4.2 绝热摩擦管流

超临界流体闭式循环很多地方都必须要用不断的管道连接, 管道外壁可以包裹隔热材料, 热损失可以忽略,

但管路的摩擦不可忽略, 因此可以看出摩擦绝热管流。完全气体的绝热摩擦管流, 出口总温等于进口总温, 但是超临界流体绝热摩擦管流出口总温不等于进口总温, 需要特别注意。

对于实际气体 (超临界流体), 对于压力同样可以定义总压恢复系数, 出口总压:

$$P_{out} = P_{in} \times \sigma \tag{43}$$

绝热过程可通过下式计算出口总焓:

$$h(P_{out}, T_{out}) = h(P_{in}, T_{in}) \tag{44}$$

然后利用下式计算出口总温:

$$T_{out} = T(P_{out}, h_{out}) \tag{45}$$

最终, 出口温度是进气压力、进气温度和总压恢复系数的函数:

$$T_{out} = f(P_{in}, T_{in}, \sigma) \tag{46}$$

在总压恢复系数特别接近 1 的情况下, 并且计算速度要求不高的场合, 也可以采用进口总温作为超临界绝热摩擦管流的出口温度。

### 4.3 换热器

逆流换热回热器的温度分布如图 2 所示。热量从流体 1 流向流体 2, 有温度梯度才会有换热, 实际的换热器第 1 股气流进口温度  $T1in$  和第 2 股气流出口气流温度  $T2out$  之间会存在一个温差。所以一般定义回热的有效度:

$$\epsilon = \frac{\text{实际换热量}}{\text{最高温差时传热量}} = \frac{G_1(h_{1out} - h_{1in})}{G_2(h_{2in} - h_{1in})} \tag{47}$$

对于两侧都是空气这样的流体来说有:

$$\epsilon = \frac{G_1 C_{P1} (T_{1out} - T_{1in})}{G_2 C_{P2} (T_{2in} - T_{1in})} \tag{48}$$

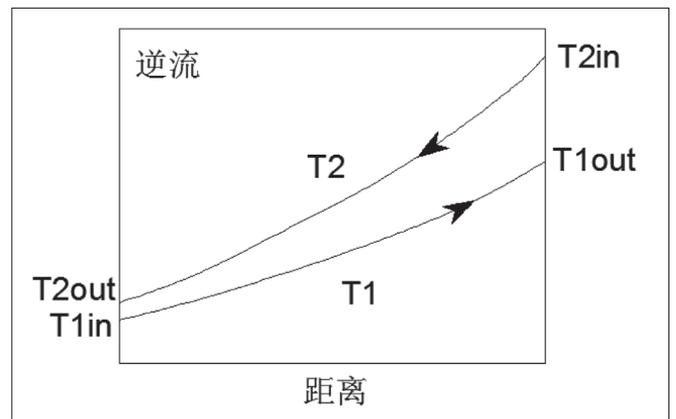


图 2 逆流换热温度分布示意图

对于超临界  $CO_2$  来数, 其焓值不仅取决于温度, 而且取决于压力。如果流体 1 压力为 7.5MPa, 在相同的  $T2out - T1in$  和向外散失热量的比列的条件下, 流体 2 的压力为 20MPa 和 10MPa 时的回热度可能差别很大, 因此对于超临界流体来说, 当回热器压力变化时用回热度来描述换热器性能是不方便的。

为了简便起见,本文回热器的模型选择了以下4个参数来描述回热器设计点的参数,以便在不同压力条件比较:

- 低温端温差:  $\Delta T_{cold}$
- 回热器热量吸收效率:  $\eta_x$
- 高压侧总压恢复系数: P35/P31
- 低压侧总压恢复系数: P65/P6

### 5 设计点性能计算实例

计算了压气机压比 2 ~ 6、涡轮前温度 600 ~ 1200 °C 范围内 200kW 级超临界简单闭式循环的等热效率曲线,如图 3 所示。其中:压气机  $\eta_c=0.8$ , 加热器  $\eta_b=0.98$ 、 $\sigma_b=0.97$ , 涡轮  $\eta_t=0.85$ , P6/P5=0.98,  $\Delta T_{cold}=10$  °C,  $\eta_x=1$ , P35/P3=0.98, P7/P6=0.96, P2/P7=0.97, 机械效率  $\eta_m=0.99$ , P2=7.5MPa, T2=31.3 °C。

从图 3 可以看出,在上述给出的部件效率和压气机出口压力 20MPa 的限制下,单纯地提高涡轮前温度对热效率的提升不大(图 3 中竖直线),热效率为 30% ~ 40% 左右、发电效率 26% ~ 38% 左右。当提高压气机出口压力到 50MPa 和涡轮前温度到 1100 °C,可使热效率提高到 50%。

很大一部分热量通过冷却器散失。如果冷却器输出的热量可以利用一部分,为了提升系统效率,可将这一部分热量再次利用起来。

采取更复杂的循环形式,如再压缩布雷顿循环,可

获得更高的发电效率,但系统的复杂程度、体积和重量都将大大增加,更适用于重型燃机。例如 MIT 提出了 S-CO<sub>2</sub> 冷却快堆(GFR)的总体方案。反应堆热功率为 2400MW,电功率约 1200MW,采用 2 环路或 4 环路设置,设计寿命 60 a;系统热效率 51%,净效率 47%;堆芯进、出口温度分别为 485.5 °C、650 °C,运行压力 20MPa。

### 6 结语

本文阐述了基于 REFPROP 和 Excel 建立超临界闭式循环设计点性能快速计算的原理、方法,可用于方案论证、方案评估等前期对于临界闭式循环总体性能的快速计算,以快速推进项目的进行。

### 参考文献:

- [1] 高峰,孙嵘,刘水根. 二氧化碳发电前沿技术发展简述[J]. 海军工程大学学报(综合版), 2015, 12(4): 92-96.
- [2] V. Dostal, M. J. Driscoll, P. Hejzlar. A Supercritical Carbon Dioxide Cycle for Next Generation Nuclear Reactors [R]. MIT, USA: Department of Nuclear Engineering, 2004.
- [3] YANG Chen. Novel cycles using carbon dioxide as working fluid[D]. Stockholm: School of Industrial Engineering and Management, 2006.
- [4] KAYO Y, NITAWAKIT, MUTO Y. Medium temperature

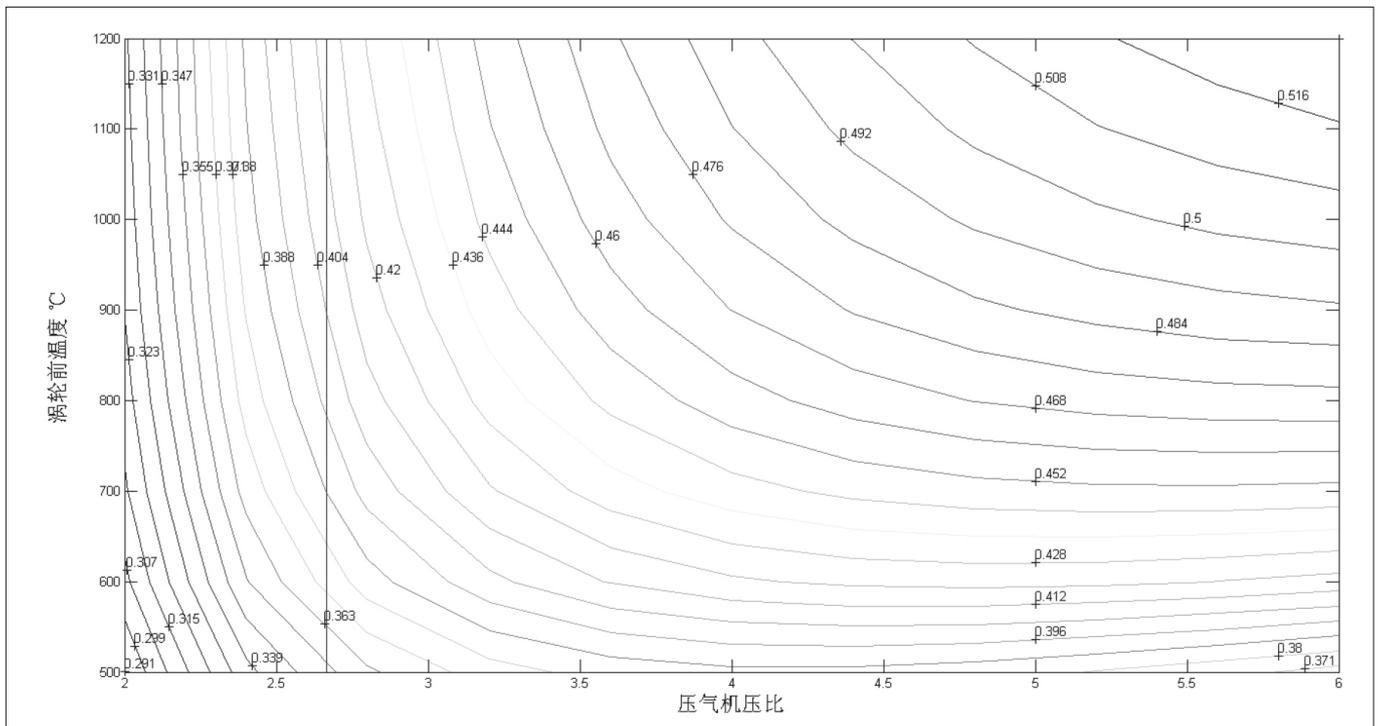


图 3 超临界简单闭式循环的等热效率曲线图

carbon dioxide gas turbine reactor[J]. Nuclear Engineering and Design, 2004, 230(1-3): 195-207.

[5] Kenneth J. Kimball, Eric M. Clementoni. Supercritical Carbon Dioxide Brayton Power Cycle Development Overview[C]. ASME Turbo Expo, 2012, Copenhagen, Denmark: ASME, 2012: GT2012-68204.

[6] Dostal V. A supercritical carbon dioxide cycle for next generation nuclear reactors[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2004.

[7] Michael Persichilli, Alex Kacludis, Edward Zdankiewicz, Timothy Held. Supercritical CO<sub>2</sub> Power Cycle Developments and Commercialization: Why sCO<sub>2</sub> can Displace Steam[R]. Power-Gen India & Central Asia 2012, 19-21 April, 2012, Pragati Maidan, New Delhi, India .

[8] 赵丹, 吴志刚, 丁国良. 超临界 CO<sub>2</sub> 热力性质及迁移性质快速计算方法 [J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(8): 1269-1273.

[9] 胡欢, 谷波, 龙琼, 等. 亚临界压力区 CO<sub>2</sub> 热力性质及传输特性的快速计算模型 [J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(8): 1259-1264.

[10] 吴志刚, 丁国良. 制冷剂热力性质的快速计算 I. 计

算方法 [J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(2): 297-300.

[11] 廉小纯, 吴虎. 航空燃气轮机原理 (下册) [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.

[12] 廉小纯, 吴虎. 航空燃气轮机原理 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005.

[13] Philip P. Walsh, Paul Fletcher. Gas turbine performance (Second edition) [M]. USA: Blackwell Publishing Inc, 2004.

[14] WRIGHT SA, RADEL RF, VERNON ME, et al. Operation and analysis of a Supercritical CO<sub>2</sub> Brayton cycle[R]. California, USA: Sandia National Laboratories, 2010.

[15] Steven A. Wright, Ross F. Radel, Milton E. Vernon. Operation and Analysis of a Supercritical CO<sub>2</sub> Brayton Cycle.

[16] Jekyoung Lee, Yoonhan Ahn, Hojoon Yoon. Design methodology of supercritical CO<sub>2</sub> brayton cycle turbomachineries. GT2012-68933.

[17] Yoonhan Ahn, Jekyoung Lee, Seong Gu Kim. The design study of supercritical carbon dioxide integral experiment loop[R]. GT2013-94122.

[18] ANGELINO G. Carbon dioxide condensation cycles for power production [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1968, 90(3): 287-295.

# 广告征订



版位 Format	价格 Price (RMB)
<b>特殊版位 Specified Ads. Position</b>	
封面	25,000
封二	16,000
封三	12,000
封底	18,000
扉一	15,000
扉二	10,000
后扉一	12,000
后扉二	9,000

版位 Format	价格 Price (RMB)
<b>正常版位 Editorial Page</b>	
编辑页	10,000
编辑页跨页	15,000
1/2编辑页	5,000
1/3编辑页	3,500
1/4编辑页	2,500

**注:** 所有特殊版位广告均为4C广告, 正常版位广告均为黑白色; 所有广告需提供成熟设计稿, 如需编辑部制作需单独收费。

**优惠说明:**

在原价格基础上, 连续预定3期, 优惠**8%**; 连续预定6期, 优惠**15%**; 连续预定12期, 优惠**20%**; 连续预定18期, 优惠**30%**; 连续预定36期, 优惠**40%**。另, 如提前一次性付款, 可在享受优惠的基础上享受**8%**的额外折扣。

**广告预定热线 : 010-6741 0664 / 1368 332 6370**