

第2部分：《太阳能光热发电原理、技术及数值方法》的有关源程序

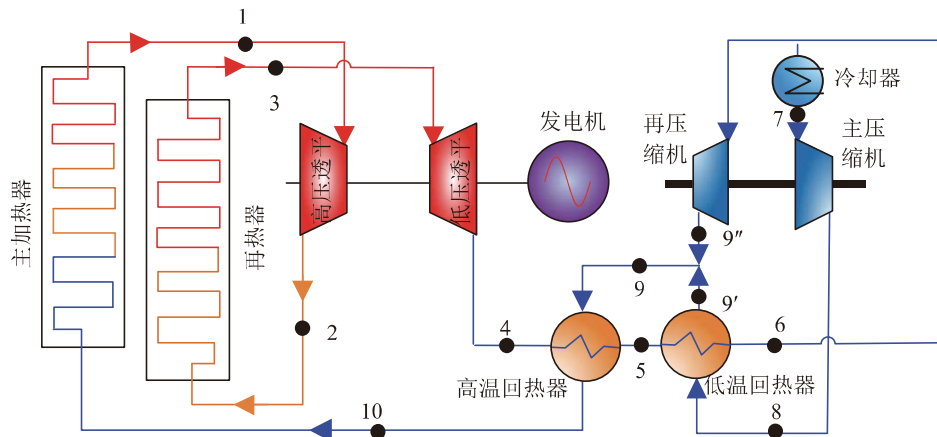
程序 3 典型超临界 CO₂ 热力循环的模拟程序

3.1 物理模型

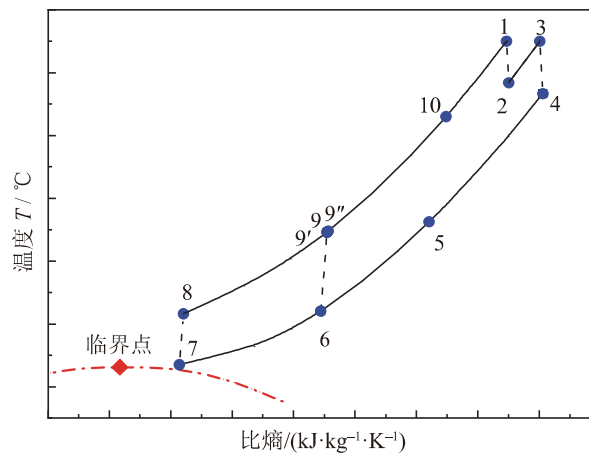
再压缩布雷顿循环是典型的超临界 CO₂(S-CO₂)动力循环形式之一，涵盖了 S-CO₂热-功转换环节所涉及的大多数热力学过程。鉴于此，可将典型的再压缩布雷顿循环作为学习 S-CO₂热力循环模拟程序的入门算例。

典型的 S-CO₂再压缩布雷顿循环包括主加热器、再热器、高压透平、低压透平、主压缩机、再压缩机、冷却器、高温回热器、低温回热器等部件，涉及定压加热、不可逆绝热膨胀、不可逆绝热压缩、定压放热、回热等热力学过程。其循环布局及 $T-s$ 图参见图 1。S-CO₂在主加热器内吸收热量(从状态点 10 到状态点 1)后，进入高压透平膨胀做功(从状态点 1 到状态点 2)，接着进入再热器内再次吸收热量(从状态点 2 到状态点 3)，然后进入低压透平膨胀做功(从状态点 3 到状态点 4)。做完功的低压 S-CO₂依次进入高温回热器(从状态点 4 到状态点 5)和低温回热器(从状态点 5 到状态点 6)，释放热量，随后在低温回热器出口处进行分流。其中一股 S-CO₂流经冷却器(从状态点 6 到状态点 7)，然后被主压缩机压缩(从状态点 7 到状态点 8)，随后进入低温回热器回收热量(从状态点 8 到状态点 9)。另一股 S-CO₂则被再压缩机直接压缩(从状态点 6 到状态点 9)。两股 S-CO₂在低温回热器出口处混合，然后进入高温回热器内回收热量(从状态点 9 到状态点 10)，最后再次进入主加热器，完成循环。

为了大家学习方便，这里给出了用于模拟 S-CO₂再压缩布雷顿循环热力学性能的程序“SCO₂RBC”(Supercritical CO₂ Recompression Brayton Cycle)的源代码，参见节 3.2。“SCO₂RBC”的源代码采用 Matlab 编写，支持的编译器为 Matlab R2017B 及更新的版本。需要配合安装美国国家标准与技术研究所(NIST)开发的 REFPROP 物性查询软件^[1]，同时将 Matlab 调用 REFPROP 的函数文件 refpropm.m、rp_proto.m 和 rp_proto64.m 放在执行程序所在的文件中。虽然该程序是针对再压缩循环编写而成的，但是读者可以通过适当修改，用来模拟其他循环形式的热力学性能。



(a) 布局示意图



(b) T-s图

图 1 再压缩布雷顿循环及其 T-s 图

3.2 SCO₂RBC 程序中的主要变量表及源程序

“SCO₂RBC”程序源代码的主要变量参见表 1。

表 1 “SCO₂RBC”程序源代码的主要变量

变量名	变量含义
t1, t2, ..., t10	状态点的温度
h1, h2, ..., h10	状态点的焓值
s1, s2, ..., s10	状态点的熵值
n_T	透平效率
n_C	压缩机效率
W_tot	总发电功率

续表

变量名	变量含义
P_H	循环最高压力
P_L	循环最低压力
P_I	中间再热压力
UA_HTR	高温回热器的热导
UA_LTR	低温回热器的热导
UAR	回热器热导分配比
SR	分流比
N	回热器离散的节点数目
W_HT	高压透平的输出功
W_LT	低压透平的输出功
W_MC	主压缩机的消耗功
W_RC	再压缩机的消耗功
Q	主加热器的吸热量
Qr	再热器的吸热功量
m	CO ₂ 质量流量的估计值
mi	CO ₂ 质量流量的迭代值
eff_pc	循环效率

程序主要包括 1 个主程序和 3 个子程序，其中主程序名为“SCO₂RBC”；子程序 1 为“refpropm”，其作用是调取 CO₂ 物性和计算状态点的未知状态参数；子程序 2 为“HTR_UA”，其作用是计算高温回热器的热导值；子程序 3 为“LTR_UA”，其作用是计算低温换热器的热导值。具体的源程序如下：

```

%*****典型超临界二氧化碳热力循环的模拟程序*****%
%-----以再压缩循环为例-----%
%-----主程序：开始-----%
clear
clc
%-----输入已知参数-----%
n_T=0.93; %透平效率
n_C=0.89; %压缩机效率
W_tot=3.5*1e7; %总发电功率, W
P_H=25000; %循环最高压力, kPa
P_L=10000; %循环最低压力, kPa

```

```

P_I=(P_H+P_L)*0.5; %循环再热压力, kPa
UA=1e7; %回热器总热导, W/K
UAR=0.568; %回热器热导分配比
UA_HTR=UA*UAR; %高温回热器热导, W/K
UA_LTR=UA*(1-UAR); %低温回热器热导, W/K
t7=50+273.15; %主压缩机入口(状态点 7) 温度, K
t1=650+273.15; %主加热器出口(状态点 1) 温度, K
t3=650+273.15; %再热器出口(状态点 3) 温度, K
SR=0.73; %分流比
N=10; %换热器离散的节点数
err=0.0000001; %设置迭代计算误差
%-----计算状态点 1、2、3、4、7、8 的状态参数-----%
h1=refpropm('H','T',t1,'P',P_H,'CO2'); %1 点焓值
s1=refpropm('S','T',t1,'P',P_H,'CO2'); %计算 1 点熵值
s2s=s1;
h2s=refpropm('H','P',P_I,'S',s2s,'CO2');
%等熵膨胀对应的理想 2s 点焓值
h2=h1-n_T*(h1-h2s); %2 点焓值
t2=refpropm('T','P',P_I,'H',h2,'CO2'); %2 点温度
s2=refpropm('S','P',P_I,'H',h2,'CO2'); %2 点熵值
h3=refpropm('H','T',t3,'P',P_I,'CO2'); %3 点焓值
s3=refpropm('S','T',t3,'P',P_I,'CO2'); %3 点熵值
s4s=s3;
h4s=refpropm('H','P',P_L,'S',s4s,'CO2');
%等熵膨胀对应的理想点 4s 的焓值
h4=h3-n_T*(h3-h4s); %4 点的焓值
t4=refpropm('T','P',P_L,'H',h4,'CO2'); %4 点的温度
h7=refpropm('H','T',t7,'P',P_L,'CO2'); %7 点焓值
s7=refpropm('S','T',t7,'P',P_L,'CO2'); %7 点熵值
s8s=s7;
h8s=refpropm('H','P',P_H,'S',s8s,'CO2');
%等熵膨胀对应的理想点 8s 点的焓值
h8=h7+(h8s-h7)/n_C; %计算 8 点焓值
t8=refpropm('T','P',P_H,'H',h8,'CO2'); %计算 8 点的温度

```

```

%-----计算吸热量、做功量与耗功量-----%
Qr=(h3-h2); %再热器内单位质量 CO2 吸收热量
W_HT=(h1-h2s)*n_T; %高压透平内单位质量 CO2 做功量
W_LT=(h3-h4s)*n_T; %高压透平内单位质量 CO2 做功量
W_MC=SR*(h8s-h7)/n_C; %主压缩机内单位质量 CO2 耗功量
%-----初步估计 5、6、9''、9 点的状态参数作为后续迭代初值-----%
m=W_tot/(W_HT+W_LT-W_MC/SR); %估算质量流量初始值
t5=(t4-t7)*2/3+t7; %估计 5 点温度
t6=(t4-t7)*1/3+t7; %估计 6 点温度
h6=refpropm('H','T',t6,'P',P_L,'CO2'); %估计 6 点焓值
s6=refpropm('S','T',t6,'P',P_L,'CO2'); %计算 6 点熵值
s9s=s6;
h9_2s=refpropm('H','P',P_H,'S',s9s,'CO2');
%等熵条件下 9_2s 点焓值
h9_2=h9_2s; %估计 9_2 点焓值
h9=h9_2; %估计 9 点焓值
t9=refpropm('T','P',P_H,'H',h9,'CO2'); %计算 9 点温度
%-----通过迭代二氧化碳质量流量来计算 5 点和 6 点的温度-----%
n_m=0; %迭代步数
mi=1.1*m; %估算质量流量迭代值 mi
%-----通过调整二氧化碳质量流量使发电功率满足设定值-----%
while abs(m-mi)/m>=err %设置循环迭代收敛条件
    n_m=n_m+1;
    m=mi; %更新质量流量
    [ua_HTR]=HTR_UA(t5,h4,h9,P_H,P_L,N,m);
    %调用高温回热器子程序
    [ua_LTR,h9_1]=LTR_UA(t6,t5,h8,P_H,P_L,N,m,SR);
    %调用低温回热器子程序
%-----对比热导计算值和设定值,若误差较大,更新 5 点和 6 点温度-----%
    while
or(abs((ua_HTR-UA_HTR)/UA_HTR)>=err,abs((ua_LTR-UA_LTR)/UA_LTR)
>=err)
        %-----低温回热器-----%

```

```

tlup=t5;tldo=t8;           %设定 t6 下限和上限
[ua_LTR,h9_1]=LTR_UA(t6,t5,h8,P_H,P_L,N,m,SR);
%调用低温回热器子程序
while abs((ua_LTR-UA_LTR)/UA_LTR)>=err
    if ua_LTR<UA_LTR       %当计算值小于设定值
        tlup=t6;          %将 t6 赋予迭代上限值
    else                   %当计算值大于设定值
        tldo=t6;          %将 t6 赋予迭代下限值
    end
    t6=(tlup+tldo)/2;     %更新 t6
    [ua_LTR,h9_1]=LTR_UA(t6,t5,h8,P_H,P_L,N,m,SR);
%调用低温回热器子程序
end
%-----计算相关状态参数-----%
s6=refpropm('S','T',t6,'P',P_L,'CO2'); %6 点熵值
h6=refpropm('H','T',t6,'P',P_L,'CO2'); %6 点焓值
s9s=s6;h9_2s=refpropm('H','P',P_H,'S',s9s,'CO2');
%等熵条件下 9_2s 点焓值
h9_2=h6+(h9_2s-h6)/n_C;           %9_2 点焓值
h9=h9_1*SR+h9_2*(1-SR);           %混合后 9 点焓值
t9=refpropm('T','P',P_H,'H',h9,'CO2'); %9 点温度
if t9>t5
    t9=t5-0.0000001;           %避免出现不符合实际的点
end
%-----高温回热器-----%
[ua_HTR]=HTR_UA(t5,h4,h9,P_H,P_L,N,m); %调用高温回子程序
thup=t4;thdo=t9;                 %设定 t5 下限和上限
while abs((ua_HTR-UA_HTR)/UA_HTR)>=err
    if ua_HTR<UA_HTR           %当计算值小于设定值
        thup=t5;               %将 t5 赋予迭代上限值
    else                       %当计算值大于设定值
        thdo=t5;               %将 t5 赋予迭代下限值
    end
    t5=(thup+thdo)/2;         %更新 t5

```

```

        [ua_HTR]=HTR-UA(t5,h4,h9,P_H,P_L,N,m);
        %调用高温回热器子程序
    end
    [ua_LTR,h9_1]=LTR-UA(t6,t5,h8,P_H,P_L,N,m,SR);
    %调用低温回热器子程序
end
%-----计算耗功量与质量流量-----%
W_RC=(1-SR)*(h9_2s-h6)/n_C;%计算再压缩机内单位质量 CO2 消耗功
W=(W_HT+W_LT-W_RC-W_MC); %计算实际单位质量的 CO2 的输出功
mi=W_tot/W; %计算新的 CO2 质量流量
%当二氧化碳质量流量收敛，跳出循环
fprintf('第%d步迭代，相对误差=%8.5f; \n',n_m,abs(m-mi)/m);
%提示每一步迭代误差
end
%-----计算迭代收敛以后的其他相关参数-----%
s4=refpropm('S','T',t4,'P',P_L,'CO2'); %4点熵值
s5=refpropm('S','T',t5,'P',P_L,'CO2'); %5点熵值
s8=refpropm('S','T',t8,'P',P_L,'CO2'); %8点熵值
s9=refpropm('S','T',t9,'P',P_L,'CO2'); %9点熵值
h5=refpropm('H','T',t5,'P',P_L,'CO2'); %5点焓值
h10=h9+(h4-h5); %10点焓值
t10=refpropm('T','P',P_H,'H',h10,'CO2'); %10点温度
t9_2=refpropm('T','P',P_H,'H',h9_2,'CO2'); %9_2点温度
t9_1=refpropm('T','P',P_H,'H',h9_1,'CO2'); %9_1点温度
s9_1=refpropm('S','T',t9_1,'P',P_L,'CO2'); %9_1点熵值
s9_2=refpropm('S','T',t9_2,'P',P_L,'CO2'); %9_2点熵值
s10=refpropm('S','P',P_H,'H',h10,'CO2'); %10点熵值
Q=(h1-h10); %主换热器单位质量 CO2 的吸热量
eff_pc=(W_HT+W_LT-W_RC-W_MC)/(Q+Qr); %循环总热效率
%-----计算结果输出文件-----%
result(1,1:5)={'状态点','温度[K]','压力[kPa]','焓[kJ/kg]','熵
[kJ/(kg K)]'};
result(2:13,1)={'1点';'2点';'3点';'4点';'5点';'6点';'7点';'8
点';'9_1点';'9_2点';'9点';'10点'};

```

```

    result(2:13,2)={t1;t2;t3;t4;t5;t6;t7;t8;t9_1;t9_2;t9;t10};
    result(2:13,3)={P_H;P_I;P_I;P_L;P_L;P_L;P_L;P_H;P_H;P_H;P_H
;P_H};
    result(2:13,4)={h1/1000;h2/1000;h3/1000;h4/1000;h5/1000;h6/
1000;h7/1000;h8/1000;h9_1/1000;h9_2/1000;h9/1000;h10/1000};
    result(2:13,5)={s1/1000;s2/1000;s3/1000;s4/1000;s5/1000;s6/
1000;s7/1000;s8/1000;s9_1/1000;s9_2/1000;s9/1000;s10/1000};
    result(1:10,7)={'相关参数';'主压缩机消耗功率[MW]';'再压缩机消耗功
率[MW]';'高压透平输出功率[MW]';'低压透平输出功率[MW]';'主加热器吸热功率
[MW]';'再热器吸热功率[MW]';'冷却器放热功率[MW]';'二氧化碳质量流量
[kg/s]'; '循环效率[%]'};
    result(1:10,8)={'数值';W_MC*m/1e6;W_RC*m/1e6;W_HT*m/1e6;
W_LT*m/1e6;Q*m/1e6;Qr*m/1e6;(h6-h7)*SR*m/1e6;m;eff_pc*100};
    status =xlswrite('运行结果.xlsx',result);

%-----主程序：结束-----%
%-----高温回热器子程序：开始-----%

function
[ua_HTR,h10,t_hot,t_cold]=HTR_UA(t5,h4,h9,P_H,P_L,N,m)
h5=refpropm('H','T',t5,'P',P_L,'CO2');    %5 点焓值
Q=m*(h4-h5);                                %回热器内的换热量
q=Q/N;                                       %每个离散区域的换热量
t4=refpropm('T','H',h4,'P',P_L,'CO2');    %4 点温度
h10=Q/m+h9;                                  %10 点焓值
%-----避免出现不符合实际的数据 ,即 10 点温度不能超过 4 点温度-----%
h10_max=refpropm('H','T',t4,'P',P_H,'CO2');
if h10>h10_max
    h10=h10_max-0.001;
end
h_hot=h4:- (h4-h5)/N:h5;                    %高温侧焓的分布
h_cold=h10:- (h10-h9)/N:h9;                %低温侧焓的分布
%-----计算高低温测每个子节点的换热温差-----%
for i=1:N+1
    t_hot(i)=refpropm('T','P',P_L,'H',h_hot(i),'CO2');
%高温侧温度分布
    t_cold(i)=refpropm('T','P',P_H,'H',h_cold(i),'CO2');
%低温侧温度分布

```

```

        dt(i)=t_hot(i)-t_cold(i);           %温差分布
    end
    for i=1:N
        dtm(i)=(max(dt(i),dt(i+1))-min(dt(i),dt(i+1)))/log(max(dt(i),dt(i+1))/min(dt(i),dt(i+1)))); %离散区域的对数平均温差
        UA_HTR(i)=q/dtm(i);               %离散区域的热导
    end
    ua_HTR=sum(UA_HTR);                   %回热器热导
end
%-----高温回热器子程序:结束-----%
%-----低温回热器子程序:开始-----%
function
[ua_LTR,h9_1,t_hot,t_cold]=LTR_UA(t6,t5,h8,P_H,P_L,N,m,SR)
h6=refpropm('H','T',t6,'P',P_L,'CO2'); %6点焓值
h5=refpropm('H','T',t5,'P',P_L,'CO2'); %5点焓值
Q=m*(h5-h6);                             %回热器内的换热量
q=Q/N;                                    %每个离散区域的换热量
h9_1=Q/(SR*m)+h8;                          %10点焓值
%-----避免出现不符合实际的数据,即9点温度不能超过5点温度-----%
h9_1_max=refpropm('H','T',t5,'P',P_H,'CO2');
if h9_1>h9_1_max
    h9_1=h9_1_max-0.001;
end

h_hot=h5:-(h5-h6)/N:h6;                    %高温侧焓的分布
h_cold=h9_1:-(h9_1-h8)/N:h8;              %低温侧焓的分布
for i=1:N+1
    t_hot(i)=refpropm('T','P',P_L,'H',h_hot(i),'CO2');
    %高温侧温度分布
    t_cold(i)=refpropm('T','P',P_H,'H',h_cold(i),'CO2');
    %低温侧温度分布
        dt(i)=t_hot(i)-t_cold(i);         %温差分布
    end
    for i=1:N
        dtm(i)=(max(dt(i),dt(i+1))-min(dt(i),dt(i+1)))/log(max(dt(i),dt(i+1))/min(dt(i),dt(i+1))));
    end
end

```

```

),dt(i+1))/min(dt(i),dt(i+1))); %离散区域的对数平均温差
    UA_LTR(i)=q/dtm(i); %离散区域的热导
end
ua_LTR=sum(UA_LTR); %回热器的热导
end
%-----低温回热器子程序:结束-----%

```

3.3 SCO₂RBC 程序的模拟结果

应用 SCO₂RBC 程序对典型 S-CO₂ 再压缩布雷顿循环进行模拟，模拟中用到的参数设置如下：循环最高压力为 25 MPa、循环最低压力为 10 MPa、循环最高温度为 650 °C、循环最低温度为 50 °C、分流比为 0.73、回热器的总热导为 10 MW·K⁻¹、热导分配比为 0.568、透平绝热效率为 93%、压缩机绝热效率为 89%、输出功率为 35 MW。

SCO₂RBC 程序在完成模拟后，会生成 1 个存有输出结果的文件：“运行结果.xlsx”。该文件列出了各状态点的温度、压力、焓值和熵值(表 2)，同时给出压缩机的消耗功率(8.55 MW)、再压缩机的消耗功率(6.21 MW)、高压透平的输出功率(19.77 MW)、低压透平的输出功率(29.99 MW)、主加热器的吸热功率(48.57 MW)、再热换热器的吸热功率 20.90 MW)、冷却器的放热功率(34.47 MW)、CO₂ 的质量流量(337.46 kg·s⁻¹)，以及循环效率(50.38%)。

表 2 循环中各状态点的状态参数

状态点	温度/K	压力/kPa	焓/(kJ·kg ⁻¹)	熵/(kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
1 点	923.15	25000	1157.94	2.83779
2 点	873.54	17500	1099.35	2.84285
3 点	923.15	17500	1161.30	2.91182
4 点	847.44	10000	1072.43	2.91974
5 点	488.46	10000	650.34	2.27350
6 点	386.76	10000	524.00	1.98249
7 点	323.15	10000	384.07	1.57951
8 点	379.76	25000	418.78	1.95633
9'点	479.32	25000	591.86	2.25139
9''点	479.51	25000	592.13	2.25185
9 点	479.37	25000	591.93	2.25151
10 点	808.96	25000	1014.02	2.67140

为了说明 SCO₂RBC 程序模拟结果的准确性,表 3 对比了 SCO₂RBC 程序与文献[2]的计算结果。其中,计算结果包括循环效率和 CO₂ 吸热温差(t_1-t_{10})。可以看出,该程序与文献[2]的计算结果吻合良好,说明本文档介绍的 SCO₂RBC 程序是可靠的。

表 3 SCO₂RBC 与文献[2]计算结果的对比

参数	文献[2]	SCO ₂ RBC	相对误差/%
循环效率/%	50.39	50.38	0.019
$\Delta t (t_1-t_{10})/^\circ\text{C}$	114.20	114.18	0.017

参 考 文 献

- [1] Lemmon E, Huber M, McLinden M. REFPROP: NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties[R]. Gaithersburg: NIST, 2007.
- [2] Neises T, Turchi C. A comparison of supercritical carbon dioxide power cycle configurations with an emphasis on CSP applications[J]. Energy Procedia, 2014, 49: 1187-1196.