

## 附录

### 1. 参数记录表

附表 1 已知条件和给定参数

序号	项目	符号	单位	取值范围或数值
1	核电厂输出电功率	$N_e$	MW	1000
2	一回路能量利用系数	$\eta_1$		0.99
3	蒸汽发生器出口蒸汽干度	$x_{fh}$	%	99.75
4	蒸汽发生器排污率	$\xi_d$		1.05%
5	高压缸内效率	$\eta_{h,i}$	%	82.07
6	低压缸内效率	$\eta_{l,i}$	%	83.59
7	汽轮机组机械效率	$\eta_m$		0.98
8	发电机效率	$\eta_{ge}$		0.98
9	新蒸汽压损	$\Delta p_{fh}$	MPa	$\Delta p_{fh} = 5\% p_{fh}$
10	再热蒸汽压损	$\Delta p_{rh}$	MPa	$\Delta p_{rh} = 3\% p_{rh}$
11	回热抽汽压损	$\Delta p_{e,j}$	MPa	$\Delta p_{e,j} = 5\% p_{e,j}$
12	低压缸排汽压损	$\Delta p_{cd}$	kPa	5%
13	高压给水加热器出口端差	$\theta_{h,u}$	℃	3
14	低压给水加热器出口端差	$\theta_{l,u}$	℃	2
15	加热器效率	$\eta_h$		0.99
16	给水泵效率	$\eta_{fwp,p}$		0.58
17	给水泵汽轮机内效率	$\eta_{fwp,ti}$		0.80

18	给水泵汽轮机机械效率	$\eta_{\text{fwp,tm}}$		0.90
19	给水泵汽轮机减速器效率	$\eta_{\text{fwp,tg}}$		0.98
20	循环冷却水进口温度	$T_{\text{sw},1}$	℃	24

附表 2 确定的主要热力参数汇总表

序号	项目	符号	单位	计算公式或来源	数值
1	反应堆冷却剂系统运行压力	$p_c$	MPa	选定, 15~16	15.6
2	冷却剂压力对应的饱和温度	$T_{c,s}$	℃	查水和水蒸汽表确定	345.31
3	反应堆出口冷却剂过冷度	$\Delta T_{\text{sub}}$	℃	选定, 15~20	16
4	反应堆出口冷却剂温度	$T_{\text{co}}$	℃	$T_{\text{co}} = T_{c,s} - \Delta T_{\text{sub}}$	329.31
5	反应堆进出口冷却剂温升	$\Delta T_c$	℃	选定, 30~40	35
6	反应堆进口冷却剂温度	$T_{\text{ci}}$	℃	$T_{\text{ci}} = T_{\text{co}} - \Delta T_c$	294.31
7	蒸汽发生器饱和蒸汽压力	$p_s$	MPa	选定, 5.0~7.0	6.5
8	蒸汽发生器饱和蒸汽温度	$T_{\text{th}}$	℃	$p_s$ 对应的饱和温度	280.86
9	一、二次侧对数平均温差	$\Delta T_m$	℃	$\Delta T_m = \frac{T_{\text{co}} - T_{\text{ci}}}{\ln \frac{T_{\text{co}} - T_s}{T_{\text{ci}} - T_s}}$	27.31
10	冷凝器中循环冷却水温升	$\Delta T_{\text{sw}}$	℃	选定, 6~8	6
11	冷凝器传热端差	$\delta T$	℃	选定, 3~10	5
12	冷凝器凝结水饱和温度	$T_{\text{cd}}$	℃	$T_{\text{cd}} = T_{\text{sw},1} + \Delta T_{\text{sw}} + \delta T$	35
13	冷凝器的运行压力	$p_{\text{cd}}$	kPa	$T_{\text{cd}}$ 对应的饱和压力	5.6
14	高压缸进口蒸汽压力	$p_{\text{h},i}$	MPa	$p_{\text{h},i} = p_{\text{th}} - \Delta p_{\text{th}}$	6.175
15	高压缸进口蒸汽干度	$x_{\text{h},i}$	%	选定	99.51

16	高压缸排汽压力	$p_{h,z}$	MPa	选定	0.8645
17	高压缸排汽干度	$x_{h,z}$	%	选定	86.12
18	汽水分离器进口蒸汽压力	$p_{sp,i}$	MPa	选定	0.8645
19	汽水分离器进口蒸汽干度	$x_{sp,i}$	%	选定	86.12
	第一级再热器				

20	再热蒸汽进口压力	$p_{rh1,i}$	MPa	选定	0.8559
21	再热蒸汽进口干度	$x_{rh1,i}$	%	选定	99.5
22	加热蒸汽进口压力	$p_{rh1,hs}$	MPa	选定	2.7012
23	加热蒸汽进口干度	$x_{rh1,hs}$	%	选定	91.92
	第二级再热器				
24	再热蒸汽进口压力	$p_{rh2,i}$	MPa	选定	0.8473
25	再热蒸汽进口温度	$T_{rh2,i}$	℃	选定	214.11
26	再热蒸汽出口压力	$p_{rh2,z}$	MPa	选定	0.8387
27	再热蒸汽出口温度	$T_{rh2,z}$	℃	选定	263.47
28	加热蒸汽进口压力	$p_{rh2,hs}$	MPa	选定	6.175
29	加热蒸汽进口干度	$x_{rh2,hs}$	%	选定	99.51
	低压缸				
30	进口蒸汽压力	$p_{1,i}$	MPa	选定	0.8387
31	进口蒸汽温度	$T_{1,i}$	℃	选定	263.47
32	排汽压力	$p_{1,z}$	MPa	选定	0.0059
33	排汽干度	$x_{1,z}$	%	选定	0.8927
34	回热级数	$Z$		选定	7

35	低压给水加热器级数	$Z_l$		选择	4
36	高压给水加热器级数	$Z_h$		选择	2
37	第一次给水回热分配	$\Delta h_{fw}$	kJ/kg	$\Delta h_{fw} = \frac{h_{fw} - h_{cd}}{Z}$	116.26
	第二次给水回热分配				
38	高压加热器给水焓升	$\Delta h_{fw,h}$	kJ/kg	$\Delta h_{fw,h} = \frac{h_{fw} - h_{dea,o}}{Z_h}$	116.37

39	除氧器及低加给水焓升	$\Delta h_{fw,l}$	kJ/kg	$\Delta h_{fw,l} = \frac{h_{dea,o} - h_{cd}}{Z_l + 1}$	116.21
40	低压加热器给水参数				
	第 1 级进口给水比焓	$h_{lfi,1}$	kJ/kg	$h_{lfi,j} = h_{lfo,j-1}$	146.64
	第 1 级出口给水比焓	$h_{lfo,1}$	kJ/kg	$h_{lfo,j} = h_{lfi,j} + \Delta h_{fw}$	262.85
	第 1 级进口给水温度	$T_{lfi,1}$	℃	按( $p_{cwp}, h_{lfi,j}$ )查水蒸汽表	34.45
	第 1 级出口给水温度	$T_{lfo,1}$	℃	按( $p_{cwp}, h_{lfo,j}$ )查水蒸汽表	62.36
	第 2 级进口给水比焓	$h_{lfi,2}$	kJ/kg	$h_{lfi,j} = h_{lfo,j-1}$	262.85
	第 2 级出口给水比焓	$h_{lfo,2}$	kJ/kg	$h_{lfo,j} = h_{lfi,j} + \Delta h_{fw}$	379.07
	第 2 级进口给水温度	$T_{lfi,2}$	℃	按( $p_{cwp}, h_{lfi,j}$ )查水蒸汽表	62.36
	第 2 级出口给水温度	$T_{lfo,2}$	℃	按( $p_{cwp}, h_{lfo,j}$ )查水蒸汽表	90.17
	第 3 级进口给水比焓	$h_{lfi,3}$	kJ/kg	$h_{lfi,j} = h_{lfo,j-1}$	379.068
	第 3 级出口给水比焓	$h_{lfo,3}$	kJ/kg	$h_{lfo,j} = h_{lfi,j} + \Delta h_{fw}$	495.28
	第 3 级进口给水温度	$T_{lfi,3}$	℃	按( $p_{cwp}, h_{lfi,j}$ )查水蒸汽表	90.17
	第 3 级出口给水温度	$T_{lfo,3}$	℃	按( $p_{cwp}, h_{lfo,j}$ )查水蒸汽表	117.77
	第 4 级进口给水比焓	$h_{lfi,4}$	kJ/kg	$h_{lfi,j} = h_{lfo,j-1}$	495.28

	第 4 级出口给水比焓	$h_{\text{fwo},4}$	kJ/kg	$h_{\text{fwo},j} = h_{\text{fwi},j} + \Delta h_{\text{fw}}$	611.496
	第 4 级进口给水温度	$T_{\text{fwi},4}$	°C	按( $p_{\text{cwp}}, h_{\text{fwi},j}$ )查水蒸汽表	117.77
	第 4 级出口给水温度	$T_{\text{fwo},4}$	°C	按( $p_{\text{cwp}}, h_{\text{fwo},j}$ )查水蒸汽表	145.07
	除氧器				
41	进口给水比焓	$h_{\text{dea},i}$	kJ/kg	$h_{\text{dea},i} = h_{\text{fwo},Z}$	611.496
42	出口给水比焓	$h_{\text{dea},o}$	kJ/kg	$h_{\text{dea},o} = h_{\text{dea},i} + \Delta h_{\text{fw}}$	727.71
43	出口给水温度	$T_{\text{dea}}$	°C	$h_{\text{dea},o}$ 对应的饱和水温度	171.94
44	运行压力	$p_{\text{dea}}$	MPa	$T_{\text{dea}}$ 对应的饱和压力	0.8299
45	高压加热器给水参数				
	第 1 级进口给水比焓	$h_{\text{hfw},1}$	kJ/kg	$h_{\text{hfw},i} = h_{\text{fwo},i-1}$	727.71
	第 1 级出口给水比焓	$h_{\text{hfw},1}$	kJ/kg	$h_{\text{hfw},i} = h_{\text{hfw},i} + \Delta h_{\text{fw}}$	844.08
	第 1 级进口给水温度	$T_{\text{hfw},1}$	°C	按( $p_{\text{fwp}}, h_{\text{hfw},i}$ )查水蒸汽表	171.07
	第 1 级出口给水温度	$T_{\text{hfw},1}$	°C	按( $p_{\text{fwp}}, h_{\text{hfw},i}$ )查水蒸汽表	197.61
	第 2 级进口给水比焓	$h_{\text{hfw},2}$	kJ/kg	$h_{\text{hfw},i} = h_{\text{fwo},i-1}$	844.08
	第 2 级出口给水比焓	$h_{\text{hfw},2}$	kJ/kg	$h_{\text{hfw},i} = h_{\text{hfw},i} + \Delta h_{\text{fw}}$	960.45
	第 2 级进口给水温度	$T_{\text{hfw},2}$	°C	按( $p_{\text{fwp}}, h_{\text{hfw},i}$ )查水蒸汽表	197.61
	第 2 级出口给水温度	$T_{\text{hfw},2}$	°C	按( $p_{\text{fwp}}, h_{\text{hfw},i}$ )查水蒸汽表	223.4
46	高压缸抽汽 ( $i = 1, \dots, Z_h$ )				
	第 1 级抽汽压力	$p_{\text{hes},1}$	MPa		1.6575
	第 1 级抽汽干度	$x_{\text{hes},1}$	%		0.8878
	第 2 级抽汽压力	$p_{\text{hes},2}$	MPa		3.3052
	第 2 级抽汽干度	$x_{\text{hes},2}$	%		0.9294

47	低压缸抽汽 ( $j = 1, \dots, Z_1$ )				
	第 1 级抽汽压力	$p_{les, 1}$	MPa		0.0256
	第 1 级抽汽干度	$x_{les, 1}$	%		0.9345
	第 2 级抽汽压力	$p_{les, 2}$	MPa		0.0802
	第 2 级抽汽干度	$x_{les, 2}$	%		0.9738
	第 3 级抽汽压力	$p_{les, 3}$	MPa		0.2076
	第 3 级抽汽干度	$x_{les, 3}$	%		1.0
	第 4 级抽汽压力	$p_{les, 4}$	MPa		0.4631
	第 4 级抽汽干度	$x_{les, 4}$	%		1.0

附表 3 热平衡计算结果汇总表

序号	项目	符号	单位	计算结果				
				1	2	3	...	$n$
1	核电厂效率	$\eta_{e,NPP}$	%	0.3	0.3	0.3		0.316
2	反应堆热功率	$Q_R$	MW	3333	3333	3333		3167.8
3	蒸汽发生器总蒸汽产量	$D_s$	kg/s	1815.7	1815.7	1815.7		1725.5
4	汽轮机高压缸耗汽量	$G_{s,hp}$	kg/s	2005.5	1097.3	1975.3		1534.2
5	汽轮机低压缸耗汽量	$G_{s,lp}$	kg/s	871.24	1213.3	877.28		1049.2
6	第一级再热器耗汽量	$G_{s,rh1}$	kg/s	57.11	79.5	57.51		68.78
7	第二级再热器耗汽量	$G_{s,rh2}$	kg/s	61.63	85.8	62.06		74.22
8	除氧器耗汽量	$G_{s,dea}$	kg/s	41.03	61.37	42.02		52.35
9	给水泵汽轮机耗汽量	$G_{s,fwp}$	kg/s	109.7	121.57	121.57		115.54
10	给水泵给水量	$G_{fw}$	kg/s	1833.8	1834.7	1834.7		1743.6

11	给水泵扬程	$H_{\text{fwp}}$	MPa	6.97	6.97	6.97		6.97
12	高压缸抽汽量							
	第 1 级抽汽量	$G_{\text{hes},1}$	kg/s	103.35	105.53	108.53		101.22
	第 2 级抽汽量	$G_{\text{hes},2}$	kg/s	122.53	115.73	119.28		111.08
13	低压缸抽汽量							
	第 1 级抽汽量	$G_{\text{les},1}$	kg/s	45.46	61.63	46.33		53.84
	第 2 级抽汽量	$G_{\text{les},2}$	kg/s	47.46	64.34	48.37		56.21
	第 3 级抽汽量	$G_{\text{les},3}$	kg/s	49.72	67.41	50.68		58.89
	第 4 级抽汽量	$G_{\text{les},4}$	kg/s	53.47	70.74	53.18		61.80

## 2. 计算程序

使用 python 语言编写

```

01. """
02.name:夏从羲
03.time:2022.06.15
04. """
05.
06.import numpy as np
07.from iapws import IAPWS97 as ip
08.import math
09.
10.N_e = 1000 # 核电厂输出功率
11.η_1 = 0.99 # 一回路能量利用系数
12.x_fh = 0.9975 # 蒸汽发生器出口蒸汽干度
13.ξd = 0.0105 # 蒸汽发生器排污率
14.η_hi = 0.8207 # 高压缸内效率
15.η_li = 0.8359 # 低压缸内效率
16.η_m = 0.98 # 汽轮机组机械效率
17.η_ge = 0.98 # 发电机效率
18.θ_hu = 3 # 高压给水加热器出口端差
19.θ_lu = 2 # 低压给水加热器出口端差
20.η_h = 0.99 # 加热器效率
21.η_fwpp = 0.58 # 给水泵效率

```

```

22.η_fwpti = 0.8 # 给水泵汽轮机内效率
23.η_fwptm = 0.9 # 给水泵汽轮机机械效率
24.η_fwptg = 0.98 # 给水泵汽轮机减速器效率
25.T_sw1 = 24 # 循环冷却水进口温度
26.p_c = 15.6 # 反应堆冷却剂系统运行压力
27.T_cs = ip(P=p_c, x=0).T - 273.15 # 冷却剂压力对应的饱和温度
28.ΔT_sub = 16 # 反应堆出口冷却剂过冷度
29.T_co = T_cs - ΔT_sub # 反应堆出口冷却剂温度
30.ΔT_c = 35 # 反应堆进出口冷却剂温升
31.T_ci = T_co - ΔT_c # 反应堆进口冷却剂温度
32.p_s = 6.5 # 蒸汽发生器饱和蒸汽压力
33.T_fh = ip(P=p_s, x=x_fh).T - 273.15 # 蒸汽发生器饱和蒸汽温度
34.h_fh = ip(P=p_s, x=x_fh).h # 蒸汽发生器出口比焓
35.ΔT_m = (T_co - T_ci) / math.log((T_co - T_fh) / (T_ci - T_fh)) # 对数平均温差
36.ΔT_sw = 6 # 冷凝器中循环冷却水温升
37.δT = 5 # 冷凝器传热端差
38.T_cd = T_sw1 + ΔT_sw + δT # 冷凝器凝结水饱和温度
39.p_cd = ip(T=T_cd + 273.15, x=0).P # 冷凝器运行压力
40.p_fh = p_s
41.
42.Δp_fh = 0.05 * p_fh # 新蒸汽压损
43.p_hi = p_fh - Δp_fh # 高压缸进口蒸汽压力
44.h_hi = h_fh # 高压缸进口比焓
45.x_hi = ip(P=p_hi, h=h_hi).x # 高压缸进口蒸汽干度
46.s_hi = ip(P=p_hi, h=h_hi).s # 高压缸进口熵
47.p_hz = 0.14 * p_hi # 高压缸排汽压力
48.h_hzo = ip(P=p_hz, s=s_hi).h # 高压缸排汽理想比焓
49.h_hz = h_hi - (h_hi - h_hzo) * η_hi # 高压缸排汽真实焓值
50.x_hz = ip(P=p_hz, h=h_hz).x # 高压缸出口干度
51.
52.Δp_rh = 0.01 * p_hz # 汽水分离再热器中每一级再热蒸汽压损
53.p_spi = p_hz # 汽水分离器进口压力
54.x_spi = x_hz # 汽水分离器进口干度
55.p_rh1i = p_spi - Δp_rh # 一级再热器进口压力
56.h_spz = ip(P=p_rh1i, x=0).h # 汽水分离器疏水比焓
57.x_rh1i = 0.995 # 一级再热器进口干度
58.h_rh1i = ip(P=p_rh1i, x=x_rh1i).h # 一级再热器进口比焓
59.p_rh2i = p_rh1i - Δp_rh # 二级再热器进口压力
60.p_rh2z = p_rh2i - Δp_rh # 二级再热器出口压力
61.p_rh2hs = p_hi # 二级再热器加热蒸汽进口压力
62.x_rh2hs = x_hi # 二级再热器加热蒸汽进口干度
63.T_rh2hs = ip(P=p_rh2hs, x=x_rh2hs).T - 273.15 # 二级再热器加热蒸汽温度

```



```

64.h_rh2hs = h_hi # 二级再热器加热蒸汽进口比焓
65.h_rh2hz = ip(P=p_rh2hs, x=0).h # 二级再热器加热蒸汽出口比焓
66.T_rh2z = T_rh2hs - 14 # 二级再热气出口温度
67.h_rh2z = ip(P=p_rh2z, T=T_rh2z + 273.15).h # 二级再热器出口比焓
68.Δh_rh = 0.5 * (h_rh2z - h_rh1i) # 再热器中焓升
69.h_rh2i = h_rh2z - Δh_rh # 二级再热器进口比焓
70.T_rh2i = ip(P=p_rh2i, h=h_rh2i).T - 273.15 # 二级再热器进口温度
71.
72.T_rh1z = T_rh2i # 一级再热器进口温度
73.T_rh1hz = T_rh1z + 14 # 一级再热器加热蒸汽温度
74.p_rh1hz = ip(T=T_rh1hz + 273.15, x=0).P # 一级再热器加热蒸汽压力
75.h_rh1hz = ip(T=T_rh1hz + 273.15, x=0).h # 一级再热器加热蒸汽出口焓
    值
76.p_rh1 = p_rh1hz / 0.95 # 一级再热器抽汽压力
77.h_rh1hso = ip(P=p_rh1, s=s_hi).h # 一级再热器理想抽汽比焓
78.h_rh1hs = h_hi - (h_hi - h_rh1hso) * η_hi # 一级再热器真实抽汽比焓
79.x_rh1hs = ip(P=p_rh1hz, h=h_rh1hs).x # 一级再热器加热蒸汽进口干度
80.
81.Δp_cd = 0.05 * p_cd # 低压缸排汽压损
82.p_lz = p_cd + Δp_cd # 低压缸排汽压力
83.h_li = h_rh2z # 低压缸进口比焓
84.p_li = p_rh2z # 低压缸进口压力
85.s_li = ip(h=h_li, P=p_li).s # 低压缸进口熵
86.T_li = ip(h=h_li, P=p_li).T # 低压缸进口温度
87.h_lho = ip(P=p_lz, s=s_li).h # 低压缸出口理想比焓
88.h_lo = h_li - (h_li - h_lho) * η_li # 低压缸出口真实比焓
89.x_lz = ip(P=p_lz, h=h_lo).x # 低压缸排汽干度
90.
91.p_fw = p_s + 0.1 # 给水压力
92.h_s = ip(P=p_s, x=0).h # 蒸汽发生器运行压力下饱和水比焓
93.h_cd = ip(P=p_cd, x=0).h # 冷凝器出口凝结水比焓
94.Z_l = 4 # 低压给水加热器级数
95.Z_h = 2 # 高压给水加热器级数
96.Z = Z_l + Z_h + 1 # 回热级数（包括除氧器）
97.Δh_fwop = (h_s - h_cd) / (Z + 1) # 每一级加热器理论给水焓升
98.h_fwop = h_cd + Z * Δh_fwop # 最佳给水比焓
99.T_fwop = ip(P=p_fw, h=h_fwop).T - 273.15 # 最佳给水温度
100.T_fw = 0.88 * T_fwop # 实际给水温度
101.h_fw = ip(P=p_fw, T=T_fw + 273.15).h # 给水比焓
102.Δh_fw = (h_fw - h_cd) / Z # 每一级给水的实际焓升
103.
104.p_dea = 0.96 * p_hz # 除氧器运行压力（假定值）
105.h_deao = ip(P=p_dea, x=0).h # 除氧器出口比焓
106.T_dea = ip(P=p_dea, h=h_deao) # 除氧器出口给水温度

```

```

107.
108.  $\Delta h_{fwh} = (h_{fw} - h_{deao}) / Z_h$  # 高压给水加热器每级焓升
109.  $\Delta h_{fwl} = (h_{deao} - h_{cd}) / (Z_l + 1)$  # 低压给水加热器每级焓升
110.  $p_{cwp} = 3.1 * p_{dea}$  # 凝水泵出口压力
111.  $p_{fwp} = 1.2 * p_s$  # 给水泵出口压力
112.  $\Delta p_{fwh} = (p_{fwp} - p_{fw}) / Z_h$  # 高压给水加热器每级压降
113.  $\Delta p_{cwl} = (p_{cwp} - p_{dea}) / (Z_l + 1)$  # 低压给水加热器每级压降
114.
115. # 第一级低压给水加热器
116.  $T_{lew1} = ip(P=p_{cwp} - \Delta p_{cwl}, h=h_{cd} + \Delta h_{fwl}).T - 273.15 + \theta_{lu}$  # 疏水温度
117.  $h_{lew1} = ip(T=T_{lew1} + 273.15, x=0).h$  # 疏水比焓
118.  $p_{lew1} = ip(T=T_{lew1} + 273.15, x=0).P$  # 疏水压力
119.  $p_{les1} = p_{lew1} / 0.95$  # 抽汽压力
120.  $h_{leso1} = ip(P=p_{les1}, s=s_{li}).h$  # 抽汽理想比焓
121.  $h_{les1} = h_{li} - (h_{li} - h_{leso1}) * \eta_{li}$  # 抽汽真实比焓
122.  $x_{les1} = ip(P=p_{les1}, h=h_{les1}).x$  # 抽汽干度
123.
124. # 第二级低压给水加热器
125.  $T_{lew2} = ip(P=p_{cwp} - 2 * \Delta p_{cwl}, h=h_{cd} + 2 * \Delta h_{fwl}).T - 273.15 + \theta_{lu}$  # 疏水温度
126.  $h_{lew2} = ip(T=T_{lew2} + 273.15, x=0).h$  # 疏水比焓
127.  $p_{lew2} = ip(T=T_{lew2} + 273.15, x=0).P$  # 疏水压力
128.  $p_{les2} = p_{lew2} / 0.95$  # 抽汽压力
129.  $h_{leso2} = ip(P=p_{les2}, s=s_{li}).h$  # 抽汽理想比焓
130.  $h_{les2} = h_{li} - (h_{li} - h_{leso2}) * \eta_{li}$  # 抽汽真实比焓
131.  $x_{les2} = ip(P=p_{les2}, h=h_{les2}).x$  # 抽汽干度
132.
133. # 第三级低压给水加热器
134.  $T_{lew3} = ip(P=p_{cwp} - 3 * \Delta p_{cwl}, h=h_{cd} + 3 * \Delta h_{fwl}).T - 273.15 + \theta_{lu}$  # 疏水温度
135.  $h_{lew3} = ip(T=T_{lew3} + 273.15, x=0).h$  # 疏水比焓
136.  $p_{lew3} = ip(T=T_{lew3} + 273.15, x=0).P$  # 疏水压力
137.  $p_{les3} = p_{lew3} / 0.95$  # 抽汽压力
138.  $h_{leso3} = ip(P=p_{les3}, s=s_{li}).h$  # 抽汽理想比焓
139.  $h_{les3} = h_{li} - (h_{li} - h_{leso3}) * \eta_{li}$  # 抽汽真实比焓
140.  $x_{les3} = ip(P=p_{les3}, h=h_{les3}).x$  # 抽汽干度
141.
142. # 第四级低压给水加热器
143.  $T_{lew4} = ip(P=p_{cwp} - 4 * \Delta p_{cwl}, h=h_{cd} + 4 * \Delta h_{fwl}).T - 273.15 + \theta_{lu}$  # 疏水温度
144.  $h_{lew4} = ip(T=T_{lew4} + 273.15, x=0).h$  # 疏水比焓
145.  $p_{lew4} = ip(T=T_{lew4} + 273.15, x=0).P$  # 疏水压力
146.  $p_{les4} = p_{lew4} / 0.95$  # 抽汽压力

```

```

147.h_leso4 = ip(P=p_les4, s=s_li).h # 抽汽理想比焓
148.h_les4 = h_li - (h_li - h_leso4) * η_li # 抽汽真实比焓
149.x_les4 = ip(P=p_les4, h=h_les4).x # 抽汽干度
150.
151.# 第一级高压给水加热器
152.T_hew1 = ip(P=p_fwp - Δp_fwh, h=h_deao + Δh_fwh).T -
    273.15 + θ_hu # 疏水温度
153.h_hew1 = ip(T=T_hew1 + 273.15, x=0).h # 疏水比焓
154.p_hew1 = ip(T=T_hew1 + 273.15, x=0).P # 疏水压力
155.p_hes1 = p_hew1 / 0.95 # 抽汽压力
156.h_heso1 = ip(P=p_hes1, s=s_hi).h # 抽汽理想比焓
157.h_hes1 = h_hi - (h_hi - h_heso1) * η_hi # 抽汽真实比焓
158.x_hes1 = ip(P=p_hes1, h=h_hes1).x # 抽汽干度
159.
160.# 第二级高压给水加热器
161.T_hew2 = ip(P=p_fwp - 2 * Δp_fwh, h=h_deao + 2 * Δh_fwh).T -
    273.15 + θ_hu # 疏水温度
162.h_hew2 = ip(T=T_hew2 + 273.15, x=0).h # 疏水比焓
163.p_hew2 = ip(T=T_hew2 + 273.15, x=0).P # 疏水压力
164.p_hes2 = p_hew2 / 0.95 # 抽汽压力
165.h_heso2 = ip(P=p_hes2, s=s_hi).h # 抽汽理想比焓
166.h_hes2 = h_hi - (h_hi - h_heso2) * η_hi # 抽汽真实比焓
167.x_hes2 = ip(P=p_hes2, h=h_hes2).x # 抽汽干度
168.
169.print("T_cs = " + str(T_cs))
170.print("T_co = " + str(T_co))
171.print("T_ci = " + str(T_ci))
172.print("T_fh = " + str(T_fh))
173.print("ΔT_m = " + str(ΔT_m))
174.print("p_cd = " + str(p_cd))
175.print("p_hi = " + str(p_hi))
176.print("x_hi = " + str(x_hi))
177.print("p_hz = " + str(p_hz))
178.print("x_hz = " + str(x_hz))
179.print("p_spi = " + str(p_spi))
180.print("x_spi = " + str(x_spi))
181.print("p_rh1i = " + str(p_rh1i))
182.print("x_rh1i = " + str(x_rh1i))
183.print("p_rh1hs = " + str(p_rh1hs))
184.print("x_rh1hs = " + str(x_rh1hs))
185.print("p_rh2i = " + str(p_rh2i))
186.print("T_rh2i = " + str(T_rh2i))
187.print("p_rh2z = " + str(p_rh2z))
188.print("T_rh2z = " + str(T_rh2z))

```

```

189.print("p_rh2hs = " + str(p_rh2hs))
190.print("x_rh2hs = " + str(x_rh2hs))
191.print("p_li = " + str(p_li))
192.print("T_li = " + str(T_li))
193.print("p_lz = " + str(p_lz))
194.print("x_lz = " + str(x_lz))
195.print("Δh_fw = " + str(Δh_fw))
196.print("Δh_fwh = " + str(Δh_fwh))
197.print("Δh_fwl = " + str(Δh_fwl))
198.print("\033[0;35m===== 第1级低压给水加热器 =====\033[0m")
199.print("h_lfw1 = " + str(h_cd))
200.print("h_lfwo1 = " + str(h_cd + Δh_fwl))
201.print("T_lfw1 = " + str(ip(P=p_cwp, h=h_cd).T - 273.15))
202.print("T_lfwo1 = " + str(T_lew1 - θ_lu))
203.print("p_les1 = " + str(p_les1))
204.print("x_les1 = " + str(x_les1))
205.print("\033[0;35m===== 第2级低压给水加热器 =====\033[0m")
206.print("h_lfw2 = " + str(h_cd + Δh_fwl))
207.print("h_lfwo2 = " + str(h_cd + 2 * Δh_fwl))
208.print("T_lfw2 = " + str(ip(P=p_cwp -
    Δp_cw1, h=h_cd + Δh_fwl).T - 273.15))
209.print("T_lfwo2 = " + str(T_lew2 - θ_lu))
210.print("p_les2 = " + str(p_les2))
211.print("x_les2 = " + str(x_les2))
212.print("\033[0;35m===== 第3级低压给水加热器 =====\033[0m")
213.print("h_lfw3 = " + str(h_cd + 2 * Δh_fwl))
214.print("h_lfwo3 = " + str(h_cd + 3 * Δh_fwl))
215.print("T_lfw3 = " + str(ip(P=p_cwp -
    2 * Δp_cw1, h=h_cd + 2 * Δh_fwl).T - 273.15))
216.print("T_lfwo3 = " + str(T_lew3 - θ_lu))
217.print("p_les3 = " + str(p_les3))
218.print("x_les3 = " + str(x_les3))
219.print("\033[0;35m===== 第4级低压给水加热器 =====\033[0m")
220.print("h_lfw4 = " + str(h_cd + 3 * Δh_fwl))
221.print("h_lfwo4 = " + str(h_cd + 4 * Δh_fwl))
222.print("T_lfw4 = " + str(ip(P=p_cwp -
    3 * Δp_cw1, h=h_cd + 3 * Δh_fwl).T - 273.15))
223.print("T_lfwo4 = " + str(T_lew4 - θ_lu))
224.print("p_les4 = " + str(p_les4))
225.print("x_les4 = " + str(x_les4))
226.print("\033[0;32m===== 除氧器 =====\033[0m")
227.print("h_deai = " + str(h_cd + 4 * Δh_fwl))
228.print("h_deao = " + str(h_deao))
229.print("T_dea = " + str(T_dea))

```

```

230.print("p_dea = " + str(p_dea))
231.print("\033[0;36m===== 第1级高压给水加热器 =====\033[0m")
232.print("h_hfwi1 = " + str(h_deao))
233.print("h_hfwo1 = " + str(h_deao + Δh_fwh))
234.print("T_hfwi1 = " + str(ip(P=p_fwp, h=h_deao).T - 273.15))
235.print("T_hfw01 = " + str(T_hew1 - θ_hu))
236.print("h_hes1 = " + str(h_hes1))
237.print("x_hes1 = " + str(x_hes1))
238.print("\033[0;36m===== 第2级高压给水加热器 =====\033[0m")
239.print("h_hfwi2 = " + str(h_deao + Δh_fwh))
240.print("h_hfwo2 = " + str(h_deao + 2 * Δh_fwh))
241.print("T_hfwi2 = " + str(ip(P=p_fwp -
    Δp_fwh, h=h_deao + Δh_fwh).T - 273.15))
242.print("T_hfw02 = " + str(T_hew2 - θ_hu))
243.print("h_hes2 = " + str(h_hes2))
244.print("x_hes2 = " + str(x_hes2))
245.print("\033[0;31m----- 循环开始 -----
    \033[0m")
246.
247.η_eNPP = 0.3 # 假定核电厂效率初值
248.G_cd = 1000 # 假定冷凝器出口凝结水流量初值
249.while True:
250.    Q_R = N_e / η_eNPP # 反应堆热功率
251.    D_s = Q_R * η_1 * 1000 / ((h_fh - h_s) + (1 + ξd) * (h_s -
        h_fw)) # 总蒸汽产量
252.    G_fw = (1 + ξd) * D_s # 蒸汽发生器给水流量
253.    H_fwp = p_fwp - p_dea # 给水泵扬程
254.    ρ_fw = 0.5 * (ip(P=p_fwp, h=h_deao).rho + ip(P=p_dea, x=0).rho) # 给水泵内密度
255.    N_fwpp = 1000 * G_fw * H_fwp / ρ_fw # 给水泵有效功率
256.    N_fwpt = N_fwpp / (η_fwpp * η_fwpti * η_fwptm * η_fwptg) #
        给水泵汽轮机有效功率
257.    H_a = h_hi - h_hz # 给水泵汽轮机内的绝热焓降
258.    G_sfwpt = N_fwpt / H_a # 给水泵汽轮机耗汽量
259.
260.    while True:
261.        # 低压给水加热器抽汽量
262.        G_les4 = G_cd * Δh_fw1 / (η_h * (h_les4 - h_lew4)) # 第
            四级
263.        G_les3 = (G_cd * Δh_fw1 - η_h * G_les4 * (h_lew4 -
            h_lew3)) / (η_h * (h_les3 - h_lew3)) # 第三级
264.        G_les2 = (G_cd * Δh_fw1 -
            η_h * (G_les4 + G_les3) * (h_lew3 - h_lew2)) / (η_h * (h_les2 -
            h_lew2)) # 第二级

```

```

265.      G_les1 = (G_cd * Δh_fw1 -
      η_h * (G_les4 + G_les3 + G_les2) * (h_lew2 -
      h_lew1)) / (η_h * (h_les1 - h_lew1)) # 第一级
266.
267.      G_slp = G_cd - ξd * D_s - G_sfw # 低压缸耗汽量
268.      G_srh1 = G_slp * (h_rh2i - h_rh1i) / (η_h * (h_rh1hs -
      h_rh1hz)) # 第一级再热器抽汽量
269.      G_srh2 = G_slp * (h_rh2z - h_rh2i) / (η_h * (h_rh2hs -
      h_rh2hz)) # 第一级再热器抽汽量
270.
271.      # 高压给水加热器抽汽量
272.      G_hes2 = (G_fw * Δh_fwh - η_h * G_srh2 * (h_rh2hz -
      h_hew2)) / (η_h * (h_hes2 - h_hew2)) # 二级
273.      G_hes1 = (G_fw * Δh_fwh -
      η_h * ((G_srh2 + G_hes2) * (h_hew2 -
      h_hew1) + G_srh1 * (h_rh1hz - h_hew1))) / (η_h * (h_hes1 -
      h_hew1)) # 一级
274.
275.      G_fss = G_slp * (x_rh1i - x_spi) / x_spi # 汽水分离器疏
      水量
276.      h_deai = h_cd + 4 * Δh_fw1 # 除氧器入口给水比焓
277.      G_sdea = (G_fss * (h_spz -
      h_deao) + (G_srh1 + G_srh2 + G_hes1 + G_hes2) * (h_hew1 -
      h_deao) + G_cd * (h_deai - h_deao)) / (η_h * (h_deao -
      h_hz)) # 除氧器抽汽量
278.      N_tl = (G_slp * (h_li - h_lo) + G_les4 * (h_li -
      h_les4) + G_les3 * (h_li - h_les3) + G_les2 * (h_li -
      h_les2) + G_les1 * (h_li - h_les1)) * η_ge * η_li * η_m # 低压缸
      发电功率
279.      N_th = 1000 * N_e - N_tl # 高压缸发电功率
280.      G_shp = (N_th / (η_ge * η_hi * η_m) - G_hes1 * (h_hi -
      h_hes1) - G_hes2 * (h_hi - h_hes2) - G_srh1 * (h_hi -
      h_rh1hs)) / (h_hi - h_hz) # 高压缸耗汽量
281.
282.      D_s_new = G_srh2 + G_shp + G_sfw # 蒸汽发生器总蒸汽产量
      (新)
283.      G_fw_new = (1 + ξd) * D_s_new # 蒸汽发生器给水量 (新)
284.      G_cd_new = G_fw_new - G_fss - G_hes2 - G_hes1 - G_srh2 -
      G_srh1 - G_sdea # 凝结水流量 (新)
285.      Q_R_new = (D_s_new * (h_fh -
      h_fw) + ξd * D_s_new * (h_s - h_fw)) / (η_1 * 1000) # 反应堆热功
      率 (新)
286.      η_eNPP_new = N_e / Q_R_new # 核电厂效率
287.

```

```

288.         print("\033[0;34mη_eNPP\033[0m" + " = " + str(η_eNPP))
289.         print("Q_R = " + str(Q_R))
290.         print("D_s = " + str(D_s))
291.         print("G_shp = " + str(G_shp))
292.         print("G_slp = " + str(G_slp))
293.         print("G_srh1 = " + str(G_srh1))
294.         print("G_srh2 = " + str(G_srh2))
295.         print("G_sdea = " + str(G_sdea))
296.         print("G_sfw = " + str(G_sfw))
297.         print("G_fw = " + str(G_fw))
298.         print("H_fwp = " + str(H_fwp))
299.         print("\033[0;36mG_hes1\033[0m" + " = " + str(G_hes1))
300.         print("\033[0;36mG_hes2\033[0m" + " = " + str(G_hes2))
301.         print("\033[0;35mG_les1\033[0m" + " = " + str(G_les1))
302.         print("\033[0;35mG_les2\033[0m" + " = " + str(G_les2))
303.         print("\033[0;35mG_les3\033[0m" + " = " + str(G_les3))
304.         print("\033[0;35mG_les4\033[0m" + " = " + str(G_les4))
305.         print("----- 分割线 -----")
306.
307.         if abs((G_cd_new - G_cd) / G_cd) < 0.01:
308.             break
309.         else:
310.             G_cd = 0.5 * (G_cd_new + G_cd)
311.             Q_R_new = (D_s_new * (h_fh - h_fw) + ξd * D_s_new * (h_s -
                h_fw)) / (η_1 * 1000) # 反应堆热功率(新)
312.             η_eNPP_new = N_e / Q_R_new # 核电厂效率
313.             if abs((η_eNPP_new - η_eNPP) / η_eNPP) < 0.001:
314.                 break
315.             else:
316.                 η_eNPP = η_eNPP_new
317.

```

### 3. 热力线图