



西安交通大学  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY



化学工程与技术学院  
SCHOOL OF CHEMICAL ENGINEERING AND TECHNOLOGY

# 西安交通大学2023届本科生毕业设计答辩

## 换热网络多目标优化建模及甲醇合成装置优化软件开发

答辩人 张子轩

指导教师 刘桂莲 王天雁

2023年6月





# 目 录

## 第 I 部分

研究背景与主要内容

## 第 II 部分

换热网络多目标优化建模

## 第 III 部分

甲醇合成装置节能优化分析

## 第 IV 部分

专用优化软件开发

## 第 V 部分

结 论

## 第 VI 部分

致 谢

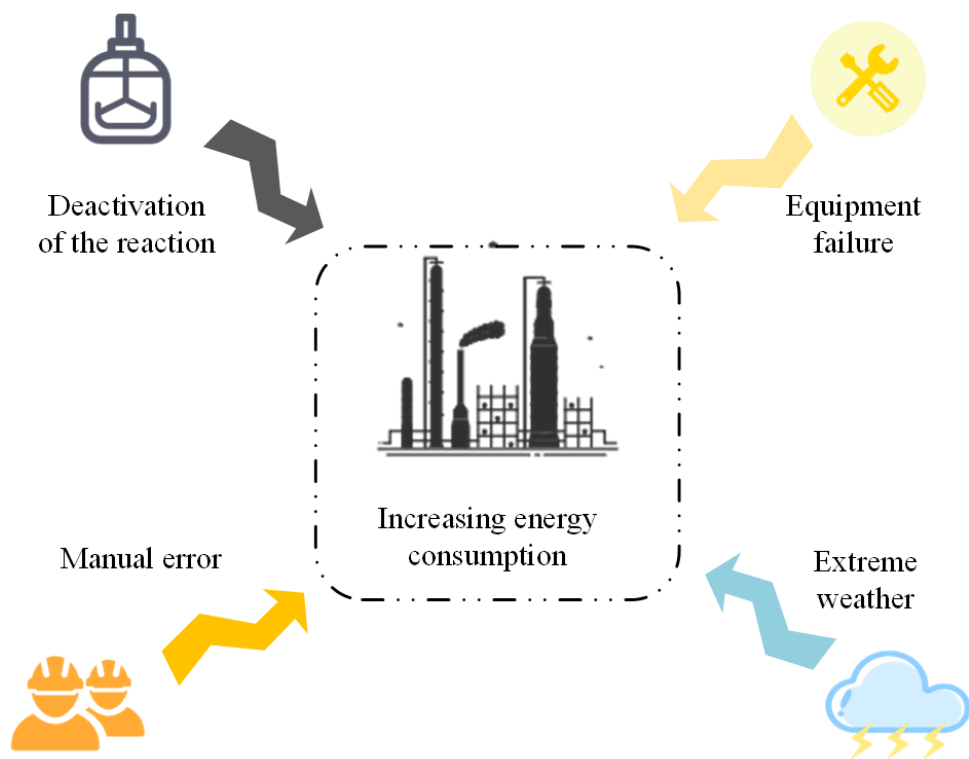


- i . 研究背景
- ii . 研究内容
- iii . 任务书

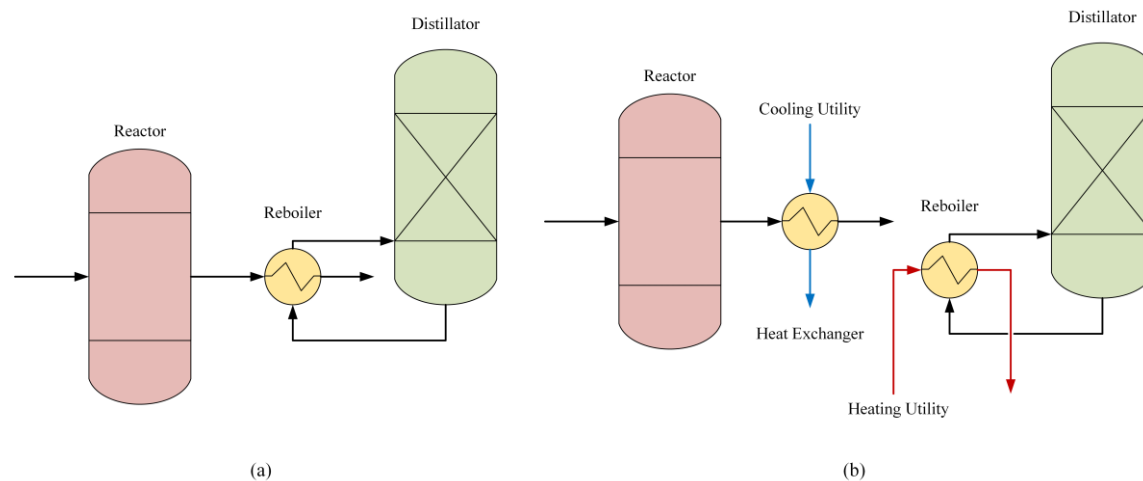
## 第 I 部分

# 研究背景与主要内容

## 存在的问题



## 挑战



“耦合”与“解耦”之间的矛盾

## 研究的主要内容

### 换热网络多目标优化建模

应用

### 甲醇合成装置节能优化分析

集成

### 专用优化软件开发

- 波动在换热网络中的传递模型
- 建立评价波动对换热网络影响大小的指数——扰动度
- 多目标优化方法权衡公用工程与扰动度

- 针对重要的煤制甲醇工艺的合成与精馏工段进行优化
- 对优化结果进行分析
- 进行经济环境分析

- 将成果集成于专用优化软件
- 可视化结果，操作方便，提高信息化程度

任务书

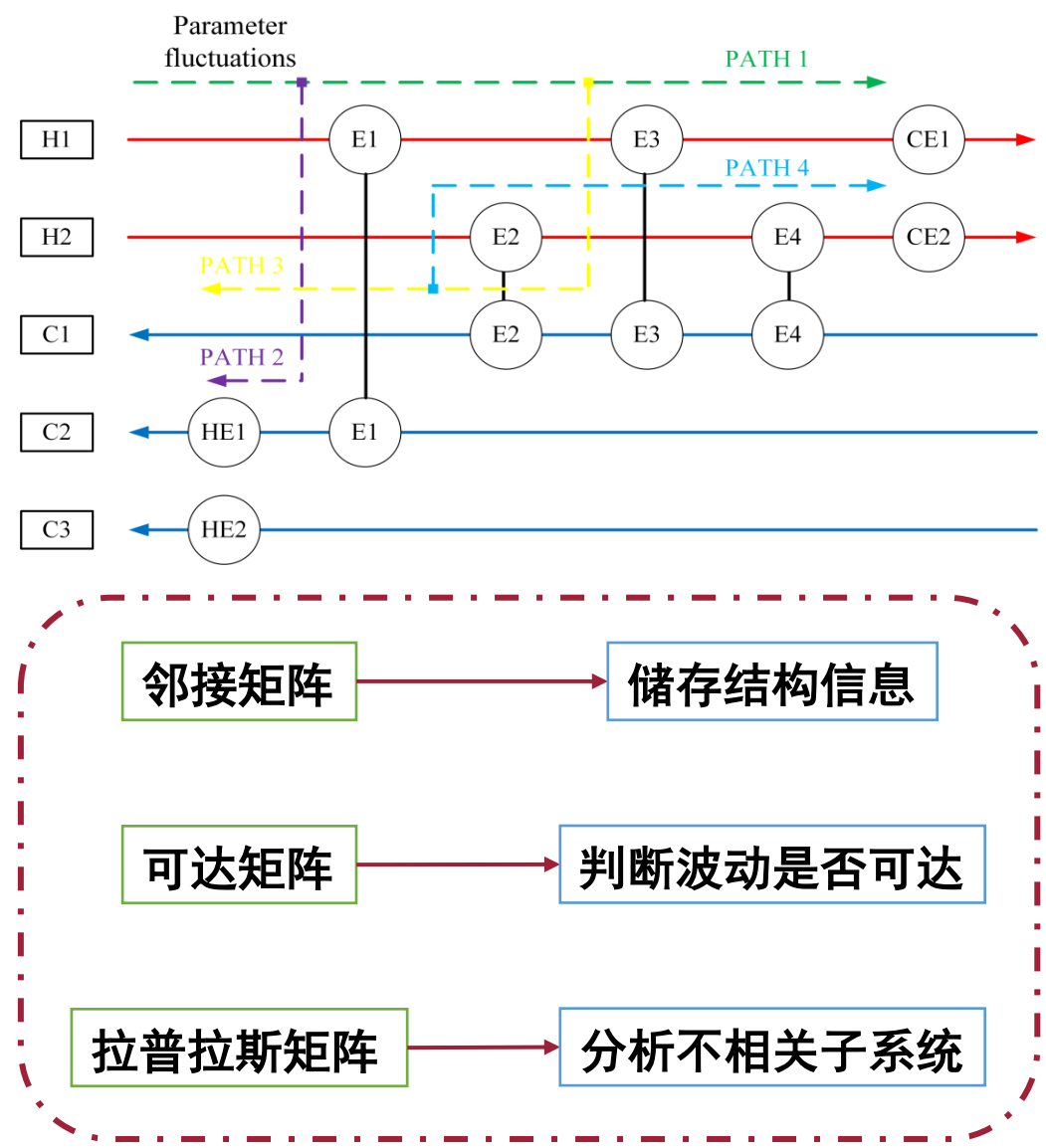
序号	任务描述	是否完成
1	查阅国内外文献，熟悉甲醇合成装置流程	已完成
2	开发换热网络多目标优化模型	已完成
3	基于多目标优化模型优化甲醇合成装置的换热网络	已完成
4	构建软件的框架，开发甲醇合成装置集成优化软件	已完成
5	经济性分析与环境影响分析	已完成
6	英文文献翻译2000字以上	已完成
7	绘制基于产品研发、工业应用的PID图（1#）	已完成
8	撰写毕业设计论文（不少于15000字）	已完成



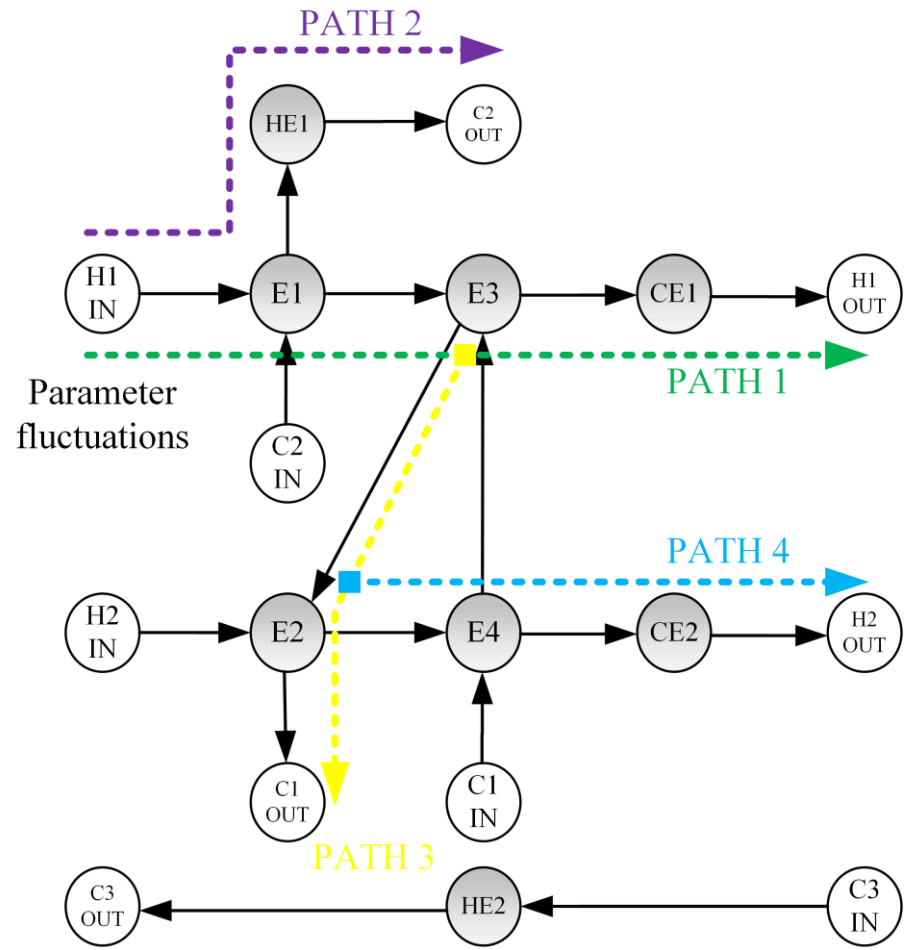
- i . 换热网络有向图
- ii . 扰动度
- iii . 超结构模型的约束转化
- iv . NSGA- II 算法的改进

## 第 II 部分

# 换热网络多目标优化建模

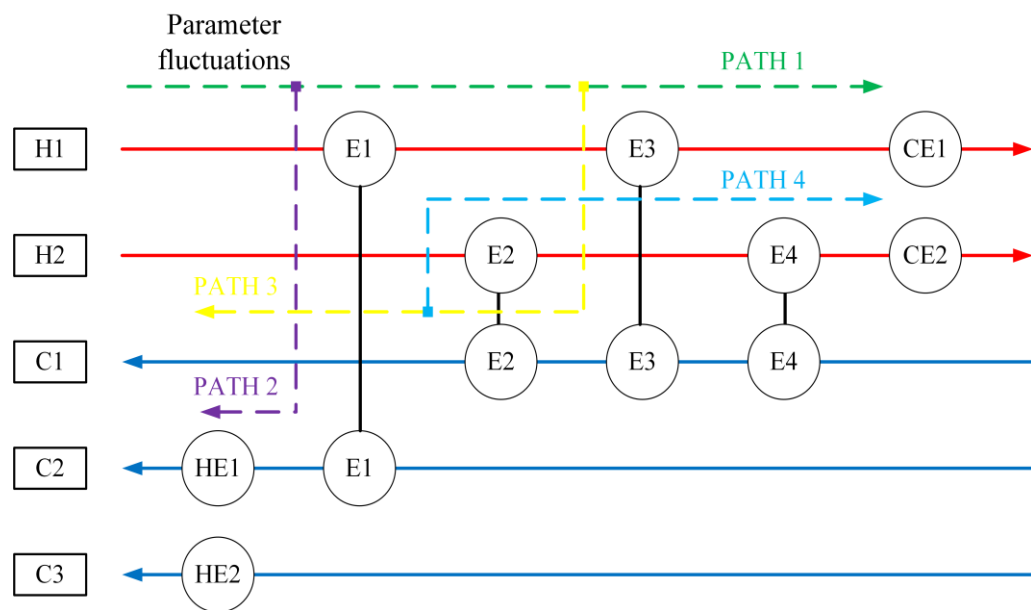


换热网络有向图转化及相关矩阵





### 扰动度——抵抗参数波动评价指标

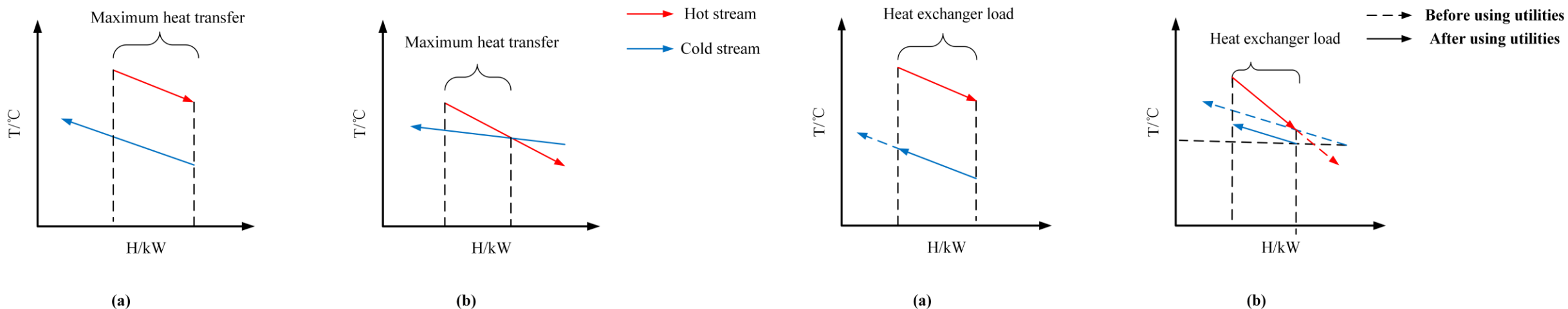
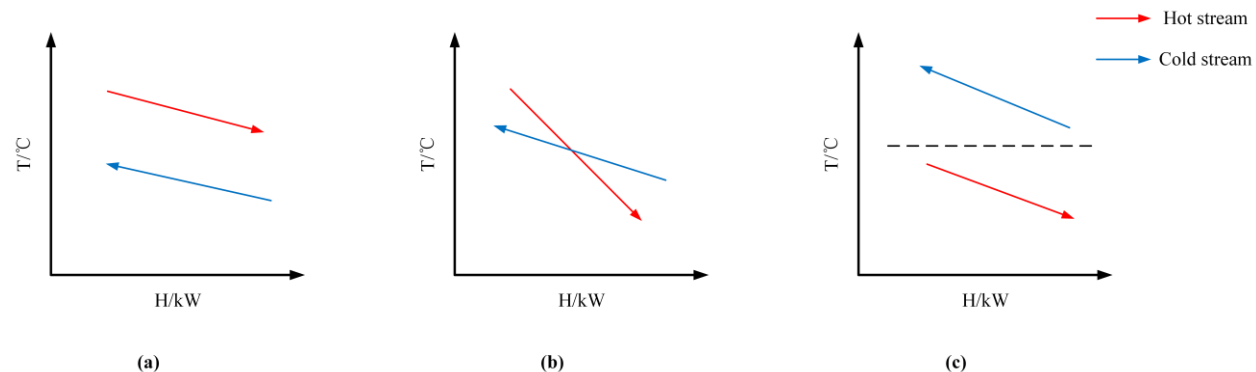


$$Excitation = \sum_{i=1}^p W_i \sum_{j=1}^{len(R_i)} \sum_{k \in R_i(r_j)} \left| \left( \frac{\partial t_k}{\partial T_{i,in}} \right) \right|$$

**扰动度的定义：**

单个流股上的扰动度定义为，流股参数变化对其导致的**波动迁移路径**的所有换热器的出口温度的**灵敏度系数的绝对值之和乘参数波动区间**。反应换热网络抵抗参数波动的能力。

## 热力学方法转化超结构模型的约束条件



### NSGA-II 算法的改进策略

- 轮盘赌与二元锦标赛结合的选择策略

选择策略合理性优化

- 种群迁移策略
- 去顶灾变策略

针对非凸性，跳出局部最优，保持种群多样性

- 基因库策略

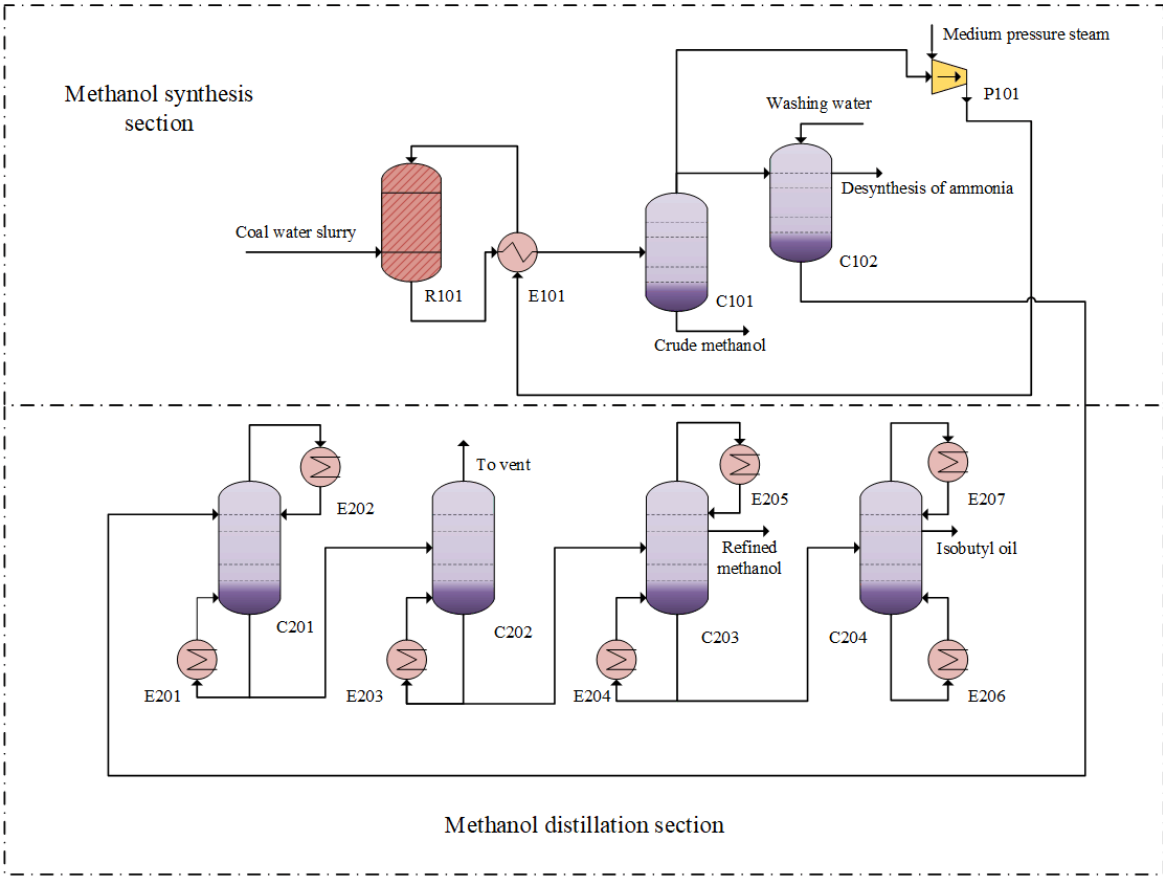
保留种群优势解

- i . 工艺流程介绍
- ii . 求解结果

## 第Ⅲ部分

# 甲醇合成装置节能优化分析

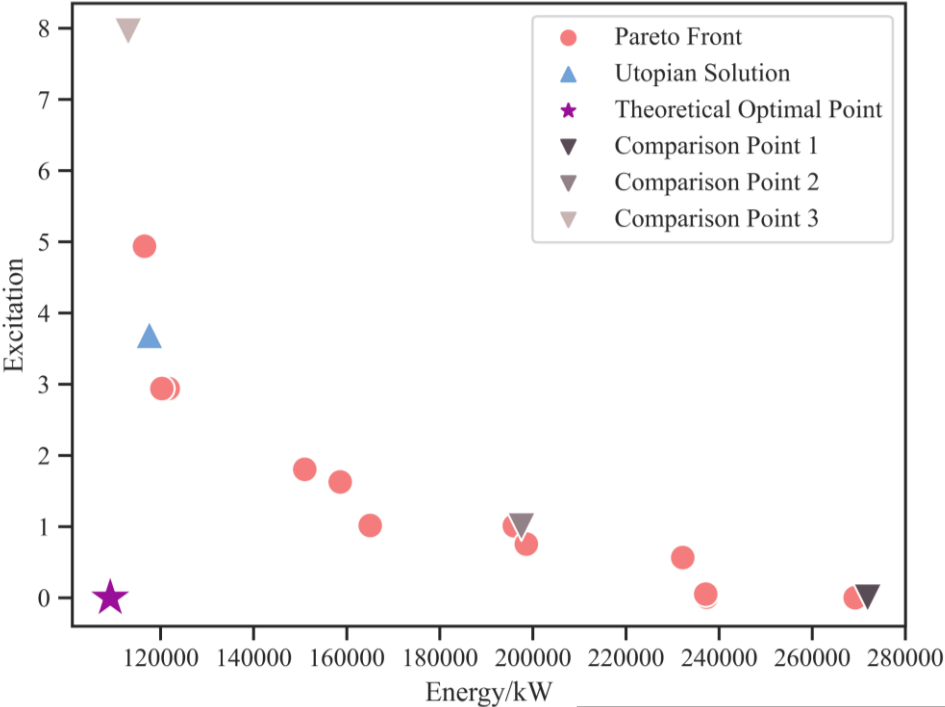
# III. 甲醇合成装置节能优化分析



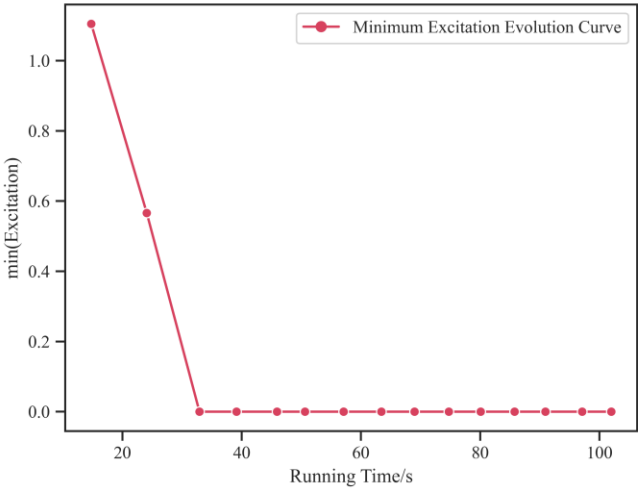
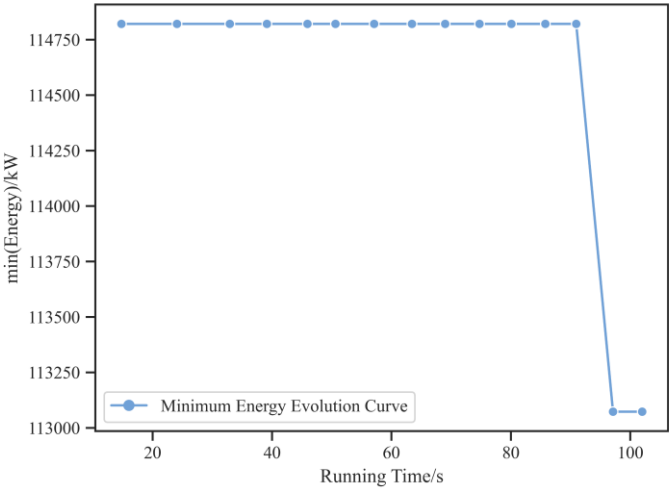
R101 - Coal to methanol reactor  
P101 - Compressor  
C101 - Methanol separator  
C102 - Washing tower  
E101 - Heat exchanger

C201 - Pre tower  
C202 - Pressurized tower  
C203 - Atmospheric tower  
C204 - Recovery tower  
Heat exchanger - E201 E202  
E203 E204 E205 E206 E207

该股编号	该股描述	温度/℃		流量 /kg·h <sup>-1</sup>	平均热容	热负荷/kW
		进口	出口		流率 /kW·℃ <sup>-1</sup>	
H1	反应器 R101 出料	242	30	279623	284.67	39854
H2	预塔 C201 塔顶出料	72	57	47000	983.07	14746
H3	EH2 出料	57	54	2480	28.33	85
H4	加压塔 C202 塔釜出料	125	102	41978	52.35	1204
H5	精甲醇	112.6	44	34800	33.01	2278
H6	加压塔 C202 塔顶出料	117.4	112.6	133000	359810	35981
H7	常压塔 C203 塔顶出料	68	53	119517	2529	37935
H8	塔顶冷凝器出料	51	31	32500	27.65	553
H9	回收塔 C204 塔顶出料	69	49	3502	56.3	1126
H10	常压塔 C203 塔釜出料	109	40	8114	9.75	673
C1	反应器 R101 进料	43	208	279623	241.54	39854
C2	粗甲醇	40	61	70715	63.81	1340
C3	C201 塔釜再沸	73	73.8	127449	20300	16240
C4	加压塔 C202 进料	74.3	89	76778	81.9	1204
C5	加压塔 C202 塔釜再沸	123	126	171184	13090	39270
C6	常压塔 C203 塔釜再沸	109.2	109.3	67191	359810	35981
C7	C204 再沸	105	105.1		10680	1068



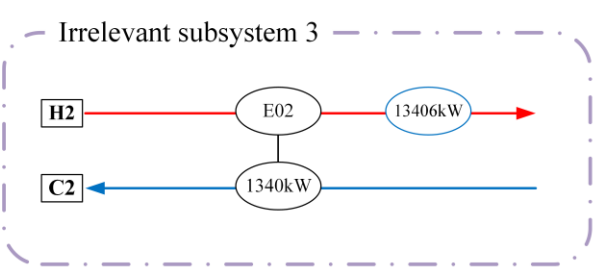
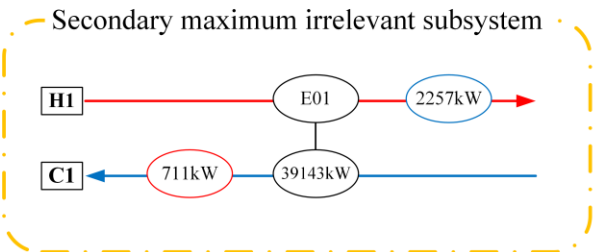
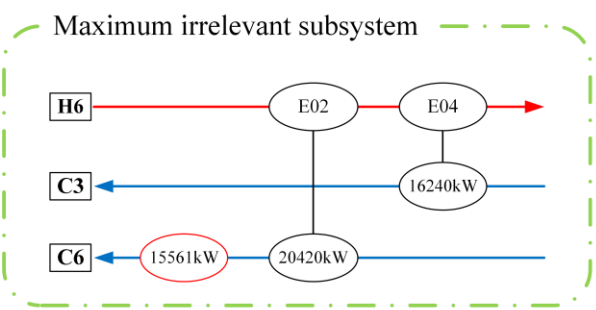
求解结果



- 扰动度↑
- 不相关子系统个数↓
- 冷热流股换热器个数↑
- 系统复杂度↑
- 抵抗波动能力↓

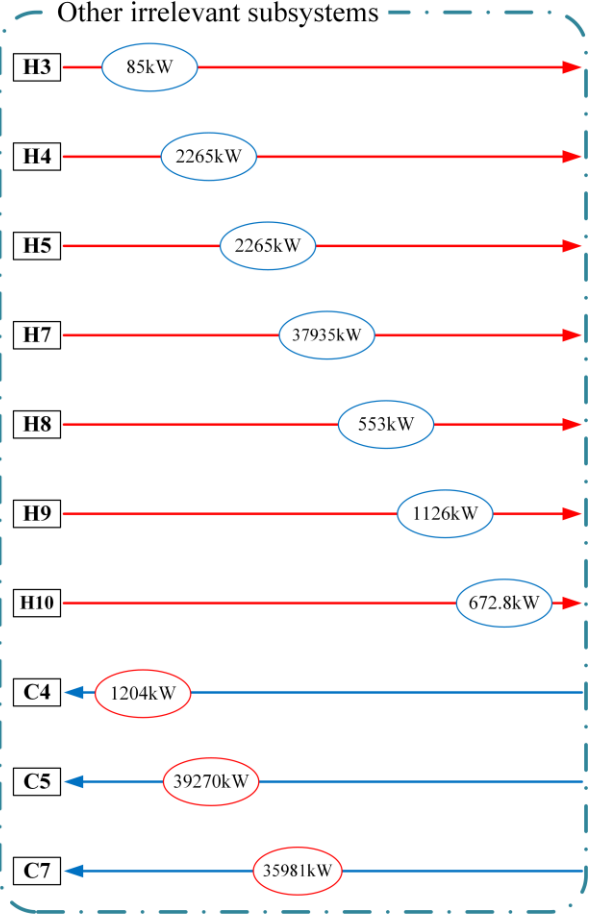
序号	描述	能量/kW	扰动度	不相关子系统个数	冷热流股换热器个数	最大不相关子系统		次大不相关子系统	
						冷热流股数	换热器数	冷热流股数	换热器数
1	乌托邦解	117617	3.69	13	4	3	2	2	1
2	对比点1	271904	0.00	17	0	1	0	1	0
3	对比点2	197534	1.00	15	2	2	1	2	1
4	对比点3	113073	7.95	10	7	3	2	3	2
5	Aspen结果	152490		10	7	8	7	1	0

III. 甲醇合成装置节能优化分析



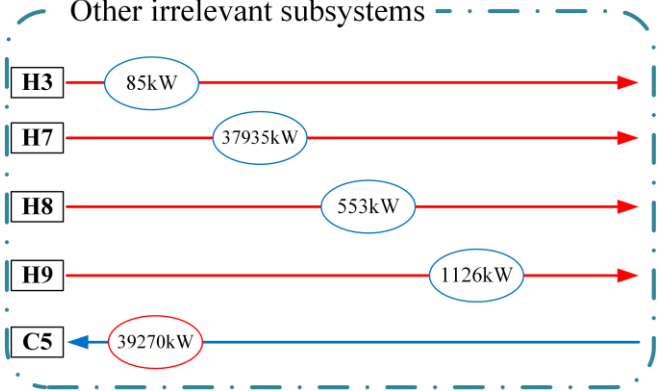
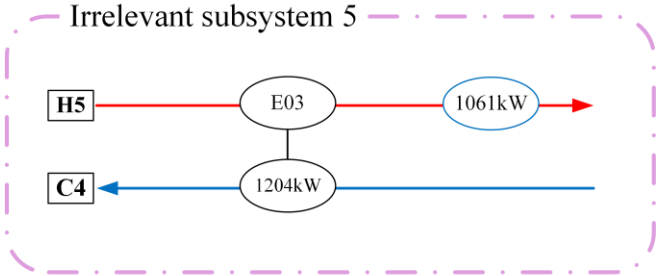
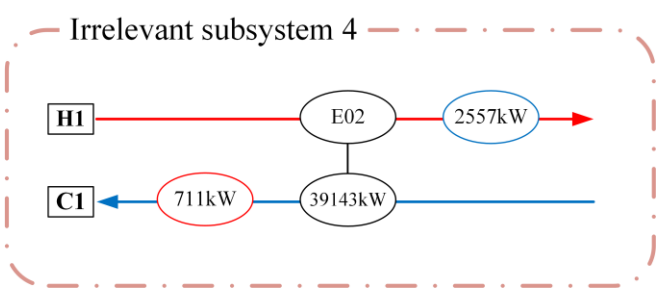
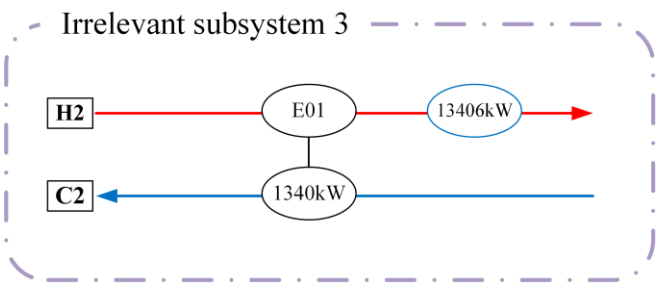
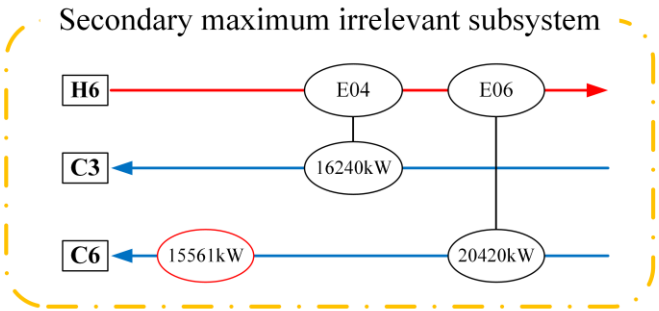
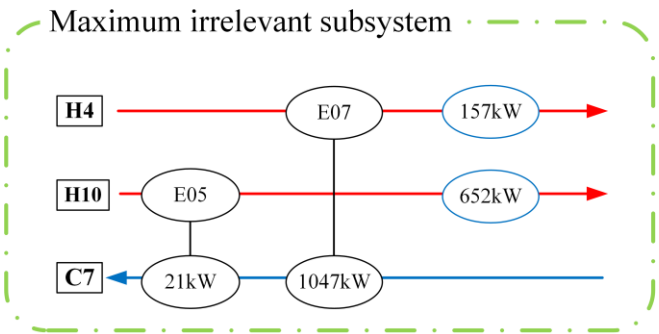
Utilities = 117617kW  
Excitation = 3.69

乌托邦解



换热器编号	热负荷/kW	换热面积/m <sup>2</sup>	换热面积投资费用/万元	公用工程操作费用/万元
E01	39143.30	17408.26	13926.61	
E02	20420.00	6040.89	4832.71	
E03	1340.01	139.72	111.77	
E04	16240.00	806.57	645.25	
EH1	710.80	370.96	296.77	
EH2	1203.93	14.13	11.30	663.94
EH3	39270.00	692.60	554.08	
EH4	15561.00	232.76	186.21	
EH5	1068.00	15.33	12.26	
EC1	2557.10	311.68	249.35	
EC2	13406.04	483.31	386.65	
EC3	84.99	3.91	3.13	
EC4	1204.05	19.08	15.26	
EC5	2264.49	66.83	53.46	5650.38
EC6	37935.00	1496.67	1197.34	
EC7	553.00	49.92	39.93	
EC8	1126.00	46.65	37.32	
EC9	672.75	21.92	17.53	
年化单项合计 /万元·年 <sup>-1</sup>			2257.69	6314.33
年化总合计/ 万元·年 <sup>-1</sup>				8572.02

III. 甲醇合成装置节能优化分析



Utilities = 113073kW  
Excitation = 7.95

对比点3

换热器编号	热负荷/kW	换热面积/m <sup>2</sup>	换热面积投资费用/万元	公用工程操作费用/万元
E01	1340.01	139.72	111.77	
E02	39143.30	17408.26	13926.61	
E03	1203.93	282.33	225.86	
E04	16240.00	756.34	605.08	
E05	21.00	15.60	12.48	
E06	20420.00	8888.08	7110.47	
E07	1047.00	799.27	639.42	
EH1	710.80	370.96	296.77	
EH2	39270.00	692.60	554.08	637.85
EH3	15561.00	232.76	186.21	
EC1	2557.10	311.68	249.35	
EC2	13406.04	483.31	386.65	
EC3	84.99	3.91	3.13	
EC4	157.05	2.80	2.24	
EC5	1060.56	43.79	35.03	5435.73
EC6	37935.00	1496.67	1197.34	
EC7	553.00	49.92	39.93	
EC8	1126.00	46.65	37.32	
EC9	651.75	21.59	17.27	
年化单项合计/万元·年 <sup>-1</sup>			2563.70	6073.58
年化总合计/万元·年 <sup>-1</sup>			8637.28	

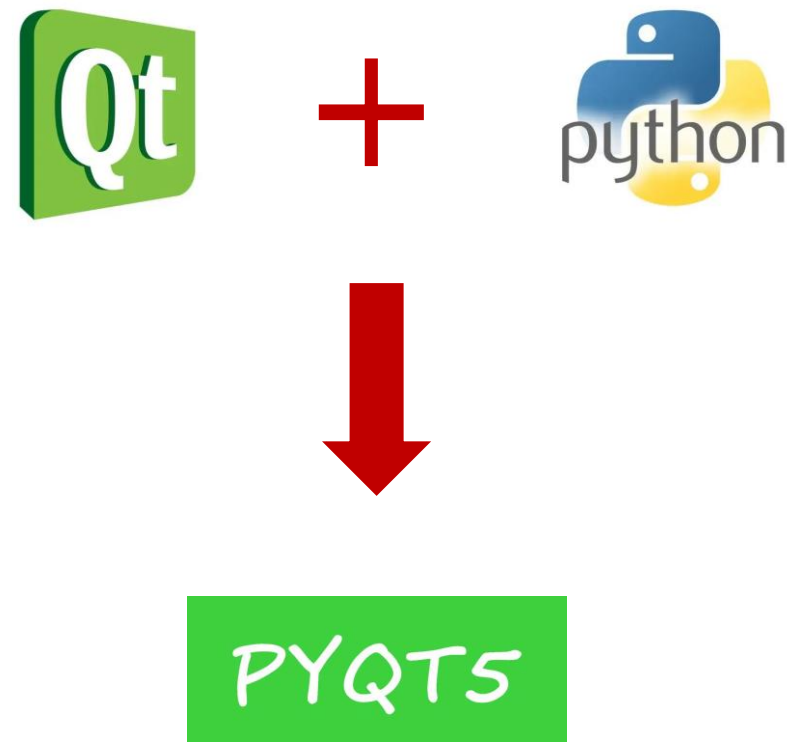
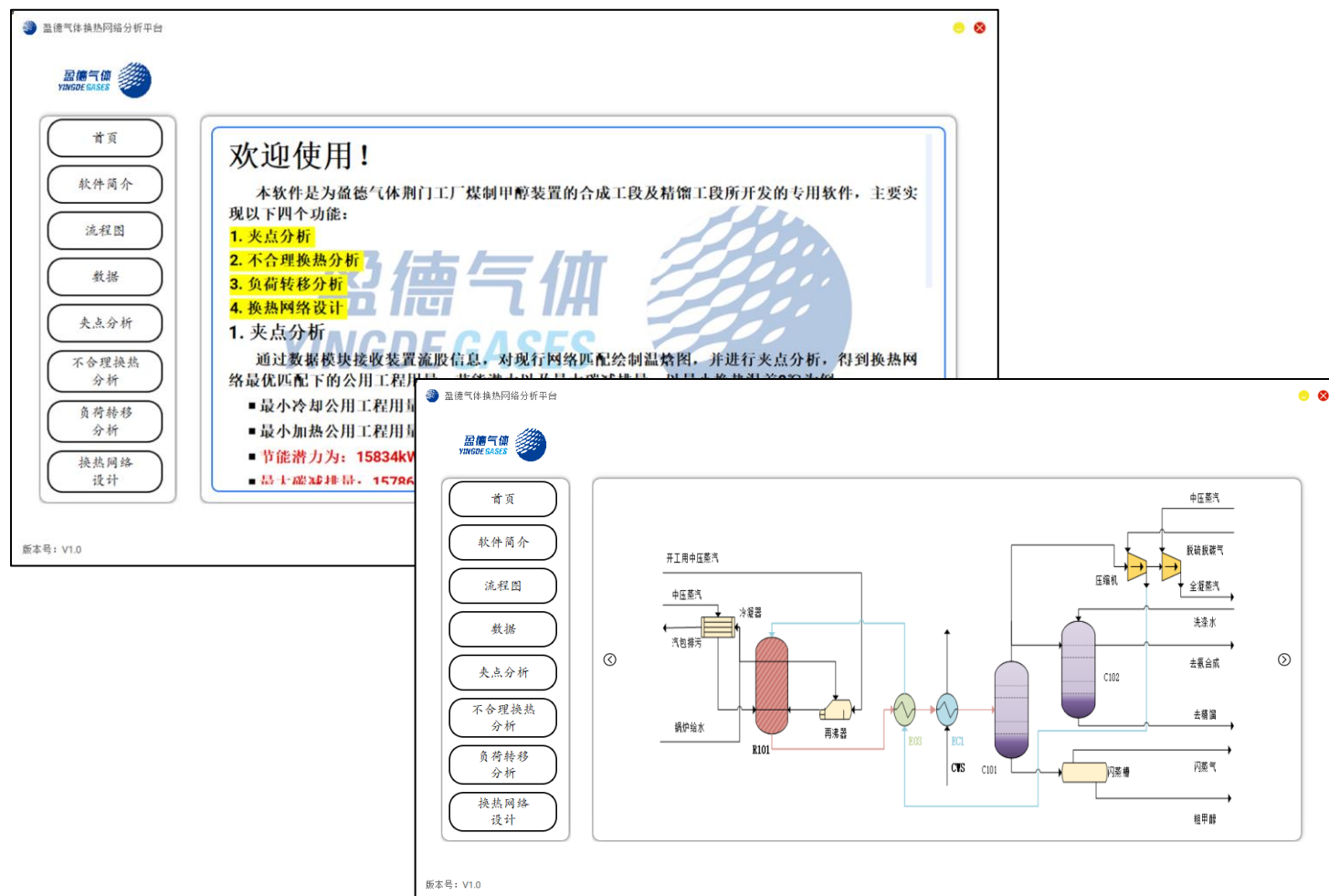


i . 软件开发

第Ⅳ部分

专用优化软件开发

## 软件开发——软件简介



## 软件开发——数据模块

可以上传新数据集  
或保存当前数据集

内置企业数据

修改源数据会  
使背景变红

盈德气体换热网络分析平台

盈德气体  
YINGDE GASES

首页  
软件简介  
流程图  
数据  
夹点分析  
不合理换热分析  
负荷转移分析  
换热网络设计

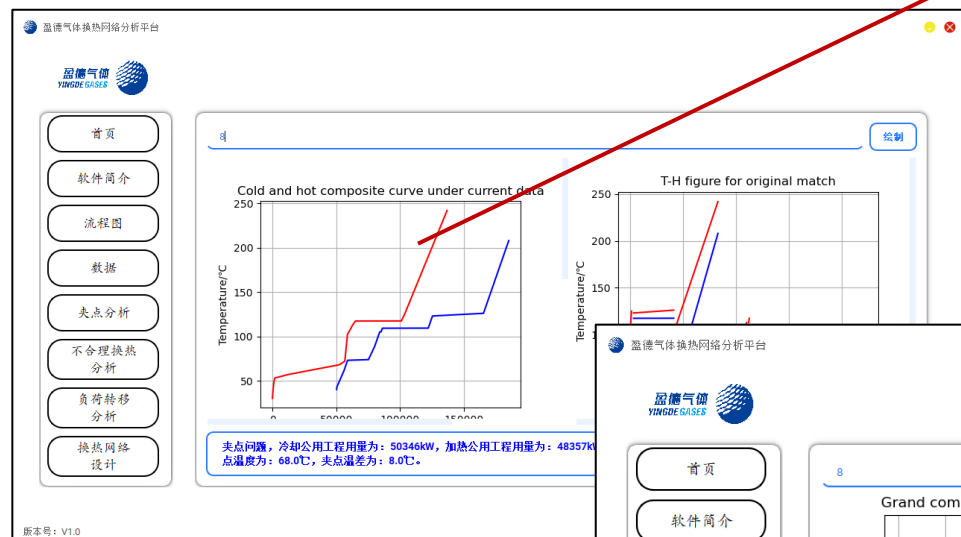
上传文件 保存文件

	流股编号	流股描述	换热器编号	进口温度/℃	出口温度/℃	流量/(KG/H)	平均热容流率
1	H1	反应器R101出料	E03	242	102	279623	284.67
2	H2	换热器E01出料	EC1	102	30	279623	25.64
3	H3	预塔C201塔顶出料	EC2	72	57	47000	983.07
4	H4	EH2出料	EC3	57	54	2480	28.33
5	H5	加压塔C202塔釜出料	E01	125	102	41978	52.35
6	H6	精甲醇	EC4	112.6	44	34800	33.01
7	H7	加压塔C202塔顶出料	E02	117.4	117.3	133000	359810
8	H8	E02出料	EC5	117.3	112.6	133000	144.47
9	H9	常压塔C203塔顶出料	EC6	60	53	119517	2529

清空数据 恢复数据 添加数据

版本号: V1.0

## 软件开发——夹点分析模块



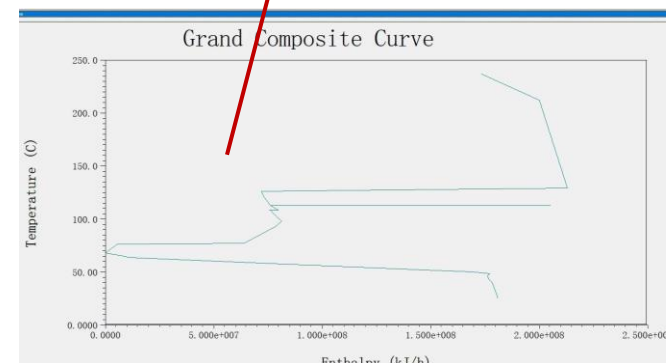
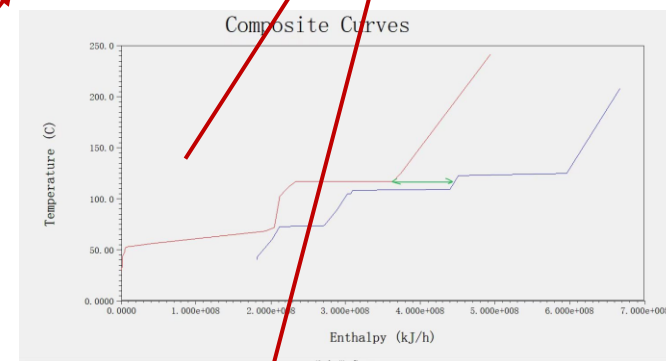
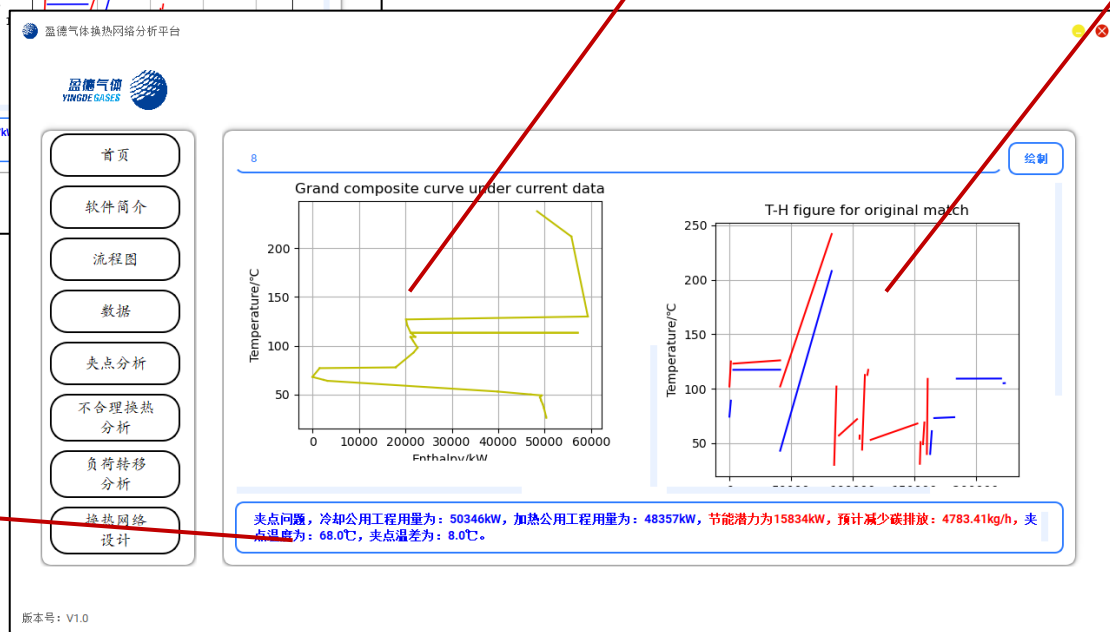
冷热复合曲线

总复合曲线

当前流股匹配

软件模拟结果对比

最小公用工程、最大  
碳减排、夹点温度



## 软件开发——不合理换热分析模块

盈德气体换热网络分析平台

盈德气体  
YINGDE GASES

首页  
软件简介  
流程图  
数据  
夹点分析  
不合理换热分析  
负荷转移分析  
换热网络设计

查找不合理换热器

1. 跨越夹点换热的换热器有:  
E03  
2. 夹点之上的冷却器有:  
EC1 EC4 EC5  
3. 夹点之下的加热器有:  
EH1

冷公用工程换热器	输入新换热器编号	输入左侧换热器编号	输入右侧换热器编号	添加冷公用工程换热器
热公用工程换热器	输入新换热器编号	输入左侧换热器编号	输入右侧换热器编号	添加热公用工程换热器
冷热流股换热器	输入新换热器编号	输入热流股左侧换热器编号	输入热流股右侧换热器编号	添加冷热流股换热器
		输入冷流股左侧换热器编号	输入冷流股右侧换热器编号	

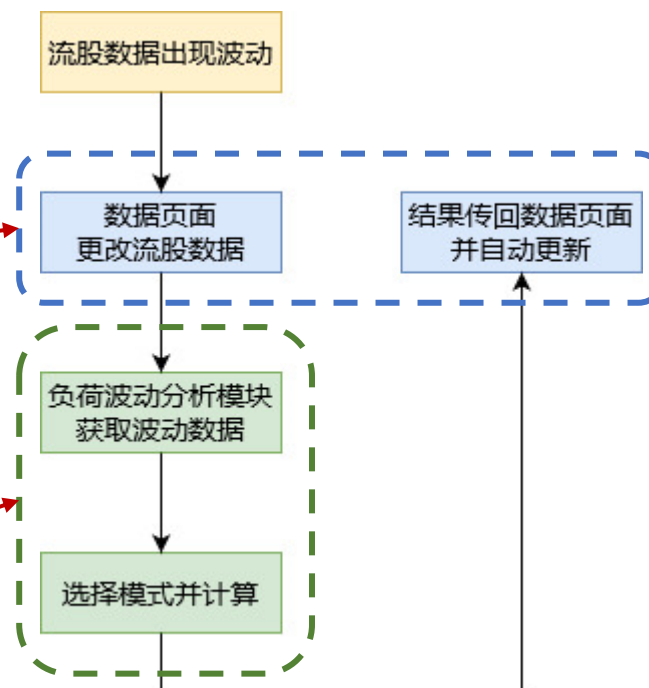
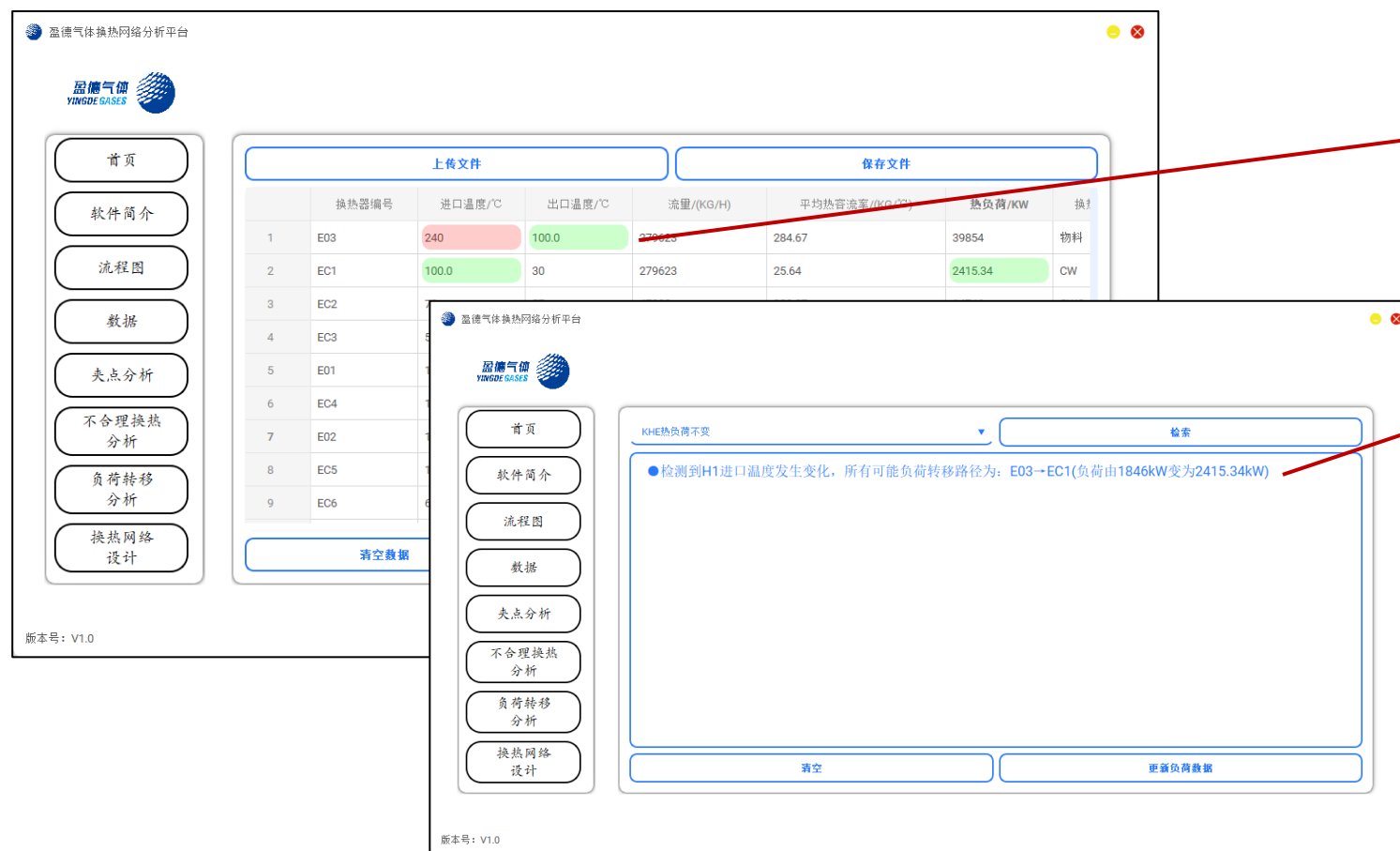
版本号: V1.0

当前流股下的不合理换热:

1. 跨越夹点的换热
2. 夹点之上的冷却公用工程
3. 夹点之下的加热器公用工程

可根据不合理换热分析酌情添加换热器

## 软件开发——负荷转移分析模块



盈德气体换热网络分析平台



- 首页
- 软件简介
- 流程图
- 数据
- 夹点分析
- 不合理换热分析
- 负荷转移分析
- 换热网络设计

版本号：V1.0

### 说明

①最优目标：最小公用工程用量；②预计最大耗时：30s

求解

共生成可行解289个，最小公用工程用量为：111918.00 kW，其中加热公用工程用量为54964.16 kW，冷却公用工程用量为56953.85 kW。共计耗时8.72 s。

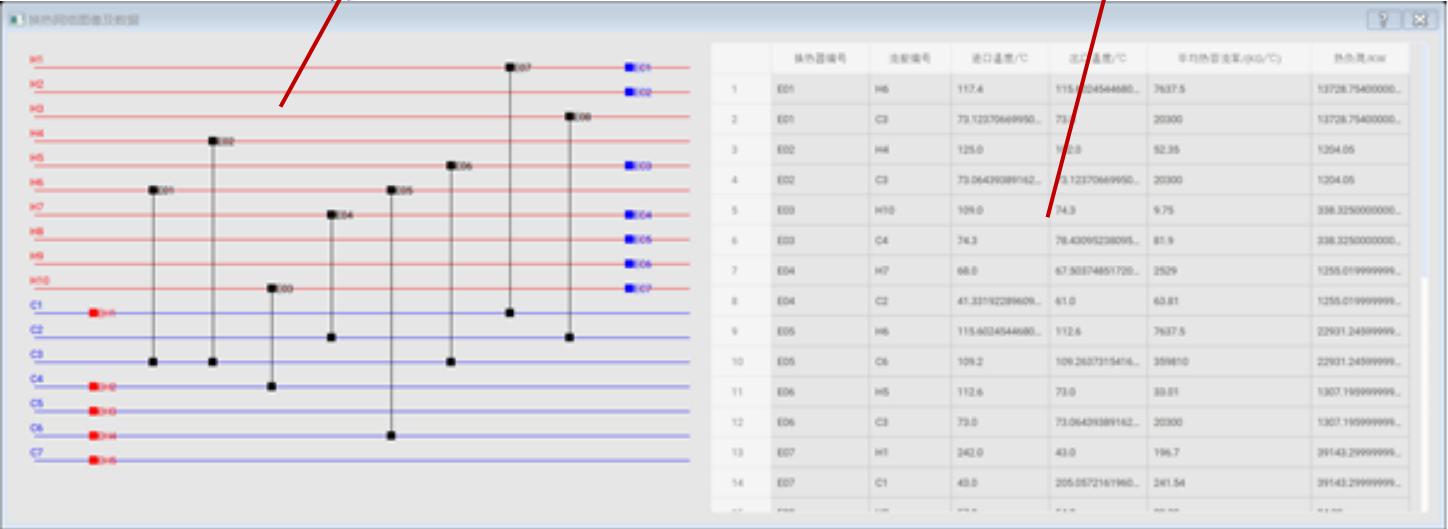
查看换热网络图像及数据

求解情况

## 软件开发——换热网络设计模块

可视化结果

详细流股数据





i . 结论

第 V 部分

结 论



## 结 论

1. 换热网络与图论结合进行换热网络的**有向图转换**、及其其矩阵表达可用于分析参数波动的可达性以及不相关子系统，为后续算法设计及结果分析提供了理论基础。
2. 基于波动传递路径及换热网络全局灵敏度定义的**扰动度模型**可评价换热网络抵抗参数波动能力**强弱**，建立的换热网络多目标优化同步综合数学模型**以扰动度与公用工程用量为目标**对系统进行优化。
3. 利用改进的NSGA-II算法进行甲醇合成装置的换热网络优化，求解时间为101.97s，得到乌托邦解的公用工程用量为117617.15kW，扰动度为3.69，年化费用为8572.02万元·年<sup>-1</sup>。**乌托邦解具有较低的公用工程用量与较强的解耦性，在考虑投资费用的条件下具有经济优势。**
4. 基于以上成果针对企业具体生产过程开发的**专用软件**，可以进行夹点分析、不合理换热分析、负荷迁移分析以及换热网络自动设计功能。

i . 致谢

第VI部分

致 谢

### 致 谢

- 感谢指导教师刘桂莲教授
- 感谢评阅教师闫孝红教授、刘敬军教授
- 感谢答辩组的各位老师
- 感谢所有毕设中提供帮助的老师和同学



西安交通大学  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

谢谢！

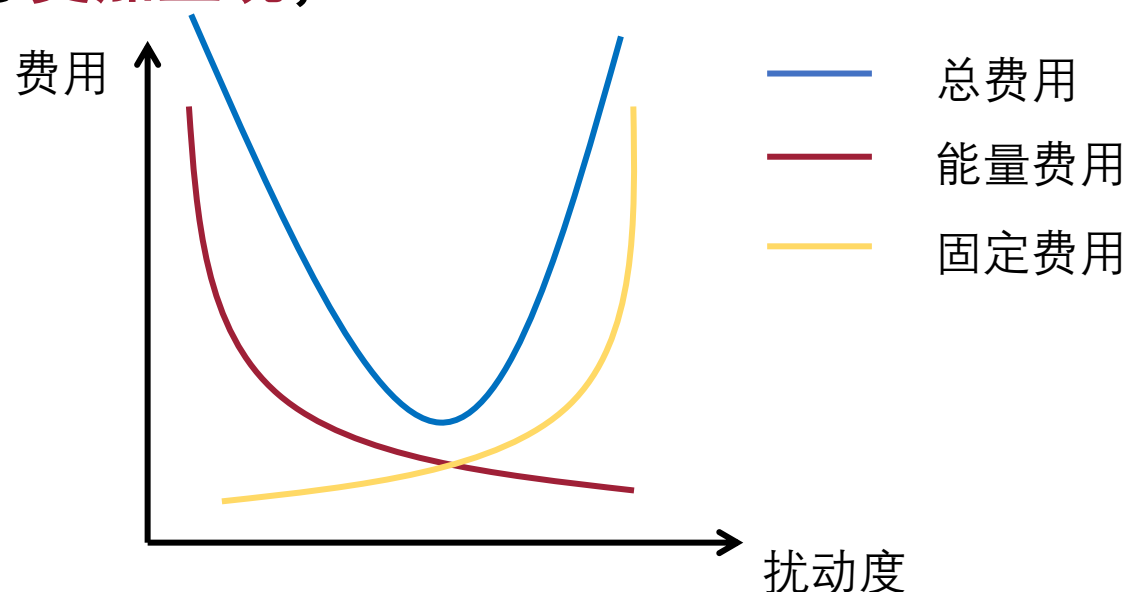
请各位专家老师批评指正！

## i . 评审意见回复

评审意见回复

1. 在构建优化模型时，为了简化模型，仅考虑了公用工程费用，而忽略了固定资产费用，该简化是否影响优化的主要结论？该简化是否对所开发的多目标优化方法可行性构成实质影响？即如果考虑所有费用，优化方法是否仍可行。

- ① 一定程度上影响优化结果：从如果以**总费用作为目标**，由于同一费用下最低点左侧扰动度比右侧高，所以帕累托解集中只能搜索到左侧的点，**不利于种群的多样性**，但是总费用作为目标**更加直观**；
- ② 不会对可行性造成影响；
- ③ 考虑所有费用均可行。



2. 对煤制甲醇工艺进行节能分析时，所开发的优化方法所得结果全面优于Aspen Energy Analyzer，该结果是否合理？试分析其本质原因是什么？所得结果在扰动度及公用工程用量方面均比Aspen Energy Analyzer结果更优，牺牲了什么？

- ① 合理；
- ② Aspen Energy Analyzer只是随机生成几个可行解，没有采用优化算法进行迭代求解，需要根据经验手动优化；
- ③ 牺牲了计算时间，简化了模型的复杂度，采用了改进的优化策略。

## 3. 所开发的多目标优化方法是否具有通用性？

- ① 具有通用性，对于**大型换热网络**优化效果更加明显，但计算时间也会相应增加。

## 4. 在实际工程应用中，除了乌托邦解之外，是否有更好的方法权衡换热网络的扰动度及费用？

- ① **没有绝对最优**，可以根据企业实际需求从**不同角度**权衡。
- ② 通过**总投资费用**权衡。
- ③ 通过计算**全生命周期碳排放**权衡。
- ④ 通过**实际工艺**权衡，如同一工段流通股之间匹配较多的更优。