



中國科學院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics
Chinese Academy of Sciences

Theory basis and schematic design to realize “heat-cold switchable” energy recovery in the cooling water system

Rui Ge, Mei Li

Cryogenic group, Accelerator division

September, 25th, 2023

1 背景概述

2 项目余热回收再利用初步方案 CEPC, JUNO

3 可行性分析和研究计划 实验样机机械设计、流程和测控设计进展

4 总结与展望



01

背景概述

1.1 高能粒子加速器的节能：问题与挑战

- 大型加速器能耗越来越高；
- 亟需找到节约能源的方案；

缺电！世界最大物理实验室将提前关停

上观 2022-11-07 15:49



图1 国内外典型大科学装置的用电功耗

<https://export.shobserver.com/baijiahao/html/547534.html>

- ◆ CERN LHC一年耗电量可达**1300 GWh**，相当于瑞士日内瓦城市的**三分之一**。
- ◆ 随着欧洲能源危机加剧，决定在用电高峰期间，优先关闭部分加速器以降低**25%**的消耗；
- ◆ CERN收到法国电力公司减轻电网负担请求后，决定缩短2023年运行时间将再削减**20%**降低能耗。

1.2 加速器废热主要表现形式：冷却水

- ◆加速器消耗的所有能量（磁铁、电源、低温、高频等）最终都转换成30°C左右的热水余热能量，通过冷却塔直接排放到环境中，造成浪费。
- ◆CERN能源协调员Serge Claudet说：“**离开冷却水回路的热水温度可以达到30°，这在能源回收方面非常有用。**”
- ◆国内外先进实验室正在大力开展余热再利用研究。

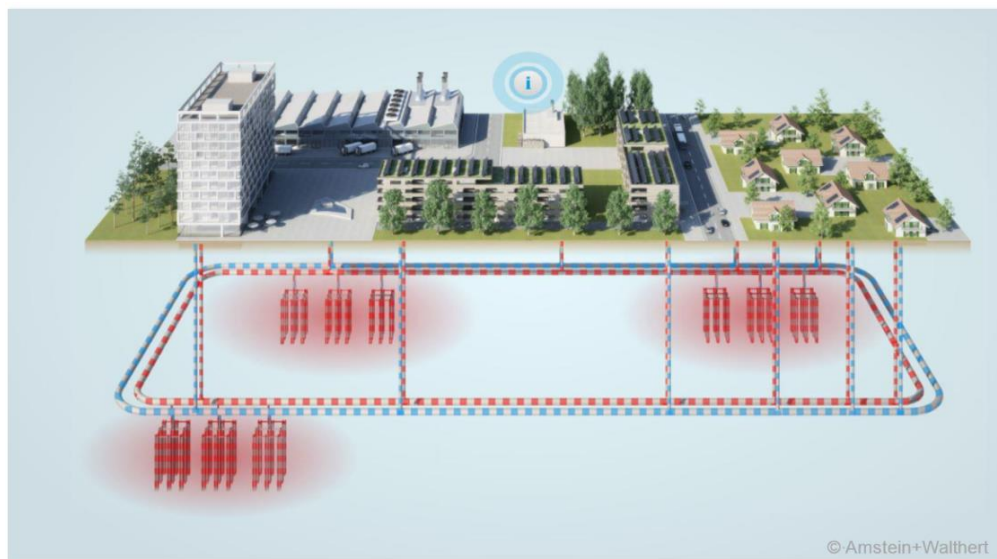


图2 典型冷却水塔

1.2 LHC废热利用

聚焦热能/废能多效利用

- ◆ 2019年7月23日，CERN 与法国地方当局签署协议，对LHC 8号点产生的热能进行回收利用，从2022年起为Ferney-Voltaire镇供暖系统提供热水。
- （引自：*环球网. “兼职”为居民供暖，欧洲大型强子对撞机不再“高冷”，2019-07-25.）
- ◆ 多达8000人的家庭受益，能以更低的成本和更少的二氧化碳排放得到供暖。



Geothermal probes implanted in the ground under the new area (the nine red “bunches” on the image) will store heat, compensating for temperature fluctuations in the network (Image: Territoire d’Innovation)

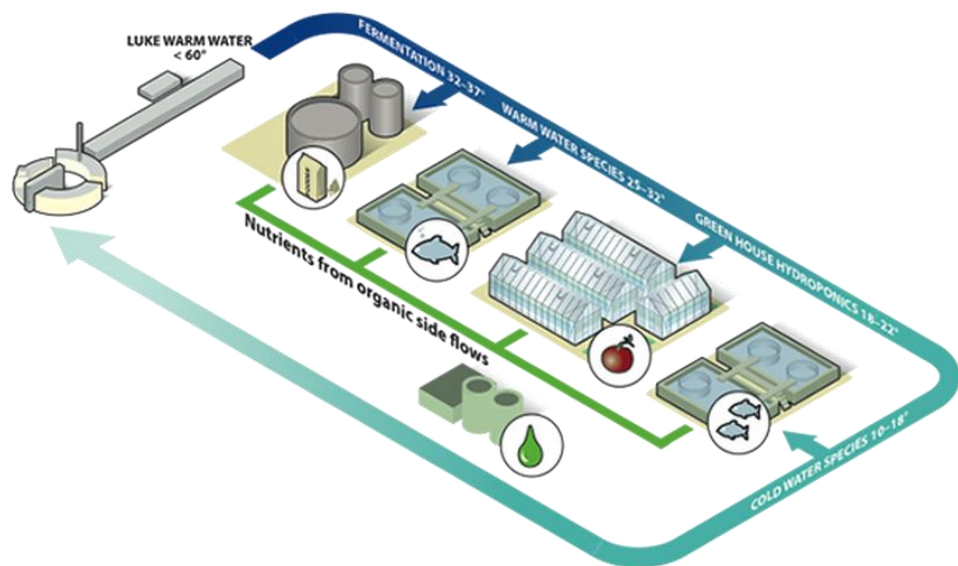
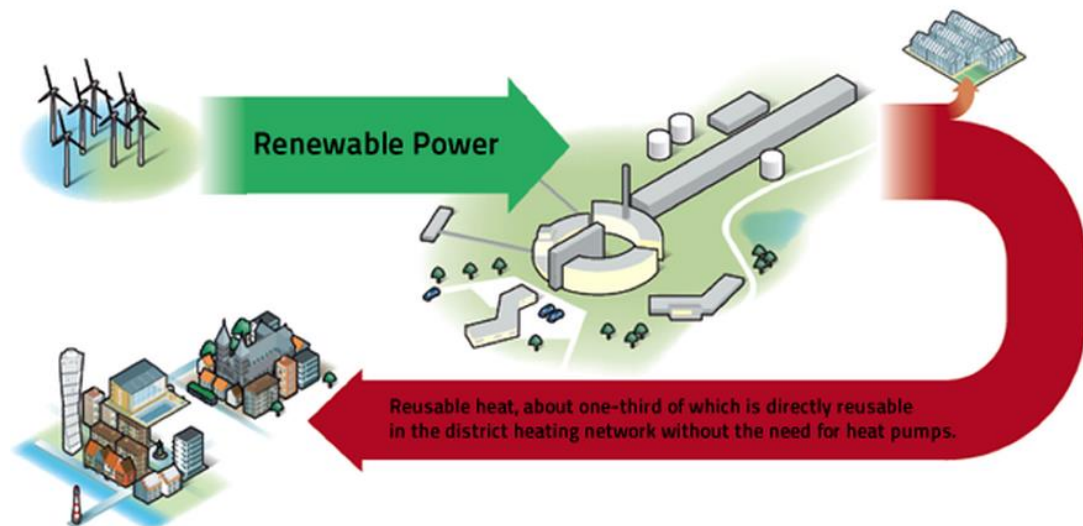


图3 CERN 冷却水余热利用给邻近Ferney-Voltaire镇居民供热水

1.3 ESS废热利用

聚焦能源综合管理

- ❑ 限制年耗电量不超过270GWh，建立详细能量流动档案
- ❑ 最大程度使用可再生能源；
- ❑ 确保装置采用有竞争力的新技术，稳定、可预测



- ❑ 优化能源的可循环利用，将余热分为三个等级
 - 高温余热直接纳入当地的供热系统
 - 低温余热可以供ESS园区的建筑供暖
 - 中温余热为自行车道除冰（北欧的自行车文化，避免因腿部骨折而涌向医院）

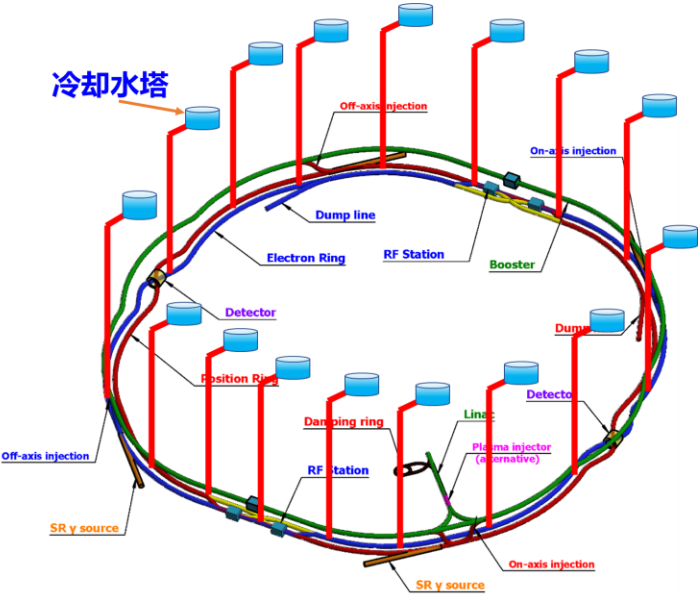
1.3 CEPC余热/废能利用问题与需求

- CEPC Higgs 50MW耗电功率约为340MW，按8000小时运行每年耗电量将高达2720 GWh（约27亿元电费）。
- 约82%的电功耗（282MW）变成低品位的热能（30℃），被冷却水带走排放；
- 通过热泵技术、光-热技术和热储能等手段，将低品位能源转化为高品位能源，增强能量梯级利用。

表2 CEPC循环冷却水需求参数表

	Ring	Booster	Linac	BTL	IR
冷负荷MW	245.814	12.68	18.344	0.856	4.552
冷水量m³/h	7045.40	363.43	525.77	36.80	195.70
冷却水回水温度℃	30	30	30	30	30

From 黄金书



CEPC产热点（热源点）
分散，热源点距离远

冷却水负荷：282MW
供水温度：10℃
回水温度：30℃

图5 CEPC对撞环内冷却水回路的布局

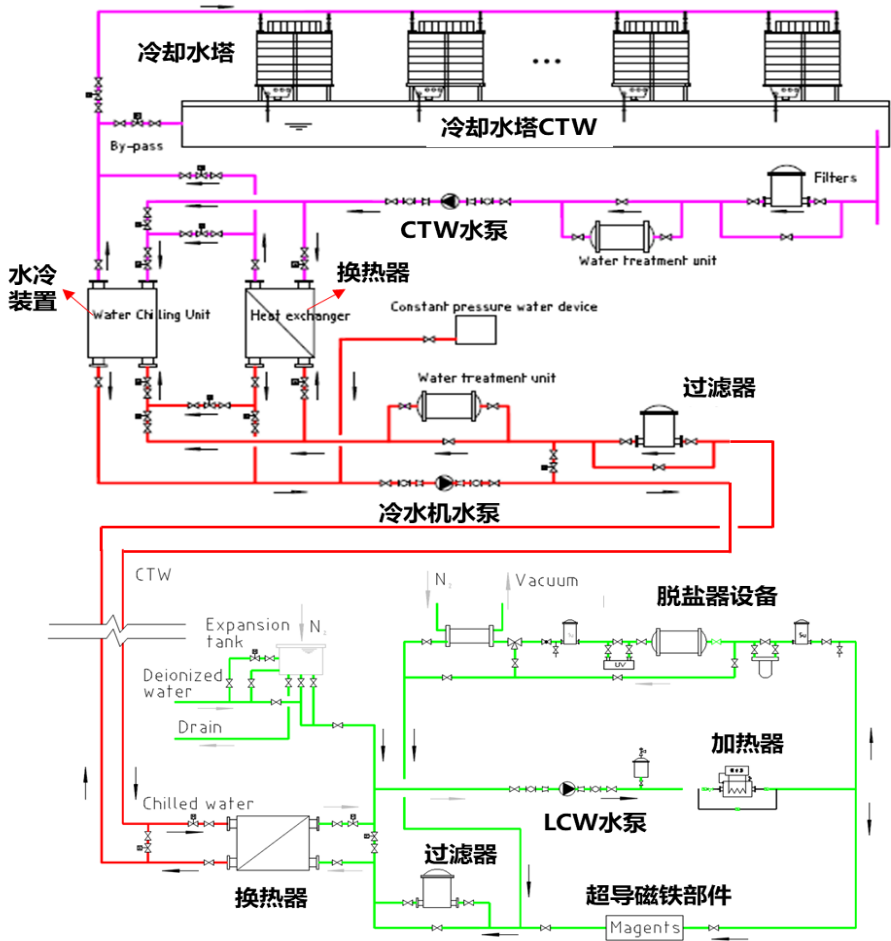


图5 典型的冷却水系统流程图

1.4 吸收式热泵技术背景介绍

- 本项目聚焦**吸收式热泵技术 (AHP)**，提出**吸收式冷热联供系统**创新方案。
- 热泵分类：蒸汽压缩热泵、蒸汽喷射热泵，**吸收式热泵**，电热热泵，化学热泵；
- **吸收式热泵的工作原理**：利用两种沸点不同的物质组成的溶液工质对的气液平衡特性来工作，热能驱动工质循环，以逆循环方式迫使热量从低温物体流向高温物体。

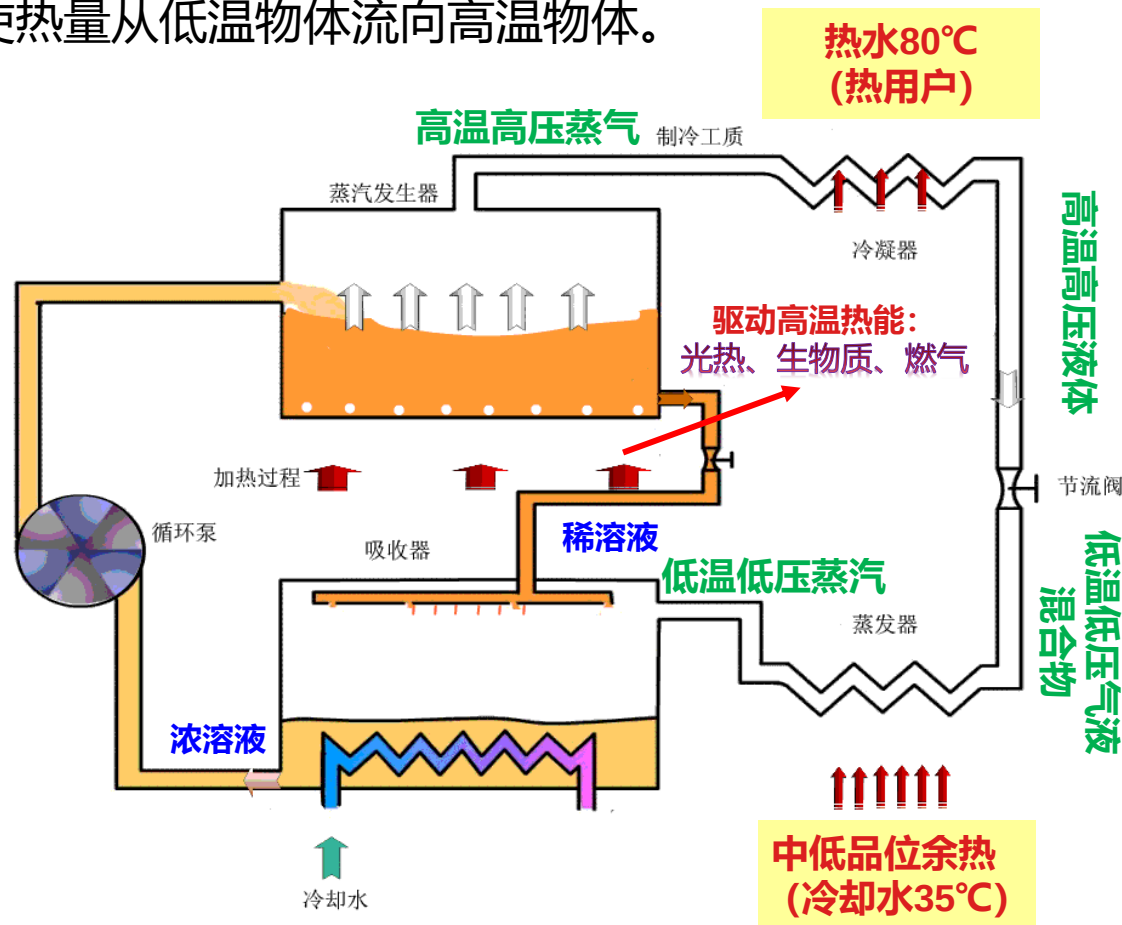
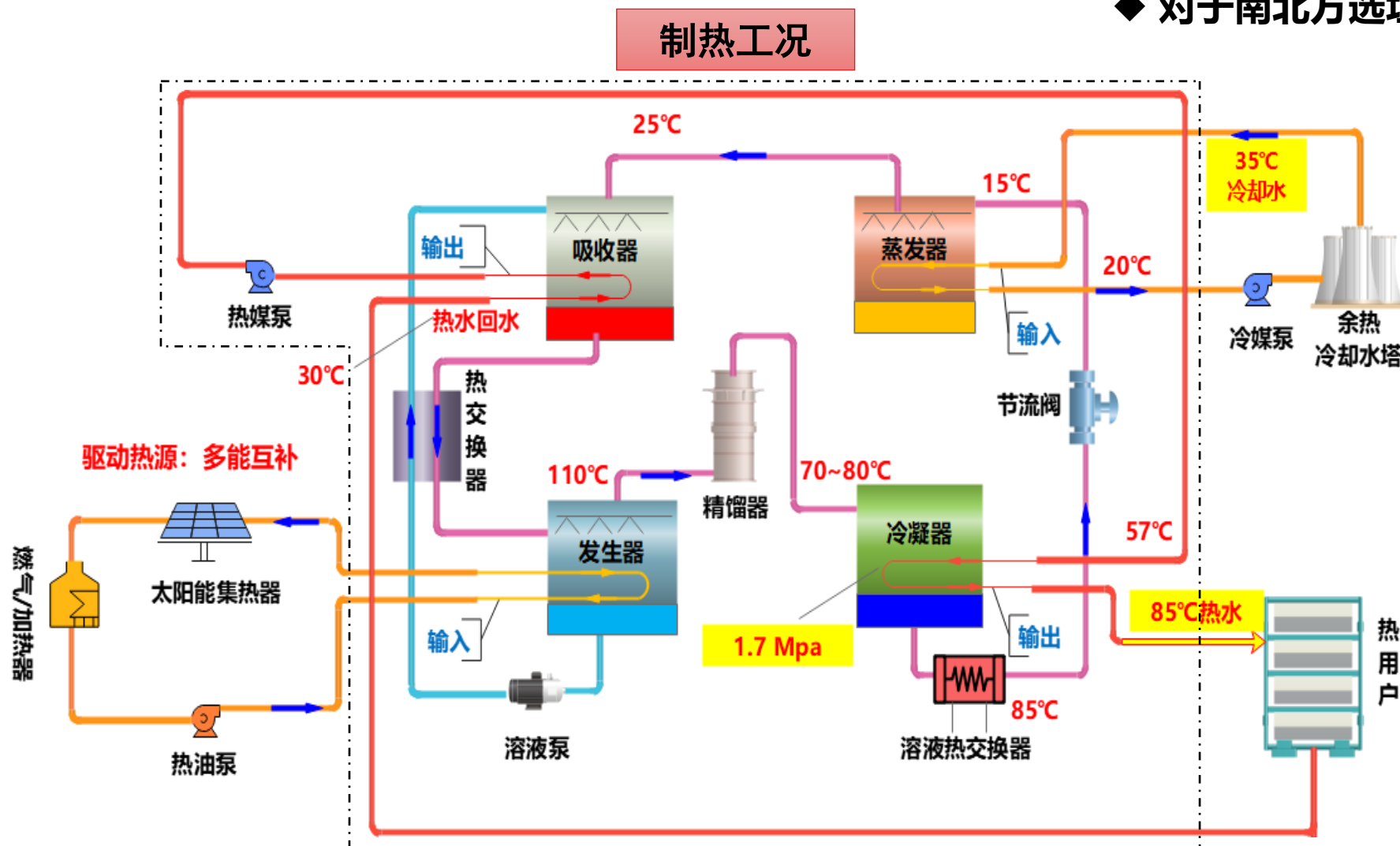


图6 吸收式热泵原理示意动图

1.5 吸收式冷热联供机组独特优点与方案



◆ 对于南北方选址不同，此方案均适用



吸收式冷热联供机组，独特优点：

- 一机两用，可实现冬季制热，夏季制冷；
- 冬季回收余热产生高温热水（80°C），节能减碳；

吸收式冷热联供机组制热工况流程图

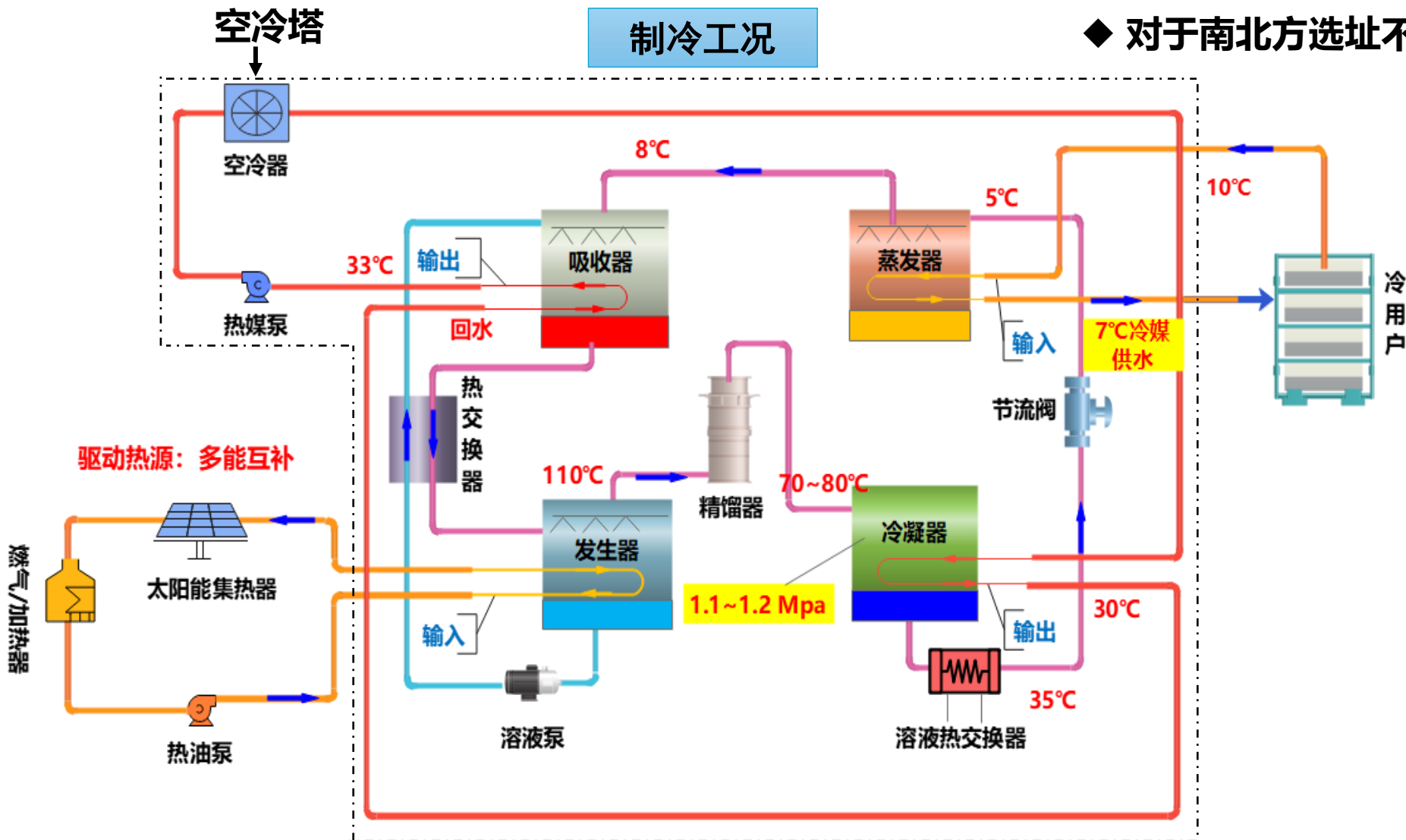
1.6 吸收式冷热联供机组独特优点与方案



空冷塔

制冷工况

◆ 对于南北方选址不同，此方案均适用



吸收式冷热联供机组，独特优点：

- 一机两用，可实现冬季制热，夏季制冷；
- 夏季产生低温冷水（7°C）替代现有的电制冷（吹空调），降低电耗；
- 多能互补（燃气+光热）驱动热源

吸收式冷热联供机组制冷工况流程图



02

项目余热回收再利用初步方案

◎CEPC, JUNO

◎初步方案、经济性分析

2.1 CEPC-经济性分析

◆项目总投资**11.8亿元**；冬季可节约燃气成本**4.4亿元/每年**；夏季除去燃气成本，可节约常规用电制冷费用**1亿元/每年**；静态回收周期**2.2年**。

吸收式系统光热（0.4）+燃气（0.6）

参数	冬季-数值
余热+光热总量	1461.6GWh
总供暖热量	2436GWh
总供暖面积*	1692万平米
减少燃气消耗**	14616万标方
节约燃气成本	4.4亿元

参数	夏季-数值
制冷总量	700GWh
燃气消耗	5250万标方
燃气成本	1亿元
节约电量	250GWh
节约电成本	2亿元
运行成本降低	1亿元

条目	金额（亿元）
核心设备投资（冷热联供机组）	6.8
辅助设备投资（光热集热器等）	2.3
设备安装投资	1.2
管网改造建设	0.7
其他费用	0.8
合计	11.8

供暖工况

冬季燃气价格：3CNY/m³
供热效率：1.5
供暖时数：2880h（4个月）
余热功率：282MW
余热总量：812GWh

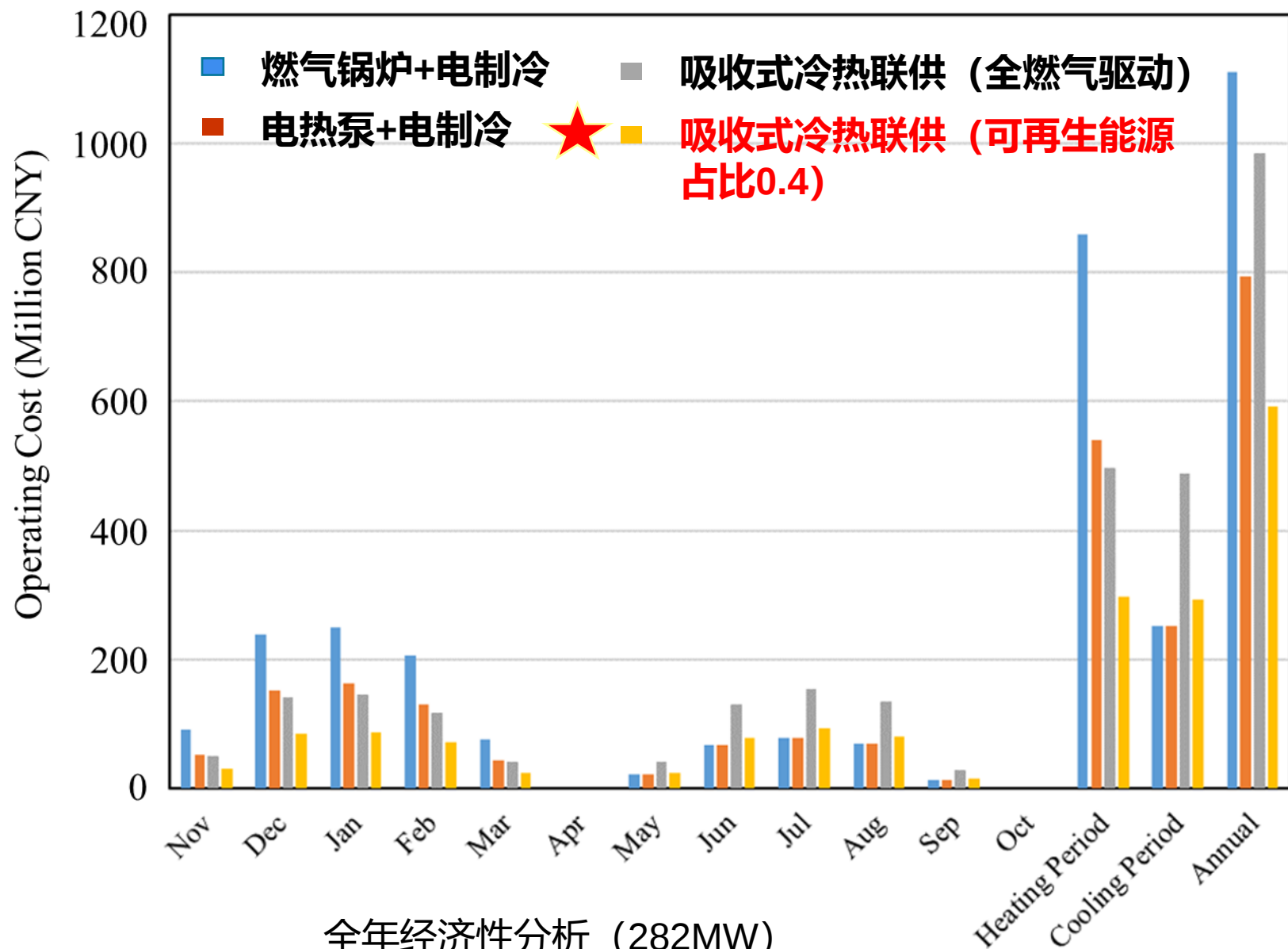
制冷工况

夏季燃气价格：2CNY/m³
制冷效率：0.8
制冷时数：5000h（约7个月）
制冷功率：140MW
制冷总量：700GWh

*单位建筑面积供暖功率：50w/m²

**天然气热值：36000kJ/m³

2.1 全年经济性分析-CEPC



2.2 JUNO-地下渗水现状&渗水利用需求

- ◆ 地下400米渗水温度：池底泵房30.9度，池顶泵房32.6度，支洞泵房31.9度，排水廊道32.6度，池底厅内流水34.3度，大概范围在31-34度；流量为450标方/h。
- ◆ 渗水利用需求: **如何利用地下渗水及其低品位热能，为实验大厅或地下隧道供冷，以及园区住宅楼供暖。**



7.12拍摄

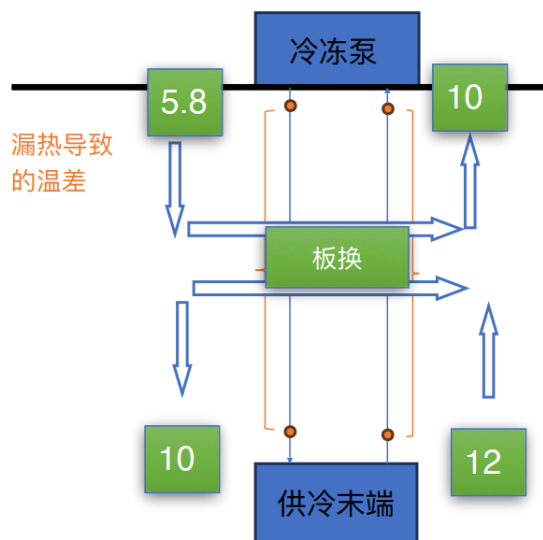


2.2 JUNO-制冷现状



- ◆实验站总制冷需求约为2MW，采用电驱动压缩式制冷，名义耗电功率530kW。
- ◆实验站地表阳光充足，且有天然气供气系统，非常适合太阳能+燃气互补驱动。

条目	费用 (万元/年)
运行费用	280
维护费用	25
配件费用	15
合计	320



地面制冷机房



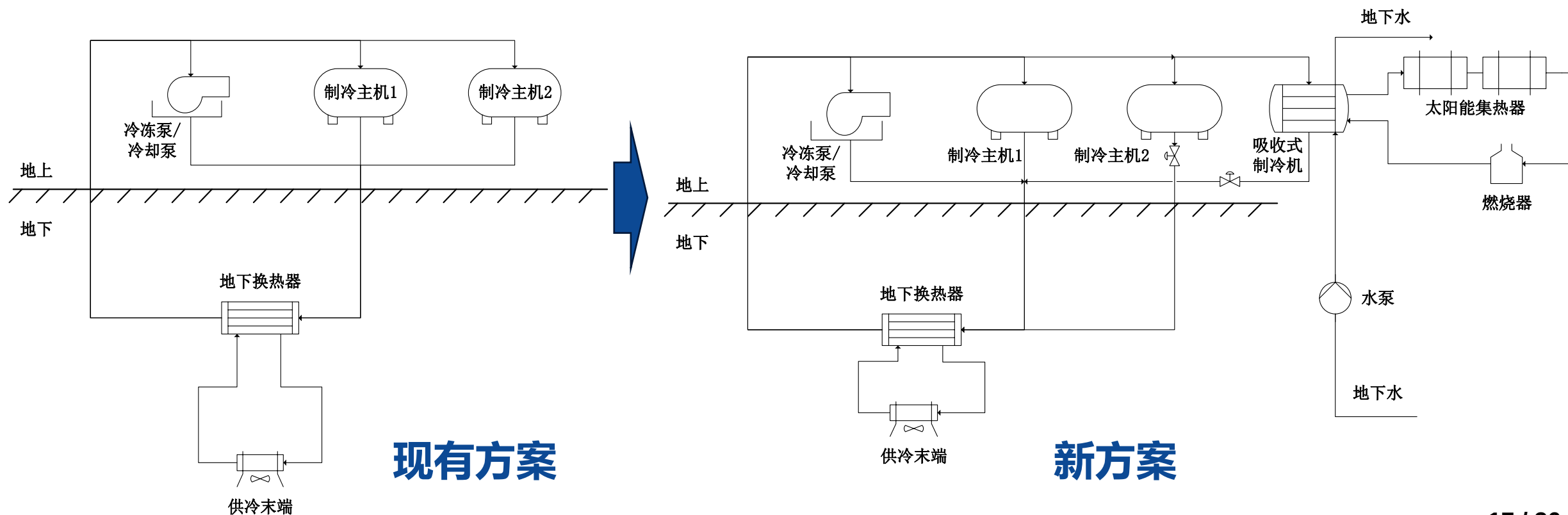
实验站地表情况

目前天然气罐是其他组的设备，能否借用需要协调。

2.2 JUNO-改造方案 (供冷)



- ◆初步方案：太阳能+燃气互补驱动吸收式制冷系统，与电驱动制冷系统互补运行；利用地下渗出的水源，不需要额外的自来水
- ◆改进原则：充分利用现有供冷管路，最大程度降低改造费用
- ◆运行机制：白天阳光充足时段光热:燃气=9:1，晚上利用储能技术或燃气



2.2 JUNO-改造方案（供冷）



● 吸收式制冷机与原制冷系统切换控制

➤ 原有制冷系统供冷

V1、V3打开；V2、V4关闭

➤ 吸收式制冷机供冷切入

太阳能加热温度 $>100^{\circ}\text{C}$ ，吸收式制冷系统正常运行后：

发送给原制冷系统就绪指令，原系统可以停机。

响应后，V2、V4阀门打开。

原系统主机停止运行后，关闭V1、V3阀门。

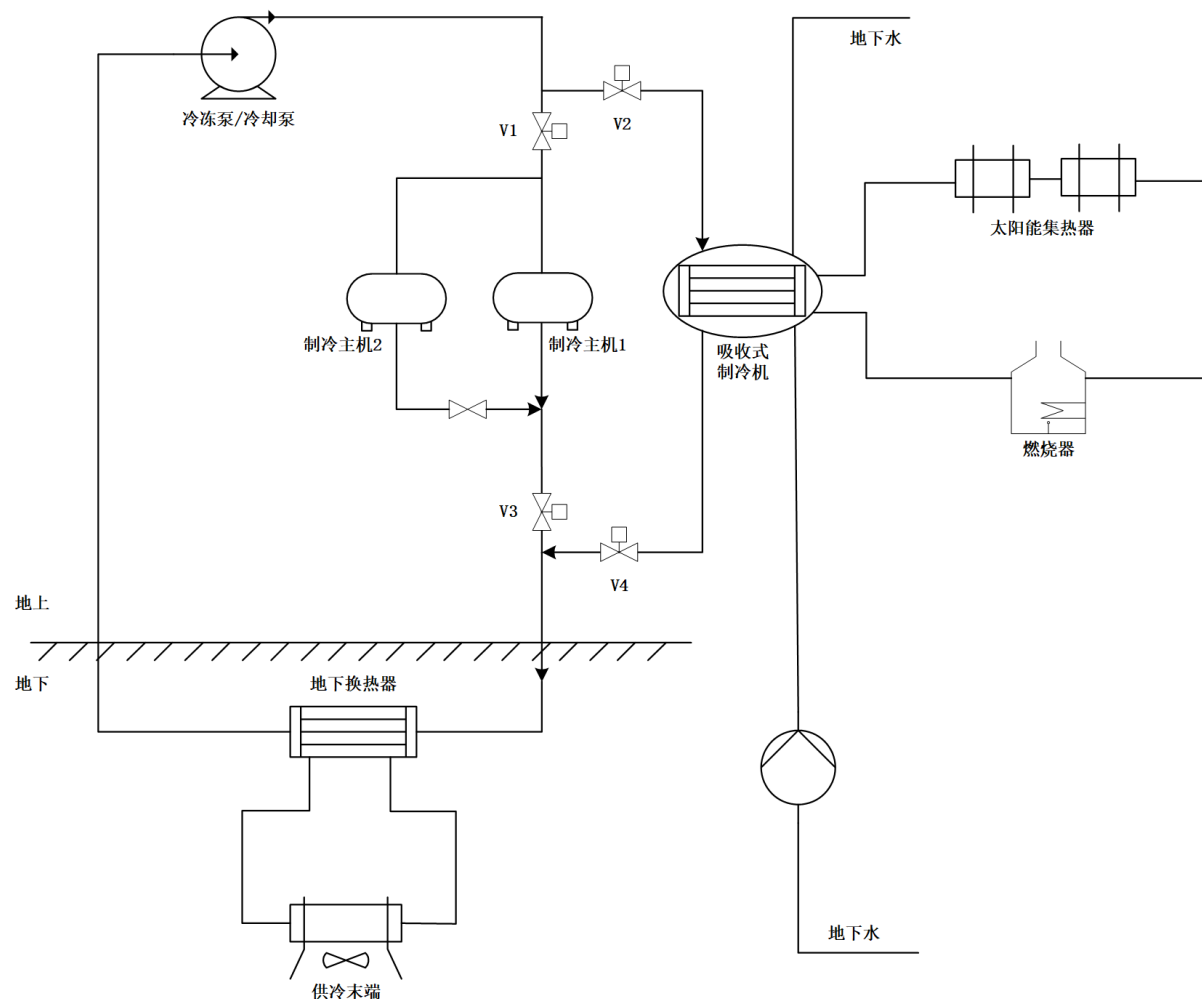
➤ 吸收式制冷机投出

太阳能加热温度 $<80^{\circ}\text{C}$ ，吸收式制冷系统准备关停：

发送关停指令，原系统可开机。

响应后，原系统开机，打开V1、V3阀门。

原系统运行正常后，吸收式制冷系统关机，关闭V2、V4阀门。



2.2 JUNO-经济性分析 (供冷)

◆项目总投资**500万元**；可节约运行成本约**199万元/年**；静态回收周期**2.5年**。

参数	数值
光热+燃气互补制冷功率	2000kW (效率0.8)
全年运行时间	5000小时
制冷总量	10 GWh
运行时段光热/燃气占比	9: 1
运行时段燃气消耗	12.5标方/小时
全年燃气消耗	62500标方
全年燃气费用	15.63万元
全年节约电量	357万kWh
全年电费节省	214.2万元
全年运行费用降低	198.57万元

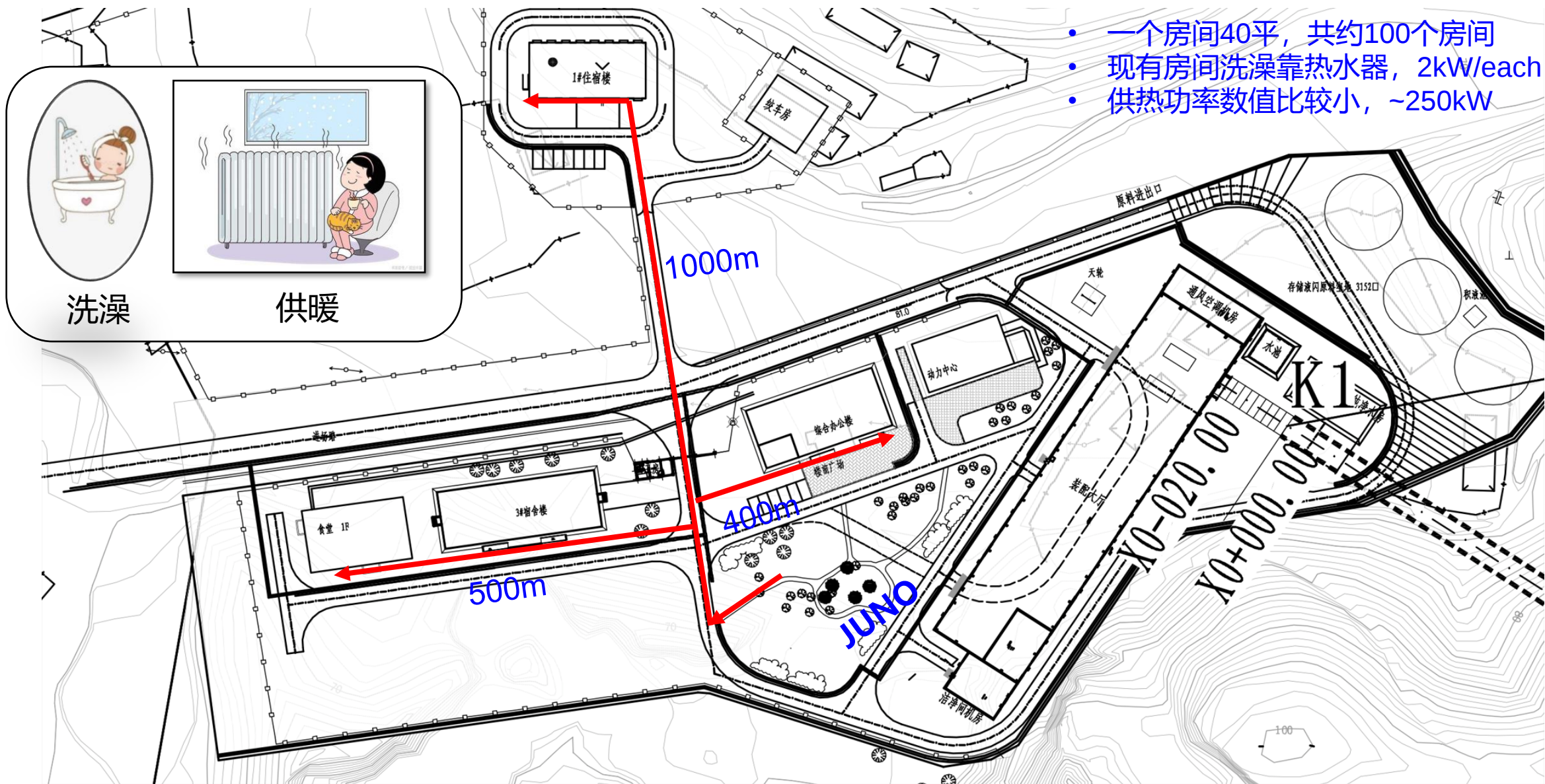
条目	金额 (万元)
核心设备投资 (吸收式制冷机组等)	300
辅助设备投资	40
设备安装投资	20
管网改造建设	100
其他费用	20
合计	500

*电价: 0.6元/kWh

*年均燃气价格: 2.5元/标方

*天然气热值: 36000kJ/m³

2.2 JUNO-位置布局 (V2-供暖+供冷)

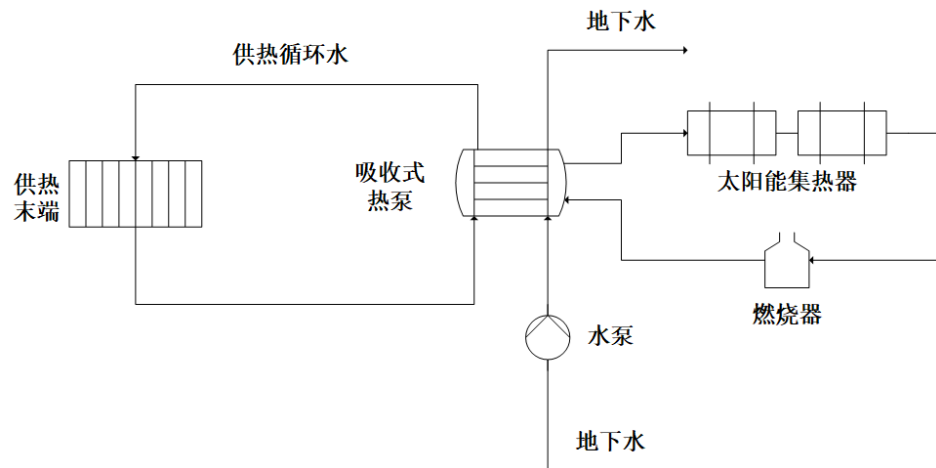


2.2 JUNO-经济性分析 (V2-供暖+供冷)

- ◆ 因为供暖功率跟制冷功率差别较大，建议不耦合在一起；
- ◆ 单独增加一台250kW的多能互补吸收式热泵机组；
- ◆ 多能互补吸收式热泵供暖投资**63万元**；冬季可节约燃气成本**12.9万元/每年**；静态回收周期4.9年。

吸收式系统光热（0.4）+燃气（0.6）

参数	冬季-数值
余热+光热总量	0.43GWh
总供暖热量	0.72GWh
总供暖面积	5000平米
减少燃气消耗	4.3万标方
节约燃气成本	12.9万元



条目	金额 (万元)
核心设备投资 (机组)	30
辅助设备投资 (光热集热器等)	10
设备安装投资	8
技术本身管网改造	10
其他费用	5
合计	63

供暖工况

冬季燃气价格：3CNY/m³

供热效率：1.5

供暖时数：2880h（4个月）

供暖功率：250kW

*单位建筑面积供暖功率：50w/m²

*天然气热值：36000kJ/m³

*热力管网建设费用：200~500元/米
(新管网铺设费用不包含)

2.3 汇总

项目	需求	方案	投资	收益		静态回收周期 (投资/每年收益)
CEPC	余热功率：282MW 制冷功率：140MW	太阳能+燃气互补驱动吸收式冷热联供机组（耦合）	11.8亿元	冬季节约燃气成本	4.4亿元/年	2.2年
				夏季节约常规用电制冷费用	1亿元/年	
JUNO	制冷功率：2MW	太阳能+燃气互补驱动吸收式制冷系统；与电驱动制冷系统互补运行	500万元	供冷节约运行成本	199万元/年	2.5 年
	供暖需求：0.25MW	太阳能+燃气互补驱动吸收式热泵机组	63万元	冬季节约供暖燃气成本	12.9万元/年	4.9 年

- ◆ 中大型加速器（规模越大），吸收式冷热联供机组经济效益越为凸显；
- ◆ 供热/供冷功率量级差别不大时候，用耦合式吸收式冷热联供机组，经济性更好；否则建议单独配置



03

可行性分析和研究计划

◎实验样机机械设计、流程和测控设计进展

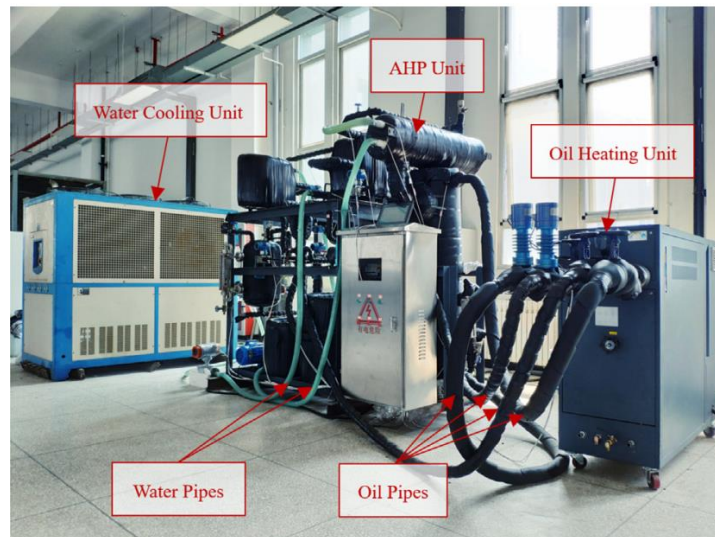
3.1 可行性分析—已具备实验条件



中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics
Chinese Academy of Sciences



先进光源研发与测试平台 (PAPS)



实验测试平台



高能光源 (HEPS)



流动传热传质实验台

3.2 技术路线



基于吸收式冷热联供系统对CEPC中低品位热能回收再利用关键技术研究

科学问题一：如何优化配置余热利用方式；如何建立系统余热回收仿真模拟

科学问题二：吸收式冷热联供系统热力循环机理和性能的定量揭示

科学问题三：先进的控制策略

研究内容1：系统级余热回收建模与计算方法研究

研究内容2：多能互补吸收式冷热联供热力循环设计和研制

研究内容3：模型失配以及热源扰动等不确定性因素过程先进控制策略研究

具体内涵 研究目标

各部件余热能量分析	定量获得关键节点参数
余热利用设备优化配置	获得最优配置余热利用方案
余热回收流程模拟和计算优化	开发建立余热回收模拟软件

具体内涵 研究目标

分析原理和性能参数	定量获得性能参数如能效比
建模和设计优化	获得合理结构提高性能
研制高效机组	具有良好的性能和稳定性

具体内涵 研究目标

建立动态数学模型	建立动态数学模型
优化控制算法	获得适合的控制策略
系统优化设计	提高效率、稳定性和安全性

研究内容4：大型超导加速器余热利用验证试验

具体内涵

研究目标

基准工况验证测试

变工况测试

模拟变温或热负荷波动失配

多维度

多层次

实现对加速器冷热管理的优化和控制

- 创新一、建立一套具有自主知识产权的加速器系统级余热回收利用仿真建模软件；
- 创新二、阐明冷热管理能量转换机制，构建热力循环模型，定量获得性能参数；
- 创新三、开展热流耦合输运机制及其强化技术研究；发展先进控制策略

研究目标：聚焦余热管理机制及热力循环性能优化等前沿问题，突破技术瓶颈，实现能源梯级利用，助力加速器“绿色”节能转型

◆ 吸收式冷热联供系统对CEPC中低品位热能回收再利用关键技术研究，整体遵循“建模与计算分析→设计与优化→控制策略设计→实验验证”层层递进的技术路线，该路线逻辑性与操作性强，是可行的。

3.3 实验验证系统—机械设计

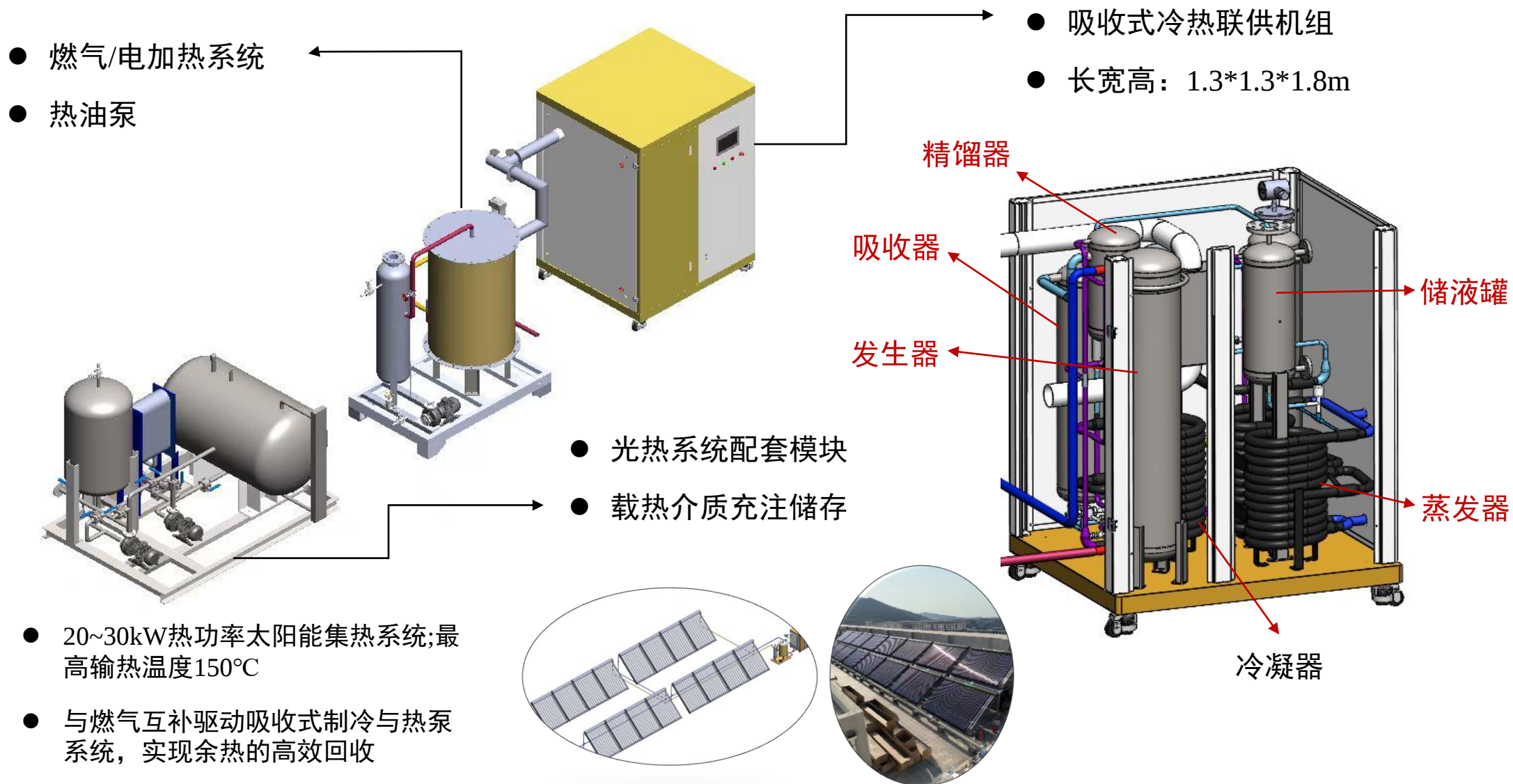
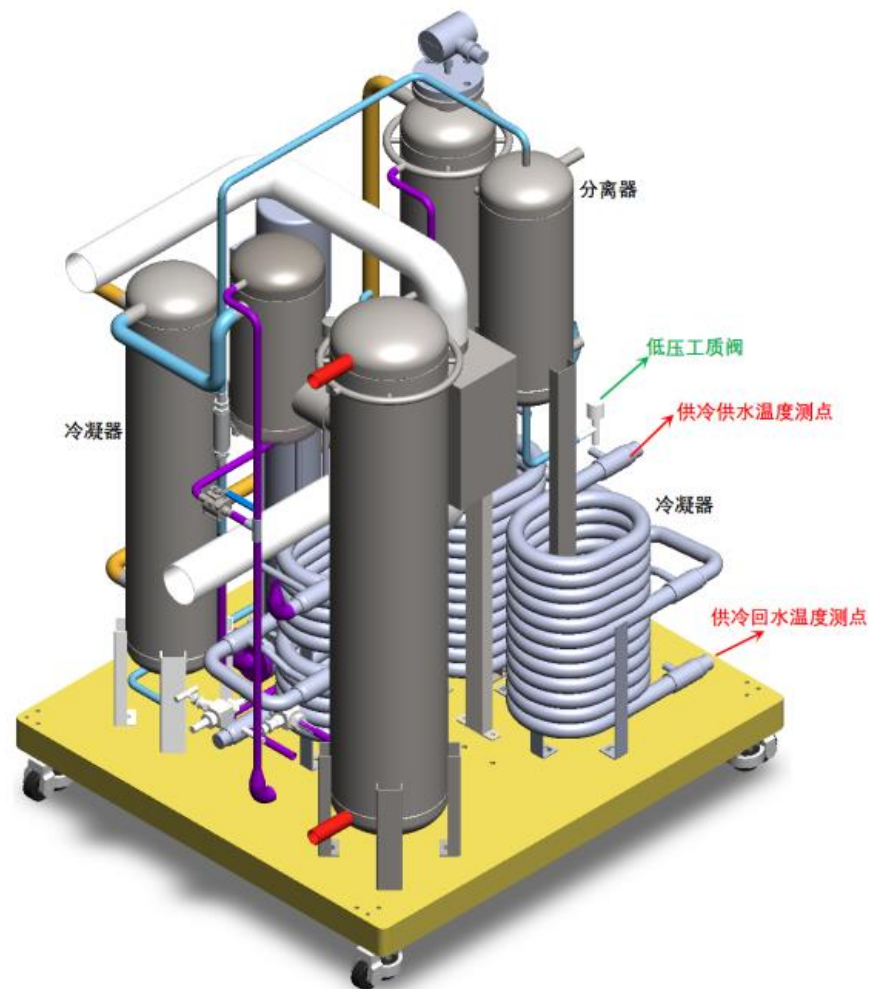
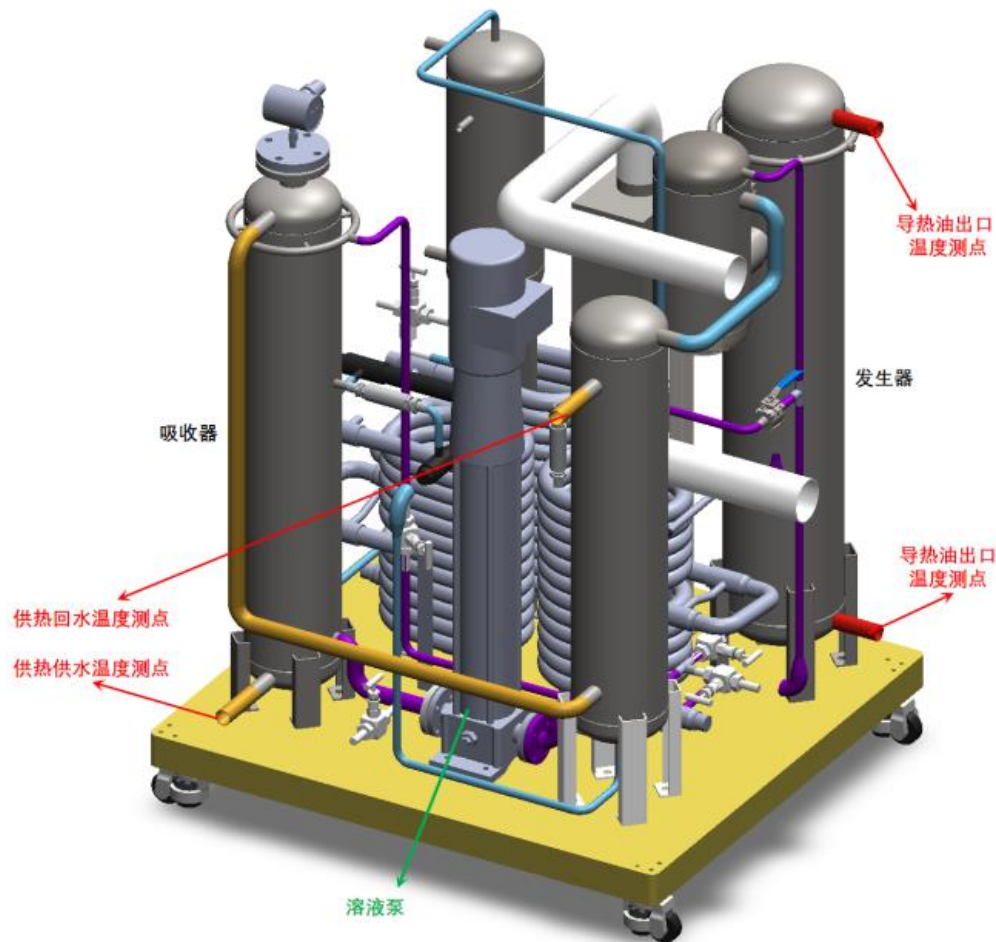


图8 吸收式冷热联供实验验证系统30kW样机—三维布局图

3.3 实验验证系统—机械设计

● 主机系统组成

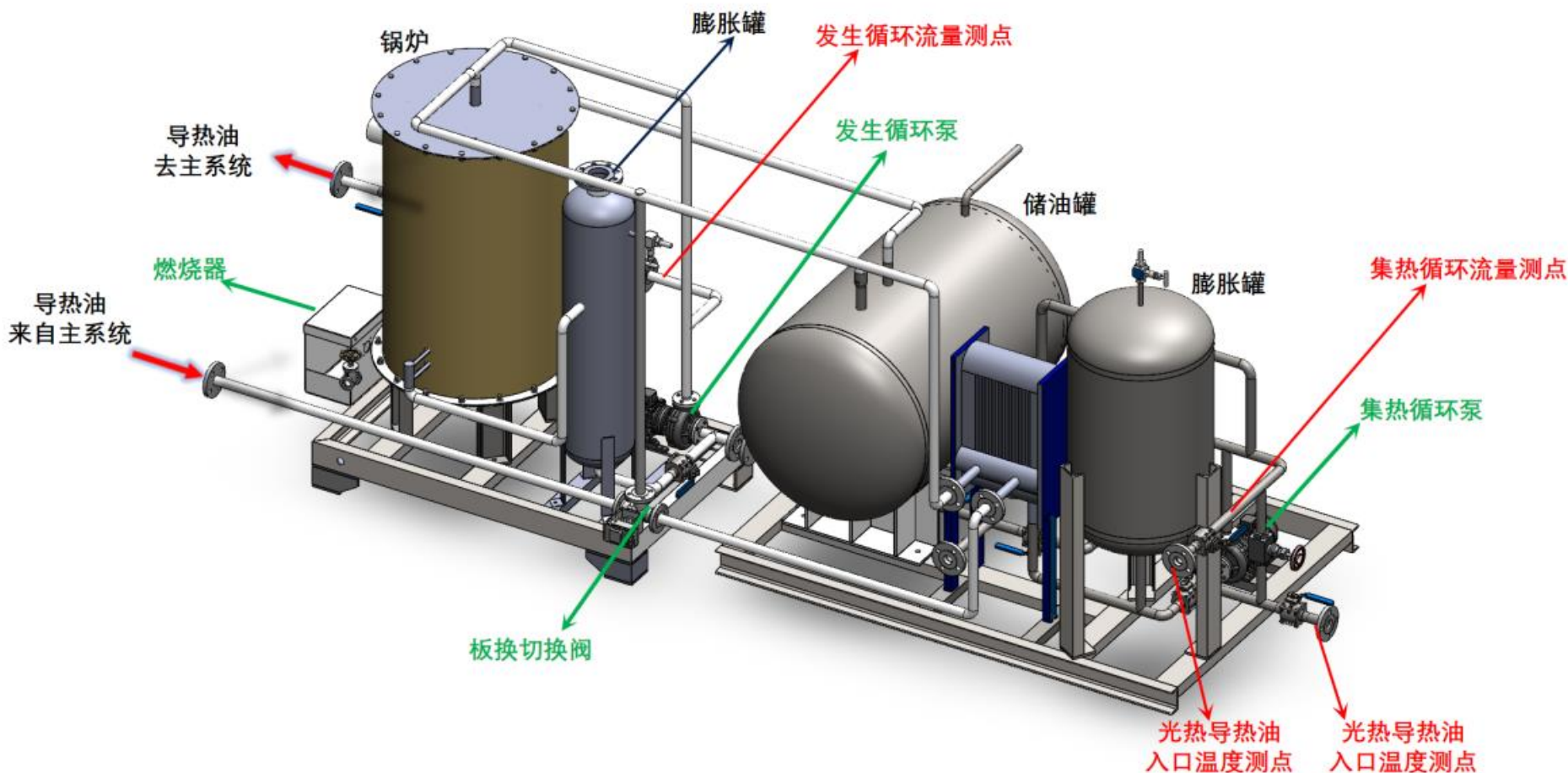
- ✓ 发生器
- ✓ 冷凝器
- ✓ 吸收器
- ✓ 分离器
- ✓ 溶液泵
- ✓ 阀门组件



3.3 实验验证系统—机械设计

● 导热油锅炉系统

- ✓ 燃气锅炉
- ✓ 燃烧器
- ✓ 导热油泵
- ✓ 储油罐
- ✓ 膨胀罐
- ✓ 板式换热器
- ✓ 阀门组件

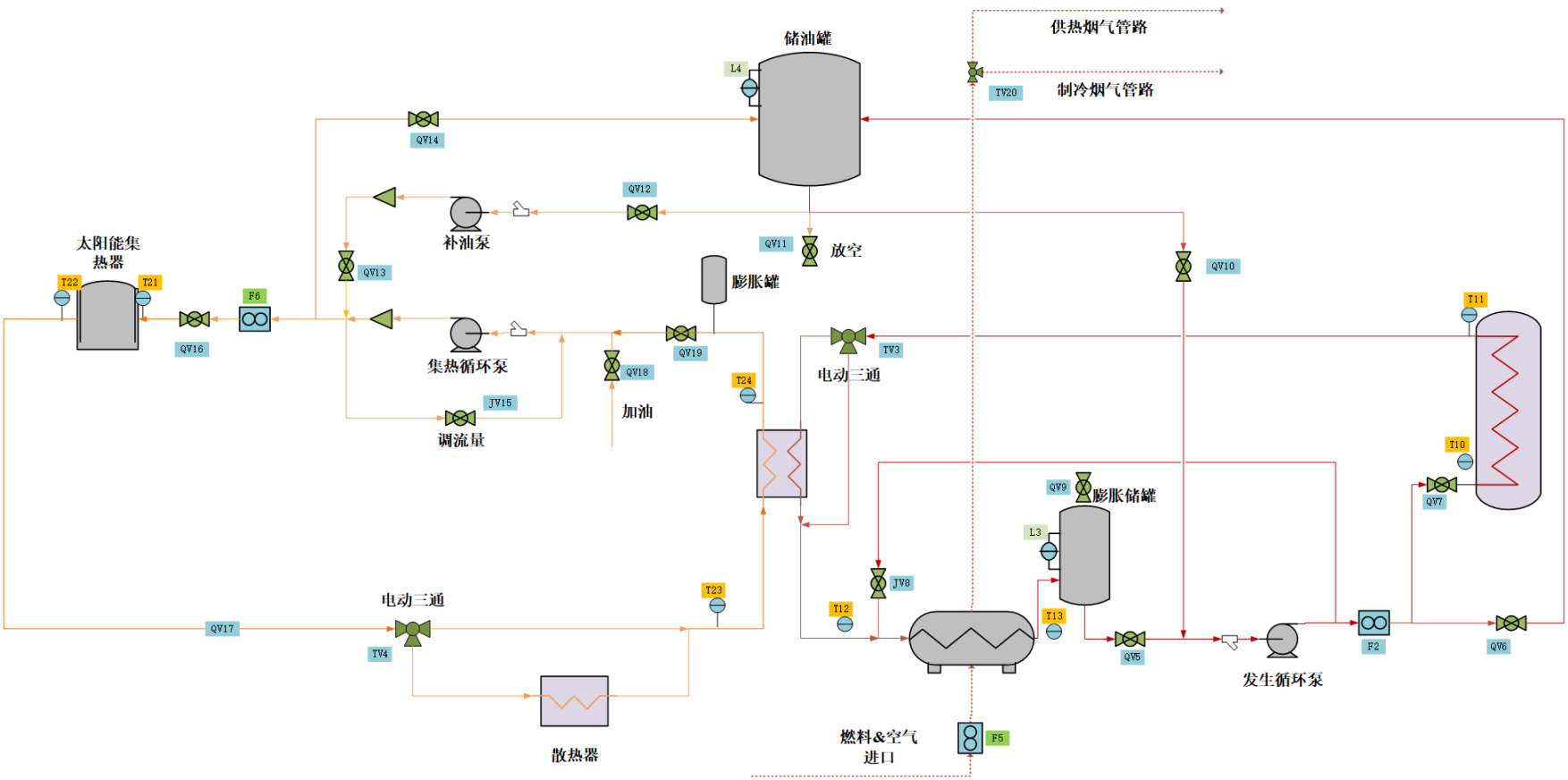


3.3 实验验证系统—工艺流程图



● 光热+燃气管路工艺流程图

- ✓ 发生系统与集热器油路隔离；
- ✓ 集热器端增加散热器，保证主系统停运时，太阳能集热器及时散热；
- ✓ 公用储油罐设计实现自动补油、系统导热油加注及回收。

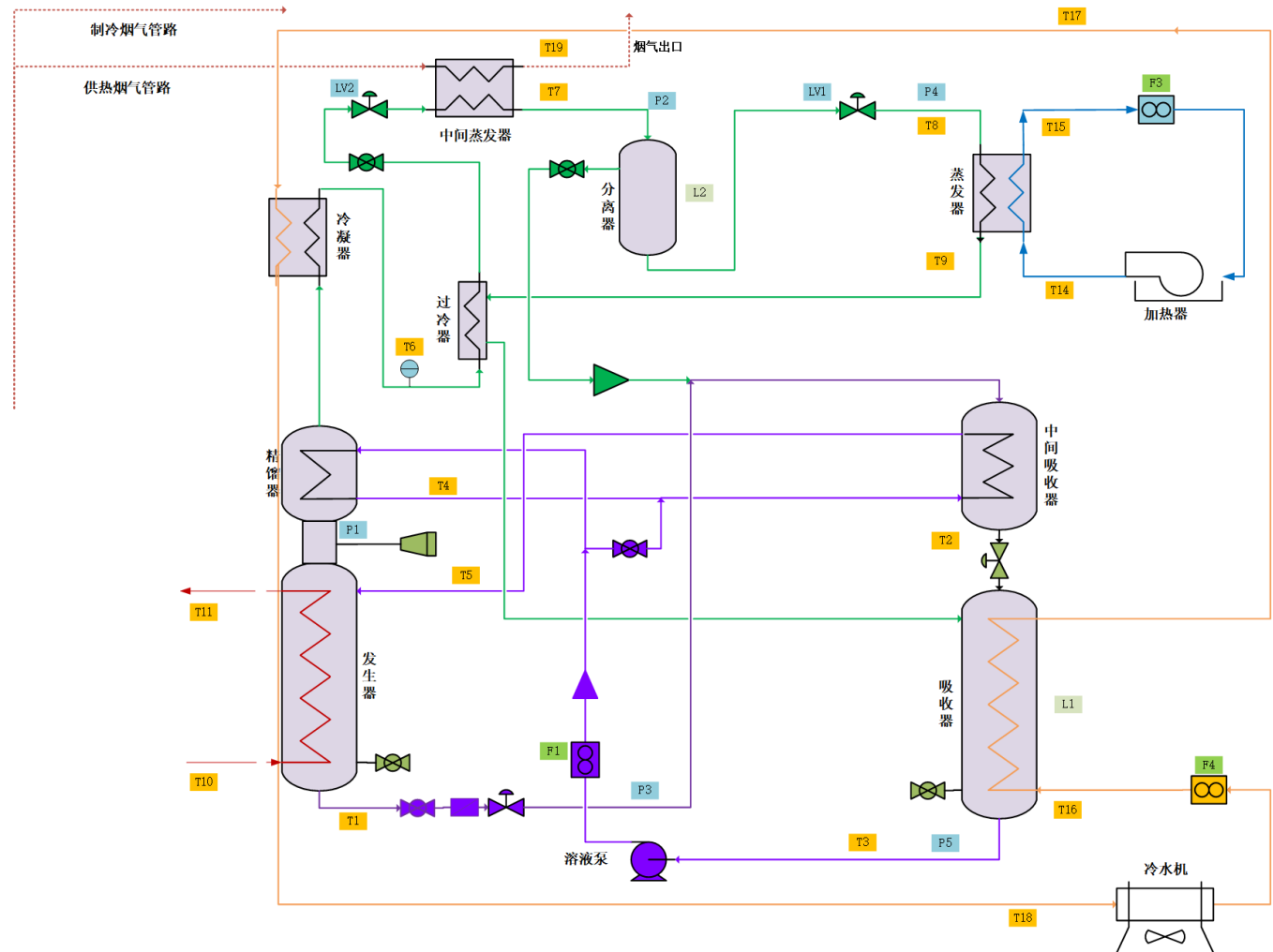


- P1发生压力
- P2中间蒸发压力
- P3中间吸收压力
- P4蒸发压力
- P5吸收压力
- T1发生温度
- T2中间吸收终了温度
- T3吸收温度
- T4精馏出口温度
- T5发生回液温度
- T6冷凝温度
- T7中间蒸发温度
- T8蒸发温度
- T9蒸发器出口温度
- T10导热油入口温度
- T11导热油出口温度
- T12锅炉入口温度
- T13锅炉出口温度
- T14供冷回水温度
- T15供冷出水温度
- T16供热出水温度
- T17供热吸收器出口温度
- T18供热回水温度
- T19排烟温度
- T20环境温度
- T21集热器入口
- T22集热器出口
- T23板换入口温度
- T24板换出口温度
- F1溶液循环流量
- F2导热油流量
- F3供冷流量
- F4供热流量
- F5燃气流量
- F6集热器流量
- L1吸收器液位
- L2分离器液位
- L3膨胀罐液位
- L4储油罐液位
- LV1低压工质节流阀
- LV2中压工质节流阀
- TV3板切换阀
- TV4散热器切换阀
- PUM1溶液泵

3.3 实验验证系统—工艺流程图

● 主系统工艺流程图

- ✓ 中间蒸发器设计在制热模式下，回收烟气热量，提高系统效率；
- ✓ 分离器设计调节可以调节系统浓度，进而调节制冷制热工况模式；
- ✓ 选取35个测量点，便于系统性能实验测试。



- P1发生压力
- P2中间蒸发压力
- P3中间吸收压力
- P4蒸发压力
- P5吸收压力
- T1发生温度
- T2中间吸收终了温度
- T3吸收温度
- T4精馏出口温度
- T5发生回液温度
- T6冷凝温度
- T7中间蒸发温度
- T8蒸发温度
- T9蒸发器出口温度
- T10导热油入口温度
- T11导热油出口温度
- T12锅炉入口温度
- T13锅炉出口温度
- T14供冷回水温度
- T15供冷出水温度
- T16供热出水温度
- T17供热吸收器出口温度
- T18供热回水温度
- T19排烟温度
- T20环境温度
- T21集热器入口
- T22集热器出口
- T23板换入口温度
- T24板换出口温度
- F1溶液循环流量
- F2导热油流量
- F3供冷流量
- F4供热流量
- F5燃气流量
- F6集热器流量
- L1吸收器液位
- L2分离器液位
- L3膨胀储罐液位
- L4储油罐液位
- LV1低压工质节流阀
- LV2中压工质节流阀
- TV3板换切换阀
- TV4散热器切换阀
- PUM1溶液泵

3.3 实验验证系统—测量仪表清单

● 测点及测量仪表详细列表

- 测量仪表类型:
- ✓ 热电阻传感器
 - ✓ 电磁流量计
 - ✓ 涡街流量计
 - ✓ 射频导纳液位计
 - ✓ 磁翻板液位计
 - ✓ 奥氏质量流量计

位号	测点名称	类型或型号	传感器精度	量程范围	信号类型	备注
P1	发生压力	绝压 WP-AK-2.5TP	0.25%	0~2.5MPa	4~20mA	
P2	中间蒸发压力	绝压 WP-AK-2.5TP	0.25%	0~2.5MPa	4~20mA	
P3	中间吸收压力	绝压 WP-AK-2.5TP	0.25%	0~2.5MPa	4~20mA	
P4	蒸发压力	绝压 WP-AK-2.5TP	0.25%	0~2.5MPa	4~20mA	
P5	吸收压力	绝压 WP-AK-2.5TP	0.25%	0~2.5MPa	4~20mA	
T1~T24	发生温度	PT100	±0.25℃	-50~200℃	阻值	
F1	溶液循环流量	超声波	±1%	0~1.6m³/h	4~20mA	
F2	导热油流量	涡街	±1%	0~5m³/h	4~20mA	
F3	供冷流量	电磁	±0.5%	0~6m³/h	4~20mA	
F4	供热流量	电磁	±0.5%	0~8m³/h	4~20mA	
F5	燃气流量	奥氏质量	±0.25%	0~6m³/h	4~20mA	
F6	集热器流量	涡街	±1%	0~5m³/h	4~20mA	
L1	吸收器液位	电容	±2mm	0~1100mm	4~20mA	
L2	分离器液位	磁翻板	±10mm	0~530mm	4~20mA	
L3	膨胀储罐液位	玻璃管	NA	0~80cm	刻度	
L4	储油罐液位	玻璃管	NA	0~80cm	刻度	

3.3 实验验证系统—测控系统设计

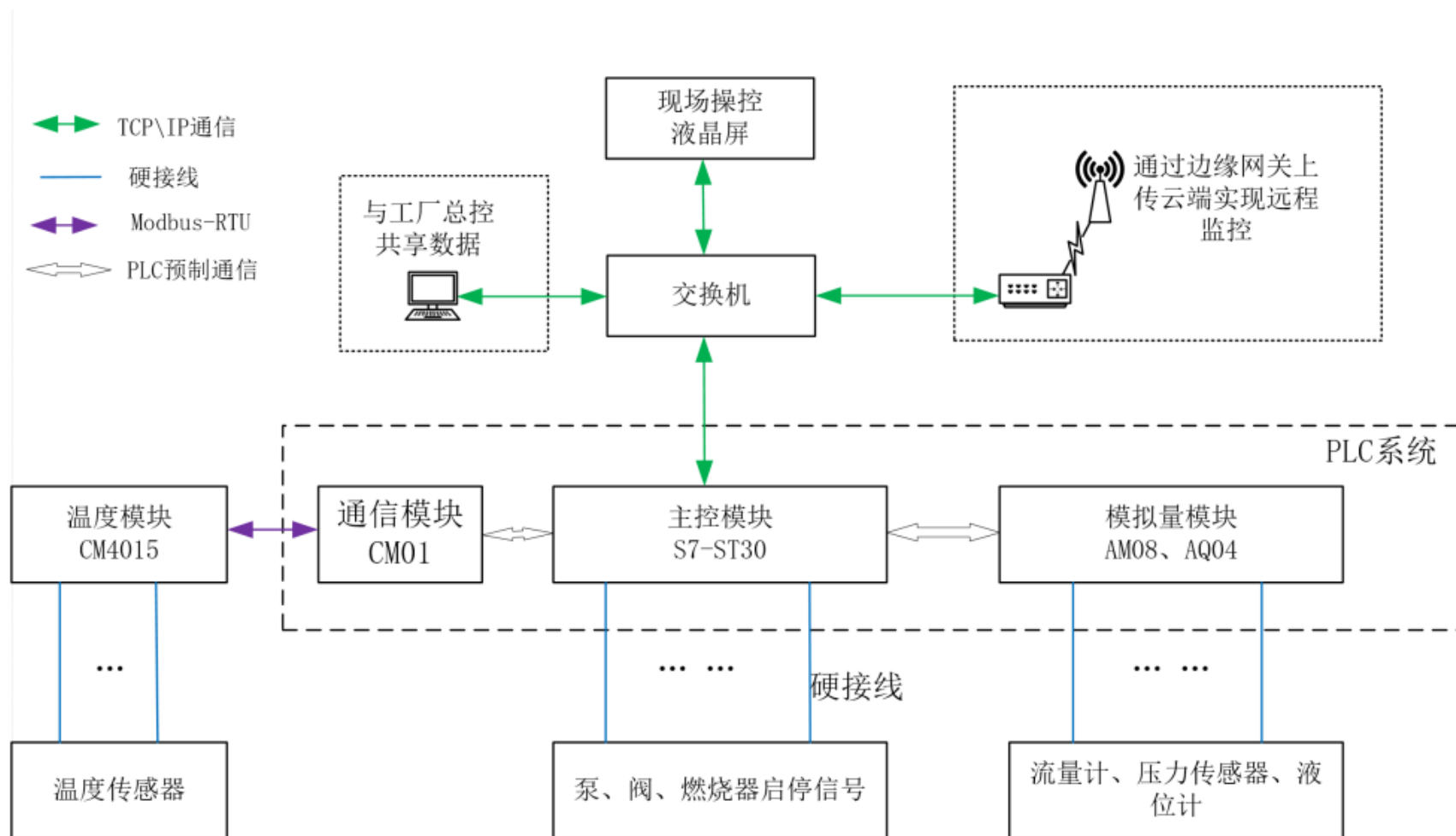


● 测控系统组成

- ✓ PLC控制器
- ✓ 通信模块
- ✓ 模拟量模块
- ✓ 温度模块
- ✓ 工业液晶触摸屏

● 通道数量

- ✓ DI通道: 22
- ✓ DO通道: 12
- ✓ 温度点通道: 30
- ✓ 4~20mA通道: 16
- ✓ 模拟量输出通道: 4



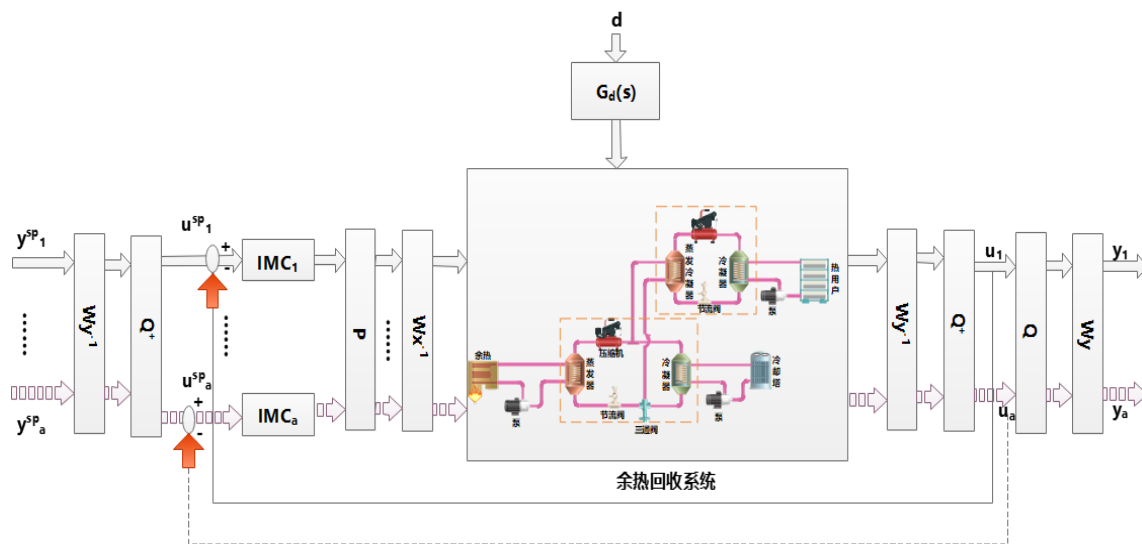
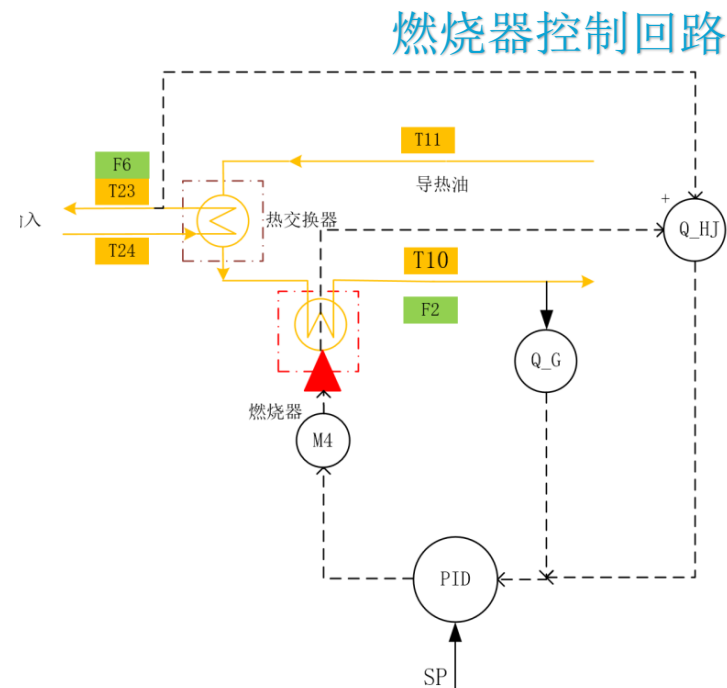
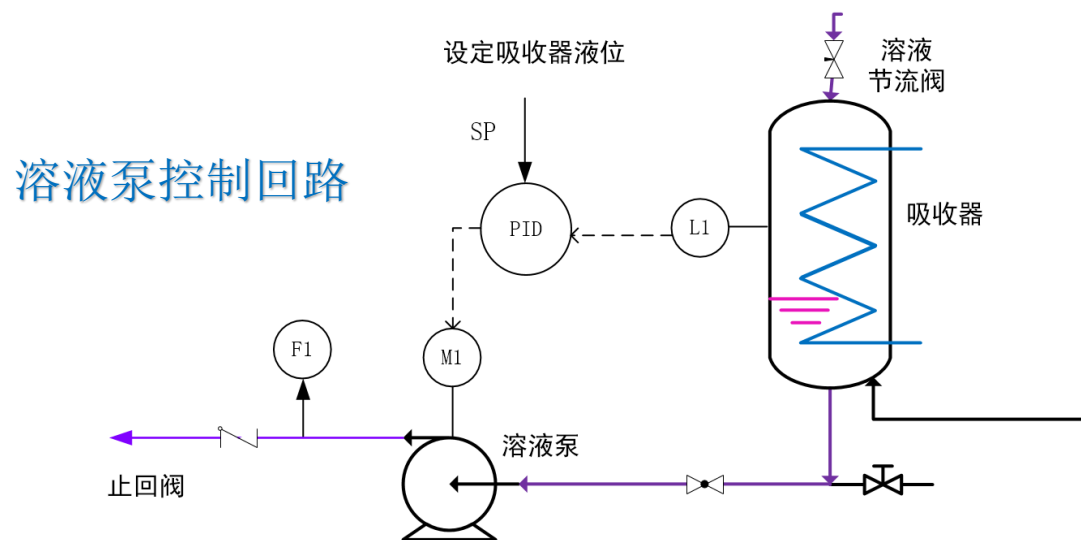
3.3 实验验证系统—测控系统设计

- 三个控制回路满足系统稳定运行及变工况运行

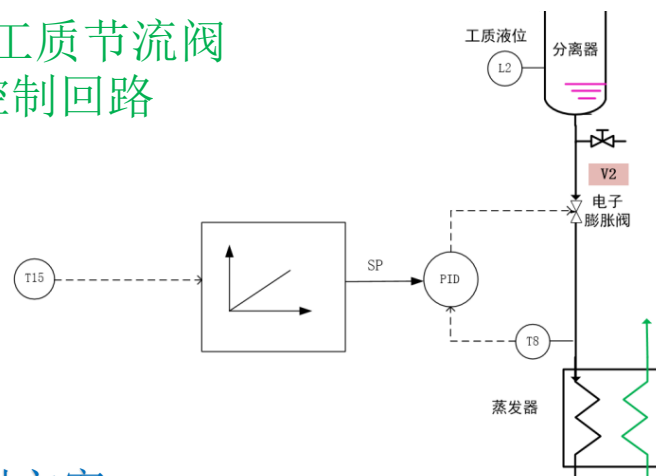
- ✓ 溶液泵控制回路
- ✓ 低压工质节流阀控制回路
- ✓ 燃烧器控制回路

- 先进控制策略：

- ✓ 预测控制
- ✓ 推断控制
- ✓ 模糊控制
- ✓ 神经控制
- ✓ 非线性控制
- ✓ 鲁棒控制等



低压工质节流阀控制回路



基于动态PLS控制框架的加速器冷热管理系统的多回路鲁棒控制方案

研究计划：1年

- 2023.07-2023.10：系统及样机设计；
- 2023.11-2024.02：样机研制；
- 2023.03-2023.06：调试与实验；
- 2024.07-2024.09：成果总结

任务完成指标

- 实验工况测试：
 - 研制出一台吸收式冷热联供实验样机，可回收余热温度 30°C ，实验测试：供热温度 $40\sim 80^{\circ}\text{C}$ ，制冷温度 $-10\sim 20^{\circ}\text{C}$ ；



04

总结与展望

4 总结与展望

- ◆发展高能量、高亮度的粒子加速器装置冷热管理技术，契合粒子加速器“绿色”节能转型的重大需求；随着降低能源消耗的需求愈发强烈，本项目的研究工作亟需启动；
- ◆目前已对CEPC和JUNO项目进行初步方案设计和经济性分析，吸收式冷热联供的**优势**：一机两用，冬季余热回收供暖+夏季（或者全年）多能互补制冷（降低制冷耗电）；
- ◆实验验证样机前期设计工作开展顺利，预计明年上半年完成实验验证！
- ◆另外还可以发展**余热能发电、热储能**等技术，以满足能源多级利用的目的和需求！

Thanks for your attention!