



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



Preliminary investigation of reusing waste energy to make CEPC an environmental friendly machine

Rui Ge, Mei Li, et al.

On behalf of the CEPC cryogenic group

March, 23th, 2023

1 背景概述

2 现状与发展动态分析

3 CEPC余热回收再利用初步方案

初步方案、经济分析、难点总结、技术路线

4 可行性分析

5 总结与展望



01

背景概述

1 背景概述

- **高功率、高亮度的加速器往往消耗大量电能**；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能耗20%**，但超导磁铁仍然需要1.9K液氮低温系统维持，关停不意味不耗电，消耗电量降至约500 GWh。

缺电！世界最大物理实验室将提前关停



2022-11-07 15:49

◆ WSJ NEWS EXCLUSIVE | WORLD

Europe's Energy Crunch Squeezes World's Largest Particle Collider

CERN is drafting plans to idle its particle accelerators, including the Large Hadron Collider, if France runs short of electricity

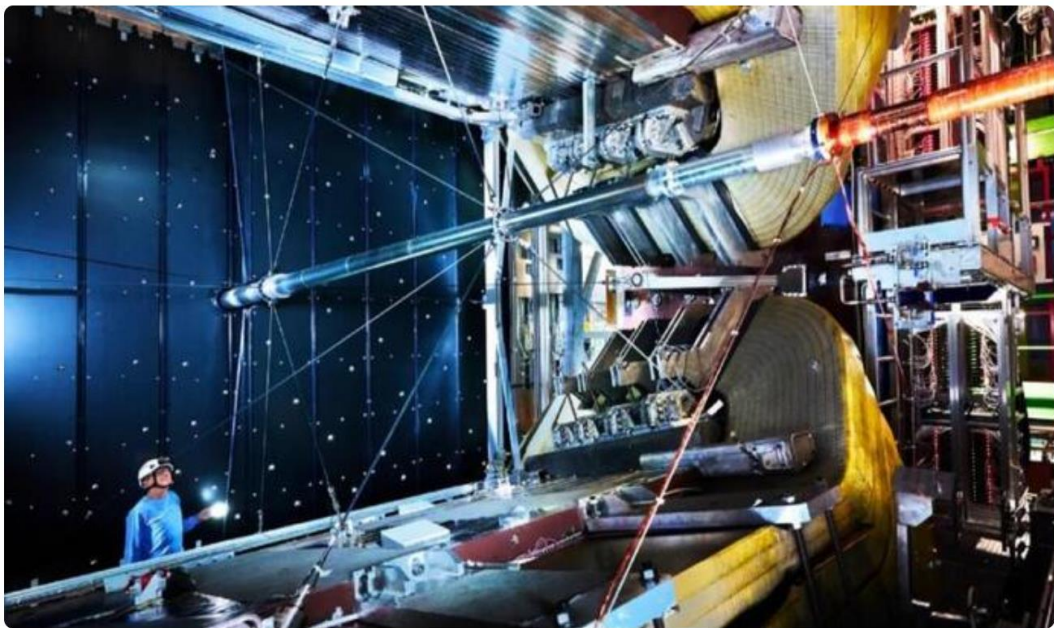


表 1 国内外典型大科学装置的用电功耗统计

Name	Lab	T (K)	Power /MW	Annual electricity /GWh (8000h)
LHC	CERN (Switzerland)	1.9	163	1300
ESS	ESS (Sweden)	2.0	40	320
XFEL	DESY (Germany)	2.0	17.76	142
ITER	EU, India, Japan, Korea, Russia & USA	4.5	72.5	580
HIAF	China (IMP)	2	3.5	28
CIADS	China (IMP)	2	7	56
SHINE	China (SARI)	2	Cryogenic-14	Cryogenic-112
HEPS	China (IHEP)	4.5	38	304
CEPC	China (IHEP)	2	340	2720
FCC-ee	CERN (Switzerland)	1.9	291	2328

1 背景概述

- 美国《大众科学》杂志报道指出，**粒子加速器亟需降低能源消耗，向“绿色”挺进。**
- **不同团队采用不同的办法：采用永磁体、高效利用排放出的废热、回收投入的能量等技术。**
- 美国康奈尔大学官网报道，ERL试验加速器（CBETA）**通过使用不需要电力的永磁铁替代电磁铁减少能源消耗。**
- 在一次关键实验中，CBETA加速器回收99.8%的能量。这意味着，提供给主加速装置的能量比没有能量回收装置的加速束流要快500倍。

- CBETA首席科学家、康奈尔大学物理学家**格奥尔格·霍夫施泰特**解释说，CBETA会发射高能电子，通过一个跑道形状的环路，电子每跑“一圈”就获得一次能量提升。4圈后，加速器可以使电子减速并存储它们的能量以供再次使用。CBETA使物理学家们第一次能在电子跑了多圈之后回收能量。

https://m.thepaper.cn/baijiahao_19675601



图1 霍夫施泰特（左）和布鲁克海文国家实验室科学家德扬·特尔博维奇。图片来源：康奈尔大学官网

1 背景概述

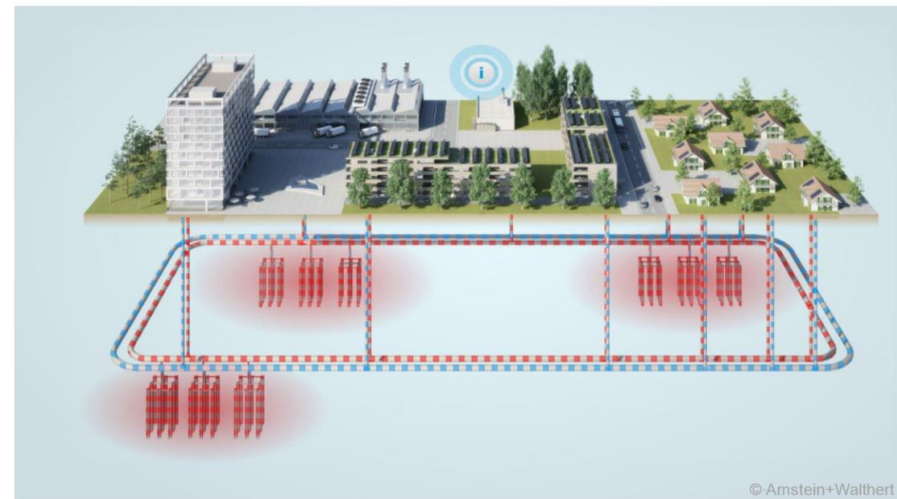


LHC's cooling system, an energy source for CERN's neighbours

Hot water from the LHC's cooling system at Point 8 will be collected to heat a new area of the neighbouring commune of Ferney-Voltaire

23 JULY, 2019 | By Anaïs Schaeffer

- 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。
- ◆ CERN能源协调员Serge Claudet说：“在CERN 许多系统和装置（低温、电子、通风等）都是用冷却水来冷却废热：**“离开回路的热水温度可以达到30°，这在能源回收方面非常有用。”**”



Geothermal probes implanted in the ground under the new area (the nine red “bunches” on the image) will store heat, compensating for



图2 CERN 冷却水余热利用给邻近Ferney-Voltaire镇居民供热水

1 背景概述

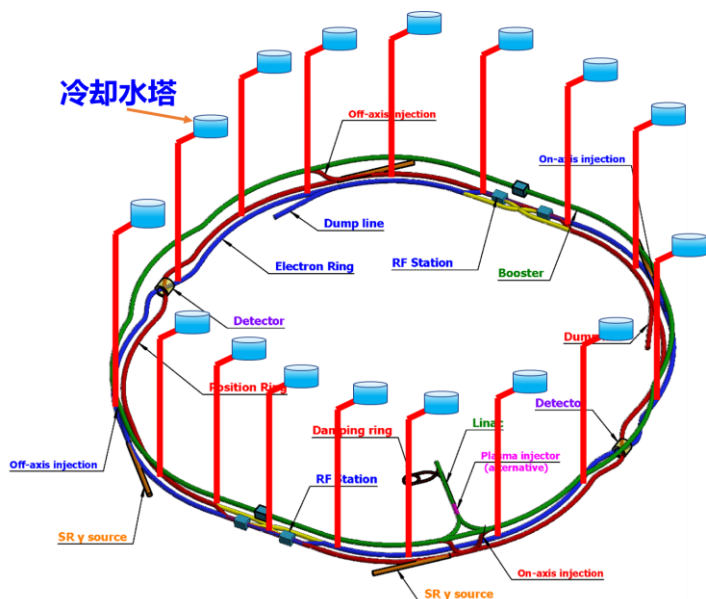


- CEPC Higgs 50MW耗电功率约为340MW，按8000小时运行每年耗电量将高达2720 GWh。其中，束流功耗约占系统总功耗1/3，其余2/3的电功耗大部分都变成低品位的热能（30℃），被冷却水带走排放或者储存，没有发挥“余热”真正价值。
- 随着科技进步，通过热泵技术、太阳能光-电技术、光-热技术和热储能等手段，可以将这部分难以直接利用的低品位能源，转化为可利用的高品位能源，增强能量梯级利用。

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m ³ /h	7045.40	363.43	525.77	36.80	195.70
冷却水回水温度℃	30~40	30~40	30~40	30~40	30~40

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

图3 CEPC对撞环内冷却水回路的布局

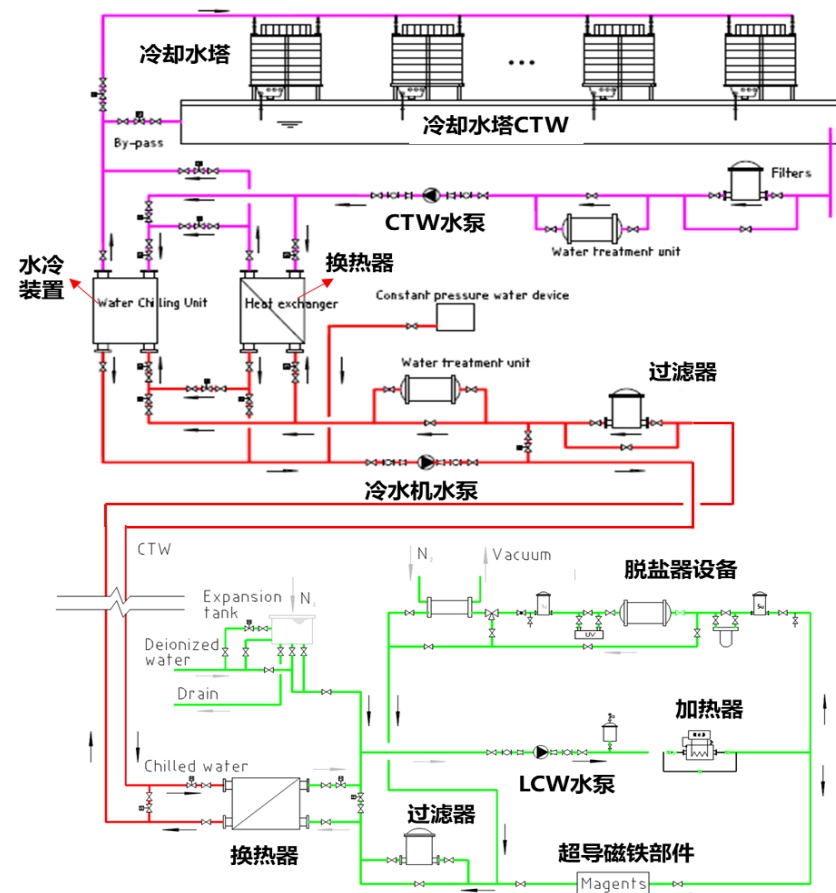


图4 典型的冷却水系统流程图

1 背景概述

- **目前，热泵技术是全世界备受关注的低品位能源再利用技术。**
- 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；
- 热量**可自发地**从高温物体传递到低温物体中去，但不能自发地沿相反方向进行。
- **热泵的工作原理：**以逆循环方式迫使热量从低温物体流向高温物体的机械装置。
- 制热效率是传统制热方式（电热锅炉、燃气锅炉等）的好几倍，节约能源的同时还降低了对环境的污染（减少碳排放）。

制热效率 $COP_h = \frac{Q_h}{W}$ Q_h 制热量， W 为消耗功率

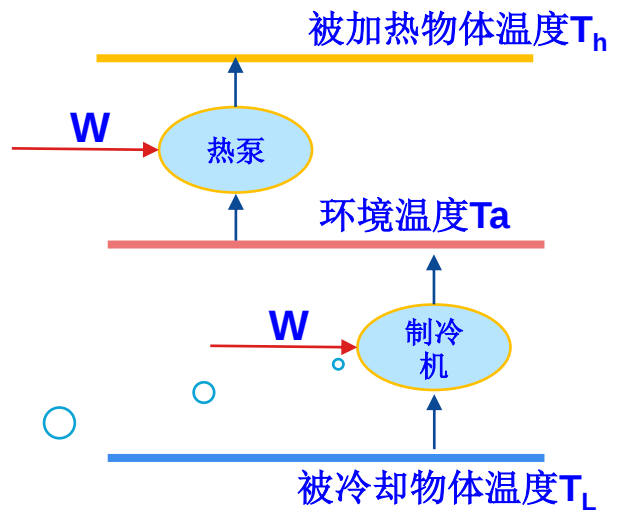


图5 制冷机和热泵的工作温度范围

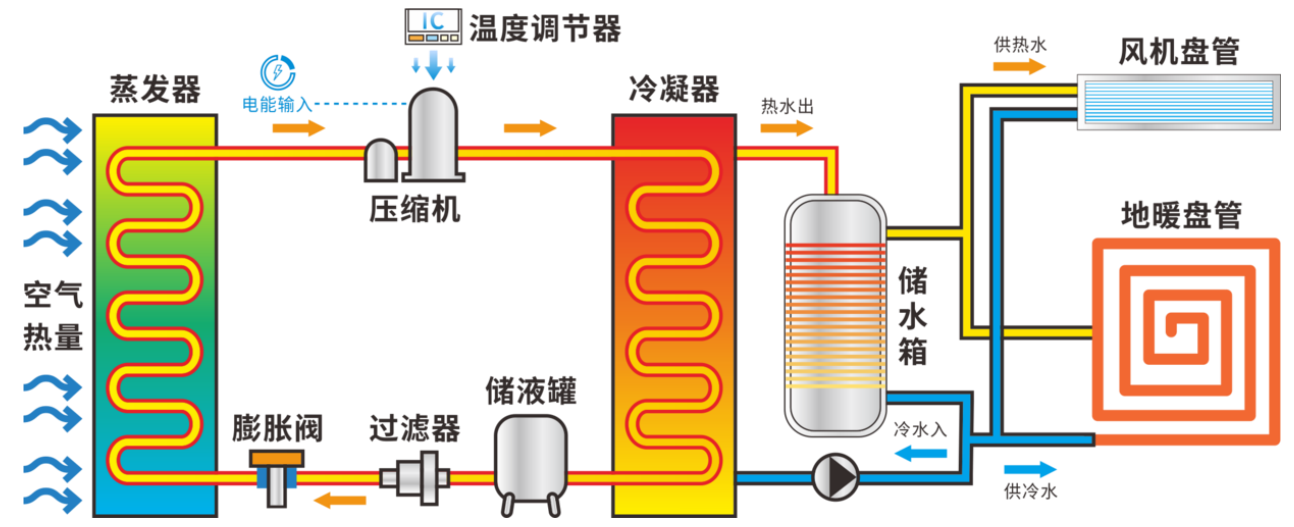
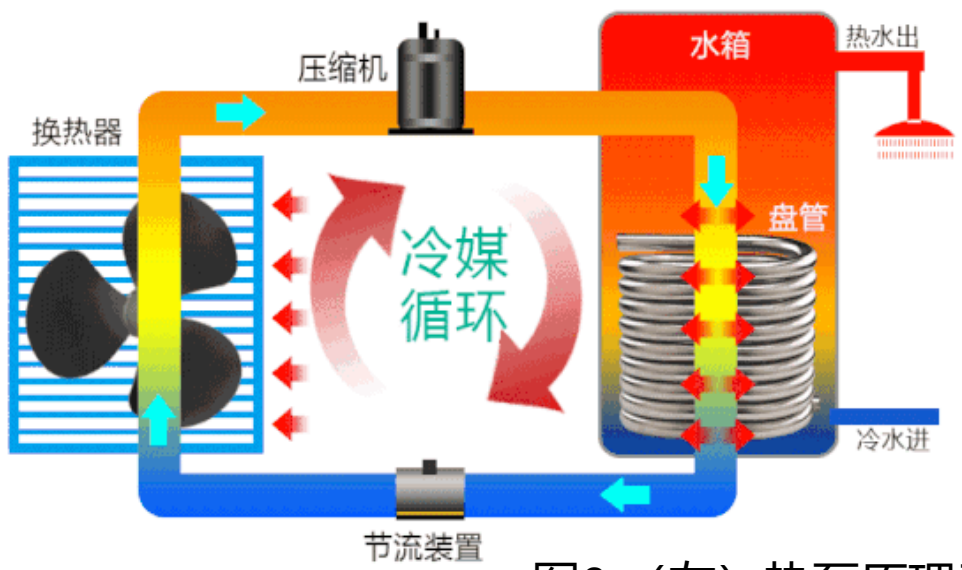


图6 （左）热泵原理示意动图 （右）空气能热泵冷暖机组工作原理



02

现状与发展动态分析

2 现状与发展动态分析



◆ **热泵其实不是新技术**，英国的开尔文教授于1852年首次提出热泵（Heat Pump）。

◆ **但是利用热泵在加速器领域，进行余热回收再利用还是比较新的，值得深入研究！**

(1)

20世纪20~30年代

- 热泵的应用研究不断拓展；
- 1938~1939年，瑞士苏黎世议会大厦安装了夏季制冷冬季供热的大型热泵装置，输出热量达175kW，制热系数为2；
- 此后美国、英国、瑞典及日本相继开始对热泵的研究。

(2)

20世纪40~60年代

- 热泵技术进入了快速发展期；
- **二战的爆发**影响了热泵的发展，同时战时能源的短缺又促进了大型供热热泵发展；
- 60年代末70年代初，热泵制造质量较差、设计安装水平低等不利因素使热泵发展进入**低谷**。

(3)

20世纪70年代

- **能源危机**的爆发又一次推动了世界范围内热泵的发展。
- 70年代末，全世界已经安装运行的热泵超过50万台，全世界的供热需求中由热泵提供的占近2%。

(4)

我国热泵发展

- 热泵在我国起步于20世纪50年代，天津大学热能研究所是国内最早开展热泵方面研究的单位。
- 90年代我国逐步形成了**完整的热泵工业体系**，成为空调用热泵的生产大国。

续 (4)

我国热泵发展

- 进入21世纪，我国热泵技术的研究**不断创新**。
- 热泵研究工作深入，变频技术、计算机仿真与优化技术、自动控制技术等都取得实质性进展。
- 2000~2003年热泵专利总数287项，年平均为71.75项。

2 现状与发展动态分析



- ◆ 即使粒子加速器对余热回收的需求很强烈，但仍存在三大挑战，可以概括为数量、质量以及制约性；
- ◆ 这方面研究文献偏少；近些年CERN、ESS也才陆续开始相关的加速器系统级的热管理方面的研究工作和应用。

(1) 数量上的挑战：

- 随季节变化、复杂工况和运行模式不同而产生的废热量波动较大，不容易评估废热量。
- 以ESS为例，其中一个区域供热系统每年分配大约1太瓦时，大约是ESS发电量的四倍。
- 然而供暖需求是有时间段的，且随着室外温度和风的变化而变化，相比之下自来水供暖的需求更加稳定。

(2) 质量上的挑战：

- 热能的质量就是温度。以CERN举例，超过1太瓦时产生的热能中，大约10%可用于建筑物供暖。目前建筑物的供暖，是通过全区域供暖系统，采用燃气锅炉来分配热量，温度可达120°C。
- 而冷却系统的回水温度约为40°C。这种大温差距必须得用电动压缩式热泵来弥补，电力消耗相当大，最后就变成加剧而不是减轻设施的能源消耗。

(3) 制约性的挑战：

- 加速器系统产生废热的部件众多、相互之间耦合性强且复杂，主要有射频电源、磁铁、真空室、低温压缩机和电源转换器（磁铁电源）等；
- 工艺循环冷却水的回水温度一般要求30°C~40°C，温度太高会对部件耐热性提出很高要求，存在约束性强、边界条件较为苛刻的难题。

2 现状与发展动态分析



早些年

(1982~1987)

- “老一代”加速器LEP开辟了加速器废热回收先例，但是集中在对束流能量的回收方面。
- M. Kolling^{[21][22]} 评估在夏季和冬季，从LEP装置冷却水中进行热回收的经济性分析。
- 可行废热回收方案：通过传统的压缩机热泵生产115℃加热水，用于冬季取暖，该热泵有带废气热回收的柴油机驱动。

2015年~2017年

- CERN加强能耗监控，提高加速器设施的能效，热回收技术再次焕发活力。
- 2015年，为解决加速器运行中产生的负荷波动，M. Seidel^[24]通过搭建高效的能耗监测网络，可以识别不同设施的功耗波动，来解决这种瞬时的冲击和影响。

2018~至今

- 人工智能“数字孪生”技术助力CERN余热回收系统控制系统优化。
- CERN B. Schofel^[26] 利用EcosimPro商业软件创建冷却厂“数字孪生”模型 (Digital Twin)，在虚拟模型上实现优化控制策略；
- 研究表明改进优化后的控制系统可以提高冷却塔的节能效果。

总的来说，**在超导加速器领域在热泵余热回收利用这方面的研究还比较缺乏**。随着超导加速器的规模逐渐扩大，粒子加速器设施亟需向“绿色”挺进，对余热回收的研究**迫在眉睫**。

2 现状与发展动态分析

- ◆ 目前高能量和高亮度是当前高能物理加速器的两大前沿；
- ◆ 已经批准建设的有：上海硬X射线自由电子激光(SHINE)、加速器驱动嬗变研究装置(CiADS)、散裂二期 (CSNSII) ， 或者已计划的直线对撞机-欧洲自由电子激光 (EXFEL) 的TESLA、国际直线对撞机 (ILC) 、 环形正负电子对撞机CEPC和FCC等项目；
- ◆ 以上项目无论是规模还是性能指标均居于世界前列，这对粒子加速器如何提高效率并节约能源提出了更高的要求和挑战。
- ◆ 我国的高能粒子加速器装置已顺利实现了“从无到有”，下一步需要应对“从有到优”、“绿色节能”的问题，以有效合理的措施积极响应“碳达峰、碳中和”的政策，推动“绿色”节能转型。
- ◆ 对于整个加速器行业，亟需做好余热/废热多级利用，大力发展热泵、蓄热及中低温余热利用技术，进一步提升余热利用效率，是下一步重中之重需要解决问题。



03

CEPC余热回收再利用初步方案

- ◎初步方案 ◎经济性分析
- ◎难点总结 ◎技术路线

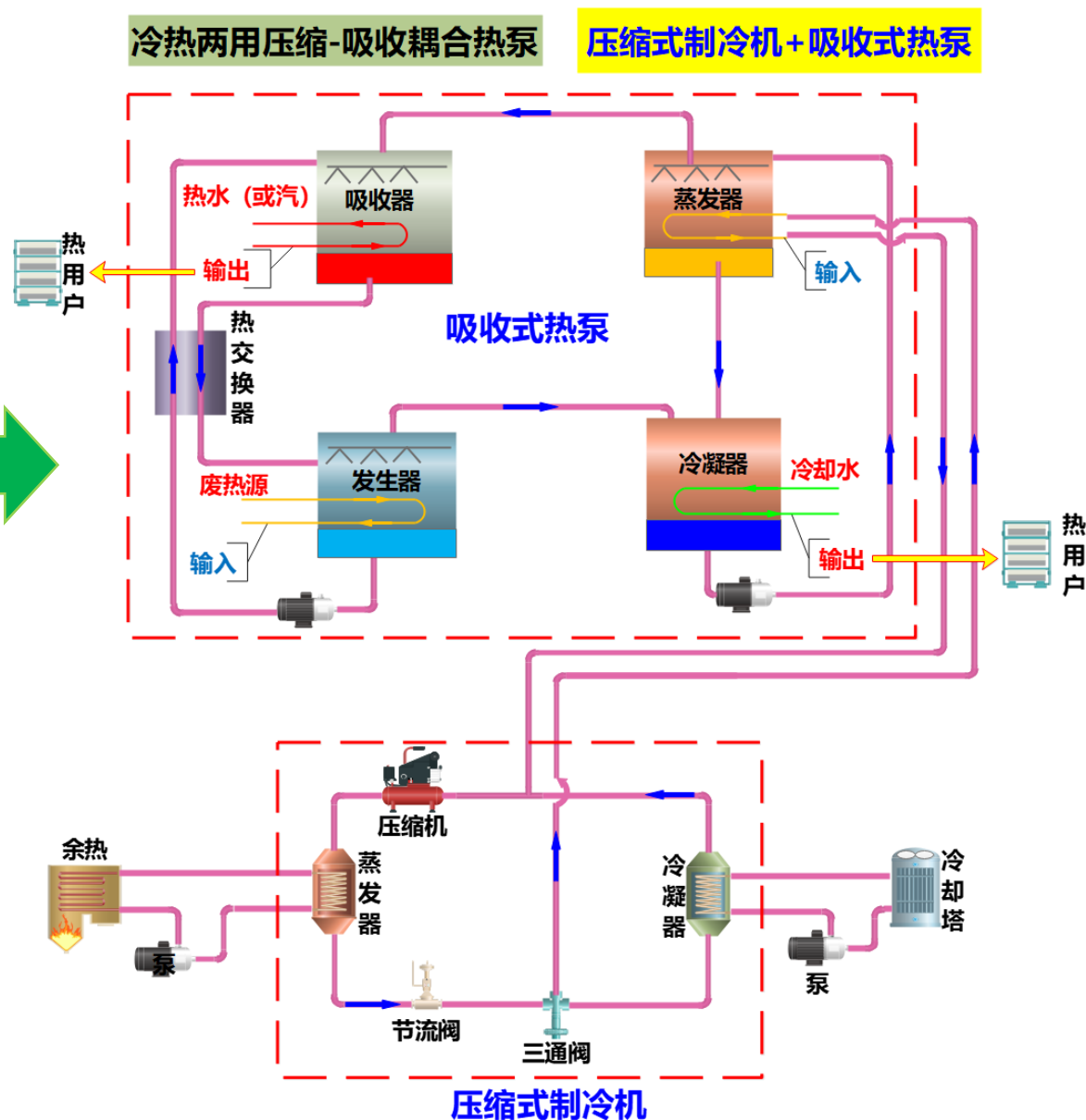
3.1 初步方案和经济性分析



◆ 目前市面上，兼顾制热/制冷功能的热泵机组，常采用完全并联，即制冷机在夏季使用，热泵在冬季使用，效率较低，且热泵的动态响应机制不够；

◆ CEPC余热回收初步方案：

- 采用“**冷热两用耦合式热泵技术**”，回收冷却水系统中的余热（余热回收量282MW，年回收292万GJ）；
- 冬季产生高温热水（80℃），提供热水/供暖；
- 夏季产生低温冷水（10℃），用于制冷吹空调使用；
- **节约冬季供暖/热水所用的天然气使用量、夏季吹空调所用的电能**；对于南北方选址不同，以上方案均适用。



3.1 初步方案和经济性分析



◆ 冷热两用耦合式热泵技术方案经济性分析:

- ◆ **项目总投资4.5亿元**，其中设备投资3.5亿元，设备安装费5000万元，管网改造建设、其他辅助等投资5000万元。
- ◆ 余热回收量282MW，年回收余热292万GJ（按采暖季2880小时计算），折合节约天然气8760万元。按燃气价格4元/Nm³计算，**年节约3.5亿元，静态投资回收期2年，2年以后纯收益约2亿元。**

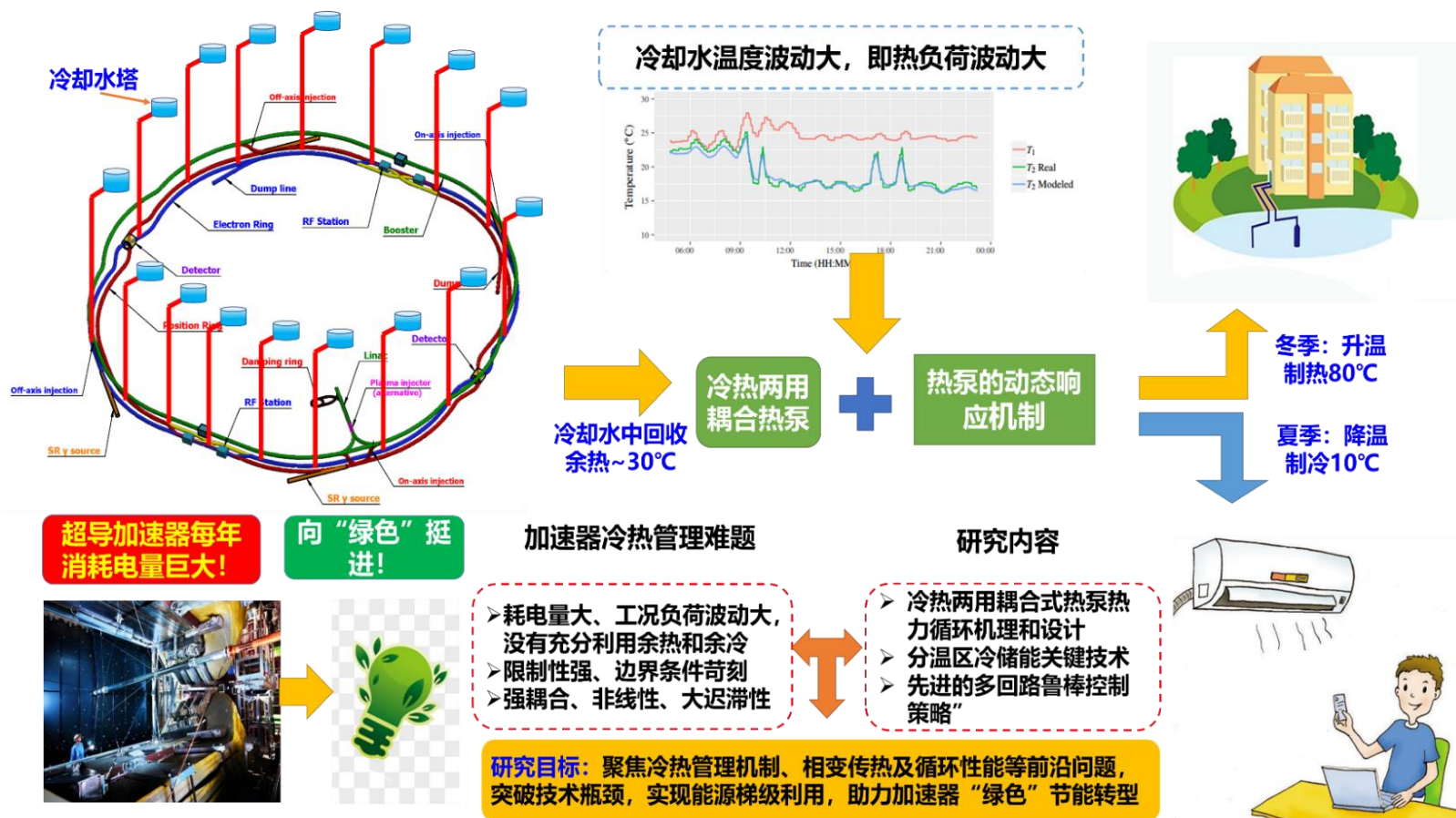


图7 本项目的研究方案设想及研究脉络

3.2 难点分析



尽管大型加速器系统对余热回收有较为迫切的需求，但具体实施的过程仍存在一些难度：

01

系统建模困难

- 加速器系统产生废热的**部件众多且复杂**，有射频电源、磁铁、真空室、低温压缩机和电源转换器（磁铁电源）；
- 对各部件的余热进行准确能量分析，明确余热利用方式，并对余热利用设备进行优化配置；
- **对整个余热回收系统进行流程建模仿真优化和经济性分析，本身就存在很大难度。**

02

冷热两用耦合式热泵重新进行热力设计和加工研制

- 市面上能兼顾制热/制冷功能的热泵机组，存在效率低且动态响应机制不够的缺点，难以满足本项目需求。
- **“冷热两用耦合式热泵技术”属于新技术**，需对常规热泵机组改良，重新进行热力循环设计和加工研制，但基本属于热泵设计的范畴难度可控。

03

先进控制困难

- 热能循环输运是典型的**非线性、大迟滞性**的工业过程，其控制问题始终是工业界的重大挑战。
- 余热回收过程可能存在**模型失配以及热源扰动等不确定性因素**，如何针对特定工况发展有针对性的先进控制策略，目前仍是亟待解决的问题。

3.3 拟开展研究内容



超导
加速
器的
余热
回收
利用
关键
技术
研究

研究内容

系统级余热回收建模与计算方法研究

冷热两用耦合式热泵热力循环机理和设计

先进的多回路鲁棒控制策略

开展多维度验证实验 (PAPS/HEPS、现有实验台)

科学问题

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

阐明能量传递和转换机制，构建热泵热力循环流程，探索工艺

如何实现并提高加速器能量回收系统的自动控制水平

评估加速器的冷热管理性能，并进行变工况测试

研究目标

获得一套计算精度高、满足要求的余热回收仿真模拟计算软件

获得制冷/制热耦合热泵合理机械结构和可靠的机组实物

获得加速器能量回收系统有效的动态仿真模型和先进控制方法

获得多维度多层次实验分析和优化结果，实现余热回收热管理

聚焦余
热管
理
机制，
旨在
实现
梯级
利用，
助力
加速
器“绿
色”
节能
转型。

3.4 技术路线



超导加速器余热利用热管理关键技术研究

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

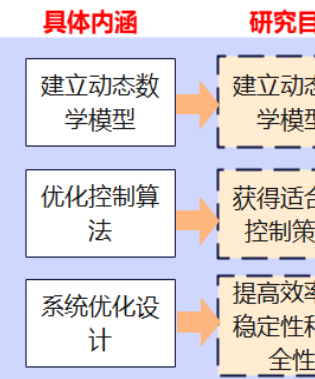
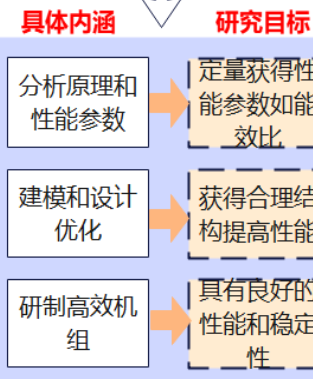
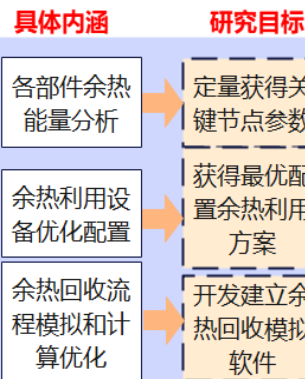
科学问题二：冷热两用耦合式热泵热力循环机理和性能的定量揭示

科学问题三：强耦合、非线性、大迟滞性过程的先进的控制策略

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：冷热两用耦合式热泵热力循环机理和设计

研究内容3：强耦合、非线性、大迟滞性过程先进控制策略研究



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

多维度

变工况测试

多层次

模拟变温或热负荷波动失配

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、发展强耦合、非线性和大迟滞性过程的加速器系统级先进控制策略

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

◆ 大型超导加速器冷热管理研究方法，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。



04

可行性分析

4 可行性分析



- ◆ 采用“冷热两用耦合式热泵技术”其原理基于热力学的热力学循环过程。
- ◆ 利用热泵，将低品位热源中的热量通过热力学循环过程传递到高温热源中，以实现热能的转换。**因此，“冷热两用耦合式热泵技术”充分利用低品位热源从科学原理上是可行的；**

- ◆ 项目人员长期从事超导加速器低温系统相关研究工作，先后参与建设运行如BEPCII//PAPS/HEPS等大科学工程项目，有成熟的项目经验，**成员学科完善，人员条件齐备。**
- ◆ 与国内外各大加速器实验室有**密切合作交流关系**，如理化所、工热所，CERN、ESS、DESY、KEK等，对本项目的开展也具有一定的借鉴意义。



- ◆ 大型超导加速器冷热管理研究方法，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**，研究方法可行。

- ◆ 为提高效率并节约能源，大型粒子加速器需要向“绿色”转型；
- ◆ 用冷热两用耦合热泵机组实现冬天制热、夏天制冷，**提高低品位能源利用效率**，这符合当下“双碳”背景下的工业发展的必然趋势。

4 可行性分析



1

- ◆ 实验室现拥有高性能解算服务器/工作站7台，正版三维仿真软件Ansys 18.0, COMSOL Multiphysics 5.5各1套，具有大规模三维复杂耦合物理场计算能力。
- ◆ 一维流程仿真正版软件EcosimPro 2套，低温物性库软件NIST RefpropV9.0和Cryocomp V5.3;

2

- ◆ 开源的Python SciPy、C++、QT、Fortran软件等，可用于自编程序开发;
- ◆ 实验台条件丰富，PAPS/HEPS，“低温传感器标定平台”“非稳态流动传热测试平台”、“多功能实验台”，等可供本项目试验使用。

3

- ◆ 与国内外各大加速器实验室有密切合作交流关系，对本项目的开展也具有一定的借鉴意义;
- ◆ 人员长期从事超导加速器低温系统相关研究工作，有着成熟的项目经验，和较好的低温和工程热物理背景，成员学科完善，人员条件齐备。

综上，本项目的硬件条件准备充分，实验条件基本完备，人员条件完善，具备支撑完成本项目的能力。

4 可行性分析—已具备实验条件



图8 先进光源研发与测试平台 (PAPS)



图9 高能光源 (HEPS)

多功能综合实验台



图10 多功能实验平台



图11 流动传热传质实验台

4 可行性分析—人员和计划

人员安排

姓名	职称	岗位职责	姓名	职称	岗位职责
葛锐	正高级工程师	项目总体负责	张卓	高级工程师	回收方案
李少鹏	研究员	项目指导	叶瑞	高级工程师	软件控制
李梅	工程师	项目实施负责	桑民敬	高级工程师	硬件控制
常正则	副研究员	热分析与编程	朱柯宇	博士研究生	编程算法
孙良瑞	工程师	实验测试	刘铸	研究生	仿真与实验
姜永诚	高级工程师	机械设计	张志航	研究生	旋转机械

研究计划：4年

- 2024.01.01-2024.12.31 系统级余热回收建模与计算方法研究；
- 2025.01.01-2025.12.31 冷热两用耦合式热泵热力循环机理和设计；
- 2026.01.01-2026.12.31 先进的控制策略研究；
- 2027.01.01-2027.12.31 开展验证实验、结果整理。



05

总结与展望

5 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；
- ◆ **CEPC余热回收方案经济性分析：冷热两用耦合式热泵技术方案，项目总投资4.5亿元。**项目余热回收量282MW，年回收余热292万GJ（按采暖季2880小时计算），折合节约天然气8760万元。按燃气价格4元/Nm³计算，年节约3.5亿元，去掉运维费用及管道泵耗等，静态投资回收期2年，2年以后纯收益约2亿元。
- ◆ 面向超导加速器余热再利用热管理需求，本项目所提出采用“**冷热两用耦合式热泵技术**”，可节约冬季供暖/热水所用的天然气使用量、夏季吹空调所用的电能，初步估计可减少这部分能耗40%甚至更多。
- ◆ **目前只是初步方案调研，更进一步研究有待进行，当然希望能得到相应的经费支持，助于我们更顺利地开展后续工作！**

Thanks for your attention!