



第十七届中国IDC产业年度大典
The 17th China IDC Industry Annual Ceremony

IDCC 2022

INTERNET DATA CENTER CONFERENCE [解码] 可持续发展

DECODING
SUSTAINABLE
DEVELOPMENT

第十七届中国IDC产业年度大典
The 17th China IDC Industry Annual Ceremony

产消型数据中心综合能源系统 关键技术与应用

王永真
北京理工大学 能源与动力系





1.研究背景



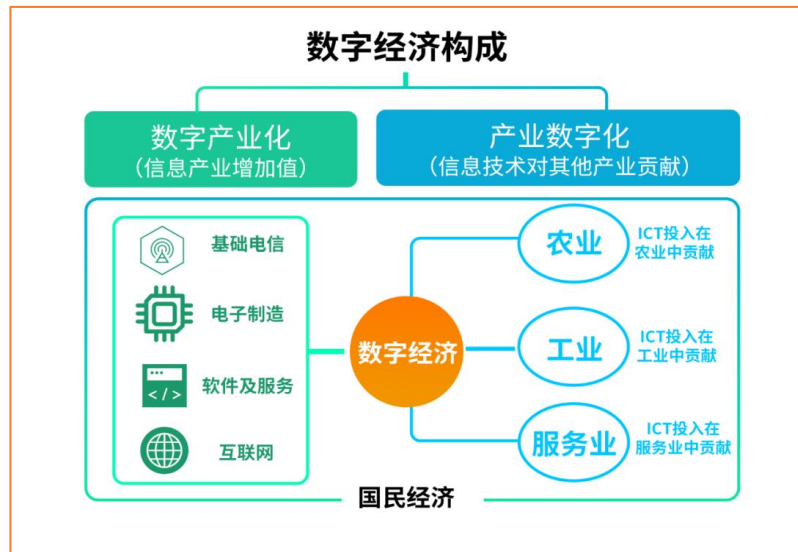
2.研究进展



3. 研究基础

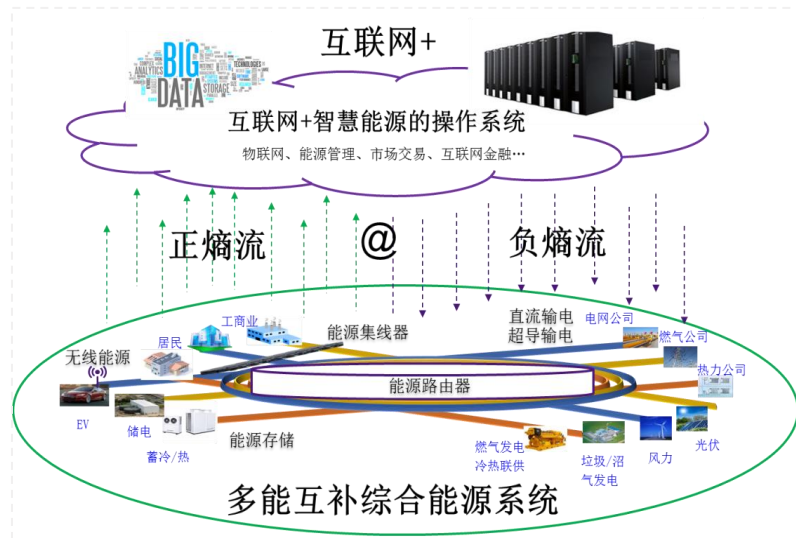
- 1.1 数字经济已成为推动世界社会经济发展的重要支撑
- 1.2 能耗问题已成为阻碍数据中心产业发展的主要矛盾
- 1.3 能耗密度大、冷负荷高、热电比稳定以及可靠性高
- 1.4 DC 系统存在分块而治、源头高碳、余热利用问题

数字经济推动人类经济形态由工业经济向信息经济、知识经济、智慧经济形态转化，分为数字产业化和产业数字化。从2012年至2021年，我国数字经济规模从11万亿元增长到超45万亿元，数字经济占国内生产总值比重由21.6%提升至**39.8%**。



能源这个百年老店也在数字化的赋能下沐浴春风，以能源信息双向流动为特点的新型价值链和产业链正在取代仅围绕能源供应的传统业务模式。**“互联网+智慧能源”**的理念已逐步形成。

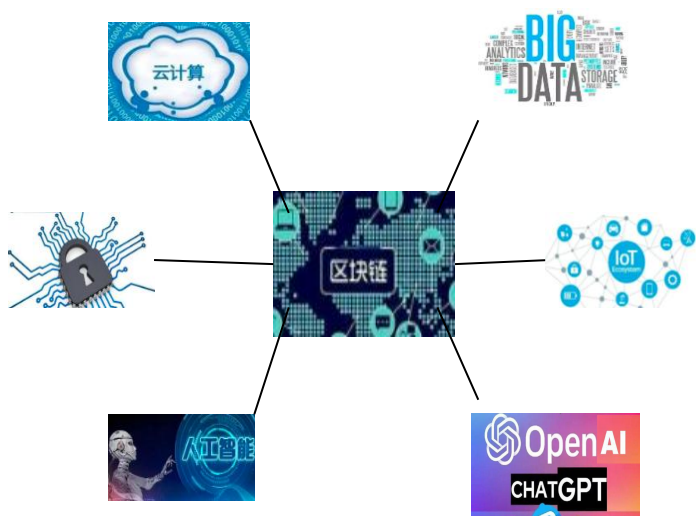
eg. 能源互联网、智慧能源、虚拟电厂、泛能网、多能互补、综合能源系统……



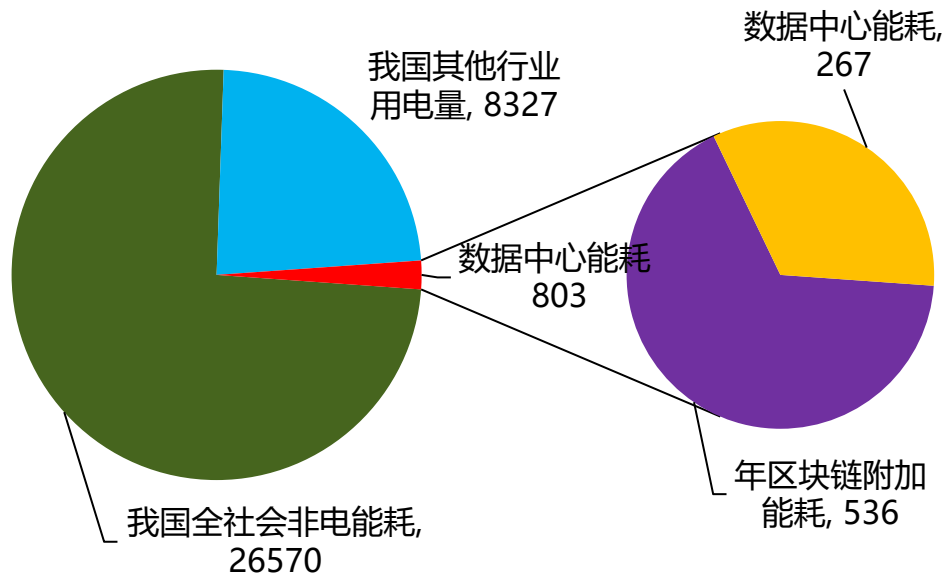
修改自孙宏斌



如全社会10%的数据按照“区块链”2.0的以太坊模式“上链”，算力的总能耗将占到2025年全社会电力消费的8.8%。



“区块链”无所不能，但能耗很高



数据中心能耗预测 (2025年情景, 单位TWh)

数据中心——“无烟囱的电老虎”



北京理工大学
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

数字经济下海量的数据需要感知、存储、加密、传输、调用、计算以及交易

数字基础设施——数据中心

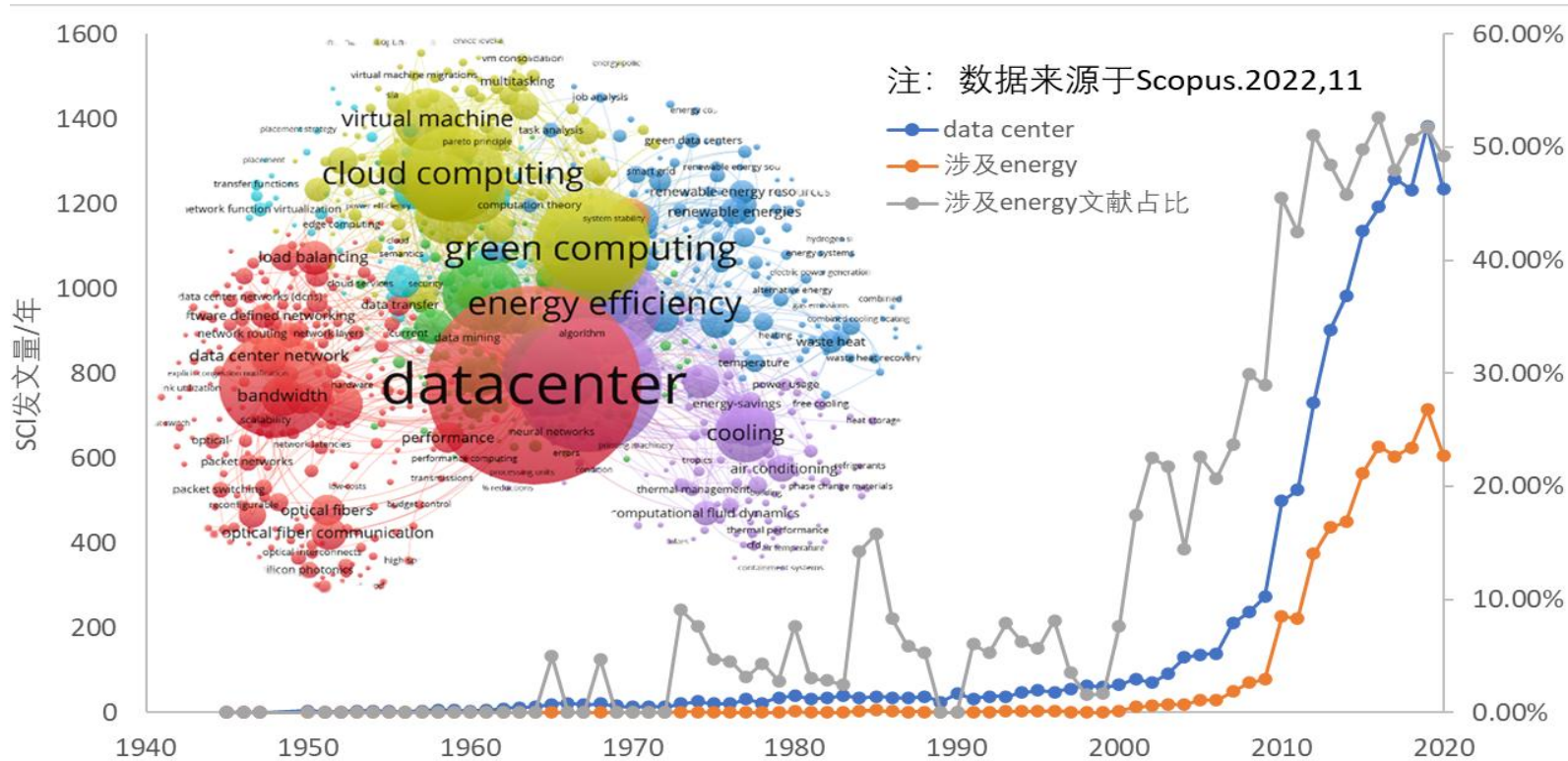


数据中心不知不觉已成为“无烟囱的电老虎”

高PUE

高WUE

高CO₂



数据中心的能效治理，关系着数字经济的可持续发展和“双碳”愿景的实现

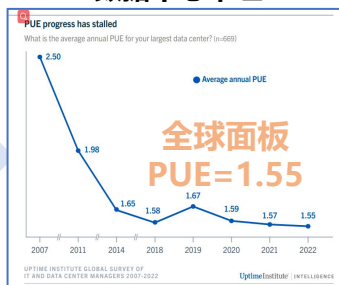
分块而治，能效低下

上游能源供应



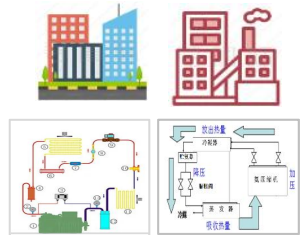
数据中心本址

电力
天然气
氢气



辅助制冷
余热回收
ORC

下游辅助设备



源头供电碳排放高

化石能源电力为主:

581g CO₂/kWh

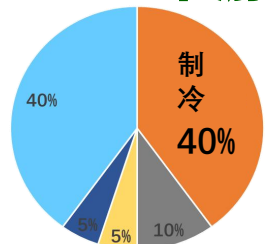
柴油备用:

1.58x10⁶ LCO₂ / L

制约碳中和愿景的实现



下游余热排放浪费



制冷系统耗电占比

老旧高能耗精密空调

制冷系统占到**40%**左右电力

中低温余热回收利用

能效联动 (负载占比与负荷需求匹配)

集约化的动态产消新模式

分块而治，能效低下

上游能源供应

数据中心本址

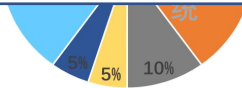
下游辅助设备

如何从系统角度实现数据中心的能效、经济、环境的多目标？

产消型数据中心综合能源系统是不是一个解决方案？

$1.58 \times 10^6 \text{ LCO}_2 / \text{L}$

制约碳中和愿景的实现

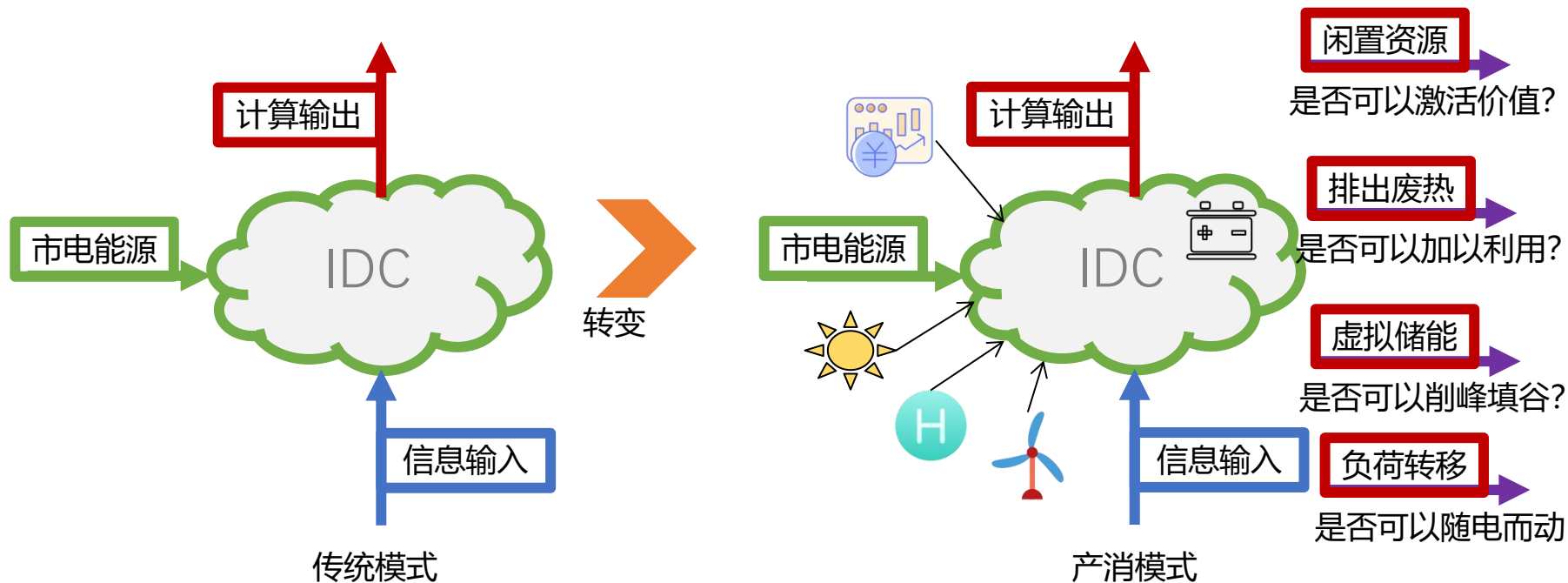


制冷系统耗电占比

能效联动（负载占比与负荷需求匹配）

集约化的动态产消新模式

构建产消型（prosumer:消费者+生产者）数据中心能源系统

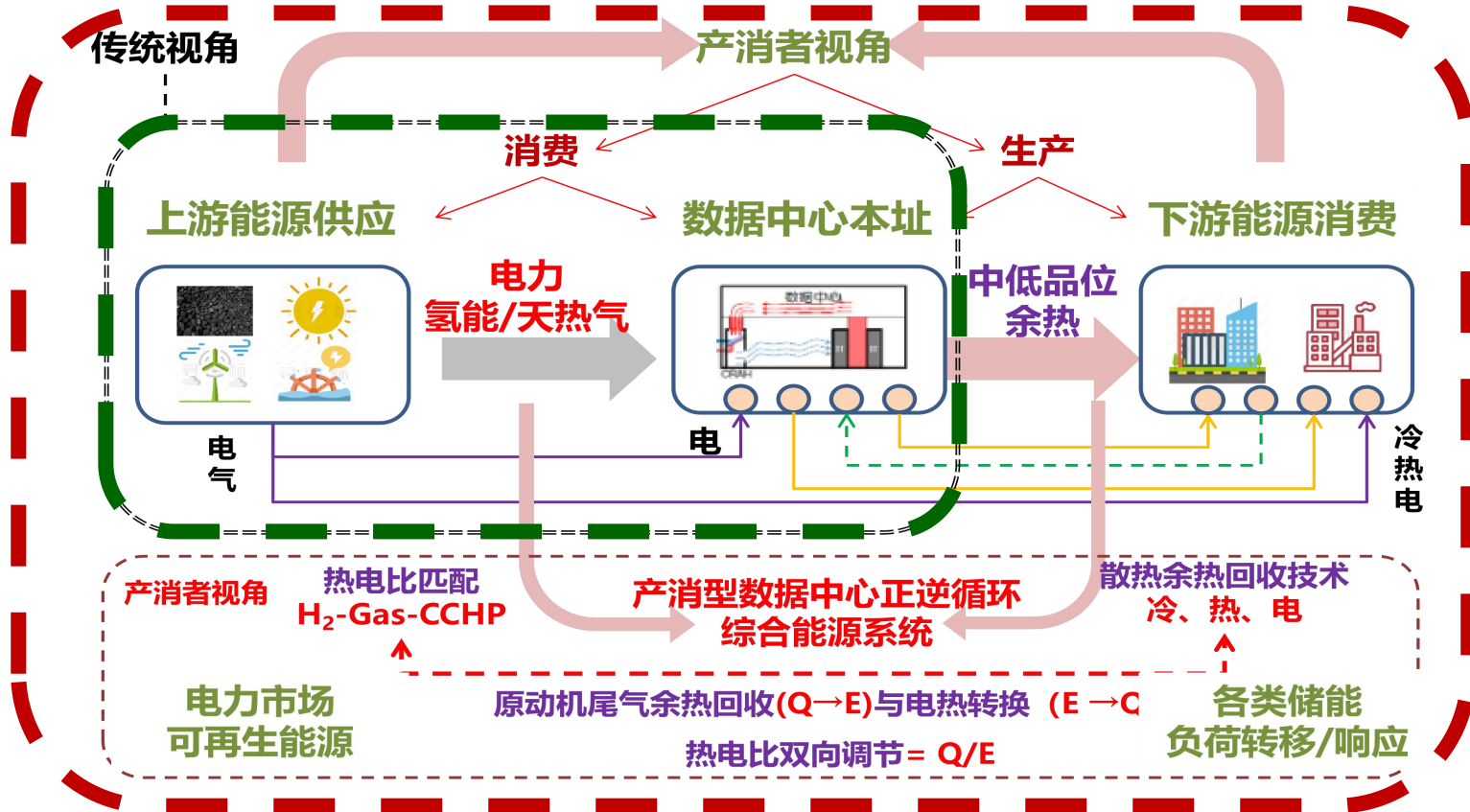


(现货/中长期) 电力 + 清洁能源 = 算力 + 柔性算力 + 热力 + 冷量 + (实体/虚拟储能)

拓扑：产消型数据中心综合能源系统



北京理工大学
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY





1.研究背景



2.研究进展



3. 研究基础

- 2.1 综合能源: 数据中心分布式综合能源规划与调度
- 2.2 动力转换: 中低温热力发电循环性能表征关联式
- 2.3 余热回收: 直膨热泵在数据中心余热的回收利用
- 2.4 负荷转移: 源网荷时空互动数据中心能效的优化

如何实现数据中心的节能降耗清洁低碳，需要认识数据中心的用能特点

- 数据中心机架的额定负荷在2 kW以上，一个大型数据中心的机架数量可达3000个以上。数据机房单位面积能耗约在800~1000 W/m²。
- 有源系统；其能耗强度是常规
- 办公大楼的数十倍以上

能耗
强度高

冷量
需求大

- 机架主机消耗的电能有一半以上变成了热能，需要大量的冷能来维持数据中心的恒温恒湿环境，数据中心的热（冷）电比往往在1左右，甚至大于1

PUE=大于1，制冷成本是数据中心一个主要的运行成本

数据中心几乎需要全年不间断运行，对电能、冷能供应的安全性要求极高，一般需要2路以上市电供应以及大量不间断电源做备用；

可靠性
要求高

热电比
稳定

数据中心能量一般用于相对恒定的计算量及空调系统，表现出全年及典型日较为稳定的负荷特征，同时空调冷负荷能耗与其他电力的能耗之比较恒定。

热电比=制冷负荷/电负荷

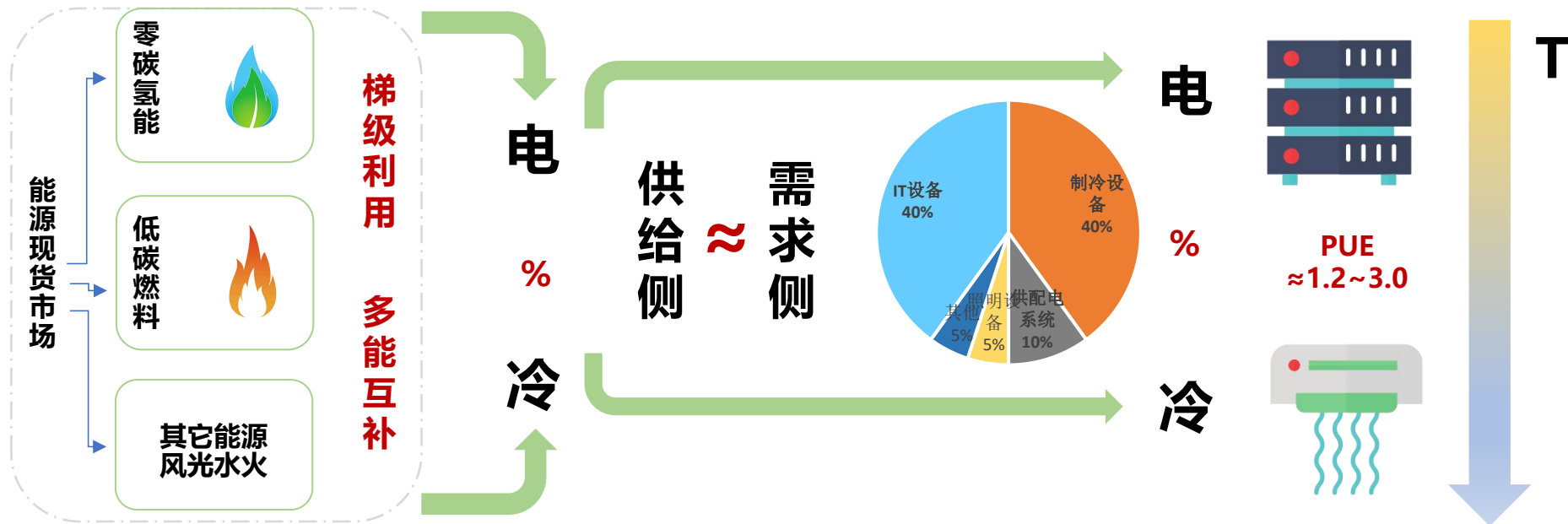
	一级	二级	三级	四级
可用性/%	99.671	99.749	99.982	99.995
年宕机时间/h	28.8	22.0	1.6	0.4

2.1 数据中心综合能源系统 (DC-IES) : 原理



北京理工大学
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

数据中心需求侧电冷需求相对均衡，碳中和倒逼低碳清洁能源的消费



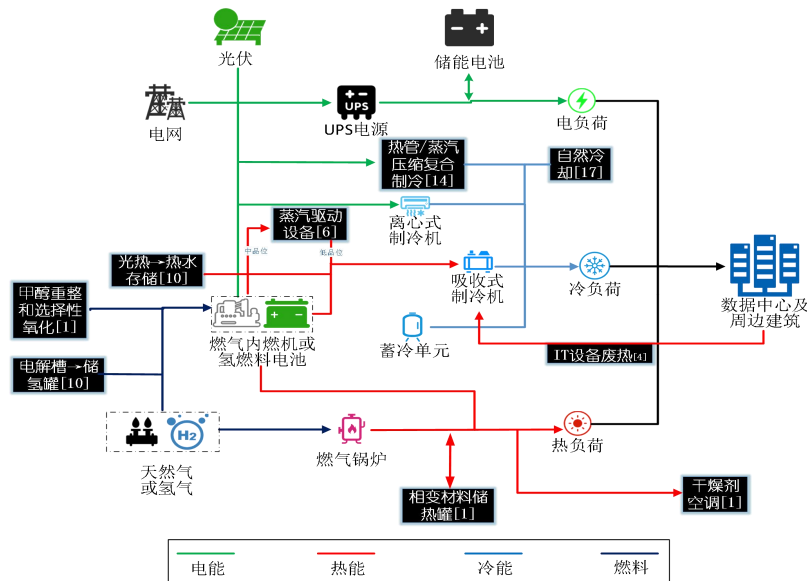
温度对口、梯级利用；分配得当、各得所需 → 综合能源系统

2.1 数据中心综合能源系统 (DC-IES) : 架构

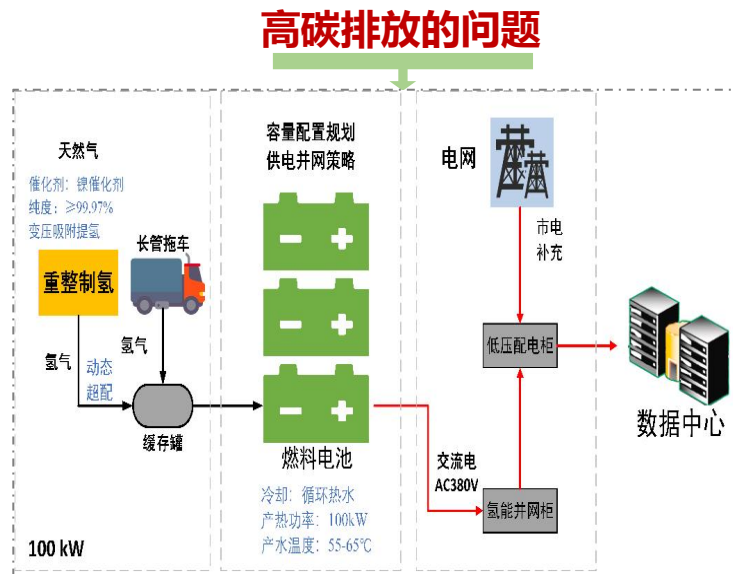


北京理工大学
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

低碳能源驱动的综合能源系统具有较高的一次能源综合效率和环境友好型



数据中心综合能源系统架构 (理论)



SOFC/PEMFC/氢内燃机 低碳供电

数据中心综合能源系统架构拓扑众多，能源转换、存储、消费的设备多样，同时面临投资大、系统复杂，以及风光电力的不确定性的挑战

2.1 DC-IES关键技术：氢内燃机+ 氢燃料电池



北京理工大学
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

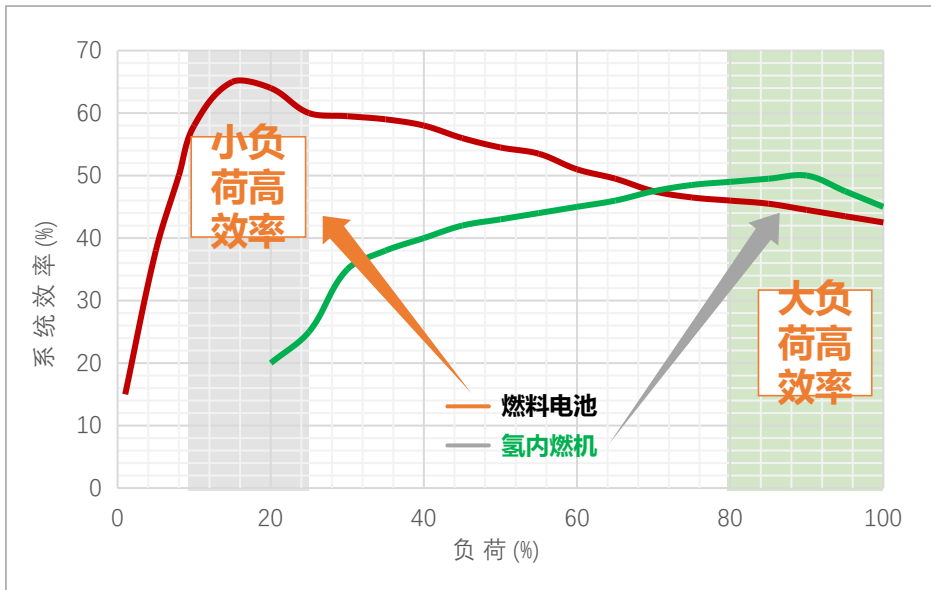
燃料电池与氢内燃机高效率工作点处于不同负荷区间，结合燃料电池小负荷高效率 and 氢内燃机大负荷高效率的优势，并综合利用工作余热，可提升混合发电系统的效率。

Ref. 孙柏刚，等



燃料电池优点

- ◆ 零排放
- ◆ 噪声低
- ◆ 效率高



氢内燃机优点

- ◆ 成本低
- ◆ 能量密度高
- ◆ 燃料适应性好

燃料电池+氢内燃机组成混合发电系统具有热效率高、功率适配灵活的优势

2.1 DC-IES关键技术：系统规划与运行调度



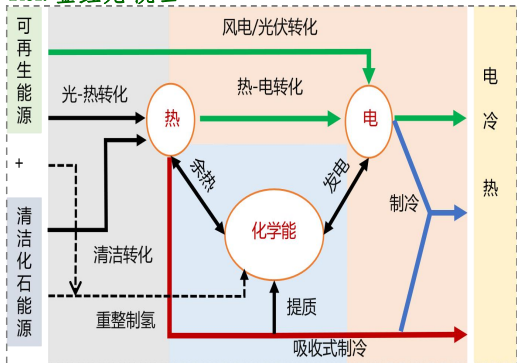
北京理工大学
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

构建氢能燃料及风光驱动数据中心综合能源系统，并考虑系统原动机余热回收、多类型储能和源荷供应的不确定性

时间与空间动态规律

异质能流分布

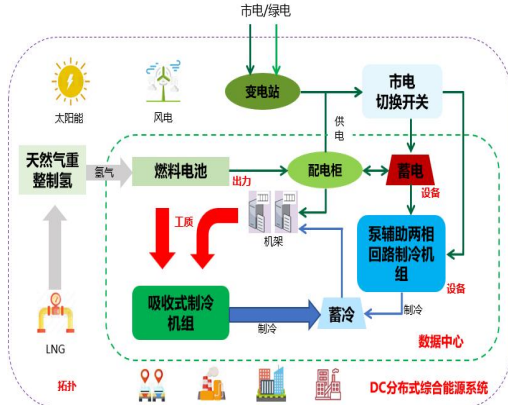
Ref. 金红光 院士



DC-IES评价体系及能量转换

分块而治高能耗问题

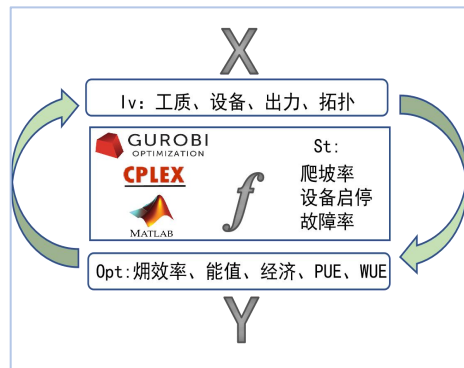
综合能源系统



DC-IES的架构设计

非线性强耦合关系

双层滚动规划与调度



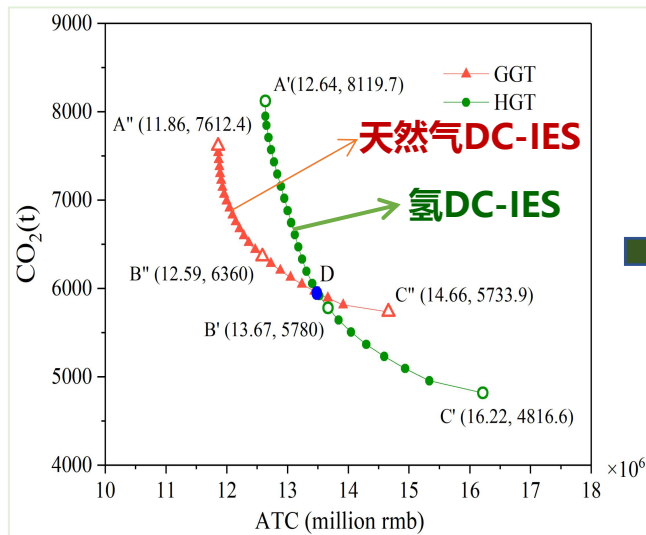
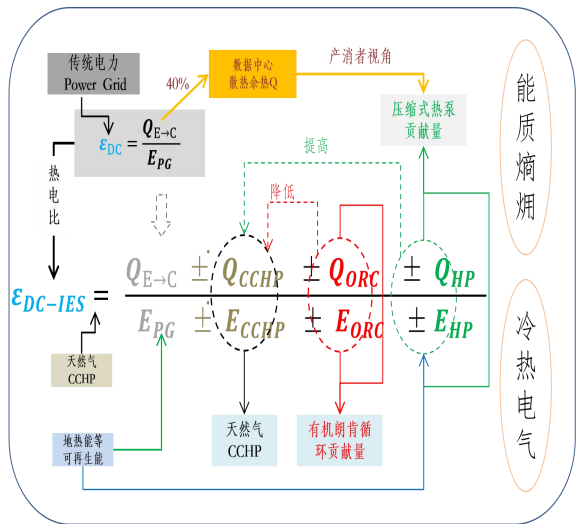
DC-IES的多目标规划及优化调度

2.1 研究结果：容量规划

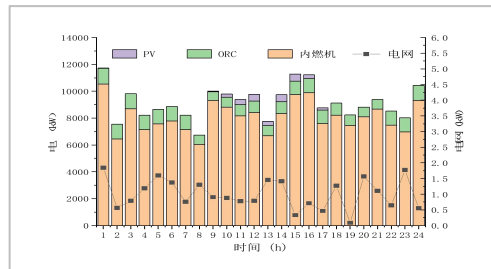
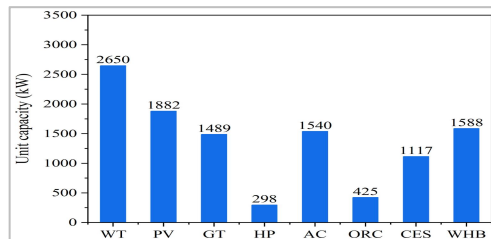


北京理工大学
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

如何实现多目标场景下DC-IES系统设备的容量规划？实现 $1+1 > 2$ ？



Ref. 王永真, 韩俊涛, 等, 动力工程学报, 2022



基于能量枢纽的建模与非劣解对比优化技术，实现不同驱动设备下系统经济、环境的多目标优化，同时，揭示了异质能源驱动下数据中心综合能源系统的适用区间。

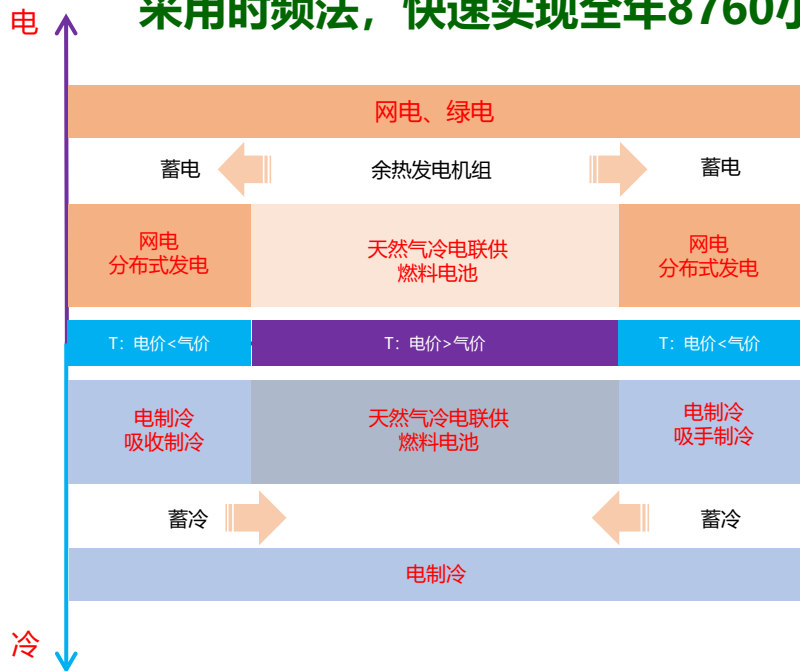
2.1 研究结果：优化调度



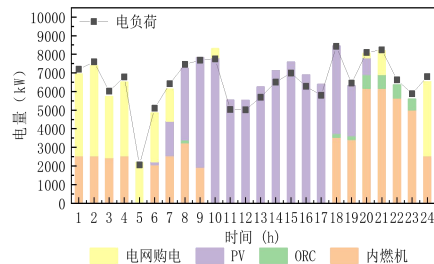
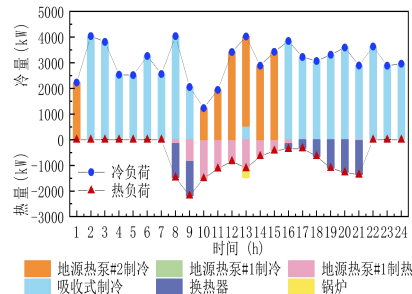
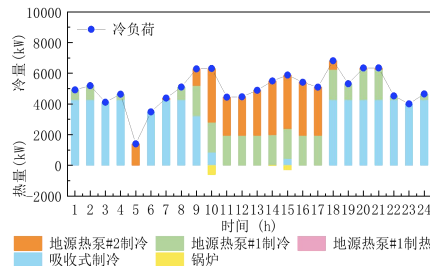
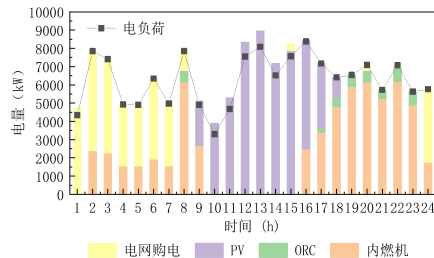
北京理工大学
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

如何实现数据中心综合能源系统的逐时调度？

采用时频法，快速实现全年8760小时多台机组的出力特性寻优，实现系统最优化跟踪



运行策略



Ref. 王永真, 王江江, 2021

揭示了系统运行随能源价格、计算负荷以及环境变化的运行规律，年节约运行成本6.2%



1.研究背景



2.研究进展



3. 研究基础

- 2.1 综合能源: 数据中心分布式综合能源规划与调度
- 2.2 动力转换: 中低温热力发电循环性能表征关联式
- 2.3 余热回收: 直膨热泵在数据中心余热的回收利用
- 2.4 负荷转移: 源网荷时空互动数据中心能效的优化

2.2 DC-IES 中低品位热能的动力回收：原理



北京理工大学
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

前述DC-IES驱动设备（燃气轮机、氢燃料电池等）存在大量的中高温余热

如何高效回收氢内燃机、
燃料电池尾气能量？

压缩空气消耗
36.85kW

压缩空气消耗
43.62kW

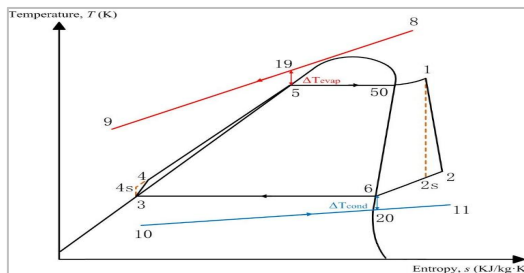
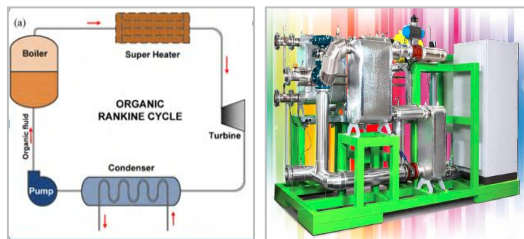
燃料电池
240kW

氢内燃机
265kW

中高温余热
120kW

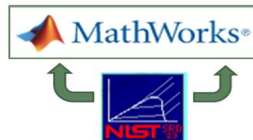
中高温余热
回收150kW

尾气驱动空压机 之外



Max:

- 1) 热力性能
- 2) 经济性能
- 3) 环境性能



St:

- 1) 安全性、环境影响、临界参数
- 2) NIST $h, s = f(xx)$
- 3) 循环过程
- 4) 冷热源

Var:

- 1) 工质 (种类 N)
- 2) 循环工况 (步长 M)
- 3) 循环过程 (数量 P)

有机朗肯循环 ORC (冷热源、物性、工况)

需要探悉ORC最优利用方式及其性能的直接表征方法
同时满足DC-IES规划与调度的求解

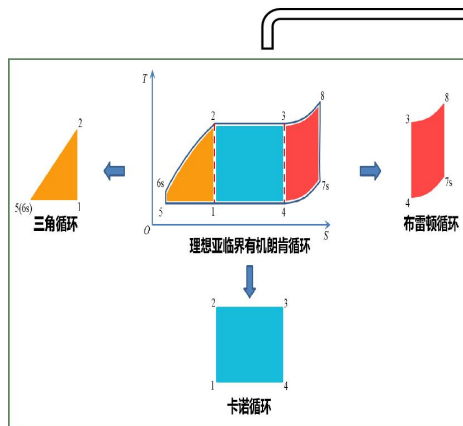
2.2 关键技术：热性能快速计算经验关联式



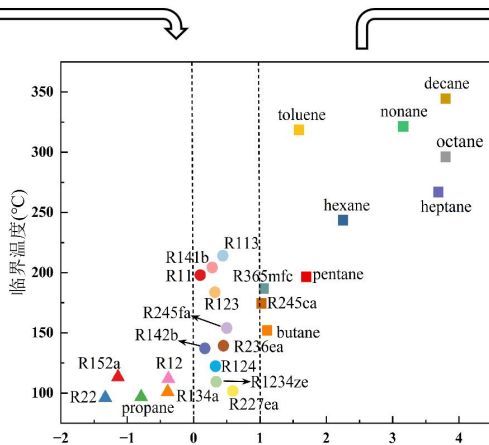
北京理工大学
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

构造了工质临界温度、偏心因子、热源温度与热力循环最优性能的经验关联式，在覆盖24个常见工质、70~260℃的热源下，预测精度超过99%。

热力循环热性能的快速表征方法



循环拆分：ORC为例



工质的干湿度

干工质 $R^2=0.991$

$$W_{\text{gan,opt}} = 2.5334 * T_{\text{cri}}^{-0.5904} * \omega_{\text{wf}}^{0.1417} * T_{\text{geo}}^{3.0442}$$

等熵工质 $R^2=0.991$

$$W_{\text{deng,opt}} = 0.0166 * T_{\text{cri}}^{1.3539} * \omega_{\text{wf}}^{-0.0156} * T_{\text{geo}}^{2.1446}$$

湿工质 $R^2=0.988$

$$W_{\text{shi,opt}} = 0.09633 * T_{\text{cri}}^{0.2913} * \omega_{\text{wf}}^{0.2846} * T_{\text{geo}}^{2.8271}$$

热性能经验关联式

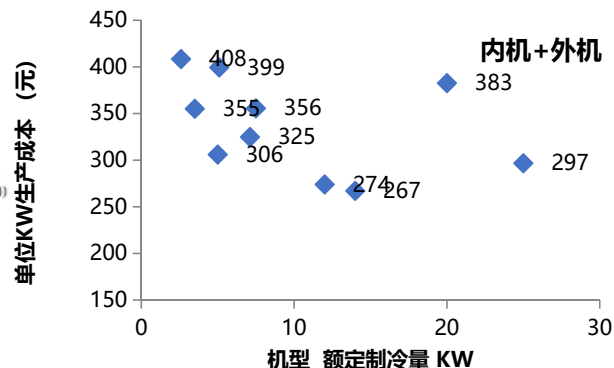
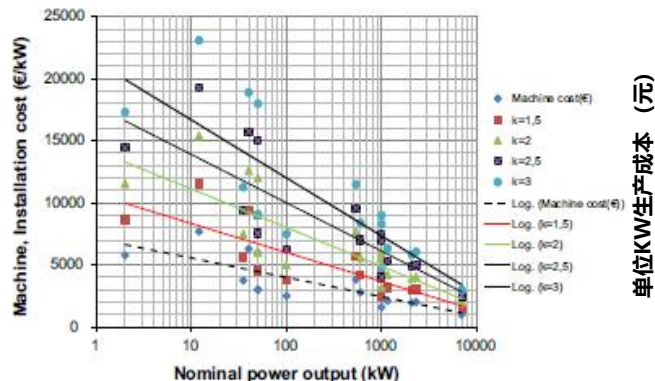
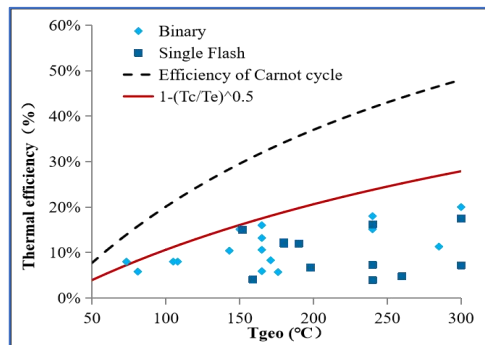
$$W_{\text{net,opt}} = C T_{\text{cri}}^m \omega_{\text{wf}}^n T_{\text{geo}}^o$$

热力循环热性能的快速表征方法，实现工质寻优

2.2 关键技术：有机朗肯循环关键设备及性能



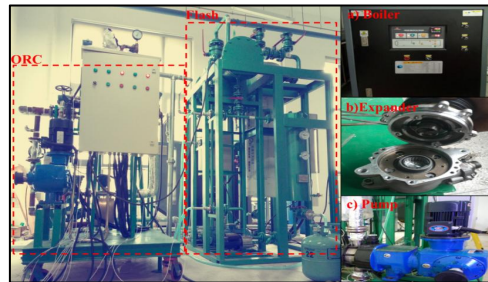
北京理工大学
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY



系统效率强耦合与余热温度与工质物性 (300°C , R245fa, 24%)，系统的经济性与膨胀机等关键部件相关($7000\text{kW} \rightarrow 400\text{kW} ??$)。



涡旋/单螺杆/双螺杆膨胀机





1.研究背景



2.研究进展



3. 研究基础

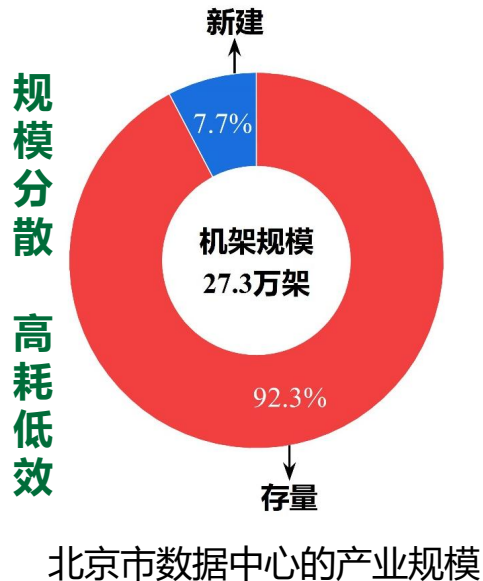
- 2.1 综合能源: 数据中心分布式综合能源规划与调度
- 2.2 动力转换: 中低温热力发电循环性能表征关联式
- 2.3 余热回收: 直膨热泵在数据中心余热的回收利用
- 2.4 负荷转移: 源网荷时空互动数据中心能效的优化

2.3 产消型数据中心的余热能回收：背景



北京理工大学
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

北京市数据中心以**存量**数据中心为主，占比**92%**以上



北京市人民政府
The People's Government of Beijing Municipality

《北京市数据中心统筹发展实施方案（2021-2023年）》

“四个一批”总体思路：**整合一批规模分散的数据中心、改造一批高耗低效的数据中心、新建一批计算型数据中心和人工智能算力中心及边缘计算中心，.....**

集约化、绿色化、智能化 是数据中心发展的核心目标

存量数据中心邻域附件存有大量的冷、热、电用户

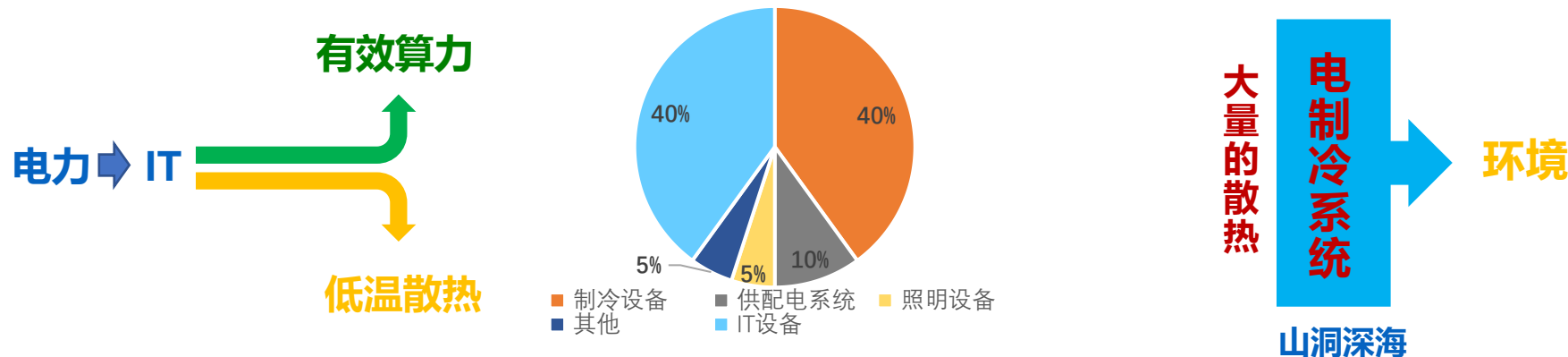
2.3 数据中心的能量守恒：低品位余热特性



北京理工大学
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

数据中心遵循热力学定律

IT设备算力运行的同时，释放了几乎等价的热能，一般再通过电制冷的方式排放到外界环境



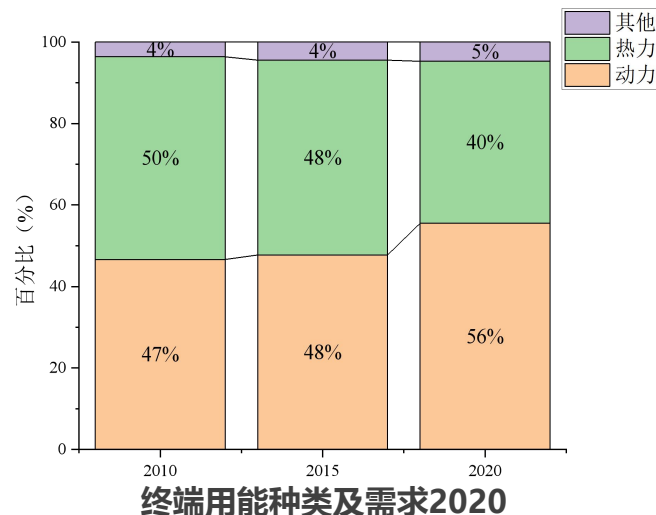
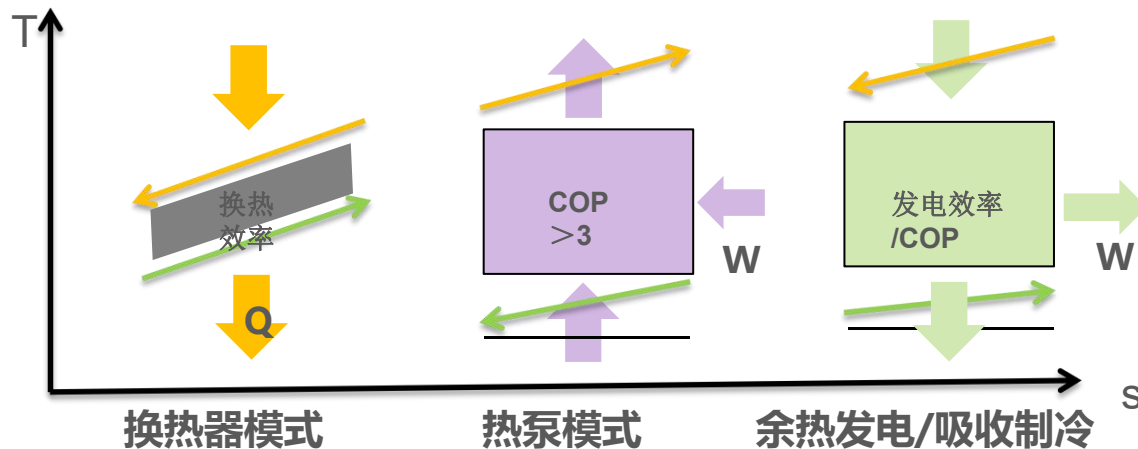
Ref: Pei Huang et al. Applied Energy, 2020

单元	微处理器	DC/DC 逆变	I/O 处理器	AC/DC 逆变	存储器	风扇	主板
散热温度 °C	85	50	40	55	70	30	40
散热比例 %	30	10	3	25	11	9	3

2.3 关键技术：基于热泵的DC余热回收



我国北方地区数据中心可回收余热总量_{2019年}可实现**3亿m²**左右建筑的供暖。



碳中和下，热泵余热利用，需要进一步考虑：

- 1) 传统压缩式热泵都需要制冷剂，温室效应，同时系统换热焓损失比较大；
- 2) 不同用户热需求特性与余热特性的动态匹配，浅层地源热泵需要充释需要平衡。

2.3 关键技术：基于CO₂直膨热泵的余热回收

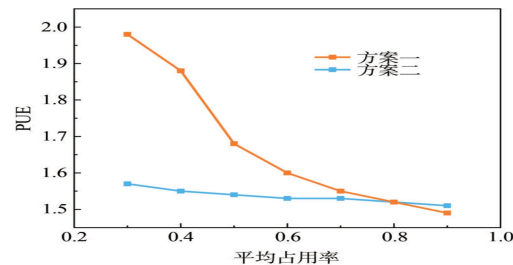
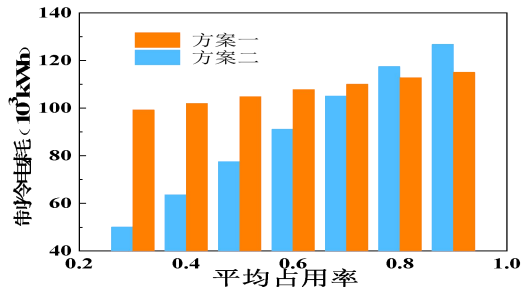
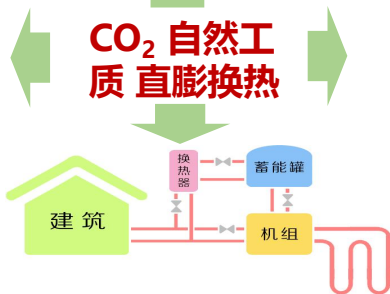


利用土壤源的长时储能特性，构建了基于**CO₂直膨地源热泵**的产消型数据中心能源系统，实现最大程度利用自然冷却，设置采用空气直接冷却、直膨式CO₂地埋管冷却和建筑供暖末端冷却三种模式。

表1 产消型运行模式

模式	运行条件	运行设备
模式一： 自然冷却	非供暖期： 室外温度低于7℃	空气冷却器
模式二： 直膨式制冷	非供暖期， 室外温度高于7℃	压缩机、地埋管、节流阀
模式三： 数据中心产热供暖	供暖期	压缩机、节流阀、供暖换热器
地源热泵制热	供暖期	压缩机、地埋管、节流阀

不同制冷剂的GWP与ODP



PUE随占用率的增大而减小，产消型PUE小于传统型，但仍高于1.4。原因在于PUE的定义不适用与产消模式，收益的电耗被计算进去了（产消型PUE）。

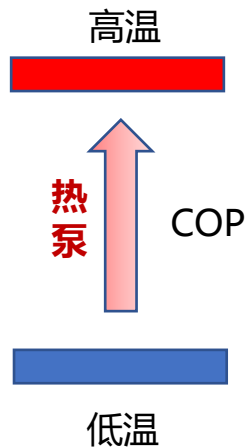
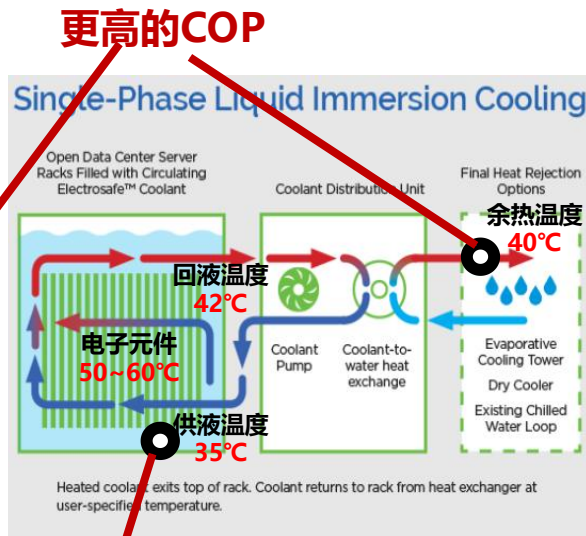
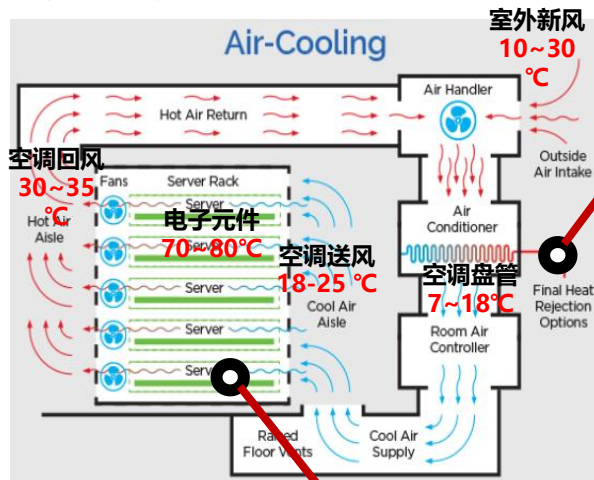
王永真, ECM, 2021

2.3 关键技术：基于液冷模式及热泵的DC余热回收



北京理工大学
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

引自：孔庆一



更高的二次侧温度

$$COP = \frac{q_1}{w_0} = \frac{q_1}{q_1 - q_2} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$

蒸发侧

空气源

地源

液冷余热

温度提升

0 °C → 60 °C

15 °C → 60 °C

40 °C → 60 °C

理论COP

5.10

6.22

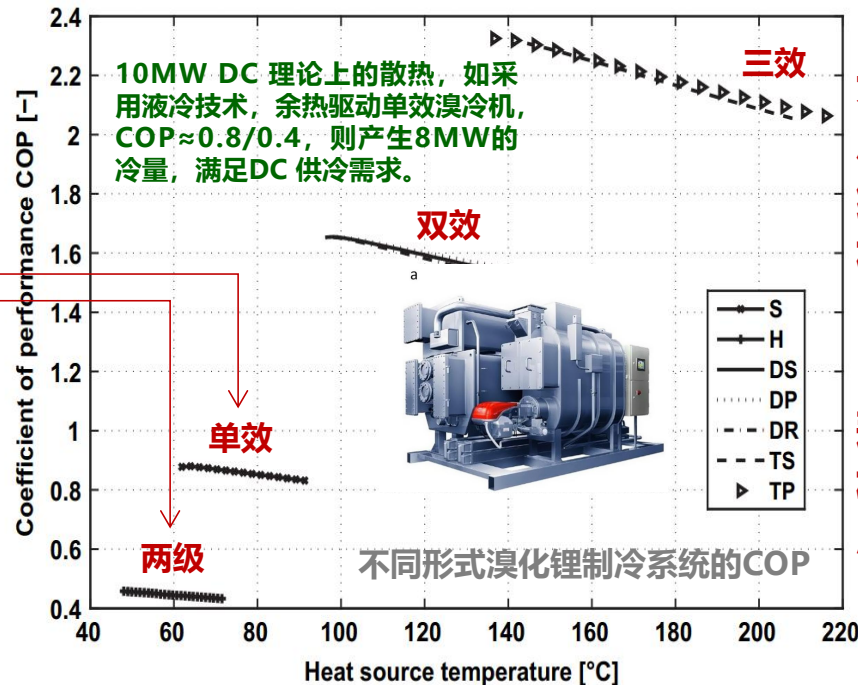
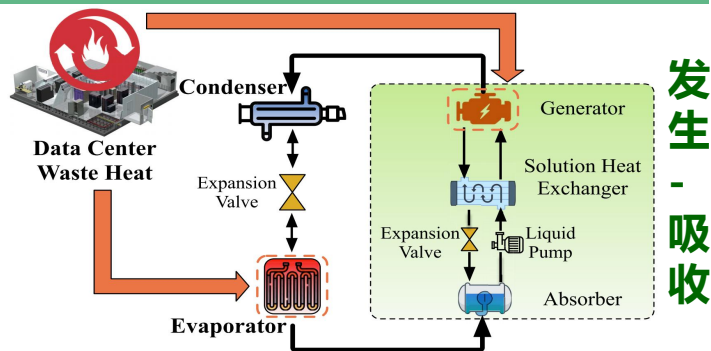
14.8

2.3 关键技术：余热能驱动的吸收式制冷技术



液冷技术给数据中心余热吸收式/吸附式制冷的条件。较高温度的IT冷却液，可以驱动单效溴冷机实现制冷，并采用数据中心的混合式冷却，可进一步提高PUE及能效。

冷却系统	位置	温度
空气冷却	冷通道	10~32℃
	热通道	50~60℃
	冷冻供水	7~10℃
	冷冻回水	35℃
液体冷却	液体供水	70~75℃
	液体回水	72-80℃





1. 研究背景



2. 研究进展



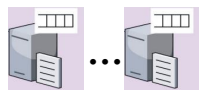
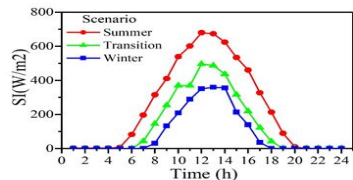
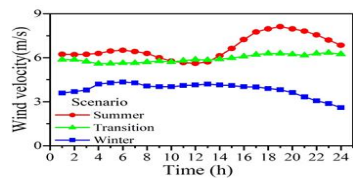
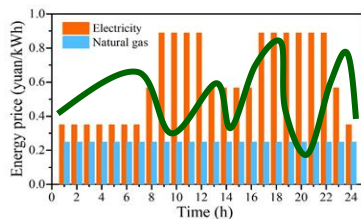
3. 研究基础

- 2.1 综合能源: 数据中心分布式综合能源规划与调度
- 2.2 动力转换: 中低温热力发电循环性能表征关联式
- 2.3 余热回收: 直膨热泵在数据中心余热的回收利用
- 2.4 负荷转移: 源网荷时空互动数据中心能效的优化

2.4 数据中心的负荷转移：原理



数据中心运行费用取决于能量价格、风光特性、任务特性与设备特性。
因此，电力现货市场/碳市场的发展，数据中心冷数据（批处理数据）和热数据（即时交互数据）
时空转移的优化潜力将被激发。

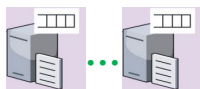


Real-time($t=0$)

— → 实时 — →

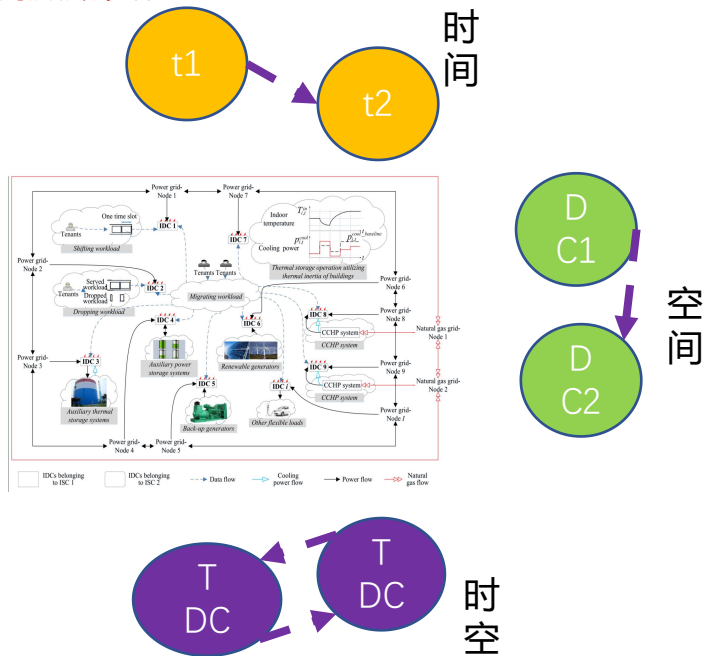
即时交互负荷

延迟处理负荷



Real-time($t > 0$)

— → 非实时 — →

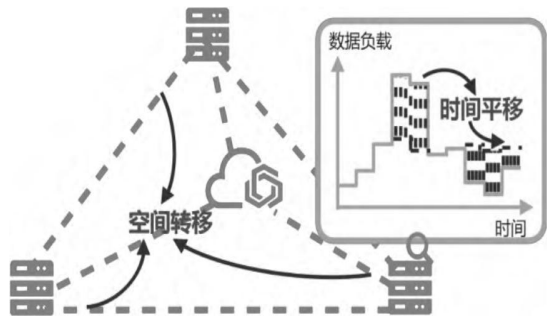


2.4 多数据中心之间的负荷转移：案例

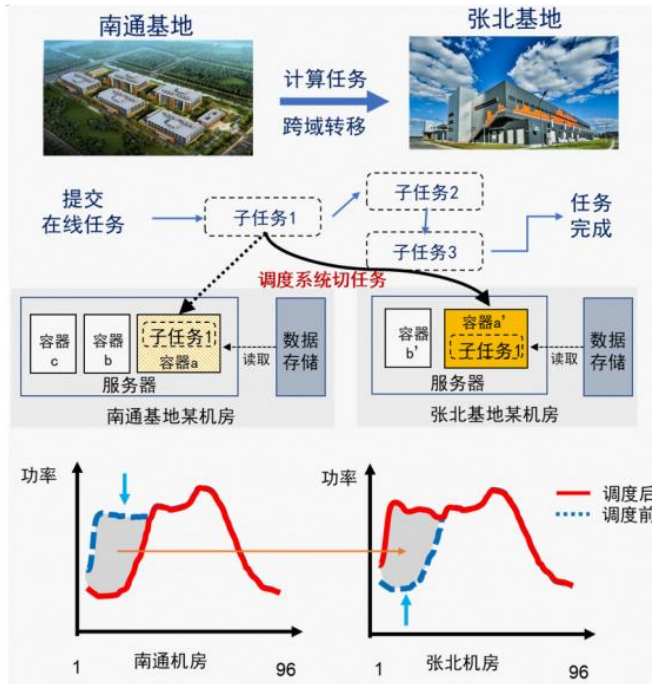
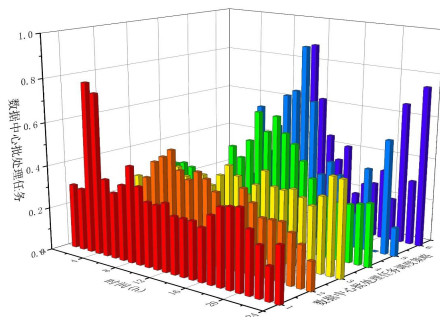
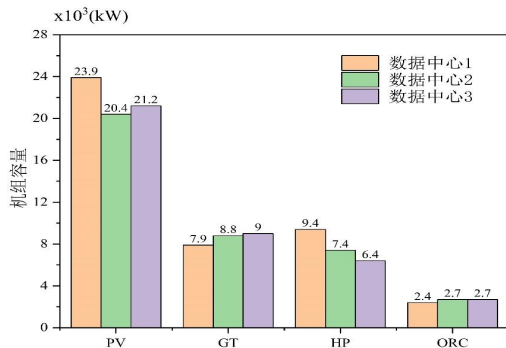


北京理工大学
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

引自，王鹏，等，电力系统自动化，2022



数据负载时空调度示意图



计算任务可分为：

- 交互任务 (TL)；
- 批处理任务，按照计算时间：A类计算任务(TM)、B类计算任务(TS)

$$l_{i,L} = \Delta t \quad l_{i,M} = 3\Delta t \quad l_{i,S} = 6\Delta t$$

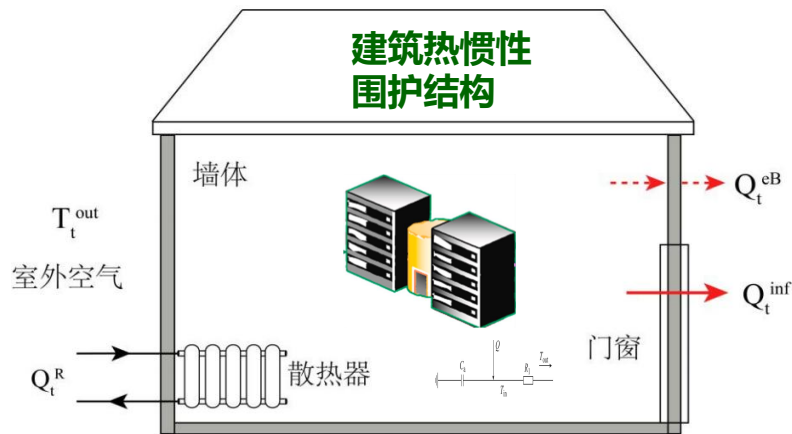
韩俊涛，王永真*，等，电力系统自动化，2022

负荷转移下三个数据中心综合能源系统的设备容量规划
年均化成本节约率：5.49%

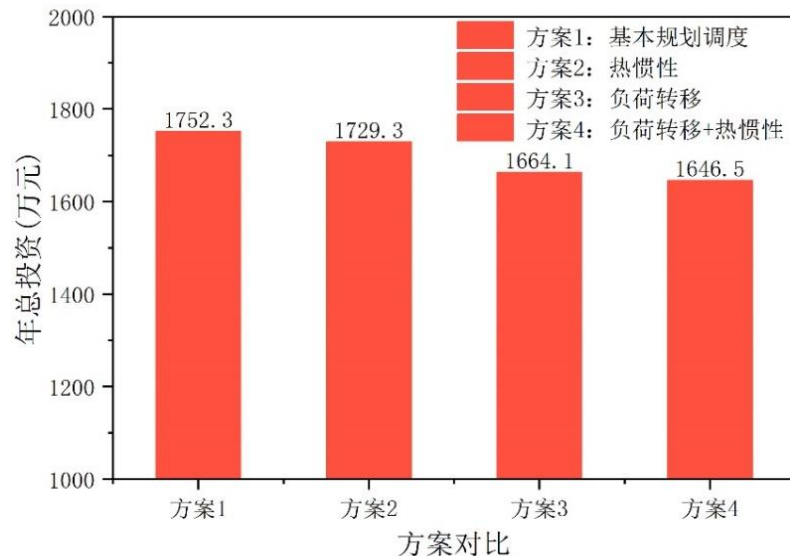
2.4 虚拟储能与负荷转移：算例



虚拟储能是利用建筑的热惯性（等效热容），基于舒适度调控与经济性优化技术参与高比例可再生能源系统的互动，实现数据中心更加经济的运行。



数据中心虚拟储能原理示意图



计及计算任务**负荷转移**+**虚拟储能**的绿色数据中心综合能源系统，系统年均化成本的节约率达到了**7.92%**



1. 研究背景

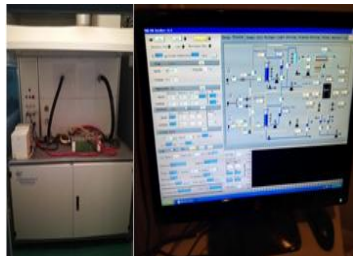
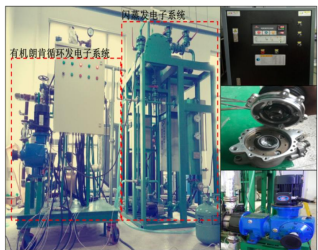


2. 研究进展



3. 研究基础

1) 产消型数据中心综合能源系统



2) 零碳氢能动力的开发与测试





北京理工大学
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

北京理工大学机械与车辆学院 能源与动力系

研究领域已经涵盖动力工程及工程热物理一级学科五个二级学科方向。致力于发展“运转速度更快、功率密度更高、承载能力更强、更加节能环保的新型动力系统”。
在**数据中心、智慧能源、燃料电池/氢内燃机动力系统、双碳**等方面积累了丰富的基础。



110人
教职工

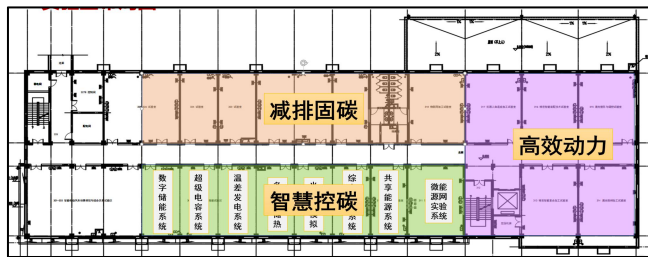
13
牵头国家/国防奖



新能源汽车
国家监管平台



能源与环境管理北京
市重点实验室



北理工
智慧控碳实验室



国家科学进步奖

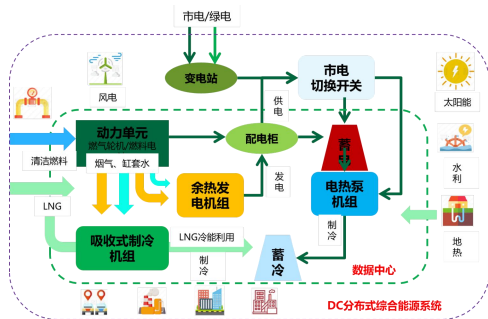
- 形成数据中心综合能源能量转化机制及动态建模、系统控制的理论和方法
- 开发了基于循环拆分的有机朗肯循环的样机、基于 CO_2 热泵数据中心余热回收技术、双级/单效溴化锂吸收余热制冷技术



ORC 余热回收机组(90℃)



水源热泵回收技术



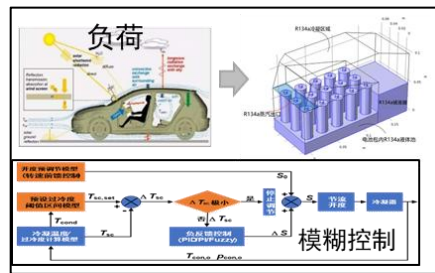
综合能源系统建模



综合能源系统建模



热泵空调实验平台

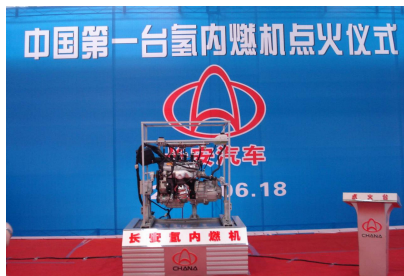


热管理集成仿真平台³⁷

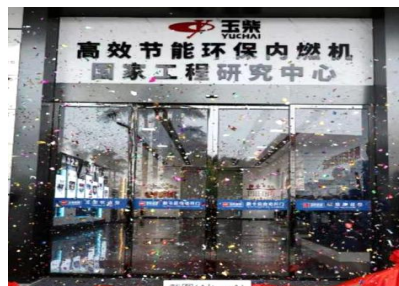
- 北理工具具有16年的氢内燃机研究基础和开发经验，其研究的成果被央视誉为“中国氢内燃机的摇篮”
- 与玉柴合作氢内燃机有效热效率达到43.15%
- 完备的PEMFC、SOFC、电化学电池系统测试平台
- 学科性公司——北京氢燃科技有限公司



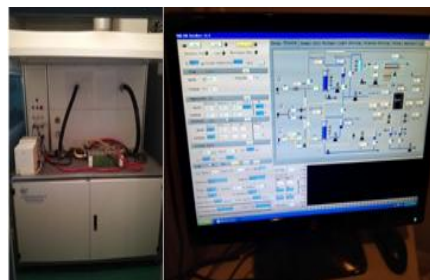
央视对北理工氢内燃机的报道



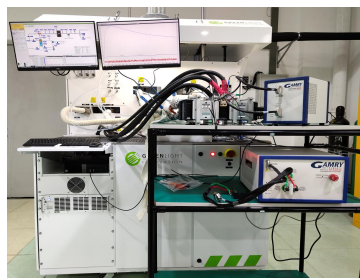
中国首台氢内燃机



国家工程研究中心

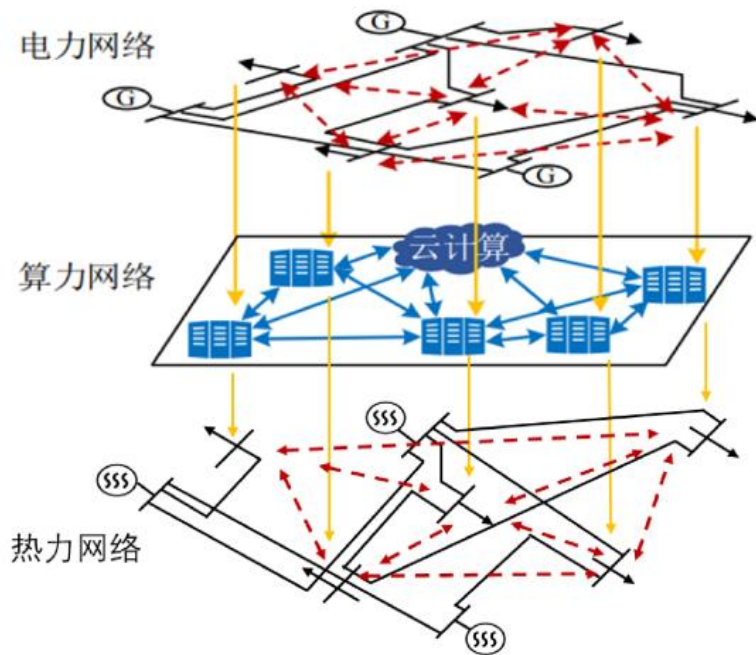


燃料电池动力系统



燃料电池测试系统

系统思维，跨界创新，三网协同赋能数据中心能效治理



修改自：陈敏

将数据中心能源系统提前纳入园区基础设施一体化建设规划，将有利于提升高质量的能源服务，提升园区环境品质 and 用户舒适度同时，对招商引资具正向促进作用。

规划前期

概念设计

综合优化

场景刻画

- **1) 规划前期：**做好相似负荷特征数据中心用能系统的案例调研，结合区域发展总规及控规（天然气管网、LNG门站和电网规划、绿电发展规划，氢能规划），从能的“量”和“质”视角，辨识数据中心内部余热资源及其周边负荷特征、资源品质以及时空分布。
- **2) 概念设计：**结合天然气联供系统、正逆循环、多能互补综合能源系统及能源互联网的基本特征，基于网络耦合及启发式方法，统筹冷、热、电、气等能源供应设备的转化特性，考虑负荷转移及虚拟储能空间，架构满足计及数据中心及其周边能源负荷需求的能源供应拓扑。
- **3) 综合规划：**确定数据中心用能的边界及约束条件。考虑灰色模型及能源价格，制定系统运行策略，基于能源枢纽规划方法，进行计及数据中心的综合能源系统的系统配置（容量及数量）、能量-经济-环境的多属性综合评价与比选。
- **4) 场景刻画：**基于业主、政府、社会等多用户需求，设计考虑运营环境及用户感受的供能价格体制，刻画计及数据中心的多能互补综合能源系统物理层、信息层和应用层的技术场景、建设模式和服务模式。



第十七届中国IDC产业年度大典
The 17th China IDC Industry Annual Ceremony

IDCC 2022

INTERNET [解码] DATA CENTER CONFERENCE 可持续发展

DECODING
SUSTAINABLE
DEVELOPMENT

第十七届中国IDC产业年度大典
The 17th China IDC Industry Annual Ceremony

THANKS

不当之处，请多指正！

产消型数据中心综合能源系统关键技术与应用王永真
副教授/博导
北京理工大学能源动力系
13661201901

