



2024中国制冷展多联机分论坛

基于混合驱动模型的多联机运行能 耗影响因素分析与能效提升研究

邵双全

2024-04-09

华中科技大学

- 1 研究背景**
- 2 混合驱动模型的构建方案**
- 3 运行能耗影响因素**
- 4 能效提升方案研究**
- 5 结论与展望**

● 国内多联机市场发展迅猛

- **2005年**：多联机的市场销售量仅为**34亿元**，在中央空调市场中占比**11.5%**
- **2020年**：多联机**460亿元**，**54.7%**
- **2021年**：多联机**523亿元**，**52.3%**

● 多联机应用现状

- 主要应用在**华东、华北、华南、华中、西南**等地区
- 多联机系统在**住宅空调**的工程增多

● 应用建筑类型



办公楼



酒店



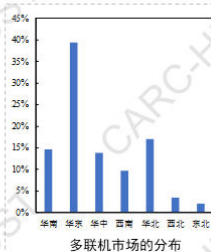
医院



别墅

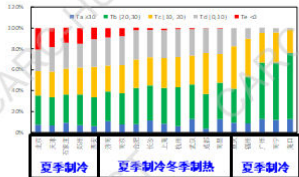


单元式住宅



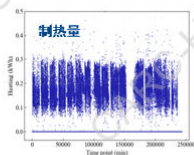
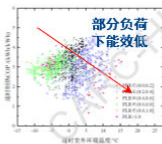
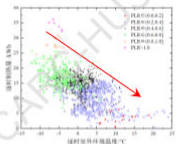
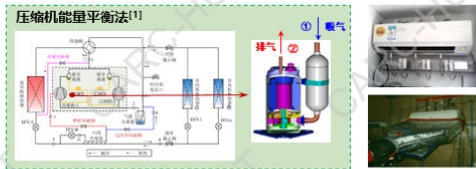
● 多工作在部分负荷/低温条件下

- 室外温度主要在10-30°C之间



● 现场测量方法的完善与大数据的应用

- 现场测量技术的不断成熟获得更可靠的数据用于分析



- 海量的建筑运行数据需要大数据技术进行数据储存与管理
- 数据挖掘技术的应用需要贴合真实的物理过程, 但至今未确立兼顾低成本、可靠性和高精度数据分析手段

多联机在部分负荷下的能效与制热量^[1]

怎么用?

[1] 张国辉. 办公建筑中多联机制冷(热)量测量方法及运行特性研究. 清华大学博士学位论文, 2020.

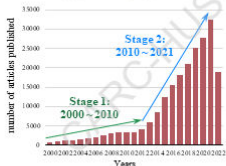
● 大数据发展的表现

- 信息开源化带来**数据存储量剧增**
- **云计算技术**的飞速发展
- **机器学习与AI技术**在基础上的突破

● 大数据逐渐渗透生活的方方面面



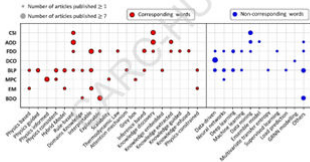
● 大数据在工科领域的实现交叉融合



The diagram of Big data and academic

- 学术领域成**指数型增长**;
- 研究大数据技术的**基础性与应用性问题**。

● 大数据在多联机系统的研究现状



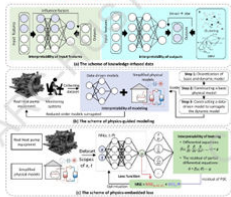
- 实际运行问题的发现仍是难点;
- 模型向混合驱动方向发展。

数据模型如何结合理论模型?

数据驱动模型



数据+理论模型 (混合驱动模型)



● 数据驱动模型：研究输入到输出的“黑箱”映射



○ 预测：根据输入进行线性组合而得到输出



○ 聚类：使用核函数计算特征相似度，如K均值等



○ 分类：使用神经网络进行特征学习，实现多分类工作

● 混合驱动模型：研究具体问题含具的物理信息与数据模型的映射

1. 利用运行数据发现有价值的知识

○ 在输入中分析影响因子，在输出中分析运行问题

2. 在损失函数中嵌入数学物理方程进行迭代求解



3. 利用数据辨识物理模型的关键参数的方法

○ 物理模型构建静态部分，数据模型构建动态部分 (利用数据反演模型参数)

- 1 研究背景
- 2 **混合驱动模型的构建方案**
- 3 运行能耗影响因素
- 4 能效提升方案研究
- 5 结论与展望

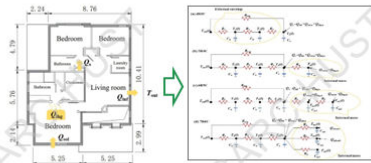
● 基于运行数据的净零能耗建筑建模

○ 数据获取与数据建模

传感器	仪器	不确定度
温度	Pt100	±0.19°C
流量计	电磁	/
空气流量计	热力学风速计	0.2 m/s
水平辐射计	总太阳辐射	5%

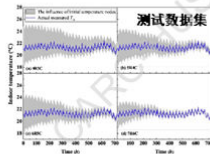
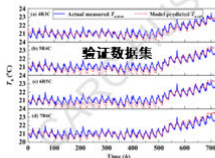
制热量

$$Q_c(t) = c_{p,air} \rho_{air} v_{air} [T_{i,a}(t) - T_{e,a}(t)] + c_{p,water} \rho_{water} v_{water} [T_{w,w}(t) - T_{e,w}(t)]$$



- 模型选择 → 电阻-电容网络 (RC模型)
- 求解算法 → 遗传算法 (GA)

○ 训练模型的验证与测试

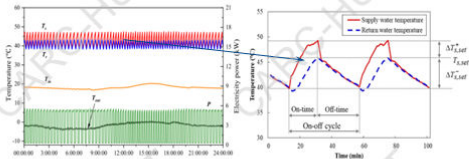


模型	训练数据集			测试数据集		
	MAE	MAPE	RMSE	MAE	MAPE	RMSE
4R3C	0.413	0.019	0.456	0.284	0.015	0.302
5R4C	0.296	0.014	0.334	0.271	0.013	0.322
6R5C	0.216	0.010	0.253	0.322	0.015	0.379
7R6C	0.137	0.006	0.183	0.229	0.011	0.289

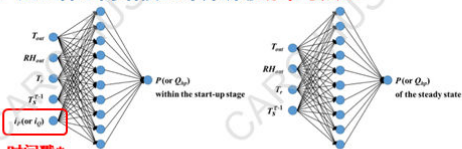
实验结论：反向参数识别和正向载荷计算，利用GA算法搜寻最优参数，7R6C结构进行净零建模时**精度最高**。

● 基于理论与数据建立功率与热量预测模型

○ 启停造成的能量损失大



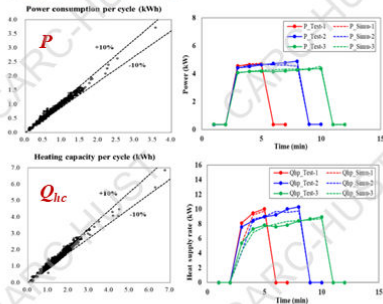
○ 建立神经网络模型计算瞬态功率与热量



时间戳*

功率与热量预测的神经网络结构。

○ 训练与测试结果展示



研究结论：为控制策略的优化提供了可靠
的模拟仿真的平台

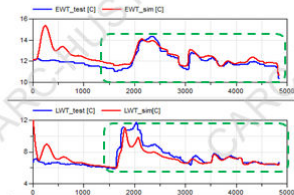
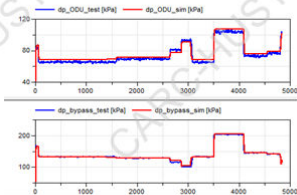
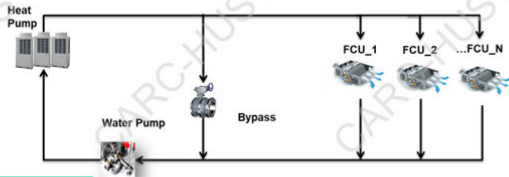
● 基于模型的中央空调系统动态仿真模型

○ 系统架构:

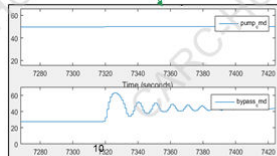
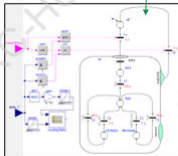
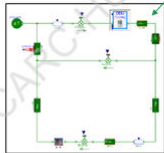
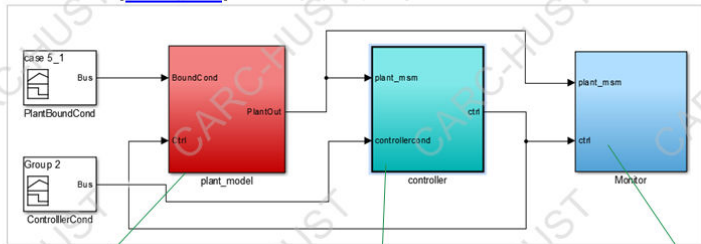
- 1~32 ODUs (冷热水机组)
- 1-128 IDUs (FCUs/AHU)
- 变频水泵
- 旁通阀

○ 模型验证:

各参数稳态与动态响应特征与系统现场测试结果有较好的吻合



● 基于虚拟机组（动态模型）的控制算法设计与优化



- 1 研究背景
- 2 混合驱动模型的构建方案
- 3 运行能耗影响因素
- 4 能效提升方案研究
- 5 结论与展望

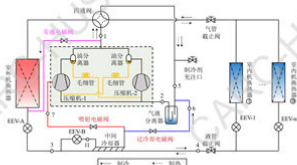
● 负荷与能耗调研

○ 数据采集与获取：在线测试平台



- 室内机：8个变量
- 室外机：34个变量
- 选择多个地区调研

➢ 选择北京、上海和武汉三个不同气候区的典型代表，这些建筑由办公室、餐厅、医院等组成。

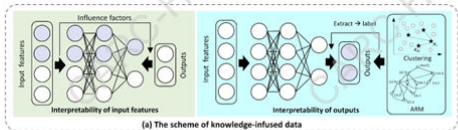


多联机系统示意图

○ 所选变量摘要

所选重要变量	测量数据范围	所选重要变量	测量数据范围
排气压力Pd(bar)	0~37.9	系统制热量Q(kWh)	0~0.737
吸气压力Ps(bar)	0~18.8	系统耗电量P(kWh)	0~0.721
排气温度Td(°C)	0~107	室内温度Tin(°C)	6~24
吸气温度Ts(°C)	-22~38	设定温度Tset(°C)	20~30
压缩机频率f(Hz)	0~110.7	室内风速(挡)	0~3

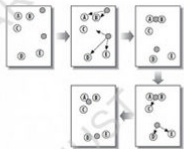
○ 混合驱动模型在能耗问题挖掘中的应用方法



● 数据预处理与分类

● K均值聚类

欧氏距离:
$$E = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in C_i} \|x - u_i\|_2^2$$



● 评价指标 (DB指数)

$$DBI = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \max_{j \neq i} \left(\frac{\text{avg}(C_i) + \text{avg}(C_j)}{d_{\text{cen}}(u_i, u_j)} \right)$$

➢ DB指数越**小**则表明聚类效果**越好**

● 聚类分析

○ 分类依据

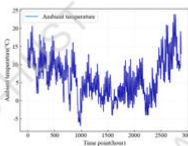
■ 热负荷变化

○ 季节性变化

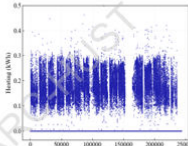
○ 机器学习能耗分析: 负荷现状与能耗现状

季节性变化 ⇌ 室外环境温度 ①

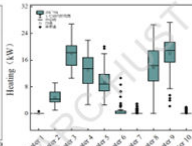
随机变化 ⇌ 用户行为、调节策略等 ②



天气分布时序图



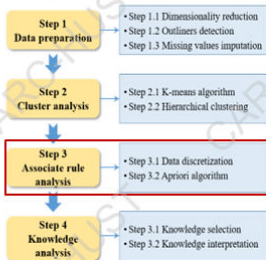
能耗时序图



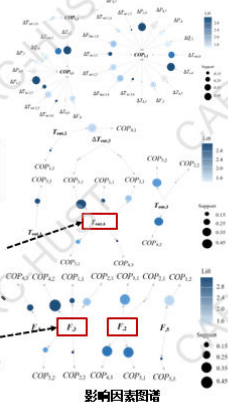
能耗聚类结果分布

■ 探明热负荷的宏观**季节性**和**区域性**分布

关联规则挖掘运行问题



- 扰动因素: **室外温度**, 室内温度、设定温度等人员行为
- 调节因素: **压缩机运行频率**、电子膨胀阀开度等



1、控制策略识别:

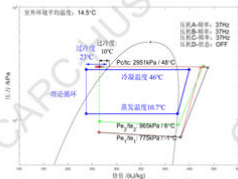
- ✓ 成功辨别到**阀门的开/关控制策略**;
- ✓ 成功识别到**压缩机频率的控制策略**;
- ✓ 识别到**风机与压缩机的协同控制**

2、低效的运行模式识别:

- ✓ 外机参数的影响比室内机参数的影响**更直观**;
- ✓ 影响制热COP的因素众多, 如室内外机组的各测点温度、压力, 系统功耗和负荷, **压缩机转速**, 以及**室外环境温度**等;

多联机实际运行问题与优化总结

● 系统结构设计的问题：环温低/部分负荷

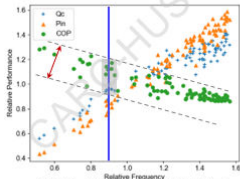


建立基于实际运行状态的理论循环

确定实际循环与理论循环的差距

调节结构参数匹配优化

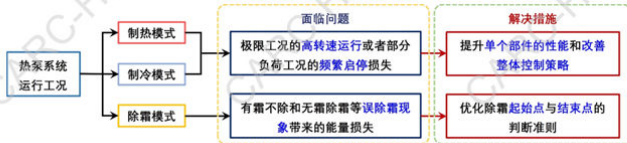
● 控制策略的问题：压缩机调频欠佳



- **存在问题：**
在相同平均频率下能效存在较大差异
- **解决方案：**
通过时序聚类寻找动态调控品质的上限

控制节能潜力很大

● 多联机系统的优化方向：① 优化系统结构 ② 不同种控制策略的优化



- **优化最终目标：**
 - 系统结构的设计和匹配接近实际过程的理想循环；
 - 研究调控的最优选择实现自适应调控。

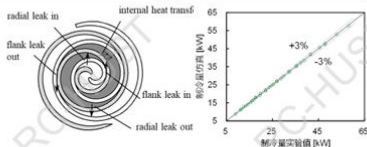
- 1 研究背景
- 2 混合驱动模型的构建方案
- 3 运行能耗影响因素
- 4 能效提升方案研究
- 5 结论与展望

带中间排气的涡旋压缩机 (针对部分负荷)

● 高保真涡旋压缩机模型

○ 提出新的压缩过程控制方程:

$$\textcircled{1} \frac{dh}{d\theta} = \frac{\left(\frac{\partial \rho}{\partial p}\right)_h (\sum_i \dot{m}_{in,i} (h_{in,i} - h) + \dot{Q}) + (\sum_i \dot{m}_{in,i} - \sum_i \dot{m}_{out,i}) - \rho \omega \frac{dV}{d\theta}}{\omega V \left(\rho \left(\frac{\partial \rho}{\partial p}\right)_h + \left(\frac{\partial \rho}{\partial h}\right)_p \right)}$$
$$\textcircled{2} \frac{dp}{d\theta} = \frac{\sum_i \dot{m}_{in,i} - \sum_i \dot{m}_{out,i} - \rho \omega \frac{dV}{d\theta} - \omega V \left(\frac{\partial \rho}{\partial h}\right)_p \frac{dh}{d\theta}}{\omega V \left(\frac{\partial \rho}{\partial p}\right)_h}$$



涡旋压缩机示意图

模型与实验对比验证图

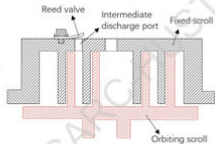
- 同时适用于单相和两相压缩;
- 数值计算更高效、准确度更高。

● 中间排气模型

○ 中间排气阀设计

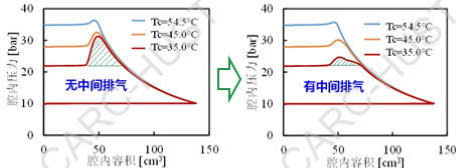
- 在静涡旋盘壁面设中间排气口;
- 中间排气口外侧设置簧片阀;
- 簧片阀门开度的控制为:

$$\chi = \begin{cases} 0 & \Delta p_{idv} \leq 0 \\ \Delta p_{idv} / \Delta p_{full} & 0 < \Delta p_{idv} < \Delta p_{full} \\ 1 & \Delta p_{idv} \geq \Delta p_{full} \end{cases}$$



带中间排放阀(簧片阀)的涡旋压缩机示意图

○ 中间排气阀的作用



- 在过压缩工况中间压缩腔内压力 > 排气压力, **开启中间排气**;
- 其他工况中间压缩腔内压力 < 排气压力, **无中间排气**。

● 涡旋压缩机参数设置

○ 待优化参数:

- 中间排气口 位置*、大小、面积分布

○ 压缩机几何参数: R32 低压腔压缩机

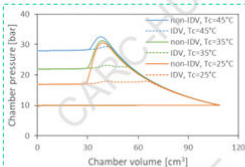
参数	数值
基圆半径	2.8648 mm
涡旋壁厚	4.20 mm
涡旋体高度	40.6 mm
涡旋圈数	3.00
标称转速	60 Hz

○ 计算工况: 制冷和制热

模式	蒸发温度	冷凝温度	压比
制冷	7°C	25~50°C	1.67 - 3.11
制热	-15~5°C	40°C	2.60 - 6.11

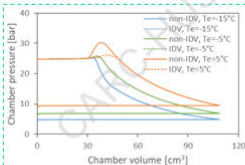
● 涡旋压缩过程特性

○ 制冷模式下IDV与非IDV的对比:



- 非 IDV 压缩机:
过压损失大, 且冷凝温度越低, 过压损失越大。
- IDV 压缩机:
过压损失小, 最大压力略高于排气压力。

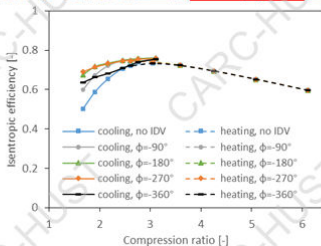
○ 制热模式下IDV与非IDV的对比:



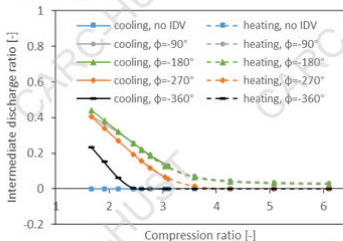
- 蒸发温度越低, 过压缩损失越小;
- 蒸发温度越高, IDV与非IDV 区别越小;
- 压缩比越高, 过压损失越小。

● 中间排气口位置对不同压比工况性能的影响

- 中间排气口的相对位置在 -360° 到 -90° 之间变化，等效水力直径为4mm



冷却条件和加热条件下不同IDV位置的等熵效率随压缩比的变化

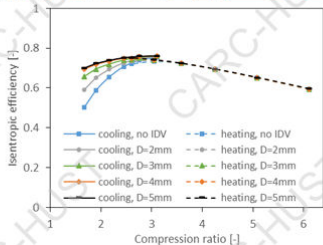


冷却条件和加热条件下不同IDV位置的中间排放比随压缩比的变化

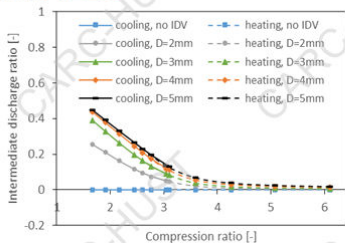
- **研究结论：** IDV位置的最佳范围为 -270° 至 -180° ，在低压缩比条件下最大等熵效率改进约为19%，且中间排气口太靠前时，中压比工况排气口无法开启

● 中间排气口大小对不同压比工况性能的影响

- 中间排气口的等效水力直径为2mm至5mm，相对端口位置为-225°



冷却条件和加热条件下不同IDV直径的等熵效率随压缩比的变化



冷却条件和加热条件下不同IDV直径的中间排放比随压缩比的变化

- **研究结论：**较优中间排气口当量直径处于3~4mm区间，当量直径<3mm时，排气口继续减小排气阻力明显增大，造成性能衰减，当量直径>4mm时，排气口继续增大排气阻力影响减小，结构强度降低。

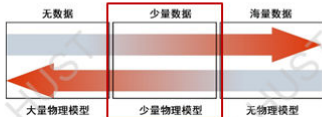
● 多联机空调系统动态仿真模型

○ 基本部件情况:

- 多联机: 1台室外机、4台室内机
- 压缩机: 无中间排气压缩机和有中间排气压缩机

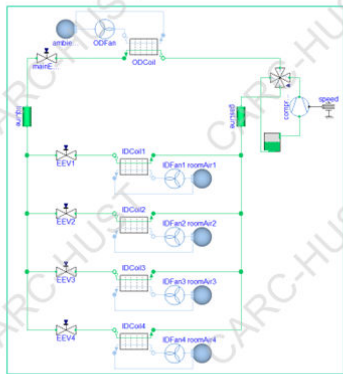
○ 模型与数据耦合方法的优点:

- 嵌入物理模型提高可靠性;
- 减小纯数据模型建模的人工复杂性。



○ 模型构建方法:

变频压缩机模型	构建物理模型, 通过数据辨识带求参数
多联机模型	(数据为主, 模型为辅)
换热器模型	一维分布参数模型

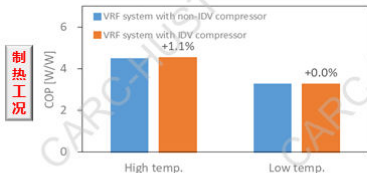
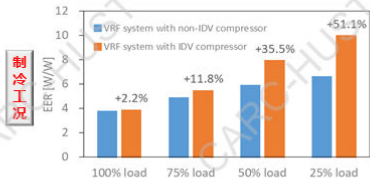


多联机空调系统模型结构图

● 多联机空调系统动态仿真模型

- 实验工况条件：部分负荷工况考虑了室外温度的变化

实验名称		室内空气		室外空气	
		干球温度(°C)	湿球温度(°C)	干球温度(°C)	湿球温度(°C)
制冷工况	100% 负载	35.0	23.9	26.7	19.4
	75% 负载	27.5	18.7		
	50% 负载	20.0	13.9		
	25% 负载	18.3	11.6		
制热工况	高温	8.3	6.1	21.1	15.6
	低温	-8.3	-9.4		



■ 部分负荷工况EER提升性能提升2.2%~51.1%

■ 部分负荷工况COP提升性能提升不明显

- 1 研究背景
- 2 混合驱动模型的构建方案
- 3 运行能耗影响因素
- 4 能效提升方案研究
- 5 结论与展望

- 多联机产品应用广泛，是中央空调的主力产品，也是节能减排的重点，目前建筑运行数据剧增，需结合大数据技术开展实际运行能耗分析
- 通过聚类分析与关联规则挖掘等大数据手段，探明实际能耗和能效的情况，有效挖掘多联机的运行问题在于低温/部分负荷能效低以及压缩机变频控制不佳，难以准确匹配扰动
- 通过数据与模型耦合的方法建立稳定、可靠和真实的多联机动态模型，是开展系统设计和控制策略研发的基础
- 通过变压比设计可有效降低涡旋压缩机的过压缩损失、提升部分负荷工况下的EER/COP

Thank you 

邵双全

华中科技大学 教授

shaoshq@hust.edu.cn