

数据中心暖通系统 AI 节能开放架构 白皮书

开放数据中心委员会
2023-09 发布

版权声明

ODCC（开放数据中心委员会）发布的各项成果，受《著作权法》保护，
编制单位共同享有著作权。

转载、摘编或利用其它方式使用 ODCC 成果中的文字或者观点的，应注明
来源：“开放数据中心委员会 ODCC”。

对于未经著作权人书面同意而实施的剽窃、复制、修改、销售、改编、汇
编和翻译出版等侵权行为，ODCC 及有关单位将追究其法律责任，感谢各单位
的配合与支持。

www.ODCC.org.cn

编写组

项目经理:

杨朴 腾讯科技（深圳）有限公司

工作组长:

岳上 腾讯科技（深圳）有限公司

贡献专家:

李鼎谦 腾讯科技(深圳)有限公司

粟海翰 腾讯科技(深圳)有限公司

吴越 腾讯科技(深圳)有限公司

王者 腾讯科技(深圳)有限公司-犀牛鸟项目

郑万富 腾讯科技(深圳)有限公司-犀牛鸟项目

吴偲 腾讯科技(深圳)有限公司-犀牛鸟项目

王振 中国移动通信有限公司

杨清 中国移动通信有限公司

朱青山 中国移动通信有限公司

员东照 中国移动通信有限公司

翟骏 中国电信股份有限公司北京分公司

龙丽萍 中兴通讯股份有限公司

段凯文 中兴通讯股份有限公司

刘明 中兴通讯股份有限公司

徐雷 阿里云计算有限公司

颜雨潇 阿里云计算有限公司

许可欣 中国信息通信研究院

刘大闯 深圳市中电电力技术股份有限公司

前言

数据中心耗能已经占据全社会总用电量的 3%左右，其中暖通系统最多可占据数据中心耗能的 40%，实践证明 AI 节能可实现数据中心制冷效率的 10%以上优化，AI 节能作为 PUE 综合优化的重要组成部分，成为实现双碳目标和 ESG 能源可持续的关键技术手段。然而 AI 模型黑盒化和封闭数据源导致大量定制型项目，形成新的数据孤岛，缺乏统一节能效率评估和模型成熟度定义导致 ROI 和可靠性客观分析困难，阻碍了 AI 节能在数据中心行业的应用。

为推进 AI 节能在数据中心行业大规模推广覆盖，特编制数据中心暖通系统 AI 节能开放架构白皮书。通过开放语义数据集、开放仿真平台和智能调优策略增强 AI 节能模型的可解释、可迁移和自学能力；构建安全沙箱、数据治理和主动运维确保暖通调优系统可靠性；并统一节能效率评估和模型成熟度评估，提升数据中心业主和运营方采纳 AI 节能的信心并降低决策成本；开放建模方法和调优策略，提供数据中心行业暖通系统 AI 节能最佳实践。AI 节能开放架构有助于加速 AI 调优的开发研究和部署应用，实现 PUE 综合优化和节能降本，在可靠运营的前提下实现能源的可持续发展，为双碳目标做出贡献。

本白皮书从暖通系统机理模型出发，定义 AI 节能总体开放架构包括八个核心模块，分别阐述开放语义数据集、白盒安全沙箱、开放仿真平台、数据治理规范、智能调优策略、节能效率评估、调优系统可靠性和模型成熟度等级。

本白皮书可作为数据中心业主、运营经理、暖通工程师、BA 系统供应商、节能服务商、开发人员、高校研究和相关节能从业者的技术参考。

由于时间仓促，水平所限，错误和不足之处在所难免，欢迎各位读者批评指正。如有意见或建议请联系编写组。



www.ODCC.org.cn

目 录

版权声明.....	I
编写组.....	II
前 言.....	III
一、 术语定义.....	1
二、 项目背景.....	2
三、 AI 节能开放架构	4
(一) 制冷系统	4
(二) AI 节能.....	4
(三) AIops 平台.....	5
(四) 开放架构	6
四、 开放语义数据集.....	10
(一) BRICK 结构定义.....	10
(二) BRICK 建模方法.....	11
(三) 暖通设备模型	17
(四) 查询 BRICK 模型	24
(五) 生成开源数据集	28
(六) 种子数据集	29
五、 白盒安全沙箱.....	30
(一) 安全沙箱原理	31
(二) 数据健康度约束	32
(三) 策略寻优过程约束	33
(四) 策略寻优结果约束	35

(五) 实时控制硬逻辑	35
六、 开放仿真平台	38
(一) 仿真语言的选择	38
(二) Modelica 仿真平台	39
(三) 冷源系统组件	40
(四) 仿真系统集成	55
(五) 冷源仿真系统	56
七、 数据治理规范	67
(一) 标准测点表	67
(二) 采集协议	69
(三) 控制协议	70
(四) 数据处理	70
(五) 数据质量	72
(六) 数据治理	73
(七) 数据校准	75
(八) 寻优变更	76
(九) 数据训练	78
八、 智能调优策略	79
(一) “数据+机理” 双驱动模型	80
(二) 数字孪生预测模型	81
(三) AI 节能算法	81
(四) BA 水冷自控系统 AI 控制	82
(五) 群控系统优化策略	91
(六) 精密空调 AI 控制策略	93

九、 节能效率评估.....	97
(一) 能效定义	97
(二) 节能公式	97
(三) 计算方法	99
十、 调优系统可靠性.....	102
(一) 潜在失效模式分析	102
(二) 失效风险	103
(三) 交付测试	105
(四) 应急预案	106
(五) 设备健康度	106
(六) 动态可靠性	108
(七) 主动运维服务	109
十一、模型成熟度等级.....	110
(一) 成熟度评估维度	111
(二) 成熟度等级定义	111
(三) 可解释的 AI 策略	112

数据中心暖通系统 AI 节能开放架构白皮书

一、术语定义

表 1

术语	定义
数据中心	Data Center，特指集中承载企业 IT 信息服务或云计算的物理空间，通常由房间、楼宇和园区组成，通过机架安置服务器、网络和存储等 IT 设备，并提供必要的电力、制冷、动环、能源、安防和消防子系统支撑。
ODCC	开放数据中心委员会 (Open Data Center Committee)
PUE	Power Usage Effectiveness，评价数据中心能源效率的指标；PUE = 数据中心总能耗/IT 设备能耗。
DevOps	一种融合软件开发和 IT 运维的研效协同和最佳实践，通过自动化流程、持续集成和持续发布 (CI/CD)，提高软件交付效率、持续改进质量和降低成本。
SRE	站点可靠性工程 (Site Reliability Engineering)，针对大规模分布式系统运维的最佳实践，将软件工程和运维思维结合起来，通过自动化手段实现站点整体的可靠性。
AIOps	从 DevOps 思想发展而来，由 AI 驱动的智能化运营方法论，并受 SRE 影响关注系统整体可靠性，强调一站式平台、低码开发、自动化流程和安全性。
BA	指楼宇自动化 (Building Automation)，实现园区基础设施系统集成，通过传感器、执行器和控制算法提高楼宇运营效率、减少能耗和保障系统可靠性。
可信数据	特指具备语义描述和质量定义的监控数据和运营数据，从采集、传输、存储、显示和访问的全过程都确保准确性、全面性、及时性、一致性和安全性。
可解释的人工智能	特指针对数据中心智能运营出于对系统可靠性的考虑，要求 AI 需要深度融合专业知识、热学机理和运营经验，具备可解释性，可以通过暖通专家、运营专家和监控专家的联合评审。
开放数据语义	在可信数据集的基础上延展出来的开源数据集，通过对商业数据的脱敏和子集处理，本项目特指基于 BRICK 标准构建的暖通系统开放数据语义。
开放仿真平台	指融合机理模型和数据驱动的仿真平台，作为 BA 系统、冷源末端、乃至 IT 设备的数字孪生，可响应调优控制策略模拟系统变化，其中设备模型基于 Modelica (优选)、MATLAB 等开放建模语言定义，并开放仿真测试接口。
模型成熟度	通过节能性、合理性、安全性、平衡性和计算性的维度评价 AI 节能模型的综合能力，按成熟度定义等级评估模型是否可以达到辅助决策或自动决策的标准。
BRICK	BRICK 是一个开源的数据模型和标记语言，旨在帮助建筑和智能建筑领域的数据交换和集成。BRICK 数据集的结构定义由一组 OWL 本体文件和 RDF 数据文件组成，用于定义建筑系统中的实体、属性和关系。
RDF	指资源描述框架 (Resource Description Framework, RDF)，是一个使用 XML 语法来表示的资料模型 (Data Model)，用来描述 Web 资源的特性及资源之间的关系。

Modelica	Modelica 是一种面向对象、基于方程的声明式编程语言（declarative language）。它可支持热、电、磁、力跨学科模拟（multi-domain modeling），作为多学科统一建模仿真的国际标准，被仿真界广泛采用。因为可输出梯度信息，它求解速度快，同时有一个活跃的开发者社区。
MATLAB	MATLAB 是一种通用的数值计算和科学编程语言，用于数学计算、数据处理和算法开发。它使用基于脚本的编程方法，适合广泛的科学和工程应用，更具灵活性。此外，Matlab 具有强大、成熟的生态系统，可与海量软件实现交互，如监控系统设计软件 Labview，直接支持 Matlab 软件程序的部署。

二、项目背景

数据中心总能耗占据全社会总用电量的 2%-3%，制冷系统能耗又占数据中心总能耗的 25%-40%，AI 节能技术逐步成熟并开始试点使用，平均能提升 10%-15% 制冷效率。AI 节能作为 PUE 综合优化的重要组成部分，成为实现双碳目标和 ESG 能源可持续的关键技术手段之一。

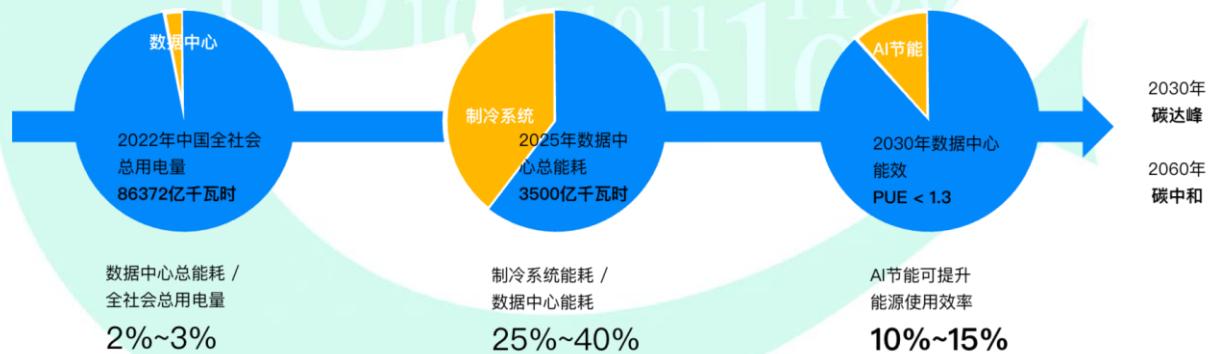


图 1 AI 节能优化数据中心 PUE

然而，目前 AI 节能商业解决方案面临较大挑战，包括 AI 模型和控制逻辑黑盒化、封闭数据源和缺乏数据质量标准、定制型项目周期长、成本高并形成新的数据孤岛、缺乏节能效率和可靠性统一评价体系，闭源系统缺乏生态合作等。

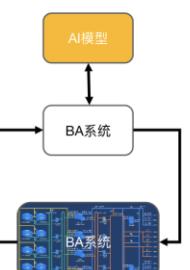
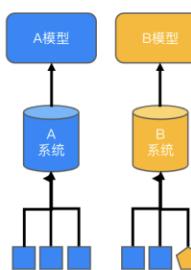
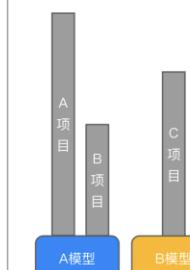
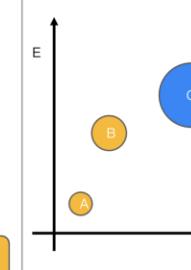
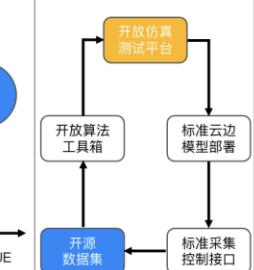
关键问题	AI模型和控制逻辑黑盒化	封闭数据集和数据质量缺乏标准	定制项目型实施成本高	缺乏节能效率统一评价体系	闭源系统缺乏生态合作
影响分析	可靠性无法评估	Garbage In, Garbage Out	形成新的数据孤岛	ROI不确定	缺乏规模化协同效应
示意描述					
解决方案	开放暖通系统机理模型 建立安全沙箱	开放语义定义 标准化数据和控制接口	方案模块化，可互联组合、部件级/设备级模型可复用、可迭代	建立节能效率体系和估算模型	建立开放仿真平台 推动产学研生态合作
标准价值	增强采纳AI信心	连接工业界和学术界	扩大应用场景	价值驱动技术进步	加速AI迭代速度

图 2 AI 模型黑盒化面临挑战

为此定义数据中心 AI 节能开放架构，通过开放语义数据集、融合机理的 AI 调优架构、开放仿真平台和 AI 节能模型的成熟度等级定义，增强 AI 节能的开放性、透明性和可量化，实现可解释性的人工智能，并通过白盒安全沙箱、数据治理规范和调优系统可靠性，增强数据中心业主采纳智能化和精细化运营的信心，统一节能效率评估，推动 AI 节能在数据中心行业的规模化覆盖和提升能源效率，实现降本增效和能源可持续发展。

www.ODCC.org.cn

三、AI 节能开放架构

(一) 制冷系统

数据中心可简化定义为一台超级计算机，输入电力输出算力，并根据能量守恒定律将消耗的电力转换为热力，制冷系统通过冷源末端将热力从机房内部导出到冷源系统，并中和到周围空气。

制冷系统根据热交换方式可分为水冷系统、风冷系统和液冷系统，其中水冷系统由冷源系统和冷源末端组成：冷源系统组件主要包括冷却塔、冷却泵、冷机、冷冻泵和蓄冷罐，一般基于 PLC（可编程逻辑控制器）或 DDC（数字化直控系统）对泵、阀门和风机等基础设施进行 PID 控制，最终集成到 BA（楼宇自动化）系统进行集中管理和调优。

(二) AI 节能

BA 系统控制基于暖通机理进行具体编程，通过实时监测所有设备状态，并基于配置和控制参数，根据规则和策略联动具体设备，通过闭环自控实现系统控制，核心是保障暖通系统的可靠运行，一般对控制参数都设定严格的约束，并确保系统留有足够的安全裕量，系统运行模式相对比较固定。运维专家根据经验会在不同的季节或 IT 负荷有较大调整后做一些手动调优，但比较依赖于人工经验，耗费运维人力，且节能空间有待进一步挖潜。

AI 节能是一种基于 AI 算法驱动的以制冷系统为主的调优方案，通常为避免系统复杂性和可靠性问题 AI 不直接控制或调节具体设备

参数，而是与 BA 系统对接，通过控制启停台数、运行频率和回水温度等系统参数，实现整体调优。AI 通过大数据训练，学习到变量之间的潜在关联关系，并能在上百万个参数组合中寻找到最优或次优的策略。

相比 BA 系统自控或运营专家人工调优，AI 具有适应性强、更快调优周期、关注全局优化和数据决策等优势，一般都能取得较好的调优效果。然而，AI 节能面对的主要挑战在于 AI 算法的天然不可解释性、受数据质量影响大和缺乏行业标准，也就是 AI 算法的安全性和可靠性存疑，导致 AI 节能还停留在少量试点的阶段。

(三) AIOps 平台

AIOps 从 DevOps 思想发展而来，由 AI 驱动的智能化运营方法论，并受 SRE 影响关注系统整体可靠性，强调一站式平台、低码开发、自动化流程和安全性。

通过对多个 AI 节能项目和研发架构的最佳实践，建议一种基于 AIOps 的开放架构。AIOps 设计包含四个基本原则：

- **产品思维：**AI 节能应遵循标准产品设计思维，关注设计和制定标准，可批量复制和覆盖到大规模数据中心机房。
- **平台思维：**可视化开发平台，连接开发工程师、暖通专家和算法专家；低码开发平台，支持交付工程师实现对具体项目实例化配置；集中管理平台，支持运营专家随时查看服务状态、节能效果和应急操作。

- **安全思维:** 数据中心是保持 IT 关键业务连续性运营的数字底座，可靠性要求 99.999%。AI 节能应遵循安全-覆盖-优化的设计策略，首先确保安全成为开放架构的一等公民，并兼容超大规模数据中心集群的异构暖通系统，最后面向整体调优和可持续升级。
- **开放思维:** 开放架构并不仅指开放的 API，还包括组件化、白盒化、标准化和流程化，即平台由标准组件组成，组件本身是有明确接口和指标定义，多个组件供应商的组件只要符合性能和安全需求即可替换使用，而且平台遵循统一的“Pipeline”流程，每个组件形成一个标准输入输出的 Filter。

AIOps 平台打通数据、模型、训练、测试、部署、运营到运维的全生命周期。

(四) 开放架构

开放架构主要流程包括数据处理、模型构建、仿真测试、调优控制和主动运维等。

www.ODCC.org.cn

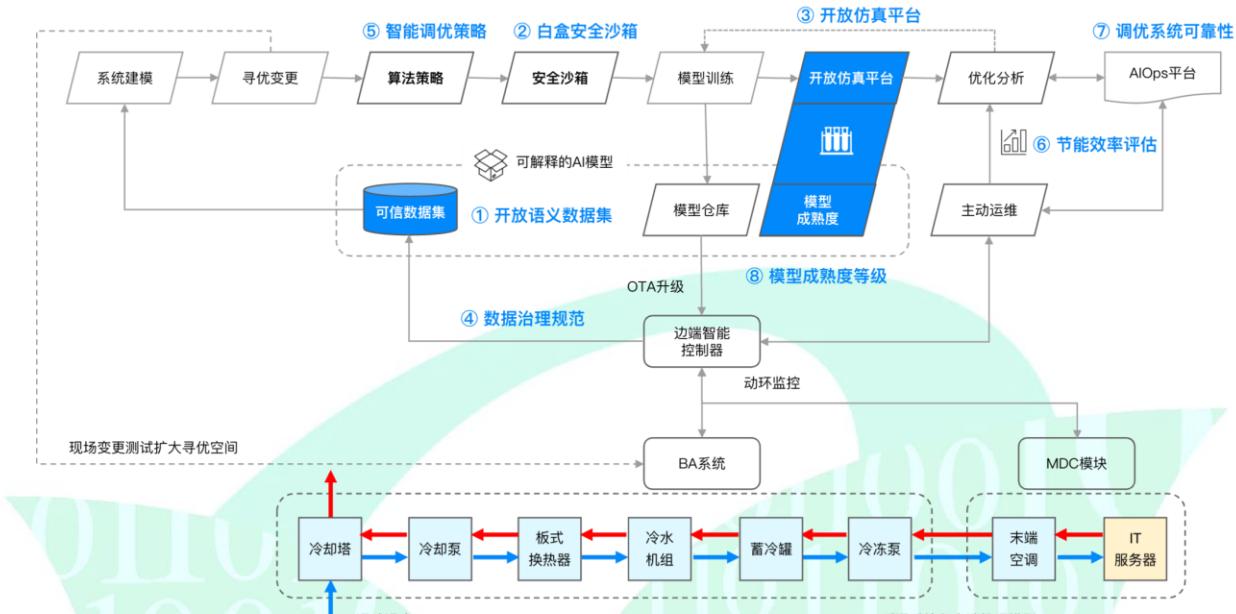


图 3 AI 节能开放架构

1. 数据处理

数据预处理包括特征提取、数据治理和变更寻优。由于 BA 系统长期运行在几种固定工况模式，因此建议在建模阶段增加寻优变更，尝试更多台数组合和运行频率范围，让 AI 有更大的寻优空间。数据预处理的结果是可信暖通数据集，好数据是训练好模型的关键。

数据治理方法不限于如下：数据降噪、数据过滤、数据修复、数据归约。

2. 模型构建

模型构建包括算法选择、安全沙箱和模型训练。AI 节能的算法从机器学习到神经网络（CNN、RNN、LSTM），逐步向强化学习发展，近年随着 LLM（自然语言大模型）的兴起，其背后的 Transformer 模型作为一种 Foundation Model 也开始被工业智能领域所关注。

安全沙箱包括对寻优过程约束、数据健康度约束和寻优结果约束，对所有控制参数和状态设定合理值域，并实时监测数据质量和设备告警，并对输出控制参数做超限检查。通过控制步长，采取“小步快跑”的方式减少系统波动。确保 AI 模型在暖通专家划定的边界内进行寻优和可靠控制。

模型训练可以在本地开发机器或云端 GPU 服务器完成，通常针对每个项目都会单独训练一个模型，并可以通过迁移学习根据周期内累积的新数据对模型进行自动训练与迭代刷新。

3. 仿真测试

通常模型将数据分为训练集和测试集，训练集用于对拟合模型的训练，测试集用于对拟合模型的预测精度进行校验。然而仅在静态和有限数据集上的测试很难评估模型的安全性和节能性，且不具备机理驱动的拟合模型缺乏可解释性，只能上线真实物理系统运行才能得到真实效果，然而这些未全面评估的模型上线会给数据中心可靠运营带来风险。

仿真系统通过融合机理模型和数据驱动，建立一个与 BA 系统对应的数字孪生，可响应调优器的调优控制，并模拟一段时间的系统运行状态。即通过在计算机上仿真模拟 AI 模型的具体决策过程，可极大加快调优算法迭代速度，并确保 AI 模型在真实部署前得到综合评测，提升 AI 决策的可靠性和节能性。

4、 调优控制

数据中心业主和运营方出于数据安全和本地控制的要求，一般需要支持 AI 模型部署在本地服务器或 AI 算法卡上，可离线运行。AI 模型定时（缺省 10 分钟）计算一组控制策略，并通过 BA 接口（BACNet 或 Modbus 协议）下发控制命令。

5、 主动运维

制冷系统是保障 IT 业务可持续运行的关键设施，针对 AI+BA 的复杂系统，需要提前做 DEFEA（潜在失效模式分析）和制定应急操作预案，并在转产测试模拟设备故障和系统异常。特别的需要支持本地集群或热备保障 AI 节能的高可用，而且 AI 模型应配置看门狗可定时上报服务状态至主动运维系统，实现软件或硬件故障可自诊断并闭环维护流程，在 SLA 内完成维修维护和服务恢复。

四、开放语义数据集

AI 模型的可解释性体现在基于开放语义的建模语言实现冷源系统和末端的统一机理模型，定义关键设备类型以及对应的特征工程，并基于实际暖通架构完成设备实例化和连接。

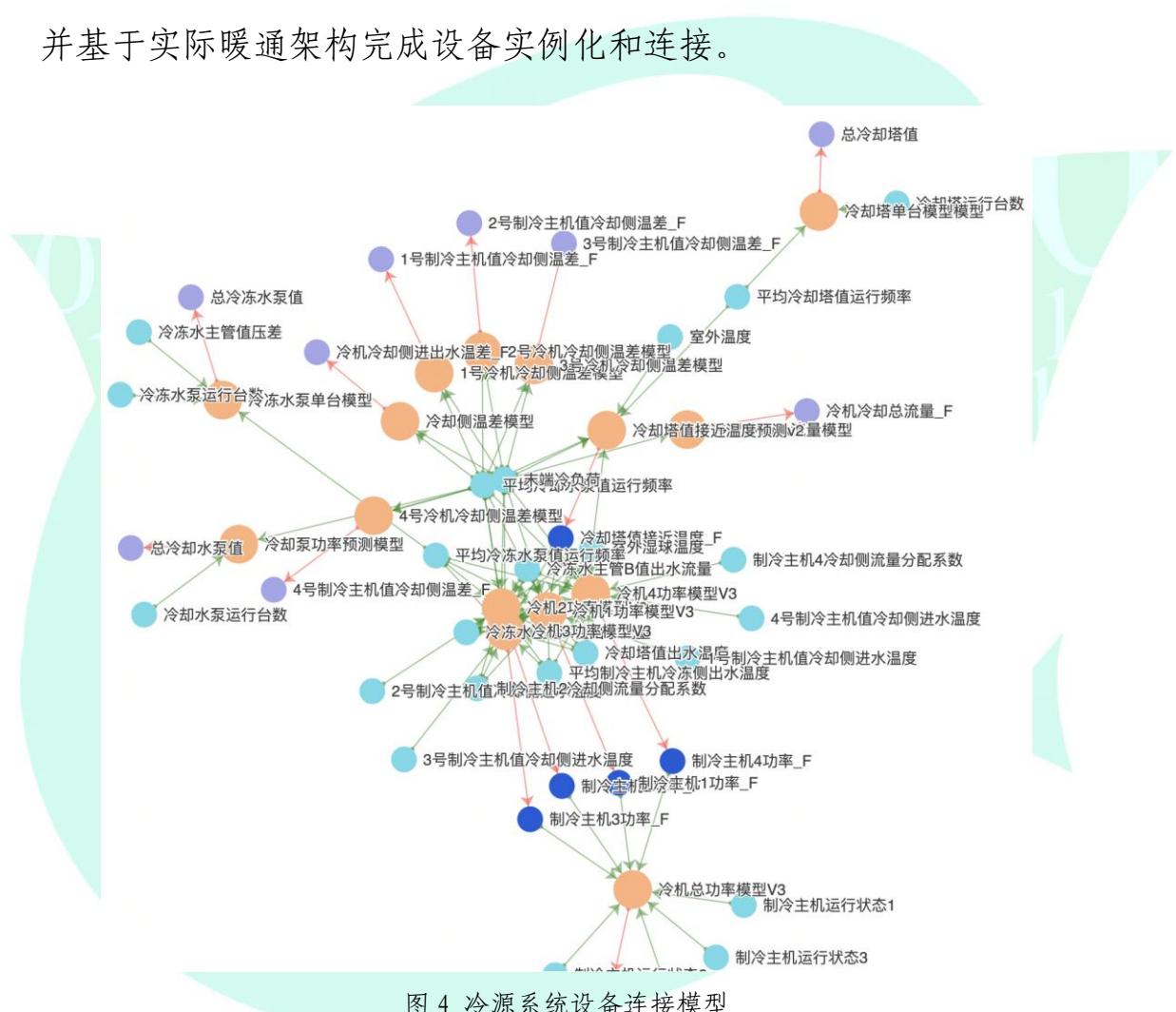


图 4 冷源系统设备连接模型

(一) BRICK 结构定义

BRICK 是一个开源的数据模型和标记语言，旨在帮助建筑和智能建筑领域的数据交换和集成。BRICK 数据集的结构定义由一组 OWL 本体文件和 RDF 数据文件组成，用于定义建筑系统中的实体、属性和关系。

BRICK 采用基于本体论的方法来描述建筑系统中的实体和属性，使用 RDF 数据模型来表示这些实体和属性之间的关系。BRICK 还提供了一组通用的命名空间和术语，用于描述建筑系统中的各种实体，例如房间、传感器、设备、测量值等。这些术语和命名空间可以帮助不同的建筑系统和设备之间进行数据交换和集成。

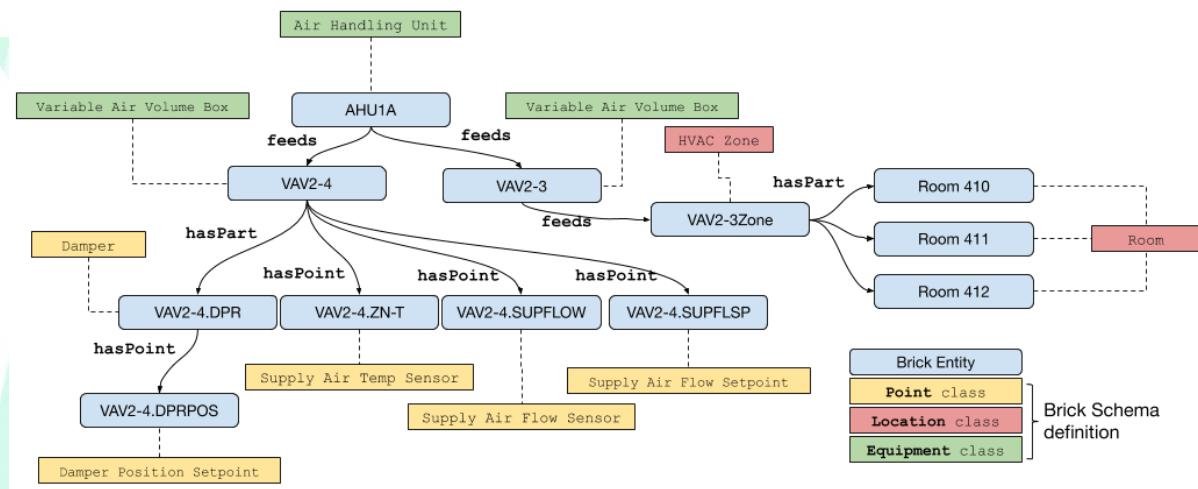


图 5 BRICK 模型示意图

(二) BRICK 建模方法

1、方法概述

下图所示，Brick Schema 建模需要：①建立物理空间的传感器名称和元数据空间的传感器类（class）的映射关系；②建立物理空间的设备名称和元数据空间的设备类（class）的映射关系；③建立物理空间的传感器与设备的拓扑连接关系；④建立物理空间的设备与设备的拓扑连接关系。现有的建模方法通常是手动完成的，例如，在传感器和设备之间存在连接关系时，建模者需要逐行手动

编写这些映射关系。特别是在涉及大量传感器和设备的情况下，这个过程繁琐且容易出错、耗时较长、并且修改起来不够灵活，尤其是当大型数据机房系统比较复杂的时候。此外，建模者需要同时掌握暖通空调系统和编程知识，人力成本较高。特提出了一种半自动建模方法，设计一种标准化的数据录入模板，以及基于 Python 代码的半自动建模过程。建模者只需要在数据模板中录入数据中心制冷系统的相关信息，Python 代码可以自动完成上述①，②，③步的 Brick 建模。④步仍然需要手动完成。

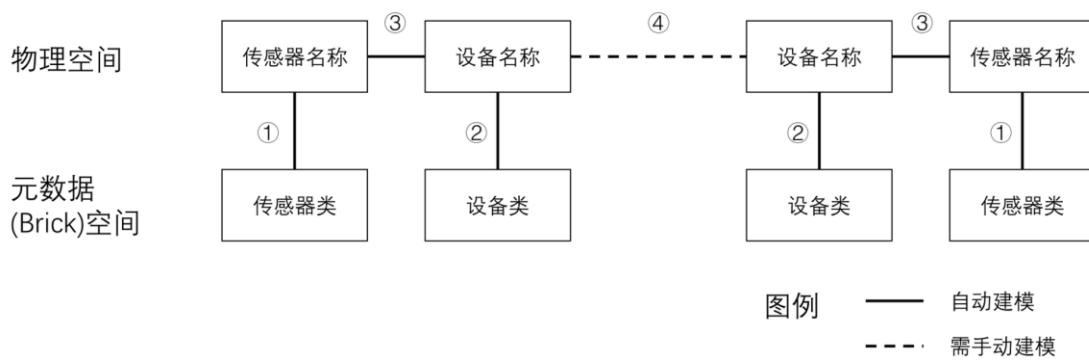


图 6 BRICK 模型半自动建模

标准化的数据录入模板以表格数据 (Tabular Data) 的格式，包括但不限于 excel, csv, Pandas DataFrame 等。

2. 设备信息录入

对于冷却设备（如冷却塔、换热器、制冷主机、水泵等），需要输入的信息包括：

- **name**: 设备的名称，用于唯一标识设备。
- **class_type**: 对象的类别，此处选择 “Equipment”。

- **namespace:** 设备的命名空间，如果是 Brick 标准库里的类选择"Brick"，如果是用户自定义的设备类，则给予相应的命名。
- **brick_type:** 设备对应的类名，用于标识设备的具体类型。
- **note** (可选): 一些额外的注释，用于记录设备的其他信息，例如厂家、型号等，以便复用。

3、传感器信息录入

对于传感器（如温度、流量、功率等），需要输入的信息包括：

- **name:** 传感器的名称，用于唯一标识传感器。
- **class_type:** 对象的类别，此处选择 "Sensor"。
- **namespace:** 传感器的命名空间，如果是 Brick 标准库里的类选择"Brick"，如果是用户自定义的传感器类，则给予相应的命名。
- **brick_type:** 传感器对应的类名，用于标识传感器的具体类型。
- **unit:** 传感器测量值的单位。
- **equipment_tagset:** 传感器所对应的设备，用于关联传感器和设备的数据，与上述设备的 name 所一一对应。
- **id:** 数据库中该数据的 ID，用于在数据库或者数据文件中唯一标识传感器的数据。
- **db_location:** 数据库或者数据文件存储的位置，用于快速定位和检索传感器的数据。

- **note** (可选)：一些额外的注释，用于记录传感器的其他信息。

该方法使用 Python 编程语言，通过读取建筑元数据，自动创建设备和传感器实例，并将传感器与其所属设备关联，然后手动建模创建设备间的连接关系，最后生成模型并保存。以下是 BRICK 建模半自动化方法流程图的流程图：

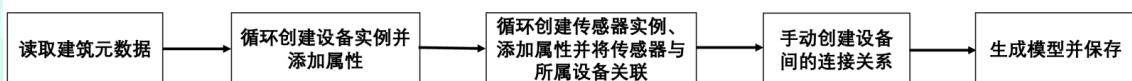


图 7 BRICK 建模流程图

4、Python 示例代码

- **读取建筑元数据**：首先，从提供的表格数据中读取建筑元数据。这些元数据包含了设备和传感器的信息，如名称、类型、所属设备等。以下是一个使用 csv 表格示例：

```
metadata_df = pd.read_csv('metadata_example.csv', index_col=False)
```

- **创建设备实例**：遍历元数据，针对每个设备创建一个实例，并添加到 Graph 中。实例的创建包括添加标签属性和根据类型添加到相应的命名空间。

```
for index, row in metadata_df.iterrows():

    # Remove leading and trailing whitespace characters
    # (including spaces, tabs, newline characters, etc.) from the
    # string.
    row.str.strip()

    # Check the type of the instance and add it to the
    graph

    if row['class_type'] == 'Equipment':
        # Add a label to the instance in the graph
        g.add((BLDG[row['name']], RDFS.label,
               Literal(row['name'])))

        if row['namespace'] == 'Brick':
            g.add((BLDG[row['name']], A,
                   BRICK[row['brick_type']]))

            # If it's not in the Brick namespace, add it to
            # the extension namespace

        elif row['namespace'] == 'EXT':
            g.add((BLDG[row['name']], A,
                   EXT[row['brick_type']]))


```

- **创建传感器实例：**重新遍历元数据，针对每个传感器创建一个实例，并添加到 Graph 中。实例的创建包括添加标签属性和根据类型添加到相应的命名空间，对于传感器可以添加更多属性，如测量单位和时间序列数据（传感器数据 ID 和数据存储位置）等；然后关联传感器到所属设备。

```
for index, row in metadata_df.iterrows():
    # Remove leading and trailing whitespace characters
    # (including spaces, tabs, newline characters, etc.) from the
    # string.
    row.str.strip()

    # If it's a sensor, add it to the graph with
    # additional properties
    if row['class_type'] == 'Sensor':
        # Add a label to the instance in the graph
        g.add((BLDG[row['name']], RDFS.label,
               Literal(row['name'])))

        if row['namespace'] == 'Brick':
            g.add((BLDG[row['name']], A,
                   BRICK[row['brick_type']]))

        # If it's not in the Brick namespace, add
        # it to the extension namespace
        elif row['namespace'] == 'EXT':
            g.add((BLDG[row['name']], A,
                   EXT[row['brick_type']]))

        # add sensor to the graph
        # link sensor to the equipment it is part
        # of
        g.add((BLDG[row['name']],
               BRICK['isPointOf'], BLDG[row['equipment_tagset']]))

        # link sensor to the unit of its
        # measurements
        g.add((BLDG[row['name']], BRICK['hasUnit'],
               UNIT[row['unit']]))

        # Link the sensor to its timeseries data
        timeseries_props = [
            (BRICK['hasTimeseriesId'],
             Literal(row['point'])),
            (BRICK['storedAt'],
             Literal(row['db_location']))
        ]
        g.add((BLDG[row['name']],
               BRICK['timeseries'], timeseries_props))
```

- 手动建模设备间的连接关系：在创建设备和传感器实例后，需要手动建模设备间的连接关系。这部分需要根据具体的设备类型和连接关系进行编写，以下是一个示例：

```
g.add((BLDG['Cooling_Tower_01'], Brick.feeds, BLDG['Condenser_Water_Pump_01']))
```

- 生成并保存模型：最后，所有的信息被整合到一个模型中，并保存为.ttl文件。

```
g.serialize(f"./{output_filename}.ttl", format="ttl")
```

(三) 暖通设备模型

本节介绍基于 BRICK 语义框架对暖通空调系统的关键设备进行建模，并提供详细的描述。该系统包括制冷主机、冷冻泵、冷却泵、冷却塔、板式换热器以及管路等设备。

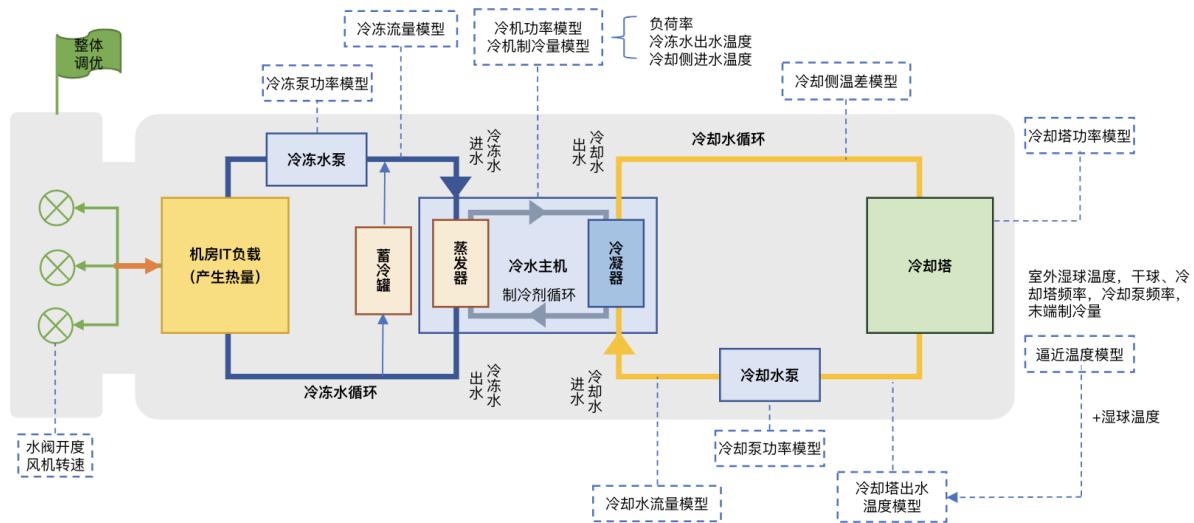


图 8 暖通系统模型

以下表格列出了包括制冷主机、冷冻泵、冷却泵、冷却塔、板式换热器在内的设备类型，以及它们的测点类型、单位、数据类型、枚举值列表、最小值、最大值和读写标识。例如，对于制冷主机，记录冷却水出水温度、冷凝器小温差、冷冻水出水温度等多个温度测点类型。这些测点类型的单位都是摄氏度，数据类型是浮点型，最小值为 0，最大值为 50。其中，冷冻水出水温度是可以进行读写操作的。

表 2 关键设备和特征点

设备类型	测点类型	单位	数据类型	枚举值列表	最小值	最大值	读写标识
制冷主机	冷却水出水温度	°C	浮点型		0	50	
	冷凝器小温差	°C	浮点型		0	50	
	冷冻水出水温度	°C	浮点型		0	50	可控
	冷冻水进水温度	°C	浮点型		0	50	
	冷却水进水温度	°C	浮点型		0	50	
	有功功率	kW	浮点型		0	9999999 9	
	系统运行状态		枚举型	0=关闭; 1=运行			可控
	冷冻水出水压力	kPa	浮点型		0	700	
	冷冻水进水压力	kPa	浮点型		0	700	
	冷却水出水压力	kPa	浮点型		0	500	
冷却塔	冷却水进水压力	kPa	浮点型		0	500	
	冷冻水出水流量	m³/h	浮点型		0	500	
	冷却水出水流量	m³/h	浮点型		0	500	
	运行频率	Hz	浮点型		0	50	可控
	冷却塔出水温度	°C	浮点型		0	50	
冷却水泵	有功功率	kW	浮点型		0	40	
	冷却塔进水温度	°C	浮点型		0	50	
冷却水泵	运行状态		枚举型	0=关闭; 1=开启			可控
	有功功率	kW	浮点型		0	9999999 9	

冷冻水泵	运行频率	Hz	浮点型		0	60	可控
	运行状态		枚举型	0=关闭; 1=运行			可控
	有功功率	kW	浮点型		0	99999999	
	运行频率	Hz	浮点型		0	60	可控
	运行状态		枚举型	0=关闭; 1=运行			可控
板式换热器	冷冻水出水温度	°C	浮点型		0	50	
	冷冻水进水温度	°C	浮点型		0	50	
	冷却水出水温度	°C	浮点型		0	50	
	冷却水进水温度	°C	浮点型		0	50	
	冷冻水进水阀位置		枚举型	0=关闭; 1=开启			

1、制冷主机

制冷主机是该系统的核心组件，负责提供制冷量对制冷剂进行冷却，包含运行状态、功率、冷却侧进出水温度、冷冻侧进出水温度、冷却侧进出水压力、冷冻侧进出水压力以及蒸发器冷凝器小温差、冷却水流量、冷冻水流量等点位，并与冷冻泵、冷却泵、板式换热器通过管道相连。

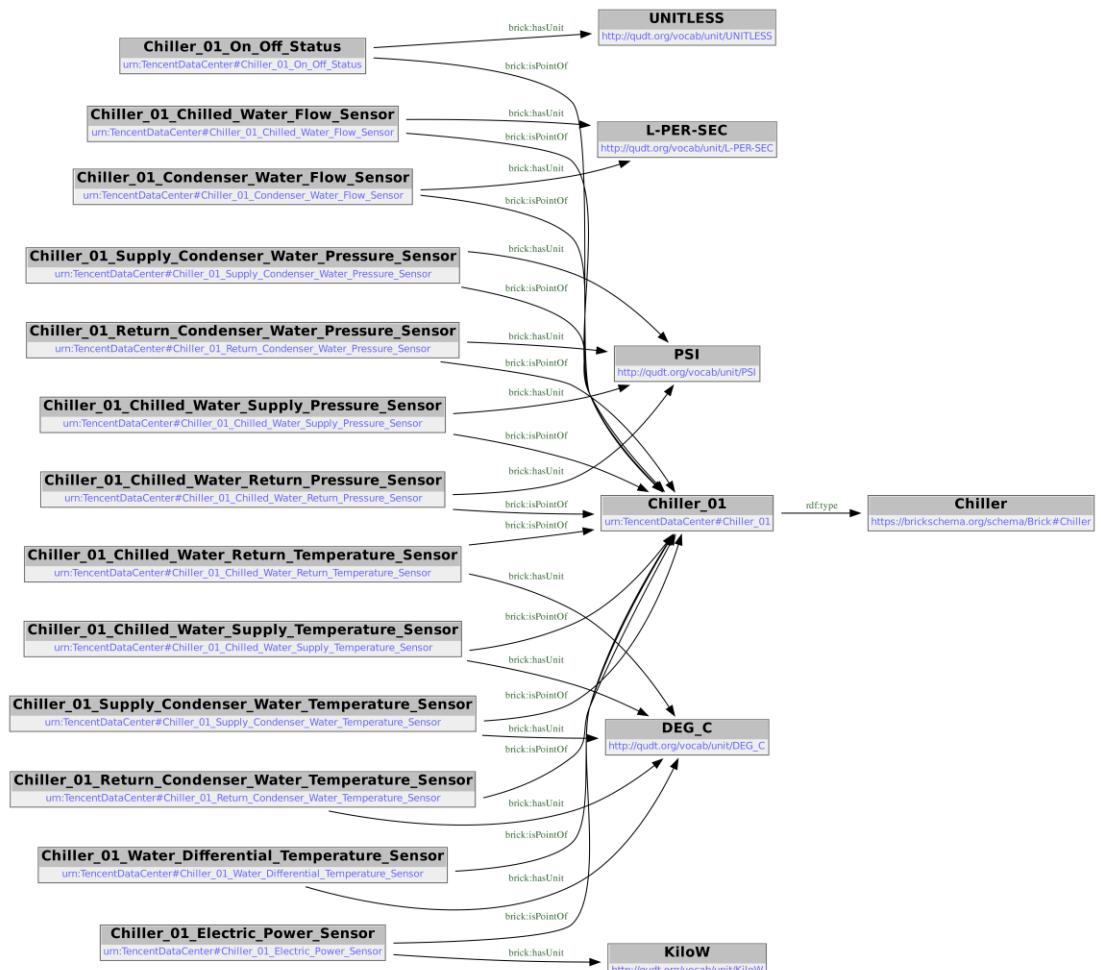


图 9 制冷主机模型

2、冷却塔

冷却塔是通过风机驱动冷却盘管外部空气流动（干模式、湿模式），实现冷却水与外环境间的热交换，以制得低温冷却水的设备，包含进出水温度、运行状态、功率、风机频率、喷淋泵启停、冷却水流量等点位，并与制冷主机、冷却泵、板式换热器通过管道相连。

（备注：串联系统时，流量值可共享，以减少测点布置，但是流量参数依然加入设备建模描述，以保障设备建模与描述的完整性）

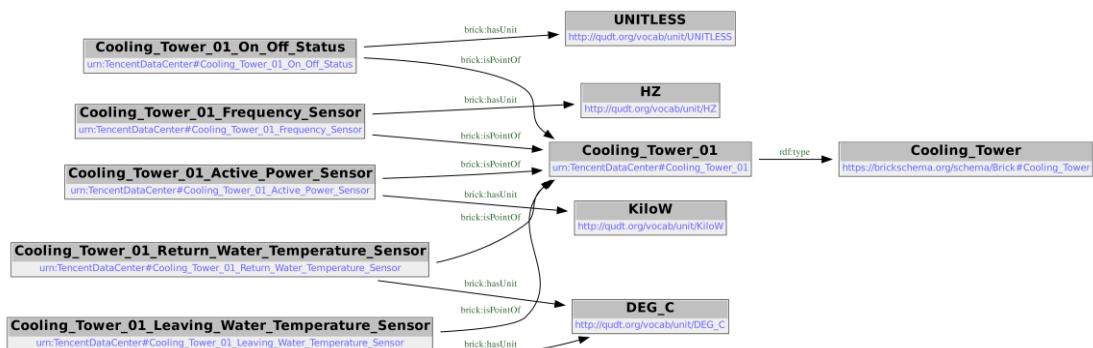


图 10 冷却塔模型

3、冷却泵

冷却泵则负责将冷却水从冷却塔输送到制冷主机的热交换器中，以降低制冷剂的温度，包含功率，运行状态以及频率、泵前后压力、流量等点位，并与制冷主机、冷却塔、板式换热器通过管道相连。

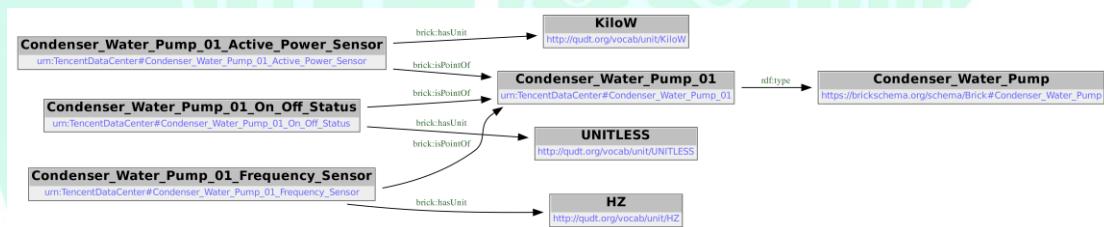


图 11 冷却泵模型

4、冷冻泵

冷冻泵是将冷冻水从制冷主机输送到冷源末端设备的重要部件，包含功率，运行状态以及频率、泵前后压力、流量等点位，并与制冷主机、板式换热器、冷源末端通过管道相连。

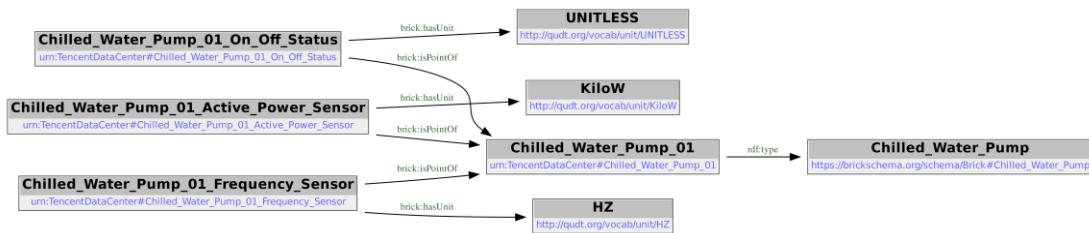


图 12 冷冻泵模型

5、板式换热器

板式换热器则是将热量通过水的传导方式传递给空气，起到冷却的作用，包含冷却侧进出水温度、冷冻侧进出水温度等点位，并与制冷主机、冷冻泵、冷却泵通过管道相连。

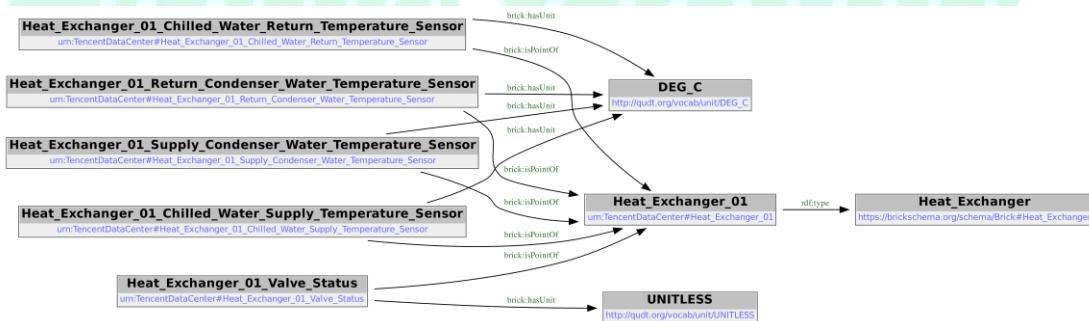


图 13 板式换热器模型

6、管道

管道则是将制冷主机、冷冻泵、冷却泵、冷却塔、板式换热器等设备连接起来的重要通道。

7、暖通系统

针对以上设备，使用 BRICK 语义框架进行建模，通过定义各种实体、关系和属性，实现了对设备的细粒度描述。例如，制冷主机

被定义为“制冷主机”实体，而冷冻泵和冷却泵则分别被定义为“冷冻泵”和“冷却泵”实体。冷却塔则被定义为“冷却塔”实体，而板式换热器则被定义为“板式换热器”实体。管道则被定义为“管道”实体，并与其他设备实体建立关系。

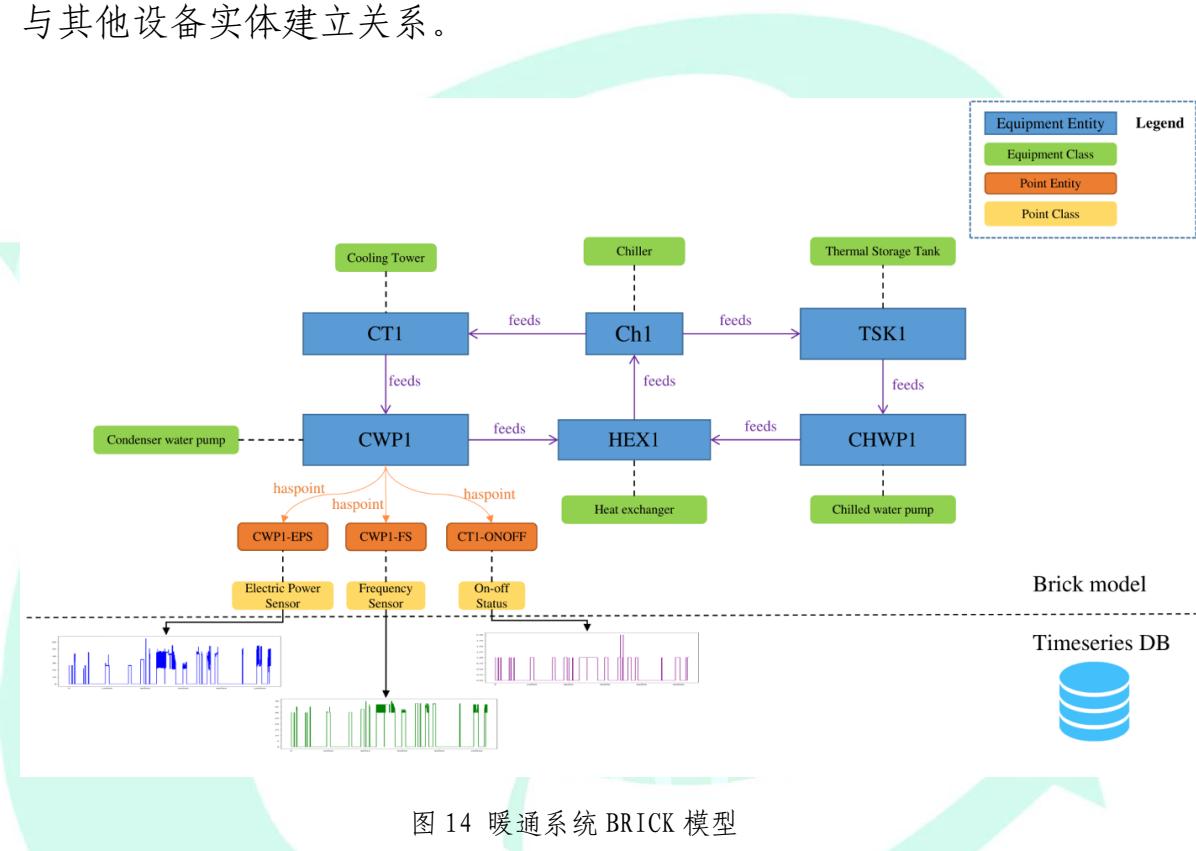


图 14 暖通系统 BRICK 模型

通过 BRICK 语义框架的建模，我们可以更全面地了解暖通空调系统的设备之间的关系和作用。通过关系描述制冷主机和冷却泵之间的能量传递关系，以及冷却塔和冷却泵之间的水流传输关系，这些细节信息对于系统的优化具有重要意义。

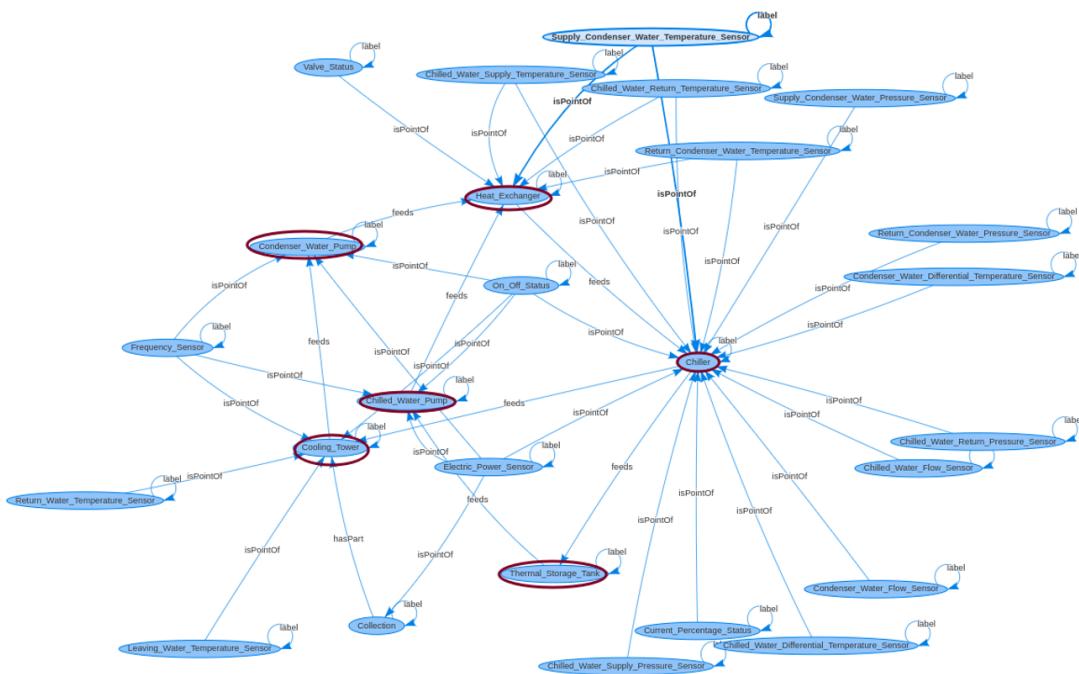


图 15 暖通系统连接模型

总之，BRICK 语义框架的使用可以帮助我们更好地了解暖通空调系统中各个设备之间的关系和作用，为系统的优化和调试提供更多的支持。

(四) 查询 BRICK 模型

SPARQL 是一种基于 RDF 的查询语言，它的全称为 SPARQL Protocol and RDF Query Language。SPARQL 使得用户可以编写和执行精确的查询，以从庞大的 RDF 数据集中检索特定的信息。其语法形式与 SQL 类似，但设计用于适应 RDF 的图形结构，而不是传统的关系数据库。由于 Brick 模型是基于 RDF 的开发的，因此我们可以使用 SPARQL 来查询 Brick 模型，从而获取到所需的系统信息。例如，我们可以使用 SPARQL 来查询某个设备的所有传感器，查询对于某个设备类型其有哪几个设备，有哪几个设备或者查询设备间的上

下游关系等等。为了进一步说明这一点，我们提供三个具体的查询示例以及结果。

查询例子 1：查询某个设备（设备 ID 为 “bldg: Chiller_01”）的所有传感器

```
from rdflib import Graph
import pandas as pd
g = Graph()
g.parse("./brick_model_using_metadata_compiled.ttl",
format="ttl");

query = """
SELECT ?point WHERE {
    ?point a brick:Point .
    bldg:Chiller_01 brick:hasPoint ?point .
}
"""

res= g.query(query)
df=pd.DataFrame.from_records(data=list(res),columns=res.vars)
df
```

输出结果如下，它包含了 Chiller_01 的 13 个传感器。输出的结果中，字符串“urn: TencentDataCenter#”表示命名空间，它是用于标识 TencentDataCenter 命名空间中的实体。字符串 '#' 后面的字符串表示传感器标识符、每个传感器都有一个特定的标识符，用于在 Brick 模型中唯一标识该传感器。

point	
0	urn:TencentDataCenter#Chiller_01_Chilled_Water_Flow_Sensor
1	urn:TencentDataCenter#Chiller_01_Chilled_Water_Return_Pressure_Sensor
2	urn:TencentDataCenter#Chiller_01_Chilled_Water_Return_Temperature_Sensor
3	urn:TencentDataCenter#Chiller_01_Chilled_Water_Supply_Pressure_Sensor
4	urn:TencentDataCenter#Chiller_01_Chilled_Water_Supply_Temperature_Sensor
5	urn:TencentDataCenter#Chiller_01_Condenser_Water_Flow_Sensor
6	urn:TencentDataCenter#Chiller_01_Electric_Power_Sensor
7	urn:TencentDataCenter#Chiller_01_On_Off_Status
8	urn:TencentDataCenter#Chiller_01_Return_Condenser_Water_Pressure_Sensor
9	urn:TencentDataCenter#Chiller_01_Return_Condenser_Water_Temperature_Sensor
10	urn:TencentDataCenter#Chiller_01_Supply_Condenser_Water_Pressure_Sensor
11	urn:TencentDataCenter#Chiller_01_Supply_Condenser_Water_Temperature_Sensor
12	urn:TencentDataCenter#Chiller_01_Water_Differential_Temperature_Sensor

查询例子 2：查询对于某个设备类型，有哪几个设备（以 Chiller 类型为例）

```
query"""
SELECT ?chillers WHERE {
?chillers a brick:Chiller
}
"""

res= g.query(query)
df=pd.DataFrame.from_records(data=list(res),columns=res.vars)
df
```

输出结果如下，可以看出有 6 台冷机。输出的结果中，字符串“urn: TencentDataCenter#”表示命名空间，它是用于标识 TencentDataCenter 命名空间中的实体。字符 '#' 后面的字符串表示设备标识符、每个设备都有一个特定的标识符，用于在 Brick 模型中唯一标识该设备。

chillers

- 0 urn:TencentDataCenter#Chiller_01
- 1 urn:TencentDataCenter#Chiller_02
- 2 urn:TencentDataCenter#Chiller_03
- 3 urn:TencentDataCenter#Chiller_04
- 4 urn:TencentDataCenter#Chiller_05
- 5 urn:TencentDataCenter#Chiller_06

查询例子 3：查询设备间的上下游关系

在 Brick 模型中，设备的上下游关系通常通过 `brick: feeds` 属性来描述。设备 A ".brick: feeds" 设备 B 表示设备 A 是设备 B 的上游设备，设备 B 是设备 A 的下游设备。因此，我们可以通过以下 SPARQL 查询设备间的上下游关系：

```
query"""
    SELECT ?hex ?chiller WHERE {
        ?hex a brick:Heat_Exchanger .
        ?chiller a brick:Chiller.
        ?hex brick:feeds ?chiller.
    }
"""

res= g.query(query)
df=pd.DataFrame.from_records(data=list(res),columns=res.vars)
df
```

输出结果如下，根据输出结果，我们可以看到每个 `Heat_Exchanger` 与相应的 `Chiller` 之间存在映射关系。例如，

Heat_Exchanger_01 为 Chiller_01 上游设备，Heat_Exchanger_02 为 Chiller_02 上游设备，以此类推。

hex		chiller
0	urn:TencentDataCenter#Heat_Exchanger_01	urn:TencentDataCenter#Chiller_01
1	urn:TencentDataCenter#Heat_Exchanger_02	urn:TencentDataCenter#Chiller_02
2	urn:TencentDataCenter#Heat_Exchanger_03	urn:TencentDataCenter#Chiller_03
3	urn:TencentDataCenter#Heat_Exchanger_04	urn:TencentDataCenter#Chiller_04
4	urn:TencentDataCenter#Heat_Exchanger_05	urn:TencentDataCenter#Chiller_05
5	urn:TencentDataCenter#Heat_Exchanger_06	urn:TencentDataCenter#Chiller_06

(五) 生成开源数据集

为了标准化开源数据集的开发流程，具体包括数据预处理、Brick 建模、数据质量评估三步，流程图如下。

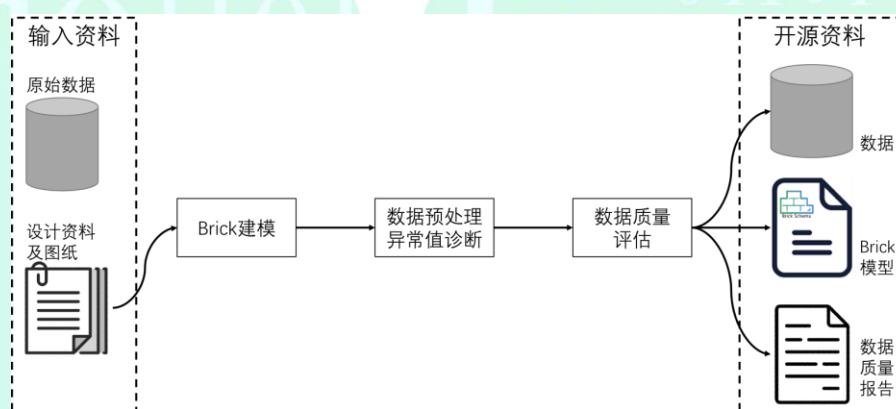


图 16 开源数据集生成流程

- **Brick 建模：**基于暖通系统历史运行数据和设计资料建立元数据模型，具体步骤见上一小节。
- **数据预处理：**异常值诊断，以识别和标记数据中的异常值。主要方法包括基于统计的方法（如 3-sigma）和基于物理的方法（如换热器热平衡）。
- **数据质量评估：**针对每个点位和每类数据，给出排除异常值之后的数据完整度。数据完整度反映了数据集中缺失数据的

程度，较高的数据完整度表示数据缺失较少，数据质量较高。

通过对数据完整度进行评估，使用者可以迅速判断数据集的可用性，并方便地比较不同的开源数据集质量。

(六) 种子数据集

BRICK 是一种语义建模框架，主要用于描述建筑物的结构和设备系统，同样也适用于数据中心的设备系统。我们使用 BRICK 描述以设备为最小集维度的种子数据集结构，并此基础上延伸以下属性：

- **种子数据集所处的场景：**场景可以是数据中心的具体空间，如房间、模组、楼宇等，也可以是数据中心具体业务应用，如冷源调优、AHU 调优、设备健康预测等。场景可以帮助我们更好地理解设备数据集的用途和功能。
- **种子数据集的时间粒度：**这取决于我们希望获得多少详细信息、数据精度的需求以及我们的应用场景。
- **种子数据集的时间范围：**基于历史时间区间数据建立相应的设备预测模型，从而对设备运行状态进行实时监控。
- **种子数据集的连续性：**时间连续的设备运行工况数据是时间序列数据，使用时间序列模型框架对设备进行建模可以实现对故障的提前预警。
- **种子数据集的标签：**如脱敏、清洗等。这有助于我们更好地管理和维护数据集，并确保其质量和隐私。此外，我们还可以添加其他元数据，如设备的类型、品牌、型号等，以便更好地理解设备的性能和行为。

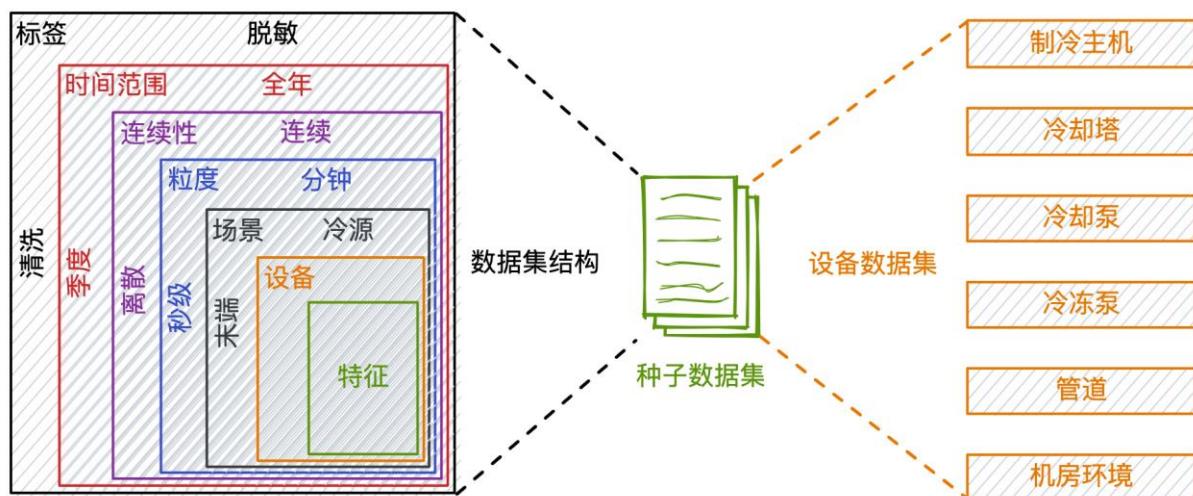


图 17 种子数据集

总之，使用 BRICK 描述以设备为最小集维度的种子数据集结构，并为其添加相应的属性和标签，可以帮助更好地理解和管理数据中心设备系统。这可以帮助我们实现设备的智能管理和优化，提高数据中心的能效和可靠性。

五、白盒安全沙箱

安全沙箱是保障数据中心制冷系统节能优化控制策略更加可靠，更加安全的一种设计机制。它可以保证 AI 模型的寻优参数输入，寻优过程，寻优结果都能受到由现场运维专家和暖通专家制定的配置边界参数的约束，能够沉淀固化专家经验，提高用 AI 控制数据中心冷源系统基础设施的可靠性和安全性。

(一) 安全沙箱原理

安全沙箱的原理框图如下图所示，它将 AI 策略算法置于安全沙箱的边界条件约束范围运行。安全沙箱的约束边界是一个可开放配置的元数据，AI 模型寻优计算过程中，需要读取该配置的约束条件和数据。

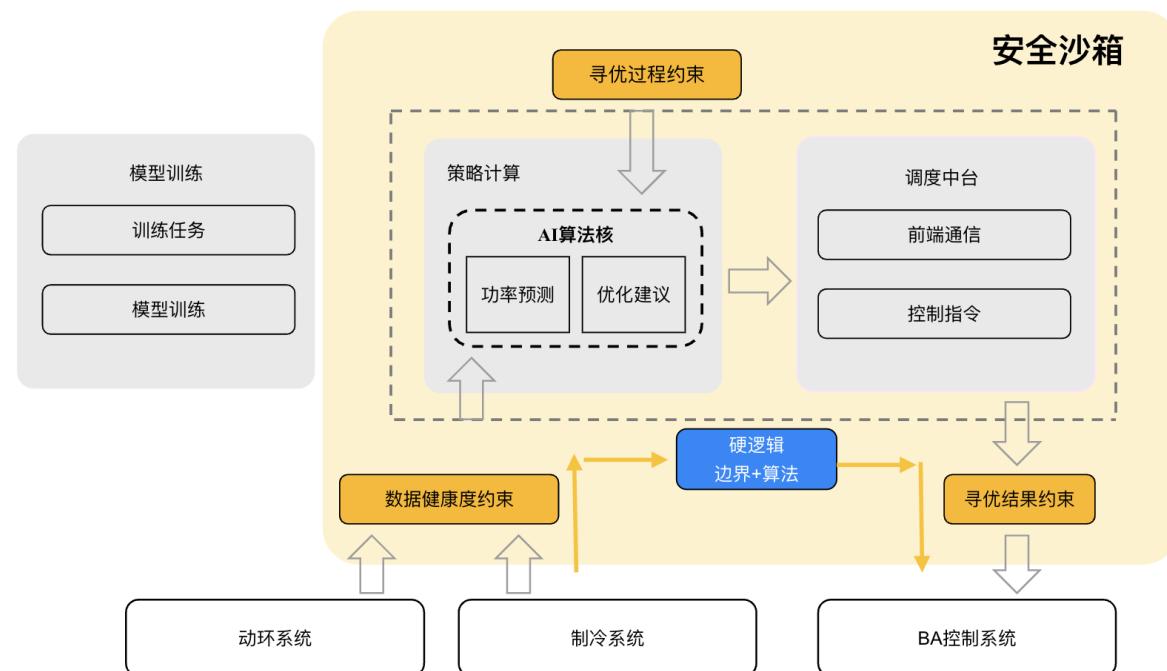


图 18 安全沙箱架构图

安全沙箱为 AI 节能调优策略算法提供了一个安全可靠的执行环境，该环境的边界和逻辑条件开放给现场运维的专家进行配置，安全沙箱主要包含输入数据健康度约束、策略寻优过程约束、策略寻优结果约束以及实时控制“硬逻辑”等功能模块。

(二) 数据健康度约束

输入数据是通过动环系统、BA 系统采集的各个传感器数据，通过标准的通讯接口服务，送到 AI 调优平台，做为 AI 算法核的输入参数。异常的输入数据将导致异常的输出结果，给数据中心的控制带来风险。异常数据产生的原因主要有：

- AI 平台的数据来源于多个系统，比如动环系统，IT 系统，BA 系统，各个系统之间时间可能不同步，错位。
- 传感器故障、长时间工作后误差变大、启动过程的尖冲等等，设备轮询过程中产生的过程参数波动，均会导致数据异常。
- 设备断电维护后，由于通讯中断，运行值还维持通讯中断前的值，但设备状态已经停止。因此需要对设备运行状态进行多维度的数据复合判断。

以上原因，需要对 AI 调优平台用到所有输入参数（大约 50 来个），逐一进行健康度约束，只有判定“合格”的数据才会输入到 AI 算法核，进行寻优计算。安全沙箱的数据健康度判断模块可以是一个开放的配置表，如下：

表 3 安全沙箱数据健康度约束

点位名称	范围
冷冻泵有功功率	10-110KW
冷冻泵运行频率	10-60Hz
冷冻泵运行状态	BOOL
冷却泵有功功率	10-110KW
冷却泵值运行频率	10-60Hz

冷却泵值运行状态	BOOL
冷却塔功率	1-40KW
冷却塔值运行频率	10-60Hz
冷却塔值运行状态	BOOL
制冷主机有功功率	0 ~ 1000kW
制冷主机电流百分比	10%-100%
制冷主机冷冻侧出水温度	8-16 °C
制冷主机冷冻侧出水压力	100-700Kpa
制冷主机冷冻侧进水温度	15-30 °C
制冷主机冷冻侧进水压力	100-700Kpa
制冷主机冷却侧出水温度	14-40 °C
制冷主机冷却侧出水压力	100-500Kpa
制冷主机冷却侧进水温度	14-35 °C
制冷主机冷却侧温差	1-10 °C
制冷主机冷却侧进水压力	100-500Kpa
冷冻水主管出水流量	100-500CMH
冷冻水主管出水温度	14-40 °C
冷冻水主管出水压力	100-700Kpa
冷冻水主管进水流量	100-500CMH
冷冻水主管进水温度	15-30 °C
冷冻水主管进水压力	100-700Kpa
室外湿球温度	0-50 °C
冷冻水主管值压差	100-400Kpa
室外温度	-10-50 °C
室外湿度	1%-99% °C
冷却塔出水温度	14-35 °C

(三) 策略寻优过程约束

冷源系统的 AI 策略计算一般寻找最优的控制策略。AI 模型基于当前的环境温湿度和 IT 负荷，对可控参数（例如冷却泵、冷却塔、冷冻泵的频率，运行台数），所有可能出现的组合进行算法计算，寻找符合约束条件的最优解。一个模型的输出，是另一个模型的输入（例如“冷却塔冷却水温差预测”和“冷机冷却侧回水温度预测”的

预测输出，即是“冷机功率预测”模型的输入），这样通过输入输出参数，将设备模型联结成系统模型。在 AI 寻优过程中，需要将不满足约束条件的控制参数组合舍弃。因此约束条件对 AI 寻优输出策略是否合理至关重要，具体的约束条件也因项目的不同而不同，例如与数据中心现场设备的品牌、额定功率、运行年限、管路连接方式、运维人员自定义的安全余量息息相关。

因此将这部分过程寻优约束条件做为安全沙箱的一个配置项，开放给运维人员设置，这样 AI 的寻优过程及输出的寻优策略，将直接受到约束条件的制约，极大提高了 AI 寻优过程的合理性和受运维专家设定的可控性。寻优约束如下图橙色框图所示，可以包含若干个系统过程参数，而不仅仅是设备的控制参数。比如冷却水温差，冷机冷却侧进水温度，冷机冷却侧出水温度，冷冻水出水温度、冷冻侧供水压差、冷源系统制冷量等等。

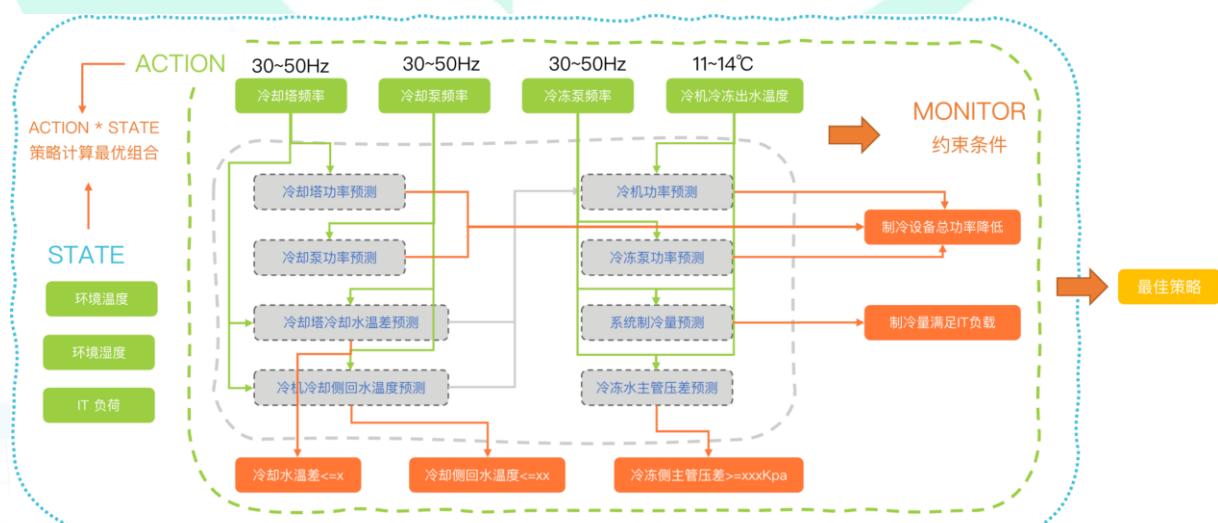


图 19 策略寻优过程约束

(四) 策略寻优结果约束

寻优结果的约束主要针对 AI 模型最终的输出的参数，进行上下限的限制，保证参数不超出现场设备允许的上下限范围。这点参考了通用 AI 输出安全控制策略的做法，只是将之做为安全沙箱的一个部件，统一综合考虑，具体参数可以参见下表。

表 4 策略寻优结果约束

序号	控制参数	下限	上限	步长	单位
1	冷冻水出水温度	11	14	0.5	℃
2	冷冻泵频率设定	30	50	1	Hz
3	冷却泵频率设定	30	50	1	Hz
4	冷却塔风机频率设定	20	50	1	Hz

当现场设备上下限范围含有较大安全余量时，可通过仿真平台进行约束边界外延分析，从而合理、适当地刷新约束边界，以获得更大的控制参数范围、节能挖潜潜力。

(五) 实时控制硬逻辑

硬逻辑是相对于 AI 软件算法软逻辑的另一种逻辑策略。如图红色数据循环图所示，硬逻辑包含了硬逻辑边界和硬逻辑算法。硬逻辑边界是运维专家设定的一些现场必须满足的设备运行参数和过程参数的限制。类似于寻优过程的约束条件，不同的是寻优过程约束边界是基于 AI 预测模型来判断的。硬逻辑边界是基于数据中心现场冷源系统实际运行的实时采集值来判断，更需要紧急处理和响应。

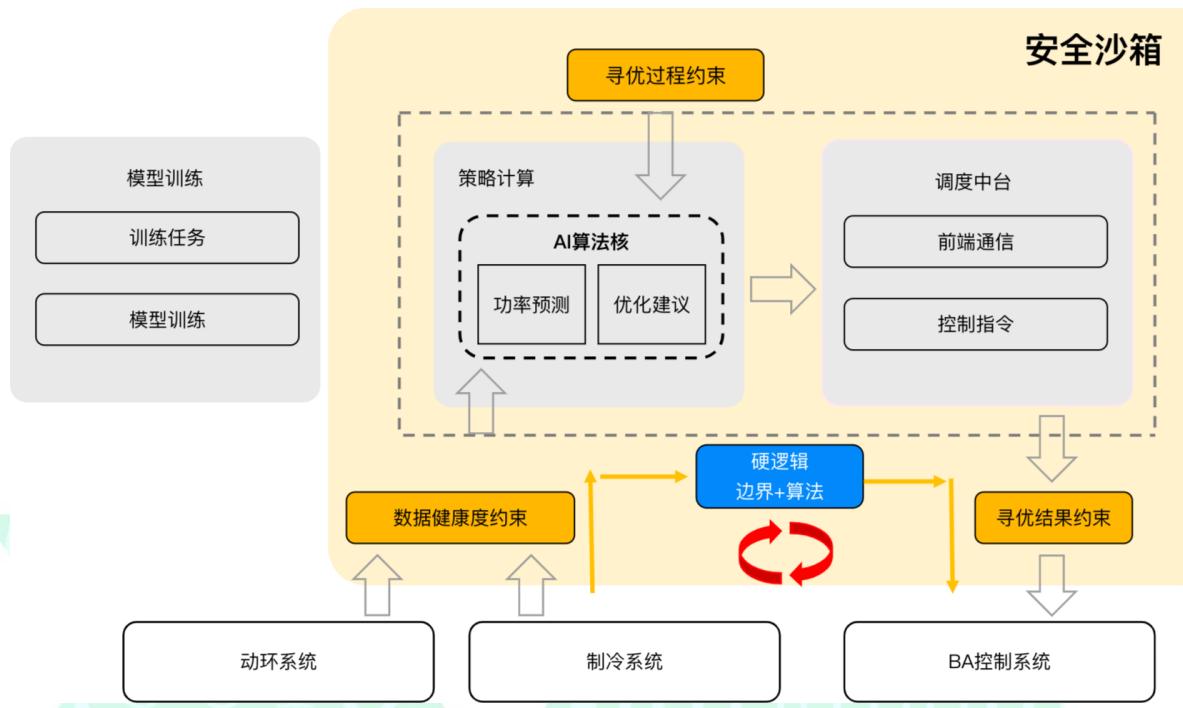


图 20 实时控制硬逻辑

当现场采集到的数据达到 AI 平台安全沙箱硬逻辑的边界时，AI 系统立即跳出 AI 模型的寻优计算，直接根据硬逻辑算法给出的响应策略，输出到 BA 系统去执行。这样提供了一种类似于应急响应的机制。因为 AI 模型计算，策略寻优时，一般需要耗时 3~5 分钟的，对于现场参数临界时，响应时间太长，可能造成现场冷源系统设备的宕机。硬逻辑则直接根据临界的的具体某项参数，直接给出运维专家事先定好响应策略，或者也可以是触发硬逻辑策略的上一次 AI 策略（回退机制），这样响应时间可以缩短到 5s 以内（通讯时间），确保数据中心现场冷源系统运行的所有参数都在边界以内，极大提高了整个 AI 系统控制调优的可靠性。

硬逻辑的配置示例如下，用户可以根据自身现场运行的实际情况，配置 N 条硬逻辑约束条件。

- 冷却塔出水温度（低）阈值限制
- 冷却塔出水温度（中）与冷机冷却侧进出水温差联合限制
- 冷机冷却侧最小流量限制
- 冷却塔出水温度（偏高）与冷机冷却侧进出水温差联合限制
- 制冷主机冷却侧进出水温差高阈值限制
- 冷却水主管 A 路/B 路压差旁通阀调节保护
- 冷冻水主管 A 路/B 路压差旁通阀调节保护
- 冷却塔出水温度（偏低）阈值限制
- 冷却塔出水温度（高）阈值限制
- 制冷主机冷冻侧出水温度高阈值限制
-

www.ODCC.org.cn

六、 开放仿真平台

(一) 仿真语言的选择

数据中心冷却系统的建模仿真属于热力系统及能量系统仿真，可通过各种编程语言和软件实现。采用专门的科学计算或物理建模语言和软件，依靠软件自带的强大的科学计算工具箱或库，可让研发人员聚焦于功能的开发上，如 Matlab 和 Modelica 等。由于科学计算和物理建模的复杂性，采用专门的科学计算或物理建模语言成为热力系统及能耗系统建模仿真的优先选择。

Matlab 是一种通用的数值计算和科学编程语言，用于数学计算、数据处理和算法开发。它使用基于脚本的编程方法，适合广泛的科学和工程应用，更具灵活性。此外，Matlab 具有强大、成熟的生态系统，可与海量软件实现交互，如监控系统设计软件 Labview，直接支持 Matlab 软件程序的部署。相比之下，Modelica 的灵活性和生态较弱，故在 AI 算法的试验研究阶段采用 Matlab 可更好地与 Labview 等软件实现接口交互，以实现数据读取、策略计算、命令下发、可视化操作界面等功能。

但 Modelica 可直接提供图形化建模和仿真环境，方便建模，复用性和扩展性好，可作为在 AI 调优技术研究成熟后作为应用阶段地主要建模语言。

(二) Modelica 仿真平台

仿真平台的目的是方便开发者能够快速、低成本、低风险地开发和比较不同的控制算法，降低数据中心冷却系统的能耗、碳排放和运行费用，并提升其运行的可靠性。该开源仿真平台将以 Modelica 为建模语言和模拟引擎，并采用标准化接口（现拟采用 OpenAI Gym, BopTest）封装开放仿真平台，以方便不同领域的研究者调用。



图 21 开源仿真平台架构

该仿真平台拟采用 Modelica 作为建模语言。Modelica 是一种面向对象、基于方程的声明式编程语言（declarative language）。它可支持热、电、磁、力跨学科模拟（multi-domain modeling），作为多学科统一建模仿真的国际标准，被仿真界广泛采用。因为可输出梯度信息，它求解速度快，同时有一个活跃的开发者社区。

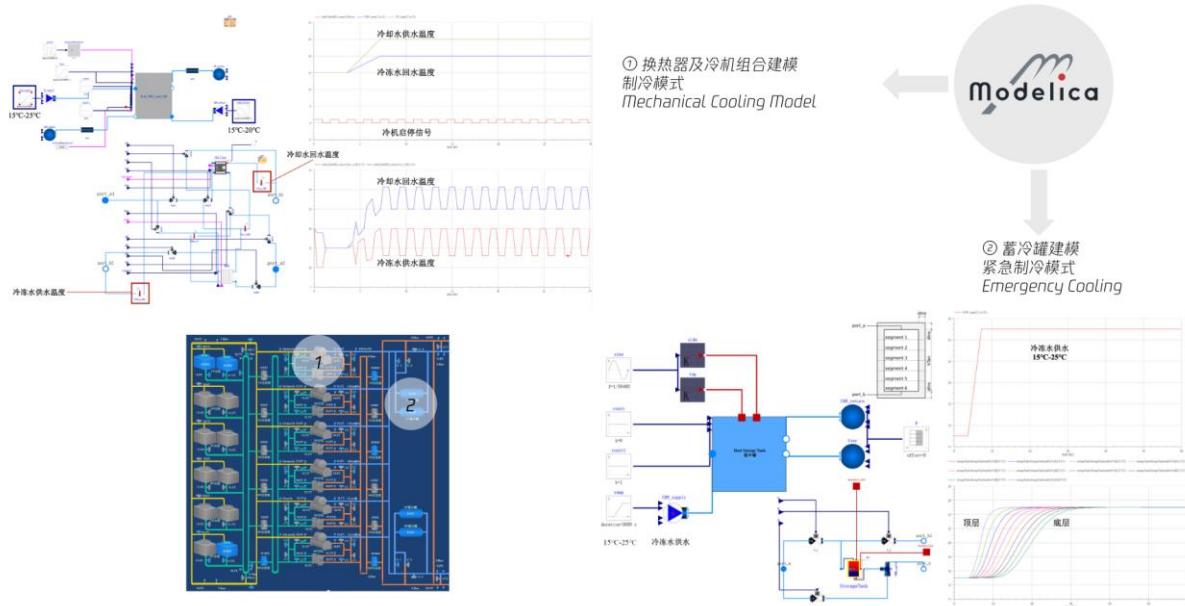


图 22 Modelica 仿真平台

根据各组件或各设备可获得的参数情况（监控参数、结构参数等），结合热学机理和特征参数，建立多级模型，以在不同数据获取程度下，依旧可提供不同精度、不同表达形式的仿真模型，以保障系统仿真平台的可建立性。

(三) 冷源系统组件

通过对典型数据中心冷却系统的分析，我们发现主要的设备类型包括：冷机、板式换热器、冷却塔、冷冻/冷却水泵、蓄冷罐。接下来分别简述上述主要模块的 Modelica 模型。

www.ODCC.org.cn

1、冷机

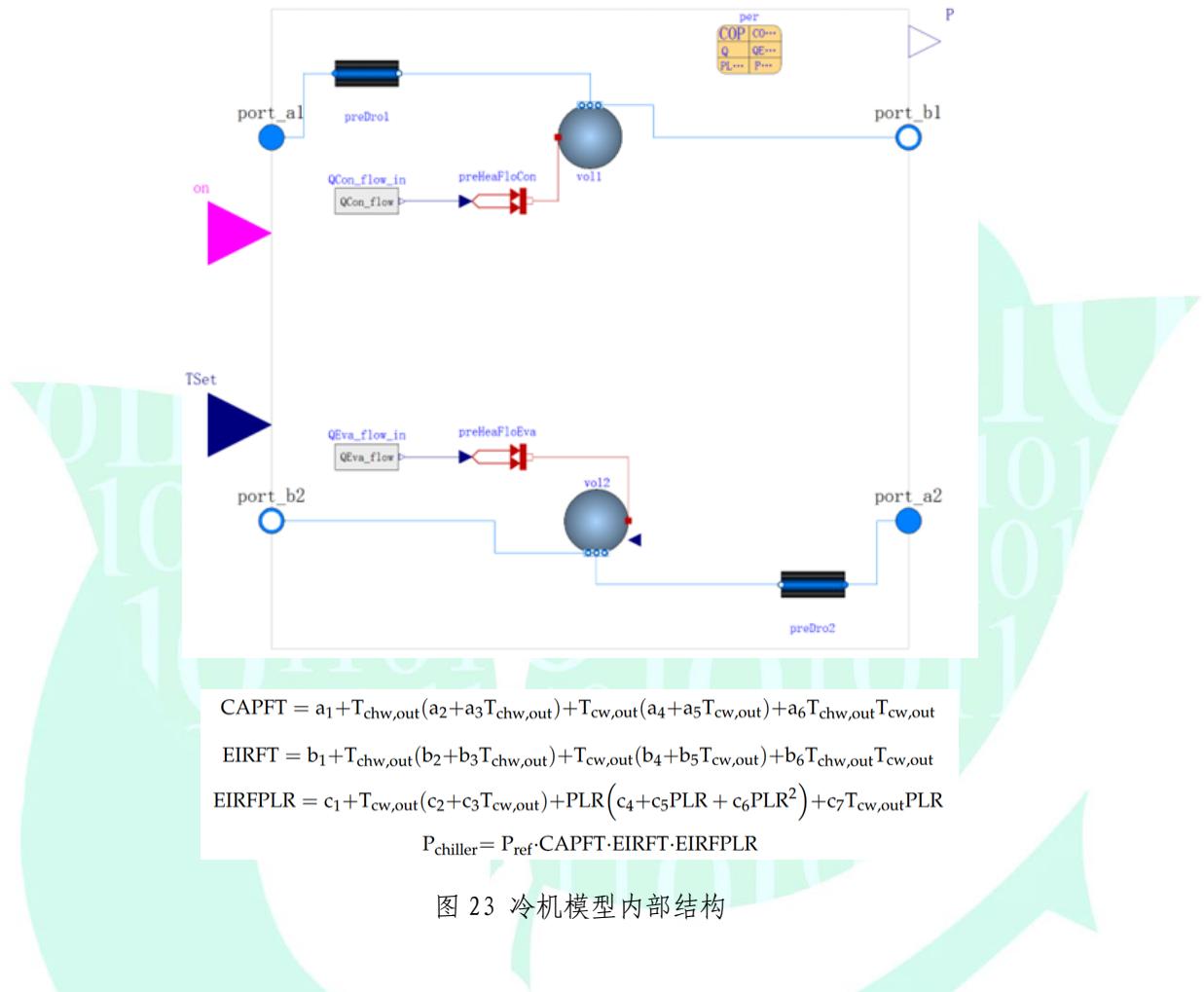


图 23 冷机模型内部结构

冷机模型概述：

模型链接：

https://simulationresearch.lbl.gov/modelica/releases/v9.1.0/help/Buildings_Fluid_Chillers.html#Buildings.Fluid.Chillers.ElectricReformulatedEIR

在该模型中，冷机的性能由上述 4 个关系式给出，4 个关系式的具体变量说明如下：

CAPFT——表示可用冷却能力为离开冷凝器 T_{cw} 和离开蒸发器 $T_{\text{ch},\text{w}}$ 流体温度的函数；

EIRFT——表示满负荷效率为离开冷凝器 T_{cw} 和离开蒸发器 T_{chw} 流体温度的函数；

EIRFPLR——代表效率为离开冷凝器的流体温度 T_{cw} 和部分负荷比 PLR 的函数。

冷机功率 $P_{chiller}$ 与额定功率 P_{ref} 的关系式。

冷机模型接口（输入输出）概述：

该模型输入运行状态、冷冻水出口温度设定值；输出冷机压缩机耗电量。具体输入、输出变量如表 5 所示。

表 5 冷机模型接口概述

类型	名称	描述
FluidPort_a	port_a1	冷却水流体入口接口，上下游可指定温度、流量、组分、压力等流体物理信息。
FluidPort_b	port_b1	冷却水流体出口接口，上下游可指定温度、流量、组分、压力等流体物理信息。
FluidPort_a	port_a1	冷冻水流体入口接口，上下游可指定温度、流量、组分、压力等流体物理信息。
FluidPort_b	port_b1	冷冻水流体出口接口，上下游可指定温度、流量、组分、压力等流体物理信息。
input BooleanInput	on	设为 on 时，开启压缩机。off 关闭压缩机。
input RealInput	TSet	冷冻水出口设定温度（单位：K，开尔文）
output RealOutput	P	压缩机功率（单位：W，瓦）

类型栏中的 Input 和 Output 分别指模型所需的输入及输出；表格名称栏指定了各输入输出及流体接口对应的名称；表格描述栏是对流体接口及输入输出量的文字描述，帮助理解模型。同时，表格的类型栏中包含了输入及输出的类型以供参考：Real, Boolean, Integer。

冷机模型参数概述：

在使用该模型的时候，需要指定冷却侧及冷冻侧的流体工质：

Medium1、Medium2。

需要基于历史运行数据或生产商数据识别冷机的三条性能曲线：

CAPFT, EIRFT, EIRFPLR（表达式详见冷机模型概述部分，识别方式参照 ASHRAE 官方指南）。

需要基于生产商数据指定冷机名义 (Nominal) 工况（此处指名义制冷量，名义 COP，名义工况下流量及蒸发器、冷凝器进出口温度等生产商数据）。

冷机模型 2 概述：(ASHRAE 半经验模型)

最常用的冷水机组能耗模型来自 ASHRAE 出版的《ASHRAE applications handbook》，此冷水机组能耗模型具有较优精确度，但 $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ 等系数由实验拟合得到，依赖实验数据的准确性。其具体表达式如下：

$$P_{ch} = a_0 + a_1(T_{cws} - T_{chws}) + a_2(T_{cws} - T_{chws})^2 + a_3Q_{ch} + a_4Q_{ch}^2 + a_5Q_{ch}(T_{cws} - T_{chws})$$

其中： T_{cws} —冷却水入口温度

T_{chws} —冷冻水供水温度

P_{ch} —冷水机组功率

Q_{ch} —冷水机组负荷

$a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ —冷水机组能耗模型的模型参数

冷机模型 2 参数概述:

冷却水入口温度、冷冻水供水温度、冷水机组负荷、冷水机组功率。

2、板式换热器

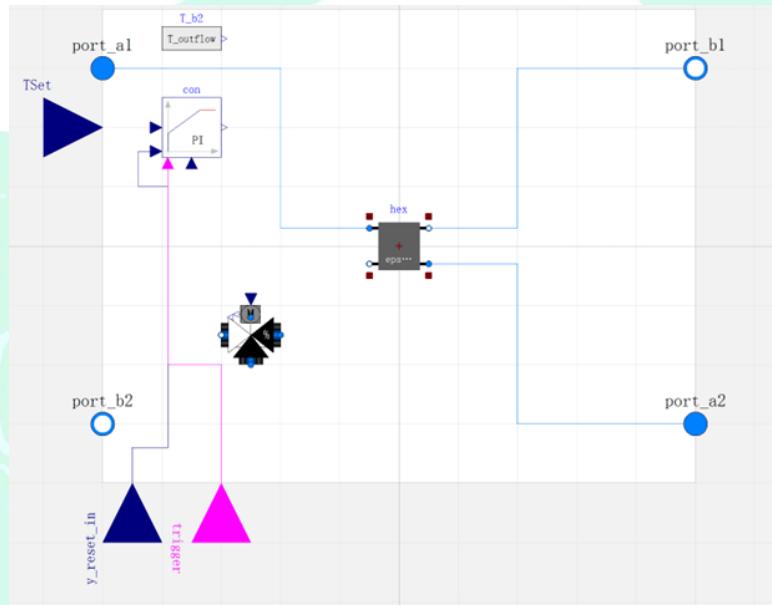


图 24 换热器模型内部结构

换热器模型概述:

模型链接:

基础换热器模型:

https://simulationresearch.lbl.gov/modelica/releases/v9.1.0/help/Buildings_Fluid_HeatExchangers.html#Buildings.Fluid.HeatExchangers.PlateHeatExchangerEffectivenessNTU

- 如有出口温控需要，则对该换热器模型进行简单改进即可得到如图 24 所示带出口温度 PID 控制的换热器模型。该换热器模型可以实现出口冷冻水温度的 PID 控制，PID 控制启用时，

可以通过调节换热器模型内部的三通阀门流量实现冷冻水侧温度控制。

换热器模型中的性能计算基于传热单元数(NTU)法，由以下3个式子给出，同时将式中具体变量说明如下：

$$NTU = \frac{UA}{(\dot{m}c_p)_{Min}} \quad R_C = \frac{(\dot{m}c_p)_{Min}}{(\dot{m}c_p)_{Max}} \quad \epsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 + R_C)]}{(1 + R_C)}$$

NTU：传热单元数。UA：总传热系数。Rc：两侧水当量小者与大者的比值。 ϵ ：换热器效能。

换热器模型接口（输入输出）概述：

该模型输入冷却水、冷冻水入口流体物性参数；输出经换热过程的冷却水、冷冻水出口流体物性参数。具体输入、输出变量如表6所示。

表 6 换热器模型接口概述

类型	名称	描述
FluidPort_a	port_a1	冷却水流体入口接口，上下游可指定温度、流量、组分、压力等流体物理信息。
FluidPort_b	port_b1	冷却水流体出口接口，上下游可指定温度、流量、组分、压力等流体物理信息。
FluidPort_a	port_a1	冷冻水流体入口接口，上下游可指定温度、流量、组分、压力等流体物理信息。
FluidPort_b	port_b1	冷冻水流体出口接口，上下游可指定温度、流量、组分、压力等流体物理信息。

类型栏中的 Input 和 Output 分别指模型所需的输入及输出；表格名称栏指定了各输入输出及流体接口对应的名称；表格描述栏是对流体接口及输入输出量的文字描述，帮助理解模型。同时，表格

的类型栏中包含了输入及输出的类型以供参考：Real, Boolean, Integer.

换热器模型参数概述：

在使用该模型的时候，需要指定冷却侧及冷冻侧的流体工质：
Medium1、Medium2；换热器类型 Heat Exchanger Configuration
(顺流/逆流/混流等)。

使用生产商数据指定名义(Nominal)工况下的流量、换热器效能等参数。

3、冷却塔

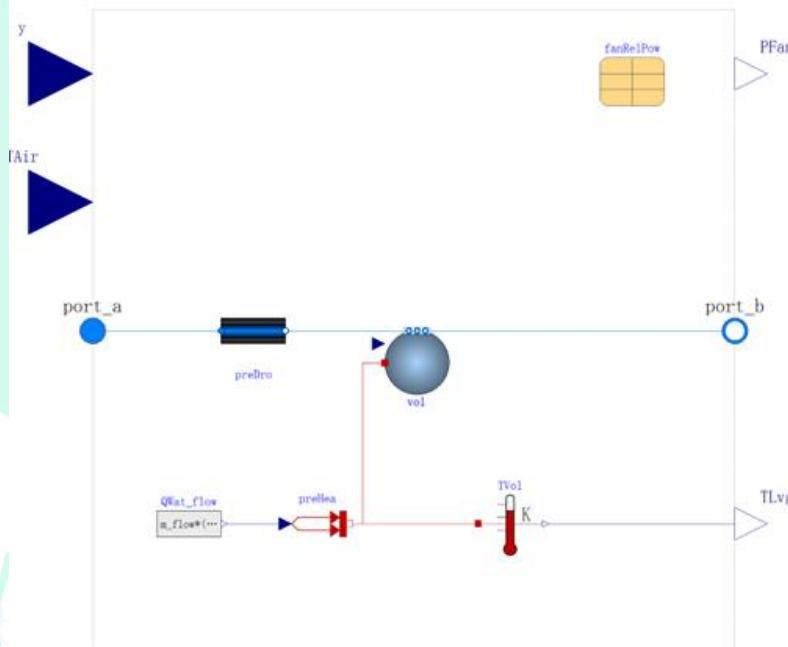


图 25 冷却塔内部结构

冷却塔模型概述：

模型链接：

https://simulationresearch.lbl.gov/modelica/releases/v9.1.0/help/Buildings_Fluid_HeatExchangers_CoolingTowers.html#Buildings.Fluid.HeatExchangers.CoolingTowers.YorkCalc

$$\begin{aligned} T_{app} = & a_1 + a_2 T_{wb} + a_3 T_{wb}^2 + a_4 T_{ran} + a_5 T_{ran} T_{wb} + a_6 T_{wb}^2 T_{ran} + a_7 T_{ran}^2 + \\ & a_8 T_{wb} T_{ran}^2 + a_9 T_{wb}^2 T_{ran}^2 + a_{10} r + a_{11} T_{wb} r + a_{12} T_{wb}^2 r + a_{13} T_{ran} r + a_{14} \\ & T_{wb} T_{ran} r + a_{15} T_{wb}^2 T_{ran} r + a_{16} T_{ran}^2 r + a_{17} T_{wb} T_{ran}^2 r + a_{18} T_{wb}^2 T_{ran}^2 r + a_{19} r^2 \\ & + a_{20} T_{wb}^2 r^2 + a_{21} T_{wb}^2 r^2 + a_{22} T_{ran} r^2 + a_{23} T_{wb} T_{ran} r^2 + a_{24} T_{wb}^2 T_{ran} r^2 + a_{25} T_{ran}^2 r^2 \\ & + a_{26} T_{wb} T_{ran}^2 r^2 + a_{27} T_{wb}^2 T_{ran}^2 r^2 \end{aligned}$$

$$P = f_1 + f_2 Q + f_3 Q^2$$

该模型中，冷却塔的性能由上述 2 个关系式给出。不仅包含冷却塔的接近温度关系，亦包含了冷却塔内部风机的性能。式中具体变量说明如下：

接近温度关系： T_{app} 接近温度。 T_{wb} 室外湿球温度。 T_{ran} 进出塔冷却水温差。 r 冷却塔液气比。

风机性能： P 功率。 Q 流量。 f_i 系数。

冷却塔模型接口（输入输出）概述：

该模型的输入为风机控制信号、室外湿球温度；输出为内部风机耗电量及出塔冷却水温度。

表 7 冷却塔模型接口概述

类型	名称	描述
FluidPort_a	port_a1	冷却水流体入口接口，上下游可指定温度、流量、组分、压力等流体物理信息。
FluidPort_b	port_b1	冷却水流体出口接口，上下游可指定温度、流量、组分、压力等流体物理信息。
output RealOutput	TLvg	出塔冷却水水温（单位：K，开尔文）
input RealInput	TAir	进塔空气湿球温度（单位：K，开尔文）
input RealInput	y	风机控制信号
output RealOutput	PFan	风机功率（单位：W，瓦）

类型栏中的 Input 和 Output 分别指模型所需的输入及输出；表格名称栏指定了各输入输出及流体接口对应的名称；表格描述栏是对流体接口及输入输出量的文字描述，帮助理解模型。同时，表格的类型栏中包含了输入及输出的类型以供参考：Real, Boolean, Integer.

冷却塔模型参数概述：

在使用该模型时，需指定冷却塔内部工质 Medium，并指定冷却塔内传热形式 Vol。

使用生产商数据指定冷却塔名义（nominal）工况下的接近温度、冷却水进出水温差、流量、风水比、塔外空气湿球温度等。

使用生产商数据指定冷却塔内风机的流量-功率性能曲线。

冷却塔概述：（YorCalc 半经验模型）

由于数据中心所有者很难获得冷却塔的一些详细参数，所以结合“热学机理+特征参数”的半经验模型在仿真软件和仿真研究中较为常用，且更适用于后续算法优化。

介绍一种精确的、应用广泛的冷却塔半经验模型（YorCalc 模型），如下式所示，该模型仅需 ASHRAE 的性能数据和曲线即可拟合。

$$\begin{aligned}
 T_{app} = & C_1 + C_2 T_{wb} + C_3 T_{wb}^2 + C_4 T_{col_d} + C_5 T_{wb} T_{col_d} + C_6 T_{wb}^2 T_{col_d} \\
 & + C_7 T_{col_d}^2 + C_8 T_{wb} T_{col_d}^2 + C_9 T_{wb}^2 T_{col_d}^2 + C_{10} LGR + C_{11} T_{wb} \\
 & \cdot LGR + C_{12} T_{wb}^2 LGR + C_{13} T_{col_d} LGR + C_{14} T_{wb} T_{col_d} LGR \\
 & C_{15} T_{wb}^2 T_{col_d} LGR + C_{16} T_{col_d}^2 LGR + C_{17} T_{wb} T_{col_d}^2 LGR + C_{18} \\
 & \cdot T_{wb}^2 T_{col_d}^2 LGR + C_{19} LGR^2 + C_{20} T_{wb} LGR^2 + C_{21} T_{wb}^2 LGR^2 \\
 & + C_{22} T_{col_d} LGR^2 + C_{23} T_{wb} T_{col_d} LGR^2 + C_{24} T_{wb}^2 T_{col_d} LGR^2 + \\
 & C_{25} T_{col_d}^2 LGR^2 + C_{26} T_{wb} T_{col_d}^2 LGR^2 + C_{27} T_{wb}^2 T_{col_d}^2 LGR^2
 \end{aligned}$$

$$LGR = \frac{W_{ratio}}{A_{ratio}}$$

$$W_{ratio} = \frac{M_{col}}{M_{col_design}}$$

$$A_{ratio} = \frac{FS}{FS_{design}}$$

$$P_{cot} = P_{cot_design} \times A_{ratio}^3$$

冷却塔逼近度 T_{app} 与环境湿球温度 T_{wb} 、冷却水进出口温差 T_{cold} 、水汽比 LGR 有关；

其中，水汽比 LGR 由冷却水相对流量 W_{ratio} 除相对风量 A_{ratio} 算得；冷却塔风机耗功与风机额定功率相关；冷却塔制冷量可由逼近度、冷却水流量、冷却塔回水温度通过 $Q=c\dot{m}\Delta T$ 算得。

冷却塔模型参数概述：

冷却塔性能曲线/实验数据拟合、风机额定转速、风机额定功率、冷却水额定流量。

相较于详细机理模型模型，半经验模型只需设备额定参数，不需换热盘管的详细结构参数，所需参数要求低，易获取。

4. 冷却/冷冻水泵

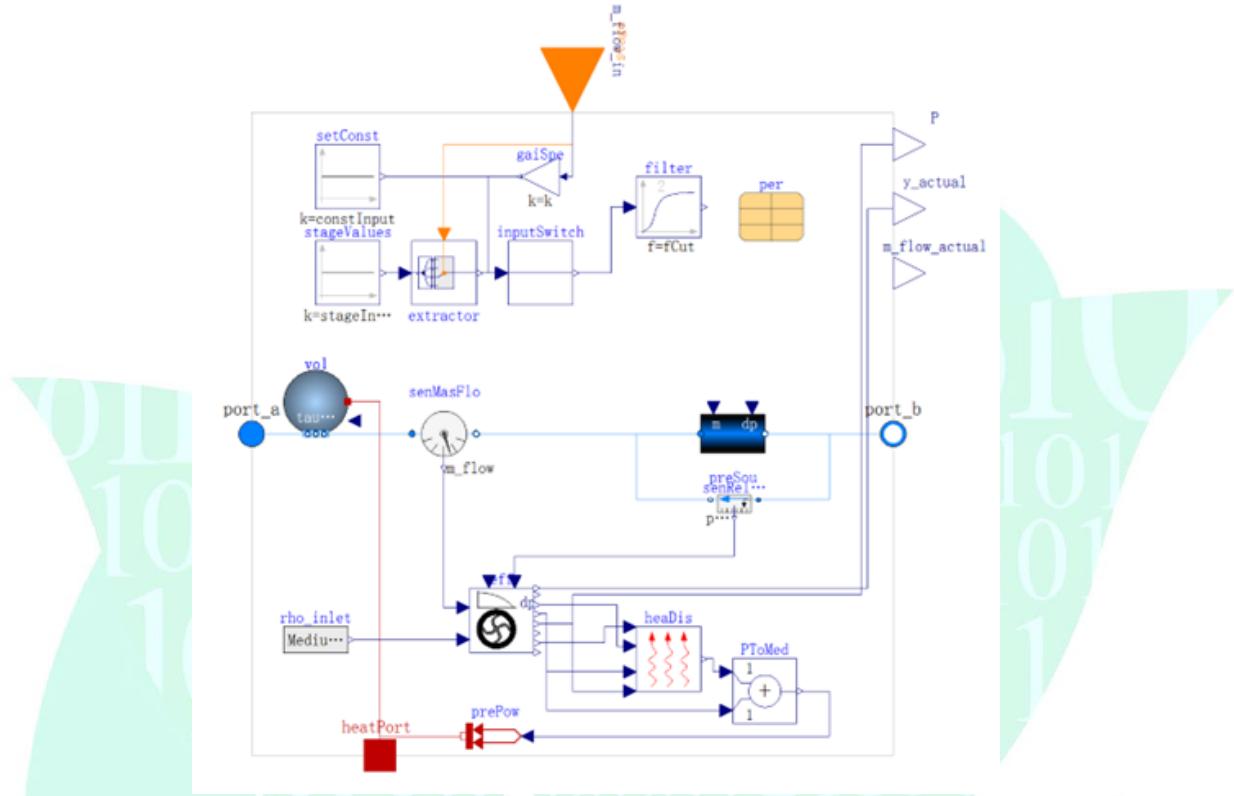


图 26 水泵内部结构

水泵模型概述:

模型链接:

https://simulationresearch.lbl.gov/modelica/releases/v9.1.0/help/Buildings_Fluid_Movers.html#Buildings.Fluid.Movers.SpeedControlled_Nrpm

该模型中，水泵的特性由 2 个关系式给出，分别为水泵的流量-扬程特性和水泵的流量-功率特性。

$$H = e_1 + e_2Q + e_3Q^2 \quad \text{水泵流量-扬程特性}$$

$$P = f_1 + f_2Q + f_3Q^2 \quad \text{水泵流量-功率特性}$$

式中具体变量说明如下：H 扬程。Q 流量。P 功率。式中 e_i , f_i 均为系数。

冷却/冷冻水泵模型接口（输入输出）概述：

该模型的输入为水泵转速及水泵特性曲线，输出为水泵功率。

表 8 冷却/冷冻水泵模型接口概述

类型	名称	描述
FluidPort_a	port_a1	冷却/冷冻水流体入口接口，上下游可指定温度、流量、组分、压力等流体物理信息。
FluidPort_b	port_b1	冷却/冷冻水流体出口接口，上下游可指定温度、流量、组分、压力等流体物理信息。
input IntegerInput	stage	水泵压头输入信号（可选）
output RealOutput	y_actual	用于计算的实际归一化泵转速
HeatPort_a	heatPort	对环境的散热
input RealInput	Nrpm	转速（单位：rpm，转每分钟）
output RealOutput	P	水泵功率（单位：W，瓦）

类型栏中的 Input 和 Output 分别指模型所需的输入及输出；表格名称栏指定了各输入输出及流体接口对应的名称；表格描述栏是对流体接口及输入输出量的文字描述，帮助理解模型。同时，表格的类型栏中包含了输入及输出的类型以供参考：Real, Boolean, Integer.

冷却/冷冻水泵模型参数概述：

在使用该模型时，首先指定水泵运输的工质 Medium。

依据生产商数据输入水泵性能曲线，即水泵模型概述节中的流量-扬程曲线及流量-功率曲线。

指定水泵模型控制输入形式 (control input type)： stage, constant, continuous。

5. 风机

风机和水泵的原理相似，可选择相同的功耗模型经验公式。

风扇或水泵的功率 P 主要是根据流量 q_v 和压差 Δp_a 来确定，如下式所示：

$$P = k \cdot q_v \cdot \Delta p_a$$

其中流量 q_v 、压差 Δp_a 分别与转速 n 的一次、二次方成正比。

因此，风机或水泵的功率与转速的三次方成正比，即：

$$P = K \cdot n^3$$

所需参数：转速、实验数据拟合系数 K

6. 蓄冷罐

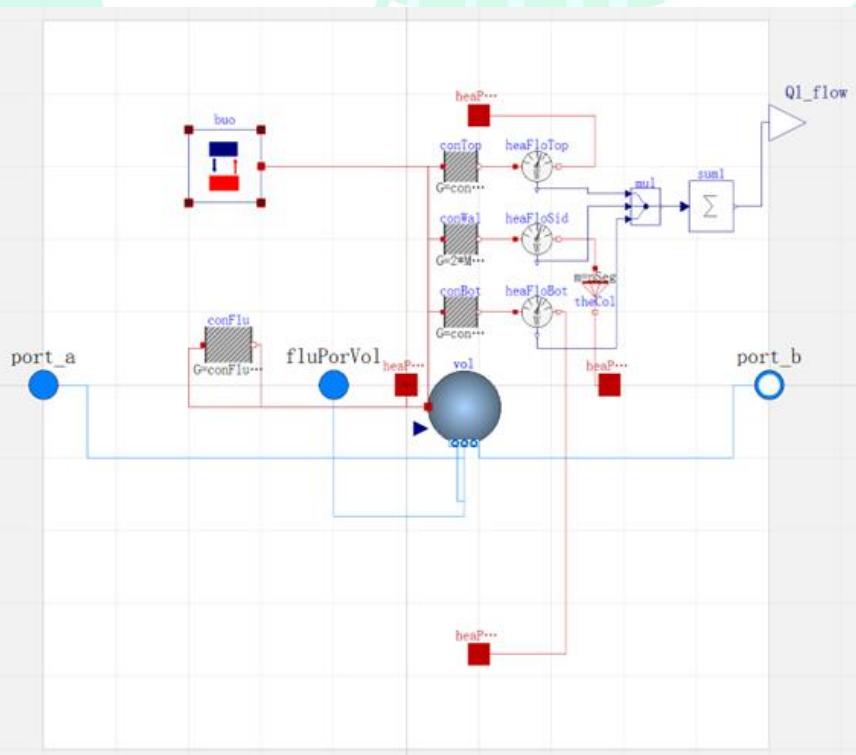


图 27 蓄冷罐内部结构

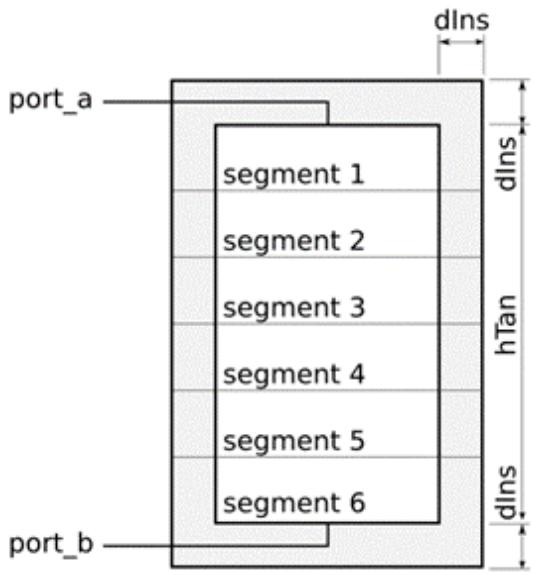


图 28 蓄冷罐结构原理示意图

蓄冷罐模型概述:

模型链接:

https://simulationresearch.lbl.gov/modelica/releases/v9.1.0/help/Buildings_Fluid_Storage.html#Buildings.Fluid.Storage.Stratified

该模型建立时，由蓄冷罐的体积参数(如：体积、高度、外壳厚度等)、内部 Segment 段数、段高度、段之间的传热性能组成热平衡方程。

该模型可以选择上下接口作为进/出水口，既可以实现蓄热，也可以实现蓄冷。

模型可以计算各层 Segment 的充/放冷(热)曲线，并计算由蓄冷罐侧壁传向周围环境的热量损失。

蓄冷罐模型接口（输入输出）概述:

该模型需要输入蓄冷罐的生产商数据，具体详见蓄冷罐模型概述节。

表 9 蓄冷罐模型接口（输入输出）概述

类型	名称	描述
FluidPort_a	port_a	蓄冷罐流体接口，上下游可指定温度、流量、组分、压力等流体物理信息。
FluidPort_b	port_b	蓄冷罐流体接口，上下游可指定温度、流量、组分、压力等流体物理信息。
output RealOutput	Q1_flow	蓄冷罐热损失(如果热量从蓄冷罐罐流向环境，则为正)
HeatPort_a	heaPorVol[nSeg]	连接到蓄冷罐内部传热控制体的热接口
HeatPort_a	heaPorSid	蓄冷罐侧面热接口(外保温)
HeatPort_a	heaPorTop	蓄冷罐顶面热接口(外保温)
HeatPort_a	heaPorBot	蓄冷罐底面热接口(外保温)
FluidPort_a	f1uPorVol[nSeg]	连接到蓄冷罐内部传热控制体的热接口。

类型栏中的 Input 和 Output 分别指模型所需的输入及输出；表格名称栏指定了各输入输出及流体接口对应的名称；表格描述栏是对流体接口及输入输出量的文字描述，帮助理解模型。同时，表格的类型栏中包含了输入及输出的类型以供参考：Real, Boolean, Integer.

蓄冷罐模型参数概述：

在使用该模型的时候，首先指定蓄冷罐传输的工质 Medium。
依据生产商数据，给定蓄冷罐尺寸、传热段数、传热段尺寸等信息。

(四) 仿真系统集成

在得到各设备多级模型后，用热力学知识将设备机理模型进行组合，一个模型的输出是另一个模型的输入，通过输入输出参数，将设备模型联结成系统模型。

须特别指出，针对冷板式液冷系统，数据中心一二次侧通过 CDU 形成强耦合，IT 设备通过管网系统与外部冷源设备形成连续的换热路径。基于冷板式液冷系统的架构特征，仿真平台的建立可进一步延伸至数据中心内部乃至 IT 设备侧，拓展了仿真界面，为后续的 AI 调优控制界面拓展奠定了基础。

以液冷系统为例，通过 Matlab 搭建系统级机理仿真模型，采用 Labview 开发可视化仿真平台界面。

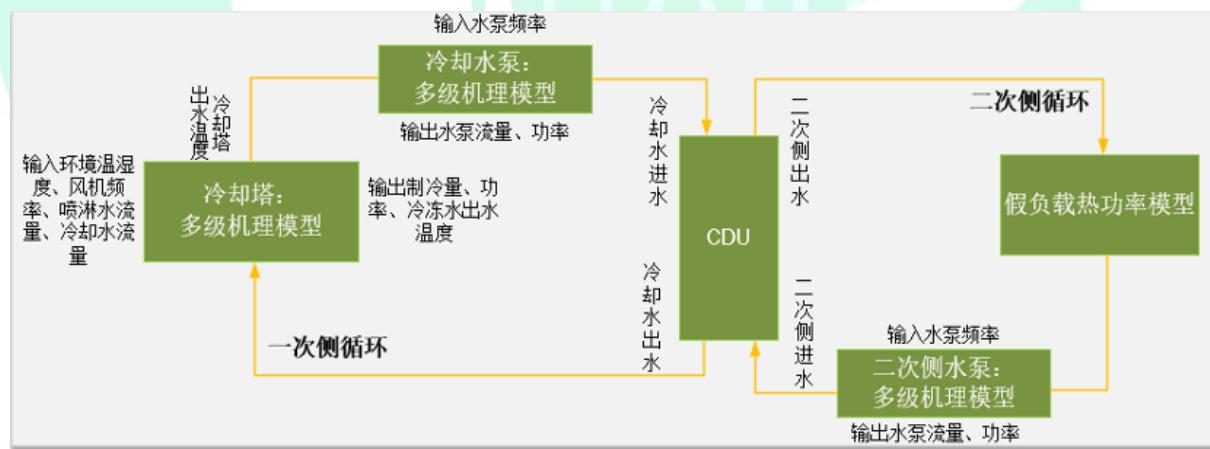


图 29 液冷系统可视化仿真平台

(五) 冷源仿真系统

融合机理模型和数据驱动的仿真系统，依照某数据中心实际制冷系统进行搭建。其包含的主要冷却设备为：冷却塔、冷水机组、板式换热器、冷却水泵、冷冻水泵、蓄冷罐。

其中，拼装式冷却塔两两封装为冷却塔组；冷水机组与板式换热器一对一封装建模为“冷机-换热器”模型，也即每个“冷机-换热器”模型中均含有一台冷机及一台换热器，并包含冷却侧的 4 个阀门及冷冻侧的 4 个阀门；蓄冷罐与蓄冷罐开关阀门 1 至 3 共同封装建模。

本节将从整体至局部介绍某数据中心实际制冷系统的建模情况，包含模型简介与现时模型与现场实测数据的对比，揭示目前仿真精度。

1、某数据中心 Modelica 模型

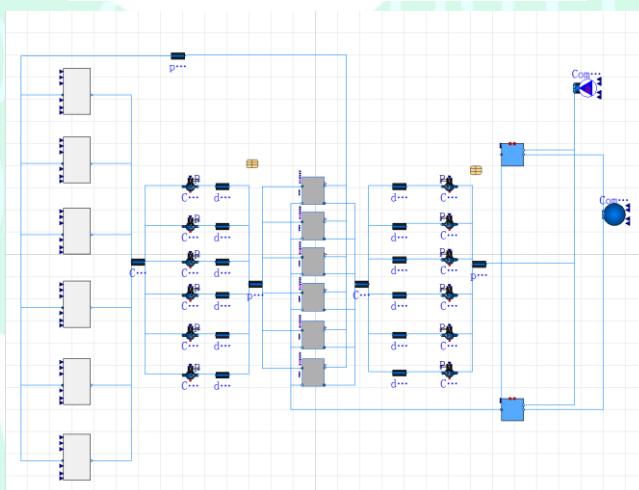
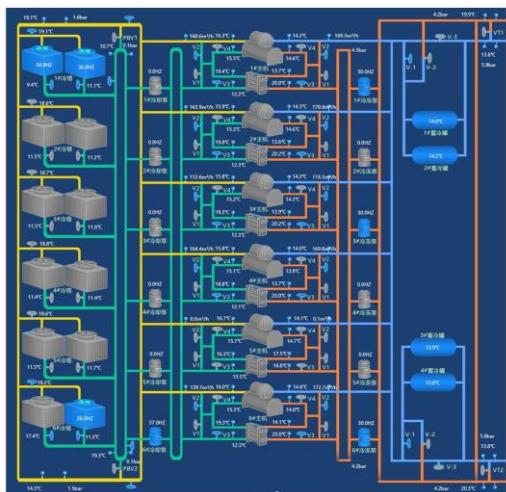


图 30 机房制冷系统组态图和 Modelica 仿真系统图

上图展示了某数据中心的机房实际制冷系统组态图（左），与针对该系统采用 Modelica 搭建的制冷系统模型拓扑图（右）。仿真模型设备与实际系统设备一一对应。

2、冷机-换热器封装模型

冷水机组与板式换热器一对一封装建模为“冷机-换热器”模型。每个“冷机-换热器”模型中均含有一台冷机及一台换热器，并包含冷

却侧的 4 个阀门及冷冻侧的 4 个阀门。封装后的模型输入为：冷却侧阀门开关控制、冷冻侧阀门开关控制、冷机启停控制、冷机蒸发器出口设定温度；输出为：冷机功率。同时，4 个流体接口分别输入/输出 冷却水/冷冻水 的物性参数（温度，压力，流量）。冷却侧连接冷却塔冷却水回水总管，冷冻侧连接机房冷冻水供水总管。

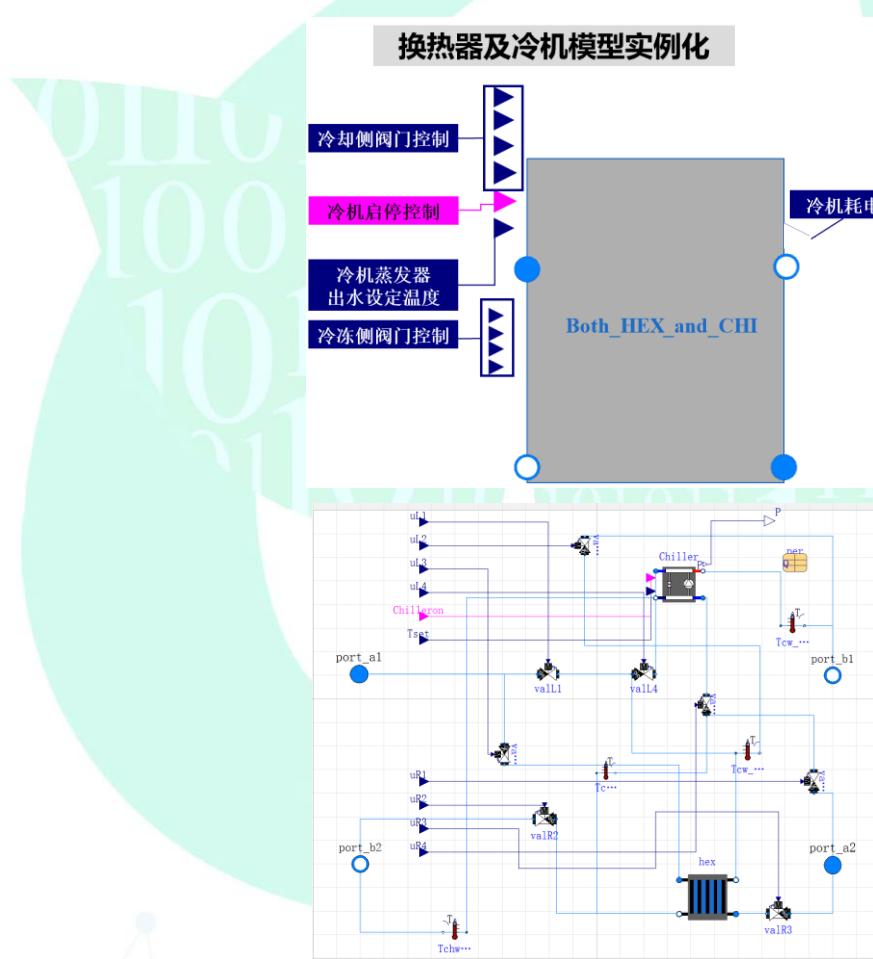


图 31 冷机-换热器封装模型

功能性验证：

对封装的模型进行了功能性验证，包含免费冷源单独供冷、主机与免费冷源联合供冷、主机单独供冷三个制冷模式。功能性验证

只验证模型正误，不涉及模拟精度，因此不采用现场实测数据作为边界条件，只采用较为简单的边界条件。

(1) 免费冷源单独供冷

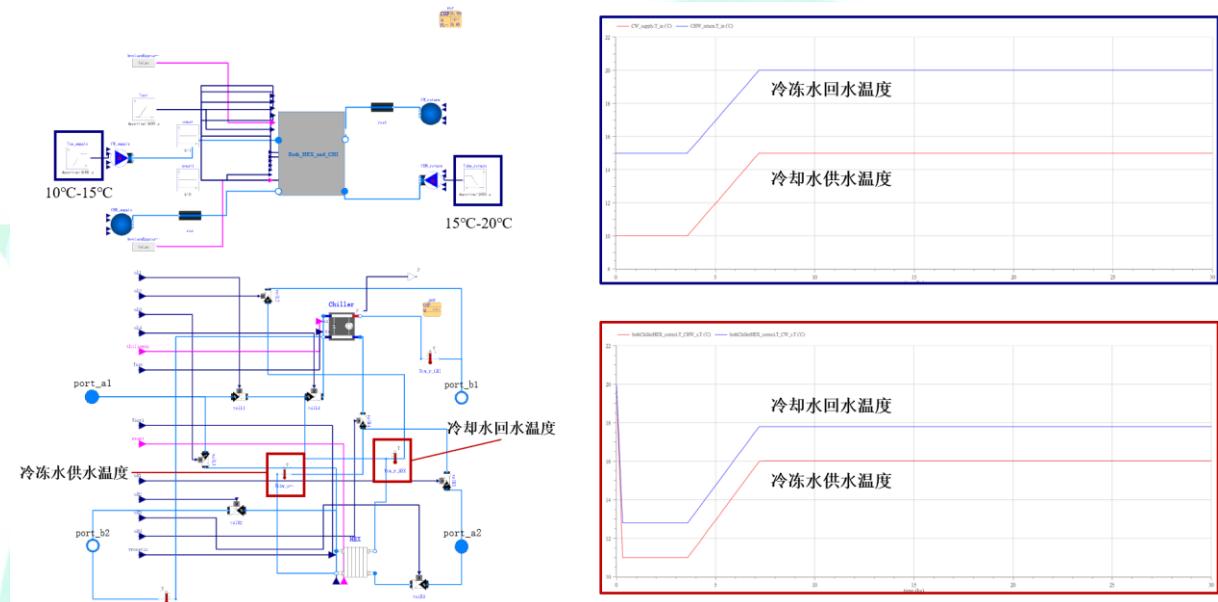


图 32 免费冷源单独供冷

(2) 主机与免费冷源联合供冷

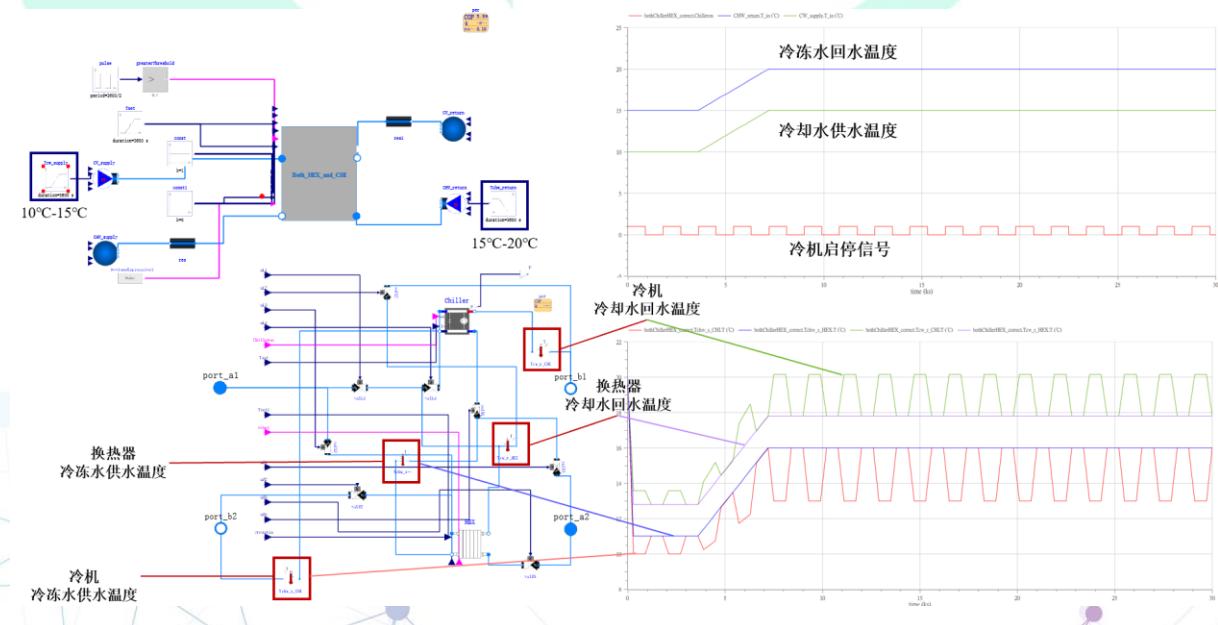


图 33 主机与免费冷源联合供冷

(3) 主机单独供冷

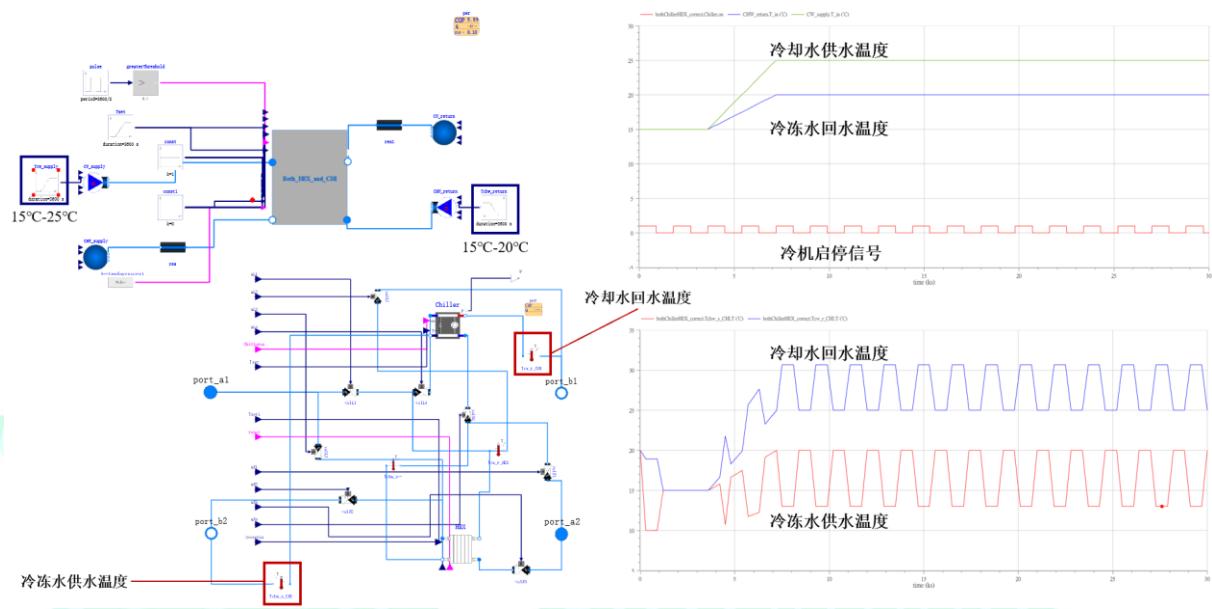


图 34 主机单独供冷

经验证，封装好的冷机-换热器模型可以很好地对三个制冷模式进行模拟。

3、蓄冷罐封装模型

蓄冷罐与蓄冷罐开关阀门 1 至 3 共同封装建模。

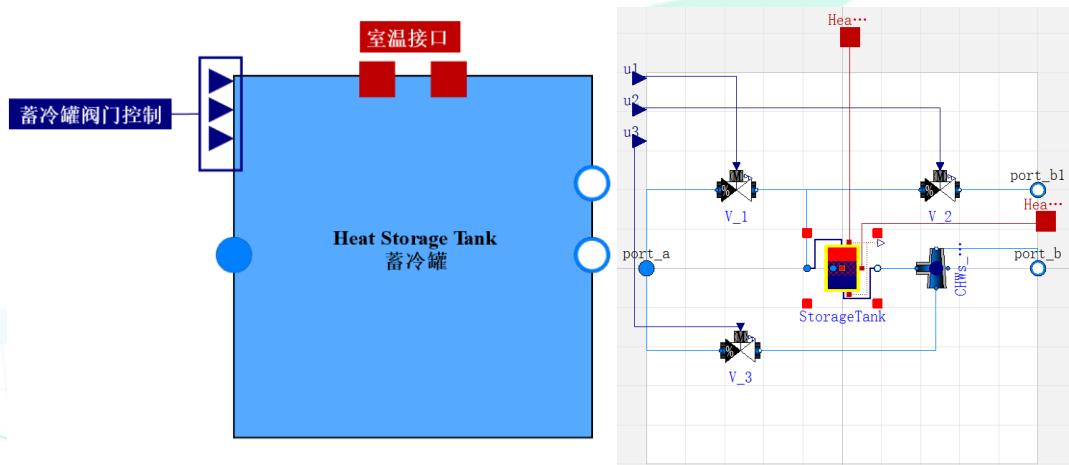


图 35 蓄冷罐封装模型

功能性验证：

对封装的模型进行了功能性验证，包含蓄冷罐充冷、蓄冷罐放冷两个工作模式。功能性验证只验证模型正误，不涉及模拟精度，因此不采用现场实测数据作为边界条件，只采用较为简单的边界条件。

(1) 充冷模式

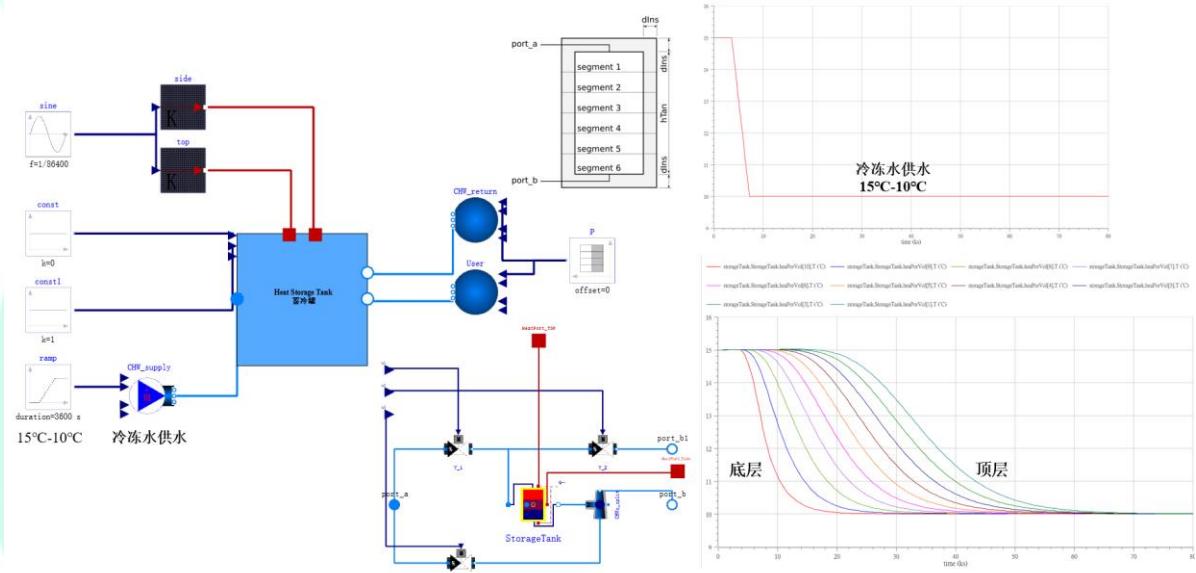


图 36 充冷模式

如图所示，充冷时由底层充冷，底层温度最先发生变化开始降温，这一现象逐层传递，最后传递到顶层。

www.ODCC.org.cn

(2) 放冷模式

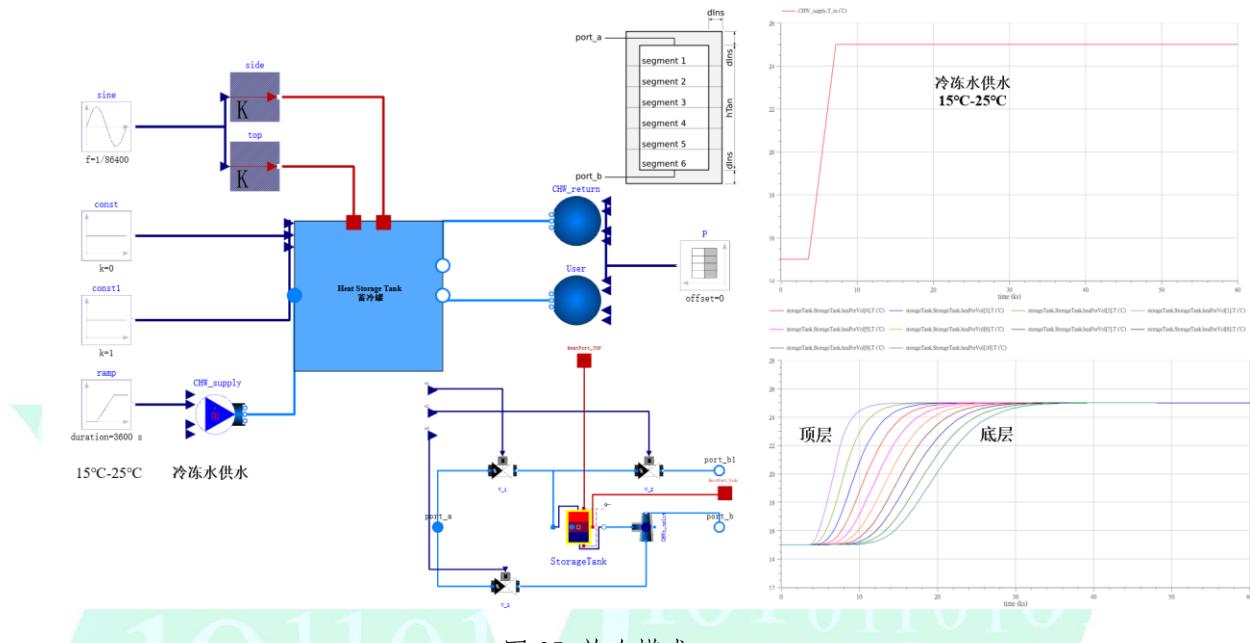


图 37 放冷模式

如图所示，放冷时由顶层放冷，顶层温度最先发生变化开始升温，这一现象逐层传递，最后传递到底层。

经验证，封装的蓄冷罐模型可以很好地对充冷过程及放冷过程进行模拟。

4、设备级仿真精度

(1) 板式换热器

以板换 01 为例，现时的仿真展现出较好的精度。评判指标为冷冻水侧出水温度。以现场数据中的冷却水侧入口流量、温度和冷冻水侧入口流量、温度为边界条件，搭建设备级验证模型，如图所示。

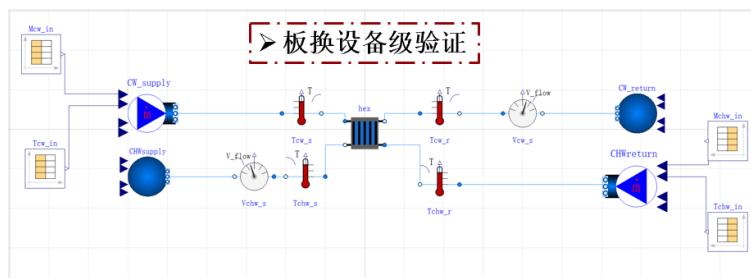


图 38 板换设备级验证

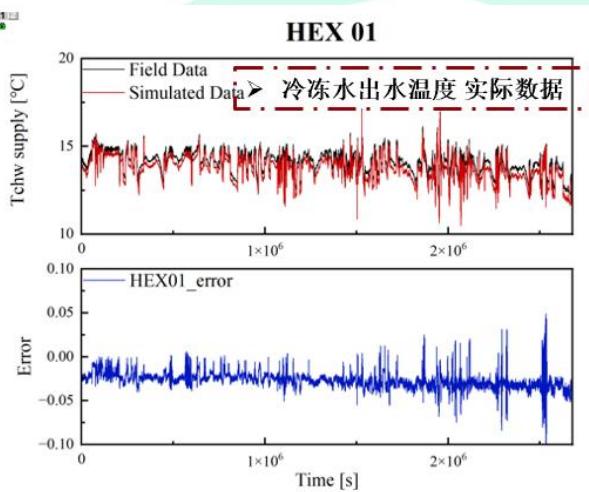


图 39 冷冻水出水温度 MAPE

由图可知，动态模拟所得全年冷冻水侧出口温度趋势与现场数据高度相符，误差均在 5% 以内。

全年冷冻水出水温度 MAPE: 2.68 %

(2) 冷水机组

以冷机 01 为例，现时的仿真展现出较好的精度。评判指标为冷冻水侧出水温度、冷却水侧出水温度和压缩机消耗的功率。以现场数据中的冷却水侧入口流量、温度和冷冻水侧入口流量、温度为边界条件，同时输入冷机启停信号，搭建设备级验证模型，如图所示。

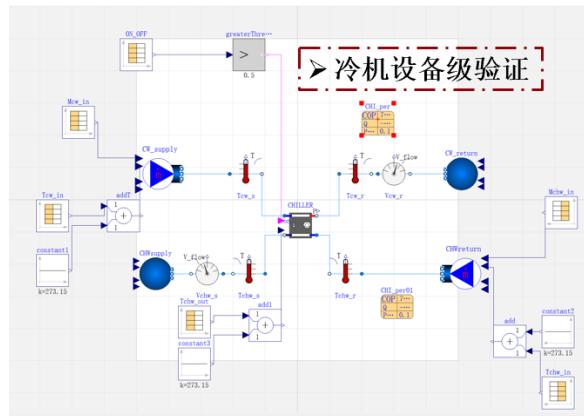


图 40 冷机设备级验证

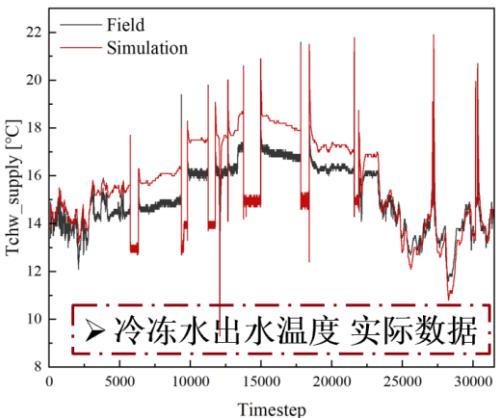


图 41 冷冻水出水温度 MAPE

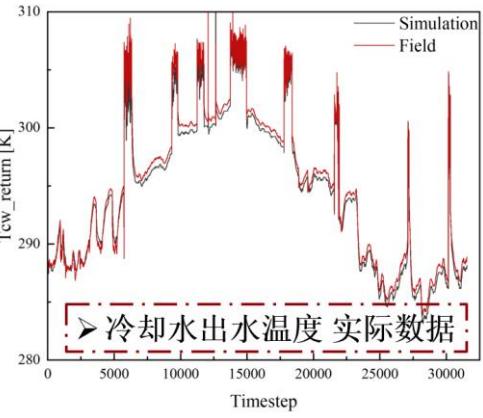


图 42 冷却水出水温度 MAPE

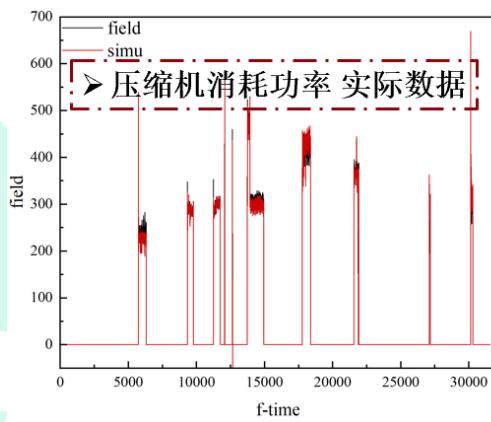


图 43 冷机功率 MAPE

由图可知，动态模拟所得全年冷冻水/冷却水侧出口温度趋势与现场数据高度相符，压缩机功率与现场数据亦相符很好，符合所需精度。

全年冷机功率 MAPE: 4.3%. 全年冷机冷却侧出水温度 MAPE: 0.853%.

(3) 冷却/冷冻水泵

以冷冻水泵 01 为例，现时的仿真展现出较好的精度。评判指标为水泵消耗的功率。以现场数据中的冷冻水侧入口流量、水泵转速为边界条件，同时输入水泵特性曲线，搭建设备级验证模型，如图所示。

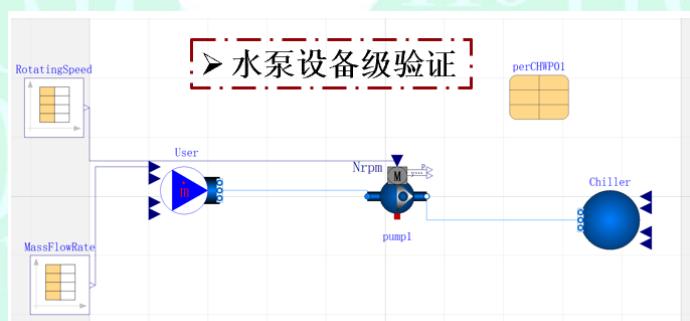


图 44 水泵设备级验证

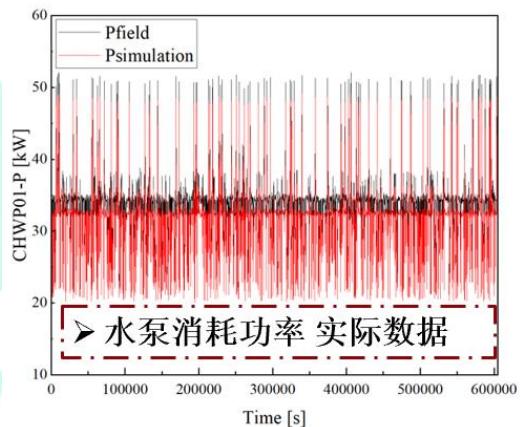


图 45 冷冻水泵功率 MAPE

由图可知，动态模拟所得全年水泵功率与现场数据高度相符，符合所需精度。

全年冷冻水泵功率 MAPE: 5.27 %.

(4) 冷却塔

以冷却塔 01 为例，现时的仿真展现出较好的精度。评判指标为风机消耗的功率和冷却塔出水温度的预测。以现场数据中的冷却塔进水流量、温度，风机转速，室外湿球温度为边界条件，搭建设备级验证模型，如图所示。

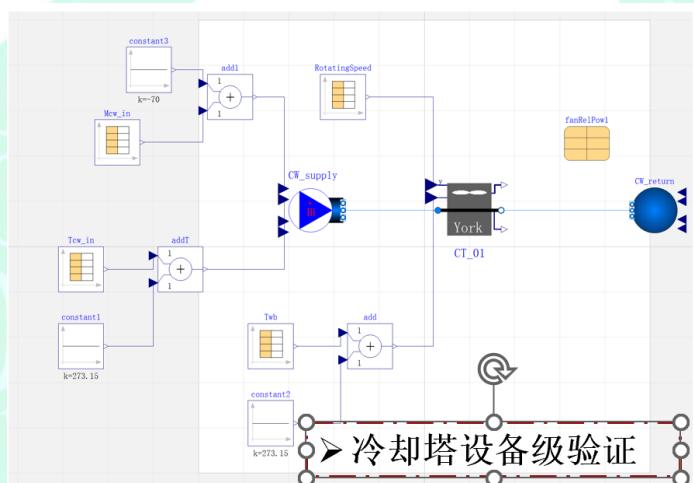


图 46 冷却塔设备级验证

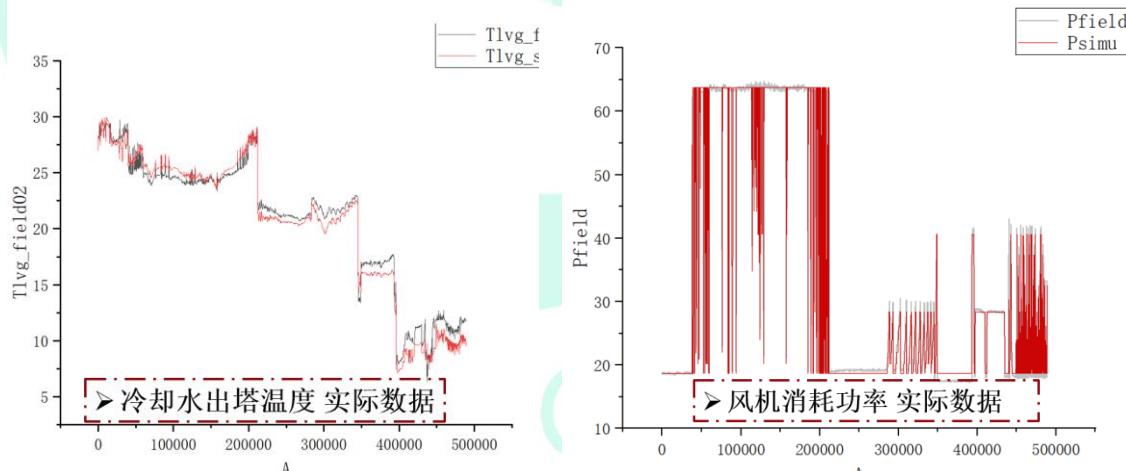


图 47 冷却水出塔温度 MAPE

图 48 风机功率 MAPE

由图可知，动态模拟所得全年冷却水出塔温度趋势与现场数据高度相符，风机功率与现场数据亦相符很好，符合所需精度。

全年冷却水出塔温度 MAPE: 4.8 %. 风机功率 MAPE: 2.29%.

(5) 蓄冷罐

因蓄冷罐全年未有放冷启用，亦无蓄冷罐温度等相关信息，因此尚无法进行蓄冷罐模型的设备级验证。

七、数据治理规范

AI 行业有句谚语：“Garbage in, garbage out”，基于坏数据或差数据训练生成的模型，必然会影响模型预测精度，甚至生成错误或反逻辑的控制策略，造成暖通系统运行超出安全边界危害系统安全或者生成热点，最终影响数据中心的可靠运营。

本章阐述数据采集、治理、训练、推理和控制的最佳实践。

(一) 标准测点表

为跨越数据中心的异构性和厂商暖通设备协议差异，定义一种标准的 AI 和 BA 之间的采集和控制协议，标准化 BA 系统测点表，并确认物理系统测点与开放语义特征点之间的映射关系。

表 10 标准测点表

设备	测点	说明
制冷机组	机组冷冻水供水温度	
	机组冷冻水回水温度	
	机组冷冻水供水压力	
	机组冷冻水回水压力	
	机组冷却水供水温度	
	机组冷却水回水温度	
	冷却水温差设定	
	单元自动运行台数	
	需求运行台数	
	冷机制冷量百分比	
	小负荷设定	

	小负荷模式延时设定	
	冷机电流百分比	
	蒸发器冷媒压力	
	冷凝器冷媒压力	
	蒸发器冷媒饱和温度	
	冷凝器冷媒温度	
	压缩机油压差	
	机组制冷剂液位	
	机组排气温度	
	机组油箱温度	
	单元平均负荷百分比	
	机组状态	
	机组手自动	
	单元手/自动	
	单元启停	
	系统总启停	
	小负荷模式	
	制冷模式	自然冷、预制冷、机械冷
板式换热器	板换冷冻水供水温度	
	板换冷冻水回水温度	
	板换冷冻水供水压力	
	板换冷冻水回水压力	
	板换冷却水供水温度	
	板换冷却水回水温度	
	板换冷却水供水压力	
	板换冷却水回水压力	
冷却塔	冷却塔运行数量	
	冷却塔运行状态	
	冷却塔风机变频反馈	
	冷却塔冷却水供水温度	
	冷却塔冷却水供回水温差	
	冷却塔冷却水回水温度	
	冷却塔冷却水供水压力	
	冷却塔冷却水回水压力	
	冷却塔冷却水总流量	
	冷却塔温度旁通温度	
	当前运行冷却塔风扇数	
	实际运行阀组数	
冷却泵	冷却泵运行数量	
	冷却泵运行状态	
	冷却泵变频反馈	
	冷却泵供水温度	
冷冻泵	冷冻泵运行数量	
	冷冻泵变频反馈	
	冷冻泵运行状态	
蓄冷罐	储冷罐温度	
	储冷罐压力	
	蓄冷罐充冷温度	

	蓄冷罐充冷负荷设定	
	罐体流量计瞬时流量	
管道	总管供水温度	
	总管回水温度	
	总管供水压力	
	总管回水压力	
	总管流量	
	总管旁通压力	
	总管旁通阀反馈	
	总管压差	
	总管负荷	
动力环境数据	总能耗	
	IT 能耗	
	制冷能耗	
	PUE	
	CLF	
	制冷主机能耗	
	冷冻泵能耗	
	冷却泵能耗	
	冷却塔能耗	
	冷通道温度	

(二) 采集协议

AI 系统需要采集制冷设备运行信息、能耗信息、环境信息及数据中心能耗信息，其中制冷设备运行信息、环境信息可以从 BA 系统获取，但制冷系统能耗信息、数据中心能耗信息需要从动环系统获取。AI 系统可通过标准 BACnet 协议、Modbus 协议、SNMP 协议向 BA 系统发送消息进行 BA 相关数据采集，通过标准 Modbus 协议、SNMP 协议向动环系统发送消息进行动环相关数据采集。

针对典型冷板式液冷系统，当 AI 系统需要进一步对二次侧基础设施（室内）进行控制时，需要与二次侧对应的 BA 系统进行通讯；当 AI 控制需要更进一步对液冷芯片精准控温时，则需要与 IT 设备进行通讯。

(三) 控制协议

AI 系统对制冷机组、冷却泵、冷冻泵、冷却塔进行控制可通过标准 BACnet 协议、Modbus 协议、SNMP 协议向 BA 系统下发控制指令进行设备控制。

为满足数据中心业主和运营方对暖通系统可靠性和数据安全性的要求，一般要求在机房属地部署边缘服务器或智能采集器，实现本地数据采集和调优推理，支持双机热备和离线运行。

(四) 数据处理

数据生产链路以现场各类设备作为起始点，由动环厂家完成数据采集、数据规整后通过动环北向发布和数据映射给 MOS 机，MOS 机再进行应用上传。因数据采集协议多样化、传输过程中受网络、设备性能的影响严重，产生的数据问题主要有：数据映射不完整、数据延迟、数据非法、数据缺失、数据中断、数据冲突等。

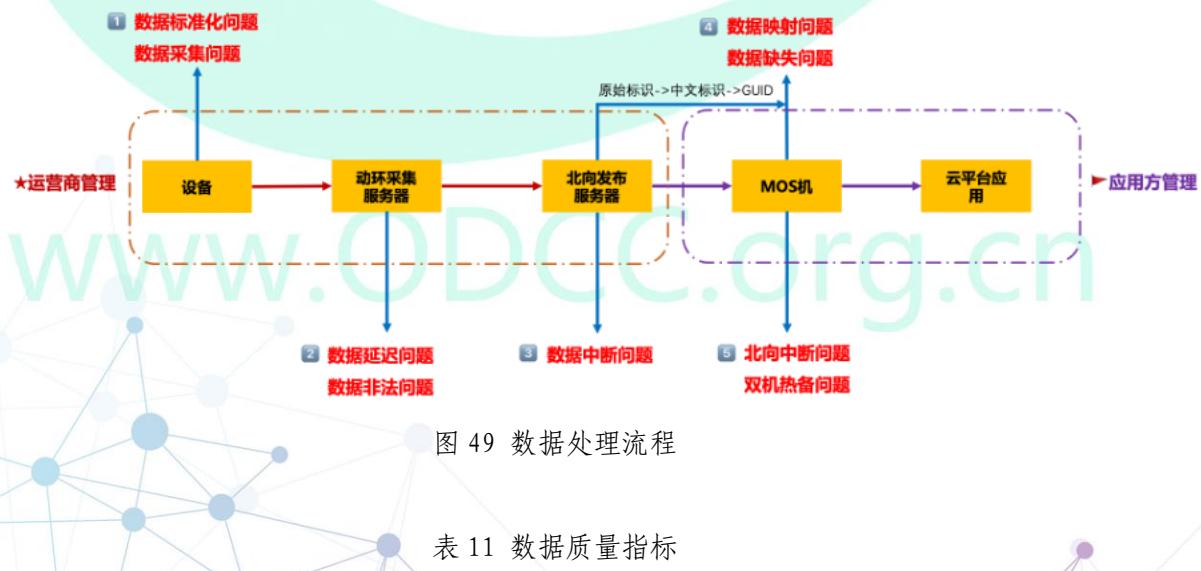


表 11 数据质量指标

数据质量指标	具体指标定义
--------	--------

数据不变	<p>已启用且已映射设备，仅对运行/合闸状态下的模拟量（AI）测点实时值进行管理；若持续不变的时间超出根据设备下测点在“设备与测点对应表”中周期字段内描述的周期后，则记一次该测点为不变问题点，指标统计周期 24 小时，刷新时间每日 0 点；周期为 0 代表不检测数据不变；部分例外情况需要单独处理，如部分低压设备电流测点数值为 0.5A 以下时，单相输出为 1A 以下时，电流、功率及电能等值不变为合理，应剔除出指标统计</p>
数据非法	<p>已启用且已映射设备内的测点，实时值不在“设备与测点对应表”内所定义的工作区间范围内，则记该测点为非法测点，指标统计周期 24 小时，数据每日 0 点刷新</p>
数据延迟	<p>有两种检测延迟的方式：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 离线检测，检测的是运营商采集数据的时间和运营商上传数据的时间，上传时间不能晚于采集时间 2min、上传时间不能早于采集时间 5s。 <p>运营商问题，周期 (t+1)</p> <ol style="list-style-type: none"> 2) 实时检测，检测的是中心平台收到数据的时间和运营商上传数据的时间，收到数据的时间不能晚于上传数据的时间 2min、收到数据的时间不能早于发送数据的时间，周期为实时 <p>备注：</p> <p>采集时间--上传时间--接收时间</p> <p>采集时间：动环从设备收到的数据时间；</p> <p>上传时间：动环发送给 MOS 机的时间；</p> <p>接受时间：平台应用接收到数据的时间。</p>
数据中断	<p>已启用且已映射设备内的测点，单次中断时长超过 3min 记为一次中断；或 1h 内频繁中断次数（含 10s）超过 15 次采集周期记为一次中断；每个测点在每天内不重复计数，指标统计周期为实时</p>
数据缺失	<p>已启用且已映射设备内的测点，在一日内（0-24）均无数据接收，则定义为数据缺失，指标统计周期为数据每日刷新；</p>
数据冲突	<p>已启用且已映射设备内的测点：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 运行状态冲突：设备的运行状态测点与该设备的实际运行状态不符。举例：列头柜所有输入状态为“分闸”但列头柜输出功率测点不为 0； 2) 设备内数据冲突：单个设备内的数据逻辑不能自洽。举例：HVDC 输入电压，输入电流经计算后与输入功率相差超过 10% 3) 设备间的数据逻辑不能自洽：举例：A、B 两路 PDU 的输出功率和小于该机柜 IT 采集到的服务器功率总和；

(五) 数据质量

保障数据质量，确保数据可用性是数据分析结论有效性和准确性的基本要求，我们从数据完整性、数据规范性、数据一致性、数据准确性、数据唯一性、数据均衡性和数据及时性七个维度来评估数据质量。

- A. **数据完整性：**完整性指的是数据信息是否存在缺失的状况，数据缺失的情况可能是整个数据记录缺失，也可能是数据中某个点位信息的记录缺失；
- B. **数据规范性：**规范性指的是描述数据遵循预定的语法规则的程度，如数据的类型、格式、取值范围等；
- C. **数据一致性：**一致性是指数据是否遵循了统一的规范，数据集合是否保持了统一的格式。数据质量的一致性主要体现在数据记录的规范和数据是否符合逻辑，一致性并不意味着数值上的绝对相同，而是数据收集、处理的方法和标准的一致；
- D. **数据准确性：**准确性是指数据记录的信息是否存在异常或错误，如乱码、异常大或者异常小、统一设备不同测点数据不符合设备运行机理（如冷机关闭但电流百分比大于 30%）的数据也是不符合准确性要求的数据；
- E. **数据唯一性：**唯一性指的是数据不存在重复或高度相似的情况；
- F. **数据均衡性：**均衡性指的是数据在不同工况下数据分布比较均匀，如 BA 系统常运行在几种固定的工况条件，需要在建模阶段尝试更多台数和运行参数组合，扩大算法寻优的控制边

界，获得全局最优策略；

G. 数据及时性：及时性是指数据从产生到可以查看的时间间隔，也叫数据的延时时长。比如数据从产生到被统计到间隔超过 30min，这种数据不符合数据及时性。

(六) 数据治理

因为多系统间时间不同步、传感器故障或者累计误差、通讯中断等问题，导致出现数据准确性、数据及时性和一致性等问题。这些数据的存在将影响模型训练效果，甚至可能使得训练难以收敛。因此，在进行模型训练之前，按照数据质量目标，对异常数据清理、修复和填充，具体包括：

1) 在检查数据完整性时，检查数据中各字段信息的缺失情况，若某个字段 90%以上均为缺失值（即未采集到数据），则需追溯导致大量缺失的原因，尝试将字段记录找回，如无法找回则只能舍弃该字段（即在建模时不考虑该字段）。此外，若某条数据中 90%以上均为缺失值，则应考虑舍弃整条数据。

2) 在检查数据规范性时，根据各个字段的业务特点，检查每个字段数据的类型、格式、取值范围等是否正确，如果发现问题，则进行纠错。

3) 在检查数据一致性时，检查数据是否遵循了统一的规范，数据集合是否保持了统一的格式，以保证数据一致性。例如，核验不同字段数据记录的采集间隔是否一致。时间间隔不一致，意味着同

一条数据中包含不同时刻的运行状况，可能对建模效果产生不良影响。

4) 在检查数据准确性时，通过单变量分析、双变量分析等常规手段，观察数据中是否存在异常值，包括数值异常和逻辑异常两种类型，其中：

数值异常是指明显超出正常范围的异常大或者异常小的数值，以及与前后时刻数据差距较大的数值，对于此类异常处理逻辑为：若是某个字段或某条数据 90%以上均为异常值，则考虑舍弃该字段或该条数据；否则，可以将异常值重置为缺失值，可通过线性插值、均值填充、中位数填充、KNN 估计值填充等方式进行修复。

逻辑异常则是不同测点数据关系不符合设备或暖通系统运行机理的数据，例如冷水机组处于关闭状态但相应的电流百分比大于 30%，又或者同一套机组的冷却泵和冷冻泵本应该同开同关，但数据却表现为冷却泵开启而冷冻泵关闭。对于逻辑异常数据，则可根据发生逻辑异常的字段的关联字段数据记录，进一步定位是哪个测点位数据发生何种异常，并选择高健康度的测点组合对逻辑异常进行修复。

5) 在检查数据唯一性时，检查数据中是否存在采集时间上相邻且各字段的数据记录完全相同或者高度近似的情况，这种高度近似的数据，多余的均为冗余数据，可能影响模型训练效果。在判断两条数据间近似程度时，可以尝试欧式距离、皮尔逊相关系数或者较

为高级的 KNN 算法等手段，量化评估数据间相似程度。当相似程度达到一定数值时，则可判断某条数据为冗余数据，可考虑清除。

6) 在检查数据均衡性时，重点关注不同工况条件下的数据是否覆盖关键点位约束范围

7) 在检查数据及时性时，检查数据从产生到可以查看的时间间隔不能超过 15 分钟

(七) 数据校准

阿里云的智能调优系统实现了模型的真实数据和专家数据相融合的上线方式，保证了在整体数据空间内都有合理输出的同时，在真实数据空间同样足够精确；另外，实现线上的新数据和旧数据之间的数据轮替，可以让模型随着时间变化而做出调整，使系统具备自适应能力。

1) 拉取测点数据宽表：目前每 10 秒传感器将返回一批测点数据，拉取所需的全部测点数据并进行聚合，形成每日离线调度的数据宽表；

2) 拉取专家数据，专家数据主要为厂商提供的数据以及根据经验公式设计的数据，这些数据可以保证趋势合理但精度不高；

3) 基于聚类算法的数据融合和残差修正，在存在真实数据空间的位置使用真实数据，没有真实数据的空间基于专家数据填充；最后利用残差修正算法对专家数据进行修正，使之更加接近真实情况；

融合成功的数据将作为初始数据上传 OSS，未来的训练数据将基于初始数据进行迭代；

4) 基于融合成功的数据对模型进行训练，使用模型包括线性回归+专家公式模型；多项式回归模型；多项式回归+专家参数选择模型。模型训练完成之后将上传 OSS 存储，供推荐系统调用；

5) 每次迭代都会拉取近 n 天的新数据和之前上传 OSS 的旧数据，新旧数据会按照之前的数据融合和残差修正算法，生成新的训练数据，并对模型进行训练和 OSS 上传，新的训练数据也将覆盖过去的旧的训练数据；

6) 每次模型更新前后的计算误差将同步更新到 ODPS，方便使用者监控模型的误差情况

(八) 寻优变更

BA 系统常运行在几种固定的工况条件，需要在建模阶段尝试更多台数和运行参数组合，扩大算法寻优的控制边界，获得全局最优策略。

冷源系统的主动测试包含了冷却塔的变台数，变频率运行，冷却泵的变台数，变频率运行，冷冻泵的变台数，变频率运行，以及冷机的变台数运行。

主动测试需要和现场有运维、数经、优化专家一起评估测试内容和测试风险，原则上只在原有基础上增加设备运行台数。变更测

试过程中，需要对系统的关键参数进行实时监控，如有超出范围，应及时进行回退及中止测试。

表 12 冷却侧测试内容示例

冷却泵台数	冷却泵频率	冷却塔台数	冷却塔频率	时间	时间长度
3	35	4	48	10: 00-12: 00	1 天
	38			12: 00-14: 00	
	41			14: 00-16: 00	
	44			16: 00-18: 00	
3	35	4	45	10: 00-12: 00	1 天
	38			12: 00-14: 00	
	41			14: 00-16: 00	
	44			16: 00-18: 00	
3	35	4	42	10: 00-12: 00	1 天
	38			12: 00-14: 00	
	41			14: 00-16: 00	
	44			16: 00-18: 00	
3	35	6	48	10: 00-12: 00	1 天
	38			12: 00-14: 00	
	41			14: 00-16: 00	
	44			16: 00-18: 00	
3	35	6	45	10: 00-12: 00	1 天
	38			12: 00-14: 00	
	41			14: 00-16: 00	
	44			16: 00-18: 00	
3	35	6	42	10: 00-12: 00	1 天
	38			12: 00-14: 00	
	41			14: 00-16: 00	
	44			16: 00-18: 00	
3	35	6	39	10: 00-12: 00	1 天
	38			12: 00-14: 00	
	41			14: 00-16: 00	
	44			16: 00-18: 00	
4	35	6	42	10: 00-12: 00	1 天
	38			12: 00-14: 00	

	41			14: 00-16: 00	
	44			16: 00-18: 00	

表 13 冷冻侧测试内容示例

冷冻泵台数	冷冻泵频率	时间	时间长度
4	32	10: 00-12: 00	1 天
	36	12: 00-14: 00	
	41	14: 00-16: 00	
	44	16: 00-18: 00	

(九) 数据训练

训练和测试数据集的基本要求：

- A. 满足数据质量要求；
- B. **数据安全要求**：从数据采集、数据传输、数据存储、数据显示和访问的全过程都确保训练集与测试集的安全性；
- C. **数据规模要求**：对于深度学习类算法而言，数据至少万量级，传统机器学习算法，数据至少千量级，且注意数据集大小不能超过 100GB；
- D. **数据集拆分要求**：将数据拆分为训练集、验证集和测试集三个部分，其中 80% 分配给训练集，10% 分配给验证集、10% 分配给测试集，并尽量保证三个数据集分布的一致性；

特别的：

- 对于时序序列预测类算法，训练集与测试集的数据时间间隔需要保持一致。
- 对于数据不均衡场景，可考虑在训练集中多复制几份占比较少的数据以增加其对训练结果的影响程度。

八、 智能调优策略

智能调优系统主要基于专家规则的智能算法，结合部分历史数据的学习，生成更为精准的模型，把专家规则固化为程序，可以脱离现场能力的限制，随时部署推广。目前方向主要是针对二次泵水冷架构，进行模型的搭建实现最优模式判断，以及对应模式下冷源系统最佳运行参数的判断：

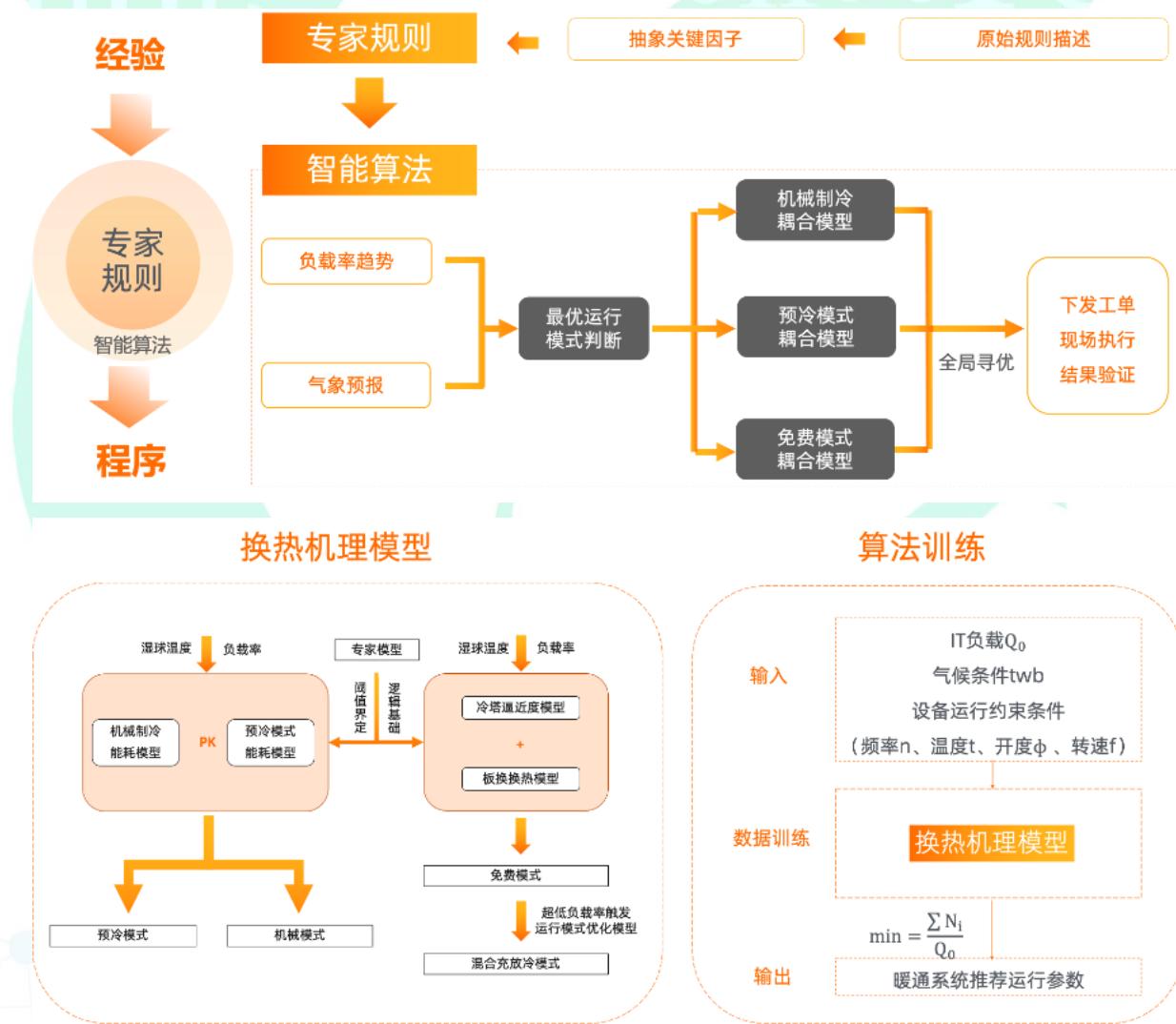


图 50 智能调优系统

(一) “数据+机理”双驱动模型

数据模型：采用深度学习、强化学习等数据拟合算法，仅利用有限场景下的纯数据样本，数据成本高、历史数据依赖性强、训练周期长，且不具有可解释性、容易反逻辑控制，在极端工况下可靠性低；

机理模型：采用热力学模型，仿真系统的稳态及动态运行特性，机理明晰、可解释性高、可靠性高，但机理模型构建难、迭代运算慢；

“数据+机理”双驱动模型：搭建机理和数据融合驱动的系统热力学模型，针对机理模型中难以建立“白箱”模型的部分，可构建数据模型解决问题，也可以利用数据驱动方法对机理模型中的参数进行优化。

“数据+机理”双驱动模型，让控制策略遵循热学原理、脱离纯数据依赖、避免反逻辑，具有更高可靠性、更优节能效果；通过对两种预测模型取长补短，双驱动模型的预测准确性极大提高，计算复杂度及成本显著降低。

通过双驱动模型建立多输入（环境参数、热负荷、直接/间接控制参数）与多输出（PUE、部件功耗、系统功耗等）间的拟合关系。

基于上述拟合关系，在某工况点下，对可控参数的所有可能出现组合进行寻优算法计算，寻找符合约束条件的最优解。最优解对应的可控参数值即为该工况点下的AI调优策略。

(二) 数字孪生预测模型

基于 DCIM，通过“BA+动环”的监测数据，可建立数据中心系统的数字孪生实时模型；

如前所述可知，双驱动模型对数据中心建立了多输入与多输出间的拟合关系，针对各工况点均具有可预测性，故通过融合机理模型和数据模型的双驱动仿真系统，借助可视化平台开发，可建立数据中心系统的数字孪生预测模型。

- 通过数字孪生预测模型，对极端场景进行复现；
- 通过双驱动模型+寻优算法，对极端场景输出 AI 调优策略；并进一步通过数字孪生预测模型对采用调优策略后的系统运行状态进行预测；

基于以上，针对极端场景，可提前获取可能的风险场景应对策略，提升运维人员的响应效率，提高 DC 运行可靠性。

(三) AI 节能算法

AI 节能算法按功能不同主要划分为两类：数据拟合类算法、参数寻优类算法。

数据拟合类算法，包括启发式、强化学习、自适应控制、神经网络和 transformer 等，适用于非线性系统，可用于难以用数学表达式来描述的系统，学习变量之间的潜在关联关系，形成多输入、多输出的数据关系拟合。不同数据拟合类算法面向不同场景（冷端、

末端、风冷、液冷）、不同架构的拟合精度不同，需要通过评价矩阵等方式对模型精度进行校核。

参数寻优类算法，例如遗传算法，在全局寻优问题上效果很好，收敛速度较快，且不易陷入局部极小点，可依据多参数间已有的数据拟合关系，快速搜索出最优目标值所对应的各参数取值。

(四) BA 水冷自控系统 AI 控制

1. AI 控制原理

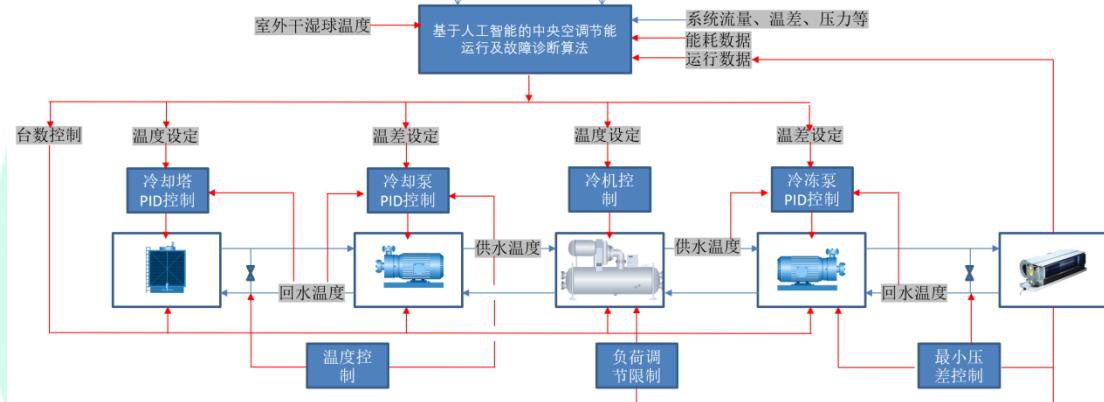


图 51 AI 控制原理图

算法程序通过采集室外干湿球温度、系统流量、温差、压力、各设备能耗数据、各设备的运行状态、空调末端需求温湿度，通过优化计算，输出各设备运行台数策略、各温度控制点策略，使得系统在满足末端温湿度要求的前提下，系统的运行效率最高，能耗最低。

2、AI 优化算法设计原则

(1) 考虑到冷源系统水力热力耦合机理模型的 6 个典型外部约束条件（把互为非独立变量单列为计算的约束边界），可采用惩罚函数的方式来进行优化约束，而其内部可控变量（包括冷水机启停、冷却塔启停、水泵运行频率、冷却塔风机频率等）已经全部连续化，且各自独立控制，即互为独立变量，根据联合概率独立性原则，将原本多维度组合概率问题，变成单变量概率乘积问题，极大的降低了计算消耗，因此我们采用了随机走步计算的近似优化方法，实现了所有独立控制的内部变量同步优化，让多达数十个控制变量的冷源系统全局耦合机理模型的优化计算成为可能。

(2) 优化计算时，需要对所有变量进行归一化处理，即所有变量都要归一至 $[-1, 1]$ 之间，计算目标函数时候，则根据变量实际范围进行映射复原。同时，每次随机计算，都需要对计算机的随机数发生器进行复位，即每次计算都要改变随机数种子，否则将生产伪随机数，从而导致无法收敛。

(3) 随机寻优过程中，尽量不要对控制变量进行范围约束，这样容易造成自变量和因变量之间非一一对应的关系，如果这样，会严重影响寻优计算收敛性，凡是遇到类似情况，尽量通过等价处理方式进行特殊处理（往往这些特殊处理的数据都会在寻优化过程中被抛弃），从而保证计算连续性，以及自变量的独立性，避免报错，保证优化结果可靠。

3、AI 算法优化策略库

(1) AI 算法优化策略库标准化

(1) 单次优化计算耗时较长，一般情况下，机理模型一次迭代计算时间约为 0.5s，而完成一次优化计算，估计需要 10000-15000 次，总计算时长约为 60-90 分钟。因此，在线优化是不现实的，需要进行离线优化计算，并对离散优化结果进行后续处理，如发现有不收敛的情况，则需要对该工况条件进行重新优化计算，为了更好收敛，也可以针对性的修改计算收敛参数（优化计算跳出的控制精度）。

(2) 由计算服务器进行 15625 次不同外部约束条件下的优化计算，获取一个标准优化控制策略库，分别对 6 个外部约束变量取 5 个不同水平值，进行均匀搭配形成 15625 个不同组合，并分别进行优化计算。为此，采用微型超算进行 100 个独立核心划分，可以满足 100 个核心独立并行计算，基本可以在 5-7 天时间内容完成一个标准离线优化控制策略库的计算。完成计算后，仍需要对整个策略库进行分析，找出错误值。

(3) 根据实际运行数据，以离线优化控制策略库为依据，寻求合适的优化控制策略，这样以来就能够实现优化控制策略的动态实时呈现。

(2) AI 算法优化策略库应用

(1) 离线优化策略库解决了机理模型在线优化时间长等缺陷，为优化运行提供了参照基准，在实际应用过程中，需要根据冷源系统的基本工艺原理，对离线优化策略库进行二次比对算法，才能应用于实际工程。

(2) 考虑到离线优化策略库的数据稀疏性（标准策略库按照 $5\times5\times5\times5\times5\times5$ 进行划分），在外界约束变量（冷负荷、环境温度、环境相对湿度）发生微量变化时，无法直接从策略库进行比对选择，因此需要进行适度差值算法，对于多维度差值问题，可以采用反距离权重插值法进行插值。同时，为了避免约束变量由于数据采集等各种偶然因素影响导致波动，可以对约束变量进行适度离散化处理，比如对冷负荷进行离散，按照 5%的范围进行离散，如实时监测到现场运行数据得到冷负荷为 83%的负荷率（相对名义工况下额定制冷量），那么就可以离散为固定值 85%，或者说，实时负荷率在 [82.5%-87.5%] 时，则都赋值为 85%的负荷率，这样就能有效的规避测量值波动带来的影响。其它约束变量的离散化处理，可以依此方法进行。如此以来，即实现了插值的比对算法，又能够在一定程度上避免来做约束变量偶然性对优化策略比对算法带来影响（对于系统而已，优化策略应该保持相对稳定，否则会带来安全隐患）。

4. 动态优化控制策略

(1) 独立变量离散化处理

通常情况下，不受人为调控的 3 个外部约束变量为：系统冷负荷、环境温度及环境相对湿度；根据空调系统负荷分布特性所确定的 3 个外部约束变量为：冷冻水系统供水温度、冷冻水系统总流量、冷冻水系统供回水压差。也就是说，3 个不受人为控制的外部变量是来自自控系统，是实时运行数据，首先就需要按照一定规则（比如 5% 的变化幅度，参见上述）离散化。

(2) 约束变量离散化处理

在系统冷负荷、环境温度及环境相对湿度一定条件下，对应时刻下，冷冻水系统供水温度、冷冻水系统总流量及冷冻水系统供回水压差可以有多种组合方式，该 3 个约束变量强耦合而非独立变量，需要根据建筑负荷预测或经验来确定。通常可以按如下规则表达其协同关系：

$$\left\{ \begin{array}{l} t_{\text{冷冻水出水温度}, 0} \rightarrow [G_{\text{冷冻水流量}, 0} \sim G_{\text{冷冻水流量}, n}] \\ G_{\text{冷冻水出水温度}, 0} \rightarrow [\Delta P_{\text{供回水压差}, 0} \sim \Delta P_{\text{供回水压差}, 1}] \\ \vdots \\ G_{\text{冷冻水出水温度}, n} \rightarrow [\Delta P_{\text{供回水压差}, 0}^n \sim \Delta P_{\text{供回水压差}, 1}^n] \end{array} \right\}$$

由上可知，某一个冷冻水供水温度，则必然对应于某一冷冻水流量范围（不能低于最小流量要求），而某一冷冻水流量又对应于某一供回水压差范围（不能低于最小供回水压差），而这样的对应

关系与负荷特性相关，需要提前进行负荷计算分析并进行预测，在条件不具备时，也可以根据经验来设定其相互约束关系。在实际应用中，可以根据已经确定的范围 $[t_{\text{冷冻水出水温度}, 0} \sim t_{\text{冷冻水出水温度}, n}]$ ，对其实离散为 19 个划分（实际应用可以改变），即 $[t_{\text{冷冻水出水温度}, 0}, t_{\text{冷冻水出水温度}, 1}, \dots, t_{\text{冷冻水出水温度}, 19}]$ ，每个出水温度对应一个 $[G_{\text{冷冻水流量}, 0}, G_{\text{冷冻水流量}, 1}, \dots, G_{\text{冷冻水流量}, 19}]$ ，而每个冷冻水流量对应一个 $[\Delta P_{\text{冷冻水供回水压差}, 0}, \Delta P_{\text{冷冻水供回水压差}, 1}, \dots, \Delta P_{\text{冷冻水供回水压差}, 19}]$ ，其中 $G_{\text{冷冻水流量}, 0}$ 为对应供水温度下的最小流量， $\Delta P_{\text{冷冻水供回水压差}, 0}$ 为对应最小流量下的最小供回水压差。由此可见，根据温度才能得到流量范围，然后根据流量才能得到压差变化范围，其组合方式为： $20 \times 20 \times 20 = 8000$ 个。

某一时刻，外部约束变量是系统冷负荷、环境温度及环境相对湿度是唯一确定的，且来自于第三方能管平台，为了避免测量偶然误差引起频繁动作，同样需要进行合理离散化处理。例如，系统冷负荷按 $[Q_0, Q_1, \dots, Q_{20}]$ 进行均匀划分，那么负荷只要在 $[Q_0 \sim Q_1]$ 之间，则都赋值 $(Q_0 + Q_1)/2$ ，（当然也可以每个离散负荷为节点，如果实时冷负荷小于 $(Q_0 + Q_1)/2$ ，则取值 Q_0 ；实时冷负荷大于或等于 $(Q_0 + Q_1)/2$ ，则取值 Q_1 ）即在一定程度上，当实测负荷变化时，只要变化范围在 $[Q_0 \sim Q_1]$ 内，都认为是偶然误差找出的偏差，以此增大系统容错能力，其它变化范围的处理可以此类推。同理，室外环境温度可以按 $[t_0, t_1, \dots, t_{20}]$ 进行均匀划分，室外相对湿度可以按 $[\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_{20}]$ 进行均匀划分。经过此法进行离散，即通常插值方式弥补了控制策略

库过于稀疏的问题，又合理离散约束变量来增大容错能力，削弱变量偶然误差带来的不确定度。

其中冷负荷及湿负荷根据历史运行数据，通过数据清洗、去重、降噪之后，采用聚类方式进行数据分析，并对冷负荷和湿负荷进行合理划分，建立冷负荷及湿负荷与环境温度及湿度的关联规则，通过分类等方式进行冷负荷及湿负荷的回归。

(3) 优中选优的策略库比对算法

1) 在实际应用中，由于冷冻水系统设计旁通回路的必然存在，而又不可能实时动态调整压差旁通调节阀的设定值。因此，可以提前计算分析（或经验）得到不同冷负荷及湿负荷耦合下的冷冻水出水温度、流量及压差的关系，事先构建其对应关系的协同数据库，实际运行时，就可以根据系统冷负荷、环境温湿度及时间等来进行选择。如果选择了某协同关系，就可以按照如下方式进行离散处理：

$$\begin{aligned} t^h_{\text{冷冻水出水温度}, 0} &\rightarrow [G_{\text{冷冻水流量}, 0} \sim G_{\text{冷冻水流量}, 19}] \rightarrow [\Delta P_{\text{冷冻水供回水压差}, 0} \sim \Delta P_{\text{冷冻水供回水压差}, 19}] \\ &\vdots \\ t^h_{\text{冷冻水出水温度}, 19} &\rightarrow [G'_{\text{冷冻水流量}, 0} \sim G'_{\text{冷冻水流量}, 19}] \rightarrow [\Delta P'_{\text{冷冻水供回水压差}, 0} \sim \Delta P'_{\text{冷冻水供回水压差}, 19}] \end{aligned}$$

根据以上规则对冷冻水供水温度、冷冻水流量及冷冻水管网供回水压差的离散化处理之后，在已知来实际运行数据的冷负荷、室外环境温度及相对湿度（可按照实际范围 20 等分的划分离散处理）的条件下，可以采用如下组合方式：

$$\left[\begin{array}{c} Q, t_{\text{环境}}, \varphi_{\text{环境}}, t_0, G_0, \Delta p_0 \\ \vdots \\ Q, t_{\text{环境}}, \varphi_{\text{环境}}, t_0, G_0, \Delta p_{19} \\ \left[Q, t_{\text{环境}}, \varphi_{\text{环境}}, t_0, G_1, \Delta p_{19} \right] \\ \vdots \\ \left[Q, t_{\text{环境}}, \varphi_{\text{环境}}, t_0, G_{19}, \Delta p_{19} \right] \end{array} \right] \dots \left[\begin{array}{c} Q, t_{\text{环境}}, \varphi_{\text{环境}}, t_{19}, G_0, \Delta p_0 \\ \vdots \\ Q, t_{\text{环境}}, \varphi_{\text{环境}}, t_{19}, G_0, \Delta p_{19} \\ \left[Q, t_{\text{环境}}, \varphi_{\text{环境}}, t_{19}, G_1, \Delta p_{19} \right] \\ \vdots \\ \left[Q, t_{\text{环境}}, \varphi_{\text{环境}}, t_{19}, G_{19}, \Delta p_{19} \right] \end{array} \right]$$

其中， G_0 和 Δp_0 为对应供水温度下的最小冷冻水流量及管网供回水压差，随供水温度改变而改变； G_{19} 可设位置系统最大可能的冷冻水流量（可设置为定值）， Δp_{19} 为压差旁通调节阀手动设置值（通常情况不经常调整，一段时间内可视为定值）。因此，某一状态下共有 $(19+20) \times 20 = 780$ 个组合方式，即某一运行状态下，需要进行780次反距离权重插值计算，并从780次插值结果中选择最佳运行策略。进行反距离权重插值时候，可以先进行归一化处理，插值完成后再进行还原。

2) 设备端的控制要求。现场设备端的群控系统，根据策略比对结果的执行设定时间间隔，实时接受控制策略，可以根据需要设定执行方式，比如每间隔5s-60s才执行一次，最大限度保证系统运行稳定。

5. 优化算法模型

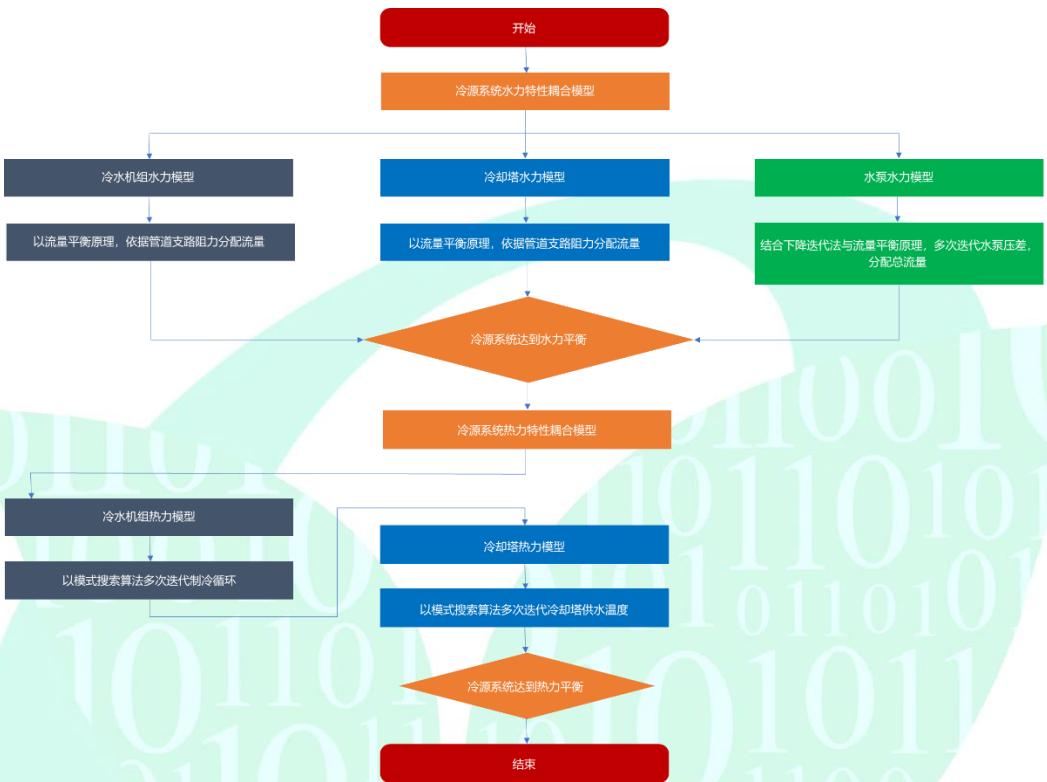


图 52 优化算法模型流程图

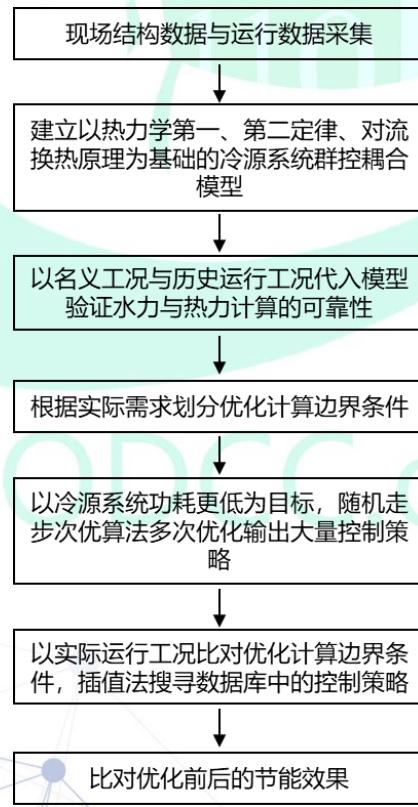


图 53 随机走步法

随机走步法在搜索过程中，以给定的基点为中心，给定步长为搜索半径，随机进行搜索。一旦发现能耗更低的点，即将搜索中心移至该点，该点即作为新的基点，重复上述步骤，使搜索区域向最优点方向移动。若进行规定次数的搜索后仍找不到更优点，则缩小步长进行更仔细的搜索，直到区间缩小至给定精度为止。

在冷源系统热力学模型的基础上，针对多个变量，以随机走步法求解变量参数与系统能耗之间高度的非线性关系能够避免计算局部最优或计算量过大的问题，且易于摆脱贫次搜索失败的影响。

(五) 群控系统优化策略

群控系统优化策略执行、故障处理控制逻辑：

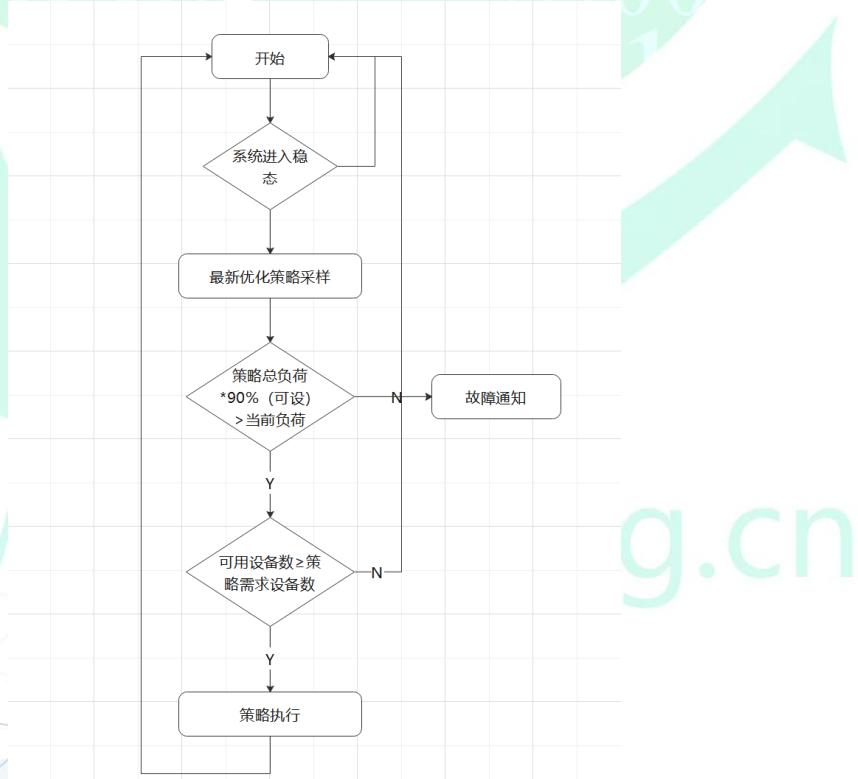


图 54 群控系统优化策略

1、 DDC 群控制系统控制器模式选择

DDC 群控制系统控制器设启用/禁用 AI 优化模式选择。

当选择禁用时，不接收优化策略进行控制；单选择启用时，系统先根据自有加装逻辑运行，直至系统进入稳态（冷机无加减机需求，出水温度达到需求）持续 30 分钟（可设），接收最新优化策略，并进行判断，当下发的优化策略理论合计负荷总数低于当前实际需求负荷，发出故障报警，提示 AI 计算出错，并结束采纳优化策略，仍按既定自动逻辑运行；当下发的优化策略理论合计负荷总数满足当前实际负荷需求，再进行判断，如当前系统可用设备数量 \geq 优化策略需求的设备数量，则采纳优化策略内容进行控制，否则，则发出告警提示并中止采纳优化策略，仍按既定自动逻辑运行。

2、 AI 群控系统交付和倒换建议

AI 系统需提交整体冷源系统优化控制方案，包括不限于系统架构、优化策略、实施方案、无缝切换与运行方案、与原有 BA 系统的分工及接口对接方案等。

联合 BA 控制系统制定确保冷源系统安全运行的控制方式，例如避免冷源系统冷冻水出水温度突变、供谁压力突变、避免制冷单元计划外停机、避免水泵、冷却塔风机过热、气蚀、剧烈震动等。当 AI 系统自身发生故障并不能继续正常工作时，应及时告警并退出 AI 系统，恢复原有 BA 系统运转，同时通知值班人员。AI 系统应根据

冷冻站系统运行要求，确保 AI 与原有 BA 系统转换时，冷源系统的平稳过渡，避免在切换过程中出现系统停机、告警等故障。

- BA 系统根据 AI 系统的对接方案和接口要求修改原有 BA 系统控制逻辑，但不得降低原有各项就地自动控制功能；
- AI 系统是否投入使用需有人工干预措施，比如发出倒计时提示，半小时内人工确认方可进入 AI 模式，否则维持之前 BA 系统运转；
- AI 系统的运行不得降低原有冷源系统的安全等级，保证 AI 系统停止运行时原有 BA 系统能独立运转；
- AI 系统运转过程中遇到任意影响到冷源系统运行安全的报警，（比如冷机故障、水泵故障、温度超限报警、压力超限报警等，具体哪些报警及报警阈值需由 AI 系统方案提出，经设计和甲方确认）需立即退出 AI 系统，恢复原有 BA 系统控制；待系统稳定运行一段时间后方可再次投入 AI 系统运转；
- 系统断电重启时，先由 BA 系统控制冷源系统运转，待系统稳定运行一段时间后方可再次投入 AI 系统运转。

(六) 精密空调 AI 控制策略

1、风冷精密空调

机房中有多个风冷空调，分布在机房的各个位置，需要将机房内各个测点的温度维持在一个稳定的水平，首先需要分析测点的温度变化与各个空调之间的相关关系，当某个测点的温度需要调整时，直接调整关联程度大的空调。

算法定制流程：

- 数据采集，采集机房一定时间内的测点温度和空调温度数据；
- 数据处理，填充缺失值，剔除异常值；
- 相关分析，以空调的温度为特征，测点的温度为标签，使用随机森林模型，建立空调温度和测点温度的回归模型，计算各个空调的特征重要度，将特征重要度进行归一化处理，使得空调对测点的相关程度和为 1，当测点温度需要调整时，调整相关性最大的空调温度；
- 温度调控，PID 控制算法在温度控制等闭环系统中应用广泛，能准确且迅速的进行系统调控，维持测点的温度稳定，使其不会过高也不会过低，通过比例增益、积分增益、微分增益以及误差（当前温度值-设定温度值）实时调整空调温度；

如图所示：测点 1 的受四台空调的影响，ac1 的影响程度最大，当测点 1 温度出现异常时，可通过空调 1 进行调控。

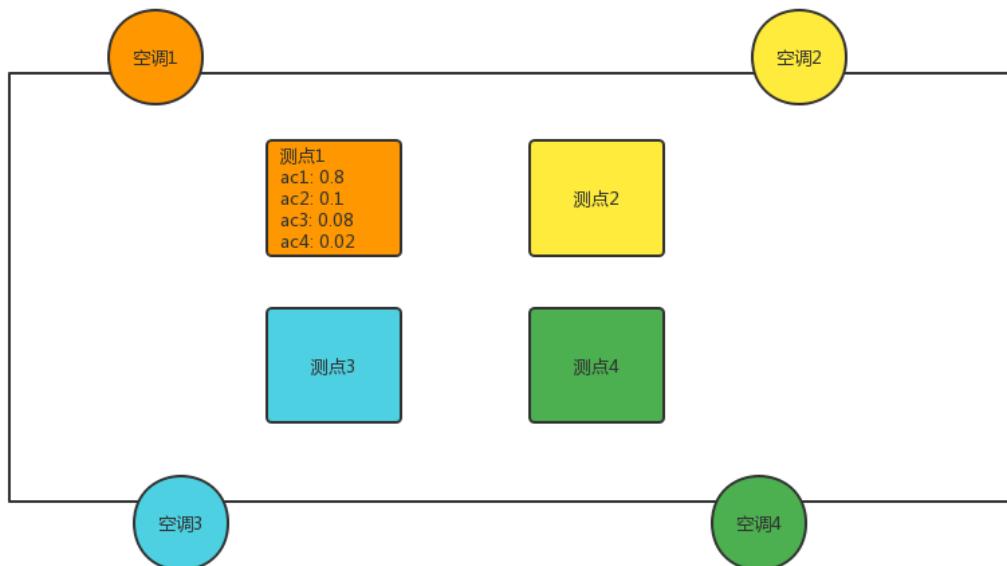
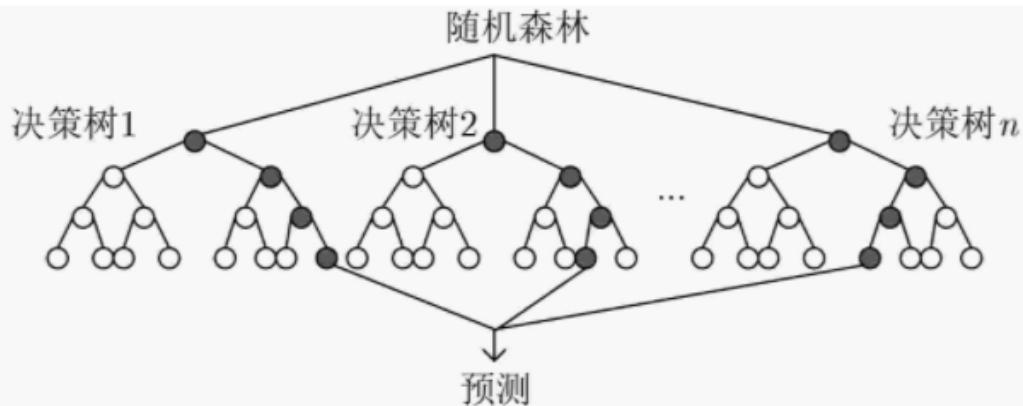


图 55 风冷精密空调平面图

随机森林回归：



PID 控制：

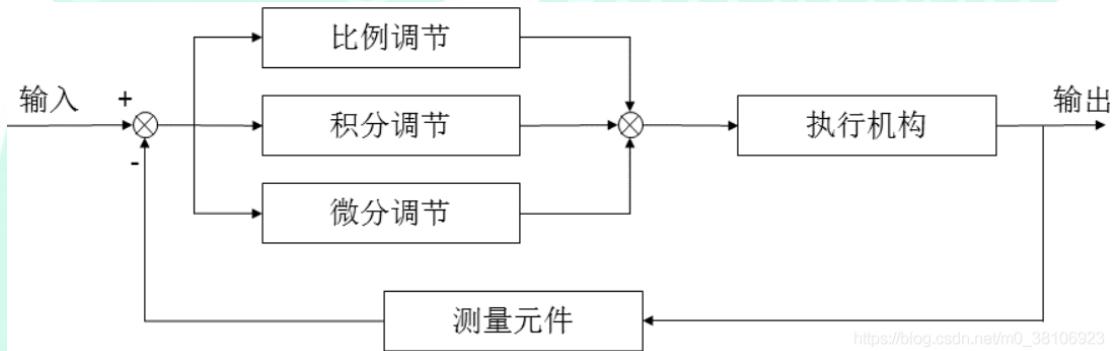


图 56 随机森林回归模型

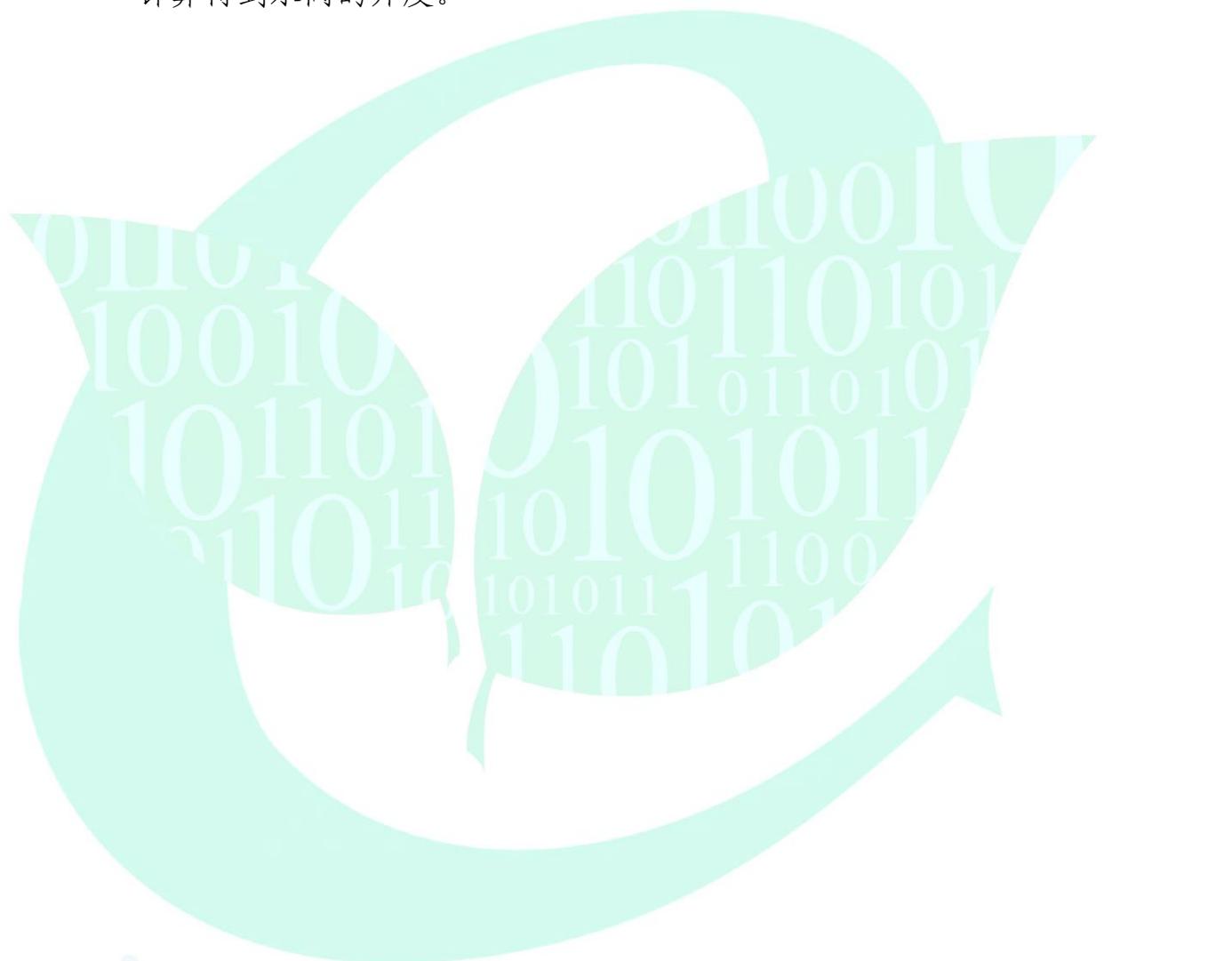
2、水冷精密空调

对风机转速/水阀开度线性调节，需调整水阀开度和各个空调之间的关联关系，水冷设备送到各个空调的温度要与空调设定温度相近，建立水冷设备送到空调的温度和水阀开度之间的回归模型

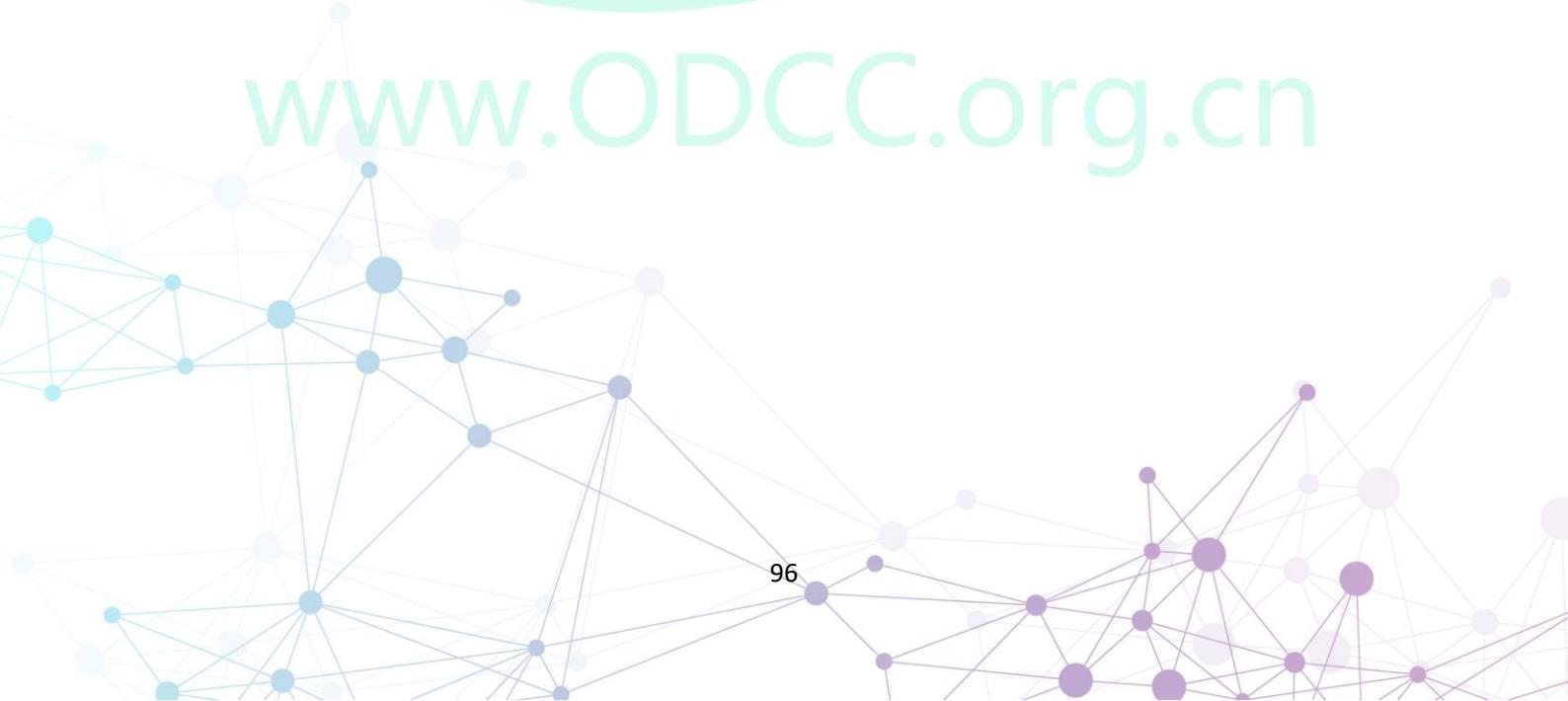
算法定制流程：

- 采集水冷设备送到各个空调的温度以及水冷设备的水阀开度数据；

- 数据处理，过滤不合理的数据；
- 建立模型，使用随机森林回归模型，送入各个空调的温度为特征，水冷设备水阀开度为标签，当给定一组空调温度时，计算得到水阀的开度。



www.ODCC.org.cn



九、节能效率评估

数据中心能效随着湿球温度、IT 负荷和运营模式动态变化，需要一个客观和标准的节能效率评估体系，可剔除掉 BA 人工调优、变频改造和机房升温等 PUE 综合调优叠加效果，准确计算 AI 节能的收益，并可适用于大部分机房，作为数据中心业主和运营方评估 AI 节能的 ROI 的基本依据。

(一) 能效定义

由于不同数据中心 PUE 能效统计方法和运营水平有较大差距，并不能简单用节省电量或百分比评价 AI 节能效果，例如 PUE1.6 的数据中心通过 AI 节能可较快实现 0.1 的优化，而 PUE1.2 的数据中心要实现 0.01 的优化付出的努力可能是前者的数倍。这里我们仅根据部分案例进行统计，从 PUE 功率法、PUE 电量法和 CLF 制冷效率的维度给出一个基本参考。

表 14 AI 节能效率评估参考

类型	PUE 功率法	PUE 电量法	CLF 制冷效率
差 (Bad)	PUE 降幅 < 2%	PUE 降幅 < 2%	CLF 降幅 < 7%
中 (Normal)	PUE 降幅 ≥ 2%	PUE 降幅 ≥ 2%	CLF 降幅 ≥ 7%
好 (Good)	PUE 降幅 ≥ 3%	PUE 降幅 ≥ 3%	CLF 降幅 ≥ 10%
优秀 (Outstanding)	PUE 降幅 ≥ 5%	PUE 降幅 ≥ 5%	CLF 降幅 ≥ 15%

(二) 节能公式

在数据中心的运营中，节能是一项非常重要的任务，因为它能够降低数据中心的运行成本，减少对环境的影响，并延长硬件设备

的寿命。然而，由于缺乏标准的节能评估计算方法，对于节能优化的效果评估变得非常困难。在开放架构体系中，我们提出了一种节能计算公式，该公式可以帮助数据中心管理人员对节能优化的效果进行量化评估。通过对数据中心的 IT 负载电力消耗、温度、湿度等多种因素进行综合考虑，我们可以使用该公式来计算出节能优化的具体效果。这将有助于数据中心管理人员更好地了解节能优化的努力是否取得了预期的效果，并根据这些数据制定更有效的节能策略，从而实现更加可持续的数据中心运营。

节能计算公式定义如下：

$$ES = \sum_{R_1}^{R_n} (PUEa_i - PUEb_i) * IT_i * L_i$$

其中 ES 表示节约能耗， R_i 表示第 i 个同湿球温度和 IT 负载区间，PUE 是数据中心消耗的所有能源与 IT 负载消耗的能源的比值， $PUEa_i$ 表示第 i 个区间节能优化前 PUE， $PUEb_i$ 表示第 i 个区间节能优化后 PUE， IT_i 表示第 i 个区间时的平均 IT 负载值， L_i 表示第 i 个区间内节能对比的运行时长。我们以制冷系统在 AI 系统控制和 BA 系统控制时作为示例，单个同湿球温度和 IT 负载区间的节约能耗计算示意图如下：

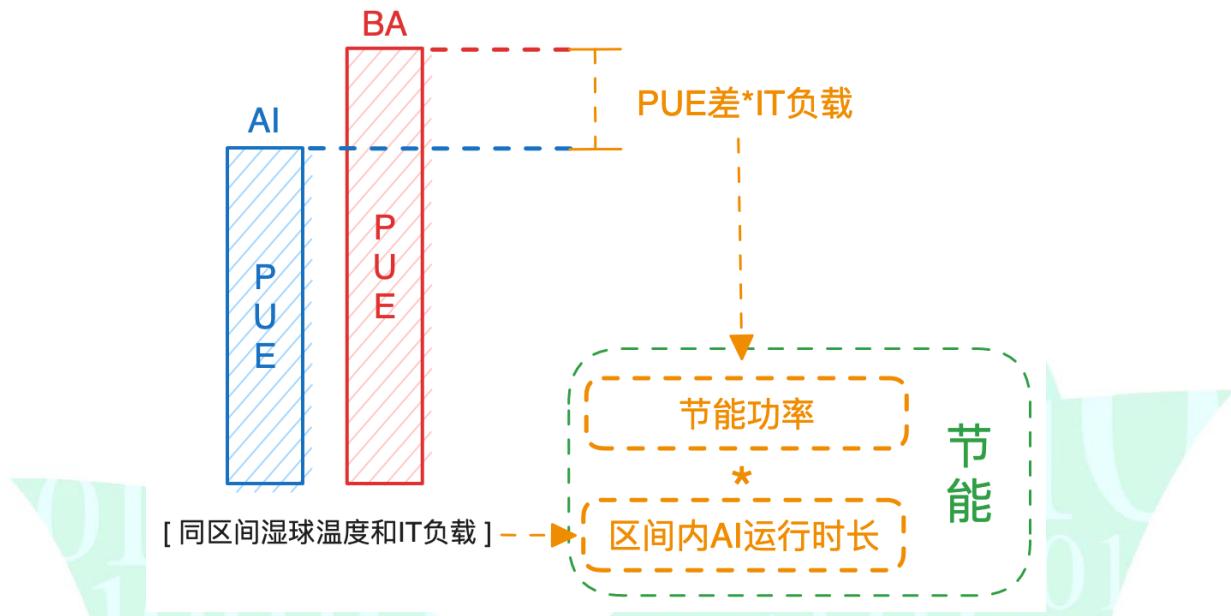


图 57 节能计算示意图

(三) 计算方法

搜寻类似的 IT 负荷和湿球温度趋势，通过同比和环比的方式实现具体节能计算。

1、环比法

选取一个月为对比周期，以“周”为单位切换 AI 节能系统的开启与关闭，比较节能效果。

计算公式：

1) PUE 功率法

$$\text{PUE 降幅} = (\text{AI 关闭时 PUE} - \text{AI 开启时 PUE}) / \text{AI 关闭时 PUE}$$

备注：每日取 0 点、8 点、16 点 3 个时间点，通过实时功率计算 PUE 值，每周共取样 21 个采集点，去除 3 个 PUE 最高值和 3 个 PUE 最低值，即 15 个值取平均为本周平均 PUE。再将 AI 开启和关闭各 2 周的 PUE 再次求平均为最终带入公式 PUE 值。

举例：某月第 1 周、第 3 周 AI 关闭，平均 PUE 分别为 1.5 和 1.52，再次求平均后为 1.51；第 2 周、第 4 周 AI 开启，平均 PUE 分别为 1.45 和 1.47，再次求平均后为 1.46。PUE 降幅 = (1.51 - 1.46) / 1.51 = 3.31%。

2) PUE 电量法

$$\text{PUE 降幅} = (\text{AI 关闭时 PUE} - \text{AI 开启时 PUE}) / \text{AI 关闭时 PUE}$$

备注：分别通过 AI 开启和关闭时间段内总用电量和 IT 设备用电量计算平均 PUE 并带入公式计算。

3) CLF 制冷效率

$$\text{CLF 降幅} = (\text{AI 关闭时 CLF} - \text{AI 开启时 CLF}) / \text{AI 关闭时 CLF}$$

备注：分别通过 AI 开启和关闭时间段内空调设备用电量和 IT 设备用电量计算平均 CLF 并带入公式计算。

2、 同比法

选取 AI 节能应用前后两年各一个月为对比周期，比较节能效果。要求参与对比月份平均湿球温度相近并剔除掉 BA 人工调优、变频改造和机房升温等其他综合调优叠加效果。

计算公式：

1) PUE 功率法

$$\text{PUE 降幅} = (\text{AI 关闭时 PUE} - \text{AI 开启时 PUE}) / \text{AI 关闭时 PUE}$$

备注：每日取 0 点、8 点、16 点 3 个时间点通过实时功率计算 PUE 值，每月共取样约 90 个采集点，去除 10 个 PUE 最高值和 10 个 PUE 最低值后计算平均 PUE。

2) PUE 电量法

$$\text{PUE 降幅} = (\text{AI 关闭时 PUE} - \text{AI 开启时 PUE}) / \text{AI 关闭时 PUE}$$

备注：分别通过 AI 开启和关闭月份内总用电量和 IT 设备用电量计算平均 PUE 并带入公式计算。

3) CLF 制冷效率

$$\text{CLF 降幅} = (\text{AI 关闭时 CLF} - \text{AI 开启时 CLF}) / \text{AI 关闭时 CLF}$$

备注：分别通过 AI 开启和关闭月份内空调设备用电量和 IT 设备用电量计算平均 CLF 并带入公式计算。

综合考虑操作难易程度、数据准确性和外界因素干扰情况。在具备能耗采集系统条件下建议采用方案 1 环比法中的 PUE 电量法和 CLF 制冷效率进行节能效果评价。

十、调优系统可靠性

为了提高 AI 节能系统的可靠性，确保运维专家总是处于对制冷系统的绝对掌控地位，可以采用多种手段。失效模式分析帮助我们深入了解不同组件的潜在故障模式和失效原因，以便在预防和应对故障时能够有针对性地采取措施。设备健康度监测则可以实时追踪设备的状态和性能指标，及时识别潜在问题，并进行预防性维护和优化。动态可靠性策略则可以根据系统性能的变化，动态地调整运行策略和决策，以确保系统能够在各种工况下保持高可靠性。主动运维服务通过实时监测、主动干预等措施，来提升系统的可靠性和稳定性。同时制定系统失效后的应急处置预案。

(一) 潜在失效模式分析

通过潜在失效模式分析（DEFA）实现潜在失效影响、严重程度、发生可能性、失效潜在原因、发现或控制能力、当前设计预防控制措施和当前设计控制检测措施，可发现系统潜在风险和制定对策。

设备级故障率：

102

水泵 > 冷水主机 > 控制系统 > 补水系统 > 冷却塔

系统级潜在失效风险识别：

电动阀门卡死 > 冷却塔水位故障 > 旁通阀故障 > Y 滤堵死 > 管道漏水 > 爆管

(二) 失效风险

1) 数据不准确或不完整：AI 节能系统依赖于准确的数据输入和分析，以便做出相应的节能决策和优化措施。如果输入的数据质量不好，或者数据源出现故障，AI 系统可能会产生错误的节能策略或无法适应实际条件变化。主要有以下失效模式：

表 15 数据失效模式

失效模式：数据不准确或不完整	原因分析
数据缺失	动环系统、BA 系统等数据源故障或接口故障
数据错误	动环或 BA 协议错误，解析出完全错误的数据值。传感器故障等。
数据质量差	传感器长期未校准偏离度增大。
数据吊死	服务器或接口程序吊死，数据无法刷新。

2) 模型不准确或不匹配：AI 节能系统使用机器学习和算法模型来识别能效优化机会和预测节能潜力。如果模型的设计不准确、参数设置不当或模型过时，系统的预测和决策可能会出现偏差，导致节能效果不佳。主要有以下失效模式：

表 16 模型失效模式

失效模式：模型不准确或不匹配	原因分析
制冷单元数量匹配错误	例如：当前 AI 节能系统针对 1 个制冷单元设定，而现场有多个制冷单元共同运行。
输入输出信号匹配错误	例如：现场 1 号制冷单元点位数据被 AI 节能系统中 2 号制冷站单元模型引用。
能耗数据偏离	能耗计算公式错误，能耗电表满量程清零，能耗数据吊死。
训练模型错误	例如：风冷空调训练模型用于水冷空调系统

这里建议 AI 节能系统向数据中心驻场运维专家开放数据匹配功能，由驻场运维专家进行 AI 系统与 BA、动环、能耗等系统的数据对接配置工作。因为不同数据中心构架千差万别，需要配置人员对本数据中心构架具有深刻了解，否则细节点位配置错误很难被发现，在错误的数据模型下训练将会直接影响寻优结果。同时向本地运维专家开放数据匹配功能可以跟快速响应数据中心扩容、割接、改造等架构变化。

表 17 BA 系统与 AI 系统 remark 映射表示例

	A	B	C	D	E	F	G
1	node_name	room_name	device_name	device_code	signal_name	remark	
2	0	1号冷冻站	1-01高低压配电站	1号冷冻站-1#冷却塔	881ad25fffe8c4b2d8dc7fc0b81180ece	1号1号冷冻塔出水温度设置值	1.1
3	1	1号冷冻站	1-01高低压配电站	1号冷冻站-2#冷却塔	881ad25fffe8c4b2d8dc7fc0b81180ece	1号2号冷冻塔出水温度设置值	1.2
4	2	2号冷冻站	1-01高低压配电站	2号冷冻站-1#冷却塔	881ad25fffe8c4b2d8dc7fc0b81180ece	2号1号冷冻塔出水温度设置值	2.1
5	3	2号冷冻站	1-01高低压配电站	2号冷冻站-2#冷却塔	881ad25fffe8c4b2d8dc7fc0b81180ece	2号2号冷冻塔出水温度设置值	2.2
6	4	1号冷冻站	1-02制冷机房	1号冷冻站-1#离心机	881ad25fffe8c4b2d8dc7fc0b81180ece	1号1号冷冻机机组停控	1.1
7	5	1号冷冻站	1-02制冷机房	1号冷冻站-2#离心机	881ad25fffe8c4b2d8dc7fc0b81180ece	1号2号冷冻机机组停控	1.2
8	6	2号冷冻站	1-02制冷机房	2号冷冻站-1#离心机	881ad25fffe8c4b2d8dc7fc0b81180ece	2号1号冷冻机机组停控	2.1
9	7	2号冷冻站	1-02制冷机房	2号冷冻站-2#离心机	881ad25fffe8c4b2d8dc7fc0b81180ece	2号2号冷冻机机组停控	2.2
10	8	1号冷冻站	1-02制冷机房	1号冷冻站-1#冷冻泵2#离心机	881ad25fffe8c4b2d8dc7fc0b81180ece	1号1号冷冻机设置点温度显示	1.1
11	9	1号冷冻站	1-02制冷机房	1号冷冻站-1#冷冻泵1#离心机	881ad25fffe8c4b2d8dc7fc0b81180ece	1号2号冷冻机主机设置点温度显示	1.2
12	10	2号冷冻站	1-02制冷机房	2号冷冻站-1#冷冻泵1#离心机	881ad25fffe8c4b2d8dc7fc0b81180ece	2号1号冷冻机冷设备点温度显示	1.1
13	11	2号冷冻站	1-02制冷机房	2号冷冻站-2#离心机	881ad25fffe8c4b2d8dc7fc0b81180ece	2号2号冷冻机冷设备点温度显示	1.2
14	12	1号冷冻站	1-03制冰机房	1号冷冻站-1#制冰水泵	881ad25fffe8c4b2d8dc7fc0b81180ece	1号1号冷冻泵压差设置值	1
15	13	1号冷冻站	1-03制冰机房	1号冷冻站-2#制冰水泵	881ad25fffe8c4b2d8dc7fc0b81180ece	1号2号冷冻泵压差设置值	1
16	14	2号冷冻站	1-03制冰机房	2号冷冻站-1#制冰水泵	881ad25fffe8c4b2d8dc7fc0b81180ece	2号1号冷冻泵压差设置值	2
17	15	2号冷冻站	1-03制冰机房	2号冷冻站-2#制冰水泵	881ad25fffe8c4b2d8dc7fc0b81180ece	2号2号冷冻泵压差设置值	2
18	16	1号冷冻站	1-01高低压配电站	1号冷冻站-1#冷却塔	881ad25fffe8c4b2d8dc7fc0b81180ece	1号1号冷冻塔1号风机状态	1.1.1
19	17	1号冷冻站	1-01高低压配电站	1号冷冻站-1#冷却塔	881ad25fffe8c4b2d8dc7fc0b81180ece	1号1号冷冻塔1号风机状态	1.1.2
20	18	2号冷冻站	1-01高低压配电站	1号冷冻站-2#冷却塔	881ad25fffe8c4b2d8dc7fc0b81180ece	1号1号冷冻塔2号风机状态	1.2.1
21	19	2号冷冻站	1-01高低压配电站	1号冷冻站-2#冷却塔	881ad25fffe8c4b2d8dc7fc0b81180ece	1号1号冷冻塔2号风机状态	1.2.2

3) 控制系统故障：AI 节能系统通常通过 BA 系统、动环系统控制数据中心暖通设施和末端空调。如果控制系统存在缺陷、软件故

障或通信问题，可能导致节能系统无法正确操作或无法及时响应变化的需求。

4) 安全漏洞：由于 AI 节能系统涉及大量的数据采集和处理，服务器架设在本地或云端，通过公网或企业内部网络传递数据。其存在的安全漏洞有可能导致黑客攻击、数据篡改或未经授权的访问，会对系统的功能和安全性带来风险。

(三) 交付测试

完整和规范的交付测试，包括功能测试、性能测试、稳定性测试和可靠性测试，特别需要对边界和异常状态进行模拟和实际测试，以确认在任何场景都处于可控状态，不影响暖通系统可靠性。

表 18 AI 调优系统交付测试报告

序号	测试项目	测试步骤	测试结果	判定
1	通信测试	1、验证参数是否可以下发至BA 2、验证AI心跳是否成功下发BA	每个设备测试3组数据，验证OK	通过，参数、心跳均下发成功
2	AI控制方式	1、AI生成参数是否自动下发到BA 2、实际设备是否按照AI设定值执行	测试3组参数，OK 时间1s	通过
		BA模式手动切换到AI		通过，下发三组参数，设备均完成执行
3	模拟设备故障	AI模式手动切BA	BA按照计算参数，恢复对设备参数的控制	通过，手动切换到BA，设备均按BA参数运行
		1、冷却塔断电模拟 2、冷却塔液位低告警模拟	模拟冷却塔低水位告警，BA给到AI的告警点未激活，AI模式继续运行，不影响4个冷却塔，模拟故障，BA系统进入“非常态模式”，塔起备机，满频。	
		冷却泵断电/故障模拟	模拟正在运行的冷却泵故障，观察系统响应，是否BA控制优先	通过，冷却泵故障，BA系统自动切换，但AI模式无影响，继续执行AI调节
		冷冻泵断电/故障模拟	模拟正在运行的冷冻泵故障，观察系统响应，是否BA控制优先	通过，冷冻泵故障，系统进入“非常态控制”模式，泵满频运行300S，AI下发参数不起作用，故障恢复后，自动恢复AI模式
4	心跳暂停	冷机故障模拟： “冷机冷却侧水流开关打到开路”	冷机关闭，自动启动备机。BA显示非常态控制模式，主要传感器异常报警（冷冻水供水到18°，高温报警，显示主要传感器报警），切机完毕后，系统自动恢复到AI控制模式	通过，冷机故障后，BA显示进入“非常态模式”，启动备用冷机，切机完毕后，系统自动恢复到AI控制模式
		AI服务挂掉，心跳暂停	AI链路中断，1分钟后，实际控制模式转BA，BA产生告警	通过
		服务挂掉后，恢复	操作员手动系统故障复位 AI平台链路显示恢复正常 AI参数恢复对设备的控制	通过
		AI服务正常，服务不下发心跳	AI链路中断，1分钟后，实际控制模式转BA，BA产生告警	通过，心跳中断后，控制模式自动切换到BA模式
		AI服务正常，服务恢复心跳	AI链路中断，1分钟后，实际控制模式转BA，BA产生告警，显示链路状态“中断” AI恢复心跳，BA显示平台链路状态“中断”，BA复位故障后，BA显示平台链路状态“正常”，系统恢复AI控制	通过，AI恢复心跳后，必须故障复位后，才能重新显示实际心跳状态
		AI服务断网	1、拔网线后，心跳中断，BA告警 2、网线恢复后，BA点击手动恢复，AI控制恢复	通过
		AI服务断电	服务断电重启后服务无法自动恢复	有条件通过，但服务器需要手动开机，并需要大约5分钟才能自动恢复。

(四) 应急预案

通过安全沙箱和硬逻辑确保整个寻优逻辑都在暖通专家划定的边界内进行，应急预案则是系统的最后安全底线，支持一键切机、一键恢复、一键转手动和一键转本地等应急操作，确保运营专家总是出于掌控地位，甚至对系统断网和断电等极端情况也有应急预案。

表 19 应急操作和应急预案

应急操作	描述	备注
一键切机	一键断 AI，“急停”	执行 2 小时前 BA 控制参数
一键恢复	一键恢复“备份参数”	手动选中需要恢复的备份数据并执行
一键转手动	BA 转手动模式操作	BA 系统中选择“手动”或“强制”等选项。
一键转本地	制冷系统转本地手动操作	需要运维人员前往现场对冷机、水泵、冷塔、末端空调等设备逐一进行切换操作
系统断网、断电	BA 系统（控制器）断网、断电	极端情况（如死机、中病毒等）下，运维人员直接对系统（控制器）进行断电、拔网线等，再前往现场对各设备逐一进行手动操作

(五) 设备健康度

1) 传感器和监测设备：AI 节能系统依赖传感器和监控设备来获取数据并进行分析。确保这些设备的正常运行和准确性至关重要。定期检查和校准传感器，确保其读数准确。

2) 控制设备：AI 节能系统通常不直接控制设备，而是向 BA 系统、动环系统发送控制和调节命令。需要定期检查和维护这些设备，确保它们正常工作，并且与 AI 系统的控制信号和指令保持良好的连接。

3) 能源管理设备：能耗数据的准确性对 AI 节能系统的算法指向有重要影响，不同维度的能耗采集涉及大量电表和公式计算，需

要定期检查确保全部电表数据准确和公式正确，必要时可设置自动校验或各子数据偏差定位功能。

4) 网络和通信设备：AI 节能系统涉及网络和通信设备，用于数据传输和与其他设备的连接。确保这些设备的正常运行，包括网络交换机、路由器、防火墙等。定期进行网络性能和安全性的评估，并针对需要进行必要的更新和维护。

5) 数据存储和处理设备：AI 节能系统涉及数据存储和处理设备，如云服务器、数据中心的服务器和存储设备等。确保这些设备的健康度和性能，包括硬件状态、存储容量、数据备份等。进行定期的维护和监测，以预防潜在的故障和数据丢失。

6) 软件和算法更新：AI 节能系统依赖软件和算法模型进行数据分析和决策制定。定期进行软件更新，确保系统使用最新版本的软件，并对算法模型进行评估和调整，以满足实际需求。

7) 网络安全：在 BA、动环、AI 节能等系统入网、变更、升级等操作时同步进行安全合规核查和加固、系统暴露面管理、弱口令管理、数据安全防护等，定期进行漏洞扫描和修复等。

表 20 AI 及其关联系统设备健康度维护检查项目表

系统名称	维护检测项目	周期
BA 群控系统	1. 更新加载系统安全补丁	月
	1. 检查防火墙策略是否正确	
	2. 检查群控系统账户权限是否符合要求	
	3. 检查并测试蓄冷、放冷、加减机、模式切换、故障切换、运行时间均衡等控制逻辑是否正常	季度
	1. 检查并测试主备服务器切换功能是否正常	
	2. 检查并测试双 DO 自保持功能是否正常	年
	3. 检查并测试主备控制器切换功能是否正常	

	4. 检查并测试双电源设备电源切换功能是否正常 5. 检查并测试就地/远程控制切换功能是否正常 6. 检查并测试数据库全量功能是否正常 7. 分析并备份系统内各统计数据、记录及报表，留存时间 3-5 年 8. 信号、告警、通讯、硬件检查、时钟同步等参照动环监控维护规程 9. 检查并校正温度、压力、流量计、液位传感器、水表等	
动环监控系统	1. 检查监控系统的运行状况是否正常 2. 检查系统主机的运行性能和磁盘容量 3. 检查监控软件的各项运行性能是否稳定可靠，并按要求进行系统软件维护 4. 检查监控系统防火墙运行是否正常，并对系统进行安全补丁，系统漏洞等检查更新 5. 检查服务器时间同步	月
	1. 检查 FSU 设备 CPU 占用率、RAM 占用率、FLASH（或硬盘）占用率是否正常，能否正常告警。 2. 全面检查监控中心各系统设备及其配套设备的运行状况（指 SC）	季度
	1. 全面检查监控系统的各项功能和系统软硬件设备的各项运行性能指标	年
	1. 更新加载系统安全补丁 1. 检查防火墙策略是否正确	月
	2. 检查 AI 节能系统账户权限是否符合要求 3. 检查 AI 模型与现场暖通构架配置是否一致 4. 检查 AI 系统各点位数据与 BA 系统、动环系统数据是否一致 5. 检查 AI 系统各维度能耗数据和计算公式是否正确	季度
AI 节能系统	1. 检查并更新 AI 系统软件和算法。 2. 检查 AI 服务器 CPU 占用率、RAM 占用率、硬盘占用率是否正常，能否正常告警。	年
	3. 检查并测试主备服务器切换功能是否正常 4. 检查并测试数据库全量功能是否正常	年
	5. 分析并备份系统内各统计数据、记录及报表，留存时间 3-5 年 6. 信号、告警、通讯、硬件检查、时钟同步等参照动环监控维护规程	年

(六) 动态可靠性

1) 实时数据采集和监测：确保数据中心 AI 节能系统能够实时采集、监测和处理各种关键数据，包括能耗、温度、湿度、负载等。实时数据对于系统的决策和优化至关重要。

2) 算法和模型实时更新：确保数据中心 AI 节能系统的算法和模型能够及时更新，以反映实际运行条件的变化。

3) 自动化控制和调节：确保自动化调优过程的可靠性和稳定性，防止故障或错误的控制信号影响系统的正常运行。

4) 预测和故障检测：数据中心 AI 节能系统应具备预测性能，能够提前识别潜在的设备故障或性能问题。监测设备状态并进行实时的故障检测，以便及时采取纠正措施，避免系统的不可预料的停机或故障。

5) 弹性和适应性：确保数据中心 AI 节能系统具备弹性和适应性，能够根据实际需求和运行条件的变化做出及时调整和优化。例如，在负荷变化或设备故障时，系统应能够快速作出响应和调整，以保持节能效果和稳定运行。

6) 安全性和容错性：为了确保动态可靠性，数据中心 AI 节能系统需要具备强大的安全性和容错性。采取适当的安全措施，确保系统的数据和通信安全。同时，备份和冗余措施也应考虑，以提供容错机制和故障恢复功能。

(七) 主动运维服务

1) 实时监测和分析：通过实时监测数据中心 AI 节能系统的性能指标，及时发现任何异常或潜在问题。通过数据分析和报警机制，快速识别并解决问题，防止可能导致能效下降或系统故障的情况发生。

2) 性能优化和调整：数据中心 AI 节能系统的性能可能随着时间和使用情况的变化而发生变化。主动运维服务应该包括对系统的

性能优化和调整，以确保其始终按照最佳效率运行。包括运维专家主动验证 AI 节能参数，对明显异常的参数进行人工校正，帮助节能算法向正确的方向进行更新迭代。

3) AI 算力规划和管理：随着业务需求的增加或变化，AI 节能系统可能需要扩展或优化。通过定期进行算力容量评估和规划，提前进行扩容或升级，可以确保系统能够满足未来的需求，并避免过度或不足的资源配置。

十一、模型成熟度等级

开放和标准的成熟度等级定义可以在不需要公开 AI 算法或训练方式的前提下完成对任何遵循开放架构标准的 AI 模型进行公平的评估，成熟度等级可提升数据中心业主采纳 AI 的信心并减少决策成本。

等级	L0	L1	L2	L3	L4	L5
名称	无效节能模型	不安全节能模型	辅助建议人工调优	人工执行AI调优建议	人工监督下AI自动调优	完全自主AI自动调优
评估						
控制	无	无	界面建议	手动控制	自动控制试运行	自动控制
建议	不具备节能性，模型无使用价值，不建议使用	有节能性，但部分策略不合理，仅供调参参考	具备一定节能性和合理性，但可能出现热点或超限参数，在界面上提供优化建议	节能性、合理性和安全性能通过评审，但在多场景适应性上需要关注，运维人员可按建议每2个小时手动调优	五个维度都具备可行性，AI可直接控制BA，每10分钟下发一次调优，但运维人员需关注系统运行状态	AI模型成熟度高，AI自主决策和调优。运维人员按应急预案处理紧急事故



图 58 模型成熟度等级设计

(一) 成熟度评估维度

从五个维度对模型成熟度进行评估，其中节能性评价优化模型的预测精度，合理性评估控制逻辑合理性，安全性评估控制参数合法性，平衡性评估多场景下模型的适应性，计算性评估模型部署算力可行性。

表 21 模型成熟度五个评估维度

维度	定义
节能性	计算评估周期内的制冷功率与典型 BA 基线比较
合理性	评估调优模式序列是否符合暖通系统控制逻辑
安全性	评估控制参数是否突破安全沙箱约束或产生热点
平衡性	测试模型对所有仿真场景的适应性是否有短板
计算性	评估模型对算力的需求和基准算力下的推理速度

其中模式指任意时刻暖通系统运行状态的抽象分类，模式序列指将优化模型输出的多步控制策略连接起来，不仅考察某一步策略的节能效果和安全性，更关注在一个时间窗口内整个策略链的合理性，从而从整体评价模型成熟度。

(二) 成熟度等级定义

AI 节能模型成熟度等级定义为五个等级，其中没有节能效果的模型定义为 L0 级。L1 级有节能效果但是不合理，不建议上线使用；L2 级部分控制参数超限，建议仅作为人工调优辅助参考；L3 级能通过具体场景测试，可上线运行但需要人工确认和执行；L4 级能实现全场景调优，AI 自动运行但需要人工关注；L5 级可完全由 AI 自主决策，人工仅在紧急场景下介入。

表 22 成熟度等级定义

等级	名称	评估	控制	建议
L0	无效节能模型		无	不具备节能性，模型无使用价值，不建议使用
L1	不安全节能模型		无	有节能性，但部分策略不合理，仅供调测参考
L2	辅助建议人工调优		界面建议	具备一定节能性和合理性，但可能出现热点或超限参数，在界面上提供优化建议
L3	人工执行AI调优建议		手动控制	节能性、合理性和安全性能通过评审，但在多场景适应性上需要关注，运维人员可按建议每2个小时手动调优
L4	人工监督下AI自动调优		自动控制试运行	五个维度都具备可行性，AI可直接控制BA，每10分钟下发一次调优，但运维人员需关注系统运行状态
L5	完全自主AI自动调优		自动控制	AI模型成熟度高，AI自主决策和调优。运维人员按应急预案处理紧急事故

(三) 可解释的 AI 策略

BA 控制逻辑和 AI 模型优化策略，实质上都是暖通知识和专家经验的固化设计和编程实现，在应对暖通系统复杂场景变化时，AI 模型具备更强的适应性，然而与明确的控制逻辑相比，AI 模型本身并不具备可解释性。即使基于 AI 节能开放架构实现白盒化机理模型、安全沙箱、数据治理和调优策略，AI 模型在可解释性上仍然存在疑问。针对暖通系统 AI 调优存在的上百万种参数和状态组合，如果仅从某个时刻观察，只能从预测精度和安全边界的单一维度解释模型能力。

将暖通系统运行状态离散化，将某段时间窗口内的运行状态映射到具体运行模式，则以任意一个时刻点都可以生成历史运行模式-实时运行模式-未来运行模式的模式序列，其中未来运行模式基于开

放仿真平台预测生成，即可把暖通系统调优控制策略转换为模式序列的总功耗和安全边界评估，评分最高的模式序列即可成为当前时间点选择的输出策略。同时可根据暖通专家经验评估模式序列的合理性，对于较为异常的序列，可触发告警及时通知运营人员关注。

当然，“异常”模式序列也可能是合理的，即 AI 模型扩展了专家经验的疆界。

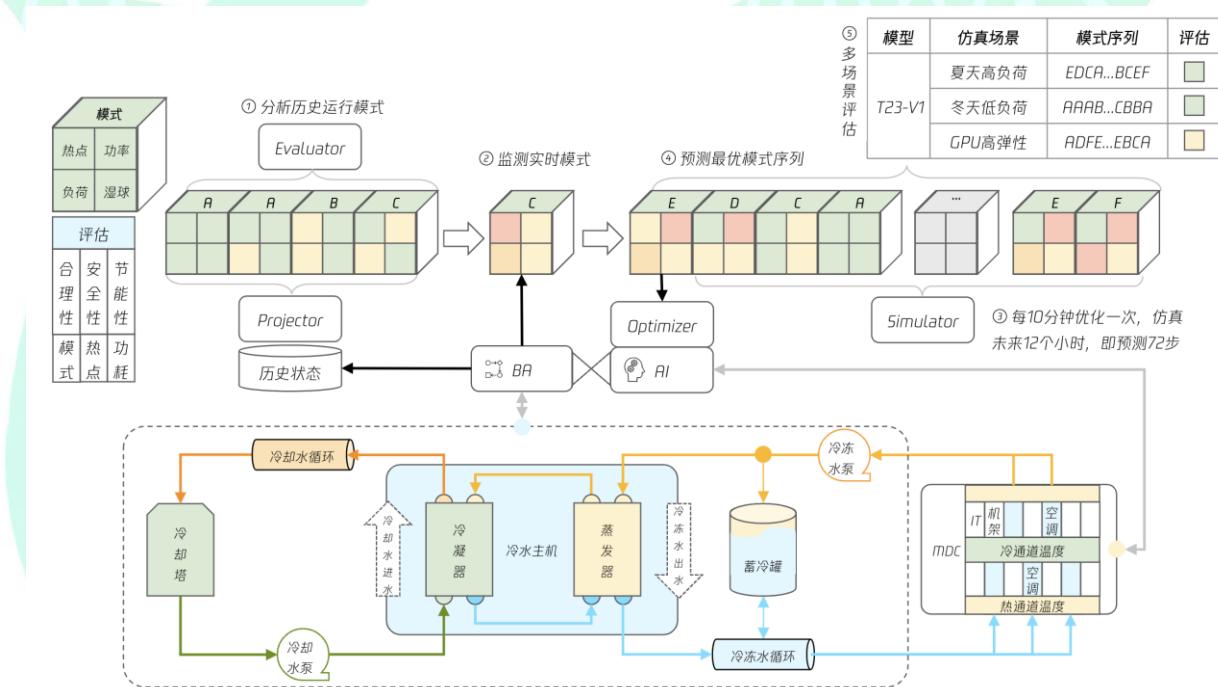


图 59 融合模式序列和动态仿真实现可解释的 AI 策略

从“鸟瞰”的视角，自上而下看暖通系统，将系统状态投影到具体模式，包括环境湿球温度、IT 负荷、机架温度和制冷功率。进一步每 10 分钟生成一个“快照”，将这些快照连接起来就形成“模式序列”。举个例子，当 IT 负荷增加，如果保持 A 模式制冷功率不变，则机架温度会升高，此时调整为 B 模式制冷功率变大，机架温度下降。如果此时负荷快速增加、环境温度也在升高，则当前的 C 模式

也无法平衡，则出现热点。通过分析模式序列，结合控制历史和专家经验，就可以确定控制策略是否“合理”。特别的，通过开放仿真平台生成暖通系统的数字孪生，可响应优化器的调优控制，假设仿真 12 个小时，即可预测未来 72 步。通过计算模式序列的合理性、安全性和节能性，即实现可解释的 AI 策略。通过扩展多种仿真场景，例如夏天高负荷、冬天低负荷和 GPU 高弹性负荷，可实现 AI 模型的成熟度评估。

www.ODCC.org.cn



ODCC公众号



ODCC订阅号