



数据中心中央空调系统节能降耗数据分析与策略优化

吴珉杰, 包晔诚

(上海理想信息产业(集团)有限公司, 上海 200135)

摘要: 随着信息化的不断深入, 我国兴建了大量配套的数据中心作为信息时代的新型基础设施, 同时这也产生了巨大的能源消耗, 因此如何为数据中心节能降耗成了当下的热门研究之一。利用一系列机器学习算法, 构建了一套完整的针对数据中心中央空调系统的智能节能降耗算法, 在保障温控水平的同时, 降低了电力消耗。基于对业务的理解, 对传感器采集的原始数据进行了适度的清洗。然后, 建立了一系列多元回归模型用以研究中央空调主要设备部件中各因素对能耗的影响。最后, 基于分析情况, 用遗传算法构建了中央空调能耗优化模型, 得到了最优解。

关键词: 中央空调; 节能降耗; 多元回归; 遗传算法

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025085

0 引言

随着数字中国发展战略的不断深入, 我国新建了一系列数据中心作为“新基建”的基础设施。研究显示数据中心的能源消耗约占全球2%的能源消费, 而制冷系统是数据中心能耗的主要来源之一, 约占数据中心总能耗的40%。如何优化数据中心的中央空调系统, 提高其能效指标, 一直是业界研究的重点方向之一。

基于此, 新建数据中心选择采用智能化和精细化的空调管理方案, 通过环境监测与算法优化, 实现供冷精准匹配, 最大限度地减少能源浪费。这也推动着数据中心空调控制算法及管理系统的研发与落地, 以支持大规模数据中心的能效管理。

1 研究目的

传统的数据中心空调模式是“一刀切”的全

局控制方式, 空调系统按最高需求机柜温度进行全量投入制冷, 这会导致部分机柜出现供冷过剩的情况, 造成较大的能源浪费。针对此问题, 智能化和精细化地管理数据中心空调成为必然趋势。通过算法分析由物联网传感器采集得到的各项数据, 动态优化分析中央空调各个部件间的约束关系, 建立综合能耗优化模型, 给出相关优化建议, 这可以最大限度地发挥空调系统的作用, 减少能源浪费。

本文紧密契合智慧数据中心发展趋势与国家“新基建”战略。研究目的在于探索适用于数据中心的空调控制优化算法, 构建智能化空调管理系统, 为数据中心提供由数据支撑的制冷方案与节能管理手段。该研究在助力数字中国建设的同时, 也为其他数据中心空调系统节能优化提供参考, 具有重要的技术价值与现实意义。

1.1 研究假设

为了降低整体建模的复杂度，更好地落地，对研究做出如下假设。

- 干球温度即室外温度。
- 不考虑冷水泵和冷冻水泵对冷冻水温度的影响。
- 不考虑水系统中管道的能力损耗，水的蒸发损耗。
- 所有设备在开启瞬间立刻进入最佳工作状态。
- 以相同室外温度下的平均制冷量代替舒适度参数。

2 研究方法 with 过程

2.1 整体流程

探索原始数据各字段的含义和关系，进行初步的数据预处理工作，进而分析空调各部件能耗影响因素，建立相应的能耗回归方程。同时，建立环境因素和制冷量的回归方程，向这些回归模型和未来两小时所需制冷量输入优化模型，通过遗传算法寻得当前所需的最佳运行参数，整体流程如图1所示。

2.2 数据预处理

数据清洗 (data cleaning) 是对数据进行重新审查和校验的过程，目的在于删除重复信息、纠正存在的错误，并提供数据一致性，数据清洗前后对比如图2所示。数据清洗是数据预处理的第一步，也是保证后续结果正确的重要一环。由于传感器采集的原始数据中往往混有一些异常数

据，或由于网络通信的不稳定可能产生某些时间点的缺失值。缺失值可以采用插值补齐，异常值采用统计学的方法进行识别并剔除。

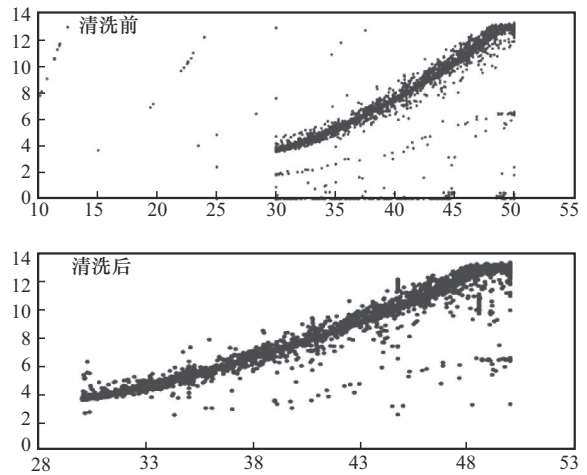


图2 数据清洗前后对比

步骤1 数据导入。

步骤2 剔除不合规的数据。

步骤3 补齐缺失值，根据不同字段采取不同的补齐策略。

步骤4 数据单位标准化。

步骤5 剔除异常值。

2.3 回归模型的建立

2.3.1 制冷量预测模型

一般来说影响变量变化的因素并非只有一个，可能有多个。首先寻找并确定影响制冷量的几个相关因素。因变量一般为不可控变量，根据实际情况及所提供数据，确定影响制冷量的几个主要天气因素有：室外干球温度、湿球温度、室外相对湿度、绝对湿度和室外焓值。根据模型需求及实际情况，

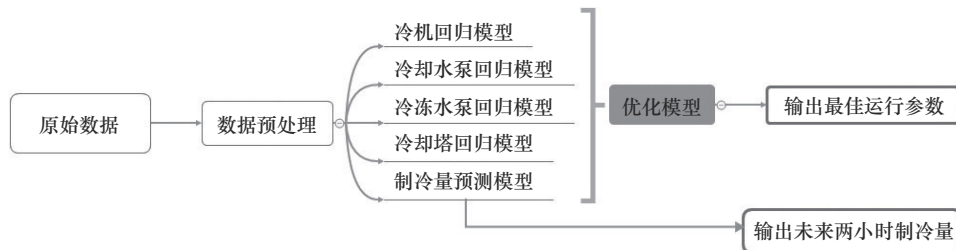


图1 整体流程



将模型初步探索设定为如下几种。

- 小时制冷量= f (IT设备电能消耗、室外干球温度、湿球温度、室外相对湿度、绝对湿度、室外焓值)
- 小时制冷量= f (IT设备电能消耗、湿球温度、室外干球温度, 室外相对湿度, 室外相对湿度)
- 小时制冷量= f (IT设备电能消耗、室外干球温度, 湿球温度, 绝对湿度, 室外焓值)
- 小时制冷量= f (IT设备电能消耗、湿球温度, 湿球温度, 室外干球温度, 室外相对湿度)

对各个模型进行拟合, 最终确定回归模型表达式如下。

小时制冷量= f (IT设备电能消耗, 湿球温度, 湿球温度, 室外干球温度, 室外相对湿度) (1)

最终得到的制冷量预测模型拟合结果如图3所示。

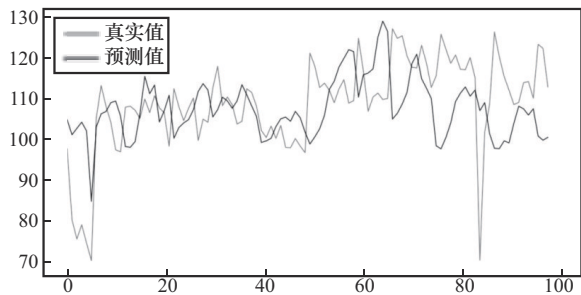


图3 制冷量预测模型拟合结果

2.3.2 主机类因素能耗影响分析

主机类主要包含冷机和冷却塔两个设备, 模型流程包括数据清洗和回归两步, 对输入的数据进行清洗并使用回归算法进行挖掘, 输出冷机功率与冷机运行参数、冷却塔功率与冷却塔运行参数的关系。

2.3.2.1 影响因素确立

首先寻找影响冷机和冷却塔功率的因素。就

冷机而言, 其为中央空调系统中能耗最大的设备, 包括压缩机、冷凝器、蒸发器和膨胀阀等部件。根据其制冷原理来看, 冷机的能耗主要受冷冻水温度、冷却水温度和实际制冷负荷的影响。就冷却塔而言, 冷却塔是空调系统中重要的散热设备, 通过风扇推动室外空气与冷却水进行热交换, 因此冷却塔功率的影响因素主要为风扇频率。

2.3.2.2 回归变量探索

冷机影响研究字段见表1。根据冷机的影响因素, 选取表1中的变量进行回归探索。

表1 冷机影响研究字段

字段名	字段解释	对应参数
ChVSDFreq	冷机运行频率	$n_{冷机}$
ChEnterEvapTemp	冷机蒸发器进水温度	$\Delta T_{冷冻水}$
ChLeaveEvapTemp	冷机蒸发器出水温度	
ChEnterCondTemp	冷机冷凝器进水温度	$\Delta T_{冷冻水}$
ChLeaveCondTemp	冷机冷凝器出水温度	
ChPower	冷机电表试试有功功率	$P_{冷机}$
ChChWTempSupplySetPoint	冷机冷水温度设定	$T_{冷机设定}$

根据冷却塔的影响因素, 选取表2中的变量进行回归探索。冷却塔影响研究字段见表2。

表2 冷却塔影响研究字段

字段名	字段解释	对应参数
CTVSDFreqSetting	冷却塔风扇频率设定	$n_{冷却塔}$
CWFlow01	冷机水流量	$m_{冷却水}$
CWTempSupply01	冷机水总管供水温度	$\Delta T_{冷却水}$
CWTempReturn01	冷机水总管回水温度	
CTGroupPower	冷却塔总功率	$P_{冷却塔}$

主机类因素二维散点如图4所示, 初步观察变量间相关关系, 进行定性分析, 以便初步建立回归模型。

2.3.2.3 回归模型择优

根据回归变量探索结果, 分别对冷机和冷却塔建立多个回归方程, 对回归结果进行分析、评价, 选择最优的回归模型。

冷机和冷却塔的部分回归模型结果分析对比如

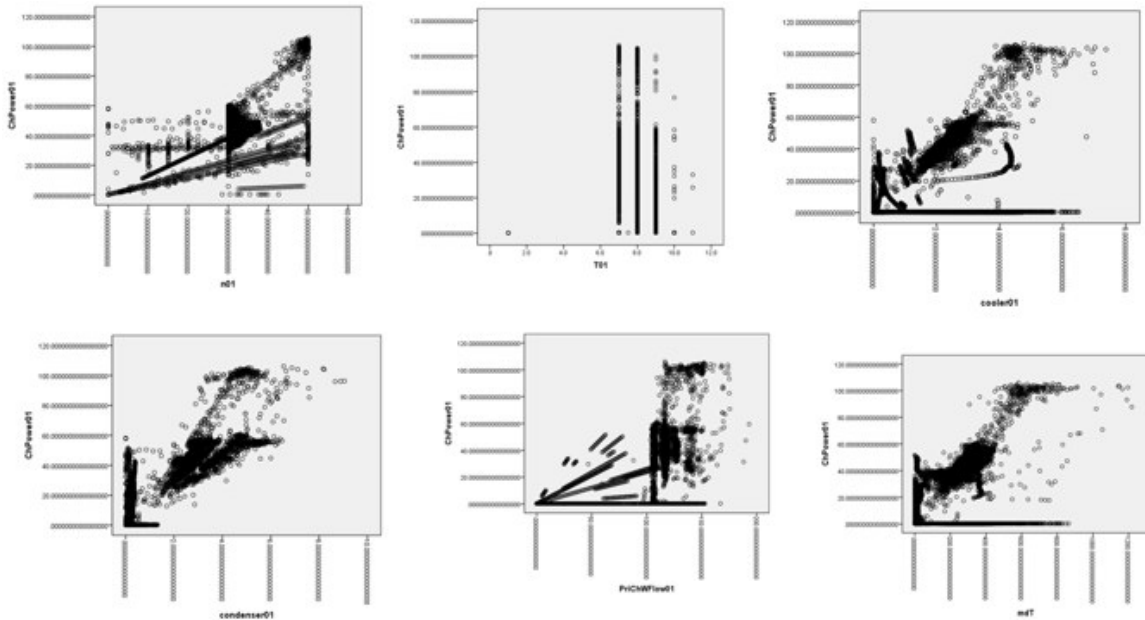


图4 主机类因素二维散点

图5所示，其中， $P_{冷机}=f(T_{冷机设定})$ 无法回归， $P_{冷却塔}=f(\Delta T_{冷却水}, m_{冷却水})$ 无法回归。最终冷机和冷却塔回归模型选型见表3。

表3 冷机和冷却塔回归模型选型

设备	一次回归	二次回归
冷机	$P_{冷机}=f(\Delta T_{冷冻水}, \Delta T_{冷却水}, m_{冷冻水}, \Delta T_{总管冷冻水})$	$P_{冷却塔}=f(\Delta T_{冷机设定}, n_{冷机})$
冷却塔	$P_{冷却塔}=f(n_{冷却塔})$	/

2.3.3 水泵类因素能耗影响分析

在进行回归模型建模时，需要找出各个因变量和自变量。这里，因变量设定为不可控变量。

根据模型需求建立多个回归模型后观察回归效果，最终确定两种回归模型进行建立与比较。两种模型分别为：

$$P_{水泵类}=f(m_{水泵类}, v_{水泵类}) \quad (2)$$

$$\begin{cases} P_{水泵类}=f(m_{水泵类}) \\ m_{水泵类}=f(v_{水泵类}) \end{cases} \quad (3)$$

$P_{水泵类}$ 为水泵类消耗功率， $m_{水泵类}$ 为流入流出水泵的水流量， $v_{水泵类}$ 为水泵频率设定。对两种回归模型分别进行拟合，发现第二种模型拟合效果较好，并最终确定为选用模型。冷却水泵模型拟合结果如图6所示，冷冻水泵模型拟合结果如图7所示。

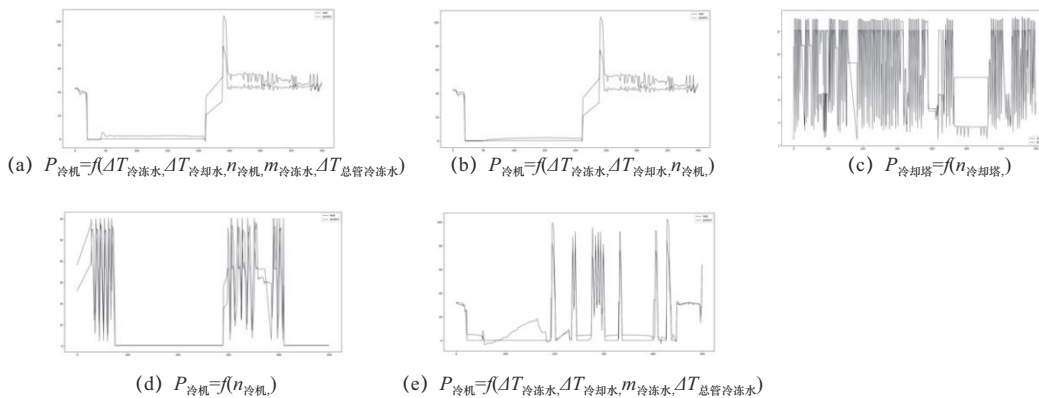


图5 部分回归模型结果分析对比

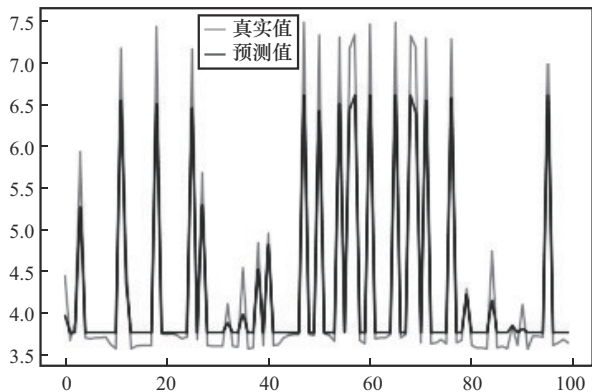


图6 冷却水泵模型拟合结果

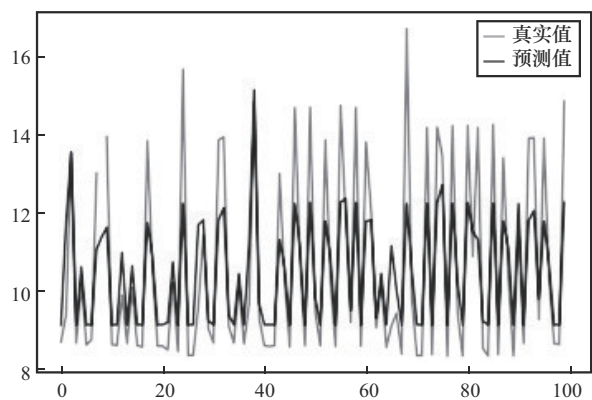


图7 冷冻水泵模型拟合结果

2.4 中央空调能耗优化模型的建立与优化

2.4.1 中央空调主要原理

中央空调主要原理如图8所示。

- 冷机组通过压缩机压缩制冷剂将常温低压的气体变成高温高压气体。压缩机冷机产生能耗的主要部件。
- 通过冷凝器冷却作用将热量通过冷却水循环散发到室外，冷却塔的风扇起到加速降温的作用。
- 通过这次热交换产生的冷却负载经由膨胀阀和蒸发器与室内冷冻水发生热交换，蒸发器将低温低压液体变成常温低压气体的过程要吸收大量热量，此时高温冷冻水就变成低温冷冻水，再由空气处理机将冷气输送至楼宇终端。

2.4.2 优化思路

空调各组件之间存在相互制约的关系，在保证基础制冷（预测得到的未来2小时制冷量）的前提下，最优化冷却水泵、冷冻水泵和冷却塔的功率，从而优化整个空调系统的输出

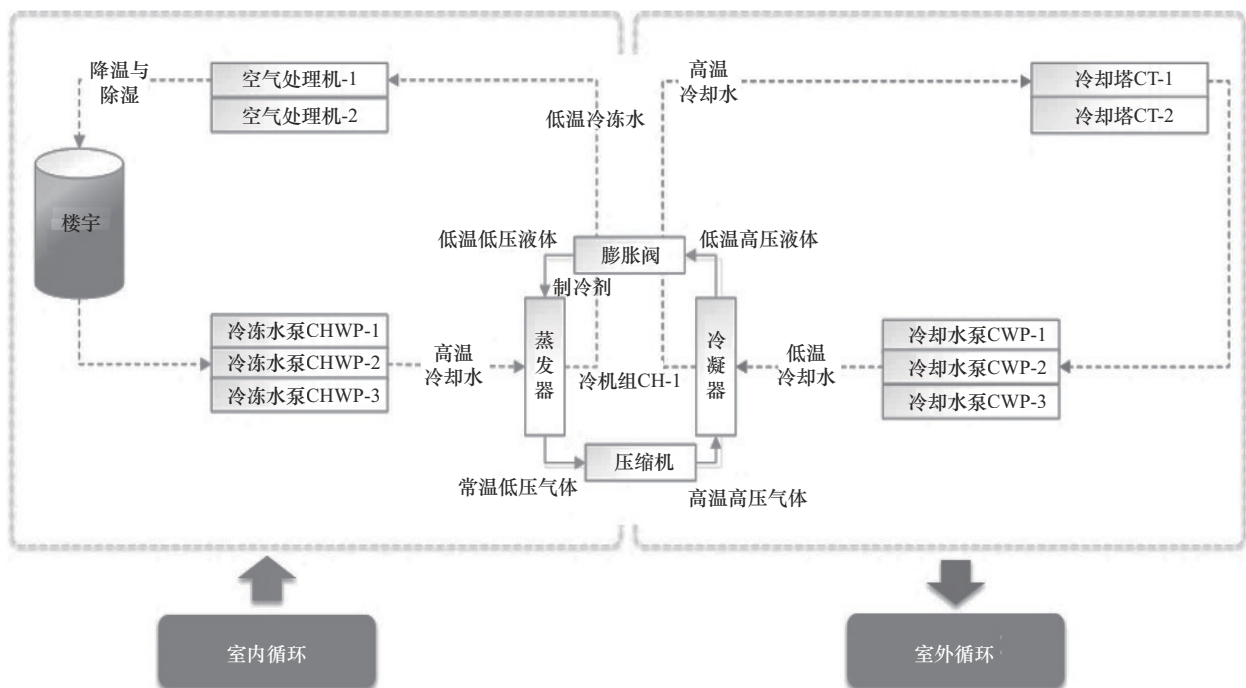


图8 中央空调主要原理

功率。

转换为多目标规划数学模型如下。

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } P_{\text{空调}} = P_{\text{冷机}} + P_{\text{冷冻水泵}} + P_{\text{冷却水泵}} + P_{\text{冷却塔}} \\
 & \text{Max } Q_{\text{制冷量}} \\
 \text{s.t. } & \left\{ \begin{array}{l} \text{制冷量} \geq \text{基础制冷量} \\ \text{冷凝器端冷却负载} \geq \text{蒸发器端冷却负载} \\ 25 \leq \text{水泵频率} \leq 50 \\ 35 \leq \text{冷却塔频率} \leq 45 \end{array} \right. \quad (4)
 \end{aligned}$$

该模型的目标是最小化空调系统的总功率，最大化空调的制冷量。约束条件如下。

- 制冷量要大于或等于基础制冷量，基础制冷量即通过天气数据预测未来两小时所需的制冷量，与冷机设置直接相关。
- 冷凝器段冷却负载大于或等于蒸发器端冷却负载，这是来自空调系统内部的约束，因为冷凝器端通过冷却水循环带走热量产生的冷却负载经由管道到蒸发器端，会产生一部分冷量流失。
- 水泵的运行频率介于 25~50。
- 冷却塔运行频率介于 35~45。

在冷机达到基础制冷量需求的情况下，计算空调水循环系统所需满足的温差、水流量需求，从而最优化冷却水泵、冷冻水泵和冷却塔的功率，达到系统最优的结果。

2.4.3 算法选择

针对多目标优化问题，为了求得最优解，采用遗传算法进行求解。遗传算法模拟一个人工种群的进化过程，通过选择、交叉以及变异等机制，在每次迭代中都保留一组候选个体，重复此过程，种群经过若干代进化后，理想情况下其适应度达到近似最优的状态。

2.4.4 遗传算法流程

遗传算法流程如图 9 所示，可以看出遗传算法主要由 7 个步骤组成。

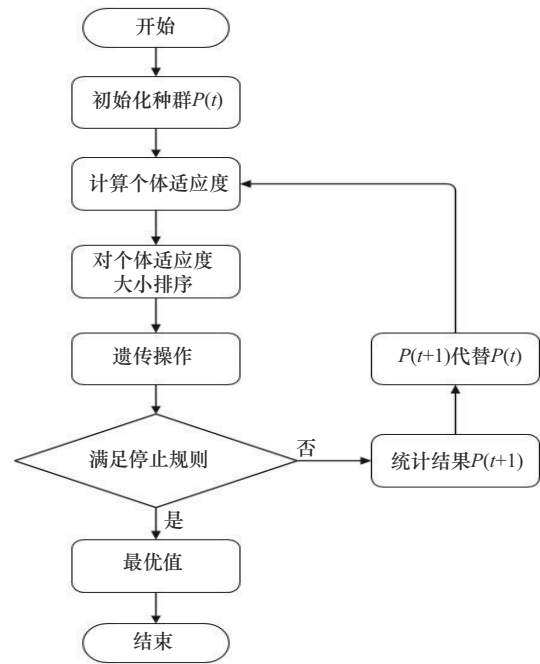


图9 遗传算法流程

步骤 1 初始化，位串解码得参数，计算目标函数值，再将函数值向适应值映射，并进行调整。

步骤 2 计算个体的适应度。

步骤 3 保存最优个体。

步骤 4 遗传操作、复制、交叉和变异，并更新最优个体。

步骤 5 记录最优个体的更新情况。

步骤 6 在适应度最高的群体中，进行局部搜索，将搜索结果代替原个体。

步骤 7 判断最新结果是否满足停止准则，若满足，得到全局最优解；否则转至步骤 2。

2.5 模型结果分析

通过建立的能耗优化模型，可以对中央空调系统输出如下参数。

- 最优冷冻泵频率
- 最优冷却泵频率
- 最优冷却塔频率
- 最优主机温度设定
- 最优总功率



- 最优主机功率
- 最优冷却塔功率
- 最优冷冻泵功率
- 最优冷却泵功率
- 主机开启台数
- 冷却塔开启台数
- 冷却泵开启台数
- 冷冻泵开启台数

优化后的总功率比优化前的总功率有所下降, 对比如图 10 所示。

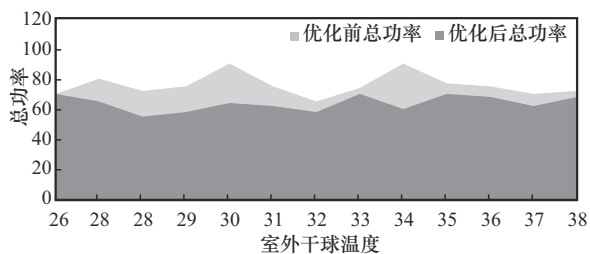


图 10 总功率优化对比

优化后的能效比要比优化前的能效比有所提升, 对比如图 11 所示。

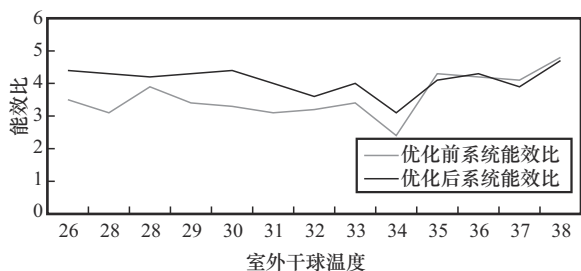


图 11 能效比优化对比

优化后的制冷量比优化前的制冷量相差不大, 对比如图 12 所示。

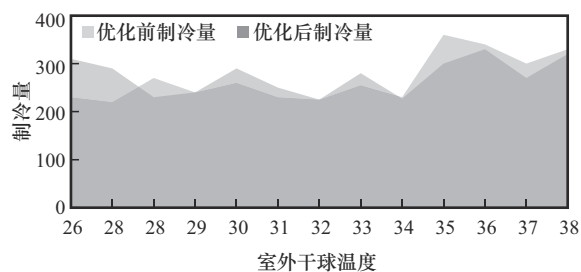


图 12 制冷量优化对比

3 结束语

数据中心的中央空调系统是一个庞大的系统工程, 在研究分析时, 需要结合数据中心业务本身, 再将系统中的每个部件拆解后逐个进行考量, 同时也需要站在全局的角度上对整个系统进行全面的协调控制, 才能达到预期的节能降耗效果。

本文主要对传感器数据及外部辅助数据进行了大规模的清洗, 以及后续基于机器学习算法对数据进行算法构建, 目前得到的结果在实际生产中取得了一定的成效, 同时由于模型选型的缘故, 在业务上的可解释性也较好。

后续将继续深入研究, 在影响分析中引入一些深度学习算法, 以减少影响分析对特征工程的依赖。同时, 近年来强化学习在数据中心中央空调系统节能策略优化中的应用, 后续也可以在基于本次研究获取参数基础上调校响应的强化学习模型, 以期获得更佳的节能降耗效果。

参考文献:

- [1] WORK TAI CHAN, FU WING YU. How Chillers React to Building Loads[J]. ASHRAE Journal. 2004.
- [2] 李巧. 中央空调系统末端设备节能优化控制策略研究[D]. 广州大学, 2015.
- [3] 禹海涛. 基于模糊控制的中央空调控制系统设计[D]. 青岛科技大学, 2014.
- [4] 吴伟伟. 办公建筑中央空调系统节能运行优化研究[D]. 重庆大学, 2016.
- [5] 郭雪平. 基于能效优化中央调节节能控制系统的应用研究[D]. 西安石油大学, 2016.
- [6] 张青. 中央空调系统节能运行控制方法研究[D]. 东南大学, 2016.

[作者简介]

吴珉杰 (1987-), 男, 上海理想信息产业(集团)有限公司工程师, 主要从事大数据和 AI 产品研发及应用工作。

包晔诚 (1985-), 男, 现就职于上海理想信息产业(集团)有限公司, 主要从事大数据及 AI 领域产品研发及行业应用推广工作。