 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i3.5208

Research on energy consumption optimization and digital twin collaborative control of refrigeration system in data center

Desheng Zhang

China Communications Construction First Engineering Bureau Co., Ltd., Baoding, Hebei, 071051, China

Abstract

As the cornerstone of the data center of the contemporary information society, its energy efficiency and operating costs are very important to the sustainable development of the entire digital economy. As the main source of energy consumption of the data center, the optimization of energy consumption is the key to improving the energy efficiency of the data center. With the continuous progress of the Internet of Things, big data and artificial intelligence technologies, digital twin technology provides a new way to optimize the energy consumption of data center refrigeration systems. The working principle, energy consumption characteristics and digital twin technology principle of data center refrigeration system are discussed, and a collaborative control strategy of energy consumption optimization and digital twin of data center refrigeration system is proposed for your reference.

Keywords

data center refrigeration system; energy consumption optimization; digital twinning technology

数据中心制冷系统能耗优化与数字孪生协同控制研究

张德生

中国通信建设第一工程局有限公司，中国 · 河北 保定 071051

摘　要

作为当代信息社会基石的数据中心，其能效和运营成本对整个数字经济可持续发展非常重要，作为数据中心主要能耗来源的制冷系统，能耗优化对提高数据中心能效是关键。随着物联网、大数据和人工智能技术不断进步，数字孪生技术给数据中心制冷系统的能耗优化提供了新途径。对数据中心制冷系统工作原理、能耗特性以及数字孪生技术原理及其在制冷系统中的应用进行了探讨，提出一种数据中心制冷系统能耗优化与数字孪生协同控制策略，以供大家参考。

关键词

数据中心制冷系统；能耗优化；数字孪生技术

1 引言

作为支撑信息化社会运作关键设施的数据中心，能耗问题引起广泛的关注。在全球能源紧缺且环境保护日益受重视的背景下，数据中心能耗优化显得越来越重要。作为数据中心主要能耗部分的制冷系统，优化后能效得到了提高，运营成本降低得很显著，为企业带来经济效益更为可观。随着物联网、大数据和人工智能等前沿技术飞速发展，数字孪生技术崭露逐渐显露头角，在数据中心管理领域找到了应用空间。数字孪生技术构建虚拟的数据中心模型，通过实时监测、数据分析和预测，为制冷系统能耗优化提供有力的支持。这种技术引入后，能耗优化效率明显提高，优化准确性大幅度提升，使得数据中心在追求高效能同时，节能减排的目标能实现的更好。

【作者简介】张德生（1975–），男，中国吉林德惠人，工程师，从事大数据与人工智能，智算中心一体化建设运维及运营研究。

2 数据中心制冷系统能耗优化

2.1 制冷系统工作原理

确保机房温度稳定与设备能够正常运行，依靠制冷机组、冷却水系统和空气处理机组等核心组件协同构建完整制冷循环很精密高效。借由压缩制冷循环历经制冷剂压缩、冷凝、膨胀、蒸发等关键流程产出冷量用于冷却水降温，对整个制冷系统的性能与能耗影响深远，承担传递冷量重任，将制冷机组降温后的冷却水，经管道网络输往各个空气处理机组达成冷量合理分配与高效利用。考虑到机房环境差异及负载动态变化具备优良调节与控制能力，以契合多样工况需求。直接参与机房空气调节，借助热交换器将冷却水中冷量

与空气进行热交换生成冷风并送入机房。精准调控送风温度与风量保证机房内部温度稳定且分布均匀，循环风机同步将机房内热空气排出促使制冷循环形成闭环，维系机房环境的动态平衡。各组件间紧密协作致力于制冷效率最大化与能耗最小化，随着技术持续革新朝着更高效、智能、环保方向不断演进，为数据中心的稳定运行筑牢根基。

2.2 能耗分析

数据中心制冷系统能耗的分析对提升其能效至关重要，制冷系统总能耗由制冷机组、冷却水泵以及空气处理机组等设备能耗共同构成，这些设备能耗特性与影响因素剖析，是制定有效能耗优化策略的基石。制冷机组作为核心设备，在制冷系统能耗中占比大，其能耗与制冷量、室内外温度有关系。制冷量对能耗水平左右的影响是直接，室内外温度通过影响机组运行效率和负荷对能耗作用是间接，比如高温环境下制冷机组为维持数据中心温度稳定的能量消耗。冷却水泵和空气处理机组作为能耗源忽视不得，冷却水泵能耗受流量、扬程影响，空气处理机组能耗与风速、风量、送风温度等运行参数相关，它们能耗虽相对制冷机组低些，但在整个制冷系统能耗中还是占有一定比例得。有效降低数据中心制冷系统能耗需多管齐下。一方面，制冷机组运行策略优化得妥当，比如采用高效压缩机、优化冷却水循环系统等，以此制冷效率提升得高效、能耗降低；另一方面，冷却水泵和空气处理机组借助智能控制系统调控得精细化，使其达到最佳运行状态，能耗降低。此外，制冷系统能耗运用自然冷源、余热回收等技术手段也是可行的。

2.3 优化策略

针对数据中心制冷系统能耗问题，需要从多个维度提出一系列行之有效的优化策略。提升制冷机组能效比在借助优化制冷循环与采用高效压缩机。优化制冷循环在于精细挑选制冷剂、改良换热器设计至增大换热面积、提升系统热效率等方面。选用变频压缩机或螺杆压缩机这类高效压缩机，使制冷机组能效增强至切实降低能耗程度。优化冷却水系统运行参数对节能降耗也很重要。合理调控冷却水流量与温度可避免能源的损耗，在数据中心负载较低时段，适度降低冷却水流量与温度，能使能耗削减。

引入智能控制系统对冷却水系统实时监测、调控，实现能耗动态化精准管理。空气处理机组结构设计与运行策略的改进也很重要。空气处理机组结构优化得好，例如换热器翅片结构改良、换热面积拓展，热交换效率提升不少；运行策略合理规划，包括送风温度与风速精准调节、变频控制技术运用，送风效率提高很多，进而能耗降低不少。智能控制系统在制冷系统能耗动态管理中角色很核心。通过安装传感器与采集设备把制冷系统运行状态及能耗数据能够准确的实时捕捉，运用数据分析与优化算法，依据数据中心负载状况、室内外温度等多元因素，制冷机组运行状态、冷却水系统参数以及空气处理机组运行策略自动灵活调整，实现能耗最优化管控。

3 数字孪生技术及其应用

3.1 数字孪生技术原理

在数字孪生技术研究范畴内，理解数字孪生模型这一核心概念要深入探究其原理才行。数字孪生模型作为物理实体的虚拟映射，能精准呈现实体的状态、行为以及性能，借由持续的数据采集与更新机制，实时追踪并预测物理实体的动态变化，给管理者提供极具价值的决策依据。数字孪生技术中，数据采集与融合作为起始步骤，是构建精确数字模型的根基。该过程需从各类传感器及设备中广泛收集数据，并把清洗、整合与标准化等处理工作进行开展。由于数据的准确性与完整性对后续模型构建及仿真的可信度影响深远得，故而制定高效的数据采集与融合策略成为数字孪生技术得以成功应用的必要前提。模型构建与仿真处于数字孪生技术的核心地位，依托采集所得数据，运用先进建模技术与算法，构建出数字模型得与物理实体高度契合。此模型不仅能展现实体静态结构，还可模拟其动态行为。通过在虚拟环境中开展仿真实验，测试与优化实体性，为实际操作提供指导。数据分析与优化是数字孪生技术提升应用成效的关键环节，对数字孪生模型生成的海量数据展开深度剖析，挖掘出实体运行过程中的潜在问题和需要优化的空间。融合机器学习、数据挖掘等前沿技术，提炼出有价值的见解与建议，助力管理者做出更加准确的决策。

3.2 数字孪生在制冷系统中的应用

数字孪生技术于数据中心制冷系统中应用彰显出潜力与价值无可估量，应用范畴广泛，深度渗透至能耗监测与优化、故障预警与诊断以及性能评估与改进等多个关键层面。传统能耗监测方式依赖人工巡检与定期数据采集，效率低下且无法实时洞悉系统能耗状况清，而数字孪生技术凭借构建制冷系统的精准数字模型，得以实时全方位监测系统各项能耗指标，像制冷机组功率、冷却水泵流量等关键数据也能监测到。同时，借助数字孪生模型的预测功能，能够对未来能耗趋势展开精准预判，为能耗优化策略的科学制定夯实的地基。在故障预警与诊断领域，数据中心制冷系统作为复杂系统工程，任一环节故障皆可能致使系统全面瘫痪，故而及时排查并化解故障隐患是关键。可准确模拟系统运行状态，实时跟踪各项关键参数的动态变化，一旦捕捉到异常就迅速发出预警信息，助力管理人员察觉并处理问题。

3.3 数字孪生模型构建

构建数据中心制冷系统数字孪生模型，需全面且深入洞悉系统关键要素得历经数据采集与预处理、模型构建与验证、参数优化与调整等一系列的关联步骤。数据采集与预处理作为基石要全方位收集制冷系统运行数据得涵盖温度、湿度、压力、流量等关键指标，这些数据精准映射系统实时运行状态，成为后续模型工作开展核心依据。为保障数据质量

要对其进行清洗与整理，去除异常值与噪声干扰，萃取对模型构建有价值信息，随后进入模型构建与验证阶段，依据制冷系统实际结构及运行特性来挑选适配的建模方法与工具，构建出能如实反映系统动态行为的数字孪生模型，要求对制冷系统工作原理与能耗特性理解得足够深，且对前沿建模技术与算法掌握得足够熟练。构建完成后，通过与实际系统对比测试，验证模型预测结果及性能的表现。最终来到参数优化与调整阶段，基于模型验证结果和实际需求，对数字孪生模型参数进行精细优化，调整参数取值调整得精细、改良算法逻辑改良得合理、提升预测性能，以此进一步提高模型预测精度与适应性，让数字孪生模型服务于数据中心制冷系统的能耗优化与协同，助力数据中心制冷系统实现高效、智能的运行管理。

4 数据中心制冷系统数字孪生协同控制策略

4.1 协同控制策略制定要点

在数据中心制冷系统数字孪生协同控制的架构下，制定科学有效的控制策略意义重大。依托数字孪生技术的协同控制策略，达成对制冷系统各组件的精准把控与高效协同目标明确，核心在于把能耗降得更低、将能效提得更高。策略制定时，充分挖掘数字孪生模型的预测功能，借由对制冷系统未来运行态势的预估来提前规划调整。例如，预知室内温度将升高就提前把制冷机组输出功率加大，维持室内温度稳定，规避温度过高引发的能耗剧增情况发生。同时，各组件间的协同配合要注重好，制冷机组、冷却水系统与空气处理机组相互关联、相互影响着，控制策略综合考量各组件运行状态，实现最优协同效果，调整制冷机组功率时同步兼顾冷却水流量与空气处理机组送风量。

4.2 协同控制策略具体实施

在数据中心制冷系统协同控制实践中，积极践行多种基于数字孪生技术的策略。首先基于预测控制的优化策略，借助数字孪生模型对制冷系统未来能耗、温度分布等关键指标预测，给决策提供有力支撑。依据未来需求变化，对系统控制参数调整得提前，当预测到数据中心负载大幅上升时，制冷量增加得提前，机房温度保障得适宜，能耗浪费杜绝。其次，采用基于故障预警的主动维护策略，数字孪生模型对制冷系统运行状态监测，通过分析历史与当前数据，异常趋势能够及时捕捉，潜在故障预警，系统可靠性与稳定性需要提升，意外停机时长减少，运营成本降低。再者，运用基于性能评估的改进策略，对制冷系统运行数据剖析，影响性能的关键因素精准定位，如设备老化、布局欠佳、冷却水流量分配不合理等情况的把握，进而针对性制定改进方案，包括老化设备及时更换、设备布局妥善优化、冷却水流量适量调节等，制冷系统性能提升了，能耗就能进一步降低。

4.3 协同控制策略实施成效

所采用的协同控制策略，充分发挥数字孪生技术优势，实现对数据中心制冷系统全方位优化。从能效层面来看，通过精准的预测控制与组件协同，有效避免能耗无端的增加，提升能源利用效率，降低数据中心运营成本。在系统稳定性方面，基于故障预警的主动维护策略减少意外停机情况，保障制冷系统持续稳定运行，为数据中心设备正常运转创造良好环境。而且，基于性能评估的改进策略促使制冷系统性能的提升，各组件间协同顺畅明显高效很多，这些协同控制策略的实施，切实提高了制冷系统的能效与稳定性提的高，为数据中心可持续发展筑牢根基，使其在高效运行的同时，适应不断变化的业务需求与技术发展趋势。

5 结语

总而言之，对制冷系统工作原理与能耗特性深度剖析，挖掘出潜在优化空间，据此制定多维度优化策略，将系统能效提升。数字孪生技术在制冷系统中的应用，把虚拟与现实的桥梁搭建得稳固，实现能耗实时监测、故障精准预警及性能持续改进，给协同控制策略的制定提供数据与模型支撑。协同控制策略在实施过程中，将数字孪生优势发挥得充分，从预测控制、主动维护到性能评估改进，把制冷系统运行全方位优化。随着物联网、大数据、人工智能等技术持续革新得不断，数字孪生协同控制有望在更复杂数据中心场景中拓展应用，挖掘制冷系统能效潜力，为全球数据中心节能减排事业贡献智慧与方案，引领行业迈向高效、绿色发展新征程。

参考文献

[1] 石云鹏.“双碳”背景下数据中心能耗现状与节能技术研究[J].中国新通信,2022,24(08):119-121.

[2] 施懿宸,陈思锐,周洲.数据中心产业助力我国实现“双碳”目标[J].国际金融,2022(05):42-46.

[3] 李程贵,王琥,张建雪.数据中心高可靠性BA控制系统优化研究与应用[J].通信电源技术,2020,37(11):132-137.