

文章编号: 0253-4339(2023) 02-0018-10
doi: 10.3969/j.issn.0253-4339.2023.02.018

数据中心冷却系统相关能效评价指标综述

王 博¹ 郭焱华¹ 邵双全¹ 涂 虬² 李千里³

(1 华中科技大学能源与动力工程学院 武汉 430074; 2 宁波工程学院建筑环境与能源应用工程系 宁波 315211;
3 杭州洲钜电子科技有限公司 杭州 311122)

摘 要 冷却系统在保证数据中心可靠运行的同时消耗了大量能量,为了助力数据中心碳中和,充分挖掘冷却系统节能潜力,对数据中心冷却系统能效进行评价很有必要。行业内对冷却系统的评价指标较多,本文调研了国内外现行数据中心标准及文献中的数据中心冷却系统相关能效评价指标,从电能使用效率及其衍生冷却系统相关指标、数据中心冷却系统用性能指标、数据中心冷源设备用性能指标三个角度对相关指标进行研究,介绍了不同指标的计算方法及计算内容,并分析了各指标的优缺点。通过对比得出:电能使用效率(PUE)及其冷却系统相关衍生指标不能准确反映数据中心运行维护技术上的水平;对于实际运行的数据中心冷却系统能效评价,全年综合性能系数(GCOP_A)较为适用;对于中国数据中心冷水机组的使用及年度运行指标而言,全年性能系数(ACOP)的计算方法更为客观,适用性更广。

关键词 数据中心;冷却系统;能效;性能指标

中图分类号: TP308; TQ051.5

文献标识码: A

Review of Energy Efficiency Evaluation Indexes Related to Data Center Cooling Systems

Wang Bo¹ Guo Yanhua¹ Shao Shuangquan¹ Tu Qiu² Li Qianli³

(1. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074, China; 2. Ningbo Institute of Technology Construction Environment and Energy Application Engineering Department, Ningbo, 315211, China; 3. Hangzhou Zhouju Electronic Technology Co., Ltd., Hangzhou, 311122, China)

Abstract Cooling systems consume a significant amount of energy to ensure the reliable operation of data centers. To help data centers achieve carbon neutrality and fully utilize the energy-saving potential of the cooling system, the energy efficiency of data center cooling systems should be evaluated. Many evaluation indexes of these cooling systems are used in the industry. In this study, the energy efficiency evaluation indexes of data center cooling systems presented in the current standards and literature are investigated, and the related indexes are explored as follows: electric energy utilization efficiency and related indexes of derivative cooling systems, performance indexes of data center cooling systems, and performance indexes of data center cold source equipment. The calculation methods and components of different indexes are introduced, and the advantages and disadvantages of each index are analyzed. Comparative experiments reveal that the power usage effectiveness (PUE) and related derivative indexes of the cooling systems cannot accurately reflect the technical level of the operation and maintenance of the data center. For the energy efficiency evaluation of the actual data center cooling systems, the annual general coefficient of performance (GCOP_A) is applicable. For the annual operation index of chillers in Chinese data centers, the annual coefficient of performance (ACOP) is applicable.

Keywords data center; cooling system; energy efficiency; performance index

数据中心(data center, DC)是计算机场地(机房)、其他基础设施、信息系统软硬件、信息资源(数据)和人员以及相应的规章制度组成的实体^[1]。随着 5G 时代的到来及人工智能、云计算等 IT(internet

technology)技术的发展,全球数据中心的规模正在快速增长^[2],预计未来几年总体规模仍平稳增长^[3]。E. Masanet 等^[4]估计,全球数据中心的能源消耗从 2010 年的 194 TW·h 升至 2018 年的 205 TW·h,约占

全球最终电力需求的 1%。数据中心运营对能源需求的增长,促使开展针对数据中心的节能减排研究^[5]。

2022 年 8 月,工业和信息化部等 7 部门印发的《信息通信行业绿色低碳发展行动计划(2022—2025 年)》^[6]指出,加快国家绿色数据中心建设,至 2025 年,全国新建大型、超大型数据中心电能使用效率(power usage effectiveness,PUE)降至 1.3 以下。冷却系统全年 24 h 不间断为 IT 设备提供可靠冷却的同时,其能耗占典型数据中心能耗达 30%~50%^[5,7],冷却系统性能系数与 PUE 的关系如图 1 所示,对于数据中心碳中和及 PUE 降至 1.3,冷却系统性能系数至少达 4.8 以上。目前已有一些针对数据中心的能效^[4,8-9]、能效评价方法^[10-12]、能效评价指标^[13]的研究,但冷却系统的研究,更多的侧重于自然冷却^[14]、蒸发冷却^[15]、复合热管系统开发^[16-17]、功耗建模和控制策略优化^[18-19]以及有效性和经济效益^[20]。

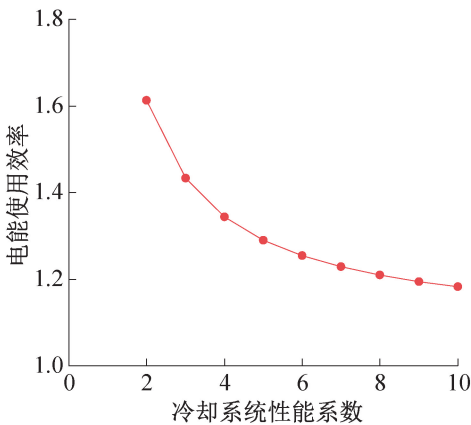


图 1 数据中心 PUE 与冷却系统性能关系
Fig.1 Relationship between data center PUE and performance of cooling system

国内外对数据中心冷却系统能效的相关标准及指标如表 1 所示,各指标间的关系如图 2 所示。鉴于数据中心用冷却系统能效评价指标繁多^[21],且各指标虽然名称不同,但指向内容相近。目前尚未有关于冷却系统能效指标的对比讨论,这对于准确评价并对比冷却系统能效、充分挖掘冷却系统节能潜力是不利的。本文调研了国内外现行数据中心标准及文献中的数据中心冷却系统相关能效评价指标,并对相关指标定义内容及计算方法进行总结归纳。这将有助于数据中心冷却系统的能效评价指标选择及应用,对于数据中心节能降碳具有积极作用。

1 PUE 及其衍生冷却系统指标

国际标准化组织 (international organization for

表 1 数据中心用冷却系统能效相关标准及文献
Tab.1 Energy efficiency standards and literature of cooling system for data center

能效指标	相关标准及文献资料
冷负荷系数 CLF (cooling load factor)	TGG (The Green Grid) 白皮书 6 号 《TGG 数据中心能源效率: PUE 和 DCiE》 ^[22]
冷却系统的电能使用效率 pPUE _{cooling} (partial PUE)	ISO/IEC 30134-2:2016/AMD 1:2018 《信息技术—数据中心—关键性能指标—第 2 部分: 电能使用效率 (PUE)—修订版 1》 ^[23]
冷却效率比 CER (cooling efficiency ratio)	BS EN 50600-4-7:2020《信息技术—数据中心设备和基础设施-4-7-冷却效率比》 ^[24] T/CAR 9.1—2021《数据中心冷却系统-第 1 部分: 综合性能系数 (GCOP) 测试与计算方法》 ^[25] T/CAR 9.2—2021《数据中心冷却系统-第 2 部分: 不同地区综合性能系数 GCOP 和能效等级》 ^[26]
综合性能系数 GCOP (general coefficient of performance)	AHRI Standard 210/240—2023 (2020) 《单元式空调和空气源热泵设备的性能等级》 ^[27] GB/T 19413—2010《计算机和数据处理机房用单元式空气调节机》 ^[28]
全年能效比 AEER (annual energy efficiency ratio)	AHRI Standard 1360 (I-P)—2017 ^[29] 、 AHRI Standard 1361 (SI)—2017 ^[30] 《计算机和数据处理室空调的性能等级》
综合净敏感性能系数 iNSenCOP (integrated net sensible coefficient of performance)	T/CAR 8—2021《数据中心用冷水机组性能试验与评价方法》 ^[31]
全年性能系数 ACOP (annual coefficient of performance)	

standardization, ISO) 给出的关键性能指标的定义为: 表示资源使用效率值或是给定系统的效率。数据中心最重要的性能指标是诸如 PUE 等的能源效率指标。PUE 自 2006 年由 C. Malone 等^[32]提出后,传播较为广泛,目前 TGG 和 ASHRAE 给出的 PUE 的定义相同,均为数据中心总能耗与 IT 设备能耗之比,其计算如式(1)所示:

PUE=E_{DC}/E_{IT} (1)

式中:E_{DC} 为数据中心全年总耗电量,kW·h;E_{IT} 为数据中心中 IT 设备全年耗电量,kW·h。

该指标虽然定义明确,但仍存在很多问题,如 IT 设备负荷对其有直接影响^[4]、实际运行数值测量方

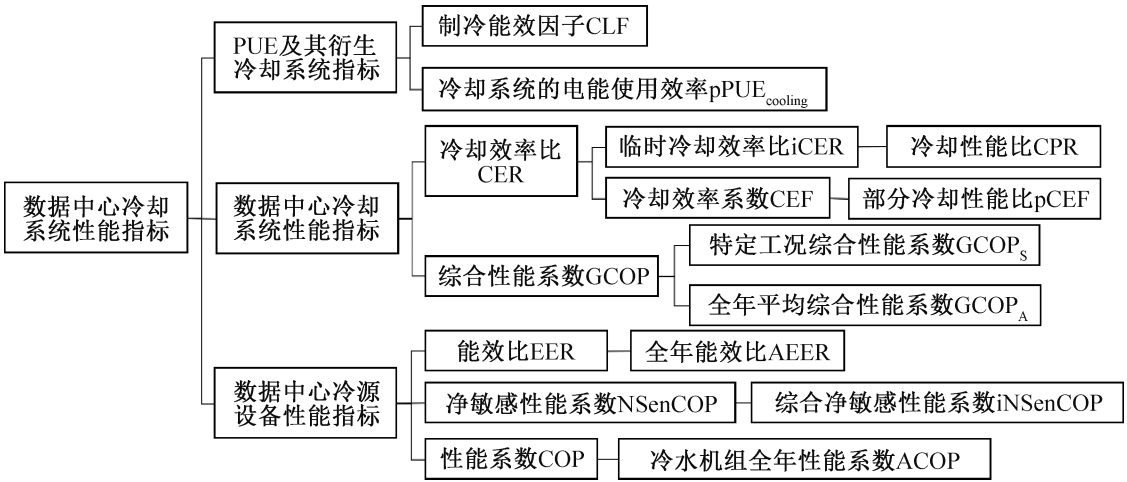


图 2 数据中心冷却系统相关能效指标及关系

Fig.2 Energy efficiency index and relationship of data center cooling system

法不一、能耗测量位置直接影响 PUE、未考虑碳排放及水资源的使用、机柜风扇的能耗未明确属于 IT 设备还是冷却设备^[33]。PUE 在科学文献和数据中心行业运维者使用过程中均受到质疑^[34]，因为 PUE 仅是一个粗糙的用于评估能源效率的指标，无法对数据中心节能提出有效建议^[35]，但其易于测量和推广，且计算方法不受服务器、存储容量或数据中心结构的限制^[10]，仍是国内外运用最为广泛的数据中心能效评价指标，在国内也是能否达到国家绿色数据中心要求的判断标准。

由 PUE 衍生出的冷却系统用能效指标主要包括制冷能效因子 CLF 及冷却系统的电能使用效率 $pPUE_{cooling}$ 。

1.1 制冷能效因子 CLF

2007 年 TGG 推出白皮书 6 号《TGG 数据中心能源效率：PUE 和 DCiE》^[22]，除了给出 PUE 的计算方法外，还提出了数据中心基础设施效率 DCiE (data center infrastructure efficiency)、冷负荷系数 CLF (cooling load factor)、电力负荷系数 PLF (power load factor) 等多项性能指标。DCiE 与 PUE 互为倒数关系，使用传播范围较小。根据其对于 PUE 的描述，可将 PUE 分解为制冷因子 CLF、电力负荷系数 PLF，计算式如式(2)~式(4)所示^[36]：

$$PUE = 1 + CLF + PLF + \text{其它} \tag{2}$$

$$CLF = E_{cooling} / E_{IT} \tag{3}$$

$$PLF = E_{power} / E_{IT} \tag{4}$$

式中：1 为标准化的 IT 设备负载；CLF 为制冷能效因子； $E_{cooling}$ 包括冷却塔、冷却器、机房空调、泵等冷却设备全年耗电量，kW·h；PLF 为供配电因子； E_{power} 包括开关设备、不间断电源、配电装置等供配电

设备全年耗电量，kW·h。

CLF 作为由 PUE 衍生的冷却系统能效指标，考虑了包括室外冷源（冷却塔、冷却器、泵）和机房空调总能耗，同时将 IT 设备的耗电量作为冷却系统的制冷量计算。该指标的主要问题是数据中心机房散热量应包括除冷却系统外所有设备的耗电量，因此，该值不能准确描述冷却系统的能效水平。同时 CLF 与诸如 COP（性能系数，coefficient of performance）、EER（能效比，energy efficiency ratio）等制冷能效指标为倒数关系，该值介于 1 与 PUE 之间，冷却系统能效水平越高时 CLF 值越小；较小的值使其在能源管理中验证冷却基础设施改进效果的帮助并不显著。

1.2 冷却系统的电能使用效率 $pPUE_{cooling}$

国际标准化组织 ISO 发布的 ISO/IEC 30134-2：2016/AMD 1：2018《信息技术—数据中心—关键性能指标—第 2 部分：电能使用效率（PUE）—修订版 1》^[23]中，将 PUE 定义为数据中心关键性能指标，即为计算、测量和评估在同一时期数据中心总能耗与 IT 设备能耗之比，衍生指标包括设计电能使用效率 dPUE (designed PUE)、部分电能使用效率 pPUE 等。由于该标准规定了 PUE 的测量方法与种类，国内相关标准制定时，对该标准参考较多。

ASHRAE 在其标准中去除了 PUE 指标的主要原因是认为 PUE 在数据中心设计阶段不适用。为此 ISO 给出了设计电能使用效率 dPUE，其定义为：由数据中心设计目标确定的预期 PUE，描述了数据中心在其运营之前或特定运营变化之前的预测 PUE。

ISO 给出的 pPUE 定义为：边界内的总能耗与信息技术设备能耗的比值，是根据数据中心基础设施的特定或指定子系统的能源使用来确定的。这

些子系统的边界在数据中心内,可适用于所有类型的数据中心。 $pPUE$ 计算式如式(5)所示。值得一提的是,TGG 和 ASHRAE 给出的 $pPUE$ 定义与 ISO 有所不同,是指某区间内数据中心总能耗与该区间内 IT 设备能耗之比。区间(zone)或范围(boundary)可以是实体,如集装箱、房间、模块或建筑物,也可以是逻辑上的边界,如设备,或对数据中心有意义的边界。

$$pPUE_{sub} = \frac{E_{sub} + E_{IT}}{E_{IT}} \quad (5)$$

式中:下标 sub 表示子系统; E_{sub} 为数据中心子系统全年总能耗, $kW \cdot h$ 。

与 PUE 相同, $pPUE$ 与 IT 能源使用有关,是一个需要全年测量的年度数据。作为能源管理过程的一个步骤, $pPUE$ 在数据中心的边界内使用,数据中心内,基础设施子系统的区域可以划分为 UPS(uninterruptible power supply)和配电系统、空气处理和 HVAC(heating, ventilation and air conditioning)系统、电子设备冷却系统、其他(灯光、电梯、安保和安全)。当子系统为电子设备冷却系统时,该参数成为数据中心子系统冷却系统的电能使用效率 $pPUE_{cooling}$,计算式如式(6)所示。

$$pPUE_{cooling} = \frac{E_{cooling} + E_{IT}}{E_{IT}} \quad (6)$$

作为从 PUE 衍生出来的数据中心冷却系统能效评价指标 $pPUE_{cooling}$,从计算方法可以看出,其不仅考虑了冷却系统的能耗,同时分子项也加入了 IT 设备的能耗,但其分母与 CLF 相同,均为 IT 设备的能耗,因此,该值等于 CLF+1,所以该值与美国 TGG 提出的数据中心冷却系统制冷因子 CLF 并无本质区别。

1.3 小结

考虑到数据中心的耗能部件多,能效的影响因素因此较多。同时,即使是相同配置的数据中心及冷却系统,在不同的全年运行条件下,其 PUE 仍存在差异。因此,以单一维度指标 PUE 作为数据中心能耗评价指标不能准确反映数据中心运行维护技术上的水平。电能使用效率及其冷却系统相关衍生指标主要包括制冷能效因子 CLF、冷却系统的电能使用效率 $pPUE_{cooling}$, $pPUE_{cooling}$ 值等于 CLF+1。CLF 作为由 PUE 衍生的冷却系统能效指标,与 COP、EER 等评价指标为倒数关系。CLF 考虑了包括室外冷源和机房空调总能耗,同时将 IT 设备的耗电量作为冷却系统的制冷量计算,热量考虑不全面。

2 数据中心冷却系统性能指标

数据中心冷却系统为保证数据中心中 IT 设备、

电源、电池等其它设备的高效稳定运行提供了适宜的温湿度环境,是数据中心能源使用中最重要的一方面之一,也是优化能源效率的最大潜力之一。

基于数据中心 IT 设备、UPS 等供电和加热、通风、空调等设备的电能消耗均转化为热量这一假设^[24],数据中心的热负荷即冷却系统的排热量 $Q_{removed}$ 可以通过式(7)计算。

$$Q_{removed} = E_{heat} = E_{IT} + E_{UPSloss} + E_{HVAC} \quad (7)$$

式中: $E_{UPSloss}$ 为数据中心中供电设备耗电量, $kW \cdot h$; E_{HVAC} 为 HVAC 系统的耗电量, $kW \cdot h$ 。

与基础设施的其他部分相比,冷却系统的 CLF 及 $pPUE$ 提供了对潜力的洞察。但 CLF 的值介于 1 和数据中心的 PUE 之间,过小的值使其在能源管理、验证冷却设备改进的效果作用不显著。同时未考虑 UPS 等的耗热量。目前数据中心冷却系统用冷却系统性能指标主要包括冷却效率比 CER 与全年综合性能系数 $GCOP_A$ 。相比 CLF, CER 与 $GCOP_A$ 计算方法类似于 COP、EER,但两者均为数据中心冷却系统专用的、为数据中心运维过程可用的性能指标。可以预见,专用指标的定义与推广将有利于数据中心冷却系统的性能评价。

2.1 冷却效率比 CER 与其衍生性能系数

欧洲标准 BS EN 50600-4-7:2020《信息技术-数据中心设备和基础设施-4-7-冷却效率比》^[24]中定义了冷却效率比 CER,为冷却系统排出的总热量与使用的电能之比。在之前的 EN 50600-3-1:2016 中,性能系数被指定为 EER,这将随着 EN 50600-3-1 的修订而修正。冷却效率比 CER 定义如式(8)所示。

$$CER = Q_{removed} / E_{cooling} \quad (8)$$

CER 的定义清楚地表明它是一个年度数字,需要连续测量至少一年 IT 能源和从数据中心去除的总热量。对于小于一整年的周期的测量和报告,这些值定义为临时冷却效率比 iCER(interim cooling efficiency ratio)。在实际运行条件下,短期内 iCER 是一个取决于负载和外部空气温度的参数,可将其定义为冷却性能比 CPR(cooling performance ratio),CPR 的计算如式(9)所示。这一新的性能系数,从定义而言,等同于制冷系数 COP、EER。

$$CPR = Q / P_{cooling} \quad (9)$$

式中: Q 为来自数据中心的实际热负荷, kW ; $P_{cooling}$ 为冷却系统的实际功率, kW 。

该标准还定义了冷却效率系数 CEF(cooling efficiency factor),CEF 是 CER 的倒数,计算如式(10)所示。与 CER 相比,CEF 能够以去除热量的百分比来

表示冷却系统的效率。例如, CEF 为 0.25 的系统, 需要 25% 的电能输入来排出热量。

$$CEF = \frac{1}{CER} = \frac{E_{cooling}}{Q_{removed}} \quad (10)$$

基于 CEF 概念的定义, 可以计算诸如机房空调 CRAC(或 CRAH)、冷却器和干式冷却器等冷却系统的子系统, 在将热量从服务器机房转移到外部空气的过程中, 单独消耗的电能百分比 pCEF(partial CEF) 的计算如式(11)所示。

$$pCEF = E_{cooling\,subsystem} / Q_{removed} \quad (11)$$

关于该标准定义的能效评价指标, 显而易见的问题是, 冷却性能比 CPR 与传统的冷却性能系数 COP、EER 无本质区别; 冷却效率比 CER 是在传统空调领域广泛使用的 EER 指标基础上提出的, 其制定者认为, EER 用于制冷机械, COP 用于热泵, 都是在特定条件下描述制冷机械性能的参数, 对冷却系统的能效水平进行定义, 需要重新定义性能指标评价参数。这一初衷是好的, 但在数据中心能效评价领域, 目前仍无使用冷却效率比 CER 的文献。同时, 该指标与空调行业产品碳效比 CER(carbon efficiency ratio)缩写一致, 这对

于冷却系统能效评价和碳中和无疑有所误导。

2.2 数据中心冷却系统全年综合性能系数 GCOP_A

中国制冷学会团体标准 T/CAR 9.1—2021《数据中心冷却系统-第 1 部分: 综合性能系数(GCOP)测试与计算方法》^[25]中, 定义了数据中心冷却系统综合性能系数 GCOP, 其为评价数据中心冷却系统效率的一项专有指标, 指为实现数据中心的冷却所付出的冷却系统能耗效率。冷却系统的排热量为数据中心总耗电量与冷却系统总耗电量之差, GCOP 计算如式(12)所示。

$$GCOP = \frac{E_{DC} - E_{CS}}{E_{CS}} \quad (12)$$

式中: E_{DC} 为数据中心耗电量, 测点为图 3 中 A 点, kW·h; E_{CS} 为冷却系统耗电量, kW·h, 包括供电系统直接供电的制冷系统(含制冷机组、冷却塔、水泵、风机等)的电能消耗(图 3 中 B 点)、由 UPS 供电的空调末端(图 3 中 C1 点)和由 UPS 供电的水泵(图 3 中 C2 点)三部分。

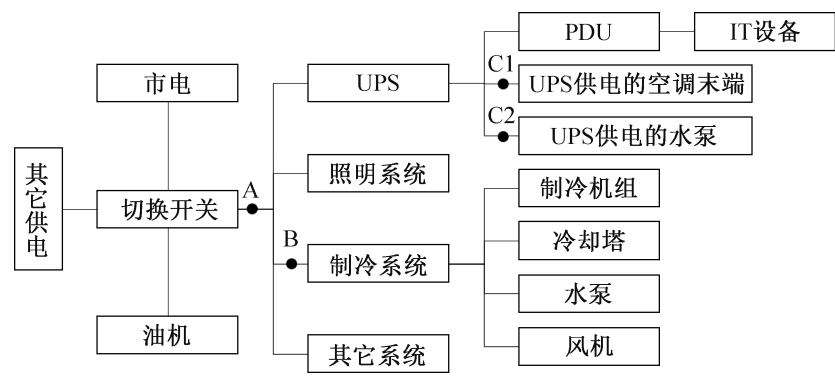


图 3 数据中心能耗监测点位置

Fig.3 Location of data center energy consumption monitoring point

GCOP 的衍生值包括特定时间综合性能系数 $GCOP_s$ 、全年综合性能系数 $GCOP_A$ 。 $GCOP_s$ 指在特定工况下为实现数据中心的冷却所付出的冷却系统能耗效率, 计算时, 能耗数值采用该特定工况内数值。

$GCOP_A$ 指在全年运行时为实现数据中心的冷却所付出的冷却系统能耗效率, 计算如式(13)所示。 $GCOP_A$ 不等于多个 $GCOP_s$ 的平均值。其计算方法与冷却效率比 CER 类似。

$$GCOP_A = \frac{\sum E_{DC} - \sum E_{CS}}{\sum E_{CS}} \quad (13)$$

式中: $\sum E_{DC}$ 为全年数据中心耗电量统计值, kW·h; $\sum E_{CS}$ 为全年冷却系统耗电量统计值, kW·h。

中国制冷学会团体标准《数据中心冷却系统-第 2 部分: 不同地区综合性能系数 GCOP 和能效等级》^[26]对不同地区不同能效级别冷却系统 GCOP 参考值和预期 EEUE(电能使用效率, electric energy usage effectiveness)做了相关规定, 其中, 数据中心冷却系统全年综合性能系数($GCOP_A$)和能效等级如表 2 所示。

由表 2 数据可知, 该系列标准不仅考虑了数据中心冷却系统的能效指标计算方法, 同时考虑了气候条件、冷却系统性能对于能效指标的影响, 并将气候影响分为 4 个区域, 将冷却系统分为 4 个等级。这不仅对冷却系统的性能计算有指导作用, 同时对于冷却系统的能效评价有重要的参考与指导作用。从定义上

表 2 数据中心冷却系统全年综合性能系数 (GCOP_A) 和能效等级^[26]
Tab.2 GCOP_A and energy efficiency rating of data center cooling system^[26]

分区	一级	二级	三级	四级	参考城市	适用地区
1 区	8.20	5.50	3.30	2.00	海口、广州、台北、中国香港、中国澳门、南宁、福州	$\tau(12) \leq 2\,000\text{ h}$
2 区	8.20	6.20	3.80	2.30	重庆、成都、武汉、长沙、南昌、合肥、南京、杭州、上海、贵阳、昆明	$2\,000\text{ h} < \tau(12) \leq 4\,400\text{ h}$
3 区	8.20	6.90	4.30	2.60	西安、郑州、济南、石家庄、天津、北京、太原、沈阳	$4\,400\text{ h} < \tau(12) \leq 6\,000\text{ h}$
4 区	8.20	7.60	4.80	2.90	长春、哈尔滨、呼和浩特、银川、兰州、乌鲁木齐、西宁、拉萨	$\tau(12) > 6\,000\text{ h}$

注: $\tau(12)$:全年室外空气湿球温度 $T_s \leq 12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时间,依据中国气象局气象信息中心气象资料室与清华大学建筑技术科学系合著的《中国建筑热交换分析专用气象数据集》^[37]中所提供的全国主要地面气象站点的全年逐时气象数据。

讲,综合性能系数 GCOP 的计算内容与冷却效率比 CER 较为类似,但 GCOP 更加明确具体,同时考虑了对于性能系数有重大影响的气候因素。由于 COP 概念已经广为人知,这有利于 GCOP 概念的传播与应用。目前,已经有将 GCOP 概念用于数据中心冷却系统能效评价的论文^[38]。

2.3 小结

数据中心冷却系统用性能指标主要包括冷却效率比 CER、全年综合性能系数 GCOP_A。CER 均是在传统空调领域广泛使用的 EER 指标基础上提出的,由于目前仍无使用冷却效率比 CER 的文献,同时,在实际应用中,热量难以测量,CER 的推广难度有待考量。GCOP_A 的计算内容与 CER 较为类似,但计算方法更为明确,同时考虑了气候条件、冷却系统性能对于能效指标的影响,在行业内已经有所传播与使用。

3 数据中心冷源设备性能指标

PUE 及其衍生冷却系统指标、数据中心冷却系统性能指标,均侧重于实际数据中心运行过程的能效评价,对于如制冷机组等数据中心冷源设备,需要单独的能效指标进行评价。目前行业内相关的能效指标主要有能效比 EER 及全年能效比 AEER、敏感性系数 NSenCOP (net sensible coefficient of performance) 及综合净敏感性性能系数 iNSenCOP、冷水机组性能系数 COP 及全年性能系数 ACOP。

3.1 能效比 EER 及全年能效比 AEER

EER 一般指空调、采暖设备的能效比,定义为在额定 (名义) 工况下,空调、采暖设备提供的冷量或热量与设备本身所消耗的能量之比,也称制冷性能系数。根据 ANSI/AHRI 标准 210/240—2008^[39],EER 是在以任何给定额定条件下,冷却能力与功率输入值

之比。

GB/T 19413—2010《计算机和数据处理机房用单元式空气调节机》^[28]将其应用于机房空调中,计算如式 (14) 所示。

$$EER = \frac{Q_s + Q_L}{P} \tag{14}$$

式中: Q_s 为机房空调从机房除去的显热部分的热量, W ; Q_L 为机房空调从机房除去的潜热部分的热量, W ; P 为机房空调所消耗的总功率, W 。三个变量均在规定的制冷量实验条件下。

通过 EER 可以衍生出全年能效比 AEER,即机房空调进行全年制冷时从室内除去的热量总和与消耗的电量总和之比。从定义上讲 AEER 为全年统计值,但 GB/T 19413—2010 中规定的 AEER 计算式如式 (15) 所示。

$$AEER = \sum_i T_i \times EER_i \tag{15}$$

式中: i 为规定的不同试验工况,不同工况参数如表 3 所示; T_i 为 i 工况的温度分布系数; EER_i 为在 i 工况的 EER。

需要注意的是,EER 在计算时,同时考虑显热与潜热的影响,而 AEER 是加权平均计算方法,这对于从机组性能大致预测数据中心冷却系统的全年性能系数有一定的参考作用。

3.2 净敏感性性能系数 NSenCOP 及综合净敏感性性能系数 iNSenCOP

美国 AHRI Standard 1360 (I-P)—2017^[29] 及 AHRI Standard 1361 (SI)—2017^[30],《计算机和数据处理室空调的性能评价》中针对计算机和数据处理室内空调,提出了能效指标净敏感性性能系数 NSenCOP 及综合净敏感性性能系数 iNSenCOP。提出 iNSenCOP 的目的是在更易于测试的方法标准化后将 NsenCOP 取代。NSenCOP 计算如式 (16) 所示。

表 3 机房空调全年能效比试验工况

Tab.3 Annual energy efficiency ratio test condition of air conditioning room

℃

室外环境条件		全年制冷工况				
		A	B	C	D	E
风冷式	空气进口干球温度	35.0	25.0	15.0	5.0	-5.0
	冷却水进口温度	35.0	25.0	18.0	10.0	10.0
水冷式	冷却水出口温度	35.0	出口温度由机组内置阀门控制			

$$\text{NSenCOP} = Q_s / P \tag{16}$$

式中： Q_s 为净显冷量，为设备在特定运行条件下从通过它的空气中去除显热的速率，包括消散至调节空间中的风扇能量，kW； P 为总输入功率（不包括再热器和加湿器），对于风冷机组，包括所有室内机组功率和风冷冷凝器、冷凝机组功率，对于水、乙二醇和冷冻水机组，包括所有室内机组功率，并包括泵和排热的功率余量，kW。

综合净敏感性能系数 iNSenCOP 为在指定的室外环境温度范围内，设备的年化冷却能效标准化评估的值。由于数据中心机房空调在广泛的室外环境条件下运行的同时，需要为 IT 设备提供独立于室外温度条件的全年连续冷却。其计算如式（17）所示。

$$\text{iNSenCOP} = \sum_{i=1}^{i=4} (C_i \times \text{NSenCOP}_{\text{Testi}}) \tag{17}$$

式中： $C_1 = 0.134$ ； $C_2 = 0.271$ ； $C_3 = 0.381$ ； $C_4 = 0.215$ ；测试条件 1~4 如表 4 所示。

ANSI/AHRI 标准，经历了从广泛使用的 EER 到新的性能指标净敏感性能系数 NSenCOP，将来的目标是切换到综合净敏感性能系数。新的性能指标只考虑显冷量，同时，该“综合”概念反映出室外环境对数据中心冷却系统性能的影响，但是该综合是通过 4 组室外工况点的加权平均计算得来的，考虑到室外环境的多样性，该综合性能系数只能起到参考作用。同时，该概念在学术界、国内工程应用影响较小。

3.3 冷水机组全年性能系数 ACOP

中国制冷学会团体标准 T/CAR 8—2021《数据中心用冷水机组性能测试与评价方法》^[31] 中，将数据中心用冷水机组明确为一种用于除去数据中心内部热负荷的，电动机驱动的采用蒸气压缩制冷循环及包括自然冷却的蒸气压缩制冷循环设备。该标准在性能系数 COP 的基础上，提出了全年性能系数 ACOP 概念。ACOP 为使用侧额定工况条件下，表 5 规定的放热侧额定、变温工况下，全年加权平均制冷量与加权平均耗电量的比值。对于风冷冷水机组、蒸发冷凝冷水机组与水冷冷水机组，ACOP 计算如式（18）所示。

$$\text{ACOP} = \frac{\sum_i k_i Q_i}{\sum_i k_i P_i} \tag{18}$$

式中： i 为规定的各个试验工况； Q 为规定工况下的制冷量，kW； P 为规定工况的输入功率，kW； k 为各个工况的温度分布系数，不同的机组、不同的气候区，其值有所差异。

中国制冷学会团体标准定义的数据中心冷水机组 COP 及 ACOP 计算式中，分子是以制冷量为单位而非电量，是针对数据中心用冷水机组的实验测量值以及年度性能预测值。欧洲标准 BS EN 50600-4-7：2020 附录 A.2^[24] 同样也认为，COP 是基于实际热负荷和电能消耗的比值，描述了在受控的最佳条件下的性能，从而给出了性能的最大值，该值不是在真实数据中心中运行的实际值。

与 AEER 及 iNSenCOP 不同，ACOP 计算时，不是简单的性能系数加权平均，而是考虑了不同点的功率及制冷量数据，同时，通过温度分布系数，考虑了不同气候区机组可能的全年性能系数，该值对于数据中心冷水机组性能计算方法更为客观，适用性更广。

3.4 小结

数据中心冷源设备用相关性能指标包括 EER、NSenCOP、COP，三者均通过额定工况及降低室外环境温度条件下的性能系统，通过加权平均或求和计算各自的全年性能指标包括 AEER、iNSenCOP、ACOP。

EER 在计算时，同时考虑显热与潜热的影响，通过 5 组工况点的加权平均计算 AEER 预测数据中心冷却系统的全年性能系数。净敏感性能系数 NSenCOP 是由 EER 发展而来，新的性能指标只考虑显冷量，但仍是通过加权平均计算 NSenCOP，不同的是仅考虑 4 组室外工况点。中国制冷学会团体标准定义的数据中心冷水机组 ACOP 是针对数据中心用冷水机组提出的年度性能预测值，考虑了 5 组工况点的功率及制冷量数据，以及 4 组气候区数据。该性能指标对于中国数据中心冷水机组的使用及年度运行指标的计算适用性较广。

表 4 综合净敏感性能系数 iNSenCOP 的环境额定值条件
Tab.4 Environmental rating conditions of iNSenCOP

冷却流体	流体状况	放热侧变温工况			
		1	2	3	4
风冷单元	进风室外环境干球温度/℃	35	26.7	18.3	4.4
	进水温度/℃	28.3	21.1	12.8	7.2
水冷单元(通常连接冷却塔)	回水温度/℃	35			
	水流速度			Max=Test 1	
冷水单元(通常连接公共冷冻水回路)	进水温度/℃	10	10		
	回水温度/℃	16.7	16.7		

注:所有额定值均在标准大气压下。

表 5 数据中心用冷水机组 ACOP 放热侧变温工况^[31]
Tab.5 Variable temperature condition on the exothermic side of ACOP of water chiller for data center^[31]℃

机组类别	试验取样参数	ACOP 的放热侧变温工况				
		A	B	C	D	E
风冷式	空气进口干球温度	35.0	25.0	15.0	5.0	-5.0
	空气进口干球温度	35.0	25.0	15.0	5.0	-5.0
蒸发冷凝式	空气进口湿球温度	28.0	19.4	10.8	2.1	
	冷凝器侧进口水温	32.0	26.0	20.0	16.0	12.0

4 结论

参考文献

本文通过调研国内外现行标准及文献,总结了数据中心冷却系统相关能效评价指标的计算方法及衍生指标,得到结论如下:

1)以单一维度指标 PUE 作为数据中心能耗评价指标不能准确反映数据中心运行维护技术上的水平。PUE 及其冷却系统相关衍生指标主要包括 CLF、 $pPUE_{cooling}$ 、 $pPUE_{cooling}$ 值等于 CLF+1。CLF 与 COP、EER 等评价指标为倒数关系,由于将 IT 设备的耗电量作为冷却系统的制冷量计算,热量考虑不全面。

2)实际数据中心运行过程的专用能效评价指标主要包括:CER、 $GCOP_A$ 。 CER 均是在传统空调领域广泛使用的 EER 指标基础上提出的。 $GCOP_A$ 的计算内容与 CER 较为类似,但计算方法更为明确,同时考虑了气候条件、冷却系统性能对于能效指标的影响,在行业内已经有所传播与使用。

3)对于诸如制冷机组等数据中心冷源设备,年化性能指标包括 AEER、iNSenCOP、ACOP。三者的主要区别是计算方法与工况点不同,对于中国数据中心冷水机组的使用及年度运行指标而言,ACOP 的计算方法更为客观,适用性更广。

[1] 数据中心 资源利用 第 1 部分:术语: GB/T 32910.1—2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017. (Data center—Resource utilization—Part 1: Terminology: GB/T 32910.1—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.)

[2] Cisco global cloud index: Forecast and methodology: 2016—2021[R/OL]. (2021-10-01)[2022-10-01]. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7469991/>.

[3] 中国信息通信研究院,开放数据中心委员会. 数据中心白皮书[R/OL]. (2020-12-15)[2022-10-01]. <https://max.book118.com/html/2021/0915/5130101221004004.shtm>. (China Academy of Information and Communications, Open Data Center Committee. Data center white paper[R/OL]. (2020-12-15)[2022-10-01]. <https://max.book118.com/html/2021/0915/5130101221004004.shtm>.)

[4] MASANET E, SHEHABI A, LEI N, et al. Recalibrating global data center energy-use estimates [J]. Science, 2020, 367(6481): 984-986.

[5] CHEUNG H, WANG Shengwei, ZHUANG Chaoqun, et al. A simplified power consumption model of information technology (IT) equipment in data centers for energy system real-time dynamic simulation [J]. Applied Energy,

- 2018, 222: 329–342.
- [6] 工业和信息化部. 信息通信行业绿色低碳发展行动计划(2022—2025年)[EB/OL]. (2022-08-22) [2022-10-01]. https://ythxxfb.miit.gov.cn/ythzxfwpt/hlwmb/tzgg/xzsk/dxhhlwyw/art/2022/art_386727482f574e5f9ef7f948367af73d.html. (Ministry of Industry and Information Technology. Action plan for green and low-carbon development of the ICT sector (2022–2025) [EB/OL]. (2022–08–22) [2022–10–01]. https://ythxxfb.miit.gov.cn/ythzxfwpt/hlwmb/tzgg/xzsk/dxhhlwyw/art/2022/art_386727482f574e5f9ef7f948367af73d.html.)
- [7] FLEISCHER A S. Cooling our insatiable demand for data [J]. *Science*, 2020, 370(6518): 783–784.
- [8] KATAL A, DAHIYA S, CHOUDHURY T. Energy efficiency in cloud computing data center: A survey on hardware technologies[J]. *Cluster Computing*, 2022, 25(1): 675–705.
- [9] 陈庆. 数据中心能效、碳效及算效研究[J]. 中国金融电脑, 2022(9): 79–81. (CHEN Qing. Research on energy efficiency, carbon efficiency and computing efficiency of data center[J]. *Financial Computer of China*, 2022(9): 79–81.)
- [10] LONG Saiqin, LI Yuan, HUANG Jinna, et al. A review of energy efficiency evaluation technologies in cloud data centers[J]. *Energy and Buildings*, 2022, 260: 111848.
- [11] 单慧中. 云数据中心能效评估方法研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2021. (SHAN Huizhong. Research on energy efficiency evaluation method of cloud data center[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2021.)
- [12] 余浩. 云数据中心的能效评估方法研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2021. (YU Hao. Research on energy efficiency evaluation methods of cloud data center[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2021.)
- [13] SHAO Xiaotong, ZHANG Zhongbin, SONG Ping, et al. A review of energy efficiency evaluation metrics for data centers[J]. *Energy and Buildings*, 2022, 271: 112308.
- [14] LING Li, ZHANG Quan, YU Yuebin, et al. A state-of-the-art review on the application of heat pipe system in data centers[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 199: 117618.
- [15] CHU Junjie, HUANG Xiang. Research status and development trends of evaporative cooling air-conditioning technology in data centers[J]. *Energy and Built Environment*, 2023, 4(1): 86–110.
- [16] ZHANG Hainan, SHAO Shuangquan, TIAN Changqing, et al. A review on thermosyphon and its integrated system with vapor compression for free cooling of data centers[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81: 789–798.
- [17] CAO Jingyu, ZHENG Zhanying, ASIM M, et al. A review on independent and integrated/coupled two-phase loop thermosyphons[J]. *Applied Energy*, 2020, 280: 115885.
- [18] ZHANG Qingxia, MENG Zihao, HONG Xianwen, et al. A survey on data center cooling systems: Technology, power consumption modeling and control strategy optimization [J]. *Journal of Systems Architecture*, 2021, 119: 102253.
- [19] HE Zhiguang, XI Haonan, DING Tao, et al. Energy efficiency optimization of an integrated heat pipe cooling system in data center based on genetic algorithm[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 182: 115800.
- [20] CHO J, YANG J, LEE C, et al. Development of an energy evaluation and design tool for dedicated cooling systems of data centers: Sensing data center cooling energy efficiency [J]. *Energy and Buildings*, 2015, 96: 357–372.
- [21] FIANDRINO C, KLIAZOVICH D, BOUVRY P, et al. Performance and energy efficiency metrics for communication systems of cloud computing data centers[J]. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 2015, 5(4): 738–750.
- [22] The green grid data center power efficiency metrics PUE and DCiE 2007[R/OL]. (2008-05-01) [2022-10-01]. https://aboutdc.ru/docs/aboutdc/4/White_Paper_PUE_DCiE_2008.pdf.
- [23] Information technology-Data centres-Key performance indicators-Part 2: Power usage effectiveness (PUE): ISO/IEC 30134-2: 2016/AMD 1: 2018[S]. Geneva: International Organization for Standardization [ISO], 2016.
- [24] Information technology-Data centre facilities and infrastructures Part 4-7: Cooling efficiency ratio: BS EN 50600-4-7: 2020 [S]. London: European Committee for Electro technical Standardization, 2020.
- [25] 数据中心冷却系统-第1部分: 综合性能系数(GCOP)测试与计算方法: T/CAR 9.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021. (Cooling system for data center-Part 1: Test and calculation method of general coefficient of performance: T/CAR 9.1—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.)
- [26] 数据中心冷却系统-第2部分: 不同地区综合性能系数GCOP和能效等级: T/CAR 9.2—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021. (Cooling system for data center-Part 2: General coefficient of Performance (GCOP) in different regions and energy efficiency grades: T/CAR 9.2—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.)
- [27] Performance rating of unitary air-conditioning & air-source heat pump equipment: AHRI Standard 210/240—2023 (2020)[S]. Arlington: AHRI, 2022.

- [28] 计算机和数据处理机房用单元式空气调节机: GB/T 19413—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010. (Unitary air-conditioners for computer and data processing room: GB/T 19413—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.)
- [29] Performance rating of computer and data processing room air conditioners: AHRI Standard 1360 (I-P)—2017[S]. Arlington: AHRI, 2017.
- [30] Performance rating of computer and data processing room air conditioners: AHRI Standard 1361 (SI) 2017[S]. Arlington: AHRI, 2017.
- [31] 数据中心用冷水机组性能试验与评价方法: T/CAR 8—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021. (Performance test and evaluation method of chillers for data center: T/CAR 8—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.)
- [32] MALONE C, BELADY C. Metrics to characterize data center & its equipment energy use[EB/OL]. (2006-09-28) [2022-10-01]. http://cool.rsn.hp.com/papers/200609%20DPF%Final.pdf\t_parent.
- [33] 殷平. 数据中心研究(4): 关键性能指标、电能使用效率 PUE 和 EEUE[J]. 暖通空调, 2017, 47(4): 36-45, 135. (YIN Ping. Research on data centers(4): Key performance indicators, power usage effectiveness (PUE) and electric energy usage effectiveness (EEUE)[J]. Journal of HV&AC, 2017, 47(4): 36-45, 135.)
- [34] PROCACCIANTI G, ROUTSIS A. Energy efficiency and power measurements: An industrial survey[C]//Proceedings of ICT for Sustainability 2016. Paris: Atlantis Press, 2016.
- [35] YUVENTI J, MEHDIZADEH R. A critical analysis of Power Usage Effectiveness and its use in communicating data center energy consumption[J]. Energy and Buildings, 2013, 64: 90-94.
- [36] 张忠斌, 邵小桐, 宋平, 等. 数据中心能效影响因素及评价指标[J]. 暖通空调, 2022, 52(3): 148-156, 99. (ZHANG Zhongbin, SHAO Xiaotong, SONG Ping, et al. Energy efficiency impact factors and evaluation indicators for data centers[J]. Journal of HV&AC, 2022, 52(3): 148-156, 99.)
- [37] 中国气象局气象信息中心气象资料室, 清华大学建筑技术科学系. 中国建筑热环境分析专用气象数据集[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005. (Meteorological Data Room, Meteorological Information Center, China Meteorological Administration, School of Architecture, Tsinghua University. Special meteorological data set for thermal environment analysis of buildings in China[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.)
- [38] 张宁, 张泉, 黄振霖, 等. 数据中心湖水源自然冷却系统现场性能测试分析[J]. 暖通空调, 2022, 52(2): 70-74. (ZHANG Ning, ZHANG Quan, HUANG Zhenlin, et al. On-site performance test analysis of free cooling system with lake water in data centers[J]. Journal of HV&AC, 2022, 52(2): 70-74.)
- [39] Performance rating of unitary air-conditioning & air-source heat pump equipment: ANSI/AHRI Standard 210/240—2008[S]. Arlington: AHRI, 2012.

通信作者简介

邵双全, 男, 博士, 教授, 华中科技大学能源与动力工程学院, E-mail: shaoshq@hust.edu.cn。研究方向: 高效热湿环境控制理论及在舒适性空调、食品保质贮运加工全程冷链、电子产品及数据中心冷却等方面应用的关键技术研究。

About the corresponding author

Shao Shuangquan, male, Ph. D., professor, School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, E-mail: shaoshq@hust.edu.cn. Research fields: high-efficiency hot and humid environment control theory and research on key technologies applied in comfort air conditioning, cold chain in the whole process of food storage, transportation and processing, electronic products and data center cooling.