

数据中心用磁悬浮压缩机 及制冷机组白皮书

Maglev Compressor and Chiller for Data
Center Cooling White Paper



中国制冷学会

2021 年 4 月

序 言

本白皮书作为数据中心用磁悬浮压缩机及制冷机组设计与应用的参考文献，内容解释由中国制冷学会负责。在应用过程中如有修改和补充的建议，请将有关资料 Email 至：idccooling@car.org.cn。

主编单位

中国制冷学会
华中科技大学
丹佛斯（上海）投资有限公司

参编单位

腾讯上海青浦数据中心
中国电信股份有限公司南京分公司
广东智江云计算股份有限公司
中铁信大数据科技有限公司
北京中科云数据中心
青岛海尔空调电子有限公司
克莱门特捷联制冷设备（上海）有限公司
南京佳力图机房环境技术股份有限公司

主要起草人

邵双全，王博，张乐平，史小平，荆华乾，赵国君

参编人（排名不分先后）

高明星，郑继春，闫兰飞，石建民，周志钢，邵正忠，朱连富，刘闯，王继鸿，徐权威，刘银灿，窦云霞，吴郑杰，盘剑，蒋进霞，周伟杰，魏永建，张旭东，杨杰，刘红绍，黄勇，姜涛，石君华，陆柳柳，陆勇，彭园媛，钱晨姬，康庄，曲磊，彭思敏

主要审查人：

邢子文，张泉，李红霞，罗海亮，李典林

目 录

1 引言	1
1.1 编制目的和适用范围	1
1.1.1 编制目的	1
1.1.2 适用范围	1
1.2 编制依据	1
1.3 编制原则	2
2 术语和符号	3
3 数据中心产业发展	5
3.1 数据中心产业发展现状与趋势	5
3.2 数据中心能耗现状与趋势	7
3.3 数据中心冷却系统节能措施	10
3.3.1 数据中心室内环境需求	10
3.3.2 数据中心负荷特征	11
3.3.3 数据中心冷却系统节能措施	14
4 磁悬浮压缩机技术	16
4.1 技术原理	16
4.1.1 磁悬浮离心式压缩机的构成	16
4.1.2 磁悬浮轴承	17
4.2 技术优势	19
4.3 产品参数	22
4.4 云服务	22
5 磁悬浮压缩机典型应用方式	23
5.1 磁悬浮离心冷水机组典型流程	23
5.2 磁悬浮压缩机在数据中心行业中的典型应用方式	24
5.2.1 风冷冷水机组+水路自然冷却系统	24
5.2.2 水冷冷水机组+水路自然冷却系统	26
5.2.3 风冷/蒸发冷多联 CRACs+自然冷却系统	27
5.2.4 磁悬浮热泵机组	28
5.2.5 磁悬浮机组+磁悬浮热泵热回收机组	30

5.2.6 磁悬浮间接蒸发冷+直膨冷却系统	31
5.3 总结展望	32
6 数据中心用磁悬浮压缩机与制冷机组性能特征	34
6.1 磁悬浮离心压缩机性能	34
6.1.1 压缩机运行范围	34
6.1.2 压缩机运行性能	34
6.2 磁悬浮离心制冷机组变工况性能	35
6.2.1 磁悬浮离心制冷机组变冷冻水温度性能	35
6.2.2 磁悬浮离心制冷机组变冷却水温度性能	36
7 磁悬浮制冷机组典型应用案例	39
7.1 磁悬浮离心制冷机组全球数据中心应用概况	39
7.2 案例 1：水冷磁悬浮冷水机组(带自然冷却)在夏热冬冷地区应用.....	41
7.2.1 数据中心简介	41
7.2.2 冷却系统概述	41
7.2.3 运行数据分析	46
7.2.4 案例小结	52
7.2.5 专家意见	52
7.3 案例 2：风冷磁悬浮冷水机组(带自然冷却)在夏热冬冷地区应用.....	53
7.3.1 数据中心简介	53
7.3.2 冷却系统概述	53
7.3.3 运行数据分析	57
7.3.4 案例小结	60
7.3.5 专家意见	60
7.4 案例 3：水冷磁悬浮冷水机组在夏热冬暖地区应用	61
7.4.1 数据中心简介	61
7.4.2 冷却系统概述	62
7.4.3 运行数据分析	64
7.4.4 案例小结	67
7.4.5 专家意见	67
7.5 案例 4：水冷磁悬浮冷水机组（带自然冷却）在寒冷地区应用	68

7.5.1 数据中心简介	68
7.5.2 冷却系统概述	69
7.5.3 运行数据分析	71
7.5.4 案例小结	73
7.5.5 专家意见	73
7.6 案例 5：水冷磁悬浮冷水机组（无自然冷却）在寒冷地区应用	74
7.6.1 数据中心简介	74
7.6.2 冷却系统概述	76
7.6.3 运行数据分析	78
7.6.4 案例小结	80
7.6.5 专家意见	80
7.7 案例总结及建议	81
8 附录	83
8.1 磁悬浮技术获得相关政策支持情况	83
8.2 数据中心能效等级与技术要求	83
8.2.1 能效等级	83
8.2.2 技术要求	84
8.3 数据中心室内空气计算参数	84
8.3.1 主机房室内空气计算参数	84
8.3.2 支持区室内空气计算参数	84
8.4 室外空气计算参数	84
8.5 室外逐时气象参数统计情况	88

CAR

CAR

CAR

CAR

CAR

CAR

CAR

CAR

1 引言

1.1 编制目的和适用范围

1.1.1 编制目的

近年来，数字经济成为我国国民经济高质量发展的新动能，云计算、5G 通信、物联网、边缘计算及人工智能的发展促进了数据中心的持续增长。运载能力和节能水平成为衡量数据中心能力的核心指标。从 2013 年 1 月到 2020 年 4 月，从“十二五”至“十三五”规划，国家部委先后发布数据中心建设相关的指导意见，并在北京、上海、深圳、杭州等大城市陆续发布相关文件，严格控制数据中心建设，且对节能减排提出更高要求，对 PUE 值的限定也更加严苛。

数据中心的设备密集度高，设备发热量大。目前针对数据中心或高热密度机柜（单机柜功耗大于 5kW，甚至达到 10~30kW）的主流冷却方案包含：充分利用自然冷源（高水温、风侧自然冷却、水侧自然冷却等）、采用高效制冷设备（蒸发冷、磁悬浮离心机等）和新型空调末端（行间、背板、热管、液冷等）等多种高效冷却技术。本白皮书将着重研究：采用高效的新型磁悬浮无油技术的冷却系统为数据中心节能和可靠性的提升所带来的影响。

编者将通过磁悬浮技术原理和性能的阐释以及数据中心的需求和趋势来分析磁悬浮技术如何满足最新的数据中心建设和运维的要求。同时通过跟踪记录 5 个使用磁悬浮技术的数据中心案例的实际数据，分析并总结出磁悬浮方案的特点及优势，为后续构建针对不同区域、气候条件和应用工况的绿色节能数据中心使用提供技术参考。

1.1.2 适用范围

数据中心相关的管理人员、研发人员、工程技术人员、运行维护人员、系统集成商、产品制造商等。

1.2 编制依据

- [1] GB/T 32910.2 数据中心资源利用 第 2 部分 关键性能指标设置要求
- [2] GB/T 32910.3 数据中心资源利用 第 3 部分 电能能效要求和测量方法
- [3] GB 50174 数据中心设计规范
- [4] GB/T xxxxx-xxxx 数据中心能效限定值及能效等级（报批稿）

- [5] JBT 12325 高出水温度冷水机组
- [6] T CECS 487 数据中心制冷与空调设计标准
- [7] 张朝晖, 等. 制冷空调技术创新与实践
- [8] 吴业正, 等. 制冷原理及设备
- [9] 中国制冷学会数据中心冷却技术工作组. 中国数据中心冷却技术年度发展研究报告 (2016, 2017, 2018, 2019, 2020)
- [10] 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 2020
- [11] 工信部信息通信发展司. 全国数据中心应用发展指引(2017, 2018, 2019, 2020)

1.3 编制原则

本白皮书的编写注重内容、文字的准确性和完整性, 以客观数据为依据, 从磁悬浮压缩机的基本原理与性能特点出发, 介绍了基于磁悬浮压缩机的适用于数据中心冷却的高效制冷机组及冷却系统的构建方式, 并结合不同地区的气候特征展示不同系统在典型数据中心应用的实际情况, 为数据中心高效制冷机组及冷却系统的设计和应用提供指导。白皮书的编写力求客观、专业、公正, 同时结合国际化视野与本土化实践, 并拓展技术的覆盖面和代表性。

2 术语和符号

ACOP: 全年性能系数 (Annual Coefficient of Performance), 冷却设备的全年累计制冷量或冷负荷与该设备全年累计耗电量的比值, kWh/kWh;

ACOP_{CL}: 制冷机组全年性能系数 (Annual Coefficient of Performance of the Chiller), 制冷机组的全年累计制冷量或冷负荷与其全年耗电量的比值, kWh/kWh;

ACOP_{CP}: 压缩机全年性能系数 (Annual Coefficient of Performance of the Compressor), 压缩机的全年累计制冷量或冷负荷与其全年累计耗电量的比值, kWh/kWh;

COP: 性能系数 (Coefficient of Performance), 冷却设备的制冷量或冷负荷与该设备耗电量的比值, kW/kW 或 kWh/kWh;

COP_{CL}: 制冷机组性能系数 (Coefficient of Performance of the Chiller), 制冷机组的制冷量或冷负荷与其耗电量的比值, kW/kW 或 kWh/kWh;

COP_{CP}: 压缩机性能系数 (Coefficient of Performance of the Compressor), 压缩机的制冷量或冷负荷与其耗电量的比值, kW/kW 或 kWh/kWh;

E: 耗电量 (Electricity Consumption), kWh;

E_{AHU}: 室内空调末端耗电量 (Electricity Consumption of Air Handling Unit), kWh;

E_{CL}: 制冷机组耗电量 (Electricity Consumption of the Chiller), kWh;

E_{CP}: 压缩机耗电量 (Electricity Consumption of the Compressor), kWh;

E_{CS}: 冷却系统耗电量 (Electricity Consumption of the Cooling System), kWh;

E_{CT}: 冷却塔耗电量 (Electricity Consumption of the Cooling Tower), kWh;

E_{DC}: 数据中心耗电量 (Electricity Consumption of the Data Center), kWh;

E_{IT}: IT 设备耗电量 (Electricity Consumption of the IT Equipment), kWh;

E_{PP}: 水泵耗电量 (Electricity Consumption of the Pump), kWh;

GCOP: 冷却系统综合性能系数 (General Coefficient of Performance), 冷却系统的总制冷量或总冷负荷与冷却系统总耗电量的比值, kWh/kWh;

$$GCOP = \frac{E_{DC} - E_{CS}}{E_{CS}}$$

PUE: 数据中心电能利用效率 (Power Usage Effectiveness), 数据中心消耗的所有能源与 IT 负载消耗的能源的比值, kWh/kWh;

$$PUE = \frac{E_{DC}}{E_{IT}}$$

Q: 制冷量 (Cooling Capacity) , kW。

CAR

CAR

CAR

CAR

CAR

CAR

CAR

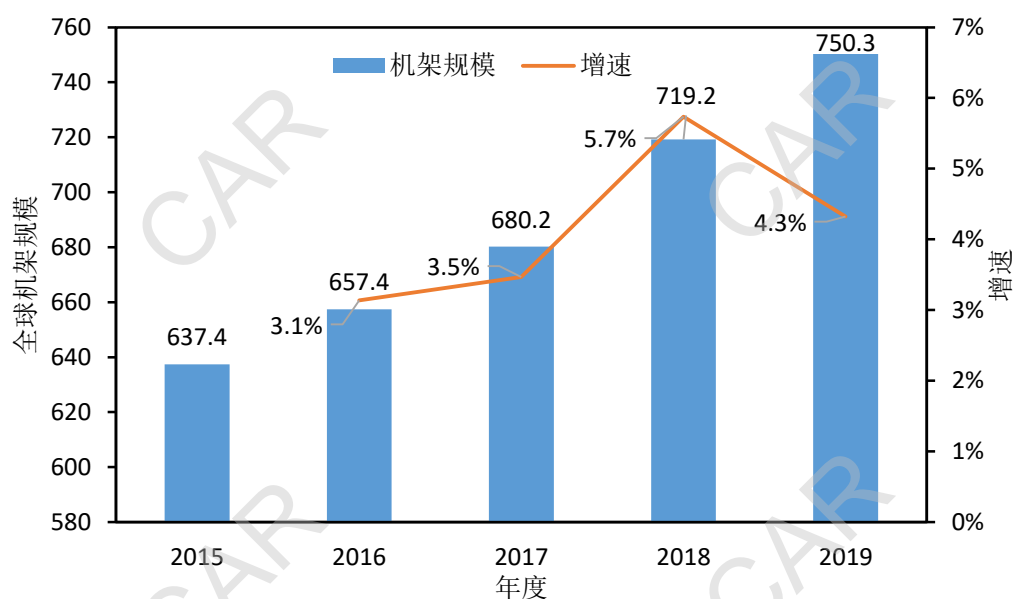
CAR

3 数据中心产业发展

3.1 数据中心产业发展现状与趋势

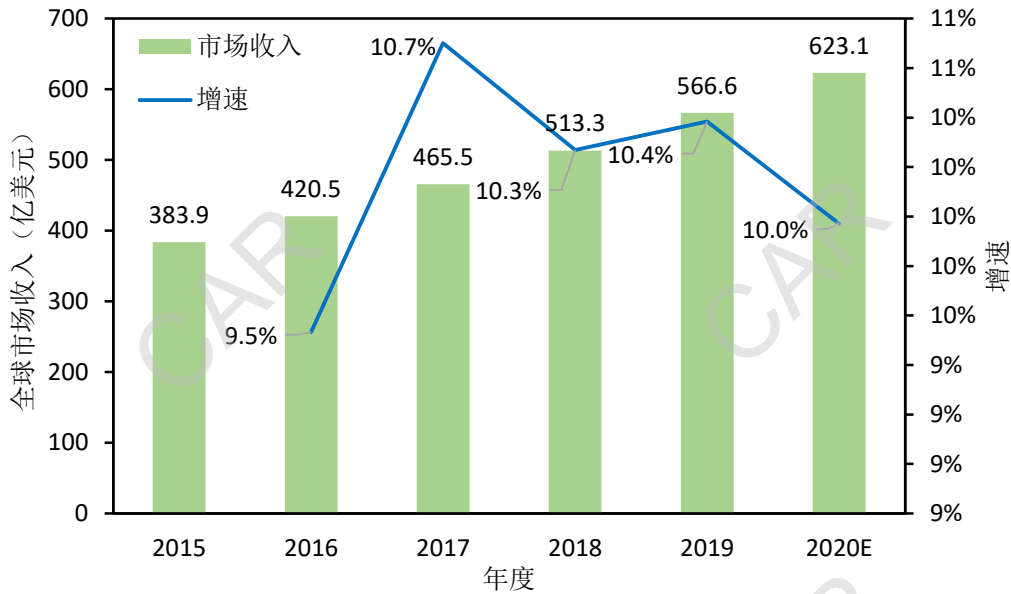
数据中心作为电子信息产业的主要建筑场所，随着 5G 移动通信、物联网、云计算、大数据、人工智能等应用的快速发展，也得到了飞速发展。特别是数字经济的规模及其在国民经济中的地位持续上升，据中国信息通信研究院《全球数字经济新图景（2020 年）》与《中国数字经济发展白皮书（2020 年）》的报道，2019 年，所测算 47 个国家的数据经济增加值规模达到 31.8 万亿美元，这 47 个国家的数字经济占 GDP 的比重达到 41.5%；而我国 2019 年数字经济增加值规模达到 35.8 万亿元，占 GDP 比重的 36.2%。作为数字经济的重要载体，全球数据中心的发展规模也保持快速增长势头。

据中国信息通信研究院与开放数据中心委员会编写的《数据中心白皮书 2020》报道，全球数据中心机架规模已经从 2015 年的 637.4 万架增加到 2019 年的 750.3 万架（如图 3-1 所示）；全球数据中心的收入也相应的从 2015 年的 383.9 亿美元增加到 2019 年的 566.6 亿美元（如图 3-2 所示）。



数据来源：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 2020》

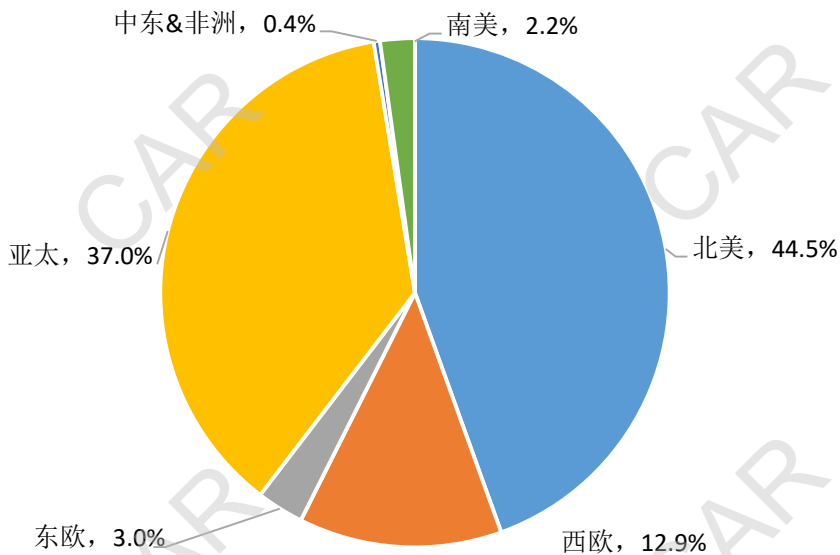
图 3-1 全球数据中心发展状况



数据来源：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 2020》

图 3-2 全球数据中心市场收入状况

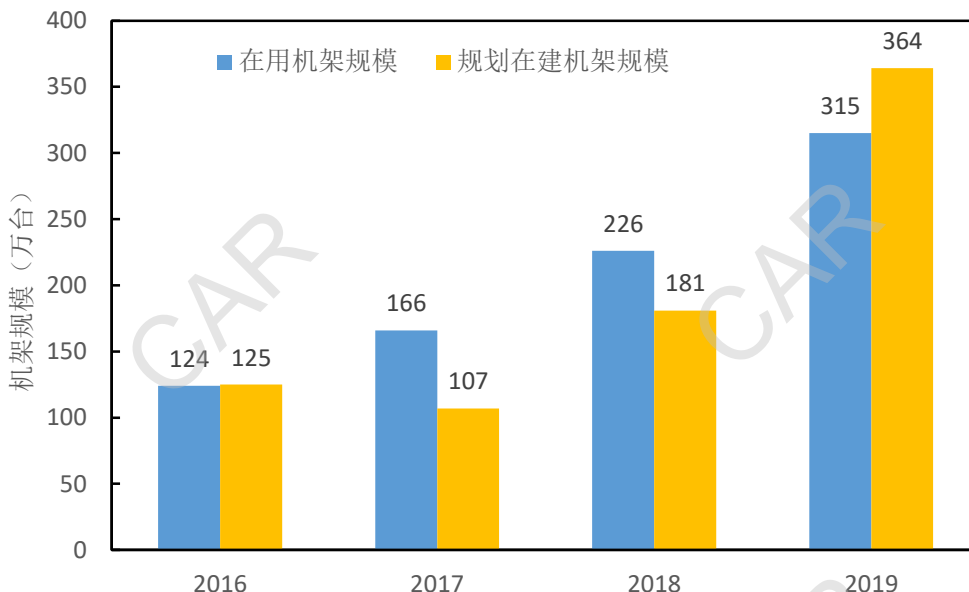
从地区分布来看(如图 3-3 所示),北美地区互联网流量集中,占比达到 44.5%;亚太地区增速较高,占比达到 37%;中东、南美、非洲等地区的数据中心也将快速增长。



数据来源：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 2020》

图 3-3 全球互联网流量分布

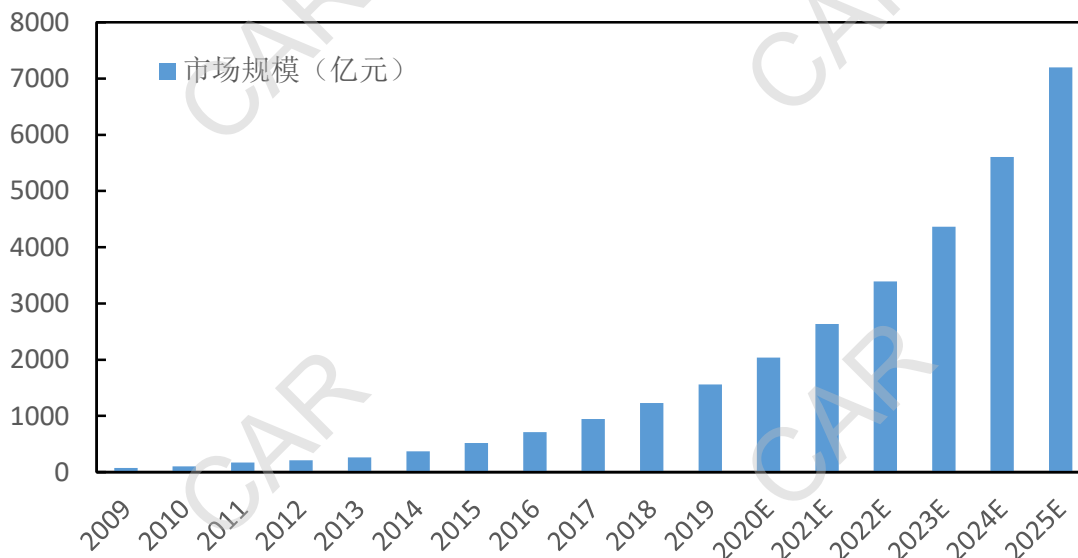
工信部信息通信发展司《全国数据中心应用发展指引》(2017, 2018, 2019, 2020)中给出了 2016 年到 2019 年我国在用和规划在建数据中心的机架规模,如图 3-4 所示。在用数据中心机架数从 2016 年的 124 万台增加到 2019 年的 315 万台,而 2019 年规划在建数据中心的机架数也达到 364 万台。



数据来源：工信部信息通信发展司《全国数据中心应用发展指引》（2017, 2018, 2019, 2020）

图 3-4 我国在用和规划在建数据中心规模

随着“新基建”战略的实施，数据中心作为“新基建”的七大领域之一，也为5G 基建、特高压、城际高铁和城市轨道交通、新能源汽车充电桩、人工智能、工业互联网等其他六大领域提供直接和间接的支撑。各个地区也迅速推出了数据中心的建设规划，在过去十年快速发展的基础上，还将在今后数年保持快速发展，数据中心市场规模如图 3-5 所示。

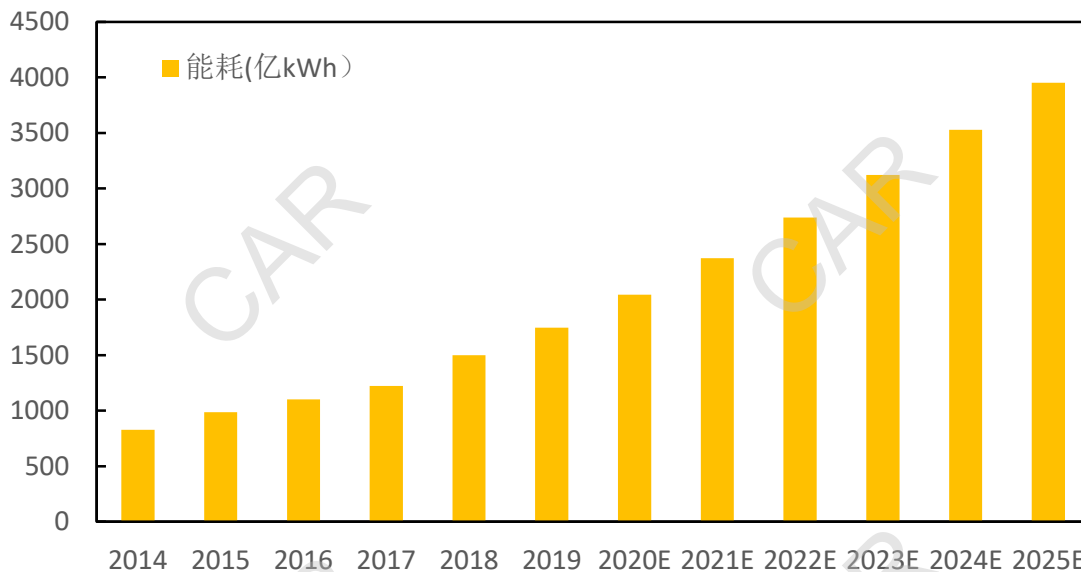


数据来源：中国制冷学会数据中心冷却技术工作组《中国数据中心冷却技术年度发展研究报告 2020》

图 3-5 我国数据中心市场规模及预测（图中 E 表示预测值）

3.2 数据中心能耗现状与趋势

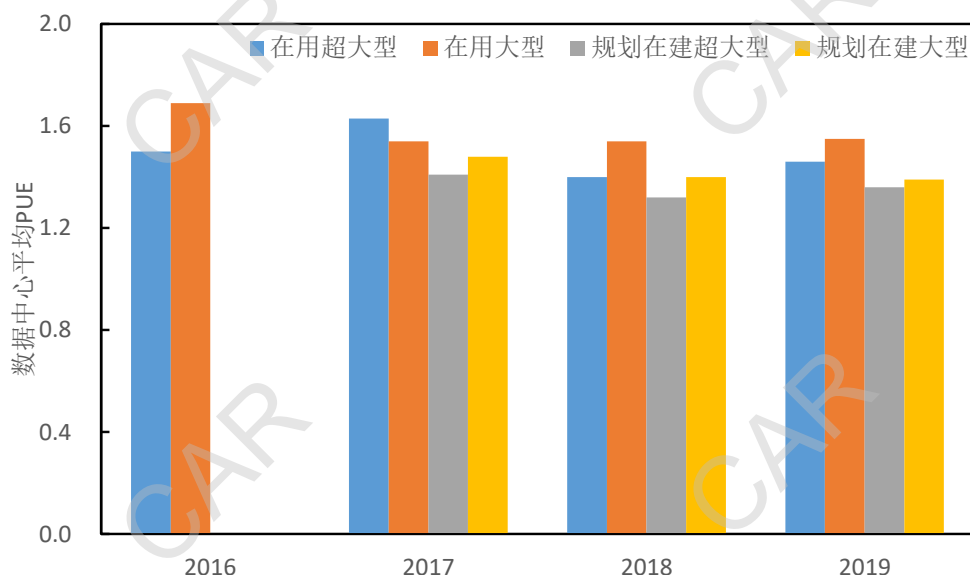
数据中心的快速发展，导致其能耗总量不断增长（如图 3-6 所示），是全球特别是我国数据中心发展建设面临的重大挑战。



数据来源：中国制冷学会数据中心冷却技术工作组《中国数据中心冷却技术年度发展研究报告 2020》

图 3-6 我全国数据中心耗电量及预测（图中 E 表示预测值）

因此，提高数据中心能效水平，加快数据中心的节能减排是保证其可持续发展的关键。工信部信息通信发展司编写的《全国数据中心应用发展指引》（2017,2018,2019,2020）中给出了 2016 年到 2019 年我国在用数据中心（大型、超大型）和规划在建数据中心（大型、超大型）的能效水平。

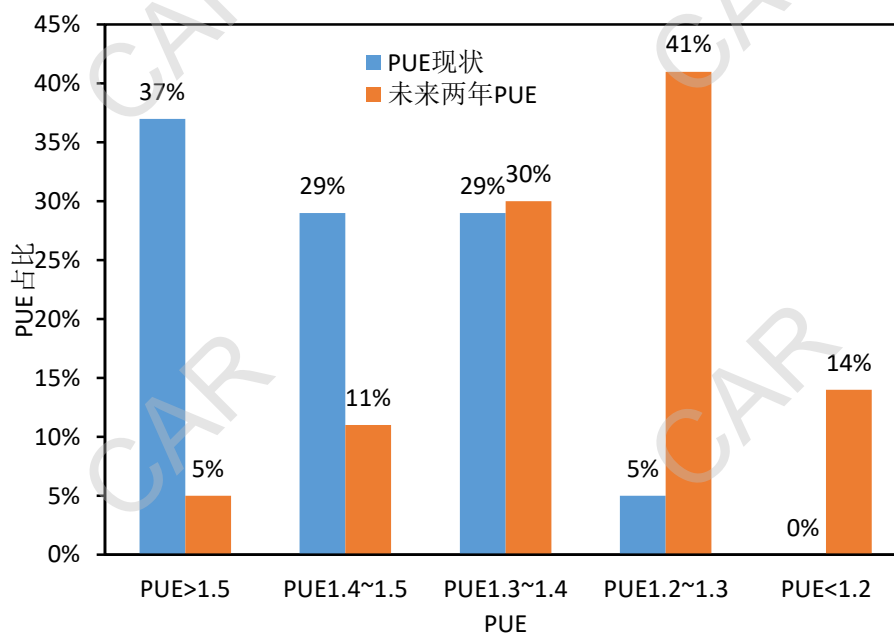


数据来源：工信部信息通信发展司《全国数据中心应用发展指引》（2017, 2018, 2019, 2020）

图 3-7 我国数据中心能效状况

在用超大型数据中心的平均 PUE 已经从 1.6 以上降低 1.5 以下，在用大型数据中心也从 1.7 左右降低到 1.55 左右。而规划在建的大型和超大型数据中心的平均 PUE 预期在 1.4 以下。

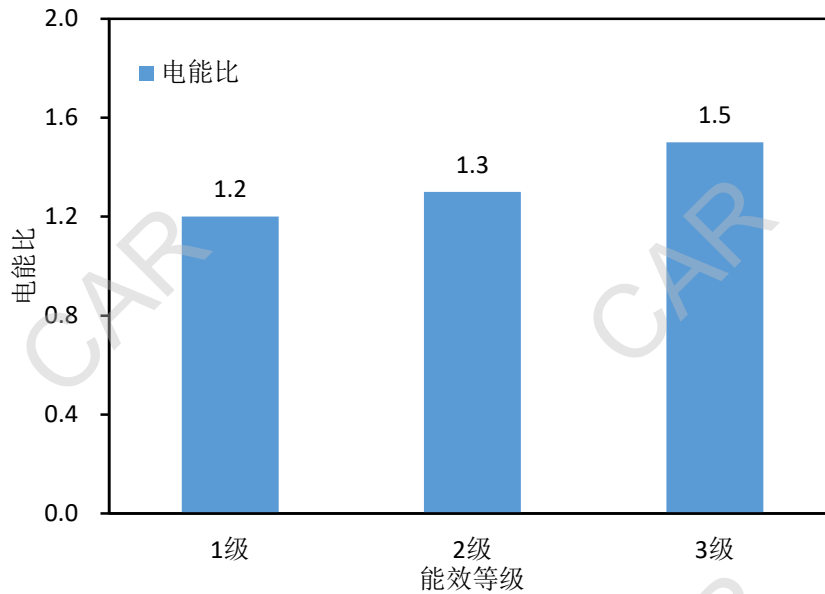
此外，中数智慧信息技术研究院发布的《2020 年中国数据中心市场报告》中也对当前及未来两年数据中心 PUE 进行了预测，如图 3-8 所示。当前 PUE 在 1.5 以上的数据中心为 37%，PUE 在 1.4~1.5 和 1.3~1.4 之间的都为 29%，而 PUE 低于 1.3 的数据中心仅有 5%。而预期未来两年后，随着现有数据中心的节能改造以及新建的高能效数据中心投入使用，PUE 在 1.5 以上的数据中心将降低至 5%，PUE 在 1.4~1.5 之间的数据中心也降低至 11%，PUE 在 1.3~1.4 的数据中心占比仍维持在 30%，而 PUE 在 1.2~1.3 之间的数据中心将大幅增加至 41%，PUE 低于 1.2 的数据中心也增加到 14%，数据中心的能效水平将大幅提高。



数据来源：中数智慧信息技术研究院《2020 年中国数据中心市场报告》

图 3-8 我全国数据中心能效状况分布及趋势

GBxxxxx-xxxx《数据中心能效限定值及能效等级》(报批稿)也对数据中心的能效分级及能效限定值进行了规定，如图 3-9 所示。该标准中，规定了数据中心能效依据电能比分为三级，分别是 1.2，1.3 和 1.5；并且规定了数据中心能效限定值为 3 级，即电能比不能低于 1.5。上述标准的实施，将大大促进现有数据中心的节能改造技术以及高效数据中心技术的推广应用。



数据来源：GBxxxx-xxxx《数据中心能效限定值及能效等级》（报批稿）

图 3-9 我国数据中心能效要求

3.3 数据中心冷却系统节能措施

3.3.1 数据中心室内环境需求

数据中心需要提供适宜的温湿度条件，以便电子产品工作时产生的热量快速转移，保证其安全稳定高效的运行，根据美国采暖制冷与空调工程师学会（ASHRAE）预测，不同用途和功能的服务器机柜的发热量还将持续增长。过去几年，ASHRAE 在其编写的数据中心环境控制指导书中多次逐步放宽了数据中心的最低能效要求，允许温度上升以节省冷却资源，如图 3-10 所示。

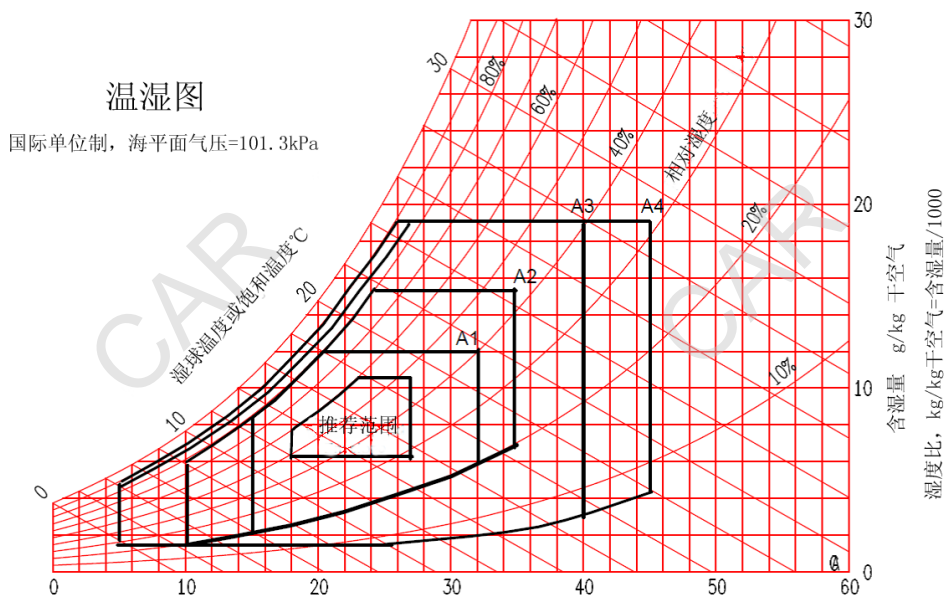


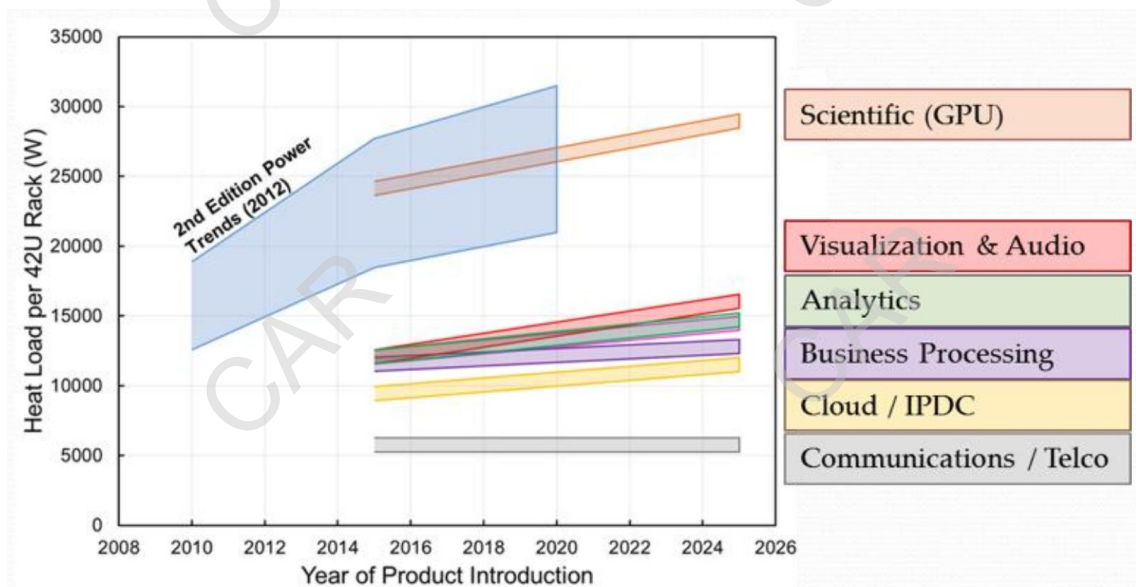
图 3-10 ASHRAE 数据中心热环境标准

随着相关技术的进步和节能需求，现阶段国家颁布发行的新版《数据中心设计规范》与目前国际上对服务器等设备进风温度普遍适用的要求相当。机房冷通道或机柜进风区域的温度推荐值扩大到 18℃-27℃，当 IT 设备对环境温度和相对湿度可以放宽要求时，机房冷通道或机柜进风区域的温度允许扩大到 15℃-32℃。

3.3.2 数据中心负荷特征

3.3.2.1 IT 设备负荷特征

随着 IT 技术的快速发展，电子器件及服务器的功率密度不断升高，据 ASHRAE 统计及预测，不同用途数据中心的标准机架功率密度还会进一步上升，如图 3-11 所示。以电信/通讯为主要用途的服务器，单机架功率还会保持在 5kW 左右，而云数据中心等用途的服务器，单机架功率普遍会上升到 10~15kW 左右。对于数据中心而言，由于单位面积上的 IT 发热量越来越高，其在数据中心的散热负荷的比例也越来越大。



数据来源：ASHRAE

图 3-11 单机架功率密度发展趋势

3.3.2.2 数据中心负荷特征

文献（程亨达，陈焕新，邵双全，李正飞，程向东. 数据中心冷却系统的综合 COP 评价. 制冷学报, 2020, 41(6): 77-84）对一典型数据中心进行建模，机房大小为 30m×40m×4.5m，建筑南向开窗，窗面积为 57m²。参考相关 IT 机柜功率和机房面积的数据，仿真中将 IT 设备能耗设为 775W/m²，其中新风量按 4000m³/h 计算。模型设置中包括了 6kW 最大日平均照明功率，并根据工作计划表有一定浮动。选择

海口（夏热冬暖地区）、哈尔滨（严寒地区）、昆明（温和地区）、天津（寒冷地区）、乌鲁木齐（严寒地区）、武汉（夏热冬冷地区）的气象数据分别进行了不同 IT 机柜负载下全年运行仿真研究。采用的 IT 机柜负载条件分为 100% 和 50% 负载率。

根据对模型的仿真计算，输出一年内的 IT 设备耗电量，并输出围护结构传热量、新风冷负荷、系统总冷负荷等系统冷负荷相关量的仿真结果，具体输出的项目如表 3-1 所示。由于围护结构冷负荷与新风冷负荷受气候条件影响显著，因此将这两类项目的仿真结果输出，并与系统总冷负荷大小的仿真结果比较，分析气候条件对数据中心冷负荷的影响。

表 3-1 典型数据中心冷负荷

机柜负载	城市	全年总冷负荷 / 10 ³ kW·h		
		围护结构冷负荷	新风冷负荷	系统总冷负荷
100%	武汉	-101.60	12.72	8 083.33
	乌鲁木齐	-154.22	0.60	7 833.33
	天津	-122.14	6.50	7 944.44
	昆明	-103.95	1.49	8 027.78
	哈尔滨	-173.97	2.76	7 777.78
	海口	-65.14	27.78	8 305.56
50%	武汉	-102.29	12.25	4 027.78
	乌鲁木齐	-154.92	0.52	3 777.78
	天津	-122.86	6.22	3 888.89
	昆明	-104.98	1.29	3 944.44
	哈尔滨	-174.67	2.56	3 722.22
	海口	-65.75	26.83	4 250.00

3.3.2.3 全年运行时间及压缩比需求分析

在不同的地区，各个温度下的时间分布也不尽相同，基于中国气象局气象信息中心气象资料室和清华大学建筑技术科学系出版的《中国建筑热环境分析专用气象数据集》中全国 270 个气象台站所提供的气象标准数据进行分析，上述 6 个城市在不同湿球温度带下的运行时间及所需要的制冷机组压缩比如图 3-12 所示。

从图 3-12 中可以看出，对于全年连续运行的数据中心，在我国严寒地区、寒冷地区及温和地区，绝大部分时间室外湿球温度较低，制冷机组需运行在小压比工况下（小于 1 时，可以运行自然冷却工况）。在夏热冬冷地区和夏热冬暖地区，室

外湿球温度较高的时间相应增长，但仍有部分时间需要小压比运行，在夏热冬冷地区也仍有较长时间可运行于自然冷却工况。

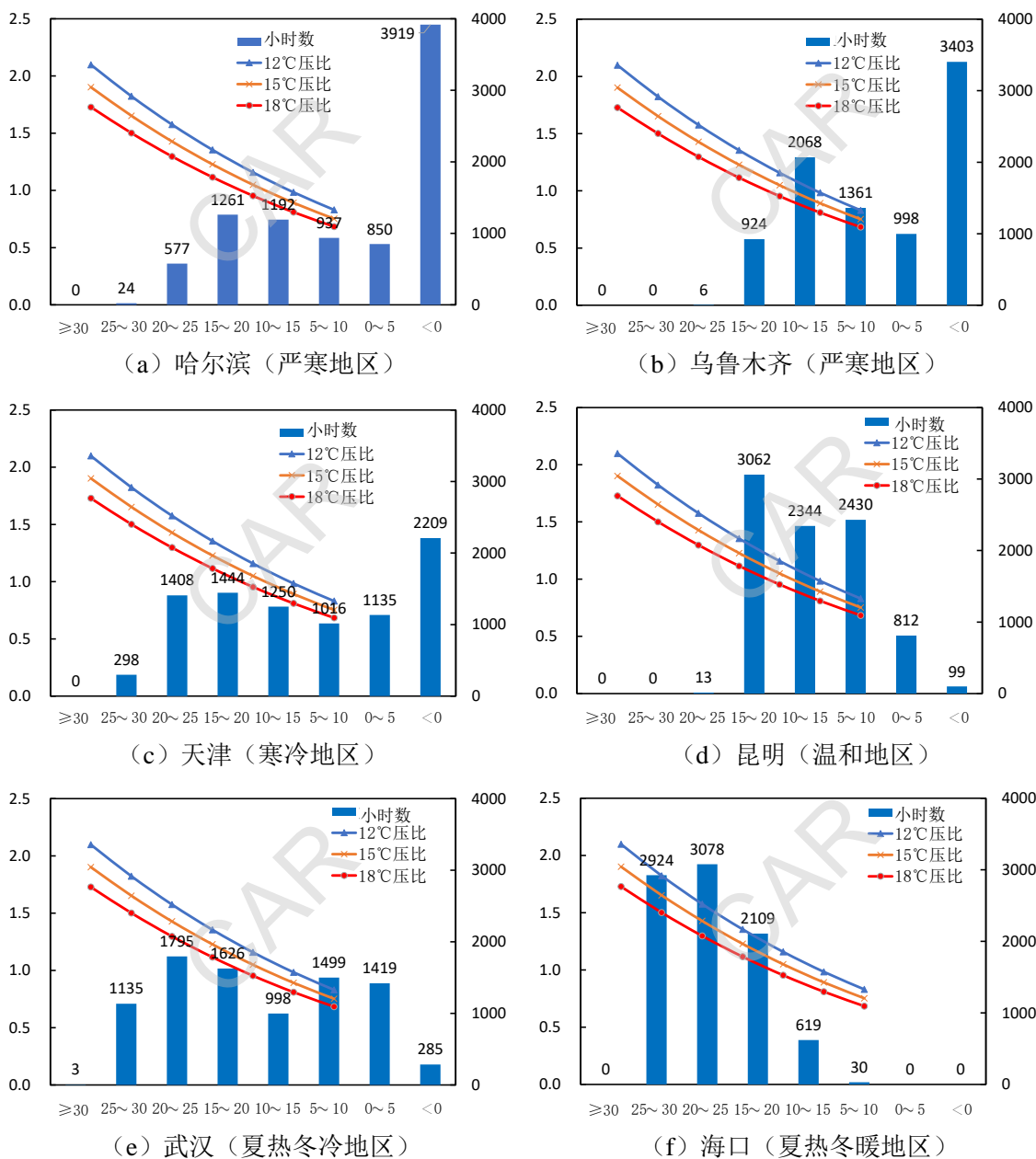


图 3-12 不同地区运行温度时间分布及压缩比需求

3.3.2.4 小结

数据中心空调系统是一种工艺性空调，主要满足其内部的 IT 设备的高效可靠运行。与传统建筑的舒适性空调系统相比，数据中心热湿环境需求的特点及对冷却系统的要求主要体现在以下几个方面：

- (1) 数据中心主要热源：数据中心的得热主要来自 IT 设备散热、围护结构传热、维护工作人员散热、照明及其他电子辅助设备散热等。其中 IT 及其他电子设备的散热量占总散热量的 90% 以上。

(2) 数据中心冷负荷大、湿负荷小：机房冷负荷主要来自 IT 及其他电子设备散热，一般不吸湿也不产湿，而且对新风需求少（仅满足 IT 设备及辅助设备的工艺需求即可），室外新风所导致的湿负荷也很小。

(3) 数据中心冷却系统需全年连续运行：从热源及负荷特征上可以发现，数据中心全年需要制冷，冷却系统中夏季高温及冬季低温条件下都需要保持制冷运行，对冷却系统及部件的可靠性和长寿命要求高，特别是在极端条件下掉电自启和快速启动功能。

数据中心机房内服务器设备散热属于稳态热源，服务器全年不间断运行，这就需要有一套全年不间断运行的空调冷却系统，把服务器散热排至室外大气或其他自然冷源中。数据中心冷却技术主要包括芯片级冷却、服务器级冷却、列间级冷却、房间级冷却等。为了降低数据中心冷却系统能耗，优化热量传递过程、提高各传热环节效率、尽量采用自然冷源，是数据中心冷却技术的发展趋势。

3.3.3 数据中心冷却系统节能措施

数据中心的主要组成部分及其能耗计量如图 3-13 所示。

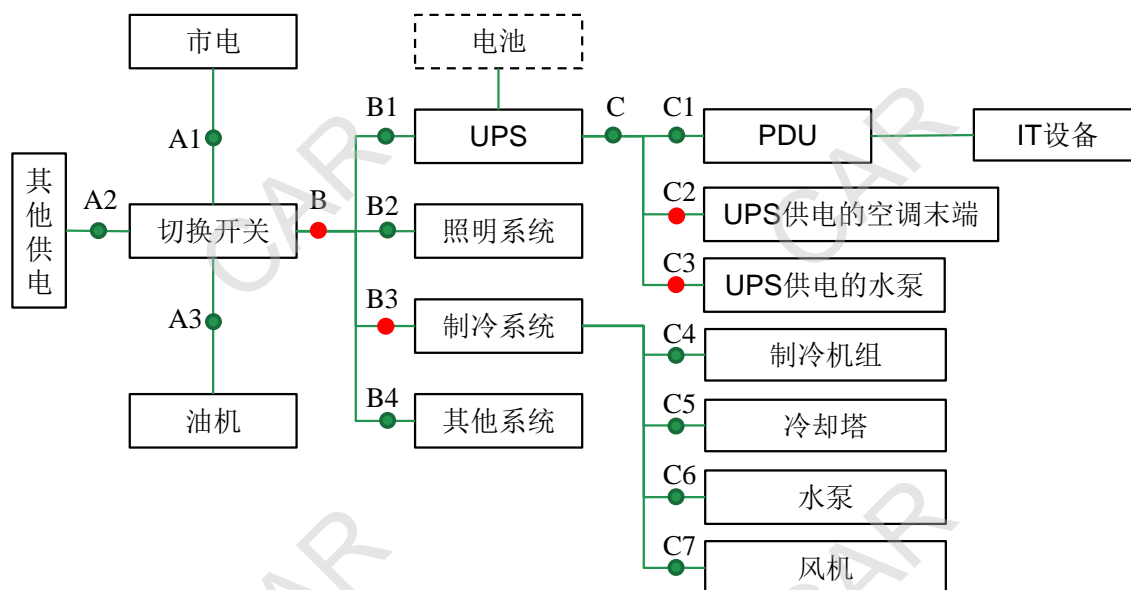


图 3-13 数据中心的主要组成部分及其能耗计量

数据中心冷却系统为保证数据中心中 IT 设备及电源、电池等其他设备的高效稳定运行，提供了适宜的温度和湿度等环境，其自身也消耗了大量的电能，约占整个数据中心能耗的 20~40%，是数据中心的能耗最大的辅助设备。因此，降低冷却系统能耗是提升数据中心能源利用效率的重要环节。

从数据中心冷却系统能耗构成上看，主要由冷源设备（制冷机组）能耗、输配设备（主要是水泵、输送风机）能耗以及散热设备能耗（主要是末端散热风机、冷却塔风机、空气冷却器风机等）构成。其中**制冷机组（主要是压缩机）的能耗占整个冷却系统能耗的 50~70%，降低制冷机组能耗是数据中心冷却系统节能的核心。**

从数据中心的冷却需求角度看，数据中心内部负荷密度高，而通过围护结构和新风所引起的冷负荷占比很小；数据中心内部的 IT 设备一般不吸湿也不产湿，而且对新风需求少（仅满足 IT 设备及辅助设备的工艺需求即可），室外新风所导致的湿负荷也很小；因此，**采用高冷冻水温度（高蒸发温度）是提高制冷机组（主要是压缩机）运行效率的主要措施之一。**此外，数据中心需全年连续稳定运行，即使在冬季室外温度很低时，数据中心仍然需要向外部散热，因此，**提高自然冷源的利用时间（通过自然冷源应用降低压缩机运行时间）是提高冷却系统运行效率的又一主要技术措施。**

因此，磁悬浮离心压缩机作为新兴的高效压缩机技术，本白皮书对悬浮离心压缩机及制冷机组的原理、性能特点、与自然冷却系统的耦合形式进行阐述，并结合在典型数据中心应用案例的性能进行分析，为提高数据中心冷却系统运行能效提供参考。

4 磁悬浮压缩机技术

4.1 技术原理

4.1.1 磁悬浮离心式压缩机的构成

磁悬浮离心式压缩机和传统的离心式压缩机一样，由进口能量调节机构（进气导叶）、叶轮转子、扩压器、蜗室、驱动装置和轴承等部件组成。制冷剂蒸气从吸气管流入吸气室，进入旋转的叶轮里。由于叶轮的高速旋转，叶片推动气体沿流道自叶轮中心向叶轮边缘流动，气体速度得到大幅提高。然后，高速气流流入扩压器降速扩压。在扩压器内，气体的速度能转化为压力能。最后，由扩压器流出的气体汇聚到蜗壳，制冷剂气体压力得到进一步提升后进入排气管。

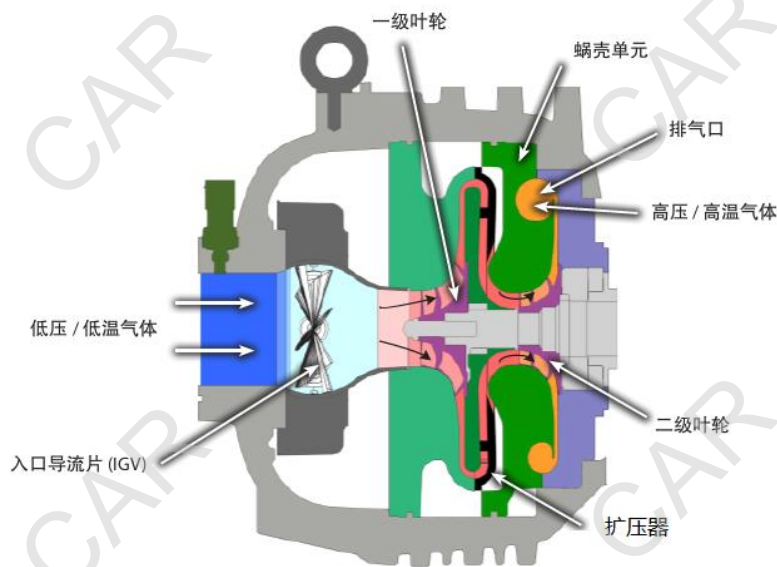


图 4-1 离心式压缩机原理图

磁悬浮离心式压缩机与传统的离心式压缩机不同之处主要在于轴承和驱动装置。表 4-1 给出了磁悬浮离心式压缩机与传统离心式压缩机的主要不同。

表 4-1 磁悬浮离心式压缩机与传统离心式压缩机的区别

项目	传统离心式压缩机	磁悬浮离心式压缩机
轴承	滑动轴承或者滚动轴承	磁浮轴承
驱动装置	多为增速齿轮+电机	变频电机直联
驱动方式	交流感应电动机	变频电机
油路系统	供油+冷却+分离+控制	无
转速	低	高
压比设计	低	高、中、低多档

磁悬浮离心式压缩机主要由以下几部分组成：2级压缩部分、变频控制部分、磁浮轴承、永磁同步电机、轴承控制以及用于控制的压力和温度传感器和扩大运行范围的进气导叶。图 4-2 是典型的磁悬浮离心式压缩机的解剖图。

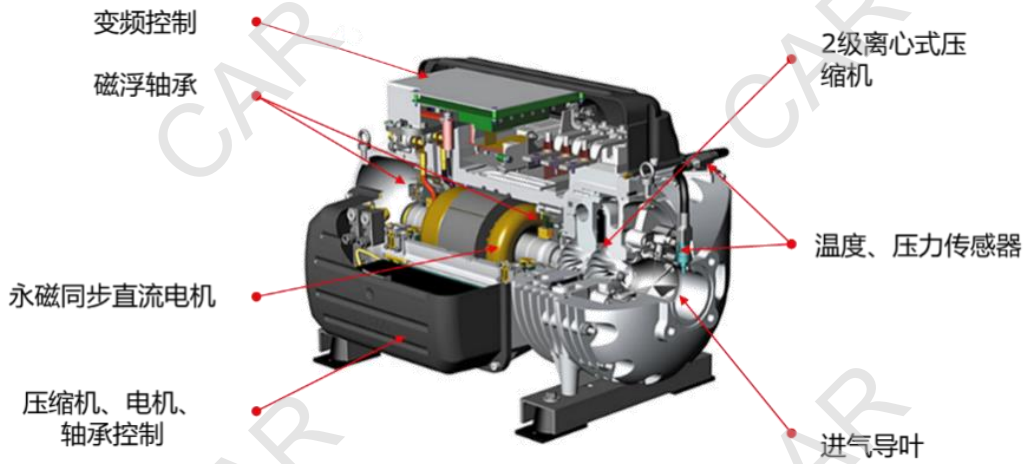


图 4-2 磁悬浮离心式压缩机的解剖图（丹佛斯供图）

4.1.2 磁悬浮轴承

(1) 磁悬浮轴承的组成

磁悬浮轴承包括径向轴承、推力轴承、位置传感器、备用轴承、控制轴承浮动及校准转子位置的轴承控制器和供电电源。图 4-3 给出了使用磁悬浮轴承的压缩机的示例。

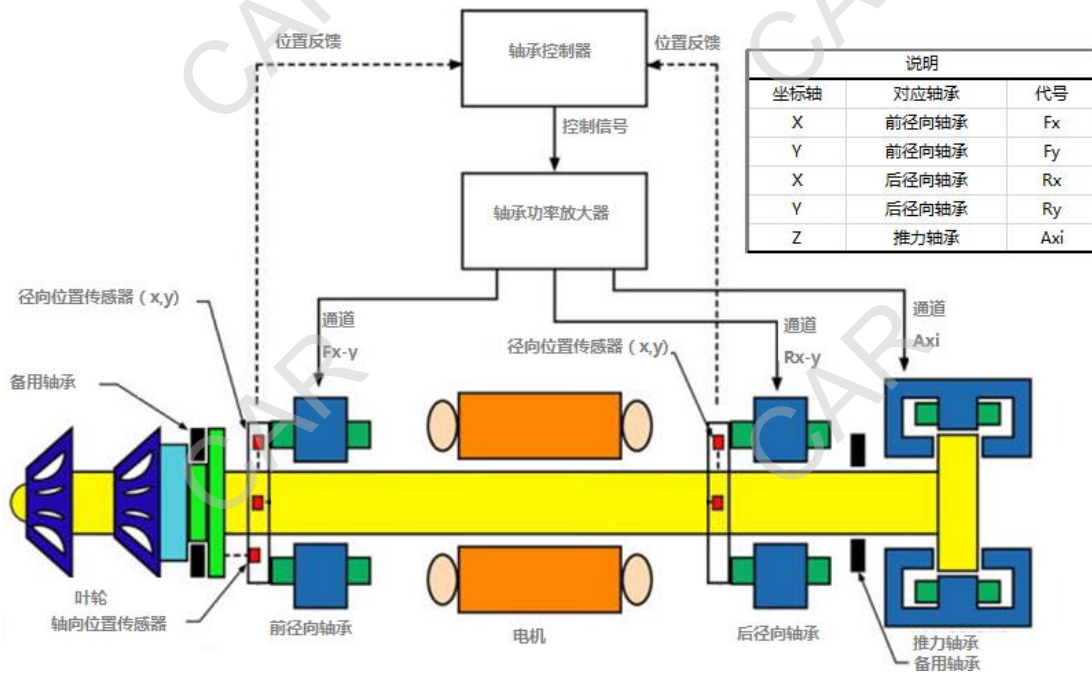


图 4-3 无油离心式压缩机磁悬浮轴承示意图（丹佛斯供图）

上述磁悬浮轴承系统采用了 5（自由度）坐标的主动控制和永磁偏置设计，其中轴承使用永磁体来做主要工作，采用数字控制的电磁铁作为辅助修整系统。图 4-4 给出了磁悬浮轴承的总成示意。



图 4-4 无油离心式压缩机磁悬浮轴承总成图（丹佛斯供图）

（2）磁悬浮轴承的工作原理

径向轴承包括轴承定子和转子部分。每个径向轴承定子包括多对电磁线圈，这些线圈围绕转子径向排列。与定子配对的“转子”部分，是由薄钢片叠合而成固定在转子（轴）上。径向轴承用来校准转子的径向位置。每个径向轴承通过多对独立的电磁线圈运行，这些线圈采用脉宽调制（PWM）数字控制。数字控制基于来自内置的位置传感器的独立信号，这些传感器可以感知小于 1 微米的位移。当发现轴偏离中心点时，将不同强度的磁场施加到轴上，使其回到所需的位置。因此，转子中心轨道和动态振动是通过轴承传感器的输入控制，通过软件驱动的轴承控制器实时地对磁悬浮轴承执行器进行控制。

推力轴承通常由一组固定在轴端推力盘两侧的环形磁铁组成。推力盘是扁平固态的铁磁体圆盘。通过调整推力轴承电磁线圈电流的大小，来控制压缩机转子轴向位置。

位置传感器用来探测待机和运转时转子的径向和轴向位置以及位移情况，并将数据传输到轴承控制器。

备降轴承在压缩机停机时支撑转子，它们也被设计成在诸如印刷电路板（PCB）或驱动器故障等灾难性故障的情况下保护压缩机。

轴承控制系统根据来自位置传感器的输入信号确定转子的实际位置，并计算调整的参数，将信号发送给轴承功率放大器。轴承功率放大器调节每个轴承的每个线圈的电流，进而调整磁力大小以校正轴的位置，确保转子位于指定的位置。轴承

控制系统的主要组成部分是处理器，功率放大器、UPS 和与其他系统的接口。轴承控制系统确保在任何情况下磁轴承系统的安全运行，包括启动、正常运转和停机。在现代磁轴承控制系统中，主动控制动平衡也得到了广泛的应用，这进一步减小了制造成本及系统的振动。图 4-5 给出了主动磁轴承反馈控制原理框图。

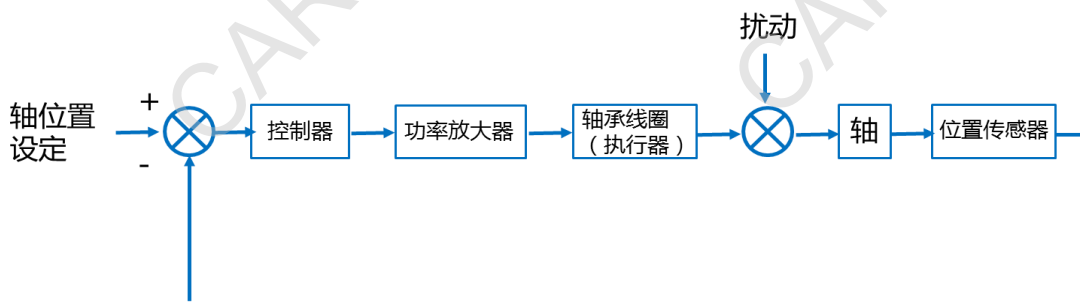


图 4-5 磁轴承反馈控制原理框图

磁悬浮轴承不需要润滑，但必须冷却。磁轴承冷却一般通过制冷剂气体冷却压缩机内部的部分，通过环境空气冷却外部的功率放大器等控制电子部分。

由于磁悬浮轴承是需要供电的，因此，必须考虑电源故障时压缩机安全停机。在电源故障情况下，通常采用两种方式为磁悬浮轴承系统供电直至转子完全停下。一种情况是使用备用电池系统。另外一种情况是使压缩机的电动机转为发电机模式，为轴承提供电源，直到机器完全停止。在电机转为发电机模式下，变频驱动系统里的电容器也有助于在掉电停机期间存储足够的电量来维持转子的控制。

4.2 技术优势

由于使用了磁悬浮轴承，转子在运转时是浮动的，没有机械接触，不需要润滑。因此，磁悬浮压缩机在运行过程中没有传统机械轴承的摩擦损失，加之永磁变频电机的使用，使磁悬浮压缩机具有较高的满负荷效率和卓越的部分负荷效率，压缩机经过长期运行性能无衰减，始终保持出厂时的高效特性；另外由于不需要润滑油，因此没有传统离心机所需的油路系统、冷却系统和相应的油路控制系统，使得磁悬浮压缩机结构更加简单，同时消除了由于油膜热阻导致的机组性能衰减，也消除了由润滑油路系统维护带来的日常维护费用。同时，由于使用了没有机械摩擦的磁浮轴承，使压缩机可以具有更高的转速，这就使压缩机的尺寸进一步减小。图 4-6 给出了传统离心式冷水机组系统和磁悬浮离心式冷水/热泵机组系统的区别。

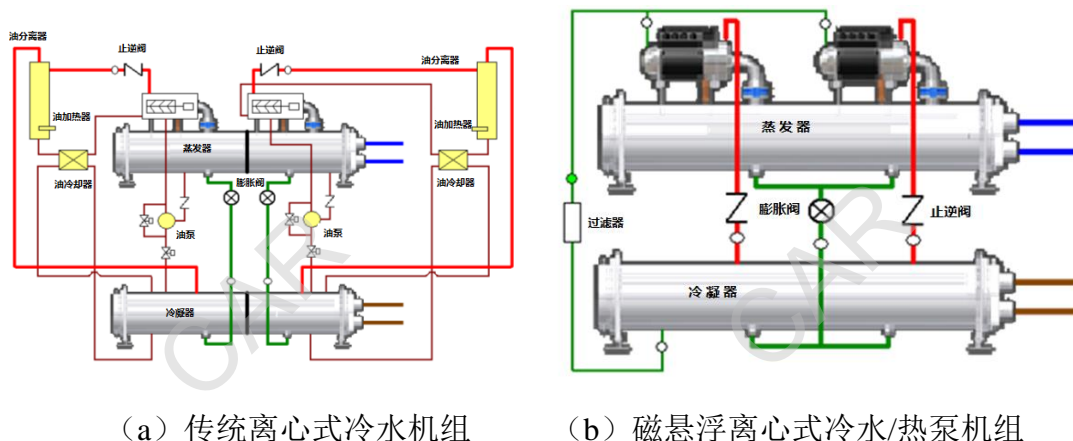


图 4-6 制冷机组对比图

综合而言，磁悬浮离心式压缩机具有以下特点：

(1) 变频调速，高效节能，多机头互为备份功能

根据负载和/或冷凝温度调整转速，满足负荷需求；杰出的部分负荷效率和一流的满负荷效率降低了全寿命周期的运行成本；无油技术彻底消除了润滑油膜在换热器内产生的热阻，减少了传热损失；同时，无油也破除了多机头并联时回油管理的掣肘，极大扩展了多机头应用，既扩展了能力范围又实现了多机头互为备份的功能。

(2) 超低启动电流，30s即可实现断电恢复后的快速启动

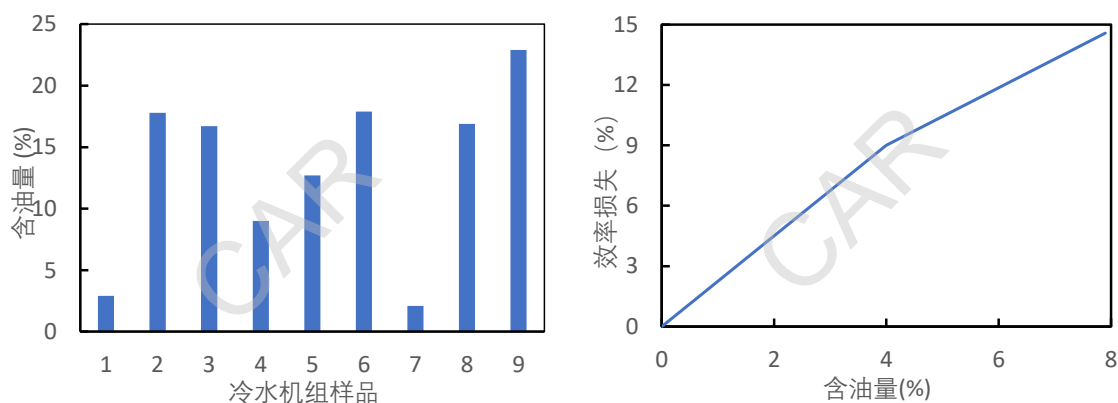
变频控制系统里的软启动模块使压缩机启动电流低至2A，显著降低启动时的电流冲击，减少对电网的影响；30s实现断电恢复后的快速启动，充分契合数据中心运维要求。

(3) 系统简单，可靠性高

磁悬浮轴承实现了100%无油运行，消除了油路系统、油冷系统和油路控制系统，简化了整机系统；降低了机械结构的复杂性，减少了维保成本。

由于润滑油在蒸发器或冷凝器内的沉积会造成换热器传热性能的下降，从而使制冷机组的蒸发温度下降，冷凝温度上升，系统的COP下降。传统压缩机总是出现润滑油部分溶于制冷剂中的情况，ASHRAE601-TRP的研究表明，制冷剂中含有润滑油会导致制冷机组出现性能衰减。根据研究统计，绝大部分运行中的制冷机组内都含有大量的油，平均含油率达到了12.9%（如图4-7（a）所示）。而有数据显示，制冷机组中含有4%的润滑油会导致机组效率下降9%（如图4-7（b）所示）。而磁悬浮技术实现了压缩机的无油润滑，避免了由于润滑油造成的传热系统下降

及制冷系统性能的下降。



(a) 机组含油量

(b) 含油量与机组效率

图 4-7 含油率对制冷机组性能的影响

(4) 低噪音、低震动，易安装

磁浮轴承消除了转子和轴承之间的机械摩擦，使机组运行噪音更低，震动更小；同样流量下，磁悬浮离心式压缩机具有更小的外形尺寸、更紧凑的结构、更轻的重量，使运输和安装更加便利。表4-2中给出了不同制冷量不同距离情况下TTS300系列磁悬浮压缩机的声压值，较传统压缩机的噪音大为降低。

表 4-2 TTS300 压缩机声压值

相对于压缩机的距离(米)	压缩机制冷量	
	250kW	315kW
1.5	70.0dBA	70.0dBA
3.0	64.0dBA	68.5dBA

(5) 数字控制

实时监控内置的数字控制系统管理和优化压缩机运行，使压缩机运行在最优工况；在无需增加硬件成本前提下，利用其固有的传感器和数控系统，实现了机器实时状态的监测和故障识别，并且利用互联网技术实现远程监控。

(6) 适用于不同应用的高、中、低压比设计，满足高压比供热和超低压比制冷应用，既适于低压比高效冷水机组应用也适于热回收热泵应用

磁悬浮离心机的无油特性尤其适合数据中心冷却、温湿度独立控制系统等超低压比的应用，彻底杜绝了传统机器在低压比下的回油问题。通过高、中、低不同压比机器组合，满足制冷、冷暖、供热的多方需求。

4.3 产品参数

目前，国内外已有多家公司拥有磁悬浮离心压缩机，其中，丹佛斯TurboCor磁悬浮离心机的产品系列如表4-2所示。

表 4-3 丹佛斯 TurboCor 磁悬浮离心式压缩机产品系列

系列	型号	制冷剂	制冷量范围	应用类型	外观
TTS	TTS300	R134a R513A	60-200 冷吨	风冷冷水机组 水冷冷水机组	
	TTS350				
	TTS400				
	TTS500				
	TTS700				
TGS	TGS230	R1234ze R515B	40-150 冷吨	风冷冷水机组 水冷冷水机组	
	TGS310				
	TGS390				
	TGS490				
	TGS520				
VTX	VTX1600	R134a	400-450 冷吨	水冷冷水机组	
		R513A			
		R1234ze			
		R515B			
TTH	TTH350	R134a R513A	70-120 冷吨	风冷冷水机组	
TGH	TGH310	R1234ze R515B	60-90 冷吨	水地源热泵机组 空气源热泵机组	

4.4 云服务

近期，各公司均推出了磁悬浮压缩机在线监测云服务功能供用户选择，通过有线或无线互联网连接，可为其销售的磁悬浮压缩机提供安全可靠的实时监测服务，通过云服务平台，系统可以根据监测数据的状态及时提醒用户对磁悬浮压缩机及冷水机进行维护保养，并且在潜在故障发生前进行预警，当系统发现潜在故障风险时会及时自动甄别并通过邮件或短信形式提醒用户及时处理，避免宕机情况发生。通过云服务平台，用户可以实时了解磁悬浮压缩机和机组的运行状态以及运行效率情况，保障机组安全可靠高效运行。

5 磁悬浮压缩机典型应用方式

磁悬浮压缩机经过 20 多年的发展，及众多用户的精心打磨，应用领域逐步扩展，从酒店、医院、商业综合体、办公建筑等传统应用行业，到数据中心、地铁站、工业生产等细分市场，都得到了广泛应用。

随着磁悬浮压缩机新产品的发布，现有产品的更新升级，其可应用的设备类型也愈加多样化，再结合其它系统集成技术，如自然冷却、间接蒸发冷、动力热管等，磁悬浮机组在数据中心应用的案例越来越多，节能效果越来越明显。

以下详细介绍一下磁悬浮离心冷水机组的典型流程，及其在数据中心行业中的典型应用方式、设备类型、系统原理以及适用条件和范围。

5.1 磁悬浮离心冷水机组典型流程

磁悬浮离心冷水机组的核心是磁悬浮离心压缩机，如前文所述，磁悬浮离心压缩机在旋转时无机械接触、无机械摩擦，可以实现 100% 无油运行，因此磁悬浮冷水机组消除了传统冷水机组所必须的油路循环系统、油路冷却系统和油路控制系统，结构非常简单。磁悬浮离心冷水机组典型流程如图 5-1（以 Tubocor TTS 系列压缩机为例）所示，机组主要由磁悬浮压缩机、蒸发器、冷凝器和节流装置组成。制冷剂以低温低压的过热气体进入磁悬浮压缩机吸气侧，经磁悬浮压缩机压缩后变成高温高压气体排出压缩机并进入冷凝器，高温高压气体经冷凝器冷凝后变为中温高压过冷液体，然后经节流装置节流后变为低温低压两相流体进入蒸发器，在蒸发器内吸收冷冻水热量后变为低温低压过热气体吸入磁悬浮压缩机并再次进行循环，同时达到降低冷冻水温度的目的。

磁悬浮离心冷水机组采用双级离心压缩机，压缩机第一级和第二级之间有一个中间补气接口，该接口可以吸入一股中间压力的制冷剂，实现经济器循环，从制冷原理可知，带经济器的两级压缩系统可以增加冷水机组的效率和制冷量。经济器可分为板式换热器和闪蒸罐两种类型。经济器管路典型流程如图 5-1 所示（以板式换热器为例），从冷凝器出来的制冷剂分一部分作为经济器支路，经膨胀阀节流后产生低温气液混合制冷剂并与冷凝器出来的主回路液态制冷剂进行热交换，从而增加主回路液态制冷剂的过冷度。吸收了热量的经济器支路制冷剂完全气化并适度过热后进入压缩机中间补气接口，与压缩机第一级排气混合后被吸入第二级并压缩。主回路进一步过冷后的制冷剂经主节流装置后继续进入蒸发器进行循环。带

经济器的冷水机组必须确保制冷剂以气体状态进入压缩机中间补气，同时为避免压缩机反向旋转以及气体通过旁路进入空闲压缩机，必须使用能够在压缩机关闭后立即闭合的电磁阀对经济器支路进行隔离。

磁悬浮离心冷水机组可以实现单制冷剂回路多压缩机并联设计，以提供不同的冷量组合，并提供最佳的机组综合性能和更宽的冷量调节范围。此外，配备多个磁悬浮压缩机的机组在压缩机级别提供足够的冗余，大大提高系统的可靠性。当多压缩机并联时，基于离心压缩特性，磁悬浮离心冷水机组需安装切入阀以提供低压旁通通路，同时可适度降低系统高低压压差，进而辅助启动和关闭压缩机，切入阀安装位置如典型流程图 5-1 所示。

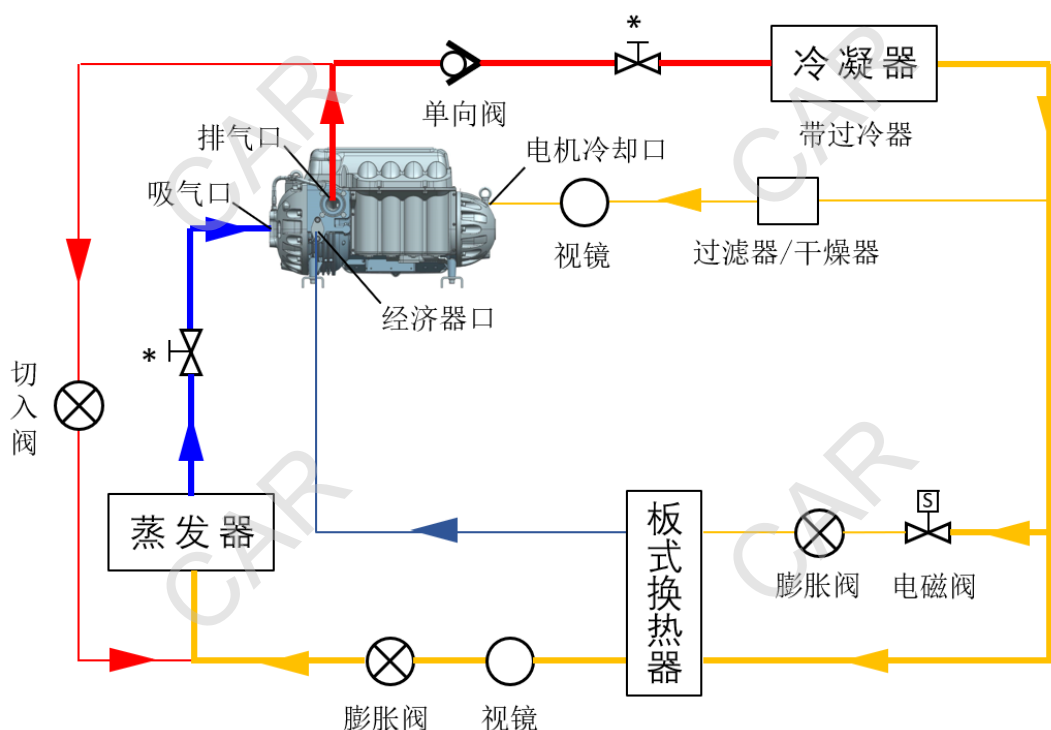


图 5-1 磁悬浮离心冷水机组典型流程图

磁悬浮离心冷水机组变频器和电机采用制冷剂冷却，如典型流程图 5-1 所示，来自冷凝器底部的过冷液态制冷剂在冷凝器压力作用下进入压缩机，经压缩机内部节流装置节流降温后，沿内部换热通道分别冷却变频器主要电子元件、电机定子和转子，以及磁悬浮轴承，完成换热后的制冷剂以过热气体的形式回到压缩机并进行再次循环。

5.2 磁悬浮压缩机在数据中心行业中的典型应用方式

5.2.1 风冷冷水机组+水路自然冷却系统

该系统的典型型式是通过额外配置一个干冷器或一个绝热冷却器，实现三种运行模式：完全机械制冷，部分机械制冷+部分自然冷却，完全自然冷却。

如图 5-2 所示，用户侧水路系统蒸发器前串联一个干冷器（或绝热冷却器），依靠电动两通阀实现水路的切换。

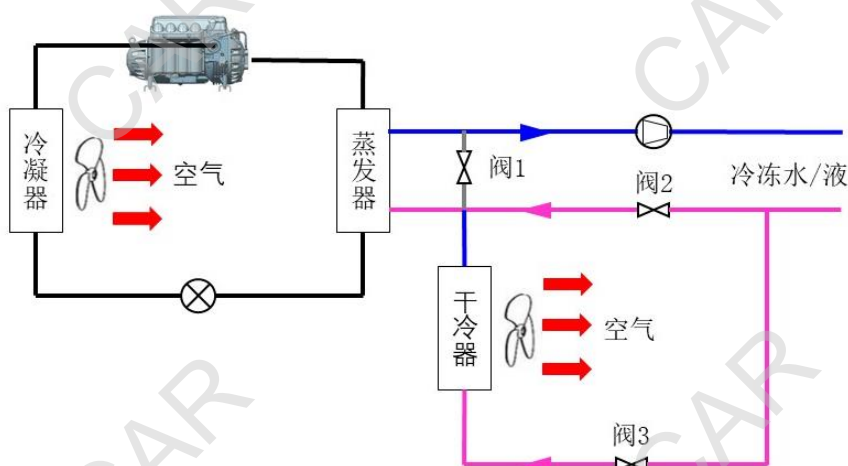


图 5-2 风冷冷水机组+自然冷却系统原理图

如果室外温度高于用户侧回水温度，不能利用自然冷却时，阀 1、3 关闭，阀 2 打开，水路不经过干冷器（或绝热冷却器），而是直接进入蒸发器，此时就是常规风冷冷水机组的运行模式，即完全采用机械制冷。

当室外温度低于回水温度，但完全自然冷却无法满足冷负荷需求时，阀 1、2 关闭，阀 3 打开，冷水回水先经过干冷器预冷，再进入蒸发器，实现部分自然冷却，制冷量不足部分由压缩机补冷实现。室外环境温度越低，自然冷却的制冷量越大，压缩机的耗电越小。

当室外的环境温度低于回水温度，且能完全满足室内的冷量需求时，阀 2 关闭，阀 1、3 打开，水路直接通过干冷器换热，此时压缩机不工作，实现完全自然冷却模式。

具体的自然冷却切换温度需根据机房冷量需求及冷水供水温度来设定。

这类系统结构简单、紧凑，占地面积小，节约机房空间；且省去了冷却水系统的冷却塔，水泵，及相应的管道布置，安装方便；仅有少量水（绝热冷却器）或者无水（干冷器）的消耗，节约了水资源，避免了水质原因引起的冷凝器结垢，水管堵塞等问题。机组可以直接放置在屋顶，裙楼的平台或水平地面上，无需专门机房，适用于任何地区。与采用传统冷水机组的技术相比，噪声较低，尤为适合一些老旧数据中心的改造。

但这类系统受室外环境温度变化影响较大，在夏天温度较高时，由于外机集中摆放或安装位置等原因，导致散热不良，容易引起高压报警。对比采用同类技术的水冷冷水系统，该系统性能系数略低。

如果系统采用集成式的干冷器，由于空气侧的通路增加，阻力会随之增加，风机功率也会有一定程度的上升。

当环境温度很低，干冷器内的载冷剂有结冰风险时，需要采用防冻液作为载冷剂。此时需要采用中间换热器。

5.2.2 水冷冷水机组+水路自然冷却系统

自然冷却水冷冷水机组是将水冷冷水机组与自然冷却相结合的系统，目的是充分利用自然冷源，减少制冷机组能耗，继而提升冷却系统的整体能效。自然冷源可以来自于较低的室外温度或适合的自然界水源。

本节中介绍的系统主要是由水冷冷水机组，冷却塔，水侧板式换热器搭建的。该系统有三种运行模式：完全机械制冷，部分机械制冷+部分自然冷却，完全自然冷却。系统原理图如图 5-3 所示。

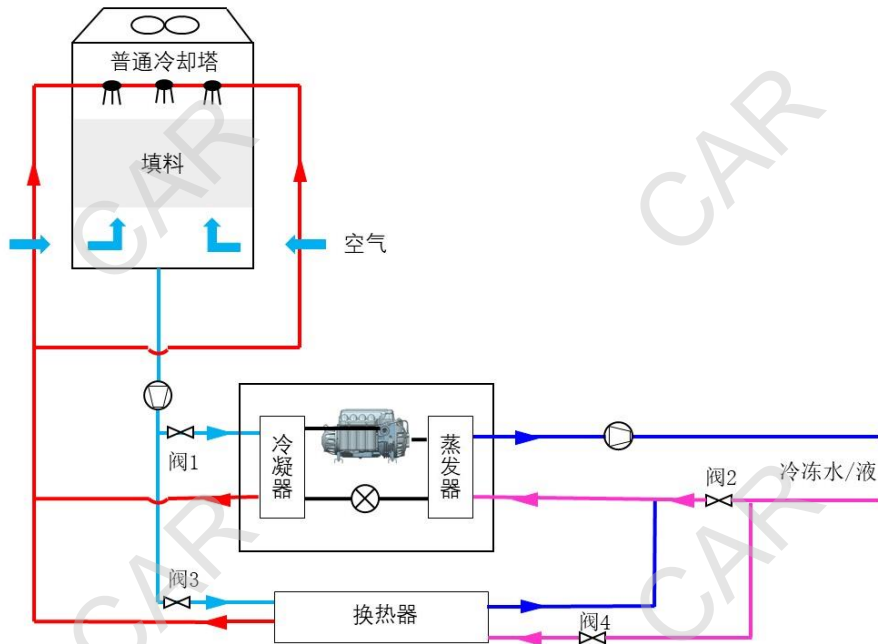
如果冷却水供水温度高于冷冻水回水温度，阀 3、4 关闭，阀 1、2 打开，采用常规水冷冷水机组模式，进行完全机械冷却。

当冷却水供水温度低于冷冻水回水温度，但不能完全满足室内的冷量需求时，阀 2 关闭，阀 1、3、4 打开，通过水侧板式换热器先给冷冻水预冷，再进入蒸发器，实现部分自由冷却，制冷量不足部分由压缩机补冷实现。冷却塔冷却水供水温度越低，自然冷却的制冷量越大，压缩机的耗功越小。

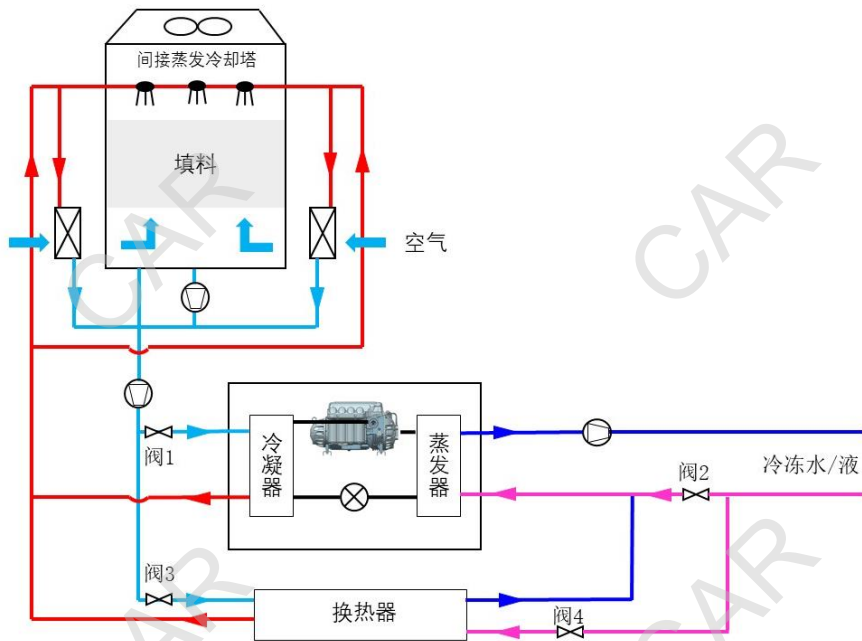
当冷却水供水温度低于冷冻水回水温度，且能完全满足室内的冷量需求时，阀 1、2 关闭，阀 3、4 打开，水侧板式换热器旁通冷水机组，直接与冷却塔提供的冷却水进行换热，获得需要的冷冻水供水温度。此时压缩机不工作，实现完全自由冷却模式。

冷却塔的形式可以是普通开式冷却塔，也可以是间接蒸发冷却塔。据《中国数据中心冷却技术年度发展研究报告 2019》第 5 章“数据中心高效冷源技术与装备”分析数据，从等效冷冻水供水温度的角度看，采用间接蒸发冷却塔-冷机流程，相比于普通冷却塔-冷机流程更为节水节能。比如在西北地区，采用间接蒸发冷却塔作为自然冷源，相比于采用普通冷却塔，年节能率可达 24%~85%，能耗相当于将冷冻水供水温度提升 3~4℃，节能效果十分明显。

注意在使用普通开式冷却塔时，当环境温度很低时，系统中采用的较大型水侧板式换热器有结冰风险，需要采用防冻液作为载冷剂。



(a) 普通冷却塔+水冷冷水机组



(b) 间接蒸发冷却塔+水冷冷水机组

图 5-3 水冷冷水机组+自然冷却系统原理图

5.2.3 风冷/蒸发冷多联 CRACs+自然冷却系统

风冷/蒸发冷多联 CRACs+自然冷却系统，是集磁悬浮无油技术、自然冷却、蒸发冷、动力热管、多联直膨等技术于一体的综合系统。它结构简单，安装灵活，适用性好，水资源的消耗较少。如果采用风冷多联 CRACs+自然冷却系统，没有水

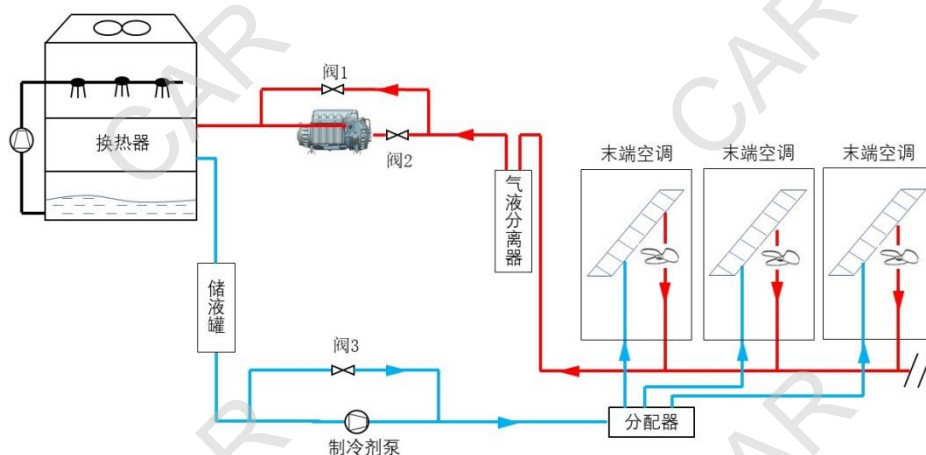
资源的消耗。系统中空气与冷媒直接换热，冷凝温度和蒸发温度的温差较小，相应地，系统要求压缩机在低压比下能正常运行。

该系统有两种运行模式，完全机械制冷，氟泵自然冷却。

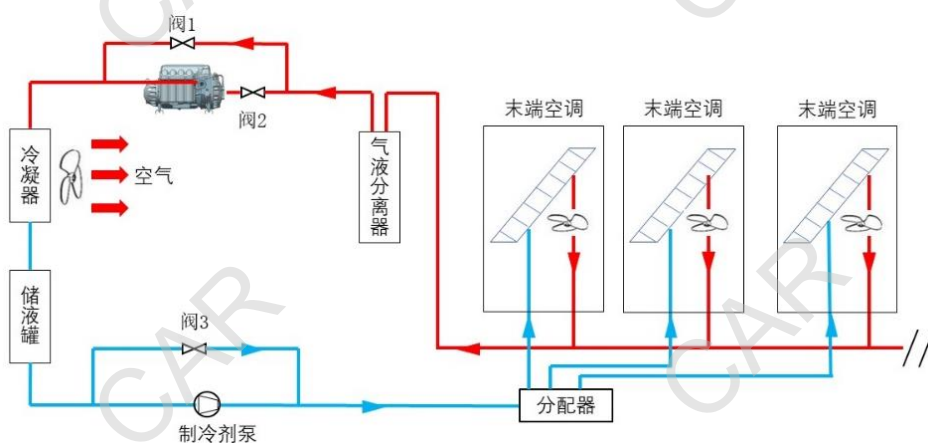
自然冷却无法满足 CRACs 冷量需求时，压缩机运行，系统进入机械制冷模式。此时，阀 1 关闭，阀 2、阀 3 打开。

自然冷却能完全满足负荷需求时，压缩机不工作，制冷剂泵将 CRACs 出来的冷媒通过电动球阀进入冷凝器，进行冷凝，再经过电子膨胀阀节流后进入 CRACs，实现冷媒侧的自然冷却。此时，阀 1 打开，阀 2、阀 3 关闭。

自然冷却的充分利用加上磁悬浮压缩机在低压比工况下的高效发挥，使整个系统的节能效果十分明显。



(a) 蒸发冷多联 CRACs+自然冷却



(b) 风冷多联 CRACs+自然冷却

图 5-4 风冷/蒸发冷多联 CRACs+自然冷却原理图

5.2.4 磁悬浮热泵机组

如图 5-5 所示，该系统是水水热泵应用，为数据中心提供冷冻水的同时产生热水供热。系统配置双冷凝器，蒸汽压缩制冷循环的冷凝热，既可以通过冷凝器传递到热用户供热回路中，实现热回收模式，也可以通过绝热冷却器回路将热量传递到绝热冷却器中，实现制冷模式。该设计避免了绝热冷却器回路和供热回路中的循环介质因为掺混而造成污染。同时采用干冷器或绝热冷却器（闭式冷却塔），既可以将制冷模式绝热冷却回路的热量耗散到外界环境中，也可以将数据中心的回水进行冷却，实现完全自然冷却及部分自然冷却模式。

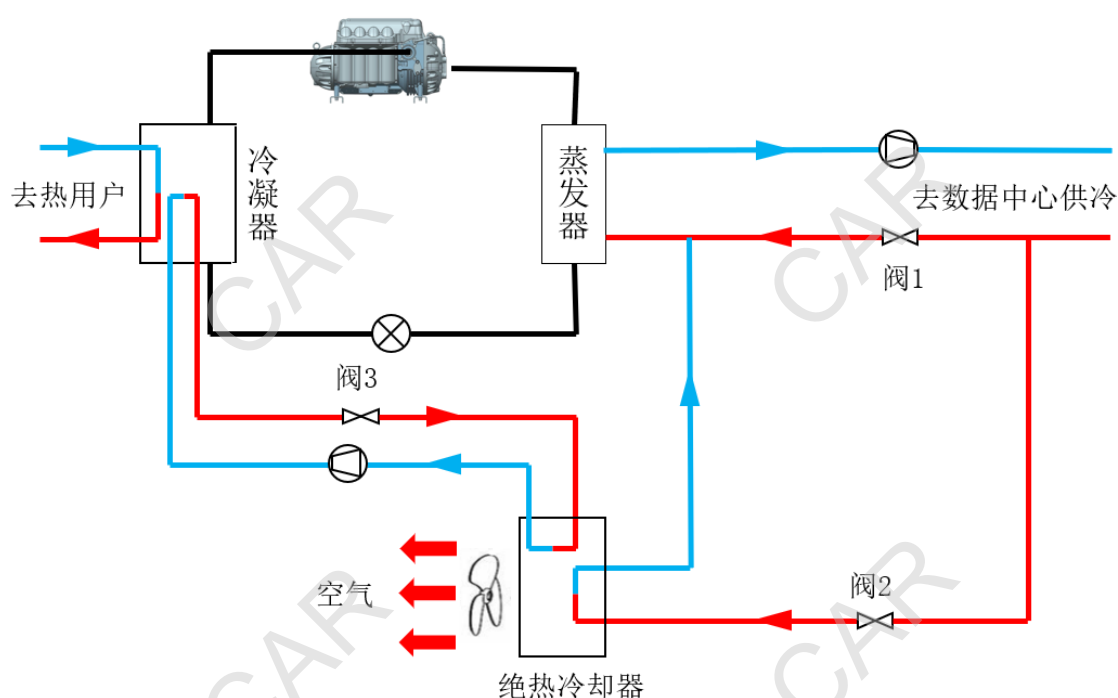


图 5-5 磁悬浮热泵+水路自然冷却系统原理图

该系统通过双冷凝器和绝热冷却器的配合，可以实现五种运行模式：完全制冷模式、部分自然冷却、完全自然冷却、完全热回收模式、部分热回收模式。不采用热回收模式时，系统冷凝热通过绝热冷却器耗散到环境中。系统阀门 3 和绝热冷却器回路的水泵联动。

完全制冷模式：此时热用户侧没有热需求，热回收冷凝器不工作。绝热冷却器回路投入运行，热泵机组冷凝热全部通过绝热冷却器耗散到大气中。阀 2 关闭，阀 1、阀 3 打开。

部分自然冷却模式：此时室外环境温度低于冷冻水回水温度，冷冻水侧可以利用部分自然冷却，同时热用户的热需求较低或者没有，绝热冷却器回路投入运行，

热泵机组冷凝热大部分或者全部通过绝热冷却器耗散到大气中。阀 1 关闭，阀 2、阀 3 打开。

完全自然冷却模式：当室外环境温度低到自然冷却可以完全满足数据中心供冷需求后且热用户没有热需求时，热泵机组不工作。阀 1、阀 3 关闭，阀 2 打开。

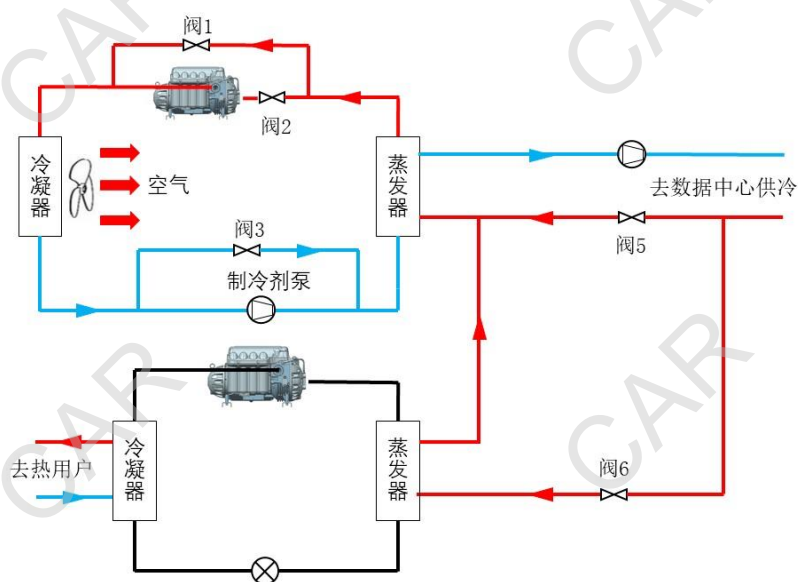
完全热回收模式：此时热泵机组所有冷凝热都供给热用户，绝热冷却器回路不工作，阀 2、阀 3 关闭，阀 1 打开。

部分热回收模式：此时热泵机组的部分冷凝热供给热用户，部分冷凝热通过绝热冷却器耗散到大气中。阀 2 关闭，阀 1、阀 3 打开，热回收冷凝器和绝热冷却回路同时工作。热回收应用采用高压比压缩机，最高出水温度可以达到 65℃。

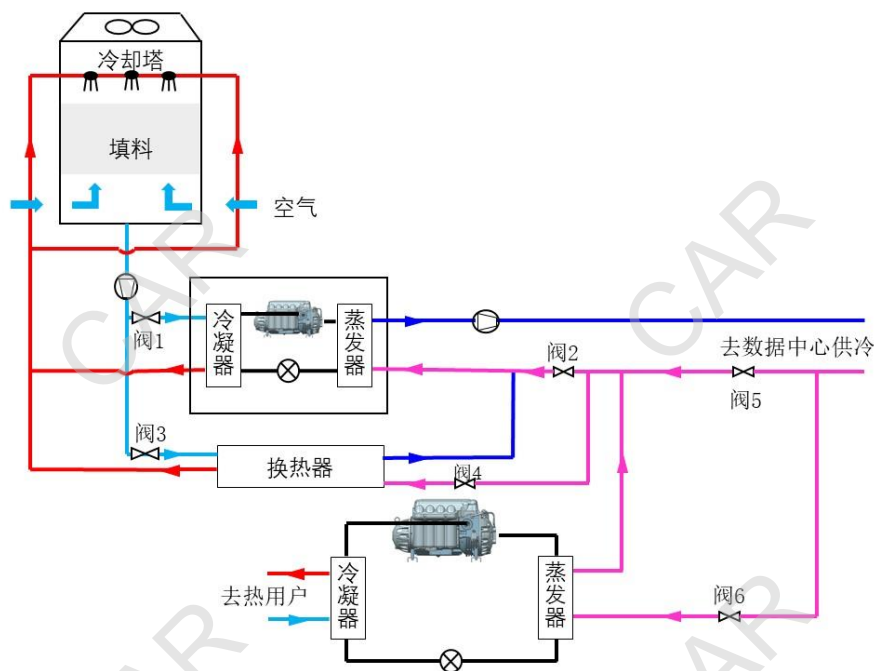
该系统可实现比较高的总效率比，具有冷/热联合效益。由于增加了热回收功能，不能按照传统 PUE 方式计算数据中心用能效率，应综合考虑制冷与热回收两个方面的贡献来衡量数据中心的能效水平。DB 31/ 652—2020《数据中心能源消耗限额》中给出了“综合电能利用效率”计算方法，可供参考。

5.2.5 磁悬浮机组+磁悬浮热泵热回收机组

为了保证数据中心冷却系统能稳定运行，不受其他因素干扰，但同时又可以满足供热的需求，可以采用磁悬浮机组+磁悬浮热泵相结合的方式。磁悬浮机组可以是风冷冷水机组+自然冷却，或水冷冷水机组+自然冷却形式，如图 5-6 所示。



(a) 风冷冷水机组+制冷剂回路自然冷却+热回收



(b) 水冷冷水机组+水路自然冷却+热回收

图 5-6 磁悬浮机组+磁悬浮热泵热回收机组原理图

该系统在不进行热回收时，阀 5 打开而阀 6 关闭，其余的阀门打开方式同 5.2.2 节，此时系统共三种运行模式即机械制冷、部分自然冷却、完全自然冷却。

当需要进行热回收时，阀 5 关闭阀 6 打开，数据中心冷冻水回水进入热泵机组蒸发器进行散热。系统中其余阀门的开关情况及运行模式视热泵机组蒸发器出水温度决定。

这种系统往往需要进行投资回报率分析，比较耗电和供热产生的效益，往往适用于已建数据中心增加热回收需求的情况。与单独的水路自然冷却的热回收系统相比，冗余度更高，成本也更高。

5.2.6 磁悬浮间接蒸发冷+直膨冷却系统

如图 5-7 所示，该系统采用间接蒸发冷与机械制冷相结合的方式制取冷风。它具有三种运行模式：

当室外温度较低时，室内外空气直接通过空气-空气换热器进行显热交换，称为干模式。

当室外温度较高，仅靠室内外显热交换无法满足室内送风温度要求时，需要采用蒸发冷却对室外空气喷雾降温，再经过空气-空气换热器降低室内回风的温度，称为湿模式。

当室外温度较高且湿度较大时，采用蒸发冷却对室内回风进行预冷，同时启动压缩机进行蒸汽压缩，对室内回风进行补冷，使室内送风温度达到系统设计要求，该模式称为混合模式。

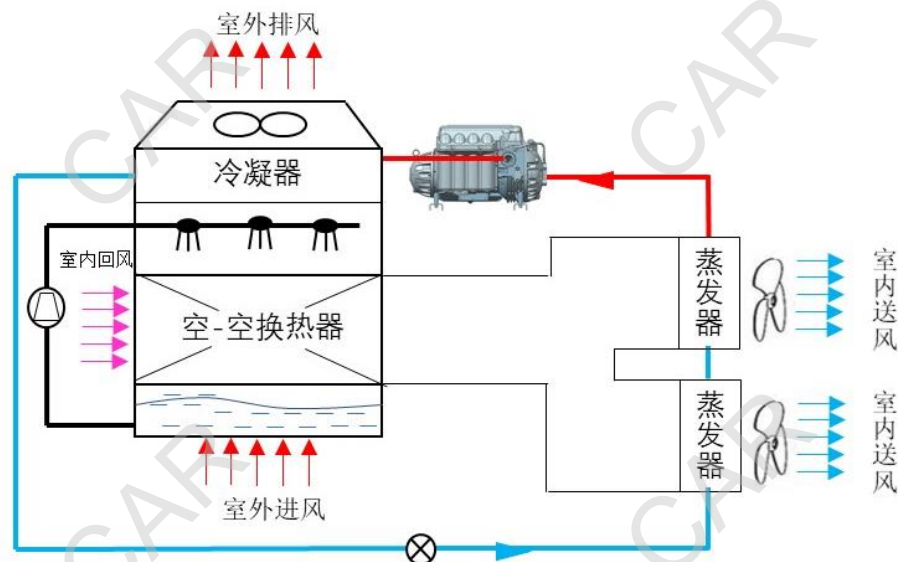


图 5-7 磁悬浮间接蒸发冷+直膨冷却系统原理图

这种系统机组尺寸比较大，能效比较高，可以达到较低的 PUE 水平。使用时，该系统对建筑物的要求较高，适用于一些层高较高的数据中心，避免由于楼层间距小造成的热岛效应。另外楼层数也有限制，由于回/送风管道需靠近 IT 室，一般是外墙安装，或者屋顶安装，此时楼层数不适宜很多。

在机械补冷时，运行压比较低，磁悬浮压缩机在低压比下高效运行的特点刚好与此契合。

5.3 总结展望

随着云计算、大数据、人工智能等技术的飞速发展，作为基础载体的数据中心目前也正在向高密发展。随着数据中心单机柜负载增加，相应的机房热负荷也会增加，但传统的制冷机组使机房 PUE 居高不下，能源消耗日益增大。磁悬浮制冷技术及机组作为一种全新的节能方式和制冷方案，在节能性和可靠性上优势突出，成为数据中心以低能耗实现高效制冷的有效方法之一，并呈现出广阔的发展前景。

磁悬浮机组无油无摩擦运转、高能效、小体积、低噪声等特点有着传统机组无法比拟的优势，非常适用于解决目前数据中心高散热、整体布局与空调能耗过高的困境。同时，磁悬浮离心机组的无油特性尤其适合数据中心冷却、温湿度独立控制

系统等超低压比的应用，彻底杜绝了传统机器在低压比下的回油问题，具有高可靠性。通过高、中、低不同压比机器组合，满足制冷、冷暖、供热的多方需求。

CAR

CAR

CAR

CAR

CAR

CAR

CAR

CAR

6 数据中心用磁悬浮压缩机与制冷机组性能特征

本章主要介绍采用磁悬浮压缩机及所构成的制冷机组的运行性能特征。

6.1 磁悬浮离心压缩机性能

6.1.1 压缩机运行范围

如前文所述，数据中心全年制冷运行，需要压缩机能够在较宽的压缩比变化范围内高效运行，另一方面需要压缩机能够在高冷冻水出水温度（高蒸发温度）条件下高效运行。TTS/VTX 系列磁悬浮压缩机是专门为数据中心冷却应用的高出水温度压缩机，其运行范围如图 6-1 所示。为了提供高冷冻水出水温度，其蒸发温度范围为 12~30℃；并且可以在压缩比 1.4~2.5 范围内运行，当配置制冷剂泵维持电机电子系统冷却时，可以在超低压压缩比 1.0~1.4 之间可靠运行。

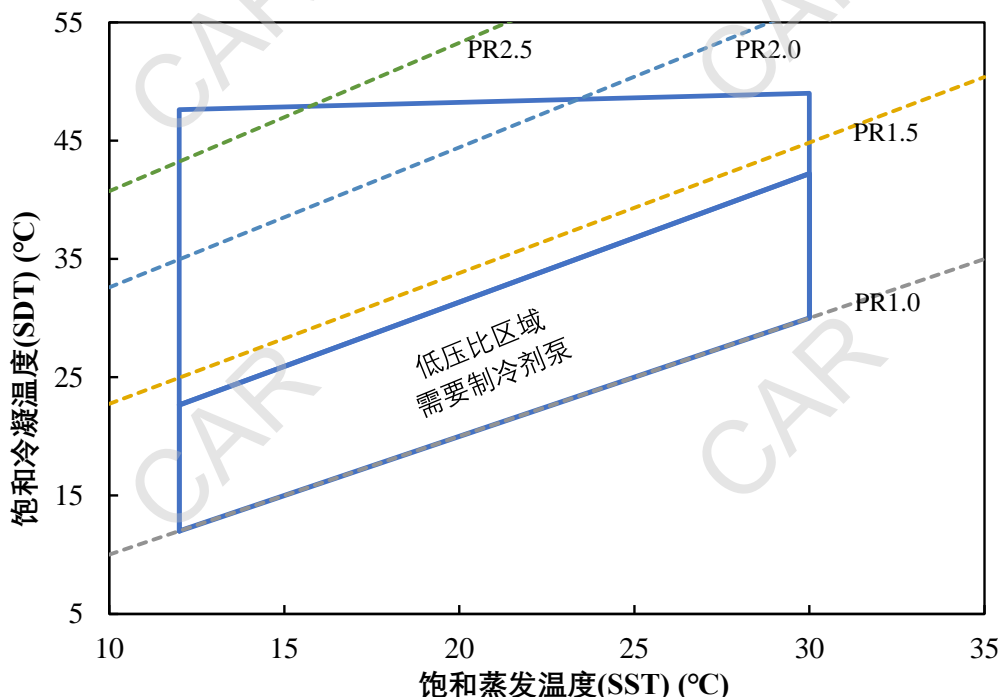


图 6-1 TTS/VTX 系列磁悬浮压缩机运行范围

6.1.2 压缩机运行性能

以 VTX1600 磁悬浮压缩机为例，其额定制冷量为 500 冷吨，图 6-2 中给出其在 80% 负荷下不同运行工况下的性能。从图 6-2 (a) 中可以看出，随着冷冻水供水温度的升高，压缩机的 COP 不断上升；而且随着冷却水进水温度的降低，压缩机的 COP 也不断上升；即压缩比越小，压缩机的 COP 越高（如图 6-2 (b) 所示）。在图 6-2 中所对应的工况下，其 COP 可以达到 20 以上。图 6-2 中未显示压缩比低于 1.3 时的性能数据，如上节所述，在配置制冷剂泵满足压缩机冷却的前提下，

VTX 系列压缩机可以运行在超低压比 1.0~1.4 工况下。性能数据可以参考各主机厂家机组试验数据。

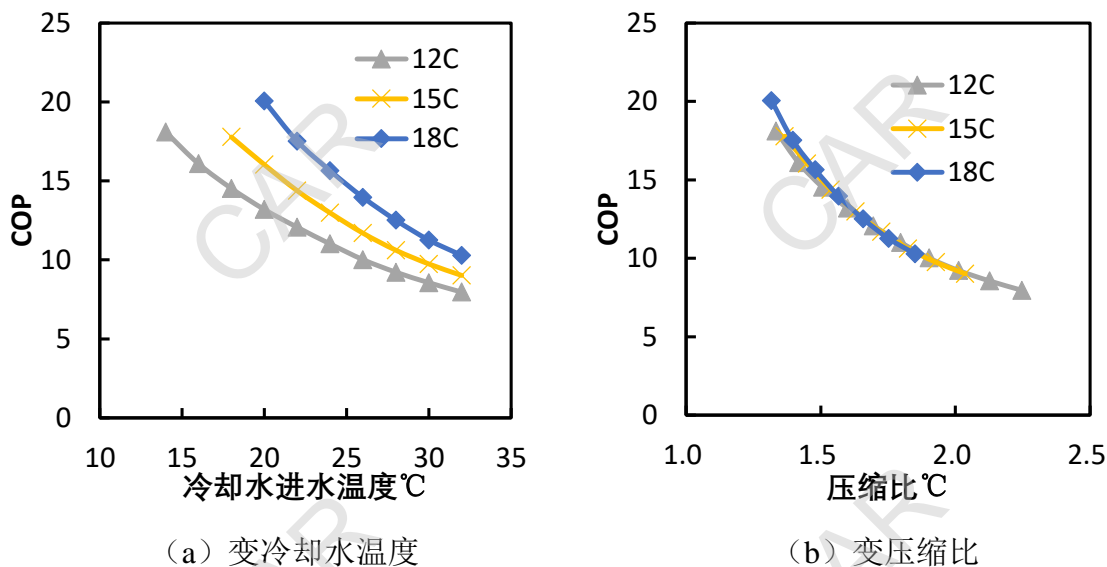


图 6-2 VTX1600 磁悬浮压缩机运行性能

6.2 磁悬浮离心制冷机组变工况性能

本节主要介绍采用多台 TTS 系列磁悬浮压缩机冷水机组性能随负荷率变化及随冷却水供水温度变化的趋势。

6.2.1 磁悬浮离心制冷机组变冷冻水温度性能

图 6-3 展示了磁悬浮压缩机冷水机组（配置多台 TTS 系列压缩机）在冷却水进/出水温度 32/37℃，冷冻水供回水温分别在 12/18℃，15/21℃，18/24℃时，从 100%到 10% 负荷调节时的性能表现。

以冷冻水供回水温度 12/18℃，100% 负荷作为基准，其基准 COP 为 8.33。从图 6-3 中可以看出在同一负荷率下，如果提高冷冻水供水温度，COP 值会有比较大的提升。在同一冷冻水供水温度下，负荷率从 100%到 40%左右变化时，冷水机组的 COP 值有上升趋势。这样的变化趋势表明，在同一台制冷机组中配置多台磁悬浮压缩机，随着负荷率的变化，可以通过调节压缩机的运行台数和每台压缩机的运行频率，两种调节方式相结合，一方面可以使得整个机组的制冷量调节范围大为增加，另一方面也可以使得在较大的负荷变化范围内，制冷机组都能保持较高的 COP 运行。

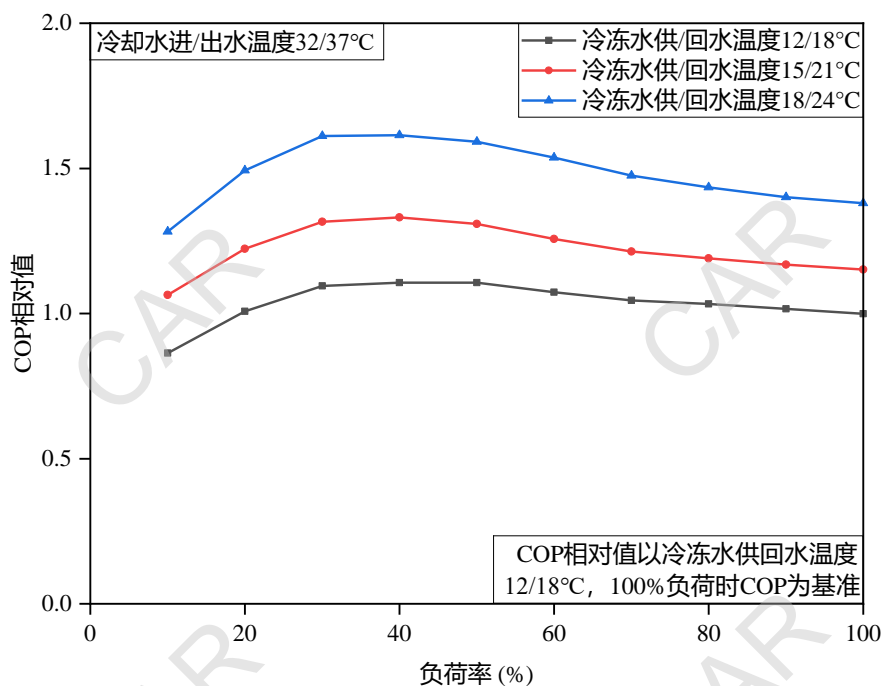


图 6-3 多台 TTS 系列磁悬浮压缩机冷水机组性能曲线

6.2.2 磁悬浮离心制冷机组变冷却水温度性能

图 6-4、图 6-5、图 6-6 分别是磁悬浮压缩机冷水机组（配置多台 TTS 系列压缩机）在冷冻水供回水温度 12/18°C、15/21°C、18/24°C 下，随负荷率变化及随冷却水供水温度变化的三维曲面图，展示了磁悬浮压缩机冷水机组变工况性能变化趋势。

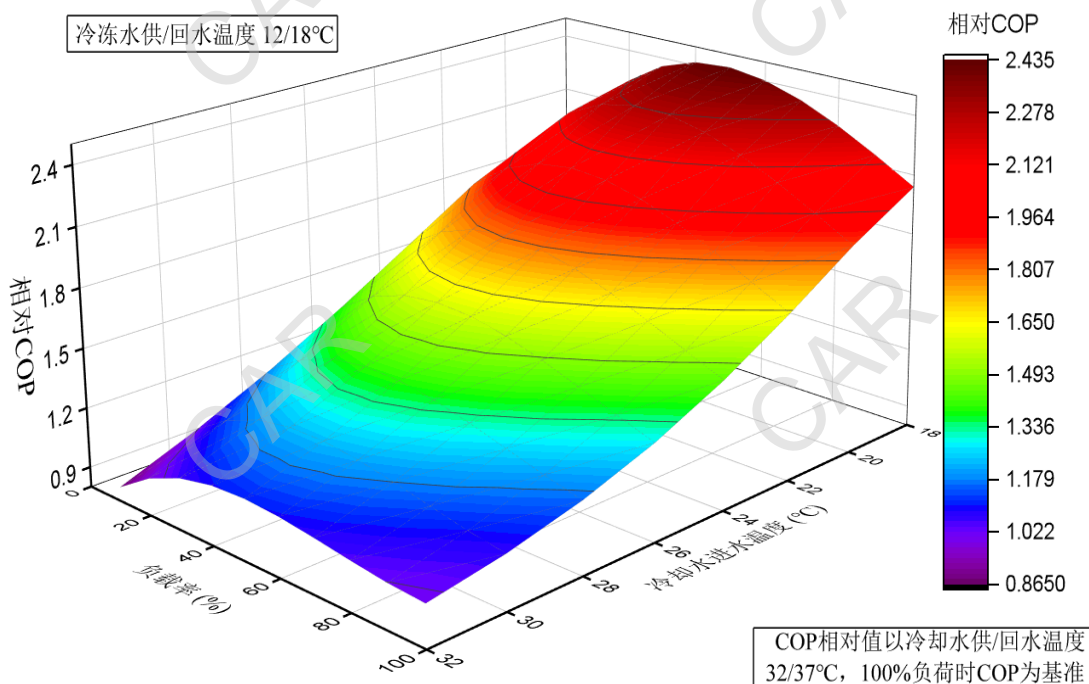


图 6-4 磁悬浮冷水机组变工况性能（冷冻水供/回水温度 12/18°C）

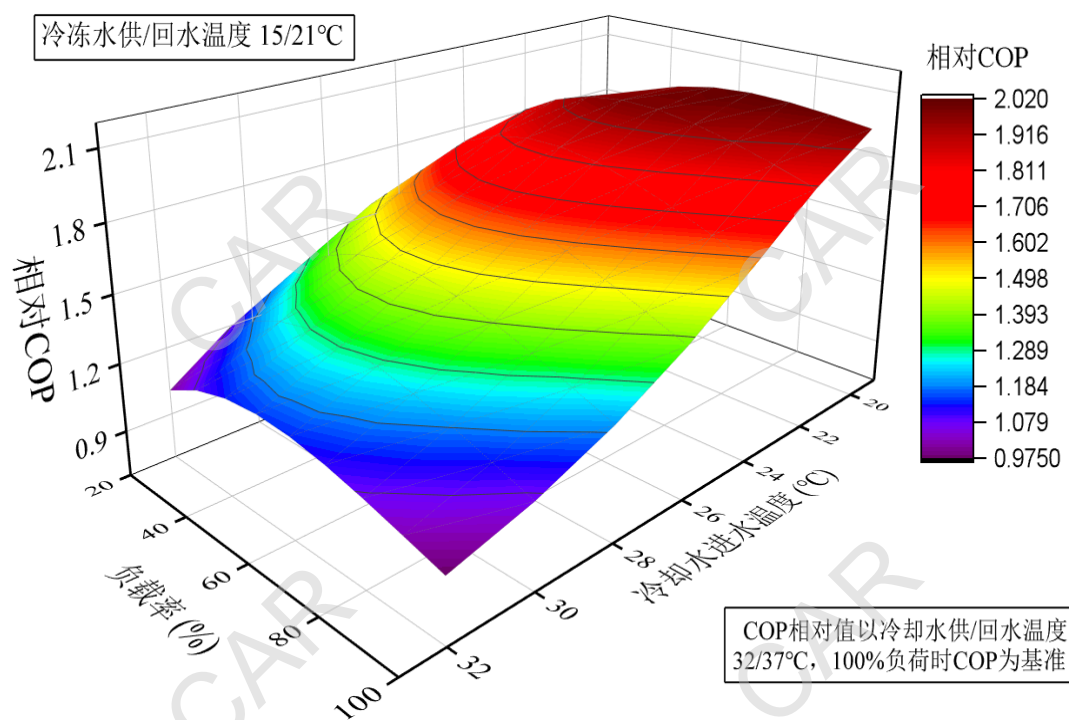


图 6-5 磁悬浮冷水机组变工况性能（冷冻水供/回水温度 15/21°C）

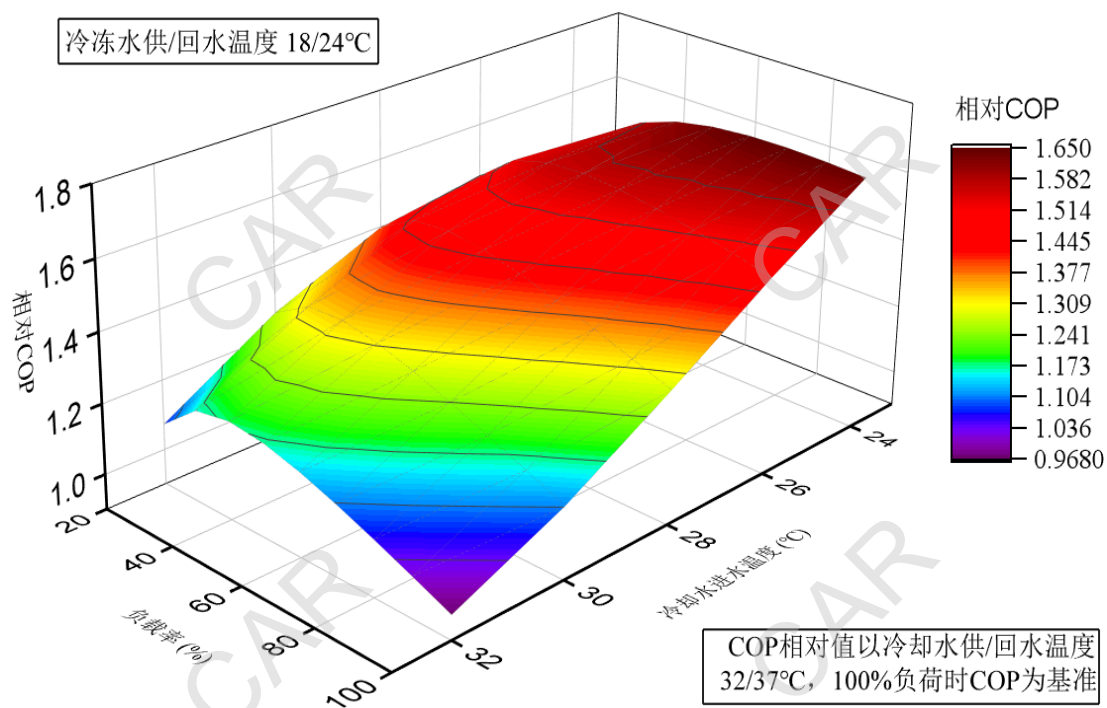


图 6-6 磁悬浮冷水机组变工况性能-冷冻水供/回水温度 18/24°C

图 6-4 中，曲面中 COP 为相对值，基准值为冷冻水供回水温度 12/18°C、冷却水供水回水温度 32/37°C 工况下满载运行的 COP 值。以此类推，图 6-5、图 6-6 中的 COP 也是相对值，基准值对应的冷冻水供回水温度为 15/21°C 和 18/24°C 应用条件。

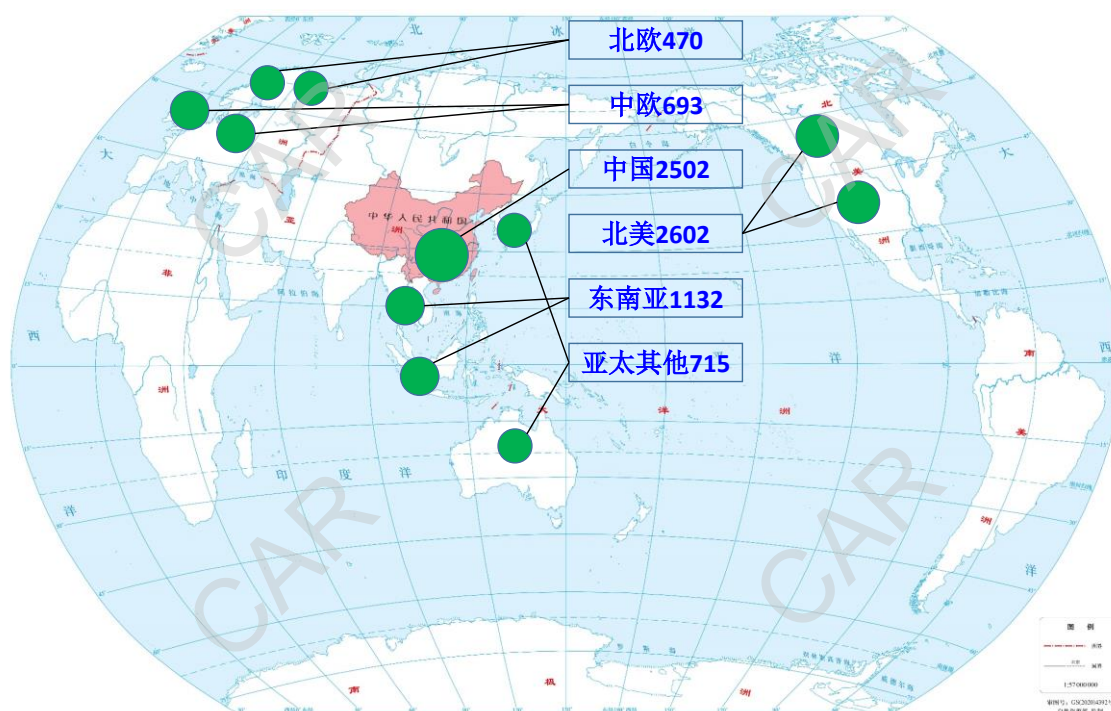
由图中可见，在同一冷却水供水温度下，随着负荷率的下降，制冷机组的 COP 值有上升趋势，从 100% 卸载到 40% 左右上升趋势明显；在同一负荷率下，随着冷凝器供水温度下降（压比降低），COP 值呈上升趋势。

需要注意的是，实际中采用磁悬浮压缩机制冷机组的卸载能力不局限于图示范围，卸载的最小负荷率及最低冷却水供水水温可视机组设计及具体实验情况而有所拓展。

7 磁悬浮制冷机组典型应用案例

7.1 磁悬浮离心制冷机组全球数据中心应用概况

磁悬浮离心压缩机自问世以来，以其优异的性能已经在世界各地得到了广泛应用（如图 7-1 所示），已经有超过 8000 台磁悬浮压缩机在全球数据中心中投入使用，主要集中在亚洲（中国、东南亚、亚太其他）、北美和欧洲市场。其中北美市场超过 2600 台，中国市场超过 2500 台，东南亚市场达到 1132 台，亚太其他地区市场（不含中国和东南亚）达到 715 台，中欧和北欧市场分别为 693 台和 470 台。



数据来源：丹佛斯公司提供

图 7-1 磁悬浮离心冷水机组全球数据中心应用分布

在中国市场上已经有 2502 台磁悬浮离心压缩机在数据中心领域得到应用，表 7-1 给出了采用磁悬浮压缩机的部分典型数据中心。从表 7-1 中可以发现，已有佳力图、克莱门特、海尔、Smardt、麦克维尔、捷丰等多个品牌采用磁悬浮离心压缩机的制冷机组在数据中心中得到应用，涉及全国多个气候区域的新建及改造数据中心项目，采用的冷却方式包括风冷、水冷、蒸发冷等。

本章选取其中代表性的数据中心项目，基于实测数据对磁悬浮离心制冷机组的性能进行分析。

表 7-1 磁悬浮制冷机组在中国数据中心应用典型项目

序号	项目名称	新建/ 改造	冷却方 式	总负荷 (KW)	投入 时间	地点	品牌
1	江苏银行总部大厦	改造	风冷	1200	2015	南京	佳力图
2	浙江杭州红宝云数据中心	新建	风冷	1350	2015	杭州	佳力图
3	南京电信长乐路机楼	改造	风冷	3600	2017	南京	佳力图
4	山东移动青岛浮山路机房	新建	风冷	5600	2018	青岛	佳力图
5	安徽电信天都路数据中心	新建	风冷	8400	2019	合肥	佳力图
6	南京证券金融城 5 号楼数据中心	新建	风冷	1800	2016	南京	佳力图
7	汕尾移动通信机楼	改造	水冷	1760	2015	汕尾	佳力图
8	广东智江网络数据中心	新建	水冷	3160	2016	中山	佳力图
9	南京大学化学化工学院数据中心	新建	水冷	900	2016	南京	佳力图
10	北京国门数据中心	新建	水冷	1200	2016	北京	佳力图
11	深圳华赛 IDC 机房	新建	水冷	2100	2014	深圳	佳力图
12	南科通信机楼	新建	水冷	2520	2018	深圳	佳力图
13	中国国家级超级计算中心	新建	水冷	28707	2015	无锡	克莱门特
14	百度云计算（阳泉）中心	新建	蒸发冷	500	2019	阳泉	克莱门特
15	中国铁路总公司数据中心	新建	水冷	17000	2019	天津	克莱门特
16	汇天云端大数据处理中心	新建	水冷	47528	2017	北京	克莱门特
17	华为云服务江苏数据中心	新建	水冷	5486	2017	盐城	克莱门特
18	中恩云数据中心	新建	水冷	11254	2020	北京	克莱门特
19	吉视传媒信息枢纽中心机房	新建	风冷	3600	2020	长春	克莱门特
20	深圳万国数据中心	新建	蒸发冷	350	2008	深圳	克莱门特
21	北京三信时代数据中心	新建	水冷	2110	2017	北京	海尔
22	宁夏中国移动数据中心	新建	水冷	6858	2017	宁夏	海尔
23	北京荣之联数据中心	改造	水冷	2110	2017	北京	海尔
24	上海兴业证券数据中心	新建	水冷	2110	2017	上海	海尔
25	上海青浦云数据中心	新建	水冷	880	2017	上海	海尔
26	南京金茂数据中心	新建	水冷	3868	2019	南京	Smardt
27	延安数据中心	新建	水冷	1582	2018	延安	麦克维尔
28	深圳易信科技数据中心	新建	水冷	3164	2019	深圳	麦克维尔
29	香港将军澳汇丰银行数据中心	新建	风冷	8440	2019	香港	捷丰
30	东莞名气通松山湖数据中心	新建	水冷	4220	2015	东莞	捷丰
31	名气通香港数据中心	新建	水冷	2110	2018	香港	捷丰
32	山东济南超算中心	新建	风冷	1232	2017	济南	捷丰
33	大连亿达名气通数据中心	新建	水冷	4220	2015	大连	捷丰

7.2 案例 1：水冷磁悬浮冷水机组(带自然冷却)在夏热冬冷地区应用

7.2.1 数据中心简介

上海青浦腾讯数据中心位于上海市青浦区（如图 7-2 所示），机架数量 4000 余台，单机架设计负荷 8~12kW。机房配电采用一路市电加一路高压直流组成的双路电源配电。



图 7-2 上海青浦腾讯数据中心建筑规划示意图

7.2.2 冷却系统概述

（1）冷源介绍

由于数据中心冷却系统的主要构成部分制冷机组、冷却塔、冷却水泵、冷冻水泵等都需要满足数据中心全年运行工况下的制冷需求，各个组成部分的匹配选型与运行控制都是影响整个冷却系统性能的关键。因此，在工厂内将上述主要组成部分在工程内进行优化设计、组装调试和智能控制，不仅可以提高整个冷源系统的设计和运行能效，还可以简化现场安装调试周期、提高运行的节能效果。

上海青浦腾讯数据中心 103#扩容机房（图 7-2 中 B 区）的冷却系统原理如图 7-3 所示，采用两套海尔中央空调与贵州绿云科技合作研发的集成式物联高效冷站（如图 7-4 所示），设计冷冻水供回水温为 22/27℃，单冷站额定制冷量 875kW。两套集成冷站联合供冷且互为备份，采用磁悬浮离心冷水机组+自然冷源双供冷模式供冷。每套冷源均有独立的传感器、执行器以及控制器，供冷单元相对独立，总体集成化、标准化、模块化特点突出。集成冷站结构紧凑，安装简单，客户仅需连

接进出水管，机组自动控制压缩机蒸气压缩制冷和自然冷却之间的切换。

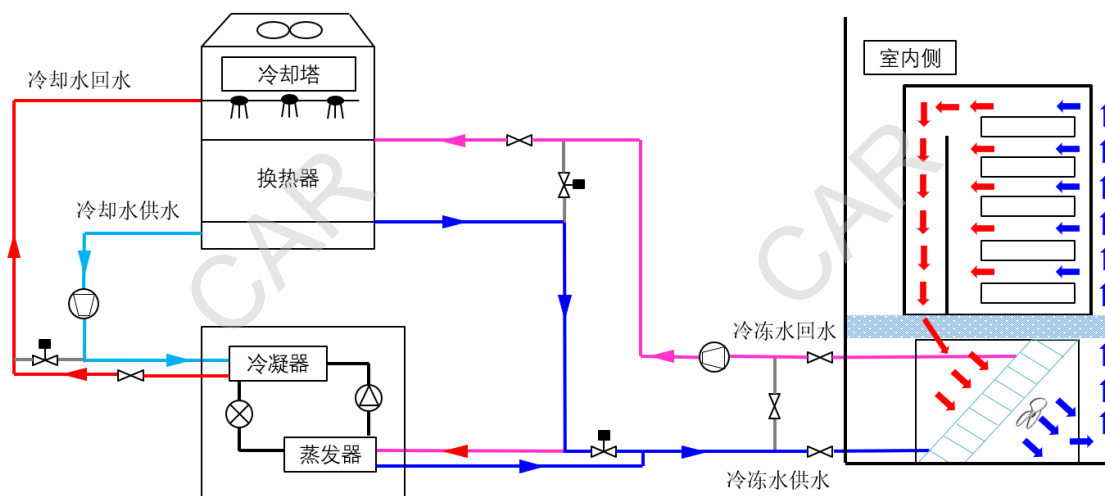


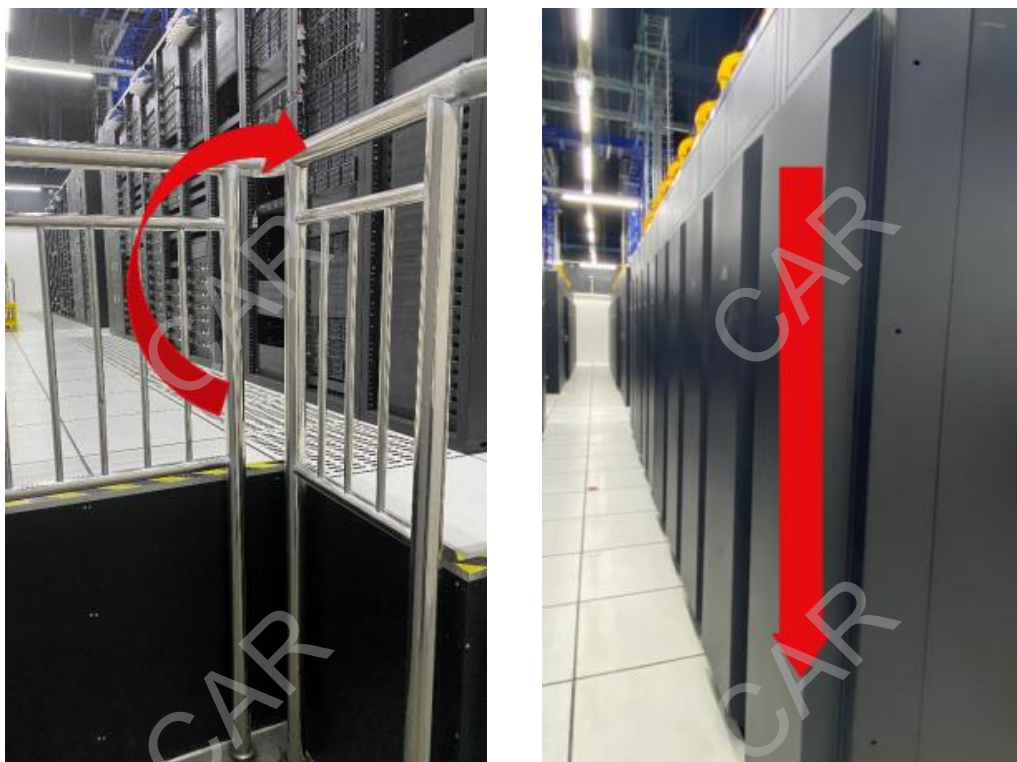
图 7-3 上海青浦腾讯数据中心冷却系统



图 7-4 集成冷站现场图

(2) 制冷末端介绍

在室内末端中，机柜采用封闭热通道结构，将热风送入地板下空气分布式处理单元中进行冷却，经过冷却后的冷风通过多孔地板进入机房，并从机柜前门进入机柜中对服务器进行冷却。机房送、回风流场及室内末端如图 7-5 和图 7-6 所示。



(a) 地板送风

(b) 封闭热通道回风

图 7-5 室内末端照片

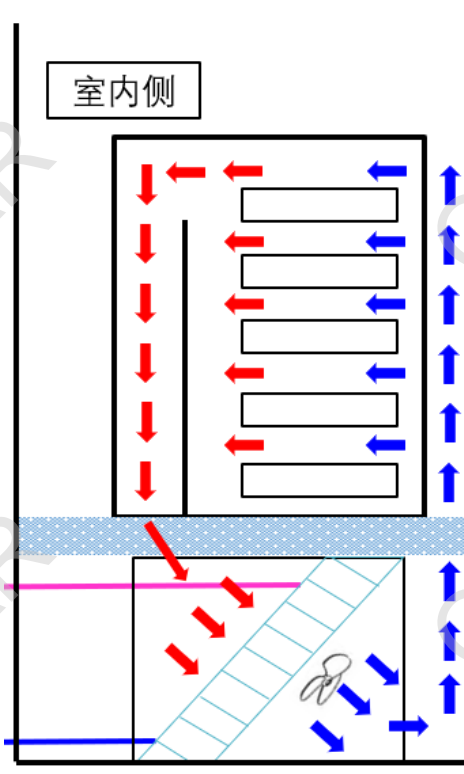


图 7-6 室内末端原理

(3) 制冷模式

该集成式冷站共有两种制冷模式，即机械制冷及自然冷却模式。

1) 机械制冷模式

当外界环境湿球温度高于 18~19℃时，冷站采用机械制冷模式（如图 7-7 所示），即通过磁悬浮压缩机，运行蒸气压缩制冷。该模式下，冷却系统主要耗能部件包括磁悬浮压缩机主机、冷冻水泵、冷却水泵、冷却塔风机、末端空气分布式处理单元风机。

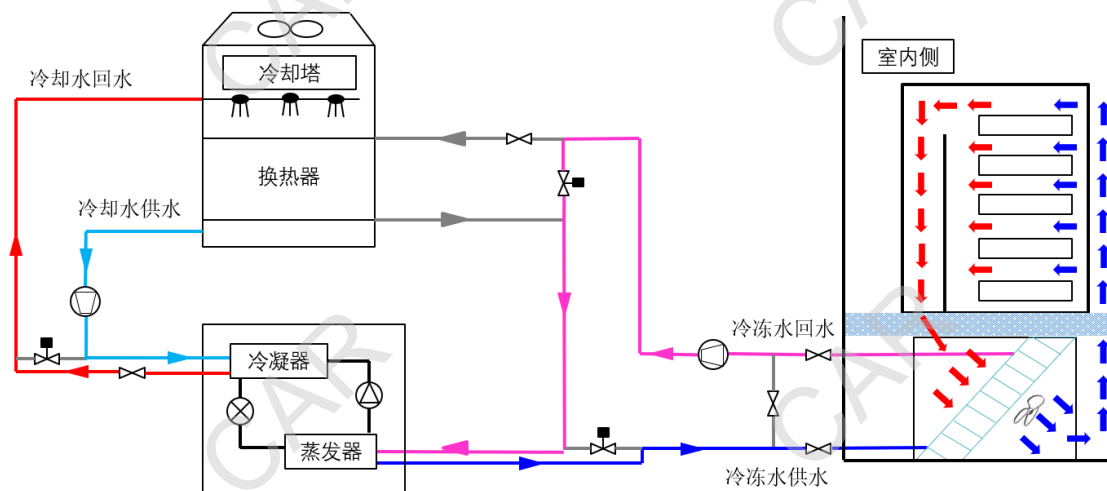


图 7-7 机械制冷模式

当蒸气压缩制冷模式开启时，由冷却水泵抽水上塔，冷却塔风机运行，空气与冷却塔喷淋水逆流直接接触换热，冷却水通过部分蒸发，温度得以进一步降低；经过冷却塔冷却后的冷却水，进入制冷机组冷凝器中，吸收制冷剂液化放出的热量，机房的冷冻水回水在制冷机组蒸发器中将热量传递为制冷剂的蒸发潜热，从而得到满足机房运行需求的冷冻水供水。而制冷剂回到磁悬浮压缩机中压缩，冷冻水供水进入机房中制冷。

2) 自然冷却模式

当外界环境湿球温度低于 17~18℃时，冷站运行自然冷却模式（如图 7-8 所示），系统通过闭式塔盘管换热器（在原理图中用冷却塔中换热器示意）进行冷冻水散热，系统主要耗能部件包括冷冻水泵、冷却水泵、冷却塔风机、末端空气分布式处理单元风机。

自然冷却模式运行时，压缩机不工作，由喷淋泵抽冷却水上塔，冷却塔风机运行，同时冷冻水循环泵将机房冷冻水回水送入冷却塔盘管换热器，冷冻水通过盘管换热器壁面，与冷却水及空气对流换热，同时由于冷却水的蒸发，冷冻水的温度得以进一步下降，自然冷源利用程度提高。

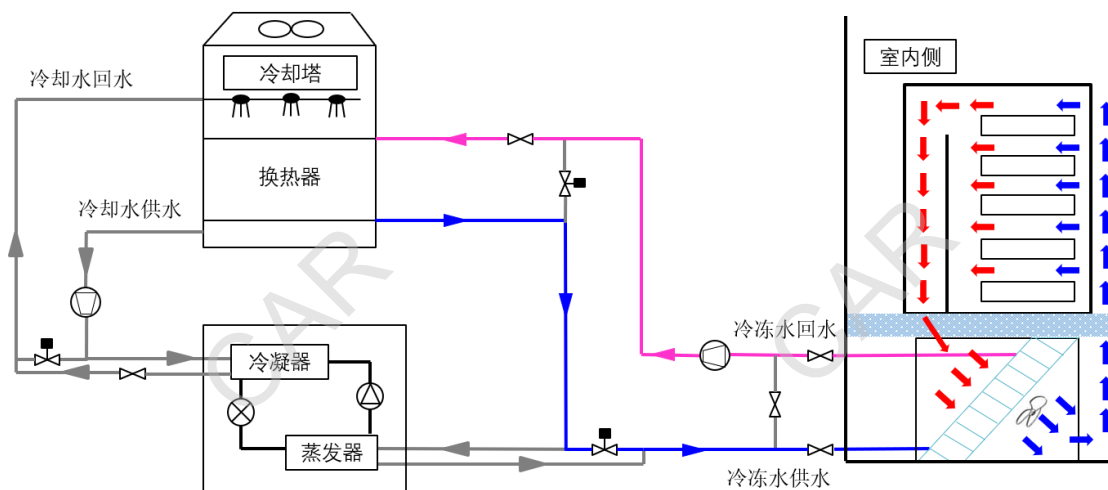


图 7-8 自然冷却模式

(4) 智能控制策略

两套冷源组成无中心结构，形成“双机热备”的供冷群，对末端机房进行不间断的供冷，如图 7-9 所示。

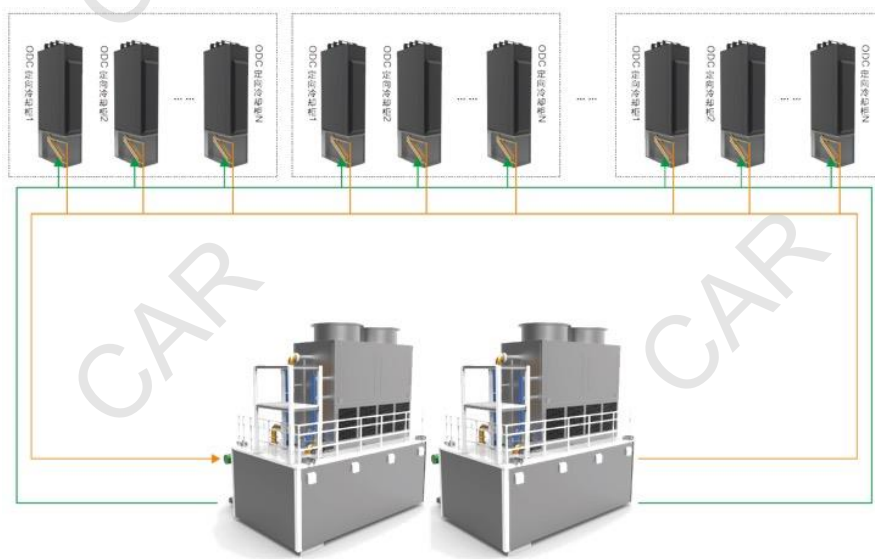


图 7-9 双冷源无中心结构

每个供冷单元、空气处理单元均采用无中心控制结构，每套设备均具备独立的传感器、执行器、控制器，实现独立自主调节、智慧运行，不依赖于任何第三方控制系统，一个功能单元的失效不影响系统可用性，并且失效单元可以得到备用单元的代偿，提高系统可靠性和可用性。

在没有任何冷源设备故障的情况下，双冷源同时且独立运行，在冷源启动时，任何情况下均先启动自然冷源，冷源启动完成后进入可切换状态。冷站采用 22℃ 高温供水，若室外环境湿球温度大于 19℃，由自然冷源立即切换至机械制冷；若

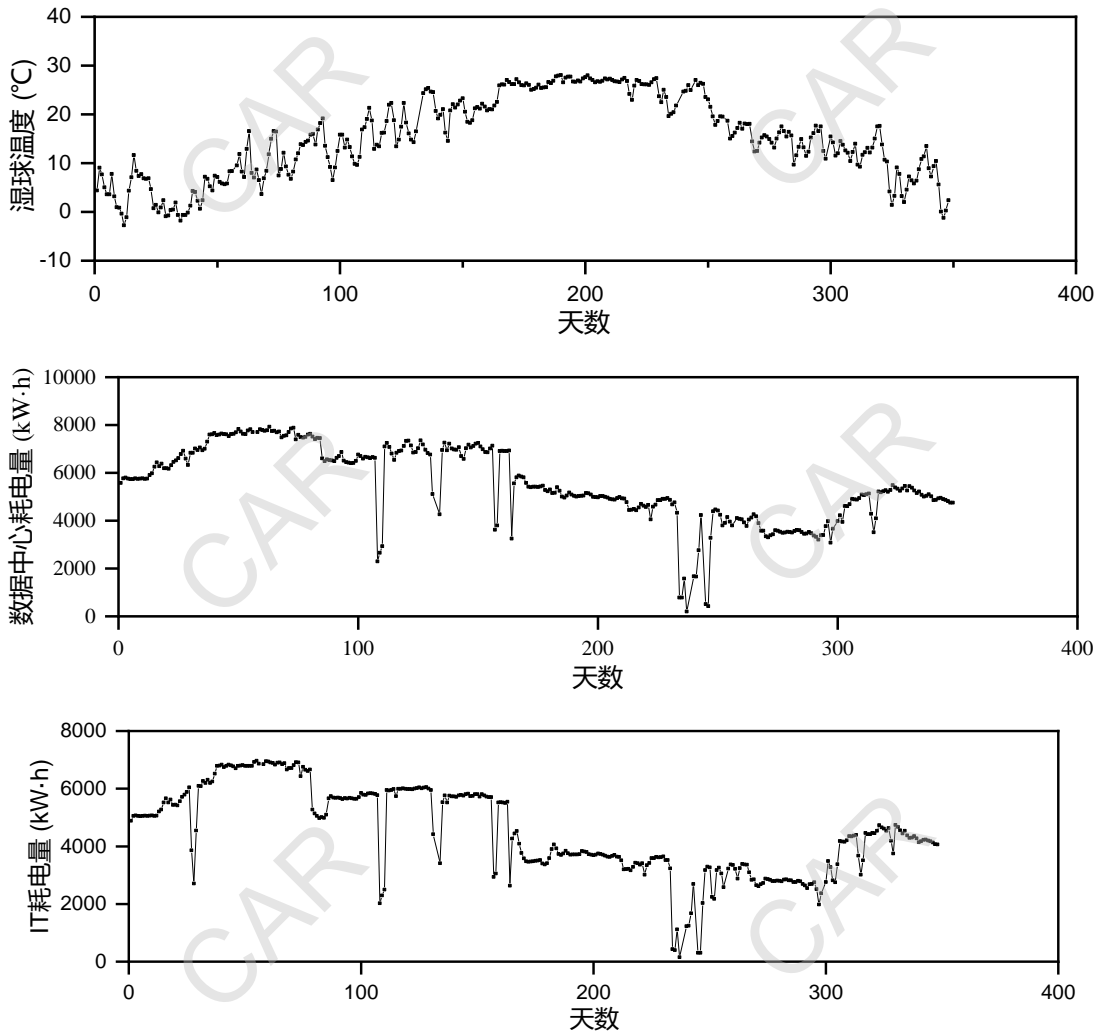
室外环境湿球温度小于 17℃，由机械制冷切换至自然冷源。冷站系统采用一只电动蝶阀，切换过程简单、可靠，到目前为止，系统已完成自动切换百余次，整个启动过程、切换过程、调节过程均无需人为干预，由系统自动完成，实现冷源站真正无人值守。

7.2.3 运行数据分析

对该数据中心在 2018 年 1 月 1 日 0 点至 2018 年 12 月 31 日 23 点期间历史数据进行分析，其冷冻水平均供水温度为 20℃。详细运行情况如下。

(1) 全年运行数据

该数据中心在 2018 年 1 月 1 日 0 点至 2018 年 12 月 31 日 23 点期间的历史数据。如图 7-10 所示：



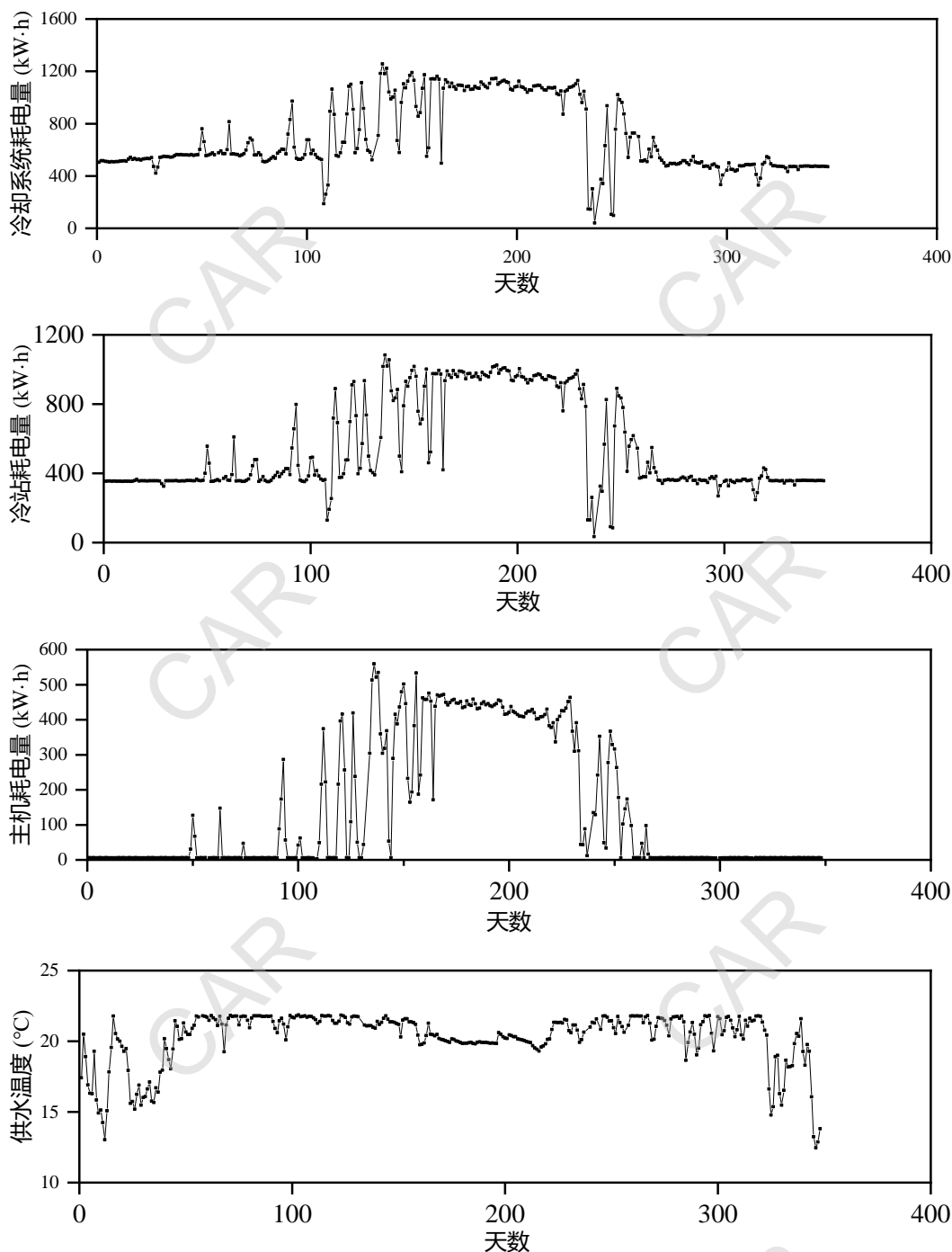


图 7-10 上海青浦腾讯数据中心 103#机房冷却系统 2018 年逐日运行性能

(2) 冷却系统逐时性能分析

图 7-11 和图 7-12 给出了该数据中心在 2018 年逐时室外湿球温度下的集成冷站 COP 和冷却系统 GCOP。从图 7-11 和图 7-12 中可以看出，该数据中心所处地区全年湿球温度在 -5°C ~ 30°C 之间，随着室外空气湿球温度的降低，集成冷站 COP 和冷却系统的 GCOP 都不断上升。在湿球温度低于 19°C ，转入自然冷却模式后，集成冷站 COP 和冷却系统的 GCOP 都进一步上升，集成冷站 COP 可达到 20 以

上，冷却系统 GCOP 可达到 15 以上。

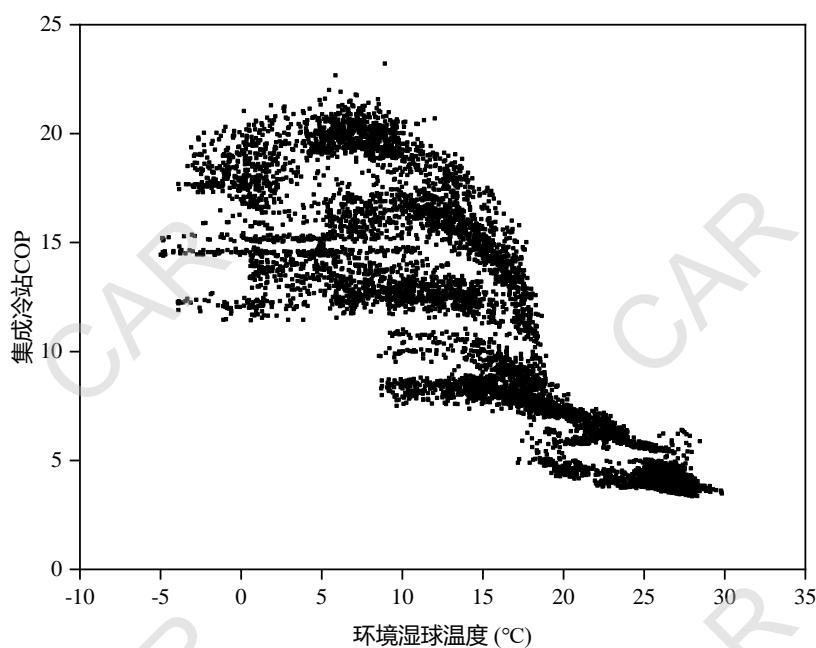


图 7-11 全年逐时湿球温度与集成冷站 COP

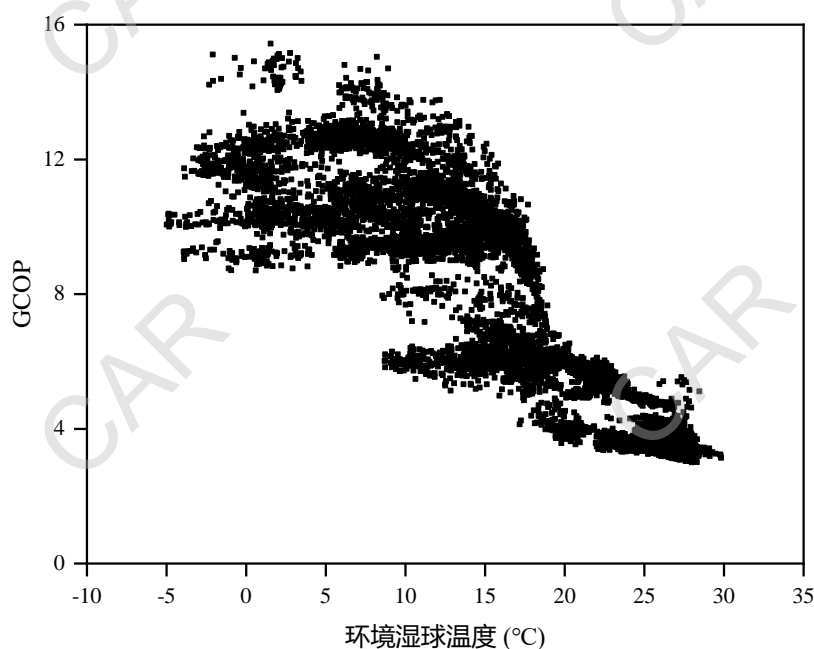


图 7-12 全年逐时湿球温度与冷却系统 GCOP

根据集成冷站冷却模式切换逻辑，在室外湿球温度高于 19°C 时，冷站运行模式为机械制冷模式，此时压缩机工作。对这部分时间的数据分析，可以得到压缩机的性能数据图（如图 7-13 所示），可以看到在室外环境湿球温度较高情况下，压缩机性能系数较好，除个别时刻因机房调整服务等特殊工况外，压缩机在较高湿球温度下 COP 均在 7.5 以上，并随室外环境湿球温度的下降呈明显上升趋势。

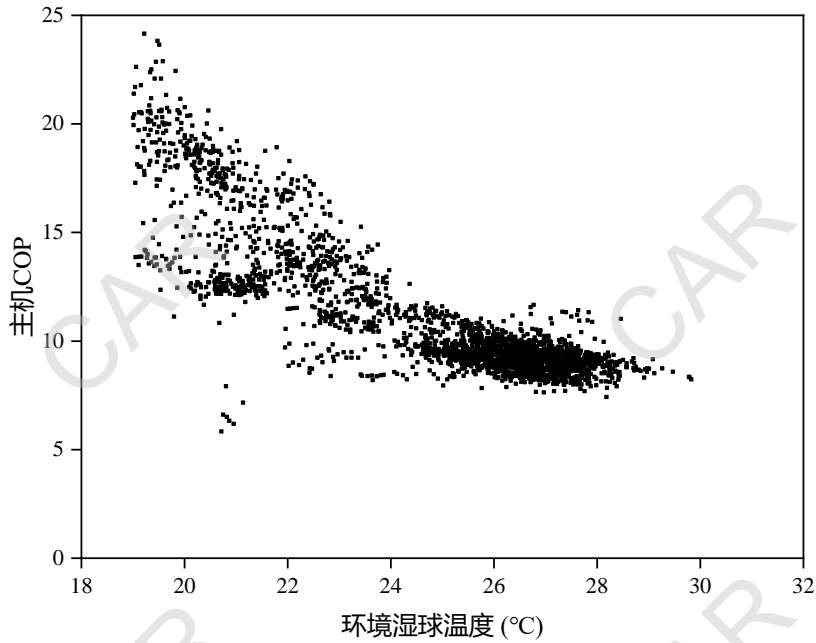


图 7-13 制冷机组性能系数与环境湿球温度

(3) 冷却系统逐月能耗分析

对该数据中心在 2018 年 1 月 1 日至 2018 年 12 月 31 日期间数据按照逐月进行统计，可以得到数据中心各部分逐月能耗占比（如图 7-14 所示）、冷却系统各个部分能耗占比（如图 7-15 所示）、数据中心逐月 PUE（如图 7-16 所示）、逐月冷却系统综合 GCOP 变化情况（如图 7-17 所示）。

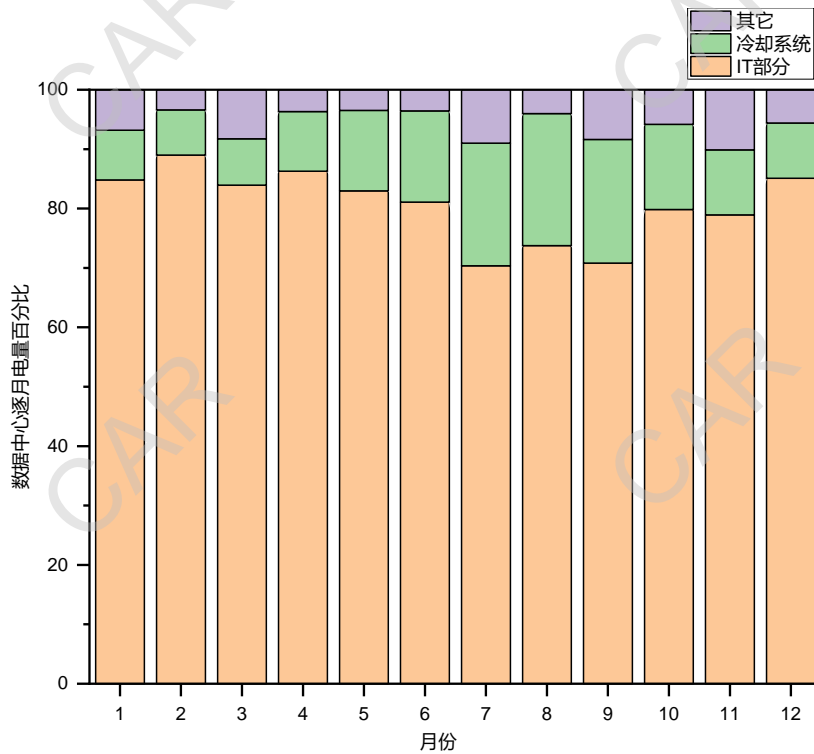


图 7-14 数据中心各部分逐月能耗占比

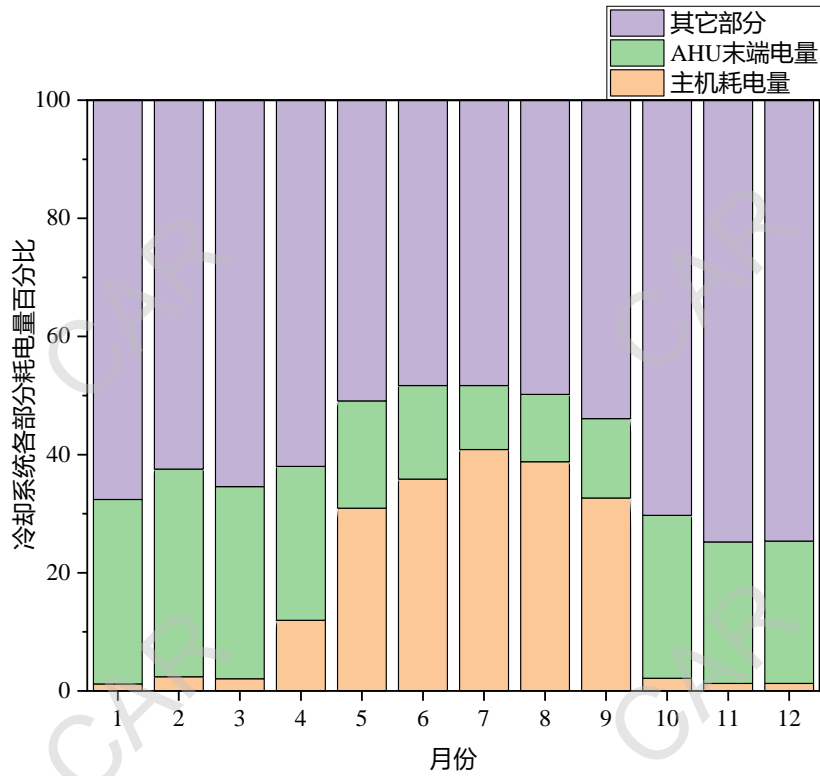


图 7-15 冷却系统逐月各部分耗电占比

对数据中心冷却系统各部分耗电量进行统计计算，可以得到逐月各部分耗电量占比情况。由图 7-15 数据中心冷却系统耗电量占比可以看到，该数据中心冷却系统压缩机的耗电量最高不超过冷却系统总耗电量的 41%，相比之下，末端空气处理单元 AHU 及泵的耗电量占比较大。

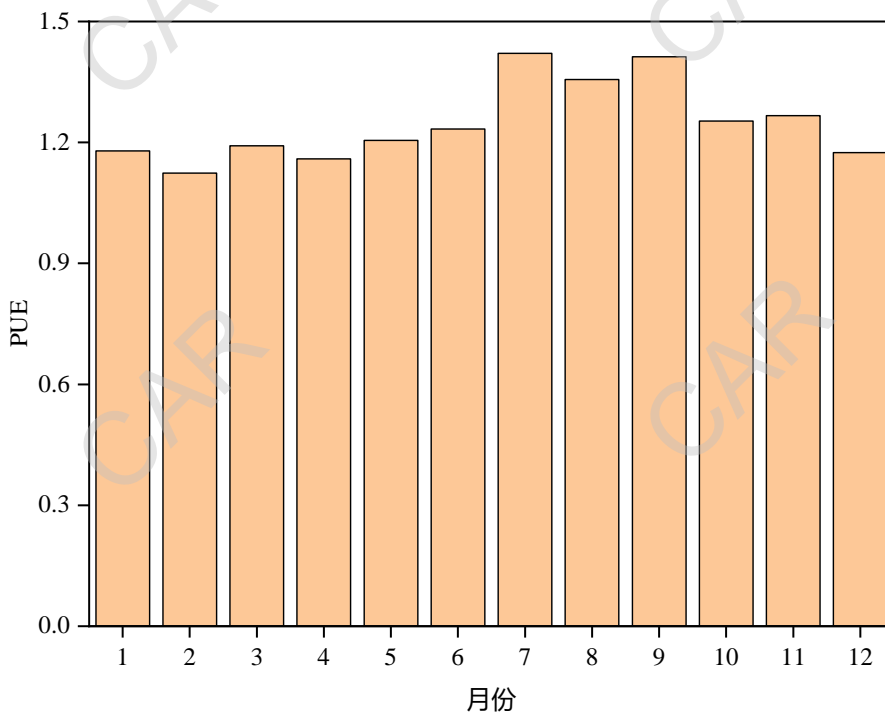


图 7-16 数据中心逐月 PUE 变化图

从图 7-16 中，数据中心的月度别 PUE 来看，在 7 月~9 月间 PUE 略高外，其余月份的 PUE 均在 1.2 左右。

计算逐月冷却系统综合性能系数 GCOP 如图 7-17 所示，可以看到在较冷的月份，冷却系统 GCOP 在 8 以上（集成冷站 COP 在 10.0 以上），在 2018 年 2 月，冷却系统 GCOP 达到最高 12.0 以上，而集成冷站的最高 COP 达到 18.0 以上。

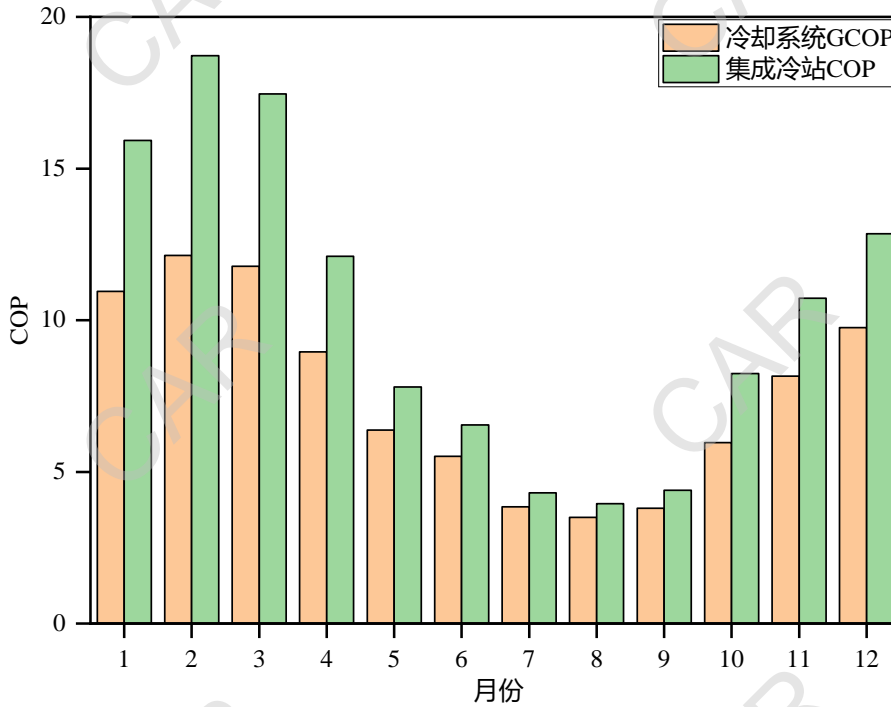


图 7-17 数据中心冷却系统 2018 年逐月性能系数

(4) 冷却系统全年性能分析

图 7-18 给出了该数据中心在 2018 年全年各部分能耗占比情况。在该数据中心年耗电中，IT 部分耗电量占比达 81.52%，冷却系统耗电量仅占 12.58%。

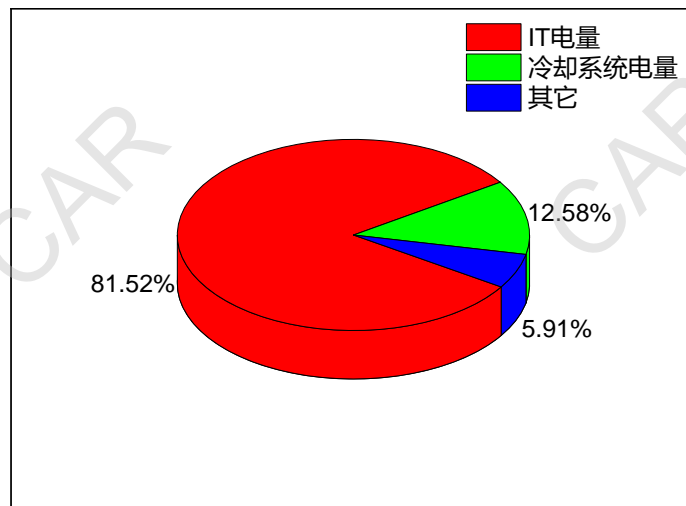


图 7-18 该数据中心 2018 年各部分耗电占比

对该数据中心机房在 2018 年 1 月 1 日至 2018 年 12 月 31 日期间数据进行分
析，去除部分时刻数据坏点，分别累加数据中心总耗电量及 IT 系统总耗电量并作
比，可以得到数据中心年能源效率（PUE）：

$$PUE = \frac{\sum_1^{12} E_{DC}}{\sum_1^{12} E_{IT}} = 1.23$$

通过数据中心全年耗电量、冷却系统总耗电量统计数据，计算冷却系统全年综
合性能系数（GCOP）：

$$GCOP = \frac{\sum_1^{12} (E_{DC} - E_{CS})}{\sum_1^{12} E_{CS}} = \frac{\sum_1^{12} (E_{DC} - E_{CS})}{\sum_1^{12} (E_{CT} + E_{CP} + E_{PP} + E_{AHU})} = 6.95$$

通过冷却系统 1 号及 2 号集成冷站总负荷及耗电量数据，计算集成冷站的全
年性能系数（ACOP）：

$$ACOP = \frac{\sum_1^{12} (E_{DC} - E_{CS})}{\sum_1^{12} (E_{CT} + E_{CP} + E_{PP})} = 8.77$$

通过环境湿球温度高于 19℃时刻的数据，计算磁悬浮压缩机在较高温度时刻
的年运行性能系数（ACOP）：

$$ACOP = \frac{\sum_1^{12} (E_{DC} - E_{CS})}{\sum_1^{12} E_{CP}} = 10.90$$

7.2.4 案例小结

腾讯上海青浦数据中心 103#扩容机房采用集成冷站和机柜级冷却方式（冷冻
水 22℃），其中集成冷站将高效磁悬浮离心冷水机组、冷却塔、冷却水泵、冷冻
水泵等进行集成匹配与工厂化预制及调试，可实现主机制冷与自然冷却两种运行
模式，具有省时、省地、省电、省钱等优点。

2018 年全年运行数据表明该机房 PUE 达到 1.23，冷却系统能耗仅占整个机房
能耗的 12.58%，冷却系统全年 GCOP 达到 6.95，集成冷站全年 ACOP 为 8.77，磁
悬浮冷水机组全年 ACOP 达到 10.90，在上海（夏热冬冷地区）表现出磁悬浮冷机
及集成冷站的优异性能。

7.2.5 专家意见

本案例介绍了水冷磁悬浮冷水机组（带自然冷却）在位于上海市青浦区的腾
讯数据中心的应用情况。冷却系统采用互为备份的两套集成高效冷站，单冷站额

定制冷量875kW。以外界环境湿球温度18~19℃为分界线，可实现水冷磁悬浮离心冷水机组机械制冷、自然冷却两种运行模式。全年运行数据表明，该机房PUE达到1.23，冷却系统能耗仅占整个机房能耗的12.58%，集成冷站全年ACOP为8.77，磁悬浮冷水机组全年ACOP达到10.90。

本案例的冷却系统表现出优异的节能性能，并具有集成化、标准化、模块化的突出优点，可为夏热冬冷地区数据中心制冷系统的设计与应用提供技术参考。

7.3 案例 2：风冷磁悬浮冷水机组(带自然冷却)在夏热冬冷地区应用

7.3.1 数据中心简介

本工程位于江苏省南京市南京电信长乐路机楼制冷改造工程(如图 7-19 所示)，独栋多层建筑，共 5 层，层高 4m。原有机房采用风冷型精密空调为机房提供冷源，室外冷凝器布置于设备平台。因设备陈旧、制冷效果差易导致高温报警、机房空调能耗高等原因，故对空调制冷系统进行改造。

本项目冷却系统如图 7-20 所示，共配置 5 台（4 用 1 备）风冷磁悬浮变频离心式冷水机组（带自然冷源）。并采用二次换热的方式，末端采用热管背板空调，避免水进入机房，同时采用佳力图 RDS 集控系统。

7.3.2 冷却系统概述

（1）冷源介绍：

本次改造使用的冷水主机为佳力图风冷磁悬浮变频离心式冷水机组（带自然冷源）MGAD900，采用进口原装的 TTS350 磁悬浮压缩机。

主机蒸发器采用了混合降膜式蒸发器并优化内部管路系统结构，减少水阻力，额定工况下，蒸发器水压降值为 50kPa。在降膜式蒸发器中，制冷剂在壳体顶部均匀分配，从管束上方喷淋，在换热管外表面形成液膜向下流动，吸收热量后蒸发为气体，从顶部的出口回到压缩机。冷冻水在管内流动，冷却到设定温度，供给空调末端。

冷凝器采用带内螺纹铜管亲水铝箔翅片结构，材质为紫铜管外加铝箔翅片，倒 M 型结构。采用高效内螺纹换热管，提高传热系数；设置独立过冷管路，采用大间距亲水波纹翅片，降低风阻，增强换热效果，长时间保证翅片清洁，方便清洗；倒 M 型设计，实现内外换热器风量均匀，减少下部风侧阻力，增大换热面积，提高换热能力。

佳力图 MGAD900 冷凝器风机采用变频风机，电机为变频电机，启动方式亦为变频启动。



图 7-19 南京电信长乐路数据中心

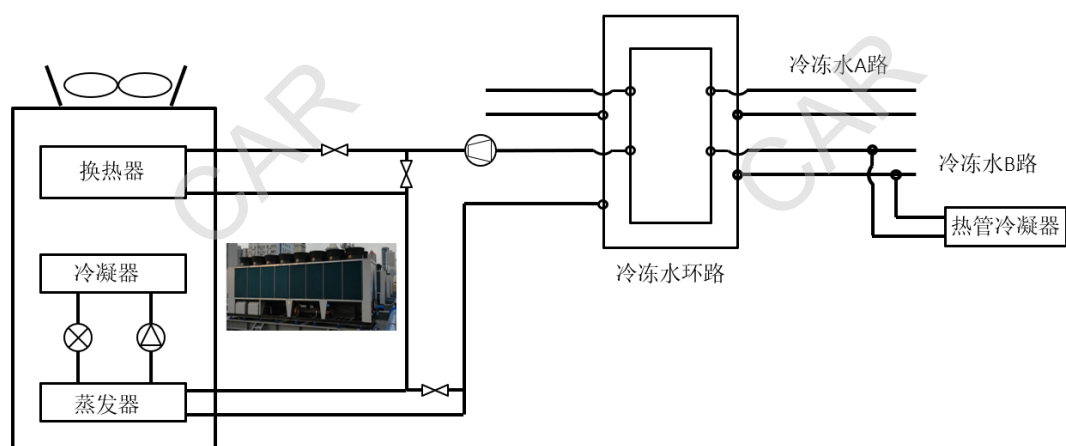


图 7-20 冷冻水系统原理

(2) 制冷末端介绍

本项目采用的制冷末端为冷冻水重力热管背板（如图 7-21 所示），实现了水不进机房。在壳管换热器内实现主机制取的冷冻水与通往室内的冷媒进行换热，由冷媒将冷量输送给末端热管背板。

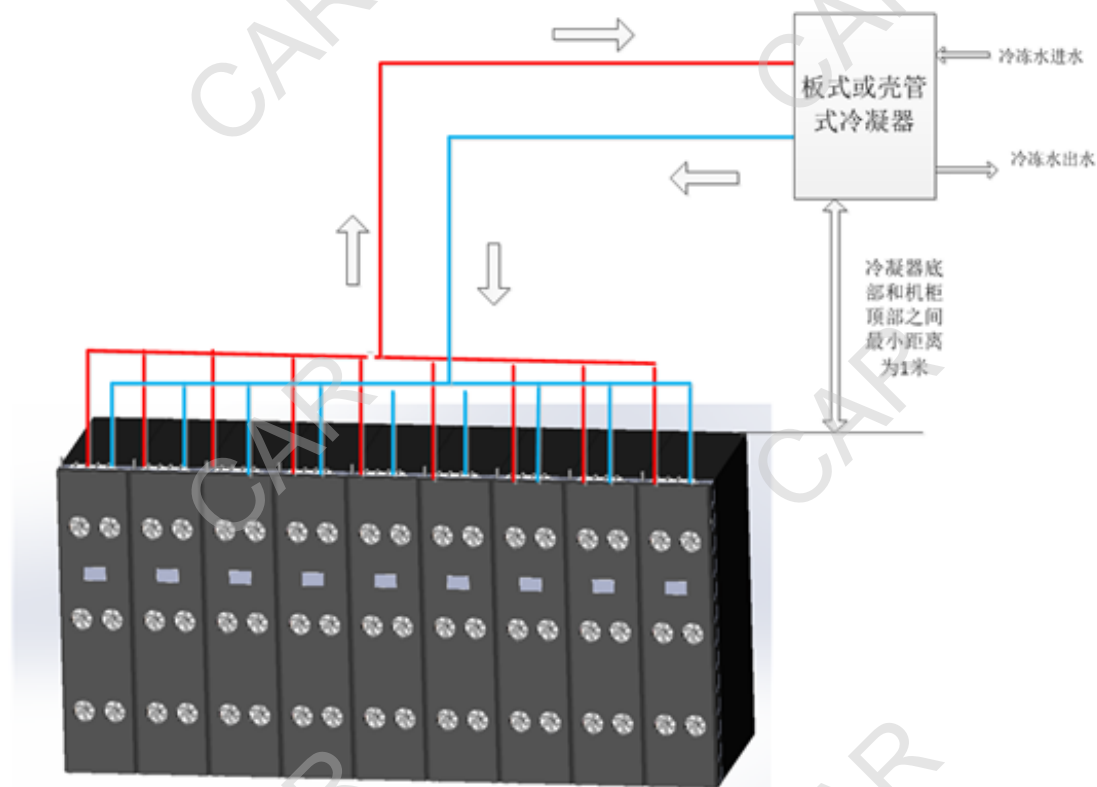


图 7-21 冷冻水重力热管背板

(3) 系统运行模式

根据室外环境温度和机房 IT 负荷率的不同，冷却系统可采用自然冷却、蒸气压缩以及复合制冷三种运行模式。

1) 复合制冷模式

如图 7-22 所示，在气温较低但温度不能低到可以完全利用自然冷源制冷时，采用部分自然冷却方式，冷冻水先流经自然冷源盘管，被空气预冷后再进入主机蒸发器，由磁悬浮压缩机制冷后输出供重力热管背板冷凝器使用的低温冷冻水。

此时系统根据机房回水温度与环境温度差值及持续时间来决定模式的切换，即当回水温度高于环境温度约 3℃ 时开启复合制冷模式。

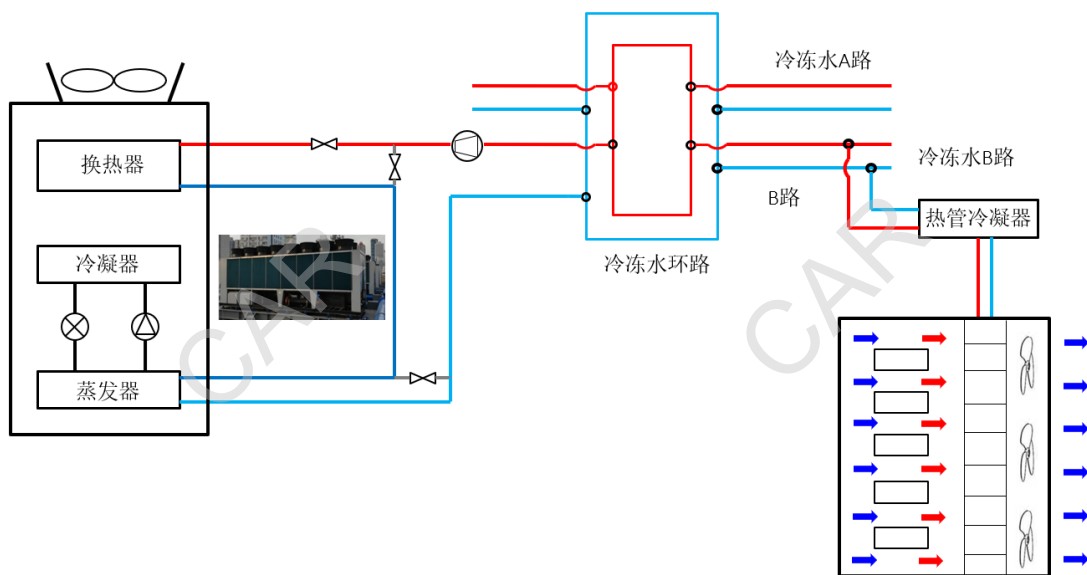


图 7-22 复合制冷模式示意图

2) 蒸气压缩制冷模式

如图 7-23 所示，当机房回水温度与室外温度之差小于设定值且持续一段时间，此时无法利用自然冷源对冷冻水进行冷却，需关闭冷冻水流经自然冷源盘管的阀门，使机房回水直接进入蒸发器，同时启动磁悬浮压缩机，进行蒸气压缩制冷。在制冷机组蒸发器中完成冷冻水循环的散热。

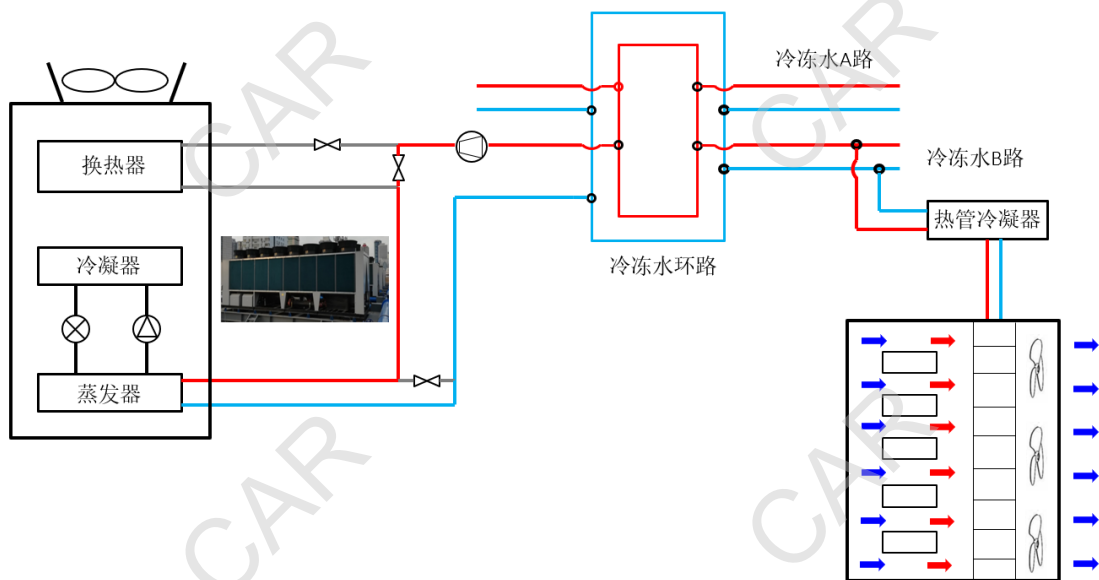


图 7-23 蒸气压缩模式示意图

3) 自然冷却模式

如图 7-24 所示，在室外气温足够低的情况下，仅依靠风冷自然冷源换热就可满足数据中心的制冷需求，此时即冷冻水回水温度与环境温度偏差超过一定值时，

压缩机停止工作，冷冻水回水历经自然冷源盘管换热后直接供给热管冷凝器使用。

冷却控制系统根据实际冷冻水回水温度与设定值差距的大小，调整室外风机的开度，以此来完成冷却及节能。

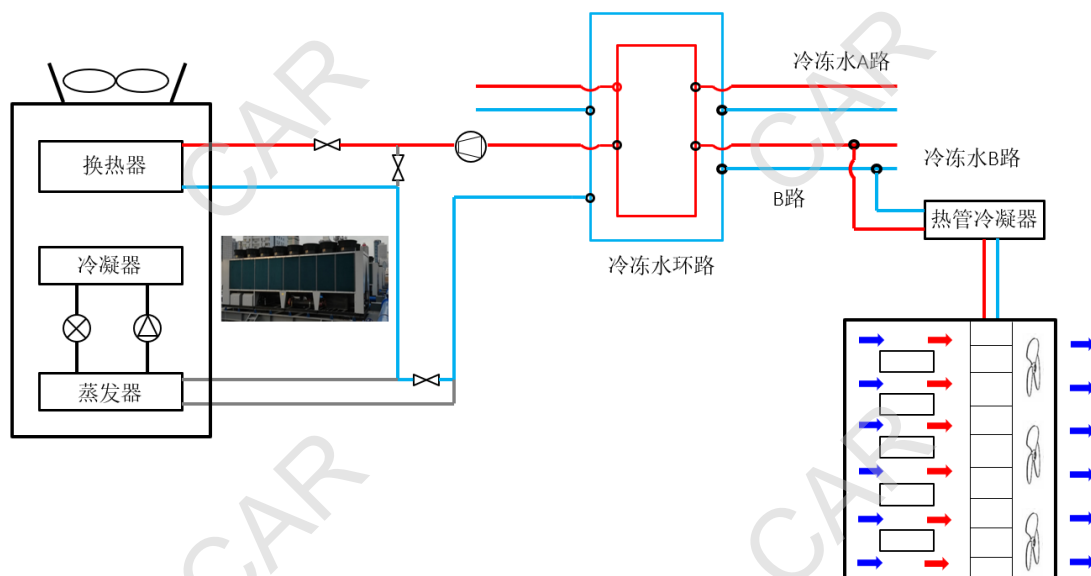


图 7-24 自然冷却模式示意图

(4) RDS 集控介绍:

佳力图 RDS 集控可实现温湿度解耦，进行温湿度信息收集、分析及预测，可对末端阀门进行控制，对主机水温及冷冻泵流量进行协作调控，达到高效节能目的。

7.3.3 运行数据分析

对该数据中心在 2019 年 11 月 26 日 0 点至 2020 年 11 月 25 日 24 点期间历史数据进行处理，其室外温度变化情况如图 7-26 所示，冷冻水供水温度变化情况如图 7-26 所示。由图可以看到，室外温度随着季节变迁而变化，在 5~10 月温度较高，数据中心全年冷冻水供水温度稳定在 14℃左右。

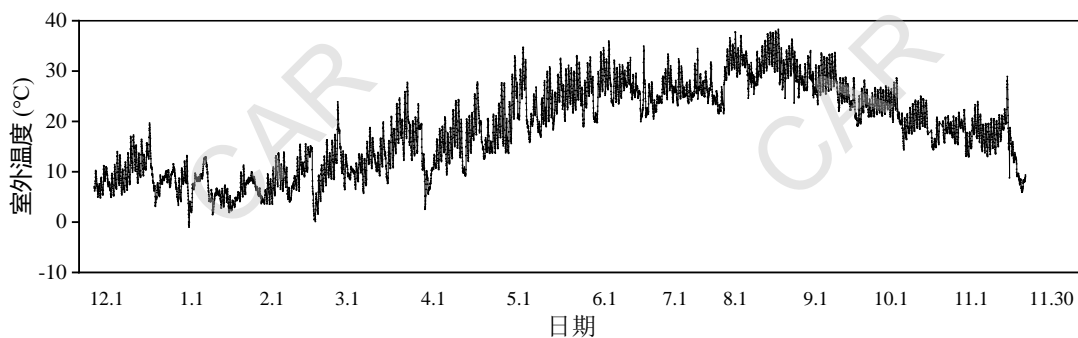


图 7-25 南京电信长乐路数据中心运行数据-室外温度

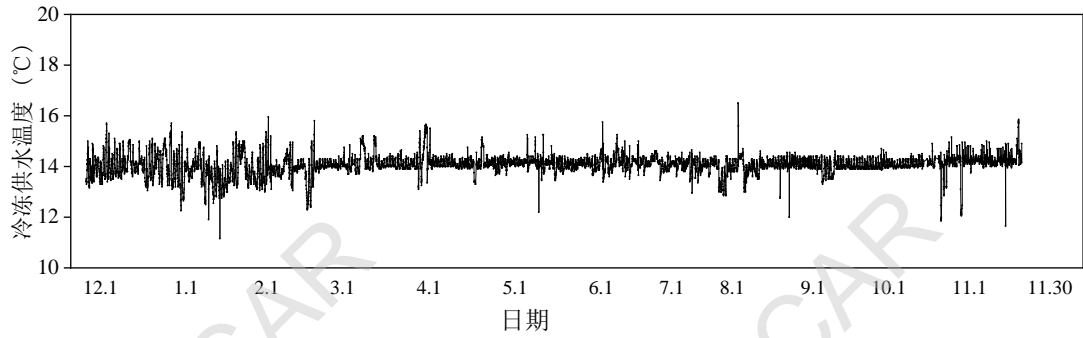


图 7-26 南京电信长乐路数据中心运行数据-冷冻水供水温度

(1) 逐时性能数据分析

图 7-27 给出了该数据中心机组性能与室外温度关系，可以看到随着室外温度的下降，冷机的性能数据和冷却系统的性能数据均会呈明显上升趋势。当外界温度大于 20°C 时，图像斜率变化幅度较低，冷机的性能系数略有下降但不显著，整体运行效果良好。

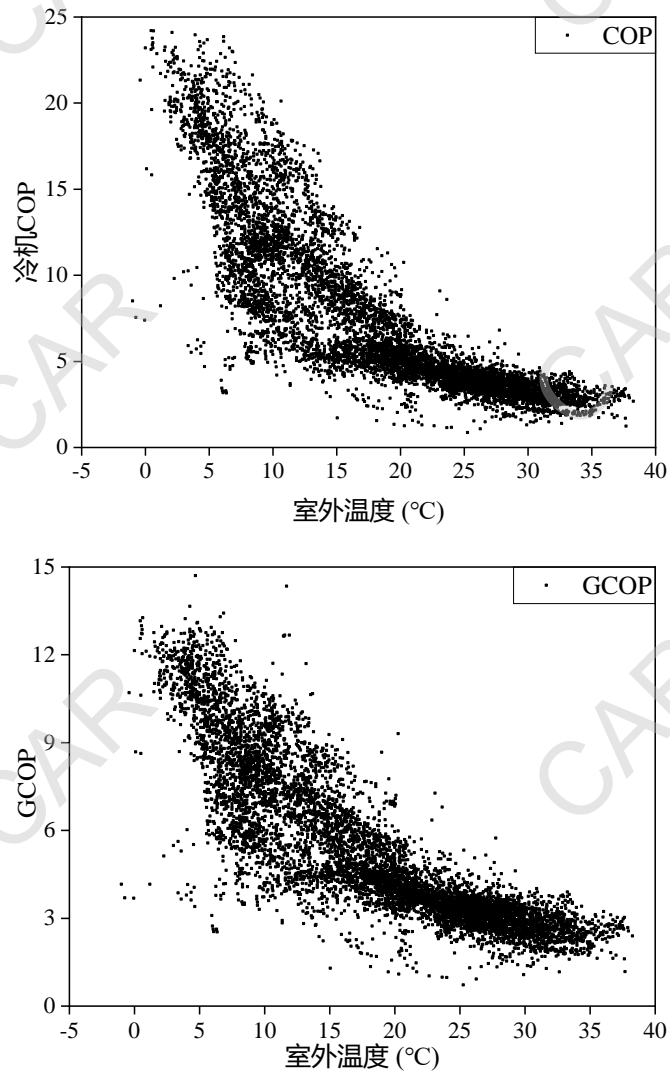


图 7-27 机组性能与室外温度关系

(2) 逐月性能分析

将 2019 年 11 月与 2020 年 11 月数据统计于一起，绘制冷却系统逐月性能图。由图 7-28 可以看到冷却系统月度平均性能，在室外温度较低的月份，冷却系统主要运行模式为自然冷却，冷机的性能系数和综合性能系数较高，平均 COP 可以达到 9.0~13.0，在温度较高的月份，冷却系统主要运行模式为主机制冷，此时磁悬浮压缩机工作，冷机的性能系数随室外温度变化有所波动，除个别月份外性能系数在 3.5 以上。

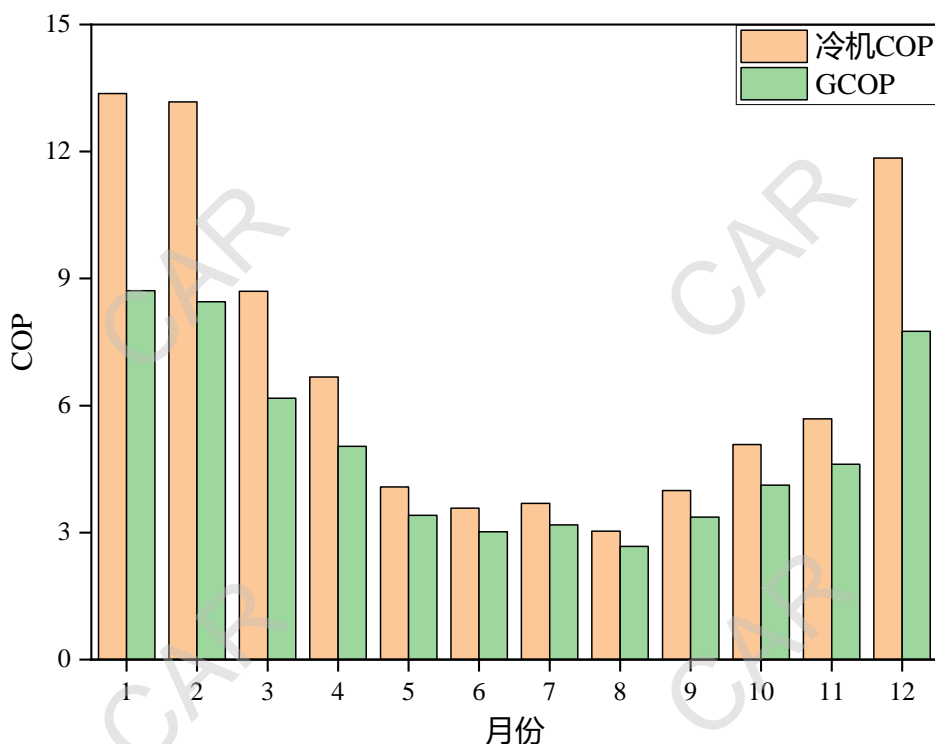


图 7-28 冷却系统月度平均性能

图 7-29 可以看到冷却系统各部分逐月占比情况，由于为风冷磁悬浮冷水机组，且末端采用重力热管背板，因此冷却系统主要耗能部件为冷机及冷冻水泵，从图中可以看到冷机的能耗始终占据冷却系统能耗的主要部分，室外温度较高时，磁悬浮制冷机组能耗占比较高。

(3) 冷却系统全年性能分析

根据统计数据可以计算制冷机组的全年性能系数（ACOP）及冷却系统综合性能系数（GCOP）：

$$ACOP = \frac{\sum_{1}^{12} Q}{\sum_{1}^{12} E_{CL}} = 5.52$$

$$GCOP = \frac{\sum_1^{12} Q}{\sum_1^{12} E_{CS}} = \frac{\sum_1^{12} Q}{\sum_1^{12} (E_{CL} + E_{PP})} = 4.41$$

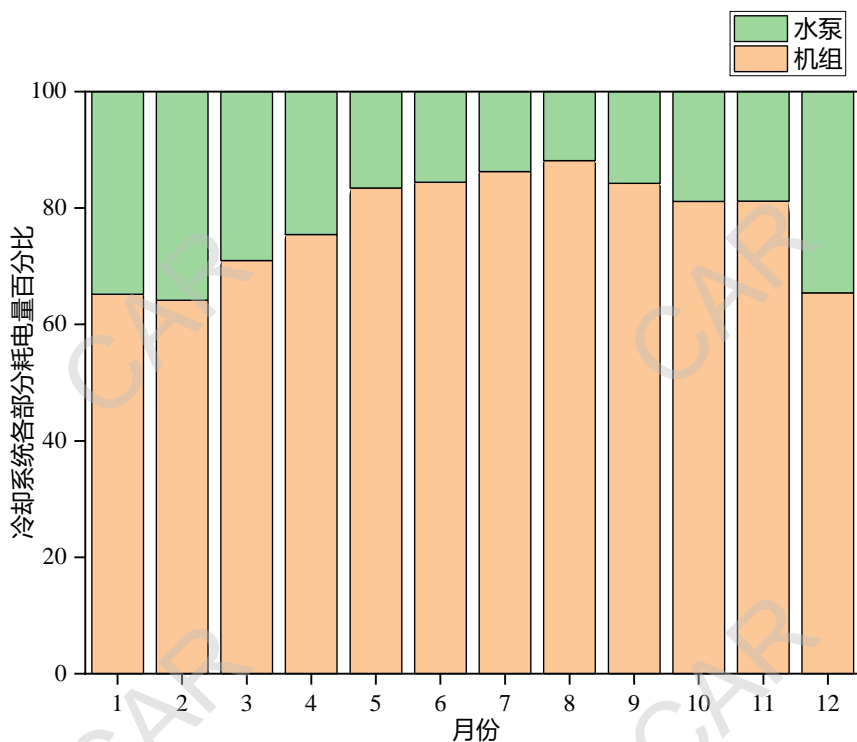


图 7-29 冷却系统各部分能耗逐月占比

7.3.4 案例小结

南京电信长乐路数据中心为改造工程，采用风冷磁悬浮变频离心式冷水机组（带自然冷源）和水冷重力热管背板，冷冻水供水温度为 14℃，系统共有自然冷却、主机制冷和复合制冷三种运行模式。

该数据中心位于南京市中心且无冷冻机房，周边居民对环境噪音比较敏感，因此，采用风冷磁悬浮变频离心冷水机组进行改造，充分发挥了磁悬浮机组噪音低、重量轻的优势。

基于 2019 年 12 月至 2020 年 11 月全年运行数据，冷机的全年性能系数 ACOP 为 5.52，冷却系统综合性能系数 GCOP 为 4.41，具有较高的运行效率和节能效果。

7.3.5 专家意见

南京电信长乐路的改造机房，独栋多层建筑，共 5 层，层高 4m。原有机房采用风冷型精密空调为机房提供冷源，室外冷凝器布置于设备平台。因设备陈旧、制冷效果差易导致高温报警、机房空调能耗高等原因，对空调制冷系统进行改造。

该项目共配置 5 台（4 用 1 备）风冷磁悬浮变频离心式冷水机组（带自然冷源）MGAD900。并采用二次换热的方式，末端采用重力热管背板空调，避免水进入机房。为了提高冷却系统的安全性，冷水侧的水管路采用环状管网。冷冻水供水温度为 14℃，系统共有自然冷却、主机制冷和复合制冷三种运行模式。

根据项目 2019 年 12 月至 2020 年 11 月全年实际运行数据，冷机的全年性能系数（ACOP）为 5.52 及冷却系统综合性能系数（GCOP）为 4.41。通过与传统方案对比，该改造工程具有较高的运行效率和节能效果。

项目优势：采用风冷磁悬浮变频离心冷水机组，无冷冻机房，由于该机房在市中心紧邻居民区，周边居民对环境噪音比较敏感，该方案充分发挥了磁悬浮机组噪音低、重量轻的优势。同时，风冷磁悬浮机组利用自然冷源效率更高（无油润滑，可以获得更长复合模式的运行时间，对比传统的螺杆机组为了保证回油安全、降低风机转速从而限制复合模式下自然冷源的冷量）。

建议：可以考虑使用更高效的末端产品，改善流量问题，降低冷却水泵的能耗占比。如果增加末端集控系统，进一步提升冷冻水温度，降低水泵功耗，可进一步提升该数据中心冷却系统的效率。

7.4 案例 3：水冷磁悬浮冷水机组在夏热冬暖地区应用

7.4.1 数据中心简介

睿江云（中山）数据中心（如图 7-30 所示）位于广东省中山市火炬开发区，数据中心用地面积 1.3 万平方米，是睿江投资 10 亿建设的 T4 级数据中心，符合 GB51047 中的 A 级标准，规划兴建两栋数据中心大楼，总面积约 4 万平方米，总规划可容纳机柜数量约为 4000 个，单机架功率 2.2kW，机房分期投入建设。一期一栋数据中心计 5 层，可容纳超过 2500 个标准机柜。土建配合严格按照数据中心标准进行，独栋机楼。



图 7-30 睿江云数据中心外景

7.4.2 冷却系统概述

(1) 冷水机组概述

项目冷源采用佳力图水冷磁悬浮冷水机组（如图 7-31 和 7-32 所示）为数据中心机房及配属办公楼和宿舍楼进行供冷，机组名义制冷量 450RT，冷冻水温度 7/12℃，冷却水 32/37℃。佳力图磁悬浮冷水机组采用多台压缩机并联设计，备份性能好，可靠性更高，并且更有利于负荷调节，实现冷量 10%~100%调节，避免喘振现象。

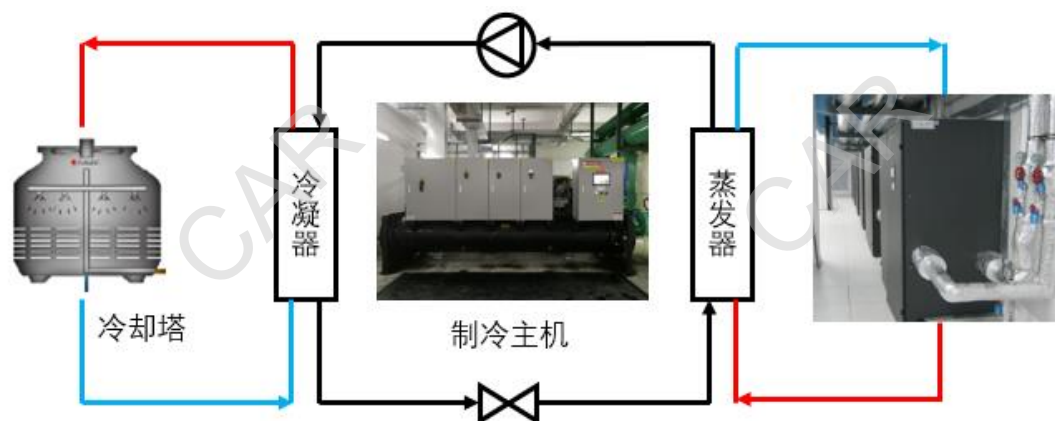


图 7-31 睿江云数据中心冷却系统



图 7-32 睿江云数据中心制冷机组

(2) 制冷末端介绍

如图 7-33 和图 7-34 所示，项目空调末端采用佳力图冷冻水型 120kW 房间级空调，配电房采用上送风形式，IDC 机房采用地板下送风，送风压力 40Pa。风机直接将气流直接沿水平直线送出，机房温度控制在 24~26℃。

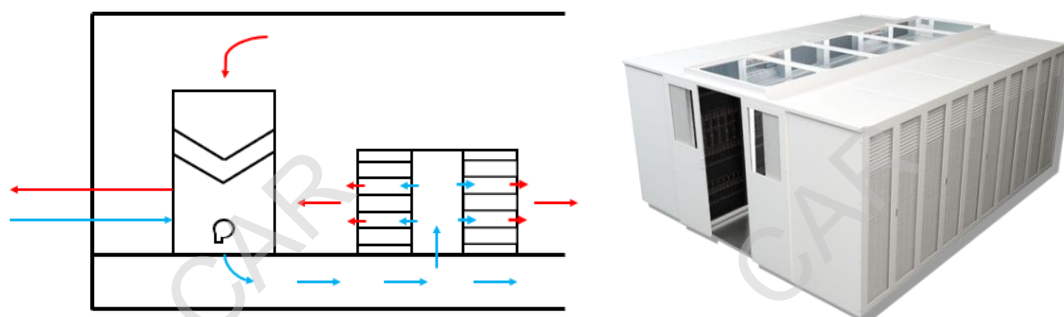


图 7-33 睿江云数据中心机房制冷末端



图 7-34 睿江云数据中心制冷末端精密空调

(3) 系统运行模式

该数据中心系统采用传统蒸气压缩制冷，冷却水在冷却塔中冷却后，回到制冷机组冷凝器中吸收制冷剂冷凝放出的热量。液态制冷剂进入蒸发器中蒸发，吸收冷冻回水热量，使冷冻水供水温度满足机房制冷需求。气态制冷剂最后回到磁悬浮压缩机中压缩，进行蒸气压缩制冷循环。

(4) 智能控制策略

冷水机组控制系统全程智能优化控制，可实现系统目标动态设定。通过工业标准协议与压缩机建立实时通讯，监控压缩机运行，具有优良的控制和保护性能；通过机组各项控制部件与运行状态，动态自我优化修正，使机组稳定工作在最佳状态，提高能效和可靠性。

7.4.3 运行数据分析

该数据中心在 2020 年 9 月 1 日至 2021 年 2 月 28 日期间，对机房内各能耗进行了测试记录，详细分析情况如下。

(1) 冷却系统逐月性能分析

数据中心主要耗能部件包括 IT 能耗（因电量仪原因，采用 UPS 前电量数据作为 IT 能耗）、制冷机组主机（一备一用）、制冷机组水泵、机房末端精密空调、配电房精密空调、电梯、照明等。将数据中心能耗划分为 IT 能耗、冷却系统能耗、其它部分能耗，可以根据统计数据绘制能耗分布。其中逐月数据中心能耗分布如图 7-35 所示，每个月数据中心中 IT 耗电量占比均超过 70%，冷却系统耗电量占比约为 25%，其它部分占比较小。冷却系统能耗分布如图 7-36 所示，由于该数据中心冷却系统为传统冷却系统，运行模式仅蒸气压缩制冷，主机全年均需不间断工作，因此占比超过冷却系统耗电量的 50%，冷却塔及水泵、末端消耗其余部分的能量。

由图 7-35 与图 7-36 各部分耗电量，可以计算数据中心逐月的 PUE（如图 7-37 所示）、冷却系统性能系数 COP（如图 7-38 所示）。从图中可以看到月份即室外环境温度对数据中心的性能系数具有明显的影响，室外温度较低的月份，PUE 较低，冷却系统性能系数较高。

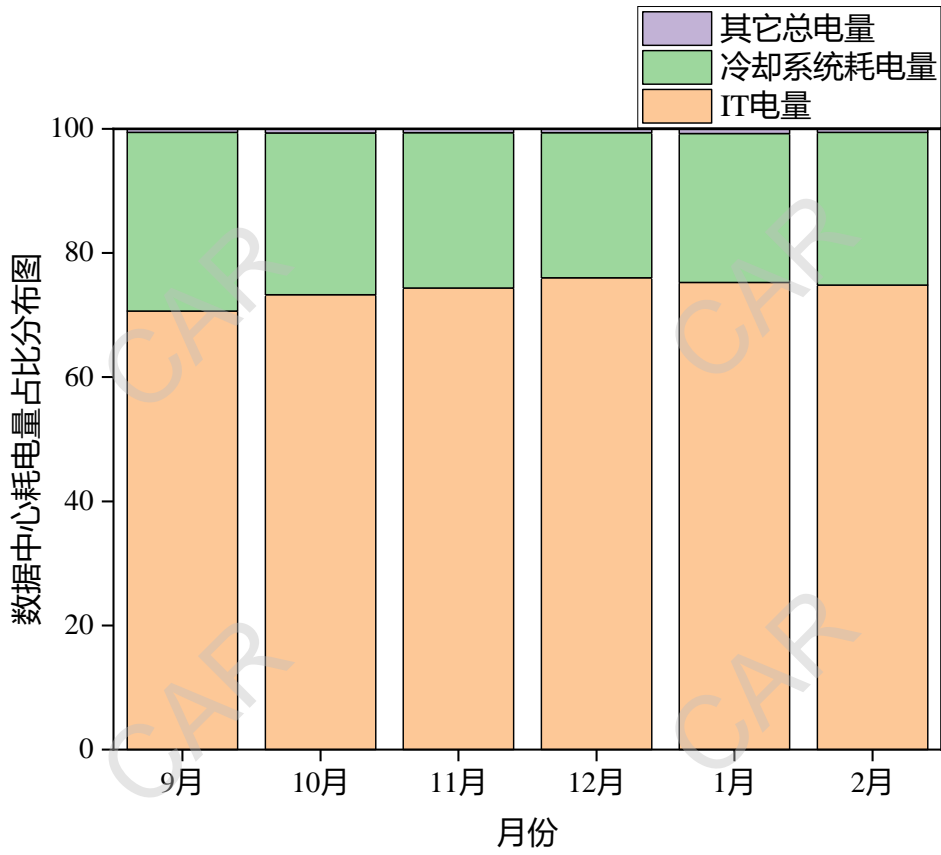


图 7-35 睿江云数据中心各部分逐月耗电量

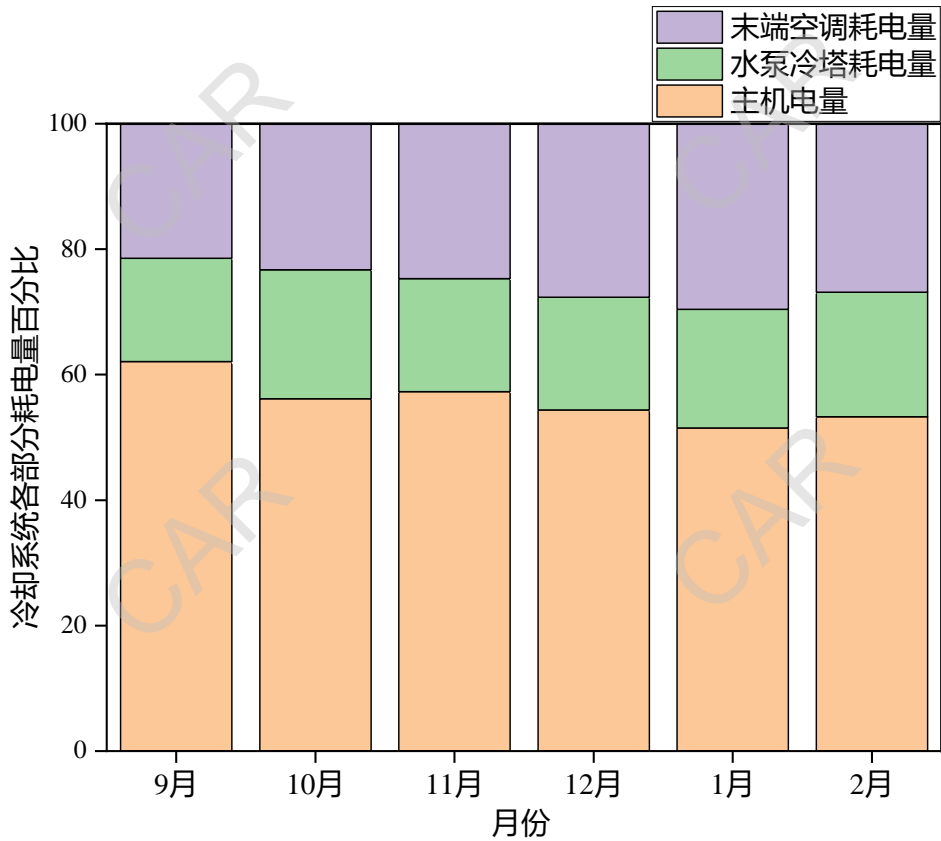


图 7-36 冷却系统各部分逐月耗电量

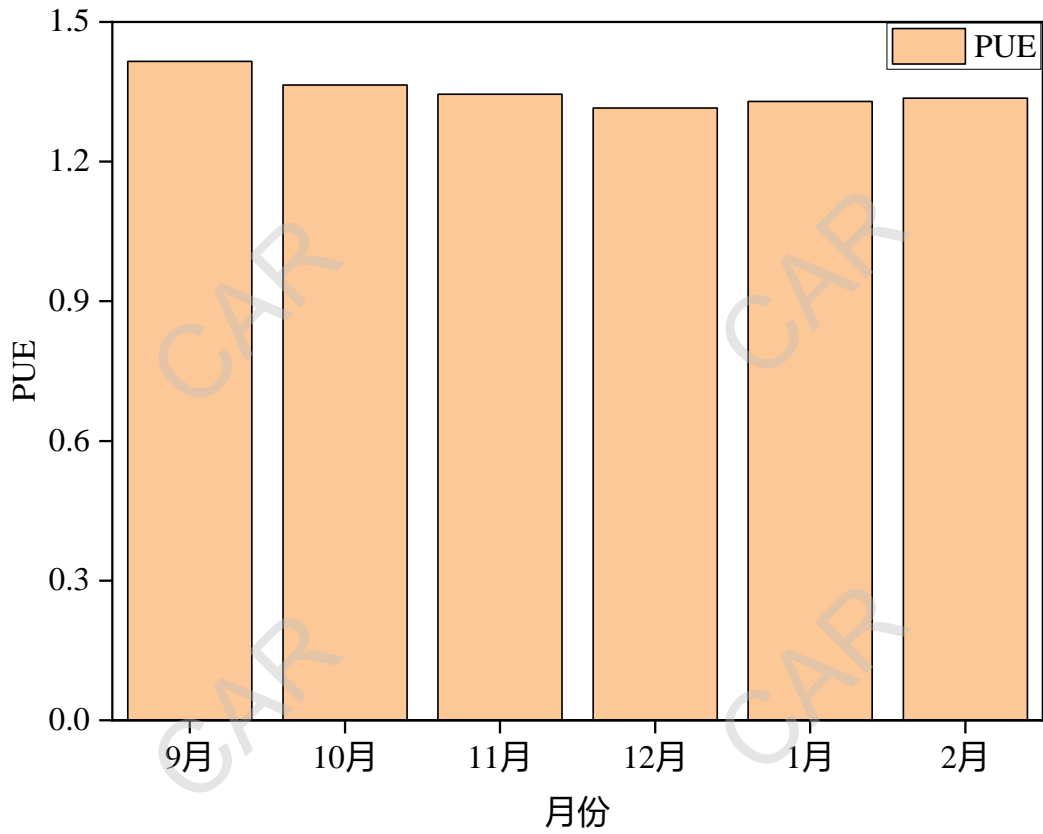


图 7-37 数据中心逐月 PUE 变化情况

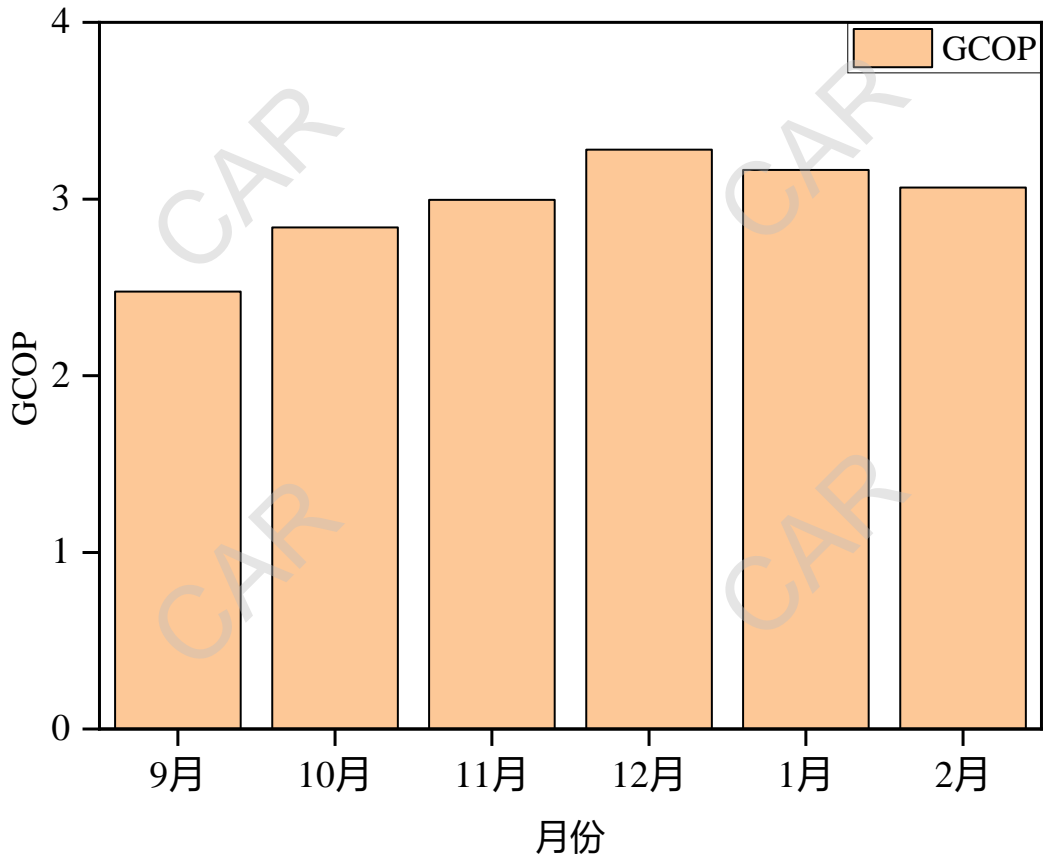


图 7-38 冷却系统逐月性能系数

(2) 2020 年 9 月至 2021 年 2 月运行性能分析

图 7-39 给出了该数据中心在 2019 年 9 月~2021 年 2 月各部分能耗占比情况。在该数据中心年耗电中，IT 设备及其他设备耗电量占比为 74.6%，系统耗电量占 25.4%。

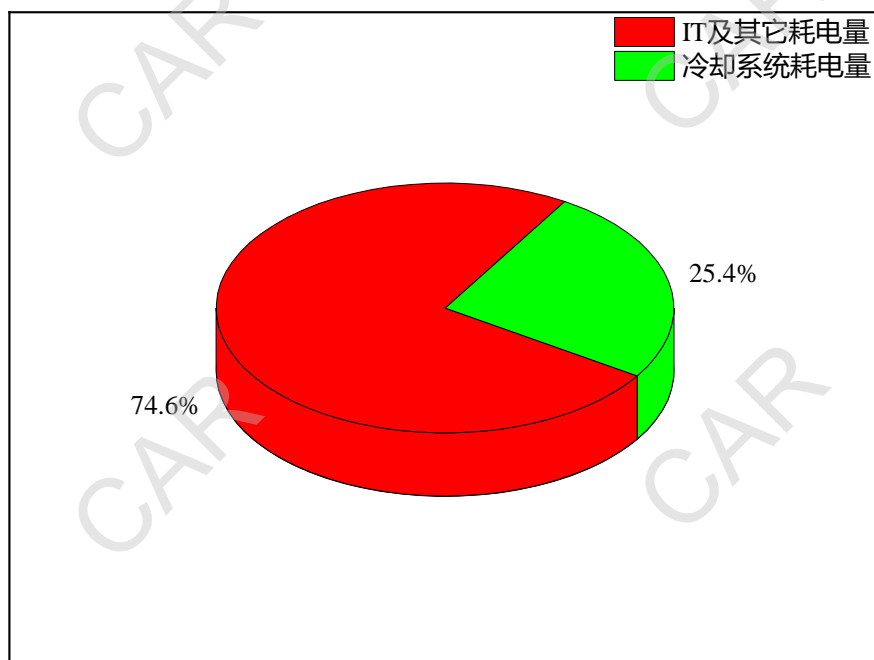


图 7-39 数据中心能耗分布示意图

根据统计数据可计算其 PUE:

$$PUE = \frac{\sum_9^2 E_{DC}}{\sum_9^2 E_{IT}} = 1.352$$

计算冷却系统综合性能系数 (GCOP) 如下:

$$GCOP = \frac{\sum_9^2 (E_{DC} - E_{CS})}{\sum_9^2 E_{CS}} = \frac{\sum_9^2 (E_{DC} - E_{CS})}{\sum_9^2 (E_{CT} + E_{CP} + E_{PP} + E_{AHU})} = 2.94$$

7.4.4 案例小结

睿江云(中山)数据中心位于广东省中山市火炬开发区,冷源采用佳力图水冷磁悬浮冷水机组,室内采用封闭冷通道加传统房间级水冷末端,自 2016 年开始运行以来,一直稳定高效运行。

基于该数据中心 2020 年 9 月~2021 年 2 月运行统计结果显示,冷却系统综合性能系数 GCOP 为 2.94,数据中心 PUE 为 1.352,在高温高湿地区表现出较高的运行效率。由于磁悬浮机组的高效和少维护特征,降低了用户的运行及维护成本。

7.4.5 专家意见

夏热冬暖地区数据中心，因其地理位置制约，数据中心冷却系统全年整体效率是大家共同关注的话题。睿江云（中山）数据中心建设时期较早，采用传统经典的集中水冷式空调系统，冷源采用磁悬浮离心冷水机组，在设计冷水供回水温度 7/12℃ 的条件下，经测试项目 2020 年 PUE 小于 1.4，获得业主满意的好评。

根据目前数据中心节能运行的共识，建议项目增加有限的投资，对水泵等采用定频的设备进行变频优化，冷水供回水运行温度由 7/12℃ 提高到 12/18℃，使空调冷却系统运行在更合理高效的条件下，提高现有空调冷却系统的能效，降低项目的 PUE。

7.5 案例 4：水冷磁悬浮冷水机组（带自然冷却）在寒冷地区应用

7.5.1 数据中心简介

中铁信大数据科技有限公司成立于 2017 年，隶属于中国铁路信息技术中心，主要负责中国铁路总公司主数据中心（如图 7-40 所示）工程建设及运行维护工作。铁路主数据中心坐落于天津市武清区高村科技创新园，承担铁路核心业务运营、信息资源服务、关键业务计算、数据存储和备份工作，肩负确保铁路业务安全稳定运行的重要使命，是铁路信息化的重要基础设施。2020 年 9 月 17 日，中国铁路主数据中心获得 CQC 数据中心场地基础设施 A 级认证。



图 7-40 中国铁路主数据中心

7.5.2 冷却系统概述

(1) 冷源介绍:

铁路主数据中心制冷系统设计 2N 独立双供、双回容错系统；采用磁悬浮变频离心式冷水机组，冷冻水供、回水温度设定 12/18℃。关键制冷设备主要集中于信息楼一层制冷机房；闭式蓄冷罐、生产水泵组、生产补水蓄水池等设备布置于信息楼地下一层；机房精密空调设置于四层 IT 模块间对应两侧空调间，高密机房辅助配置 2N 列间精密空调，冷却塔设置于信息楼屋顶。冷冻水泵、末端冷冻水型机房精密空调，冷冻水系统电动阀门均为“1 路 UPS+1 路市电”供电，保证系统连续可靠供冷；蓄冷罐 2N 配置对应总容量 312m³，满足制冷系统满负荷连续运行 15 分钟。冷却系统原理如图 7-41 所示。

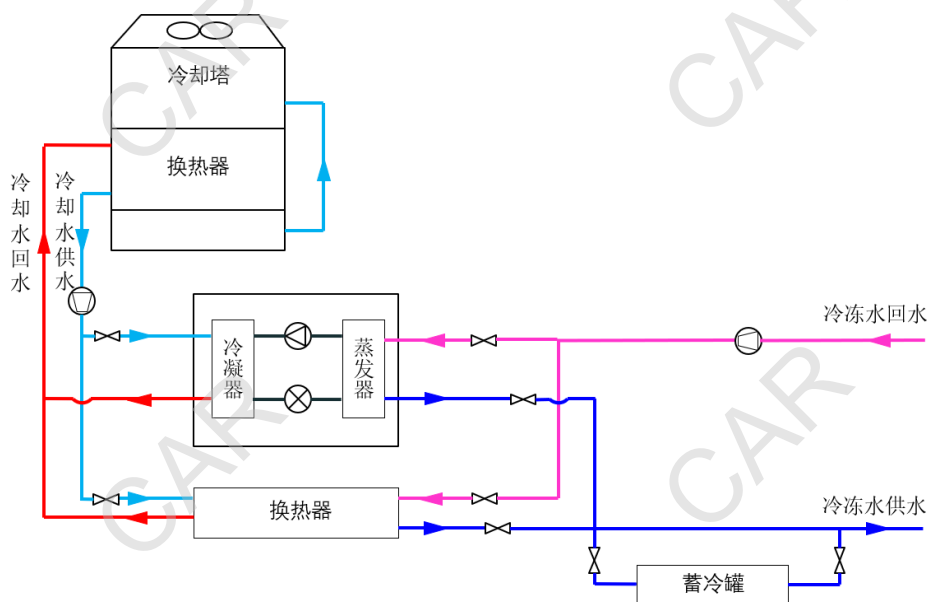


图 7-41 冷却系统原理图

(2) 系统运行模式

该数据中心冷却系统共有自然冷却和冷水机组制冷两种模式。

自然冷却模式（如图 7-42 所示）：当室外湿球温度足够低，冷却塔可以提供低于 10.5℃的冷却水时，冷水机组关闭，冷却水、冷冻水于板式换热器内进行热交换，直接提供 12℃的冷冻水，系统进入自然冷却制冷模式。

冷水机组制冷模式（如图 7-43 所示）：随着室外湿球温度逐步升高，利用板式换热器无法提供 12℃冷冻水时，自然冷却模式退出，冷水机组开启，系统进入冷水机组制冷模式。冷冻水回水进入冷水机组蒸发器内，将热量传递为制冷剂相变潜热，从而制得满足机房运行需求的冷冻水供水，制冷剂被磁悬浮压缩机压缩做功

为高温、高压气体后进入冷水机组冷凝器，冷却水供水进入冷水机组冷凝器内，吸收制冷剂液化放出的热量，返回冷却塔与外界环境进行热交换，液化后的制冷剂再次流入磁悬浮压缩机内，通过吸收冷冻水回水热量进行相变。

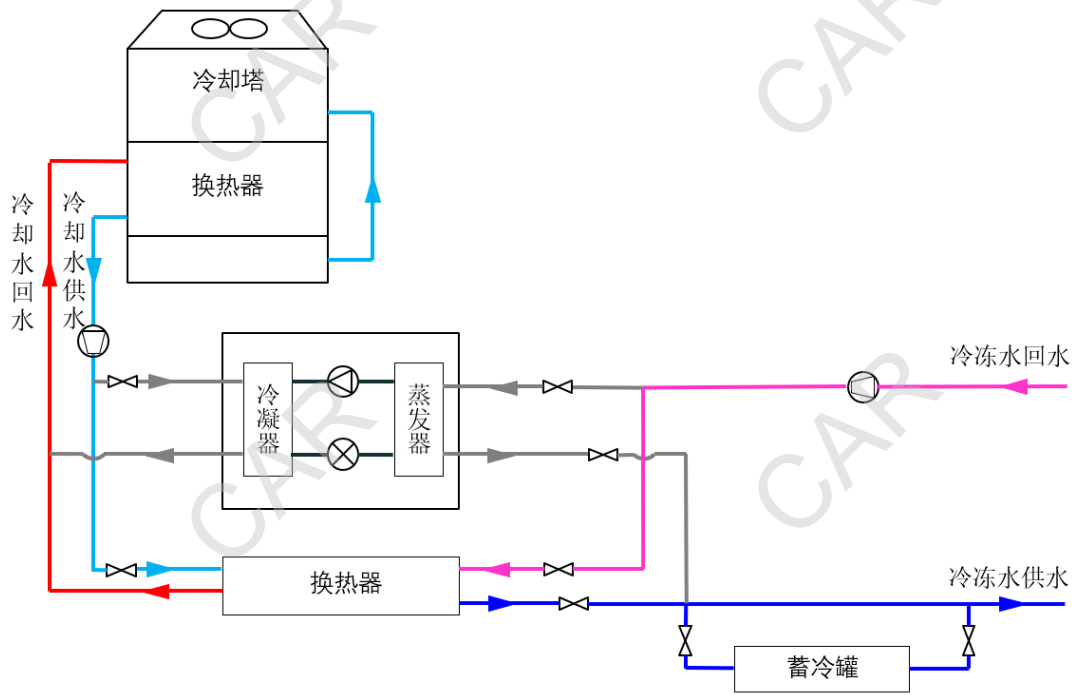


图 7-42 自然冷却模式

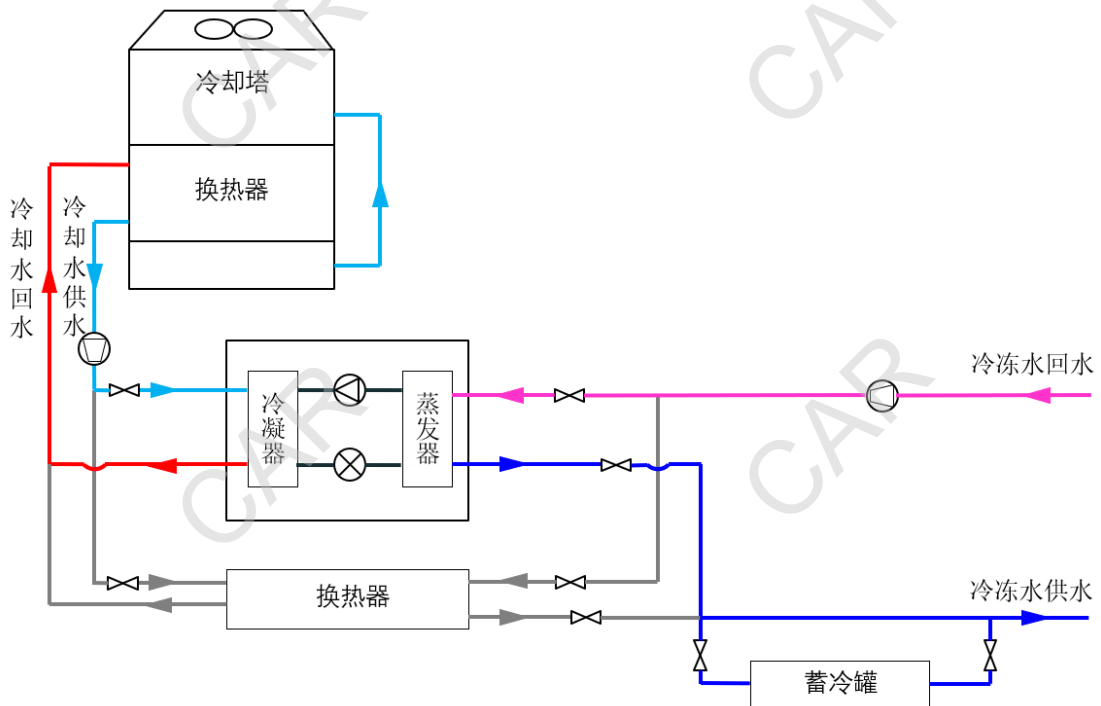


图 7-43 蒸汽压缩制冷模式

7.5.3 运行数据分析

(1) 历史运行数据

对该数据中心在 2020 年 5 月 10 日 0 点至 2020 年 05 月 31 日 23 点期间历史数据进行分析，冷却水供水温度、冷冻水供水温度和室内空调末端回风温度分别如图 7-44、图 7-45 和图 7-46 所示。从图中可以看出，在数据记录的这段时间内，冷却水供水温度保持在 31~32℃左右，冷冻水温度保持在 12℃左右，而室内末端空气回风温度保持在 27~28℃左右，各个温度的波动都很小。

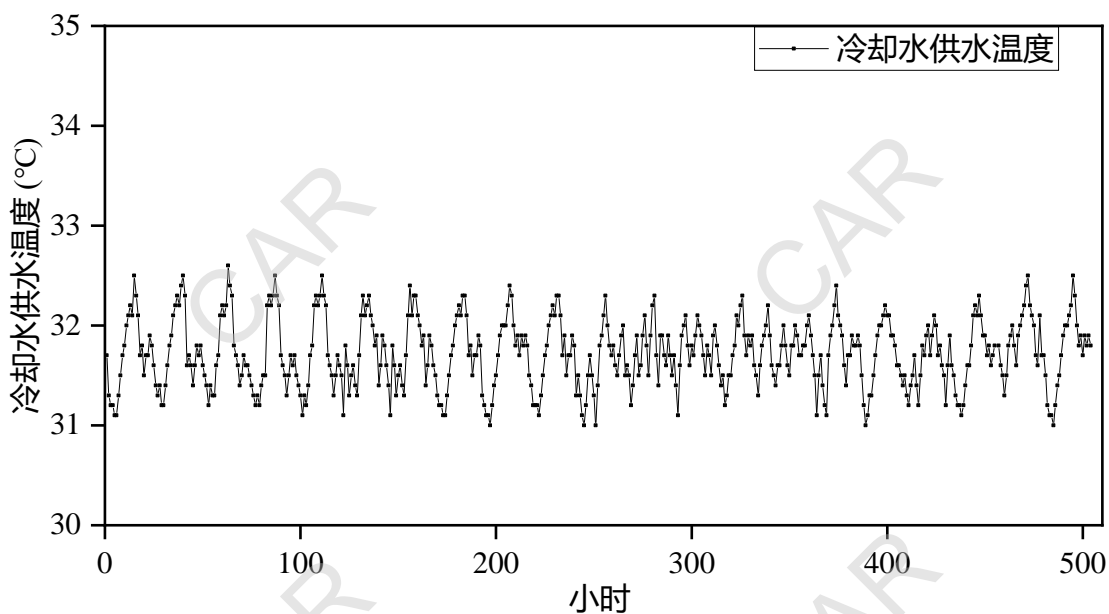


图 7-44 冷却水供水温度

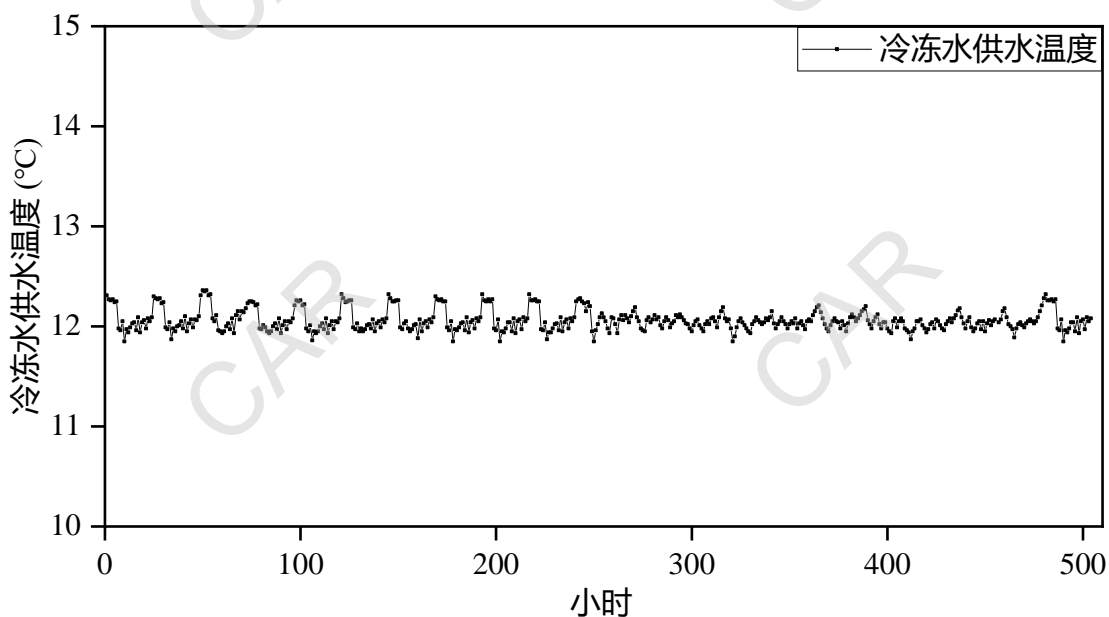


图 7-45 冷冻水供水温度

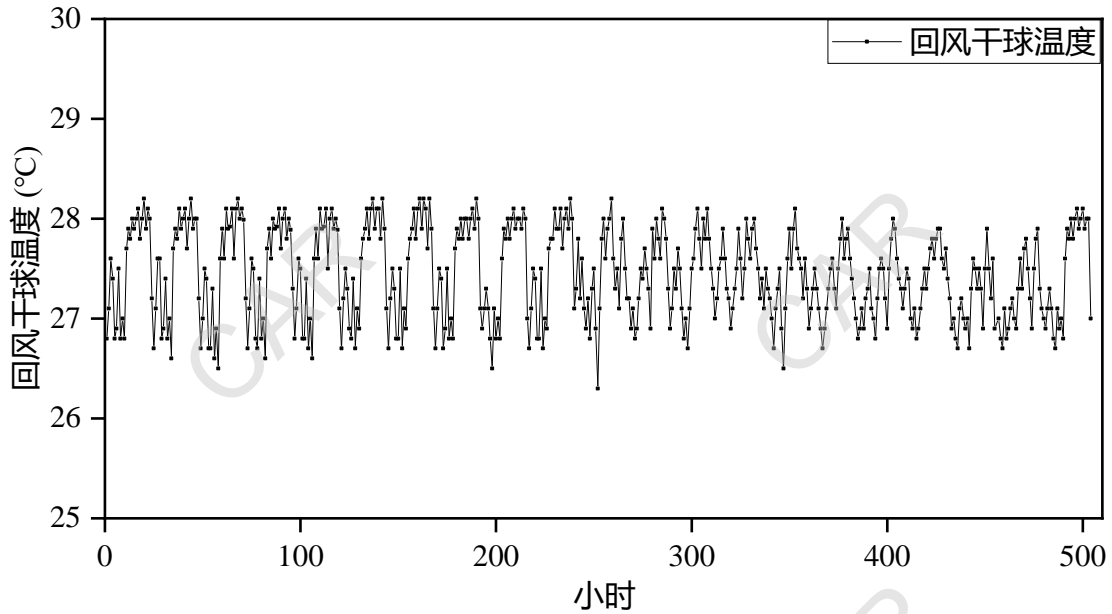


图 7-46 室内回风温度

(2) 数据中心冷却系统运行性能分析

对该数据中心 2020 年 5 月中下旬运行数据进行分析，IT 能耗、冷却系统能耗占比如图 7-47 所示。从图 7-47 中可以看到 IT 能耗占数据中心总能耗的 45.6%，冷却系统能耗占比为 37.2%，其它部分能耗占比 17.17%。主要是由于该数据中心配电及冷却系统全部采用 2N 设计以保证数据中心的高可靠性，且运行初期负载率较低，因此配电系统及冷却系统能耗占比较高。

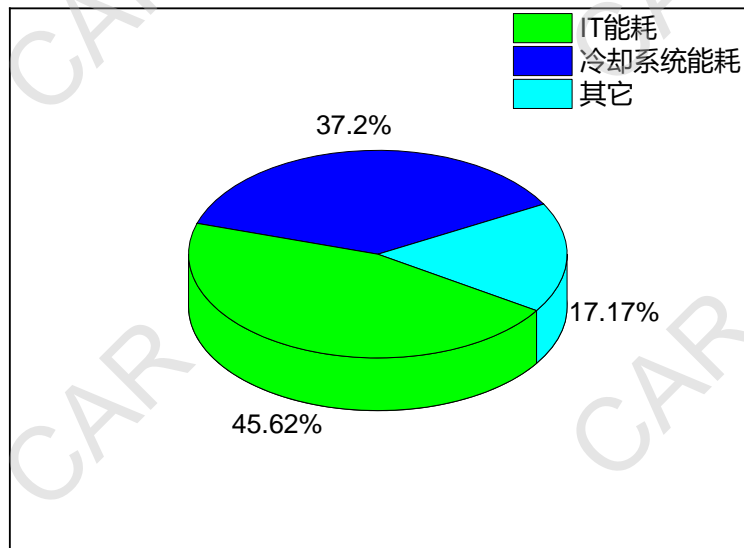


图 7-47 数据中心 5 月中下旬能耗分布图

2020 年 5 月中下旬，冷却系统全部运行于主机制冷模式，冷却系统各个组成部分的能耗占比如图 7-48 所示。其中，冷机的耗电仅占冷却系统总耗电的 27.75%；

冷却系统中能耗最大的部分为末端，其占比为 32.98%；冷却水泵和冷冻水泵能耗占比分别为 16.89%和 17.77%；冷却塔占比最小，为 4.61%。由于天津处于寒冷地区，全年可利用自然冷却时间较长，冷却系统运行效率可进一步提高。鉴于该数据中心在冷机制冷模式下，室内末端和水泵能耗占比都较高，可进一步优化冷冻水侧（室内末端与冷冻水泵）和冷却水侧（冷却水泵与冷却塔）的运行工况，降低室内末端和水泵的运行能耗，以提升冷却系统和整个数据中心的运行能效。

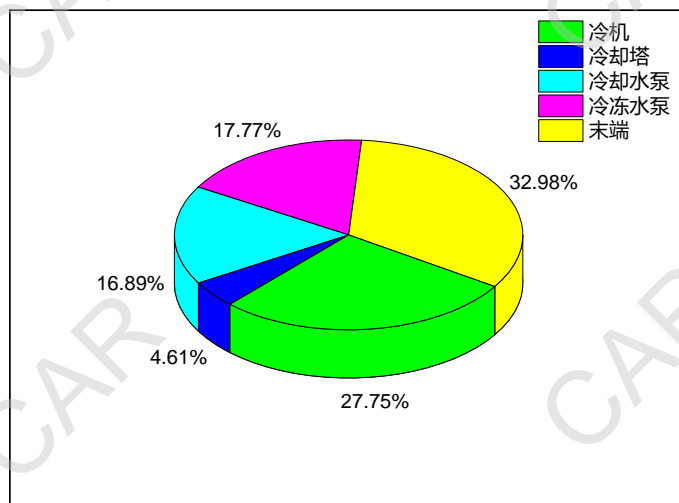


图 7-48 冷却系统 5 月中下旬能耗分布图

7.5.4 案例小结

中国铁路主数据中心坐落于天津市武清区，肩负确保铁路业务安全稳定运行的重要使命，是铁路信息化的重要基础设施，获得 CQC 数据中心场地基础设施 A 级认证。

铁路主数据中心冷却系统设计 2N 独立双供、双回容错系统；采用磁悬浮变频离心式冷水机组，室内采用 2N 房间精密空调两侧地板送风（低密度机房）和 2N 房间精密空调两侧地板送风+2N 列间精密空调侧送风（高密度机房）。

采用磁悬浮冷水主机，高水温（12℃）运行，可以达到较高的 COP，在冷机制冷模式下冷机能耗仅占冷却系统总能耗的 27.75%。自开机运行以来，一直稳定运行，满足了高可靠性数据中心安全运行的要求。在天津等寒冷地区有较长时间的自然冷却利用条件，冷却系统全年可以达到更高运行效率。

7.5.5 专家意见

该案例的数据中心冷却系统采用 2N 容错架构，可靠性高。上文中的数据主要来自项目运行初期，机房负荷率较低，整个冷却系统处于低负载运行状态，出现了

空调末端、循环水泵能耗较高、以及热备电源设备能耗高的情况，这也是很多大型、超大型数据中心在系统架构及初期运行时面临的挑战，整体系统的低负荷运行控制策略有待提升。但从数据上看，该项目中采用的水冷磁悬浮变频离心式冷水机组，在低负载情况下，也发挥了磁悬浮机组的部分负荷效率优异、磁悬浮低压比、变工况适应性强的特点。该案例地处寒冷地区，且有自然冷却架构，在保证系统可靠性的前提下，通过优化冷却系统的节能运行，可达到更佳的运行效率。

7.6 案例 5：水冷磁悬浮冷水机组（无自然冷却）在寒冷地区应用

7.6.1 数据中心简介

北京中科云数据中心位于北京中关村（如图 7-49 和图 7-50 所示），数据中心整体占地面积为 5000m²，机房可用面积为 1000m²，共设有两个机房，同时配有 UPS 室、配电室、监控室以及会议室等；机房地板采用架空方式的抗静电地板，全钢结构支撑，地板铺设高度为 50cm，地板下铺设电源管线，线槽以及一些电气设施。

数据中心共有机架 315 个，单机架功率为 7-15kW，通过两路高压供电（总容量 3200kVA）+UPS+直流系统+油机供电系统 2N 供电方案对数据中心进行供电，如图 7-51 所示。



图 7-49 北京中科云计算中心

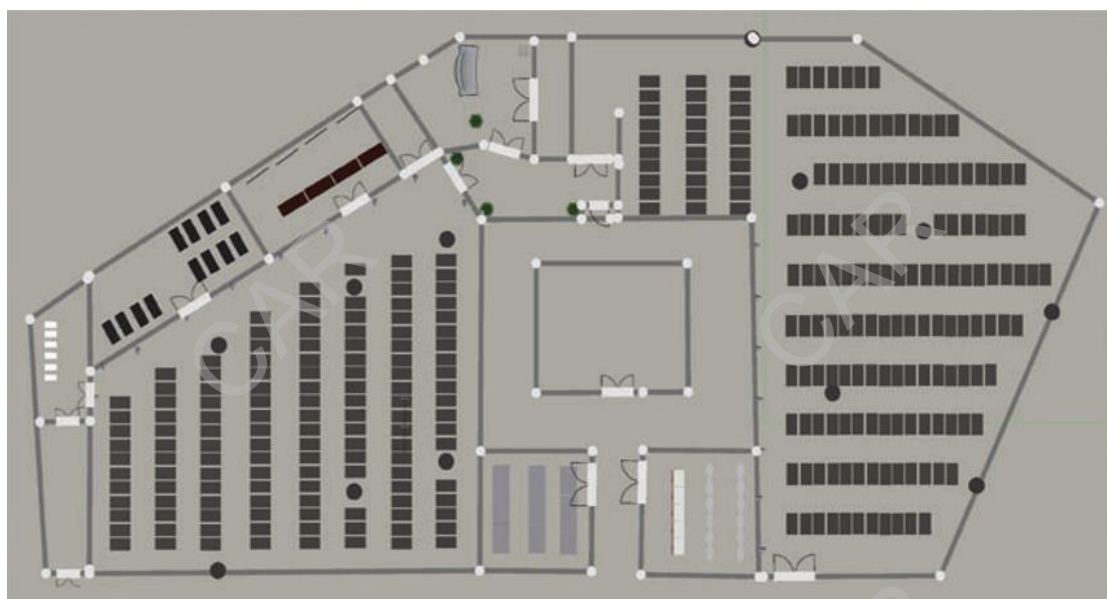


图 7-50 中科云数据中心园区平面图

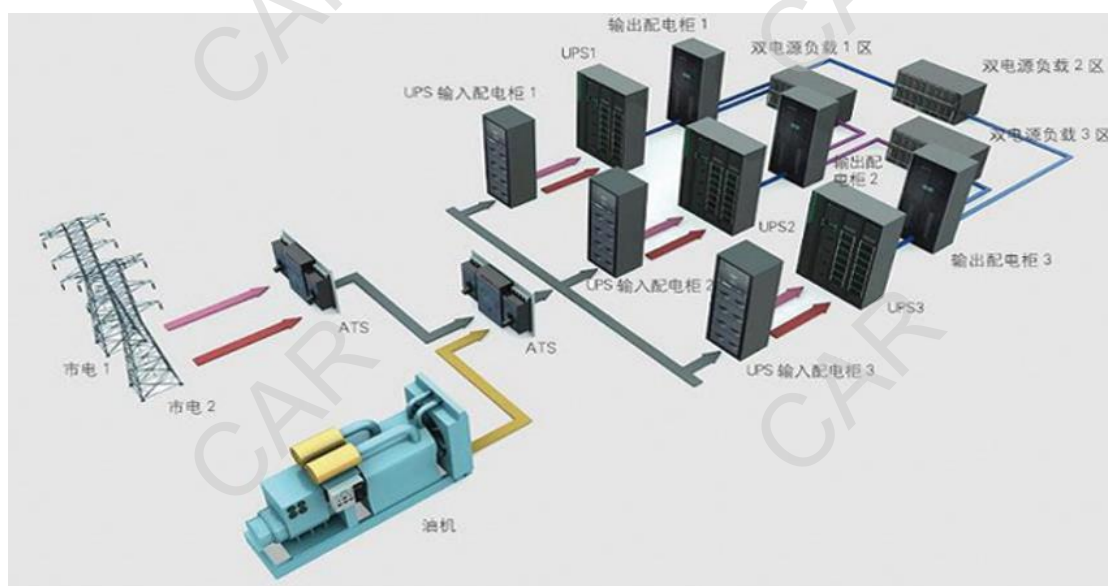


图 7-51 中科云数据中心配电系统

该数据中心位于中关村核心地区（如图 7-52 所示），无专用制冷机房，且周围有比较密集的办公、学校和住宅区。2014 年以前，使用水冷螺杆机进行制冷，噪音太大，投诉很多，改用无油磁悬浮离心冷水机组后，噪声大大降低。



图 7-52 中科云数据中心室外环境

7.6.2 冷却系统概述

(1) 冷源介绍

北京中科云计算中心项目制冷系统如图 7-53 所示。

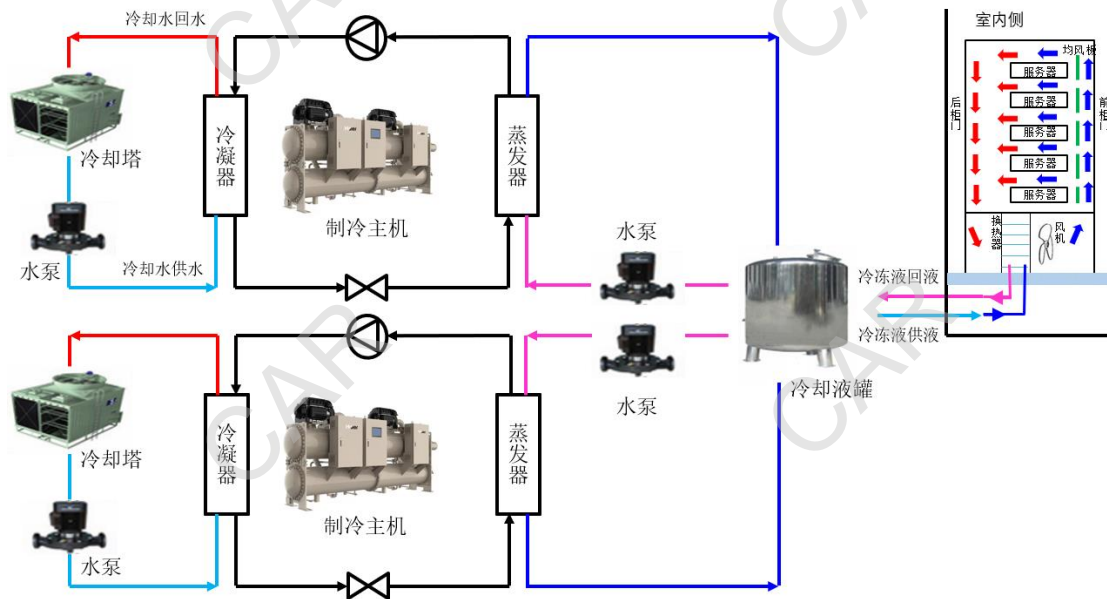


图 7-53 中科云数据中心冷却系统

该冷却系统采用 2N 构架, 选用 2 台海尔 LSBLX300/R4(BP)磁悬浮空调主机,

采用环保冷媒 R134a，机组名义工况制冷量 1100kW。每台机组设置了两台磁悬浮压缩机，两台压缩机各自为独立制冷回路，可实现制冷能力 2~100%无级调节。机组启动电流 2A，实现对电网的无冲击。冷冻液（为避免水进机房，采用自制油为冷冻液）回路采用地下环形管路设计。

(2) 制冷末端介绍

机房采用国家发明专利的密闭式机柜空调方式，机柜热回风经过底部热交换器冷却后，从前门后侧的均风板流向服务器，均风板可以帮助将冷风更均匀地分配到每台服务器，冷风吸收服务器散热后，热风沿着机柜后门回到底部热交换器，通过柜内小循环达到最佳散热方式，同时侧面使用保温层防止热量散失，可比传统机房单机柜多承载一倍的服务器，单柜最大制冷量可达 15kW。



图 7-54 机柜照片

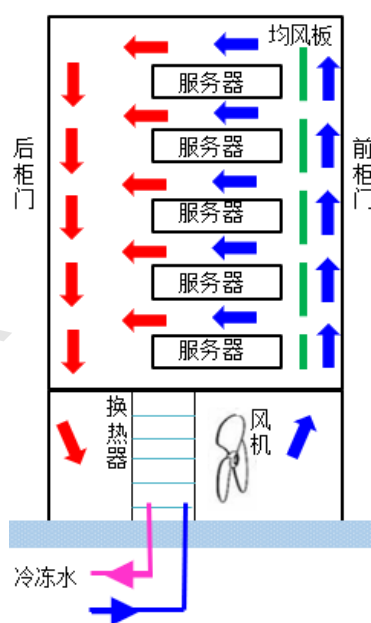


图 7-55 机柜级服务器冷却示意图

7.6.3 运行数据分析

对该数据中心在 2018 年 7 月 1 日 0 点至 2018 年 11 月 30 日 23 点期间历史数据进行分析，运行数据记录如图 7-56，该数据中心采用冷冻液 9℃ 供冷，全年采用冷机制冷（无自然冷却运行），在冬季室外低温工况时，降低冷却塔风机台数和频率运行。详细情况如下。

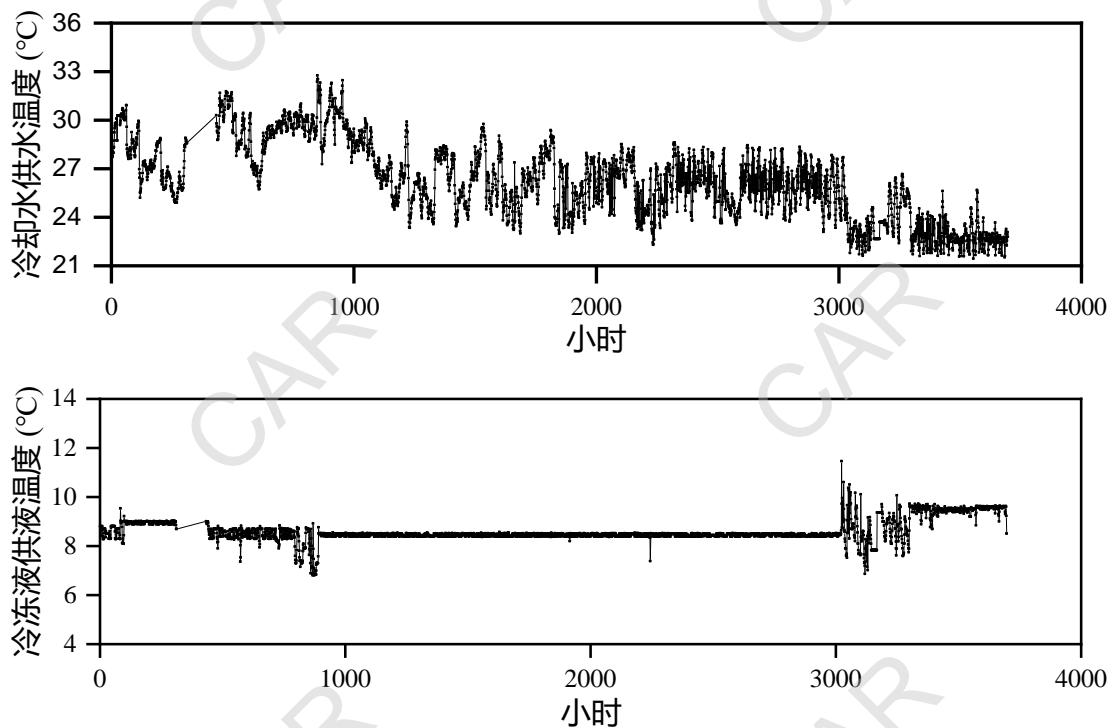


图 7-56 中科云数据中心运行数据

(1) 冷水机组逐时性能分析

图 7-57 给出了该磁悬浮离心冷水机组不同冷却水进水温度下的逐时运行性能。从中可以看出，随着进水温度的降低，冷水机组的 COP 逐渐上升，在 32℃ 左右的冷却水进水温度下，冷水机组的 COP 可以达到 8.0 左右，而在 22℃ 的冷却水进水温度下，其 COP 可以达到 20.0 以上。上述结果都表明在低环境温度（冷却水进水温度）和低负荷率下，磁悬浮离心冷水机组可以获得很高的运行效率。

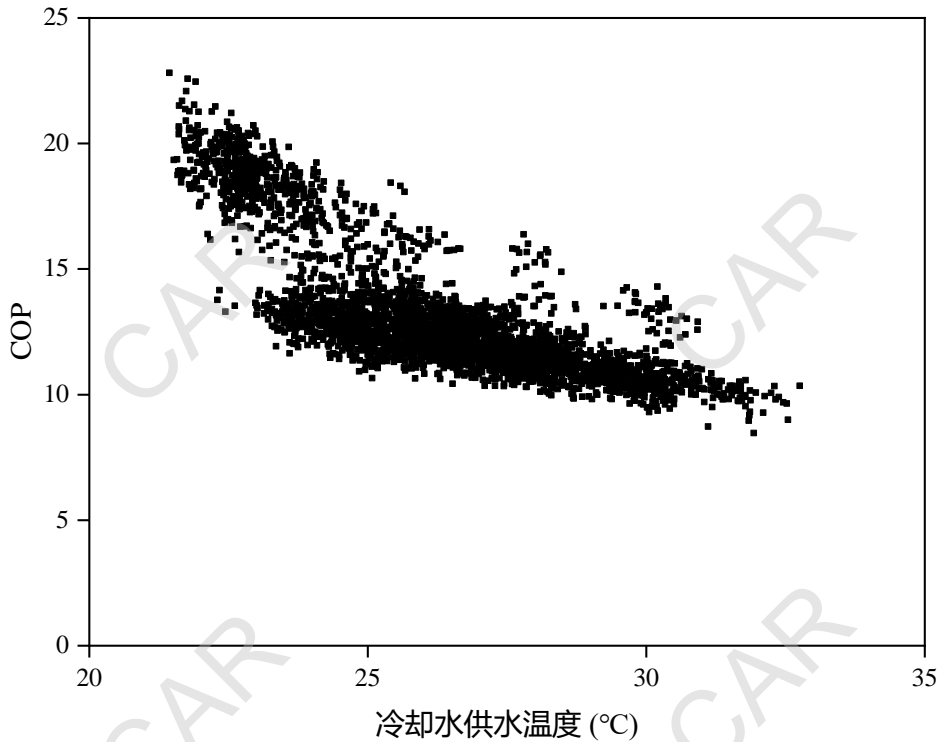


图 7-57 冷却水供水温度与主机性能关系

(2) 月度运行数据分析

对 2018 年 7~11 月运行数据进行累加计算，可以得到逐月制冷量及耗电量（如图 7-58 所示），以及相应的主机性能数据（如图 7-59 所示）。可以看到，即使在北京最热的 7~8 月份，磁悬浮冷水机组的运行 COP 也都在 10.0 以上，随着室外平均温度的降低，冷水机组的 COP 不断提高，在 11 月机组性能数据达到 18.0 左右。

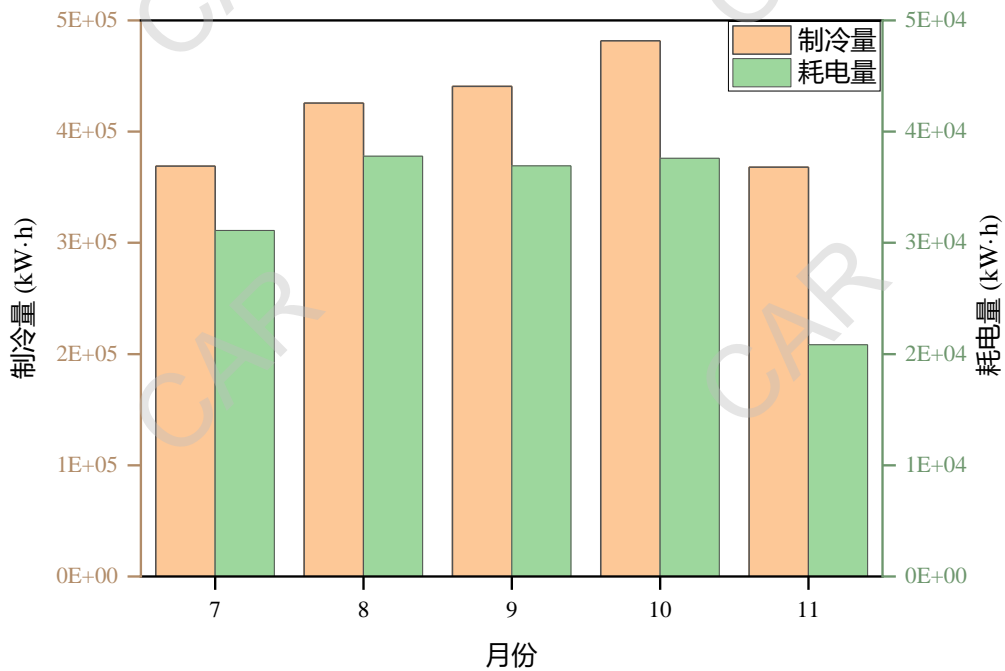


图 7-58 冷却系统冷量及耗电量数据

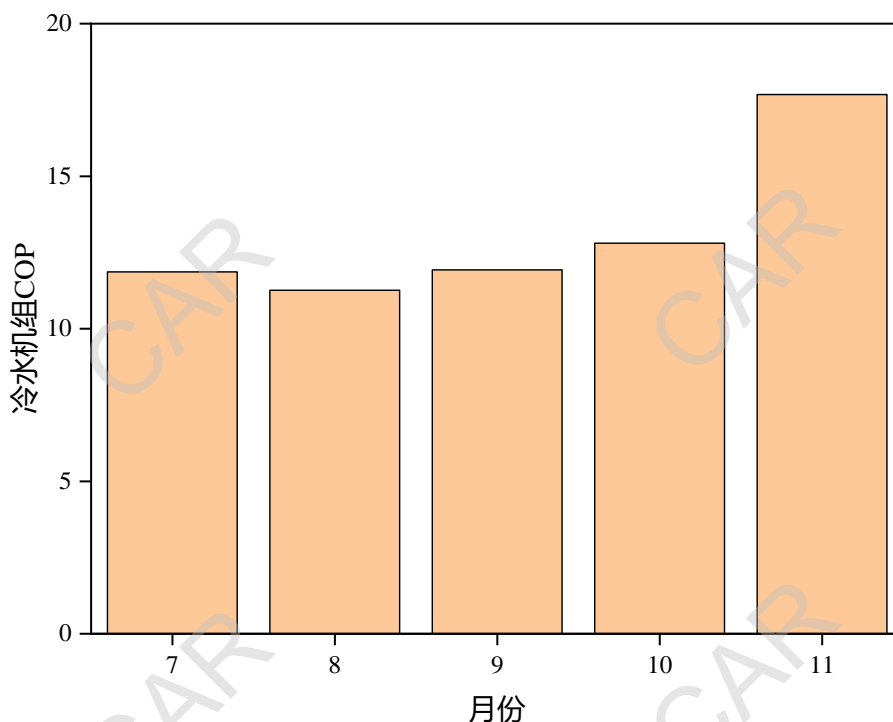


图 7-59 磁悬浮冷水逐月性能数据变化

(3) 冷水机组 COP

基于上述两台压缩机的总的累计制冷量和累计能耗进行计算，可以得到该数据中心所采用的两台磁悬浮离心冷水机组在 2018 年 7~11 月间的平均 COP 为 12.69。

$$COP = \frac{\sum_7^{11} Q}{\sum_7^{11} E_{CP}} = 12.69$$

7.6.4 案例小结

北京中科云数据中心冷源侧采用 2N 架构的磁悬浮离心冷水机组、室内采用机柜级冷却末端，全年采用 9℃ 冷冻液供冷无自然冷却运行。

该数据中心位于中关村核心地区，无专用制冷机房，周围办公、学校及住宅较为密集，自 2014 改用无油磁悬浮离心冷水机组后，噪声大大降低。

基于 2018 年 7 月~11 月间的运行数据，该磁悬浮离心冷水机组平均 COP 达到 12.69，在运行 4 年后仍保持非常优秀的运行效率，在北京（寒冷地区）具有非常优秀的节能效果。

7.6.5 专家意见

该数据中心属于北方中小规模高机柜功率数据中心，并采用了磁悬浮高效冷机制冷以及密闭机柜内高效空调散热，单机柜最大支持 15kW 供电能力，在低温环

境和低负载率下实现了良好的运行 PUE。且利用磁悬浮压缩机大大降低了冷机运行噪音，是在城市核心区域机房很好的应用创新案例。

建议：可以运行在更高的冷冻水温，这样可以增加自然冷时间，并实现更好的电费节省。此外因为是高功率机柜，且新的服务器深度较深，采用机柜内送风方式存在一定的送风空间和风速问题，建议关注底部服务器的负压问题。还有大量空调置于机柜底部，空调维护和管路阀门等也需要重点关注运行可维护性和安全性。

总之，该项目技术创新性强，运行数据优良，是个不错的改造优化项目案例。

7.7 案例总结及建议

上述 5 个应用案例，分布在寒冷地区（北京、天津）、夏热冬冷地区（上海、南京）和夏热冬暖地区（中山），冷却方式为风冷和水冷两种方式，分别应用于改造机房和新建机房，均达到了良好的运行效果，体现出磁悬浮压缩机及制冷机组的优势如下：

(1) **磁悬浮压缩机及制冷机组具有非常高的能效水平，在 5 个案例中均得到体现，特别是全年运行小压比工况下（冷冻水侧高水温，最高可到 22℃供水；低环境温度或低冷却水温度）具有非常高运行性能。**在上海案例和北京案例应用中制冷机组的全年平均 COP 分别达到 10.90（上海：夏热供冷地区）和 12.69（北京：寒冷地区），前者整个冷却系统全年 GCOP 也达到 6.95，整个数据中心的 PUE 也达到 1.23。中山案例（夏热冬暖地区）和南京案例（夏热冬冷地区，风冷机组）也达到了较高的效率，前者的 PUE 达到 1.352，后者的 GCOP 达到 4.41。在天津案例（夏热冬冷地区）中冷水主机的能耗也仅占整个冷却系统的 27.75%。

(2) **磁悬浮压缩机及制冷机组的高可靠性和运行稳定性在上述案例中都得到了充分的表现，在正式启动运行后，除例行维护外，均未发生因故障引起的维护问题，特别是天津案例数据中心可靠性要求高，系统采用 2N 设计，制冷机组保持高效稳定运行。**

(3) **磁悬浮压缩机及制冷机组噪音低、占地面积小，北京案例、南京案例中均处于市中心且无专门冷冻机房，利用磁悬浮机组进行改造，很好的解决了占地空间以及对周边居民的噪音影响问题。**

当然，在上述案例的数据测试及分析过程中，也发现了一些问题，最普遍的表现是室内末端能耗、水泵输配能耗占比较大，希望在今后的数据中心冷却系统应用中能够得到改进：

(1) 对**整个数据中心冷却系统进行集成优化**，针对冷却系统各个环节（室内空调末端、冷冻水泵或冷却水泵、制冷机组和冷却塔）各自的性能特性进行优化匹配，合理确定室内末端送风温度、冷冻水和冷却水的供水温度，以避免室内末端大风量小温差、冷却水或冷冻水大流量小温差造成的室内末端能耗及冷却水泵和冷冻水泵能耗占比过高问题。

(2) 建议**采用集成冷站**，适度对冷却系统冷源部分进行集成，将高效制冷机组、冷却塔、冷却水泵、冷冻水泵等进行集成匹配与工厂化预制及调试，可实现主机制冷与自然冷却等运行模式，具有省时、省地、省电、省钱等优点。案例 1 中即采用了集成冷站的方式，在全年运行中制冷机组、冷却水泵和冷却塔都表现出了非常高效的性能，也实现了无人值守和免维护。

(3) 建议**采用集成冷却系统**，即将集成冷站进一步与室内空调末端进行集成匹配与工厂化预制及运行调试，可针对室内的负荷变化要求以及室外运行环境的变化，自动转换系统的运行模式，实现包括制冷机组、室内空调末端、冷冻水泵、冷却水泵和冷却塔（或风冷机组的主机）等设备的整个冷却系统全年运行性能最优，通过智能远程控制实现无人值守和免维护，达到具有省时、省地、省电、省钱等优点。

8 附录

8.1 磁悬浮技术获得相关政策支持情况

磁悬浮的绿色节能特征已经得到了多项国家和地方相关政策的支持，如表 8-1 所示。

表 8-1 磁悬浮技术获得政策支持情况

文件名称	技术/产品类别	序号	名称	适用范围
工业和信息化部 《绿色数据中心先进适用技术目录（第一批）2016 年》	高效制冷/冷却技术产品	5	低压比优化设计磁悬浮离心式压缩机智能控制技术	新建数据中心
工业和信息化部 《绿色数据中心先进适用技术产品目录（2019 年版）》	高效制冷/冷却技术产品	7	磁悬浮变频离心式冷水机组	新建数据中心
工业和信息化部 《国家绿色数据中心先进适用技术产品目录（2020）》（征求意见稿）	高效制冷/冷却技术产品	6	磁悬浮变频离心式冷水机组	新建数据中心
2019 年上海市节能产品名单		2	水冷磁悬浮变频离心式冷水机组	
		8	磁悬浮模块化机组	
		9	磁悬浮热泵机组	
		10	磁悬浮蒸发冷机组	
		11	磁悬浮风冷机组	
		12	磁悬浮水冷冷水机组	
		13	磁悬浮自然冷却风机组	

8.2 数据中心能效等级与技术要求

GBxxxxx-xxxx《数据中心能效限定值及能效等级》（报批稿）中对数据中心的能耗等级及技术要求进行了规定。

8.2.1 能效等级

数据中心能效等级分为 3 级，1 级表示能效最高，各能效等级数据中心点能比数值应不大于表 8-2 中的规定。

表 8-2 数据中心能效等级指标

指标	能效等级		
	1 级	2 级	3 级
电能比	1.20	1.30	1.50

8.2.2 技术要求

数据中心能效限定值为表 8-2 中能效等级 3 级。

8.3 数据中心室内空气计算参数

8.3.1 主机房室内空气计算参数

参考国家标准《数据中心设计规范》GB50174-2017，主机房内的温度、露点温度和相对湿度应满足电子信息设备的使用要求，当电子信息设备无明确环境参数要求时，应根据数据中心等级按照表 8-3 中室内环境要求设计。

表 8-3 室内空气温湿度要求

项目	环境要求	备注
冷通道或机柜进风区域的温度	18℃~27℃	不得结露
冷通道或机柜进风区域的相对湿度和露点温度	露点温度宜为 5.5℃~15℃，同时相对湿度不宜大于 60%	
主机房环境温度和相对湿度（停机时）	5℃~45℃，8%~80%，同时露点温度不宜大于 27℃	
主机房温度变化率	使用磁带驱动时，应小于 5℃/h 使用磁盘驱动时，应小于 20℃/h	

8.3.2 支持区室内空气计算参数

不间断电源系统电池室室内环境温度为 20℃~30℃，相对湿度为 20%~80%。
发电机组机房、变配电机房室内环境温度为 5℃~40℃

8.4 室外空气计算参数

室外空气设计计算参数应采用现行国家标准《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》GB 50736 和《工业建筑供暖通风与空气调节设计规范》GB 50019 中的夏季室外空气设计计算参数。

数据中心用来支持电子信息设备稳定运行的空调及其配套设施，需要依照室外空气参数选型时，宜符合下列规定（参考《数据中心制冷与空调设计标准》T / CECS 487-2017）：

- （1）湿球温度宜采用有气象记录以来的极端湿球温度；
- （2）夏季干球温度宜采用极端最高干球温度，统计年份宜为 30 年，不足 30 年者，也可按实有年份采用，但不宜少于 10 年；
- （3）冬季干球温度宜采用极端最低干球温度，统计年份宜为 30 年，不足 30 年者，也可按实有年份采用，但不宜少于 10 年。

表 8-4、表 8-5 和表 8-6 中分别摘录了三种不同来源的我国典型城市极端室外温度情况，以供参考。

表 8-4 我国典型城市极端室外干球温度

(摘自《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》GB50736-2012)

序号	城市	台站号	极端最高 (°C)	极端最低 (°C)
1	北京	54511	41.9	-18.3
2	天津	54527	40.5	-17.8
3	石家庄	53698	41.5	-19.3
4	太原	53772	37.4	-22.7
5	呼和浩特	53463	38.5	-30.5
6	沈阳	54342	36.1	-29.4
7	长春	54161	35.7	-33.0
8	哈尔滨	50953	36.7	-37.7
9	上海	58367	39.4	-10.1
10	南京	58238	39.7	-13.1
11	杭州	58457	39.9	-8.6
12	合肥	58321	39.1	-13.5
13	福州	58847	39.9	-1.7
14	南昌	58606	40.1	-9.7
15	济南	54823	40.5	-14.9
16	郑州	57083	42.3	-17.9
17	武汉	57494	39.3	-18.1
18	长沙	57679	39.7	-11.3
19	广州	59287	38.1	0.0
20	南宁	59431	39.0	-1.9
21	海口	59758	38.7	4.9
22	重庆	57515	40.2	-1.8
23	成都	56294	36.7	-5.9
24	贵阳	57816	35.1	-7.3
25	昆明	56778	30.4	-7.8
26	拉萨	55591	29.9	-16.5
27	西安	57036	41.8	-12.8
28	兰州	52889	39.8	-19.7
29	西宁	52866	36.5	-24.9
30	银川	53614	38.7	-27.7
31	乌鲁木齐	51463	42.1	-32.8

表 8-5 我国典型城市极端室外干球温度
(摘自《中国建筑热环境分析专用气象数据集》)

序号	城市	台站号	极端最高 (°C)	极端最低 (°C)
1	北京	54511	41.9	-18.3
2	天津	54527	40.5	-17.8
3	石家庄	53698	42.9	-19.3
4	太原	53772	37.4	-23.3
5	呼和浩特	53463	38.5	-30.5
6	沈阳	54342	36.1	-32.9
7	长春	54161	36.7	-33.7
8	哈尔滨	50953	39.2	-37.7
9	上海	58362	39.6	-7.7
10	南京	58238	40.0	-13.1
11	杭州	58457	40.3	-8.6
12	合肥	58321	40.3	-13.5
13	福州	58847	41.7	-1.7
14	南昌	58606	40.1	-9.7
15	济南	54823	42.0	-14.9
16	郑州	57083	42.3	-17.9
17	武汉	57494	39.6	-18.1
18	长沙	57687	40.6	-10.3
19	广州	59287	38.1	0.0
20	南宁	59431	39.0	-1.9
21	海口	59758	39.6	4.9
22	成都	56294	37.3	-5.9
23	重庆	57516	41.9	-1.7
24	贵阳	57816	35.1	-7.3
25	昆明	56778	30.4	-7.8
26	拉萨	55591	29.9	-16.5
27	西安	57036	41.8	-16.0
28	兰州	52889	39.8	-19.7
29	西宁	52866	36.5	-24.9
30	银川	53614	38.7	-27.7
31	乌鲁木齐	51463	42.1	-32.8

表 8-6 我国典型城市极端室外干球温度

(摘自 ASHRAE Handbook 2017)

序号	城市	北纬	东经	海拔 (m)	历年室外极端气象参数								
					温度 (°C)	5 年		10 年		20 年		50 年	
						最低	最高	最低	最高	最低	最高	最低	最高
1	北京	39.9	116.41	35	干球	-16.1	39.5	-17.6	40.6	-19.1	41.6	-21.0	42.9
					湿球	-17.1	29.6	-18.4	30.3	-19.7	30.9	-21.4	31.8
2	天津	39.34	117.36	3	干球	-14.8	38.6	-16.0	39.7	-17.2	40.7	-18.7	42.0
					湿球	-16.0	29.7	-17.1	30.3	-18.2	30.9	-19.6	31.6
3	石家庄	38.04	114.51	105	干球	-12.0	40.0	-13.2	40.9	-14.4	41.9	-15.9	43.1
					湿球	-13.0	29.1	-14.1	29.7	-15.1	30.2	-16.5	30.9
4	太原	37.87	112.55	785	干球	-20.1	37.3	-21.3	38.3	-22.5	39.3	-24.0	40.5
					湿球	-20.7	26.9	-21.8	27.7	-22.9	28.4	-24.2	29.4
5	呼和浩特	40.84	111.75	1084	干球	-29.9	35.7	-33.0	36.5	-36.0	37.3	-39.8	38.4
					湿球	-30.1	23.2	-33.2	23.7	-36.1	24.2	-39.9	24.9
6	沈阳	41.81	123.43	43	干球	-27.7	34.2	-29.4	35.0	-31.1	35.7	-33.2	36.7
					湿球	-27.9	27.5	-29.6	28.1	-31.2	28.6	-33.4	29.3
7	长春	43.82	125.32	215	干球	-30.9	34.7	-33.0	35.7	-35.0	36.7	-37.7	38.0
					湿球	-31.0	26.1	-33.1	26.8	-35.1	27.4	-37.7	28.2
8	哈尔滨	45.8	126.53	118	干球	-32.4	35.5	-34.4	36.6	-36.3	37.7	-38.7	39.0
					湿球	-32.5	26.0	-34.4	26.6	-36.3	27.1	-38.7	27.8
9	上海	31.23	121.47	3	干球	-6.0	38.7	-6.8	39.4	-7.6	40.1	-8.7	41.0
					湿球	-7.4	30.1	-8.2	30.6	-9.0	31.0	-10.0	31.6
10	南京	32.06	118.8	15	干球	-8.8	38.2	-9.9	39.0	-11.0	39.7	-12.4	40.6
					湿球	-9.5	29.8	-10.6	30.3	-11.6	30.8	-12.9	31.4
11	杭州	30.27	120.16	7	干球	-5.7	39.2	-6.7	39.9	-7.6	40.5	-8.8	41.3
					湿球	-6.9	29.5	-7.7	29.9	-8.5	30.3	-9.5	30.8
12	合肥	31.82	117.23	33	干球	-9.1	38.3	-10.4	39.0	-11.8	39.6	-13.5	40.5
					湿球	-9.9	30.4	-11.2	30.8	-12.4	31.2	-14.0	31.8
13	福州	26.07	119.3	14	干球	1.4	38.6	0.6	39.2	-0.2	39.7	-1.2	40.4
					湿球	-1.1	29.2	-2.0	29.6	-2.8	29.9	-3.9	30.4
14	南昌	28.68	115.86	44	干球	-4.0	38.2	-5.1	38.9	-6.1	39.6	-7.5	40.5
					湿球	-5.4	29.6	-6.3	30.1	-7.1	30.6	-8.2	31.3
15	济南	36.65	117.12	58	干球	-12.4	38.6	-13.6	39.5	-14.8	40.4	-16.3	41.6
					湿球	-13.7	28.8	-14.7	29.3	-15.7	29.8	-17.0	30.4
16	郑州	34.75	113.63	151	干球	-11.2	39.6	-12.5	40.6	-13.8	41.5	-15.5	42.6
					湿球	-12.2	30.0	-13.4	30.5	-14.6	31.0	-16.2	31.6
17	武汉	30.59	114.31	34	干球	-6.1	38.6	-7.2	39.4	-8.2	40.1	-9.6	41.0
					湿球	-7.2	30.9	-8.1	31.5	-8.9	32.1	-10.0	32.8
18	长沙	28.23	112.94	120	干球	-5.1	38.8	-6.6	39.4	-7.9	40.1	-9.7	40.8
					湿球	-5.8	29.2	-7.1	29.7	-8.3	30.2	-10.0	30.8
19	广州	23.13	113.26	15	干球	2.3	38.4	1.4	39.1	0.6	39.7	-0.5	40.6

					湿球	-0.6	29.0	-1.5	29.2	-2.5	29.4	-3.7	29.7
20	南宁	22.82	108.37	128	干球	0.9	37.9	0.0	38.5	-0.9	38.9	-2.1	39.6
					湿球	0.5	29.0	-0.4	29.3	-1.2	29.5	-2.2	29.8
21	海口	20.04	110.2	24	干球	8.3	37.8	7.5	38.5	6.8	39.1	5.8	40.0
					湿球	6.9	29.0	6.2	29.4	5.5	29.7	4.6	30.1
22	成都	30.57	104.07	495	干球	-2.2	36.7	-2.8	37.6	-3.4	38.4	-4.1	39.5
					湿球	-2.7	29.1	-3.2	29.7	-3.8	30.3	-4.5	31.1
23	重庆	29.43	106.91	416	干球	-0.6	40.5	-1.4	41.4	-2.1	42.3	-3.0	43.5
					湿球	-1.3	29.1	-2.1	29.7	-2.9	30.2	-3.9	30.9
24	贵阳	26.65	106.63	1139	干球	-4.9	33.6	-5.9	34.5	-6.8	35.4	-8.1	36.6
					湿球	-5.6	24.8	-6.5	25.5	-7.4	26.3	-8.6	27.2
25	昆明	24.88	102.83	1895	干球	-3.0	30.6	-4.0	31.4	-5.0	32.1	-6.2	33.0
					湿球	-4.0	22.1	-5.0	22.8	-5.9	23.4	-7.1	24.2
26	拉萨	29.65	91.14	3650	干球	-12.6	28.1	-13.5	28.8	-14.4	29.5	-15.6	30.3
					湿球	-14.5	16.2	-15.1	17.3	-15.6	18.3	-16.3	19.7
27	西安	34.34	108.94	479	干球	-13.0	39.9	-14.6	40.6	-16.1	41.3	-18.0	42.2
					湿球	-13.7	28.5	-15.1	29.1	-16.4	29.7	-18.2	30.5
28	兰州	36.06	103.83	1518	干球	-15.3	37.1	-16.5	38.2	-17.7	39.2	-19.2	40.6
					湿球	-16.0	22.3	-17.1	22.7	-18.2	23.1	-19.5	23.7
29	西宁	36.62	101.78	2262	干球	-21.8	32.4	-23.1	33.5	-24.3	34.6	-25.9	35.9
					湿球	-22.2	19.8	-23.4	20.7	-24.6	21.6	-26.1	22.8
30	银川	38.49	106.23	1112	干球	-20.6	36.3	-22.0	37.2	-23.4	38.0	-25.2	39.0
					湿球	-21.1	24.5	-22.4	25.3	-23.6	26.1	-25.3	27.1
31	乌鲁木齐	43.83	87.62	919	干球	-25.8	37.9	-27.2	38.9	-28.5	39.8	-30.3	41.1
					湿球	-26.0	20.1	-27.4	20.8	-28.7	21.5	-30.4	22.3
32	香港	22.32	114.17	62	干球	6.3	33.7	5.3	33.9	4.4	34.1	3.1	34.4
					湿球	2.7	28.3	1.7	28.4	0.7	28.4	-0.6	28.6
33	澳门	22.2	113.54	6	干球	4.7	35.7	3.8	36.3	3.0	36.8	2.0	37.6
					湿球	2.3	29.3	1.5	29.6	0.7	29.9	-0.4	30.3
34	台北	25.03	121.57	9	干球	7.4	37.4	6.7	37.9	6.0	38.4	5.2	39.0
					湿球	5.2	29.1	4.6	29.4	3.9	29.7	3.2	30.0

8.5 室外逐时气象参数统计情况

中国气象局气象信息中心气象资料室和清华大学建筑技术科学系出版的《中国建筑热环境分析专用气象数据集》中以全国 270 个地面气象站 1971~2003 年的实测气象数据为基础,通过分析、整理、补充源数据以及合理的插值计算,获得列全国 270 个台站的建筑热环境分析专用气象数据集。依托该数据,对全国 270 个台站的干球温度、湿球温度和露点温度进行整理,典型城市的干球温度和湿球温度的时间分布数据分别如表 8-7 和表 8-8 所示。

表 8-7 我国典型城市室外干球温度时间分布（单位：小时）

城市名	$T \geq 35$ °C	$35^\circ\text{C} > T$ $\geq 30^\circ\text{C}$	$30^\circ\text{C} > T$ $\geq 25^\circ\text{C}$	$25^\circ\text{C} > T$ $\geq 20^\circ\text{C}$	$20^\circ\text{C} > T$ $\geq 15^\circ\text{C}$	$15^\circ\text{C} > T$ $\geq 10^\circ\text{C}$	$10^\circ\text{C} > T$ $\geq 5^\circ\text{C}$	$5^\circ\text{C} > T$ $\geq 0^\circ\text{C}$	$T < 0^\circ\text{C}$
北京	16	356	1103	1396	1121	1139	1035	1020	1574
天津	7	299	1215	1465	1223	1020	893	1059	1579
石家庄	36	385	1211	1490	1209	998	935	1077	1419
太原	0	122	737	1359	1398	1075	1153	1120	1796
呼和浩特	0	78	547	1053	1307	951	873	810	3141
沈阳	0	126	796	1281	1209	1004	837	923	2584
长春	0	49	488	1181	1249	921	862	758	3252
哈尔滨	0	71	484	1045	1299	868	730	747	3516
上海	13	298	1545	1854	1370	1243	1424	876	137
南京	31	563	1359	1551	1208	1091	1363	1252	342
杭州	67	457	1429	1839	1317	1207	1475	855	114
合肥	41	512	1415	1763	1224	918	1364	1204	319
福州	62	701	2044	1870	1723	1447	895	18	0
台北	34	1017	2768	2402	1866	652	21	0	0
南昌	77	694	1506	1668	1432	1084	1592	638	69
济南	35	465	1421	1578	1038	1122	1024	1197	880
郑州	44	486	1147	1550	1289	991	1281	1246	726
武汉	103	700	1600	1423	1337	994	1457	994	152
长沙	59	530	1437	1665	1264	1439	1490	799	77
广州	28	851	2602	2275	1426	1310	263	5	0
南宁	23	822	2689	2080	1581	1094	451	20	0
海口	6	975	3499	2490	1516	274	0	0	0
重庆	62	544	1451	1920	1507	1697	1528	51	0
成都	0	219	1021	2044	1895	1410	1703	456	12
贵阳	0	67	813	2086	1954	1313	1660	811	56
昆明	0	1	234	1765	3199	1794	1363	374	30
拉萨	0	0	40	534	1294	2145	1804	1406	1537
西安	43	479	1018	1414	1469	1055	1064	1273	945
兰州	0	130	599	1057	1603	1246	1048	1265	1812
西宁	0	5	152	519	1173	1688	1337	1189	2697
银川	0	140	618	1211	1438	1026	1062	926	2339
乌鲁木齐	23	241	484	1119	1138	929	757	681	3194

表 8-8 我国典型城市室外湿球温度时间分布（单位：小时）

城市名	$T_w \geq 3$ 5℃	$35^\circ\text{C} > T_w$ $\geq 30^\circ\text{C}$	$30^\circ\text{C} > T_w$ $\geq 25^\circ\text{C}$	$25^\circ\text{C} > T_w$ $\geq 20^\circ\text{C}$	$20^\circ\text{C} > T_w$ $\geq 15^\circ\text{C}$	$15^\circ\text{C} > T_w$ $\geq 10^\circ\text{C}$	$10^\circ\text{C} > T_w$ $\geq 5^\circ\text{C}$	$5^\circ\text{C} > T_w$ $\geq 0^\circ\text{C}$	$T_w < 0$ ℃
北京	0	5	283	1310	1264	1251	1031	1172	2444
天津	0	0	298	1408	1444	1250	1016	1135	2209
石家庄	0	1	232	1437	1529	1193	1008	1127	2233
太原	0	0	12	610	1594	1425	1129	1294	2696
呼和浩特	0	0	0	153	1374	1245	1232	907	3849
沈阳	0	0	81	1117	1269	1123	1056	1064	3050
长春	0	0	2	569	1343	1110	1192	755	3789
哈尔滨	0	0	24	577	1261	1192	937	850	3919
上海	0	2	928	1845	1480	1294	1712	1188	311
南京	0	0	1035	1425	1420	1324	1290	1652	614
杭州	0	0	926	1822	1751	1179	1451	1316	315
合肥	0	11	987	1777	1564	1090	1205	1557	569
福州	0	0	1142	2311	2157	1577	1366	207	0
台北	0	0	1544	3517	2224	1232	243	0	0
南昌	0	4	1246	1857	1647	1105	1659	1099	143
济南	0	0	443	1583	1317	1154	1160	1574	1529
郑州	0	0	435	1508	1670	1098	1109	1602	1338
武汉	0	3	1135	1795	1626	998	1499	1419	285
长沙	0	1	1041	2012	1437	1303	1771	1088	107
广州	0	10	1834	2906	1492	1538	949	31	0
南宁	0	0	2084	2633	1897	1131	981	34	0
海口	0	0	2924	3078	2109	619	30	0	0
重庆	0	1	753	2333	1834	1590	2148	101	0
成都	0	0	269	2106	2044	1660	1746	918	17
贵阳	0	0	0	1598	2420	1552	1950	1096	144
昆明	0	0	0	13	3062	2344	2430	812	99
拉萨	0	0	0	0	13	1466	2048	1762	3471
西安	0	0	107	1446	1936	1344	1095	1253	1579
兰州	0	0	0	20	1467	1854	1423	1366	2630
西宁	0	0	0	1	326	1612	1810	1428	3583
银川	0	0	0	235	1618	1341	1254	1217	3095
乌鲁木齐	0	0	0	6	924	2068	1361	998	3403

CAR

CAR

CAR

CAR

CAR

CAR

CAR

CAR