

文章编号: 1671-6612 (2021) 05-656-08

寒冷地区某银行数据中心空调系统分析与设计

颜晓光¹ 王波¹ 吴双云²

(1. 北京首钢国际工程技术有限公司 北京 100041;

2. 首钢京唐钢铁联合有限责任公司 唐山 063000)

【摘要】 以某银行数据中心为研究对象, 总结并比较了数据中心常用气流组织形式和制冷方案, 计算分析了该数据中心空调冷负荷及常用制冷方案的全年不同运行模式的时长。根据计算、分析结果确定了采用地板下送风+封闭冷通道的气流组织形式和带自然冷却的干式水冷直膨机组的制冷方案, 与采用传统风冷空调相比每年预计可节省 41.9% 的电耗。

【关键词】 数据中心; 机柜; 气流组织; 制冷空调; 自然冷却

中图分类号 TU834 文献标识码 B

Analysis and Design of Air Conditioning System in Data Center of a Bank

Yan Xiaoguang¹ Wang Bo¹ Wu Shuangyun²

(1. Beijing Shougang International Engineering Technology Co., Ltd, Beijing, 100041;

2. Shougang Jingtang United Iron & Steel Co., Ltd, Tangshan, 063000)

【Abstract】 Taking a data center of a bank as the research object, this paper summarizes and compares the common air distribution forms and refrigeration schemes of the data center, and calculates and analyzes the cooling load of the air conditioning and the duration of different operation modes of the common refrigeration schemes of the data center in the whole year. According to the results of calculation and analysis, the air distribution form of underfloor air supply and closed cold channel and the refrigeration scheme of dry water-cooled direct expansion unit with natural cooling are determined. Compared with the traditional air-cooled air conditioning, it is estimated to save 41.9% of the annual power consumption.

【Keywords】 Data center; cabinet; air distribution; air conditioning; free cooling

0 前言

数据中心制冷系统能耗约占整个数据中心能耗的 30~45%, 降低制冷系统能耗是提高数据中心能源利用效率的必然途径。据统计, 国外数据中心的 PUE 值约为 2.0^[3], 国际上先进数据中心的 PUE 值可达到 1.7 以下。而我国数据中心的 PUE 值普遍高于 2.0, 特别是中小规模的数据中心, PUE 测量值在 2.5 左右。国内数据中心在前期规划设计时对节能问题考虑不足, 在影响数据中心能源消耗的重要环节—空调制冷环节上设计深度不足、方案选择不合理是导致 PUE 值偏高的重要原因。

数据中心全年运行, 根据国内外的运行经验, 根据所在地的气候条件, 充分利用自然冷源进行冷却, 是降低制冷系统能耗的最直接、有效手段。因此, 数据中心在规划设计阶段能因地制宜的正确选择空调制冷方案极为关键。

1 数据中心制冷与空调设计要求

本数据中心位于内蒙古包头市, 为某银行数据中心, 设置在银行办公楼内, 按 A 级数据中心进行设计。数据中心主机房区分为网络区、PC 服务器区和存储/小机区, 网络区布置在单独的房间内,

作者(通讯作者)简介: 颜晓光(1986.01-), 男, 硕士研究生, 高级工程师, E-mail: yxg0101@163.com

收稿日期: 2021-01-18

共设置部署网络机柜 38 台; PC 服务器区和存储/ 部署存储机柜和小型机共 32 台。布置如图 1 所示。小机区布置在同一房间内, 部署服务器机柜 96 台,

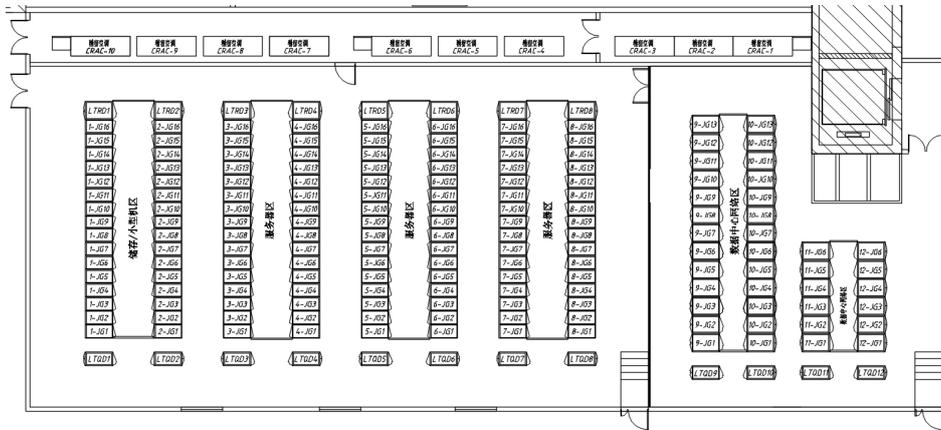


图 1 数据机房平面布置图

Fig.1 Layout plan of data center

本数据机房为 A 级数据机房, 可靠性和可用性等级要求较高, 依据《数据中心设计规范》的要求, 机柜进风区域的温度应为 18℃~27℃, 相对湿度≤60%, 制冷与空调系统应满足最大散热量的需求, 且应设置冗余, 任一组件故障或维护时, 不应影响电子信息设备的正常运行。

2 数据机房冷负荷分析

根据本项目数据中心所处位置及内部设施情况, 其空调冷负荷主要包含: 机房内设备散热、照明散热、建筑围护结构得热(包含通过外窗进入的太阳辐射热)、人员散热、新风负荷及新风和人体散湿的潜热。空调冷负荷计算值如表 1 所示。

表 1 数据机房设计冷负荷表

Table 1 Cooling load table for data room

序号	空调冷负荷类型	网络区		服务器区	
		冷负荷 (kW)	占比	冷负荷 (kW)	占比
1	设备散热量	101	75.03%	435	83.13%
2	照明散热量	3.6	2.65%	9.4	1.80%
3	围护结构传入热量	14.2	10.60%	37.6	7.18%
4	人员散热量(显热)	0.15	0.11%	0.3	0.06%
5	新风冷负荷(显热)	6.4	4.82%	17.1	3.26%
6	新风湿负荷(潜热)	8.9	6.62%	23.5	4.49%
7	人员湿负荷(潜热)	0.22	0.16%	0.44	0.08%
8	冷负荷总计	134.3	100%	523.5	100%

根据表 1 分析, 数据机房冷负荷主要由设备散热、围护结构、新风负荷产生, 设备散热占比在 75%以上, 围护结构得热和新风负荷占 15%~20%, 显热冷负荷和潜热冷负荷分别占总负荷的 93.2%和 95.4%。说明数据机房的负荷变化主要受设备运行状态的影响, 室外环境对其影响有限。

3 气流组织方案的分析与设计

数据机房的气流组织是保证数据中心可靠运

行、节能降耗的关键点。现代化的数据中心已普遍采用机柜面对面或背对背的冷热通道分离的布置方式, 可以提高冷风的利用率, 是简单易行的节能手段。如将冷通道或热通道封闭, 可以避免冷、热气流的短路, 将有效提升送回风温差, 进一步提升冷风的利用率和制冷机的效率。

数据中心常用气流组织形式主要有下送风+冷(热)通道、上送风+风管+冷池、行间空调+冷池的方式, 详见图 2~图 5。其特点及适用条件如表 2 所示。

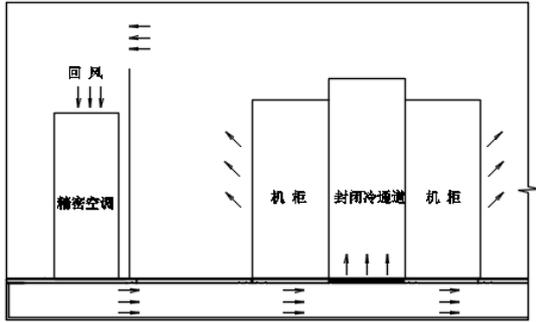


图2 地板下送风+冷通道

Fig.2 Under-floor air supply + cold channel

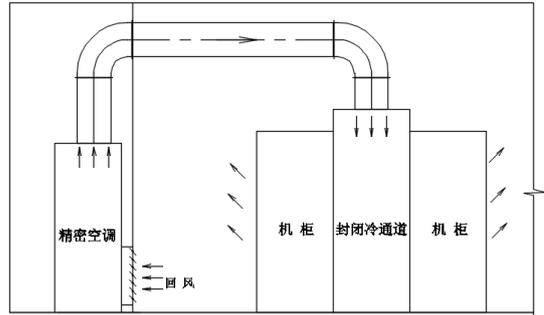


图4 上送风+风管+冷通道

Fig.4 Upper air supply + cold channel

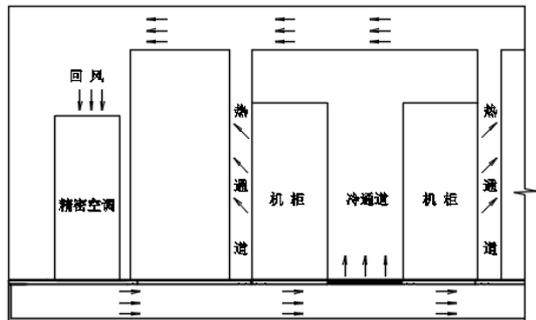


图3 地板下送风+热通道

Fig.3 Under-floor air supply + hot channel

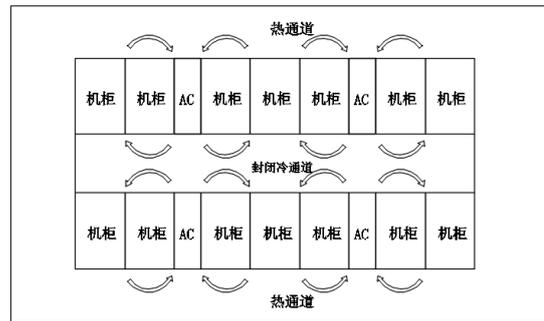


图5 行间空调+冷通道

Fig.5 Inter row air conditioning + cold channel

表2 气流组织形式及特点

Table 2 Air distribution form and characteristics

序号	形式	气流组织特点	适用条件
1	地板下送风+冷通道	(1) 冷风通过架空地板的静压箱进入封闭冷通道, 进行气流二次均压后对IT设备进行冷却。 (2) 开放区域温度高, 围护结构冷量损失小。 (3) 系统相对简单, 布置美观, 投资低, 便于扩容。 (4) 故障响应时间短	(1) 可适用发热密度密度4~8kW/机柜。 (2) 当应用于发热密度达到8~20kW/机柜时宜采用活化地板
2	地板下送风+热通道	(1) 通过地板把冷风送至机柜附近, 对热通道进行封闭, 热风通过风道强制抽回到空调。 (2) 回风温度高, 制冷效率高; 开放区域温度低, 围护结构冷量损失大。 (3) 故障响应时间长, 利于维护管理。 (4) 投资大、施工难度大	多用于采用水冷空调的新建项目, 发热密度3~8kW/机柜
3	上送风+冷通道	(1) 冷风从上部送入封闭冷通道, 均压后对IT设备进行冷却。 (2) 采用直接在冷通道上部设置空调末端时, 能解决局部热点问题。 (3) 高热机房解决方案, 气流组织合理	(1) 风管送风时可适用发热密度3~8kW/机柜的机房; 采用冷通道上部直接设置空调末端设备时, 可适用发热密度10~20kW/机柜的机房。 (2) 适合机房改造, 不需要架空地板
4	行间空调+冷通道	(1) 空调放在服务器机柜列间, 水平送风至封闭冷通道, 均压后对IT设备进行冷却。热风通过热通道回到空调, 空调能效比高。 (2) 有效地控制冷风和热风的短路, 冷却效率高, 有利于消除局部热点, 提高可靠性	主要应用于高热密度数据中心, 不需要架空地板

通过对比分析, 地板下送风+封闭冷通道的形式具有热损失小、布置美观, 易于维护等优点, 可适应高热密度机房, 得到广泛应用。本工程机柜的单机功率密度 3~5kW, 机房具备设置架空地板的条件, 采用地板下送风+封闭冷通道的气流组织形式。设计送、回风温差为 10℃, 网络区空调系统循环风量为 35700m³/h, 服务器区空调系统循环风量为 141900m³/h。架空地板采用模块化高架地板, 空间高度 600mm。送风口采用全钢通风格栅, 具备手动调节开度的功能, 通风面积 0~80%范围可调。

在机柜前端设置温度传感器, 根据机柜前端的温度要求自动调节空调机组的风机转速, 调节空气流量, 匹配机柜的制冷需求。同时设置压力控制平衡系统, 在地板下设置压力传感器, 将地板下气压维持在额定压力范围内 (20~80Pa), 优化系统的效率, 有效避免热点的产生。

4 制冷方案的分析与设计

数据中心全年运行, 利用自然冷却, 降低运行能耗是数据中心发展趋势。现有的自然冷却技术可以分为两大类: 空气侧自然冷却和水侧自然冷却。每类自然冷却方式又可以分成若干不同类型, 如表 3 所示。

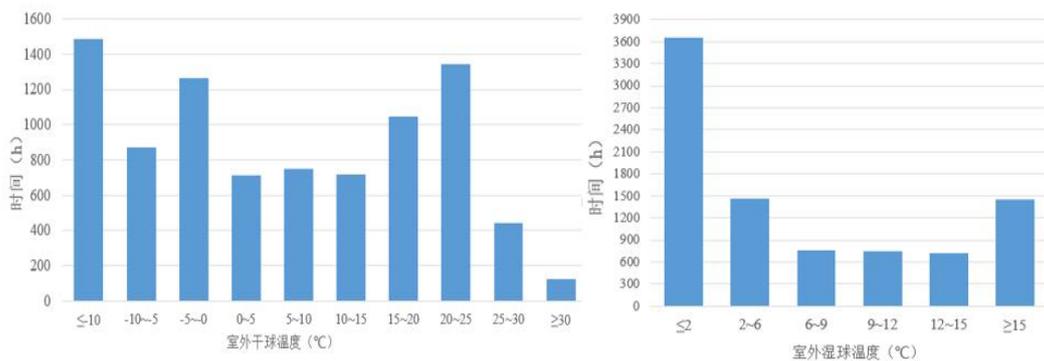


图 6 当地全年气温分布

Fig.6 Local annual temperature distribution

根据全年气温分布分析, 该地区全年 10℃ 以下的时间约占全年的 57%, 湿球温度低于 2℃ 的时间占全年的 41%, 全年具有较长的时间可采用自然冷却。考虑本项目的特点及可靠性要求, 可供选择的制冷方案主要有带自然冷却的风冷冷水机组、带

表 3 自然冷却方式分类

Table 3 Classification of natural cooling modes

自然冷却分类	冷却方式	
空气侧	直接空气冷却	全新风直接冷却 直接蒸发冷却 间接蒸发冷却
	间接空气冷却	制冷剂自然冷却 带自然冷却的风冷冷水机组 热管换热 冷却塔冷水直接冷却
	直接水冷却	湖水、河水、地下水等直接冷却
	间接水冷却	冷却塔+板式换热器 干冷器+机组双盘管

数据中心制冷方案的选择应考虑的主要因素:

- (1) 所处地理位置和该地区的全年气候条件;
- (2) 数据中心热环境的要求;
- (3) 不同自然冷却技术的适用范围, 能达到的节能效益;
- (4) 数据中心的规模及建设条件。

本项目地处内蒙古包头市, 按照我国建筑气候分区, 属于严寒地区, 一月平均气温≤-10℃, 7月平均气温≤25℃, 7月平均相对湿度≥50%, 图 6 为其全年气温分布的统计, 其中的干球温度来自 DEST 模拟软件中的气象参数 (取距离最近的呼和浩特市气象参数), 湿球温度为根据 DEST 软件中的干球温度、湿度等参数经计算得出。

自然冷却的干式水冷直膨机组 (干冷器+机组双盘管)、制冷剂自然冷却机组及冷却塔间接自然冷却系统, 本文主要将这四种方案进行阐述。制冷方案的原理如图 7~图 10 所示, 各种方案的特点如表 4 所示。

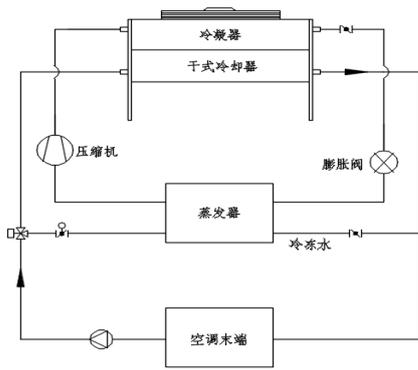


图 7 带自然冷却的风冷冷水机组

Fig.7 Air cooled chiller with natural cooling

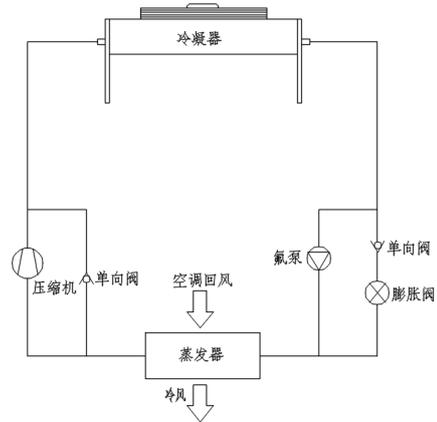


图 9 制冷剂自然冷却

Fig.9 Natural cooling of refrigerant

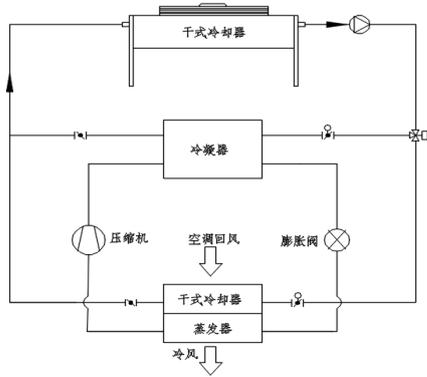


图 8 带自然冷却的干式水冷直膨机组

Fig.8 Dry type water cooled air conditioner with natural cooling

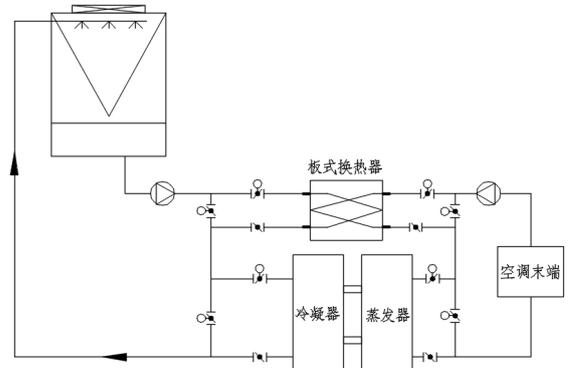


图 10 冷却塔间接自然冷却

Fig.10 Indirect natural cooling of cooling tower

表 4 各种空调系统的特点

Table 4 Characteristics of various air conditioning systems

序号	方案	特点	难点及存在问题
1	带自然冷却的风冷冷水机组	(1) 在传统风冷冷水机组基础上并联自然冷却盘管，使机组同时具备机械制冷和自然冷却的功能。 (2) 可实现全压缩制冷、压缩制冷与自然冷却混合制冷、纯自然冷却制冷3种模式的自动切换，最大化地利用自然冷源	根据环境温度进行3种运行模式的切换是难点，否则，可能出现制冷压缩机频繁启动，影响自然冷却的节能效果
2	带自然冷却的干式水冷直膨机组	(1) 干冷器代替冷却塔，冷却水中加入乙二醇，适用于冬季温度较低的地区。 (2) 可实现全压缩制冷、压缩制冷与自然冷却混合制冷、纯自然冷却制冷3种模式的自动切换，最大化地利用自然冷源。 (3) 技术成熟，冬季室外低温时可靠性高	(1) 要保证系统内乙二醇溶液的体积和品质。 (2) 与风冷相比需要增加泵、阀体等组件

续表 4 各种空调系统的特点

序号	方案	特点	难点及存在问题
3	制冷剂自然冷却(氟泵)	(1) 同时设置制冷剂泵和压缩机, 制冷剂可不通过压缩机直接到室外冷凝器冷却, 减少压缩机功耗。 (2) 可实现全压缩制冷、压缩制冷与自然冷却混合制冷、纯自然冷却制冷3种模式的自动切换, 最大化地利用自然冷源。 (3) 不需要增加换热器, 结构紧凑, 不用水, 无冻结风险	(1) 目前只适用小型机房, 机组冷量小于100kW。 (2) 由于增加了制冷剂溶液泵、低压循环桶、集油器及浮球阀等设备及附件, 投资增加。 (3) 压缩机与制冷剂溶液泵切换时, 常常出现泵流量丢失、泵锁定等故障, 稳定性差
4	冷却塔间接自然冷却	(1) 当气候条件适宜时, 节能效果明显。 (2) 适合各种规模数据中心使用, 通常与制冷机组联合供冷。 (3) 技术相对简单、成熟; (4) 机房空调机组的水质可以得到保证	(1) 水系统阻力明显增加, 导致输送能耗上升。 (2) 系统庞大, 初投资增加。 (3) 冷却塔的水耗量直接影响数据中心的WUE。 (4) 冷却塔水质污染转移到板式换热器, 板式换热器容易堵塞

上述四种方案均能实现全压缩制冷、压缩制冷与自然冷却混合制冷、全自然冷却, 但由于设计上的差异, 每种方案的切换控制存在较大差异。表 5 为各种系统全年运行的分析统计, 切换控制根据目前常用设备的切换控制方式确定, 冷水机组按照机组出水温度 10℃, 回水温度 15℃考虑。

表 5 各空调系统全年运行分析

Table 5 Annual operation analysis of each air conditioning system

序号	方案	运行方式	运行条件	运行时间 (h)	全年比例	备注
1	带自然冷却的风冷冷水机组	全压缩制冷	室外温度 t_w 比冷冻水回水高 2℃, $t_w > 13℃$	3450	39.4%	冷冻水供水温度 10℃, 回水温度 15℃
		压缩制冷+自然冷却	室外温度 t_w 比冷冻水回水低 2℃及以上, $5℃ < t_w \leq 13℃$	1585	18.1%	
		全自然冷却	室外温度 t_w 比冷冻水回水低 10℃及以上, $t_w \leq 5℃$	3725	42.5%	
2	带自然冷却的干式水冷直膨机组	全压缩制冷	室外温度 $t_w > 18℃$	2160	24.7%	8~12℃时强制自然冷却, 备份机组工作, 干冷器全速运行
		压缩制冷+自然冷却	$12℃ < t_w \leq 18℃$	1440	16.4%	
		全自然冷却	室外温度 $t_w \leq 12℃$	5160	58.9%	
3	制冷剂自然冷却	全压缩制冷	室外温度 $t_w > 20℃$	1910	21.8%	
		压缩制冷+自然冷却	$10℃ < t_w \leq 20℃$	1780	20.3%	
		全自然冷却	室外温度 $t_w \leq 10℃$	5070	57.9%	
4	冷却塔间接自然冷却	全压缩制冷	冷却塔出水温度 $t > 15.5℃$ 对应湿球温度 $t_s > 8.1℃$	2420	27.6%	制冷机出水温度 10℃, 回水温度 15℃
		压缩制冷+自然冷却	$10.5℃ < t \leq 15.5℃$ $2.1℃ < t_s \leq 8.1℃$	2740	31.3%	
		全自然冷却	冷却塔出水温度 $t \leq 10.5℃$, 对应湿球温度 $t_s \leq 2.1℃$	3600	41.1%	

根据上述分析,采用带自然冷却的干式水冷直膨机组的方案全自然冷却时间最长,制冷剂自然冷却的方案全压缩制冷的时间最短,这两种方案在中小型数据中心中使用具有较大的优势,本数据中心所在地区冬季气候较低,选用具有更高运行稳定性的带自然冷却的干式风冷直膨机组,采用乙二醇溶

液作为循环液,有效解决冬季防冻问题。制冷原理如图 3-7 所示。

本工程空调按照 N+1 的冗余进行配置,网络区设置 3 台精密空调,服务器区设置 7 台精密空调。设备参数如表 6 所示。

表 6 精密空调参数

Table 6 Precision air conditioning parameters

区域	空调参数 (单台)		额定风量	数量	备注
	压缩制冷模式参数	自然制冷模式			
网络区	总制冷量: 82.4kW	总制冷量: 96.6kW	22000m ³ /h	2+1	冗余 1 台
	显冷量: 79.9kW	显冷量: 95.7kW			
服务器区	总制冷量: 90.6kW	总制冷量: 98.4kW	23000m ³ /h	6+1	冗余 1 台
	显冷量: 82.5kW	显冷量: 97.6kW			

注: 制冷量为额定制冷量, 回风温度 24℃, 相对湿度 50%, 室外环境温度 35℃, 自然冷却对应环境温度 5℃。

当室外温度 $t_w > 18℃$ 时, 机组纯机械制冷模式运行, 仅制冷剂回路制冷, 乙二醇回路仅冷却制冷系统的冷凝器。当 $12℃ < t_w \leq 18℃$ 时, 机组采用机械+自然冷却的混合模式运行, 乙二醇在制冷盘管中循环, 制冷剂回路和乙二醇回路同时制冷, 减少压缩机的功耗。当室外温度 $t_w \leq 12℃$ 时, 机组纯自然冷却模式运行, 乙二醇回路全部通过制冷盘管实现制冷, 压缩机制冷系统就会完全关闭, 其中 $8℃ < t_w \leq 12℃$ 时系统可根据需要自动将备用机组投入

工作。

该工程总冷负荷约 657kW, 新风由双冷源新风机组处理 (本文不详细介绍), 预计空调全年平均负荷约 600kW。根据该种空调在不同室外温度条件下的能效比及不同工况的运行时间, 经专业空调商模拟计算, 预测固定制冷量为 600kW 时的全年制冷耗电量为 94.4 万 kWh, 与采用传统风冷空调相比每年可节省 41.9% 的电耗, 全年空调能耗预测分布如图 11 所示。



图 11 全年空调能耗分布预测

Fig.11 Annual air conditioning energy consumption forecast

5 结语

(1) 数据机房冷负荷主要由设备散热产生, 占总冷负荷的 75% 以上, 冷负荷的变化主要受 IT 设备实际运行的负载率影响。冷负荷几乎全部为显热冷负荷, 占总负荷的 90% 以上。

(2) 数据机房气流组织的设计应避免热气流

和冷气流的短路, 一方面可提高冷气流的利用率, 另一方面可提高空调回风温度, 从而提高空调制冷效率。对于高热密度机房应采用封闭冷通道的气流组织形式。

(3) 冷却方案的确定应考虑数据中心全年运行特点, 结合当地的气候特点, 采取可行的自然冷

却方案,节省全年运行能耗。为延长使用自然冷却的时间,有条件时应提高空调送风温度及冷冻水供水温度。

(4) 根据分析,本项目采用带自然冷却的干式水冷直膨机组,全年有57.9%的时间采用完全自然冷却,与采用传统风冷空调相比每年可节省41.9%的电耗。

(5) 寒冷地区,采用带自然冷却的干式水冷直膨机组,具有较好的节能效益,制冷回路采用乙二醇溶液能够适应冬季的低温环境,运行稳定性高。

参考文献:

- [1] 殷平.数据中心研究(7):自然冷却[J].暖通空调,2017,(11):49-60.
- [2] 肖新文,魏贻,曾春利.间接蒸发冷却空调箱机组制冷的数据中心气流组织探讨[J].制冷与空调,2020,(1):62-69.
- [3] U.S. Environmental Protection Agency. Report to Congress on Server and Data Center Energy Efficiency Public Law[M]. 2007:109-431.
- [4] 刘成,陈乐天,王颖.通信机房空调气流组织合理化研究.建筑热能通风空调,2010,29(5):80-84.
- [5] 高亭亭.华北地区数据中心冷却方式优化研究[D].保定:华北电力大学,2019.
- [6] 张建伟.某数据中心空调系统设计与节能优化分析[J].建筑工程技术与设计,2018,(25):39-45.
- [7] 钱晓栋,李震.数据中心空调系统节能研究[J].暖通空调,2012,(3):91-96.
- [8] 吴一凡.数据中心自然冷却技术的现状探讨[J].节能,2018,(7):103-105.
- [9] 吕继祥,王铁军,赵丽,等.基于自然冷却技术应用的数据中心空调节能分析[J].制冷学报,2016,37(3):113-118.
- [10] 傅烈虎.数据中心空调系统设计应关注的问题[J].制冷与空调,2017,(11):70-75.
- [11] 熊慧亮,涂祥宇.数据中心工程中暖通系统节能措施的分析[J].现代信息科技,2019,(14):89-90.
- [12] 黄翔,李婷婷,刘凯磊,等.乌鲁木齐某数据中心热环境分析及气流组织优化研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2019,(1):104-108.
- [13] 张海南,邵双全,田长青.数据中心自然冷却技术研究进展[J].制冷学报,2016,(4):46-54.
- [14] 张华.数据中心空调节能技术探讨及新型机械冷却+自然冷却空调技术研究[J].上海节能,2016,(7):376-379.