

# 某数据中心空调系统设计与节能优化分析

金茂英泰物业设施管理有限公司 周兰兰<sup>☆</sup>  
同济大学 潘毅群

**摘要** 从系统设计、设备的选择、系统的优化、运行费用、投资回收期和系统的安全可靠性等方面,详细分析了上海某 IT 企业研发中心大楼数据中心的空调系统设计与节能优化。

**关键词** 数据中心 空调系统设计 节能优化 系统安全

## HVAC system design and energy saving optimal analysis of a data center

By Zhou Lanlan<sup>★</sup> and Pan Yiqun

**Abstract** Presents the HVAC system design and energy saving optimization from the aspects of system design, equipment selection, system optimization, operation costs, payback period and system reliability for a data center of an office building of an IT company in Shanghai.

**Keywords** data center, HVAC design, energy saving optimization, system reliability

<sup>★</sup> Shanghai JM Imtech Facility Services Co., Ltd., Shanghai, China

### 0 引言

现代科技的发展对 IT、电信企业的要求逐步提高,为了满足市场要求和行业竞争,企业必须不断投入人力物力进行硬件加强,随之,研发大楼越建越多,研发的核心之一——数据中心的规模也在逐步扩大。据 Jonathan Koomey 博士(美国斯坦福大学和伯克利实验室教授)的一份研究报告统计,自 2000 年到 2005 年,全球数据中心能耗翻了一番,2005 年美国所有数据中心的电耗是 450 亿 kWh,其中包括了数据中心 IT 设备、空调制冷设备及其辅助设备的耗电量,直接产生的经济费用为 27 亿美元<sup>①</sup>,由此估计全球数据中心的能耗所产生的费用为 72 亿美元。根据美国 Uptime 研究院的分析,数据中心的电耗增长迅速,以每年 15% 的速度增长,到 2005 年已经达到了 18 000 W/(m<sup>2</sup> 机柜占地面积)。从 2000 年到 2001 年,仅一年时

间,机柜能耗就增长了 1 100 W/(m<sup>2</sup> 机柜占地面积)<sup>②</sup>。数据中心单位面积能耗可由机房总能耗以机房面积得到。

如何以最节能的方式保证系统的稳定运行成为了空调设计师的首要任务。本文针对上海某 IT 企业研发大楼的 4 个数据中心进行分析。

### 1 数据中心概况

该 IT 企业大楼位于上海郊区某科技园区,共 5 层,建筑面积约为 25 000 m<sup>2</sup>,本文研究的数据中心位于该大楼 5 层中心位置,呈长条形布置,4 个数据中心的面积分别为 286,164,104,144 m<sup>2</sup>。数据中心的正上方屋顶上设有 1.8 m 高的平台,用于放置大楼的空调处理设备,平台下则放置了与数据中心有关的排风设备以及用于数据中心全新风制冷的新风百叶,既保证了设备的隐蔽性和安全性,又防止雨天或者其他特殊天气对数据中心空气

<sup>①</sup> Jonathan Koomey. EPA Authorized to Study Data Center Energy Usage, 2007

<sup>②</sup> The Uptime Institute. Heat density trends in data processing, computer systems, and telecommunications equipment, White paper, Santa Fe, NM, The Uptime Network, 2000

<sup>☆</sup> 周兰兰,女,1980 年 7 月生,大学,助理工程师  
201600 上海市松江区中山二路 125 弄 60 号 302 室  
(0) 13916910716  
E-mail:z.lanlan@yahoo.com

收稿日期:2008-11-28

修回日期:2009-02-09

调节带来的影响。数据中心空调系统流程图图 1。

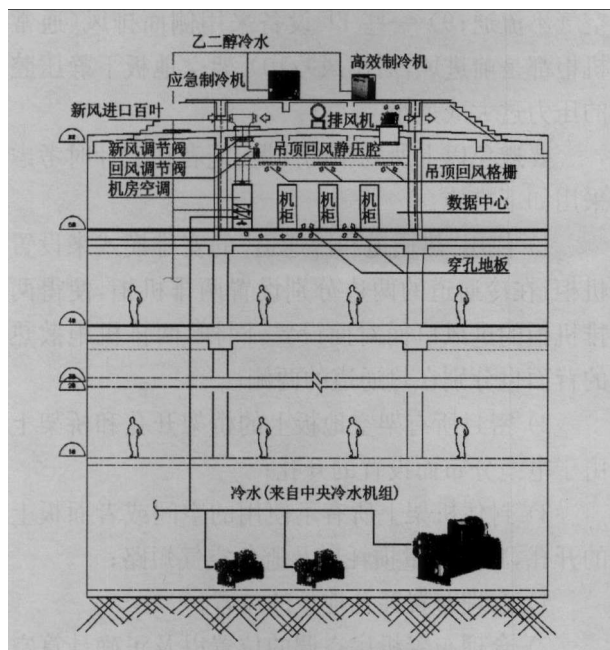


图 1 数据中心空调系统流程图

## 2 空调系统设计

### 2.1 数据中心房间设计温湿度

数据中心和网络系统的 IT 设备会产生大量集中的热量,同时部分设备对温湿度的变化极其敏感。根据设备供应商提供的数据,数据中心 IT 设备要求的运行温度为  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度为  $30\% \sim 80\%$ 。

### 2.2 冷负荷和风量的计算

IT 设备消耗的电量为  $1\ 600\ \text{W}/\text{m}^2$ ,由于 IT 设备是纯散热设备,所以在计算房间负荷时,考虑所有耗电量转换为房间冷负荷,且同时使用系数取  $100\%$ ,1#,2#,3#,4# 数据中心面积依次为  $286,164,104,144\ \text{m}^2$ ,从而得出 4 个数据中心的冷负荷依次为  $457.6,262.4,166.4,230.4\ \text{kW}$ 。

得到了数据中心的冷量和房间的温度后,可以算出所需风量,但是值得注意的是,在计算总送风量时,根据设计经验,增加  $10\%$  的系统冗余以保证由于漏风等造成的损失。

### 2.3 系统方案的确定

在进行空调设计时所遵循的核心思想是在满足设备基本温湿度要求的基础上,尽可能多地运用各种节能手段并且兼顾系统的稳定性、安全性和多样化。

下面结合图 1 详细介绍本数据中心所有风侧及水侧的系统。

#### 2.3.1 风侧系统

1) 在数据中心内设置单独的机房空调 (CRAC),既承担数据中心的冷负荷,又独立于整个大楼的送风系统。

2) 机房空调采用下送上回方式,冷风被送至架空地板下,整个架空地板作为一个送风静压腔,然后通过架空地板上设置的部分穿孔将冷风送至房间内各 IT 机柜。房间回风通过吊顶回风口进入吊顶内,整个吊顶以上的空间作为一个回风静压腔,然后通过安装在吊顶内的回风风管,回到机房空调进行循环冷却。

3) 由于大楼的中央冷水机组于室外温度低于  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  时停止使用,但是数据中心全年需要供冷,所以给数据中心设计了新风供冷模式。4 个数据中心分别位于大楼两侧的顶楼,给新风供冷模式时引进大量新风创造了有利条件。采用新风供冷模式节约了大部分的能源,笔者将在第 5.2 节进行分析。

4) 机房空调全部安装新风管道并且在数据中心配备排风机进行排风以引进新风,排风机设置变频器以控制数据中心的房间始终为正压  $10\ \text{Pa}$ ,并且在过渡季节,通过变频器实现新风供冷,减少了风机的能耗。

#### 2.3.2 水侧系统

1) 在正常模式下,1#~4# 数据中心的所有机房空调采用冷水制冷而非乙二醇溶液制冷,以得到更高的  $COP$ 。冷水来自中央制冷机房的冷水机组,冷水管路单独设置,以确保与整个大楼空调的管路系统相互独立。

2) 考虑到会出现冷水系统故障或者节能模式运行的排风机故障或者大楼意外断电,为 3# 数据中心和位于其他楼层的弱电机房单独设置了一台冷水机组(以下简称“高效冷水机组”),以确保这些房间的空调能  $24\ \text{h}$  不间断供冷。高效冷水机组要求同样具有新风供冷模式,该机组的制冷剂为乙二醇溶液,当室外温度低于乙二醇溶液回水温度时,通过机组自带的三通阀将部分乙二醇溶液引入机组的新风冷却盘管,利用新风进行直接供冷,以达到节能的要求。

3) 考虑高效冷水机组会出现故障,设置一台带应急电源的风冷冷水机组作为备用。

4) 由于中央冷水机组提供普通冷水而高效冷

水机组和备用冷水机组提供的是乙二醇溶液,所以要求机房空调采用双盘管双水源系统,以达到两种模式的切换。

### 2.3.3 空调系统的控制

1) 每个房间的机房空调设置集中控制器,以执行机组切换、风机启停、水阀开关、盘管切换等动作。

2) 高效冷水机组和风冷冷水机组内置控制器对压缩机、冷凝器等进行控制以实现机组的正常运行。

3) 设置一个专门的中央控制器用于采集机房空调的集中控制器的数据,切换高效冷水机组和风冷冷水机组并采集其运行状态信号,控制机房空调新风管风阀以及回风管风阀的开度,控制排风机以及变频器。

### 2.4 气流组织设计

在参考了 Greenberg Steve 博士(伯克利实验室)对美国 22 个数据中心进行研究统计所得出的一系列经验<sup>[1]</sup>以及笔者总结以往所参与的项目和实践中的几个经常出现的问题,提出以下问题:

1) 机柜上部以及周围的热空气短路;2) 由架空地板上电缆桥架穿孔不密封造成空调送风短路;3) 不合理的穿孔地板的布置;4) 不合理的机房空调的布置;5) 不合理的吊顶空间高度的设计造成过小的回风静压箱;6) 架空地板下大管径的水管或者地板下大量的桥架造成的空气阻塞;7) 机柜前后左右开放的面板造成的空气从热通道到冷通

道的短路;8) 由于机柜内部阻力太大造成的内部空气不流通;9) 一些 IT 设备采用侧面排风(通常机柜都是前进风,后出风);10) 架空地板下静压腔的压力过大或过小。

要避免以上所列举的问题,笔者在设计时考虑采用如下措施:

1) 使用“热通道和冷通道”的安排模式来设置机柜,在冷通道的两边分别设置两排机柜,使得两排机柜的进风口面对面设置,同样,两排机柜散热的背面也分别在热通道的两侧;

2) 密封所有架空地板上的桥架开孔和桥架上由于电缆分布而设置的开孔;

3) 封住机架上所有不使用的空间或者面板上的开孔,减少冷量损耗以及避免空气短路;

4) 合理布置穿孔地板的位置;

5) 合理布置机房空调的位置以及正确计算空调的各个参数;

6) 尽量在机柜的上方收集所有的热风进入吊顶静压箱内或者风管内;

7) 将架空地板下大管径的水管布置在机房空调的后下方(设备机房可以稍稍离开墙壁以留出地板下的空间布置水管);

8) 架空地板下的主桥架也尽可能靠墙布置。

克服以上所列各种气流布置的注意点和问题后所布置的典型的机房气流分布见图 2。

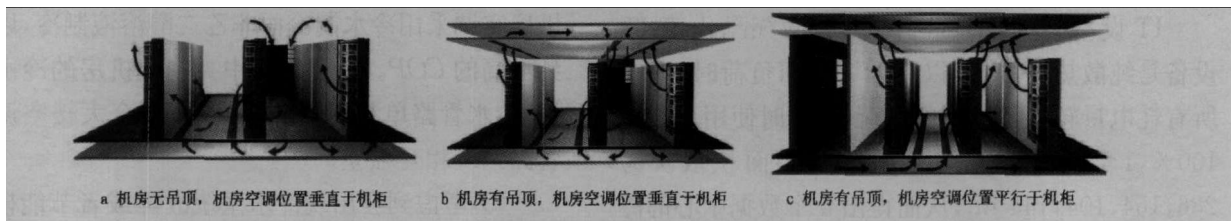


图 2 典型机房气流分布

综上所述,在选择穿孔地板类型时应综合考虑透风率和布置位置并且选择带风阀的穿孔地板以便日后进行风量平衡调试。然后根据机柜的冷量计算所需风量,以 2 m/s 的速度计算穿孔板所需的

截面积,从而确定穿孔板的数量。吊顶回风格栅的设置同样遵循以上原则。

## 3 设备选型

### 3.1 机房空调的选型(见表 1)

表 1 数据中心机房空调数量及形式

数据中心	机房空调	设计冷量/ kW	每台机房空调 冷量/kW	机房空调数量 (运行+备用)/台	应急电源 数量/台	双盘管 数量/台	风量/ (m <sup>3</sup> /h)	冷水温度/ ℃	冷水来源
1#	CRAC/1~5	458	115	4+1	0	0	26 000	8~16	中央机房制冷机
2#	CRAC/6~8	262	130	2+1	0	0	26 000	8~16	中央机房制冷机
3#	CRAC/9~11	166	83	2+1	3	3	26 000	8~13.5/14 <sup>1)</sup>	中央机房制冷机以及高效和应急制冷机
4#	CRAC/12~14	230	115	2+1	0	0	26 000	8~16	中央机房制冷机
总计		1 117		10+4					

1) 3# 数据中心的机房空调配备双盘管。

### 3.2 排风机的选择

由于过渡季节大量的新风会进入数据中心,需要强制排风,并且考虑到数据中心的防排烟设计,所以设置屋顶排风机。根据机房空调的数量配备

排风机,每个数据中心设置 1 台排烟风机。排风机技术参数见表 2。EF/1~3 服务于 1# 数据中心,EF/4~8 服务于 2# 数据中心,EF/9~10 服务于 3# 数据中心,EF/11~13 服务于 4# 数据中心。

表 2 排风机技术参数

排风机编号	风量/(m <sup>3</sup> /h)	机外静压/Pa	风机			电动机			
			类型	功率/kW	转速/(r/min)	功率/kW	电压/V/频率/Hz/相数	控制方法	运行时间
EF/5,8,11,14	19 440	100	轴流风机	2.27	1 450	3	380/50/3	VFD变频	日常通风兼排烟
EF/1~4, 6, 7, 9, 10,12,13	19 440	100	离心式屋顶风机	1.37	473	1.47	380/50/3	VFD变频	日常通风

### 3.3 高效冷水机组的选型(见表 3)

表 3 高效冷水机组技术参数

冷量/kW	全新风/供冷量/kW	制冷剂	蒸发器			冷凝器		总输入功率/kW	
			进/出口水温/℃	压力损失/kPa	水量/(m <sup>3</sup> /h)	介质	进风温度/℃		风量/(m <sup>3</sup> /h)
285.9	190.4	R407C	12/6	122	53.68	乙二醇	34	88,200	109.4
								80%/20%	

### 4 数据中心的能耗分析

对 4 个数据中心的用电能耗进行了统计,见图 3(图中数据是系统正常运行的能耗,其中没有考虑任何节能措施)。IT 设备的能耗为 9 784 920 kWh/a,制冷机能耗为 1 900 920 kWh/a,机房空调的能耗为 765 624 kWh/a,冷却塔和水泵的能耗分别为 131 400 kWh/a 和 486 180 kWh/a,照明能耗为 61 145 kWh/a。该图直观地显示了数据中心设备耗电量的分布,其中,主要的耗电设备是 IT 设备本身,所占比例为 74.5%,除了要求在 IT 设备的设计和选型时尽量选择节能型产品外,25%的空调耗电量也不容小觑,空调工程师应该运用各种节能手段对空调系统进行优化。

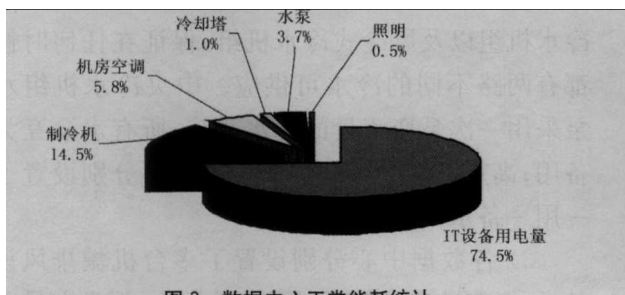


图 3 数据中心正常能耗统计

### 5 节能系统运行费用和投资回收期

数据中心主要的节能模式有中央机房冰蓄冷系统、过渡季新风供冷系统、一次泵变流量系统、冷却塔风机带变频器、带新风冷却的高效冷水机组、带高效盘管的机房空调、高效的电动机等等。本文将就节能比较显著的冰蓄冷和过渡季新风供冷系统进行运行费用的比较和投资回收期的计算。

### 5.1 采用冰蓄冷系统的节能分析

在该项目的空调设计中,配备了 2 台 1 050 kW 的冰蓄冷螺杆制冷机和 1 台容量较大的制冷机。22:00—06:00 由 2 台冰蓄冷螺杆机进行蓄冰,白天电价高峰时进行融冰,供应部分数据中心的空调制冷,考虑到数据中心的冷量非常稳定且集中在特定房间内,所以可以平均分配夜间所蓄冷量(忽略融冰损耗),表 4,5 对冰蓄冷设备的运行费用进行了分析,其中蓄冰空调系统耗电量的计算只包含了制冷机房中的乙二醇主机、乙二醇泵、冷却水泵,冷却塔的电量,常规空调系统的耗电量只含制冷机房中的冷水机组、冷却水泵,冷却塔的电量,其他部分两种系统基本相同,故未加考虑。

表 4 冰蓄冷系统运行费用分析

时刻	电价/(元/(kWh))	负荷/kW	蓄冰空调系统		常规空调系统	
			耗电量/(kWh)	电费/元	耗电量/(kWh)	电费/元
00:00	0.229	0	419	96	0	0
01:00	0.229	0	419	96	0	0
02:00	0.229	0	419	96	0	0
03:00	0.229	0	419	96	0	0
04:00	0.229	0	419	96	0	0
05:00	0.229	0	419	96	0	0
06:00	0.229	0	354	81	0	0
07:00	0.621	0	0	0	0	0
08:00	1.003	1 780	38	38	420	421
09:00	1.003	1 780	38	38	420	421
10:00	1.003	1 780	38	38	420	421
11:00	0.621	0	0	0	0	0
12:00	0.621	0	0	0	0	0
13:00	0.621	0	0	0	0	0
14:00	0.621	0	0	0	0	0
15:00	0.621	0	0	0	0	0
16:00	0.621	0	0	0	0	0
17:00	0.621	0	0	0	0	0
18:00	1.003	1 780	38	38	420	421
19:00	1.003	1 780	38	38	420	421
20:00	1.003	1 780	38	38	420	421
21:00	0.621	0	0	0	0	0
22:00	0.621	0	0	0	0	0
23:00	0.229	0	419	96	0	0
总计		10 680		981		2 529

注:蓄冰系统较常规系统节省电费 1 548 元/d,占正常运行能耗的 38.8%。

表 5 蓄冰设备投资回收期计算

蓄冰空调系统增加的初投资/元	1 522 000	包括乙二醇水泵,蓄冰设备(13 365 kWh (3 800 rth)),换热器,乙二醇溶液
每年节约的费用/元	230 000	以全年运行冰蓄冷系统 150d 计算
设备投资回收期/a	7	系统运行前 7 a 为投资回收阶段
按设备寿命 20 a 计,共节约运行费用/元	3 000 000	系统运行的后 13 a 所节约的费用

5.2 采用过渡季节新风供冷系统的节能分析

当采用过渡季节新风供冷系统时,服务数据中心的设备仅仅是机房空调和排风机。当室外的比焓小于数据中心内的比焓时,空调的冷源可以采用室外的新风。第 2.3.1 节中提到过 4 个数据中心将设置 1 台中央控制器控制整个数据中心空调系统,室外的比焓值由空气处理设备系统上的新风温湿度传感器采集并计算得到,室内的比焓值为干球温度 15℃,相对湿度 26% 时的比焓,中央控制器根据逐时的比焓比较来控制新风阀门的开度。根据上海市历年逐时温湿度数据统计了过渡季节新风供冷系统和日常冷水机组系统的运行费用,并对前者的运行成本进行了分析,结果见表 6。从表中可以看到,两种系统运行时间相同,全年不间断运行,但耗电量不同。当采用过渡季节新风供冷系统时,耗电量的计算只包含了排风机的用电量,如表中的 1—4 月和 11,12 月;当系统的冷源来自中央冷水机组系统时,耗电量包含了 1 台 1050kW 螺

表 6 过渡季节新风供冷系统和中央冷水机组空调系统的运行时间和成本比较及设备投资回收期计算

月份	过渡季节新风供冷系统			中央冷水机组空调系统		
	运行时间/h	耗电量/(kWh)	电费/元	运行时间/h	耗电量/(kWh)	电费/元
1	744	2 708.16	1 625	744	210 924	126 554
2	696	2 533.44	1 520	696	197 316	118 390
3	744	2 708.16	1 625	744	210 924	126 554
4	720	2 620.80	1 572	720	204 120	122 472
5	744	210 924.00	126 554	744	210 924	126 554
6	720	204 120.00	122 472	720	204 120	122 472
7	744	210 924.00	126 554	744	210 924	126 554
8	744	210 924.00	126 554	744	210 924	126 554
9	720	204 120.00	122 472	720	204 120	122 472
10	744	210 924.00	126 554	744	210 924	126 554
11	720	2 620.80	1 572	720	204 120	122 472
12	744	2 708.16	1 625	744	210 924	126 554
总计		760 701			1 494 158	
过渡季节新风供冷系统较中央冷水机组系统年节省电费/(元/a)				733 457		
节约费用占正常运行费用的百分比/%				50.9		
过渡季节新风供冷系统所增加的额外费用(排风机,变频器,新风百叶,风管)/(元/a)				630 000		
设备投资回收期/a				1.2		
按设备寿命 20 a 计,共节约运行费用/元				13 788 992		

注:电价按 0.6 元/(kWh)计。

杆冷水机组、冷水泵、冷却水泵、冷却塔。由于其他部分,例如机房空调,无论何种系统运行能耗都相同,故未考虑其耗电量。

应用以上两种节能方式后,全年能耗统计见图 4。两种节能方式节约的费用约为 14 000 000 元/a,约占整栋大楼空调年运行费用的 30%。

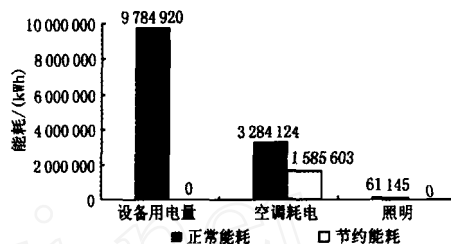


图 4 数据中心采取节能措施后全年能耗统计

6 系统的安全可靠性和多样化

为了保证 3# 数据中心全年 8 760 h 不间断电源(同时也兼顾该大楼中其他有同样要求的房间,如弱电机房、程控交换机房和 UPS 房间等),设计中机房空调进行互为备用和多样化的设计。

6.1 设备的备用和多样化

1) 各数据中心分别设置了 N(表示实际需要的设备台数)+1 台机房空调,保证任何 1 台机器发生故障都能有备用空调替代,同时也合理分配了每台机房空调的运行时间,机组的控制和切换由各数据中心的机房空调的集中控制器进行。

2) 对于要求较高的 3# 中心,机房空调配备了双盘管,冷源分别来自不同的冷水机组。设计三路冷水系统,分别是来自中央冷水机组,高效冷水机组以及风冷式冷水机组,保证在任何时候都有两路不同的冷水可供应。中央冷水机组水泵采用一次泵变流量的集水系统,所有水泵互为备用;高效冷水机组和风冷冷水机组分别设置了一用一备水泵。

3) 各数据中心分别设置了多台机械排风设备,不仅在过渡季节可利用新风供冷,而且在最差的情况下(假设所有冷水机组都故障的情况下)机房有最基本的通风功能。对于 3# 数据中心,机房空调和排风机都配备了应急电源。

6.2 系统的备用和多样化

除了设备的互为备用和多样化以外,空调系统也要求互为备用和多样化,本项目中根据温度提出了不同的方案,每种方案都保证有 3 套系统可以互

为支持运行。

1) 当室外温度高于 15 °C 时,机房空调制冷可以来自于:中央冷水机组+机房空调(冷水盘管),高效冷水机组+机房空调(乙二醇盘管),风冷冷水机组+机房空调(乙二醇盘管)。

2) 当室外温度低于 15 °C 时,机房空调制冷可以来自于:排风机+机房空调(无冷水),高效冷水机组+机房空调(乙二醇盘管),风冷冷水机组+机房空调(乙二醇盘管)。

### 6.3 系统的应急性

对于 3# 数据中心,所有服务于机房的空调排风机和风冷冷水机组都设有来自柴油发电机组的应急电源。当大楼两路供电都失效时,机房空调的制冷来自:风冷冷水机组+机房空调(乙二醇盘管),排风机+机房空调(无冷水)。

### 7 结语

对上海某研发大楼 4 个数据中心的空调系统设计进行了介绍,并从系统设计、气流分布、设备选型、节能方案、系统的安全可靠性和多样化等方面进行了详细描述。数据中心是个纯显热的环境,并且要全年连续运行,根据这一特点,过渡季节新风供冷系统的合理应用可以节约运行费用,结合空调本身的一些节能措施,如冰蓄冷冷

水机组、高效率的带全新风制冷的冷水机组、设备中高效率的电动机以及一套智能的独立的数据中心空调的中央控制器,种种节能系统的结合,使得整个数据中心的空调系统设计得到了优化,更使得数据中心的日常运行费用得到了大幅缩减。这种节能设计理念也给空调设计工作者拓宽了思路,更给数据中心运营者提供了更多合理选择。最后,不得不提的是数据中心的空调的多样化和安全性,只有具备了一个多样化的系统,使得数据中心的空调系统能够确保全年不间断运行,以上种种节能方案才能得以实现。

### 参考文献:

- [1] Steve Greenberg, Evan Mills, Bill Tschudi. Best practices for data centers: lessons learned from Benchmarking 22 Data Centers[D]
- [2] ASHRAE Technical Committee (TC) 9. 9. Thermal guidelines for data processing environments. TC 9. 9 mission critical facilities [R]. Atlanta, Geor; American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, 2004
- [3] 赵荣义,范存养,薛殿华,等. 空气调节[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2000
- [4] 陈霖霖,岳孝方. 空气与制冷技术手册[M]. 2 版. 上海:同济大学出版社,1999
- [5] radiation in a panel-heated room [G] // ASHRAE Trans, 1956, 62: 337-358
- [6] 王景云,王建翔,林其标,等. 建筑物理[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1987
- [7] ASHRAE. ASHRAE handbook—fundamentals[M]. Atlanta: ASHRAE Inc, 2005
- [8] [英] 麦金太尔 D A. 室内气候[M]. 龙惟定,殷平,夏清,译. 上海:上海科学技术出版社,1988
- [9] ASHRAE. ASHRAE handbook—HVAC systems and equipment[M]. Atlanta: ASHRAE Inc, 2008
- [10] 中国有色工程设计研究总院. GB 50019—2003 采暖通风与空气调节设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2004
- [11] 朱颖心. 建筑环境学[M]. 2 版. 北京:中国建筑工业出版社,2005
- [12] 王昭俊. 现场研究中热舒适指标的选取问题[J]. 暖通空调, 2004, 34(12): 39-41
- [13] [丹麦] 范格 P O. 舒适[M]. 李天麟,译. 北京:科学技术出版社,1992
- [14] 亢燕铭,沈恒根,徐惠英,等. 地板辐射供暖的节能效应分析[J]. 暖通空调, 2001, 31(4): 4-6
- [15] 朱能,吕石磊,刘俊杰,等. 人体热舒适区的实验研究[J]. 暖通空调, 2004, 34(12): 19-23
- [16] 王怡,刘加平. 空调房间冬季室内致适参数的分析与研究[J]. 暖通空调, 2000, 30(3): 12-14
- [17] 罗忆,刘忠伟. 建筑节能技术与应用[M]. 北京:化学工业出版社,2007
- [18] 薛卫华,张旭. 供暖房间热环境参数的实验研究及人体热舒适的模糊分析[J]. 建筑热能通风空调, 2000, 19(2): 1-4
- [19] Min T C, Schutrum L F. Natural convection and

(上接第 141 页)

### 参考文献:

- [1] 王景云,王建翔,林其标,等. 建筑物理[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1987
- [2] ASHRAE. ASHRAE handbook—fundamentals[M]. Atlanta: ASHRAE Inc, 2005
- [3] [英] 麦金太尔 D A. 室内气候[M]. 龙惟定,殷平,夏清,译. 上海:上海科学技术出版社,1988
- [4] 朱颖心. 建筑环境学[M]. 2 版. 北京:中国建筑工业出版社,2005
- [5] [丹麦] 范格 P O. 舒适[M]. 李天麟,译. 北京:科学技术出版社,1992
- [6] 朱能,吕石磊,刘俊杰,等. 人体热舒适区的实验研究[J]. 暖通空调, 2004, 34(12): 19-23
- [7] 罗忆,刘忠伟. 建筑节能技术与应用[M]. 北京:化学工业出版社,2007
- [8] Min T C, Schutrum L F. Natural convection and