

# 广州某办公建筑集中空调系统能耗分析\*

骆超<sup>1),2),3),4)</sup> 刘广平<sup>1),2),3),5)</sup> 徐琼辉<sup>1),2),3)</sup> 龚宇烈<sup>1),2),3)</sup>  
马志同<sup>1),2),3)</sup> 马伟斌<sup>1),2),3)</sup>

<sup>1)</sup>(中国科学院广州能源研究所) <sup>2)</sup>(中国科学院可再生能源重点实验室)

<sup>3)</sup>(广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室)

<sup>4)</sup>(中低温热能高效利用教育部重点实验室(天津大学)) <sup>5)</sup>(中国科学院大学)

**摘要** 以广州某办公建筑集中空调系统为典型案例,基于集中空调系统的制冷系数、能效比等指标,从工艺和设备方面,提出办公场所集中空调系统的不同改造方案,对比不同方案的节能潜力,并基于层次分析法给出各个优化方案的权重。结果表明:采用水泵和压缩机变频技术并提高室内设定温度的节能潜力最大;合理确定设计运行参数,可以有效节约空调系统用能。

**关键词** 集中空调系统;办公建筑;层次分析法;节能潜力;优化设计

## Energy consumption analysis on central air-conditioning system of one office building

Luo Chao<sup>1),2),3),4)</sup> Liu Guangping<sup>1),2),3),5)</sup> Xu Qionghui<sup>1),2),3)</sup>  
Gong Yulie<sup>1),2),3)</sup> Ma Zhitong<sup>1),2),3)</sup> Ma Weibin<sup>1),2),3)</sup>

<sup>1)</sup>(Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences)

<sup>2)</sup>(Key Laboratory of Renewable Energy, Chinese Academy of Science)

<sup>3)</sup>(Guangdong Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development)

<sup>4)</sup>(Key Laboratory of Efficient Utilization of Low and Medium Grade Energy (Tianjin University), Ministry of Education) <sup>5)</sup>(University of Chinese Academy of Sciences)

**ABSTRACT** Taking the central air-conditioning system for one office building in Guangzhou as typical case, based on the main indexes of central air-conditioning system, such as COP and EER, different kinds of optimization scheme of central air-conditioning systems in office building are provided from the aspects of process and equipment. The energy-saving potentials of different schemes are compared, and the weight ratios of the schemes are calculated based on analytic hierarchy process. The results show that the pump & compressor frequency conversion technologies and higher indoor temperature are the main energy efficiency measurements for central air-conditioning system. The reasonable operation parameters are positive for energy-saving in central air-conditioning system.

**KEY WORDS** central air-conditioning system; office building; analytic hierarchy process; energy-saving potential; optimized design

随着经济的发展和人们对舒适性环境要求的提高,建筑物及其空调系统的能耗问题日益严峻。空调能耗约占公共建筑能耗的30%~60%<sup>[1]</sup>,以

北京和广州为例,北京地区的商场、宾馆、写字楼的空调系统电耗占总用电量的40%~60%,广州地区的商场、写字楼和医院的空调能耗约占27%

\* 广东省科技计划项目“典型用能系统节能诊断技术研究与应用”(2013B091500087)。

收稿日期:2016-05-26

作者简介:骆超,在职博士研究生,工程师,主要研究方向为用能系统节能潜力分析与节能诊断技术等。

~40%<sup>[2-3]</sup>。张圆明等<sup>[4]</sup>提出集中空调系统有 2 个节能途径:一是从围护结构、照明和人员等 3 方面减少制冷空调不必要的冷负荷;二是利用空调排风冷量回收和智能化优化控制等 6 种技术提高集中空调系统的能源利用效率。杨昌智等<sup>[5]</sup>针对长沙市公共建筑集中空调系统能耗结果,从空调冷热源选择、运行管理和政策支持等方面提出了提高空调系统能源利用率的建议。重庆大学<sup>[6-9]</sup>在对公共建筑整体能耗评价的基础上,对集中空调系统进行了能耗测试和节能潜力分析,提出了不同优化方案并进行节能性和经济性对比,指出在保持室内热舒适的前提下,提高空调系统的能源利用率,对我国建筑节能有着重要作用。

笔者针对广州某办公建筑集中空调系统,提出 7 种优化方案,并基于层次分析法,以经济性、节能性和环保性为性能指标,分析不同方案的权重,为空调系统的管理者提供理论支撑。

### 1 空调系统优化方案设计及潜力分析

以广州市某办公建筑为例,坐北朝南,共 3 层,层高 3 m,建筑宽 10 m,长 30 m。一二层为办公室,由分体式空调器单独供冷;三层为公共场所,采用集中空调系统供冷。笔者仅对三层公共场所的集中空调系统进行方案设计和节能潜力分析。如图 1 所示,三层公共场所集中空调系统包括 4 个回路:空气侧回路、冷冻水回路、制冷回路和排热回路。

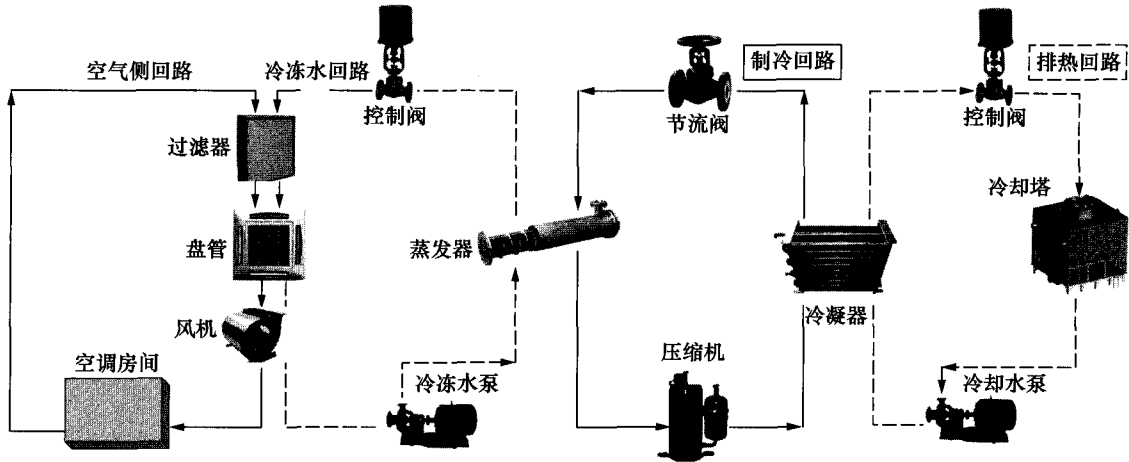


图 1 集中空调系统示意图

集中空调系统的能耗一般包括 3 个部分:空调冷热源的能耗、水或空气输送系统能耗及空调机组末端设备的能耗。原有集中空调系统的室内设定温度为 26 °C,送风温差为 7 °C,冷冻水温差为 5 °C,冷却水温差为 5 °C,相关基准数据和性能指标数据如表 1 所示。

表 1 原有集中空调系统基准数据

额定 制冷量/ kW	设备 总功耗/ kW	单位耗电 CO <sub>2</sub> 减排量/ (kg/(kW·h))	电价/(元/ 千瓦时)	年运行 时间/h
50	27.64	0.890 8	0.65	1 440

按照实际空调改造的可操作性原则,对三层办公场所集中空调系统在技术和工艺上进行了如下 7 种方案设计,并从经济性(只考虑运行费用,暂且不考虑投资成本)、节能性和环保性三方面进行了潜力分析。

方案一,即采用水泵变频技术,使空调的冷冻水温差增加至 10 °C;

方案二,即采用压缩机变频技术,减小压缩机进出口压差,送风温差增加至 9.8 °C,使压缩机功率随着需求侧负荷的变化而变化;

方案三,即增强节能意识,使室内空调设定温度提高至 27 °C;

方案四,即采用水泵和压缩机变频技术,使冷冻水温差增加至 10 °C,送风温差增加至 9.8 °C;

方案五,即采用压缩机变频技术和提高室内温度,使送风温差增加至 9.8 °C,室内空调设定温度提高至 27 °C;

方案六,即采用水泵变频技术并提高室内设定温度,使冷冻水温差增加至 10 °C,室内空调设定温度提高至 27 °C;

方案七,即同时采用水泵和压缩机变频技术,并提高室内设定温度,使冷冻水和冷却水温差增加至 10 °C,使送风温差增加至 9.8 °C,室内空调设定温度提高至 27 °C。

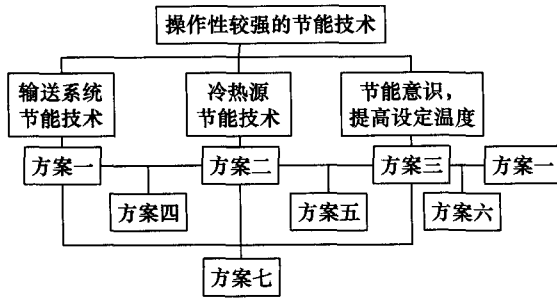


图 2 方案拓扑关系图

上述 7 种方案的拓扑关系如图 2 所示。利用下述公式计算空调系统的性能指标：制冷机组的制冷系数  $COP$  为

$$COP = \frac{Q}{N_{chiller}} \quad (1)$$

空调系统的能效比  $EER$  为

$$EER = \frac{Q}{N_{chiller} + P_{chilled} + P_{cooling}} \quad (2)$$

冷冻水输送系数  $WTF_{chilled}$  为

$$WTF_{chilled} = \frac{Q}{P_{chilled}} \quad (3)$$

冷却水输送系数  $WTF_{cooling}$  为

$$WTF_{cooling} = \frac{Q}{P_{cooling}} \quad (4)$$

式中： $Q$  为空调负荷(kW)， $Q = c_p m_{chilled} \Delta t$ ， $c_p$  为水的定压比热容(kJ/(kg·K))， $m_{chilled}$  为冷冻水质量流量(kg/s)， $\Delta t$  为冷冻水温差(°C)； $N_{chiller}$  为制冷机功率(kW)； $P_{chilled}$  和  $P_{cooling}$  分别为冷冻水泵和冷却水泵功率(kW)， $P = q_v m \Delta p$ ， $q_v$  为水的比容( $m^3/kg$ )， $m$  为水泵工质的质量流量(kg/s)， $\Delta p$  为泵前后压差(kPa)。

利用式(1)~式(4)计算得出 7 种方案的性能指标，如表 2 所示。

对原有集中空调系统和改造系统的经济性(年运行费用)、节能性(年耗电量)和环保性( $CO_2$  排放量)进行计算，其节能潜力如表 3 所示。

表 2 集中空调系统性能指标

方案	$COP$	$EER$	$WTF_{chilled}$	$WTF_{cooling}$	室内设定温度/°C
原有系统	4.105	3.264	30.40	36.90	26
方案一	4.114	3.356	43.00	36.90	26
方案二	3.448	2.743	26.46	32.44	26
方案三	4.382	3.386	29.16	35.32	27
方案四	3.455	2.283	37.42	32.44	26
方案五	3.667	2.858	25.50	31.60	27
方案六	4.392	3.512	41.25	35.32	27
方案七	3.676	2.961	36.06	31.16	27

表 3 集中空调系统经济性对比(一年期)

方案	运行费用/万元	耗电量/(kW·h)	$CO_2$ 排放量/t	相对节约运行费用/万元	相对节电量/(kW·h)	相对减少 $CO_2$ 排放量/t
原有系统	2.59	39 801.6	35.46	—	—	—
方案一	2.50	38 448.0	34.25	0.09	1 353.6	1.21
方案二	2.31	35 568.0	31.68	0.28	4 233.6	3.78
方案三	2.28	35 121.6	31.29	0.31	4 680.0	4.17
方案四	2.24	34 488.0	30.72	0.35	5 313.6	4.74
方案五	2.06	31 766.4	28.30	0.53	8 035.2	7.16
方案六	2.20	33 868.8	30.17	0.39	5 932.8	5.29
方案七	1.99	30 672.0	27.32	0.60	9 129.6	8.14

从表 3 可以看出，方案七的节能性、经济性和环保性最好，每年可节约电量约 9 129.6 kW·h，运行费用近 0.60 万元和减排  $CO_2$  近 8.14 t；方案一的效果最不明显，年节约电量约 1 353.6 kW·h，节约运行费用 0.09 万元和每年可减排  $CO_2$  约 1.21 t。

上述分析给出了 7 种空调系统的改造方案。在实际空调工程改造中，通常采用电机变频、更换高效电机、更换冷冻/却水泵和压缩机变频等设备改造手段，对于管道布置等工艺流程的改造由于

涉及成本较高，常常不采用。另外，从上述方案也可以看出，合理的设计和运行参数(送风温差 9.8 °C，冷冻水温差 10 °C)有利于空调系统节能。

## 2 评价方法及模型分析

### 2.1 层次分析法

采用层次分析法建立综合评价模型，全面、客观、综合分析各优化方案的权重，具体分为以下 4 个步骤：

①建立层次结构模型。明确所要解决的问题，确定问题所涉及的因素以及各因素之间的相

互关系。

②构造判断矩阵。设有  $m$  个目标(方案或元

素),根据专家经验,将这  $m$  个目标的相对重要性两两进行比较,评判时引入了九分位的比例标度,见表 4。

表 4 相对重要性的比例标度

相对乙指标	极重要	很重要	重要	略重要	同等	略次要	次要	很次要	极次要
甲指标评价值	9	7	5	3	1	1/3	1/5	1/7	1/9

注:取 8,6,4,2,1/2,1/4,1/6,1/8 为上述评价值的中间值。

③判断矩阵的一致性检验。对于每一层次作单准则排序时,均需要做一致性的检验,首先须计算一致性指标  $C. I$ ,

$$C. I = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

式中: $n$  为矩阵阶数; $\lambda_{\max}$  为矩阵最大特征向量值。

然后计算一致性比率  $C. R$ ,

$$C. R = \frac{C. I}{R. I} \quad (6)$$

式中  $R. I$  为平均随机一致性指标。

根据表 5 查找  $R. I$ ,给出判断结果。当  $C. R < 0.10$  时,认为判断矩阵的一致性是可以接受的,否则应对判断矩阵作适当的修改。

表 5 平均随机一致性指标

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$R. I$	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51

④层次排序,给出决策排名。

## 2.2 评价模型及分析

对集中空调系统方案构建评价模型,如图 3 所示。其中,准则层主要考虑经济性、节能性以及环保性因素,方案层包括上述 7 种方案。

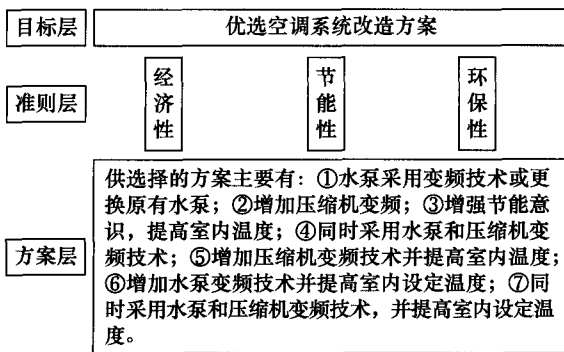


图 3 空调系统方案评价模型

根据表 3 构造准则层对目标层的比较矩阵  $A$ ,并求解矩阵  $A$  的特征值  $\lambda_A$  和权重系数  $\omega_A$ 。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ \frac{1}{3} & 1 & 3 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\lambda_A = \begin{bmatrix} 1.900 & 0 \\ 0.781 & 5 \\ 0.318 & 5 \end{bmatrix}$$

$$\omega_A = \begin{bmatrix} 0.633 & 3 \\ 0.260 & 5 \\ 0.106 & 2 \end{bmatrix}$$

目标矩阵  $A$  的最大特征向量  $\lambda_{\max}$  和一致性指标  $C. I$  分别为 3.04 和 0.019。

一致性比率  $C. R = C. I / R. I = 0.037 < 0.1$ ,矩阵  $A$  通过一致性验证。

提高室内设定温度,构造方案层对准则层经济性、节能性、环保性的目标矩阵  $B_1^{(7)}$ ,  $B_2^{(7)}$  和  $B_3^{(7)}$ :

$$B_1^{(7)} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{9} & \frac{1}{6} & \frac{1}{9} \\ 3 & 1 & \frac{1}{5} & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{7} \\ 7 & 5 & 1 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & \frac{1}{5} \\ 5 & 2 & 1 & 1 & \frac{1}{4} & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} \\ 9 & 3 & 3 & 4 & 1 & 3 & \frac{1}{3} \\ 6 & 3 & 2 & 3 & \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{3} \\ 9 & 7 & 5 & 5 & 3 & 3 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$B_2^{(7)} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{4} & \frac{1}{7} & \frac{1}{4} & \frac{1}{9} \\ 3 & 1 & 2 & \frac{1}{2} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{7} \\ 3 & \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{7} \\ 4 & 2 & 2 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & \frac{1}{7} \\ 7 & 5 & 5 & 3 & 1 & 5 & \frac{1}{3} \\ 4 & 3 & 3 & 2 & \frac{1}{5} & 1 & \frac{1}{5} \\ 9 & 7 & 7 & 7 & 3 & 5 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$B_3^{(7)} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{9} \\ 3 & 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{7} & \frac{1}{4} & \frac{1}{7} \\ 4 & 2 & 1 & 1 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} \\ 4 & 2 & 1 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & \frac{1}{5} \\ 7 & 7 & 5 & 3 & 1 & 3 & \frac{1}{3} \\ 5 & 4 & 3 & 2 & \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{3} \\ 9 & 7 & 5 & 5 & 3 & 3 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

第二层次目标矩阵  $B_1^{(7)}$ ,  $B_2^{(7)}$  和  $B_3^{(7)}$  的特征向量和权重分别记为  $\lambda_{B_1}$ ,  $\lambda_{B_2}$ ,  $\lambda_{B_3}$  和  $\omega_{B_1}$ ,  $\omega_{B_2}$ ,  $\omega_{B_3}$  :

$$\lambda_{B_1} = \begin{bmatrix} 0.154 4 \\ 0.335 8 \\ 0.766 8 \\ 0.540 6 \\ 1.571 0 \\ 0.982 6 \\ 2.648 9 \end{bmatrix}, \lambda_{B_2} = \begin{bmatrix} 0.185 8 \\ 0.418 5 \\ 0.342 7 \\ 0.578 6 \\ 1.708 2 \\ 0.792 6 \\ 2.973 6 \end{bmatrix}, \lambda_{B_3} = \begin{bmatrix} 0.179 8 \\ 0.324 2 \\ 0.514 1 \\ 0.560 1 \\ 1.764 8 \\ 0.999 3 \\ 2.657 7 \end{bmatrix}$$

$$\omega_{B_1} = \begin{bmatrix} 0.022 1 \\ 0.048 0 \\ 0.109 5 \\ 0.077 2 \\ 0.224 4 \\ 0.140 4 \\ 0.378 4 \end{bmatrix}, \omega_{B_2} = \begin{bmatrix} 0.026 5 \\ 0.059 8 \\ 0.049 0 \\ 0.082 7 \\ 0.244 0 \\ 0.113 2 \\ 0.424 8 \end{bmatrix}, \omega_{B_3} = \begin{bmatrix} 0.025 7 \\ 0.046 3 \\ 0.073 4 \\ 0.080 0 \\ 0.252 1 \\ 0.142 8 \\ 0.379 7 \end{bmatrix}$$

第二层次目标矩阵  $B_1^{(7)}$ ,  $B_2^{(7)}$  和  $B_3^{(7)}$  的一致性指标  $C. I_{B_1}$ ,  $C. I_{B_2}$  和  $C. I_{B_3}$  分别为 0.082, 0.07 和 0.05; 一致性比率  $C. R_{B_1}$ ,  $C. R_{B_2}$  和  $C. R_{B_3}$  分别为 0.06, 0.05 和 0.039。

第二层次目标矩阵  $B_1^{(7)}$ ,  $B_2^{(7)}$  和  $B_3^{(7)}$  均通过一致性验证。

第二层次目标矩阵  $B_1^{(7)}$ ,  $B_2^{(7)}$  和  $B_3^{(7)}$  的权重组成新的矩阵  $\omega_B$ , 层次总目标排序  $\omega$  为  $\omega_B$  和  $\omega_A$  的乘积。

$$\omega_B = \begin{bmatrix} 0.022 1 & 0.026 5 & 0.025 7 \\ 0.048 0 & 0.059 8 & 0.046 3 \\ 0.109 5 & 0.049 0 & 0.073 4 \\ 0.077 2 & 0.082 7 & 0.080 0 \\ 0.224 4 & 0.244 0 & 0.252 1 \\ 0.140 4 & 0.113 2 & 0.142 8 \\ 0.378 4 & 0.424 8 & 0.379 7 \end{bmatrix}$$

$$\omega = \omega_B \omega_A = \begin{bmatrix} 0.022 1 & 0.026 5 & 0.025 7 \\ 0.048 0 & 0.059 8 & 0.046 3 \\ 0.109 5 & 0.049 0 & 0.073 4 \\ 0.077 2 & 0.082 7 & 0.080 0 \\ 0.224 4 & 0.244 0 & 0.252 1 \\ 0.140 4 & 0.113 2 & 0.142 8 \\ 0.378 4 & 0.424 8 & 0.379 7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.633 3 \\ 0.260 5 \\ 0.106 2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.023 6 \\ 0.050 9 \\ 0.089 9 \\ 0.078 9 \\ 0.232 4 \\ 0.133 6 \\ 0.390 6 \end{bmatrix}$$

通过层次分析评价模型和计算, 空调系统 7 个方案中, 方案七所占的权重百分比最高为 39.06%, 说明采用水泵和压缩机变频技术并提高室内设定温度的节能、经济和环保效果最好; 其次为方案五, 所占权重为 23.25%, 说明增加压缩机变频技术并提高室内温度的改造效果次之。

根据模型计算权重和潜力分析结果, 空调系统 7 个方案的权重分别为 2.36%, 5.09%, 7.89%, 8.99%, 23.25%, 13.36%, 39.06%。因此, 对空调系统改造的方案选择依次为: ⑦同时采用水泵和压缩机变频技术, 并提高室内设定温度, ⑤增加压缩机变频技术并提高室内温度, ⑥增加

水泵变频技术并提高室内设定温度, ④同时采用水泵和压缩机变频技术, ③增强节能意识, 提高室内温度, ②增加压缩机变频, ①采用水泵变频技术或更换原有水泵。

基于经济性、节能性和环保性三方面的综合性能指标, 采用层次分析法, 全面、客观地得出 7 种方案的权重比例, 避免了单一评价指标带来的片面性和公正性问题。通过权重比例结果可以看出, 单一技术改造方面, 合理设定运行参数的权重 (7.89%) 远高于水泵变频 (2.36%) 和压缩机变频 (5.09%), 从而给空调系统的管理层发出信号, 宣传节能理念和提高自觉节能意识比设备改造能够更有效地节约能源。

### 3 结论

通过对办公场所集中空调系统方案设计和节能潜力分析,得出如下结论:

1) 空调系统实际改造工程,常采用变频、更换高效电机、增加制冷主机等设备改造的方法,使空调系统处于节能的运行模式。笔者对集中空调系统的节能技术进行了不同组合方案设计,单一采用水泵变频、压缩机变频技术和提高室内设定温度的节能率相对原有系统可以提高 3.4%,10.6% 和 11.8%,3 种技术全部采用的效果最优,年节电量和相对 CO<sub>2</sub> 减排量分别为 9 129.6 kW·h 和 8.14 t。

2) 合理确定设计运行参数,可以有效节约空调系统用能。空调系统的设计送风温差为 9.8 °C 时,空调系统的节能效果最为理想,提高自觉节能意识,当室内设定温度升高 1 °C,可以节约能量约 5% 左右。通过方案三的节能潜力分析,提高室内温度 1 °C,较原有空调系统可以节约 11.3% 的耗电量。

3) 不同优化方案的权重系数与其采用的节能技术和节能潜力相关。节能潜力最大和最小的权

重比例分别为 39.06% 和 2.36%,权重份额的计算结果有助于空调系统管理层作出决策,有针对性地对空调系统能耗较高的部分进行改造。

### 参考文献

- [1] 罗运有. 某集中空调冷源系统性能评估及节能潜力分析[J]. 建设科技, 2015(6): 74-75.
- [2] 薛志峰, 江亿. 北京市大型公共建筑用能现状与节能潜力分析[J]. 暖通空调, 2004, 34(9): 8-10.
- [3] 宋玮. 广州地区公共建筑能耗调查与研究[D]. 广州: 广州大学, 2006.
- [4] 张圆明, 杨茹. 中央空调系统节能潜力及途径分析[J]. 应用能源技术, 2015(11): 30-34.
- [5] 杨昌智, 吴晓艳. 长沙市公共建筑空调系统能耗现状与节能潜力分析[J]. 暖通空调, 2005, 35(12): 39-43.
- [6] 蒲清平. 城市居住建筑能耗影响因素与预测模型构建研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [7] 马明明. 公共建筑空调系统改造与节能潜力的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [8] 钟玮. 我国建筑集中空调能耗现状及全面节能措施[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
- [9] 郭林文. 重庆市公共建筑能耗现状及节能评价分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2005.

(上接第 65 页)

最高点出现在 1 m 左右竖直高度处,到 1.5 m 处时风速基本衰减为 0。由于 1 m 左右的高度相当于感受明显的人的腹部位置,因此要提高蒸发式冷气机在户外应用时人体的舒适性,须对蒸发式冷气机的高度做适当的调整。由图 6(b)中测点 5 的风速变化曲线可以看出,该测点位置的风速波动较为平缓,可以满足工作人员的热舒适性。因此,当交警站在距离蒸发式冷气机出风口 0.8 m 的位置时是人的最佳舒适位置。

### 4 结论

蒸发式冷气机在交通岗亭使用时的蒸发冷却效率为 70%,其有效覆盖面积为 4.9 m<sup>2</sup>。当交警站在距离冷气机出风口 0.8 m 的位置时是人的最佳舒适位置。实测结果证明了蒸发式冷气机为户外岗亭降温的可行性,并为今后岗亭用蒸发式冷气机的研发奠定基础。

### 参考文献

- [1] 黄翔. 国内外蒸发冷却空调技术研究进展(1)[J]. 暖通空调, 2007, 37(2): 24-25.
- [2] 尧德华, 黄翔, 吴志湘. 蒸发冷却与工位—环境送风相结合空调系统的应用分析[J]. 制冷空调与电力机械, 2009, 30(3): 69-71.
- [3] 黄翔. 空调工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [4] 钱炜. 城市户外热环境舒适性研究[D]. 重庆大学, 2003.
- [5] 田元媛, 许为全. 热湿环境下人体热反应的实验研究[J]. 暖通空调, 2003, 33(4): 27-30.
- [6] 孙哲, 黄翔, 范坤, 等. 蒸发式蒸发式冷气机在西安地区的几种应用[J]. 发电与空调, 2012, 33(6): 88-91.
- [7] 黄翔, 夏青, 孙铁柱. 蒸发冷却空调技术分类及术语探讨[J]. 暖通空调, 2012, 42(9): 52-57.
- [8] 黄翔. 蒸发冷却空调理论与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [9] 约翰·瓦特, 威尔·布朗. 蒸发冷却空调技术手册[M]. 黄翔, 武俊梅, 等, 译. 北京: 机械工业出版社, 2008.