

# 设定参数对空调系统能耗的影响

邱泽晶<sup>1</sup>, 骆超<sup>2</sup>, 马志同<sup>2,3,4</sup>, 郑鑫<sup>1</sup>, 段志强<sup>5</sup>

1. 南瑞(武汉)电气设备与工程能效测评中心, 武汉 430074
2. 中国科学院广州能源研究所; 中国科学院可再生能源重点实验室, 广州 510640
3. 中国科学院大学, 北京 100086
4. 深圳市计量质量检测研究院, 深圳 518055
5. 国家电网湖北省电力公司经济技术研究院, 武汉 430074

**摘要** 选择位于深圳的一栋小面积办公建筑为例, 建立了建筑空调系统的物理和数学模型, 基于EES和Matlab软件计算模拟, 研究了空调系统的室内设定温度、送风温差、冷冻水和冷却水温差参数对空调系统能效比(EER)、制冷系数(COP)、输送效率和功耗等指标的影响。结果表明, 室内设定温度每升高1℃, 空调冷负荷减少5.6%, COP和EER分别升高7.2%和4.75%; 送风温度每升高1℃, 冷负荷下降4%, COP和EER分别降低5.2%和4.64%, 以设备总功耗为单一指标, 送风温差9.5℃为最佳值; 冷冻水温差每升高1℃, 冷冻水输送系数升高7.85%; 冷却水温差每升高1℃, 冷却水输送系数升高8.68%。该结果对空调设计和施工具有指导意义。

**关键词** 空调系统; 能耗; 制冷机制冷系数; 制冷系统能效比; 输送效率

**中图分类号** TK122

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.15.009

## Effects of parameters setup on energy consumption of air conditioning systems

QIU Zejing<sup>1</sup>, LUO Chao<sup>2</sup>, MA Zhitong<sup>2,3,4</sup>, ZHENG Xin<sup>1</sup>, DUAN Zhiqiang<sup>5</sup>

1. Nanrui (Wuhan) Electrical Equipment and Engineering Energy Efficiency Evaluation Center, Wuhan 430074, China
2. Guangzhou Institute of Energy Conversion; Key Laboratory of Renewable Energy, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100086, China
4. Shenzhen Academy of Metrology & Quality Inspection, Shenzhen 518055, China
5. Economic and Technology of State Grid Hubei Electrical Power Company, Wuhan 430074, China

**Abstract** An office building in Shenzhen was selected as an example to study the effects of indoor temperature setup, air supply temperature difference, cold and cooling water temperature difference on energy consumption of air conditioning systems, based on the established physical and mathematical model. The results show that indoor temperature setup has relatively large influence on the air conditioning load and energy consumption. With indoor temperature setup increasing by 1℃, the air conditioning load decreases by 5.6%, and Coefficient of Performance (COP) and Energy Efficiency Ratio (EER) increase by 7.2% and 4.75%. With air supply temperature difference increasing by 1℃, the air conditioning load decreases by 4%, and COP and EER decrease by 5.2% and 4.64%. With cold water temperature difference increasing by 1℃, the cold water transfer factor increases by 7.85%. With cooling water temperature difference increasing by 1℃, the cooling water transfer factor increases by 8.68%.

**Keywords** air conditioning system; energy consumption; energy efficiency ratio; coefficient of performance; transfer factor

收稿日期: 2014-12-19; 修回日期: 2015-04-15

作者简介: 邱泽晶, 工程师, 研究方向为用能系统能耗诊断, 电子信箱: qiuzejing@sgepri.sgcc.com.cn, 马志同(通信作者), 高级工程师, 研究方向为能耗监测, 电子信箱: mazi@smq.com.cn

引用格式: 邱泽晶, 骆超, 马志同, 等. 设定参数对空调系统能耗的影响[J]. 科技导报, 2015, 33(15): 60-65.

李兆坚等<sup>[1]</sup>从人的舒适性角度出发,对智能建筑的设计进行了决策性分析,通过实验调查研究指出,室外环境参数和空调行为对空调能耗的影响较大,当室温从 25℃ 提高至 26℃,空调能耗减少约 23%。同时,室内空气设计参数对空调系统能耗影响的比例要结合具体案例具体分析<sup>[2]</sup>,不同类型的建筑和不同的空调方式,对空调系统节能都不一样,将典型案例推广到一般工程,容易导致工程设计混淆。文献[3]中指出,在同样室内人体热舒适环境条件下,采用较大的室内相对湿度和较低的室内干球温度的组合,可更有效节能<sup>[3]</sup>。空调系统能耗不仅与室内温度等设定参数有关,而且还与室外气象参数、建筑围护结构和保温等相关,空调冷负荷要以准确的室外气象参数为准<sup>[4,5]</sup>,墙体保温和外遮阳能有效降低空调系统能耗<sup>[6-9]</sup>。设定参数包括室内设定温度、冷冻水供回水温差、冷却水供回水温差和送风温差等,国内研究大都针对室内温度对空调能耗的影响,本研究分析其他过渡性设定参数对空调能耗的影响。

## 1 空调系统物理和数学模型

### 1.1 空调建筑物理模型

建筑物物理可以在建筑数据库中设定相应参数。以深圳市某办公建筑为例,办公楼为坐北朝南,共 3 层,层高 3 m,建筑宽 10 m,长 30 m。建筑物理模型如图 1 所示。一、二层为办公室,由单体空调单独供冷,三层为公共场所,由中央空调集中供冷。

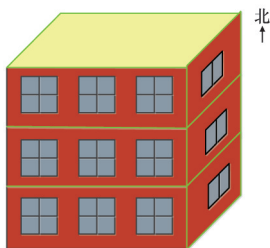


图 1 空调建筑物理模型

Fig. 1 Physical model of the building containing air conditioning systems

### 1.2 空调系统物理模型

空调系统物理模型如图 2 所示,主要由空气处理系统,冷冻水系统、冷水机组和冷却水系统组成,空调区域采用风机盘管送风。

空气处理系统采用典型的一次回风系统,空调区域采用露点送风,空调负荷包括建筑冷负荷和新风冷负荷两部分。空调负荷随着时间推移和室内、外环境温度的改变而改变,新风量为送风量的 20%。

冷冻水系统由冷冻泵和分、集水器等部件组成,采用一次泵定流量系统,用定压罐对集水器定压,冷冻泵的进口与蒸发器冷冻水进口链接,冷冻系统的阻力损失包括沿程和局

部两部分,冷冻泵的功耗主要由冷冻水流量和冷冻系统阻力损失决定。

冷水机组主要由蒸发器、压缩机、冷凝器和膨胀阀四大部件组成,压缩机采用活塞式压缩机,制冷剂选用 R134a,冷水机组功耗主要为压缩机功耗。

冷却系统由冷却塔和冷却泵等设备组成,冷却方式采用循环水间接冷却,主要功耗为冷却泵和冷却风机。

空调系统的能耗主要集中在冷冻泵、压缩机、冷却泵和冷却风机。

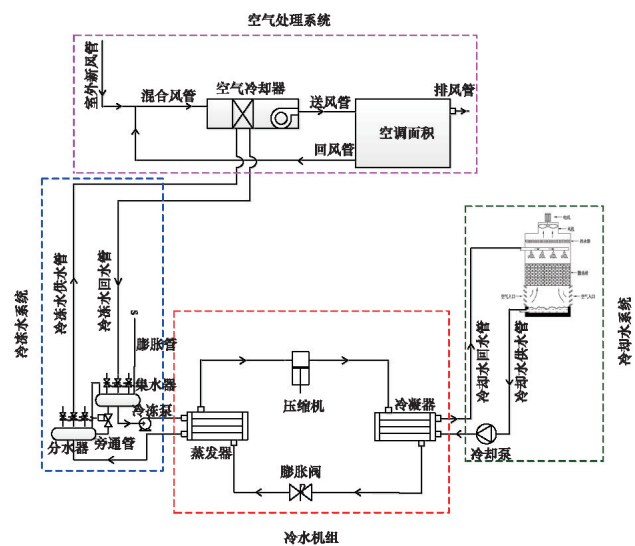


图 2 空调系统物理模型

Fig. 2 Physical model of the air conditioning system

### 1.3 空调系统数学模型

图 3 为空气处理过程在湿空气焓-湿( $h-d$ )过程,室外新风和室内回风混合后,进入空气冷却器,混合空气被冷却至露点状态,经过送风管道,有一定的温升,然后达到送风状态点,送风经过建筑冷负荷消耗后达到室内状态点。图中 $\Delta t_0$ 为送风温差,℃。

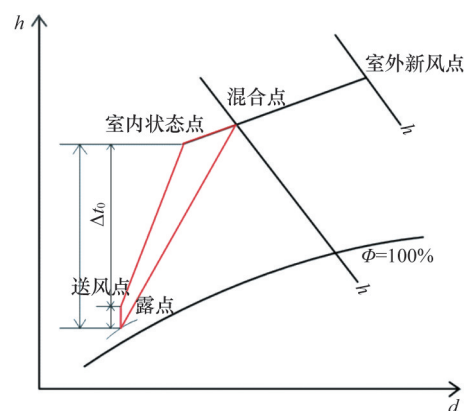


图 3 空气处理热力过程

Fig. 3 Thermal process of air state change

图4为泵和压缩机的热力过程,泵和压缩机的理想过程是等熵过程,由于机械和不可逆等损失,实际热力过程是一个熵增的过程。数学表达式为

$$\eta = \frac{W_s}{W_a} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1} \quad (1)$$

式中,  $\eta$  为压缩机或泵效率;  $W_s$  为理想压缩功, kW;  $W_a$  为实际压缩功, kW;  $h_1$  为压缩机进口焓,  $h_{2s}$  为压缩机理想出口焓,  $h_{2a}$  为压缩机实际出口焓, kJ/kg。图4中  $p_1, p_2$  分别为压缩机进出口压力, Pa。

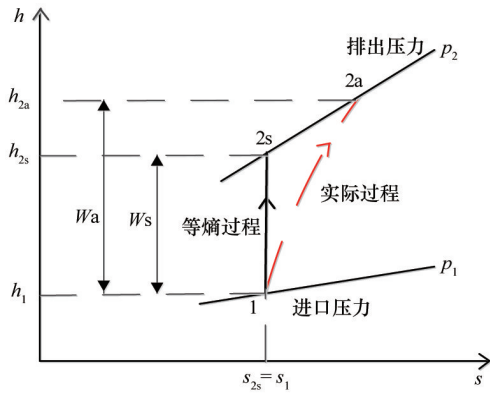


图4 泵和压缩机热力循环H-S

Fig. 4 H-S diagram of the geothermal power system

图5为制冷机组中制冷剂的温度( $\theta$ )和熵(S)的热力过程( $\theta$ -S),制冷机组的热力循环过程中蒸发器是等压过程,压缩机采用实际熵增过程,冷凝器是等压过程,膨胀阀是等焓过程。

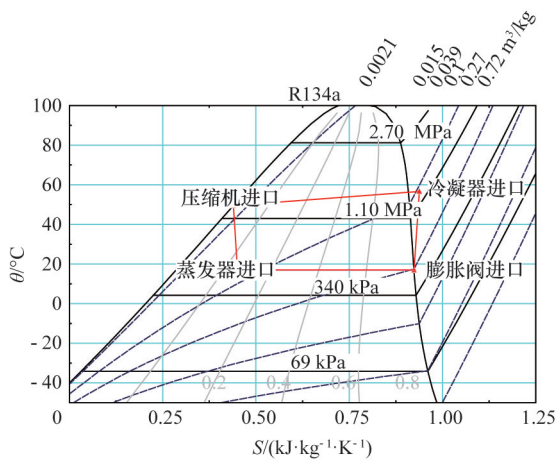


图5 制冷剂热力循环 $\theta$ -S

Fig. 5  $\theta$ -S curve showing thermal circulation of the cooling agent

模型求解过程如下:

$$Q_{c,1} = (K_{wa}A_{wa} + K_{wi}A_{wi})(t_z - t_i) + CA_{wi}D_w \quad (2)$$

$$Q_1 = 2.2Q_{c,1} \quad (3)$$

$$G_s = Q_{c,1}/(h_i - h_e) \quad (4)$$

$$Q_1 = G_s(h_m - h_d) \quad (5)$$

$$w_{c,p} = 0.001\Delta P_{c,p}v_w m_{c,w}/\eta \quad (6)$$

$$WTF_{ch,w} = Q_1/w_{c,p} \quad (7)$$

$$w_{c,o,p} = 0.001\Delta P_{c,o,p}v_w m_{c,o,p}/\eta \quad (8)$$

$$WTF_{c,w} = Q_1/w_{c,o,p} \quad (9)$$

$$w_c = 0.001\Delta P_c v_r m_r/\eta \quad (10)$$

$$COP = Q_1/w_c \quad (11)$$

$$EER = Q_1/(w_c + w_{c,p} + w_{c,o,p}) \quad (12)$$

式中,  $Q_{c,1}$ 、 $Q_1$  分别为围护结构及制冷系统冷负荷, kW;  $K_{wa}$ 、 $K_{wi}$  分别为围护结构及窗户传热系数, kW/(m<sup>2</sup>·K);  $A_{wa}$ 、 $A_{wi}$  分别为围护结构及窗户面积, m<sup>2</sup>;  $t_z$ 、 $t_i$  分别为室外综合温度及室内温度, °C;  $C$  为窗户遮阳系数;  $D_w$  为窗户辐射强度, kW/m<sup>2</sup>;  $G_s$  为房间送风量, kg/s;  $h_i$ 、 $h_s$ 、 $h_m$  和  $h_d$  分别为室内空气、空调送风、混合空气及露点空气焓值, kJ/kg;  $WTF_{ch,w}$ 、 $WTF_{c,w}$  分别为冷冻水及冷却水输送系统效率;  $COP$  为制冷机制冷系数;  $EER$  为制冷系统能效比;  $W_{c,p}$ 、 $W_{c,o,p}$  和  $W_c$  分别为冷冻水泵、冷却水泵及压缩机功率, kW;  $\Delta p_{c,p}$ 、 $\Delta p_{c,o,p}$  和  $\Delta p_c$  分别为冷冻泵、冷却泵及压缩机进出口压差, Pa;  $v_w$ 、 $v_r$  分别为水及压缩机进口制冷剂比容, m<sup>3</sup>/kg;  $m_{c,w}$ 、 $m_{c,o,p}$  和  $m_r$  分别为冷冻水、冷却水及制冷剂质量流量, kg/s。

## 2 控制条件对空调系统能耗分析

空调系统冷负荷,  $COP$ ,  $EER$ ,  $WTF$  和设备功耗是空调系统能耗的主要指标, 空调系统能耗除了受环境温度、湿度等外界不可控制的影响外, 还受设计和控制调节参数的影响, 如室内温度, 冷冻水供回水温差, 冷却水供回水温度以及送风温差。

### 2.1 室内温度对空调能耗的影响

图6给出了空调负荷  $Q_1$  随室内温度  $t_i$  的变化, 随着室内温度从 22°C 增至 28°C, 空调房间送风温度及冷冻水温度都升高, 制冷系统冷负荷从 87.6 kW 降至 58.0 kW。室内温度每升高 1°C, 空调系统冷负荷减少约 5.6%。

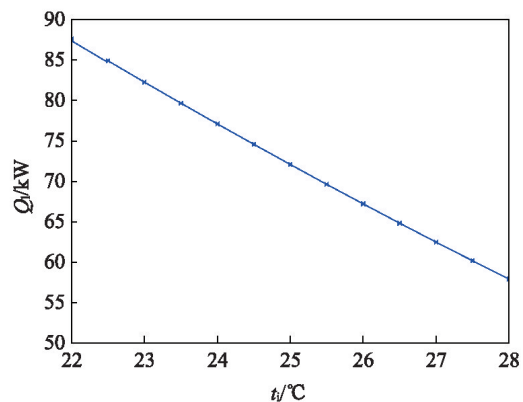


图6 空调负荷随室内温度变化趋势

Fig. 6 Variation of air conditioning load with indoor temperature

图7给出了COP、EER、WTF<sub>chw</sub>和WTF<sub>cw</sub>随室内温度变化。随着室内温度从22℃增至28℃,制冷机组制冷系数和制冷系统能效比分别从3.58升至5.13和3.02升至3.88。冷冻水输送系统系数和冷却水输送系统系数分别从38.3降至31.1和46.5降至37.2。

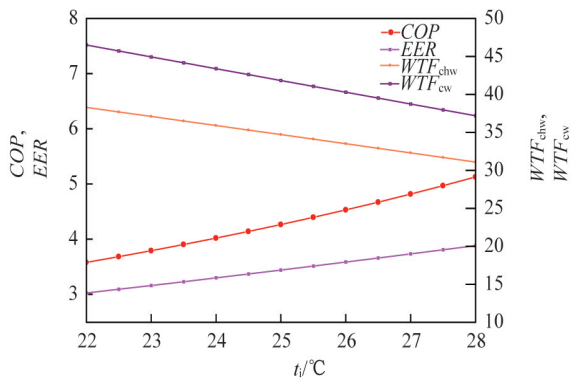


图7 COP、EER、WTF<sub>chw</sub>和WTF<sub>cw</sub>随室内温度变化趋势  
Fig. 7 Variation of COP, EER, WTF<sub>chw</sub>, WTF<sub>cw</sub> with indoor temperature

图8给出了设备功耗随室内温度变化。压缩机、冷冻泵和冷却泵功率随室内温度增大而减小,压缩机、冷冻泵和冷却泵功率分别从24.5 kW降至11.3 kW,2.3 kW降至1.9 kW及2.2 kW降至1.8 kW。三者总功耗从29 kW降至15 kW,室内温度每升高1℃,压缩机等总功耗平均减少约8%

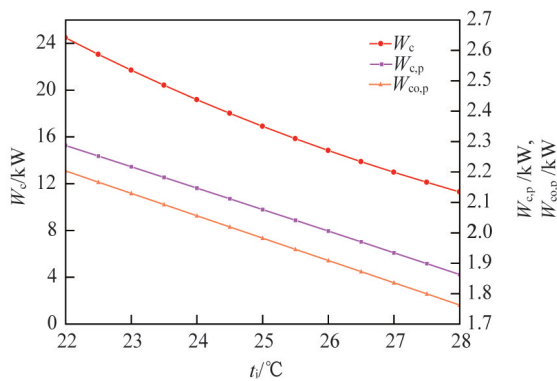


图8 设备功耗随室内温度变化趋势  
Fig. 8 Variation of power consumption with indoor temperature

### 2.2 送风温差对空调系统相关指标的影响

图9给出了空调冷负荷随送风温差( $\Delta t_0$ )的变化。随着送风温差从8℃增至13℃,空调房间送风温度下降,制冷系统冷负荷从77.3降至61.5 kW。送风温度每升高1℃,冷负荷下降约4%。

图10给出了COP、EER、WTF<sub>chw</sub>和WTF<sub>cw</sub>随送风温差变化。随着送风温差从8℃增至13℃,制冷机组制冷系数及制冷系统能效比分别从5.12降至3.79和4.01降至3.08。冷冻水

输送系统系数和冷却水输送系统系数分别从35.9降至32.1和43降至38.9。

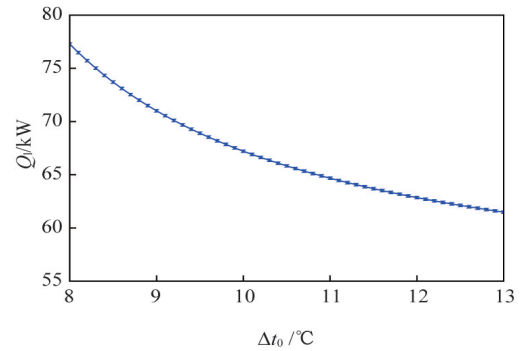


图9 空调负荷随送风温差变化趋势

Fig. 9 Variation of air conditioning load with air supply temperature difference

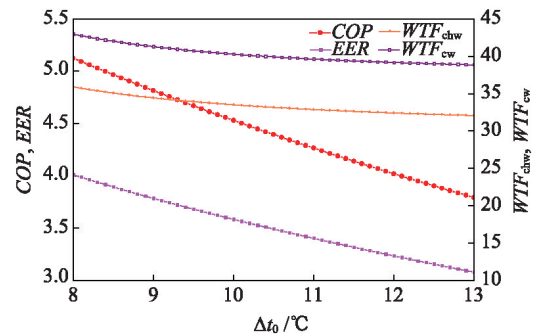


图10 COP、EER、WTF<sub>chw</sub>和WTF<sub>cw</sub>随送风温差趋势  
Fig. 10 Variation of COP, EER, WTF<sub>chw</sub>, WTF<sub>cw</sub> with air supply temperature difference

图11给出了设备功耗随送风温差变化。压缩机功耗随送风温差增大呈现先减小后增大的趋势,冷冻泵和冷却泵功率随送风温差增大而减小,压缩机功率从15.1 kW降至14.7 kW再升高到16.21 kW,冷冻泵和冷却泵功率分别从2.2 kW降至1.9 kW和2.0 kW降至1.8 kW。设备总功耗先减少后增加,当送风温差为9.5℃,设备总功耗达到最小值18.7 kW。如果以设备总功耗为单一指标,送风温差9.5℃为最佳值。

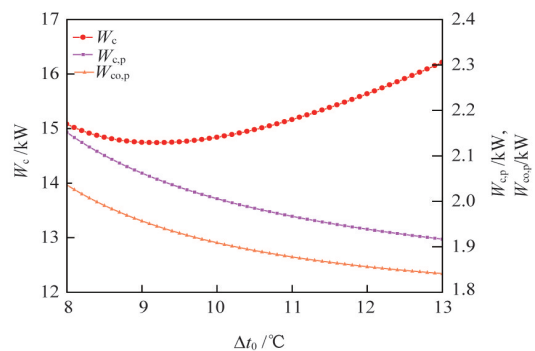


图11 设备功耗随送风温差趋势

Fig. 11 Variation of power consumption with air supply temperature difference

### 2.3 冷冻水温差对空调系统相关指标的影响

图12给出了冷冻水温差( $\Delta t_{c,w}$ )对冷冻水流量的影响。制冷系统负荷维持在67.22 kW,随着冷冻水温差从5℃增至12℃,冷冻水流量从3.21 kg/s降至1.34 kg/s。

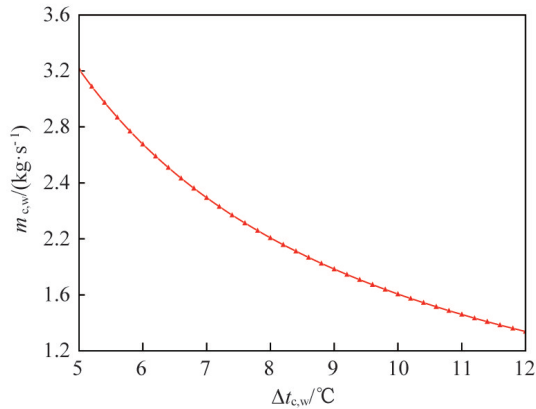


图12 冷冻水流量随冷冻水温差变化趋势

Fig. 12 Variation of cold water mass flow rate with temperature difference

图13给出了COP, EER,  $WTF_{chw}$ 和 $WTF_{cw}$ 随冷冻水温差变化。随着冷冻水温差从5℃增至12℃,冷冻水输送系统系数变化幅度较大,  $WTF_{chw}$ 从33.51升至51.92,其余指标变化不大,制冷机组制冷系数基本维持在4.53~4.54,制冷系统能效比从3.58升至3.73,冷却水输送系统系数基本维持在40.3。

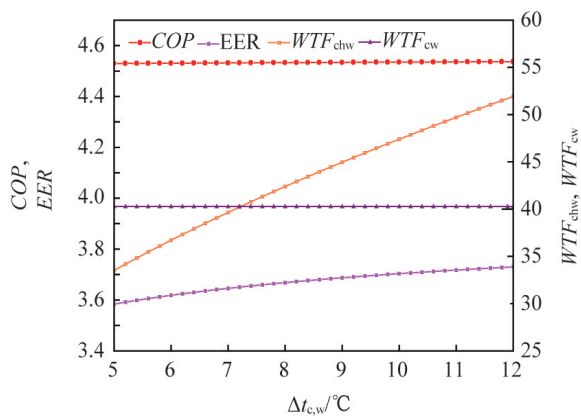


图13 COP、EER、 $WTF_{chw}$ 和 $WTF_{cw}$ 随冷冻水温差变化趋势

Fig. 13 Variation of COP, EER,  $WTF_{chw}$ ,  $WTF_{cw}$  with cold water temperature difference

图14给出了设备功耗随冷冻水温差变化趋势。冷冻泵功率随冷冻水温差增大而减小,从2 kW降至1.3 kW,压缩机和冷却泵功率随冷冻水温差增大保持不变,压缩机功率保持在14.9 kW,冷却泵功率保持在1.9 kW。设备总功耗从18.8 kW降至18.1 kW,冷冻水温差平均每增加1℃,总能耗约下降0.5%。

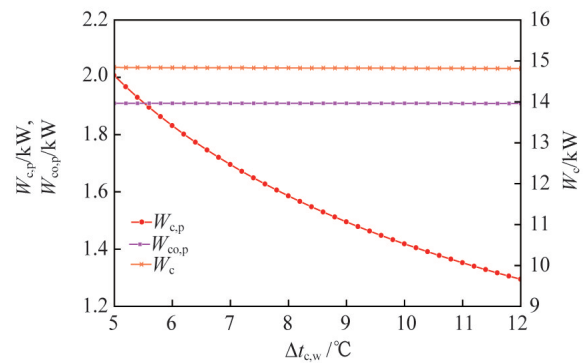


图14 设备功耗随冷冻水温差变化趋势

Fig. 14 Variation of power consumption with cold water temperature difference

### 2.4 冷却水温差对空调系统相关指标的影响

图15给出了冷却水温差( $\Delta t_{co,w}$ )对冷却水流量的影响。制冷系统负荷维持在67.22 kW左右,随着冷却水温差从5℃增至10℃,冷却水出口温度从36.98℃降至41.98℃,冷却水流量的下降较大,从3.68 kg/s降至1.89 kg/s。

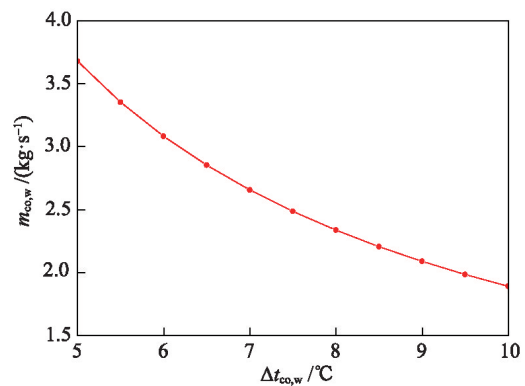


图15 冷却水流量随冷却水温差变化趋势

Fig. 15 Variation of cooling water mass flow rate with temperature difference

图16给出了COP, EER,  $WTF_{chw}$ 和 $WTF_{cw}$ 随冷却水温差变化。随着冷却水温差从5℃增至10℃,冷却水输送系统系数变化幅度较大,  $WTF_{cw}$ 从40.3升高到57.8,制冷机组制冷系数和制冷系统能效比分别从4.53降至3.44及3.58降至2.93,冷冻水输送系统系数基本不变,维持在33.51。

图17给出了设备功耗随冷却水温差变化。压缩机功率随冷却水温差增大而增大,压缩机从14.84 kW升高至19.54 kW,冷却泵功率随冷却水温差增大而减小,冷却泵功率从1.9 kW降至1.37 kW,冷冻泵功率随冷却水温差增大基本保持不变,维持在2.0 kW,设备总功耗从18.76 kW升高到22.91 kW,冷却水温差平均每升高1℃,总能耗平均上升4.4%。

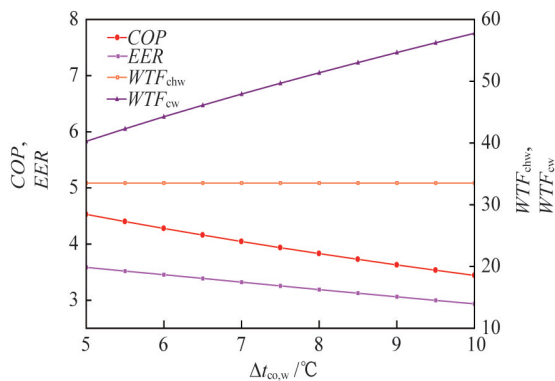
图 16 COP、EER、 $WTF_{chw}$ 和  $WTF_{cw}$ 随冷却水温差变化趋势

Fig. 16 Variation of COP, EER,  $WTF_{chw}$ ,  $WTF_{cw}$  with cooling water temperature difference

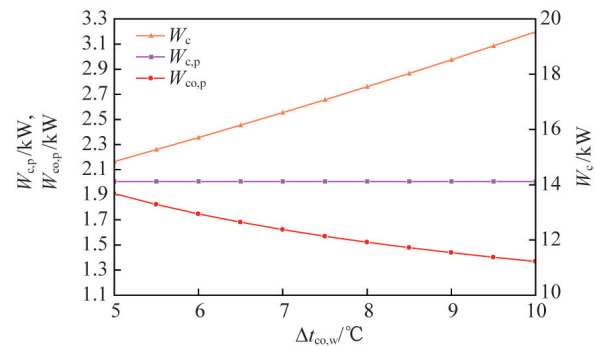


图 17 设备功耗随冷却水温差变化趋势

Fig. 17 Variation of power consumption with cooling water temperature difference

### 3 结论

对本案例空调系统的室内温度、送风温差、冷冻水温差和冷却水温差等设定参数对能耗影响的分析表明:

1) 室内设定温度、送风温差、冷冻水及冷却水温差 4 个因素对空调系统的能耗都有影响,其中室内温度的影响较大,室内温度每升高  $1^\circ\text{C}$ ,空调冷负荷减少约 5.6%,压缩机及泵总能耗下降约 8%,COP 和 EER 分别升高 7.2% 和 4.75%。

2) 加大送风温差,空调系统的冷负荷较减小,送风温度每升高  $1^\circ\text{C}$ ,冷负荷下降约 4%,COP 和 EER 分别降低 5.2% 和 4.64%,综合考虑制冷系统的能效比和功耗等因素,以设备总功耗为单一指标,设送风温差  $9.5^\circ\text{C}$  为最佳值。

3) 冷冻水温差对输送系统的能耗效率有较大的影响,冷冻水温差每升高  $1^\circ\text{C}$ ,冷冻水输送系数约升高 7.85%,设备总能耗下降 0.5%。

4) 冷却水温差对输送系统的能耗效率有较大的影响,冷却水温差每升高  $1^\circ\text{C}$ ,冷却水输送系数约升高 8.68%,设备总能耗上升 4.4%。

#### 参考文献 (References)

- [1] 李兆坚, 江亿, 魏庆梵. 环境参数与空调行为对住宅空调能耗影响调查分析[J]. 暖通空调, 2007, 37(8): 67-71.  
Li Zhaojian, Jiang Yi, Wei Qingfan. Survey and analysis on influence of environment parameters and residents' behaviours on air conditioning energy consumption in a residential building[J]. Journal of HV&AC, 2007, 37(8): 67-71.
- [2] 余晓平, 付祥钊, 代鹏. 室内空气设计参数与空调系统节能条件浅析[J]. 建筑科技, 2010, 26(2): 41-46.  
Yu Xiaoping, Fu Xiangzhao, Dai Peng. Analysis on design parameters for indoor air and energy efficiency condition of air-condition system[J]. Building Science, 2010, 26(2): 41-46.
- [3] 张景玲, 万建武. 室内温、湿度对人体舒适和空调能耗影响的研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2008, 30(1): 9-12.

Zhang Jingling, Wan Jianwu. Analysis on design parameters for indoor air and energy efficiency condition of air-condition system[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2008, 30(1): 9-12.

- [4] 刘魁星, 刘书贤, 麻风海. 气候变化影响空调室外计算参数选取的分析[J]. 建筑节能, 2014, 42(10): 1-5.  
Liu Kuixing, Liu Shuxian, Ma Fenghai. Climate change impacts on parameter selection of air conditioning outdoor calculation[J]. Building Energy Efficiency, 2014, 42(10): 1-5.
- [5] 朱春健, 袁锋. 空调能耗分析用简明气象参数的构成研究[J]. 节能技术, 2005, 23(2): 143-145.  
Zhu Chunjian, Yuan Feng. Study on constitute of climatic parameters for simple calculating air-conditioning energy consumption[J]. Energy Conservation Technology, 2005, 23(2): 143-145.
- [6] 李雪飞, 程海峰. 合肥某高校图书馆空调能耗模拟及影响因素分析[J]. 山西建筑, 2014, 40(32): 127-128.  
Li Xuefei, Cheng Haifeng. Analysis of HVAC energy consumption simulation and influence factors for a university library in Hefei[J]. Shanxi Architecture, 2014, 40(32): 127-128.
- [7] 付衡, 龚延风, 余效恩. 夏热冬冷地区外墙遮阳对建筑热环境与空调能耗的影响[J]. 建筑技术, 2012, 43(1): 67-70.  
Fu Heng, Gong Yanfeng, Yu Xiaoen. Effects of external wall shading on building thermal environment and air conditioning energy consumption in hot summer and cold winter area[J]. Architecture Technology, 2012, 43(1): 67-70.
- [8] 叶国栋, 胡文斌. 夏热冬暖地区墙体保温对高层住宅空调能耗的影响分析[J]. 新型建筑材料, 2004(4): 41-44.  
Ye Guodong, Hu Wenbin. Effects of wall thermal insulation on high building air conditioning energy consumption in hot summer and warm winter area[J]. New Building Material, 2004(4): 41-44.
- [9] 龙恩深, 王勇, 肖益民. 遮阳系数对供暖与空调能耗影响差异的逐时解析[J]. 暖通空调, 2005, 35(6): 46-51.  
Long Enshen, Wang Yong, Xiao Yimin. Hourly analysis of the influence of shading coefficient on heating and cooling energy consumption[J]. Journal of HV & AC, 2005, 35(6): 46-51.

(责任编辑 赵业玲)