

# 夏热地区商场类建筑集中空调系统全新风运行性能分析

刘猛<sup>a,b</sup>, 钱发<sup>a,b</sup>, MCKINNELL Keith<sup>a,b</sup>, 李永强<sup>a,b</sup>

(重庆大学 a. 城市建设与环境工程学院; b. 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400030)

**摘要:** 分析了我国夏热地区的室外气候条件, 对于冬季, 有近乎 100% 的时间可以采用全新风模式, 而过渡季节会有一半左右的时间可以采用全新风模式, 从而全年可以减少 30%~60% 的人工冷源运行时间。通过对焓值控制和温度控制 2 种调控模式的分析, 研究了不同室内负荷强度、不同通风量和不同室内空气温湿度设定值条件下的调控方案。研究发现: 室内负荷越大, 采用全新风模式的节能效果越好; 送风量宜设置为 6~8 h<sup>-1</sup>; 室内空气参数对节能效果影响很大, 考虑到室内外温差对人体热舒适的影响, 可以考虑不同季节不同的室内空气参数设置; 对于调控模式, 冬季和过渡季节可采用焓值控制模式; 夏季宜采用温度控制模式。采用全新风模式, 每年可以实现 100~180 kWh/m<sup>2</sup> 的节能效果, 从而产生 30~50 kg/m<sup>2</sup> 的碳减排量。

**关键词:** 新风, 节能, 碳减排, 空调, 商场

**中图分类号:** TU834.3    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2011)03-0094-06

## Performance in Full Fresh Air Mode of Centralised Air-conditioning System for Shopping Malls in China's Hot Summer Region

LIU Meng<sup>a,b</sup>, QIAN Fa<sup>a,b</sup>, MCKINNELL Keith<sup>a,b</sup>, LI Yong-qiang<sup>a,b</sup>

(a. Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering; b. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

**Abstract:** Based on the analysis of the outdoor weather condition in China's hot summer region, it is found that the full fresh air mode can work in the whole winter and half of the time in transition season. Thus, about 30%-60% runtime of the artificial cold source can be reduced. It studies the control strategies at different conditions of indoor load, ventilation and indoor air temperature and humidity by analyzing two control modes—enthalpy control and temperature control. It shows that the higher the indoor load is, the more efficient the full fresh air mode is. And the airflow is better to be set as 6~8 h<sup>-1</sup>. Since the indoor air parameter has great influence on energy saving, it is necessary to set different indoor air parameters in different seasons by taking the effect of temperature difference on human thermal comfort into consideration. It is also found that the enthalpy control mode can be used in winter and in transition season, while the temperature control mode can be applied in summer. If the full fresh air mode were adopted, it would cut down the energy consumption by 100~180 kWh/m<sup>2</sup> and the carbon emission by 30~50 kg/m<sup>2</sup> each year.

**Key words:** fresh air, energy efficiency, carbon reduction, air-conditioning, shopping mall

收稿日期: 2010-12-21

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50838009); 国家自然科学基金外国青年学者基金项目(51050110139)

作者简介: 刘猛(1979-), 男, 博士, 副教授, 主要从事建筑环境、建筑生命周期和低碳建筑技术研究, (E-mail)

liumeng2033@126.com

随着中国城镇化和社会经济的不断发展,建筑作为社会能耗大户,近30%的社会能耗用于建筑的运行能耗<sup>[1-3]</sup>,如果从建筑的生命周期来看,有大约50%的能源消耗于建筑<sup>[4-7]</sup>。商场类建筑作为一类典型的大型公共建筑,其运行时间固定,商场内的高设备负荷(照明负荷)和高人流密度<sup>[8]</sup>,造成了商场建筑较大的空调负荷,同时由于商场类建筑通常进深较大,通常存在大面积的建筑内区,内区的存在使得商场类建筑常年有稳定的冷负荷和供冷需求。据商业建筑的能耗调查统计,装有空调系统的商业建筑每年的能耗费用接近150元/m<sup>2</sup>,其中空调能耗占到50%~60%<sup>[9]</sup>。在夏热地区,夏季室外温度较高;冬季温度不是特别低,一般高于寒冷地区和严寒地区(有利于冬季直接将新风送入室内),有助于减少空调能耗和碳排放<sup>[10]</sup>。

中央空调的全新风运行作为减少建筑碳排放的一种主动式技术,已经受到学者的广泛关注,一些学者从节能减排的视角展开了对商场类空调运行策略的研究<sup>[11-14]</sup>,提出了一些分析模型。对新风的控制策略分为4种:定新风(最小新风量)控制策略;以室内人员数确定新风量控制策略;焓值控制策略;温度控制策略。对于中国的夏热地区,在过渡季节和冬季有比较适宜的室外气象条件,利用适宜的室外自然条件解决商场类建筑的室内冷负荷,可以有效地减少人工冷源的运行时间,从而实现节能减排。研究以焓值和温度调控2种模式为基础,对影响全新风运行的主要因素:室内负荷、通风量和室内温湿度参数设置进行了分析,通过分析对中国夏热地区(中国热工气候分区中的夏热冬冷地区和夏热冬暖地区,简称夏热地区)典型城市的空调系统全新风运行调控策略进行了优化。

## 1 模型建立

### 1.1 负荷计算

商场类建筑的空调系统冷负荷主要包括围护结构冷负荷、内热源造成的冷负荷和新风冷负荷,其中,

1)内热源造成的冷负荷和室外气候条件基本无关;

2)围护结构冷负荷与室外气候条件紧密相关,当室外温度低于室内温度时,这部分负荷可忽略,由于室外焓值低于室内焓值时,室外温度通常低于室内温度,或者室外温度略高于室内温度,这部分负荷近似忽略;

3)新风冷负荷与室外气候条件紧密相关,当室外焓值低于室内焓值或室外温度低于室内温度时,

这部分冷负荷近似没有。

因此,当采用全新风运行时,商场类建筑的空调系统冷负荷仅为内热源造成的冷负荷,包括照明、设备冷负荷和人体冷负荷。其中,显热部分有照明、设备和人体部分冷负荷;潜热部分只有人体部分冷负荷。根据《实用供热空调设计手册(第二版)》,各冷负荷指标取值为:照明19W/m<sup>2</sup>,设备13W/m<sup>2</sup>,人体依据轻度劳动取值,商场人员密度文中取0.5人/m<sup>2</sup><sup>[15]</sup>。

### 1.2 运行模式

空调系统运行采用以下3种模式运行

基准模式(BE):制冷机供冷,最小新风量运行。

新风模式1(FE):全新风运行,焓值控制,全热控制。室外空气焓值等于或低于某一值( $i_1$ )时,新风可以完全承担室内冷负荷,人工冷源不启动;当室外空气焓值大于该值,但是小于室内空气焓值( $i_h$ )时,开启制冷机,新风和人工冷源各承担一部分室内冷负荷。

新风模式2(FT):全新风运行,温度控制,显热控制。室外空气温度等于或低于某一值( $t_1$ )时,新风可以完全承担室内冷负荷,人工冷源不启动;当室外空气温度大于该值,但是小于室内空气温度( $t_h$ )时,开启制冷机,新风和人工冷源各承担一部分室内冷负荷。

### 1.3 新风模式碳减排潜力预测模型

新风模式的碳减排潜力为新风模式与基准模式碳排放差值。与基准模式相比,新风模式的碳减排潜力主要体现在全新风运行时,节省的人工冷源系统能耗与所耗通风机能耗之差,两者相比,前者多出了制冷机房能耗,而后者多了排风风机能耗,取制冷机房能效比(包括制冷机能耗、水泵能耗、冷却塔能耗)为2.7,风机能耗指标为0.2W/(m<sup>3</sup>·h)。

通过采用典型气象年逐时数据,分析各种工况条件下,全新风系统完全承担负荷的运行时间,当冷负荷由全新风系统和人工冷源系统共同承担时,按承担的负荷比折算成当量全新风承担时间,如式(1)或式(2):

$$T_i = \begin{cases} 1, & i_i \leq i_1 \\ \frac{i_h - i_i}{i_h - i_1}, & i_1 < i_i \leq i_h \\ 0, & i_i > i_h \end{cases} \quad (1)$$

或

$$T_i = \begin{cases} 1, & t_i \leq t_1 \\ \frac{t_h - t_i}{t_h - t_1}, & t_1 < t_i \leq t_h \\ 0, & t_i > t_h \end{cases} \quad (2)$$

式中: $T_i$ 为逐时时刻*i*时刻全新风承担负荷时间,h; $i_i$ 为逐时时刻*i*时刻室外空气焓值,kJ/kg; $i_1$ 为全新风运行空气焓值下限值,kJ/kg; $i_h$ 为全新风运行

空气焓值上限值,即,室内设定焓值,  $\text{kJ/kg}$ ;  $t_i$  为逐时时刻  $i$  时刻,室外空气温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_l$  为全新风运行空气温度下限值,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_h$  为全新风运行空气温度上限值,即,室内设定温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

$i_i, t_i$  可通过下式确定,

$$i_i = i_h - \frac{3.6Q_t}{\rho G} \quad (3)$$

或

$$t_i = t_h - \frac{3.6Q_x}{c_p \rho G} \quad (4)$$

式中:  $Q_t$  为室内内热源冷负荷,  $\text{W}$ ;  $\rho$  为空气密度,取  $1.2 \text{ kg/m}^3$ ;  $G$  为送风量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $Q_x$  为室内内热源显热冷负荷,  $\text{W}$ ;  $c_p$  为空气定压比热,取  $1.01 \text{ kJ/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$ 。

则,新风模式碳减排潜力模型如式:

$$C_p = 0.001 \times \left( \frac{Q_t}{E_s} - P_f \right) \cdot \sum T_i \cdot C_e \quad (5)$$

式中:  $C_p$  为碳减排潜力,  $\text{kg}$ ;  $E_s$  为制冷机房能效比,取 2.7;  $P_f$  为排风风机能耗,  $\text{W}$ , 指标取  $0.2 \text{ W}/(\text{m}^3/\text{h})$ ;

$C_e$  为电力碳排放系数,  $\text{kg/kWh}$ , 2008 年,发电煤耗为  $349 \text{ g/kWh}^{[16]}$ ,碳排放系数为  $0.279 \text{ kg/kWh}^{[17]}$ 。

## 2 夏热典型城市分析

### 2.1 模拟条件与结果

取夏热冬冷地区的重庆、长沙、上海和夏热冬暖地区的广州、福州作为典型城市进行分析。气象数据取清华大学 DeST 气象数据库各城市典型气象年数据。 $i_h, t_h$  分别取  $59 \text{ kJ/kg}$  ( $26^{\circ}\text{C}$ ,  $60\%$ ),  $26^{\circ}\text{C}$ 。商场营业时间为每天 9:00 至 22:00,建筑层高为 4 m,送风量为  $8 \text{ h}^{-1}$ 。

根据式(3)、(4),可得  $i_i, t_i$  分别为  $46.53 \text{ kJ/kg}$ ,  $16.7^{\circ}\text{C}$ ,基于研究选择的典型气象年数据,新风模式 1 和新风模式 2 的全新风承担负荷时间占营业时间的百分比(按月)如图 1、图 2。根据式 5,可得 5 个典型城市的节能量指标和碳减排指标,如图 3。

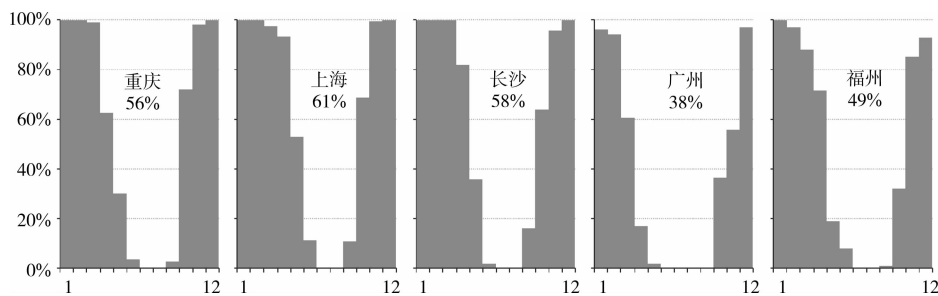


图 1 新风模式 1 (FE) 全新风承担时间比例

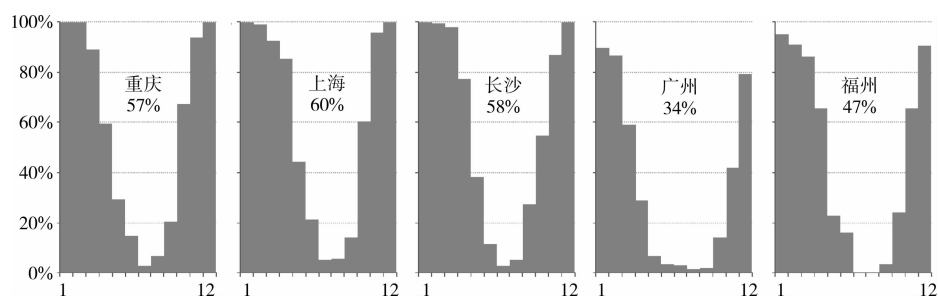


图 2 新风模式 2 (FT) 全新风承担时间比例

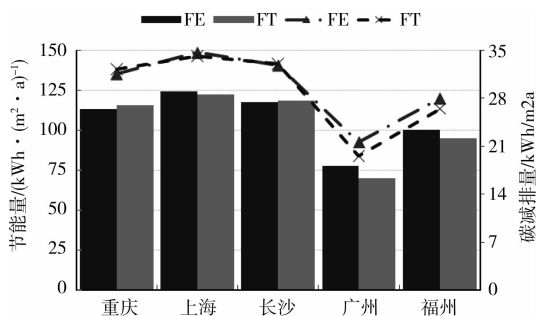


图 3 新风模式节能量指标和碳减排指标

### 2.2 分析与讨论

2.2.1 不同模式对比 新风模式与基准模式相比,有较明显的节能减排潜力,能够有  $30\% \sim 60\%$  的减排潜力。

对比 2 种新风模式,从全年的总体效果看,2 种模式基本相当,对于潮湿地区,FE 模式减排潜力略优,如重庆和长沙;湿度不大地区,FT 模式减排潜力略优,如广州和福州。2 种新风模式的差异,取决于室内负荷特点、室内空气的参数设定和室外空气条

件,对于商场建筑,其负荷变化因地区变化不大。因此,在室内空气参数一定的情况下,2种新风模式的差异主要来自室外空气条件。

将全年分成3段进行分段分析,12—2月为冬季,3—5月、10—11月为过渡季节,6—9月为夏季。对于冬季和过渡季节,室外空气的湿度情况低于室内空气的湿度情况,FE模式优于FT模式,高4%~6%;对于夏季,室外空气的湿度情况高于室内空气的湿度情况,FT模式优于FE模式,高3%~9%。

**2.2.2 不同地区对比** 从全年的总体效果看,夏热冬冷地区城市,约有60%的时间可以通过全新风模式来减少人工冷源的使用,达到节能减排目的;对于夏热冬暖地区,约有1/3~1/2的时间可以采用全新风模式。

对于冬季(12—2月),夏热冬冷地区完全可以采用全新风模式,而夏热冬暖地区,有90%多的时间可以采用全新风模式;夏季(6—9月),夏热冬冷地区普遍好于夏热冬暖地区,约5%~10%的时间可以利用室外新风,而夏热冬暖地区小于5%,其中,重庆由于室外温度高,且湿度大,FE模式下,夏季可利用时间仅为2%;过渡季节,夏热冬冷地区约有70%~80%的时间可以采用全新风模式,夏热冬暖地区约有30%~50%的时间可以采用全新风模式。

此外,由于室外空气的湿度较大,重庆和长沙夏季条件下,FT模式比FE模式高7%~9%。

### 3 调控方案优化

从碳减排潜力预测模型分析,碳减排的潜力主要取决于室内负荷、系统能效、风机能耗、全新风运行时间和碳排放系数。碳排放系数主要由电力来源决定,采用可再生能源电力可以提高碳减排潜力;系统能效和风机能耗主要取决于系统设计和设备情况。该研究重点分析室内负荷和运行时间的影响。运行时间主要取决于室内空气设置参数、室内负荷和送风量。因此,主要分析因素为:室内负荷、室内空气参数和送风量。

以重庆和广州的气象参数为基础,进行模型应用,主要如下:

1) 室内负荷:考虑人员密度变化-20%,-10%,0,10%,20%带来的负荷变化,照明和设备负荷不变;

2) 送风量:考虑换气次数为2、4、6、8、10  $\text{h}^{-1}$  5种情况,层高不变;

3) 室内空气参数:考虑22、24、26、28、30  $^{\circ}\text{C}$  5种情况,相对湿度不变。

在送风量为8  $\text{h}^{-1}$ ,室内空气参数为26  $^{\circ}\text{C}$ 的工况下,室内负荷变化(人员密度变化)引起的节能量变化如图4。室内负荷的变化对运行时间造成影响较小,-20%与20%相比,下降不到3%,其中主要为过渡季节,约5%,其他季节变化不到2%。全新风模式产生的节能减排效应也会有相当的变化率,但是,要注意负荷构成方面的变化对2种调控策略的影响。

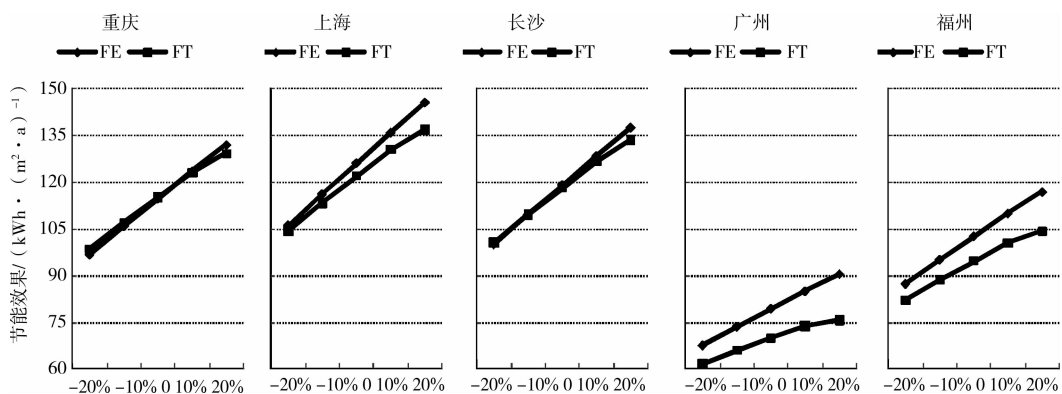


图4 室内负荷变化对节能效果的影响

在室内负荷为125  $\text{W}/\text{m}^2$ ,室内空气参数为26  $^{\circ}\text{C}$ 的情况下,送风量变化产生的效果如图5。送风量的增加会增加全新风模式运行的时间,当送风量由6  $\text{h}^{-1}$ 增加到10  $\text{h}^{-1}$ 时,全新风模式的运行时间增加了约4%,其中,主要也是过渡季节,约8%。但是,由于增加风量会增加风机运行能耗,当送风量大

于4  $\text{h}^{-1}$ 后,节能效果变缓,当送风量大于6  $\text{h}^{-1}$ 后,增加风量产生的节能减排效果不明显,尤其,对于焓值控制,可能还会造成负效果,分析其他室内空气参数和室内负荷情况,6~8  $\text{h}^{-1}$ 为一个优值区域,当室内空气参数设置越低,室内负荷越小,优值区域会左移(变小)。

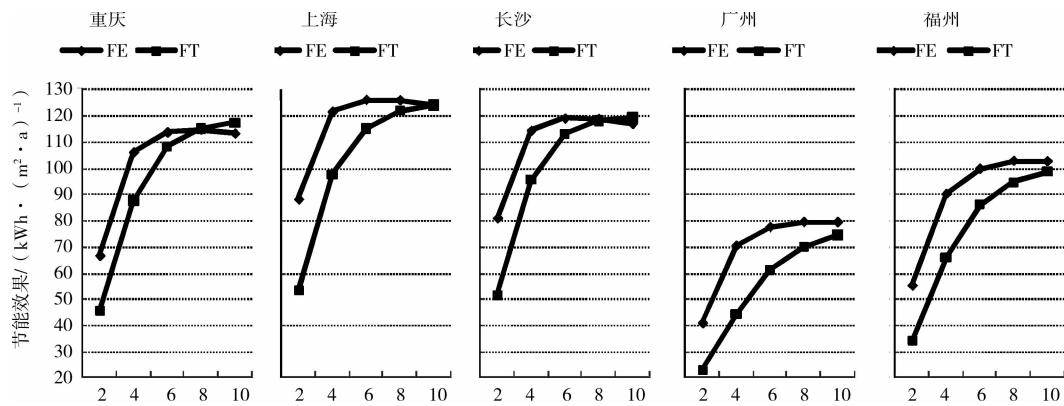


图 5 送风量变化对节能效果的影响

在室内负荷为  $125 \text{ W/m}^2$ , 送风量为  $8 \text{ h}^{-1}$  的情况下, 室内空气参数的变化产生的影响如图 6。室内空气参数的变化对运行时间和节能减排效果都有

很明显的影 响, 当室内空气参数从  $22 \text{ }^\circ\text{C}$  提高到  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  时, 过渡季节和夏季, 运行时间都有较大提高, 分别为  $40\%$  多和  $30\%$  多, 节能量提高了近一倍。

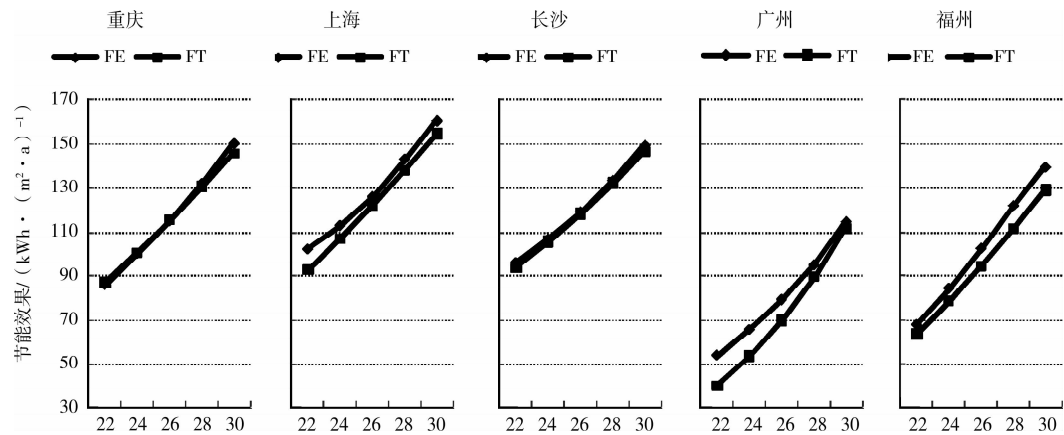


图 6 室内空气参数变化对节能效果的影响

## 4 结 论

对于商场类建筑, 存在较大的内负荷, 在全年适宜的室外空气条件下, 充分利用室外空气, 采用焓值控制和温度控制模式, 减少人工冷源的运行时间约  $30\% \sim 60\%$ , 可以实现每年  $100 \sim 180 \text{ kWh/m}^2$  的节能效果, 从而产生每年  $30 \sim 50 \text{ kg/m}^2$  的碳减排量。

其节能潜力主要取决于室内负荷(内负荷)、送风量和室内空气参数 3 个因素。根据各因素的影响分析, 针对本研究的夏热地区典型城市, 在本研究探讨的各参数条件下, 全新风模式可以采用以下调控策略:

1) 送风量大于  $4 \text{ h}^{-1}$  后, 其对节能量的影响变小, 对于内负荷适中( $110 \sim 150 \text{ W/m}^2$ ) 情况, 当达到  $6 \sim 8 \text{ h}^{-1}$  时, 节能效果达到最大值。送风量宜设置为  $6 \sim 8 \text{ h}^{-1}$ ;

2) 室内负荷越大, 采用全新风模式的节能效果

越好, 可根据室内负荷情况, 合理选择送风量, 负荷越小, 最优的送风量越小。

3) 室内空气参数对节能效果影响很大。考虑到室内外温差对人体热舒适的影响, 可以考虑不同季节不同的室内空气参数设置。对于夏热冬冷地区典型城市: 冬季取  $22 \text{ }^\circ\text{C}$  或更低(运行时间接近  $100\%$ ), 过渡季节取  $22 \sim 26 \text{ }^\circ\text{C}$  (运行时间约为  $50\% \sim 80\%$ ), 夏季取  $26 \sim 28 \text{ }^\circ\text{C}$  (运行时间约为  $20\%$  左右); 对于夏热冬暖地区典型城市: 冬季取  $22 \sim 24 \text{ }^\circ\text{C}$  (运行时间约为  $80\% \sim 90\%$ ), 过渡季节取  $24 \sim 26 \text{ }^\circ\text{C}$  (运行时间约为  $20\% \sim 30\%$ ), 夏季取  $26 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$  (运行时间约为  $5\% \sim 10\%$ )。

4) 对于调控模式, 冬季和过渡季节可采用焓值控制模式; 夏季宜采用温度控制模式, 当夏季室内空气参数的温度较高时, 如设置  $28 \text{ }^\circ\text{C}$  以上时, 较高的湿度会增加人的不舒适感, 也宜采用焓值控制模式。

## 参考文献:

- [1] FU XIANGZHAO. Heating, Ventilation and Air Conditioning[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2008.
- [2] PENNINGTON D W, POTTING J, FINNVEDEN G, et al. Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice [J]. Environment International, 2004, 30(5):721-739.
- [3] LIU MENG, LI BAIZHAN, YAO RUNMING. A generic model of exergy assessment for the environmental impact of building lifecycle[J]. Energy and Buildings, 2010, 42(9), 1482-1490.
- [4] VAN DER MERWE C A, Grobler L J. How to use the commercial benchmarking database to establish the potential of an energy-efficiency upgrade in a commercial building[J]. Energy in Southern Africa, 2003, 14, (2):40-45.
- [5] DAVIS JOELLE, SWENSON ALAN. Characteristics and energy use trends for major commercial building types [J]. Proceedings ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, 2000, 10:49-60.
- [6] 李丽,大型百货商场的空调负荷分析[J]. 广东建材, 2009(5):203-205.  
LI LI. Analysis of air conditioning load for large shopping malls[J]. Guangdong Building Materials, 2009 (5):203-205.
- [7] 李英娜,顾平道,庄琛.大中型商场空调负荷影响因素的探讨[J]. 应用能源技术, 2004(2):32-35.  
LI YING-NA, GU PING-DAO, ZHUANG CHEN. Research on factors exerting influence on air conditioning load for large medium-sized shopping malls [J]. Applied Energy Technology, 2004(2):32-35.
- [8] 邹建忠,袁敏,程珈宁,等.商场空调设计中客流量和新风量取值的探讨[J]. 长春工程学院学报:自科版, 2001, 2(2):40-42.  
ZOU JIAN-ZHONG, YUAN MIN, CHENG JIAN-NING, et al. Research on the flow of passengers and fresh air volume in air conditioning design for shopping malls[J]. Changchun Inst. Tech: Nat. Sci. Edi., 2001, 2(2):40-42.
- [9] 高甫生,赵建成,高鹏.大中型商场空调冷负荷问题[J]. 暖通空调, 1995(4):227-230  
GAO FU-SHENG, ZHAO JIAN-CHENG, GAO PENG. Analysis of air conditioning cooling load for large and middle scale shopping malls[J]. Heating, Ventilation and Air Conditioning, 1995(4):227-230.
- [10] ZHAO JIANING, GUO JUN, SUN WEIMENG. Analysis of running energy consumption of fresh air cooling systems[J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(5):781-788.
- [11] LI ZHEN, LIU XIAOHUA, JIANG YI, et al. New type of fresh air processor with liquid desiccant total heat recovery[J]. Energy and Buildings, 2005, 37(6):587-593.
- [12] ZHONG KE, KANG YANMING. Applicability of air-to-air heat recovery ventilators in China [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(5/6):830-840.
- [13] BIN YANG, SEKHAR S C. Three-dimensional numerical simulation of a hybrid fresh air and recirculated air diffuser for decoupled ventilation strategy [J]. Building and Environment, 2007, 42(5):1975-1982.
- [14] WENDT R, AGLAN H, LIVENGOOD S, et al. Indoor air quality of an energy-efficient, healthy house with mechanically induced fresh air [J]. Journal of Environmental Management, 2009, 91(1), 1-21.
- [15] 陆耀庆,实用供热空调设计手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2008.
- [16] 潘昊,倪旻. 我国发电煤耗刷新世界纪录[N]. 中国电力报, 2010-01-13.
- [17] IPCC. Guideline of Greenhouse Gas Inventory for Nations[R]. 2006.

(编辑 胡英奎)