

# 基于送风状态的地下工程 空调节能运行管理研究

解放军理工大学 缪小平<sup>☆</sup> 江 丰 隋鲁彦 张 迪  
总参工程兵第四设计研究院 金晓公 毛 维

**摘要** 结合地下工程的特点建立了集中式空调系统的运行能耗模型,并给出了求解策略。求解时以空调房间送风状态为连接点,将模型划分为空调房间送风和空气处理两个阶段,并分别探讨了两个阶段的求解方法,简化了求解运算,在满足空调房间环境要求的前提下,可以求得系统运行能耗最低的运行方案。

**关键词** 送风状态 地下工程 空调系统 节能运行 能耗模型

## Air conditioning energy efficient operation and management based on supply air state for underground projects

By Miao Xiaoping<sup>★</sup>, Jiang Feng, Sui Luyan, Zhang Di, Jin Xiaogong and Mao Wei

**Abstract** Establishes an operation energy consumption model of centralized air conditioning systems based on the characteristics of the underground projects, and gives the strategy in solving. Taking the supply air state in the air conditioned room as a connection point when solving the model, divides the model into two phases—air supply and air handling, and discusses the solving methods for that two phases, which simplifies the calculation and produces the operation scheme with the lowest energy consumption, under the condition of satisfying the environment requirements in the air conditioned room.

**Keywords** air supply state, underground project, air conditioning, energy saving operation, energy consumption model

★ PLA University of Science and Technology, Nanjing, China

①

### 0 引言

自 20 世纪 80 年代末建筑设备自动化系统 (BAS) 广泛使用以来, 用其降低公共建筑设备系统 (特别是通风空调系统) 运行能耗一直是相关工程师和科学家的努力目标。实现这一目标的障碍无疑是缺乏有效的空调节能优化运行管理系统 (管理软件)。由于空调系统能耗占整个建筑能耗的一半以上, 并且系统运行复杂, 因此, 空调系统管理软件是建筑能源管理系统 (BEMS) 最为重要的组成部分。同理, 研究空调节能优化运行策略成为研发 BEMS 的关键所在。理论上, 影响空调系统运行能耗的因素非常多, 包括房间的室内状态点  $N$ 、房间余热  $Q$ 、余湿量  $W$ 、房间参数 (温度、湿度、 $\text{CO}_2$  浓度) 的设定值、室外气象参数以及设备的运行状态等。由于各个因素之间是相互关联的, 并且关系

复杂, 要直接建立一个空调能耗和上述各个影响因素的数学表达式并非易事。有相当多的文献仅就其中单个影响因素进行了研究。文献 [1] 研究了考虑室内外温度的新风经济运行控制策略; 文献 [2] 研究了室内温度设定值与系统能耗的关系; 文献 [3-5] 研究了用需求控制通风解决在夏季和冬季以最小的新风量既满足室内人员卫生需求又使空调能耗最低的方法; 文献 [6] 研究了建筑能源和环境管理预测控制技术, 以一个空调房间为对象, 建立了室内参数 (温度、相对湿度、 $\text{CO}_2$  浓度和照明

①☆ 缪小平, 男, 1957 年 5 月生, 博士, 教授, 博士生导师  
210007 南京市白下区海福巷 1 号  
(025) 80821082  
E-mail: mxp57@163.com  
收稿日期: 2012-06-18  
修回日期: 2012-07-10

强度)的状态方程(差分方程),该研究建立的模型比较庞大,并且状态方程的状态矩阵和输入矩阵中的众多系数需要通过实验数据辨识才能确定,计算工作量比较大,此外,该研究主要针对地上空调房间,其状态方程的控制矢量分量有开窗、遮阳、空调和照明控制等四项内容。

地下工程与地上工程的最大区别在于空调房间的热湿特性。不妨设地下工程空调房间的余热和余湿分别为  $Q$  和  $W$ ,如图 1 所示,在热特性方

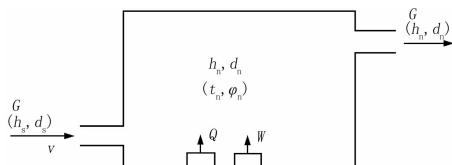


图1 房间的空调模型

面,由于地下工程空调房间的余热  $Q$  不受室外气象参数和太阳辐射的影响,在夏季要比地上建筑空调房间的余热小很多;在湿特性方面,地下工程房间的余湿  $W$  中包含了壁面散湿,而地上工程的壁面散湿可以忽略,因此,同类型空调房间地下工程的余湿  $W$  比地上工程的大一些。这样,地下建筑空调房间的送风热湿比  $\epsilon$  要比地上建筑小很多,无法采用露点送风,导致地下工程的空气处理设备必须采用有再热功能的调温除湿机<sup>[7]</sup>,并主要采用全空气空调系统。本文以地下工程集中式空调系统为对象,考虑影响空调运行能耗的各个因素,建立空调系统运行能耗模型,在此基础上,通过预测空调房间送风状态求得最佳的空调运行方案。

## 1 空调系统节能管理理论分析

理论上,一个地下工程通风空调系统的运行能耗  $P$  应由房间的室内状态点  $N$ 、房间余热  $Q$ 、余湿  $W$ 、房间参数的设定值和室外气象参数及设备的运行情况共同确定。即

$$P = f(h_n, d_n, c, Q, W, X, h_w, d_w, h_s, c_s, d_s, y) \quad (1)$$

式中  $P$  为空调系统的运行能耗, kW;  $h_n$  为室内空气的比焓, kJ/kg;  $d_n$  为室内空气的含湿量, g/kg;  $c$  为房间内  $\text{CO}_2$  体积分数,  $10^{-6}$ ;  $Q$  为房间空气余热, kW;  $W$  为房间空气余湿, kg/h;  $X$  为房间内有害物发生量, mg/h;  $h_w$  为室外空气的比焓, kJ/kg;  $d_w$  为室外空气的含湿量, g/kg;  $h_s$  为房间空气比焓设定值, kJ/kg;  $c_s$  为房间  $\text{CO}_2$  体积分数设定

值,  $10^{-6}$ ;  $d_s$  为房间空气含湿量设定值, g/kg;  $y$  为空调系统的运行方案。

根据设备的设置情况,一个空调系统可能有多种运行方案能满足房间的空气环境要求,不妨设有  $n$  种,但只有一种运行能耗最低,找到最低运行能耗的运行方案是本算法的目标,即要求

$$P = \min[P(y_1), P(y_2), P(y_3), \dots, P(y_n)] \quad (2)$$

式中  $P(y_i)$  表示第  $i$  种运行方案的能耗,  $i=1, 2, \dots, n$ 。

## 2 空调系统最佳运行方案的确定

由式(1)可知,影响空调系统运行能耗的因素非常多,要确定最优运行方案,必须求出其数学表达式。显然,这是一个非常复杂的工作,即使能够求出,其表达式也十分繁杂,不仅计算工程量大,并且控制管理也比较复杂。从集中式空调系统的空气处理过程可知,整个空调过程由送风和空气处理两个阶段组成,这两个阶段的连接点是空调房间的送风状态(状态点为  $S$ )。在空调房间侧,  $S$  的影响因素为  $h_n, d_n, c, Q, W, X, h_s, d_s, c_s$ , 表明  $S$  是由房间内的要求确定的。在空气处理侧,  $S$  的影响因素为  $h_w, d_w, y$ 。

显然,  $S$  两侧的影响因素不重叠,可以将式(1)分解为两段讨论。

### 2.1 房间送风状态点的确定

分析如图 1 所示的空调房间。已知房间的室内状态点  $N$ , 房间的余热  $Q$ 、余湿  $W$  以及房间的送风量  $G$ , 可以通过热平衡和湿平衡方程确定出房间的送风状态。

$$h_s = h_n - \frac{Q}{G} \quad (3)$$

$$d_s = d_n - \frac{1\,000W}{G} \quad (4)$$

式(3), (4)中  $G$  为房间送风量, kg/s。

由于在实际工程中,房间内空气的温度和相对湿度并不要求精确到某一个点上,而是允许在一定的范围内波动,即室内状态并不是一个点,而是一个区间( $N'$ ) (温度为  $t_{nL} \sim t_{nH}$ , 相对湿度为  $\phi_{nL} \sim \phi_{nH}$ ), 则按照式(5)和式(6)计算出的送风状态也是一个区间( $S'$ ), 在焓湿图上的表示如图 2 所示。显然,只要送风状态在  $S'$  区间,就可以确保送风过程能消除余热  $Q$  和余湿  $W$ , 使房间内温度和相对湿度

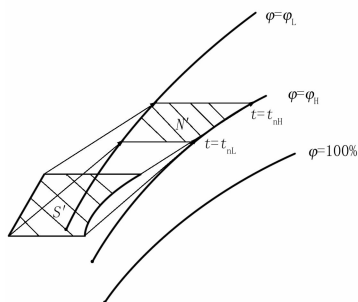


图2 房间送风状态焓湿图

$$P = P_{\text{进风机}} + P_{\text{排风机}} + P_{\text{调温除湿机}} + P_{\text{冷却水泵}} + P_{\text{冷却塔风机}} + P_{\text{送风机}} + P_{\text{回风机}} \quad (5)$$

式中  $P_{\text{进风机}}, \dots, P_{\text{回风机}}$  分别为空调系统运行时系统中进风机, ..., 回风机的运行能耗。

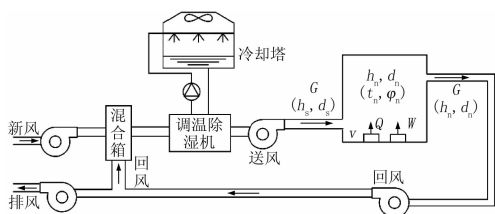


图3 某地下工程的空调系统

### 2.2.2 最优节能运行方案的确定

以  $S'$  为处理目标, 并根据式(7)计算各种可能的空调运行方案的能耗  $P$ , 从而找到最优运行方案。下面分别进行讨论。

#### 1) 维护管理最优运行方案

地下工程中, 有些空调房间(如地下会议大厅)大部分时间并不使用, 此时空调系统的作用是确保其干燥, 对工程的温度  $t_n$  和  $\text{CO}_2$  浓度均没有要求, 此时的  $N'$  区域  $\varphi \leq \varphi_n$ , 在图4中  $\varphi = \varphi_H$  线左侧。显然, 在图4中, 当送风落在  $S'$  区域( $S$  线的左侧)时, 便能确保房间内的相对湿度  $\varphi \leq \varphi_H$ 。

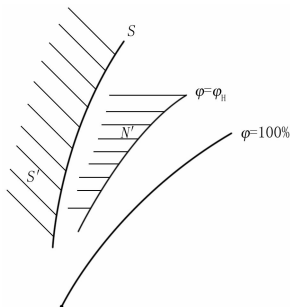


图4 维护管理要求的送风状态

如果室外空气比较干燥, 并处于  $S'$  区域内, 此时仅有两种空调方案能够满足使用要求。

方案1: 直接通风方案。空调能耗  $P_1$  为

度维持在  $N'$  区域。

### 2.2 最优空调方案的确定

空调系统空气处理过程的目标是将送风处理到  $S'$  区域。在不同的处理方案中, 通过比较可以找到能耗最低的方案。

#### 2.2.1 空调系统的运行能耗模型

以某地下工程的空调系统为例分析, 如图3所示, 为了满足将空气处理到  $S'$  区域, 并确保空调房间要求的状态  $N'$ , 所需的能耗为

$$P_1 = P_{\text{进风机}} + P_{\text{排风机}} + P_{\text{送风机}} + P_{\text{回风机}} \quad (6)$$

方案2: 开调温除湿机, 不进新风。空调能耗  $P_2$  为

$$P_2 = P_{\text{调温除湿机}} + P_{\text{送风机}} + P_{\text{回风机}} \quad (7)$$

通过比较  $P_1$  和  $P_2$  的大小即可确定最优空调运行方案, 通常  $P_{\text{调温除湿机}} \geq P_{\text{进风机}} + P_{\text{排风机}}$ , 因此, 方案1运行能耗最低。这就是大部分地下工程在寒冷季节经常采用通风除湿的原因。

#### 2) 夏季最优工况的确定

夏季空气处理过程如图5所示, 室外状态点  $W_x$  为典型夏季样本。混合点  $C$  的比焓  $h_c$  是确定夏季空气处理能耗的关键数据, 显然, 新风量越小, 混合点  $C$  越靠近室内状态点  $N$ , 运行能耗越低。系统可以根据  $\text{CO}_2$  浓度检测值进行需求通风控制。

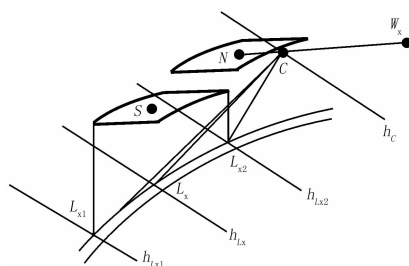


图5 夏季工况空气处理过程

因此, 夏季最佳运行方案就是在一次回风系统的基础上, 采用需求控制通风, 使进入房间的新风量最小。

#### 3) 冬季最佳运行方案的确定

如图6所示, 室外状态点为  $W_d$ , 新、回风混合点为  $C$ , 希望将其处理到要求的送风区域  $S'$ 。由于地下工程, 特别是深埋地下工程, 冬季房间余热  $Q$  和余湿  $W$  与夏季是相同的, 如果新风量选取适当, 就可以使混合点  $C$  落在  $S'$  区域, 此时不必开空气

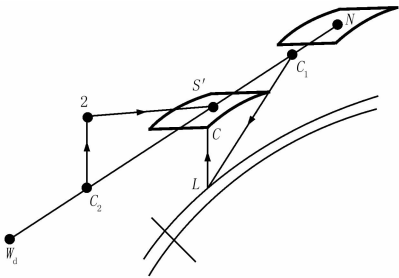
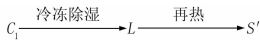


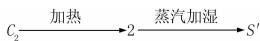
图6 冬季处理工况

处理设备,直接通入室外新风便能满足使用要求,如果新风量取得过小,混合点为  $C_1$ ,直接送风显然不能满足要求,需要的空气处理过程为:



即要处理到要求的送风状态  $S'$  还必须先冷冻除湿,然后再加热,显然不是最佳方案。

若新风量过大,则混合点为  $C_2$ ,要处理到要求的状态  $S'$ ,必须进行加热和加湿处理,其空气处理过程为:



显然,以往算法冬季取最小新风的做法并不科学,并且新风量越大,要求的加热和加湿量就越大,消耗能量就越多。

因此,冬季最佳的运行方案是调节新风量,使新、回风的混合点  $C$  直接落在送风状态  $S'$  区域中。

#### 4) 过渡季节最佳运行方案的确定

不论偏热还是偏冷,室外气象参数和室内设定区域  $N'$  以及要求送风区域  $S'$  比较接近,此时空气处理方案多种多样,并非新风量越小越节省能量,这也是传统控制方法难以解决的问题。下面分别讨论以下几种情况。

##### ① 需要除湿

当混合点的含湿量  $d_C > d_{S2}$  时,必须除湿。室外状态点  $W_x$  和室内状态点  $N$  的相对关系有以下几种情况:

a)  $h_{Wx} > h_n$ ,如图 7 中的点 1,混合点  $C_x$  的比焓大于  $h_n$ 。新风量小,达到同样机器露点的能耗低,此时应取最小新风。

b)  $h_{Wx} = h_n$ ,如图 7 中的点 2,混合点在等  $h_n$  线上。加大新风量不影响空气处理能耗,有利于室内空气质量。

c)  $h_{Wx} < h_n$ ,如图 7 中的点 3,混合点的比焓小

于  $h_n$ 。加大新风量空气处理能耗降低,同时还能改善空气质量,此时应尽量加大新风量。

##### ② 不需除湿

当室外空气含湿量  $d \leq d_{S1}$  且新、回风混合点的含湿量  $d_C \in (d_{S1}, d_{S2})$  时,不需除湿。根据送风状态点  $S$  和室内状态点  $N$  的相对位置,可以分为以下几种情况。

a) 室外空气状态点  $W$  在室内状态点  $N$  和送风区域  $S'$  的映射区域中,如图 7 中的点 4,这时仅需通过调节新回风混合比便可使  $C$  点落在  $S'$  区域内。

b) 室外空气状态点  $W$  在室内状态点  $N$  和送风区域  $S'$  的映射区域上,如图 7 中的点 5,这时需要制冷,但仅需保持干冷工况。

c) 室外空气状态点  $W$  在室内状态点  $N$  和送风区域  $S'$  的映射区域下,如图 7 中的点 6,这时需要加热。

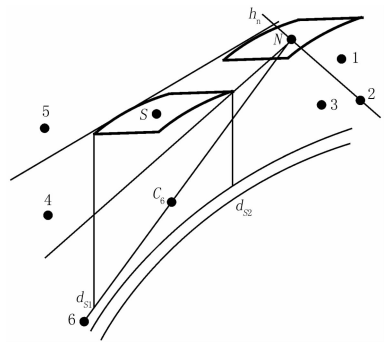


图7 过渡季节空气处理情况

### 3 房间余热和余湿的预测

显然,将整个空调过程分成送风过程和空气处理过程两个阶段来分析可以将复杂的问题简单化,并且综合了影响空调能耗的各个因素。但要确定送风状态点  $S$ ,必须知道房间的余热  $Q$  和余湿  $W$ ,其值可以采用差分方程预测。

如图 1 所示,房间的热湿动态数学模型为

$$Q = V\rho \frac{dh_n}{dt} - G(h_n - h_s) \quad (8)$$

$$W = V\rho \frac{dd_n}{dt} - \frac{1}{1000}G(d_n - d_s) \quad (9)$$

式(8),(9)中  $V$  为房间的容积,  $m^3$ ;  $\rho$  为空气密度,  $kg/m^3$ 。

以  $T$  为周期进行采样,则热动态平衡的差分方程为

$$Q(k-0) = V\rho \frac{h_n(k-0) - h_n(k-1)}{T} - G[h_n(k-0) - h_s(k-0)] \quad (10)$$

$$Q(k-1) = V\rho \frac{h_n(k-1) - h_n(k-2)}{T} - G[h_n(k-1) - h_s(k-1)] \quad (11)$$

.....

$$Q(k-9) = V\rho \frac{h_n(k-9) - h_n(k-10)}{T} - G[h_n(k-9) - h_s(k-9)] \quad (12)$$

式(12)~(14)中  $k$  为采样点编号。

取 10 次的平均值:

$$\bar{Q}(k) = V\rho \frac{h_n(k-0) - h_n(k-10)}{10T} - \frac{G}{10} \left[ \sum_{j=0}^9 h_n(k-j) - \sum_{j=0}^9 h_s(k-j) \right] \quad (13)$$

同理,房间湿度差分方程为

$$W(k-0) = V\rho \frac{d_n(k-0) - d_n(k-1)}{1\,000T} - \frac{G}{1\,000} [d_n(k-0) - d_s(k-0)] \quad (14)$$

取 10 次的平均值:

$$\bar{W}(k) = V\rho \frac{d_n(k-0) - d_n(k-10)}{10\,000T} - \frac{G}{10\,000} \left[ \sum_{j=0}^9 d_n(k-j) - \sum_{j=0}^9 d_s(k-j) \right] \quad (15)$$

由此可得房间热湿比为

$$\epsilon(k) = \frac{\bar{Q}(k)}{\bar{W}(k)} \quad (16)$$

采样周期  $T$  根据房间的大小确定。如某工程取  $T=10\text{ s}$ , 取 10 次数据计算平均值  $\bar{Q}(k)$  和  $\bar{W}(k)$ , 从而得到热湿比, 得到送风状态区域  $S'$ , 每 100 s 调整一次送风状态。

显然, 式(13)和(15)分别根据房间温度值和湿度值(比焓和含湿量)的变化率来确定房间的余热和余湿数值。

#### 4 空调系统最佳运行管理算法的实现

第一步, 检测工程内外的参数。包括壁面温度, 室内空气温度、湿度,  $\text{CO}_2$  浓度, 室外温度、湿度等。

第二步, 根据室内参数及其变化情况判断工程的状况, 即判断工程目前是处于“维护工况”还是“使用工况”。通常, 工程处于使用工况时, 工程内的热湿负荷均比较大, 温度上升, 而处于维护管理状态时, 热湿负荷均比较小, 温度保持不变。另外, 还可以根据室内  $\text{CO}_2$  浓度进行辅助判断, 如  $\text{CO}_2$  浓度较高, 则处于使用工况,  $\text{CO}_2$  浓度较低, 则处于维护工况。

第三步, 根据工程所处的状况确定工程内空气的要求区域  $N'$ 。如是维护工况, 工程对空气环境的要求仅是调节相对湿度, 温度可以不作要求, 室内空气的要求区域为图 4 所示的  $N'$  区域。该区域比较大, 反推可知, 要求的送风区域也比较大, 空调

处理要达到该区域可选择的方案就越多, 节能的潜力也就越大。如是使用工况, 不仅有相对湿度的要求, 而且还有温度的要求, 其要求域为图 2 所示的  $N'$  区域。

第四步, 预测空调区域实际空气余热和空气余湿。

第五步, 根据室内空气的要求域  $N'$  反推出要求的送风状态域  $S'$ 。知道了房间的空气余热  $Q$  和余湿  $W$ , 可以计算出房间的热湿比, 再根据房间要求的空气状态区域  $N'$ , 可以反推出要求的送风区域  $S'$ 。

第六步, 根据要求的送风域确定空气的最佳处理方案。

根据设备的设置情况及室外空气状态和工程状况, 遍历可能的空气处理方案, 并进行能耗比较, 从而确定设备的最佳运行方案。

运行管理的算法流程如图 8 所示。

#### 5 空调系统最佳运行管理算法的特点

该管理算法具有以下优点。

1) 计算简单, 容易实现。

该算法分为两个阶段, 送风过程主要确定空调房间的送风状态  $S$ , 测量房间内的  $t_n$  和  $\varphi_n$  ( $h_n$  和  $d_n$ ), 然后计算房间余热  $\bar{Q}(k)$ 、余湿  $\bar{W}(k)$  及其热湿比  $\epsilon(k)$ , 计算过程比较简单; 在空调处理阶段, 主要是统计各种处理方案的功耗, 尽管部分设备的功耗需要实验数据支撑, 但这不难实现。

2) 较好地协调了空气质量和热湿处理的控制管理问题。

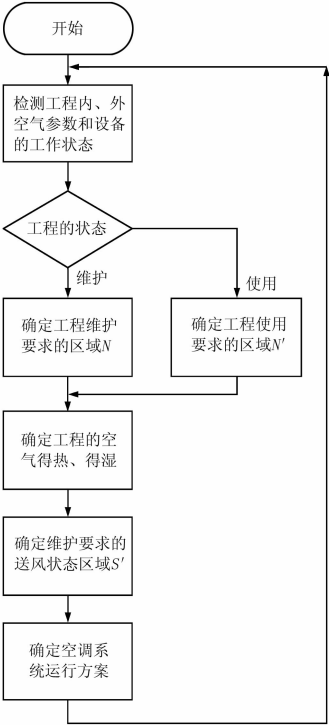


图8 空调节能运行管理算法流程

以往的需求通风控制,主要是解决最小新风量问题,而温湿度控制系统与其完全独立。在夏季工况,尚可确保运行节能,但在冬季和过渡季情况比较复杂,无法确定最佳新风量。

3) 考虑影响因素全面,便于推广。

该运行管理算法考虑的影响因素非常全面,既适合地下工程空调系统的管理,也便于推广到地上工程,如地上房间的辐射得热在能耗模型式(1)中并未考虑,但辐射得热最终也是以房间比焓的变化体现出来的,因此,可以一并考虑在房间余热  $Q$  中。

6 结论

6.1 针对影响因素众多的地下工程集中式空调系统的运行能耗管理模型,将其处理过程划分为送风

和空气处理两个阶段,并以空调房间送风状态点为连接点,简化了求解运算,实现了模型在满足环境要求的前提下,空调系统运行能耗最低的运行方案的求解。

6.2 在空调房间送风阶段,根据房间的比焓变化率、含湿量变化率,预测空调房间的余热  $Q$  和余湿  $W$ ,为确定空调房间送风状态  $S$  打下基础。

6.3 在空气处理阶段,根据要求的送风状态  $S$ ,通过遍历各种可能的空调处理方案,并比较它们的处理能耗,从而找到既满足房间空气环境要求,又使系统运行能耗最低的空气处理方案,以达到空调系统节能优化的目标。

6.4 该管理策略可以满足在不同室外气象条件、不同房间热湿负荷、不同使用条件(设定值)情况下的空调节节能管理。

参考文献:

[1] 王厉,李念平,龙舜心. 新风系统经济运行控制策略的分析与研究[J]. 暖通空调,2003,33(2):129-132

[2] 李莉,陶求华. 居住建筑空调能耗模拟及夏季室内温度设定[J]. 建筑热能通风空调,2008,27(6):78-80

[3] Mortensen D K, Walker L S, Sherman M H. Optimization of occupancy based demand controlled ventilation in residences [J]. Internal Journal Ventilation, 2011,10(1):49-60

[4] 贾代勇,耿世彬,袁印奎,等. 基于  $CO_2$  和 TVOC 浓度的空调新风随机控制系统[J]. 暖通空调,2004,34(6):14-16,60

[5] Haghighat F, Donnini G. IAQ and energy management by demand controlled ventilation[J]. Environment Technology, 1992, 13(4):351-359

[6] Kolokotsa D, Pouliezios A, Stavrakakis G, et al. Predictive control techniques for energy and indoor environmental quality management in buildings[J]. Building and Environment, 2009,44(9):1850-1863

[7] 缪小平,彭福胜,王琴. 集中式空调系统的除湿设计[J]. 暖通空调,2004,34(7):73-75