

出口平均过冷度与入口水温显著负相关，而系统稳定制取冰浆时间与入口水温低度负相关。

表5 相关系数计算结果

变量	相关系数 r
过冷却器出口平均过冷度 $T_s$ 入口水温	-0.673
系统稳定产冰时间 $T_s$ 入口水温	-0.466

从计算结果可以看出，过冷却器入口水温和循环水流量与过冷却器出口平均过冷度均呈显著负相关关系，相关系数分别为-0.673 和-0.699。因此可以考虑通过降低过冷却器入口水温和减小循环水流量来增大平均过冷度，进而增大产冰率。系统稳定制取冰浆的时间与过冷却器入口水温相关系数为-0.466，低度负相关；与循环水流量相关系数为-0.795，显著负相关。此外，过冷却器入口水温受环境温度的影响，不易控制，可以考虑适当降低循环水流量以延长系统稳定制取冰浆的时间。

### 3. 结论

(1) 本文通过实验研究了过冷却器入口水温和循环水流量与过冷却器出口平均过冷度和系统稳定制取冰浆时间之间的相互关系，得到以下结论：过冷却器出口平均过冷度受到过冷却器入口水温和循环水流量的影响。其他条件相同时，过冷却器入口水温越大，平均过冷度越小；循环水流量越大，平均过冷度越小。

(2) 系统稳定产生冰浆的时间受到过冷却器入口水温和循环水流量的影响。其他条件相同时，过冷却器入口水温越大，系统稳定产生冰浆时间越短；循环水流量越大，系统稳定产生冰浆时间越短。

(3) 过冷却器入口水温和循环水流量与过冷却器出口平均过冷度均显著负相关，因此可以考虑通过降低过冷却器入口水温和减小循环水流量来增大平均过冷度。系统稳定制取冰浆的时间与

过冷却器入口水温低度负相关，与循环水流量显著负相关，因此可以考虑适当降低循环水流量以延长系统稳定制取冰浆的时间。

### 参考文献

- [1] 冯自平. 建筑节能新技术——动态冰蓄冷[J]. 建筑, 2009, (3).
- [2] 曲凯阳. 过冷水制取的基础与应用研究[D]. 北京: 清华大学, 2000.
- [3] 稻柴英男, 武谷键吾. 静止水の過冷却現象に及ぼす諸因子の影響. 日本機械学会論文集(B), 1993, 59(567): 3357.17.
- [4] S. Wakamoto, K. Nakao and N. Tanaka. Study of the stability of supercooled water in an ice generator. ASHRAE Transactions, 1996, 102(2): 142-150.
- [5] 柳飞, 何国庚, 成维. 过冷水动态冰晶制取的实验研究[J]. 制冷与空调, 2005, 5(3): 66-70.
- [6] Jean Castaing-Lasvignottes, Thomas David, Francoise Strub, et al. Dynamic Modeling and Experimental Study of Ice Generator Heat Exchanger Using Supercooled Water[J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47: 3644~3651.
- [7] 徐海卿. 小型冰晶式蓄冷装置研究[D]. 上海: 上海海事大学, 2007.
- [8] 郁庆庆. 过冷水动态制冰系统中过冷却器的仿真与优化研究[D]. 上海: 上海海事大学, 2006.
- [9] 谢若非. 过冷法制备冰浆的控制参数研究[D]. 上海: 同济大学, 2012.
- [10] 吴锐. 过冷法动态冰浆制取的分析及实验[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [11] M.Faucheux, G. Muller, M. Havet, et al. Influence of surface roughness on the supercooling degree: case of selected water/ethanol solutions frozen on aluminium surfaces[J]. International Journal of Refrigeration, 2006, 29: 1218-1224.

## 基于模型预测控制的空调系统运行优化仿真研究

### THE SIMULATION STUDY OF HVAC SYSTEM OPERATION AND OPTIMIZATION BASED ON MODEL PREDICTIVE CONTROL STRATEGY

刘羽岱<sup>1</sup> 潘毅群<sup>2</sup> 黄治钟<sup>3</sup>

1 华东建筑设计研究院有限公司技术中心, 上海 200041, E-mail: yudai\_liu@xd-ad.com.cn

2 同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804

**摘要:**采用 TRNSYS 与 MATLAB 联合仿真的方法将空调系统仿真运行和系统的优化控制动态结合起来, 在仿真平台上实现了空调系统模型预测控制策略的验证。在本文研究中, 以空调系统总能耗为目标函数优化每个控制时间步长内冷冻水供水温度和空气处理机组送风温度, 并对该策略所带来的节能效益进行分析和评价。仿真结果表明, 相对于固定值控制策略, 采用模型预测控制的优化模型在夏季典型工况可以节省 15.5% 的能耗, 在过渡季节典型工况可以节省 9.6% 的能耗。

**关键词:** 模型预测控制; 空调系统; 仿真优化

## 0 引言

建筑运行阶段的优化问题, 随着楼宇自控水平的提升以及计算机性能的提高, 越来越引起人们的兴趣和重视。整个空调系统内部各环路和组件之间有着密切而复杂的联系, 因此需要优化控制系统不同的设定值或者运行模式来适应建筑负荷动态变化以及室外不断变化的天气情况。然而, 空调系统是一个典型的高度非线性、时变性、耦合性和不确定性的复杂多变量系统, 难以建立起准确的数学模型, 因此也难以设计并实现有效的优化控制。

基于仿真的优化方法的优势在于可以利用目前已有的建筑仿真软件的功能和模块, 避免从头开始建模。尽管基于仿真的全局控制这一理念最早由 Kelly<sup>[1]</sup>于 1988 年提出, 但是由于这项技术对计算机性能的要求较高, 使得它的发展一直非常缓慢。直到近十年, 越来越多的研究人员采用这种方法来解决空调领域中的优化设计和控制问题。先前在这一领域的工作主要集中在优化某些特殊的系统方面, 而现在的研究热点集中在日照控制、蓄能系统的控制以及 HVAC 系统控制方面的问题<sup>[2-4]</sup>。模型预测控制是一种先进的控制策略, 采用设备模型来预测系统的将来行为和响应, 以滚动优化的方式来优化目标函数。在过去的十年当中, 模型预测控制也逐渐引起了空调系统领域的专家和学者的兴趣。Coffey<sup>[5]</sup>等人提出了一个灵活的软件框架用来基于仿真的全局控制研究。这个框架是基于 GenOpt 软件并采用修正的 GA 算法作为全局优化器。这个框架被成功应用到一个办公室需求响应的案例研究当中。Ma<sup>[6]</sup>等人通过模型预测控制来研究建筑能耗的需求响应, 采用 BCVTB 软件作为中间件连接建筑全能耗模拟软件 EnergyPlus 和数值计算程序 MATLAB 的联合仿真。以一个多区的商业办公建筑为研究对象, 采用 EnergyPlus 对 VAV 制冷系统建模, 采用 MATLAB 的系统辨识工具来获取房间温度和能耗模型。Nghiem<sup>[7]</sup>等人采用滚动优化全局控制的方式, 通过他们自行开发的 MLE+界面耦合

MATLAB 和 EnergyPlus, 成功解决了需求计费的优化问题。

目前盛行的建筑性能仿真软件设计之初都是以建筑能耗模拟或者空调系统仿真为目标, 如 EnergyPlus、TRNSYS 和 ESP-r 等, 而没考虑像模型预测控制这类先进控制策略的应用问题。因此, 这类先进的控制策略很难在这些单一软件中得到验证和评价。然而, 联合仿真技术为我们解决这类复杂问题提供了新的思路。联合仿真代表了一种特殊的仿真情景, 在这个情景中至少使用两个仿真程序来求解耦合的微分代数方程, 并在运行时间内进行数据交换<sup>[8]</sup>。

本研究以一小型办公建筑为研究对象, 采用联合仿真的技术将空调系统模型与优化算法动态结合起来, 分析其空调系统在夏季和过渡季节典型工况下采用模型预测控制的节能效益。

## 1 模型预测控制

在过去的二三十年当中, 模型预测控制 (Model Predictive Control, MPC) 已经在许多领域取得了广泛的成功应用, 如化工和制造等<sup>[9]</sup>。MPC 最大的特点在于可以将所要优化的目标函数和系统的限制性条件以一种系统的方式来整合处理, 并通过滚动优化的方式实现在线优化<sup>[10]</sup>。

模型预测控制的基本思想是在每个时间步长内, 求解如下有限时域的优化控制问题:

$$J(x) = \min_u \sum_{k=t}^{t+N-1} l(x_k, u_k), \text{ 目标函数 (1)}$$

约束条件:

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k), k=t, \dots, t+N-1, \quad \text{动态计算(2)}$$

$$x_k \in X, k=t, \dots, t+N-1, \quad \text{约束条件(3)}$$

$$u_k \in U, k=t, \dots, t+N-1, \quad \text{约束条件(4)}$$

$$x_t = x(t), \quad \text{约束条件(5)}$$

其中,  $N$  表示预测时域,  $X_k$  和  $U_k$  表示的

是在当前时间步长  $k=t$ ，系统状态  $x_k$  和控制输入  $u_k$  的限制性条件集合。优化目标函数和限制性条件是设计 MPC 的主要内容。当前系统状态用来初始化预测控制状态。动态系统的计算 (2) 要采用足够精度来模拟才能达到较优性能的控制目标。图 1 为模型预测控制算法框图。

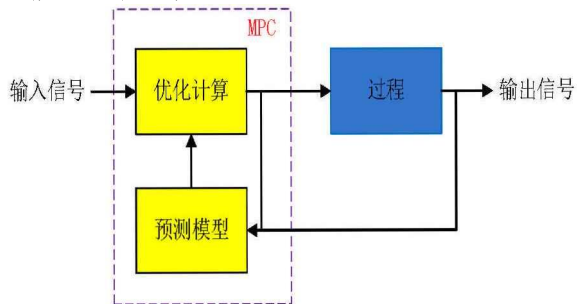


图 1 模型预测控制算法框架

## 2 仿真优化平台的建立

本研究所选取的建筑为小型办公建筑，总共两层。总面积为 475 m<sup>2</sup>，每层面积为 237.5 m<sup>2</sup>，总空调面积为 387m<sup>2</sup>。室内设计参数：夏季干球温度 24℃，相对湿度 60%。建筑空调系统形式采用的是变风量空调系统，如图 2 所示。

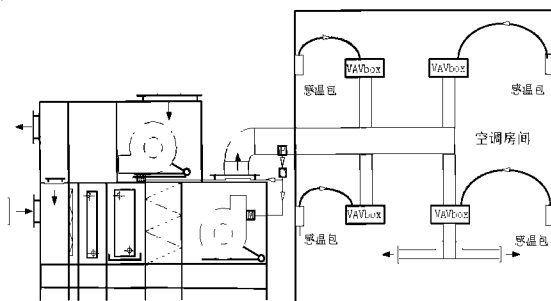


图 2 空调系统风侧系统图

变风量末端根据房间负荷的变化，通过 PID 控制器调节变风量末端的风阀开度从而改变房间的送风量以维持房间温度在设定值。风机的送风温度通过调节进入盘管的冷冻水阀门的开度来满足，这也是通过 PID 控制器调节来实现。送风机和冷冻水泵采用变频控制，冷冻水泵为定频水泵。水泵与机组之间采用联动控制。在本模型空调系统中，只有一台冷机、一台冷冻水泵、一台冷却塔以及一台冷却水泵。办公建筑的运行时间为 08:00—18:00。优化变量为空气处理机组(AHU)送风温度和制冷机的供水温度。基准模型与优化模型的控制策略如表 1 所示。

表 1 基准模型与优化模型控制策略

模型	控制策略
基准模型	固定值策略
优化模型	模型预测控制策略

为了求解 HVAC 系统运行优化问题，和以往采用简化的模型作为预测模型不同，本文采用基于仿真的优化方法。具体来说，利用 MATLAB 的遗传算法工具箱作为优化求解器，并通过封装 TRNSYS 到 MATLAB 的 M 函数文件中计算遗传算法的适应度函数值。采用基于仿真的技术来做空调系统优化的好处在于可以充分利用软件自带的模型和组件从而构建更为精确的模型，计算得到更为准确的目标函数值，优化控制的效果才可以得到保证。

此外，通过基于仿真的技术，仿真器 TRNSYS 可以作为黑盒子来使用，只需通过改变优化变量的值传递给 TRNSYS 的输入文本文件，TRNSYS 会自动计算并返回所需要的目标函数值。像遗传算法这类不需求导的启发式算法，就非常适合用于这类黑盒子模型的优化问题。不过，遗传算法的对内存需要较高，可能会导致计算量过大。因此需要在计算准确性和效率上做出平衡。

### 2.1 MATLAB 遗传算法工具箱

在非线性 HVAC 系统模拟当中，有两类优化技术：全局优化和局部优化。二者最大的差异在于非线性局部优化技术通常会导致局部最优解而不是全局最优解。遗传算法<sup>[11]</sup> (Genetic Algorithm) 是模拟达尔文生物进化论的自然选择和遗传机理的生物进化过程的计算模型，非常适用于处理传统搜索方法难以解决的复杂和非线性优化问题。

遗传算法最大的特点是这种算法是基于结果的算法，它直接对结果对象进行操作，不存在求导和函数连续性的限定，并具有内在的隐并行性和更好的全局寻优能力。遗传算法采用概率化的寻优方法，能自动获取和指导优化的搜索空间，自适应地调整搜索方向，不需要确定的规则。

MATLAB 是一个强大的数值计算引擎，其自带 GADS 工具箱包含了遗传算法。GADS 是针对 MATLAB 优化处理算法的扩展，它在 MATLAB 和 Optimization Toolbox 的基础上提供遗传算法和直接搜索的基本功能。用户可以直接在 MATLAB 命令窗口或者 M 文件中使用

ga 函数来调用遗传算法工具箱。

## 2.2 封装 TRNSYS 到 MATLAB 函数

封装 TRNSYS 到 MATLAB 函数的目的是使得在 MATLAB 的 M 文件中可以非常方便和灵活地调用 TRNSYS，可以根据需要来修改 TRNSYS 的运行时间、优化变量值以及将计算结果返回到 MATLAB 的工作空间。封装 TRNSYS 到 MATLAB 函数的步骤如下：

首先，在 TRNSYS Simulation Studio 中建立好建筑及空调系统模型，并且定义好所需要的输出文件，通常是模拟者所关注的如系统总能耗、费用或者舒适性等。模型建立好后，TRNSYS 的输入文件都会保存到 Dck 格式的文本文件。Dck 文件保存和记录了模型中各组件的信息和组件间的连接关系，可以由 TRNExec.exe 调用并执行。同时，Dck 文件可以很容易的在 MATLAB 中加载和读取。TRNExec 程序是一个代数和微分方程的求解器，根据 Dck 输入文件在每个时间步长迭代计算直至收敛，再进行下一个时间步长的计算。

其次，在 MATLAB 中，如图 3 所示，可以通过复制原 Dck 文件到 MATLAB 工作目录下，以免在优化过程中修改最原始的 DCK 文件。在 M 文件中，通过 Dos() 命令或!命令可以调用 TRNExec，不过需要将当前 MATLAB 的工作目录改为 TRNExec 的工作目录。多区建筑模块 Type56 的 bui 输入文件须与 Dck 文件放在同一个文件夹内。运行 TRNExec 结束后，可以再将 TRNSYS 的输出结果文本文件通过 textread 命令函数加载到 MATLAB 工作空间中读取，然后返回当前优化变量对应的目标函数值。在 M 文件中，通过 ga() 函数调用遗传算法工具箱，通过遗传算法不断寻优，每一次寻优结束后，将更新的优化变量在 MATLAB 中通过查找和替换 Dck 文件中相应的优化变量值，再进行下一步的寻优计算，直至算法结束。

最后，再对计算结果进行后处理。可以通过 MATLAB 的画图函数将这些优化变量和优化目标函数值输出，也可以通过遗传算法自带的画图函数在线输出。

通过封装 TRNSYS 到 MATLAB 函数，在 MATLAB 工作空间中只要输入 [x fval] = ga(@MATLAB\_TRNSYS\_HVAC.2.options) 命令，就会自动计算并反馈优化变量矩阵 x 以及

对应的最优函数值 fval。其中，@MATLAB\_TRNSYS\_HVAC 表示封装的优化函数，是一个 M 函数文件，放在当前 MATLAB 的工作目录下，用来计算空调系统的能耗。2 则表示当前优化变量的个数为两个，在本研究中是 AHU 送风温度和冷机的供水温度。options 定义了遗传算法的参数，优化变量的取值范围，如交叉选择的概率、变异的概率、算法终止条件等。

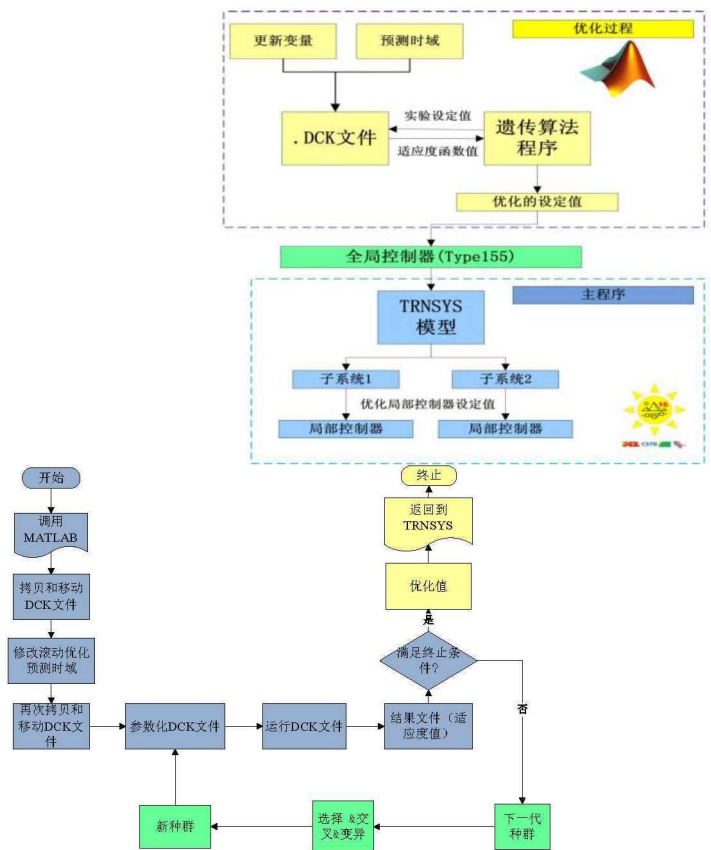


图 3 封装 TRNSYS 到 MATLAB 函数

## 2.3 基于遗传算法的优化过程

在本研究中，选取的目标函数为空调系统的总能耗，包括水泵、风机、机组和冷机塔的能耗之和，可以通过 TRNSYS 组件 Type65 打印并在线输出。即目标函数为  $fval = P_{fan} + P_{pump} + P_{chiller} + P_{tower}$ 。水泵和风机均采用变频控制。选取的优化变量为空气处理机组 AHU 送风温度和机组冷冻水供水温度。选取

的这个两个变量与空调系统风侧和水侧的能耗变化紧密相关。

遗传算法程序用来搜索每个控制时域内的PID控制器设定值的最优值。这里的控制时域是指一次优化结果作用在PID控制器的时间。首先，GA从给定的变量范围内开始随机搜索。在每一代计算过程中，每一个寻优值都会传递给封装函数用来计算出适应度函数值，然后再根据预先定义好的规则和当前群体的适应度值，通过选择、交叉和变异产生下一代的个体种群，进行下一代的计算，直到满足算法终止的条件，然后通过Type155将当前控制时域内的优化值返回给TRNSYS。

TRNSYS组件Type155可以使得MATLAB与TRNSYS建立数据通信。Type155充当TRNSYS的空调系统模型的全局优化控制器，可以调用MATLAB的遗传算法工具箱进行寻优，再将MATLAB中优化的设定值返回到TRNSYS。全局控制器Type155只有在如下两个条件都满足时才会开启：一个条件为当前TRNSYS的仿真时间为办公建筑工作时间8:00~18:00；另一个条件是从8:00开始，每隔半个小时开启一次，也就是说滚动优化的控制时间步长取0.5小时，在这0.5小时内PID控制器的设定值均保持在上一时间步长的优化值，并保持不变。预测时间步长为2小时，也就说在8:00时刻，要以8:00~10:00这一段时间的系统总能耗为目标函数。

基于遗传算法和仿真的优化过程如图4所示。

图4 优化过程

在本研究中，GA优化算法的运行参数如下：群体个数20，交叉和变异算子的参数均采用默认值，中止条件为最大进化代数150代并且停滞代数为15代。

## 2.4 空调系统仿真优化模型

通过上述步骤，可以建立好建筑空调系统仿真模型，如图5所示。

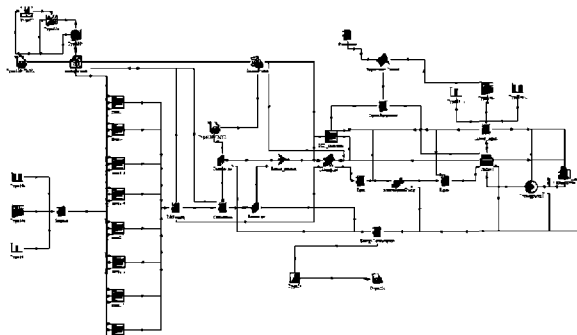


图5 建筑空调系统优化模型

## 3 仿真结果及分析

本文中选择了两个工况进行仿真研究，工况1为夏季设计日工况，工况2为过度季节典型工况日。TRNSYS仿真时间步长取0.1h（6分钟）。

### 3.1 夏季设计日工况仿真结果

通过比较基准模型与优化模型的能耗，可以对优化模型的节能效益进行评价。在夏季设计日工况中，基准模型的AHU送风温度为15℃，制冷机供水温度为7℃。从图6中可以看出，基准模型温度可以很好的控制在设定值，送风温度15℃，冷冻水供水温度7℃。从图7中可以看出，在优化模型中，送风温度和冷冻水供水温度则每半个小时优化一次。两个模型中房间的温度都能很好的控制在设定值24℃，从而也认为人员在该房间内是舒适的。图8和图9分别反应的基准模型和优化模型的逐时能耗。在夏季设计日工况，基准模型的耗电量为410.6kWh，优化模型的耗电量为346.9kWh，从而可以计算出优化模型采用模型预测控制策略相对于基准模型可以减少15.5%的能耗。

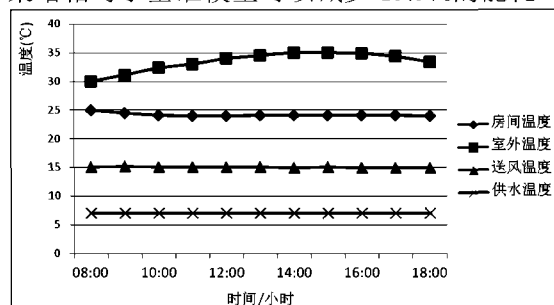


图6 基准模型的温度曲线

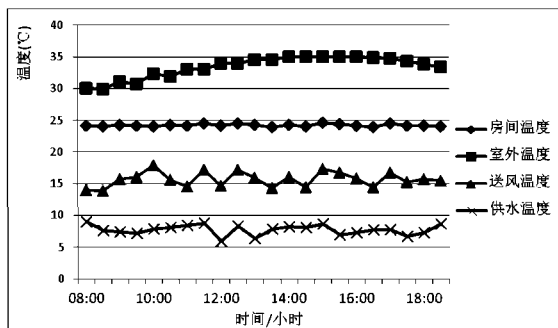


图7 优化模型2的温度曲线

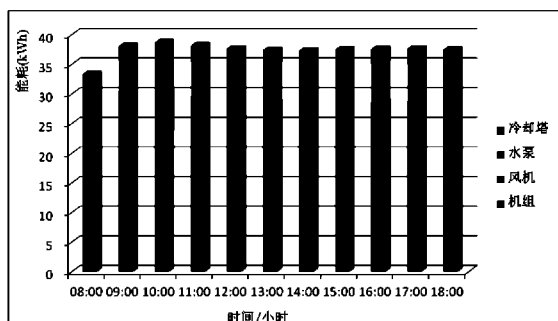


图8 基准模型的逐时能耗

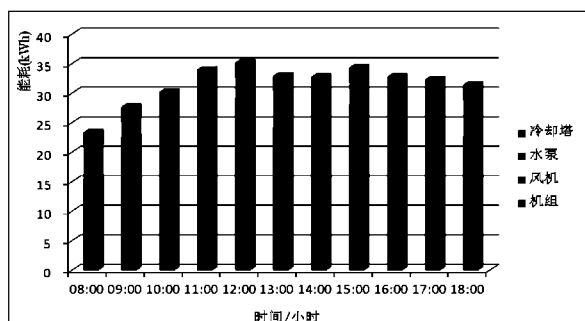


图9 优化模型的逐时能耗

### 3.2 过渡季节工况日仿真结果

图10为基准模型温度曲线,图11为优化模型温度曲线。基准模型的温度维持在设定值,优化模型的送风温度和冷冻水供水温度则每个半个小时滚动优化一次。

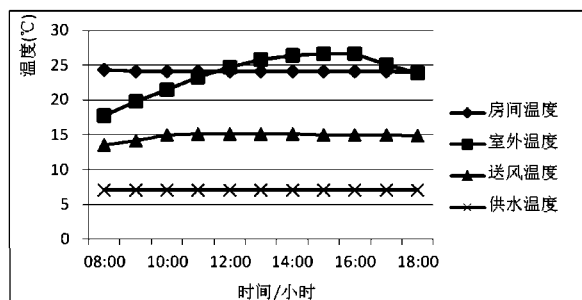


图10 过渡季节工况基准模型的温度曲线

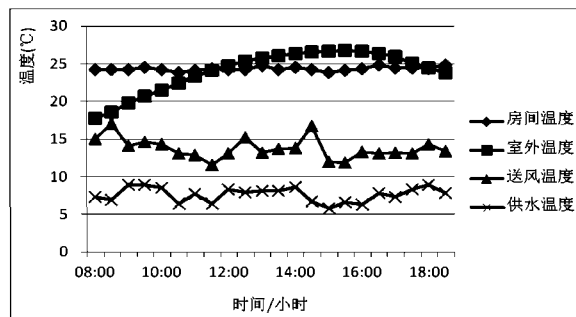


图11 过渡季节工况优化模型的温度曲线

图12和图13则反应基准模型和优化模型在典型过渡季节工况下的逐时能耗情况。

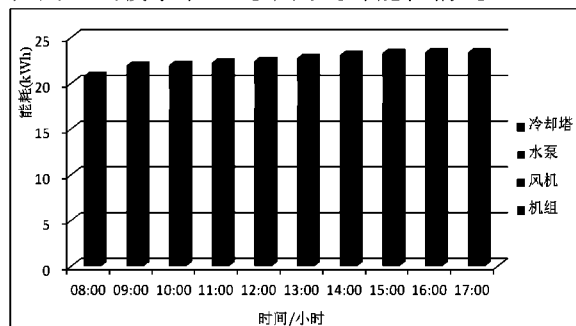


图12 过渡季节工况基准模型的逐时能耗

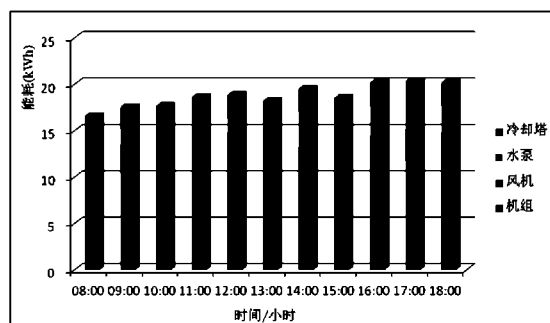


图13 过渡季节工况优化模型的逐时能耗

基准模型在过渡季节工况日总耗电量为228.2kWh,优化模型的总耗电量为206.4kWh。从而可以计算出,优化模型相对于基准模型则可以节省9.6%的能耗。

## 4 结论

通过上述仿真结果可以说明,模型预测控制无论在夏季典型工况日还是过度季节工况日,都要比温度固定值策略节能。在夏季典型工况日可以节省15.5%的能耗,在过度季节典型工况日可以节省9.6%的能耗。

但是,由于本案例研究中的模型比较复杂,而且考虑局部控制器的特性,如PID控制器,时间步长比较小,从而导致了滚动优化的时间过长,一个典型工况日的计算时间在5~8小时之间。尽管如此,基于仿真的滚动优化的

方法还是证明了它一定的优越性。

基于仿真优化的最大不足之处在于它的运行时间过长,这主要取决于模型的复杂程度和仿真时间步长。不过在将来的研究中,可以通过以下几种措施来解决这个问题。1)先采用离线的方式来仿真各种工况下对应的优化值,并在 MATLAB 中制作这样的图表,然后这个图表作为“模型”实现在线优化。2)还可以通过 MATLAB 自带的系统识别工具箱来辨识数学模型。这样可以减少仿真的运行时间。

此外,模型预测控制若应用到实际项目中还需通过实测数据来校验模型,并且考虑诸如天气、人员活动等非确定性因素带来的影响。

#### 参考文献

- 1 Kelly G.E. Control System Simulation in North America, 1988, Energy and Buildings 10, pp.193-202
- 2 Mahdavi A. Simulation-based control of building systems operation, 2001, Building and Environment, 36, .pp.789-796
- 3 Mahdavi A., Spasojević B., Brunner K.A. Elements of a Simulation-Assisted Daylight-Reponsive Illumination Systems Control in Buildings. In Proceedings of the 9th International Building Performance Simulation Association (IBPSA) Conference 2005, Montreal, Canada
- 4 G.Henze, M.Krarti. Predictive Control of Active and Passive Building Thermal Storage Inventory: Final Report for Cooperative Agreement DE-FC-26-01NT41255, 2005
- 5 Brian Coffey, Fariborz Haghghat, Edward Morofsky, et al. A software framework for model predictive control with GenOpt, Energy and Buildings 42(2010):1084-1092
- 6 Jingran Ma, Joe Qin, Timoshy Salsbury, et al. Demand reduction in building energy systems based on economic model predictive control, Chemical Engineering Science 67 (2012): 92-100
- 7 Truong X.Nghiem, George J.Pappas. Receding-horizon Supervisory Control of Green Buildings, 2011 American Control Conference on o'Farrell Street, San Francisco, CA, USA, June 29-July 01, 2011
- 8 Marija Trecka, Michael Wetter, Jan L.M.Hensen. An Implement of Co-simulation for Performance Prediction of Innovative Integrated HVAC Systems in Buildings, Eleventh International IBSPSA Conference Glasgow, Scotland 2009
- 9 S.Joe Qin, Thomas A.Badgwell, A survey of industrial model predictive control technology, Control Engineering Practice 11 (2003) 733-764
- 10 Pengfei Li, Miroslav Barić, Satish Narayanan, et al. A Simulation-Based of Model Predictive Control in a Medium-Sized Commercial Building, International High Performance Buildings Conference at Purdue, July 16-19, 2012
- 11 王小平, 曹立明. 遗传算法——理论、应用于软件实现, 西安交通大学出版社, 1~50, 2002.1

## 基于实测的居室环境与儿童健康相关性研究

### THE STUDY OF RELEVANCE INDOOR ENVIRONMENT AND CHILDREN'S HEALTH BASED ON MEASUREMENT

沈丽 黄晨 邹志军 刘炜

上海理工大学环境与建筑学院, 上海 200093

Tel: 021-55271045, E-mail: slsjxyz@163.com

**摘要:** 上海儿童过敏性疾病发病率在近几十年内持续增长,且增长速度惊人。由于人类基因不可能在短