

# 面向能源规划的围护结构负荷简化预测模型

陈淑琴<sup>1</sup>, 何 茜<sup>2</sup>, 吕西林<sup>2</sup>, KIM Eui-Jong<sup>3</sup>

(1. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092;  
3. 法国里昂国立应用科学学院 里昂热能研究实验室, 维勒班 F-69621)

**摘要:** 提出了一种单体建筑围护结构动态空调负荷预测的简化模型, 在保证满足区域预测结果精度的同时, 将模型输入参数简化至 6 个; 同时采用劳伦斯伯克利国家实验室开发的 Buildings Modelica Library 开源模型库来建立模型, 并验证了该模型的精度; 在此基础上运用线性集合法对简化模型进行降阶处理, 有效提高了负荷预测的计算速度。该模型的提出, 使得区域每栋建筑简化快速模拟均成为可能, 为进一步推广到区域空调负荷预测提供了方法基础。

**关键词:** 区域建筑; 负荷预测; 简化模型; 降阶模型; 线性集合法

**中图分类号:** TU831.2

**文献标志码:** A

## Energy Planning-oriented Simplified Models of Envelope Dynamic Load Prediction for Individual Buildings

CHEN Shuqin<sup>1</sup>, HE Xi<sup>2</sup>, LÜ Xilin<sup>2</sup>, KIM Eui-jong<sup>3</sup>

(1. Research Institute of Building Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Université de Lyon, CNRS, INSA-Lyon, CETHIL, UMR5008, Villeurbanne F-69621, France)

**Abstract:** A simplified model of envelope HVAC load prediction for individual building was proposed, in which the number of input parameters was reduced to six, and prediction accuracy guaranteed. This building thermal dynamic model was established with the open source library of Buildings Modelica Library developed by Lawrence Berkeley National Laboratory. The linear aggregation method was used to reduce the order of simplified model, in order to accelerate calculation. This simplified model makes possible the fast calculation of HVAC load for each individual building, and hence provides the method basis to expand to the regional scale simulation. Finally, discussion was conducted to expand the method in regional dynamic load prediction in the future.

**Key words:** urban building districts; load prediction; simplified model; reduced model; linear aggregation method

区域空调负荷的准确预测是区域空调系统优化配置和运行管理的基础, 也是当前研究的热点问题。区域空调负荷预测目前主要有 3 类方法: ①利用不同类型建筑的空调负荷指标来估算区域建筑空调负荷是区域规划的一种简单方法, 也是当前工程中最常用的方法, 但该方法的预测结果通常大于实际需求, 且无法反映区域空调负荷的时空特征<sup>[1-3]</sup>。②建立统计模型来进行区域空调负荷预测也是一种常用方法<sup>[4-7]</sup>。如 Signor 等人以窗墙比、传热系数、屋顶吸收率、玻璃遮阳系数、外遮阳系数、立面和屋顶颜色、人员和设备用电强度等参数对办公建筑空调负荷及电耗进行分析, 得出巴西 14 个城市的回归预测模型<sup>[4]</sup>。Ruth 等人研究应对美国马里兰州气候变化对地区能源需求的影响时, 以 1 年趋势、空调度日数、采暖度日数、照明时数和能源价格作为变量对住宅及商业建筑采暖空调用能进行回归, 分析预测在不同能源价格、温度和其他驱动因素下建筑用能的变动趋势<sup>[5]</sup>。国内李爱旗采用多元线性回归方法, 得到了 3 个由城镇居住建筑室内冷热负荷及其影响因素构成的方程式<sup>[6]</sup>。但基于统计学的建筑负荷动态预测方法, 其物理意义不明显; 同时需要调研大量数据, 获取难度较高; 且审计部门一般是对能耗总量的统计, 很难获得空调逐时数据, 因此无法反映空调负荷的动态特征<sup>[8]</sup>。③通过建立标准建筑模型来模拟各类建筑负荷的全年逐时动态变化, 进而对区域建筑负荷进行预测是另一种普遍使用的方法<sup>[9-13]</sup>。如 Heiple 等人建立了 22 个公共建筑模型, 利用 eQUEST 软件模拟了这些典型建筑模型的用能, 再

通过当地城市地理数据库获得各类建筑面积以推算城市建筑能源需求<sup>[10]</sup>. Huang 等人利用美国能源信息管理局提供的住宅和商业能耗调查数据建立典型建筑模型,然后评估整个美国由于一些因素引起的采暖和空调能耗<sup>[11]</sup>. 国内俞东伟模拟获得典型单体建筑能耗,并结合调研统计得到的该区域建筑能耗分布,利用 Bayesian 统计理论进行修正,使之用于城市规模的既有建筑负荷及能源需求估算<sup>[13]</sup>. 建立典型建筑模型进行负荷及能耗模拟所需的建筑输入信息量大,在规划阶段通常难以获取这些信息;且通过建立典型单体建筑模型来模拟,并据此推广到区域建筑整体负荷,其预测精度还有待验证<sup>[14]</sup>. 在区域负荷模拟时,由于缺乏详细参数,相关学者,如龙惟定提出了应用情景分析法预测区域建筑空调负荷,即通过设定可能发生的几种情景进行分析<sup>[15]</sup>. 但情景分析法只能分析区域负荷少部分特点,无法反映其动态特性. 从以上分析可见,找到一种简化的预测方法,既能保证预测精度,又能降低工作量和计算时间,是当前一项重要的研究工作.

鉴于此,本课题组提出了在单体建筑动态空调负荷简化预测的基础上,从单体建筑推广至区域建筑空调负荷预测的研究框架,如图 1 所示:①针对基于状态空间法的单体建筑空调负荷预测模型,通过建立等效围护结构、得热计算线性化和前处理,进行物理模型的简化,建立一个仅包含 6 个输入参数的线性时不变的围护结构负荷简化预测模型,并耦合内扰模块,该预测模型可以适用于各种不同类型的单体建筑动态空调负荷的简化预测<sup>[16-17]</sup>;②掌握人员在区域各类建筑中移动的时空特性,开展区域人员移动的时空预测模拟;③基于人员在各建筑中移动,开展各类建筑内空调随机使用行为预测;④将基于区域人流的各类建筑空调随机使用行为的时间序列(即空调随机使用作息)与单体建筑空调负荷简化预测模型进行耦合,对不同类型的各单体建筑空调动态负荷进行预测;⑤耦合不同类型的各单体建筑空调动态负荷,得到区域建筑的整体动态空调负荷.

从上述区域建筑空调动态负荷预测的整体思路可以看出,单体建筑动态空调负荷简化预测模型是整个区域建筑空调负荷预测的基础. 课题组通过前述研究,已经建立了单体建筑围护结构动态负荷的简化预测模型,并将该简化预测模型结果和 CLIMA2000、DOE2、Transys 软件模拟的结果进行了对比,验证了其准确性<sup>[16-17]</sup>. 但该模型采用了法国电力公司自主研发的仅限内部使用的模型库,因此

限制了该模型的应用和推广. 鉴于此,本文在该简化模型的基础上,采用由劳伦斯伯克利国家实验室开发的 Buildings Modelica Library 模型库来建立简化模型和降阶模型,同时利用线性集结法进行降阶,并验证了新模型的预测精度和计算速度,从而确保了该方法的推广和应用.

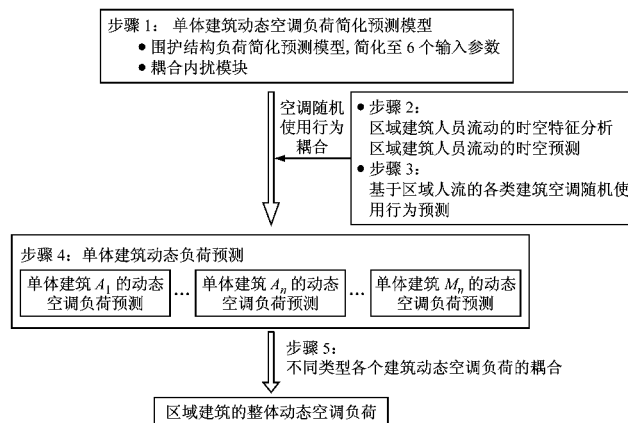


图 1 区域建筑动态空调负荷预测的研究框架

Fig. 1 Research framework of HVAC load prediction for urban building districts

## 1 建筑动态空调负荷简化预测物理模型的建立

### 1.1 详细模型

建筑空调负荷预测的详细模型(DM)包括非透光围护结构(墙体)传导得热引起的负荷、透光围护结构(窗户)得热引起的负荷、渗透得热引起的负荷等部分,其中对流得热直接转化成空调瞬时负荷,辐射得热被室内壁面吸收,再逐步被释放,成为瞬时冷负荷. 空调负荷计算采取状态空间法. 模型的相关假设如下:①围护结构导热系数和对流换热系数恒定;②长波辐射得热会随着围护结构外表面温度的变化而变化;③玻璃的短波透射率随太阳入射角的变化而变化;④透过玻璃进入房间的太阳辐射得热完全被楼板吸收.

根据建筑的外形特征建立模型的墙体和窗户. 对于一栋有  $n$  个不同朝向(包括各向墙体和屋面)的建筑,相应的模型需要定义  $3n$  个太阳辐射数据(逐时值),即每个朝向包括单位面积太阳直射辐射量  $\Phi_{\text{dir}}$ 、单位面积天空散射辐射量  $\Phi_{\text{dif}}$ 、太阳入射角的余弦值  $\cos i$ . 此外,模型的输入参数还包括逐时室外空气温度  $T_{\text{ext}}$ 、逐时有效天空温度  $T_{\text{sky}}$ 、空调逐时负荷  $P$ .

详细模型的状态方程可表示为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{C}}\mathbf{T} = \mathbf{A}(\mathbf{T})\mathbf{T} + \mathbf{B}(\mathbf{T}, t)\mathbf{U} \\ \mathbf{Y} = \mathbf{J}\mathbf{T} + \mathbf{D}\mathbf{U} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{T}$  为各节点(包括墙体节点、窗体节点、楼板节点及室内温度节点等)的温度;  $\dot{\mathbf{T}}$  为对时间的导数;  $\mathbf{U}$  为模型的输入参数(包括室外空气温度、有效天空温度、太阳直射得热、天空散射得热等外扰组成的向量);  $\mathbf{Y}$  为输出参数,在此模型中是室内空气温度;  $\mathbf{C}$  为各温度节点的材料比热容和材料密度,为恒定参数;  $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$  矩阵包括墙体、窗体等围护结构传热系数,还包括随温度变化的参数,是节点温度的函数,用于计算长波辐射得热;矩阵  $\mathbf{B}$  还包括随时间变化的参数,比如玻璃的太阳短波透射率等;矩阵  $\mathbf{J}$  和  $\mathbf{D}$  恒定不变,与材料导热系数等热工参数有关<sup>[16]</sup>。

## 1.2 简化模型(SM)

由于模型中所用的降阶方法只能用于线性时不变系统,所以必须将式(1)中的矩阵  $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{J}$ 、 $\mathbf{D}$  转化为恒定不随时间变化的<sup>[16]</sup>。

长波辐射得热计算公式如下:

$$\Phi_{\text{rad}} = \epsilon F_{\text{sky}} \sigma (T_{\text{sky}}^2 + T_s^2) (T_{\text{sky}} + T_s) (T_{\text{sky}} - T_s) \quad (2)$$

式中:  $\epsilon$  为外墙吸收率;  $F_{\text{sky}}$  为墙体对天空的角系数;  $\sigma$  为斯蒂芬玻尔兹曼常数;  $T_{\text{sky}}$  为有效天空温度;  $T_s$  为外墙表面温度。对非线性的长波辐射得热计算进行线性简化,采用常用的年平均有效天空温度  $\bar{T}_{\text{sky}}$  和年平均外墙表面温度  $\bar{T}_s$  来代替,使  $\gamma = \sigma (T_{\text{sky}}^2 + T_s^2) (T_{\text{sky}} + T_s)$  恒定不变,这样近似地将矩阵  $\mathbf{A}(\mathbf{T})$  和  $\mathbf{B}(\mathbf{T}, t)$  转变为  $\mathbf{A}$  和  $\mathbf{B}(t)$ 。

而在计算透过玻璃的日射得热时,太阳短波透射率  $\tau$  和太阳相对于玻璃法线入射角之间的关系也是非线性关系。为了简化模型,单位面积太阳短波辐射得热提取出来放在预处理阶段单独计算,即透过玻璃的日射得热将采用随着太阳入射角变化的透射率单独进行计算<sup>[16]</sup>,公式如下:

$$\bar{\Phi}_{\text{trans}}(t) = \frac{\sum_i S_{\text{win}_i} (\Phi_{\text{dir}_i} \tau_i(t) + \Phi_{\text{dif}_i} \tau_0)}{\sum_i S_{\text{win}_i}} \quad (3)$$

式中:  $\bar{\Phi}_{\text{trans}}(t)$  为透过所有玻璃的日射得热的加权算术平均值,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $\tau_i(t)$  为随时间变化的直射辐射透射率;  $\tau_0$  为恒定的散射辐射透射率;  $S_{\text{win}_i}$  为面向各个朝向  $i$  的窗户的面积,  $\text{m}^2$ ;  $\Phi_{\text{dir}_i}$  和  $\Phi_{\text{dif}_i}$  分别为直射和散射辐射强度,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。将  $\bar{\Phi}_{\text{trans}}(t)$  作为模型的一个输入参数,在模型计算时该参数乘以建筑窗体玻璃总面积即得到透过玻璃的太阳日射总得热,并假

定该得热均被楼板吸收。通过以上处理,将详细模型转变为线性时不变系统,有恒定的矩阵  $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{J}$ 、 $\mathbf{D}$ 。

为进一步简化详细模型,采用了等效的围护结构模型,如图2所示,将详细模型中各不同朝向墙体和窗体接收的辐射强度求平均值,将得到墙体的平均辐射强度 ( $\bar{\Phi}_{\text{abs\_wall}}$ ) 和窗体的平均辐射强度 ( $\bar{\Phi}_{\text{abs\_win}}$ ) 作为简化模型的输入参数。这样简化之后,只需要用一个等效的单一墙体和窗体就可以模拟详细模型中各种复杂的建筑形态,大大简化了模型的输入参数,将复杂多变的建筑形态描述和简化的工作放置在预处理模型中进行处理。

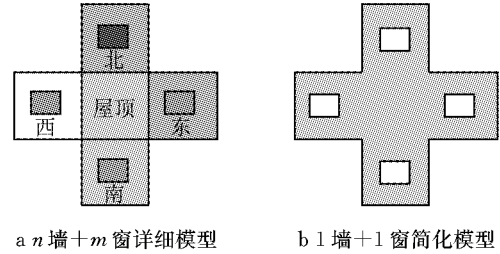


图2 围护结构朝向平均化示意图  
Fig.2 Treatment of absorbed solar fluxes on walls and windows

有了这3个输入参数  $\bar{\Phi}_{\text{abs\_win}}$ 、 $\bar{\Phi}_{\text{abs\_wall}}$ 、 $\bar{\Phi}_{\text{trans}}(t)$ , 简化模型可以只用3个一维的模型,即1面墙、1扇窗和1个楼板,表达1个单空间实例,如图3所示。图中3个输入参数  $\bar{\Phi}_{\text{abs\_win}}$ 、 $\bar{\Phi}_{\text{abs\_wall}}$ 、 $\bar{\Phi}_{\text{trans}}(t)$  分别指向了所对应的窗体接收的逐时平均辐射强度、墙体接收的逐时平均辐射强度、以及透过玻璃的逐时太阳日射得热等3个模块。再加上室外气温  $T_{\text{ext}}$ 、有效天空温度  $T_{\text{sky}}$ 、空调逐时负荷  $P$ ,简化模型仅需要6个参数,即可计算出空调负荷。

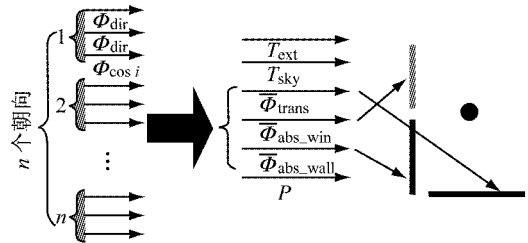


图3 简化模型输入参数  
Fig.3 Inputs to SM model

多层建筑也可近似简化为单空间模型。为了考虑层间楼板的热惰性,在简化模型中采用一个虚拟楼板以模拟各层间楼板。这个虚拟楼板的面积等于各层间楼板面积之和(除去底层楼板),且和底层楼板按面积比例分配透过玻璃的太阳辐射得热。

### 1.3 降阶模型(RM)

在简化模型的基础上,采用降阶方法建立降阶模型<sup>[18]</sup>.降阶方法就是运用数学手段,使得原来模型由高阶化成低阶,由复杂变为简单,同时确保简化后的模型输出能逼近原来模型输出的数学处理过程.如果一个高阶过程能用低阶模型来逼近,那么用低阶逼近模型来进行控制系统的设计,能大大简化计算过程,提高计算速度<sup>[19]</sup>.本研究采用线性集结法(linear aggregation method)进行简化模型的降阶<sup>[20]</sup>.所谓集结,就是将系统的状态变量进行合并,用数目较少的一组状态变量来描述系统的模型<sup>[21]</sup>.降阶模型中,合理选择降阶阶数,是模型简化的关键.本研究用 Matlab 语言编程以实现线性集结法,以用于数值模拟.

## 2 建筑动态空调负荷数值模型的建立

### 2.1 Modelica 和 Dymola 仿真工具介绍

Modelica 是一种采用了基于方程的非因果建模模式的编程语言<sup>[22]</sup>,相对于赋值语句,方程体现了不同的数据流向,能够更好地支持组件复用,采用面向对象建模方式. Dymola 是法国 Dassault Systemes 公司研发的基于 Modelica 语言的多学科系统建模仿真工具,它具有 Modelica 语言的参数化、模块化、图形化等特点,使系统模块既可以独立建立,又可以快速组装,被称为动力学建模实验室.

在 Eui-Jong Kim 的研究中,使用了法国电力公司自主开发的 BuildSysPro 数据库.该模型库包含了较全面的建筑围护结构及空调系统组件.利用 BuildSysPro 数据库,Eui-Jong Kim 建立了建筑空调负荷预测的详细模型,并和 Clim2000、DOE2、Transys 等能耗模拟软件的结果进行了模拟精度的校核.在此基础上,进一步利用 BuildSysPro 数据库建立简化模型,并和详细模型进行了校核.但 BuildSysPro 数据库仅限法国电力公司内部流通,不对外开放使用,因此限制了模型的推广利用.

鉴于此,本研究采用了完全开源的 Buildings Library 模型库,建立建筑围护结构负荷预测的简化模型,并进行模拟结果验证.该模型库由伯克利国家实验室研发,包括 HVAC(供热通风及空调)系统、控制系统、建筑传热、多区域通风、基于需求响应的负荷预测、直流/交流电器系统等多个模块.模型库中模块基于 Modelica 语言编程,可应用于 Dymola 平台中,进行建筑围护结构传热的动态模拟,建筑多区

域通风模拟,建筑负荷及能耗预测,以及建筑空调系统优化运行控制和故障诊断<sup>[23]</sup>.相对于常规建筑能耗模拟及控制软件而言,研究者可以根据特定的研究需要,在 Dymola 平台中自由组合模型库的各模块,并结合自行编程以及多软件联合仿真,进行相关模拟,从而可有效避免常规模拟软件中模拟模块、模拟功能均固定不变等问题.相关研究人员已成功利用该模型库进行建筑传热、HVAC 和建筑控制系统、室内环境的相关模拟研究<sup>[24-25]</sup>.本文利用 Buildings Library 模型库中的建筑传热模块,并建立天气数据读取模块和建筑预处理模块,从而搭建建筑空调负荷预测的简化模型,在此基础上进一步建立降阶模型,以提高模型的计算速度.

图 4 对比展示了基于 Buildings 简化模型和基于 BuildSysPro 的简化模型.图中, $T_{Buildings}$  和  $T_{BuildSysPro}$  分别表示采用 Buildings Library 和 BuildSysPro 模型库计算出的室内温度.

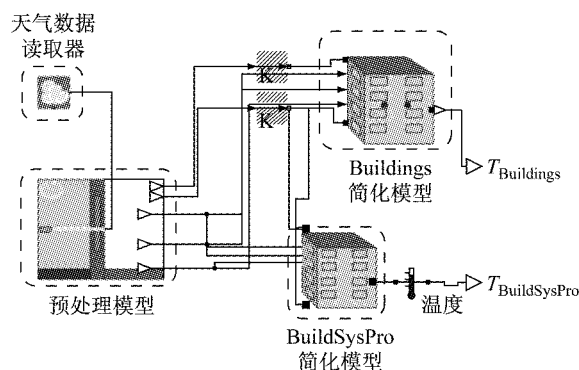


图 4 Buildings 简化模型和 BuildSysPro 简化模型的计算示意图

Fig. 4 Calculation between SM based "Buildings" library and SM based "BuildSysPro"

### 2.2 数值简化模型

利用 Dymola 平台建立数值简化模型,依次对墙体、窗体、楼板和空气 4 个主要部件进行建模.图 5 以墙体为例,展示了墙体得热引起的空调负荷数值模型.墙体外表面得热考虑了墙体与大气及周围环境的长波辐射、太阳辐射和与室外空气的对流换热,通过墙体热传导将室外热流传至墙体内表面,一部分热量以对流的形式传给室内空气,形成瞬时负荷,另一部分热量以长波辐射的形式,假设被楼板全部吸收.

在 Dymola 平台下,利用 Buildings 基础元件分别建立墙体模块、窗户模块、空气模块和楼板模块.

其中,空气模块将整栋建筑的内部空间视为一个通过墙体和窗体同外界分离的整体,考虑室内空气的蓄热能力;同时引入换气次数这一参数,以考虑空气渗透和自然通风的影响。最后,将各模块组装,可得到数值简化模型,如图 6 所示。

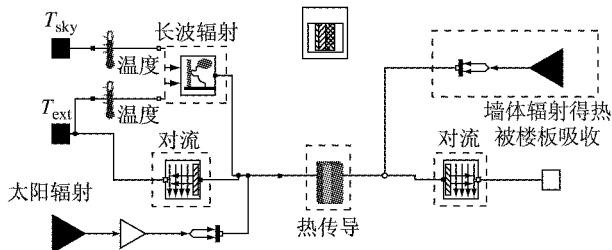


图 5 墙体简化数值模型示意图

Fig.5 Numerical simplified model for wall

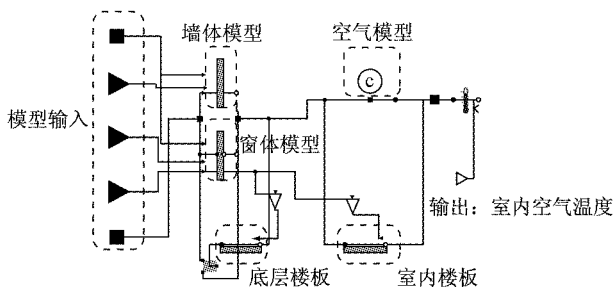


图 6 简化数值模型整体示意图

Fig.6 Numerical simplified model

### 2.3 数值降阶模型

从数值简化模型得到降阶模型遵循以下步骤:  
① 在 SM 模型中定义建筑的体型参数,墙体、窗体、楼板的热工性能等;② 采用 Modelica® 平台的线性化公式输出简化模型的状态空间矩阵  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ ;③ 采用线性集结法的 Matlab 命令,将上一步骤中得到的矩阵进行降阶,选择合适的阶数得到降阶矩阵  $A_r$ 、 $B_r$ 、 $C_r$ 、 $D_r$ ;④ 再将得到的降阶矩阵输回 Modelica® 平台中进行计算和控制调节,得到在一定温度控制条件下的负荷预测值。

其中通过实时室内空气温度得到实时负荷是通过 PID(比例-积分-微分)控制器实现的。这个过程由 3 个部分组成:测量、比较和执行。测量被控变量的实际值,在本研究中即为室内空气温度;与期望值相比较,用这个偏差来纠正系统的响应,执行调节控制。

综上所述,将物理模型转化为数值模型并验证其精确度和可行性,是数值模拟工作的重点,接下来将对模型进行验证。

## 3 建筑动态空调负荷预测模型的验证

### 3.1 简化模型的验证

选用的研究对象为两层楼平行六面体建筑,每层建筑面积为  $36 \text{ m}^2$ ,层高为  $2.5 \text{ m}$ ,总空气体积为  $180 \text{ m}^3$ 。墙体、楼板组成如表 1 和表 2 所示。采用 EnergyPlus 提供的美国旧金山气象数据。利用 Building 数据库建立简化模型,以 6 月的气象数据(30 d)为例,模拟步长为  $0.5 \text{ h}$ ( $1800 \text{ s}$ )。以模型库 BuildSysPro 建立的简化模型为参考模型,以验证 Building 数据库建立的简化模型的准确性。两简化模型的验证结果如图 7 所示。

表 1 围护结构材料热工性能

Tab.1 Performance of envelope materials

材料	导热系数 $\lambda/(\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1})$	材料密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	比热容 $c/(\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1})$
混凝土	1.750	2450	920
隔热层	0.041	20	1210
木板	1.300	800	850
抹灰	0.350	900	837

表 2 围护结构组成

Tab.2 Structure of envelope

组成	层数	混凝土/mm	隔热层/mm	抹灰/mm
墙体	3	200	140	10
组成	层数	混凝土/mm	隔热层/mm	木板/mm
楼板	3	160	200	10

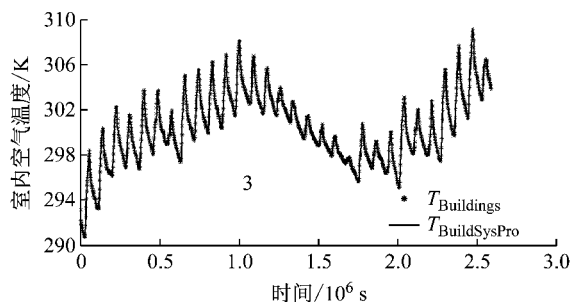


图 7 单体建筑简化数值模型验证结果

Fig.7 Result of verification of simplified model for one building

在前述研究中, Eui-Jong Kim 已经利用 BuildSysPro 数据库建立的空调负荷简化预测模型进行过校核,以验证其准确性<sup>[16-17]</sup>。而图 7 表明,本研究中利用 Buildings 数据库建立的简化预测模型结果曲线和利用 BuildSysPro 数据库建立的简化预测模型结果曲线几乎完全重合,即可验证由 Buildings Library 模型库建立的单体简化模型结果

精度的可靠性。

### 3.2 降阶模型的验证

对于单体降阶模型,首先需要确定最优降阶阶数。一般情况下很难确定最优降阶阶数,因为该参数与激励的频率和建筑的类型有关。本研究中选择了 2、6、10 阶作为比较对象,计算结果如图 8 所示。从图中可以看到,二阶模型在下降段会出现一些不稳定情况,而六阶模型和十阶模型曲线几乎重合。其结果可进一步用表 3 来解释。从表 3 可以看到,二阶模型的准确度是 99.969 8%,四阶模型的准确度是 99.998 3%,而六阶模型的准确度为 99.999 7%,非常接近 100%。考虑到本模型比较简单,对于稍复杂的建筑模型而言,4 阶精度通常达不到 99.99% 的精度,因此选取六阶降阶模型计算。

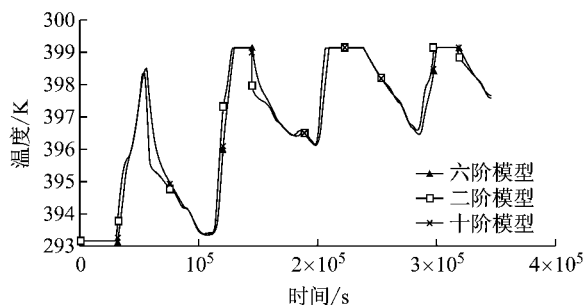


图 8 降阶阶数计算比较

Fig.8 Choice of reduction order

表 3 各阶模态的计算结果贡献度

Tab.3 Contribution of each order

阶数	贡献度	贡献度和	阶数	贡献度	贡献度和
1	99.941 5	99.941 5	6	0.000 5	99.999 7
2	0.028 3	99.969 8	7	0.000 3	99.999 9
3	0.018 4	99.988 2	8	0.000 0	100
4	0.010 1	99.998 3	9	0.000 0	100
5	0.000 9	99.999 2	10	0.000 0	100

在最优阶数选择后,可用上一步中得到的单体建筑简化模型来验证降阶模型的准确度。采用相同的气象预处理模型,将降阶模型同相对应的简化模型作对比。以一组测试为例,任意选取 4 d 的气象数据(6 月 1 日—6 月 4 日),可得到如图 9 所示的室内空气温度比较图。两条曲线在上升阶段非常接近,在下降阶段可看到区别,最大温差仅为 0.35 °C。

图 10 进一步比较了降阶模型和简化模型预测得到的负荷值。结果表明,除开始阶段外,两模型的模拟结果非常一致。在模拟最开始有一个非常大的区别,是由于初始化不一致造成的。由于简化模型具有物理含义,可以定义其初始温度为 20 °C,但是对于降阶模型,它本身并没有物理含义,没有办法定义初始温度,只能通过在计算中逐渐达到平衡。因此,

在模拟初期会有差别,但随着模拟达到平衡,降阶模型和简化模型的室内温度和负荷曲线趋于一致,可以验证降阶模型的准确性。

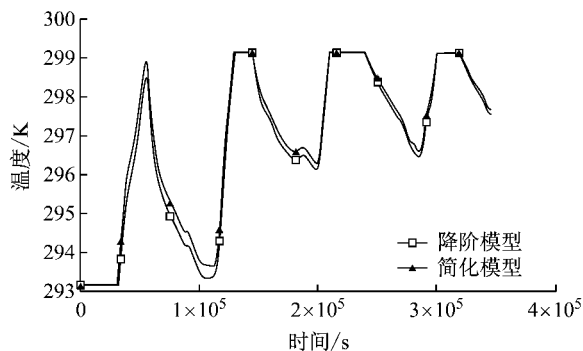


图 9 降阶模型与简化模型室内空气温度计算结果比较

Fig.9 Indoor air temperature between SM and RM for test

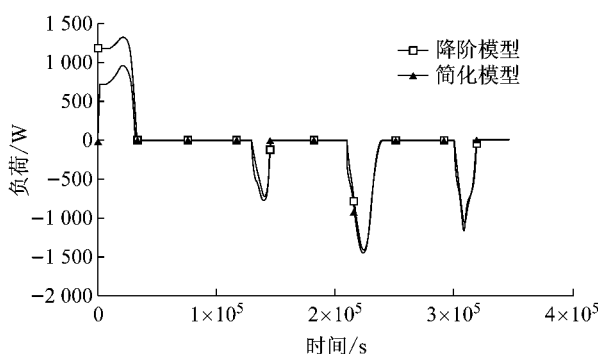


图 10 降阶模型与简化模型负荷计算结果比较

Fig.10 Hourly load between SM and RM

## 4 结论

本文延用了 Eui-Jong Kim 建立的简化物理模型,采用劳伦斯伯克利国家实验室研发的开源的 Buildings Library 模型库,在 Dymola 环境下建立了单体建筑围护结构动态空调负荷简化模型,且利用线性集结法建立了降阶模型,并验证了开源的单体简化模型和降阶模型的准确性。建筑围护结构动态空调负荷简化预测模型的建立,大大减少了单体建筑负荷模拟所需的输入参数,且这几个输入参数均为建筑设计最基本的参数,较为容易获取,这样能满足区域规划阶段无法得到建筑详细参数的现状;同时,采用降阶模型计算单体建筑年负荷预测,可以提高计算机的计算速度。输入参数的大大减少和计算速度的提高,使得在区域规划阶段逐栋计算各栋建筑的空调负荷成为了可能。本文提出的单体建筑空调负荷简化预测模型,为进一步将单体模型推广到

多栋建筑负荷预测奠定了方法基础。在后续的系列研究中,将进一步引入建筑内扰模块,从而比较准确地预测出各栋建筑空调负荷。同时,将阐述基于区域人流的建筑空调随机使用行为预测模型,并将空调使用行为与本文的单体建筑动态空调负荷预测模型进行耦合,进而耦合各栋建筑空调动态负荷,即可得到区域建筑动态负荷特性,并进行模型验证,分析其计算时长,进行相关案例应用。

## 参考文献:

- [1] 沈钢,由世俊,吴文忠. 区域能源需求预测[J]. 暖通空调, 2011,41(7):58.  
SHEN Gang, YOU Shijun, WU Wenzhong. District energy requirement prediction [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2011,41(7):58.
- [2] 王利珍,谭洪卫,武涌,等. 基于蒙特卡罗数值模拟的区域建筑冷负荷预测模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(11):4026.  
WANG Lizhen, TAN Hongwei, WU Yong, *et al.* Regional building cooling load prediction model based on Monte Carlo simulation[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014,45(11):4026.
- [3] 林欢欢,黄锦涛,王耀文,等. 基于负荷曲线的楼宇热电冷联产系统方案及运行模式分析[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2010(3):193.  
LIN Huanhuan, HUANG Jintao, WANG Yaowen, *et al.* Building combined cooling heat and power production system plan based on load curve and operation mode analysis[J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science), 2010(3):193.
- [4] SIGNOR R, WESTPHAL F S, LAMBERTS R. Regression analysis of electric energy consumption and architectural variables of conditioned commercial buildings[C]// Seventh International IBPSA Conference. Rio de Janeiro: [s. n.], 2001: 13-15.
- [5] MATTHIAS R, LIN A C. Regional energy demand and adaptations to climate change: methodology and application to the state of Maryland, USA[J]. Energy Policy, 2006,34(17): 2820.
- [6] 李爱旗. 重庆市小城镇居住建筑热环境分析和建筑冷、热负荷预测研究[D]. 重庆:重庆大学,2006.  
LI Aiqi. Study on residential building thermal environment and energy prediction for small towns in Chongqing [D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [7] ICHINOSE T, SHIMODOZONO K, HANAKI K. Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo[J]. Atmospheric Environment, 1999, 33: 3897.
- [8] 王振江. 城市能源规划中建筑冷负荷预测方法研究[D]. 大连:大连理工大学, 2010.  
WANG Zhenjiang. Prediction of building air conditioning load for urban planning stage[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [9] 韩传忠. 一种区域供冷供热系统能耗模拟方法的研究[D]. 大连:大连理工大学,2011.  
HAN Chuanzhong. Research on a method of energy consumption simulation of district cooling and heating [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.
- [10] HEIPLE S, SAILOR D J. Using building energy simulation and geospatial modeling techniques to determine high resolution building sector energy consumption profiles[J]. Energy and Buildings, 2008, 40: 1426.
- [11] Huang Y J, Brodrick J. A bottom-up engineering estimate of the aggregate heating and cooling loads of the entire US building stock[EB/OL]. [2017-05-10]. <http://escholarship.org/uc/item/5hv2t661#page-1>, Lawrence Berkeley National Laboratory.
- [12] SHIMODA Y, FUJII T, MORIKAWA T, *et al.* Residential end-use energy simulation at city scale [J]. Building and Environment, 2004, 39:959.
- [13] 俞东伟. 城市建筑能源需求预测模型研究[D]. 上海:同济大学,2012.  
YU Dongwei. Research of urban-scale building energy demand forecasting model[D]. Shanghai: Tongji University, 2012.
- [14] 潘毅群,郁丛,龙惟定,等. 区域建筑负荷与能耗预测研究综述[J]. 暖通空调, 2015, 45(3): 33.  
PAN Yiqun, YU Cong, LONG Weiding, *et al.* Review of district building load and energy consumption prediction[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2015, 45(3): 33.
- [15] 龙惟定. 区域节能管理的重要环节——区域建筑能源规划[J]. 暖通空调, 2008,38(3):31.  
LONG Weiding. Important stage of building energy efficiency: community energy planning [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2008,38(3):31.
- [16] KIM E J, PLESSIS G. Urban energy simulation: simplification and reduction of building envelope models[J]. Energy and Buildings, 2014,84:193.
- [17] DEQUE F, OLLIVIER F, POBLADOR A. Grey boxes used to represent buildings with a minimum number of geometric and thermal parameters[J]. Energy and Buildings, 2000, 31(1): 29.
- [18] PALOMO E, BONNEFOUS Y, DEQUE F. Guidance for the selection of a reduction technique for thermal model[C]// Proceedings of Building Simulation 1997. Prague: International Building Performance Simulation Association, 1997: 10-17.
- [19] 李康吉. 建筑室内环境建模-控制与优化及能耗预测[D]. 杭州:浙江大学, 2013.  
LI Kangji. Modeling, control and optimization for Indoor environment and energy consumption prediction [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [20] MOORE B C. Principal component analysis in linear system: controllability, observability, and model reduction[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1981, 26(1): 17.
- [21] 祝小平,陈士楷. 一种简便的模型降阶处理方法[J]. 南京航空航天大学学报, 1994, 26(4): 464.  
ZHU Xiaoping, CHEN Shilu. A simple model order reduction method[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1994, 26(4): 464.
- [22] 苏州同元软控信息技术有限公司. Modelica 语言介绍[EB/OL]. [2017-05-10]. <https://wenku.baidu.com/view/>

0fd91d3d767f5acfa0c7cd47.html.

Suzhou Tong Yuan Software Company. The introduction of modelica language [EB/OL]. [2017-05-10]. <https://wenku.baidu.com/view/0fd91d3d767f5acfa0c7cd47.html>, Baidu Library.

- [23] Lawrence Berkeley National Laboratory. Modelica building library [EB/OL]. [2017-05-10]. <http://simulationresearch.lbl.gov/modelica/index.html>. Lawrence Berkeley National Laboratory.
- [24] ZUO W, WETTER M, LI D, *et al.* Coupled simulation of

indoor environment, HVAC and control system by using fast fluid dynamics and the modelica buildings library [C] // Proceedings of 2014 ASHRAE/IBPSA-USA. Atlanta: American Society of Heating, Refrigeration, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), 2014:56-63.

- [25] WETTER M I, ZUO W, THIERRY S, *et al.* Modeling of heat transfer in rooms in the modelica "buildings" library [C] // Proceedings of Building Simulation 2011. Sydney: International Building Performance Simulation Association, 2011:1096-1103.

(上接第 1052 页)

如图 10 所示,电磁阀开启阶段,优化后的动铁芯所受合力明显增加。

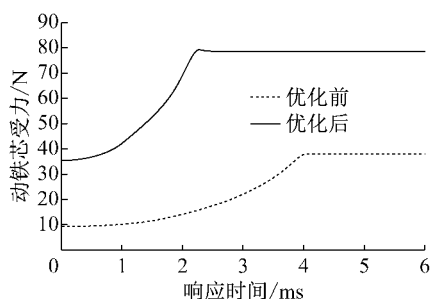


图 10 优化前后动铁芯开启阶段响应时间与受力的关系

Fig. 10 Response time versus force of moving core before and after optimization

## 4 结语

基于对电磁场能流波动规律影响参数分析,对电空制动电磁阀的动态性能进行了仿真分析。

通过分析电磁阀电磁场变化及其影响参数,提出了通过改进结构参数,减少电磁场突变,即电磁能转化为机械能过程中尽量减少额外损耗(这部分转化为热能),以提高电磁阀使用寿命;分析了衔铁间隙、线圈匝数及弹簧预紧力对电磁阀性能的影响。

采用正交试验法得出最优解,仿真分析和推论结果可缩短电磁阀开启关闭的响应时间,提高其灵

敏度,同时降低动铁芯对静铁芯的冲击力,改善电磁阀的使用寿命.本研究为实际设计和优化电空制动用的电磁阀提供了一些可参考的模型和参数。

## 参考文献:

- [1] 高明春. 柴油机电控单体泵高速电磁阀特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.  
GAO Mingchun. Research on characteristics of high-speed solenoid valve for diesel engine electronic unit pump [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012.
- [2] 陈娜. 柴油机高速电磁阀电磁场分析及结构优化研究[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2013.  
CHEN Na. Research on electromagnetic analysis and structure optimization for high-speed solenoid valve in diesel engine [D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2013.
- [3] 吴萌, 熊庆辉, 王浚哲, 等. 电磁阀开启过程动态响应特性有限元仿真研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2015(2):117.  
WU Meng, XIONG Qinghui, WANG Junzhe, *et al.* Finite element simulation research on the dynamic response characteristics in the opening process of solenoid valve [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015(2):117.
- [4] 李春青, 姜峰, 李明海, 等. 高速电磁阀动态响应特性的仿真分析[J]. 计算机仿真, 2013(11):224.  
LI Chunqing, JIANG Feng, LI Minghai, *et al.* Research on dynamic response characteristics of high speed solenoid valve [J]. Computer Simulation, 2013(11):224.