

文章编号: 1671-6612 (2022) 05-714-07

基于联合仿真的 DSF 建筑能耗敏感性分析

刘 猛¹ 刘福玲¹ 张小怀¹ 潘 嵩²

(1. 上海城建职业学院城市运营管理学院 上海 200438;

2. 北京工业大学建筑工程学院 北京 100124)

【摘 要】 详细介绍了建筑能耗敏感性分析的方法, 对取样、生成输入文件、运行模拟软件、提取结果和敏感性分析都进行了介绍。然后选取 DSF 相关的影响因素, 以及建筑内扰放热影响因素, 利用联合仿真方式对双层玻璃幕墙建筑年能耗进行敏感性分析, 做出量化的排序, 结果表明遮阳装置的透射率对年冷热负荷的影响最大, 外侧幕墙吸收率对年热负荷的影响最小, 本研究为进一步挑选影响程度较大的因素进行全局优化提供了基础。

【关键词】 联合仿真; 双层玻璃幕墙; 建筑能耗; 敏感性分析

中图分类号 TU111.4 文献标识码 A

Co-Simulation Based Sensitivity Analysis of DSF Building Energy Demand

Liu Meng¹ Liu Fuling¹ Zhang Xiaohuai¹ Pan Song²

(1. School of Urban Operation Management, Shanghai Urban Construction Vocational College, Shanghai, 200438;

2. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing, 100124)

【Abstract】 This paper introduces the method of sensitivity analysis of building energy consumption in detail, including sampling, generating input files, running simulation software, extracting results, and sensitivity analysis. Then select the influencing factors related to DSF and the influencing factors of internal disturbance and heat release of the building, use the co-simulation method to analyze the sensitivity of the annual energy consumption of double-skin façade buildings, and make a quantitative ranking. The results show that the transmittance of the shading device has the greatest impact on the annual cooling and heating load, and the absorption rate of the outer curtain wall has the least impact on the annual heating load, Influencing factors with more significant impact need to be further analyzed for global optimization.

【Keywords】 co-simulation; glazing double-skin façade; annual energy demand; sensitivity analysis

0 引言

影响建筑能耗的因素很多, 如外墙传热系数、外墙吸收系数、人员密度、照明功率密度、风机单位风量功耗以及冷机 COP 等, 这些因素对建筑能耗的影响有些表现为线性, 有些为非线性, 总体上较为复杂^[1]。众多影响因素对建筑总能耗的影响程度各不相同, 在建筑初步设计阶段, 需要对这些因素的“影响力”进行排序, 找出对建筑能耗影响较

大的因素, 在后续深化设计过程中尽可能优化其性能参数, 同时忽略对建筑能耗影响较小的因素。

国内外关于建筑能耗敏感性的研究已很多, Reddy 等国外学者^[2-4]和国内的周辉、马素珍^[5,6]等学者都开展过相关工作, 大多数研究者都采用能耗模拟软件计算建筑能耗, 算例数量很多的情况下, 在能耗模型中逐一设置每个影响因素的值、运行模型并提取结果, 工作量巨大且易出错。运用联合模

基金项目: “十三五”国家重点研发计划“建筑全性能联合仿真平台内核开发”(2017YFC0702202)

作者(通讯作者)简介: 刘 猛(1979.9-), 男, 博士, 副教授, E-mail: mengliutj@163.com

收稿日期: 2021-10-28

拟 (Co-Simulation) 方式能够很好得解决这个问题, 本文将以 TRNSYS 为能耗模拟工具, 给出采用联合模拟 (Co-Simulation) 方式进行建筑能耗敏感性分析的方法, 在此基础上进行双层玻璃幕墙 (Double-skin Façade, DSF) 建筑的能耗敏感性分析。

1 建筑能耗敏感性分析

建筑能耗敏感性分析的过程如图 1 所示。

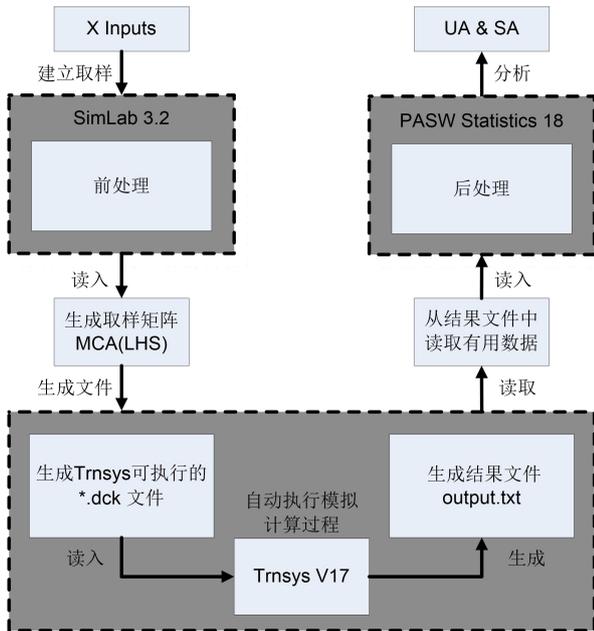


图 1 建筑能耗敏感性分析的流程

Fig.1 Procedure of sensitivity analysis

其主要步骤为: (1) 确定每个影响因素的取值区间; (2) 根据每个影响因素的分布特性, 产生取样矩阵; (3) 将取样矩阵写入特定格式的输入文件, 如 eQUEST 的*.inp 文件, EnergyPlus 的*.idf 文件, TRNSYS 的*.dck 文件; (4) 控制能耗模拟软件批量运行输入文件; (5) 提取结果, 进行相关敏感性分析。

1.1 取样矩阵

前已述及影响建筑能耗的因素很多, 其数学描述为:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$$

其中, Y 为建筑能耗, X_n 为影响因素如窗墙比。因素 X_n 有多种取值, 以窗墙比为例, 其可能的取值有 0.2, 0.3, 0.5, ..., 0.7 等。任一影响因素以此类推, 各影响因素在其取值范围内的不同取

值, 构成了取样矩阵。

常用的取样方法有蒙特卡洛 (MonteCarlo) 取样和拉丁超立方 (Latin Hypercube) 取样^[7]。蒙特卡洛法是完全利用随机抽样的方法, 在每个变量的取值区间上进行抽样; 拉丁超立方方法是先将每个变量的取值区间均分为若干不重叠的小区间之后, 在每个小区间上随机取样, 如图 2 所示。二者对比可以看出, 蒙特卡洛法需要大量的取样才能产生有代表性的结果, 对于比较耗时的模拟过程来说是不合适的, 相对而言, 拉丁超立方取样更有优势。

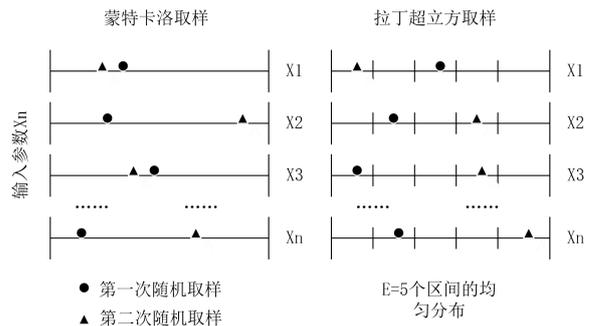


图 2 蒙特卡洛与拉丁超立方取样的区别

Fig.2 Distinction between basic MonteCarlo and Latin Hypercube sampling

拉丁超立方取样是构建一个 $n * E$ 的取样矩阵, n 是影响因素的个数, 每个影响因素的取值空间均分为 E 个互不重叠的子空间, 在每个子空间上取值的概率为 $1/E$, 在每个子空间内的取值是完全随机的。该方法可以较好得在取值空间上取值, 相对于蒙特卡洛方法, 可以减少能耗模拟的数量。

1.2 取样矩阵的实现

取样矩阵的实现, 主要有以下三种方法:

(1) 手动实现。从现有的文献来看, 多数研究者根据影响因素的取值范围, 选取几个常用的值, 然后简单排列组合后, 选择少量有代表性的排列组合形成取样矩阵。例如窗墙比取 0.2、0.3、0.4 等值, 外墙吸收系数取 0.5、0.6、0.7 等值, 几个影响因素排列组合后再挑选出若干组认为有代表性的组合作为取样, 这种做法主观性太强, 不能反映整体取样空间的真实属性。

(2) 采用 SimLab 软件实现。SimLab 是一款用于敏感性和不确定性分析的专业工具, SimLab 是在 Matlab 平台上开发出的软件, 需要与 Matlab 配合使用, 相当于 Matlab 功能的扩展。SimLab 可以产生用于敏感性分析的各种取样, 包括蒙特卡洛

取样和拉丁超立方取样,通过文件操作命令,可将取样数据直接写入输入文件,如*.inp、*.idf、*.dck等。

(3)采用 modeFRONTIER 软件实现。该软件是 Airbus 开发出来的多目标优化软件,其内部提供了包括蒙特卡洛取样和拉丁超立方取样在内的多种取样方式。通过变量节点,取样矩阵的数据可以写进*.inp、*.idf、*.dck 等输入文件,然后通过能耗模拟软件来执行输入文件即可得到结果。

1.3 运行能耗模拟软件

由于需要运行的输入文件很多,为提高执行效率节省时间,可以采取的方法有:

(1)批处理命令。在 Windows 操作系统下,可以通过批处理命令来“指挥”能耗模拟软件来依次执行。首先将生成的输入文件存放于一个文件夹,使用 copy 命令将一个输入文件复制到能耗模拟软件*.exe 所在的文件夹,运行程序生成结果文件,使用 move 命令将结果文件移动到专门存放运行结果的文件夹,然后开始执行下一个输入文件,整个过程使用 for 循环语句来控制执行。

(2)采用 modeFRONTIER 软件实现,使用时需要指定能耗模拟软件*.exe 文件和输入文件如*.dck 的绝对路径。不需要其他的参数设置,简单方便且不易出错。

1.4 提取运行结果

运行结果文件中包含的数据很多,对有用的数据提取方法如下:

(1)采用批处理命令。与运行模拟软件相似,编写批处理命令提取运行结果。

(2)采用 SimLab 软件。该软件对文件的操作可以定位到结果文件中的某一行/列,可进行读取、删除等操作,比采用批处理命令读取结果更灵活。

(3)采用 modeFRONTIER 软件。在该软件中先设置文件节点读取结果文件,然后设置结果变量节点读取结果文件中的一个/多个数据、字符串等,读取方式可采用绝对路径和相对路径两种。

1.5 敏感性分析

多元线性经验回归方程的一般形式为^[6]:

$$y = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 + \dots + \hat{\beta}_p x_p \quad (1)$$

其中, $p \geq 2$ 。上式中每个偏回归系数 $\hat{\beta}_i$ 表示其他自变量保持不变的情况下, x_i 每增加一个单位时因变量 y 的平均增加程度。由于各自变量的单位不

同,其偏回归系数之间无法直接比较,需要对偏回归系数标准化,以消除量纲的影响,定义:

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_{x_j}}, \quad y_i^* = \frac{y_i - \bar{y}}{s_y} \quad (2)$$

其中, $i=1, 2, \dots, n$; $j=1, 2, \dots, p$ 。

经过变换,得到标准化的回归方程:

$$y^* = \hat{\beta}_1^* x_1^* + \hat{\beta}_2^* x_2^* + \dots + \hat{\beta}_p^* x_p^* \quad (3)$$

标准化偏回归系数 $\hat{\beta}_i^*$ 与一般偏回归系数 $\hat{\beta}_i$ 之间的关系为:

$$\hat{\beta}_j^* = \frac{\sqrt{L_{jj}}}{\sqrt{L_{yy}}} \hat{\beta}_j \quad (4)$$

由于标准化后的所有变量均数为 0,标准差为 1。因此标准化偏回归系数表示当其他自变量保持不变时,自变量 x_j 每 1% 相对变化引起的因变量均值的相对变化百分数。标准化偏回归系数绝对值的大小,可用来衡量自变量对因变量贡献的大小,即各自变量在多元回归方程中的相对重要程度。

标准化偏回归系数可以借助 SPSS 等统计软件来实现,本文采用标准化偏回归系数衡量各影响因素对年负荷量、峰值负荷等的影响程度。

综合对比来看,采用 modeFRONTIER 产生取样最为方便,虽然 SimLab 等工具更为专业,但多数非专业人员使用起来较为困难,另外使用 modeFRONTIER 可以直接控制 TRNSYS 等能耗模拟软件进行能耗分析,然后提取结果中有用的数据,避免了编程过程。因此采用 modeFRONTIER 与 TRNSYS 联合仿真的方式进行建筑能耗敏感性分析是最有效的方法。

2 DSF建筑模型

2.1 DSF建筑的类型

双层皮玻璃幕墙根据功能与结构形式的不同,有多种划分原则^[8],常用的双层皮玻璃幕墙是根据空气的活动方式与特点,分为封闭式内循环和敞开式外循环两种,后者在我国应用较多。

敞开式外循环双层皮玻璃幕墙一般外层为单层玻璃,内层为镀膜中空玻璃。外层玻璃幕墙上下两端设有排风口和进风口,与通风腔相连,通风腔内设有可自动调控的百叶或窗帘。根据通风路径的不同,敞开式外循环双层皮玻璃幕墙又可分为整体式、廊道式、通道式和箱体式 4 种基本形式^[8]。其

中箱体式的典型做法是在水平方向以两块玻璃为一个单元, 然后分别在两边作竖向隔断, 形成一层楼高、两块玻璃宽的独立箱体, 如图3所示。

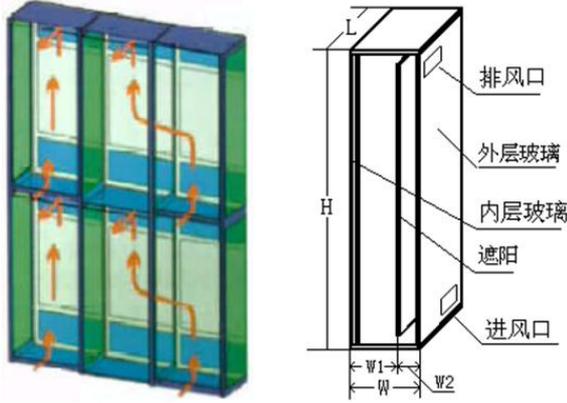


图 3 箱体式双层皮幕墙示意图

Fig.3 Schematic diagram of trunk DSF

箱体式双层皮玻璃幕墙整体性能的发挥, 实际上是依靠每个独立的箱体单元完成的, 每个箱体单元是一个功能齐备的“呼吸”体: 夏季打开通风腔上下两端的进、排风口, 使气流将通风腔内的热量带出; 冬季关闭通风腔进、排风口, 通风腔内空气温度升高, 形成一个温室, 热阻增大, 从而减少建筑物室内热量向外散失。

2.2 物理模型

箱体式双层皮玻璃幕墙单元的形体尺寸如下^[9]: 通风腔高度 $H=4.00\text{m}$, 长度 $L=1.50\text{m}$, 宽度 $W=0.50\text{m}$; 遮阳装置高度 $h=3.80\text{m}$, 长度 $l=1.30\text{m}$, 厚度 $\delta=2.00\text{mm}$, 遮阳装置到外层玻璃的宽度 $W_1=0.18\text{m}$, 到内层玻璃的宽度 $W_2=0.32\text{m}$ ($W=W_1+W_2$), 其中心在通风腔中心的铅垂线上 (见图3); 进排风口的尺寸相同, 高度 $h'=0.30\text{m}$, 长度 $l'=0.50\text{m}$, 外侧的两条边与幕墙单元边沿的距离都是 0.10m 。

DSF 建筑其他相关参数如下: 室内人员和设备负荷参考文献[10], 地面温度为 5.28°C , 人员显热负荷为 90W , 潜热负荷为 60W , 对流换热占比为 0.8 , 其余为辐射换热。照明功率为 212W , 对流换热占比为 0.2 , 设备发热功率为 135W , 对流换热占比为 0.8 , 内墙的吸收率都为 0.6 , 长波发射系数都为 0.9 。

3 敏感性分析

选取上海市典型的DSF办公建筑为例, 研究各

影响因素对建筑年能耗的影响程度。

3.1 能耗模型

本研究采用TRNSYS软件多温度场的分析模块TYPE56作为建筑模块。对双层玻璃幕墙之间的通风腔, 采用TRNFLOW建模, 将通风腔分成内外两个区域^[11], 遮阳装置位于两个区域的中间, 通风腔模型与建筑模型的耦合关系及气流节点如图4所示。

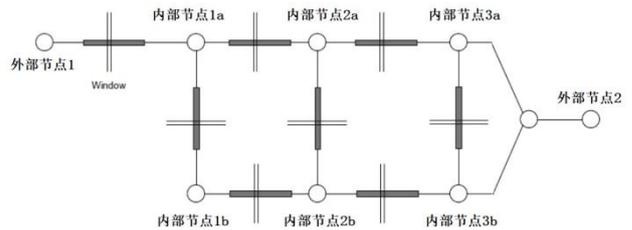


图 4 通风腔与建筑本体耦合关系

Fig.4 Coupling between ventilation cavity and building

读取气象数据采用TYPE15-3, 气象文件采用EnergyPlus网站气象文件数据库中提供的上海标准气象年数据。设定室内温度超过 27°C 开启制冷, 温度低于 20°C 开启供暖, 室内温度介于 $20^\circ\text{C}\sim 27^\circ\text{C}$ 之间时自由浮动, 不供冷也不采暖。目标参数是年冷负荷和年热负荷, 通过TYPE24对逐时冷热负荷积分得到, TRNSYS模型如图5所示。

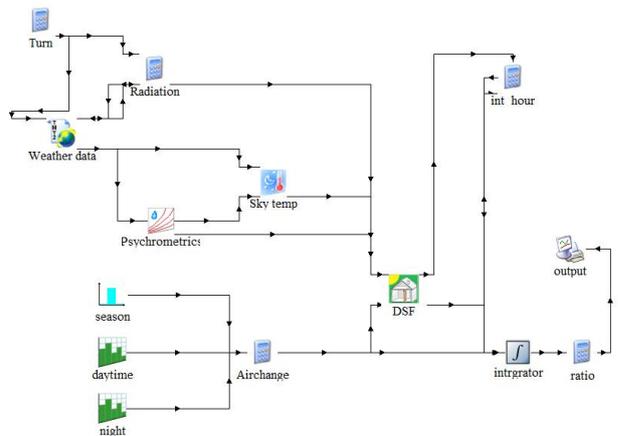


图 5 DSF 建筑能耗模型

Fig.5 DSF model in TRNSYS 17 simulation studio

3.2 影响因素

DSF建筑多用作办公建筑, 其设备运行规律相对固定, 能耗设备的数量和功率将直接导致年冷热负荷的差异, 因此本文重点分析DSF自身性能参数和室内热扰动对年冷热负荷的敏感性, 暂不考虑室外气候参数、室内环境参数、新风等变化较大的因

素。鉴于本文重点介绍DSF建筑敏感性分析的方法，所以选取较少数量的影响因素，DSF相关的影

响因素7个，内扰放热影响因素7个，所有影响因素的取值见表1。

表 1 各个影响因素的基准值及取值范围

Table 1 Mode value and scope of influence factors

变量	单位	最小值	中间值	最大值	参数个数	数值
窗墙面积比 (WWR, Window Wall Ratio)	—	0.4	0.65	0.9	11	0.4/0.45/0.5/.../0.9
遮阳装置透射率 (ST, Shading Transmittance)	—	0.3	0.5	0.7	5	0.3/0.4/0.5/.../0.7
内侧幕墙吸收率 (IA, Internal Absorptivity)	—	0.65	0.725	0.80	11	0.65/0.665/0.68/.../0.80
围护结构参数 外侧幕墙吸收率 (EA, External Absorptivity)	—	0.55	0.725	0.90	11	0.55/0.585/0.62/.../0.90
内侧幕墙发射率 (IE, Internal Emissivity)	—	0.85	0.90	0.95	11	0.85/0.86/0.87/.../0.95
外侧幕墙发射率 (EE, External Emissivity)	—	0.85	0.90	0.95	11	0.85/0.86/0.87/.../0.95
DSF 朝向 (WO, Window Orientation)	°	-5.0	0.0	5.0	11	-5.0/-4.0/-3.0/.../5.0
人员显热 (OSH, Occupants Sensible Heat)	W	69.0	90.0	111.0	11	69.0/73.2/77.4/.../111.0
人员潜热 (OLH, Occupants Latent Heat)	W	46.0	60.0	74.0	11	46.0/48.8/51.6/.../74.0
人员散热对流比例 ^a (OCF, Occupants Convective Fraction)	—	0.75	0.80	0.85	11	0.75/0.76/0.77/.../0.85
室内得热参数 照明散热 (LP, Lighting Power)	W	190.8	212.0	233.2	13	190.8/194.3/197.9/.../233.2
照明散热对流比例 ^a (LCF, Lighting Convective Fraction)	—	0.15	0.20	0.25	11	0.15/0.16/0.17/.../0.25
设备散热 (EP, Equipment Power)	W	121.5	135	148.5	21	121.5/122.85/124.2/.../148.5
设备散热对流比例 ^a (ECF, Equipment Convective Fraction)	—	0.75	0.80	0.85	11	0.75/0.76/0.77/.../0.85

备注：a其余部分为辐射换热。

3.3 modeFRONTIER模型

TRNSYS 模型完成之后，产生了完整的输入文件*.dck 和建筑描述文件*.b17，运行模型产生结果文件 output.plt，在此基础上建立 modeFRONTIER 模型如图 6 所示。

图 6 中各影响因素的取值分别输入到 DCK_File 和 BLD_File 中，其分别对应 TRNSYS 生成的 *.dck 文件和建筑模型的*.b17 文件。各影响因素的取值，即表 1 中的数据由 DOE 模块产生。模型中设定均匀拉丁超立方取样，取样数量为 500 个。

DOSBatch 模块是运算的核心, 控制 TRNSYS 软件运行, 产生的结果存放在 Annual_Load 模块对应的 output.plt 文件中, 通过 Q_Heating 和 Q_Cooling 模块提取 output.plt 文件中的年热负荷和年冷负荷。

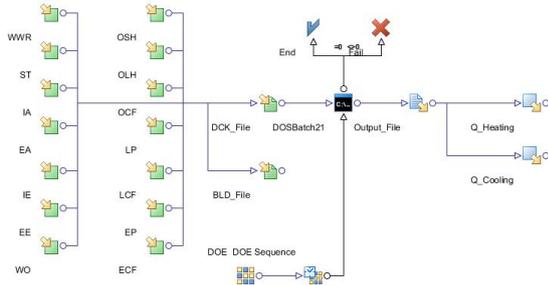


图 6 modeFRONTIER 模型

Fig.6 Workflow in modeFRONTIER

3.4 敏感性分析结果

modeFRONTIER 模型产生的数据结果如表 2 所示。横坐标方向是 14 个影响因素, 纵坐标是 500 个取样。由于数据量较大, 只截取了部分数据。表中最后两列是年冷热负荷的总量。

将表 2 的数据在 SPSS 软件中进行多元线性回归分析, 得到线性标准偏相关系数如图 7 所示, 从柱状图可以很清晰且直观地看出不同影响因素对目标参数的影响力大小。

表 2 modeFRONTIER 模型产生的结果

Table 2 Outputs of modeFRONTIER model

NO.	EA	ECF	...	WWR	WO	Q _{COOL}	Q _{HEAT}
0	0.795	0.81	...	0.60	4	1.7E+07	1.0E+07
1	0.620	0.78	...	0.40	2	1.6E+07	1.0E+07
2	0.550	0.75	...	0.80	2	1.7E+07	1.1E+07
3	0.725	0.77	...	0.70	1	1.7E+07	1.1E+07
4	0.550	0.75	...	0.60	0	1.8E+07	9.7E+06
5	0.830	0.84	...	0.55	2	1.7E+07	1.0E+07
...
496	0.900	0.84	...	0.70	4	1.7E+07	1.0E+07
497	0.655	0.84	...	0.80	-5	1.3E+07	1.1E+07
498	0.620	0.84	...	0.45	1	1.7E+07	9.7E+06
499	0.725	0.81	...	0.75	3	1.8E+07	1.1E+07

从结果来看, 遮阳装置的透射率对年冷热负荷的影响最大, 透射的太阳辐射经内侧幕墙到达室内, 最终会形成室内冷负荷; 其次是窗墙比, 即 DSF 占外围护结构的比例, 因为 DSF 的综合传热系数一般会大于非透明围护结构, 因此大的窗墙比导致冷负荷的增加。再次分别是人员显热和照明功

率。

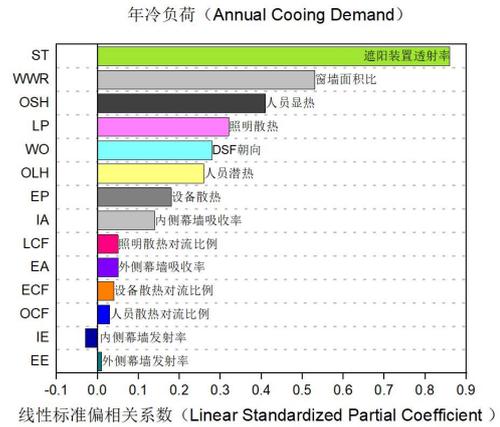


图 7 年冷负荷的敏感性分析

Fig.7 Sensitivity analysis of annual energy demand for cooling

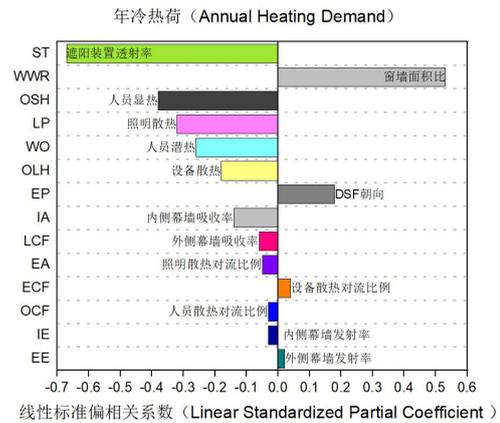


图 8 年热负荷的敏感性分析

Fig.8 Sensitivity analysis of annual energy demand for heating

外侧幕墙吸收率对年热负荷的影响最小, 这说明同一影响因素对不同分析目标参数的影响是不同的。建筑朝向对年冷负荷的影响排在第五位, 对于年热负荷的影响排在第八位, 这说明上海地区的南向 DSF 对冷负荷的影响大于对热负荷的影响。

室内人员显热功率、照明功率等因素对年热负荷的影响成负相关性, 说明人员显热功率越大, 则年热负荷总量需求越小; 幕墙的吸收率对年热负荷成正相关, 而发射率对年热负荷成负相关性, 但二者对年负荷的影响相对均较小。

4 结论

(1) 本文介绍了 DSF 建筑能耗敏感性分析的

流程和方法,从取样、生成输入文件、运行模拟软件、提取结果和进行敏感性分析都做了详细的介绍;

(2) 联合模拟的方法与传统的手动方法进行敏感性分析相比较,效率显著提高且不易出错;

(3) 本文重点介绍 DSF 建筑敏感性分析的方法,影响因素的选取较简单,运用同样的方法还可以分析其他影响因素对目标参数的影响;

(4) 得到不同影响因素对目标参数的影响程度后,下一步的工作是挑选影响程度较大的因素进行全局优化分析。

参考文献:

- [1] Hoes P, Trcka M, Hensen JLM, et al. Investigating the potential of a novel low-energy house concept with hybrid adaptable thermal storage[J]. *Energy Conversion and Management*, 2011,52(6):2442-2447.
- [2] Reddy T A, Claridge D E. Using synthetic data to evaluate multiple regression and principal component analyses for statistical modeling of daily building energy consumption[J]. *Energy and Buildings*, 1994,21(1):35-44.
- [3] Navid Delgarm, BehrangSajadi, Khadijeh Azarbad, et al. Sensitivity analysis of building energy performance: A simulation-based approach using OFAT and variance-based sensitivity analysis methods[J]. *Journal of Building Engineering*, 2018,15(1):181-193.
- [4] Richard Gagnon, Louis Gosselin, Stephanie Decker. Sensitivity analysis of energy performance and thermal comfort throughout building design[J]. *Energy & Buildings*, 2018,164(4):278-294.
- [5] Zhou H, Long W. REGRESSION ANALYSIS OF HIGH RISE AIR-CONDITIONED OFFICE BUILDING ENERGY USE[C]. *Proceedings of the 4th International Symposium on Heating, Ventilating and Air Conditioning vol.1*. Dept. of Facility Engineering Management, Shanghai, 2003.
- [6] 马素贞. 上海既有办公建筑节能改造效果评估研究[D]. 上海:同济大学,2009.
- [7] Petr K, Filip J, Karel K, et al. Technique of uncertainty and sensitivity analysis for sustainable building energy systems performance calculations[C]. *Proceedings of the 10th IBPSA Building Simulation Conference*, Beijing, 2007.
- [8] 刘猛,龙惟定. 夏季工况双层皮玻璃幕墙综合传热系数计算模型[J]. *同济大学学报自然科学版*,2009,37(10):1403-1408.
- [9] 刘猛,龙惟定. 外循环式综合传热系数的影响因素研究—夏热冬冷地区夏季工况[J]. *太阳能学报*,2011,32(5):639-644.
- [10] 刘猛. 热活性建筑系统部分参数的敏感性分析[J]. *发电技术*,2014,35(2):32-38.
- [11] Saelens D. Energy performance assessment of single storey multiple-skin facades[D]. Leuven: K.U.Leuven, Laboratory for Building Physics, 2002.