

建筑热桥多维传热模型与仿真

MODEL AND SIMULATION OF HEAT TRANSFER IN
MULTIDIMENSIONAL FOR BUILDING THERMAL BRIDGE

高 岩 著

中国建筑工业出版社

建筑热桥多维传热模型与仿真

高 岩 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑热桥多维传热模型与仿真/高岩著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2012.3

ISBN 978-7-112-14131-9

I. ①建… II. ①高… III. ①建筑—传热—仿真模型—研究 IV. ①TU111.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 042653 号

*

*

*

责任编辑: 齐庆梅

责任设计: 张虹

责任校对: 姜小莲 陈晶晶

建筑热桥多维传热模型与仿真

高岩 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

华鲁印联 (北京) 科贸有限公司制版

北京云浩印刷有限责任公司印刷

*

开本: 880×1230 毫米 1/32 印张: 4 $\frac{1}{2}$ 字数: 118 千字

2012 年 7 月第一版 2012 年 7 月第一次印刷

定价: 22.00 元

ISBN 978-7-112-14131-9

(22166)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)



前 言

奉献在您面前的这本书是由作者在相关研究的基础上，关于建筑热桥多维传热模型与仿真方面的成果。

在当今社会中，能源是人类社会经济发展得以进步的源泉和动力，而建筑节能是节能减排的重要领域。建筑节能工作受到了各国政府的高度重视。在开展的建筑节能工作中，低能耗建筑通过法规和技术规范得到了越来越多的发展。低能耗建筑越来越多地采用低导热系数建筑保温材料，以满足对能耗及环境方面的要求。同时，现代建筑技术的发展带来更复杂的内部外部结构，为了满足对结构方面的考虑，建筑同时需要应用很多具有高导热特性的建筑材料。由于建筑材料热特性非连续或几何条件的变化而导致具有明显的多维热传导特性的热桥现象在现代建筑中极其普遍，并在整个建筑能耗中占有重要的比例。然而，现有的建筑动态热模拟计算软件中，为了简化模拟计算，在处理围护结构的传热问题时，都是利用一维热模型来代替实际的三维传热，从而忽略了热桥部位的影响，即使考虑到热桥的影响也基本上是从静态的角度予以修正。为了寻求更精确的计算方法，本书以动态三维建筑热桥低阶模型及其与热模拟软件耦合来实现对建筑围护结构传热的模拟，从而对建筑热桥多维传热予以更精确的修正。

所谓动态三维建筑热桥低阶模型及其与热模拟软件耦合，是分析建筑围护结构传热问题的一种更贴近实际传热计算结果的计算方法，它克服了一维热模型忽略热桥影响传热的缺点。本书在构建建筑围护结构多维动态传热状态空间模型的基础上，利用不同的模型分析工具，完成解决多维动态高阶传热模型向低阶模型转化的过程，以获得一个简化的热计算模型。该低阶模型满足对砌块、建筑热桥等的模拟计算要求，并且具有很高的计算效率，容易被工程设

计、计算人员采纳和应用到工程实践。同时给出了热桥附加能耗减秩模型的概念,为解决当前众多建筑模拟软件难以包括动态模拟热桥热损失这一问题,提供一种可能实现的方法。此外,书中提供了一种途径,把该模型应用植入到当前流行的建筑热模拟软件当中去,高效地完成了耦合热桥附加耗热量的热负荷计算。

全书共分为5章。第1章主要介绍课题研究的国内外背景及现状分析和课题研究的重要性。第2章引入了线性系统中的状态空间模型,并利用控制容积法进行空间离散、建立能量平衡方程,构建热桥热计算的状态空间表达式。第3章讲述了传递函数方法和辨识方法,以两个应用实例来说明算法的应用。第4章利用模型减秩的方法解决高阶模型模拟过程中所造成计算、分析比较困难的问题并提出了一种模态平衡形式,确定了在计算效率和准确度上满足建筑热模拟需要的模型减秩方法。第5章以热桥附加能耗减秩模型为基础,建立其与能耗模拟软件的连接,构建能够考虑动态多维热桥热损失的建筑热计算软件,实现了在整个建筑中考虑到热桥附加热损失的各种热现象、各种热设备间相互耦合的动态模拟计算。

本书在编写过程中得到北京建筑工程学院供热、供燃气、通风及空调工程北京市重点实验室、绿色建筑与节能技术北京市重点实验室等相关的支持;研究生高艺珂同学为本书成稿做了很多工作,对此谨致谢意。

由于编者的学识和经验有限,书中难免有错误和不足之处,恳请读者批评指正。

目 录

符号表	1
第 1 章 绪论	4
1.1 背景及其理论与实际意义	4
1.2 国内外研究现状及分析	6
1.2.1 建筑围护结构及相关的热力系统的热模拟研究	7
1.2.2 热桥及其在房间热力系统中的重要性	13
1.2.3 当前建筑热模拟计算中的不足	17
1.3 本书的主要工作	20
第 2 章 系统状态空间方程的建立	22
2.1 模型的假设及物理现象	22
2.1.1 必要的模型假设	22
2.1.2 物理现象和数学简化表达	23
2.2 状态模型	24
2.3 状态空间的描述	25
2.4 围护结构传热模型的状态空间表达	27
2.4.1 状态方程系数矩阵的产生	33
2.4.2 两控制体之间热流的通用表达方法	34
2.4.3 系统矩阵的获得	35
2.5 结果验证	37
2.5.1 静态条件下结果验证	37
2.5.2 动态条件下结果验证	39
2.6 本章小结	41
第 3 章 传递函数方法与辨识方法	43
3.1 传递函数模型	43
3.1.1 传递函数模型算法	43

3.1.2 传递模型的数值不稳定性·····	47
3.2 子空间辨识获取低阶模型·····	50
3.3 子空间辨识算法的应用·····	52
3.3.1 应用实例一·····	52
3.3.2 应用实例二·····	53
3.4 本章小结·····	56
第4章 模型减秩·····	58
4.1 模型减秩方法·····	59
4.1.1 Marshall 的快慢反应模型分解法·····	60
4.1.2 线性集合法·····	62
4.1.3 Moore 方法(平衡实现法)·····	65
4.2 方程的求解·····	67
4.2.1 模态平衡形式·····	68
4.2.2 状态方程的求解·····	70
4.3 模拟研究·····	71
4.3.1 空心砌块的实验与模拟计算·····	71
4.3.2 热桥围护结构的减秩模型·····	89
4.4 本章小结·····	94
第5章 热桥附加热损失模型及 TRNSYS 植入·····	96
5.1 热桥附加热损失模型·····	96
5.1.1 热桥附加热损失矩阵·····	97
5.1.2 热桥附加热损失矩阵模型的验证·····	101
5.2 模型的 TRNSYS 植入·····	102
5.2.1 TRNSYS 的设计方法·····	103
5.2.2 热桥附加热损失低阶模型的 TRNSYS 植入·····	104
5.2.3 模拟计算·····	107
5.3 本章小结·····	111
结论与展望·····	113
结论·····	113
展望·····	116
参考文献·····	117

符 号 表

h_{conv}	对流换热系数
h_{rad}	辐射换热系数
T	温度
C_{apa}	热容阵
Δt	时间步长
τ	时间常数
$h_{\text{c},i}$	第 i 面墙内表面对流换热系数
$h_{\text{c},\text{o}}$	墙的外表面对流换热系数
$K_{i,j}$	i, j 节点间的传热系数
ρ	密度
c	体积热容
λ	导热系数
λ_i	矩阵特征值
e	砌块孔洞的空气层宽度
H	砌块孔洞的高度
T_{m}	辐射平均温度
σ	黑体辐射常数
ε	发射率
$T_{\text{sa},i}$	第 i 面墙的太阳辐射综合温度
V	风速
T_{a}	室外空气温度
T_{Z}	室（区域）内空气温度
$T_{\text{s},i}$	第 i 面的墙面温度
C_{ap}	室内空气热容
$\dot{Q}_{\text{TBA}}$	热桥附加能量率

$\dot{Q}_v$	通风气流进入区域的能量率
$\dot{Q}_{infl}$	渗风进入区域的能量率
$\dot{Q}_{spepl}$	人的显热进入区域的能量率
$\dot{Q}_{int}$	除人、光，进入区域的其他能量率
$\dot{Q}_{ZO}$	其他区进入区域的对流能量率
TB	整个热桥部位
TBC	热桥一维组元
TBA	热桥附加
A_0	各个控制体之间热交换的矩阵
B_0	热系统与环境之间热交换矩阵
A	状态矩阵等于 $C_{apa}^{-1} \cdot A_0$
B	输入矩阵等于 $C_{apa}^{-1} \cdot B_0$
C	观察矩阵
D	直达矩阵
U	输入向量
Y	输出向量
X	状态向量
$\dot{X}$	向量的微分
W	对角阵
Γ	经线性变换的输入矩阵
H	经线性变换的观察矩阵
F	低阶模型的状态矩阵
Λ	低阶模型的输入矩阵
K	低阶模型的观察矩阵
Ω	低阶模型的直达矩阵
$\tilde{Y}$	低阶模型的输出向量
F_{Ma}	Marshall 低阶模型的状态矩阵
Λ_{Ma}	Marshall 低阶模型的输入矩阵
K_{Ma}	Marshall 低阶模型的观察矩阵

Ω_{Ma}	Marshall 低阶模型的直达矩阵
F_{Ag}	线性集合低阶模型的状态矩阵
Λ_{Ag}	线性集合低阶模型的输入矩阵
K_{Ag}	线性集合低阶模型的观察矩阵
Ω_{Ag}	线性集合低阶模型的直达矩阵
F_{MO}	Moore 低阶模型的状态矩阵
Λ_{MO}	Moore 低阶模型的输入矩阵
K_{MO}	Moore 低阶模型的观察矩阵
Ω_{MO}	Moore 低阶模型的直达矩阵
Y_{TBA}	热桥附加热损失
Y_{TB}	整个热桥部位的多维热损失
Y_{TBC}	一维组元的一维热损失

第1章 绪 论

1.1 背景及其理论与实际意义

本书是建筑节能领域关于建筑热模拟,尤其是建筑围护结构多维传热模拟仿真方面的研究内容。发生于20世纪70年代的能源危机让各国,尤其是发达国家政府认识到了能源是人类社会、经济发展得以进步的源泉和动力^[1]。面对这一问题,人们采取了许多相关措施以改进我们的能源消耗行为,出台各种降低能耗的法规和技术规范,优化能源利用行为,发展节能技术等。随着进入21世纪,人们更清楚地认识到煤、石油、天然气等矿物燃料燃烧时生成的二氧化碳、烟尘、硫化物和氮氧化物等有害物质,对环境造成极大的污染,对人类的生存环境也造成了严重的危害^[2]。所以不可再生能源的枯竭威胁以及由能源的利用所造成的地球环境危机问题(温室效应、酸雨等)让人们有了更加迫切的要求来发展新的技术,并合理地认识、利用能源,使能源、经济、社会可持续发展。

我国能源短缺的局面尚未得到根本改变,供需之间存在一定的缺口,特别是在东部沿海地区,能源、电力短缺现象更为严重。以电力消费来看,我国城市电力消耗大幅增长,大多数城市的负荷增长达到10%~24%^[3],上海、天津、重庆等地则达25%^[4];从2002年夏季开始,我国20个省(市)陆续出现了电力短缺现象^[5]。由CBEM(China Building Energy Model)计算,1996~2008年,我国总的建筑商品能耗从2.59亿吨标准煤(tce)增长到6.55亿tce(不含生物质能)。建筑能耗的增长,一方面是由于室内环境的改善,建筑服务水平的提高,以及建筑内用能设备的增加造成单位面

积能耗的攀升；另一方面，是由于建筑总量的增长造成人均建筑面积的飞速增长（随着城市化进程的推进，城市人口的增加和大规模城市建设的结果，造成我国建筑城镇总面积在 1996~2008 年内从 62 亿 m^2 猛增到 204 亿 m^2 ）。2007 年的建筑能耗为 6.07 亿 tce（不含生物质能），约占当年社会总能耗的 23%，其中电力消耗为 7150 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，约占当年总电耗的 22%^[7]。对于在整个能源消耗领域占有很大比重的建筑用能来讲，在保证居住者热舒适度的情况下，采取措施提高能源利用效率是积极必要的。如提高建筑热设备的能源效率，采取更加合理的控制调节手段，降低建筑围护结构的能耗量，以及利用更有效的能源运行策略等方法。但我们也认识到，在采取不同的方法之前，必须更加深入、细致地了解，掌握建筑热系统，而这这就要求我们更进一步地了解建筑热系统行为和更细致的系统热模型。

据统计，我国建筑能耗占总能耗的消费量的比例已经从 1978 年的 10% 上升到目前的 23%^[6-7]，其飞速增长的主要原因为：（1）人民生活水平的提高，导致对采暖、空调、生活热水及照明需求的增加。采暖地域已从黄河以北地区发展到长江中下游地区，每百户城镇居民拥有的空调器已经超过 30 台；（2）城镇建设的飞速发展，近年来竣工的面积连续在 10 亿 m^2 /年，建筑面积的增长速度超过 GDP 的增长。这将导致能源资源的短缺，能源生产的不足和 CO_2 、 NO_x 、 SO_x 排放量的增加。同时带来能源建设、环境保护等一系列的问题，制约我国国民经济的可持续发展，并进一步制约建筑业的发展。因此，建筑节能应是我国可持续发展战略的重要组成部分。

我国地域辽阔，不同地区的气象条件差异很大，要在低能耗的条件下获得较好的室内热舒适，所需要采取的主要措施也不大相同，绝不是简单地采取外墙保温和窗保温等措施就能解决的。要在建筑规划设计、材料、暖通空调系统选择等每一环节都要做细致的工作。而在此之前我们必须有一个能够正确对建筑物能耗进行科学评估的手段，本书讲述的就是在建立动态建筑模型的基础上对建筑物能耗进行了科学、客观评估的方法。

我们知道，房间采暖与空气调节的目的是在室内造成一定的空气状态和热湿环境，如空气的温度、湿度、清洁度、流速和压力，以及围护结构内表面温度等。而且还经常要求这些条件不会因室外空气的气象条件（如室外空气的温度、湿度和太阳辐射等）和室内各种条件（如灯光、设备和人员的活动情况）的变化而变化，或者使之维持在一定的允许波动范围内变化。为了经济合理地达到上述目的，一方面应选择合理的建筑布局和围护结构，另一方面则应正确地确定采暖、空气调节系统的运行方案，这样才能既满足建筑物对冷、热量的要求，又能经济合理地使用能源，节约投资和运行费用。要做到上述两点，必须清楚建筑围护结构的动态热工特性，掌握室内外各种因素如何影响房间空气的热湿状况，从而正确地考虑和计算各种因素，求得比较合理的房间冷、热负荷。计算机动态模拟计算是解决这些问题最经济有效的手段。

随着建筑节能研究的深入，对建筑物的能耗分析已从一维转向多维，静态转向动态。在设计采暖空调系统、计算建筑物全年能耗以及研讨建筑物采暖与空调系统预控制方案时，首先必须知道建筑物围护结构或房间的动态热特性。而在更加清楚的认识建筑围护结构能耗的过程中，不仅需要知道其标准工况下得到的热特性参数，还必须获得其在真实随机室外气象参数与室内设计参数共同作用下的动态特性。因此，对建筑围护结构的热动态特性进行研究有着重要的意义。

1.2 国内外研究现状及分析

建筑热力系统的热动态研究包括多项内容，如房间内空气流动热分布、建筑的能耗分析、热系统设备与建筑内热环境的关系等。在这些方面国外、国内都投入了相当大量的人力物力进行研究，在各个方面也取得了很多的成果。

比如，在关于空气流动研究方面，最完整的方法是利用离散的微小空气控制单元，而后基于 Navier-Stokes 方程在不同假设的基础上进行近似，来获取所研究问题的数值解。这种方法一般被称为

CFD (Computational Fluid Dynamics)。CETHIL INSA de Lyon 在这方面也作了很多的工作^[8-12]，例如利用 CFD 软件研究实验房间 MINIBAT- INSA de Lyon 的空气流动以及湿传递现象^[13-14]。我国的一些高校，如湖南大学、重庆大学等在这方面的研究^[15-16]开展也很早，并有相当多的成果获得。同时一些新的方法也相继在该领域出现，如利用大涡模拟的方法对室内流场的分析^[17]。但也存在一些简化模型来估计室内空气运动，这些模型是基于区域模型的方法。区域模型的方法也是把室内空气进行空间离散，只不过控制容积相对较大。在区域模型里，考虑了各控制单元之间垂直、水平边界的质交换和热交换，限制了变量的数目，并且保存了比较好的物理模型。

1.2.1 建筑围护结构及相关的热力系统的热模拟研究

研究围护结构热模拟是建筑热力系统模拟的重要组成部分。其中有两个重要的分支，第一个分支一般研究利用谐波法、传递函数法、状态模型和反应系数法等方法，以围护结构构成的房间热力系统作为分析目标，主要目的是建立比较简单的热模型，研究组成房间热力系统的能耗、室内外环境、围护结构、各种供冷供热设备、人等因素的相互关系。国内湖南大学、上海交通大学、清华大学以及同济大学等高校都曾做过相关方法在建筑热过程方面的研究工作^[18-22]。他们一般利用一维模型简化围护结构的传热模型，不考虑围护结构的多维传热问题。另一个分支主要是研究围护结构的局部多维传热问题，即我们所说的热桥问题，不涉及与整个建筑热力系统其他组成部分相互耦合联系的问题。这些内容在本书后续章节中都有所介绍。现在，我们先来了解一下建筑热力系统计算分析工具。

建筑热力系统的计算分析工具随着计算机的发展，开始于 20 世纪 60 年代中期。最早出现的建筑模拟程序是最大冷负荷计算方法 (Peak heating and cooling calculation, HCC) (APEC 1967)，该方法计算了设计日的房间负荷、送风量及建筑的总负荷。1967 年，ASHRAE 专门成立了一个特别的研究小组 (Task Group on Energy Requirement)，专门利用计算机来计算冷热负荷的过程、

建筑传热的算法（包括 Energy Balance 和 Weighting Factor 方法）。第一代建筑负荷模拟程序 NBSLD 由美国国家标准局（NIST）于 1974 年完成，同时完成的还有由美国邮政局（US Post Office）支持的 Post office Program。在 20 世纪 70 年代，通过两次比较重要的合作，形成了至今在美国仍然处于主导地位的两个建筑模拟程序：1977 年，美国陆军建筑工程实验室（US Army Construction Engineering Research Laboratory）将 NBSLD 和空调系统以及冷热源设备的模拟结合在一起，构成一个统一的能耗分析软件：BLAST（Building Loads Analysis and System Thermodynamics）；另一个是先后由美国太空总署（NASA）和 LBL（Lawrence Berkeley Laboratory）将 Post Office Program 升级而开发出的 DOE-2，DOE-2 是使用较多的建筑能耗软件，有很多不同用户界面的版本都是采用它作为计算引擎，如 VisualDOE、eQUEST、PowerDOE 等。但它采用顺序模拟法，由四个模块组成，模块之间没有反馈，具有一定的缺点。

由于 BLAST 和 DOE-2 都有其优缺点，所以在 1996 年美国能源部开发了一个集 BLAST 和 DOE-2 优点为一体的新一代建筑能耗分析软件 EnergyPlus，EnergyPlus 采用集成同步的负荷/系统/设备的模拟方法，具备了更多的新功能，得到了更广泛的应用。EnergyPlus 的另一个特点是具有开放性，既是一个免费的软件，又为开发者开放源代码。它的工作方式如图 1-1 所示：用户首先通过第三方用户界面描述建筑信息，生成建筑描述文件；EnergyPlus 作为能耗模拟内核，使用输入数据文件，并根据需要调用各种第三方功能模块和软件，执行模拟计算；EnergyPlus 将包含计算结果的输入数据文件交与第三方用户界面进行加工处理，以更直观的方式显示模拟结果。

美国的另一种软件 TRNSYS CA-SIS 开发于 20 世纪 70 年代末期，随着模块化集成思想的出现，建筑及空调系统的模拟软件也逐渐向此方面靠拢，在美国出现了 TRNSYS（A TRaNsient SYStem simulation program）。TRNSYS 是一个用来分析随时间而变化建筑热系统的模拟软件。它是由美国 Wisconsin 大学太阳能实验室编

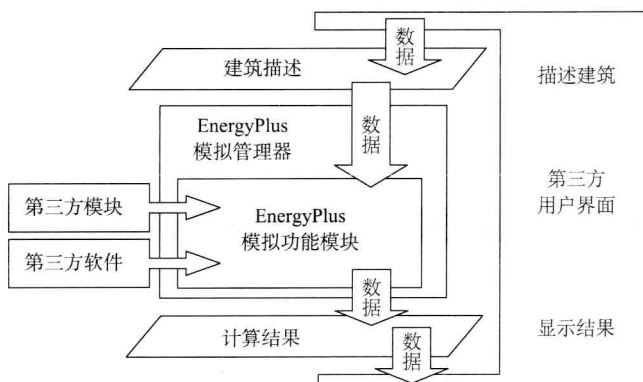


图 1-1 EnergyPlus 的工作模型

写的一个具有“模块化结构”设计思想的动态模拟软件，它的出现有力地推动了模拟技术的发展。它“模块化结构”的特征，给整个系统的模拟、各个程序的编写带来了极大的灵活性、简便性。软件本身有一些在建筑热模拟中需要常常用到的标准模块，并且在标准的 TRNSYS 模块以外，TRNSYS 允许用户对各自的系统添加新的模块，这给用户分析解决不同的问题带来了很大的方便性、实用性。并给予它自身的发展提供了广阔的空间和便利条件。所以，也可以认为 TRNSYS 是一个模拟平台，可以用来模拟建筑及其相关热设备的热能关系。此软件已经成为各国广大建筑热能研究、设计人员、学生经常使用的分析工具。随后，EDF 开发了一个更适用于设计者（Bureaux d'études）需要的软件 CA-SIS。此软件是在 TRNSYS 环境的基础上开发的模拟程序。法国建筑科学技术中心（Centre Scientifique et Technique du Batiment）开发了第一个版本的 CA-SIS 是使用在工作站上的图形界面 IISiBat。此交互界面能够在用户的帮助下自动产生模型信息。它能够更好地在物理意义上识别各个组元在系统中的关系。每一个组元在库程序中都拥有自己的图表，一旦选择了此组元，用户只需要将此组元安排在网络适当位置并将其与其关联的其他组元予以正确的连接。并且，这个过程并不要求用户对系统的热现象有很清楚的了解。组元间是通过一些流动的物理变量连接的（比如太阳辐射热流、对流热流、导热热

流、温度场、质流率等)。此软件的不足是当建筑热系统比较复杂时将会带来组元相互联系过多而造成连接的过程过于复杂,图形界面超负荷,建筑的物理特性的可视化不明显,缺乏形态化特性。图 1-2 为单户房间模型表述。

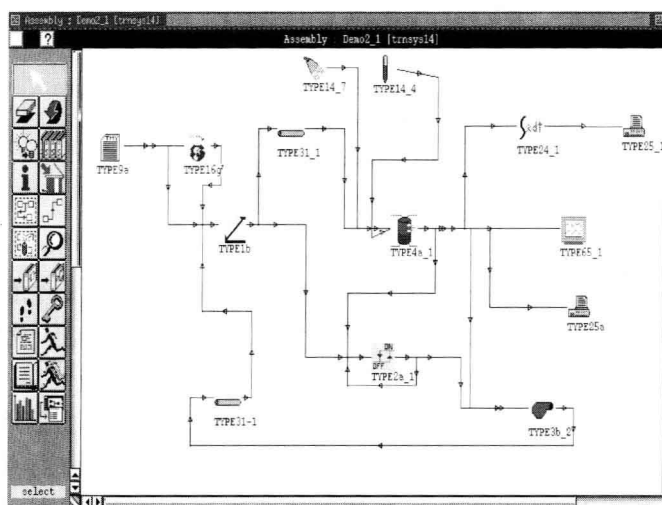


图 1-2 TRNSYS 下单户房间模型

欧洲也于 20 世纪 70 年代起开始研究模拟分析的方法,如英国科学与工程研究委员会(UK SERC)支持的 ESP(Environment System Performance),ESP(ESP-r)是用于进行建筑与设备系统能耗动态模拟的软件,目前,ESP-r 已经发展成为一个集成的模拟分析工具,可以模拟建筑的声、光、热性能,还可以对建筑能耗以及温室气体排放做出评估用于环境系统控制,此外该软件还集成了对新的可再生能源技术的分析手段,目前在市场上采用 ESP-r 为计算核心的商用软件主要是 IES^[23]。ESP-r 的模拟界面如图 1-3 所示。

法国在这方面也开发了自己的模拟软件,CLIM2000 是一个由法国电力部 EDF(Etudes et Recherches d'Electricité de France)开发的一个动态热模拟软件^[25]。ALLAN 是由法国燃气总公司(Gaz de France, GDF)开发并与 CLIM2000 拥有一致的模型结构