

[文章编号] 1002-8528(2012)增刊 2-0218-10

建筑能耗模拟软件对比: DeST、EnergyPlus and DOE-2

朱丹丹, 燕 达, 王 闯 (清华大学建筑学院, 北京 100084)

洪天真 (美国劳伦斯·伯克利国家实验室)

[摘要] 不同建筑能耗模拟软件的模拟结果存在着较大的差异, 大多数使用者将这种差异简单地归咎于软件本身, 而对模拟工具和模拟方法产生质疑。实际上, 模拟结果的差异不仅受软件本身的影响, 更加取决于使用者对软件操作的熟练度和输入参数。为了说明软件计算核心对模拟结果的影响, 本文对比了 DeST、EnergyPlus 和 DOE-2 在负荷计算方法的差异, 并通过 ASHRAE 140 标准算例检验其模拟结果, 说明三种软件负荷模拟结果的相对偏差小于 40%, 绝大部分小于 30%。进一步控制表面对流换热系数, DeST 和 EnergyPlus 负荷模拟结果的差异小于 10%, 并分析了造成差异的关键原因。此外, 实际工程模拟工况说明 DOE-2 在计算邻室传热和间歇空调等工况时模拟结果不准确, 其原因是 DOE-2 没有严格考虑房间热平衡。

[关键词] 软件对比; 负荷计算; DeST; EnergyPlus; DOE-2

[中图分类号] TU111.19+5.2 **[文献标识码]** A

Comparison of Building Energy Simulation Programs: Dest, Energyplus and Doe-2

ZHU Dan-dan¹, Da Yan¹, HONG Tian-zhen², WANG Chuang¹

(1. School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Lawrence Berkeley National Lab, California, U. S.)

[Abstract] It is widely known that large discrepancies in simulation results can and quite often exist between different building energy modeling programs (BEMPs), which results in many users and stakeholders to lack confidence in building simulations. Actually, both the program itself and inputs to models lead to the discrepancies in simulation results for different BEMPs. In order to address this problem, an inter-program comparison of DeST, EnergyPlus and DOE-2 was carried out focusing on load calculations, and also this scientific methods and processes to do the comparison are proposed. The comparison including load calculation methods, ASHRAE Standard 140 test and in-depth test indicate that the difference of load simulation result between DeST and EnergyPlus is less than 10% and DOE-2 has limitations in accounting for accurate multiple zone heat balance and part-time operation of AC systems due to its lack of zone heat balance in load calculations.

[Key words] inter-program comparison; load calculation; DeST; EnergyPlus; DOE-2

1 引言

建筑能耗模拟软件是计算分析建筑性能、辅助建筑系统设计运行与改造、指导建筑节能标准制定的有力工具, 已得到越来越广泛的应用。据统计, 目前全世界建筑能耗模拟软件超过一百种, 如美国 BLAST、DOE-2、EnergyPlus, 英国 ESP-r, 中国 DeST 等。DOE-2 是开发最早应用也最广泛的模拟软件之一, 并作为计算核心衍生了一系列模拟软件, 如 eQuest, VisualDOE, EnergyPro 等; EnergyPlus 是美国能源部支持开发的新一代建筑能耗模拟软件, 目前仅是一个无用户图形界面的计算核心, 以此为核

心开发的软件有 DesignBuilder 等; DeST 是以 AutoCAD 为图形界面的建筑能耗模拟软件。

在实际工程与研究中, 建筑系统往往十分复杂, 针对同一问题的研究, 使用不同的模拟软件, 由于用户对软件熟练程度不同、输入参数和软件计算核心存在差异, 计算结果的差异较大, 从而得出不同甚至相反的结论。对大多数使用者而言, 由于不了解软件的内部情况, 往往简单地认为这种差异是软件本身引起的, 从而对模拟工具和模拟方法产生质疑。事实上, 模拟结果的差异不仅受软件本身的影响, 更加取决于使用者对软件操作的熟练程度。如图 1 所示, 影响能耗模拟软件计算结果的因素可以归纳为三大类: 首先, 计算核心决定了软件的算法和基本假设, 体现了不同软件之间的本质差异, 且这种差异无法改变; 其次, 许多机构基于同一个计算核心开发了

[收稿日期] 2012-05-28

[作者简介] 朱丹丹(1981.11-), 女, 在读硕士研究生

[联系方式] zhudd06@mails.tsinghua.edu.cn

不同的软件界面,这些界面增强了软件的可操作性,但同时也削弱了计算核心的功能,因为软件界面常常会简化一些计算边界,从而无法实现计算核心的全部功能;最后,用户对软件操作的熟练程度直接影响模拟结果,因为用户决定了模型简化、输入参数和输出结果的选择。因此,针对不同建筑能耗模拟软件计算结果的差异问题,需要正确区分这三个因素,分别研究其对模拟结果的影响。而计算核心作为建筑能耗模拟软件的最核心部分,由于其复杂性,输入参数众多,想仔细梳理其中的关系并不容易,因此,需要对不同计算核心之间的差异做深入的分析与比较。



图 1 能耗模拟软件计算结果的影响因素

2 研究框架

自上世纪七十年代初出现建筑能耗模拟软件,模拟软件计算结果的准确性就成为模拟领域一直探讨的问题,DOE-2、DeST 和 EnergyPlus 都做了大量的验证工作。Michael J. Witte, Drury B. Crawley 等^[1]人为了验证 EnergyPlus 模拟结果的可靠性和准确性,从理论验证、程序间对比验证、实验验证的方面对比了 EnergyPlus 与 DOE-2、BLAST、ESP 的计算结果。清华大学 DeST 开发小组也做了大量 DeST 验证工作^[2],证明了其模拟结果具有相当的可靠性,可用于实际建筑的模拟,以辅助设计建筑和空调系统。Joe Huang, Norman Bourassa 等^[3]人根据美国加利福尼亚州建筑节能标准 Title-24 模拟案例比较了 DOE-2 和 EnergyPlus 模拟结果的差异。Simg Andolsun 和 Charles. H. Culp^[4]从最简单的“鞋盒”模型到住宅模型对比了 DOE-2 和 EnergyPlus 模拟结果的差异。Cassie Waddell 和 Shruti Kaserekar^[5]对比研究了多个模拟软件如 eQuest、EnergyPlus、IES 和 TRACE 在处理太阳得热及对冷负荷的影响等方面的差异。

这些研究工作一方面反映了不同软件在各种模拟工况下模拟结果的差异;另一方面,也分析了造成差异的部分原因。但是,这些工作更多地注重模拟结果差异的大小,而不是系统深入地分析差异产生的关键原因,从而澄清计算核心、输入参数等对模拟结果的影响。另外,这些研究大部分直接比较末端能耗,从而很难区分建筑负荷、空调系统及空调设备等各部分对模拟结果的影响。针对这些不足,本文从负荷模拟出发,客观地比较和总结了 DOE-2、DeST 和 EnergyPlus 这三种软件计算核心的差异(DOE-2 版本为 DOE-2.1E,DeST 版本为 DeST 2011-11-18,EnergyPlus 版本为 EnergyPlus7.0)。

首先,本文从负荷计算方法出发,对比三种软件在房间热平衡计算方法和基本假设存在的差异,分析不同算法的优点和局限性,明确不同软件的界面输入参数和缺省输入参数。其次,根据 ASHRAE 140 标准算例^[6],严格控制各项输入参数,评价三种软件计算结果的准确性和可靠性。基于 ASHRAE 140 标准算例模拟结果,设计一系列算例,分析 DeST 和 EnergyPlus 负荷模拟结果产生差异的关键原因。最后,从工程实际应用出发,通过几个特殊算例进一步说明三种软件在负荷计算中可能存在的局限性。纵观整个软件对比的研究工作,并不是为了说明某种软件的好坏,而是客观地总结各个软件在算法、输入参数和模拟结果的差异,指出负荷计算中的局限性,从而为建筑能耗模拟软件开发、实际工程与研究中的模拟计算等提供参考。

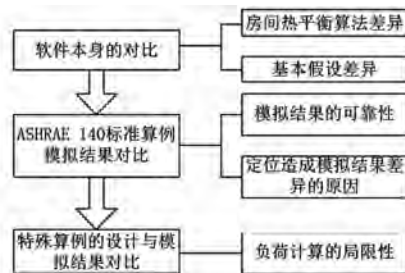


图 2 软件对比的技术路线

3 负荷计算方法对比

3.1 房间热平衡计算方法

建筑动态热过程模拟是负荷计算的核心,它的基本问题是对于给定的建筑给出在不同气象条件下、不同使用状况下(室内人员与设备、外窗开启状

况等)以及环境控制系统(采暖空调系统)送入不同的冷热量的条件下,建筑物内温度的变化情况^[2]。

DOE-2^[7]采用反应系数法求解房间不透明围护传热,冷负荷系数法计算房间负荷和房间温度。DOE-2不直接计算各围护内表面的长波辐射换热,而是将其折合在内表面与空气的对流换热系数中;在考虑围护内表面与空气的对流换热时,将空气温度设为固定值,求得自围护传入室内的热量,当空气温度改变后,不再重新计算;在考虑邻室换热时采用邻室上一时刻的温度进行计算,以避免房间之间的联立求解。所以,DOE-2在负荷计算时没有严格考虑房间热平衡。在DOE-2软件结构中,计算模块LOADS和SYSTEMS均会计算房间负荷,前者的负荷计算结果是假设各个房间全年都维持在一个恒定空调温度,而后者是考虑了室外新风利用、空调系统控制等因素后对LOADS负荷计算结果的修正。计算时间步长为1h。

DeST^[2]采用状态空间法计算不透明围护传热,一次性求解房间的传热特性系数,在求解过程中考虑了房间各围护内表面之间的长波辐射换热以及与空气的对流换热,从而严格保证了房间的热平衡。在处理邻室换热时,DeST采用多房间联立求解的方法,同时计算出各房间的温度或投入的冷热量。DeST采用“分阶段设计,分阶段模拟”的开发思想,结合实际设计过程的阶段性特点,将模拟划分为建筑热特性分析、系统方案分析、AHU方案分析、风网模拟和冷热源模拟共5个阶段,并且采用“理想控制”来处理后续阶段的部件特性和控制效果,即假定能满足任何冷热量、水量等要求。理论上,DeST计算时间步长可以是任意值,缺省设置的时间步长为1h。

不同DOE-2和DeST的顺序模拟方法,EnergyPlus采用集成同步的负荷/系统/设备模拟方法^[8]。在本研究中,EnergyPlus采用理想的空调设备模型(IdealLoadsAirSystem)来计算理想负荷,从而与另外两种软件的负荷计算结果进行比较。EnergyPlus将房间热平衡分为围护结构表面热平衡和空气热平衡两部分。在求解不透明围护传热时,EnergyPlus采用CTF(Conduction Transfer Function)或有限差分法,CTF实质上也是一种反应系数法,但不同于DOE-2的基于室内空气温度的反应系数法,它是基于墙体的内表面温度,而有限差分法可以处

理相变材料或变导热系数材料等问题。EnergyPlus先采用状态空间法求解单面围护的热特性,基于热特性系数得到其内外表面热流与内外表面温度的关系,然后在考虑围护内外表面的热平衡时,考虑各围护内表面之间的长波互辐射换热及与室内空气的对流换热,构成围护结构表面热平衡方程,再结合空气热平衡,严格保证了房间的热平衡。在处理邻室换热时,EnergyPlus采用邻室上一时刻的温度,但由于EnergyPlus在计算负荷时一般采用10~15min的时间步长,且各房间不断迭代求解,保证了多房间的热平衡。

总的来说,在建筑热过程模拟中,DeST和EnergyPlus严格保证了房间热平衡,DOE-2则相反;DOE-2和DeST只能处理线性定常系统,而EnergyPlus突破了这种局限,可以处理表面对流换热系数、导热系数随时间变化、相变材料等工况。

3.2 基本假设

由于实际建筑物的复杂性,模拟软件在建筑模型建立和建筑热特性分析时都会做一些简化,这些都是模拟计算的基本假设,如墙壁的三维传热简化为一维传热计算等。不同软件的基本假设有所差异,如表1所示,这些差异会对模拟结果产生较大的影响。DeST和EnergyPlus分别计算围护结构内表面的对流换热和长波互辐射换热,其中DeST采用固定的对流换热系数,EnergyPlus中对流换热系数随时间步长变化,而DOE-2采用固定的对流辐射综合换热系数考虑这两个部分换热。虽然DOE-2和DeST都采用K-Sc窗户模型,但两者也有所不同,DOE-2窗户K值是不计入外表面综合换热系数条件下的窗户传热系数,且在非垂直入射下的太阳辐射透过率采用软件内部拟合曲线进行计算^[7],而DeST窗户K值是指整个窗户的传热系数,且采用构造法计算出符合K值和Sc值的玻璃和镀膜的具体参数,从而详细计算非垂直入射下的太阳辐射透过率^[2]。EnergyPlus可以逐层定义玻璃、空气、膜层等具体参数,更为细致、精确。

在DOE-2和EnergyPlus的计算核心中,可以灵活修改输入参数,但在visual DOE, e-Quest, design builder等软件中,由于软件界面通常无法实现计算核心的全部功能,因此,某些缺省参数如表面对流换热系数、室内太阳辐射分配、室内热扰分配等无法在界面上进行修改,导致不同软件的输入参数产生差异。

表 1 负荷计算的基本假设

	DOE-2	DeST	EnergyPlus
外表面对流换热系数	受室外风速大小影响,逐时变化	定常数,用户可修改	多种算法供选择,各个时间步长变化
外表面长波辐射换热	分别计算外表面与天空、地面、空气的长波辐射,其中空气部分考虑在表面辐射对流综合系数中,天空部分根据云量进行计算,而不是有效天空温度	目前只考虑天空背景辐射,其辐射换热系数为定常数,用户可修改	分别计算外表面与天空、地面、空气的长波辐射,假设地面温度与空气温度一致
内表面对流换热系数	表面辐射对流综合系数,定常数,用户可修改	定常数,用户可修改	各个时间步长变化,多种算法供选择
内表面长波辐射换热		换热量与表面温度成非线性关系: $q_{i,j} = A_i F_{i,j} (T_i^4 - T_j^4)$ 在一些边界条件下,角系数 = 长波辐射面积/总面积	采用辐射系数转化为线性关系: $q_{i,j} = hr_{i,j} (T_i - T_j)$ 无约束边界条件下,角系数 = 长波辐射面积/总面积
非透光围护结构外表面的太阳辐射	太阳位置计算时间点:每小时的中间点 均匀天空散射辐射模型 太阳吸收率	太阳位置计算时间点:每小时的起始点 均匀天空散射辐射模型 太阳吸收率	每小时多个计算时间点 非均匀天空散射辐射模型 太阳吸收率、可见光吸收率
室内太阳辐射分配	定常数分配,用户可修改	定常数分配,用户可修改	直射辐射分配:各个时间步长变化,多种算法供选择 散射辐射分配:ScriptF 算法
室内热扰	schedule,辐射、对流比例,定常数分配	schedule,辐射、对流比例,定常数分配,用户可修改	schedule,辐射、对流比例,根据内壁面的热吸收系数分配
家具蓄热	根据家具定义计算冷负荷系数	家具系数	家具表面积和热容
窗户模型	窗户构件库 K-Sc 模型	窗户构件库 K-Sc 模型	逐层材料定义 K-SHGC 模型
通风	渗风:schedule,与室外风速大小相关 房间互通风:无	渗风:schedule 房间互通风:schedule	渗风:schedule,可定义风速、温差等相关参数 房间互通风:schedule,可定义温差相关参数

4 ASHRAE 140 标准算例对比

为评价各种建筑能耗模拟软件的异同,ASHRAE(American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers,美国暖通空调工程师协会)组织设计了 140 标准算例来检验模拟软件的计算结果。这套算例基于 IEA(the International Energy Agency)资助项目 Building Energy Simulation Test(BESTEST)发展而来。本文采用 ASHRAE Standard 140-2007 作为三种软件程序间对比的标准算例。

针对建筑热过程模拟的检验,ASHRAE 140 标准设计了基础算例和深入算例两个部分。基础算例共有 17 个算例,如表 2 所示;深入算例包括 195~320,395~440 和 800~810 共 22 个算例。每一个算例都严格规定了气象参数、建筑几何描述、材料性质、地表参数、室内发热量、空调系统控制策略等基本参数,同时也规定了一些通常作为各个软件的缺

省参数,如外表面对流辐射综合系数、内表面对流辐射综合系数、不透明围护的辐射性质、太阳光分配等。所有算例的空调系统均为纯对流换热的理想空调系统,即负荷计算结果均为理想负荷。

算例 600 的建筑模型如图 3 所示,长 8m,宽 6m,高 2.7m,南墙窗户面积为 12m²,窗户为双层玻璃窗。渗风量全年恒定,设为 0.5 次/h。全年房间空调温度设为 20~27℃。其他输入参数详见 ASHRAE Standard 140-2007。

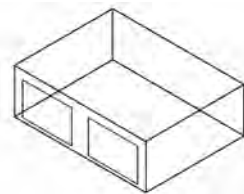


图 3 算例 600 建筑模型

基础算例的简单描述如表 2 所示,其中算例 600~650 为轻型围护结构,900~960 为重型围护结构,600FF-950FF 无空调系统。算例 600~650 和

900 ~ 960 模拟结果为逐时冷、热负荷,算例 600FF ~ 950FF 模拟结果为逐时基础室温。

表 2 ASHRAE 140 标准算例描述

	算例	描述
轻型围护结构	600	基本算例
	610	600 + 南窗遮阳
	620	600 + 两个南窗改为东、西向各一个窗
	630	620 + 东、西窗遮阳
	640	600 + 空调控制策略
	650	600 + 夜间通风
重型围护结构	900	同 600
	910	同 610
	920	同 620
	930	同 630
	940	同 640
	950	同 650
计算基础室温	600FF	600 + 无空调
	650FF	650 + 无空调
	900FF	900 + 无空调
	950FF	950 + 无空调

三种软件算例 600 ~ 650 全年累计热负荷和尖峰热负荷分别如图 4 和 5 所示,算例 600FF 和 900FF 逐时基础室温如图 6 所示,单比较 DOE-2、DeST 和 EnergyPlus 模拟结果很难判定哪种软件好哪种软件不好,这是因为程序间对比缺少一个绝对的真值作为评判标准。因此,本文将这三种软件外的其他软件(如 ESP、BLAST、TRACE、TRNSYS 等)模拟结果(ASHRAE 提供)作为参照标准,来评判其负荷模拟结果。如表 3 所示,全年累计(或尖峰)冷/热负荷最小值和最大值分别为其他软件模拟结果的最小值和最大值,y 表示该软件模拟结果处于最小值与最大值之间,黄色 y 表示该软件模拟结果处于最小值与最大值区间扩大 5% 后的新区间,n 表示该软件模拟结果不处于新区间。由统计结果可知,DOE-2 和 DeST 模拟结果基本上处于除 DOE-2、DeST 和 EnergyPlus 其他模拟软件最小值和最大值的区间,但 EnergyPlus 重型围护结构算例的全年累计热负荷模拟结果和基础室温偏小,超出了其他软件模拟结果的范围。

5 DeST 和 EnergyPlus 模拟结果差异的原因分析

虽然 ASHRAE 140 标准严格规定了算例的气象

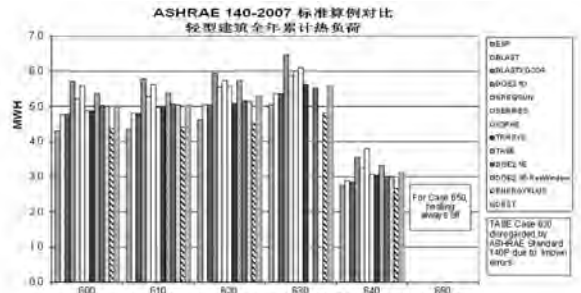


图4 算例600-650全年累计热负荷

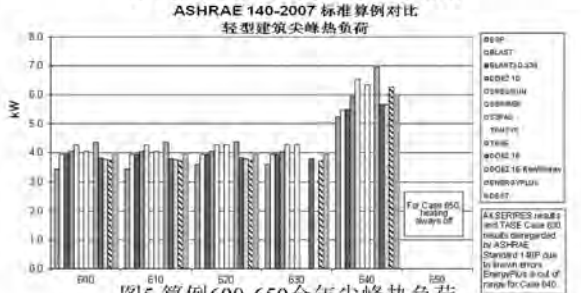


图5 算例600-650全年尖峰热负荷

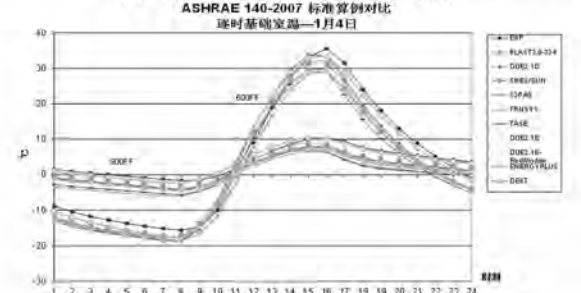


图6 算例600FF和900FF逐时基础室温

参数、建筑几何描述、材料性质等基本参数,但 DeST 和 EnergyPlus 的各个算例模拟结果仍然存在着较大的差异。算例 195 是最简单的算例之一,无窗户、无室内随机发热、无渗风,围护结构内外表面的太阳辐射吸收率/热发射率均为 0.1,空调温度全年恒定为 20℃。如图 7 所示,算例 195 冷、热负荷的差异分别为 5% 和 11%,算例 600 冷、热负荷的差异分别为 18% 和 13%。究其原因,一方面是根据 ASHRAE 140 标准,DeST 和 EnergyPlus 中表面对流换热系数分别采用缺省设置,导致输入参数的一致,另一方面,这两种软件在长波辐射换热、照射到围护结构外表面的太阳辐射强度、室内太阳辐射分配、窗户模型等方面的简化处理存在着差异。

为定位造成模拟结果差异的原因,在 ASHRAE 140 标准算例的基础上,设计以下算例,如表 4 所示。其中算例 C1 只有恒定外温作用,无其他热扰,为稳态算例。在此基础上,逐个增加热扰,如外表面太阳辐射的吸收、室内外长波辐射换热、室内热扰、

表 3 冷、热负荷和基础室温统计

算例	全年累计热负荷 (MWh)								全年累计冷负荷 (MWh)							
	最小值	最大值	DOE-2.1E	DeST	EnergyPlus	最小值	最大值	DOE-2.1E	DeST	EnergyPlus						
600	4.296	5.709	4.994	y	5.007	y	4.364	y	6.137	8.448	8.054	y	5.924	y	7.006	y
610	4.355	5.786	5.042	y	5.042	y	4.398	y	3.915	6.139	5.874	y	4.873	y	4.976	y
620	4.613	5.944	5.144	y	5.292	y	4.512	y	3.417	5.482	5.256	y	3.847	y	4.384	y
630	5.050	6.469	5.508	y	5.570	y	4.813	y	2.129	3.701	3.235	y	2.879	y	2.952	y
640	2.751	3.803	2.995	y	3.127	y	2.667	y	5.952	8.097	7.713	y	5.759	y	6.710	y
650	0.000	0.000	0.000	y	0.000	y	0.000	y	4.816	7.064	6.678	y	4.625	y	5.538	y
900	1.170	2.041	1.301	y	1.894	y	1.163	y	2.132	3.669	3.390	y	2.296	y	2.683	y
910	1.512	2.282	1.559	y	2.266	y	1.427	n	0.821	1.883	1.738	y	1.202	y	1.350	y
920	3.261	4.300	3.312	y	4.025	y	3.087	n	1.840	3.313	3.169	y	2.401	y	2.683	y
930	4.143	5.335	4.249	y	4.485	y	3.785	n	1.039	2.238	1.823	y	1.696	y	1.745	y
940	0.793	1.411	0.838	y	1.270	y	0.727	n	2.079	3.546	3.272	y	2.262	y	2.606	y
950	0.000	0.000	0.000	y	0.000	y	0.000	y	0.387	0.921	0.749	y	0.455	y	0.571	y
960	2.144	3.373	2.216	y	2.835	y	2.322	y	0.411	0.895	0.855	y	0.537	y	0.732	y

算例	全年尖峰热负荷 (kW)								全年尖峰冷负荷 (kW)							
	最小值	最大值	DOE-2.1E	DeST	EnergyPlus	最小值	最大值	DOE-2.1E	DeST	EnergyPlus						
600	3.437	4.354	3.767	y	3.986	y	3.732	y	5.965	7.188	6.965	y	6.151	y	6.678	y
610	3.437	4.354	3.755	y	3.954	y	3.720	y	5.669	6.673	6.482	y	5.964	y	6.274	y
620	3.591	4.379	3.785	y	3.962	y	3.726	y	3.634	5.096	4.679	y	3.819	y	4.005	y
630	3.592	4.280	3.762	y	3.963	y	3.703	y	3.072	4.116	3.834	y	3.270	y	3.446	y
640	5.232	6.954	5.656	y	5.991	y	6.265	y	5.884	7.126	6.903	y	6.116	y	6.614	y
650	0.000	0.000	0.000	y	0.000	y	0.000	y	5.831	7.068	6.843	y	5.973	y	6.479	y
900	2.850	3.797	3.248	y	3.600	y	3.140	y	2.888	3.932	3.778	y	3.469	y	3.320	y
910	2.858	3.801	3.256	y	3.612	y	3.139	y	1.896	3.277	2.703	y	2.844	y	2.640	y
920	3.308	4.061	3.508	y	3.776	y	3.453	y	2.385	3.505	3.342	y	2.844	y	2.835	y
930	3.355	4.064	3.536	y	3.801	y	3.475	y	1.873	3.080	2.638	y	2.527	y	2.332	y
940	3.980	6.428	5.322	y	5.723	y	4.785	y	2.888	3.932	3.778	y	3.497	y	3.320	y
950	0.000	0.000	0.000	y	0.000	y	0.000	y	2.033	3.170	2.917	y	2.586	y	2.451	y
960	2.410	2.863	2.603	y	2.601	y	2.691	y	0.953	1.422	1.048	y	1.085	y	1.213	y

算例	全年最高基础室温 (°C)								全年最低基础室温 (°C)							
	最小值	最大值	DOE-2.1E	DeST	EnergyPlus	最小值	最大值	DOE-2.1E	DeST	EnergyPlus						
600FF	64.90	75.10	73.40	y	65.49	y	66.03	y	-18.80	-15.57	-17.70	y	-18.60	y	-17.51	y
650FF	41.81	46.40	45.50	y	42.39	y	43.65	y	-6.38	-1.65	-2.00	y	-4.50	y	-2.39	y
900FF	63.24	73.50	71.70	y	63.67	y	64.31	y	-23.00	-21.10	-21.00	y	-22.91	y	-23.08	y
950FF	35.54	38.50	37.10	y	35.67	y	36.90	y	-20.20	-17.80	-17.80	y	-19.97	y	-20.34	y

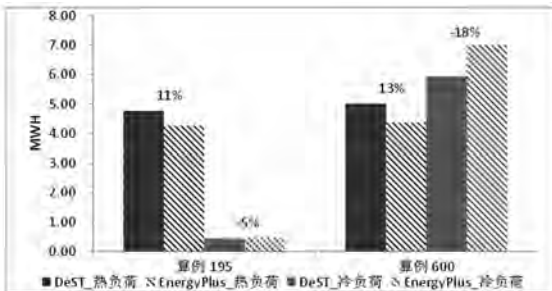


图 7 算例 195 和 600 全年累计冷热负荷对比

至 C9, EnergyPlus 内外表面对流换热系数设为常数, 且与 DeST 缺省设置时, 数值相同, 以排除表面对流换热系数差异对模拟结果的影响。

在只有逐时变化的室外干球温度作用下, DeST 和 EnergyPlus 的 2 月份逐时热负荷模拟结果如图 8 所示, 两者基本完全符合。进一步对比各个算例全年累计冷、热负荷的差异, 可以发现: 在保证相同的表面对流换热系数条件下, DeST 和 EnergyPlus 在全年累计热负荷几乎无差异 (C1 ~ C9), 但 C9 全年累计冷负荷差异较大, 说明两者在处理透过窗户的太阳辐射对冷负荷作用存在差异。

渗风、透过窗户的太阳辐射等, 从而比较各个算例 DeST 和 EnergyPlus 模拟结果的差异。其中算例 C1

表 4 DeST 和 EnergyPlus 对比的算例设计

算例名称	算例说明	全年累计热负荷 (MWh)		全年累计冷负荷 (MWh)	
		DeST	EnergyPlus	DeST	EnergyPlus
C1	算例 195 + 悬空 + 所有表面吸收率为 0 + 室外干球温度恒定为 10℃	4.333	4.341	0.000	0.000
C2	算例 195 + 悬空 + 所有表面吸收率为 0	4.844	4.853	0.383	0.385
C3	算例 195	4.758	4.756	0.434	0.437
C4	C3 + 太阳吸收率为 0.6	4.126	4.095	1.042	1.038
C5	C4 + 热发射率为 0.9	4.689	4.641	0.866	0.821
C6	C5 + 室内热扰 200W	3.544	3.493	1.355	1.309
C7	C6 + 渗风量 0.5 次/h	5.248	5.327	1.442	1.394
C8	C7 + 空调运行模式同算例 600	5.025	5.089	0.276	0.227
C9	C8 + 南窗同算例 600	5.007	4.989	5.924	6.351
C10	算例 600	5.007	4.364	5.924	7.006

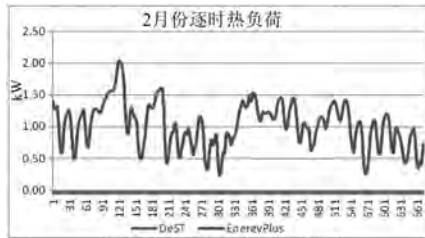


图8 算例C2逐时热负荷

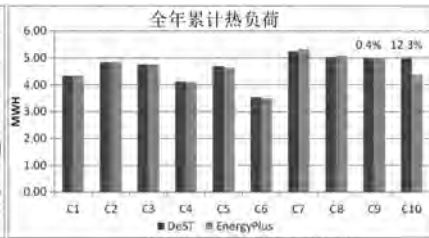


图9 全年累计热负荷

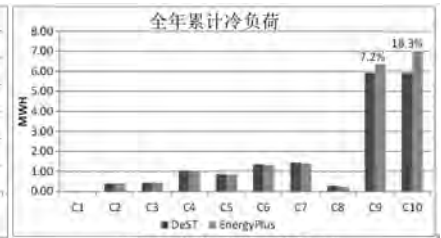


图10 全年累计冷负荷

计算透过窗户的太阳辐射对建筑冷负荷的作用可以分为两个阶段,首先是透过窗户的太阳辐射量的计算,由于散射辐射模型和太阳位置计算时间点的差异,DeST 和 EnergyPlus 照射到围护结构外表面和透过窗户的太阳辐射强度存在差异,如图 11 所示。进一步分析,在不同的太阳光入射角下,两者双层玻璃窗户模型的透过率相差无几,如图 12 所示,说明 EnergyPlus 逐层定义窗户模型和 DeST 的 K-Sc 窗户模型差异很小,两种软件透过窗户的太阳辐射差异主要由太阳辐射模型和计算时间点的不同造成的。然后计算太阳辐射在室内的分配和房间热平衡的计算。对于算例 C9,全年累计冷负荷 EnergyPlus 比 DeST 大 7.2%,与透过南窗的太阳辐射全年累计值差异相近。

在缺省设置下,DeST 逐时内、外表面对流换热系数基本上大于 EnergyPlus,导致 EnergyPlus 冷负荷相对较高,热负荷相对较低,进一步加大了两者负荷模拟结果的差异。

总的来说,DeST 和 EnergyPlus 的软件计算核心存在着差异,这些差异一方面造成了房间热平衡方程的算法的差异,更重要是造成了在缺省输入下表面对流换热系数、太阳辐射分配等输入参数的差异,

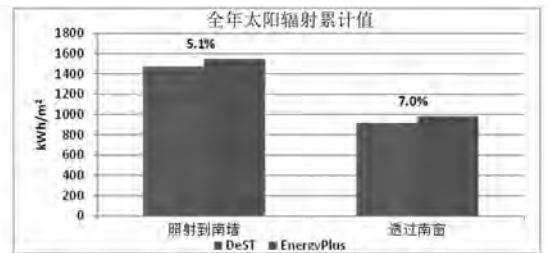


图 11 照射到南墙和透过窗户的全年太阳辐射累计值

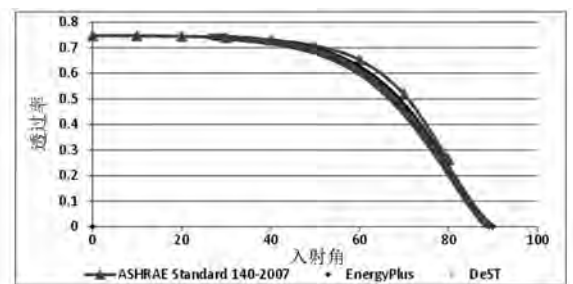


图 12 不同入射角下的太阳辐射透过率

由此导致 DeST 和 EnergyPlus 负荷模拟结果的差异。从模拟结果看,表面对流换热系数、太阳辐射模型和太阳辐射分配是造成负荷模拟结果差异的主要原因,且对热负荷影响较小,冷负荷较大。

6 负荷计算的局限性分析

与 DeST 和 EnergyPlus 相比,DOE-2 没有严格考虑房间热平衡:围护结构内表面长波互辐射换热被折算在综合换热系数中,且这一系数为全年固定值,因此,无法考虑辐射地板采暖、辐射吊顶供冷等辐射空调形式;计算当前时刻的房间温度时,采用上一时刻的邻室温度,因此在计算邻室传热、间歇空调等实际工况下,负荷或室温模拟结果可能出现较大的偏差。

设计以下算例:双房间的建筑模型如图 13 所示,每个房间长和宽均为 10 米,高 3 米,除内墙外的围护结构设置同算例 600,内墙同算例 960(导热热阻为 $0.392\text{K} \cdot \text{m}^2/\text{W}$),无室内随机发热,无通风。由于三种软件在太阳辐射模型和长波互辐射换热模型等存在差异,因此将所有表面的太阳吸收率、可见光吸收率和热发射率均为 0,即各个表面与空气只存在对流换热,且三种软件的对流换热系数均设为固定值,与 DeST 缺省值一致。

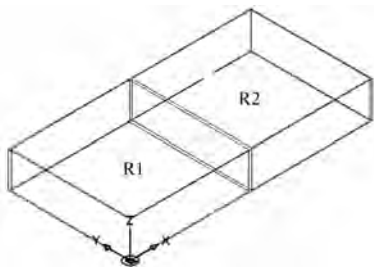


图 13 双房间建筑模型(无窗)

室外空气温度和土壤温度恒为 10°C ,设房间 1 全年空调,且室温周期性波动,如图 14 所示,房间 2 无空调,其室温模拟结果如图 15 所示。在同样的边界设定条件下,DeST 和 EnergyPlus 的室温模拟结果恒定不变,但 DOE-2 室温模拟结果在 $13.8 \sim 14.4^\circ\text{C}$ 之间波动,这是因为 DOE-2 在计算邻室传热时采用上一时刻的邻室温度,没有严格考虑多房间的热平衡。如果考虑房间互通风,DOE-2 模拟结果的波动范围会更大,但 DOE-2 无法计算互通风,并且空调房间的温度设定范围 $-17.78 \sim 48.89^\circ\text{C}$ ($0 \sim 120^\circ\text{C}$),从而部分规避了无严格热平衡造成的影响。

为进一步考察 DOE-2 负荷计算局限性对实际工程模拟的影响,设计以下三个算例,其中 SC0 为

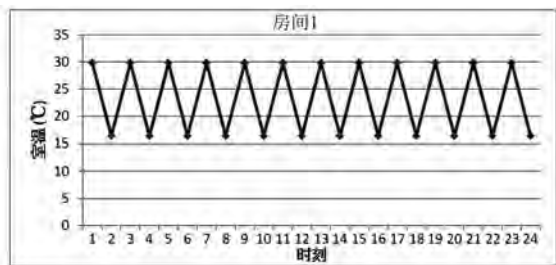


图 14 空调房间的室温设定

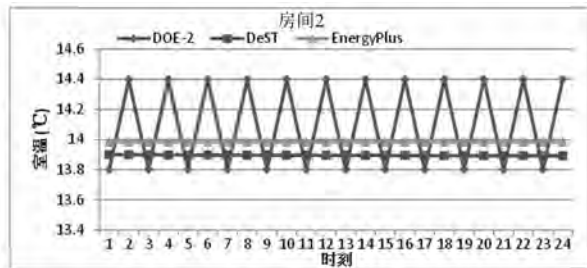


图 15 非空调房间室温模拟结果

基础算例,两个房间输入参数一致,连续空调,SC1 和 SC2 中一个房间为空房间,另一个房间间歇空调,比较三种软件在间歇空调、邻室传热条件下的负荷模拟结果,冷负荷只考虑显热部分。

三个算例都采用同一个建筑模型如图 16 所示,每个房间长和宽均为 10m,高 3m,南窗墙比为 0.4,除内墙外的围护结构设置同算例 600,内墙同算例 960(导热热阻为 $0.392\text{K} \cdot \text{m}^2/\text{W}$)。气象参数同 ASHRAE 140 负荷计算标准算例。两个房间的渗风量均为 0.5 次/h。围护结构所有表面的太阳吸收率和可见光吸收率设为 0.6,热发射率为 0.9,地面反射率为 0.2。由于在实际工程模拟中,工程人员不会对缺省输入参数进行修改,因此,三种软件在室内太阳辐射分配、室内热扰分配、渗风等设定中采用缺省方式。

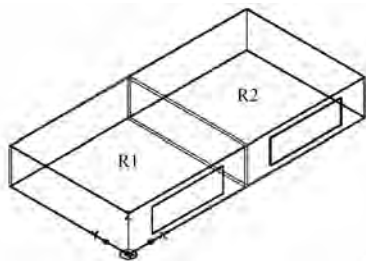


图 16 双房间模型(有窗)

表 5 实际工程模拟算例设计

算例名称	算例说明
SC0	基础算例:两个房间设置相同 室内随机热扰:0.1 人/m ² ,人员显热发热量为 66W,潜热发热量为 71W,灯光 10W/m ² ,设备 5W/m ² 空调:全年不间断空调,设定温度恒为 21.1℃ (70 °F)
SC1	办公作息: 房间 1 室内随机热扰和空调作息如图 16 所示,空调设定温度为 20~27℃ 房间 2 为无空调,无室内随机热扰
SC2	卧室作息: 房间 1 室内随机热扰和空调作息如图 17 所示,空调设定温度为 20~27℃ 房间 2 为无空调,无室内随机热扰

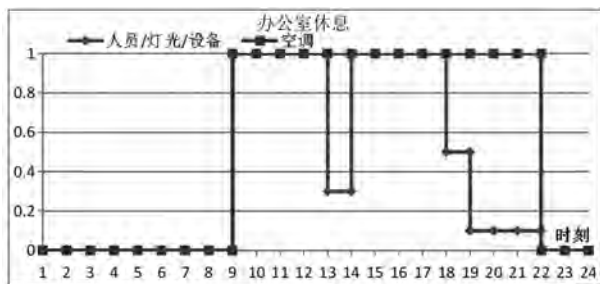


图 17 办公室作息

DOE-2 的 LOADS 和 SYSTEMS 都能导出负荷模拟结果,由于 LOADS 是在假定所有空调房间不间断空调,并且空调温度固定的条件下计算,在其他条件下 LOADS 与 SYSTEMS 负荷计算结果不一致,如图 19 所示。所以,在工程上用 DOE-2 计算建筑负荷时,若房间非连续空调且空调温度不固定,采用 LOADS 模拟结果会大大偏离实际负荷需求。

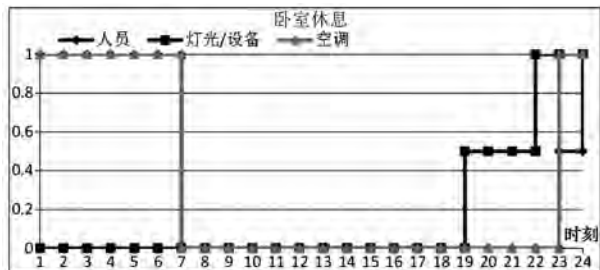


图 18 卧室作息

三种软件热负荷模拟结果差异不大,对比冷负荷模拟结果:在连续空调(算例 SC0)下,三种软件模拟结果非常接近,全年累计冷负荷差异小于 10%;在办公室间歇空调(算例 SC1)下,DOE-2 逐月冷负荷均偏大,其全年累计冷负荷分别比 DeST 和 EnergyPlus 大 26%、15%;在卧室间歇空调(算例

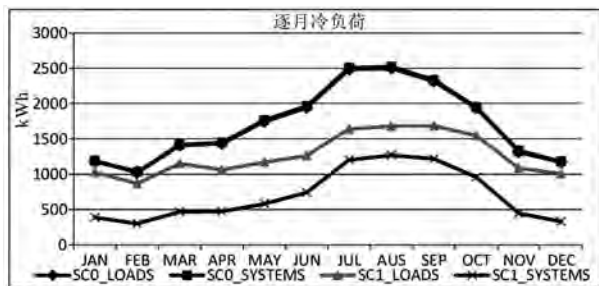


图 19 LOADS 和 SYSTEMS 负荷模拟结果差异

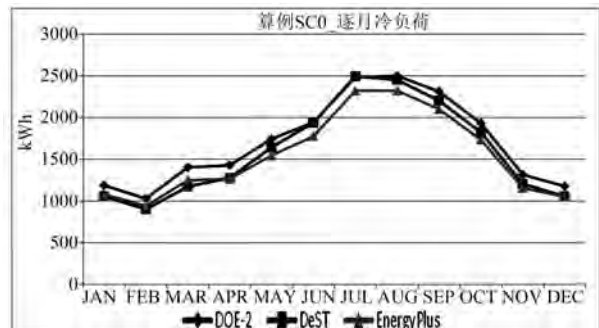


图 20 算例 SC0 逐月冷负荷



图 21 算例 SC1 逐月冷负荷

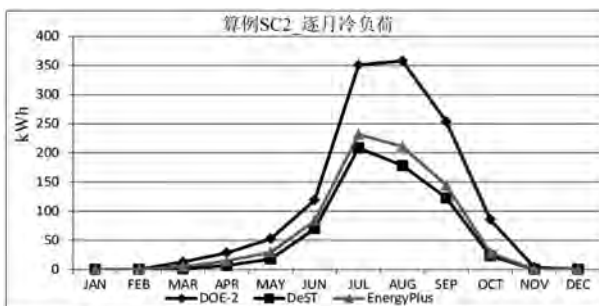


图 22 算例 SC2 逐月冷负荷

SC2)下,DOE-2 逐月冷负荷偏大得更加厉害,其全年累计冷负荷分别比 DeST 和 EnergyPlus 大 101%、69%。由此可见,DOE-2 没有严格考虑房间热平衡,在邻室传热、间歇空调等模拟工况下,尤其是夜间空

调模式下,其模拟结果较大地偏离 DeST 和 EnergyPlus。

7 结论

建筑能耗模拟软件的对比研究是一项长期的基础性工作,而计算核心的对比是能耗模拟对比中最基本的部分。本文对比了 DOE-2、DeST 和 EnergyPlus 在负荷计算方面的差异,得出以下结论:

(1)在软件算法方面,DeST 和 EnergyPlus 都严格考虑了房间热平衡,DOE-2 则没有;三种软件的基本假设有所不同,造成了各个软件缺省输入参数的差异,如表面对流换热系数、太阳辐射分配系数等,从而影响模拟结果。

(2)各个软件 ASHRAE 140 标准算例模拟结果对比说明,三种软件负荷模拟结果的相对偏差低于 40%,绝大部分算例低于 30%。进一步控制表面对流换热系数,DeST 和 EnergyPlus 负荷模拟结果差异小于 10%。因此,在严格控制输入参数的条件下,三种软件的计算核心在模拟简单工况时,模拟结果的差异很小。

(3)通过逐个分析影响房间负荷的热扰,说明表面对流换热系数、太阳辐射模型和室内太阳辐射分配是造成负荷模拟结果差异的主要原因,并且这些因素对热负荷影响较小,冷负荷影响较大。

(5)对比三种计算核心在极限算例下的室温计算结果,说明 DOE-2 没有严格考虑房间热平衡,造成了负荷模拟结果的不准确。并进一步通过实际工程算例,说明 DOE-2 在计算邻室传热和间歇空调的

工况时,冷负荷模拟结果偏大,尤其是夜间空调工况,全年累计冷负荷模拟结果分别比 DeST 和 EnergyPlus 高 101% 和 69%。

[参考文献]

- [1] Michael J. Witte, Robert H. Henninger, and Jason Glazer. Testing and validation of a new building energy simulation program[C]. Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brazil, August 13 ~ 15, 2001.
- [2] 清华大学 DeST 开发组. 建筑环境系统模拟分析方法——DeST[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2006 年 1 月.
- [3] Joe Huang, Norman Bourassa, Fred Buhl, Ender Erdem, Rob Hitchcock. Using EnergyPlus for California title-24 compliance calculations[C], Proceedings of SimBuild 2006, August 2 ~ 4, 2006, MIT, Cambridge, Massachusetts. IBPSA-USA.
- [4] Simge Andolsun, Charles. H. Culp. A comparison of EnergyPlus to DOE-2. 1E: Multiple Cases Ranging from a sealed box to a residential building[C], Proceedings of SimBuild 2010, August 11 ~ 13, 2010, New York City, New York. IBPSA-USA.
- [5] Cassie Waddell, Shruti Kaserekar. Solar gain and cooling load comparison using energy modeling software[C], Proceedings of SimBuild 2010, August 11 ~ 13, 2010, New York City, New York. IBPSA-USA.
- [6] ANSI/ASHRAE 2007. Standard 140-2007, Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers[S], Atlanta, Georgia.
- [7] DOE-2 Engineers Manual Version 2. 1A[R], LBL-11353, LA-8520-M.
- [8] EnergyPlus Engineering Reference[R], October 2011.
- [9] 潘毅群,吴刚,Volker Hartkopf. 建筑全能耗分析软件 EnergyPlus 及其应用[J]. 暖通空调,2004,34(9).
- [7] S. Xu, L. Rybach. Utilization of Shallow Resources Performance of Direct Use System in Beijing [J]. Geothermal Resource Council Transactions, 2003, 27: 115 ~ 118.
- [8] 倪龙,姜益强,姚杨,等. 单井循环地下换热系统健康运行的研究[J]. 流体机械,2009, 37 (4): 64 ~ 68.
- [9] 倪龙. 同井回灌地下水热源泵源汇井运行特性研究[D]. 哈尔滨工业大学 博士学位论文,2007.
- (上接第 202 页)
- [5] S. N. Sorensen, J. Reffstrup. Prediction of Long-Term Operational Conditions for Single-Well Groundwater Heat Pump Plants [C]. Proceedings of the 27th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, San Diego, CA, USA, 1992. 4. 109 ~ 4. 114.
- [6] 徐生恒. 井式液体冷热源系统[P]. 中华人民共和国国家知识产权局:(00123494. 3), 2002.