

# 建筑能耗模拟软件中空调系统模拟对比研究

周欣<sup>1</sup> 燕达<sup>1,\*</sup> 洪天真<sup>2</sup> 朱丹丹<sup>1</sup>

<sup>1</sup>清华大学建筑学院建筑技术科学系

<sup>2</sup>美国劳伦斯·伯克利国家实验室

## 摘要:

建筑能耗模拟软件是节能评估和设计优化的有效工具,在工程实际中,发现使用不同模拟软件计算同一栋建筑得到的计算结果却往往存在较大差异,这种现象自然造成了对模拟计算软件的可靠性和科学性的质疑,也为是否可以采用模拟计算作为评估依据带来了担忧。为了明确造成这种不同软件计算结果差异的原因,以及定位影响建筑能耗模拟结果的主要因素是一项基础性且急需开展的研究课题。本文对 EnergyPlus、DeST 和 DOE-2.1E 这三个建筑能耗模拟软件的空调系统模拟部分,从方法、计算过程和主要基本假设几方面进行了对比和分析,并通过一系列测试案例对不同模拟软件的计算过程进行了详细对比分析。通过本文的研究可以看到这三个模拟软件均可实现空调系统和能耗的模拟,且在输入参数保持一致或者等效的前提下,三者的模拟结果的差异较小。这为进一步开展节能评估和能耗标识等工作起到了技术支撑作用。

## 关键词:

建筑能耗模拟软件    HVAC 系统模拟    理论分析    对比测试

## Building energy modeling programs comparison

### Research on HVAC systems simulation part

Xin Zhou<sup>1</sup>, Da Yan<sup>1,\*</sup>, Tianzhen Hong<sup>2</sup>, Dandan Zhu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Building Science, School of Architecture, Tsinghua University, Beijing, China

<sup>2</sup>Lawrence Berkeley National Laboratory, 1 Cyclotron Road, Berkeley, CA 94720, USA

## Abstract:

Building energy simulation programs are effective tools for the evaluation of building energy saving and optimization of design. The fact that large discrepancies exist in simulated results when different BEMPs are used to model the same building has

---

\*通讯作者。电话: +010-62789761  
邮箱: yanda@tsinghua.edu.cn

caused wide concern. Urgent research is needed to identify the main elements that contribute towards the simulation results. This technical report summarizes methodologies, processes, and the main assumptions of three building energy modeling programs (BEMPs) for HVAC calculations: EnergyPlus, DeST, and DOE-2.1E, and test cases are designed to analyze the calculation process in detail. This will help users to get a better understanding of BEMPs and the research methodology of building simulation. This will also help build a foundation for building energy code development and energy labeling programs.

**Keywords:**

Building energy modeling programs, HVAC system simulation, theory analysis, comparison tests

## 1 引言

计算机模拟是预测及分析建筑能耗和性能的最经济有效的方式之一。自1960年代以来，模拟行业飞速发展，在全世界范围内已有成百上千的建筑能耗模拟软件被开发并使用。著名的模拟软件包括由美国能源部开发的DOE-2和EnergyPlus，由英国斯特拉斯克莱德大学开发的ESP-r，由中国清华大学开发的DeST等。这些模拟软件在建筑行业的各个方面发挥着重要的作用，例如：新建筑的设计阶段、既有建筑的改造阶段以及建筑能效标识及标准制定等领域。然而，越来越多的实际应用表明，不同的建筑能耗模拟软件模拟同一栋建筑时，计算结果往往存在较大差异，而这引起了使用者对模拟分析方法和工具的质疑，也有的研究将这种差异归结为模拟软件的计算核心不同而造成。以上模拟分析应用中存在的疑问在现阶段阻碍了各类建筑能耗模拟软件的发展和应用。因此，对模拟行业而言，迫切需要理清计算结果差异产生的原因并确定标准输入方式，这对促进各模拟软件的应用具有十分重要的意义。为了解决以上建筑能耗模拟软件应用中存在的问题，推动设计精细化，对各建筑能耗模拟软件核心进行细致深入对比是一件重要的基础工作。

建筑能耗模拟是一个多环节耦合的过程，因此需要一个系统的模拟软件验证技术方法。目前世界范围内建筑能耗模拟软件的验证方法包括实验验证、分析验

证和对比验证等。从对比的侧重点上来分类，建筑能耗模拟软件的计算一般分为两个部分：负荷侧对比以及空调系统侧对比，如图 1 所示。国际建筑能耗模拟机构已公布了一系列关于软件验证的标准或指南，例如 IEA BESTest 和 ASHRAE Standard 140<sup>[1]</sup>等。同时也有大量研究者开展了相应的对比工作并对部分建筑能耗模拟软件的优缺点进行了细致对比<sup>[2]</sup>。

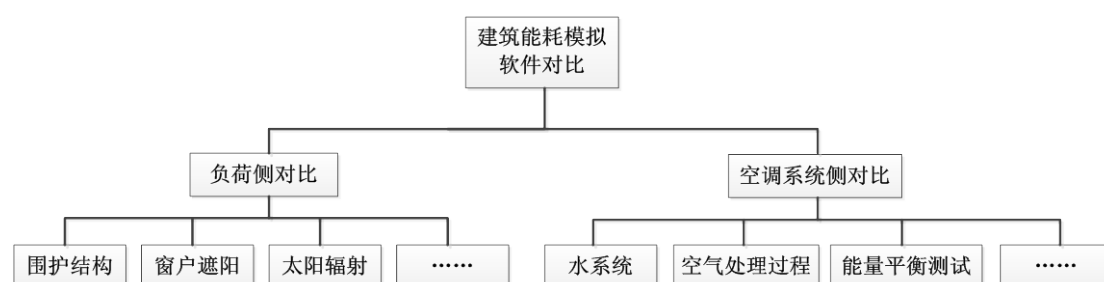


图 1 建筑能耗模拟软件对比

关于建筑负荷侧模拟软件的测试和验证工作通常包括建筑围护结构计算测试、窗户遮阳测试、内部太阳辐射分布测试等方面，通过对比工作，可对负荷计算中大部分的影响因素进行检验。大多数应用较为广泛的模拟软件均已参与了负荷侧的对比验证工作，例如 EnergyPlus, DeST, DOE-2, ESP, BLAST 和 TRNSYS 等。

空调系统侧的模拟是建筑能耗模拟的另一个重要组成部分，这一部分的软件测试包括：1、基于 ASHRAE 研究项目 RP865<sup>[4]</sup>的空调系统测试案例，其中提供了一系列分析测试案例，对系统空气流量及热质平衡进行深入对比；2、ANSI/ASHRAE Standard 140 则提供了测试简单一体化蒸发压缩冷却系统的测试案例<sup>[4]</sup>；3、国际能源组织的太阳能冷热项目（IEA SHC）提出了 BESTest，其中一个测试针对冷冻水和热水系统的机械设备和控制策略，其检验了冷机、冷/热水盘管、冷冻水液压回路、锅炉和热水液压回路的性能和控制策略<sup>[5]</sup>。同时，一些模拟软件的开发者也提出测试案例来对模拟软件的计算结果进行验证。例如，EnergyPlus 的能量平衡测试案例校核了在模拟空调系统时，处在不同边界流量下的能量平衡的准确性<sup>[6]</sup>。许多研究文献也涉及了模拟软件空调系统的对比工作<sup>[7][8][9][10]</sup>。

然而与负荷侧计算的测试方法相比，空调系统模拟的对比测试仍处在起步阶段，目前还未对模拟软件的内核进行系统深入的对比工作。因而针对应用广泛的建筑能耗模拟软件中空调系统计算的程序内核开展对比工作将有助于更好地了解各个模拟软件核心的异同，同时也将有力推动建筑模拟在实际工程中的科学应

用。

基于以上研究背景，本文针对三个在中美两国得到广泛应用的软件：EnergyPlus, DeST 及 DOE-2.1E 展开对比工作。其中负荷侧对比的研究工作已在《建筑能耗模拟软件对比:DeST、EnergyPlus and DOE-2》中发表<sup>[11]</sup>，本文的对比内容将侧重于各软件空调系统侧的核心、基本假设、计算结果的深入对比研究，其中包括：

1. 基于各软件的技术文档及源程序代码，针对计算流程、设备部件模型、控制策略模拟等方面分析总结不同软件的优势及局限性，并进行对比。
2. 通过测试案例分析不同软件设备模型的计算情况，并针对计算差异分析具体原因。
3. 通过具体案例测试不同软件的控制策略的模拟结果，并针对计算结果分析差异产生的原因。

## 2 研究方法

本文对比研究的方法如图 2 所示，可分为理论对比和案例分析两个主要组成部分：

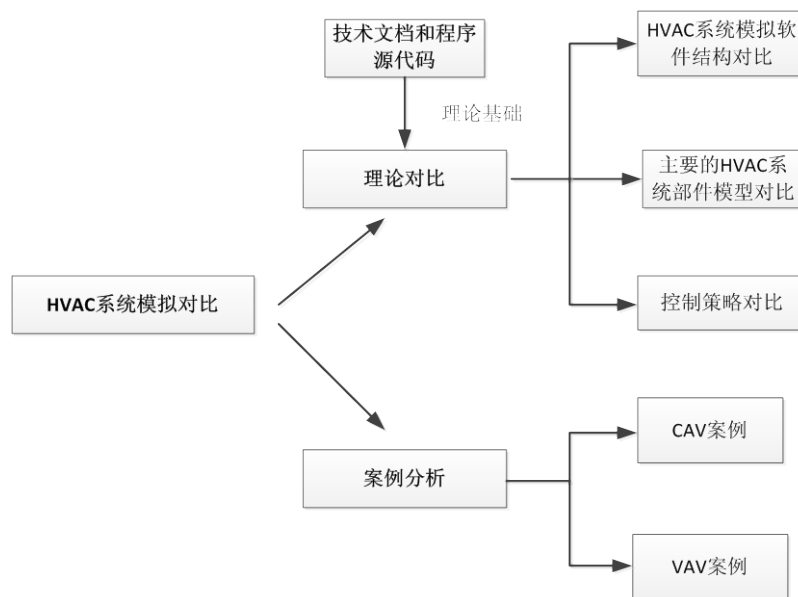


图 2 空调系统计算对比的技术路线

### 理论对比

基于各软件提供的技术文档和程序源代码，从理论上对三个软件的空调系统计算部分进行详细分析，根据各软件提供的基本假设和计算流程，总结不同软件在计算空调系统方面的优势和局限性。

该部分的总体思路如下：

1、关注空调系统的整体计算结构，总结各软件如何划分各计算模块以及各模块间如何连接计算；

2、分析各软件中设备部件模型的构建过程和简化假设，涉及的主要部件模型包括冷机、锅炉、水泵、风机、冷/热盘管及冷却塔等；

3、讨论三个软件中针对控制策略的处理方法，并以变风量系统的送风量及送风温度的确定为例，具体分析差异情况。

### 案例分析

为了深入分析不同软件在计算空调系统方面的差异及内在原因，本文通过设计一系列计算案例的方式，对影响计算结果的关键因素及计算过程进行分析和讨论。由于 EnergyPlus 和 DOE-2 在空调系统设备模型上较为类似，因此本文中的案例中选取 EnergyPlus 和 DeST 两个软件进行比较分析，对不同负荷率工况下定风量和变风量两种主要的空调系统形式进行案例测试，深入对比和分析各主要设备模型和控制策略的计算流程和模拟方法。

## 3 理论对比部分

对模拟软件的内核而言，计算结构、主要设备模型及控制策略是影响计算结果准确性的主要方面，为此本文基于 EnergyPlus, DOE-2 和 DeST 的技术文档及源代码内容<sup>[12][13][14][15][16][17]</sup>，对以上三方面的差异和限制条件进行了对比。

### 3.1 软件概况及计算结构的对比

三个软件在时间步长、计算流程、模型算法、空调系统构型、压降计算和局限性等几个方面的特征如表 1 所示。

表 1 软件空调系统计算情况概述

软件	EnergyPlus	DeST	DOE-2
----	------------	------	-------

时间步长	根据负荷计算时间步长自动调整	固定为逐时	固定为逐时
计算流程	集成处理。采用 predictor-correct 方法	DeST 软件将冷热站与用户侧隔开,相互耦合迭代求解	DOE-2 软件为顺序模拟。
模型算法	大部分设备模型均为前置模型,带有性能曲线的类似稳态模型		
空调系统构型	用户定义&典型的空调系统模板	预定义好的可选择设备的固定的系统模板	25 种带有可选设备的固定的系统类型
压降计算	两种类型的压降曲线	等效用户末端的特性	使用者输入
相同类型的设备联合运行的控制策略	根据用户选择的控制策略调节	根据用户选择的控制策略调节	认为所有型号的这种设备是一个大的整体。即尽管型号不同,这些设备有相同的运行曲线。
局限	没有管路模型,其流量、风量分配主要采用规则化的 flow resolver。 压力特性是根据流量特性给出。压力变化不影响支路流量。支路流量变化与支路阻力特性无关。	目前虽然等效用户末端涵盖了主要的几种空调系统类型,但处理比较新型或者独特的系统时,由于对这些类型的末端特性尚未研究,因此在反映实际情况时可能存在局限	软件结构上不存在反馈。采用前一时刻的温度来计算邻室传热以及温度平衡。 用于系统模拟的负荷时通过权重因素修正负荷得到的。

三个软件的计算结构分别如图 3 所示。EnergyPlus 软件分为以下几个主要元素:建筑、系统、设备,各元素相互连接并由整合处理单元控制。各部件同时求解,通常采用不断更新的 Guass-Seidell 连续迭代方法进行处理。DOE-2 软件为顺序模拟。其包括用户输入的编译器(BDL),以及四个子程序(LOADS, SYSTEMS, PLANT and ECON)。其中 LOADS, SYSTEMS 和 PLANT 按照顺序依次模拟,输出的信息作为条件输入 ECON 模块。DeST 软件将冷热站与用户侧隔开,划分为等效末端用户和冷热站两个模块,相互耦合迭代求解。在 DeST 中对冷热源侧的管道、制冷机、水泵按照每一段管道进行准确严格的模拟,而对用户侧管网,则只对一个能正确反映整体流量、压差和热量变化的等效末端进行计算,而不对每一段管段进行具体模拟。

从以上分析可以看到,在计算流程上,DOE-2 与其他两个软件差异较大。DOE-2 各模块间为单向连接,顺序模拟。而 EnergyPlus 和 DeST 均为整体耦合的程序。

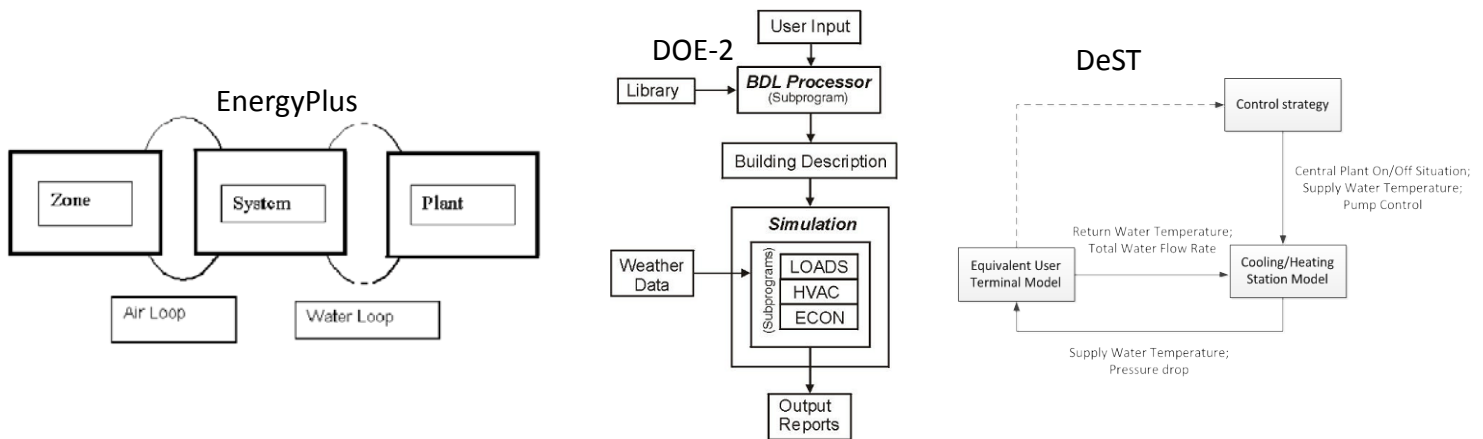


图 3 三个软件空调系统计算结构

### 3.2 软件设备模型

设备模型是空调系统模拟中很重要的一部分。在 EnergyPlus 中，设备模型被分为 33 组，涵盖大部分的设备类型，例如：锅炉、冷机、盘管、水泵和风机等。在 DeST 中，模型涉及 VAV、CAV、FCU 及 VRF 系统中常用的主要设备。DeST 软件中同一类设备可供选择的模型种类少于 EnergyPlus，各模型要求的输入参数也少于 EnergyPlus 软件。EnergyPlus 中许多设备模型是从 DOE-2 继承来的，因此两个软件的设备模型库差异不大。

在三个软件这么多种类的设备中，本部分选取了 6 种主要的设备模型进行详细的分析和对比，包括：水泵、冷却盘管、冷却塔、风机、电制冷机和热水锅炉。同时文章以表格的形式详细地罗列了三个软件中这几种设备模型的主要特点，如表 2 所示。

三个软件在水泵、风机和锅炉方面有完全一致的模型。EnergyPlus 和 DeST 中的盘管模型是基于符合理论方法的工程公式进行计算，而 DOE-2 中的盘管模型采用的是基于经验数据的模型，相对而言模型不够完备。三个软件均考虑了负荷率、冷凝器进水温度以及蒸发器出水温度对冷机效率的影响。在 EnergyPlus 和 DOE-2 的冷机模型中，冷机曲线的系数由用户定义，而 DeST 中，冷机曲线为程序提供，不能更改。EnergyPlus 和 DOE-2.1E 的冷却塔风机电耗与负荷率相关，因此在特点的时间步长内，如果负荷较小，风机将启停调节。而在 DeST 中，只要该时间步长内需要开启冷却塔，则冷却塔风机电耗保持恒定，与负荷率无关。

表 2 各软件主要设备模型总结及对比

	EnergyPlus	DeST	DOE-2
冷机	3 条曲线构成的冷机模型；输入参数由用户定义；独立变量包括：负荷率、冷机进水温度、冷凝器出水温度	1 条曲线构成的冷机模型；模型内嵌于软件中无法修改；独立变量包括：负荷率、冷机进水温度、冷凝器出水温度	3 条曲线构成的冷机模型；输入参数由用户定义；独立变量包括：负荷率、冷机进水温度、冷凝器出水温度
变速风机/水泵	功率根据负荷率修正；用户可修改参数	功率根据负荷率修正；参数内嵌于软件中，无法修改	功率根据负荷率修正；用户可修改参数
冷盘管	对于干盘管，采用 $\epsilon$ -NTU 法；对于湿盘管，采用等效干工况法	采用热效率法	采用盘管旁通系数模型
冷却塔	模型基于 Merkel 理论、能量平衡、质量平衡。风机功率根据负荷率修正	模型基于 Merkel 理论、能量平衡、质量平衡。风机功率恒定	使用性能表格及湿球温度预测冷却塔的出力及出水温度。风机功率根据负荷率修正。
锅炉	效率曲线为负荷率的单变量曲线或负荷率及锅炉出水温度的双变量曲线	修正曲线为负荷率的单变量曲线	使用热输入率修正部分负荷率下的锅炉性能，其为负荷率的单变量曲线。

### 3.3 软件对控制策略的处理

控制策略涉及模拟软件如何确定送风量和送风温度，以及流量在各支路是如何分配的。尽管系统的类型十分类似，逐时的模拟结果受控制方式的影响很大。EnergyPlus 中大部分设定值通过 Setpoint Manager 模块确定。Setpoint Manager 属于 EnergyPlus 中高层的控制结构。其能够访问所有空调系统节点的数据并使用这些数据计算一个或多个节点的设定值。之后，控制器或环路将使用这些设定值作为控制目标。

在 DOE-2 中，Heat-Temp-Sch、Cool-Temp-Sch 以及 Throttling-Range 确定了空间恒温器的三个运行区间。当房间温度在供热或供冷范围内时，相应措施的采用和设备的类型有关。当在供热范围内，以下的措施将以此执行：1) 送风温度升；2) 热源供热量提高；3) 再热盘管投入增大；4) 送风量增大。当处在供冷范围内，以下的措施依次执行：1) 降低送风温度；2) 提高送风量。

DeST 中的送风温度和送风量在 SCHEME 子程序中确定。房间的负荷情况由



于室外温度、热扰等因素的影响而不断变化。为了保持室内热环境的要求，送风温度或送风量需要进行相应的调整。DeST 软件在 SCHEME 模块中采用最优化的方法搜索最优的送风温度及送风量。

总体而言，DeST 及 DOE-2 软件侧重于设计阶段，因此其对控制策略的处理偏理想化。相对而言，EnergyPlus 在控制策略方面则前进了一些，添加了部分细致的控制算法内容，如 PID 等，但这样的处理方式同时也增加了计算的复杂度，易造成发散的情况。

以 VAV 的控制策略为例，对比了三个软件在控制策略方面的差异，如表 3。

表 3 VAV 控制策略对比

软件	控制变量	描述
EnergyPlus (普通末端)	供暖	送风量设为最小值，送风温度随着需求变化
	供冷	送风温度保持不变，送风量随着需求变化
DeST	供暖&供冷	通过最优化方法搜索最优送风温度，当存在最优送风温度区间时，根据风量最小原则确定送风温度；当不存在最优送风温度区间时，基于室温最小偏差原则确定送风温度
DOE-2	供暖	以下的措施依次执行：1) 送风温度升高；2) 供热量提高；3) 再热盘管投入增大；4) 送风量增大
	供冷	以下的措施依次执行：1) 降低送风温度；2) 提高送风量

## 4 案例分析部分

在案例分析部分，仅针对 EnergyPlus 及 DeST 两个软件展开对比研究。同时，为了对各软件的设备模型、基本算法和控制策略有更详细直观的了解，本文通过一系列稳态案例对软件中空调系统（定风量及变风量系统）计算过程进行具体的对比分析。测试案例仅讨论显热负荷的处理工况。在选取测试的设备模型方面，为了保证对比工作的可比较性，在两个软件中均选取了最接近的模型类型进行对比。

本部分的研究思路如图 4 所示：

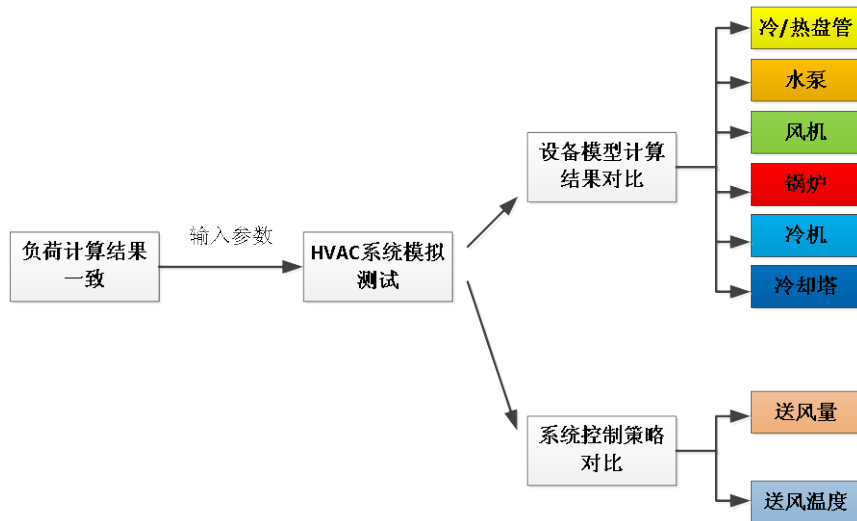


图 4 案例分析部分研究思路

## 4.1 测试案例介绍

稳态测试案例包括定风量系统（CAV）测试案例及变风量系统（VAV）测试案例。在定风量系统测试案例中对比了两个软件的设备模型建模方法和计算结果，包括电制冷机、锅炉、定流量泵、冷却塔、盘管。由于空调系统设备在这几个系统中是基本一致的，因此变风量系统测试案例主要是为了测试在不同负荷率下控制策略的情况。同时测试案例采用稳态条件，其优势为能够得到分析解，同时能够对模拟过程进行逐步地详细分析。

测试案例基于美国能源部商业参考建筑中的小型办公建筑进行修改，该建筑的围护结构性能按照 ASHRAE Standard 90.1-2004 中的要求进行设定。EnergyPlus 和 DeST 的负荷侧计算结果要求尽可能一致，以减小负荷侧计算对空调系统侧计算造成的误差。为了实现该目标，对原始的建筑模型进行了一定的修改。

### 4.1.1 基本案例建筑描述

为了突出系统侧的对比分析，本文对建筑模型进行如下约定，以保证各软件的负荷侧计算一致且为稳态工况：

1. 为减少由于各软件对斜屋顶的不同处理方式而引入的差异，建筑采用平屋顶。修改后的建筑如图 5 所示。

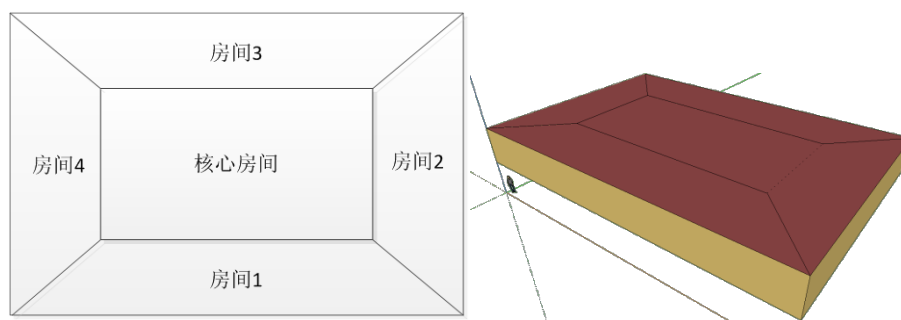


图 5 小型办公建筑模型

2. 为减少内部热扰在内表面的分布不同造成的影响，设定室内热扰为 0；
3. 为避免室内长波辐射的算法不同而引入的差异，表面的热吸收率设为 0；
4. 不考虑天空背景辐射的影响；
5. 室外气象参数设定为恒定的室外干球温度和室外空气含湿量，无太阳辐射，室外风速为 0，以实现案例的稳态假设；
6. 忽略室内外空气渗透；
7. 为减少地下传热处理不同导致的计算结果差异，地板设置为悬空；
8. 所有房间 24 小时连续空调，且设定温度恒定为 20°C。

建筑围护结构材料的热工性能参数如表 4 所示。

表 4 围护结构参数信息

围护结构	外墙	内墙	屋顶	地板
传热系数 ( $W/m^2 \cdot K$ )	0.694	2.573	1.274	4.249

#### 4.1.2 建筑负荷计算结果

如图 6 所示，以室外空气温度恒定为 10°C 的条件下 EnergyPlus 和 DeST 的五个房间全年热负荷的计算结果为例，可以看到 EnergyPlus 和 DeST 软件的负荷计算结果基本吻合。

通过以上案例的设置和负荷计算结果一致性的对比工作，可以将对能耗产生影响的两个主要因素，建筑负荷侧和空调系统侧的影响实现分离，因此在后续案例计算中，空调系统计算得到的能耗结果的差异主要由空调系统模拟方法的差异造成。该方法能够突出本文空调系统模拟对比的目标，突出空调系统计算结果的对比。同时通过改变室外温度得到不同的建筑负荷水平，可实现不同负荷率下控

制策略和设备性能的对比工作。

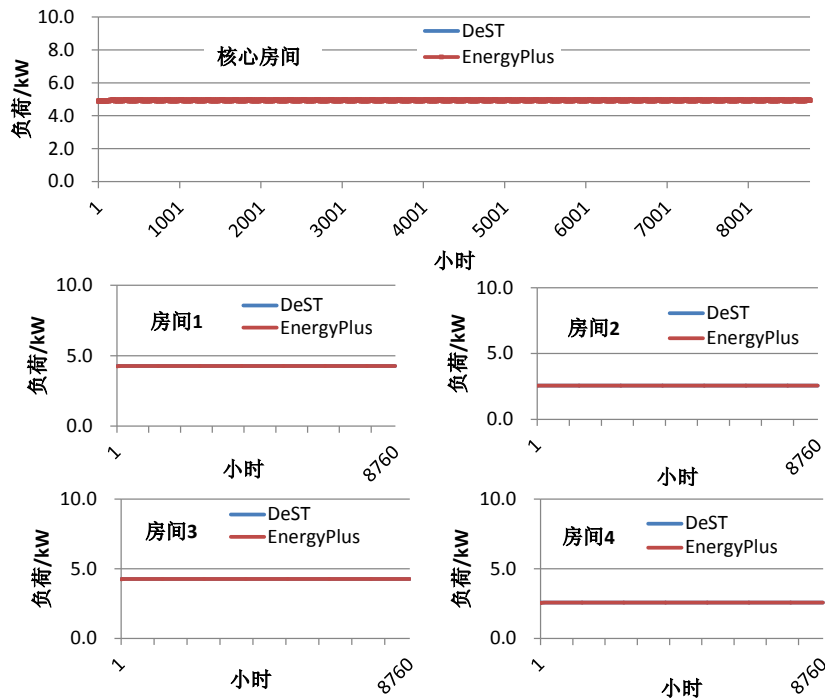


图 6 室外温度为 10°C 下的全年负荷计算结果

## 4.2 测试案例

在定风量及变风量空调系统测试中，为较大范围内涵盖冷、热负荷的处理情况，如表 5 所示，分别设计了 21 个案例对各负荷率下空调系统的计算结果进行计算分析。

表 5 空调系统测试案例设置汇总

空调系统形式	定风量系统 (CAV)	变风量系统 (VAV)
室温温度	最低温度: 10°C; 最高温度 30 摄氏度; 温度变化间隔: 1°C	最低温度: 10°C; 最高温度 30 摄氏度; 温度变化间隔: 1°C
室内空气温度	5 个房间的室内设定温度均为 20°C	5 个房间的室内设定温度均为 20°C
空调系统	每个房间一个空调系统, 5 个系统由同一个水系统提供水侧的需求	每个房间一个空调系统, 5 个系统由同一个水系统提供水侧的需求
水系统构成	热水环路: 简单的热水锅炉, 热水泵; 冷冻水环路: 电制冷机, 冷冻水泵; 冷却水环路: 单速冷却塔, 冷却水泵	热水环路: 简单的热水锅炉, 热水泵; 冷冻水环路: 电制冷机, 冷冻水泵; 冷却水环路: 单速冷却塔, 冷却水泵
空气系统基本	100% 对流空气系统; 100% 的输送	100% 对流空气系统; 100% 的输送

假设	效率无管道损失；房间空气理想混合 无新风和排风；风机热量不传给气流；水泵热量不传给水流	效率无管道损失；房间空气理想混合 无新风和排风；风机热量不传给气流；水泵热量不传给水流
----	--	--

### 4.3 案例计算结果对比及分析

#### 4.3.1 设备模型计算结果及分析

在空调系统中，处理负荷及输送冷热量的主要设备包括：冷/热盘管、水泵、风机、锅炉、冷机、冷却塔。下面针对各模型进行详细分析。

##### 1. 冷/热盘管

以核心房间在各个负荷率下的盘管计算结果为例，计算结果如图 7、图 8 所示。图中负荷率负值表示冷负荷，对应的负荷为冷盘管负荷，负荷率正值表示热负荷，对应的负荷为热盘管负荷。

通过计算结果（图 8）可以看到，两个软件的计算结果基本一致。这主要由于两个软件关于盘管的计算方法和基本假设是一致的。EnergyPlus 采用  $\epsilon$ -NTU 方法计算盘管模型，DeST 中采用热效率法。在处理显热负荷的情况下，两种方法等效。

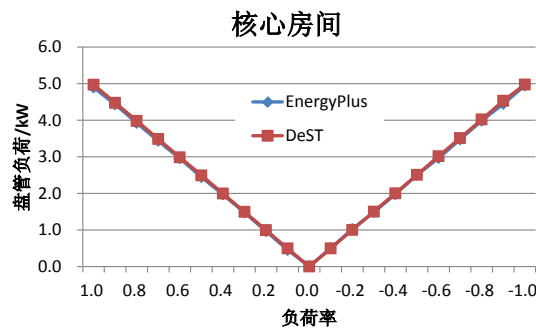


图 7 盘管在各负荷率下的负荷情况对比

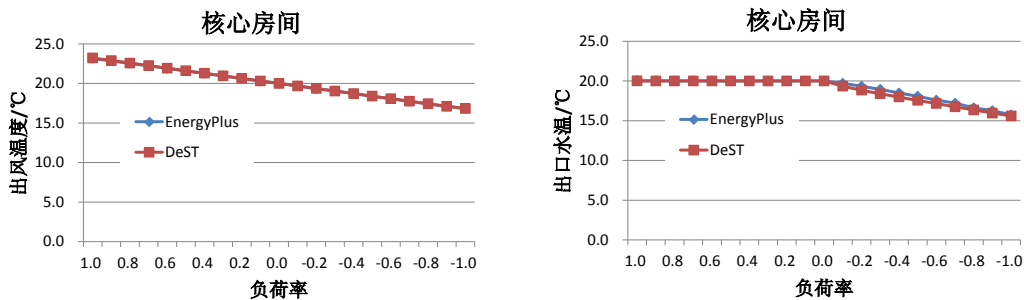


图 8 盘管在各负荷率下出口温度情况

## 2. 水泵

案例中选用的水泵（热水泵、冷冻泵及冷却泵）类型均为定速泵。以冷冻水泵为例，两个软件中定速泵模型的计算结果如图 9 所示。

从图中可以看到，两个软件定速泵模型的模拟结果基本重叠。在两个软件中定速泵模型的输入参数均为额定流量、额定压头和电机效率，计算公式完全一致。当流量变化时，在两个软件中，水泵的压头和效率将根据流量比率进行修正，修正公式均为二次曲线公式。

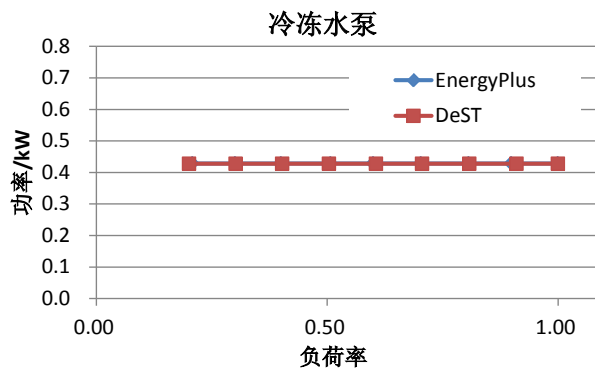


图 9 冷冻水泵计算结果对比

## 3. 定速风机

风机计算结果如图 10 所示，两个软件计算结果的差异基本可以忽略。

在 DeST 和 EnergyPlus 中，风机功率计算采用的公式一致。差异之处在于，在 DeST 中，假设空气密度为恒定值  $1.2 \text{ kg/m}^3$ ，而在 EnergyPlus 中，空气密度为标准条件下的密度，即在当地大气压下，空气温度为  $20^\circ\text{C}$ ，含湿量为 0。但在一般情况下，该差异可以忽略。

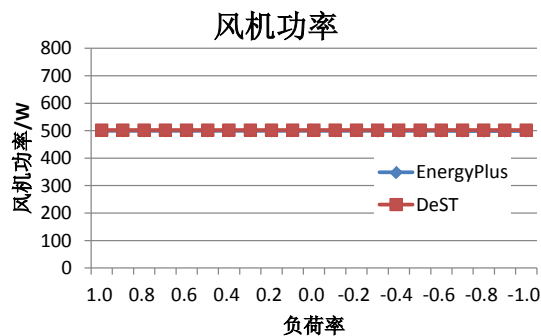


图 10 风机功率计算结果对比

#### 4. 锅炉

DeST 及 EnergyPlus 关于锅炉的计算结果基本一致，如图 10 所示。

在两个软件中，锅炉的耗热量均根据锅炉处理的负荷及锅炉效率得出。同时，对部分负荷率下的锅炉效率，采用二次曲线进行修正。

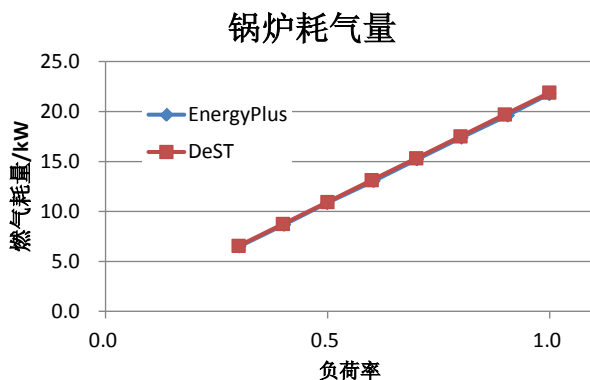


图 11 锅炉耗气量对比

#### 5. 冷机

冷机的计算结果如图 11 所示。由于两个软件中曲线公式的具体形式不一致，因此在计算过程中引入了误差。

两个软件中，冷机模型均采用曲线模型，并根据冷机负荷率、冷冻水出水温度及冷却水进水温度修正不同工况下的冷机性能。在 EnergyPlus 中，有三个可用的电冷机模型：基于流体温差的电冷机模型、基于冷凝器进水温度的电制冷机模型以及基于冷凝器出口温度的电制冷机模型。在测试案例中，采用基于流体温差的电冷机模型，因为该模型与 DeST 软件中的冷机模型有相同的输入参数，同时也相对最为简单。

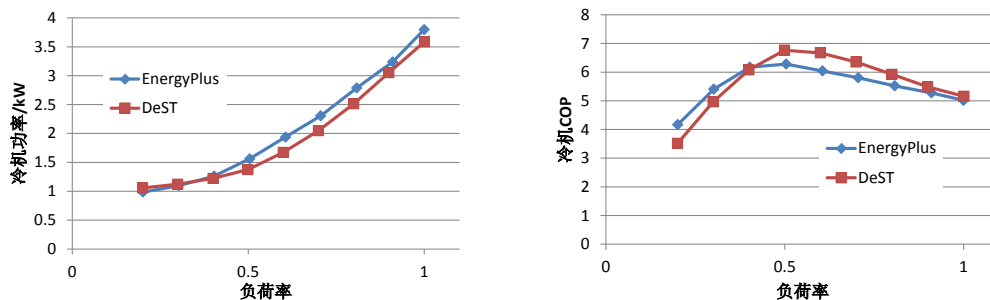


图 12 冷机功率计负荷率计算结果对比

## 6. 冷却塔

冷却塔计算结果如图 13、图 14 所示。由于风机模型的不一致，冷却塔电耗的差异随着负荷率的降低而增大。在冷却塔进出口水温方面，由于整体模型采用的算法是一致的，误差较小，误差造成的主要原因为两个软件对焓的计算方法不一致，同时在冷却塔选型时采用的空气参数存在不同。

冷却塔进水温度通过先假定冷凝器的进水温度，进而迭代计算得到。而在 EnergyPlus 的冷却塔模型计算中，首先基于空气的湿球温度确定湿空气的焓值。EnergyPlus 中冷却塔的计算分为稳态计算和实际运行工况计算两个部分。在稳态计算部分，计算过程与 DeST 大体一致，同样用到迭代的方法。不同之处为收敛的判定条件及初始的假设条件为冷却塔出口空气的湿球温度。该方法用于计算在自然对流条件（水泵开启，冷却塔风机关闭）及风机满负荷工作条件下的冷却塔出口温度。在实际运行工况计算部分，冷却塔模型根据用户的设定值确定冷却塔出水温度的调节目标。

对于风机电耗，在 DeST 中，冷却塔风机电耗恒定，为额定值。然而，EnergyPlus 在处理冷却塔部分负荷工况时，假定风机功率为两个稳态工况的线性差分，并不考虑任何循环损失。

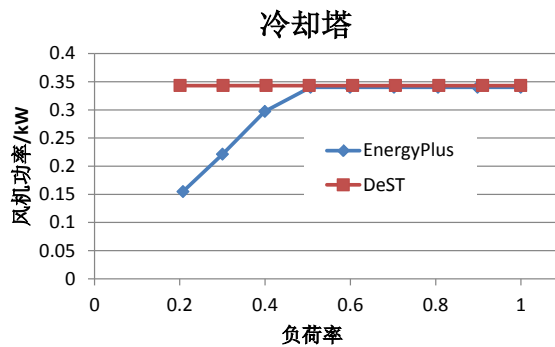


图 13 冷却塔风机电耗计算结果对比

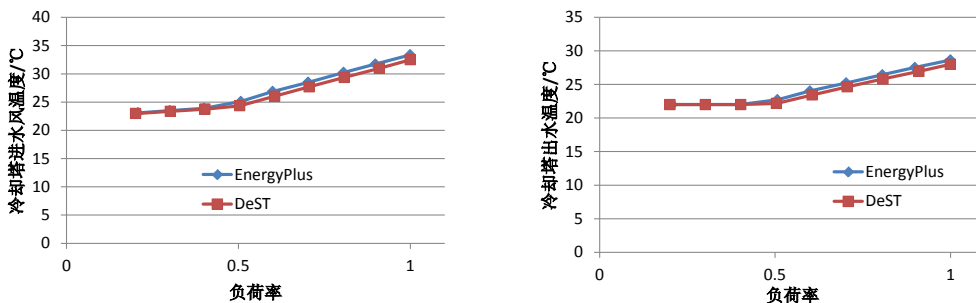




图 14 冷却塔进出口水温对比

### 4.3.2

为了实现系统控制策略的对比工作，本文对一个 VAV 系统的送风温度和送风量等计算结果进行对比，分析 EnergyPlus 和 DeST 中采用的控制策略的异同。其中案例中 EnergyPlus 选取的是普通末端的控制方式。

送风量及送风温度的计算结果如图 15、图 16 所示（以核心房间为例）。负荷率负值代表冷负荷。从图中可以看到，送风温度的计算结果近似，但送风量存在差异，进而导致房间温度存在差异。

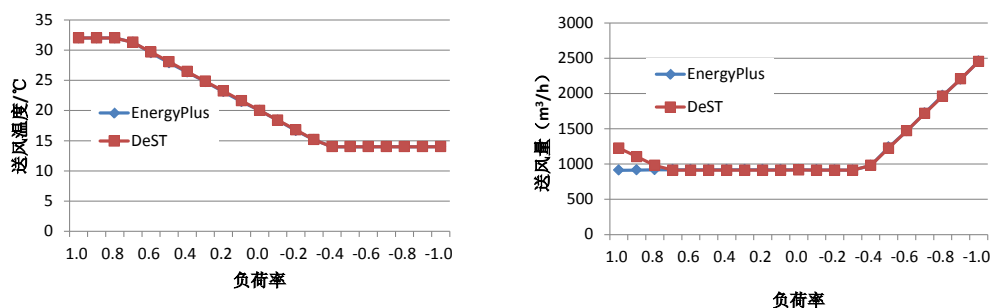


图 15 核心房间在软件默认的控制方式下的送风温度及送风量

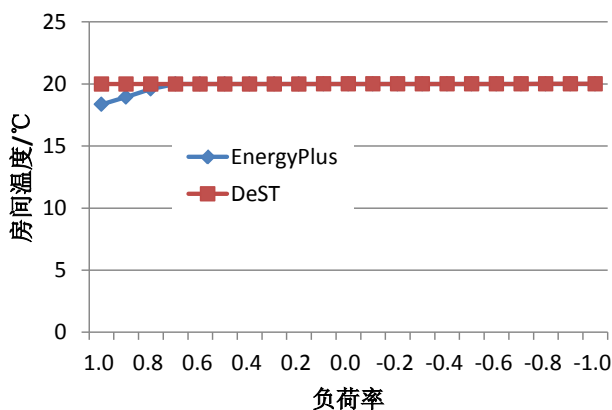


图 16 在软件默认的控制方式下核心房间的室内温度计算情况

在确定系统送风温度及送风量的过程中，两个软件采用的计算流程不一致。在 DeST 中，送风温度和送风量由优化策略确定，该策略保证在房间设定温度达到的前提下，房间的送风量能够尽量小。然而，在 EnergyPlus 中，当需要供热时，送风量设定为最小值，送风温度根据负荷和送风量确定。在本案例中，当热负荷率为 1 时，为了保证房间的设定温度，送风温度将比最大值高，因此，房间的送

风温度设定为最大值 32℃，如图 15 所示。这样由于提供的负荷不能满足需求，因此房间的温度将比设定值（20℃）低，如图 16 所示。当需要冷负荷时，首先确定送风温度，送风温度为前一步房间负荷和送风量的函数。当送风温度降低至最低值时，送风温度将保持在最低值，而送风量则通过能量平衡确定。

为了进一步验证控制策略的影响，将 EnergyPlus 中的送风温度和送风量设定为与 DeST 中的一致。这可以通过作息模块定义送风温度设定值和最小送风量得到。在相同送风温度和送风量下，两软件的计算结果如图 17 至图 18 所示：

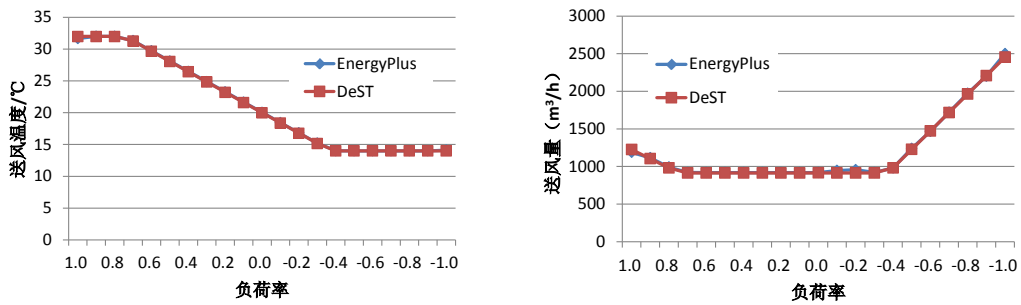


图 17 核心房间在一致的控制方式下的送风温度及送风量

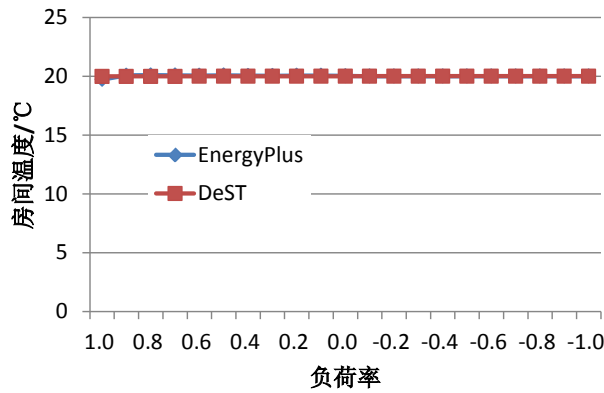


图 18 在一致的控制方式下核心房间的室内温度计算情况

从图中可以看到，两软件中送风温度和送风量基本一致，以此可以证明控制策略是导致图 15、图 16 中产生差异的原因。

## 5 结论

1、与 EnergyPlus 和 DeST 相比，DOE-2.1E 在空调系统模拟的基本假设上存在较大局限。其从“负荷到系统到设备”的单向的计算结构无法实现负荷侧和系统侧的耦合计算，这使得在分析实际空调系统运行状况和控制方案对比等工作中，

会有很大的局限性。

2、EnergyPlus、DOE-2 和 DeST 均具有全面的设备模型。这三个软件在水泵、风机和锅炉方面的模型是完全一致的。EnergyPlus 和 DeST 中的盘管模型是基于符合理论方法的工程公式进行计算,而 DOE-2 中的盘管模型采用的是基于经验数据的模型,相对而言模型不够完备。在冷机模型方面,各软件考虑的因素一致,且均采用曲线模型,但曲线的具体公式略有不同。

3、通过本文的研究发现,EnergyPlus、DOE-2 和 DeST 三个软件均可实现空调系统和能耗的模拟,且在输入参数保持一致或者等效的前提下,三个软件的模拟结果的差异较小。其中,DOE-2 由于开发时计算规模的影响,在计算负荷与系统设备的耦合方面具有一定的局限性。在案例测试中,EnergyPlus 及 DeST 的总能耗误差在 10%以内。通过对比研究,可以看到,EnergyPlus 及 DeST 均可以完成复杂建筑能耗模拟分析的需求。

## 6 致谢

本文受国际科技合作计划《中美清洁能源联合研究中心建筑节能》合作项目课题《建筑能耗数据采集、监控与分析及模拟分析关键技术和应用》(课题编号: 2010DFA72740-02)及十二五国家科技支撑计划课题《建筑节能评估方法和指标体系研究》(课题编号: 2012BAJ12B03)资助,特此表示感谢!

## 参考文献

- [1] 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, Atlanta, GA.
- [2] Crawley, Drury B. and Hand, Jon W. and Kummert, Michael and Griffith, Brent T. (2008) Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. Building and Environment, 43 (4). pp. 661-673.
- [3] ASHRAE Research Project 865 - Development Of Accuracy Tests For Mechanical System Simulations

- [4] Robert H. Henninger and Michael J. Witte. Test Report of LBNL DOE-2.1E119 Based on ANSI/ASHRAE Standard 140-2004, September 2006
- [5] Robert H. Henninger and Michael J. Witte, EnergyPlus Testing with IEA BESTEST Mechanical Equipment & Control Strategies for a Chilled Water and a Hot Water System, November 2011
- [6] Robert H. Henninger and Michael J. Witte. EnergyPlus Testing with Global Energy Balance Tests, November 2011
- [7] Robert H. Henninger and Michael J. Witte, EnergyPlus Testing with HVAC Equipment Performance Tests CE100 to CE200 from ANSI/ASHRAE Standard 140-2007, November 2011.
- [8] Robert H. Henninger and Michael J. Witte, EnergyPlus Testing with HVAC Equipment Performance Tests CE300 to CE545 from ANSI/ASHRAE Standard 140-2007, November 2011.
- [9] Robert H. Henninger and Michael J. Witte, EnergyPlus Testing with Fuel-Fired Furnace Tests HE100 to HE230 from ANSI/ASHRAE Standard 140-2007, November 2011.
- [10] Robert H. Henninger and Michael J. Witte, EnergyPlus Testing with HVAC Equipment Component Tests, November 2011.
- [11] 朱丹丹,燕达,王闯,洪天真. 建筑能耗模拟软件对比:DeST、EnergyPlus and DOE-2[J].建筑科学 2012(S2)
- [12] Yan D, Xia J, Tang W, Song F, Zhang X, Jiang Y (2008). DeST—An integrated building simulation toolkit, Part I : Fundamentals. Building Simulation, 1: 95-110.
- [13] DOE-2 Engineers Manual Version 2.1A, LBL-11353, LA-8520-M
- [14] Zhang X, Xia J, Jiang Z, Huang J, Qin R, Zhang Y, Liu Y, Jiang Y (2008). DeST—An integrated building simulation toolkit, Part II : Applications. Building Simulation, 1: 193-209.
- [15] EnergyPlus Engineering Reference, October 2011
- [16] DOE-2 BDL Summary Version 2.1E
- [17] DOE-2 Supplement Version 2.1 C