

建筑性能集成模拟技术

J. A. Clarke

ESRU, University of Strathclyde

joe@esru.strath.ac.uk

[摘要] 本文叙述了评估建筑性能集成仿真方法的必要性，提供了集成模拟的技术评估实例。本文认为：只着眼于单个区域的设计工具的应用将会导致室内空气品质、室内人员舒适性、能源使用及环境影响等方面并非最优的设计方案。

1. 前言

能源效率可以比作一种未被应用的潜力巨大的清洁能源。要获得这种资源，由于技术方面制约要做的工作较少，因为许多技术已经被掌握和存在；而在低效的决策支持方面所要做的工作较多。在信息技术的时代，信息未被需要用它来作出信息决策的人所掌握，这真是一个奇怪的自相矛盾的事。

建筑模拟技术发展起来了，它正是对这种缺陷的反应。建筑模拟技术是用来评估一些可选方案的，这些方案是为了解决人体健康和舒适、降低能源需求及可持续实践等方面的有关问题的。由于人们逐渐接受建筑模拟技术给出最好的实践的事实，在将技术转化实践方面正在进行实质性尝试^{[1][2]}。

2. 集成性能模拟

集成建模的目的是，通过同时处理与问题的目标和描述性数据的内在不确定性相对应的所有能量传输途径来保证建筑/机组系统的集成性能。为了达到这个目的，建筑应该被看成是系统的（有许多部分组成）、动态的（各部分演变的速度不同）、非线性的（各参数与热动力学状态有关），首要的是应看成是错综复杂的（有许多内部的和各组成部分之间的相互作用）。为了达到较高的模型集成性，模拟程序应保证这些系统内部固有的特征。

就程序的接口问题来说，在整个设计阶段使用集成模拟程序且忽略许多理论的不连续性和有害的假设比使用一系列由简到繁的工具，肯定更为合适。

本文阐述了集成模拟所能做到的建筑性能评估。这种模拟所用数学模型已在其它的文献描述过^[3]。

3. 实际应用

将模拟应用到建筑环境设计和管理中代表了一个规模空前的和典范性的转变。首先，建筑业有了进行根本的热动力学复杂性分析和以合理的费用进行各方案的集成性能评估的手段。在整体模拟方法中，如表 1 所总结的那样，有所描述必有所表现特性（或者说，有所付出比有所回报）。这意味着较少的输入往往能得到可观的决策支持，还意味着在设计假设过程中可以加入更多细节到模型中，各技术领域的相互作用变得更加复杂。

考虑下面的情形，其目的是突出集成评估过程。也意味着，显示出将来可能的设计行为。在潜在的数据模型按照表 1 的过程日益凝炼时，需要使用了 ESP-r 系统（见 <http://www.esru.strath.ac.uk>）。

一个项目管理模块给出了访问支持数据库、模拟引擎、性能评估工具和一系列CABD、可视化及报告生成工具的第三方应用程序的途径等。其功能是当设计前提改变时，调整问题的定义和发出数据模型到模拟引擎（或接受来自模拟引擎的数据模型）。重要的是，它通过给出访问每个阶段的仿真器相应功能的路径来支持逐渐加强问题定义演变。

表 1 问题描述与模型表现特性的映射关系

模型描述	模型的表现特性
事先存在的数据库	简单的特性指标（如材料的特性）；
+几何形状	可视化、照片、照片的明暗处理等；
+结构属性	材料数量、内部能源等；
+运行特性	偶然增长、电力需求等；
+边界条件	照片-真实影像、照明分布、非系统热舒适及视觉舒适等；
+特殊材料	光电及可开关的玻璃窗的评估；
+控制系统	日光的利用、能源的利用、系统的反应等；
+空气流路	通风和热回收评估等；
+HVAC管网	焓湿度分析、元部件尺寸确定等；
+CFD领域	室内空气品质、热舒适性等；
+电力网络	可再生能源集成、负荷控制等；
+强化途径	冷热桥等；
+湿气流路	局部结露、霉菌滋生及健康问题。

新项目的起点应该是仔细察看并准备数据库。这包括建筑结构各组成部分的湿热特性、内部能源及光学特性，还包括典型的室内人员分布情况、与空气流动模型有关的问题中使用的压力系数、HVAC系统模型中使用的机组部件、用预测局部表面状况以评估霉菌滋生风险的霉菌种类数据及气象数据的收集。

包含在数据库中的是有效地支持设计概念化过程的知识。例如，建筑结构部件数据库将包含一些建筑材料的基本热湿、光学特性数据，由这些特性数据导出的特性（如用表征热传输的反应速度的热扩散率来表征热损失速度）。

尽管定义问题的方法在很大程度上是一种由个人选择的事，但从用CABD工具详细描述建筑的几何外形开始这个过程仍不太常见的。ESP-r能与AutoCAD等的CAD工具交互运行，这就能创建任意复杂的建筑模型。这个模型能被输入到项目管理模块中去，在项目管理模块中能进行属性化过程。

产生简单的线条或着色的映像来帮助传达设计意图或分析日光的通路。项目管理模块通过辐射系统提供具有线条轮廓的照片及着色而加有条纹的图片^[5]。在后面的例子中，所需输入模型会自动生成，ESP-r调用并控制辐射系统模块。

结构和运行属性，现在可通过从支持数据库中选择产品（如墙体结构）及实体（如室内人员分布情况），及通过将这些与预先定义的几何实体关联起来而获得。正是在这个阶段，模拟的初学者将认识到良好构思的问题抽象的重要性。良好构思的问题抽象能取得恰当的解决方案，同时使需要属性的实体数量、模拟处理和性能评估达到最小限度。问题抽象是一种可获得的不断提高的技能。

要求苛刻的温度、风、辐射、照明的边界条件现在与模型相联系起来，以便能进行环境性能(如全年的热舒适性和视觉舒适性)评估,并获取对补救措施的洞察力。这些边界条件可适当修改以表示极端气象条件和当地微气候现象。如有需要，外

形、建筑或运行上的改变能在模型中应用以确定这些因素对建筑性能的影响。例如，可检讨备选用的建筑系统，加载不同的室内人员负荷，用光线刺眼的程度及地点来评估不同的日光利用。可能性会受到设计者想象力的限制。

现在也许要考虑特殊的立面系统，例如：将部分太阳能光谱转化成电（和热）的光电组件、被动接受并处理太阳能的透明保温材料、控制眩光或太阳光得热的自适应玻璃窗。能确定每种情况对提高环境性能和降低能耗的贡献。甚至还有可能研究消除各种冲突的途径，比如，光电PV材料表面减少渗入内部的日光。

为了评估日光的能源取代潜力，要引入一套照明控制系统。这套照明控制系统由一个或多个与电路开关和照明管制装置相连接的光电管组成。随后进行的模拟可优化该控制系统的参数，力图最大程度用日光替代电照明。这时，可以研究利用日光的有利方面与减少得热的不利方面之间的矛盾。

通过建立由许多开环或闭环所构成的控制系统来探讨集成环境控制问题。其中的一些环路将支配供热、空调、通风及照明等系统；而其他的环路则只用来解决这些传输系统间的冲突。为了改变建筑对调节控制行为的动态响应特性，现在可重新查阅先前讨论过模型的一些内容。

为了研究自然通风的可行性，气体流动网路应与建筑模型连接起来，以代表其相互间的动态作用。控制定义可延伸到包括作用在网路组件的控制作用，如对窗户开口或风阀的模拟。这个模型能用来检查引起空气渗透的缝隙对空气流动的影响。用这种方法能设计出稳健的自然和混合通风方案。

在需要机械通风的地方，为将建筑模型与任何较活跃的网络联系起来，可定义一个元件网络代表HVAC系统。先前建立的控制定义可进一步延伸以提供内部元件控制，并将送风条件与房间参数相连接起来。这样的模型可用来研究整个机组系统或其元部件的运行特性。

为了检查室内空气品质，要离散化建筑模型中的空间，能用CFD来评估内部空间的空气运动和温湿度、空气各成分的分布状况。这些数据联合起来以确定不同空间点的舒适性和空气品质。确定室内空气品质的一个有用的方法是平均空气龄的分布。

当一个模型的元部件，包括建筑物、流体流动及HVAC网络、CFD域等可各自独立处理时，通常将它们置于集成评估之中。这样，各部件间的动态作用能被清楚地表达出来。这里给出的一个例子中，一个房屋模型赋予了代表自然通风流动网络模型、一个代表通风热回收系统的HVAC网络、一个能详细分析空气品质的CFD域和一个精确评估湿度分布的湿气流动模型。

还应增加一个网络来代表建筑的电力环路。这可用于将以前已建立的立面集成光电模型、照明控制模型、HVAC及流体网络模型联合在一起研究由建筑集成可再生能源组件、公共供电系统协调配电系统及作为能源效率措施的各种负荷设施的能源输出使用情况。也可以进行如热电联产、燃料电池等其他技术的评估。

对于专家应用，模型各部分的方案可有选择性地增强使之能详细研究特殊的问题。例如，离散化多层建筑的一部分来研究热桥或新型建筑构件的特性。可加入一个湿气流动网络来支持空隙和表面结露可能性的评估。

通过将靠近墙体表面的逐时温度和相对湿度时间序列（从集成建筑模型、CFD和空气/湿气流动模型中产生）与霉菌种类数据库中的霉菌生长条件范围数据联系起来，可以确定霉菌生长的可能性，并探讨不同的补救措施，如从源头上消除湿气、改变建筑材料或其布置方式，以防止霉菌最适宜生长条件的出现。

项目管理模块要求保留问题的编辑纪录，直到最后还能储存和操作文本及图片。在任何阶段，性能的不同方面的结果应表示为集成性能图的形式。它定量分析一些问题，。这些问题有季度燃料使用量、环境废物排放量、热/光/声舒适性、日光的利用情况、结露的可能性、可再生能源的贡献等。

其核心讯息是，从有简单的控制和指定的通风方式的单一空间到系统健全的、分布式控制的和需要提高方案的整栋大楼任何问题，这些问题可以传送到仿真器。在仿真器中，对多变的性能进行评估，获得信息并报告设计演变过程。通过将不同的技术领域集成在一起，该方法能对恰当的折衷方案进行鉴别。

最重要的是，集成模拟支持团队工作，因为它提供了将不同专业的观点聚集到一起并对最终结果产生影响的机制。另外，如果已知基本模型的计算机模型形式，随着设计前提的变化而有效更新此模型，团队中的不同成员便可从不同地点及时区操作它。这种具有内部规律的方法有可能产生更恰如其分的方案。

目前，这项工作是将寿命周期影响评估（LCIA）方法加到ESP-r系统中去[6]。它可支持与生产、运输、安装、维护及建筑材料的处理有关的能源使用和环境排放物评估。

4. 性能评估方法

为了在实际中达到有效的应用，需要用性能评估方法（Performance Assessment Method 简称PAM）来指导用户。表2列出了一般PAM的各个阶段，每个阶段所要求的工作加了划线。

表2 用于建筑能源模拟的一般的PAM

阶段	相应的工作
1	<u>建立对应于一个基础设计实例的计算机模型</u>
2	用可靠的技术 <u>校核这个模型</u>
3	恰当严格地 <u>确定具有代表性的边界条件</u>
4	用适当的应用程序 <u>进行集成模拟</u>
5	用适当的标准 <u>表达多变的性能</u>
6	<u>将问题的范围识别为标准接受性的函数</u>
7	<u>分析模拟的结果，识别问题的原因</u>
8	<u>将原因与适当的设计方案联系起来，假定修改方案</u>
9	对于每一个假定方案， <u>建立一个参考模型</u> ，得到可评判的解决办法的结果
10	<u>重复第4步的工作</u> ，直到总体性能令人满意

可认为上述PAM具有可选性的知识实例的属性，这种属性取决于用户观点、应用主题及程序容量。以Glasgow市的内部配有可再生能源系统的Lighthouse大楼为例来说明这种方法^[7]。该项目使用了集成模拟方法来确定能源需求与当地可再生能源之间的最佳匹配。

此实例中建立了一个与最佳实际应用相符的基础案例模型，由相关的气候条件来确定其多变的性能。许多能源效率措施应用到该模型中，来决定其降低能源需求和改变需求分布的潜力，使之适应可再利用组元的集成。

图1示出了几条措施产生的影响：先进的玻璃窗、日光照明控制、立面集成的透明绝热、高效的照明及室温设定的动态采暖控制。与原来的设计相比，这些措施能使年能耗降低68%（其中供热能耗降低58%，照明能耗降低80%）。更为重要的是，最终的需求情况更好地与当地配置的可再生能源系统的输出相匹配：光电(PV)组件在混合模式下运行提供电和热；管道风力涡轮（DWT）与集成光电板结合提高了电力的输出能力^[8]。图1示出的是由这两种再生能源技术同时作用于最有利的能源需求情况时的预测电力输出。如图2所示，混合光电组件与Lighthouse大楼南向立面组合在一起，管道风力涡轮安装在南向和西向屋顶的边缘。

集成模拟方法如同它适用于新建筑一样，也适用于建筑的改造。它能用于报告计划编制和资源分配过程。也可用于新方法的研究，如人工环境中微型动力系统的开发。随着高速、低费用计算技术的发展，甚至还有可能将集成模拟与建筑控制系统结合在一起。气象数据及空间条件要求输入到确定的建筑/机组模型中去，这样能预测到任何提出的控制作用所产生的结果。这种方式给控制系统赋予了预测能力，也具有事先纠正错误的能力。

5. 结论

本文描述了由于模拟程序的出现所能进行的一种新的评估的可能性。这种模拟程序能对建筑多变性能产生影响的各个领域进行探讨。目前存在的挑战是需要将技术嵌入到的实时、实际尺度和资源约束的设计实践环节中去。遇到这种挑战，可以认为是对可持续发展规划的一种重大贡献。

参考文献

1. Bartholomew D, Hand J, Irving S, Lomas K, McElroy L B, Parand F, Robinson D and Strachan P 1997 An Application Manual for Building Energy and Environmental Modelling Proc. Building Simulation '97 (Prague)
2. McElroy L B and Clarke J A 1999 Embedding Simulation Within Energy Sector Businesses Proc. Building Simulation '99 (Kyoto)
3. Clarke J A 2001 Energy Simulation in Building Design (2nd Edn) (Butterworth-Heinemann)
4. Hand 1998 Removing Barriers to the Use of Simulation in the Building Design Professions

PhD Thesis(Glasgow: Department of Mechanical Engineering, University of Strathclyde)

5. Larson G W and Shakespeare R 1998 Rendering with Radiance - The Art and Science of Lighting Visualization(San Francisco: MorganKaufmann)

6. Citherlet S, Clarke J A and Hand J 2001 Integration in Building Physics Simulation Energy and Buildings 33 (5) 451-61.

7. Clarke J A, Johnstone C M, Macdonald I A, French P, Gillan S, Glover C, Tatton D, Devlin J and Mann R 2000 The Development of Photovoltaic Components Within the Lighthouse Building in Glasgow Proc. 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference (Glasgow)

8. Grant A D and Dannecker R 2000 A Hybrid PV/Wind Energy Module for integration in Buildings Proc. 16th European Photovoltaic Solar Energy Conf. (Glasgow)