



建 筑 节 能 技 术 与 实 践 丛 书

江 亿 主 编

建筑环境系统模拟分析方法—DeST

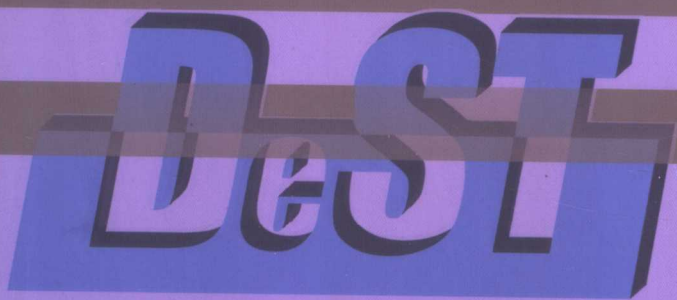
清华大学 DeST 开发组 著

Building Energy Efficiency

Technology and

Application

中国建筑工业出版社



建筑节能技术与实践丛书

Building Energy Efficiency Technology and Application

江 亿 主编

建筑环境系统模拟分析方法—DeST

Building Environmental System

Simulation and Analysis—DeST

清华大学 DeST 开发组 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑环境系统模拟分析方法—DeST/清华大学 DeST 开发组著. —北京:
中国建筑工业出版社, 2005

(建筑节能技术与实践丛书)

ISBN 7-112-07921-7

I. 建... II. 清... III. 建筑物—环境管理—应用软件, DeST

IV. TU111

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 145048 号

建筑节能技术与实践丛书

Building Energy Efficiency Technology and Application

江 亿 主编

建筑环境系统模拟分析方法—DeST

Building Environmental System

Simulation and Analysis—DeST

清华大学 DeST 开发组 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京嘉泰利德公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 29 字数: 600 千字

2006 年 1 月第一版 2006 年 1 月第一次印刷

印数: 1—3,000 册 定价: 72.00 元

ISBN 7-112-07921-7

(13875)

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)

本社网址: <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

内 容 提 要

计算机模拟技术已成为预测、分析和评价建筑热湿环境的主要手段，广泛应用于建筑及空气调节系统设计、运行管理、故障诊断等方面，并取得了极大的成功。

本书以清华大学建筑技术科学系开发的建筑环境模拟软件——DeST 为基础，对建筑环境的模拟方法进行了系统、全面的介绍和论述。全书共分 4 篇 15 章，分别介绍了 DeST (Designer's Simulation Toolkits) 的发展历史、主要特点和可应用的领域；建筑物本体热状况的动态逐时模拟方法及其验证过程；建筑热环境控制系统的全工况模拟方法；建筑模拟软件在实际工程中的应用。本书的附录中还补充介绍了 DeST 的软件结构，以更好地指导读者使用 DeST。

本书可供建筑节能技术研究的科研工作者、住宅和公共建筑节能设计的工程技术人员使用。对从事建筑环境计算机模拟软件设计的软件设计者也有很好的参考价值。

* * *

责任编辑：姚荣华 田启铭 石枫华

责任设计：赵 力

责任校对：王雪竹 张 虹

建筑节能技术与实践丛书

编委会

主 编 江 亿

编 委 朱颖心 张寅平 付 林 田贯三

薛志峰 林波荣 刘晓华 燕 达

《建筑节能技术与实践丛书》总序

能源是中国崛起的动力。要贯彻十六大报告中全面建设小康社会的历史任务、保证中国经济 2020 年比 2000 年翻一番，就不得不先解决能源问题。不容置疑的是，中国能源发展正面临着越来越严峻的挑战，能源供不应求和末端低效利用的矛盾越来越突出。而长期以来受“先生产、后生活”的计划经济思想影响，我国政府一直偏重于工业节能而忽略了建筑节能。据统计，到 2000 年底，能够达到建筑节能设计标准的建筑累计仅占全部城乡建筑总面积的 0.5%，占城市既有采暖居住建筑面积的 9%，绝大部分新建建筑仍是高能耗建筑。

需要注意的是，伴随着我国的城市化的飞速发展，建筑能耗所占社会商品能源总消费量的比例也持续增加，对国民经济发展和人民的正常工作的影响日益突出。例如，我国空调高峰负荷已经超过 4500 万 kW，相当于 2.5 倍三峡电站满负荷出力。由于这期间工业结构调整导致电力消费持续下降，空调负荷的增加才没有使得电力供应不足的问题过于凸现。然而，随着工业结构调整的完成和经济的继续增长，工业生产能耗的降低将难以补足建筑能耗的飞速增加，建筑能耗增加导致能源短缺的问题将更加突出。据统计，目前建筑能耗所占社会商品能源总消费量的比例已从 1978 年的 10% 上升到 25% 左右。而根据发达国家经验，随着我国城市化进程的不断推进和人民生活水平不断提高，建筑能耗的比例将继续增加，并最终达到 35% 左右。因此，建筑将超越工业、交通等其他行业而最终成为能耗的首

位，建筑节能将成为提高全社会能源使用效率的首要方面。

建筑节能的经济效益和社会效益无疑是十分重大的，然而长期以来单纯依靠建筑节能设计标准中强制性条文实施却难以得到推动，这既有政策法规的原因，也与缺乏深入地开展科学建筑规划与设计、加快节能新技术的开发及应用有关。

20 世纪 90 年代以来，清华大学建筑技术科学系在优化建筑规划设计（从小区微气候模拟预测优化到建筑单体节能模拟设计优化）、加强新型建筑围护结构材料和部品与应用与开发、高效通风与排风热回收装置、热泵技术、降低输配系统能耗、新型空调采暖方式开发（如湿度温度独立控制系统）、区域供热与能源规划研究、建筑式热电冷三联供系统研究等领域开展了全面的科研和实践工作，并得到了国家自然科学基金委、科技部、建设部、北京市科委、北京市政管委、北京市发改委等各级部门的大力支持，完成了大量理论成果和应用成果。本套系列丛书即是这些成果的纪录。

清华大学近年来承担的与建筑节能相关的大型项目

项目名称	项目来源	期限
住区微气候的物理问题研究	自然科学基金委重点项目	1999 ~ 2004
与城市能源结构调整相适应的采暖方式综合比较	建设部	2001 ~ 2003
北京市采暖方式研究	北京市政府科技顾问团项目	2002 ~ 2004
新建建筑能耗评估体系与超低能耗示范建筑的建立与实践研究	北京市科委	2002 ~ 2004
区域性天然气热电冷联供系统应用研究与示范	北京市科委	2002 ~ 2004
绿色奥运建筑评估体系及奥运园区能源系统综合评价分析	北京市科委	2002 ~ 2003
奥运绿色建筑标准研究	科技部 奥运十大科技专项之一	2002 ~ 2003
SARS 在空气中的传播规律	自然科学基金委	2003
湿空气处理过程的热力学分析及应用	自然科学基金委	2003 ~ 2005
溶液除湿空调系统应用研究与示范	北京市科委	2003 ~ 2004
天然气末端应用方式研究	中国工程院咨询项目	2004 ~ 2005
降低建筑物能耗的综合关键技术研究	科技部 “十五”科技攻关项目	2004 ~ 2006

建筑节能是一个系统工程，应该立足于我国不同建筑的用能特点和建筑的全生命周期过程，在规划、设计、运行等各个阶段通过技术集成化的解决手段，降低建筑能源需求、优化供能系统设计、开发新型能源系统方式、提高运行效率。基于此，本套丛书对相应的技术方法、要点进行了系统全面地阐述。其中既包括前沿基础技术研究成果的综述与探讨，也提供了工程应用背景强的技术成果总结；既突出了先进技术研究在建筑节能中的指引作用，也注重对一些经验性成果进行总结和罗列来直接指导工程设计。特别地，还通过“清华大学超低能耗楼”这一集成平台，把各种技术的集成应用给予了示范。

本套丛书能顺利出版，得到了中国建筑工业出版社张惠珍副总编和姚荣华、田启铭、石枫华编辑的大力支持，在此表示深深的谢意。

衷心希望本套丛书的出版能对我国建筑节能工作的全面开展有所助益。

江 亿

2005 年 3 月

前 言

建筑的根本目的是为居住者提供舒适及便利的生活工作环境。其中，室内热湿状态是影响环境的主要因素。居住者长时间居住后，在对建筑物的评价中，室内的热湿状态是被评判的主要内容之一。建筑能源消耗目前越来越被认为是很严重的问题，而建筑能耗中的很大一部分都是被采暖、通风和空调系统所消耗，用来营造室内的热湿环境。因此怎样获取健康舒适的室内热湿环境，怎样设计和运行节能的室内热湿环境系统，已成为民用建筑追求的重要目标。

室内热湿环境受三个主要因素制约：建筑本体的性能，建筑物中采暖空调通风系统的构成及其运行，建筑物中人的行为（即人对建筑的各种作用和影响）。这三个因素通过各种方式从多方面影响室内热湿状态与能源消耗，并且相互影响，相互制约，同时由于建筑物的热湿状态在很大的程度上受室外气象条件的影响，还使得这种相互的影响与制约随气象条件而变化，一年四季各有不同。这样的复杂过程用以往的常规方法很难准确地定量分析，从而也就不能对设计和运行做科学的评价与优化。自 20 世纪 70 年代起，计算机模拟分析的方法就开始应用于这一领域，解决上述定量分析、预测和优化的问题，并且取得了很大的成功。利用计算机强大的计算功能对上述诸因素间的相互关系与作用随时间的变化进行仿真，从而清晰地向人们展示出可能出现的各种现象，帮助人们优化设计，改善运行。计算机模拟分析成为预测、分析及评价建筑热湿环境的主要手段。

20 世纪 70 年代初我国还处在“文化大革命”中，无参与这一工作的可能。“四人帮”倒台后，百业复兴，各高校暖通空调与建筑热物理专业开始恢复科研工作并开始招收研究生。很有趣的现象是，当时全国近半数的此领域的研究生都开始了建筑热模拟方面的研究，建筑热模拟成为当时很“火”的研究课题，我也参加了这个研究队伍。1980 年在成都的全国暖通空调大会上，我发表了那篇“状态空间法计算建筑动态热过程”的论文，感谢单寄平教授、孙延勋高工不辞辛苦，审阅文章，支持这篇“初生牛犊”的作品。我的导师王兆霖教授更是冒暑期之炎热，亲自用手动打字机，把这篇文章译成英文，使之成为后来在 ASHRAE Transactions 发表的那篇“State space method”的文章。这就是清华建筑热环境研究的开始。一株小苗是这样在各位大家的扶植、栽培下成长起来的。

20 世纪 80 年代中期，在彦启森教授的组织下，我们成立了建筑热模拟研讨小组，并着重开始了从谐波法出发，建立在房间热平衡基础上的计算方法和研究分析工作。赵庆珠教授、陈清焰同学（现美国普渡大学教授）、常安中同学（现就职于美国 Applied materials）都是这一小组的成员，为此做了开创性的工作。1988 年开始我作为访问学者在英国 Building Research Establishment 工作，在 Dave Bloomfield 先生指导下，从事建筑热模拟方面的工作。Bloomfield 先生当时主持“IEA Annex 21: Thermal modeling”大型国际合作项目，我得以参加这一项目，深入了解世界各国建筑热模拟研究状况，直接参与当时各个建筑热模拟软件的注释、评价、验证工作，并与各国同行建立了广泛的联系，这对后来 DeST 的开发推广起了重要作用。

1990 年开始，组建研究开发小组开始了 DeST 的初期开发工作。主要骨干为洪天真博士（现在美国继续在建筑热模拟这一领域耕耘）、张金乾先生（目前是国内建筑 CAD 软件的大师级开发人员）、魏庆芃博士、吴如宏先生、陈锋博士和徐珍喜硕士等后来也陆续参加到这一小组来。当时开发出的建筑模拟版本命名为 BTP（Building Thermal Processes），是世界上能够在图形化界面上描述建筑，利用房间热平衡法作逐时动态热分析的早期软件

之一。这一软件在当时通过了 IEA Annex 21 组织的各种验证,被评价为“最好的几个结果之一”。在这期间朱颖心教授也参加了一些工作,尤其是和我共同提出“自然室温”的概念,为建筑物和建筑环境控制系统的解耦问题,开始了前期的探讨。

1995 年开始,我们参加了由比利时列日大学 Jean Lebrun 教授领导的 IEA Annex 34 国际合作研究项目:“建筑模拟分析:从研究到工程应用”。为了解实际的工程应用问题,我在工作会议上提出了用模拟分析解决建筑环境系统设计分析的基本方法:“Design by simulation”(见 Proceedings of IEA Annex 34 workshop, 1996, 华沙)。这一方法奠定了以后进一步开发建筑环境控制系统设计过程中的模拟分析方法的基础。陈锋博士、薛志峰硕士成为完善和实践这一方法的最先开拓者,陈锋也成为在这一研究框架下,第一个获得博士学位者。

1998 年陈锋完成了在比利时的学习与合作研究后,正式组建了专门的研究开发小组,正式开始了建筑和环境控制系统模拟分析软件开发与应用推广的全面研发。陈锋博士倡议小组和软件都命名为 DeST (Designer's Simulation Toolkits)。命名为 Toolkits 而不是一个单一软件,可能就是要把 DeST 开发成为面对各种设计过程中模拟分析问题的系列的应用软件吧。到 2000 年 DeST 1.0 完成。当时的主要开发人员为:陈锋博士,邓宇春硕士,吴如宏,翟超勤,夏建军等,并于 2000 年通过教育部组织的鉴定。在预先准备的鉴定意见草稿中,我们写上了“国际先进水平”,可是几位鉴定专家认定,此软件是“国际领先水平”。这可能是界内对国产自主技术开发的模拟软件的诚心支持与殷切希望吧。值得一提的是 1999 年华南理工大学的孟庆林教授直接找到我,希望参加开发和应用 DeST 的工作,由此成立了 DeST 南方研究中心,这是 DeST 向外迈出的第一步。南方中心在孟教授的领导下,持续到今,在 DeST 开发和应用方面都做出了重要贡献。

2000 年至 2001 年 DeST 小组由邓宇春主持。主要成员为:邹立军、林涛、吴如宏、赵滨、翟超勤、王福林、夏建军、杨瑞等。在这一时期,他

们重新整理了整个 DeST 结构, 开发出 DeST 2.0, 使 DeST 向成熟的应用软件方向又前进了一大步。2001 年, 由于各种原因, 邓宇春等研发骨干离开 DeST, 使当时的 DeST 工作陷入危机。此时刚刚开始研究生学习的燕达同志临危受命, 重组队伍, 主持 DeST 工作, 使 DeST 走上新的高速发展期。在 2.0 框架的基础上, 按照“Design by simulation”的思路, 终于真正完成了 DeST 的各个主要部分, 形成了包括建筑、采光、通风、系统方案分析、设备模拟、冷站、水网、经济分析等各部分内容的模拟分析软件, 实现并超过了最初的框架构想, 使几代人的理想终于得以实现。参加这一阶段工作的有燕达、吴如宏、简毅文、谢晓娜、宋芳婷、张晓亮、张野、刘烨、诸群飞、罗涛、张萌、高岩、宋兆培、庄旻娟和吴彦廷等。

DeST 的飞速发展得益于全社会对建筑节能重视程度的日益提高。自 2001 年起, 随着生态住区、绿色住区建设的需要, DeST 开始承担大量住宅节能分析评估的工作。这些工作的深入开展使我们认识到住宅的节能分析和节能设计对模拟分析技术的真正需求, 从而修正我们的工作计划, 使研发工作更适合工程的需要。2002 年完成并鉴定了专门用于住宅分析与优化的 DeST-h 版, 这是第一个得到广泛使用的 DeST 版本, 目前国内至少有 100 名以上的经常使用者, 并完成了超过 1000 万 m^2 建筑面积的工程分析。随着大型公共建筑节能问题受到全社会的日益关注, 对建筑和环境控制系统的全面模拟分析成为社会的广泛需求。尤其是对新建建筑的节能评审与系统分析, 成为 DeST 的又一主要应用领域。目前完成的 DeST-c (DeST 商建版) 正是为适应这一需求而研究开发。

在此期间, DeST 开发组相继与北京建筑设计研究院、上海建筑科学研究院以及日本名古屋大学等国内外著名的建筑环境科研机构建立了密切的合作关系。在大家的共同努力下, DeST 由一个科研型的软件逐步走向了实际工程的应用, 上了一个大的台阶, 在此一并表示感谢, 并衷心希望彼此之间的合作能够更加深入, 也希望将来能有更多的人或单位参与到这项工作中来。

世界上有不少建筑热模拟分析软件，但主要都是由政府给与巨大投资，进行研究开发。这样一个大型软件，涉及大量的基础研究、算法、测试、验证、软件编程与维护等大量工作，而很难通过软件销售或咨询服务得到回报，因此没有多年持续的资金支持是很难维持的。世界上还没有一个从头开发的大型建筑热模拟软件无政府资金支持，完全靠商业运作完成，然而 DeST 确是一个成功的例外。DeST 的全部开发过程至今没有得到任何科研经费的支持，研究开发完全依靠各种其他研究与对外服务经费的结余，更依赖于全部研发人员多少年来对事业的追求与敬业精神——为了实现一个梦想，为了让我们这个领域有一个自主知识产权的基础性软件，为了使我们今后在建筑节能和建筑环境控制这一领域的工作能走在世界的前列。现在每年全世界新建的房屋 1/3 以上都在中国，中国是建筑发展最快的国家，也应该有走在世界最前列的建筑节能和建筑环境控制的研究分析手段。

感谢《暖通空调》杂志王曙明主编，毅然同意开设连载，连续 15 期刊登 DeST 介绍。在王主编的支持和督促下，我们终于完成了这一庞大的工程，同时也系统地整理了 DeST 的相关文档。在这 15 期连载内容的基础上，完成本书。这是目前 DeST 组全体同志集体努力的结果，其中：

第 1 章执笔人：燕达 谢晓娜 宋芳婷 江亿

第 2 章执笔人：谢晓娜 宋芳婷 燕达 江亿

第 3 章执笔人：谢晓娜 宋芳婷 张晓亮 刘焯 江亿

第 4 章执笔人：谢晓娜 高岩

第 5 章执笔人：张野 谢晓娜 罗涛 江亿

第 6 章执笔人：宋芳婷 诸群飞 燕达 江亿

第 7 章执笔人：张晓亮 简毅文 谢晓娜 燕达 江亿

第 8 章执笔人：燕达 宋芳婷 江亿

第 9 章执笔人：燕达 张野 江亿

第 10 章执笔人：燕达 夏建军 刘焯 张晓亮 江亿

第 11 章执笔人：夏建军 燕达 江亿

第 12 章执笔人：刘烨 燕达 江亿

第 13 章执笔人：张野 章宇峰 宋芳婷 燕达 江亿

第 14 章执笔人：张晓亮 朱光俊 江亿

第 15 章执笔人：张野 燕达 刘烨 江亿

附录执笔人：诸群飞 吴如宏 谢晓娜

在此，也同时感谢社会各界多年来对 DeST 工作的无私支持，没有这些用户的鼓励、使用、帮助和督促，很难想像 DeST 能发展到今天，本书应是回报各界 DeST 朋友的一份礼物。

江 亿

清华大学建筑技术科学系

2005 年 8 月 9 日

目 录

第 1 篇 综述

第 1 章 建筑模拟技术与 DeST 发展简介	2
1.1 建筑模拟的意义	2
1.2 建筑模拟技术的发展	3
1.3 建筑模拟工具介绍	4
1.4 DeST 的主要特点	7
1.5 DeST 的软件结构	9
1.6 DeST 的主要应用领域	19
1.6.1 建筑及空调系统辅助设计	20
1.6.2 建筑节能评估	21
1.6.3 科研领域研究	22
1.7 本书主要内容介绍	23

第 2 篇 建筑动态热过程模拟

第 2 章 建筑动态热过程模型	26
2.1 建筑热过程模拟的主要问题	26
2.1.1 建筑热过程模拟的物理模型	26
2.1.2 建筑热过程模拟的数学模型	28
2.2 房间热平衡方程组的建立及热特性系数的求解	31
2.2.1 围护结构的热平衡方程组	32
2.2.2 室内家具的热平衡方程组	36

2.2.3	室内空气的热平衡方程	37
2.2.4	房间的总热平衡方程组	38
2.2.5	房间热特性系数的求解	41
2.3	单房间温度和负荷的求解	43
2.3.1	房间温度的求解	43
2.3.2	房间负荷的求解	45
2.4	多房间温度和负荷的求解	46
2.5	DeST 热模型与其他软件热模型之间的比较	50
2.5.1	求解房间不透明围护传热的方法比较	50
2.5.2	处理房间各围护内表面之间以及与空气热交换的方法比较	51
2.5.3	处理建筑物相邻房间之间热交换的方法比较	52
第 3 章	与地面相邻区域动态传热问题的处理	54
3.1	问题提出	54
3.2	地下传热问题的研究现状	55
3.2.1	地下传热问题的研究方法	55
3.2.2	模拟软件中地下传热问题的处理方法	56
3.3	地下区域动态传热物理过程分析	58
3.3.1	地下区域动态传热问题的数学模型	58
3.3.2	室外地表面的影响	60
3.3.3	室内底层地面温度波动的影响	64
3.3.4	相邻室之间通过地下区域的传热	70
3.4	DeST 的具体处理方法	70
3.5	底层房间模拟结果分析	71
3.5.1	建筑模型描述	71
3.5.2	模拟结果	72
3.6	总结	74
第 4 章	热桥动态传热问题的处理	75
4.1	概述	75
4.2	热桥附加热损失动态计算模型	77
4.2.1	热桥传热模型的状态空间表达	78
4.2.2	热桥附加传热量矩阵模型	83
4.2.3	热桥附加传热量低阶矩阵	85

4.3	热桥附加热损失动态计算模型的验证	87
4.4	DeST 考虑热桥后房间热特性系数的修正	90
第5章	建筑热过程中的太阳辐射相关模型	93
5.1	概述	93
5.1.1	太阳辐射对建筑热环境的影响过程	93
5.1.2	目前模拟软件对建筑阴影及透过体系计算处理	95
5.1.3	DeST 对建筑阴影和透过体系的处理	96
5.2	照射到建筑外表面的太阳辐射计算	97
5.2.1	太阳直射辐射计算	97
5.2.2	散射辐射计算	102
5.3	透过体系	104
5.3.1	太阳辐射量的透过与吸收计算	105
5.3.2	传热与辐射换热模型	112
5.3.3	窗户的 K-Sc 模型	114
5.4	总结	116
第6章	影响建筑热过程的各种外界因素的取值方法	117
6.1	概述	117
6.2	室外影响因素的取值方法	118
6.2.1	气象参数的取值方法现状	119
6.2.2	逐时气象数据的取值方法	120
6.2.3	动态模拟分析用逐时气象数据	122
6.2.4	典型年逐时气象数据的检验	126
6.3	室内发热量的取值方法	129
6.3.1	建筑物室内发热量的描述方式	129
6.3.2	室内发热量的取值方法	131
6.4	总结	141
第7章	建筑热环境动态模拟结果的验证	142
7.1	验证方法	142
7.2	理论验证	144
7.2.1	稳态验证	145
7.2.2	谐波反应法验证	148
7.3	程序间对比验证	152