

同济大学机械工程学院

硕士学位论文

中庭建筑负荷模拟方法的研究

姓名：李玉明

申请学位级别：硕士

专业：供热、供燃气、通风与空调工程

指导教师：潘毅群

20090301

摘要

近年来, 采光中庭因其建筑美学及自然采光和供暖的特性深受人们的欢迎。但是, 由于中庭空间的大空间和大量采光引起的中庭空间内复杂的热环境, 使我们很难对中庭建筑的负荷进行准确计算。因此本文旨在寻求一种用能耗模拟软件 EnergyPlus 准确模拟计算各类中庭建筑负荷的方法。

首先通过文献资料搜集各类中庭信息, 确定出影响中庭负荷的因子, 根据这些影响因子对中庭建筑进行分类。然后对每类中庭建筑分别建立 CFD 模型和能耗模型, CFD 模型用于模拟中庭空间的温度分层, 能耗模型则用于模拟计算中庭空间的负荷。根据 CFD 模拟结果归纳出模拟计算中庭空间负荷的简化方法(包括充分混合模型、单梯度温度模型和自定义温度模型等), 并在能耗模型中应用各简化方法计算中庭空间的负荷。将由 CFD 模拟得到中庭空间的温度分层输入自定义温度模型, 模拟计算出中庭空间负荷并作为中庭空间最接近实际负荷的结果, 然后比较各简化方法模拟结果的准确性, 最后总结出适用于一定体型中庭建筑的负荷模拟简化计算方法。

为了验证这种模拟计算方法的准确性, 本文以某一实际的中庭建筑为研究对象, 在典型夏季日对该建筑进行中庭空间温度分层及室内负荷使用情况、建筑逐时负荷的现场测试, 并用实测数据作为模拟的输入参数, 以保证模型的准确性, 从而验证该模拟计算方法的准确性。

关键词: 中庭建筑, 采光玻璃顶, 温度分层, 室内空气模型, 能耗模型

ABSTRACT

In recent years, highly glazed atriums are favorable to architectural aesthetics and to taking advantage of daylighting and solar heating. However, the estimation of the building load and energy consumption of an atrium building is difficult because of the complex thermal phenomena occurred in the atrium space due to its large size and high solar gains through the fenestration. The study aims to find out the methods of conducting accurate simulations of the cooling loads of various types of atriums, using whole building energy simulation tool – EnergyPlus.

Cases of atrium buildings are collected via literature review and the factors that have impact on the cooling loads of atriums are defined in order to classify the atriums into various categories. For every category of atrium buildings, CFD models and energy models are developed. CFD models are built to simulate the air temperature stratifications in the atriums while energy models are built to calculate the cooling loads of the atriums. Three simplified modeling methods of simulating the cooling loads of atriums using different room air temperature patterns are summarized and applied to EnergyPlus. The non-dimensional height room air models using CFD results as temperature inputs are defined as the baseline models. The simulation results of the simplified modeling methods are compared to the baseline models to find the most accurate method for every category of atrium buildings.

To validate the methods, an actual atrium office building is tested on site of its cooling load and air temperature stratification in atrium space on a typical summer day. EnergyPlus non-dimensional height room air model is constructed to obtain the cooling load of the entire building, using both site measured and CFD air temperature distributions as the inputs. The good consistence between the measured and the simulated results validate the accuracy of the non-dimensional height room air model. Then the simulation results using the simplified modeling methods are compared with the test results to find relatively more accurate cooling load simulation method for atrium office buildings. Finally, appropriate methods of simulating different types of

atrium buildings are suggested in this paper.

Key Words: atrium building, glass-glazed roof, temperature stratification, room air model, energy model

学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版；学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所提交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

第 1 章 绪论

1.1 中庭建筑的研究背景

随着科学技术的日新月异,能源短缺已不容忽视,节约能源受到了世界性的普遍关注。建筑节能是当今人类社会面临的生存与可持续发展的重大问题,是可持续发展概念的具体体现、是经济发展的需要、也是减轻大气污染保护生态环境的需要、更是改善建筑热环境的需要。所谓建筑节能,最初是指减少建筑物中能量的流失,现在则称为“提高建筑物中的能源利用率”,即在保证提高建筑物舒适度的前提下,合理使用能源,不断提高能源利用效率。随着经济、社会、科技的发展和城市化进程的加快,建筑高层化的趋势也越来越明显,中庭这种建筑形式也越来越普及,在办公大楼、酒店、商场随处可见中庭的踪影,它设置有方便的垂直交通设备而成为整幢建筑的交通枢纽空间,同时也作为人们憩息、交往、观赏、娱乐、餐饮等活动的中心场所。但是中庭空间由于其大空间及大采光面积导致室内热环境的特殊性,导致中庭建筑的高能耗,在当今提倡节能的社会环境下,中庭建筑由于其高能耗引起了人们的重视。

一方面,中庭的大面积玻璃采光围护结构在透射阳光的同时,阻挡了来自室内的长波辐射,有效防止了室内热量的外溢,形成温室效应,有利于提高冬季建筑室内温度,降低采暖费用;中庭空间作为一个空气间层,减弱了室外风、雨、烈日的剧烈变化,成为一个从室内向室外的缓冲与过渡空间,利于室内小气候保持稳定。另一方面,在夏季供冷期,由于采光中庭具有较大的玻璃采光面,而玻璃的透射系数大,热阻小,隔离室外物理环境的能力较弱,成了所在建筑物中单位面积耗能最大的部分之一。因此,采光中庭是影响建筑室内环境与建筑能耗重要因素。

传统的负荷计算和能耗模拟方法是假设单一房间内的空气状态为充分混合,整个房间内的空气处于同一状态。这种模拟计算方法对于典型的混合送风的空调房间是比较适用的,但是对于一些特殊空调送风或运行模式的房间或高大空间,譬如中庭空间、地板送风、自然通风等,由于室内气流造成了室内空间温度分布的不均匀性,仍然采用这种充分混合模型的模拟方法将会造成很大

的计算误差，因此不再适用。可见，寻找一种能够准确模拟计算非传统混合送风方式的室内温度分布不均匀的空间负荷的方法非常有必要。

中庭的热环境由于受诸多因素影响相当复杂，传统的空调设计方法根本不能满足实际工程设计的需要，同时设计人员缺乏量化的辅助分析工具，中庭热环境的设计和空调效果往往不理想，不但居住者的舒适性得不到满足，同时也造成了大量的能源浪费。这种情况和中庭设计的初衷无疑是背道而驰的。因此，寻求一种能准确模拟计算中庭负荷的方法是解决中庭空调设计的根本。

1.2 国内外中庭建筑能耗的研究现状

1.2.1 国外相关研究状况

中庭的大空间、大面积采光等特点带来其能耗状况的特殊性引起人们的关注。学者们通过对中庭室内环境的实地测量发现，中庭空间内空气温度随垂直高度升高而增加，这种温度分层在夏季比冬季更加明显；若在中庭顶部开启窗扇通风，由于室内外空气压力差，将引起较强烈的自然通风，并导致中庭室内空气温度下降，上下温差减弱；冬季中庭内空气温度明显高于室外，夏季，在缺乏有效通风、遮阳措施情况下，室内过热可能性很大。

中庭室内气候的特殊性，源自中庭空间内发生的温室效应和烟囱效应这两个物理热过程。温室效应，指阳光辐射透过中庭的大面积玻璃进入室内，加热室内地面和墙体，地面和墙体被加热后发射出的长波辐射却无法穿透玻璃，被反射回室内，导致中庭内空气温度迅速升高。烟囱效应是指由于中庭内空气温度高于室外，导致室内随高度方向的气压差较室外低，从而形成气流不断从中庭底部进入，顶部排出现象。

随着研究的深入，中庭能耗研究逐渐由定性认识向定量分析方向发展。定量分析的研究方法主要包括两种，模型实验和数值模拟。模型实验一般采用缩小的实体模型，对其中发生的热过程进行精确的测量分析。但模型实验研究周期长，搭建模型费用昂贵，同时相似准则要求的实验条件往往难以实现。因此仅局限于个例。

数值模拟是随着计算机技术和湍流模拟技术发展起来的新兴研究方法，利用计算机软件模拟中庭建筑的实际热环境及其能耗并进行分析。这种研究方法

具有很多优点:

(1) 计算机上可以较快较方便的建立各种气候条件下不同类型的中庭模型, 避免了建造真实建筑, 不仅使研究更加系统, 也大大节省了研究费用;

(2) 中庭内部环境数据的获得, 不必再依靠复杂的专业测量设备, 可由计算机直接输出, 大大缩短了研究周期。

国外很多学者进行了数值模拟研究: 瑞典学者 Maria Wall^[1]基于 DEROB-LTH 软件的模拟研究发现, 在瑞典气候条件下, 中庭的采光方式(垂直采光、水平采光)、玻璃的物理性能、中庭内建筑材料蓄热性能对中庭空间吸收太阳辐射影响很大, 吸收率可在 30%到 90%间变化; 相对而言, 中庭建筑所在地理方位、中庭采光朝向(东、南、西、北)、季节变化对吸收率影响较小。加拿大学者 Morad R. Atif^[2]等基于加拿大渥太华市及美国加利福尼亚州弗雷斯诺市(Fresno)的气候条件下的 TRNSYS 软件模拟研究表明, 中庭空间的采光面积、中庭内墙体材料蓄热性能对中庭室内热环境影响很大, 同时, 对于垂直高度较低和采光面面积较大的中庭, 这种影响更为明显。Guohui Gan 和 Saffa B. Riffat.^[3]对某一具体的中庭建筑利用软件 Fluent 对中庭空间进行气流及温度分布的模拟研究, 并将模拟结果与实测比较得到了较好的一致性; L. Yi, W.K. Chow, Y.Z. Li, R. Huo^[4]研究送风口位置对有机机械通风的中庭空间的热环境的影响; Abdelaziz Laouadi 和 Morad R. Atif^[5]对加拿大一栋三层的中庭建筑的热环境进行了模拟计算和现场测试的研究比较; Özgür Göçer, Aslihan Tavail 和 Ertan Özkan^[6]利用软件 EnergyPlus 和 Fluent 对伊斯坦布尔的一栋典型办公建筑进行了能耗和中庭温度分层的模拟, 分析了设计日中庭建筑的热环境, 结果表明中庭建筑的遮阳可以降低空调能耗, 同时中庭建筑的灯光负荷由于中庭采光可以大大减少; 国外也有学者对中庭建筑的采光进行研究^[7], 为当前中庭建筑的采光设计提供估测方法; Brent Griffith 和 Qingyan (Yan) Chen^[8]对存在温度分层房间的负荷及能耗计算进行了详细的研究, 但是研究对象房间的高度基本在 3 米左右, 并未涉及中庭空间的研究; Ian Beausoleil-Morrison^[9]通过耦合计算流体力学与建筑能耗模拟来实现室内气流及内表面对流的模拟; E. Djunaedy, J.L.M. Hensen 和 M.G.L.C. Loomans^[10]通过实例来论证外部耦合 CFD 和能耗模拟软件的优点等; Atila Novoselac^[11]亦提出耦合能耗模拟软件和计算流体力学软件的方法并论证其准确性。

1.2.2 国内相关研究状况

关于采光中庭的研究,我国已有一定的理论基础,主要包括中庭的物理环境、围护结构材料性能(如玻璃)、通风设计、烟气控制和以及不同气候区域中庭的节能设计研究和空调设计方法等等,如彭小云^[12]、^[13]等通过测试调查、分析现有中庭的热环境状况,研究现有中庭热环境状况形成的各种原因;白雪莲^[14]引用国外通过计算机模拟的具体实例,说明中庭体积、中庭顶部玻璃面积和中庭墙壁材质对中庭能耗的影响;田先锋^[15]通过对中庭热舒适度的分析,提出前期的建筑设计阶段应充分考虑气候、中庭空间形态、顶部处理、自然景观和玻璃材料对中庭舒适度和节能的影响,并提出相应的设计策略;王欢^[16]从空间形态、室外环境、实体建筑、和采光界面研究采光中庭空间形态构成影响因子,探讨其对不同类型采光中庭空间形态构成影响的强度以及与能耗控制的关系,并在归纳整理出影响因子后,对它们进行了常量影响因子和变量影响因子的分类;雷涛^[17]运用计算机模拟方法定量分析了中庭空间的通风、能耗等问题,对不同类型中庭建筑的室内热环境和夏季自然通风进行了研究,并提出中庭空间的生态节能设计策略;诸群飞^[18]归纳了影响中庭热环境的各种因素,分析了中庭建筑的热过程以及中庭内部空气流动和传热过程的数学模型,提出了一种中庭热环境联合动态模拟的新方法,解决了建筑热过程模型和空气流动传热模型之间的耦合问题。

1.2.3 目前国内外相关研究的不足

(1)采用数值模拟进行量化分析是当前中庭能耗研究的重要方法,这一方面使相关研究更加精确化、系统化,同时也为夏热冬冷地区的中庭节能设计这一难题提供了研究途径。但是国内对于采用数值模拟量化分析中庭建筑中庭空间的热环境及能耗研究较少。而国外相关研究,其结论是否适用于我国气候条件,有待检验;

(2)国内外研究多局限在对具体中庭建筑的研究或者定性分析研究,而少有定量的分析中庭建筑的温度分层及负荷状况;

(3)虽然国内外对中庭研究作了大量工作,但是系统性的归纳总结仍然不足,也没有提出准确模拟中庭建筑负荷的方法。

1.3 本课题的研究方法、目的、内容及意义

1.3.1 本课题的研究方法和目的

本课题将运用计算机模拟方法结合现场测试对中庭建筑温度分层及负荷进行研究，目的在于通过量化分析的方法，模拟中庭空间的室内热环境和负荷，确定影响中庭建筑温度分层和负荷的体型因子，从而提出准确模拟中庭建筑负荷的方法。

1.3.2 本课题的研究内容

本文研究内容主要包括三大部分：1、用于负荷模拟计算的建筑中庭空间的分类；2、计算机模拟；3、现场测试。为了对中庭建筑提出准确模拟其负荷的方法，需首先对中庭建筑进行用于负荷计算的分类，初步确定影响中庭建筑负荷的体型因素；然后，采用计算流体力学软件 Fluent 对上海地区典型中庭建筑中庭空间热环境进行模拟，得出中庭温度分层的结果，应用于能耗模拟分析软件 EnergyPlus 中进行负荷模拟比较分析不同的中庭模拟方法的负荷模拟结果，以确定适用于一定体型的中庭建筑的负荷模拟方法；现场测试主要用于对计算机模拟结果的验证，包括对中庭建筑中庭空间温度分层的测试和中庭建筑内部负荷及空调负荷的测试。

本文研究的整体思路如图 1.1 所示。

1.3.3 本课题的研究意义

集总参数法是目前工程上使用的最为广泛的一种负荷计算方法。它假设中庭内部温度均匀，整个中庭视为一个温度节点对中庭进行模拟计算。一般设计人员采用的冷负荷系数法就是一种单日计算的集总参数法。这种方法的优点是计算简单，省时，然而这种方法过于粗糙，其基本假设没有描述中庭内部温度分布状况，不符合中庭的特性。因此，将中庭的高大空间看作是温度均匀空间的负荷计算方法与实际情况有很大差别，会造成较大的计算误差。

本文从中庭的分类及影响中庭热环境的因素入手，确定出一种将中庭空间的垂直温度分层结合到负荷模拟计算中的方法。这种方法不但计算量较小，可

以根据不同体形的中庭选择适用的负荷模拟计算简化方法，模拟结果准确，而且有助于中庭建筑空调设计的负荷计算，有助于降低建筑能耗，从而促进中庭的发展及相关领域的研究。

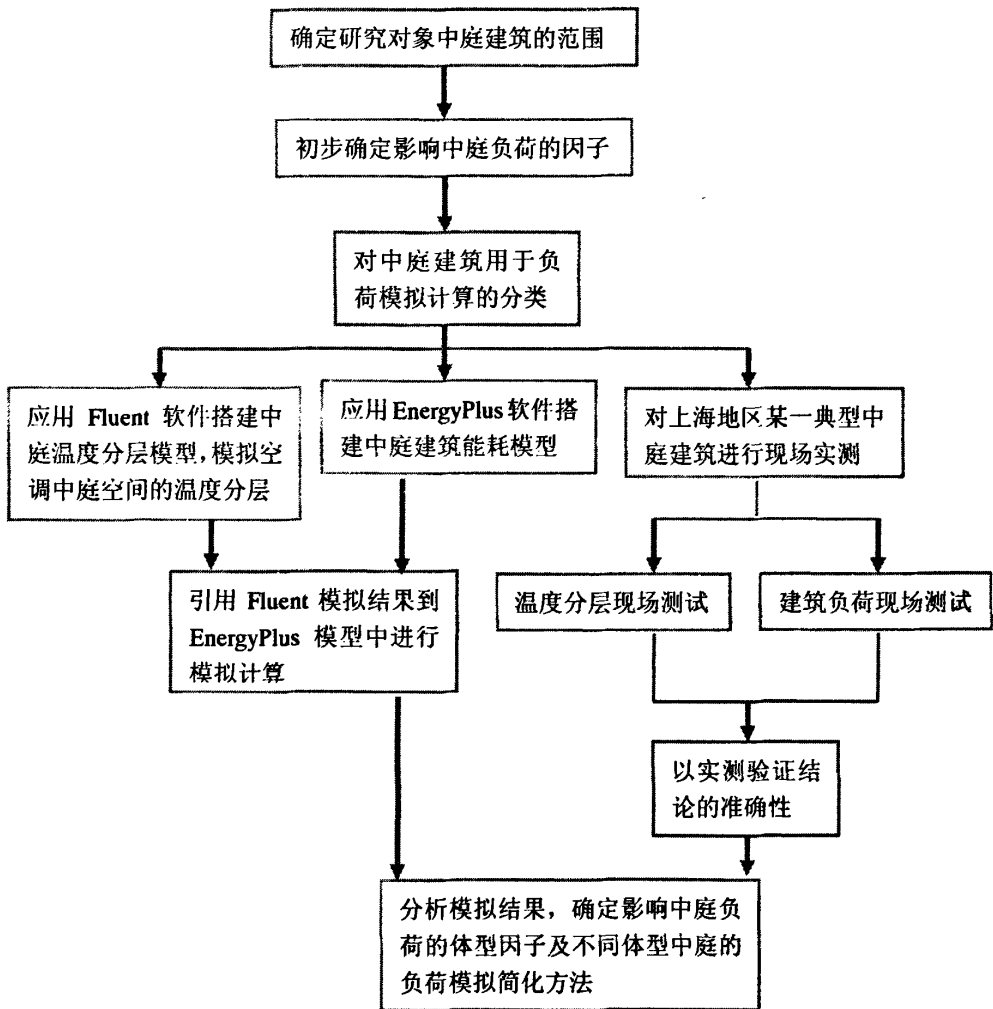


图 1.1 论文框架图

第2章 采光中庭建筑的发展、分类及其能耗特点

2.1 采光中庭建筑概述

2.1.1 中庭建筑

中庭，通常是指建筑内部的庭院空间，其最大特点是形成具有位于建筑内部的“室外空间”，是建筑设计中营造一种与外部空间既隔离又融合的特有形式，是建筑内部环境分享外部自然环境的一种方式。中庭建筑即为带有中庭的建筑。根据中庭是否对外采光，将其分为不采光中庭建筑与采光中庭建筑。

1、不采光中庭建筑 不采光中庭建筑的中庭通常位于建筑内部，是大厅式的室内空间，所有的界面都不直接对外，平面形状可以是任何形式，垂直高度方向上跨越多层。在功能上通常作为人流的组织集散场所，如室内步行街等。不采光中庭位于建筑中部，受外界影响很小，因此室内温度波动也很小。它的缺点在于缺乏自然光线，完全依靠人工照明，通风性较差，新鲜空气不足，因此容易引起人的生理和心理不适。在现在的建筑设计中已经很少被采用。

2、采光中庭建筑 采光中庭建筑的中庭至少有一个面直接对外，通过透光材料将自然光引入室内，它的空间内部通常包含着自然因素，诸如植物、水景、山石、小桥等，在功能上是社交与休闲的多功能场所，常与建筑的出入口结合，成为建筑的交通枢纽或是整个建筑的核心标志。采光中庭的室内环境容易受到外界影响，不使用空气调节设备时，室温随气候变化明显。它的优点在于拥有自然光线，能够与室外环境进行视觉的交流，在现在的建筑设计，特别是公共建筑设计中被广泛使用。

2.1.2 采光中庭建筑

采光中庭建筑在概念上表达了三个层次的内涵^[16]：

1、形态特征 采光中庭建筑的中庭在剖面形式上表现为贯穿多层或全部建筑高度的室内空间；在实体层面上作为实体建筑的一部分，不孤立存在；从界面来说它至少有一个界面直接对外，同时这个界面的绝大部分是透明的。它是建筑内部的庭院空间，通过这个透明的界面与室外空间有所区别和隔离。

2、情感特征 采光中庭作为建筑内部环境分享外部自然环境的一种方式，将自然光引入建筑。现代的采光中庭本身往往具有较强的精神功能，是一个可以让人放松、休息的场所。

3、功能特征 采光中庭在功能上除了改善气候等基本功能外，具有综合功能的特点，往往具有交通组织、休闲交往、展示集会等多种功能。此外，采光中庭以其独特的形式加强室内通风，接受更多的自然采光，具有调节室内微气候的功能。

以上三个特征相互关联，建筑内的中庭只有同时具备以上三个特征，我们才能称之为“采光中庭建筑”。

2.2 国内外采光中庭发展现状及趋势

2.2.1 国外采光中庭发展现状及趋势

1、高技术化 二十世纪60年代后的25年时间里，人们的生活愈来愈为高度发达的技术(特别是信息技术)所支撑，这也成为建筑发展的主流。采光中庭把自然纳入室内，是人与人、人与自然情感交流的理想场所。而这种理想环境的创造无一不得依靠高技术的手段才能实现，从宏伟的屋面构造，到围护结构新材料得广泛应用；从室内温度气候的调节，到节能技术的引入；从消防监控设施到植物的种植管理、环境的控制都运用了高科技成果。采光中庭设计走高新技术道路已经成为了一个明显的趋势，代表人物如理查德·罗杰斯(Richard Rogers)，代表作品有伦敦劳埃德大厦(Lloyd's of London)中庭，布劳德维克住宅(Broadwick House)中庭等；尼古拉斯·格雷姆肖(Nicholas Grimshaw)，代表作品有慕尼黑宝马总部大厦(BMW —— Verwaltungszentrum)中庭，Ladkarn 总部(Headquarters for Ladkarn)中庭等。这些作品都采用了先进的技术特别是主动式能耗控制技术，关注于提高中庭空间的环境品质。

2、生态化 在世界范围内，现代生活中的建筑能耗占人类总能耗的50%以上，能源的大量消耗使地球资源枯竭的局面日趋严重，而且产生大量废气、垃圾污染环境，甚至威胁到人类的生存。这种高能耗、低效率的状况在建筑中体现的尤为明显。在现代空调技术尚未出世之前，建筑只能顺从自然，因地制宜。而在技术进步的今天，现代空调技术可以提供各种人工气候。不管热带、亚热

带还是高寒地带，人们在采光中庭中采用的设计手法无甚差别，消耗了大量能源，因此生态化中庭的设想应运而生。

2.2.2 我国采光中庭发展现状及趋势

上世纪八十年代以来，随着经济发展，建筑业蓬勃发展，国内建筑师开始学习西方，在宾馆与商业建筑中大范围的建造采光中庭。

二十一世纪以来，采光中庭的应用在我国更加广泛，用途与形式也越来越多。教育、办公、会展、大型商业综合体等大型公共建筑中，采光中庭已经成为了不可缺少的建筑元素，会所、别墅等一些小型建筑也常采用采光中庭这种建筑形式。在功能上，如今的采光中庭已经成为人文交流的载体，形式多种多样，在结构形式、室内物理环境营造方面体现着建筑技术的发展。更重要的是，采光中庭调节室内热环境的作用逐渐被建筑师认识并利用起来，它适应了国家的建筑节能政策，容易被推广和发展起来。

2.3 采光中庭建筑的分类

中庭建筑的形式从建筑结构本身分类，一般有简单型和综合型两大类。其中简单型包括：单向中庭、双向中庭、三向中庭、四向中庭等；综合型包括联接中庭（在多组建筑中间）、基座中庭（在建筑底部）、多层垂直中庭等。

单向中庭是指中庭的顶面和四个侧面中，只有一个侧面是与主体建筑接触或相通，而其余面都是与室外环境直接接触。这类中庭一般都是封闭式的，在设计应用中通常设计为一个有良好视野和采光的宽敞门厅；

双向中庭是指中庭有两个侧面与主体建筑接触或相通，其余面与室外环境直接接触；

三向中庭即指中庭空间有三个侧面是与主体建筑接触或相通；

四向中庭，又称为核心式中庭，是指中庭的四个侧面都与主体建筑接触或相通，只有中庭顶面与室外环境直接接触。大型办公建筑内部直通屋顶的“内厅”就是典型的核心中庭，其顶部通常为大面积的采光屋顶。核心中庭是最常见、最典型的一种中庭形式。

多层垂直中庭多存在于高层办公建筑中。由于基地面积的限制，高层办公楼只能采取隔层或者间断设置空中庭院，以形成丰富的立体绿化。近年来，随

着生态环境意识的不断增强，竖向上的开放式中庭空间越来越成为高层办公建筑的有机组成部分。中庭空间用来绿化，帮助自然通风采光，给人提供呼吸新鲜空气、远眺自然风景的场所。

此外还有条形中庭、基座中庭等，但大多数中庭是这几种基本形式的混合或某种形式的局部变化。

根据中庭采光面位置不同，采光中庭一般又可分为顶面采光中庭、侧面采光中庭及混合采光中庭。顶面采光中庭是指中庭空间只有顶面是与外界环境直接接触，并且顶面为玻璃采光；侧面采光中庭按其采光面的数量分为单侧采光、双侧采光、三侧采光等；混合采光中庭是将侧面采光和顶面采光同时应用于中庭空间。

2.4 采光中庭热环境和能耗的基本特征

2.4.1 采光中庭热环境的基本特征

和常规建筑空间一样，中庭空间的热环境状况也要受到许多室内外因素的影响，但这些因素对中庭空间的影响表现出不同于常规建筑空间的一些特点。

太阳辐射对中庭热环境的影响很大。由于采光中庭具有大面积的玻璃屋顶和幕墙，导致其室内热环境受室外气象条件，主要是透过透明围护结构的太阳辐射的影响很大。太阳辐射对中庭热环境的影响表现在：直接照射在中庭外表面的太阳辐射，将通过围护结构热传递影响中庭内表面温度，并通过对流、辐射影响室内空气；太阳辐射还将通过窗户的直接透射影响中庭内表面温度。在夏季，由于温室效应的作用，中庭有可能蓄积大量的太阳辐射能，从而导致中庭内部热环境的恶化以及空调制冷负荷的增加；在冬季，太阳辐射能够减小室内采暖负荷，有利于室内热环境。

内扰对采光中庭热环境的作用（主要指显热）较小。中庭内的照明、人体和设备的显热散热以两种方式在室内进行热交换，一种是以对流方式直接传给室内空气，另一种则以辐射形式向周围各表面传递，之后再通过各表面和空气之间的对流换热，逐渐传递给室内空气。一般来说，内扰对中庭热环境的影响相对于太阳辐射来说要小。

中庭内部的气流运动在很大程度上决定了中庭热环境的状况。形成中庭内

部的气流运动和传热主要动力是：热压作用、风压作用、机械系统作用。热压作用指的是由于空气温度不同造成其密度不同而引起的空气流动。热压引起的气流运动主要包括烟囱效应、太阳辐射热和室内热源散热引起浮力驱动的空气流动。由于中庭的大高度，热压作用引起的烟囱效应十分明显，同时温室效应的作用使得中庭空间普遍存在着垂直温度分层现象，中庭顶部常常过热。此外，由于围护表面热状况与空气热状况之间存在差异，围护结构以热的形式影响气流运动，在冷壁面附近出现下降流，热壁面附近出现上升流，各围护热状况的差异可能引起中庭空间大尺度的回流。风压作用指的是当风吹过建筑物时，由风速形成的室内外压差形成的空气流动。在中庭的开口区域，风压的作用十分明显。机械系统作用指的是空调送风、机械通风等由机械系统压力形成的空气流动。尤其是空调气流组织的设计，它会对中庭内部的空气流动和传热产生很大的影响，不同的气流组织形成不同的流场和温度场，从而造成不同的中庭热环境。图 2.1 为采光中庭热环境示意图。

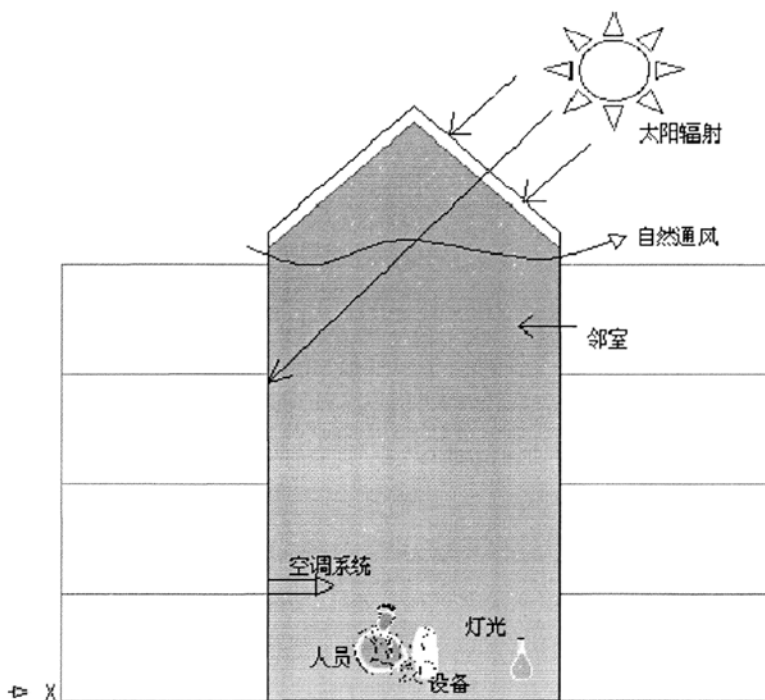


图 2.1 采光中庭热环境示意图

2.4.2 采光中庭能耗的基本特征

采光中庭空间由于其热环境的特殊性，其能耗状况引起广大业主和建筑师的重视。基于半室内半室外的空间环境特性，中庭是其所在建筑物中单位面积耗能最大的部分之一，换言之，也是节能潜力较大的部分之一。中庭作为建筑物室内空间与室外环境的过渡空间，它的存在使外界环境的变化先作用于中庭，再作用于主要居住空间，通过中庭的过渡，可以减缓室内外的热交换速度，降低建筑物的热损失。在寒冷的气候环境中，中庭可以使内部采暖空间避免直接与外环境接触，从而节约采暖能源的消耗，对于室内空间来说，相当于多了一层保护体。并且由于空间本身的封闭性，室内空间散逸的热可以在中庭内滞留聚集，配合阳光热能的吸收，而提供一个较为舒适的活动环境。在夏季，由于阳光照射及空间的温室效应，这一缓冲设想会遭到一定的破坏，但如果结合遮阳及空间的通风设计，仍能在炎热的气候环境中带来能源方面的好处。中庭的这种缓冲效应是由于中庭空间包含了庞大的缓冲介质——空气，空气可以吸热，空气流动可以传热。热传递对这些庞大体积的空气的作用效果是复杂而缓慢的，从而有效地影响室内的小气候。

在室内利用自然采光，减少人工照明是节能的要求之一。中庭在大进深的建筑平面中起到采光口的作用，使大进深建筑的平面最远处有可能获得足够的自然光线。通过对进入中庭的自然光线的控制，进而控制进入中庭周围空间的光线，可以增加室内获得自然光的面积，也可以使无法得到直射日光的地方获得更多的间接日光，从而减少建筑物内的昼间照明。由于人工照明是建筑物室内的主要热源之一，天然光线在室内产生的热较少，因此，减少人工照明相应地减少了夏季空调的使用。

总的说来，中庭设计虽然存在大量相互矛盾的构造要素，但只要在建筑设计上权衡利弊，对其加以综合考虑，就让它们相辅相成地对中庭的热环境及节能设计起到作用。中庭的合理设计不仅可以创造出舒适的“室外”空间，减少中庭自身的能耗，而且能够使主体建筑内部舒适的费用降低，有利于整个建筑的节能。

第3章 用于负荷模拟计算的建筑中庭空间的分类

3.1 建筑中庭的体形

中庭空间的底面和高度共同构成中庭的体形。中庭空间底面一般采用规则的几何形状（圆形、方形等）或其组合，其中以方形为主。相同的底面积，当高度不一样时，中庭空间不但给人产生不同的感官效果，同时中庭空间内的热环境及负荷也会有很大差异。因此，在对中庭空间进行模拟计算分类时，需考虑中庭体形对中庭空间内热环境及负荷的影响。

3.2 用于负荷模拟计算的中庭空间的分类方法

本文的研究对象确定为核心式采光中庭建筑，因为核心式采光中庭是办公建筑中的典型中庭形式。不仅比单向中庭等更高效地利用了基地面积，而且提高了办公建筑内部的室内环境品质，使得建筑内部更多地接触大自然，提高了室内人员的工作效率。

3.2.1 中庭建筑模型的设置要求

为了保证研究可行性及模拟结果的可比性和代表性，中庭建筑模型的设置应满足如下要求：

1、与室外环境直接接触的中庭界面围护结构材料由玻璃构成，以便研究太阳辐射对中庭温度分层及负荷的影响。本文中的研究对象为核心式中庭建筑，因此其采光面设定为顶面采光；

2、在垂直高度方向上，中庭空间是贯穿主体建筑全部垂直高度的室内空间，因此本课题研究对象中不包括多层垂直中庭；

3、中庭空间平面尺寸及垂直高度具有代表性，如果其平面尺寸和垂直高度的设定脱离实际值，那么最终的研究结果将没有太大的实际意义；

4、中庭底面积和主体建筑的投影面积比例必须合适。若这个比例过小，则不利于研究中庭负荷对主体建筑的影响；若这个比例过大，则在实际设计中不

经济，即中庭建筑的模型不典型，研究结论的可信度将会大大降低。

3.2.2 中庭建筑模型平面尺寸的确定

由于中庭空间平面尺寸影响中庭的采光面积，而采光面积对中庭室内热环境影响很大，同时中庭空间的垂直高度影响核心式中庭空间与建筑周边区域的热量交换，因此在确定模型的中庭尺寸时应慎重。本论文中引用文献 17 中对 30 栋已建中庭建筑的统计结果作为确定中庭空间平面尺寸及垂直高度的依据。其统计结果如下：

表 3.1 中庭面积统计

中庭面积 $S(m^2)$	$S=200$	$200<S=500$	$500<S=800$	$800<S=1100$	$S>1100$
个数	5	14	5	3	3
比例	16.7%	46.7%	16.7%	10%	10%

表 3.2 中庭高度统计

中庭层数	2层	3层	4层	5层	6层及以上
个数	6	12	5	2	5
比例	20%	40%	16.7%	6.7%	16.7%

表 3.3 核心式中庭底面长宽比

中庭平面长宽比 a	$a=1.5$	$1.5<a=2.5$	$2.5<a=3.5$	$a>3.5$
个数	11	3	1	2
比例	64.7%	17.6%	5.9%	11.8%

对于中庭底面积与主体建筑的投影面积比例的确定，本文参考上海地区某一典型核心式中庭办公建筑的中庭底面积与主体建筑投影面积的比例，最终确定所建模型的中庭底面积与主体建筑投影面积的比例为 1: 10。

根据以上建模要求及相关中庭建筑的统计结果，本文选取具有代表性的核心式中庭办公建筑为研究对象。中庭建筑的中庭面积 S 选取 $136m^2$ 和 $303m^2$ 两种，中庭平面长宽比 a 选取 1 和 2 两种类型。

3.2.3 中庭建筑模型高度的确定

为了使中庭建筑的体形符合实际,本文首先寻求一个因子来表示中庭空间的体形。一般中庭空间其中庭高度和底面积之比有一定的范围,这一比例过小或过大都不符合实际的中庭建筑。由于中庭高度与底面积的比值是以米为单位的,不适合用于衡量中庭建筑的体形,因此本文选择 h/\sqrt{S} 这一无量纲比值来表示中庭建筑的体形,并用此比值来确定中庭建筑的高度。

对于一定底面积的中庭空间,若高度过小,则中庭空间几乎等同于一般的空调房间,不属于本文的研究对象;若高度过大,则太阳辐射对中庭空间的影响过小,不利于研究。如选取一个极端情况, h/\sqrt{S} 取10,则中庭投影面积在中庭高度下显得非常小,基本可以忽略中庭对建筑的影响。因此, h/\sqrt{S} 的取值需切合实际情况,使中庭空间平面尺寸及垂直高度具有代表性。

为便于研究中庭高度对中庭空间热环境及能耗的影响,本文根据 $h/\sqrt{S}=1$ 和 $h/\sqrt{S}>1$ 两个分界点选取中庭空间的高度,由于现代办公中庭建筑以高层较为典型,即 $h/\sqrt{S}>1$ 包含的范围较大,故选取两个 $h/\sqrt{S}>1$ 的值来确定中庭空间的高度。实际中庭建筑的 h/\sqrt{S} 值,如同济大学嘉定校区国际会议中心中庭空间的 h/\sqrt{S} 值为1.5,同济大学主校区综合楼中庭空间的 h/\sqrt{S} 值为6.6,因此本文参考以上两栋实际中庭建筑确定 h/\sqrt{S} 的取值。

典型中庭模型的中庭底面积、中庭底面长宽比及中庭高度参数组合见表3.4。

表 3.4 各典型中庭模型的几何参数

Model	中庭底面积 $S(m^2)$	中庭底面长宽比 a	h/\sqrt{S}	中庭高度 $h(m)$	建筑底面积 $S'(m^2)$
Model 1	136	1	1.0	12 (3层)	1360
Model 2	136	1	3.4	40 (10层)	1360
Model 3	136	1	6.9	80 (20层)	1360
Model 4	136	2	1.0	12 (3层)	1360
Model 5	136	2	3.4	40 (10层)	1360
Model 6	136	2	6.9	80 (20层)	1360
Model 7	303	1	1.1	20 (5层)	3030
Model 8	303	1	2.3	40 (10层)	3030
Model 9	303	1	5.7	100 (25层)	3030
Model 10	303	2	1.1	20 (5层)	3030
Model 11	303	2	2.3	40 (10层)	3030
Model 12	303	2	5.7	100 (25层)	3030

第4章 中庭建筑温度分层模型的建立及其模拟结果分析

4.1 模拟软件的介绍

本文选用模拟软件 FLUENT 对中庭建筑进行中庭空间温度分层的模拟。

FLUENT是FLUENT公司开发用于模拟流体流动以及热传导的CFD软件。由于采用了多种求解方法和多重网格加速收敛技术，因而能达到最佳的收敛精度。灵活的非结构化网格和基于求解精度的自适应网格及成熟的物理模型，使FLUENT在层流、湍流、传热、化学反应、多相流等领域取得了显著成效。FLUENT用C语言编写，具有很大的灵活性强大的能力，能够动态分配内存、灵活求解。除此之外，FLUENT使用client/server结构，允许同时在用户桌面工作站和强有力的服务器上分离地运行程序，实现高效执行和交互控制，并能灵活适应各种机器与操作系统。FLUENT的主要组成部分包括：FLUENT解算器；prePDF：模拟PDF燃烧的程序；GAMBIT：几何图形模拟以及网格生成的预处理程序；Tgrid：可以从已有边界网格中生成体网格的附加前处理程序；Filters(Translators)可以从CAD/CAE软件如：ANSYS，I-DEAS，NASTRAN，PATRAN等的文件中输入面网格或者体网格。同时，FLUENT软件有多种优化的物理模型，可以解决一系列的问题，如：不可压缩或可压缩流动，定常流动或非定常流动，无粘、层流和湍流，牛顿流或非牛顿流，亚声速、跨声速、超声速和高超声速流动等。

GAMBIT目前是CFD分析中最好的前置处理器。它包含全面的几何建模能力和功能强大的网格划分工具，可以划分出包含边界层等CFD特殊要求的高质量的网格。GAMBIT借助功能灵活，完全集成的和易于操作的界面，显著减少CFD应用中的前置处理时间。复杂的模型可直接采用GAMBIT的固有几何模块生成，或从主流的CAD/CAE系统中直接读入数据。GAMBIT软件高度自动化的网格生成工具可生成结构化网格、非结构化网格、多块网格、或混合格网，保证了最佳的网格生成。

本文采用GAMBIT、FLUENT6.3对中庭空间的温度分层作三维稳态模拟。

4.2 中庭建筑温度分层模型的建立

本文研究对象为核心式中庭建筑，在建立中庭建筑模型以讨论空调中庭空间的温度分层时，根据第三章中列出的具有代表性的各中庭的尺寸建立中庭建筑的模型，同时，模型建立中的输入参数均按照设计日 14 时的状态选取。

在建立 FLUENT 模型时，需输入的参数有中庭空间几何尺寸、边界条件、室内负荷，送风口位置、送风状态、送风量等。

为了简化模型，本文作如下假设：

- a) 中庭空间内空气不可压缩且符合 Boussinesq 假设；
- b) 空气流动为稳态湍流；
- c) 中庭空间内空气为辐射透明介质；
- d) 不考虑漏风影响，认为室内气密性良好；在空调期间，室内成正压状态，无渗透。

4.2.1 几何尺寸及边界条件的确定

由于本文只研究建筑内部中庭区域的温度分层，因此为了简化模型，分析中庭空间温度分层时，运用软件 FLUENT 只建立中庭空间区域的几何模型。

对于壁面边界条件，假定中庭建筑内中庭区域周围的空调区域稳定在空调设定状态，壁面温度相对稳定，因此中庭空间与周围空调区域接触的壁面设定为温度为 25℃ 的定温壁面。

中庭空间与地面接触的地板设定为定热流边界。由于考虑中庭底部有一定的人员、设备等室内负荷，为了便于网格生成，在建立模型时将中庭空调区域内的室内负荷均匀分布于地板，从而简化为地板的定热流输入。

对于中庭顶部接受太阳辐射的玻璃屋顶的边界条件，本文设定为热流边界，其透过玻璃顶的热流值由软件 EnergyPlus 计算得到。

4.2.2 室内负荷的确定

在中庭底部空调区，有人员、设备等室内热源，且室内热源变化较小，因此本文将底部空调区地板设定为定热流边界作为人体、设备等室内热源的散热。这一简化在不影响结果的前提下，使模型网格生成相对容易，并节省计算时间。

4.2.3 送风口位置、送风状态及送风量的确定

送风口参考实测建筑中庭空间的送风口，设定中庭空间底层侧送风，风口位置在底层吊顶处；由于室内空调设定温度为 25°C ，因此根据送风温差 7°C 计算，确定送风温度为 18°C ；对于中庭空间送风量的确定，根据相关设计手册^[19] 计算得到，具体方法如下：

高大空间夏季空调区分层空调冷负荷计算，采用经验系数法，即对分层空调建筑物按全室空调方法(充分混合模型)进行冷负荷计算，然后乘以经验系数 r ， r 为空调区分层空调冷负荷与全室空调冷负荷之比，其值由特定性质的高大建筑物决定，经实测与计算得出，通常 $r=0.5\sim 0.85$ ，一般取 0.7 。

由软件EnergyPlus计算出中庭空间全室空调的冷负荷和相应送风量，然后乘以经验系数 $r(0.7)$ ，得到中庭空间分层空调的冷负荷及相应送风量。

由于中庭屋顶下方热量积聚，实际建筑中通常在屋顶下方设置机械排风以带走多余热量，因此模型中在中庭顶部设置排风口。

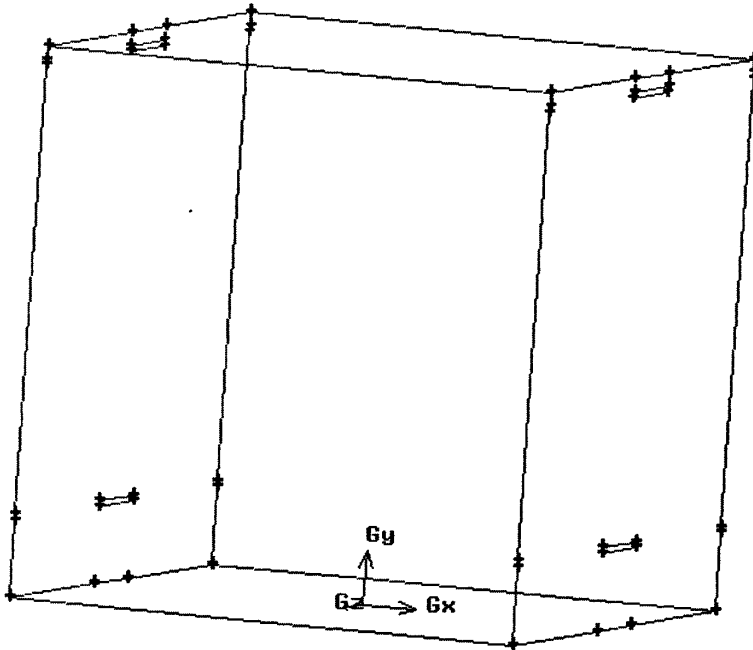


图 4.1 模型 1 的温度分层模型三维示意图

由于一天中 12 点的太阳辐射最大，但是太阳辐射对中庭空间温度分层的影响有一定的延迟性，同时办公建筑 14 点的空调运行情况较为典型，因此本文选取夏季设计日 14 时作为各项计算和结果比较分析的典型时刻点。图 4.1 为模型 1 的温度分层模型三维示意图。

4.2.4 Fluent 内的参数设置

考虑中庭空间内的空气为不可压缩流体，因此在房间内的气流属于稳态三维不可压缩紊流流动，在计算中采用 k-e 模型^[20]。

另外，考虑到中庭空间内由浮力引起的垂直高度方向上的空气流动，在 Fluent 模拟中开启浮力计算选项。

4.3 中庭建筑温度分层的模拟结果分析

按照经验系数 $r=0.7$ 计算中庭空间的送风量，由此 Fluent 模拟得到各模型中庭空间夏季设计日 14 时的垂直高度方向的温度变化如图 4.2-4.5:

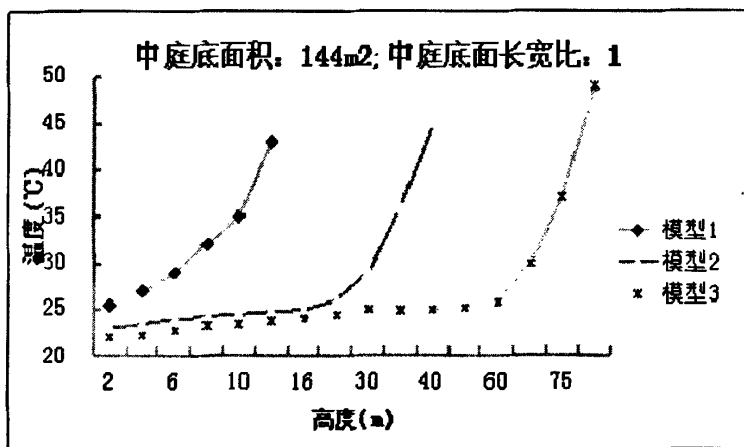


图 4.2 模型 1、2、3

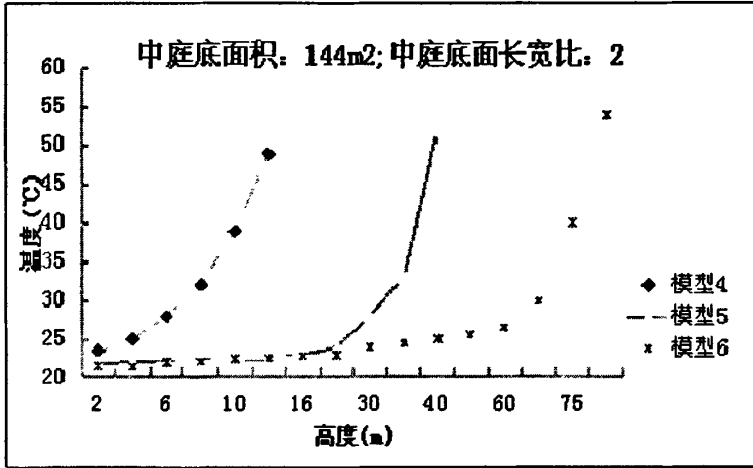


图 4.3 模型 4、5、6

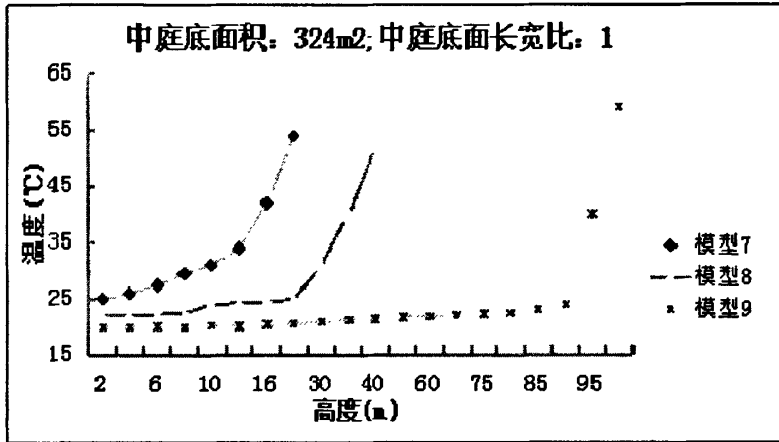


图 4.4 模型 7、8、9

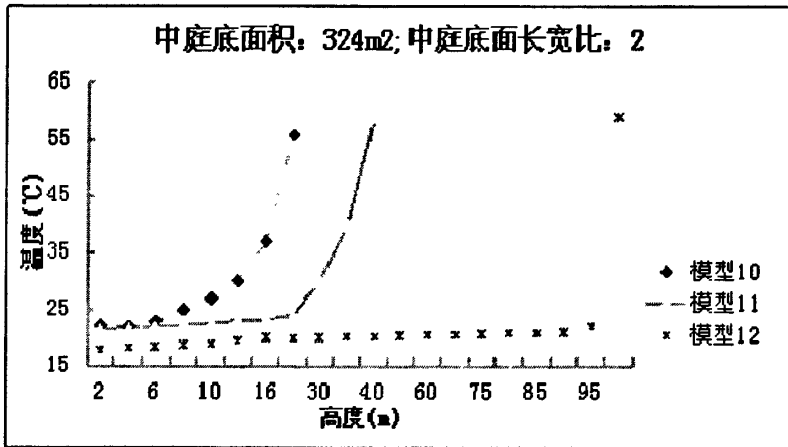


图 4.5 模型 10、11、12

由图示结果可以得到：空调区温度随着中庭高度的增加而降低，且低于空调区设定温度 25℃。室内温度降低是由于对中庭空间的负荷估算过大造成的。由于在设定 Fluent 中送风参数时，根据高大空间负荷计算方法计算出全室空调负荷，再乘以经验系数 r 得到中庭空间所需负荷。由 Fluent 结果看出，对于高度较高的中庭经验系数取 r 为 0.7 偏高。为了便于在后面的负荷分析中保持前提条件一致，对 CFD 模型进行调整，适当降低经验系数 r 值，使得 CFD 结果中空调区温度保持在 25℃左右。对每个模型的经验系数 r 的取值如下表 4.1。

调整经验系数之后，Fluent 模拟得到的各模型中庭空间垂直高度方向的温度变化如图 4.5-4.8 所示。

经调整经验系数 r 后，在空调区域的温度基本控制在 $25\pm 1^\circ\text{C}$ 。

表 4.1 各模型 r 的调整值

Model	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
r	0.70	0.62	0.65	0.63	0.60	0.65	0.70	0.60	0.62	0.65	0.67	0.63

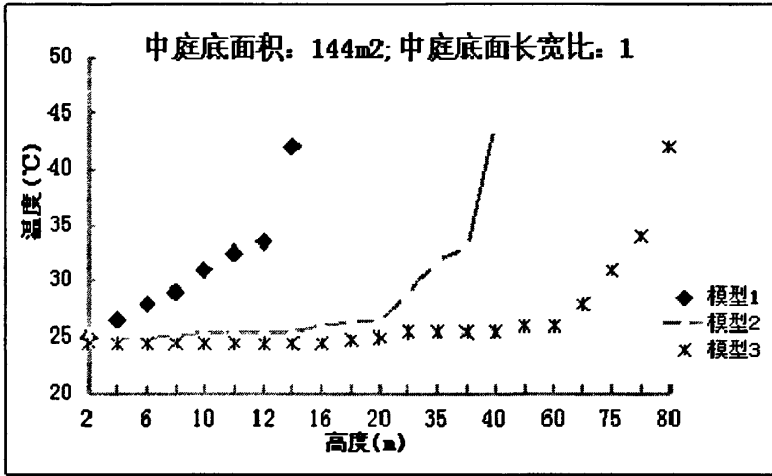


图 4.6 模型 1、2、3

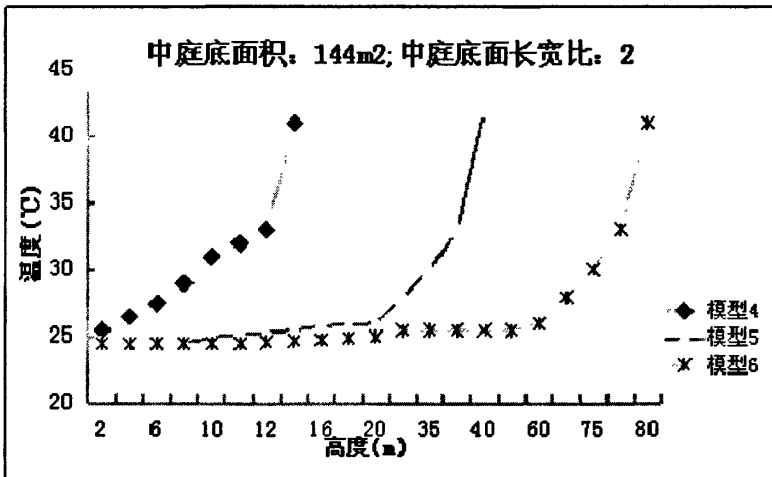


图 4.7 模型 4、5、6

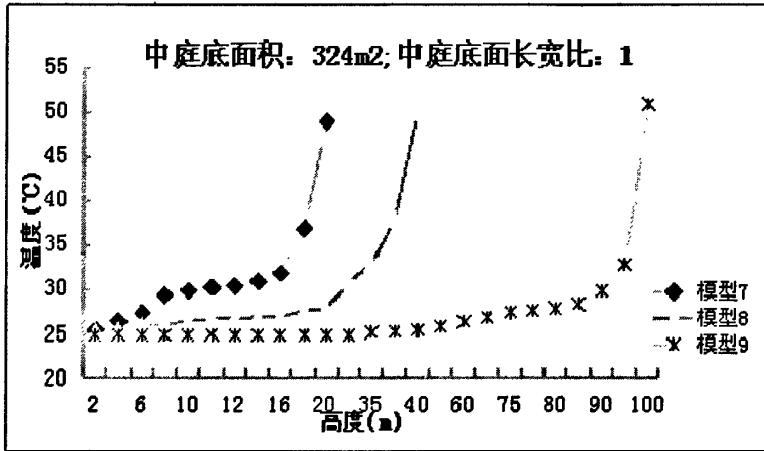


图 4.8 模型 7、8、9

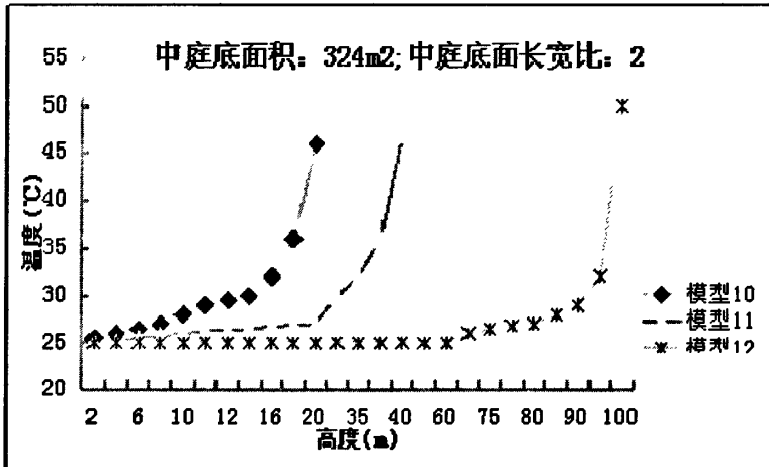


图 4.9 模型 10、11、12

4.3.1 中庭高度 h 对中庭温度分层影响的分析

由相同中庭底面积和底面长宽比、不同高度的中庭模型结果可知，中庭高度对中庭温度分层影响显著。总的来说，中庭空间内空气温度沿中庭的垂直方向逐渐增加，尤其是在接近中庭顶部的区域温度梯度很大。这是由于采光中庭具有大面积的透明玻璃围护结构，大量太阳辐射透过屋顶进入室内加热表面后，又以长波辐射、对流、导热等形式进行热量的再分配，同时由于浮力作用，热空气密度较轻，故热量大量滞留在中庭顶部。从上文中的温度分布模拟结果（图

4.6-4.9) 亦可以看出, 中庭空间温度迅速上升的范围在距玻璃顶 10m 左右, 同时垂直高度越高的中庭, 其中庭空间距顶部的高温区高度越小。

4.3.2 中庭底面积 S 对中庭温度分层影响的分析

中庭底面积的大小直接影响中庭接受太阳辐射的多少。由图 4.6-4.9 中可以看出, 底面积大的中庭其接近顶部处空气温度较高。

4.3.3 中庭底面长宽比 a 对中庭温度分层影响的分析

由相同中庭底面积和高度, 不同长宽比的中庭建筑模型结果可以看出, 长宽比为 2 的中庭其一定高度的空气温度比长宽比为 1 的稍微低一些。这是因为长宽比大的中庭空间其侧面积相对较大, 即与周围空调房间接触面积较大, 散热较多, 因此相应高度的室内空气温度较低。

总而言之, 中庭高度 h 和中庭底面长宽比 a 对空调中庭空间的平均温度有正面作用, 即 h 和 a 越大, 中庭空间的平均温度越低; 而中庭底面积 S 则对空调中庭空间的平均温度有负面作用, 即 S 越大, 中庭空间的平均温度越高。

第 5 章 中庭建筑能耗模型的建立及其模拟结果分析

5.1 模拟软件的介绍

本文选用能耗模拟软件 EnergyPlus 对中庭建筑进行负荷的模拟分析。

EnergyPlus 是一种建筑全能耗分析软件(whole building energy analysis tool)。建筑全能耗分析软件可以用来模拟建筑及空调系统全年逐时的负荷及能耗,有助于建筑师和工程师从整个建筑设计过程来考虑如何节能。大多数的建筑全能耗分析软件由四个主要模块构成:负荷模块(Loads)、系统模块(Systems)、设备模块(Plants)和经济模块(Economics)。这四个模块相互联系形成一个建筑系统模型。其中负荷模块是模拟建筑外围护结构及其与室外环境和室内负荷之间的相互影响的。在负荷模块中有多种计算墙体传热和负荷的方法,如反应系数法(response factor)和热传导传递函数法(conduction transfer functions, CTF)用来计算墙体传热;传递函数法(transfer function method, TFM)、热平衡法(heat balance method)和热网络法(thermal network method)用来将窗、墙得热及内部负荷转变为冷、热负荷。系统模块是模拟空调系统的空气输送设备、风机、盘管以及相关的控制装置的。设备模块是模拟制冷机、锅炉、冷却塔、蓄能设备、发电设备、泵等将冷热源设备的。经济模块是计算为了满足建筑负荷所需能源费用的。有些软件没有经济模块,有些软件把系统模块和设备模块合并为一个模块。

目前世界上比较流行的建筑全能耗分析软件主要有:Energy-10、HAP、TRACE、DOE-2、BLAST、EnergyPlus、TRNSYS、ESP-r、DeST 等。这些软件具有各自的特点,例如,Energy-10 只能用来模拟 1000 平米以下的小型建筑,TRNSYS 在模拟空调系统时能够提供最大的灵活性,DOE-2 能够准确地模拟较复杂的围护结构的负荷,EnergyPlus 能够进行集成同步的负荷/系统/设备模拟等。

EnergyPlus 是在 BLAST 和 DOE-2 的基础上开发的,兼具两者的优点以及一些新特点。它是在美国能源部的支持下,由美国劳伦斯·伯克利国家实验室(LBNL)、伊利诺斯大学(University of Illinois)、美国军队建筑工程实验室(U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory)、厄克拉河马洲立大学

(Oklahoma State University) 及其他单位共同开发的。EnergyPlus采用热传导传递函数法计算墙体传热,采用热平衡法计算负荷。热传导传递函数法较反应系数法计算更为精确,因为它是基于墙体的内表面温度,而不同于一般的基于室内空气温度的反应系数。热平衡法是室内空气、围护结构内外表面之间的热平衡方程组的精确解法,突破了传递函数法的种种局限,如对流换热系数和太阳辐射得热可以随时间变化等。由于本文研究的是负荷计算方法,因此负荷计算的准确性是本文选择EnergyPlus作为能耗模拟计算软件的一个重要原因,另一个重要原因是软件EnergyPlus有室内空气模型这一模块。EnergyPlus的室内空气模型主要适用于模拟非等温房间的负荷、能耗状况等,可以根据空调空间的温度分布情况选择合适的室内空气模型,这正是本文研究所需要的重要模块。

本文选用EnergyPlus3.0作为中庭空间负荷计算的模拟分析工具。

5.2 中庭建筑能耗模型的建立

本文采用建筑全能耗分析软件 EnergyPlus 建立中庭建筑的负荷计算模型。在建立建筑模型时,需输入的参数包括地理位置、天气参数、建筑几何尺寸和朝向、围护结构、室内人员密度、照明与设备负荷等。

5.2.1 地理位置和天气参数

本文研究的中庭建筑位于上海,因此地理位置就定位在上海。上海纬度 N31.12o, 经度 E121.26o, 时区 GMT+8。天气参数采用上海典型气象年数据。

5.2.2 建筑几何模型

建筑几何模型根据第三章中列出的典型中庭建筑尺寸,同时结合上海市办公型中庭建筑的典型功能分区确定。建筑模型主朝向为正南。中庭位于建筑的正中央,底面是主建筑底面积的 1/10,中庭从建筑底层贯穿至建筑顶层,其屋顶为透明玻璃构成。建筑能耗模型平面及立面图见附录 A。

5.2.3 建筑围护结构

围护结构包括外墙、外窗和屋顶三部分,根据《公共建筑节能设计标准

GB50189-2005》^[21]的规定来设定围护结构传热系数和遮阳系数，具体见表 5.1:

表 5.1 建筑围护结构参数设定值

围护结构部位	传热系数 $K(W/(m^2 \cdot K))$		
屋面	0.7		
外墙（包括非透明幕墙）	1.0		
外窗（包括透明幕墙）	传热系数 $K(W/m^2 \cdot K)$	遮阳系数 SC	太阳得热系数 SHGC
窗墙面积比 0.5	2.8	0.45	0.387
屋顶透明部分	3.0	0.4	0.344

5.2.4 室内负荷与运行时间

室内负荷由照明、设备和人员负荷构成。

表 5.2 各功能区室内负荷设定值

房间类别	人员 (m^2/p)	照明 (W/m^2)	设备 (W/m^2)	新风量 ($m^3/(h \cdot p)$)
办公室	4	11	20	30
门厅	20	11	0	10
走道	50	5	0	0

室内负荷参数的设定和建筑各功能区运行时间表是根据《公共建筑节能设计标准 GB50189—2005》的相关规定（如表 5.2 和附录 B）。

5.2.5 室内空气模型

本文研究对象主要为中庭空间的室内温度分层对其负荷的影响，因此本文采用软件 Energyplus 中的室内空气模型（Room Air Model）来比较分析中庭空间内温度分层对负荷计算的影响。

室内空气模型^[22]主要适用于模拟非等温房间的负荷、能耗状况等，其原理是将室内空气看作若干个充分混合的控制体的集总。假设每个控制体满足以下条件：(a) 统一的空气状态参数，如温度、压力等；(b) 密度、比热等特性参数

为常数，不随温度、时间变化；(c) 空气不吸收辐射；(d) 传热和传质均匀分布在控制体积边界上；同时假设与室内空气控制体相平行的相邻建筑内表面符合下列条件：(a) 均匀的表面温度；(b) 表面均匀辐射；(c) 表面漫反射；(d) 表面只沿厚度方向导热。

因此，墙体外表面热平衡、墙体导热传热、墙体内部表面热平衡、各控制体之间的对流传热和空气系统热平衡这五个热过程构成了整个热平衡过程。如图5.1所示。

每个内表面（窗户、墙体、地板、天花板等围护结构内表面）与特定的控制体（与内表面相邻的控制体）进行相互热交换，而不是所有的内表面与一个单一的总控制体积进行热交换，这就是室内空气模型与充分混合模型的区别。

室内空气模型包括温度单梯度模型、温度双梯度模型、自定义温度模型等。

1) 温度单梯度模型

温度单梯度模型是室内温度模型中模拟非等温空间最简单的一种方法。室内空气温度以某一固定梯度值沿垂直高度方向线性变化，通过设定室内平均温度和沿垂直高度方向温度变化的梯度值确定室内各高度的空气温度值，从而应用于负荷能耗的计算中。

除了温度梯度值这一重要参数，另外还有三个重要的设定参数，第一个是室内空气平均温度与干球温度传感器所在位置的空气温度之差；第二个参数是室内空气平均温度与房间回风温度之差。这两个参数确定了空调系统是如何控制房间温度的，送、回风温差的变化决定了如何控制空调系统来满足空调房间负荷要求的。第三个参数是室内空气平均温度与房间排风温度之差，这一参数通过改变空调房间的排风温度来影响房间的热平衡。

2) 温度双梯度模型

这一模型同样用于设定室内空气温度沿垂直高度方向的变化，进而应用于负荷能耗计算中。这一模型区别于温度单梯度模型的特点是：温度双梯度模型根据梯度转换模式来选择室内空气温度的梯度值转换。模型中供选择的梯度转换模式有室外干球温度、室内干球温度、室内外温差、显冷负荷、显热负荷等。例如选择室外干球温度作为梯度转换模式，则当达到室外干球温度的上限值时，室内空气温度变化的梯度值选用梯度上限值；当室外干球温度降至其下限值时，室内空气温度变化的梯度值选用梯度下限值；当室外干球温度处于其上、下限值之间时，室内空气温度变化的梯度值则与梯度上限值、梯度下限值呈线性关

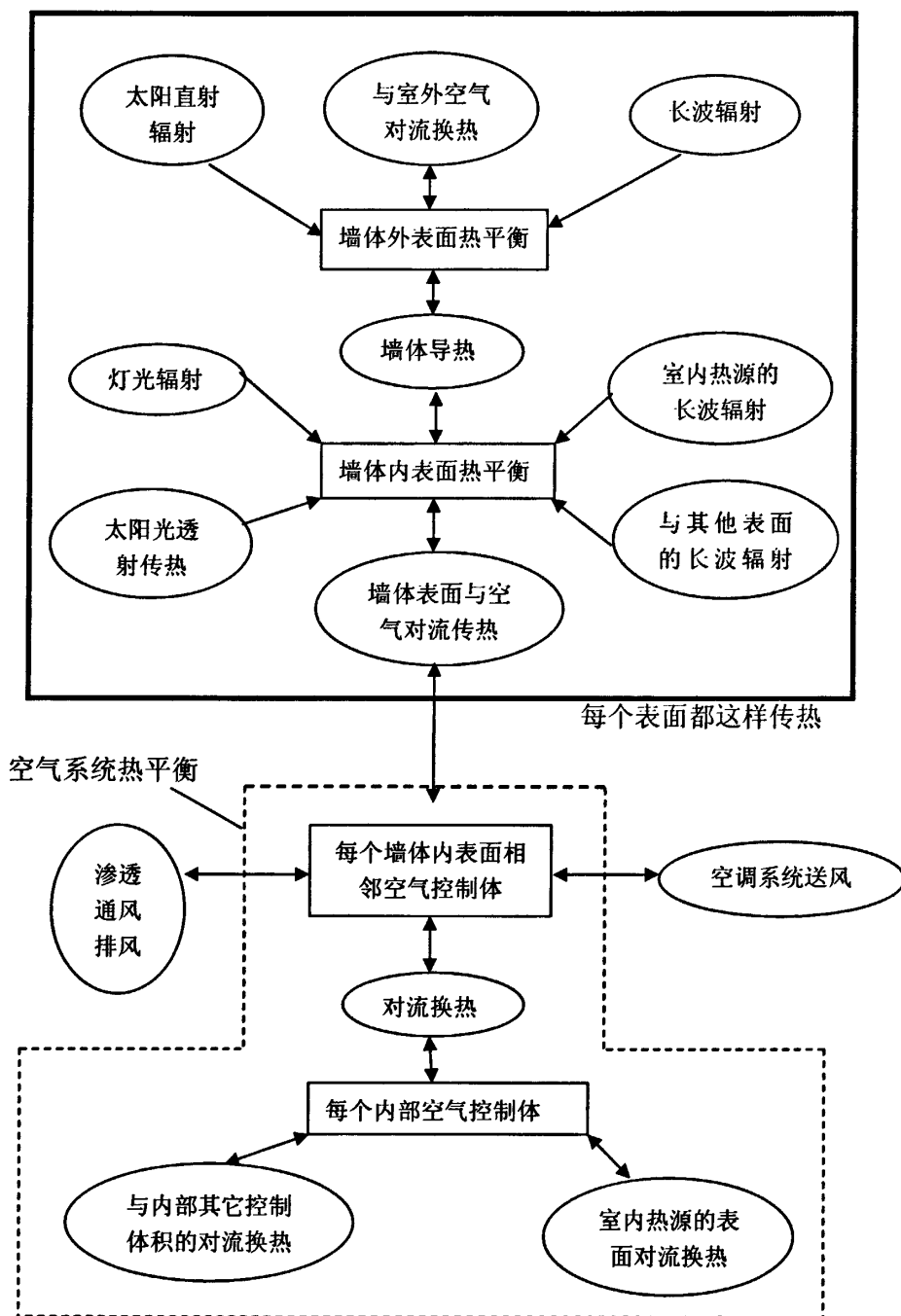


图 5.1 采用室内空气模型的房间热平衡过程示意图

系。

温度双梯度模型的输入参数有：温度传感器的放置高度、回风口高度、排风口高度、温度梯度的上限值和下限值、梯度转换模式、温度（热流）上限值、温度（热流）下限值。

3) 自定义温度模型

自定义温度模型通过输入室内空气平均温度和一定高度的空气温度与室内空气平均温度的差值确定室内空气沿垂直高度方向的温度分布。

自定义温度模型的输入参数有：室内空气平均温度与干球温度传感器所在位置的空气温度之差、室内空气平均温度与房间回风温度之差、室内空气平均温度与房间排风温度之差、高度值及对应高度的温度与室内平均温度的差值。其中，高度值是一无量纲数，是某一高度与空间高度之比。地面的高度值为 0，天花板的高度值为 1。高度值与对应高度的温度与室内平均温度的差值是一一对应的，而且，高度值是从 0 逐渐增大至 1 的。

虽然中庭空间的温度分层随着白天室外环境变化而发生微小的变化，但是由于其温度分层变化对中庭空间冷负荷的影响不明显，而且温度分层变化的分界条件不易确定，因此温度双梯度模型不适合用于中庭空间负荷计算方法的研究。

本文选择温度单梯度模型和自定义温度模型来模拟研究中庭空间的负荷计算方法。由于采光中庭空间内的温度分层并非均随高度呈线性变化，因此本文以 CFD 温度分层结果输入自定义温度模型作为基准模型，用于分析其他简化模拟方法的准确性。

5.3 中庭建筑负荷模拟结果的分析

根据 CFD 的模拟结果，空调区域温度为 25℃，中庭玻璃顶附近由于热量积聚，空气温度梯度很大，整个中庭空间垂直高度方向上的温度变化基本可以划分为两部分：(a)空调区域至距玻璃顶往下 10 米，这一区域受玻璃顶太阳辐射影响较小，温度变化较小，基本在空调设定温度和高于空调设定温度 2℃之间；(b)玻璃顶往下 10 米至玻璃顶，这一区域由于受太阳辐射影响很大，热空气积聚，温度梯度非常大，通常玻璃顶附近的空气可以达到 40℃以上。但是，玻璃顶附近空气温度也和玻璃顶面积密切相关，玻璃顶面积越大，接受的太阳辐射越多，

空气温度越高。根据上述分析，本文选择 EnergyPlus 室内空气模型中自定义温度模型计算中庭空间的负荷，即将 CFD 模拟结果以中庭空间一定高度对应的空气温度输入到 EnergyPlus 模型中，因为这一温度变化曲线与实际最吻合，因此本文以此结果作为最接近中庭实际负荷的值，并将其它温度模型的结果与之比较，从而判断其它温度模型的准确性。（见图 5.2 和 5.3）

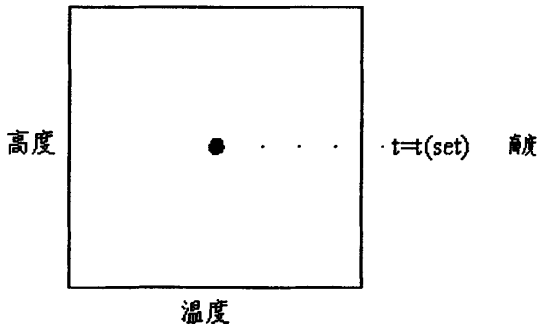


图 5.2 充分混合模型

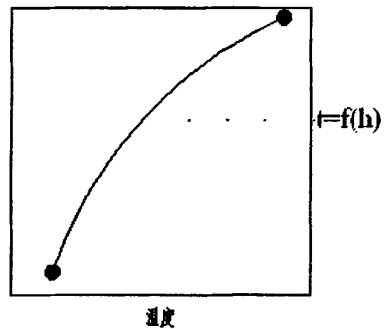


图 5.3 基准模型

5.3.1 中庭空间负荷模拟计算简化方法的提出

现阶段，对中庭空间的模拟方法大多只能采用充分混合模型，而空调设定温度仍取中庭空间空调区域的温度，而实际上中庭空间具有明显的温度分层现象（中庭顶部温度高），这势必会造成模拟结果偏大。因此，对于一个实际的中庭空间，要想能准确模拟中庭空间的负荷，就必须知道中庭空间垂直高度上的温度变化情况，这一点，就现阶段的研究方法，往往只能通过 CFD 模拟来准确估算，但是如果每一栋实际的中庭建筑都须先进行 CFD 模拟得到中庭空间的温度分层，然后再应用能耗模拟软件来模拟计算其负荷，这是非常耗时耗能的，不现实的。因此，本文要寻求一种能简化中庭空间负荷模拟计算的方法，不需要进行 CFD 模拟就能准确估算出中庭空间的负荷。因此本文考虑采用充分混合模型、温度单梯度模型和自定义温度模型三种方法来简化模拟计算中庭空间的负荷。这就需要能准确确定出充分混合模型的平均温度、温度单梯度模型中的温度梯度和自定义温度模型中中庭空间的温度设定值。

5.3.1.1 充分混合模型

充分混合模型是最常用也是最简单的一种模拟计算的方法。因此，若能找

出中庭空间的等效负荷计算温度（等效负荷计算温度是指能准确计算中庭空间负荷的中庭空间平均温度），则计算有温度分层的高大空间负荷将会非常简便。从中庭空间 CFD 的温度分层结果可以看出，温度分层是由多段线性变化温度曲线组成的。因此，考虑将中庭空间的温度分层简化为两部分：(a)空调区域至距玻璃顶往下 10 米；(b)玻璃顶往下 10 米至玻璃顶。然后以这两部分的空气平均温度值作为中庭空间充分混合模型的室内空调设定温度值。

对于第一段区域，空气温度从空调设定温度线性变化至高于空调设定温度 2℃ 之间；而对于第二段区域，空气温度从高于空调设定温度 2℃ 线性变化至夏季室外计算干球温度。（见图 5.4 和表 5.3）

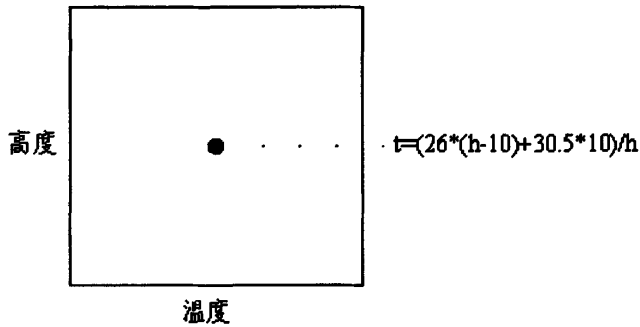


图 5.4 简化方法 1

表 5.3 各模型采用充分混合模型简化的空间温度设定值

Model	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6
T(°C)	29.8	27.1	26.6	29.8	27.1	26.6
Model	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10	Model 11	Model 12
T(°C)	28.3	27.1	26.5	28.3	27.1	26.5

5.3.1.2 单梯度温度模型

对于单梯度模型温度梯度的端点，根据 CFD 模拟结果提出下面的简化方法：假定中庭空间工作面高度 1.2m 处的中庭空间温度为空调设定温度，顶部温度为夏季室外计算干球温度。（见图 5.5 和 5.6）

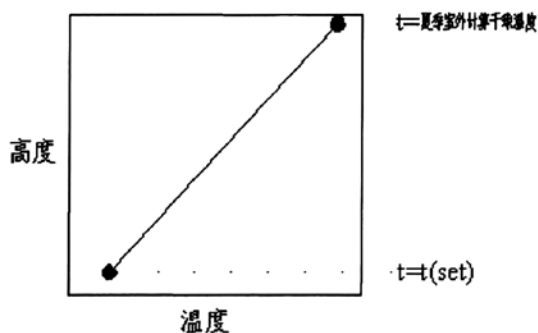


图 5.5 简化方法 2

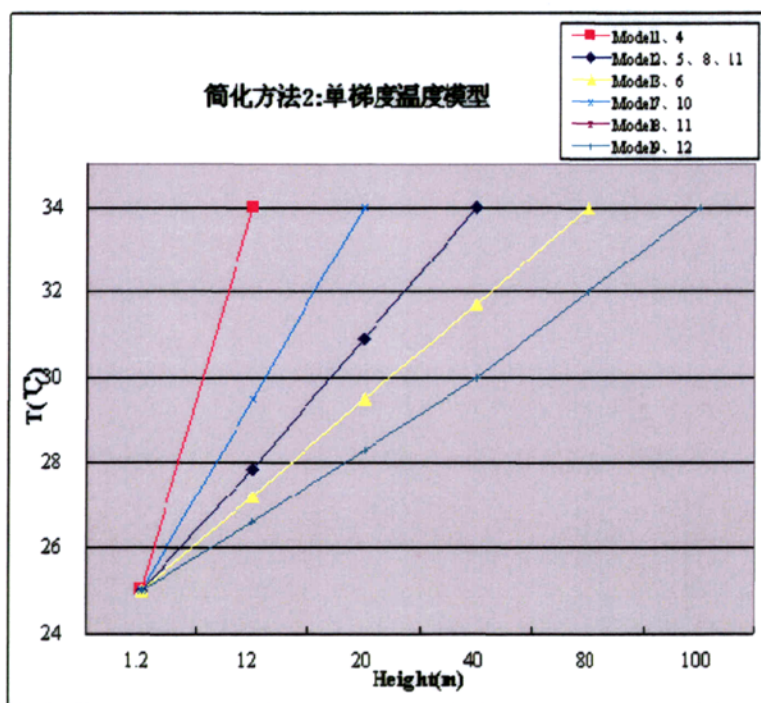


图 5.6 各模型应用单梯度温度简化模型后的中庭空间的温度分布

5.3.1.3 自定义温度模型

对于自定义温度模型中室内空调设定温度值的确定，本文提出以下的简化方法：同 4.4.1.1 充分混合模型的考虑，将中庭空间的温度分层简化为两部分：
(a) 空调区域至距玻璃顶往下 10 米；(b) 玻璃顶往下 10 米至玻璃顶。然后以这两

部分的空气温度梯度作为中庭空间自定义温度模型的两段温度梯度输入中庭空间。对于第一段区域，空气温度均从空调设定温度线性变化至高于空调设定温度 2℃ 之间；而对于第二段区域，空气温度从高于空调设定温度 2℃ 线性变化至夏季室外计算干球温度。（见图 5.7 和 5.8）

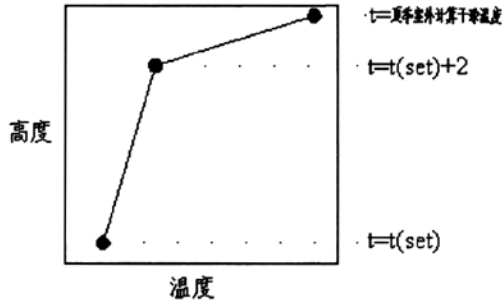


图 5.7 简化方法 3

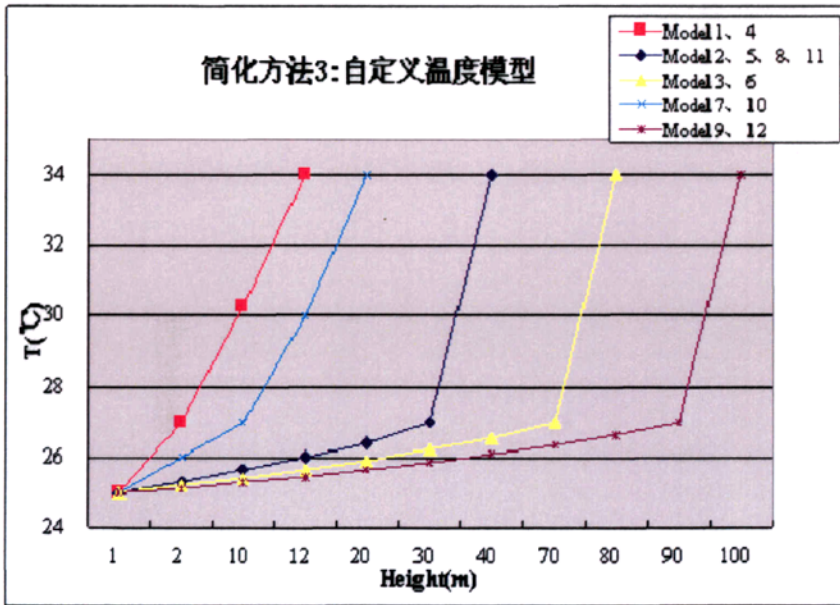


图 5.8 各模型应用自定义温度简化模型后的中庭空间的温度分布

将上述简化方法分别应用于本文中 12 个中庭模型，具体见表 5.4:

表 5.4 各简化方法应用于中庭建筑房间空气模型的具体设定方法

各中庭空间模型	具体设定方法
基准模型	将 CFD 温度分层结果以自定义温度模型输入中庭空间
充分混合模型 (空调设定温度)	传统计算室内负荷的方法, 即将房间看做充分混合空间, 将工作区空调设定温度输入中庭空间
简化方法1: 充分混合模型 (空间平均值)	第一段区域是中庭底部空调区域至玻璃顶下10m处, 温度变化从空调设定温度25℃至高于空调设定温度2℃(27℃); 第二段区域是玻璃顶下10m处至玻璃顶, 温度变化从高于空调设定温度2℃(27℃)至夏季室外计算干球温度34℃; 中庭空间的平均温度值为 $(26*(h-10)+30.5*10)/h$, 以此值作为中庭空间的空调设定温度计算中庭空间的负荷
简化方法2: 单梯度温度模型	假设中庭空间1.2m处为空调设定温度(25℃), 玻璃顶处为夏季室外计算干球温度34℃, 中庭空间温度梯度为 $(34-25)/(h-1.2)$, 以单梯度温度模型输入中庭空间
简化方法3: 自定义温度模型	中庭空间的区域划分同简化方法1, 中庭空间的平均温度值为 $(26*(h-10)+30.5*10)/h$, 以自定义模型输入中庭空间的三个温度端点, 形成两段温度梯度

5.3.2 中庭空间各简化模拟方法的结果分析

表 5.5 基准模型与充分混合模型(空调设定温度)中庭空间负荷的比较

Model	基准模型 (W)	充分混合模型 (空调设定温 度)(W)	充分混合模型(空调 设定温度)相对于自 定义温度模型结果 的误差(%)
Model1	14366	27036	+88
Model2	14114	27664	+96
Model3	17079	31482	+84
Model4	13774	26632	+93
Model5	12212	26812	+120
Model6	15364	29870	+94
Model7	22544	63059	+180
Model8	19463	62879	+223
Model9	25828	72115	+179
Model10	20534	62177	+203
Model11	13710	61463	+348
Model12	22899	71549	+212

比较相同中庭底面积、相同中庭底面长宽比和不同中庭高度的模型, 发现

它们的自定义模型得出的中庭负荷并非随着中庭体积（或中庭高度）的增大而增加或减小，呈现出一定的不规律性。而它们的充分混合模型(空调设定温度)得出的中庭负荷则是随着中庭体积（或中庭高度）的增大而增加。

以模型 1、2、3 为例，因为三个模型的非空调平均气温与空调平均气温的差值不一定相等，而且三个模型的中庭空间体积亦不等。模型 1、2、3 的体积依次增大，这对负荷有增大作用；而随着高度的增加，中庭空间的非空调平均气温和空调平均气温均发生变化，因此两者的差值并非逐渐增大或逐渐减小，因此模型 1、2、3 的自定义模型负荷结果变化不规律。而在充分混合模型(空调设定温度)中，虽然三个模型的非空调平均气温不一样（随着高度增加，中庭空间的非空调平均气温降低），但是三者的空调平均气温一样，同时体积在逐渐增大，因此模型 1、2、3 的负荷依次增大。因此为了消除中庭空间体积对负荷的影响，在后面的分析中，将中庭空间的负荷均分子单位建筑面积（各模型中，中庭底面积占建筑总投影面积的 1/10）。

比较自定义温度模型和充分混合模型(空调设定温度)的结果,若将通常所用的充分混合模型(设置成空调设定温度)应用于有温度分层的高大空间，其计算结果误差非常大，故对于高大空间的负荷计算，不宜采用充分混合模型。

由 EnergyPlus 模拟输出结果，可以得到采用基准模型与充分混合模型(空调设定温度)计算中庭空间负荷时的空调送风量的比值如表 5.6（两模型的送风温度均为 18℃），将表 5.6 与表 4.1 比较可以看出， r 与 r' 两者的误差在 10% 以内，从而进一步验证了 CFD 模拟校正的准确性。

表 5.6 基准模型与充分混合模型(空调设定温度)的中庭送风量比值 r'

Model	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
r'	0.64	0.57	0.67	0.59	0.65	0.63	0.66	0.64	0.64	0.59	0.62	0.58

表 5.7 不同简化方法中庭空间负荷均分于建筑面积的值

Model	建筑面积(m ²)	基准模型(W/m ²)	简化方法1:充分混合模型(W/m ²)	简化方法2:单梯度温度模型(W/m ²)	简化方法3:自定义温度模型(W/m ²)
Model1	3822	3.76	3.06	3.70	3.18
Model2	12056	1.17	1.40	0.60	1.24
Model3	23818	0.72	0.88	0.31	0.69
Model4	3822	3.60	2.71	3.81	3.10
Model5	12056	1.01	0.86	0.49	0.94
Model6	23818	0.65	0.82	0.10	0.69
Model7	13999	1.61	1.87	1.77	2.08
Model8	27335	0.71	0.86	0.20	0.78
Model9	67342	0.38	0.45	0.06	0.42
Model10	13999	1.47	1.69	1.60	1.89
Model11	27335	0.50	0.62	0.17	0.55
Model12	67342	0.34	0.29	0.11	0.36

表 5.8 三种简化方法与基准模型的误差

Model	简化方法1与基准模型结果的误差(%)	简化方法2与基准模型结果的误差(%)	简化方法3与基准模型结果的误差(%)
Model1	-18.59	-1.50	-15.46
Model2	19.49	-48.75	5.89
Model3	22.54	-56.78	-3.28
Model4	-24.93	5.63	-13.94
Model5	-14.96	-51.44	-6.86
Model6	26.37	-85.06	7.02
Model7	15.99	9.88	29.07
Model8	20.30	-72.49	9.54
Model9	17.28	-83.07	9.49
Model10	15.22	8.99	29.02
Model11	23.62	-66.75	9.42
Model12	-14.06	-67.05	7.13

表 5.7 中的建筑面积是指扣除一层以上的中庭底面积的建筑面积。如对于 Model1, 将建筑底面积乘以 3 减去中庭底面积乘以 2 得到 Model1 的建筑面积。

表 5.8 中误差值为负表明简化方法计算出的负荷小于基准模型的结果。各模型采用简化方法 1 时, 计算结果与基准模型结果的误差很大, 因此, 简化方法 1

对各中庭均不适用；对于模型 1、4、7、10，当采用简化方法 2 时，其结果的误差在 10%以内，当采用简化方法 3 时，其结果的误差在 14%至 30%；对于模型 2、3、5、6、8、9、11、12，采用简化方法 2 时，其结果与基准模型结果的误差很大，当采用简化方法 3 时，其结果的误差在 10%以内。

因此，高度相对较小的中庭比较适合采用单梯度温度模型（简化方法 2）；而随着中庭高度增大，单梯度简化方法的误差较大，高度较大的中庭空间比较适合采用简化方法 3（自定义温度模型）。

5.3.2.1 中庭高度对中庭空间负荷的影响分析

对于相同底面积的模型，随着高度的增加，单位建筑面积的负荷逐渐减小。这是因为相同底面积，接受的太阳辐射相等，而太阳辐射对中庭空间的影响有一定的高度范围，因此中庭高度增加，中庭空间体积增大，太阳辐射的影响范围占整个中庭的比例越小，故单位建筑面积的负荷越小。

5.3.2.2 中庭底面积对中庭空间负荷的影响分析

底面积大的中庭空间接受的太阳辐射增加，这会增大中庭空间的负荷，但同时建筑面积也增大，因此其单位建筑面积的负荷变化不确定。

5.3.2.3 中庭底面长宽比对中庭空间负荷的影响分析

由相同中庭底面积、相同中庭高度和不同中庭底面长宽比的模型结果看出，底面长宽比大的中庭空间负荷略有减小。相同中庭底面积和相同中庭高度使得中庭空间接受太阳辐射相等，中庭空间体积也相等，而底面长宽比大的中庭空间侧面积较大，向周围空调房间的散热较多，因此负荷减小。

5.4 确定影响中庭负荷的体型系数表达式及其应用范围

在中庭建筑结构方面，对中庭负荷有影响的主要是与空间外部存在热量交换的壁面。对于本文的研究对象——顶面采光的核心中庭建筑，其与空间外部存在热量交换的壁面主要是中庭底面积 S 和中庭侧面积 A 。由于中庭顶面是玻璃面，直接接受太阳辐射，因此中庭底面积越大，中庭的负荷越大；而中庭侧面在本文模型中均为空调房间，因此中庭空间通过其侧面散热，故中庭侧面积越大，中庭的负荷越小。因此，本文选用 $R=A/S$ 作为影响中庭负荷的体型因

子, 即 $R=L \cdot h/S$, L 为中庭底面周长。

各模型的体型因子及较准确简化方法相对于基准模型结果的误差见表 5.9:

表 5.9 各模型的体型因子及较准确简化方法的误差

Model	体型因子 R	相应模型适用的简 化方法	较准确简化方法较基准 模型的误差 t (%)
Model1	4.13	单梯度温度模型	-1.50
Model2	13.00	自定义温度模型	5.89
Model3	26.00	自定义温度模型	-3.28
Model4	4.17	单梯度温度模型	5.63
Model5	13.89	自定义温度模型	-6.86
Model6	27.78	自定义温度模型	7.02
Model7	4.62	单梯度温度模型	9.88
Model8	8.64	自定义温度模型	9.54
Model9	21.60	自定义温度模型	9.49
Model10	4.56	单梯度温度模型	8.99
Model11	9.11	自定义温度模型	9.42
Model12	22.78	自定义温度模型	7.13

从表中可以得到, 当中庭底面积占建筑投影面积的 1/10 时, 对于中庭体型因子小于 8 的建筑, 可以采用单梯度温度模型来简化中庭空间的负荷计算; 对于中庭体型因子大于 8 的建筑, 采用自定义温度模型来简化中庭空间的负荷计算, 误差一般控制在 10%。

5.5 中庭底面积占建筑投影面积的比例对中庭负荷的影响

为了讨论中庭底面积占建筑投影面积的比例对中庭负荷的影响, 本文新建模型 13 (将模型 1 的建筑投影面积缩小至中庭底面积的 6.3 倍, 而中庭底面积、中庭底面长宽比、中庭高度不变), 计算模型 13 中庭空间基准负荷及各简化方法的误差值。

比较 Model1 和 Model13 的计算结果, 中庭空间基准模型的负荷值基本不变, 这说明中庭底面积占建筑投影面积的比例对中庭空间的负荷值影响不大。因为中庭四周都为空调房间, 只有中庭顶部与外界直接接触, 受外界环境影响小。同时, Model13 可采用简化方法 2 (单梯度温度模型) 来准确模拟计算中庭空间负荷, 误差控制在 5% 以内。

表 5.10 模型 1 与模型 13 中庭空间各方法的负荷值

Model	体型因子 R	基准模 型(W)	基准模 型 (W/m ²)	简化方法 2: 单梯度 温度模型 (W/m ²)	简化方法 3: 自定义 温度模型 (W/m ²)	简化方法2 与基准模 型结果的 误差(%)	简化方法3 与基准模 型结果的 误差(%)
Model1	4.13	14366	3.76	3.70	3.18	-1.50	-15.46
Model13	4.13	14259	6.19	6.10	5.14	-1.42	-16.96

由于中庭底面积占建筑投影面积的比例并非中庭负荷的敏感因子，因此，可将结论扩展为当中庭底面积占建筑投影面积的 1/6 至 1/20 时，对于中庭体型因子小于 8 的建筑，可以采用单梯度温度模型来简化中庭空间的负荷计算；而对中庭体型因子大于 8 的建筑，采用自定义温度模型来简化中庭空间的负荷计算，误差一般可控制在 10%。

第 6 章 具有中庭空间的某高层办公建筑的模拟与实测验证

为了验证模拟方法的准确性和可靠性，本文对上海某典型办公建筑的中庭进行了现场实测，并将实测结果与模拟结果进行对比和验证。

该中庭建筑为 25 层的办公建筑，总高 100 米，采用双层玻璃幕墙，中庭顶部采用天窗玻璃屋顶，同时中庭空间采用部分侧面采光。建筑底面积为正方形，中庭空间在建筑的正中间，其底面为正方形，面积占建筑投影面积的十分之一。

6.1 测试内容及方法

6.1.1 中庭空间温度分层测试

为了验证 CFD 的模拟结果，本文对某高层办公建筑的中庭空间的热环境进行现场测试，为期两天，主要对中庭空间温度沿垂直高度上的变化进行测试分析。

本文采用将 BES-02 温湿度采集记录器按一定的高度贴附于一根垂直的测试线上的方法来测试办公建筑中庭空间各垂直高度的逐时温度值。首先在中庭正中间垂直悬挂一根测试线，测试线的顶部固定一个氦气球，以保证测试线不会弯曲，从而保证贴附于测试线上的温湿度采集记录器能处于准确的高度位置。温湿度采集记录器的高度分别为 2.4m, 10.4m, 18.4m, 26.4m, 34.4m, 42.4m, 50.4m, 58.4m, 66.4m, 74.4m, 78.4m, 82.4m, 86.4m, 90.4m，其中在接近中庭顶部，温湿度采集记录器的安放垂直高度间隔减小为 4m，而处于中庭空间底部的温湿度采集记录器的安放垂直高度间隔为 8m，这是因为考虑到中庭空间顶部透明的玻璃天窗，直接接受太阳辐射，温度较高，靠近中庭顶部的空间温度分层会比中庭底部明显很多，因此在靠近中庭空间顶部安放较多的温湿度采集记录器有利于得到更多数据，便于更准确地得到中庭空间的温度分层数据。



图 6.1 现场测试图片



图 6.2 现场测试及温湿度采集记录器图片

温湿度采集记录器是一种用于节能建筑现场测试的室内、外温度采集、环境监测、科研测试的超低能耗测试仪表。它不但测温范围宽、精度高、存储量大，而且连续测量时间长，不需要现场接线，使用方便。因此非常适合本文中的测试。在用于本文现场测试之前，需先对温湿度采集记录器进行校正，以消除系统误差。

首先通过计算机对温湿度采集记录器设定相关参数（校对时钟、开始时间、结束时间、数据采集周期（本现场测试中设定为 10min）、现场编号等），将温湿度采集记录器放置于一稳定环境中同一个地方，经过一定时间之后，通过计算机读取测量数据，剔除坏值，然后将同一时刻的各温湿度采集记录器记录值的

平均值记为该时刻环境温度的真实值，从而可以得到当前时刻各温湿度采集记录器记录值相对于真实值的误差，选取三个时刻，将各温湿度采集记录器三个时刻的误差平均值作为该温湿度采集记录器的误差。具体校正数据见附录 D。

6.1.2 建筑负荷模拟输入参数的测试

在建立建筑负荷模型中，室内负荷、室外天气参数等输入参数对结果影响很大，因此为了使建筑负荷模型的结果与实测结果吻合，必须使模型的输入参数符合建筑实际的运行情况。本文通过现场测试得到模型的主要输入参数。

现场测试周期为两天，测试内容包括：每天对办公建筑三个典型时刻（09:00、11:30、14:00）采集建筑各房间内的在室人员、照明开启数、使用设备、房间内空调设定温度等数据并记录。室外天气参数由同济大学某气象站测得，所测得室外天气参数包括温度、湿度、风速、风向等。

对于办公建筑中的灯具功率及设备（主要是台式液晶电脑）功率由钳形电流表测得。任意选定三个办公房间，对其房间内的电路控制板用钳形电流表测定，将所得三个房间的灯具功率和设备功率取平均值，得到灯具及设备功率分别为 38W/盏和 120W/台。

办公建筑空调系统的总供回水温度及流量通过机房监控系统读取，其水温及流量数据记录间隔为 15min/次。

6.2 实测建筑的模拟内容及方法

6.2.1 中庭温度分层模拟

本文采用 Fluent 软件对实测建筑进行中庭空间温度分层模拟。在建立模型时，需输入的参数有中庭空间几何尺寸、边界条件，室内负荷，送风口位置、送风状态、送风量等。

为了简化模型，本文作如下假设：

- e) 中庭空间内空气不可压缩且符合 Boussinesq 假设；
- f) 空气流动为稳态湍流；
- g) 中庭空间内空气为辐射透明介质；
- h) 不考虑漏风影响，认为室内气密性良好；在空调期间，室内成正压状态，

无渗透。

6.2.1.1 中庭空间几何尺寸及边界条件的确定

由于本文实测建筑的中庭为核心式中庭与三向中庭的组合，因此在建立中庭空间模型时，采取从整栋建筑挖除周边房间的方法来得到最接近实际中庭的几何形状。

对于壁面边界条件，假定中庭建筑内中庭区域周围的空调区域稳定在空调设定状态，壁面温度相对稳定，因此中庭空间与周围空调区域接触的壁面设定为温度为 27℃ 的定温壁面。对于中庭空间与地面接触的地板设定为定热流边界。由于考虑中庭底部有一定的人员、设备等室内负荷，为了便于网格生成，在建立模型时将中庭空调区域内的室内负荷均匀分布于地板，从而简化为地板的定热流输入。对于中庭顶部接受太阳辐射的玻璃屋顶边界条件，本文设定为热流边界，其透过玻璃顶的热流值由软件 EnergyPlus 计算得到。

6.2.1.2 送风口位置、送风状态及送风量的确定

实测建筑中庭空间的送风口为中庭底层侧送风，送风口为条形风口，风口尺寸及位置按照实际输入，送风温度为 18℃，送风速度为 1.5m/s，位于建筑 13 层和 19 层与中庭相通区域分别有室内绿化区域，其中有空调送风，在模型中也输入相应的风口参数。同时在中庭顶部设置出风口，以符合实际的排风口。

太阳辐射值的确定等同于上述典型中庭模型中太阳辐射值的确定，选定为夏季设计日 14 时的太阳辐射值，包括顶部太阳辐射值、各朝向太阳辐射值。

6.2.1.3 Fluent 内的参数设置

考虑中庭空间内的空气为不可压缩流体，因此在房间内的气流属于稳态三维不可压缩紊流流动，在计算中采用 k-ε 模型。同时，考虑到中庭空间内由浮力引起的垂直高度方向上的空气流动，在 Fluent 模拟中开启浮力计算选项。图 6.3 为实测中庭建筑的温度分层模型的三维示意图。

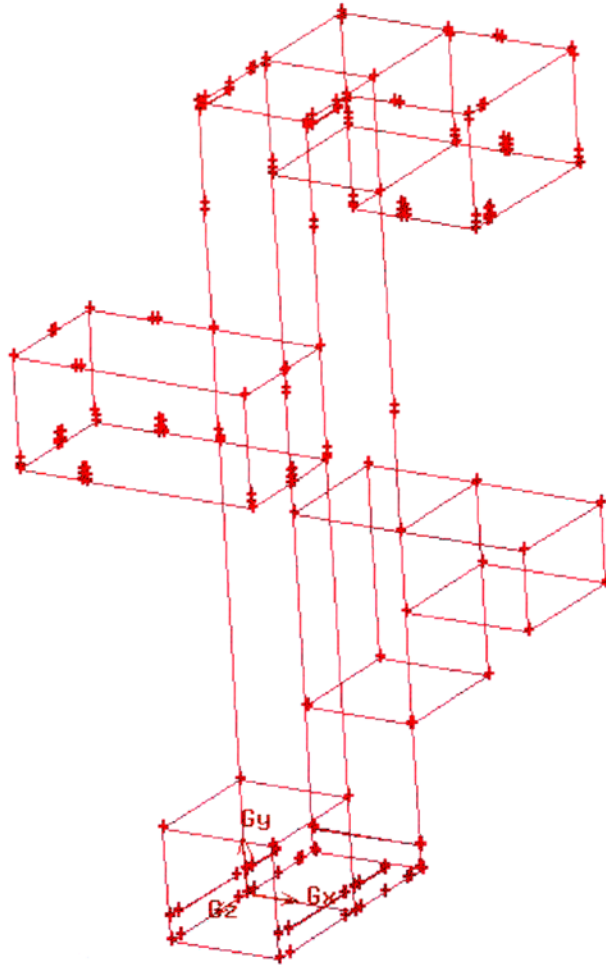


图 6.3 实测中庭建筑的温度分层模型的三维示意图

6.2.2 建筑负荷模拟计算

本文采用建筑全能耗分析软件 EnergyPlus 对实测建筑进行负荷的模拟计算。在建立建筑模型时，需输入的参数包括地理位置、天气参数、建筑几何尺寸和朝向、围护结构、室内人员密度、照明与设备负荷、空调系统形式等。

6.2.2.1 地理位置和天气参数

本文测试的办公建筑位于上海，故地理位置就定位在上海。上海纬度 31.12° ，经度 -121.26° ，时区 GMT+8。将同济大学内某气象站所测得的室外天气参数（室

外温度、湿度、风速、风向等) 输入上海典型气象年的相应数据中作为本建筑模型的室外环境输入参数。

6.2.2.2 建筑几何模型

建筑几何模型根据测试的实际建筑确定。建筑模型 21 层，主朝向为正南。建筑底面为正方形，标准层面积 2500 m^2 。中庭位于建筑的正中央，底面是边长为 15m 的正方形，中庭从建筑底层贯穿至建筑顶层，其顶面为透明的玻璃，内装有遮阳装置。图 6.4 是建筑模型立体示意图。

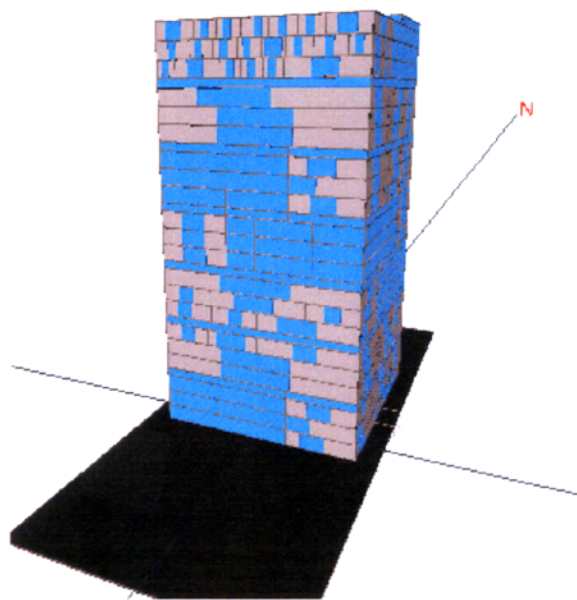


图 6.4 实测建筑模型立体示意图

6.2.2.3 建筑围护结构

围护结构包括外墙、外窗和屋顶三部分，根据实测建筑实际情况设定，具体参数见表 6.1:

表 6.1 实测建筑围护结构参数

围护结构部位	传热系数 $K(W/(m^2 \cdot K))$	
屋面	0.62	
外墙（包括非透明幕墙）	0.73	
外窗（包括透明幕墙）	2.5	SC =0.53(SHGC=0.46)
屋顶透明部分	2.5	SC =0.45(SHGC=0.384)

6.2.2.4 室内负荷与运行时间

室内负荷由照明、设备和人员负荷构成。本模型中的室内负荷由实测得到。建筑各功能区运行时间表亦根据建筑运行的实测结果而确定。

本文实测建筑通过冷冻水的供回水温差和流量的乘积来计算建筑的负荷，因此本模型中不涉及冷热源，只计算冷冻水的供回水温度及其流量。

6.2.2.5 新风量与漏风率

本模型中的新风量根据实测建筑空调系统运行时开启新风机组的总风量设定。外区房间漏风率按照 0.2 h^{-1} 计，空调系统开启时因房间呈正压，漏风率为零。

6.3 中庭建筑的实测结果

6.3.1 建筑中庭空间垂直高度温度分层的实测结果

测试完毕之后，将温湿度采集记录器取下，通过通讯接口一次性读取测量数据，通过对数据的校正，得到测试两天内各时刻的中庭空间的温度值。附录 E 为经过校正后中庭空间垂直高度方向各时刻的温度值。

本文选取同一天不同时刻的中庭空间垂直方向温度分布（图 6.5 和 6.6）和同一时刻不同天的中庭空间垂直方向温度分布（图 6.7 和 6.8）来分析问题：

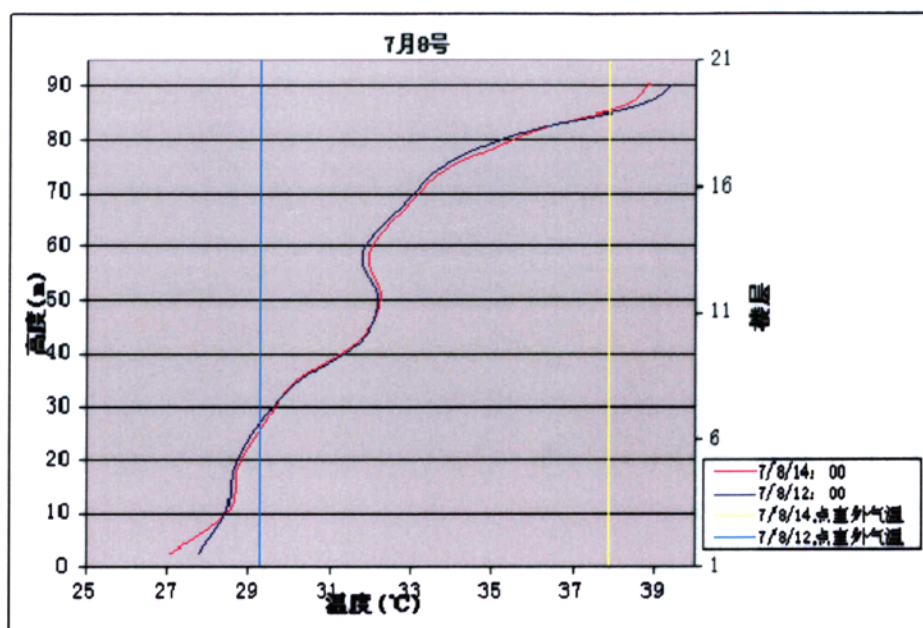


图 6.5 7 月 8 号不同时刻中庭空间的垂直温度分布

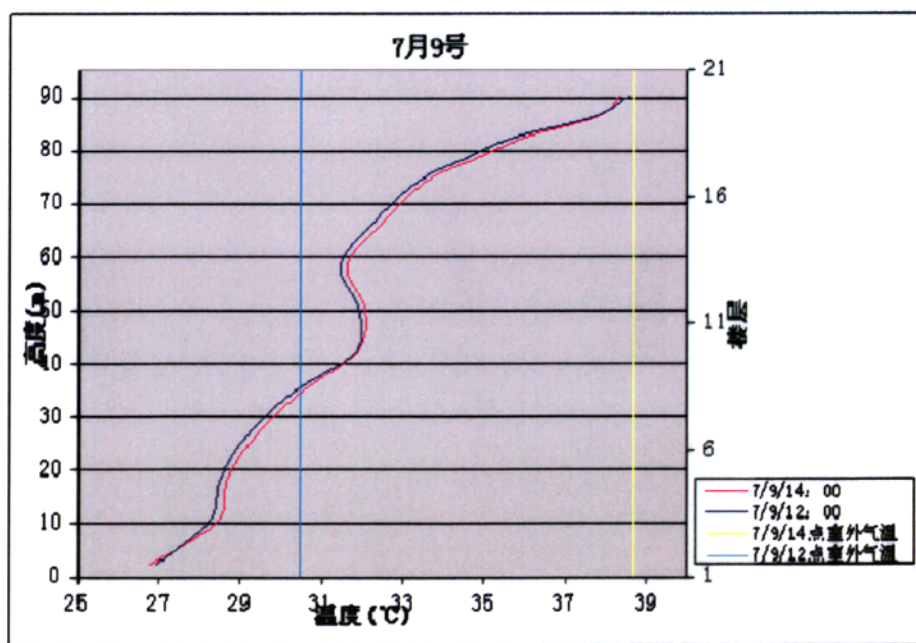


图 6.6 7 月 9 号不同时刻中庭空间的垂直温度分布

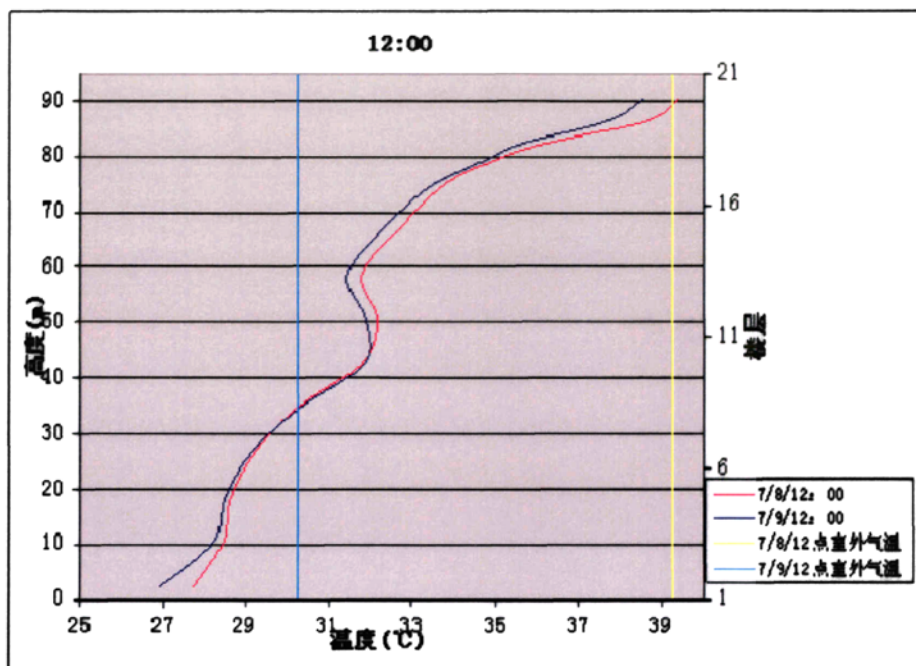


图 6.7 不同天中午 12 时中庭空间的垂直温度分布

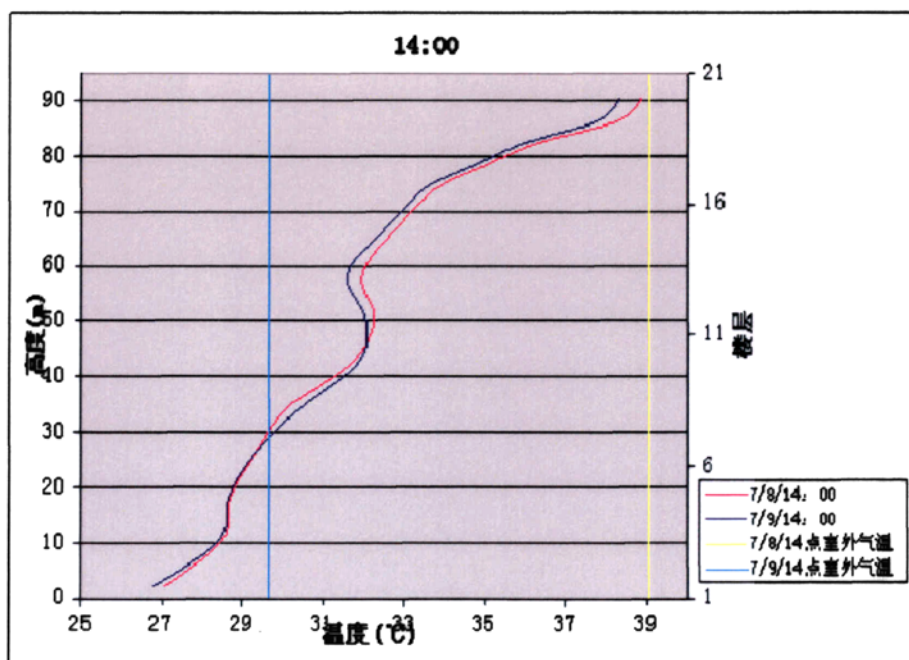


图 6.8 不同天下午 14 时中庭空间的垂直温度分布

由结果可以看出,对于实测建筑,同一天不同时刻的中庭空间垂直方向温度分层基本不变。由此证明可以采用设计日 14 时的温度分层代表中庭空间夏季白天的温度分层。中庭空间从底部的空调区温度基本以线性梯度逐渐上升,至高度为 40 米至 50 米处,中庭空间温度基本不变且略有降低,随后又基本以线性梯度逐渐上升至中庭顶部。由于在 40 米高度有一片室内绿化区域,其中有一定的空调送风保持绿化区域的温度不会过热,而这片绿化区域与中庭相连,因此影响到中庭的温度分布,使得这层周围的中庭温度基本稳定。同一时刻不同天的温度分层也基本不变,遵循相同的规律。因此,在室外条件和建筑内部负荷运行情况均相对稳定时,中庭空间的垂直温度分布基本保持不变。

由于实测条件的限制,最靠近中庭顶部 10 米空间的空气温度未能实测到,但从图中可以看出,在中庭 90 米处有温度急剧上升的趋势。这与本文研究的 12 个中庭模型空间的温度分层相似,在靠近中庭顶部 10 米距离空气温度变化剧烈。由于本文研究的模型都是顶面采光的中庭建筑,中庭顶面都是玻璃透明围护结构,在导热的同时,透射太阳辐射,从而加热室内空气。如果中庭顶面为一般的混凝土围护结构,则能大大减少太阳辐射得热,从而降低室内空气温度。

6.3.2 中庭建筑模型输入参数的实测结果

测试时间为期两天,分别记录典型时刻各房间的室内负荷运行情况及空调状态,并以此确定出各房间两天内的室内负荷运行时间表。

建筑室内负荷及其运行时间表详见附录 F,实测建筑冷冻水逐时供、回水温度及流量见附录 G。

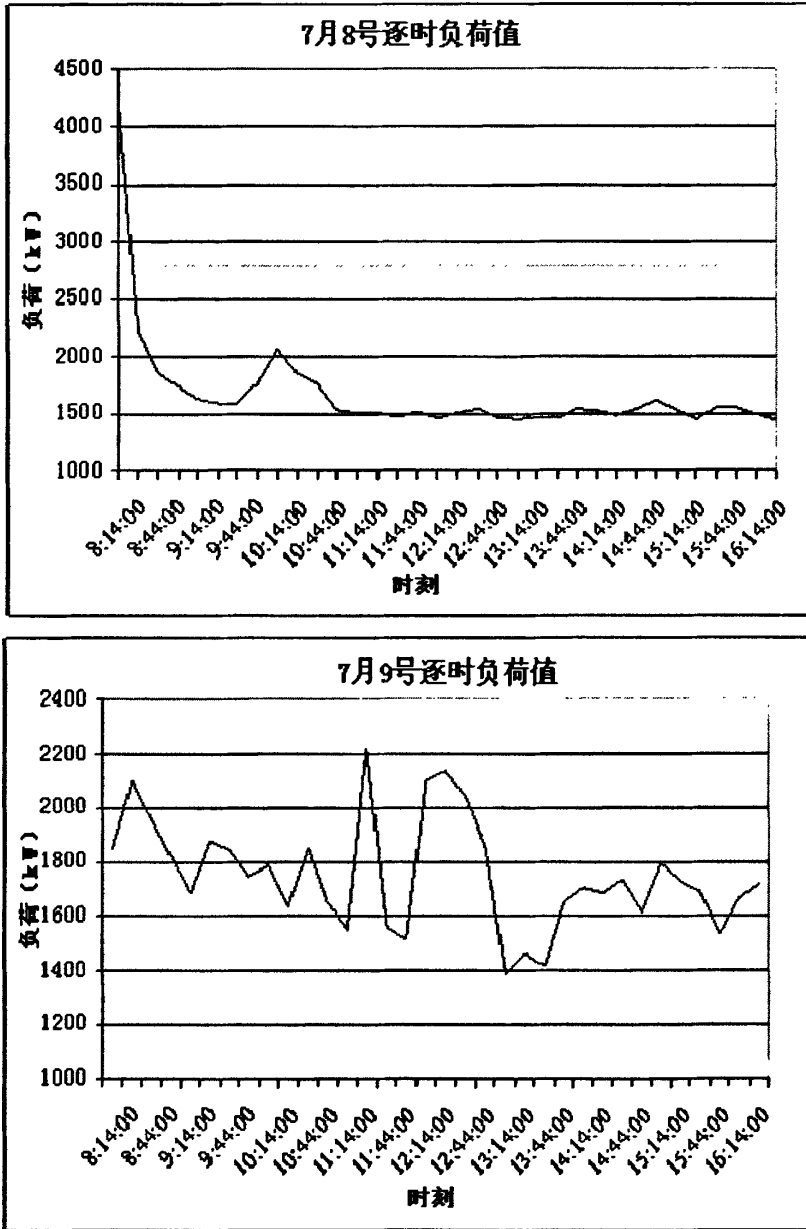


图 6.9 实测建筑逐时负荷值

比较两天的逐时负荷，7月8号早晨开机负荷很大，而7月9号早晨开机负荷不是很明显，这可能由于8号夜间室外温度相对较低，室内蓄热不多造成的。空调负荷波动是由于室内负荷变化及室外天气变化引起的，如7月9号在中午

就餐至下午上班之间负荷波动较大。

6.4 中庭建筑的模拟结果

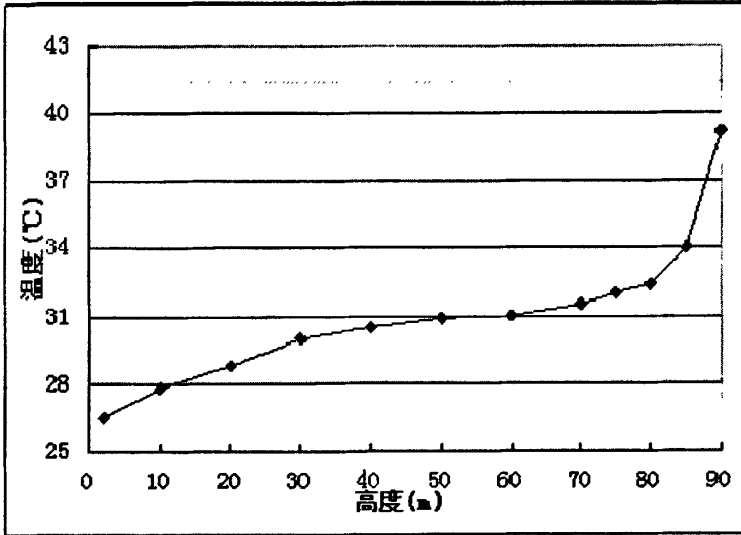


图 6.10 实测建筑 CFD 温度分层模拟结果

图 6.10 为实测建筑在 7 月 9 号 14 点的 CFD 温度分层模拟曲线图，其结果截图见附录 H。

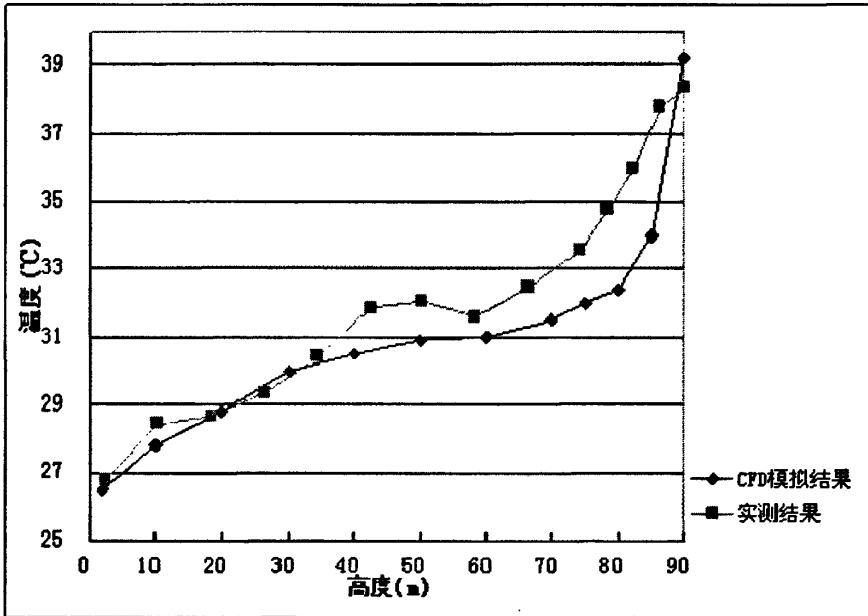


图 6.11 实测建筑中庭空间温度分层模拟结果与实测比较

图 6.11 可以看出，在 40 米以下区域，CFD 模拟与实测结果吻合较好，而 40 米以上部分 CFD 模拟结果较实测结果偏低。因为在 CFD 模拟中，中庭四周壁面的边界条件设定为定温边界 27℃，而实测建筑中楼层 11 至 17 层在测试时都没有开启空调，而 18 至 21 层有侧面采光，因此中庭空间的四周壁面温度偏高，并非保持在 27℃，所以实测结果 40 米以上部分的温度较模拟结果略有偏高。

由于在 CFD 模拟中设定中庭壁面的温度为 27℃，而实际中庭由于上部温度较高，其上部的壁面温度不可能仍然维持在 27℃，这一 CFD 边界条件的设定会对温度分层结果引起一定的误差，但由图 6.11 可以看出，这一边界条件对温度分层影响不大，误差在可接受范围，因此亦可以证明前面 12 个模型中 CFD 定温壁面边界条件对温度分层结果影响的误差在可接受范围内。

表 6.2 为实测建筑总负荷值与模拟建筑总负荷值的比较，建筑模型中采用自定义温度模型输入中庭空间 7 月 9 号 14 点的温度分层实测值得到的建筑总负荷。

表 6.2 建筑负荷实测值与模拟值比较

时间	实测值 (kW)	模拟值(kW)	模拟值相对于实测值的误差 (%)
7月9号14时	1652	1581	-4

表 6.3 中庭空间采用不同空气温度模型的负荷值

时 间	自定义温度模型 (实测温度分层) (W/m^2)	充分混合模型(空调设定温度)(W/m^2)	自定义温度模型 CFD 模拟结果 (W/m^2)	简化方法 2: 单梯度模型 (W/m^2)	简化方法 3: 自定义温度模型(W/m^2)
7月9号14时	5.08	16.50	5.54	4.37	4.51
其他方法相对实测温度分层自定义温度模型误差 (%)		体型因子 $R=26.67$	9.16	-13.80	-11.22

表 6.3 为对实测建筑中庭空间采用不同空气温度模型所得到的中庭空间负荷值，其中中庭空间的温度分布情况均采用 7 月 9 号 14 点的值。

表 6.3 的结果表明，CFD 模拟得到的温度分层结果是比较准确的，由此得到的中庭空间负荷值相对于将实测温度分层值输入到自定义温度模型中得到的中庭空间负荷的误差为 9.16%。实测建筑中庭的体型因子为 26.67，简化方法 2 相对于自定义温度模型（实测温度分层）的误差为-13.80%，简化方法 3 相对于自定义温度模型（实测温度分层）的误差为-11.22%。由此看出，对于实测建筑，简化方法 3 较简化方法 2 更适合用于计算中庭空间的负荷，即验证了前面得到的结论。

第7章 结论与研究展望

7.1 结论

中庭在现代建筑中被广泛采用,而其热环境受诸多因素影响相当复杂,传统的空调设计方法根本不能满足实际工程设计的需要,同时设计人员缺乏量化的辅助分析工具,中庭热环境的设计和空调效果往往不理想,不但使用者的舒适性得不到满足,同时也造成了大量的能源浪费。因此,寻求一种能准确模拟计算中庭负荷的方法是十分有必要的。因此本文研究一种能用能耗模拟软件 EnergyPlus 准确模拟各类中庭建筑负荷的方法。

本文研究对象确定为仅有顶面采光的中庭建筑,首先通过文献资料搜集各类中庭信息,确定出影响中庭负荷的因子,根据这些影响因子对中庭建筑进行分类。然后对每类中庭建筑分别建立 CFD 模型和能耗模型,CFD 模型用于模拟中庭空间的温度分层,能耗模型则用于计算中庭空间的负荷。根据 CFD 模拟结果归纳计算中庭空间的简化方法(包括充分混合模型、单梯度温度模型和自定义温度模型等),并在能耗模型中应用各简化方法计算中庭空间的负荷。在自定义温度模型中输入由 CFD 模拟的中庭空间的温度分层得到的中庭空间负荷作为中庭空间最接近实际负荷的结果,然后比较各简化方法模拟结果的准确性,总结出适用于一定体型中庭建筑的负荷简化计算方法。

为了验证这种研究方法的准确性,本文对一栋实际的中庭建筑进行相同方法的研究,并在典型夏季日对实际中庭建筑进行中庭空间温度分层及室内负荷使用情况、建筑逐时负荷的现场测试,并用实测数据作为模拟的输入参数,保证模型的准确性,从而验证论文研究方法的准确性。

根据本文的研究,可得到以下结论:

一、中庭的温度分层与负荷特点

由 CFD 模拟结果及实测结果总结出中庭建筑玻璃顶接受的太阳辐射对中庭空间热环境的影响范围约在距玻璃顶以下 10 米左右。

对于相同底面积的中庭,其高度越高,则中庭负荷均分子于建筑面积的值越小。这是因为中庭空间越高,太阳辐射的影响范围占中庭空间的比例越小,因

此对中庭空间的负荷影响亦越小；而对于相同底面积的中庭，底面周长越大，其负荷越小。底面周长越大表明中庭侧面积（不与外界环境直接接触）大，与周围空调房间换热越多，其负荷就越小。

二、中庭空间负荷的计算方法

对中庭等高大空间，传统的充分混合模型不适合用于其负荷计算。本文通过模拟计算与现场实测总结出适用于具有温度分层中庭的负荷简化计算方法。

三、中庭的体型系数与简化计算方法

对于只有顶面采光的核心中庭，体型因子 R 表示中庭空间不与外界环境直接接触的侧面积与采光面积之比。

通过本文的研究得出对中庭底面积占建筑投影面积 $1/6$ 至 $1/20$ 的中庭的负荷简化计算方法：

对于中庭体型因子小于 8 的建筑，可以采用单梯度模型来简化中庭空间的负荷计算；假定中庭空间工作面高度 1.2m 处的中庭空间温度为空调设定温度，顶部温度为夏季室外计算干球温度。

对中庭体型因子大于 8 的建筑，采用自定义温度模型来简化中庭空间的负荷计算；将中庭空间的温度分层简化为两部分：**(a)**空调区域至距玻璃顶往下 10 米，空气温度均从空调设定温度线性变化至高于空调设定温度 2°C 之间；**(b)**玻璃顶往下 10 米至玻璃顶，空气温度从高于空调设定温度 2°C 线性变化至夏季室外计算干球温度。然后以这两部分的空气温度梯度作为中庭空间自定义温度模型的两段温度梯度输入中庭空间。

7.2 研究展望

由于研究时间有限，本文的研究仍缺乏一点完整性，只对核心式顶面采光中庭建筑做了研究，而中庭建筑的其它分类，如侧面采光中庭建筑、混合采光中庭建筑、单向中庭建筑等有待于做进一步研究，并对本文的结论加以更多的实际中庭建筑的验证，最终寻找出适合各类中庭建筑的负荷模拟简化方法，以形成一套完整准确的计算中庭建筑负荷的简化方法。

致谢

感谢我的导师潘毅群教授对我的悉心指导，在我攻读硕士学位期间，她的言传身教将是我终生受益。

感谢中德工程学院的黄治钟老师，两年来对我的教育和帮助，他严谨治学的态度对我影响颇深。在此谨向潘毅群老师和黄治钟老师致以诚挚的谢意。

感谢同门师友黄森、林兴斌、姚远、张洁、左明明，正是由于你们的帮助和支持，我才能顺利完成论文实测及模拟工作。

感谢同学王颖在研究生学习生活中给我的支持与帮助，在论文期间帮我搜集相关资料，与我一起摸索如何准确运用模拟软件。

最后感谢我的父母对我的支持和培养，没有他们我不可能完成今天的学业。

从论文的选题到最终成稿，我得到过很多人的帮助与关心，在此不一一列出了，由衷的感谢所有帮助过我的人！

2009年3月

参考文献

- [1] Maria Wall. A design tool for glazed spaces, ASHARE TRANS,95 PART 2:1261-1271.
- [2] Morad R.Atif,David E.Claridge,Lester L.Boyer. Atrium Buildings:Thermal Performance and Climatic Factors.ASHARE TRANS,93 PART I:454~460.
- [3] Guohui Gan, Saffa B. Riffat. CFD modelling of air flow and thermal performance of an atrium integrated with photovoltaics. *Building and Environment* 39 (2004) 735-748.
- [4] L. Yi, W.K. Chow, Y.Z. Li, R. Huo. A simple two-layer zone model on mechanical exhaust in an atrium. *Building and Environment* 40 (2005) 869-880.
- [5] Abdelaziz Laouadi, Morad R. Atif. Comparison between computed and filed measured thermal parameters in an atrium building. *Building and Environment* 34 (1999) 129-138.
- [6] Özgür Göçer, Aslihan Tavail, Ertan Özkan. Thermal performance simulation of an atrium building. eSim 2006 Building Performance Simulation Conference.
- [7] Littlefair,P. Daylight prediction in atrium buildings. *Solar Energy*, 2002,73,(2), 105-109.
- [8] Brent Griffith, Qingyan (Yan) Chen. Framework for coupling room air models to Heat Balance Model Load and Energy Calculations. HVAC&R RESEARCH, April2004, Volume10, Number2.
- [9] Beausoleil-Morrison, I.2000. The adaptive coupling of heat and air flow modeling within dynamic whole-building simulation. Ph.D.Thesis, University of Strathclyde.
- [10] E. Djunaedy, J.L.M. Hensen, M.G.L.C. Loomans. External coupling between CFD and Energy Simulation:implementation and validation. ASHRAE Transactions, Vol 111, Part 1.
- [11] Atila Novoselac. 2005. Combined airflow and energy simulation program for building mechanical system design. Ph.D.Thesis,The Pennsylvania State University.
- [12] 彭小云, 中庭的热环境与节能研究, 东南大学博士学位论文, 2003.
- [13] 彭小云, 夏热冬冷地区中庭的热环境调查研究, 绿色建筑与建筑物理.
- [14] 白雪莲, 中庭建筑能耗简析, 重庆建筑大学学报, 第21卷第6期.
- [15] 田先锋, 建筑中庭热舒适度控制与节能设计, 北京建筑工程学院硕士学位论文, 2004.
- [16] 王欢, 基于能耗控制的采光中庭空间形态构成影响因子研究, 浙江大学硕士学位论文, 2008.
- [17] 雷涛, 中庭空间生态设计策略的计算机模拟研究, 清华大学硕士学位论文, 2004.
- [18] 诸群飞, 辅助设计用中庭热环境全年动态模拟方法的研究, 清华大学硕士学位论文, 2007.
- [19] 陆耀庆.实用供热空调设计手册, 中国建筑工业出版社, 2005.
- [20] 陶文铨.数值传热学 2 版, 西安交通大学出版社, 2001.
- [21] 中华人民共和国建设部.《公共建筑节能设计标准 GB50189—2005》. 中国建筑工业出版社. 2005.

参考文献

- [22] Lawrence Berkely National Laboratory, University of Illinois, University of California.
EnergyPlus3.0 Manual[M]. California: LBNL in Berkeley , 2002.

附录 A：中庭建筑各能耗模型俯视及立面图

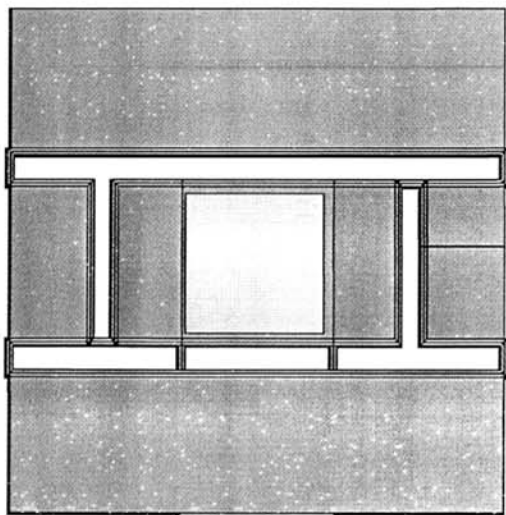


图 A1 Model 1、2、3 的俯视图

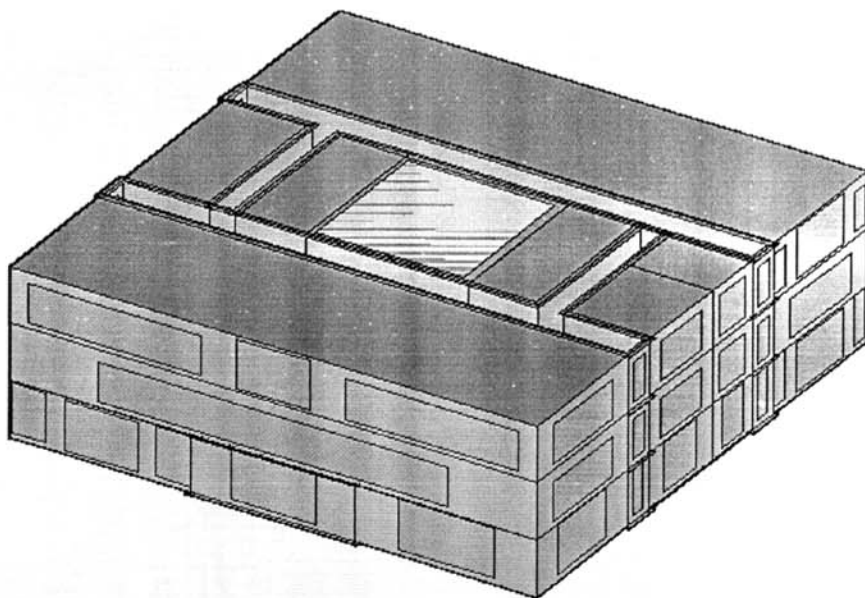


图 A2 Model 1 的立面图

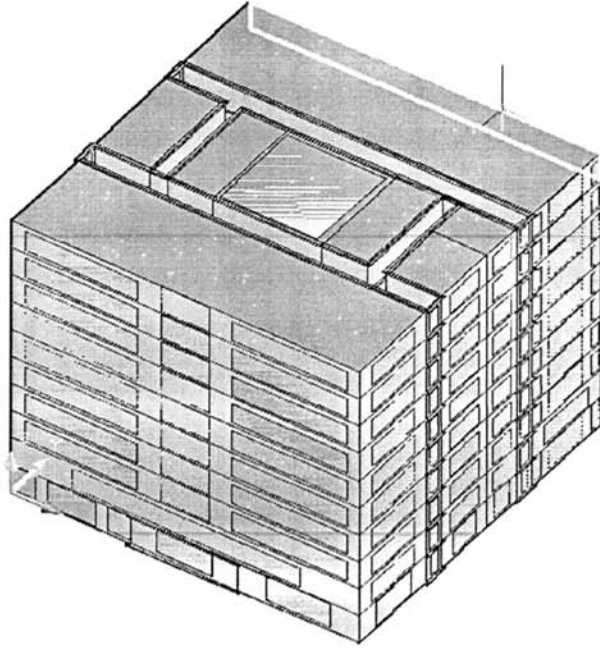


图 A3 Model 2 的立面图

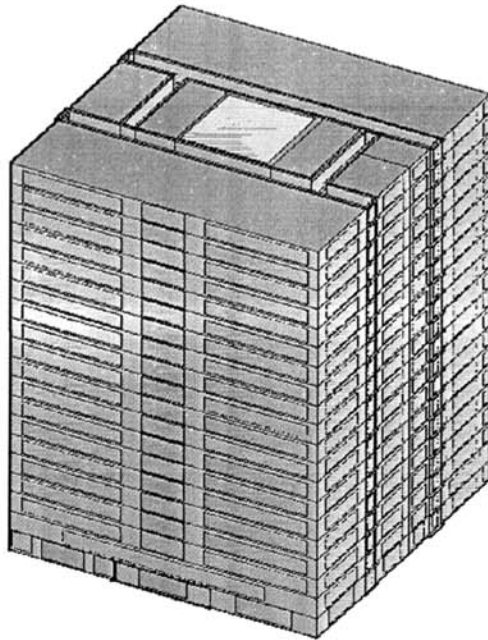


图 A4 Model 3 的立面图

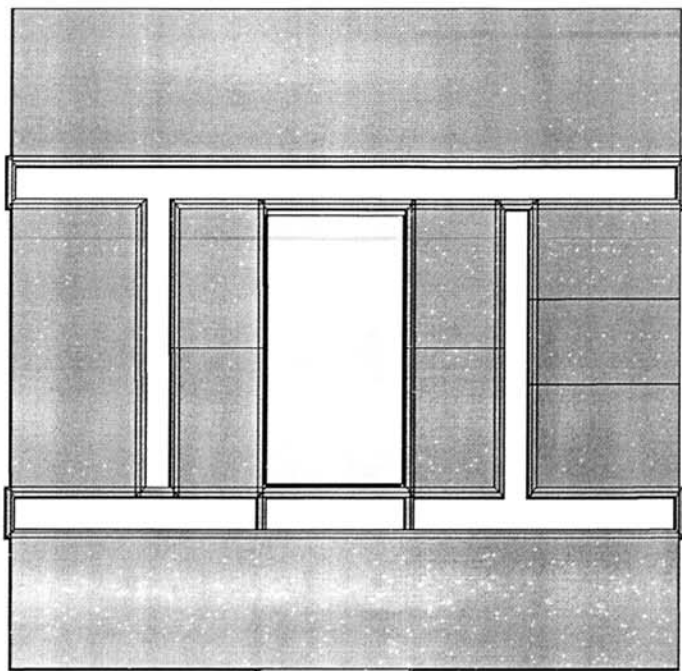


图 A5 Model 4、5、6 的俯视图

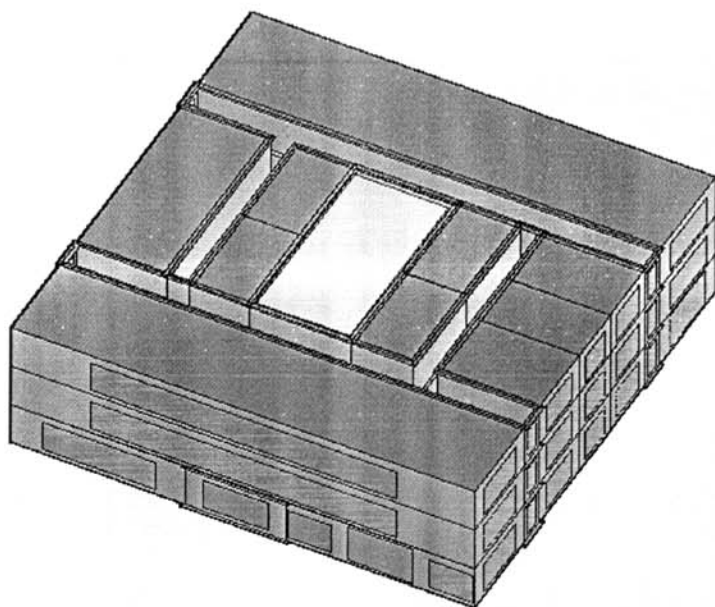


图 A6 Model 4 的立面图

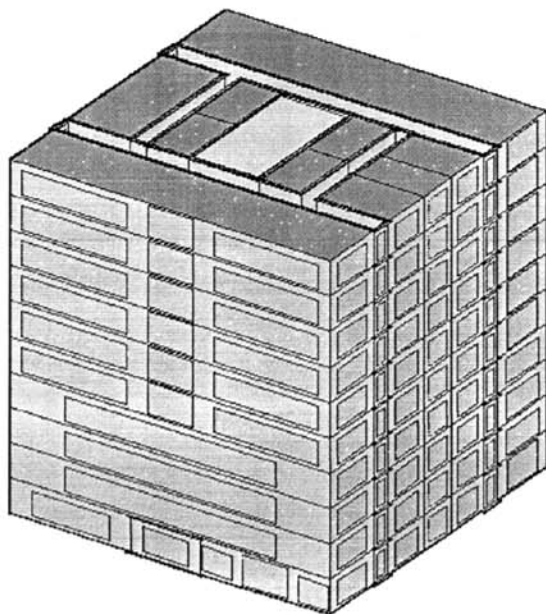


图 A7 Model 5 的立面图

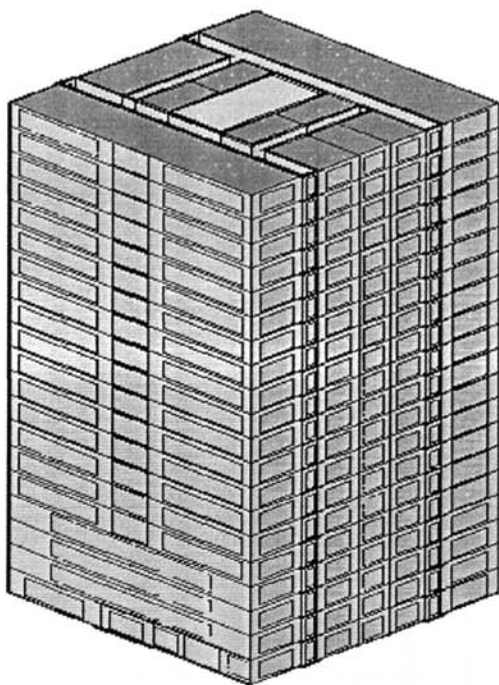


图 A8 Model 6 的立面图

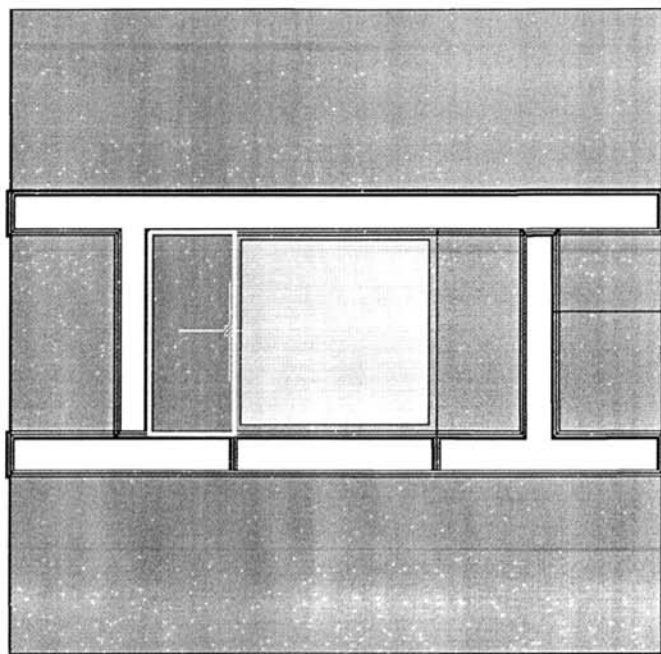


图 A9 Model 7、8、9 的俯视图

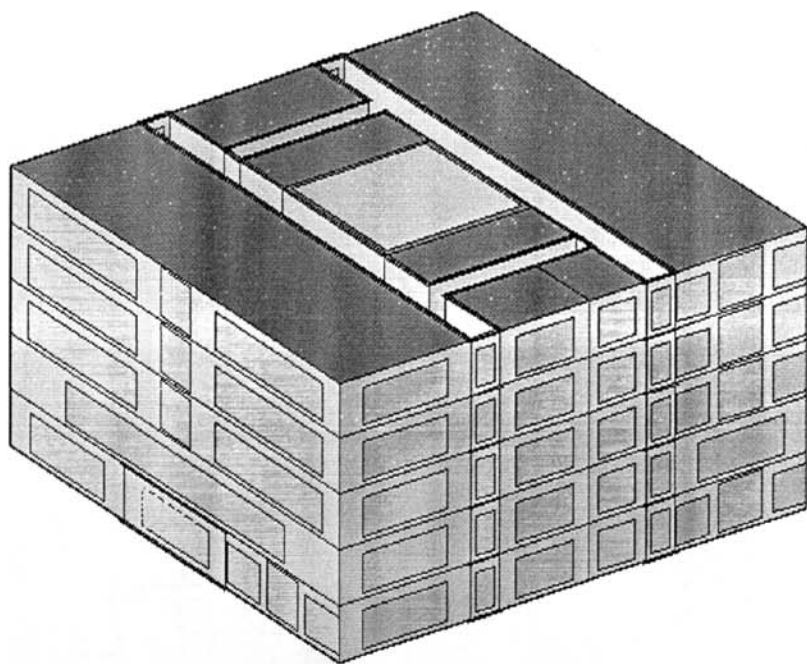


图 A10 Model 7 的立面图

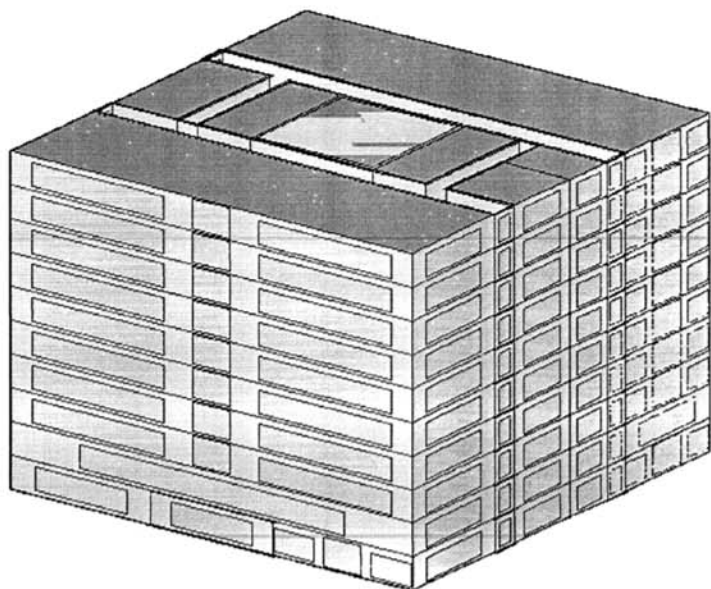


图 A11 Model 8 的立面图

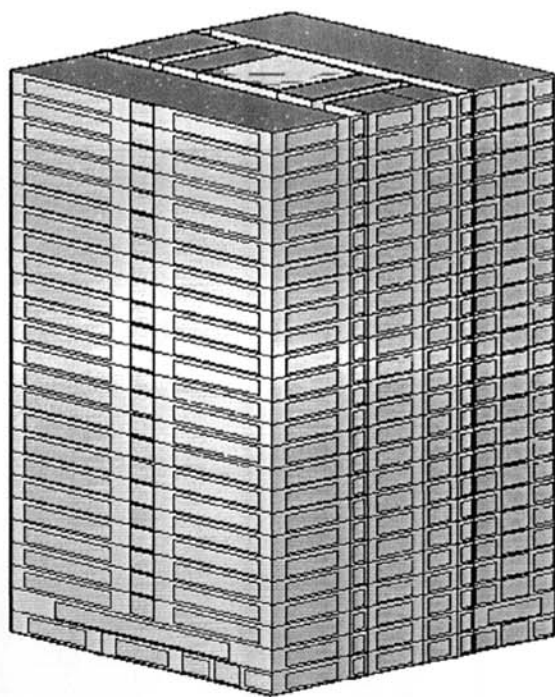


图 A12 Model 9 的立面图

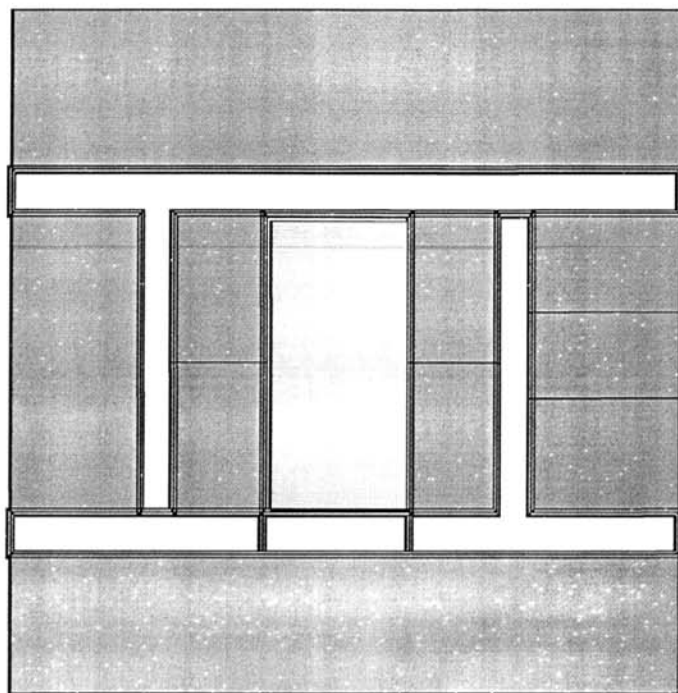


图 A13 Model 10、11、12 的俯视图

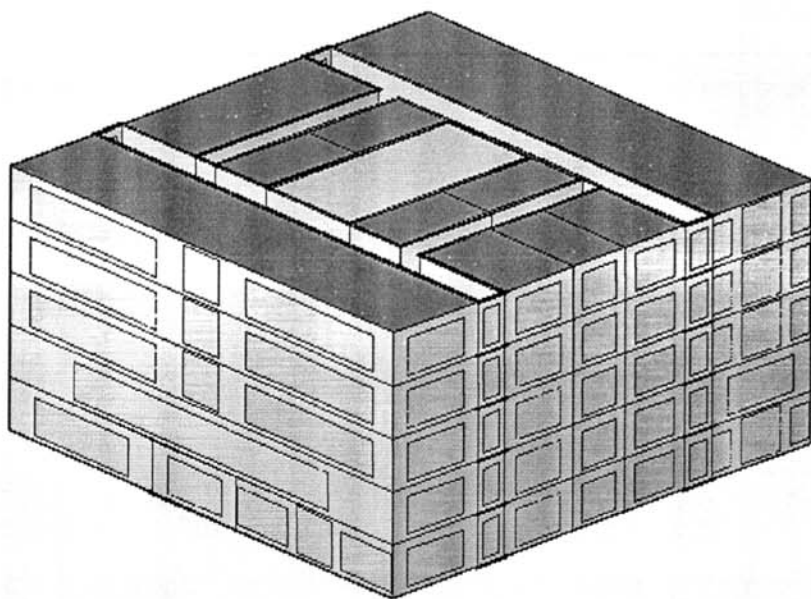


图 A14 Model 10 的立面图

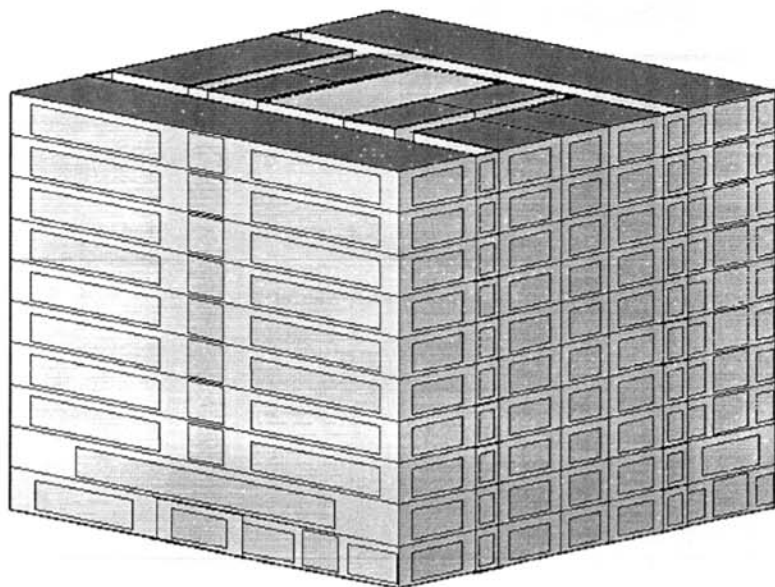


图 A15 Model 11 的立面图

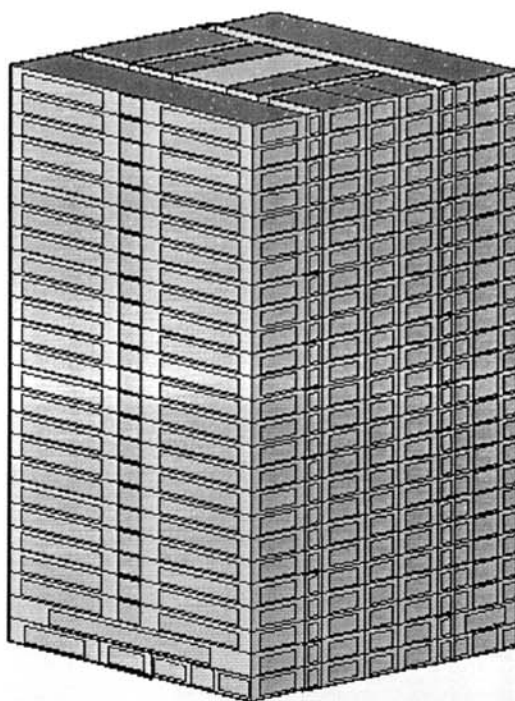


图 A16 Model 12 的立面图

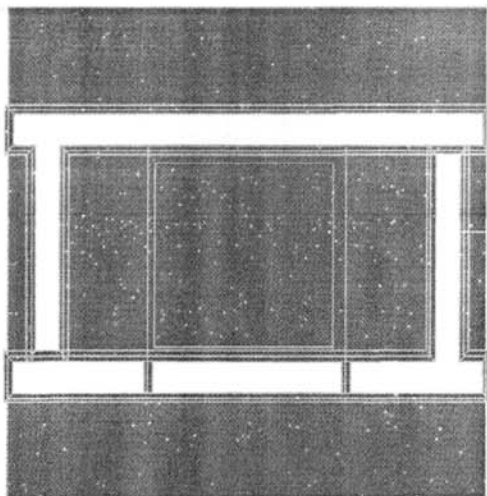


图 A17 Model 13 的俯视图

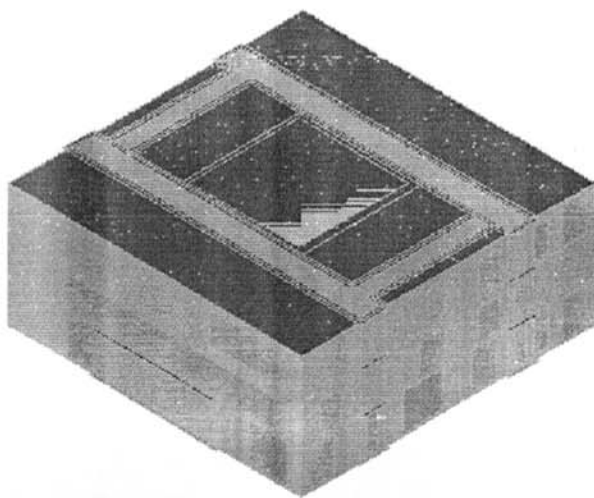


图 A18 Model 13 的立面图

附录 B: 中庭建筑模型各功能区运行时间表

表 B1 房间人员逐时在室率(%):

		时 间											
房间类别		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
工作日	办公室	0	0	0	0	0	0	10	50	95	95	95	80
	便利店	0	0	0	0	0	0	100	100	80	70	70	100
	电梯厅	0	0	0	0	0	0	100	100	80	70	70	100
节假日		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		时 间											
房间类别		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
工作日	办公室	80	95	95	95	95	30	30	0	0	0	0	0
	便利店	100	80	70	70	80	90	90	0	0	0	0	0
	电梯厅	100	80	70	70	80	90	90	0	0	0	0	0
节假日		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

附录 B 中庭建筑模型各功能区运行时间表

表 B2 照明逐时开启率(%):

		时 间											
房间类别		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
工作日	办公室	0	0	0	0	0	0	10	50	95	95	95	80
	便利店	0	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100	100
	电梯厅	0	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100	100
节假日		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		时 间											
房间类别		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
工作日	办公室	80	95	95	95	95	30	30	0	0	0	0	0
	便利店	100	100	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0
	电梯厅	100	100	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0
节假日		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 B3 设备逐时使用率(%):

		时 间											
房间类别		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
工作日	办公室	0	0	0	0	0	0	10	50	95	95	95	50
	便利店	0	0	0	0	0	0	100	100	80	70	70	100
	电梯厅	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
节假日		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		时 间											
房间类别		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
工作日	办公室	50	95	95	95	95	30	30	0	0	0	0	0
	便利店	100	80	70	70	80	90	90	0	0	0	0	0
	电梯厅	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
节假日		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

附录 C: 中庭建筑中庭空间的温度分层模拟结果截图

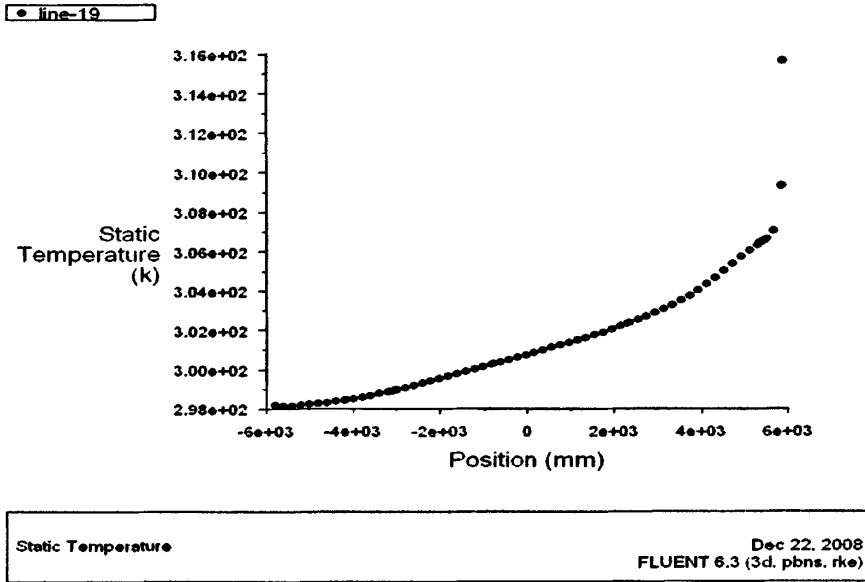


图 C1 Model 1 中庭空间温度分层示意图

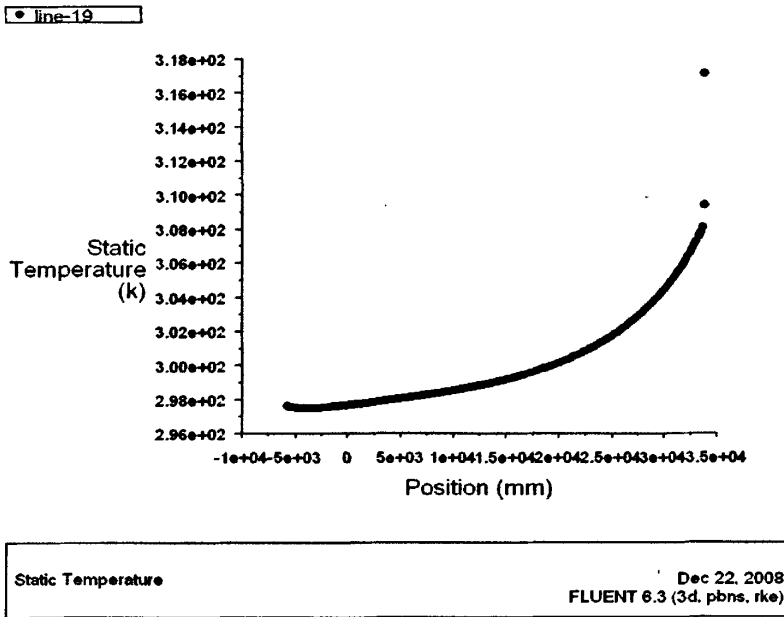
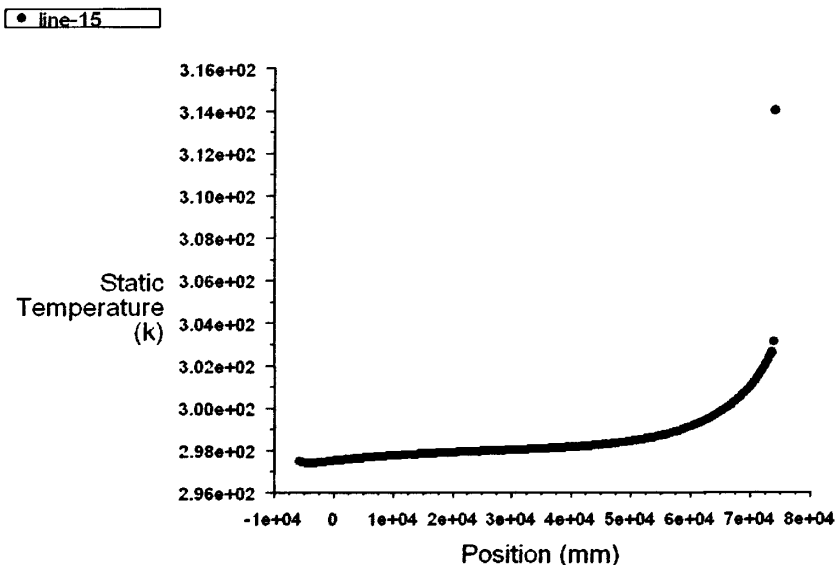


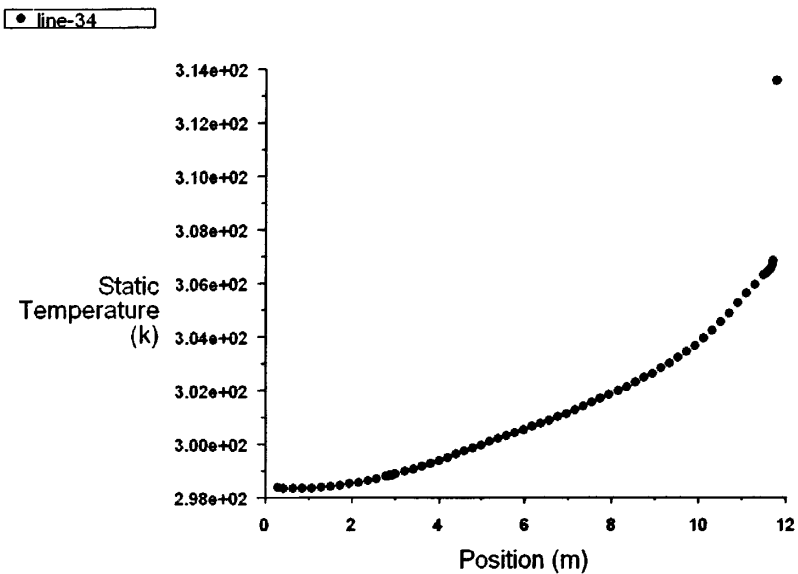
图 C2 Model 2 中庭空间温度分层示意图

附录 C 中庭建筑中庭空间的温度分层模拟结果截图



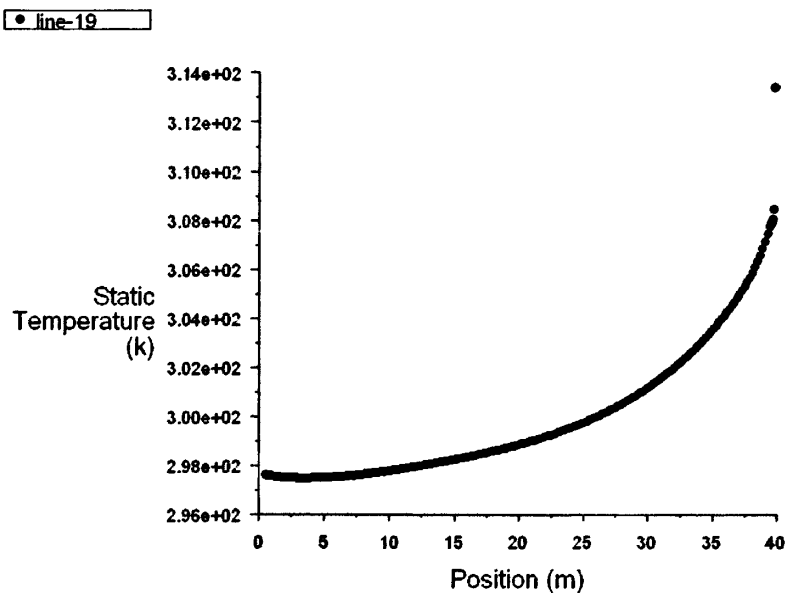
Static Temperature Dec 22, 2009
FLUENT 6.3 (3d, pbns, rke)

图 C3 Model 3 中庭空间温度分层示意图



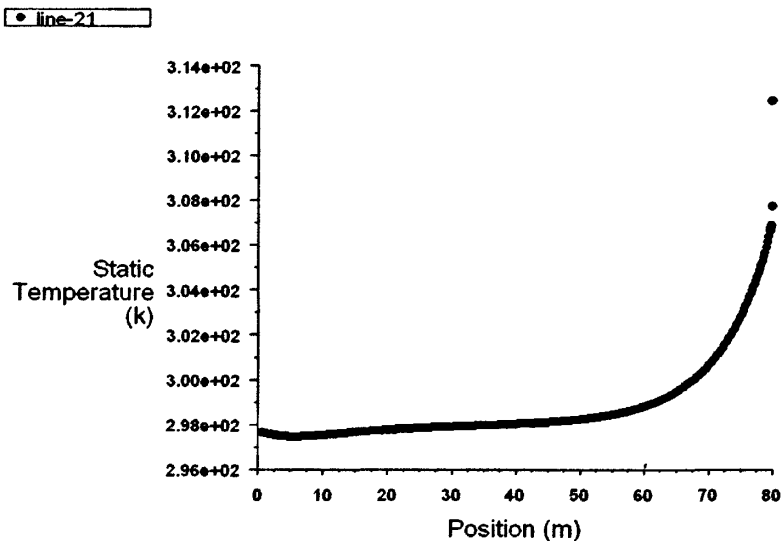
Static Temperature Dec 23, 2008
FLUENT 6.3 (3d, pbns, rke)

图 C4 Model 4 中庭空间温度分层示意图



Static Temperature Dec 23, 2008
FLUENT 6.3 (3d, pbns, ike)

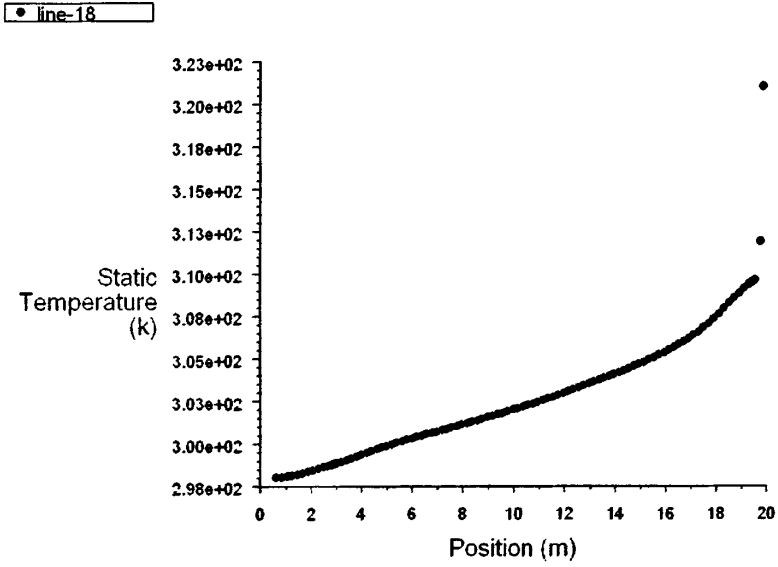
图 C5 Model 5 中庭空间温度分层示意图



Static Temperature Dec 23, 2008
FLUENT 6.3 (3d, pbns, ike)

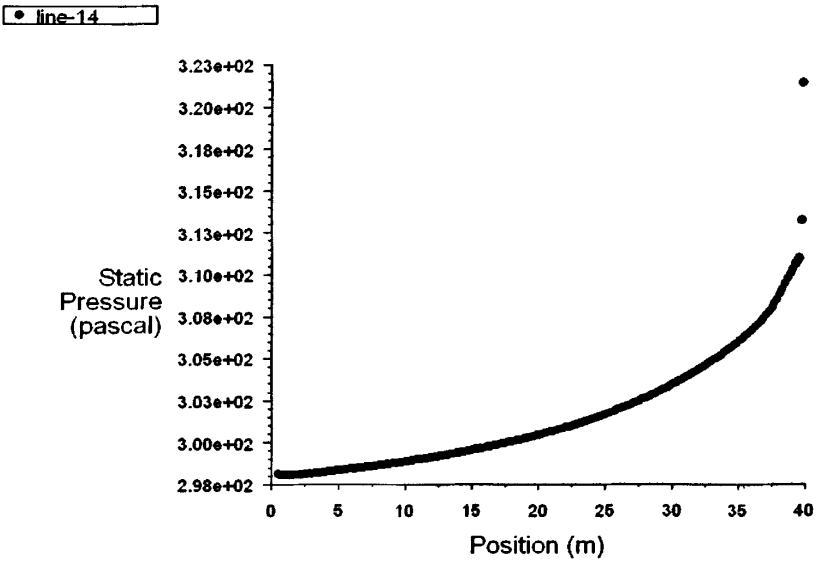
图 C6 Model 6 中庭空间温度分层示意图

附录 C 中庭建筑中庭空间的温度分层模拟结果截图



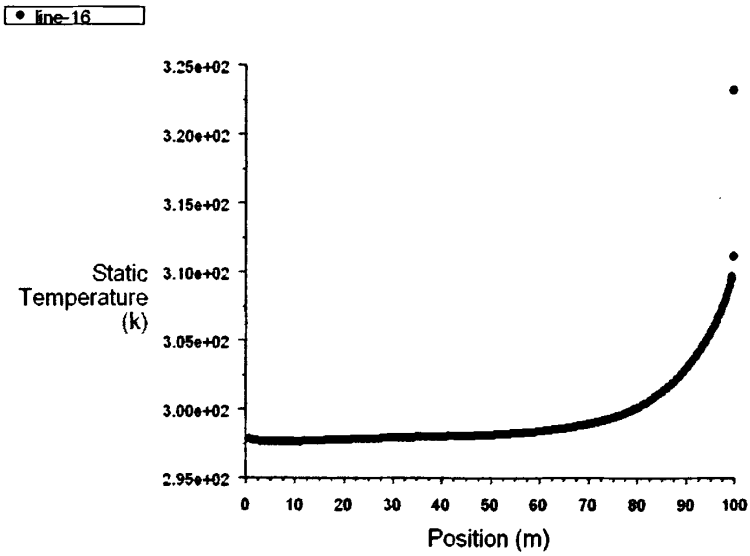
Static Temperature
 Dec 22, 2008
 FLUENT 6.3 (3d, pbns, rke)

图 C7 Model 7 中庭空间温度分层示意图



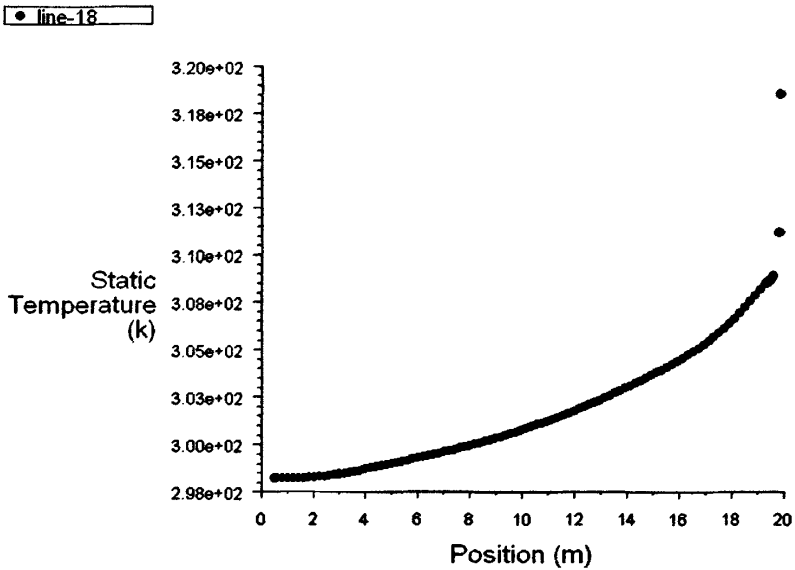
Static Pressure
 Dec 22, 2008
 FLUENT 6.3 (3d, pbns, rke)

图 C8 Model 8 中庭空间温度分层示意图



Static Temperature
Dec 23, 2008
FLUENT 6.3 (3d, pbns, rke)

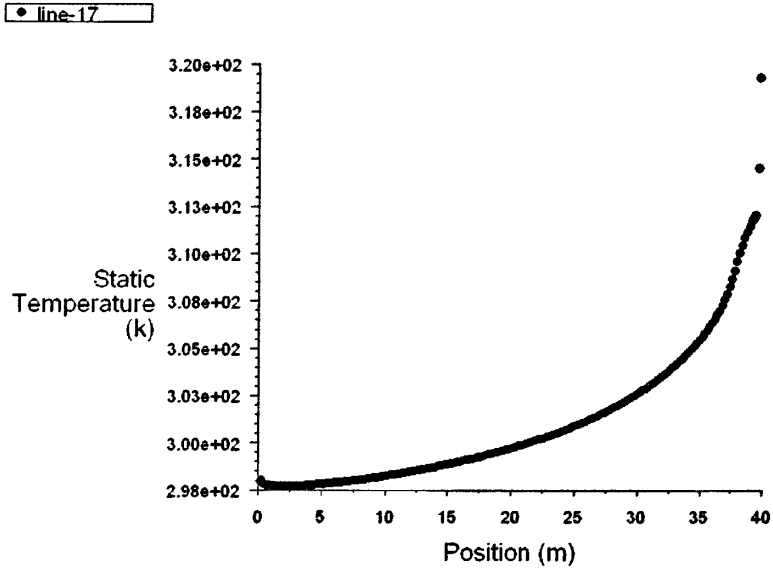
图 C9 Model 9 中庭空间温度分层示意图



Static Temperature
Dec 22, 2008
FLUENT 6.3 (3d, pbns, rke)

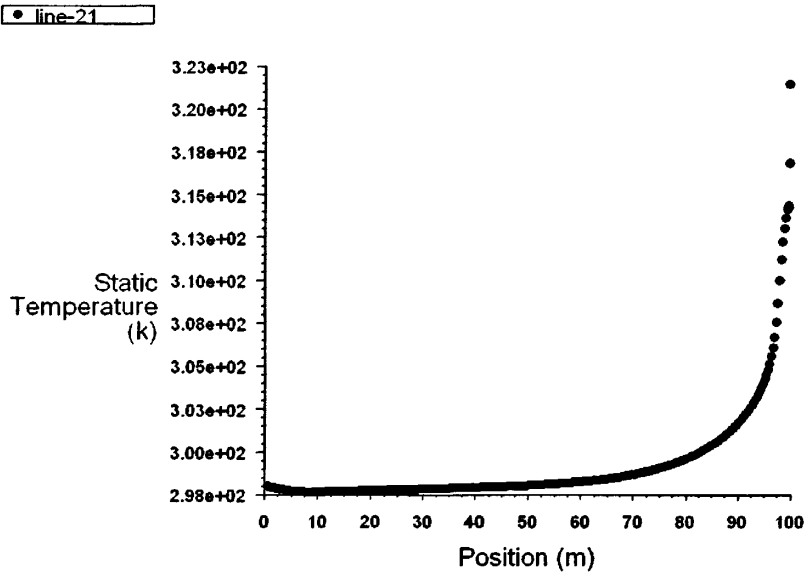
图 C10 Model 10 中庭空间温度分层示意图

附录 C 中庭建筑中庭空间的温度分层模拟结果截图



Static Temperature
Dec 22, 2009
FLUENT 6.3 (3d, pbns, rke)

图 C11 Model 11 中庭空间温度分层示意图



Static Temperature
Dec 23, 2008
FLUENT 6.3 (3d, pbns, rke)

图 C12 Model 12 中庭空间温度分层示意图

附录 D: 温湿度采集记录器的校正

编号	时刻1 (℃)	时刻2 (℃)	时刻3 (℃)	同一时刻各温湿度采集记录器的误差			综合考虑各时刻后 各温湿度采集记录器的误差 (℃)
				时刻1 (℃)	时刻2 (℃)	时刻3 (℃)	
1	26.76	26.86	26.81	-0.35	-0.24	-0.20	-0.26
2	27.24	27.18	27.09	0.13	0.08	0.08	0.10
3	26.93	26.95	26.90	-0.18	-0.15	-0.11	-0.15
4	26.97	26.96	26.91	-0.14	-0.14	-0.10	-0.13
5	26.81	26.81	26.79	-0.30	-0.29	-0.22	-0.27
7	27.28	27.17	27.07	0.17	0.07	0.06	0.10
8	27.74	27.59	27.40	0.63	0.49	0.39	0.50
10	26.88	26.88	26.83	-0.23	-0.22	-0.18	-0.21
11	26.86	26.96	26.92	-0.25	-0.14	-0.09	-0.16
12	27.04	27.08	27.02	-0.07	-0.02	0.01	-0.03
13	27.23	27.28	27.22	0.12	0.18	0.21	0.17
14	27.24	27.20	27.05	0.13	0.10	0.04	0.09
15	27.33	27.27	27.14	0.22	0.17	0.13	0.17
16	27.07	27.10	27.06	-0.04	0.00	0.05	0.00
17	27.24	27.16	26.98	0.13	0.06	-0.03	0.05
平均值 (℃)	27.11	27.10	27.01				

附录 E: 实测建筑中庭空间各时刻垂直高度的温度值

温湿度采集记录器		7月8号各时刻温度 (°C)									
编号	高度 (m)	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
1	90.4	34.38	36.99	38.2	39.63	39.41	38.6	38.87	38.34	37.69	36.82
2	86.4	34.19	36.5	37.74	38.98	38.64	37.93	38.29	38.01	37.08	36.4
3	82.4	33.54	34.96	35.69	36.59	36.22	35.89	36.28	36.23	36.26	35.89
4	78.4	32.41	33.77	34.14	34.92	34.66	34.36	35.04	34.92	35.19	35.35
5	74.4	32.39	33.25	33.32	33.59	33.67	33.39	33.85	34.23	34.48	34.55
7	66.4	31.76	32.15	32.44	32.46	32.62	32.53	32.74	33.02	33.22	33.49
8	58.4	31.18	31.53	31.67	31.78	31.77	31.69	31.96	32.28	32.26	32.32
10	50.4	31.68	32.02	32.15	32.18	32.18	32.09	32.26	32.22	31.95	32.01
11	42.4	31.2	31.77	31.86	31.86	31.76	31.73	31.7	31.48	31.11	31.29
12	34.4	30.58	30.46	30.35	30.33	30.17	30.14	30.11	30.2	30.29	30.51
13	26.4	30.25	29.79	29.47	29.29	29.21	29.23	29.35	29.52	29.73	30.03
14	18.4	29.73	28.95	28.79	28.61	28.63	28.61	28.71	28.91	29.05	29.37
15	10.4	29.47	28.54	28.49	28.33	28.45	28.45	28.51	28.63	28.81	29.53
16	2.4	29.78	27.76	26.97	27.04	27.75	27.19	27.06	27.26	28.6	27.98
温湿度采集记录器		7月9号各时刻温度 (°C)									
编号	高度 (m)	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
1	90.4	35.33	37.36	38.97	39.07	38.54	38.01	38.33	37.1	36.66	36.03
2	86.4	34.92	36.65	38.07	38.4	37.71	37.42	37.78	36.42	36.15	35.47
3	82.4	34.02	35.03	35.79	36.2	35.68	35.61	35.96	35.19	35.07	34.99
4	78.4	32.63	33.77	34.09	34.47	34.47	34.31	34.75	34.14	34.02	34.34
5	74.4	32.33	33.08	33.08	33.37	33.38	33.34	33.57	33.4	33.47	33.61
7	66.4	31.66	31.99	32.25	32.32	32.22	32.26	32.46	32.24	32.28	32.67
8	58.4	31.06	31.46	31.47	31.54	31.44	31.4	31.6	31.49	31.52	31.67
10	50.4	31.55	32.01	32.13	32.03	31.88	31.87	32.05	31.88	31.86	31.73
11	42.4	31.32	31.75	31.82	31.88	31.83	31.74	31.86	31.62	31.46	31.38
12	34.4	30.58	30.35	30.67	30.25	30.23	30.46	30.43	30.15	29.97	30.19
13	26.4	30.07	29.54	29.2	29.03	29.12	29.25	29.34	29.15	29.11	29.63
14	18.4	29.64	28.88	28.53	28.36	28.49	28.46	28.67	28.59	28.54	28.98

附录 E 实测建筑中庭空间各时刻垂直高度的温度值

15	10.4	29.42	28.59	28.25	28.12	28.22	28.18	28.43	28.25	28.26	28.87
16	2.4	29.69	27.92	27.09	26.96	26.92	26.42	26.79	26.56	26.78	26.51

附录 F: 实测建筑室内负荷及运行时间表

表 F1 室内负荷实测值

7月8号	9:30			12:30			14:30		
房间	人员 (人)	照明 (W)	设备 (W)	人员 (人)	照明 (W)	设备 (W)	人员 (人)	照明 (W)	设备 (W)
F1_Cafe	12	1026	360	16	1026	120	12	1026	120
Main Atrium	5	0	0	7	0	0	4	0	0
F2_Classroom1	90	3192	120	0	0	0	0	0	0
F2_Classroom2	50	1824	120	0	0	0	0	0	0
F2_Classroom3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F2_Lobby2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F6_Office1	3	1368	360	0	2280	0	2	456	240
F6_Office2	7	3648	480	2	0	0	9	4560	720
F7_Office1	6	1368	360	0	1368	0	2	1026	240
F7_Office2	6	3420	120	6	3420	0	4	2394	120
F8_Office1	3	1368	240	1	1368	0	10	1482	1200
F8_Office2	5	684	600	0	1368	0	1	1140	120
F10_Office	0	2394	0	0	0	0	0	0	0
F18_Office1	6	1482	0	3	1824	240	2	1824	240
F18_Office2	0	0	0	1	0	120	1	0	120
1901	0	0	0	0	0	0	1	570	120
1902	3	684	240	0	684	0	1	684	120
1903	2	456	240	0	0	0	1	456	120
1904	2	456	240	0	0	0	3	342	360
1906	3	342	240	0	0	0	2	228	240
1913	3	570	360	2	456	0	8	570	240
2001	2	684	240	0	0	0	0	0	0
2002	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2005	0	0	0	0	0	0	1	228	120
2009	0	0	0	2	684	240	4	684	480
2010	2	684	240	1	684	120	2	684	240
2011	2	798	120	0	0	0	0	0	0
2012	1	228	120	1	0	120	2	0	240

附录 F 实测建筑室内负荷及运行时间表

2013	1	684	120	0	0	0	3	0	0
2014	3	684	360	3	684	360	3	684	360
2016	1	0	120	0	0	0	1	342	120
2101	2	684	240	0	0	0	3	456	240
2103	1	456	120	0	0	0	0	0	0
2104	1	684	120	0	0	0	0	0	0
2105	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2106	1	684	120	1	684	120	1	684	120
2108	0	0	0	0	0	0	2	684	240
2109	3	684	360	1	684	120	1	684	120
2113	3	2280	360	0	0	0	2	0	240
2114	0	0	0	1	570	120	4	2280	480
2115	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7月9号	9:30			11:30			14:30		
房间	人员 (人)	照明 (W)	设备 (W)	人员 (人)	照明 (W)	设备 (W)	人员 (人)	照明 (W)	设备 (W)
F1_Cafe	7	1026	120	20	1026	120	22	1026	120
Main Atrium	5	0	0	4	0	0	5	0	0
F2_Classroom1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F2_Classroom2	40	3420	120	0	0	0	0	0	0
F2_Classroom3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F2_Lobby2	3	0	0	3	114	0	0	0	0
F6_Office1	1	1140	120	0	0	0	4	456	240
F6_Office2	5	3648	600	3	3648	240	4	4104	360
F7_Office1	2	912	120	2	684	120	6	912	360
F7_Office2	3	1824	0	1	4104	120	7	4560	0
F8_Office1	3	456	120	0	114	0	3	228	360
F8_Office2	2	912	240	1	0	120	3	684	360
F10_Office	1	0	0	0	0	0	0	0	0
F18_Office1	5	1824	600	1	1140	120	0	912	120
F18_Office2	1	0	120	1	0	120	1	0	120
1901	1	684	120	1	684	120	1	684	120
1902	1	684	120	1	684	120	1	684	120
1903	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1904	2	342	240	0	0	0	0	0	0
1906	1	228	360	1	228	120	1	228	120
1913	3	228	360	2	228	240	4	228	480

附录 F 实测建筑室内负荷及运行时间表

2001	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2002	1	684	120	1	684	240	2	684	240
2005	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2009	2	684	240	1	684	120	1	684	120
2010	3	684	240	4	684	360	1	684	120
2011	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2012	1	228	120	0	228	120	2	228	240
2013	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014	4	684	240	0	0	0	3	684	360
2016	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2101	4	684	240	4	684	360	3	684	240
2103	1	456	120	0	0	0	1	456	120
2104	2	684	120	0	0	0	0	0	0
2105	0	0	0	1	456	120	1	456	120
2106	2	684	240	3	684	240	2	684	120
2108	1	684	120	2	684	240	1	684	120
2109	1	684	120	2	684	240	3	684	240
2113	3	0	240	0	0	120	1	0	120
2114	1	1368	120	2	1368	240	2	1368	240
2115	1	228	120	2	456	120	0	0	0

表 F2 室内负荷运行时间表

房间	人员 (人)					
	7月8号			7月9号		
	9:30	12:30	14:30	9:30	11:30	14:30
F1_Cafe	0.55	0.73	0.55	0.32	0.91	1.00
Main Atrium	0.71	1.00	0.57	0.71	0.57	0.71
F2_Classroom1	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F2_Classroom2	1.00	0.00	0.00	0.80	0.00	0.00
F2_Classroom3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F2_Lobby2	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00
F6_Office1	0.75	0.00	0.50	0.25	0.00	1.00
F6_Office2	0.78	0.22	1.00	0.56	0.33	0.44
F7_Office1	1.00	0.00	0.33	0.33	0.33	1.00
F7_Office2	0.86	0.86	0.57	0.43	0.14	1.00
F8_Office1	0.30	0.10	1.00	0.30	0.00	0.30
F8_Office2	1.00	0.00	0.20	0.40	0.20	0.60
F10_Office1	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
F18_Office1	1.00	0.50	0.33	0.83	0.17	0.00

附录 F 实测建筑室内负荷及运行时间表

F18_Office2	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1901	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1902	1.00	0.00	0.33	0.33	0.33	0.33
1903	1.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00
1904	0.67	0.00	1.00	0.67	0.00	0.00
1906	1.00	0.00	0.67	0.33	0.33	0.33
1913	0.38	0.25	1.00	0.38	0.25	0.50
2001	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2002	0.00	0.00	0.00	0.50	0.50	1.00
2005	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
2009	0.00	0.50	1.00	0.50	0.25	0.25
2010	0.50	0.25	0.50	0.75	1.00	0.25
2011	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2012	0.50	0.50	1.00	0.50	0.00	1.00
2013	0.33	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
2014	0.75	0.75	0.75	1.00	0.00	0.75
2016	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
2101	0.50	0.00	0.75	1.00	1.00	0.75
2103	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00
2104	0.50	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
2105	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
2106	0.33	0.33	0.33	0.67	1.00	0.67
2108	0.00	0.00	1.00	0.50	1.00	0.50
2109	1.00	0.33	0.33	0.33	0.67	1.00
2113	1.00	0.00	0.67	1.00	0.00	0.33
2114	0.00	0.25	1.00	0.25	0.50	0.50
2115	0.00	0.00	0.00	0.50	1.00	0.00
房间	照明(W)					
	7月8号			7月9号		
	9:30	12:30	14:30	9:30	11:30	14:30
F1_Cafe	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Main Atrium	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F2_Classroom1	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F2_Classroom2	0.53	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
F2_Classroom3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F2_Lobby2	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
F6_Office1	0.60	1.00	0.20	0.50	0.00	0.20
F6_Office2	0.80	0.00	1.00	0.80	0.80	0.90

附录 F 实测建筑室内负荷及运行时间表

F7_Office1	1.00	1.00	0.75	0.67	0.50	0.67
F7_Office2	0.75	0.75	0.53	0.40	0.90	1.00
F8_Office1	0.92	0.92	1.00	0.31	0.08	0.15
F8_Office2	0.50	1.00	0.83	0.67	0.00	0.50
F10_Office1	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F18_Office1	0.81	1.00	1.00	1.00	0.63	0.50
F18_Office2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1901	0.00	0.00	0.83	1.00	1.00	1.00
1902	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1903	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
1904	1.00	0.00	0.75	0.75	0.00	0.00
1906	1.00	0.00	0.67	0.67	0.67	0.67
1913	1.00	0.80	1.00	0.40	0.40	0.40
2001	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2002	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00
2005	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
2009	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2010	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2011	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2012	1.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00
2013	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2014	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00
2016	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
2101	1.00	0.00	0.67	1.00	1.00	1.00
2103	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00
2104	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
2105	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
2106	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2108	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2109	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2113	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2114	0.00	0.25	1.00	0.60	0.60	0.60
2115	0.00	0.00	0.00	0.50	1.00	0.00
房间	设备(W)					
	7月8号			7月9号		
	9:30	12:30	14:30	9:30	11:30	14:30
F1_Cafe	1.00	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
Main Atrium	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

附录 F 实测建筑室内负荷及运行时间表

F2_Classroom1	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F2_Classroom2	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
F2_Classroom3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F2_Lobby2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F6_Office1	1.00	0.00	0.67	0.33	0.00	0.67
F6_Office2	0.67	0.00	1.00	0.83	0.33	0.50
F7_Office1	1.00	0.00	0.67	0.33	0.33	1.00
F7_Office2	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
F8_Office1	0.20	0.00	1.00	0.10	0.00	0.30
F8_Office2	1.00	0.00	0.20	0.40	0.20	0.60
F10_Office1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F18_Office1	0.00	0.40	0.40	1.00	0.20	0.20
F18_Office2	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1901	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1902	1.00	0.00	0.50	0.50	0.50	0.50
1903	1.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00
1904	0.67	0.00	1.00	0.67	0.00	0.00
1906	0.67	0.00	0.67	1.00	0.33	0.33
1913	0.75	0.00	0.50	0.75	0.50	1.00
2001	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2002	0.00	0.00	0.00	0.50	1.00	1.00
2005	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
2009	0.00	0.50	1.00	0.50	0.25	0.25
2010	0.67	0.33	0.67	0.67	1.00	0.33
2011	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2012	0.50	0.50	1.00	0.50	0.50	1.00
2013	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2014	1.00	1.00	1.00	0.67	0.00	1.00
2016	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
2101	0.67	0.00	0.67	0.67	1.00	0.67
2103	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00
2104	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
2105	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
2106	0.50	0.50	0.50	1.00	1.00	0.50
2108	0.00	0.00	1.00	0.50	1.00	0.50
2109	1.00	0.33	0.33	0.33	0.67	0.67
2113	1.00	0.00	0.67	0.67	0.33	0.33
2114	0.00	0.25	1.00	0.25	0.50	0.50

附录 F 实测建筑室内负荷及运行时间表

2115	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00
------	------	------	------	------	------	------

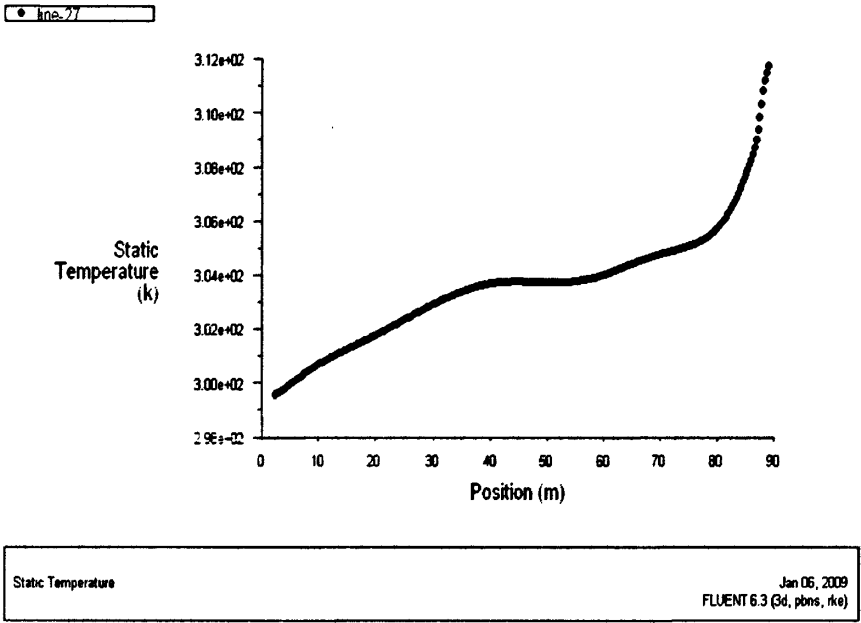
附录 G：实测建筑冷冻水供、回水温度及流量实测数据

日期	时间	供水温度 (℃)	回水温度 (℃)	流量 (T/h)	负荷 (kW)
2008-7-8	8:14:00	7.5	20.6	279	4264
2008-7-8	8:29:00	6.3	13.3	270	2205
2008-7-8	8:44:00	6.5	11.8	301	1861
2008-7-8	8:59:00	7	11.6	324	1739
2008-7-8	9:14:00	6.9	11.7	291	1630
2008-7-8	9:29:00	6.9	11.6	291	1596
2008-7-8	9:44:00	7.2	11.9	291	1596
2008-7-8	9:59:00	7.1	11.9	315	1764
2008-7-8	10:14:00	7	12.2	341	2069
2008-7-8	10:29:00	6.9	11.9	317	1849
2008-7-8	10:44:00	7	11.7	321	1760
2008-7-8	10:59:00	7.1	11.7	286	1535
2008-7-8	11:14:00	7.1	11.5	294	1509
2008-7-8	11:29:00	7	11.4	294	1509
2008-7-8	11:44:00	7.2	11.5	294	1475
2008-7-8	11:59:00	6.9	11.4	289	1517
2008-7-8	12:14:00	7.1	11.5	285	1463
2008-7-8	12:29:00	6.9	11.4	288	1512
2008-7-8	12:44:00	6.9	11.3	301	1545
2008-7-8	12:59:00	7.1	11.5	286	1468
2008-7-8	13:14:00	6.9	11.2	260	1304
2008-7-8	13:29:00	7.1	11.4	273	1370
2008-7-8	13:44:00	7	11.3	271	1360
2008-7-8	13:59:00	7	11.4	281	1442
2008-7-8	14:14:00	7	11.5	252	1323
2008-7-8	14:29:00	6.9	11.5	260	1395
2008-7-8	14:44:00	6.9	11.5	288	1546
2008-7-8	14:59:00	7.1	11.5	277	1422
2008-7-8	15:14:00	6.9	11.6	280	1535
2008-7-8	15:29:00	6.9	11.3	263	1350
2008-7-8	15:44:00	7.1	11.6	296	1554
2008-7-8	15:59:00	7	11.6	290	1556

附录 G 实测建筑冷冻水供、回水温度及流量实测数据

2008-7-8	16:14:00	7	11.6	278	1492
2008-7-8	16:29:00	7	11.5	275	1444
日期	时间	供水温度 (°C)	回水温度 (°C)	流量 (T/h)	负荷 (kW)
2008-7-9	8:14:00	13.3	19.4	260	1850
2008-7-9	8:29:00	9.7	16.7	257	2099
2008-7-9	8:44:00	7.2	13.6	262	1956
2008-7-9	8:59:00	6.4	12.4	260	1820
2008-7-9	9:14:00	6.8	11.9	275	1636
2008-7-9	9:29:00	7.9	12.2	314	1575
2008-7-9	9:44:00	6.8	12.1	298	1843
2008-7-9	9:59:00	6.8	12	288	1747
2008-7-9	10:14:00	6.9	12.2	289	1787
2008-7-9	10:29:00	7.1	11.9	292	1635
2008-7-9	10:44:00	6.7	12.1	294	1852
2008-7-9	10:59:00	7.2	11.8	271	1454
2008-7-9	11:14:00	9.1	12.7	321	1348
2008-7-9	11:29:00	7.3	13.7	298	2225
2008-7-9	11:44:00	8.9	11.9	276	966
2008-7-9	11:59:00	10.3	12.4	308	755
2008-7-9	12:14:00	8.5	14.5	300	2100
2008-7-9	12:29:00	7.9	14.2	304	2234
2008-7-9	12:44:00	5.4	12.3	303	2439
2008-7-9	12:59:00	6.7	12.1	294	1852
2008-7-9	13:14:00	9.1	12.4	313	1205
2008-7-9	13:29:00	11.5	13.5	327	763
2008-7-9	13:44:00	11.3	15	328	1416
2008-7-9	13:59:00	10.3	14.9	345	1852
2008-7-9	14:14:00	9.5	14.2	311	1705
2008-7-9	14:29:00	9.3	13.8	321	1685
2008-7-9	14:44:00	8.9	13.5	323	1733
2008-7-9	14:59:00	8.7	13.3	301	1615
2008-7-9	15:14:00	8.4	13	334	1792
2008-7-9	15:29:00	8.5	13	329	1727
2008-7-9	15:44:00	8.4	12.9	322	1691
2008-7-9	15:59:00	8.1	12.6	292	1533
2008-7-9	16:14:00	8	12.6	310	1664
2008-7-9	16:29:00	8	12.4	335	1720

附录 H: 实测建筑中庭空间温度分层模拟结果截图



个人简历 在读期间发表的学术论文与研究成果

个人简历:

李玉明, 女, 1984 年 11 月生。

2006 年 7 月毕业于江苏大学建筑环境与设备工程专业 获学士学位。

2009 年 3 月即将毕业于同济大学供热、供燃气、通风及空调工程专业 获硕士学位。

已发表论文:

[1] 李玉明. 上海地区既有办公建筑围护结构节能改造措施研究. 制冷与空调. 2008. 第 6 期.

待发表论文:

[1] 李玉明. 上海市既有公共建筑节能改造适用技术研究. 建筑热能通风空调(已接收)

中庭建筑负荷模拟方法的研究

作者: 李玉明

学位授予单位: 同济大学机械工程学院

本文读者也读过(2条)

1. 李玉明, 潘毅群, 黄治钟 中庭建筑负荷模拟方法的研究[会议论文]-2009
2. 于建伟 开启式中庭建筑冬季空调气流组织的CFD模拟研究[学位论文]2007

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y1449829.aspx